

核燃料輸送物設計承認申請書の一部補正について

原設発第 19 号

令和 5 年 9 月 29 日

原子力規制委員会 殿

住所 東京都港区芝大門一丁目 1 番 3 号

氏名 原燃輸送株式会社

代表取締役社長 宮田 賢司

令和 5 年 5 月 30 日付け原設発第 6 号をもって申請しました核燃料輸送物設計承認申請書について、下記のとおり一部補正します。

記

核燃料輸送物設計承認申請書を以下のとおり変更する。

1 核燃料輸送物の名称

NFT-14P 型

2 輸送容器の外形寸法、重量及び主要材料

(1) 輸送容器の外形寸法

外径：約 2.6m (上・下部緩衝体を含む。)

長さ：約 6.3m (上・下部緩衝体を含む。)

(2) 輸送容器の重量

101.2 トン以下 (輸送架台は含まず。)

(3) 核燃料輸送物の総重量

115.0 トン以下 (輸送架台は含まず。)

(4) 輸送容器の主要材料

内筒、底板 : ステンレス鋼
中間筒 : 炭素鋼
外筒 : 炭素鋼 ()
蓋 : ステンレス鋼
トラニオン : ステンレス鋼
ガンマ線遮蔽体 : 鉛
中性子遮蔽体 : レジン
伝熱フィン : 銅
フィン : ステンレス鋼
バスケット : ボロン入りステンレス鋼及びステンレス鋼
緩衝体 : ステンレス鋼及び木材 ()及び ()

(5) 輸送容器の概略を示す図

第1図及び第2図のとおり

詳細形状は、本核燃料輸送物の核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号(令和5年9月29日付け原設発第19号をもって一部補正))に係る別紙1の(イ)-第C.1図から(イ)-第C.15図まで及び(イ)-第D.1図から(イ)-第D.15図までに示されている。

3 核燃料輸送物の種類

BM型輸送物及び核分裂性輸送物

4 収納する核燃料物質等の種類、性状、重量及び放射能の量

第1表のとおり

なお、表面から1mの距離における空気吸収線量率は1グレイ毎時を超える。

5 輸送制限個数

- (1) 輸送制限個数 : 制限なし
- (2) 配列方法 : 任意
- (3) 臨界安全指数 : 0

6 運搬中に予想される周囲の温度の範囲

-20℃から38℃まで

7 収納物の臨界防止のための核燃料輸送物の構造に関する事項

本輸送容器には、燃料集合体を収納するバスケットが用いられ、輸送中燃料集合体が分散・集合しないようになっている。また、バスケットのチャンネルには未臨界維持のために中性子吸収材であるボロンを含むボロン入りステンレス鋼が用いられている。

8 臨界安全評価における浸水の領域に関する事項

本核燃料輸送物は湿式輸送物であり、臨界計算では、燃料集合体の周り及び輸送容器の内部に水が存在するものとして評価している。

9 収納物の密封性に関する事項

本輸送容器の密封境界は内筒、底板、フランジ、蓋、ベント・水位調整バルブ、水位調整用加圧バルブ及びドレンバルブから構成され、蓋及びバルブ類にはふっ素ゴム製Oリングが使用されている。また、本収納物の密封境界は燃料被覆管と燃料棒端栓から構成されている。

10 BM型輸送物にあつては、BU型輸送物の設計基準のうち適合しない基準についての説明

-40℃の周囲温度において、き裂、破損等の生じるおそれがないことが確認されていない。

11 輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱いに関する事項

本輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱いについては、本核燃料輸送物の核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号(令和5年9月29日付け原設発第19号をもって一部補正))に係る別紙1のとおり。

本核燃料輸送物の運搬は、環境温度が-20℃以上で専用積載にて実施する。

12 輸送容器に係る品質管理の方法等(設計に係るものに限る。)に関する事項

輸送容器に係る品質管理の方法等(設計に係るものに限る。)については、本核燃料輸送物の核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号(令和5年9月29日付け原設発第19号をもって一部補正))に係る別紙2のとおり。

13 その他特記事項

(1) 使用予定年数

60年

(2) 安全設計及び安全輸送に関する特記事項

- ・輸送に当たっては、その期間及び経路における最低温度を調査し、崩壊熱量と照らし合わせ内筒内水が凍結しないことを確認する。また、確認は十分余裕をもって行う。
- ・本輸送物は発送前の温度測定検査で、日陰において輸送中人が容易に近づくことができる表面温度が85℃を超える場合は、近接防止金網を装着して輸送するものとする。
- ・安全性向上の観点から、緩衝材として使用する木材の経年変化に関する知見の拡充の取組みの一環として、緩衝体の使用に際しては、都度、輸送容器の使用履歴を蓄積し、輸送前に、輸送容器の使用履歴、収納物の発熱量及び輸送時に想定される環境温度を踏まえ、木材温度が、概ね実績のある温度の範囲内であることを確認した後に輸送を行う。
- ・本輸送容器は疲労評価による許容繰返し回数を考慮して使用予定回数を設定しているが、安全性向上の観点から、本輸送容器の使用回数を管理するものとする。
- ・「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則」及び「核燃料物質等の

工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目等を定める告示」の改正に伴い、本核燃料輸送物に係る技術上の基準が変更となった場合及び新たな技術的知見が得られた場合は、設計への影響を評価し、必要に応じて設計変更承認申請等の手続きを行う。

- ・ 収納する燃料集合体の発熱量により収納位置を決定する。収納位置は第3図に示す配置とする。

(別紙記載事項)

別紙1 輸送容器の設計及び核燃料物質等を当該輸送容器に収納した場合の核燃料輸送物の安全性に関する説明書

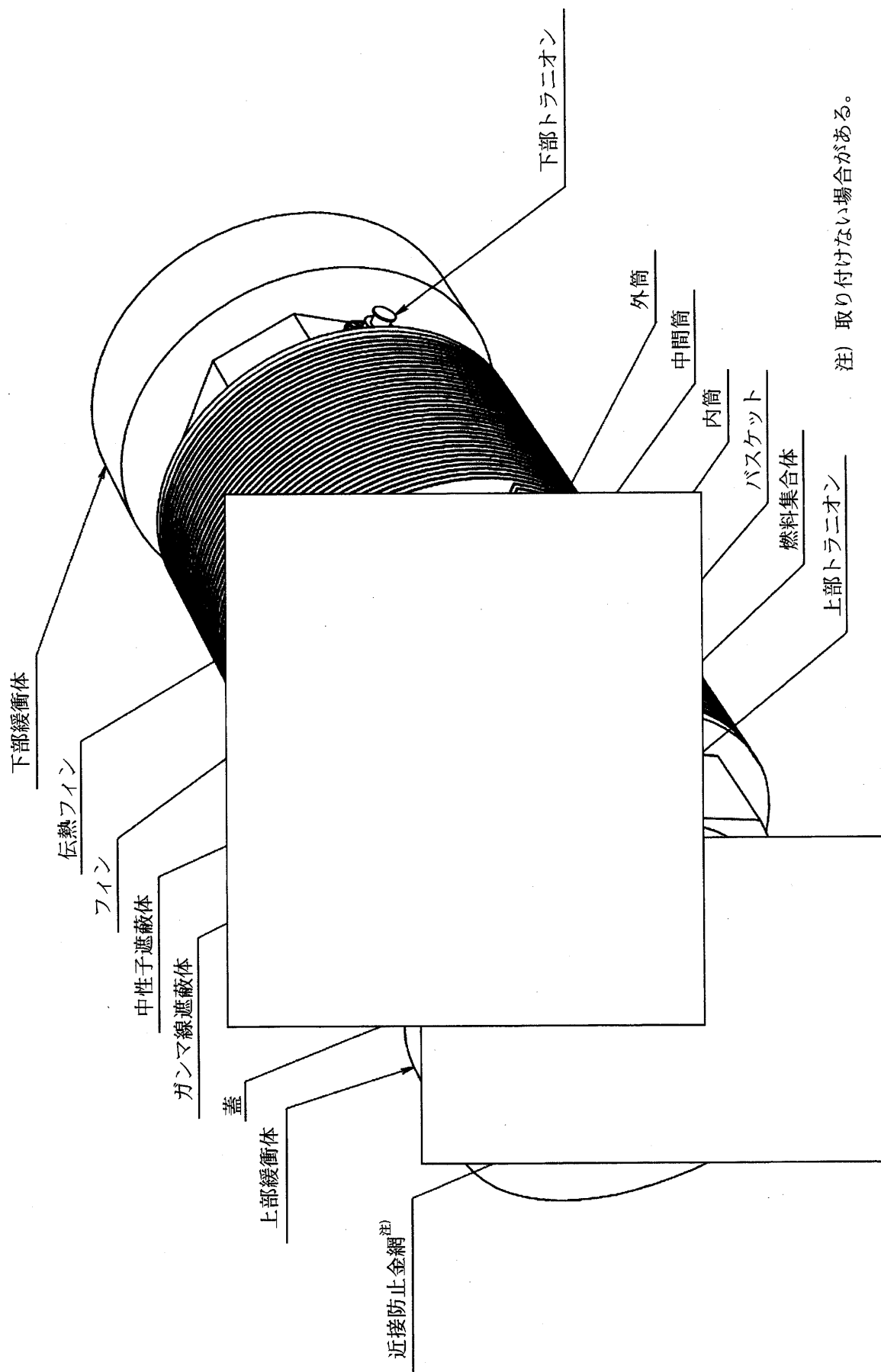
イ 核燃料輸送物の説明	(イ) 章
ロ 核燃料輸送物の安全解析	(ロ) 章
ハ 輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱方法	(ハ) 章
ニ 安全設計及び安全輸送に関する特記事項	(ニ) 章

別紙2 輸送容器に係る品質管理の方法等(設計に係るものに限る。)に関する説明書

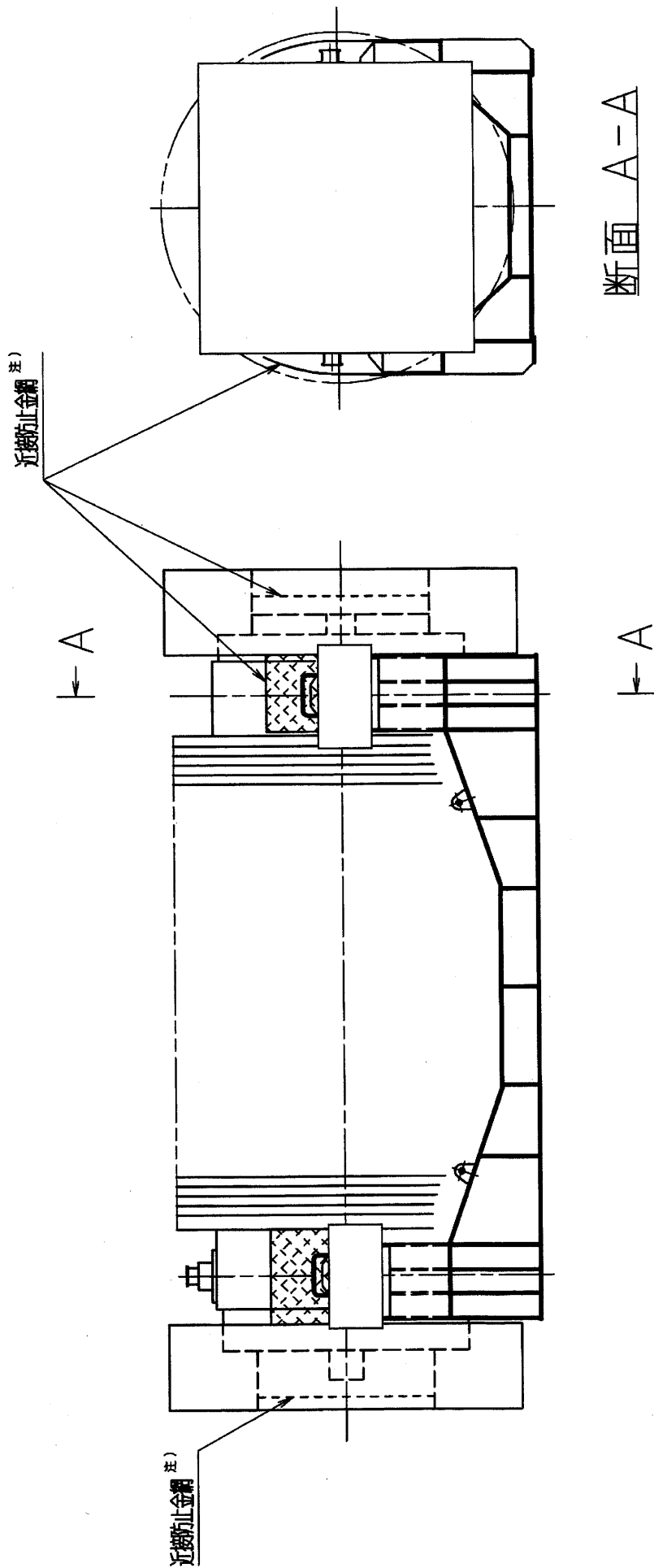
(添付)

補正内容一覧

取扱注意



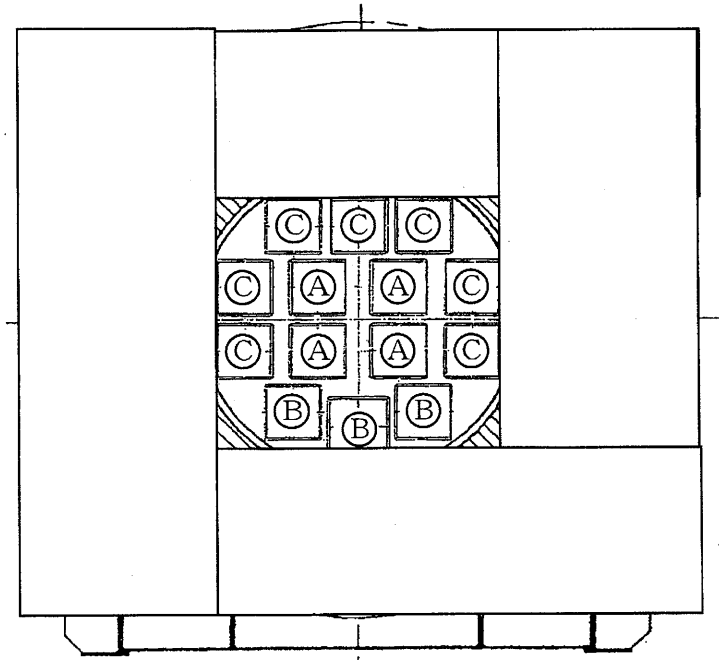
第1図 輸送容器の概略を示す図 (核燃料輸送物全体図)



注) 取り付けがない場合がある。

取扱注意

第2図 輸送容器の概略を示す図 (輸送荷姿)



- Ⓐ : 発熱量の大きい方から 1~4 体目を収納する。
- Ⓑ : 発熱量の大きい方から 5~7 体目を収納する。
- Ⓒ : 発熱量の大きい方から 8~14 体目を収納する。

第 3 図 燃料集合体収納位置

第1表 収納する核燃料物質等の種類、性状、重量及び放射能の量(1/2)

燃料集合体の種類と型式		タイプ1	タイプ2	タイプ3
		14×14 配列型 (12 フィート)	15×15 配列型	17×17 配列型
項目	種類	使用済燃料(軽水炉(PWR))		
	性状	固体(二酸化ウラン粉末焼結体)		
輸送容器1基当たりの仕様	平均燃焼度 ^{注1)} (MWD/MTU 以下)			
	放射能の量 ^{注3)} (PBq 以下)			
	発熱量 (kW 以下)	54		
	収納体数 (体以下)	14		
	収納物重量 ^{注4)} (トン以下)	10.2		
燃料集合体1体の仕様	燃料集合体重量 (kg 以下)	590	670	680
	ウラン重量 (kg 以下)	410	470	470
	初期濃縮度 (%以下)	4.3	4.3	4.3
	最高燃焼度 (MWD/MTU 以下)			
	冷却日数 (日以上)			

注1) 平均燃焼度とは、各タイプの燃焼度の平均値を示す。

注2) 平均燃焼度と冷却日数の関係は別図1による。

注3) 主要な核種の放射能強度を別表1に示す。

注4) 収納物重量は、燃料集合体、バーナブルポイズン集合体、スツール及び上・下部スツール^{注5)}の合計値である。(スツール：約□kg/体、上部スツール：約□kg/体、下部スツール：約□kg/体)

注5) 燃料集合体の上下端に上・下部スツールを設置する。上・下部スツールの種類を別表2に示す。

第1表 収納する核燃料物質等の種類、性状、重量及び放射能の量(2/2)

燃料集合体の種類と型式		タイプ4	タイプ5	タイプ6
		14×14 配列型	15×15 配列型	17×17 配列型
項目	種類	使用済燃料(軽水炉(PWR))		
	性状	固体(二酸化ウラン粉末焼結体)		
輸送容器1基当たりの仕様	平均燃焼度 ^{注1)} (MWD/MTU 以下)			
	放射能の量 ^{注3)} (PBq 以下)			
	発熱量 (kW 以下)	54		
	収納体数 (体以下)	14		
	収納物重量 ^{注4)} (トン以下)	10.2		
燃料集合体1体の仕様	燃料集合体重量 (kg 以下)	600	680	690
	ウラン重量 (kg 以下)	420	470	480
	初期濃縮度 (%以下)	4.9	4.7	4.9
	最高燃焼度 (MWD/MTU 以下)			
	冷却日数 (日以上)			

注1) 平均燃焼度とは、各タイプの燃焼度の平均値を示す。

注2) 平均燃焼度と冷却日数の関係は別図2及び別図3による。

注3) 主要な核種の放射能強度を別表1に示す。

注4) 収納物重量は、燃料集合体、バーナブルポイズン集合体、スツール及び上・下部スツール^{注5)}の合計値である。(スツール：約□kg/体、上部スツール：約□kg/体、下部スツール：約□kg/体)

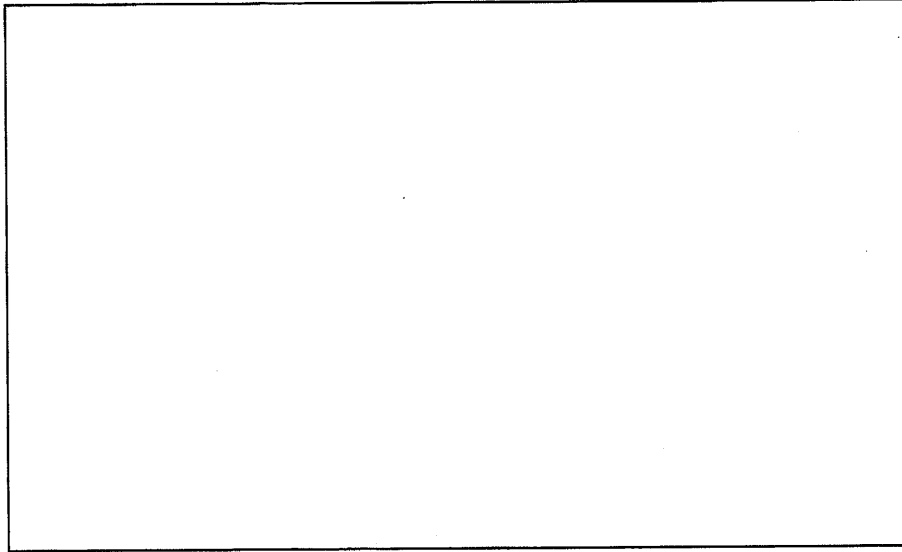
注5) 燃料集合体の上下端に上・下部スツールを設置する。上・下部スツールの種類を別表2に示す。

別表1 輸送容器1基に収納する主要な核種の放射能強度

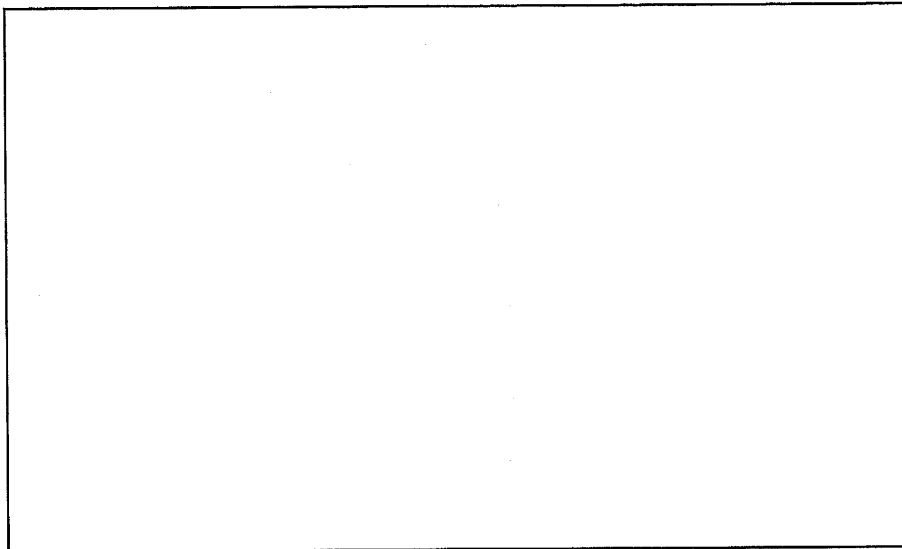
主要な核種	放射能強度 (PBq)
^{144}Ce	
^{144}Pr	
^{106}Ru	
^{106}Rh	
^{147}Pm	

別表2 上・下部ツールの種類

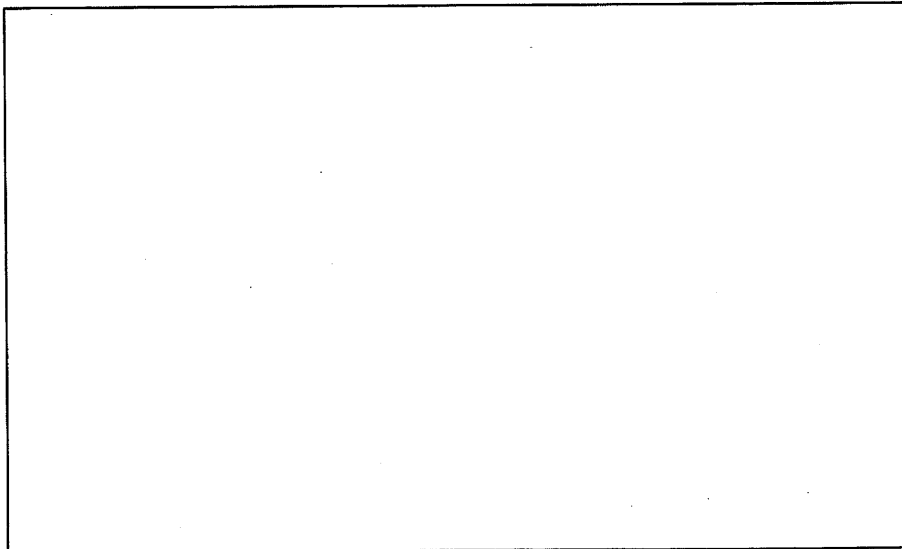
上部ツール(タイプI)	3種類(燃料タイプ1及び4、2及び5、3及び6用)
上部ツール(タイプII)	3種類(燃料タイプ1及び4、2及び5、3及び6用)
下部ツール	1種類(各燃料タイプで共通)



別図 1 タイプ 1、2 及び 3 燃料の冷却日数と平均燃焼度



別図 2 タイプ 4 燃料の冷却日数と平均燃焼度



別図 3 タイプ 5 及びタイプ 6 燃料の冷却日数と平均燃焼度

以上

NFT-14P型

核燃料輸送物設計承認申請書

別紙 1

原燃輸送株式会社

目 次

(イ)章 核燃料輸送物の説明	(イ)-1
A. 目的及び条件	(イ)-1
B. 核燃料輸送物の種類	(イ)-2
C. 輸送容器	(イ)-7
D. 輸送容器の収納物	(イ)-15
(ロ)章 核燃料輸送物の安全解析	(ロ)-1
(ロ)章 A 構造解析	(ロ)-A-1
A. 1 構造設計	(ロ)-A-1
A. 1. 1 概要	(ロ)-A-1
A. 1. 2 設計基準	(ロ)-A-2
A. 2 重量及び重心	(ロ)-A-18
A. 3 材料の機械的性質	(ロ)-A-18
A. 4 核燃料輸送物の要件	(ロ)-A-18
A. 4. 1 化学的及び電気的反応	(ロ)-A-18
A. 4. 2 低温強度	(ロ)-A-28
A. 4. 3 密封装置	(ロ)-A-29
A. 4. 4 吊上装置	(ロ)-A-30
A. 4. 5 固縛装置	(ロ)-A-39
A. 4. 6 圧力	(ロ)-A-47
A. 4. 7 振動	(ロ)-A-47
A. 5 一般の試験条件	(ロ)-A-52
A. 5. 1 熱的試験	(ロ)-A-52
A. 5. 1. 1 温度及び圧力の要約	(ロ)-A-52
A. 5. 1. 2 熱膨張	(ロ)-A-53
A. 5. 1. 3 応力計算	(ロ)-A-56
A. 5. 1. 4 許容応力との比較	(ロ)-A-59

A. 5. 2	水噴霧	(口)-A-65
A. 5. 3	自由落下	(口)-A-66
A. 5. 3. 1	垂直落下	(口)-A-80
A. 5. 3. 2	水平落下	(口)-A-96
A. 5. 3. 3	コーナー落下	(口)-A-107
A. 5. 4	積み重ね試験	(口)-A-108
A. 5. 5	貫通	(口)-A-111
A. 5. 6	角又は縁落下	(口)-A-113
A. 5. 7	結果の要約及びその評価	(口)-A-114
A. 6	特別の試験条件	(口)-A-118
A. 6. 1	強度試験・落下試験 I (9m 落下時)	(口)-A-118
A. 6. 1. 1	垂直落下	(口)-A-129
A. 6. 1. 2	水平落下	(口)-A-144
A. 6. 1. 3	コーナー落下	(口)-A-153
A. 6. 1. 4	傾斜落下	(口)-A-155
A. 6. 1. 5	結果の要約	(口)-A-155
A. 6. 2	強度試験・落下試験 II (1m 落下時)	(口)-A-156
A. 6. 2. 1	結果の要約	(口)-A-160
A. 6. 3	熱的試験	(口)-A-161
A. 6. 3. 1	温度及び圧力の要約	(口)-A-161
A. 6. 3. 2	熱膨張	(口)-A-162
A. 6. 3. 3	許容応力との比較	(口)-A-165
A. 6. 4	浸漬	(口)-A-172
A. 6. 5	結果の要約及びその評価	(口)-A-174
A. 7	強化浸漬試験	(口)-A-181
A. 8	放射性収納物	(口)-A-185
A. 9	核分裂性輸送物	(口)-A-186
A. 9. 1	核分裂性輸送物に係る一般の試験条件	(口)-A-186
A. 9. 2	核分裂性輸送物に係る特別の試験条件	(口)-A-188
A. 10	付属書類	(口)-A-194
A. 10. 1	段付き部の応力集中係数	(口)-A-194

A. 10. 2	ボロン入りステンレス鋼の材料特性	(ロ)-A-195
A. 10. 3	9m 水平落下時のフィンの衝撃力及び吸収エネルギーの計算	(ロ)-A-204
A. 10. 4	実機大スケール模擬燃料集合体を用いた 9m 落下試験	(ロ)-A-210
A. 10. 5	1/3 スケールモデルを用いた 9m 落下試験	(ロ)-A-224
A. 10. 6	実規模モデルを用いた実証試験	(ロ)-A-228
A. 10. 7	傾斜落下時の輸送物健全性	(ロ)-A-233
A. 10. 8	緩衝材低温時の強度評価	(ロ)-A-244
A. 10. 9	実機大レジソカバーを用いた実証試験	(ロ)-A-248
A. 10. 10	9m 水平落下評価の荷重条件	(ロ)-A-250
A. 10. 11	参考文献	(ロ)-A-254
(ロ)章 B	熱解析	(ロ)-B-1
B. 1	概要	(ロ)-B-1
B. 2	材料の熱的性質	(ロ)-B-5
B. 3	構成要素の仕様	(ロ)-B-12
B. 4	一般の試験条件	(ロ)-B-13
B. 4. 1	熱解析モデル	(ロ)-B-13
B. 4. 1. 1	解析モデル	(ロ)-B-13
B. 4. 1. 2	試験モデル	(ロ)-B-25
B. 4. 2	最高温度	(ロ)-B-26
B. 4. 3	最低温度	(ロ)-B-32
B. 4. 4	最大内圧	(ロ)-B-34
B. 4. 5	最大熱応力	(ロ)-B-37
B. 4. 6	結果の要約及びその評価	(ロ)-B-37
B. 5	特別の試験条件	(ロ)-B-40
B. 5. 1	熱解析モデル	(ロ)-B-40
B. 5. 1. 1	解析モデル	(ロ)-B-40
B. 5. 1. 2	試験モデル	(ロ)-B-45
B. 5. 2	核燃料輸送物の評価条件	(ロ)-B-45
B. 5. 3	核燃料輸送物温度	(ロ)-B-46
B. 5. 4	最大内圧	(ロ)-B-51

B. 5. 5 最大熱応力	(口)-B-53
B. 5. 6 結果の要約及びその評価	(口)-B-53
B. 6 付属書類	(口)-B-55
B. 6. 1 解析に用いた対流熱伝達率及び熱放射係数	(口)-B-55
B. 6. 1. 1 輪切り半ピッチモデルに用いた熱伝達率及び熱放射係数	(口)-B-55
B. 6. 1. 2 全体モデルに用いた熱伝達率及び熱放射係数	(口)-B-73
B. 6. 1. 3 近接防止金網の温度評価について	(口)-B-85
B. 6. 2 参考文献	(口)-B-88
(口)章 C 密封解析	(口)-C-1
C. 1 概要	(口)-C-1
C. 2 密封装置	(口)-C-1
C. 2. 1 密封装置	(口)-C-1
C. 2. 2 密封装置の貫通部	(口)-C-2
C. 2. 3 密封装置のガスケット及び溶接部	(口)-C-3
C. 2. 4 蓋	(口)-C-4
C. 3 一般の試験条件	(口)-C-5
C. 3. 1 放射性物質の漏えい	(口)-C-5
C. 3. 2 密封装置の加圧	(口)-C-11
C. 3. 3 冷却材汚染	(口)-C-11
C. 3. 4 冷却材損失	(口)-C-11
C. 4 特別の試験条件	(口)-C-12
C. 4. 1 核分裂生成ガス	(口)-C-12
C. 4. 2 放射性物質の漏えい	(口)-C-12
C. 5 結果の要約及びその評価	(口)-C-15
C. 6 付属書類	(口)-C-16
C. 6. 1 参考文献	(口)-C-16
(口)章 D 遮蔽解析	(口)-D-1
D. 1 概要	(口)-D-1
D. 2 線源仕様	(口)-D-3

D. 2. 1	ガンマ線源	(口)-D-8
D. 2. 2	中性子源	(口)-D-13
D. 3	モデル仕様	(口)-D-16
D. 3. 1	解析モデル	(口)-D-16
D. 3. 2	解析モデル各領域における原子個数密度	(口)-D-33
D. 4	遮蔽評価	(口)-D-46
D. 5	結果の要約及びその評価	(口)-D-58
D. 6	付属書類	(口)-D-62
D. 6. 1	火災時のレジンの損傷状態	(口)-D-62
D. 6. 2	平均燃焼度が低い場合の冷却日数について	(口)-D-68
D. 6. 3	平均燃焼度を超える燃料をバスケット最外周に収納した場合の 線量当量率について	(口)-D-72
D. 6. 4	参考文献	(口)-D-74
(口)章 E	臨界解析	(口)-E-1
E. 1	概要	(口)-E-1
E. 2	解析対象	(口)-E-2
E. 2. 1	収納物	(口)-E-2
E. 2. 2	輸送容器	(口)-E-4
E. 2. 3	中性子吸収材	(口)-E-4
E. 3	モデル仕様	(口)-E-5
E. 3. 1	解析モデル	(口)-E-5
E. 3. 2	解析モデル各領域における原子個数密度	(口)-E-5
E. 4	未臨界評価	(口)-E-12
E. 4. 1	計算条件	(口)-E-12
E. 4. 2	核燃料輸送物への水の浸入等	(口)-E-13
E. 4. 3	計算方法	(口)-E-14
E. 4. 4	計算結果	(口)-E-14
E. 5	ベンチマーク試験	(口)-E-16
E. 6	結果の要約及びその評価	(口)-E-25
E. 7	付属書類	(口)-E-26

E. 7. 1 参考文献	(口)-E-26
(ロ)章 F 核燃料輸送物の経年変化の考慮	(ロ)-F-1
F. 1 考慮すべき経年変化要因	(ロ)-F-1
F. 2 安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価	(ロ)-F-2
F. 3 安全解析における経年変化の考慮内容	(ロ)-F-18
F. 4 付属書類	(ロ)-F-22
F. 4. 1 参考文献	(ロ)-F-22
(ロ)章 G 外運搬規則及び外運搬告示に対する適合性の評価	(ロ)-G-1
(ハ)章 輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱方法	(ハ)-A-1
A. 核燃料輸送物の取扱方法	(ハ)-A-1
A. 1 装荷方法	(ハ)-A-1
A. 1. 1 発電所での空容器受取り・燃料装荷準備作業	(ハ)-A-1
A. 1. 2 装荷作業	(ハ)-A-2
A. 1. 3 後作業	(ハ)-A-2
A. 2 核燃料輸送物の発送前検査	(ハ)-A-3
A. 2. 1 発送前検査	(ハ)-A-3
A. 2. 2 輸送物の再処理工場への輸送	(ハ)-A-3
A. 3 取出し方法	(ハ)-A-4
A. 3. 1 再処理工場での輸送物受取り・燃料取出準備作業	(ハ)-A-4
A. 3. 2 取出作業	(ハ)-A-5
A. 3. 3 後作業	(ハ)-A-6
A. 4 空容器の準備	(ハ)-A-6
A. 4. 1 空容器搬出前作業	(ハ)-A-6
A. 4. 2 空容器の保管	(ハ)-A-6
A. 4. 3 空容器の発電所への輸送	(ハ)-A-7
B. 保守条件	(ハ)-B-1
B. 1 外観検査	(ハ)-B-4
B. 2 耐圧検査	(ハ)-B-4

B. 3 気密漏えい検査	(ハ)-B-4
B. 4 遮蔽検査	(ハ)-B-4
B. 5 未臨界検査	(ハ)-B-4
B. 6 熱検査	(ハ)-B-4
B. 7 吊上検査	(ハ)-B-4
B. 8 作動確認検査	(ハ)-B-4
B. 9 補助系の保守	(ハ)-B-5
B. 10 密封装置の弁、ガスケット等の保守	(ハ)-B-5
B. 11 輸送容器の保管	(ハ)-B-5
B. 11.1 保管状態の管理	(ハ)-B-5
B. 11.2 保管期間終了後の検査・補修	(ハ)-B-5
B. 12 記録の保管	(ハ)-B-6
B. 13 その他	(ハ)-B-6
(二)章 安全設計及び安全輸送に関する特記事項	(二)-1
参考 輸送容器の製作の方法の概要に関する説明	(参)-A-1

(イ)章 核燃料輸送物の説明

(イ)章 核燃料輸送物の説明

A. 目的及び条件

1. 使用目的 軽水炉型原子力発電所の使用済燃料(PWR型)を再処理工場に輸送するため。
2. 輸送容器の型名 NFT-14P型
3. 使用予定年数 60年
4. 使用予定回数 400回
5. 核燃料輸送物の種類 BM型輸送物及び核分裂性輸送物
6. 輸送制限個数 制限なし
7. 輸送指数 10以下
8. 臨界安全指数 0
9. 核燃料輸送物の総重量 115.0トン以下(輸送架台は含まず。)
10. 輸送容器の外形寸法 外径約2.6m、長さ約6.3m(上・下部緩衝体を含む。)
11. 輸送容器の重量 101.2トン以下(輸送架台は含まず。)
12. 輸送容器の材質
内筒、底板 : ステンレス鋼
中間筒 : 炭素鋼
外筒 : 炭素鋼()
蓋 : ステンレス鋼
トラニオン : ステンレス鋼
ガンマ線遮蔽体 : 鉛
中性子遮蔽体 : レジン
伝熱フィン : 銅
フィン : ステンレス鋼
バスケット : ボロン入りステンレス鋼及びステンレス鋼
緩衝体 : ステンレス鋼及び木材
()及び()
13. 輸送容器に収納する核燃料物質の仕様
核燃料物質の仕様を(イ)-第A.1表に示す。
14. 輸送形態 車両による陸上輸送あるいは船による海上輸送
いずれの場合も専用積載として輸送
15. 冷却方法 自然空気冷却

B. 核燃料輸送物の種類

本核燃料輸送物の収納物は、特別形核燃料物質等以外のものに該当し、原子力規制委員会の定める量 (A_2 値の 10 万倍) を超える量の放射能を有する核燃料物質等に該当する。また、収納物は核分裂性物質を含んでいる。

したがって、本核燃料輸送物は BM 型輸送物及び核分裂性輸送物として輸送する。

(イ)-第 A. 1 表 輸送容器 1 基に収納する核燃料物質の仕様(1/2)

燃料集合体の種類と型式		タイプ 1	タイプ 2	タイプ 3
		14×14 配列型 (12 フィート)	15×15 配列型	17×17 配列型
項目				
種 類		使用済燃料(軽水炉(PWR))		
性 状		固体(二酸化ウラン粉末焼結体)		
輸送容器 1 基当たりの仕様	平均燃焼度 ^{注 1)} (MWD/MTU 以下)			
	放射能の量 ^{注 3)} (PBq 以下)			
	発 熱 量 (kW 以下)	54		
	収 納 体 数 (体 以 下)	14		
	収納物重量 ^{注 4)} (トン以下)	10.2		
燃料集合体 1 体の仕様	燃料集合体重量 (kg 以下)	590	670	680
	ウ ラ ン 重 量 (kg 以下)	410	470	470
	初 期 濃 縮 度 (% 以 下)	4.3	4.3	4.3
	最 高 燃 焼 度 (MWD/MTU 以下)			
	冷 却 日 数 (日 以 上)			

注 1) 平均燃焼度とは、各タイプの燃焼度の平均値を示す。

注 2) 平均燃焼度と冷却日数の関係は(イ)-第 A. 1 図による。

注 3) 主要な核種の放射能強度を(イ)-第 A. 2 表に示す。

注 4) 収納物重量は、燃料集合体、バーナブルポイズン集合体、スツール及び上・下部スツールの合計値である。(スツール：約 kg/体、上部スツール：約 kg/体、下部スツール：約 kg/体)

(イ)-第 A.1 表 輸送容器 1 基に収納する核燃料物質の仕様(2/2)

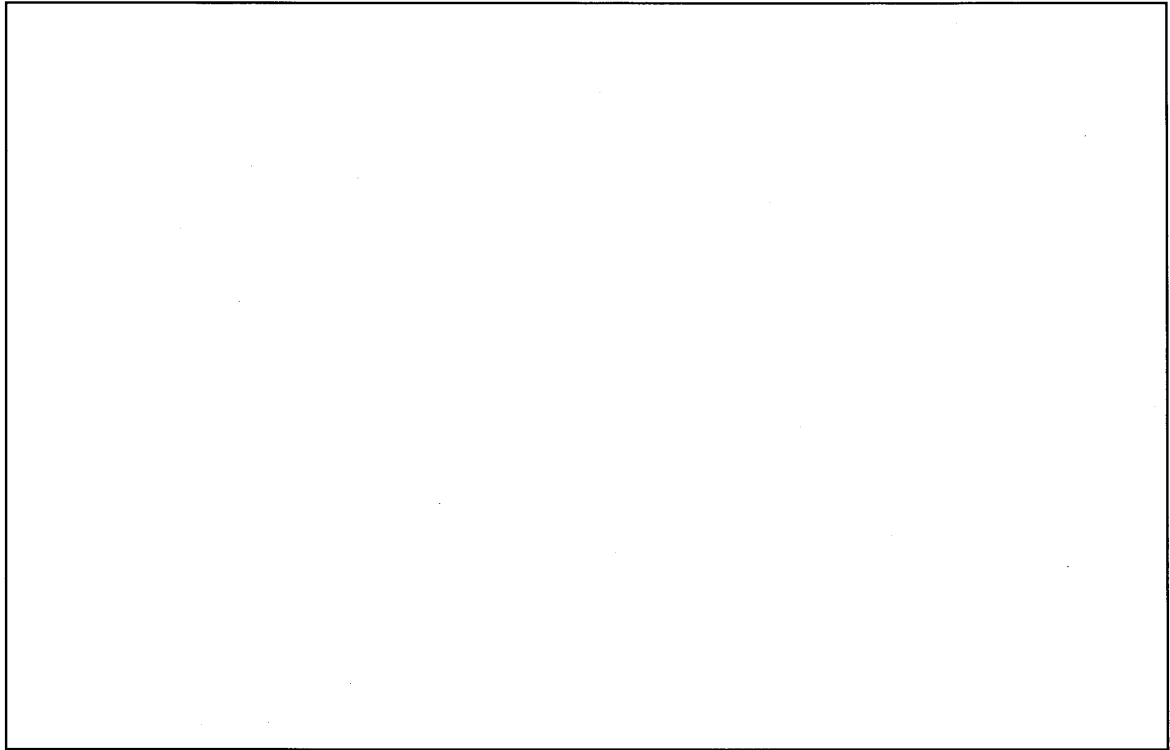
燃料集合体の種類と型式		タイプ 4	タイプ 5	タイプ 6
		14×14 配列型	15×15 配列型	17×17 配列型
項目	種類	使用済燃料(軽水炉(PWR))		
	性状	固体(二酸化ウラン粉末焼結体)		
輸送容器 1 基当たりの仕様	平均燃焼度 ^{注 1)} (MWD/MTU 以下)			
	放射能の量 ^{注 3)} (PBq 以下)			
	発熱量 (kW 以下)	54		
	収納体数 (体以下)	14		
	収納物重量 ^{注 4)} (トン以下)	10.2		
燃料集合体 1 体の仕様	燃料集合体 (kg 以下)	600	680	690
	ウラン重量 (kg 以下)	420	470	480
	初期濃縮度 (% 以下)	4.9	4.7	4.9
	最高燃焼度 (MWD/MTU 以下)			
	冷却日数 (日以上)			

注 1) 平均燃焼度とは、各タイプの燃焼度の平均値を示す。

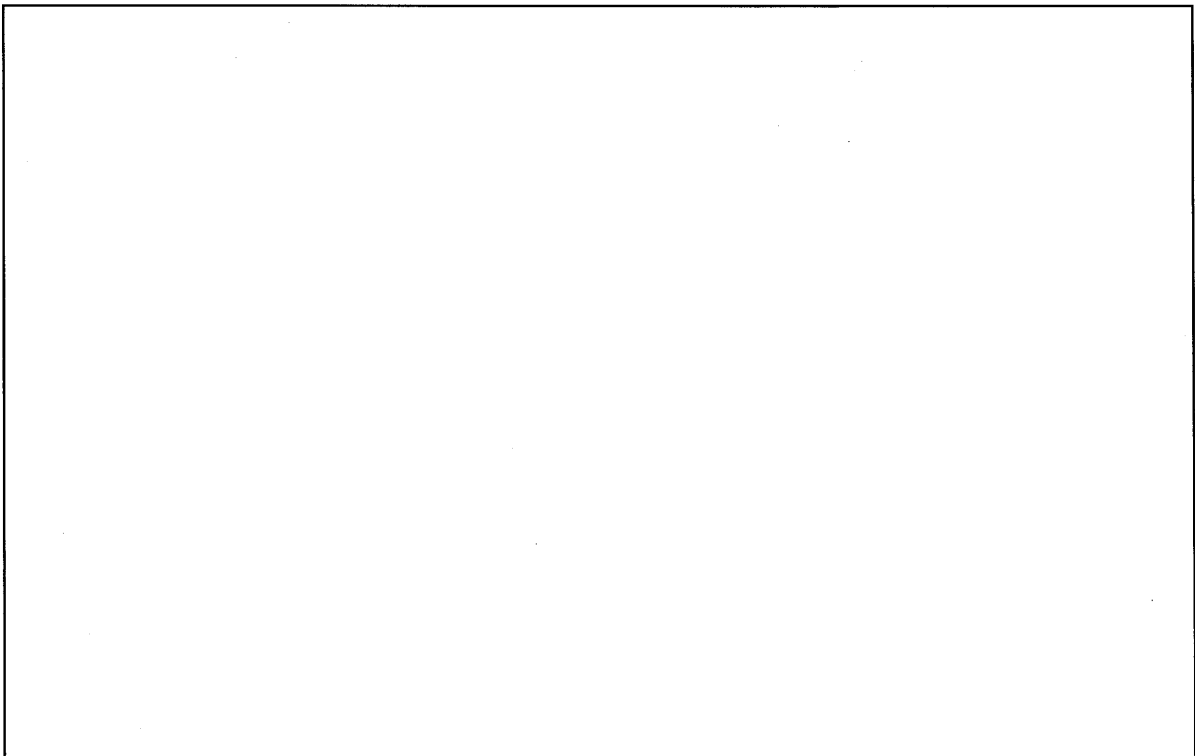
注 2) 平均燃焼度と冷却日数の関係は(イ)-第 A.2 図及び(イ)-第 A.3 図による。

注 3) 主要な核種の放射能強度を(イ)-第 A.2 表に示す。

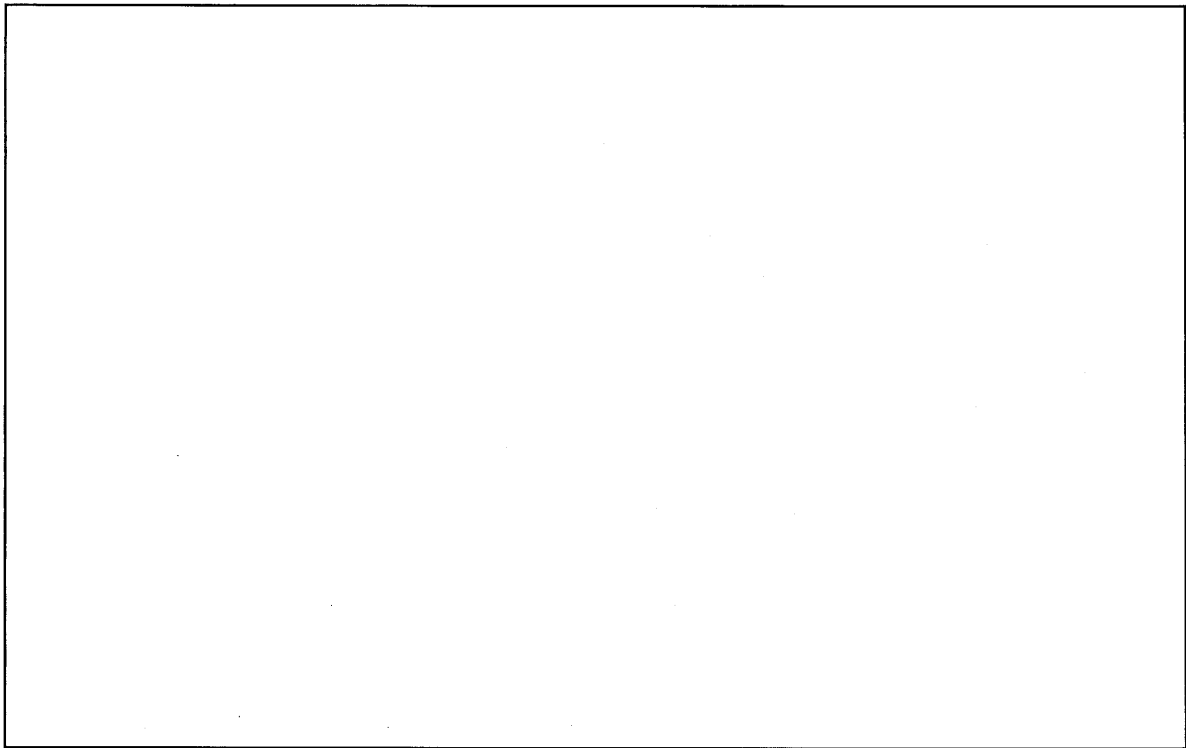
注 4) 収納物重量は、燃料集合体、バーナブルポイズン集合体、スツール及び上・下部スツールの合計値である。(スツール：約 kg/体、上部スツール：約 kg/体、下部スツール：約 kg/体)



(イ)-第 A.1 図 タイプ 1、2 及び 3 燃料の冷却日数と平均燃焼度



(イ)-第 A.2 図 タイプ 4 燃料の冷却日数と平均燃焼度



(イ)-第 A.3 図 タイプ 5 及びタイプ 6 燃料の冷却日数と平均燃焼度

(イ)-第 A.2 表 輸送容器 1 基に収納する主要な核種の放射能強度

主要な核種	放射能強度 (PBq)
^{144}Ce	
^{144}Pr	
^{106}Ru	
^{106}Rh	
^{147}Pm	

C. 輸送容器

1. 設計の概要

核燃料輸送物の全体図を(イ)-第 C.1 図に、輸送容器の縦断面図を(イ)-第 C.2 図に示す。

輸送容器は円筒形状であり、トラニオンがあるが不要な突起物はない。また、輸送容器の表面は滑らかに仕上げられており、表面の汚染の除去は容易である。輸送容器は輸送中には、(イ)-第 C.3 図に示すように輸送架台に横置き状態に保持され、固縛装置で固定される。輸送容器は原子力発電所あるいは再処理工場建屋内での取扱い時には縦置き状態に保持される。燃料集合体は容器内に収納されたバスケットに収納される。燃料集合体は、縦置き状態に保持された容器の上部から出し入れが行われる。輸送容器の取扱いは容器に取り付けられたトラニオンを使用して行われる。

緩衝体は落下等の衝撃を緩和するため、容器の上部及び下部に取り付けられている。容器は、落下等による衝撃に耐えうる強度を持っている。

輸送容器内部には、燃料集合体より発生する崩壊熱の除去を容易にし、中性子の遮蔽効果を向上するため、純水又はボロン入りの水(燃料プール水)が充填される。

容器外筒外面には崩壊熱を放散するため、円周方向にフィンが取り付けられている。

輸送容器の密封境界は、(イ)-第 C.4 図に示すように内筒、底板、フランジ、蓋、ベント・水位調整バルブ、水位調整用加圧バルブ及びドレンバルブから構成され、蓋及びバルブ類にはふっ素ゴム製 Oリングが使用されている。これらを密封装置とする。

輸送容器の主な遮蔽材は、鉛及びレジンである。鉛はガンマ線遮蔽材、レジンは中性子遮蔽材として用いられている。

核燃料輸送物の未臨界性を維持するため、中性子吸収材としてボロン入りステンレス鋼製のバスケットが用いられている。なお、本輸送容器は湿式であり、内部に水が存在することから、臨界安全評価上は内部雰囲気を満水として評価する。

2. 構造

輸送容器は、(イ)-第 C.1 図及び(イ)-第 C.2 図に示すように本体、蓋、バスケット及び緩衝体により構成される。

付属機器として、輸送架台がある。また、近接防止金網を取り付ける場合がある。

(1) 本体

本体縦断面図を(イ)-第 C.5 図に、横断面図を(イ)-第 C.6 図に示す。

本体は三重円筒構造であり、主要構成物は内筒、中間筒及び外筒、伝熱フィン、フィン、遮蔽材としての鉛及びレジン、ベント・水位調整バルブ及びドレンバルブ並びに上・下部トラニオンである。

内筒は底板とフランジに溶接され、密封容器本体を構成している。

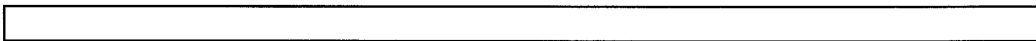
フランジは、中間筒とも溶接されている。

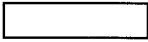


外筒は、仕切板を介し上下部が中間筒に溶接されている。

仕切板は外筒とともに中性子遮蔽材であるレジンを覆い、保持している。

内筒と中間筒の間にはガンマ線遮蔽材である鉛が充填されている。



中間筒と外筒の間には、伝熱フィンが設けられるとともにレジンが充填され、中性子遮蔽部となっている。また、外筒より上部側及び下部側にはレジンカバーが設けられ、フランジ、中間筒、とレジンカバーの間にもレジンが充填されている。

フィンは、(イ)-第 C.7 図に示すように外筒外面に円周方向に等間隔で溶接されている。

外筒の上下端部にはバギング(輸送容器を燃料プールに入れる際に表面汚染を防止するために、輸送容器底からフィン部上端まで覆う袋)等を固定するためのバギングリングが設けられている。

底板底面には、下部緩衝体取付用ボルト穴が設けられている。

本体内側上部には、バスケットの位置決めを行い、バスケットの挿入を容易にするためバスケットガイドが取り付けられている。

本体上部には、ベント・水位調整バルブ及び上部トラニオンが取り付けられている。

上部トラニオンは、吊上専用の吊上用トラニオンと輸送架台への積載にも使用する固縛兼用トラニオンがあり、これらトラニオンが各一對ずつ設けられている。これらトラニオンの構造は(イ)-第 C. 8 図に示すとおりである。

本体下部には、ドレンバルブ及び下部トラニオンが取り付けられている。下部トラニオンは、上部トラニオンと同一構造であり、輸送架台への積載及び輸送架台へ積載した状態での水平吊りに使用される。

ベント・水位調整バルブ及びドレンバルブは、基本的には、いずれも [] のバルブであり、その構造は(イ)-第 C. 9 図及び(イ)-第 C. 10 図に示すとおりである。

(2) 蓋

蓋の構造を(イ)-第 C. 11 図に示す。蓋は [] 本の蓋ボルトで本体上部のフランジ面に取り付けられる。この蓋と本体上部フランジ面との接合面には蓋側に二重 O リングが設けられており、この二重の O リングの内側 O リングにより密封性が確保されるようになっている。 []

[]

[]

[]

[]

蓋には、中央上部に蓋吊手が取り付けられ、水位調整用加圧バルブが組み込まれている。水位調整用加圧バルブの構造を(イ)-第 C. 12 図に示す。

また、蓋上部には上部緩衝体取付用のボルト穴と、蓋の位置決めを行うための位置決めボルト用の穴が設けられている。

なお、蓋は輸送中緩衝体に覆われており、不用意にボルトが外されないようになっている。

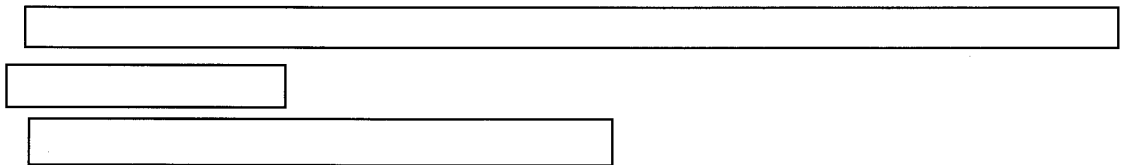
(3) バスケット

バスケットは個々の燃料集合体を輸送容器に収納するためのもので、輸送中燃料集合体を分散・集合させず、かつ未臨界の状態を保持するように設けられている。

中性子吸収材は、バスケットチャンネルを構成するボロン入りステンレス鋼である。

バスケットは(イ)-第 C. 13 図に示すように、ボロン入りステンレス鋼で作られた 14 個のチャンネルをステンレス鋼の支持リングで支持する構造になっている。

チャンネルは支持リングに溶接されている。



(4) 緩衝体

上部緩衝体は蓋上面に、下部緩衝体は容器本体の底面に [] 本のボルトで取り付けられ、落下等により輸送容器に加わる機械的衝撃を吸収して輸送容器を保護する。

上部緩衝体を(イ)-第 C. 14 図に、下部緩衝体を(イ)-第 C. 15 図に示す。

緩衝体は、ステンレス鋼のカバープレートとリブから構成される溶接構造物の内部に緩衝材である木材 ([] 及び []) を充填したものである。

なお、上・下部緩衝体中央凹部に近接防止金網を取り付ける場合がある。

3. 材質

下記(イ)-第 C.1 表のとおりである。

(イ)-第 C.1 表 材質




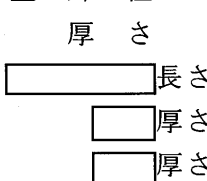
部 位	部 品	材 料	規 格 ^{注)}
本 体	内 筒	ステンレス鋼	
	底 板	ステンレス鋼	
	中 間 筒	炭 素 鋼	
	[]	ステンレス鋼	
	フランジ	ステンレス鋼	
	外 筒	炭 素 鋼 ([])	
	仕 切 板	ステンレス鋼	
	ガンマ線遮蔽体	鉛	
	中性子遮蔽体	レ ジ ン	
	伝熱フィン	銅	
	フ ィ ン	ステンレス鋼	
	バギングリング	ステンレス鋼	
	トラニオン	析出硬化型ステンレス鋼	
	ベント・水位調整バルブ、ドレンバルブ	ステンレス鋼	
	バルブカバープレート	[]	
0 リング	ふっ素ゴム		
レジンカバー	ステンレス鋼		
蓋	蓋 板	ステンレス鋼	JIS G 3214 SUSF304
	[] 及び []	ステンレス鋼	
	蓋 吊 手	ステンレス鋼	
	蓋ボルト	[]	
	水位調整用加圧バルブ	ステンレス鋼	
	バルブカバープレート	[]	
0 リング	ふっ素ゴム		
バスケット	チャンネル	ボロン入りステンレス鋼	-
	支持リング、スペーサ	ステンレス鋼	JIS G 4304 SUS304
緩 衝 体	緩 衝 材	[]	-
	上部緩衝体ボルト	ステンレス鋼	JIS G 4303 SUS304
	下部緩衝体ボルト	ステンレス鋼	JIS G 4303 SUS304
	カバープレート	ステンレス鋼	JIS G 4304 又は 4305 SUS304
リ ブ	ステンレス鋼	JIS G 4304 又は 4305 SUS304	
付属機器	輸送架台	炭 素 鋼	-

注) 記載の規格材料又は相当品を用いる。





4. 寸法(公称)

下記(イ)-第 C.2 表のとおりである。

(イ)-第 C.2 表 輸送容器各部の寸法(1/2)

部 品 名	寸 法(mm)	参 照 図
本 体		
内筒内径		(イ)-第 C.5 図
板厚		
中間筒内径		
板厚		
外筒内径		
板厚		
仕切板厚さ		
鉛 厚 さ		
レジン厚さ		
伝熱フィン厚さ		
枚数		
フィン高さ	160	
厚さ	8	(イ)-第 C.7 図
枚数	77	
バギングリング		
高さ	161	(イ)-第 C.8 図
トラニオン外径	120/200	
高さ		
レジンカバー		厚さ
底板厚さ		
全 長		
全 幅	2,500	
(バギングリング)	2,498	
(フィン)		
Oリング断面径		
バルブ用	3.5	
蓋		
蓋 外 径	1,680	(イ)-第 C.11 図
厚 さ		
長さ		
厚さ		
厚さ		
蓋吊手高さ		

(イ)-第 C. 2 表 輸送容器各部の寸法(2/2)

部 品 名	寸 法(mm)	参 照 図
<u>蓋(続き)</u> 蓋ボルト径 長 さ Oリング断面径 蓋用 バルブ用		
<u>バスケット</u> 外 径 長 さ チャンネル数 チャンネル内幅	1,331  14 	(イ)-第 C. 13 図
<u>緩衝体</u> 外 径 幅 上部緩衝体ボルト径 下部緩衝体ボルト径 上部緩衝体長さ 下部緩衝体長さ	2,600 2,600  636 636	(イ)-第 C. 14 図及び (イ)-第 C. 15 図

5. 重量

本核燃料輸送物の総重量は 115.0 トン以下であり、その詳細を(イ)-第 C.3 表に示す。

(イ)-第 C.3 表 核燃料輸送物重量

輸送容器各部又は収納物	重量(トン)
A. 本体	82.2 以下
B. 蓋	5.3 以下
C. バスケット	6.7 以下
D. 緩衝体	
① 上部緩衝体(近接防止金網を含む。)	3.5 以下
② 下部緩衝体(近接防止金網を含む。)	3.5 以下
E. 燃料集合体 ^{注1)} (バーナブルポイズン集合体、スツール及び上・下部スツールを含む。)	10.2 以下
F. 冷却水 ^{注2)}	4.1 以下
G. 輸送架台(近接防止金網を含む。)	10.0 以下
H. 輸送容器総重量 A+B+C+D	101.2 以下
I. 核燃料輸送物総重量 ^{注3)} A+B+C+D+E+F ^{注4)}	115.0 以下

注1) 各燃料集合体タイプのうち、重量の大きい17×17型で算出

注2) 各燃料集合体タイプのうち、燃料を収納した場合に冷却水重量が最大となる14×14型で算出

注3) 輸送容器各部、収納物及び冷却水の端数処理前の重量を基に算出

注4) 各燃料集合体タイプのうち、重量の大きい17×17型を収納した場合の冷却水重量(3.9トン以下)で算出

D. 輸送容器の収納物

本輸送容器の収納物は、PWR 使用済燃料集合体、スツール及び上・下部スツールである。

1. PWR 燃料集合体

PWR 燃料集合体には数種の型式があり、本輸送容器に収納可能な主な燃料集合体の仕様例を(イ)-第 D. 1 表に示す。

(イ)-第 D. 1 図は本輸送容器に収納する PWR 燃料集合体の代表的な全体図であり、(イ)-第 D. 2 図から(イ)-第 D. 7 図までは各燃料集合体タイプの断面図である。これらの図に示されているように、燃料集合体は正方配列された燃料棒で構成され、両端及び中間部数箇所が支持格子により保持されている。燃料は低濃縮の UO_2 ペレットでジルカロイ製の燃料被覆管の中に充填され、両端に端栓を溶接して密封されている。

また、燃料には可燃性毒物である Gd_2O_3 を含むものがある。

なお、燃料集合体にあつては燃料集合体単独あるいは、燃料集合体にバーナブルポイズン集合体を挿入した状態でも本輸送容器に収納することができる。燃料集合体に挿入可能なバーナブルポイズン集合体の仕様例を(イ)-第 D. 2 表に示す。(イ)-第 D. 8 図から(イ)-第 D. 11 図まではバーナブルポイズン集合体の断面図である。

収納物の燃焼条件として、燃焼度、平均比出力及び冷却日数は(イ)-第 D. 3 表に示すとおりである。燃料集合体は上述のようにジルカロイ製の被覆管とセラミック状の UO_2 ペレットが主であり、照射に伴って発生する核分裂生成ガスが被覆管内の空隙に蓄積されている。

燃料集合体が輸送容器に収納された状態では冷却材である純水又はボロン入りの水が充填されるが、冷却材の放射線分解はごく微量であり収納物への化学的影響はない。収納物の主要な放射性核種と放射能の量(放射能強度)は(イ)-第 D. 4 表に示すとおりである。

また、輸送容器 1 基当たりの最大の発熱量(崩壊熱量)は、(イ)-第 A. 1 表に示すとおり安全側に 54kW とする。

燃料集合体は(イ)-第 C. 13 図に示したバスケットに格納して容器に収納される。このとき、燃料集合体の最大の発熱量を考慮しても輸送容器内部の圧力は 1.7MPa 以下であるため、密封装置の健全性に影響はない。

2. スツール

バスケットには、(イ)-第 C. 13 図に示すように下部スペーサのないチャンネル(大)がある。このチャンネルに燃料集合体を装荷して輸送する場合には、バスケット底部にステンレス鋼製のスツール(重量約 kg)を挿入し長さを調整する。

スツールの構造図を(イ)-第 D. 12 図に示す。また、スツールの材質を(イ)-第 D. 5 表に示す。

3. 上・下部スツール

輸送中の燃料集合体のがたつきを抑えるため、燃料集合体の上下端にステンレス鋼製の
上・下部スツールを設置する。バスケットの各チャンネル内に下部スツールが設置さ
れており、燃料集合体を装荷した後、燃料集合体の上端に上部スツールを装着する。

上部スツールの構造図を(イ)-第 D. 13 図及び(イ)-第 D. 14 図に、下部スツールの構造
図を(イ)-第 D. 15 図に示す。また、上・下部スツールの材質を(イ)-第 D. 5 表に示す。

上部スツール(タイプ I)(重量約□kg)はバーナブルポイズン棒を挿入していない燃
料集合体を本輸送容器に収納する場合に装着される。上部スツール(タイプ II)(重量約
□kg)はバーナブルポイズン棒を挿入していない燃料集合体、又はバーナブルポイズン
棒を挿入している燃料集合体を本輸送容器に収納する場合に装着される。


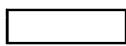
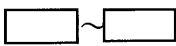

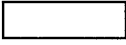
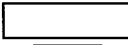

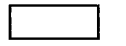
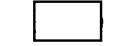






下部スツール(重量約□kg)は、燃料集合体が装荷される全てのチャンネルに設置さ
れる。

(イ)-第 D.1 表 燃料集合体の型式及び仕様例(代表的な例)

燃料集合体の種類と型式 主要な燃料諸元	タイプ 1	タイプ 2	タイプ 3	タイプ 4	タイプ 5	タイプ 6
		14×14 配列型 (12 フライット)	15×15 配列型	17×17 配列型	14×14 配列型	15×15 配列型
材 質	UO ₂ 注)	UO ₂ 注)	UO ₂ 注)	UO ₂ 注)	UO ₂ 注)	UO ₂ 注)
燃 料	ジルカロイ-4	ジルカロイ-4	ジルカロイ-4	ジルコニウム基金金	ジルコニウム基金金	ジルコニウム基金金
被 覆 管	約 95	約 95	約 95	約 97	約 97	約 97
燃料密度(理論密度比 %)						
形 状						
集合体長さ (mm)	約 4,100	約 4,100	約 4,100	約 4,100	約 4,100	約 4,100
燃料有効長 (mm)						
燃料棒配列	14×14	15×15	17×17	14×14	15×15	17×17
燃料棒直径 (mm)	10.7	10.7	9.5	10.7	10.7	9.5
燃料棒ピッチ (mm)	14.1	14.3	12.6	14.1	14.3	12.6
集合体幅 (mm)	197	214	214	197	214	214
燃料棒本数 (本)	179	204	264	179	204	264

注) 可燃性毒物として Gd₂O₃ を含むものがある。

(イ)-第D.2表 バーナブルポイズン集合体の仕様例(代表的な例)

諸 元	形 式	タイプ 1、4	タイプ 2、5	タイプ 3、6
	① 形状、全長等			
バーナブルポイズン集合体				
外形 (mm)		140×140	156×156	161×161
全長 (mm)		3,964 又は 3,917	同 左	3,834~4,003
バーナブルポイズン棒				
全長(ネジ部を含む)				
吸収材有効長(mm)	3,460~3,624	同 左	3,230~3,607	
外径 (mm)	11.0	11.2	9.7	
内径 (mm)	9.2~10.0	9.4~10.2	8.1~8.7	
シンプルプラグ				
全長(ネジ部を含む)				
外径 (mm)				
② 重 量				
総重量 (kg)				
吸収材重量 (kg)				
③ 材 料				
吸収材	ホウケイ酸ガラス (パイレックス) 又はホウ素アルミナ	同 左	同 左	
ボロン含有量(B ₂ O ₃) 又は(B ₄ C)	13%(B ₂ O ₃) 又は 3%(B ₄ C)	13%(B ₂ O ₃)、18%(B ₂ O ₃) 又は 3%(B ₄ C)	同 左	
被覆管	ステンレス鋼 又はジルカロイ-4	同 左	同 左	
シンプルプラグ	ステンレス鋼	同 左	同 左	
ホールドダウンアセン ブリー	ステンレス鋼 インコネル	同 左	同 左	

(イ)-第 D.3 表 収納物の燃焼条件

燃料集合体の種類 燃焼条件	タイプ 1	タイプ 2	タイプ 3	タイプ 4	タイプ 5	タイプ 6	制限放射能量 設定用 ^{注3)}
	収納物平均燃焼度 収納物最高燃焼度 (MWD/MTU)						
平均比出力 (MW/MTU)							
冷却日数 (日)							

注 1) 平均燃焼度と冷却日数の関係は(イ)-第 A.1 図、(イ)-第 A.2 図及び(イ)-第 A.3 図による。

注 2) () 値は、バーナブルポイズン集合体。

注 3) 輸送容器 1 基当たりの放射能の量の制限値設定用に、全てのタイプの放射能強度を包含する燃料仕様として設定。

(イ)-第 D.4 表 主要核種の種類と量

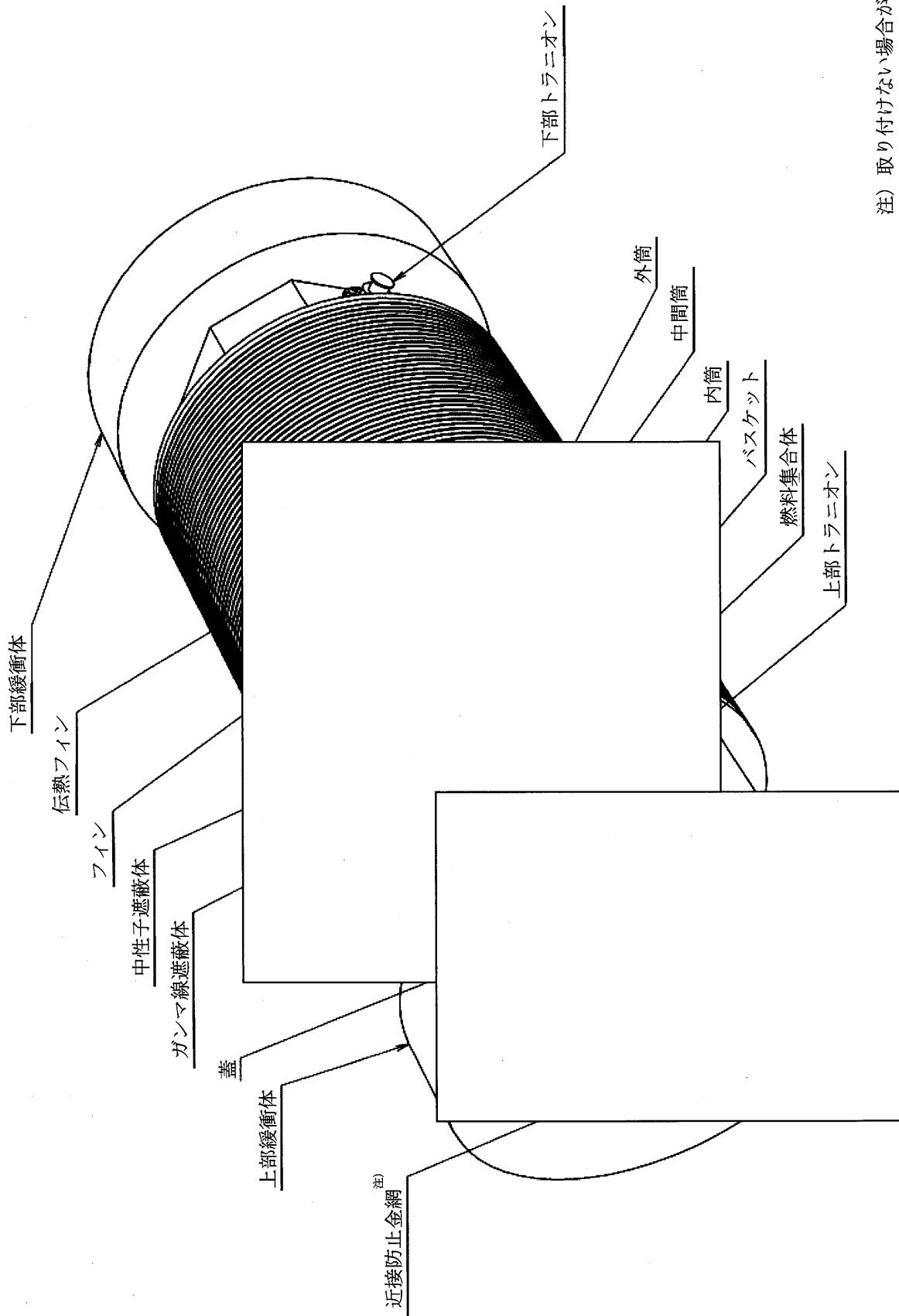
項目	燃料タイプ	タイプ1	タイプ2	タイプ3	タイプ4	タイプ5	タイプ6	制限放射能設定用
① 燃料集合体収納体数(体)		14	14	14	14	14	14	14
② 放射能強度 (PBq) (輸送容器 1 基当たり)								
③ 主要核種の放射能強度 (PBq) (②を主要核種ごとに分類) [核種]	^{89}Sr ^{90}Sr ^{90}Y ^{91}Y ^{95}Zr ^{95}Nb ^{97}Tc ^{103}Ru ^{103}Rh ^{106}Ru ^{106}Rh ^{110m}Ag ^{113m}Cd ^{119m}Sn ^{123}Sn ^{125}Sb ^{125m}Te ^{127}Te ^{127m}Te ^{134}Cs ^{137}Cs ^{137m}Ba ^{144}Ce ^{144}Pr ^{144m}Pr ^{147}Pm ^{151}Sm ^{154}Eu ^{155}Eu ^3H ^{85}Kr							
④ 崩壊熱量 (kW) (輸送容器 1 基当たり)		40	48	50	35	32	34	-
小計								
その他								
合計								

注記) (イ)-第 D.3 表に基づき、ORIGEN2.1 コードにより計算された値

(イ)-第D.5表 スツール及び上・下部スツールの材質

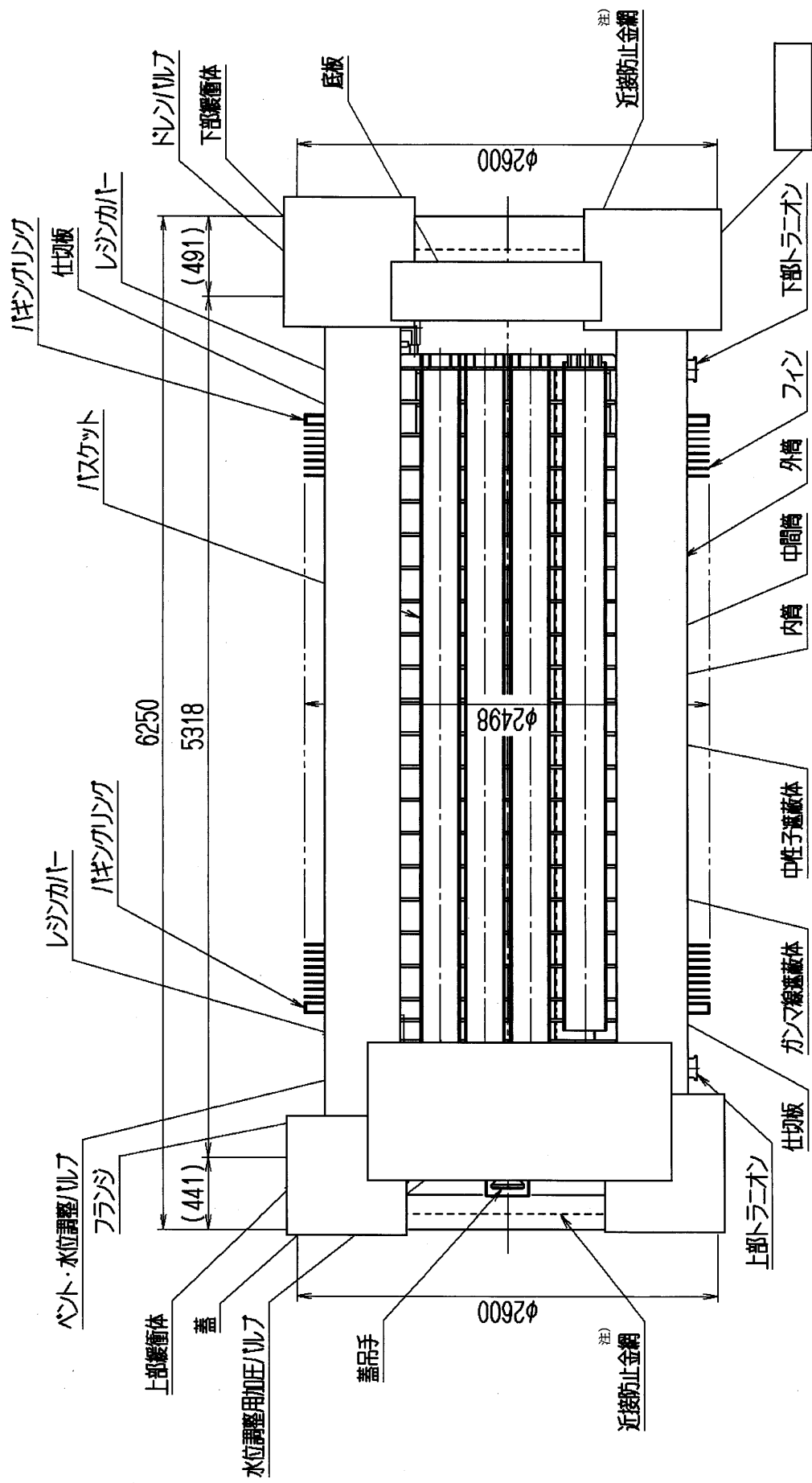
部品名	材料	規格 ^{注)}
<u>スツール</u>	ステンレス鋼	JIS G 4304 又は 4305 SUS304 及び JIS G 4317 SUS304
<u>上部スツール(タイプ I)</u>		
ガイドパイプ	ステンレス鋼	JIS G 3459 SUS304TP 又は JIS G 4303 SUS304
ばね	ステンレス鋼	JIS G 4314 SUS304WPB
<u>上部スツール(タイプ II)</u>		
ガイドパイプ	ステンレス鋼	JIS G 3459 SUS304TP 又は JIS G 4303 SUS304
ばね	ステンレス鋼	JIS G 4314 SUS304WPB
<u>下部スツール</u>		
パイプ	ステンレス鋼	JIS G 3459 SUS304TP

注) 記載の規格材料又は相当品を用いる。



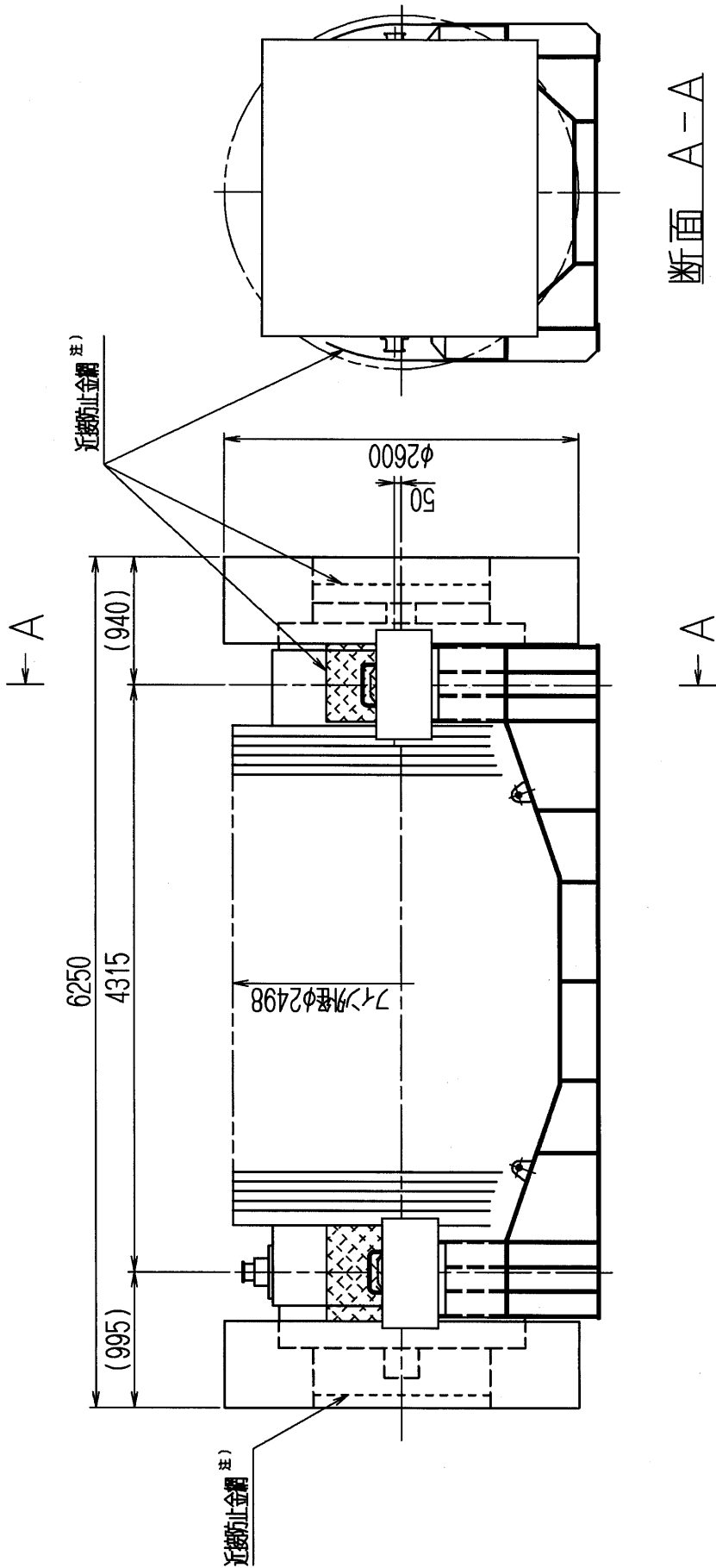
注) 取り付けない場合がある。

(イ)-第 C.1 図 核燃料輸送物全体区(鳥瞰図)



(単位：mm) 注) 取り付けない場合がある。

(イ)-第 C.2 図 輸送容器縦断面図

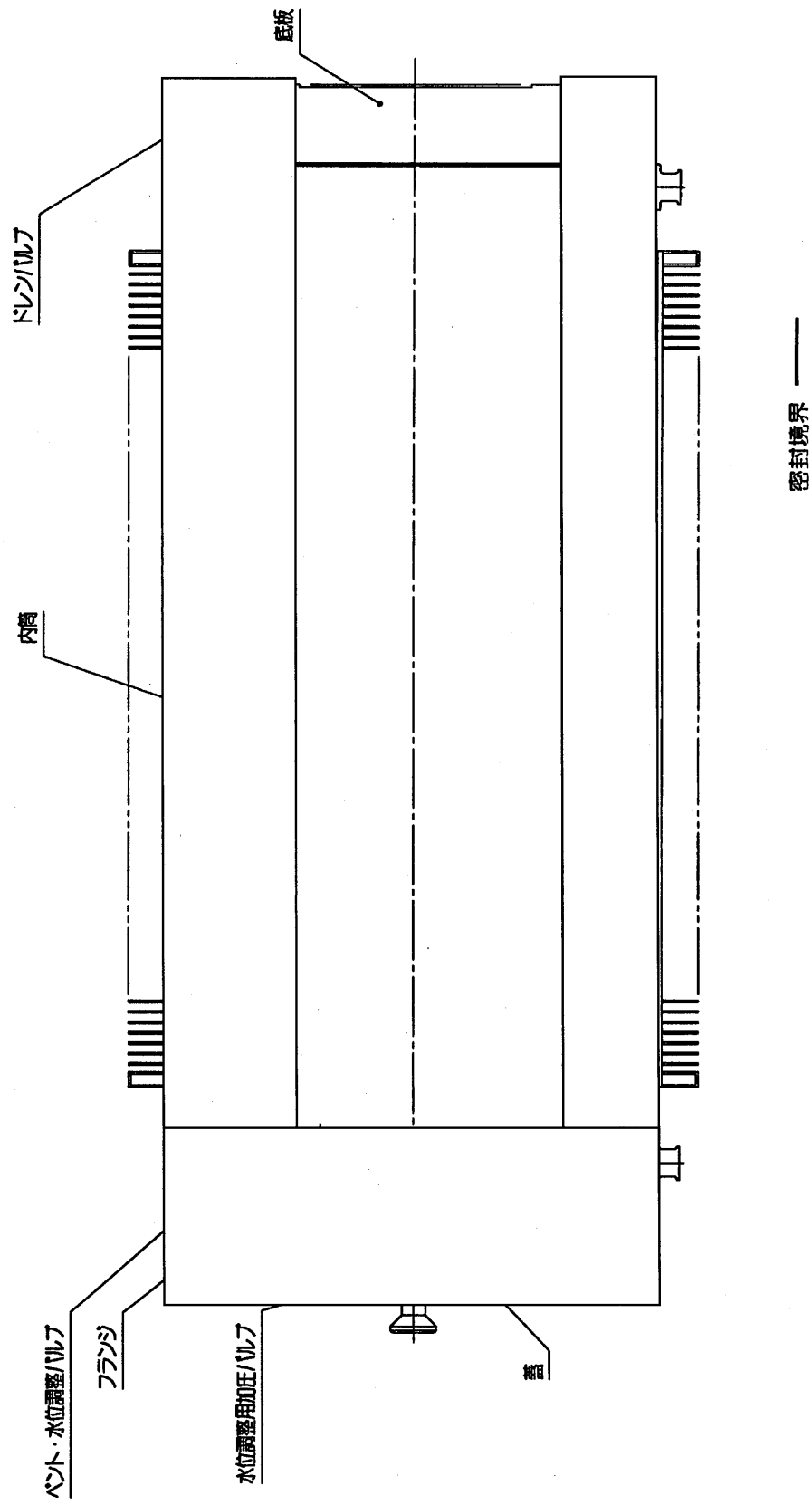


注) 取り付けない場合がある。

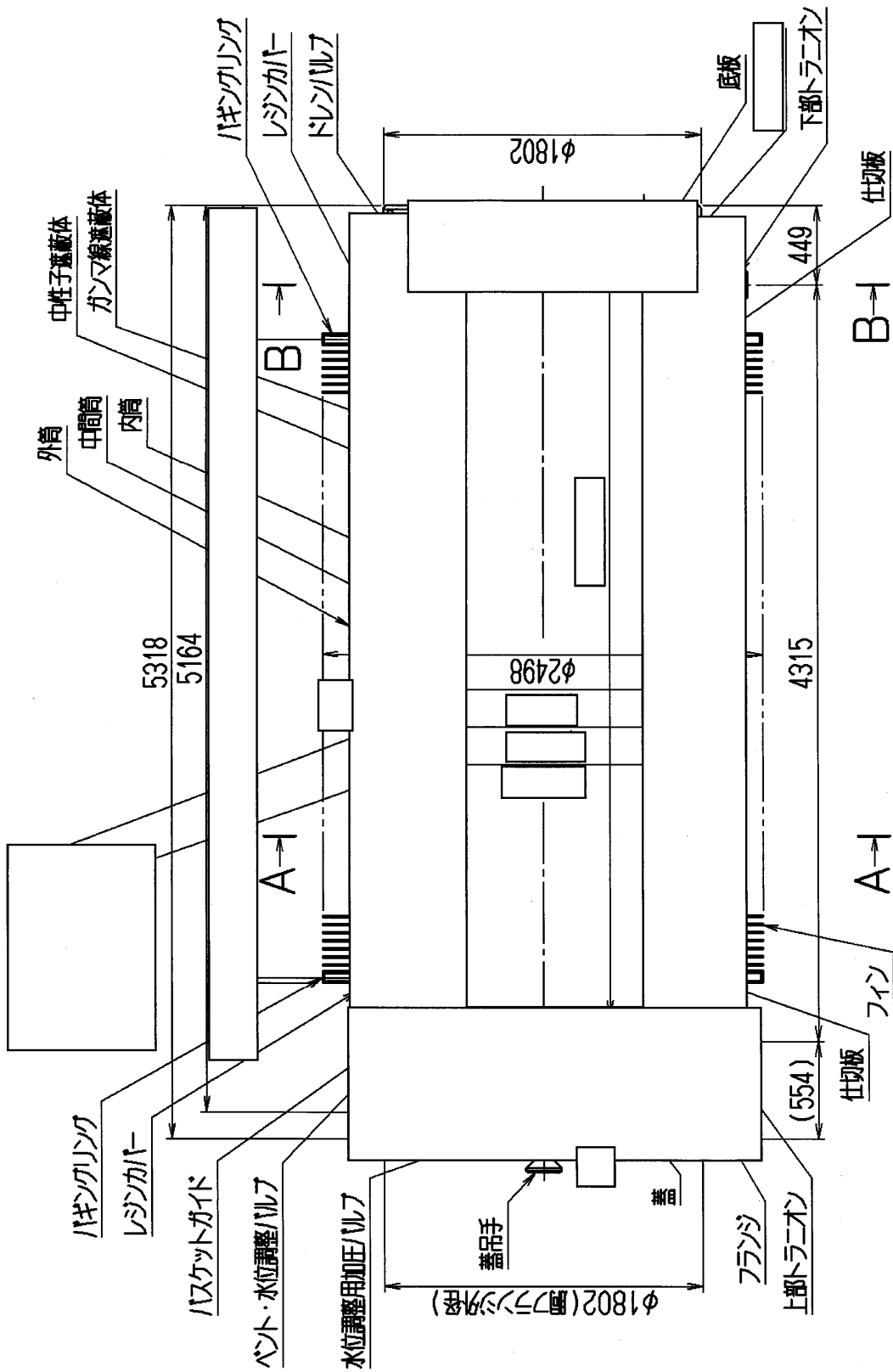
取扱注意

(単位: mm)

(1)-第 C.3 図 輸送荷姿

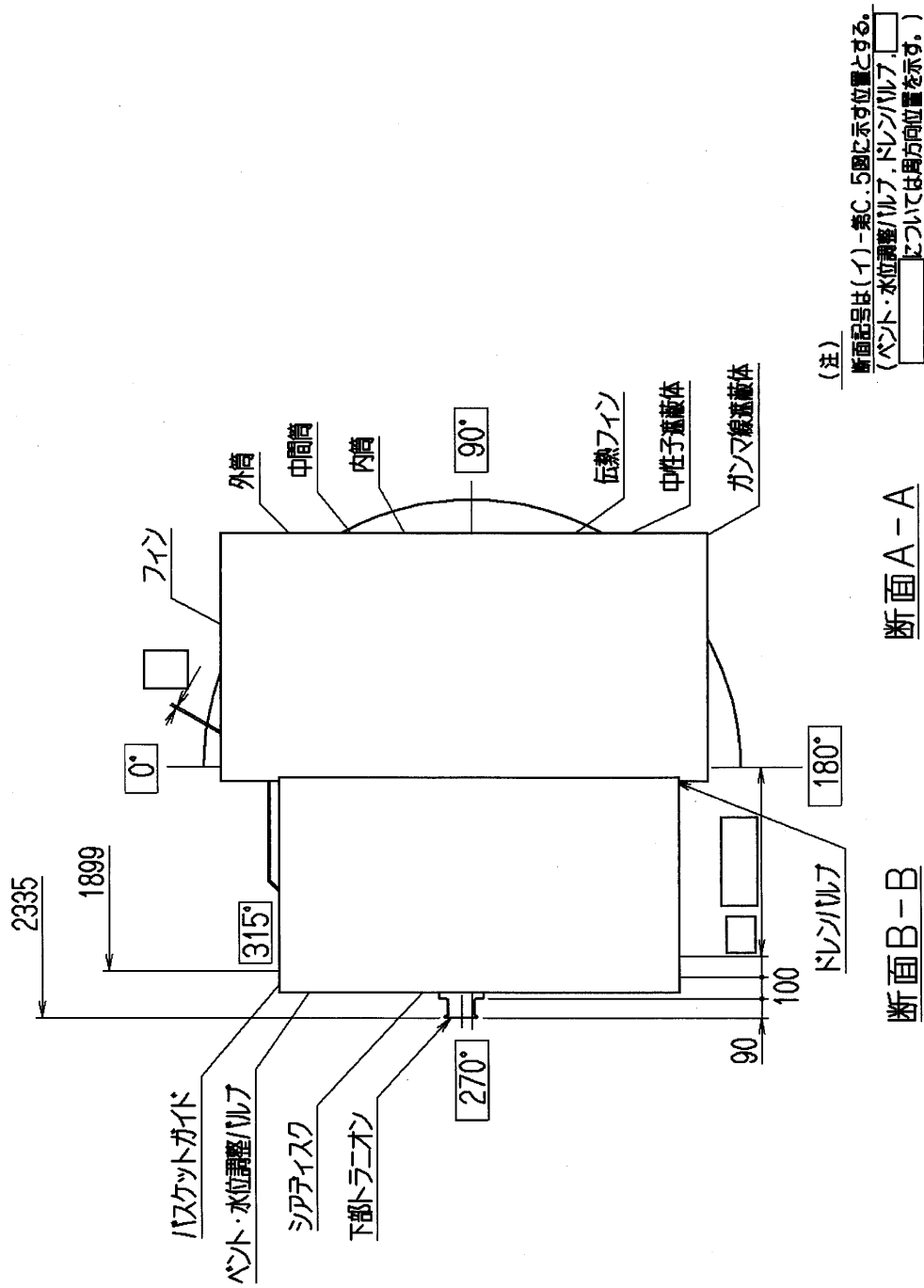


(イ)-第 C.4 図 密封境界



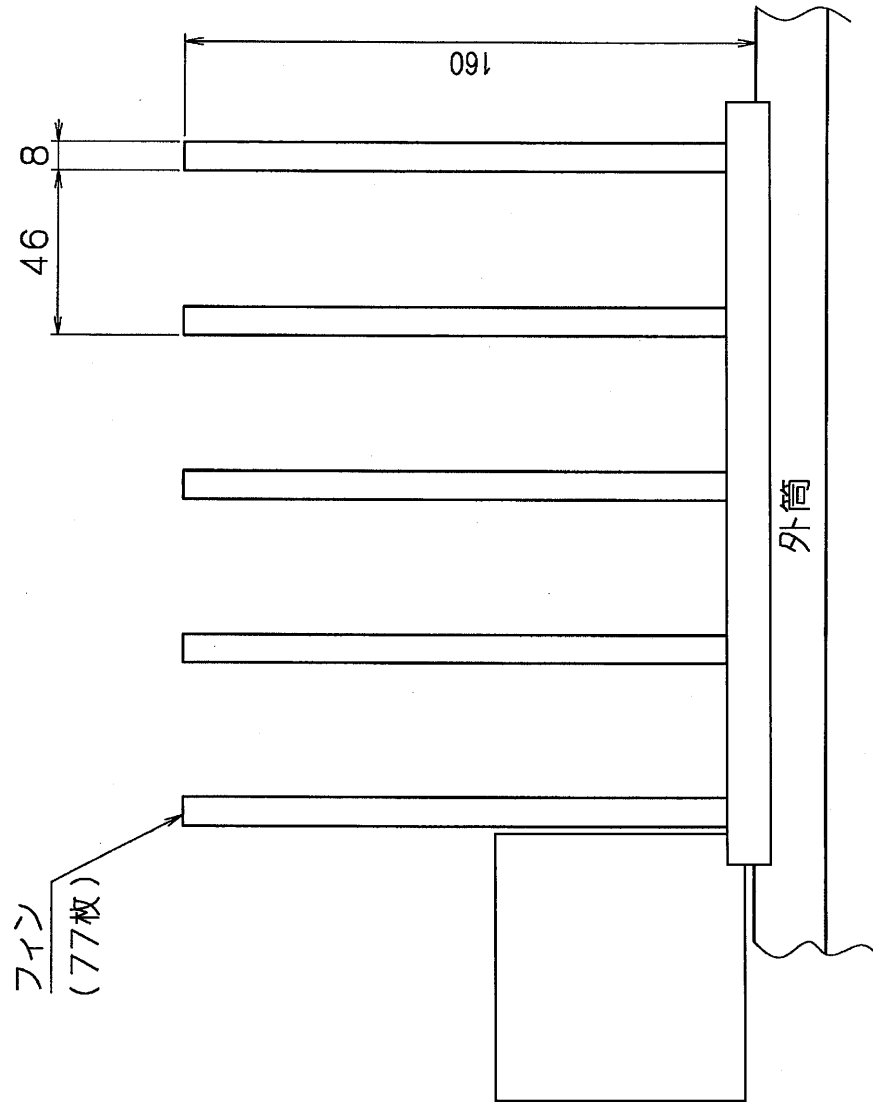
(単位: mm)

(イ)-第 C.5 図 本体縦断面図



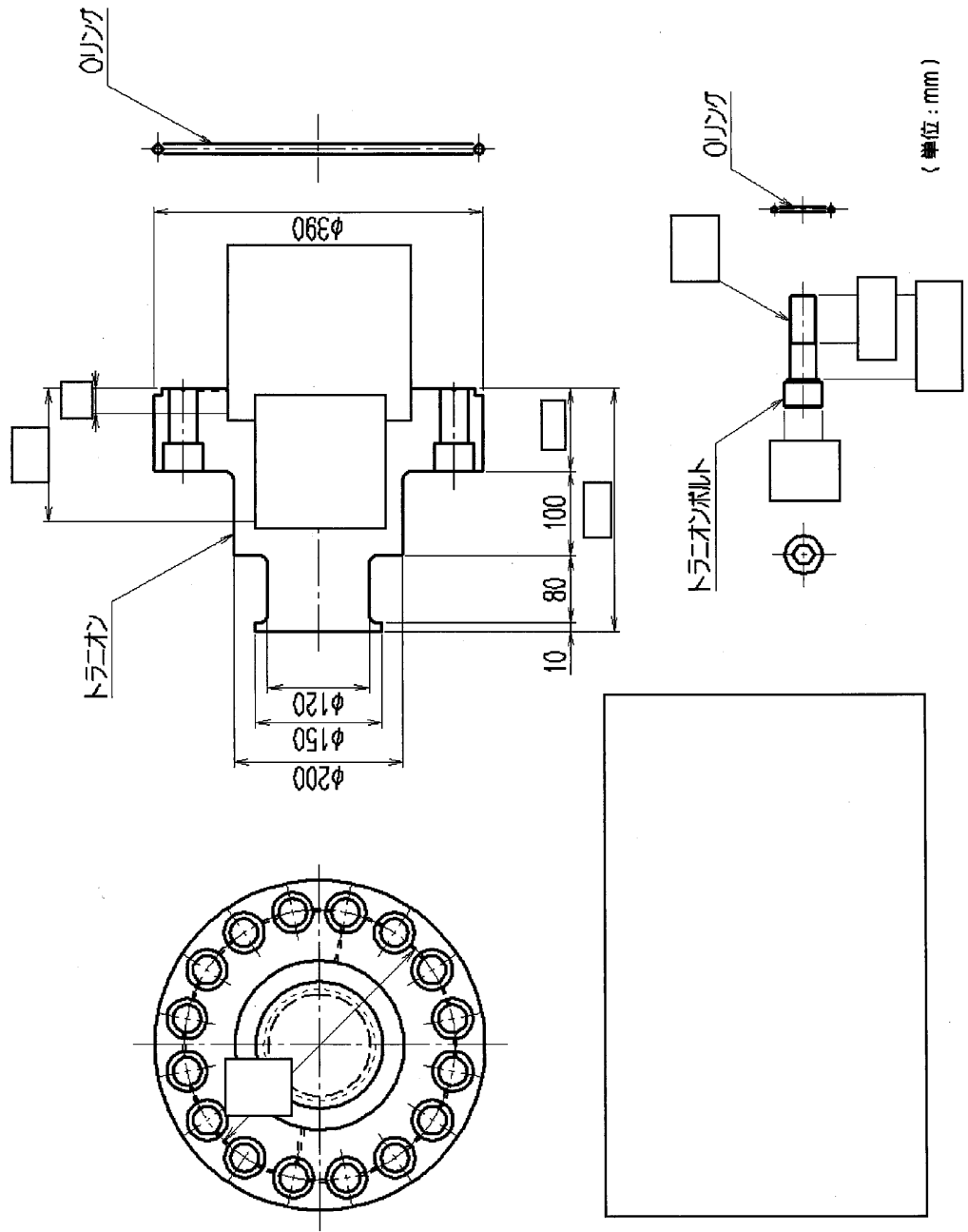
(単位: mm)

(イ)-第C.6図 本体横断面図



(単位: mm)

(イ)-第C.7図 フィン



(イ)-第 C. 8 図 トラネオン

取扱注意

(単位: mm)

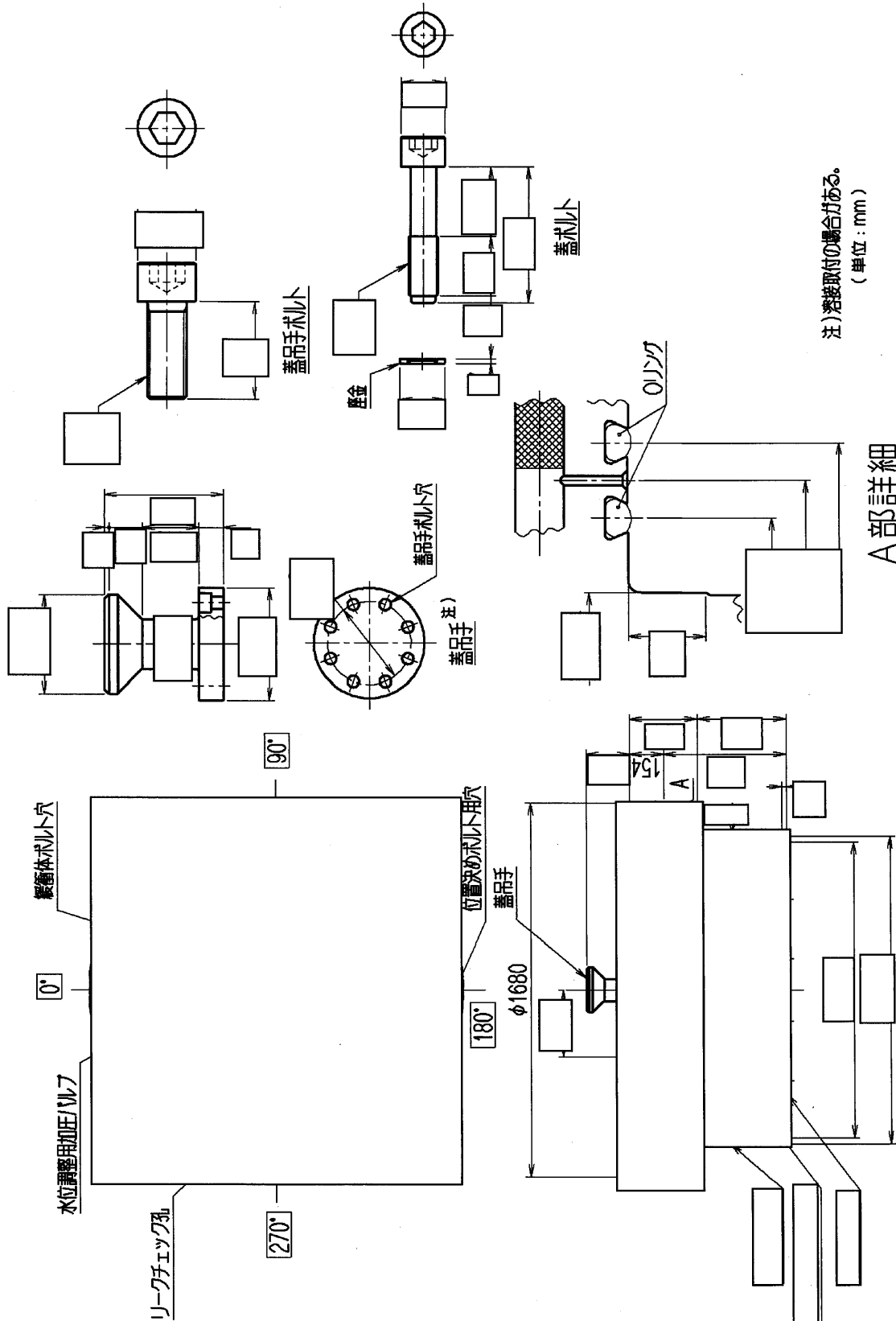
(イ)-第 C.9 図 ベント・水位調整バルブ

取扱注意

(単位: mm)

(イ)-第 C.10 図 ドレンバルブ

取扱注意

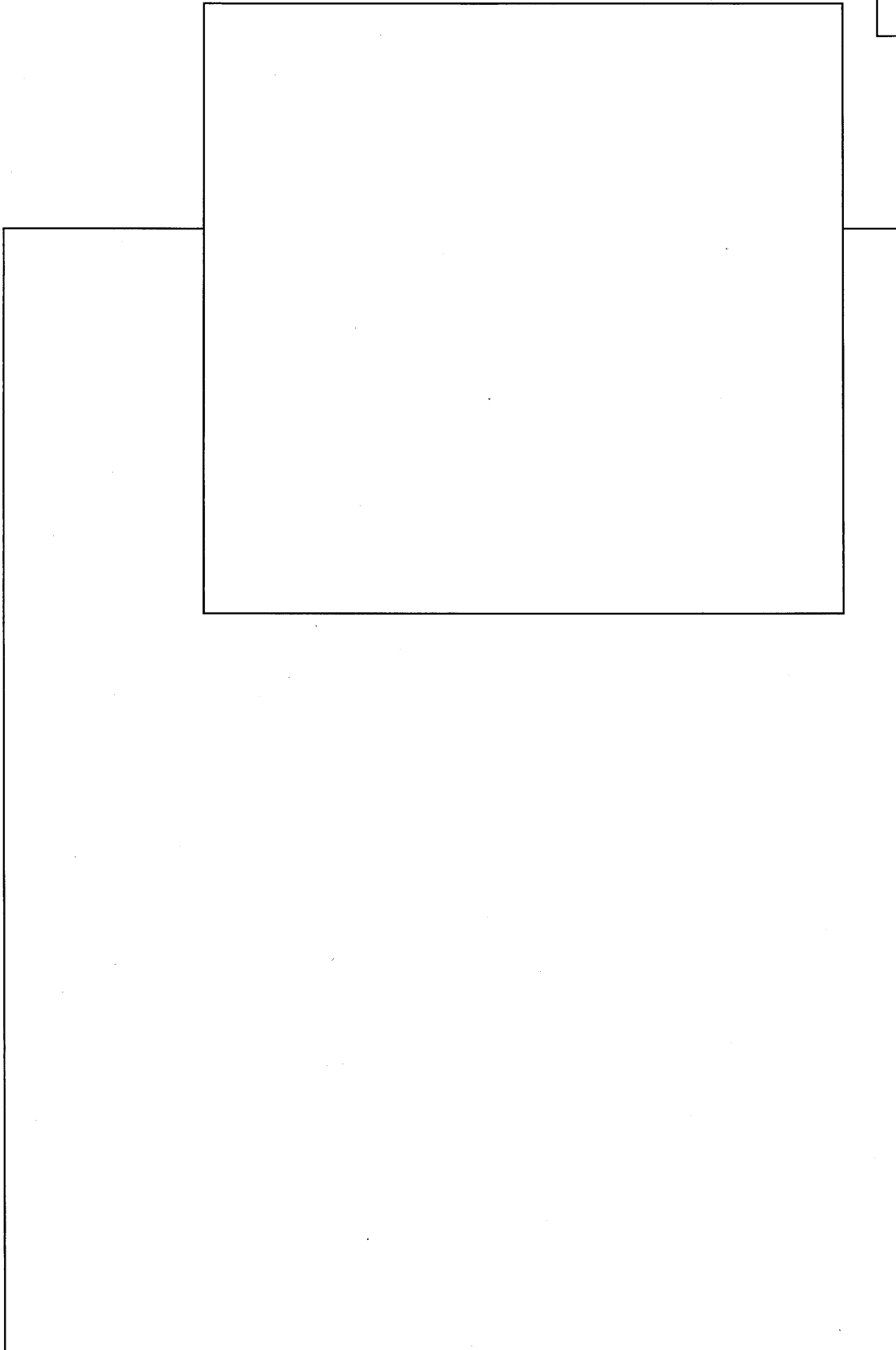


注) 溶接取付の場合がある。
(単位: mm)

A部詳細

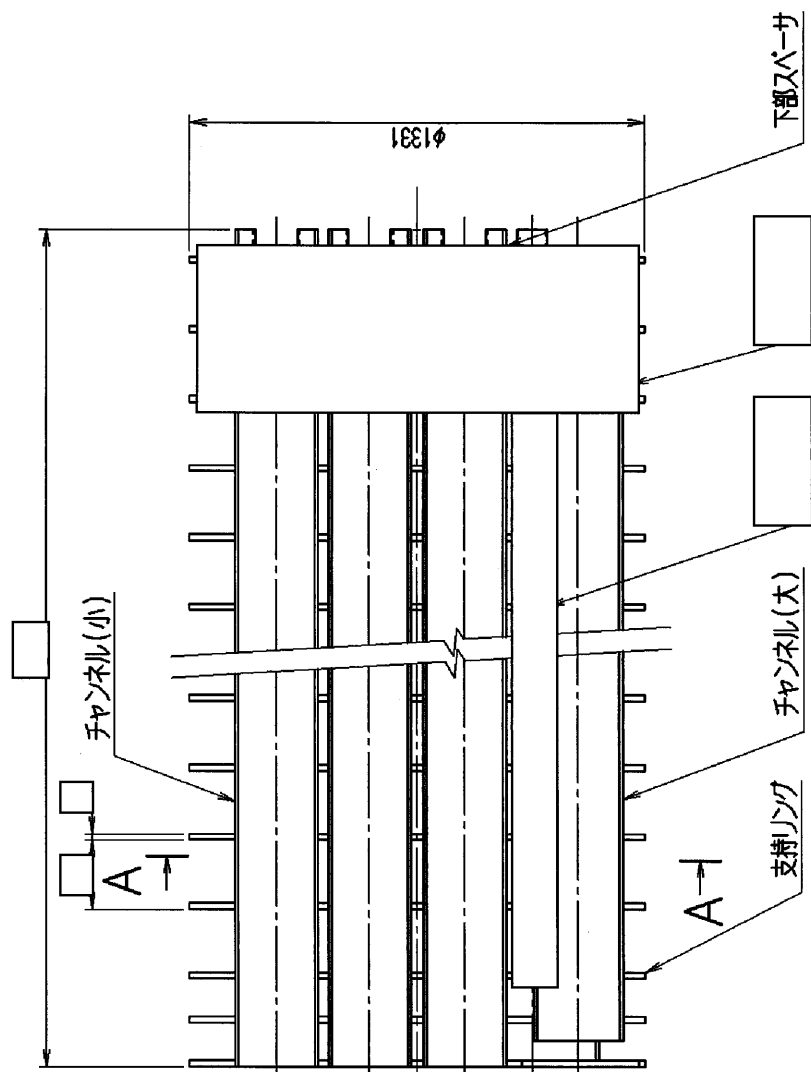
(イ)-第 C.11 図 蓋

取扱注意



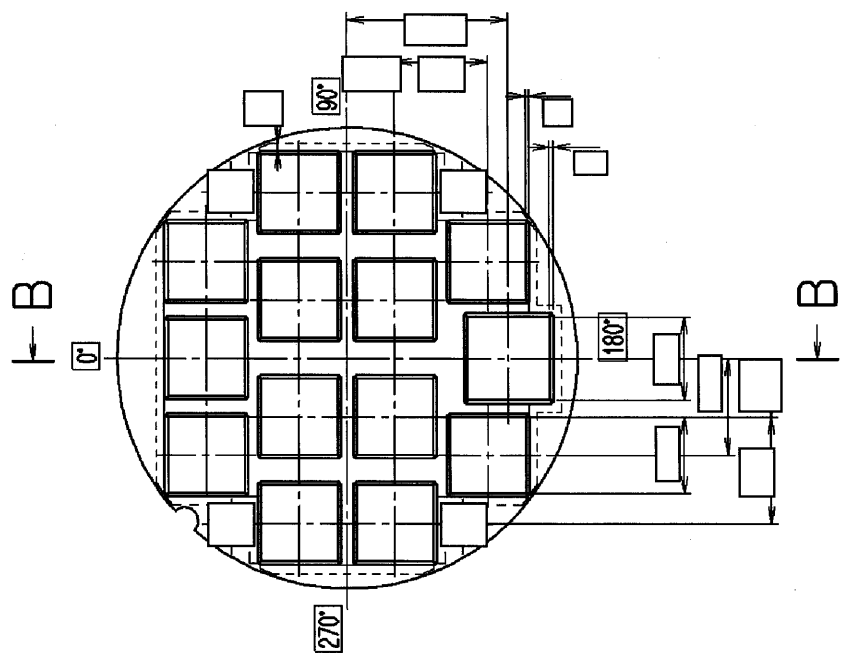
(単位: mm)

(イ)-第 C.12 図 水位調整用加圧バルブ



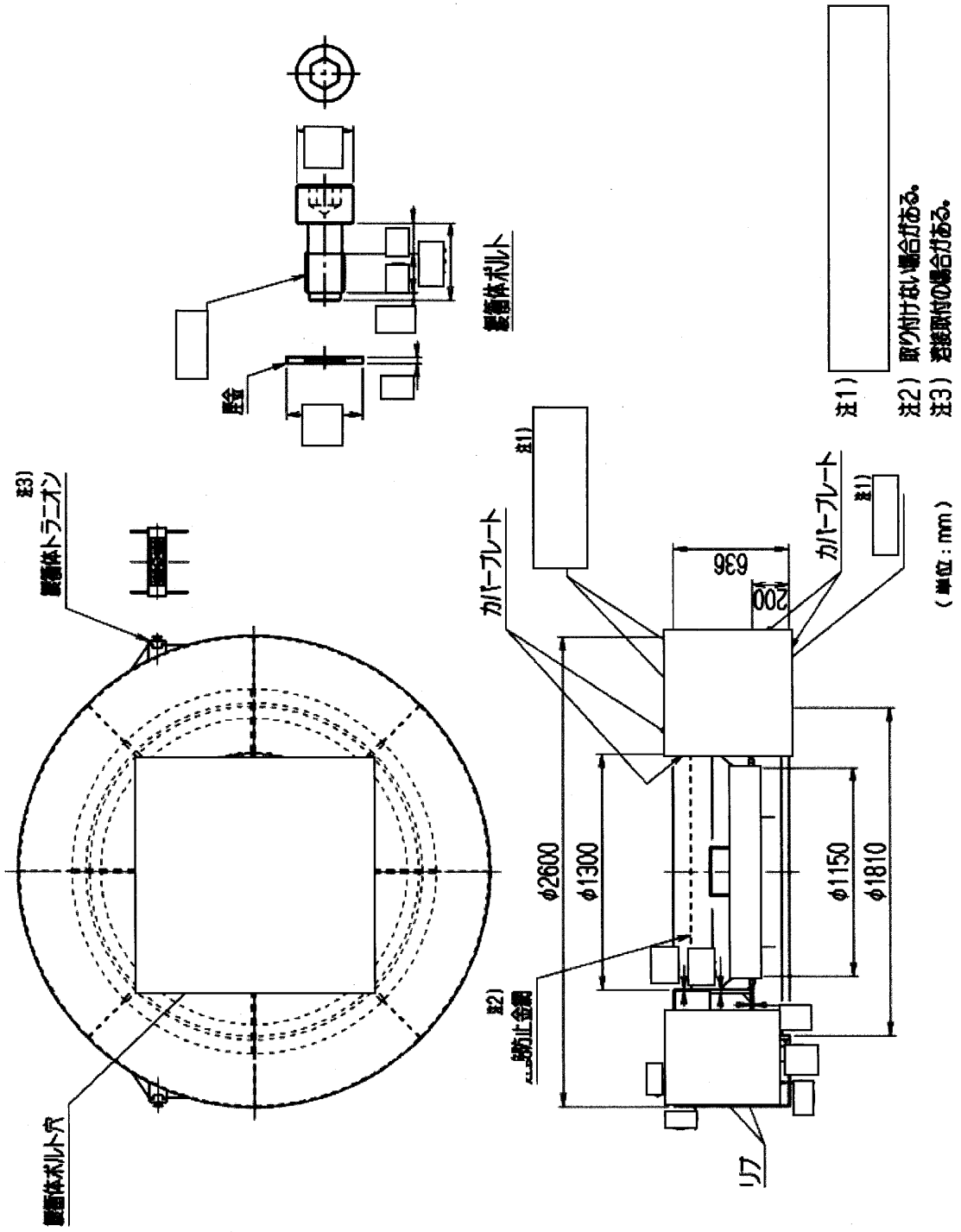
断面B-B

(単位: mm)

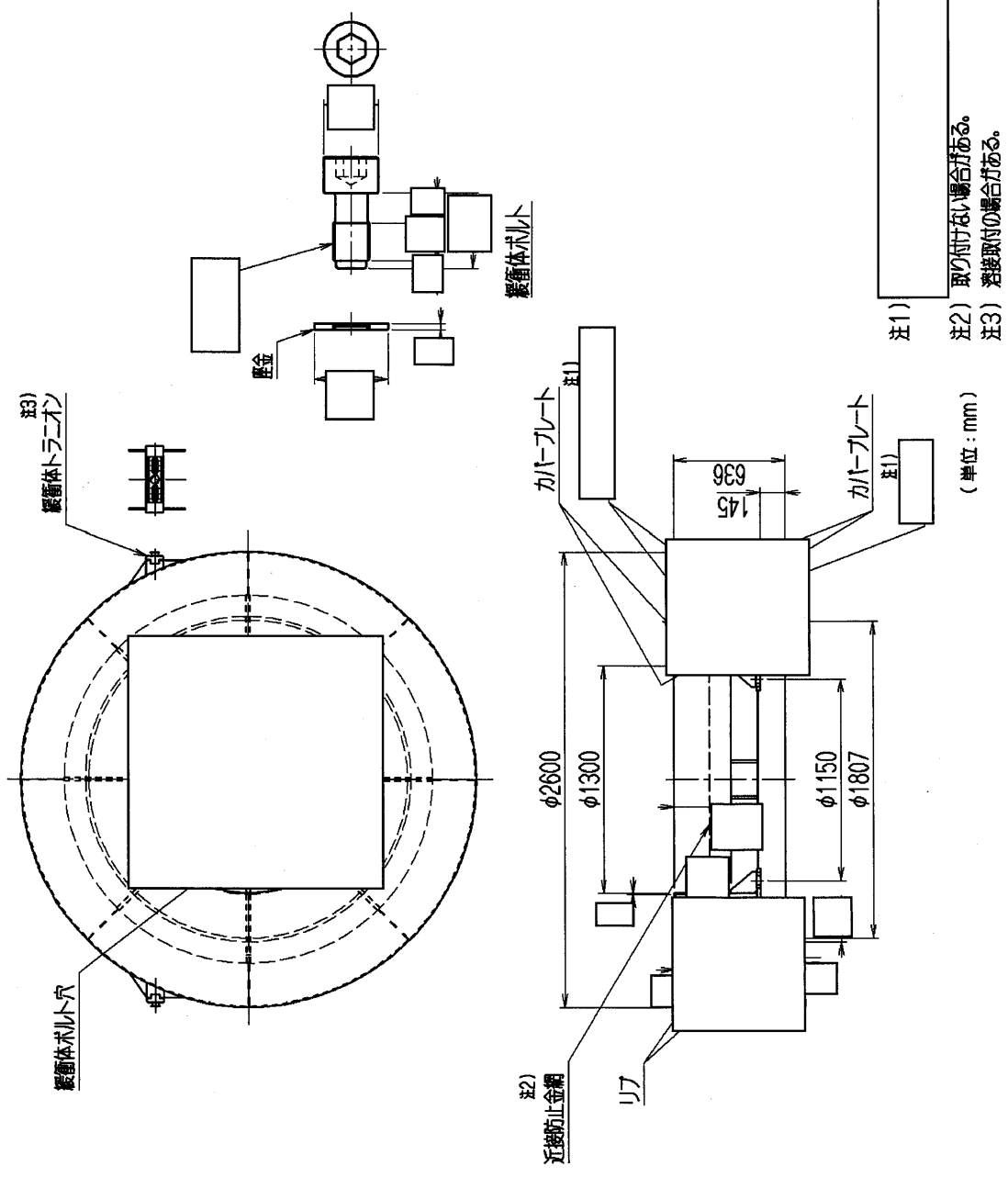


断面A-A

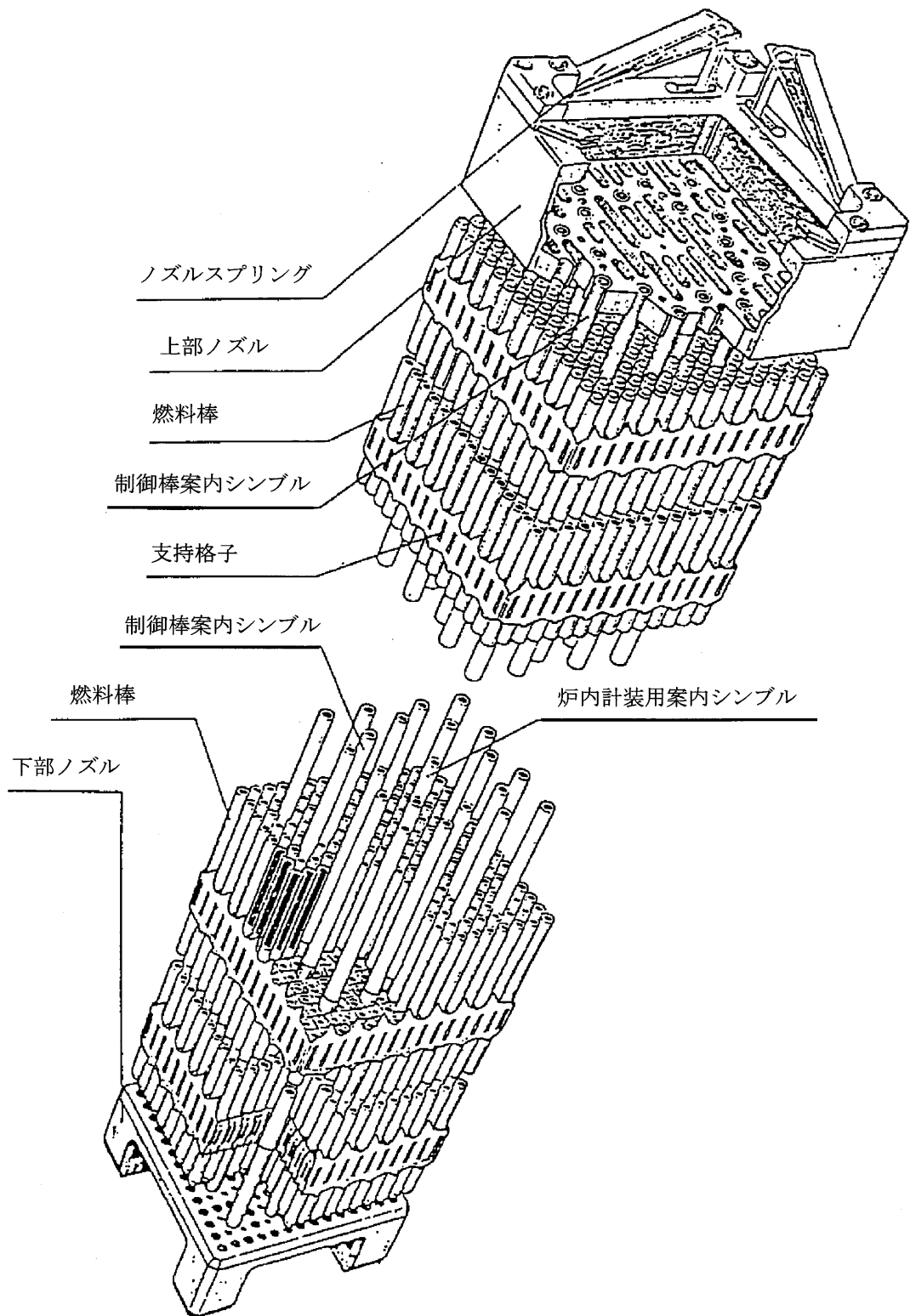
(イ)-第C.13 図 バスケット



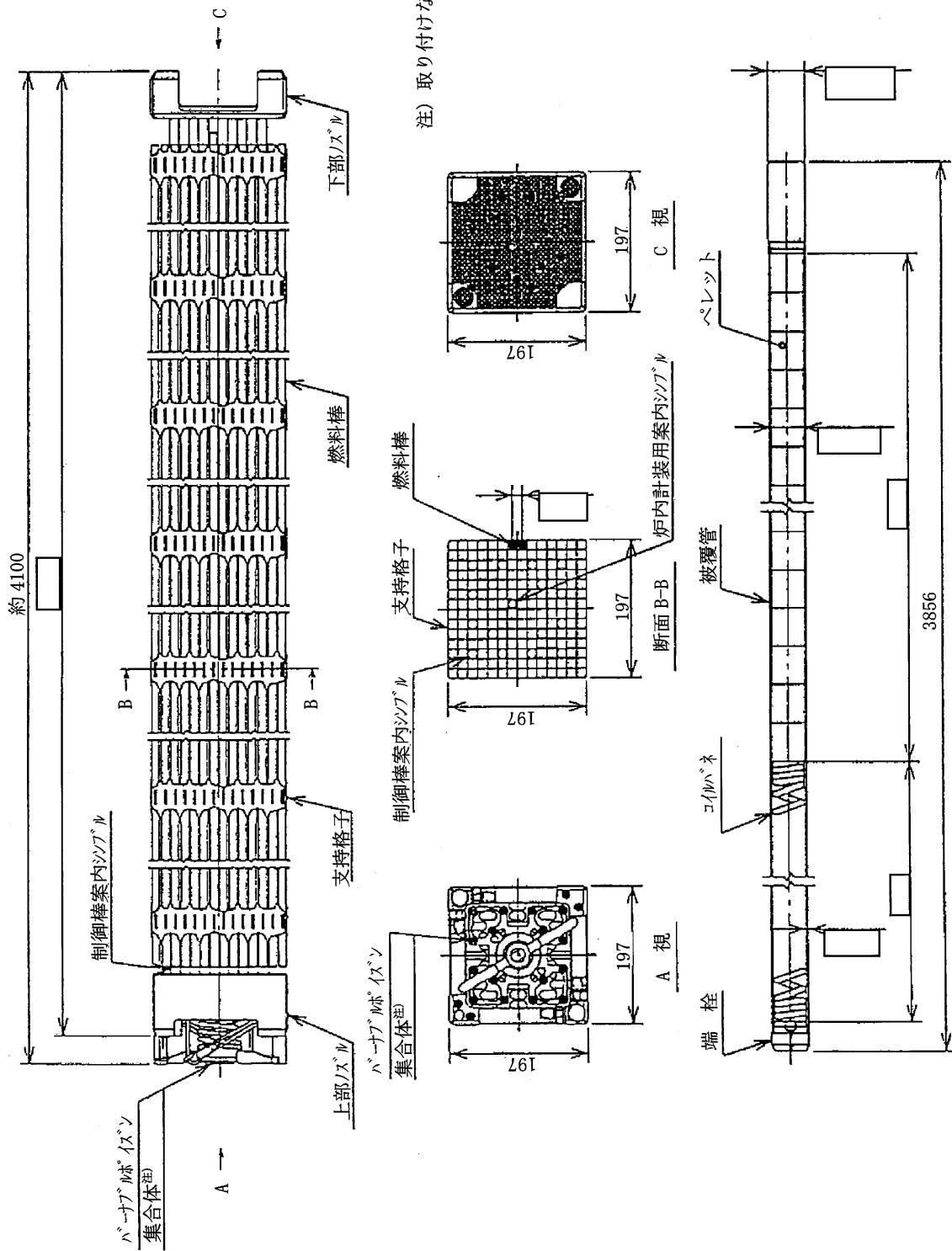
(イ)-第 C.14 図 上部緩衝体



(イ)-第 C.15 図 下部緩衝体



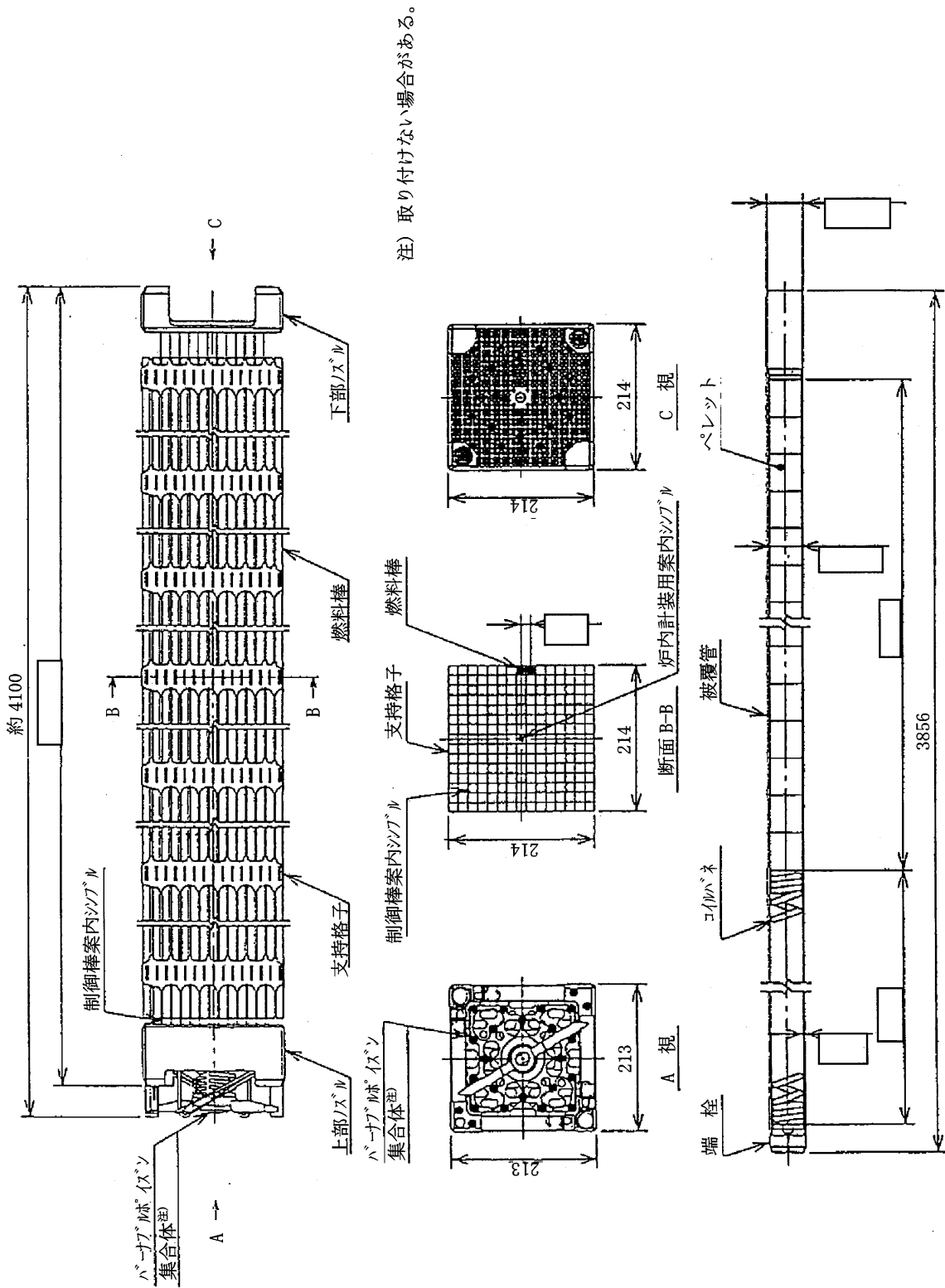
(イ)-第 D.1 図 PWR 燃料集合体全体図



注) 取り付けない場合がある。

(単位: mm)

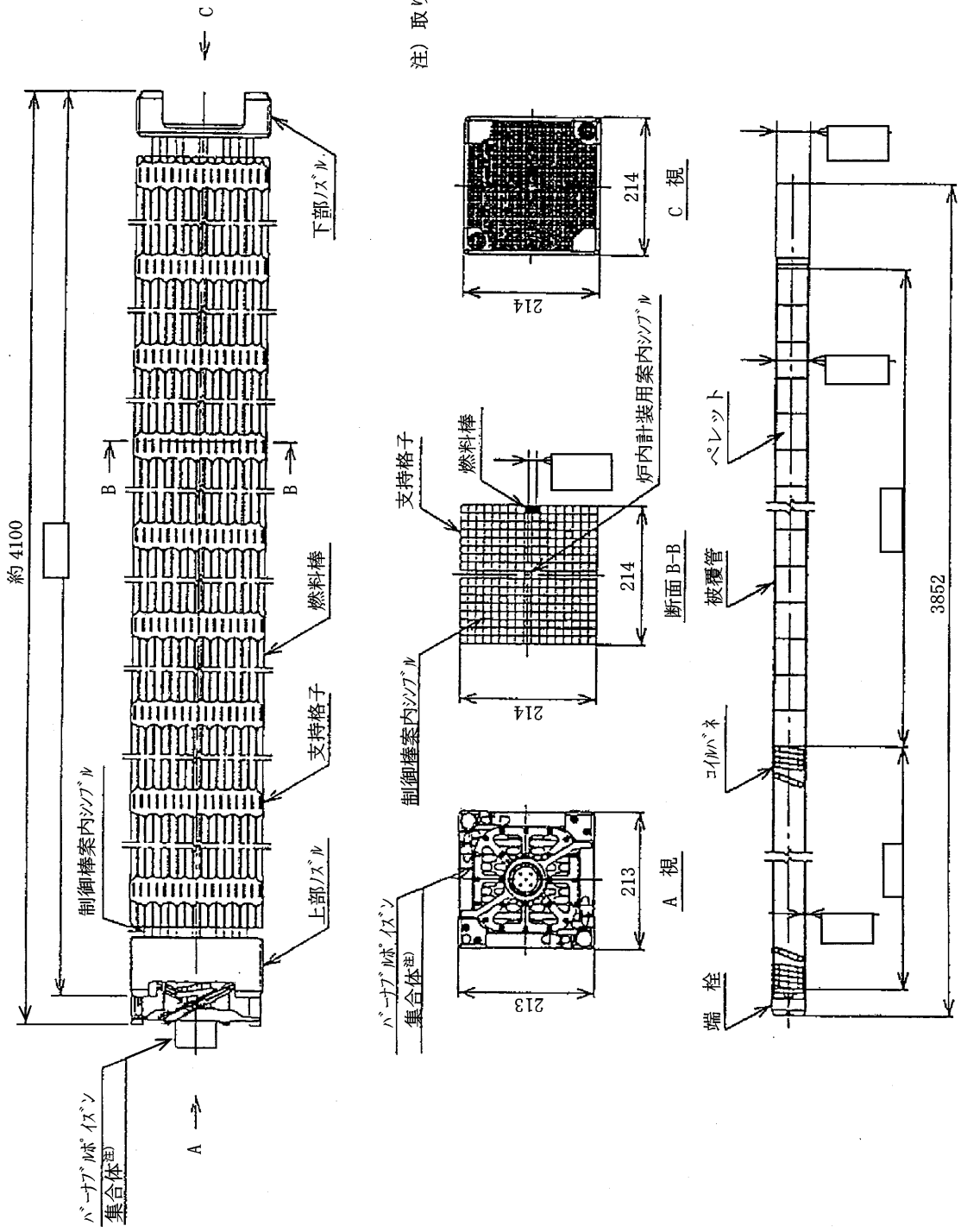
(イ)-第D.2 図 PWR 燃料集合体(14×14 配列)(タイプ1)



注) 取り付けない場合がある。

(単位: mm)

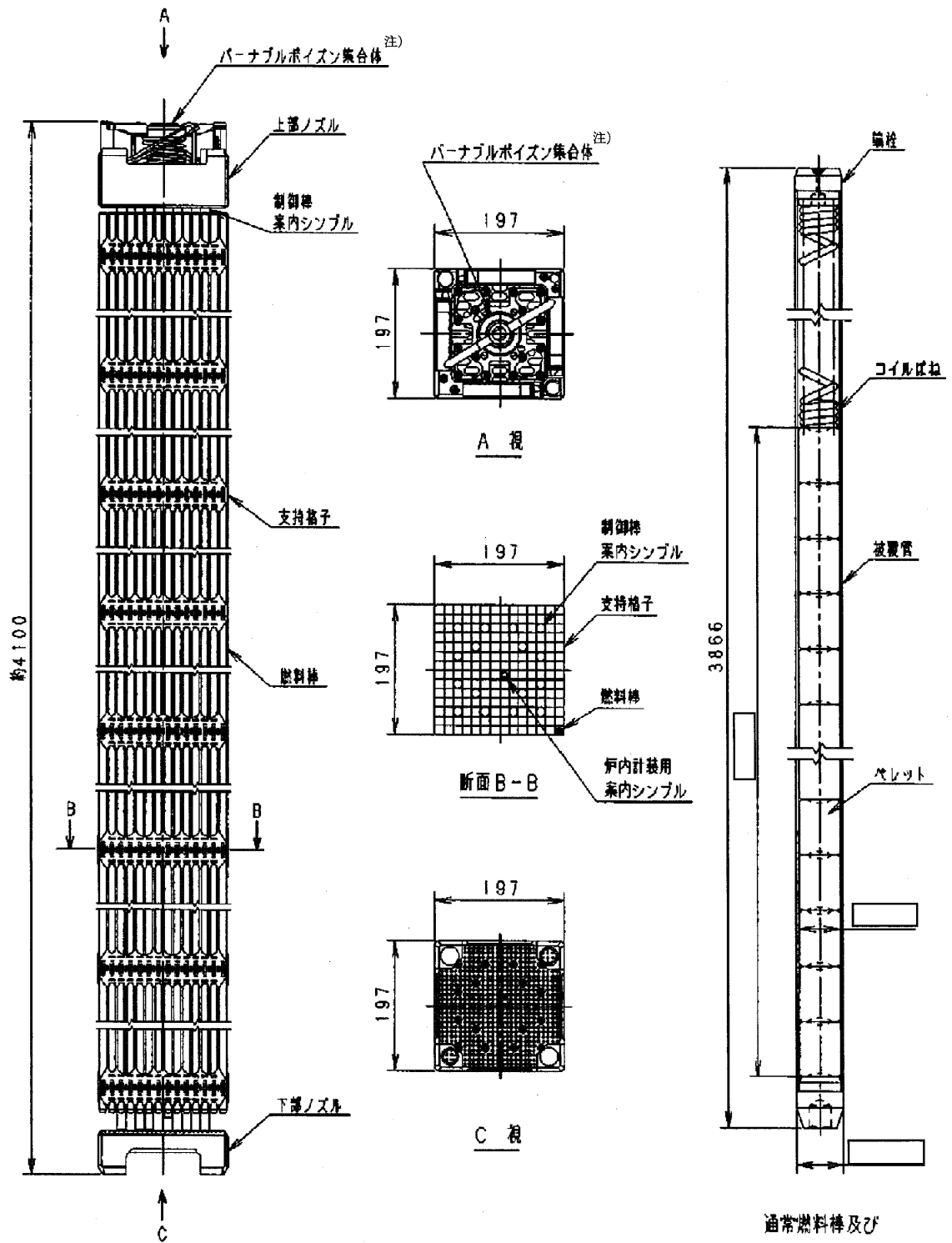
(イ)-第 D. 3 図 PWR 燃料集合体(15×15 配列)(タイプ 2)



注) 取り付けない場合がある。

(単位: mm)

(イ)-第D.4図 PWR燃料集合体(17×17配列)(タイプ3)

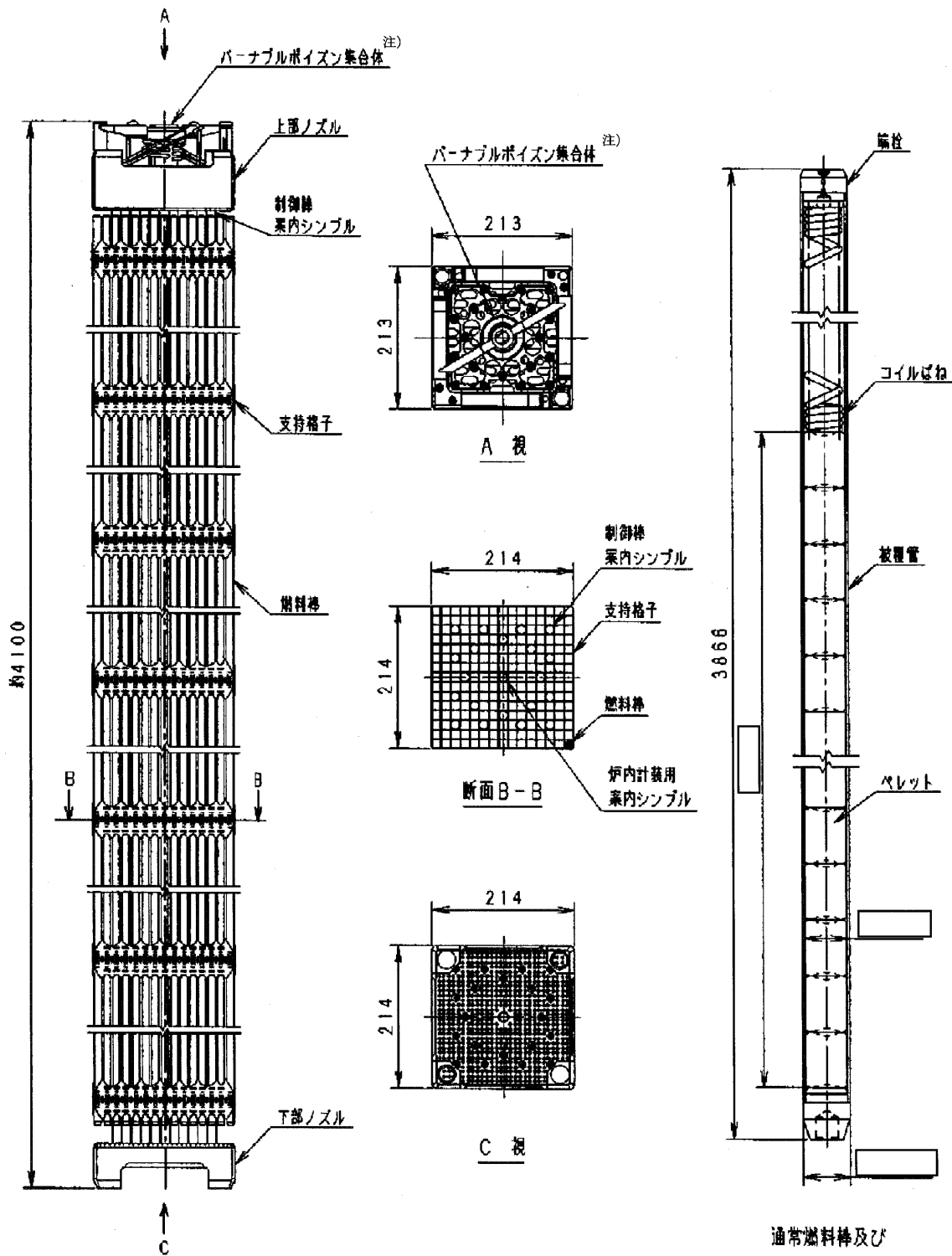


通常燃料棒及び
ガドリニア入り燃料棒

注) 取り付けない場合がある。

(単位: mm)

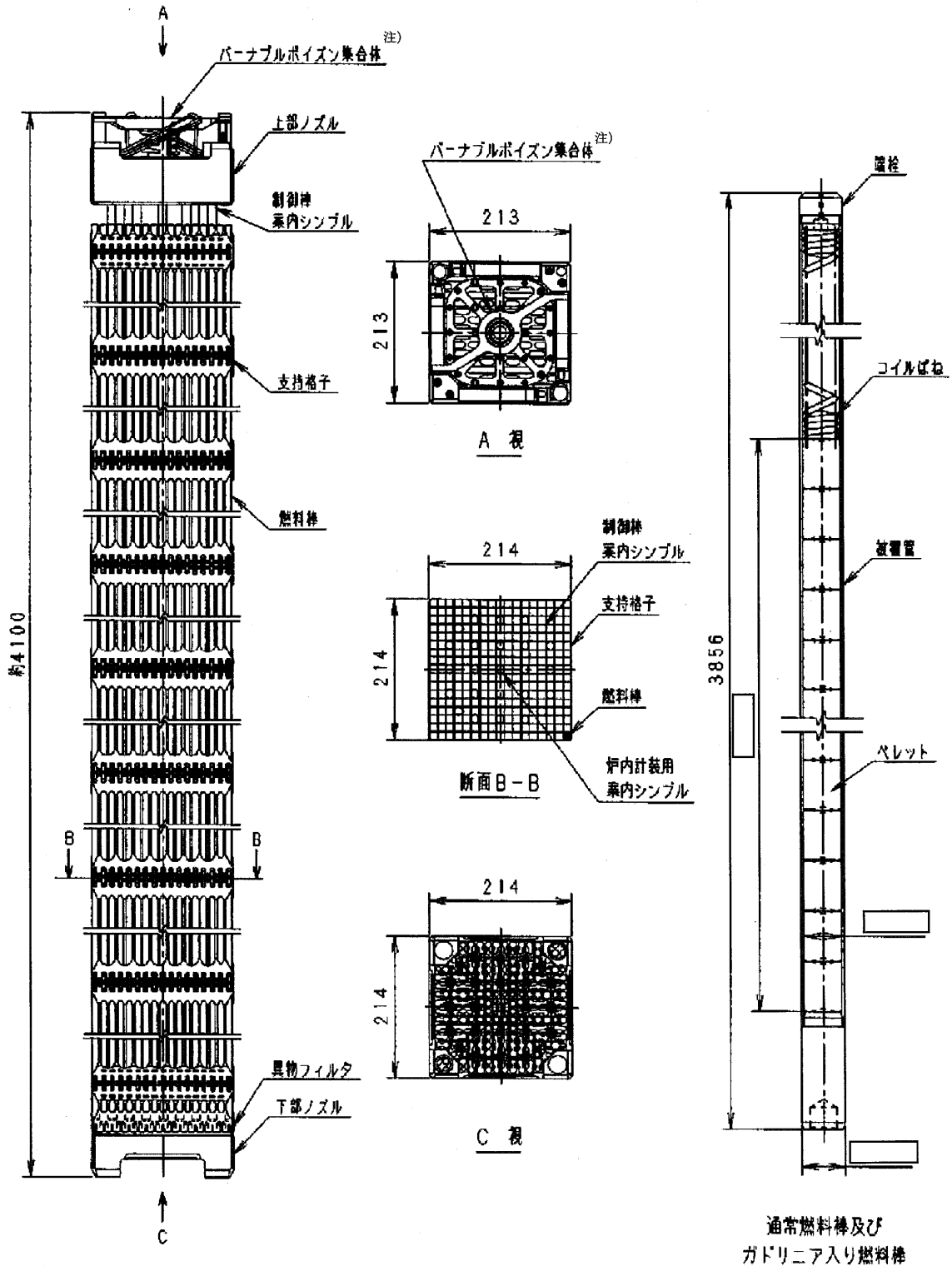
(イ)-第 D. 5 図 PWR 燃料集合体(14×14 配列)(タイプ 4)



注) 取り付けない場合がある。

(単位: mm)

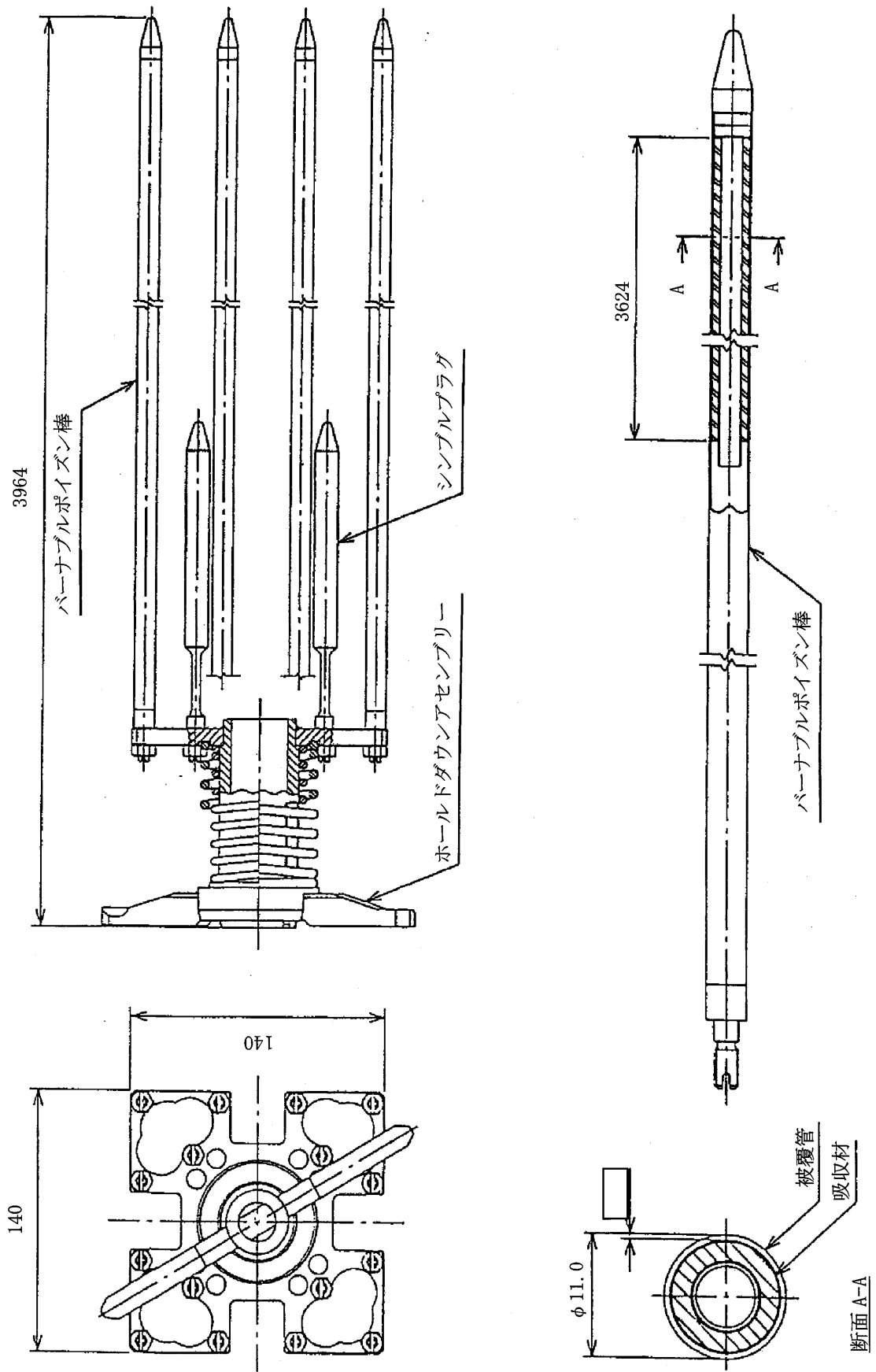
(イ)-第 D.6 図 PWR 燃料集合体(15×15 配列)(タイプ 5)



注) 取り付けない場合がある。

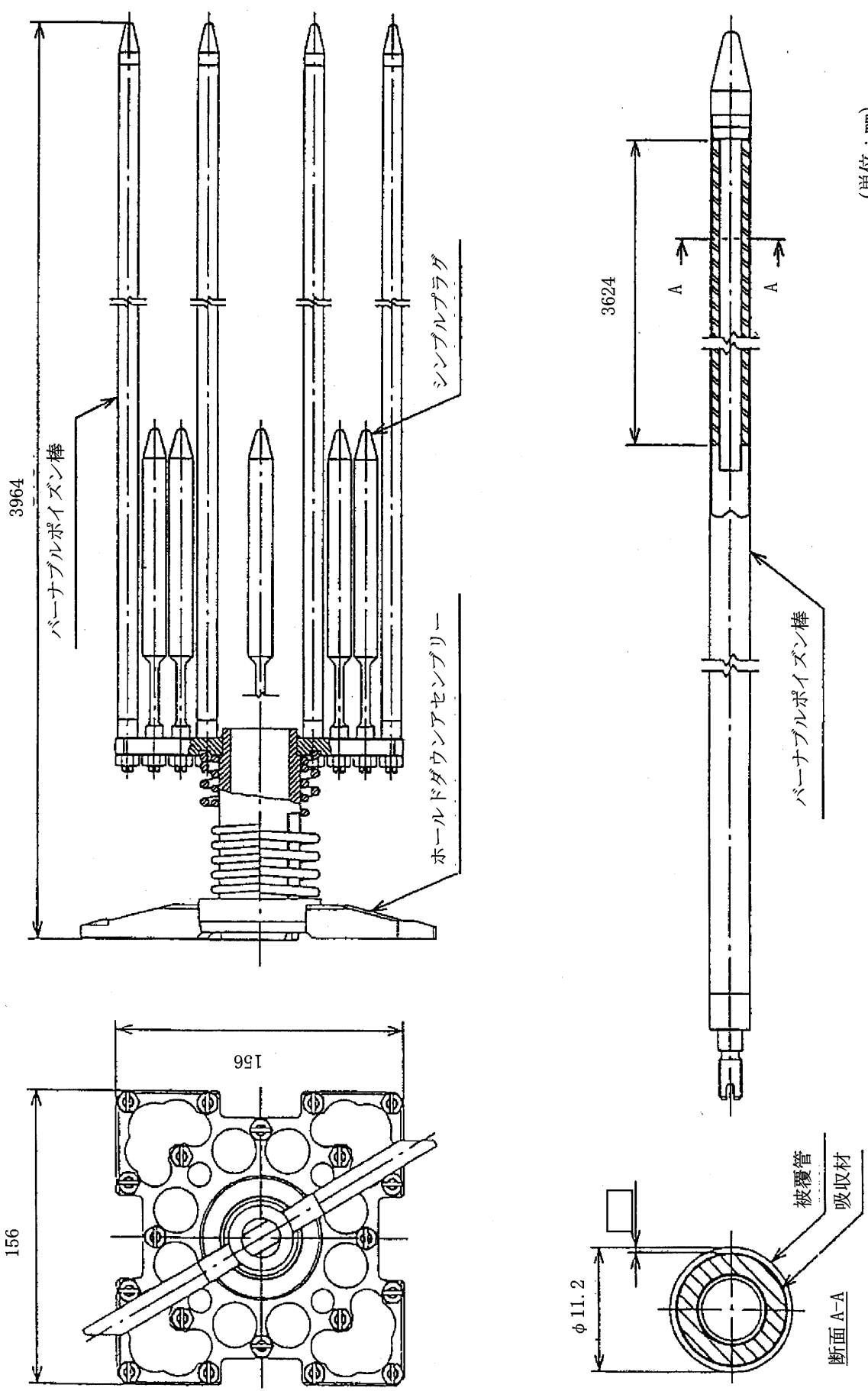
(単位: mm)

(イ)-第D.7図 PWR 燃料集合体(17×17配列)(タイプ6)



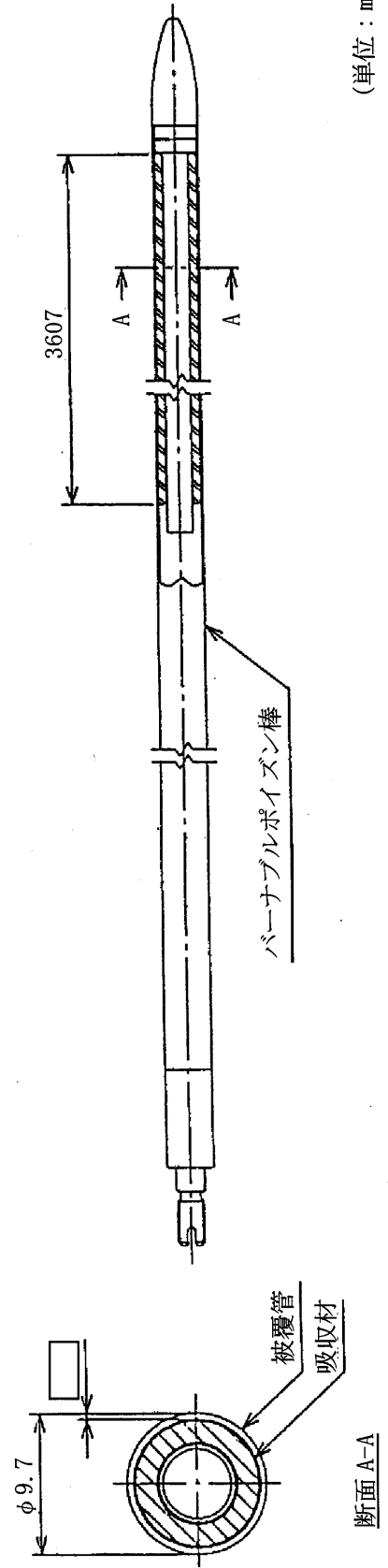
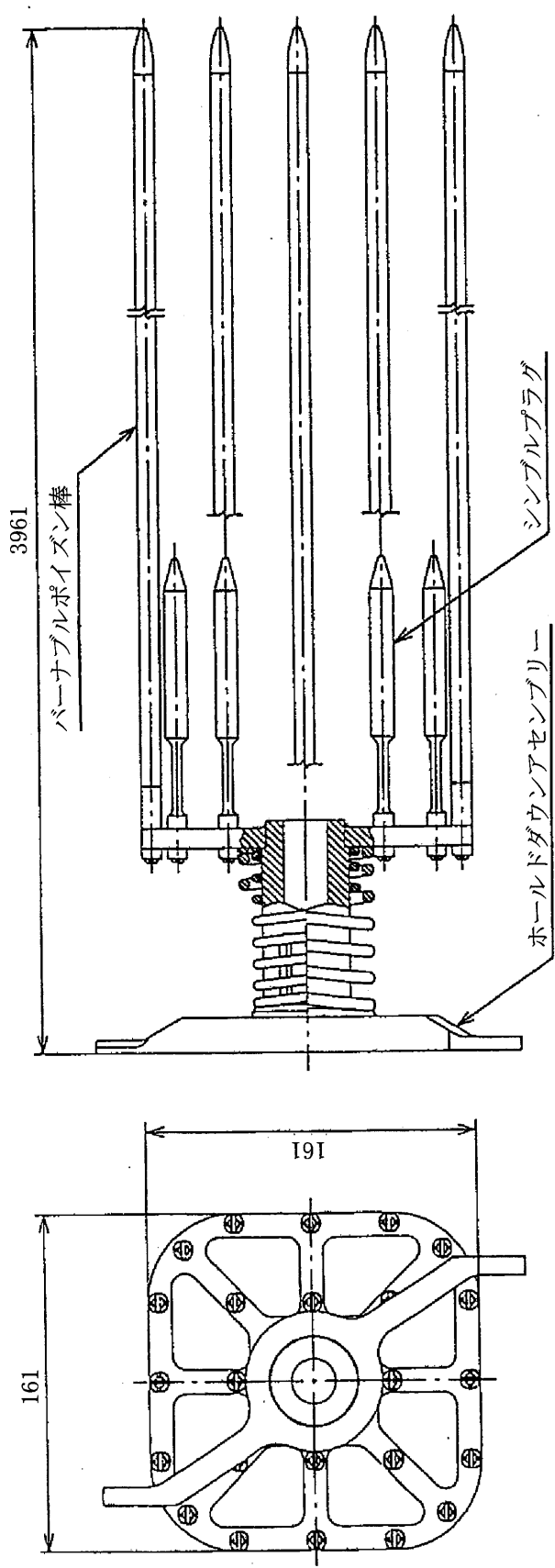
(単位：mm)

(イ)-第 D. 8 図 バーナブルポイズン集合体図(タイプ 1)



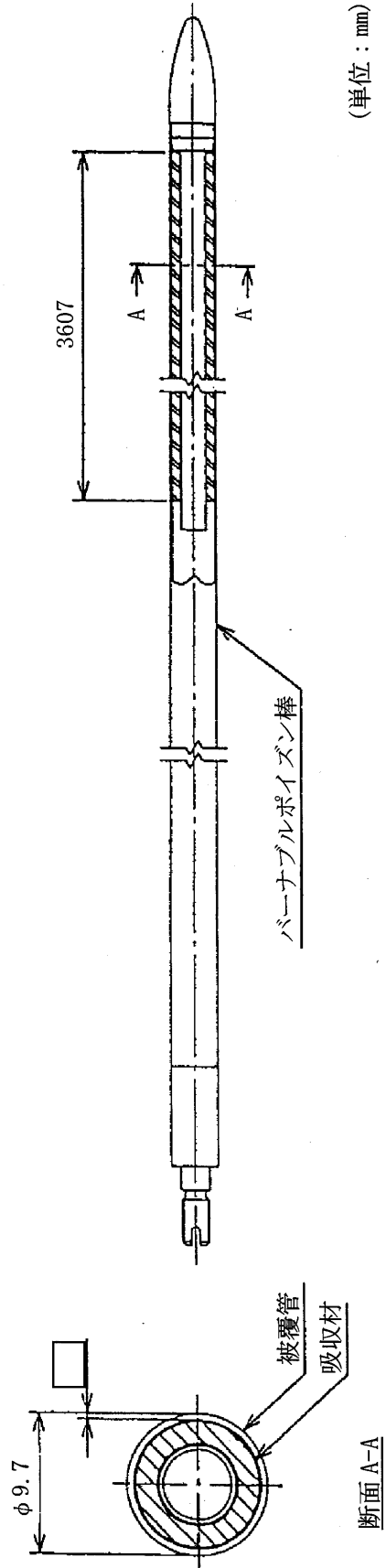
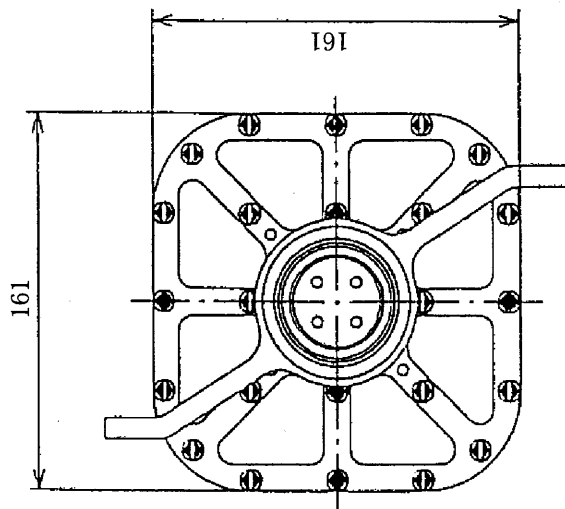
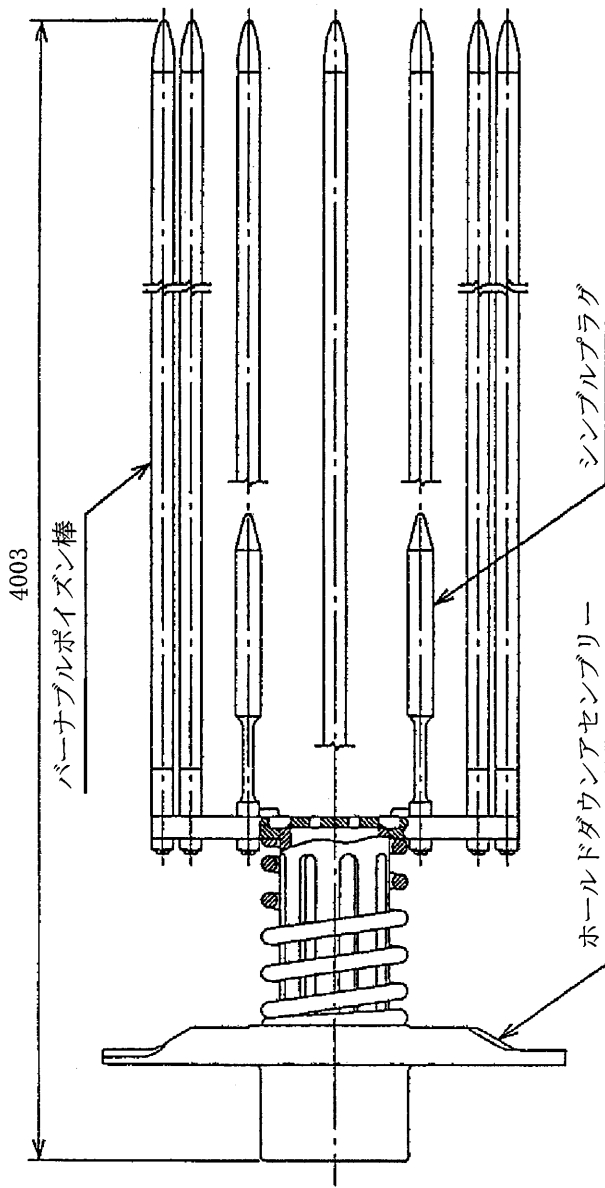
(単位：mm)

(イ)-第 D.9 図 バーナブルポイズン集合体図 (タイプ 2)



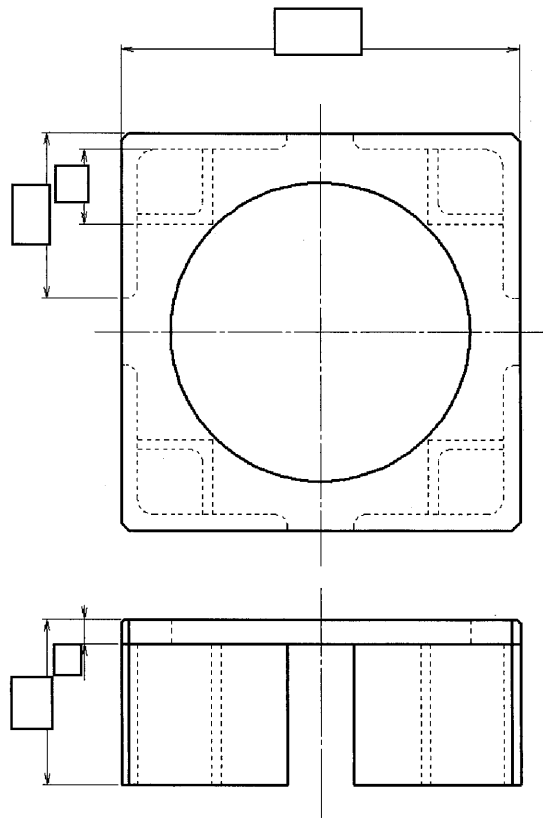
(単位：mm)

(イ)-第 D.10 図 バーナブルポイズン集合体図(タイプ 3、その 1)



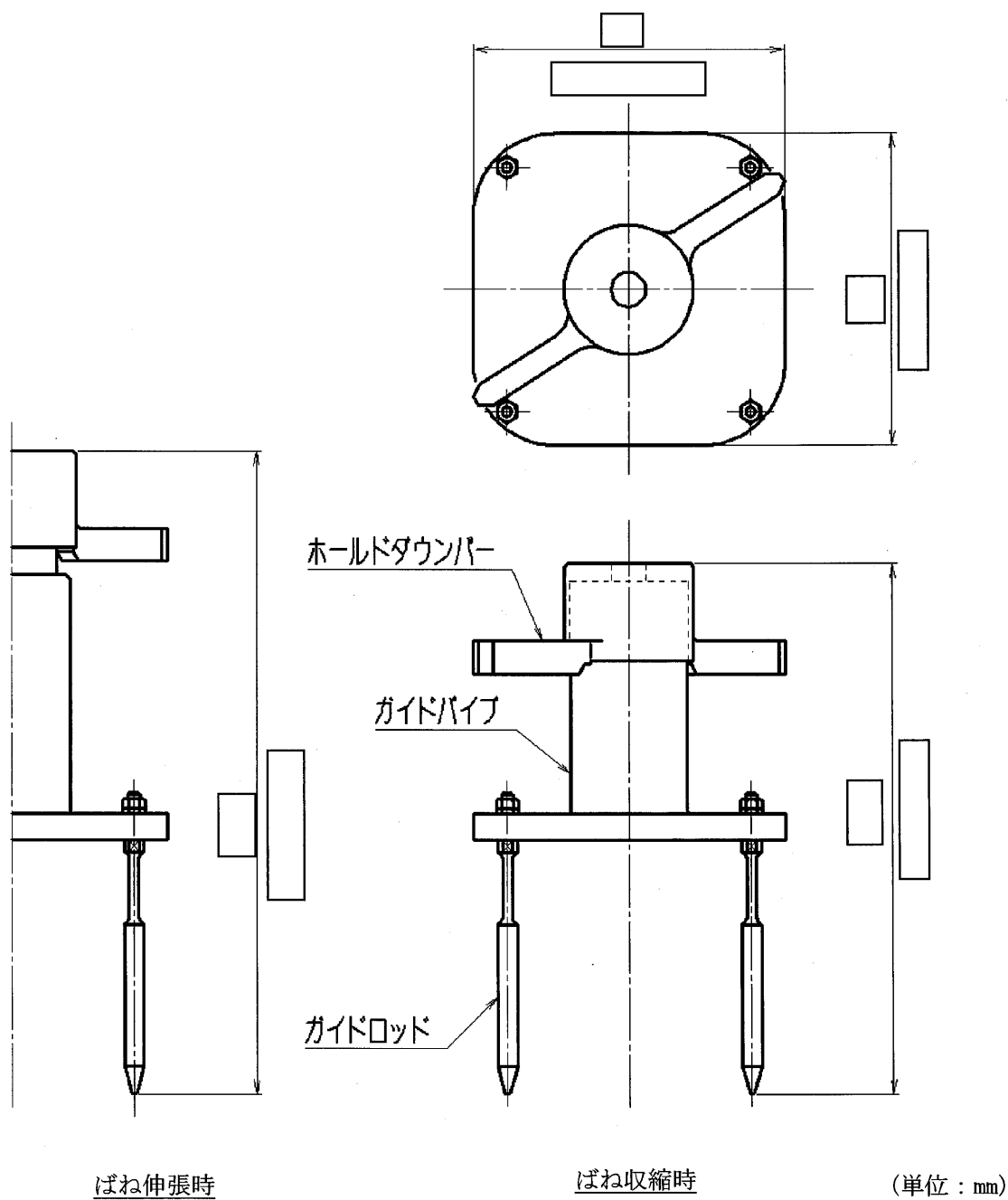
(単位：mm)

(イ) 第 D.11 図 バーナブルポイズン集合体図 (タイプ 3、その 2)



(単位 : mm)

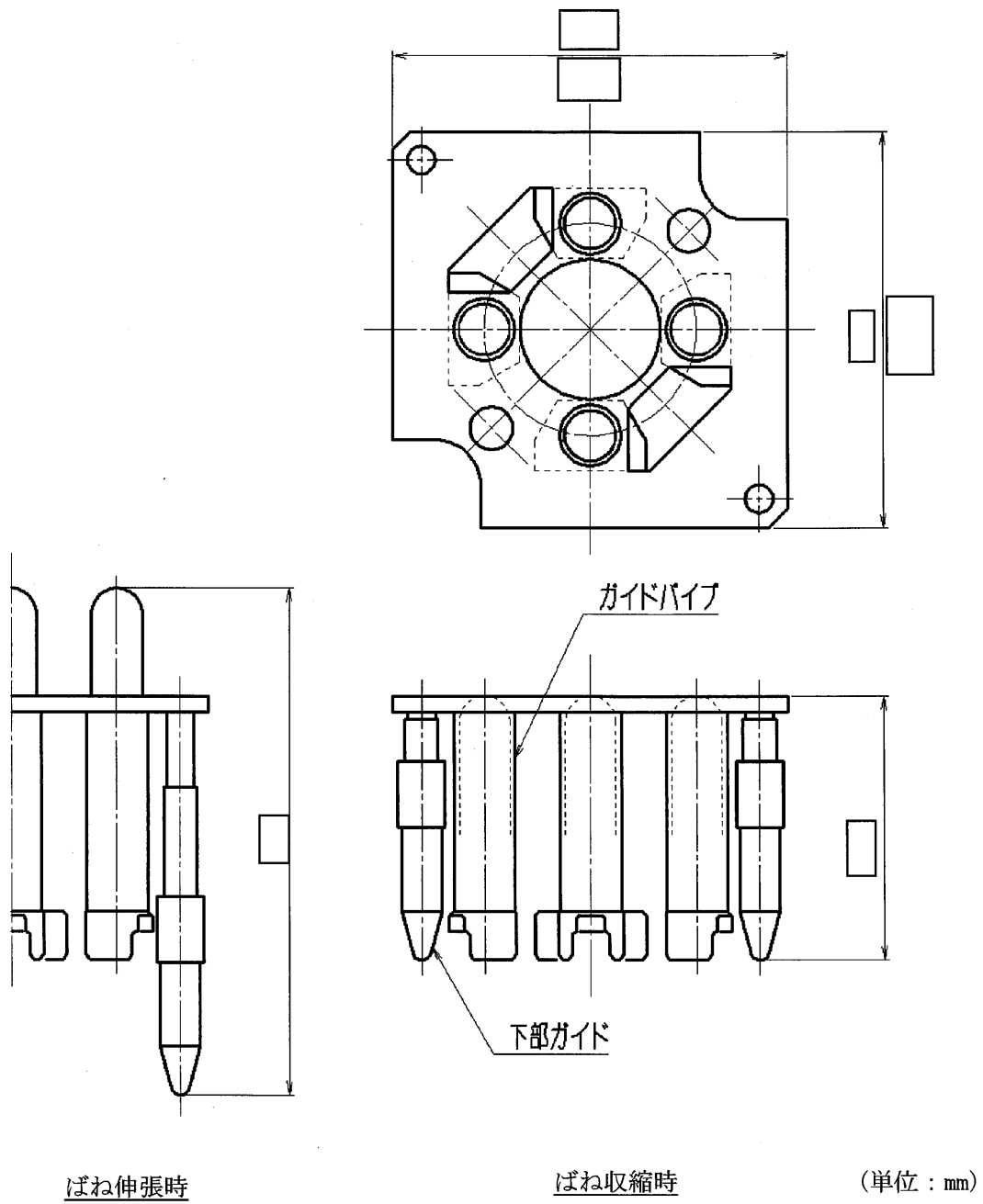
(イ)-第 D. 12 図 ツール



()内はタイプ 2 燃料用及びタイプ 5 燃料用の寸法

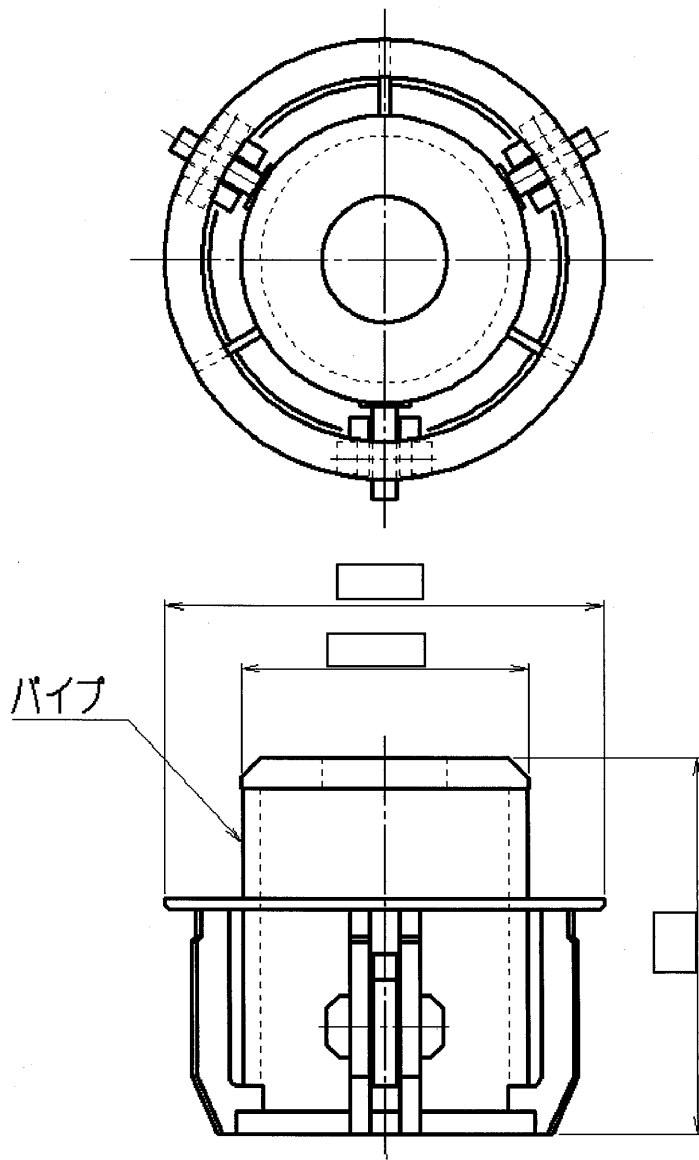
[]内はタイプ 1 燃料用及びタイプ 4 燃料用の寸法

(イ)-第 D. 13 図 上部スツール(タイプ I)



[]内はタイプ1燃料用及びタイプ4燃料用の寸法

(イ)-第D.14図 上部スツール(タイプII)



(単位：mm)

(イ)-第D.15図 下部スツール

(ロ) 章 核燃料輸送物の安全解析

(ロ) 章 核燃料輸送物の安全解析

本核燃料輸送物(以下「輸送物」という。)に関する安全解析は、本輸送物が「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則(昭和53年12月28日付、総理府令第57号)」(以下「規則」という。)及び「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目等を定める告示(平成2年11月28日付、科学技術庁告示第5号)」(以下「告示」という。)に基づいて、経年変化を考慮した上でBM型輸送物及び核分裂性輸送物(以下「BM型核分裂性輸送物」という。)としての技術上の基準に適合することを示している。

本解析の概要は以下のとおりである。

また、評価は全て解析に基づいており、モデル試験は行っていない。

1. 構造解析

構造解析では、通常輸送時において輸送物にき裂、破損等が生じないことを確認する他、一般及び特別の試験条件において密封解析の前提となる密封装置が健全であることを確認した。

また、熱及び遮蔽解析の評価条件を得るために一般及び特別の試験条件における輸送物の状態を評価した。

さらに、本輸送物は核分裂性輸送物であるため、核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件における輸送物の状態についても評価した。

2. 熱解析

熱解析では、構造解析の評価結果に基づいて、一般及び特別の試験条件における輸送物各部の温度及び圧力を評価し、構成部品の温度及び圧力が使用可能温度及び圧力を超えないことを評価し、健全であることを確認するとともに、構造、密封、遮蔽及び臨界解析の評価条件を与えた。

また、一般の試験条件の日陰において人が容易に近づくことができる表面における温度基準(85℃)を超えないことを評価し、健全であることを確認した。

3. 密封解析

密封解析では、構造及び熱解析の評価結果並びに発送前検査における気密漏えい検査合格基準に基づいて、一般及び特別の試験条件における放射性物質の漏えい率を評価し、基準値を満足することを確認した。

4. 遮蔽解析

遮蔽解析では、構造及び熱解析の評価結果に基づいて、通常輸送時並びに一般及び特別の試験条件における輸送物表面及び表面から 1m 離れた位置の線量当量率を評価し、基準値を満足することを確認した。

5. 臨界解析

臨界解析では、構造解析の評価結果に基づいて、通常輸送時、孤立系並びに核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件下に置かれた輸送物の孤立系及び配列系の各状態のいずれの場合にも未臨界であることを確認した。

6. 核燃料輸送物の経年変化の考慮

使用予定期間中に想定される使用状況において、経年変化の要因として熱、放射線、化学的变化による影響を評価した結果、レジンについては熱による経年変化の影響を考慮する必要があるが、その他の部材については技術上の基準に適合していることを確認する上で、その影響は考慮する必要はないことを確認した。

また、吊上げによる荷重、運搬中の内外圧差による荷重、蓋ボルトの締付けによる荷重、熱膨張差による荷重を繰り返し受けることから、経年変化の要因として疲労を考慮する必要がある。使用予定回数を踏まえた上で疲労を評価したところ、疲労破壊が生じるおそれはないため、技術上の基準に適合していることへの影響はないことを確認した。

7. 外運搬規則及び外運搬告示に対する適合性の評価

以上の結果及び(イ)章の輸送物の説明を総合して、本輸送物の設計が規則及び告示に定める技術基準に適合していることを確認した。

以下、(ロ)章 A から G に各解析、評価の詳細を示す。

(口)章 A 構造解析

A. 構造解析

A.1 構造設計

A.1.1 概要

容器本体は、(イ)-第 C.2 図に示すように三重円筒構造である。内筒は、(イ)-第 C.9 図に示すベント・水位調整バルブ、(イ)-第 C.10 図に示すドレンバルブ、(イ)-第 C.12 図に示す水位調整用加圧バルブ、(イ)-第 C.11 図に示す蓋、(イ)-第 C.5 図に示すフランジ及び底板とともに密封境界を構成しており、内筒内部の圧力に耐えられる構造になっている。中間筒はガンマ線遮蔽材を、また、外筒は中性子遮蔽材を保持する構造になっている。輸送容器は、熱応力及び振動に対しても耐えられる構造になっている。

蓋は、(イ)-第 C.11 図に示すように蓋ボルトによって容器本体に固定される。容器本体とのシールは O リングを用いて行い、密封境界構成要素として圧力等の負荷に耐えられる構造になっている。蓋は、輸送中には(イ)-第 C.1 図に示すように上部緩衝体によって覆われている。

ベント・水位調整バルブ、ドレンバルブ及び水位調整用加圧バルブは、(イ)-第 C.9 図、(イ)-第 C.10 図及び(イ)-第 C.12 図に示すようにカバーに覆われている。

(イ)-第 C.14 図及び(イ)-第 C.15 図に示す上部及び下部緩衝体は、輸送容器本体の上部及び下部にそれぞれボルトによって取り付けられる構造になっており、落下等による機械的衝撃を吸収する。

(イ)-第 C.13 図に示すバスケットは、密封容器である内筒内において燃料集合体を分散・集合させないように支持する構造になっている。

輸送容器の吊上げ、縦起こし及び横倒しは、フランジに取り付けられている上部トラニオン及び底コーナーに取り付けられている下部トラニオンを用いて行う。(イ)-第 C.8 図に示す上部トラニオンは、輸送容器の吊上荷重に耐えられる構造になっている。下部トラニオンは、輸送容器の縦起こし及び横倒し時にかかる荷重に耐えられる構造になっている。また、輸送容器は、(イ)-第 C.3 図に示すように、上部及び下部トラニオンにより輸送架台に固定され、両トラニオンは輸送中の加速度に耐えられる構造になっている。

A.1.2 設計基準

本輸送容器は構造上以下に述べる設計の基本に基づく設計基準に従って解析している。

1. 設計の基本

設計の基本としては、規則及び告示に基づいて以下の条件等を考慮した。

(1) 通常の輸送条件

- a. 輸送容器の材質間又は輸送容器の材質と収納物間において危険な物理的作用又は化学反応の生じるおそれがないこと。
- b. 密封装置は不用意に開かれないこと。
- c. 輸送容器の吊上装置としてのトラニオンは吊上荷重の3倍に耐えること。
- d. 固縛装置は輸送中発生する上下方向及び輸送方向 2g 並びに左右方向 1g の加速度に耐えること。
- e. 輸送容器の構成部品は、規則に定められる -40°C から 38°C の温度範囲において、き裂、破損等の生じるおそれがないこと。
- f. 輸送容器の振動について考慮すること。

(2) 一般の試験条件

- a. 38°C の環境に1週間放置の熱的試験に耐えること。
- b. 水噴霧試験に耐えること。
- c. 0.3m自由落下試験に耐えること。
- d. 自重の5倍の荷重による積み重ね試験に耐えること。
- e. 6kg棒貫通試験に耐えること。

(3) 特別の試験条件

- a. 9m 落下試験に耐えること。
- b. 1m 貫通試験に耐えること。
- c. 上記の試験条件に置いた後、熱的試験(耐火)に耐えること。
- d. 15m の水中浸漬(0.15MPa の外圧)試験に耐えること。

ただし、a. 及び b. については最大の破損を受けるような順序で連続して行われること。

(4) 原子力規制委員会の定める量を超える放射能を有する核燃料物質等を収納した輸送物に係る追加条件

- a. 200m の水中浸漬(2MPa の水圧)試験(強化浸漬試験)に耐えること。

(5) 核分裂性輸送物に係る試験条件

- a. 次の核分裂性輸送物に係る一般の試験条件の下に置き、輸送物の損傷状態を評価すること。

(a) 以下の連続試験

- i. 水噴霧試験
- ii. 0.3m 自由落下試験

(b) 積み重ね試験

(c) 6kg 棒貫通試験

- b. 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件として、以下の(a)及び(b)のうち、最大の破損を受ける条件の下に置いた後の輸送物の損傷状態を評価すること。

(a) 次の条件の下に順次置くこと。

i. 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件(上記 a.)

- ii. iii の条件の下で輸送物が最大の損傷を受ける順序で次に掲げる条件の下に順次置くこと。

(i) 9m 落下試験

(ii) 1m 貫通試験

iii. 熱的試験(耐火)

iv. 0.9m の水中浸漬試験

(b) 次の条件の下に順次置くこと。

i. 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件(上記 a.)

- ii. 15m の水中浸漬試験

なお、核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件の中で機械的(強度)試験においては、本輸送物が使用される最低周囲温度である-20℃から 38℃までの周囲温度範囲を考慮する。

2. 評価基準

設計の基本条件に従い、解析項目に対して材質、温度、負荷係数等の設計条件を考慮して適用数式、要素及び解析基準を決定した。

設計条件及び解析方法の要約を(ロ)-第 A.1 表に示す。

この中で応力に関する設計基準値は、各試験条件に対して次のように定めた。

(1) 通常の輸送条件(吊上装置及び固縛装置)

- a. 応力強さが設計降伏点以下であること。ここで、応力強さとは主応力の差の絶対値をいう。
- b. 吊上装置については疲労評価を行うこと。

(2) 一般の試験条件(熱的試験、自由落下試験及び積み重ね試験)

- a. ボルト以外の輸送容器の各部位については発生応力を分類し、各応力強さが以下の基準値以下であること。

$$P_m \leq S_m$$

$$P_L \leq 1.5S_m$$

$$P_L + P_b \leq 1.5S_m$$

$$P_L + P_b + Q \leq 3S_m$$

ここで、

P_m : 一次一般膜応力強さ

P_L : 一次局部膜応力強さ

P_b : 一次曲げ応力強さ

Q : 二次応力強さ

S_m : 設計・建設規格¹⁾付録材料図表 Part5 表 1 に示される設計応力強さ

- b. ボルトに対しては以下の基準を適用する。

$$(\text{平均引張応力}) \leq 2S_m$$

$$(\text{平均引張応力} + \text{曲げ応力}) \leq 3S_m$$

ここで、

S_m : 設計・建設規格¹⁾付録材料図表 Part5 表 2 に示される設計応力強さ

- c. バスケット等については、膜応力強さ及び(膜+曲げ)応力強さが降伏応力以下であること。
- d. 燃料被覆管については応力強さが降伏応力以下であること。
- e. 熱的試験に対しては輸送容器各部の疲労評価を行うこと。

(3) 特別の試験条件

- a. ボルト以外の輸送容器各部位については発生応力を分類し、各応力強さが以下に示す基準値以下であること。

$P_m \leq 2/3S_u$ (オーステナイト系ステンレス鋼に対しては $2.4S_m$ との小さい方)

$P_L \leq S_u$ (オーステナイト系ステンレス鋼に対しては $3.6S_m$ との小さい方)

$P_L + P_b \leq S_u$ (オーステナイト系ステンレス鋼に対しては $3.6S_m$ との小さい方)

ここで、

S_u : 設計・建設規格¹⁾付録材料図表 Part5 表 9 に示される設計引張強さ

- b. ボルトに対しては以下の基準を適用する。

(平均引張応力) $\leq 2/3S_u$

(平均引張応力 + 曲げ応力) $\leq S_u$

- c. バスケット等については、膜応力強さが降伏応力、(膜 + 曲げ) 応力強さが降伏応力の 1.5 倍以下であること。
- d. 熱的試験における熱応力については、発生ひずみが材料の破断ひずみより十分小さいこと。
- e. 浸漬試験における胴部に対しては許容座屈応力以下であること。

3. 余裕率

適用数式及び要素による結果のうち、定量的な基準のあるものについては次に示す余裕率 MS を用いて評価する。

$$\text{余裕率 MS} = \frac{\text{解析基準値}}{\text{解析結果}} - 1$$

したがって、余裕率は 0 以上あれば良いとする。

余裕率を用いられないものは、該当箇所にその基準等を記載した。なお、解析基準値は(ロ)章 A.3 に示す材料の機械的性質及び(ロ)章 B に示す温度等に基づいて決定する^{注)}。解析基準値及び解析結果の端数処理は四捨五入とする。


注) 設計降伏点又は降伏応力、設計引張強さ又は引張強さ、縦弾性係数等の値は、(ロ)章 A.3 に示す引用文献中で与えられている温度依存データを内挿することによって求める。

(ロ) 第A.1表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法(1/10)

条件	解析項目及びその詳細	設計条件						解析方法			備考	
		参照図表	材質	温度	種類	設計負荷	要素	適用数式又は要素	解析基準			
通常	化学的及び電気的反応											
	1) 化学的反応	(ロ)-第A.3表	表による	-	食	-	活性化	活性の有無	無			
	2) 電気的反応	(ロ)-第A.3表	表による	-	食	-	電位差	反応の有無	無			
低	温度											
	強度											
常	1) 構成部品	(ロ)-第A.4表	表による	-	質	-	き裂・破損	-40℃でのき裂・破損の有無	無			
	2) 低温時の強度	(ロ)-第A.4表	表による	-	質	-	脆性破壊	-20℃での脆化の有無	無			
輸	密封装置											
	1) 蓋	(イ)-第C.4図	-	-			誤操作による開放	誤操作の可否	否			
	2) ベント・水位調整バルブ、水位調整用加圧バルブ及びドレインバルブ	(イ)-第C.4図	-	-			誤操作による開放	誤操作の可否	否			
送	吊上装置											
	1) トラニオン本体	(ロ)-第A.3図	SUS630	180℃	吊上荷重	3	曲げとせん断疲労評価	$S = \sqrt{\sigma b^2 + 4\tau^2}$ Nu	Sy Na			注1)

注1) S: 応力強さ、Sy: 設計降伏点、Nu: 使用計画回数、Na: 許容繰返し回数、σb: 曲げ応力、τ: せん断応力

(ロ)-第A.1表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法(2/10)

条件	解析項目及びその詳細	設計条件						解析方法			備考
		参照図表	材質	温度	種類	設計負荷	要素	適用数式又は要素	解析基準		
通常の輸送条件	2) トラニオンボルト	(ロ)-第A.3図	SNB23-3	180°C	吊上荷重及び初期締付トルク	3 1	引張	$\sigma t = \sigma t_1 + \sigma t_2$	Sy	注2)	
	3) シアディスク	(ロ)-第A.3図	SUS630	180°C	吊上荷重	3	せん断	$S = 2\tau$	Sy		
	固縛装置										
	1) トラニオン本体	(ロ)-第A.5図	SUS630	180°C	上下、前後2g (下方向には自重を考慮し3g)	1	曲げとせん断	$S = \sqrt{\sigma b^2 + 4\tau^2}$	Sy		
	2) トラニオンボルト	(ロ)-第A.3図	SNB23-3	180°C	上下、前後2g 初期締付トルク (下方向には自重を考慮し3g)	1	引張	$\sigma t = \sigma t_1 + \sigma t_2$	Sy		
	3) シアディスク	(ロ)-第A.5図	SUS630	180°C	上下、前後2g (下方向には自重を考慮し3g)	1	せん断	$S = 2\tau$	Sy		
圧力		-	-	-	周囲圧力の降下	-	圧力	密封性	良		
振動		(ロ)-第A.6図		170°C	振動による力	-	振動	固有振動数	加振源の振動数		
										蓋の緩みの有無	無

注2) σt : 引張応力、 σt_1 : 吊上荷重による引張応力、 σt_2 : 初期締付トルクによる引張応力

(ロ) 第A.1表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法(3/10)

条件	解析項目及びその詳細	設計条件				解析方法		備考	
		参照図表	材質	温度	設計種類	設計負荷	適用数式又は要素		解析基準
一般の試験条件	熱的試験								
	1) 応力評価								
	フランジ	(ロ)-第A.8図		170℃	内筒内圧、中性子遮蔽材充填空間圧力、熱膨張及び初期縮付トルク	1	応力強さ	$\begin{cases} P_m \\ P_L \\ P_L + P_b \\ P_L + P_b + Q \\ Nu \end{cases}$	Sm 1.5Sm 1.5Sm 3Sm Na
	内筒	上		180℃	上	1	疲労評価	上	上
	蓋	上		170℃	上	1	上	上	上
	中間筒	上		170℃	上	1	上	上	上
	底板	上		180℃	上	1	上	上	上
	外筒	上		140℃	上	1	上	上	上
	仕切板	上		160℃	上	1	上	上	上
	レジンカバー	上		160℃	上	1	上	上	上
	蓋ボルト	上		170℃	上	1	引張と曲げ 疲労評価	σ_m $\sigma_m + \sigma_b$ Nu	2Sm 3Sm Na
	0リングの密封性	上	ふっ素ゴム	-	上	1	変形量	口開き変形量	初期縮付代
	伝熱フィン	-	C1020P	160℃	熱膨張	1	引張	$\sigma_1 = \frac{E_1 E_2 t_2}{E_1 t_1 + E_2 t_2} (\alpha_2 - \alpha_1) \times (T - T_0)$	3Sm
							疲労評価	Nu	Na

注3) P_m: 一次一般膜応力強さ、P_L: 一次局部膜応力強さ、P_b: 二次曲げ応力強さ、Q: 二次曲げ応力強さ、Sm: 設計応力強さ

注4) σ_m: 平均引張応力、σ_b: 曲げ応力

注5) σ₁: 伝熱フィンに生じる引張応力、E₁: 伝熱フィンの縦弾性係数、E₂: レジンの周方向拘束の場合の縦弾性係数、t₁: 伝熱フィンの板厚、t₂: レジンの平均厚み、α₁: 伝熱フィンの熱膨張係数、α₂: レジンの熱膨張係数、T: 伝熱フィンとレジンの平均温度、T₀: 常温

(ロ) 第A.1表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法(4/10)

条件	解析項目及びその詳細	設計条件			解析式		備考						
		参照図表	材質	温度	種類	設計負荷係数		荷要素	適用数	式又	要素	解析基準	
													水噴霧
一般の試験条件	水噴霧	-	SUSF304 SUS304	-	水噴霧	-	吸水による脆化	吸水	水性	切	無 良		
	自由落下	(ロ)-第A.12図から	木材	-	落下エネギ-	1	エネギ-吸収	$E_a = \sum \sigma c V$				$E_k = WgH$	注6)
	1) 緩衝体の変形量と衝撃加速度	(ロ)-第A.15図	SUS304	-	落下エネギ-	1	エネギ-吸収	$E_a = \sum \sigma c V$				$E_k = WgH$	
	垂直落下	(ロ)-第A.16図から	木材	-	落下エネギ-	1	エネギ-吸収	$E_a = \sum \sigma c V$				$E_k = WgH$	
	水平落下	(ロ)-第A.17図	SUS304	-	落下エネギ-	1	エネギ-吸収	$E_a = \sum \sigma c V$				$E_k = WgH$	
	コーナー落下	(ロ)-第A.18図から	木材	-	落下エネギ-	1	エネギ-吸収	$E_a = \sum \sigma c V$				$E_k = WgH$	
	2) 垂直落下	(ロ)-第A.21図	SUS304	-	落下エネギ-	1	エネギ-吸収	$E_a = \sum \sigma c V$				$E_k = WgH$	
	フランジ	(ロ)-第A.22図 (ロ)-第A.23図		170°C	内筒内圧、中性子遮蔽材充填空間圧力、慣性力、熱膨張及び初期縮付トルク	1	応力強さ	$\begin{cases} P_m \\ P_L \\ P_L + P_b \\ (P_L + P_b) + Q \end{cases}$				S_m 1.5S _m 1.5S _m 3S _m	
	内筒	同上		180°C	同上	1	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上
	蓋	同上		170°C	同上	1	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上
中間筒	同上		170°C	同上	1	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	
底板	同上		180°C	同上	1	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	
外筒	同上		140°C	同上	1	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	
仕切板	同上		160°C	同上	1	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	
レジンカバー	同上		160°C	同上	1	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	
蓋ボルト	同上		170°C	同上	1	引張	引張と曲げ	σ_m $\sigma_m + \sigma_b$			2S _m 3S _m	初期縮付代	
0リングの密封性	同上	同上	-	同上	1	変形量	変形量	口開き変形量					
伝熱フィン	(ロ)-第A.26図	同上	160°C	慣性力 熱膨張及び慣性力	1	せん断引張とせん断	せん断引張とせん断	$S = 2\tau$ $S = \sqrt{\sigma_1^2 + 4\tau^2}$			S_m 3S _m		
燃料被覆管	-	同上	190°C	内圧及び慣性力	1	応力強さ	応力強さ	S			σ_y	注7)	

注6) E_a : 吸収エネギー、 σ_c : 圧縮応力、 V : 変形量、 E_k : 変形量、 W : 輸送物最大総重量、 g : 重力加速度、 H : 落下高さ
 注7) σ_y : 降伏応力

(ロ) 第A.1表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (5/10)

条件	解析項目及びその詳細	設計条件			荷要素		解析式又は要素	解用数式	法	備考
		参照図表	材質	温度	種類	設計				
一般の試験条件	3) 水平落下	(ロ)-第A.28図		170°C	内筒内圧、中性子遮蔽材充填空間圧力、慣性力、熱膨張及び初期縮付トルク	1	応力強さ	$\begin{cases} P_m \\ P_L \\ P_L+P_b \\ P_L+P_b+Q \end{cases}$	$\begin{cases} S_m \\ 1.5S_m \\ 1.5S_m \\ 3S_m \end{cases}$	
	フランジ									上
	内筒	上		180°C	上	1	上	上	上	上
	蓋	上		170°C	上	1	上	上	上	上
	中間筒	上		170°C	上	1	上	上	上	上
	底板	上		180°C	上	1	上	上	上	上
	外筒	上		140°C	上	1	上	上	上	上
	仕切板	上		160°C	上	1	上	上	上	上
	レジンカバー	上		160°C	上	1	上	上	上	上
	蓋ボルト	上		170°C	上	1	引張	σ_m	2S _m	初期
	0リングの密封性	上	ふっ素ゴム	-	上	1	引張と曲げ	$\sigma_m + \sigma_b$	3S _m	縮付代
	燃料被覆管		ジルコイ	190°C	内圧及び慣性力	1	変形量	口開き変形量		σ_y
	4) コーナ-落下						応力強さ	S		
	積み重ね						— 垂直及び水平落下の結果を引用して評価			
1) 軸に直角方向	(ロ)-第A.30図		170°C	輸送重量の5倍	1	曲げ	$\sigma_b = M_{max} \cdot d_o / (2I)$	Sy	注8)	
2) 軸方向	(ロ)-第A.31図		170°C	輸送重量の5倍	1	圧縮	$\sigma_c = W/A$	Sy		
貫通	(ロ)-第A.32図		160°C	落下エネルギー	1	せん断	$E_s = 1/2 \cdot \pi d t^2 S$	E	注9)	

注8) M_{max} : 最大曲げモーメント、 d_o : 円筒外径、I: 断面二次モーメント、A: 断面積

注9) E_s : せん断エネルギー、d: 直径、t: 板厚、S: せん断強さ、E: 落下エネルギー

(ロ)-第A.1表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法(6/10)

条件	解析項目及びその詳細	設計条件				解析方法			備考			
		参照図表	材質	温度	種類	設計負荷係数	荷要素	適用数式又は要素		解析基準		
											必要	
特別の試験条件	落下試験 I 1) 緩衝体の変形量と衝撃加速度 垂直落下 水平落下 コーナー-落下	(ロ)-第A.33図から	木材	-	落下エネルギー-	1	エネルギー-吸収	$E_k = \Sigma \sigma cV$	$E_k = WgH$			
		(ロ)-第A.36図	SUS304	-	落下エネルギー-	1	エネルギー-吸収	$E_k = \Sigma \sigma cV$	$E_k = WgH$			
		(ロ)-第A.37図から	木材	-	落下エネルギー-	1	エネルギー-吸収	$E_k = \Sigma \sigma cV$	$E_k = WgH$			
	2) 垂直落下	フランジ 内筒 蓋 中間筒 底板 外筒 仕切板 レジンカバー 蓋ボルト	(ロ)-第A.43図	[]	170°C	内筒内圧、中性子遮蔽材充填空間圧力、慣性力及び初期縮付トルク	1	応力強さ	$\begin{cases} P_m \\ P_L \\ P_L + P_b \end{cases}$	2/3Su Su Su	注10)	
			(ロ)-第A.44図		180°C	同上	1	同上	同上	同上	同上	
			同上		170°C	同上	1	同上	同上	同上	同上	同上
			同上		170°C	同上	1	同上	同上	同上	同上	同上
			同上		180°C	同上	1	同上	同上	同上	同上	同上
			同上		140°C	同上	1	同上	同上	同上	同上	同上
			同上		160°C	同上	1	同上	同上	同上	同上	同上
0リングの密封性	蓋ボルト	同上	ふっ素ゴム	170°C	内筒内圧、中性子遮蔽材充填空間圧力、慣性力、熱膨張及び初期縮付トルク	1	引張 引張と曲げ	σ_m $\sigma_m + \sigma_b$	2/3Su Su	初期縮付代		
		-		同上	1	変形量	口開き変形量					

注10) Su : 設計引張強さ

(ロ)-第A.1表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法(7/10)

条件	解析項目及びその詳細	設計条件				解析方法			備考		
		参照図表	材質	温度	種類	設計負荷係数	荷要素	適用数式又は要素		解析基準	
											種
特別の試験条件	2) 垂直落下(続き) 伝熱フィン バスケット 下部スペーサ	-	C1020P	160°C	慣性力	1	せん断	$S=2\tau$	2/3 σ_u	注11)	
		-		170°C	慣性力	1	縮	$\sigma_c=W\cdot Gv/A$	Sy, σ_{cr}	注12)	
	-	SUS304	190°C	慣性力	1	圧	圧	$\sigma_c=W\cdot Gv/A$	Sy	注13)	
	-	SUS304	190°C	外圧	1	圧	圧	$\sigma=P\cdot r/h$	Sy		
		燃料被覆管									
		燃料落下試験の結果を引用して評価									
		スツール	-	SUS304	190°C	慣性力	1	圧	$\sigma_c=W\cdot Gv/A$	Sy, σ_{cr}	注14)
		3) 水平落下									
		フランジ	(ロ)-第A.47図		170°C	内筒内圧、中性子遮蔽材充填空間圧力、慣性力及び初期締付トルク	1	応力強さ	$\begin{cases} P_m \\ P_L \\ P_L+P_b \end{cases}$	2/3 σ_u Su Su	
		内筒	上		180°C	上	1	上	上	上	
		蓋	同		170°C	上	1	上	上	上	
		中間筒	同		170°C	上	1	上	上	上	
		底板	同		180°C	上	1	上	上	上	
		外筒	同		140°C	上	1	上	上	上	
	仕切板	同		160°C	上	1	上	上	上		
	レジンカバー	同		160°C	上	1	上	上	上		
	蓋ボルト	同	上	170°C	内筒内圧、中性子遮蔽材充填空間圧力、慣性力、熱膨張及び初期締付トルク	1	引張 引張と曲げ	σ_m $\sigma_m+\sigma_b$	2/3 σ_u Su	初期締付代	
	0リングの密封性	-	ふっ素	-	同上	1	変形量	口開き変形量			

注11) σ_u : 引張強さ
 注12) W: 燃料、バスケット、内筒内水及び自重の重量、Gv: 垂直落下時の衝撃加速度、 σ_{cr} : 座屈限界応力
 注13) W: 燃料及びバスケットの重量、P: [] に作用する外圧、r: [] 平均半径、h: [] 板厚
 注14) W: 燃料及びスツールの重量

(ロ)-第A.1表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法(8/10)

条件	解析項目及びその詳細	設計条件				解析方法			備考							
		参照図表	材質	温度	種類	設計負荷係数	要素	適用数式又は要素		解析基準						
											要素					
特別の試験条件	3) 水平落下(続き) バスケット チャンネル チャンネル支持部 燃料被覆管	(ロ)-第A.49図 (ロ)-第A.50図 ——燃料落下試験の結果を引用して評価	B-SUS SUS304	190°C	慣性力 慣性力	1 1	曲げ 曲げ	$\sigma_b = M/Z$ $\sigma_b = M/Z$	1.5 σ_y 1.5Sy	注15)						
				170°C							(ロ)章A.10.7を引用して評価	1	引張	$\sigma_t = \sigma_{t1} + \sigma_{t2}$	2/3Su	注16)
				170°C 180°C												
	170°C	軟鋼棒圧潰荷重	1	せん断	$F = \pi dtS$	F	注17)									
	170°C 180°C							軟鋼棒圧潰荷重 軟鋼棒圧潰荷重	1 1	せん断 せん断	$tr = (W/Su)^{0.71}$ $F = \pi dtS$	t F	注18)			

注15) Z: 断面係数

注16) σ_t : ボルトに生じる引張応力、 σ_{t1} : 慣性力により生じる引張応力、 σ_{t2} : 内筒内圧により生じる引張応力

注17) F: 貫通強度

注18) tr: 耐貫通板厚

(ロ)-第A.1表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法(9/10)

条件	解析項目及びその詳細	設計条件				解析方法			備考			
		参照図表	材質	温度	種類	設計負荷	適用数式又は要素	解析基準				
特別の試験条件	熱的試験											
	フランジ	(ロ)-第A.52図		440°C	内筒内圧及び初期締付トルク	1	応力強さ	$\begin{cases} P_m \\ P_L \\ P_L + P_b \end{cases}$	$\begin{cases} 2/3Su \\ Su \\ Su \end{cases}$			
	内筒蓋	同上		210°C	同上	1	同上	同上	同上	同上		
	中間筒蓋	同上		380°C	同上	1	同上	同上	同上	同上		
	底板	同上		260°C	同上	1	同上	同上	同上	同上		
	蓋ボルト	同上		400°C	同上	1	同上	同上	同上	同上		
	0リングの密封性	同上		260°C	内筒内圧、熱膨張及び初期締付トルク	1	引張と曲げ	σ_m $\sigma_m + \sigma_b$	$\begin{cases} 2/3Su \\ Su \end{cases}$	初期締付代		
	伝熱フィン	(ロ)-第A.54図	ふっ素ゴム	-	同上	1	変形量	口開き変形量				
	バスケット		C1020P	371°C	熱膨張	1	ひずみ	$\epsilon = (\ell_1 - \ell_f) / \ell_f$	ϵ_f			注19)
	15 m 浸漬	-	SUS304	220°C	外圧	1	圧力	$\sigma = P \cdot r / h$	Sy			
	蓋	(ロ)-第A.55図		170°C	外圧	1	曲げ	$\sigma_b = \frac{3(3+\nu)P \cdot a^2}{8t^2}$	Su			注20)
	200 m 浸漬											
	1) 中間筒	-		170°C	外圧	1	圧力	$P_a = 1.5 \frac{4Bt}{3Do}$	Pa			注21)
2) 底板	-		180°C	外圧	1	曲げ	$\sigma_b = 0.75 \frac{P \cdot a^2}{t^2}$	Su			注22)	
3) 蓋	(ロ)-第A.55図		170°C	外圧	1	曲げ	$\sigma_b = \frac{3(3+\nu)P \cdot a^2}{8t^2}$	Su				
4) パネルカバープレート	-		170°C	外圧	1	曲げ	同上	同上				

注19) ϵ : 熱ひずみ、 ℓ_1 : 火災発生後30分における伝熱フィン長さ、 ℓ_f : 火災発生後30分における伝熱フィンの自由伸び長さ、 ϵ_f : 破断ひずみ

注20) ν : ポアソン比、P : 圧力、a : 蓋半径、t : 板厚

注21) Pa : 許容外圧、B : L/Do、Do/t 及び温度で定まる係数、t : 中間筒板厚、Do : 中間筒外径

注22) P : 外圧、a : 円板の半径、t : 板厚

(ロ)-第 A.1 表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法(10/10)

条件	解析項目及びその詳細	設計条件					解析方法			備考
		参照図表	材質	温度	設計種類	設計負荷	適用数式又は要素	解析基準		
核分裂性輸送物に係る試験条件	一般の試験条件									
	1)水噴霧	}								
	2)0.3m自由落下									
	3)積み重ね									
4)6kg棒貫通										
核分裂性輸送物に係る試験条件	特別の試験条件									
	1)①(i)9m落下	(ロ)-第 A.56 図								注 23)
	(ii)1m落下									
	② 熱的試験									
核分裂性輸送物に係る試験条件	③ 0.9m 浸漬									
	2)15m 浸漬試験									注 24)

注 23) 1)と 2)のうち最大の破損を受ける条件の下に置いた後の評価を行う。1)では、核分裂性輸送物に係る一般の試験条件の後、②の条件の下で輸送物が最大の破損を受ける順序で(i)(ii)の条件の下に置く。続いて、③の条件の下に置く。

注 24) 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件の後、2)の条件の下に置く。

A.2 重量及び重心

輸送物の重量は、(イ)章 C.5 に記載したとおり 115 トン以下である。また、輸送物の幾何学的重心の位置は、(ロ)-第 A.1 図に示すとおりである。

A.3 材料の機械的性質

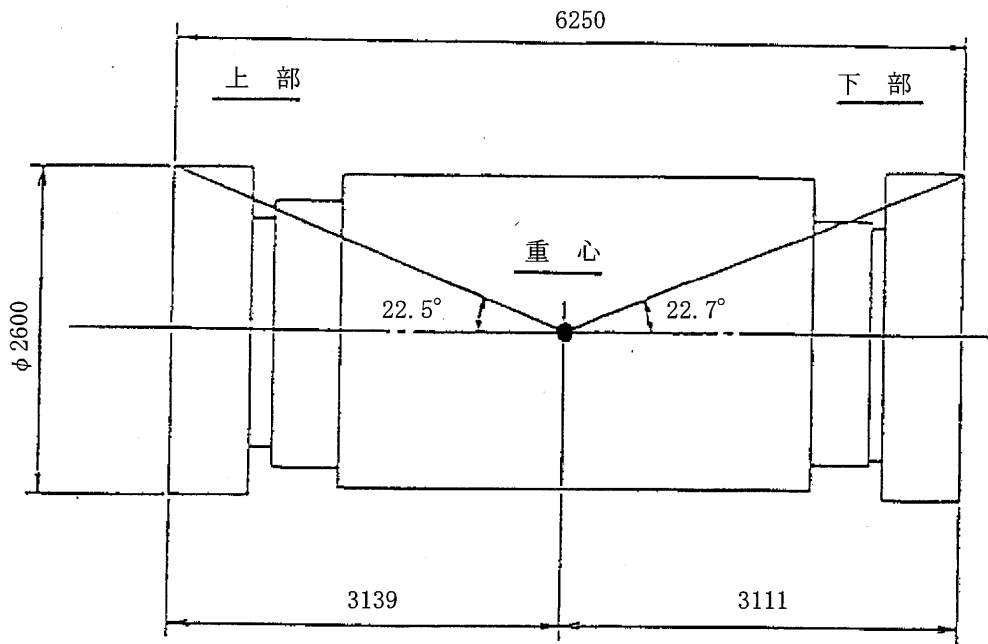
解析に用いる材料の機械的性質を(ロ)-第 A.2 表に示す。ステンレス鋼、析出硬化型ステンレス鋼、炭素鋼、 ボロン入りステンレス鋼及び銅の温度に対する機械的性質の変化を(ロ)-第 A.2 図に示す。これらは、主に設計・建設規格¹⁾より引用した。なお、緩衝体の材料の機械的性質については、(ロ)章 A.5.3 に示す。

A.4 核燃料輸送物の要件

A.4.1 化学的及び電気的反応

本輸送物は、(イ)-第 C.1 表に示すとおり化学的に安定した材料を使用している。また、輸送物構成部品が相互に接触する異種材料の一覧を(ロ)-第 A.3 表に示す。

鉛及びレジンは、内筒、中間筒、外筒等に密閉されて収納されており、これらの金属と化学的及び電気的に反応することはない²⁾。伝熱フィンと中間筒及び外筒の接合部は、密閉静止した淡水環境における銅が接続した鋼の腐食試験において鋼単独の場合の腐食速度と同程度になることが確認されていること及びレジンより生じる水分量は限定的であり、レジン充填空間は閉鎖環境にあって酸素が連続的に供給されないことから、異種金属接触による腐食促進の影響は小さく、化学的及び電気的な反応による腐食の影響はない。ステンレス鋼と水、ジルカロイと水の間では、安定な不動態を生じるので化学的及び電気的に作用して問題になるような腐食を起こすことはない³⁾。なお、収納物の周囲には内筒内水が充填されるが、水の放射線分解は極めて微量であり、収納物に対する化学的影響はない。



(単位 : mm)

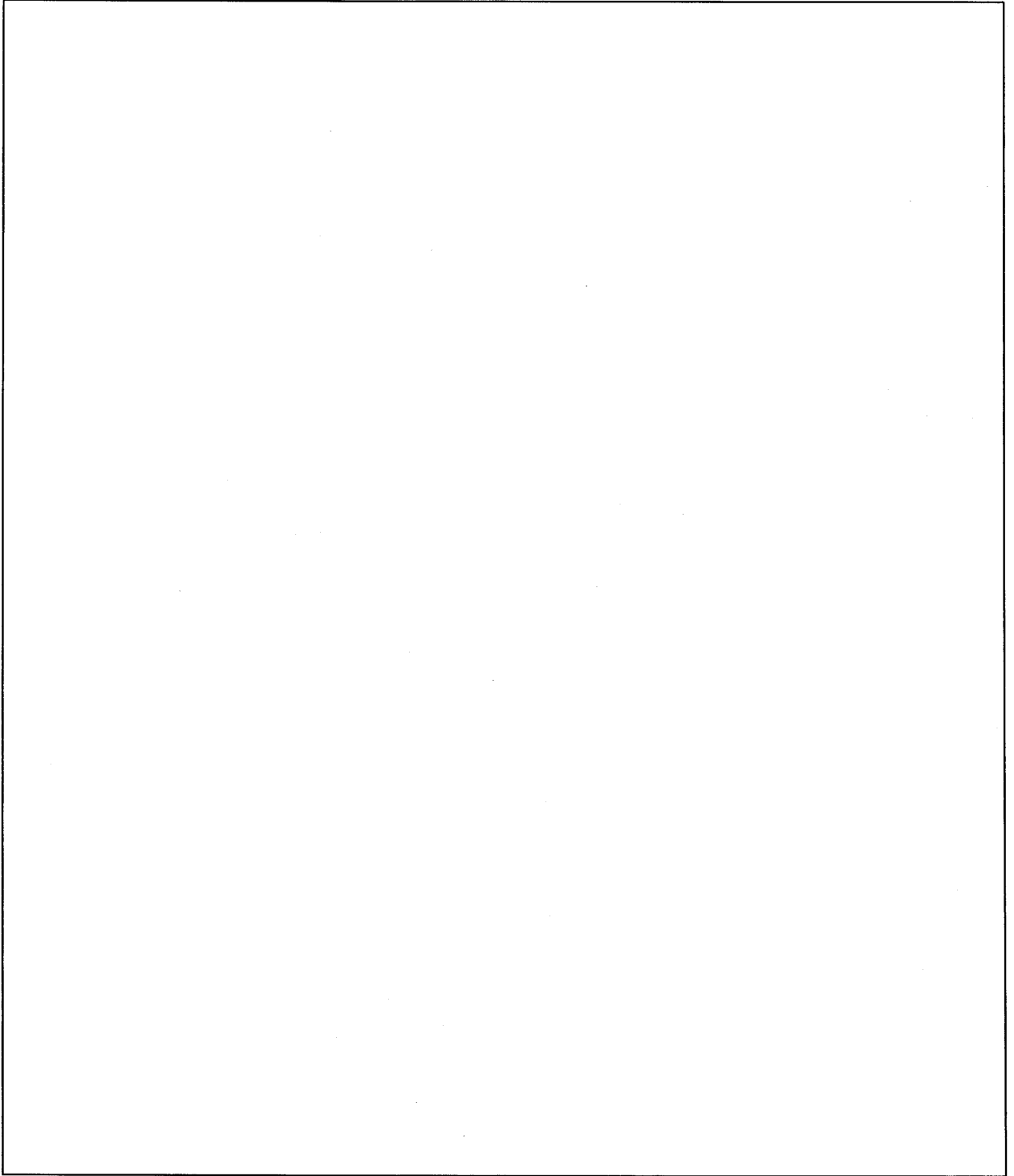
(ロ)-第 A. 1 図 重心の位置

(ロ)-第 A. 2 表 材料の機械的性質(常温)

材 料	設計引張強さ 又は引張強さ (MPa)	設計降伏点 又は降伏応力 (MPa)	熱膨張係数 (1/°C)	ポアソン比	縦弾性係数 (MPa)
ステンレス鋼 ¹⁾ (<input type="text"/>)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.266	<input type="text"/>
析出硬化型ステンレス鋼 ¹⁾ (SUS630 H1150)	930	725	10.64×10^{-6}	0.3	1.95×10^5
炭素鋼 ¹⁾ (<input type="text"/>)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.3	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.3	<input type="text"/>
ボロン入りステンレス鋼 ^{注1)}	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
銅 ^{4) 注2)} (C1020P-1/4H)	216	153	16.5×10^{-6}	0.343	1.21×10^5
ジルカロイ ⁵⁾	922	735	—	—	—

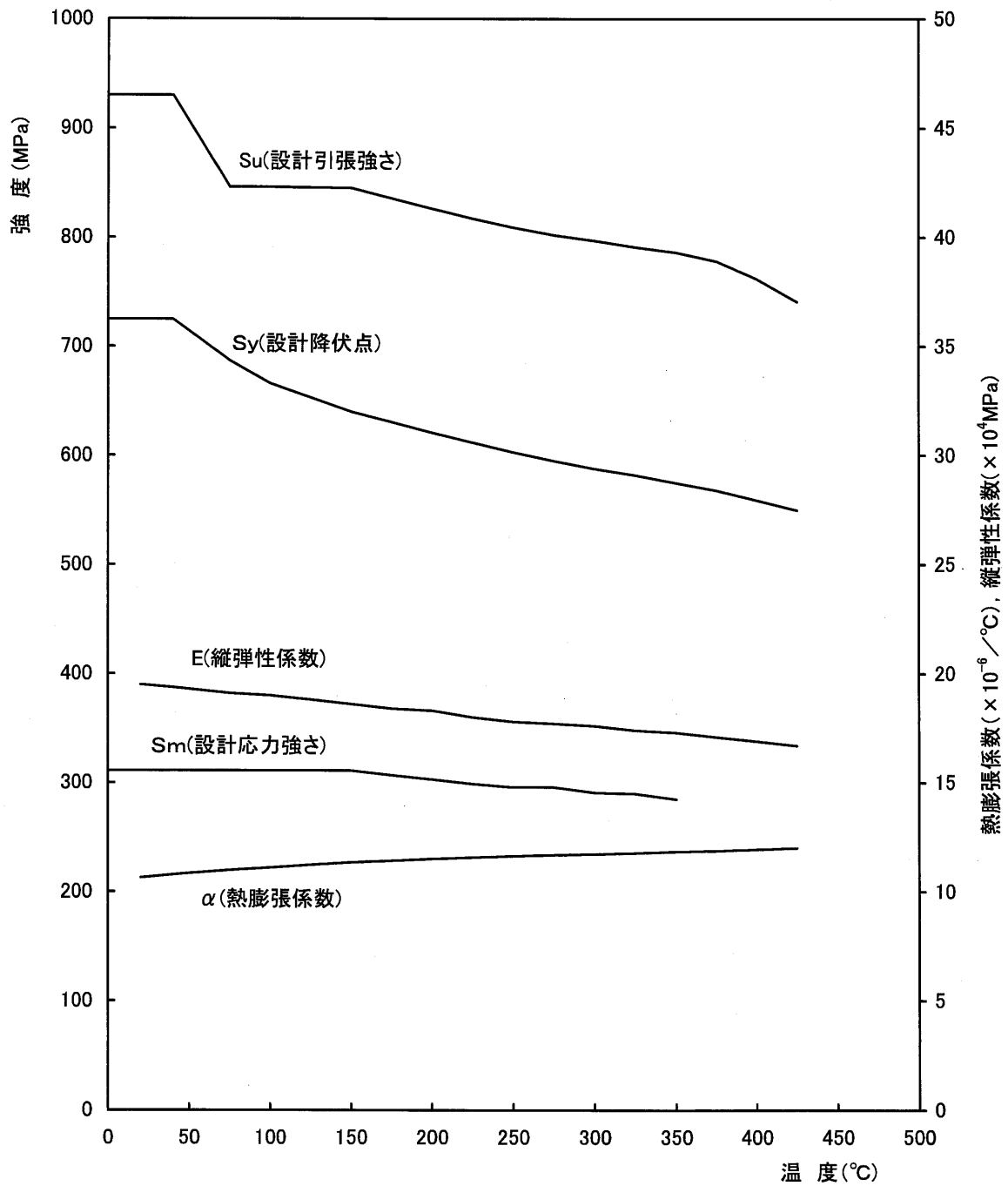
注1) (ロ)章 A. 10. 2 参照

注2) 文献記載値の単位を SI の単位に換算した。



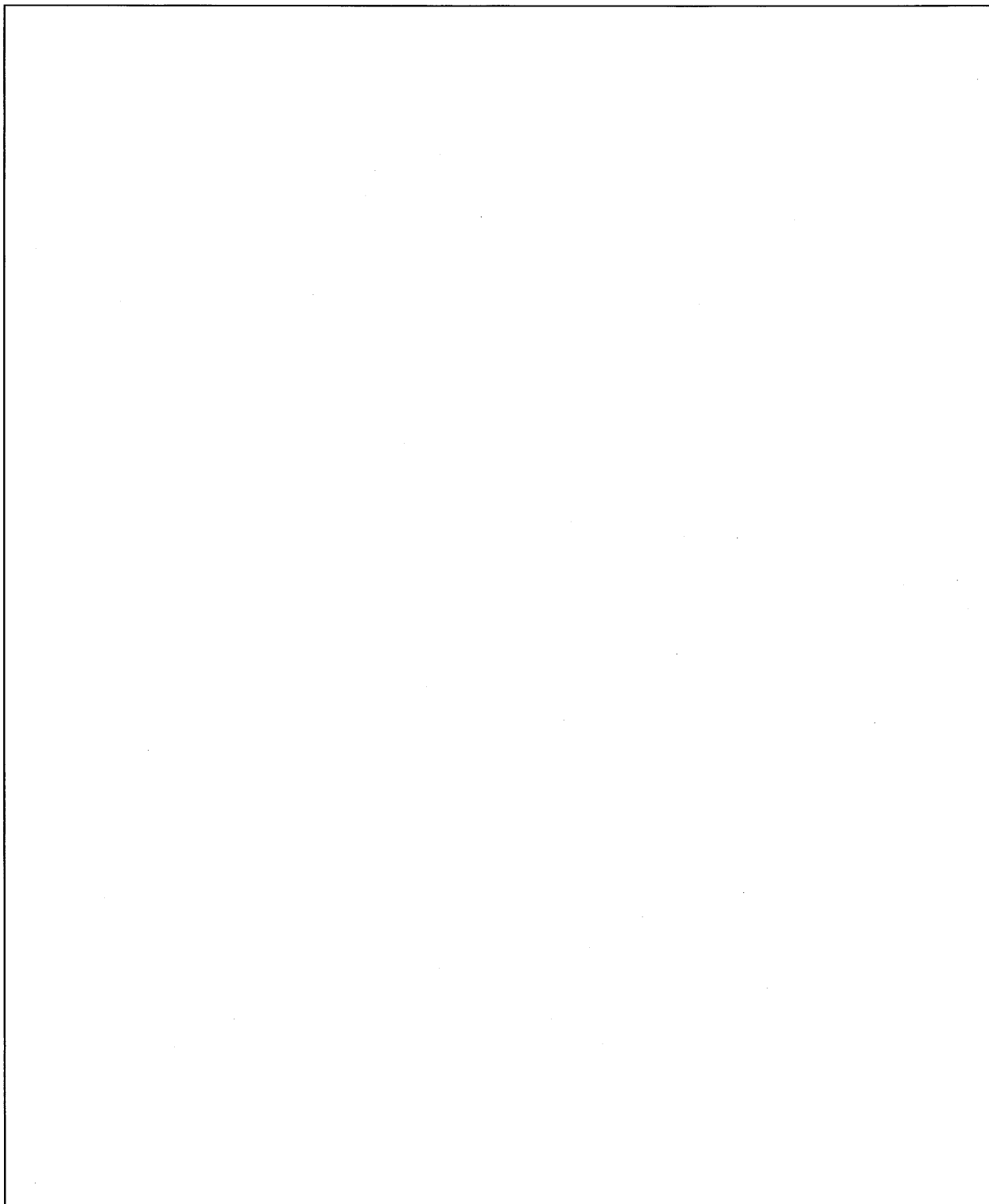
(a) ステンレス鋼 ()^{1), 6)}

(ロ)-第 A. 2 図 材料の温度に対する機械的性質の変化 (1/7)



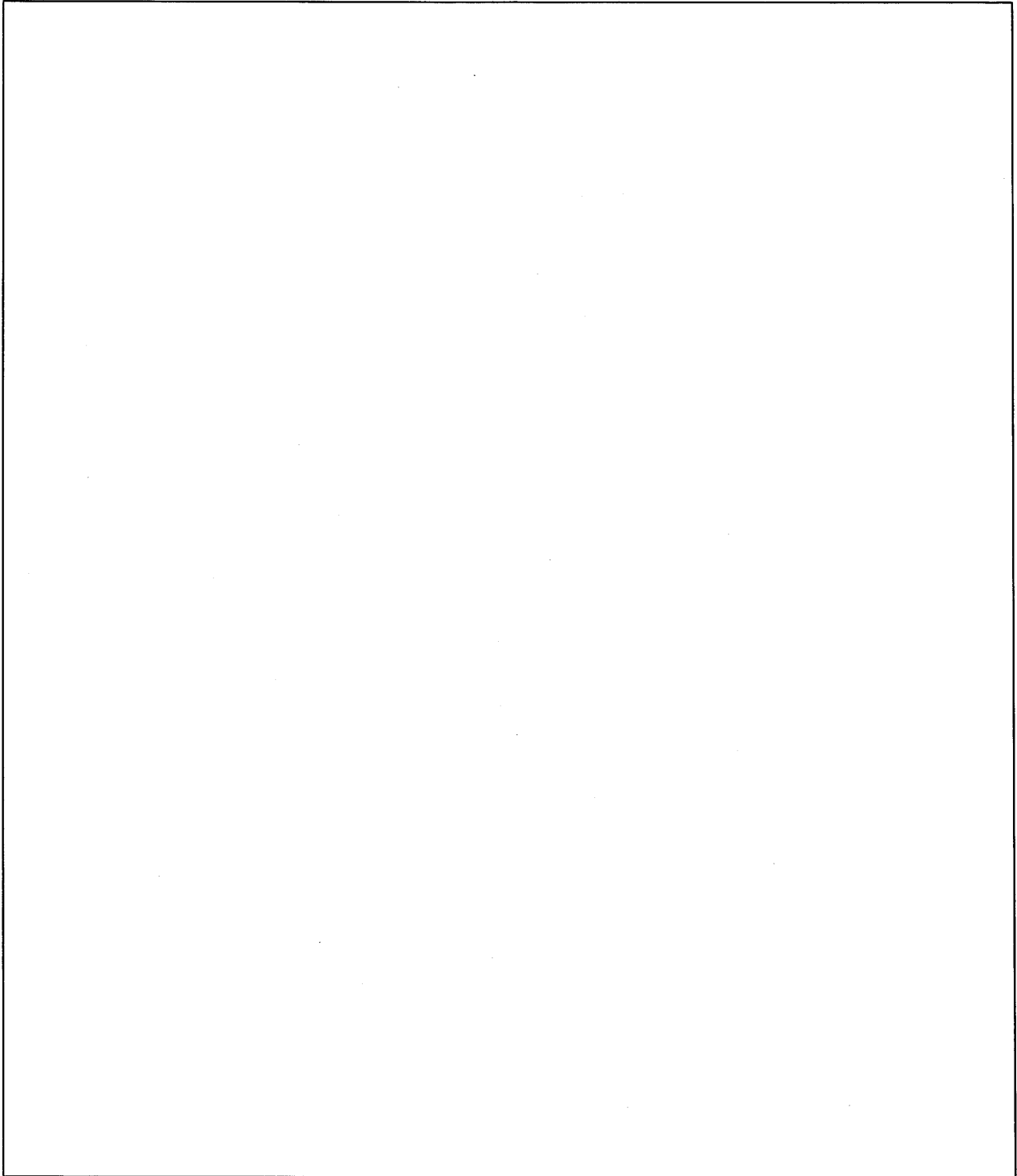
(b) 析出硬化型ステンレス鋼(SUS630 H1150)¹⁾

(ロ)-第 A. 2 図 材料の温度に対する機械的性質の変化(2/7)



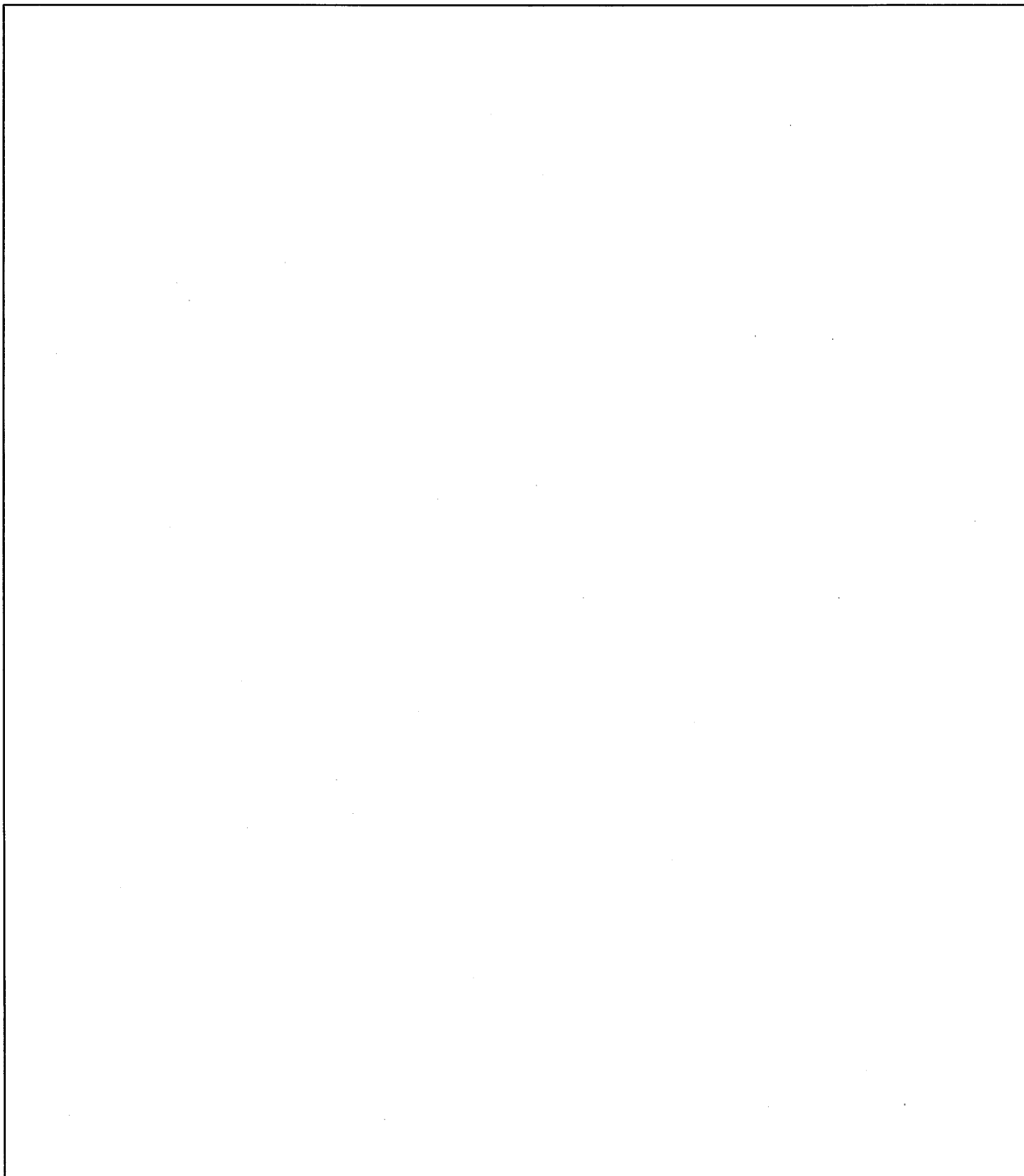
(c) 炭素鋼 ()^{1), 7)}

(口)-第 A. 2 図 材料の温度に対する機械的性質の変化(3/7)



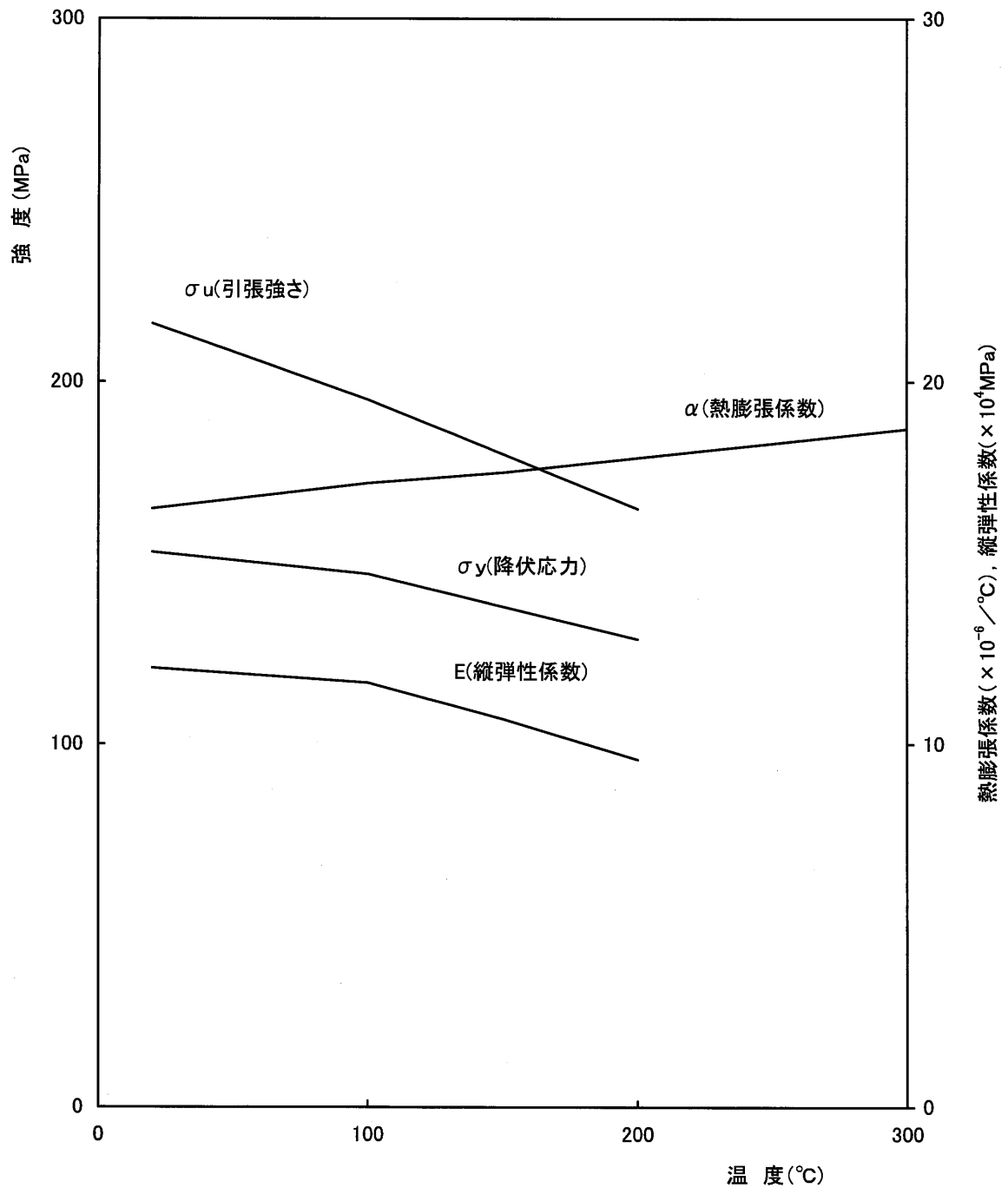
(d)

(口)-第 A. 2 図 材料の温度に対する機械的性質の変化(4/7)



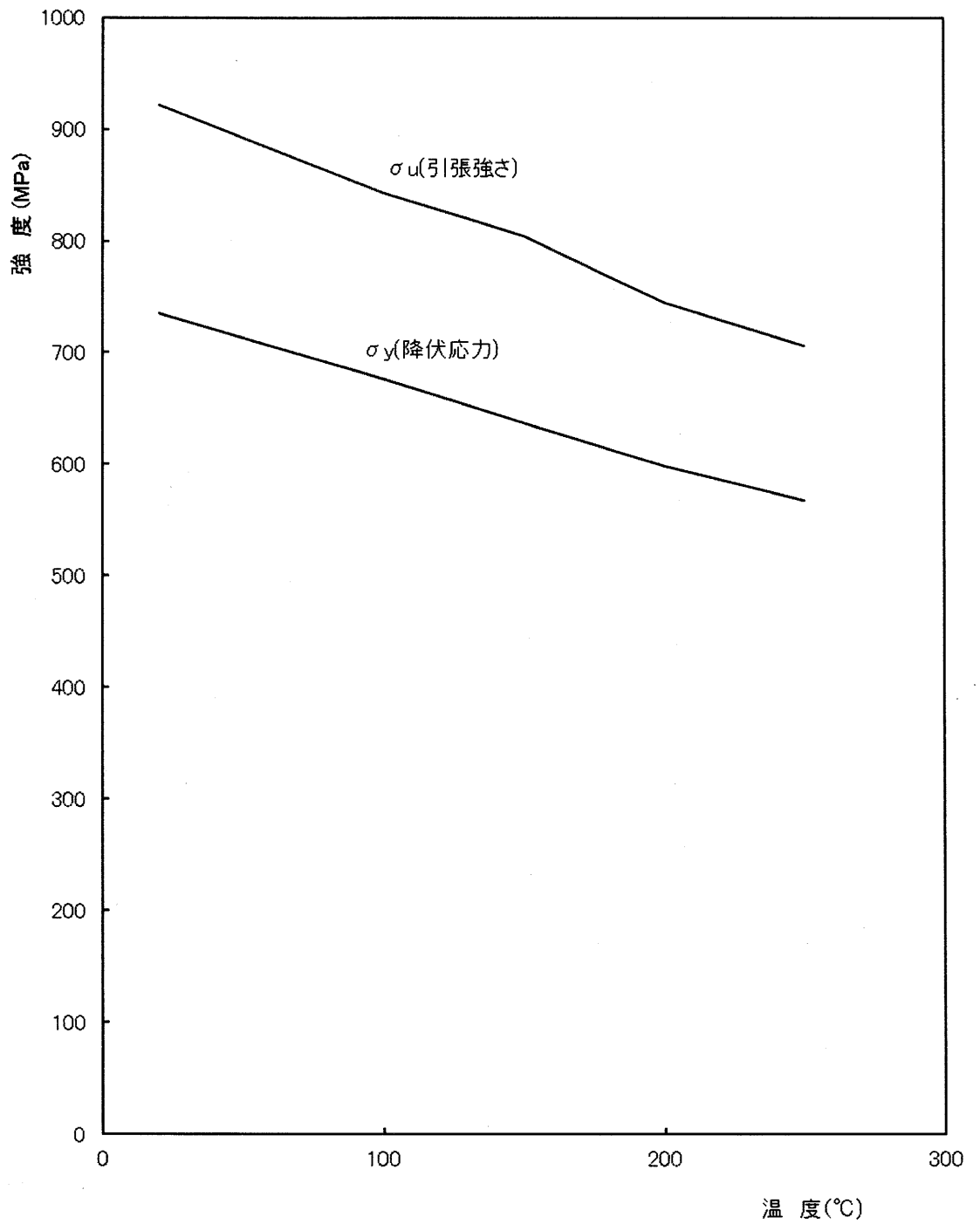
(e) ボロン入りステンレス鋼((口)章 A. 10. 2 参照)

(口)-第 A. 2 図 材料の温度に対する機械的性質の変化(5/7)



(f) 銅(C1020P-1/4H)^{4), 8)}




(口)-第 A. 2 図 材料の温度に対する機械的性質の変化(6/7)



(g) ジルカロイ⁵⁾

(ロ)-第 A. 2 図 材料の温度に対する機械的性質の変化(7/7)

(ロ)-第A.3表 接触する異種材料の一覧表

接触する異種材料の一覧表					
材 質	部 品		材 質	部 品	
ステンレス鋼	内 筒	接 触 境 界 面	}	鉛	ガンマ線遮蔽体
炭 素 鋼	中 間 筒				
炭 素 鋼	中間筒、外筒		}	レジン	中性子遮蔽体
銅	伝熱フィン				
ステンレス鋼	仕切板、ビンカバー				
ステンレス鋼	蓋				ボルト
ステンレス鋼	緩衝体カバープレート		 、 		緩衝体緩衝材
ステンレス鋼	蓋		ふっ素ゴム		Oリング
ボロン入りステンレス鋼	バスケット		}	水	内筒内水
ステンレス鋼	蓋、内筒、底板				
ふっ素ゴム	Oリング				
ジルカロイ	燃料被覆管		}	銅	伝熱フィン
炭 素 鋼	中間筒				
炭 素 鋼	外筒				
炭 素 鋼	中間筒			析出硬化型 ステンレス鋼	トランニオン

A.4.2 低温強度

本輸送物は周囲温度-20℃以上で使用する。

1. 構成部品の低温特性

(イ)章 C.3 に示す本輸送容器の使用材料の低温特性を(ロ)-第 A.4 表に示す。同表より明らかなように、最低使用温度-20℃において構成部品はき裂、破損等の生じるおそれはない。また、(ニ)章 1. に示すように、内筒内水が凍結しないよう、収納物の最低崩壊熱量について規定しているため、内筒内水が凍結することはない。

(ロ)-第 A.4 表 輸送容器使用材料の-20℃における低温特性評価

輸送容器の部品	材 質	評 価	引用、文献、資料
内筒、底板、底コーナ、バルブカバープレート、レジンカバー蓋 バスケット 緩衝体カバープレート バルブ、フィン	ステンレス鋼 ()	-20℃において使用可能	JIS B 8270 ⁷⁾
バスケットチャンネル	ボロン入りステンレス鋼	-20℃において使用可能	(ロ)章 A.10.2
中間筒	炭素鋼 ()	-20℃において使用可能	() ⁹⁾
外筒	ステンレス鋼 () 炭素鋼 ()	-20℃において使用可能	JIS B 8270 ⁷⁾ 衝撃試験結果 ⁹⁾
蓋ボルト	()	-20℃において使用可能	JIS B 8270 ⁷⁾
Oリング	ふっ素ゴム	-20℃において使用可能	複合材料技術集成 ¹⁰⁾
トラニオン	析出硬化型ステンレス鋼 (SUS630 H1150)	-20℃において使用可能	ステンレス鋼便覧 ¹¹⁾
伝熱フィン	銅(C1020P-1/4H)	-20℃において使用可能	JIS B 8270 ⁷⁾
ガンマ線遮蔽体	鉛	-20℃において使用可能	鉛ハンドブック ¹²⁾
中性子遮蔽体	レジン	-20℃において使用可能	基礎試験結果 ¹³⁾
緩衝体緩衝材	()、()	-20℃において使用可能 ^{注)}	木材工業ハンドブック ¹⁴⁾

注) 緩衝体緩衝材の()及び()は、-20℃では常温時に対して強度が15%から24%上昇する。(ロ)章 A.10.8 に示すように、-20℃の木材強度を用いた場合の自由落下試験時の衝撃加速度は、常温時の木材強度を用いて算出した(ロ)-第 A.12 表及び(ロ)-第 A.23 表に示す設計加速度に対して最大22%増加するが、各評価部位に発生する応力は低温時の評価基準を満足するため、輸送物の構造上の健全性が損なわれることはない。

2. 低温時の強度

輸送容器本体材料のステンレス鋼は、低温脆化のない材料であるので低温での機械的性質が低下することはない。また、中間筒及び外筒材料の炭素鋼は、設計・建設規格¹⁾において-30℃以上の温度で強度が規定されており、-20℃において機械的性質が低下することはない。

蓋ボルト材料は設計・建設規格¹⁾PVB-2300の破壊靱性要求を満足するように製造するので、-20℃において低温脆性破壊を起こすことはない。

トラニオン材料は日本産業規格 JIS G 3214の破壊靱性要求を満足するように製造するので、-20℃において低温脆性破壊を起こすことはない。

A. 4. 3 密封装置

輸送容器の蓋及び蓋ボルトは通常の輸送時には(イ)-第 C. 2 図に示すように上部緩衝体で覆われており、かつ□が施されているので不用意に開けられることはない。

また、バルブは通常の輸送時には(イ)-第 C. 9 図、(イ)-第 C. 10 図及び(イ)-第 C. 12 図に示すように、カバーをかぶせ、かつ□が施されているので不用意に開けられることはない。

A. 4. 4 吊上装置

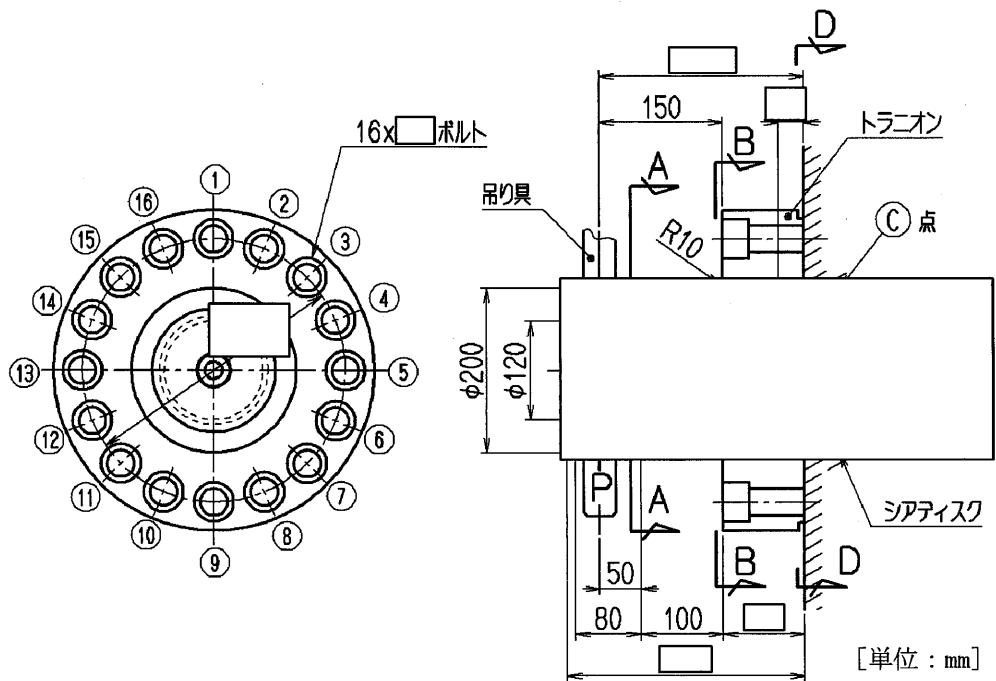
本項で説明する吊上装置は、垂直吊りの場合、本体容器の上部トラニオンであり、トラニオンボルトにより容器に取り付けられている。上部トラニオンと同一形状の下部トラニオンは輸送架台上で輸送容器を縦起こし、又は横倒しの際の支点となり、上部トラニオン以上の荷重が下部トラニオンには作用しない。したがって、垂直吊りの場合の検討は上部トラニオンのみ行う。水平吊りの場合の吊上装置は上部及び下部トラニオンである。

構造解析では、各トラニオンの温度を底板の設計温度の 180℃として基準値を設定する。

1. 応力評価

(1) トラニオン本体

トラニオンの解析モデル図を(ロ)-第 A. 3 図に示す。



(ロ)-第 A. 3 図 吊上げ用トラニオン解析モデル図

輸送物吊上重量は、垂直吊り時の重量が最大となる燃料装荷直後の状態の 108.5 トン以下であり、水平吊り時(輸送架台を含む。)は 125 トン以下である。垂直吊り時には 2 個のトラニオンを使用し、水平吊り時には前後各 2 個のトラニオンを使用するので、1 個のトラニオンに作用する荷重 P(N) は、次式により求められる。

$$P_v = W \times a \times g / n$$

$$P_h = (W/2) \times a \times g / n$$

ここで、

P_v : 垂直吊り時のトラニオン 1 個に作用する荷重(N)

P_h : 水平吊り時のトラニオン 1 個に作用する荷重(N)

n : トラニオンの数=2

W : 容器の重量 垂直吊り時 : 1.085×10^5 (kg)

水平吊り時 : 1.25×10^5 (kg)

a : 負荷係数=3¹⁵⁾

g : 重力加速度=9.8m/s²

したがって、

$$P_v = 1.085 \times 10^5 \times 3 \times 9.8 / 2$$

$$= 1.59 \times 10^6 \text{N}$$

$$P_h = (1.25 \times 10^5 / 2) \times 3 \times 9.8 / 2$$

$$= 9.19 \times 10^5 \text{N}$$

以上より、作用する荷重の大きい垂直吊り時のみ検討する。

a. A-A 断面

(a) 曲げ応力

(ロ)-第 A.3 図に示すトラニオンの A-A 断面に発生する曲げ応力 σ_b (MPa) は次式で与えられる。

$$\sigma_b = \frac{M \cdot C}{I}$$

$$M = P \times X$$

ただし、

M : 曲げモーメント (N・mm)

P : 最大荷重 = 1.59×10^6 N

X : モーメントアーム = 50 mm

C : 中立軸からの距離 = 60 mm

I : 断面二次モーメント (mm^4)

ここで、

$$I = \frac{\pi}{64} \times (D^4 \boxed{})$$

D : トラニオン径 = 120 mm

したがって、

$$\begin{aligned} \sigma_b &= \frac{1.59 \times 10^6 \times 50 \times 60}{\frac{\pi}{64} \times (120^4 \boxed{})} \\ &= \boxed{} \text{ MPa} \end{aligned}$$

(b) せん断応力

(ロ)-第 A.3 図に示すトラニオンの A-A 断面に発生するせん断応力 τ (MPa) は次式で与えられる。

$$\tau = \frac{P}{\frac{\pi}{4} (D^2 \boxed{})}$$

したがって、

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{1.59 \times 10^6}{\frac{\pi}{4} \times (120^2 \boxed{})} \\ &= \boxed{} \text{ MPa} \end{aligned}$$

(c) 応力強さ

上述の曲げ応力 σ_b とせん断応力 τ による応力強さ S (MPa) は次式で与えられる。

$$S = \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau^2}$$

したがって、

$$S = \sqrt{\square^2 + 4 \times \square^2} = 547 \text{MPa}$$

材料の設計降伏点 S_y は 180°C において 629MPa であるから、余裕率 MS は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} MS &= \frac{S_y}{S} - 1 \\ &= \frac{629}{547} - 1 = 0.15 \end{aligned}$$

b. B-B 断面

(a) 曲げ応力

(ロ)-第 A.3 図に示すトラニオンの B-B 断面に発生する曲げ応力 σ_b (MPa) は次式で与えられる。

$$\sigma_b = \frac{M \cdot C}{I}$$

$$M = P \times X$$

ただし、

M : 曲げモーメント (N・mm)

P : 最大荷重 = 1.59×10^6 N

X : モーメントアーム = 150mm

C : 中立軸からの距離 = 100mm

I : 断面二次モーメント (mm^4)

ここで、

$$I = \frac{\pi}{64} \times (\text{do}^4 \square)$$

do : トラニオン外径 = 200mm

$$\square$$

したがって、

$$\sigma_b = \frac{1.59 \times 10^6 \times 150 \times 100}{\frac{\pi}{64} \times (200^4 \square)} = \square \text{MPa}$$

(b) せん断応力

(ロ)-第 A.3 図に示すトラニオンの B-B 断面に発生するせん断応力 τ (MPa) は次式で与えられる。

$$\tau = \frac{P}{\frac{\pi}{4} (d_o^2 \square)}$$

したがって、

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{1.59 \times 10^6}{\frac{\pi}{4} (200^2 \square)} \\ &= \square \text{ MPa} \end{aligned}$$

(c) 応力強さ

上述の曲げ応力 σ_b とせん断応力 τ による応力強さ S (MPa) は次式で与えられる。

$$S = \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau^2}$$

したがって、

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{\square^2 + 4 \times \square^2} \\ &= 416 \text{ MPa} \end{aligned}$$

180°Cにおける材料の設計降伏点 S_y は 629MPa であるから、余裕率 MS は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} MS &= \frac{S_y}{S} - 1 \\ &= \frac{629}{416} - 1 \\ &= 0.51 \end{aligned}$$

(2) トラニオンボルト

トラニオンボルトには、以下の2つの応力が生じる。

- ① 吊上荷重による引張応力
- ② 初期締付トルクによる引張応力

a. 吊上荷重による引張応力

(ロ)-第 A.3 図に示す ㉔ 点を支点とする回転モーメントにより生じる最大引張応力

σt_1 (MPa) はボルト ㉑ に生じ、次式で与えられる。

$$\sigma t_1 = M \times y / I$$

$$M = P \times \ell$$

$$I = (\pi / 64) \times d_b^4 \times 16 + \sum_{i=1}^{16} (\pi / 4 \times d_b^2 \cdot y_i^2)$$

ただし、

P : 最大荷重 = 1.59×10^6 N

M : 曲げモーメント (N・mm)

I : 断面二次モーメント (mm⁴)

ℓ : モーメントアーム = mm

y : ㉔ 点よりボルト ㉑ までの距離 = mm

y_i : ㉔ 点より各ボルトまでの距離 (mm)

d_b : ボルト谷径 () = mm

したがって、

$$M = 1.59 \times 10^6 \times \text{} = \text{} \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$I = 1.97 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$\sigma t_1 = \text{} \times \text{} / (1.97 \times 10^8) = \text{} \text{ MPa}$$

b. 初期締付トルクによる引張応力

初期締付トルクによる引張応力 σt_2 (MPa) は、次式により与えられる。

$$\sigma t_2 = [T / (K \times dm)] / (\pi \times d_b^2 / 4)$$

ただし、

T : 初期締付トルク = N・mm

K : 締付トルク係数 = 0.2

dm : ボルトの呼び径 () = mm

したがって、

$$\begin{aligned} \sigma t_2 &= [\text{} / (0.2 \times \text{}^2 / 4) \\ &= \text{} \text{ MPa} \end{aligned}$$

吊上荷重による引張応力 σt_1 と初期締付トルクによる引張応力 σt_2 の合計は、

$$\begin{aligned}\sigma t &= \sigma t_1 + \sigma t_2 \\ &= 613 \text{MPa}\end{aligned}$$

となる。

180°Cにおける材料の設計降伏点 S_y は 815MPa であるので、余裕率 MS は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\text{MS} &= S_y / \sigma t - 1 \\ &= 815 / 613 - 1 \\ &= 0.33\end{aligned}$$

(3) シアディスク

(ロ)-第 A.3 図に示すように、シアディスクにはせん断応力 τ (MPa) が生じ、次式により与えられる。

$$\tau = \frac{P}{\frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_i^2)}$$

ここで、

P : 最大荷重(N)

d_o : シアディスク外径 = mm

d_i : シアディスク内径 = mm

したがって、

$$\begin{aligned}\tau &= 1.59 \times 10^6 / \left[\frac{\pi}{4} \times (\text{}^2 - \text{}^2) \right] \\ &= 51.1 \text{MPa}\end{aligned}$$

応力強さ S は、

$$\begin{aligned}S &= 2 \tau \\ &= 2 \times 51.1 \\ &= 102 \text{MPa}\end{aligned}$$

となる。

180°Cにおける材料の設計降伏点 S_y は 629MPa であるので、余裕率 MS は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\text{MS} &= \frac{S_y}{S} - 1 \\ &= \frac{629}{102} - 1 \\ &= 5.17\end{aligned}$$

2. トラニオンの疲労評価

上部トラニオンは垂直吊り、水平吊り時ともに荷重が作用する。また、発生応力は垂直吊り時で最大となる。したがって、垂直吊り時の応力をベースに解析する。

トラニオン段付き部の応力について、応力集中を考慮し繰返しピーク応力強さによる許容繰返し回数と使用計画回数を比較して検討を行う。

(1) 繰返しピーク応力強さ、 S_a

$$S_a = S \times K_t \times K_r \times (2.00 \times 10^5 / E_t) / 2$$

ここで、

S_a : 繰返しピーク応力強さ (MPa)

S : 段付き部の応力強さ (垂直吊り時)

K_t : 応力集中係数 ((口)章 A. 10. 1 参照)

K_r : 表面粗さ係数 ¹⁶⁾ = 1. 04 (-)

E_t : 材料の使用温度における縦弾性係数 = $1. 84 \times 10^5$ MPa (180°C)

a. 段付き部の応力強さ、 S

疲労評価においては実際に作用する荷重をベースとし、負荷係数はクレーン構造規格で使用されている作業係数及び衝撃係数を用いる。

(a) トラニオンに作用する荷重

$$P = 1/n \times W \times \phi \times \phi \times g$$

ここで、

W : 容器の垂直吊り時の重量 = $1. 085 \times 10^5$ kg

n : トラニオンの数 = 2

ϕ : 作業係数 = 1. 05

ϕ : 衝撃係数 = 1. 25

g : 重力加速度 = $9. 8 \text{ m/s}^2$

したがって、

$$P = 6. 98 \times 10^5 \text{ N}$$

(b) トラニオンの発生応力

1. に示す計算式を使用して求めた結果を以下に示す。

① A-A 断面

曲げ応力 : $\sigma_b = \square$ MPa

せん断応力 : $\tau = \square$ MPa

応力強さ : $S = 240$ MPa

② B-B 断面

曲げ応力 : $\sigma_b = \square$ MPa

せん断応力 : $\tau = \square$ MPa

応力強さ : $S = 183$ MPa

b. 繰返しピーク応力強さ、 S_a

トラニオンの形状による応力集中係数を考慮して求めた繰返しピーク応力強さを
(ロ)-第A.5表に示す。

(ロ)-第A.5表 トラニオンに生じる繰返しピーク応力強さ

項 目	A-A 断面	B-B 断面
丸み半径、 r (mm)	10	10
小径部、 d (mm)	120	200
大径部、 D (mm)	200	390
r/d	8.33×10^{-2}	5.00×10^{-2}
D/d	1.67	1.95
K_t	1.84	2.24
K_r	1.04	1.04
S (MPa)	240	183
S_a (MPa)	250	232

(2) 許容繰返し回数

設計疲労線図¹⁶⁾より許容繰返し回数 N_a は以下となる。

A-A 断面 : 8.9×10^6 (回)

B-B 断面 : 1.0×10^7 (回)

(3) 使用計画回数

本吊上装置の使用計画回数 N_u は次のようになる。

使用予定年数 : 60 年

使用予定回数 : 400 回

輸送時吊上回数 : 40 回 (輸送ごとの吊上回数を保守的に 2 倍)

なお、上記の輸送時吊上回数は、(ハ)章の A. に示す標準的な取扱いとして想定される吊上回数を保守的に設定した回数であり、燃料装荷、再処理工場への輸送における取扱いを含む。

したがって、

$$N_u = 400 \times 40 = 16,000 \text{ 回}$$

保守的に設定した使用計画回数は許容繰返し回数を十分下回っており、トラニオンは十分な疲労強度を有している。

以上より、トラニオンの疲労破壊が生じるおそれはない。

A. 4. 5 固縛装置

本輸送物は、(イ)-第 C. 3 図に示すように上部及び下部のトラニオンを利用して輸送架台に固定される。

上下方向及び左右方向の荷重は上部トラニオン及び下部トラニオンが支え、前後方向の荷重を支持するのは下部トラニオンである。

固縛装置の荷重条件として、前後及び上下に各 2g の加速度が作用し、左右方向に 1g の加速度が作用する場合を考える。また、上下方向に関しては、上方向は 2g、下方向は自重を考慮し 3g の加速度が作用すると考える。

1. トラニオンに作用する荷重

各トラニオンに作用する荷重は、(ロ)-第 A. 4 図に示す荷重状態図から、次のように与えられる。

$$F_v = \frac{b}{a+b} \times V$$

$$R_v = \frac{a}{a+b} \times V$$

$$R_L = H$$

$$F_T = \frac{b}{a+b} \times L$$

$$R_T = \frac{a}{a+b} \times L$$

ただし、

F_v : 上部トラニオンに作用する上下方向荷重 (N)

R_v : 下部トラニオンに作用する上下方向荷重 (N)

R_L : 下部トラニオンに作用する前後方向荷重 (N)

F_T : 上部トラニオンに作用する左右方向荷重 (N)

R_T : 下部トラニオンに作用する左右方向荷重 (N)

V : 上下方向慣性力

$$= 1.15 \times 10^5 \times 2 \times 9.8 = 2.25 \times 10^6 \text{N (上方向)}$$

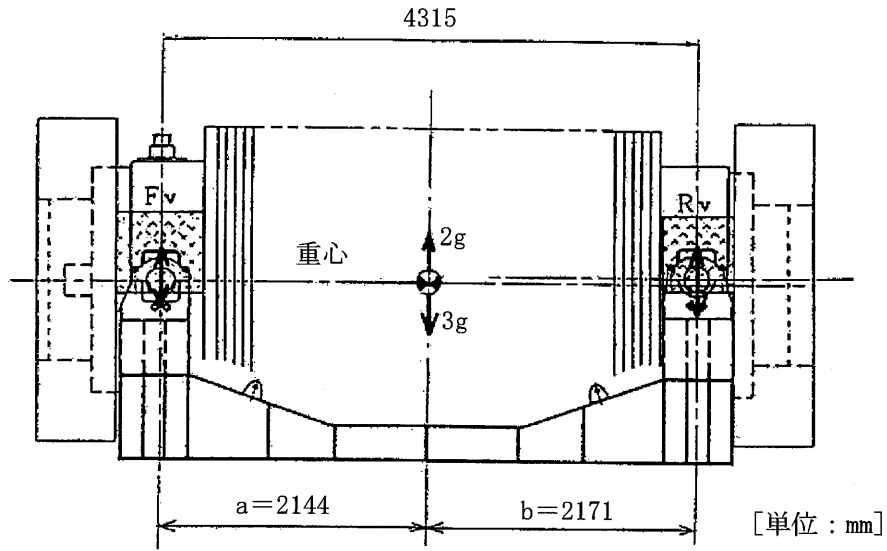
$$= 1.15 \times 10^5 \times 3 \times 9.8 = 3.38 \times 10^6 \text{N (下方向)}$$

H : 前後方向慣性力 $= 1.15 \times 10^5 \times 2 \times 9.8 = 2.25 \times 10^6 \text{N}$

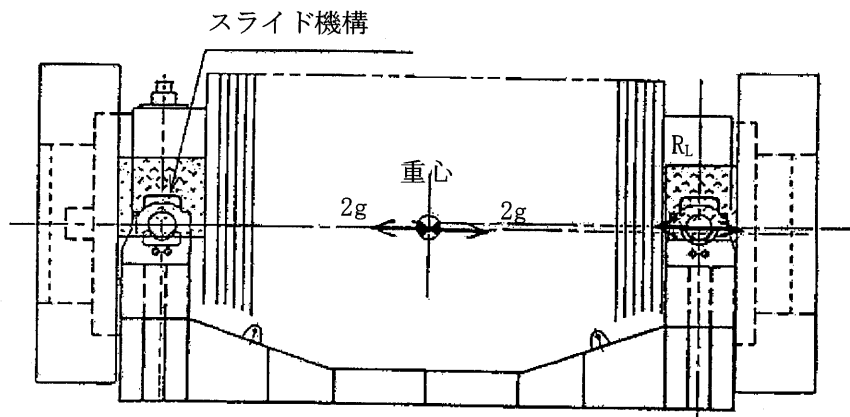
L : 左右方向慣性力 $= 1.15 \times 10^5 \times 9.8 = 1.13 \times 10^6 \text{N}$

a : 重心より上部トラニオン中心までの距離 $= 2,144 \text{mm}$

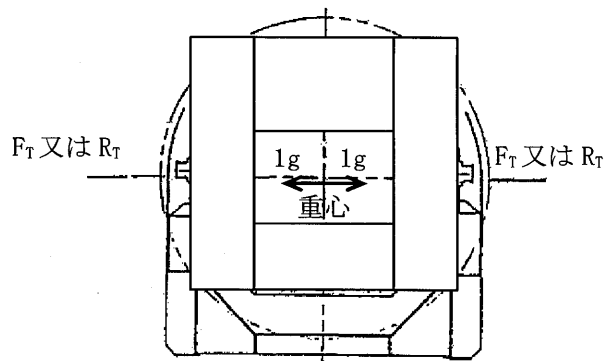
b : 重心より下部トラニオン中心までの距離 $= 2,171 \text{mm}$



(a) 上下方向に加速度が作用する場合



(b) 前後方向に加速度が作用する場合



(c) 左右方向に加速度が作用する場合

(ロ)-第 A. 4 図 各方向に加速度が作用する場合のトランニオンに作用する荷重

(ロ)-第A.6表に以上の式を用いて求めた各方向の荷重を示す。

(ロ)-第A.6表 トラニオンに作用する荷重

(単位：×10⁶N)

加速度方向 ^{注1)}	上部側			下部側		
	F _v	F _L	F _T	R _v	R _L	R _T
上(2g)	1.13	0	0	1.12	0	0
下(3g)	1.70	0	0	1.68	0	0
前後(2g) ^{注2)}	0	0	0	0	2.25	0
左右(1g)	0	0	0.569	0	0	0.561

注1) F_v、R_v：垂直方向荷重

F_L、R_L：容器軸方向荷重

F_T、R_T：容器軸に直角な方向の荷重

注2) 上部側のトラニオン受けはスライド機構となっているので上部トラニオンに前後方向の荷重は作用しない。

(ロ)-第A.6表に示すように、下部トラニオンの方が荷重が大きいため下部トラニオンのみを評価する。また、左右の加速度による荷重はトラニオン本体に直接作用しないので、評価を除外する。

2. トラニオン本体

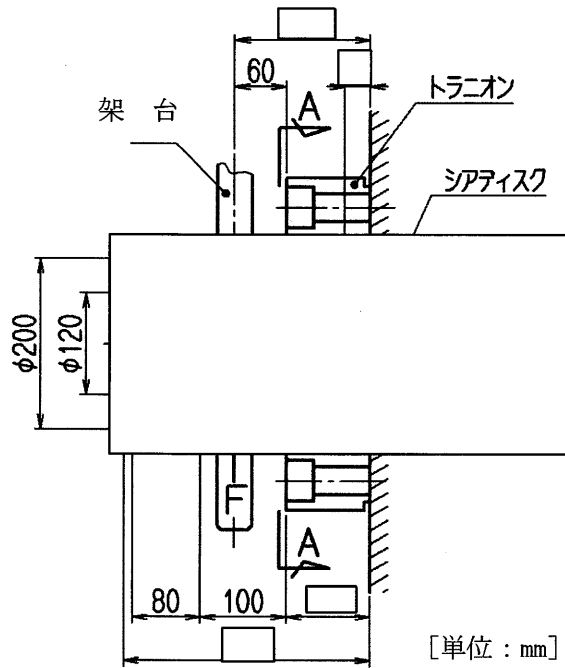
トラニオン本体には、下方向荷重 R_v と前後方向荷重 R_L の合成荷重 F(N) が作用する。

$$F = \sqrt{R_v^2 + R_L^2} / n$$

$$= 1.40 \times 10^6 \text{N}$$

ここで、

n：荷重を受けもつトラニオンの数=2



(ロ)-第 A. 5 図 輸送架台固縛状態解析モデル図

(1) 曲げ応力

(ロ)-第 A. 5 図に示す A-A 断面に最大曲げ応力が生じる。曲げ応力 σ_b (MPa) は、次式で表される。

$$M = F \times X$$

$$\sigma_b = \frac{M \cdot C}{I}$$

ただし、

M : 曲げモーメント (N・mm)

X : モーメントアーム = 60mm

C : 中立軸からの距離 = 100mm

I : 断面二次モーメント (mm⁴)

ここで、

$$I = \frac{\pi}{64} \times (d_o^4 - d_i^4)$$

d_o : トラニオン外径 = 200mm

d_i : 架台内径 = 120mm

したがって、A-A 断面の曲げ応力は

$$\sigma_b = \frac{1.40 \times 10^6 \times 60 \times 100}{\frac{\pi}{64} \times (200^4 \square)}$$

$$= \square \text{MPa}$$

となる。

(2) せん断応力

A-A断面に生じるせん断応力 τ (MPa) は、次式で与えられる。

$$\tau = \frac{F}{\frac{\pi}{4} (d_o^2 \square)}$$

よって、せん断応力は、

$$\tau = \frac{1.40 \times 10^6}{\frac{\pi}{4} \times (200^2 \square)}$$

$$= \square \text{MPa}$$

(3) 応力強さ

上述の曲げ応力 σ_b とせん断応力 τ による応力強さ S (MPa) は、次式で与えられる。

$$S = \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau^2}$$

$$= \sqrt{\square^2 + 4 \times \square^2}$$

$$= 206 \text{MPa}$$

となる。180°Cにおける材料の設計降伏点 S_y は 629MPa であるので、余裕率 MS は、次式で与えられる。

$$MS = S_y/S - 1$$

$$= 629/206 - 1$$

$$= 2.05$$

3. トラニオンボルト

トラニオンボルトには、以下の2つの応力が生じる。

- ① 固縛荷重による引張応力
- ② 初期締付トルクによる引張応力

ここで、②は、(ロ)章 A. 4. 4 の 1. (2)b. に示す $\sigma_{t2} = \square$ MPa である。

(1) 固縛荷重による引張応力

(ロ)章 A. 4. 4 の 1. (2)a. と同様にボルトに生じる最大引張応力は、次式で与えられる。

((ロ)-第 A. 3 図参照)

$$\sigma_{t1} = M \times y / I$$

$$M = P \times \ell$$

$$I = (\pi / 64) \times d_b^4 \times 16 + \sum_{i=1}^{16} (\pi / 4 \times d_b^2 \cdot y_i^2)$$

ただし、

P : 最大荷重 = 1.40×10^6 N

M : 曲げモーメント (N・mm)

I : 断面二次モーメント (mm⁴)

ℓ : モーメントアーム = $\square + 60 = \square$ mm

y : ㉔点よりボルト㉑までの距離 = \square mm

y_i : ㉔点より各ボルトまでの距離 (mm)

d_b : ボルト谷径 (\square) = \square mm

したがって、

$$M = 1.40 \times 10^6 \times \square = \square \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$I = 1.97 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_{t1} = \square \times \square / (1.97 \times 10^8) = \square \text{ MPa}$$

(2) 初期締付トルクによる引張応力

初期締付トルクによる引張応力は、(ロ)章 A. 4. 4 の 1. (2)b. に示すように、

$$\sigma_{t_2} = \boxed{\quad} \text{MPa}$$

固縛荷重による引張応力 σ_{t_1} と初期締付トルクによる引張応力 σ_{t_2} の合計は、

$$\sigma_t = \sigma_{t_1} + \sigma_{t_2} = 385 \text{MPa}$$

となる。

180°Cにおける材料の設計降伏点 S_y は 815MPa であるので、余裕率 MS は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} MS &= S_y / \sigma_t - 1 \\ &= 815 / 385 - 1 \\ &= 1.12 \end{aligned}$$

4. シアディスク

(ロ)章 A. 4. 4 の 1. (3)と同様に、シアディスクに生じるせん断応力 τ (MPa)は、次式により与えられる。

$$\tau = \frac{F}{\frac{\pi}{4}(d_o^2 - d_i^2)}$$

ただし、

F : 最大荷重(N)

d_o : シアディスク外径=mm

d_i : シアディスク内径=mm

したがって、

$$\begin{aligned}\tau &= 1.40 \times 10^6 / \left[\frac{\pi}{4} \times (\text{}^2 - \text{}^2) \right] \\ &= 45.0 \text{MPa}\end{aligned}$$

応力強さ S は、

$$\begin{aligned}S &= 2\tau \\ &= 2 \times 45.0 \\ &= 90.0 \text{MPa}\end{aligned}$$

となる。

180°Cにおける材料の設計降伏点 S_y は 629MPa であるので、余裕率 MS は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned}MS &= \frac{S_y}{S} - 1 \\ &= \frac{629}{90.0} - 1 \\ &= 5.99\end{aligned}$$

A. 4.6 圧力

本輸送物の一般の試験条件下での最大内筒内圧は 1.39MPaG であり、外気圧が 60kPa まで低下した場合には、最大内筒内圧は 1.43MPaG となる。

後述するように、(ロ)章 A. 5. 1 の熱的試験において内筒内圧を 1.70MPaG とした条件で構造健全性が維持され、き裂、破損等の生じるおそれはないこと及び O リング取付位置での相対口開き変形量が O リングの初期締付代より小さいことを確認していることから、上記の圧力降下が生じた場合にも輸送容器の健全性が損なわれることはない。

A. 4.7 振動

本輸送容器は(イ)章 C. 1 で述べるように固縛装置によって 2 か所で輸送架台に固定されている((イ)-第 C. 3 図参照)。(ロ)章 A. 4. 5 において説明したように加速度 2g が作用しても本輸送容器の健全性が損なわれることはない。ここでは、本輸送容器の固有振動数を計算し、輸送時に輸送架台から伝搬される振動数域と比較して本輸送物が共振しないことを示す。

本輸送物を(ロ)-第 A. 6 図のとおり両端支持の梁と考えると、輸送物の n 次の固有振動数 f_n は次式で示される¹⁷⁾。

$$f_n = \frac{\lambda^2}{2\pi\ell^2} \sqrt{\frac{E \cdot I \cdot g}{w}}$$

ただし、

λ : 境界条件と振動形によって定まる無次元定数

E : 縦弾性係数 (MPa)

I : 振動面に直交する断面主軸に関する断面二次モーメント (mm^4)

ℓ : 輸送容器支持間長さ (mm)

g : 重力加速度 (mm/s^2)

w : 単位長さ当たりの重量 (N/mm)

ここで、最も振動数の低い一次の固有振動数を計算すると、

$\lambda = \pi$ (両端支持の一次固有振動に対する定数)

$E = 1.93 \times 10^5 \text{ MPa}$ () (170°C)

また、断面二次モーメントとしては中間筒のみを考えると、

$$I = \frac{\pi}{64} (d_2^4 - d_1^4)$$

ただし、

d_2 : 中間筒外径 = mm

d_1 : 中間筒内径 = mm

したがって、

$$I = \frac{\pi}{64} (\text{}^4 - \text{}^4)$$
$$= 1.61 \times 10^{11} \text{ mm}^4$$

$$\ell = 4,315 \text{ mm}$$

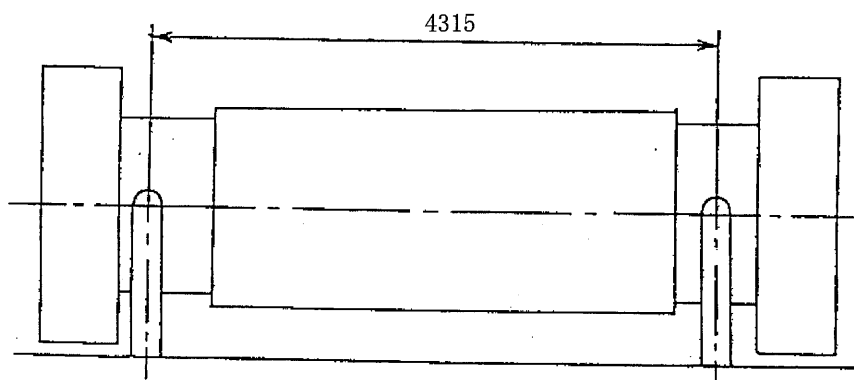
$$g = 9.8 \times 10^3 \text{ mm/s}^2$$

$$w = 1.15 \times 10^5 \times 9.8 / 5318 = 212 \text{ N/mm}$$

以上より、

$$f_1 = \frac{\pi^2}{2\pi \times (4315)^2} \sqrt{\frac{1.93 \times 10^5 \times 1.61 \times 10^{11} \times 9.8 \times 10^3}{212}}$$
$$= 101 \text{ Hz}$$

一方、輸送中の車両の最大加速度と振動数の関係において、輸送中の振動により輸送物に作用する励振力の振動数域は大部分が 10Hz 以下であり、十分離れた固有振動数を有しているため、励振力による輸送物の応答増幅の影響はなく、輸送中の振動による荷重は(ロ)章 A. 5. 3 の一般の試験条件の 0. 3m 落下事象に包絡されることから、輸送物は予想される振動等によってき裂、破損等の生じるおそれはない。



[単位 : mm]

(ロ)-第 A. 6 図 輸送架台モデル図

また、蓋を取り付けている蓋ボルトは振動等により緩まないよう、(ロ)章 A. 4. 5 にて考慮した左右方向加速度 1g と下方向加速度 3g による蓋の慣性力(1.643×10^5 N)より十分大きい摩擦力(4.798×10^5 N)が生じるように強固に締め付けられており、輸送時の振動によって蓋ボルトが緩むことはない。

なお、バスケットは内筒との隙間が小さく、バスケットガイドによって位置決めされており、振動に耐える。

以上の結果より通常の輸送時における輸送物の要件に対する評価結果の要約を(ロ)-第 A. 7 表に示す。

(ロ)-第 A. 7 表 輸送物の要件に対する評価結果の要約(1/2)

条件	解析及びその詳細	解析基準	解析基準値	解析結果等	余裕率 MS (-)
通常 の 輸 送 条 件	・化学的及び電氣的反応				
	化学的反應	反応のないこと	-	反応なし	基準に合致
	電氣的反應	反応のないこと	-	反応なし	基準に合致
	・低温強度				
	構成部品の低温特性	-40℃でのき裂、破損のないこと	-	き裂、破損なし	基準に合致
	低温時の強度	低温脆化温度	-20℃	-20℃では低温脆化なし	基準に合致
	・密封装置の誤操作による開放の可能性				
	蓋	可能性がないこと	-	可能性なし	基準に合致
	ベント・水位調整バルブ、ドレンバルブ及び水位調整用加圧バルブ	可能性がないこと	-	可能性なし	基準に合致
	・吊上装置				
	1. 応力評価				
	1) トラニオン本体	Sy	629MPa	547MPa	0.15
	2) トラニオンボルト	Sy	815MPa	613MPa	0.33
3) シアディスク	Sy	629MPa	102MPa	5.17	

(ロ)-第A.7表 輸送物の要件に対する評価結果の要約(2/2)

条件	解析及びその詳細	解 析 基 準	解析基準値	解析結果等	余裕率 MS (-)
通常 の 輸 送 条 件	2. 疲労評価 トランオン本体	許容繰返し回数以下 であること	許容繰返し回数 8.9×10^6 回	使用計画回数 1.6×10^4 回	基準に合致
	・ 固縛装置				
	1) トランオン本体	Sy	629MPa	206MPa	2.05
	2) トランオンボルト	Sy	815MPa	385MPa	1.12
	3) シアディスク	Sy	629MPa	90.0MPa	5.99
	・ 圧 力	密封性が維持される こと	良	良	基準に合致
	・ 振 動	共振しないこと 蓋を取り付けている 蓋ボルトが緩まない こと	固有振動数(101Hz)と輸送による振動数(10Hz) の差が大であり、輸送物の応答増幅の影響はな く、輸送中の振動による荷重は、一般の試験条件 の0.3m落下事象に包絡されることから、輸送物 にき裂、破損等の生じるおそれはない。 蓋ボルトは振動等により緩まないよう、強固に 締め付けられており、振動等によって蓋ボルト が緩むことはない。		

A.5 一般の試験条件

A.5.1 熱的試験

A.5.1.1 温度及び圧力の要約

1. 圧力

輸送容器に最大崩壊熱の燃料を収納し、太陽熱放射を考慮した場合の輸送容器内の圧力は(ロ)章 B.4.4 において 1.39MPaG と求められている。構造解析においては内筒内圧を 1.70MPaG として評価する。なお、中性子遮蔽材充填空間には、充填空間温度に対応する飽和水蒸気圧及び空気分圧を考慮する。構造解析においては中性子遮蔽材充填空間圧力を 0.40MPaG として評価する。中性子遮蔽材充填空間圧力は、製造時の周囲温度が仮に -20°C であった場合、温度上昇により製造時の周囲温度が常温であった場合に比べて約 7%増加する可能性があるが、上記の構造解析において使用した中性子遮蔽材充填空間圧力の設定時の保守性に包含される。したがって、製造時の周囲温度が仮に -20°C であった場合においても、構造健全性は維持される。

2. 温度

輸送物各部の温度分布は(ロ)章 B.4.2 に示されている。各部位の最高温度と解析基準値に適用する温度を(ロ)-第 A.8 表に示す。

(ロ)-第 A.8 表 一般の試験条件における最高温度の要約

(単位： $^{\circ}\text{C}$)

部 位	熱解析結果	解析基準値に適用する温度
蓋	167	170
蓋ボルト	160	170
フランジ	168	170
外 筒	134	140
伝熱フィン	154	160
中間筒	162	170
内 筒	177	180
底 板	173	180
仕 切 板	150	160
レジンカバー	152	160
バスケット	183	190
燃料被覆管	184	190

A. 5. 1. 2 熱膨張

本項では、一般の試験条件下における輸送容器本体各部の応力計算を行う。

(ロ)章 B. 4. 2 に示す温度分布及び内筒内圧を考慮し、解析は有限要素法による ABAQUS コードを用いて行う。

なお、本輸送物は周囲温度 -20°C から 38°C の温度範囲において使用するが、当該温度範囲における輸送物の各部品の熱膨張に伴う寸法変化は十分に小さく、最も熱膨張の差の大きいバスケットと内筒においても隙間が 3mm 以上あり部品同士の干渉は生じないため、周囲温度の変化によりき裂、破損等の生じるおそれはない。

1. 解析モデル

解析モデルとして(ロ)-第 A. 7 図に示す三次元 180° 対称モデルを用いる。

本解析モデルは、外筒、レジン、仕切板、レジンカバー、中間筒、鉛、内筒、フランジ、底板、蓋ボルト及び蓋より構成され、蓋は蓋ボルトによりフランジに接続され、蓋とフランジとの接触が考慮されている。

なお、NFT-14P 型輸送容器のレジンカバー部は、八角形の角部やトラニオン接合部等の構造不連続部がレジンカバーの変形を拘束しているが、レジンカバーの変形を大きく評価するため、拘束点がない円筒形のモデルを採用する。実形状を考慮した場合のレジン保持機能に与える影響については実証試験により確認している。

((ロ)章 A. 10. 9 参照)

2. 荷重条件及び境界条件

(1) 荷重条件

(ロ)章 A. 5. 1. 1 で示した(ロ)章 B. 4. 2 の温度分布による熱膨張及び内筒内圧を荷重条件とする。初期温度は常温(20°C)とする。

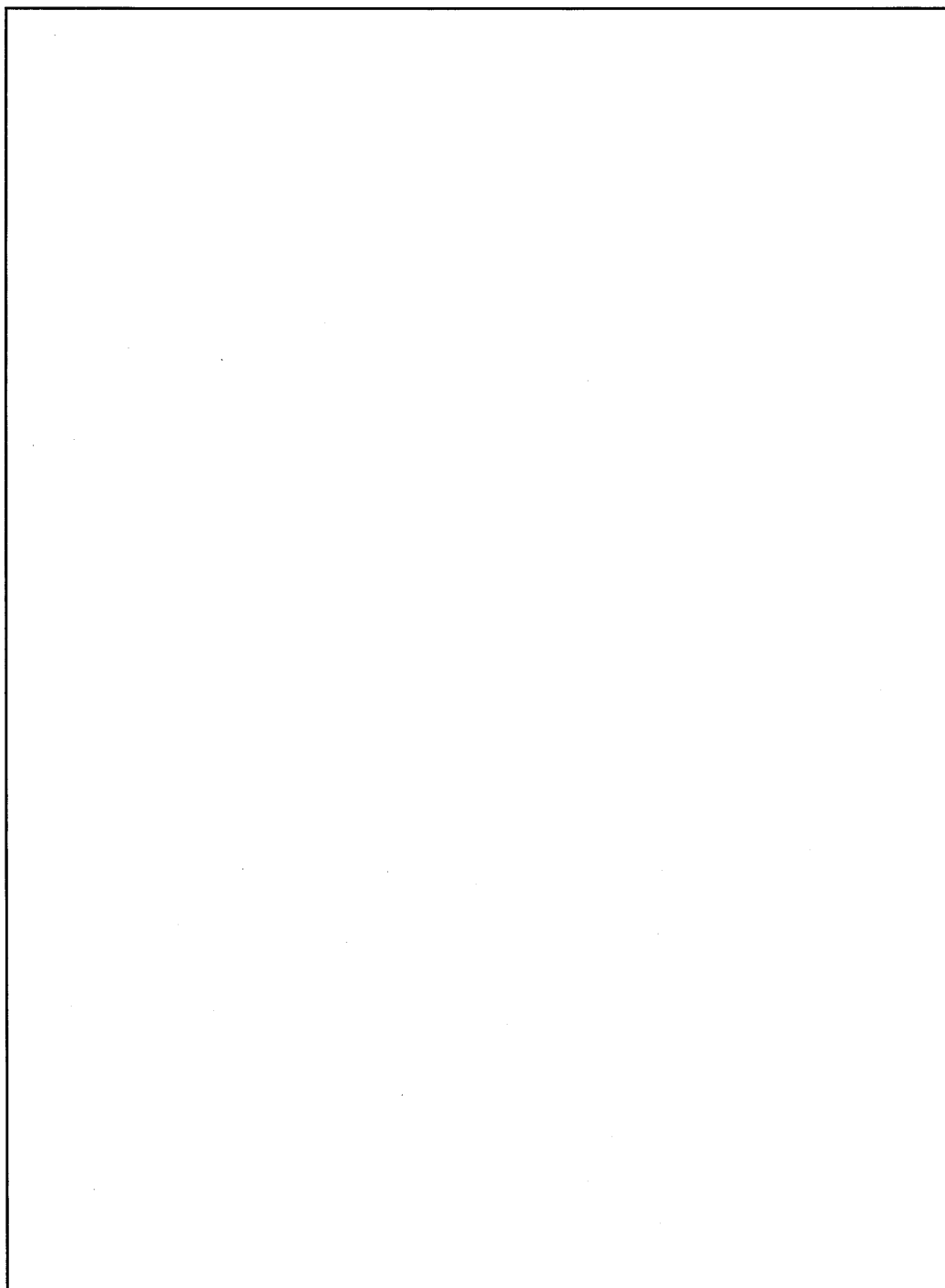
また、蓋ボルトには初期締付トルク ($\square\text{N}\cdot\text{m}$) による引張応力を予応力として考慮する。

(2) 境界条件

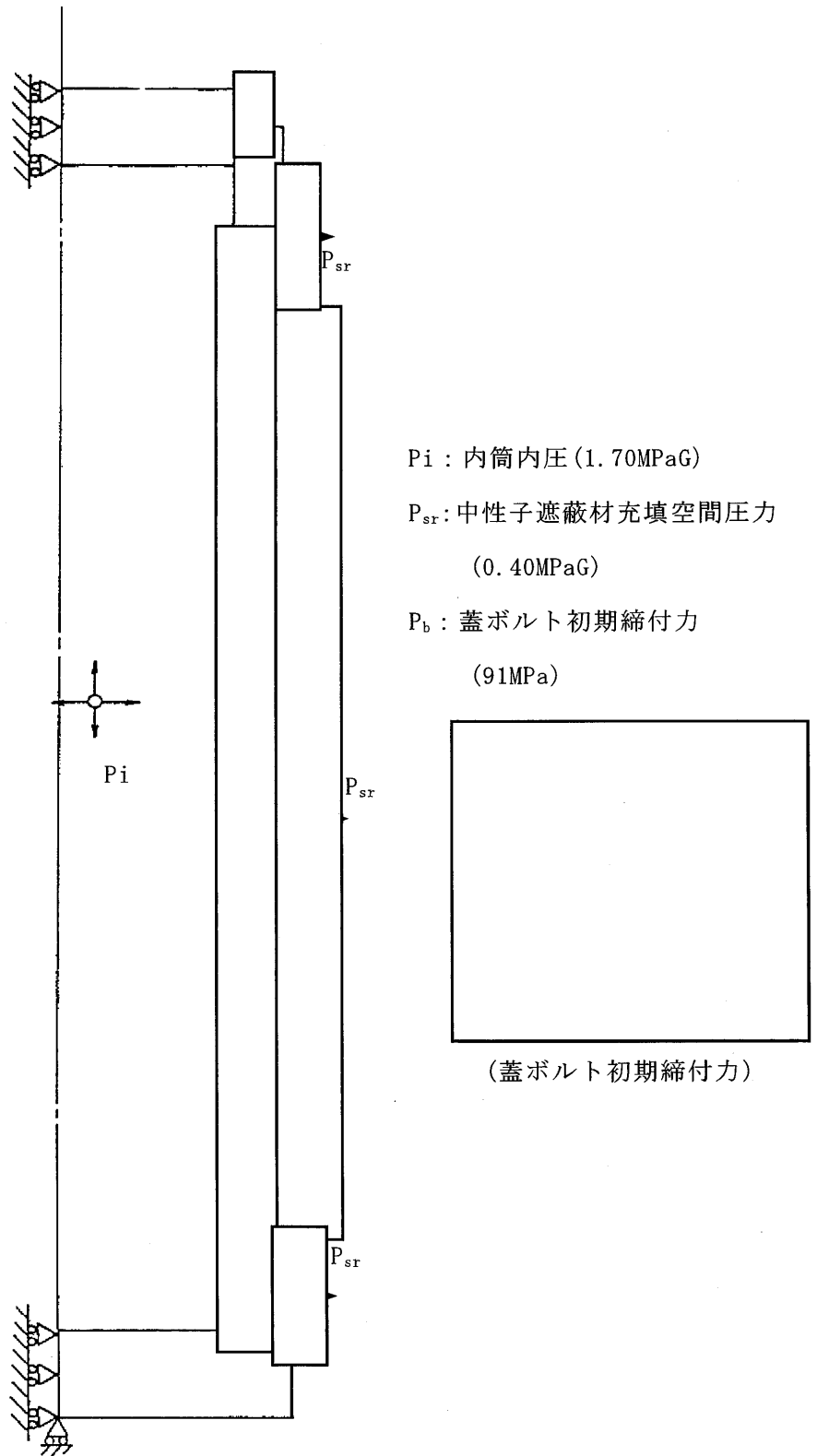
(ロ)-第 A. 8 図に示すように、底部の軸方向変位及び対称面上の法線方向変位を拘束し、他は変位自由とする。

3. 解析結果

熱応力と圧力による応力との組合せに対する応力評価は(ロ)章 A. 5. 1. 4 において行う。



(口)-第 A.7 図 三次元 180° 対称モデル



(口)-第 A. 8 図 一般の試験条件の熱的試験における荷重条件及び境界条件

A.5.1.3 応力計算

本項では、一般の試験条件の熱的試験における輸送容器本体各部の応力計算を行う。

輸送容器本体各部の応力は、温度勾配による応力及び内筒内圧による応力が考えられるが、ここでは内筒内圧による応力について解析する。

1. 解析モデル

(口)章 A.5.1.2 と同様に三次元有限要素を用いた(口)-第 A.7 図に示す三次元 180° 対称モデルを用いる。

2. 荷重条件及び境界条件

(1) 荷重条件

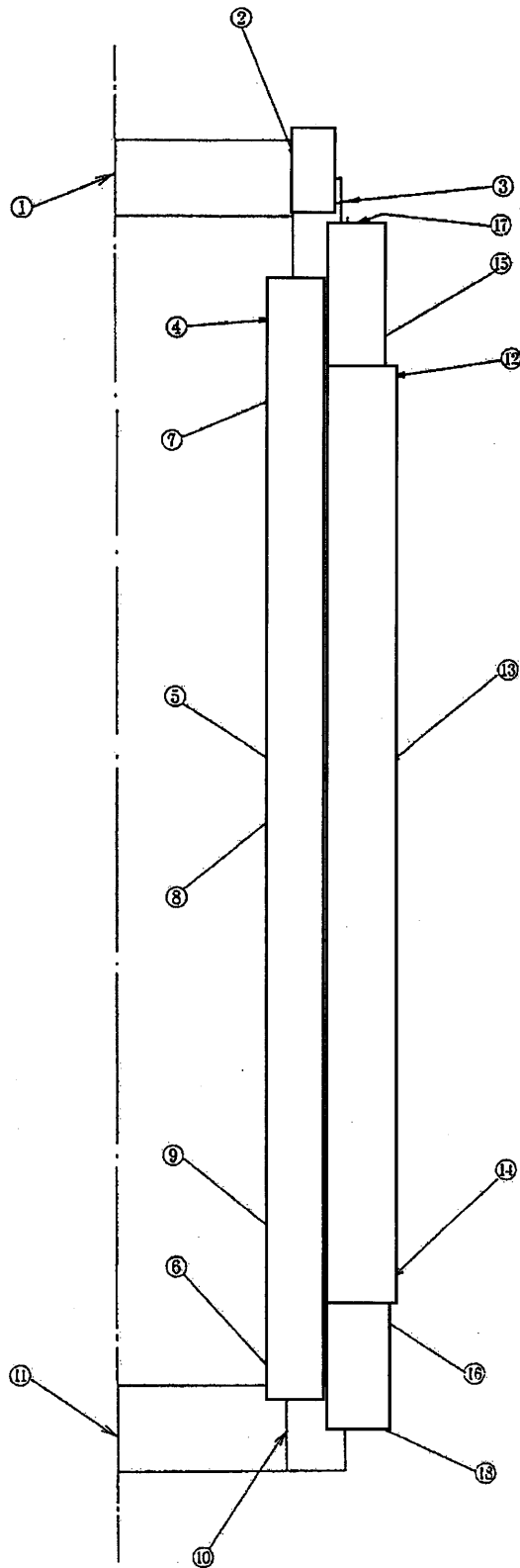
(口)-第 A.8 図に示すように、容器内に 1.70MPaG の内筒内圧を作用させる。また、(口)章 A.5.1.2 と同様に蓋ボルトには初期締付トルクによる引張応力を考慮する。

(2) 境界条件

境界条件は底部の軸方向変位及び対称面上の法線方向変位を拘束し、他は変位自由とする。

3. 解析結果

(口)-第 A.9 図に示す主要な評価位置における内筒内圧による応力の評価結果を(口)-第 A.9 表に示す。表に示すように、いずれの応力も(口)章 A.1.2 に定めた解析基準値以下である。



評価断面	部 位
①	蓋中央部
②	蓋 端 部
③	フランジ
④	内筒上部
⑤	内筒中央部
⑥	内筒下部
⑦	中間筒上部
⑧	中間筒中央部
⑨	中間筒下部
⑩	底板端部
⑪	底板中央部
⑫	外筒上部
⑬	外筒中央部
⑭	外筒下部
⑮	上部仕切板
⑯	下部仕切板
⑰	上部ノズルカバー
⑱	下部ノズルカバー

(口)-第 A.9 図 一般の試験条件の熱的試験における応力評価位置

(ロ)-第 A.9 表 一般の試験条件における内筒内圧による容器本体の一次応力の評価

部位	断面 No. ^{注1)}	応力分類 ^{注2)}	表面	応力 強さ (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) ^{注3)}	余裕率 MS (-)
蓋	①	P _m	—	1.18	170		
		P _L +P _b	内	14.8			
			外	14.6			
	②	P _L	—	11.0			
フランジ	③	P _L	—	7.31	170		
内筒	④	P _L	—	13.1	180		
	⑤	P _m	—	12.1			
	⑥	P _L	—	13.5			
中間筒	⑦	P _L	—	8.65	170		
	⑧	P _m	—	7.56			
	⑨	P _L	—	8.08			
底板	⑩	P _L	—	3.02	180		
	⑪	P _m	—	1.52			
		P _L +P _b	内	4.08			
			外	6.93			
外筒	⑫	P _L	—	16.3	140		
	⑬	P _m	—	21.5			
	⑭	P _L	—	16.2			
仕切板	⑮	P _L	—	5.60	160		
	⑯	P _L	—	5.44			
レジン カバー	⑰	P _L	—	8.24	160		
	⑱	P _L	—	8.57			

注 1) (ロ)-第 A.9 図参照

注 2) P_m : 一次一般膜応力強さ、P_L : 一次局部膜応力強さ、P_b : 一次曲げ応力強さ

注 3) P_m に対する基準値は S_m、P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は 1.5S_m である。

A.5.1.4 許容応力との比較

1. 容器本体各部

(ロ)章 A.5.1.2 で求めた熱応力と内筒内圧による応力の組合せに対する容器本体の(一次+二次)応力と蓋ボルトの評価結果を(ロ)-第 A.10 表に示す。この表から明らかなように、容器本体及び蓋ボルトは(ロ)章 A.1.2 の基準を満足し、健全性を保つ。なお、蓋ボルトの応力は 170℃における設計降伏点 ()MPa より低いので、蓋ボルトは塑性変形しない。

なお、蓋ボルトは蓋と異なる材質のため、運搬中に予想される-20℃から 38℃の周囲温度の変化により軸力が変化する。仮に周囲温度-20℃で蓋ボルトを締め付けた後 38℃に置かれた場合は、ステンレス鋼製の蓋と合金鋼製の蓋ボルトの熱膨張係数の差により蓋ボルトの軸力が約 20%増加するものの余裕率が 0.20 以上あるため、また、周囲温度 38℃で締め付けた後に-20℃に置かれた場合には、軸力が約 20%低下するものの O リングを締め付けるために必要な軸力を維持しているため、蓋ボルトに緩みや破損を生じることはない。

また、蓋とフランジとの蓋 O リング位置における相対口開き変形量は 0.05mm 以下であり、O リングの初期締付代 2.5mm より小さく密封性を損なうことはない。

次に、疲労強度について評価する。

容器本体各部及び蓋ボルトの繰返しピーク応力強さ S_p (MPa) は疲労強度減少係数を考慮して次のように求められる。

$$S_p = \frac{S}{2} \times k_f \times \frac{E_o}{E}$$

ただし、

S : (ロ)-第 A.10 表に示される応力強さ (MPa)

k_f : 設計・建設規格 ¹⁾PVB-3130 に示される疲労強度減少係数の最大値

(容器本体 : $k_f=5$ 、蓋ボルト : $k_f=4$)

E_o : 設計疲労線図に示される基準縦弾性係数 (MPa)

E : 最高温度での縦弾性係数 (MPa)

S_p に対する許容繰返し回数は各材料に対して設計・建設規格 ¹⁾添付 4-2 に示される設計疲労線図より与えられる。代表的な箇所における容器本体各部及び蓋ボルトに対する評価結果を(ロ)-第 A.11 表に示す。

輸送容器の使用予定回数の 400 回は、(ロ)-第 A.11 表に示すようにいずれの許容繰返し回数より小さく、疲労強度は十分である。

以上より、輸送容器本体各部及び蓋ボルトの疲労破壊が生じるおそれはない。

(ロ)-第 A. 10 表 一般の試験条件における熱及び内筒内圧による容器本体の

(一次+二次)応力及び蓋ボルトの評価(1/2)

部位	断面 No.注 1)	表面	応力 強さ (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa)注 2)	余裕率 MS (-)
蓋	①	内	18.4	170		
		外	13.1			
	②	内	25.9			
		外	49.3			
フランジ	③	内	46.6	170		
		外	62.7			
内筒	④	内	288	180		
		外	237			
	⑤	内	282			
		外	238			
	⑥	内	285			
		外	174			
中間筒	⑦	内	152	170		
		外	139			
	⑧	内	157			
		外	145			
	⑨	内	157			
		外	157			
底板	⑩	内	85.9	180		
		外	134			
	⑪	内	79.4			
		外	47.9			

注 1) (ロ)-第 A. 9 図参照

注 2) 基準値は 3Sm である。

(ロ)-第 A. 10 表 一般の試験条件における熱及び内筒内圧による容器本体の
(一次+二次)応力及び蓋ボルトの評価(2/2)

部 位	断面 No. 注 1)	表 面	応 力 強 さ (MPa)	温 度 (°C)	解 析 基 準 値 (MPa) 注 2)	余 裕 率 MS (-)
外 筒	⑫	内	245	140		
		外	222			
	⑬	内	175			
		外	53.8			
	⑭	内	281			
		外	243			
仕 切 板	⑮	内	30.8	160		
		外	84.3			
	⑯	内	83.6			
		外	118			
レ ジ ン カ バ ー	⑰	内	144	160		
		外	148			
	⑱	内	162			
		外	169			
蓋 ボ ル ト	σ_m		189	170		
	$\sigma_m + \sigma_b$		315			

注 1) (ロ)-第 A. 9 図参照

注 2) 蓋ボルトを除く基準値は 3Sm である。

蓋ボルトの基準値は σ_m に対して 2Sm、 $\sigma_m + \sigma_b$ に対して 3Sm である。

(ロ)-第 A. 11 表 一般の試験条件における容器本体各部の疲労評価

部 位	断面 No. ^(注)	(一次+二次) 応力強さ (MPa)	温度 (°C)	繰返しピーク 応力強さ (MPa)	許容繰返し 回数 (回)	使用予定 回数 (回)
蓋及びフランジ	③	62.7	170	166	$>1.0 \times 10^6$	400
内 筒	④	288	180	763	1.3×10^3	
中 間 筒	⑨	157	170	421	2.3×10^3	
底 板	⑩	134	180	355	2.9×10^4	
外 筒	⑭	281	140	746	4.7×10^2	
仕 切 板	⑯	118	160	311	5.7×10^4	
レジンカバー	⑱	169	160	445	9.6×10^3	
蓋 ボ ル ト	-	315	170	717	9.3×10^2	

注) (ロ)-第 A. 9 図参照

2. 伝熱フィン

レジンの熱膨張により外筒は半径方向に押し広げられるので、外筒に接続している伝熱フィンには引張応力が発生する。外筒はレジンの熱膨張を拘束し伝熱フィンの応力を減少させるので、ここでは安全側に外筒の拘束を無視するとレジンと伝熱フィンとの熱膨張差による応力は次の関係式より求められる。

$$\sigma_1 = \frac{E_1 E_2 t_2}{E_1 t_1 + E_2 t_2} (\alpha_2 - \alpha_1) \times (T - T_0)$$

ただし、

- σ_1 : 伝熱フィンに生じる引張応力 (MPa)
- E_1 : 伝熱フィンの縦弾性係数 (MPa)
- E_2 : レジンの周方向拘束の場合の縦弾性係数 (MPa)
- t_1 : 伝熱フィンの板厚 (mm)
- t_2 : レジンの平均厚み (mm)
- α_1 : 伝熱フィンの熱膨張係数 (1/°C)
- α_2 : レジンの熱膨張係数 (1/°C)
- T : 伝熱フィンとレジンの平均温度 (°C)
- T_0 : 常温 (20°C)

レジンの縦弾性係数については伝熱フィンに囲まれて周方向に変形が拘束されるので、次式により修正する。

$$E_2 = \frac{E_r}{1 - \nu_r^2}$$

ただし、

- E_r : レジンの縦弾性係数 (MPa)
- ν_r : レジンのポアソン比

ここで、

$$E_1 = 1.06 \times 10^5 \text{ MPa}$$

$$t_1 = \square \text{ mm}$$

$$t_2 = \pi (\square + \square) / \square - \square = \square \text{ mm}$$

$$\alpha_1 = 17.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

$$\alpha_2 = \square / ^\circ\text{C}$$

$$E_r = \square \text{ MPa}$$

$$\nu_r = \boxed{}$$

$$T = 156^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 20^\circ\text{C}$$

したがって、

$$E_2 = \boxed{} \text{MPa}$$

$$\sigma_1 = 14.5 \text{MPa}$$

伝熱フィン材料の 160°C における降伏応力 σ_y は 136MPa であり、引張強さ σ_u は 177MPa であるので、設計・建設規格¹⁾に従い、(一次+二次)応力強さに対する基準値は以下のようなになる。

$$3Sm = 3 \times \min(\sigma_y/1.5, \sigma_u/3) = 3 \times 59 = 177 \text{MPa}$$

したがって、余裕率 MS は次のようになる。

$$\begin{aligned} MS &= \frac{3Sm}{\sigma_1} - 1 = \frac{177}{14.5} - 1 \\ &= 11.2 \end{aligned}$$

次に疲労強度について評価する。

伝熱フィン $\boxed{}$ の疲労強度減少係数 S_c を 4 とすると、繰返しピーク応力強さ S_p は、

$$S_p = \frac{1}{2} (\sigma_1 \times S_c) \times \frac{E_0}{E}$$

ここで、

$$E_0 : \text{基準縦弾性係数} = 1.38 \times 10^5 \text{MPa}$$

$$E : \text{使用温度}(160^\circ\text{C})\text{における縦弾性係数} = 1.05 \times 10^5 \text{MPa}$$

$$\begin{aligned} S_p &= \frac{1}{2} \times 14.5 \times 4.0 \times \frac{1.38 \times 10^5}{1.05 \times 10^5} \\ &= 38.1 \text{MPa} \end{aligned}$$

これに対する許容繰返し回数 N_a は設計・建設規格¹⁾図 添付 4-2-3 より、

$$N_a > 1 \times 10^6$$

容器の使用予定回数 400 回は、許容繰返し回数より小さく疲労強度は十分である。以上により、伝熱フィンの疲労破壊が生じるおそれはない。

A.5.2 水噴霧

本容器の外側はステンレス鋼製であり、水噴霧に対して吸水による脆化により密封性が損なわれることや、水溜まりによる腐食が発生することがないため線量当量率の増加等を生じることはない。

A. 5.3 自由落下

ここでは、(ロ)章 A. 1.2 のうち、一般の試験条件の自由落下試験において規則及び告示に規定された輸送物の健全性について評価を行う。本輸送物の最大総重量は 115 トンであるため、告示により、落下高さは 0.3m となる。

輸送物が 0.3m 落下した場合、その落下エネルギーが容器本体の上下部に取り付けられた緩衝体の変形によって吸収される。

本項では、自由落下試験時の緩衝体の変形量及び衝撃加速度について評価し、輸送容器の健全性を評価する。

緩衝体の変形量及び衝撃加速度の解析条件を以下に述べる。

1. 解析モデル

(1) 解析する落下姿勢

輸送物の落下姿勢として次の 3 種類を考える。((ロ)-第 A.10 図参照)

- ① 垂直落下
- ② 水平落下
- ③ コーナー落下

(2) 解析方法

- ① 輸送物の落下エネルギーは緩衝体の弾塑性変形によって全て吸収されるものとする。この仮定では、緩衝体を除いた輸送物及び落下試験台を剛体とし、落下エネルギーの振動や熱等への消費を無視することになるので、落下による緩衝体の変形を大きく評価し安全側の解析となる。
- ② 解析に用いる輸送物の重量に関する数値は、(イ)章 C.5 で示した輸送物最大総重量 115 トンを用いる。

落下エネルギーは次式で与えられる。

$$E_k = W \times g \times H$$

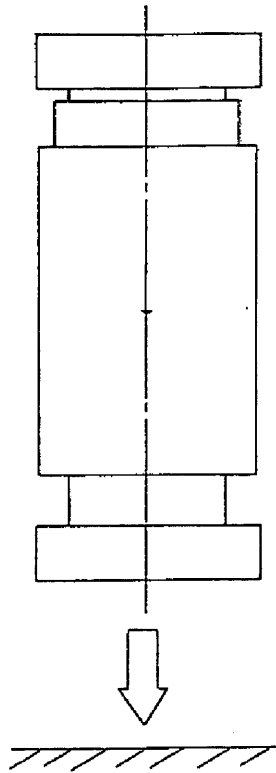
ただし、

E_k : 輸送物の落下エネルギー (N・mm)

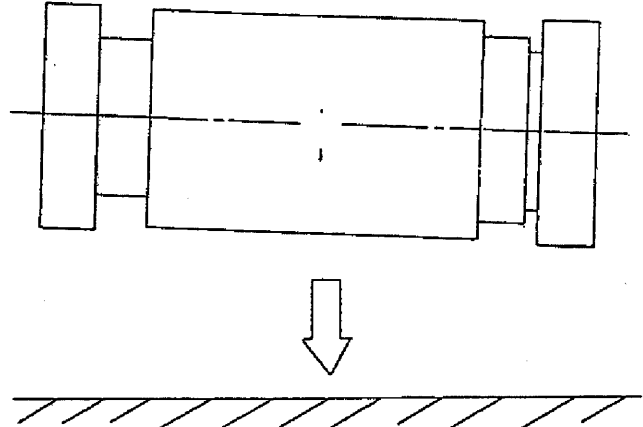
W : 輸送物最大総重量 (kg)

g : 重力加速度 (m/s²)

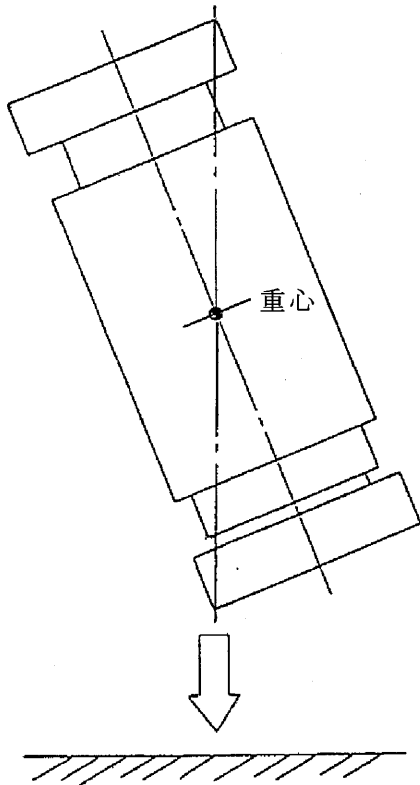
H : 落下高さ (mm)



垂直落下



水平落下



コーナー落下

(口)-第 A. 10 図 0.3m 落下試験での落下姿勢

ここで、

$$W = 115 \times 10^3 \text{kg}$$

$$g = 9.8 \text{m/s}^2$$

$$H = 3.0 \times 10^2 \text{mm}$$

したがって、

$$\begin{aligned} E_k &= 115 \times 10^3 \times 9.8 \times 3.0 \times 10^2 \\ &= 3.38 \times 10^8 \text{N} \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

- ③ 緩衝体は(イ)-第 C. 14 図及び(イ)-第 C. 15 図に示すとおり、カバープレート及び内部のリブがステンレス鋼板(SUS304)製であり、カバープレートで囲まれた空間には [] 及び [] が詰められている。
- ④ 緩衝体の変形量と衝撃力の計算は CRUSH コード¹⁸⁾を用いて行う。このコードにおいてはエネルギー吸収に寄与する部材は安全側に内部の木材のみとして、緩衝体の変形量を単軸変形法(UDM)により求めている。
- ⑤ 衝撃力については解析と実験との比較検証により得られた誤差±20%を考慮した負荷係数 1.2¹⁸⁾を④で求められる衝撃力に乗じる。さらに、変形領域内に存在する内部のリブによる衝撃力を加算する。これは内部のリブのステンレス鋼の平均圧潰応力(設計降伏点と設計引張強さの平均=363MPa)にリブの断面積を乗じて求められる。
- ⑥ 木材の場合、圧潰特性は異方性を持つ。木材([]及び[])の積層(又は木目)方向と、積層(又は木目)方向と直角方向における圧潰特性を(ロ)-第 A. 11 図に示す。積層(又は木目)方向とある角度を持つ落下方向に対しては、次式により異方性の影響を考慮する。

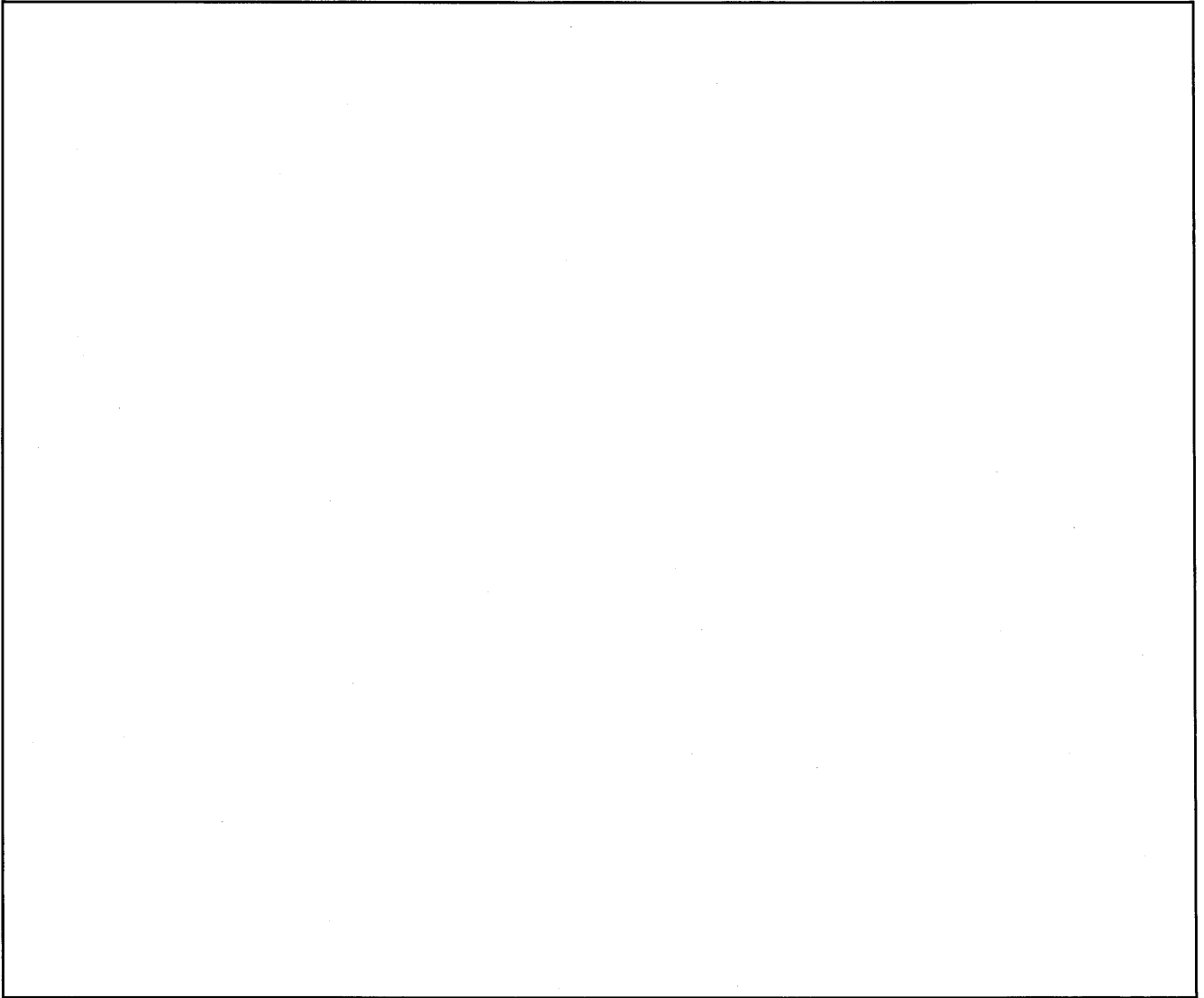
$$\sigma_{\theta} = \sigma_0 \times \cos^2 \theta + \sigma_{90} \times \sin^2 \theta$$

ここで、

σ_{θ} : 積層(又は木目)方向と角度 θ 傾斜した方向の圧潰応力

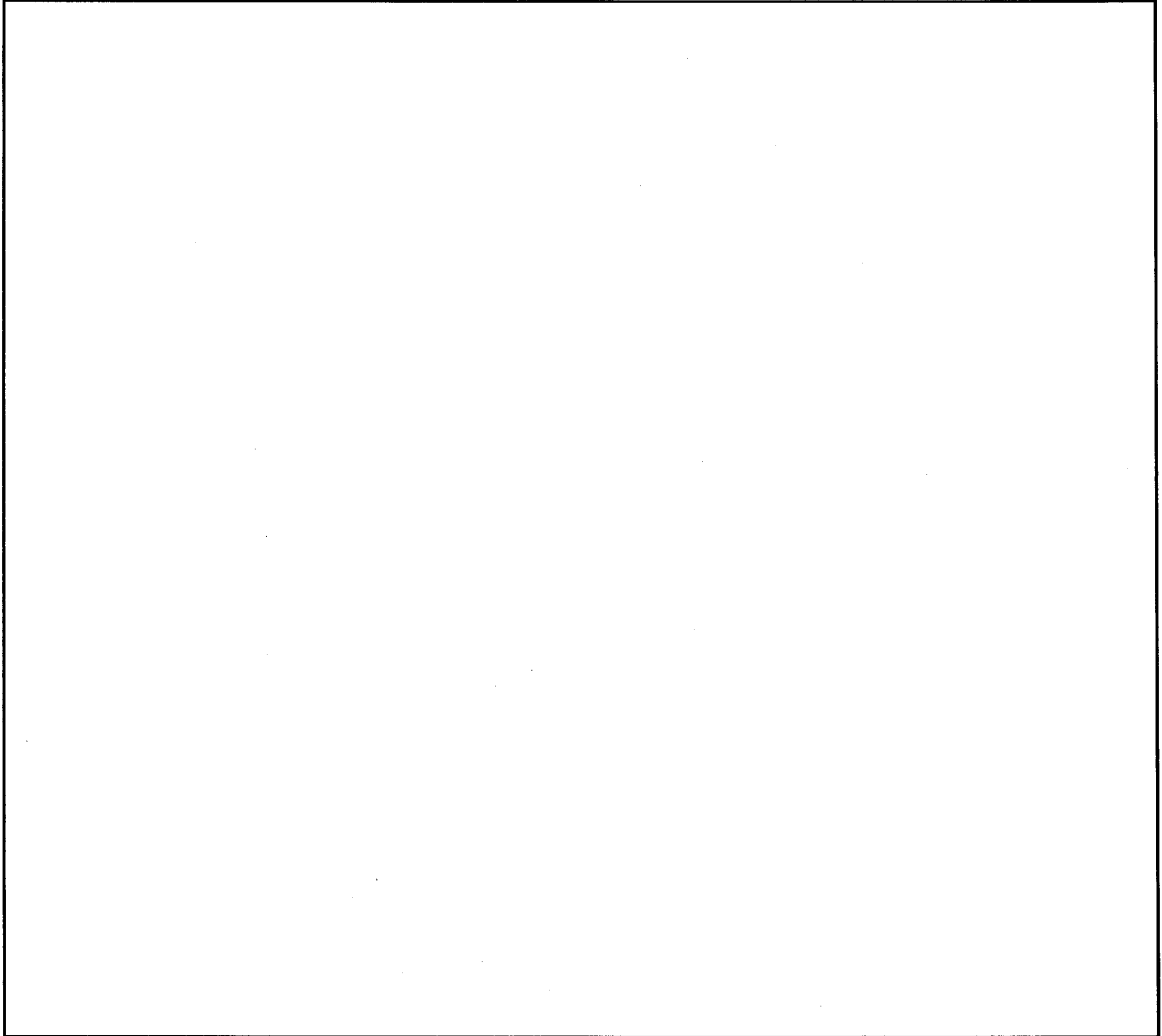
σ_0 : 積層(又は木目)方向の圧潰応力

σ_{90} : 積層(又は木目)方向と直角方向の圧潰応力



(a)

(口)-第 A.11 図 木材の圧潰特性(1/2)



(b)

(口)-第 A. 11 図 木材の圧潰特性 (2/2)

(3) 垂直落下時の緩衝体の変形量と衝撃加速度

a. 頭部垂直落下

解析モデルを(ロ)-第 A. 12 図に示す。斜線を施した部分、すなわち緩衝体内の木材が深さ δ だけ圧潰して落下エネルギーを吸収するものとする。

(2)に示した方法により求めた変形量と吸収エネルギー及び衝撃力との関係を(ロ)-第 A. 13 図に示す。

(ロ)-第 A. 13 図より、落下エネルギー E_k に対応する変形量は 11.4mm であり、衝撃加速度 G_v は次のようになる。

$$\begin{aligned} G_v &= \frac{F}{W} \\ &= \frac{6.07 \times 10^7}{115 \times 10^3} \\ &= 528 \text{m/s}^2 \end{aligned}$$

ここで、

F : 衝撃力 (N)

W : 輸送物最大総重量 (kg)

b. 底部垂直落下

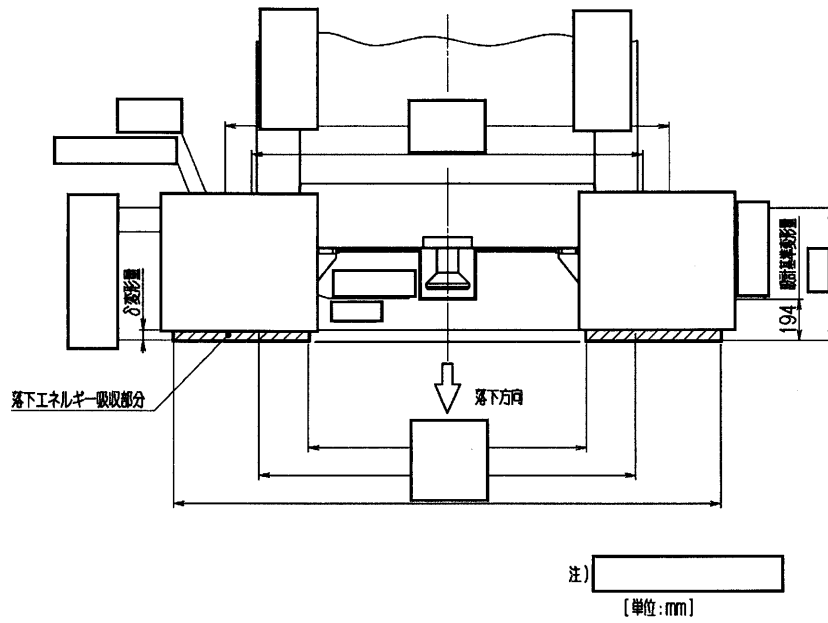
(ロ)-第 A. 14 図に底部垂直落下時の解析モデルを示す。a. と同様にして求めた変形量と吸収エネルギー及び衝撃力との関係を(ロ)-第 A. 15 図に示すが、落下エネルギー E_k に対応する変形量は 11.7mm であり、衝撃加速度 G_v は次のようになる。

$$\begin{aligned} G_v &= \frac{F}{W} \\ &= \frac{5.97 \times 10^7}{115 \times 10^3} \\ &= 519 \text{m/s}^2 \end{aligned}$$

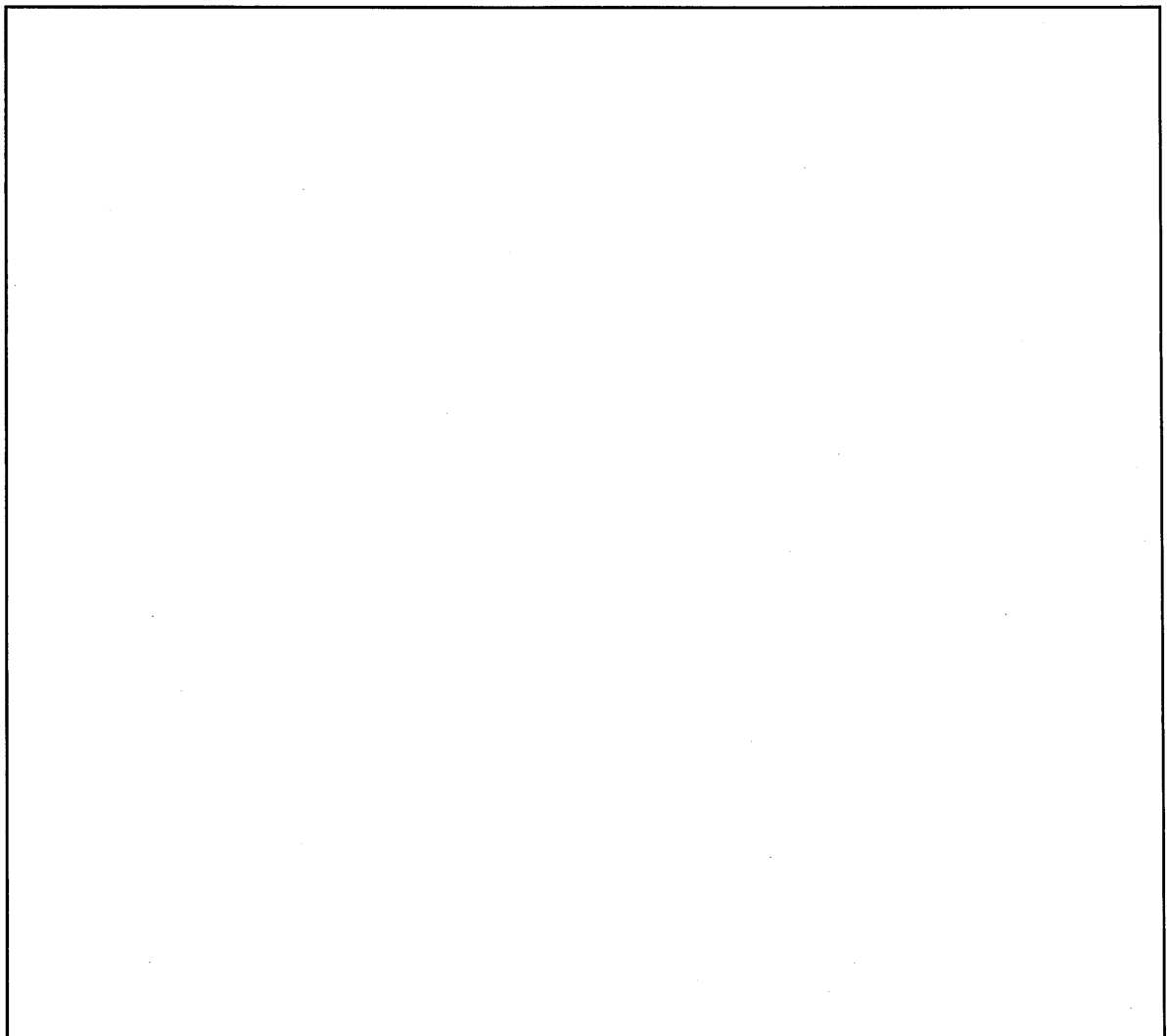
ここで、

F : 衝撃力 (N)

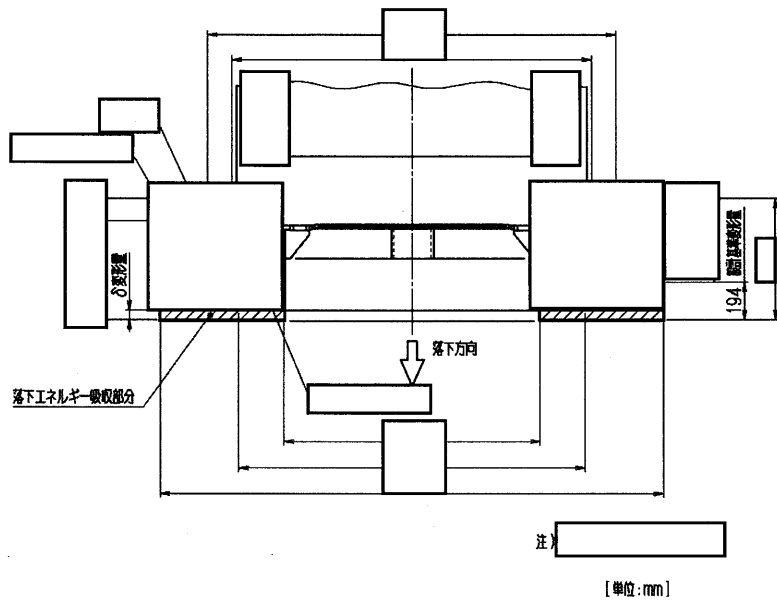
W : 輸送物最大総重量 (kg)



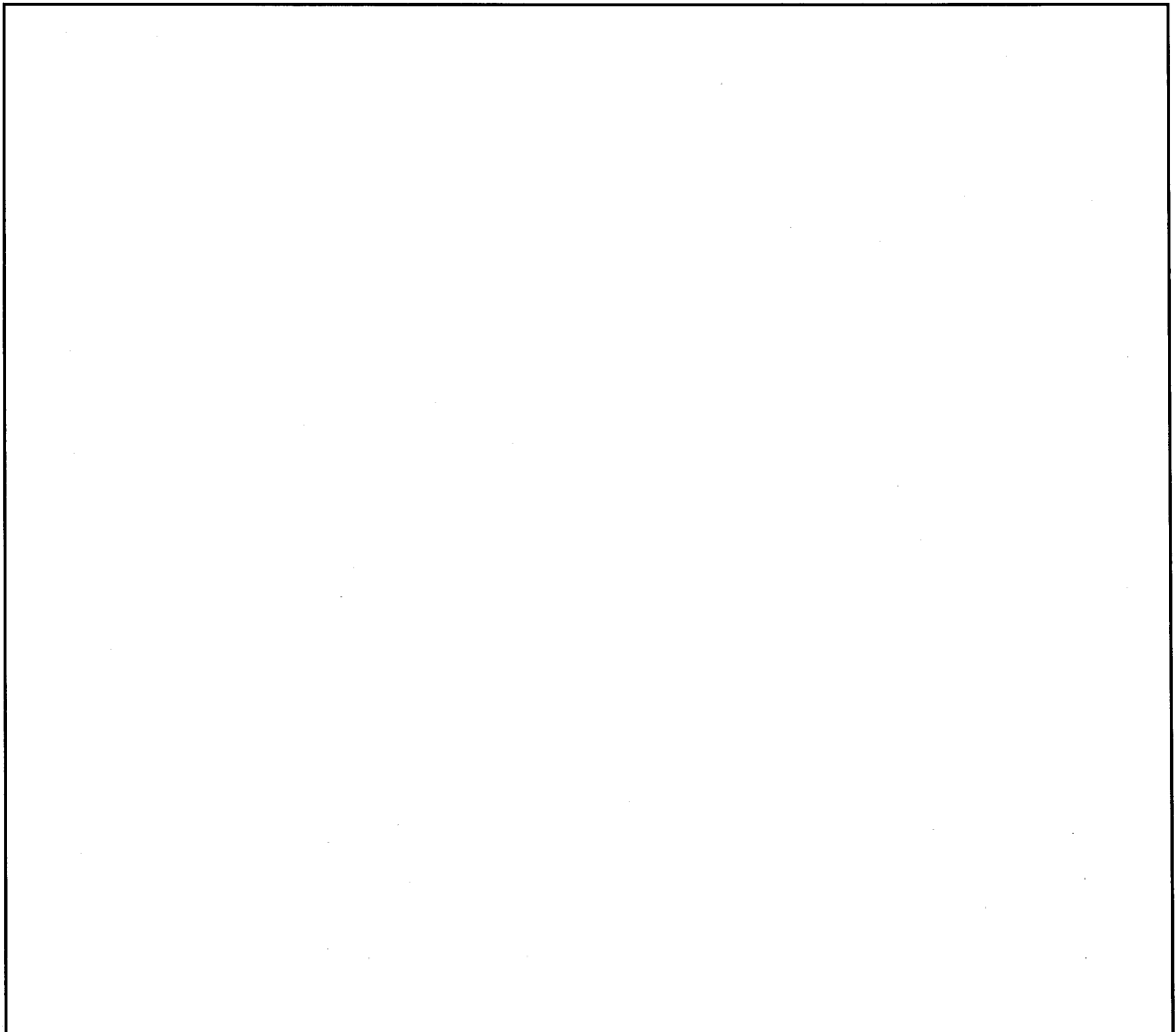
(ロ)-第 A. 12 図 頭部垂直落下解析モデル



(ロ)-第 A. 13 図 頭部垂直落下時の変形量と吸収エネルギー及び衝撃力との関係



(ロ)-第 A. 14 図 底部垂直落下解析モデル



(ロ)-第 A. 15 図 底部垂直落下時の変形量と吸収エネルギー及び衝撃力との関係

(4) 水平落下時の緩衝体の変形量と衝撃加速度

解析モデルを(口)-第 A. 16 図に示す。図において斜線を施した部分の木材が圧潰して落下エネルギーを吸収するものとする。

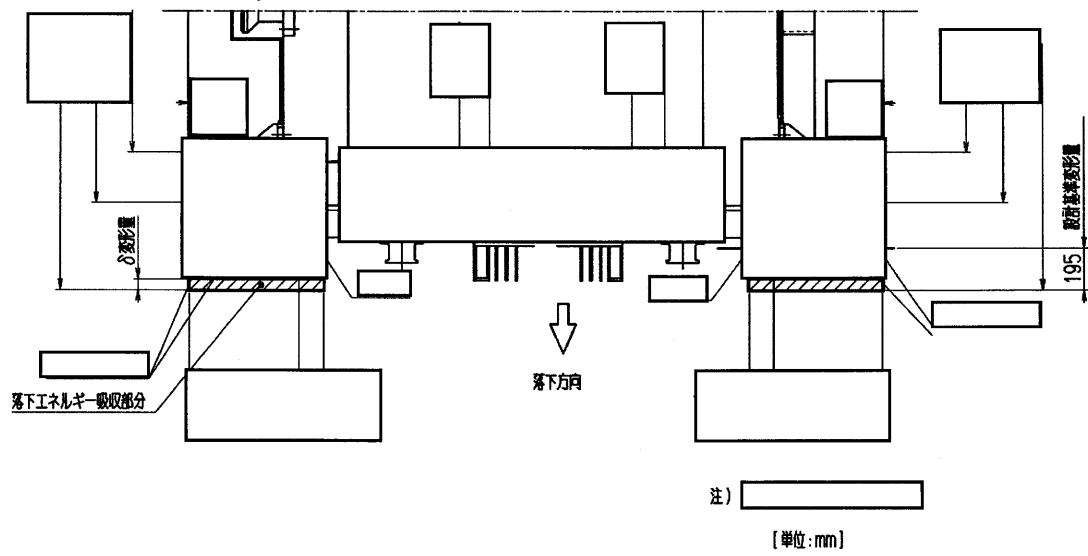
変形量と吸収エネルギー及び衝撃力との関係を(口)-第 A. 17 図に示す。図より、落下エネルギー E_k に対応する変形量は 38.4mm であり、衝撃加速度 G_H は次のようになる。

$$\begin{aligned} G_H &= \frac{F}{W} \\ &= \frac{2.23 \times 10^7}{115 \times 10^3} \\ &= 194 \text{m/s}^2 \end{aligned}$$

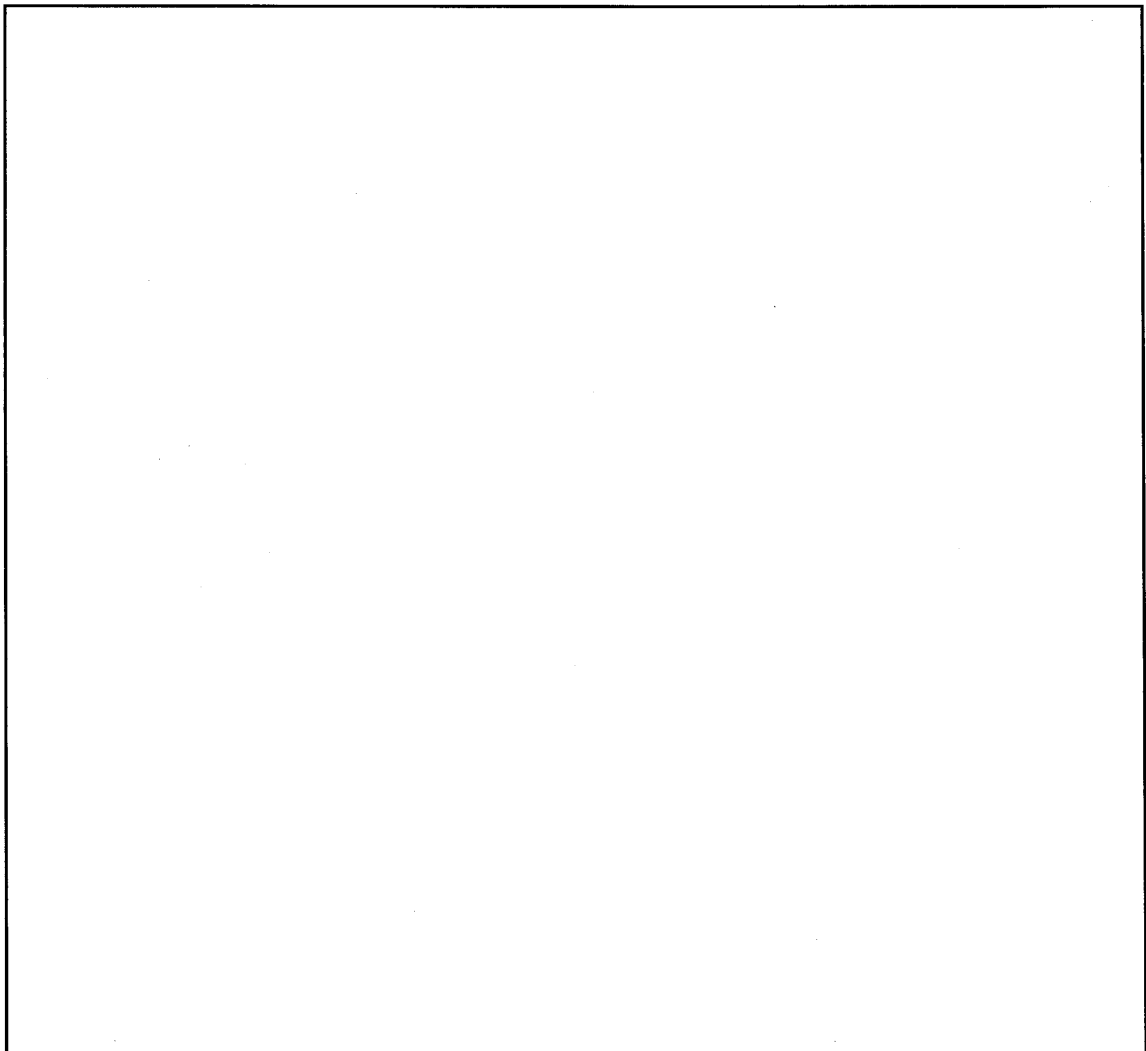
ここで、

F : 衝撃力 (N)

W : 輸送物最大総重量 (kg)



(口)-第 A. 16 図 水平落下解析モデル



(口)-第 A. 17 図 水平落下時の変形量と吸収エネルギー及び衝撃力との関係

(5) コーナー落下時の緩衝体の変形量と衝撃加速度

a. 頭部コーナー落下

(ロ)章 A. 2 で述べたように輸送物の頭部コーナーと重心を結ぶ直線及び中心軸のなす角は 22.5° である。

(ロ)-第 A. 18 図に示す解析モデルにおいて斜線を施した部分の木材が圧潰して落下エネルギーを吸収するものとする。

変形量と吸収エネルギー及び衝撃力との関係を(ロ)-第 A. 19 図に示す。図より落下エネルギー E_k に対応する変形量は 133mm であり、衝撃加速度 G_c は次のようになる。

$$\begin{aligned} G_c &= \frac{F}{W} \\ &= \frac{8.15 \times 10^6}{115 \times 10^3} \\ &= 70.9 \text{m/s}^2 \end{aligned}$$

ここで、

F : 衝撃力 (N)

W : 輸送物最大総重量 (kg)

b. 底部コーナー落下

(ロ)章 A. 2 で述べたように輸送物の底部コーナーと重心を結ぶ直線及び中心軸のなす角は 22.7° である。

(ロ)-第 A. 20 図に示す解析モデルにおいて斜線を施した部分の木材が圧潰して落下エネルギーを吸収するものとする。

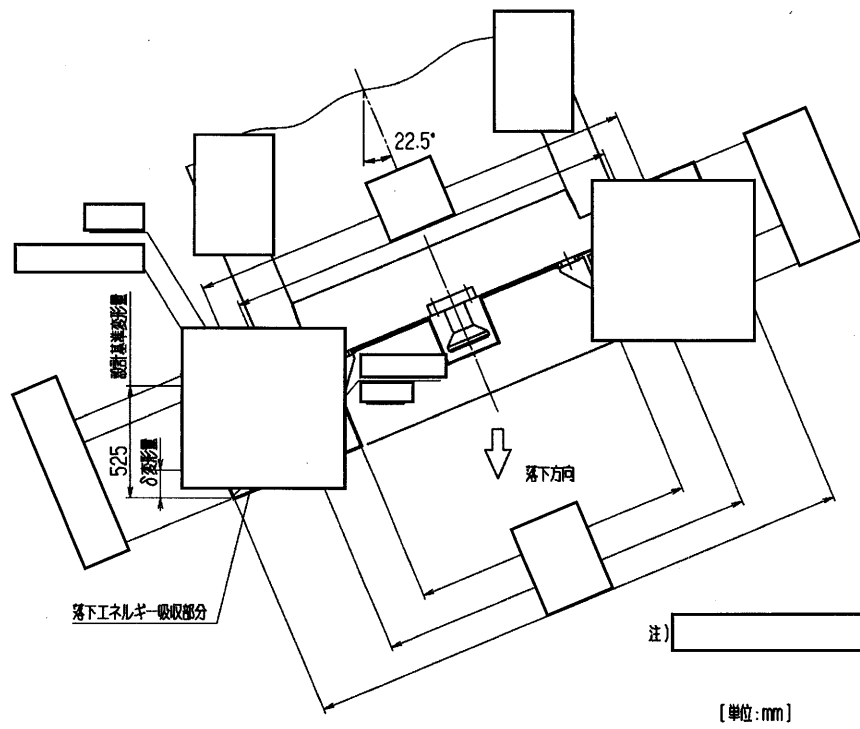
変形量と吸収エネルギー及び衝撃力との関係を(ロ)-第 A. 21 図に示す。図より落下エネルギー E_k に対応する変形量は 133mm であり、衝撃加速度 G_c は次のようになる。

$$\begin{aligned} G_c &= \frac{F}{W} \\ &= \frac{8.08 \times 10^6}{115 \times 10^3} \\ &= 70.3 \text{m/s}^2 \end{aligned}$$

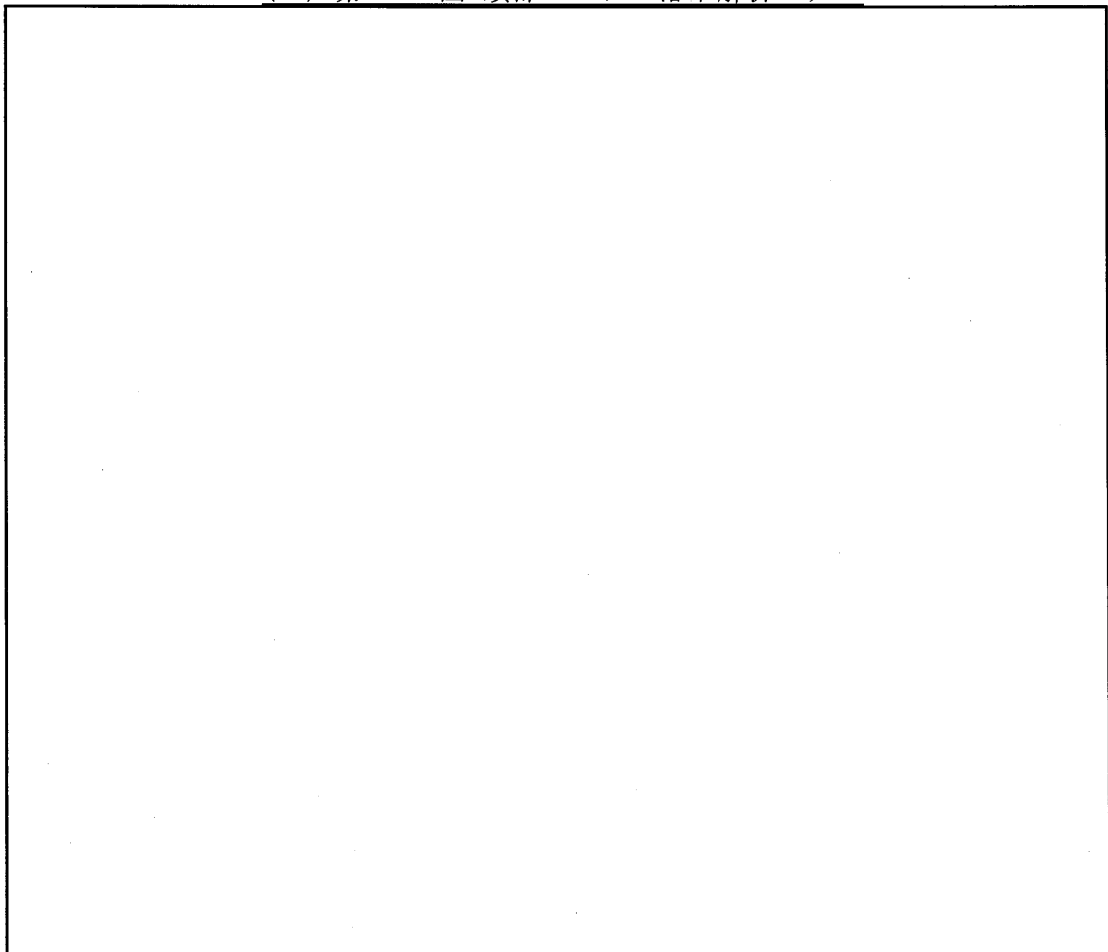
ここで、

F : 衝撃力 (N)

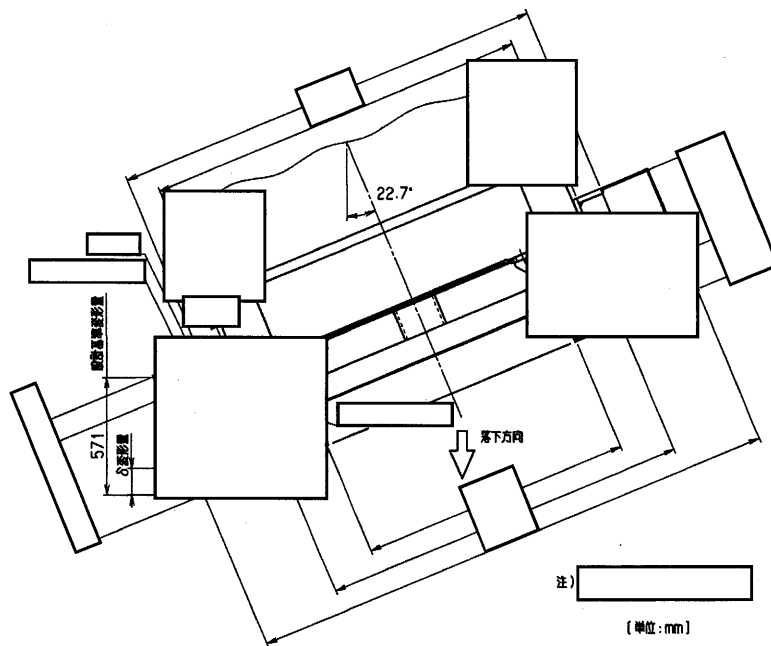
W : 輸送物最大総重量 (kg)



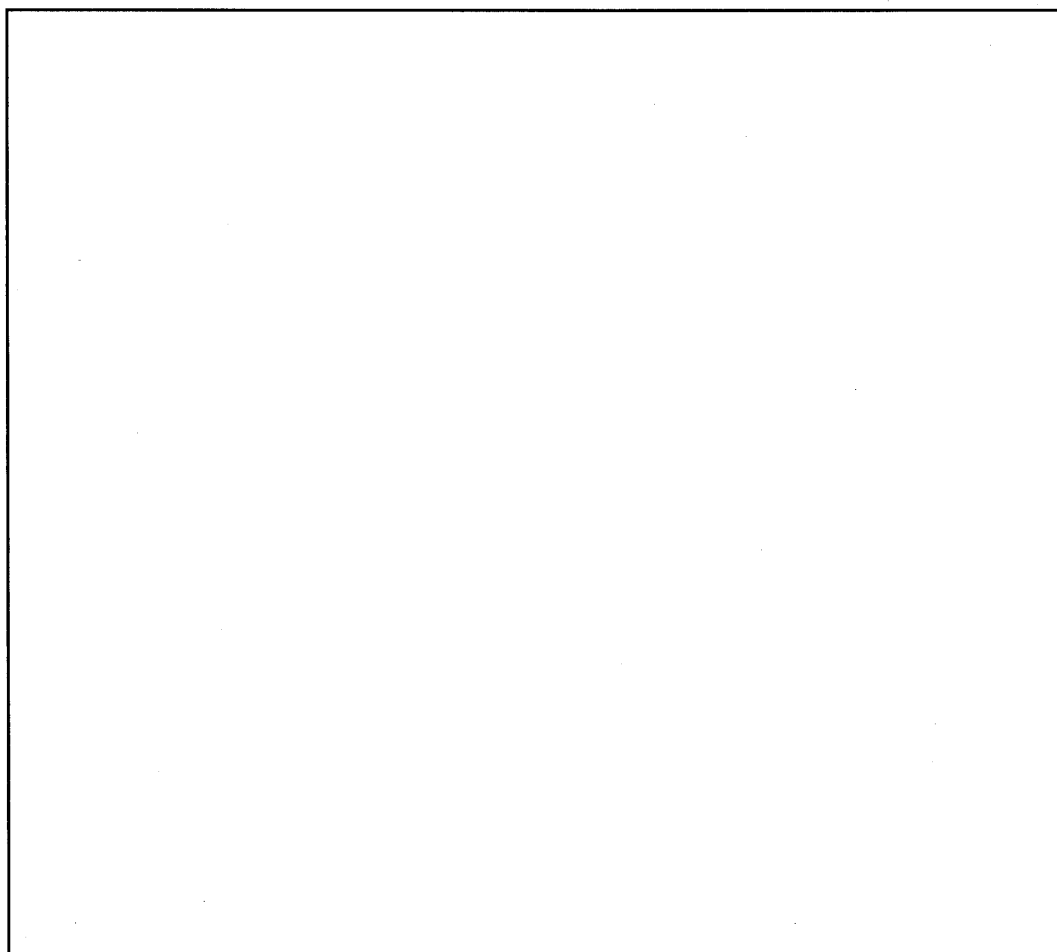
(ロ)-第 A. 18 図 頭部コーナー落下解析モデル



(ロ)-第 A. 19 図 頭部コーナー落下時の変形量と吸収エネルギー及び衝撃力との関係



(ロ)-第 A. 20 図 底部コーナー落下解析モデル



(ロ)-第 A. 21 図 底部コーナー落下時の変形量と吸収エネルギー及び衝撃力との関係

(6) 解析結果の要約

自由落下試験時の緩衝体の変形量と衝撃加速度の解析結果の要約を(ロ)-第 A.12 表に示す。

(ロ)-第 A.12 表に示すとおり、自由落下試験時に輸送物の緩衝体に圧潰変形が生じる。

しかし、緩衝材の熱伝導率は、他の金属のステンレス鋼等と比べて 2%以下と小さいため、断熱材としての効果が高く緩衝体からの放熱量は少ない。したがって、緩衝体に(ロ)-第 A.12 表に示すような変形が生じても輸送物全体の放熱特性への影響は微小である。また、変形がない方が輸送物の温度を高く評価できるため、一般の試験条件における熱解析においては、緩衝体の変形を無視する。

また、遮蔽解析においては緩衝体の変形を考慮して評価する。

(ロ)-第 A.12 表 自由落下試験時の衝撃加速度と緩衝体の変形量

落下姿勢		衝撃加速度 (m/s ²)	緩衝体の変形量 δ (mm)	設計基準変形量 ^{注)} δ max (mm)
垂直落下	頭部	528	11.4	194
	底部	519	11.7	194
水平落下		194	38.4	195
コーナー落下	頭部	70.9	133	525
	底部	70.3	133	571

注) 設計基準変形量とは、それぞれの落下方向において衝撃力を急激に上昇させないための設計上の基準値であり、垂直落下、水平落下及びコーナー落下でそれぞれ以下のとおり設定している。

垂直落下：緩衝体の表面から緩衝体の鋼板(内側リング)までの距離

水平落下：緩衝体の表面から外筒までの距離

コーナー落下：緩衝体の表面から緩衝体の鋼板(コーナー部)までの距離

2. 原型試験

該当なし

3. モデル試験

該当なし

A.5.3.1 垂直落下

0.3m 垂直落下時の衝撃力に対して、輸送容器の本体及び蓋は十分な強度で密封性を保持することを示す。輸送容器内部のツール等に対する評価は条件が厳しい 9m 落下試験に対して行うので、本項では省略する。

1. 輸送容器本体

垂直落下時の衝撃力に対する輸送容器本体の解析を有限要素法による ABAQUS コードにより行う。また、落下方向は頭部及び底部落下とする。

(1) 解析モデル

(ロ)章 A.5.1.3 と同様に、三次元有限要素を用いた(ロ)-第 A.7 図に示す三次元 180° 対称モデルを用いる。

(2) 荷重条件及び境界条件

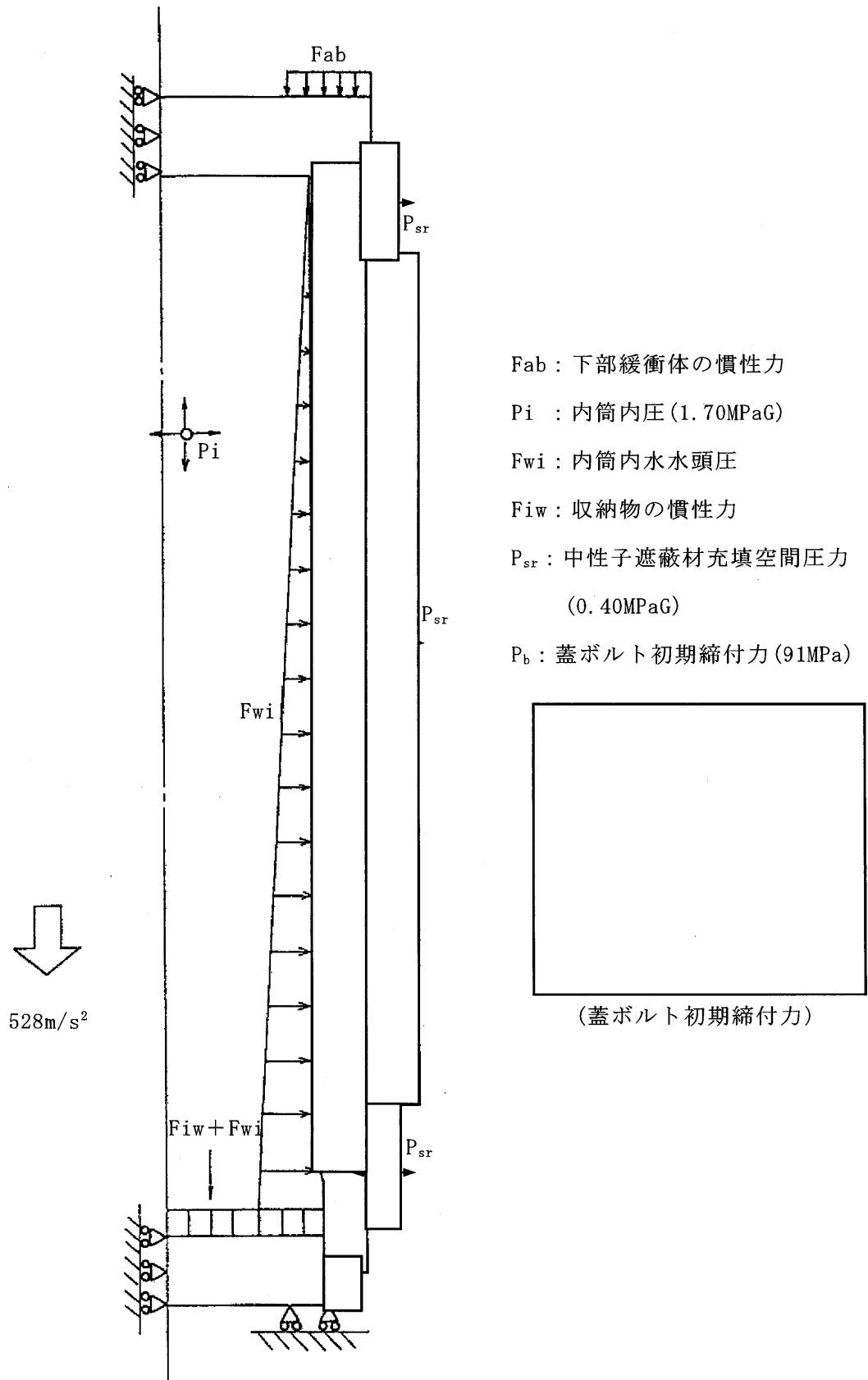
a. 荷重条件

頭部垂直落下時に作用する荷重は次のとおりである。衝撃加速度 (528m/s^2) による自重の慣性力が落下方向に働く。下部緩衝体の自重による慣性力が底部外面に働く。内部の収納物等(バスケット、収納物、内筒内水)の慣性力が蓋部内面へ、内筒内水の衝撃圧が内筒側面に働く。

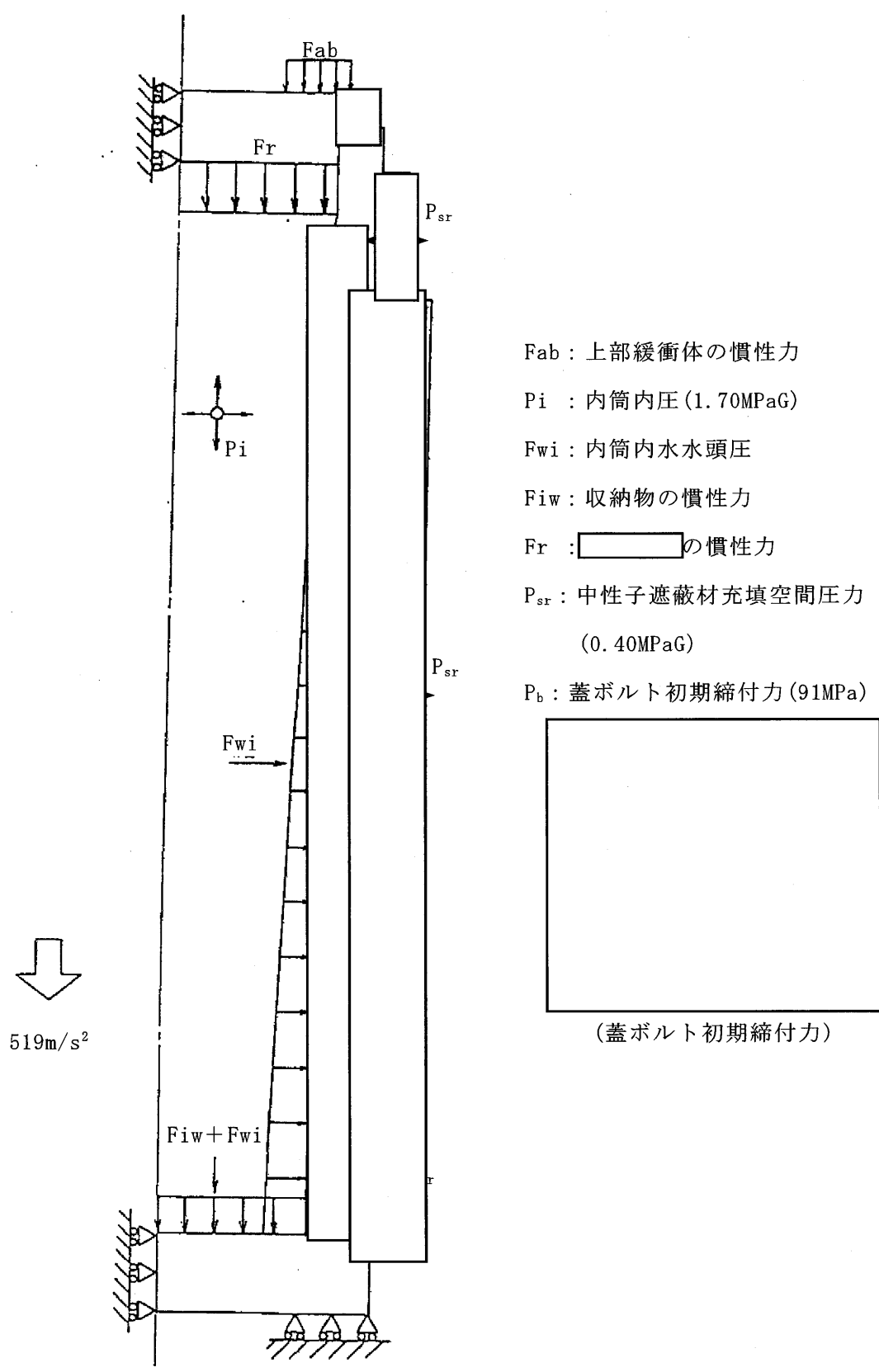
底部垂直落下時に作用する荷重は次のとおりである。衝撃加速度 (519m/s^2) による自重の慣性力が落下方向に働く。また、上部緩衝体の自重による慣性力が蓋外面に、の慣性力が蓋部内面に働く。内部の収納物等(バスケット、収納物、内筒内水)の慣性力が底部内面へ、内筒内水の衝撃圧が内筒側面に働く。

b. 境界条件

境界条件は衝撃力を受ける面の節点の軸方向変位及び対称面上の法線方向変位を拘束し、他は変位自由とした。それぞれの落下方向に対する荷重条件及び境界条件を(ロ)-第 A.22 図及び(ロ)-第 A.23 図に示す。



(口)-第 A. 22 図 頭部 0.3m 垂直落下時の荷重条件及び境界条件



- Fab : 上部緩衝体の慣性力
- Pi : 内筒内圧 (1.70MPaG)
- Fwi : 内筒内水水頭圧
- Fiw : 収納物の慣性力
- Fr : の慣性力
- Psr : 中性子遮蔽材充填空間圧力 (0.40MPaG)
- Pb : 蓋ボルト初期締付力 (91MPa)

(口)-第 A. 23 図 底部 0.3m 垂直落下時の荷重条件及び境界条件

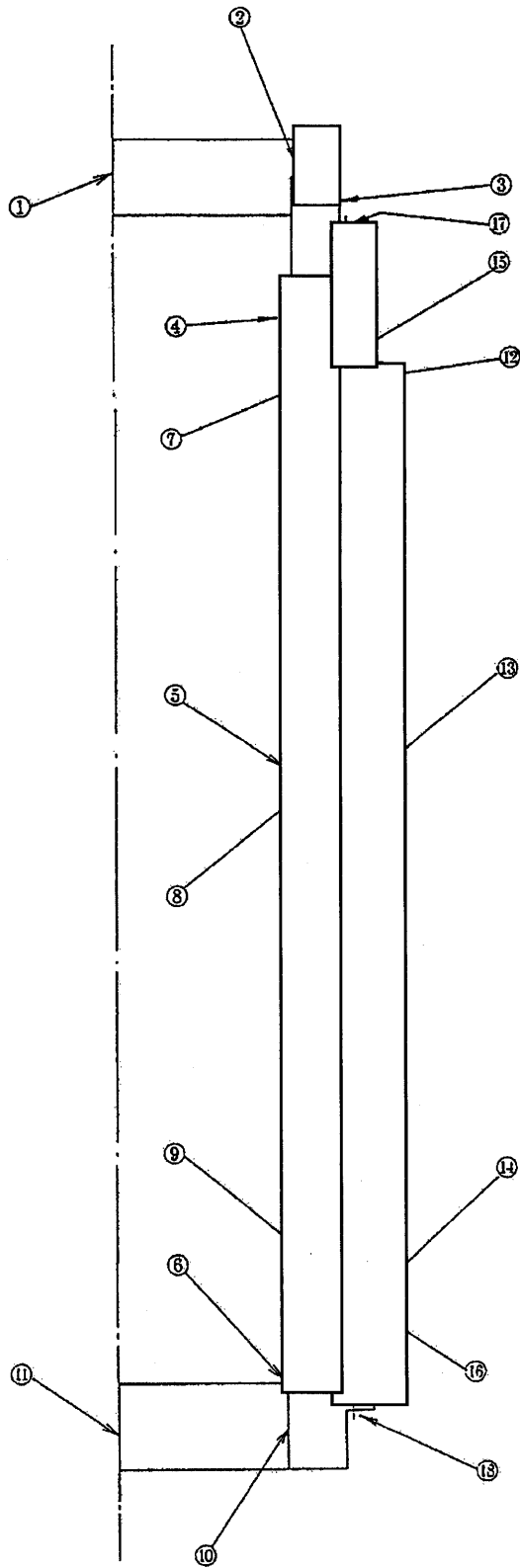
(3) 解析結果

頭部垂直落下時の主要な位置((口)-第 A. 24 図参照)に対する一次応力強さの評価結果を(口)-第 A. 13 表に、(一次+二次)応力強さ及び蓋ボルトの評価結果を(口)-第 A. 14 表に、底部垂直落下時の主要な位置((口)-第 A. 25 図参照)に対する一次応力強さの評価結果を(口)-第 A. 15 表に、また、(一次+二次)応力強さ及び蓋ボルトの評価結果を(口)-第 A. 16 表に示す。それぞれの表に示すように、全ての評価位置において(口)章 A. 1. 2 に示す解析基準を満足する。

なお、蓋ボルトの応力は 170℃における設計降伏点(□MPa)より低いので、蓋ボルトは塑性変形しない。

頭部垂直落下時には、蓋に内部の収納物等の自重による慣性力が作用し、蓋 O リング位置において蓋とフランジとの間に口開き変形が生じる。その値は 0.01mm 以下であり、O リングの初期締付代 2.5mm に比べて小さく蓋部の密封性は維持される。

底部垂直落下時には、蓋はフランジに押し付けられる方向に慣性力が作用し、口開き変形が生じるおそれはない。



評価断面	部 位
①	蓋中央部
②	蓋 端 部
③	フランジ
④	内筒上部
⑤	内筒中央部
⑥	内筒下部
⑦	中間筒上部
⑧	中間筒中央部
⑨	中間筒下部
⑩	底板端部
⑪	底板中央部
⑫	外筒上部
⑬	外筒中央部
⑭	外筒下部
⑮	上部仕切板
⑯	下部仕切板
⑰	上部リジンカバー
⑱	下部リジンカバー

(口)-第 A. 24 図 頭部 0.3m 垂直落下時の応力評価位置

(口)-第 A. 13 表 頭部 0.3m 垂直落下時の容器本体に対する一次応力の評価

部位	断面 No. 注 1)	応力分類 注 2)	表面	応力 強さ (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) 注 3)	余裕率 MS (-)
蓋	①	Pm	—	4.87	170		
		P _L +P _b	内	29.6			
			外	36.2			
	②	P _L	—	141			
フランジ	③	P _L	—	41.9	170		
内筒	④	P _L	—	101	180		
	⑤	Pm	—	36.4			
	⑥	P _L	—	11.5			
中間筒	⑦	P _L	—	71.9	170		
	⑧	Pm	—	35.2			
	⑨	P _L	—	19.4			
底板	⑩	P _L	—	1.52	180		
	⑪	Pm	—	1.19			
		P _L +P _b	内	4.06			
			外	1.69			
外筒	⑫	P _L	—	60.4	140		
	⑬	Pm	—	93.3			
	⑭	P _L	—	47.7			
仕切板	⑮	P _L	—	74.1	160		
	⑯	P _L	—	21.9			
レジ ン カ バ ー	⑰	P _L	—	62.1	160		
	⑱	P _L	—	11.9			

注 1) (口)-第 A. 24 図参照

注 2) P_m : 一次一般膜応力強さ、P_L : 一次局部膜応力強さ、P_b : 一次曲げ応力強さ注 3) P_m に対する基準値は S_m、P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は 1.5S_m である。

(ロ)-第 A. 14 表 頭部 0.3m 垂直落下時の容器本体に対する(一次+二次)

応力及び蓋ボルトの評価(1/2)

部位	断面 No. ^{注1)}	表面	応力 強さ (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) ^{注2)}	余裕率 MS (-)
蓋	①	内	39.6	170		
		外	42.5			
	②	内	102			
		外	157			
フランジ	③	内	110	170		
		外	56.5			
内筒	④	内	237	180		
		外	343			
	⑤	内	284			
		外	240			
	⑥	内	305			
		外	174			
中間筒	⑦	内	170	170		
		外	144			
	⑧	内	155			
		外	144			
	⑨	内	156			
		外	165			
底板	⑩	内	86.8	180		
		外	131			
	⑪	内	70.1			
		外	38.8			

注1) (ロ)-第 A. 24 図参照

注2) 基準値は 3Sm である。

(ロ)-第 A. 14 表 頭部 0.3m 垂直落下時の容器本体に対する(一次+二次)

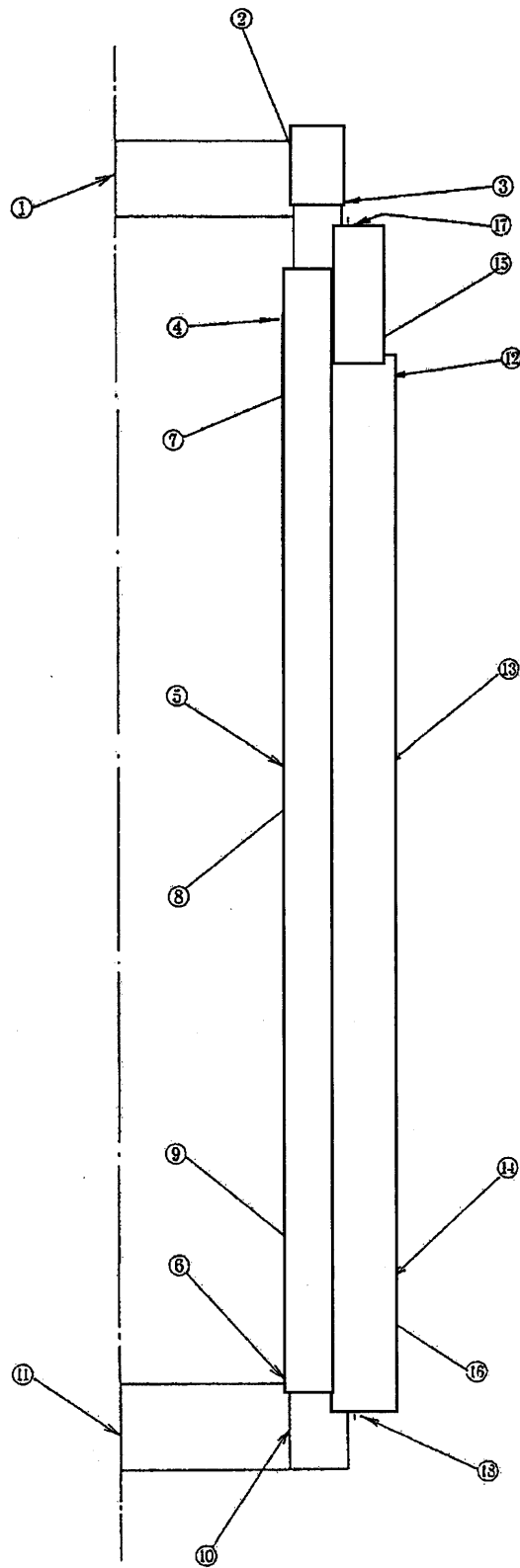
応力及び蓋ボルトの評価(2/2)

部位	断面 No.注1)	表面	応力 強さ (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa)注2)	余裕率 MS (-)
外筒	⑫	内	259	140		
		外	258			
	⑬	内	252			
		外	124			
	⑭	内	346			
		外	274			
仕切板	⑮	内	132	160		
		外	146			
	⑯	内	119			
		外	159			
レジン カバー	⑰	内	126	160		
		外	108			
	⑱	内	177			
		外	189			
蓋ボルト	σ_m		136	170		
	$\sigma_m + \sigma_b$		158			

注1) (ロ)-第 A. 24 図参照

注2) 蓋ボルトを除く基準値は 3Sm である。

蓋ボルトの基準値は σ_m に対して 2Sm、 $\sigma_m + \sigma_b$ に対して 3Sm である。



評価断面	部 位
①	蓋中央部
②	蓋端部
③	フランジ
④	内筒上部
⑤	内筒中央部
⑥	内筒下部
⑦	中間筒上部
⑧	中間筒中央部
⑨	中間筒下部
⑩	底板端部
⑪	底板中央部
⑫	外筒上部
⑬	外筒中央部
⑭	外筒下部
⑮	上部仕切板
⑯	下部仕切板
⑰	上部リジンカバー
⑱	下部リジンカバー

(口)-第 A. 25 図 底部 0.3m 垂直落下時の応力評価位置

(ロ)-第 A. 15 表 底部 0.3m 垂直落下時の容器本体に対する一次応力の評価

部位	断面 No. 注 1)	応力分類 注 2)	表面	応力 強さ (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) 注 3)	余裕率 MS (-)		
蓋	①	P _m	—	0.21	170				
		P _L +P _b	内	0.36					
			外	0.73					
	②	P _L	—	8.04					
フランジ	③	P _L	—	8.03	170				
内筒	④	P _L	—	22.1	180				
	⑤	P _m	—	39.5					
	⑥	P _L	—	58.2					
中間筒	⑦	P _L	—	20.6	170				
	⑧	P _m	—	38.4					
	⑨	P _L	—	74.4					
底板	⑩	P _L	—	40.2	180				
	⑪	P _m	—	6.55					
		P _L +P _b	内	25.8					
			外	37.3					
外筒	⑫	P _L	—	49.4	140				
	⑬	P _m	—	107					
	⑭	P _L	—	56.2					
仕切板	⑮	P _L	—	22.0	160				
	⑯	P _L	—	74.1					
レジ ン カ バ ー	⑰	P _L	—	8.07	160				
	⑱	P _L	—	96.0					

注 1) (ロ)-第 A. 25 図参照

注 2) P_m : 一次一般膜応力強さ、P_L : 一次局部膜応力強さ、P_b : 一次曲げ応力強さ注 3) P_m に対する基準値は S_m、P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は 1.5S_m である。

(ロ)-第 A.16 表 底部 0.3m 垂直落下時の容器本体に対する(一次+二次)

応力及び蓋ボルトの評価(1/2)

部 位	断面 No. 注 1)	表 面	応 力 強 さ (MPa)	温 度 (°C)	解析 基準値 (MPa) 注 2)	余裕率 MS (-)
蓋	①	内	6.97	170		
		外	2.28			
	②	内	25.4			
		外	45.7			
フランジ	③	内	52.8	170		
		外	61.5			
内 筒	④	内	278	180		
		外	241			
	⑤	内	284			
		外	240			
	⑥	内	368			
		外	147			
中 間 筒	⑦	内	152	170		
		外	145			
	⑧	内	155			
		外	144			
	⑨	内	175			
		外	150			
底 板	⑩	内	86.4	180		
		外	218			
	⑪	内	85.8			
		外	60.6			

注 1) (ロ)-第 A.25 図参照

注 2) 基準値は 3Sm である。

(ロ)-第 A.16 表 底部 0.3m 垂直落下時の容器本体に対する(一次+二次)

応力及び蓋ボルトの評価(2/2)

部 位	断面 No.注1)	表 面	応 力 強 さ (MPa)	温 度 (℃)	解 析 基 準 値 (MPa)注2)	余 裕 率 MS (-)
外 筒	⑫	内	311	140		
		外	253			
	⑬	内	267			
		外	137			
	⑭	内	260			
		外	268			
仕 切 板	⑮	内	61.0	160		
		外	116			
	⑯	内	73.6			
		外	104			
レ ジ ン カ バ ー	⑰	内	153	160		
		外	161			
	⑱	内	116			
		外	99.8			
蓋 ボ ル ト	σ_m		180	170		
	$\sigma_m + \sigma_b$		287			

注 1) (ロ)-第 A.25 図参照

注 2) 蓋ボルトを除く基準値は 3Sm である。

蓋ボルトの基準値は σ_m に対して 2Sm、 $\sigma_m + \sigma_b$ に対して 3Sm である。

2. 伝熱フィン

垂直落下時には、伝熱フィンの中筒取付部において外筒、フィン及び自重による慣性力によりせん断応力 τ (MPa)が生じる。

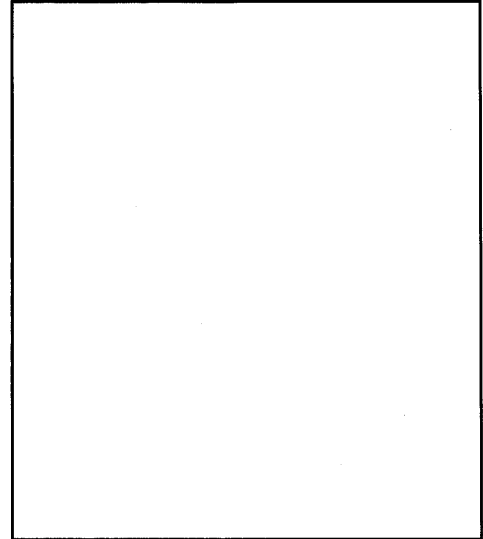
$$\tau = \frac{W \cdot Gv}{A}$$

ただし、

W : フィン1ピッチ当たりの外筒、
フィン及び自重の全重量 (kg)

Gv : 垂直落下時の衝撃加速度 (m/s^2)

A : フィン1ピッチ当たりの
 の面積 (mm^2)



(ロ)-第 A. 26 図より、

(ロ)-第 A. 26 図 伝熱フィン取付部

$$W = (\pi \times (1249^2 - 1089^2) \times 8 + \pi \times (1089^2 - \text{}^2) \times 46) \times 7.93 \times 10^{-6} \\ + \text{} \times 46 \times \text{} \times 8.94 \times 10^{-6} \times \text{} = \text{} \text{ kg}$$

$$A = \text{} \times 46 \times \text{} = \text{} \text{ mm}^2$$

また、

$$Gv = 528 m/s^2$$

したがって、

$$\tau = \frac{\text{} \times 528}{\text{}}$$

$$= 4.27 \text{ MPa}$$

応力強さ S は

$$S = 2\tau = 8.54 \text{ MPa}$$

160℃における伝熱フィン材料の降伏応力 σ_y は 136MPa、引張強さ σ_u は 177MPa であるので、一次一般膜応力強さ P_m (MPa) に対する基準値 S_m は設計・建設規格¹⁾ に従い、次のように与えられる。

$$\begin{aligned} S_m &= \min(\sigma_y/1.5, \sigma_u/3) \\ &= 59.0\text{MPa} \end{aligned}$$

したがって、余裕率 MS は次のようになる。

$$\begin{aligned} MS &= \frac{S_m}{S} - 1 = \frac{59.0}{8.54} - 1 \\ &= 5.91 \end{aligned}$$

次に熱応力を加えた(一次+二次)応力強さについて評価する。

(ロ)章 A.5.1.4 より、熱膨張による応力 σ_1 (MPa)は、

$$\sigma_1 = 14.5\text{MPa}$$

落下試験時のせん断応力 τ は 4.27MPa であるので、(一次+二次)応力強さ S (MPa) は次のようになる。

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{\sigma_1^2 + 4\tau^2} \\ &= \sqrt{14.5^2 + 4 \times 4.27^2} \\ &= 16.8\text{MPa} \end{aligned}$$

(一次+二次)応力強さに対する基準値 $3S_m$ は、

$$3S_m = 3 \times 59.0 = 177\text{MPa}$$

であるので、余裕率 MS は次のようになる。

$$\begin{aligned} MS &= \frac{3S_m}{S} - 1 \\ &= \frac{177}{16.8} - 1 \\ &= 9.54 \end{aligned}$$

3. 燃料被覆管

垂直落下時に燃料被覆管に生じる応力は、落下衝撃による圧縮応力 σ_c (MPa) と内圧による各方向応力 σ_z 、 σ_r 、 σ_θ (MPa) である。垂直落下時において最大応力強さは、燃料被覆管内面に生じるので燃料被覆管内面のみ評価する。

また、衝撃加速度が大きい頭部垂直落下時のみ評価する。

(1) 落下衝撃により生じる圧縮応力： σ_c (MPa)

落下衝撃により生じる圧縮応力は、次式で与えられる。

$$\sigma_c = - \frac{W \cdot G_v}{A}$$

ここで、

W : 燃料被覆管最下端における重量 (kg)

G_v : 頭部垂直落下時の衝撃加速度 = 528m/s²

A : 燃料被覆管の断面積 = $\pi (d_o^2 - d_i^2) / 4$ (mm²)

d_o : 燃料被覆管の外径 (mm)

d_i : 燃料被覆管の内径 (mm)

(2) 内圧による各方向応力： σ_z 、 σ_r 、 σ_θ (MPa)

内圧 P_o により生じる各方向応力は、以下の式で与えられる。

$$\sigma_z = P_o / (K^2 - 1)$$

$$\sigma_r = - (K^2 / R^2 - 1) P_o / (K^2 - 1)$$

$$\sigma_\theta = (K^2 / R^2 + 1) P_o / (K^2 - 1)$$

ここで、

σ_z : 軸方向応力 (MPa)

σ_r : 半径方向応力 (MPa)

σ_θ : 周方向応力 (MPa)

$$K = b/a$$

b : 燃料被覆管外半径 = $d_o/2$ (mm)

a : 燃料被覆管内半径 = $d_i/2$ (mm)

P_o : 内圧 = MPaG

$R = r/a$ (内面においては $R=1$)

r : 評価位置 ($a \leq r \leq b$)

(3) 応力強さ： S (MPa)

垂直落下時に生じる圧縮応力及び内圧により生じる各方向応力から求まる応力強さは、次式で与えられる。

$$S = \text{Max} \{ |\sigma_{rL} - \sigma_{\theta L}|, |\sigma_{\theta L} - \sigma_{zL}|, |\sigma_{zL} - \sigma_{rL}| \}$$

ここで、

$$\sigma_{rL} = \sigma_r$$

$$\sigma_{\theta L} = \sigma_{\theta}$$

$$\sigma_{zL} = \sigma_c + \sigma_z$$

燃料被覆管材料(ジルカロイ)の 190℃における降伏応力 σ_y は、606MPa¹⁹⁾である。余裕率 MS は、次式で与えられる。

$$MS = \sigma_y / S - 1$$

以上の諸式を用いて各燃料に対して計算した結果を(ロ)-第 A. 17 表に示す。各燃料被覆管に発生する応力強さは基準値以下である。

(ロ)-第 A. 17 表 垂直落下時の燃料被覆管の強度評価結果

燃料タイプ	タイプ 4	タイプ 5	タイプ 6
	14×14 配列型	15×15 配列型	17×17 配列型
燃料被覆管最下端での重量 W (kg)	[Redacted]		
燃料被覆管外径 do (mm)			
燃料被覆管内径 di (mm)			
応力強さ S (MPa)	145	145	142
余裕率 MS (-)	3.18	3.18	3.27

A. 5. 3. 2 水平落下

0. 3m 水平落下時の衝撃力に対して、輸送容器の本体及び蓋は十分な強度で密封性を保持することを示す。輸送容器内部のバスケット等に対する評価は条件が厳しい 9m 落下試験に対して行うので、本項では省略する。

1. 輸送容器本体

水平落下時の衝撃力に対する輸送容器本体の解析を有限要素法による ABAQUS コードにより行う。

(1) 解析モデル

(ロ)-第 A. 27 図に水平落下時の三次元 180° 対称モデルを示す。

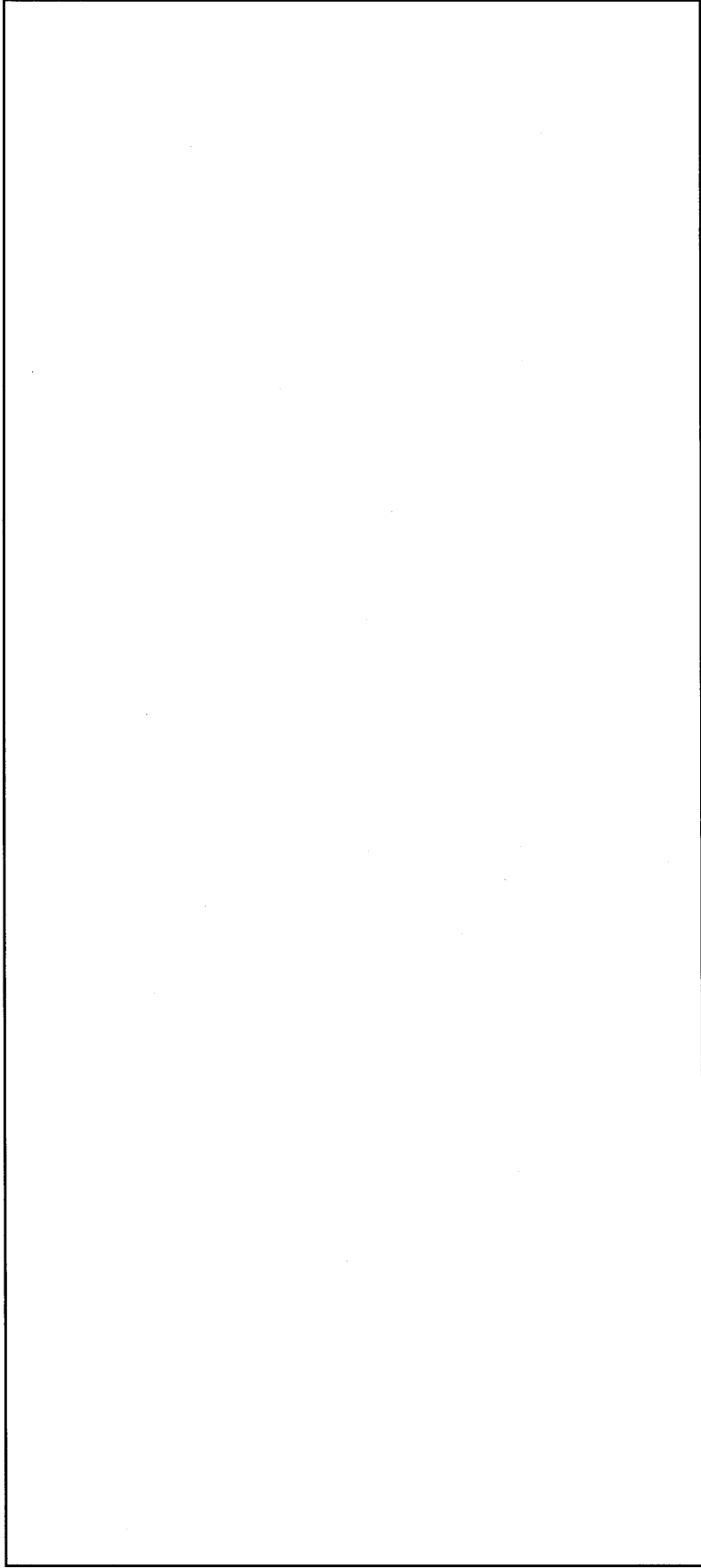
(2) 荷重条件及び境界条件

a. 荷重条件

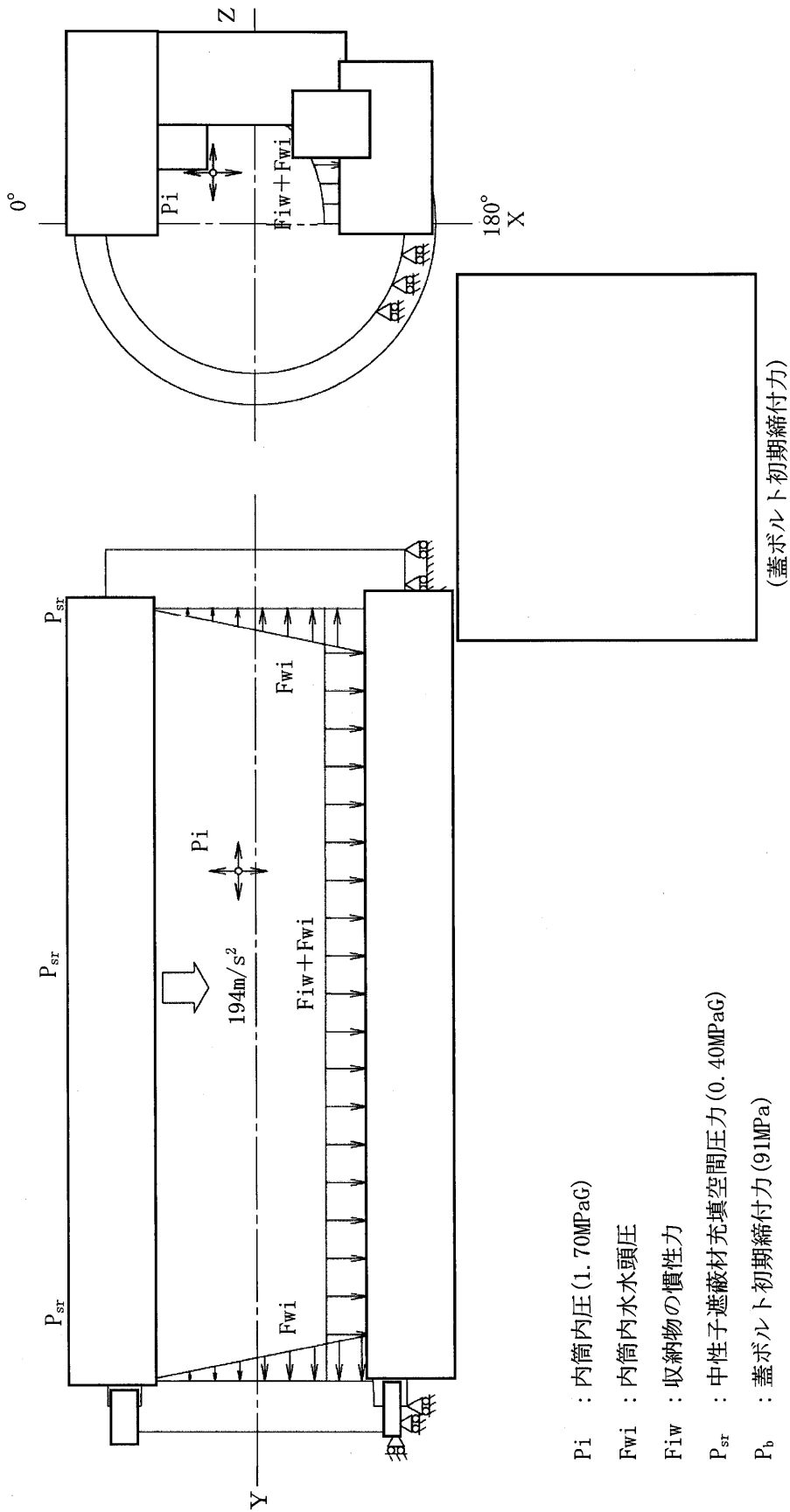
水平落下時に作用する荷重を(ロ)-第 A. 28 図に示す。ここで、衝撃加速度 (194m/s^2) による自重の慣性力が落下方向に働く。内部の収納物等(バスケット、収納物、内筒内水)の慣性力が内筒内面へ、内筒内水の衝撃圧が蓋及び底部内面に働く。

b. 境界条件

(ロ)-第 A. 28 図に示すように底コーナーと蓋及びフランジの緩衝体に取り付けられる箇所において落下方向(X)の変位を、また、 0° - 180° 面において落下方向と直角方向(Z)の変位を拘束した。



(ロ)-第 A.27 図 水平落下時の三次元 180° 対称モデル



Pi : 内筒内圧 (1.70MPaG)

Fwi : 内筒内水水頭圧

Fiw : 収納物の慣性力

Psr : 中性子遮蔽材充填空間圧力 (0.40MPaG)

Pb : 蓋ボルト初期縮付力 (91MPa)

(蓋ボルト初期縮付力)

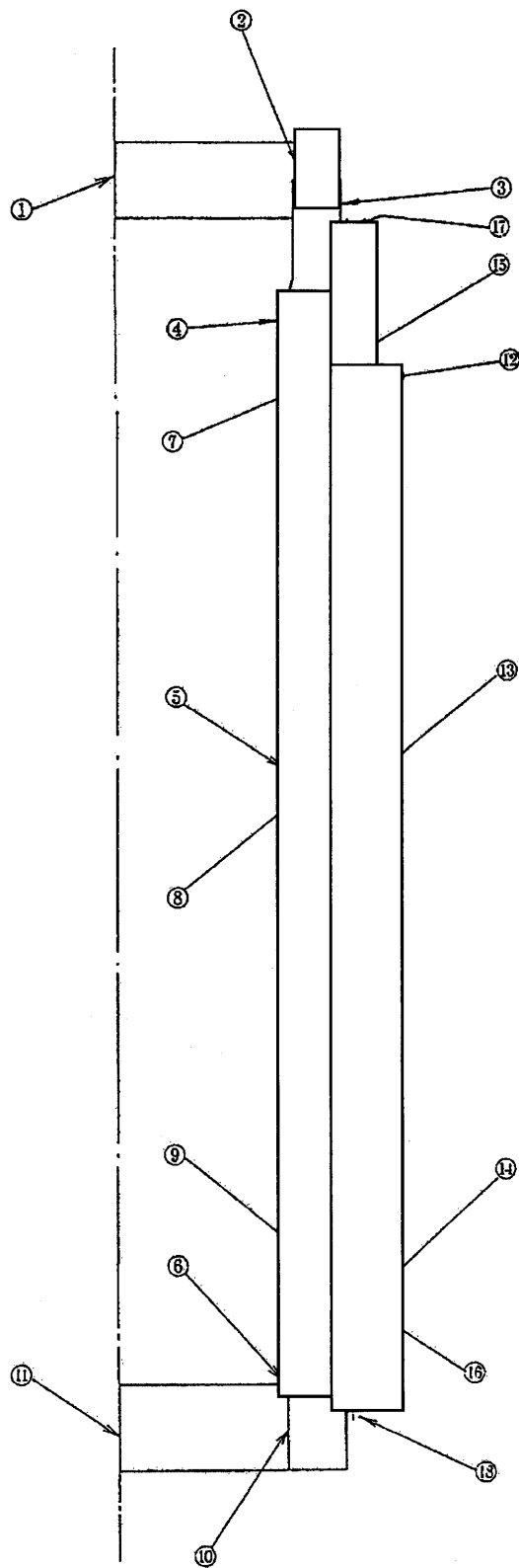
(口)-第 A. 28 図 0.3m 水平落下時の荷重条件及び境界条件

(3) 解析結果

水平落下時の主要な位置((口)-第 A.29 図参照)に対する一次応力強さの評価結果を(口)-第 A.18 表に、(一次+二次)応力強さ及び蓋ボルトの評価結果を(口)-第 A.19 表に示す。表に示すように、全ての評価位置において(口)章 A.1.2 に示す解析基準を満足する。

なお、蓋ボルトの応力は 170℃における設計降伏点(□MPa)より低いので、蓋ボルトは塑性変形しない。

水平落下時には、蓋に緩衝体からの慣性力が作用し、蓋 Oリング位置において蓋とフランジとの間に口開き変形が生じる。その値は 0.3mm 以下であり、Oリングの初期締付代 2.5mm に比べて小さく蓋部の密封性は維持される。



評価断面	部 位
①	蓋中央部
②	蓋 端 部
③	フランジ
④	内筒上部
⑤	内筒中央部
⑥	内筒下部
⑦	中間筒上部
⑧	中間筒中央部
⑨	中間筒下部
⑩	底板端部
⑪	底板中央部
⑫	外筒上部
⑬	外筒中央部
⑭	外筒下部
⑮	上部仕切板
⑯	下部仕切板
⑰	上部レジンカバー
⑱	下部レジンカバー

(口)-第 A. 29 図 0. 3m 水平落下時の応力評価位置

(ロ)-第 A. 18 表 0.3m 水平落下時の容器本体に対する一次応力の評価

部位	断面 No. ^{注1)}	応力分類 ^{注2)}	表面	応力 強さ (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) ^{注3)}	余裕率 MS (-)
蓋	①	P _m	—	18.1	170		
		P _L +P _b	内	23.9			
			外	30.5			
	②	P _L	—	58.5			
フランジ	③	P _L	—	62.6	170		
内筒	④	P _L	—	56.7	180		
	⑤	P _m	—	42.0			
	⑥	P _L	—	45.2			
中間筒	⑦	P _L	—	45.7	170		
	⑧	P _m	—	58.6			
	⑨	P _L	—	36.7			
底板	⑩	P _L	—	37.6	180		
	⑪	P _m	—	20.3			
		P _L +P _b	内	14.2			
			外	26.4			
外筒	⑫	P _L	—	96.5	140		
	⑬	P _m	—	48.1			
	⑭	P _L	—	73.5			
仕切板	⑮	P _L	—	25.7	160		
	⑯	P _L	—	24.4			
レジ ン カ バ ー	⑰	P _L	—	109	160		
	⑱	P _L	—	35.3			

注1) (ロ)-第 A. 29 図参照

注2) P_m : 一次一般膜応力強さ、P_L : 一次局部膜応力強さ、P_b : 一次曲げ応力強さ注3) P_m に対する基準値は S_m、P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は 1.5S_m である。

(ロ)-第 A. 19 表 0.3m 水平落下時の容器本体に対する(一次+二次)応力及び

蓋ボルトの評価(1/2)

部位	断面 No.注1)	表面	応力 強さ (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa)注2)	余裕率 MS (-)
蓋	①	内	24.1	170		
		外	27.9			
	②	内	135			
		外	49.9			
フランジ	③	内	46.7	170		
		外	116			
内筒	④	内	228	180		
		外	239			
	⑤	内	287			
		外	236			
	⑥	内	227			
		外	153			
中間筒	⑦	内	164	170		
		外	146			
	⑧	内	160			
		外	160			
	⑨	内	155			
		外	174			
底板	⑩	内	75.4	180		
		外	117			
	⑪	内	88.5			
		外	51.7			

注1) (ロ)-第 A. 29 図参照

注2) 基準値は 3Sm である。

(ロ)-第 A.19 表 0.3m 水平落下時の容器本体に対する(一次+二次)応力及び

蓋ボルトの評価(2/2)

部位	断面 No. ^{注1)}	表面	応力 強さ (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) ^{注2)}	余裕率 MS (-)
外筒	⑫	内	396	140		
		外	276			
	⑬	内	192			
		外	55.3			
	⑭	内	374			
		外	279			
仕切板	⑮	内	73.4	160		
		外	115			
	⑯	内	148			
		外	159			
レジ ン カ バ ー	⑰	内	205	160		
		外	246			
	⑱	内	204			
		外	224			
蓋ボルト	σ_m		229	170		
	$\sigma_m + \sigma_b$		380			

注1) (ロ)-第 A.29 図参照

注2) 蓋ボルトを除く基準値は 3Sm である。

蓋ボルトの基準値は σ_m に対して 2Sm、 $\sigma_m + \sigma_b$ に対して 3Sm である。

2. 燃料被覆管

水平落下時に生じる応力は、落下衝撃による曲げ応力 σ_b (MPa) と内圧による各方向応力 σ_z 、 σ_r 、 σ_θ (MPa) である。水平落下時において最大応力強さは、外面に生じるので外面のみ評価する。

(1) 落下衝撃により生じる曲げ応力： σ_b (MPa)

燃料被覆管は支持格子により支持される連続梁とみなすことができ、1つの支持スパン内の部分を考えると両端固定梁となる。したがって、落下衝撃により生じる最大曲げ応力は、次式で与えられる。

$$\sigma_b = M \times d_o / (2I)$$

$$M = 1/12 \times (W_f + W_c) \times \ell^2 \times G_H$$

$$I = \pi / 64 \times (d_o^4 - d_i^4)$$

ここで、

M : 曲げモーメント (N・mm)

G_H : 水平落下時の衝撃加速度 = 194m/s²

I : 断面二次モーメント (mm⁴)

W_f : ペレット単位長さ当たり重量 (kg/mm)

W_c : 燃料被覆管単位長さ当たり重量 (kg/mm)

ℓ : 支持スパン (mm)

d_o : 燃料被覆管外径 (mm)

d_i : 燃料被覆管内径 (mm)

(2) 内圧による各方向応力： σ_z 、 σ_r 、 σ_θ (MPa)

内圧 P_o により生じる各方向応力は、以下の式で与えられる。

$$\sigma_z = P_o / (K^2 - 1)$$

$$\sigma_r = - (K^2 / R^2 - 1) P_o / (K^2 - 1)$$

$$\sigma_\theta = (K^2 / R^2 + 1) P_o / (K^2 - 1)$$

ここで、

σ_z : 軸方向応力 (MPa)

σ_r : 半径方向応力 (MPa)

σ_θ : 周方向応力 (MPa)

$$K = b/a$$

b : 燃料被覆管外半径 = $d_o/2$ (mm)

a : 燃料被覆管内半径 = di/2 (mm)

Po : 内圧 = MPaG

R = r/a

r : 評価位置 (a ≤ r ≤ b)

(3) 応力強さ : S (MPa)

水平落下時に生じる曲げ応力及び内圧により生じる各方向応力から求まる最大応力強さは、次式で与えられる。

$$S = \text{Max} \{ |\sigma_{rL} - \sigma_{\theta L}|, |\sigma_{\theta L} - \sigma_{zL}|, |\sigma_{zL} - \sigma_{rL}| \}$$

ここで、

$$\sigma_{rL} = \sigma_r$$

$$\sigma_{\theta L} = \sigma_{\theta}$$

$$\sigma_{zL} = -\sigma_b + \sigma_z$$

燃料被覆管に生じる応力の計算条件と計算結果を(口)-第 A. 20 表に示す。表に示すとおり、燃料被覆管は解析基準値である燃料被覆管材料(ジルカロイ)の 190°Cにおける降伏応力 σ_y (606MPa¹⁹⁾) を満足している。

(ロ)-第 A. 20 表 水平落下時の燃料被覆管の強度評価結果

燃料タイプ	タイプ 4	タイプ 5	タイプ 6
	14×14 配列型	15×15 配列型	17×17 配列型
ペレット単位長さ当たり 重量 W_f (kg/mm)			
燃料被覆管単位長さ当たり 重量 W_c (kg/mm)			
支持スパン l (mm)			
燃料被覆管外径 d_o (mm)			
燃料被覆管内径 d_i (mm)			
応力強さ S (MPa)	176	176	133
余裕率 MS (-)	2.44	2.44	3.56

A.5.3.3 コーナー落下

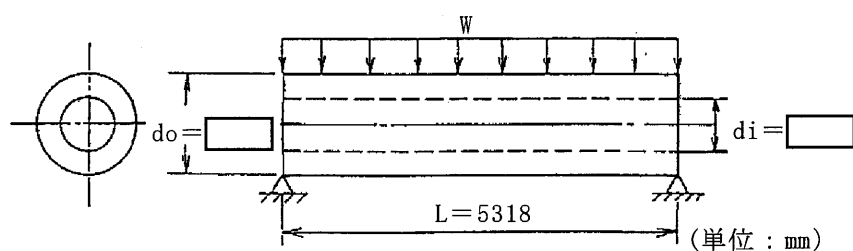
(ロ)-第 A.12 表に示すように、コーナー落下時の衝撃加速度は垂直落下及び水平落下時に比べて小さい。したがって、垂直及び水平落下時に比べて条件が厳しくないことから、コーナー落下時に輸送容器及び収納物の構造健全性が損なわれることはない。

A.5.4 積み重ね試験

本項の条件として、輸送物の5倍に相当する荷重又は鉛直投影面積に $1.3 \times 10^{-2} \text{MPa}$ を乗じて得た値のいずれか厳しい方を24時間負荷することになっている。本輸送物の場合、輸送物の総重量 $1.15 \times 10^5 \text{kg}$ の5倍に相当する $5.75 \times 10^5 \text{kg}$ ($5.64 \times 10^6 \text{N}$)の荷重の方が、本輸送容器の鉛直投影面積に $1.3 \times 10^{-2} \text{MPa}$ を乗じて得た値に相当する荷重(軸に垂直な方向の場合： $6.90 \times 10^4 \text{N}$ 、軸方向の場合： $2.11 \times 10^5 \text{N}$)より大きいので、 $5.75 \times 10^5 \text{kg}$ ($5.64 \times 10^6 \text{N}$)の荷重が連続して輸送容器の軸に垂直な方向にかかる場合及び軸方向にかかる場合について評価を行う。

1. 軸に垂直な方向の荷重の場合

本輸送物本体は円筒構造であるので、最も厳しい条件として(ロ)-第A.30図に示すように、長さL、外径 d_o 、内径 d_i の円筒(中間筒)を横置きにして両端を単純支持し、鉛直方向に $5.64 \times 10^6 \text{N}$ の等分布荷重が負荷する場合について解析する。



(ロ)-第A.30図 両端単純支持された容器の解析モデル図

この場合、荷重を受けるのは輸送容器本体であり、緩衝体が両端支持として働く。輸送容器本体を梁と仮定すれば、生じる最大曲げ応力 σ_b (MPa)は、次式で与えられる。

$$\sigma_b = \frac{M_{\max} \cdot d_o}{2 \cdot I}$$

ただし、

M_{max} : 最大曲げモーメント (N・mm)

$$M_{max} = \frac{1}{8}WL$$

L : 円筒の長さ (mm)

I : 円筒の中心軸に垂直な断面における Z 軸に関する断面二次モーメント (mm⁴)

$$I = \frac{\pi}{64} (d_o^4 - d_i^4)$$

d_o : 円筒外径 (mm)

d_i : 円筒内径 (mm)

W : 荷重 (N)

ここで、輸送容器をこの円筒とみなし、

$W = 5.64 \times 10^6$ N (輸送物総重量の 5 倍の荷重)

$L = 5,318$ mm (輸送容器本体の全長)

$d_o = \square$ mm (中間筒の外径)

$d_i = \square$ mm (中間筒の内径)

したがって、

$$\begin{aligned} M_{max} &= \frac{1}{8} \times 5.64 \times 10^6 \times 5318 \\ &= 3.75 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I &= \frac{\pi}{64} \times (\square^4 - \square^4) \\ &= \square \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

以上より、

$$\begin{aligned} \sigma_b &= \frac{3.75 \times 10^9 \times \square}{2 \times \square} \\ &= 21.0 \text{ MPa} \end{aligned}$$

一方、中間筒の材料の 170°C における設計降伏点 S_y は \square MPa であるので、余裕率 MS は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} MS &= \frac{S_y}{\sigma_b} - 1 \\ &= \frac{\square}{21.0} - 1 \\ &= \square \end{aligned}$$

したがって、本輸送物は、軸に垂直な方向の荷重により変形することはない。

2. 軸方向の荷重の場合

(ロ)-第 A. 31 図に示すように、円筒を縦置きにし、円筒の軸方向に両端から等分布荷重 W をかけたときに円筒に生じる圧縮応力 σ_c (MPa) は、次式で与えられる。

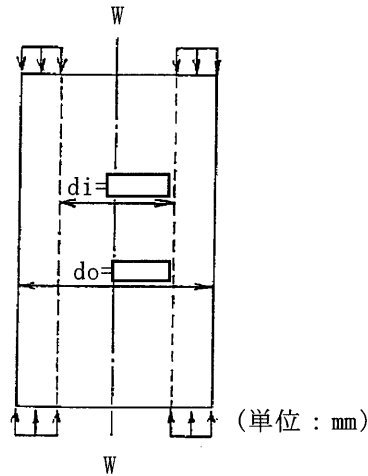
$$\sigma_c = \frac{W}{\frac{\pi}{4}(d_o^2 - d_i^2)}$$

ただし、

W : 荷重 (N)

d_i : 円筒内径 (mm)

d_o : 円筒外径 (mm)



(ロ)-第 A. 31 図 両端より圧縮される容器の解析モデル

ここで、中間筒をこの円筒とみなし、

$W = 5.64 \times 10^6$ N (輸送物総重量の 5 倍の荷重)

$d_i = \square$ mm

$d_o = \square$ mm

したがって、

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \frac{5.64 \times 10^6}{\frac{\pi}{4} \times (\square^2 - \square^2)} \\ &= 13.0 \text{ MPa} \end{aligned}$$

一方、中間筒の材料の 170°C における設計降伏点 S_y は \square MPa であるので、余裕率 MS は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 MS &= \frac{Sy}{\sigma_c} - 1 \\
 &= \frac{\square}{13.0} - 1 \\
 &= \square
 \end{aligned}$$

したがって、本輸送物は、軸方向の圧縮荷重により圧潰することはない。

以上より、容器本体の構造健全性が維持されるので、密封部の健全性が維持される。なお、実際に輸送物を積み重ねた場合には緩衝体部分が積み重なり、フィン、外筒や蓋部には荷重が作用しないため、遮蔽解析に影響を及ぼすような破損が生じるおそれはない。

一方、緩衝体は、最大 12mm 程度変形する可能性があるが、(ロ)章 D の遮蔽解析で考慮している 0.3m 落下で想定される変形量に包含される。

A. 5. 5 貫通

本項では、重量 6kg、直径 3.2cm の軟鋼棒が 1m の高さから本輸送物外表面で最も板厚の薄いレジンカバー(板厚 \square mm)へ落下するとした場合に、レジンカバーが破断せず軟鋼棒は内部に貫通しないことを示す。

6kg の軟鋼棒が 1m の高さから落下したときの落下エネルギー E(N・mm)は、次式で与えられる。

$$E = W \times H \times g$$

ただし、

W : 軟鋼棒の重量 (kg)

H : 落下高さ (mm)

g : 重力加速度 (m/s²)

ここで、

$$W = 6 \text{ kg}$$

$$H = 1,000 \text{ mm}$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

したがって、

$$E = 5.88 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

となる。

軟鋼棒がレジンカバーへ落下し、貫通する最小エネルギーは落下エネルギーが (ロ)-

第 A. 32 図に示すようにレジンカバーのせん断に消費される場合である。この場合のせん断に要するエネルギー E_s (N・mm) は、次式で与えられる。

$$E_s = 1/2 \times \pi d \times t^2 \times S$$

ただし、

d : 軟鋼棒の直径 (mm)

t : レジンカバーの板厚 (mm)

S : レジンカバーのせん断強さ (MPa)

ここで、

$$d = 32 \text{ mm}$$

$$t = \square \text{ mm}$$

せん断強さはせん断ひずみエネルギー説に基づき、設計引張強さの $1/\sqrt{3}$ とすると、

$$S = \square / \sqrt{3} = \square \text{ MPa (160}^\circ\text{C)}$$

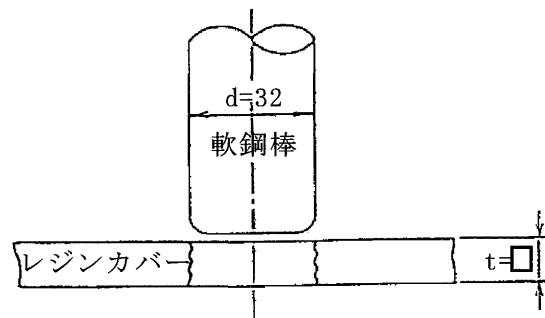
$$E_s = 1/2 \times \pi \times 32 \times \square^2 \times \square$$

$$= \square \text{ N} \cdot \text{mm}$$

となる。落下エネルギー E とせん断エネルギー E_s を比較すると、

$$E = 5.88 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{mm} < E_s = \square \text{ N} \cdot \text{mm}$$

であるのでレジンカバーは軟鋼棒の落下によりせん断破壊せず、軟鋼棒はレジンカバーを貫通しない。



(単位 : mm)

(ロ)-第 A. 32 図 せん断による貫通モデル図

その他の輸送物の外表面のステンレス鋼は全てレジンカバーより厚く、せん断に要するエネルギーはレジンカバーより大きいため、せん断破損は起こらず、密封部の健全性が維持され、また、熱解析及び遮蔽解析への影響は無視できる。

A.5.6 角又は縁落下

本輸送物は、鋼製の円筒形で重量は115トンであり、角又は縁落下は該当しない。

A. 5. 7 結果の要約及びその評価

1. 解析結果の要約

一般の試験条件下における輸送物に対する評価結果の要約を(ロ)-第 A. 21 表に示す。表に示すように、自由落下試験及び積み重ね試験により緩衝体に永久変形が生じるが、各試験条件下において輸送物各部は(ロ)章 A. 1. 2 に定めた基準を満足し構造上の健全性が損なわれることはない。

(ロ)-第 A. 21 表 一般の試験条件下に対する構造解析結果の要約(1/3)

条件	項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等 (-)			
一般の試験条件	熱的試験							
	一次応力							
		蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	177	14.8	11.2		
		フランジ (P _L)	1.5S _m		7.31			
		内筒 (P _m)	S _m		12.1			
		内筒 (P _L)	1.5S _m		13.5			
		中間筒 (P _m)	S _m		7.56			
		中間筒 (P _L)	1.5S _m		8.65			
		底板 (P _L +P _b)	1.5S _m		6.93			
		外筒 (P _m)	S _m		21.5			
		外筒 (P _L)	1.5S _m		16.3			
		仕切板 (P _L)	1.5S _m		5.60			
		リジンカバー (P _L)	1.5S _m		8.57			
		(一次+二次)応力						
		蓋	3S _m		49.3			
		フランジ	3S _m		62.7			
		内筒	3S _m	288				
		中間筒	3S _m	157				
		底板	3S _m	134				
		外筒	3S _m	281				
		仕切板	3S _m	118				
		リジンカバー	3S _m	169				
		蓋ボルト (σ _m)	2S _m	189				
		蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	315				
		伝熱フィン	3S _m	14.5				
		疲労評価						
	外筒	許容繰返し回数以下であること	許容繰返し回数 4.7×10 ² 回	使用予定回数 400回	基準に合致			
	蓋ボルト		9.3×10 ² 回	400回	基準に合致			
	水噴霧試験							
		吸水性 水切り	無 良	無 良	基準に合致 基準に合致			

(ロ)-第 A. 21 表 一般の試験条件に対する構造解析結果の要約 (2/3)

条件	項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等 (-)	
一般の試験条件	自由落下試験					
	1) 頭部垂直落下					
	一次応力					
		蓋 (P _L)	1.5Sm	59.0	141	5.91
		フランジ (P _L)	1.5Sm		41.9	
		内筒 (P _m)	Sm		36.4	
		内筒 (P _L)	1.5Sm		101	
		中間筒 (P _m)	Sm		35.2	
		中間筒 (P _L)	1.5Sm		71.9	
		底板 (P _L +P _b)	1.5Sm		4.06	
		外筒 (P _m)	Sm		93.3	
		外筒 (P _L)	1.5Sm		60.4	
		仕切板 (P _L)	1.5Sm		74.1	
		レンカバー (P _L)	1.5Sm		62.1	
		伝熱フィン (P _m)	Sm		8.54	
		(一次+二次)応力				
		蓋	3Sm	177	157	9.54
		フランジ	3Sm		110	
		内筒	3Sm		343	
		中間筒	3Sm		170	
		底板	3Sm		131	
		外筒	3Sm		346	
		仕切板	3Sm		159	
		レンカバー	3Sm		189	
		蓋ボルト (σ _m)	2Sm		136	
		蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3Sm		158	
		伝熱フィン	3Sm	606	16.8	3.18
		燃料被覆管	σ _y	606	145	
		2) 底部垂直落下				
		一次応力				
		蓋 (P _L)	1.5Sm	59.0	8.04	3.18
		フランジ (P _L)	1.5Sm		8.03	
		内筒 (P _m)	Sm		39.5	
	内筒 (P _L)	1.5Sm	58.2			
	中間筒 (P _m)	Sm	38.4			
	中間筒 (P _L)	1.5Sm	74.4			
	底板 (P _L)	1.5Sm	40.2			
	外筒 (P _m)	Sm	107			
	外筒 (P _L)	1.5Sm	56.2			
	仕切板 (P _L)	1.5Sm	74.1			
	レンカバー (P _L)	1.5Sm	96.0			
	(一次+二次)応力					
	蓋	3Sm	59.0	45.7	3.18	
	フランジ	3Sm		61.5		
	内筒	3Sm		368		

(ロ)-第 A.21 表 一般の試験条件に対する構造解析結果の要約 (3/3)

条件	項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等 (-)		
一般の試験条件	中間筒	3Sm	606	175	2.44		
	底板	3Sm		218			
	外筒	3Sm		311			
	仕切板	3Sm		116			
	レジソカバー	3Sm		161			
	蓋ボルト (σ_m)	2Sm		180			
	蓋ボルト ($\sigma_m + \sigma_b$)	3Sm		287			
	3) 水平落下						
	一次応力						
	蓋 (P_L)	1.5Sm		58.5			
	フランジ (P_L)	1.5Sm		62.6			
	内筒 (P_m)	Sm		42.0			
	内筒 (P_L)	1.5Sm		56.7			
	中間筒 (P_m)	Sm		58.6			
	中間筒 (P_L)	1.5Sm		45.7			
	底板 (P_L)	1.5Sm		37.6			
	外筒 (P_m)	Sm		48.1			
	外筒 (P_L)	1.5Sm		96.5			
	仕切板 (P_L)	1.5Sm		25.7			
	レジソカバー (P_L)	1.5Sm		109			
	(一次+二次)応力						
	蓋	3Sm		135			
	フランジ	3Sm		116			
	内筒	3Sm		287			
	中間筒	3Sm		174			
	底板	3Sm		117			
	外筒	3Sm		396			
	仕切板	3Sm		159			
	レジソカバー	3Sm		246			
	蓋ボルト (σ_m)	2Sm		229			
	蓋ボルト ($\sigma_m + \sigma_b$)	3Sm		380			
	燃料被覆管	σ_y		176			
4) コーナー落下		衝撃加速度が垂直及び水平落下に比べて小さいので、垂直及び水平落下の結果より厳しくない。					
積み重ね試験							
軸に垂直な方向	Sy		21.0				
軸方向	Sy		13.0				
貫通							
レジソカバー	せん断エネルギー		<input type="text"/> N・mm	5.88×10^4 N・mm	基準に合致		

2. 一般の試験条件における蓋部 O リング密封性能の評価(口開き変形量の評価)

一般の試験条件のうち、蓋部 O リングの密封性能に影響を及ぼす熱的試験、落下試験及び貫通試験に対して検討した。蓋部の O リング取付位置での口開き変形量の計算結果と O リングの初期締付代との比較を(ロ)-第 A. 22 表に示す。表に示すように、O リング位置での口開き変形量は基準値より十分小さく、密封性能が損なわれることはない。

(ロ)-第 A. 22 表 一般の試験条件に対する蓋部密封境界の口開き変形量評価

条 件	O リング位置での蓋とフランジとの相対口開き変形量	基 準 値
熱 的 試 験	0.05mm 以下	O リング初期 締付代=2.5mm
自 由 落 下	0.3mm 以下(水平落下)	
6 k g 棒 貫 通	条件がより厳しい特別の試験条件にて評価	

A.6 特別の試験条件

本節では本輸送物が規則及び告示に規定された特別の試験条件下において、(ロ)章 A.1.2 に示す基準を満足することを示す。

特別の試験は強度試験に引き続いて熱的試験(耐火)が行われるとする。熱的試験(耐火)に影響を及ぼす強度試験による変形は、輸送物の熱的性能に関係するフィン及び緩衝体の変形である。9m 落下試験と 1m 貫通試験の試験順序の違いによってこれらの破損又は変形に有意な差は生じないので、これらに引き続く熱的試験(耐火)においては、強度試験の順序の違いは輸送物に影響を与えない。したがって、強度試験は 9m 落下試験に続いて 1m 貫通試験が行われるとして解析する。

A.6.1 強度試験・落下試験 I (9m 落下時)

連続して行われる特別の試験の一番目は、輸送物が最大破損を受けるよう、平らな降伏しない落下試験台上に 9m の高さから輸送物を落下させるものである。

本項では輸送物が 9m 落下した場合、その落下エネルギーが、輸送容器端部に取り付けられた緩衝体及びフィンの変形によって吸収され、輸送物に加わる衝撃力が十分緩和されることを示し、それに対する輸送物の健全性を評価する。

1. 解析モデル

(1) 解析する落下姿勢

輸送物が最大破損を受ける落下方向としては次の 4 種類を考える。

- ① 垂直落下
- ② 水平落下
- ③ コーナー落下(落下点が輸送物の重心を通る鉛直線上にある場合)
- ④ 傾斜落下

ここで、傾斜落下については、(ロ)章 A.10.7 に示すように落下試験結果に基づき評価する。

(2) 解析方法

- ① 解析に当たっては、落下試験台を剛体とし、落下エネルギーは輸送物でのみ吸収するものと仮定する。この仮定により、輸送物の変形量を大きめに評価することになる。
- ② 解析に用いる輸送物の重量に関する数値は、(イ)章 C.5 に示した輸送物最大総重量 115 トンを用いる。

落下エネルギー E_k (N・mm)は、次式で与えられる。

$$E_k = W \times g \times H$$

ただし、

W : 輸送物の重量(kg)

g : 重力加速度(m/s²)

H : 落下高さ(mm)

ここで、

$$W = 115 \times 10^3 \text{kg}$$

$$g = 9.8 \text{m/s}^2$$

$$H = 9 \times 10^3 \text{mm}$$

したがって、

$$E_k = 1.015 \times 10^{10} \text{N} \cdot \text{mm}$$

- ③ 緩衝体は、(イ)-第 C. 14 図及び(イ)-第 C. 15 図に示すとおり、カバープレート及び内部のリブがステンレス鋼(SUS304)製であり、カバープレートで囲まれた空間には [] 及び [] が詰められている。

また、外筒にはフィンが取り付けられており、9m 水平落下の場合には緩衝体の [] 及び [] とフィンがエネルギー吸収に寄与する。

- ④ 緩衝体の変形量と衝撃力の計算方法は(ロ)章 A. 5. 3 の 1. (2)に示す方法と同様に行う。
- ⑤ 9m 水平落下の場合のフィンのエネルギー吸収量と衝撃力の計算はフィンの落下衝撃実験の結果を基に作成された変形量-エネルギー吸収量関係を用いて行う²⁰⁾。
- ⑥ 9m 水平落下の場合には、変形量によってはトラニオンが落下台に衝突する可能性があるため、衝撃力のみを考慮する。

(イ)-第 C. 8 図に示すようにトラニオン底部は [] となっており、頭部に衝撃力が作用すると肩部が [] して頭部が底部 [] 構造となっている。この場合の [] に要する荷重(F)は、次式で与えられる。

$$F = \pi \times d \times t \times S$$

ここで、

d : トラニオン頭部直径(120mm)

t : トラニオン肩部厚み [] (mm)

S : せん断強さ = $\frac{1}{\sqrt{3}} \times Su$

Su : トラニオン材の設計引張強さ(930MPa)

したがって、

$$F = \pi \times 120 \times \square \times 930 / \sqrt{3}$$

$$= \square \text{ N}$$

(3) 垂直落下時の緩衝体の変形量と衝撃加速度

a. 頭部垂直落下

解析モデルを(ロ)-第 A. 33 図に示す。斜線を施した部分、すなわち緩衝体内の木材が深さ δ だけ圧潰して落下エネルギーを吸収するものとする。

(2) に示した方法により求めた変形量と吸収エネルギー及び衝撃力との関係を(ロ)-第 A. 34 図に示す。

(ロ)-第 A. 34 図より、落下エネルギー E_k に対応する変形量は 139mm であり、衝撃加速度 G_v は、次のようになる。

$$G_v = \frac{F}{W}$$

$$= \frac{10.29 \times 10^7}{115 \times 10^3}$$

$$= 895 \text{ m/s}^2$$

ここで、

F : 衝撃力 (N)

W : 輸送物最大総重量 (kg)

b. 底部垂直落下

(ロ)-第 A. 35 図に底部垂直落下時の解析モデルを示す。a. と同様にして求めた変形量と吸収エネルギー及び衝撃力との関係を(ロ)-第 A. 36 図に示すが、落下エネルギー E_k に対応する変形量は 140mm であり、衝撃加速度 G_v は、次のようになる。

$$G_v = \frac{F}{W}$$

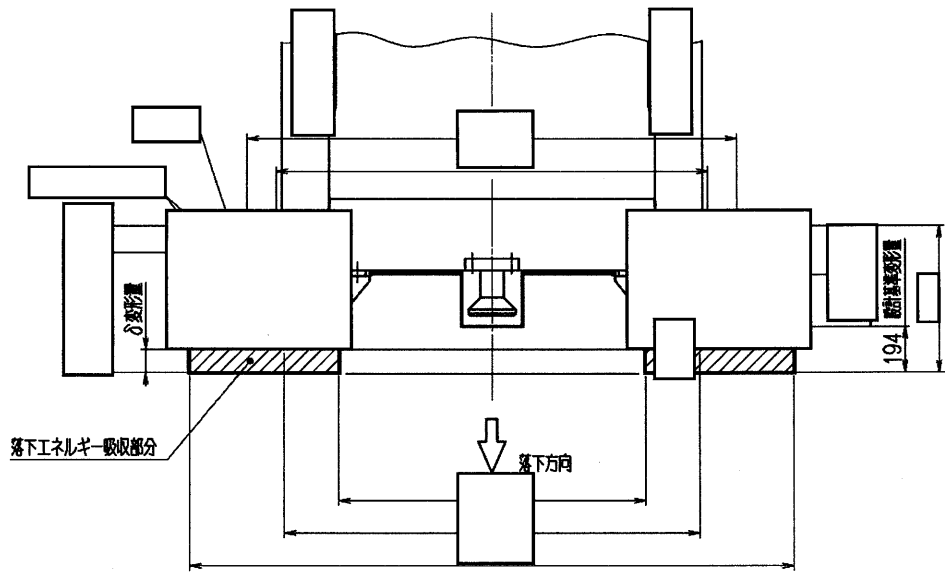
$$= \frac{10.23 \times 10^7}{115 \times 10^3}$$

$$= 890 \text{ m/s}^2$$

ここで、

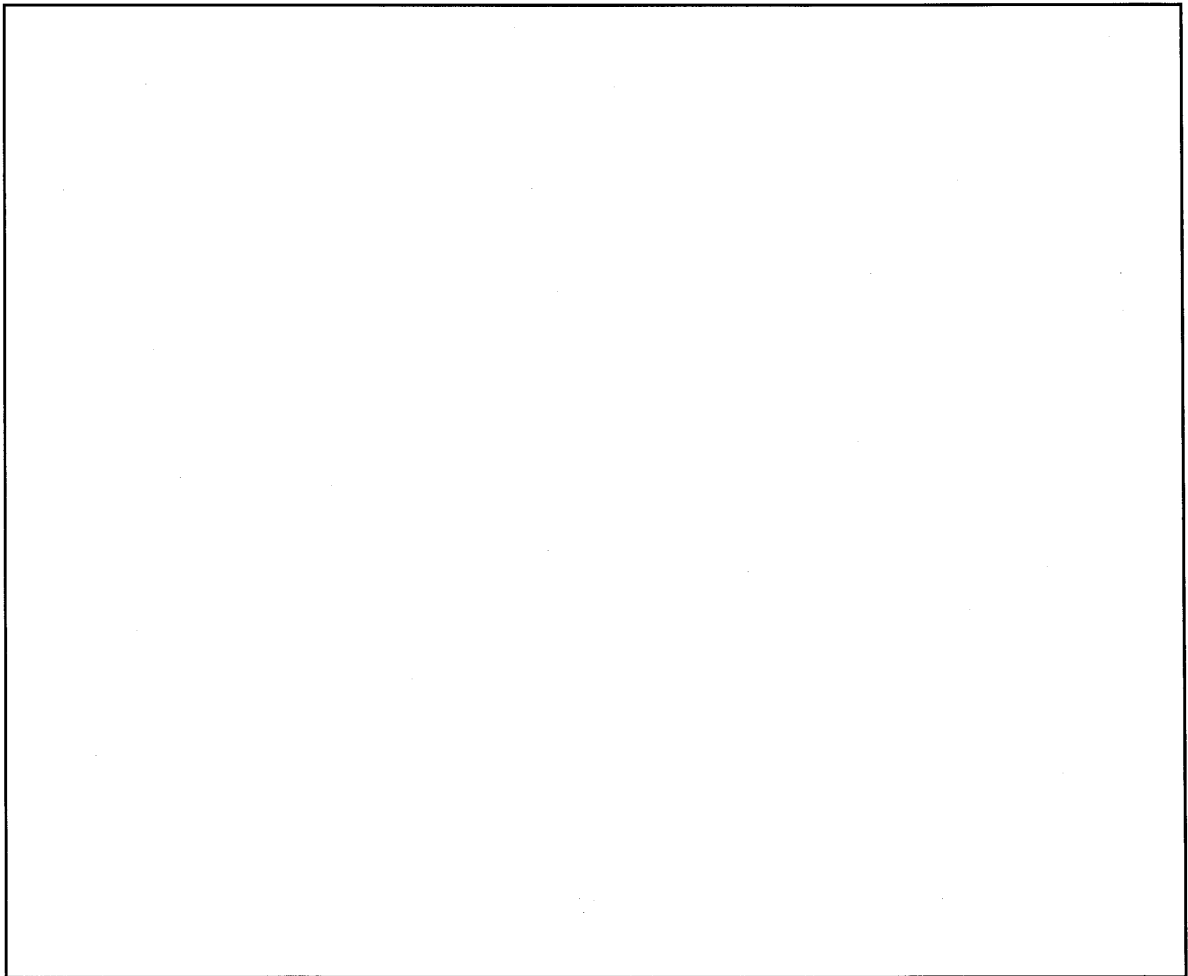
F : 衝撃力 (N)

W : 輸送物最大総重量 (kg)

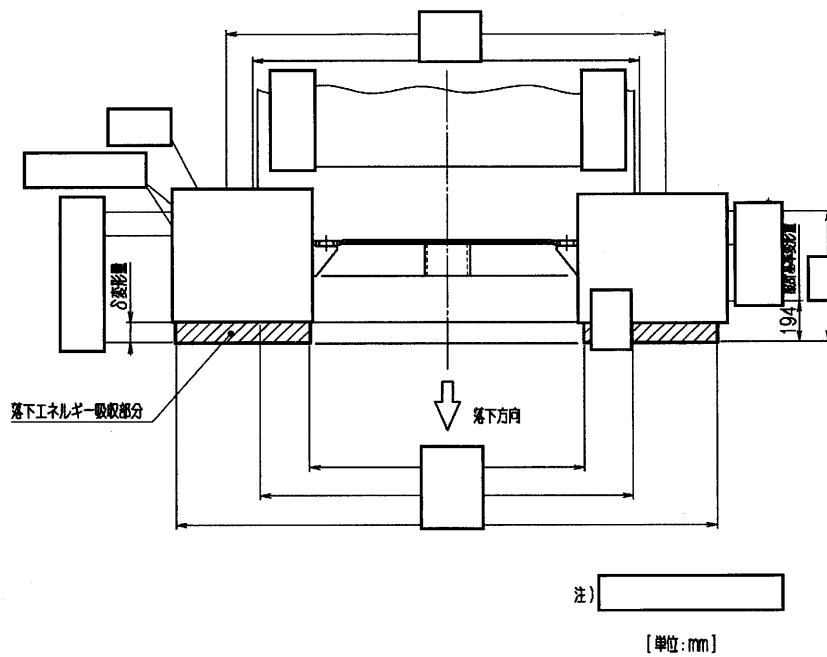


注)
 [単位: mm]

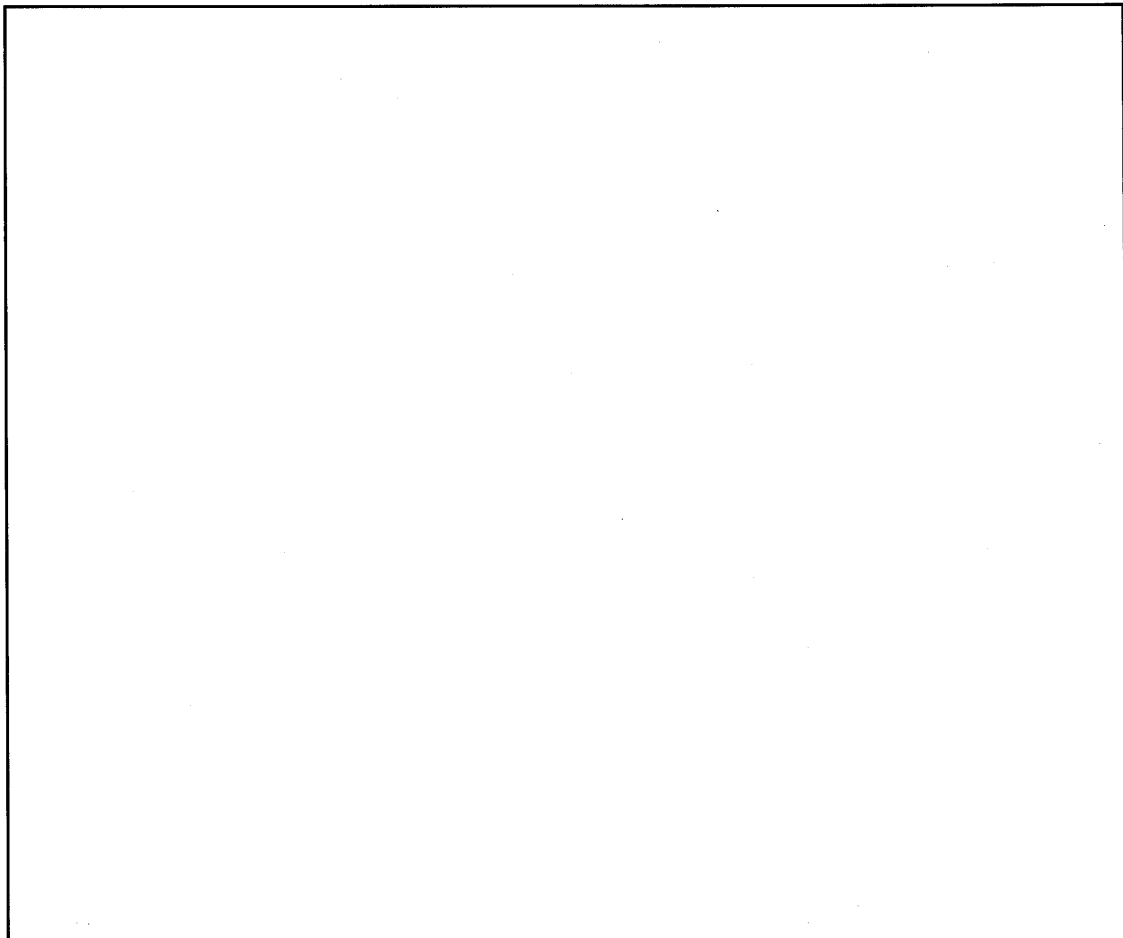
(ロ)-第 A. 33 図 頭部垂直落下解析モデル



(ロ)-第 A. 34 図 頭部垂直落下時の変形量と吸収エネルギー及び衝撃力との関係



(ロ)-第 A. 35 図 底部垂直落下解析モデル



(ロ)-第 A. 36 図 底部垂直落下時の変形量と吸収エネルギー及び衝撃力との関係

(4) 水平落下時の緩衝体の変形量と衝撃加速度

解析モデルを(口)-第 A. 37 図に示す。図において斜線を施した部分の木材及びフィンが圧潰して落下エネルギーを吸収するものとする。

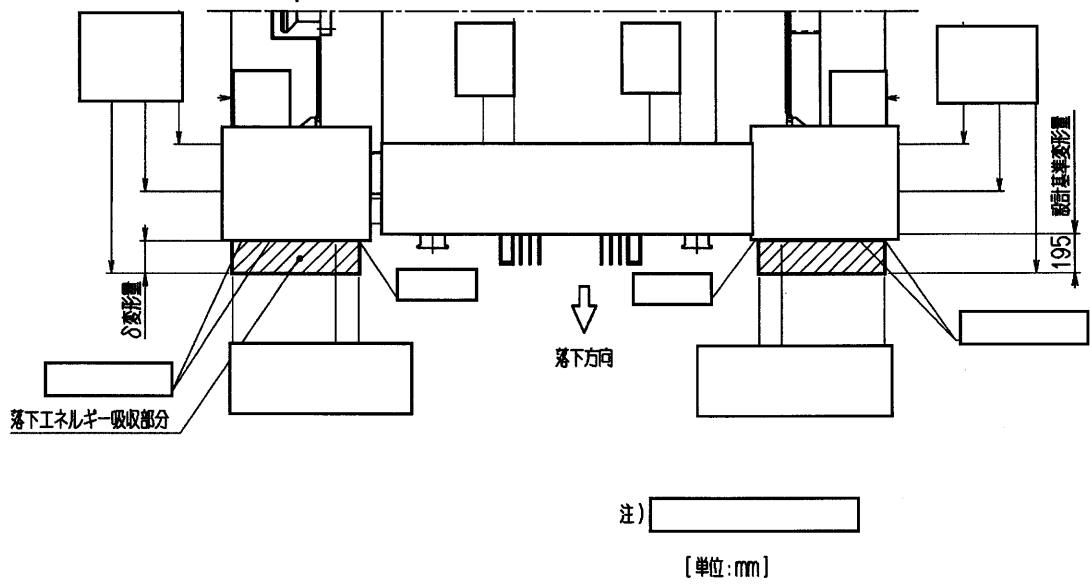
変形量と吸収エネルギー及び衝撃力との関係を(口)-第 A. 38 図に示す。図より、落下エネルギー E_k に対応する変形量は 184mm であり、最大の衝撃加速度 G_H はトランシオン衝突時であり次のようになる。

$$\begin{aligned} G_H &= \frac{F}{W} \\ &= \frac{11.13 \times 10^7}{115 \times 10^3} \\ &= 968 \text{m/s}^2 \end{aligned}$$

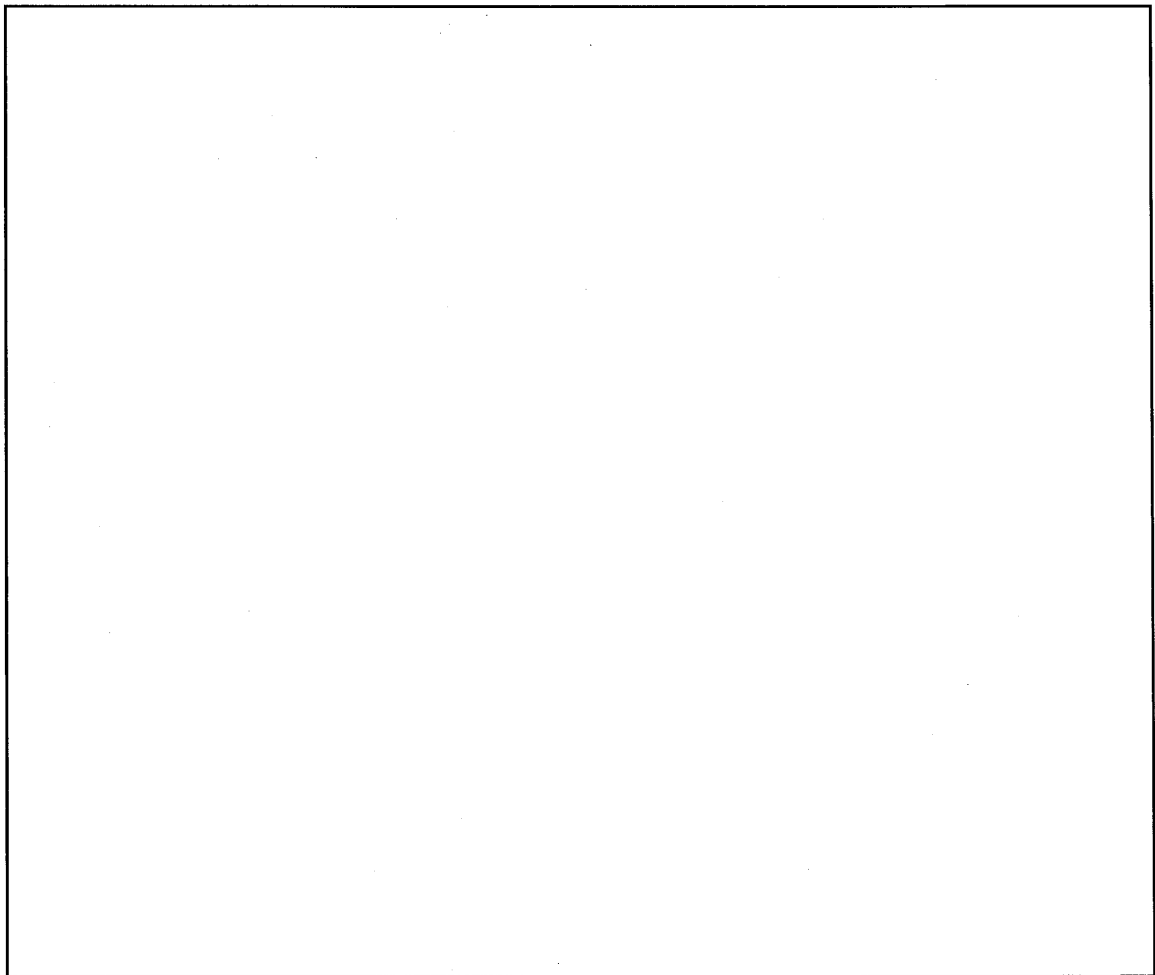
ここで、

F : 衝撃力(N)

W : 輸送物最大総重量(kg)



(ロ)-第 A. 37 図 水平落下解析モデル



(ロ)-第 A. 38 図 水平落下時の変形量と吸収エネルギー及び衝撃力との関係

(5) コーナー落下時の緩衝体の変形量と衝撃加速度

a. 頭部コーナー落下

(ロ)章 A. 2 で述べたように、輸送物の頭部コーナーと重心を結ぶ直線及び中心軸のなす角は 22.5° である。

(ロ)-第 A. 39 図に示す解析モデルにおいて斜線を施した部分の木材が圧潰して落下エネルギーを吸収するものとする。

変形量と吸収エネルギー及び衝撃力との関係を(ロ)-第 A. 40 図に示す。

図より落下エネルギー E_k に対応する変形量は 457mm であり、衝撃加速度 G_c は、次のようになる。

$$\begin{aligned} G_c &= \frac{F}{W} \\ &= \frac{6.57 \times 10^7}{115 \times 10^3} \\ &= 571\text{m/s}^2 \end{aligned}$$

ここで、

F : 衝撃力 (N)

W : 輸送物最大総重量 (kg)

b. 底部コーナー落下

(ロ)章 A. 2 で述べたように、輸送物の底部コーナーと重心を結ぶ直線及び中心軸のなす角は 22.7° である。

(ロ)-第 A. 41 図に示す解析モデルにおいて斜線を施した部分の木材が圧潰して落下エネルギーを吸収するものとする。

変形量と吸収エネルギー及び衝撃力との関係を(ロ)-第 A. 42 図に示す。

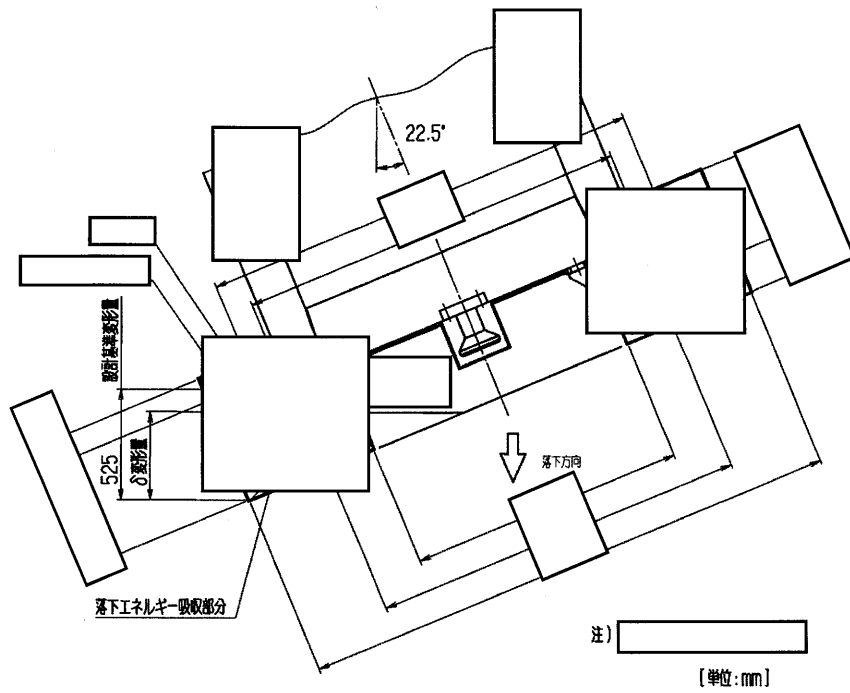
図より落下エネルギー E_k に対応する変形量は 460mm であり、衝撃加速度 G_c は、次のようになる。

$$\begin{aligned} G_c &= \frac{F}{W} \\ &= \frac{6.65 \times 10^7}{115 \times 10^3} \\ &= 578\text{m/s}^2 \end{aligned}$$

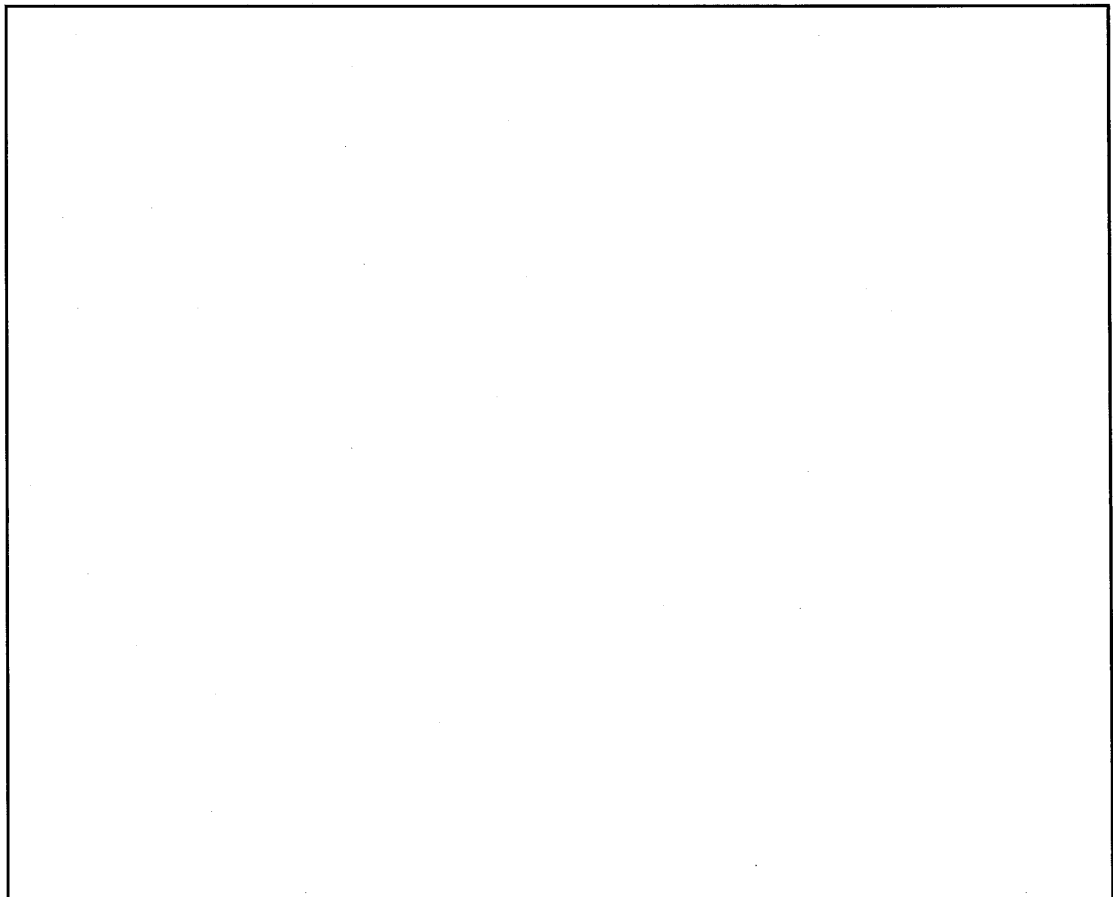
ここで、

F : 衝撃力 (N)

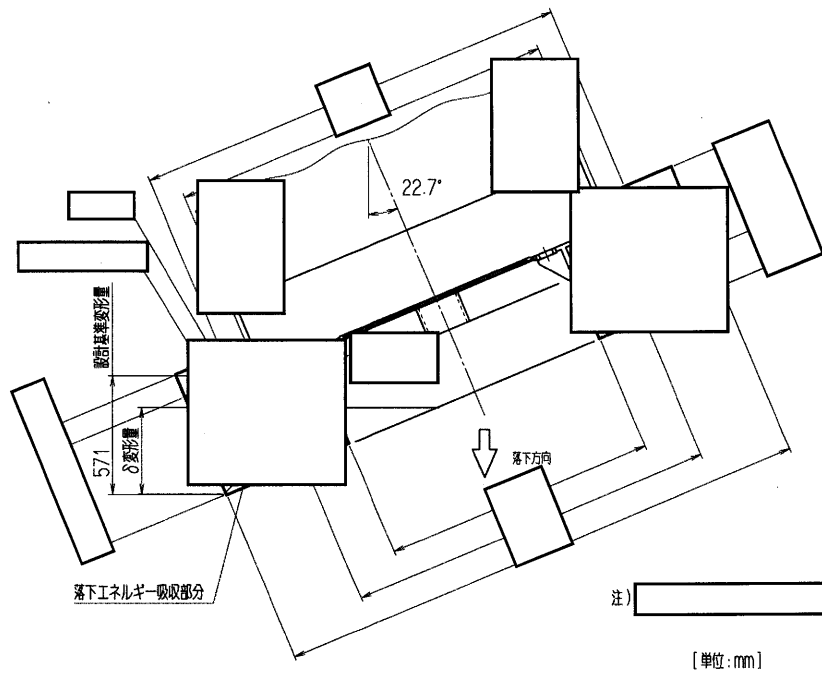
W : 輸送物最大総重量 (kg)



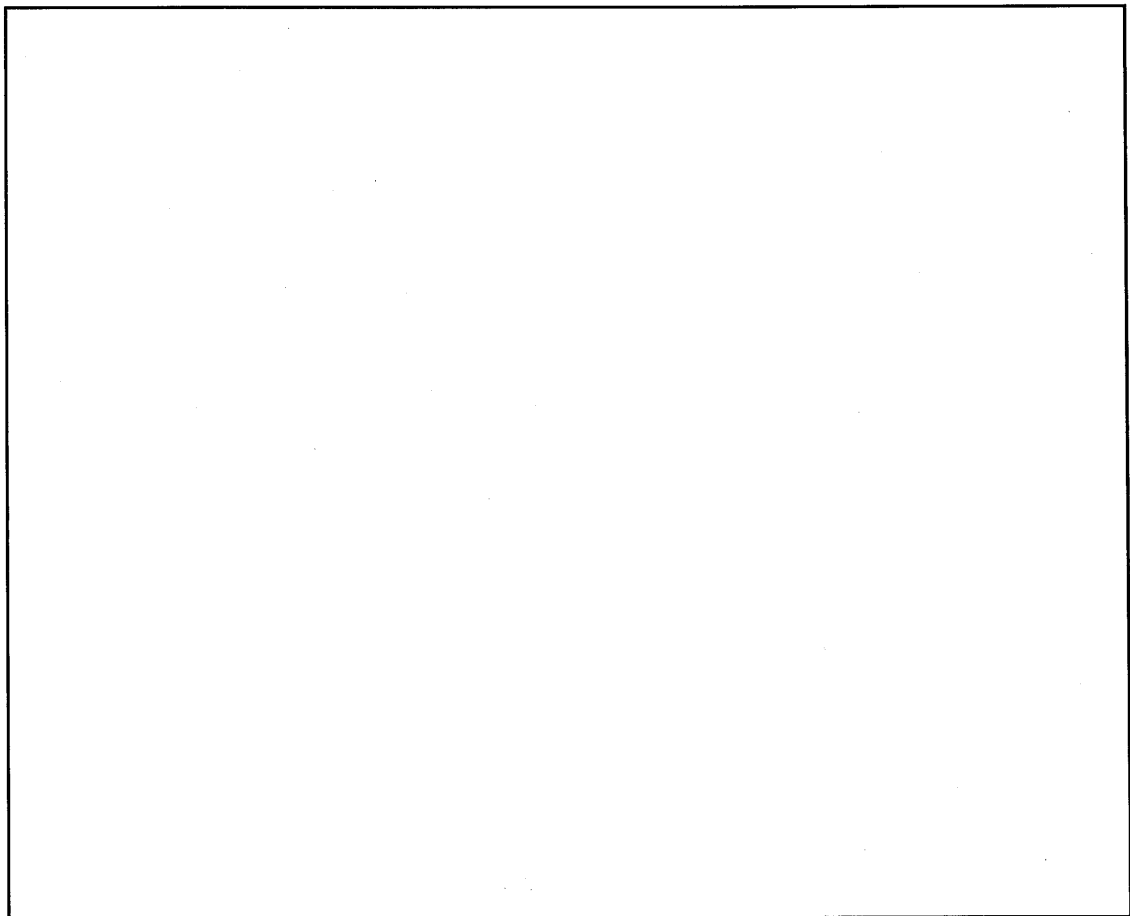
(ロ)-第 A. 39 図 頭部コーナー落下解析モデル



(ロ)-第 A. 40 図 頭部コーナー落下時の変形量と吸収エネルギー及び衝撃力との関係



(ロ)-第 A. 41 図 底部コーナー落下解析モデル



(ロ)-第 A. 42 図 底部コーナー落下時の変形量と吸収エネルギー及び衝撃力との関係

(6) 解析結果の要約

9m 落下試験時の緩衝体及びフィンの変形量と衝撃加速度の解析結果の要約を(ロ)-第 A. 23 表に示す。

(ロ)-第 A. 23 表に示すとおり、9m 落下試験時に輸送物の緩衝体及びフィンに圧潰変形が生じる。特別の試験条件における熱解析においては、緩衝体からの入熱量は緩衝体の変形すると多くなると考えられるので、変形を考慮する。

また、遮蔽解析においては緩衝体及びフィンを無視して評価する。

(ロ)-第 A. 23 表 9m 落下試験時の衝撃加速度と緩衝体及びフィンの変形量

落下姿勢		衝撃加速度 (m/s ²)	緩衝体の変形量 δ (mm)	設計基準変形量 ^{注 2)} δ max (mm)
垂直落下	頭部	895	139	194
	底部	890	140	194
水平落下		968	184 (133) ^{注 1)}	195
コーナー落下	頭部	571	457	525
	底部	578	460	571

注 1) フィンの変形量を示す。

注 2) 設計基準変形量とは、それぞれの落下方向において衝撃力を急激に上昇させないための設計上の基準値であり、垂直落下、水平落下及びコーナー落下でそれぞれ以下のとおり設定している。

垂直落下 : 緩衝体の表面から緩衝体の鋼板(内側リング)までの距離

水平落下 : 緩衝体の表面から外筒までの距離

コーナー落下 : 緩衝体の表面から緩衝体の鋼板(コーナー部)までの距離

2. 原型試験

該当しない。

3. モデル試験

該当しない。

A.6.1.1 垂直落下

9m 垂直落下時の衝撃力に対して、輸送容器の本体及び蓋は十分な強度で密封性を保持し、輸送容器内部のバスケット及び燃料集合体は破損することなく、かつ遮蔽評価に影響を及ぼすような塑性変形が生じないことを示す。

1. 輸送容器本体

垂直落下時の衝撃力に対する輸送容器本体の解析を有限要素法による ABAQUS コードにより行う。また、落下方向は頭部及び底部落下とする。

(1) 解析モデル

(ロ)章 A.5.1.3 と同様に、三次元有限要素を用いた(ロ)-第 A.7 図に示す三次元 180° 対称モデルを用いる。

(2) 荷重条件及び境界条件

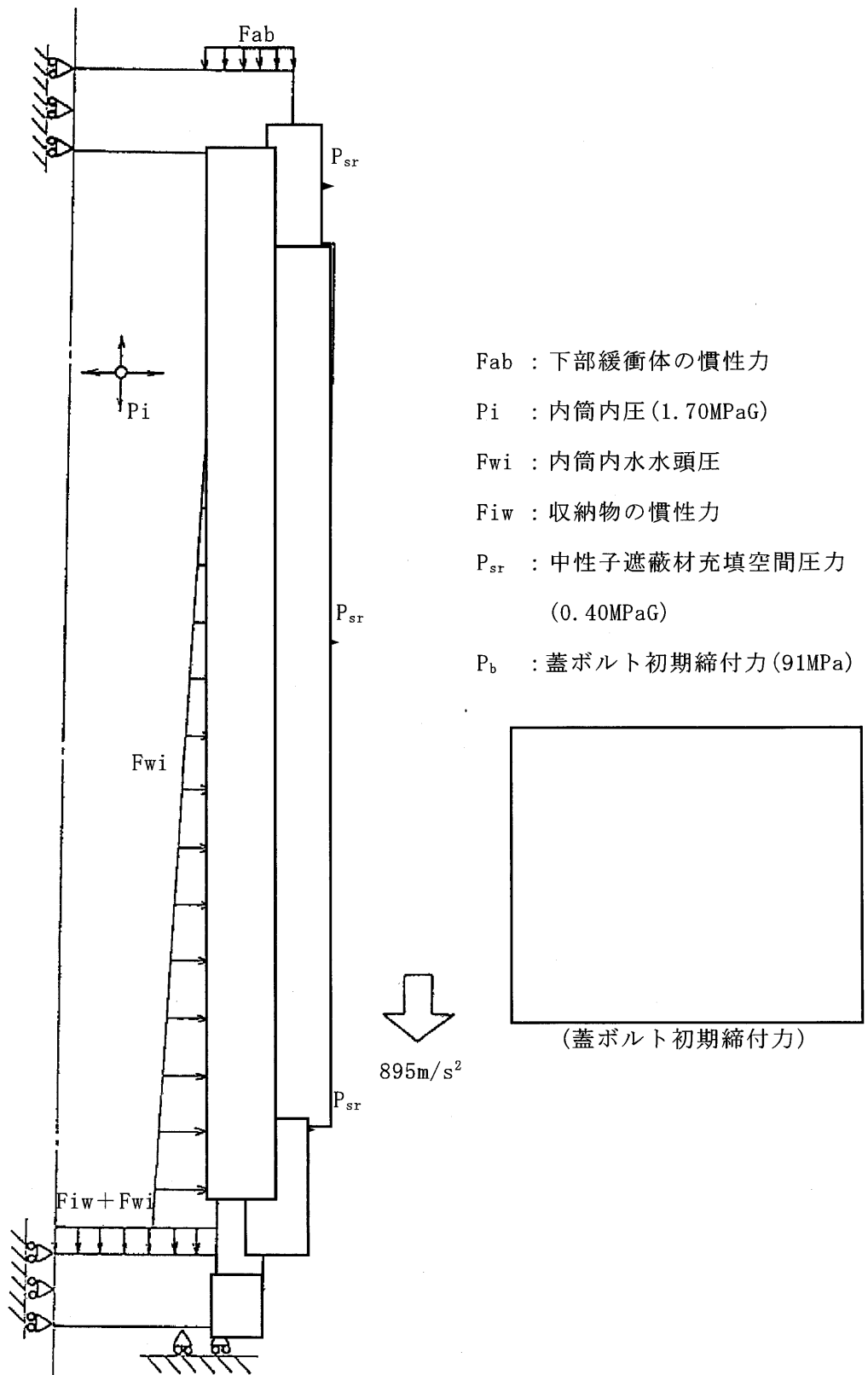
a. 荷重条件

頭部垂直落下時に作用する荷重は次のとおりである。衝撃加速度 (895m/s^2) による自重の慣性力が落下方向に働く。下部緩衝体の自重による慣性力が底部外面に働く。内部の収納物等(バスケット、収納物、内筒内水)の慣性力が蓋部内面へ、内筒内水の衝撃圧が内筒側面に働く。

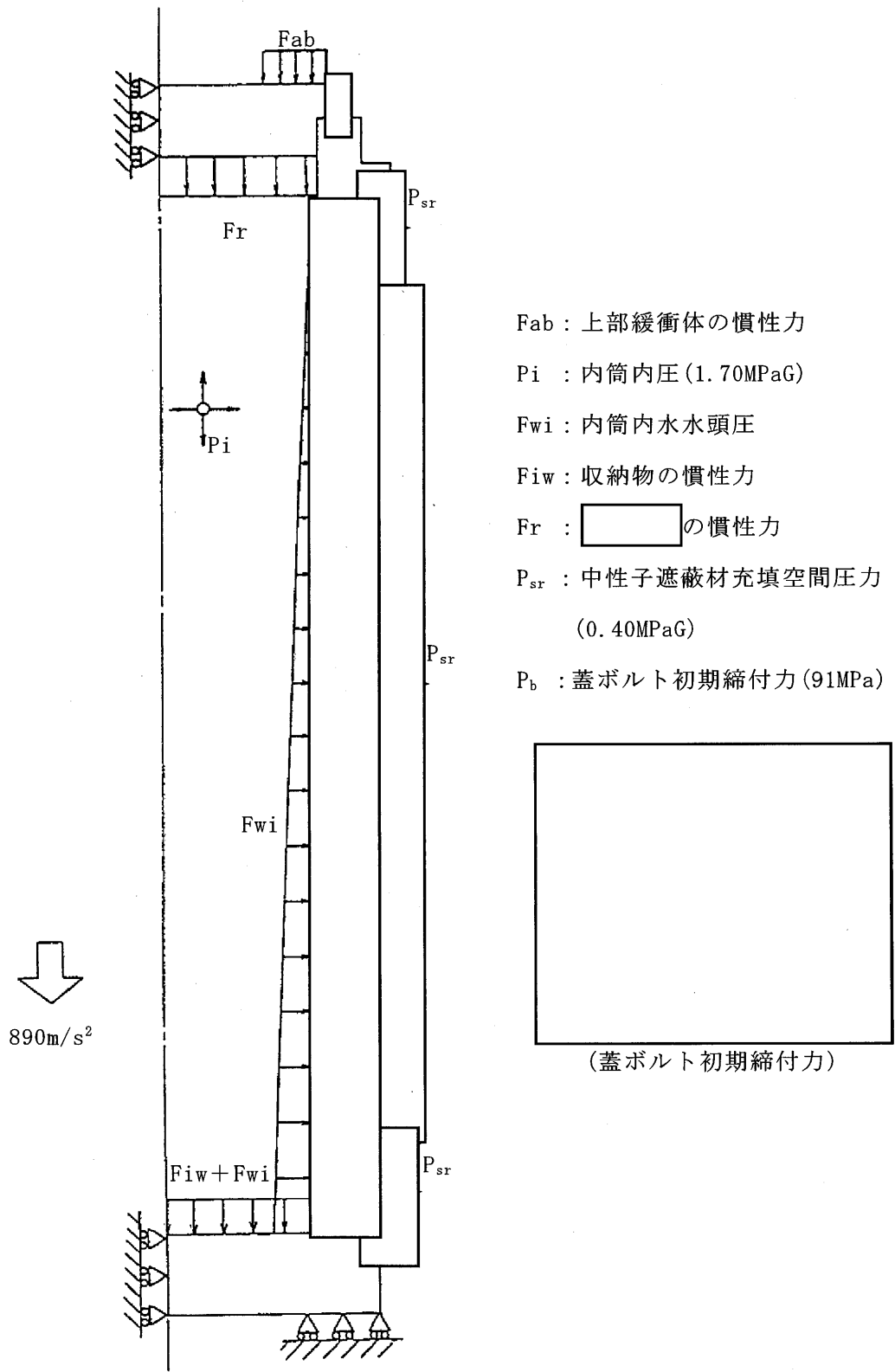
底部垂直落下時に作用する荷重は次のとおりである。衝撃加速度 (890m/s^2) による自重の慣性力が落下方向に働く。また、上部緩衝体の自重による慣性力が蓋外面に、の慣性力が蓋部内面に働く。内部の収納物等(バスケット、収納物、内筒内水)の慣性力が底部内面へ、内筒内水の衝撃圧が内筒側面に働く。

b. 境界条件

境界条件は衝撃力を受ける面の節点の軸方向変位及び対称面上の法線方向変位を拘束し、他は変位自由とした。それぞれの落下方向に対する荷重条件及び境界条件を(ロ)-第 A.43 図及び(ロ)-第 A.44 図に示す。



(口)-第 A. 43 図 頭部 9m 垂直落下時の荷重条件及び境界条件



- Fab : 上部緩衝体の慣性力
- Pi : 内筒内圧 (1.70MPaG)
- Fwi : 内筒内水水頭圧
- Fiw : 収納物の慣性力
- Fr : の慣性力
- Psr : 中性子遮蔽材充填空間圧力 (0.40MPaG)
- Pb : 蓋ボルト初期締付力 (91MPa)

(口)-第 A. 44 図 底部 9m 垂直落下時の荷重条件及び境界条件

(3) 解析結果

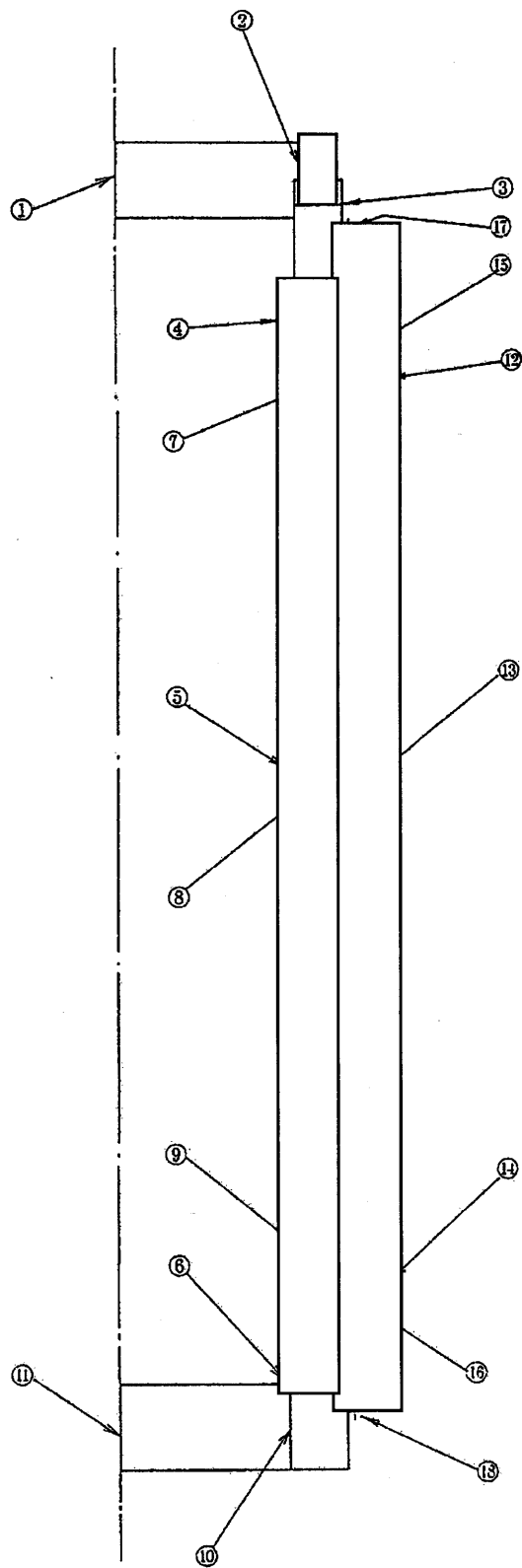
頭部垂直落下時の主要な位置((口)-第 A. 45 図参照)に対する一次応力強さ及び蓋ボルトの評価結果を(口)-第 A. 24 表に、また、底部垂直落下時の主要な位置((口)-第 A. 46 図参照)に対する一次応力強さ及び蓋ボルトの評価結果を(口)-第 A. 25 表に示す。

それぞれの表に示すように、全ての評価位置において(口)章 A. 1. 2 に示す解析基準を満足する。

なお、蓋ボルトの応力は 170℃における設計降伏点(□ MPa)より低いので、蓋ボルトは塑性変形しない。

頭部垂直落下時には、蓋に内部の収納物等の自重による慣性力が作用し、蓋 O リング位置において蓋とフランジとの間に口開き変形が生じる。その値は 0.1mm 以下であり、O リングの初期締付代 2.5mm に比べて小さく蓋部の密封性は維持される。

底部垂直落下時には、蓋はフランジに押し付けられる方向に慣性力が作用し、口開き変形は生じない。



評価断面	部 位
①	蓋中央部
②	蓋 端 部
③	フランジ
④	内筒上部
⑤	内筒中央部
⑥	内筒下部
⑦	中間筒上部
⑧	中間筒中央部
⑨	中間筒下部
⑩	底板端部
⑪	底板中央部
⑫	外筒上部
⑬	外筒中央部
⑭	外筒下部
⑮	上部仕切板
⑯	下部仕切板
⑰	上部リジソカバー
⑱	下部リジソカバー

(口)-第 A. 45 図 頭部 9m 垂直落下時の応力評価位置

(ロ)-第 A. 24 表 頭部 9m 垂直落下時の容器本体に対する一次応力及び蓋ボルトの評価

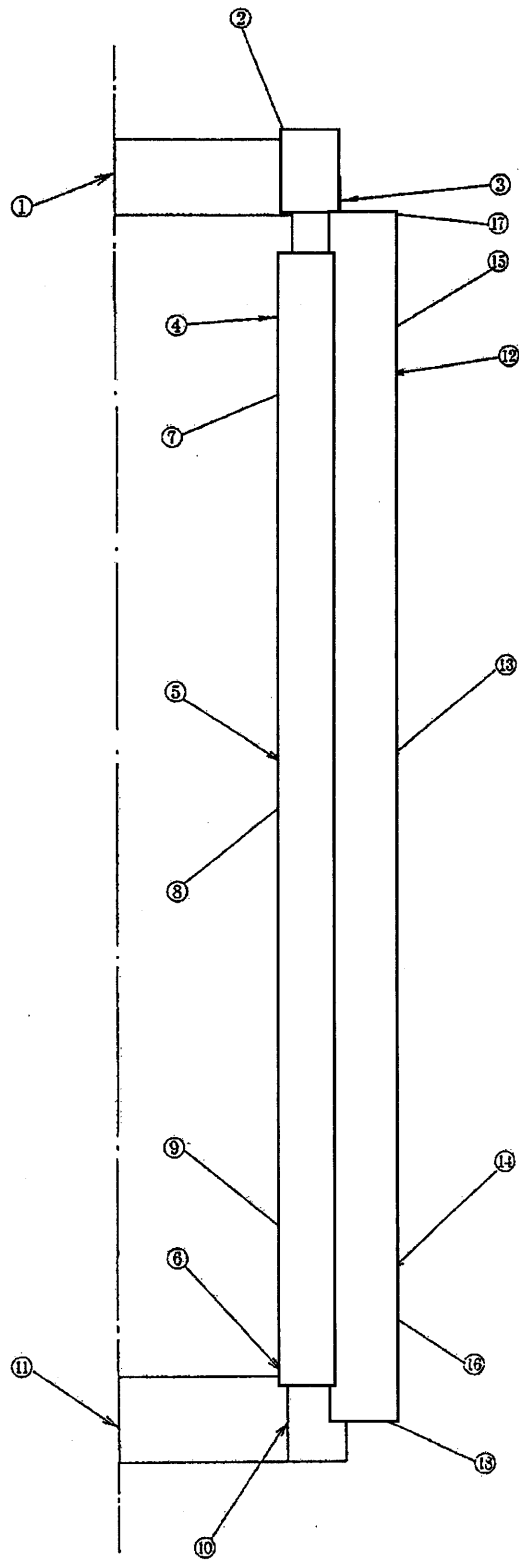
部位	断面 No. ^{注1)}	応力分類 ^{注2)}	表面	応力 強さ (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) ^{注3)}	余裕率 MS (-)
蓋	①	P _m	-	7.30	170		
		P _L +P _b	内	44.7			
	外		54.3				
②	P _L	-	240				
フランジ	③	P _L	-	72.7	170		
内筒	④	P _L	-	167	180		
	⑤	P _m	-	57.6			
	⑥	P _L	-	22.4			
中間筒	⑦	P _L	-	120	170		
	⑧	P _m	-	57.8			
	⑨	P _L	-	30.7			
底板	⑩	P _L	-	3.11	180		
	⑪	P _m	-	1.12			
		P _L +P _b	内	9.55			
外	7.61						
外筒	⑫	P _L	-	96.4	140		
	⑬	P _m	-	145			
	⑭	P _L	-	70.5			
仕切板	⑮	P _L	-	122	160		
	⑯	P _L	-	33.5			
レジ ン カ バ ー	⑰	P _L	-	101	160		
	⑱	P _L	-	24.2			
蓋 ボルト ^{注4)}	σ_m			110	170		
	$\sigma_m + \sigma_b$			182			

注 1) (ロ)-第 A. 45 図参照

注 2) P_m : 一次一般膜応力強さ、P_L : 一次局部膜応力強さ、P_b : 一次曲げ応力強さ
 σ_m : 断面平均応力、 σ_b : 曲げ応力

注 3) P_m 及び σ_m に対する基準値は 2/3Su、P_L、P_L+P_b 及び $\sigma_m + \sigma_b$ に対する基準値は 1.5 × (2/3Su) である。

注 4) (ロ)章 B. 4. 2 に示す一般の試験条件下の温度分布による熱膨張を考慮



評価断面	部 位
①	蓋中央部
②	蓋端部
③	フランジ
④	内筒上部
⑤	内筒中央部
⑥	内筒下部
⑦	中間筒上部
⑧	中間筒中央部
⑨	中間筒下部
⑩	底板端部
⑪	底板中央部
⑫	外筒上部
⑬	外筒中央部
⑭	外筒下部
⑮	上部仕切板
⑯	下部仕切板
⑰	上部レジンカバー
⑱	下部レジンカバー

(口)-第 A. 46 図 底部 9m 垂直落下時の応力評価位置

(ロ)-第 A. 25 表 底部 9m 垂直落下時の容器本体に対する一次応力及び蓋ボルトの評価

部位	断面 No. ^{注1)}	応力分類 ^{注2)}	表面	応力 強さ (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) ^{注3)}	余裕率 MS (-)
蓋	①	P _m	-	0.66	170		
		P _L +P _b	内	8.14			
	外		7.51				
	②	P _L	-	13.9			
フランジ	③	P _L	-	9.05	170		
内筒	④	P _L	-	32.4	180		
	⑤	P _m	-	63.4			
	⑥	P _L	-	103			
中間筒	⑦	P _L	-	33.2	170		
	⑧	P _m	-	64.1			
	⑨	P _L	-	125			
底板	⑩	P _L	-	66.9	180		
	⑪	P _m	-	10.3			
		P _L +P _b	内	42.1			
			外	60.0			
外筒	⑫	P _L	-	73.9	140		
	⑬	P _m	-	171			
	⑭	P _L	-	90.7			
仕切板	⑮	P _L	-	34.0	160		
	⑯	P _L	-	128			
レジン カバー	⑰	P _L	-	12.0	160		
	⑱	P _L	-	159			
蓋 ボルト ^{注4)}	σ_m			177	170		
	$\sigma_m + \sigma_b$			274			

注 1) (ロ)-第 A. 46 図参照

注 2) P_m : 一次一般膜応力強さ、P_L : 一次局部膜応力強さ、P_b : 一次曲げ応力強さ
 σ_m : 断面平均応力、 σ_b : 曲げ応力

注 3) P_m 及び σ_m に対する基準値は 2/3Su、P_L、P_L+P_b 及び $\sigma_m + \sigma_b$ に対する基準値は 1.5 × (2/3Su) である。

注 4) (ロ)章 B. 4. 2 に示す一般の試験条件下の温度分布による熱膨張を考慮

2. 伝熱フィン

垂直落下時には、伝熱フィンの中間筒取付部において外筒、フィン及び自重による慣性力によりせん断応力 τ (MPa)が生じる。

$$\tau = \frac{W \cdot G_v}{A}$$

ただし、

W : フィン 1 ピッチ当たりの外筒、フィン及び自重の全重量 (kg)

G_v : 頭部垂直落下時の衝撃加速度 (m/s^2)

A : フィン 1 ピッチ当たりの の面積 (mm^2)

(ロ)章 A. 5. 3. 1 の 2. より

$$W = \text{} \text{ kg}$$

$$G_v = 895 m/s^2$$

$$A = \text{} mm^2$$

したがって、

$$\tau = \frac{\text{} \times 895}{\text{}}$$

$$= 7.23 \text{ MPa}$$

応力強さ S (MPa)は

$$S = 2 \tau = 14.5 \text{ MPa}$$

160°Cにおける伝熱フィン材料の引張強さ σ_u は 177MPa であるので、一次一般膜応力強さ P_m (MPa)に対する基準値は

$$2/3 \sigma_u = 118 \text{ MPa}$$

したがって、余裕率 MS は、次のようになる。

$$MS = \frac{2 / 3 \sigma_u}{S} - 1 = \frac{118}{14.5} - 1$$

$$= 7.14$$

3.

頭部垂直落下時に 本の (× × 本、 × × 本)には燃料、バスケット及び内筒内水の慣性力が作用し、圧縮応力 σ_c (MPa)が生じる。

$$\sigma_c = \frac{W \cdot G_v}{A}$$

ただし、

W : 燃料重量 (10, 200kg) + バスケット重量 (6, 700kg) +
内筒内水重量 (3, 900kg) + 自重 (600kg)

G_v : 頭部垂直落下時の衝撃加速度 (m/s^2)

A : の全断面積 (mm^2)

ここで、

$$W = 10200 + 6700 + 3900 + 600 = 2.14 \times 10^4 \text{kg}$$

$$G_v = 895 \text{m/s}^2$$

$$A = \frac{\pi}{4} \times \{ \text{} \times (\text{} - \text{)}) + (\text{} - \text{)}) \} = 1.34 \times 10^5 \text{mm}^2$$

したがって、

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \frac{2.14 \times 10^4 \times 895}{1.34 \times 10^5} \\ &= 143 \text{MPa} \end{aligned}$$

170°Cにおけるステンレス鋼の設計降伏点 S_y は MPa であるので、

は塑性変形しない。

次に座屈強度について評価する。

の座屈限界応力 σ_{cr} (MPa) は次式で与えられる¹⁷⁾。

$$\sigma_{cr} = \pi^2 E (k/\ell)^2$$

ただし、

E : 縦弾性係数 (MPa)

$$k = (I/A)^{1/2}$$

I : 断面二次モーメント (mm^4)

A : 断面積 (mm^2)

ℓ : 座屈長さ (mm)

ここで、

$$E = 1.84 \times 10^5 \text{MPa} (170^\circ\text{C})$$

$$I = \pi \times (\square^4 - \square^4) / 64 = \square \text{mm}^4$$

$$A = \pi \times (\square^2 - \square^2) / 4 = \square \text{mm}^2$$

$$k = (\square / \square)^{1/2} = \square \text{mm}$$

$$l = 2 \times \square = \square \text{mm} (\text{一端固定梁})$$

したがって、

$$\begin{aligned} \sigma_{cr} &= \pi^2 \times 1.84 \times 10^5 \times (\square / \square)^2 \\ &= 7.79 \times 10^3 \text{MPa} \end{aligned}$$

$\sigma_c < \sigma_{cr}$ であるので \square は座屈することはない。

余裕率 MS は S_y に対して次のようになる。

$$\begin{aligned} MS &= \frac{S_y}{\sigma_c} - 1 = \frac{\square}{143} - 1 \\ &= \square \end{aligned}$$

4. バスケット

(1) 下部スペーサ

底部垂直落下時にバスケットの下部スペーサには、燃料及びバスケットの慣性力が作用し、圧縮応力 σ_c (MPa) が生じる。

$$\sigma_c = \frac{W \cdot G_v}{A}$$

ただし、

W : 燃料重量 ($\square \times 13$) + バスケット重量 (6,700kg)

G_v : 底部垂直落下時の衝撃加速度 (m/s^2)

A : 下部スペーサの全断面積 (mm^2)

ここで、

$$W = \square \times 13 + 6700 = \square \text{kg}$$

$$G_v = 890 \text{m/s}^2$$

$$A = \square \times \square + \square \times \square = \square \text{mm}^2$$

(アングル L $\square \times \square \times \square$ $\square \times \square$ 個、L $\square \times \square \times \square$ $\square \times \square$ 個)

したがって、

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \frac{\square \times 890}{\square} \\ &= 113 \text{MPa} \end{aligned}$$

190℃におけるステンレス鋼の設計降伏点 S_y は 146MPa であるので、下部スペーサは塑性変形しない。また、スペーサの高さは mm と細長比が小さいので座屈することもない。

したがって、余裕率 MS は、次のようになる。

$$MS = \frac{S_y}{\sigma_c} - 1 = \frac{146}{113} - 1 \\ = 0.29$$

(2)

バスケットの外周には が設置されている。 の強度評価における荷重条件としては自重のみである慣性力は無視し、外圧のみを考慮して評価する。

a. 胴部

頭部垂直落下時に に生じる応力 σ は次式で与えられる。

$$\sigma = P \times r / h$$

ただし、

P : に生じる外圧 (MPaG)

r : 平均半径 (mm)

h : 板厚 (mm)

ここで、

$$P = 5.5 \text{ MPaG}$$

(衝撃加速度を考慮した水頭圧と内筒内圧を足し合わせた値)

$$h = \text{} \text{ mm}$$

$$r = \text{} \text{ mm}$$

したがって、

$$\sigma = 5.5 \times \frac{\text{}}{\text{}} = 58.5 \text{ MPa}$$

190℃におけるステンレス鋼の設計降伏点 S_y は MPa であるので、 は塑性変形しない。

次に座屈強度について評価する。

薄肉円筒の外圧による座屈限界外圧 P_{cr} (MPaG) は次式で与えられる。

$$P_{cr} = \frac{E}{4(1-\nu^2)} \left(\frac{h}{r}\right)^3$$

ただし、

E : 縦弾性係数 (MPa)

ν : ポアソン比 (-)

ここで、

$$E = 183,000 \text{ MPa (190}^\circ\text{C)}$$

$$\nu = 0.3$$

したがって、

$$P_{cr} = \frac{183000}{4 \times (1 - 0.3^2)} \times \left(\frac{\square}{\square}\right)^3$$

$$= 41.8 \text{ MPaG}$$

$P < P_{cr}$ であるので \square は座屈することはない。

余裕率 MS は S_y に対して次のようになる。

$$MS = \frac{S_y}{\sigma} - 1 = \frac{\square}{58.5} - 1$$

$$= \square$$

b. 端部

\square 端部を端部固定の円板にモデル化すると、その最大曲げ応力 σ_b (MPa) は、次式で与えられる。

$$\sigma_b = 0.75 \times \frac{P \cdot a^2}{t^2}$$

ただし、

a : 円板の半径 (mm)

P : 外圧 (MPaG)

t : 板厚 (mm)

ここで、

$$a = \square \text{ mm}$$

$$P = 5.5 \text{ MPaG}$$

$$t = \square \text{ mm}$$

したがって、

$$\sigma_b = 0.75 \times \frac{5.5 \times \square^2}{\square^2}$$
$$= 20.9 \text{MPa}$$

余裕率 MS は Sy に対して次のようになる。

$$MS = \frac{Sy}{\sigma} - 1 = \frac{146}{20.9} - 1$$
$$= 5.99$$

5. 燃料被覆管

(ロ)章 A. 10.4 実機大スケール模擬燃料集合体を用いた 9m 落下試験に示すように、9m 頭部及び底部垂直落下時において燃料集合体にわずかな残留変形が認められるものの、燃料被覆管は破損しない。

6. スツール

底部垂直落下時にスツールには燃料の慣性力が作用し、圧縮応力 σ_c (MPa) が生じる。

$$\sigma_c = \frac{W \cdot G_v}{A}$$

ただし、

W : 燃料の重量 (730kg) + スツールの重量 (\square kg)

G_v : 底部垂直落下時の衝撃加速度 (m/s^2)

A : スツール本体の断面積

ここで、

$$W = \square \text{kg}$$

$$G_v = 890 \text{m/s}^2$$

$$A = \square \times 4 + \square \times 4 = \square \text{mm}^2$$

したがって、

$$\sigma_c = \frac{\square \times 890}{\square}$$
$$= 68.7 \text{MPa}$$

190°Cにおけるステンレス鋼の設計降伏点 Sy は 146MPa であるのでスツールは塑性変形しない。

次に座屈強度について評価する。

スツール本体の座屈限界応力 σ_{cr} (MPa) は次式で与えられる¹⁷⁾。

$$\sigma_{cr} = \pi^2 E (k/\ell)^2$$

ただし、

E : 縦弾性係数 (MPa)

$$k = (I/A)^{1/2}$$

I : 断面二次モーメント (mm⁴) (L × ×)

A : 断面積 (mm²) (L × ×)

ℓ : 座屈長さ (mm)

ここで、

$$E = 1.83 \times 10^5 \text{MPa} (190^\circ\text{C})$$

$$I = \text{ mm}^4$$

$$A = \text{ mm}^2$$

$$k = (\text{} / \text{})^{1/2} = \text{ mm}$$

$$\ell = 2 \times \text{} = \text{ mm} \text{ (一端固定梁)}$$

したがって、

$$\begin{aligned} \sigma_{cr} &= \pi^2 \times 1.83 \times 10^5 \times (\text{} / \text{})^2 \\ &= 2.38 \times 10^4 \text{MPa} \end{aligned}$$

$\sigma_c < \sigma_{cr}$ であるので支持脚は座屈することはない。

余裕率 MS は S_y に対して次のようになる。

$$\begin{aligned} MS &= \frac{S_y}{\sigma_c} - 1 = \frac{146}{68.7} - 1 \\ &= 1.13 \end{aligned}$$

A.6.1.2 水平落下

9m 水平落下時の衝撃力に対して、輸送容器の本体及び蓋は十分な強度で密封性を保持することを示す。輸送容器内部のバスケット及び燃料集合体は破損することなく、かつ遮蔽評価に影響を及ぼすような塑性変形が生じないことを示す。

1. 輸送容器本体

水平落下時の衝撃力に対する輸送容器本体の解析を有限要素法による ABAQUS コードにより行う。

(1) 解析モデル

(ロ)章 A.5.3.2 と同様に、三次元有限要素を用いた(ロ)-第 A.27 図に示す三次元 180° 対称モデルを用いる。

(2) 荷重条件及び境界条件

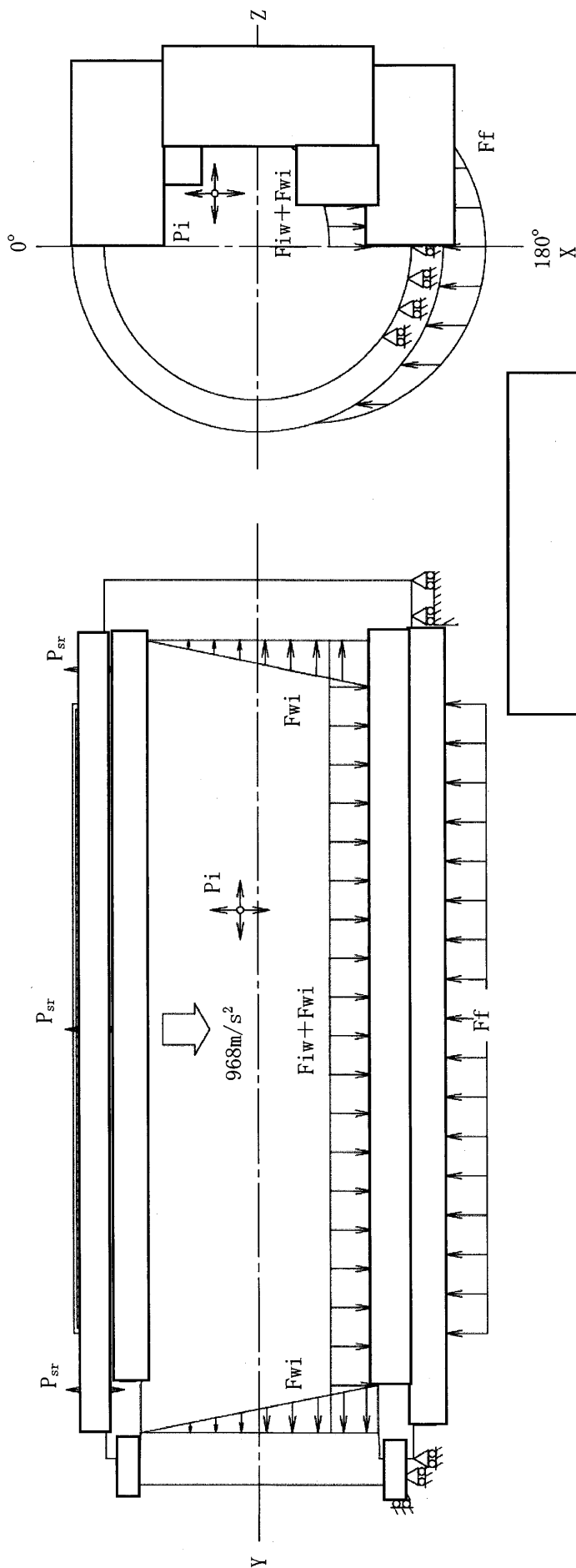
a. 荷重条件

水平落下時に作用する荷重を(ロ)-第 A.47 図に示す。ここで、衝撃加速度 (968m/s^2) による自重の慣性力が落下方向に働く。内部の収納物等(バスケット、収納物、内筒内水)の慣性力が内筒内面に、内筒内水の衝撃圧が蓋及び底部内面に、また、フィンの反力が外筒に働く。

なお、(ロ)章 A.10.6 に示す実証試験に基づくトラニオンはせん断破壊しているため、トラニオンから輸送容器に伝わる荷重の影響は小さいことが予想される。ここで、(ロ)章 A.10.10 に示すような理論式に基づく評価により、トラニオン衝突時の衝突荷重を考慮してフィンの荷重を補正した評価と、フィン及びトラニオンからの荷重が個別に作用する場合の評価を比較した。この結果、トラニオン衝突時の衝撃荷重を考慮してフィンの荷重を補正した評価の方が保守的であることから、有限要素法による ABAQUS コードを用いた評価においてもこの荷重条件を採用した。

b. 境界条件

(ロ)-第 A.47 図に示すように底板と蓋及びフランジの緩衝体を取り付く箇所において落下方向(X)の変位を、また、 0° - 180° 面において落下方向と直角方向(Z)の変位を拘束した。



P_i : 内筒内圧 (1.70MPaG)

F_{wi} : 内筒内水水頭圧

F_{iw} : 収納物の慣性力

F_f : フインの反力

P_{sr} : 中性子遮蔽材充填空間圧力 (0.40MPaG)

P_b : 蓋ボルト初期締付力 (91MPa)

(蓋ボルト初期締付力)

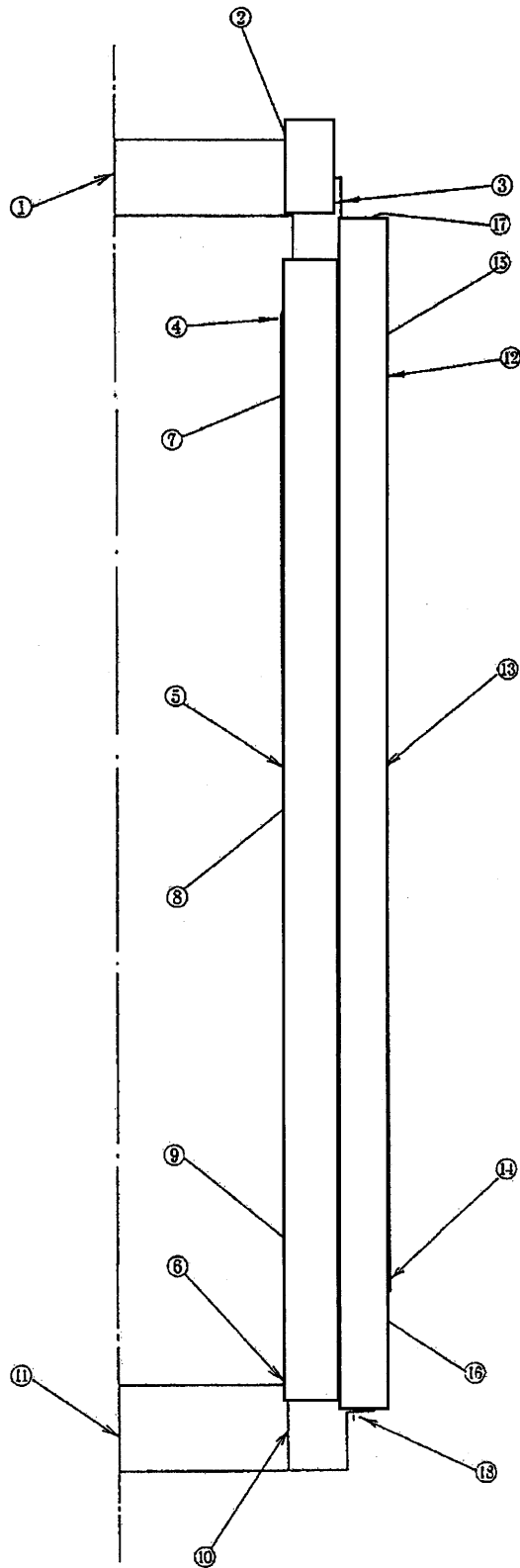
(口)-第 A. 47 図 9m 水平落下時の荷重条件及び境界条件

(3) 解析結果

水平落下時の主要な位置((口)-第 A. 48 図参照)に対する一次応力強さ及び蓋ボルトの評価結果を(口)-第 A. 26 表に示す。表に示すように、全ての評価位置において(口)章 A. 1. 2 に示す解析基準値を満足する。

なお、蓋ボルトの応力は 170℃における設計降伏点(□MPa)より低いので、蓋ボルトは塑性変形しない。

水平落下時には、蓋に緩衝体からの慣性力が作用し、蓋 O リング位置において蓋とフランジとの間に口開き変形が生じる。その値は 0.5mm 以下であり、O リングの初期締付代 2.5mm に比べて小さく蓋部の密封性は維持される。



評価断面	部 位
①	蓋 中 央 部
②	蓋 端 部
③	フ ラ ン ジ
④	内 筒 上 部
⑤	内 筒 中 央 部
⑥	内 筒 下 部
⑦	中 間 筒 上 部
⑧	中 間 筒 中 央 部
⑨	中 間 筒 下 部
⑩	底 板 端 部
⑪	底 板 中 央 部
⑫	外 筒 上 部
⑬	外 筒 中 央 部
⑭	外 筒 下 部
⑮	上 部 仕 切 板
⑯	下 部 仕 切 板
⑰	上 部 レジンカバー
⑱	下 部 レジンカバー

(ロ)-第 A. 48 図 9m 水平落下時の応力評価位置

(ロ)-第 A. 26 表 9m 水平落下時の容器本体に対する一次応力及び蓋ボルトの評価

部位	断面 No. 注 1)	応力分類 注 2)	表面	応力 強さ (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) 注 3)	余裕率 MS (-)
蓋	①	P _m	-	34.9	170		
		P _L +P _b	内	46.8			
			外	42.5			
②	P _L	-	107				
フランジ	③	P _L	-	132	170		
内筒	④	P _L	-	108	180		
	⑤	P _m	-	138			
	⑥	P _L	-	73.6			
中間筒	⑦	P _L	-	94.5	170		
	⑧	P _m	-	149			
	⑨	P _L	-	81.1			
底板	⑩	P _L	-	55.8	180		
	⑪	P _m	-	45.0			
		P _L +P _b	内	54.5			
外	35.5						
外筒	⑫	P _L	-	118	140		
	⑬	P _m	-	240			
	⑭	P _L	-	99.8			
仕切板	⑮	P _L	-	104	160		
	⑯	P _L	-	88.2			
レジン カバー	⑰	P _L	-	129	160		
	⑱	P _L	-	84.4			
蓋 ボルト 注 4)	σ_m			367	170		
	$\sigma_m + \sigma_b$			643			

注 1) (ロ)-第 A. 48 図参照

注 2) P_m: 一次一般膜応力強さ、P_L: 一次局部膜応力強さ、P_b: 一次曲げ応力強さ
 σ_m : 断面平均応力、 σ_b : 曲げ応力

注 3) P_m 及び σ_m に対する基準値は 2/3Su、P_L、P_L+P_b 及び $\sigma_m + \sigma_b$ に対する基準値は 1.5×(2/3Su) である。

注 4) (ロ)章 B. 4. 2 に示す一般の試験条件下の温度分布による熱膨張を考慮

2. バスケット

(1) チャンネル

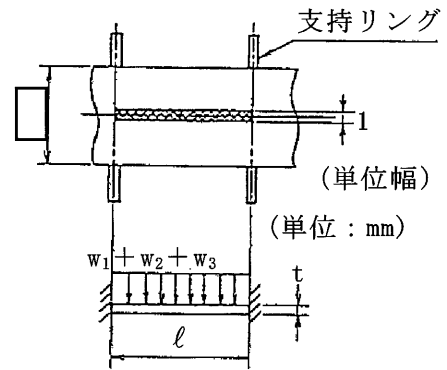
水平落下時に、チャンネルには、燃料、チャンネル内水及びチャンネル板自体の慣性力により曲げ応力が生じる。チャンネル板を(ロ)-第 A. 49 図に示す。

支持リングにおいて固定する単位幅の梁を考えると、曲げ応力 σ_b (MPa) は、次式で与えられる。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z}$$

$$M = \frac{1}{12} (w_1 + w_2 + w_3) \times \ell^2 \times G_H$$

$$Z = \frac{t^3}{6}$$



(ロ)-第 A. 49 図 チャンネル板
水平落下時の解析モデル

ただし、

M : 曲げモーメント (N・mm/mm)

Z : 断面係数 (mm³/mm)

G_H : 衝撃加速度 (m/s²)

w_1 : 燃料の単位面積当たりの重量 (kg/mm²)

w_2 : チャンネル内水の単位面積当たりの重量 (kg/mm²)

w_3 : チャンネル板自体の単位面積当たりの重量 (kg/mm²)

t : 板厚 (mm)

ここで、

$$G_H = 968 \text{ m/s}^2$$

$$t = \square \text{ mm}$$

$$\ell = \square \text{ mm}$$

$$w_1 = (\text{燃料重量}) / (\text{チャンネル板全長} \times \text{幅})$$

$$= \frac{\square}{(\square \times \square)}$$

$$= \square \text{ kg/mm}^2$$

14×14 配列型燃料棒の排水を考慮して、

$$w_2 = (\square - \pi/4 \times 10.72^2 \times 14^2) \times 10^{-6} / \square$$

$$= \square \text{ kg/mm}^2$$

$$w_3 = \square \times 7.93 \times 10^{-6}$$

$$= \square \text{ kg/mm}^2$$

したがって、

$$M = (\square + \square + \square) \times \square^2 \times 968/12$$

$$= \square \text{ N}\cdot\text{mm/mm}$$

$$Z = \square^2/6 = \square \text{ mm}^3/\text{mm}$$

$$\sigma b = \square / \square$$

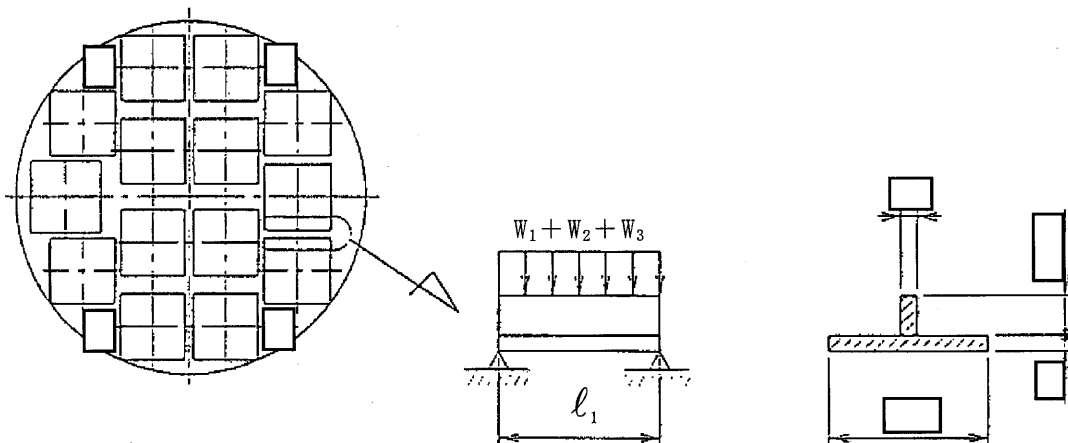
$$= 204 \text{ MPa}$$

190℃におけるチャンネル板材料の降伏応力 σ_y は \square MPa であるので、曲げ応力に対する基準値は、 $1.5\sigma_y = \square$ MPa となり、余裕率 MS は、次のようになる。

$$MS = \frac{1.5\sigma_y}{\sigma b} - 1 = \frac{\square}{204} - 1 = \square$$

(2) チャンネル支持部

(ロ)-第 A. 50 図に示すチャンネル支持部に生じる曲げ応力 σb (MPa) は支持部とチャンネル板との組合せ部材を両端支持梁として考えると、次式で与えられる。



(ロ)-第 A. 50 図 チャンネル支持部解析モデル

$$\sigma b = \frac{M}{Z}$$

$$M = \frac{1}{8}(w_1 + w_2 + w_3) \times l_1 \times G_H$$

ただし、

M : 曲げモーメント (N・mm)

Z : 断面係数 (mm³)

w₁ : チャンネル支持部に作用する燃料の重量 (kg)

w₂ : チャンネル支持部に作用するチャンネル内水の重量 (kg)

w₃ : 自重 (kg)

G_H : 衝撃加速度 (m/s²)

l₁ : チャンネル支持部長さ (mm)

ここで、

$$l_1 = \boxed{} \text{ mm}$$

$$w_1 = (\text{燃料重量}) / (\text{支持リング数})$$

$$= \boxed{} / \boxed{} = \boxed{} \text{ kg}$$

$$w_2 = w_2 \times l \times l_1$$

$$= \boxed{} \times \boxed{} \times \boxed{} = \boxed{} \text{ kg}$$

$$w_3 = (\boxed{} \times \boxed{} \times \boxed{} + \boxed{} \times \boxed{}) \times \boxed{} \times 7.93 \times 10^{-6}$$

((口)-第 A. 50 図参照)

$$= \boxed{} \text{ kg}$$

$$Z = \boxed{} \text{ mm}^3$$

$$G_H = 968 \text{ m/s}^2$$

したがって、

$$M = (\boxed{} + \boxed{} + \boxed{}) \times \boxed{} \times 968 / 8$$

$$= \boxed{} \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$\sigma b = \boxed{} / \boxed{}$$

$$= 48.2 \text{ MPa}$$

190°Cにおけるチャンネル支持部(支持リング)材料の設計降伏点 S_y は MPa
であるので、余裕率 MS は、次のようになる。

$$MS = \frac{1.5S_y}{\sigma_b} - 1 = \frac{\text{}}{48.2} - 1$$
$$= \text{}$$

3. 燃料被覆管

(口)章 A. 10. 4 に示すように、9m 水平落下時において燃料集合体に残留変形が認められるものの、燃料被覆管は破損しない。

A.6.1.3 コーナー落下

(ロ)-第 A.23 表に示すように、コーナー落下時の衝撃加速度は垂直落下及び水平落下に比べて小さい。

したがって、コーナー落下時の輸送容器の各部の応力は垂直及び水平落下時の結果より厳しくなることはない。ただし、頭部コーナー落下時は、頭部垂直落下時と違い蓋部に作用する緩衝体の圧潰力が蓋全面に作用しないので内部の収納物等による慣性力が蓋を介して蓋ボルトに作用するので蓋ボルトの健全性を評価する。

頭部コーナー落下時に、蓋ボルトには、蓋自重、及び内部の収納物等(バスケット、収納物、内筒内水)の慣性力と内筒内圧による引張応力が生じる。ここで、初期締付トルクによる応力と熱応力によるボルト引張力と等しい圧縮力が蓋ボルト穴部に反力として作用し両者は釣り合った状態になるが、この圧縮力よりも大きな外力の慣性力が作用すると、蓋ボルトに引張力が付加されることにより蓋ボルトは伸びて蓋ボルト穴部の圧縮力は解放される。したがって、頭部コーナー落下時に蓋ボルトに生じる応力は外力の慣性力と内筒内圧による引張応力となる。

1. 慣性力により生じる引張応力： σt_1 (MPa)

慣性力によりボルトに生じる引張応力は、次式で与えられる。

$$\sigma t_1 = W \times Gc \times \cos \theta / ((\pi / 4) \times d^2 \times n)$$

ただし、

W : 蓋・バスケット・燃料・内筒内水の重量 = 26,100kg

(蓋 5,300kg、バスケット 6,700kg、燃料 10,200kg、内筒内水 3,900kg)

Gc : 衝撃加速度 = 571m/s²

θ : 落下角度 = 22.5°

d : ボルト最小径 = mm ()

n : ボルトの数 = 本

したがって、

$$\begin{aligned} \sigma t_1 &= 26100 \times 571 \times \cos 22.5^\circ / ((\pi / 4) \times \text{}^2 \times \text{}) \\ &= \text{} \text{MPa} \end{aligned}$$

2. 内筒内圧により生じる引張応力： σt_2 (MPa)

内筒内圧によりボルトに生じる引張応力は、次式で与えられる。

$$\sigma t_2 = (\pi/4) \times d_g^2 \times P / ((\pi/4) \times d^2 \times n)$$

ただし、

$$d_g : \text{蓋 O リング溝中心径} = \boxed{} \text{mm}$$

$$P : \text{内筒内圧} = 1.70 \text{MPaG}$$

したがって、

$$\begin{aligned} \sigma t_2 &= (\pi/4) \times \boxed{}^2 \times 1.70 / ((\pi/4) \times \boxed{}^2 \times \boxed{}) \\ &= \boxed{} \text{MPa} \end{aligned}$$

3. ボルトに生じる引張応力の合計： σt (MPa)

各荷重によりボルトに生じる引張応力の合計は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \sigma t &= \sigma t_1 + \sigma t_2 \\ &= \boxed{} + \boxed{} \\ &= 441 \text{MPa} \end{aligned}$$

ボルト材料の 170℃における解析基準値 $2/3 \cdot S_u$ は $\boxed{}$ MPa であるので余裕率 MS は、次のようになる。

$$\begin{aligned} MS &= 2/3 \times S_u / \sigma t - 1 \\ &= \boxed{} \end{aligned}$$

なお、蓋ボルトの応力は 170℃における設計降伏点 ($\boxed{}$ MPa) より低いので、蓋ボルトは塑性変形しない。

A. 6. 1. 4 傾斜落下

傾斜落下については、落下方向がコーナー落下と垂直落下との間の場合とコーナー落下と水平落下との間の場合がある。

前者の場合は、落下エネルギーの一部が輸送物を垂直方向に回転されるのに費やされるので、エネルギーの吸収は垂直落下とコーナー落下よりも小さくなり、これらのいずれよりも条件が厳しくなることはない。

一方、後者の場合、細長い輸送物では落下エネルギーの一部が輸送物の回転エネルギーとなり二次衝突側の吸収エネルギーが増加する。特に、蓋密封部が二次衝撃側となる場合、密封性能を損なうおそれがあるため、二次衝撃側の衝撃加速度の影響を評価する必要がある。(ロ)章 A. 10. 7 に示すように、落下試験結果を基にした密封性能の評価の結果、傾斜落下時に輸送物の健全性が損なわれることはない。

A. 6. 1. 5 結果の要約

1. 結果の要約

落下試験 I の衝撃加速度と緩衝体及びフィンの変形量の要約は(ロ)-第 A. 23 表のとおりである。なお、緩衝体変形量は設計基準変形量以下であり、容器本体に発生する衝撃加速度が急激に上昇することはない。

本試験では、緩衝体は変形するが、緩衝体は輸送容器本体から外れることはない。

2. 結果の検討

落下試験 I による塑性変形は、緩衝体及びフィンに生じるが、輸送容器本体及びバスケットの構造上の健全性が損なわれることはない。

以上の解析及び評価は周囲温度 38℃ の高温側の環境下に対して行った。低温側の環境下に対しては、(ロ)章 A. 4. 2 に示すように低温になっても材料は脆化等がなく、機械的性質が低下することがないため、また、(ロ)章 A. 10. 8 に示すように応力は基準値を満足するため、輸送物の構造上の健全性は維持され、密封性は維持される。

A.6.2 強度試験・落下試験Ⅱ(1m落下時)

本項では、落下試験Ⅰに引き続いて落下試験Ⅱが行われるとして輸送物が1m高さから直径150mmの軟鋼棒へ落下した場合に対して、輸送物が耐えることを解析によって示す。

落下試験Ⅱは、輸送物が最大破損を受けるよう垂直又は水平方向に落下し、バルブ部以外の部分については軟鋼棒が重心を直撃するとして解析した。

これ以外の落下は、落下エネルギーが回転モーメントとして作用するので輸送物に対して上記落下より大きな破損を生じることはない。

解析は垂直方向において蓋部及び底部、また、水平方向においては中間筒及びバルブ部について行う。

なお、密封境界を構成する蓋及びフランジ周辺が軟鋼棒上へ垂直又は水平方向に落下する場合は、当該部は上部緩衝体に覆われており、軟鋼棒からの荷重が直接作用することはないため、密封性能が損なわれることはない。

1. 垂直落下

押抜きせん断によって板にせん断破壊を引き起こすのに必要な力 $F(N)$ は、次式で与えられる。

$$F = \pi d \times t \times S$$

ただし、

d : 軟鋼棒直径 = 150mm

t : 板厚 (mm)

S : せん断強さ (MPa)

蓋部の板厚は mm、底部の板厚は mm であるので、薄い方の蓋に対して検討する。

$$t = \text{ mm}$$

せん断強さはせん断ひずみエネルギー説に基づき設計引張強さの $1/\sqrt{3}$ とすると、せん断強さは(ロ)-第 A.2 図より 170°Cにおいて、

$$S = \text{} / \sqrt{3} = \text{ MPa}$$

したがって、

$$F = \pi \times 150 \times \square \times \square \\ = \square \text{ N}$$

落下時に軟鋼棒が圧潰することにより輸送容器に加わる最大荷重 F_{bar} (N) は軟鋼棒が塑性変形するときであるから、

$$F_{\text{bar}} = \sigma_u \times A$$

ただし、

σ_u : 軟鋼棒の引張強さ (MPa)

A : 軟鋼棒の断面積 (mm^2)

$$A = \frac{\pi}{4} \times d^2$$

d : 軟鋼棒の直径 = 150mm

したがって、

$$A = \frac{\pi}{4} \times 150^2 \\ = 1.77 \times 10^4 \text{ mm}^2$$

σ_u を 400MPa とすると、

$$F_{\text{bar}} = 400 \times 1.77 \times 10^4 \\ = 7.08 \times 10^6 \text{ N}$$

となる。

したがって、余裕率 MS は、次式で与えられる。

$$MS = \frac{F}{F_{\text{bar}}} - 1 \\ = \frac{\square}{7.08 \times 10^6} - 1 \\ = \square$$

以上より、蓋部及び底部が貫通されることはない。

また、蓋はフランジ部に押し付けられ、O リング取付位置での口開き変形は生じない。

2. 水平落下

(1) 中間筒の貫通強度

水平落下の場合、軟鋼棒にはフィン及び外筒が衝突して変形し、破損する可能性がある。したがって、水平落下では中間筒に対して検討する。

中間に鉛を有する三層構造の外側胴部の耐貫通板厚 tr (in)は次式で与えられる²¹⁾。

$$tr = (W/Su)^{0.71}$$

ただし、

W : 輸送物重量 (lb_s)

Su : 設計引張強さ (lb/in^2)

ここで、

$$W = 115 \times 10^3 \text{ kg} = 2.54 \times 10^5 \text{ } lb_s$$

$$Su = \boxed{} \text{ MPa} = \boxed{} \text{ } lb/in^2 (170^\circ\text{C})$$

したがって、

$$tr = (2.54 \times 10^5 / \boxed{})^{0.71}$$

$$= \boxed{} \text{ in}$$

$$= \boxed{} \text{ mm}$$

中間筒の板厚は、

$$t = \boxed{} \text{ mm}$$

であるので、余裕率 MS は、次のようになる。

$$MS = \frac{t}{tr} - 1$$

$$= \frac{\boxed{}}{\boxed{}} - 1$$

$$= 0.15$$

したがって、中間筒が貫通されることはない。

(2) バルブ部の貫通強度

ベント・水位調整バルブ、ドレンバルブ及び水位調整用加圧バルブは、(イ)-第 C.9 図、(イ)-第 C.10 図及び(イ)-第 C.12 図に示すようにカバープレートがついており、軟鋼棒の直撃に対してバルブ本体を保護する。

解析は、1.と同様にして、カバープレートの貫通強度を検討する。

押抜きせん断によって板にせん断破壊を引き起こすのに必要な力 $F(N)$ は、次式で与えられる。

$$F = \pi d \times t \times S$$

ただし、

d : 軟鋼棒直径 = 150mm

t : 板厚 = mm

カバープレート材料の 180°Cにおける設計引張強さは MPa であるので、

$$S = \frac{\text{}}{\sqrt{3}} = \text{} \text{ MPa}$$

したがって、

$$F = \pi \times 150 \times \text{} \times \text{} \\ = \text{} \text{ N}$$

落下時に軟鋼棒が輸送容器に加える最大荷重 $F_{\text{bar}}(N)$ は、1. より、

$$F_{\text{bar}} = 7.08 \times 10^6 \text{ N}$$

である。

したがって、余裕率 MS は次式で与えられる。

$$MS = \frac{F}{F_{\text{bar}}} - 1 \\ = \frac{\text{{}}}{7.08 \times 10^6} - 1 \\ = \text{{}}$$

したがって、カバープレートが貫通されることはない。

A. 6. 2. 1 結果の要約

落下試験Ⅱにおいては緩衝体、フィン、外筒及びレジンに貫通又は変形が生じるおそれがあるが、容器本体に破損が生じることはない。

以上の解析及び評価は周囲温度 38℃の高温側の環境下に対して行った。低温側の環境下に対しては、(ロ)章 A. 4. 2 に示すように低温になっても材料は脆化等がなく、機械的性質が低下することがないので、輸送物の構造上の健全性は維持されるため、密封性が損なわれることはない。

A. 6.3 熱的試験

A. 6.3.1 温度及び圧力の要約

1. 圧力

特別の試験条件における輸送容器内の圧力は(口)章 B. 5. 4 において 4. 97MPaG である。構造解析では 5. 20MPaG として評価する。

2. 温度

輸送物各部の最高温度は(口)章 B. 5. 3 に示されている。各部位の最高温度と解析基準値に適用する温度を(口)-第 A. 27 表に示す。

(口)-第 A. 27 表 特別の試験条件における最高温度の要約

(単位 : °C)

部 位	熱解析結果	解析基準値に適用する温度
蓋	375	380
蓋ボルト	253	260
フランジ	431	440
外 筒	501	510
中 間 筒	252	260
内 筒	207	210
底 板	398	400
仕 切 板	596	600

A.6.3.2 熱膨張

本項では、特別の試験条件下における輸送容器本体各部の応力計算を行う。(ロ)章 B.5.3 に示す温度分布と内筒内圧を考慮し、解析は有限要素法による ABAQUS コードを用いて行う。

1. 解析モデル

解析モデルとしては上下レジン部が落下試験Ⅱにより破損したとして上下レジン部を取り除いた(ロ)-第 A.51 図に示す三次元 180° 対称モデルを用いる。

2. 荷重条件及び境界条件

(1) 荷重条件

(ロ)章 B.5.3 に示される容器本体の温度差が一番大きくなる火災発生 30 分後における温度分布((ロ)-第 B.14 図参照)を考慮する。容器本体に対しては、内筒内圧(5.20MPaG)を荷重条件とし、また、蓋ボルトに対しては熱膨張及び内筒内圧(5.20MPaG)を荷重条件とする。なお、中性子遮蔽材充填空間の圧力は、可溶栓によって開放される。

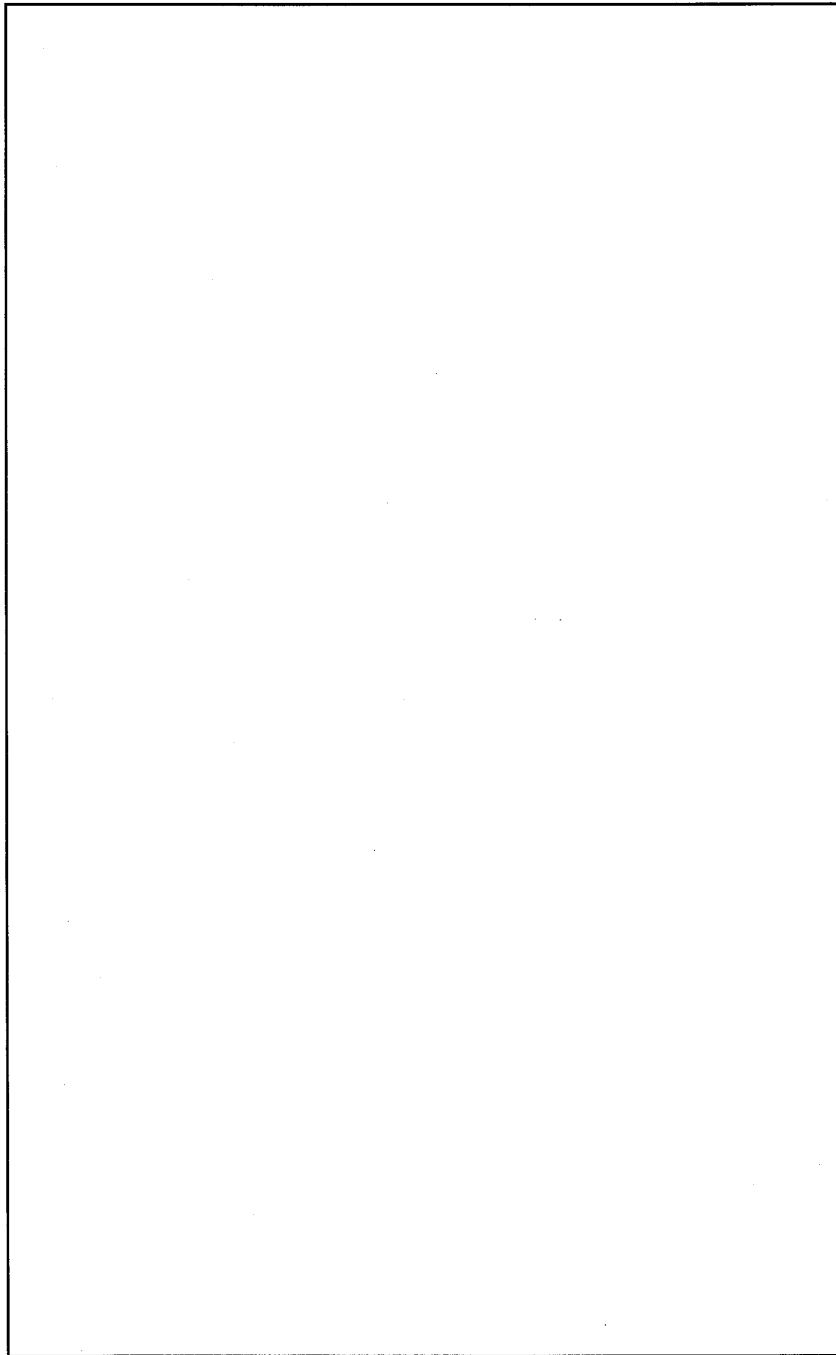
また、蓋ボルトには初期締付トルク (N·m) による引張応力を予応力として考慮する。

(2) 境界条件

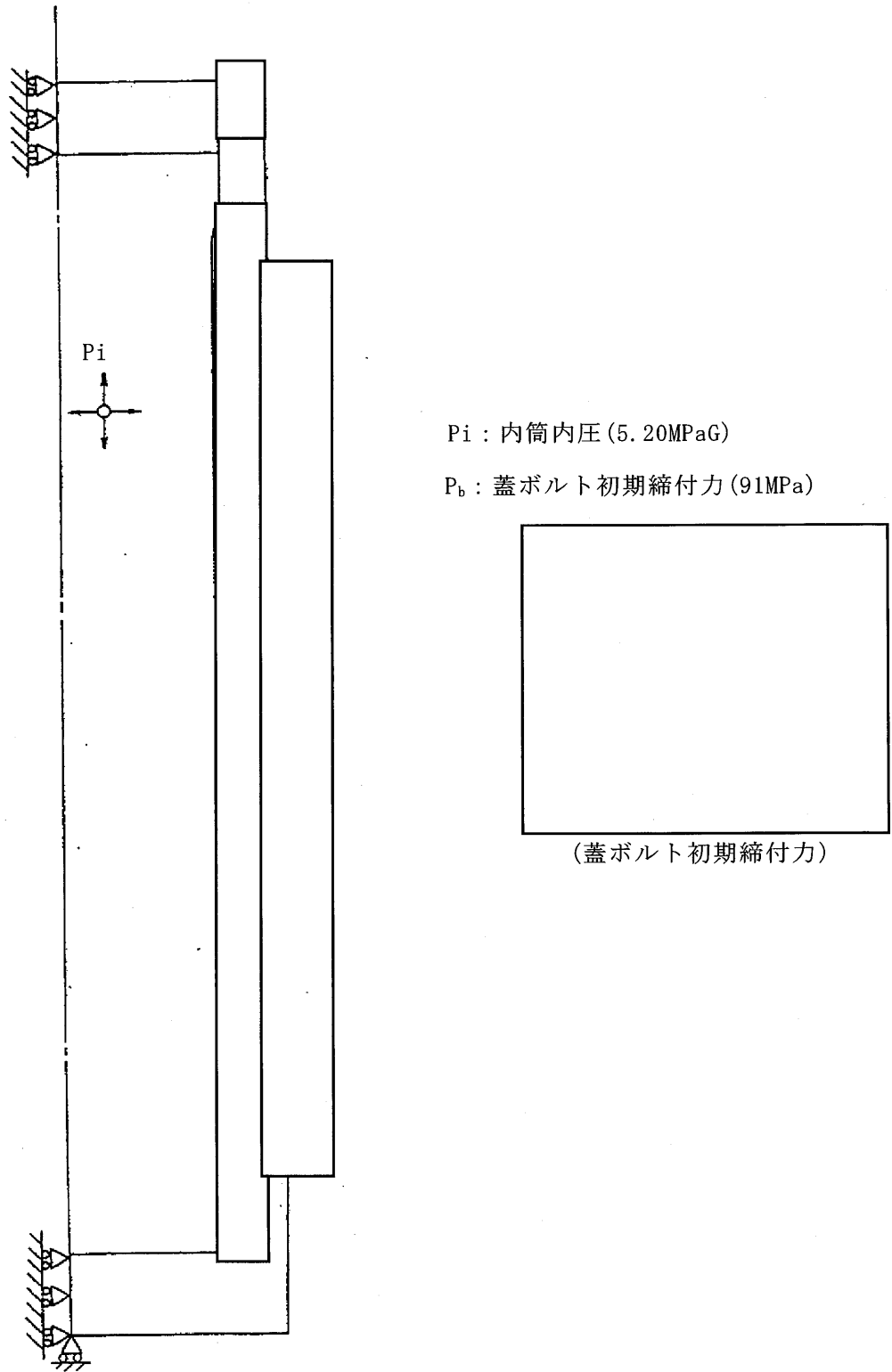
(ロ)-第 A.52 図に示すように、底部の軸方向変位及び対称面上の法線方向変位を拘束し、他は変位自由とする。

3. 解析結果

応力評価は、(ロ)章 A.6.3.3 において行う。



(ロ)-第 A. 51 図 特別の試験条件の熱的試験における解析モデル



(ロ)-第 A. 52 図 特別の試験条件の熱的試験における荷重条件及び境界条件

A.6.3.3 許容応力との比較

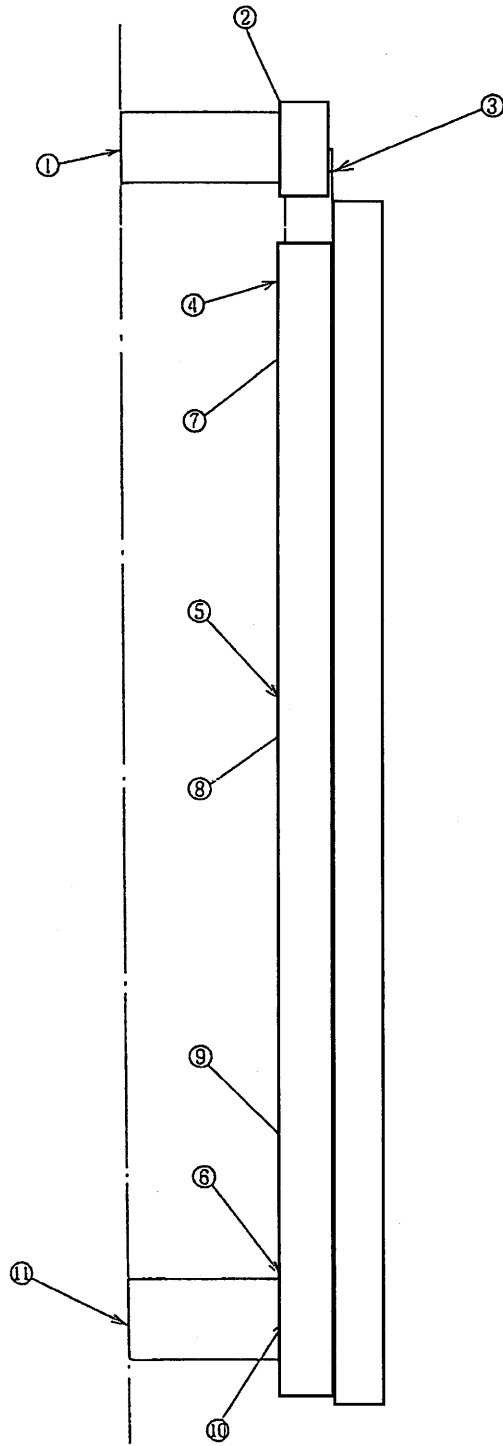
1. 容器本体各部

(ロ)-第 A.53 図に示す容器本体の主要な評価位置における一次応力及び蓋ボルトの評価結果を(ロ)-第 A.28 表に示す。表に示すように、いずれの応力も(ロ)章 A.1.2 に定めた解析基準値以下である。

なお、蓋ボルトの応力は 260℃での設計降伏点 (□MPa) より低いので、蓋ボルトは塑性変形しない。

さらに、蓋ボルトは蓋と異なる材質のため、運搬中に予想される-20℃から 38℃の周囲温度の変化により軸力が変化する。仮に周囲温度-20℃で蓋ボルトを締め付けた後、特別の試験条件下に置かれた場合は、ステンレス鋼製の蓋と合金鋼製の蓋ボルトの熱膨張係数の差により蓋ボルトの軸力が約 15%増加するが、蓋ボルトの応力は設計降伏点 (□MPa) より低く、また、周囲温度 38℃で締め付けた後、特別の試験条件下に置かれた場合には、軸力が約 15%低下するものの Oリングを締め付けるために必要な軸力を維持しているため、蓋ボルトに緩みや破損を生じることはない。

また、蓋とフランジとの蓋 Oリング位置での相対口開き変形量は 1.1mm 以下となり、Oリングの初期締付代 2.5mm より小さく密封性を損なうことはない。



評価断面	部 位
①	蓋 中 央 部
②	蓋 端 部
③	フ ラ ン ジ
④	内 筒 上 部
⑤	内 筒 中 央 部
⑥	内 筒 下 部
⑦	中 間 筒 上 部
⑧	中 間 筒 中 央 部
⑨	中 間 筒 下 部
⑩	底 板 端 部
⑪	底 板 中 央 部

(口)-第 A. 53 図 特別の試験条件の熱的試験における応力評価位置

(ロ)-第 A. 28 表 特別の試験条件における内筒内圧による容器本体の一次応力及び

蓋ボルトの応力の評価

部位	断面 No. ^{注1)}	応力分類 ^{注2)}	表面	応力 強さ (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) ^{注3)}	余裕率 MS (-)
蓋	①	P _m	-	3.69	380		
		P _L +P _b	内	46.3			
			外	45.9			
	②	P _L	-	34.9			
フランジ	③	P _L	-	20.5	440		
内筒	④	P _L	-	42.9	210		
	⑤	P _m	-	47.4			
	⑥	P _L	-	43.3			
中間筒	⑦	P _L	-	29.9	260		
	⑧	P _m	-	30.5			
	⑨	P _L	-	27.6			
底板	⑩	P _L	-	9.18	400		
	⑪	P _m	-	4.53			
		P _L +P _b	内	12.6			
			外	21.1			
蓋 ボルト ^{注4)}	σ _m			527	260		
	σ _m +σ _b			766			

注 1) (ロ)-第 A. 53 図参照

注 2) P_m : 一次一般膜応力強さ、P_L : 一次局部膜応力強さ、P_b : 一次曲げ応力強さ
σ_m : 断面平均応力、σ_b : 曲げ応力

注 3) P_m 及び σ_m に対する基準値は 2/3Su (ただし、オーステナイト系ステンレス鋼に対しては 2/3Su 又は 2.4Sm の小さい方の値) であり、P_L、P_L+P_b 及び σ_m+σ_b に対する基準値は 1.5×(2/3Su) (ただし、オーステナイト系ステンレス鋼に対しては 1.5×(2/3Su) 又は 3.6Sm の小さい方の値) である。

注 4) (ロ)章 B. 5. 3 に示す火災発生 30 分後における温度分布による熱膨張を考慮

2. 伝熱フィン

熱的試験時には外筒の温度がレジンより非常に高くなり、伝熱フィンに生じる熱ひずみは外筒の熱膨張による径の増加が支配的となる。(ロ)-第 A. 54 図に示すように外筒の熱膨張によって外筒と中間筒との間隔が広がる量だけ伝熱フィンが伸びるとすると、伝熱フィンの熱ひずみ ε は次式で与えられる。

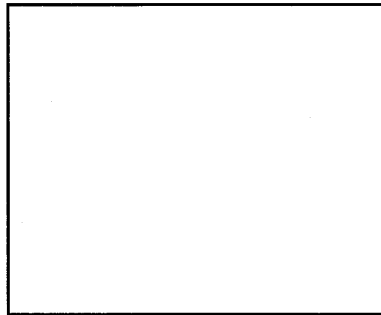
$$\varepsilon = (\ell_1 - \ell_f) / \ell_f$$

$$\ell_1 = \lambda_1 / \cos \beta$$

$$\lambda_1 = R_1 \times (1 + \alpha_1 \times (T_1 - 20)) - R_2 \times (1 + \alpha_2 \times (T_2 - 20))$$

$$\ell_f = \ell_0 \times (1 + \alpha_3 \times (T_3 - 20))$$

$$\ell_0 = (R_1 - R_2) / \cos \beta$$



(ロ)-第 A. 54 図 伝熱フィン形状

ただし、

ℓ_1 : 火災発生後 30 分における伝熱フィン長さ (mm)

ℓ_f : 火災発生後 30 分における伝熱フィンの自由伸び長さ (mm)

λ_1 : 火災発生後 30 分における外筒と中間筒の距離 (mm)

β : 伝熱フィン取付角 (°)

ℓ_0 : 伝熱フィン長さ (mm)

R_1 : 外筒内半径 (mm)

R_2 : 中間筒外半径 (mm)

T_1 : 火災発生後 30 分における外筒の温度 (°C)

T_2 : 火災発生後 30 分における中間筒の温度 (°C)

T_3 : 火災発生後 30 分における伝熱フィンの温度 (°C) ($= (T_1 + T_2) / 2$)

α_1 : 外筒の熱膨張係数 (1/°C)

α_2 : 中間筒の熱膨張係数 (1/°C)

α_3 : 伝熱フィンの熱膨張係数 (1/°C)

ここで、

$$R_1 = \boxed{} \text{ mm}$$

$$R_2 = \boxed{} \text{ mm}$$

$$\beta = \boxed{}^\circ$$

$$T_1 = \boxed{}^\circ\text{C}$$

$$T_2 = \boxed{}^\circ\text{C}$$

$$T_3 = \boxed{}^\circ\text{C}$$

$$\alpha_1 = \boxed{} / ^\circ\text{C} \quad (\boxed{}^\circ\text{C})$$

$$\alpha_2 = \boxed{} / ^\circ\text{C} \quad (\boxed{}^\circ\text{C})$$

$$\alpha_3 = 19.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \quad (\boxed{}^\circ\text{C})$$

したがって、

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \boxed{} \times (1 + \boxed{} \times (\boxed{} - 20)) - \boxed{} \times (1 + \boxed{} \times (\boxed{} - 20)) \\ &= \boxed{} \text{ mm} \end{aligned}$$

$$l_0 = (\boxed{} - \boxed{}) / \cos \boxed{}^\circ = \boxed{} \text{ mm}$$

$$l_f = \boxed{} \times (1 + 19.3 \times 10^{-6} \times (\boxed{} - 20)) = \boxed{} \text{ mm}$$

$$l_1 = \boxed{} / \cos \boxed{}^\circ = \boxed{} \text{ mm}$$

$$\varepsilon = (\boxed{} - \boxed{}) / \boxed{} = 0.026 \quad (2.6\%)$$

生じる熱ひずみは JIS H3100(2006)「銅及び銅合金の板並びに条」に示される伝熱フィン材料の最小破断ひずみ(25%)より十分小さく、伝熱フィン健全性を維持する。

3. バスケット

バスケットの外周には $\boxed{}$ が設置されている。 $\boxed{}$ の強度評価における荷重条件としては自重のみである慣性力は無視し、外圧のみを考慮して評価する。

(1) $\boxed{}$ 胴部

熱的試験時に $\boxed{}$ に生じる応力 σ は次式で与えられる。

$$\sigma = P \times r / h$$

ただし、

$$P : \boxed{} \text{ に生じる外圧 (MPaG)}$$

$$r : \boxed{} \text{ 平均半径 (mm)}$$

h : 板厚 (mm)

ここで、

$$P = 5.2 \text{MPaG}$$

(水頭圧と内筒内圧を足し合わせた値)

$$h = \text{ mm}$$

$$r = \text{ mm}$$

したがって、

$$\sigma = 5.2 \times \frac{\text{}}{\text{}} = 55.3 \text{MPa}$$

220°Cにおけるステンレス鋼の設計降伏点 S_y は MPa であるので、

は塑性変形しない。

次に座屈強度について評価する。

薄肉円筒の外圧による座屈限界外圧 P_{cr} (MPaG) は次式で与えられる。

$$P_{cr} = \frac{E}{4(1-\nu^2)} \left(\frac{h}{r} \right)^3$$

ただし、

E : 縦弾性係数 (MPa)

ν : ポアソン比 (-)

ここで、

$$E = 181,000 \text{MPa} (220^\circ\text{C})$$

$$\nu = 0.3$$

したがって、

$$P_{cr} = \frac{181000}{4 \times (1 - 0.3^2)} \times \left(\frac{\text{}}{\text{}} \right)^3$$
$$= 41.3 \text{MPaG}$$

$P < P_{cr}$ であるので は座屈することはない。

余裕率 MS は S_y に対して次のようになる。

$$MS = \frac{S_y}{\sigma} - 1$$
$$= \frac{\text{}}{55.3} - 1$$
$$= \text{}$$

(2) 端部

端部を端部固定の円板にモデル化すると、その最大曲げ応力

σ_b (MPa) は、次式で与えられる。

$$\sigma_b = 0.75 \times \frac{P \cdot a^2}{t^2}$$

ただし、

a : 円板の半径 (mm)

P : 外圧 (MPaG)

t : 板厚 (mm)

ここで、

$$a = \text{ mm}$$

$$P = 5.2 \text{ MPaG}$$

$$t = \text{ mm}$$

したがって、

$$\begin{aligned} \sigma_b &= 0.75 \times \frac{5.2 \times \text{}^2}{\text{}^2} \\ &= 19.8 \text{ MPa} \end{aligned}$$

余裕率 MS は S_y に対して次のようになる。

$$\begin{aligned} MS &= \frac{S_y}{\sigma} - 1 \\ &= \frac{\text{}}{19.8} - 1 \\ &= \text{} \end{aligned}$$

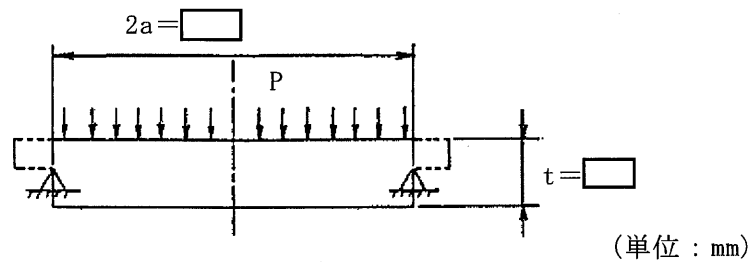
A.6.4 浸漬

本輸送物の収納物は、最大放射エネルギーが A_2 値の 10 万倍を超えるので、(ロ)章 A.7 において 200m 浸漬に相当する水頭圧で解析を行い、中間筒、底板及び蓋に破損のないことを確認している。

特別の試験条件の 15m 浸漬試験においては、200m 浸漬試験の負荷条件より厳しくな
いたため中間筒、底板及び蓋は(ロ)章 A.1.2 で定めた基準を満足するが、規則及び告示
に基づいて 15m 浸漬試験における蓋の強度を確認する。

なお、ここでは内圧を大気圧(0MPaG)とし、水頭圧と内圧の差圧(0.15MPa)を外圧と
する。

蓋の強度解析モデルを(ロ)-第 A.55 図に示す。



(ロ)-第 A.55 図 外圧に対する蓋の強度解析モデル

蓋の最大応力は蓋中央部に生じる。この半径方向曲げ応力 σ_b (MPa) は、次式で与えられる。

$$\sigma_b = \frac{3(3+\nu)P \cdot a^2}{8t^2}$$

ただし、

a : 蓋半径 (mm)

P : 圧力 (MPaG)

t : 板厚 (mm)

ν : ポアソン比

ここで、

a = [] mm

P = 0.15MPaG

t = [] mm

$\nu = 0.3$

したがって、

$$\sigma_b = \frac{3 \times (3+0.3) \times 0.15 \times \square^2}{8 \times \square^2}$$

$$= 0.99\text{MPa}$$

蓋の温度 170℃における設計引張強さ Su は \square MPa、Sm は 134MPa であるので、基準値は Su の \square MPa である。したがって、余裕率 MS は、次式で与えられる。

$$MS = \frac{Su}{\sigma_b} - 1$$

$$= \frac{\square}{0.99} - 1$$

$$= \square$$

なお、外圧は蓋をフランジに押し付けるように作用するので蓋 Oリングの密封性能は 15m 浸漬において保持される。また、外筒は内部空間に 0.4MPaG の内圧が生じているが、水深 15m の水圧 (0.15MPa) が外圧として負荷されることで差圧が緩和されるため、遮蔽解析に影響を及ぼすような破損は生じない。

A. 6. 5 結果の要約及びその評価

1. 解析結果の要約

特別の試験条件下における構造解析結果の要約を(口)-第 A. 29 表に示す。

表に示すように、各試験条件下において輸送物各部は(口)章 A. 1. 2 に定めた基準を満足し構造上の健全性が損なわれることはない。

(ロ)-第A.29表 特別の試験条件に対する構造解析結果の要約(1/2)

条件	項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等 (-)	
特別の試験条件	落下試験 (I)					
	1. 垂直落下					
	頭部垂直落下					
		蓋 (P _L)	Su		240	
		フランジ (P _L)	Su		72.7	
		内筒 (P _m)	2/3Su		57.6	
		内筒 (P _L)	Su		167	
		中間筒 (P _m)	2/3Su		57.8	
		中間筒 (P _L)	Su		120	
		底板 (P _L +P _b)	Su		9.55	
		外筒 (P _m)	2/3Su		145	
		外筒 (P _L)	Su		96.4	
		仕切板 (P _L)	Su		122	
		ビンカバー (P _L)	Su		101	
		蓋ボルト (σ _m)	2/3Su		110	
		蓋ボルト (σ _m +σ _b)	Su		182	
		伝熱フィン	2/3σ _u	118	14.5	7.14
			Sy		143	
		燃料被覆管	燃料集合体にわずかな残留変形が認められるものの、燃料被覆管は破損しない。			
		底部垂直落下				
		蓋 (P _L)	Su		13.9	
		フランジ (P _L)	Su		9.05	
		内筒 (P _m)	2/3Su		63.4	
		内筒 (P _L)	Su		103	
		中間筒 (P _m)	2/3Su		64.1	
		中間筒 (P _L)	Su		125	
		底板 (P _L)	Su		66.9	
		外筒 (P _m)	2/3Su		171	
		外筒 (P _L)	Su		90.7	
		仕切板 (P _L)	Su		128	
		ビンカバー (P _L)	Su		159	
		蓋ボルト (σ _m)	2/3Su		177	
	蓋ボルト (σ _m +σ _b)	Su		274		
	バスケット					
	下部スペーサ	Sy	146	113	0.29	
		Sy		58.5		
	燃料被覆管	燃料集合体にわずかな残留変形が認められるものの、燃料被覆管は破損しない。				
	スツール	Sy	146	68.7	1.13	
	2. 水平落下					
	蓋 (P _L)	Su		107		
	フランジ (P _L)	Su		132		
	内筒 (P _m)	2/3Su		138		
	内筒 (P _L)	Su		108		

(ロ)-第 A. 29 表 特別の試験条件に対する構造解析結果の要約(2/2)

条件	項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等 (-)		
特別試験条件	2. 水平落下(つづき)						
	中間筒 (P _m)	2/3Su	[]	149	[]		
	中間筒 (P _L)	Su		94.5			
	底板 (P _m)	2/3Su		45.0			
	外筒 (P _m)	2/3Su		240			
	外筒 (P _L)	Su		118			
	仕切板 (P _L)	Su		104			
	レンカバー (P _L)	Su		129			
	蓋ボルト (σ _m)	2/3Su		367			
	蓋ボルト (σ _m +σ _b)	Su		643			
	バスケット チャンネル	1.5σ _y		204			
	チャンネル支持部	1.5S _y		48.2			
	燃料被覆管	燃料集合体に残留変形が認められるものの、燃料被覆管は破損しない。					
3. コーナー落下							
蓋ボルト (σ _m)	2/3Su	[]	441	[]			
他の部位については衝撃加速度が垂直及び水平落下時の衝撃加速度に比べて小さいので、1. 及び 2. の結果より厳しくない。							
4. 傾斜落下							
蓋部	落下試験後も漏えい率の有意な増加はなく、漏えい率は基準値を十分下回っていることから、蓋部の密封性能が損なわれることはない。						
落下試験(II)							
1. 垂直落下							
蓋部及び底部	許容貫通強度	[] N	7.08×10 ⁶ N	[]			
2. 水平落下							
中間筒	耐貫通板厚	[] mm	69.6mm	[]			
バルブ部	許容貫通強度	[] N	7.08×10 ⁶ N	[]			
熱的試験							
蓋 (P _L +P _b)	Su	[]	46.3	[]			
フランジ (P _L)	3.6S _m		20.5				
内筒 (P _m)	2/3Su		47.4				
内筒 (P _L)	Su		43.3				
中間筒 (P _m)	2/3Su		30.5				
中間筒 (P _L)	Su		29.9				
底板 (P _L +P _b)	3.6S _m		21.1				
蓋ボルト (σ _m)	2/3Su		527				
蓋ボルト (σ _m +σ _b)	Su		766				
伝熱フィン	生じる熱ひずみは伝熱フィン材料の最小破断ひずみより十分小さく、伝熱フィン健全性を維持する。						
バスケット []	S _y		[]		55.3	[]	
15m 浸漬試験							
蓋	Su		[]		0.99	[]	

2. 蓋 O リングの密封性能の評価(口開き変形量の評価)

各試験条件において蓋部に作用する荷重に対して O リング位置での蓋の口開き変形量を各項において求めた。その変形量と O リングの初期締付代との比較を(ロ)-第 A.30 表に示すが、各条件においていずれも基準値の初期締付代より口開き変形量は小さく密封性能が損なわれることはない。

(ロ)-第 A.30 表 特別の試験条件に対する蓋部密封境界の口開き変形量評価

条 件		0 リング位置での蓋とフランジとの相対口開き変形量	基準値
9m 落下	頭部垂直	9m 落下時の口開き変形量は 0.1mm 以下である。	O リング 初期締付代 =2.5mm
	底部垂直	蓋がフランジに押し付けられ、口開き変形は生じない。	
	水 平	9m 落下時の口開き変形量は 0.5mm 以下である。	
	頭部コーナ	垂直、水平に比べて条件が厳しくない。	
1m 貫通	頭部垂直	蓋がフランジに押し付けられ、口開き変形は生じない。	
熱的試験		熱的試験時の口開き変形量は 1.1mm 以下である。	
15m 浸漬試験		蓋がフランジに押し付けられ、口開き変形は生じない。	

3. 破損の要約

特別の試験条件下における破損の要約を各試験項目に従って説明する。

(1) 落下試験 I (9m 落下)

本試験では緩衝体及びフィンが塑性変形、また、トラニオンが破損する。最大変形は底部コーナー落下時に下部緩衝体に生じ、最大 460mm 圧潰する。緩衝体は変形するが、容器本体から外れることはない。

(2) 落下試験 II (貫通試験)

本試験では、緩衝体、レジンカバー、フィン及び外筒に貫通又は変形が生じる。緩衝体には貫通が生じるが、容器本体から外れることはない。

(3) 熱的試験

本試験では、(ロ)章 D.6.1 に示すように中性子遮蔽材のレジンの一部が焼損するが、(ロ)章 B.5.6 に示すように鉛が溶融することはない。容器本体各部の応力及びひずみは解析基準値以下で容器本体は構造健全性を維持する。

(4) 15m 及び 200m 浸漬試験

15m 及び 200m のいずれの水頭下においても、容器本体は破断することなく、密封性能を損なうことはない。

(5) まとめ

特別の試験条件下における輸送物の主な破損の要約を(ロ)-第 A.31 表に示す。これらの破損が、容器の熱的性能、密封性能及び遮蔽性能に与える影響は、(ロ)-第 A.32 表に示すとおりである。これらの影響の具体的評価は、以下(ロ)章各項で検討する。

(ロ)-第 A. 31 表 特別の試験条件下の輸送物破損の評価

試験 \ 部位	本体	フィン	緩衝体	バスケット	燃料集合体	備考
落下試験 I	-	○	○	-	-	・トラニオンが破損する。
落下試験 II	○	○	○	-	-	・レジンカバー、外筒及びレジンに局所的な塑性変形が生じる。 ・緩衝体のカバープレートが貫通される。 ・フィンは局所的に塑性変形する。
熱的試験	-	-	-	-	-	・鉛の溶融はない。 ・レジンが一部焼損する。
浸漬試験	-	-	-	-	-	——

注記) ○：破損あり、-：破損なし

(ロ)-第 A. 32 表 特別の試験条件における他の解析への影響

熱解析	密封解析	遮蔽解析
<p>落下試験 I による緩衝体の変形量を考慮して解析する。</p> <p>落下試験 I 又は II によるフィン及び外筒の変形については局所的であり、また、変形すると熱的試験時の入熱面積が減少するので、より厳しい条件となるようにフィンは健全であるとして解析する。</p> <p>また、落下試験 II により上下レジン部に貫通が生じるおそれがあるので安全側に貫通部分をモデルより除外する。</p>	<p>密封装置は緩衝体及びカバープレートに覆われているので、直接突起物等により衝撃を受けることはない。</p> <p>また、蓋部密封境界の口開き変形量は小さく密封性能が損なわれることはない。</p>	<p>緩衝体の変形が大きいので、解析モデル上、緩衝体がないとし緩衝体による放射線の減衰効果を見逃して解析する。</p> <p>落下試験 I 又は II により上下レジン部、フィン、外筒及び中央レジン部の一部が破損するおそれがある。また、熱的試験によりレジンが一部焼損するので、安全側に上下レジン部及びフィンの全部並びに外筒及び中央レジン部の一部を見逃す。</p>

A.7 強化浸漬試験

1. 外圧に対する中間筒の耐圧強度

本輸送物の収納物は最大放射エネルギーが、 A_2 値の 10 万倍を超えるので、200m 浸漬に相当する水頭圧で解析を行う。本輸送容器の胴部は、密封境界を構成する内筒、内筒の外周に位置する中間筒、更にはその周りを囲む外筒で構成された三重円筒構造となっている。これらのうち、中間筒が外圧に対して十分な強度を有していれば、密封境界を構成する内筒が破損することはないことから、外圧に対する輸送容器胴部の強度評価においては、中間筒を評価対象としている。

設計・建設規格¹⁾においては、本試験条件に対応する供用状態 D における円筒の許容外圧 P_a (MPaG) は、次のように与えられる。

$$P_a = 1.5 \times \frac{4Bt}{3D_o}$$

ただし、

t : 中間筒板厚 (mm)

D_o : 中間筒外径 (mm)

B : L/D_o 、 D_o/t 及び温度で定まる係数

L : 中間筒支持間隔 (mm)

ここで、

$$t = \square \text{ mm}$$

$$D_o = \square \text{ mm}$$

$$L = \square \text{ mm}$$

設計・建設規格¹⁾付録材料図表 Part 7 図 1 及び \square より、170°C における炭素鋼に対する

B 値は、

$$L/D_o = \square$$

$$D_o/t = \square$$

から、

$$B = 110$$

したがって、

$$P_a = 1.5 \times \frac{4 \times \square \times \square}{3 \times \square}$$

$$= \square \text{ MPaG}$$

本試験条件において中間筒に作用する外圧 P_o は、2.00MPaG であるから、余裕率 MS は、次式で与えられる。

$$MS = \frac{P_a}{P_o} - 1$$

$$= \frac{\square}{2.00} - 1$$

$$= \square$$

したがって、中間筒の耐圧強度は十分であるため、密封境界を構成する内筒が破損することはない。

2. 外圧に対する輸送容器本体底板の強度

底板を端部固定の円板にモデル化すると、その最大曲げ応力 σ_b (MPa) は、次式で与えられる¹⁷⁾。

$$\sigma_b = 0.75 \times \frac{P \cdot a^2}{t^2}$$

ただし、

a : 円板の半径 (mm)

P : 外圧 (MPaG)

t : 板厚 (mm)

ここで、

$$a = \boxed{} \text{ mm}$$

$$P = 2.00 \text{ MPaG}$$

$$t = \boxed{} \text{ mm}$$

したがって、

$$\begin{aligned} \sigma_b &= 0.75 \times \frac{2.00 \times \boxed{}^2}{\boxed{}^2} \\ &= 5.51 \text{ MPa} \end{aligned}$$

この応力を一次曲げ応力に分類すると基準値は(ロ)章 A. 1. 2 より、Su 又は 3.6Sm の小さい方である。

底板の温度 180℃における設計引張強さ Su は $\boxed{}$ MPa、Sm は 132MPa であるので、基準値は Su の $\boxed{}$ MPa である。

したがって、余裕率 MS は、次のようになる。

$$\begin{aligned} MS &= \frac{Su}{\sigma_b} - 1 \\ &= \frac{\boxed{}}{5.51} - 1 \\ &= \boxed{} \end{aligned}$$

したがって、底板は、外圧に対して十分な強度を有する。

3. 外圧に対する蓋の強度

蓋の強度解析モデルを(ロ)-第 A. 55 図に示す。

蓋の最大応力は蓋中央部に生じる。この半径方向曲げ応力 σ_b (MPa) は、次式で与えられる。

$$\sigma_b = \frac{3(3+\nu)P \cdot a^2}{8t^2}$$

ただし、

a : 蓋半径 (mm)

P : 圧力 (MPaG)

t : 板厚 (mm)

ν : ポアソン比

ここで、

$$a = \square \text{ mm}$$

$$P = 2.00 \text{ MPaG}$$

$$t = \square \text{ mm}$$

$$\nu = 0.3$$

したがって、

$$\begin{aligned} \sigma_b &= \frac{3 \times (3 + 0.3) \times 2.00 \times \square^2}{8 \times \square^2} \\ &= 13.2 \text{ MPa} \end{aligned}$$

蓋の温度 170°C における設計引張強さ S_u は \square MPa、 S_m は 134 MPa であるので、基準値は S_u の \square MPa である。したがって、余裕率 MS は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} MS &= \frac{S_u}{\sigma_b} - 1 \\ &= \frac{\square}{13.2} - 1 \\ &= \square \end{aligned}$$

したがって、外圧に対し蓋は十分な強度を有する。なお、上記の発生応力値は 170°C における設計降伏点 ($S_y = \square$ MPa) より低く、また、外圧は蓋をフランジに押し付けるように作用するので、蓋 O リングの密封性能は 200m 浸漬試験において保持される。

4. 外圧に対するバルブカバープレートの強度

3. に示す外圧に対する蓋の強度評価と同様の評価式により、外圧に対するバルブカバープレートの強度評価を行う。

なお、バルブカバープレートは、水位調整用加圧バルブ、ベント・水位調整バルブ及びドレンバルブに設置されており、板厚は全て同じである。本評価では、外径が大きく外圧による荷重が大きいベント・水位調整バルブ及びドレンバルブのバルブカバープレートに対して評価を行う。

バルブカバープレートの最大応力はバルブカバープレート中央部に生じる。この半径方向曲げ応力 σ_b (MPa) は、次式で与えられる。

$$\sigma_b = \frac{3(3+\nu)P \cdot a^2}{8t^2}$$

ただし、

a : 半径 (mm)

P : 圧力 (MPaG)

t : 板厚 (mm)

ν : ポアソン比

ここで、

$$a = \square \text{ mm}$$

$$P = 2.00 \text{ MPaG}$$

$$t = \square \text{ mm}$$

$$\nu = 0.3$$

したがって、

$$\begin{aligned} \sigma_b &= \frac{3 \times (3 + 0.3) \times 2.00 \times \square^2}{8 \times \square^2} \\ &= 21.0 \text{ MPa} \end{aligned}$$

バルブカバープレートの温度 170°C における設計引張強さ S_u は \square MPa であるので、基準値は S_u の \square MPa である。したがって、余裕率 MS は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} MS &= \frac{S_u}{\sigma_b} - 1 \\ &= \frac{\square}{21.0} - 1 \end{aligned}$$

$$= \square$$

したがって、外圧に対しバルブカバープレートは十分な強度を有するため、密封境界を構成するバルブが破損することはない。

A.8 放射性収納物

本輸送物の放射性収納物は、PWR 使用済燃料集合体であり、PWR 燃料集合体の構造図を(イ)-第 D.1 図に示す。

各収納物の構造的特徴及び仕様は(イ)章 D に示すとおりである。

燃料集合体の強度解析については、特別の試験条件である 9m 落下時に輸送容器と等しく落下衝撃を受けるものとして行っている。その結果、燃料被覆管が変形する可能性はあるものの、破損することはないことから、燃料被覆管内の燃料又は核分裂生成物は、外部に放散されることはない。

これより、特別の試験条件では各安全解析における燃料集合体の状態を(ロ)-第 A.33 表に示すように設定して評価を行う。

(ロ)-第 A.33 表 各安全解析における燃料集合体の設定

解析項目	各解析における燃料集合体の設定
熱解析	燃料棒ピッチの変化が熱解析の結果に与える影響は小さいので、変形を無視する。
密封解析	-
遮蔽解析	燃料棒ピッチの変化が遮蔽解析の結果に与える影響は小さいので、変形を無視する。

A.9 核分裂性輸送物

本輸送物は核分裂性輸送物に該当し、周囲温度-20℃以上で使用する。

本輸送物は、(ロ)章 A.4.2 で示すとおり、周囲温度-20 から 38℃の温度条件において、き裂、破損等の生じるおそれはない。したがって、本項では、(ロ)章 E において想定する輸送物の損傷状態を、以下の試験条件に対して評価する。

A.9.1 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件

核分裂性輸送物に係る一般の試験条件は、告示により次の3種類が定められており、1.については連続条件となる。

1. 水噴霧・落下試験

- (1) 水噴霧試験
- (2) 0.3m 自由落下試験

2. 積み重ね試験

3. 6kg 棒貫通試験

(ロ)章 E の臨界解析における評価方法を考慮して、影響する輸送物の損傷状態を(ロ)章 A.5 及び A.9.2 の解析結果をもとに評価すると次のようになる。

1. 水噴霧・落下試験

(1) 水噴霧試験

(ロ)章 A.5.2 と同一であり、輸送物に損傷はない。

(2) 0.3m 自由落下試験

(ロ)章 A.5.3 と同一であり、緩衝体に変形が生じるがそれ以外の部位に損傷はない。

2. 積み重ね試験

(ロ)章 A.5.4 と同一であり、緩衝体に変形が生じるがそれ以外の部位に損傷はない。

3. 6 kg 棒貫通試験

(ロ)章 A.5.5 と同一であり、輸送物に損傷はない。

以上の結果より、核分裂性輸送物に係る一般の試験条件下の輸送物の損傷状態は(ロ)-第 A.34 表のようにまとめられる。本輸送物は、(ロ)-第 A.35 表に示すように、核分裂性輸送物に係る一般の試験条件において、規則及び告示に定められている核分裂性輸送物としての要件を満足する。

(ロ)-第 A. 34 表 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件下の輸送物の損傷状態

試験条件		輸送物の損傷状態	備 考
水噴霧・ 落下試験	水噴霧試験	損傷なし	-
	0.3m 自由落下試験	緩衝体の変形	緩衝体は臨界解析では無視する。
積み重ね試験		緩衝体の変形	緩衝体は臨界解析では無視する。
6 kg 棒貫通試験		損傷なし	-

(ロ)-第 A. 35 表 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件における適合性評価

核分裂性輸送物としての要件	評 価
構造部に一辺 10cm の立方体を包含する ようなくぼみが生じないこと及び外接す る直方体の各辺が 10cm 以上であること。	緩衝体の変形するが一辺が 10 cm の立方体を 包含するようなくぼみが生じることはなく、 外接する直方体の各辺は 10cm 以上である。な お、緩衝体は臨界解析で無視する。

A. 9. 2 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件

(ロ)章 A. 9. 1 の核分裂性輸送物に係る一般の試験条件に続いて 15m 浸漬試験が実施される場合には、(ロ)章 A. 6. 4 に示すように本輸送物の損傷が拡大することはないので、本輸送物に関する核分裂性輸送物に係る特別の試験条件は最大破損条件となる以下の順序で実施する。

- ① (ロ)章 A. 9. 1 の核分裂性輸送物に係る一般の試験条件
- ② 9m 落下試験
- ③ 1m 貫通試験
- ④ 熱的試験(耐火)
- ⑤ 0. 9m 浸漬試験

ここで、核分裂性輸送物に係る一般の試験条件としては(ロ)-第 A. 34 表に示すように損傷がある 0. 3m 落下試験を考慮する。

(ロ)章 E の臨界解析における評価方法を考慮して、影響する輸送物の損傷状態を評価すると次のようになる。

1. 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件

本試験条件における輸送物の損傷状態は(ロ)-第 A. 34 表に示すとおりであり、緩衝体の変形のみを考慮する必要がある。

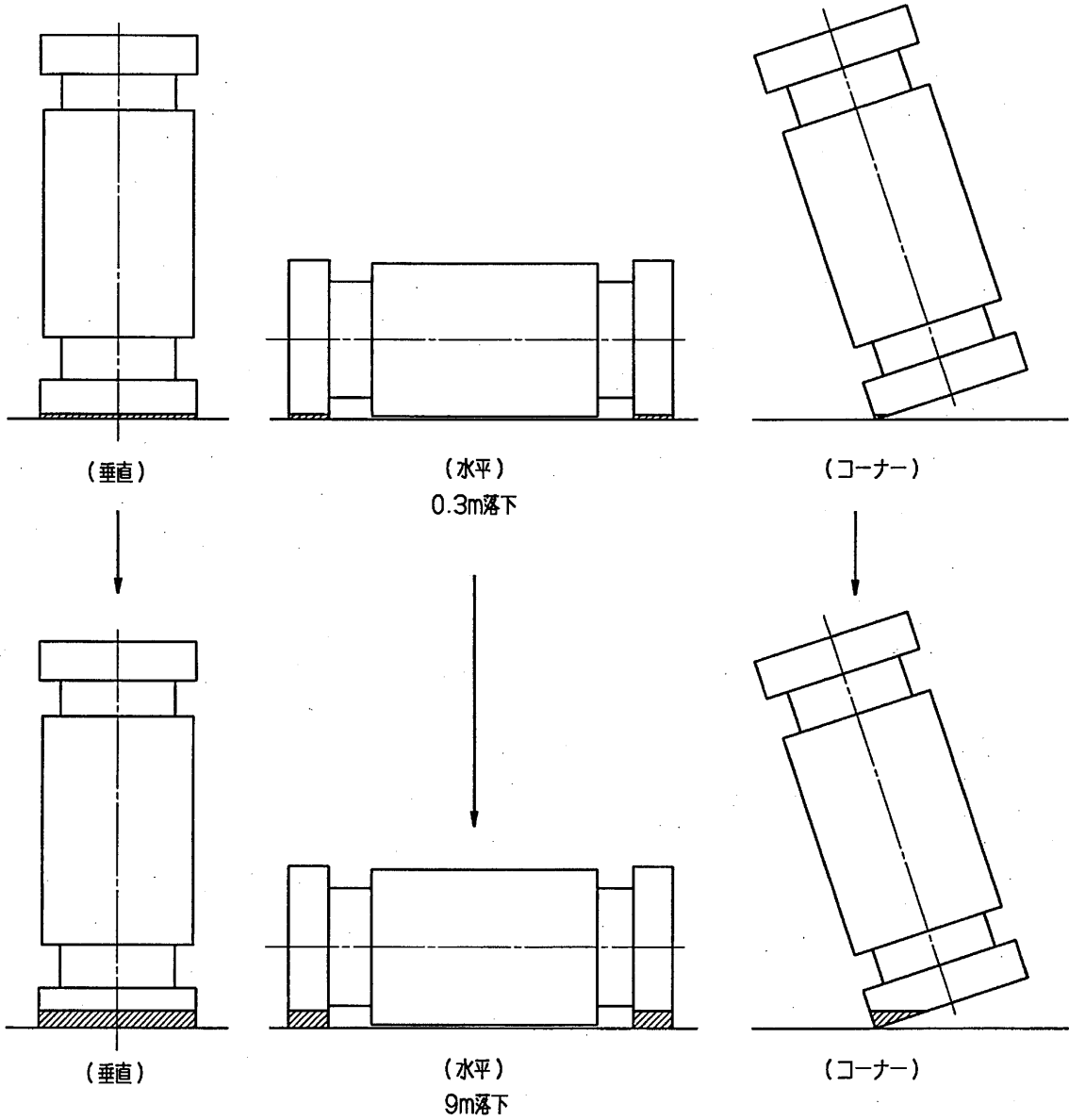
2. 9m 落下試験

(1) 落下姿勢と落下試験の順序

(ロ)-第 A. 56 図に落下姿勢と落下試験の順序を示す。

(ロ)章 A. 9. 1 の 0. 3m 落下と 9m 落下の落下方向が同一の場合に緩衝体の変形量が最大になると考えられるので、この場合について検討を行う。

▨ : 変形領域



(口)-第 A. 56 図 落下姿勢と試験の順序

(2) 9m 落下試験時の変形量と衝撃加速度

a. 垂直落下

落下高さとしては、0.3m 落下及び 9m 落下の合計 9.3m を与える。

(a) 頭部垂直落下

(ロ) 章 A. 6. 1 の 1. (2) ②と同様に、落下エネルギー E_k は、次のように与えられる。

$$\begin{aligned} E_k &= W \times g \times H \\ &= 115 \times 10^3 \times 9.8 \times 9300 \\ &= 1.05 \times 10^{10} \text{N} \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

(ロ) 章 A. 6. 1 の 1. (3)a. に示す手法を用いて、変形量 δ を求めると次のとおりである。

$$\delta = 142 \text{mm}$$

また、衝撃加速度 G_v は、

$$G_v = 901 \text{m/s}^2$$

である。

(b) 底部垂直落下

落下エネルギーは(a)と同様に、

$$E_k = 1.05 \times 10^{10} \text{N} \cdot \text{mm}$$

である。(ロ) 章 A. 6. 1 の 1. (3)b. に示す手法を用いて、変形量 δ を求めると次のようになる。

$$\delta = 143 \text{mm}$$

また、衝撃加速度 G_v は、

$$G_v = 895 \text{m/s}^2$$

である。

b. 水平落下

(ロ) 章 A. 6. 1 の 1. (4)と同様に、落下高さを 0.3m 落下と 9m 落下の総落下エネルギーに対応する 9.3m として計算を行うと、緩衝体の変形量 δ は、

$$\delta = 187 \text{mm}$$

となる。

このときの最大衝撃加速度 G_H は、

$$G_H = 968 \text{m/s}^2$$

である。

c. コーナー落下

落下高さが、0.3m 落下及び 9m 落下の合計 9.3m であるとして、(ロ) 章 A. 6. 1 の 1. (5)

と同様な方法により計算を行うと、その結果は以下のとおりである。

(a) 頭部コーナー落下

上部緩衝体の変形量 = 463mm
 衝撃加速度 = 576m/s²

(b) 底部コーナー落下

下部緩衝体の変形量 = 466mm
 衝撃加速度 = 583m/s²

d. まとめ

9m 落下試験後の緩衝体及びフィンの累積変形量及び最大衝撃加速度は(ロ)-第 A. 36 表に示すとおりである。

(ロ)-第 A. 36 表 9m 落下試験における緩衝体及びフィンの累積変形量及び衝撃加速度

方 向	落下姿勢	緩衝体の 累積変形量 (mm)	設計基準 変 形 量 ^{注2)} (mm)	衝撃加速度 (m/s ²)	落下試験 I (9m 単独) における 衝撃加速度との比
垂 直	頭 部	142	194	901	1.01
	底 部	143	194	895	1.01
水 平		187 (136) ^{注1)}	195	968	1.00
コ-ナ-	頭 部	463	525	576	1.01
	底 部	466	571	583	1.01

注 1) フィンの変形量を示す。

注 2) 設計基準変形量とは、それぞれの落下方向において衝撃力を急激に上昇させないための設計上の基準値である。

e. 輸送物各部の損傷評価

9m 落下試験時の衝撃加速度は(ロ)-第 A. 36 表に示すように(ロ)章 A. 6. 1 の落下試験 I 時に比べて最大で 1% の増加である。落下試験 I の構造解析結果の要約を示す(ロ)-第 A. 29 表において、輸送容器及び収納物に関する構造評価の余裕率は 1% 以上あるので、本落下試験においても輸送容器及び収納物の構造健全性は維持される。

3. 1m 貫通試験

1. の落下試験において緩衝体及びフィンが変形するが、これらは(ロ)章 A. 6. 2 に示すように 1m 貫通試験に対する評価において関係しない。したがって、本試験における輸送物の損傷状態は(ロ)章 A. 6. 2 の結果((ロ)章 A. 6. 5 に示す要約参照)と同一である。

4. 熱的試験

熱的試験においては、緩衝体の変形は考慮しているが、緩衝体の変形量による影響は微小であると考えられる。したがって、本試験における輸送物の損傷評価は(ロ)章 A. 6. 5 の 3. (3) と同一となる。

5. 0. 9m 浸漬試験

(ロ)章 A. 6. 4 の 15m 浸漬試験の結果から明らかなように、0. 9m 浸漬試験において輸送物は損傷が拡大することはない。

6. 輸送物の損傷状態の要約

(ロ)-第 A. 37 表に特別の試験条件下の輸送物の損傷状態の要約を示す。なお、特別の試験条件において燃料被覆管は破損することはないが、燃料棒の変形が想定される²²⁾ことから、燃料集合体については、臨界解析において(ロ)-第 A. 38 表に示すように条件を設定する。

(ロ)-第 A. 37 表 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下の輸送物の損傷状態

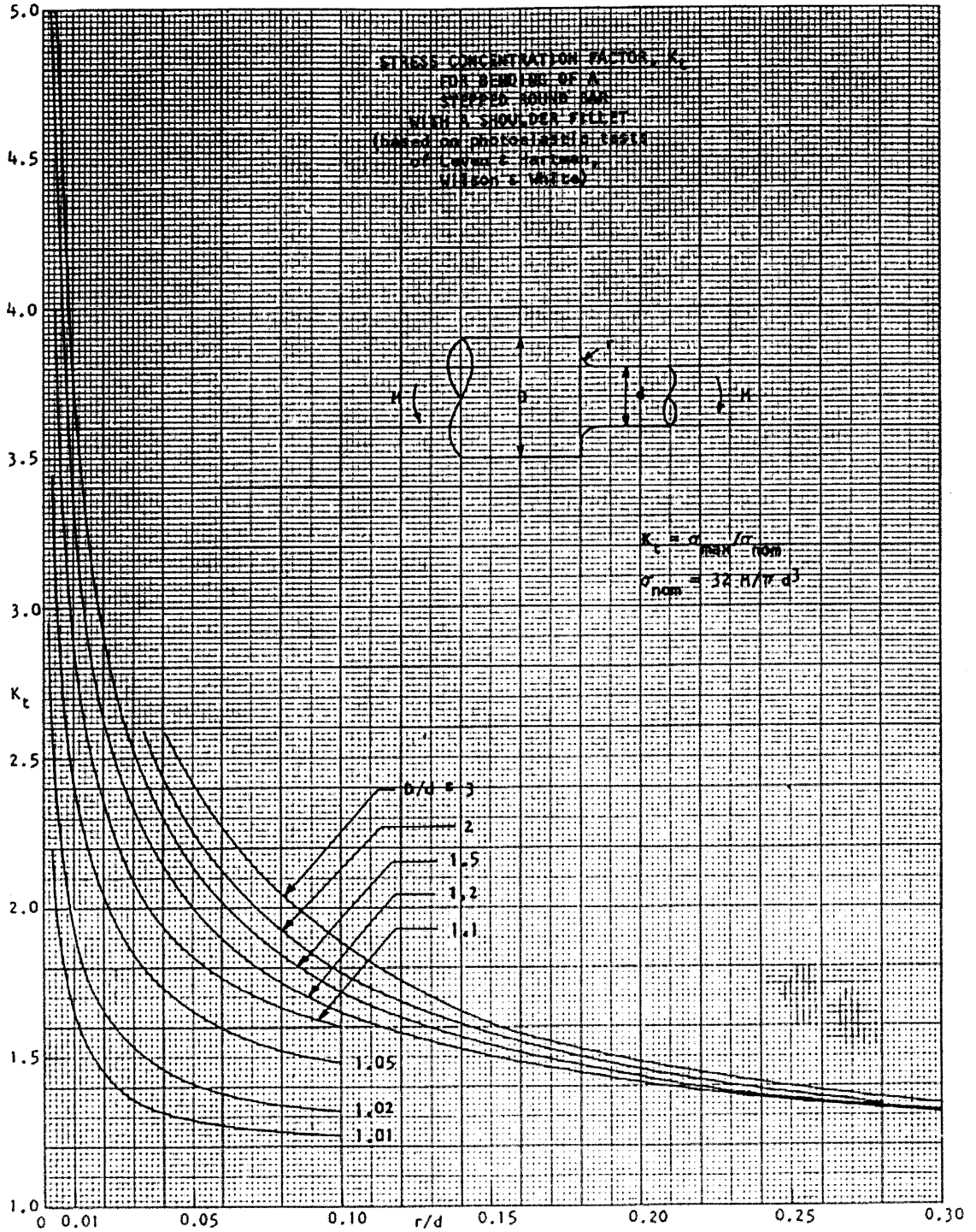
条 件	輸送物の損傷状態	備 考
9m 落下	緩衝体、フィン及びトラニオンの変形	緩衝体、フィン及びトラニオンは臨界解析で無視。
1m 貫通	緩衝体、フィン、外筒及びレジンの変形	緩衝体、フィン及びレジンは臨界解析で無視。
熱的試験 (耐火)	レジンの一部焼損 各部位の温度が上昇	臨界解析上はレジンを無視し、水密度を 1.0g/cm ³ 、燃料温度を 20°Cとしている。
0.9m 浸漬	損傷なし	臨界解析上は満水で解析する。

(ロ)-第 A. 38 表 臨界解析における燃料集合体の設定

解析項目	解析における燃料集合体の設定
臨界解析	グリッド 1 スパン間の燃料棒ピッチの拡大を仮定する。

A. 10 付属書類

A. 10. 1 段付き部の応力集中係数



(口)-第 A. 付 1 図 段付き部の応力集中係数線図

A. 10. 2 ボロン入りステンレス鋼の材料特性

1. 概要

本輸送物のバスケット格子に使用するボロン入りステンレス鋼は、中性子吸収材と構造材を兼ねた新しい材料である。

本材料は[]ステンレス鋼を母材に []ボロンを添加したもので、[] []ステンレス鋼に比べて高強度であるが低延性の特徴を持つ。本材料の機械的強度及び低温靱性について材料試験を行い、本輸送物の輸送及び試験条件下での材料特性に問題がないことを確認した。

2. 供試体材料

供試体として使用した材料の化学成分を(ロ)-第A.付1表に示す。

(ロ)-第A.付1表 材料試験に使用したボロン入りステンレス鋼の化学成分

(単位：%)

メーカー	部 材 (板 厚)	
A 社	板 ([]mm)	
B 社	角パイプ ([]mm)	
	板 ([]mm)	
C 社	板 ([]mm)	

溶接方法としては溶加材([])を用いる []溶接と角パイプに用いる溶加材なしの []溶接([]溶接)の2種類があり、それぞれの溶接部に対して機械試験を実施した。

3. シャルピー衝撃試験

(1) 試験要領

JIS Z 2242(1980)「金属材料衝撃試験方法」に基づき、吸収エネルギー、横膨出量及び脆性破面率を求めた。試験温度は□℃から□℃の温度範囲内において□℃ごとであり、試験片としては JIS Z 2202「金属材料衝撃試験片」に示される 4号試験片(2mmV ノッチ)のサブサイズ試験片を用いた。

(2) 試験結果

(ロ)-第 A. 付 2 図から(ロ)-第 A. 付 4 図に板材及び角パイプとそれぞれの溶接部に対する吸収エネルギー値及び横膨出量と温度との関係を示す。吸収エネルギー及び横膨出量は低温になると下がる傾向にあるが、脆性破面率についてはいずれの試験片も 0%であり、全て延性破面であった。試験温度が □℃と□℃における破面の断面写真を写真(ロ)-A. 付 1 及び写真(ロ)-A. 付 2 に示す。写真に示すように、両者の破面の状態はほとんど同一であり、いずれも延性破面を示している。

4. 落重試験

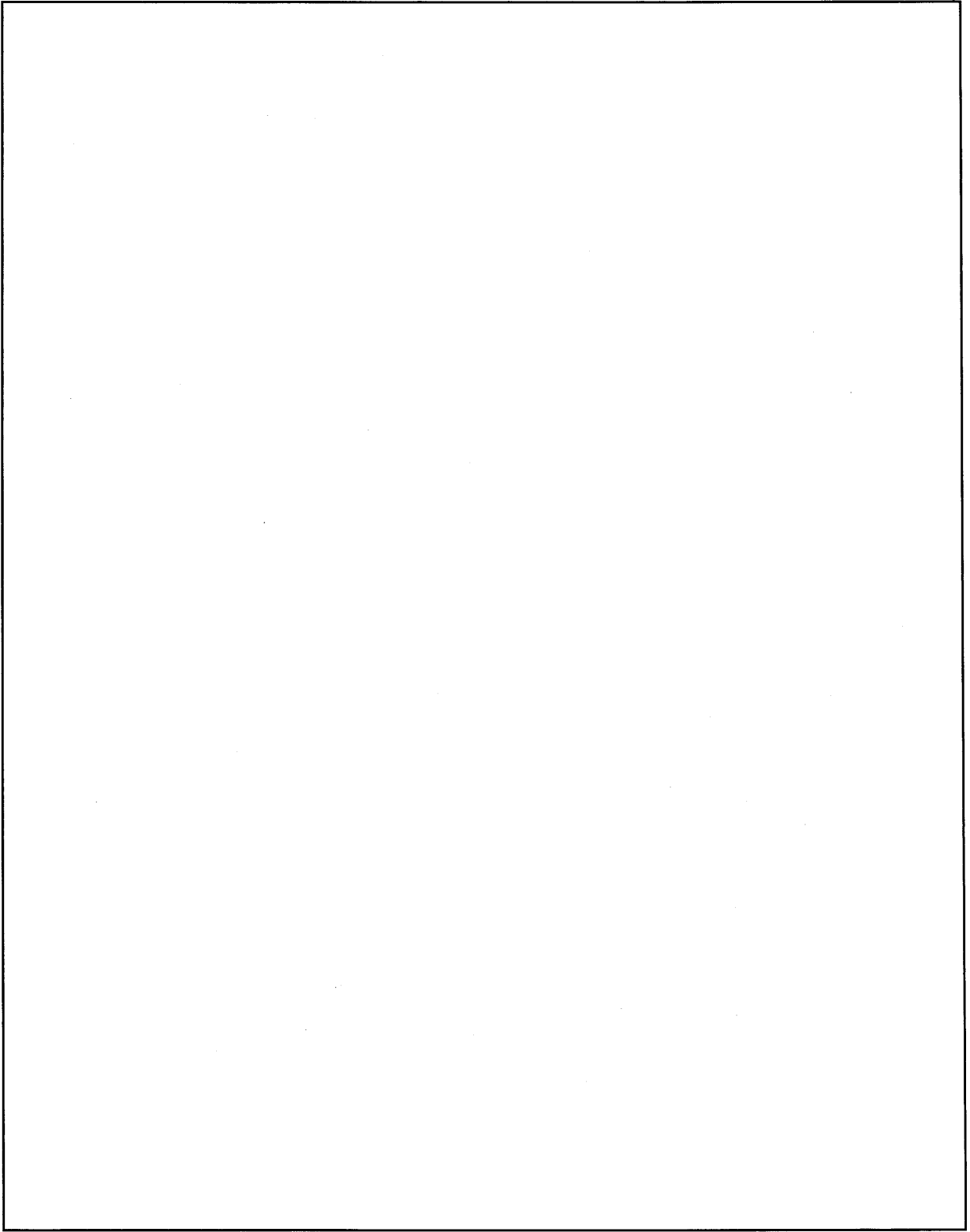
(1) 試験要領

通産省告示第 501 号第 4 条(設計・建設規格¹⁾ PVB-2300 と同等)に示される落重試験の方法に準じて脆性遷移温度を求めた。なお、供試体の板厚が最大 □mm で、試験片の最小板厚 16mm(三種試験片)に達しないため、試験は板厚 □mm に対して行い、供試体に生じるひずみ量を三種試験片と同等になるように試験受台の形状を変更して行った。試験温度は □℃から□℃の温度範囲内において□℃ごととした。

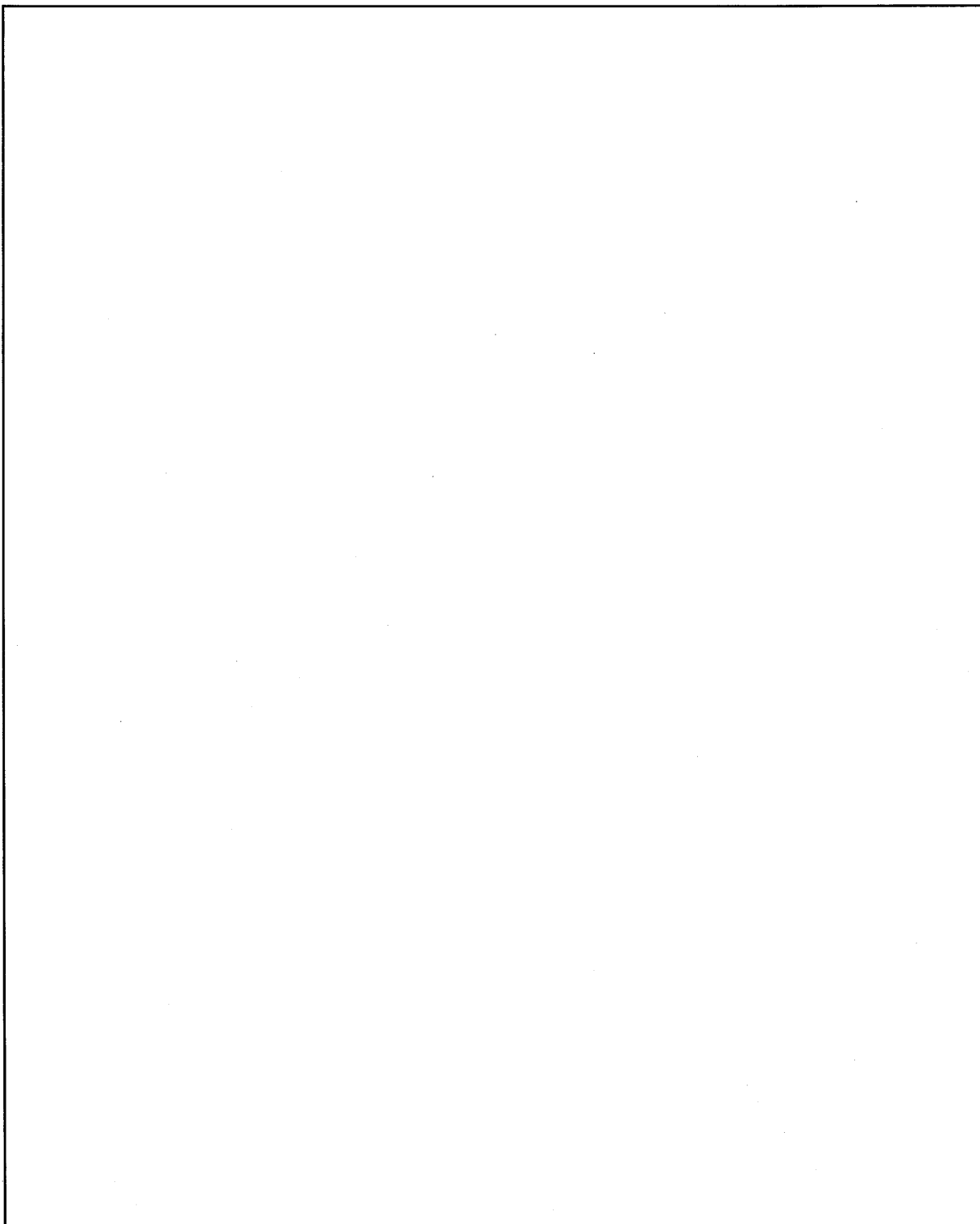
(2) 試験結果

いずれの材料いずれの温度においても非破断の結果となり、□℃から □℃の温度範囲内において脆性遷移温度を特定できなかった。

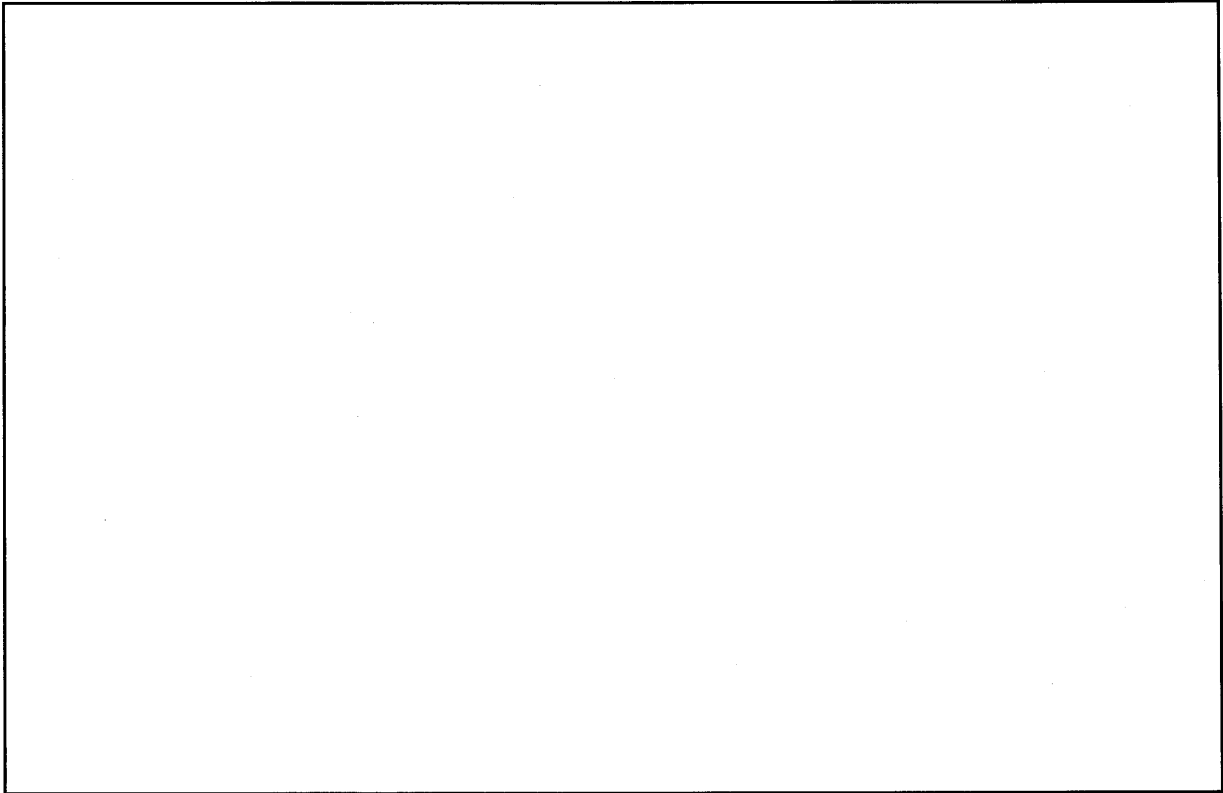
以上の結果より、ボロン入りステンレス鋼は□ステンレス鋼本来の性質である「低温脆性のない材料」を保持していると判断できる。



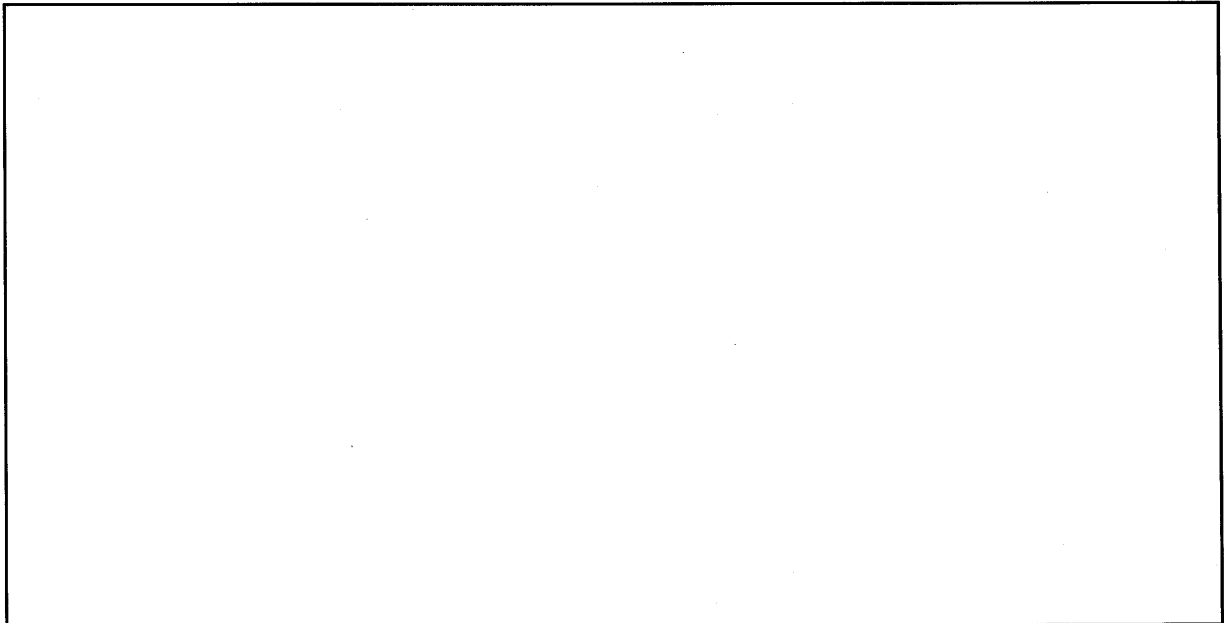
(ロ)-第 A. 付 2 図 ボロン入りステンレス鋼板材のシャルピー衝撃試験結果(吸収エネルギー)
(JIS4 号試験片 幅 7.5mm)



(ロ)-第 A. 付 3 図 ボロン入りステンレス鋼板材のシャルピー衝撃試験結果(横膨出量)
(JIS4 号試験片 幅 7.5mm)

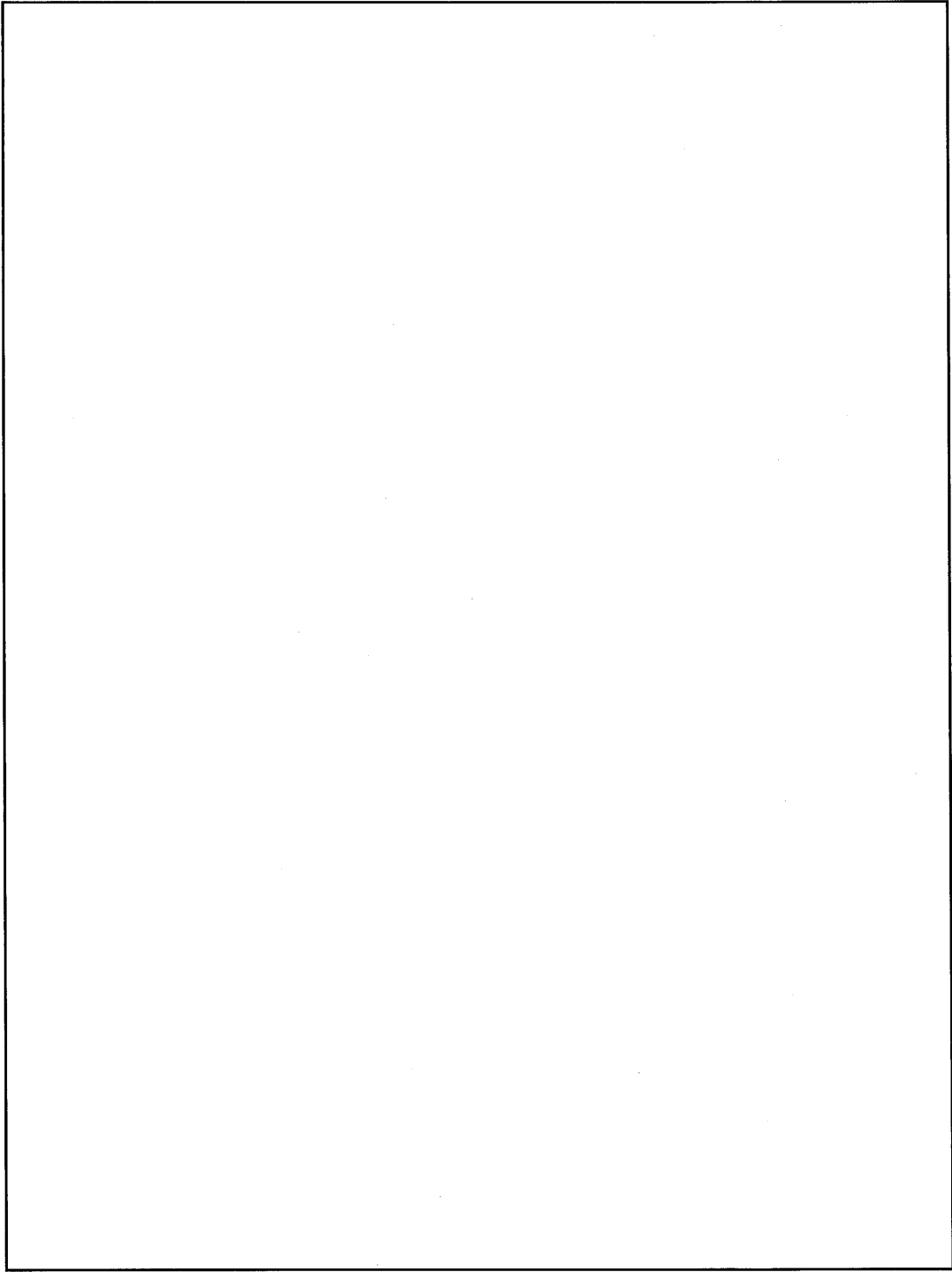


(a) 吸収エネルギー

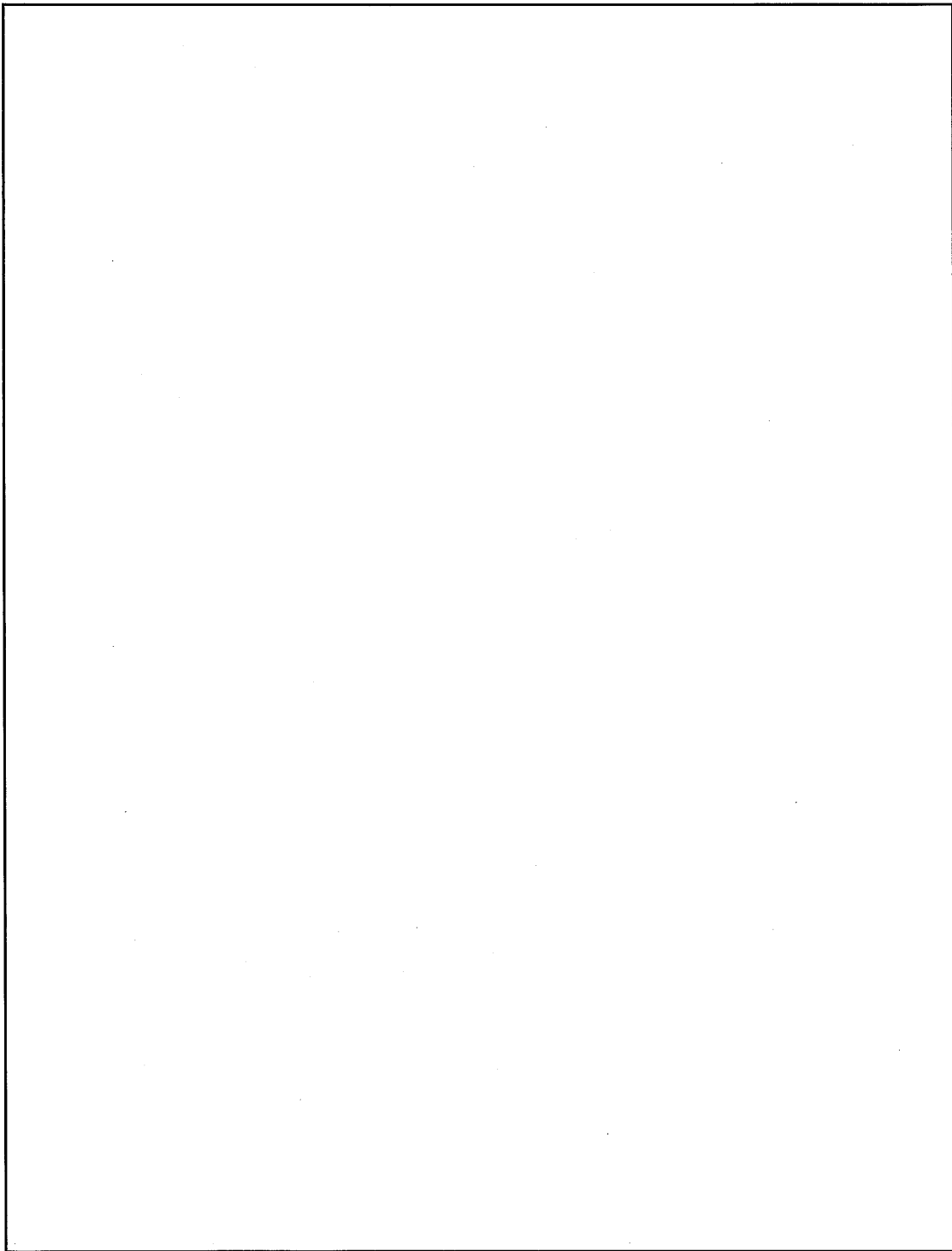


(b) 横膨出量

(ロ)-第 A. 付 4 図 ボロン入りステンレス鋼角パイプのシャルピー衝撃試験結果



写真(ロ)-A.付1 シャルピー衝撃試験片破断面(試験温度: °C)



写真(ロ)-A.付2 シヤルピー衝撃試験片破断面(試験温度: ℃)

5. 引張試験

(1) 試験要領

JIS Z 2241(1980)「金属材料引張試験方法」に基づき引張試験を行い、降伏応力(0.2%耐力)、引張強さ及び伸びを求めた。試験温度は□と□°Cとし、試験片はJIS Z 2201「金属材料引張試験片」の5号試験片又はJIS G 0578「鉄鋼材料高温引張試験片」に基づいた。

(2) 試験結果

(口)-第A.付2表に引張試験結果を示す。0.2%耐力の試験結果は基準値を十分上回っており、□及び□とも強度は十分あることが確認できた。

(ロ)-第 A. 付 2 表 ボロン入りステンレス鋼の引張試験結果

(a) における引張試験結果

材 料	区 分	メーカー	最小 0.2% 耐力 (MPa)	最小引張強さ (MPa)	最小伸び (%)
板 材	母 材	A 社			
		B 社			
		C 社			
	<input type="text"/> 溶 接 部	A 社			
		B 社			
		C 社			
角パイプ	母 材	B 社			
	<input type="text"/> 溶接部	B 社			

注記) における基準値はMPa である。

(b) °Cにおける引張試験結果

材 料	区 分	メーカー	最小 0.2% 耐力 (MPa)	最小引張強さ (MPa)	最小伸び (%)
板 材	母 材	A 社			
		B 社			
		C 社			
	<input type="text"/> 溶 接 部	A 社			
		B 社			
		C 社			
角パイプ	母 材	B 社			
	<input type="text"/> 溶接部	B 社			

注記) °Cにおける基準値はMPa である。

A. 10.3 9m 水平落下時のフィンの衝撃力及び吸収エネルギーの計算

本輸送物は 9m 水平落下時にフィンが落下台に当たり、フィンが座屈変形することにより落下エネルギーを吸収する。この変形による衝撃力及び吸収エネルギー量は、長方形板フィンに対する落下実験データ²⁰⁾より得られた変形量と吸収エネルギーとの関係を円環フィンに適用して求められる。この計算手法は円環フィンの部分モデルに対する落下実験との比較検討により、衝撃力を修正することにより妥当な評価結果が得られることを確認した。

1. 長方形フィンの実験結果

実験は、(ロ)-第 A. 付 5 図に示す長方形板の試験片に上方よりハンマーを落下させ、試験片に取り付けたロードセルとハンマーに取り付けた加速度計により衝撃力と加速度の時間的変化を計測した。この計測結果よりフィンの変形量と吸収エネルギーの関係を求めている。(ロ)-第 A. 付 6 図にフィン高さ \square mm の場合の関係を示す。ここでは、吸収エネルギーは塑性曲げモーメント、変形量はフィン高さとの無次元数により整理している。

2. 円環フィンに対する衝撃力と吸収エネルギーの計算方法

(ロ)-第 A. 付 7 図に示すように、円環フィンを長方形板要素に分割し、個々の長方形板要素に対して前項の変形量と吸収エネルギーの関係を適用して円環フィンの変形量と衝撃力及び吸収エネルギーの関係を求める。計算は(ロ)-第 A. 付 7 図に示す円環フィンの変形量 Δ を与え、その変形領域内にある長方形板要素 i の変形量 δ_i に対する吸収エネルギーを(ロ)-第 A. 付 6 図に示す関係式より求め、合計したものを円環フィンの吸収エネルギーとする。衝撃力については、求められた変形量と吸収エネルギーの関係より(吸収エネルギー増分)/(変形量増分)を求めることにより得られる。

3. 円環フィン落下実験結果による補正

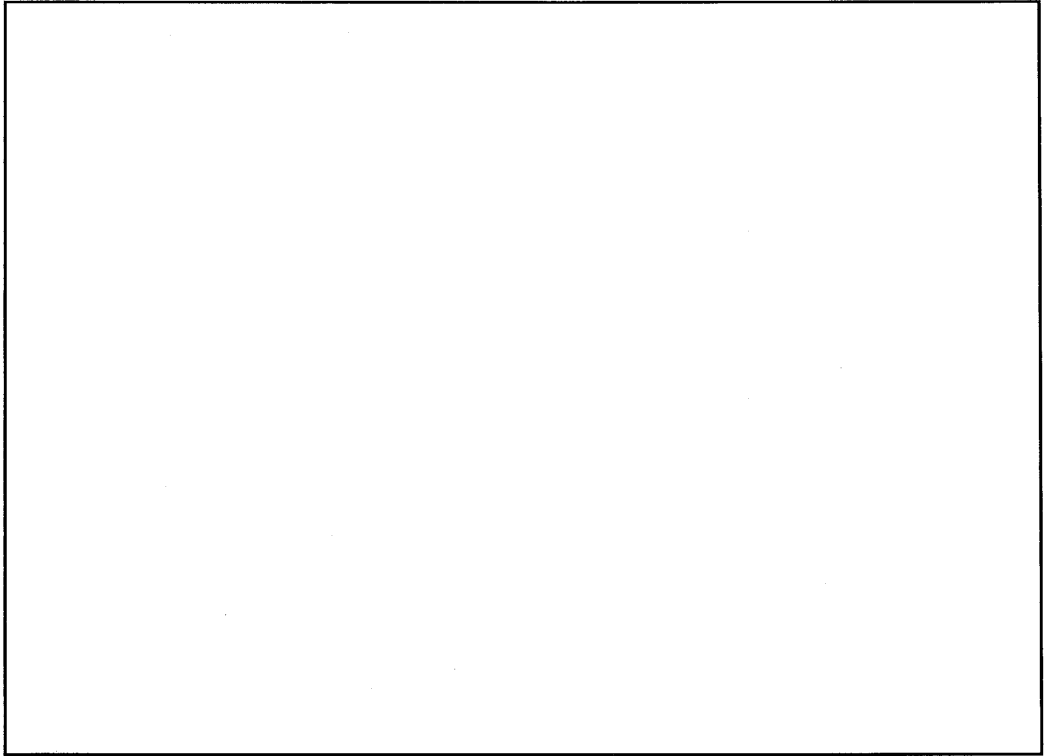
(ロ)-第 A. 付 8 図に示す円環フィン部分モデルに対して 1. と同様に上方よりハンマーを落下させ、ハンマーに取り付けた加速度計によりハンマーの加速度応答を計測した。この計測結果より求めた変形量と衝撃力及び吸収エネルギーの関係並びに前項の計算方法による結果との比較の一例を(ロ)-第 A. 付 9 図に示す。図において変形量が小さい範囲において吸収エネルギーの計算値は実験値より高くなっているが、フィンの変形が進むにつれて実験値に近づき 9m 落下時の最終変形量前後では実験値より低く安全側の評価となる。

一方、衝撃力については変形量が大きくなると計算値が実験値より低くなるので、計算値に一定の負荷係数を乗じて安全側に評価する必要がある。(ロ)-第 A. 付 3 表に各実験モデルに対して実験結果より衝撃力が高くなるように設定した負荷係数の値を示す。また、(ロ)-第 A. 付 9 図に補正した衝撃力と変形量の関係を示す。変形量の小さい領域では実験結果に合わせて衝撃力は線形に増加するとして評価する。

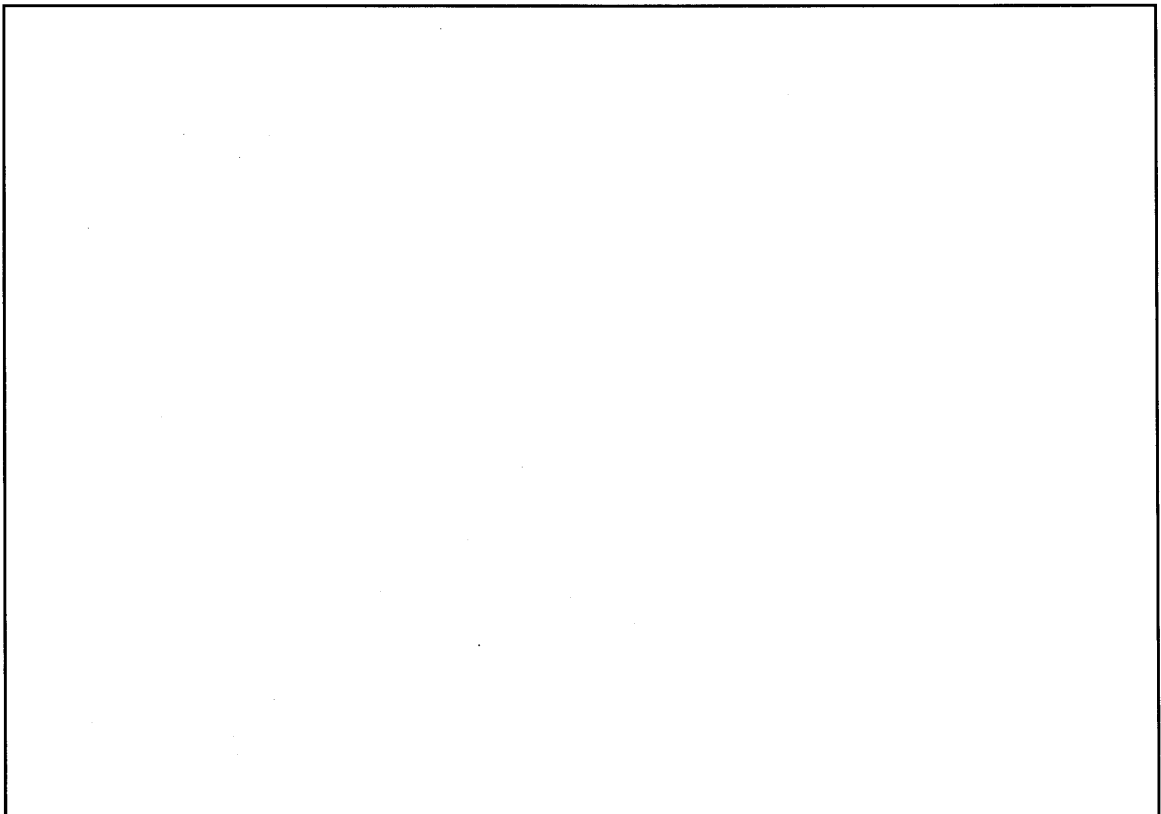
本輸送物のフィン(高さ：160mm、板厚：8mm)に対しては(ロ)-第 A. 付 3 表より負荷係数を とし、衝撃力を前項の計算値に して評価する。

(ロ)-第 A. 付 3 表 フィン落下試験モデルに対する負荷係数の設定

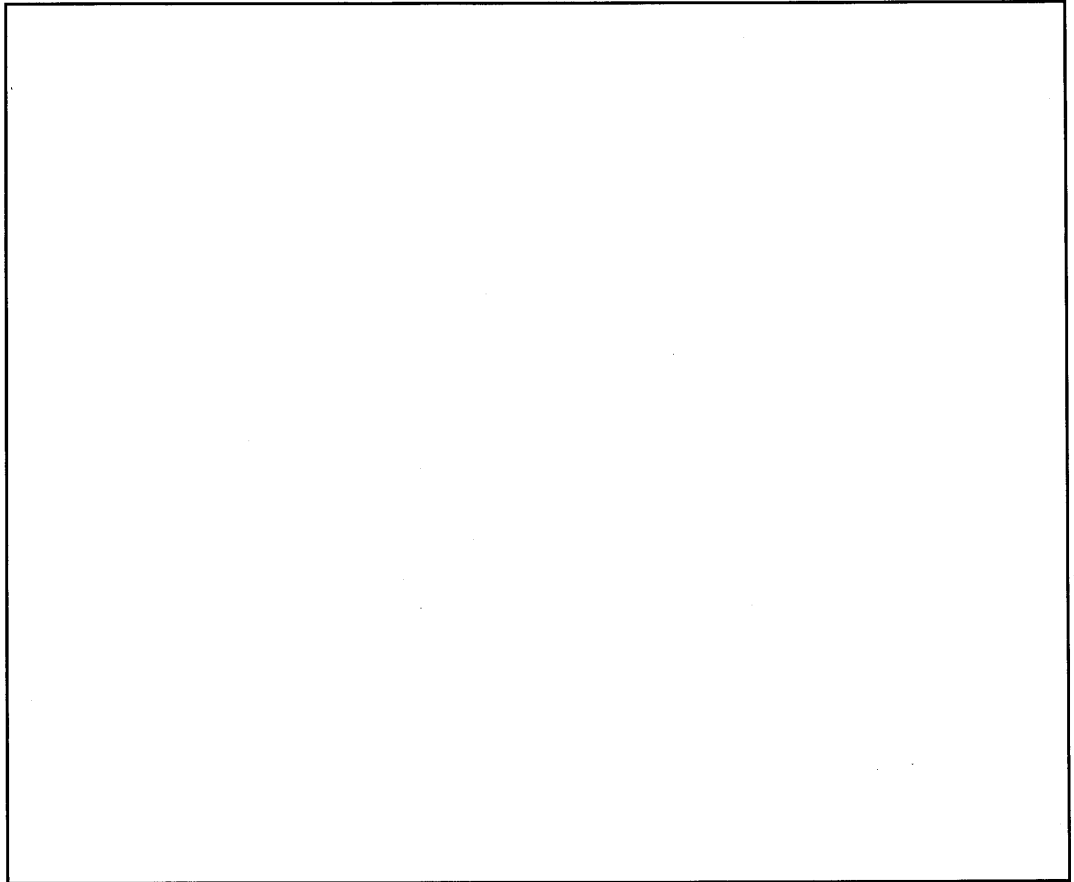
試験片No.	フィン形状			負荷係数
	高さ、H(mm)	板厚、t(mm)	H/t	
I				
II				
III				
IV				



(ロ)-第 A. 付 5 図 長方形板フィンの試験片形状

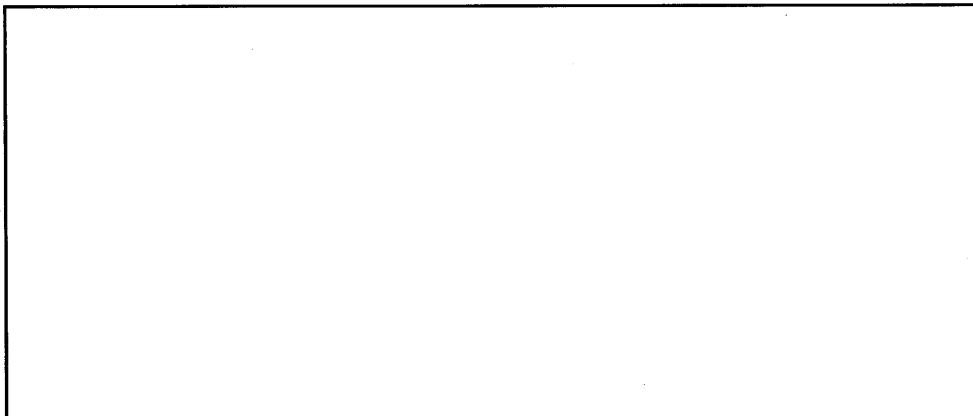


(ロ)-第 A. 付 6 図 高さ mm の長方形板フィンに対する変形量と吸収エネルギーとの関係

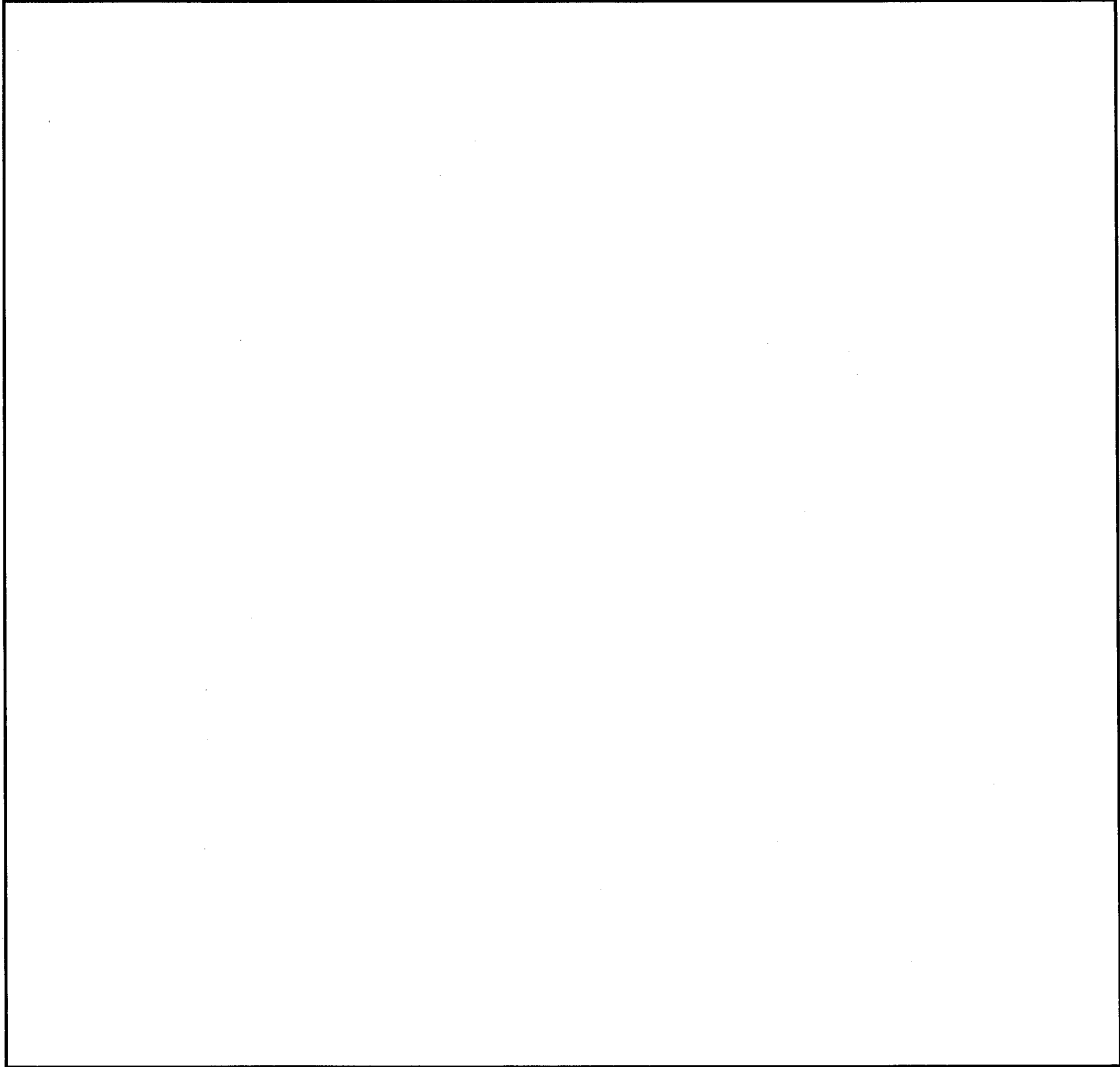


(ロ)-第 A. 付 7 図 円環フィンの計算モデル

試験モデル No.	R	H	t
I			
II			
III			
IV			



(ロ)-第 A. 付 8 図 円環フィン部分モデル形状



(ロ)-第A.付9図 円環フィン(高さ：mm、板厚：mm)の計算結果と実験結果との比較

4. 計算方法の妥当性

本計算方法の妥当性は、(ロ)章 A. 10. 5 に示す 1/3 スケールモデルキャスクに対して水平落下試験を行って確認した。

A. 10. 4 実機大スケール模擬燃料集合体を用いた 9m 落下試験

1. 概要

実機大スケール模擬燃料集合体を用いて 9m 垂直及び水平落下試験を行った。その結果、燃料集合体に残留変形が認められるものの、燃料被覆管は、破損しないことを確認した。また、臨界評価条件の妥当性を確認するため、模擬燃料集合体の残留変形量を確認した。

なお、本試験では、燃料被覆管の剛性が最も低い燃料タイプとして、燃料被覆管の外径が細く、かつ、肉厚の最も薄い PWR17×17 配列型燃料集合体を対象に試験を実施したが、PWR14×14 配列型及び PWR15×15 配列型の燃料集合体についても、試験結果に基づき燃料棒の残留変形量を評価した。

2. 試験条件

(1) 落下姿勢

a. 9m 頭部垂直落下

試験用容器内に実機大スケール模擬燃料集合体を収納した状態で、9m の高さから模擬燃料集合体の頭部を下側にして、垂直姿勢にて落下させる。試験用容器に発生する加速度は、実機の 9m 頭部垂直落下時の設計加速度である 895m/s^2 (91G) を目標とする。模擬燃料集合体の上・下部ノズルには、上・下部スツールを装荷して試験を実施する。

b. 9m 底部垂直落下

試験用容器内に実機大スケール模擬燃料集合体を収納した状態で、9m の高さから模擬燃料集合体の底部を下側にして、垂直姿勢にて落下させる。試験用容器に発生する加速度は、実機の 9m 底部垂直落下時の設計加速度である 890m/s^2 (91G) を目標とする。模擬燃料集合体の上・下部ノズルには、上・下部スツールを装荷して試験を実施する。

c. 9m 水平落下

試験用容器内に実機大スケール模擬燃料集合体を収納した状態で、9m の高さから模擬燃料集合体を水平姿勢にて落下させる。試験用容器に発生する加速度は、実機の 9m 水平落下時の設計加速度である 968m/s^2 (99G) を目標とする。水平落下時には上・下部スツールが燃料集合体の落下挙動に与える影響は小さく、燃料被覆管のひずみへの影

響は軽微であると考えられることから、模擬燃料集合体の上・下部ノズルには、上・下部スツールを装荷せずに試験を実施する。

(2) 試験装置

a. 試験用容器

落下試験に使用する試験用容器を(ロ)-第 A. 付 10 図に示す。試験用容器は、鋼製の円筒容器で、両端に底蓋と上蓋がフランジ/ボルトで結合される。内部には、模擬燃料集合体 1 体を収納できる角型鋼製のバスケットチャンネルが収められる。また、試験用容器には計装配線用貫通孔が設けられており、大気圧とした。

この試験用容器は、各落下試験に共通に使用する。落下試験時には、(ロ)-第 A. 付 11 図に示すように容器端部に緩衝体を設ける。

b. 模擬燃料集合体

落下試験に使用する模擬燃料集合体は、剛性が最も小さい燃料タイプとして、燃料被覆管の外径が細く、かつ、肉厚の最も薄い PWR17×17 配列型燃料集合体を対象とし、実機燃料と同一形状、同一重量とした。ペレットには を使用した。(ロ)-第 A. 付 4 表に落下試験に使用する模擬燃料集合体仕様を示す。

c. 上・下部スツール

垂直落下時には、実輸送と同様に上部ノズルには上部スツール、下部ノズルには下部スツールを設置した。試験に使用した上・下部スツールの種類を(ロ)-第 A. 付 5 表に示す。なお、水平落下試験時には、上・下部スツールが燃料集合体の落下挙動に与える影響は小さく、燃料被覆管のひずみへの影響は軽微であると考えられることから、上・下部スツールは設置していない。

(ロ)-第 A. 付 4 表 落下試験に使用する模擬燃料集合体仕様

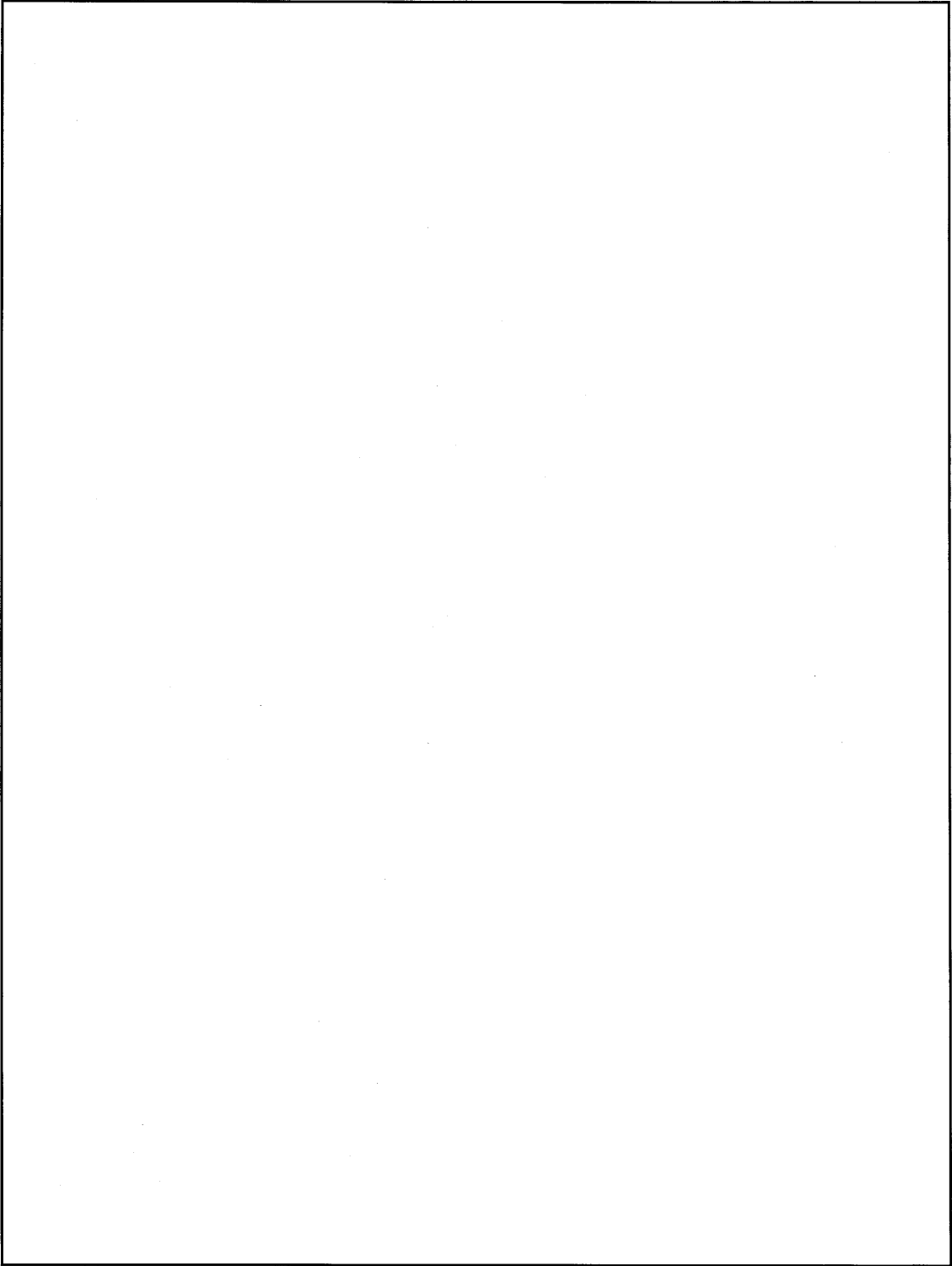
試 験		模擬燃料集合体の仕様	
		燃料タイプ	共通仕様
9m 頭部垂直落下	(1)	B 型	・燃料型式： PWR17×17 配列型燃料集合体 ・構成部材： 実燃料模擬 ・ペレット： <input type="text"/> (重量模擬)
	(2)	A 型	
9m 底部垂直落下		A 型 ^{注 1)}	
9m 水平落下		A 型 ^{注 2)}	

注 1)

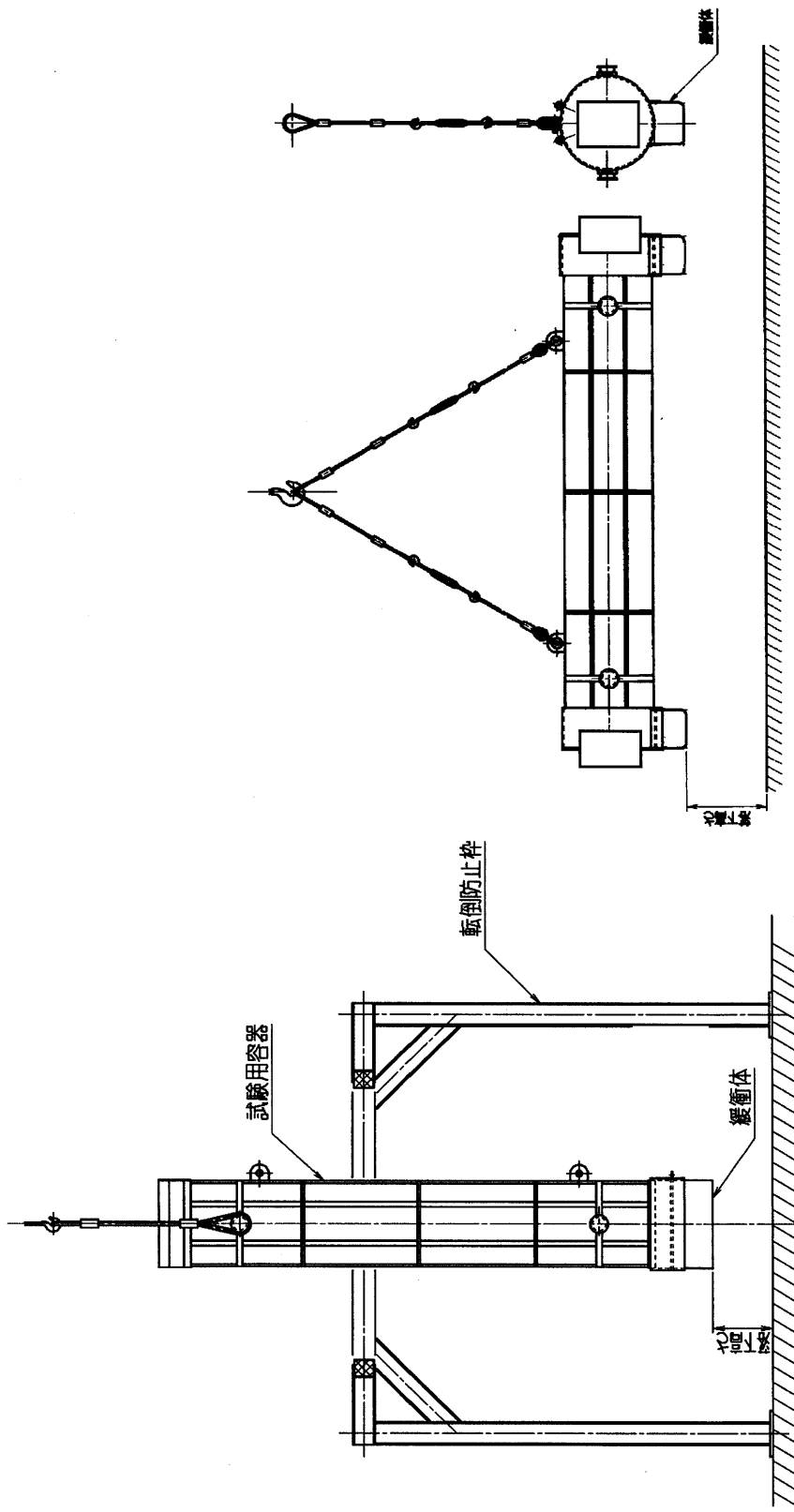
注 2)

(ロ)-第 A. 付 5 表 落下試験に使用した上・下部スツールの種類

落下姿勢		模擬燃料集合体の仕様	上・下部スツールの種類	
			模擬燃料集合体上部	模擬燃料集合体下部
9m 頭部垂直落下	(1)	B 型模擬燃料集合体 PWR17×17 配列型	上部スツール (タイプ I)	下部スツール
	(2)	A 型模擬燃料集合体 PWR17×17 配列型	上部スツール (タイプ II)	下部スツール
9m 底部垂直落下		A 型模擬燃料集合体 PWR17×17 配列型	上部スツール (タイプ I)	下部スツール
9m 水平落下		A 型模擬燃料集合体 PWR17×17 配列型	-	-



(口)-第A.付10図 試験用容器



(1) 垂直落下

(2) 水平落下

(口)-第A.付11図 落下試験状態図

3. 測定項目及び測定器

模擬燃料集合体を用いた落下試験において測定した主な測定項目とその測定部位及び測定器等について(ロ)-第 A. 付 6 表及び(ロ)-第 A. 付 12 図から(ロ)-第 A. 付 14 図に示す。

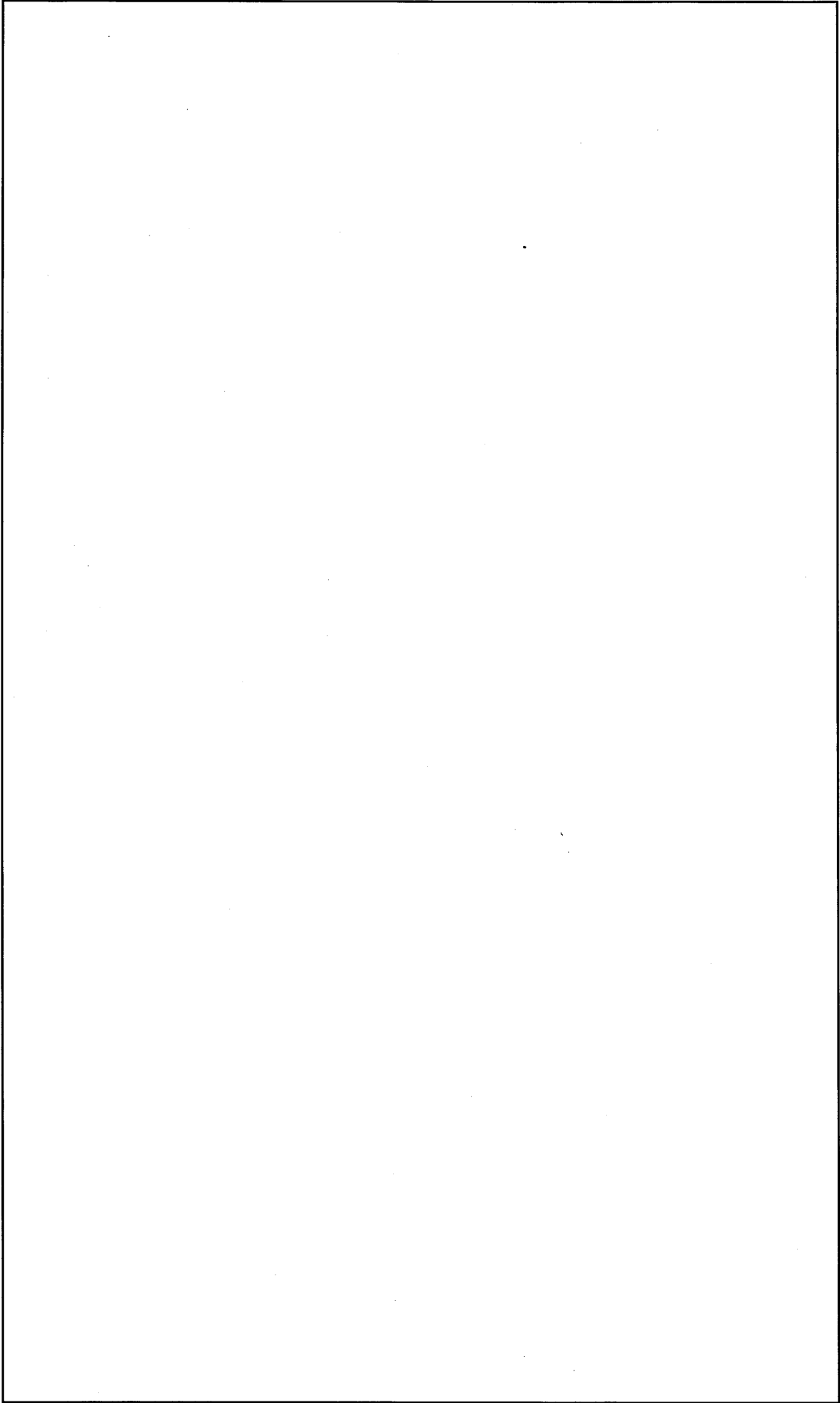
試験用容器の胴には、端部及び中央に加速度計を設置し、落下時に容器に発生する加速度を測定した。

模擬燃料集合体の燃料被覆管については、中央及び端部のグリッドスパン間にひずみゲージを設置し、燃料被覆管に発生するひずみを測定した。垂直落下時には、落下方向に対して燃料被覆管のひずみが最大になると想定される最下段のグリッドスパン間中央にひずみゲージを重点的に設置した。また、ひずみゲージは、燃料被覆管断面の周方向に複数個取り付けた。

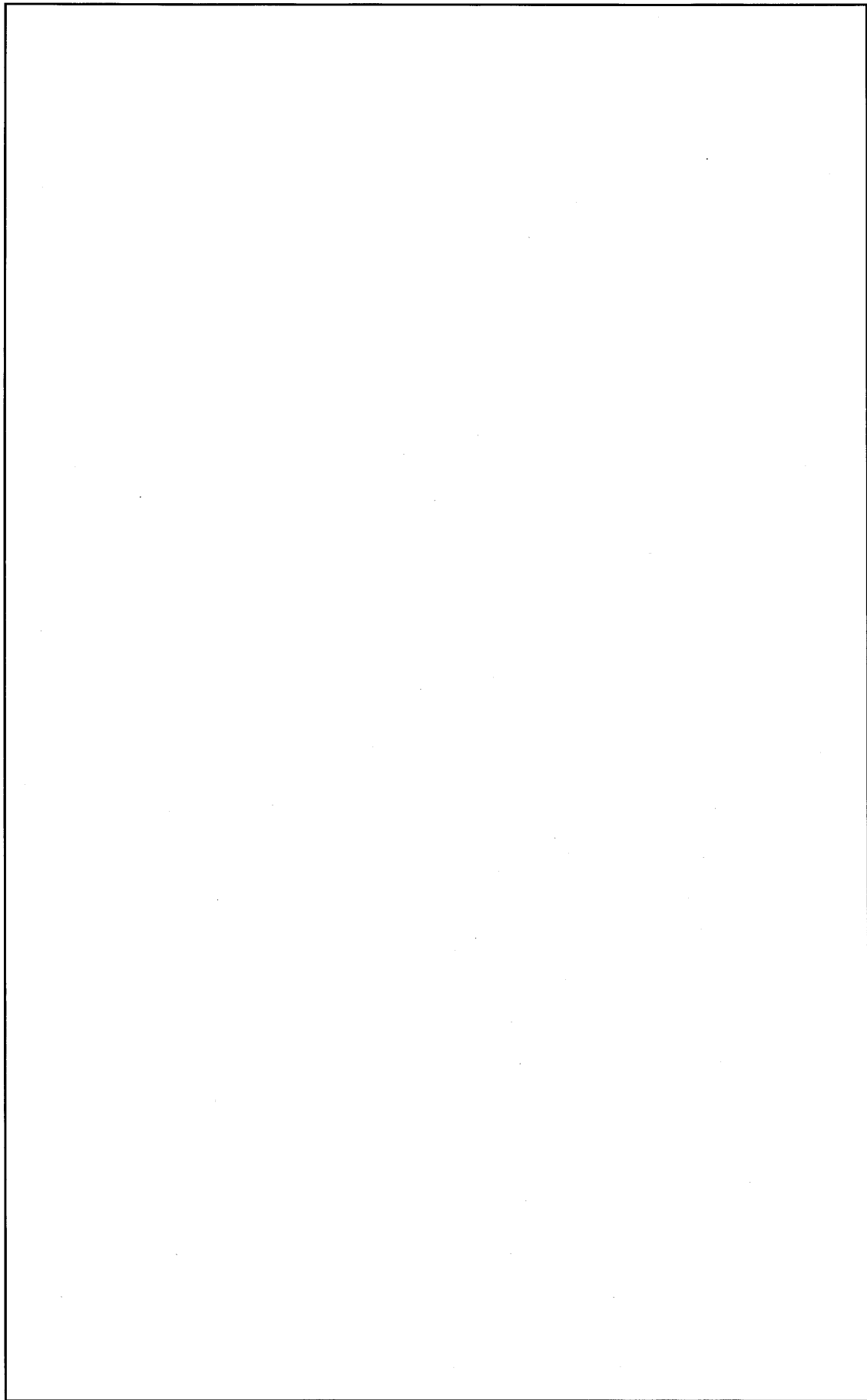
さらに、落下試験後、模擬燃料集合体の残留変形量を確認するため、模擬燃料集合体幅を測定した。

(ロ)-第 A. 付 6 表 実機大スケール模擬燃料集合体を用いた落下試験における主な測定項目

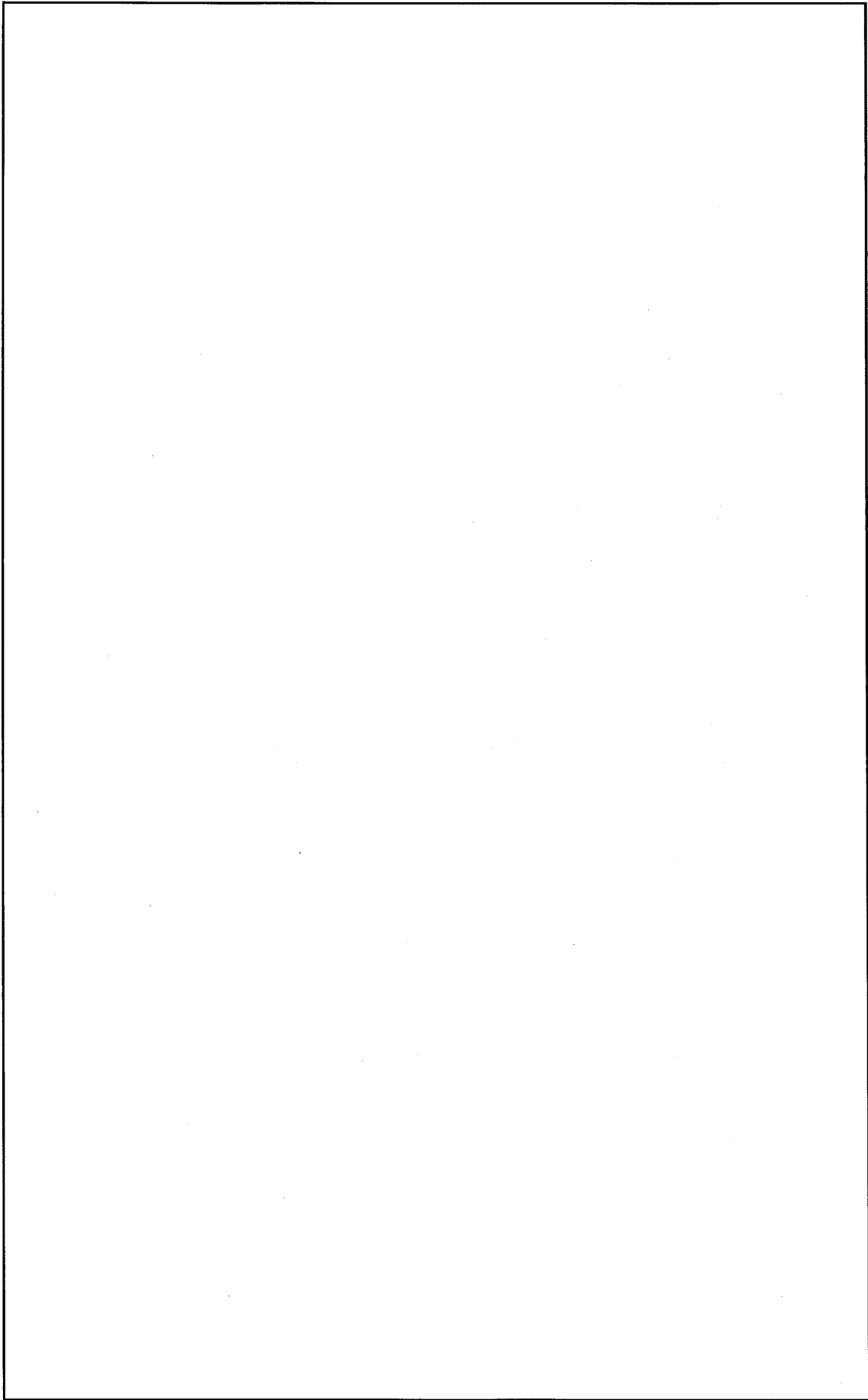
測定項目	測定部位	測定器等	測定器取付け個数
加速度	試験用容器(内筒)	加速度計	2 点
ひずみ	燃料被覆管	ひずみゲージ	9m 頭部垂直(1) : 54 点 9m 頭部垂直(2)及び底部 : 51 点 9m 水平 : 54 点
残留変形	模擬燃料集合体幅	ノギス	-



(口)-第A.付12図 9m 頭部垂直落下試験(1)時の加速度計及びびびりゲージ計装位置図



(口)-第A.付13 図 9m 頭部垂直落下試験(2)及び9m 底部垂直落下試験時の加速度計及びびびり計装位置図



(ロ)-第A.付14図 9m水平落下試験時の加速度計及びびびりゲージ計装位置図

4. 試験結果

模擬燃料集合体を用いて 9m 頭部及び 9m 底部垂直落下試験並びに 9m 水平落下で得られた試験結果を示す。

(1) 試験用容器の加速度

落下試験で得られた試験用容器の加速度と CRUSH コードを用いた実機条件の 9m 垂直落下時の加速度の比較を(ロ)-第 A. 付 7 表に示す。

9m 頭部及び 9m 底部垂直落下のいずれの試験においても、実機と同等の加速度が発生していることを確認した。試験用容器の格子寸法及び軸方向ギャップ寸法は実機を模擬していること、また、試験用容器は乾式であり内水の緩衝効果がないことから、模擬燃料集合体には実機と少なくとも同等以上の荷重が負荷されたものと判断される。

(2) 模擬燃料集合体のひずみ及び残留変形

各落下試験において、測定された燃料被覆管の最大ひずみ及び模擬燃料集合体の残留変形の測定結果を(ロ)-第 A. 付 8 表に示す。

a. 9m 頭部垂直落下

測定された燃料被覆管の最大ひずみは 9,300 μ であった。

模擬燃料集合体は、落下方向の最下段のグリッド 1 スパン間領域において模擬燃料集合体幅が最大約 \square mm 拡大したが、最下段より上位のスパン間領域では、有意な変形は見られなかった。

b. 9m 底部垂直落下

測定された燃料被覆管の最大ひずみは 3,500 μ であった。

模擬燃料集合体は、落下方向の最下段のグリッド 1 スパン間領域において模擬燃料集合体幅が約 \square mm 拡大したが、最下段より上位のスパン間領域では、有意な変形は見られなかった。

c. 9m 水平落下

測定された燃料被覆管の最大ひずみは 3,200 μ であった。

模擬燃料集合体は、模擬燃料集合体中央のグリッド位置で、全長にわたり圧縮変形し、更に第 3 グリッドから第 7 グリッドにおいて模擬燃料集合体幅が約 \square mm 縮小した。

(ロ)-第 A. 付 7 表 試験用容器の加速度と実機条件との比較

落下姿勢			加速度		備考
			落下試験	実機条件	
9m 頭部垂直落下	(1)	端部	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 100%;"></div>		実機条件の加速度は、 (ロ)章 A. 6. 1 による。
		中央			
	(2)	端部			
		中央			
9m 底部垂直落下		端部			
		中央			
9m 水平落下		端部			
		中央			

(ロ)-第 A. 付 8 表 模擬燃料集合体を用いた落下試験結果のまとめ

落下姿勢 試験結果	9m 頭部垂直落下		9m 底部垂直落下	9m 水平落下
	(1)	(2)		
燃料被覆管 最大ひずみ ()内は発生 位置	9, 300 μ	6, 900 μ	3, 500 μ	3, 200 μ
模擬燃料集合 体の残留変形	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 100%;"></div>			

5. 評価

9m 頭部及び底部垂直落下時並びに 9m 水平落下時に燃料被覆管に発生した最大ひずみは、9,300 μ であった。

実機条件では、高温(190℃)であることから燃料被覆管の強度は低下するものの、照射により降伏応力が上昇し、常温及び未照射条件の降伏応力よりも大きくなる。したがって、実機条件において燃料被覆管に発生するひずみは、常温及び未照射条件の燃料被覆管を用いた落下試験で得られたひずみに比べて同等以下となる。

以上より、実機条件における落下時においても照射材燃料被覆管の動的破断ひずみ 20,000 μ (約 2%)²³⁾を超えることはない。

また、上記は燃料被覆管の外径が細く、かつ、肉厚の最も薄い PWR17×17 配列型燃料集合体を対象とした試験結果であることから、試験結果に基づき、PWR14×14 配列型及び PWR15×15 配列型の燃料集合体の燃料被覆管に発生する残留変形量を推測する。

変形量は、グリッド間にプレナム部(UO₂ペレットのない領域)がない燃料集合体最下段の支持格子間 1 スパンに対して、各燃料タイプの燃料被覆管の断面形状及び支持格子間隔並びに作用する荷重を考慮して評価する。落下姿勢は、燃料集合体最下段の支持格子間の残留変形が最大となる 9m 底部垂直落下とする。

各燃料タイプの燃料被覆管に発生する変形量 V_k (mm) は、次式で与えられる。

$$V_k = 5 \times W_k \times \frac{L_k^4}{384 \times E \times I_k} \quad (\text{等分布荷重、両端支持の梁に発生する最大変形量})$$

$$W_k = Wf_k + Wc_k$$

$$I = \pi \times \frac{d_{o_k}^4 - d_{i_k}^4}{64}$$

ここで、

W_k : ペレット重量を考慮した燃料被覆管の単位長さ当たりの重量(kg/mm)

(水平落下姿勢時に支持格子間に作用する荷重を想定)

Wf_k : ペレット単位長さ当たり重量(kg/mm)

Wc_k : 燃料被覆管単位長さ当たり重量(kg/mm)

L_k : 燃料被覆管の支持格子間隔(最下段)(mm)

E : 燃料被覆管の縦弾性係数(MPa)(全燃料タイプで共通)

I_k : 燃料被覆管の断面二次モーメント(mm⁴)

d_{ok} : 燃料被覆管の外径 (mm)

d_{ik} : 燃料被覆管の内径 (mm)

※各記号の添え字の k は、評価対象の燃料タイプを表す。

(17×17 配列型は $k=17$ 、15×15 配列型は $k=15$ 、14×14 配列型は $k=14$)

したがって、PWR17×17 配列型燃料集合体に対する他の燃料タイプの変形量の比率 α_k は、次式で与えられる。

$$\alpha_k = \frac{V_k}{V_{17}} = \frac{\frac{(Wf_k + Wc_k) \times L_k^4}{d_{ok}^4 - d_{ik}^4}}{\frac{(Wf_{17} + Wc_{17}) \times L_{17}^4}{d_{o17}^4 - d_{i17}^4}}$$

ここで、

V_k : 他の燃料タイプの燃料被覆管に発生する変形量 (mm)

V_{17} : PWR17×17 配列型燃料集合体の燃料被覆管に発生する変形量 (mm)

Wf_k : ペレット単位長さ当たり重量 (kg/mm)

$$(Wf_{14} = Wf_{15} = \boxed{} \text{ kg/mm}, Wf_{17} = \boxed{} \text{ kg/mm})$$

Wc_k : 燃料被覆管単位長さ当たり重量 (kg/mm)

$$(Wc_{14} = Wc_{15} = \boxed{} \text{ kg/mm}, Wc_{17} = \boxed{} \text{ kg/mm})$$

L_k : 燃料被覆管の支持格子間隔 (落下方向最下段) (mm)

$$(L_{14} = L_{15} = \boxed{} \text{ mm}, L_{17} = \boxed{} \text{ mm})$$

d_{ok} : 燃料被覆管の外径 (mm)

$$(d_{o14} = d_{o15} = \boxed{} \text{ mm}, d_{o17} = \boxed{} \text{ mm})$$

d_{ik} : 燃料被覆管の内径 (mm)

$$(d_{i14} = d_{i15} = \boxed{} \text{ mm}, d_{i17} = \boxed{} \text{ mm})$$

以上より、PWR17×17 配列型燃料集合体に対する PWR14×14 配列型及び PWR15×15 配列型の燃料集合体の変形量の比率は $\boxed{}$ となる。

(ロ)-第 A. 付 8 表より、9m 底部垂直落下時における PWR17×17 配列型模擬燃料集合体の残留変形が約□mm 発生することから、9m 底部垂直落下時における PWR14×14 配列型及び PWR15×15 配列型の燃料集合体の燃料被覆管の変形は約□mm 発生すると推測される。

6. まとめ

実機大スケール模擬燃料集合体 (PWR17×17 配列型) を用いて 9m 垂直落下試験を実施した結果、模擬燃料集合体の落下方向最下段グリッド 1 スパン間領域の模擬燃料集合体幅が最大約□mm 拡大する残留変形が見られたものの、9m 落下時に燃料被覆管に発生するひずみは最大 9,300 μ であり燃料被覆管が破損しないことが確認された。9m 水平落下試験においては、模擬燃料集合体は圧縮の残留変形が見られたものの、9m 落下時に燃料被覆管に発生するひずみは最大 3,200 μ であり燃料被覆管が破損しないことが確認された。

実機条件においては、落下時に燃料被覆管に発生するひずみは落下試験で得られたひずみに比べて同等以下となることから、落下時に燃料被覆管が破損することはない。

また、上記の PWR17×17 配列型模擬燃料集合体の落下試験の結果に基づき、9m 底部垂直落下時における PWR14×14 配列型及び PWR15×15 配列型の燃料集合体の燃料被覆管の残留変形量を評価した結果、燃料被覆管には□mm 程度の変形が発生すると推測される。(ロ) 章 E の臨界評価では、燃料被覆管がバスケットチャンネル内で均一に広がった場合を想定しており、各燃料タイプで推測される変形量よりも大きな変形量を考慮して保守的に評価していることから、臨界評価条件は妥当である。

A. 10. 5 1/3 スケールモデルを用いた 9m 落下試験

1. 概要

1/3 スケールモデルによる落下試験では、垂直及び水平の 2 つの落下姿勢について実施し、落下時の容器及び収納物の加速度、並びに緩衝体の変形量についてデータを取得した。

取得した容器及び収納物の加速度並びに緩衝体の変形量を評価し、加速度及び変形量ともに解析値が試験値を上回ることを確認した。また、収納物の加速度が容器の加速度に比べて同等以下となることを確認した。

2. 試験条件

(1) 落下姿勢

落下姿勢を(ロ)-第 A. 付 9 表に示す。

(2) 試験装置

a. 試験体

試験体は鉛-鋼-レジンタイプのキャスクを対象とした 1/3 スケールモデルを適用した。モデル形状及び寸法をそれぞれ(ロ)-第 A. 付 15 図及び(ロ)-第 A. 付 10 表に示す。

容器本体は、三重円筒構造であり、内筒、中間筒、外筒、ガンマ線遮蔽体及びフィン等により構成されている。

バスケットは、バスケットと燃料集合体の重量を模擬した重量体であり、バスケットへは燃料集合体を模擬した収納物を 1 体収納した。また、実輸送物と同様に内筒内水が充填されている。

緩衝体は、上部・下部とも同じ構造であり、缶体とリブ構造の空間部に緩衝材である 及び を充填したものである。

b. 試験装置

容器本体及び内部収納物に加速度計を設置し、落下時に容器及び収納物に発生する加速度を測定するとともに、落下試験後には、緩衝体及びフィンの変形量を測定した。加速度の測定位置を(ロ)-第 A. 付 15 図に示す。

3. 試験結果

試験で得られた容器及び内部収納物の加速度並びに緩衝体及びフィンの変形量を(ロ)-第 A. 付 11 表に示す。なお、頭部垂直落下時の容器及び内部収納物の加速度は 300Hz、水平落下時の容器及び内部収納物の加速度はそれぞれ 410Hz 及び 300Hz のローパスフィルター処理を行ったものである。

4. 評価

1/3 スケールモデルに対して、本輸送物の構造解析で示している落下時の変形量及び衝撃加速度の解析方法を適用し、試験解析を実施した。落下試験結果(試験値)と試験解析結果(解析値)の比較を(ロ)-第 A. 付 12 表に示す。

同表に示すとおり、加速度及び変形量ともに解析値が試験値を上回ることが確認された。

(ロ)-第 A. 付 9 表 試験項目

落下姿勢	落下高さ	備考
頭部垂直落下	9m	-
水平落下	9m	トラニオン方向に落下

(ロ)-第A.付10表 1/3スケールモデル寸法

	寸法 (mm)	実機想定寸法 ^{注)} (mm)
本体 全長(緩衝体除く) 外径(緩衝体除く)		
緩衝体(上部/下部) 外径 長さ カバープレート板厚		

注) モデル寸法の3倍

(ロ)-第A.付11表 1/3スケールモデルの落下試験結果

(a) 容器及び内部収納物の加速度並びに緩衝体及びフィンの変形量

落下姿勢	加速度(m/s ²) ^{注1)}				最大変形量(mm)	
	容器			内部収納物	緩衝体	フィン
	内筒 (90°)	内筒 (270°)	蓋			
頭部垂直落下						
水平落下						

注1) 表中の加速度及び最大変形量は、1/3スケールモデルの落下試験における実測データである。なお、実規模モデルにおける加速度、最大変形量は、スケール則に従うとそれぞれ、1/3倍、3倍となる。

注2)

注3)

(b) 容器と内部収納物の加速度の比較

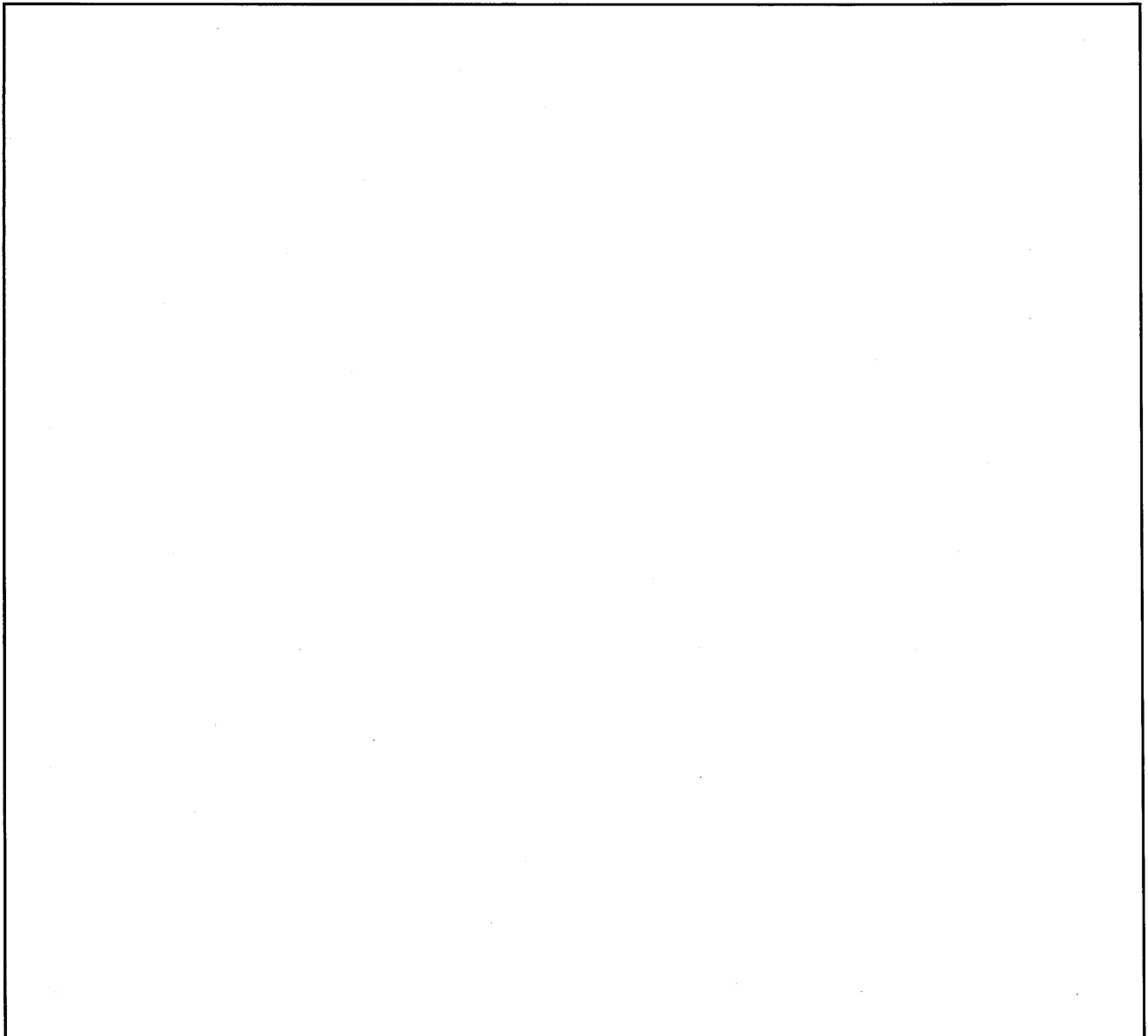
落下姿勢	加速度(m/s ²)		[B]/[A]
	容器 ^{注)} [A]	内部収納物 [B]	
頭部垂直落下			0.93
水平落下			0.91

注) 測定された最大の値

(ロ)-第A.付12表 1/3スケールモデルの落下試験結果と試験解析結果の比較

落下姿勢	落下試験[A]		解析結果[B]		[B]/[A]	
	加速度 ^{注)} (m/s ²)	変形量 (mm)	加速度 (m/s ²)	変形量 (mm)	加速度	変形量
頭部垂直落下					1.02	1.07
水平落下					1.61	1.54

注) 測定された最大の値



(ロ)-第A.付15図 1/3スケールモデルキャスク形状図

A. 10.6 実規模モデルを用いた実証試験

1. 概要

国内の原子力発電所から再処理工場への使用済燃料輸送に用いられる NFT 型輸送容器の実規模試験体を用いて安全性実証試験²⁴⁾が実施された。安全性実証試験として、環境伝熱試験、自由落下試験、落下試験Ⅰ、落下試験Ⅱ、耐火試験、及び浸漬試験(15m、200m)が同一供試体にて実施され、いずれの試験においても構造の健全性が維持され、輸送規則に定められた技術基準を満足することが確認された。

本付属書では、自由落下試験(0.3m 落下試験)及び落下試験Ⅰ(9m 落下試験)を対象として、安全解析書に示された落下時の衝撃力及び変形量の算出方法を検証した。

2. 試験条件

(1) 落下姿勢

落下姿勢を(ロ)-第 A. 付 13 表に示す。

(2) 試験装置

a. 試験体

試験体は NFT-14P 型輸送容器を用いた。NFT-14P 型輸送容器の主要寸法及び輸送物全体図をそれぞれ(ロ)-第 A. 付 14 表及び(ロ)-第 A. 付 16 図に示す。

容器本体は、三重円筒構造であり、内筒、中間筒、外筒、ガンマ線遮蔽体及びフィン等により構成されている。

容器内部に実機と同じバスケットを有し、重量、外形寸法及び発熱量を模擬した模擬収納物を 14 体収納した。また、実輸送物と同様に内筒内水が充填されている。

緩衝体は、缶体とリブ構造の空間部に緩衝材である 及び
 を充填したものである。

b. 試験装置

容器本体に加速度計を設置し、落下時に容器に発生する加速度を測定するとともに、落下試験後には、緩衝体及びフィンの変形量を測定した。測定位置を(ロ)-第 A. 付 17 図に示す。

3. 試験結果

試験で得られた加速度及び変形量を(口)-第 A. 付 15 表に示す。なお、加速度はそれぞれ 160Hz のローパスフィルター処理を行ったものである。

4. 評価

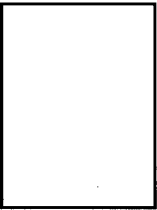


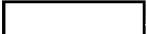

落下試験結果(試験値)と NFT-14P 型輸送容器の構造解析結果(解析値)の比較を(口)-第 A. 付 16 表に示す。同表に示すとおり、加速度及び変形量ともに解析値が試験値を上回ることが確認された。

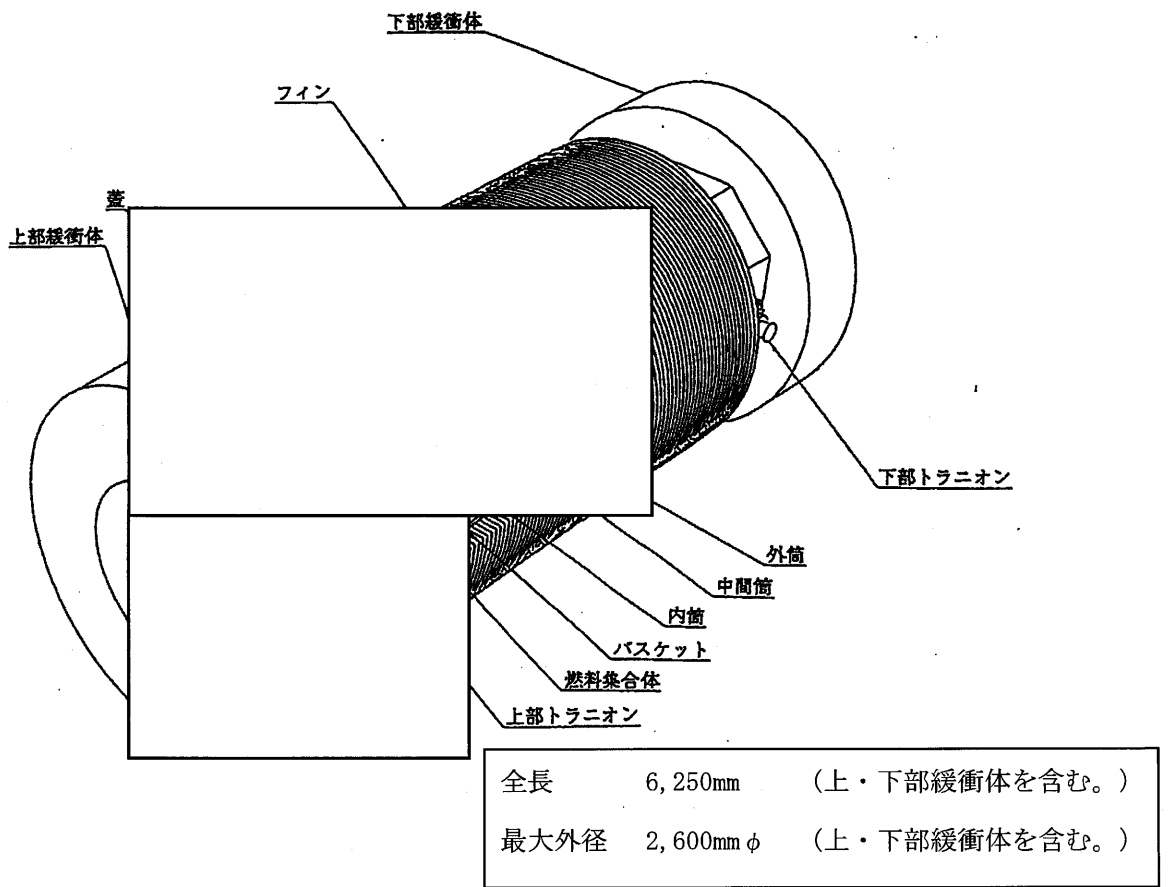
NFT-14P 型輸送容器以外の NFT 型輸送容器についても、基本構造が同じであるため、上記において検証された解析手法が適用可能である。

(口)-第 A. 付 13 表 試験項目

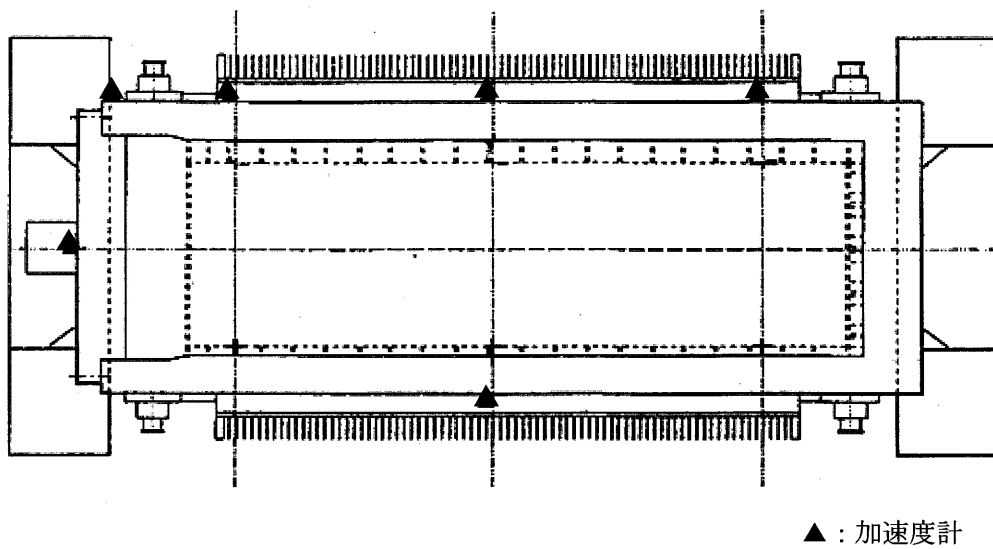
試験項目	落下姿勢	落下高さ	備考
自由落下試験 (0.3m 落下)	水平落下	0.3m	トラニオン方向 に落下
落下試験 I (9m 落下)	水平落下	9m	同上

(ロ)-第 A. 付 14 表 NFT-14P 型輸送容器の主要寸法

部 品 名	寸 法(mm)	
本 体		
内筒内径		
板厚		
中間筒内径		
板厚		
外筒内径		
板厚		
フィン高さ		160
厚さ		8
枚数		77
底板厚さ		
全 長	5,164	
蓋		
蓋 外 径	1,680	
厚 さ		
バスケット		
外 径	1,331	
長 さ		
チャンネル数	14	
チャンネル内幅		
緩衝体		
外 径	2,600	
幅	2,600	
上部緩衝体長さ	636	
下部緩衝体長さ	636	



(口)-第 A. 付 16 図 輸送物全体図(NFT-14P 型輸送容器)



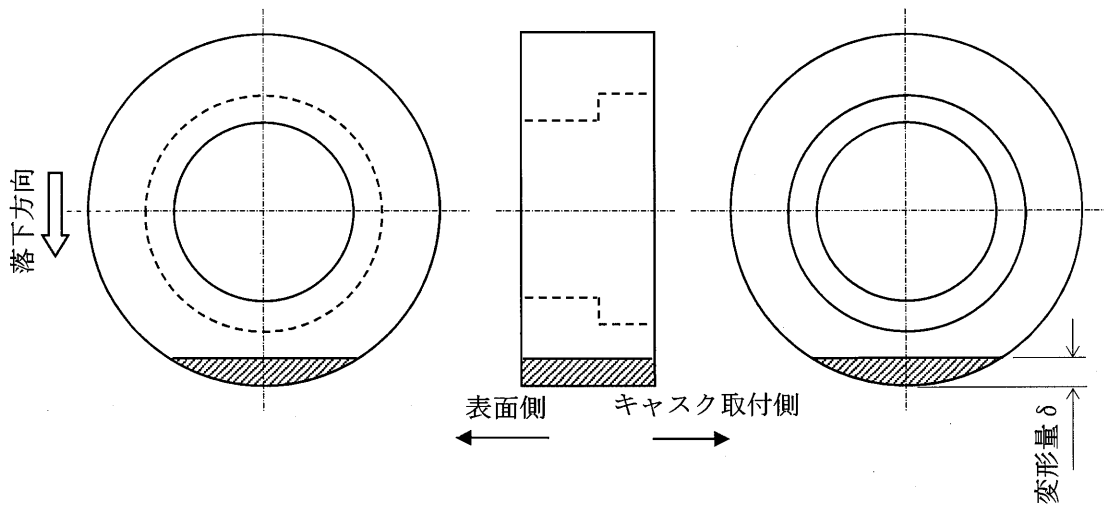
(口)-第 A. 付 17 図 測定位置

(ロ)-第 A. 付 15 表 実規模モデルの落下試験結果

落下姿勢	加速度 (m/s^2)	変形量 δ (mm)
自由落下試験 (0.3m 落下)	108 (11G ^{注1)})	15 [緩衝体]
落下試験 I (9m 落下)	755 (77G ^{注1)})	150 [緩衝体] 99 ^{注2)} [フィン]

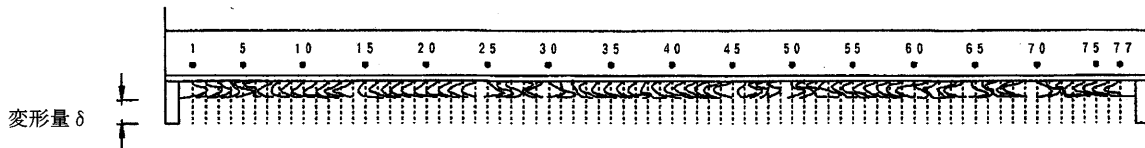
注 1) 加速度の時刻歴を積分して求めた速度履歴の勾配より求めた値

注 2) フィン変形量の平均値



斜線部：緩衝体の変形領域

注 1) 水平落下時の緩衝体変形量測定位置



注 2) 水平落下時のフィン変形量計測位置

(ロ)-第 A. 付 16 表 実規模モデルの落下試験結果と試験解析結果の比較

落下姿勢	落下試験 [A]		解析結果 ^{注)} [B]		[B]/[A]	
	加速度 (m/s^2)	変形量 (mm)	加速度 (m/s^2)	変形量 (mm)	加速度	変形量
自由落下試験 (0.3m 落下)	108 (11G)	15 [緩衝体]	194 (20G)	38.4 [緩衝体]	1.80	2.56 [緩衝体]
落下試験 I (9m 落下)	755 (77G)	150 [緩衝体] 99 [フィン]	968 (99G)	184 [緩衝体] 133 [フィン]	1.28	1.23 [緩衝体] 1.34 [フィン]

注) NFT-14P 型の構造解析の評価結果

A. 10.7 傾斜落下時の輸送物健全性

1. 概要

NFT 型輸送容器の傾斜落下時の密封健全性を確認するため、1/2.5 スケールモデル(以下「落下試験体」という。)を用いて水平落下試験及び傾斜落下試験を実施し、落下時の容器の加速度及び緩衝体等の変形量についてデータを取得するとともに、密封健全性を確認した。また、そのデータに基づき、NFT-14P 型輸送容器の密封性能を評価した。

2. 試験条件

(1) 落下姿勢

落下姿勢を(ロ)-第 A. 付 17 表に示す。

(2) 試験装置

a. 落下試験体

落下試験体の形状及び寸法をそれぞれ(ロ)-第 A. 付 18 図及び(ロ)-第 A. 付 18 表に示す。落下試験体は、NFT-14P 型輸送容器と同様に、9m 水平落下時には輸送容器の上下部に取り付けられている緩衝体及びフィンの変形によって落下エネルギーを吸収する構造である。

本体は二重円筒構造であり、主要構成物は内筒、外筒、伝熱フィン、フィン、遮蔽材としてのレジン、ベント・水位調整バルブ、ドレンバルブ及び上・下部トラニオンである。落下試験体としては、ベント・水位調整バルブ及びドレンバルブは省略した。

蓋は□本の蓋ボルトで本体上部のフランジ面に取り付けられる。この蓋と本体上部フランジ面との接合面には蓋側に二重 O リングが設けられており、この二重の O リングの内側 O リングにより密封性が確保されるようになっている。□

□

バスケットは、ステンレス鋼のプレートを組み立てたものをステンレス鋼のリブ及びスペーサで支持する構造をモデル化し、セル個々に模擬重量体を装荷した。

上部緩衝体は蓋上面に、下部緩衝体は容器本体の底面に各々□本のボルトで取り付けられ、落下等により輸送容器に加わる機械的衝撃を吸収して輸送容器を保護する。緩衝体は、ステンレス鋼のカバープレートとリブから構成される溶接構造物の内部に緩衝材である木材(□及び□)を充填したものである。

b. 試験装置

本体に加速度計を設置し、落下時に本体に発生する加速度を測定するとともに、落下試験後には、緩衝体及びフィンの変形量を測定した。加速度の測定位置を(ロ)-第 A. 付 18 図に示す。また、落下試験前後で蓋部の気密漏えい試験を実施し、Oリングからの漏えい率を測定した。

3. 試験結果

試験で得られた容器本体の加速度、上部緩衝体及びフィンの変形量、気密漏えい試験結果並びに衝突速度を(ロ)-第 A. 付 19 表に示す。なお、本体の加速度は 250Hz のローパスフィルター処理を行ったものである。同表に示すとおり、落下試験前後で顕著な漏えい率の変化はなく、落下試験後の漏えい率は、判定値を満足することが確認された。

4. 評価

(1) 水平落下時の衝撃加速度及び変形量

試験で測定した水平落下時の本体の加速度及び緩衝体の変形量を実規模スケールへ変換し、NFT 型輸送容器の構造解析で示された水平落下時の衝撃加速度及び変形量と比較した。落下試験結果(試験値)と解析結果(解析値)の比較を(ロ)-第 A. 付 20 表に示す。同表に示すとおり、衝撃加速度及び変形量ともに解析値が試験値を上回ることが確認された。

(2) 傾斜落下時の蓋部に対する応力評価

NFT-14P 型輸送容器の傾斜落下時の蓋部に対する応力について評価した。

初めに、落下試験体の傾斜落下試験時の二次衝突時の衝突速度を論文²⁵⁾の式に基づき評価した。(ロ)-第 A. 付 19 図に示すとおり、評価で得られた二次衝突時の衝突速度は、試験結果と概ね一致することが確認されたことから、落下試験体と基本構造が同じである NFT-14P 型輸送容器についても、本論文が適用可能である。

次に、本論文を用いて NFT-14P 型輸送容器の二次衝突速度を算出し、位置エネルギーに対する二次衝突時の運動エネルギーの比を評価した。二次衝突速度及び位置エネルギーに対する二次衝突時の運動エネルギーの比をそれぞれ(ロ)-第 A. 付 20 図及び(ロ)-

第 A. 付 21 図に示す。評価の結果、二次衝突速度は最大 20.1m/s であり、位置エネルギーに対する二次衝突時の運動エネルギーの比は 0.78 となった。つまり、一次衝突で位置エネルギーの 22%を吸収し、残りの 78%が二次衝突で吸収することとなる。この結果を受け、二次衝突時の荷重を仮想的に評価するため、約 14m(=9m×78/50)からの水平落下として、(ロ)章 A. 6. 1 の手法を用いて落下時の衝撃加速度を評価した。評価の結果、水平落下時に対して 1.67 倍の衝撃加速度が発生することが確認された。

この加速度の倍率を用いて、NFT-14P 型輸送容器の傾斜落下時における蓋部の応力を評価した。(ロ)-第 A. 付 21 表に示すとおり、傾斜落下時における蓋、フランジ及び蓋ボルトに発生する応力は、解析基準値以下である。

(3) NFT-14P 型輸送容器の密封性能評価

9m 傾斜落下において、NFT-14P 型輸送容器の密封性能が維持することを、密封性能が維持することが実証されている落下試験体及びその落下試験結果を用いて検証する。

落下後の漏えい率の増加は蓋に取り付けられたゴム O リングとフランジ面との口開き量の増加及び蓋ボルトの締付力の低下に起因するガスケット線力の低下が原因である。したがって、蓋部の変形量を抑えることが密封性能の維持につながる。そこで、落下時に NFT-14P 型輸送容器のフランジ、蓋及び蓋ボルトの変形量が落下試験体に比べて小さいことを示すことにより、NFT-14P 型輸送容器の密封性能を検証する。

密封性能評価方法の手順を以下に示す。(ロ)-第 A. 付 22 図参照)

- ① NFT-14P 型輸送容器と落下試験体の蓋部を構成する各部位(フランジ、蓋及び蓋ボルト)の各変形モード(曲げ、引張)の剛性に影響する寸法を抽出する。
- ② 各部位の剛性に影響する設計条件(材質、温度、縦弾性係数)を抽出する。
- ③ 抽出した寸法及び設計条件を基に、NFT-14P 型輸送容器と落下試験体の各部位の剛性比を算出する。
- ④ 落下時の衝撃力を決定する設計条件(輸送物重量、落下時の衝撃加速度)を抽出し、NFT-14P 型輸送容器と落下試験体の落下時に作用する荷重比を算出する。
- ⑤ 各部位の剛性比と落下時に作用する荷重比から、落下時の衝撃力が作用した時の変形量比を算出する。

- ⑥ ⑤で算出した変形量比が1以下(NFT-14P型輸送容器の方が小さい)であれば、落下試験体に比べて、より高い密封性能を有していることが示される。

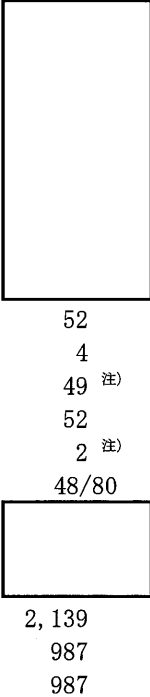
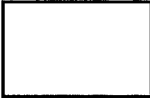
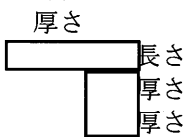
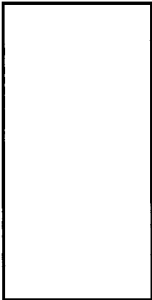
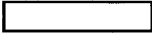
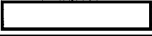
落下試験体とNFT-14P型輸送容器の主要諸元の比較を(ロ)-第A.付22表に、9m水平落下時を対象として落下試験体とNFT-14P型輸送容器の蓋部の変形量評価結果を(ロ)-第A.付23表に示す。落下試験体に比べて、NFT-14P型輸送容器はフランジ、蓋及び蓋ボルトの剛性は低いものの、落下時に作用する荷重が小さいことから、蓋部の変形量は小さい。

以上より、落下試験体を用いた落下試験により、傾斜落下時において蓋密封健全性が確認され、かつ、NFT-14P型輸送容器は、落下試験体に比べて水平落下方向からの荷重に対する蓋部の変形量が小さいことから、傾斜落下においてもNFT-14P型の密封健全性は維持される。

(ロ)-第A.付17表 試験項目

落下姿勢	落下高さ	備考
水平落下	9m	-
傾斜落下(10°)	9m	蓋側が二次衝突

(ロ)-第A.付18表 落下試験体寸法

No.	部位	寸法 [mm]
1	本体 内筒内径 板厚 外筒内径 外筒外径 板厚 仕切板厚さ レジン厚さ 伝熱フィン厚さ 枚数 フィン高さ 厚さ 枚数 バギングリング高さ 枚数 トラニオン外径 高さ レジンカバー厚さ 底板厚さ 全長 全幅(バギングリング) (フィン)	 52 4 49 ^{注)} 52 2 ^{注)} 48/80  2,139 987 987
2	蓋 蓋外径 長さ 厚さ 長さ 厚さ 厚さ 蓋吊手高さ 蓋ボルト呼び径 首径 長さ Oリング断面径	732  
3	バスケット 外径 長さ 格子数 格子内幅	532  38 
4	緩衝体 外径 幅 上部緩衝体長さ 下部緩衝体長さ	1,024 1,024 280 280
5	燃料集合体 外寸 長さ	56 1,787

注) 両端のバギングリング以外はフィンとして扱う。

(ロ)-第A.付19表 落下試験体の落下試験結果

(a) 容器本体の加速度並びに上部緩衝体及びフィンの最大変形量

落下姿勢	加速度(G)			最大変形量(mm)	
	容器			上部緩衝体	フィン
	蓋	外筒中央	底板		
水平落下					
傾斜落下 (10°)					

注記) 表中の加速度及び最大変形量は、落下試験体の落下試験における実測データである。

なお、実規模モデルにおける加速度、最大変形量は、スケール則に従うとそれぞれ、1/2.5倍、2.5倍となる。

(b) 気密漏えい試験検査結果

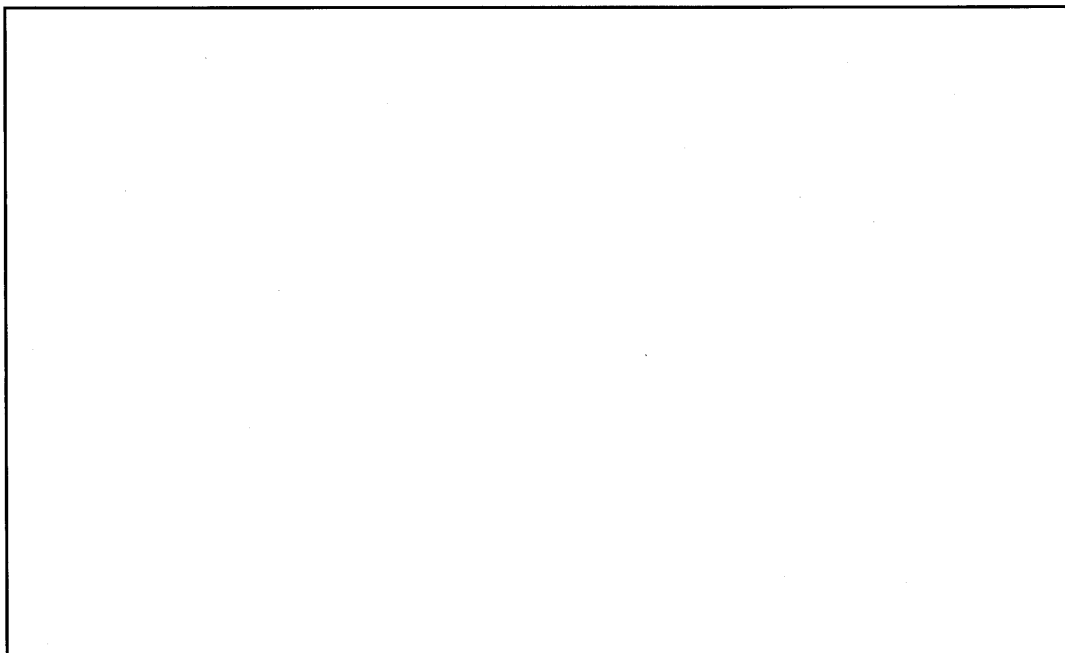
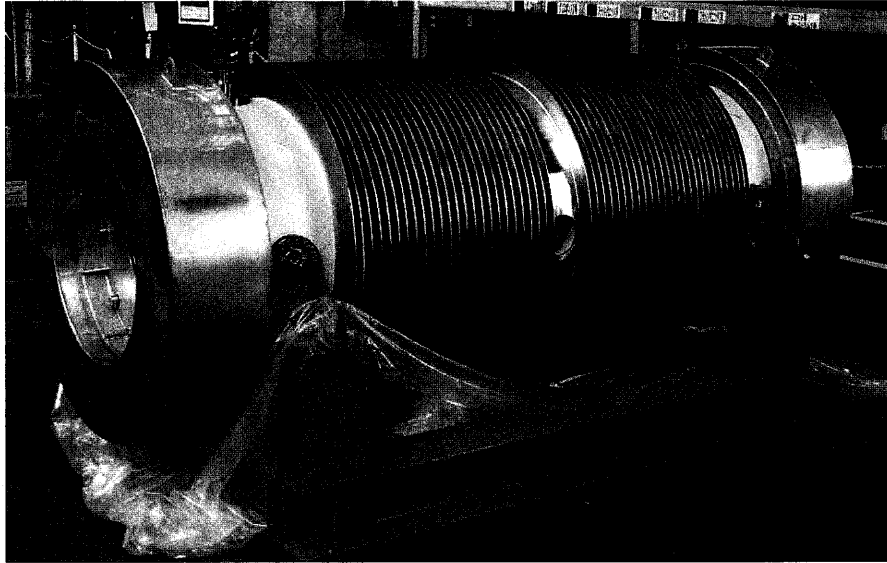
検査時期	検査結果(Pa・m ³ /s)		判定値 (Pa・m ³ /s)
	水平落下	傾斜落下(10°)	
落下試験前			3.0×10 ⁻³
落下試験後			

(c) 衝突速度

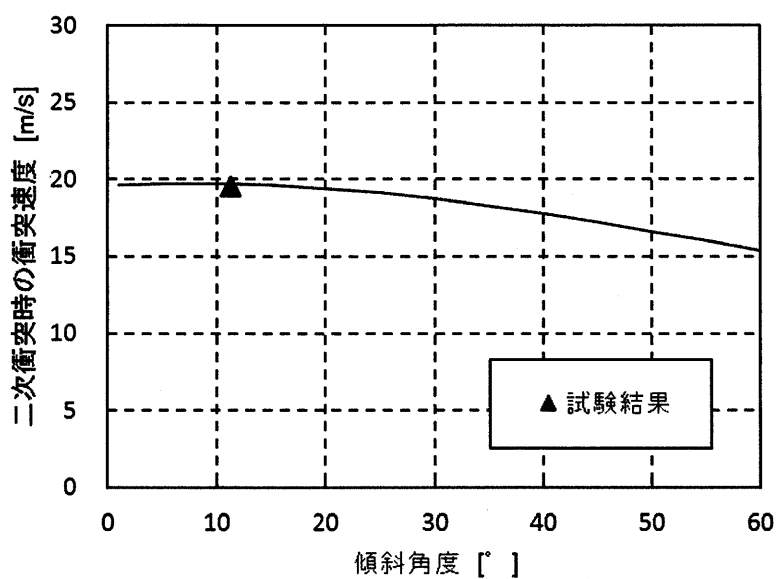
落下姿勢	衝突速度(m/s)	
	一次衝突	二次衝突
水平落下		/
傾斜落下 (10°)		

(口)-第 A. 付 20 表 水平落下時における落下試験体の落下試験結果と解析結果の比較

項目		試験結果 [A]	解析結果 [B]	[A]/[B]
加速度 (m/s ²)				0.92
変形量 (mm)	緩衝体			0.69
	フィン			0.67

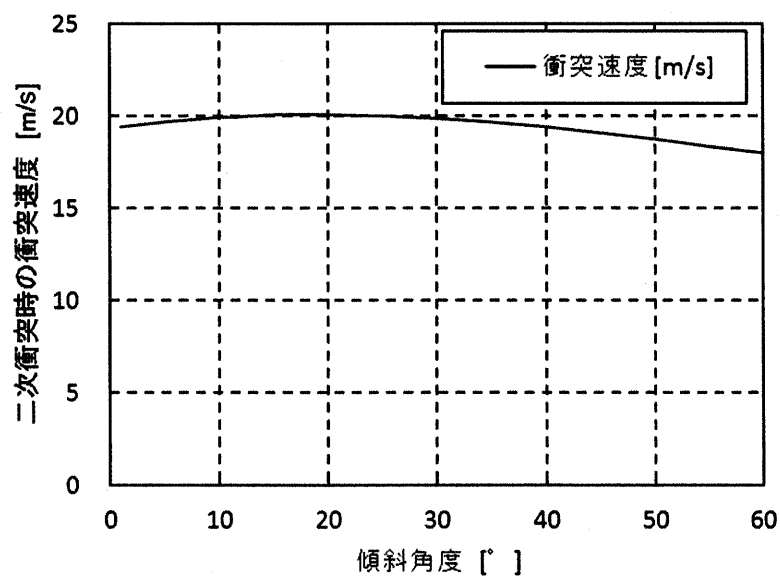


(口)-第 A. 付 18 図 落下試験体形状図

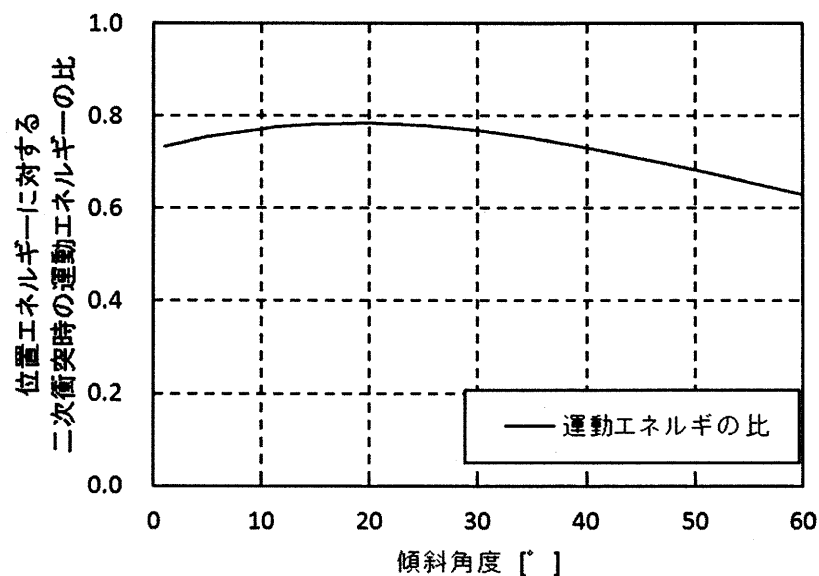


	試験結果	解析結果
二次衝突速度 (m/s)	19.5	19.7

(口)-第 A. 付 19 図 落下試験体の傾斜落下時の二次衝突速度の評価



(口)-第 A. 付 20 図 NFT-14P 型の傾斜落下時の二次衝突速度の評価



(口)-第 A. 付 21 図 NFT-14P 型の位置エネルギーに対する二次衝突時の運動エネルギーの比

(口)-第 A. 付 21 表 NFT-14P 型輸送容器の 9m 傾斜落下時に蓋部に発生する応力

部位	断面 No. ^{注1)}	応力分類 ^{注2)}	表面	応力 強さ (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) ^{注3)}	余裕率 MS (-)
蓋	①	Pm	-	58.3	170		
		P _L +P _b	内	78.2			
	外		71.0				
	②	P _L	-	179			
フランジ	③	P _L	-	220	170		
蓋 ボルト ^{注4)}	σ _m			486 ^{注5)}	170		
	σ _m +σ _b			863 ^{注5)}			

注 1) (口)-第 A. 48 図参照

注 2) P_m: 一次一般膜応力強さ、P_L: 一次局部膜応力強さ、P_b: 一次曲げ応力強さ
σ_m: 断面平均応力、σ_b: 曲げ応力

注 3) P_m 及び σ_m に対する基準値は 2/3Su、P_L、P_L+P_b 及び σ_m+σ_b に対する基準値は 1.5×(2/3Su) である。

注 4) (口)章 B. 4. 2 に示す一般の試験条件下の温度分布による熱膨張を考慮

注 5) 外力により発生する応力を 1.67 倍して算出

(ロ)-第 A. 付 22 表 落下試験体と NFT-14P 型輸送容器の主要諸元比較

No.	部位	寸法(mm)/重量(トン)			比率 ([A]/[B])
		落下試験体	実規模諸元 ^{注)} [A]	NFT-14P [B]	
1	本体 フランジ外径 板厚 長さ	[A]	[B]	[C]	1.06
					1.02
					0.85
2	蓋 厚さ フランジ内径 厚さ 蓋ボルト呼び径 首径 首長さ Oリング断面径	[A]	[B]	[C]	1.00
					1.07
					1.05
					0.95
					0.96
					1.05
3	緩衝体 外径 幅 上部緩衝体長さ 下部緩衝体長さ	[A]	[B]	[C]	0.98
					0.98
					1.10
					1.10
4	輸送物重量	7.3	114	115	0.99

注) 落下試験体の寸法を 2.5 倍、重量は 2.5³ 倍した値

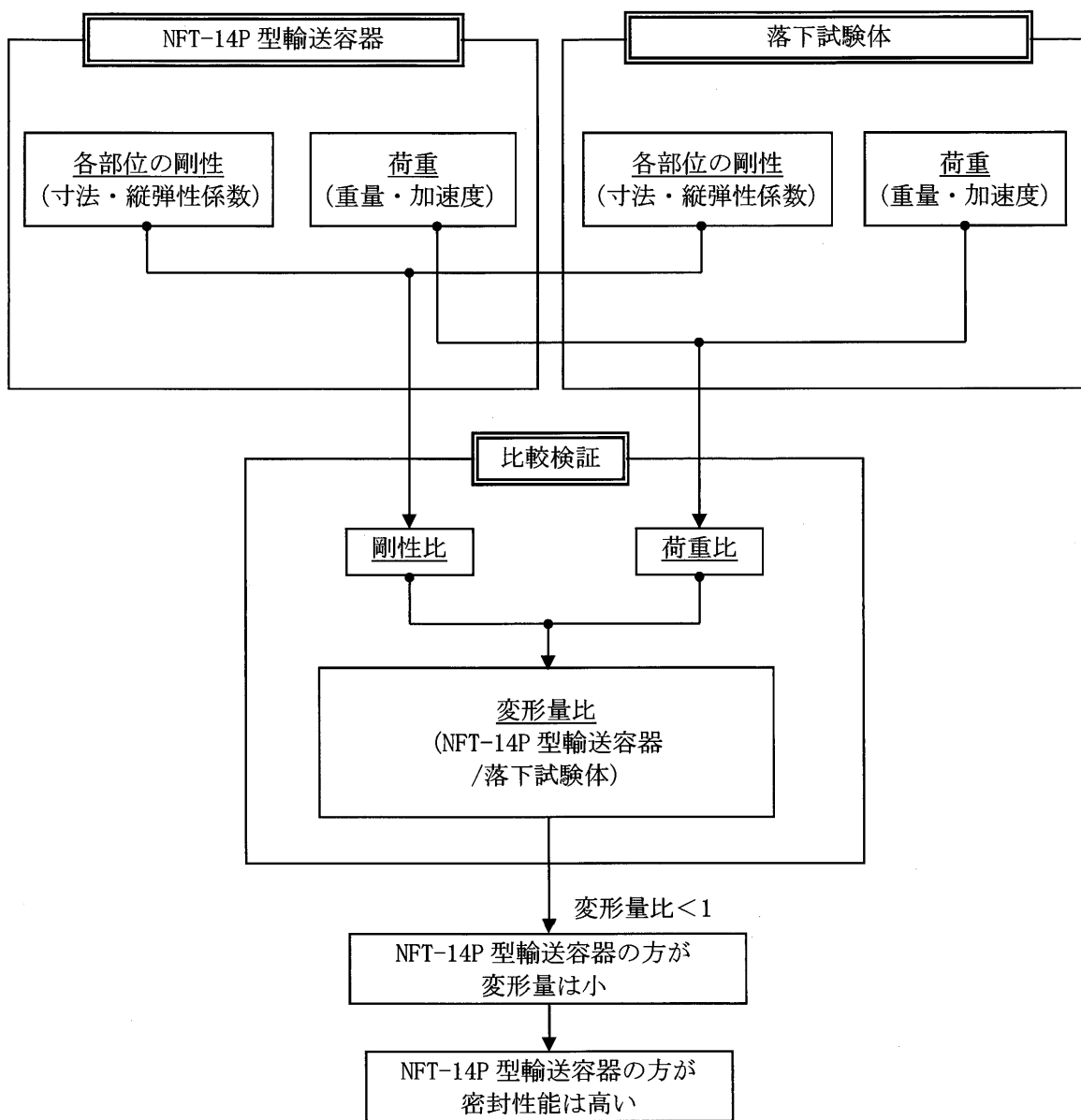
(ロ)-第 A. 付 23 表 落下試験体と NFT-14P 型輸送容器の

9m 水平落下時の蓋部の変形量評価結果

部位 ^{注1)}	変形モード	荷重比 ^{注2)}	剛性比 ^{注2)}	変形量比 ^{注2)}
蓋	曲げ	0.71	1.08	0.65
蓋ボルト	引張	0.71	1.08	0.65
	曲げ	0.71	1.29	0.55
フランジ	曲げ	0.71	0.89	0.79

注 1) 部位は、NFT-14P 型輸送容器の各部位を示す。

注 2) 荷重比、剛性比及び変形量比は全て、落下試験体に対する NFT-14P 型輸送容器の比を示す。



(口)-第 A. 付 22 図 密封性能評価手順

A. 10. 8 緩衝材低温時の強度評価

NFT-14P 型輸送容器の緩衝体緩衝材には木材 () 及び () を適用している。緩衝材である各木材は、使用最低温度である-20℃では常温時に対して強度が 15%から 24%上昇する。-20℃の木材強度を用いて評価を行った場合に輸送容器へ発生する衝撃加速度は、(ロ)-第 A. 12 表及び(ロ)-第 A. 23 表に示す衝撃加速度に対して増加する。本項では、その衝撃加速度の増加を考慮しても、輸送容器の各部位に発生する応力は評価基準を満足することを確認した。

1. -20℃における木材強度

木材は温度が低くなると強度が上昇する。 () 及び () の温度と圧潰強度の関係を(ロ)-第 A. 付 23 図及び(ロ)-第 A. 付 24 図に示す。

2. -20℃における衝撃加速度

(ロ)章 A. 10. 8 の 1. に示す木材強度の上昇割合を考慮して衝撃加速度評価を行った結果を(ロ)-第 A. 付 24 表(0. 3m 落下時)及び(ロ)-第 A. 付 25 表(9m 落下時)に示す。その他解析方法は(ロ)章 A. 5. 3 及び A. 6. 1 に示す方法と同様である。

木材温度が低くなると木材の強度は上昇するため、(ロ)-第 A. 付 24 表及び(ロ)-第 A. 付 25 表に示すとおり、落下時の衝撃加速度は全般的に常温時に比べて大きくなる。

3. 衝撃加速度の上昇が構造評価に与える影響

木材常温時に対する木材低温時における衝撃加速度の上昇が構造評価に与える影響について以下に示す。

(ロ)-第 A. 付 24 表及び(ロ)-第 A. 付 25 表に示すとおり、木材低温時の衝撃加速度は、(ロ)-第 A. 12 表及び(ロ)-第 A. 23 表に示す衝撃加速度から全般的に増加する。ここで、余裕率が最も小さい部位について、木材低温時の衝撃加速度において発生する応力を評価する。評価式を以下に示す。

$$\sigma_1 = (\sigma_2 - \sigma_f) \times \frac{\alpha_1}{\alpha_2} + \sigma_f \quad (\text{蓋ボルトの評価式})$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 \times \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \quad (\text{蓋ボルト以外の評価式})$$

ここで、

σ_1 : 木材低温時の 0.3m 又は 9m 落下時に評価部位に発生する応力 (MPa)

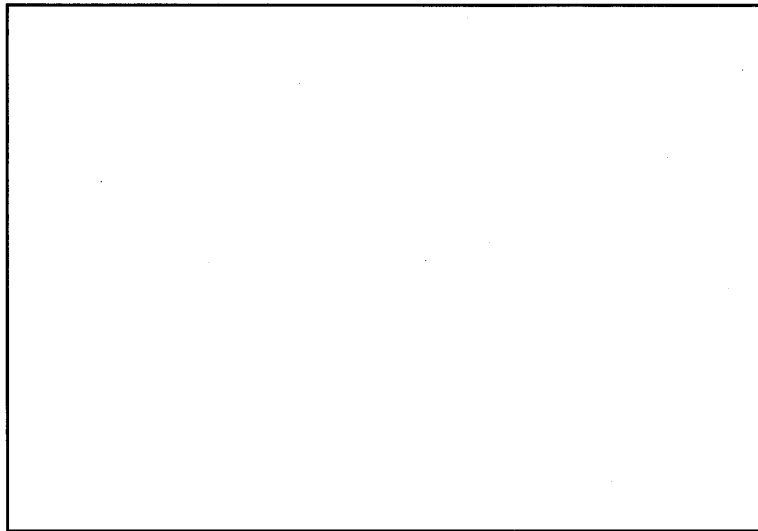
σ_2 : 木材常温時の 0.3m 又は 9m 落下時に評価部位に発生する応力 (MPa)

σ_f : 蓋ボルトの初期締付応力 (MPa)

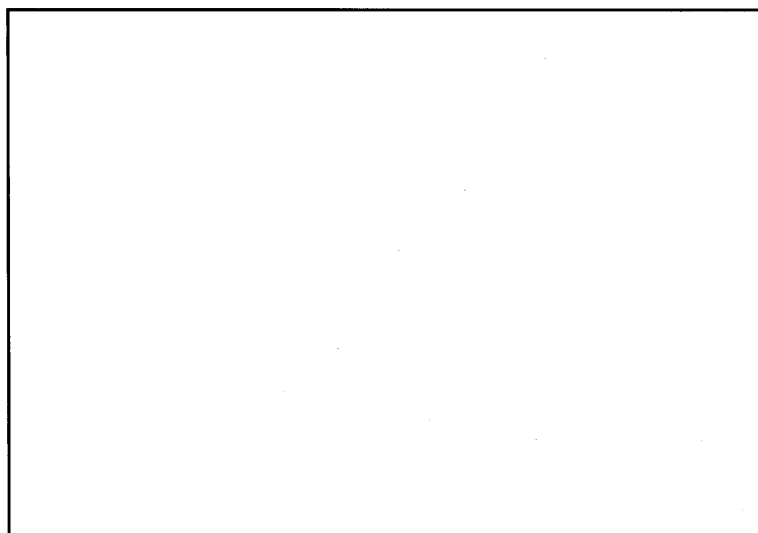
α_1 : 木材低温時の 0.3m 又は 9m 落下時の衝撃加速度 (m/s^2)

α_2 : 木材常温時の 0.3m 又は 9m 落下時の衝撃加速度 (m/s^2)

評価条件及び評価結果を(口)-第 A. 付 26 表及び(口)-第 A. 付 27 表に示す。(口)-第 A. 付 26 表及び(口)-第 A. 付 27 表に示すとおり余裕率が最も小さい部位へ発生する応力は評価基準を満足する。



(口)-第 A. 付 23 図 温度と圧潰強度の関係()



(口)-第 A. 付 24 図 温度と圧潰強度の関係()

(ロ)-第 A. 付 24 表 0.3m 落下時の衝撃加速度計算結果

落下姿勢	常温における 衝撃加速度 ^{注)} (m/s ²) [A]	-20℃における 衝撃加速度 (m/s ²) [B]	[B]/[A]
頭部垂直			0.95
底部垂直			0.93
水平			1.01
頭部コーナー			1.04
底部コーナー			1.04

注) 常温における衝撃加速度は、構造解析に適用した値である。

(ロ)-第 A. 付 25 表 9m 落下時の衝撃加速度計算結果

落下姿勢	常温における 衝撃加速度 ^{注)} (m/s ²) [A]	-20℃における 衝撃加速度 (m/s ²) [B]	[B]/[A]
頭部垂直			1.08
底部垂直			1.08
水平			1.07
頭部コーナー			1.22
底部コーナー			1.22

注) 常温における衝撃加速度は、構造解析に適用した値である。

(ロ)-第 A. 付 26 表 0.3m 落下時の強度評価

落下姿勢	頭部垂直落下		底部垂直落下		水平落下	
	内筒	蓋ボルト	内筒	蓋ボルト	外筒	蓋ボルト
σ_2						
σ_f						
α_1						
α_2						
σ_1						
評価基準 ^{注)}						

注) 評価基準を設定する温度(輸送容器各部位の低温時温度)は、木材温度と同程度低下(木材温度: 38℃から-20℃へ約 60℃低下)するとし、「低温時温度=(設計温度)-60℃」とした。

(ロ)-第 A. 付 27 表 9m 落下時の強度評価

落下姿勢	頭部垂直落下		底部垂直落下		水平落下		コーナー 落下
		蓋ボルト	バスケット 下部スペーサ	蓋ボルト	外筒	蓋ボルト	蓋ボルト
σ_2							
σ_f							
α_1							
α_2							
σ_1							
評価基準 ^{注)}							

注) 評価基準を設定する温度(輸送容器各部位の低温時温度)は、木材温度と同程度低下(木材温度: 38℃から-20℃へ約 60℃低下)するとし、「低温時温度=(設計温度)-60℃」とした。

A. 10.9 実機大レジンカバーを用いた実証試験

1. 概要

(ロ)章 A. 5 において一般の試験条件下における NFT-14P 型輸送容器の本体各部の応力を評価しているが、(ロ)章 A. 5. 1. 2 に示すとおり、レジンカバーは実形状の八角形とは異なる円筒形の評価モデルを用いて評価している。

本付属書では、実機大レジンカバーを用いた実証試験²⁶⁾により、八角形の角部等の構造不連続部を考慮した場合のレジン保持機能に与える影響について確認した。

2. 試験条件

(ロ)-第 A. 付 25 図に示す実機大レジンカバーの試験体を用いて、レジンカバーに発生するひずみを計測した。実証試験は、試験体内面に設置したヒーターを発熱させ、熱平衡状態におけるレジンカバー表面のひずみを計測した。

3. 試験結果

八角コーナー部に発生した最大ひずみを(ロ)-第 A. 付 28 表に示す。3 回の試験において、試験する度にひずみが増大することはなく、レジンが保持されることを確認した。



(ロ)-第 A. 付 25 図 実機大レジンカバーを用いた実証試験 試験体図

(ロ)-第 A. 付 28 表 実機大レジソカバーを用いた実証試験時のレジソカバーの発生ひずみ

部位	方向	位置	1 回目	2 回目	3 回目
			54kW 時	54kW 時	54kW 時
八角コーナー部	軸	30°			
	周	30°			

4. まとめ

実機大レジソカバーの試験体を用いた実証試験により、八角形の角部等の構造不連続部を考慮した場合のレジソ保持機能に与える影響について確認した。試験の結果、ひずみが増大することはなく、レジソ保持機能が担保されることを確認した。

A. 10. 10 9m 水平落下評価の荷重条件

1. 概要

(ロ)章 A. 6. 1. 2 の 9m 水平落下時における構造評価に使用している解析モデルは、(ロ)章 A. 10. 6 の実規模モデルを用いた 9m 水平落下試験²⁴⁾を考慮したものであり、緩衝体及びフィンの最大変形時には、トラニオンはすでにせん断破壊していることから、トラニオンからの荷重は発生していないが、構造解析においてはトラニオン衝突時の衝撃荷重をフィンの荷重に補正して解析を実施している。

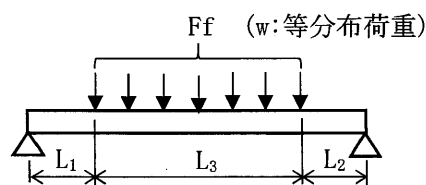
本付属書では、9m 水平落下時における評価モデルの違いによる輸送容器本体に発生する曲げモーメントの比較を行い、9m 水平落下時の構造評価に使用している解析モデルにおける荷重条件の妥当性について確認した。

2. 輸送容器本体に発生する曲げモーメントの比較

(1) トラニオン衝突時の衝撃荷重を考慮してフィン荷重を補正した評価の場合

(ロ)章 A. 6. 1. 2 の 9m 水平落下時における構造評価に使用している解析モデルと同様に、トラニオン荷重を補正して評価した場合における、輸送容器本体に発生する曲げモーメントの評価モデルを(ロ)-第 A. 付 26 図に示す。

なお、輸送容器本体の内圧及び収納物重量による容器内部に発生する荷重は無視し、輸送容器本体の外部から作用する荷重により輸送容器本体に発生する最大曲げモーメントを評価する。



(ロ)-第 A. 付 26 図 輸送容器本体に対する曲げモーメント評価モデル(トラニオン荷重位置未考慮)

輸送容器本体に発生する最大曲げモーメント M(N) は、次式で与えられる。

$$M = w \times \frac{L_3}{L} \times \left(L_2 + \frac{L_3}{2} \right) \times \left(L_1 + \frac{2L_2 \times L_3 + L_3^2}{4 \times L} \right)$$

$$w = \frac{Ff}{L_3}$$

ここで、

M : 輸送容器本体に発生する最大曲げモーメント (N・mm)

W : 9m 水平落下時にフィンから輸送容器本体に作用する等分布荷重 (N/mm)

Ff : 9m 水平落下時にフィンから輸送容器本体に作用する反力 = N

(緩衝体及びフィン並びにトラニオン衝突時のトラニオン荷重を考慮した荷重。(ロ)-第 A. 38 図を参照。)

L : 輸送容器全長 = 5,318mm

L₁ : 蓋上面からフィンまでの距離 = mm

L₂ : 底板下面からフィンまでの距離 = mm

L₃ : フィンの容器軸方向長さ = mm

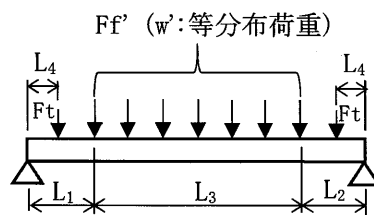
したがって、

$$M = \text{}$$
$$= \text{} \text{ N}\cdot\text{mm}$$

以上より、(ロ)章 A. 6. 1. 2 の評価と同様にトラニオン衝突時の衝撃荷重を考慮し、フィンの荷重を補正して評価した場合における輸送容器本体に発生する最大曲げモーメントは、 N・mm となる。

(2) トラニオン衝突時の衝撃荷重をフィンの荷重として考慮せずに評価した場合

トラニオン衝突時の衝撃荷重をフィンの荷重として考慮せずに評価した場合における輸送容器本体に発生する曲げモーメントの評価モデルを(ロ)-第 A. 付 27 図に示す。



(ロ)-第 A. 付 27 図 輸送容器本体に対する曲げモーメント評価モデル(トラニオン荷重位置考慮)

輸送容器本体に発生する最大曲げモーメント M(N)は、次式で与えられる。

$$M = M_f + M_t$$

$$M_f = w' \times \frac{L_3}{L} \times \left(L_2 + \frac{L_3}{2} \right) \times \left(L_1 + \frac{2L_2 \times L_3 + L_3^2}{4 \times L} \right)$$

$$w' = \frac{Ff'}{L_3}$$

$$M_t = Ft \times L_4$$

ここで、

M : 輸送容器本体に発生する最大曲げモーメント (N・mm)

M_f : トラニオン衝突時の衝撃荷重をフィンの荷重として考慮しない場合の
フィン反力により輸送容器本体に発生する曲げモーメント (N・mm)

M_t : トラニオン衝突時のトラニオン荷重により輸送容器本体に発生する曲げ
モーメント (N・mm)

w' : 9m 水平落下時にフィンから輸送容器本体に作用する等分布荷重 (N/mm)

Ff' : 9m 水平落下時にフィンから輸送容器本体に作用する反力 = N
(緩衝体及びフィンからの反力を考慮した荷重)

Ft : 9m 水平落下時にトラニオンから輸送容器本体に作用する反力 = N
(トラニオンの肩部のせん断破壊に要する荷重)

L : 輸送容器全長 = 5,318mm

L₁ : 蓋上面からフィンまでの距離 = mm

L₂ : 底板下面からフィンまでの距離 = mm

L₃ : フィンの容器軸方向長さ = mm

L₄ : 輸送容器の端面からトラニオン中心軸までの距離 = 554mm

(曲げモーメントを大きく評価するため、距離が長い上部側のトラニオン
位置を考慮)

したがって、

$$M = \text{}$$

$$= \text{} \text{ N}\cdot\text{mm}$$

以上より、トラニオン衝突時の衝撃荷重をフィンの荷重として考慮せず、フィン及びトラニオンからの荷重が個別に作用するとして評価した場合における輸送容器本体に発生する最大曲げモーメントは、 N・mm となる。

3. 評価

(ロ)章 A. 6. 1. 2 の 9m 水平落下時における構造評価(トラニオン衝突時の衝撃荷重を考慮してフィンの荷重を補正して評価)及びトラニオン衝突時の衝撃荷重をフィンの荷重として考慮せずフィン及びトラニオンからの荷重が個別に作用する場合の評価を比較した結果、2. に示すように(ロ)章 A. 6. 1. 2 における評価の方が輸送容器本体に発生する曲げモーメントをより大きく評価していることを確認した。

以上より、9m 水平落下時の構造評価に使用している解析モデルにおける荷重条件は妥当である。

A. 10. 11 参考文献

- 1) (社)日本機械学会, “発電用原子力設備規格 設計・建設規格<第 I 編 軽水炉規格>”
JSME S NC1-2005(2007 年追補版含む), (2007).
- 2) 高分子学会編, “高分子工学講座 18-高分子材料の応用と開発”, (1967).
- 3) 石森富太郎, “原子炉工学講座 4”, (1972).
- 4) ASTM, “Elevated Temperature Properties of Coppers and Copper Alloys”
ASTM STP181, (1957).
- 5) “Proving Test on the Reliability for PWR 15×15 Fuel Assemblies Through
Three Reactor Cycles in Japan”, Proceedings of the International Topical
Meeting on LWR Fuel Performance April 17-20, (1988).
- 6) (社)日本機械学会, “非弾性構造解析法の実用化に関する研究(I)”, (1977).
- 7) JIS B 8270, “圧力容器(基盤規格)”, (1993).
- 8) (社)日本機械学会, “伝熱工学資料(改訂第 4 版)”, (1986).
- 9) 日本鉄鋼協会編, “第 3 版鉄鋼便覧”, (1981).
- 10) 牧広, 島村昭治編, “複合材料技術集成”, (1976).
- 11) 長谷川正義監修, “ステンレス鋼便覧”, (1973).
- 12) 日本鉛垂鉛需要研究会, “鉛ハンドブック”, (1975).
- 13)
- 14) 木材工業ハンドブック編集委員会, “木材工業ハンドブック(改訂 3 版)”, (1982).
- 15) 10CFR71, “Packaging and Transportation of Radioactive Material”, (2022).
- 16) The American Society of Mechanical Engineers, “ASME Boiler and Pressure
Vessel Code, Section VIII Division 3”, (2015).
- 17) 日本機械学会編, “機械工学便覧”, (1987).
- 18) 幾島毅, 浅田和雄, “放射性物質輸送容器の衝突解析用簡易計算コードの開発, (I)
緩衝体付き輸送容器衝突計算コード CRUSH”, 日本原子力学会誌 Vol. 33, No.4,
(1991).
- 19) S. Doi et al., “High Burnup Experience of PWR Fuel in Japan”, ANS/ENS
International Topical Meeting on LWR Fuel Performance, April 21-24, 1991,
Avignon France, (1991).
- 20) K. G. Torr, “Verification of the Performance of Impact Limiting Fins for
Transportation Containers”, Monserco Limited, INFO-D146, (1984, 1986).
- 21) L. B. Shappert, “Cask Designers Guide”, ORNL-NSIC-68 VC-80-Reactor
Technology, Oak Ridge National Laboratory, (1970).

- 22) International Atomic Energy Agency, “Spent Fuel Performance Assessment and Research : Final Report of a Coordinated Research Project on Spent Fuel Performance Assessment and Research (SPAR-III) 2009-2014” , IAEA-TECDOC-1771, (2015).
- 23) 通商産業省 原子力発電技術顧問会(基本設計), 高燃焼度化検討会, “加圧水型原子炉 高燃焼度化ステップ2 先行照射燃料 検討結果報告書” , (1993).
- 24) (財)電力中央研究所, “平成8年度「放射性廃棄物輸送容器等安全性実証試験」事業成果報告書” , (1997).
- 25) T.Quercetti, V.Ballheimer, G.Wieser, “Analytical, Numerical and Experimental Investigations on the Impact Behaviour of Packagings for the Transport of Radioactive Material under Slap Down Conditions” , Journal of Nuclear Materials Management, (2002).
- 26)

(口)章 B 熱解析

B. 熱解析

B.1 概要

1. 熱設計

本輸送容器の熱設計の要点は、容器内部に収納された使用済燃料により発生する崩壊熱を外部に放散するシステムである。本輸送容器は(イ)-第 C.5 図に示すように三重円筒構造である。

内筒内に収納された使用済燃料により発生する崩壊熱は、内筒内に充填された水及び空気(飽和水蒸気)の自然対流並びに伝導によって内筒に伝えられる。

内筒に伝えられた熱は、ガンマ線遮蔽体である鉛層の伝導によって中間筒に伝えられる。

中間筒に伝えられた熱は、主として中性子遮蔽体のレジン中に設けられた 枚の銅製の伝熱フィンの伝導によって外筒に伝えられる。外筒に伝えられた熱は、外筒に 46mm 間隔で された 77 枚のフィンから大気に放散される。

使用済燃料収納時、内筒内は内筒内水の温度上昇及び膨張により圧力上昇を生じる。

内筒内の圧力上昇は、内筒内

により制限される。

なお、輸送物の崩壊熱量は、54kW 以下であり、自然冷却にて輸送を行う。

2. 熱解析

熱解析は、本輸送物が規則及び告示に基づいて BM 型核分裂性輸送物に係る技術上の基準に適合することを示すために行った。

一般の試験条件下における熱的条件は、次のとおりである。

① 最高温度評価条件

輸送物は、38℃の大気中において12時間ごとに太陽熱放射を1週間受ける。

② 近接表面温度評価条件

輸送物は、38℃の大気中において太陽熱放射を受けない。

③ 最低崩壊熱量を求める条件

輸送物は大気中において太陽熱放射を受けない。また、輸送物の最低使用温度は、-20℃であり、輸送物の内筒内水は、収納物の崩壊熱量と周囲温度との関係で凍結しないこととする。

特別の試験条件下における熱的条件は、次のとおりである。

① 火災前の輸送物は、38℃の大気中において12時間ごとに太陽熱放射を受け、熱的に平衡な状態に置く。

② 輸送物は、0.9の周囲放射率を持つ800℃の熱環境に30分間さらされる。この場合、輸送物表面の吸収率は□である^{注)}。

また、火災中においても太陽熱放射を受ける。

③ 火災後の輸送物は、38℃の大気中において12時間ごとに太陽熱放射を受ける。

④ 以上の試験は、設計上最大となる内部発熱量があるという条件下で行う。

注) 輸送物が火災にさらされた場合、輸送物表面の吸収率は□より小さいので、

「IAEA Safety Standards Series “Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material” (2018 Edition)」に基づき、安全側に□とする。

本輸送物は、(ロ)章 A で示したように一般の試験条件下及び特別の試験条件下において緩衝体等に変形を生じるので輸送物の熱的性能は、これらの変形の影響を受けると考えられる。

一般の試験条件のうち、水噴霧試験及び積み重ね試験では輸送物は変形しないが、自由落下試験、積み重ね試験及び貫通試験において緩衝体に変形を生じる。

一般の試験条件下では、緩衝体に変形していないとする方が収納物及び緩衝体の最高温度を高く評価できる。したがって、緩衝体には変形がないものとし、38℃の環境に1週間放置したものとして一般の試験条件下の熱解析を行う。

特別の試験条件下では、落下試験 I 及び II によりフィン、緩衝体等に変形や破損が生じる。フィンについては変形していない方が周囲よりの入熱量が大きくなるので変形がないものとする。緩衝体等については変形及び破損を考慮して評価する。

一般の試験条件下及び特別の試験条件下の熱解析は、有限要素法による ABAQUS コード¹⁾を用いて行った。

3. 最大崩壊熱量

本輸送容器に収納する燃料の仕様は、(イ)章 D で述べたとおりである。

熱解析に用いた最大崩壊熱量は、全体で 54kW とした。

4. 熱解析の条件及び方法

熱解析の条件及び方法を(ロ)-第 B.1 表に示す。

(ロ)-第B.1表 熱解析の条件及び方法

項目	条件	一般の試験条件			特別の試験条件		
		近接表面温度評価条件	最低温度評価条件	最高温度評価条件	火災前	火災時	火災後
崩壊熱量		54kW	6.5kW以下	54kW	54kW	54kW	54kW
環境条件	周囲温度	静止空気 38℃	静止空気-20℃	静止空気 38℃	静止空気 38℃	火災30分間 800℃	静止空気 38℃
	太陽熱放射	なし	なし	あり	あり	あり	あり
	周囲吸収率	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9 ^(注1)	1.0
容器表面放射率/吸収率 ^(注2)		[Redacted]					
計算モデル	輸送物	輪切り半ピッチモデル及び軸対称全体モデル(緩衝体を含む。)					
	燃料集合体	均質化近似					
温度分布計算プログラム		有限要素法による ABAQUS コード					
使用物性値		(ロ)章B.2に示す。					
最大内圧		$\frac{P \cdot V}{T} = \text{一定}$ 及び蒸気分圧					

注1) 火災の放射率を示す。

注2) 放射率と吸収率を等しいとしている。

B.2 材料の熱的性質

輸送容器の構成材料は(イ)章 C.3 に示すとおりである。これらの材料のうち熱解析で用いた材料の熱的性質を以下に示す。

1. ステンレス鋼及びボロン入りステンレス鋼

ステンレス鋼の熱的性質を(ロ)-第 B.2 表に示す。ボロン入りステンレス鋼は熱的には(ロ)-第 B.2 表に示すステンレス鋼と同じと見なす。このデータは伝熱工学資料²⁾に基づいている。

なお、放射率/吸収率のうち、(a)は火炎にさらされない鋼板表面の放射率/吸収率であり、伝熱工学資料²⁾に基づいている。また、(b)は火炎にさらされている鋼板表面の吸収率であり、「IAEA Safety Standards Series “Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material” (2018 Edition)」に基づいている。

2. 鉛

鉛の熱的性質を(ロ)-第 B.3 表に示す。このデータは伝熱工学資料²⁾に基づいている。

3. 炭素鋼

炭素鋼()の熱的性質を(ロ)-第 B.4 表に示す。このデータは伝熱工学資料²⁾に基づいている。

4. 水(飽和水)

水の熱的性質を(ロ)-第 B.5 表に示す。このデータは伝熱工学資料²⁾に基づいている。

5. 燃料集合体

燃料集合体は、二酸化ウラン、ジルカロイ及びステンレス鋼で構成されている。二酸化ウランの熱的性質を(ロ)-第 B.6 表に示す。このデータは伝熱工学資料²⁾に基づいている。

ジルカロイの熱的性質を(ロ)-第 B.7 表に示す。

このデータは MATPRO-VERSION 11(Rev.2) A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior³⁾及び原子炉材料ハンドブック⁴⁾に基づいている。

6. 銅

銅の熱的性質を(ロ)-第 B. 8 表に示す。このデータは伝熱工学資料²⁾及び JIS ハンドブック「非鉄」参考⁵⁾に基づいている。

7. レジン

レジンの熱的性質を(ロ)-第 B. 9 表に示す。このデータはメーカ資料^{6), 7)}に基づいている。

8.

の熱的性質を(ロ)-第 B. 10 表に示す。このデータは木材工業ハンドブック⁸⁾に基づいている。

9.

の熱的性質を(ロ)-第 B. 11 表に示す。このデータは木材工業ハンドブック⁸⁾に基づいている。

10. 空気

空気の熱的性質を(ロ)-第 B. 12 表に示す。このデータは伝熱工学資料²⁾に基づいている。

(ロ)-第 B. 2 表 ステンレス鋼()の熱的性質

ステンレス鋼(<input type="text"/>)		
密度	7.92×10 ³ kg/m ³	
放射率/吸収率	(a) <input type="text"/> / (b) <input type="text"/>	
温度	熱伝導率	比熱
K(°C)	W/(m·K)	kJ/(kg·K)
253 (-20)	<input type="text"/>	
300 (27)		
400 (127)		
600 (327)		
800 (527)		
1,000 (727)		

(口)-第 B. 3 表 鉛の熱的性質

鉛		
密 度	1.13×10 ⁴ kg/m ³	
温 度 K(°C)	熱伝導率 W/(m·K)	比 熱 kJ/(kg·K)
150 (-123)		
200 (-73)		
250 (-23)		
300 (27)		

(口)-第 B. 4 表 炭素鋼 () の熱的性質

炭 素 鋼 ()		
密 度	7.85×10 ³ kg/m ³	
温 度 K(°C)	熱伝導率 W/(m·K)	比 熱 kJ/(kg·K)
253 (-20)		
300 (27)		
500 (227)		
800 (527)		

(口)-第 B. 5 表 水(飽和水)の熱的性質

水						
温 度	密 度	比 熱	動粘性係 数	熱伝導率	膨張率	プラントル 数
K(°C)	kg/m ³	kJ/(kg·K)	mm ² /s	W/(m·K)	K ⁻¹	(-)
273 (0)	999.78	4.217	1.792	0.5619	-6.00×10 ⁻⁵	13.44
300 (27)	996.62	4.179	0.8573	0.6104	2.50×10 ⁻⁴	5.850
400 (127)	937.22	4.257	0.2331	0.6842	9.87×10 ⁻⁴	1.359
500 (227)	831.57	4.661	0.1409	0.6423	1.76×10 ⁻³	0.850
600 (327)	649.30	6.980	0.1165	0.4917	2.53×10 ⁻³	1.073

(口)-第 B. 6 表 二酸化ウランの熱的性質

二酸化ウラン		
密 度	[] kg/m ³	
温 度	熱伝導率	比 熱
K(°C)	W/(m·K)	kJ/(kg·K)
273 (0)	8.44	0.230
300 (27)	8.21	0.237
500 (227)	6.53	0.286
800 (527)	4.73	0.300
1,300 (1,027)	3.17	0.322
1,800 (1,527)	2.53	0.369

(ロ)-第 B.7 表 ジルカロイの熱的性質

ジルカロイ		
密 度	6.55×10 ³ kg/m ³	
温 度 K(°C)	熱伝導率 W/(m·K)	比 熱 kJ/(kg·K)
273 (0)	12.4	0.275
300 (27)	12.7	0.281
400 (127)	14.0	0.302
600 (327)	16.5	0.326
1,000 (727)	21.6	0.366

(ロ)-第 B.8 表 銅の熱的性質

銅		
密 度	8.94×10 ³ kg/m ³	
温 度 K(°C)	熱伝導率 W/(m·K)	比 熱 kJ/(kg·K)
150 (-123)	428	0.322
250 (-23)	404	0.376
300 (27)	398	0.386
600 (327)	383	0.425
800 (527)	371	0.447
1,000 (727)	357	0.471
1,200 (927)	342	0.492

(ロ)-第 B. 9 表 レジンの熱的性質

レジン		
密度	$1.67 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	
温度 K	熱伝導率 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	比熱 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
常温		

(ロ)-第 B. 10 表 の熱的性質

<input type="text"/>		
密度	<input type="text"/> kg/m^3	
温度 K (°C)	熱伝導率 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	比熱 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
300 (27)	<input type="text"/>	
400 (127)		

(ロ)-第 B. 11 表 の熱的性質

<input type="text"/>		
密度	<input type="text"/> kg/m^3	
温度 K (°C)	熱伝導率 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	比熱 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
300 (27)	<input type="text"/>	
400 (127)		

(ロ)-第 B. 12 表 空気の熱的性質

空 気					
温 度	密 度	比 熱	動粘性 係 数	熱伝導率	プラントル数
K(°C)	kg/m ³	kJ/(kg·K)	mm ² /s	W/(m·K)	(-)
253 (-20)	1.3976	1.007	11.61	0.02249	0.726
300 (27)	1.1763	1.007	15.83	0.02614	0.717
400 (127)	0.8818	1.015	26.39	0.03305	0.715
500 (227)	0.7053	1.031	38.58	0.03951	0.710
600 (327)	0.5878	1.052	52.36	0.0456	0.710
700 (427)	0.5038	1.076	67.7	0.0513	0.715
800 (527)	0.4408	1.099	84.5	0.0569	0.719
900 (627)	0.3918	1.122	102.7	0.0625	0.722
1,000 (727)	0.3527	1.142	122.1	0.0672	0.732

B.3 構成要素の仕様

1. 蓋部シール

ふっ素ゴム製 O リング

使用可能温度 $-50\sim 180^{\circ}\text{C}$ ^{9)、10)}/一般の試験条件

$-50\sim 260^{\circ}\text{C}$ ^{9)、10)}/特別の試験条件

使用可能圧力 6.9MPa 以下¹⁰⁾

太さ 約 ϕ mm

2. ベント・水位調整バルブ、ドレンバルブ及び水位調整用加圧バルブ

ステンレス鋼製 バルブ

シール材 ふっ素ゴム製 O リング (形状を除き、1. と同じ仕様)

3. 中性子遮蔽体

レジン

使用可能温度 170°C 以下¹¹⁾

B.4 一般の試験条件

B.4.1 熱解析モデル

輸送物の熱解析は、有限要素法による ABAQUS コードを用いて行った。

B.4.1.1 解析モデル

1. 形状モデル

本輸送物の一般の試験条件における各部温度を評価するために解析モデルとして以下の2つのモデルを用いた。

- ① 半径方向輪切り軸方向フィン半ピッチモデル(以下「輪切り半ピッチモデル」という。)
- ② 軸方向二次元軸対称全体モデル(以下「全体モデル」という。)

各モデルにおいて評価する輸送物部位は次のとおりである。

輪切り半ピッチモデル…… フィン先端、外筒、レジン(中央部)、伝熱フィン、
中間筒、鉛、内筒、内筒内水、バスケット、
燃料集合体

全体モデル…………… 緩衝体、蓋、蓋 O リング、レジン(端部)、
ベント・水位調整バルブ O リング、
ドレンバルブ O リング、
水位調整用加圧バルブ O リング、バギングリング、
フランジ、レジンカバー、仕切板、底板、
蓋ボルト

(ロ)章 B.1 の 2. で述べたように一般の試験条件下の熱解析では輸送容器は変形及び破損はしていないとする。本輸送容器の放熱面積は、外筒とフィンの放熱面積が約 221m^2 であり、これに対し上・下部緩衝体軸方向端面の放熱面積は約 11m^2 である。

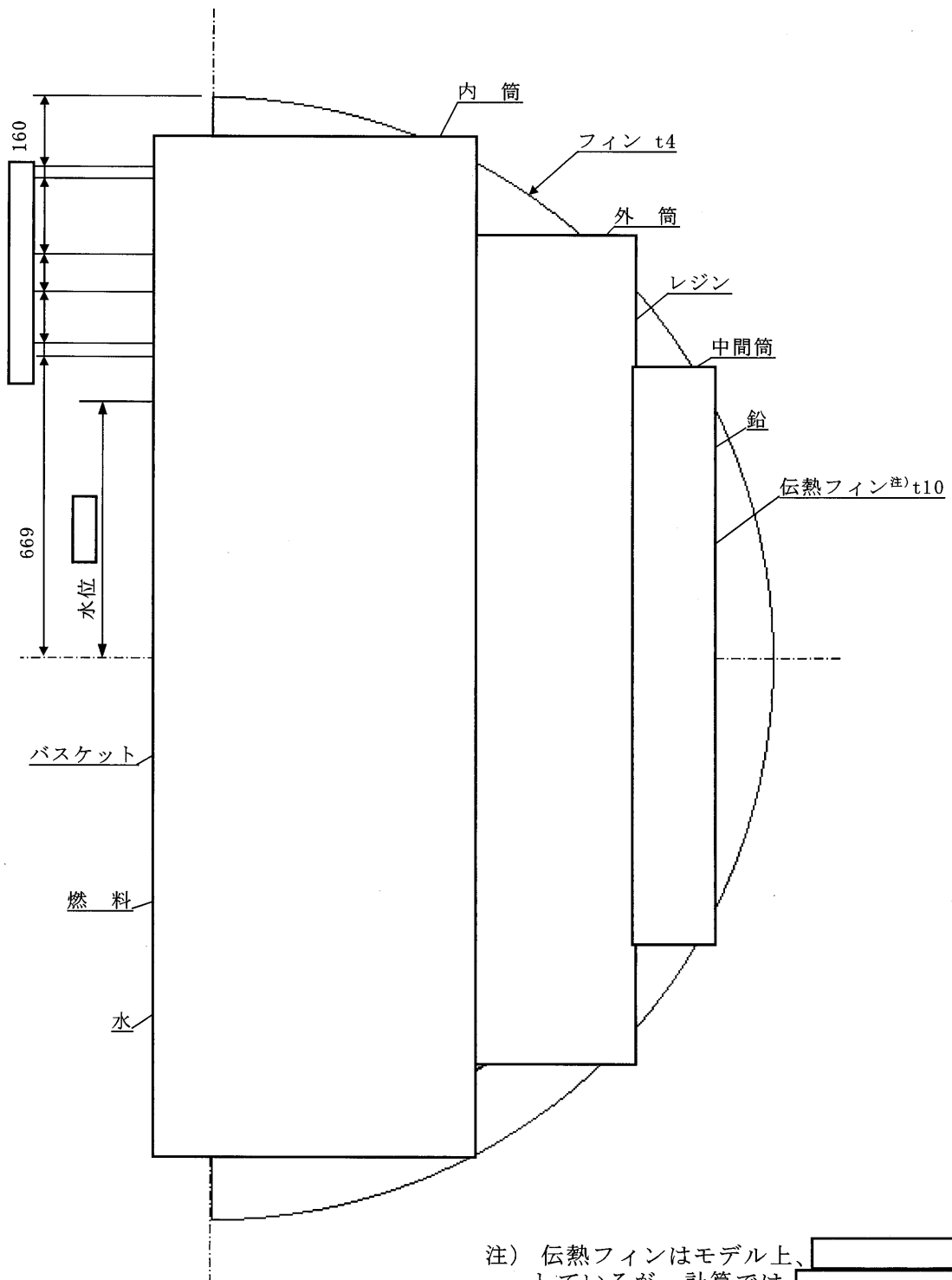
したがって、輸送容器に収納された燃料より発生する崩壊熱は、そのほとんどが、半径方向に伝達され、外筒及びフィンの表面から外部に放散されるので、軸方向に断熱とする輪切り半ピッチモデルで評価する。

また、輪切り半ピッチモデルで評価できない部位については、軸方向の温度分布が求められる全体モデルで評価する。全体モデルではフィンモデルを除外している。フィンからの放熱は外筒表面での熱伝達率を輪切り半ピッチモデルの解析結果から算出することにより考慮する。

本輸送物は内筒内に水位が生じるので本解析では、水平に置かれた状態とし、輸送容器中心より mm の初期水位を考慮してモデル化する。

各解析モデルに用いる熱伝達率等の諸係数については(ロ)章 B. 6. 1 に詳細を示す。

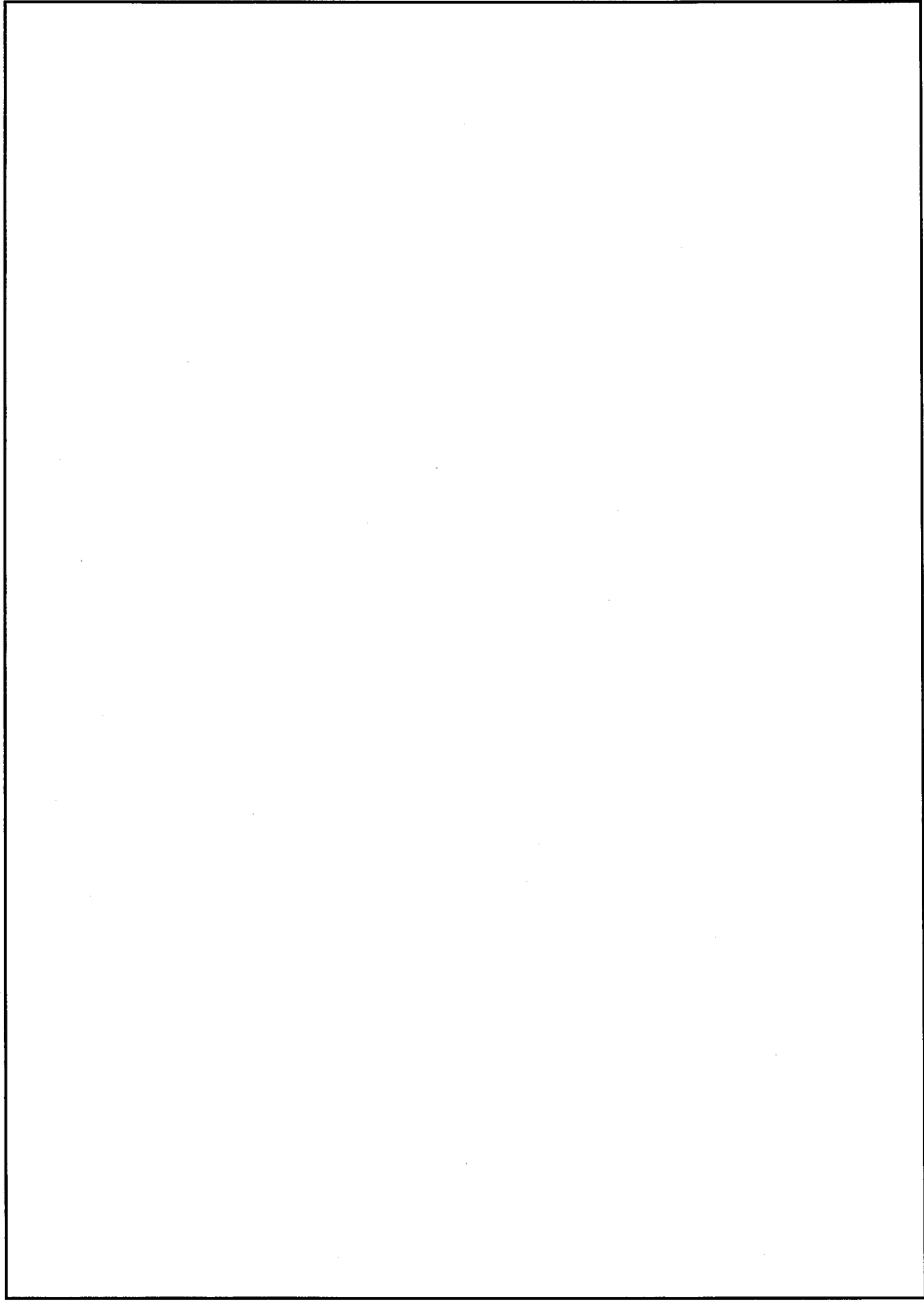
各解析モデルの形状及び要素分割図を(ロ)-第 B. 1 図から(ロ)-第 B. 4 図に示す。



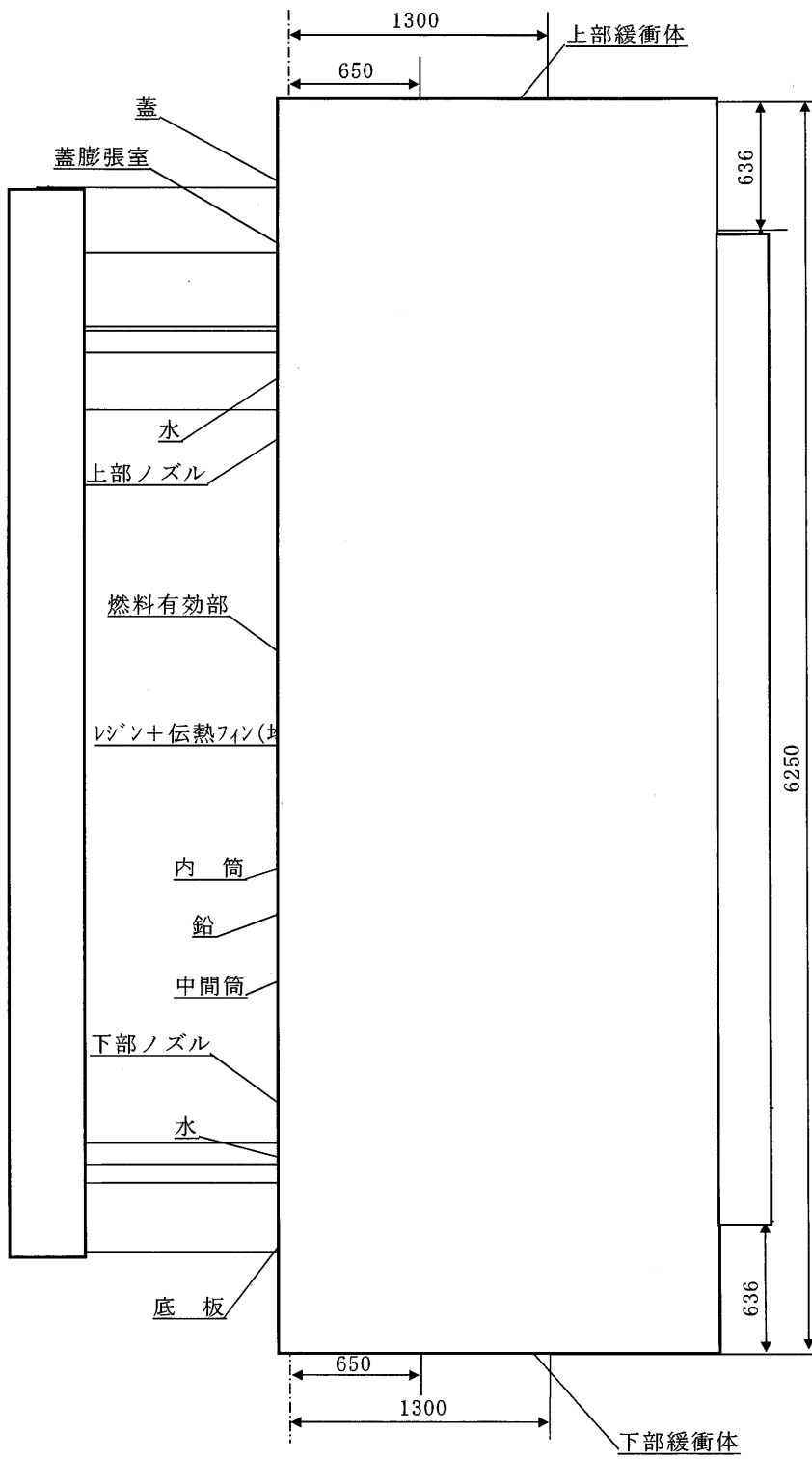
注) 伝熱フィン^{注)}はモデル上、しているが、計算ではを使用している。

(単位 : mm)

(ロ)-第 B.1 図 輪切り半ピッチモデル形状図

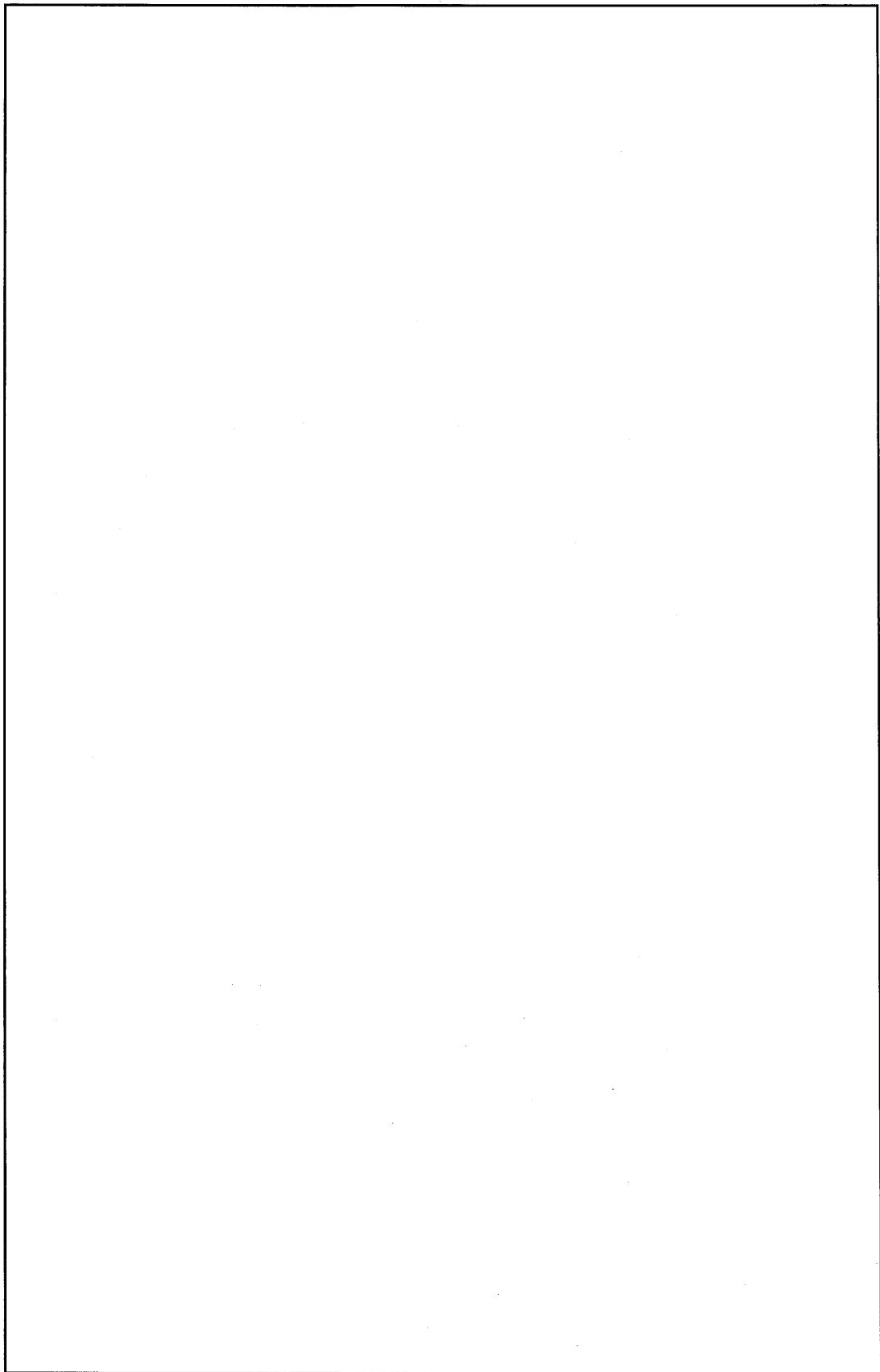


(ロ)-第 B.2 図 輪切り半ピッチモデル要素分割図



(単位：mm)

(ロ)-第 B.3 図 一般の試験条件下の全体モデル形状図



(ロ)-第 B. 4 図 一般の試験条件下の全体モデル要素分割図

輪切り半ピッチモデルにおいて燃料集合体は1体ずつの独立した均質な領域であると近似し、二酸化ウラン、ジルカロイ、ステンレス鋼(インコネルも含める)及び水が均一に混合されていると仮定した。均質化した燃料集合体の平均密度及び平均比熱は以下の式を用いて計算した。

$$\rho_{ave} = \frac{\sum W_i}{V}$$

$$C_{pave} = \frac{\sum W_i \cdot C_{pi}}{\sum W_i}$$

ただし、

ρ_{ave} : 平均密度 (kg/m³)

W_i : 二酸化ウラン、ジルカロイ、ステンレス鋼又は水の重量 (kg)

V : 均質化した領域の体積 (m³)

C_{pave} : 平均比熱 (kJ/(kg·K))

C_{pi} : 二酸化ウラン、ジルカロイ、ステンレス鋼又は水の比熱 (kJ/(kg·K))

均質化した燃料集合体領域の体積と構成材料の重量を(ロ)-第 B.13 表に示す。

(ロ)-第 B.13 表 均質化した燃料集合体有効部領域の体積と構成材料の重量

総体積 (m ³)		□
総重量 (kg)		
内 訳 (kg)	二酸化ウラン	532.9
	ジルカロイ	□
	ステンレス鋼	
	水	

均質化した燃料集合体の平均密度及び平均比熱を(口)-第 B. 14 表に示す。

(口)-第 B. 14 表 均質化した燃料集合体の熱的性質

平均密度 (kg/m ³)	
温度 (°C)	平均比熱 (kJ/(kg·K))
0	
20	
100	
200	
300	

全体モデルにおいて中性子遮蔽体部はレジンと伝熱フィンの均質な領域であると近似し、レジンと銅が均一に混合されていると仮定した。均質化した中性子遮蔽体部の平均密度及び平均比熱は以下の式を用いて計算した。

$$\rho_{ave} = \frac{\sum W_i}{V}$$

$$C_{pave} = \frac{\sum W_i \cdot C_{pi}}{\sum W_i}$$

ただし、

ρ_{ave} : 平均密度 (kg/m³)

W_i : レジン又は銅の重量 (kg)

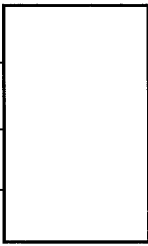
V : 均質化した領域の体積 (m³)

C_{pave} : 平均比熱 (kJ/(kg·K))

C_{pi} : レジン又は銅の比熱 (kJ/(kg·K))

均質化した中性子遮蔽体部の体積と構成材料の重量を(ロ)-第 B. 15 表に示す。

(ロ)-第 B. 15 表 均質化した中性子遮蔽体部の体積と構成材料の重量

総体積 (m ³)		
総重量 (kg)		
内訳 (kg)	レジン	
	銅	

均質化した中性子遮蔽体部の平均密度及び平均比熱を(口)-第 B.16 表に示す。

(口)-第 B.16 表 均質化した中性子遮蔽体部の熱的性質

平均密度 (kg/m ³)	
温度 (°C)	平均比熱 (kJ/(kg·K))
20	
100	
200	
300	

また、均質化した中性子遮蔽体部の平均熱伝導率を輪切り半ピッチモデルの結果から求めた。

緩衝体も同様に、緩衝材部に対してはリブを考慮し、次のように均質化した。

平均密度及び平均比熱は、

$$\rho_{ave} = \frac{\sum W_i}{V}$$

$$C_{pave} = \frac{\sum W_i \cdot C_{pi}}{\sum W_i}$$

ここで、

ρ_{ave} : 平均密度 (kg/m³)

W_i : 、又はステンレス鋼の重量 (kg)

V : 均質化した領域の体積 (m³)

C_{pave} : 平均比熱 (kJ/(kg·K))

C_{pi} : 、又はステンレス鋼の比熱
(kJ/(kg·K))

また、平均熱伝導率は、

$$\lambda_{ave} = \frac{\sum V_i \cdot \lambda_i}{V}$$

ここで、

V_i : 、又はステンレス鋼の体積 (m³)

λ_i : 、又はステンレス鋼の熱伝導率
(W/(m·K))

λ_{ave} : 平均熱伝導率 (W/(m·K))

均質化した緩衝体の体積と構成材料の重量を(ロ)-第 B. 17 表及び(ロ)-第 B. 18 表に示す。

(ロ)-第 B. 17 表 均質化した上部緩衝体の体積と構成材料の重量

総体積 (m ³)		
内 訳 (m ³)	<input type="text"/>	
	ステンレス鋼	
総重量 (kg)		
内 訳 (kg)	<input type="text"/>	
	ステンレス鋼	

(ロ)-第 B. 18 表 均質化した下部緩衝体の体積と構成材料の重量

総体積 (m ³)		
内訳 (m ³)		
	ステンレス鋼	
総重量 (kg)		
内訳 (kg)		
	ステンレス鋼	

均質化した緩衝体の平均密度、平均比熱及び平均熱伝導率を(ロ)-第 B. 19 表及び(ロ)-第 B. 20 表に示す。

(ロ)-第 B. 19 表 均質化した上部緩衝体の熱的性質

平均密度 (kg/m ³)		
温度 (°C)	平均比熱 (kJ/(kg·K))	平均熱伝導率 (W/(m·K))
20		
100		
200		
300		

(ロ)-第 B. 20 表 均質化した下部緩衝体の熱的性質

平均密度 (kg/m ³)		
温度 (°C)	平均比熱 (kJ/(kg·K))	平均熱伝導率 (W/(m·K))
20		
100		
200		
300		

2. 解析条件

一般の試験条件下における解析条件を(ロ)-第 B. 21 表に示す。また、太陽熱放射を(ロ)-第 B. 22 表に示す。

使用済燃料の最大崩壊熱量は、燃料 14 体で 54kW である。また、周囲空気温度は最高 38℃、最低-20℃とし、容器表面の放射率/吸収率は 、周囲吸収率は 1.0 とする。

(ロ)-第 B. 21 表 一般の試験条件下の熱解析条件

項	目	条 件
崩 壊 熱 量		54kW
環 境 条 件	周 围 温 度	-20℃～38℃
	太 陽 熱 放 射	(ロ)-第 B. 22 表に示した熱量があり又はなし
	周 围 吸 收 率	1.0
容器表面放射率/吸収率		<input type="text"/>

(ロ)-第 B. 22 表 太陽熱放射データ

表面の形状及び位置	1 日当たり 12 時間の放射熱 (W/m ²) ^{注 1)}
垂直に輸送される表面及び 水平に輸送されない下向きの表面	200
その他の表面(曲面) ^{注 2)}	400

注 1) 規則及び告示に定める技術基準上は一日につき 12 時間の負荷であるが、解析上は連続照射とする。

注 2) 規則及び告示に定める技術基準上は「水平に輸送されない下向きの表面」に対しては 200W/m²であるが、解析上は安全側に全ての曲面に対して 400W/m²とする。

B. 4. 1. 2 試験モデル

該当しない。

B. 4.2 最高温度

(ロ)章 B. 4. 1 に記載した解析モデル及び条件に基づいて求めた一般の試験条件下における輸送物各部の最高温度の結果を(ロ)-第 B. 23 表に示す。

ABAQUS コードで解析して得られた近接表面温度評価条件における輸送容器とその収納物の各部の温度分布を(ロ)-第 B. 5 図及び(ロ)-第 B. 6 図に、また、最高温度評価条件における温度分布を(ロ)-第 B. 7 図及び(ロ)-第 B. 8 図に示す。

人が容易に近づくことができる表面としては、(ロ)-第 B. 23 表に示すように、近接表面温度評価条件において緩衝体は 76℃、フィン先端は 70℃、バギングリングは 78℃となり、これらは基準値の 85℃以下である。

なお、(ロ)章 B. 4. 1. 1 の 1. に示すとおり、一般の試験条件においては収納物及び緩衝体の最高温度を高く評価するために緩衝体の変形を考慮していないが、緩衝体表面積の減少分が全て緩衝体表面温度上昇に寄与する場合、保守側に一般の試験条件の垂直落下、水平落下及びコーナー落下の緩衝体変形後の形状を包含する形状を考慮すると、緩衝体の表面積は約 14%減少することになり、緩衝体表面温度は約 81℃となるが、技術上の基準に定める 85℃を超えることはない。

また、蓋及び底板近傍の緩衝体カバープレート並びにトラニオンの温度は 85℃を超えるが、蓋及び底板近傍の緩衝体カバープレート並びにトラニオンの近傍には近接防止金網(80℃以下((ロ)章 B. 6. 1. 3 参照))を取り付けて輸送するため^{注)}、人が容易に近づくことができる表面の温度は全て 85℃以下である。

一般の試験条件における輸送物各部の最高温度は、フィン先端で 103℃、中性子遮蔽体部で 158℃、ガンマ線遮蔽体の鉛部で 171℃、内筒内水(平均)で 179℃及び燃料集合体で 184℃である。また、蓋 O リングは 162℃、ベント・水位調整バルブ O リングは 164℃、ドレンバルブ O リングは 155℃、水位調整用加圧バルブ O リングは 156℃となる。

以上の熱解析結果より、一般の試験条件において、密封装置 O リングの最高温度は使用可能温度 180℃を超えることはない。中性子遮蔽材であるレジン^{注)}は使用可能温度 170℃を超えることはなく、また、ガンマ線遮蔽材である鉛もその融点 327. 5℃を超えず、その他の構成材料についても悪影響を及ぼすような温度にはならない。

注) 輸送中の衝撃等により近接防止金網の脱落等が生じた場合、再取付けをする等の対策を施した上で、輸送に供するものとする。

(ロ)-第 B. 23 表 一般の試験条件下の最高温度

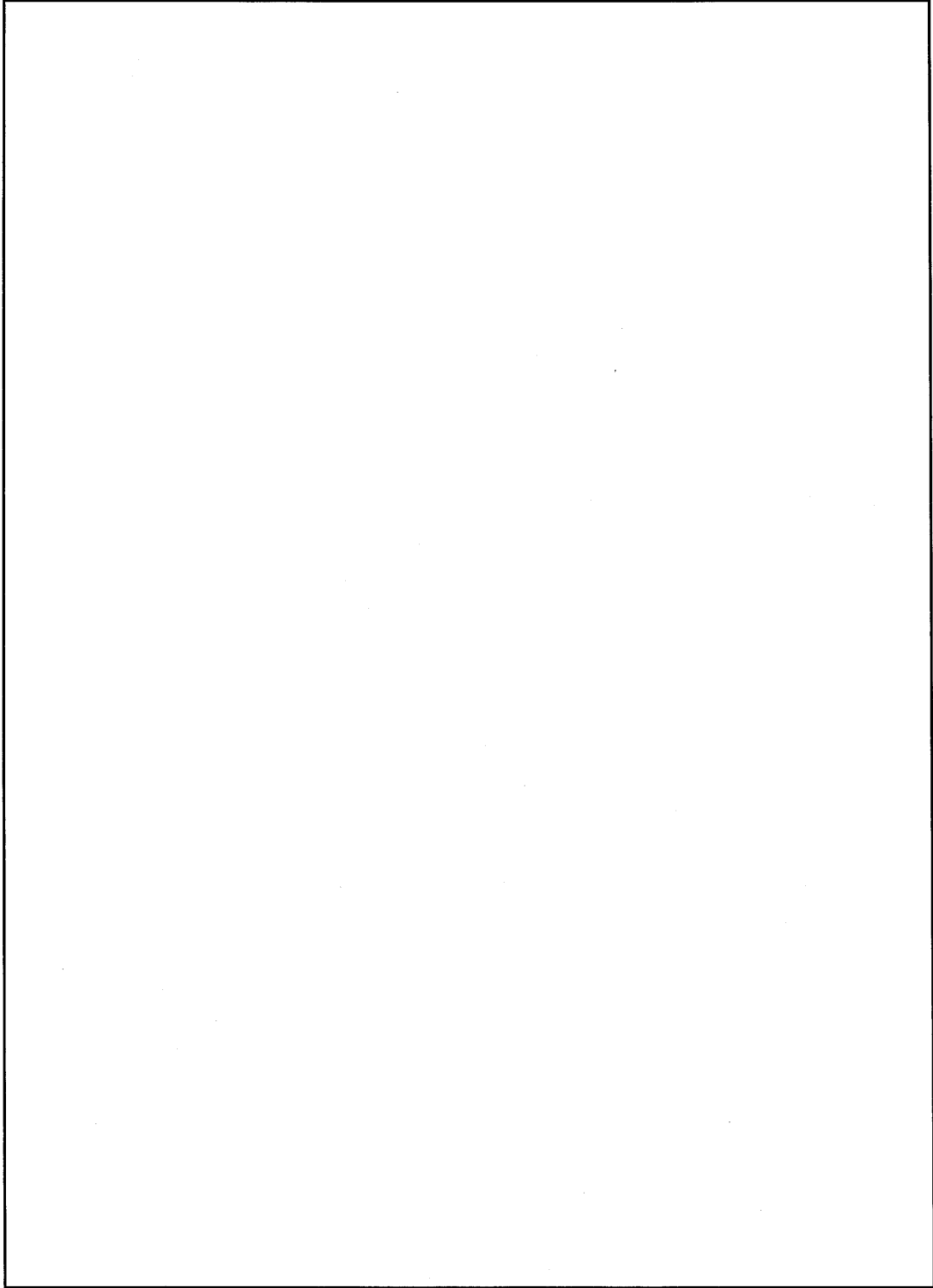
(単位：℃)

部 位	条 件	
	近接表面温度評価条件	最高温度評価条件
	太陽熱放射なし	太陽熱放射あり
周 囲 温 度	38	38
緩 衝 体 表 面	76	83
緩衝体カバープレート (蓋 近 傍)	(141) ^{注 1)}	-
緩衝体カバープレート (底 板 近 傍)	(137) ^{注 1)}	-
緩 衝 体 木 材	-	125
フ ィ ン 先 端	100 (70) ^{注 1)}	103
バギングリング表面	78	81
ト ラ ニ オ ン	176 ^{注 2)} (153) ^{注 3)}	177 ^{注 2)}
外 筒	132	134
レ ジ ン カ バ ー	151	152
仕 切 板	149	150
伝 熱 フ ィ ン	152	154
レ ジ ン	157	158
中 間 筒	160	162
フ ラ ン ジ	168	168
鉛	170	171
底 板	173	173
内 筒	176	177
内 筒 内 水 (平 均)	178	179
バ ス ケ ッ ト	182	183
燃 料 集 合 体	183	184
蓋	167	167
蓋 0 リ ン グ	162	162
ベ ン ト ・ 水 位 調 整 バルブ 0 リ ン グ	163	164
ド レ ン バ ル ブ 0 リ ン グ	154	155
水 位 調 整 用 加 圧 バルブ 0 リ ン グ	155	156
蓋 ボ ル ト	159	160

注 1) 人が容易に近づくことができる位置の表面温度である。

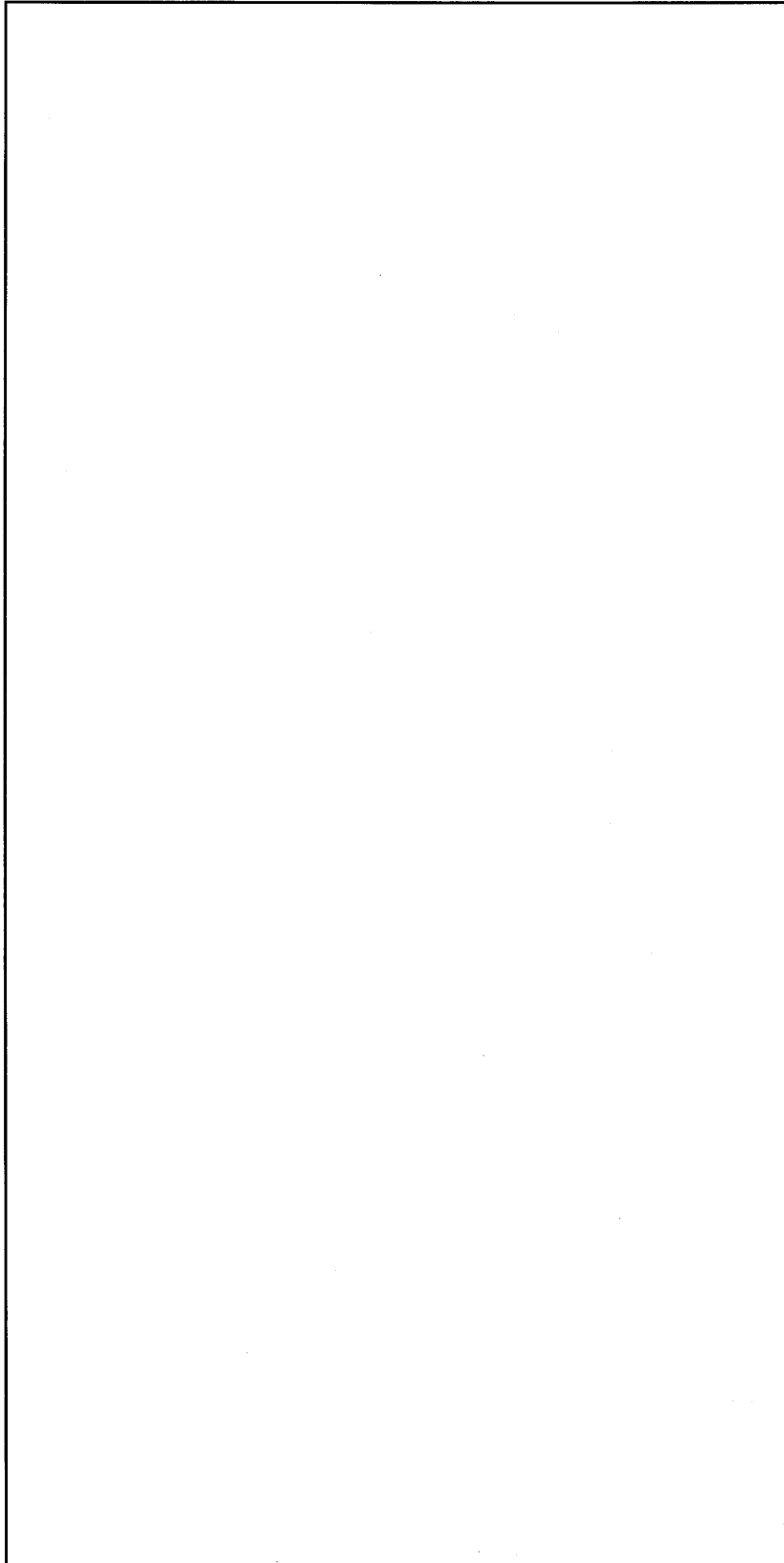
注 2) トラニオンの最高温度は内筒の最高温度と同じとする。

注 3) トラニオンの人が容易に近づくことができる位置の温度はトラニオン近傍の内筒の外表面温度と同じとする。



(ロ)-第 B. 5 図 一般の試験条件における輪切り半ピッチモデル温度分布

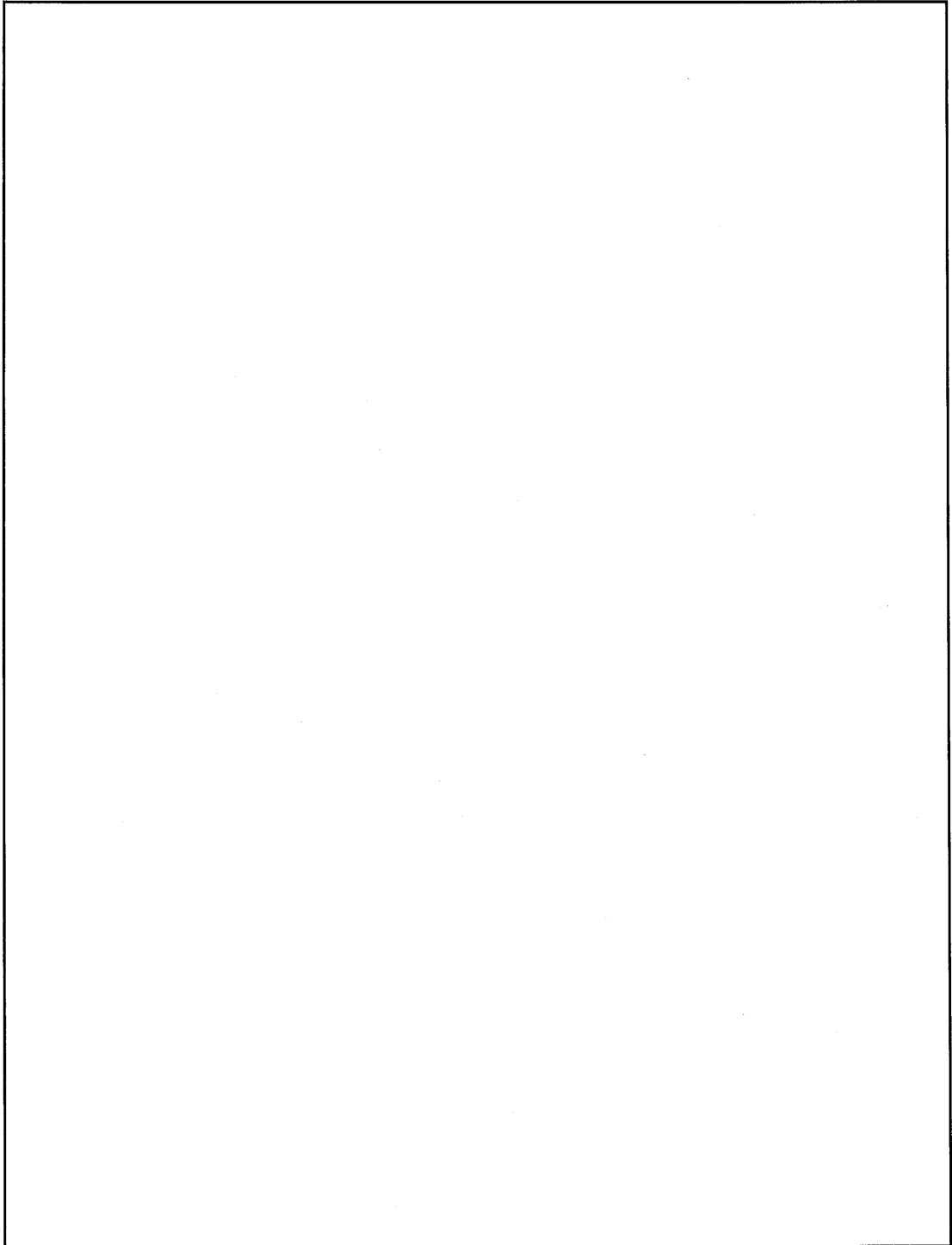
(近接表面温度評価条件)



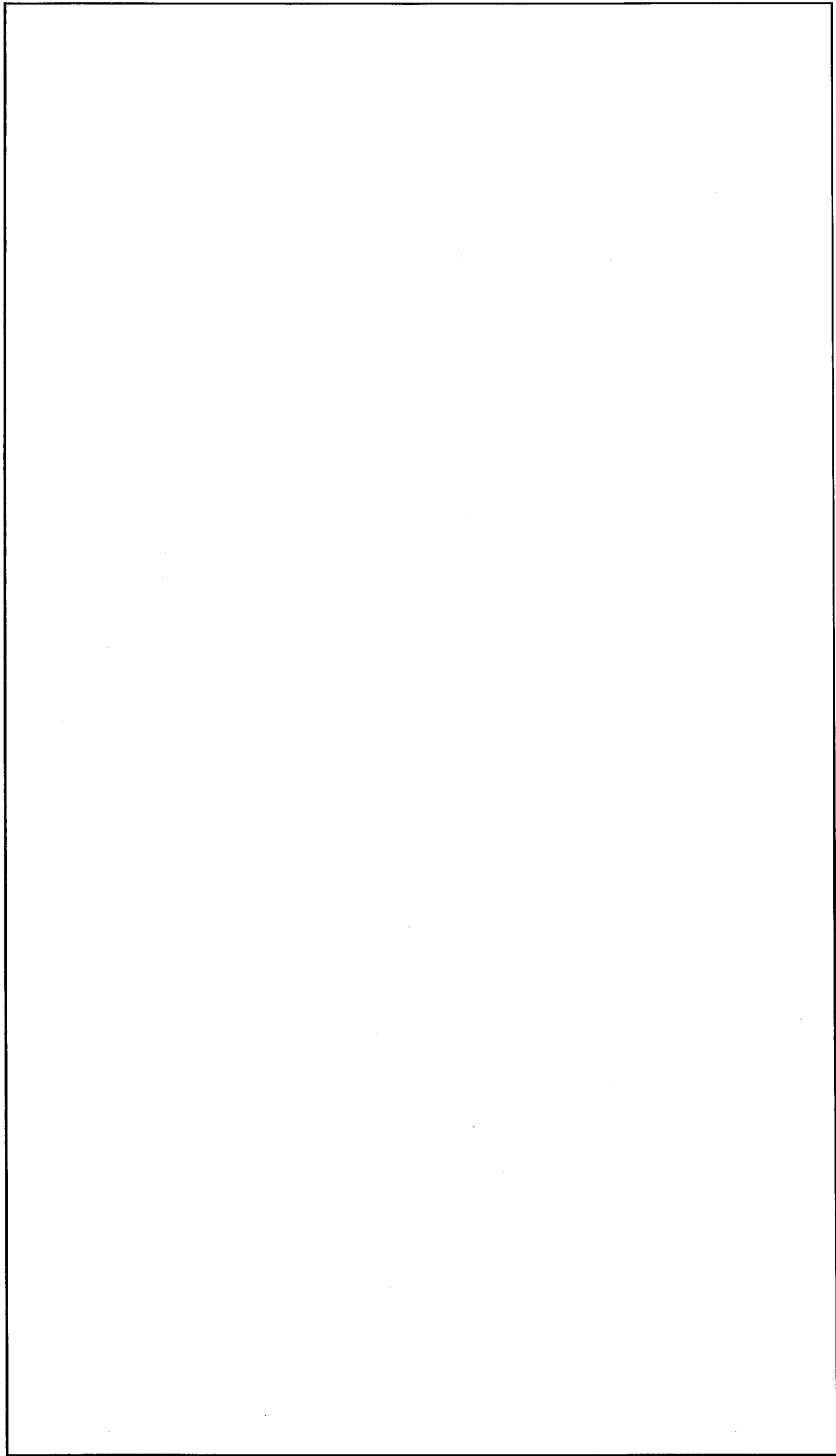
(ロ)-第 B. 6 図 一般の試験条件における全体モデル温度分布

(近接表面温度評価条件)

(ロ)-B-29



(ロ)-第 B.7 図 一般の試験条件下の輪切り半ピッチモデル温度分布
(最高温度評価条件)



(口)-第 B. 8 図 一般の試験条件下の全体モデル温度分布

(最高温度評価条件)

B.4.3 最低温度

本輸送物の最低使用温度は(口)章 A.4.2 に述べたように -20°C である。

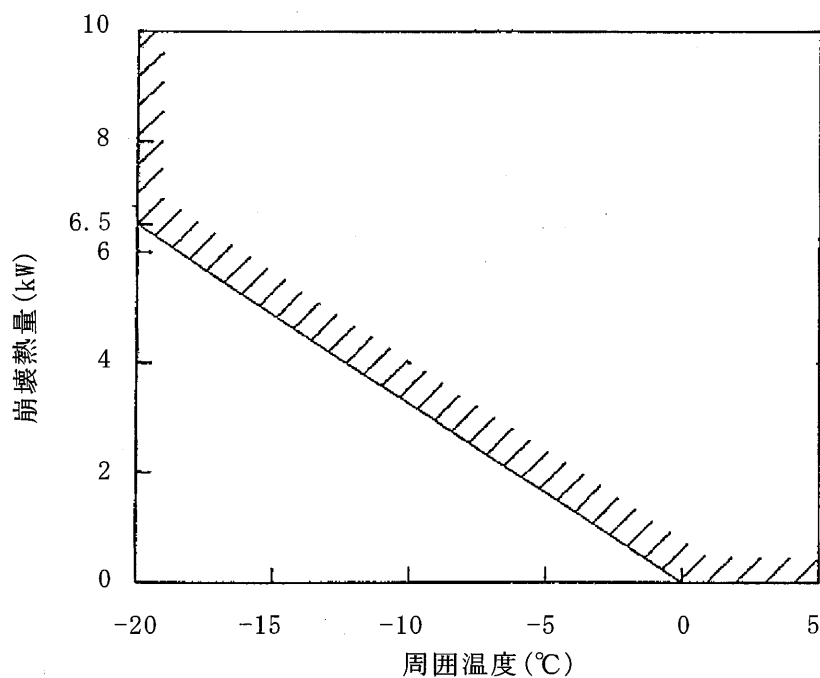
一方、本輸送物は収納物の冷却のため内筒内に水を充填しているため、周囲温度 -20°C から 0°C までの使用範囲においてこの内筒内水が凍結しないこととする。

周囲温度が、 -20°C から 0°C において内筒内水が凍結しない最低崩壊熱量を、ABAQUS コードを用いて計算した。本評価においては、安全側の評価となるよう以下の条件を考慮した。

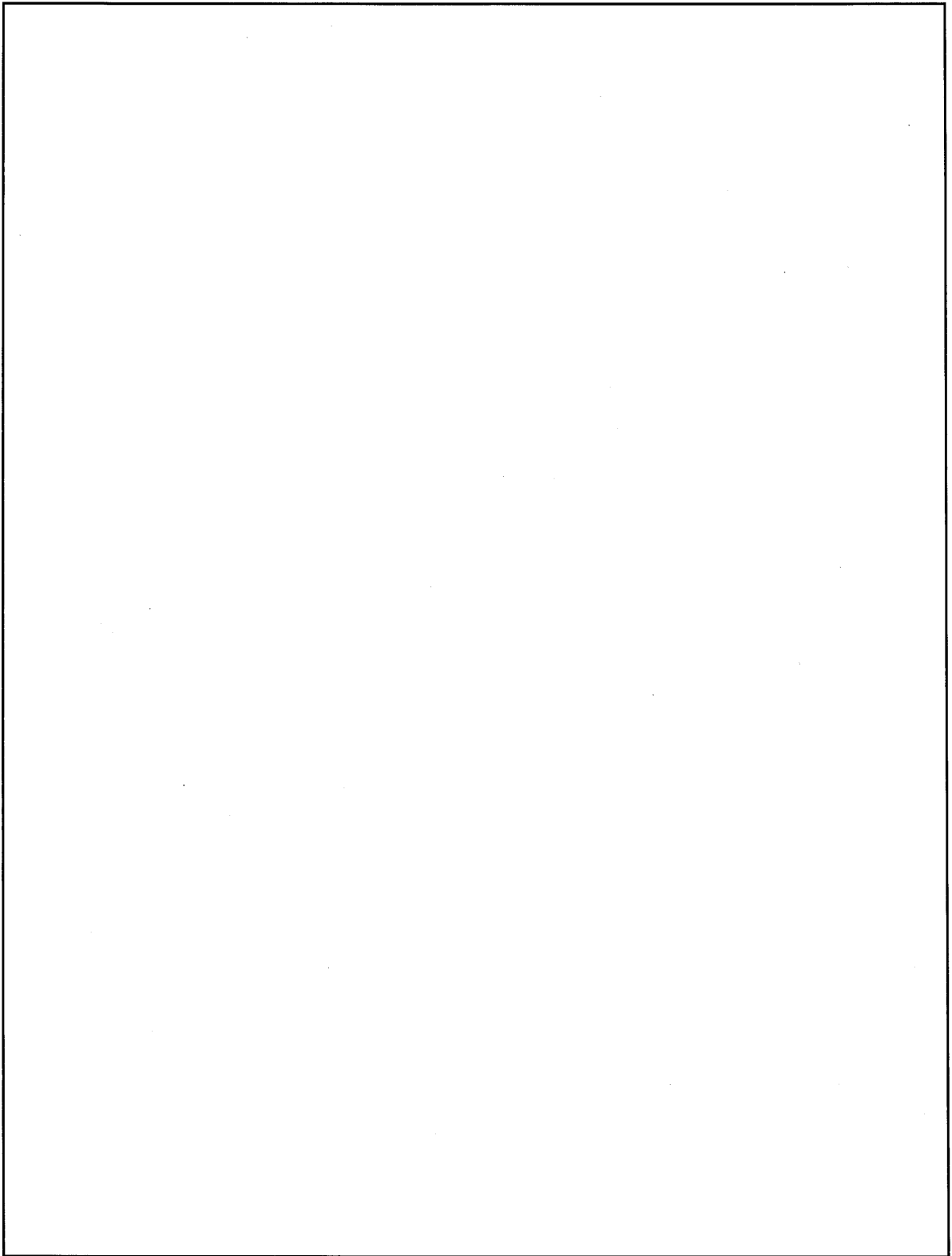
- ・(口)章 B.6.1.1 の 2. (3) に示すとおり、内筒内面下部における熱伝達率は冷却水平上面に対する自然対流熱伝達率とする。
- ・外筒表面及びフィン表面の対流熱伝達率については、(口)章 B.6.1.1 の 5. に示す外表面における自然対流熱伝達率の周方向分布を考慮せず、上部側の放熱が多くなるよう設定する。
- ・太陽熱放射を考慮しない。

この結果、周囲温度 -20°C から 0°C までの使用範囲で、収納物の崩壊熱量に対して内筒内水が凍結しない条件は(口)-第 B.9 図に斜線で示した範囲となる。

また、輸送物の最低使用温度である周囲温度 -20°C における崩壊熱量 6.5kW のときの温度分布を(口)-第 B.10 図に示す。



(口)-第 B.9 図 周囲温度と最低崩壊熱量



(口)-第 B. 10 図 周囲温度-20℃、崩壊熱量 6.5kW の場合の温度分布

B. 4. 4 最大内圧

熱解析の結果、一般の試験条件において輸送容器に最大内圧を生じる崩壊熱量は54kWで、環境温度は38℃の場合である。

このときの内筒内の圧力の計算を以下に示す。

なお、相変化及び化学的分解はおこらないので考慮しない。また、放射線分解により発生する気体による圧力上昇は小さく、本圧力計算では無視できる。

(ロ)章 A. 5 に述べたように燃料棒は一般の試験条件下において破損することはない。したがって、燃料棒の破損による圧力上昇は生じない。

内筒内部の圧力は、次のように求められる。

本輸送容器の内筒内容積()Vは、 m³である。燃料集合体14体を装荷した時の内筒内水温度を20℃とすると、このときの内筒内部の条件は、以下のように求められる。

1. 燃料装荷及び水抜き時の内筒内容積

内筒内容積()をV、燃料集合体の体積をV_fとすると、燃料装荷時における内筒内の空間容積V_cは、

$$V_c = V - V_f \quad \text{————— (1)}$$

発送前に、水位調整のため規定水位まで水抜きを行い、水抜き後の内筒内水体積をV_wとする。このとき全空气体積V_aは、

$$V_a = V_c - V_w \quad \text{————— (2)}$$

となる。

2. 一般の試験条件

一般の試験条件下の内筒内圧は、次のように求められる。

一般の試験条件下における内筒内水の平均温度を t_1 °C とすれば、このときの内筒内水体積 V_{wt_1} は、

$$V_{wt_1} = V_w \frac{\rho_{20}}{\rho_{t_1}} \quad \text{-----} \quad (3)$$

ただし、

ρ_{20} : 20°C の水の密度 (kg/m³)

ρ_{t_1} : t_1 °C の水の密度 (kg/m³)

したがって、一般の試験条件下における内筒内の空气体積 V_{at_1} は、

$$V_{at_1} = V_c - V_{wt_1} \quad \text{-----} \quad (4)$$

したがって、空気分圧 P_1 は、

$$P_1 = P_0 \times \frac{V_a}{V_{at_1}} \times \frac{T_{t_1}}{T_{20}} \quad \text{-----} \quad (5)$$

ただし、

P_1 : 最終圧力 (MPa abs)

P_0 : 初期圧力 (大気圧 : 0.1013 MPa abs)

V_a : 初期空气体積 (m³)

T_{20} : 初期温度 (293K)

$T_{t_1} = t_1 + 273$ (K)

したがって、内筒内圧 P は、

$$P = P_1 + P_s \quad \text{-----} \quad (6)$$

ただし、

P_s : 温度 t_1 °C における飽和蒸気圧 (MPa abs)

上記(1)式から(6)式より求めた輸送物の内筒内圧を(ロ)-第 B. 24 表に示す。なお、蓋取付け時の周囲温度が仮に -20°C であった場合には空気の密度が大きくなるため、内筒内圧は約 5% 増加する可能性があるが、構造評価は保守的にこれを包絡する圧力で評価している。また、O リングの最大使用可能圧力は 6.9 MPa であり、内筒内圧が使用可能範囲を超えることはない。

(ロ)-第 B. 24 表 一般の試験条件下の内筒内圧

項 目	記 号	単 位	式	計 算 値
内筒内の空間容積	V	m ³	-	
燃料集合体の体積	V _f	m ³	-	
燃料装荷時の内筒内空間容積	V _c	m ³	(1)	
内筒内水体積	V _w	m ³	-	
水抜後空气体積	V _a	m ³	(2)	
内筒内水平均温度 ^{注 1)}	t ₁	°C	-	179
20°Cにおける水の密度	ρ ₂₀	kg/m ³	-	998.3
温度 t ₁ における水の密度	ρ _{t₁}	kg/m ³	-	888.0
温度 t ₁ における内筒内水体積	V _{w_{t₁}}	m ³	(3)	
温度 t ₁ における内筒内空气体積	V _{a_{t₁}}	m ³	(4)	
温度 t ₁ における空気分圧	P ₁	MPa abs	(5)	0.5161
温度 t ₁ における飽和蒸気圧	P _s	MPa abs	-	0.9798
内筒内圧	P	MPa abs	(6)	1.50 (1.39MPaG)

注 1) NFT-14P 型輸送物の実証試験における伝熱試験において、実際の内筒内水平均温度はより低く、本評価に用いる平均温度が水の膨張による内筒内圧が高くなるよう保守的な値であることを確認している¹²⁾。

B. 4.5 最大熱応力

一般の試験条件下においては輸送物に熱応力が生じるが、(ロ)章 A. 5. 1 に示すようにいずれも評価基準を下回る。

B. 4.6 結果の要約及びその評価

一般の試験条件下における輸送物各部の最高温度は(ロ)-第 B. 23 表に、輸送容器内部の圧力は(ロ)-第 B. 24 表に示すとおりである。

近接表面温度評価条件において、人が容易に近づくことができる部分の最高温度はバギングリング表面の 78℃であり、基準温度の 85℃を超えることはない。一方、蓋及び底板近傍の緩衝体カバープレート並びにトラニオンの温度は 85℃を超えているが、蓋及び底板部近傍の緩衝体カバープレート並びにトラニオンの近傍には近接防止金網を取り付けて輸送するため、人が容易に近づくことができる表面の温度は 85℃以下である。

最高温度評価条件において、蓋 O リングの最高温度は 162℃となり、(ロ)章 B. 3 に記載した使用可能温度 180℃を超えることはない。また、輸送容器内部の圧力は(ロ)-第 B. 24 表に示したように 6. 9MPa を超えることはない。蓋 O リングの最大使用可能圧力は 6. 9MPa であることから、一般の試験条件下で密封性能が損なわれることはない。

最高温度評価条件において、ベント・水位調整バルブ、ドレンバルブ及び水位調整用加圧バルブの O リングの温度は最高 164℃で蓋 O リングと同様使用可能温度より低い。

最高温度評価条件において、レジンは、その最高温度が 158℃であり、使用可能温度 170℃を超えることはない。また、鉛は、その最高温度が 171℃であり、融点 327. 5℃を超えることはない。その他の構成材料についても、最高温度評価条件において、輸送物の健全性に対し悪影響を及ぼすような温度にはならないことから、き裂、破損等の生じるおそれはない。

なお、一般の試験条件下の構造解析においては、(ロ)-第 B. 23 表に示す温度及び(ロ)-第 B. 24 表に示す圧力に余裕をとった圧力条件で解析を行っている。

周囲温度が-20℃から 0℃で太陽熱放射なしの場合、内筒内水が凍らないために必要な最低崩壊熱量は(ロ)-第 B. 9 図に示したとおりである。この図の斜線で示した範囲では、内筒内水の温度が凝固点 0℃より低くなることはなく、凍結することはない。

したがって、周囲温度が-20℃から 0℃においても輸送容器の健全性に問題はないことから、き裂、破損等の生じるおそれはない。

一般の試験条件下における熱解析結果の要約と評価を(口)-第 B. 25 表に示す。

(ロ)-第 B. 25 表 一般の試験条件下の熱解析結果の要約と評価

項 目	基 準 値	結 果	評 価	他解析への条件
最高温度				
燃料集合体	-	184℃	基準値以下 ^{注3)}	190℃
中性子遮蔽体(レジン)	170℃	158℃	基準値以下	-
ガンマ線遮蔽体(鉛)	融点 327.5℃	171℃	基準値以下	-
近接表面 ^{注1)}	85℃	78℃ ^{注2)}	基準値以下	-
Oリング	180℃	164℃	基準値以下	-
外 筒	-	134℃	基準値以下 ^{注3)}	140℃
中 間 筒	-	162℃	基準値以下 ^{注3)}	170℃
内 筒	-	177℃	基準値以下 ^{注3)}	180℃
最大内圧				
Oリング	6.9MPa	1.50MPa abs (1.39MPaG)	基準値以下	構造解析では 安全側に 1.70MPaG を使用
最低崩壊熱量	内筒内水の 凍結なし	周囲温度-20℃、崩 壊熱量 6.5kW で内 筒内水凍結せず	基準に合致	-

注 1) 近接表面温度評価条件における評価である。なお、蓋及び底板温度は 85℃を超えているが、蓋及び底板部には必要に応じ近接防止金網(80℃以下((ロ)章 B. 6. 1. 3 参照))を取り付けて輸送するため、人が容易に近づくことができる表面の温度は 85℃以下である。

注 2) バギングリング表面の最高温度

注 3) (ロ)章 A. 5 に示す応力評価において、生じる応力が当該温度における解析基準値を満足することを確認。

B.5 特別の試験条件

B.5.1 熱解析モデル

輸送物の熱解析は、燃料を 14 体収納した輸送物について、有限要素法による ABAQUS コードを用いて行った。

B.5.1.1 解析モデル

1. 形状モデル

一般の試験条件と同様に、各部温度を算出するために解析モデルとして以下の 2 つのモデルを用いた。

① 輪切り半ピッチモデル

② 全体モデル

各モデルにおいて評価する輸送物部位は次のとおりである。

輪切り半ピッチモデル…… フィン先端、外筒、レジン(中央部)、中間筒、鉛、
内筒、内筒内水、バスケット、燃料集合体

全体モデル…………… 緩衝体、蓋、蓋 O リング、
ベント・水位調整バルブ O リング、
ドレンバルブ O リング、
水位調整用加圧バルブ O リング、フランジ、
仕切板、底板、蓋ボルト

(ロ)章 B.1 の 2. で述べたように、特別の試験条件下の耐火試験においては、落下試験 I によりフィン及び緩衝体に変形する。

しかし、耐火試験時においては、フィンが変形していないと考えた方が火炎にさらされる面積が多くなり、輸送容器に対する入熱量が大きくなるため、安全側である。さらに、耐火試験後においても、フィンの変形した部分の放熱面積はわずかであり、フィンは太陽熱放射に対する吸収面として働くことを考えれば、フィンは変形していないと仮定することができる。

緩衝体に対しては、変形を考慮する方が輸送容器への入熱量を大きく与えるので、変形後の形状をモデルに考慮する。

落下試験 II (貫通落下)における輸送物の変形は緩衝体、フィン、外筒及びレジンカバーに生じる変形である。

この場合のフィン及び外筒の最大変形は、フィン 4 枚、幅 150mm の範囲の変形である。

しかし、耐火試験時においては、フィンが変形していないと考えた方が安全側である。

また、この変形は局所的であり、フィン及び外筒が変形していないと仮定しても、輸送物の熱的性能に影響を及ぼすことはない。

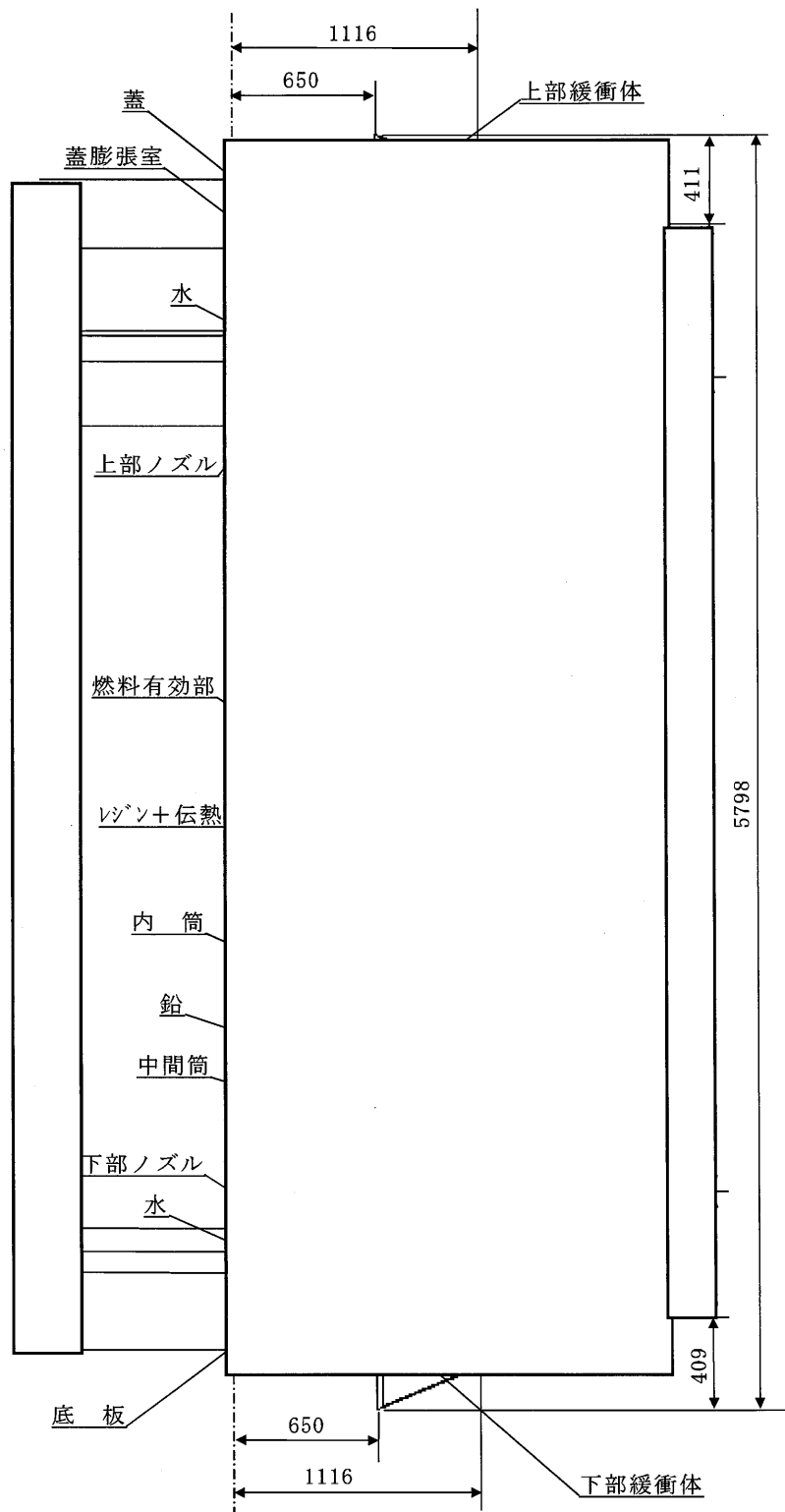
したがって、特別の試験条件下における熱解析では、フィン及び外筒が変形していないとする。

緩衝体については、落下時に緩衝体に穴があく可能性があるが、局所的であり断熱効果に大きな変化はない。

レジンカバーについては、ドレンバルブ及びベント・水位調整バルブの温度を安全側に評価するため、レジンと共に取り除いている。

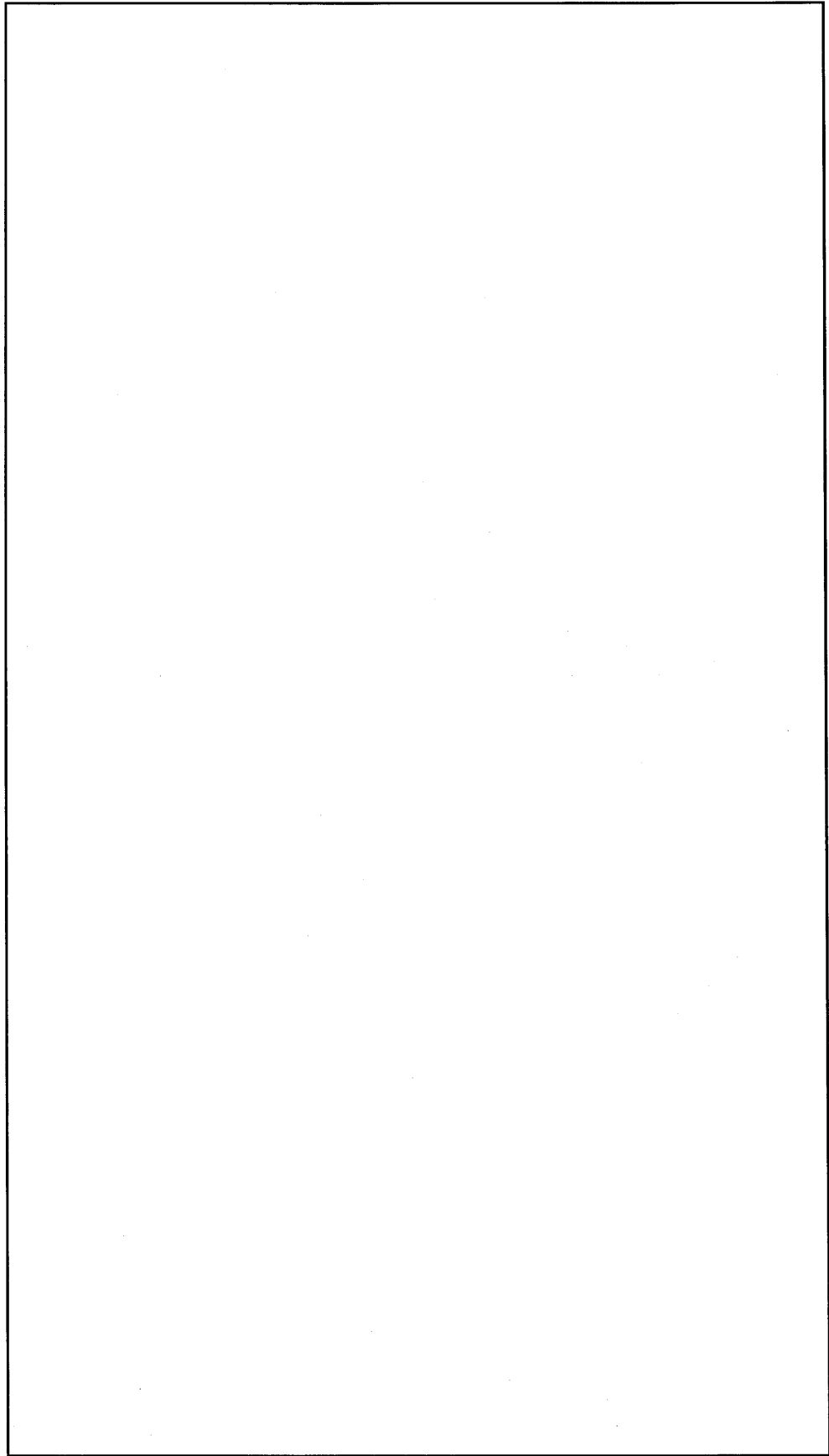
以上の条件を考慮した特別の試験条件に対する、輪切り半ピッチモデルの形状及び要素分割図は(ロ)-第 B. 1 図及び(ロ)-第 B. 2 図に示すとおりである。また、全体モデルの形状を(ロ)-第 B. 11 図に、要素分割図を(ロ)-第 B. 12 図に示す。

全体モデルにおいては、フィン部をモデル化していない。フィン部の等価熱伝達率を輪切り半ピッチモデルの解析結果より求め、これらの値を全体モデルの境界条件として与える。詳細は(ロ)章 B. 6. 1 に示す。



(単位：mm)

(ロ)-第 B. 11 図 特別の試験条件下の全体モデル形状図



(ロ)-第 B.12 図 特別の試験条件下の全体モデル要素分割図

2. 解析条件

解析に使用した熱的条件は次のとおりである。

使用済燃料の崩壊熱量は、全体で 54kW である。特別の試験条件下の熱解析は、強度試験(落下試験 I 及び II)条件に引き続いて、耐火試験条件下に置かれるものとする。また、火災前の輸送容器の温度分布は、周囲温度 38℃、太陽熱放射を受ける場合の温度分布((口)-第 B. 7 図及び第 B. 8 図参照)であるとする。

火災時の熱的条件は、周囲温度 800℃、火災時間 30 分、火災の放射率 0.9、容器表面の吸収率 であり、太陽熱放射を受けるものとする。火災後の熱的条件は、周囲温度 38℃であり、太陽熱放射((口)-第 B. 22 表参照)を連続で受けるものとする。このとき、容器表面の放射率/吸収率は、 であり、周囲の吸収率は 1.0 とする。容器表面からの熱放散は自然対流と放射を考慮する。

解析条件のまとめを(口)-第 B. 26 表に示す。

(口)-第 B. 26 表 特別の試験条件下の熱解析条件

事 象 項 目		火災前	火災時 (30 分間)	火災後
		崩 壊 熱 量		54kW
環 境 条 件	周 囲 温 度	静止空気 38℃	火 災 800℃	静止空気 38℃
	太 陽 熱 放 射	あり	あり	あり
	周 囲 吸 収 率	1.0	0.9 注)	1.0
容器表面放射率/吸収率		<input type="text"/>		

注) 火災の放射率を示す。

B. 5. 1. 2 試験モデル

該当しない。

B. 5. 2 核燃料輸送物の評価条件

落下試験Ⅰ(9m落下)における輸送物の変形は、フィン及び緩衝体に生じる変形である。

フィンについては変形していない方が周囲からの入熱量が大きくなるため変形がないものとする。なお、NFT-14P型輸送物の落下試験によってフィンが変形した状態とした後に実施した耐火試験後の各部温度が、(ロ)章B. 5. 3に示す評価値と比べて同等又は小さいことが実証試験により確認されている¹²⁾。

緩衝体の変形は、頭部垂直落下で139mm、底部垂直落下で140mm、水平落下で184mm、頭部コーナー落下で457mm、底部コーナー落下で460mmの変形量である。

解析においては、垂直落下、水平落下及びコーナー落下の変形後の形状を包含するような形状に緩衝体をモデル化する。

落下試験Ⅱ(貫通落下)における輸送物の変形は緩衝体、フィン、外筒、及びレジンカバーに生じる変形である。緩衝体は落下時に穴があく可能性があるが、局所的であるため、断熱効果に大きな変化はない。

フィン及び外筒の最大変形は、フィン4枚、幅150mmの範囲の変形である。この変形は局所的であり、フィン及び外筒が変形していないと仮定しても、輸送物の熱的性能に影響を及ぼすことはない。

レジンカバーについては、ドレンバルブ及びベント・水位調整バルブの温度を安全側に評価するため、レジンと共に取り除いている。

B. 5.3 核燃料輸送物温度

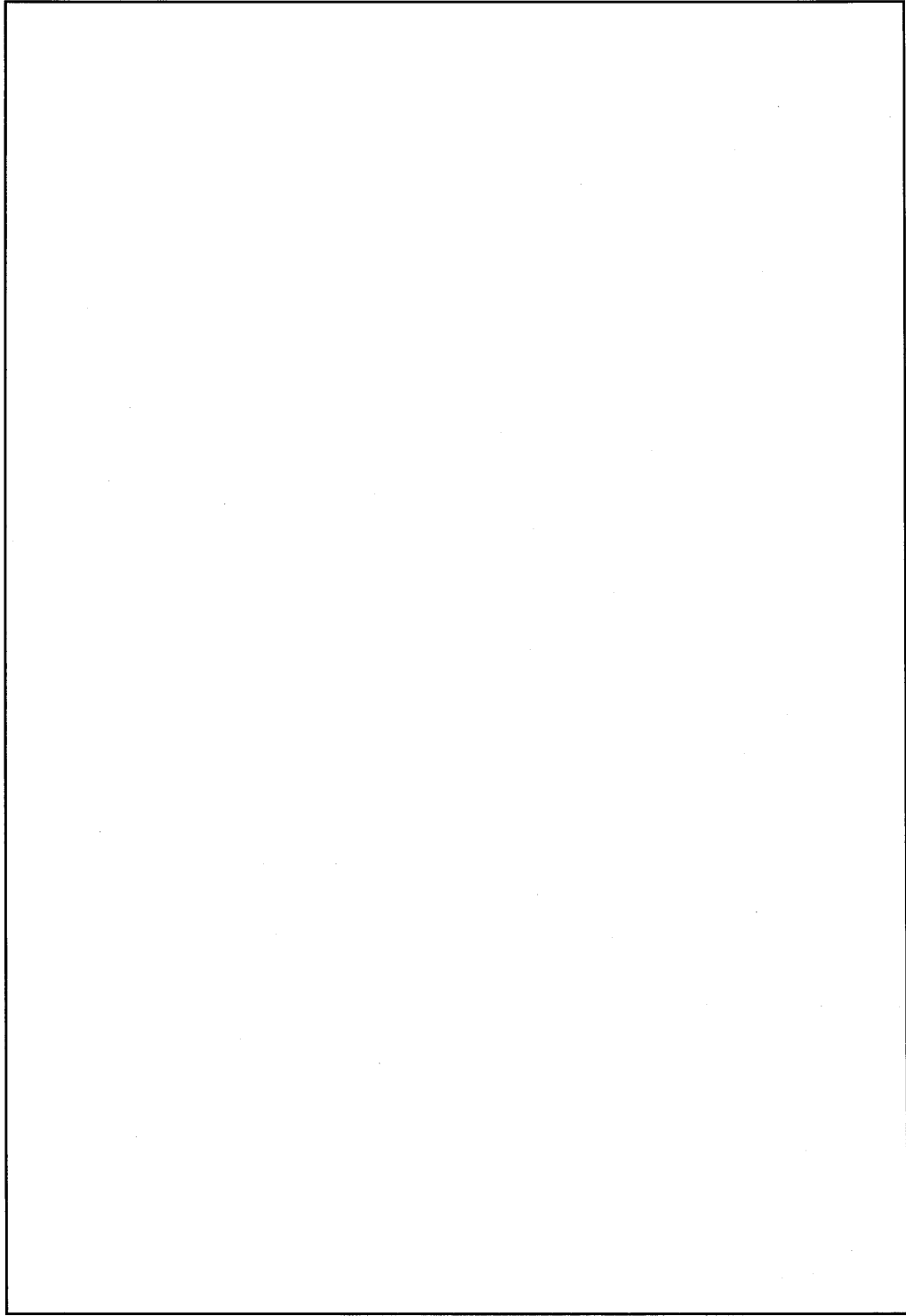
(ロ)章 B. 5. 1. 1 の 1. に記載したモデル及び 2. に記載した条件に基づいて、ABAQUS コードにより解析した。特別の試験条件下における最高温度と火災発生後からの時間の結果を(ロ)-第 B. 27 表に示す。

火災発生 30 分後の輸送物の各部の温度分布を(ロ)-第 B. 13 図及び(ロ)-第 B. 14 図に、時刻歴温度変化を(ロ)-第 B. 15 図に示す。

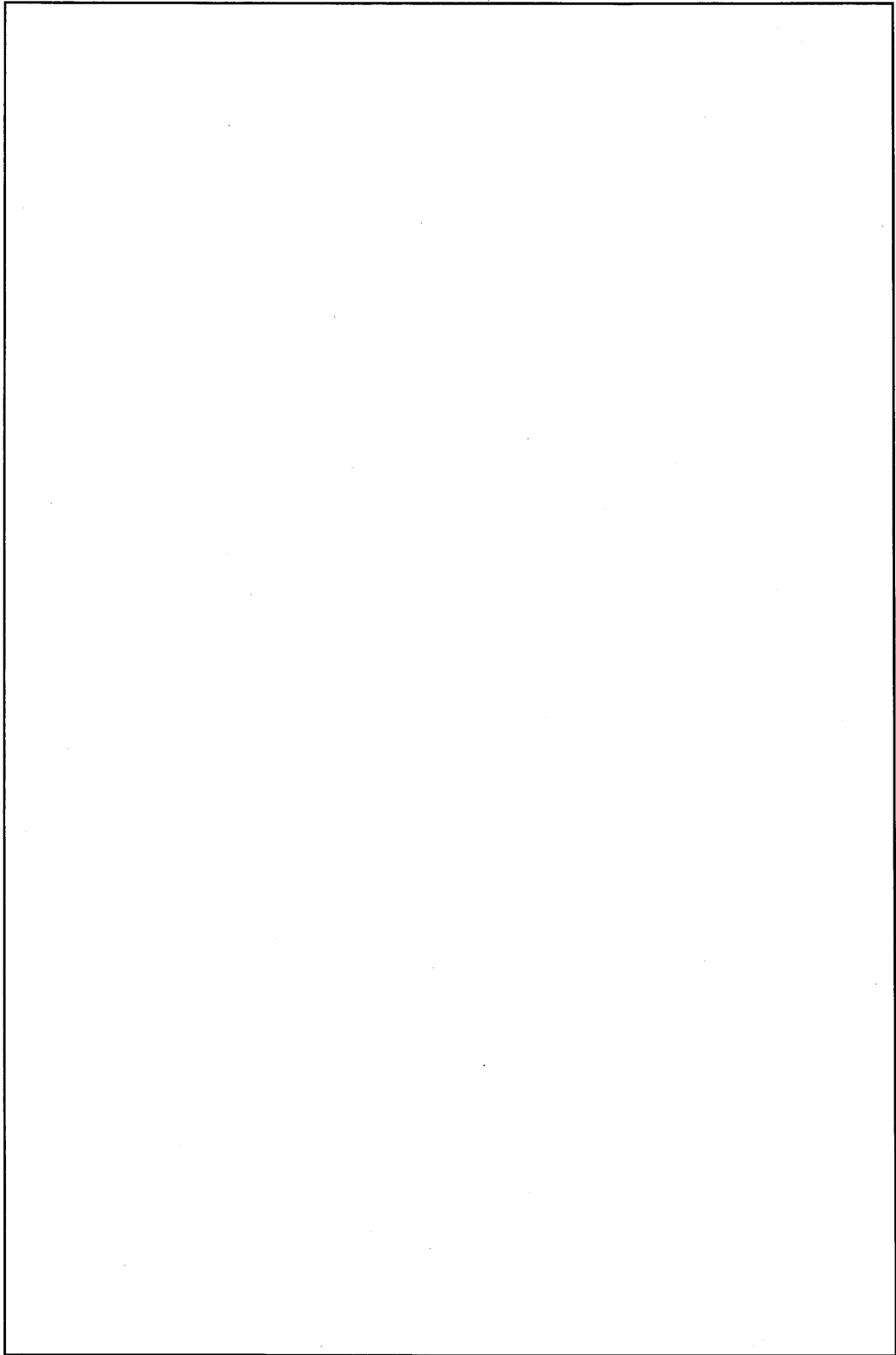
なお、密封境界の蓋 O リングの最高温度は 213℃、ベント・水位調整バルブ O リングは 222℃、ドレンバルブ O リングは 202℃、水位調整用加圧バルブ O リングは 221℃ となり、特別の試験条件下における使用可能温度 260℃を超えることはない。

(ロ)-第 B. 27 表 特別の試験条件下の最高温度

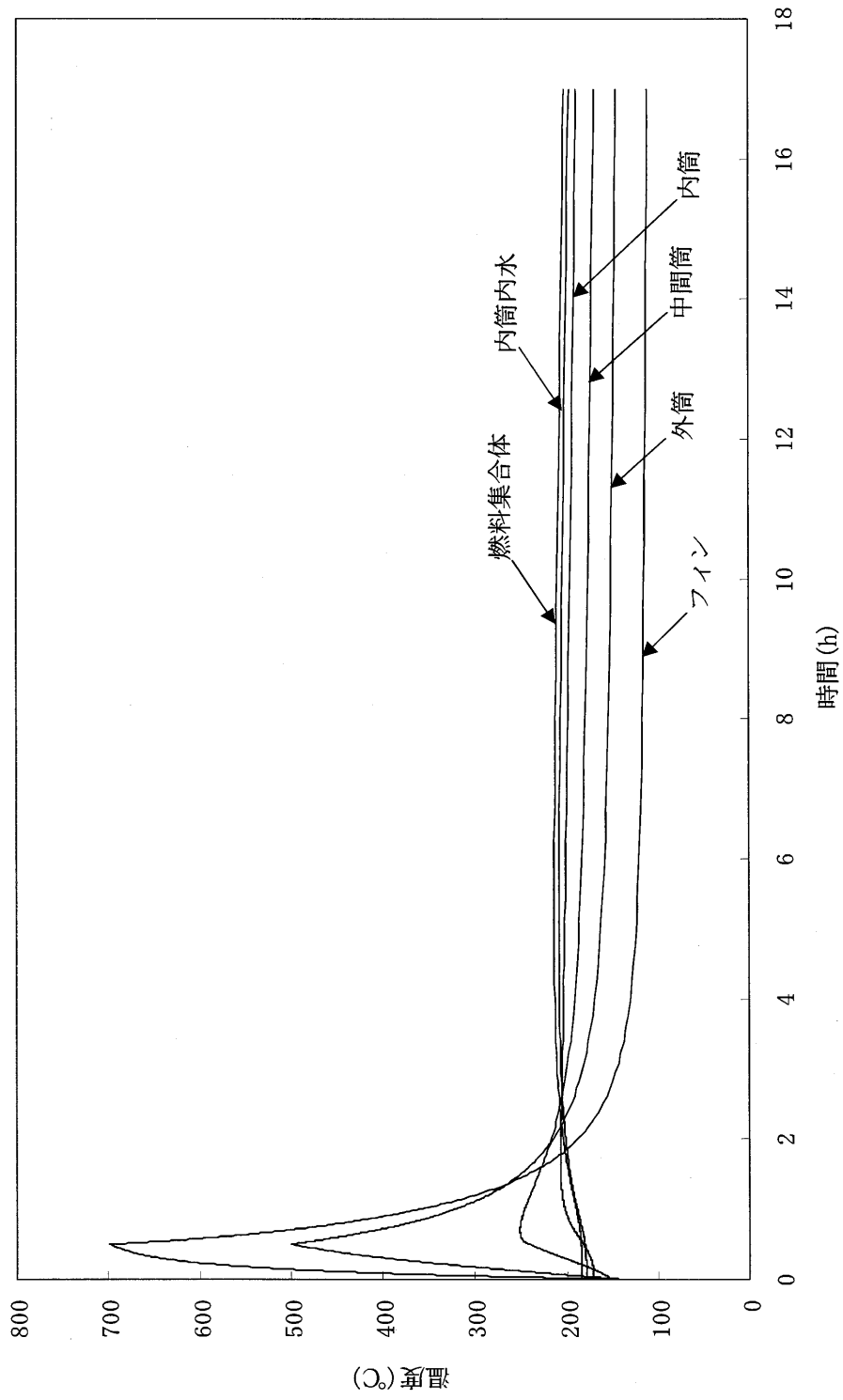
部 位 \ 条 件	特 別	
	温度(°C)	火災発生後の時間(h)
緩衝体表面	772	0.5
フィン先端	699	0.5
外筒	501	0.5
仕切板	596	0.5
レンジン	357	0.6
中間筒	252	0.7
フランジ	431	0.5
鉛	224	1.1
底板	398	0.5
内筒	207	1.6
内筒内水 (平均)	209	4.8
バスケット	212	5.1
燃料集合体	214	5.1
蓋	375	0.5
蓋 O リング	213	1.3
ベント・水位調整 バルブ O リング	222	0.8
ドレンバルブ O リング	202	1.9
水位調整用加圧 バルブ O リング	221	0.7
蓋 ボ ル ト	253	0.6



(ロ)-第 B.13 図 特別の試験条件下の輪切り半ピッチモデルの温度分布(火災発生 30 分後)



(ロ)-第 B.14 図 特別の試験条件下の全体モデルの温度分布(火災発生 30 分後)



(ロ)-第B.15図 特別の試験条件下の時刻歴温度変化

B.5.4 最大内圧

輸送物の熱解析から、特別の試験条件下において輸送容器内筒内の圧力は、内筒内水の温度が最高になる火災発生後 4.8 時間の時に最大になる。

以下、この条件における内筒内の圧力の計算を行う。

なお、放射線分解により発生する気体による圧力上昇は小さく、本圧力計算では無視する。

また、(ロ)章 A.6 に述べたように燃料棒は特別の試験条件下において破損しないので、燃料棒からの放射性ガスの放出による圧力上昇はない。

水位調整時の諸条件は、一般の試験条件で示した(ロ)-第 B.24 表と同様である。

また、特別の試験条件後の内筒内圧は、(ロ)章 B.4.4 と同様に、(1)から(6)式を用いて求められる。

特別の試験条件における輸送物の内筒内圧の計算結果を(ロ)-第 B.28 表に示す。なお、蓋取付け時の周囲温度が仮に -20°C であった場合には空気の密度は大きくなるため、内筒内圧は約 10%増加する可能性がある。ただし、温度上昇による内筒の熱膨張を考慮した内筒内の空間容積を本圧力計算へ適用すると、内筒内圧は 3.84MPa abs となることから、(ロ)-第 B.28 表に示した内筒内圧の方が保守的な値となる。このため、構造評価は(ロ)-第 B.28 表に示した内筒内圧を包絡する圧力で評価している。また、Oリングの最大使用可能圧力は 6.9MPa であり、内筒内圧が使用可能範囲を超えることはない。

(口)-第 B. 28 表 特別の試験条件下の内筒内圧

項 目	記 号	単 位	式	計 算 値
内筒内の空間容積	V	m ³	-	
燃料集合体の体積	Vf	m ³	-	
燃料装荷時の内筒内空間容積	Vc	m ³	(1)	
内筒内水体積	Vw	m ³	-	
水抜後空气体積	Va	m ³	(2)	
内筒内水平均温度	t ₁	°C	-	209
20°Cにおける水の密度	ρ ₂₀	kg/m ³	-	998.3
温度 t ₁ における水の密度	ρ _{t₁}	kg/m ³	-	854.0
温度 t ₁ における内筒内水体積	Vwt ₁	m ³	(3)	
温度 t ₁ における内筒内空气体積	Vat ₁	m ³	(4)	
温度 t ₁ における空気分圧	P ₁	MPa abs	(5)	3.198
温度 t ₁ における飽和蒸気圧	P _s	MPa abs	-	1.870
内筒内圧	P	MPa abs	(6)	5.07 (4.97MPaG)

B. 5.5 最大熱応力

特別の試験条件下における輸送物各部の温度分布は(ロ)章 B. 5. 3 に記載したとおりである。特別の試験条件下において輸送物に生じる熱応力については、(ロ)章 A. 6. 3 で説明したように容器本体各部位が熱膨張を拘束しあって生じ、温度差が最大になる火災発生 30 分後の時に最大熱応力が生じる。

最大熱応力は(ロ)章 A. 6. 3 に示すようにいずれも評価基準を下回る。

B. 5.6 結果の要約及びその評価

特別の試験条件下における輸送物の性能評価は、崩壊熱量が 54kW、周囲温度 38℃の環境条件下で 800℃の熱環境に 30 分間さらされるとして行った。この場合の輸送物各部の温度変化は、(ロ)-第 B. 15 図に示すとおりである。

輸送物各部について最高温度と火災発生時からの時間をまとめると、(ロ)-第 B. 27 表に示すとおりである。また、輸送容器内部の最大圧力は(ロ)-第 B. 28 表に示したように 6. 9MPa を超えることはない。ふっ素ゴム製 O リングの温度は(ロ)-第 B. 27 表に示したように(ロ)章 B. 3 に記載した使用可能温度 260℃を超えることはない。ふっ素ゴム製 O リングは 260℃に耐えられ、最大使用可能圧力は 6. 9MPa であることから、特別の試験条件下で密封性能が損なわれることはない。

レジンは、その最高温度が 357℃であり、使用可能温度 170℃を超えるがこれによりレジンが全て失われることはない。遮蔽解析ではレジンの密度減少を考慮する。

(レジンの焼損については、(ロ)章 D. 6. 1 に示す。)

鉛は、その最高温度が 224℃であり、融点 327. 5℃を超えることはなく、遮蔽能力が低下することはない。その他の構成材料については、悪影響を及ぼす温度にはならない。

臨界解析においては、外筒までをモデル化し、レジン は 全て 喪失 すると すること に より、これらの中性子の吸収効果を見ない、安全側の解析を行っている。

なお、特別の試験条件に対する構造解析においては、(ロ)-第 B. 27 表に示す温度及び(ロ)-第 B. 28 表に示す圧力に余裕をとった圧力条件で解析を行っており、特別の試験条件下の熱的試験において輸送物が健全性を維持していることを示している((ロ)章 A. 6. 3 参照)。

特別の試験条件下における輸送物の総合的評価を(ロ)-第 B. 29 表に示す。

(ロ)-第 B. 29 表 特別の試験条件下の輸送物の総合的評価

項 目	基 準 値	結 果	評 価	他解析への条件
最高温度				
燃料集合体	-	214℃	基準値以下 ^{注1)}	-
中性子遮蔽体(レジン)	170℃	357℃	基準値を超えるため、損傷を考慮した安全評価を実施	遮蔽解析で密度減少考慮、 臨界解析で無視
ガンマ線遮蔽体(鉛)	融点 327.5℃	224℃	基準値以下	-
Oリング	260℃	222℃	基準値以下	-
外筒	-	501℃	基準値以下 ^{注1)}	510℃
中間筒	-	252℃	基準値以下 ^{注1)}	260℃
内筒	-	207℃	基準値以下 ^{注1)}	210℃
最大内圧				
Oリング	6.9MPa	5.07MPa abs (4.97MPaG)	基準値以下	構造解析では安全側に 5.20MPaG を使用

注1) (ロ)章 A. 6 に示す応力評価において、生じる応力が当該温度における解析基準値を満足することを確認。

B.6 付属書類

B.6.1 解析に用いた対流熱伝達率及び熱放射係数

B.6.1.1 輪切り半ピッチモデルに用いた熱伝達率及び熱放射係数

1. 燃料集合体とバスケットチャンネル壁間の熱伝達率

均質化燃料集合体とバスケットチャンネル壁間の熱伝達率は、次の Wooton の式¹³⁾を用いる。

$$h = 0.4 \frac{\lambda}{D} \left(\frac{g \beta D^3}{\nu^2} \cdot Pr \cdot \Delta t \right)^{1/4}$$

ただし、

- h : 熱伝達率 (W/(m²·K))
- λ : 熱伝導率 (W/(m·K))
- D : バスケットチャンネル内側壁長さ (m)
- g : 重力加速度 (9.8m/s²)
- β : 体積膨張係数 (K⁻¹)
- ν : 動粘性係数 (m²/s)
- Pr : プラントル数 (-)
- Δt : 温度差 (K)

上式より求めた均質化燃料集合体とバスケットチャンネル壁間の各温度に対する熱伝達率を(ロ)-第 B. 付 1 表に示す。

(ロ)-第 B. 付 1 表 均質化燃料集合体とバスケットチャンネル壁間の熱伝達率

温 度 (°C)	熱 伝 達 率 (W/(m ² ·K))
0	Δ t ^{0.25}
20	Δ t ^{0.25}
100	Δ t ^{0.25}
200	Δ t ^{0.25}
300	Δ t ^{0.25}

2. バスケット及び内筒内面と内筒内水及び気相部の熱伝達率

(1) バスケット及び内筒内面と内筒内水間の熱伝達率

バスケット及び内筒内面と内筒内水間の熱伝達率は、McAdams の自然対流熱伝達式¹⁴⁾を用いる。

$$\text{垂直面} \quad h = 0.13 \lambda \left(\frac{g \beta}{\nu^2} \cdot \text{Pr} \cdot \Delta t \right)^{1/3}$$

$$\begin{array}{l} \text{加熱水平上面} \\ \text{冷却水平下面} \end{array} \quad h = 0.14 \lambda \left(\frac{g \beta}{\nu^2} \cdot \text{Pr} \cdot \Delta t \right)^{1/3}$$


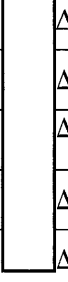
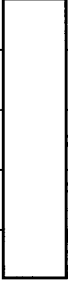












$$\begin{array}{l} \text{加熱水平下面} \\ \text{冷却水平上面} \end{array} \quad h = 0.27 \frac{\lambda}{L} \left(\frac{g \beta L^3}{\nu^2} \cdot \text{Pr} \cdot \Delta t \right)^{1/4}$$

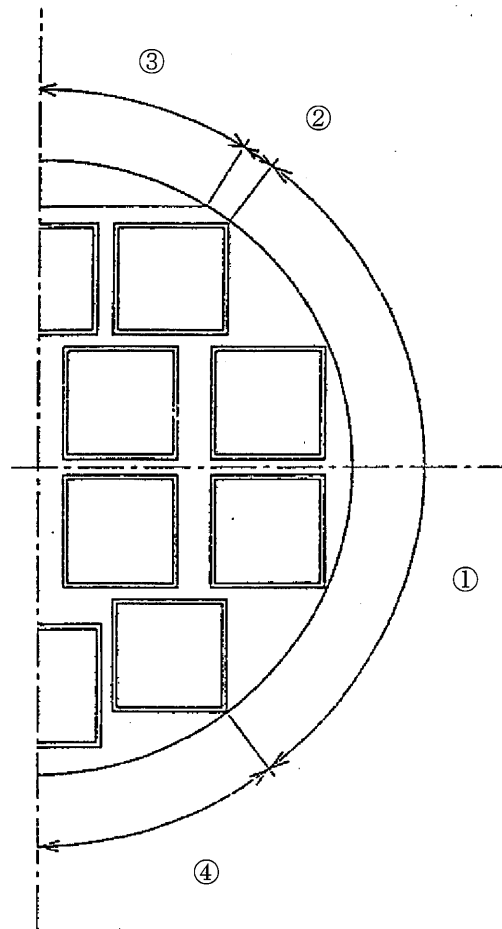
ただし、

- h : 熱伝達率 (W/(m²·K))
- λ : 熱伝導率 (W/(m·K))
- g : 重力加速度 (9.8m/s²)
- β : 体積膨張係数 (K⁻¹)
- ν : 動粘性係数 (m²/s)
- Pr : プラントル数 (-)
- L : 面長さ (m : チャンネル幅)
- Δt : 温度差 (K)

内筒内面に対する上式の適用部位は、(ロ)-第 B. 付 1 図に示す①及び②である。上式より求められるバスケット及び内筒内面と内筒内水間の熱伝達率は (ロ)-第 B. 付 2 表に示すとおりである。

(ロ)-第 B. 付 2 表 バスケット及び内筒内面と内筒内水間の熱伝達率

温度(°C)	熱 伝 達 率 (W/(m ² ·K))		
	垂 直 面	加熱水平上面 冷却水平下面	加熱水平下面 冷却水平上面
0	 $\Delta t^{0.333}$	 $\Delta t^{0.333}$	 $\times \Delta t^{0.25}$
20	 $t^{0.333}$	 $\Delta t^{0.333}$	 $\times \Delta t^{0.25}$
100	 $t^{0.333}$	 $\Delta t^{0.333}$	 $\times \Delta t^{0.25}$
200	 $t^{0.333}$	 $\Delta t^{0.333}$	 $\times \Delta t^{0.25}$
300	 $t^{0.333}$	 $\Delta t^{0.333}$	 $\times \Delta t^{0.25}$



- ① 垂直面
- ② 冷却水平下面
- ③ 気相部
- ④ 内筒内面下部

(ロ)-第 B. 付 1 図 内筒内面の熱伝達式の適用部位

(2) 気相部における凝縮熱伝達率

(ロ)-第 B. 付 1 図に示す③気相部において、気相部の蒸気が凝縮する場合の膜状凝縮熱伝達率は、空気(不凝縮ガス)の混合の影響を考慮して次式²⁾で与えられる。

$$h = \frac{\lambda}{L} \left(0.78 \frac{\text{Gal} \cdot \text{Pr}}{H} \right)^{1/4} \exp(-5.4W_{g\infty})$$

ただし、

h : 熱伝達率 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)

λ : 熱伝導率 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)

L : 伝熱面高さ (m)

Gal : ガリレイ数 (-)

Pr : プラントル数 (-)

H : 顕潜熱比 (-)

$W_{g\infty}$: 空気の質量濃度 (-)

ここで、

$$\text{Gal} = L^3 g / \nu^2$$

$$H = C_p \Delta t / \gamma$$

$$W_{g\infty} = \frac{P_a \cdot M_a}{P_v \cdot M_v + P_a \cdot M_a}$$

g : 重力加速度 ($9.8 \text{m}/\text{s}^2$)

ν : 動粘性係数 (m^2/s)

C_p : 定圧比熱 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)

Δt : 温度差 (K)

γ : 潜熱 (J/kg)

P_a : 空気分圧 (MPa)

M_a : 空気の分子量 ($29.0 \text{g}/\text{mol}$)

P_v : 蒸気分圧 (MPa)

M_v : 蒸気の分子量 ($18.0 \text{g}/\text{mol}$)

今、分圧として一般の試験条件における圧力 ($P_a = 0.516 \text{MPa}$ 、 $P_v = 0.980 \text{MPa}$) を用いて、各温度に対して求めた熱伝達率を(ロ)-第 B. 付 3 表に示す。

なお、最低温度評価条件に対しては、内筒内水温度が低く蒸気圧が零に近いので、凝縮熱伝達が生じず断熱とする。

(ロ)-第 B. 付 3 表 気相部での凝縮熱伝達率

温 度(°C)	熱 伝 達 率(W/(m ² ·K))
100	<input type="text"/> $\Delta t^{-0.25}$
200	<input type="text"/> $\Delta t^{-0.25}$

(3) 内筒内面下部における熱伝達率

(ロ)-第 B. 付 1 図に示す④内筒内面下部に対しては次式で表される水の熱伝導に相当する熱伝達率を与える。

$$h = \frac{\lambda}{L}$$

ただし、

h : 熱伝達率(W/(m²·K))

λ : 熱伝導率(W/(m·K))

L : (m)

上式より求められる④内筒内面下部における熱伝達率は(ロ)-第 B. 付 4 表に示すとおりである。

(ロ)-第 B. 付 4 表 内筒内面下部での熱伝達率

温 度(°C)	熱 伝 達 率(W/(m ² ·K))
20	<input type="text"/>
100	
200	
300	

なお、最低温度評価条件に対しては、内筒内水温度を安全側に低く評価するため(1)に示す冷却水平上面に対する自然対流熱伝達率を与える。

3. [Redacted]

[Redacted]

[Redacted] 15) [Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

4. 外筒表面の対流熱伝達率

外筒表面の自然対流熱伝達率は、水平円筒表面の自然対流熱伝達率を表す次の Schutz の式²⁾を用いる。

$$h = 0.1 \lambda \left(\frac{g \beta}{\nu^2} \cdot Pr \cdot \Delta t \right)^{1/3}$$

ただし、

- h : 熱伝達率 (W/(m²·K))
- λ : 熱伝導率 (W/(m·K))
- g : 重力加速度 (9.8m/s²)
- β : 体積膨張係数 (K⁻¹)
- ν : 動粘性係数 (m²/s)
- Pr : プラントル数 (-)
- Δt : 温度差 (K)

各温度に対して求めた熱伝達率を(ロ)-第 B. 付 5 表に示す。

(ロ)-第 B. 付 5 表 円筒外表面の自然対流熱伝達率

温 度 (°C)	熱 伝 達 率 (W/(m ² ·K))
-20	Δt ^{0.333}
0	Δt ^{0.333}
20	Δt ^{0.333}
100	Δt ^{0.333}
200	Δt ^{0.333}
300	Δt ^{0.333}
400	Δt ^{0.333}
600	Δt ^{0.333}
800	Δt ^{0.333}

ここで、実際に解析に用いた熱伝達率としては、(口)-第 B. 付 2 図に示される水平円管外面の周方向分布を考慮した。外筒表面の熱伝達率としては、その係数を(口)-第 B. 付 5 表の値に乗じた値を与えて周方向に変化させた。

ただし、火災時に対しては、上部側の入熱も多くなるよう分布を考慮せず周方向に一樣とした。また、最低温度評価に対しても同様である。

5. フィン表面の対流熱伝達率

フィン表面の熱伝達率は、垂直平板に対する次の Jakob の式¹⁶⁾を用いる。

$$h=0.129 \lambda \left(\frac{g \beta}{\nu^2} \cdot \text{Pr} \cdot \Delta t \right)^{1/3}$$

ただし、

h : 熱伝達率 (W/(m²・K))

λ : 熱伝導率 (W/(m・K))

g : 重力加速度 (9.8m/s²)

β : 体積膨張係数 (K⁻¹)

ν : 動粘性係数 (m²/s)

Pr : プラントル数 (-)

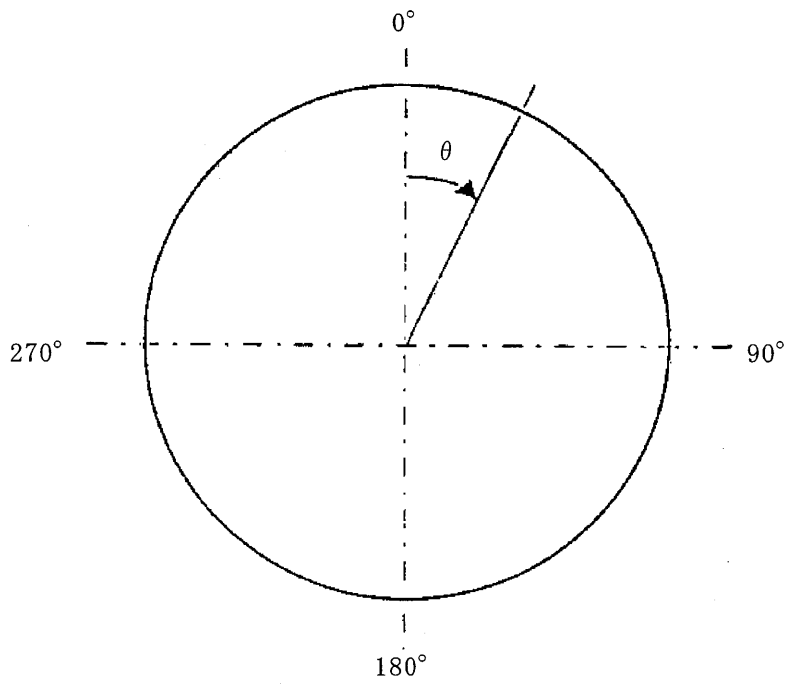
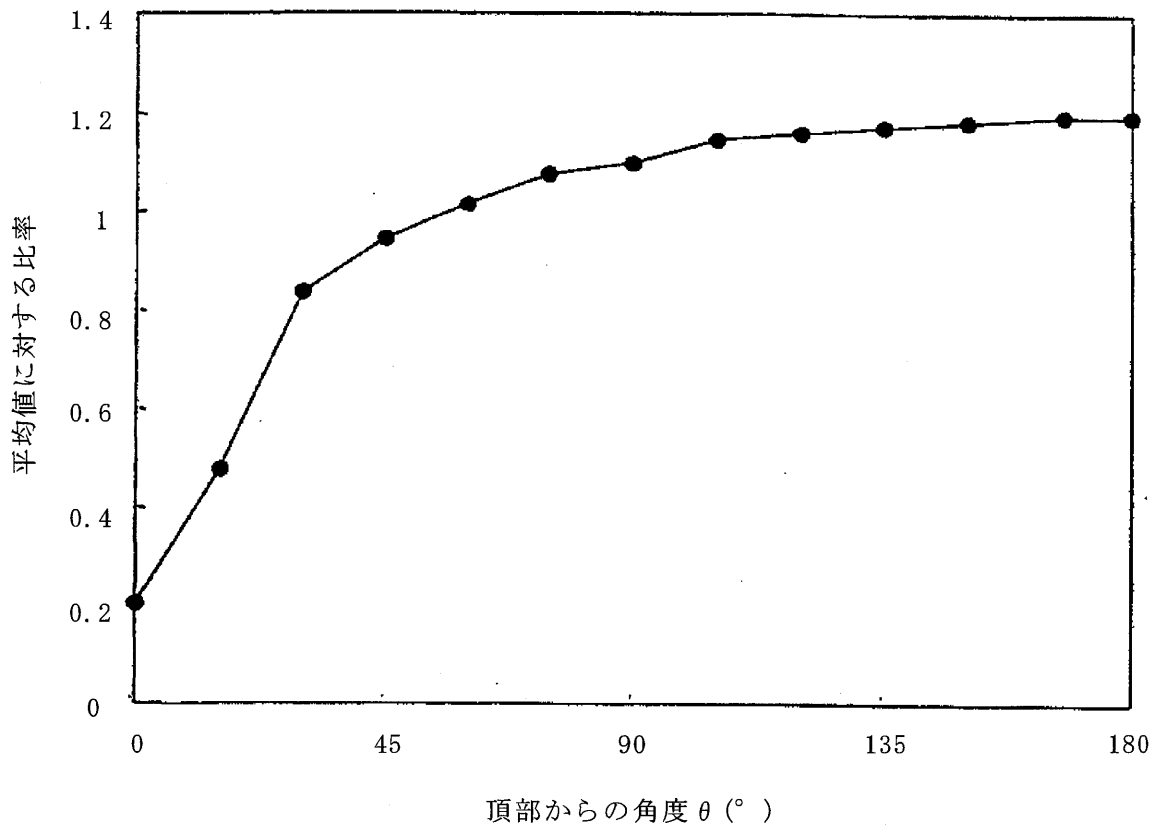
Δ t : 温度差 (K)

各温度に対して求めた熱伝達率を(ロ)-第 B. 付 6 表に示す。

ここで、実際に解析に用いた熱伝達率としては、前項の外筒表面の熱伝達率と同様に、火災時及び最低温度評価条件を除き、(ロ)-第 B. 付 2 図に示す周方向分布を考慮した。

(口)-第 B. 付 6 表 垂直面の自然対流熱伝達率

温 度 (°C)	熱 伝 達 率 (W/(m ² ·K))
-20	$\Delta t^{0.333}$
0	$\Delta t^{0.333}$
20	$\Delta t^{0.333}$
100	$\Delta t^{0.333}$
200	$\Delta t^{0.333}$
300	$\Delta t^{0.333}$
400	$\Delta t^{0.333}$
600	$\Delta t^{0.333}$
800	$\Delta t^{0.333}$



(口)-第 B. 付 2 図 外表面における自然対流熱伝達率の周方向分布²⁾

6. フィン部の放射係数と太陽放射熱量

フィン部の形状を(ロ)-第 B. 付 3 図に示すが、外筒表面及びフィン側面での放射係数は各面間の熱収支・形態係数を含めた式で表現される。それらの式について以下に示す。

(1) n 面に関するエネルギーバランス

(ロ)-第 B. 付 4 図に示す n 面でのエネルギーバランスは以下の式で示される。

$$q_n = q_{on} - q_{jn} \quad (1)$$

$$q_{on} = \varepsilon_n \times q_{BLn} + (1 - \varepsilon_n) \times q_{jn} \quad (2)$$

(1) 及び (2) 式より q_{jn} を消去し、

$$q_n = [\varepsilon_n / (1 - \varepsilon_n)] \times (q_{BLn} - q_{on})$$

となり、

$$q_{on} = q_{BLn} - [(1 - \varepsilon_n) / \varepsilon_n] \times q_n \quad (3)$$

となる。

ここで、

q_n : n 面に放射以外で供給される熱流束

q_{on} : n 面より外部に放出される放射熱流束

q_{jn} : n 面に外部より入射する放射熱流束

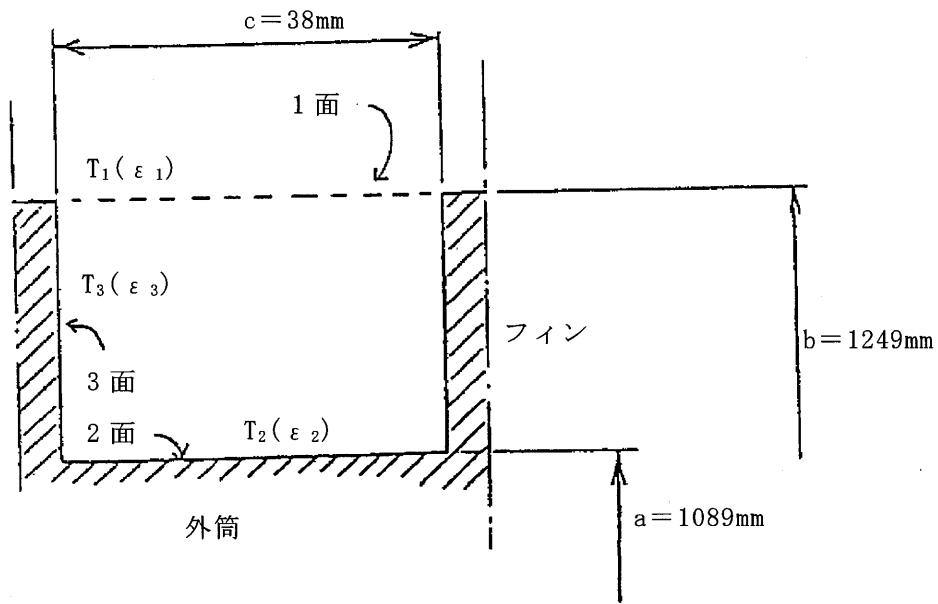
q_{BLn} : n 面より放射する自己放射熱流束 ($\delta \times T_n^4$)

ε_n : n 面の放射率 (= 吸収率)

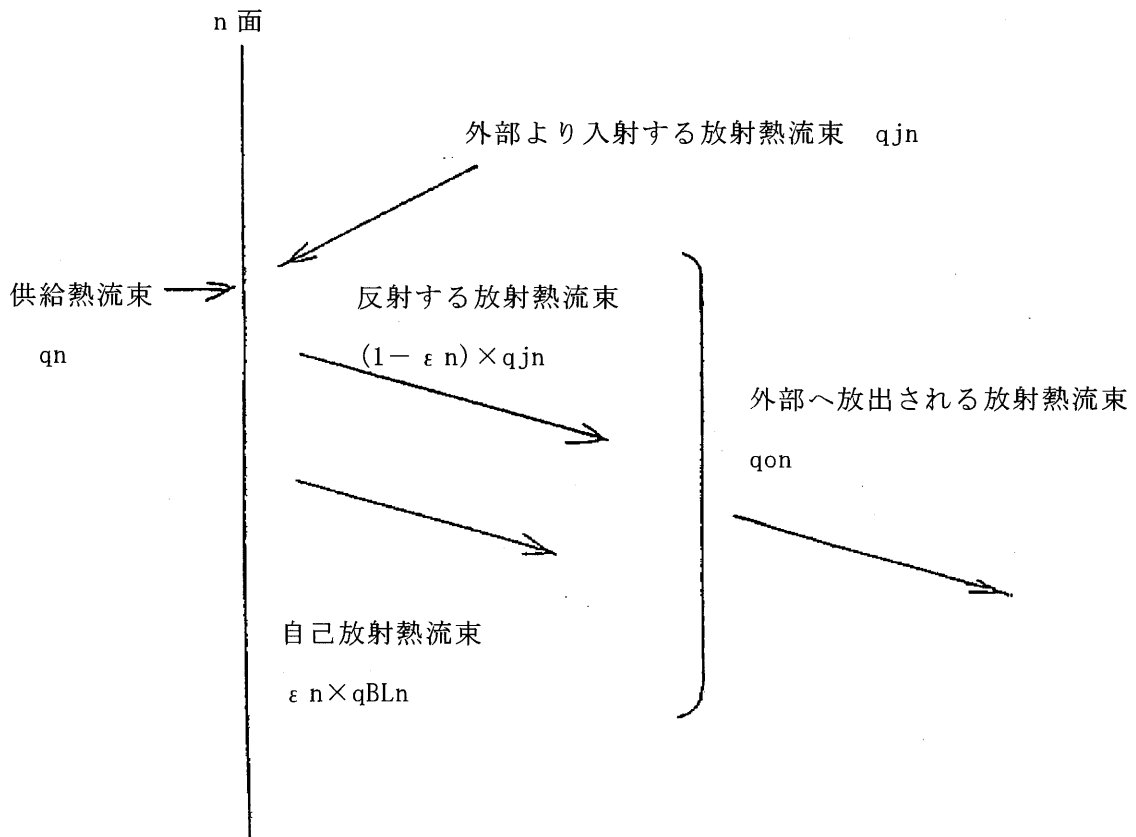
T_n : n 面の温度

δ : ステファン・ボルツマン定数

である。



(口)-第 B. 付 3 図 フィン形状



(口)-第 B. 付 4 図 n 面での放射

(2) 形態係数に関する式

M個の面よりなる閉空間においては、以下の式が成立する。

$$\begin{cases} A_n \times F_{nk} = A_k \times F_{kn} & (4) \\ \sum_n F_{kn} = 1.0 & (5) \end{cases}$$

$$n=1, 2, 3, \dots, M$$

ここで、

A_n : n面の面積

F_{kn} : k面よりn面への形態係数

である。

(ロ)-第 B. 付 3 図に示すような形状の形態係数として、Handbook of Heat Transfer¹⁷⁾に以下の式が示されている。

$$F_{12} = \frac{1}{X} - \frac{1}{\pi X} \left[\cos^{-1} \frac{B}{A} - \frac{1}{2Y} \left\{ \sqrt{(A+2)^2 - (2X)^2} \cos^{-1} \left[\frac{B}{XA} \right] + B \sin^{-1} \left[\frac{1}{X} \right] - \frac{\pi A}{2} \right\} \right] \quad (6)$$

$$F_{11} = 1 - \frac{1}{X} + \frac{2}{\pi X} \tan^{-1} \left[\frac{2\sqrt{X^2-1}}{Y} \right] - \frac{Y}{2\pi X} \left[\frac{\sqrt{4X^2+Y^2}}{Y} \sin^{-1} \left\{ \frac{4(X^2-1) + (Y^2/X^2)(X^2-2)}{Y^2+4(X^2-1)} \right\} - \sin^{-1} \left[\frac{X^2-2}{X^2} \right] + \frac{\pi}{2} \left[\frac{\sqrt{4X^2+Y^2}}{Y} - 1 \right] \right] \quad (7)$$

$$F_{13} = 1 - F_{12} - F_{11} \quad (8)$$

ここで、

$$X = b/a$$

$$Y = c/a$$

$$A = X^2 + Y^2 - 1$$

$$B = Y^2 - X^2 + 1$$

(3) 閉空間の灰色面間の熱伝達

k面よりn面に入る放射熱流束を q_{ikn} とすれば、

$$A_n \times q_{ikn} = A_k \times q_{ok} \times F_{kn} \quad (9)$$

が成り立ち、各面からn面に入る総熱量は、

$$A_n \times q_{jn} = \sum_k A_n \times q_{ikn} = \sum_k A_k \times q_{ok} \times F_{kn} \quad (10)$$

となり(4)式より、

(11)

また、(1)式より、

(12)

となる。

(3)式と(12)式を3面よりなる閉空間の場合に適用すると、

(13)

(14)

(15)

となる。ただし、本体外筒表面は凸面であるため、

$$F_{22} = 0$$

である。また、(13)から(15)式から q_2 , q_3 を求めると、

(16)

(17)

の形となる。ここで、

(18)

(19)

(20)

(21)

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

また、ステファン・ボルツマンの法則より、

$$qBLn = \delta \times Tn^4 \tag{22}$$

となるので、(16)、(17)式より、

[Redacted] (23)

[Redacted] (24)

となる。

一般の試験条件では T_2 と T_3 はほぼ等しいと考えられるため外筒表面及びフィン側面での修正放射係数 σ' はそれぞれ以下のとおり、

本体外筒表面 :

フィン側面 :

したがって、一般の試験条件において外筒表面、フィン側面での修正放射係数 σ' は以下のようになる。

$$F_{11} = \text{, } F_{12} = \text{, } F_{13} = \text{$$

$$\varepsilon_1 = 1.0, \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \text{} \text{より、}$$

$$f_2 = \text{$$

$$f_3 = \text{$$

$$\text{外筒表面 : } \sigma_2' = \text{$$

$$= \text{} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$$

$$\text{フィン側面 : } \sigma_3' = \text{$$

$$= \text{} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$$

一方、特別の試験条件では T_2 と T_3 が等しいとは考えられないため、外筒表面とフィン間に (23)、(24) 式の放射熱伝達を考慮して解析を行った。

(4) 太陽放射熱量

外筒表面及びフィン側面への太陽放射熱は(ロ)-第 B. 付 3 図に示す 1 面を通過する熱量を (6) 及び (8) 式に示される形態係数を用いて以下のように振り分けられる。

ただし、

q_{s2} 、 q_{s3} : 2, 3 面への太陽放射熱量

S_1 、 S_2 、 S_3 : 1, 2, 3 面の表面積

Q_s : その他の表面(曲面)への放射熱量

ϵ_2 、 ϵ_3 : 2, 3 面の吸収率

ここで、

$$S_1 = 2\pi \times 1249 \times 38 = 2.982 \times 10^5 \text{ mm}^2$$

$$S_2 = 2\pi \times 1089 \times 38 = 2.600 \times 10^5 \text{ mm}^2$$

$$S_3 = \pi \times (1249^2 - 1089^2) \times 2 = 2.350 \times 10^6 \text{ mm}^2$$

$$Q_s = 400 \text{ W/m}^2$$

したがって、一般の試験条件において太陽放射熱量は以下のようなになる。

$$\epsilon_2 = \epsilon_3 = \boxed{}$$

$$F_{12} = \boxed{}$$

$$F_{13} = \boxed{}$$

$$q_{s2} = \boxed{} \text{ W/m}^2$$

$$q_{s3} = \boxed{} \text{ W/m}^2$$

特別の試験条件における太陽放射熱量は、 $\epsilon_2 = \epsilon_3 = \boxed{}$ として同様に求められる。

B. 6. 1. 2 全体モデルに用いた熱伝達率及び熱放射係数

1. 燃料-バスケット均質部と内筒内面間の熱伝達率

燃料-バスケット均質部と内筒内面間の熱伝達率は、次の水平同心円筒間の熱伝達式²⁾を用いる。

$$h = 0.20 \frac{\lambda}{D} \left\{ \frac{\sqrt{r_2/r_1}}{(r_2/r_1) - 1} \text{Ln} \frac{r_2}{r_1} \right\}^{3/4} \left(\frac{g \beta D^3}{\nu^2} \cdot \text{Pr} \cdot \Delta t \right)^{1/4}$$

ただし、

- h : 熱伝達率 (W/(m²·K))
- λ : 熱伝導率 (W/(m·K))
- D : 水層厚さ (m)
- r₁ : 燃料-バスケット均質部半径 (m)
- r₂ : 内筒内半径 (m)
- g : 重力加速度 (9.8m/s²)
- β : 体積膨張係数 (K⁻¹)
- ν : 動粘性係数 (m²/s)
- Pr : プラントル数 (-)
- Δt : 温度差 (K)

上式より求めた熱伝達率を(ロ)-第 B. 付 7 表に示す。全体モデルでは、気相部及び内筒内水領域の両方をモデル化できないので 3. に示す補正を行う。

(ロ)-第 B. 付 7 表 燃料-バスケット均質部と内筒内面間の熱伝達率

温 度 (°C)	熱伝達率 (W/(m ² ·K))
0	<input type="text"/> Δt ^{0.25}
20	<input type="text"/> Δt ^{0.25}
100	<input type="text"/> Δt ^{0.25}
200	<input type="text"/> Δt ^{0.25}
300	<input type="text"/> Δt ^{0.25}

2. 燃料-バスケット均質部と蓋、底板及び の熱伝達率

燃料-バスケット均質部と蓋、底板及び の熱伝達率は、次の Emery-Chu の式²⁾を用いる。

$$h = 0.28 \lambda \left(\frac{g \beta}{\nu^2} \cdot \text{Pr} \cdot \Delta t \right)^{1/4} L^{-1/4}$$

ただし、

h : 熱伝達率 (W/(m²·K))

λ : 熱伝導率 (W/(m·K))

g : 重力加速度 (9.8m/s²)

β : 体積膨張係数 (K⁻¹)

ν : 動粘性係数 (m²/s)

Pr : プラントル数 (-)

Δt : 温度差 (K)

L : 水層長さ (m)

上式より求めた熱伝達率を(ロ)-第 B. 付 8 表に示す。全体モデルでは気相部及び内筒内水領域の両方をモデル化できないので、3. に示す補正を行う。

(ロ)-第 B. 付 8 表 燃料-バスケット均質部と蓋、底板及び の熱伝達率

温 度 (°C)	熱伝達率 (W/(m ² ·K))	
	蓋及び底板	<input type="text"/>
0	<input type="text"/> Δt ^{0.25}	<input type="text"/> Δt ^{0.25}
20	<input type="text"/> Δt ^{0.25}	<input type="text"/> Δt ^{0.25}
100	<input type="text"/> Δt ^{0.25}	<input type="text"/> Δt ^{0.25}
200	<input type="text"/> Δt ^{0.25}	<input type="text"/> Δt ^{0.25}
300	<input type="text"/> Δt ^{0.25}	<input type="text"/> Δt ^{0.25}

3. 全体モデルにおける気相部の考慮

全体モデルでは輸送容器を軸対称として扱っているため、内筒内水領域と気相部の両方をモデル化することはできない。そこで伝熱性能を輪切り半ピッチモデルと等価とするため、熱伝達率、熱容量をそれぞれ以下のとおり補正した。(ロ)-第 B. 付 5 図に参考図を示す。

(1) 側部

a. 熱伝達率

側部の周方向の温度分布は輪切り半ピッチモデルで計算され、気相部、内筒内水対流及び伝導部のそれぞれの熱伝達性能が求まっている。そこで全体モデルにおいて気相部と内筒内水領域の両方の伝熱性能を考慮するため輪切り半ピッチモデルの結果を用いて全体モデルの内筒内水対流熱伝達率を以下のように補正する。



ここで、

h' : 補正された内筒内面の熱伝達率

η : 補正係数

h : (ロ)-第 B. 付 7 表に示される熱伝達率

hw_1 : 輪切り半ピッチモデルでの内筒内水対流領域の熱伝達率

hw_2 : 輪切り半ピッチモデルでの内筒内水下部(伝導)領域の熱伝達率

h_v : 気相部の凝縮熱伝達率

Sw_1 : 内筒内水対流領域の熱伝達面積

Sw_2 : 内筒内水伝導領域の熱伝達面積

S_v : 気相部の熱伝達面積

b. 熱容量

気相部の熱容量を無視して熱容量の補正は以下に示すような方法で行った。



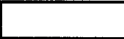
ここで、

C' : 補正された内筒内水の熱容量

C_w : 内筒内水の熱容量

V_v : 気相部の体積

V_w : 内筒内水の体積

(2) 蓋、底板及び 

a. 熱伝達率

気相部の凝縮熱伝達を考慮して次のように熱伝達率を補正した。



ここで、

h' : 補正された熱伝達率

h_v : 気相部の凝縮熱伝達率

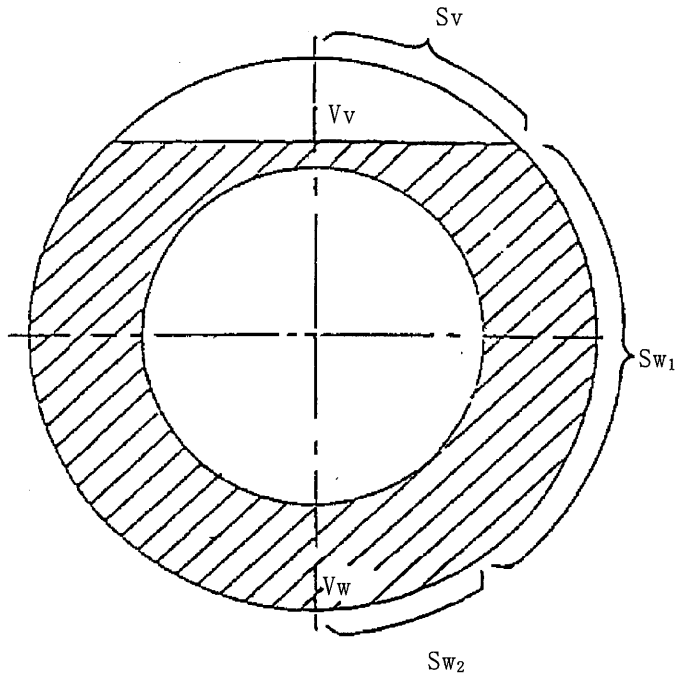
h_w : (口)-第 B. 付 8 表に示される熱伝達率

S_v : 気相部の熱伝達面積

S_w : 内筒内水領域の熱伝達面積

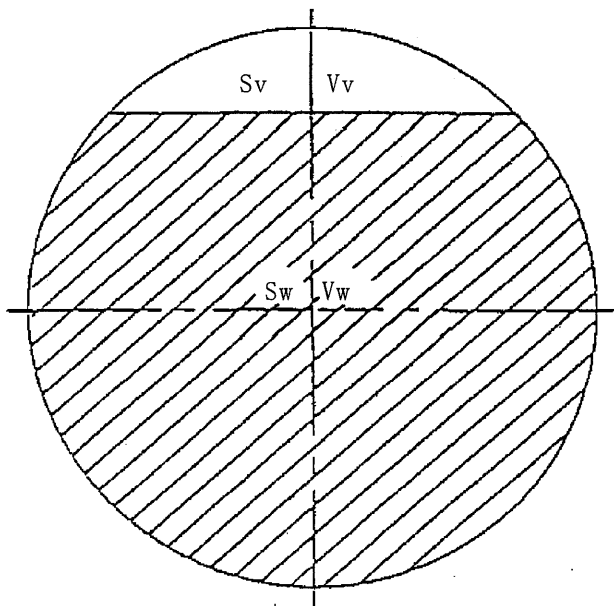
b. 熱容量

(1)b. と同じ方法で補正を行った。



- S_v : 気相部の熱伝達面積
- S_{w1} : 内筒内水対流領域の熱伝達面積
- S_{w2} : 内筒内水下部(伝導)領域の熱伝達面積
- V_v : 気相部の体積
- V_w : 内筒内水の体積

側 部



- S_v : 気相部の熱伝達面積
- S_w : 内筒内領域の熱伝達面積
- V_v : 気相部の体積
- V_w : 内筒内水の体積

蓋、底板部及び

(口)-第 B. 付 5 図 容器内熱伝達率の補正

4. 全体モデルにおけるフィンの取扱い

全体モデルにおいて、フィンモデルに含まれていないので、フィンが付く外筒表面での熱伝達は次のように補正している。

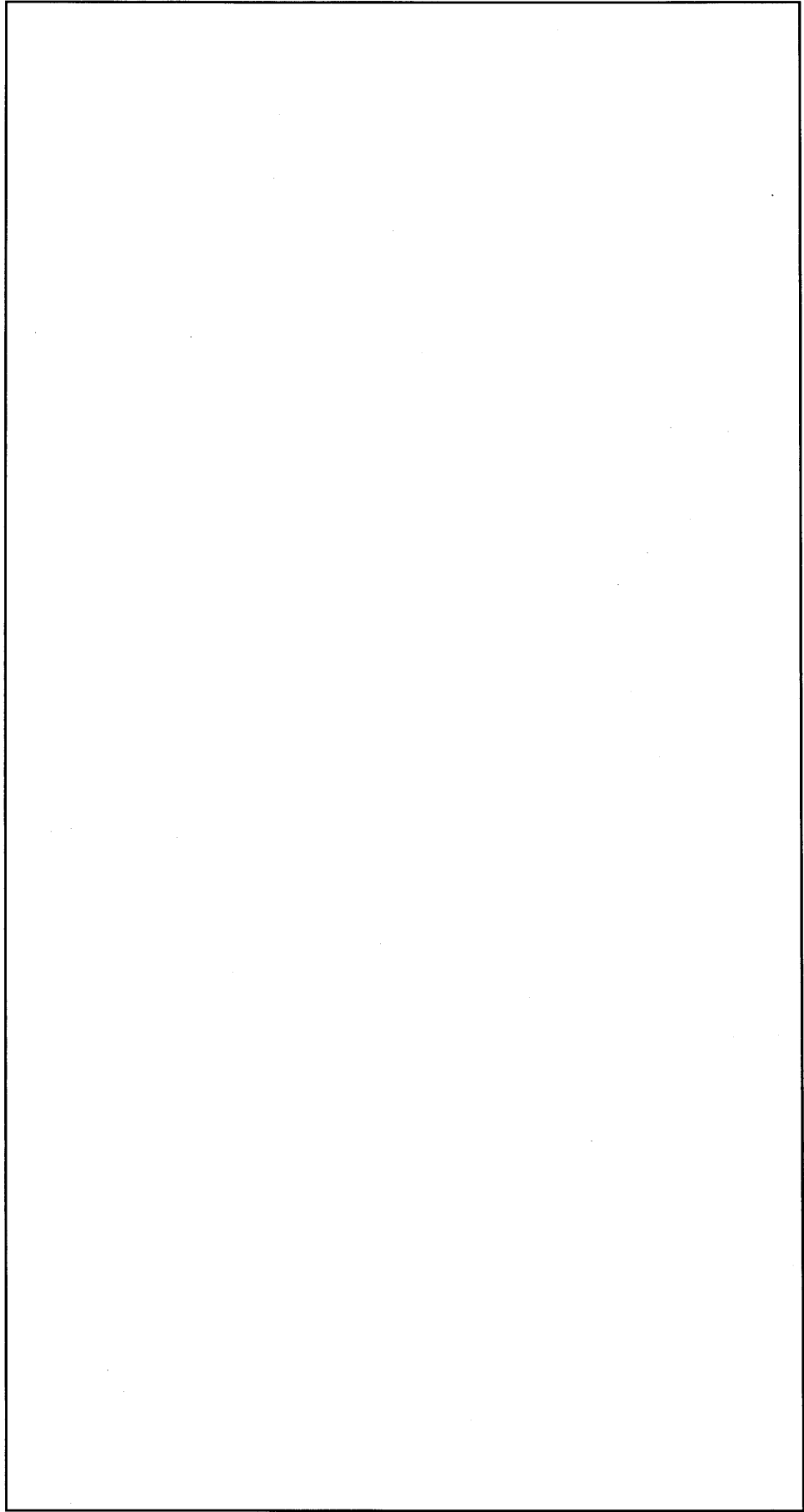
輪切り半ピッチモデルの解析結果より、フィン部を考慮した外筒表面での等価熱伝達率を求め、一般の試験条件及び火災前、火災後の放熱時に対しては安全側に上半分(270° -0° -90°)の低い等価熱伝達率を、また、火災時は全周入熱を考慮するため全周の等価熱伝達率を与えた。

求めた一般の試験条件の等価熱伝達率を(ロ)-第 B. 付 9 表に示す。

また、特別の試験条件の等価熱伝達率を(ロ)-第 B. 付 6 図に示す。

(ロ)-第 B. 付 9 表 全体モデルにおけるフィン部を考慮した外筒表面の熱伝達率

評 価 条 件		等価熱伝達率 (W/(m ² ·K))
一般の試験条件	近接表面温度 評価条件	□
	最高温度 評価条件	



(ロ)-第B.付6図 特別の試験条件下の外筒外表面の等価熱伝達率

5. フィン部を除く容器外表面と周囲の熱伝達率

(1) 円筒表面

輸送容器本体のフィン部を除く円筒表面及び緩衝体円筒表面の自然対流熱伝達率は、(ロ)-第 B. 付 5 表に示す値に、フィン部と同様に火災時を除き、(ロ)-第 B. 付 2 図の分布の上半分(270° -0° -90°)の平均比率を乗じた値を与えた。

(2) 垂直面

緩衝体垂直面の熱伝達率は(ロ)-第 B. 付 6 表に示す値を用いた。

6. フィン部を除く容器表面と周囲の放射係数と太陽放射熱
容器表面と周囲の放射係数 F_{ϵ} は次の式により求める。

$$F_{\epsilon} = \boxed{}$$

ただし、

ϵ_1 : 容器表面の放射率/吸収率

ϵ_2 : 周囲放射率/周囲吸収率

一般の試験条件では、

$\epsilon_1 = \boxed{}$ ((口)-第 B. 21 表参照)

$\epsilon_2 = 1.0$ ((口)-第 B. 21 表参照)

$$F_{\epsilon} = \boxed{}$$
$$= 0.15$$

火災中に対しては、

$\epsilon_1 = \boxed{}$ ((口)-第 B. 26 表参照)

$\epsilon_2 = 0.9$ ((口)-第 B. 26 表参照)

$$F_{\epsilon} = \boxed{}$$
$$= 0.74$$

火災後に対しては、

$\epsilon_1 = \boxed{}$ ((口)-第 B. 26 表参照)

$\epsilon_2 = 1.0$ ((口)-第 B. 26 表参照)

$$F_{\epsilon} = \boxed{}$$
$$= 0.15$$

次に、太陽放射熱 q_s は(ロ)-第 B. 22 表に示されるデータより、緩衝体垂直平面に対して容器表面の吸収率を考慮すると次のように与えられる。

$$q_{s1} = \boxed{}$$

ただし、

ε_1 : 容器表面の吸収率

Q_{s1} : 垂直に輸送される表面に対する太陽放射熱

一般の試験条件では、

$$\varepsilon_1 = \boxed{}$$

$$Q_{s1} = 200\text{W/m}^2$$

$$q_{s1} = \boxed{}$$

$$= 30\text{W/m}^2$$

火災中に対しては、

$$\varepsilon_1 = \boxed{}$$

$$Q_{s1} = \boxed{}$$

$$= 160\text{W/m}^2$$

火災後に対しては、

$$\varepsilon_1 = \boxed{}$$

$$Q_{s1} = \boxed{}$$

$$= 30\text{W/m}^2$$

容器上・下部レジンカバー表面に対しては、解析モデル化の関係上、円筒形状に近似する。容器表面の吸収率を考慮すると太陽放射熱 q_s は次のように与えられる。

$$q_{s2} = \boxed{}$$

ただし、

ε_1 : 容器表面の吸収率

Q_{s2} : その他の表面(曲面)に対する太陽放射熱

一般の試験条件では、

$$q_{s2} = \boxed{}$$

$$= 60\text{W/m}^2$$

火災中に対しては、

$$q_{s2} = \boxed{}$$

$$= 320\text{W/m}^2$$

火災後に対しては、

$$qs_2 = \boxed{}$$

$$= 60\text{W/m}^2$$

7. 緩衝体と輸送容器本体との間の熱伝達

(ロ)-第 B. 付 7 図に示すように、緩衝体と本体との間には取合いの関係上ギャップがあり、この間の熱伝達は空気の熱伝導と熱放射によるとした。

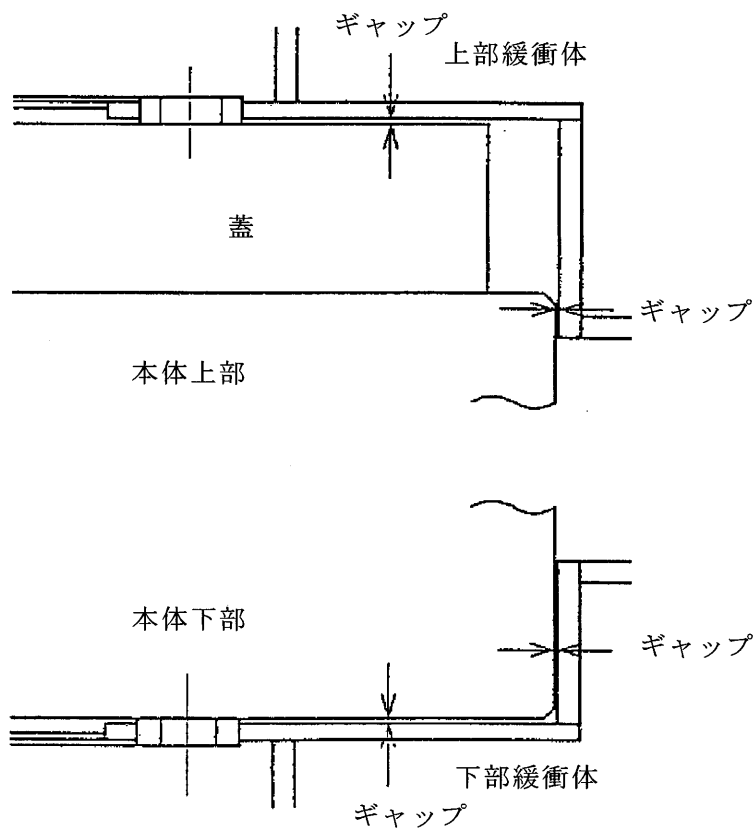
放射係数 F_ϵ は、

$$F_\epsilon = \boxed{}$$

$$= \boxed{}$$

$$= 0.0811$$

を与える。

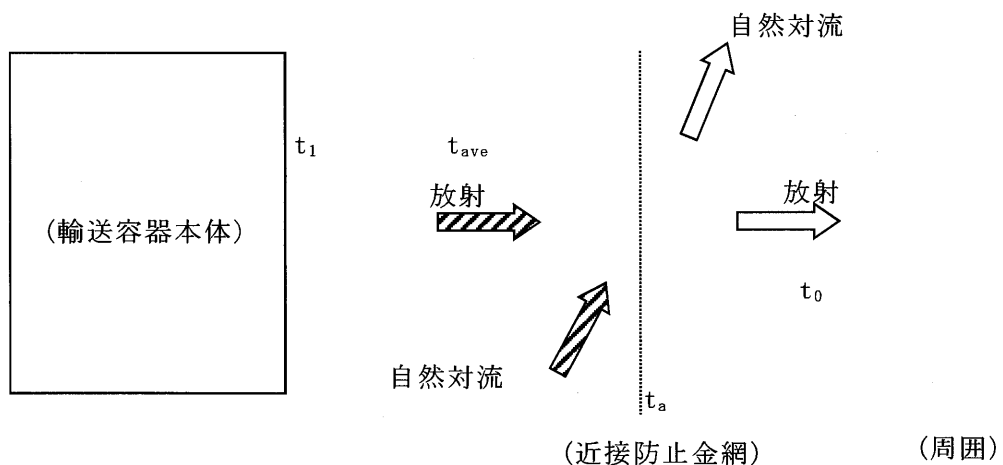


(ロ)-第 B. 付 7 図 緩衝体と容器本体のギャップ

B.6.1.3 近接防止金網の温度評価について

以下の考え方にに基づき近接防止金網の温度を評価した。((ロ)-第B.付8図参照)

- ① 近接防止金網温度に対応する規則要件は 38℃の日陰における近接可能な容器表面最高温度を 85℃以下とすることであるから、太陽熱放射を考慮しない。
- ② 近接防止金網は、当該輸送容器を架台上に設置した際に近接可能な蓋中央領域、底板中央領域及びトラニオン領域を覆うように取り付けられている。
- ③ 近接防止金網は近接可能な部位に垂直平板状に設けられているため、厚さを持たない板として考える。
- ④ 近接防止金網は輸送容器と周囲の自然対流を阻害しない形状とすることにより熱伝達を干渉しないものと仮定する。したがって、近接防止金網温度を求めるために使用する輸送容器表面の温度は、38℃の大気中において太陽熱放射を受けない条件(人が容易に近づくことができる表面の最高評価条件)で得られた結果を用いる。
- ⑤ 温度を求めるに当たっては、自然対流と放射を考慮する。自然対流熱伝達率は垂直平板の自然対流熱伝達率を用いて評価する。これらを考慮して、容器から近接防止金網への入熱量と近接防止金網から大気への放熱量が釣り合うように近接防止金網温度を定める。
- ⑥ 容器と近接防止金網間にある空気の流れの自然対流の評価において、容器と近接防止金網の間の空気の温度は近接防止金網温度と容器表面温度の平均温度とする。



(ロ)-第B.付8図 近接防止金網周りの伝熱モデル

以上より、輸送容器本体から近接防止金網への入熱量 Q_{in} 及び近接防止金網から大気への放熱量 Q_{out} は、それぞれ以下の式で表され、近接防止金網温度 t_a は、 $Q_{in} = Q_{out}$ を満たす t_a を求める。

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{in} = \boxed{\phantom{\hspace{10em}}} \\ Q_{out} = \boxed{\phantom{\hspace{10em}}} \\ F_{\epsilon} = \boxed{\phantom{\hspace{10em}}} \end{array} \right.$$

ただし、

Q_{in} : 近接防止金網への入熱量 (W/m^2)

Q_{out} : 近接防止金網から大気への放熱量 (W/m^2)

h_1 : 入熱の境界膜温度における垂直平板の自然対流熱伝達率 ($W/(m^2 \cdot K)$)
((口)-第 B. 付 10 表参照)

h_0 : 放熱の境界膜温度における垂直平板の自然対流熱伝達率 ($W/(m^2 \cdot K)$)
((口)-第 B. 付 10 表参照)

t_1 : 輸送容器外表面温度 ($153^{\circ}C$)
(輸送容器外表面温度は、安全側に、輸送容器外表面において最も温度が高いトラニオン近傍の温度に設定)

t_{ave} : 輸送容器外表面と近接防止金網の平均温度 ($^{\circ}C$)

t_a : 近接防止金網温度 ($^{\circ}C$)

t_0 : 周囲温度 ($38^{\circ}C$)

σ : ステファン・ボルツマン定数 ($5.670367 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$)

F_{ϵ} : 形態係数

ϵ_1 : 輸送容器外表面の放射率 ()

ϵ_2 : 近接防止金網の放射率 (: アルミニウムの酸化面)

(ロ)-第 B. 付 10 表 垂直平板の自然対流熱伝達率

境界膜温度 ^{注)} (°C)	垂直平板の自然対流熱伝達率 (W/(m ² ·K))	
20	0.86	$\Delta t^{1/3}$
100		$\Delta t^{1/3}$
200		$\Delta t^{1/3}$

注) 入熱の境界膜温度 : t_{ave} 、放熱の境界膜温度 : $(t_a + t_o)/2$

容器表面各部位近傍に設けられた近接防止金網温度を(ロ)-第 B. 付 11 表に示す。
容器表面に設けられた近接防止金網の温度は基準値(85°C)より低い。

(ロ)-第 B. 付 11 表 近接防止金網の温度評価結果

評価条件 (°C)		評価結果 (°C)
輸送容器外表面温度 (t_1)	周囲温度 (t_o)	近接防止金網温度 (t_a)
153	38	76

B.6.2 参考文献

- 1) ABAQUS Inc., “ABAQUS Theory Manual (Version 6.5)”, (1995).
- 2) (社)日本機械学会, “伝熱工学資料(改訂第4版又は改訂第3版)”, (1986, 1975).
- 3) D. L. Hagrman, G. A. Reymann, R. E. Mason, “MATPRO-VERSION 11 (Revision 2) A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior”, NUREG/CR-0497, TREE-1280, Rev.2, EG & G Idaho Inc., (1981).
- 4) 長谷川正義, 三島良績監修, “原子炉材料ハンドブック”, (1977).
- 5) (財)日本規格協会, “JIS ハンドブック「非鉄」参考”, (1996).
- 6)
- 7)
- 8) 木材工業ハンドブック編集委員会, “木材工業ハンドブック(改訂3版)”, (1982).
- 9) (財)電力中央研究所, “輸送キャスク密封装置の耐熱限界性能の評価”, (1998).
- 10) 日本バルカー工業株式会社, “VALQUA HAND BOOK 技術編”, (2010).
- 11)
- 12) (財)電力中央研究所, “平成8年度「放射性廃棄物輸送容器等安全性実証試験」事業成果報告書”, (1997).
- 13) R. O. Wooton, H. M. Epstein, “Heat Transfer from a Parallel Rod Fuel Element in a Shipping Container”, Battelle Memorial Institute, (1963).
- 14) W. H. McAdams, “Heat Transmission”, Third Edition McGraw Hill., (1954).
- 15) (社)日本機械学会, “昭和42年度原子力平和利用委託研究「使用済燃料輸送容器の熱除去に関する試験研究」研究成果報告書”, (1969).
- 16) M. Jakob, “Heat Transfer”, Volume I. John Wiley & Sons, Inc., New York, (1962).
- 17) W. M. Rohsenow, J. P. Hartnett, Y. I. Cho, “Handbook of Heat Transfer”, McGRAW-HILL BOOK CO., (1973).

(口) 章 C 密封解析

C. 密封解析

C.1 概要

密封解析は、本輸送物が規則及び告示に基づいて BM 型核分裂性輸送物に係る技術上の基準に適合することを示すために行った。

本輸送容器の密封境界は、(イ)-第 C.4 図に示す内筒、底板、フランジ、蓋、ベント・水位調整バルブ、水位調整用加圧バルブ及びドレンバルブから構成され、蓋及びバルブ類にはふっ素ゴム製 O リングが使用されている。本輸送容器の密封性は、(ロ)章 C.2 に記述する密封装置によって確保されている。すなわち、密封装置のフランジ、内筒、底板及び貫通部の継手は密封性の良好な溶接構造であり、蓋及びバルブのシールは規定の試験条件に耐える密封性の良好なふっ素ゴム製の O リングが使用されている。本解析では空気漏えい試験等によって求めた各密封境界からの漏えい率に基づいて放射性物質の密封境界外への漏えい率を評価し、その漏えい率が一般の試験条件及び特別の試験条件における放射性物質漏えい率の基準を満足することを示す。

C.2 密封装置

C.2.1 密封装置

1. 構成

本輸送容器の密封境界を構成する密封装置は、(イ)-第 C.4 図に示すように内筒、底板、フランジ、蓋、ベント・水位調整バルブ、水位調整用加圧バルブ及びドレンバルブから構成され、蓋及びバルブ類にはふっ素ゴム製 O リングが使用されている。

密封装置は、製作中及び保守時にヘリウムリーク試験等により漏えいのないことが確認され、また、蓋及びバルブのシールは輸送ごとに漏えい率が基準値以下であることが確認される。

2. 材質

内筒、底板、フランジ、蓋、ベント・水位調整バルブ、水位調整用加圧バルブ及びドレンバルブにはステンレス鋼、蓋ボルトにはニッケルクロムモリブデン鋼、蓋シール及びバルブのガスケットにはふっ素ゴム製の O リングがそれぞれ使用されている。

3. 圧力及び温度

密封装置は、(ロ)-第C.1表に示す圧力に対し十分な強度を備えている。

(ロ)-第C.1表 各条件下における圧力及び温度

条 件	項 目	計 算 値
一般の試験条件	圧 力 (MPa abs)	1.50
	温 度 ^{注)} (°C)	179
特別の試験条件	圧 力 (MPa abs)	5.07
	温 度 ^{注)} (°C)	209

注) 温度は内筒内水の平均値

4.

蓋は、上部緩衝体で覆われているので蓋ボルトが不用意に外されることはなく、上部緩衝体の取付部にはを施すことができるようになっている。

ベント・水位調整バルブ、水位調整用加圧バルブ及びドレンバルブはカバープレートが施されており、バルブが不用意に開かれることはない。また、各バルブ部には
を施すことができるようになっている。

5. 製作検査

密封装置の構成部品の製作及び検査は、密封性を確保するために参考に記述されている方法で行われる。

C. 2. 2 密封装置の貫通部

1. 貫通部

密封装置には、(イ)-第C.4図に示すように、本体上部、本体下部及び蓋にベント・水位調整バルブ、ドレンバルブ及び水位調整用加圧バルブを設けるための貫通部が設けられている。

2. 貫通部の機能

燃料装荷時においては、ベント・水位調整バルブ及び水位調整用加圧バルブは密封装置内の水位調整に用いられる。

燃料取出し時においては、ドレンバルブは内筒内水の排出のために用いられ、ベント・水位調整バルブ及び水位調整用加圧バルブは密封装置の空気抜きのために用いられる。

3. バルブの仕様

ベント・水位調整バルブ、水位調整用加圧バルブ及びドレンバルブは(口)章 B. 3 の 2. に示す仕様のステンレス鋼製の バルブである。

智

C. 2.3 密封装置のガスケット及び溶接部

1. ガスケット

蓋には、(イ)-第 C. 11 図に示すようにふっ素ゴム製の O リング 2 本が同心円状に設けられている。O リングが二重に設けられている目的は、(ハ)章で述べる気密漏えい検査を行うことにある。

バルブには、(イ)-第 C. 9 図、(イ)-第 C. 10 図及び(イ)-第 C. 12 図に示すように、ふっ素ゴム製の O リングが設けられている。

2. ガスケットの仕様

ガスケットの寸法及び材質を(口)-第 C. 2 表に示す。

ふっ素ゴム製の O リングは、その耐熱性及び耐寒性((口)章 B. 3)に適合する温度範囲で使用され((口)章 B. 4.6 及び(口)章 B. 5.6)、さらに、一般及び特別の試験条件における口開き変形量が基準値以下となるため((口)章 A. 5.7 及び(口)章 A. 6.5)、蓋及びバルブの密封性を保つことができる。

(口)-第 C. 2 表 ガスケットの寸法及び材質

(単位：mm)

部 位		寸 法	材 質	備 考
蓋	内 側	φ約 <input type="text"/> × I. D. 約 <input type="text"/>	ふっ素ゴム	O リング
	外 側	φ約 <input type="text"/> × I. D. 約 <input type="text"/>		
バルブ		φ約 <input type="text"/> × I. D. 約 <input type="text"/>	ふっ素ゴム	O リング
		φ約 <input type="text"/> × I. D. 約 <input type="text"/>		

3. 溶接部

密封境界に係る溶接部は、内筒の継手、フランジと内筒、内筒と底板及びバルブ本体取付部である。フランジ、内筒、底板及びバルブは、通商産業省令第123号等に準拠して実施した溶接施工法確認試験に合格した施工法に従って溶接施工される。

溶接部は製作中に放射線透過試験又は浸透探傷試験等を行ってその健全性を確認する。さらに、ヘリウムリーク試験を行い、溶接部の漏えいのないことを確認する。

溶接部はその耐寒性((口)章 A.4.2)により、最低使用温度でも健全であり密封性を保つことができる。

C.2.4 蓋

1. 密封構造

蓋は、(口)-第C.1表に示す温度、圧力に耐える強度を備え、かつ密封性を保つことができるシーリングを設けてある。

2. 蓋の締付け

蓋の密封性を保つため、蓋ボルトを適切なトルクで締め付ける(蓋ボルト：、
本、締付けトルク：約N・m)。

C.3 一般の試験条件

一般の試験条件における密封装置内の圧力及び温度は、(口)-第C.1表に示すとおりであり、本条件において密封装置の性能が損なわれないことは(口)章Aにより確認している。

C.3.1 放射性物質の漏えい

密封装置は、製作中及び保守時に行うヘリウムリーク試験等により漏えいがないことが確認される。

さらに、本輸送物の密封性能については、輸送ごとに空気漏えい試験等により漏えい率が基準値以下であることを確認することとしている。

このように漏えいはないが、本解析では漏えい試験において蓋のシール及びバルブに供給した空気等の圧力変化(最大許容空気漏えい率相当)が一定時間後に検知されたと想定し放射性物質の漏えいを評価する。

放射性物質は密封装置内のガス中又は内筒内水中にそれぞれ存在するので、その漏えい率は空気漏えい試験等から求められる空気漏えい率とは異なる。

したがって、ここでは最大許容空気漏えい率から一般の試験条件のガス及び内筒内水の漏えい率を求め、ガス及び内筒内水中の放射性物質濃度とそれぞれの漏えい率から、放射性物質の漏えい率を求めて、放射性物質の漏えい率が規則及び告示の基準値以下であることを確認する。

なお、本解析においては密封装置内のガス中に放射性物質は存在せず、内筒内水中の放射性物質は、発電所の燃料プール水から同伴されるものとして、濃度は Bq/cm³、核種は全て ⁶⁰Co と仮定する。

1. 最大許容空気漏えい率

密封解析の設計基準として設定した最大許容空気漏えい率 L_{Rt} は、輸送容器の被検査部4か所の合計空気漏えい率として(口)-第C.3表に示す値とする。

(口)-第C.3表 最大許容空気漏えい率

項目	全密封境界 (蓋部及びバルブ3か所)
L_{Rt} : 最大許容空気漏えい率 (ref cm ³ /s)	3×10^{-2}

2. 空気漏えい試験時の漏えい率と空気漏えい試験条件

(1) 空気漏えい試験時の漏えい率

圧力降下試験による漏えい試験時の漏えい率は次式で表される。

$$L_R = \frac{V \cdot T_S}{3600H \cdot P_S} \left(\frac{P_1}{T_1} - \frac{P_2}{T_2} \right)^n \quad \text{————— (1)}$$

ただし、

L_R : 25℃、0.101MPa (1atm abs) の標準状態における体積漏えい率 (ref cm³/s)

V : テスト系の容積 (cm³)

H : 試験時間 (h)

T_S : 基準温度 (298K)

P_S : 基準圧力 (0.101MPa、(1atm abs))

T_1 : 試験開始時の空気温度 (K)

T_2 : 試験終了時の空気温度 (K)

P_1 : 試験開始時の空気圧力 (MPa abs)

P_2 : 試験終了時の空気圧力 (MPa abs)

上記の (1) 式に次の空気漏えい試験条件を入れて空気漏えい率を求め、設計基準として設定した最大許容空気漏えい率以下であることを確認する。

(2) 空気漏えい試験条件

- ① 試験開始時の空気圧力はサイトで得られる圧縮空気の圧力とする (通常 0.7 から 0.8MPa abs)。 (1) 式で求める空気漏えい率の計算においては代表的な値として、 $P_1=0.760\text{MPa abs}$ を用いる。
- ② 計算においては $T_1=T_2=T_S=298\text{K}$ (25℃) とする。
- ③ 上記①、②の条件及びサイトの漏えい試験装置系の全容積 V を考慮して、合計空気漏えい率 L_R ($L_R = \sum L_{Ri}$ (i: 被検査部 4 か所)) が最大許容空気漏えい率 $L_{Rt}=3.99 \times 10^{-3}\text{cm}^3/\text{s}$ 注) at 0.760MPa abs、298K ($=3 \times 10^{-2}$ ref cm³/s) 以下であることを確認できるように、試験時間 H 及び圧力降下 ΔP ($P_1 - P_2$) を定め試験を実施する。

注) $L_{Rt} \times \frac{P_S}{P_1} \times \frac{T_1}{T_S} = 3 \times 10^{-2} \times \frac{0.101}{0.760} \times \frac{298}{298} = 3.99 \times 10^{-3}\text{cm}^3/\text{s}$ at 0.760MPa abs、298K

3. 最大漏えい孔径

最大漏えい孔径は、漏えい試験における最大許容空気漏えい率 L_{Rt} に基づいて以下の手順により求める。

漏えい孔としてはシール部を最短で横切る丸孔を仮定する。

漏えい孔中の流体の流れの形態は自由分子流と連続流が考えられ、その漏えい率は次式で与えられる。

$$L = (F_c + F_m) (P_u - P_d)^2 \quad \text{-----} \quad (2)$$

ここで、

L : 圧力 P_a における体積漏えい率 (cm^3/s at P_a , T_a)

P_a : 流れの平均圧力 (MPa)

$$P_a = \frac{1}{2} (P_u + P_d) \quad \text{-----} \quad (3)$$

T_a : 流体の平均温度 (K)

P_u : 上流側の圧力 (MPa)

P_d : 下流側の圧力 (MPa)

F_c : 連続流の流動伝導係数 ($\text{cm}^3/(\text{MPa}\cdot\text{s})$)

F_m : 自由分子流の流動伝導係数 ($\text{cm}^3/(\text{MPa}\cdot\text{s})$)

$$F_c = 2.49 \times 10^{-2} \times \frac{D^4}{a \cdot \mu} \quad \text{-----} \quad (4)$$

$$F_m = 3.81 \times 10^3 \times \frac{D^3 \sqrt{T/M}}{a \cdot P_a} \quad \text{-----} \quad (5)$$

ただし、

D : 漏えい孔径 (cm)

a : 漏えい孔長 (cm)

μ : 粘性係数 ($\text{MPa}\cdot\text{s}$)

T : 流体の温度 (K)

M : 流体の分子量 (g/mol)

注) ANSI N14.5 記載式の単位を SI 単位に換算した。

漏えい孔径 (D) は、次式及び (2) 式から求められる。

$$L = L_{Ri} \cdot \frac{P_s}{P_a} \cdot \frac{T_a}{T_s} \quad (6)$$

ここで、

L_{Ri} : 密封境界 1 か所の空気漏えい率 (ref cm³/s)

T_a : 平均温度 (= T_s) (K)

蓋部及びバルブ部の漏えい試験時の最大漏えい孔径を (口)-第 C.4 表に示す。なお、ここでは漏えい孔径を大きく評価するため蓋部及びバルブ部の密封境界 1 か所の漏えい率 L_{Ri} を安全側に最大許容空気漏えい率 L_{Rt} に等しいものとする。

(口)-第 C.4 表 漏えい試験時の最大漏えい孔径

項 目	部 位	蓋 部	バルブ部 (1 か所)
L_{Ri} : 密封境界 1 か所の空気漏えい率	(ref cm ³ /s)	3×10^{-2}	
P_u : 上流側圧力	(MPa abs)	0.760	
P_d : 下流側圧力	(MPa abs)	0.101	
P_a : 流れの平均圧力	(MPa abs)	0.431	
T_a, T : 空気の温度	(K)	298	
L : 漏えい試験時の空気漏えい率	(cm ³ /s at P_a, T_a)	7.03×10^{-3}	
μ : 空気の粘性係数	(MPa·s)	1.85×10^{-11}	
a : 漏えい孔長	(cm)	<input type="text"/> 注)	<input type="text"/> 注)
M : 空気の分子量	(g/mol)	29.0	
F_c : 連続流の流動伝導係数	($\frac{\text{cm}^3}{\text{MPa} \cdot \text{s}}$)	<input type="text"/> D ⁴	<input type="text"/> D ⁴
F_m : 自由分子流の流動伝導係数	($\frac{\text{cm}^3}{\text{MPa} \cdot \text{s}}$)	<input type="text"/> D ³	<input type="text"/> D ³
D : 漏えい孔径	(cm)	<input type="text"/>	

注) Oリング断面直径を採用

4. 一般の試験条件におけるガス中の放射性物質の漏えい率

一般の試験条件においては、密封装置内にガス状の放射性物質が存在しないことから、ガス中の放射性物質の漏えいはない。

5. 一般の試験条件における内筒内水の漏えい率

一般の試験条件における内筒内水の漏えい率は (2) から (4) 式に一般の試験条件下の圧力条件、内筒内水物性値及び最大漏えい孔径を代入して求められる。ただし、液体では分子流は存在しないので、(2) 式において $F_m=0$ とする。

一般の試験条件下の内筒内水漏えい率を (口)-第 C. 5 表に示す。計算は蓋部とバルブ部について行い、より大きい方の漏えい率を内筒内水漏えい率とする。

(口)-第 C. 5 表 一般の試験条件下の内筒内水漏えい率

項 目	部 位	全密封境界 (蓋 部)	全密封境界 (バルブ部)
D : 漏えい孔径 (cm)			
a : 漏えい孔長 (cm)			
μ : 内筒内水の粘性係数 (MPa·s)		1.50 × 10 ⁻¹⁰ 注)	
P _{u, x} : 一般の試験条件下の密封装置内圧力 (MPa abs)		1.50	
P _{d, x} : 一般の試験条件下の外圧 (MPa abs)		0.097	
L _x : 一般の試験条件下の内筒内水漏えい率 (cm ³ /s)			

注) 内筒内水の平均温度 452K の値。

6. 一般の試験条件における内筒内水中の放射性物質の漏えい率

一般の試験条件における内筒内水中の放射性物質の漏えい率は、密封装置内の内筒内水中に存在する各核種の放射性物質濃度と前項で求めた一般の試験条件下の内筒内水の漏えい率 L_x を乗じて求められる。

本解析においては密封装置内の内筒内水の全放射性物質濃度を Bq/cm³ と仮定し、内筒内水中の放射性物質が全て ⁶⁰Co であると仮定する。

一般の試験条件における内筒内水中の放射性物質の漏えい率と基準値との比率を (口)-第 C. 6 表に示す。

(ロ)-第 C. 6 表 一般の試験条件下の内筒内水中の放射性物質の漏えい率

核 種	放射性物質濃度 (Bq/cm ³)	放射性物質漏えい率 (Bq/h)	基 準 値 (Bq/h)	比 率
⁶⁰ Co		2.44×10^5	4×10^5	6.10×10^{-1}

7. 放射性物質の漏えい率

ガス中の放射性物質は存在しないため、内筒内水中の放射性物質の漏えい率が、一般の試験条件における密封装置からの放射性物質の漏えい率になる。

一般の試験条件における放射性物質の漏えい率と基準値との比率のまとめを(ロ)-第 C. 7 表に示す。

(ロ)-第 C. 7 表 一般の試験条件下の放射性物質の漏えい率と基準値との比率

項 目	比 率
ガス中の放射性物質	-
内筒内水中の放射性物質	6.10×10^{-1}
合 計	6.10×10^{-1}

(ロ)-第 C. 7 表に示すように放射性物質の漏えい率と基準値との比率は 6.10×10^{-1} であり 1 より小さい。

したがって、密封装置からの放射性物質の 1 時間当たりの漏えい量は基準値よりも小さい。

C. 3. 2 密封装置の加圧

密封装置の加圧は、

- ① 密封装置内の内筒内水と空気の温度上昇
- ② 内筒内水の放射線分解によるガスの発生

によっておこる。

②の内筒内水の放射線分解による発生ガスの加圧は、①の内筒内水と空気の温度上昇による加圧と比べて無視できる。

したがって、密封装置の加圧は①の内筒内水と空気の温度上昇によるものを考慮して、(口)章 C. 2. 1 の 3. に示す条件で密封装置の耐圧強度及び O リング部の密封性能が損なわれないことを (口) 章 A により確認している。

C. 3. 3 冷却材汚染

本解析においては、密封装置内の冷却材 (内筒内水) の全放射性物質濃度を Bq/cm³ と仮定し、冷却材 (内筒内水) 中の放射性物質が全て ⁶⁰Co であると仮定する。

C. 3. 4 冷却材損失

本輸送容器は、(口)章 C. 2 に述べたように一般及び特別の試験条件においても密封装置の密封性が保たれるので、冷却材 (内筒内水) の損失がない。

本解析では、(口)章 C. 3. 1 に述べたように、輸送ごとに行われる空気漏えい試験等における漏えい検出量に基づいて冷却材 (内筒内水) の漏えいを解析している。

この結果、最大漏えいにおける冷却材 (内筒内水) 損失は一般の試験条件において (口)-第 C. 5 表に示すように cm³/h、特別の試験条件において、(口)-第 C. 8 表に示すように cm³/week 以下であり、輸送物の安全性に影響を及ぼすことはない。

C.4 特別の試験条件

特別の試験条件における密封装置内の圧力及び温度は、(口)-第 C.1 表に示すとおりであり、本条件において密封装置の性能が損なわれないことは(口)章 A により確認している。

C.4.1 核分裂生成ガス

密封装置内の核分裂生成ガスは一般の試験条件においては、存在しないと仮定した。

特別の試験条件において、(口)章 A.8 に説明したように燃料集合体の破損がなく燃料被覆管内に封入されている核分裂生成ガスが漏出しないので、密封装置内の核分裂生成ガスは存在しない。

C.4.2 放射性物質の漏えい

1. 特別の試験条件におけるガス中の放射性物質の漏えい率

特別の試験条件においては、密封装置内にガス状の放射性物質が存在しないことから、ガス中の放射性物質の漏えいはない。

2. 特別の試験条件における内筒内水の漏えい率

特別の試験条件における内筒内水の漏えい率は(2)から(4)式に特別の試験条件下の圧力条件、内筒内水物性値及び最大漏えい孔径を代入して求められる。ただし、液体では分子流は存在しないので、(2)式において $F_m=0$ とする。

特別の試験条件下の内筒内水漏えい率を(口)-第 C.8 表に示す。計算は蓋部とバルブ部について行い、より大きい方の漏えい率を内筒内水漏えい率とする。

(口)-第 C. 8 表 特別の試験条件下の内筒内水漏えい率

項 目	部 位	全 密 封 境 界 (蓋 部)	全 密 封 境 界 (バルブ部)
D : 漏えい孔径 (cm)			
a : 漏えい孔長 (cm)			
μ : 内筒内水の粘性係数 (MPa·s)		1.28×10 ⁻¹⁰ 注)	
Pu, x : 特別の試験条件下の密封装置内圧力 (MPa abs)		5.07	
Pd, x : 特別の試験条件下の外圧 (MPa abs)		0.097	
Lx : 特別の試験条件下の内筒内水漏えい率 (cm ³ /s)			

注) 内筒内水の平均温度 482K の値

3. 特別の試験条件における内筒内水中の放射性物質の漏えい率

特別の試験条件における内筒内水中の放射性物質の漏えい率は、密封装置内の内筒内水中に存在する各核種の放射性物質濃度と前項で求めた特別の試験条件の内筒内水の漏えい率 Lx を乗じて求められる。

本解析においては密封装置内の内筒内水の全放射性物質濃度を Bq/cm³ と仮定し、内筒内水中の放射性物質が全て ⁶⁰Co であると仮定する。

特別の試験条件における放射性物質濃度を用いて求めた内筒内水中の放射性物質の漏えい率と基準値との比率を (口)-第 C. 9 表に示す。

(口)-第 C. 9 表 特別の試験条件下の内筒内水中の放射性物質の漏えい率

核種	放射性物質濃度 (Bq/cm ³)	放射性物質漏えい率 (Bq/week)	基準値 (Bq/week)	比率
⁶⁰ Co		1.70×10 ⁸	4×10 ¹¹	4.25×10 ⁻⁴

4. 放射性物質の漏えい率

ガス中の放射性物質は存在しないため、内筒内水中の放射性物質の漏えい率が、特別の試験条件における密封装置からの放射性物質の漏えい率になる。

特別の試験条件における放射性物質の漏えい率と基準値との比率のまとめを(口)-第 C. 10 表に示す。

(口)-第 C. 10 表 特別の試験条件下の放射性物質の漏えい率と基準値との比率

項目	比率
ガス中の放射性物質	-
内筒内水中の放射性物質	4.25×10 ⁻⁴
合計	4.25×10 ⁻⁴

(口)-第 C. 10 表に示すように放射性物質の漏えい率と基準値との比率は4.25×10⁻⁴であり1より小さい。したがって、密封装置からの放射性物質の1週間当たりの漏えい量は基準値よりも小さい。

C.5 結果の要約及びその評価

密封解析の評価結果は以下に示すとおりであり、本輸送容器の密封性能は規則及び告示に定められる BM 型輸送物に係る技術上の基準に適合する。

1. 密封装置

本輸送容器の主な密封装置は容器とバルブであり、密封境界は内筒、底板、フランジ、蓋、ベント・水位調整バルブ、水位調整用加圧バルブ及びドレンバルブから構成され、蓋及びバルブ類にはふっ素ゴム製 O リングが使用されている。これらの密封装置は、一般及び特別の試験条件に対して十分な強度を有し、また、ガスケットの密封性能が損なわれることはない。

2. 一般の試験条件

(1) 放射性物質の漏えい

一般の試験条件における放射性物質の漏えい率と基準値との比率の合計は 6.10×10^{-1} であり、放射性物質の漏えい率は基準値を満足する。

(2) 密封装置の加圧

密封装置の加圧は、主に内筒内水と空気の温度上昇による。(口)章 A に示したようにこの加圧により密封性能が損なわれるような変形は生じない。

(3) 冷却材汚染

密封装置内の冷却材(内筒内水)の全放射性物質濃度を Bq/cm³ と仮定し、冷却材(内筒内水)中の放射性物質が全て ⁶⁰Co と仮定した。

(4) 冷却材損失

本輸送容器は規則及び告示に定められた条件において密封装置の密封性が保たれるので冷却材(内筒内水)の損失はない。

3. 特別の試験条件

(1) 核分裂生成ガス

特別の試験条件においては、(口)章 A に示したように燃料集合体の破損がなく、密封装置内の核分裂生成ガスは一般の試験条件と同じく存在しない。

(2) 放射性物質の漏えい

特別の試験条件における放射性物質の漏えい率と基準値との比率の合計は 4.25×10^{-4} であり、放射性物質の漏えい率は基準値を満足する。

C. 6 付属書類

C. 6.1 参考文献

- 1) American National Standards Institute, "Radioactive Materials - Leakage Tests On Packages For Shipment", ANSI N14.5-1997, (1998), 式(B.14).
- 2) 同上 式(B.2).
- 3) 同上 式(B.3).
- 4) 同上 式(B.4).

(口)章 D 遮蔽解析

D. 遮蔽解析

D.1 概要

遮蔽解析は、本輸送物が規則及び告示に基づいて BM 型核分裂性輸送物に係る技術上の基準に適合することを示すために行った。

(イ)-第 C.5 図及び(イ)-C.6 図に示すとおり、本輸送容器の主要なガンマ線遮蔽材は、側部方向には内筒と中間筒の間にある鉛、内筒のステンレス鋼並びに中間筒及び外筒の炭素鋼であり、軸方向には底板及び蓋のステンレス鋼である。主要な中性子遮蔽材は、内筒内水及び側部方向には中間筒と外筒間のレジンは、中間筒及び外筒の炭素鋼並びに内筒、底板及び蓋のステンレス鋼もその役目をする。

本解析の基とした遮蔽体の概略形状、主要部寸法及び材料を(ロ)-第 D.1 図に示す。

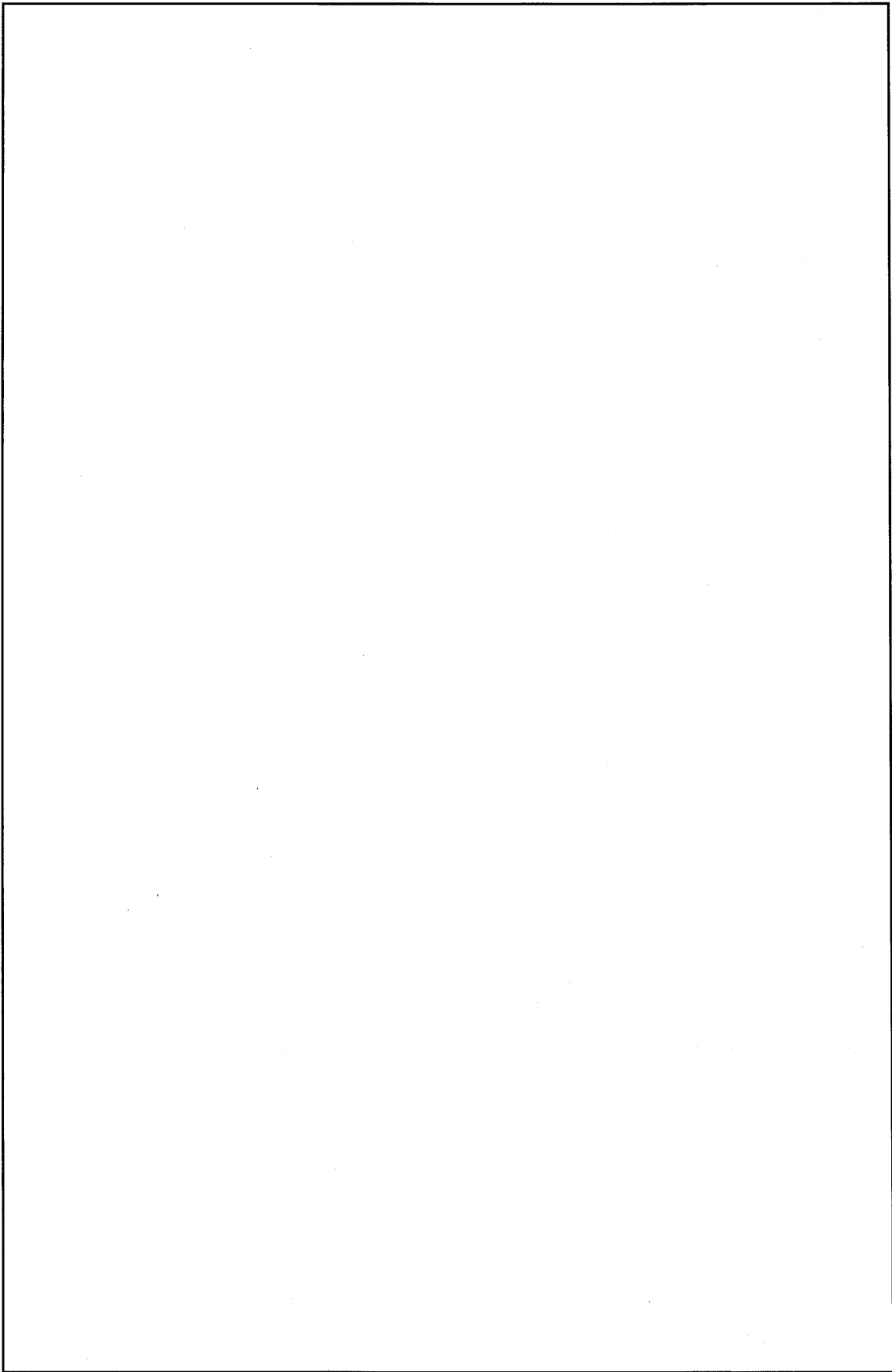
線量当量率評価位置は、通常輸送時及び一般の試験条件下ではフィン部はフィン先端、フィンのない所は容器本体の外表面、頭部及び底部は緩衝体の表面をそれぞれ輸送物表面とした。特別の試験条件下においては、緩衝体は大幅に変形し、フィンも部分的に変形するので、全ての方向に対して容器本体表面を輸送物表面とした。

線源としては核分裂生成物及び超ウラン元素による線源並びに構造材の放射化による線源を考慮した。

線源強度は、ORIGEN2 コード¹⁾及び放射化計算式により連続照射を仮定して求めた。また、ORIGEN2 コードによる線源強度計算で用いるライブラリーは、ORIGEN2 コード内蔵の PWRU50 のデータを使用した。

通常輸送時、一般及び特別の試験条件下での線量当量率は、DOT3.5 コード²⁾で求めた。また、線量当量率評価で用いる断面積ライブラリーは、DLC-23/CASK ライブラリー³⁾を使用した。

これらの計算から得られた線量当量率は、規則及び告示で定められた基準を満足する。



(口)-第 D.1 図 遮蔽体構成

D.2 線源仕様

線源計算に当たって、燃料集合体上下の構造材部は後述する解析モデルで示すように、上部ノズル部、上部プレナム部及び下部ノズル部(下部端栓部、下部ノズル部)の領域に分けて求める。

線源強度の計算に用いる燃焼度、照射日数及び冷却日数を(ロ)-第 D.1 表に示す。

(ロ)-第 D.1 表の線源条件に基づいて、PWR 燃料集合体を容器に収納した場合のガンマ線源強度及び中性子源強度を求めた。このうち、ガンマ線源としては次の 2 種類に分類できる。

- ・核分裂生成物及び超ウラン元素によるガンマ線源
- ・構造材の放射化生成物によるガンマ線源

計算は、原子炉の実際の運転履歴に基づくものではなく、(ロ)-第 D.1 表に示した比出力で連続照射したものとして行った。

各収納物の線源強度の比較を(ロ)-第 D.2 表に示す。遮蔽解析対象を以下のとおり設定した。

- ・タイプ 1 から 3 については、冷却日数が同じであるため、タイプ 3 で代表する。
- ・タイプ 5 については、冷却日数が同じタイプ 6 で代表する。
- ・遮蔽解析は、タイプ 3、タイプ 4、タイプ 6 を対象とする。

(ロ)-第 D.1 表 収納物の線源計算条件(1/2)

燃料集合体の種類 条件	P W R 燃 料 集 合 体		
	タイプ 1	タイプ 2	タイプ 3
燃 焼 度 (MWD/MTU)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
比 出 力 ^{注 1)} (MW/MTU)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
照 射 日 数 ^{注 2)} (日)	<input type="text"/> (<input type="text"/>)	<input type="text"/> (<input type="text"/>)	<input type="text"/> (<input type="text"/>)
冷 却 日 数 (日)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
制 限 放 射 能 強 度 (PBq/輸送物)	4.89×10^2		

注 1) 比出力は 100%出力に相当する炉平均値を用いる。

注 2) ()内はバーナブルポイズン集合体の値(90,000MWD/MTU 相当)

(ロ)-第 D.1 表 収納物の線源計算条件 (2/2)

燃料集合体の種類 条件	P W R 燃料集合体		
	タイプ 4	タイプ 5	タイプ 6
燃 焼 度 (MWD/MTU)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
比 出 力 ^{注 1)} (MW/MTU)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
照 射 日 数 ^{注 2)} (日)	<input type="text"/> (<input type="text"/>)	<input type="text"/> (<input type="text"/>)	<input type="text"/> (<input type="text"/>)
冷 却 日 数 (日)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
制限放射能強度 (PBq/輸送物)	4.89×10^2		

注 1) 比出力は 100%出力に相当する炉平均値を用いる。

注 2) ()内はバーナブルポイズン集合体の値(90,000MWD/MTU 相当)

(ロ)-第D.2表 線源強度の比較(1/2)

項目	燃料集合体の種類		PWR 燃料集合体(14体)		
	タイプ1	タイプ2	タイプ3		
ガンマ線源	燃料有効部 (photons/s)				
	上部ノズル部 ^{注)} (⁶⁰ Co TBq)				
	上部プレナム部 ^{注)} (⁶⁰ Co TBq)				
	下部ノズル部 ^{注)} (⁶⁰ Co TBq)				
	バーナブルポイズン 集合体 ^{注)} (⁶⁰ Co TBq)				
	構造材放射化合計 (⁶⁰ Co TBq)				
全中性子源	燃料有効部 (n/s)				

注) 燃料構造材中の各領域の⁶⁰Co含有量を考慮した。

(ロ)-第D.2表 線源強度の比較(2/2)

燃料集合体の種類		PWR 燃料集合体(14体)			
		タイプ4	タイプ5	タイプ6	
ガンマ線源	燃料有効部 (photons/s)				
	上部ノズル部 ^(注) (⁶⁰ Co TBq)				
	上部プレナム部 ^(注) (⁶⁰ Co TBq)				
	下部端栓部 ^(注) (⁶⁰ Co TBq)				
	下部ノズル部 ^(注) (⁶⁰ Co TBq)				
	バーナブルポイズン 集合体 ^(注) (⁶⁰ Co TBq)				
全中性子源	構造材放射化合計 (⁶⁰ Co TBq)				
	燃料有効部 (n/s)				

注) 燃料構造材中の各領域の ⁵⁹Co 含有量を考慮した。

D.2.1 ガンマ線源

1. 燃料有効部のガンマ線源

燃料有効部のガンマ線源は、核分裂生成物及びアクチノイドによるものである。

ガンマ線源強度の計算は、ORIGEN2 コードを用いて行った。

燃料有効部の各エネルギーのガンマ線源強度を(口)-第 D.3 表に示す。

(ロ)-第D.3表 燃料有効部のガンマ線の各エネルギーの線源強度

(輸送容器1基当たり)

エネルギー群	平均エネルギー (MeV)	燃料有効部 (photons/s)					
		タイプ1	タイプ2	タイプ3	タイプ4	タイプ5	タイプ6
1	0.01						
2	0.025						
3	0.0375						
4	0.0575						
5	0.085						
6	0.125						
7	0.225						
8	0.375						
9	0.575						
10	0.85						
11	1.25						
12	1.75						
13	2.25						
14	2.75						
15	3.5						
16	5.0						
17	7.0						
18	9.5						
合計							

2. 放射化線源

燃料集合体構造材の放射化によるガンマ線源のうち、容器外部の線量当量率に寄与するものは、構造材中に含まれる⁵⁹Coの(n, γ)反応により生じる⁶⁰Coが大部分である。

⁶⁰Coの放射化線源強度は次式を用いて求めた。

$$A = N_0 \times \sigma \times \phi \{1 - \exp(-\lambda T_1)\} \times \exp(-\lambda T_2)$$

ここで、

A : 放射化核種(⁶⁰Co)の放射能(Bq)

N₀ : ターゲット核種(⁵⁹Co)の個数(atoms)

σ : 2,200m/sの中性子による⁵⁹Coの(n, γ)反応断面積(cm²)

$$(37.2\text{barn}^4) = 37.2 \times 10^{-24}\text{cm}^2$$

φ : 炉内照射熱中性子束(n/(cm²・s))^{注)}

λ : ⁶⁰Coの崩壊定数(3.601×10⁻⁴/日)

T₁ : 照射日数(日)

T₂ : 冷却日数(日)

⁶⁰Coの放射化線源強度計算に用いた計算条件と結果を(ロ)-第D.4表及び(ロ)-第D.5表に示す。

なお、⁶⁰Coは1崩壊で1.17MeVと1.33MeVのガンマ線を1個ずつ放出する。

注) 炉設計コードによる炉心計算で求められた軸方向炉内中性子束分布の典型例の放射化評価部位での熱中性子束を用いている。

(ロ)-第 D.4 表 燃料集合体端部構造材の放射化によるガンマ線源強度

(輸送容器 1 基当たり)

PWR 燃料集合体 (14 体)					
領 域		上部 ノズル部	上部 プレナム部	下部ノズル部	
				下部 端栓部	下部 ノズル部
コバルト含有量 (g)	タイプ 1				
	タイプ 2				
	タイプ 3				
	タイプ 4				
	タイプ 5				
	タイプ 6				
照射熱中性子束 (n/(cm ² ・s))	タイプ 1				
	タイプ 2				
	タイプ 3				
	タイプ 4				
	タイプ 5				
	タイプ 6				
照射日数(日)	タイプ 1				
	タイプ 2				
	タイプ 3				
	タイプ 4				
	タイプ 5				
	タイプ 6				
冷却日数(日)	タイプ 1				
	タイプ 2				
	タイプ 3				
	タイプ 4				
	タイプ 5				
	タイプ 6				
線源強度 (⁶⁰ Co TBq)	タイプ 1				
	タイプ 2				
	タイプ 3				
	タイプ 4				
	タイプ 5				
	タイプ 6				

注記) 燃料構造材中の各領域の ⁵⁹Co 含有量を考慮した。

(ロ)-第 D.5 表 バーナブルポイズン集合体構造材の放射化によるガンマ線源強度

(輸送容器 1 基当たり)

バーナブルポイズン集合体 (14 体)				
領 域		ホールドダウン アセンブリ	シンプルプラグ	BP 棒被覆管
コバルト含有量 (g)	タイプ 1			
	タイプ 2			
	タイプ 3			
	タイプ 4			
	タイプ 5			
	タイプ 6			
モデル化領域		上部ノズル部	上部プレナム部	燃料有効部
照射熱中性子束 (n/(cm ² ・s))	タイプ 1			
	タイプ 2			
	タイプ 3			
	タイプ 4			
	タイプ 5			
	タイプ 6			
照射日数(日)	タイプ 1			
	タイプ 2			
	タイプ 3			
	タイプ 4			
	タイプ 5			
	タイプ 6			
冷却日数(日)	タイプ 1			
	タイプ 2			
	タイプ 3			
	タイプ 4			
	タイプ 5			
	タイプ 6			
線源強度 (⁶⁰ Co TBq)	タイプ 1			
	タイプ 2			
	タイプ 3			
	タイプ 4			
	タイプ 5			
	タイプ 6			

注記) 燃料構造材中の各領域の ⁵⁹Co 含有量を考慮した。

D.2.2 中性子源

照射済燃料中には中性子源となる超ウラン元素が生成される。これらの核種から中性子が生成する反応は、自発核分裂及び (α, n) 反応である。一次中性子源強度の計算は、ORIGEN2 コードを用いて行った。

体系の増倍効果を考慮した全中性子源強度(N_s)は次式で求められる。

$$N_s = N_o / (1 - k_{eff})$$

ここで、

N_o : 輸送容器 1 基当たりの一次中性子源強度

k_{eff} : 照射済燃料を収納した場合の輸送物の実効増倍率

燃焼に伴い k_{eff} は減少するので、ここでは(口)章 E と同一の手法により照射済燃料を収納した場合の輸送物の k_{eff} を求めた。

中性子源強度を(口)-第 D.6 表に示す。

上記の中性子源強度のうち大部分は、 ^{244}Cm の自発核分裂線源と増倍による ^{235}U 、 ^{239}Pu の核分裂線源であり、 (α, n) 反応による線源はわずかである。

そこで、計算に用いる線源のエネルギースペクトルは、線源強度に支配的な核分裂線源のうち最もスペクトルが硬い ^{239}Pu の核分裂スペクトルとする。計算に使用する ^{239}Pu の核分裂スペクトルを(口)-第 D.7 表に示す。

(ロ)-第 D.6 表 中性子源強度

(輸送容器 1 基当たり)

		PWR 燃料集合体 (14 体)					
		タイプ 1	タイプ 2	タイプ 3	タイプ 4	タイプ 5	タイプ 6
一次中性子源 強 度 N_0 (n/s)	(α, n) 反 応						
	自 発核分裂						
	計						
輸送物の実効増倍率 ^{注)} (k_{eff})							
全中性子源強度 N_s (n/s)							

注) ORIGEN2 コードにより、燃焼に伴う核分裂性物質の減少及びポイズンとなる核分裂生成物の生成量を求め、これらを考慮した核種構成を用いて臨界解析に示す手法と同一手法 (KENO-V.a コード) により得られた値である。

(ロ)-第 D.7 表 中性子線源スペクトル

エネルギー群数	上限エネルギー (eV)	スペクトル ^{注)}
1	1.492×10^7	5.72×10^{-4}
2	1.220×10^7	2.02×10^{-3}
3	1.000×10^7	6.07×10^{-3}
4	8.180×10^6	2.00×10^{-2}
5	6.360×10^6	4.12×10^{-2}
6	4.960×10^6	5.27×10^{-2}
7	4.060×10^6	1.10×10^{-1}
8	3.010×10^6	8.74×10^{-2}
9	2.460×10^6	2.28×10^{-2}
10	2.350×10^6	1.15×10^{-1}
11	1.830×10^6	2.07×10^{-1}
12	1.110×10^6	1.89×10^{-1}
13	5.500×10^5	1.31×10^{-1}
14	1.110×10^5	1.59×10^{-2}
15	3.350×10^3	8.12×10^{-5}
16	5.830×10^2	5.89×10^{-6}
17	1.010×10^2	3.89×10^{-7}
18	2.900×10^1	5.53×10^{-8}
19	1.070×10^1	1.33×10^{-8}
20	3.060×10^0	1.88×10^{-9}
21	1.120×10^0	4.19×10^{-10}
22	4.140×10^{-1}	1.20×10^{-10}
合 計		1.0

注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを DLC-23 ライブラリー³⁾ の中性子 22 群構造に振り分けたものである。

D.3 モデル仕様

D.3.1 解析モデル

(ロ)-第 D.1 図の基本遮蔽体構造に基づき、遮蔽解析モデルは二次元(R-Z)モデルを設定する。輸送物頭部方向は、横置き時に水位のできる方向のトラニオン部断面をモデル化する。底部方向は、横置き時水位方向及び横方向のトラニオン部断面をモデル化する。

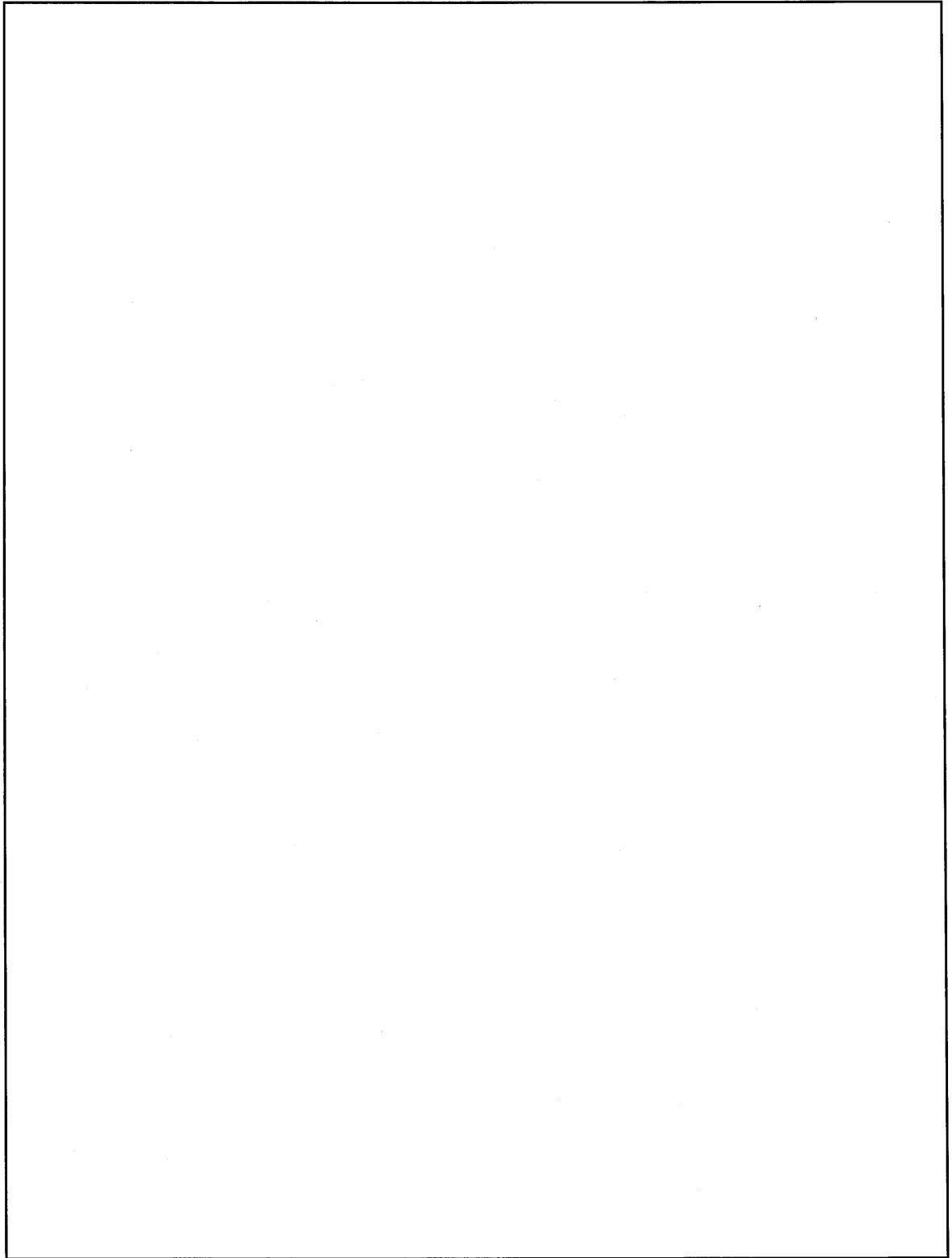
各試験条件におけるモデル化は以下に示す条件を考慮する。

1. 通常輸送時及び一般の試験条件下

通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデルは、一般の試験条件下において 0.3m 落下における緩衝体の変形(最大変形量：133mm)を考慮すること以外は同一とし、以下の条件とする。解析モデルを(ロ)-第 D.2 図から(ロ)-第 D.10 図に示す。

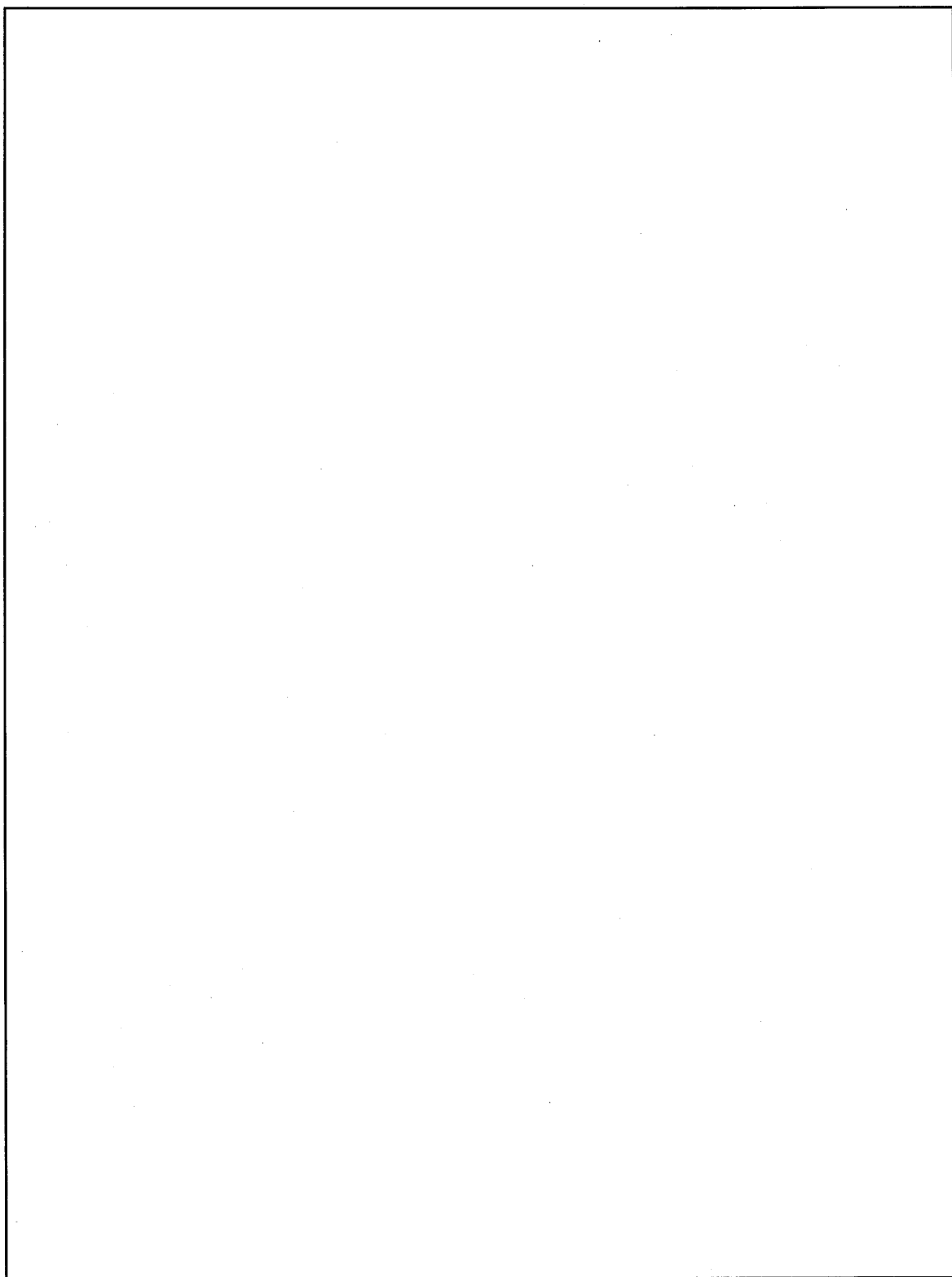
- ・内筒内での燃料集合体の軸方向の移動を安全側に考慮し、頭部方向評価モデルでは蓋方向に、底部方向評価モデルでは底方向に移動したモデルとする。
- ・内筒内水温度は、安全側に(ロ)章 B で求めた一般の試験条件下における水温(179℃)より高い□℃に設定する。
- ・内筒内水位は、安全側に□場合の水位とする。
- ・バスケットの□は遮蔽体として考慮し、他の部分については、□は燃料領域に均質化し、□は□に置き換え、均質化領域から除外する。
- ・フィン、空気、カバープレートのみ遮蔽体として考慮し、他の部材は安全側に空気に置き換え、距離のみ考慮する。
- ・各部寸法は全てノミナル値とし、公差は密度係数として考慮する。
- ・側部中性子遮蔽体については保守側の仮定として、レジンの□%の質量減損を考慮する。

なお、各バルブは空隙の少ない□バルブであり、ストリーミングの少ない構造である。本体のバルブに至る貫通孔のストリーミングに対しては、貫通孔を屈曲させる等により、また、蓋のバルブに至る貫通孔のストリーミングに対しては、緩衝体への補助遮蔽体の設置により、ストリーミングを含めたバルブ部の線量当量率は当該近傍表面の最大線量当量率より十分低いことを確認している。



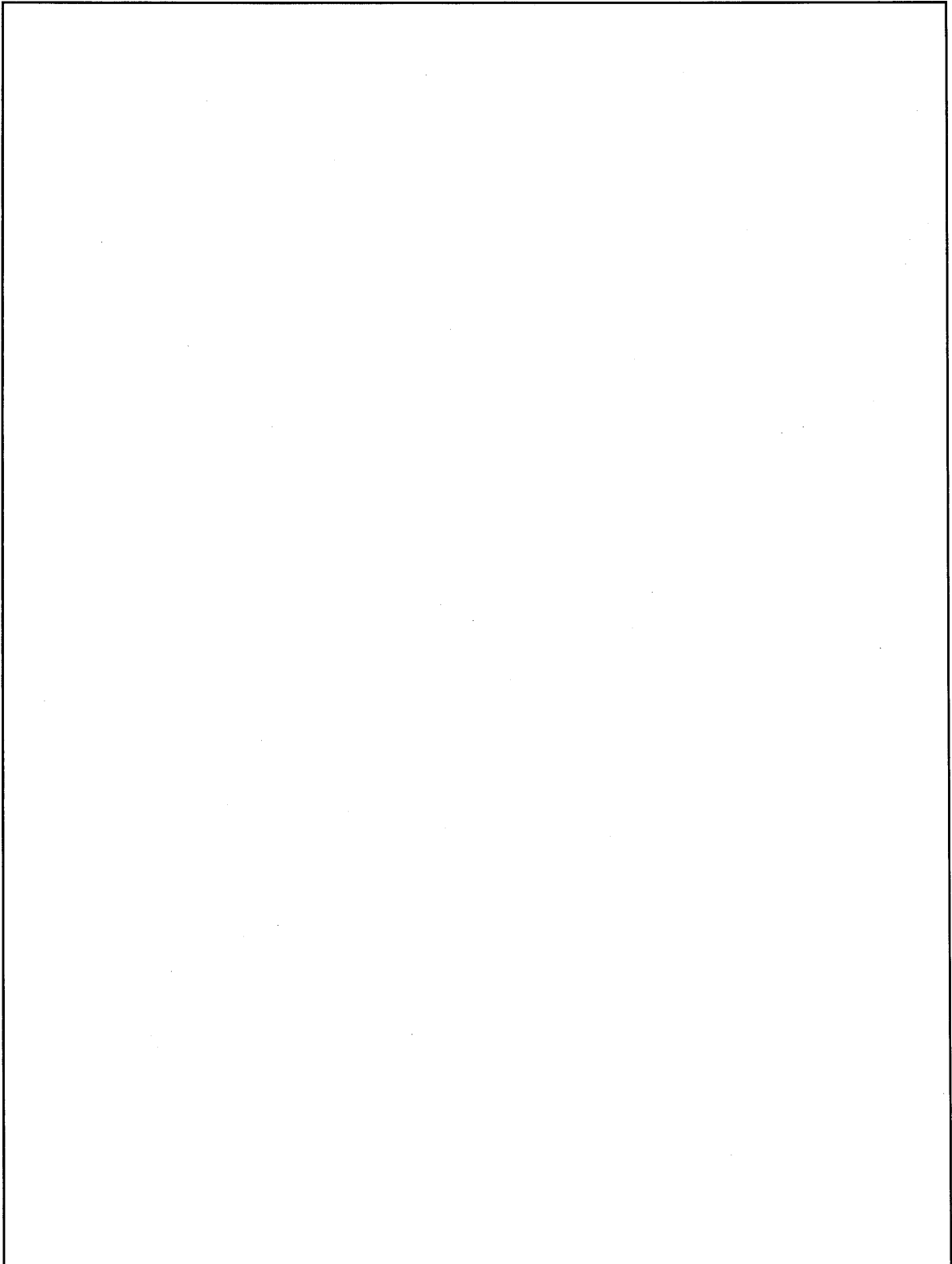
(ロ)-第 D. 2 図 通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデル

(タイプ 3(頭部))



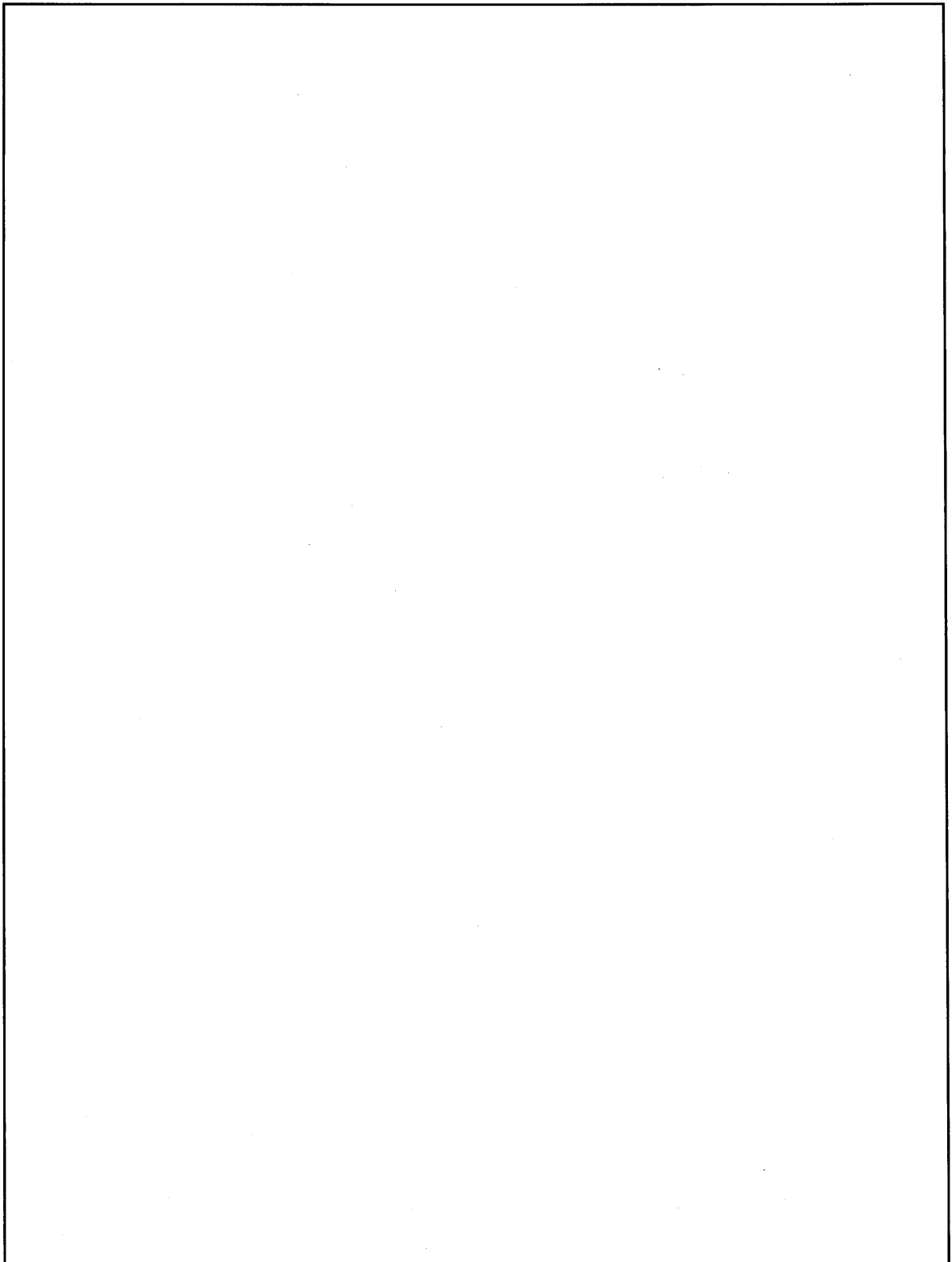
(ロ)-第 D.3 図 通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデル

(タイプ 3(底部水位方向))



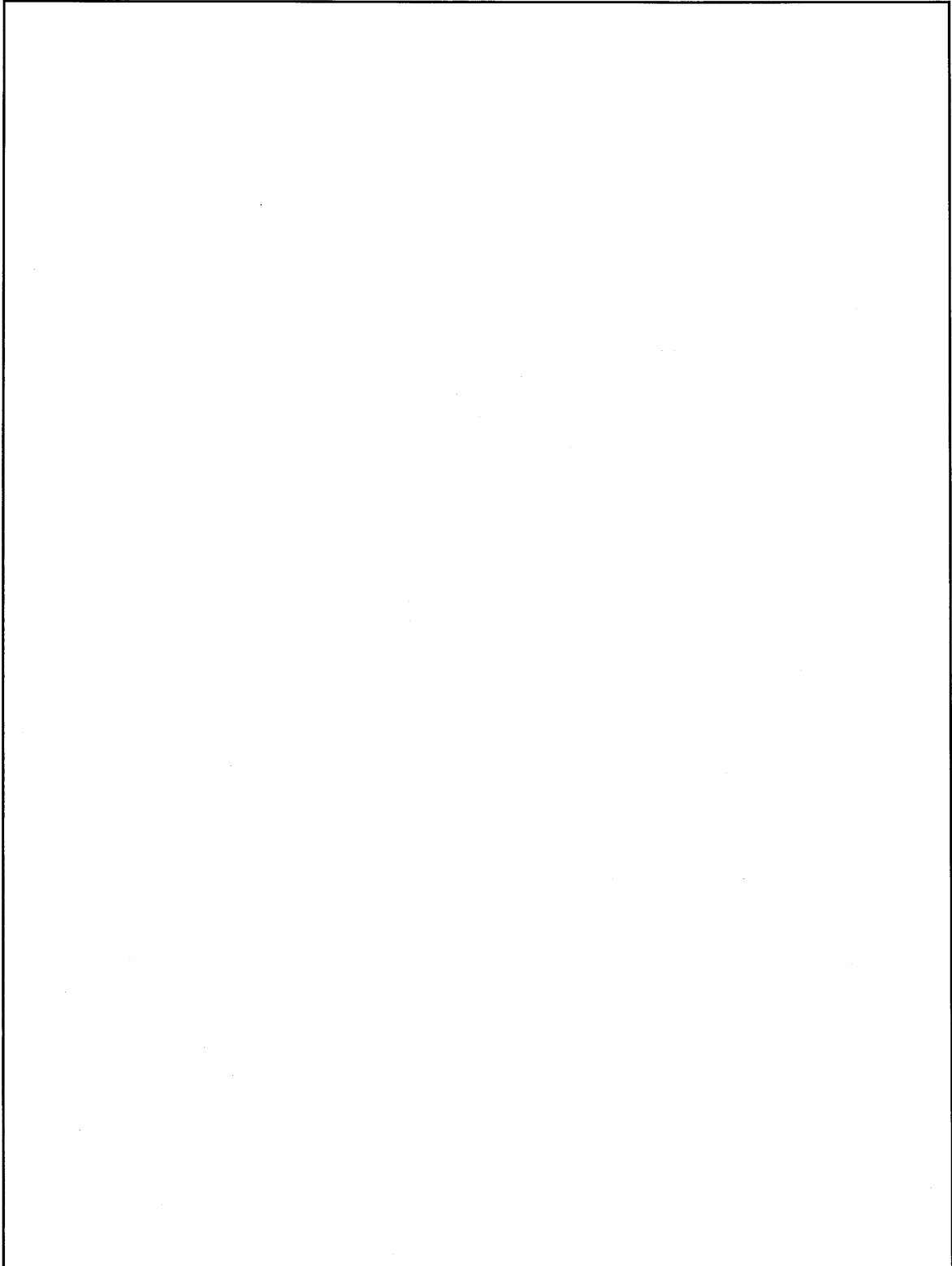
(ロ)-第 D. 4 図 通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデル

(タイプ 3(底部トラニオン方向))

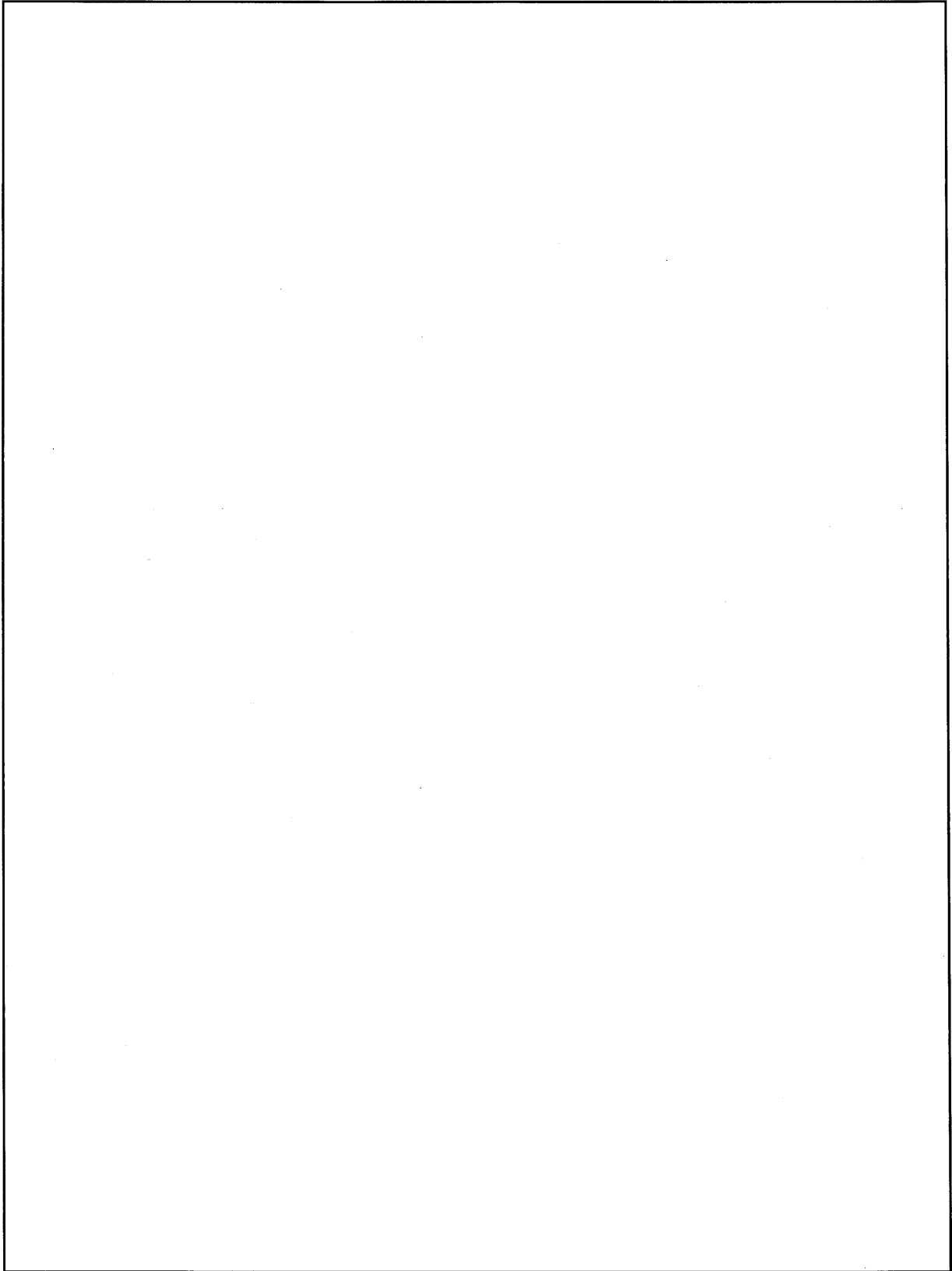


(ロ)-第 D.5 図 通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデル

(タイプ 4(頭部))

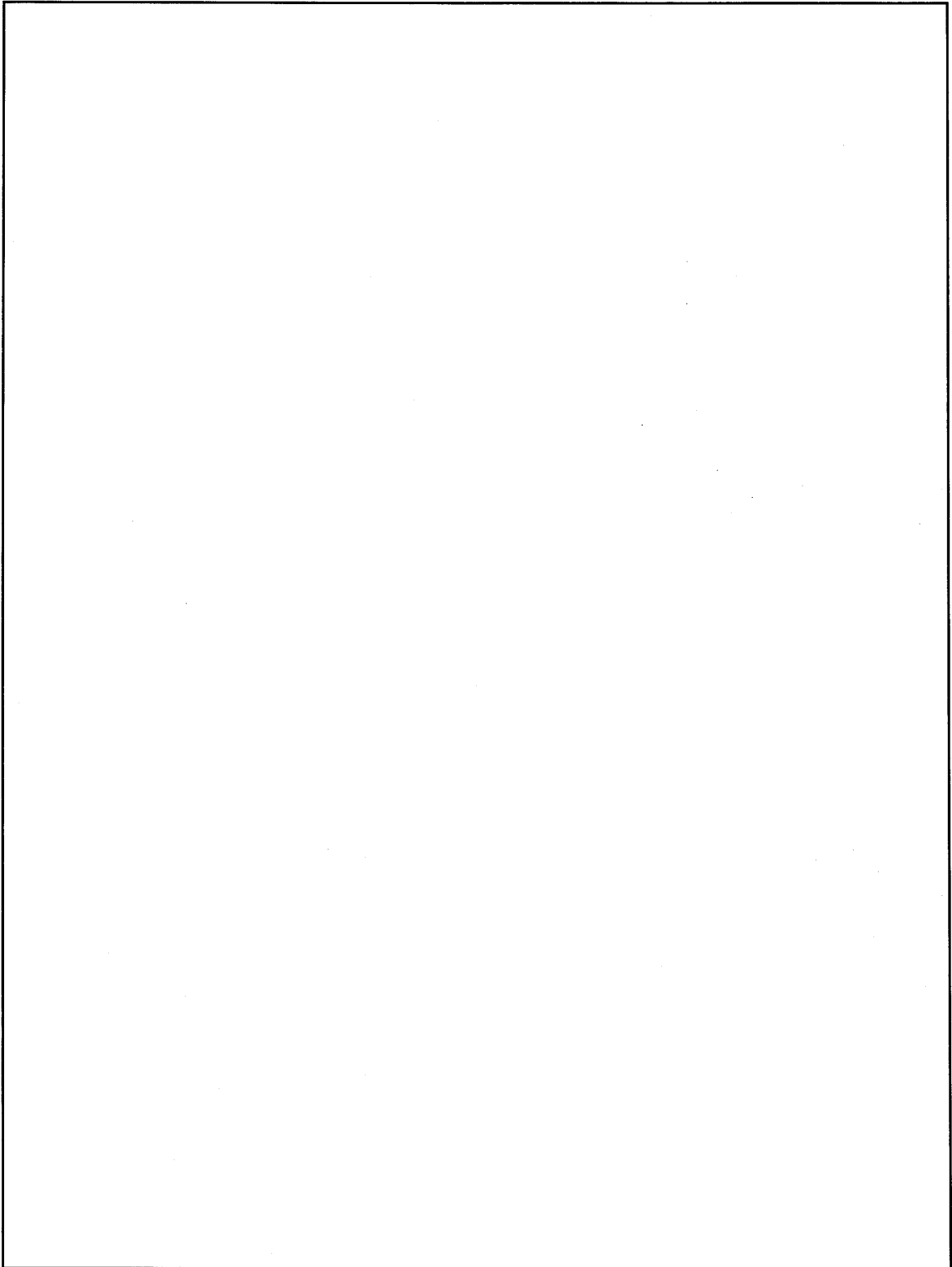


(ロ)-第 D. 6 図 通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデル
(タイプ 4(底部水位方向))



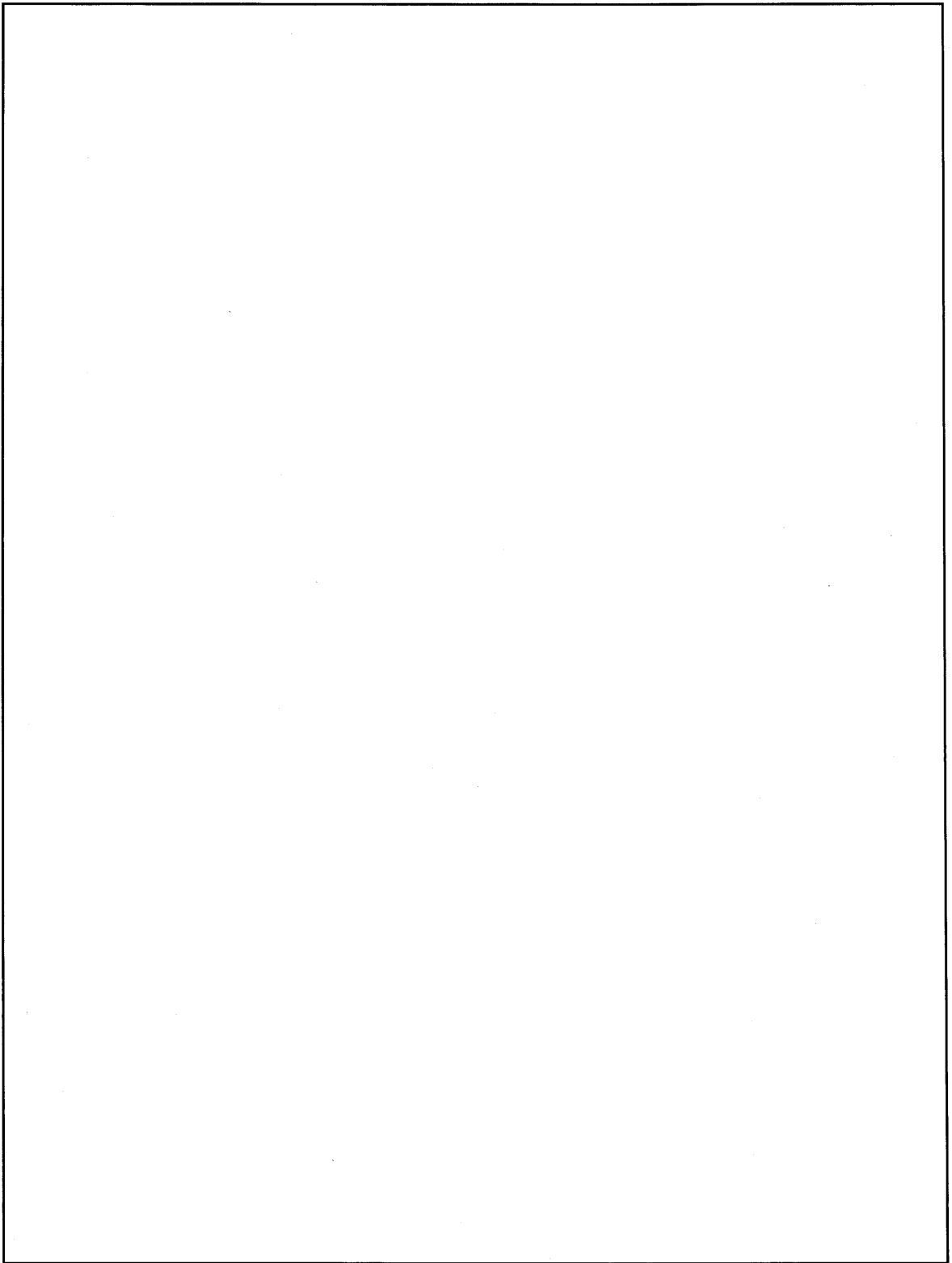
(ロ)-第 D.7 図 通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデル

(タイプ 4(底部トラニオン方向))



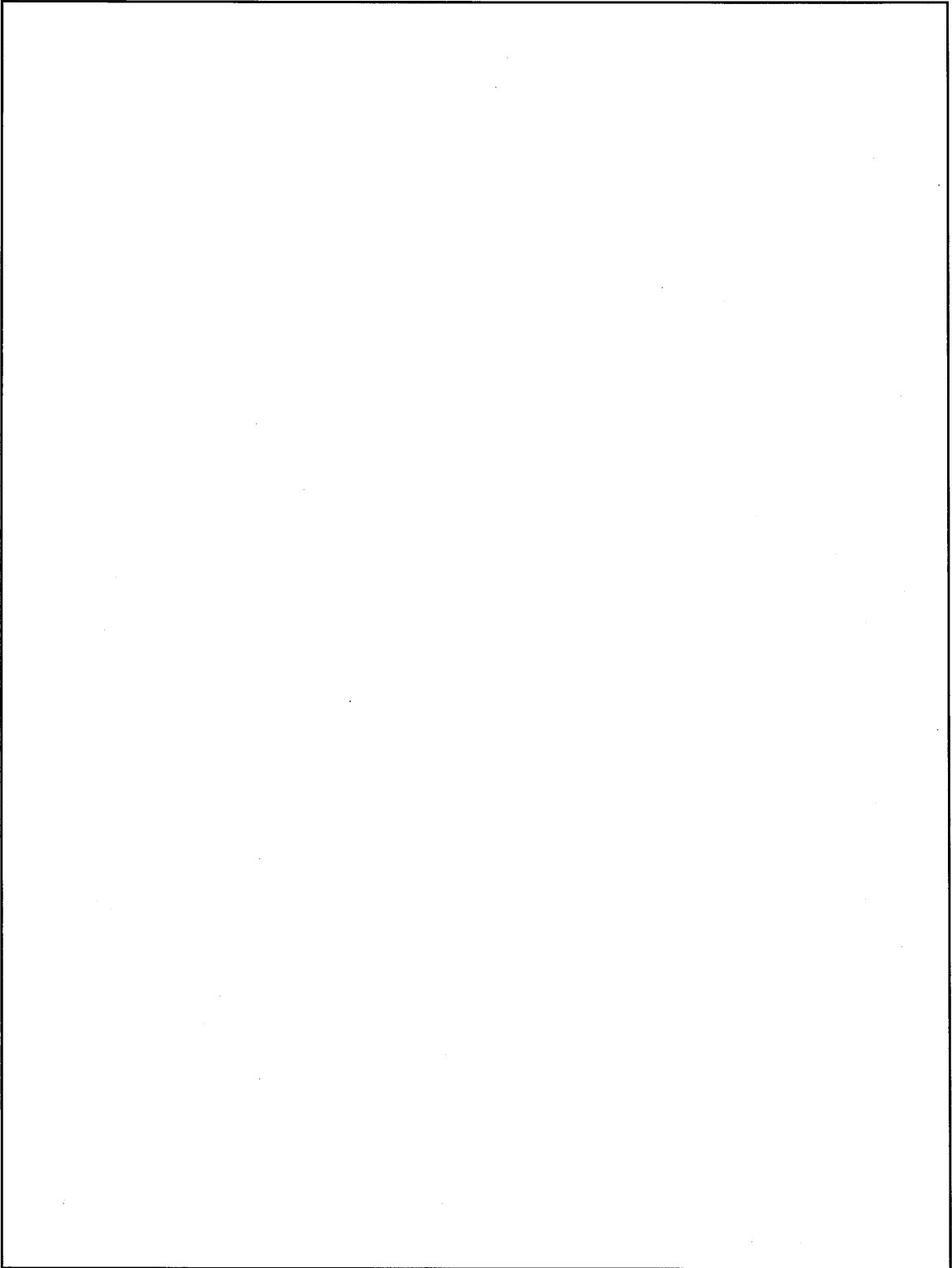
(ロ)-第 D. 8 図 通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデル

(タイプ 6(頭部))



(ロ)-第 D.9 図 通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデル

(タイプ 6(底部水位方向))

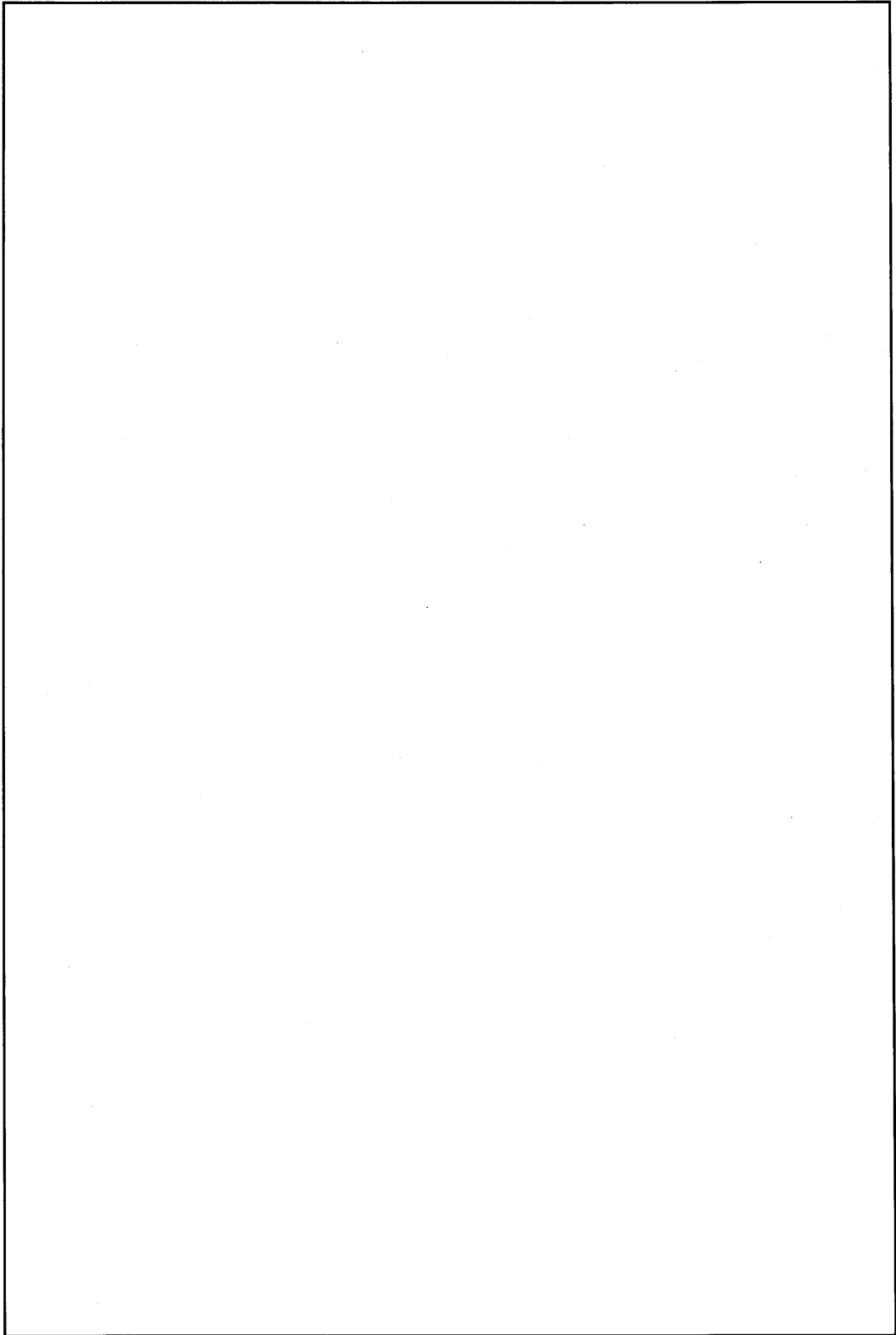


(ロ)-第 D. 10 図 通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデル
(タイプ 6(底部トラニオン方向))

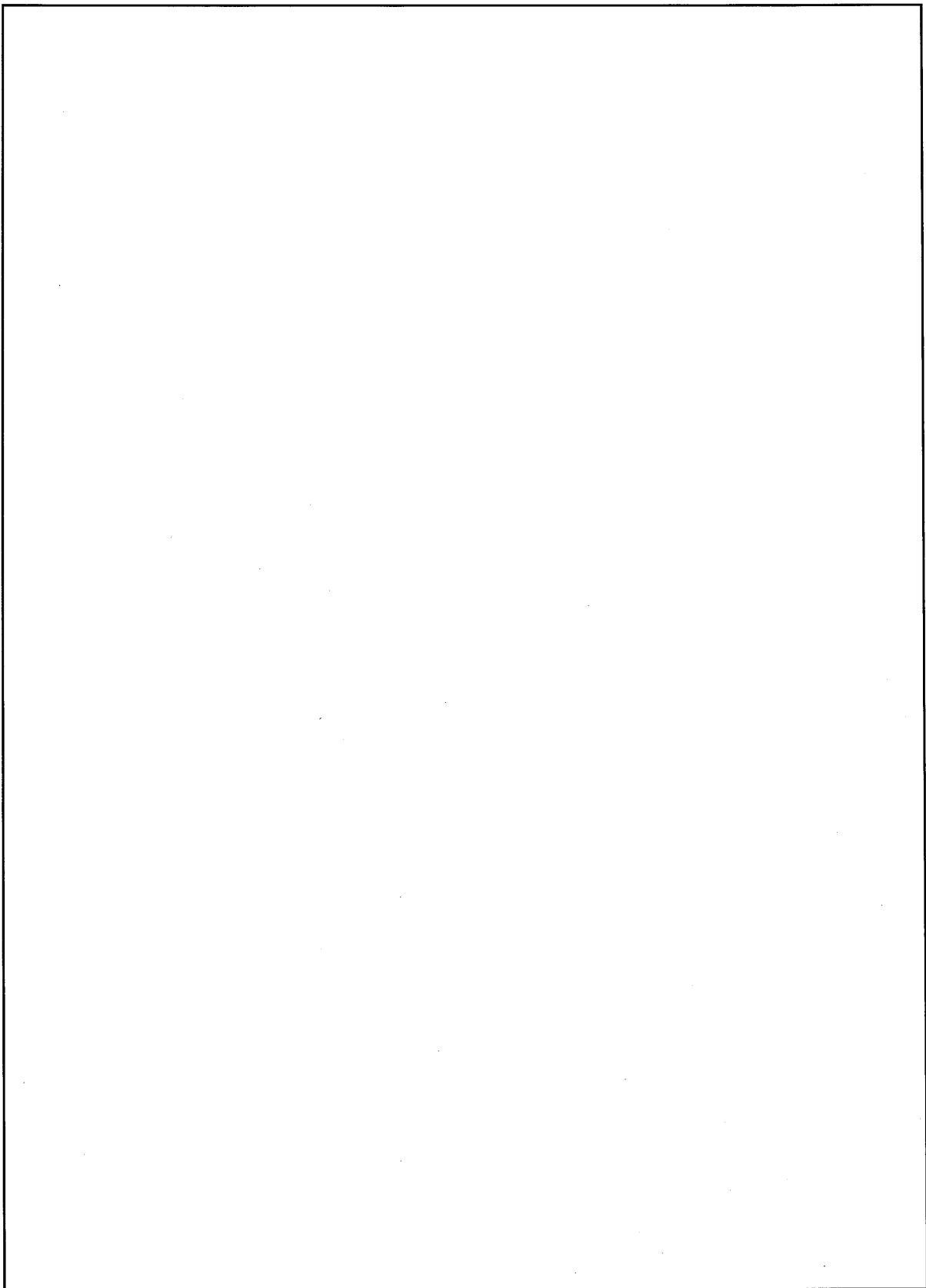
2. 特別の試験条件下

特別の試験条件下における解析モデルは一般の試験条件下の場合と以下の点で異なる。解析モデルを(ロ)-第 D. 11 図から(ロ)-第 D. 16 図に示す。

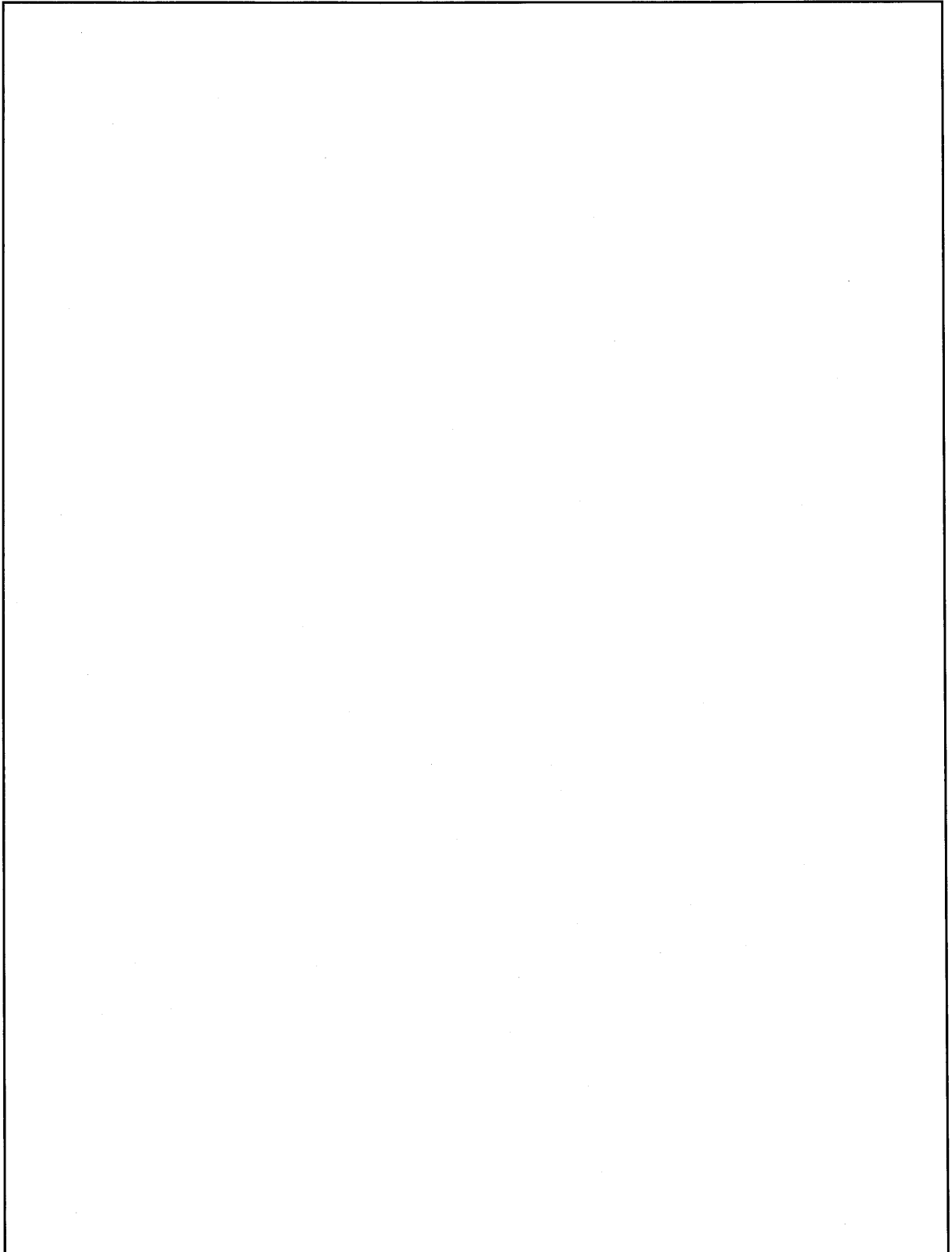
- ・内筒内水温度は、安全側に(ロ)章 B で求めた特別の試験条件下における水温(209℃)より高い□℃に設定する。
- ・内筒内水位は、横置きその他、蓋及び底を上にした縦置き状態も考慮する。
- ・下部スペーサ部は無視し、空気に置き換える。
- ・側部中性子遮蔽体のレジンの焼損は、(ロ)章 D. 6. 1 に示すように著しく焼損することはないが、安全側に□減少するものとする。また、落下試験Ⅱにより外筒及びレジンは部分的に変形することが考えられるので、安全側に貫通孔を模擬して側部中性子遮蔽体中央部の外筒及びレジンを無視するものとする。
- ・上・下部中性子遮蔽体及びレジンカバーは、落下試験Ⅱにより破損することが考えられるので、無視するものとする。
- ・フィン、落下試験により変形するのでモデルでは無視し、外筒表面を輸送物表面とする。
- ・緩衝体は外れることはないが、落下試験により大幅に変形するので、空気に置き換える。



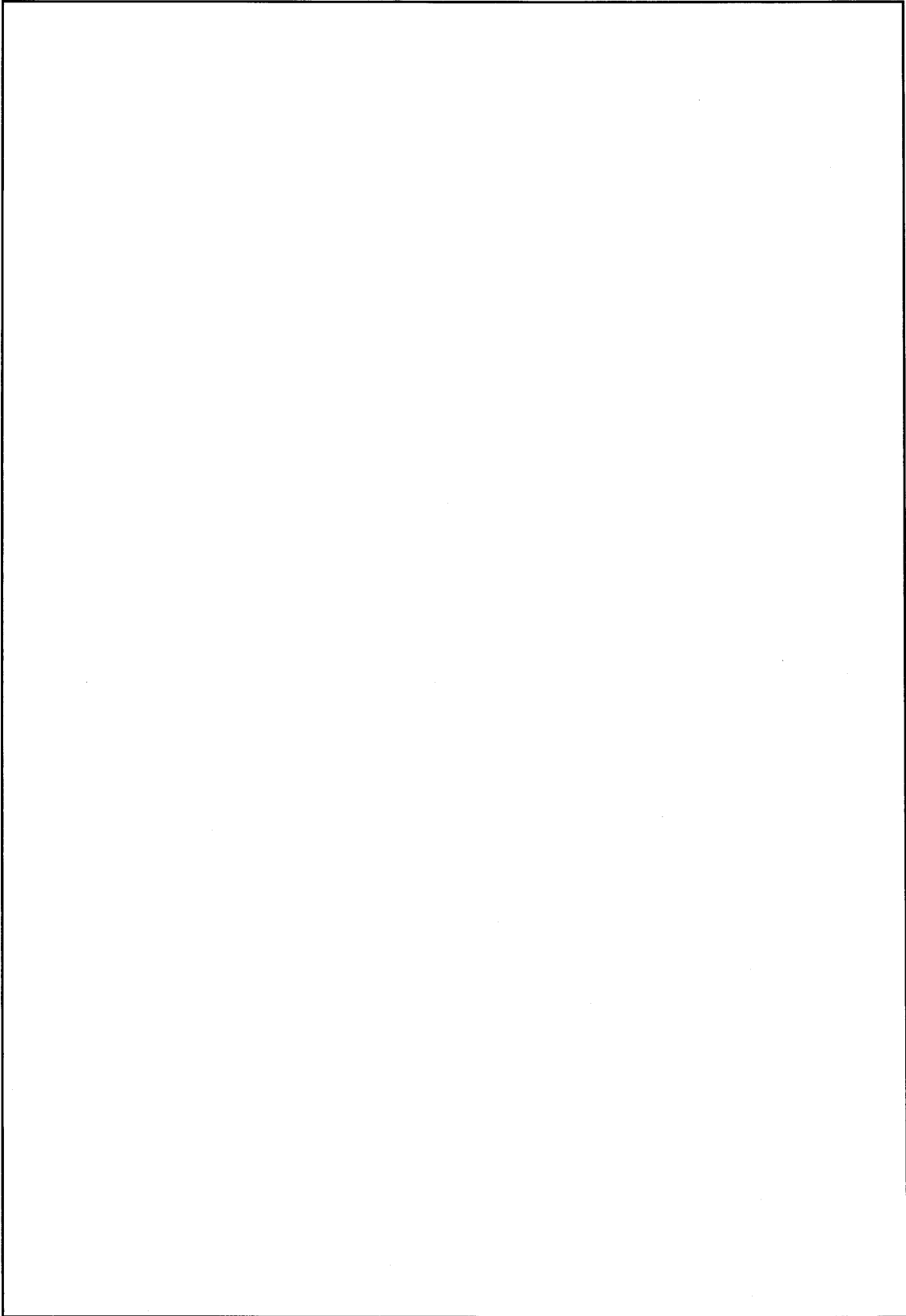
(ロ)-第 D. 11 図 特別の試験条件下の解析モデル(タイプ 3(頭部))



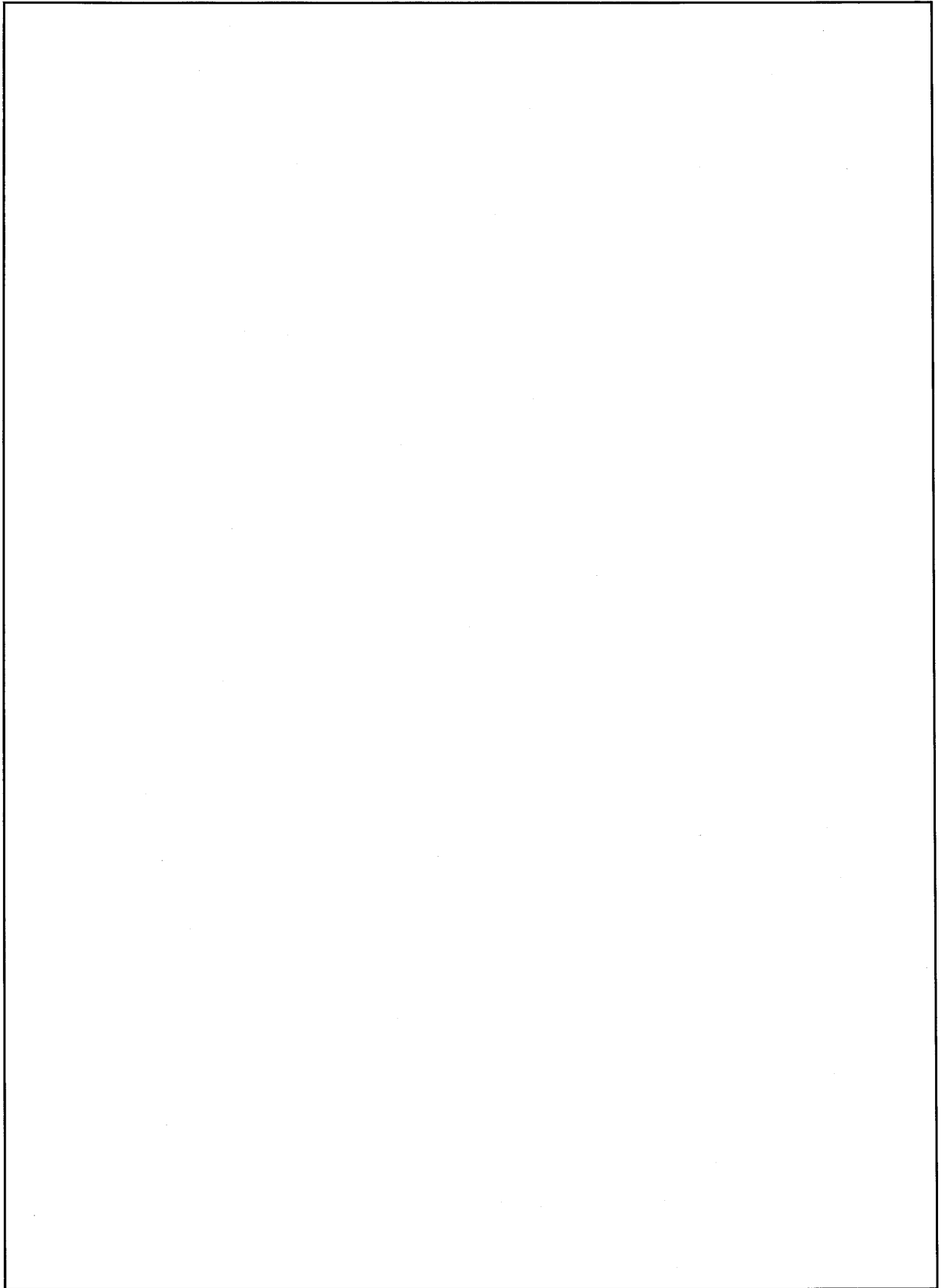
(ロ)-第 D. 12 図 特別の試験条件下の解析モデル(タイプ 3(底部))



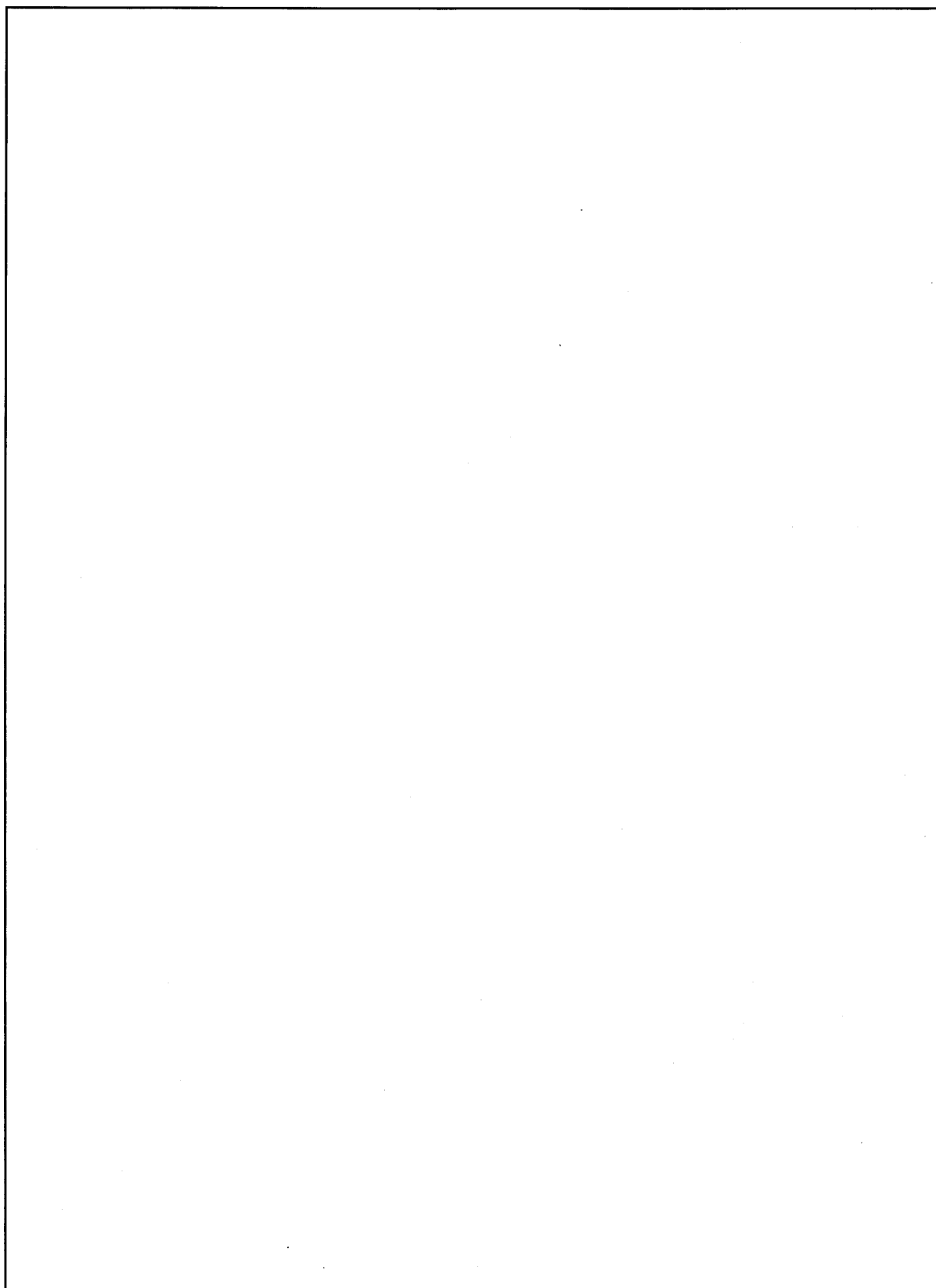
(ロ)-第 D. 13 図 特別の試験条件下の解析モデル(タイプ 4(頭部))



(ロ)-第 D.14 図 特別の試験条件下の解析モデル(タイプ 4(底部))



(ロ)-第 D. 15 図 特別の試験条件下の解析モデル(タイプ 6(頭部))



(ロ)-第 D. 16 図 特別の試験条件下の解析モデル(タイプ 6(底部))

D.3.2 解析モデル各領域における原子個数密度

遮蔽解析に用いる均質化領域の構成物質体積比を(口)-第 D.8 表に示す。

また、遮蔽解析に用いる各領域の原子個数密度を(口)-第 D.9 表及び(口)-第 D.10 表に示す。

原子個数密度算出に用いた内筒内水温度は、(口)章 B の結果に安全余裕を見込んで、一般の試験条件下では °C、特別の試験条件下では °C とした。

また、解析に用いる各部位の密度係数を(口)-第 D.11 表に示す。

以下に主要な遮蔽材の使用密度を示す。

1. レジン

密度 (g/cm³) : 1.62

B₄C (g/cm³) : 0.0155

H (g/cm³) : 0.086

なお、上記の炭化ホウ素濃度及び水素濃度については、工程中の誤差を考慮して設定した。

2. 炭素鋼 ()

密度 (g/cm³) :

3. ステンレス鋼 ()

密度 (g/cm³) :

4. ボロン入りステンレス鋼

密度 (g/cm³) :

5. 鉛

密度 (g/cm³) :

(ロ)-第D.8表 遮蔽解析に用いる均質化領域の構成物質体積比(1/3)

領域	均質化燃料領域(タイプ3)		
	上部ノズル部	上部プレナム部	燃料有効部
構成物質			
燃料集合体			
UO ₂			
Zr			
ステンレス鋼			
インコネル			
ボロン入りステンレス鋼			
ステンレス鋼			
水			
レジン			
伝熱フィン			
ボイド			

(ロ)-第D.8表 遮蔽解析に用いる均質化領域の構成物質体積比(2/3)

領域	均質化燃料領域(タイプ4)							
	上部ノズル部	上部プレナム部	燃料有効部	下部ノズル部				
構成物質								
燃料集合体					UO ₂	Zr	ステンレス鋼	インコネル
バスケット					ボロン入りステンレス鋼	ステンレス鋼	水	レジン
伝熱フィン					ボロン入りステンレス鋼	ステンレス鋼	水	伝熱フィン
ポイド					ボロン入りステンレス鋼	ステンレス鋼	水	ポイド
					ボロン入りステンレス鋼	ステンレス鋼	水	
					ボロン入りステンレス鋼	ステンレス鋼	水	
					ボロン入りステンレス鋼	ステンレス鋼	水	
					ボロン入りステンレス鋼	ステンレス鋼	水	
					ボロン入りステンレス鋼	ステンレス鋼	水	

(ロ)-第D.8表 遮蔽解析に用いる均質化領域の構成物質体積比(3/3)

領域 構成物質	均質化燃料領域(タイプ6)						側部中性子 遮蔽体
	上部 ゾル部	燃料有効部	下部 ゾル部	下部 ペーパー部	内筒内水		
燃料 集合体	UO ₂						
	Zr						
	ステンレス鋼						
バスケット	インコネル						
	ボロン入り ステンレス鋼						
	ステンレス鋼						
水							
レジン							
伝熱フィン							
ボイド							

(ロ)-第D.9表 通常輸送時及び一般の試験条件下の遮蔽解析に用いる各領域の原子個数密度(1/4)

(単位: 10^{24} atoms/cm³)

領域 元素	均 質 化 燃 料 領 域(タ イ プ 3)		
	上部ノズル部	上部プレナム部	燃料有効部
H			
¹⁰ B			
C			
N			
O			
Al			
Cr			
Fe			
Ni			
Cu			
Zr			
Pb			
²³⁵ U			
²³⁸ U			

注記) ()内は底部のトラニオン方向の評価に用いる値である。

(ロ)-第D.9表 通常輸送時及び一般の試験条件下の遮蔽解析に用いる各領域の原子個数密度(2/4)

(単位: 10^{24} atoms/cm³)

領域 元素	均 質 化 燃 料 領 域(タ イ プ 4)				下部ノズル部
	上部プレンム部	燃料有効部	下部端栓部	下部ノズル部	
H					
¹⁰ B					
C					
N					
O					
Al					
Cr					
Fe					
Ni					
Cu					
Zr					
Pb					
²³⁵ U					
²³⁸ U					

注記) ()内は底部のトランニオン方向の評価に用いる値である。

(ロ)-第D.9表 通常輸送時及び一般の試験条件下の遮蔽解析に用いる各領域の原子個数密度(3/4)

(単位: 10^{24} atoms/cm³)

領域 元素	均 質 化 燃 料 領 域 (タ イ プ 6)					
	上部ノズル部	上部プレナム部	燃料有効部	下部端栓部	下部ノズル部	
H						
¹⁰ B						
C						
N						
O						
Al						
Cr						
Fe						
Ni						
Cu						
Zr						
Pb						
²³⁵ U						
²³⁸ U						

注記) ()内は底部のトラニオン方向の評価に用いる値である。

(ロ)-第D.9表 通常輸送時及び一般の試験条件下の遮蔽解析に用いる各領域の原子個数密度(4/4)

(単位: 10^{24} atoms/cm³)

領域 元素	下部 スペーサ部	内筒内水 (□℃)	ボロン入り ステンレス鋼	ステンレス鋼	炭素鋼	鉛	中性子遮蔽材		空気
							側部	上・下部	
H									
¹⁰ B									
C									
N									
O									
Al									
Cr									
Fe									
Ni									
Cu									
Zr									
Pb									
²³⁵ U									
²³⁸ U									

注記) ()内は底部のトランニオン方向の評価に用いる値である。

(ロ) 第D.10表 特別の試験条件下の遮蔽解析に用いる各領域の原子個数密度(1/4)

(単位: 10^{24} atoms/cm³)

領域 元素	均 質		燃 料		領 域(タ イ プ 3)	
	上部ノズル部	上部プレナム部	燃 料	燃 料	燃 料 有 効 部	下 部 ノ ズ ル 部
H						
¹⁰ B						
C						
N						
O						
Al						
Cr						
Fe						
Ni						
Cu						
Zr						
Pb						
²³⁵ U						
²³⁸ U						

注記) ()内は非水没領域の値である。

(ロ)-第D.10表 特別の試験条件下の遮蔽解析に用いる各領域の原子個数密度(2/4)

(単位: 10^{24} atoms/cm³)

領域 元素	均質化燃料領域(タイプ4)			
	上部ノズル部	上部プレナム部	燃料有効部	下部端栓部
H				
¹⁰ B				
C				
N				
O				
Al				
Cr				
Fe				
Ni				
Cu				
Zr				
Pb				
²³⁵ U				
²³⁸ U				

注記 ()内は非水没領域の値である。

(ロ)-第D.10表 特別の試験条件下の遮蔽解析に用いる各領域の原子個数密度(3/4)

(単位: 10^{24} atoms/cm³)

領域 元素	均 質 化 燃 料 領 域(タ イ プ 6)					
	上部ノズル部	上部プレナム部	燃料有効部	下部端栓部	下部ノズル部	
H						
¹⁰ B						
C						
N						
O						
Al						
Cr						
Fe						
Ni						
Cu						
Zr						
Pb						
²³⁵ U						
²³⁸ U						

注記 ()内は非水没領域の値である。

(ロ)-第D.10表 特別の試験条件下の遮蔽解析に用いる各領域の原子個数密度(4/4)

(単位: 10^{24} atoms/cm³)

領域 元素	内筒内水 (□°C)	ボロン入り ステンレス鋼	ステンレス鋼	炭素鋼	鉛	側部中性子 遮蔽材	空気
H							
¹⁰ B							
C							
N							
O							
Al							
Cr							
Fe							
Ni							
Cu							
Zr							
Pb							
²³⁵ U							
²³⁸ U							

(ロ)-第D.11表 遮蔽解析に用いる密度係数

部 位	材 質	密 度 係 数
内 筒	ステンレス鋼	
中 間 筒	炭 素 鋼	
外 筒	炭 素 鋼	
上 部 ト ラ ニ オ ン 部	ステンレス鋼	
下 部 ト ラ ニ オ ン 部		
フ ラ ン ジ		
レ ジ ン カ バ ー	ステンレス鋼	
緩 衝 体 カ バ ー プ レ ー ト	ステンレス鋼	
蓋	ステンレス鋼	
	ステンレス鋼	
仕 切 板	ステンレス鋼	
底 板	ステンレス鋼	
バスケット格子(外周板)	ボロン入りステンレス鋼	
ガ ン マ 線 遮 蔽 体	鉛	
上 部 中 性 子 遮 蔽 体	レ ジ ン	
下 部 中 性 子 遮 蔽 体 水位方向		
下 部 中 性 子 遮 蔽 体 トランニオン方向		
側 部 中 性 子 遮 蔽 体	レジン+銅	

D.4 遮蔽評価

輸送物の外部の指定場所でガンマ線量当量率、中性子線量当量率を評価するために使用した基本手法とコードについて以下に説明する。

1. 基本手法

遮蔽計算はガンマ線、中性子ともに DOT3.5 コードを用いて行った。

DOT3.5 コードは二次元輸送計算プログラムであり、角度方向を Sn 近似により、散乱の角度依存性を P0 近似によりそれぞれ扱っている。本解析では、 近似を用いた。

断面積は、DLC-23/CASK ライブラリーのデータ³⁾を使用した。

本ライブラリーは、米国オークリッジ国立研究所(ORNL)により ENDF/B 核データファイルを用いて照射済燃料輸送容器の遮蔽計算用に作成されたもので、すでに多くの使用実績を持っている。

このデータの中性子のエネルギー群数は22であり、ガンマ線のエネルギー群数は18である。この群構造に対応した線束から線量当量率への変換係数は ICRP Pub1. 74⁵⁾の値に基づいており、これを(口)-第 D. 12 表及び(口)-第 D. 13 表に示す。

(口)-第D.12表 中性子線量当量率変換係数

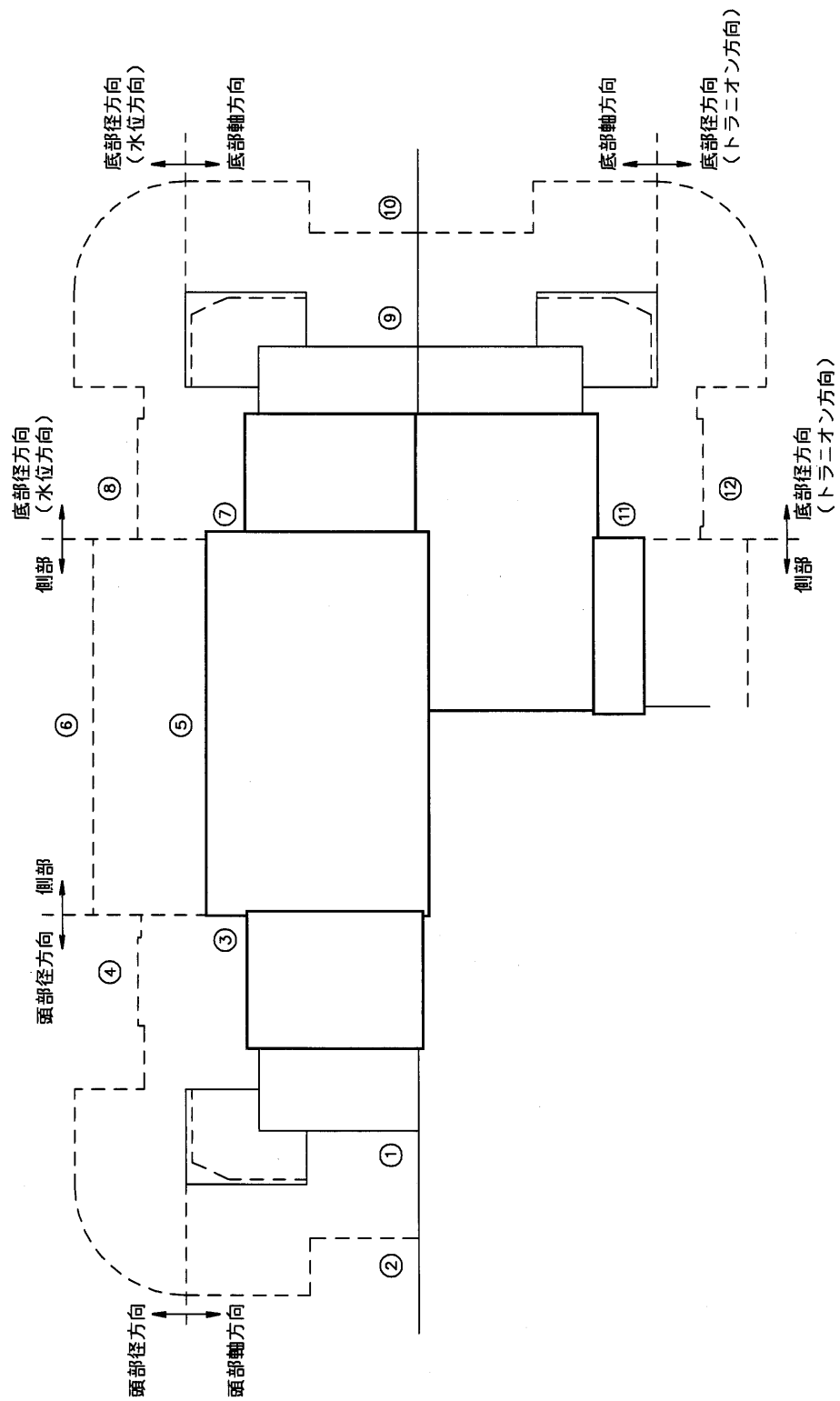
エネルギー群数	上限エネルギー (eV)	線量当量率変換係数 ((μ Sv/h)/(n/cm ² ·s))
1	1.4920×10^7	1.8107×10^0
2	1.2200×10^7	1.6435×10^0
3	1.0000×10^7	1.5115×10^0
4	8.1800×10^6	1.4577×10^0
5	6.3600×10^6	1.4475×10^0
6	4.9600×10^6	1.4642×10^0
7	4.0600×10^6	1.4758×10^0
8	3.0100×10^6	1.4901×10^0
9	2.4600×10^6	1.4989×10^0
10	2.3500×10^6	1.5100×10^0
11	1.8300×10^6	1.5319×10^0
12	1.1100×10^6	1.4016×10^0
13	5.5000×10^5	8.9057×10^{-1}
14	1.1100×10^5	1.1054×10^{-1}
15	3.3500×10^3	2.8151×10^{-2}
16	5.8300×10^2	3.1602×10^{-2}
17	1.0100×10^2	3.5432×10^{-2}
18	2.9000×10^1	3.8652×10^{-2}
19	1.0700×10^1	4.2723×10^{-2}
20	3.0600×10^0	4.6532×10^{-2}
21	1.1200×10^0	4.8504×10^{-2}
22	4.1400×10^{-1}	4.1010×10^{-2}

(ロ)-第D.13表 ガンマ線量当量率変換係数

エネルギー群数	上限エネルギー (eV)	線量当量率変換係数 ((μ Sv/h)/(photons/cm ² ·s))
1	1.0000×10^7	8.4944×10^{-2}
2	8.0000×10^6	7.2388×10^{-2}
3	6.5000×10^6	6.1456×10^{-2}
4	5.0000×10^6	5.2036×10^{-2}
5	4.0000×10^6	4.4163×10^{-2}
6	3.0000×10^6	3.7842×10^{-2}
7	2.5000×10^6	3.3385×10^{-2}
8	2.0000×10^6	2.8967×10^{-2}
9	1.6600×10^6	2.4817×10^{-2}
10	1.3300×10^6	2.0800×10^{-2}
11	1.0000×10^6	1.7275×10^{-2}
12	8.0000×10^5	1.4112×10^{-2}
13	6.0000×10^5	1.0523×10^{-2}
14	4.0000×10^5	7.5325×10^{-3}
15	3.0000×10^5	5.4060×10^{-3}
16	2.0000×10^5	3.2205×10^{-3}
17	1.0000×10^5	1.9332×10^{-3}
18	5.0000×10^4	2.6973×10^{-3}

2. 計算結果

通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデルにおける主要部位でのガンマ線量当量率及び中性子線量当量率の計算結果を(口)-第D. 17 図、(口)-第D. 14 表、(口)-第D. 15 表及び(口)-第D. 16 表に、特別の試験条件下の解析モデルにおける各線量当量率の計算結果を(口)-第D. 18 図、(口)-第D. 17 表、(口)-第D. 18 表及び(口)-第D. 19 表に示す。



(ロ)-第D.17図 通常輸送時及び一般の試験条件下の線量当量率評価位置

(ロ)-第D.14表 通常輸送時及び一般の試験条件下の線量当量率(タイプ3)

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部		側部	底部				
	軸方向	径方向		径方向 (水位方向)	軸方向	径方向 (トランニオン方向)		
							①	③
表面	ガンマ線	燃料有効部	9.5	69.8	99.6	221.2	5.9	158.9
		構造材放射化	132.5	190.6	6.7	27.3	6.0	20.9
		二次ガンマ線	< 0.1	4.8	6.4	19.6	0.3	11.9
	中性子	16.2	302.1	38.2	990.4	65.0	1,105.6	
合計	158.3	567.3	150.9	1,258.5	77.2	1,297.3		
表面から1m	ガンマ線	燃料有効部	2.7	16.9	45.3	30.0	5.2	28.4
		構造材放射化	34.7	24.0	3.5	5.5	5.2	2.6
		二次ガンマ線	< 0.1	0.9	2.9	1.9	< 0.1	1.6
	中性子	4.2	13.9	15.2	29.3	15.1	46.1	
合計	41.7	55.7	66.9	66.7	25.6	78.7		

(ロ)-第D.15表 通常輸送時及び一般の試験条件下の線量当量率(タイプ4)

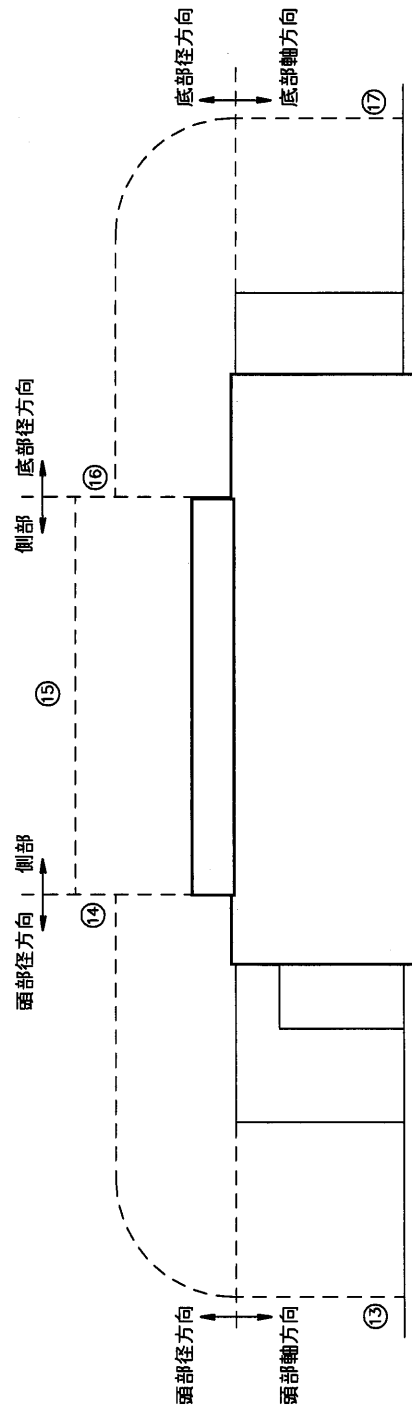
(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部		側部	底部			
	軸方向	径方向		径方向 (水位方向)	軸方向	径方向 (トランニオン方向)	
							①
表面	燃料有効部	5.9	39.4	62.3	130.5	6.5	130.1
	構造材放射化	272.8	415.7	5.6	38.7	45.0	33.6
	二次ガンマ線	< 0.1	3.6	6.7	17.9	0.1	14.8
	中性子	11.7	191.7	37.5	934.0	31.6	950.3
合計	290.5	650.4	112.1	1,121.1	83.2	1,128.8	
表面から1m	燃料有効部	1.6	9.0	28.4	18.0	2.6	17.5
	構造材放射化	74.2	48.3	3.5	12.2	16.4	3.8
	二次ガンマ線	< 0.1	0.7	2.8	1.7	< 0.1	1.5
	中性子	3.1	11.0	14.6	26.3	12.2	39.5
合計	79.0	69.0	49.3	58.2	31.3	62.3	

(ロ)-第D.16表 通常輸送時及び一般の試験条件下の線量当量率(タイプ6)

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部			側部	底部		
	軸方向		径方向		径方向 (水位方向)	軸方向	径方向 (トランニオン方向)
	①	②	③				
⑤	⑦	⑨	⑪	⑥	⑧	⑩	⑫
燃料有効部	5.0	36.0	52.3	111.3	5.6	110.8	
構造材放射化	275.0	346.4	5.6	36.8	43.2	32.0	
二次ガンマ線	< 0.1	3.9	7.0	19.0	0.1	15.7	
中性子	13.2	214.7	38.9	978.3	34.1	997.5	
合計	293.3	601.0	103.8	1,145.4	83.0	1,156.0	
評価点	②	④	⑥	⑧	⑩	⑫	
燃料有効部	1.4	7.7	23.8	15.2	2.2	14.7	
構造材放射化	72.8	45.1	3.5	11.8	15.8	3.6	
二次ガンマ線	< 0.1	0.8	2.9	1.8	< 0.1	1.6	
中性子	3.5	11.8	15.2	27.7	13.0	41.9	
合計	77.8	65.4	45.4	56.5	31.1	61.8	



(口)-第 D. 18 図 特別の試験条件下の線量当量率評価位置

(ロ)-第D.17表 特別の試験条件下の線量当量率(タイプ3)

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部		側部	底部		
	軸方向	径方向		径方向	軸方向	
⑬	⑭	⑮	⑯	⑰		
ガンマ線	燃料有効部	26.0	55.3	217.8	191.5	76.8
	構造材放射化	141.3	243.4	20.9	64.0	40.2
	二次ガンマ線	0.7	10.2	37.6	15.5	4.9
中性子	195.8	487.8	1,141.3	2,094.8	1,551.5	
合計	363.8	796.7	1,417.6	2,365.8	1,673.4	

(ロ)-第D.18表 特別の試験条件下の線量当量率(タイプ4)

(単位：μSv/h)

評価点	頭部		側部	底部		
	軸方向	径方向		径方向	軸方向	
⑬	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	
表面から 1m ガンマ線	燃料有効部	19.1	35.0	146.5	127.9	46.2
	構造材放射化	318.2	544.9	26.7	247.4	113.2
	二次ガンマ線	0.6	9.4	37.5	17.5	4.7
中性子	175.8	428.4	1,141.6	2,029.3	1,520.9	
合計	513.7	1,017.7	1,352.3	2,422.1	1,685.0	

(ロ)-第D.19表 特別の試験条件下の線量当量率(タイプ6)

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部		側部	底部		
	軸方向	径方向		径方向	軸方向	
⑬	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	
ガンマ線	燃料有効部	14.8	28.9	118.3	100.7	35.2
	構造材放射化	265.2	468.7	25.5	235.6	107.3
	二次ガンマ線	0.7	9.7	38.2	17.6	4.6
中性子	174.8	434.1	1,151.3	1,979.8	1,459.2	
合計	455.5	941.4	1,333.3	2,333.7	1,606.3	

D.5 結果の要約及びその評価

通常輸送時、一般及び特別の試験条件下の遮蔽解析条件の要約を(ロ)-第D.20表に示す。

また、計算から得られた最大線量当量率の要約は(ロ)-第D.21表、(ロ)-第D.22表及び(ロ)-第D.23表に示すとおりであり、使用期間60年での中性子遮蔽体の質量減損を考慮した場合においても規則及び告示で定められた基準を満足する。また、一般の試験条件下における輸送物表面の最大線量当量率は著しく増加することはない。

(ロ)-第D.20表 遮蔽解析条件の要約

項 目		条 件		
		通常輸送時	一般の試験条件	特別の試験条件
線 源		軸方向移動考慮 ・ 頭部方向評価モデルでは蓋方向に移動 ・ 底部方向評価モデルでは底方向に移動		
遮 蔽 体	内筒内水	通常輸送時の水位 () 水温は、一般の試験条件の温度より高く設定	水位は横置き、縦置き状態を考慮 () () 水温は特別の試験条件の最高温度より高く設定	
	本 体	内筒、蓋、底板(ステンレス鋼) 中間筒、外筒(炭素鋼) ガンマ線遮蔽体(鉛) 中性子遮蔽体(レジン)	同左 ただし、上・下部中性子遮蔽体無視 側部中性子遮蔽体及び外筒の変形を考慮 レジンの密度は半分に設定	
	フ ィ ン	空気に置き換え、距離のみ考慮		無 視
	緩 衝 体	カバープレートのみ遮蔽体として考慮し、他は空気に置き換え、距離のみ考慮	変形を考慮	無 視
バルブ部のストリーミング		各バルブ部のストリーミングを含む線量当量率は当該近傍の最大線量当量率より十分低いのでモデル上考慮していない。		

(ロ)-第D.21表 最大線量当量率の要約(タイプ3)

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

部 位 項 目	輸送物表面					表面から 1m								
	頭 部		側 部	底 部		頭 部		側 部	底 部					
	軸方向	径方向		径方向	軸方向	軸方向	径方向		径方向	軸方向				
通常輸送時														
ガンマ線	142.1	265.2	112.7	191.7	12.2	37.5	41.8	51.7	32.6	10.5				
中性子	16.2	302.1	38.2	1,105.6	65.0	4.2	13.9	15.2	46.1	15.1				
合 計	158.3	567.3	150.9	1,297.3	77.2	41.7	55.7	66.9	78.7	25.6				
一般の試験条件下						/								
ガンマ線	142.1	265.2	112.7	191.7	12.2									
中性子	16.2	302.1	38.2	1,105.6	65.0									
合 計	158.3	567.3	150.9	1,297.3	77.2									
特別の試験条件下	/													
ガンマ線						168.0	308.9	276.3	271.0	121.9				
中性子						195.8	487.8	1,141.3	2,094.8	1,551.5				
合 計	363.8	796.7	1,417.6	2,365.8	1,673.4									
基 準 値	/					/								
通常輸送時											2,000		100	
一般の試験条件下											2,000		-	
特別の試験条件下	-		10,000											

(ロ)-第D.22表 最大線量当量率の要約(タイプ4)

(単位: μ Sv/h)

部 位 項 目	輸送物表面					表面から 1m				
	頭 部		側 部	底 部		頭 部		側 部	底 部	
	軸方向	径方向		径方向	軸方向	軸方向	径方向		径方向	軸方向
通常輸送時										
ガンマ線	278.8	458.7	74.6	178.5	51.6	75.9	58.0	34.7	22.8	19.1
中性子	11.7	191.7	37.5	950.3	31.6	3.1	11.0	14.6	39.5	12.2
合 計	290.5	650.4	112.1	1,128.8	83.2	79.0	69.0	49.3	62.3	31.3
一般の試験条件下						/				
ガンマ線	278.8	458.7	74.6	178.5	51.6					
中性子	11.7	191.7	37.5	950.3	31.6					
合 計	290.5	650.4	112.1	1,128.8	83.2					
特別の試験条件下	/									
ガンマ線						337.9	589.3	210.7	392.8	164.1
中性子						175.8	428.4	1,141.6	2,029.3	1,520.9
合 計	513.7	1,017.7	1,352.3	2,422.1	1,685.0					
基準値	/									
通常輸送時						2,000			100	
一般の試験条件下						2,000			-	
特別の試験条件下	-			10,000						

(ロ)-第D.23表 最大線量当量率の要約(タイプ6)

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

部 位 項 目	輸送物表面					表面から 1m				
	頭 部		側 部	底 部		頭 部		側 部	底 部	
	軸方向	径方向		径方向	軸方向	軸方向	径方向		径方向	軸方向
通常輸送時										
ガンマ線	280.1	386.3	64.9	158.5	48.9	74.3	53.6	30.2	19.9	18.1
中性子	13.2	214.7	38.9	997.5	34.1	3.5	11.8	15.2	41.9	13.0
合 計	293.3	601.0	103.8	1,156.0	83.0	77.8	65.4	45.4	61.8	31.1
一般の試験条件下										
ガンマ線	280.1	386.3	64.9	158.5	48.9					
中性子	13.2	214.7	38.9	997.5	34.1					
合 計	293.3	601.0	103.8	1,156.0	83.0					
特別の試験条件下										
ガンマ線						280.7	507.3	182.0	353.9	147.1
中性子						174.8	434.1	1,151.3	1,979.8	1,459.2
合 計						455.5	941.4	1,333.3	2,333.7	1,606.3
基準値										
通常輸送時			2,000					100		
一般の試験条件下			2,000					-		
特別の試験条件下			-					10,000		

D.6 付属書類

D.6.1 火災時のレジンの損傷状態

火災時のレジンの損傷状態については、以下に示すように、輸送容器のレジン部を模擬したモデルによる燃焼試験で確認している。試験の結果から、レジンの損傷は被熱面から $\square \sim \square$ mm 程度であり、大きな欠損は生じない。

1. 中性子遮蔽材燃焼試験概要

(1) 試験目的

中性子遮蔽材の特別の試験条件下(耐火試験)での自己消火性及び損傷程度を把握し、解析モデルの余裕度を把握する。

(2) 試験要領

a. 試験内容

レジンから製作した試験体について加熱炉による燃焼試験と燃焼試験終了後の試験体の性状試験を実施した。

b. 試験体

レジンの材料仕様を(ロ)-第D.付1表に、また、試験体の形状及び被覆状態を(ロ)-第D.付2表に示す。試験体は、輸送容器の伝熱フィンと外筒-中間筒間に挟まれた棒状の形態を模擬している。

これらの試験体は(ロ)-第D.付1図に示すように断熱材を内張りした断熱材ケース内に埋め込んだ。したがって、試験体6面の内直接被熱面は2面である。

c. 試験方法

上述した試験体について下記に示す方法により試験した。

① 燃焼試験

試験にはガスバーナによる加熱炉を使用した。試験手順は、まず炉内温度を800℃に昇温し約1時間保持した。次いで、炉の台車(炉の底板)を引き出し、試験体を積載したパレットを台車に乗せすばやく炉内に挿入した。なお、この間炉内の温度低下を極力防ぐため加熱バーナーは燃焼状態のままにした。試験体を炉内に挿入し炉内温度が再び800℃に回復してから32分間保持した後バーナーを消火し炉内より試験体を取り出し大気中で自然放冷した。

② 燃焼試験後のレジンの性状試験

燃焼試験終了後炉内より引き出したレジンの炎と煙の発生状況及び消火状況を目視観察した。また、被覆ありレジンについては中央部より切断し断面の変質状態(炭化層など)を観察した。また、切断後の断面からサンプルを採取し有機元素分解装置により水素と炭素を JISM 8813 の 7(酸素百分率算出法)により酸素を分析するとともに比重ビンによる重量法により真比重を測定した。

(3) 試験結果

① 燃焼状態の目視観察結果

全面被覆したレジン以外は炉内挿入と同時に燃焼が始まった。また、燃焼試験を終え炉内から取り出した直後は燃焼は継続しており熔融栓が溶けた穴から煙(ガス)の噴出も観察されたが、時間の経過に伴い速やかに消火・消煙した。したがって、本材料は十分な自己消火性を有するといえる。

② 燃焼試験後のレジンの性状

試験体中央部から切断した断面を(ロ)-第 D. 付 2 図に示す。レジンは被熱側の表面から□~□mm 程度分解消失している。また、熱影響によりレジン表面から□~□mm 程度が白色を帯びて変色していることが観察された。

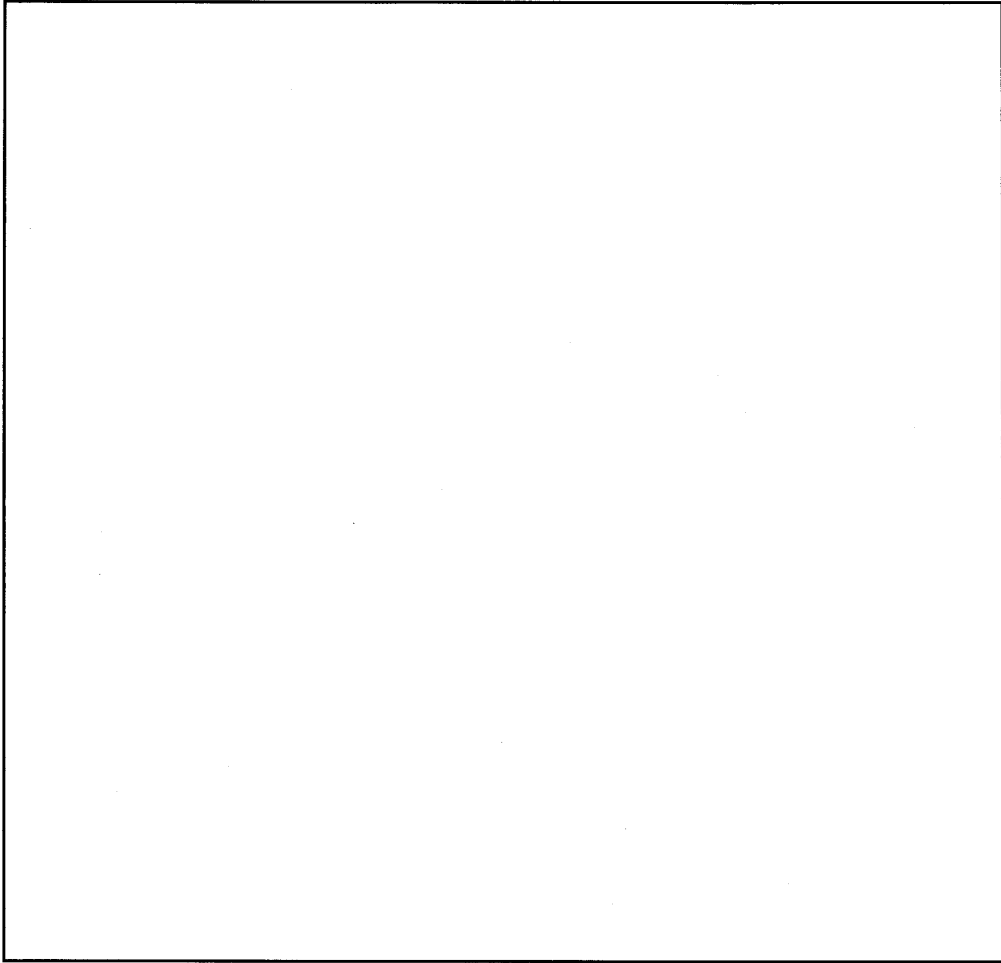
燃焼試験後のレジンの分析結果を(ロ)-第 D. 付 3 表に示す。(ロ)-第 D. 付 3 表から、変色部についても水素の減少がわずかであることがわかる。したがって、遮蔽上考慮する必要があるのは、消失部だけと考えられる。

(ロ)-第 D. 付 1 表 レジンの材料仕様

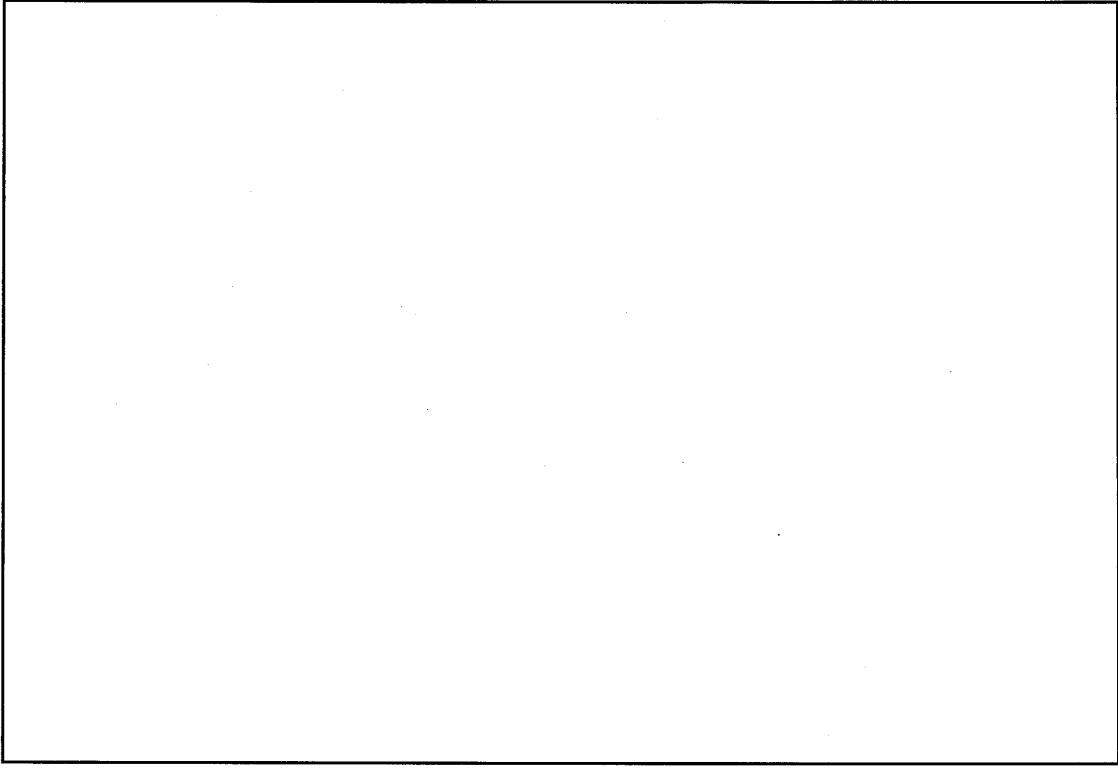
仕 様	1) 密度	: 1.67±0.05g/cm ³
	2) H 密度	: 0.0959g/cm ³ 以上
	3) B ₄ C 密度	: 0.0194g/cm ³ 以上

(ロ)-第D.付2表 燃焼試験用試験体

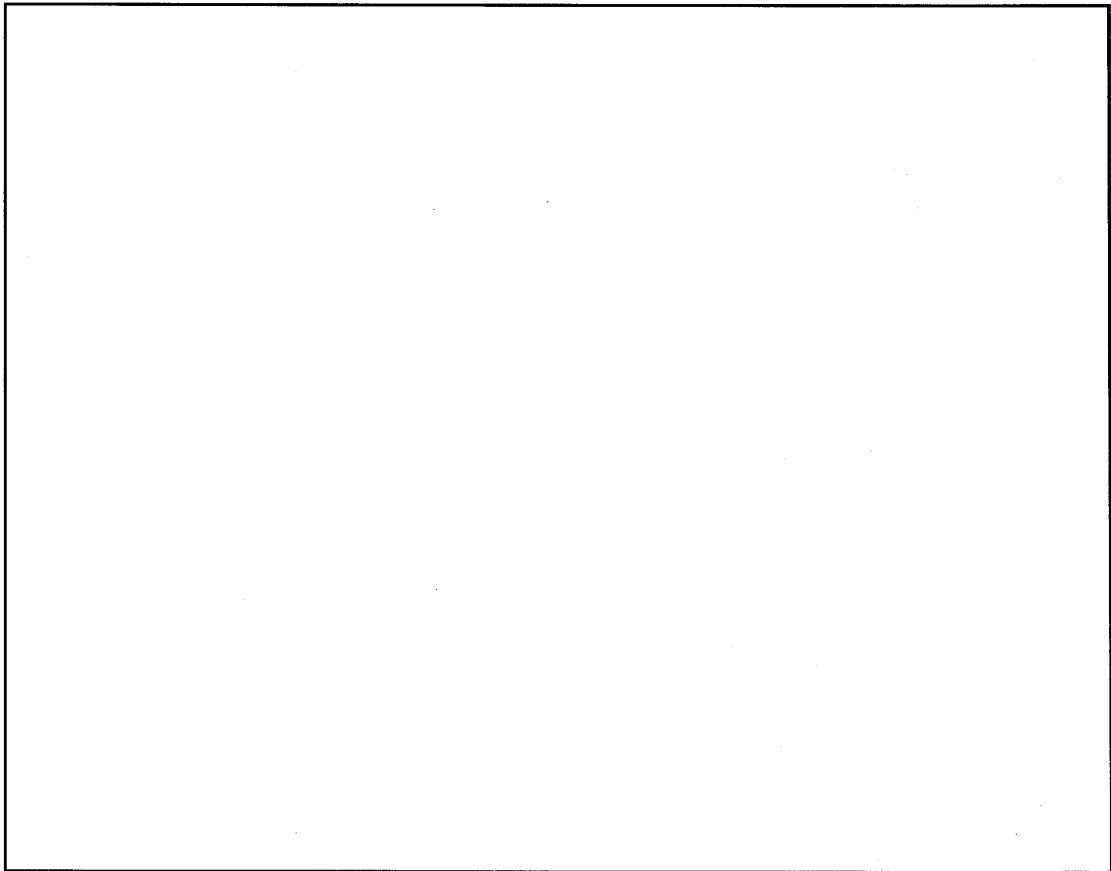
種類	中性子遮蔽材
項目	
材料	エポキシ系レジン
形状	□×□×□mm
被覆状態	① 被覆なし ② 厚さ□mmの□により全面被覆 ③ 同②、ただし、被覆板に□mmφの穴 1か所を貫通
試験体数	3体



(ロ)-第D.付1図 試験体の被熱状態



全 面 被 覆



(口)-第 D. 付 2 図 燃焼後の試験体断面

(口)-D-66

(ロ)-第D.付3表 レジン分析試験結果

(1) レジン燃焼試験前後の比重変化

	測定値 (g/cm ³)		平均 (g/cm ³)	前後変化 (g/cm ³)
試験前サンプル				
C-1 変色部				
C-1 中心部				
C-2 変色部				
C-2 中心部				

注記) C-1 は全面被覆のレジン、C-2 は貫通孔被覆のレジン

(2) レジン燃焼試験前後の元素重量変化

	測定値 (wt%)			前後変化 (wt%)		
	H	C	O	H	C	O
試験前サンプル						
C-1 変色部						
C-1 中心部						
C-2 変色部						
C-2 中心部						

注記) C-1 は全面被覆のレジン、C-2 は貫通孔被覆のレジン

D.6.2 平均燃焼度が低い場合の冷却日数について

遮蔽解析については、(イ)-第 A.1 図、(イ)-第 A.2 図及び(イ)-第 A.3 図に示す燃料タイプごとの平均燃焼度の最大値を用いて実施した。ここでは、(イ)-第 A.1 図、(イ)-第 A.2 図及び(イ)-第 A.3 図で示した平均燃焼度と冷却日数の関係が、規則及び告示で定められた基準を満足することを示す。

なお、一般の試験条件下及び特別の試験条件下の評価については、規則及び告示で定められた基準に対して十分保守的であることが明らかであるため、ここでは通常輸送時の評価結果のみ実施する。

1. 検討条件

(ロ)-第 D. 付 4 表、(ロ)-第 D. 付 5 表及び(ロ)-第 D. 付 6 表に示す燃焼度及び冷却日数の条件に基づき評価を行う。

2. 検討方法

上記の条件のもと(ロ)章 D.4 に従って検討した輸送容器各部の線量当量率評価結果を用い、それらを線源強度補正することにより各燃焼度・冷却日数の線量当量率を概算する。

3. 検討結果

通常輸送時における輸送物表面及び表面から 1m 位置における線量当量率を(ロ)-第 D. 付 7 表、(ロ)-第 D. 付 8 表及び(ロ)-第 D. 付 9 表に示す。これらの評価結果より、(イ)-第 A.1 図、(イ)-第 A.2 図及び(イ)-第 A.3 図で示した平均燃焼度及び冷却日数については規則及び告示で定められた基準を満足する。

(ロ)-第D.付4表 タイプ別の平均燃焼度及び冷却日数

燃料集合体の種類 条件	タイプ1、2	タイプ3
	平均燃焼度 (MWD/MTU)	
冷却日数 (日)		

(ロ)-第D.付5表 タイプ別の平均燃焼度及び冷却日数

燃料集合体の種類 条件	タイプ4	
	平均燃焼度 (MWD/MTU)	
冷却日数 (日)		

(ロ)-第D.付6表 タイプ別の平均燃焼度及び冷却日数

燃料集合体の種類 条件	タイプ5、6	
	平均燃焼度 (MWD/MTU)	
冷却日数 (日)		

(ロ)-第 D. 付 7 表 タイプ別の通常輸送時の線量当量率

(単位： μ Sv/h)

部 位	輸送物表面の最大値		表面から 1m の最大値	
燃料集合体の種類	タイプ 1、2、3		タイプ 1、2、3	
平均燃焼度 (MWD/MTU)				
冷却日数 (日)				
ガンマ線	328.9	191.7	65.2	32.6
中性子	730.6	1,105.6	10.8	46.1
合 計	1,059.5	1,297.3	76.0	78.7
通常輸送時 基準線量率	2,000		100	

(ロ)-第 D. 付 8 表 タイプ別の通常輸送時の線量当量率

(単位： μ Sv/h)

部 位	輸送物表面の最大値		表面から 1m の最大値	
燃料集合体の種類	タイプ 4		タイプ 4	
平均燃焼度 (MWD/MTU 以下)				
冷却日数 (日)				
ガンマ線	281.6	178.5	80.6	75.9
中性子	598.3	950.3	1.9	3.1
合 計	879.9	1,128.8	82.5	79.0
通常輸送時 基準線量率	2,000		100	

(ロ)-第 D. 付 9 表 タイプ別の通常輸送時の線量当量率

(単位 : μ Sv/h)

部 位	輸送物表面の最大値				表面から 1m の最大値			
燃料集合体の種類	タイプ 5、6				タイプ 5、6			
平均燃焼度 (MWD/MTU)								
冷却日数 (日)								
ガンマ線	414.5	298.9	294.2	158.5	77.0	83.9	85.3	74.3
中性子	68.6	688.2	824.5	997.5	1.4	2.4	2.9	3.5
合 計	483.1	987.1	1,118.7	1,156.0	78.4	86.3	88.2	77.8
通常輸送時 基準線量率	2,000				100			

D.6.3 平均燃焼度を超える燃料をバスケット最外周に収納した場合の線量当量率について

線源強度の計算には(イ)-第 A.1 表に示す平均燃焼度を用いているが、より高い燃焼度の燃料集合体を収納する場合がある。一方で、遮蔽解析モデルでは、バスケット最外周の燃料とキャビティ内面の間の内筒内水厚を実形状よりも小さく安全側に設定している。ここでは、平均燃焼度と最高燃焼度の差を考慮しても、本解析モデルによる計算から得られた線量当量率が保守的であることを示す。

1. 検討条件

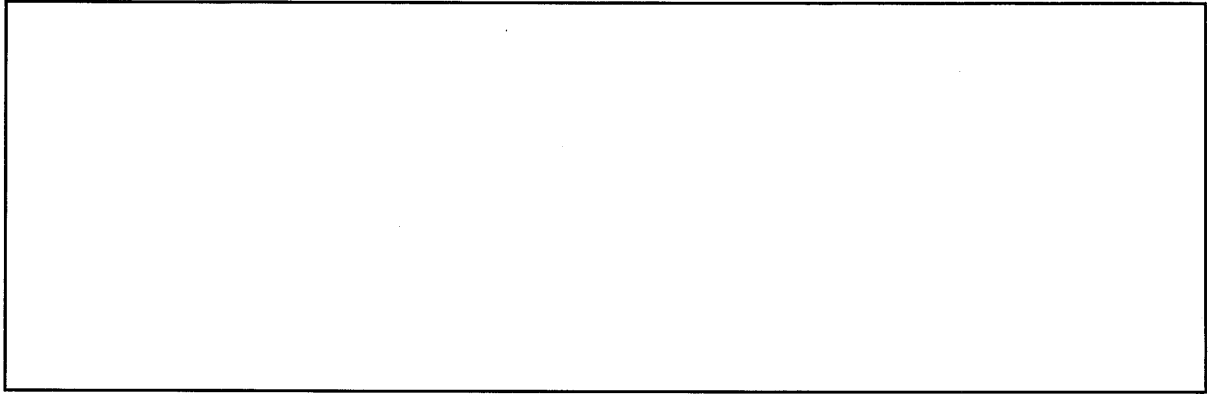
- 平均燃焼度と最高燃焼度の差が最も大きいタイプ 6 燃料を対象とする。
- 遮蔽解析結果に寄与の大きい(ロ)-第 D. 付 3 図の斜線に示したバスケット最外周位置に最高燃焼度の燃料集合体を収納するものとする。
- (ロ)-第 D. 2 図から(ロ)-第 D. 10 図に示す二次元(R-Z)モデルにおける内筒内水厚 cm に対し、(ロ)-第 D. 付 3 図の実形状での水厚 cm の差による減衰率比を考慮する。
- 内筒内水中のガンマ線及び中性子の減衰率は(ロ)章 D. 4 で実施した評価結果から下記のとおり設定する。
ガンマ線： cm/1 桁減衰
中性子： cm/1 桁減衰
- 線源強度は遮蔽解析で用いた平均燃焼度 GWD/MTU の値に対し、最高燃焼度 GWD/MTU の値とした場合の増加比を考慮する。

2. 検討方法

上記の条件に基づいて、(ロ)-第 D. 付 3 図の解析モデルと実形状の内筒内水厚及び燃焼度の差から、実形状体系において最外周に最高燃焼度の燃料集合体を収納した場合の線量当量率を概算する。

3. 検討結果

バスケット最外周に最高燃焼度の燃料集合体を収納した場合の線量当量率を(ロ)-第 D. 付 10 表に示す。バスケット最外周に最高燃焼度燃料の収納を考慮した場合、 $(\text{ GWD/MTU}) / (\text{ GWD/MTU})$ の燃焼度差から線源強度は増加するが、本解析モデルで内筒内水厚を安全側に設定していることから、解析から得られた線量当量率を超えることはない。



(ロ)-第D.付3図 バスケット最外周に最高燃焼度燃料が収納された場合の評価モデル

(ロ)-第D.付10表 バスケット最外周に最高燃焼度燃料が収納された場合の評価結果

		①遮蔽解析結果 ^{注1)} (μ Sv/h)	②水厚によ る減衰率比	③線源強度に よる増加比 ^{注2)}	④補正後線量当量率 (=①×②×③) (μ Sv/h)
表面 から 1m	燃料有効部ガンマ線	23.8	0.72	1.04	17.8
	構造材放射化ガンマ線	3.5	0.72	1.03	2.6
	二次ガンマ線	2.9	0.73 ^{注3)}	1.18	2.5
	中性子	15.2	0.73	1.18	13.1
	合計	45.4	—	—	36.0

注1) (ロ)-第D.16表に示すタイプ6燃料の平均燃焼度 \square GWD/MTU の線源強度における側部中央(表面から1m)の結果

注2) タイプ6燃料の平均燃焼度 \square GWD/MTU に対する最高燃焼度 \square GWD/MTU の線源強度増加比

注3) 中性子とガンマ線の減衰率のうち、減衰率が小さい中性子の減衰率とした。

D. 6. 4 参考文献

- 1) A. G. Croff, "ORIGEN2-A Revised and Updated Version of the Oak Ridge Isotope Generation and Depletion Code", ORNL-5621, (1980).
- 2) ORNL-RSIC, "DOT3.5-Two Dimensional Discrete Ordinates Radiation Transport Code", CCC-276, (1976).
and
W. A. Rhoades, "The DOT III Two-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code", ORNL-TM-4280, (1973).
- 3) ORNL-RSIC, "CASK-40 Group Coupled Neutrons and Gamma-ray Cross-section Data", DLC-23, (1973).
- 4) BNL, "Neutron Cross Sections", BNL-325 3rd Edition, (1973).
- 5) ICRP, "Conversion Coefficients for use in Radiological Protection Against External Radiation", Publication 74, (1996).

(口) 章 E 臨界解析

E. 臨界解析

E.1 概要

臨界解析は、本輸送物が規則及び告示に基づいて BM 型核分裂性輸送物としての技術上の基準に適合することを示すために行った。

本輸送容器には、燃料集合体を収納するバスケットが用いられ、輸送中燃料集合体が分散・集合しないようになっている。バスケット格子は、未臨界維持のために中性子吸収材であるボロンを含むボロン入りステンレス鋼で構成される。

(ロ) 章 A.9 に述べているように、核分裂性輸送物に係る一般の試験条件下において、燃料集合体、バスケット、輸送容器本体、フィン、外筒、レジンカバー及び中性子遮蔽体の変形・破損はなく、緩衝体の一部が落下時に変形する。核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下において、バスケット、輸送容器本体の変形・破損はなく、燃料集合体、フィン、緩衝体、外筒、レジンカバー及び中性子遮蔽体の一部が落下時に変形する。また、熱的試験では、中性子遮蔽体のレジンの一部が焼損する。

そこで本解析では、核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下における燃料集合体の変形を考慮し、境界条件として完全反射を仮定することにより、以下の条件より厳しい評価とする。

- ① 通常輸送時
- ② 輸送物を孤立系の条件に置く場合
- ③ 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件の下に置いた輸送物を孤立系の条件に置く場合
- ④ 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件の下に置いた輸送物を孤立系の条件に置く場合
- ⑤ 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件の下に置いた輸送物を配列系の条件に置く場合
- ⑥ 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件の下に置いた輸送物を配列系の条件に置く場合

臨界解析は、SCALE コードシステム¹⁾を用い、実効増倍率 (k_{eff}) の計算は多群モンテカルロ法による KENO-V. a コード¹⁾を用いて行った。その結果、 k_{eff} は標準偏差 (σ) の 3 倍を加えても十分未臨界である。

したがって、本輸送物は上記①から⑥のいずれの条件においても未臨界である。

E.2 解析対象

E.2.1 収納物

本輸送容器には PWR 燃料集合体を 14 体装荷する。

本輸送容器に装荷する燃料集合体の型式と仕様は(イ)-第 A.1 表に示したとおりであり、(ロ)-第 E.1 表に示す ^{235}U 濃縮度の高いステップ 2 燃料を対象として未臨界性を評価した。

本解析においては、燃料集合体として実在する部分は燃料有効長に相当する部分のみと考え、PWR 燃料集合体における上・下部ノズル部などを水に置き換えた。これは、中性子の吸収を小さく、また、反射効果を大きく見積ることになるので安全側の仮定である。

燃料集合体は 1 体ずつ独立し、ウラン、ジルコニウム、水素及び酸素からなり、燃料棒配列と水の非均質効果を考慮した均質な領域であるとして取り扱った。被覆管の材料であるジルカロイは純ジルコニウムであるとした。

本輸送容器に装荷する燃料は照射済のものであるが、 ^{235}U 濃縮度は未照射のままの減損していない値をとり、安全側の仮定とした。また、燃料集合体には可燃性毒物としてガドリニウムを添加した燃料棒が含まれる場合があるが、本解析では中性子吸収断面積の大きいガドリニウムの存在を無視し、ガドリニウムを添加していない燃料棒に置き換え、安全側の仮定とした。

燃料集合体中の制御棒案内シンプルにはバーナブルポイズン棒が充填されることがあるが、バーナブルポイズン棒は中性子吸収材であるため、本解析では安全側にこれらの制御棒案内シンプルの入る格子は全て水が満たされているものと仮定した。

また、核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下における燃料集合体の変形を考慮し、輸送容器に収納される全燃料集合体についてグリッド 1 スパン間の燃料棒ピッチの変化を仮定した。燃料棒がバスケットチャンネル内で均一に広がった場合について評価する。

(ロ)-第 E. 1 表 臨界解析の対象とした燃料集合体の仕様

燃料集合体の種類		PWR 燃料集合体	PWR 燃料集合体	PWR 燃料集合体
		タイプ 4	タイプ 5	タイプ 6
燃 料 材 質	-	二酸化ウラン	二酸化ウラン	二酸化ウラン
被 覆 管 材 質	-	ジルコニウム基合金	ジルコニウム基合金	ジルコニウム基合金
燃 料 棒 直 径	mm	[Redacted]		
燃 料 ペ レ ッ ト 直 径	mm			
被 覆 管 肉 厚	mm			
燃 料 有 効 長	mm			
燃 料 棒 配 列	-			
集 合 体 当 たり 燃 料 棒 数	本	14×14 179	15×15 204	17×17 264
燃 料 棒 ピ ッ チ	mm	[Redacted]		
集 合 体 の 幅 ^{注)}	mm			
²³⁵ U 濃 縮 度	%	4.9	4.7	4.9

注) (燃料棒ピッチ) × (燃料棒配列数) を臨界解析上の集合体の幅とする。

E. 2. 2 輸送容器

輸送容器本体については、(イ)-第 C. 2 図等に示すように、半径方向に中心から順にステンレス鋼製内筒、鉛、炭素鋼製中間筒、側部中性子遮蔽体及び炭素鋼製外筒で構成され、軸方向頭部はステンレス鋼製蓋、底部はステンレス鋼製底板で構成されている。輸送容器本体の軸方向には、更にそれぞれ緩衝体がついている。

本輸送容器は(ロ)章 A. 9 に示すとおり核分裂性輸送物に係る一般の試験条件下においては、緩衝体の一部が変形するが、臨界評価に影響する構造物の変形や密封装置の形状変化は生じない。

核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下においては、輸送容器本体は破損せず、フィン、緩衝体、外筒、レジンカバー及び中性子遮蔽体の一部が変形する。また、熱的試験では、(ロ)章 D. 6. 1 に示すとおり、中性子遮蔽体のレジンの一部が焼損する。

したがって、本解析のモデルにおいては、(ロ)章 E. 3. 1 に示すように緩衝体、フィン及び中性子遮蔽体は、安全側でないものとし、通常輸送時並びに核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件下に対して共通して適用できるモデルとしている。これは、中性子吸収を少なくすることになり安全側の仮定である。また、内筒内は全て水で満たされるものと仮定した。

E. 2. 3 中性子吸収材

(イ)-第 C. 13 図にバスケットの構造を示す。

バスケットは、PWR 燃料集合体を 14 体収納するように作られており、各バスケット格子は構造材と中性子吸収材を兼ねたボロン入りステンレス鋼製のチャンネルで形成されている。

核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下においても、バスケット格子の変形はない。

E.3 モデル仕様

E.3.1 解析モデル

(口)-第 E.1 図及び(口)-第 E.2 図に臨界解析モデルを示す。

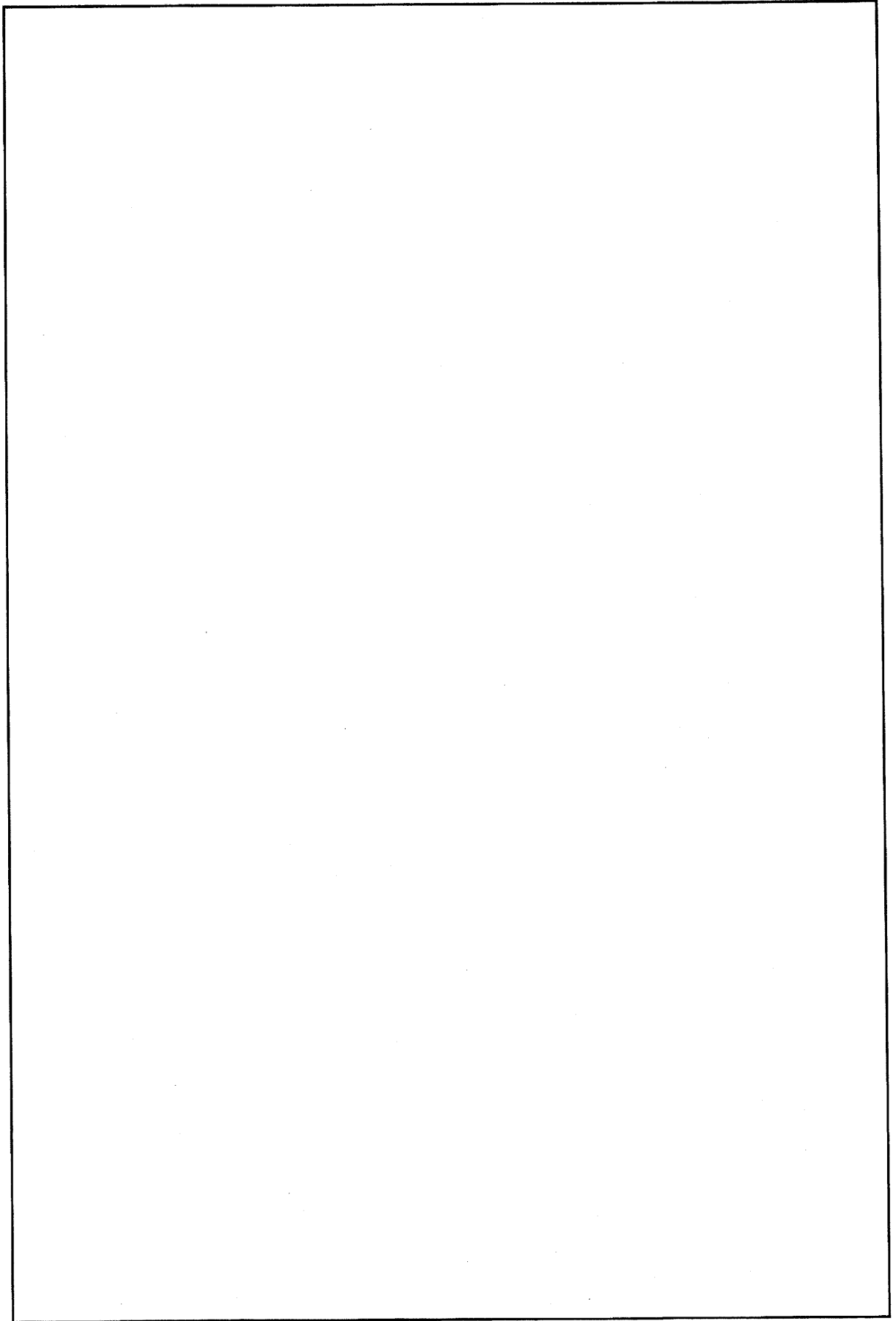
本解析モデルは、安全側の評価となるよう以下の条件を考慮した。

- ・燃料集合体の変形を考慮し、輸送容器に収納される全燃料集合体についてグリッド1スパン間の燃料棒ピッチを変化させた配列とする。
- ・燃料棒のピッチの変化のない領域は燃料集合体を 配置する。
- ・内筒内における燃料集合体として実在する部分は燃料有効長に相当する部分のみとし、上・下部ノズル部などを水に置き換える。
- ・内筒内の燃料有効長の範囲外の構造物は水に置き換える。
- ・バスケット格子寸法及びボロン入りステンレス鋼厚さには寸法公差を考慮する。
- ・中性子遮蔽体は真空とし、フィン及び緩衝体を無視する。
- ・輸送容器外部の雰囲気は安全側に真空とし、境界条件を完全反射とすることにより、無限個の配列を仮定する。

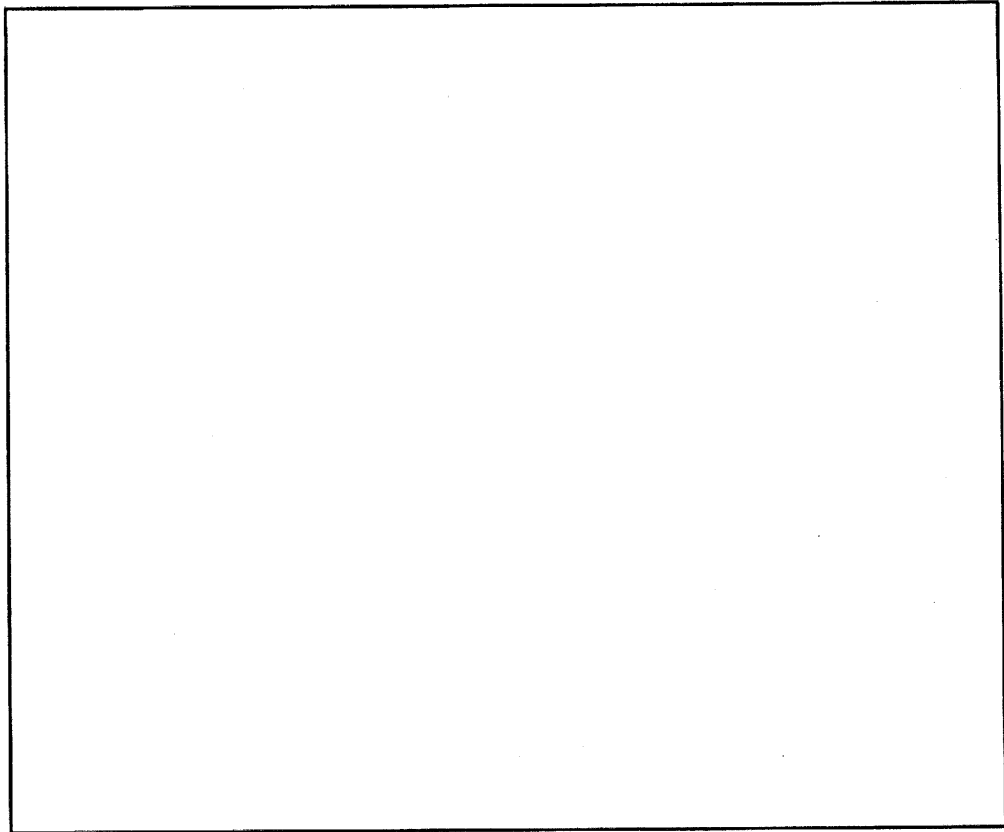
E.3.2 解析モデル各領域における原子個数密度

本解析で用いた輸送物の各領域の構成物質の原子個数密度を (口)-第 E.2 表、(口)-第 E.3 表及び(口)-第 E.4 表に、また、均質化燃料領域の構成物質の体積比を (口)-第 E.5 表に示す。

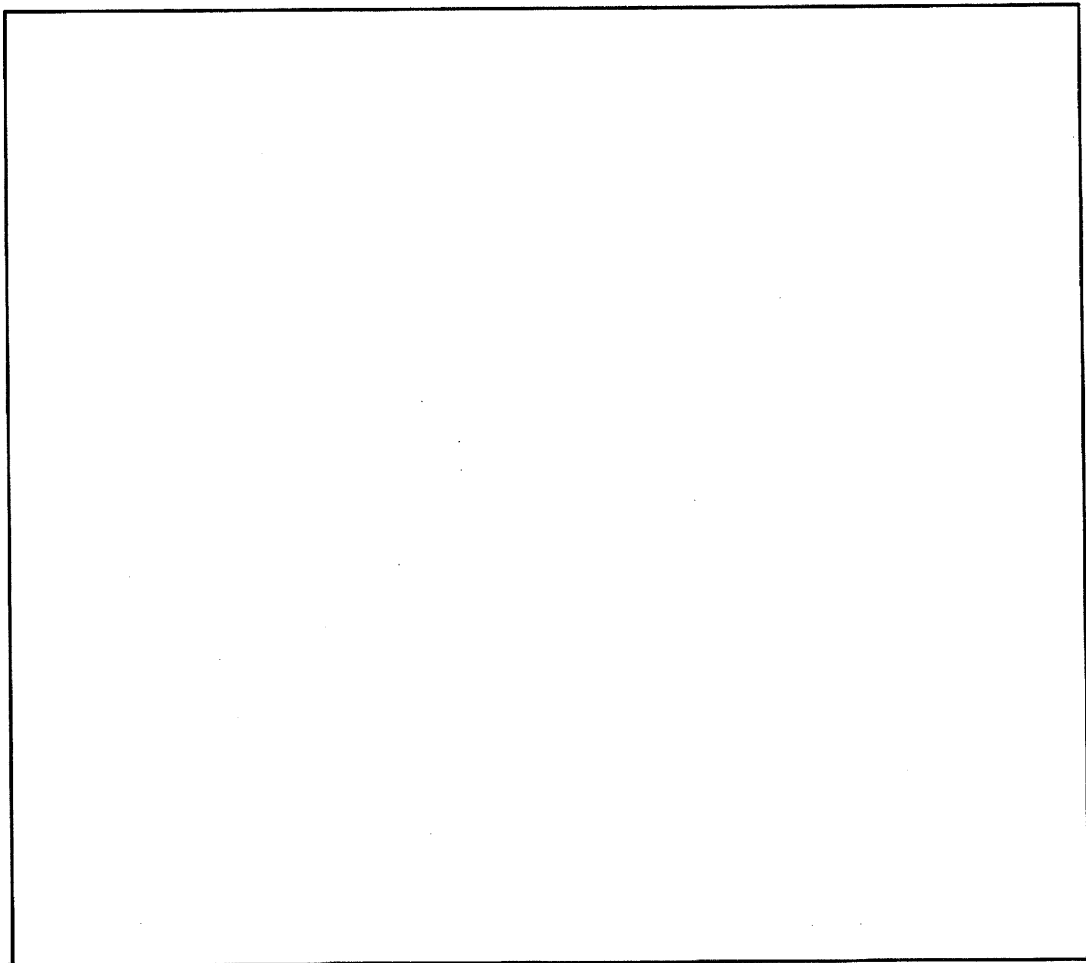
輸送物の k_{eff} を最も大きく評価するために、容器内の水の密度は 1.0g/cm^3 とし、燃料の温度は常温 (20°C) とした。



(口)-第 E. 1 図 臨界計算モデル(縦断面図)



燃料棒ピッチの変化のない領域



燃料棒ピッチの変化のある領域

(口)-第 E. 2 図 臨界計算モデル(燃料領域部横断面図)

(口)-E-7

(ロ)-第 E. 2 表 輸送物各領域の原子個数密度(タイプ 4)

領 域	密 度 (g/cm ³)	元 素	原子個数密度 (10 ²⁴ atoms/cm ³)		
			燃料棒ピッチ の変化のない 領域	燃料棒ピッチの変化のある領域	
				チャンネル 内寸 <input type="text"/> mm	チャンネル 内寸 <input type="text"/> mm
均質化燃料領域	H ₂ O: <input type="text"/> ジルカロイ: <input type="text"/>	²³⁵ U			
		²³⁸ U			
		Zr			
		H			
		O			
ボロン入り ステンレス鋼	<input type="text"/>	¹⁰ B			
		¹¹ B			
		Cr			
		Fe			
		Ni			
水	1.00	H	6.684×10 ⁻²		
		O	3.342×10 ⁻²		
炭 素 鋼	<input type="text"/>	Fe			
鉛		Pb			
ステンレス鋼		Cr			
		Fe			
		Ni			

(ロ)-第 E. 3 表 輸送物各領域の原子個数密度(タイプ 5)

領 域	密 度 (g/cm ³)	元 素	原子個数密度 (10 ²⁴ atoms/cm ³)		
			燃料棒ピッチ の変化のない 領域	燃料棒ピッチの変化のある領域	
				チャンネル 内寸 <input type="text"/> mm	チャンネル 内寸 <input type="text"/> mm
均質化燃料領域	UO ₂ : <input type="text"/> ジルカロイ: <input type="text"/>	²³⁵ U	<input style="width: 100%; height: 100%;" type="text"/>		
		²³⁸ U			
		Zr			
		H			
		O			
ボロン入り ステンレス鋼	<input type="text"/>	¹⁰ B			
		¹¹ B			
		Cr			
		Fe			
		Ni			
水	1.00	H	6.684×10 ⁻²		
		O	3.342×10 ⁻²		
炭 素 鋼	<input type="text"/>	Fe	<input style="width: 100%; height: 100%;" type="text"/>		
鉛		Pb			
ステンレス鋼		Cr			
		Fe			
		Ni			

(口)-第 E.4 表 輸送物各領域の原子個数密度(タイプ 6)

領 域	密 度 (g/cm ³)	元 素	原子個数密度 (10 ²⁴ atoms/cm ³)		
			燃料棒ピッチ の変化のない 領域	燃料棒ピッチの変化のある領域	
				チャンネル 内寸 <input type="text"/> mm	チャンネル 内寸 <input type="text"/> mm
均質化燃料領域	UO ₂ : <input type="text"/> ジルカロイ: <input type="text"/>	²³⁵ U			
		²³⁸ U			
		Zr			
		H			
		O			
ボロン入り ステンレス鋼	<input type="text"/>	¹⁰ B			
		¹¹ B			
		Cr			
		Fe			
		Ni			
水	1.00	H	6.684 × 10 ⁻²		
		O	3.342 × 10 ⁻²		
炭 素 鋼	<input type="text"/>	Fe			
鉛		Pb			
ステンレス鋼		Cr			
		Fe			
		Ni			

(口)-第 E. 5 表 均質化燃料領域各物質の体積比

燃料タイプ	物 質	燃料棒ピッチの 変化のない領域	燃料棒ピッチの変化のある領域	
			チャンネル 内寸 <input type="text"/> mm	チャンネル 内寸 <input type="text"/> mm
タイプ 4	UO ₂	[Empty Box]		
	ジルカロイ ^{注)}			
	水			
タイプ 5	UO ₂			
	ジルカロイ ^{注)}			
	水			
タイプ 6	UO ₂			
	ジルカロイ ^{注)}			
	水			

注) ギャップ領域を含む。

E. 4 未臨界評価

E. 4. 1 計算条件

1. 収納物

本輸送物の最大燃料装荷量は PWR 燃料集合体 14 体であるため、本解析は最大装荷量の場合を想定している。

解析の対象とした (口)-第 E. 1 表に示す燃料に対し、安全側に核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下における燃料集合体の変形を考慮し、グリッド 1 スパン間の燃料棒をバスケットチャンネル内で均一にピッチ拡大させている。

なお、安全側となるように燃料集合体の燃料棒ピッチの変化のない領域は

配置でモデル化を行った。

2. 輸送容器

本解析では、安全側に中性子遮蔽体、フィン及び緩衝体が存在しないモデルとし、輸送容器の外側で完全反射境界条件とした。

また、輸送容器内部は反射効果を最大とするために満水とし、水密度は k_{eff} が最大となる密度 (1.0g/cm^3) を仮定した。

3. 中性子吸収材

(口) 章 A. 9 で述べたように、バスケットは核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下において変形することはない。また、(口) 章 F. 2 に示すように、輸送容器内の中性子束に対して、ボロン入りステンレス鋼は使用期間中に有意な性能低下はない。

E. 4. 2 核燃料輸送物への水の浸入等

本解析では(口)章 E. 4. 1 の 2. で述べたように容器内部は満水と仮定しているので、水が浸入しても、未臨界性の変化はない。容器内部の水が漏えいした場合には、中性子の減速が行われにくくなるため、 k_{eff} は小さくなる。

また、本解析では中性子遮蔽体、フィン及び緩衝体を無視し、輸送容器の外側で完全反射境界条件としているので、輸送物の配列変化による接近により k_{eff} がより大きくなることはない。収納物は最も k_{eff} が大きくなる配置をモデル化しているので、収納物の再配列により k_{eff} がより大きくなることはない。

また、本解析では輸送容器の外側で完全反射境界条件とし容器からの漏えい中性子が全て反射されて容器系内に戻るものとしているので、水中又は雪中への浸漬によって k_{eff} がより大きくなることはない。

本解析では k_{eff} が最大となるように水の密度を 1.0g/cm^3 と仮定した。したがって、温度変化は水の密度を減じ、 k_{eff} を小さくする。

E. 4.3 計算方法

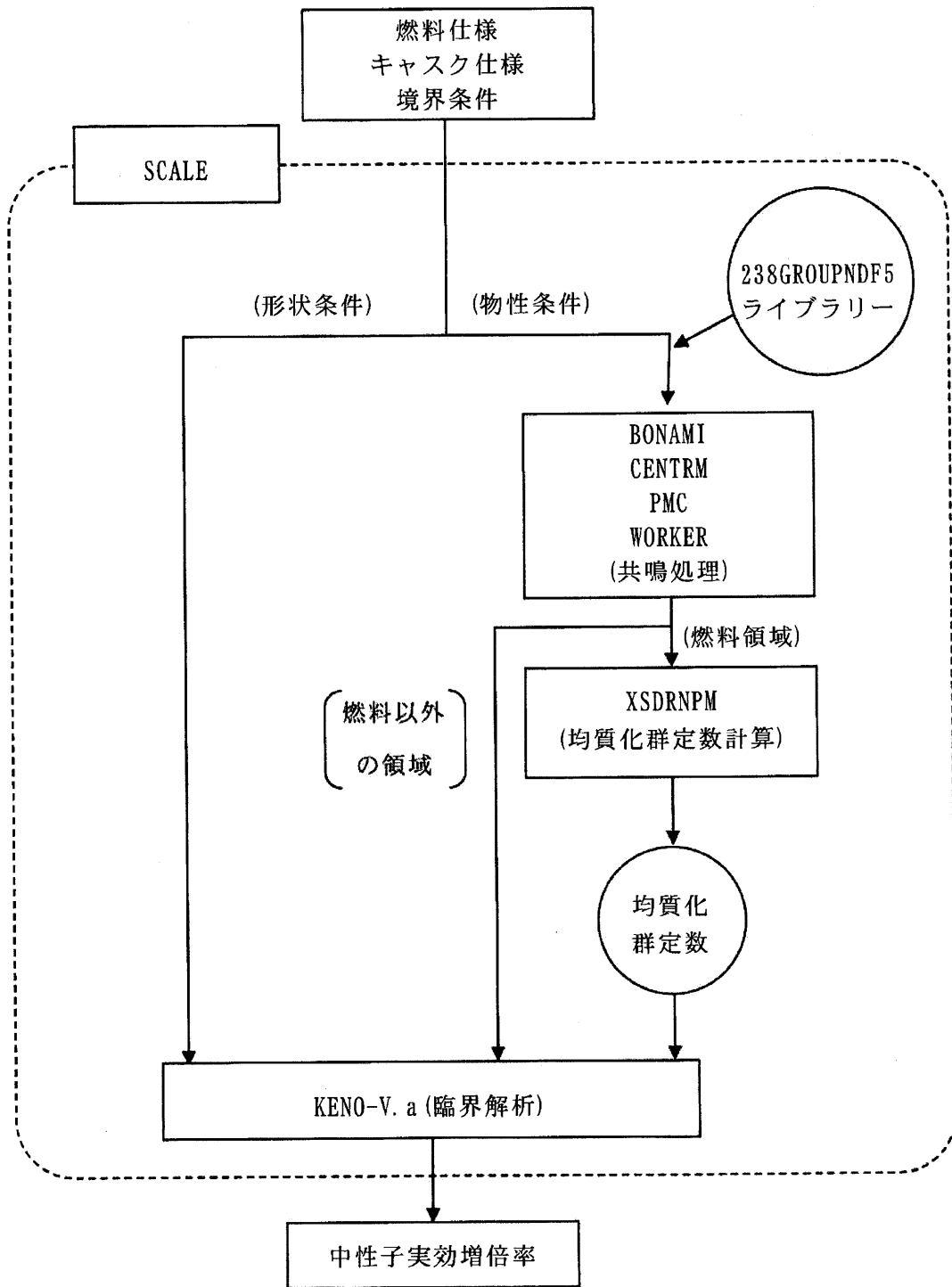
臨界計算には、米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) で、原子力関連許認可評価用に開発された SCALE (Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation) コードシステム¹⁾を用いた。keff の計算には、KENO-V. a コード¹⁾を用いた。均質化した燃料集合体領域の群定数計算には共鳴処理コード BONAMI¹⁾、CENTRM/PMC/WORKER^{1), 2)}及び一次元輸送計算コード XSDRNPM¹⁾を用い、核データライブラリーは SCALE コードシステムの内蔵ライブラリーデータの一つである 238GROUPNDF5 ライブラリーデータを用いた。計算の流れを(口)-第 E. 3 図に示す。

燃料集合体領域の均質化の方法としては、単位燃料棒の形状を一次元円柱モデルで近似し、XSDRNPM コードを用いて 238 群の中性子束分布を求め、それを重みとして燃料集合体の均質化領域の 238 群定数を算出した。

この 238 群定数及び KENO-V. a コードを用い、(口)-第 E. 1 図のモデルに対して臨界計算を行った。

E. 4.4 計算結果

(口)-第 E. 6 表に臨界計算の結果を示す。本計算は(口)章 E. 1 に示す①から⑥の条件と比較して安全側の計算であり、実効増倍率は標準偏差(σ)の 3 倍を加えても十分未臨界である。



(口)-第 E. 3 図 臨界計算の流れ

(口)-第 E. 6 表 臨界計算結果

	keff	σ	keff+3 σ
PWR 燃料集合体 (タイプ 4) 14 体装荷時	0.91959	0.00114	0.92301
PWR 燃料集合体 (タイプ 5) 14 体装荷時	0.91133	0.00135	0.91538
PWR 燃料集合体 (タイプ 6) 14 体装荷時	0.90979	0.00116	0.91327

E. 5 ベンチマーク試験

1. 対象とした臨界実験

仏国 Valduc³⁾で行われた臨界実験を対象としたベンチマーク解析を実施した。

ベンチマーク解析対象とした Valduc の臨界実験の体系は、低濃縮ウラン燃料棒を燃料棒ピッチ 1.6cm 間隔で 18 行×18 列の正方格子状に配列した燃料集合体 4 体を 2 行×2 列に配置し、各々の燃料集合体の周囲に中性子吸収板を設置し、更にその 4 体の燃料集合体の周囲に中性子反射体を設置したもので、減速材には軽水を使用している。臨界実験は中性子吸収板及び中性子反射体の材質、燃料集合体と反射体間のギャップ幅、臨界水位を変化させた 10 ケースの実験が実施されている。燃料集合体の仕様を (口)-第 E. 7 表に、各ケースの実験条件を (口)-第 E. 8 表に、実験体系を (口)-第 E. 4 図及び (口)-第 E. 5 図に示す。

この臨界実験体系は周囲を炭素鋼製の厚い胴に囲まれ、各燃料集合体間に中性子吸収材であるボロン入りステンレス鋼製バスケットを有する本輸送容器の臨界解析体系と類似している。

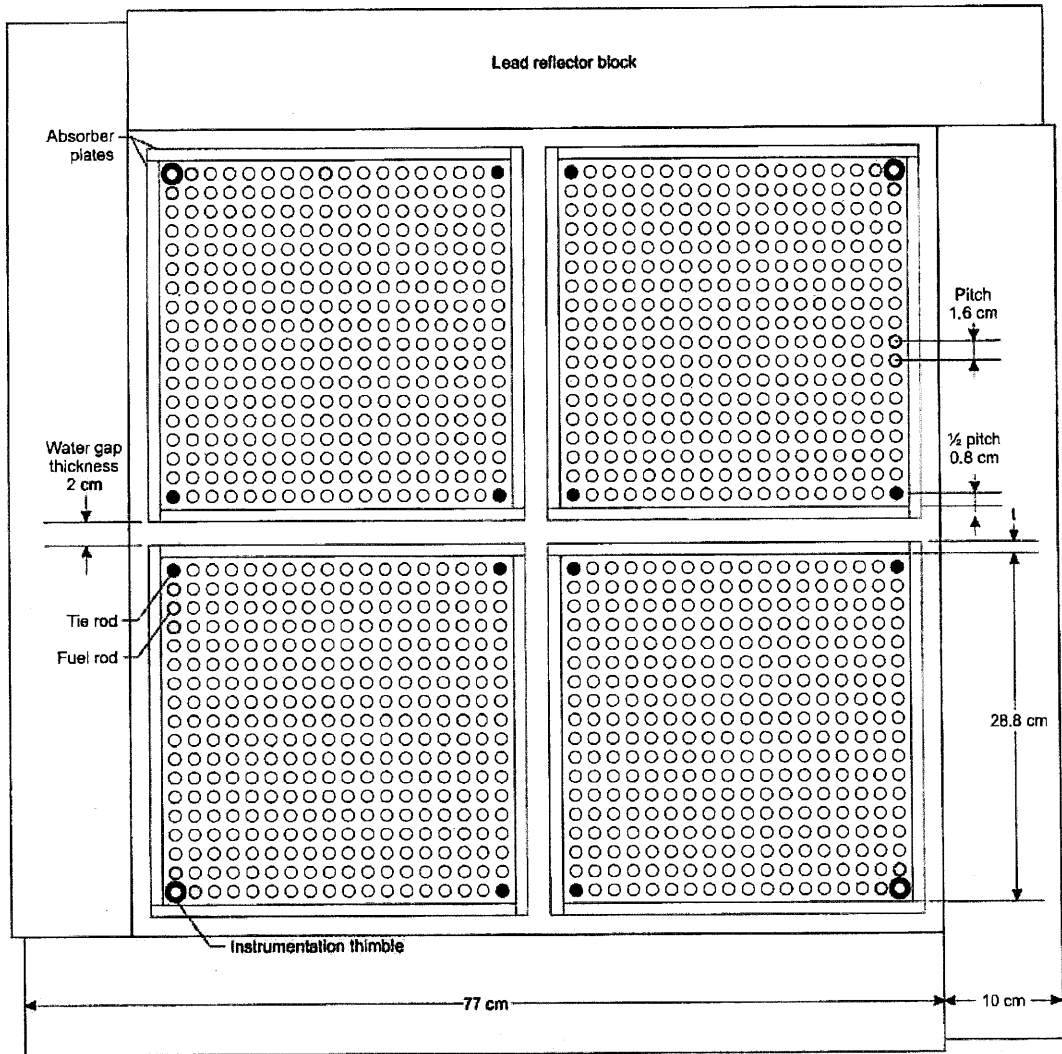
(ロ)-第 E. 7 表 臨界実験に使用した燃料集合体の仕様

		Valduc 臨界実験
燃 料 材 質	-	低濃縮二酸化ウラン
被 覆 管 材 質	-	アルミニウム合金 (AGS)
燃 料 棒 直 径	cm	0.94
燃 料 ペ レ ッ ト 直 径	cm	0.79
被 覆 管 肉 厚	cm	0.06
燃 料 有 効 長	cm	90.0
燃 料 棒 配 列	-	18×18
集 合 体 当 たり 燃 料 棒 数	本	320
燃 料 棒 ピ ッ チ	cm	1.6
集 合 体 の 幅 ^{注)}	cm	28.8
²³⁵ U 濃 縮 度	%	4.738

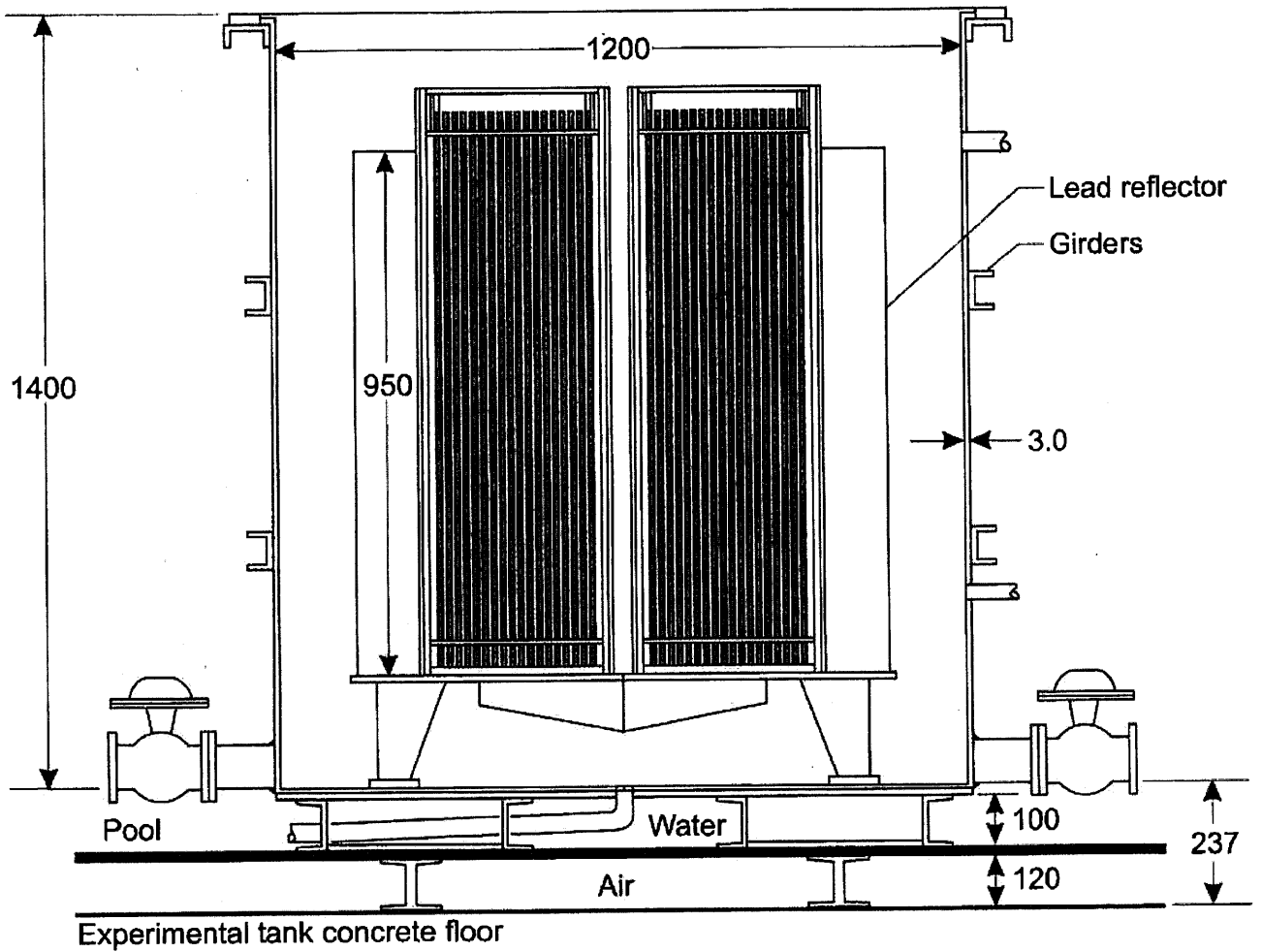
注) (燃料棒ピッチ) × (燃料棒配列数) を臨界解析上の集合体の幅とする。

(ロ)-第 E. 8 表 臨界実験条件

ケース	中性子吸収板	中性子反射体	燃料集合体と反射体間のギャップ幅 (cm)	臨界水位 (cm)
1	ボロン入りステンズ鋼	なし	-	40.01
2	ボロン入りステンズ鋼	鉛	0.1	33.04
3	ボロン入りステンズ鋼	鉛	2.5	36.13
4	ボロン入りステンズ鋼	鉛	5.0	37.95
5	ボラル	なし	-	72.96
6	ボラル	鉛	0.1	53.98
7	ボラル	鉛	2.5	63.85
8	ボラル	鉛	5.0	69.40
9	ボラル	炭素鋼	0.1	51.55
10	ボラル	炭素鋼	2.5	61.84



(口) - 第 E. 4 図 Valduc の臨界実験体系 (水平断面)

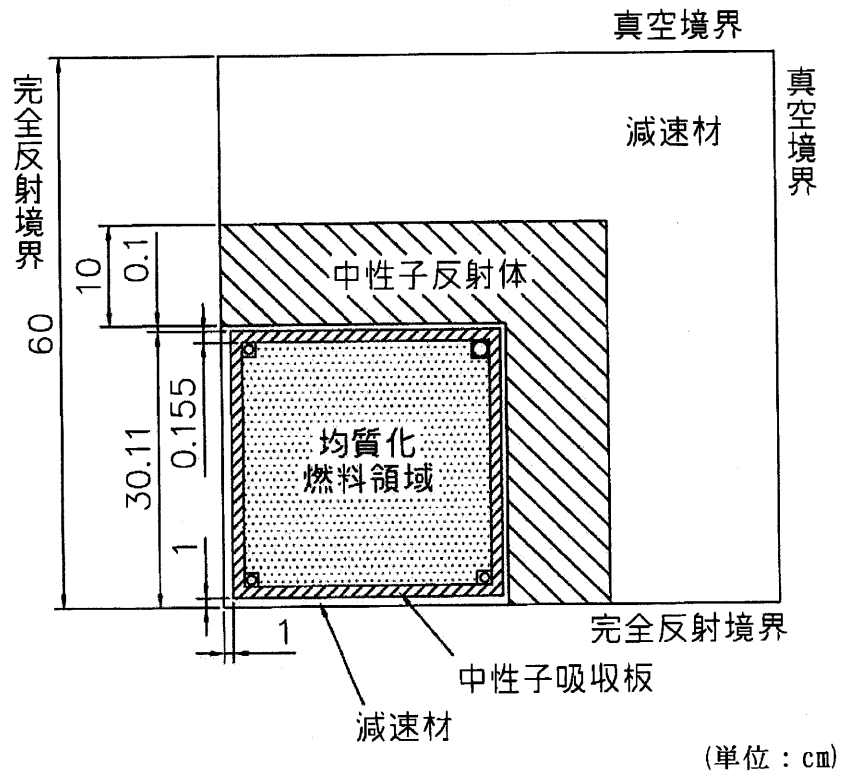


(単位 : mm)

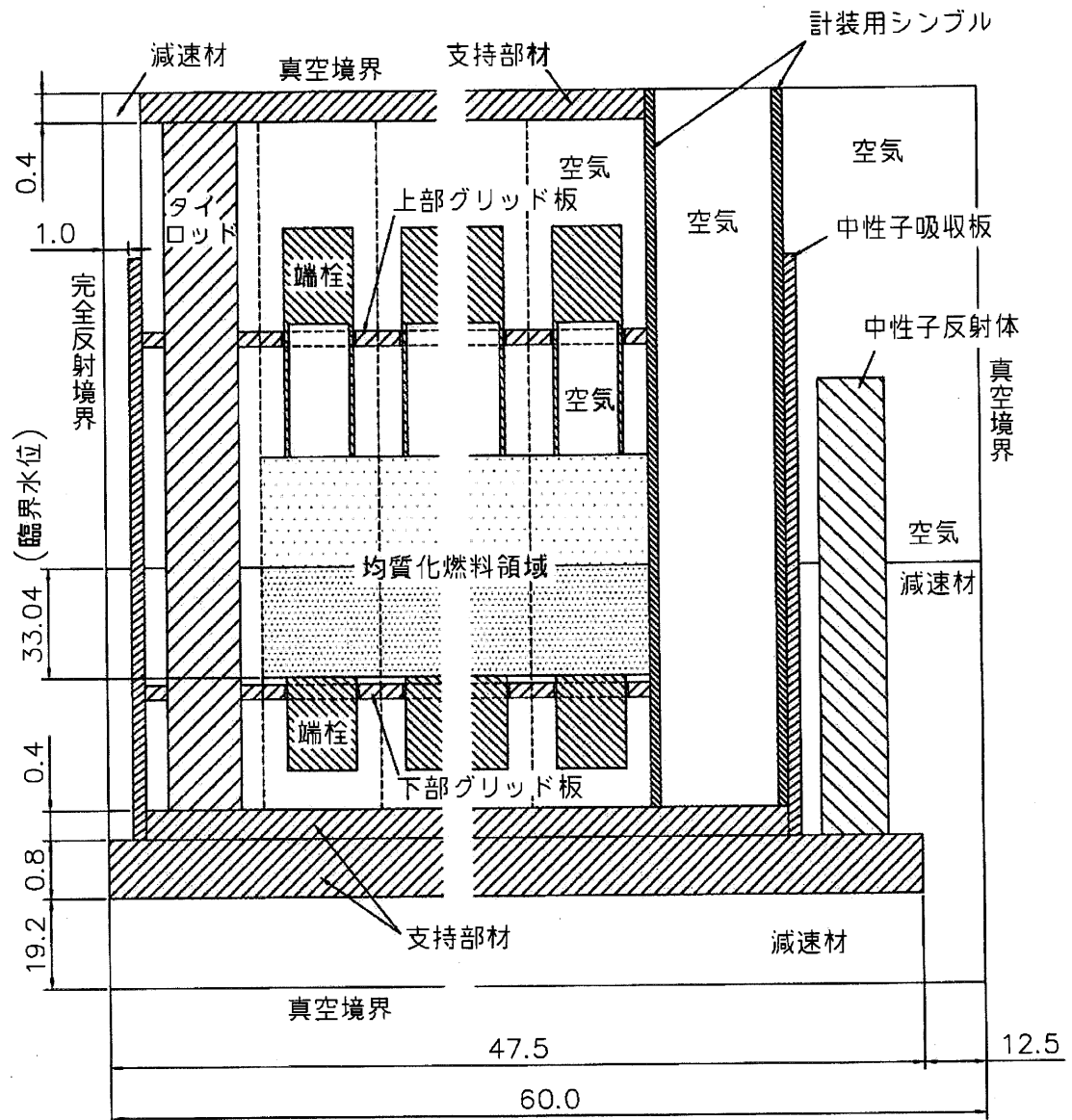
(口)-第 E. 5 図 Valduc の臨界実験体系 (垂直断面)

2. ベンチマーク解析条件

ベンチマーク解析は 238GROUPNDF5 ライブラリーを用い SCALE コードシステムで行った。ベンチマーク解析のモデル図を (ロ)-第 E. 6 図及び (ロ)-第 E. 7 図に、解析で用いた各領域の構成物質の原子個数密度を (ロ)-第 E. 9 表及び (ロ)-第 E. 10 表に示す。



(ロ)-第 E. 6 図 臨界ベンチマーク解析モデル図 (水平断面) (ケース 2 の例)



(単位 : cm)

(口)-第 E. 7 図 臨界ベンチマーク解析モデル図 (垂直断面) (ケース 2 の例)

(口)-第 E. 9 表 各領域の構成物質の原子個数密度(基本構成部材)

領域	材質	元素	原子個数密度 (10^{24} atoms/cm ³)
燃料ペレット	低濃縮 二酸化ウラン	²³⁴ U	7.1318×10^{-6}
		²³⁵ U	1.1104×10^{-3}
		²³⁶ U	3.1838×10^{-5}
		²³⁸ U	2.2006×10^{-2}
		O	4.6391×10^{-2}
		¹⁰ B	5.7531×10^{-8}
		¹¹ B	2.3157×10^{-7}
被覆管、端栓	アルミニウム合金 ^{注1)} (AGS)	Al	5.9569×10^{-2}
		Mg	3.1442×10^{-4}
		Si	2.4894×10^{-4}
		Fe	6.4052×10^{-5}
支持部材、 上・下部グリッド板、 タイロッド、 計装用シンプル	ステンレス鋼	Fe	5.8694×10^{-2}
		Cr	1.6469×10^{-2}
		Ni	8.1061×10^{-3}
		Mn	1.7319×10^{-3}
		Si	1.6939×10^{-3}
		P	6.1438×10^{-5}
		S	4.4504×10^{-5}
減速材	軽水 ^{注2)}	H	6.6707×10^{-2}
		O	3.3354×10^{-2}
空気		N	4.1805×10^{-5}
		O	1.2633×10^{-5}

注 1) Zn は SCALE ライブラリーにないため、無視した。

注 2) 水温 22℃ の値

(口)-第 E. 10 表 各領域の構成物質の原子個数密度(中性子吸収板・反射体)

領 域	材 質	元 素	原子個数密度 (10^{24} atoms/cm ³)	
中性子吸収板	ボロン入り ステンレス鋼	Fe	5.7220×10^{-2}	
		Cr	1.7203×10^{-2}	
		Ni	1.0707×10^{-2}	
		Mn	5.9877×10^{-4}	
		Si	1.0507×10^{-3}	
		P	4.6855×10^{-5}	
		S	9.0506×10^{-6}	
		C	1.4499×10^{-4}	
		¹⁰ B	9.7950×10^{-4}	
	¹¹ B	3.9426×10^{-3}		
	ボラル	炭化ホウ素+ アルミニウム	C	8.0894×10^{-3}
			Al	4.1873×10^{-2}
			¹⁰ B	6.4448×10^{-3}
¹¹ B			2.5941×10^{-2}	
	アルミニウム	Al	5.9169×10^{-2}	
中性子反射体	鉛	Pb	3.2959×10^{-2}	
	炭素鋼	Fe	8.3739×10^{-2}	
		C	5.4751×10^{-4}	
		Si	3.3450×10^{-4}	
		P	1.5165×10^{-4}	

3. ベンチマーク解析結果

(口)-第 E. 11 表にベンチマーク解析の結果を示す。ベンチマーク解析の結果、本輸送容器の臨界解析に用いた計算コード及び核データは妥当な結果を与えるといえる。

(口)-第 E. 11 表 ベンチマーク解析結果

ケース	keff	σ
1	0.99971	0.00087
2	0.99921	0.00093
3	0.99940	0.00078
4	0.99931	0.00082
5	0.99655	0.00089
6	1.00167	0.00085
7	0.99817	0.00090
8	0.99458	0.00084
9	1.00471	0.00099
10	0.99605	0.00099
平均値	0.99894	-
標準偏差	0.00275	-
最小値	0.99458	-
最大値	1.00471	-

E.6 結果の要約及びその評価

本輸送容器には、燃料集合体を収納するバスケットが用いられ、輸送中燃料集合体が分散・集合しないようになっている。バスケット格子は、未臨界維持のために中性子吸収材であるボロンを含むボロン入りステンレス鋼で構成される。

本輸送容器の臨界解析は、①通常輸送時、②輸送物を孤立系の条件に置く場合、③核分裂性輸送物に係る一般の試験条件の下に置いた輸送物を孤立系の条件に置く場合、④核分裂性輸送物に係る特別の試験条件の下に置いた輸送物を孤立系の条件に置く場合、⑤核分裂性輸送物に係る一般の試験条件の下に置いた輸送物を配列系の条件に置く場合、⑥核分裂性輸送物に係る特別の試験条件の下に置いた輸送物を配列系の条件に置く場合のいずれの条件よりも厳しい条件で行い、結果は十分未臨界であった。したがって、上記①から⑥のいずれの条件においても未臨界が維持される。

E. 7 付属書類

E. 7. 1 参考文献

- 1) “SCALE : A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation” , Vols. 1-3, ORNL/TM-2005/39 Version 5. 1, (2006)
- 2) D. F. Hollenbach, P. B. Fox, “CENTRM Validation” , ORNL/TM-2004/66, (2005)
- 3) “International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments” , LEU-COMP-THERM-040, NEA/NSC/DOC (95) 03, (2009)

(ロ)章 F 核燃料輸送物の経年変化の考慮

F. 核燃料輸送物の経年変化の考慮

ここでは、使用予定期間(60年)中の輸送容器の構成部材及び繰り返し使用される収納物の経年変化について、(ロ)章の安全解析で考慮する事項について示す。

F.1 考慮すべき経年変化要因

本輸送物において想定される使用条件(使用予定年数60年及び使用予定回数400回)を踏まえ、輸送容器の構成部材及び繰り返し使用される収納物に対して考慮すべき経年変化の要因については、以下を抽出する。

- ・熱的劣化

高温での材料組成・材料組織の変化、強度・延性・脆性・クリープ・その他物性値の変化及び質量減損

- ・放射線照射による劣化

中性子照射・ガンマ線照射による材料組成・材料組織の変化及び強度・弾性・延性・脆性・その他物性値の変化

- ・化学的劣化

全面腐食、応力腐食割れ及び異種材料接触部の化学的反応

- ・疲労による劣化

繰り返し荷重の作用による疲労破壊

F.2 安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価

1. 経年変化の影響について評価する対象

経年変化の影響について評価する本輸送物の構成部材を(口)-第 F.1 表に示す。
なお、収納物である燃料集合体については、繰り返し使用されることはなく、また、長期保管後に輸送するものではないため、評価対象から除外している。

(ロ)-第F.1表 経年変化の影響について評価する本輸送物の構成部材

輸送物の構成部材	評価対象材料
本体 内筒 底板 [] フランジ 仕切板 フィン バギングリング トラニオン ベント・水位調整バルブ ドレンバルブ バルブカバープレート レジンカバー	ステンレス鋼 ^{注)}
蓋 蓋板 [] 蓋吊手 水位調整用加圧バルブ バルブカバープレート	
緩衝体 カバープレート リブ 上部緩衝体ボルト 下部緩衝体ボルト	
収納物 ツール 上・下部ツール	
本体 中間筒 外筒	炭素鋼([])
本体 ガンマ線遮蔽材	鉛
本体 中性子遮蔽材	レジン(エポキシ系樹脂)
本体 伝熱フィン	銅
蓋 蓋ボルト []	
バスケット 支持リング スペーサ チャンネル	ステンレス鋼及び ボロン入りステンレス鋼
緩衝体 緩衝材	木材
本体 Oリング	ふっ素ゴム
蓋 Oリング	

注) 析出硬化型ステンレス鋼を含む。

2. 経年変化の考慮の必要性に関する評価条件

(ロ)章 F.1 において抽出した経年変化要因を踏まえ、経年変化の考慮の必要性について以下の条件で評価した。

- ・ 輸送容器の使用予定期間(60年)のうち、保守や空容器輸送等の期間は収納物が収納されないが、経年変化の評価に当たっては、収納物が収納された際に想定される熱や放射線等の環境に継続的にさらされるものとし、その期間を保守的に60年(以下「評価期間」という。)として経年変化の影響を評価した。
- ・ 放射線照射による劣化は、非金属材料(レジン・木材・ふっ素ゴム)については、中性子とガンマ線に対して影響を評価した。一方、金属材料については、主に原子のはじき出しにより照射脆化が生じるが、ガンマ線に起因するはじき出しが生じる確率は中性子と比較して2桁以上小さいため¹⁾、ガンマ線に起因する照射脆化への影響は中性子と比較して十分小さくなる。このため、金属材料の放射線照射による劣化の影響は中性子に対して評価した。
- ・ 累積ガンマ線照射量については、(ロ)章 D で算出したガンマ線束計算結果から各部材における最大線束を抽出し、吸収線量率変換係数及び評価期間を乗ずることで算出した。また、累積中性子照射量については、(ロ)章 D で算出した中性子束計算結果から各部材における最大線束を抽出し、評価期間を乗ずることで算出した。なお、ふっ素ゴムの放射線照射による劣化の評価については、ガンマ線及び中性子の吸収線量の合算値が基準となるため、中性子束の最大値に線量当量率変換係数及び評価期間を乗ずることで算出した線量当量率を $Sv=Gy$ として吸収線量とし、累積ガンマ線照射量と合算した値を累積照射量とした。
- ・ 疲労については、吊上げによる荷重、運搬中の内外圧差による荷重、蓋ボルトの締付けによる荷重、熱膨張差による荷重を繰り返し受ける構成部材を評価した。
- ・ 上・下部スツールについては、輸送中の燃料集合体のがたつきを抑えるために設置している。疲労については、輸送物発送前検査の収納物検査において交換が必要となった場合、その都度取り替えることから評価の対象外とした。
- ・ 緩衝材については、使用済燃料の輸送実績から想定される輸送容器が通常使用される条件での緩衝材の温度評価及び過去に使用済燃料の輸送に供された輸送容器から採取した木材の試験結果を基に評価した。放射線照射による劣化、化学的劣化については、その他の部材と同様に評価期間の間使用されるものとして影響を評価した。
- ・ O リングについては、定期点検及び輸送物発送前検査において交換が必要となった場合には、その都度新品と取り替え、また、前述の検査等の結果にかかわらず、実使用期間(燃料装荷期間)の合計で1年に1回以上の頻度で交換を実施するため、

最長使用期間を1年として経年変化の影響を評価した。なお、疲労については、輸送容器の使用回数は年10回程度であり、また、定期点検及び輸送物発送前検査において交換が必要となった場合、その都度新品と取り替えることから評価の対象外とした。

ここで、各構成部材に係る熱的劣化については、通常使用条件ではなく保守的に一般の試験条件下の太陽熱放射ありの条件の最高温度が60年間(0リングについては1年間)継続する際の影響を評価する。

3. 経年変化の考慮の必要性に関する評価結果

(口)-第 F.1 表にて整理した本輸送物の構成部材の材料に対して、経年変化の考慮の必要性を評価した結果を(口)-第 F.2 表に示す。

(口)-第 F.2 表に示す評価結果に基づき、構造評価で疲労破壊が生じるおそれはないことを確認するとともに、構造評価及び遮蔽評価ではレジンの熱的劣化を考慮する。

(ロ)-第 F.2 表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(1/12)

材 料	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価
本体・蓋・緩衝体・収納物 ステンレス鋼	熱	<p>ステンレス鋼は、熱による経年変化として、高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられる。</p> <p>上記の中で最も厳しい温度条件となるのはクリープによる変形であり、クリープによる変形が生じる材料温度は、一般に純金属の場合は融点の三分の一付近、実用鋼では種々の因子により強化されていることからそれ以上と言われている²⁾。本輸送物では、輸送時の各部材の最高温度(180℃未満)はクリープによる変形を考慮する必要のない範囲(ステンレス鋼の融点³⁾の三分の一である 280℃以下)である。また、設計用強度・物性値が規定⁴⁾、⁵⁾されている温度範囲において構造健全性を確認しているため、熱的劣化を考慮する必要はない。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>
	放射線 照射	<p>ステンレス鋼は、放射線による経年変化として、中性子照射量が 10^{17} n/cm² オーダーを上回る環境における機械的特性の変化に伴う照射脆化⁶⁾が考えられる。</p> <p>本輸送物では、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、評価期間中の累積中性子照射量は 5.8×10^{14} n/cm² であり、照射脆化が生じるおそれがある中性子照射量を下回る。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>
	化学	<p>ステンレス鋼は、化学的要因による経年変化として、腐食に伴う表面の性状の変化が考えられる。</p> <p>ステンレス鋼は、加圧水型原子炉の一次冷却水の温度や水質等の環境条件下において問題となるような腐食は起こらないことが研究⁷⁾により示されている。本輸送物では、一般の試験条件下における内水平均温度が 180℃未満であり、運転中の加圧水型原子炉の一次冷却水の温度約 325℃(電気出力 1,100MWe 級の例)に比べて十分に低く、加圧水型原子炉より環境条件が厳しくないため、輸送容器内部のステンレス鋼の腐食の影響はない。また、定期点検及び輸送物発送前検査の外観検査で輸送容器外面に腐食が確認された場合には補修する。さらに、ステンレス鋼は表面に不動態皮膜が形成された状態が維持されるため、腐食は発生しにくい。</p> <p>中性子遮蔽材であるレジンに接する部材は、充填空間が密閉環境であり、酸素が連続的に供給されないため、腐食の影響はない。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>

(ロ)-第F.2表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(2/12)

材 料	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価
本体・蓋・緩衝体・収納物 ステンレス鋼	疲労	<p>輸送物の構成部材において、吊上げと内外圧差の2つの要因による繰返し荷重を受けるため、経年変化についての考慮が必要となる。</p> <p>トラニオンについては、使用予定期間中において吊上げによる荷重を繰返し受けることになる。このため、繰返し回数を保守的に設定した上でトラニオンの疲労を評価し、疲労破壊が生じるおそれはないことを確認する((ロ)章 A.4.4.2)。</p> <p>蓋、フランジ、内筒、底板、仕切板及びレジンカバーについては、使用予定期間中において運搬中の内外圧差による荷重を繰返し受けることになる。このため、使用予定回数を踏まえた上で蓋、フランジ、内筒、底板、仕切板及びレジンカバーの疲労を評価し、疲労破壊が生じるおそれはないことを確認する((ロ)章 A.5.1.4)。</p>

(ロ)-第F.2表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(3/12)

材 料	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価
炭素鋼	熱	<p>炭素鋼は、熱による経年変化として、高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられる。</p> <p>上記の中で最も厳しい温度条件となるのはクリープによる変形であり、クリープによる変形が生じる材料温度は、一般に純金属の場合は融点の三分の一付近、実用鋼では種々の因子により強化されていることからそれ以上と言われている²⁾。本輸送物では、輸送時の各部材の最高温度(170℃未満)はクリープによる変形を考慮する必要のない範囲(炭素鋼の融点³⁾の三分の一である⁴⁾である。また、設計用強度・物性値が規定⁴⁾、⁵⁾されている温度範囲において構造健全性を確認しているため、熱的劣化を考慮する必要はない。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化を考慮する必要はない。</p>
炭素鋼	放射線 照射	<p>炭素鋼は、放射線に伴う照射脆化⁶⁾が考えられる。</p> <p>本輸送物では、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、評価期間中の累積中性子照射量は1.1×10^{14} n/cm²であり、照射脆化が生じるおそれがある中性子照射量を下回る。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>
炭素鋼	化学	<p>炭素鋼は、化学的要因による経年変化として、腐食に伴う表面の性状の変化が考えられる。</p> <p>本輸送物では、炭素鋼(中間筒の外面及び外筒の内面)は中性子遮蔽材(レジン)に接しており、中性子遮蔽材の熱的劣化により水分が生じる。一方、炭素鋼の腐食速度は、水中に溶存した酸素濃度に比例して増大するが¹⁰⁾、中性子遮蔽材充填空間は密閉環境にあり、酸素が連続的に供給されないため腐食の影響はない。</p> <p>炭素鋼(外筒の外面)については、ステンレス鋼オーバーレイなどの防錆措置を施しているため、腐食は発生しにくい。また、定期点検及び輸送物発送前検査において外観に異常がないことを確認している。</p> <p>炭素鋼(中間筒の内面)は、密閉環境であり、酸素が連続的に供給されないため、腐食の影響はない。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>

(ロ)-第 F.2 表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(4/12)

材 料		経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価
本体	炭素鋼	疲労	<p>輸送物の構成部材において、内外圧差による繰返し荷重を受けるため、経年変化についての考慮が必要となる。</p> <p>中間筒及び外筒については、使用予定期間中において運搬中の内外圧差による荷重を繰り返し受けることになる。このため、使用予定回数を踏まえたと上で中間筒及び外筒の疲労を評価し、疲労破壊が生じるおそれはないことを確認する((ロ)章 A.5.1.4)。</p>

(ロ)-第 F.2 表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(5/12)

材 料	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価
	熱	<p>鉛は、熱による経年変化として、高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられる。ただし、本輸送物は構造強度部材に鉛を使用していないため、強度低下の影響はない。また、鉛には自重による応力が作用するが、クリープによる変形量は無視し得る。</p> <p>また、鉛については、高温環境下での組織変化による変形に伴う遮蔽性能の低下が考えられるが、輸送時の本部材の最高温度は 180℃未満であり、融点である 327.5℃⁽¹¹⁾に対して十分に余裕のある温度範囲で使用するため、熱的劣化を考慮する必要はない。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化を考慮する必要はない。</p>
本 体	放射線 照射	<p>鉛は、放射線による経年変化として、中性子吸収に伴う質量減損による遮蔽性能の低下が考えられる。</p> <p>ただし、鉛の同位体の中性子吸収反応では質量数が 1 増えた鉛の同位体に変化することから質量減損による遮蔽性能の低下は無い。なお、²⁰⁸Pb の中性子吸収反応では短半減期の ²⁰⁹Pb を経て ²⁰⁹Bi を生成するが、²⁰⁸Pb の中性子吸収断面積が $0.487 \times 10^{-27} \text{cm}^2$ と小さく⁽¹²⁾、保守的に燃料近傍(バスケット部)の累積中性子照射量 $5.8 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ を考慮した場合においても、評価期間中の変化率は 2.82×10^{-13} と非常に小さいことから、質量減損による遮蔽性能の低下は無視し得る。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>
	化学	<p>鉛は、化学的要因による経年変化として、腐食に伴う表面の性状の変化が考えられる。</p> <p>ただし、鉛は、充填空間が密閉環境であり、酸素が連続的に供給されないため、腐食の影響はない。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の考慮をする必要はない。</p>

(ロ)-第 F.2 表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(6/12)

材 料	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価
本体 レジン (エポキシ系樹脂)	熱	レジンは、熱による経年変化として、高温環境下では含有する水分の放出に伴う水蒸気による圧力上昇と質量減損による原子個数密度の減少が考えられる。 このため、圧力上昇については、中性子遮蔽材充填空間の圧力にレジンから放出される水分の飽和蒸気圧を考慮した上で構造解析を実施し、技術上の基準に適合していることを確認する(ロ)章 A)。 また、質量減損については、一般の試験条件下の太陽熱放射による原子個数密度の減少を考慮した上で遮蔽解析評価期間(60年)の条件におけるレジンの質量減損による原子個数密度の減少を考慮した上で遮蔽解析を実施し、技術上の基準に適合していることを確認する(ロ)章 D)。
	放射線 照射	レジンは、放射線による経年変化として、中性子照射量が 10^{15} n/cm ² オーダー、ガンマ線照射量が 3.9×10^4 Gy を上回る環境における質量減損による原子個数密度の減少が考えられる。 ^{13)、14)、15)} 本輸送物では、最も照射量が高くなる箇所においても、評価期間中の累積中性子照射量は 3.2×10^{13} n/cm ² 、累積ガンマ線照射量が 6.5×10^2 Gy であり、質量減損が生じるおそれがある照射量を下回る。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。
	化学	レジンは、遮蔽性能に影響を与える化学的要因による経年変化は生じないため、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の影響を考慮する必要はない。

(ロ)-第F.2表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(7/12)

材 料	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価
	熱	<p>銅は、熱による経年変化として、高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられる。</p> <p>上記の中で最も厳しい温度条件となるのはクリープによる変形であり、クリープによる変形が生じる材料温度は、一般に純金属の場合は融点の三分の一付近、実用鋼では種々の因子により強化されていることからそれ以上と言われている²⁾。本輸送物では、輸送時の最高温度(160°C未満)はクリープによる変形を考慮する必要のない範囲(銅の融点¹⁰⁾の三分の一である170°C以下)である。また、設計用強度・物性値が規定¹¹⁾されている温度範囲において構造健全性を確認しているため、熱的劣化を考慮する必要はない。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>
銅 本体	放射線 照射	<p>銅は、放射線による経年変化として、中性子照射量が10^{16} n/cm²オーダーを上回る環境における機械的特性の変化に伴う照射脆化¹⁸⁾が考えられる。</p> <p>本輸送物では、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、評価期間中の累積中性子照射量は3.2×10^{13} n/cm²であり、照射脆化が生じるおそれがある中性子照射量を下回る。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>
	化学	<p>銅は、化学的要因による経年変化として、腐食に伴う表面の性状の変化が考えられる。</p> <p>銅は、電極電位が炭素鋼に比べて高く、イオン化傾向の低い金属である¹⁰⁾ことから、銅の腐食は発生しにくく、炭素鋼が選択的に腐食されやすい。また、中性子遮蔽材(レジン)に接しており、中性子遮蔽材の熱的劣化により水分が生じるが、酸化鉄の生成により酸素の拡散障壁が形成されること及び中性子遮蔽材充填空間は密閉環境にあり、酸素が連続的に供給されないため、腐食の影響はない。</p> <p>伝熱フィン並びに中間筒及び外筒の接合部において、異種金属接触により中間筒及び外筒の腐食が促進される可能性があるが、密閉環境かつ淡水環境では、銅が接続された鋼の腐食速度が鋼単独の場合と同程度になる¹⁹⁾ことが示されている。また、中性子遮蔽材の熱的劣化により生じる水分量は限定的であることに加え、中性子遮蔽材充填空間は密閉環境にあり、酸素が連続的に供給されないため、異種金属接触による接合部への腐食促進の影響は小さく、腐食の影響はない。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>

(ロ)-第 F.2 表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(8/12)

材 料	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価
本 体 銅	疲 労	銅が使用される伝熱フィンは、熱膨張差による繰返し荷重を受けるため、経年変化についての考慮が必要となる。 このため、使用予定回数を踏まえた上で伝熱フィンの疲労を評価し、疲労破壊が生じるおそれはないことを確認する((ロ)章 A.5.1.4)。

(ロ)-第 F.2 表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(9/12)

材 料	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価
蓋	熱	<p> は、熱による経年変化として、高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられる。 上記の中で最も厳しい温度条件となるのはクリープによる変形であり、クリープによる変形が生じる材料温度は、一般に純金属の場合は融点の三分の一付近、実用鋼では種々の因子により強化されていることからそれ以上と言われている²⁾。本輸送物では、輸送時の最高温度(170℃未満)はクリープによる変形を考慮する必要のない範囲()の融点³⁾の三分の一である300℃以下)である。また、設計用強度・物性値が規定^{4), 5)}されている温度範囲において構造健全性を確認しているため、熱的劣化を考慮する必要はない。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化の影響を考慮する必要はない。 </p>
	放射線 照射	<p> は、放射線による経年変化として、中性子照射量が10^{16} n/cm²オーダーを上回る環境における機械的特性の変化に伴う照射脆化⁶⁾が考えられる。 本輸送物では、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、評価期間中の累積中性子照射量は1.0×10^{13} n/cm²であり、照射脆化が生じるおそれがある中性子照射量を下回る。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。 </p>
	化学	<p> は、化学的要因による経年変化として、腐食に伴う表面の性状の変化が考えられる。 本輸送物では、メッキにより防錆措置を施していることから、腐食は発生しにくい。また、定期点検及び輸送物発送前検査において外観に異常がないことを確認している。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の影響を考慮する必要はない。 </p>
	疲労	<p> が使用される蓋ボルトは、内外圧差とボルト締付けの2つの要因による繰返し荷重を受けるため、経年変化についての考慮が必要となる。 このため、使用予定回数を踏まえた上で蓋ボルトの疲労を評価し、疲労破壊が生じるおそれはないことを確認する((ロ)章 A.5.1.4)。 </p>

(ロ)-第 F.2 表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(10/12)

材 料	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価
バスケット ステンレス鋼及び ボロン入りステンレス鋼	熱	<p>ステンレス鋼及びボロン入りステンレス鋼は、熱による経年変化として、高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられる。</p> <p>上記の中で最も厳しい温度条件となるのはクリープによる変形であり、クリープによる変形が生じる材料温度は、一般に純金属の場合は融点の三分の一付近、実用鋼では種々の因子により強化されていることからそれ以上と言われている²⁾。本輸送物では、輸送時の各部材の最高温度(190°C未滿)はクリープによる変形を考慮する必要のない範囲(ステンレス鋼及びボロン入りステンレス鋼の融点³⁾の三分の一である 280°C以下)である。また、設計用強度・物性値が規定^{4), 5)}されている温度範囲において構造健全性を確認しているため、熱的劣化を考慮する必要はない。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>
	放射線 照射	<p>ステンレス鋼及びボロン入りステンレス鋼は、放射線による経年変化として、中性子照射量が 10^{17} n/cm² オーダーを上回る環境における機械的特性の変化に伴う照射脆化^{6), 20)}が考えられる。</p> <p>本輸送物では、最も中性子照射量が高くなく、評価期間中の累積中性子照射量は 5.8×10^{14} n/cm² であり、照射脆化が生じるおそれがある中性子照射量を下回る。</p> <p>また、ボロン入りステンレス鋼については、B-10 の減損に伴う中性子吸収性能の低下が考えられるが、B-10 の評価期間中の減損割合は 10^{-5} 未滿であり、無視し得るほど小さい。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>
	化学	<p>ステンレス鋼及びボロン入りステンレス鋼は、化学的要因による経年変化として、腐食に伴う表面の性状の変化が考えられる。</p> <p>ステンレス鋼及びボロン入りステンレス鋼は、軽水炉の一次冷却水である純水又はホウ酸水に浸漬された場合においても腐食は発生しにくい。加圧水型原子炉の一次冷却水の温度や水質等の環境条件下において問題となるようなステンレス鋼の腐食は起こらないことが研究⁷⁾により示されている。本輸送物では、一般の試験条件下における内水平平均温度が 180°C 未滿であり、運転中の加圧水型原子炉の一次冷却水の温度約 325°C (電気出力 1,100MWe 級の例)に比べて十分に低く、加圧水型原子炉より環境条件が厳しくないため、輸送容器内部のステンレス鋼の腐食の影響はない。また、ステンレス鋼は表面に不動態皮膜が形成された状態が維持されるため、腐食は発生しにくい。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>

(ロ)-第F.2表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(11/12)

材 料	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価
緩衝体	熱	<p>木材は、熱による経年変化として、高温環境下での強度低下が考えられる。本輸送物では、緩衝材の最高温度は、通常輸送条件よりも保守的な一般の試験条件下(環境温度 38℃、太陽熱放射あり)であっても 125℃である。</p> <p>木材温度が 200℃に達すると木材の熱分解が進む²¹⁾との文献が確認できたものの、直接参照できる文献は乏しい状況にある。一方で、緩衝材として木材が広く使用されていることを踏まえ、本輸送容器を含め現在国内事業者が使用中又は使用予定の輸送容器について、これまでの実輸送時の条件を基に収納物による設計上の最大入熱を考慮した輸送容器の緩衝材の平均温度を評価した結果、約 40～70℃程度(本輸送物は約 50℃程度)であること、使用済燃料輸送実績のある輸送容器を廃棄する際に採取した木材の圧潰強度及び密度測定の結果、木材の衝撃吸収性能は健全であり、性能劣化はなかつたことから、これまでの実績と同様の使用環境であれば、木材の熱的劣化は生じないと考えられる²²⁾。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化の影響を考慮する必要はない。なお、輸送に際しては、都度、輸送容器の使用履歴を蓄積し、輸送前に、輸送容器の使用履歴、収納物の発熱量及び輸送時に想定される環境温度を踏まえ、木材温度が、おおむね実績のある温度の範囲内であることを確認した後輸送を行う。</p>
木材	放射線 照射	<p>木材は、放射線による経年変化として、中性子照射量が 10^{16} n/cm² オーダー、ガンマ線照射量が 10^5 Gy オーダーを上回る環境における機械的特性の変化に伴う照射脆化^{22)、23)}が考えられる。</p> <p>本輸送物では、最も照射量が高くなる箇所においても、評価期間中の累積中性子照射量は 3.8×10^{11} n/cm²、累積ガンマ線照射量は 2.8×10^2 Gy であり、照射脆化が生じるおそれがある照射量を下回る。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>
木材	化学	<p>木材は、化学的要因による経年変化として、腐朽に伴う材料の強度低下や脆化等の影響が考えられる。本輸送物では、木材の充填空間はステンレス鋼製のカパープレートに覆われた密閉環境にあり、酸素が連続的に供給されないため、腐朽しない。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>

注) 参考資料：第 12 回輸送容器及び使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器に関する審査会(令和 4 年 4 月 25 日)資料 1 別紙「緩衝材(木材)の熱的劣化について」

(ロ)-第F.2表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(12/12)

材 料	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価
本体・蓋(0リング) ふっ素ゴム	熱	0リングは、熱による経年変化として、高温環境下では圧縮変位に対する復元力の低下が考えられる。本輸送物では、輸送時の0リングの最高温度は164℃であり、一般の試験条件下の使用可能温度である180℃ ²⁴⁾ を大きく下回る。また、164℃の温度条件で使用したとしても1年以上密封性能が維持されることが示されているため ²⁴⁾ 、最長使用期間である1年間使用したとしても0リングの密封性能に影響はない。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化の影響を考慮する必要はない。
	放射線 照射	0リングは、放射線による経年変化として、放射線照射により機械的特性の変化が生じることが考えられる。また、その影響は吸収線量と同じであれば、放射線の種類によらないことが知られている ²⁵⁾ 。 本輸送物では、0リングの最長使用期間である1年間の累積ガンマ線及び中性子の照射量は 2.0×10^4 Gyであり、0リングがシール材として使用可能であることが示されている 6×10^4 Gy ²⁶⁾ を下回るため、0リングの密封性能に影響はない。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。
	化学	0リングは、化学的要因による経年変化として、高温湿潤環境で使用することによる加水分解が考えられる。 本輸送物において使用している0リングの材質はふっ素ゴムであり、1年間の高温湿潤環境に対しても密封性が維持されることが確認されており ²⁷⁾ 、0リングの密封性能への影響はない。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の影響を考慮する必要はない。

F.3 安全解析における経年変化の考慮内容

前項に示したとおり、輸送物の構成部材を対象に、経年変化の考慮の必要性について評価を行った。

鉛、バスケットに用いられるステンレス鋼、ボロン入りステンレス鋼、緩衝体に用いられる木材については、使用予定期間中の経年変化を考慮する必要がないことを確認した。バスケット以外に用いられるステンレス鋼、炭素鋼、銅、については、熱、放射線、化学反応における経年変化要因においては使用予定期間中の経年変化を考慮する必要がないことを確認した。また、Oリングについては、最長使用期間中の経年変化を考慮する必要がないことを確認した。

経年変化の考慮が必要なものとしては、ステンレス鋼製の内筒、底板、フランジ、仕切板、レジンカバー、蓋、トラニオン、炭素鋼製の中間筒、外筒、銅製の伝熱フィン及び
製の蓋ボルトについては、吊上げ、内外圧差、ボルト締付け、熱膨張差による繰返し荷重を受けるため、疲労による経年変化を考慮する必要がある。使用予定期間中に想定される最も厳しい荷重条件かつ使用予定回数を踏まえた上で、吊上げ、内外圧差、ボルト締付け、熱膨張差による疲労を評価し、疲労破壊が生じるおそれはないことを確認する。

また、レジンについては、レジンから放出される水分により中性子遮蔽材充填空間の圧力上昇及び質量減損が発生するため、熱による経年変化を考慮する必要がある。

疲労評価の条件、レジンから放出される水分による中性子遮蔽材充填空間の圧力上昇の影響及び遮蔽解析における質量減損を以下に示す。

1. 構造解析における疲労評価

疲労評価の条件としては、使用回数1回当たりの吊上げ回数を40回と想定し、使用予定期間を通しての吊上げに関する繰返し回数(使用計画回数)を16,000回(=400回×40回)と設定する。また、使用回数1回において内外圧差、ボルト締付け、熱膨張差による荷重が発生する回数を1回と想定し、使用予定期間を通しての繰返し回数を使用予定回数である400回と設定する。吊上げに関する繰返し回数については、使用回数1回当たりの吊上げ回数(20回)を保守的に2倍に設定しており、使用予定期間における取扱い及び運搬において想定される繰返し回数を包含している。これらの条件を考慮した疲労評価については、(ロ)章A.4.4.2及び(ロ)章A.5.1.4に示す。

2. 構造解析における中性子遮蔽材充填空間の圧力上昇

中性子遮蔽材充填空間には、レジンが充填されており、その空間部には空気が大気圧で封入されている。中性子遮蔽材を保持する仕切板又はレジンカバーには可溶栓が設置されており、輸送前にはそれらの交換などの容器保守で一時的に圧力が開放されるが、通常は大気と遮断された環境にある。

中性子遮蔽材に用いるエポキシ系樹脂について、使用予定期間を考慮した経年劣化評価試験が実施されており^{14)、28)、29)、30)}、使用予定期間中の中性子遮蔽材充填空間の気相部分の成分は主に水、二酸化炭素及び窒素と考えられる。

水については、水の存在による圧力上昇を飽和水蒸気圧として考慮する。二酸化炭素については、初期に空間部分に存在する酸素によるレジンの酸化反応により発生するため、二酸化炭素は初期に存在した酸素と同量の物質質量に設定する。また、窒素は、不活性ガスであることからレジンへの吸収がないものとし、初期に存在した物質質量とする。したがって、空間部分の水を除くガスの物質質量は変化しないものとし、初期に存在する空気として評価する。

構造解析では中性子遮蔽材充填空間の気相部分の圧力上昇として、空気温度の上昇及び飽和水蒸気圧を考慮した。

中性子遮蔽材充填空間の圧力 P (MPa) は、以下のとおり求められる。

$$P = P_w + P_g$$

ここで、

P_w : 温度 t の飽和水蒸気圧 (MPa)

P_g : 温度 t の空気の分圧 (MPa)

$$P_g = P_0 \times \frac{t + 273}{20 + 273}$$

P_0 : 大気圧 (0.1013 MPa)

t : 一般又は特別の試験条件における中性子遮蔽材の評価温度 (°C)

一般の試験条件及び特別の試験条件における中性子遮蔽材充填空間圧力の計算条件及び計算結果を(ロ)-第 F.3 表に示す。なお、特別の試験条件において、中性子遮蔽材充填空間の圧力は可溶栓によって開放される。

(ロ)-第 F. 3 表 中性子遮蔽材部圧力の計算条件及び計算結果

部位	試験条件	中性子遮蔽材温度 : t (°C) ^{注1)}	温度 t の 空気の分圧 : P _G (MPa)	温度 t の 飽和水蒸気圧 : P _W (MPa)	中性子遮蔽材充填空間 圧力 : P (MPa)
側部	一般	134	0.141	0.306	0.447
	特別 ^{注2)}	-	-	-	-

注1) 一般の試験条件又は特別の試験条件における外筒の最高温度

注2) 特別の試験条件において、仕切板に設けられた可溶栓が熱により溶融し、中性子遮蔽材充填空間は大気圧となるため圧力は負荷しない。

3. 遮蔽解析における質量減損

評価期間経過後の中性子遮蔽材の質量減損率の評価を行い、経年劣化を考慮した原子個数密度を遮蔽解析に用いている。

実際のレジンの充填空間は密閉空間であるため、レジンから放出された水蒸気は系内で飽和してレジンの分解反応は平衡に達するが、保守的にレジンの分解反応が平衡とならずに発生した水蒸気が全てレジンの質量減損に寄与する環境を想定すると、質量減損率は劣化パラメータにより次式で表される。

$$\Delta w = \boxed{\hspace{10em}}^{13)}$$

ここで、

Δw : レジンの質量減損率(%)

E_p : 劣化パラメータ

$$E_p = \boxed{\hspace{10em}}$$

T : レジン温度(K)

t : レジン加熱時間(h)

前述のように、経年変化を評価する際の温度については、レジンには温度分布があるが、安全側にレジン全体が一般の試験条件下の太陽熱放射ありの条件の最高温度とし、また、実際には評価期間である 60 年間の連続熱曝露は起こり得ないが、この温度が評価期間である

60年間継続するものとして、質量減損率を算出する。質量減損の評価で用いたレジンの最高温度を(ロ)-第F.4表に示す。

上記を基にすれば、評価期間経過後の劣化パラメータは約 となり、質量減損率は %と算定される。遮蔽解析におけるレジンの質量減損を考慮した場合の影響評価については、(ロ)章Dに示す。なお、レジンから放出される成分は水が支配的であり、水よりも水素含有率が高いガス成分はわずかである^{14)、28)、29)、30)}。したがって、遮蔽解析においては、中性子の遮蔽性能を安全側に設定するため、レジンの質量減損の成分を全て水とし、この質量減損分を遮蔽体として無視している。

(ロ)-第F.4表 質量減損の算出に用いるレジンの最高温度^{注)}

側部(°C)
158

注) 一般の試験条件下における太陽熱放射ありの条件の最高温度

F.4 付属書類

F.4.1 参考文献

- 1) D. E. Alexander, L. E. Rehn, “Analysis of Gamma Ray Displacement Damage in Light Water Reactor Pressure Vessels”, ANL/MSD/CP86640, Argonne National Laboratory, (1995).
- 2) 田中良平, “耐熱鋼のクリープ特性の評価について”, 圧力技術, 第16巻, 第2号, p. 87-95, (1978).
- 3) ステンレス協会編, “ステンレス鋼便覧(第3版)”, 日刊工業新聞社, (1995).
- 4) (社)日本機械学会, “使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格 (JSME S FA1-2007)”, (2007).
- 5) (社)日本機械学会, “発電用原子力設備規格 材料規格(2012年版)(JSME S NJ1-2012)”, (2012).
- 6) 土肥謙次, 秀耕一郎, 黛正己, 恩地健雄, 大岡紀一, “304 ステンレス鋼の SCC 特性に及ぼす中性子照射効果(その2)-熱鋭敏化材の SCC 感受性に及ぼす照射影響-”, (財)電力中央研究所, (1997).
- 7) 前川立夫, 香川優, “ステンレス鋼の高温ホウ酸水中における腐食”, 防蝕技術, 17巻, 3号, p. 114-119, (1968).
- 8) (社)日本金属学会編, “金属便覧(改訂6版)”, 丸善株式会社, (2000).
- 9) K. Farrell, S. T. Mahmood, R. E. Stoller, L. K. Mansur, “An Evaluation of Low Temperature Radiation Embrittlement Mechanisms in Ferritic Alloys”, Journal of Nuclear Materials, Vol. 210, (1994).
- 10) (社)腐食防食協会編, “腐食・防食ハンドブック CD-ROM版 第2版”, 丸善出版, (2005).
- 11) 自然科学研究機構 国立天文台編, “理科年表 2019”, 丸善出版, (2019).
- 12) S. F. Mughabghab et al., “Neutron Cross Sections Volume 1, Resonance Parameters”, BNL325 Third Edition, National Neutron Cross Section Center Brookhaven National Laboratory, (1973).
- 13) (財)原子力発電技術機構, “平成14年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(金属キャスク貯蔵技術確証試験) 報告書”, (2003).
- 14) T. Ichihashi, D. Ishiko, A. Ogawa, M. Morishima, “Verification Tests of Neutron

Shielding Materials and Shielding Assessment”, Proceedings of the 15th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, (2007).

- 15) (財)原子力発電技術機構, “平成15年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(金属キャスク貯蔵技術確証試験) 最終報告書”, (2004).
- 16) (社)日本機械学会, “伝熱工学資料(改訂第4版)”, 丸善株式会社, (1986).
- 17) (財)日本規格協会, “圧力容器の設計(JIS B 8267:2015)”, (2015).
- 18) S. J. Zinkle, G. L. Kulcinski, “Low-Load Microhardness Changes in 14-MeV Neutron Irradiated Copper Alloys”, ASTM STP888, (1986).
- 19) 能登谷武紀, “密閉系淡水における鋼-銅系のガルバニック腐食”, 伸銅技術研究会誌 33巻, (1994).
- 20) S. E. Soliman, et al., “Neutron effects on borated stainless steel”, Nuclear Technology, vol. 96, p. 346-352, (1991).
- 21) 岡野健, 祖父江信夫, “木材科学ハンドブック”, 朝倉書店, (2006).
- 22) T. Aoki, M. Norimoto, T. Yamada, “Some Physical Properties of Wood and Cellulose Irradiated with Gamma Rays”, Wood research, vol. 62, p. 19-28, (1977).
- 23) O. Teszler, et al., “The Effect of Nuclear Radiation on Fibrous Materials Part III: Relative Order of Stability of Cellulosic Fibers”, Textile Research Journal, vol. 28, p. 456-462, (1958).
- 24) (財)電力中央研究所, “輸送キャスク密封装置の耐熱限界性能の評価”, (1998).
- 25) M. Ferrari, et al., “Degradation of EPDM and FPM elastomers irradiated at very high dose rates in mixed gamma and neutron fields”, Polymer Engineering and Science, vol. 59, p. 2522-2532, (2019).
- 26) W. W. Parkinson, O. Sisman, “The use of plastics and elastomers in nuclear radiation”, (1971).
- 27) 日本バルカー工業株式会社, “原燃輸送(株) 殿設計条件におけるOリング性能評価試験受託業務結果報告書”, 報告書 No. 07080014, (2009).
- 28) 原燃輸送株式会社, “使用済燃料等の輸送容器に用いられる中性子しゃへい材(NS-4-FR)の連続加熱評価試験”, NFT-TR-97001, (1997).

- 29) (財)原子力発電技術機構, “平成 13 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術確証試験(金属キャスク貯蔵技術確証試験)報告書”, (2002).
- 30) (財)原子力発電技術機構, “平成 15 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(金属キャスク貯蔵技術確証試験)報告書”, (2003).

(ロ) 章 G 外運搬規則及び外運搬告示に対する適合性の評価

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目																					
(核燃料輸送物としての核燃料物質等の運搬) 第3条第1項 第1号 第3条第1項 第2号	(L型輸送物として運搬できる核燃料物質等) 第3条 (A型輸送物として運搬できる核燃料物質等の放射能の量の限度) 第4条	該当しない。 該当しない。																						
第3条第1項 第3号	第4条 及び 別表第1	本輸送物の仕様は下表のとおりであり、原子力規制委員会 の定める量を超える量の放射能を有する核燃料物質等に 該当するのでBM型輸送物として輸送する。 <table border="1" data-bbox="644 1115 1230 1637"> <tr> <td>種類</td> <td>使用済燃料(軽水炉(PWR))</td> </tr> <tr> <td>性状</td> <td>固体 (二酸化ウラン粉末焼結体)</td> </tr> <tr> <td>ウラン重量</td> <td>6,580kg 以下</td> </tr> <tr> <td>放射能の量</td> <td><input type="text"/> PBq 以下</td> </tr> <tr> <td>濃縮度</td> <td>4.3%以下</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">燃焼度</td> <td>収納物平均</td> <td><input type="text"/> MWD/MTU 以下</td> </tr> <tr> <td>収納物最高</td> <td><input type="text"/> MWD/MTU 以下</td> </tr> <tr> <td>発熱量</td> <td>54kW 以下</td> </tr> <tr> <td>冷却日数</td> <td><input type="text"/> 日以上</td> </tr> <tr> <td>収納体数</td> <td>14 体以下</td> </tr> </table> 注記) タイプ3 燃料を代表として記載	種類	使用済燃料(軽水炉(PWR))	性状	固体 (二酸化ウラン粉末焼結体)	ウラン重量	6,580kg 以下	放射能の量	<input type="text"/> PBq 以下	濃縮度	4.3%以下	燃焼度	収納物平均	<input type="text"/> MWD/MTU 以下	収納物最高	<input type="text"/> MWD/MTU 以下	発熱量	54kW 以下	冷却日数	<input type="text"/> 日以上	収納体数	14 体以下	(イ)-A、 (イ)-B、 (イ)-D
種類	使用済燃料(軽水炉(PWR))																							
性状	固体 (二酸化ウラン粉末焼結体)																							
ウラン重量	6,580kg 以下																							
放射能の量	<input type="text"/> PBq 以下																							
濃縮度	4.3%以下																							
燃焼度	収納物平均	<input type="text"/> MWD/MTU 以下																						
	収納物最高	<input type="text"/> MWD/MTU 以下																						
発熱量	54kW 以下																							
冷却日数	<input type="text"/> 日以上																							
収納体数	14 体以下																							
第3条第2項	第5条	該当しない。																						

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第3条第3項		<p>本輸送物は、BM型輸送物に該当するため、輸送容器の構成部材及び繰り返し使用される収納物の経年変化を以下のとおり考慮した上で、規則第6条の技術上の基準に適合することを確認している。</p> <p>1. 本輸送物に想定される使用状況及びそれに伴い考慮すべき経年変化の要因は以下のとおり。</p> <p>(1) 使用状況 軽水炉型原子力発電所から再処理工場への使用済燃料(PWR型)の輸送の用途で、使用予定年数を60年、使用予定回数を400回と想定する。ただし、ふっ素ゴム製のOリングについては1年に1回以上の頻度で交換を実施することから、最長使用期間を1年と想定する。</p> <p>(2) 経年変化の要因 熱的劣化、放射線照射による劣化、化学的劣化及び疲労による劣化とする。</p> <p>2. 「1.」を踏まえ、輸送容器の構成部材及び繰り返し使用される収納物に対し、経年変化の考慮の必要性について、以下のとおり評価した。</p> <p>(1) 熱的劣化については、保守的に一般の試験条件下の太陽熱放射ありの条件の最高温度が60年間(Oリングについては1年間)継続するとした条件において評価した。</p> <p>組織変化による強度低下及びクリープによる変形(ステンレス鋼、炭素鋼、鉛、銅、、、ボロン入りステンレス鋼)、復元力の低下による密封性能への影響(ふっ素ゴム)が考えられるが、各部材の最高温度がこれらの影響を考慮する必要がない温度範囲である等の理由から、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化の影響を考慮する必要はないことを確認した。</p> <p>中性子遮蔽材であるレジンに関しては、高温環境下では含有する水分が放出されることによる中性子遮蔽材充填圧力の圧力上昇及び質量減損が考えられるため、経年変化の影響を考慮する必要がある。熱解析結果の最高温度を基に</p>	(イ)-A、 (ロ)-A. 4. 4、 (ロ)-A. 5. 1、 (ロ)-F

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第3条第3項 (つづき)		<p>評価した結果、構造解析では、中性子遮蔽材充填空間の気相部分の圧力として 0.447MPa を、また、遮蔽解析では、<input type="text"/>%の質量減損を考慮する。</p> <p>また、緩衝材として用いる木材については、実輸送時における緩衝材の温度及び使用済燃料輸送実績のある輸送容器を廃棄する際に採取した木材の試験結果より、これまでの実績と同様の使用環境であれば、木材の熱的劣化は生じないと考えられるため、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化の影響を考慮する必要はないことを確認した。</p> <p>(2) 放射線照射による劣化については、機械的特性の変化に伴う照射脆化及び密封性能への影響(ステンレス鋼、炭素鋼、銅、<input type="text"/> <input type="text"/>、ボロン入りステンレス鋼、木材、ふっ素ゴム)、質量減損による原子個数密度の減少(鉛、レジン)、B-10の減損による中性子吸収性能の低下(ボロン入りステンレス鋼)が考えられるが、使用予定期間中の累積照射量等が上記の影響を考慮する必要のない照射量に比べても更に小さい等の理由から、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はないことを確認した。</p> <p>(3) 化学的劣化については、腐食に伴う表面の性状の変化(ステンレス鋼、炭素鋼、鉛、銅、<input type="text"/> <input type="text"/>、ボロン入りステンレス鋼)、腐朽に伴う強度低下や脆化等(木材)、加水分解による密封性能への影響(ふっ素ゴム)が考えられる。</p> <p>ステンレス鋼及びボロン入りステンレス鋼は、内水が軽水炉の運転中の一次冷却水温度に対して十分に低いため、腐食の影響はない。また、ステンレス鋼は、材料の表面に不動態皮膜が形成された状態が維持されるため、腐食は発生しにくい。さらに、ステンレス鋼は定期点検及び</p>	

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第3条第3項 (つづき)		<p>輸送物発送前検査の外観検査で輸送容器外面に腐食が確認された場合には補修する。</p> <p>中性子遮蔽材であるレジンに接するステンレス鋼、炭素鋼、鉛、銅は、充填空間に酸素が連続的に供給されないため、腐食の影響はない。</p> <p>□□□□□□□□はメッキにより腐食は発生しにくい。また、定期点検及び輸送物発送前検査において外観に異常がないことを確認する。</p> <p>木材の充填空間には酸素が連続的に供給されないため、腐朽しない。</p> <p>ふっ素ゴムは1年間の高湿潤環境に対しても密封性が維持されるためことが確認されており、密封性能への影響はない。</p> <p>中性子遮蔽材であるレジンは、遮蔽性能に影響を与える化学的要因による経年変化は生じない。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の影響を考慮する必要はないことを確認した。</p> <p>(4) 疲労による劣化については、吊上げ、内外圧差、ボルト締付け、熱膨張差の繰返し荷重による疲労破壊が考えられるため、経年変化の考慮が必要となる。いずれも、使用予定期間中の使用計画回数を設定した上で疲労を評価し、疲労破壊が生じるおそれはないことを確認する。</p> <p>3. 以上より、安全解析においては、上記で抽出された中性子遮蔽材であるレジンの熱的劣化を考慮した場合の構造評価及び遮蔽評価を実施した。また、繰返し荷重を受ける部材に対する疲労評価を実施し、疲労破壊が生じるおそれがないことを確認した。さらに、その他の材料についても技術上の基準に適合していることへの影響がないことを確認した。</p>	

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
(第4条第2号)		<p>本輸送物は、以下に示すように運搬中に予想される温度(-20℃から 38℃)及び内圧の変化、振動等により、き裂、破損等の生じるおそれはない。</p> <p>1. 運搬中に予想される輸送物各部の最低温度は一律 -20℃とし、最高温度は一般の試験条件の熱的試験と同様に周囲温度 38℃及び太陽放射熱を保守的に連続で負荷した条件の下で、収納物の発熱量が最大である 54kW として輸送物各部の温度を ABAQUS コードを用いて解析評価している。</p> <p>低温環境において輸送容器及び収納物の材料は、-20℃までの使用に耐え、低温脆性破壊に対して問題ない。</p> <p>一方、高温環境において、収納物の最高温度は 184℃であり、燃料被覆管の機械的特性に影響はない。また、本輸送物の主要な遮蔽材である鉛の温度は上記の状態でも 171℃であり、鉛の融点である 327.5℃よりはるかに低く、遮蔽能力に影響はない。また、同じく主要な中性子遮蔽材であるレジンの温度は 158℃であり、使用可能温度 170℃より低いため、遮蔽性能に影響はない。また、O リング温度は 164℃であり、O リングの使用可能温度 180℃より低いため、密封性能に影響はない。</p> <p>2. 運搬中に予想される温度の変化に対して、輸送物は周囲温度-20℃から 38℃の温度範囲において、各部品の熱膨張に伴う寸法変化は十分に小さく、部品同士の干渉が生じないため、き裂、破損等の生じるおそれはない。また、下記の ABAQUS コードを用いた評価により、発生する熱応力を含めた各部の応力が設計応力強さ等の基準値を下回ることを確認しており、構造健全性は維持され、き裂、破損等の生じるおそれはない。</p> <p>3. 運搬中に予想される内圧の変化に対して、本輸送物の内圧に運搬中に予想される周囲の温度変化(-20℃から 38℃)を考慮した場合の内圧は、1.39MPaG となる。一方、外圧が 0.06MPa に減少した場合の内圧は、1.43MPaG となる。輸送物の運搬中に予想される最大内圧は内筒内圧が</p>	<p>(イ)-C</p> <p>(ロ)-A. 4. 2、 (ロ)-B. 1、 (ロ)-B. 4. 6</p> <p>(ロ)-A. 5. 1</p> <p>(ロ)-A. 5. 1、 (ロ)-B. 4. 4</p>

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
(第4条第2号) (つづき)		<p>1. 50MPa abs であるが、本輸送物の密装置の強度及び密封性の評価には、その圧力条件を上回り、さらに、蓋取付時の周囲温度を-20℃とした場合に想定される圧力増加も包含した差圧(1.70MPaG)を内筒内に設定した条件で、熱応力を含めた各部の応力を ABAQUS コードを用いて解析評価している。また、中性子遮蔽材充填空間においても温度上昇に伴う圧力上昇を考慮している。運搬中の温度変化により予想される容器本体各部の温度差による熱応力や内圧の変化による荷重が負荷されても各部が設計応力強さ等基準値を下回ることから、き裂、破損等の生じるおそれはないこと並びに蓋の口開き変形量は O リングの初期締付代より小さく、密封性が確保されることを確認している。また、規則第3条第3号の技術上の基準に対する適合性に係る説明のとおり、密装置については、繰返し応力が発生することから経年変化の考慮が必要となるが、使用予定期間中の使用予定回数を設定した上で、疲労を評価し、疲労破壊が生じるおそれはないことを確認している。</p> <p>4. 輸送物の内筒内水の放射線分解によって生じるガス発生量は微量であり、内圧を高めることはなく、密封性に影響はない。</p> <p>5. 蓋は輸送時の振動等により緩まないよう蓋ボルトで強固に締め付けられており、輸送中の温度及び内圧の変化を考慮しても、開くことはない。輸送物の本体と蓋の接合部の密封境界にはふっ素ゴム製 O リングを設けており、密封性に影響はない。なお、規則第3条第3号の技術上の基準に対する適合性に係る説明のとおり、蓋ボルトは内外圧差とボルト締付けによる繰返し荷重を受けることから経年変化の考慮が必要となるが、使用予定期間中の使用予定回数を設定した上で、疲労を評価し、疲労破壊が生じるおそれはないことを確認している。</p>	<p>(ロ)-B. 4. 4</p> <p>(ロ)-A. 4. 7、 (ロ)-A. 5. 1、 (ロ)-C. 2. 4</p>

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
(第4条第2号) (つづき)		6. 固縛装置であるトラニオンは、工学式を用いた計算により、輸送物最大重量を考慮した上で、輸送中発生する上下及び前後方向加速度 2g 並びに左右方向加速度 1g の負荷時にも設計降伏点を下回るように設計されているため、き裂、破損等の生じるおそれはない。また、本輸送物は固有振動数(101Hz)と輸送による振動数(10Hz)の差が大きく、励振力による輸送物の応答増幅の影響はなく、輸送中の振動による荷重は 0.3m 落下事象に包含される。よって、輸送物は予想される振動等によって、き裂、破損等の生じるおそれはない。	(ロ)-A. 4. 5、 (ロ)-A. 4. 7
(第4条第3号)		輸送物表面には、吊上装置であるトラニオン、取扱用吊具以外には不要な突起物がなく、また、輸送物表面はステンレス鋼面であり、滑らかに仕上げていることから、除染は容易である。	(イ)-C
(第4条第4号)		<p>本輸送物は、運搬中に予想される温度範囲(-20℃から38℃)において有意な熱膨張差等が生じることはなく、熱膨張により輸送容器及び収納物が相互に干渉することはないことから、それぞれの構造材間又は収納物との間で、危険な物理的作用又は化学反応の生じるおそれはない。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 構成部品同士の熱膨張による干渉はないことから、材料相互の接触による、き裂、破損等を生じるおそれはない。 2. 鉛及びレジンを内筒、中間筒、外筒等に密閉する、また、ステンレス鋼と水、ジルカロイと水の間では、安定な不動態を生じるため腐食等が生じない設計としている。 3. レジン及びOリングは金属と接触しても化学反応を起こすおそれはない。 4. 伝熱フィンと中間筒及び外筒の接合部は、異種金属接触による電氣的な腐食促進の影響は小さい。 	(ロ)-A. 5. 1. 2 (ロ)-A. 4. 1 (ロ)-A. 4. 1 (ロ)-A. 4. 1

規則の項目	告示の項目	説 明	申請書記載 対応項目						
(第4条第5号)	(表面密度限度) 第9条	弁は、輸送物本体に埋め込まれた構造であり、カバープレートが取り付けられる。また、弁の操作は専用の開閉用ソケットで行われるものであり、誤って操作されることはない。	(ロ)-A.4.3						
(第4条第6号)		該当しない。							
(第4条第7号)		該当しない。							
(第4条第8号)		本輸送物の表面の放射性物質の密度は、発送前に表面密度限度以下であることを確認した上で、発送される。	(ハ)-A.2.1						
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>区 分</th> <th>表面密度限度 (Bq/cm²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>アルファ線を放出する放射性物質</td> <td>0.4</td> </tr> <tr> <td>アルファ線を放出しない放射性物質</td> <td>4</td> </tr> </tbody> </table>	区 分	表面密度限度 (Bq/cm ²)	アルファ線を放出する放射性物質	0.4	アルファ線を放出しない放射性物質	4	
区 分		表面密度限度 (Bq/cm ²)							
アルファ線を放出する放射性物質		0.4							
アルファ線を放出しない放射性物質	4								
(第4条第9号)	該当しない。								
(第4条第10号)	本輸送物には、収納物以外のものが収納されていないことを確認した上で蓋をするので、本輸送物の安全性を損なうおそれのあるものを収納することはない。また、本輸送物の使用等に必要な書類、工具等以外のものを同時に輸送することはない。	(ハ)-A							
(第5条第2号)	本輸送物の仕様は外径2,600mm、長さ6,250mmの円筒型容器であり、外接する直方体の各辺は10cm以上である。	(イ)-C							

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
(第5条第3号)		<p>本輸送物の蓋は、蓋ボルトで強固に締め付けられており、輸送の際には上部緩衝体で覆われているため、不用意に蓋ボルトが外されることはない。かつ、容易に破れないシールのはり付等の措置が講じられ、開封された場合に開封されたことが明らかになる。</p> <p>弁類はカバープレートをかぶせた後、ボルト締めされるので不用意に開放されることはない。また、弁類は <input type="checkbox"/> されるので、仮に開放された場合はそれが明らかとなる。</p>	(イ)-C、 (ハ)-A
(第5条第4号)		<p>本輸送物は周囲温度-20℃から 38℃で使用される。そのため、本輸送物の構成部品は、-20℃から運搬中に予想される最高温度の範囲で脆化、著しい強度の低下等、材料強度への影響はなく、構成部品にき裂、破損等の生じるおそれはない。</p>	(ロ)-A. 3、 (ロ)-A. 4. 2、 (ロ)-B. 4. 6
(第5条第5号)		<p>本輸送物の密封装置は、周囲圧力が 60kPa の場合を考慮した差圧を内筒内に設定した解析においても構造健全性が維持され、き裂、破損等の生じるおそれはないこと及びOリング取付位置での相対口開き変形量がOリングの初期締付代より小さいことを、規則第4条第2号の熱解析及び構造解析において ABAQUS コードを用いて確認している。このため、本輸送物の密封性が損なわれることはなく、放射性物質の漏えいはない。</p>	(ロ)-A. 4. 6
(第5条第6号) イ ロ		<p>該当しない。</p> <p>本輸送物は、収納物等の温度変化による圧力増加並びに運搬時及び注入時の挙動に対応できるように適切な内部空間を有している。</p>	(ロ)-B. 4. 4

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
(第5条第7号)		<p>最大の放射能の量を示す収納物を収納した場合において、ガンマ線強度及び中性子源強度は ORIGEN2 コード及び放射化計算式により連続照射を仮定して求め、遮蔽解析については、以下を考慮して保守的な条件を設定し、DOT3.5 コードを用いて解析を行った。通常輸送時の輸送物表面の最大線量当量率は 1,297.3 μSv/h であり、基準値の 2mSv/h 以下を満足する。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 線源として保守的に全て最高燃焼度の燃料 14 体を収納するとしている。 2. 燃料集合体の放射化を考慮している。 3. 解析モデルについては遮蔽材の最小寸法を使用している。 4. 中性子遮蔽材については規則第3条第3項の技術上の基準に対する適合性において説明のとおり、熱的劣化を考慮し、その質量が <input type="checkbox"/> %減損したとしている。 	(ロ)-D. 4、 (ロ)-D. 5
(第5条第8号)		<p>本輸送物は、上記と同じ保守的な条件にて解析した結果、通常輸送時の輸送物の表面から 1m の距離における最大線量当量率は 79.0 μSv/h であり、基準値の 100 μSv/h を超えない。</p>	(ロ)-D. 4、 (ロ)-D. 5
(第5条第9号)		<p>該当しない。</p>	
(第5条第10号)		<p>該当しない。</p>	

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第6条第2号	(BM型輸送物に係る一般の試験条件) 第14条 別記第4第1号	<p>日陰において 38℃の大気中に、本輸送物に最大崩壊熱を発生する燃料集合体を収納した場合において ABAQUS コードを用いて求めた。</p> <p>一般の試験条件下での人が容易に近づくことができる表面における最高温度は、バギングリングで 78℃である。したがって、本輸送物の表面温度は技術基準に定める気温 38℃の日陰において 85℃を超えることはない。</p> <p>また、一般の試験条件の下での本輸送物の各部温度評価として、規則第4条第2号 1. の熱解析において、周囲温度 38℃及び太陽放射熱を保守的に連続で負荷した条件にて定常状態に達した温度を評価し、バスケットで 183℃であり、ステンレス鋼の規格等で定められる使用可能温度の範囲内であることを確認している。</p> <p>続いて、上記で評価した各部の温度分布を引き継いだ ABAQUS コードによる構造解析において、各部が設計応力強さ等基準値を下回ることを確認しているため、構造健全性が維持され、き裂、破損等の生じるおそれはないこと及び 0 リング取付位置での相対口開き変形量が 0 リングの初期締付代より小さいことを確認している。</p>	(ロ)-A. 5. 1、 (ロ)-B. 4

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第6条第2号 (つづき)	別記第4第2号	以下のとおり別記第3第1号の条件の下に置いて評価している。	
	別記第3第1号 イ	<p>一般の試験条件</p> <p>水噴霧</p> <p>本輸送物の表面はステンレス鋼であり、水切りは極めてよく、本試験の実施によっても輸送物の構造健全性及び密封性を損なうことはない。</p>	(ロ)-A.5.2
	ロ (1)	<p>イの条件の下に置いた後、次の条件の下に置く。</p> <p>自由落下</p> <p>本輸送物の重量は115トン以下であるため、落下高さは0.3mであり、落下時に輸送物が最大損傷を受けるよう、垂直、水平及びコーナーの各姿勢についてCRUSHコードを用いて、緩衝体を除いた輸送物と落下試験台を剛体とし、緩衝体の変形量及び落下試験との比較検証結果を踏まえ保守的に設定した負荷係数1.2を考慮して衝撃荷重を解析し、設計加速度を設定している。緩衝体の最大変形量は頭部及び底部コーナー落下時における133mmである。</p> <p>また、このときの容器本体各部の応力をABAQUSコードを用いて解析評価し、バスケット及び燃料被覆管については工学式を用いた計算により評価している。容器本体、バスケット及び燃料被覆管は、自由落下による衝撃力が負荷されても各部に生じる応力が設計応力強さ等基準値を下回ることから、容器本体、バスケット及び燃料被覆管の構造健全性及び容器本体の密封性が損なわれることはない。</p>	(ロ)-A.5.3
	(2)	該当しない。	

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
<p>第 6 条第 2 号 (つづき) イ</p>	<p>(BM 型輸送物に係 る一般の試験条 件の下における 漏えい量) 第 15 条</p>	<p>本輸送物を一般の試験条件下に置いた場合、緩衝体に変形が生じることを踏まえ、規則第 5 条第 7 号の通常輸送時の評価条件に基づき、CRUSH コードにより得られた緩衝体の各落下方向の変形を重畳させた保守的なモデルを用いて、DOT3.5 コードにて解析した結果、一般の試験条件下の輸送物表面の最大線量当量率は 1, 297.3 μSv/h であり、基準値の 2mSv/h を超えることはない。</p> <p>なお、この緩衝体の変形を考慮しても、通常輸送時に比べ本輸送物の最大線量当量率の著しい増加はない。</p> <p>本輸送物は、一般の試験条件下に置いた場合でも規則第 6 条第 2 号の ABAQUS コードを用いた熱解析で 0 リングの温度が使用可能温度以下であること、また、同号の構造解析で 0 リング取付位置での相対口開き変形量が 0 リングの初期締付代より小さいことが確認されており、密封性を損なうことはない。本輸送物は密封装置内にガス又は内筒内水が存在するが、密封装置内のガス中に放射性物質は存在せず、内筒内水中の全放射性物質は発電所の燃料プール水から同伴される ^{60}Co と仮定して工学式を用いた放射性物質 (^{60}Co) の漏えい計算により確認しており、放射性物質の 1 時間当たりの漏えい量が A_2 値の百万分の 1 を超えることはない。</p>	<p>(ロ)-D. 4、 (ロ)-D. 5</p> <p>(ロ)-A. 5、 (ロ)-C. 3. 1</p>

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第6条第2号 (つづき) ハ		<p>本輸送物は、専用積載として運搬する。収納物の最大の発熱量 54kW を収納したとして、一般の試験条件下に置いた場合の輸送物の温度を高く評価する条件のもとで周囲温度 38°C の日陰に置いた場合の輸送物の表面温度を ABAQUS コードを用いて解析した結果、蓋表面及びトラニオン近傍温度が 85°C を超えるが、必要に応じて近接防止金網を取り付けて輸送するとともに、上記を除いた部位の最高表面温度はバギングリング表面の 78°C となることから、規則に定める技術基準(専用積載の場合 85°C を超えないこと)を満足している。(近接防止金網の温度は 80°C 以下)</p>	(イ)-A、 (ロ)-B. 4. 6
	ニ	<p>本輸送物は、一般の試験条件下に置いた場合でも構造健全性が維持され、き裂、破損等の生じるおそれはないこと及び O リング取付位置での相対口開き変形量が O リングの初期締付代より小さいことを規則第 6 条第 2 号の ABAQUS コード等を用いた構造解析の結果より確認していることから、放射性物質が核燃料輸送物外に放出されることはない。また、輸送物表面の放射性物質の密度を発送前検査においても測定により確認するため、表面密度限度を超えることはない。</p>	(ロ)-A. 5、 (ロ)-C. 3. 1、 (ハ)-A. 2. 1

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第6条第3号	(BM型輸送物に係る特別の試験条件) 第16条 別記第5第1号 イ	<p>強度試験・落下試験 I</p> <p>本輸送物は、一般の試験条件と同様の方法で最大損傷を受けよう、垂直、水平及びコーナー方向に剛体平面である落下試験台上に9m高さから落下するとしてCRUSHコードを用いて緩衝体変形量及び衝撃荷重を解析している。また、このときの容器本体各部の応力をABAQUSコードを用いて解析評価し、バスケットについては工学式を用いた計算により評価している。</p> <p>容器本体及びバスケットは、落下試験 I による衝撃力が負荷されても容器本体各部及びバスケットに生じる応力が設計引張強さ等の基準値を下回ることから、容器本体及びバスケットの構造健全性を損なうことはない。さらに、Oリング取付位置での相対口開き変形量がOリングの初期締付代より小さいことから、容器本体の密封性が損なわれることはない。</p> <p>また、本輸送物が傾斜落下するとして、蓋密封部が二次衝撃側となる場合について評価している。落下試験結果を基にした密封性能の評価を行った結果、本輸送物の蓋部の変形量は落下試験で密封健全性維持が確認された落下試験モデルに比べて小さいことから、傾斜落下時に容器本体の構造健全性を損なうことはない。さらに、落下試験後も漏えい率に有意な増加がないことから、容器本体の密封性が損なわれることはない。</p>	(ロ)-A. 6. 1、 (ロ)-A. 10. 3、 (ロ)-A. 10. 4、 (ロ)-A. 10. 5、 (ロ)-A. 10. 6、 (ロ)-A. 10. 7

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第6条第3号 (つづき)	第16条 別記第5第1号 ロ	<p>強度試験・落下試験Ⅱ</p> <p>9m 落下試験に引き続いて、以下のように1m 貫通試験が起こるとした場合、外筒及び中性子遮蔽材に貫通又は変形が生じるおそれがあるが、工学式を用いた計算により、蓋部、底部及び中間筒にせん断が生じないことを確認しているため、本輸送物の構造健全性が維持され、Oリング取付位置での相対口開き変形量がOリングの初期締付代より小さいことはない。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 本輸送物は最大の破損を受けるよう、垂直方向及び水平方向に輸送物の重心が軟鋼棒直上となる1mの高さから落下するとして解析している。 2. 軟鋼棒の長さは、輸送物に最大の破損をひき起すように十分長いものとして解析している。 <p>また、密封境界を構成する蓋及びフランジ周辺が軟鋼棒上へ垂直又は水平方向に落下する場合は、当該部は上部緩衝体に覆われており、軟鋼棒からの荷重が直接作用することはないため、密封性が損なわれることはない。</p>	(ロ)-A.6.2

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第6条第3号 (つづき)	第16条 別記第5第2号 イ	<p>熱的試験(耐火)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 本輸送物は、落下試験Ⅰ、Ⅱの落下順序を考慮して火災による入熱量を大きく評価するように、落下試験Ⅰの緩衝体の各落下方向の変形を重畳させた保守的なモデルで解析している。 2. これらの試験は、設計上最大となる54kWの内部発熱量があるという条件でABAQUSコードを用いて輸送物各部の温度を解析している。この解析では、技術基準に定められる周囲温度800℃に30分間放置、火災の放射率0.9とし、容器表面放射率は□を適用した。 3. 解析の結果、一部の側部中性子遮蔽体は使用可能温度を超えるが著しく焼損することはない。また、密封境界のOリングやその他の構成部材の温度は、使用可能温度を下回り、熱的健全性及び密封性が損なわれることはない。 4. また、このときの各部の応力をABAQUSコードを用いて解析評価している。容器本体は火災による内筒内圧及び熱応力が負荷されても各部が設計引張強さ等基準値を下回り、さらに、蓋の口開き変形量がOリングの初期締付代より小さいことから、容器本体は破損することなく、密封性が損なわれることはない。 	(ロ)-A. 6. 3、 (ロ)-B. 1、 (ロ)-B. 5
	ロ	本輸送物は、火災の放射熱の条件下に30分置いた後、火災終了後38℃の環境で太陽放射熱を保守的に連続で負荷した条件の下で、自然冷却の状態で放置された場合でも、本輸送物の健全性が損なわれることはない。	(ロ)-B. 1、 (ロ)-B. 5

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
<p data-bbox="201 340 360 416">第 6 条第 3 号 (つづき)</p> <p data-bbox="336 1032 360 1059">イ</p>	<p data-bbox="421 340 612 367">別記第 5 第 3 号</p>	<p data-bbox="638 340 813 367">浸漬試験(15m)</p> <p data-bbox="638 387 1276 784">本輸送物は、より厳しい強化浸漬試験に対して評価し、中間筒、底板及び蓋に破損はないことを確認している。蓋については、工学式を用いた評価により 0.15MPa の差圧を負荷しても発生する応力は設計引張強さ等の基準を下回ることを確認していることから、本輸送物の構造健全性が損なわれることはない。また、外圧は蓋を押し付ける方向に作用し、Oリングの密封性能は維持されるため、本輸送物の密封性が損なわれることはない。</p> <p data-bbox="638 799 1276 967">また、外筒は内部空間に 0.4MPa G の内圧が生じているが、水深 15m の水圧(0.15MPa)が外圧として負荷されることで差圧が緩和されるため、遮蔽解析に影響する破損も生じない。</p> <p data-bbox="638 1032 1276 1565">本輸送物は、特別の試験条件下に置いた場合、構造解析の結果から緩衝体に変形、中性子遮蔽材に貫通変形及び燃料集合体に変形が生じる可能性がある。そのため、緩衝体の全部及び中性子遮蔽材の一部をモデルから除いて DOT3.5 コードにて遮蔽解析を行っている。また、熱解析で一部の中性子遮蔽体が使用可能温度を超えることから、その密度が保守的に半減するものとしている。なお、燃料集合体の変形は遮蔽解析結果に有意な影響を与えないため考慮していない。その場合でも輸送物の表面から 1m 離れた位置での最大線量当量率は 2,422.1 μSv/h であり、基準値の 10mSv/h を超えない。</p>	<p data-bbox="1295 340 1433 367">(口)-A. 6. 4</p> <p data-bbox="1295 1032 1417 1153">(口)-D. 3、 (口)-D. 4、 (口)-D. 5</p>

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第6条第3号 (つづき) ロ	(BM型輸送物に係る特別の試験条件の下における漏えい量) 第17条	<p>本輸送物は特別の試験条件下に置いた場合、フィン、緩衝体及び中性子遮蔽材に変形が生じるが、構造健全性が維持され、Oリング取付位置での相対口開き変形量がOリングの初期締付代より小さいことから、火災試験を経た後も輸送容器の密封性は保持できる。本輸送物は密封装置内にガス又は内筒内水が存在するが、密封装置内のガス中に放射性物質は存在せず、内筒内水中の全放射性物質は発電所の燃料プール水から同伴される⁶⁰Coと仮定して工学式を用いて評価した結果、放射性物質(⁶⁰Co)の漏えい率の基準値との比の合計は4.25×10^{-4}であり、放射性物質の一週間当たりの漏えい量はA₂値を超えることはない。</p>	(ロ)-A. 6、 (ロ)-C. 4
第6条第4号		<p>本輸送物は、周囲温度-20℃以上で使用する。本輸送容器の材料は、-20℃の低温下においてもき裂、破損等の生じるおそれはないことを確認している。</p> <p>また、規則第4条第2号1.の熱解析において、周囲温度38℃で設計上最大となる54kWのときの輸送物の各部温度が使用可能温度の範囲内であることを確認している。続いて、上記で評価した各部の温度分布を引き継いだ構造解析において、各部が設計応力強さ等基準値を下回り、輸送物の構造健全性が損なわれないことを確認している。なお、構造解析においては、木材低温時の強度上昇及び木材高温時の強度低下の影響を考慮している。したがって、本輸送物は-20℃から38℃までの運搬中に予想される温度変化に対しても、き裂、破損等の生じるおそれはない。</p>	(ロ)-A. 4. 2、 (ロ)-A. 5. 1、 (ロ)-A. 10. 8、 (ロ)-B. 4. 6

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
<p>第6条第5号</p> <p>第7条から 第10条</p>	<p>(原子力規制委員会の定める量を超える放射能を有する核燃料物質等を収納した核燃料輸送物に係る試験条件)</p> <p>第18条 第1項</p> <p>第2項 別記第6</p>	<p>本輸送物の収納物は使用済燃料であり、最大放射エネルギーは A_2 値の10万倍を超える。</p> <p>強化浸漬試験(200m) 本輸送物は深さ200mの水中に浸漬させた場合の評価として、中間筒、底板、蓋及びバルブカバープレートに対し、水頭圧(2MPaG)を負荷した条件で工学式を用いて評価している。 評価の結果、中間筒、底板、蓋及びバルブカバープレートは許容外圧や設計引張強さ等の基準を下回ることを確認していることから、密封装置である内筒、底板、蓋及びバルブが破損することはない。また、外圧は蓋を押し付ける方向に作用し、Oリングの密封性能は維持されるため、本輸送物の密封性が損なわれることはない。</p> <p>該当しない。</p>	<p>(イ)-A、 (イ)-B</p> <p>(ロ)-A.7</p>

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
(核分裂性物質に係る核燃料輸送物の技術上の基準) 第 11 条	第 23 条第 1 号	<p>本輸送物に収納する核分裂性物質量は、^{235}U が約 330kg であり、本輸送物は核分裂性輸送物に該当する。</p> <p>輸送容器の構成部材及び収納物の経年変化を、規則第 3 条第 3 項の技術上の基準に対する適合性における説明のとおり考慮した上で、規則第 11 条第 2 号の技術上の基準に対する適合性において後述するように、通常輸送時に比べてより保守的な条件で臨界解析を行った結果においても臨界に達することはないことから、本輸送物は輸送中において臨界に達することはない。また、経年変化を考慮した上で、本条第 1 号から第 3 号の技術上の基準に適合していることを確認している。</p>	(イ)-A、 (イ)-B、 (ロ)-E. 4. 4、 (ロ)-F
第 11 条第 1 号 イ、ロ	(核分裂性輸送物に係る一般の試験条件) 第 24 条 別記第 11	<p>本輸送物は、核分裂性輸送物に係る一般の試験条件下に置いた場合、規則第 6 条第 2 号の構造解析により 0.3m 落下及び積み重ね試験では緩衝体の変形が生じるが、一辺が 10cm の立方体を包含するようなくぼみが生じるような変形ではない。また、他の試験条件も含めそれ以外の部位に損傷はない。なお、規則第 11 条第 2 号に示すように、臨界解析では緩衝体を無視しているため、臨界防止機能への影響はない。</p> <p>以上より、構造部に一辺が 10cm の立方体を包含するようなくぼみが生じることはなく、かつ、外接する立方体の各辺は 10cm 以上である。</p>	(ロ)-A. 9. 1

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第 11 条第 2 号 イ、ロ、ハ、ニ、 ホ	(核分裂性輸送 物に係る孤立 系の条件) 第 25 条 第 1、2、3 号 (核分裂性輸送 物に係る特別 の試験条件) 第 26 条 別記第 12 (核分裂性輸送 物に係る配列 系の条件) 第 27 条	<p>規則第 6 条第 3 号の熱解析及び負荷係数 1.2 を考慮した衝撃加速度に対し保守的な設計加速度を設定することで、0.3m 落下後の 9m 落下の衝撃力をも考慮できている規則第 6 条第 3 号の構造解析の結果より、本輸送容器は、経年変化を考慮した上で、落下試験等においてもバスケットの臨界解析モデルに影響を与えるような物理的・化学的变化はないが、燃料集合体は落下試験において変形する可能性がある。</p> <p>また、本輸送物は、規則第 6 条第 5 号においてより厳しい強化浸漬試験に対して評価した結果、中間筒、底板及び蓋に破損がなく、また、外圧は蓋を押し付ける方向に作用し、0 リングの密封性能は維持されるため、密封装置は健全である。</p> <p>以上を踏まえ、臨界解析では SCALE コードシステムを用い、経年変化を考慮した上で、規則第 11 条第 2 号イ、ロ、ハ、ニ及びホにおいて要求される評価条件のいずれよりも厳しい条件とした以下の安全側の条件で評価した結果、実効増倍率は 0.92301 となり、いずれの評価条件に置かれた場合にも臨界に達しない。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・燃料集合体の支持格子 1 スパン間の燃料棒ピッチの拡大を考慮する。 ・燃料のウラン濃縮度は保守的に減損していない未照射の値とし、一部の燃料に添加されているガドリニウムの効果は考慮しない。 ・収納物の温度は常温(20℃)とし、収納物は <input type="text"/> <input type="text"/> 配置する。 ・中性子遮蔽材、フィン及び上・下部緩衝体が存在しない保守的なモデルで、周囲が完全反射の条件で評価する。 	(ロ)-A. 9. 2、 (ロ)-E. 2. 2、 (ロ)-E. 3. 1、 (ロ)-E. 3. 2、 (ロ)-E. 4. 1、 (ロ)-E. 4. 2、 (ロ)-E. 4. 4、 (ロ)-E. 6

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第 11 条第 3 号		<p>本輸送物は、周囲温度-20℃以上で使用する。本輸送物の構成部品は、最低使用温度-20℃において使用可能であるため、き裂、破損等の生じるおそれはない。また、規則第 4 条第 2 号の熱解析において、周囲温度 38℃で収納物の最大発熱量 54kW とした場合の輸送物の各部温度及び圧力を評価しており、このときの温度分布及び圧力条件を引き継いだ構造解析において、各部の応力は設計応力強さ等の基準値を下回り、輸送物の構造健全性を損なうことがないことを確認している。なお、構造解析においては、木材低温時の強度上昇及び木材高温時の強度低下の影響を考慮している。したがって、-20℃から 38℃までの周囲温度の範囲において、き裂、破損等の生じるおそれはない。</p>	<p>(ロ)-A. 5. 1、 (ロ)-A. 9、 (ロ)-A. 10. 8、 (ロ)-B. 4. 6</p>

(八) 章 輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱方法

(ハ) 章 輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱方法

輸送物の安全設計に合致した標準的な取扱方法について記述するとともに、保守条件を記述する。

A. 核燃料輸送物の取扱方法

輸送物の基本的な取扱いは、以下の方法により行われる。ただし、発電所によって手順が異なる場合もある。輸送物の取扱いの流れを (ハ)-第 A.1 図 に示す。

A.1 装荷方法

輸送容器への燃料装荷は、以下の方法により行われる。

A.1.1 発電所での空容器受取り・燃料装荷準備作業

輸送容器は、上部緩衝体及び下部緩衝体を取り外した後、建屋内作業場に移動し、蓋を取り外して、クレーンにより燃料プールに沈め、燃料装荷準備を行う。

1. 準備作業

- ① 岸壁において、水平吊具等の点検・準備を行う。
- ② 発電所建屋においては、使用工具、垂直吊具等の点検・準備を行う。

2. 水切作業

- ① 専用運搬船の指定船倉を開ける。
- ② 船内にて輸送架台の固縛を解除する。
- ③ 近接防止金網を取り外す。
- ④ 岸壁クレーン及び水平吊具を用いて、輸送容器を専用車面上に設置する。
- ⑤ 輸送架台を専用車面に固縛ボルトで固定する。
- ⑥ 専用車両と輸送容器の標識を確認する。
- ⑦ 近接防止金網を取り付ける。
- ⑧ 専用車両を出発させる。

3. 搬入作業

- ① 専用車両を搬入口へ移動する。
- ② 近接防止金網を取り外す。
- ③ 輸送容器に取り付けられている を解除する。
- ④ 上・下部緩衝体を取り外す。
- ⑤ 専用車両を建屋内に搬入する。

4. 除染場への移動

- ① クレーン及び垂直吊具を用いて、輸送容器を縦起こす。
- ② 輸送容器を吊り上げ、除染場へ移動して縦置き設置する。
- ③ 輸送容器転倒防止装置を取り付ける。

5. 燃料プールへの移動

- ① 水位調整用加圧バルブを開とし、輸送容器の内圧を開放する。
- ② 蓋ボルトを取り外し、蓋ガイドピンを取り付ける。
- ③ クレーン及び蓋吊具を用いて、蓋を取り外す。
- ④ 輸送容器のフランジ面に異常がないこと及びバスケットに異常がないことかつ異物がないことを確認する。
- ⑤ プール入水のための養生を行う。
- ⑥ 輸送容器に純水を入れる。
- ⑦ 輸送容器転倒防止装置の固定を取り外す。
- ⑧ クレーン及び垂直吊具を用いて、輸送容器を吊り上げ、燃料プールに移動する。
- ⑨ 輸送容器を燃料プールに吊り下ろす。

A. 1.2 装荷作業

下部スツールをバスケット内へ設置する。燃料取扱装置を用いて、輸送容器に使用済燃料集合体を1体ずつバスケット内へ装荷する。装荷燃料の収納配置の確認を行う。その後、上部スツールを1体ずつ使用済燃料集合体の上部ノズル上へ装荷する。

A. 1.3 後作業

輸送容器に使用済燃料を装荷後、蓋を取り付けて、プール外に取り出した後、内筒内水を規定水位まで抜き取り、輸送容器表面を除染する。その後、建屋内作業場より移動し、上部緩衝体及び下部緩衝体を取り付け、をする。

なお、本輸送容器は湿式型に設計されているので、残留蒸気の除去は特に行わない。

1. 蓋取付け及び輸送容器除染場への移動

- ① クレーン及び垂直吊具を用いて、蓋を吊り上げ、蓋を燃料プール上に移動する。
- ② 蓋を吊り下ろし、輸送容器本体に取り付ける。
- ③ クレーン及び垂直吊具を用いて、輸送容器のフランジ面が水面レベルになるまで吊り上げる。
- ④ 蓋ボルトを仮締めする。
- ⑤ 輸送容器を純水で水洗いしながら吊り上げる。
- ⑥ 輸送容器を除染場に移動する。
- ⑦ 輸送容器転倒防止装置を取り付ける。

2. 除染場内作業

- ① 輸送容器の蓋ガイドピンを取り外す。
- ② 仮締めした蓋ボルトを取り外し、蓋ボルトを規定トルクにて取り付ける(規定トルク値： N・m)。
- ③ プール入水のための養生等を取り外す。
- ④ 輸送容器の仮除染を行う。
- ⑤ 輸送容器の水位調整を行う。
- ⑥ 水位調整後、使用した各バルブが閉になっていることを確認する。
- ⑦ 密封境界の漏えい率を測定する。
- ⑧ 輸送容器の本除染を行う。

3. 搬出作業

- ① 輸送容器転倒防止装置の固定を取り外す。
- ② クレーン及び垂直吊具を用いて、輸送容器を移動し、専用車両上の輸送架台のトラクション受けに吊り下ろす。
- ③ クレーン操作で輸送容器を横倒しにする。
- ④ 専用車両を建屋外に搬出する。
- ⑤ 上・下部緩衝体を取り付ける。
- ⑥ 輸送物にを施す。
- ⑦ 近接防止金網を取り付ける。
- ⑧ 専用車両と輸送物の標識を確認する。

A. 2 核燃料輸送物の発送前検査

A. 2. 1 発送前検査

輸送物を発送する前に(ハ)-第A.1表に示す輸送物発送前検査を行う。

A. 2. 2 輸送物の再処理工場への輸送

本輸送物は、専用運搬船に積み付け、再処理工場まで輸送される。

1. 船積み

- ① 輸送物を岸壁まで輸送し、定位置に停止する。
- ② 専用運搬船の指定船倉を開ける。
- ③ 近接防止金網を取り外す。
- ④ 専用車両と輸送架台との固縛ボルトを取り外す。
- ⑤ 岸壁クレーン及び水平吊具を用いて、輸送物を吊り上げ、指定船倉内に積み込む。
- ⑥ 船内にて輸送架台を固縛する。
- ⑦ 近接防止金網を取り付ける。

2. 再処理工場への輸送

- ① 専用運搬船によって、再処理工場まで輸送する。

A.3 取出し方法

輸送容器からの使用済燃料の取出しは、以下の方法により行われる。

A.3.1 再処理工場での輸送物受取り・燃料取出準備作業

本輸送物から□を解き、上・下部緩衝体を取り外した後、減圧設備を使用して輸送容器内の減圧を行った後、燃料取出ピット中に沈め、蓋を取り外し、バスケットから燃料集合体を取り出す準備を行う。

1. 準備作業

- ① 岸壁において、水平吊具等の点検・準備を行う。
- ② 再処理工場においては、使用工具、垂直吊具等の点検・準備を行う。

2. 水切作業

- ① 専用運搬船の指定船倉を開ける。
- ② 船内にて輸送架台の固縛を解除する。
- ③ 近接防止金網を取り外す。
- ④ 岸壁クレーン及び水平吊具を用いて、輸送物を専用車両上に設置する。
- ⑤ 輸送架台を専用車両に固縛ボルトで固定する。
- ⑥ 専用車両と輸送物の標識を確認する。
- ⑦ 近接防止金網を取り付ける。
- ⑧ 専用車両を出発させる。

3. 輸送物受入・保管

- ① 輸送容器管理建屋内のトレーラエリアに、専用車両により輸送物を搬入する。
- ② 近接防止金網を取り外す。
- ③ 専用車両と輸送架台の固縛ボルトを取り外す。
- ④ クレーン及び水平吊具を用いて、輸送物を専用車両より吊り上げ、輸送容器受入エリア内移送台車のパレット上に設置する。
- ⑤ 移送台車にて、輸送物を所定の保管場所へ移送し、保管する。

4. 輸送容器搬送室への移送

- ① 移送台車にて、輸送物を所定の保管場所より輸送容器搬送室に移送する。
- ② 近接防止金網を取り外す。
- ③ 輸送物に取り付けられている□を解除する。
- ④ 上・下部緩衝体を取り外す。
- ⑤ クレーン及び垂直吊具を用いて、輸送容器を縦起こす。
- ⑥ 輸送容器を吊り上げ、燃料取出準備室に移送し、所定の位置に設置する。

5. 燃料取出準備室内作業

- ① ベント・水位調整バルブ及びドレンバルブを、浄化・循環冷却設備と接続する。
- ② 水位調整用加圧バルブと排気設備を接続し、水位調整用加圧バルブを開とする。
- ③ ベント・水位調整バルブを開とし、輸送容器の内圧を開放する。
- ④ ドレンバルブを開とし、浄化・循環冷却を行う。
- ⑤ 浄化・循環冷却終了後、ベント・水位調整バルブ及びドレンバルブを閉とし、ベント・水位調整バルブ及びドレンバルブと浄化・循環冷却設備を切り離す。
- ⑥ 水位調整用加圧バルブと排気設備を切り離す。
- ⑦ プール入水のための養生を行う。

6. 燃料取出準備

- ① クレーン及び垂直吊具を用いて、輸送容器を燃料取出準備室より燃料取出ピット上へ移送する。
- ② 輸送容器を防染バケット内に吊り下げ収納する。
- ③ 防染バケットにシールカバーを取り付ける。
- ④ 防染バケット内に純水を給水する。
- ⑤ クレーン及び防染バケット吊具を用いて、防染バケットを燃料取出ピット中の燃料取出位置に吊り下ろす。
- ⑥ クレーン及び蓋吊具を用いて、蓋を取り外す。
- ⑦ 蓋を蓋置場へ移動し、除染を行った後仮置きする。

A. 3. 2 取出作業

上部スツールを使用済燃料集合体から 1 体ずつ取り出し、所定の仮置き場へ移動する。燃料取出装置を用いて、輸送容器から使用済燃料集合体を 1 体ずつ取り出し、燃料番号の確認を行い、所定の仮置きラックに収納する。下部スツールを取り出し、所定の仮置き場へ移動する。

A. 3.3 後作業

燃料取出し後、輸送容器を燃料取出ピットから吊り出し、輸送容器の除染を行う。

1. 後作業

- ① クレーン及び防染バケット吊具を用いて、防染バケットを燃料取出ピットから吊り上げる。
- ② 防染バケットからシールカバーを取り外す。
- ③ クレーン及び垂直吊具を用いて、輸送容器を防染バケットより取り出し、輸送容器返却準備室へ移送する。
- ④ プール入水のための養生等を取り外す。
- ⑤ ドレンバルブと排水設備を接続し、ドレンバルブを開とし排水を行う。
- ⑥ バルブを閉とし、ドレンバルブと排水設備を切り離す。
- ⑦ 輸送容器のフランジ面及び内部に異常がないことを確認する。
- ⑧ クレーン及び蓋吊具を用いて、蓋を取り付ける。
- ⑨ 蓋ボルトを規定トルクにて取り付ける(規定トルク値：N・m)。
- ⑩ 密封境界の漏えい率を測定する。
- ⑪ 輸送容器の除染を行う。

A. 4 空容器の準備

燃料取出し後の輸送容器は、次の輸送のために適切に保管し、空容器搬出前に適切に発送準備を行い、発電所まで搬送する。

A. 4.1 空容器搬出前作業

燃料取出し後の輸送容器を次の輸送に使用する前に(ハ)-第 A.2 表に示す空容器の準備における検査を行う。

A. 4.2 空容器の保管

輸送容器は次の輸送まで、所定の保管場所に保管する。屋外保管する場合には養生を実施する。

1. 空容器の保管

- ① クレーン及び垂直吊具を用いて、輸送容器を輸送容器返却準備室より輸送容器搬送室へ移送する。
- ② 移送台車のパレット上の輸送架台のトラニオン受けに吊り下ろす。
- ③ クレーン操作で輸送容器を横倒しする。
- ④ 上・下部緩衝体を取り付ける。
- ⑤ 輸送容器にを施す。
- ⑥ 近接防止金網を取り付ける。
- ⑦ 移送台車にて、輸送容器を所定の保管場所へ移送し、保管する。

A. 4. 3 空容器の発電所への輸送

輸送容器の受渡しを行う際には、(ハ)-第 B. 1 表に示す定期点検及び(ハ)-第 A. 2 表に示す空容器の準備における検査の記録を確認した上で行う。輸送容器は、専用運搬船に積み付け、発電所まで輸送される。なお、輸送容器の輸送は A 型輸送物として、適切に行う。

1. 搬出作業

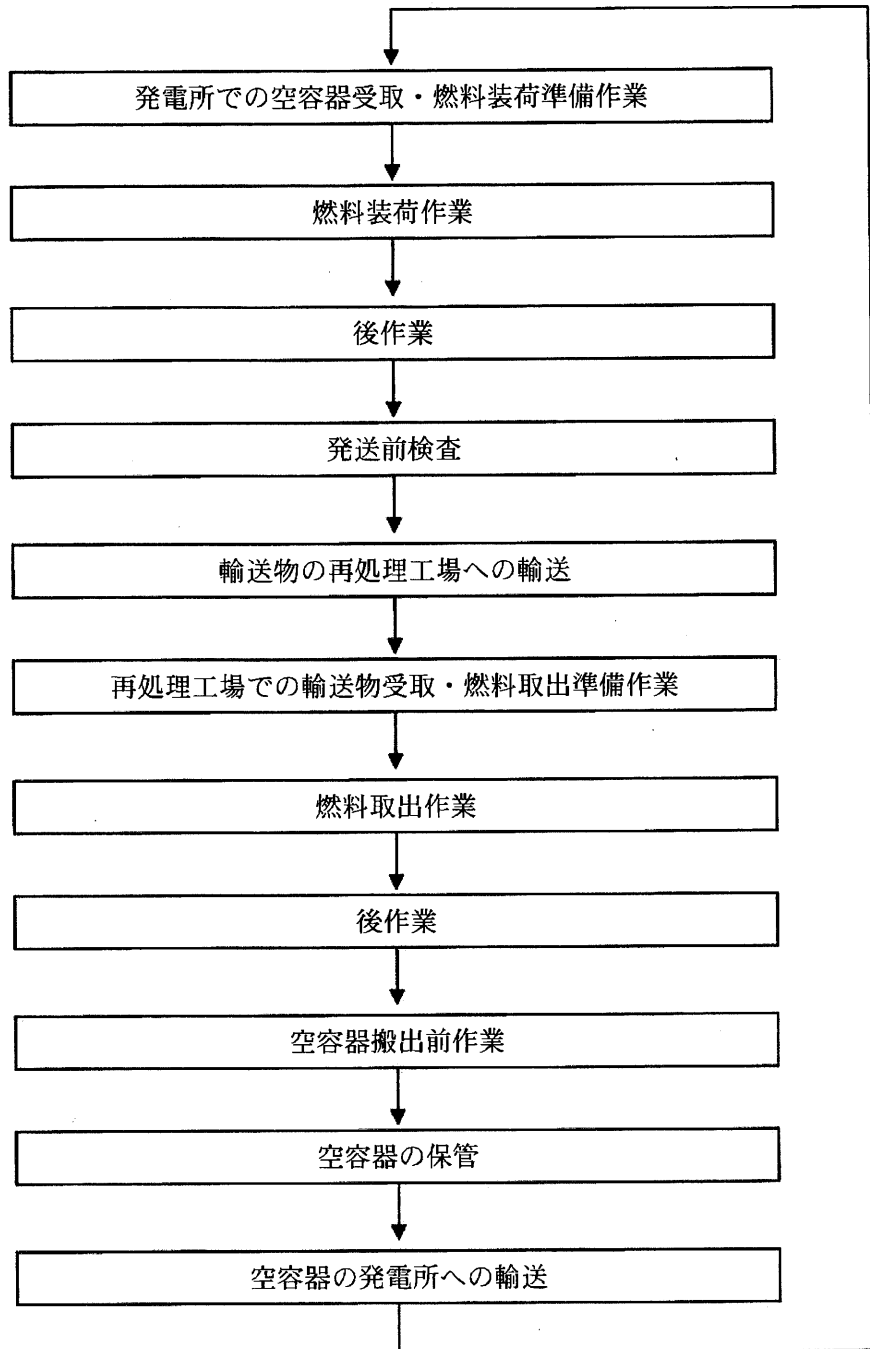
- ① 移送台車にて、輸送容器を所定の保管場所より輸送容器受入エリアに移送する。
- ② クレーン及び水平吊具を用いて、輸送容器を吊り上げ、専用車両上に置く。
- ③ 輸送架台を専用車両に固縛ボルトで固定する。
- ④ 近接防止金網を取り付ける。
- ⑤ 専用車両と輸送容器の標識を確認する。
- ⑥ 専用車両を建屋外に搬出する。

2. 船積み

- ① 輸送容器を岸壁まで輸送し、定位置に停止する。
- ② 専用運搬船の指定船倉を開ける。
- ③ 近接防止金網を取り外す。
- ④ 専用車両と輸送架台との固縛ボルトを取り外す。
- ⑤ 岸壁クレーン及び水平吊具を用いて、輸送容器を吊り上げ、指定船倉内に積み込む。
- ⑥ 船内にて輸送架台を固縛する。
- ⑦ 近接防止金網を取り付ける。

3. 発電所への輸送

- ① 専用運搬船によって、発電所まで輸送する。



(ハ)-第A.1図 輸送物の取扱いの流れ

(ハ)-第A.1表 輸送物発送前検査の項目、検査方法及び合格基準(1/2)

No.	検査項目	検査方法	合格基準
1	外観検査	輸送物の外観を目視で検査する。	輸送物の形状に異常な傷又は割れないこと。輸送物の□が施されていること。
2	吊上検査	輸送物を吊り上げた後の状態において、上部トラニオン部の外観を目視で検査する。	トラニオン部など吊上部等に異常な変形又は破損がないこと。
3	重量検査	輸送容器、冷却水及び収納物の合計重量を計算により確認する。	115.0トンを超えないこと。
4	表面密度検査	輸送物の表面密度をスミヤ法等により測定する。	α線を放出する放射性物質： 0.4Bq/cm ² α線を放出しない放射性物質： 4Bq/cm ² をそれぞれ超えないこと。
5	線量当量率検査	輸送物の表面及び表面から1mの距離におけるガンマ線量当量率及び中性子線量当量率をサーベイメータ等で測定する。	ガンマ線量当量率及び中性子線量当量率の合計が 表面： 2mSv/h 表面から1mの距離： 100μSv/h をそれぞれ超えないこと。
6	未臨界検査	燃料集合体を装荷する前の状態において、輸送容器内に収納されたバスケットの外観を目視で検査する。	バスケットに異常な変形又は破損がないこと。

(ハ)-第A.1表 輸送物発送前検査の項目、検査方法及び合格基準 (2/2)

No.	検査項目	検査方法	合格基準
7	収納物検査	<p>① 収納物^{注1)}の外観、数量を目視等で検査する。</p> <p>② 燃料集合体を装荷する前後の状態において、輸送容器内部を目視等で検査する。</p> <p>③ 使用済燃料についてウラン重量、放射能の量、燃焼度、発熱量、冷却日数等を運転記録等により確認する。</p> <p>④ 内筒内水が規定水位まで水抜きされていることを確認する。</p> <p>⑤ ツール及び上・下部ツールが正しく製作されていることを検査要領^{注2)}に基づき確認する。</p>	<p>① 外観に異常な変形又は破損がないこと並びに数量に異常がないこと。</p> <p>② 輸送容器内部に異物のないこと。</p> <p>③ 設計承認条件のとおりであること。</p> <p>④ 規定水位まで水抜きされていること。</p> <p>⑤ 検査結果が合格基準を満足していること。</p>
8	温度測定検査	温度計により輸送物の表面温度を測定し、周囲温度 38℃での値に補正する。	輸送中に人が容易に近づくことができる表面の温度が日陰において 85℃を超えないこと。
9	気密漏えい検査	輸送物密封部に 0.66MPaG 以上の圧力を加え、圧力降下を測定し、漏えい率を算出する。	各部の漏えい率の合計が 3×10^{-2} ref cm ³ /s を超えないこと。
10	圧力測定検査	輸送物の内圧が設計基準圧力を超えないことを確認するために、輸送物の発熱量を確認する。	発熱量が設計発熱量 (54kW) を超えないこと。

注 1) 燃料集合体 (パーナブルポイズン集合体を含む。)、ツール及び上・下部ツール

注 2) 検査要領は、(ハ)-第A.3表に示す。

(ハ)-第A.2表 空容器の準備における検査の項目、検査方法及び合格基準

No.	検査項目	検査方法	合格基準
1	外観検査	輸送容器の外観を目視で検査する。	輸送容器の形状に異常な傷又は割れがないこと。
2	吊上検査	輸送容器を吊り上げた後の状態において、上部トランシオン部の外観を目視で検査する。	トランシオン部など吊上部等に異常な変形又は破損がないこと。
3	表面密度検査	輸送容器の表面密度をスミヤ法等により測定する。	α線を放出する放射性物質： 0.4Bq/cm ² α線を放出しない放射性物質： 4Bq/cm ² をそれぞれ超えないこと。
4	線量当量率検査	輸送容器の表面及び表面から1mの距離におけるガンマ線量当量率及び中性子線量当量率をサーベイメータ等で測定する。	ガンマ線量当量率及び中性子線量当量率の合計が 表面： 2mSv/h 表面から1mの距離： 100μSv/h をそれぞれ超えないこと。
5	未臨界検査	輸送容器内に収納されたバスケットの外観を目視で検査する。	バスケットに異常な変形又は破損がないこと。
6	気密漏えい検査	輸送容器密封部に0.66MPaG以上の圧力を加え、圧力降下を測定し、漏えい率を算出する。	各部の漏えい率の合計が 3×10^{-2} ref cm ³ /sを超えないこと。
7	作動確認検査	バルブの開閉を行い、作動性を検査する。	作動性に異常がないこと。

(ハ)-第A.3表 ツール及び上・下部ツールの検査要領

検査項目	検査方法 ^{注)}	合格基準
外観検査	外観を目視等により検査する。	形状に異常な傷又は割れないこと。
材料検査	ミルシートにより所定の材料であることを確認する。	所定の材料であること。
寸法検査	主要寸法を計測器を用いて測定する。	測定寸法が規定値の公差内にあること。
重量検査	重量を検査する。	規定の重量以下であること。

注) 製造時検査記録等により確認する。

B. 保守条件

輸送容器の仕様を長期にわたって保証できる保守条件について定める。

輸送容器は、定期点検として、(ハ)-第 B.1 表の項目に示す定期自主検査、定常検査、基本検査及び総合検査を実施する。また、定期点検の結果、必要に応じて補修を実施する。なお、1年以上使用する計画のない輸送容器については、保管状態に置くことができる。

1. 定期自主検査

外観検査(I)、気密漏えい検査、未臨界検査(I)、吊上検査(I)、作動確認検査を1年に1回以上実施する。なお、保管期間中は、これらを省略し、外観検査(Ⅲ)を実施することができる。

ただし、年間使用回数が10回を超えるものにあつては、使用回数10回に1回以上実施する。

2. 定常検査

外観検査(I)、気密漏えい検査、未臨界検査(I)、吊上検査(I)、作動確認検査を輸送前ごとに実施する。

3. 基本検査

外観検査(I)・(Ⅱ)、気密漏えい検査、未臨界検査(I)、吊上検査(I)・(Ⅱ)、作動確認検査を5年に1回実施する。

ただし、前回の検査から使用回数が30回を超えるものにあつては、使用回数30回に1回実施する。

4. 総合検査

総合検査その1として、輸送容器が空の状態の外観検査(I)・(Ⅱ)、耐圧検査、気密漏えい検査、未臨界検査(I)・(Ⅱ)・(Ⅲ)、吊上検査(I)・(Ⅱ)及び作動確認検査を、総合検査その2として、輸送容器に収納物を収納した状態で遮蔽検査及び熱検査をそれぞれ10年に1回実施する。

ただし、前回の検査から使用回数が60回を超えるものにあつては、使用回数60回に1回実施する。なお、遮蔽検査及び熱検査については検査期限を過ぎた場合、期限を過ぎた初回の燃料輸送時(燃料装荷から燃料取出し)に実施する。

5. 定期点検の期限管理

定期点検の有効期間は、前回の各々の定期点検終了日を起点とし、有効期間内に次の定期点検を開始する。

基本検査、総合検査その1及び総合検査その2の有効期間の期限が輸送容器の保管期間中になる場合は、各々の検査を省略することができる。

6. 補修

1. から 4. の検査の結果、補修が必要と判定された部位については、補修を行う。

7. 輸送容器保管状態の管理

輸送容器を保管状態に置くに当たっては、定期自主検査を実施する。輸送容器は、必要に応じて養生等を行った上で保管する。

8. 保管期間終了後の検査

保管期間終了後に輸送容器を再使用する場合には、定期自主検査に加え、保管期間中に省略した基本検査又は総合検査その1及び総合検査その2を行う。

9. 記録の保管

製作時検査記録、定期自主検査記録、定常検査記録、基本検査記録及び総合検査記録等の定期点検記録(補修記録や部品交換履歴を含む。)は、当該輸送容器存続中保存する。

(ハ)-第B.1表 定期点検の項目、検査方法、合格基準及び検査区分

検査項目	検査方法	合格基準	検査区分				
			定期 自主 検査	定常 検査	基本 検査	総合 検査	
						その1	その2
外観検査 (I)	輸送容器の外表面を目視で検査する。	輸送容器の形状に異常な傷又は割れがないこと。	○	○	○	○	-
外観検査 (II)	輸送容器の構成部品である蓋部、バルブ及びシール面について外観を目視で検査する。	表面の形状に異常な傷又は割れがないこと。	-	-	○	○	-
外観検査 (III)	輸送容器の外表面を目視で検査する。	輸送容器の形状に異常な傷又は割れがないこと。	○注1)	-	-	-	-
耐圧検査	2.125MPaGの水圧(輸送容器製作時の耐圧検査圧力)を加え、輸送容器の外表面を目視で検査する。	異常な変形、ひび、割れ等がないこと。	-	-	-	○	-
気密漏えい検査	輸送容器密封部に0.66MPaG以上の圧力を加え、圧力降下を測定し、漏えい率を算出する。	各部の漏えい率の合計が 3×10^{-2} ref cm ³ /sを超えないこと。	○	○	○	○	-
遮蔽検査	収納物を収納した状態で、輸送容器表面の各部の線量当量率測定を行い、測定結果と収納物仕様相当の線源強度で行った評価結果を比較する。	遮蔽能力に劣化のないこと。	-	-	-	-	○注2)
未臨界検査(I)	輸送容器内に収納されたバスケットの外観を目視で検査する。	バスケットに異常な変形又は破損がないこと。	○	○	○	○	-
未臨界検査(II)	バスケットの格子枠について、寸法確認用スルーゲージを挿入する。	スルーゲージが支障なく挿入できること。	-	-	-	○	-
未臨界検査(III)	中性子吸収による中性子吸収材の減損について計算により評価する。	臨界防止性能に影響を及ぼす減損がないこと。	-	-	-	○	-
熱検査	収納物を収納した状態で、輸送容器表面の各部の温度測定を行い、測定結果と収納物仕様相当の発熱量で行った評価結果を比較する。	伝熱性能に劣化のないこと。	-	-	-	-	○注2)
吊上検査(I)	輸送容器を吊り上げた後の状態において、上部トラニオン部の外観を目視で検査する。	トラニオン部など吊上部等に異常な変形又は破損がないこと。	○	○	○	○	-
吊上検査(II)	上部トラニオン部について浸透探傷試験を行う。	有害な傷による浸透指示模様のないこと。	-	-	○	○	-
作動確認検査	バルブの開閉を行い、作動性を検査する。	作動性に異常がないこと。	○	○	○	○	-

注1) 保管期間中は、外観検査(I)、気密漏えい検査、未臨界検査(I)、吊上検査(I)及び作動確認検査を省略し、外観検査(III)を実施することができる。

注2) 有効期間10年を過ぎた場合には、初回の燃料輸送時(燃料装荷から燃料取出し)に実施する。

B.1 外観検査

外観検査(I)は、輸送容器の外表面を目視で検査する。

外観検査(II)は、輸送容器の構成部品である蓋部、バルブ及びシール面について外観を目視で検査する。

外観検査(III)は、保管状態の輸送容器の外表面を目視で検査する。

B.2 耐圧検査

2.125MPaGの水圧(輸送容器製作時の耐圧検査圧力)を加えて、輸送容器の外表面を目視で検査する。

B.3 気密漏えい検査

輸送容器密封部に0.66MPaG以上の圧力を加え、圧力降下を測定し、漏えい率を算出する。

B.4 遮蔽検査

収納物を収納した状態で、輸送容器表面の各部の線量当量率測定を行い、測定結果と収納物仕様相当の線源強度で行った評価結果を比較する。

B.5 未臨界検査

未臨界検査(I)は、輸送容器内に収納されたバスケットの外観を目視で検査する。

未臨界検査(II)は、バスケットの格子枠について、寸法確認用スルーゲージを挿入する。

未臨界検査(III)は、中性子吸収による中性子吸収材の減損について計算により評価する。

B.6 熱検査

収納物を収納した状態で、輸送容器表面の各部の温度測定を行い、測定結果と収納物仕様相当の発熱量で行った評価結果を比較する。

B.7 吊上検査

吊上検査(I)は、輸送容器を吊り上げた後の状態において、上部トラニオン部の外観を目視で検査する。

吊上検査(II)は、上部トラニオン部について浸透探傷試験を行う。

B.8 作動確認検査

バルブの開閉を行い、作動性を検査する。

B.9 補助系の保守

該当しない。

B.10 密封装置の弁、ガスケット等の保守

輸送容器の弁の保守は、分解点検を原則として1年に1回実施する。また、輸送容器の弁、Oリング及びボルトは、定期点検及び輸送物発送前検査においても交換が必要となった場合に、その都度新品と取り替える。なお、輸送容器が保管期間中の場合は、輸送容器の弁の保守を省略することができる。

上記にかかわらず、(ハ)-第B.2表に示す部品については同表の交換頻度で無条件に交換する。部品交換又は補修後は、当該部位の再検査を行う。定期点検の実績、部品交換や安全機能に係る部位の補修については、記録し、輸送容器存続中保存する。

(ハ)-第B.2表 部品交換頻度

部品名	交換頻度	備考
Oリング	実使用期間(燃料装荷期間)の合計で1年に1回以上	密封境界に係る部位とする。

B.11 輸送容器の保管

B.11.1 保管状態の管理

輸送容器を保管状態に置くに当たっては、定期自主検査を実施する。輸送容器は、必要に応じて養生等を行った上で保管する。

B.11.2 保管期間終了後の検査・補修

保管期間終了後に輸送容器を再使用する場合は、保管開始前に行った定期点検から再使用までの保管状況に応じて、定期点検及び補修を行う。

B.12 記録の保管

製作時検査記録、定期自主検査記録、定常検査記録、基本検査記録及び総合検査記録などの定期点検記録(補修記録や部品交換履歴を含む。)は、当該輸送容器存続中保存する。

B.13 その他

該当しない。

(二) 章 安全設計及び安全輸送に関する特記事項

(二) 章 安全設計及び安全輸送に関する特記事項

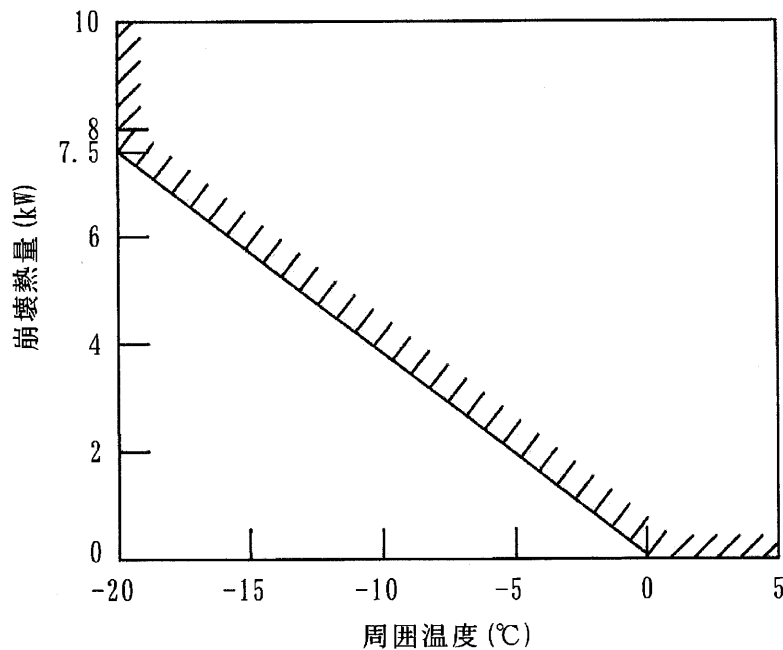
本輸送物の安全輸送のために、次の措置を講じるものとする。

1. 輸送物の収納物の最低崩壊熱量

本輸送物の内筒内水が -20°C の周囲温度において凍結しないためには、収納物の崩壊熱量が 6.5kW 以上でなければならないことを(口)章 B. 4. 3 に示したが、実際の輸送においては余裕を考慮し、安全側に 7.5kW とする。

また、周囲温度が -20°C より高い場合、内筒内水が凍結しないための最低崩壊熱量は、(二)-第1図に斜線で示すとおりである。

輸送に当たっては、その期間及び経路における最低温度を調査し、崩壊熱量と照らし合わせ内筒内水が凍結しないことを確認する。また、確認は十分余裕をもって行う。



(二)-第1図 周囲温度と最低崩壊熱量

2. 近接防止金網の装着

本輸送物は発送前の温度測定検査で、日陰において輸送中人が容易に近づくことができる表面温度が 85℃を超える場合は、近接防止金網を装着して輸送するものとする。

3. 緩衝体の取扱いについて

安全性向上の観点から、緩衝材として使用する木材の経年変化に関する知見の拡充の取組みの一環として、緩衝体の使用に際しては、都度、輸送容器の使用履歴を蓄積し、輸送前に、輸送容器の使用履歴、収納物の発熱量及び輸送時に想定される環境温度を踏まえ、木材温度が、概ね実績のある温度の範囲内であることを確認した後に輸送を行う。

4. 輸送容器の使用回数について

本輸送容器は(口)章 A. 5. 1. 4 に示すとおり疲労評価による許容繰返し回数を考慮して使用予定回数を設定しているが、安全性向上の観点から、本輸送容器の使用回数を管理するものとする。

5. 技術基準が変更となった場合及び新たな技術的知見が得られた場合の対応について

規則及び告示の改正に伴い本輸送物に係る技術上の基準が変更となった場合及び新たな技術的知見が得られた場合は、設計への影響を評価し、必要に応じて設計変更承認申請等の手続きを行う。

6. 収納物 (使用済燃料集合体) の収納制限

本輸送物に収納する使用済燃料の収納制限を以下のとおりとする。

① 発熱量の制限

収納する全ての燃料集合体の発熱量を合算して 54kW 以下とする。また、収納配置は (二)-第 2 図に示すような配置とする。

② 放射能の量の制限

収納する全ての燃料集合体の放射能の量を合算して PBq 以下とする。

③ 燃焼度の制限

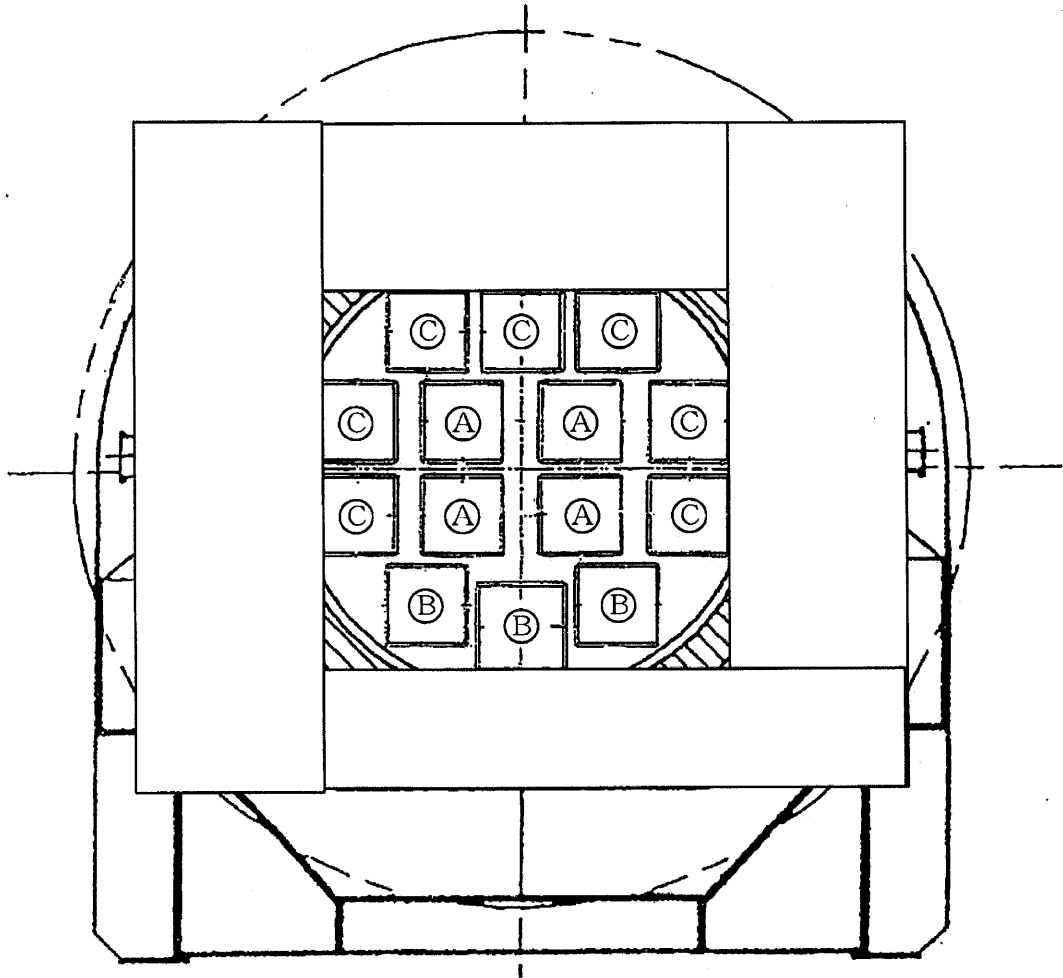
収納する燃料タイプごとの収納物平均の燃焼度は (二)-第 1 表に示す値以下とする。

(二)-第 1 表 収納物平均の燃焼度 (1/2)

燃料タイプ	1	2	3
燃料型式	14×14 配列型	15×15 配列型	17×17 配列型
燃焼度 MWD/MTU 以下	<input type="text"/>		

(二)-第 1 表 収納物平均の燃焼度 (2/2)

燃料タイプ	4	5	6
燃料型式	14×14 配列型	15×15 配列型	17×17 配列型
燃焼度 MWD/MTU 以下	<input type="text"/>		



- Ⓐ : 発熱量の大きい方から 1~4 体目を収納する。
- Ⓑ : 発熱量の大きい方から 5~7 体目を収納する。
- Ⓒ : 発熱量の大きい方から 8~14 体目を収納する。

(二)-第 2 図 収納物の崩壊熱配置

参考 輸送容器の製作の方法の概要に関する説明

参考 輸送容器の製作の方法の概要に関する説明

輸送容器は、(ロ)章に述べられた構造、熱、密封、遮蔽、臨界の各解析及びそれらにより決定される寸法等、構造を満足するように、参考 A に従って製作し、それらが上記各設計条件を満足していることを、参考 B に説明する各種検査により確認する。

A. 輸送容器の製作方法

A.1 概要

輸送容器の製作手順例を(参)-第 A.1 図に示す。

以下、(参)-第 A.1 図に従い、製作手順及び方法の概要について述べる。

1. 容器本体の製作

(1) 内筒の製作

内筒はステンレス鋼板から下記の手順・方法で製作する。

a. 部材加工

ステンレス鋼板の開先加工及び曲げ加工を行う。なお、曲げ加工前に板継ぎ溶接を行う場合がある。

b. 組立溶接

円筒胴の長手継手の溶接を行う。

(2) 内筒、フランジ及び底板との組立溶接

フランジにベント・水位調整バルブ本体を溶接した後、内筒、フランジ及び底板の組立溶接(周継手)を行う。なお、ベント・水位調整バルブ本体の組立溶接は(15)のドレンバルブ本体の組立溶接と同時期に行う場合がある。

(3) 内筒の

外面の を行う。

(4) 中間筒の製作

中間筒は炭素鋼板から下記の手順・方法で製作する。

a. 部材加工

鋼板の開先加工及び曲げ加工を行う。

b. 組立・

円筒胴の長手継手の溶接及び周継手部の () を行う。

c. 熱処理

溶接後熱処理を行う。

d. 機械加工

円筒胴周継手の機械加工を行う。

e.

内面の を行う。

- (5) 内筒部への中間筒の組立溶接
内筒に溶接されているフランジに中間筒を溶接(周継手)する。
- (6) 鉛の []
内筒と中間筒の間に鉛を []。
- (7) 鉛 [] の加工
[] の組立てを行うために鉛 [] の加工を行う。
- (8) 容器本体への [] の組立溶接
[] と底板及び中間筒との溶接を行う。
- (9) 容器本体の機械加工
容器本体のトラニオン部及びバルブ本体の組込部の機械加工を行う。
なお、本機械加工の加工時期については、下記の条件のもとで変更する場合がある。
トラニオン部 : トラニオン取付けまでに加工を完了させておく。
バルブ本体取付部 : バルブ本体取付けまでに加工を完了させておく。
- (10) 伝熱フィンの製作
伝熱フィンとは銅板で、必要に応じ、所定の寸法・形状に加工(切断、機械加工等)する。
- (11) フィン、仕切板、バギングリング及びレジンカバーの製作
フィン、仕切板、バギングリング及びレジンカバーは、ステンレス鋼板又はステンレス鋼棒から所定の寸法・形状に加工(切断、機械加工、曲げ加工等)する。
- (12) 外筒の製作
外筒は [] 板から下記の手順・方法で製作する。
- a. 部材加工
[] 板の開先加工及び曲げ加工を行う。
- b. 組立溶接
円筒胴の長手継手の溶接を行う。
- (13) 外筒へのフィンの []
フィンを外筒外面に [] する。
- (14) 伝熱フィンの容器本体及び外筒への []
伝熱フィンを容器本体及び外筒に [] する。
- (15) 容器本体へのドレンバルブ本体、仕切板、バギングリング及びレジンカバーの組立溶接
容器本体にドレンバルブ本体を溶接後、仕切板、バギングリング及びレジンカバーを溶接する。
なお、次工程で行われるレジン充填が、数回に分かれる場合は、本工程の仕切板及びレジンカバー等の組立溶接と次工程のレジン充填が数回繰り返される。
- (16) レジン充填
外筒内及び上・下部のレジンカバー内にレジンを充填する。

(17) 容器本体へのレジンカバーの組立溶接

レジンの最終充填口となるレジンカバーの溶接を行う。

(18) 容器本体の仕上げ機械加工

容器本体の仕上げ代を有する箇所等を最終仕上げのために機械加工する。

なお、仕上げ機械加工後に組立溶接作業等を行っても仕上がり精度に影響を与えない場合、仕上げ機械加工の一部又は全ての加工時期を変更する(組立溶接作業等の前にもってくる)場合がある。

2. 蓋の製作

(1) []、[]及び[]の部材加工

ステンレス鋼板及びステンレス鋼管を所定の寸法・形状に加工(切断、機械加工、曲げ加工等)する。

(2) 蓋板と[]、[]及び[]との[]

鍛造品(ステンレス鋼)の蓋板に[]、[]及び[]の[]
[]を行う。

(3) 仕上げ機械加工

仕上げ代を有する箇所等を最終仕上げのために機械加工する。

3. バスケットの製作

(1) 部材加工

ステンレス鋼管、ステンレス鋼板及びボロン入りステンレス鋼板を所定の寸法・形状に加工(切断、機械加工等)する。

(2) 組立溶接

所定の寸法・形状に加工された部材等の組立溶接を行う。

4. 上・下部緩衝体の製作

(1) 部材加工

ステンレス鋼板及びステンレス鋼管を所定の寸法・形状に加工(切断、機械加工、曲げ加工等)する。

(2) 組立溶接

所定の寸法・形状に加工された部材の組立溶接を行う。

(3) 緩衝材の組込み

缶体に緩衝材を組み込む。

(4) 組立溶接

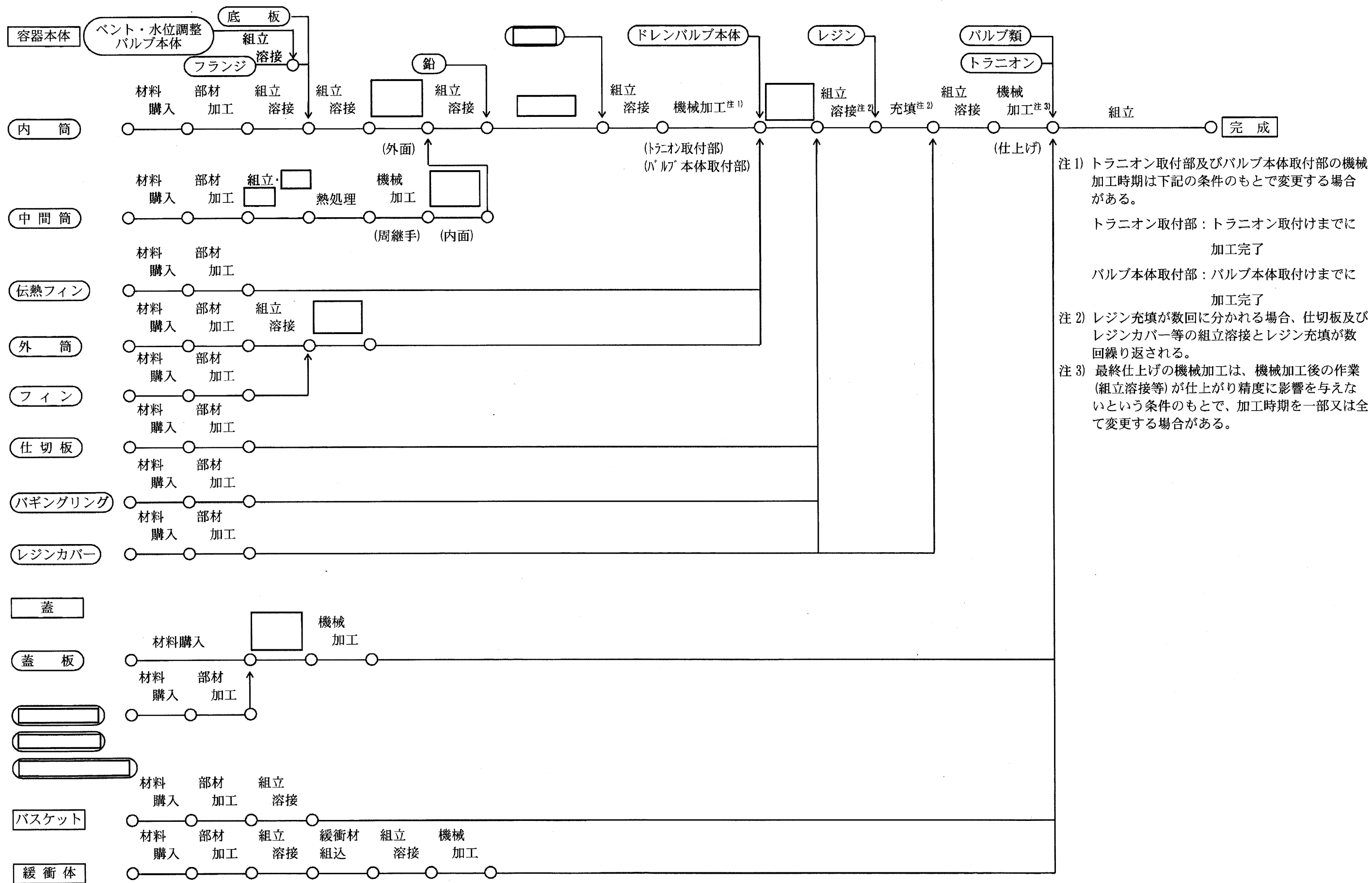
緩衝材の組込みを完了した缶体にカバープレートを溶接する。

(5) 機械加工

容器本体との当たり面等の機械加工を行う。

5. 輸送容器の組立て

完成した容器本体にバスケットの組込み並びにトラニオン、バルブ類、蓋及び上・下部緩衝体の取付けを行い輸送容器を組み立てる。



注1) トラニオン取付部及びバルブ本体取付部の機械加工時期は下記の条件のもとで変更する場合がある。
 トラニオン取付部：トラニオン取付けまでに加工完了
 バルブ本体取付部：バルブ本体取付けまでに加工完了

注2) レジン充填が数回に分かれる場合、仕切板及びレジンカバー等の組立溶接とレジン充填が数回繰り返される。

注3) 最終仕上げの機械加工は、機械加工後の作業（組立溶接等）が仕上がり精度に影響を与えないという条件のもとで、加工時期を一部又は全て変更する場合がある。

(参)-第A.1図 輸送容器全体製作手順図(例)

A. 2 材料の説明

A. 2.1 板材料

輸送容器に使用する板材料は、(ロ)章に述べられた設計条件から、(参)-第 A. 1 表に示す規格の材料又は(参)-第 A. 2 表に示す相当品を使用し、参考 B. 1 に示す検査を実施することにより、(参)-第 A. 3 表に示されている材料諸特性が得られていることを確認する。

外筒は、で、合せ材面を輸送容器の露出面とするため、輸送容器使用条件下における材料の腐食の問題はない。

中間筒は炭素鋼であるが、輸送容器から露出せず、輸送容器の構成材料である鉛及びレジン、並びに内部に閉じ込められた空気と接触をするだけであり、輸送容器使用条件下における腐食の問題はない。

伝熱フィンが銅で、輸送容器使用条件下における材料の腐食の問題はない。

上記以外の部位に使用される板材料は全て、オーステナイト系ステンレス鋼で、輸送容器使用条件下における材料の腐食の問題はない。

また、上記材料は切断、穴あけ、曲げ、溶接等の各種製作法においても特性を失うことなく加工可能である。

A. 2.2 管材類

材料の適用規格を、(参)-第 A. 1 表又は(参)-第 A. 2 表に示す。材料の諸特性の確認方法については、上記参考 A. 2. 1 に同じ。

本材料は、全てオーステナイト系ステンレス鋼であり、輸送容器使用条件下における材料の腐食の問題はない。

A. 2.3 鍛造品及びボルト・ナット類

材料の適用規格を、(参)-第 A. 1 表又は(参)-第 A. 2 表に示す。材料の諸特性の確認方法については、上記参考 A. 2. 1 に同じ。

底板、、フランジ、バルブ、蓋、蓋吊手、緩衝体ボルト、トラニオン及び
はオーステナイト系ステンレス鋼又は析出硬化型ステンレス鋼であり、輸送容器使用条件下における材料の腐食の問題はない。

トラニオンボルト、蓋ボルト及び蓋吊手ボルトは、で耐食性向上のため、メッキを施す。

A. 2.4 溶接用電極・棒・ワイヤ

輸送容器に使用する材料に対し、健全な溶接を得るために(参)-第 A. 4 表に示す規格の溶接材料又は相当品を使用する。

ティグ溶接の非消耗電極にはタングステンを使用する。

A. 2.5 特殊材料

前記一般材料の他に、(参)-第 A.5 表に示す特殊材料を使用する。

1. ガンマ線遮蔽材

ガンマ線遮蔽材として内筒と中間筒との間に鉛を□。

2. 中性子遮蔽材

中性子遮蔽材として中間筒と外筒との間にレジンを充填する。

3. 中性子吸収材

中性子吸収材としてバスケットのチャンネルにボロン入りステンレス鋼を使用する。

4. 緩衝材

緩衝材の材料として上・下部緩衝体内部に□及び□を充填する。

5. シール材

蓋及びバルブには、密封性を保つためのシール材としてふっ素ゴム製の Oリングを使用する。

A. 2.6 ミルシート

製造された材料が規格等で要求される諸特性を満足していることを確認するため、材料メーカーにて参考 B. 1 に示す検査を実施し、その結果をミルシート等に記載する。材料受入時には、各材料とミルシート等の記載事項を比較照合し、規定とおりの材料であることを確認する。

A. 2.7 材料の欠陥部の修理

表面欠陥等については、グラインダ、機械加工等により欠陥を除去し、滑らかに仕上げた後、目視検査及びその材料に要求される非破壊検査を実施する。

溶接補修が必要な欠陥については、下記に示す手順で修理する。

- ① 欠陥をグラインダ、機械加工等により除去する。
- ② 欠陥除去部の浸透探傷試験を行う。
- ③ 欠陥除去部の肉盛溶接を行う。
- ④ 肉盛溶接部をグラインダ、機械加工等により滑らかに仕上げる。
- ⑤ 欠陥修理部の浸透探傷試験及び放射線透過試験 (放射線透過試験を行うことが困難な場合は、超音波探傷試験) を行う。

A. 2.8 材料の切断

材料の切断は、プラズマ切断等の熔融切断又はシャーリング等の機械的方法で行い、開先加工はグラインダ、機械加工等で行う。

A. 2. 9 材料の成型

材料の曲げ加工は、ロール加工又はプレス加工により行う。

(参)-第A.1表 材料適用規格(板、棒、管、鍛造及びボルト材) (1/2)

使用部位	材料区分	適用規格 ^{注)}	備考	
<u>1. 容器本体</u>				
内筒	板材		ステンレス鋼	
底板	鍛造品		ステンレス鋼	
中間筒	板材		炭素鋼	
<input type="text"/>	鍛造品		ステンレス鋼	
フランジ	鍛造品		ステンレス鋼	
外筒	板材		<input type="text"/>	
仕切板	板材		ステンレス鋼	
伝熱フィン	板材		JIS H 3100 C1020P-1/4H	銅
フィン	板材 又は 棒材		JIS G 4304 SUS304	ステンレス鋼
バギングリング	板材 又は 棒材		JIS G 4303 SUS304	ステンレス鋼
		JIS G 4304 SUS304	ステンレス鋼	
		JIS G 4303 SUS304	ステンレス鋼	
トラニオン	鍛造品	JIS G 3214 SUSF630 H1150	析出硬化型ステンレス鋼	
バルブ本体	棒材 又は 鍛造品	<input type="text"/>	ステンレス鋼	
ベント・水位調整バルブ 及びドレンバルブ	棒材 又は 鍛造品		ステンレス鋼	
			ステンレス鋼	
			ステンレス鋼	
バルブカバープレート	鍛造品		<input type="text"/>	
レジンカバー	板材		ステンレス鋼	
トラニオンボルト	ボルト材	JIS G 4108 SNB23-3		

注) 記載の規格材料、(参)-第A.2表に示す相当品又はそれ以外の相当品を用いる。

(参)-第 A.1 表 材料適用規格 (板、棒、管、鍛造及びボルト材) (2/2)

使用部位	材料区分	適用規格 ^{注)}	備考
2. 蓋			
・ 蓋板	鍛造品	[]	ステンレス鋼
・ []、 []	板材		ステンレス鋼
・ []	管材		ステンレス鋼
・ 蓋吊手	鍛造品	JIS G 3214 SUSF304	ステンレス鋼
・ 蓋ボルト及び 蓋吊手ボルト	ボルト材	[]	[]
・ 水位調整用加圧バルブ	棒材 又は 鍛造品		ステンレス鋼
・ バルブカバープレート	鍛造品		ステンレス鋼
3. バスケット			
・ チャンネル	板材	(材料メーカー標準)	ボロン入りステンレス鋼 (参考 A. 2.5 及び(参)-第 A. 5 表参照)
・ 支持リング	板材	JIS G 4304 SUS304	ステンレス鋼
・ []	管材	JIS G 3459 SUS304TP	ステンレス鋼
・ スペーサ	板材	JIS G 4304 SUS304	ステンレス鋼
・ []	板材	JIS G 4304 SUS304	ステンレス鋼
4. 緩衝体			
・ カバープレート	板材	JIS G 4304 又は 4305 SUS304	ステンレス鋼
・ リブ	板材	JIS G 4304 又は 4305 SUS304	ステンレス鋼
・ パイプ	管材	JIS G 3459 SUS304TP	ステンレス鋼
・ 上部緩衝体ボルト	棒材	JIS G 4303 SUS304	ステンレス鋼
・ 下部緩衝体ボルト	棒材	JIS G 4303 SUS304	ステンレス鋼

注) 記載の規格材料、(参)-第 A. 2 表に示す相当品又はそれ以外の相当品を用いる。

(参)-第 A. 2 表 相当品

適用規格	材料区分	相当品 ^{注)}
JIS G 3118 SGV480	板 材	ASTM A516 Gr. 70
JIS G 4304 SUS304 JIS G 4305 SUS304	板 材	ASTM A240 TP304
JIS G 3459 SUS304TP	管 材	ASTM A312 TP304
JIS G 4303 SUS304	棒 材	ASTM A479 TP304
JIS G 3214 SUSF630 H1150	鍛造品	ASTM A705 TP630 H1150
JIS G 3214 SUSF304	鍛造品	ASTM A182 TP304
JIS G 4108 SNB23-3	ボルト材	ASTM A540 Gr. B23 Cl. 3
JIS H 3100 C1020P-1/4H	板 材	ASTM B152 C10200 H01

注) 記載の ASTM 材に相当する ASME 材を使用しても良い。

(参)-第 A.3 表 材料特性(板、棒、管、鍛造及びボルト材)

適用規格	材料区分	降伏点 又は耐力 MPa	引張強さ MPa	伸び %	絞り %	硬 さ			破 壊 韌 性			化 学 成 分 (%)										せん断強 さ MPa				
						HB	HRB	HV	注1) 吸収エネルギー J	注2)、注3) 横膨出量 mm	注2) 関連温度	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	Nb		V	N	O	
JIS G 4304 SUS304 JIS G 4305 SUS304	板 材	205 以上	520 以上	40 以上	-	187 以下	90 以下	200 以下	-	-	-	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	8.00 ~ 10.50	18.00 ~ 20.00	-	-	-	-	-	-	-	-
(ASTM A240 TP304)	板 材	205 以上	515 以上	40 以上	-	201 以下	92 以下	-	-	-	-	0.08 以下	0.75 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	8.0 ~ 10.5	18.0 ~ 20.0	-	-	-	-	-	0.10 以下	-	-
JIS G 3459 SUS304TP	管 材	205 以上	520 以上	注6) 縦方向: 35 以上 横方向: 25 以上	-	-	-	-	-	-	-	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.040 以下	0.030 以下	8.00 ~ 11.00	18.00 ~ 20.00	-	-	-	-	-	-	-	
(ASTM A312 TP304)	管 材	205 以上	515 以上	縦方向: 35 以上 横方向: 25 以上	-	-	-	-	-	-	-	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	8.00 ~ 11.0	18.0 ~ 20.0	-	-	-	-	-	-	-	
JIS G 4303 SUS304	棒 材	205 以上	520 以上	40 以上	60 以上	187 以下	90 以下	200 以下	-	-	-	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	8.00 ~ 10.50	18.00 ~ 20.00	-	-	-	-	-	-	-	
(ASTM A479 TP304)	棒 材	205 以上	515 以上	30 以上	40 以上	-	-	-	-	-	-	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	8.0 ~ 10.5	18.0 ~ 20.0	-	-	-	-	-	-	-	
JIS G 3214 SUSF630 H1150	鍛造品	725 以上	930 以上	15 以上	50 以上	277 以上	-	-	41 以上注3)	-	-	0.07 以下	1.00 以下	1.00 以下	0.040 以下	0.030 以下	3.00 ~ 5.00	15.00 ~ 17.50	3.00 ~ 5.00	-	0.15 ~ 0.45	-	-	-	-	
(ASTM A705 TP630 H1150)	鍛造品	725 以上	930 以上	16 以上	50 以上	277 以上	-	-	41 以上注3)	-	-	0.07 以下	1.00 以下	1.00 以下	0.040 以下	0.030 以下	3.00 ~ 5.00	15.00 ~ 17.50	3.00 ~ 5.00	-	0.15 ~ 0.45注7)	-	-	-	-	
JIS G 3214 SUSF304	鍛造品	205 以上	520 以上	29 以上	45 以上	187 以下	-	-	-	-	-	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.040 以下	0.030 以下	8.00 ~ 11.00	18.00 ~ 20.00	-	-	-	-	-	-	-	
(ASTM A182 F304)	鍛造品	205 以上	515 以上	30 以上	50 以上	-	-	-	-	-	-	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	8.0 ~ 11.0	18.0 ~ 20.0	-	-	-	-	0.10 以下	-	-	
JIS G 4108 SNB23-3	ボルト材	890 以上	1,000 以上	12 以上	40 以上	293 ~ 363注4)	-	-	40 以上(平均) 34 以上 (個別の値)注4)	注5) 0.65 以上	-	0.37 ~ 0.44	0.20 ~ 0.35	0.60 ~ 0.95	0.025 以下	0.025 以下	1.55 ~ 2.00	0.65 ~ 0.95	-	0.20 ~ 0.30	-	-	-	-	-	
(ASTM A540 Gr. B23 C1.3)	ボルト材	896 以上	1,000 以上	12 以上	40 以上	293 ~ 363注4)	-	-	41 以上(平均) 34 以上 (個別の値)注4)	注5) 0.65 以上	-	0.37 ~ 0.44	0.15 ~ 0.35	0.60 ~ 0.95	0.025 以下	0.025 以下	1.55 ~ 2.00	0.65 ~ 0.95	-	0.20 ~ 0.30	-	-	-	-	-	
JIS H 3100 C1020P-1/4H	板 材	-	215 ~ 275	25 以上	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99.96 以上	-	-	-	-	-	-	
(ASTM B152 C10200 H01)	板 材	-	234 ~ 296	注9)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99.95 以上	-	-	-	-	0.0010 以下	-	

注1) 吸収エネルギーの求め方及び合格基準については材料規格による。

注2) 横膨出量及び関連温度の求め方並びに合格基準については、通商産業省告示第501号第4条の破壊靱性試験又は社団法人日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格(以下「設計・建設規格」という。)のPVB-2300に準拠する。

注3) 試験温度は□℃とする。

注4) 径寸法75mm(JIS規格)又は76.2mm(ASTM規格)以下の場合を示す。なお、試験温度は-12℃(JIS規格)又は-12.2℃(ASTM規格)とする。径寸法が75mm(JIS規格)又は76.2mm(ASTM規格)を超える場合はそれぞれの規格による。

注5) □について適用する。

注6) 厚さ8mm未満の管で、12号試験片又は5号試験片を用いて引張試験を行う場合には、伸びの最小値は厚さ1mm減じるごとに表の値から1.5%減じたものをJIS Z 8401により整数値に丸める。

注7) Nb+Taの合計値が0.15~0.45%であること。

注8) 母材厚さ□mm、合せ材厚さ□mmの場合を示す。

注9) ASTM材には伸び規格値はないが25%以上であること。

(参)-第 A. 4 表 溶接材料 (1/2)

適用継手	溶接法	適用規格 ^{注)}
ステンレス鋼同士の溶接、 []	被覆アーク溶接 (SMAW)	JIS Z 3221
	ティグ溶接 (GTAW)	JIS Z 3321
	フラックスコールドアーク溶接 (FCAW)	JIS Z 3323
	サブマージアーク溶接 (SAW)	JIS Z 3324
炭素鋼 [] 同士の溶接	サブマージアーク溶接 (SAW)	JIS Z 3183
	被覆アーク溶接 (SMAW)	JIS Z 3212
	ティグ溶接 (GTAW)	JIS Z 3316
	フラックスコールドアーク溶接 (FCAW)	JIS Z 3313
	ミグ溶接 (GMAW)	JIS Z 3312

注) 記載の規格又は相当品を用いる。

(参)-第A.4表 溶接材料(2/2)

適用継手	溶接法	適用規格 ^{注)}
	被覆アーク溶接 (SMAW)	JIS Z 3221
	ティグ溶接 (GTAW)	JIS Z 3321
	フラックスコールドアーク溶接 (FCAW)	JIS Z 3323
	サブマージアーク溶接 (SAW)	JIS Z 3322
	エレクトロスラグ溶接 (ESW)	JIS Z 3322
外筒の□と仕切板の溶接、仕切板と中間筒の溶接	被覆アーク溶接 (SMAW)	JIS Z 3221
	ティグ溶接 (GTAW)	JIS Z 3321
	フラックスコールドアーク溶接 (FCAW)	JIS Z 3323
	ティグ溶接 (GTAW)	□
	ミグ溶接 (GMAW)	

注) 記載の規格又は相当品を用いる。

(参)-第 A. 5 表 特殊材料

使用目的	材料名	適用規格 ^{注)}	備考
ガンマ線 遮蔽材	鉛	JIS H 2105	比重 : 11.3 以上 Pb (%) : 99.90 以上
中性子遮蔽材	レジン	メーカー標準	密度 (g/cm ³) : 1.67±0.05 B ₄ C (g/cm ³) : 0.0155 以上 H (g/cm ³) : 0.086 以上
中性子吸収材	ボロン入り ステンレス鋼	メーカー標準	耐力 (MPa) : <input type="text"/> 以上 <input type="text"/> (°C) <input type="text"/> (°C) 密度 (g/cm ³) : <input type="text"/> 化学成分 (%) : <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>
緩衝材	<input type="text"/>	メーカー標準	密度 (g/cm ³) : <input type="text"/>
	<input type="text"/>		密度 (g/cm ³) : <input type="text"/>
シール材 (Oリング)	ふっ素ゴム	メーカー標準	硬さ (Hs) : <input type="text"/>

注) 記載の規格材料又は相当品を用いる。

A.3 溶接

A.3.1 溶接方法及び材料

- ① 容器本体の溶接は、通商産業省令第123号、科学技術庁原子力安全局長通知12安局第211号又は社団法人日本機械学会「発電用原子力設備規格 溶接規格(2007年版)」(JSME S NB1-2007)(以下「溶接規格」という。)に準拠して実施した溶接施工法確認試験に合格した施工法により行う。
- ② 輸送容器の溶接は、サブマージアーク溶接(SAW)、ティグ溶接(GTAW)、被覆アーク溶接(SMAW)、フラックスコアードアーク溶接(FCAW)、ミグ溶接(GMAW)、電子ビーム溶接(EBW)及びエレクトロスラグ溶接(ESW)のいずれか又はそれらの組合せにより行う。
- ③ 以下に各溶接法について述べる。
 - ・サブマージアーク溶接(SAW)
フラックス中において、ワイヤと溶接物との間にアークを発生させ、発生させたアークの熱でワイヤを溶かして溶接する方法。
 - ・ティグ溶接(GTAW)
非消耗電極と溶接物の間に発生させたアークで溶接棒を溶かして溶接する方法で、電極の周囲からアルゴンガス等を流してシールドを行う。
 - ・被覆アーク溶接(SMAW)
被覆アーク溶接棒を電極として溶接物との間にアークを発生させ、発生させたアークで溶接棒を溶かして溶接する方法。
 - ・フラックスコアードアーク溶接(FCAW)
連続的に供給されるフラックス入りワイヤを電極として、溶接物との間にアークを発生させ、発生させたアークでワイヤを溶かして溶接する方法で、電極の周囲から炭酸ガス等を流してシールドを行う。
 - ・ミグ溶接(GMAW)
連続的に供給されるソリッドワイヤを電極として、溶接物との間にアークを発生させ、発生させたアークでワイヤを溶かして溶接する方法で、電極の周囲からアルゴンガス等を流してシールドを行う。
 - ・電子ビーム溶接(EBW)
真空中で発生させた高速の電子ビームを当て、その衝撃熱を利用して溶接する方法。
 - ・エレクトロスラグ溶接(ESW)
ワイヤと熔融スラグ中を流れる電気の抵抗発熱によりワイヤを溶かして溶接する方法。
- ④ 溶接材料は、母材と同等以上の諸特性を有する(参)-第A.4表に示す規格又は相当品のものを使用する。

A.3.2 溶接機の管理及び溶接士資格

- ① 溶接機は1年を超えない期間ごとに検査を実施し、溶接作業には検査有効期限内の溶接機のみ使用する。
- ② 輸送容器の溶接は、通商産業省令第123号又は溶接規格に準拠して実施した溶接士の技能の確認試験に合格した溶接士又は省令に基づく試験と同等の、JIS等の規定に準拠した検定試験に合格した溶接士が行う。

A. 3. 3 溶接の主要事項に関する説明

- ① ステンレス鋼溶接時の層間温度は最大□℃とする。
- ② 容器本体の主要溶接部の代表的な継手形状例及び溶接法を(参)-第A. 2図に示す。
- ③ 溶接完了後、溶接部は容器完成までのいずれかの時期に洗浄し、汚れ、異物等を除去する。
- ④ 突合せ溶接部の余盛高さは、参考B. 3に規定される値以下とする。
- ⑤ 溶接完了後、溶接部表面に付着したスパッタ(溶接材料の飛び粉)を除去し、溶接ビードの凹凸を滑らかに仕上げる。

A. 3. 4 溶接欠陥の修理

検査の結果、割れ、ピンホール、ブローホール、スラグの巻込み等の欠陥が発見され不具合と判定された溶接部は、グラインダ、機械加工等の機械的方法又はアークエアガウジングにより欠陥部を除去後グラインダ手入れを行い、溶接補修する。補修溶接は技量認定された溶接士により、溶接施工法確認試験に合格した施工法にて実施する。補修後は再検査を実施し合否を確認する。

A. 3. 5 溶接後の熱処理

中間筒は、周開先部の□完了後、フランジ及び底板との溶接前に熱処理を行う。熱処理温度、保持時間及び熱処理方法は通商産業省令第123号又は溶接規格に準拠し、以下のとおりとする。

熱処理温度範囲：595～700℃

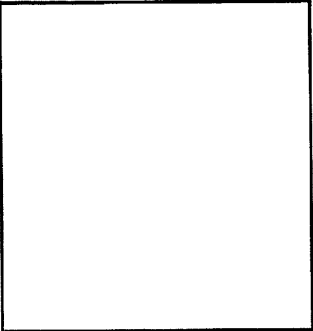
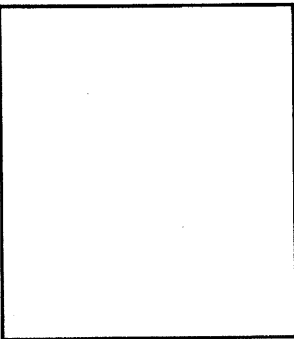
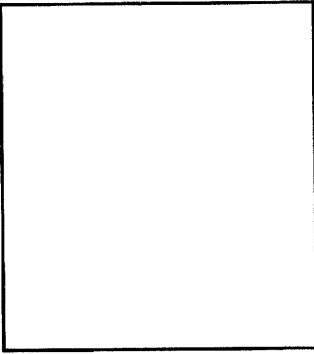
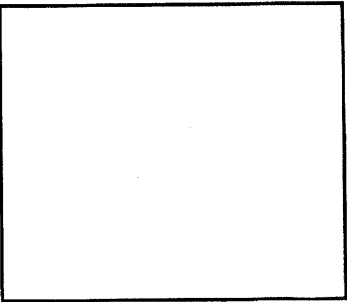
保持時間：□時間以上

A. 3. 6 特殊溶接

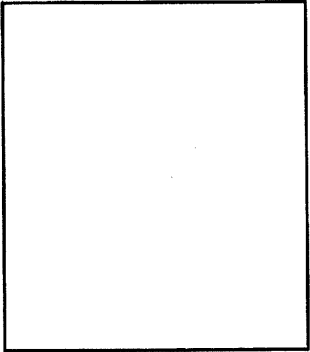

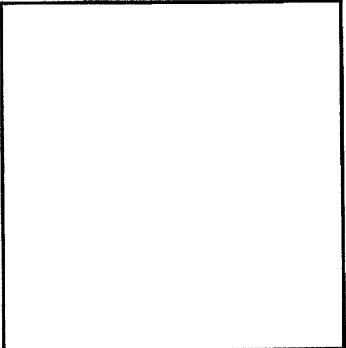

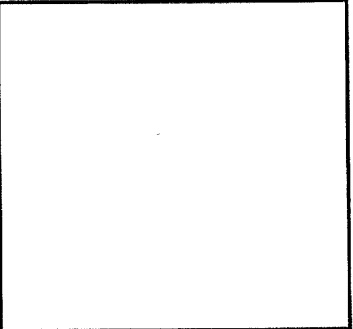
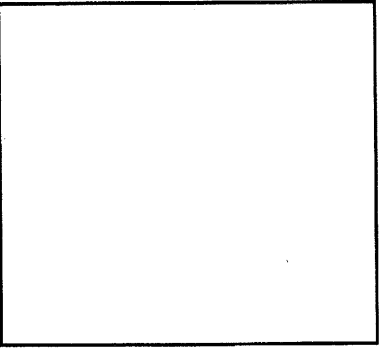
該当しない。

A. 3. 7 溶接の施工管理、その他

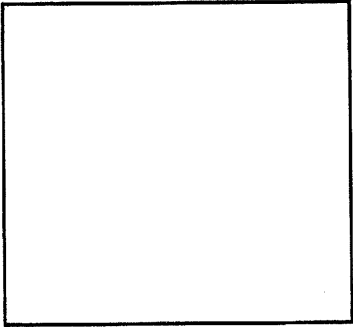
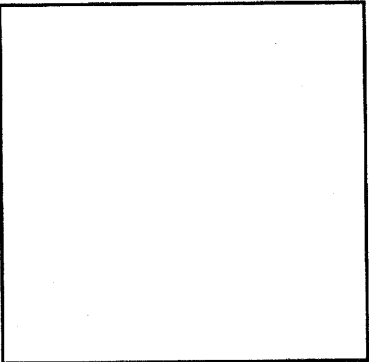
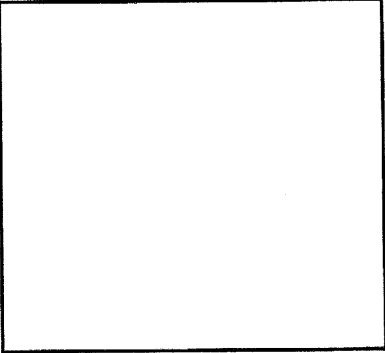
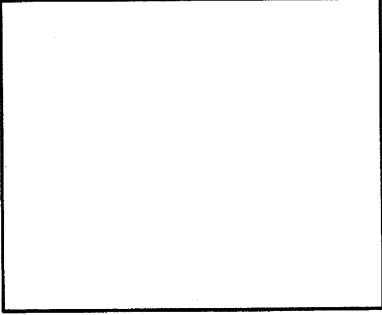
輸送容器の溶接は、技量認定された溶接士が溶接施工法確認試験に合格した施工法で行う。容器本体の溶接時には、継手位置、施工法ナンバー、作業日時及び溶接士名を記録し、その記録を溶接作業及び溶接士の管理に使用する。

継手位置	溶接法	継手形状例
内筒の長手継手	SAW FCAW EBW GTAW GMAW SMAW (単独又は組合せ)	
内筒とフランジの周継手	SAW FCAW EBW GTAW GMAW SMAW (単独又は組合せ)	
内筒と底板の周継手	SAW FCAW EBW GTAW GMAW SMAW (単独又は組合せ)	
中間筒の長手継手	SAW FCAW EBW GTAW GMAW SMAW (単独又は組合せ)	

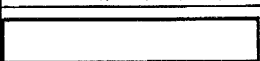
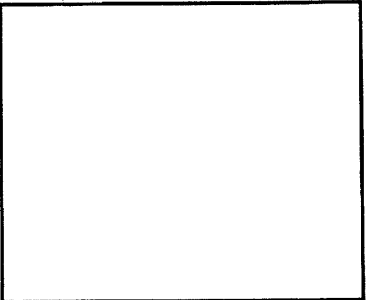
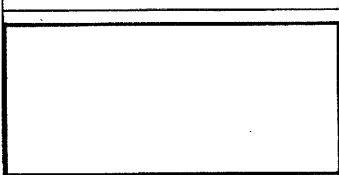
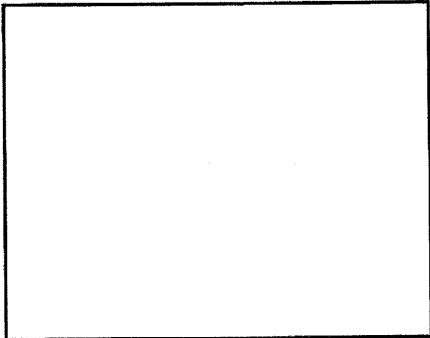
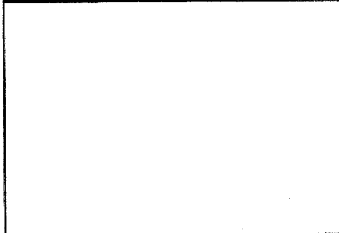
(参)-第 A. 2 図 輸送容器本体の主要溶接部の継手形状例及び溶接法 (1/4)

継手位置	溶接法	継手形状例
中間筒とフランジの周継手	FCAW GTAW SAW SMAW (単独又は組合せ)	
	FCAW GTAW SAW SMAW (単独又は組合せ)	
	FCAW GTAW SMAW GMAW SAW (単独又は組合せ)	
外筒の長手継手	SAW FCAW SMAW GTAW GMAW EBW (単独又は組合せ)	

(参)-第 A. 2 図 輸送容器本体の主要溶接部の継手形状例及び溶接法 (2/4)

継手位置	溶接法	継手形状例
仕切板と中間筒の継手	FCAW GTAW SMAW (単独又は組合せ)	
仕切板と外筒の継手	FCAW GTAW SMAW (単独又は組合せ)	
レジンカバーと本体の継手	FCAW GTAW SMAW (単独又は組合せ)	
	GTAW 又は	
	GMAW	

(参)-第 A. 2 図 輸送容器本体の主要溶接部の継手形状例及び溶接法 (3/4)

継手位置	溶接法	継手形状例
	GTAW 又は FCAW	
	SMAW GTAW FCAW SAW ESW (単独又は組合せ)	
		

(参)-第 A. 2 図 輸送容器本体の主要溶接部の継手形状例及び溶接法 (4/4)

A.4 遮蔽体の製作法

1. ガンマ線遮蔽体(鉛)の製作法

ガンマ線遮蔽体として、下記手順により鉛を[]。

① 内筒外面及び中間筒内面に[]を施す。

② 内筒及び中間筒を組み立てる。

③ []

④ []

⑤ []

[]

⑥ []

⑦ ガンマ線遮蔽性能検査を実施する。

2. 中性子遮蔽体(レジン)の製作法

中性子遮蔽体として、下記手順によりレジンを充填する。

① 中間筒と外筒の間隔をスルーゲージ等で確認し、中性子遮蔽寸法を確認する。

② レジン原材料を調合し、真空脱泡する。

③ ホース等で導きながら、レジンを注入する。

④ 注入作業中、材料サンプリングを行い、硬化後密度を確認する。

⑤ 注入後、放置し硬化させる。

A.5 弁等の付属機器の製作法

バント・水位調整バルブ、ドレンバルブ及び水位調整用加圧バルブは、ステンレス鋼板、ステンレス鋼棒等を適当な長さに切断した後、旋盤等により仕上げ加工を行う。

A.6 組立等その他の製作法

輸送容器本体のガスケットシート面、トラニオン取付部等仕上げ程度、形状及び位置の精度が重要な箇所については、仕上げ代を有する粗仕上げの状態又は未加工の状態で行い、仕上げ精度に影響を及ぼすような箇所の溶接を全て完了した後、機械加工仕上げを行う。

全ての組立溶接及び仕上げ加工を完了した後、バルブ類、蓋、バスケット及び上・下部緩衝体を参考Bで述べる製作完了時に行う検査を実施するために、順次、ボルト締め等により組み立てる。

B. 輸送容器の試験及び検査方法

輸送容器の製作中及び製作完了後、(ロ)章で述べられた各解析に対応する設計条件を満たすように製造されていることを確認するために、(参)-第B.1表に示す検査を実施する。以下各検査の方法等について記述する。

B.1 材料検査

全ての材料は受取検査時に、ミルシート等により所定の性能を満足していることを確認する。
輸送容器主要材料は、(参)-第B.2表に示す検査を行う。

B.2 寸法検査

適切に管理されている巻尺、ノギス、マイクロメータ、その他計測器具を用いて輸送容器の寸法を測定し、(参)-第B.1図から(参)-第B.5図に示す合格基準を満足していることを確認する。

(参)-第B.1表 検査項目一覧表

検査項目	容器本体(蓋を含む。)		バスケット		緩衝体		備考
	実施区分	実施時期	実施区分	実施時期	実施区分	実施時期	
材料検査	○	製作中(材料受取時)	○	製作中(材料受取時)	○	製作中(材料受取時)	(参)-第B.2表参照
寸法検査	○	製作中及び製作完了時	○	製作完了時	○	製作完了時	
溶接検査	○	製作中	○	製作中	○	製作中	(参)-第B.3表参照
外觀検査	○	製作完了時	○	製作完了時	○	製作完了時	
耐圧検査	○	製作中及び製作完了時	-	-	-	-	
気密漏えい検査	○	製作中及び製作完了時	-	-	-	-	
遮蔽性能検査	○	製作中	-	-	-	-	
遮蔽寸法検査	○	製作中	-	-	-	-	
伝熱検査	○	製作完了時	○	製作完了時	○	製作完了時	
吊上荷重検査	○	製作完了時	-	-	-	-	
重量検査	○	製作完了時	○	製作完了時	○	製作完了時	
未臨界検査	-	-	○	製作完了時	-	-	
作動確認検査	○	製作完了時	-	-	-	-	
取扱検査	○	製作完了時	○	製作完了時	○	製作完了時	

(参)-第B.2表 材料検査項目一覧表(1/2)

名 称	使用材質 ^{注5)}	試験検査項目															
		化学分析	引張試験	<input type="checkbox"/>	硬度試験	破壊靱性試験	曲げ試験	へん平試験	水圧試験	浸透探傷試験 ^{注1)}	超音波探傷試験 ^{注2)}	比重測定	密度計測				
1. 容器本体																	
内筒	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 100%;"></div> <p>JIS G 4304 SUS304 JIS H 3100 C1020P-1/4H JIS G 4303 又は 4304 SUS304 JIS G 4303 又は 4304 SUS304 JIS G 3214 SUSF630 H1150</p>				<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
底板					<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
中間筒					<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
<input type="checkbox"/>					<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
フランジ					<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
外筒					<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
仕切板					<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
伝熱フィン					<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
フィン					<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
バギングリング					<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
トラニオン				<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>						
バルブ本体				<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>						
ベント・水位調整バルブ、ドレンバルブ				<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>						
バルブカバープレート				<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>						
レジンカバー				<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>						
トラニオンボルト				<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>						
ガンマ線遮蔽材				<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>						
中性子遮蔽材				<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					<input type="checkbox"/>	

注1) 試験方法及び合格基準は通商産業省告示第501号又は設計・建設規格 PVB-2420 に準拠する。
注2) 又は においては、直径又は対辺距離が 50mm を超えるものについて実施する。
注3) 又は においては、 又は を使用する場合に浸透探傷試験を実施する。
注4) 浸透探傷試験又は超音波探傷試験を実施する。
注5) 相当品 又は を使用する場合は硬度試験は要求しない。
注6) JIS G 3459 に準拠して非破壊試験(超音波探傷試験、渦流探傷試験又は放射線透過試験)でも良い。

(参) 第 B. 2 表 材料検査項目一覽表 (2/2)

名 称	使用材質	試 験 検 査 項 目											
		化 学 分 析	引 張 試 験		硬 度 試 験	破 壊 韌 性 試 験	曲 げ 試 験	へ ん 平 試 験	水 圧 試 験	注 II 浸 透 探 傷 試 験	注 I 超 音 波 探 傷 試 験	比 重 測 定	密 度 計 測
2. 蓋 板		○	○		○					○			
蓋 吊 手	JIS G 3214 SUSF304	○	○		○					○			
蓋 ボ ル ト		○	○		○					○			
蓋 吊 手 ボ ル ト		○	○		○					○			
水 位 調 整 用 加 圧 バ ル ブ		○	○		○					○			
パ ル ブ カ バ ー プ レ ー ト		○	○		○					○			
3. パ ス ケ ッ ト		○	○		○					○			
チャ ン ネ ル	(参) 第 A. 5 表 による	○	○		○					○			
支 持 リ ン グ	JIS G 4304 SUS304	○	○		○					○			
4. 緩 衝 体	JIS G 3459 SUS304TP	○	○		○					○			
カ バ ー プ レ ー ト	JIS G 4304 又は 4305 SUS304	○	○		○					○			
リ ン グ	JIS G 4304 又は 4305 SUS304	○	○		○					○			
パ イ プ	JIS G 3459 SUS304TP	○	○		○					○			
上 部 緩 衝 体 ボ ル ト	JIS G 4303 SUS304	○	○		○					○			
下 部 緩 衝 体 ボ ル ト	JIS G 4303 SUS304	○	○		○					○			
緩 衝 材	(参) 第 A. 5 表 による	○	○		○					○			

注 1) 試験方法及び合格基準は通産省告示第 501 号又は設計・建設規格 P1B-2420 に準拠する。

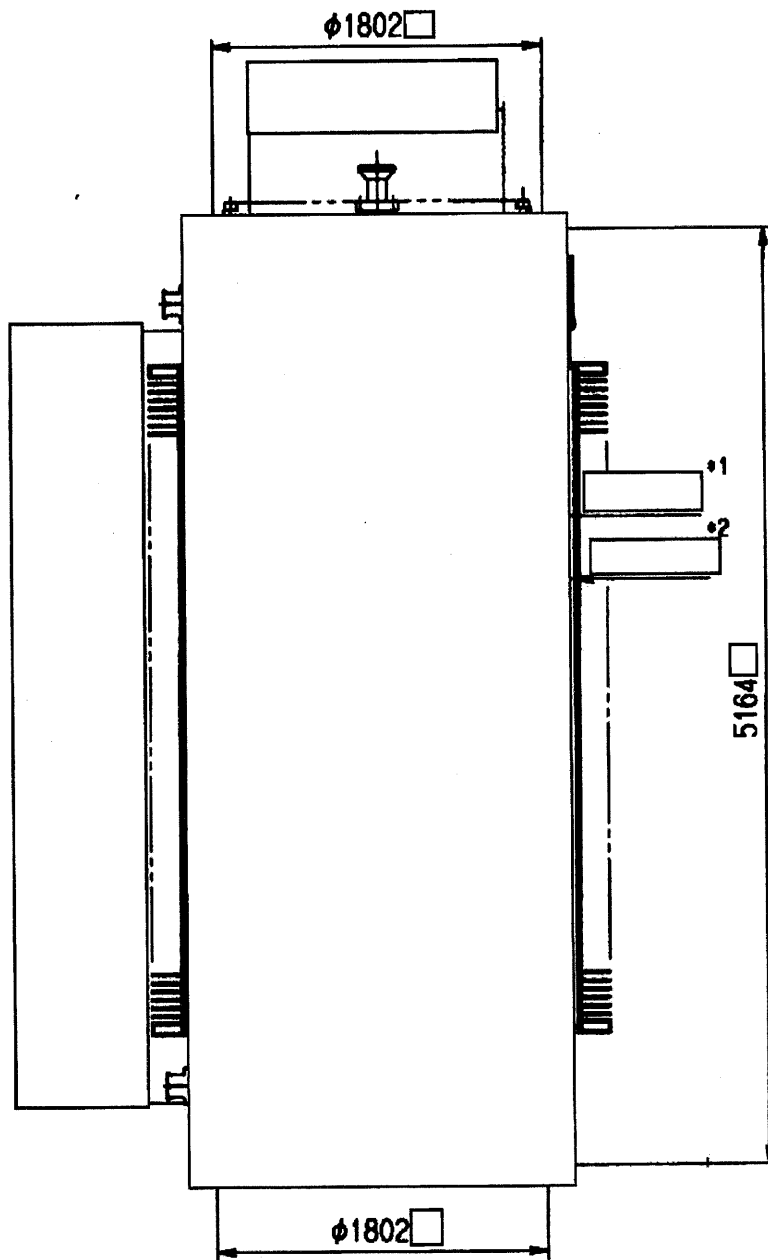
注 2) [] 又は [] において、直径又は対辺距離が 50mm を超えるものについて実施する。

注 3) [] 又は [] において、[] に実施する。

注 4) 浸透探傷試験又は磁粉探傷試験を実施する。

注 5) 相当品 [] 又は [] を使用する場合は硬度試験は要求しない。

注 6) JIS G 3459 に準拠して非破壊試験(超音波探傷試験、渦流探傷試験又は放射線透過試験)でも良い。

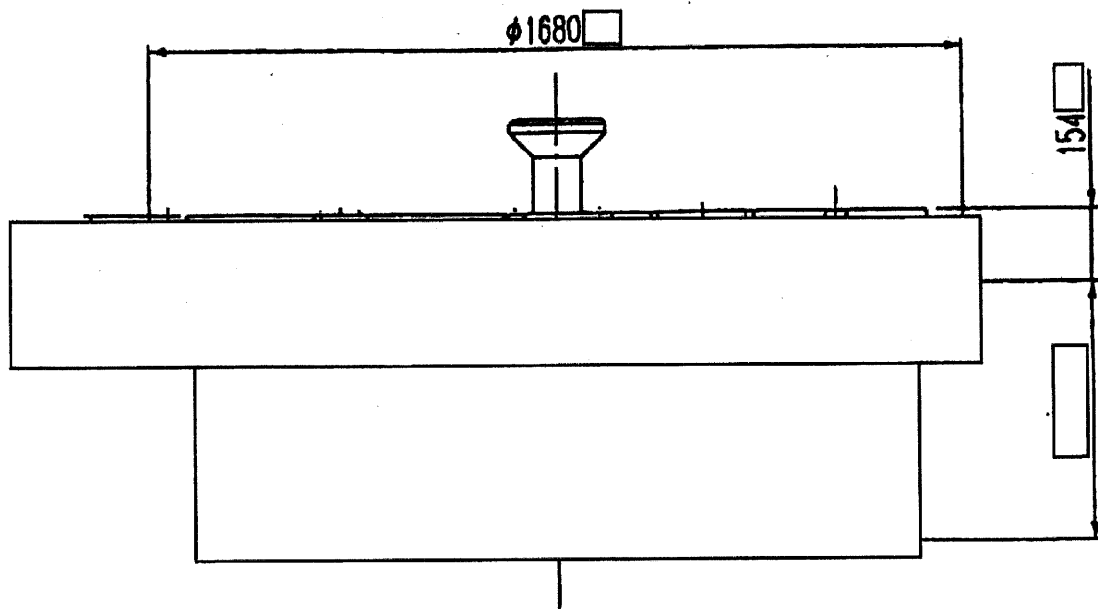


*1

*2

(単位：mm)

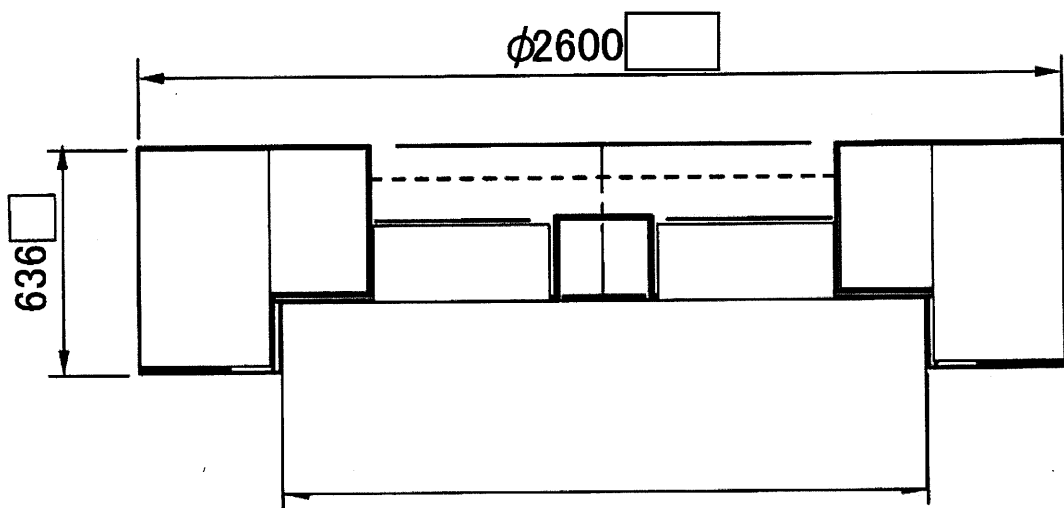
(参)-第 B.1 図 輸送容器本体の寸法測定箇所及び合格基準



*1

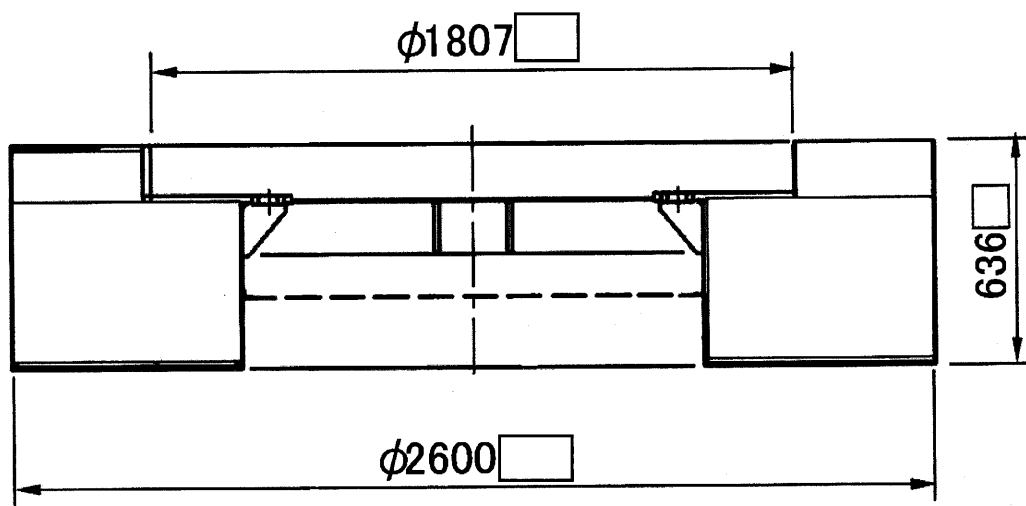
(単位：mm)

(参)-第 B. 2 図 蓋の寸法測定箇所及び合格基準



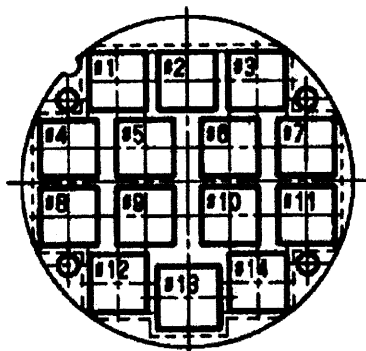
(単位：mm)

(参)-第 B. 3 図 上部緩衝体の寸法測定箇所及び合格基準



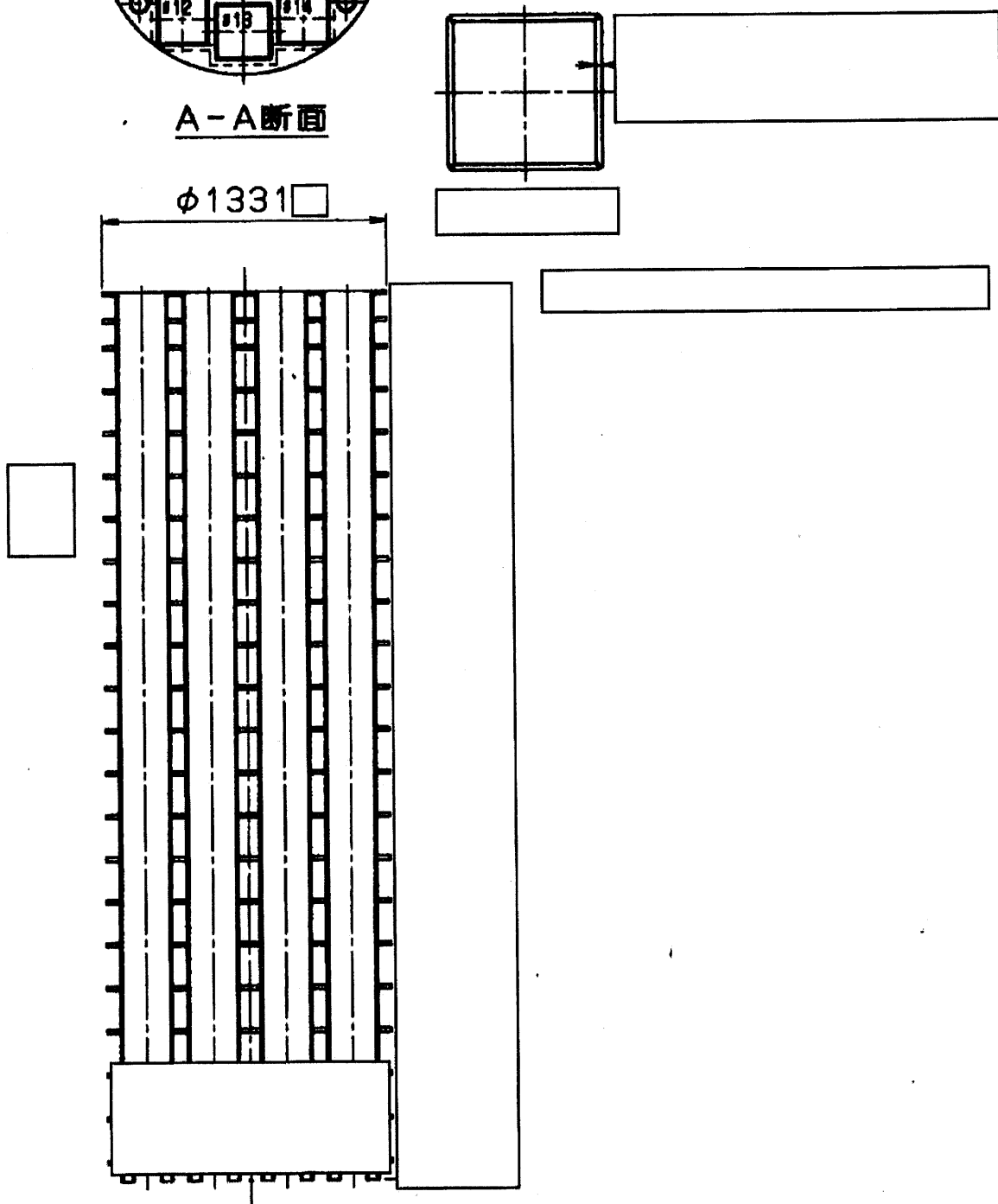
(単位：mm)

(参)-第 B. 4 図 下部緩衝体の寸法測定箇所及び合格基準



A-A断面

φ1331



(単位：mm)

(参)-第 B. 5 図 バスケットの主要寸法及び合格基準

B.3 溶接検査

輸送容器製作中、溶接部の健全性を確認するため、(参)-第B.3表に従い各部分の溶接検査を行う。

要領及び判定基準を下記に示す。

1. 開先検査

- ① 開先の形状は図示とおり加工され、開先及びその付近には塗料、油分、錆等がないことを確認する。
- ② 開先寸法は、仮付け状態において、下記の許容値を満足することを確認する。
 - ・ 開先角度 $\pm 5^\circ$
 - ・ ルート間隔 $\pm 1\text{mm}$
 - ・ 板の食違い 下表の中項に掲げる母材の厚さ (母材の厚さが異なる場合は、薄い方の厚さ) の区分に応じ、それぞれ同表の右項に掲げる値を超えてはならない。

継手の種類	母材の厚さの区分	食違いの値
長手継手	20mm 以下	1mm
	20mm を超え 120mm 以下	母材の厚さの 5%
	120mm を超えるもの	6mm
周継手	15mm 以下	1.5mm
	15mm を超え 120mm 以下	母材の厚さの 10%
	120mm を超えるもの	12mm

2. 外観検査

- ① 溶接完了後、目視により外観検査を行い、割れ、アンダーカット、オーバーラップ等の有害なきずがないことを確認する。
- ② 放射線透過試験を行う継手の余盛り高さは下表の右項に示す値以下であること。

母材の厚さの区分	余盛りの高さ
12mm 以下	1.5mm
12mm を超え 25mm 以下	2.5mm
25mm を超え 50mm 以下	3mm
50mm を超え 100mm 以下	4mm
100mm を超えるもの	5mm

3. 浸透探傷試験

溶接部の最終層について、通商産業省令第123号又は溶接規格に準拠して浸透探傷試験を行い、判定する。

(1) 試験方法

次のいずれかの日本産業規格 (JIS 規格) に準拠する。

- ・ JIS Z 2343 (1992) 「浸透探傷試験方法及び浸透指示模様分類」の「4. 試験方法」
- ・ JIS Z 2343-1 (2001) 又は (2017) 「非破壊試験—浸透探傷試験—第1部：一般通則：浸透探傷試験方法及び浸透指示模様分類」の「5.4 装置」、「6. 探傷剤の組合せ、感度及び分類」、「7. 探傷剤及び試験体の適合性」及び「8. 試験手順」

(2) 合格基準

- ① 割れによる浸透指示模様がないこと。
- ② 長さ1mmを超える線状浸透指示模様がないこと。
- ③ 長さ4mmを超える円形状浸透指示模様がないこと。
- ④ 4個以上の円形状浸透指示模様が直線状に並んでいる場合は、隣接する浸透指示模様の間の距離が1.5mmを超えること。
- ⑤ 面積が3,750mm²の長方形(短辺の長さは、25mm以上とする。)内に円形状浸透指示模様が10個以上含まれないこと。ただし、長さが1.5mm以下の浸透指示模様は算定することを要しない。

4. 磁粉探傷試験

溶接部の最終層について、通商産業省令第123号又は溶接規格に準拠して磁粉探傷試験を行い、判定する。

(1) 試験方法

次のいずれかの日本産業規格 (JIS 規格) に準拠する。

- ・ JIS G 0565 (1992) 「鉄鋼材料の磁粉探傷試験方法及び磁粉模様分類」の「8.4 磁化」のプロッド法、コイル法又は極間法
- ・ JIS Z 2320-1 (2007) 「非破壊試験—磁粉探傷試験—第1部：一般通則」の「7 検査性能の確認方式、及び試験方法分類」のプロッド法、コイル法又は極間法
- ・ JIS Z 2320-1 (2017) 「非破壊試験—磁粉探傷試験—第1部：一般通則」の「8.3 磁化方法」のプロッド法、コイル法又は極間法

(2) 合格基準

- ① 割れによる磁粉模様がないこと。
- ② 長さ1mmを超える線状の磁粉模様がないこと。
- ③ 長さ4mmを超える円形状の磁粉模様がないこと。
- ④ 4個以上の円形状の磁粉模様が直線状に並んでいる場合は、隣接する磁粉模様の間の

距離が 1.5mm を超えること。

- ⑤ 面積が 3,750mm² の長方形 (短辺の長さは、25mm 以上とする。) 内に円形状の磁粉模様は 10 個以上含まれないこと。ただし、長さが 1.5mm 以下の磁粉模様は算定することを要しない。

5. 放射線透過試験

溶接部について、通商産業省令第 123 号第 1 種容器 (内筒溶接部) 若しくは第 3 種容器 (中間筒及び外筒溶接部) 又は溶接規格に準拠して放射線透過試験を行い、判定する。

合格基準は下記のとおりである。

- ① 日本産業規格 JIS Z 3104 (1995) 「鋼溶接継手の放射線透過試験方法」の付属書 4 「透過写真によるきずの像の分類方法」の 1 類であること。ただし、中間筒及び外筒溶接部の場合に当たっては、第 1 種及び第 4 種のきずについては、試験視野を 3 倍に拡大してきず点数を求め、その 3 分の 1 の値をきず点数とすることができる。
- ② 第 1 種及び第 4 種のきずがある場合には、それぞれのきずの隣接する他の第 1 種及び第 4 種のきずとの間の距離が 25mm 未満の場合にあっては、それぞれのきずの最大径が母材の厚さの 0.2 倍 (3.2mm を超える場合は、3.2mm)、隣接する他の第 1 種のきずとの間の距離が 25mm 以上の場合にあっては、それぞれのきずの最大径が母材の厚さの 0.3 倍 (6.4mm を超える場合は、6.4mm) の値を超えないこと。この場合において、①においてきず点数として算定しないきずについては、きずとみなさない。
- ③ 母材の厚さの 12 倍の長さの範囲内で、隣接する第 2 種のきずの間の距離が長い方の第 2 種のきずの長さの 6 倍未満であり、かつ、これらが連続して直線上に並んでいるときにおけるこれらの長さの合計が母材の厚さを超えないこと。

(参)-第 B. 3 表 溶接検査項目一覧表

検査対象継手	開先検査	外観検査	浸透探傷試験	放射線透過試験
<u>1. 容器本体</u>				
(1) 内筒の長手継手	○	○	○	○
(2) 内筒とフランジ	○	○	○	○
(3) 内筒と底板	○	○	○	○
(4) 中間筒の長手継手	○	○	○注1)	○
(5) 中間筒とフランジ	○	○	○	
(6) <input type="text"/>		○	○	
(7) <input type="text"/>	○	○	○	
(8) 外筒の長手継手 (<input type="text"/> 継手)	○	○	○注2)	○
(9) 仕切板と中間筒		○	○	
(10) 仕切板と外筒		○	○	
(11) レジンカバー及びバギングリングの組立溶接部		○	○	
(12) バルブ本体の溶接部		○	○	
(13) 外筒の <input type="text"/>		○	○	
(14) <input type="text"/>		○		
<u>2. 蓋</u>				
外面溶接部		○	○	
<u>3. バスケット</u>				
溶接部		○		
<u>4. 上・下部緩衝体</u>				
外面溶接部		○	○	

注 1) 浸透探傷試験又は磁粉探傷試験を実施する。

注 2) 外筒の長手継手の外面側は浸透探傷試験を、内面側は浸透探傷試験又は磁粉探傷試験を実施する。

B.4 外観検査

容器本体(蓋を含む。)、バスケット及び上・下部緩衝体について目視により下記の検査を行う。

- ① 形状が図示とおりであること。
- ② 外観上のきず及び切削部の返り等、不手際な部分がないこと。
- ③ 仕上げ面の状態が良好であること。
- ④ 腐食等がないこと。

B.5 耐圧検査

容器本体(蓋を含む。)の水圧試験を実施する。

試験圧力は最高使用圧力の 1.25 倍で 2.125MPaG (21.7kg/cm²G) とし、目視により異常な変形、ひび、割れ等がないことを確認する。

B.6 気密漏えい検査

1. 内筒

内筒溶接部のヘリウムリークテストを実施し、漏えい率が MPa・cm³/s (atm・cm³/s) 以下であることを確認する。

2. 容器本体

容器本体の製作完了後、蓋、ドレンバルブ、ベント・水位調整バルブ及び水位調整用加圧バルブを組み込み、各二重 O リングシール部を 0.66MPaG (6.7kg/cm²G) 以上に加圧し、漏えい量を測定する。

各シール部の合計漏えい率が 3×10^{-2} ref cm³/s 以下であることを確認する。

B.7 遮蔽性能検査

1. ガンマ線遮蔽性能検査

- (1) 容器本体製作中、にガンマ線源を容器内部に挿入し、透過線量を実測する。
この実測値と、最小遮蔽厚さのテストピースにより得られる計数率とを比較することにより、容器の実効遮蔽寸法が最小遮蔽厚さを満足していることを確認する。検査には ⁶⁰Co 線源及びシンチレーションカウンターを使用する。
- (2) 底板及び蓋については、参考 B.8 のガンマ線遮蔽寸法を満足していることを確認し、かつ、素材の超音波探傷試験を行い、遮蔽性能に影響を及ぼす欠陥がないことを確認することによりガンマ線遮蔽性能を確認する。

2. 中性子遮蔽性能検査

容器本体の製作中、参考 B.8 の中性子遮蔽寸法を満足していることを確認する。また、中性

子遮蔽材を構成する主剤、硬化剤等の配合比が明らかな場合は、各々の成分及び所定の配合比で混練されていることを確認する。また、前記の配合比が不明な場合は、実機充填時に採取したサンプルの分析等を行うことにより中性子遮蔽性能を確認する。ただし、ロットサンプル等が実機充填サンプルと同等の成分を持つことが確認できる場合は、ロットサンプル等の分析により中性子遮蔽性能を確認する。

B.8 遮蔽寸法検査

1. ガンマ線遮蔽寸法検査

容器製作中、参考 B.2 で述べた寸法検査で、底板及び蓋の寸法が合格基準内にあることを確認する。また、参考 B.7 の 1. (1) の方法により、ガンマ線遮蔽寸法を確認する。

2. 中性子遮蔽寸法検査

中間筒と外筒の間隔をスルーゲージ等で確認することにより中性子遮蔽寸法を確認する。

B.9 伝熱検査

容器内に、輸送容器1基当たりの最大の発熱量 54kW 以上の熱出力を持つ電気ヒータを挿入し、熱平衡に達した後容器内及び表面温度を計測し、環境温度 38℃ に換算した後、人が容易に近づくことができる輸送容器表面温度が 85℃ 以下であることを確認する。

なお、蓋、上・下部緩衝体及びバスケットは、必要に応じ仮のものを使用する。

B.10 吊上荷重検査

容器完成後、上・下部トラニオンに、輸送容器の吊上げ重量の 2 倍 (216 トン) 以上の荷重を付加し、異常がないことを目視により確認する。

B.11 重量検査

各部品の重量を測定し、合計重量が(参)-第 B.4 表に示す合格基準を満足することを確認する。

(参)-第 B.4 表 輸送容器重量

部 品	合 格 基 準
容 器 本 体	合計重量が 101.2 トン以下 であること。
蓋	
バ ス ケ ャ ッ ト	
上・下部緩衝体	

B.12 未臨界検査

バスケットの製作完了後、形状及び寸法が図示とおりであることを確認する。

またミルシートにより、使用したボロン入りステンレス鋼が所定の成分のものであることを確認する。

B.13 作動確認検査

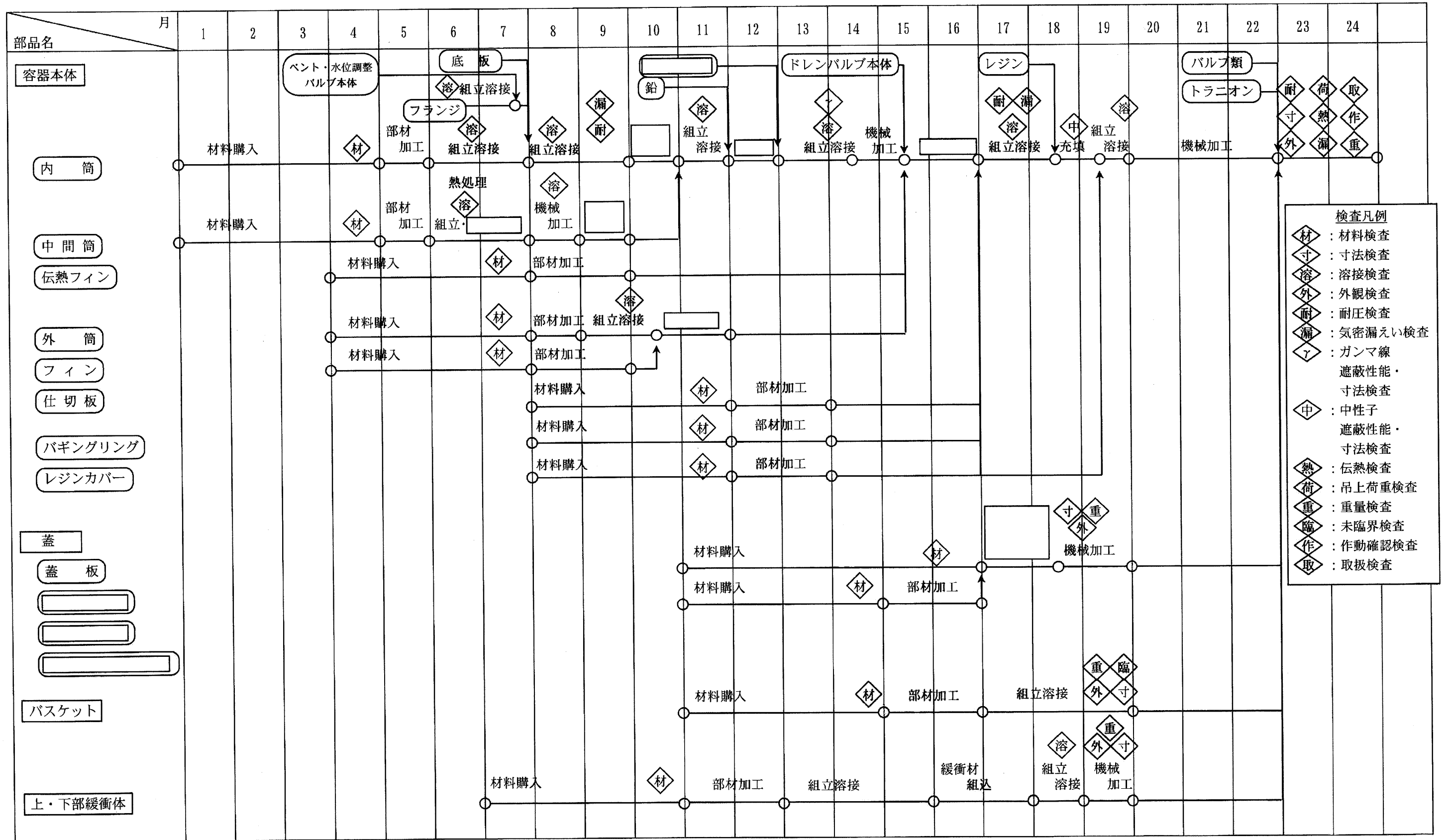
ドレンバルブ、ベント・水位調整バルブ及び水位調整用加圧バルブを手動で操作し、正常に作動することを確認する。

B.14 取扱検査

輸送容器本体に対し、バスケット、蓋、上・下部緩衝体等の組込み、取外し、吊上げ等の取扱い並びに模擬収納物による装荷及び取出しが正常に行えることを確認する。

C. 輸送容器の製作スケジュール

輸送容器の標準的な製作スケジュール例を(参)-第C.1図に示す。



(参)-第 C.1 図 輸送容器の標準的な製作スケジュール(例)

NFT-14P型
核燃料輸送物設計承認申請書

参考資料

原燃輸送株式会社

目 次

(口) 章 A 構造解析

- A. 1 「CRUSH」コードの説明…………… (参)-(口)-A-1
- A. 2 「ABAQUS」コードの説明…………… (参)-(口)-A-3
- A. 3 輸送中の車両の振動数域について…………… (参)-(口)-A-7
- A. 4 低温強度評価について…………… (参)-(口)-A-10
- A. 5 余裕率が小さい構造解析結果の補足説明について…………… (参)-(口)-A-21
- A. 6 高燃焼度燃料の健全性について…………… (参)-(口)-A-25
- A. 7 参考文献…………… (参)-(口)-A-33

(口) 章 B 熱解析

- B. 1 「ABAQUS」コードの説明…………… (参)-(口)-B-1
- B. 2 容器内水の放射線分解による圧力上昇について…………… (参)-(口)-B-2
- B. 3 中性子遮蔽材(レジ)の設計基準値について…………… (参)-(口)-B-5
- B. 4 参考文献…………… (参)-(口)-B-19

(口) 章 D 遮蔽解析

- D. 1 「ORIGEN2」コードの説明…………… (参)-(口)-D-1
- D. 2 「DOT3.5」コードの説明…………… (参)-(口)-D-5
- D. 3 放射化線源について…………… (参)-(口)-D-14
- D. 4 ガンマ線に関する「DOT3.5」コードと「QAD」コードの比較について…………… (参)-(口)-D-18
- D. 5 DOT 計算モデルの水位の設定方法について…………… (参)-(口)-D-19

(口) 章 E 臨界解析

- E. 1 「SCALE」システムの説明…………… (参)-(口)-E-1
- E. 2 「KENO-V. a」コードの説明…………… (参)-(口)-E-2
- E. 3 「BONAMI」コードの説明…………… (参)-(口)-E-3
- E. 4 「CENTRM」コードの説明…………… (参)-(口)-E-4
- E. 5 「PMC」コードの説明…………… (参)-(口)-E-5
- E. 6 「WORKER」コードの説明…………… (参)-(口)-E-6
- E. 7 「XSDRNPM」コードの説明…………… (参)-(口)-E-7

参考資料(口)章A 構造解析

A.1 「CRUSH」コードの説明

1. 概要

CRUSH コードは単軸変形法 (UDM: Uni-axial Displacement Method) と呼ばれ、(口)-第A. 参 1 図に示すように、緩衝材を互いに干渉しない一次元棒の集合とみなし、一次元棒塑性変形によって衝突エネルギーを吸収すると仮定して、変形、荷重及び加速度を求めるものである。

2. 計算式

UDM の計算式について、一般的な考え方を説明する。

(口)-第A. 参 1 図に示すように長さ ℓ_i の i 番目の一次元棒が圧縮力を受け変形した場合のひずみ及び変形抵抗力 (荷重) は以下の式で表すことができる。

$$\varepsilon_i(\delta) = \frac{\delta_i}{\ell_i}$$

$$F_i(\delta) = K_i \times \sigma_i(\varepsilon_i) \times A_i$$

ここで、

δ : 変形

ε : ひずみ

ℓ : 一次元棒の長さ

F : 荷重

K : 端面拘束係数

σ : 応力

A : 一次元棒の断面積

である。端面拘束係数の値は以下の範囲にある。

$$0 \leq K_i \leq 1$$

緩衝材の全荷重は次式となる。

$$F(\delta) = \sum F_i(\delta)$$

緩衝材の吸収エネルギーは次式となる。

$$E(\delta) = \int F(\delta) d\delta$$

一方、重量 W の輸送容器が高さ H から落下した場合の衝突エネルギーは次式で表すことができる。

$$E(\delta) = \gamma \times W \times H$$

ここで、

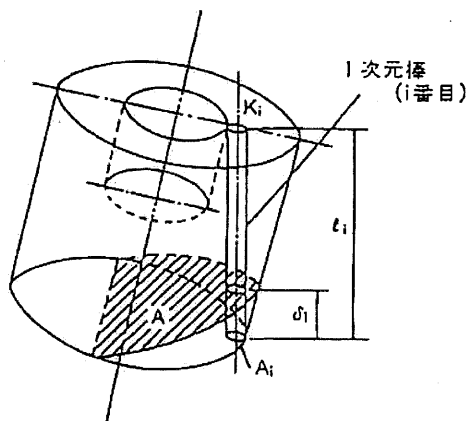
γ : 落下エネルギーに対する一次衝突によって消費されるエネルギーの割合である。輸送容器に加わる加速度は次式で求めることができる。

$$\alpha = \frac{F(\delta)}{W}$$

ここで、

α : 加速度

である。



(口)-第A.参1図 UDMによる衝突計算法

3. 信頼性

CRUSH コードの計算結果については実験結果及び詳細計算コードによる計算結果との比較検討がなされ、妥当性が検証されている。

A.2 「ABAQUS」コードの説明

1. 概要

ABAQUS コードとは、ダッソー・システムズ (Dassault Systemes Simulia Corp.) において、開発・整備されている有限要素法解析のための汎用プログラム・システムである。

このコードは、構造解析の分野における線形及び非線形問題を解析するために開発されたものであり、大変形問題、接触問題及び座屈問題等のような幾何学的非線形解析、弾塑性問題やクリープ問題等の材料非線形解析、動的解析及び熱応力問題に対する熱伝導解析等の幅広い解析が可能である。

さらに、種々の形状に対して応用するため、二次元連続体、三次元連続体、シェル、はり等の構造に対して、多くの要素を含んだ要素ライブラリーが用意されており、線形解析のみでなく非線形解析が可能である。要素ライブラリーには非圧縮性材料に関するものや、接触及びインターフェイス等の特殊な問題に対する要素も含まれている。

(1) ABAQUS プログラムの構成

このシステムは次のプログラムから構成されている。

- ・プリプログラム
- ・メインプログラム

プリプログラムはメインプログラムのプリプロセッサで、入力データチェック及びモデルのプロットを行い、解析のためのデータベースを作成する。メインプログラムは、このシステムを中心となるものであり、弾性、弾塑性、クリープ、大変形、座屈解析及び動的解析の機能を有している。さらに、ポストプロセッシングとして解析結果のプリント出力、結果ファイルの作成及びリスタート解析のためのリスタートファイルの作成も行う。

2. 応力解析の解析プロシージャ

ABAQUS は、構造物の応答を数値的に解析する柔軟性に富むツールとなるように設計されており、線形及び非線形の解析をできるだけ自由に行えるよう、解析プロシージャは解析すべき問題の履歴をごく一般的にモデル化できるように作成されている。

解析においては、負荷の履歴をいくつかのステップに分割することができ、非線形解析ではプログラムの自動コントロールによって、各ステップは複数のインクリメントに分割される。各インクリメントの非線形釣合いを解くために、ABAQUS はほとんどの問題でニュートン法を用いている。

使用可能な主なプロシージャは以下のとおりである。

(1) 静的応力/変位解析

ABAQUS は静的応力解析に 2 種類の方法を用いている。ひとつは負荷履歴が指定されている解析 (熱衝撃での温度ランジェント等) である。もうひとつは弧長法 (修正 Riks 法) であり、崩壊後又は座屈後のような不安定問題の解析に用いることができる。負荷履歴が指定される解析では、材料の応答は時間依存又は非依存とすることができる。

(2) 線形問題に対する動的応力/変位解析

ABAQUS は系の固有モードに基づく時刻暦応答解析、応答スペクトル解析、定常応答解析及び不規則応答解析の機能を持っている。固有振動数の計算にはサブスペース法が用いられており、解析の任意の段階での計算が可能で、初期荷重を考慮することができる。

(3) 非線形問題に対する動的応力/変位解析

非線形の動的問題に対し、ABAQUS は Hilber-Hughes-Taylor 法 (制御可能な数値減衰を含むニューマーク法) による直接陰的積分機能を持っており、自動時間増分機能がある。非線形の弱い問題に対しては、系の初期状態の固有モードを基底関数として用いるモード投影法があり、非線形制止構造物を含む配管系のような局所的非線形性のある系の解析に非常に有効である。

3. 熱伝導解析

ABAQUS には、熱伝導 (拡散) 問題の解析機能が用意されており、線形及び非線形問題に対して、定常及び非定常の解析を行うことができる。

定常問題の解は、時間積分を行うことなく直接求めることが可能である。非定常問題に対しては、後退差分法 (修正 Crank-Nicholson 法) による時間積分が行われる。この積分法は線形問題に対しては無条件安定である。

熱伝導解析は、熱応力解析に用いる温度場を得るために行われることが多い。ABAQUS は、熱伝導解析から出力された結果ファイルを、応力解析の入力データとするための使いやすいインターフェイスを用意している。

ABAQUS は、非線形熱伝導問題の解析にイテレーションを行う。その方法は基本的にはニュートン法であるが、強い非線形の潜熱が存在する場合の安定性を確保するために、修正が加えられている。

熱伝導解析のための要素ライブラリーは、ほとんどの問題をモデル化することが可能となるように準備されている。シェル構造物の解析のためには、シェル型の熱伝導要素が用意されている。

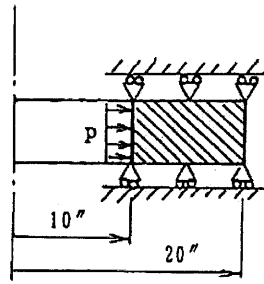
熱伝導解析における境界条件には、熱流束 (分布又は集中)、温度指定、熱伝達、ふく射がある。これらはいずれも時間の関数として与えることができる。

熱伝導と応力の問題を完全に連成させた解析機能も用意されている。

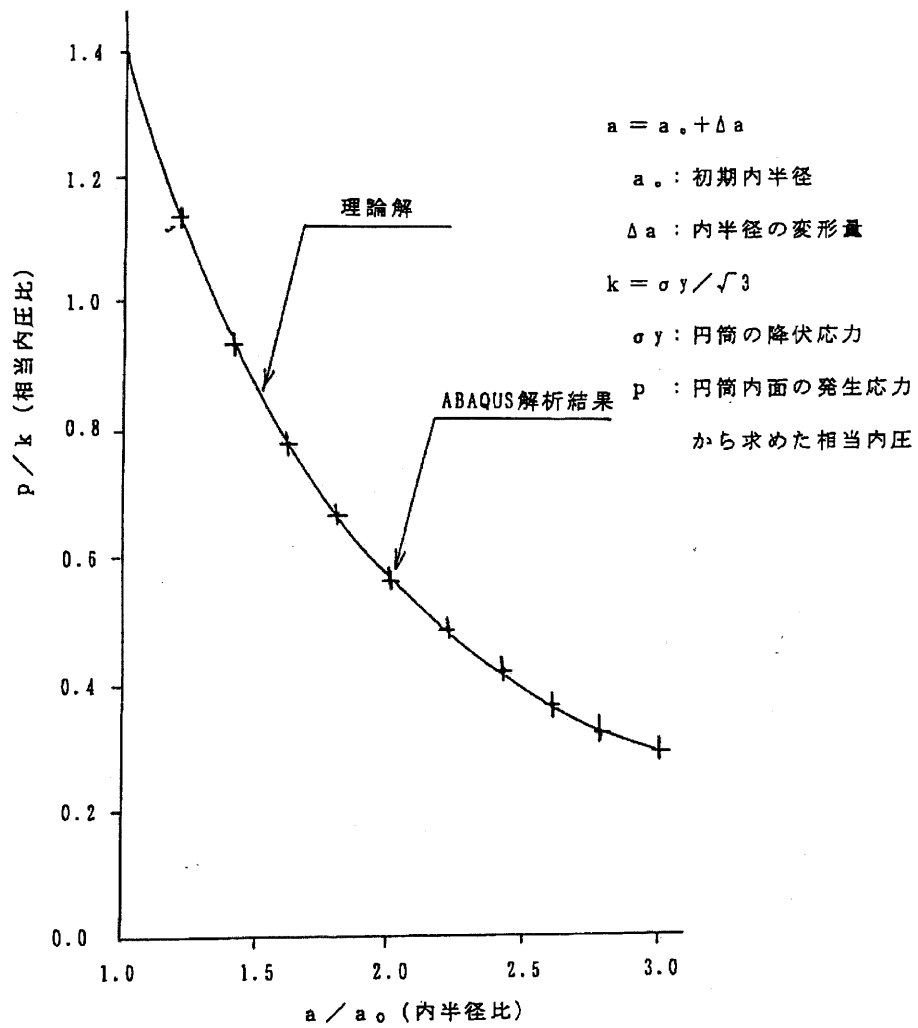
4. 信頼性

ABAQUS コードの検証は数多くの問題に対して理論解と比較することにより行われており、それらは ABAQUS EXAMPLE PROBLEMS MANUAL と VERIFICATION MANUAL に詳細が示されている。

検証例として、内圧力を受ける厚肉円筒の ABAQUS による解析結果と理論解の比較を (ロ)-第 A. 参 2 図 に示す。



解析モデル

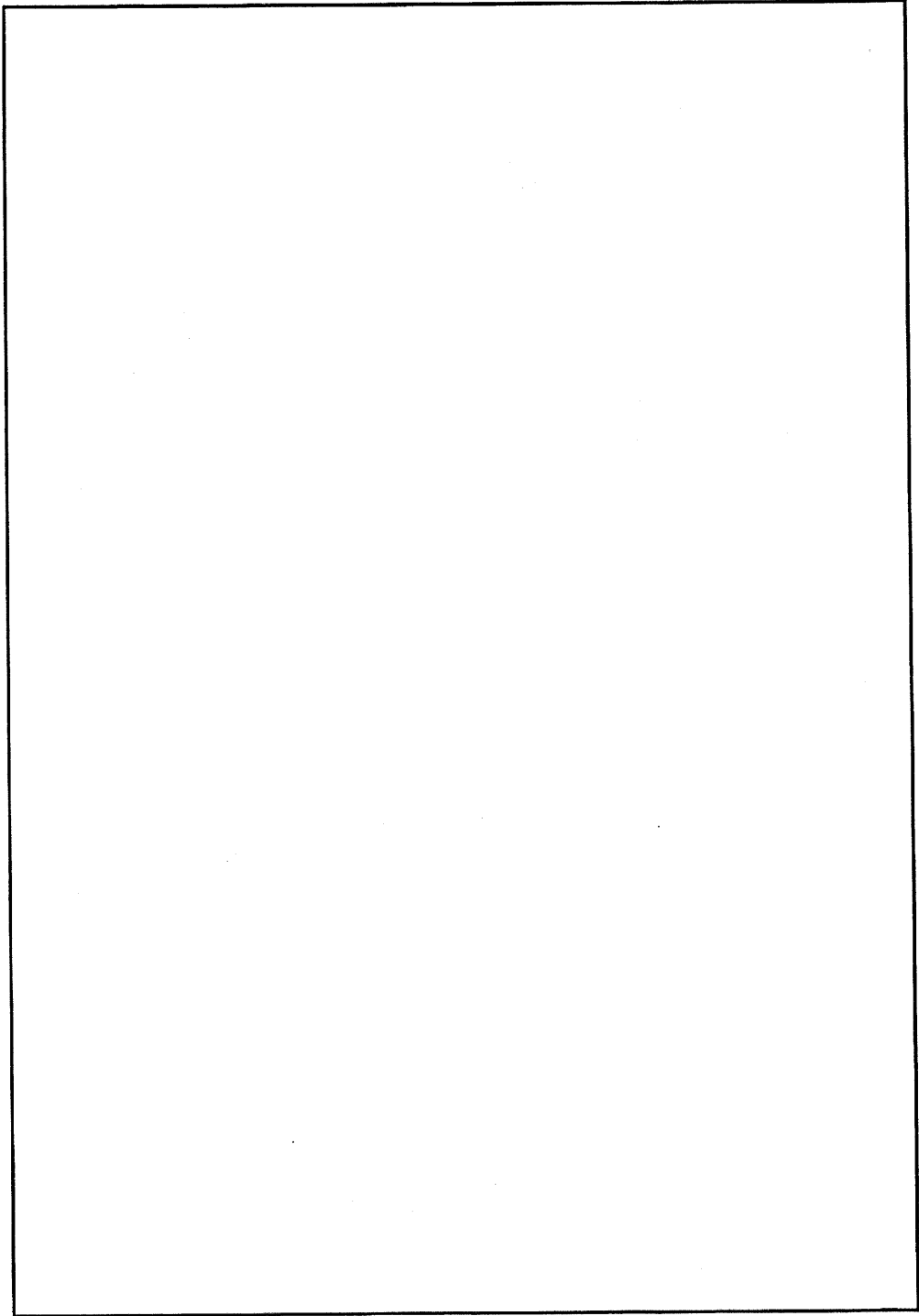


(口)-第A 参2 図 ABAQUS コードの検証例

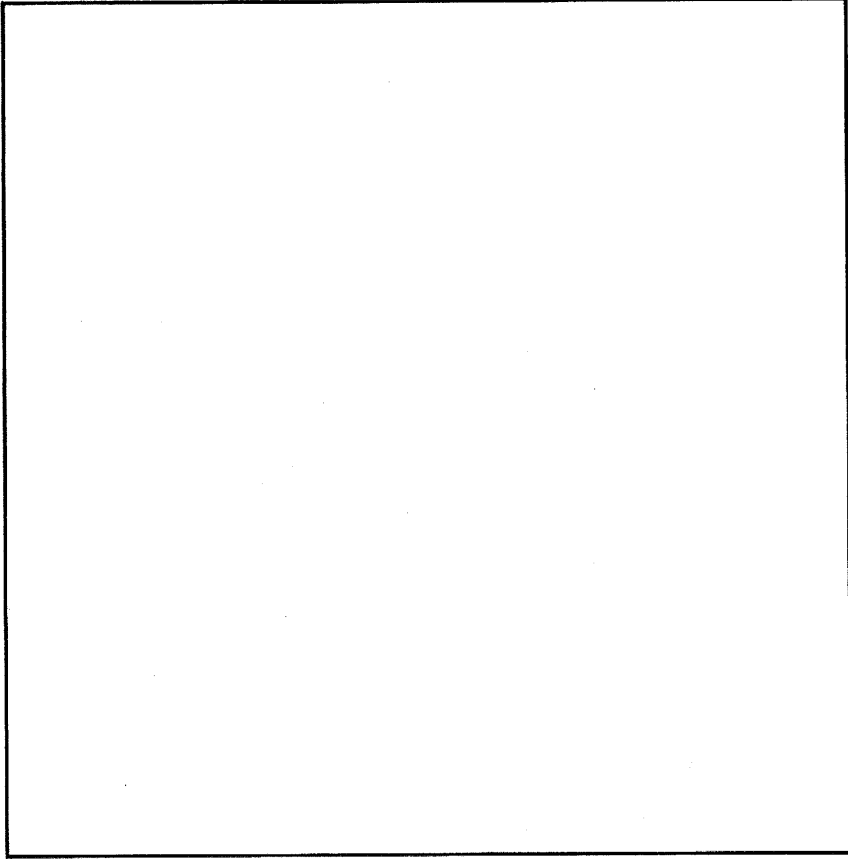
(厚肉円筒の内面に強制変位を与えて塑性大変形させる問題)

A.3 輸送中の車両の振動数域について

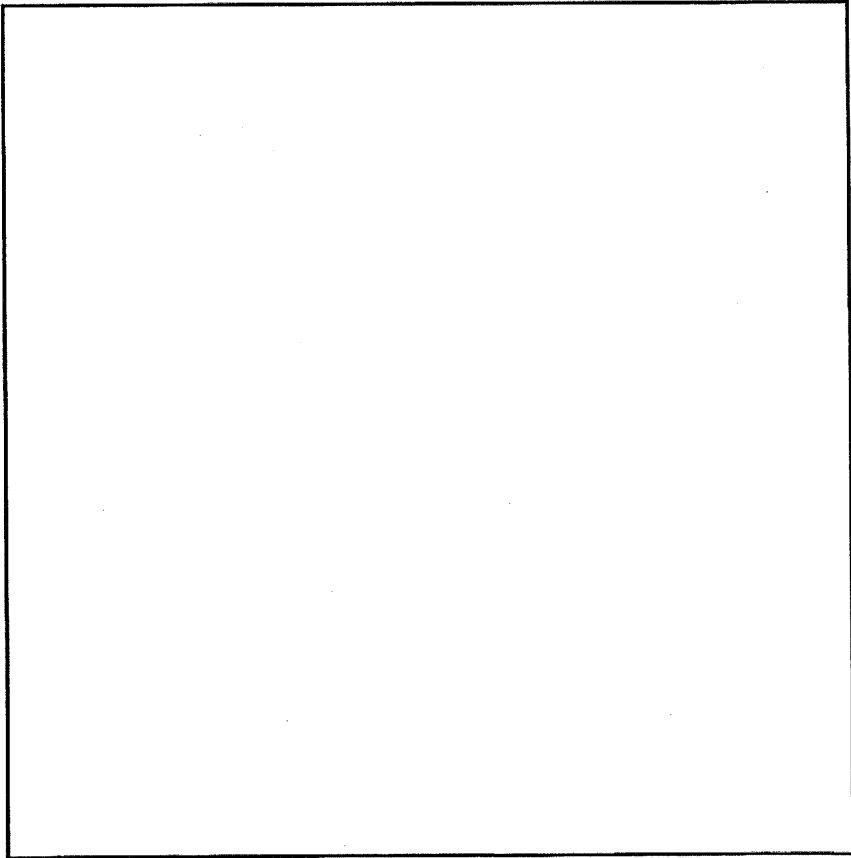
トラックの荷台での各種条件下での振動特性を測定し周波数分析を行った結果を(口)-第 A. 参 3 図から(口)-第 A. 参 5 図に示す。これらの図において、ピークは Hz の振動数領域にあって、10Hz 以上ではレベルが低く、車両の支配的な振動数領域は 10Hz までであることを示している。



(口)-第A.参3図 方向別周波数スペクトル



(口)-第A.参5图 積載重量比別周波数スペクトル



(口)-第A.参4图 道路条件別周波数スペクトル

A.4 低温強度評価について

1. 顧問会内規による評価

輸送物使用材料に対して、輸送物安全技術顧問会内規「輸送物設計温度要件及び低温強度評価の考え方」(以下「内規」という。)に基づき低温特性評価を行った結果を(口)-第A.参1表及び(口)-第A.参2表に示す。内規に別途評価が必要とされる材料を×印で示すが、これらについては次項以降に内規に従った健全性評価結果を示す。

(ロ)-第A. 参1表 静置状態における-40℃でのき裂、破損等の評価

輸送容器の部品	材 料	内規による 判 定 ^{注)}	別 途 評 価
蓋、内筒、底板 バスケット 緩衝体カバープレート バルブ フィン	ステンレス鋼 []	○	-
バスケット格子	ボロン入りステンレス鋼	○	-
外筒	ステンレス鋼 [] 炭素鋼 []	○	-
中間筒	炭素鋼 []	○	-
蓋ボルト	[]	○	-
Oリング	ふっ素ゴム	○	-
トラニオン	析出硬化型ステンレス鋼 (SUS630 H1150)	○	-
ガンマ線遮蔽体	鉛	○	-
伝熱フィン	銅 (C1020P-1/4H)	○	-
中性子遮蔽体	レジン	×	[]℃での圧縮試験結果より強度低下がないことを確認 (参考資料(ロ)章A.4の2.参照)
緩衝体緩衝材	[] []	○	-

注) ○：-40℃でき裂、破損等の生じるおそれがないと判定

×：未判定材料で別途評価必要

(ロ)-第A.参2表 密封境界構成材料及びバスケット材料の-20℃での低温脆性破壊の評価

輸送容器の部品	材 料	内規による判定 ^{注)}	別途評価
蓋、内筒、底板 バスケット バルブ	ステンレス鋼 ()	○	-
バスケット格子	ボロン入りステンレス鋼	×	低温脆化がない材料であることを材料試験より確認 ((ロ) 章 A. 10. 2 参照)
蓋ボルト	()	×	()℃において脆性破面率が 0%であることを確認 (参考資料 (ロ) 章 A. 4 の 3. 参照)
Oリング	ふっ素ゴム	○	-

注) ○ : -20℃で低温脆性破壊しないと判定

× : 未判定材料で別途評価必要

2. 中性子遮蔽材レジンの低温圧縮試験結果

(1) 試験要領

□℃から□の温度範囲において中性子遮蔽材の静的圧縮試験を行い、応力-ひずみ関係を求めた。

a. 材料仕様

① 密度 : $1.67 \pm 0.05 \text{g/cm}^3$

② 組成

・ H 密度 : 0.0959g/cm^3 以上

・ B_4C 密度 : 0.0194g/cm^3 以上

b. 試験片形状

直径 : □ mm

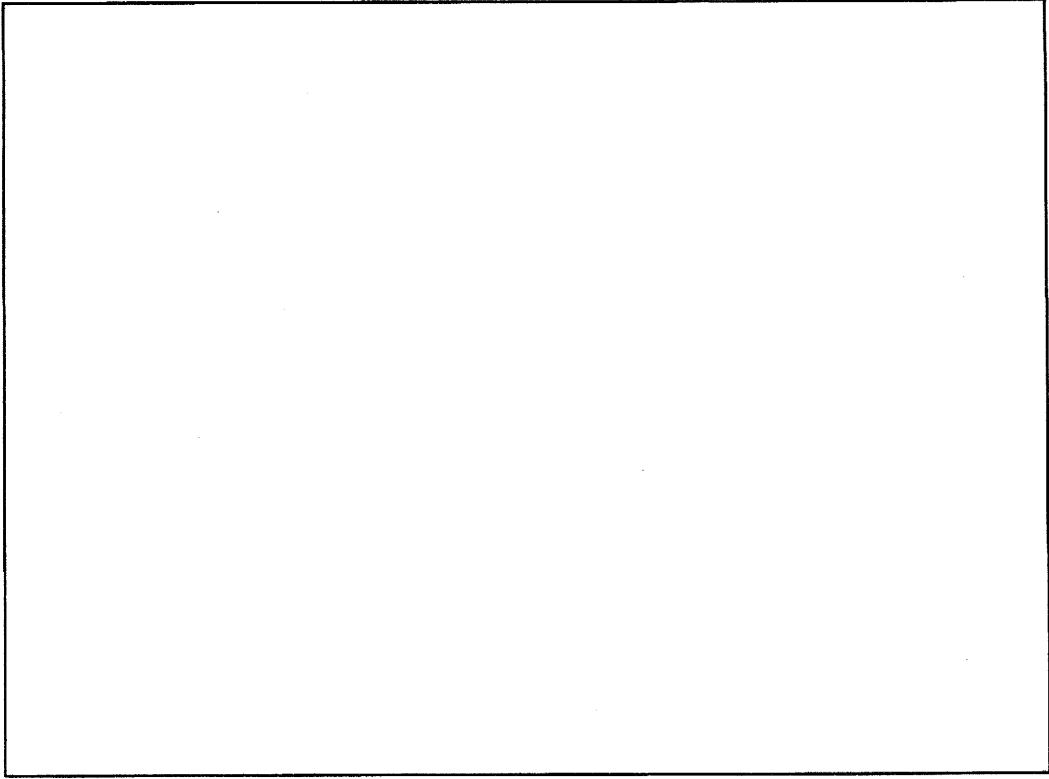
高さ : □ mm

c. 試験温度

(2) 圧縮試験結果

求めた応力-ひずみ関係線図を(口)-第A.参6図に示す。(口)-第A.参6図に示すように、□℃においては強度は常温より上昇し、圧潰時のひずみ量は常温と同じ程度であった。また、低温下においた試験前の試験片には割れ等が観察されなかった。

以上の結果より、レジンは-40℃の低温になっても劣化等により機械的性質が損なわれることはないことが確認された。



(口)-第A. 参6 図 レジンの静的圧縮試験結果

3. 蓋ボルト材 のシャルピー衝撃試験結果

(1) 試験要領

a. 材料

(棒材) (添付-1)

b. 試験片

JIS Z 2202 4号試験片

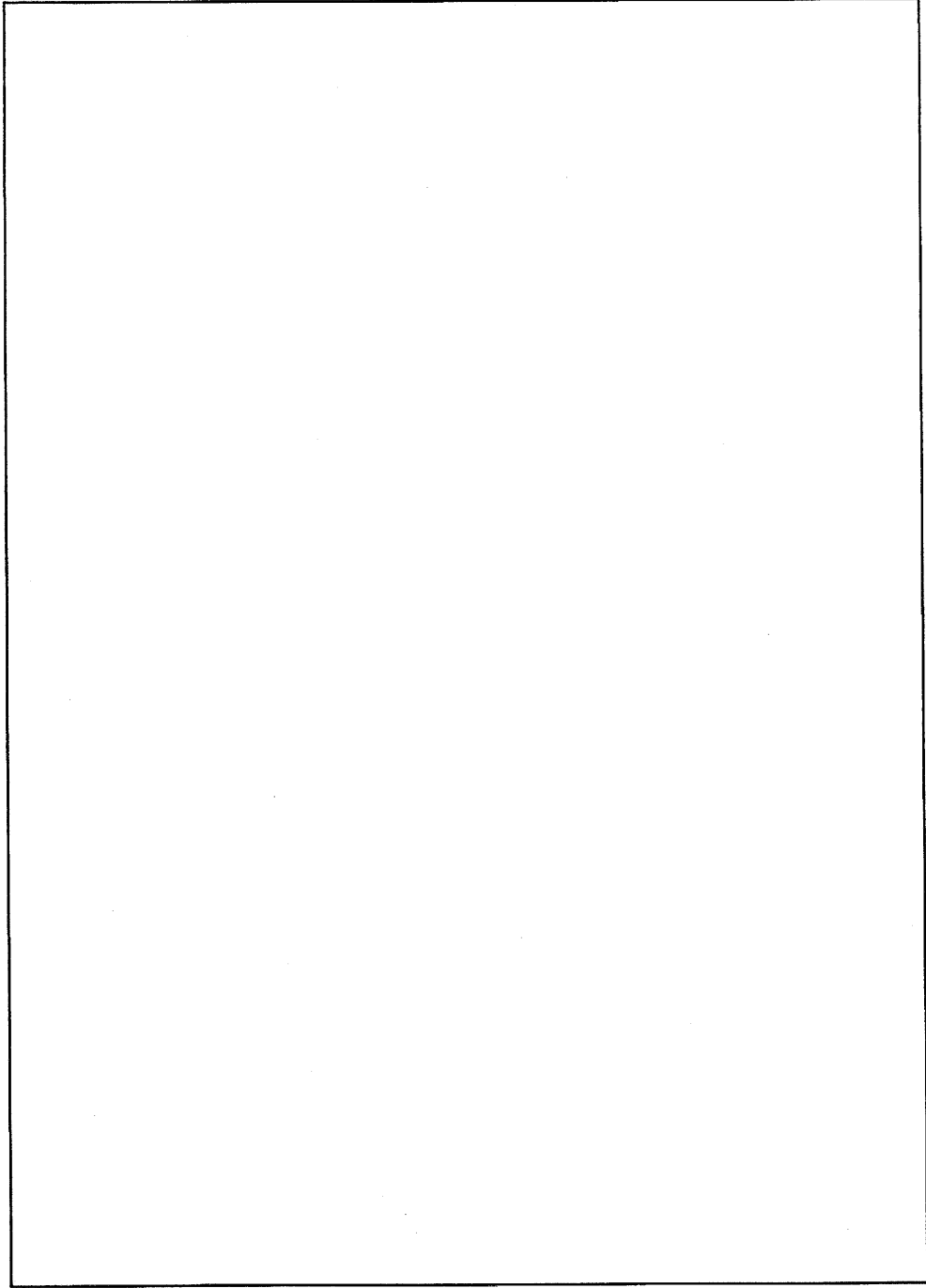
c. 試験温度

℃～℃の温度範囲で℃ごと

(2) 試験結果

衝撃吸収エネルギーの結果を(口)-第A.参3表及び(口)-第A.参7図に、脆性破面率の結果を(口)-第A.参4表及び(口)-第A.参8図に示す。(口)-第A.参8図において脆性破面率は℃において0%であり、-20℃において本材料は脆性破壊をおこすことはない。

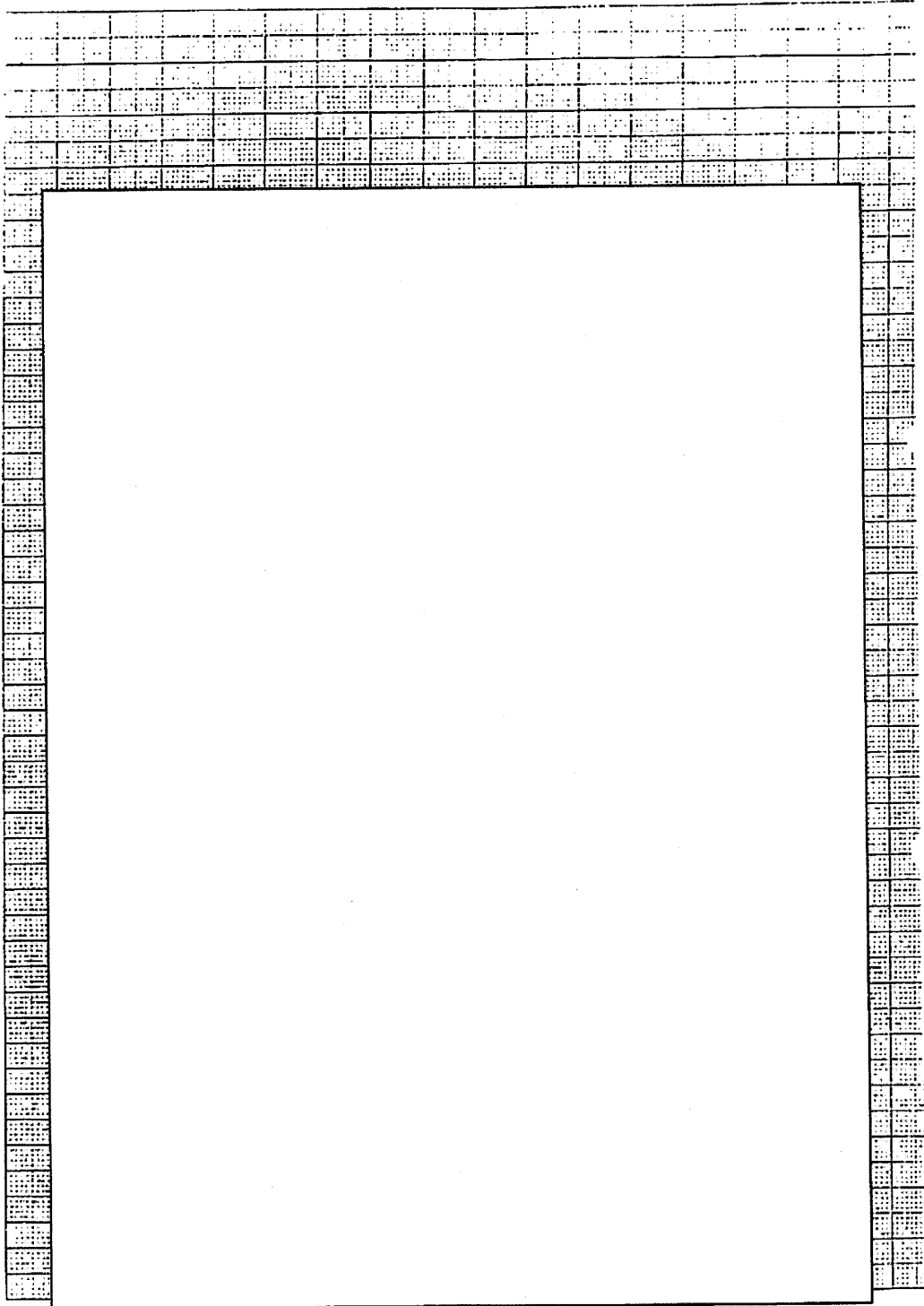
添付-1 ボルト材 供試体材料のミルシート



(口)-第A. 参3表 ボルト材 [] の衝撃吸収エネルギー値

(単位: Kgf·m)

温 度	1	2	3	平 均

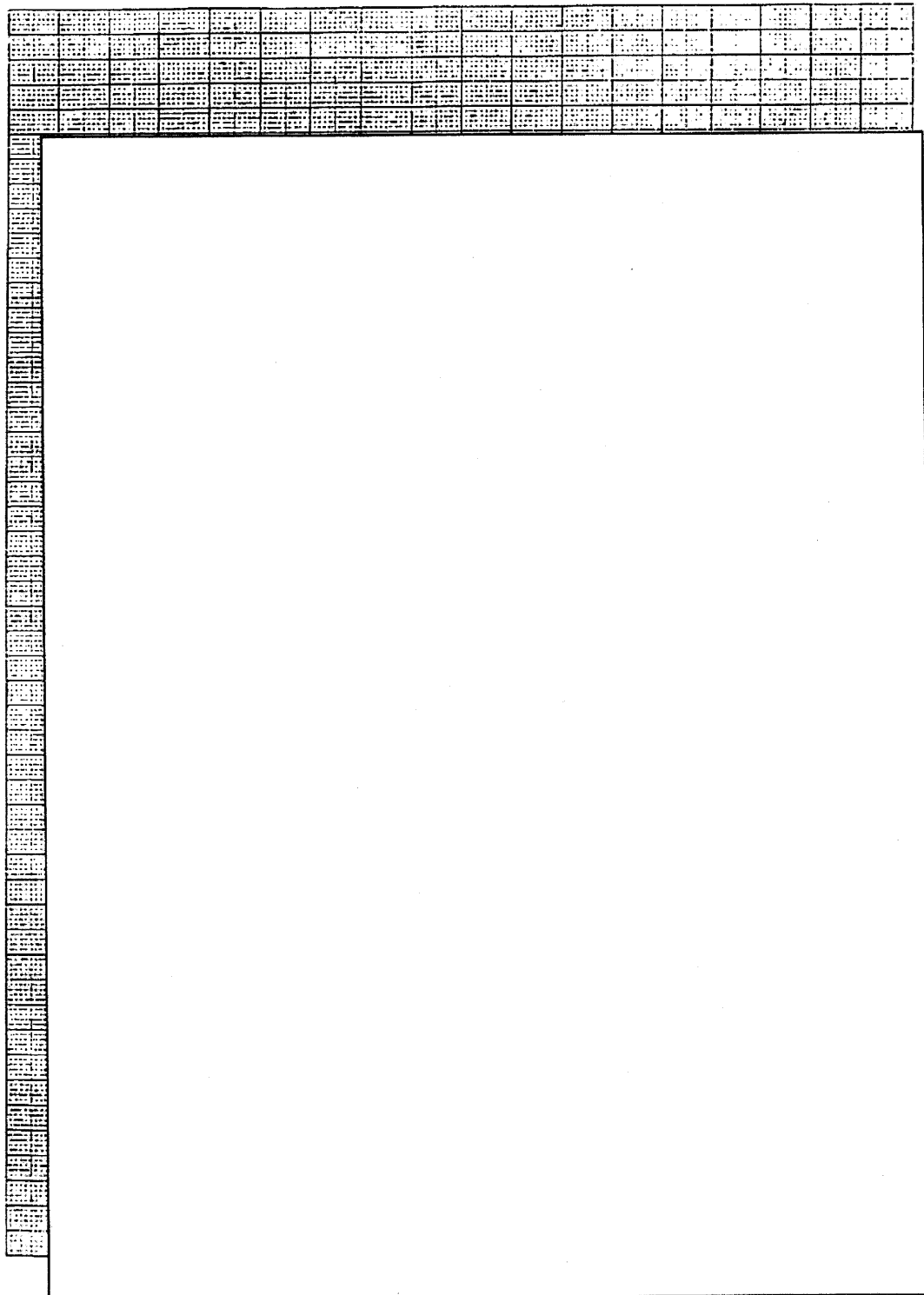


(口)-第A 参7 図 ボルト材 () の吸収エネルギーギ一遷移曲線

(口)-第A.参4表 ボルト材 の脆性破面率

(単位：%)

温 度	1	2	3	平 均



(口)-第A.参8 図 ポルト材 (口) の脆性破面率遷移曲線

A.5 余裕率が小さい構造解析結果の補足説明について

1. 概要

余裕率が小さい構造解析評価結果について、基準値、荷重条件、解析手法等の設定に安全余裕をどのように考慮されているかを説明し、これらを見直した場合の現実的な安全余裕は十分あることを示す。

(口)-第A.参5表に本核燃料輸送物(以下「輸送物」という。)の余裕率が0.1以下の部位の構造解析結果と安全側の仮定を示す。

(口)-第A.参5表 余裕率が小さい部位の評価結果の内容

輸送物	余裕率	部位	試験条件	安全側の仮定の説明	
				基準値	評価手法/モデル
NFT-14P 型	0.08	内筒	一般の試験条件の底部垂直落下(一次+二次)	-	内筒内圧、収納物の重量、評価温度及び慣性力の設定において安全側に設定していることを示す。
	0.06		特別の試験条件の頭部 9m 垂直落下	-	燃料重量、バスケット重量、内筒内水重量及び自重の全てが [] のみに作用する安全側の評価を行っている。ここでは現実的に荷重を受け持つ [] の強度も考慮して安全余裕が大きいことを示す。
	0.10	蓋ボルト	特別の試験条件の熱的試験	-	内筒内圧の設定において安全側に設定していることを示す。

2. 構造解析評価結果の見直し

(1) 内筒

底部 0.3m 垂直落下時には、内筒内圧、収納物の重量、評価温度及び慣性力の設定において安全側に設定している。

一般の試験条件における内筒内圧は(ロ)章 B. 4. 4 に示すように 1.39MPaG に対して、構造解析では安全側に 1.70MPaG を作用させており、22%高い内筒内圧を設定している。

収納物の重量は、燃料集合体重量が重いタイプ 6 の燃料重量に、最も重い内筒内水重量を加算しており、1%重い重量を設定している。

内筒の最高温度 177℃を繰り上げた評価温度 180℃で評価を行っているが、評価断面位置の温度は 170℃であり、10℃高めに評価温度が設定されている。これにより、170℃に対応する評価基準値は、397℃から 401℃となり、1%評価基準値が高い。

一般の試験条件における衝撃加速度は、CRUSH コードを用いて評価されている。この評価では、落下試験で得られた加速度を包絡するよう解析値に 1.2 倍を乗じていることから衝撃加速度についても安全側に設定されている。

(2)

頭部 9m 垂直落下時に燃料、バスケット及び内筒内水の慣性力の全てが の 本の のみに作用すると仮定した安全側の評価を行っている。ここでは、 の形状からバスケット及び内筒内水による荷重は 及び が支持し、燃料による荷重は が支持する、より現実的な評価を行う。

頭部垂直落下時に 本の (× × 本、 × × 本) には燃料、バスケット及び内筒内水の慣性力が作用し、圧縮応力 σ_c (MPa) が生じる。

$$\sigma_c = \sigma_{c1} + \sigma_{c2}$$

$$\sigma_{c1} = \frac{W_1 \cdot Gv}{A_1}$$

$$\sigma_{c2} = \frac{W_2 \cdot Gv}{A_2}$$

ただし、

W_1 : 燃料重量 (10, 200kg)

W_2 : バスケット重量 (6, 700kg) + 内筒内水重量 (3, 900kg) + 自重 (730kg)

Gv : 頭部垂直落下時の衝撃加速度 (m/s^2)

A_1 : の全断面積 (mm^2)

A_2 : 及び の全断面積 (mm^2)

ここで、

W_1 : 10, 200kg

W_2 : $6700 + 3900 + 730 = 1.13 \times 10^4$ kg

Gv : $895 m/s^2$

$A_1 =$

$=$ mm^2

$A_2 =$

$=$ mm^2

したがって、

$$\sigma_{c1} = \frac{10200 \times 895}{\text{}} = \text{}$$

$$\sigma_{c2} = \frac{1.13 \times 10^4 \times 895}{\text{}} = \text{}$$

$$\sigma_c = \text{} + \text{} = 126 \text{MPa}$$

170℃におけるステンレス鋼の降伏応力 S_y は 151MPa であるので、 は塑性変形しない。

また、余裕率 MS は S_y に対して、

$$MS = \frac{S_y}{\sigma_c} - 1 = \frac{151}{126} - 1$$
$$= 0.20$$

となり、十分安全余裕がある値となる。

(3) 蓋ボルト

特別の試験条件の熱的試験時には、内筒内圧の設定において安全側に設定している。

特別の試験条件の熱的試験時における内筒内圧は(口)章 B. 5. 4 に示すように 4. 97MPaG に対して、構造解析では安全側に 5. 20MPaG を作用させており、4. 6%高い内筒内圧を設定している。

A.6 高燃焼度燃料の健全性について

被覆管材料ジルカロイの照射後機械試験データから、中性子照射量による被覆管の機械的性質の変化を検討すると、以下ようになる。

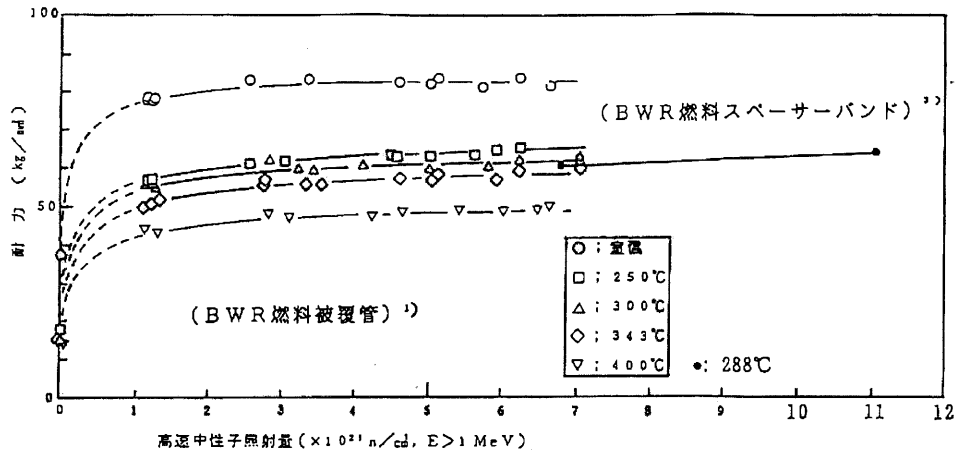
- ① 本輸送物に収納する BWR 燃料の最高燃焼度 MWD/T は高速中性子照射量約 n/cm^2 に、また、PWR 燃料の最高燃焼度 MWD/T は高速中性子照射量約 n/cm^2 に相当する。
- ② 炉の中で実際に照射した被覆管材料ジルカロイの中性子照射量と降伏応力、引張強さ、破断伸び及び硬さの関係を (口)-第 A 参 9 図から (口)-第 A 参 15 図に示す^{2), 3), 4)}。図からわかるように、降伏応力、引張強さ及び伸びともに約 $1 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ の中性子照射量でほぼ飽和し、それ以上の照射を受けても大きな変化はない。また、硬さについても 1 サイクルから 2 サイクル照射でほぼ変化はなくなる。
- ③ 安全解析書では、0.3m 落下試験時における燃料被覆管の強度評価基準値として降伏応力を採用し、発生応力は降伏応力より小さく、健全性が維持されることを確認している。この降伏応力値としては 1×10^{21} 又は $1.5 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ の低い照射量に対する高温での降伏応力値を採用しており、(口)-第 A 参 9 図及び(口)-第 A 参 12 図に示すようにこれより高い照射量及び低温側に対しては降伏応力値が高くなるので安全側の設定となっている。
- ④ ジルカロイの靱性値の低下に影響する要素に、水素含有量と中性子照射量がある。靱性値を表す指標の一つとして破断伸び量があるが、実際に原子炉の中で長時間照射された燃料被覆管の破断伸びの試験結果が (口)-第 A 参 11 図及び(口)-第 A 参 14 図に示されている。これらの図において、燃焼度に伴い中性子照射量が高く炉内時間が長くなっても、低燃焼度のものと破断伸び量に大きな変化はない。したがって、高燃焼度になっても、破壊靱性値は低下しないと考えられる。なお、BWR 燃料被覆管の水素含有量は運転日数が増加しても飽和し、燃料被覆管の健全性が問題となるような量になっていないことが確認されている (添付-2)²⁾。また、燃焼度 70,000MWD/T までの BWR 燃料被覆管の水素含有量が最大でも 400ppm 程度であり、強度は維持されることが示されている⁵⁾。PWR 燃料被覆管に対しても、燃焼度 55,000MWD/T までの PWR 燃料被覆管の水素含有量が最大でも 400ppm 程度であり、強度は維持されることが示されている⁵⁾。

また、中性子照射量の増加は靱性値にほとんど影響しないと言われている⁶⁾。

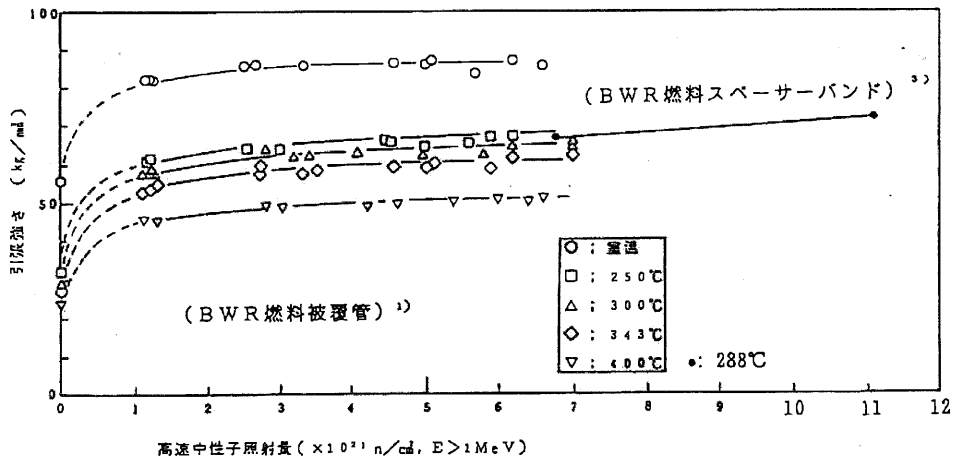
例えば、(口)-第 A 参 16 図に示すように 0.5 及び 1.0 ft-lb となる衝撃吸収エネルギーの温

度の上昇量(同じ衝撃吸収エネルギーを呈する未照射材との温度差)を見ると、照射量が高くなっても温度の上昇はほとんどなく、照射量の影響は見られない⁷⁾。

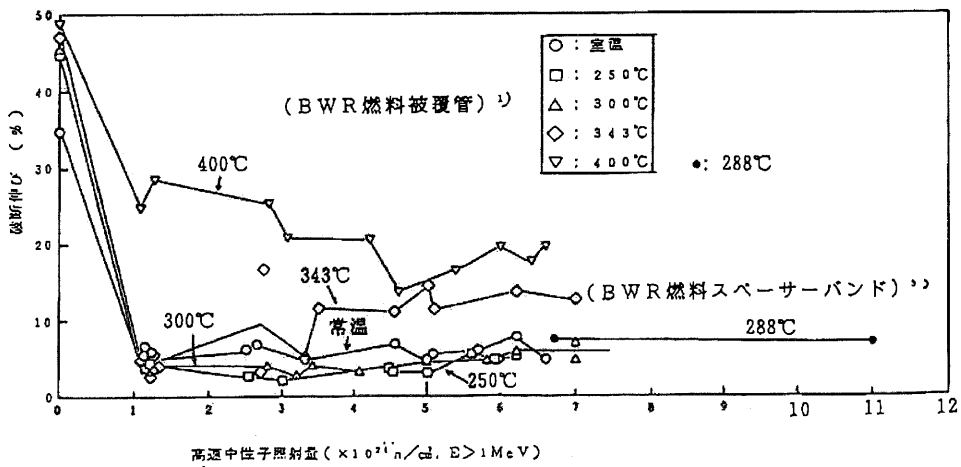
以上の試験データより、高燃焼度化に伴い中性子照射量が高くなっても被覆管材料の機械的特性は従来の燃焼度燃料と大きな相違は見られないと考えられる。



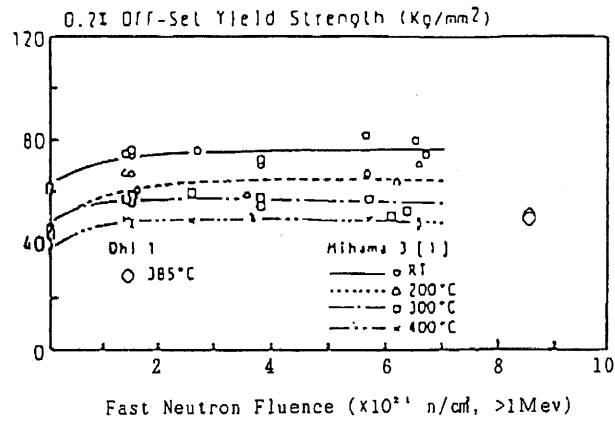
(ロ)-第A. 参9 図 ジルカロイの耐力の中性子照射量に対する変化(BWR)



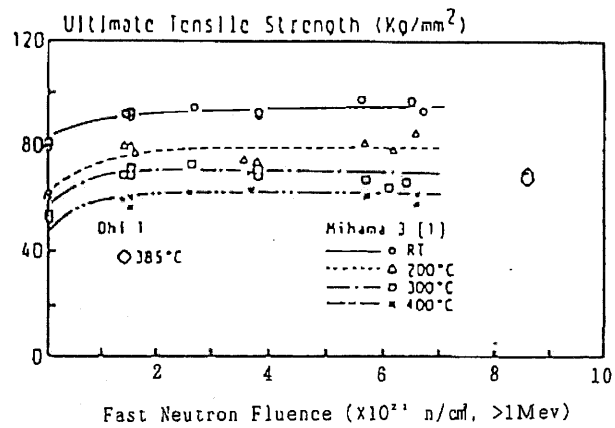
(ロ)-第A. 参10 図 ジルカロイの引張強さの中性子照射量に対する変化(BWR)



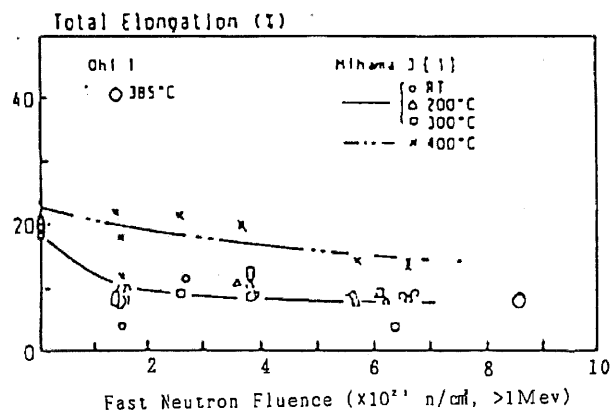
(ロ)-第A. 参11 図 ジルカロイの破断伸びの中性子照射量に対する変化(BWR)



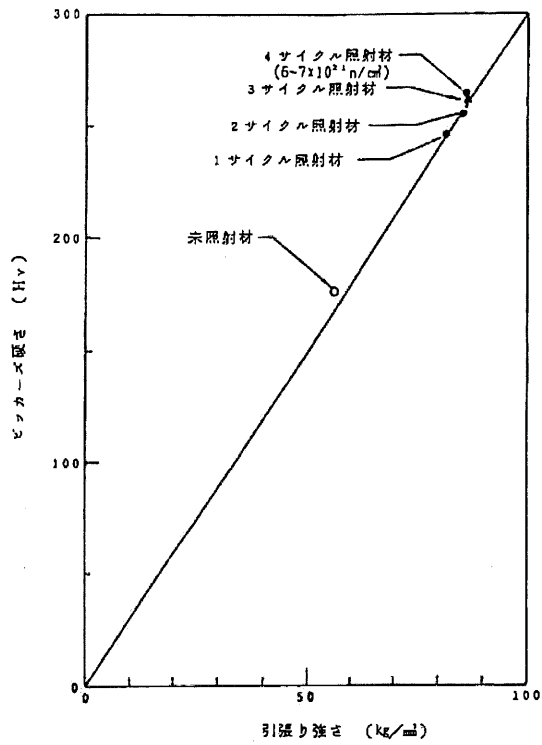
(口)-第A. 参 12 図 ジルカロイの耐力の中性子照射量に対する変化 (PWR)³⁾



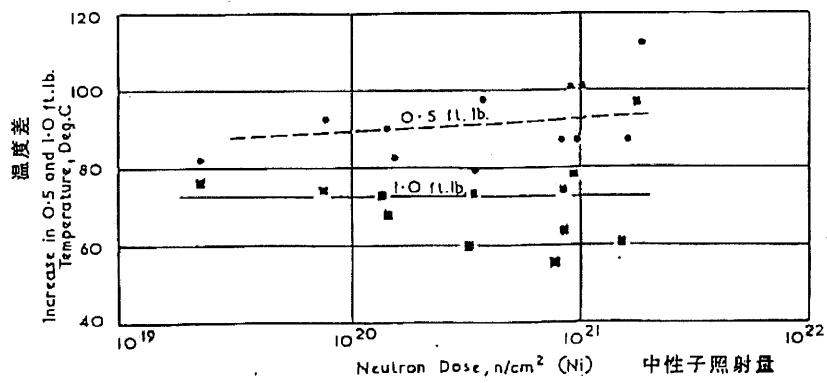
(口)-第A. 参 13 図 ジルカロイの引張強さの中性子照射量に対する変化 (PWR)³⁾



(口)-第A. 参 14 図 ジルカロイの破断伸びの中性子照射量に対する変化 (PWR)³⁾



(口)-第A. 参 15 図 引張強さと硬さの関係(室温)²⁾



(口)-第A. 参 16 図 水素化ジルコニウムにおける衝撃吸収エネルギー0.5と
1.0ft-lb レベル温度に対する中性子照射量の影響⁷⁾

特集 !!



沸騰水型原子炉燃料集合体の 信頼性実証試験

Proving Test on Reliability for BWR Fuel Assemblies

(1986年 12月23日 受理)

三島 良績^{*1}, 大久保 忠恒^{*2}, 大石 政夫^{*3}, 青木 利昌^{*3},
二見 常夫^{*4}, 北村 信行^{*4}, 藤林 徹^{*5}, 小泉 成実^{*5,†},
野俣 輝満^{*5}, 津久井 一茂^{*5}, 永井 将之^{*5}, 松島 安義^{*5}, 大内 淳弘^{*5}

I. 緒 言

軽水炉によるわが国の原子力発電は、今日その大要を占めており、昭和45年に日本原子力発電㈱の敦賀炉が稼働して以来、沸騰水型原子炉(BWR)と加圧水型原子炉(PWR)の2種の発電炉が用いられてきている。原子力発電所で使用される燃料集合体にはわが国で軽水炉燃料の使用が開始された40年代後期において、燃料要素(燃料棒ともいわれている)の曲り、偏平化、局部水素化、ペレットの焼きしまり、ペレット・被覆管相互作用等による燃料の損傷が見られた。しかし、燃料の国産化の進行に伴って、燃料製造方法の改善と品質管理の強化に加えて原子炉運転上の対策がとられてからは、これらの不具合は48~49年を境として急減するに至り、今日では、わが国の燃料要素の破損率は諸外国のそれと比較して最も低い値となっている。

燃料集合体の信頼性実証試験は、これらの努力により向上した軽水炉燃料集合体の健全性に対する信頼度を確認する目的で51年度に開始された。本報はBWR燃料集合体について、その設計、製造、照射に至る過程を追跡して照射後試験の結果を検討することにより、総合的に健全性の解析・評価を行なったものである。

I. 試験の目的と経緯

BWR燃料集合体が高い信頼性を有していることは現在までの使用実績に示されているが、さらに原子炉の中で実際に照射した燃料集合体を調べ、燃料設計で使用している照射挙動データの妥当性あるいは想定している設計余裕などを確認することにより、総合的な信頼性が実証できる。

実証試験は、燃料集合体の信頼性を製造段階から照射段階、さらに詳細な照射後試験から得られる一貫したデータにより実証することを目的として計画したものである。第1表に試験の工程を示す。試験の対象としたモニタリング燃料集合体は、東京電力㈱福島第一原子力発電所3号機(以下、「福島第一・3号機」という、80万kWe級BWR)の第1回取替燃料から無作為に選定した10体である。燃料集合体は51年に製造され、翌52年福島第一・3号機に装荷して通常の運転条件下で最大4サイクル照射された。この間、燃料集合体について、照射前の特性把握を目的とした製造時試験および出力などの運転データ採取を目的とした照射中試験を実施した。照射後試験は、各照射サイクル終了後取り出した1体または2体の燃料集合体、全サイクル総計7体について54年から60年にかけて実施された。

II. 試験の内容

1. モニタリング燃料集合体

モニタリング燃料集合体は8×8型燃料集合体であり、㈱東芝が福島第一・3号機の第1回取替燃料用に設計したものである。燃料集合体の構造を第1図に、

^{*1} 東京大学名誉教授 (Professor Emeritus, Univ. of Tokyo)

^{*2} 上智大学 (Sophia Univ.)

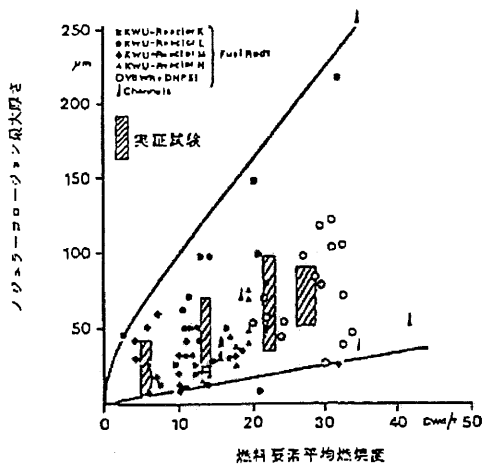
^{*3} (財)原子力工学試験センター (Nucl. Power Eng. Test Center)

^{*4} 東京電力㈱ (Tokyo Elec. Power Co.)

^{*5} ㈱東芝 (Toshiba Corp.)

^{*6} 日本核燃料開発㈱ (Nippon Nucl. Fuel Dev. Co.)

† 現在、日本核燃料開発㈱



第10図 ノジュラーコローション最大厚さの燃焼度変化

に、逆の傾向を示している。ノジュラーコローション最大厚さは、燃焼度の0.6乗に比例しているが、Stehle⁽⁸⁾は燃焼度の0.7乗に比例することを報告している。こ

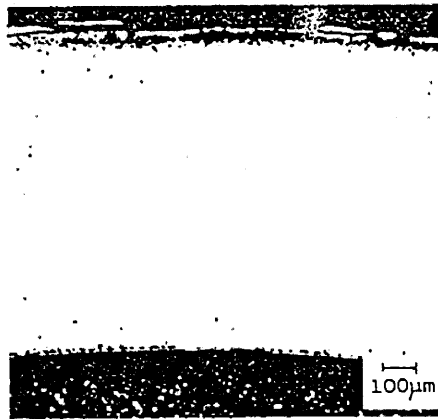
のように最大厚さは絶対値が異なるものの、いずれも燃焼度の0.6~0.7乗に比例し、燃焼度に対して飽和する傾向を示している。ノジュラーコローションのデータとしてこのほか、SGHWR⁽⁹⁾、敦賀発電所第1号機⁽¹⁰⁾の報告があるが、観察された最大厚さはいずれも100 μm 前後であり第10図のデータに一致しており、全体的に飽和する傾向を示している。

(4) 被覆管の水素吸収

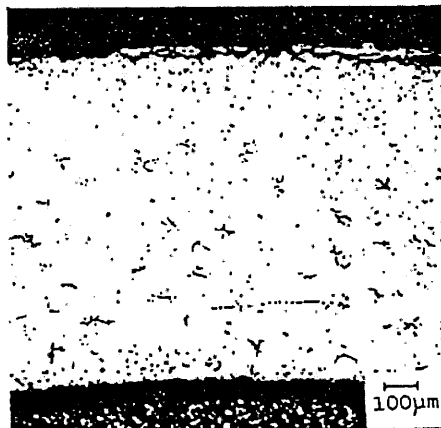
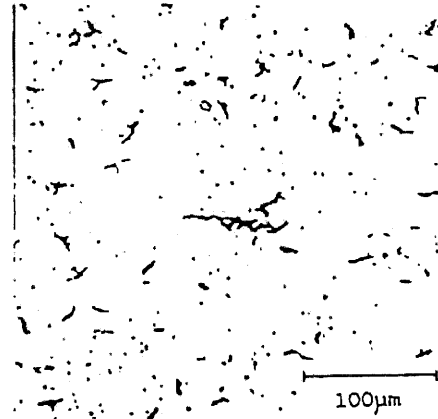
Zr合金は水による酸化の際生成する水素の一部を吸収する。水素吸収量が多くなるとマトリックス中に水素化物を形成し、水素脆化が生ずる可能性がある。このため、被覆管部分の水素化物金相試験および被覆管金属中の水素等のガス分析を行い水素吸収について評価した。

(1) 水素化物金相試験

水素化物金相写真の1例を写真4に示す。これは4サイクル照射した被覆管の状態を示したものであるが、1~3サイクル照射した被覆管もほぼ同様の状態



試料 1



試料 2

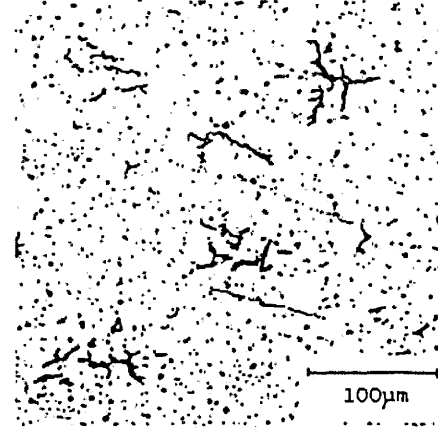


写真4 被覆管横断面水素化物の金相写真

であった。写真4のように材料のロットにより水素化物の析出の仕方が若干異なっているが、大きな差異はない。4サイクル照射した試料について水素化物方向係数(F_n 値)を測定した結果、照射前は0.14~0.21であったのに対し、照射後のデータは0.09~0.35と範囲が広がっている。ただし、照射後の F_n 値は写真4のような状態で測定したものであり、測定誤差も大きいと思われる。

水素化物が析出すると材料の脆化をもたらす。Marshall⁽¹¹⁾は結晶方位による影響の程度を調べ、 F_n 値が0.35以下では水素化物の影響を受けにくいことを報告している。実証試験で得た水素濃度は、後述のように、いずれも70 ppm以下と低く、また運転時には固溶しており、水素化物として析出している室温条件下でも強度および延性への影響は小さいと考えられる。

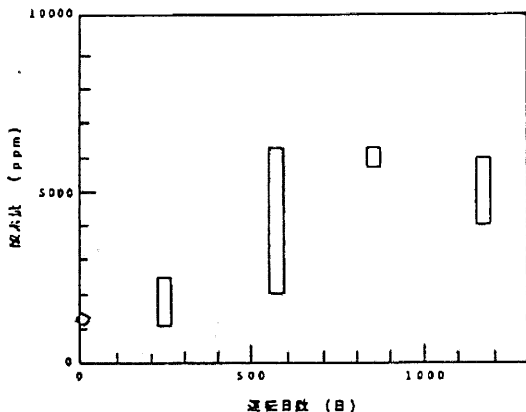
(2) 金属中ガス分析

金属中ガス分析では被覆管を長さ5 mmのリング状

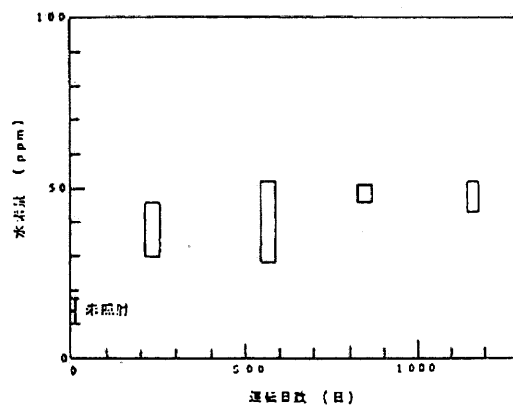
試料に切り出し、さらに、これを縦に6分割し対面の各2試料を用いて酸素量、水素量およびチタニウム量を測定した。試料は酸化膜を付けたままの状態では不活性ガス溶解法により測定した。酸素量を第11図(a)に、水素量を第11図(b)に運転日数の関数として示す。また、第12図に酸素量と水素量との関係を示す。酸素濃度は照射とともに増加するが、7,000 ppm程度で飽和する傾向を示している。これらのデータより酸素増加がすべて外面酸化によるものと仮定して水素吸収率を推定すると、1サイクル照射した被覆管のデータを除き、すべての水素吸収率は10%以下である。

(5). まとめ

(1) 健全性： 燃料集合体から引き抜いたモニタリング燃料要素について外観観察、超音波探傷試験、渦電流探傷試験などを行い健全性を評価した結果、いずれの燃料要素も健全であることを確認した。

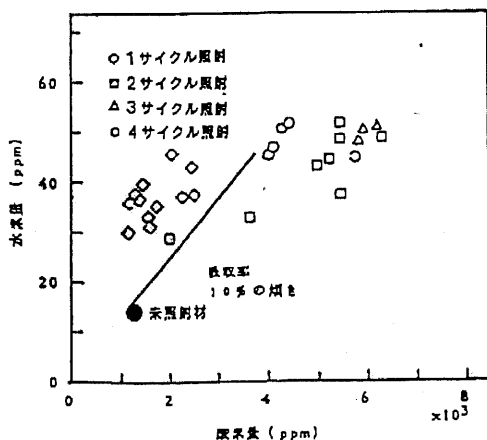


(a) 酸素量



(b) 水素量

第11図(a),(b) 被覆管の酸素量と水素量の変化



第12図 被覆管中の水素量：酸素量

(2) 寸法変化： 燃料要素について長さ、外径の変化を評価した。いずれも代表的な BWR 燃料の挙動を示していた。燃料要素の長さは燃焼度とともに増加するが、伸びは BWR 燃料の文献データと良く一致した。

燃料要素の外径は酸化膜、残留クラッドの影響で微増あるいはほとんど変化していない。しかしながら酸化膜の影響を考慮すると若干クリープ変形していることになる。

(3) 表面酸化： 燃料要素に見られたノジュラーコーションは BWR 燃料の典型的な酸化形態であり、その厚さは文献データの範囲内にあった。燃料要素の被覆管について水素量を測定した結果、水素含有量は4サイクル照射した被覆管でも70 ppm以下で、水素吸収率は10%以下であった。この値は使用温度である300

A.7 参考文献

- 1) 幾島毅, 浅田和雄, “放射性物質輸送容器の衝突解析用簡易計算コードの開発, (I) 緩衝体付き輸送容器衝突計算コード CRUSH”, 日本原子力学会誌 Vol. 33, No.4, (1991).
- 2) 三島良績他, “沸騰水型原子炉燃料集合体の信頼性実証試験”, 日本原子力学会誌, vol. 29 No. 2, (1987).
- 3) S. Doi et al., “High Burnup Experience of PWR Fuel in Japan”, ANS/ENS International Topical Meeting on LWR Fuel Performance, April 21-24, 1991, Avignon France, (1991).
- 4) J. A. Baumgartner, “BWR Fuel Bundle Extended Burnup Program, Technical Progress Report, January 1983-December 1983.”, General Electric Report GEAP-30643, DOE/ET/34031-17, (1984).
- 5) (社)日本原子力学会, “日本原子力学会標準 使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査標準: 2010”, (2010).
- 6) S. H. Bush, “Irradiation Effects in Cladding and Structural Materials”, Rowman & Littlefield, Inc., (1965).
- 7) B. Watkins, et al., “Embrittlement of ZircAloy-2 Pressure tubes”, Applications-Related Phenomena in Zirconium and its Alloys, ASTM STP 458, American Society for Testing and Materials, p.141-159, (1969).

B.1 「ABAQUS」コードの説明

ABAQUS コードについては、熱解析機能も含めて参考資料(口)章 A.2 に示している。

B.2 容器内水の放射線分解による圧力上昇について

輸送容器内のような密閉した槽内での水の放射線分解により発生するガスの水中濃度はある飽和値に達する。ここでは、NFT-14P 型及び NFT-38B 型を例として、実輸送後に輸送容器内の水素ガス濃度を測定した結果¹⁾及び NFT 型輸送物の評価を以下に示す。

1. NFT 型輸送容器内の水素ガス濃度測定結果

(1) 測定対象輸送容器

測定対象輸送容器は、PWR 燃料輸送用の NFT-14P 型及び BWR 燃料用の NFT-38B 型とし、各 1 基の測定を行った。収納物は、漏えいのない健全な使用済燃料であり、ガンマ線照射線量はそれぞれ 640Gy/h 及び 844Gy/h である(中性子による照射線量は全照射線量の 10^{-5} 程度であるため評価の上で無視した。)

(2) 輸送容器内ガスのサンプリング

NFT 型輸送容器の内部ガスは、蓋膨張室内とキャビティ内に分かれているため、それぞれからガスのサンプリングを行った。サンプリングは、NFT 型輸送容器からの使用済燃料の取出し作業の過程で行った。

まず、輸送容器縦起こし状態にて、蓋のバルブを通して、蓋膨張室内のガスをサンプリングタンクに回収し、検知器にガスを吸入して測定した(図-第 B. 参 1 図)。

次に、輸送容器縦起こし状態にて、輸送容器をプールに入水し、蓋を取り外す際に、輸送容器にガス捕集フードを取り付け、サンプリングラインを通してサンプリングバッグに回収し、サンプリングバッグから検知器にキャビティ内のガスを吸入して測定した(図-第 B. 参 2 図)。

(3) 水素ガス濃度測定

水素濃度の測定は、ガス検知管により行った。実測結果を(図-第 B. 参 1 表)に示す。NFT-14P 型及び NFT-38B 型の水素濃度測定値は、いずれも発火下限の水素濃度 4%を下回る結果であった。

(ロ)-第B. 参1表 水素ガス濃度測定結果¹⁾

輸送物	水素ガス濃度	
	蓋膨張室	キャビティ
NFT-14P 型	0.50%	1.24%
NFT-38B 型	0.14%	0.43%

2. NFT 型輸送容器内の水素ガス濃度評価

(1) 水素ガス濃度を測定した NFT 型輸送容器に対する評価

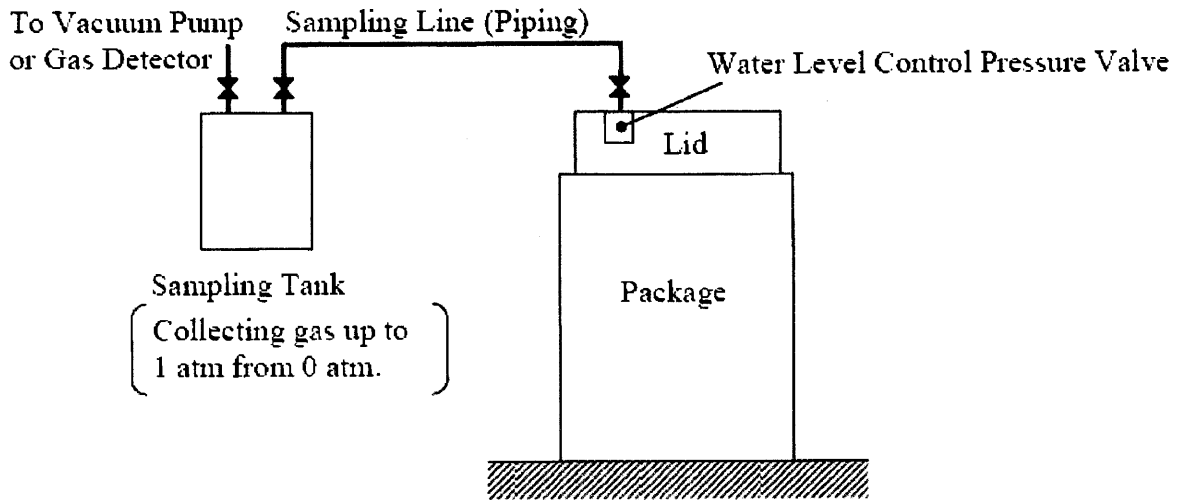
NFT 型輸送容器内の水素ガス濃度の評価は、類似の環境下における水の放射線分解による水素定常濃度評価結果をベースに、水中定常濃度が照射線量の平方根に比例するとして概算計算を行っている¹⁾。その評価結果を(ロ)-第B. 参2表に示す。NFT-14P 型では計算値が実験値を若干下回っており、NFT-38B 型では計算値が実験値を上回っているが、比較的良好一致を示している。

(ロ)-第B. 参2表 水素ガス濃度評価結果¹⁾

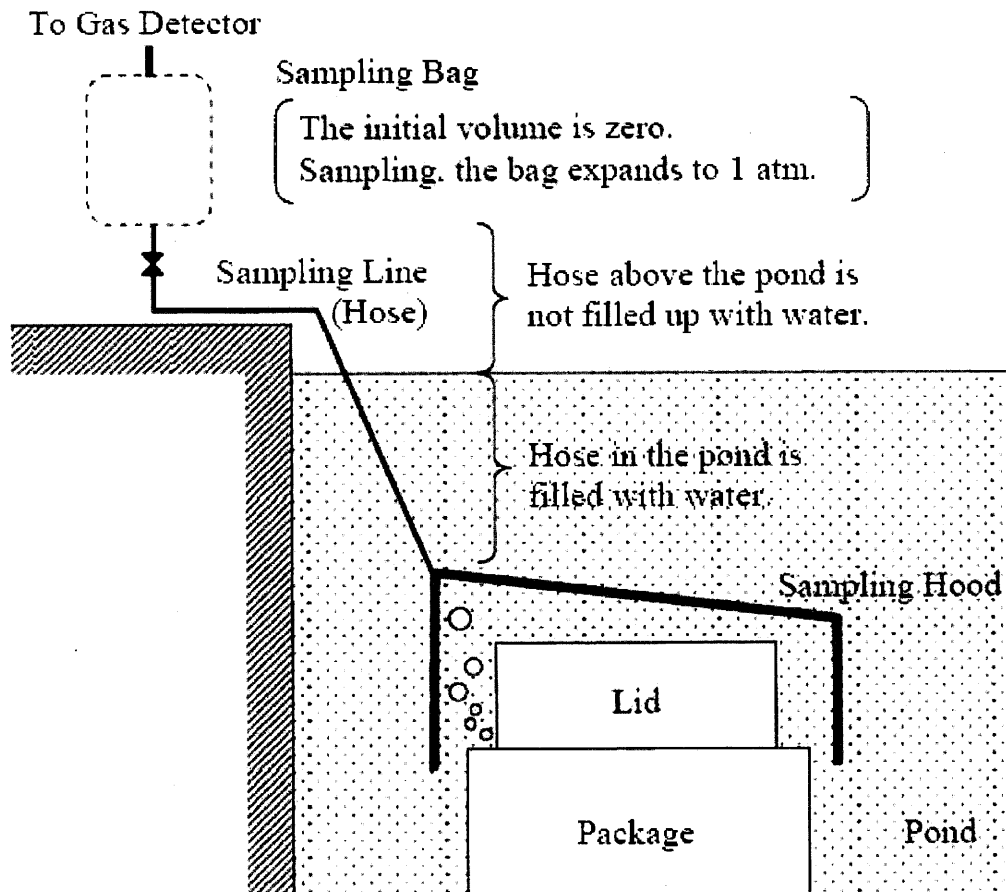
輸送物	ガンマ線照射線量	水素ガス濃度
NFT-14P 型	640Gy/h	0.99%
NFT-38B 型	844Gy/h	1.14%

(2) NFT 型輸送物における線源条件に対する評価

NFT 型輸送物において、最もガンマ線源強度が大きい NFT-14P 型においても、ガンマ線照射線量は約 Gy/s であるが、仮にガンマ線照射線量を保守側に 1Gy/s (3,600Gy/h) とし、(1) で示した値を同様に水中定常濃度が照射線量の平方根に比例するとして補正すると、水素ガス濃度は 2.4% となる。この値は、水素ガスの爆発下限である空気との混合比 4% に対して十分小さい値であり、容器内圧の上昇としても無視できるものである。



(口)-第B. 参1図 蓋膨張室内ガスのサンプリング方法¹⁾



(口)-第B. 参2図 輸送容器キャビティ内ガスのサンプリング方法¹⁾

B.3 中性子遮蔽材(レジン)の設計基準値について

中性子遮蔽材(レジン)の設計基準値を設定するに当たり、その考え方を以下に述べる。

設定した設計基準値：170℃

レジンの中性子遮蔽材としての耐熱性については、熱分解、燃焼等の化学反応及び重量の変化を確認することによって評価できると考えられる。

レジン熱分解、燃焼等の化学反応は、熱の発生あるいは吸収を伴う反応であり、一般的に行われている示差熱分析によって確認することができる。また、レジン重量の変化については、一般的に行われている熱重量分析によって確認することができる。

したがって、レジン設計基準値の設定に当たっては、当該レジンの「熱重量分析」及び「示差熱分析」に基づく検討を行った。

また、参考として、同一レジンを用いている米国 NAC-STC 貯蔵・輸送容器の調査に基づき、貯蔵要件等当該レジンが高温条件下に連続して置かれるような場合に評価の指標となる連続・高温条件下における遮蔽材の変化(減損)についても検討を行った。特に、米国で設定しているレジン設計基準値である 170℃について評価を行った。

1. 熱重量分析・示差熱分析に基づくレジン設計基準値の検討

当該レジンを用いた、国内における耐熱性に関する熱重量分析(TG)及び示差熱分析(DTA)による加熱試験データによると、当該レジン以下のように 200℃程度までは有意な状態変化あるいは質量減損を発生しないとの結果が得られている。

- (1) 示差熱分析によると、200℃程度までは当該レジンに有意な吸・発熱反応は認められないとの結果が得られているので、この温度までは有意な燃焼、反応等の化学変化及び形態変化は起こらないと考えられる。((口)-第 B. 参 3 図)
- (2) 熱重量分析によると、230℃程度までは有意な質量減損は認められないとの結果が得られている。((口)-第 B. 参 3 図)

2. レジン連続加熱評価試験に基づく設計基準値の検討

絶縁材料の耐熱性評価手法に関する国際規格 (IEC Pub. 216-1) 及びドイツのプラスチックに対する長期耐熱性試験に関する規格 (DIN53 446) に準拠して当該レジンに対し 150℃から 190℃における最長 5,000 時間の連続加熱評価試験を実施した。

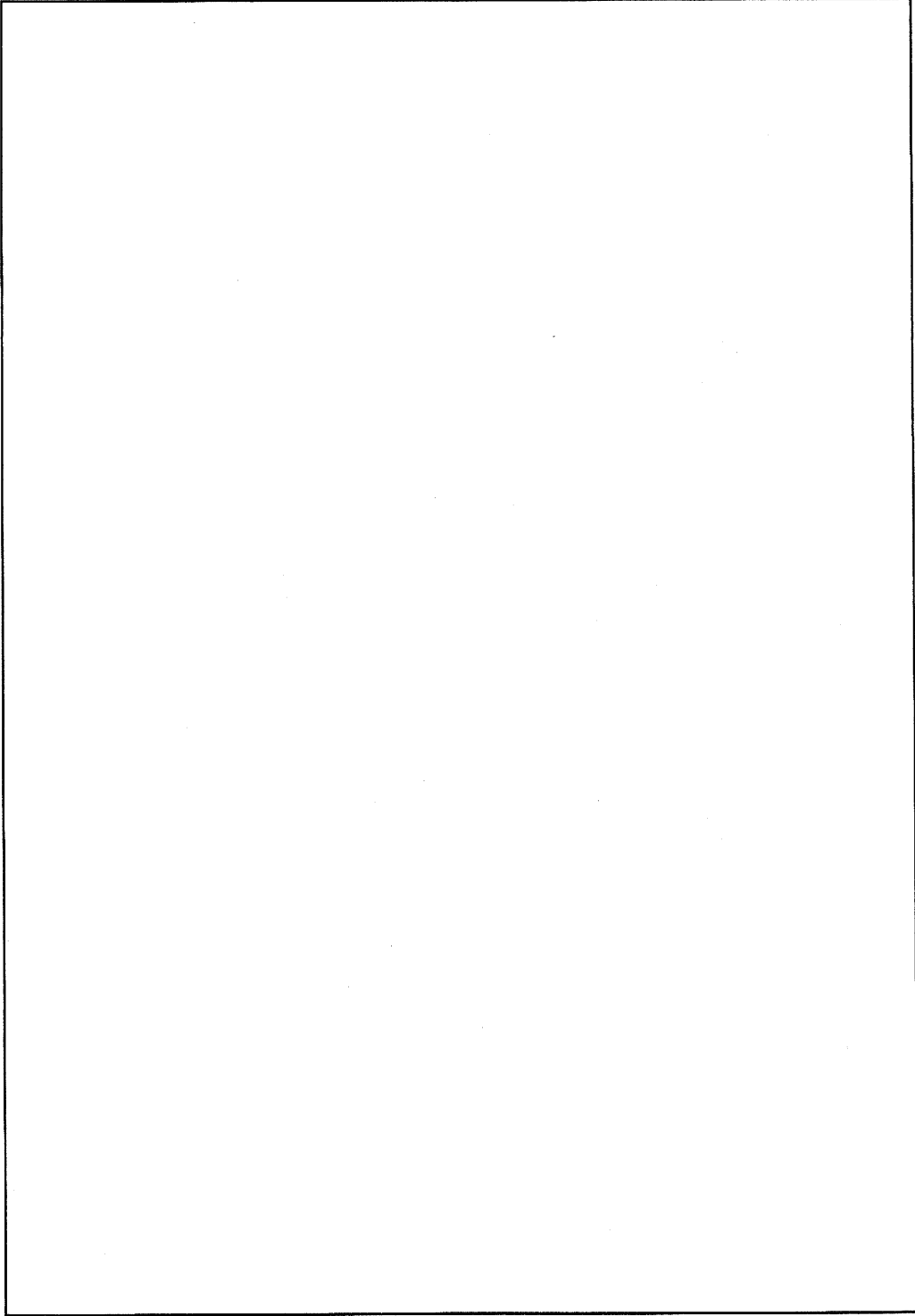
その結果、170℃におけるレジンの質量減損はわずかであること、またその質量減損のほとんどは加熱初期の 1,000 時間までに発生し、その後の質量減損は極めて小さいことを確認した。(添付-2)

さらに、5,000 時間の質量減損データを用いて NFT-14P 型核燃料輸送物の胴中央部・0° 方向 (最上部) のレジン温度分布を考慮した質量減損量を求め、それが 1.4%とごくわずかであることを確認した。(添付-2)

なお、核燃料輸送物の輸送に当たっては、その発送前検査において輸送物表面等の線量等量率を測定するので、遮蔽性能に関する安全性は毎回確認される。

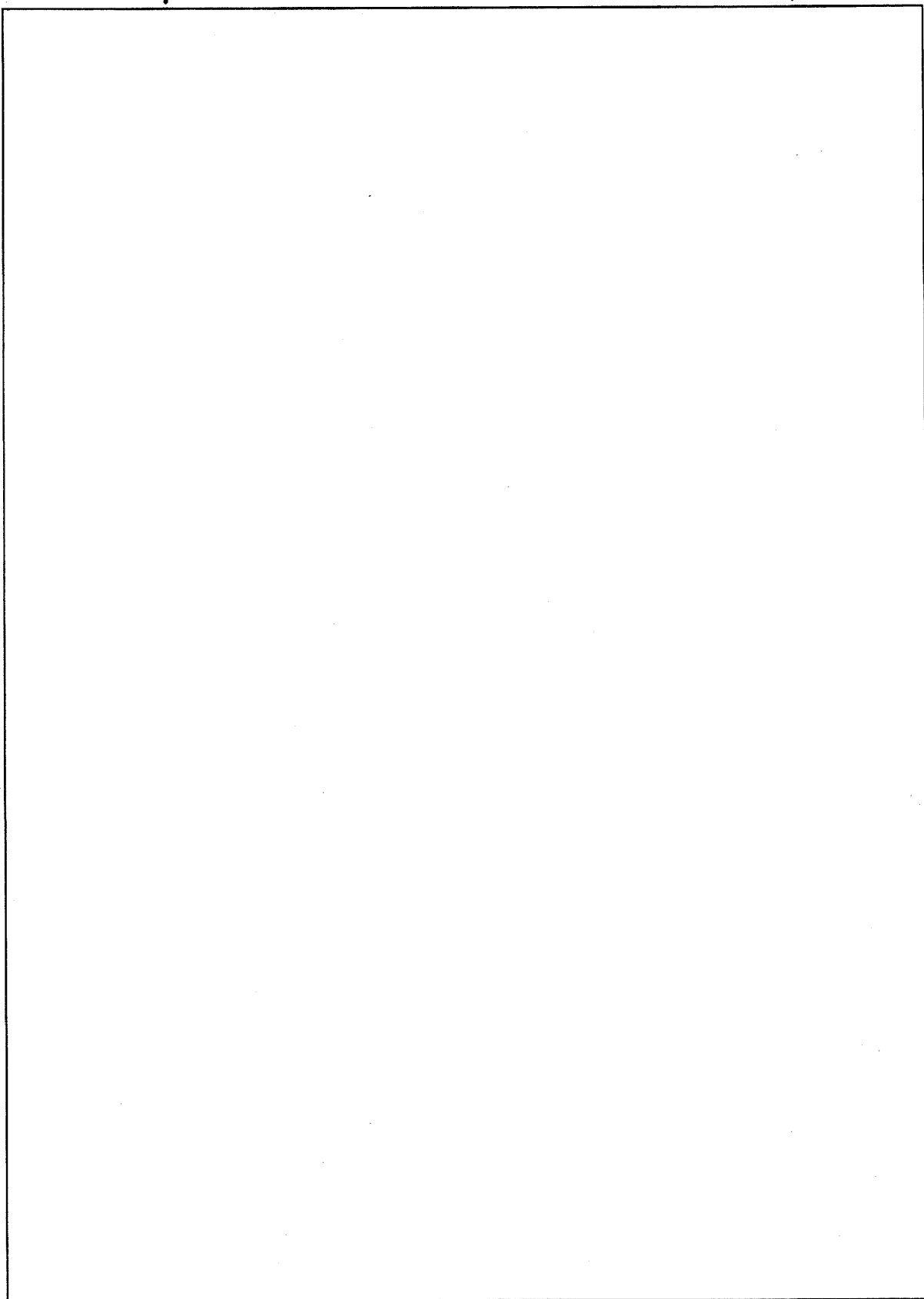
3. まとめ

当該レジンに係る熱重量分析、示差熱分析の結果及び参考として実施した連続加熱評価試験データに基づいた評価により、中性子遮蔽材 (レジン) の設計基準値を 170℃に設定した。



(口)-第B.参3図 当該レジンの熱重量分析(TG)及び示差熱分析(DTA)の結果(三菱社内データ)

添付-1 NFT 型核燃料輸送物に使用されている中性子遮蔽材に係る製造メーカーの技術資料



添付-2 中性子遮蔽材(レジン)の連続加熱評価試験

中性子遮蔽材(レジン)について、参考として実施した当該レジンの連続加熱評価試験について以下に述べる。

1. レジン連続加熱評価試験の内容及び試験結果

(1) レジン連続加熱評価試験の内容

当該レジンに対し、150℃から190℃における最長5,000時間の連続加熱評価試験を実施した。

レジンの加熱条件(温度、時間、試料数等)は実輸送物でのレジン条件をできるだけ模擬していると共に、絶縁材料の耐熱性評価手法に関する国際規格(IEC Pub. 216-1)及びドイツのプラスチックに対する長期耐熱性試験での温度-時間限界の決定方法を定めた規格(DIN53 446)に準拠して決定している。(□)-第B.参3表)

試験用試料は、実際のNFT型核燃料輸送物に鋳形されているレジンとできるだけ同一状態となるように、その成形工程を除き、攪拌、混合、脱泡工程では実機器を用い、実工程と同一工程で製作した。

成形後のレジン試料(6mmφ×60mL)はステンレス製容器に挿入後、容器空間を酸素-窒素混合ガスで置換の後、栓をして密閉状態とした。所定温度で所定時間加熱後の試料は、直示天秤で重量を測定し、質量減損を測定した。試料から放出されたガス成分はガスクロマトグラフ分析装置及びガスクロマトグラフ-質量分析装置を用いて分析した。(□)-第B.参4図及び(□)-第B.参5図にレジン試料及び試料密封用容器の外観を示す。(□)-第B.参6図及び(□)-第B.参7図には、ガスクロマトグラフ分析装置及びガスクロマトグラフ-質量分析装置の外観を示す。

(2) 連続加熱評価試験の結果

連続加熱評価試験結果によると、当該レジンの最長5,000時間の加熱に伴う質量減損は時間の対数(log t)との間で良好な直線関係が成立することが確認されており、5,000時間加熱後の質量減損は150℃で約1.4%、170℃で約2.9%と小さな値となっている。(□)-第B.参8図)

また、質量減損のほとんどは加熱開始後約 1,000 時間までの比較的短期間で発生しており、その後の質量減損は極めて小さいことを確認した。(口)-第 B. 参 9 図)

さらに、当該レジンの連続加熱後の試料雰囲気ガスの成分分析によって、質量減損の要因であるレジンから放出されるガス成分のほとんどは水(水蒸気)であることを確認した。(口)-第 B. 参 10 図)

2. NFT-14P 型核燃料輸送物の温度分布を考慮したレジン質量減損評価

5,000 時間のレジン質量減損データを用いて、NFT-14P 型核燃料輸送物の中性子遮蔽体内温度分布に基づくレジン質量減損量を以下の手法で評価する。

(1) 遮蔽体内温度分布

NFT-14P 型核燃料輸送物の胴中央部・0° 方向(最上部)のレジン内温度分布(輪切り半ピッチモデルによる一般の試験条件下における当該部分の温度分布)の解析結果によると、レジンのほとんどの部分は 150℃ 以下であり、150℃ を超える領域はごく限られた部分である。(口)-第 B. 参 11 図)

(2) 遮蔽体としての質量減損の考え方

NFT-14P 型核燃料輸送物の胴中央部・0° 方向(最上部)のレジン内温度分布を考慮して、当該部分を 10℃ ごとの領域に分割する。次にレジンの連続加熱評価試験結果を基に各温度領域の質量減損を算出し、これを下式に基づき各温度領域の質量減損を温度分布により重み平均して、0° 方向全体の質量減損を求めるものとする。

$$X(\text{平均質量減損量}) = \Sigma (X_n \times L_n) / \Sigma L_n$$

ここで、

L_n : 温度 $t \sim t+10^\circ\text{C}$ の領域のレジン厚さ

X_n : 温度 $t+10^\circ\text{C}$ におけるレジンの質量減損

ΣL_n : レジン厚さ (168mm)

なお、各温度領域に対する質量減損は保守側に次のとおりとする。

レジン温度 $t \sim t+10^{\circ}\text{C}$ の温度領域の質量減損は、温度 $t+10^{\circ}\text{C}$ における質量減損すなわち、例えば $150 \sim 160^{\circ}\text{C}$ の領域では 160°C における質量減損を与えるものとする。

(3) NFT-14P 型核燃料輸送物におけるレジンの質量減損

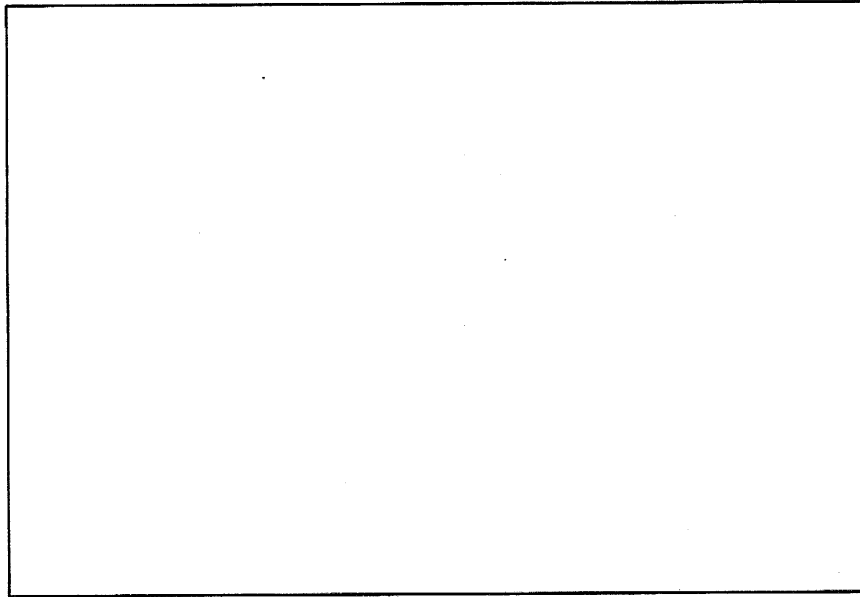
5,000 時間のレジン質量減損データと NFT-14P 型核燃料輸送物の胴中央部・ 0° 方向(最上部)の一般の試験条件下における温度解析結果((口)-第 B. 参 11 図)を基にしたレジン各温度領域の質量減損量を用いて、上記の手法で 0° 方向全体の質量減損量を求めると 1.4%となる。

(ロ) - 第 B. 参 3 表 レジンの連続加熱評価試験における試料加熱条件

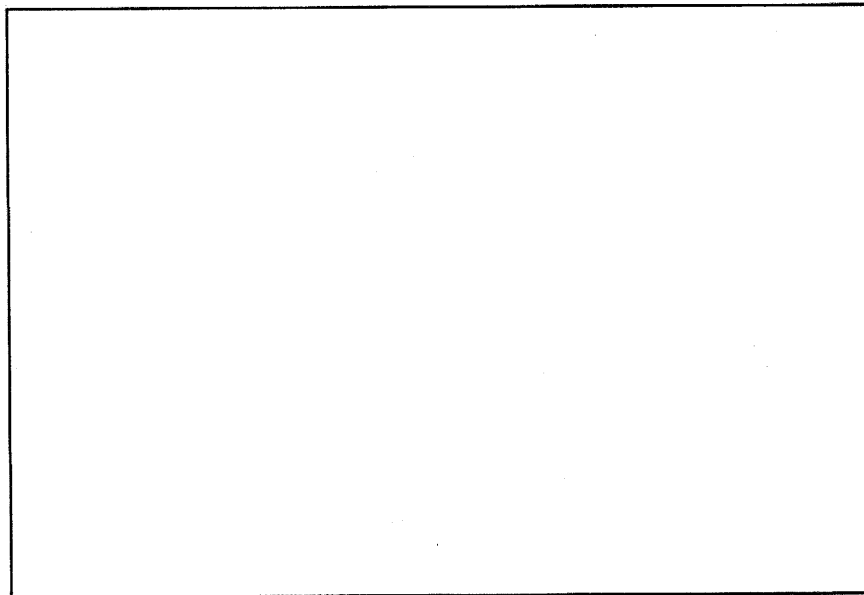
試験条件項目	試験条件	規格に示された試験条件 ^{注1)}	試験条件の規格との比較
試験温度 温度条件数 温度間隔 加熱設定温度	<ul style="list-style-type: none"> ・ 5 温度条件 ・ 10℃ ・ 150, 160, 170, 180, 190℃ ・ 連続加熱 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 少なくとも 3 条件 ・ 10～25℃の間隔 ・ 通常 20℃間隔 (10℃以上とする。)^{注2)} ・ 最低試験温度は寿命 5,000 時間以上の温度を選定 最高試験温度は寿命 100 時間以上となる温度を選定^{注2)} ・ 連続加熱 (または熱サイクル)^{注2)} 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 条件を満足している。 ・ 条件を満足している。 ・ 試験最低、最高温度 (150℃及び 190℃) での寿命は各々 5,000 時間及び 100 時間を十分上回ると予想され規格条件を満足。また使用最高温度は内挿評価可能である。 ・ 連続加熱が時間的に安全側である。
試験時間 加熱時間	<ul style="list-style-type: none"> ・ 100, 200, 500, 1000, 2000, 3600, 5000 時間 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 1, 2, 4 日または 1, 2, 4, 8, 16, 32 週間 (168, 336, 672, 1344, 2688, 5376 時間) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 短時間側のデータを得るため DIN 規格どおりの時間間隔としていないが、時間間隔を倍とする考えに準拠していると共に、時間間隔数は規格を上回っている。 ・ 規格より最長加熱時間が 7%短いものの、時間間隔数は規格を上回っているので耐熱グラフ作成上不都合はない。
試料条件 試料寸法 試験数 試料雰囲気	<ul style="list-style-type: none"> ・ 6mm φ × 60mm ・ 5 試料 ・ 密閉条件 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 120mm × 15mm × 10mm (衝撃靱性、ブリネル硬度評価用試料と同一寸法) ・ 測定数 5 ・ 製品の使用環境を考慮した雰囲気条件設定^{注2)} 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 質量減損評価上は本試験用試料の比表面積が大きいので安全側と考えられる。 ・ 条件を満足している。 ・ 試料容器空隙部分に含まれる酸素量を実輸送容器相当量としている。

注 1) ドイツのプラスチックに対する耐熱性試験での温度-時間限界の決定方法を定めた規格 (DIN53 446) の内容

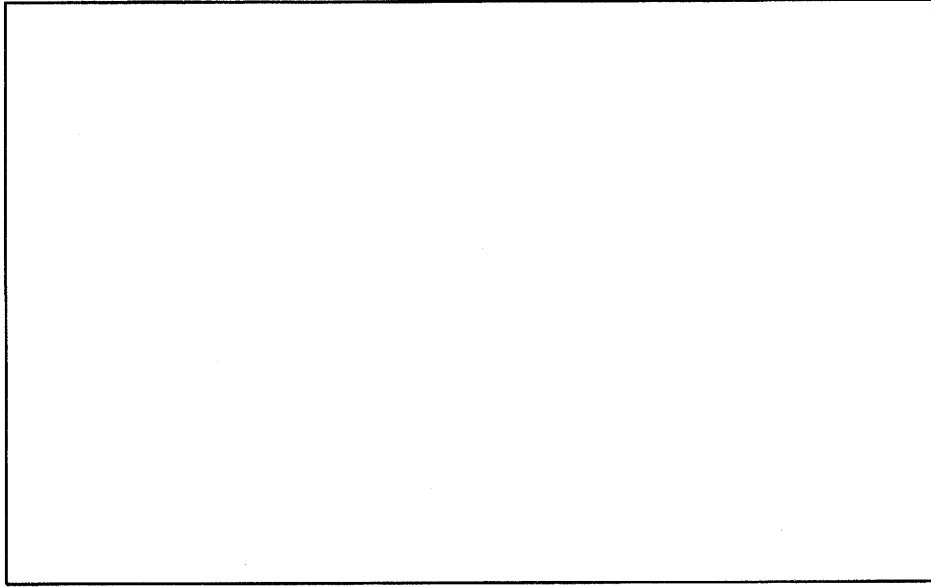
注 2) 絶縁材料の耐熱性評価手法に関する国際規格 IEC Pub. 216-1 (Thermal Evaluation and Classification of Electrical Insulation) の内容



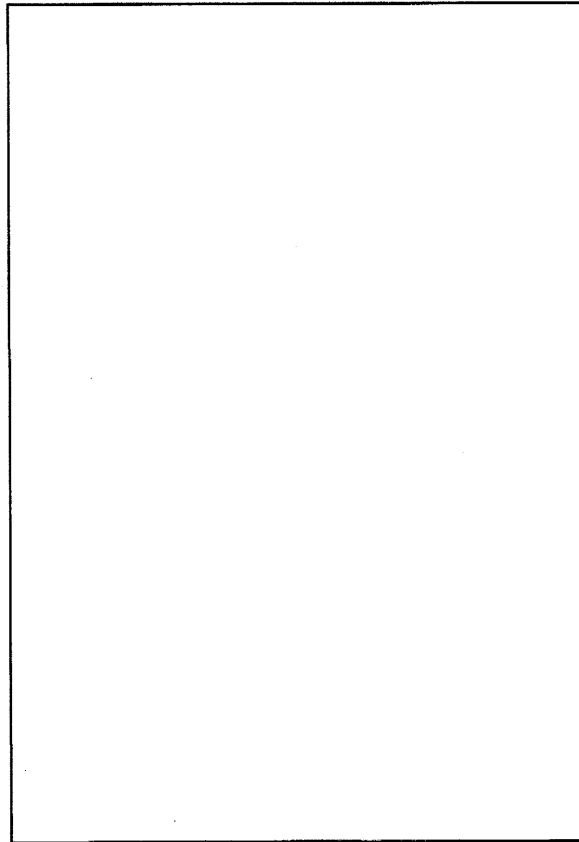
(ロ)-第 B. 参 4 図 連続加熱評価試験用レジン試料の外観



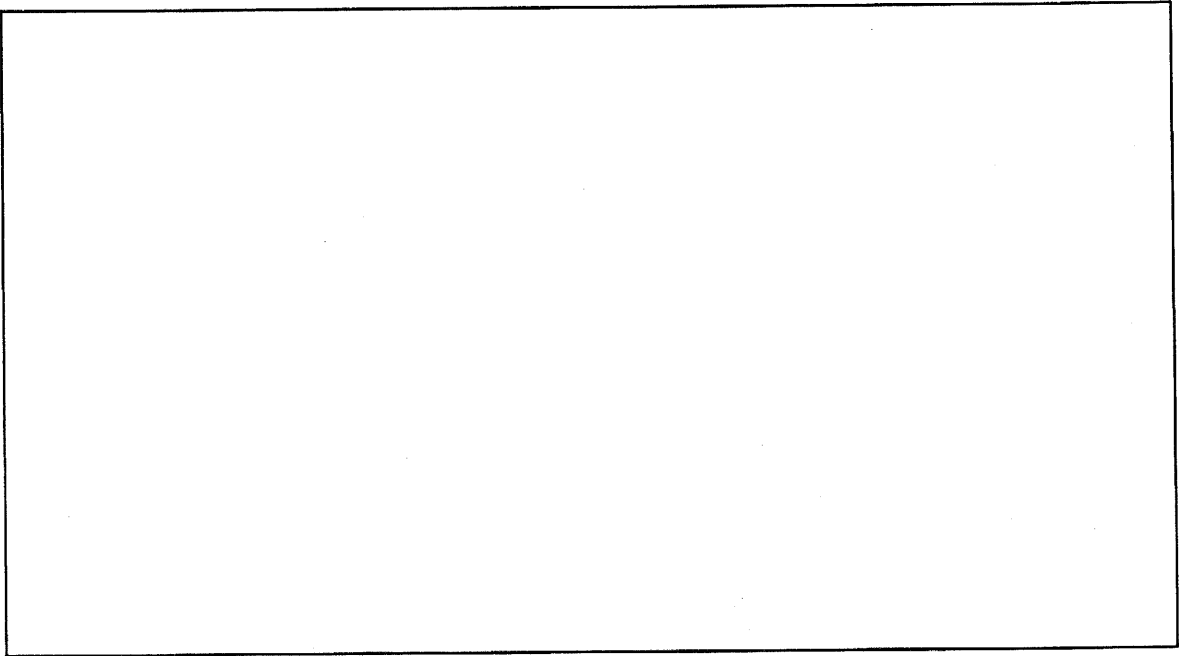
(ロ)-第 B. 参 5 図 レジン試料容器の外観



(口)-第B.参6 図 ガス成分分析用ガスクロマトグラフ-質量分析装置の外観

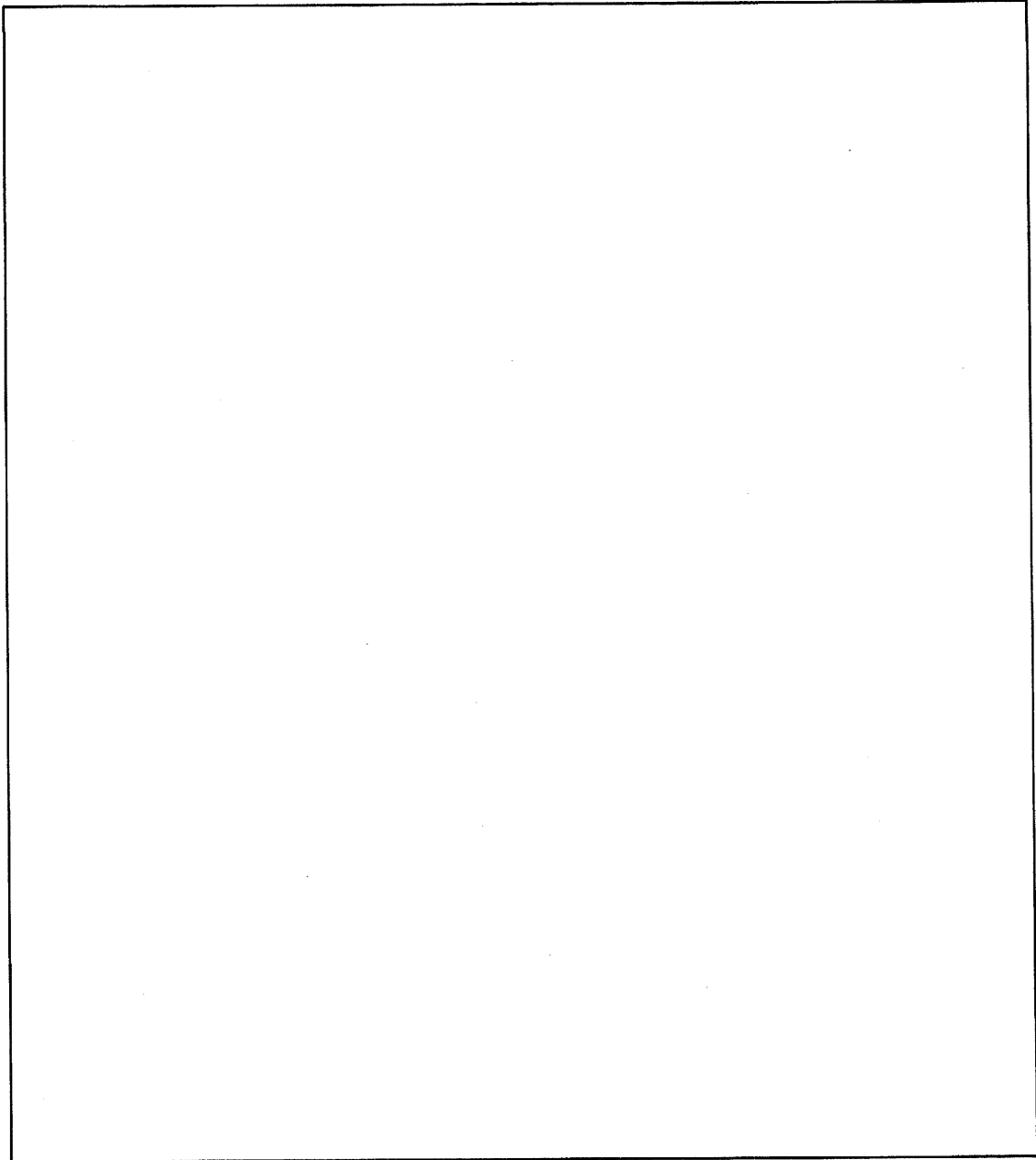


(口)-第B.参7 図 ガス成分分析用ガスクロマトグラフ分析装置の外観



注記) 質量減損予測直線は最小二乗法により $A+B \cdot \log t$ 式 (A, B : 定数、 t : 加熱時間) でフィッティングしたものである。

(ロ)-第 B. 参 8 図 レジンの連続加熱試験における質量減損評価結果
(5,000 時間までの結果)



(ロ)-第B. 参9 図 レジン減損速度の時間変化

(質量減損速度 $\Delta W/\Delta T = (\Delta W_n - \Delta W_{n-1}) / (t_n - t_{n-1})$)

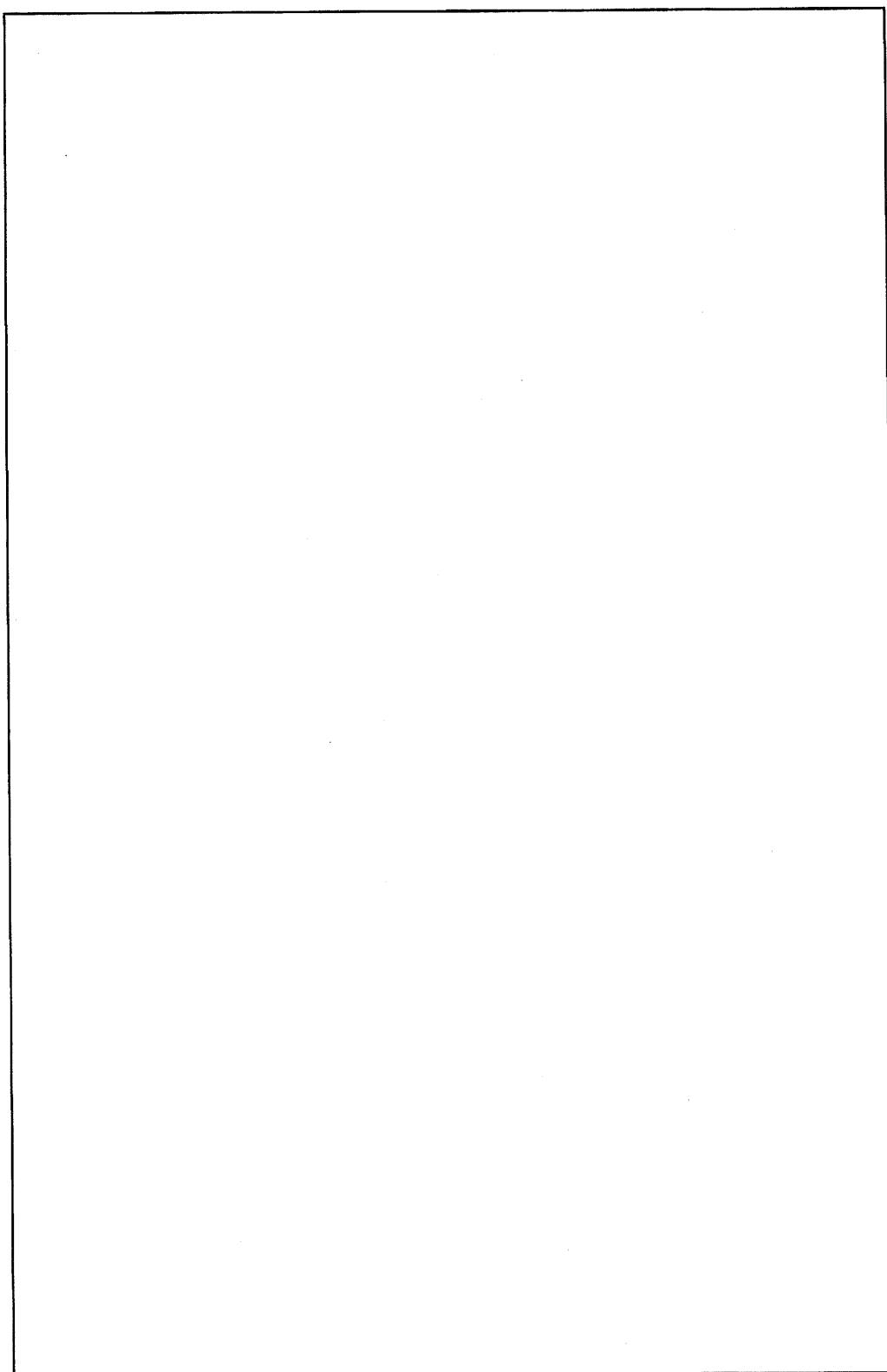
ΔW : 加熱時間 t_{n-1} から t_n の間の質量減損

Δt : t_{n-1} から t_n までの時間間隔

ΔW_n : 加熱時間 t_n における質量減損

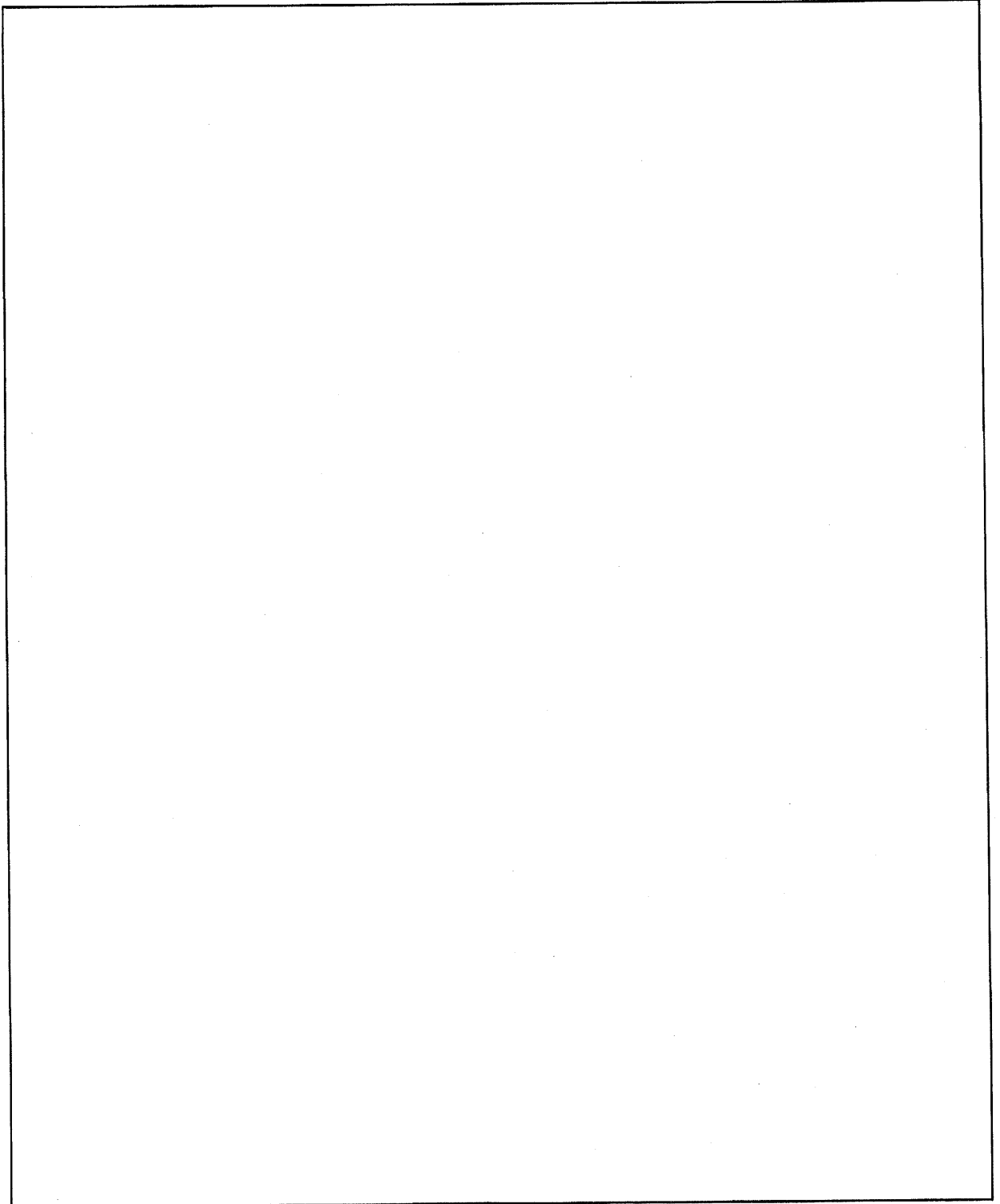
ΔW_{n-1} : 加熱時間 t_{n-1} における質量減損

注記) 各時間の質量減損は(ロ)-第B. 参8 図のフィッティング直線に基づいて算出した。



(ロ)-第B.参10図 レジンの連続加熱評価試験における放出ガス成分分析結果
(5,000時間までの結果)

(参)-(ロ)-B-17



B.4 参考文献

- 1) Y. Fujita, M. Ebihara, "Evaluation of Hydrogen Yield in Spent Fuel Transport Package", The 16th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM 2010), October 3-8, 2010, London, UK, Poster Session 210, (2010).

D.1 「ORIGEN2」コードの説明

1. 概要

ORIGEN2 は、米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発され、互いに関連した多数の同位元素の生成及び壊変量を計算するために広く使われてきた ORIGEN コードを改良したものである。本輸送容器の遮蔽解析では、本コードをガンマ線源強度及び中性子源強度の計算に用いた。

2. 機能

ORIGEN2 は、燃料中等に生成される同位元素と放射能の量を求める基本式では ORIGEN と同一であるが、核データが変更され、炉型式ごとに標準的なデータが整備されている。

本コードは約 1,300 核種におよぶ同位元素のデータライブラリーを持っており、これを用いて ^{235}U 燃料だけでなく ^{239}Pu 、 ^{233}U 燃料等を扱うことができる。

また、本ライブラリー中には核分裂生成物からのガンマ線放出率及び超ウラン元素からの中性子放出率のデータが含まれているので、本コードを使用済燃料中の放射線源強度及び崩壊熱の計算に用いることができる。

本コードのインプット及びアウトプットを (口)-第 D. 参 1 図 に示す。

3. 計算手法

ORIGEN2 では、個々の同位元素の生成量と壊変量を下記に示す一階の微分方程式を解くことにより求める。

$$\frac{dX_i}{dt} = \sum_{j=1}^N I_{ij} \lambda_j X_j + \phi \cdot \sum_{k=1}^N f_{ik} \sigma_k X_k - (\lambda_i + \phi \sigma_i) X_i \quad (i=1, \dots, N)$$

ただし、

X_i : 核種 i の密度

λ_i : 核種 i の崩壊定数

σ_i : 核種 i の平均中性子吸収断面積

ϕ : 平均中性子束

I_{ij} : 核種 j から核種 i に崩壊する割合

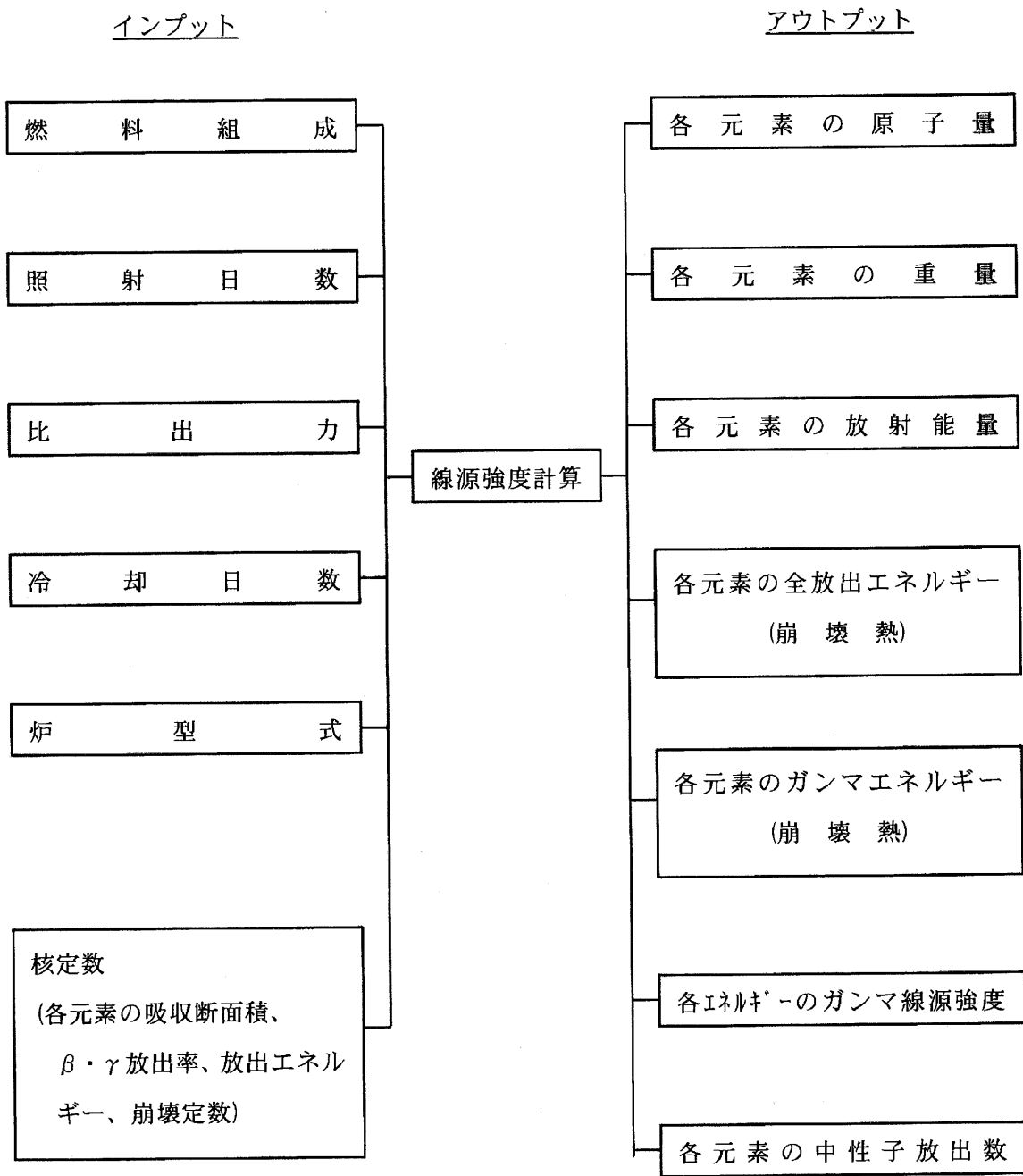
f_{ik} : 核種 k が中性子と反応して核種 i になる割合

この一階連立方程式を解くに当たって、2つの方法が用いられる。1つはマトリックス指数法であり、長寿命核種に対して用いられる。他の1つは Bateman 法であり、短寿命核種に対して用いられる。本コードの概略計算フローを (口)-第 D. 参 2 図 に示す。

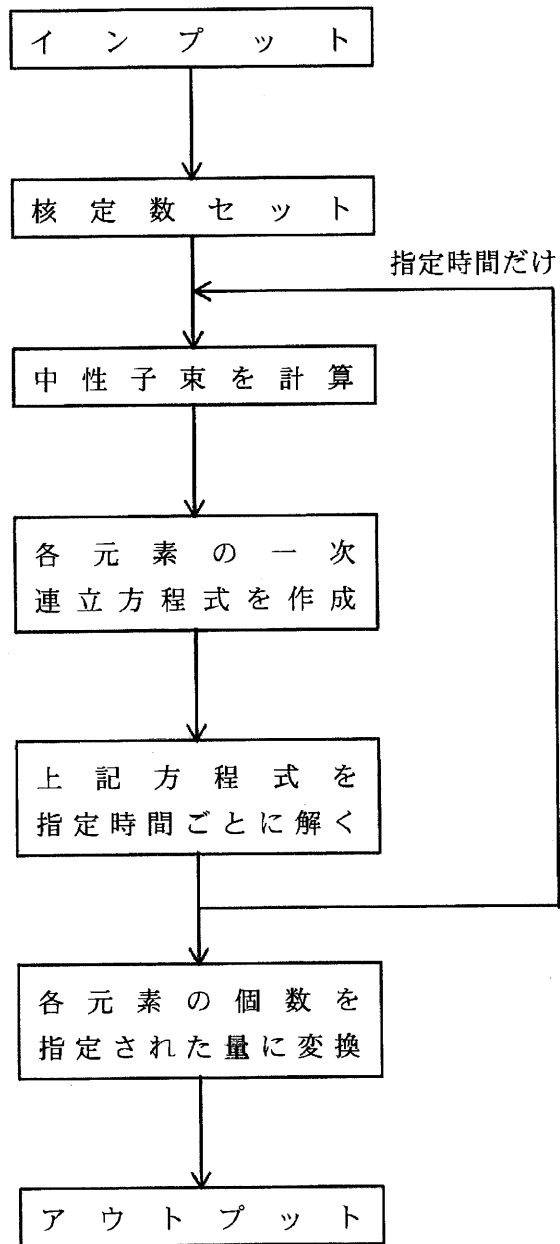
4. 信頼性

ORIGEN2 は、米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発されたコードである。

ORIGEN2 は約 1,300 核種におよぶ元素の核データを内蔵しており、他の同種のコードに比べて、取り扱うことができる核種が多い。使用済燃料輸送容器の放射線源強度の計算に用いられた実績として HZ-75T 型輸送容器等がある。



(口)-第D.参1図 ORIGEN2 コード インプット/アウトプット



(口)-第D.参2 図 ORIGEN2 コード 概略計算フロー

D.2 「DOT3.5」コードの説明

1. 概要

DOT3.5 は、米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発された二次元輸送 Sn コードである。現在本コードは、臨界解析及び遮蔽解析等の分野で広く用いられている。解法は角度方向を有限個の代表角で表示する Sn 法である。

DOT3.5 は DOTⅢを改良したものであり、両者に本質的な差異はない。本輸送容器の遮蔽解析では、ガンマ線及び中性子の線量当量率を計算するために用いた。

2. 機能

散乱の角度依存性については、ルジャンドル球関数の多項式近似を用いて表すことができる (P_ℓ近似)。エネルギー群については、用いる核定数の群数に合わせてとることができる。また中性子及びガンマ線の方向の分割についても任意の分割を選ぶことができる。本解析では、 近似を用いている。

本コードのインプット及びアウトプットを(口)-第D.参3図に示す。

3. 計算手法

時間に依存しない線形の輸送方程式は次のように書ける。

$$\begin{aligned} \vec{\Omega} \times \nabla \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) + \Sigma t(\vec{r}, E) \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \\ = \iint \phi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}') \Sigma s(\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) dE' d\Omega' + S(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \end{aligned}$$

ここで、

$\phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega})$: 位置 \vec{r} , エネルギーE, 方向 $\vec{\Omega}$ の中性子束
$\Sigma t(\vec{r}, E)$: 全断面積
$\Sigma s(\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega})$: 散乱断面積
$S(\vec{r}, E, \vec{\Omega})$: 線源
\vec{r}	: 空間座標ベクトル
E	: エネルギー
$\vec{\Omega}$: 方向単位ベクトル

P_l 近似においては、 $\Sigma_s(\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega})$ を次のように展開する。

$$\Sigma_s(\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) = \sum_l \sigma_l(\vec{r}, E' \rightarrow E) P_l(\vec{\Omega} \times \vec{\Omega}')$$

ただし、

$$\sigma_l(\vec{r}, E' \rightarrow E) = \frac{2l+1}{4\pi} \int \Sigma(\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) P_l(\mu) d\mu$$

ここで、

$$\mu = \vec{\Omega} \times \vec{\Omega}'$$

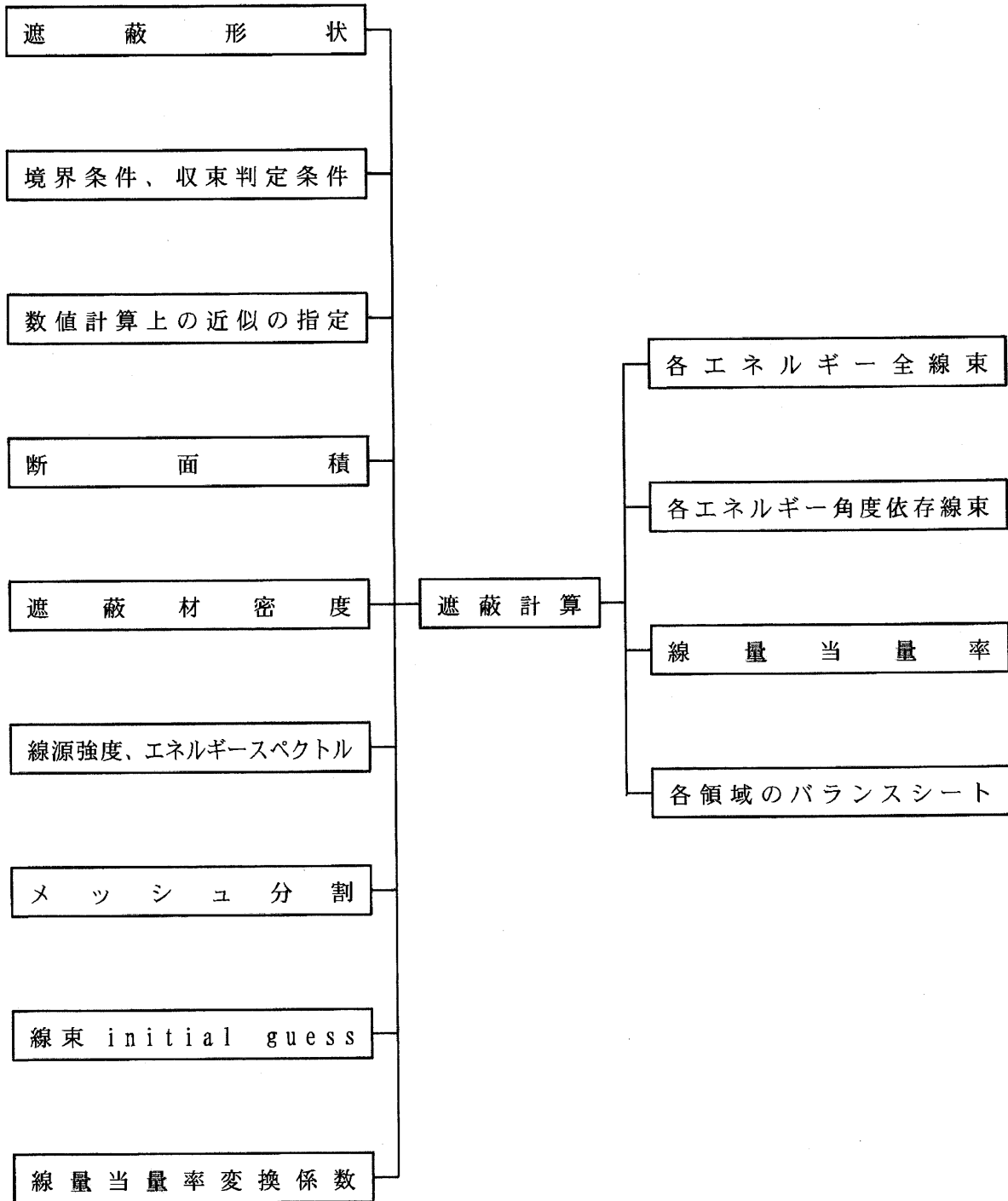
DOT3.5 では、空間は空間メッシュに、中性子及びガンマ線の方法は方向メッシュに分けて計算を行う。Sn は中性子及びガンマ線の方法の分け方を表すものである。

DOT3.5 は上記輸送方程式を、空間、方向性に関して分割し差分法により解く。

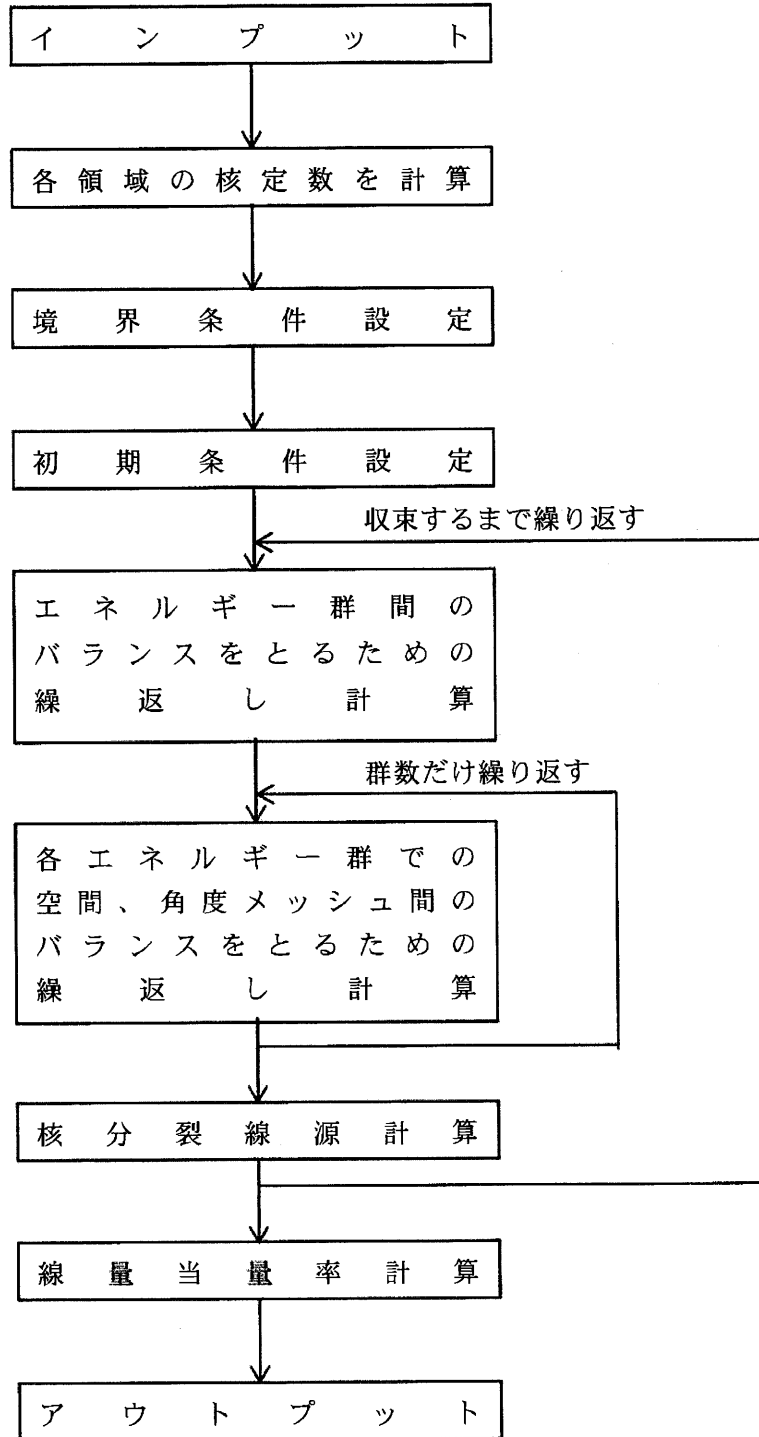
本コードの概略計算フローを(口)-第D.参4図に示す。

インプット

アウトプット



(口)-第D. 参3図 DOT3.5コード インプット/アウトプット



(ロ)-第D.参4図 DOT3.5コード 概略計算フロー

4. 信頼性

DOT3.5 は、遮蔽計算及び臨界計算で広範囲に用いられているコードである。

ベンチマークの例を添付-1 に示す。

添付-1 HZ-75T 型輸送物の遮蔽ベンチマーク解析

1. 解析対象

平成元年 1 月に行われた東海 2 号炉から動燃再処理工場までの輸送を対象とした。

輸送物内の燃料配列は(口)-第 D. 参 5 図のとおりである。

2. 燃料仕様

(口)-第 D. 参 5 図に示すとおり本輸送物の燃料仕様はほぼ同じであるため、解析では

(口)-第 D. 参 1 表に示す代表燃料仕様を用いた。


(口)-第 D. 参 1 表 遮蔽ベンチマーク解析代表燃料仕様

項	目	数 値 等
初 期 濃 縮 度	(²³⁵ U%)	2.7
燃 料 有 効 長	(mm)	3,708
燃 料 棒 配 列		8×8
ウ ラ ン 重 量	(kg/集合体)	190
集 合 体 平 均 燃 焼 度	(MWD/MTU)	
冷 却 日 数	(日)	

3. 線源仕様

(口)-第 D. 参 1 表の燃料仕様に基づいて安全解析書 (HZ-75T) と同様に ORIGEN2 コード及び放射化計算式を用いて求めた線源強度を(口)-第 D. 参 2 表に示す。

(ロ)-第D.参2表 ベンチマーク解析燃料の線源強度

		BWR 燃料集合体 (17 体)	安全解析書線源強度との比 (安全解析書/ベンチマーク)
中性子源	燃料有効部 全中性子源 (n/s)		

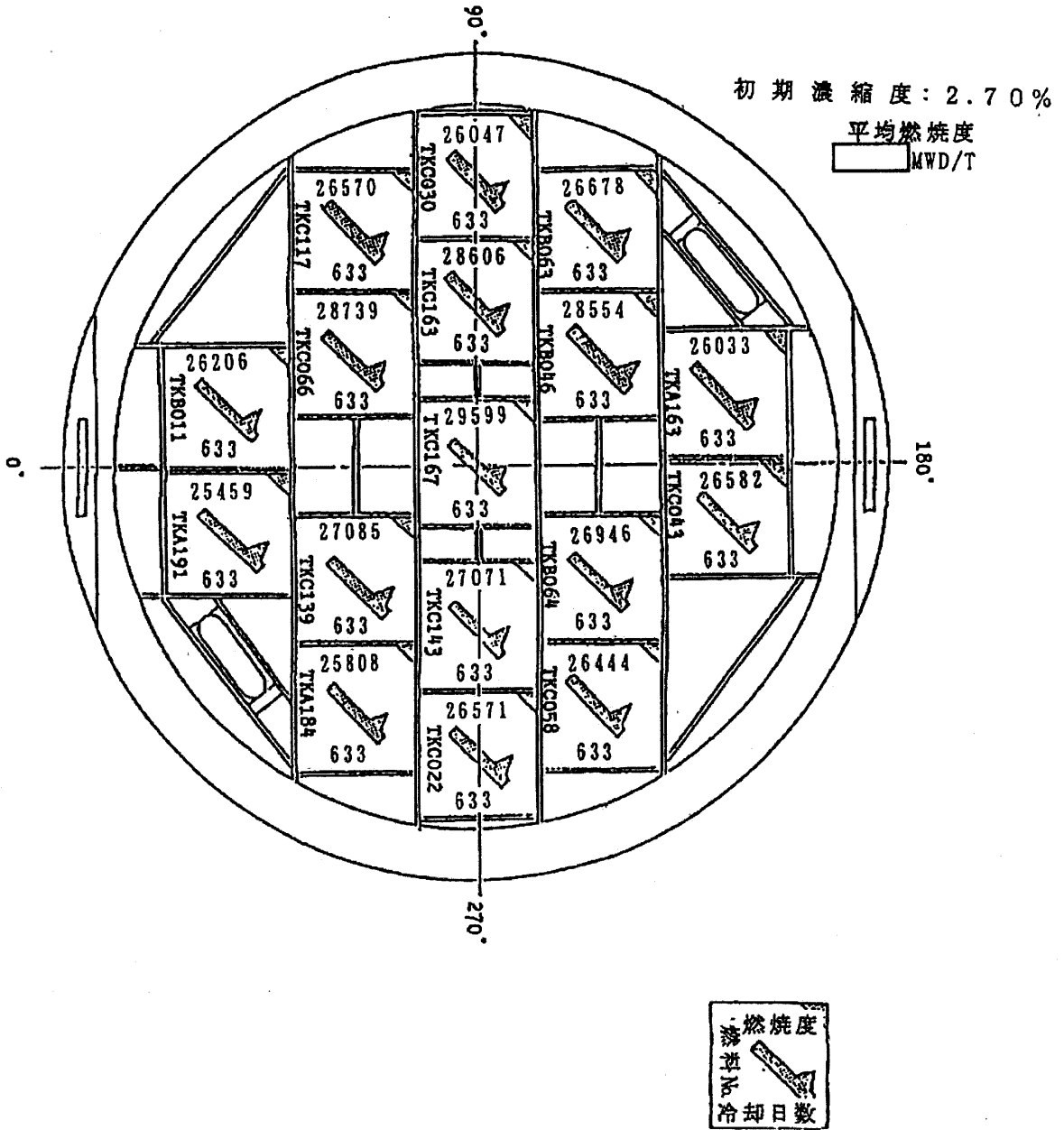
4. 解析モデル

安全解析書 (HZ-75T) と同一である。ただし、各領域の密度は実際の燃料仕様及び崩壊熱量 (約 13kW/輸送) を考慮している。

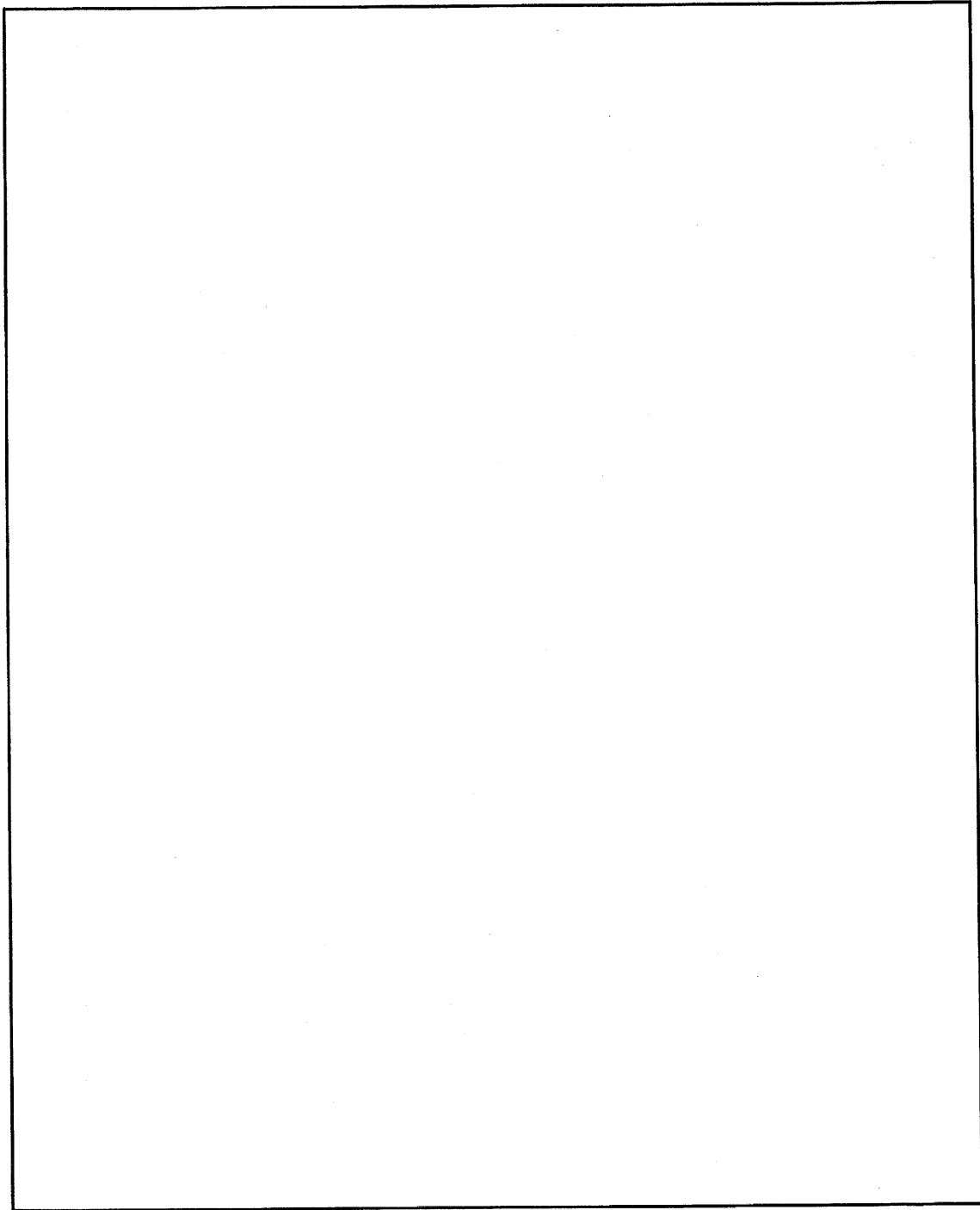
5. ベンチマーク結果

(ロ)-第D.参6図に計算値と実測値の比較を示す。

本結果より (計算値)/(実測値) の値は、中性子に対し 2.0 から 4.9 程度であり、計算が実際の線量当量率分布をよく表し、かつ安全余裕を有していることがわかる。



(口)-第D.参5図 平成元年1月東海2号燃料輸送時燃料配列(HZ-75T 4号機)



(口)-第D.参6図 HZ-75T型輸送物 東海2号燃料収納時の遮蔽ベンチマーク解析結果

D.3 放射化線源について

構造材として量的に有意であると考えられるのは、Si、Cr、Mn、P、S、Fe、Co、Ni、Ca、Moである。これらの材料が中性子を吸収して生成される放射性物質はほとんどが短寿命であり、半減期の長い(100日を超える)ものは、 ^{32}Si 、 ^{53}Mn 、 ^{54}Mn 、 ^{55}Fe 、 ^{60}Co 、 ^{59}Ni 、 ^{63}Ni 、 ^{93}Mo である。これらのうち、ガンマ線源となるのは(口)-第D.参3表に示すように ^{54}Mn 及び ^{60}Co であるが、 ^{54}Mn のガンマ線源強度 (photons/s) は例えば NFT-38B 型では添付-2 に示すように ^{60}Co の1%程度と小さく、そのガンマ線エネルギーも小さいため添付-3 に示すようにキャスクの遮蔽で十分に減衰するのでキャスク体系では ^{54}Mn を考慮する必要はない。したがって、放射化線源としては、 ^{60}Co のみを対象とする。

(口)-第D.参3表 長寿命放射化核種の半減期と放出ガンマ線エネルギー

核種	半減期	放出ガンマ線エネルギー
^{32}Si	$7 \times 10^2 \text{y}$	no γ
^{53}Mn	$1.9 \times 10^6 \text{y}$	no γ
^{54}Mn	303d	0.835MeV
^{55}Fe	2.60y	no γ
^{60}Co	5.263y	1.17MeV, 1.33MeV
^{59}Ni	$8 \times 10^5 \text{y}$	no γ
^{63}Ni	92y	no γ
^{93}Mo	$>100 \text{y}$	no γ

注記) アイソトープ便覧より

添付-2 ^{54}Mn と ^{60}Co の生成量の比較

^{54}Mn の生成反応は、 $^{54}\text{Fe} (n, p) ^{54}\text{Mn}$ 、 ^{60}Co の生成反応は、 $^{59}\text{Co} (n, \gamma) ^{60}\text{Co}$ であり、 ^{60}Co 及び ^{54}Mn の放射化線源強度の比は次式で求められる。

$$\frac{A_{\text{Mn}}}{A_{\text{Co}}} = \frac{N_{\text{Mn}} \cdot \sigma_{\text{Mn}} \cdot \phi_{\text{F}} \cdot \{1 - \exp(-\lambda_{\text{Mn}} T_1)\} \cdot \exp(-\lambda_{\text{Mn}} T_2)}{N_{\text{Co}} \cdot \sigma_{\text{Co}} \cdot \phi_{\text{T}} \cdot \{1 - \exp(-\lambda_{\text{Co}} T_1)\} \cdot \exp(-\lambda_{\text{Co}} T_2)}$$

ここで、

A : 放射化核種の放射能密度 (Bq/cm³)

N_o : ターゲット核種の原子個数密度 (atoms/cm³) (^{54}Fe 又は ^{59}Co)

σ : 反応断面積 (cm²) (Mn は E > 2.8 MeV の中性子、Co は熱中性子に対する値)

ϕ_{F} : 炉内高速中性子束 (n/cm²·s)

ϕ_{T} : 炉内熱中性子束 (n/cm²·s)

λ : 崩壊定数 (/日)

T₁ : 照射日数 (日)

T₂ : 冷却日数 (日)

また、添字 _{Mn}、_{Co} はそれぞれ ^{54}Mn 、 ^{60}Co の生成、崩壊に関することを表す。

NFT-38B 型を例にして以下に放射化線源強度の比の評価を示す。

燃料の構造部材の中で、 ^{59}Co に比して ^{54}Fe の量の多いステンレス鋼について線源強度の比較を行うと原子個数密度は、

$$N_{\text{Mn}} = \boxed{} \text{ atoms/cm}^3, N_{\text{Co}} = \boxed{} \text{ atoms/cm}^3$$

反応断面積は、BNL-325 より、

$$\sigma_{\text{Mn}} = 102 \times 10^{-27} \text{ cm}^2 (E > 2.8 \text{ MeV})$$

$$\sigma_{\text{Co}} = 37.2 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 (\text{熱中性子})$$

典型的な炉内スペクトルでは、

$$\frac{\phi_{\text{F}}}{\phi_{\text{T}}} = \frac{5}{4} \text{ (ただし、}\phi_{\text{F}} \text{ は } E > 1.0 \text{ MeV の値であり、この値を用いることにより}$$

^{54}Mn の生成量を多めに評価する。)

崩壊定数、照射日数、冷却日数は、

$$\lambda_{\text{Mn}} = 2.220 \times 10^{-3} (\text{/日})$$

$$\lambda_{\text{Co}} = 3.601 \times 10^{-4} (\text{/日})$$

$$T_1 = \boxed{} (\text{日})$$

$$T_2 = \boxed{} (\text{日})$$

以上から、

$$\frac{A_{\text{Mn}}}{A_{\text{Co}}} = 1.95 \times 10^{-2}$$

また、 ^{54}Mn と ^{60}Co の photon 数の比は、 ^{60}Co は 2photons/崩壊なので、

$$\frac{1.95 \times 10^{-2}}{2} = 9.75 \times 10^{-3} \approx 1\%$$

となる。

添付-3 ^{54}Mn のガンマ線と ^{60}Co のガンマ線の線量当量率の比較

^{54}Mn のガンマ線エネルギーは 0.835MeV、 ^{60}Co のガンマ線エネルギーは 1.17 及び 1.33MeV である。

0.835MeV のガンマ線と 1.17 及び 1.33MeV のガンマ線のキャスク胴部における線量当量率の減衰割合を QAD で求めた結果を (口)-第 D. 参 4 表に示す。

(口)-第 D. 参 4 表 ガンマ線の減衰割合の比較

線源	ガンマ線エネルギー	線量当量率減衰割合 (鉄 <input type="checkbox"/> mm) 注)
^{54}Mn	0.835MeV	1.34×10^{-6}
^{60}Co	1.17 MeV	7.51×10^{-6}
	1.33 MeV	1.44×10^{-5}

注) NFT-38B 型の胴厚さ

(口)-第 D. 参 4 表より、 ^{54}Mn のガンマ線は、 ^{60}Co のガンマ線と比べて減衰が大きいことがわかる。

添付-2 より、 ^{54}Mn の放射能強度は ^{60}Co の 1.95%なので、(口)-第 D. 参 4 表の線量当量率減衰割合と放射能強度から、キャスク胴外表面の ^{54}Mn のガンマ線と ^{60}Co のガンマ線による線量当量率の比は、

$$\frac{{}^{54}\text{Mn} \text{ のガンマ線による線量当量率}}{{}^{60}\text{Co} \text{ のガンマ線による線量当量率}} = \frac{1.34 \times 10^{-6} \times 0.0195}{7.51 \times 10^{-6} + 1.44 \times 10^{-5}} = 0.00119$$

となり、 ^{54}Mn のガンマ線による線量当量率は ^{60}Co と比べて無視することができる。

D.4 ガンマ線に関する「DOT3.5」コードと「QAD」コードの比較について

NFT-38B 型の側部について QAD の二次元モデルを用いて DOT3.5 との比較計算を行った結果を (口)-第 D. 参 5 表に示す。線源としては燃料有効部のみ考慮している。前提条件は次のとおり。

- ① 使用コード : QAD-CGGP2
- ② ビルドアップ係数 : 鉄 (検出点 : 空気) (GP 法による)
- ③ エネルギー群 : ORIGEN2 の 0.375~3.5MeV の 8 群
- ④ 計算モデル : 二次元円筒モデル

(口)-第 D. 参 5 表 側部ガンマ線量当量率

(μ Sv/h)

部位 \ 計算コード	DOT3.5	QAD
表面	104.2	102.6
表面から 1 m	44.5	56.1

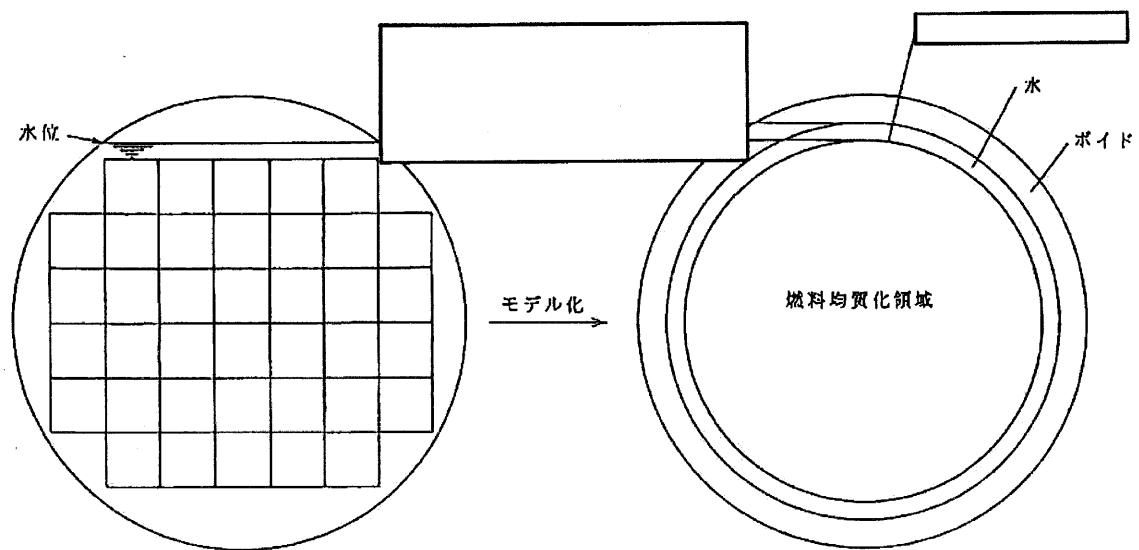
比較の結果、表面においては両者は良い一致を示し、表面から 1m になると QAD の値が DOT3.5 の値に比べて高くなっているが、基準値は満足している。

なお、ガンマ線の解析においては、安全解析書のモデル化ではフィン領域 (SUS 製で NFT-38B 型では約 4 トン) を遮蔽体として無視していること、また、安全解析書の解析手法が十分なマージンを有していることから、安全解析書の解析結果は十分安全側になっていると考えられる。

D.5 DOT 計算モデルの水位の設定方法について

NFT 型輸送容器の遮蔽解析モデルは、DOT 二次元 (R-Z) モデルであるため、同心円状のモデルとなる。バスケット格子内部は燃料均質化領域として、均質化し、その外側に []、 []、水の層及びボイド層を設けている。((口)-第 D. 参 7 図参照) (ただし、NFT-12B 型では [] ために [] と燃料均質化領域の間に水の層があるモデルとなっている。)

モデルの水の厚さとしては、 [] と [] の間の距離を用いている。ただし、バスケット格子の配置により [] 場合は、 [] [] をモデル上の水厚さとしている。



(口)-第D.参7図 キャスク内のDOTモデルの水厚さ(通常輸送時)

E.1 「SCALE」システムの説明

SCALE (Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation) コードシステムは、米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) により米国原子炉規制委員会 (NRC) の原子力関連許認可評価用に作成されたモジュラー・コード・システムであり、熱、遮蔽及び臨界関係の評価コードが整備されている。

本解析では臨界計算の CSAS25 モジュールを用いた。

また、SCALE コードシステムは改良が続けられており、本解析では SCALE5.1 バージョンを用いている。

E.2 「KENO-V. a」コードの説明

KENO-V. a は米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発された多群モンテカルロ法に基づく計算コードであり、複雑な体系の中性子増倍率の計算を行うことができる。

本コードでは中性子飛程履歴において中性子の確率的な重みが吸収率に応じて減少してゆくものとして取り扱われる。中性子の消滅は、中性子の重みがある値以下になったときロシアンルーレットにより決定される。中性子の k_{eff} は次式により計算される。

$$k_{eff} = \frac{\sum_{j=1}^{NPB} \sum_{i=1}^{NCOLL} WT_{ij} \frac{\nu \Sigma f}{\Sigma t}}{\sum_{j=1}^{NPB} WToj}$$

ただし、

- NPB : 1回のバッチで発生する中性子数
- NCOLL : 中性子の衝突回数
- WT_{ij} : 核分裂が起こったとき中性子の持っていた重み
- WToj : 発生した中性子が持っていた重み
- ν : 1回の核分裂で発生する中性子数
- Σf : 巨視的核分裂断面積
- Σt : 巨視的全断面積

E.3 「BONAMI」コードの説明

BONAMI コードは高速中性子エネルギー側の非分離共鳴エネルギー領域を含む多群で扱う領域の断面積作成を担い、CENTRM コードの多群で扱う領域の中性子スペクトル計算に使用される。

E.4 「CENTRM」コードの説明

CENTRM コードは分離共鳴エネルギー領域の共鳴処理の精度向上を目的として開発されたコードであり、ポイントワイズの断面積データを用いてボルツマン輸送方程式を解くことにより、連続エネルギー中性子スペクトルを求めるものである。

E.5 「PMC」コードの説明

PMC コードは、CENTRM コードにより作成された分離共鳴エネルギー領域の連続エネルギーの中
性子スペクトルを重みとして共鳴処理を行い、目的とする多群断面積ライブラリーの群構造に縮
約した断面積セットを作成する。

E.6 「WORKER」コードの説明

WORKER コードは、SCALE コードシステムに含まれる各コード間の橋渡しを行うための、断面積ファイルのフォーマット変換等を受け持つコードである。

E.7 「XSDRNPM」コードの説明

XSDRNPM コードは Sn 法に基づき一次元輸送方程式を解くコードであり、輸送計算により求められたエネルギー及び空間依存の中性子束を重みとして、指定した領域の均質化定数の作成及び断面積のエネルギー群数の縮約を行うものである。

本コードで解く基礎式は次式である。

$$\begin{aligned} & \vec{\Omega} \times \nabla \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) + \Sigma t(\vec{r}, E) \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \\ & = \iint \phi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}') \Sigma s(\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) dE' d\Omega' \\ & + (1/k) \times \chi(E) \iint \phi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}') \nu \Sigma f(\vec{r}, E') dE' d\Omega' \end{aligned}$$

ここで、

$\phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega})$: 位置 \vec{r} 、エネルギー E 、方向 $\vec{\Omega}$ の中性子束
$\Sigma t(\vec{r}, E)$: 中性子全断面積
$\Sigma s(\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega})$: 中性子散乱断面積
$\chi(E)$: 核分裂スペクトル
k	: 実効増倍率
ν	: 1回の核分裂当たり発生する中性子数
$\Sigma f(\vec{r}, E')$: 核分裂断面積

NFT-14P型
核燃料輸送物設計承認申請書

別紙 2

輸送容器に係る品質管理の方法等
(設計に係るものに限る。)に関する説明書

原燃輸送株式会社

目次

(イ) 章 輸送容器に係る品質管理の方法等 (設計に係るものに限る。) に関する説明	(イ)-1
(イ)-A 品質マネジメントシステム	(イ)-1
A.1 品質マニュアル	(イ)-1
A.2 文書管理	(イ)-1
A.3 品質記録の管理	(イ)-2
(イ)-B 申請者の責任	(イ)-3
(イ)-C 教育・訓練	(イ)-9
(イ)-D 設計管理	(イ)-10
(イ)-E 輸送容器の製造発注	(イ)-13
(イ)-F 取扱い及び保守	(イ)-14
(イ)-G 測定、分析及び改善	(イ)-15
G.1 内部品質監査	(イ)-15
G.2 不適合及び是正処置の管理	(イ)-15
G.3 未然防止処置	(イ)-16

(イ) 章 輸送容器に係る品質管理の方法等(設計に係るものに限る。)に関する説明

(イ)-A 品質マネジメントシステム

申請者である原燃輸送株式会社(以下「当社」という。)は、原子力安全の確保を最優先に顧客満足並びに製品及び役務の品質を継続的に向上させることを目的として品質マネジメントシステムを確立し、維持し、その有効性を継続的に改善する。本申請に係る品質保証活動は、この品質マネジメントシステムに基づき体制を適切に構築し、実施する。

A.1 品質マニュアル

当社は、次の事項を含む「品質保証規程」を品質マニュアルとして作成し、維持する。

- ① 品質マネジメントシステムの適用範囲
- ② 品質マネジメントシステムについて確立された“文書化された手順”又はそれらを参照できる情報
- ③ 品質マネジメントシステムのプロセス間の相互関係に関する記述

A.2 文書管理

1. 当社は、品質マネジメントシステムで要求されている文書化した情報は、次の事項を確実にするために、管理する。
 - ① 文書化した情報が、必要なときに、必要なところで、入手可能かつ利用に適した状態である。
 - ② 文書化した情報が十分に保護されている(例えば、機密性の喪失、不適切な使用及び完全性の喪失からの保護)。
2. 文書化した情報の管理に当たって、部門長は、該当する場合には、必ず、次の行動に取り組む。
 - ① 配付、アクセス、検索及び利用
 - ② 読みやすさが保たれることを含む、保管及び保存
 - ③ 変更の管理(例えば、版の管理)
 - ④ 保持及び廃棄

品質マネジメントシステムの計画及び運用のために当社の部門長が必要と決定した外部からの文書化した情報は、必要に応じて識別し、管理する。

適合の証拠として保持する文書化した情報(記録)は、意図しない改変から保護する。

A.3 品質記録の管理

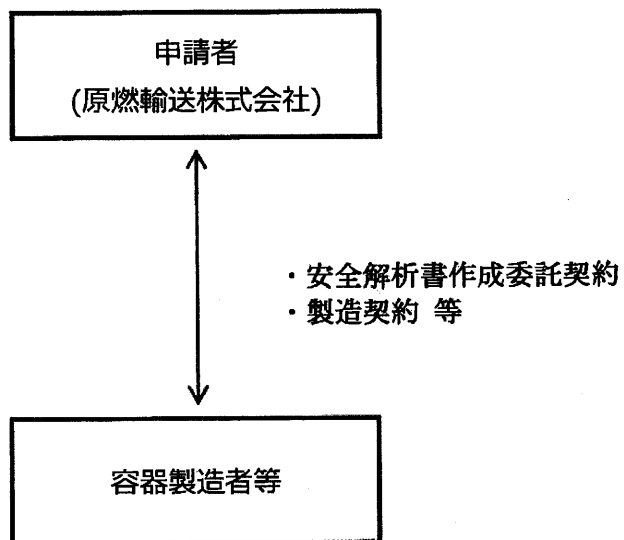
当社は、要領書等の文書、作業者の資格、記録及び材料証明書を含む検査記録等の品質管理記録の取りまとめ並びに保存について(イ)-AのA.2に従い実施する。

(イ)-B 申請者の責任

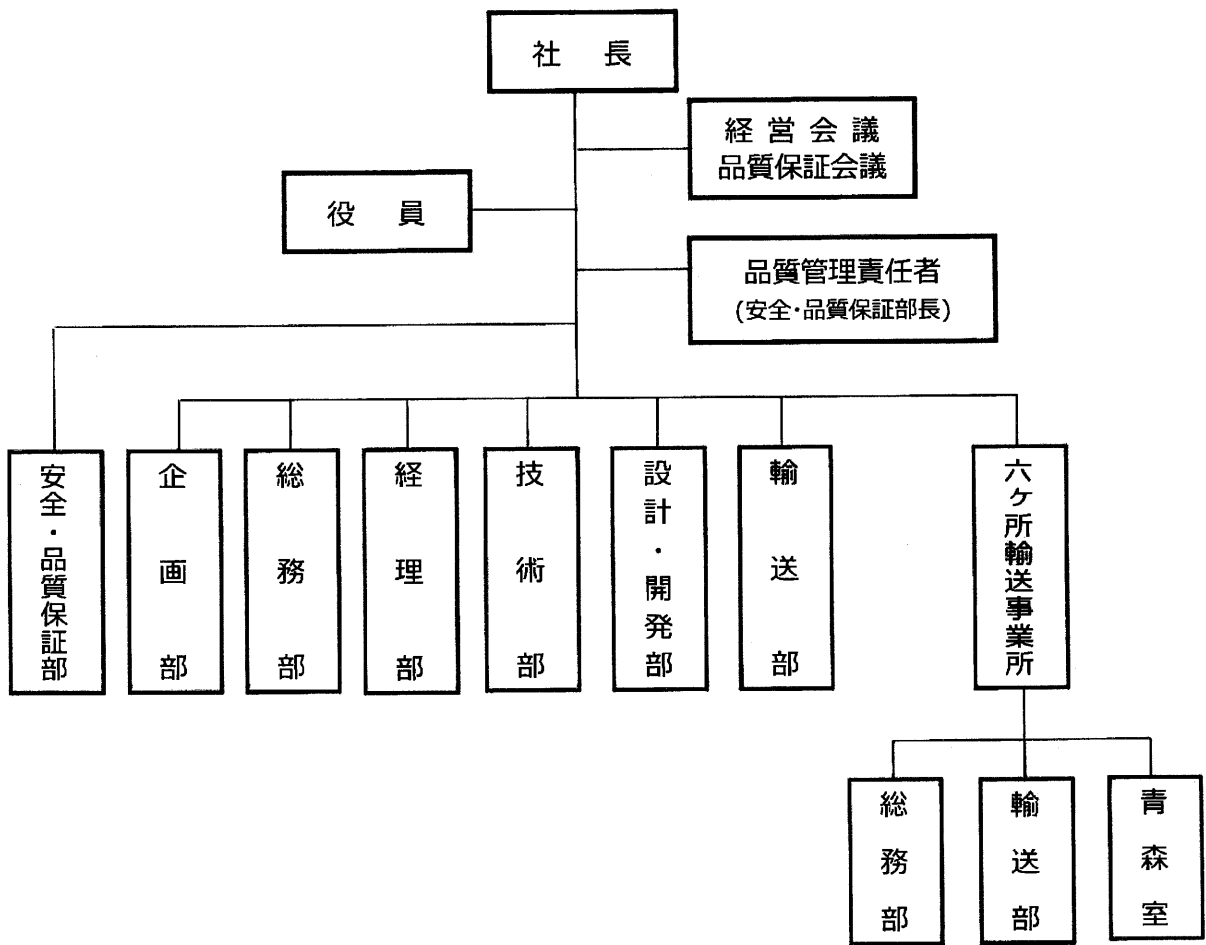
1. 責任体制

NFT-14P 型輸送容器の設計承認申請及び容器承認申請に係る申請者及び容器製造者等の組織について、品質マネジメントシステム遂行に係る責任体制を(イ)-第1図に示す。

また、申請者の体制図を(イ)-第2図に示す。



(イ)-第1図 品質マネジメントシステム遂行に係る責任体制



(イ)-第2図 申請者の体制図

2. 品質方針及び品質目標

当社の社長は、次の事項を満たす品質方針を確立し、実施し、維持する。

- ① 組織の目的及び状況に対して適切であり、組織の戦略的な方向性を支援する。
- ② 品質目標の設定のための枠組みを与える。
- ③ 適用される要求事項を満たすことへのコミットメントを含む。
- ④ 品質マネジメントシステムの継続的改善へのコミットメントを含む。

また、当社の部門長は、品質マネジメントシステムに必要な、関連する機能、階層及びプロセスにおいて、品質目標を確立する。

品質目標は、次の事項を満たすものとする。

- ① 品質方針と整合している。
- ② 測定可能である。
- ③ 適用される要求事項を考慮に入れる。
- ④ 製品及び役務の適合、並びに顧客満足の向上に関連している。
- ⑤ 監視する。
- ⑥ 伝達する。
- ⑦ 必要に応じて、更新する。

当社は、品質目標に関する文書化した情報(文書)を維持・管理し、品質保証会議にてレビューする。

3. 組織の役割、責任及び権限

当社の組織では社長以下全ての要員は、各職責における原子力安全確保の責任を有する。

当社の社長は、関連する役割に対して、責任及び権限が割り当てられ、組織内に伝達され、理解されることを確実にする。

また、当社の部門長は、品質マネジメントシステムに共通する文書・記録管理、外部提供者評価、教育計画・実施、不適合・是正処置・未然防止処置に関する責任を有する。

当社の社長は、与えられている他の業務上の責任と関わりなく、次の事項についての責任と権限を持つ「品質管理責任者」として、安全・品質保証部長を任命する。

- ① 品質マネジメントシステムに必要なプロセスの確立、実施及び維持を確実にする。
- ② 品質マネジメントシステムの成果を含む実施状況及び改善の必要性の有無について、社長へ報告する。
- ③ 組織全体にわたって顧客要求事項に対する認識を高めることを確実にする。
- ④ 各部門の品質目標とその展開計画のレビュー、及び実施状況の監視を行う。
- ⑤ 各部門の不適合の処置、原因特定、是正処置等の実施状況を監視、検証し、品質マネジメントシステムの有効性の継続的改善を確実にする。

当社の各部門の責任と権限を以下に示す。

(1) 社長

組織の業務運営並びに品質マネジメントシステムの確立、実施、維持、及びその有効性の継続的改善に対して最高責任を有する。

(2) 安全・品質保証部長

- ① マネジメントレビュー会議(品質保証会議)の運営
- ② 原子力安全文化醸成活動の総括
- ③ 品質保証に関する社外対応
- ④ 外部提供者の評価(主として能力面)
- ⑤ 不適合及び是正処置の審査及び承認
- ⑥ 未然防止処置の審査及び承認
- ⑦ 品質監査の計画及び実施
- ⑧ 放射線管理の統括

(3) 企画部長

- ① 経営資源の充実(経営計画、設備計画、組織・要員計画)
- ② マネジメントレビュー会議(経営会議)の運営

(4) 総務部長

- ① 経営資源の充実
- ② 安全衛生の統括
- ③ 通信機器の維持・管理
- ④ 教育・訓練の統括

(5) 経理部長

- ① 顧客との契約
- ② 外部提供者の評価(主として財務面)と統括
- ③ 外部提供者の選定及び契約

(6) 技術部長

- ① 購買文書の作成
- ② 輸送用設備の設計・開発管理(設計・開発部長所管分を除く。)
- ③ 輸送容器及び輸送用設備の製造管理
- ④ 輸送容器の保守管理

(7) 設計・開発部長

- ① 購買文書の作成
- ② 輸送容器の設計・開発管理
- ③ 輸送容器の許認可管理

④ 輸送用設備の設計・開発管理(技術部長所管分を除く。)

(8) 輸送部長

① 購買文書の作成

② 輸送計画の策定

③ 輸送(六ヶ所輸送事業所長所管分を除く。)

④ 船舶の保守管理

(9) 六ヶ所輸送事業所長

① 外部提供者の選定及び契約(権限内での製品及び役務に限る。)

② 六ヶ所村、周辺自治体等との折衝

③ 購買文書の作成

④ むつ小川原港における荷役及び陸上輸送

4. マネジメントレビュー

当社の社長は、組織の品質マネジメントシステムが、引き続き、適切、妥当かつ有効で更に組織の戦略的な方向性と一致していることを確実にするために、あらかじめ定めた間隔で、品質マネジメントシステムをレビューする。

(イ)-C 教育・訓練

当社の部門長は、次の事項を行う。

- ① 品質マネジメントシステムのパフォーマンス及び有効性に影響を与える業務をその管理下で行う要員に必要な力量を明確にする。
- ② 適切な教育、訓練又は経験に基づいて、それらの要員が力量を備えていることを確実にする。
- ③ 該当する場合には(必要な力量が不足している場合等には)、必ず、必要な力量を身に付けるための処置をとり、とった処置の有効性を評価する。
- ④ 力量の証拠として、適切な文書化した情報(記録)を保持する。

(イ)-D 設計管理

1. 設計・開発の計画

設計・開発の段階及び管理を決定するに当たって、当社の部門長は、次の事項を考慮する。

- ① 設計・開発活動の性質、期間及び複雑さ
- ② 要求されるプロセス段階。これには適用される設計・開発のレビューを含む。
- ③ 要求される、設計・開発の検証及び妥当性確認活動
- ④ 設計・開発プロセスに関する責任及び権限
- ⑤ 製品及び役務の設計・開発のための内部資源及び外部資源の必要性
- ⑥ 設計・開発プロセスに関与する人々間のインタフェースの管理の必要性
- ⑦ 設計・開発プロセスへの顧客及びユーザの参画の必要性
- ⑧ 以降の製品及び役務の提供に関する要求事項
- ⑨ 顧客及びその他の密接に関連する利害関係者によって期待される、設計・開発プロセスの管理レベル
- ⑩ 設計・開発の要求事項を満たしていることを実証するために必要な文書化した情報(記録)
公的規格が定められていない特殊な材料又は新技術を採用する場合には、部門長は材料仕様などの意味、重要性、技術内容などが十分理解されるよう、十分な検討を行うとともに、必要に応じ、関係者(顧客、外部提供者など)間で一層の情報交換を行う。

2. 設計・開発へのインプット

当社の部門長は、設計・開発する特定の種類の製品及び役務に不可欠な要求事項を明確にする。部門長は、次の事項を考慮する。

- ① 機能及びパフォーマンスに関する要求事項
- ② 以前の類似の設計・開発活動から得られた情報
- ③ 法令・規制要求事項
- ④ 当社が実施することをコミットメントしている、標準又は規範(codes of practice)
- ⑤ 製品及び役務の性質に起因する失敗により起こり得る結果

インプットは、設計・開発の目的に対して適切で、漏れがなく、曖昧でないものとする。

設計・開発へのインプット間の相反を解決する。

部門長は、設計・開発へのインプットに関する文書化した情報(記録)を保持する。

3. 設計・開発の管理

当社の部門長は、次の事項を確実にするために、設計・開発プロセスを管理する。

- ① 達成すべき結果を定める。
- ② 設計・開発の結果の、要求事項を満たす能力を評価するために、レビューを行う。

- ③ 設計・開発からのアウトプットが、インプットの要求事項を満たすことを確実にするために、検証活動を行う。
- ④ 結果として得られる製品及び役務が、指定された用途又は意図された用途に応じた要求事項を満たすことを確実にするために、妥当性確認活動を行う。
- ⑤ レビュー、又は検証及び妥当性確認の活動中に明確になった問題に対して必要な処置をとる。
- ⑥ これらの活動についての文書化した情報(記録)を保持する。

(1) 設計・開発のレビュー

設計・開発の適切な段階において、次の事項を目的として、計画されたとおりに体系的なレビューを行う。

- ① 設計・開発の結果が、要求事項を満たせるかどうかを評価する。
- ② 問題を明確にし、必要な処置を提案する。

レビューへの参加者には、レビューの対象となっている設計・開発段階に関連する部門を代表する者が含まれていることを確認する。このレビューの結果の文書化した情報(記録)、及び必要な処置があればその文書化した情報(記録)を保持する。

(2) 設計・開発の検証

設計・開発からのアウトプットが、設計・開発へのインプットで与えられている要求事項を満たしていることを確実にするために、計画されたとおりに検証を実施する。この検証の結果の文書化した情報(記録)、及び必要な処置があればその文書化した情報(記録)を保持する。

設計・開発の検証は、原設計者以外の者又はグループが実施する。

(3) 設計・開発の妥当性確認

結果として得られる製品及び役務が、指定された用途又は意図された用途に応じた要求事項を満たすことを確実にするために、計画した方法に従って、設計・開発の妥当性確認を実施する。実行可能な場合にはいつでも、製品及び役務の引渡し又は提供の前に、妥当性確認を完了する。妥当性確認の結果の文書化した情報(記録)、及び必要な処置があればその文書化した情報(記録)を保持する。

4. 設計・開発からのアウトプット

当社の部門長は、設計・開発からのアウトプットが、次のとおりであることを確実にする。

- ① インプットで与えられた要求事項を満たす。
- ② 製品及び役務の提供に関する以降のプロセスに対して適切である。

- ③ 必要に応じて、監視及び測定の要求事項、並びに合否判定基準を含むか、又はそれらを参照している。
- ④ 意図した目的並びに安全で適切な使用及び提供に不可欠な、製品及び役務の特性を規定している。

また、設計・開発からのアウトプットは、リリース前に承認する。

当社の部門長は、設計・開発のアウトプットについて、文書化した情報(記録)を保持する。

5. 設計・開発の変更管理

- ① 当社の部門長は、要求事項への適合に悪影響を及ぼさないことを確実にするために必要な程度まで、製品及び役務の設計・開発の間又はそれ以降に行われた変更を識別し、レビューし、管理する。
- ② 当社の部門長は、次の事項に関する文書化した情報(記録)を保持する。
 - ・ 設計・開発の変更
 - ・ レビューの結果
 - ・ 変更の許可
 - ・ 悪影響を防止するための処置
- ③ 設計・開発の変更は、原設計に適用された方法と同じ設計・開発の方法により実施する。
- ④ 設計・開発の変更のレビューは、原則として原設計のレビューを実施したグループ又は組織が実施する。

(イ)-E 輸送容器の製造発注

1. 容器製造者の評価

当社は、容器製造者の輸送容器を製作する能力について評価し、選定する。能力の評価に当たっては、必要に応じて、品質監査等により次の事項を考慮する。

- ① 輸送容器の製作に関する技術・要員及び製作設備
- ② 容器製造者の品質方針、品質管理計画及びそれらの実施状況
- ③ 輸送容器又は類似のものに関する供給実績
- ④ 輸送容器又は類似のものに関する使用実績及び品質に関する記録
- ⑤ 試作品、サンプル等の評価

2. 容器製造者への品質マネジメントシステム要求事項

当社は、容器製造者に対して発行する購買技術仕様書において、確立された品質マネジメントシステムのもとに、品質マニュアル及び品質保証計画書を作成し、維持することを要求する。

また、品質管理に係る適用又は準拠規格として以下を要求する。

- ① ISO9001：有効な版
- ② JEAG4121 附属書-1「品質マネジメントシステムに関する標準品質保証仕様書」又は JEAC4111 附属書-4「品質マネジメントシステムに関する標準品質保証仕様書」
- ③ 核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に係る核燃料輸送物設計承認及び容器承認等に関する申請手続ガイド別添「輸送容器の製作の方法に係る品質マネジメント指針」

3. 輸送容器の製作に係る検査及び品質監査による検証

当社は安全上の重要性などを考慮しつつ、公的規格及び公的資格制度の有無、容器製造者及び供給者の品質管理の状況等を勘案し、立会検査又は記録確認を実施する。

また、(イ)-E の 1. に基づき容器製造者に対する品質監査を実施する。

(イ)-F 取扱い及び保守

当社は、核燃料輸送物の発送前検査、輸送容器の保守の品質管理方針及び輸送容器管理方法について、品質マニュアルに基づき、各手順書等を制定し、実施する。

(イ)-G 測定、分析及び改善

G.1 内部品質監査

1. 当社の安全・品質保証部長は、品質マネジメントシステムが次の状況にあるか否かに関する情報を提供するために、あらかじめ定めた間隔で内部監査を実施する。
 - ① 次の事項に適合している。
 - ・品質マネジメントシステムに関して、当社自体が規定した要求事項
 - ・ISO9001 及び JEAC4111 附属書-4 の要求事項
 - ② 有効に実施され、維持されている。

2. 当社の安全・品質保証部長及び部門長は、次に示す事項を行う。
 - ① 頻度、方法、責任、計画要求事項及び報告を含む、監査プログラムの計画、確立、実施及び維持。

監査プログラムは、関連するプロセスの重要性、組織に影響を及ぼす変更、及び前回までの監査の結果を考慮に入れる。
 - ② 各監査について、監査基準及び監査範囲を定める。
 - ③ 監査プロセスの客観性及び公平性を確保するために、監査員を選定し、監査を実施する。
 - ④ 監査の結果を当社の関連する管理層に報告することを確実にする。
 - ⑤ 遅滞なく、適切な修正を行い、是正処置をとる。
 - ⑥ 監査プログラムの実施及び監査結果の証拠として、文書化した情報(記録)を保持する。

G.2 不適合及び是正処置の管理

苦情から生じたものを含め、不適合が発生した場合、当社の部門長は、次の事項を行う。

- ① その不適合に対処し、該当する場合には、必ず、次の事項を行う。
 - ・その不適合を管理し、修正するための処置をとる。
 - ・その不適合によって起こった結果に対処する。
 - ② その不適合が再発又は他のところで発生しないようにするため、次の事項によって、その不適合の原因を除去するための処置をとる必要性を評価する。
 - ・その不適合をレビューし、分析する。
 - ・その不適合の原因を明確にする。
 - ・類似の不適合の有無、又はそれが発生する可能性を明確にする。
 - ③ 必要な処置を実施する。
 - ④ とった全ての是正処置の有効性をレビューする。
 - ⑤ 必要な場合には、計画の策定段階で決定したリスク及び機会を更新する。
 - ⑥ 必要な場合には、品質マネジメントシステムの変更を行う。
- 是正処置は、検出された不適合のもつ影響に応じたものとする。

当社の安全・品質保証部長及び部門長は、不適合の性質及びそれに対してとったあらゆる処置並びに是正処置の結果の証拠として、文書化した情報(記録)を保持する。

G.3 未然防止処置

当社の部門長は、起こり得る不適合が発生することを防止するために、その原因を除去する処置を決める。

未然防止処置は、起こり得る不適合の重要性に応じたものとする。

当社の安全・品質保証部長は、次の事項に関する要求事項を規定するために、“文書化された手順”を確立する。

- ① 起こり得る不適合及びその原因の調査
- ② 不適合の発生を防止するための処置の必要性の評価
- ③ 必要な処置の決定及び実施
- ④ とった処置及びその結果の記録
- ⑤ とった処置の有効性のレビュー

添付

補正内容一覧
(別紙記載事項の補正前後比較表)

補正内容一覧

・別紙1

頁番号	補正前 目次	頁番号	補正後 目次
目-1	(イ)章 核燃料輸送物の説明	目-1	(イ)章 核燃料輸送物の説明
目-2	A.5.2 水噴霧……………(ア)-A-85 A.5.3 自由落下……………(ア)-A-86 A.5.3.1 垂直落下……………(ア)-A-80 A.5.3.2 水平落下……………(ア)-A-86 A.5.3.3 コーナ―落下……………(ア)-A-107 A.5.4 積み重ね試験……………(ア)-A-108 A.5.5 貫通……………(ア)-A-111 A.5.6 角又は線落下……………(ア)-A-113 A.5.7 結果の要約及びその評価……………(ア)-A-114 A.8 特別の試験条件……………(ア)-A-118 A.8.1 強度試験・落下試験Ⅰ(9m落下時)……………(ア)-A-118 A.8.1.1 垂直落下……………(ア)-A-129 A.8.1.2 水平落下……………(ア)-A-144 A.8.1.3 コーナ―落下……………(ア)-A-153 A.8.1.4 傾斜落下……………(ア)-A-155 A.8.1.5 結果の要約……………(ア)-A-155 A.8.2 強度試験・落下試験Ⅱ(1m落下時)……………(ア)-A-156 A.8.2.1 結果の要約……………(ア)-A-160 A.8.3 熱的試験……………(ア)-A-161 A.8.3.1 温度及び圧力の要約……………(ア)-A-161 A.8.3.2 熱膨張……………(ア)-A-162 A.8.3.3 許容応力との比較……………(ア)-A-165 A.8.4 浸漬……………(ア)-A-172 A.8.5 結果の要約及びその評価……………(ア)-A-174 A.7 強化浸漬試験……………(ア)-A-181 A.8 放射線照射物……………(ア)-A-185 A.9 移分型輸送物……………(ア)-A-188 A.9.1 移分型輸送物に係る一般の試験条件……………(ア)-A-188 A.9.2 移分型輸送物に係る特別の試験条件……………(ア)-A-188 A.10 付属書類……………(ア)-A-194 A.10.1 送りき部の応力集中係数……………(ア)-A-194	目-2	(イ)章 核燃料輸送物の説明……………(イ)-1 A.5.2 水噴霧……………(ア)-A-85 A.5.3 自由落下……………(ア)-A-86 A.5.3.1 垂直落下……………(ア)-A-80 A.5.3.2 水平落下……………(ア)-A-86 A.5.3.3 コーナ―落下……………(ア)-A-107 A.5.4 積み重ね試験……………(ア)-A-108 A.5.5 貫通……………(ア)-A-111 A.5.6 角又は線落下……………(ア)-A-113 A.5.7 結果の要約及びその評価……………(ア)-A-114 A.8 特別の試験条件……………(ア)-A-118 A.8.1 強度試験・落下試験Ⅰ(9m落下時)……………(ア)-A-118 A.8.1.1 垂直落下……………(ア)-A-129 A.8.1.2 水平落下……………(ア)-A-144 A.8.1.3 コーナ―落下……………(ア)-A-153 A.8.1.4 傾斜落下……………(ア)-A-155 A.8.1.5 結果の要約……………(ア)-A-155 A.8.2 強度試験・落下試験Ⅱ(1m落下時)……………(ア)-A-156 A.8.2.1 結果の要約……………(ア)-A-160 A.8.3 熱的試験……………(ア)-A-161 A.8.3.1 温度及び圧力の要約……………(ア)-A-161 A.8.3.2 熱膨張……………(ア)-A-162 A.8.3.3 許容応力との比較……………(ア)-A-165 A.8.4 浸漬……………(ア)-A-172 A.8.5 結果の要約及びその評価……………(ア)-A-174 A.7 強化浸漬試験……………(ア)-A-181 A.8 放射線照射物……………(ア)-A-185 A.9 移分型輸送物……………(ア)-A-188 A.9.1 移分型輸送物に係る一般の試験条件……………(ア)-A-188 A.9.2 移分型輸送物に係る特別の試験条件……………(ア)-A-188 A.10 付属書類……………(ア)-A-194 A.10.1 送りき部の応力集中係数……………(ア)-A-194

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前	頁番号	補正後
目-3	<p>A.10.2 ボロン入りステンレス鋼の材料特性…………… (ロ)-A-194</p> <p>A.10.3 $9m$ 水平落下時のフィンの衝撃力及び吸収エネルギーの計算…………… (ロ)-A-203</p> <p>A.10.4 実機大スケール模擬燃料集合体を用いた $9m$ 落下試験…………… (ロ)-A-209</p> <p>A.10.5 1/3スケールモデルを用いた $9m$ 落下試験…………… (ロ)-A-221</p> <p>A.10.6 実規模モデルを用いた実証試験…………… (ロ)-A-225</p> <p>A.10.7 傾斜落下時の輸送物健全性…………… (ロ)-A-230</p> <p>A.10.8 積層体低温時の強度評価…………… (ロ)-A-238</p> <p>A.10.9 参考文献…………… (ロ)-A-242</p> <p>(ロ)章 B 熱解析…………… (ロ)-B-1</p> <p>B.1 概要…………… (ロ)-B-1</p> <p>B.2 材料の熱的性質…………… (ロ)-B-5</p> <p>B.3 構成要素の仕様…………… (ロ)-B-12</p> <p>B.4 一般の試験条件…………… (ロ)-B-13</p> <p>B.4.1 熱解析モデル…………… (ロ)-B-13</p> <p>B.4.1.1 解析モデル…………… (ロ)-B-28</p> <p>B.4.1.2 試験モデル…………… (ロ)-B-28</p> <p>B.4.2 最高温度…………… (ロ)-B-32</p> <p>B.4.3 最低温度…………… (ロ)-B-34</p> <p>B.4.4 最大内圧…………… (ロ)-B-37</p> <p>B.4.5 最大熱応力…………… (ロ)-B-37</p> <p>B.4.6 結果の要約及びその評価…………… (ロ)-B-40</p> <p>B.5 特別の試験条件…………… (ロ)-B-40</p> <p>B.5.1 熱解析モデル…………… (ロ)-B-40</p> <p>B.5.1.1 解析モデル…………… (ロ)-B-45</p> <p>B.5.1.2 試験モデル…………… (ロ)-B-45</p> <p>B.5.2 核燃料輸送物の評価条件…………… (ロ)-B-46</p> <p>B.5.3 核燃料輸送物温度…………… (ロ)-B-51</p> <p>B.5.4 最大内圧…………… (ロ)-B-53</p> <p>B.5.5 最大熱応力…………… (ロ)-B-53</p> <p>B.5.6 結果の要約及びその評価…………… (ロ)-B-53</p>	目-3	<p>A.10.2 ボロン入りステンレス鋼の材料特性…………… (ロ)-A-195</p> <p>A.10.3 $9m$ 水平落下時のフィンの衝撃力及び吸収エネルギーの計算…………… (ロ)-A-204</p> <p>A.10.4 実機大スケール模擬燃料集合体を用いた $9m$ 落下試験…………… (ロ)-A-210</p> <p>A.10.5 1/3スケールモデルを用いた $9m$ 落下試験…………… (ロ)-A-224</p> <p>A.10.6 実規模モデルを用いた実証試験…………… (ロ)-A-228</p> <p>A.10.7 傾斜落下時の輸送物健全性…………… (ロ)-A-239</p> <p>A.10.8 積層体低温時の強度評価…………… (ロ)-A-244</p> <p>A.10.9 実機大スケールモデルを用いた実証試験…………… (ロ)-A-248</p> <p>A.10.10 $9m$ 水平落下評価の荷重条件…………… (ロ)-A-250</p> <p>A.10.11 参考文献…………… (ロ)-A-254</p> <p>(ロ)章 B 熱解析…………… (ロ)-B-1</p> <p>B.1 概要…………… (ロ)-B-1</p> <p>B.2 材料の熱的性質…………… (ロ)-B-5</p> <p>B.3 構成要素の仕様…………… (ロ)-B-12</p> <p>B.4 一般の試験条件…………… (ロ)-B-13</p> <p>B.4.1 熱解析モデル…………… (ロ)-B-13</p> <p>B.4.1.1 解析モデル…………… (ロ)-B-13</p> <p>B.4.1.2 試験モデル…………… (ロ)-B-25</p> <p>B.4.2 最高温度…………… (ロ)-B-28</p> <p>B.4.3 最低温度…………… (ロ)-B-32</p> <p>B.4.4 最大内圧…………… (ロ)-B-34</p> <p>B.4.5 最大熱応力…………… (ロ)-B-37</p> <p>B.4.6 結果の要約及びその評価…………… (ロ)-B-37</p> <p>B.5 特別の試験条件…………… (ロ)-B-40</p> <p>B.5.1 熱解析モデル…………… (ロ)-B-40</p> <p>B.5.1.1 解析モデル…………… (ロ)-B-40</p> <p>B.5.1.2 試験モデル…………… (ロ)-B-45</p> <p>B.5.2 核燃料輸送物の評価条件…………… (ロ)-B-45</p> <p>B.5.3 核燃料輸送物温度…………… (ロ)-B-46</p> <p>B.5.4 最大内圧…………… (ロ)-B-51</p> <p>B.5.5 最大熱応力…………… (ロ)-B-53</p> <p>B.5.6 結果の要約及びその評価…………… (ロ)-B-53</p>

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前	頁番号	補正後
目-5	<p>D.3 モデル仕様..... (目)-D-16</p> <p>D.3.1 解析モデル..... (目)-D-16</p> <p>D.3.2 解析モデル各領域における原子価数密度..... (目)-D-33</p> <p>D.4 遮熱評価..... (目)-D-46</p> <p>D.5 結果の要約及びその評価..... (目)-D-58</p> <p>D.6 付属書類..... (目)-D-62</p> <p>D.6.1 火災時のレジンの積層状態..... (目)-D-62</p> <p>D.6.2 平均燃焼速度が低い場合の冷却日数について..... (目)-D-68</p> <p>D.6.3 参考文献..... (目)-D-72</p> <p>(目)章 E 臨界解析..... (目)-E-1</p> <p>E.1 概要..... (目)-E-1</p> <p>E.2 解析対象..... (目)-E-2</p> <p>E.2.1 取納物..... (目)-E-2</p> <p>E.2.2 輸送容器..... (目)-E-4</p> <p>E.2.3 中性子吸収材..... (目)-E-4</p> <p>E.3 モデル仕様..... (目)-E-5</p> <p>E.3.1 解析モデル..... (目)-E-5</p> <p>E.3.2 解析モデル各領域における原子価数密度..... (目)-E-5</p> <p>E.4 未読評価面..... (目)-E-12</p> <p>E.4.1 計算条件..... (目)-E-12</p> <p>E.4.2 核燃料輸送物への水の過入等..... (目)-E-13</p> <p>E.4.3 計算方法..... (目)-E-14</p> <p>E.4.4 計算結果..... (目)-E-14</p> <p>E.5 ペンチマーク試験..... (目)-E-16</p> <p>E.6 結果の要約及びその評価..... (目)-E-25</p> <p>E.7 付属書類..... (目)-E-26</p> <p>E.7.1 参考文献..... (目)-E-26</p>	目-5	<p>D.2.1 カンマ線源..... (目)-D-8</p> <p>D.2.2 中性子源..... (目)-D-13</p> <p>D.3 モデル仕様..... (目)-D-16</p> <p>D.3.1 解析モデル..... (目)-D-16</p> <p>D.3.2 解析モデル各領域における原子価数密度..... (目)-D-33</p> <p>D.4 遮熱評価..... (目)-D-46</p> <p>D.5 結果の要約及びその評価..... (目)-D-58</p> <p>D.6 付属書類..... (目)-D-62</p> <p>D.6.1 火災時のレジンの積層状態..... (目)-D-62</p> <p>D.6.2 平均燃焼速度が低い場合の冷却日数について..... (目)-D-68</p> <p>D.6.3 平均燃焼速度を超える燃料をバスケット外部周に取納した場合の 線量当量率について..... (目)-D-72</p> <p>D.6.4 参考文献..... (目)-D-74</p> <p>(目)章 E 臨界解析..... (目)-E-1</p> <p>E.1 概要..... (目)-E-1</p> <p>E.2 解析対象..... (目)-E-2</p> <p>E.2.1 取納物..... (目)-E-2</p> <p>E.2.2 輸送容器..... (目)-E-4</p> <p>E.2.3 中性子吸収材..... (目)-E-4</p> <p>E.3 モデル仕様..... (目)-E-5</p> <p>E.3.1 解析モデル..... (目)-E-5</p> <p>E.3.2 解析モデル各領域における原子価数密度..... (目)-E-5</p> <p>E.4 未読評価面..... (目)-E-12</p> <p>E.4.1 計算条件..... (目)-E-12</p> <p>E.4.2 核燃料輸送物への水の過入等..... (目)-E-13</p> <p>E.4.3 計算方法..... (目)-E-14</p> <p>E.4.4 計算結果..... (目)-E-14</p> <p>E.5 ペンチマーク試験..... (目)-E-16</p> <p>E.6 結果の要約及びその評価..... (目)-E-25</p> <p>E.7 付属書類..... (目)-E-26</p>
目-5	目-5	目-5	目-5

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前	頁番号	補正後																																																												
(イ)-14	<p>(イ)-第0.3表 核燃料輸送物重量</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>輸送容器各部又は収納物</th> <th>重量(トン)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A. 本体</td> <td>82.2以下</td> </tr> <tr> <td>B. 蓋</td> <td>5.3以下</td> </tr> <tr> <td>C. バスケット</td> <td>6.7以下</td> </tr> <tr> <td>D. 緩衝体</td> <td></td> </tr> <tr> <td>① 上部緩衝体(近接防止金網を含む。)</td> <td>3.5以下</td> </tr> <tr> <td>② 下部緩衝体(近接防止金網を含む。)</td> <td>3.5以下</td> </tr> <tr> <td>E. 燃料集合体^{注1)}</td> <td>10.2以下</td> </tr> <tr> <td>(バーナブルポイズン集合体、スツール及び上・下部スツールを含む。)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>F. 冷却水^{注2)}</td> <td>4.1以下</td> </tr> <tr> <td>G. 輸送架台(近接防止金網を含む。)</td> <td>10.0以下</td> </tr> <tr> <td>H. 輸送容器総重量</td> <td></td> </tr> <tr> <td>A+B+C+D</td> <td>101.2以下</td> </tr> <tr> <td>I. 核燃料輸送物総重量</td> <td></td> </tr> <tr> <td>A+B+C+D+E+F^{注3)}</td> <td>115.0以下</td> </tr> </tbody> </table> <p>注1) 各燃料集合体タイプのうち、重量の大きい17×17型で算出 注2) 各燃料集合体タイプのうち、燃料を収納した場合に冷却水重量が最大となる14×14型で算出 注3) 各燃料集合体タイプのうち、重量の大きい17×17型を収納した場合の冷却水重量(3.9トン以下)で算出</p>	輸送容器各部又は収納物	重量(トン)	A. 本体	82.2以下	B. 蓋	5.3以下	C. バスケット	6.7以下	D. 緩衝体		① 上部緩衝体(近接防止金網を含む。)	3.5以下	② 下部緩衝体(近接防止金網を含む。)	3.5以下	E. 燃料集合体 ^{注1)}	10.2以下	(バーナブルポイズン集合体、スツール及び上・下部スツールを含む。)		F. 冷却水 ^{注2)}	4.1以下	G. 輸送架台(近接防止金網を含む。)	10.0以下	H. 輸送容器総重量		A+B+C+D	101.2以下	I. 核燃料輸送物総重量		A+B+C+D+E+F ^{注3)}	115.0以下	(イ)-14	<p>(イ)-第0.3表 核燃料輸送物重量</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>輸送容器各部又は収納物</th> <th>重量(トン)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A. 本体</td> <td>82.2以下</td> </tr> <tr> <td>B. 蓋</td> <td>5.3以下</td> </tr> <tr> <td>C. バスケット</td> <td>6.7以下</td> </tr> <tr> <td>D. 緩衝体</td> <td></td> </tr> <tr> <td>① 上部緩衝体(近接防止金網を含む。)</td> <td>3.5以下</td> </tr> <tr> <td>② 下部緩衝体(近接防止金網を含む。)</td> <td>3.5以下</td> </tr> <tr> <td>E. 燃料集合体^{注1)}</td> <td>10.2以下</td> </tr> <tr> <td>(バーナブルポイズン集合体、スツール及び上・下部スツールを含む。)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>F. 冷却水^{注2)}</td> <td>4.1以下</td> </tr> <tr> <td>G. 輸送架台(近接防止金網を含む。)</td> <td>10.0以下</td> </tr> <tr> <td>H. 輸送容器総重量</td> <td></td> </tr> <tr> <td>A+B+C+D</td> <td>101.2以下</td> </tr> <tr> <td>I. 核燃料輸送物総重量^{注3)}</td> <td></td> </tr> <tr> <td>A+B+C+D+E+F^{注4)}</td> <td>115.0以下</td> </tr> </tbody> </table> <p>注1) 各燃料集合体タイプのうち、重量の大きい17×17型で算出 注2) 各燃料集合体タイプのうち、燃料を収納した場合に冷却水重量が最大となる14×14型で算出 注3) 輸送容器各部、収納物及び冷却水の端数処理前の重量を差に算出 注4) 各燃料集合体タイプのうち、重量の大きい17×17型を収納した場合の冷却水重量(3.9トン以下)で算出</p>	輸送容器各部又は収納物	重量(トン)	A. 本体	82.2以下	B. 蓋	5.3以下	C. バスケット	6.7以下	D. 緩衝体		① 上部緩衝体(近接防止金網を含む。)	3.5以下	② 下部緩衝体(近接防止金網を含む。)	3.5以下	E. 燃料集合体 ^{注1)}	10.2以下	(バーナブルポイズン集合体、スツール及び上・下部スツールを含む。)		F. 冷却水 ^{注2)}	4.1以下	G. 輸送架台(近接防止金網を含む。)	10.0以下	H. 輸送容器総重量		A+B+C+D	101.2以下	I. 核燃料輸送物総重量 ^{注3)}		A+B+C+D+E+F ^{注4)}	115.0以下
輸送容器各部又は収納物	重量(トン)																																																														
A. 本体	82.2以下																																																														
B. 蓋	5.3以下																																																														
C. バスケット	6.7以下																																																														
D. 緩衝体																																																															
① 上部緩衝体(近接防止金網を含む。)	3.5以下																																																														
② 下部緩衝体(近接防止金網を含む。)	3.5以下																																																														
E. 燃料集合体 ^{注1)}	10.2以下																																																														
(バーナブルポイズン集合体、スツール及び上・下部スツールを含む。)																																																															
F. 冷却水 ^{注2)}	4.1以下																																																														
G. 輸送架台(近接防止金網を含む。)	10.0以下																																																														
H. 輸送容器総重量																																																															
A+B+C+D	101.2以下																																																														
I. 核燃料輸送物総重量																																																															
A+B+C+D+E+F ^{注3)}	115.0以下																																																														
輸送容器各部又は収納物	重量(トン)																																																														
A. 本体	82.2以下																																																														
B. 蓋	5.3以下																																																														
C. バスケット	6.7以下																																																														
D. 緩衝体																																																															
① 上部緩衝体(近接防止金網を含む。)	3.5以下																																																														
② 下部緩衝体(近接防止金網を含む。)	3.5以下																																																														
E. 燃料集合体 ^{注1)}	10.2以下																																																														
(バーナブルポイズン集合体、スツール及び上・下部スツールを含む。)																																																															
F. 冷却水 ^{注2)}	4.1以下																																																														
G. 輸送架台(近接防止金網を含む。)	10.0以下																																																														
H. 輸送容器総重量																																																															
A+B+C+D	101.2以下																																																														
I. 核燃料輸送物総重量 ^{注3)}																																																															
A+B+C+D+E+F ^{注4)}	115.0以下																																																														

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

頁番号		(イ)-20						
(イ)-第 D.4 表 主要核種の種類と量								
項目	燃料タイプ	タイプ1	タイプ2	タイプ3	タイプ4	タイプ5	タイプ6	制限放射能設定用
		14	14	14	14	14	14	14
① 燃料集合体収納体数(体)								
② 放射能強度(PBq)	(輸送容器1基当たり)							
③ 主要核種の放射能強度(PBq)	(②を主要核種ごとに分類)							
	【核種】							
	⁹⁰ Sr							
	¹³⁷ Sr							
	⁹⁰ Y							
	⁹¹ Y							
	⁹⁰ Zr							
	⁹³ Nb							
	⁹³ Tc							
	¹⁰⁶ Ru							
	¹⁰⁶ Zn							
	¹⁰⁶ Ag							
	¹¹⁰ Cd							
	¹¹³ Sn							
	¹¹³ Sb							
	¹²⁷ Te							
	¹²⁷ I							
	¹²⁹ I							
	¹³⁴ Ce							
	¹³⁷ Cs							
	¹³⁷ Ba							
	¹⁴⁰ Ce							
	¹⁴⁴ Pr							
	¹⁴⁴ Sm							
	¹⁴⁷ Pm							
	¹⁵¹ Sm							
	¹⁵⁴ Eu							
	¹⁵⁹ Eu							
	¹⁶² Er							
	小計	40	48	50	35	32	34	-
	その他							
	合計							
④ 崩壊熱量(kW)	(輸送容器1基当たり)	40	48	50	35	32	34	-
注記) (イ)-第 D.3 表に基づき、ORIGEN2.1 コードにより計算された値								

補正前

02-(ト)

頁番号		(イ)-20						
(イ)-第 D.4 表 主要核種の種類と量								
項目	燃料タイプ	タイプ1	タイプ2	タイプ3	タイプ4	タイプ5	タイプ6	制限放射能設定用
		14	14	14	14	14	14	14
① 燃料集合体収納体数(体)								
② 放射能強度(PBq)	(輸送容器1基当たり)							
③ 主要核種の放射能強度(PBq)	(②を主要核種ごとに分類)							
	【核種】							
	⁹⁰ Sr							
	¹³⁷ Sr							
	⁹⁰ Y							
	⁹¹ Y							
	⁹⁰ Zr							
	⁹³ Nb							
	⁹³ Tc							
	¹⁰⁶ Ru							
	¹⁰⁶ Zn							
	¹⁰⁶ Ag							
	¹¹⁰ Cd							
	¹¹³ Sn							
	¹¹³ Sb							
	¹²⁷ Te							
	¹²⁷ I							
	¹²⁹ I							
	¹³⁴ Ce							
	¹³⁷ Cs							
	¹³⁷ Ba							
	¹⁴⁰ Ce							
	¹⁴⁴ Pr							
	¹⁴⁴ Sm							
	¹⁴⁷ Pm							
	¹⁵¹ Sm							
	¹⁵⁴ Eu							
	¹⁵⁹ Eu							
	¹⁶² Er							
	小計	40	48	50	35	32	34	-
	その他							
	合計							
④ 崩壊熱量(kW)	(輸送容器1基当たり)	40	48	50	35	32	34	-
注記) (イ)-第 D.3 表に基づき、ORIGEN2.1 コードにより計算された値								

補正後

02-(ト)

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を で示す。

補正内容一覧

頁番号		(ロ)-A-15											
補正前	(ロ)-A-15	(ロ)-第A.1表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法(8/10)											
		条件	解析項目及びその詳細	設計条件					解析方法		備考		
				参照図表	材質	温度	設計負荷		適用数式又は要素	解析基準			
		種類	負荷係数				要素						
		特別	3) 水平落下(続き) バスケット チャンネル チャンネル支持部 燃料被覆管	(ロ)-第A.48図 (ロ)-第A.50図	B-SUS SUS304	190℃ 190℃	慣性力 慣性力	1 1	曲げ 曲げ	$\sigma_b = M/Z$ $\sigma_b = M/Z$	1.5 σ_y 1.5 σ_y	注15)	
		試験	4) コーナー落下 蓋ボルト	-	[]	170℃	内筒内圧及び慣性力	1	引張	$\sigma_t = \sigma_{t1} + \sigma_{t2}$	2/3Su	注16)	
			5) 傾斜落下	(ロ)章 A.10.7を引用して評価									
		条件	落下試験II										
			1) 垂直落下 蓋部及び底部	-	[]	170℃	軟鋼棒圧潰荷重	1	せん断	$F = \pi dtS$	F	注17)	
			2) 水平落下 中間筒 ハブ加ワレット	- -	[]	170℃ 180℃	軟鋼棒圧潰荷重 軟鋼棒圧潰荷重	1 1	せん断 せん断	$tr = (W/Su)^{0.71}$ $F = \pi dtS$	t F	注18)	
注15) Z: 断面係数 注16) σ_t : ボルトに生じる引張応力、 σ_{t1} : 慣性力により生じる引張応力、 σ_{t2} : 内筒内圧により生じる引張応力 注17) F: 貫通強度 注18) tr: 耐貫通板厚													
頁番号		(ロ)-A-15											
補正後	(ロ)-A-15	(ロ)-第A.1表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法(8/10)											
		条件	解析項目及びその詳細	設計条件					解析方法		備考		
				参照図表	材質	温度	設計負荷		適用数式又は要素	解析基準			
		種類	負荷係数				要素						
		特別	3) 水平落下(続き) バスケット チャンネル チャンネル支持部 燃料被覆管	(ロ)-第A.48図 (ロ)-第A.50図	B-SUS SUS304	190℃ 190℃	慣性力 慣性力	1 1	曲げ 曲げ	$\sigma_b = M/Z$ $\sigma_b = M/Z$	1.5 σ_y 1.5 σ_y	注15)	
		試験	4) コーナー落下 蓋ボルト	-	[]	170℃	内筒内圧及び慣性力	1	引張	$\sigma_t = \sigma_{t1} + \sigma_{t2}$	2/3Su	注16)	
			5) 傾斜落下	(ロ)章 A.10.7を引用して評価									
		条件	落下試験II										
			1) 垂直落下 蓋部及び底部	-	[]	170℃	軟鋼棒圧潰荷重	1	せん断	$F = \pi dtS$	F	注17)	
			2) 水平落下 中間筒 ハブ加ワレット	- -	[]	170℃ 180℃	軟鋼棒圧潰荷重 軟鋼棒圧潰荷重	1 1	せん断 せん断	$tr = (W/Su)^{0.71}$ $F = \pi dtS$	t F	注18)	
注15) Z: 断面係数 注16) σ_t : ボルトに生じる引張応力、 σ_{t1} : 慣性力により生じる引張応力、 σ_{t2} : 内筒内圧により生じる引張応力 注17) F: 貫通強度 注18) tr: 耐貫通板厚													

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

頁番号		(ロ)-A-16									
(ロ)-第A.1表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法(9/10)											
条件	解析項目及びその詳細	参照図表	材質	温度	設計条件			解析方法		備考	
					種類	荷重係数	要素	適用数式又は要素	解析基準		
特別試験条件	熱的試験										
	フランジ	(ロ)-第A.52図		440℃	内筒内圧及び初期締付トルク	1	応力強さ	$\begin{cases} P_m \\ P_l \\ P_l + P_b \end{cases}$	$\begin{cases} 2/3S_u \\ S_u \\ S_u \end{cases}$		
	内筒	同上		210℃	同上	1	同上	同上	同上		
	蓋	同上		380℃	同上	1	同上	同上	同上		
	中間筒	同上		260℃	同上	1	同上	同上	同上		
	底板	同上		400℃	同上	1	同上	同上	同上		
	蓋ボルト	同上		260℃	内筒内圧、熱膨張及び初期締付トルク	1	引張 引張と曲げ	$\begin{cases} \sigma_m \\ \sigma_m + \sigma_b \end{cases}$	$\begin{cases} 2/3S_u \\ S_u \end{cases}$		
	Oリングの密封性	同上	ふっ素ゴム	-	同上	1	変形量	口開き変形量	初期締付代		
	伝熱フィン	(ロ)-第A.54図	C1020P	371℃	熱膨張	1	ひずみ	$\varepsilon = (\ell_1 - \ell_t) / \ell_t$	ε_f	注19)	
	バスケット	-	SUS304	220℃	外圧	1	圧力	$\sigma = P \cdot r / h$	S_y		
核燃料輸送物の追加試験条件	15 m 浸漬										
	蓋	(ロ)-第A.55図		170℃	外圧	1	曲げ	$\sigma_b = \frac{3(3+\nu)P \cdot a^2}{8t^2}$	S_u	注20)	
	200 m 浸漬										
	1) 中間筒	-		170℃	外圧	1	圧力	$P_a = 1.5 \frac{4Bt}{3D_o}$	P_a	注21)	
	2) 底板	-		180℃	外圧	1	曲げ	$\sigma_b = 0.75 \frac{P \cdot a^2}{t^2}$	S_u	注22)	
	3) 蓋	(ロ)-第A.55図		170℃	外圧	1	曲げ	$\sigma_b = \frac{3(3+\nu)P \cdot a^2}{8t^2}$	S_u		
	4) ガードプレート	-		170℃	外圧	1	曲げ	同上	同上		

注19) ε : 熱ひずみ、 ℓ_1 : 火災発生後30分における伝熱フィン長さ、 ℓ_t : 火災発生後30分における伝熱フィンの自由伸び長さ、 ε_f : 破断ひずみ
 注20) ν : ポアソン比、P: 圧力、a: 蓋半径、t: 板厚
 注21) P_a : 許容外圧、B: L/D_o、D_o/t 及び温度で定まる係数、t: 中間筒板厚、D_o: 中間筒外径
 注22) P: 外圧、a: 円板の半径、t: 板厚

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を 示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前	頁番号	補正後
(D)-A-31	<p>輸送物吊上重量は、(イ)章 C.5 より垂直吊り時(縦衝体なし)は 108.5 トン以下であり、水平吊り時(輸送架台含む)は 125 トン以下である。</p> <p>ここで、</p> <p>P_v : 垂直吊り時のトラニオン 1 個に作用する荷重 (N)</p> <p>P_h : 水平吊り時のトラニオン 1 個に作用する荷重 (N)</p> <p>n : トラニオンの数=2</p> <p>W : 容器の重量 垂直吊り時 : 1.085×10^5 (kg)</p> <p>水平吊り時 : 1.25×10^5 (kg)</p> <p>a : 負荷係数=3</p> <p>g : 重力加速度=9.8m/s²</p>	(D)-A-31	<p>輸送物吊上重量は、垂直吊り時の重量が最大となる燃料装荷直後の状態の 108.5 トン以下であり、水平吊り時(輸送架台含む)は 125 トン以下である。</p> <p>ここで、</p> <p>P_v : 垂直吊り時のトラニオン 1 個に作用する荷重 (N)</p> <p>P_h : 水平吊り時のトラニオン 1 個に作用する荷重 (N)</p> <p>n : トラニオンの数=2</p> <p>W : 容器の重量 垂直吊り時 : 1.085×10^5 (kg)</p> <p>水平吊り時 : 1.25×10^5 (kg)</p> <p>a : 負荷係数=3^{脚)}</p> <p>g : 重力加速度=9.8m/s²</p> <p>(注記：以降の文献番号ずれについては記載を省略する。)</p>
(D)-A-53	<p>1. 解析モデル</p> <p>解析モデルとして(□)-第 A.7 図に示す三次元 180° 対称モデルを用いる。</p> <p>本解析モデルは、外筒、レジン、仕切板、レジンカバー、中間筒、鉛、内筒、フランジ、底板、蓋ボルト及び蓋より構成され、蓋は蓋ボルトによりフランジに接続され、蓋とフランジとの接触が考慮されている。</p>	(D)-A-53	<p>1. 解析モデル</p> <p>解析モデルとして(□)-第 A.7 図に示す三次元 180° 対称モデルを用いる。</p> <p>本解析モデルは、外筒、レジン、仕切板、レジンカバー、中間筒、鉛、内筒、フランジ、底板、蓋ボルト及び蓋より構成され、蓋は蓋ボルトによりフランジに接続され、蓋とフランジとの接触が考慮されている。</p> <p>なお、NPT-14P 型輸送容器のレジンカバー部分は、八角形の角部やトラニオン接合部等の構造不連続部がレジンカバーの変形を拘束しているが、レジンカバーの変形を大きく評価するため、拘束点がない円筒形のモデルを採用する。実形状を考慮した場合のレジン保持機能に与える影響については実証試験により確認している。(□)章 A.10.9 参照)</p>
(D)-A-144	<p>a. 荷重条件</p> <p>水平落下時に作用する荷重を(□)-第 A.47 図に示す。ここで、衝撃加速度(968m/s²)による自重の慣性力が落下方向に働く。内部の収納物等(バスケット、収納物、内筒内水)の慣性力が内筒内面に、内筒内水の衝撃圧が蓋及び底部内面に、また、フィンの反力が外筒に働く。</p>	(D)-A-144	<p>a. 荷重条件</p> <p>水平落下時に作用する荷重を(□)-第 A.47 図に示す。ここで、衝撃加速度(968m/s²)による自重の慣性力が落下方向に働く。内部の収納物等(バスケット、収納物、内筒内水)の慣性力が内筒内面に、内筒内水の衝撃圧が蓋及び底部内面に、また、フィンの反力が外筒に働く。</p> <p>なお、(□)章 A.10.6 に示す実証試験に基づくとトラニオンはせん断破壊しているため、トラニオンから輸送容器に伝わる荷重の影響は小さいことが予想される。ここで、(□)章 A.10.10 に示すような理論式に基づく評価により、トラニオン衝突時の衝突荷重を考慮してフィンの荷重を補正した評価と、フィン及びトラニオンからの荷重が個別に作用する場合の評価を比較した。この結果、トラニオン衝突時の衝撃荷重を考慮してフィンの荷重を補正した評価の方が保守的であることから、有限要素法による ABAQUS コードを用いた評価においてもこの荷重条件を採用した。</p>

注記) 核燃料輸送施設設計承認申請書(令和 5 年 5 月 30 日付け原設発第 6 号)申請時からの変更箇所を 〇 で示す。

補正内容一覧

補正前	<p>頁番号</p> <p>(D)-A-145</p>	<p> P_i : 内筒内圧(1.70MPaG) F_{wi} : 内筒内水水頭圧 F_{iw} : 収納物の慣性力 F_f : フィンの反力 P_{sv} : 中性子遮蔽材充填空間圧力(0.40MPaG) P_b : 蓋ボルト初期締付力(91MPa) </p> <p>(蓋ボルト初期締付力)</p> <p>(D)-第A.47図 9m水平落下時の荷重条件及び境界条件</p>
補正後	<p>頁番号</p> <p>(D)-A-145</p>	<p> P_i : 内筒内圧(1.70MPaG) F_{wi} : 内筒内水水頭圧 F_{iw} : 収納物の慣性力 F_f : フィンの反力 P_{sv} : 中性子遮蔽材充填空間圧力(0.40MPaG) P_b : 蓋ボルト初期締付力(91MPa) </p> <p>(蓋ボルト初期締付力)</p> <p>(D)-第A.47図 9m水平落下時の荷重条件及び境界条件</p>

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前	頁番号	補正後
(D)-A-181	<p>A.7 強化浸漬試験</p> <p>1. 外圧に対する中間筒の耐圧強度</p> <p>本輸送物の取納物は最大放射能量が、A_2 値の 10 万倍を超えるので、200m 浸漬に相当する水頭圧で解析を行う。</p>	(D)-A-181	<p>A.7 強化浸漬試験</p> <p>1. 外圧に対する中間筒の耐圧強度</p> <p>本輸送物の取納物は最大放射能量が、A_2 値の 10 万倍を超えるので、200m 浸漬に相当する水頭圧で解析を行う。本輸送器の胴部は、密封境界を構成する内筒、内筒の外周に位置する中間筒、更にその周りを囲む外筒で構成された三重円筒構造となっている。これらのうち、中間筒が外圧に対して十分な強度を有していれば、密封境界を構成する内筒が破損することはないことから、外圧に対する輸送器胴部の強度評価においては、中間筒を評価対象としている。</p>
(D)-A-181	<p>したがって、中間筒の耐圧強度は十分である。</p>	(D)-A-181	<p>したがって、中間筒の耐圧強度は十分であるため、密封境界を構成する内筒が破損することはない。</p>

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書 (令和 5 年 5 月 30 日付け原設発第 6 号) 申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前 (記載なし)	頁番号 (D)-A-184	補正後
—			<p>4. 外圧に対するバルブカバプレートの強度 9)に示す外圧に対する蓋の強度評価と同様の評価式により、外圧に対するバルブカバプ レートの強度評価を行う。</p> <p>なお、バルブカバプレートは、水位調整用加圧バルブ、ベント・水位調整バルブ及びドレ ンバルブに設置されており、板厚は全て同じである。本評価では、外径が大きく外圧による荷 重が大きいベント・水位調整バルブ及びドレンバルブのバルブカバプレートに対して評価 を行う。</p> <p>バルブカバプレートの最大応力はバルブカバプレート中央部に生じる。この半径方向 曲げ応力σ_b(MPa)は、次式で与えられる。</p> $\sigma_b = \frac{3(3+\nu)P \cdot a}{8t}$ <p>ただし、</p> <ul style="list-style-type: none"> a : 半径 (mm) P : 圧力 (MPaG) t : 板厚 (mm) ν : ポアソン比 <p>ここで、</p> <ul style="list-style-type: none"> a = <input type="text"/> mm P = 2.00MPaG t = <input type="text"/> mm ν = 0.3 <p>したがって、</p> $\sigma_b = \frac{3 \times (3+0.3) \times 2.00 \times \square}{8 \times \square}$ <p>= 21.0MPa</p> <p>バルブカバプレートの温度 170℃における設計引張強さ Su は <input type="text"/> MPa であるので、基準値 は Su の <input type="text"/> MPa である。したがって、余裕率は、次式で与えられる。</p> $MS = \frac{Su}{\sigma_b} - 1$ $= \frac{\square}{21.0} - 1$ <p>= <input type="text"/></p> <p>したがって、外圧に対しバルブカバプレートは十分な強度を有するため、密封境界を構成 するバルブが破損することはない。</p> <p style="text-align: right;">(D)-A-184</p> <p>(注記：以降の頁番号すれについては記載を省略する。)</p>

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書 (令和 5 年 5 月 30 日付け原設発第 6 号) 申請時からの変更箇所を で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前	頁番号	補正後
(D)-A-209	<p>1. 概要 実機大スケール模擬燃料集合体を用いて9m垂直及び水平落下試験を行った。その結果、燃料集合体に残留変形が認められるものの、燃料被覆管は、破損しないことを確認した。また、臨界評価条件の妥当性を確認するため、模擬燃料集合体の残留変形量を確認した。 なお、本試験では、燃料被覆管の剛性が最も低い燃料タイプとして、燃料被覆管の外径が細く、かつ、肉厚の最も薄いPWR17×17配列型燃料集合体を対象に試験を実施した。</p>	(D)-A-210	<p>1. 概要 実機大スケール模擬燃料集合体を用いて9m垂直及び水平落下試験を行った。その結果、燃料集合体に残留変形が認められるものの、燃料被覆管は、破損しないことを確認した。また、臨界評価条件の妥当性を確認するため、模擬燃料集合体の残留変形量を確認した。 なお、本試験では、燃料被覆管の剛性が最も低い燃料タイプとして、燃料被覆管の外径が細く、かつ、肉厚の最も薄いPWR17×17配列型燃料集合体を対象に試験を実施したが、PWR14×14配列型及びPWR15×15配列型の燃料集合体についても、試験結果に基づき燃料棒の残留変形量を評価した。</p>

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前	頁番号	補正後																																																																											
(D)-A-211	<p>(ロ)-第A.位4表 落下試験に使用する模擬燃料集合体仕様</p> <table border="1" data-bbox="239 1232 399 1859"> <thead> <tr> <th colspan="2">試験</th> <th colspan="2">模擬燃料集合体の仕様</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">9m 頭部垂直落下</td> <td>(1)</td> <td rowspan="2">燃料型式 : PWR17×17配列型燃料集合体 構成材料 : 実燃料模擬 ペレット :</td> <td rowspan="2">模擬燃料集合体の仕様</td> </tr> <tr> <td>(2)</td> </tr> <tr> <td>9m 底部垂直落下</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>9m 水平落下</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>(ロ)-第A.位5表 落下試験に使用した上・下部スツールの種類</p> <table border="1" data-bbox="526 1209 798 1881"> <thead> <tr> <th rowspan="2">落下姿勢</th> <th rowspan="2">燃料タイプ</th> <th colspan="2">上・下部スツールの種類</th> </tr> <tr> <th>模擬燃料集合体上部</th> <th>模擬燃料集合体下部</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">9m 頭部垂直落下</td> <td>(1) 模擬燃料集合体 PWR17×17配列型</td> <td>上部スツール (タイプI)</td> <td>下部スツール</td> </tr> <tr> <td>(2) 模擬燃料集合体 PWR17×17配列型</td> <td>上部スツール (タイプII)</td> <td>下部スツール</td> </tr> <tr> <td>9m 底部垂直落下</td> <td>模擬燃料集合体 PWR17×17配列型</td> <td>上部スツール (タイプI)</td> <td>下部スツール</td> </tr> <tr> <td>9m 水平落下</td> <td>模擬燃料集合体 PWR17×17配列型</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>	試験		模擬燃料集合体の仕様		9m 頭部垂直落下	(1)	燃料型式 : PWR17×17配列型燃料集合体 構成材料 : 実燃料模擬 ペレット :	模擬燃料集合体の仕様	(2)	9m 底部垂直落下				9m 水平落下				落下姿勢	燃料タイプ	上・下部スツールの種類		模擬燃料集合体上部	模擬燃料集合体下部	9m 頭部垂直落下	(1) 模擬燃料集合体 PWR17×17配列型	上部スツール (タイプI)	下部スツール	(2) 模擬燃料集合体 PWR17×17配列型	上部スツール (タイプII)	下部スツール	9m 底部垂直落下	模擬燃料集合体 PWR17×17配列型	上部スツール (タイプI)	下部スツール	9m 水平落下	模擬燃料集合体 PWR17×17配列型	-	-	(D)-A-212	<p>(ロ)-第A.位4表 落下試験に使用する模擬燃料集合体仕様</p> <table border="1" data-bbox="239 268 430 940"> <thead> <tr> <th colspan="2">試験</th> <th colspan="2">模擬燃料集合体の仕様</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">9m 頭部垂直落下</td> <td>(1)</td> <td rowspan="2">燃料型式 : PWR17×17配列型燃料集合体 構成材料 : 実燃料模擬 ペレット :</td> <td rowspan="2">模擬燃料集合体の仕様</td> </tr> <tr> <td>(2)</td> </tr> <tr> <td>9m 底部垂直落下</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>9m 水平落下</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>注1)</p> <p>注2)</p> <p>(ロ)-第A.位5表 落下試験に使用した上・下部スツールの種類</p> <table border="1" data-bbox="702 268 973 940"> <thead> <tr> <th rowspan="2">落下姿勢</th> <th rowspan="2">燃料タイプ</th> <th colspan="2">上・下部スツールの種類</th> </tr> <tr> <th>模擬燃料集合体上部</th> <th>模擬燃料集合体下部</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">9m 頭部垂直落下</td> <td>(1) B型模擬燃料集合体 PWR17×17配列型</td> <td>上部スツール (タイプI)</td> <td>下部スツール</td> </tr> <tr> <td>A型模擬燃料集合体 PWR17×17配列型</td> <td>上部スツール (タイプII)</td> <td>下部スツール</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">9m 底部垂直落下</td> <td>A型模擬燃料集合体 PWR17×17配列型</td> <td>上部スツール (タイプI)</td> <td>下部スツール</td> </tr> <tr> <td>A型模擬燃料集合体 PWR17×17配列型</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>	試験		模擬燃料集合体の仕様		9m 頭部垂直落下	(1)	燃料型式 : PWR17×17配列型燃料集合体 構成材料 : 実燃料模擬 ペレット :	模擬燃料集合体の仕様	(2)	9m 底部垂直落下				9m 水平落下				落下姿勢	燃料タイプ	上・下部スツールの種類		模擬燃料集合体上部	模擬燃料集合体下部	9m 頭部垂直落下	(1) B型模擬燃料集合体 PWR17×17配列型	上部スツール (タイプI)	下部スツール	A型模擬燃料集合体 PWR17×17配列型	上部スツール (タイプII)	下部スツール	9m 底部垂直落下	A型模擬燃料集合体 PWR17×17配列型	上部スツール (タイプI)	下部スツール	A型模擬燃料集合体 PWR17×17配列型	-	-
試験		模擬燃料集合体の仕様																																																																												
9m 頭部垂直落下	(1)	燃料型式 : PWR17×17配列型燃料集合体 構成材料 : 実燃料模擬 ペレット :	模擬燃料集合体の仕様																																																																											
	(2)																																																																													
9m 底部垂直落下																																																																														
9m 水平落下																																																																														
落下姿勢	燃料タイプ	上・下部スツールの種類																																																																												
		模擬燃料集合体上部	模擬燃料集合体下部																																																																											
9m 頭部垂直落下	(1) 模擬燃料集合体 PWR17×17配列型	上部スツール (タイプI)	下部スツール																																																																											
	(2) 模擬燃料集合体 PWR17×17配列型	上部スツール (タイプII)	下部スツール																																																																											
9m 底部垂直落下	模擬燃料集合体 PWR17×17配列型	上部スツール (タイプI)	下部スツール																																																																											
9m 水平落下	模擬燃料集合体 PWR17×17配列型	-	-																																																																											
試験		模擬燃料集合体の仕様																																																																												
9m 頭部垂直落下	(1)	燃料型式 : PWR17×17配列型燃料集合体 構成材料 : 実燃料模擬 ペレット :	模擬燃料集合体の仕様																																																																											
	(2)																																																																													
9m 底部垂直落下																																																																														
9m 水平落下																																																																														
落下姿勢	燃料タイプ	上・下部スツールの種類																																																																												
		模擬燃料集合体上部	模擬燃料集合体下部																																																																											
9m 頭部垂直落下	(1) B型模擬燃料集合体 PWR17×17配列型	上部スツール (タイプI)	下部スツール																																																																											
	A型模擬燃料集合体 PWR17×17配列型	上部スツール (タイプII)	下部スツール																																																																											
9m 底部垂直落下	A型模擬燃料集合体 PWR17×17配列型	上部スツール (タイプI)	下部スツール																																																																											
	A型模擬燃料集合体 PWR17×17配列型	-	-																																																																											

(ロ)-A-211

(ロ)-A-212

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書 (令和5年5月30日付け原設発第6号) 申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前	頁番号	補正後
(D)-A-220	<p>5. 評面</p> <p>9m 頭部及び底部垂直落下時並びに 9m 水平落下時に燃料被覆管に発生した最大ひずみは、9,300μであった。</p> <p>実験条件では、高温(180℃)であることから燃料被覆管の強度は低下するものの、照射により臨伏応力が上昇し、常温及び未照射条件の臨伏応力よりも大きくなる。したがって、実験条件において燃料被覆管に発生するひずみは、常温及び未照射条件の燃料被覆管を用いた落下試験で得られたひずみに比べて同等以下となる。</p> <p>以上より、実験条件における落下時においても照射材燃料被覆管の動的破断ひずみ 20,000μ(約 2%)を超えない。</p> <p>8. まとめ</p> <p>実験スケール模擬燃料集合体を用いて 9m 垂直落下試験を実施した結果、模擬燃料集合体の落下方向最下段グリッド1スパン間領域の模擬燃料集合体幅が最大約 2mm 拡大する残留変形が見られたものの、9m 落下時に燃料被覆管に発生するひずみは最大 9,300μであり燃料被覆管が破損しないことが確認された。9m 水平落下試験においては、模擬燃料集合体は圧縮の残留変形が見られたものの、9m 落下時に燃料被覆管に発生するひずみは最大 9,300μであり燃料被覆管が破損しないことが確認された。</p> <p>実験条件においては、落下時に燃料被覆管に発生するひずみは落下試験で得られたひずみに比べて同等以下となることから、落下時に燃料被覆管が破損することはない。</p>	(D)-A-221	<p>5. 評面</p> <p>9m 頭部及び底部垂直落下時並びに 9m 水平落下時に燃料被覆管に発生した最大ひずみは、9,300μであった。</p> <p>実験条件では、高温(180℃)であることから燃料被覆管の強度は低下するものの、照射により臨伏応力が上昇し、常温及び未照射条件の臨伏応力よりも大きくなる。したがって、実験条件において燃料被覆管に発生するひずみは、常温及び未照射条件の燃料被覆管を用いた落下試験で得られたひずみに比べて同等以下となる。</p> <p>以上より、実験条件における落下時においても照射材燃料被覆管の動的破断ひずみ 20,000μ(約 2%)を超えない。</p> <p>また、上記は燃料被覆管の外径が細く、かつ、肉厚の最も薄い PWR17×17 配列型燃料集合体を対象とした試験結果であることから、試験結果に基づき、PWR14×14 配列型及び PWR15×15 配列型の燃料集合体の燃料被覆管に発生する残留変形量を推測する。</p> <p>変形量は、グリッド間に対して、各燃料タイプの燃料被覆管の断面形状及び支持格子間隔の支持格子間 1スパンに対して、各燃料タイプの燃料被覆管の断面形状及び支持格子間隔並びに作用する荷重を考慮して評価する。落下変形は、燃料集合体最下段の支持格子間の残留変形が最大となる 9m 底部垂直落下とする。</p> <p>各燃料タイプの燃料被覆管に発生する変形量 V_k(mm)は、次式で与えられる。</p> $V_k = 5 \times W_k \times \frac{L^4}{384 \times E \times I}$ <p style="text-align: center;">(等分布荷重、両端支持の梁に発生する最大変形量)</p> $W_k = W_{Lk} + W_{Qk}$ $I = \pi \times \frac{d_k^4 - d_{i,k}^4}{64}$ <p>ここで、</p> <p>W_k : ペレット重量を考慮した燃料被覆管の単位長さ当たりの重量(kg/mm) (水平落下試験時に支持格子間に作用する荷重を想定)</p> <p>W_{Lk} : ペレット単位長さ当たり重量(kg/mm)</p> <p>W_{Qk} : 燃料被覆管単位長さ当たり重量(kg/mm)</p> <p>L_k : 燃料被覆管の支持格子間隔(最下段)(mm)</p> <p>E : 燃料被覆管の縦弾性係数(MPa)(全燃料タイプで共通)</p> <p>I_k : 燃料被覆管の断面二次モーメント(mm⁴)</p>
(D)-A-220	<p>5. 評面</p> <p>9m 頭部及び底部垂直落下時並びに 9m 水平落下時に燃料被覆管に発生した最大ひずみは、9,300μであった。</p> <p>実験条件では、高温(180℃)であることから燃料被覆管の強度は低下するものの、照射により臨伏応力が上昇し、常温及び未照射条件の臨伏応力よりも大きくなる。したがって、実験条件において燃料被覆管に発生するひずみは、常温及び未照射条件の燃料被覆管を用いた落下試験で得られたひずみに比べて同等以下となる。</p> <p>以上より、実験条件における落下時においても照射材燃料被覆管の動的破断ひずみ 20,000μ(約 2%)を超えない。</p>	(D)-A-221	<p>5. 評面</p> <p>9m 頭部及び底部垂直落下時並びに 9m 水平落下時に燃料被覆管に発生した最大ひずみは、9,300μであった。</p> <p>実験条件では、高温(180℃)であることから燃料被覆管の強度は低下するものの、照射により臨伏応力が上昇し、常温及び未照射条件の臨伏応力よりも大きくなる。したがって、実験条件において燃料被覆管に発生するひずみは、常温及び未照射条件の燃料被覆管を用いた落下試験で得られたひずみに比べて同等以下となる。</p> <p>以上より、実験条件における落下時においても照射材燃料被覆管の動的破断ひずみ 20,000μ(約 2%)を超えない。</p>

(ロ)-A-220

(ロ)-A-221

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前	頁番号	補正後
(D)-A-220	<p>5. 評価 9m 頭部及び底部垂直落下時並びに 9m 水平落下時に燃料被覆管に発生した最大ひずみは、9,300μであった。 実燃条件では、高温(180℃)であることから燃料被覆管の強度は低下するものの、照射により腐食応力が上昇し、常温及び未照射条件の腐食応力よりも大きくなる。したがって、実燃条件において燃料被覆管に発生するひずみは、常温及び未照射条件の燃料被覆管を用いた落下試験で得られたひずみに比べて同等以下となる。 以上より、実燃条件における落下時においても照射が燃料被覆管の脆化をひき起こすひずみ(約 2%)を起えることはない。</p>	(D)-A-222	<p>d_{O_2} : 燃料被覆管の外径(mm) d_{I_2} : 燃料被覆管の内径(mm) ※各記号の添え字の k は、評価対象の燃料タイプを表す。 (17×17配列型)は k=17、15×15配列型は k=15、14×14配列型は k=14)</p>
6. まとめ	<p>実燃大スケール模擬燃料集合体を用いて 9m 垂直落下試験を実施した結果、模擬燃料集合体の落下方向最下段グリッド1スパン間領域の模擬燃料集合体幅が最大約 2mm 拡大する残留変形が見られたものの、9m 落下時に燃料被覆管に発生するひずみは最大 9,300μであり燃料被覆管が脆損しないことが確認された。9m 水平落下試験においては、模擬燃料集合体は圧縮の残留変形が見られたものの、9m 落下時に燃料被覆管に発生するひずみは最大 8,200μであり燃料被覆管が脆損しないことが確認された。 実燃条件においては、落下時に燃料被覆管に発生するひずみは落下試験で得られたひずみに比べて同等以下となることから、落下時に燃料被覆管が脆損することはない。</p>		<p>したがって、PWR17×17配列型燃料集合体に対する他の燃料タイプの変形量の比率α_kは、次式で与えられる。 $\alpha_k = \frac{V_k}{V_{17}}$ $\frac{(W_{17} + W_{O_2}) \times L_k^4}{d_{O_2}^4 - d_{I_2}^4} \div \frac{(W_{17} + W_{O_2}) \times L_{17}^4}{d_{O_2}^4 - d_{I_2}^4}$</p>
	<p>ここで、 V_k : 他の燃料タイプの燃料被覆管に発生する変形量(mm) V_{17} : PWR17×17配列型燃料集合体の燃料被覆管に発生する変形量(mm) W_{17} : 9m レット単位長さ当たり重量(kg/mm) W_{O_2} : 燃料被覆管単位長さ当たり重量(kg/mm) W_{17} : PWR17×17配列型燃料集合体の燃料被覆管に発生する変形量(mm) W_{O_2} : 燃料被覆管単位長さ当たり重量(kg/mm) L_k : 燃料被覆管の支持骨子間隔(落下方向最下段)(mm) L_{17} : 燃料被覆管の外径(mm) d_{O_2} : 燃料被覆管の内径(mm) d_{I_2} : 燃料被覆管の内径(mm)</p>		<p>以上より、PWR17×17配列型燃料集合体に対するPWR14×14配列型及びPWR15×15配列型の燃料集合体の変形量の比率は□となる。</p>

(D)-A-222

(D)-A-220

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を□で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前	頁番号	補正後
(D)-A-220	<p>5. 評価</p> <p>9m 頭部及び底部垂直落下時並びに 9m 水平落下時に燃料被覆管に発生した最大ひずみは、9,300μであった。</p> <p>実燃条件では、高温(180℃)であることから燃料被覆管の強度は低下するものの、照射により隆起応力が上昇し、常温及び未照射条件の隆起応力よりも大きくなる。したがって、実燃条件において燃料被覆管に発生するひずみは、常温及び未照射条件の燃料被覆管を用いた落下試験で得られたひずみに比べて同等以下となる。</p> <p>以上より、実燃条件における落下時においても照射材燃料被覆管の動的破断ひずみは、20,000μ(約 2%)μを超えない。</p> <p>6. まとめ</p> <p>実燃大スケール模擬燃料集合体を用いて 9m 垂直落下試験を実施した結果、模擬燃料集合体の落下方向最下段グリッド1スパン間領域の模擬燃料集合体幅が最大約 2mm 拡大する残留歪形が見られたものの、9m 落下時に燃料被覆管に発生するひずみは最大 9,300μであり燃料被覆管が破損しないことが確認された。9m 水平落下試験においては、模擬燃料集合体は圧縮の残留歪形が見られたものの、9m 落下時に燃料被覆管に発生するひずみは最大 3,200μであり燃料被覆管が破損しないことが確認された。</p> <p>実燃条件においては、落下時に燃料被覆管に発生するひずみは落下試験で得られたひずみに比べて同等以下となることから、落下時に燃料被覆管が破損することはない。</p> <p>また、上記の PWR17\times17 配列型模擬燃料集合体の落下試験の結果に基づき、9m 底部垂直落下時における PWR14\times14 配列型及び PWR15\times15 配列型の燃料被覆管の残留歪形は、9m 落下時に燃料被覆管に発生するひずみに比べて同等以下となることから、落下時に燃料被覆管が破損することはない。</p> <p>また、上記の PWR17\times17 配列型模擬燃料集合体の落下試験の結果に基づき、9m 底部垂直落下時における PWR14\times14 配列型及び PWR15\times15 配列型の燃料集合体の燃料被覆管の残留歪形を評価した結果、燃料被覆管には、9m 程度の歪形が発生すると推測される。(D) 章 E の補正前値では、燃料被覆管がスケットチャンネル内で均一に広がった場合を想定しており、各燃料タイプで推測される歪形量よりも大きな歪形量を考慮して保守的に評価していることから、結果評価条件は妥当である。</p>	(D)-A-223	<p>(D) 第 4 付 8 表より、9m 底部垂直落下時における PWR17\times17 配列型模擬燃料集合体の残留歪形は、9m 落下時に燃料被覆管に発生するひずみに比べて同等以下となることから、落下時に燃料被覆管が破損しないことが確認された。</p> <p>また、上記の PWR17\times17 配列型模擬燃料集合体の落下試験の結果に基づき、9m 底部垂直落下時における PWR14\times14 配列型及び PWR15\times15 配列型の燃料被覆管の残留歪形は、9m 落下時に燃料被覆管に発生するひずみに比べて同等以下となることから、落下時に燃料被覆管が破損することはない。</p> <p>また、上記の PWR17\times17 配列型模擬燃料集合体の落下試験の結果に基づき、9m 底部垂直落下時における PWR14\times14 配列型及び PWR15\times15 配列型の燃料集合体の燃料被覆管の残留歪形を評価した結果、燃料被覆管には、9m 程度の歪形が発生すると推測される。(D) 章 E の補正前値では、燃料被覆管がスケットチャンネル内で均一に広がった場合を想定しており、各燃料タイプで推測される歪形量よりも大きな歪形量を考慮して保守的に評価していることから、結果評価条件は妥当である。</p>
(D)-A-220	<p>5. 評価</p> <p>9m 頭部及び底部垂直落下時並びに 9m 水平落下時に燃料被覆管に発生した最大ひずみは、9,300μであった。</p> <p>実燃条件では、高温(180℃)であることから燃料被覆管の強度は低下するものの、照射により隆起応力が上昇し、常温及び未照射条件の隆起応力よりも大きくなる。したがって、実燃条件において燃料被覆管に発生するひずみは、常温及び未照射条件の燃料被覆管を用いた落下試験で得られたひずみに比べて同等以下となる。</p> <p>以上より、実燃条件における落下時においても照射材燃料被覆管の動的破断ひずみは、20,000μ(約 2%)μを超えない。</p> <p>6. まとめ</p> <p>実燃大スケール模擬燃料集合体を用いて 9m 垂直落下試験を実施した結果、模擬燃料集合体の落下方向最下段グリッド1スパン間領域の模擬燃料集合体幅が最大約 2mm 拡大する残留歪形が見られたものの、9m 落下時に燃料被覆管に発生するひずみは最大 9,300μであり燃料被覆管が破損しないことが確認された。9m 水平落下試験においては、模擬燃料集合体は圧縮の残留歪形が見られたものの、9m 落下時に燃料被覆管に発生するひずみは最大 3,200μであり燃料被覆管が破損しないことが確認された。</p> <p>実燃条件においては、落下時に燃料被覆管に発生するひずみは落下試験で得られたひずみに比べて同等以下となることから、落下時に燃料被覆管が破損することはない。</p>	(D)-A-223	<p>(D) 第 4 付 8 表より、9m 底部垂直落下時における PWR17\times17 配列型模擬燃料集合体の残留歪形は、9m 落下時に燃料被覆管に発生するひずみに比べて同等以下となることから、落下時に燃料被覆管が破損しないことが確認された。</p> <p>また、上記の PWR17\times17 配列型模擬燃料集合体の落下試験の結果に基づき、9m 底部垂直落下時における PWR14\times14 配列型及び PWR15\times15 配列型の燃料集合体の燃料被覆管の残留歪形を評価した結果、燃料被覆管には、9m 程度の歪形が発生すると推測される。(D) 章 E の補正前値では、燃料被覆管がスケットチャンネル内で均一に広がった場合を想定しており、各燃料タイプで推測される歪形量よりも大きな歪形量を考慮して保守的に評価していることから、結果評価条件は妥当である。</p>

(D)-A-223

(D)-A-220

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前	頁番号	補正後
(D)-A-231	<p>本体に加速度計を設置し、落下時に本体に発生する加速度を測定するとともに、落下試験後には、緩衝体及びフィンの変形量を測定した。加速度の測定位置を(ロ)第A.付18図に示す。また、落下試験前後で蓋部の気密漏えい試験を実施し、0リングからの漏えい率を測定した。</p> <p>3. 試験結果</p> <p>試験で得られた容器本体の加速度、上部緩衝体及びフィンの変形量並びに気密漏えい試験結果を(ロ)第A.付18表に示す。なお、本体の加速度は250Hzのローパスフィルター処理を行ったものである。同表に示すとおり、落下試験前後で顕著な漏えい率の変化はなく、落下試験後の漏えい率は、判定値を満足することが確認された。</p> <p>4. 評価</p> <p>(1) 水平落下時の衝撃加速度及び変形量</p> <p>試験で測定した水平落下時の本体の加速度及び緩衝体の変形量を実規模スケールへ変換し、NFT型輸送容器的構造解析で示された水平落下時の衝撃加速度及び変形量と比較した。落下試験結果(試験値)と解析結果(解析値)の比較を(ロ)第A.付20表に示す。同表に示すとおり、衝撃加速度及び変形量ともに解析値が試験値を上回ることが確認された。</p> <p>(2) NFT-14P型輸送容器的密封性能評価</p> <p>9m 試験落下において、NFT-14P型輸送容器的密封性能が維持することを、密封性能が維持することが実証されている落下試験体及びその落下試験結果を用いて検証する。</p> <p>落下後の漏えい率の増加は蓋に取り付けられたゴム0リングとフランジ面との口開き量の増加及び蓋ボルトの締付力の低下に起因するガスケット線力の低下が原因である。したがって、蓋部の変形量を抑えることが密封性能の維持につながる。そこで、落下時にNFT-14P型輸送容器的フランジ、蓋及び蓋ボルトの変形量が落下試験体に比べて小さいことを示すことにより、NFT-14P型輸送容器的密封性能を検証する。</p> <p>密封性能評価方法の手順を以下に示す。(ロ)第A.付19図参照)</p> <p>① NFT-14P型輸送容器と落下試験体の蓋部を構成する各部位(フランジ、蓋及び蓋ボルト)の名変形モード(曲げ、引張)の剛性に影響する寸法を抽出する。</p> <p>② 各部位の剛性に影響する設計条件(材質、温度、総弾性係数)を抽出する。</p> <p>(ロ)-k-231</p>	(D)-A-234	<p>b. 試験装置</p> <p>本体に加速度計を設置し、落下時に本体に発生する加速度を測定するとともに、落下試験後には、緩衝体及びフィンの変形量を測定した。加速度の測定位置を(ロ)第A.付18図に示す。また、落下試験前後で蓋部の気密漏えい試験を実施し、0リングからの漏えい率を測定した。</p> <p>3. 試験結果</p> <p>試験で得られた容器本体の加速度、上部緩衝体及びフィンの変形量、気密漏えい試験結果並びに衝撃速度を(ロ)第A.付19表に示す。なお、本体の加速度は250Hzのローパスフィルター処理を行ったものである。同表に示すとおり、落下試験前後で顕著な漏えい率の変化はなく、落下試験後の漏えい率は、判定値を満足することが確認された。</p> <p>4. 評価</p> <p>(1) 水平落下時の衝撃加速度及び変形量</p> <p>試験で測定した水平落下時の本体の加速度及び緩衝体の変形量を実規模スケールへ変換し、NFT型輸送容器的構造解析で示された水平落下時の衝撃加速度及び変形量と比較した。落下試験結果(試験値)と解析結果(解析値)の比較を(ロ)第A.付20表に示す。同表に示すとおり、衝撃加速度及び変形量ともに解析値が試験値を上回ることが確認された。</p> <p>(2) 試験落下時の蓋部に対する応力評価</p> <p>NFT-14P型輸送容器的構造落下試験時の二次衝突時の衝撃速度を論文⁹⁾の式に基づき初めに、落下試験体の構造落下試験時の二次衝突時の衝撃速度を論文⁹⁾の式に基づき評価した。(ロ)第A.付19図に示すとおり、評価で得られた二次衝突時の衝撃速度は、試験結果と概ね一致することが確認されたことから、落下試験体と蓋部構造が同じであるNFT-14P型輸送容器についても、本論文が通用可能である。</p> <p>次に、本論文を用いてNFT-14P型輸送容器的二次衝突速度を算出し、位置エネルギーに対する二次衝突時の運動エネルギーの比を評価した。二次衝突速度及び位置エネルギーに対する二次衝突時の運動エネルギーの比をそれぞれ(ロ)第A.付20図及び(ロ)第A.付21図に示す。</p> <p>(ロ)-k-234</p> <p>(注記：以降の図表番号ずれについては記載を省略する。)</p>

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を⁹⁾で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前	頁番号	補正後
(ロ)-A-231	<p>本体に加速度計を設置し、落下時に本体に発生する加速度を測定するとともに、落下試験後には、緩衝体及びフィンの変形量を測定した。加速度の測定位置を(ロ)-第A.付18図に示す。また、落下試験前後で蓋部の気密漏えい試験を実施し、0リングからの漏えい率を測定した。</p> <p>3. 試験結果</p> <p>試験で得られた容器本体の加速度、上部緩衝体及びフィンの変形量並びに気密漏えい試験結果を(ロ)-第A.付19表に示す。なお、本体の加速度は250Hzのローパスフィルター処理を行ったものである。同表に示すとおり、落下試験前後で顕著な漏えい率の変化はなく、落下試験後の漏えい率は、判定値を満足することが確認された。</p> <p>4. 評価</p> <p>(1) 水平落下時の衝撃加速度及び変形量</p> <p>試験で測定した水平落下時の本体の加速度及び緩衝体の変形量を突触構造スケールへ変換し、NFT型輸送容器的構造解析で示された水平落下時の衝撃加速度及び変形量と比較した。落下試験結果(試験値)と解析結果(算出値)の比較を(ロ)-第A.付20表に示す。同表に示すとおり、衝撃加速度及び変形量ともに解析値が試験値を上回ることが確認された。</p> <p>(2) NFT-14P型輸送容器的密封性能評価</p> <p>① 傾斜落下において、NFT-14P型輸送容器的密封性能が維持することを、密封性能が維持することが実証されている落下試験体及びその落下試験結果を用いて検証する。落下後の漏えい率の増加は蓋に取り付けられたゴム0リングとフランジ面との口開きの増加及び蓋ボルトの締付力の低下に起因するガスケット線力の低下が原因である。したがって、蓋部の変形量を抑えることが密封性能の維持につながる。そこで、落下時にNFT-14P型輸送容器的フランジ、蓋及び蓋ボルトの変形量が落下試験体に比べて小さいことを示すことにより、NFT-14P型輸送容器的密封性能を検証する。</p> <p>(ロ)-第A.付18図参照</p> <p>① NFT-14P型輸送容器と落下試験体の蓋部を構成する各部位(フランジ、蓋及び蓋ボルト)の各変形モード(曲げ、引張)の剛性に影響する寸法を抽出する。</p> <p>② 各部位の剛性に影響する設計条件(材質、温度、縦弾性係数)を抽出する。</p> <p>③ 抽出した寸法及び設計条件を基に、NFT-14P型輸送容器と落下試験体の各部位の剛性を算出する。</p> <p>④ 落下時の衝撃力を決定する設計条件(輸送物重量、落下時の衝撃加速度)を抽出し、NFT-14P型輸送容器と落下試験体の落下時に作用する荷重比を算出する。</p> <p>⑤ 各部位の剛性比と落下時に作用する荷重比から、落下時の衝撃力が作用した時の変形比を算出する。</p> <p>(ロ)-A-231</p>	(ロ)-A-235	<p>第A.付21図に示す。評価の結果、二次衝突速度は最大20.1m/sであり、位置エネルギーに対する二次衝突時の運動エネルギーの比は0.78となった。つまり、一次衝突で位置エネルギーの22%を吸収し、残りの78%が二次衝突で吸収することとなる。この結果を基に、二次衝突時の荷重を仮想的に評価するため、約14m(=20.1×78/50)からの水平落下として、(ロ)-第A.8.1.1の手法を用いて落下時の衝撃加速度を評価した。評価の結果、水平落下時に対して1.07倍の衝撃加速度が発生することが確認された。</p> <p>この加速度の倍率を用いて、NFT-14P型輸送容器的構造解析結果における蓋部の応力を評価した。(ロ)-第A.付22表に示すとおり、傾斜落下時における蓋、フランジ及び蓋ボルトに発生する応力は、解析基準値以下である。</p> <p>(3) NFT-14P型輸送容器的密封性能評価</p> <p>① 傾斜落下において、NFT-14P型輸送容器的密封性能が維持することを、密封性能が維持することが実証されている落下試験体及びその落下試験結果を用いて検証する。落下後の漏えい率の増加は蓋に取り付けられたゴム0リングとフランジ面との口開きの増加及び蓋ボルトの締付力の低下に起因するガスケット線力の低下が原因である。したがって、蓋部の変形量を抑えることが密封性能の維持につながる。そこで、落下時にNFT-14P型輸送容器的フランジ、蓋及び蓋ボルトの変形量が落下試験体に比べて小さいことを示すことにより、NFT-14P型輸送容器的密封性能を検証する。</p> <p>(ロ)-第A.付22図参照</p> <p>① NFT-14P型輸送容器と落下試験体の蓋部を構成する各部位(フランジ、蓋及び蓋ボルト)の各変形モード(曲げ、引張)の剛性に影響する寸法を抽出する。</p> <p>② 各部位の剛性に影響する設計条件(材質、温度、縦弾性係数)を抽出する。</p> <p>③ 抽出した寸法及び設計条件を基に、NFT-14P型輸送容器と落下試験体の各部位の剛性を算出する。</p> <p>④ 落下時の衝撃力を決定する設計条件(輸送物重量、落下時の衝撃加速度)を抽出し、NFT-14P型輸送容器と落下試験体の落下時に作用する荷重比を算出する。</p> <p>⑤ 各部位の剛性比と落下時に作用する荷重比から、落下時の衝撃力が作用した時の変形比を算出する。</p> <p>(ロ)-A-235</p>

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

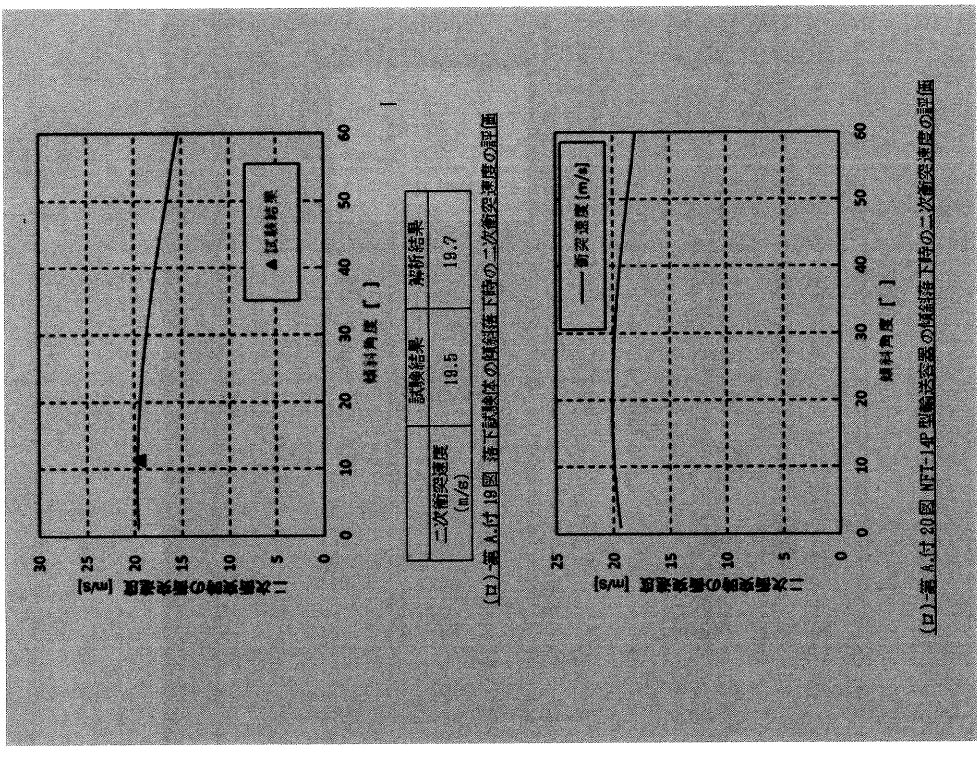
頁番号	補正前	補正後																																																																																
(ロ)-A-234	<p>(ロ)-第 A.1 付 19 表 落下試験体の落下試験結果</p> <p>(a) 容器本体の加速度並びに上部緩衝体及びフィンの最大変形量</p> <table border="1" data-bbox="279 1220 454 1859"> <thead> <tr> <th rowspan="2">落下姿勢</th> <th colspan="3">加速度 (G)</th> <th colspan="2">最大変形量 (mm)</th> </tr> <tr> <th>蓋</th> <th>外筒中央</th> <th>底板</th> <th>上部緩衝体</th> <th>フィン</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>水平落下</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>傾斜落下 (10°)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>注① 表中の加速度及び最大変形量は、落下試験体の落下試験における実測データである。 なお、実規模モデルにおける加速度、最大変形量は、スケール則に従うとそれぞれ 1/2.5 倍、2.5 倍となる。</p> <p>(b) 気密漏えい試験検査結果</p> <table border="1" data-bbox="630 1265 758 1814"> <thead> <tr> <th rowspan="2">検査時期</th> <th colspan="2">検査結果 (Pa・m³/s)</th> <th rowspan="2">判定値 (Pa・m³/s)</th> </tr> <tr> <th>水平落下</th> <th>傾斜落下 (10°)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>落下試験前</td> <td></td> <td></td> <td rowspan="2">3.0 × 10⁻³</td> </tr> <tr> <td>落下試験後</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	落下姿勢	加速度 (G)			最大変形量 (mm)		蓋	外筒中央	底板	上部緩衝体	フィン	水平落下						傾斜落下 (10°)						検査時期	検査結果 (Pa・m³/s)		判定値 (Pa・m³/s)	水平落下	傾斜落下 (10°)	落下試験前			3.0 × 10 ⁻³	落下試験後			<p>(ロ)-第 A.1 付 19 表 落下試験体の落下試験結果</p> <p>(a) 容器本体の加速度並びに上部緩衝体及びフィンの最大変形量</p> <table border="1" data-bbox="295 280 470 929"> <thead> <tr> <th rowspan="2">落下姿勢</th> <th colspan="3">加速度 (G)</th> <th colspan="2">最大変形量 (mm)</th> </tr> <tr> <th>蓋</th> <th>外筒中央</th> <th>底板</th> <th>上部緩衝体</th> <th>フィン</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>水平落下</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>傾斜落下 (10°)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>注① 表中の加速度及び最大変形量は、落下試験体の落下試験における実測データである。 なお、実規模モデルにおける加速度、最大変形量は、スケール則に従うとそれぞれ 1/2.5 倍、2.5 倍となる。</p> <p>(b) 気密漏えい試験検査結果</p> <table border="1" data-bbox="646 324 774 884"> <thead> <tr> <th rowspan="2">検査時期</th> <th colspan="2">検査結果 (Pa・m³/s)</th> <th rowspan="2">判定値 (Pa・m³/s)</th> </tr> <tr> <th>水平落下</th> <th>傾斜落下 (10°)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>落下試験前</td> <td></td> <td></td> <td rowspan="2">3.0 × 10⁻³</td> </tr> <tr> <td>落下試験後</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>(c) 衝突速度</p> <table border="1" data-bbox="821 436 1013 840"> <thead> <tr> <th colspan="2">衝突速度 (m/s)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>落下姿勢</td> <td></td> </tr> <tr> <td>水平落下</td> <td></td> </tr> <tr> <td>傾斜落下 (10°)</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	落下姿勢	加速度 (G)			最大変形量 (mm)		蓋	外筒中央	底板	上部緩衝体	フィン	水平落下						傾斜落下 (10°)						検査時期	検査結果 (Pa・m³/s)		判定値 (Pa・m³/s)	水平落下	傾斜落下 (10°)	落下試験前			3.0 × 10 ⁻³	落下試験後			衝突速度 (m/s)		落下姿勢		水平落下		傾斜落下 (10°)	
落下姿勢	加速度 (G)			最大変形量 (mm)																																																																														
	蓋	外筒中央	底板	上部緩衝体	フィン																																																																													
水平落下																																																																																		
傾斜落下 (10°)																																																																																		
検査時期	検査結果 (Pa・m³/s)		判定値 (Pa・m³/s)																																																																															
	水平落下	傾斜落下 (10°)																																																																																
落下試験前			3.0 × 10 ⁻³																																																																															
落下試験後																																																																																		
落下姿勢	加速度 (G)			最大変形量 (mm)																																																																														
	蓋	外筒中央	底板	上部緩衝体	フィン																																																																													
水平落下																																																																																		
傾斜落下 (10°)																																																																																		
検査時期	検査結果 (Pa・m³/s)		判定値 (Pa・m³/s)																																																																															
	水平落下	傾斜落下 (10°)																																																																																
落下試験前			3.0 × 10 ⁻³																																																																															
落下試験後																																																																																		
衝突速度 (m/s)																																																																																		
落下姿勢																																																																																		
水平落下																																																																																		
傾斜落下 (10°)																																																																																		
(ロ)-A-238		<p>(ロ)-A-238</p>																																																																																

(ロ)-A-234

(ロ)-A-238

注① 核燃料輸送物設計承認申請書 (令和 5 年 5 月 30 日付け原設発第 6 号) 申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前 (記載なし)	頁番号 (D)-A-240	補正後						
-			 <p>(A) 着入付18図 落下試験体の傾斜落下時の二次空気速度の断面</p> <table border="1" data-bbox="606 425 686 806"> <thead> <tr> <th>二次空気速度 (m/s)</th> <th>試験結果</th> <th>解析結果</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>18.5</td> <td>18.5</td> <td>19.7</td> </tr> </tbody> </table> <p>(B) 着入付20図 NF1-14P型輸送容器の傾斜落下時の二次空気速度の断面</p>	二次空気速度 (m/s)	試験結果	解析結果	18.5	18.5	19.7
二次空気速度 (m/s)	試験結果	解析結果							
18.5	18.5	19.7							

(D)-A-240

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前 (記載なし)	頁番号 (D)-A-241	補正後																																						
—			<div data-bbox="215 257 694 974"> <p>(D)-補 A.付 21 図 NFI-MP 型輸送容器の位置エネルギーに対する二次補正後の運動エネルギーの比</p> </div> <div data-bbox="702 257 742 974"> <p>(D)-補 A.付 21 表 NFI-MP 型輸送容器の無負荷落下時に蓋密封部に発生する応力</p> </div> <table border="1" data-bbox="758 302 1045 952"> <thead> <tr> <th>部位</th> <th>断面 形状</th> <th>応力分類</th> <th>応力 強さ (MPa)</th> <th>温度 (°C)</th> <th>解折 基準値 (MPa)</th> <th>余裕率 MS (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">蓋</td> <td rowspan="3">①</td> <td>P_a</td> <td>58.3</td> <td rowspan="3">170</td> <td rowspan="3"></td> <td rowspan="3"></td> </tr> <tr> <td>$P_a + P_b$</td> <td>78.2</td> </tr> <tr> <td>外</td> <td>71.0</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">フランチ</td> <td rowspan="3">②</td> <td>P_c</td> <td>179</td> <td rowspan="3">170</td> <td rowspan="3"></td> <td rowspan="3"></td> </tr> <tr> <td>P_c</td> <td>220</td> </tr> <tr> <td></td> <td>488</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">ボルト</td> <td rowspan="2">③</td> <td>σ_a</td> <td>488</td> <td rowspan="2">170</td> <td rowspan="2"></td> <td rowspan="2"></td> </tr> <tr> <td>$\sigma_a + \sigma_b$</td> <td>863</td> </tr> </tbody> </table> <div data-bbox="1053 257 1332 974"> <p>注 1) (D)-補 A.43 図参照 注 2) P_a: 一次一般負荷応力強さ, P_b: 一次荷重応力強さ, P_c: 一次曲げ応力強さ σ_a: 断面平均応力, σ_b: 面げ応力 注 3) P_a 及び σ_a に対する基準値は $2/3 S_u$, P_c, $P_a + P_b$ 及び $\sigma_a + \sigma_b$ に対する基準値は $1.5 \times (2/3 S_u)$ である。 注 4) (D)-補 B.4.2 に示す一般の試験条件下の温度分布による熱膨張を考慮 注 5) 外力により発生する応力を 1.07 倍して算出</p> </div>	部位	断面 形状	応力分類	応力 強さ (MPa)	温度 (°C)	解折 基準値 (MPa)	余裕率 MS (%)	蓋	①	P_a	58.3	170			$P_a + P_b$	78.2	外	71.0	フランチ	②	P_c	179	170			P_c	220		488	ボルト	③	σ_a	488	170			$\sigma_a + \sigma_b$	863
部位	断面 形状	応力分類	応力 強さ (MPa)	温度 (°C)	解折 基準値 (MPa)	余裕率 MS (%)																																			
蓋	①	P_a	58.3	170																																					
		$P_a + P_b$	78.2																																						
		外	71.0																																						
フランチ	②	P_c	179	170																																					
		P_c	220																																						
			488																																						
ボルト	③	σ_a	488	170																																					
		$\sigma_a + \sigma_b$	863																																						

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書 (令和 5 年 5 月 30 日付け原設発第 6 号) 申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前 (記載なし)	頁番号 (ロ)-A-248	補正後
—			<p>A.10.9 実機大レンジカバナーを用いた実証試験</p> <p>1. 概要 (ロ)章 A.5 において一般の試験条件下における NF-T-4P 型輸送容器の本体各部の応力を評価しているが、(ロ)章 A.5.1.2 に示すとおり、レンジカバナーは実用状の八角形とは異なる円筒形の積層モデルを用いて評価している。 本付属書では、実機大レンジカバナーを用いた実証試験により、八角形の角部等の構造不連続部を考慮した場合のレンジ保持機能に与える影響について確認した。</p> <p>2. 試験条件 (ロ) 第 5.1 付図に示す実機大レンジカバナーの試験体を用いて、レンジカバナーに発生するひずみを計測した。実証試験は、試験体内部に設置したヒーターを発熱させ、熱平衡状態におけるレンジカバナー表面のひずみを計測した。</p> <p>3. 試験結果 八角コーナー部に発生した最大ひずみを(ロ) 第 5.1 付図に示す。3 回の試験において、試験する際にひずみが増大することはなく、レンジが保持されることを確認した。</p> <div data-bbox="798 358 1181 907" style="border: 1px solid black; width: 240px; height: 245px; margin: 10px auto;"></div> <p>(ロ) 第 5.1 付図 実機大レンジカバナーを用いた実証試験 試験体図</p> <p style="text-align: right;">(ロ)-A-248</p>

注記) 核燃料輸送物施設計承認申請書 (令和 5 年 5 月 30 日付け原設発第 6 号) 申請時からの変更箇所を [] で示す。


補正内容一覧

頁番号	補正前 (記載なし)	頁番号 (D)-A-249	補正後																	
—			<p>(E)第A付28番 実験大レジカンバーを用いた遠隔試験時のレジカンバーの発生ひずみ</p> <table border="1" data-bbox="215 257 359 952"> <thead> <tr> <th>部位</th> <th>方向</th> <th>位置</th> <th>1回目 54分時</th> <th>2回目 54分時</th> <th>3回目 54分時</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">八角コーナー部</td> <td>軸</td> <td>30°</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>周</td> <td>30°</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>4. まとめ 実験大レジカンバーの試験体を用いた遠隔試験により、八角形の角部等の構造不連続部を考慮した場合のレジカンバー保持機能に与える影響について確認した。試験の結果、ひずみが増大することではなく、レジカンバー保持機能が担保されることを確認した。</p>	部位	方向	位置	1回目 54分時	2回目 54分時	3回目 54分時	八角コーナー部	軸	30°				周	30°			
部位	方向	位置	1回目 54分時	2回目 54分時	3回目 54分時															
八角コーナー部	軸	30°																		
	周	30°																		

(D)-A-248

注記) 核燃料輸送物施設承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前 (記載なし)	頁番号 (D)-A-250	補正後
			<p>A.10.10 9m 水平落下評価の荷重条件</p> <p>1. 概要</p> <p>(ロ)章 A.6.1.2 の 9m 水平落下時における構造評価に使用している解析モデルは、(ロ)章 A.10.8 の実規模モデルを用いた 9m 水平落下試験を考慮したものであり、橋面及びフィンの最大梁形状には、トラニオンはすでにせん断破壊していることから、トラニオンからの荷重は発生しないが、構造解析においてはトラニオン衝突時の衝撃荷重をフィンの荷重に補正して解析を実施している。</p> <p>本付属書では、9m 水平落下時における評価モデルの違いによる輸送容器本体に発生する曲げモーメントの比較を行い、9m 水平落下時の構造評価に使用している解析モデルにおける荷重条件の妥当性について確認した。</p> <p>2. 輸送容器本体に発生する曲げモーメントの比較</p> <p>(1) トラニオン衝突時の衝撃荷重を考慮してフィン荷重を補正した評価の場合</p> <p>(ロ)章 A.8.1.2 の 9m 水平落下時における構造評価に使用している解析モデルと同様に、トラニオン荷重を補正して評価した場合における、輸送容器本体に発生する曲げモーメントの評価モデルを(ロ)章 A.付 28 図に示す。</p> <p>なお、輸送容器本体の内圧及び液体物重量による容器内部に発生する荷重は無視し、輸送容器本体の外側から作用する荷重により輸送容器本体に発生する最大曲げモーメントを評価する。</p> <div data-bbox="906 257 1082 981" style="border: 1px solid black; padding: 5px;">  <p>(ロ)章 A.付 28 図 輸送容器本体に対する曲げモーメント評価モデル(トラニオン荷重位置未考慮)</p> </div> <p>輸送容器本体に発生する最大曲げモーメント $M(N)$ は、次式で与えられる。</p> $M = p \times \frac{L_1}{2} \times \left(L_2 + \frac{L_1}{2} \right) \times \left(L_1 + \frac{2L_2 \times L_1 + L_1^2}{4 \times L_1} \right)$ $p = \frac{Ff}{L_2}$ <p>(ロ)-A-250</p>

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書 (令和 5 年 5 月 30 日付け原設発第 6 号) 申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前 (記載なし)	頁番号 (D)-A-251	補正後
—		(D)-A-251	<p>ここで、</p> <p>M：輸送器本体に発生する最大曲げモーメント(N・mm)</p> <p>II：9m 水平落下時にフィンから輸送器本体に作用する等分布荷重(N/mm)</p> <p>FF：9m 水平落下時にフィンから輸送器本体に作用する反力= <input type="text"/> N (横断体及びフィン並びにトラニオン衝突時のトラニオン荷重を考慮した荷重。(D) 第 A.38 図を参照。)</p> <p>L：輸送器全長=5,918mm</p> <p>L₁：蓋上面からフィンまでの距離= <input type="text"/> mm</p> <p>L₂：底板下面からフィンまでの距離= <input type="text"/> mm</p> <p>L₃：フィンの容器補方向長さ= <input type="text"/> mm したがって、</p> <p>M= <input type="text"/> = <input type="text"/> N・mm</p> <p>以上より、(D) 第 A.6.1.2 の評価と同様にトラニオン衝突時の衝撃荷重を考慮し、フィンの荷重を補正して評価した場合における輸送器本体に発生する最大曲げモーメントは <input type="text"/> N・mm となる。</p> <p>(2) トラニオン衝突時の衝撃荷重をフィンの荷重として考慮せずに評価した場合 トラニオン衝突時の衝撃荷重をフィンの荷重として考慮せずに評価した場合における輸送器本体に発生する曲げモーメントの評価モデルを(D) 第 A.付 27 図に示す。</p> <div data-bbox="1021 280 1189 974" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">FF (等分布荷重)</p> <p style="text-align: center;">(D) 第 A.付 27 図 輸送器本体に対する曲げモーメント評価モデル(トラニオン衝突位置考慮)</p> </div>

(D)-A-251

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書 (令和 5 年 5 月 30 日付け原設発第 6 号) 申請時からの変更箇所を で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前 (記載なし)	頁番号 (D)-A-252	補正後
-			<p>輸送容器本体に発生する最大曲げモーメント $M(N)$ は、次式で与えられる。</p> $M = M_f + M_t$ $M_f = v' \times \frac{L}{4} \times \left(L_1 + \frac{L}{2} \right) \times \left(L_1 + \frac{2L \times L_1 + L^2}{4 \times L} \right)$ $v' = \frac{F_f v}{L}$ $M_t = F_t \times L_1$ <p>ここで、</p> <ul style="list-style-type: none"> M : 輸送容器本体に発生する最大曲げモーメント (N・mm) M_f : トラニオン衝突時の衝撃荷重をフィンの荷重として考慮しない場合のフィン反力により輸送容器本体に発生する曲げモーメント (N・mm) M_t : トラニオン衝突時のトラニオン荷重により輸送容器本体に発生する曲げモーメント (N・mm) v' : 9m 水平落下時にフィンから輸送容器本体に作用する等分布荷重 (N/mm) F_f : 9m 水平落下時にフィンから輸送容器本体に作用する反力 = <input type="text"/> N (横衝突及びフィンからの反力を考慮した荷重) F_t : 9m 水平落下時にトラニオンから輸送容器本体に作用する反力 = <input type="text"/> N (トラニオンの肩部のせん断破壊に要する荷重) L : 輸送容器全長 = 5,310mm L_1 : 臺上面からフィンまでの距離 = <input type="text"/> mm L_2 : 底板下面からフィンまでの距離 = <input type="text"/> mm L_3 : フィンの容器軸方向長さ = <input type="text"/> mm L_4 : 輸送容器の端面からトラニオン中心軸までの距離 = 554mm (曲げモーメントを大きく評価するため、距離が長い上部側のトラニオン位置を考慮) <p>したがって、</p> $M = \text{ N・mm}$

(口)-A-252

注記) 核燃料輸送物設備承認申請書 (令和 5 年 5 月 30 日付け原設発第 6 号) 申請時からの変更箇所を で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前	頁番号	補正後
(D)-A-243	<p>Performance Assessment and Research(SPAR-III)2009-2014”, IAEA-TECDOC-1771, (2015).</p> <p>22) 通商産業省 原子力発電技術顧問会(基本設計), 高燃焼度化検討会, “加圧水型原子炉 高燃焼度化ステップ2 先行照射燃料 検討結果報告書”, (1998).</p> <p>23) (財)電力中央研究所, “平成8年度「放射性廃棄物輸送容器等安全性実証試験」事業 成果報告書”, (1997).</p> <p>24) I.Sasaki, Y.Kanae, T.Shirakura, “The Effect of Secondary Impact on a Spent Fuel Shipping Cask Subjected to Slant-Angle Drop Tests”, The 9th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATR/M 1989, June 11-16, Washington, DC, USA, (1989).</p>	(D)-A-255	<p>International Atomic Energy Agency, “Spent Fuel Performance Assessment and Research: Final Report of a Coordinated Research Project on Spent Fuel Performance Assessment and Research(SPAR-III)2009-2014”, IAEA-TECDOC-1771, (2015).</p> <p>22) 通商産業省 原子力発電技術顧問会(基本設計), 高燃焼度化検討会, “加圧水型原子炉 高燃焼度化ステップ2 先行照射燃料 検討結果報告書”, (1998).</p> <p>24) (財)電力中央研究所, “平成8年度「放射性廃棄物輸送容器等安全性実証試験」事業 成果報告書”, (1997).</p> <p>25) T.Querzetti, V.Bal Bellmer, G.Wieser, “Analytical, Numerical and Experimental Investigations on the Impact Behaviour of Packagings for the Transport of Radioactive Material under Slap Down Conditions”, Journal of Nuclear Materials Management, (2002).</p>
			(D)-A-255

(D)-A-243

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前	頁番号	補正後																																																				
(D)-B-26	<p>B. 4. 2 最高温度</p> <p>(D)章B. 4. 1に記載した解析モデル及び条件に基づいて求めた通常時及び一般の試験条件下における輸送物各部の最高温度の結果を(D)-第B. 23表に示す。</p> <p>ABAQUS コードで解析して得られた太陽熱放射のない場合の通常時の輸送容器とその収納物の各部の温度分布を(D)-第B. 5図及び(D)-第B. 6図に、また、最高温度評価条件における温度分布を(D)-第B. 7図及び(D)-第B. 8図に示す。</p> <p>通常時に人が容易に近づけることができる表面としては、(D)-第B. 23表に示すように、通常時(太陽熱放射なしの場合)において緩衝体は76℃、フィン先端は70℃、バギングリングは78℃となり、これらは基準値の85℃以下である。</p>	(D)-B-26	<p>B. 4. 2 最高温度</p> <p>(D)章B. 4. 1に記載した解析モデル及び条件に基づいて求めた一般の試験条件下における輸送物各部の最高温度の結果を(D)-第B. 23表に示す。</p> <p>ABAQUS コードで解析して得られた近接表面温度評価条件における輸送容器とその収納物の各部の温度分布を(D)-第B. 5図及び(D)-第B. 6図に、また、最高温度評価条件における温度分布を(D)-第B. 7図及び(D)-第B. 8図に示す。</p> <p>人が容易に近づけることができる表面としては、(D)-第B. 23表に示すように、近接表面温度評価条件において緩衝体は76℃、フィン先端は70℃、バギングリングは78℃となり、これらは基準値の85℃以下である。</p> <p>なお、(D)章B. 4. 1の1.に示すとおり、一般の試験条件においては収納物及び緩衝体の最高温度を高く評価するために緩衝体の変形を考慮していないが、緩衝体表面積の減少分が全て緩衝体表面温度上昇に寄与する場合、保守側に一般の試験条件の垂直落下、水平落下及びコーナー一落下の緩衝体変形後の形状を包含する形状を考慮すると、緩衝体の表面積は約14%減少することになり、緩衝体表面温度は約81℃となるが、技術上の基準に定める85℃を超えることはない。</p>																																																				
(D)-B-26	<p>以上の熱解析結果より、一般の試験条件において、密封装置0リングの最高温度は使用可能温度300℃を超えることはない。</p>	(D)-B-26	<p>以上の熱解析結果より、一般の試験条件において、密封装置0リングの最高温度は使用可能温度180℃を超えることはない。</p>																																																				
(D)-B-27	<p>(D)-第B. 23表 通常時及び一般の試験条件下の最高温度 (単位：℃)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>部位</th> <th>条件</th> <th>通常時</th> <th>一般</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>周囲温度</td> <td>太陽熱放射なし</td> <td>38</td> <td>太陽熱放射あり</td> </tr> <tr> <td>緩衝体表面</td> <td></td> <td>76</td> <td>38</td> </tr> <tr> <td>緩衝体カバープレート(蓋近傍)</td> <td></td> <td>(141)注D</td> <td>83</td> </tr> <tr> <td>緩衝体カバープレート(底板近傍)</td> <td></td> <td>(137)注D</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>フィン先端</td> <td></td> <td>100(70)注D</td> <td>103</td> </tr> </tbody> </table>	部位	条件	通常時	一般	周囲温度	太陽熱放射なし	38	太陽熱放射あり	緩衝体表面		76	38	緩衝体カバープレート(蓋近傍)		(141)注D	83	緩衝体カバープレート(底板近傍)		(137)注D	-	フィン先端		100(70)注D	103	(D)-B-27	<p>(D)-第B. 23表 一般の試験条件下の最高温度 (単位：℃)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>部位</th> <th>条件</th> <th>近接表面温度評価条件</th> <th>最高温度評価条件</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>周囲温度</td> <td>太陽熱放射なし</td> <td>38</td> <td>太陽熱放射あり</td> </tr> <tr> <td>緩衝体表面</td> <td></td> <td>76</td> <td>38</td> </tr> <tr> <td>緩衝体カバープレート(蓋近傍)</td> <td></td> <td>(141)注D</td> <td>83</td> </tr> <tr> <td>緩衝体カバープレート(底板近傍)</td> <td></td> <td>(137)注D</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>緩衝体木材</td> <td></td> <td>100(70)注D</td> <td>125</td> </tr> <tr> <td>フィン先端</td> <td></td> <td>100(70)注D</td> <td>103</td> </tr> </tbody> </table>	部位	条件	近接表面温度評価条件	最高温度評価条件	周囲温度	太陽熱放射なし	38	太陽熱放射あり	緩衝体表面		76	38	緩衝体カバープレート(蓋近傍)		(141)注D	83	緩衝体カバープレート(底板近傍)		(137)注D	-	緩衝体木材		100(70)注D	125	フィン先端		100(70)注D	103
部位	条件	通常時	一般																																																				
周囲温度	太陽熱放射なし	38	太陽熱放射あり																																																				
緩衝体表面		76	38																																																				
緩衝体カバープレート(蓋近傍)		(141)注D	83																																																				
緩衝体カバープレート(底板近傍)		(137)注D	-																																																				
フィン先端		100(70)注D	103																																																				
部位	条件	近接表面温度評価条件	最高温度評価条件																																																				
周囲温度	太陽熱放射なし	38	太陽熱放射あり																																																				
緩衝体表面		76	38																																																				
緩衝体カバープレート(蓋近傍)		(141)注D	83																																																				
緩衝体カバープレート(底板近傍)		(137)注D	-																																																				
緩衝体木材		100(70)注D	125																																																				
フィン先端		100(70)注D	103																																																				

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前	頁番号	補正後
(D)-B-28	(D)-第 B.5 図 通常時 (太陽熱放射：なし) における輸切り半ピッチモデル温度分布	(D)-B-28	(D)-第 B.5 図 一般の試験条件における輸切り半ピッチモデル温度分布 《近接表面温度評価条件》
(D)-B-29	(D)-第 B.6 図 通常時 (太陽熱放射：なし) における全体モデル温度分布	(D)-B-29	(D)-第 B.6 図 一般の試験条件における全体モデル温度分布 《近接表面温度評価条件》
(D)-B-32	B.4.3 最低温度 本輸送物の最低使用温度は (D) 章 A.4.2 に述べたように -20℃ である。 一方、本輸送物は収納物の冷却のため内筒内に水を充填しているため、周囲温度 -20℃ から 0℃ までの使用範囲においてこの内筒内水が凍結しない最低崩壊熱量を、周囲温度が、-20℃ から 0℃ において内筒内水が凍結しない最低崩壊熱量を、ABAQUS コードを用いて計算した。	(D)-B-32	B.4.3 最低温度 本輸送物の最低使用温度は (D) 章 A.4.2 に述べたように -20℃ である。 一方、本輸送物は収納物の冷却のため内筒内に水を充填しているため、周囲温度 -20℃ から 0℃ までの使用範囲においてこの内筒内水が凍結しない最低崩壊熱量を、周囲温度が、-20℃ から 0℃ において内筒内水が凍結しない最低崩壊熱量を、ABAQUS コードを用いて計算した。本評価においては、安全側の評価となるよう以下の条件を考慮した。 ・ (D) 章 B.6.1.1 の 2. (3) に示すとおり、内筒内面下部における熱伝達率は冷却水平上面に対する自然対流熱伝達率とする。 ・ 外筒表面及びフィン表面の対流熱伝達率については、(D) 章 B.6.1.1 の 5. に示す外表面における自然対流熱伝達率の周方向分布を考慮せず、上部側の放熱が多くなるよう設定する。 ・ 太陽熱放射を考慮しない。
(D)-B-35	上記 (I) 式から (6) 式より求めた輸送物の内筒内圧を (D)-第 B.24 表に示す。なお、この圧力は蓋取付け時の周囲温度が仮に -20℃ であった場合には空気の密度が大きくなるため、約 5% 増加する可能性があるが、構造評価は保守的にこれを包絡する圧力で評価している。また、0 リングの最大使用可能圧力は 6.9MPa であり、内筒内圧が使用可能範囲を超えることはない。	(D)-B-35	上記 (I) 式から (6) 式より求めた輸送物の内筒内圧を (D)-第 B.24 表に示す。なお、蓋取付け時の周囲温度が仮に -20℃ であった場合には空気の密度が大きくなるため、内筒内圧は約 5% 増加する可能性があるが、構造評価は保守的にこれを包絡する圧力で評価している。また、0 リングの最大使用可能圧力は 6.9MPa であり、内筒内圧が使用可能範囲を超えることはない。

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書 (令和 5 年 5 月 30 日付け原設発第 6 号) 申請時からの変更箇所を 〇 で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前	頁番号	補正後																																																																																																																																												
(a)-B-36	<p>(口)-第 B.24 表 一般の試験条件下の内筒内圧</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>記号</th> <th>単位</th> <th>式</th> <th>計算値</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>内筒内の空間容積</td> <td>V</td> <td>m³</td> <td>-</td> <td></td> </tr> <tr> <td>燃料集合体の体積</td> <td>Vf</td> <td>m³</td> <td>-</td> <td></td> </tr> <tr> <td>燃料装荷時の内筒内空間容積</td> <td>Vc</td> <td>m³</td> <td>(1)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>内筒内水体積</td> <td>Vw</td> <td>m³</td> <td>-</td> <td></td> </tr> <tr> <td>水抜後空気体積</td> <td>Va</td> <td>m³</td> <td>(2)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>内筒内水平平均温度</td> <td>t₁</td> <td>℃</td> <td>-</td> <td>179</td> </tr> <tr> <td>20℃における水の密度</td> <td>ρ₂₀</td> <td>kg/m³</td> <td>-</td> <td>998.3</td> </tr> <tr> <td>温度 t₁における水の密度</td> <td>ρ t₁</td> <td>kg/m³</td> <td>-</td> <td>888.0</td> </tr> <tr> <td>温度 t₁における内筒内水体積</td> <td>Vwt₁</td> <td>m³</td> <td>(3)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>温度 t₁における内筒内空気体積</td> <td>Vat₁</td> <td>m³</td> <td>(4)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>温度 t₁における空気分圧</td> <td>P₁</td> <td>MPa abs</td> <td>(5)</td> <td>0.5161</td> </tr> <tr> <td>温度 t₁における飽和蒸気圧</td> <td>P_s</td> <td>MPa abs</td> <td>-</td> <td>0.9798</td> </tr> <tr> <td>内筒内圧</td> <td>P</td> <td>MPa abs</td> <td>(6)</td> <td>1.50 (1.99MPaG)</td> </tr> </tbody> </table>	項目	記号	単位	式	計算値	内筒内の空間容積	V	m ³	-		燃料集合体の体積	Vf	m ³	-		燃料装荷時の内筒内空間容積	Vc	m ³	(1)		内筒内水体積	Vw	m ³	-		水抜後空気体積	Va	m ³	(2)		内筒内水平平均温度	t ₁	℃	-	179	20℃における水の密度	ρ ₂₀	kg/m ³	-	998.3	温度 t ₁ における水の密度	ρ t ₁	kg/m ³	-	888.0	温度 t ₁ における内筒内水体積	Vwt ₁	m ³	(3)		温度 t ₁ における内筒内空気体積	Vat ₁	m ³	(4)		温度 t ₁ における空気分圧	P ₁	MPa abs	(5)	0.5161	温度 t ₁ における飽和蒸気圧	P _s	MPa abs	-	0.9798	内筒内圧	P	MPa abs	(6)	1.50 (1.99MPaG)	(a)-B-36	<p>(口)-第 B.24 表 一般の試験条件下の内筒内圧</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>記号</th> <th>単位</th> <th>式</th> <th>計算値</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>内筒内の空間容積</td> <td>V</td> <td>m³</td> <td>-</td> <td></td> </tr> <tr> <td>燃料集合体の体積</td> <td>Vf</td> <td>m³</td> <td>-</td> <td></td> </tr> <tr> <td>燃料装荷時の内筒内空間容積</td> <td>Vc</td> <td>m³</td> <td>(1)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>内筒内水体積</td> <td>Vw</td> <td>m³</td> <td>-</td> <td></td> </tr> <tr> <td>水抜後空気体積</td> <td>Va</td> <td>m³</td> <td>(2)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>内筒内水平平均温度</td> <td>t₁</td> <td>℃</td> <td>-</td> <td>179</td> </tr> <tr> <td>20℃における水の密度</td> <td>ρ₂₀</td> <td>kg/m³</td> <td>-</td> <td>998.3</td> </tr> <tr> <td>温度 t₁における水の密度</td> <td>ρ t₁</td> <td>kg/m³</td> <td>-</td> <td>888.0</td> </tr> <tr> <td>温度 t₁における内筒内水体積</td> <td>Vwt₁</td> <td>m³</td> <td>(3)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>温度 t₁における内筒内空気体積</td> <td>Vat₁</td> <td>m³</td> <td>(4)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>温度 t₁における空気分圧</td> <td>P₁</td> <td>MPa abs</td> <td>(5)</td> <td>0.5161</td> </tr> <tr> <td>温度 t₁における飽和蒸気圧</td> <td>P_s</td> <td>MPa abs</td> <td>-</td> <td>0.9798</td> </tr> <tr> <td>内筒内圧</td> <td>P</td> <td>MPa abs</td> <td>(6)</td> <td>1.50 (1.99MPaG)</td> </tr> </tbody> </table>	項目	記号	単位	式	計算値	内筒内の空間容積	V	m ³	-		燃料集合体の体積	Vf	m ³	-		燃料装荷時の内筒内空間容積	Vc	m ³	(1)		内筒内水体積	Vw	m ³	-		水抜後空気体積	Va	m ³	(2)		内筒内水平平均温度	t ₁	℃	-	179	20℃における水の密度	ρ ₂₀	kg/m ³	-	998.3	温度 t ₁ における水の密度	ρ t ₁	kg/m ³	-	888.0	温度 t ₁ における内筒内水体積	Vwt ₁	m ³	(3)		温度 t ₁ における内筒内空気体積	Vat ₁	m ³	(4)		温度 t ₁ における空気分圧	P ₁	MPa abs	(5)	0.5161	温度 t ₁ における飽和蒸気圧	P _s	MPa abs	-	0.9798	内筒内圧	P	MPa abs	(6)	1.50 (1.99MPaG)
項目	記号	単位	式	計算値																																																																																																																																											
内筒内の空間容積	V	m ³	-																																																																																																																																												
燃料集合体の体積	Vf	m ³	-																																																																																																																																												
燃料装荷時の内筒内空間容積	Vc	m ³	(1)																																																																																																																																												
内筒内水体積	Vw	m ³	-																																																																																																																																												
水抜後空気体積	Va	m ³	(2)																																																																																																																																												
内筒内水平平均温度	t ₁	℃	-	179																																																																																																																																											
20℃における水の密度	ρ ₂₀	kg/m ³	-	998.3																																																																																																																																											
温度 t ₁ における水の密度	ρ t ₁	kg/m ³	-	888.0																																																																																																																																											
温度 t ₁ における内筒内水体積	Vwt ₁	m ³	(3)																																																																																																																																												
温度 t ₁ における内筒内空気体積	Vat ₁	m ³	(4)																																																																																																																																												
温度 t ₁ における空気分圧	P ₁	MPa abs	(5)	0.5161																																																																																																																																											
温度 t ₁ における飽和蒸気圧	P _s	MPa abs	-	0.9798																																																																																																																																											
内筒内圧	P	MPa abs	(6)	1.50 (1.99MPaG)																																																																																																																																											
項目	記号	単位	式	計算値																																																																																																																																											
内筒内の空間容積	V	m ³	-																																																																																																																																												
燃料集合体の体積	Vf	m ³	-																																																																																																																																												
燃料装荷時の内筒内空間容積	Vc	m ³	(1)																																																																																																																																												
内筒内水体積	Vw	m ³	-																																																																																																																																												
水抜後空気体積	Va	m ³	(2)																																																																																																																																												
内筒内水平平均温度	t ₁	℃	-	179																																																																																																																																											
20℃における水の密度	ρ ₂₀	kg/m ³	-	998.3																																																																																																																																											
温度 t ₁ における水の密度	ρ t ₁	kg/m ³	-	888.0																																																																																																																																											
温度 t ₁ における内筒内水体積	Vwt ₁	m ³	(3)																																																																																																																																												
温度 t ₁ における内筒内空気体積	Vat ₁	m ³	(4)																																																																																																																																												
温度 t ₁ における空気分圧	P ₁	MPa abs	(5)	0.5161																																																																																																																																											
温度 t ₁ における飽和蒸気圧	P _s	MPa abs	-	0.9798																																																																																																																																											
内筒内圧	P	MPa abs	(6)	1.50 (1.99MPaG)																																																																																																																																											
(b)-B-37	<p>B.4.6 結果の要約及びその評価</p> <p>通常時及び一般の試験条件下における輸送物各部の最高温度は (口)-第 B.23 表に、輸送容器内部の圧力は (口)-第 B.24 表に示すとおりである。</p> <p>最高温度評価条件において、蓋 0 リングの最高温度は 162℃ となり、(口) 章 B.3 に記載した使用可能温度 300℃ を超えることはない。また、輸送容器内部の圧力は (口)-第 B.24 表に示したように 6.9MPa を超えることはない。蓋 0 リングの最大使用可能圧力は 6.9MPa であることから、通常時及び一般の試験条件下で密封性能が損なわれることはない。</p>	(b)-B-37	<p>B.4.6 結果の要約及びその評価</p> <p>一般の試験条件下における輸送物各部の最高温度は (口)-第 B.23 表に、輸送容器内部の圧力は (口)-第 B.24 表に示すとおりである。</p> <p>最高温度評価条件において、蓋 0 リングの最高温度は 162℃ となり、(口) 章 B.3 に記載した使用可能温度 300℃ を超えることはない。また、輸送容器内部の圧力は (口)-第 B.24 表に示したように 6.9MPa を超えることはない。蓋 0 リングの最大使用可能圧力は 6.9MPa であることから、一般の試験条件下で密封性能が損なわれることはない。</p>																																																																																																																																												
(c)-B-37	<p>B.4.6 結果の要約及びその評価</p> <p>通常時及び一般の試験条件下における輸送物各部の最高温度は (口)-第 B.23 表に、輸送容器内部の圧力は (口)-第 B.24 表に示すとおりである。</p> <p>最高温度評価条件において、蓋 0 リングの最高温度は 162℃ となり、(口) 章 B.3 に記載した使用可能温度 300℃ を超えることはない。また、輸送容器内部の圧力は (口)-第 B.24 表に示したように 6.9MPa を超えることはない。蓋 0 リングの最大使用可能圧力は 6.9MPa であることから、通常時及び一般の試験条件下で密封性能が損なわれることはない。</p>	(c)-B-37	<p>B.4.6 結果の要約及びその評価</p> <p>一般の試験条件下における輸送物各部の最高温度は (口)-第 B.23 表に、輸送容器内部の圧力は (口)-第 B.24 表に示すとおりである。</p> <p>最高温度評価条件において、蓋 0 リングの最高温度は 162℃ となり、(口) 章 B.3 に記載した使用可能温度 300℃ を超えることはない。また、輸送容器内部の圧力は (口)-第 B.24 表に示したように 6.9MPa を超えることはない。蓋 0 リングの最大使用可能圧力は 6.9MPa であることから、一般の試験条件下で密封性能が損なわれることはない。</p>																																																																																																																																												

注) NPT-14 型輸送物の実証試験における燃熱試験において、実際の内筒内水平平均温度はより低く、本評価に用いる平均温度が水の膨張による内筒内圧が高くなるよう保守的な値であることを確認している。

(注記：以降の文献番号ずれについては記載を省略する。)

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書 (令和 5 年 5 月 30 日付け原設発第 6 号) 申請時からの変更箇所を で示す。

補正内容一覧

頁番号		補正前		補正後	
(D)-B-39	(D)-B-39	(D)-第 B.25 表 運転時及び一般の試験条件下の熱解析結果の要約と評価	(D)-第 B.25 表 一般の試験条件下の熱解析結果の要約と評価		
頁番号	補正前	補正後	頁番号		
(D)-B-39	(D)-第 B.25 表 運転時及び一般の試験条件下の熱解析結果の要約と評価	(D)-第 B.25 表 一般の試験条件下の熱解析結果の要約と評価	(D)-B-39		
項目	項目	結果	結果	評価	評価
最高温度	最高温度	184℃	184℃	差違値以下 ⁽¹⁾⁽²⁾	190℃
燃料集合体	燃料集合体	-	-	差違値以下	-
中性子遮断体(レジン)	中性子遮断体(レジン)	170℃	170℃	差違値以下	-
ガンマ線遮断体(鉛)	ガンマ線遮断体(鉛)	融点 327.5℃	融点 327.5℃	差違値以下	-
近接表面 ⁽¹⁾	近接表面 ⁽¹⁾	85℃	78℃ ⁽¹⁾⁽²⁾	差違値以下	-
0 リング	0 リング	300℃	164℃	差違値以下	-
外筒	外筒	-	134℃	差違値以下 ⁽¹⁾⁽²⁾	140℃
中間筒	中間筒	-	162℃	差違値以下 ⁽¹⁾⁽²⁾	170℃
内筒	内筒	-	177℃	差違値以下 ⁽¹⁾⁽²⁾	180℃
最大内圧	最大内圧	6.9MPa	6.9MPa	差違値以下	構造解析では安全側に1.70MPaを適用
0 リング	0 リング	1.50MPa abs (1.39MPaG)	1.50MPa abs (1.39MPaG)	差違値以下	
最低曲げ熱量	最低曲げ熱量	内筒内水の凍結なし	周囲温度-20℃、曲げ熱量 6.5kW で内筒内水凍結せず	差違に合致	-

注1) 本熱放射なしの通常時に対する評価である。なお、蓋及び底板温度は 85℃を超えているが、蓋及び底板部には必要に応じ近接防止金網(80℃以下)((D)章 B.6.1.3 参照))を取り付けて輸送するため、人が容易に近づくことができる表面の温度は 85℃以下である。

注2) バギングリング表面の最高温度

注3) (D)章 A.5 に示す応力評価において、生じる応力が当該温度における解析差違値を満たすことを確認。

注1) 送熱系温度評価条件における評価である。なお、蓋及び底板温度は 85℃を超えているが、蓋及び底板部には必要に応じ近接防止金網(80℃以下)((D)章 B.6.1.3 参照))を取り付けて輸送するため、人が容易に近づくことができる表面の温度は 85℃以下である。

注2) バギングリング表面の最高温度

注3) (D)章 A.5 に示す応力評価において、生じる応力が当該温度における解析差違値を満たすことを確認。

補正内容一覧

頁番号	補正前	頁番号	補正後
(四)-B-44	<p>2. 解析条件</p> <p>解析に使用した熱的条件は次のとおりである。 使用済燃料の崩壊熱量は、全体で54kWである。特別の試験条件下の熱解析は、強度試験(落下試験Ⅰ及びⅡ)条件に引き続いて、耐火試験条件下に置かれるものとする。また、火災前の輸送容器の温度分布は、通常輸送時、周囲温度38℃太陽熱放射を受ける場合の温度分布(□)-第B.7図及び第B.8図参照)であるとする。</p>	(四)-B-44	<p>2. 解析条件</p> <p>解析に使用した熱的条件は次のとおりである。 使用済燃料の崩壊熱量は、全体で54kWである。特別の試験条件下の熱解析は、強度試験(落下試験Ⅰ及びⅡ)条件に引き続いて、耐火試験条件下に置かれるものとする。また、火災前の輸送容器の温度分布は、周囲温度38℃、太陽熱放射を受ける場合の温度分布(□)-第B.7図及び第B.8図参照)であるとする。</p>
(四)-B-45	<p>B.5.2 核燃料輸送物の評価条件</p> <p>落下試験Ⅰ(9m落下)における輸送物の変形は、フィン及び緩衝体に生じる変形である。 フィンについては変形していない方が周囲からの入熱量が大きくなるため変形がないものとする。</p>	(四)-B-45	<p>B.5.2 核燃料輸送物の評価条件</p> <p>落下試験Ⅰ(9m落下)における輸送物の変形は、フィン及び緩衝体に生じる変形である。 フィンについては変形していない方が周囲からの入熱量が大きくなるため変形がないものとする。なお、NFT-14P型輸送物の落下試験によってフィンが変形した状態とした後に実施した耐火試験後の各部温度が、(□)章B.5.3に示す評価値と比べて同等又は小さいことが実証試験により確認されている¹⁰⁾。</p>
(四)-B-46	<p>なお、密封境界の蓋0リングの最高温度は213℃、ベント・水位調整バルブ0リングは222℃、ドレンバルブ0リングは202℃、水位調整用加圧バルブ0リングは221℃となり、使用可能温度300℃を超えることはない。</p>	(四)-B-46	<p>なお、密封境界の蓋0リングの最高温度は213℃、ベント・水位調整バルブ0リングは222℃、ドレンバルブ0リングは202℃、水位調整用加圧バルブ0リングは221℃となり、特別の試験条件下における使用可能温度260℃を超えることはない。</p>
(四)-B-53	<p>輸送物各部について最高温度と火災発生時からの時間をまとめると、(□)-第B.27表に示すとおりである。また、輸送容器内部の最大圧力は(□)-第B.28表に示したように6.9MPaを超えることはない。ふっ素ゴム製0リングの温度は(□)-第B.27表に示したように300℃を超えることはない。ふっ素ゴム製0リングは300℃に耐えられ、最大使用可能圧力は6.9MPaであることから、特別の試験条件下で密封性能が損なわれることはない。</p>	(四)-B-53	<p>輸送物各部について最高温度と火災発生時からの時間をまとめると、(□)-第B.27表に示すとおりである。また、輸送容器内部の最大圧力は(□)-第B.28表に示したように6.9MPaを超えることはない。ふっ素ゴム製0リングの温度は(□)-第B.27表に示したように(□)章B.3に記載した使用可能温度260℃を超えることはない。ふっ素ゴム製0リングは260℃に耐えられ、最大使用可能圧力は6.9MPaであることから、特別の試験条件下で密封性能が損なわれることはない。</p>

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を¹⁰⁾で示す。

補正内容一覧

頁番号		補正前		補正後																																																			
(D)-B-54	(D)-B-54	<p>(D)-第 B.23 表 特別の試験条件下の輸送物の総合的評価</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>基準値</th> <th>結果</th> <th>評価</th> <th>他解析への条件</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>最高温度 燃料集合体</td> <td>-</td> <td>214℃</td> <td>基準値以下<small>(注1)</small></td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>中性子遮蔽体(レジン)</td> <td>170℃</td> <td>357℃</td> <td>基準値を超えるため、損傷を考慮した安全評価を実施</td> <td>遮蔽解析で密度減少考慮、臨界解析で無視</td> </tr> <tr> <td>ガンマ線遮蔽体(鉛)</td> <td>融点 327.5℃</td> <td>224℃</td> <td>基準値以下</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>0 リンダ</td> <td>300℃</td> <td>222℃</td> <td>基準値以下</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>		項目	基準値	結果	評価	他解析への条件	最高温度 燃料集合体	-	214℃	基準値以下 <small>(注1)</small>	-	中性子遮蔽体(レジン)	170℃	357℃	基準値を超えるため、損傷を考慮した安全評価を実施	遮蔽解析で密度減少考慮、臨界解析で無視	ガンマ線遮蔽体(鉛)	融点 327.5℃	224℃	基準値以下	-	0 リンダ	300℃	222℃	基準値以下	-	<p>(D)-第 B.23 表 特別の試験条件下の輸送物の総合的評価</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>基準値</th> <th>結果</th> <th>評価</th> <th>他解析への条件</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>最高温度 燃料集合体</td> <td>-</td> <td>214℃</td> <td>基準値以下<small>(注1)</small></td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>中性子遮蔽体(レジン)</td> <td>170℃</td> <td>357℃</td> <td>基準値を超えるため、損傷を考慮した安全評価を実施</td> <td>遮蔽解析で密度減少考慮、臨界解析で無視</td> </tr> <tr> <td>ガンマ線遮蔽体(鉛)</td> <td>融点 327.5℃</td> <td>224℃</td> <td>基準値以下</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>0 リンダ</td> <td>260℃</td> <td>222℃</td> <td>基準値以下</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>		項目	基準値	結果	評価	他解析への条件	最高温度 燃料集合体	-	214℃	基準値以下 <small>(注1)</small>	-	中性子遮蔽体(レジン)	170℃	357℃	基準値を超えるため、損傷を考慮した安全評価を実施	遮蔽解析で密度減少考慮、臨界解析で無視	ガンマ線遮蔽体(鉛)	融点 327.5℃	224℃	基準値以下	-	0 リンダ	260℃	222℃	基準値以下	-
項目	基準値	結果	評価	他解析への条件																																																			
最高温度 燃料集合体	-	214℃	基準値以下 <small>(注1)</small>	-																																																			
中性子遮蔽体(レジン)	170℃	357℃	基準値を超えるため、損傷を考慮した安全評価を実施	遮蔽解析で密度減少考慮、臨界解析で無視																																																			
ガンマ線遮蔽体(鉛)	融点 327.5℃	224℃	基準値以下	-																																																			
0 リンダ	300℃	222℃	基準値以下	-																																																			
項目	基準値	結果	評価	他解析への条件																																																			
最高温度 燃料集合体	-	214℃	基準値以下 <small>(注1)</small>	-																																																			
中性子遮蔽体(レジン)	170℃	357℃	基準値を超えるため、損傷を考慮した安全評価を実施	遮蔽解析で密度減少考慮、臨界解析で無視																																																			
ガンマ線遮蔽体(鉛)	融点 327.5℃	224℃	基準値以下	-																																																			
0 リンダ	260℃	222℃	基準値以下	-																																																			
(D)-B-78	(D)-B-78	<p>4. 全体モデルにおけるフィンの取扱い</p> <p>全体モデルにおいて、フィンはモデルに含まれていないので、フィンが付く外筒表面での熱伝達は次のように補正している。</p> <p>輪切り半ピッチモデルの解析結果より、フィン部を考慮した外筒表面での等価熱伝達率を求め、通常輸送時、一般の試験条件及び火災前、火災後の放熱時に対しては安全側に上半分(270°-0°-90°)の低い等価熱伝達率を与えた。</p> <p>求めた通常輸送時及び一般の試験条件の等価熱伝達率を(D)-第 B.付 9 表に示す。</p> <p>また、特別の試験条件の等価熱伝達率を(D)-第 B.付 6 図に示す。</p>		<p>4. 全体モデルにおけるフィンの取扱い</p> <p>全体モデルにおいて、フィンはモデルに含まれていないので、フィンが付く外筒表面での熱伝達は次のように補正している。</p> <p>輪切り半ピッチモデルの解析結果より、フィン部を考慮した外筒表面での等価熱伝達率を求め、一般の試験条件及び火災前、火災後の放熱時に対しては安全側に上半分(270°-0°-90°)の低い等価熱伝達率を与えた。</p> <p>求めた一般の試験条件の等価熱伝達率を(D)-第 B.付 9 表に示す。</p> <p>また、特別の試験条件の等価熱伝達率を(D)-第 B.付 6 図に示す。</p>																																																			
(D)-B-78	(D)-B-78	<p>(D)-第 B.付 9 表 全体モデルにおけるフィン部を考慮した外筒表面の熱伝達率</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>評価条件</th> <th>等価熱伝達率 (W/(m²·K))</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>通常輸送時</td> <td rowspan="2">[]</td> </tr> <tr> <td>一般の試験条件</td> </tr> </tbody> </table>		評価条件	等価熱伝達率 (W/(m ² ·K))	通常輸送時	[]	一般の試験条件	<p>(D)-第 B.付 9 表 全体モデルにおけるフィン部を考慮した外筒表面の熱伝達率</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>評価条件</th> <th>等価熱伝達率 (W/(m²·K))</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>近接表面温度評価条件</td> <td rowspan="2">[]</td> </tr> <tr> <td>一般の試験条件</td> </tr> </tbody> </table>		評価条件	等価熱伝達率 (W/(m ² ·K))	近接表面温度評価条件	[]	一般の試験条件																																								
評価条件	等価熱伝達率 (W/(m ² ·K))																																																						
通常輸送時	[]																																																						
一般の試験条件																																																							
評価条件	等価熱伝達率 (W/(m ² ·K))																																																						
近接表面温度評価条件	[]																																																						
一般の試験条件																																																							

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前	頁番号	補正後
(ロ)-B-88	<p>B.6.2 参考文献</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) ABAQUS Inc., "ABAQUS Theory Manual (Version 6.5)", (1995). 2) (社)日本機械学会, "伝熱工学資料(改訂第4版又は改訂第3版)", (1986, 1975). 3) D.L.Hazman, G.A.Reynann, R.E.Mason, "MATPRO-VERSION 11 (Revision 2) A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior", NUREG/CR-0497, TREE-1280, Rev.2, EG & G Idaho Inc., (1981). 4) 長谷川正義, 三島良楨監修, "原子炉材料ハンドブック", (1977). 5) (財)日本規格協会, "JISハンドブック「非鉄」参考", (1986). 6) [Redacted] 7) [Redacted] 8) 木材工業ハンドブック編集委員会, "木材工業ハンドブック(改訂3版)", (1982). 9) 牧広, 島村昭治編, "複合材料技術集成", (1976). 10) 日本バルカー工業株式会社, "VALQUA HAND BOOK 技術編", (2010). 11) [Redacted] 12) R.O.Wooton, H.M.Erstein, "Heat Transfer from a Parallel Rod Fuel Element in a Shipping Container", Battelle Memorial Institute, (1963). 13) W.H.Adams, "Heat Transmission", Third Edition McGraw Hill., (1954) 14) (社)日本機械学会, "昭和42年度原子力平和利用委託研究「使用済燃料輸送容器的熱除去に関する試験研究」研究成果報告書", (1968). 15) M.Jakob, "Heat Transfer", Volume I.John Wiley & Sons, Inc., New York, (1962). 16) W.M.Rohsenow, J.P.Hartnett, Y.I.Cho, "Handbook of Heat Transfer", McGRAW-HILL BOOK CO., (1973). 	(ロ)-B-88	<p>B.6.2 参考文献</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) ABAQUS Inc., "ABAQUS Theory Manual (Version 6.5)", (1995). 2) (社)日本機械学会, "伝熱工学資料(改訂第4版又は改訂第3版)", (1986, 1975). 3) D.L.Hazman, G.A.Reynann, R.E.Mason, "MATPRO-VERSION 11 (Revision 2) A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior", NUREG/CR-0497, TREE-1280, Rev.2, EG & G Idaho Inc., (1981). 4) 長谷川正義, 三島良楨監修, "原子炉材料ハンドブック", (1977). 5) (財)日本規格協会, "JISハンドブック「非鉄」参考", (1986). 6) [Redacted] 7) [Redacted] 8) 木材工業ハンドブック編集委員会, "木材工業ハンドブック(改訂3版)", (1982). 9) (財)電力中央研究所, "輸送キャスク密封装置の耐熱腐蝕性能の評価", (1988). 10) 日本バルカー工業株式会社, "VALQUA HAND BOOK 技術編", (2010). 11) [Redacted] 12) (財)電力中央研究所, "平成8年度「放射性廃棄物輸送容器安全性実証試験」事業成果報告書", (1997). 13) R.O.Wooton, H.M.Erstein, "Heat Transfer from a Parallel Rod Fuel Element in a Shipping Container", Battelle Memorial Institute, (1963). 14) W.H.McAdams, "Heat Transmission", Third Edition McGraw Hill., (1954). 15) (社)日本機械学会, "昭和42年度原子力平和利用委託研究「使用済燃料輸送容器的熱除去に関する試験研究」研究成果報告書", (1968). 16) M.Jakob, "Heat Transfer", Volume I.John Wiley & Sons, Inc., New York, (1962). 17) W.M.Rohsenow, J.P.Hartnett, Y.I.Cho, "Handbook of Heat Transfer", McGRAW-HILL BOOK CO., (1973).

注記) 核燃料輸送物施設承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を [Redacted] で示す。

(ロ)-B-88

(ロ)-B-88

補正内容一覧

頁番号	補正前 (記載なし)	頁番号 (b) D-72	補正後
			<p>D.6.3 平均燃焼速度を超える燃料をバスケット最外面に収納した場合の燃焼当量率について 燃焼速度の計算には(イ)第 A.1 表に示す平均燃焼速度を用いているが、より高い燃焼速度の燃 料集合体を収納する場合があります。一方で、燃焼解析モデルでは、バスケット最外面の燃料とキ ャビライ内面の間の内筒内水厚を実形状よりも小さく安全側に設定している。ここでは、平均 燃焼速度と最高燃焼速度の差を考慮しても、本解析モデルによる計算から得られた燃焼当量率が保 守的であることを示す。</p> <p>1. 検討条件</p> <ul style="list-style-type: none"> 平均燃焼速度と最高燃焼速度の差が最も大きいタイプ 8 燃料を対象とする。 燃焼解析結果に等号の大きい(ロ)第 D.1 付 3 図の斜線に示したバスケット最外面位置に 最高燃焼速度の燃料集合体を収納するものとする。 (ロ)第 D.2 図から(ロ)第 D.10 図に示す二次示(ロ)モデルにおける内筒内水厚 $0.2m$ に対し、(ロ)第 D.1 付 3 図の実形状での水厚 $0.2m$ の差による燃焼率比を考慮する。 内筒内水中のガンマ線及び中性子の燃焼率比(ロ)第 D.4 で実施した評価結果から下記の とおり設定する。 <p>ガンマ線： $0.2m/1$ 相減衰 中性子： $0.2m/1$ 相減衰</p> <ul style="list-style-type: none"> 燃焼速度は燃焼解析で用いた平均燃焼速度 $0.2m/1m$ の値に対し、最高燃焼速度 $0.2m/1m$ の値とした場合の増加比を考慮する。 <p>2. 検討方法</p> <p>上記の条件に基づいて、(ロ)第 D.1 付 3 図の解析モデルと実形状の内筒内水厚及び燃焼速 の差から、実形状体系において最外面に最高燃焼速度の燃料集合体を収納した場合の燃焼当量 率を算出する。</p> <p>3. 検討結果</p> <p>バスケット最外面に最高燃焼速度の燃料集合体を収納した場合の燃焼当量率を(ロ)第 D. 付 10 表に示す。バスケット最外面に最高燃焼速度燃料の収納を考慮した場合、 $0.2m/1m/1m/1m/1m/1m$ の燃焼速度差から燃焼速度は増加するが、本解析モデルで内筒内水 厚を安全側に設定していることから、解析から得られた燃焼当量率を超えることはない。</p>

(ロ) D-72

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和 5 年 5 月 30 日付け原設発第 6 号)申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前	頁番号	補正後
(b)-F-4	<p>・放射線照射による劣化は、非金属材料(レジン・木材・ふっ素ゴム)については、中性子とガンマ線に対して影響を評価した。一方、金属材料については、主に原子のはじき出しにより照射脆化が生じるが、ガンマ線に起因するはじき出しが生じる確率は中性子と比較して2桁以上小さいため、ガンマ線に起因する照射脆化への影響は中性子と比較して十分小さくなる。このため、金属材料の放射線照射による劣化の影響は中性子に対して評価した。</p>	(b)-F-4	<p>・放射線照射による劣化は、非金属材料(レジン・木材・ふっ素ゴム)については、中性子とガンマ線に対して影響を評価した。一方、金属材料については、主に原子のはじき出しにより照射脆化が生じるが、ガンマ線に起因するはじき出しが生じる確率は中性子と比較して2桁以上小さいため、ガンマ線に起因する照射脆化への影響は中性子と比較して十分小さくなる。このため、金属材料の放射線照射による劣化の影響は中性子に対して評価した。</p> <p>・累積ガンマ線照射量については、(ロ)章Dで算出したガンマ線束計算結果から各部材における最大線束を抽出し、吸収線量率変換係数及び評価期間を乗ずることで算出した。また、累積中性子照射量については、(ロ)章Dで算出した中性子束計算結果から各部材における最大線束を抽出し、評価期間を乗ずることで算出した。なお、ふっ素ゴムの放射線照射による劣化の評価については、ガンマ線及び中性子の吸収線量の合算値が基準となるため、中性子束の最大値に線量当量率変換係数及び評価期間を乗ずることで算出した線量当量率を $Sv=6y$ として吸収線量とし、累積ガンマ線照射量と合算した値を累積照射量とした。</p>

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

補正前	頁番号	(四)-F-6											
	(ロ)-第F.2表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(1/12)												
9-7-1(ロ)	本体・蓋・緩衝体・収納物	ステンレス鋼	<table border="1"> <thead> <tr> <th>材料</th> <th>経年変化要因</th> <th>経年変化の考慮の必要性の評価</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">ステンレス鋼</td> <td>熱</td> <td> <p>ステンレス鋼は、熱による経年変化として、高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられる。</p> <p>本輸送物では、輸送時の各部材の最高温度(180℃未満)は、上記の中で最も厳しい温度条件となるクリープによる変形を考慮する必要のない範囲(280℃以下)である。また、設計用強度・物性値が規定²⁾されている温度範囲において構造健全性を確認しているため、熱的劣化を考慮する必要はない。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p> </td> </tr> <tr> <td>放射線照射</td> <td> <p>ステンレス鋼は、放射線による経年変化として、中性子照射量が10^{17} n/cm²オーダーを上回る環境における機械的特性の変化に伴う照射脆化⁴⁾が考えられる。</p> <p>本輸送物では、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、評価期間中の累積中性子照射量は5.8×10^{14} n/cm²であり、照射脆化が生じるおそれがある中性子照射量を下回る。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p> </td> </tr> <tr> <td>化学</td> <td> <p>ステンレス鋼は、化学的要因による経年変化として、腐食に伴う表面の性状の変化が考えられる。</p> <p>本輸送物では、輸送容器内部は内水平平均温度が180℃未満であり、軽水炉の運転中の一次冷却水温度に対して十分に低いため、腐食の影響はない⁵⁾。また、定期点検及び輸送物発送前検査の外観検査で輸送容器外面に腐食が確認された場合には補修する。さらに、ステンレス鋼は表面に不動態皮膜が形成された状態が維持されるため、腐食は発生しにくい。</p> <p>中性子遮蔽材であるレジンに接する部材は、充填空間が密閉環境であり、酸素が連続的に供給されないため、腐食の影響はない。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p> </td> </tr> </tbody> </table>	材料	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の評価	ステンレス鋼	熱	<p>ステンレス鋼は、熱による経年変化として、高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられる。</p> <p>本輸送物では、輸送時の各部材の最高温度(180℃未満)は、上記の中で最も厳しい温度条件となるクリープによる変形を考慮する必要のない範囲(280℃以下)である。また、設計用強度・物性値が規定²⁾されている温度範囲において構造健全性を確認しているため、熱的劣化を考慮する必要はない。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>	放射線照射	<p>ステンレス鋼は、放射線による経年変化として、中性子照射量が10^{17} n/cm²オーダーを上回る環境における機械的特性の変化に伴う照射脆化⁴⁾が考えられる。</p> <p>本輸送物では、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、評価期間中の累積中性子照射量は5.8×10^{14} n/cm²であり、照射脆化が生じるおそれがある中性子照射量を下回る。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>	化学	<p>ステンレス鋼は、化学的要因による経年変化として、腐食に伴う表面の性状の変化が考えられる。</p> <p>本輸送物では、輸送容器内部は内水平平均温度が180℃未満であり、軽水炉の運転中の一次冷却水温度に対して十分に低いため、腐食の影響はない⁵⁾。また、定期点検及び輸送物発送前検査の外観検査で輸送容器外面に腐食が確認された場合には補修する。さらに、ステンレス鋼は表面に不動態皮膜が形成された状態が維持されるため、腐食は発生しにくい。</p> <p>中性子遮蔽材であるレジンに接する部材は、充填空間が密閉環境であり、酸素が連続的に供給されないため、腐食の影響はない。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>
	材料	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の評価										
	ステンレス鋼	熱	<p>ステンレス鋼は、熱による経年変化として、高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられる。</p> <p>本輸送物では、輸送時の各部材の最高温度(180℃未満)は、上記の中で最も厳しい温度条件となるクリープによる変形を考慮する必要のない範囲(280℃以下)である。また、設計用強度・物性値が規定²⁾されている温度範囲において構造健全性を確認しているため、熱的劣化を考慮する必要はない。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>										
放射線照射		<p>ステンレス鋼は、放射線による経年変化として、中性子照射量が10^{17} n/cm²オーダーを上回る環境における機械的特性の変化に伴う照射脆化⁴⁾が考えられる。</p> <p>本輸送物では、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、評価期間中の累積中性子照射量は5.8×10^{14} n/cm²であり、照射脆化が生じるおそれがある中性子照射量を下回る。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>											
化学		<p>ステンレス鋼は、化学的要因による経年変化として、腐食に伴う表面の性状の変化が考えられる。</p> <p>本輸送物では、輸送容器内部は内水平平均温度が180℃未満であり、軽水炉の運転中の一次冷却水温度に対して十分に低いため、腐食の影響はない⁵⁾。また、定期点検及び輸送物発送前検査の外観検査で輸送容器外面に腐食が確認された場合には補修する。さらに、ステンレス鋼は表面に不動態皮膜が形成された状態が維持されるため、腐食は発生しにくい。</p> <p>中性子遮蔽材であるレジンに接する部材は、充填空間が密閉環境であり、酸素が連続的に供給されないため、腐食の影響はない。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>											

補正後	頁番号	(四)-F-6											
	(ロ)-第F.2表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(1/12)												
9-7-1(ロ)	本体・蓋・緩衝体・収納物	ステンレス鋼	<table border="1"> <thead> <tr> <th>材料</th> <th>経年変化要因</th> <th>経年変化の考慮の必要性の評価</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">ステンレス鋼</td> <td>熱</td> <td> <p>ステンレス鋼は、熱による経年変化として、高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられる。</p> <p>上記の中で最も厳しい温度条件となるのはクリープによる変形であり、クリープによる変形が生じる材料温度は、一般に純金属の場合は融点の三分の一付近、実用鋼では種々の因子により強化されていることからそれ以上と言われている²⁾。本輸送物では、輸送時の各部材の最高温度(180℃未満)はクリープによる変形を考慮する必要のない範囲(ステンレス鋼の融点³⁾の三分の一である280℃以下)である。また、設計用強度・物性値が規定²⁾されている温度範囲において構造健全性を確認しているため、熱的劣化を考慮する必要はない。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p> </td> </tr> <tr> <td>放射線照射</td> <td> <p>ステンレス鋼は、放射線による経年変化として、中性子照射量が10^{17} n/cm²オーダーを上回る環境における機械的特性の変化に伴う照射脆化⁴⁾が考えられる。</p> <p>本輸送物では、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、評価期間中の累積中性子照射量は5.8×10^{14} n/cm²であり、照射脆化が生じるおそれがある中性子照射量を下回る。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p> </td> </tr> <tr> <td>化学</td> <td> <p>ステンレス鋼は、化学的要因による経年変化として、腐食に伴う表面の性状の変化が考えられる。</p> <p>ステンレス鋼は、加圧水型原子炉の一次冷却水の温度や水質等の環境条件下において問題となるような腐食は起こらないことが研究⁵⁾により示されている。本輸送物では、一般の試験条件下における内水平平均温度が180℃未満であり、運転中の加圧水型原子炉の一次冷却水の温度約325℃(電気出力1,100Mw級の例)に比べて十分に低く、加圧水型原子炉より環境条件が厳しくないため、輸送容器内部のステンレス鋼の腐食の影響はない。また、定期点検及び輸送物発送前検査の外観検査で輸送容器外面に腐食が確認された場合には補修する。さらに、ステンレス鋼は表面に不動態皮膜が形成された状態が維持されるため、腐食は発生しにくい。</p> <p>中性子遮蔽材であるレジンに接する部材は、充填空間が密閉環境であり、酸素が連続的に供給されないため、腐食の影響はない。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p> </td> </tr> </tbody> </table>	材料	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の評価	ステンレス鋼	熱	<p>ステンレス鋼は、熱による経年変化として、高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられる。</p> <p>上記の中で最も厳しい温度条件となるのはクリープによる変形であり、クリープによる変形が生じる材料温度は、一般に純金属の場合は融点の三分の一付近、実用鋼では種々の因子により強化されていることからそれ以上と言われている²⁾。本輸送物では、輸送時の各部材の最高温度(180℃未満)はクリープによる変形を考慮する必要のない範囲(ステンレス鋼の融点³⁾の三分の一である280℃以下)である。また、設計用強度・物性値が規定²⁾されている温度範囲において構造健全性を確認しているため、熱的劣化を考慮する必要はない。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>	放射線照射	<p>ステンレス鋼は、放射線による経年変化として、中性子照射量が10^{17} n/cm²オーダーを上回る環境における機械的特性の変化に伴う照射脆化⁴⁾が考えられる。</p> <p>本輸送物では、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、評価期間中の累積中性子照射量は5.8×10^{14} n/cm²であり、照射脆化が生じるおそれがある中性子照射量を下回る。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>	化学	<p>ステンレス鋼は、化学的要因による経年変化として、腐食に伴う表面の性状の変化が考えられる。</p> <p>ステンレス鋼は、加圧水型原子炉の一次冷却水の温度や水質等の環境条件下において問題となるような腐食は起こらないことが研究⁵⁾により示されている。本輸送物では、一般の試験条件下における内水平平均温度が180℃未満であり、運転中の加圧水型原子炉の一次冷却水の温度約325℃(電気出力1,100Mw級の例)に比べて十分に低く、加圧水型原子炉より環境条件が厳しくないため、輸送容器内部のステンレス鋼の腐食の影響はない。また、定期点検及び輸送物発送前検査の外観検査で輸送容器外面に腐食が確認された場合には補修する。さらに、ステンレス鋼は表面に不動態皮膜が形成された状態が維持されるため、腐食は発生しにくい。</p> <p>中性子遮蔽材であるレジンに接する部材は、充填空間が密閉環境であり、酸素が連続的に供給されないため、腐食の影響はない。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>
	材料	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の評価										
	ステンレス鋼	熱	<p>ステンレス鋼は、熱による経年変化として、高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられる。</p> <p>上記の中で最も厳しい温度条件となるのはクリープによる変形であり、クリープによる変形が生じる材料温度は、一般に純金属の場合は融点の三分の一付近、実用鋼では種々の因子により強化されていることからそれ以上と言われている²⁾。本輸送物では、輸送時の各部材の最高温度(180℃未満)はクリープによる変形を考慮する必要のない範囲(ステンレス鋼の融点³⁾の三分の一である280℃以下)である。また、設計用強度・物性値が規定²⁾されている温度範囲において構造健全性を確認しているため、熱的劣化を考慮する必要はない。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>										
放射線照射		<p>ステンレス鋼は、放射線による経年変化として、中性子照射量が10^{17} n/cm²オーダーを上回る環境における機械的特性の変化に伴う照射脆化⁴⁾が考えられる。</p> <p>本輸送物では、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、評価期間中の累積中性子照射量は5.8×10^{14} n/cm²であり、照射脆化が生じるおそれがある中性子照射量を下回る。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>											
化学		<p>ステンレス鋼は、化学的要因による経年変化として、腐食に伴う表面の性状の変化が考えられる。</p> <p>ステンレス鋼は、加圧水型原子炉の一次冷却水の温度や水質等の環境条件下において問題となるような腐食は起こらないことが研究⁵⁾により示されている。本輸送物では、一般の試験条件下における内水平平均温度が180℃未満であり、運転中の加圧水型原子炉の一次冷却水の温度約325℃(電気出力1,100Mw級の例)に比べて十分に低く、加圧水型原子炉より環境条件が厳しくないため、輸送容器内部のステンレス鋼の腐食の影響はない。また、定期点検及び輸送物発送前検査の外観検査で輸送容器外面に腐食が確認された場合には補修する。さらに、ステンレス鋼は表面に不動態皮膜が形成された状態が維持されるため、腐食は発生しにくい。</p> <p>中性子遮蔽材であるレジンに接する部材は、充填空間が密閉環境であり、酸素が連続的に供給されないため、腐食の影響はない。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>											

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

頁番号		(D) -F-8		
補正前	8-F-(ロ)	(ロ)-第 F.2 表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(3/12)		
		材 料	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価
		本体 炭素鋼	熱	炭素鋼は、熱による経年変化として、高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられる。 本輸送物では、輸送時の各部位の最高温度(170℃未満)は、上記の中で最も厳しい温度条件となるクリープによる変形を考慮する必要のない範囲(300℃以下)である。また、設計用強度・物性値が規定 ²⁾ されている温度範囲において構造健全性を確認しているため、熱的劣化を考慮する必要はない。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化を考慮する必要はない。
	放射線 照射	炭素鋼は、放射線による経年変化として、中性子照射量が 10^{16} n/cm ² オーダーを上回る環境における機械的特性の変化に伴う照射脆化 ⁴⁾ が考えられる。 本輸送物では、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、評価期間中の累積中性子照射量は 1.1×10^{14} n/cm ² であり、照射脆化が生じるおそれがある中性子照射量を下回る。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。		
	化学	炭素鋼は、化学的要因による経年変化として、腐食に伴う表面の性状の変化が考えられる。 本輸送物では、炭素鋼(中間筒の外面及び外筒の内面)は中性子遮蔽材(レジン)に接しており、中性子遮蔽材の熱的劣化により水分が生じる。一方、炭素鋼の腐食速度は、水中に溶解した酸素濃度に比例して増大するが ⁵⁾ 、中性子遮蔽材充填空間は密閉環境にあり、酸素が連続的に供給されないため腐食の影響はない。 炭素鋼(外筒の外面)については、ステンレス鋼オーバーレイなどの防錆措置を施しているため、腐食は発生しにくい。また、定期点検及び輸送物発送前検査において外観に異常がないことを確認している。 炭素鋼(中間筒の内面)は、密閉環境であり、酸素が連続的に供給されないため、腐食の影響はない。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の影響を考慮する必要はない。		
補正後	8-F-(ロ)	(ロ)-第 F.2 表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(3/12)		
		材 料	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価
		本体 炭素鋼	熱	炭素鋼は、熱による経年変化として、高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられる。 上記の中で最も厳しい温度条件となるのはクリープによる変形であり、クリープによる変形が生じる材料温度は、一般に純金属の場合は融点の三分の一付近、実用鋼では種々の因子により強化されていることからそれ以上と言われている ²⁾ 。本輸送物では、輸送時の各部位の最高温度(170℃未満)はクリープによる変形を考慮する必要のない範囲(炭素鋼の融点 ³⁾ の三分の一である 300℃以下)である。また、設計用強度・物性値が規定 ⁴⁾ されている温度範囲において構造健全性を確認しているため、熱的劣化を考慮する必要はない。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化を考慮する必要はない。
	放射線 照射	炭素鋼は、放射線による経年変化として、中性子照射量が 10^{16} n/cm ² オーダーを上回る環境における機械的特性の変化に伴う照射脆化 ⁴⁾ が考えられる。 本輸送物では、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、評価期間中の累積中性子照射量は 1.1×10^{14} n/cm ² であり、照射脆化が生じるおそれがある中性子照射量を下回る。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。		
	化学	炭素鋼は、化学的要因による経年変化として、腐食に伴う表面の性状の変化が考えられる。 本輸送物では、炭素鋼(中間筒の外面及び外筒の内面)は中性子遮蔽材(レジン)に接しており、中性子遮蔽材の熱的劣化により水分が生じる。一方、炭素鋼の腐食速度は、水中に溶解した酸素濃度に比例して増大するが ⁵⁾ 、中性子遮蔽材充填空間は密閉環境にあり、酸素が連続的に供給されないため腐食の影響はない。 炭素鋼(外筒の外面)については、ステンレス鋼オーバーレイなどの防錆措置を施しているため、腐食は発生しにくい。また、定期点検及び輸送物発送前検査において外観に異常がないことを確認している。 炭素鋼(中間筒の内面)は、密閉環境であり、酸素が連続的に供給されないため、腐食の影響はない。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の影響を考慮する必要はない。		

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和 5 年 5 月 30 日付け原設発第 6 号)申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

補正前		頁番号	(ロ)-F-10		
補正前	(ロ)	(ロ)-第 F.2 表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(5/12)			
		材料	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の評価	
		本体	鉛	熱	鉛は、熱による経年変化として、高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられる。ただし、本輸送物は構造強度部材に鉛を使用していないため、強度低下の影響はない。また、鉛には自重による応力が作用するが、クリープによる変形量は無視し得る。 また、鉛については、高温環境下での組織変化による変形に伴う遮蔽性能の低下が考えられるが、輸送時の本部材の最高温度は 180℃未満であり、融点である 327.5℃ ^(ロ) に対して十分に余裕のある温度範囲で使用するため、熱的劣化を考慮する必要はない。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化を考慮する必要はない。
				放射線照射	鉛は、放射線による経年変化として、中性子吸収に伴う遮蔽性能の低下が考えられる。ただし、鉛は、中性子吸収断面積が小さいことから ^(ロ) 、質量減損は無視し得る。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。
化学	鉛は、化学的要因による経年変化として、腐食に伴う表面の性状の変化が考えられる。ただし、鉛は、充填空間が密閉環境であり、酸素が連続的に供給されないため、腐食の影響はない。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の考慮をする必要はない。				
補正後		頁番号	(ロ)-F-10		
補正後	(ロ)	(ロ)-第 F.2 表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(5/12)			
		材料	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の評価	
		本体	鉛	熱	鉛は、熱による経年変化として、高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられる。ただし、本輸送物は構造強度部材に鉛を使用していないため、強度低下の影響はない。また、鉛には自重による応力が作用するが、クリープによる変形量は無視し得る。 また、鉛については、高温環境下での組織変化による変形に伴う遮蔽性能の低下が考えられるが、輸送時の本部材の最高温度は 180℃未満であり、融点である 327.5℃ ^(ロ) に対して十分に余裕のある温度範囲で使用するため、熱的劣化を考慮する必要はない。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化を考慮する必要はない。
				放射線照射	鉛は、放射線による経年変化として、中性子吸収に伴う質量減損による遮蔽性能の低下が考えられる。 ただし、鉛の同位体の中性子吸収反応では質量数が 1 増えた鉛の同位体に変化することから質量減損による遮蔽性能の低下は無い。なお、 ²⁰⁸ Pb の中性子吸収反応では短半減期の ²⁰⁸ Pb を経て ²⁰⁷ Pb を生成するが、 ²⁰⁷ Pb の中性子吸収断面積が 0.487×10 ⁻²⁸ cm ² と小さく ^(ロ) 、保守的に燃料近傍(バスケット部)の累積中性子照射量 5.8×10 ¹⁸ n/cm ² を考慮した場合においても、評価期間中の変化率は 2.82×10 ⁻¹² と非常に小さいことから、質量減損による遮蔽性能の低下は無視し得る。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。
化学	鉛は、化学的要因による経年変化として、腐食に伴う表面の性状の変化が考えられる。ただし、鉛は、充填空間が密閉環境であり、酸素が連続的に供給されないため、腐食の影響はない。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の考慮をする必要はない。				

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和 5 年 5 月 30 日付け原設発第 6 号)申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

頁番号		(四)-F-12		
補正前	(四)-F-12	(四)-第 F.2 表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(7/12)		
		材料	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の評価
		本体 銅	熱	銅は、熱による経年変化として、高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられる。 本輸送物では、輸送時の最高温度(160℃未満)は、上記の中で最も厳しい温度条件となるクリープによる変形を考慮する必要のない範囲(170℃以下)である。また、設計用強度・物性値が規定 ¹³⁾ されている温度範囲において構造健全性を確認しているため、熱的劣化を考慮する必要はない。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化の影響を考慮する必要はない。
			放射線照射	銅は、放射線による経年変化として、中性子照射量が 10^{16} n/cm ² オーダーを上回る環境における機械的特性の変化に伴う照射脆化 ¹⁴⁾ が考えられる。 本輸送物では、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、評価期間中の累積中性子照射量は 3.2×10^{15} n/cm ² であり、照射脆化が生じるおそれがある中性子照射量を下回る。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。
化学	銅は、化学的要因による経年変化として、腐食に伴う表面の性状の変化が考えられる。 銅は、電極電位が炭素鋼に比べて高く、イオン化傾向の低い金属である ¹⁵⁾ ことから、銅の腐食は発生しにくく、炭素鋼が選択的に腐食されやすい。また、中性子遮蔽材(レジン)に接しており、中性子遮蔽材の熱的劣化により水分が生じるが、酸化鉄の生成により酸素の拡散障壁が形成されること及び中性子遮蔽材充填空間は密閉環境にあり、酸素が連続的に供給されないため、腐食の影響はない。 伝熱フィン並びに中間筒及び外筒の接合部において、異種金属接触により中間筒及び外筒の腐食が促進される可能性があるが、密閉環境かつ淡水環境では、銅が接続された銅の腐食速度が鋼単独の場合と同程度になる ¹⁶⁾ ことが示されている。また、中性子遮蔽材の熱的劣化により生じる水分量は限定的であることに加え、中性子遮蔽材充填空間は密閉環境にあり、酸素が連続的に供給されないため、異種金属接触による接合部への腐食促進の影響は小さく、腐食の影響はない。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の影響を考慮する必要はない。			
頁番号	(四)-F-12			
補正後	(四)-F-12	(四)-第 F.2 表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(7/12)		
		材料	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の評価
		本体 銅	熱	銅は、熱による経年変化として、高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられる。 上記の中で最も厳しい温度条件となるのはクリープによる変形であり、クリープによる変形が生じる材料温度は、一般に純金属の場合は融点の三分の一付近、実用鋼では種々の因子により強化されていることからそれ以上と言われている ¹⁷⁾ 。本輸送物では、輸送時の最高温度(160℃未満)はクリープによる変形を考慮する必要のない範囲(銅の融点 ¹⁸⁾ の三分の一である170℃以下)である。また、設計用強度・物性値が規定 ¹⁹⁾ されている温度範囲において構造健全性を確認しているため、熱的劣化を考慮する必要はない。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化の影響を考慮する必要はない。
			放射線照射	銅は、放射線による経年変化として、中性子照射量が 10^{16} n/cm ² オーダーを上回る環境における機械的特性の変化に伴う照射脆化 ¹⁹⁾ が考えられる。 本輸送物では、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、評価期間中の累積中性子照射量は 3.2×10^{15} n/cm ² であり、照射脆化が生じるおそれがある中性子照射量を下回る。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。
化学	銅は、化学的要因による経年変化として、腐食に伴う表面の性状の変化が考えられる。 銅は、電極電位が炭素鋼に比べて高く、イオン化傾向の低い金属である ²⁰⁾ ことから、銅の腐食は発生しにくく、炭素鋼が選択的に腐食されやすい。また、中性子遮蔽材(レジン)に接しており、中性子遮蔽材の熱的劣化により水分が生じるが、酸化鉄の生成により酸素の拡散障壁が形成されること及び中性子遮蔽材充填空間は密閉環境にあり、酸素が連続的に供給されないため、腐食の影響はない。 伝熱フィン並びに中間筒及び外筒の接合部において、異種金属接触により中間筒及び外筒の腐食が促進される可能性があるが、密閉環境かつ淡水環境では、銅が接続された銅の腐食速度が鋼単独の場合と同程度になる ²¹⁾ ことが示されている。また、中性子遮蔽材の熱的劣化により生じる水分量は限定的であることに加え、中性子遮蔽材充填空間は密閉環境にあり、酸素が連続的に供給されないため、異種金属接触による接合部への腐食促進の影響は小さく、腐食の影響はない。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の影響を考慮する必要はない。			

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

補正前	頁番号	(D)-F-14		
	(ロ)-第 F.2 表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(9/12)			
(ロ)-F-14	蓋	材料	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の評価
		熱	<p>は、熱による経年変化として、高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられる。</p> <p>本輸送物では、輸送時の最高温度(170℃未満)は、上記の中で最も厳しい温度条件となるクリープによる変形を考慮する必要のない範囲(300℃以下)である。また、設計用強度・物性値が規定²⁾、³⁾されている温度範囲において構造健全性を確認しているため、熱的劣化を考慮する必要はない。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>	
		放射線照射	<p>は、放射線による経年変化として、中性子照射量が 10^{16} n/cm² オーダーを上回る環境における機械的特性の変化に伴う照射脆化⁴⁾が考えられる。</p> <p>本輸送物では、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、評価期間中の累積中性子照射量は 1.0×10^{15} n/cm² であり、照射脆化が生じるおそれがある中性子照射量を下回る。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>	
		化学	<p>は、化学的要因による経年変化として、腐食に伴う表面の性状の変化が考えられる。</p> <p>本輸送物では、メッキにより防錆措置を施していることから、腐食は発生しにくい。また、定期点検及び輸送物発送前検査において外観に異常がないことを確認している。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>	
疲労	<p>が使用される蓋ボルトは、内外圧差とボルト締付けの2つの要因による繰返し荷重を受けるため、経年変化についての考慮が必要となる。</p> <p>このため、使用予定回数を踏まえた上で蓋ボルトの疲労を評価し、疲労破壊が生じるおそれはないことを確認する((ロ)章 A.5.1.4)。</p>			

補正後	頁番号	(D)-F-14		
	(ロ)-第 F.2 表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(9/12)			
(ロ)-F-14	蓋	材料	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の評価
		熱	<p>は、熱による経年変化として、高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられる。</p> <p>上記の中で最も厳しい温度条件となるのはクリープによる変形であり、クリープによる変形が生じる材料温度は、一般に純金属の場合は融点の三分の一付近、実用鋼では種々の因子により強化されていることからそれ以上と言われている²⁾。本輸送物では、輸送時の最高温度(170℃未満)はクリープによる変形を考慮する必要のない範囲(融点²⁾の三分の一である300℃以下)である。また、設計用強度・物性値が規定³⁾されている温度範囲において構造健全性を確認しているため、熱的劣化を考慮する必要はない。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>	
		放射線照射	<p>は、放射線による経年変化として、中性子照射量が 10^{16} n/cm² オーダーを上回る環境における機械的特性の変化に伴う照射脆化⁴⁾が考えられる。</p> <p>本輸送物では、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、評価期間中の累積中性子照射量は 1.0×10^{15} n/cm² であり、照射脆化が生じるおそれがある中性子照射量を下回る。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>	
		化学	<p>は、化学的要因による経年変化として、腐食に伴う表面の性状の変化が考えられる。</p> <p>本輸送物では、メッキにより防錆措置を施していることから、腐食は発生しにくい。また、定期点検及び輸送物発送前検査において外観に異常がないことを確認している。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>	
疲労	<p>が使用される蓋ボルトは、内外圧差とボルト締付けの2つの要因による繰返し荷重を受けるため、経年変化についての考慮が必要となる。</p> <p>このため、使用予定回数を踏まえた上で蓋ボルトの疲労を評価し、疲労破壊が生じるおそれはないことを確認する((ロ)章 A.5.1.4)。</p>			

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

補正前	頁番号	(ロ)-F-15
	(ロ)-第F.2表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(10/12)	
補正後	頁番号	(ロ)-F-15
	(ロ)-第F.2表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(10/12)	

材 料	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価
バスケット ステンレス鋼及び ボロン入りステンレス鋼	熱	<p>ステンレス鋼及びボロン入りステンレス鋼は、熱による経年変化として、高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられる。</p> <p>本輸送物では、輸送時の各部材の最高温度(190℃未満)は、上記の中で最も厳しい温度条件となるクリープによる変形を考慮する必要のない範囲(280℃以下)である。また、設計用強度・物性値が規定²⁾、³⁾されている温度範囲において構造健全性を確認しているため、熱的劣化を考慮する必要はない。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>
	放射線 照射	<p>ステンレス鋼及びボロン入りステンレス鋼は、放射線による経年変化として、中性子照射量が 10^{17} n/cm² オーダーを上回る環境における機械的特性の変化に伴う照射脆化⁴⁾、¹⁵⁾が考えられる。</p> <p>本輸送物では、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、評価期間中の累積中性子照射量は 5.8×10^{14} n/cm² であり、照射脆化が生じるおそれがある中性子照射量を下回る。</p> <p>また、ボロン入りステンレス鋼については、B-10 の減損に伴う中性子吸収性能の低下が考えられるが、B-10 の評価期間中の減損割合は 10^{-5} 未満であり、無視し得るほど小さい。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>
	化学	<p>ステンレス鋼及びボロン入りステンレス鋼は、化学的要因による経年変化として、腐食に伴う表面の性状の変化が考えられる。</p> <p>ステンレス鋼及びボロン入りステンレス鋼は、軽水炉の一次冷却水である純水又はボウ酸水に浸漬された場合においても腐食は発生しにくい⁶⁾。本輸送容器の内水平均温度は 180℃未満であり、軽水炉の運転中の一次冷却水温度に対して十分に低いため、腐食の影響はない。また、ステンレス鋼は表面に不動態皮膜が形成された状態が維持されるため、腐食は発生しにくい。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>

材 料	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価
バスケット ステンレス鋼及び ボロン入りステンレス鋼	熱	<p>ステンレス鋼及びボロン入りステンレス鋼は、熱による経年変化として、高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられる。</p> <p>上記の中で最も厳しい温度条件となるのはクリープによる変形であり、クリープによる変形が生じる材料温度は、一般に純金属の場合は融点の三分の一付近、実用鋼では種々の因子により強化されていることからそれ以上と書かれている⁷⁾。本輸送物では、輸送時の各部材の最高温度(190℃未満)はクリープによる変形を考慮する必要のない範囲(ステンレス鋼及びボロン入りステンレス鋼の融点⁸⁾の三分の一である 280℃以下)である。また、設計用強度・物性値が規定⁹⁾、¹⁰⁾されている温度範囲において構造健全性を確認しているため、熱的劣化を考慮する必要はない。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>
	放射線 照射	<p>ステンレス鋼及びボロン入りステンレス鋼は、放射線による経年変化として、中性子照射量が 10^{17} n/cm² オーダーを上回る環境における機械的特性の変化に伴う照射脆化⁴⁾、¹⁶⁾が考えられる。</p> <p>本輸送物では、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、評価期間中の累積中性子照射量は 5.8×10^{14} n/cm² であり、照射脆化が生じるおそれがある中性子照射量を下回る。</p> <p>また、ボロン入りステンレス鋼については、B-10 の減損に伴う中性子吸収性能の低下が考えられるが、B-10 の評価期間中の減損割合は 10^{-5} 未満であり、無視し得るほど小さい。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>
	化学	<p>ステンレス鋼及びボロン入りステンレス鋼は、化学的要因による経年変化として、腐食に伴う表面の性状の変化が考えられる。</p> <p>ステンレス鋼及びボロン入りステンレス鋼は、軽水炉の一次冷却水である純水又はボウ酸水に浸漬された場合においても腐食は発生しにくい。加圧水型原子炉の一次冷却水の温度や水質等の環境条件下において問題となるようなステンレス鋼の腐食は起こらないことが研究¹¹⁾により示されている。本輸送物では、一般の試験条件下における内水平均温度が 180℃未満であり、運転中の加圧水型原子炉の一次冷却水の温度約 325℃(電気出力 1,100MW 級の例)に比べて十分に低く、加圧水型原子炉より環境条件が厳しくないため、輸送容器内部のステンレス鋼の腐食の影響はない。また、ステンレス鋼は表面に不動態皮膜が形成された状態が維持されるため、腐食は発生しにくい。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和 5 年 5 月 30 日付け原設発第 6 号)申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

補正前	(ロ)-F-16	
	(ロ)-F-16	
(ロ)-第 F.2 表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(11/12)		
材 料	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価
緩衝体 木材	熱	<p>木材は、熱による経年変化として、高温環境下での強度低下が考えられる。 本輸送物では、緩衝材よりも高い緩衝体表面の最高温度は、通常輸送条件よりも保守的な一般の試験条件下(環境温度 38℃、太陽熱放射あり)であっても 125℃である。 木材温度が 200℃に達すると木材の熱分解が進む¹⁷⁾との文献が確認できたものの、直接参照できる文献は乏しい状況にある。一方で、緩衝材として木材が広く使用されていることを踏まえ、本輸送容器を含め現在国内事業者が使用中又は使用予定の輸送容器について、これまでの実輸送時の条件を基に収納物による設計上の最大入熱を考慮した輸送容器の緩衝材の平均温度を評価した結果、約 40~70℃程度(本輸送物は約 50℃程度)であること、使用済燃料輸送実績のある輸送容器を廃棄する際に採取した木材の圧潰強度及び密度測定の結果、木材の衝撃吸収性能は健全であり、性能劣化はなかったことから、これまでの実績と同様の使用環境であれば、木材の熱的劣化は生じないと考えられる¹⁸⁾。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化の影響を考慮する必要はない。なお、輸送に際しては、都度、輸送容器の使用履歴を蓄積し、輸送前に、輸送容器の使用履歴、収納物の発熱量及び輸送時に想定される環境温度を踏まえ、木材温度が、おおむね実績のある温度の範囲内であることを確認した後輸送を行う。</p>
	放射線 照射	<p>木材は、放射線による経年変化として、中性子照射量が 10^{16} n/cm² オーダー、ガンマ線照射量が 10^5 Gy オーダーを上回る環境における機械的特性の変化に伴う照射脆化¹⁹⁾、²⁰⁾が考えられる。 本輸送物では、最も照射量が高くなる箇所においても、評価期間中の累積中性子照射量は 3.8×10^{11} n/cm²、累積ガンマ線照射量は 2.8×10^2 Gy であり、照射脆化が生じるおそれがある照射量を下回る。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>
	化学	<p>木材は、化学的要因による経年変化として、腐朽に伴う材料の強度低下や脆化等の影響が考えられる。 本輸送物では、木材の充填空間はステンレス鋼製のカバープレートに覆われた密閉環境にあり、酸素が連続的に供給されないため、腐朽しない。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>
注) 参考資料：第 12 回輸送容器及び使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器に関する審査会合(令和 4 年 4 月 25 日)資料 1 別紙「緩衝材(木材)の熱的劣化について」		

補正後	(ロ)-F-16	
	(ロ)-F-16	
(ロ)-第 F.2 表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(11/12)		
材 料	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価
緩衝体 木材	熱	<p>木材は、熱による経年変化として、高温環境下での強度低下が考えられる。 本輸送物では、緩衝材の最高温度は、通常輸送条件よりも保守的な一般の試験条件下(環境温度 38℃、太陽熱放射あり)であっても 125℃である。 木材温度が 200℃に達すると木材の熱分解が進む¹⁸⁾との文献が確認できたものの、直接参照できる文献は乏しい状況にある。一方で、緩衝材として木材が広く使用されていることを踏まえ、本輸送容器を含め現在国内事業者が使用中又は使用予定の輸送容器について、これまでの実輸送時の条件を基に収納物による設計上の最大入熱を考慮した輸送容器の緩衝材の平均温度を評価した結果、約 40~70℃程度(本輸送物は約 50℃程度)であること、使用済燃料輸送実績のある輸送容器を廃棄する際に採取した木材の圧潰強度及び密度測定の結果、木材の衝撃吸収性能は健全であり、性能劣化はなかったことから、これまでの実績と同様の使用環境であれば、木材の熱的劣化は生じないと考えられる¹⁹⁾。</p> <p>以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化の影響を考慮する必要はない。なお、輸送に際しては、都度、輸送容器の使用履歴を蓄積し、輸送前に、輸送容器の使用履歴、収納物の発熱量及び輸送時に想定される環境温度を踏まえ、木材温度が、おおむね実績のある温度の範囲内であることを確認した後輸送を行う。</p>
	放射線 照射	<p>木材は、放射線による経年変化として、中性子照射量が 10^{16} n/cm² オーダー、ガンマ線照射量が 10^5 Gy オーダーを上回る環境における機械的特性の変化に伴う照射脆化²⁰⁾、²¹⁾が考えられる。 本輸送物では、最も照射量が高くなる箇所においても、評価期間中の累積中性子照射量は 3.8×10^{11} n/cm²、累積ガンマ線照射量は 2.8×10^2 Gy であり、照射脆化が生じるおそれがある照射量を下回る。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>
	化学	<p>木材は、化学的要因による経年変化として、腐朽に伴う材料の強度低下や脆化等の影響が考えられる。 本輸送物では、木材の充填空間はステンレス鋼製のカバープレートに覆われた密閉環境にあり、酸素が連続的に供給されないため、腐朽しない。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の影響を考慮する必要はない。</p>
注) 参考資料：第 12 回輸送容器及び使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器に関する審査会合(令和 4 年 4 月 25 日)資料 1 別紙「緩衝材(木材)の熱的劣化について」		

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和 5 年 5 月 30 日付け原設発第 6 号)申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

頁番号		(ロ)-F-17		
補正前	(ロ)-F-17	(ロ)-第F.2表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(12/12)		
		材 料	経年変化 要因	
		本体・蓋(0リング) ふっ素ゴム	熱	0リングは、熱による経年変化として、高温環境下では圧縮変位に対する復元力の低下が考えられる。本輸送物では、輸送時の0リングの最高温度は164℃であり、使用可能温度である300℃ ²⁰⁾ を大きく下回る。また、164℃の温度条件で使用したとしても1年以上密封性能が維持されることが示されているため ²¹⁾ 、最長使用期間である1年間使用したとしても0リングの密封性能に影響はない。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化の影響を考慮する必要はない。
			放射線 照射	0リングは、放射線による経年変化として、放射線照射により機械的特性の変化が生じることが考えられる。また、その影響は吸収線量が同じであれば、放射線の種類によらないことが知られている ²²⁾ 。本輸送物では、0リングの最長使用期間である1年間の累積ガンマ線及び中性子の照射量は 2.0×10^4 Gyであり、0リングがシール材として使用可能であることが示されている 6×10^4 Gy ²³⁾ を下回るため、0リングの密封性能に影響はない。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。
化学	0リングは、化学的要因による経年変化として、高温湿潤環境で使用することによる加水分解が考えられる。本輸送物において使用している0リングの材質はふっ素ゴムであり、1年間の高温湿潤環境に対しても密封性が維持されることが確認されており ²⁴⁾ 、0リングの密封性能への影響はない。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の影響を考慮する必要はない。			
頁番号		(ロ)-F-17		
補正後	(ロ)-F-17	(ロ)-第F.2表 輸送物の各材料に対する安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(12/12)		
		材 料	経年変化 要因	
		本体・蓋(0リング) ふっ素ゴム	熱	0リングは、熱による経年変化として、高温環境下では圧縮変位に対する復元力の低下が考えられる。本輸送物では、輸送時の0リングの最高温度は164℃であり、 一般の試験条件下 の使用可能温度である 180℃ ²⁰⁾ を大きく下回る。また、164℃の温度条件で使用したとしても1年以上密封性能が維持されることが示されているため ²¹⁾ 、最長使用期間である1年間使用したとしても0リングの密封性能に影響はない。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、熱による経年変化の影響を考慮する必要はない。
			放射線 照射	0リングは、放射線による経年変化として、放射線照射により機械的特性の変化が生じることが考えられる。また、その影響は吸収線量が同じであれば、放射線の種類によらないことが知られている ²²⁾ 。本輸送物では、0リングの最長使用期間である1年間の累積ガンマ線及び中性子の照射量は 2.0×10^4 Gyであり、0リングがシール材として使用可能であることが示されている 6×10^4 Gy ²³⁾ を下回るため、0リングの密封性能に影響はない。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、放射線による経年変化の影響を考慮する必要はない。
化学	0リングは、化学的要因による経年変化として、高温湿潤環境で使用することによる加水分解が考えられる。本輸送物において使用している0リングの材質はふっ素ゴムであり、1年間の高温湿潤環境に対しても密封性が維持されることが確認されており ²⁴⁾ 、0リングの密封性能への影響はない。 以上のことから、技術上の基準に適合していることを確認する上で、化学的要因による経年変化の影響を考慮する必要はない。			

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前	頁番号	補正後
(ロ)-F-20	<p>3. 遮蔽解析における質量減損</p> <p>評価期間経過後の中性子遮蔽材の質量減損率の評価を行い、経年劣化を考慮した原子個数密度を遮蔽解析に用いている。</p> <p>質量減損率は、劣化パラメータにより次式で表される。</p> $\Delta W = \frac{10}{E_p}$ <p>ここで、 ΔW : レジンの質量減損率 (%) E_p : 劣化パラメータ</p> $E_p = \frac{10}{T \cdot t}$ <p>T : レジン温度 (K) t : レジン加熱時間 (h)</p> <p>前述のように、経年変化を評価する際の温度については、安全側に一般の試験条件下の太陽熱放射ありの条件の最高温度とし、この温度が評価期間である 60 年間継続するものとして、質量減損率を算出する。質量減損の評価で用いたレジンの最高温度を(ロ)-第 F.4 表に示す。</p>	(ロ)-F-20 ~21	<p>3. 遮蔽解析における質量減損</p> <p>評価期間経過後の中性子遮蔽材の質量減損率の評価を行い、経年劣化を考慮した原子個数密度を遮蔽解析に用いている。</p> <p>実際のレジンの充填空間は密閉空間であるため、レジンから放出された水蒸気は系内で飽和してレジンの分解反応は平衡に達するが、保守的にレジンの分解反応が平衡とならずに発生した水蒸気が全てレジンの質量減損に寄与する環境を想定すると、質量減損率は劣化パラメータにより次式で表される。</p> $\Delta W = \frac{10}{E_p}$ <p>ここで、 ΔW : レジンの質量減損率 (%) E_p : 劣化パラメータ</p> $E_p = \frac{10}{T \cdot t}$ <p>T : レジン温度 (K) t : レジン加熱時間 (h)</p> <p>前述のように、経年変化を評価する際の温度については、レジンには温度分布があるが、安全側にレジン全体が一般の試験条件下の太陽熱放射ありの条件の最高温度とし、また、実際には評価期間である 60 年間の連続曝露は起こり得ないが、この温度が評価期間である 60 年間継続するものとして、質量減損率を算出する。質量減損の評価で用いたレジンの最高温度を(ロ)-第 F.4 表に示す。</p>

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書 (令和 5 年 5 月 30 日付け原設発第 6 号) 申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前	頁番号	補正後
(D)-F-22	<p>F.4 付属書類</p> <p>F.4.1 参考文献</p> <p>1) D.E.Alexander, L.E.Rehn, "Analysis of Gamma Ray Displacement Damage in Light Water Reactor Pressure Vessels", ANL/MSD/CP88840, Argonne National Laboratory, (1995).</p> <p>2) (社)日本機械学会, "使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格 (JSME S FAI-2007)", (2007).</p> <p>3) (社)日本機械学会, "発電用原子力設備規格 材料規格(2012年版)(JSME S NUJ-2012)", (2012).</p> <p>4) 土肥謙次, 秀耕一郎, 黛正己, 恩地健雄, 大同記一, "804 ステンレス鋼の SCC 特性に及ぼす中性子照射効果(その2)熱敏感化材の SCC 感受性に及ぼす照射影響", (財)電力中央研究所, (1997).</p> <p>5) 前川立夫, 香川優, "ステンレス鋼の高温ボウ酸水中における腐食", 防触技術, 17 巻, 8 号, p.114-119, (1988).</p> <p>6) K.Farrell, S.I.Mahmood, R.E.Stoller, L.K.Mansur, "An Evaluation of Low Temperature Radiation Embrittlement Mechanisms in Ferritic Alloys", Journal of Nuclear Materials, Vol. 210, (1994).</p> <p>7) (社)腐食防食協会編, "腐食・防食ハンドブック CD-ROM 版 第2版", 丸善出版, (2005).</p> <p>8) 自然科学研究機構 国立天文台編, "理科年表 2019", 丸善出版, (2019).</p> <p>9) S.F.Mughabghab et al., "Neutron Cross Sections Volume 1, Resonance Parameters", BNL925 Third Edition, National Neutron Cross Section Center Brookhaven National Laboratory, (1978).</p> <p>10) (財)原子力発電技術機構, "平成 14 年度 リサイクル燃料資源行蔵技術調査等(金属キャスク貯蔵技術確認試験)報告書", (2003).</p> <p>11) T.Ichihashi, D.Ishiko, A.Ogawa, M.Morishima, "Verification Tests of Neutron Shielding Materials and Shielding Assessment", Proceedings of the 15th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, (2007).</p> <p>12) (財)原子力発電技術機構, "平成 15 年度 リサイクル燃料資源行蔵技術調査等(金属キャ</p>	(D)-F-22	<p>F.4 付属書類</p> <p>F.4.1 参考文献</p> <p>1) D.E.Alexander, L.E.Rehn, "Analysis of Gamma Ray Displacement Damage in Light Water Reactor Pressure Vessels", ANL/MSD/CP88840, Argonne National Laboratory, (1995).</p> <p>2) 田中良平, "腐蝕鋼のクリープ特性の評価について", 圧力技術, 第16巻, 第2号, p.87-95, (1976).</p> <p>3) ステンレス協会編, "ステンレス鋼便覧(第9版)", 日刊工業新聞社, (1995).</p> <p>4) (社)日本機械学会, "使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格 (JSME S FAI-2007)", (2007).</p> <p>5) (社)日本機械学会, "発電用原子力設備規格 材料規格(2012年版)(JSME S NUJ-2012)", (2012).</p> <p>6) 土肥謙次, 秀耕一郎, 黛正己, 恩地健雄, 大同記一, "804 ステンレス鋼の SCC 特性に及ぼす中性子照射効果(その2)熱敏感化材の SCC 感受性に及ぼす照射影響", (財)電力中央研究所, (1997).</p> <p>7) 前川立夫, 香川優, "ステンレス鋼の高温ボウ酸水中における腐食", 防触技術, 17 巻, 8 号, p.114-119, (1988).</p> <p>8) (社)日本金属学会編, "金属便覧(改訂8版)", 丸善株式会社, (2000).</p> <p>9) K.Farrell, S.I.Mahmood, R.E.Stoller, L.K.Mansur, "An Evaluation of Low Temperature Radiation Embrittlement Mechanisms in Ferritic Alloys", Journal of Nuclear Materials, Vol. 210, (1994).</p> <p>10) (社)腐食防食協会編, "腐食・防食ハンドブック CD-ROM 版 第2版", 丸善出版, (2005).</p> <p>11) 自然科学研究機構 国立天文台編, "理科年表 2019", 丸善出版, (2019).</p> <p>12) S.F.Mughabghab et al., "Neutron Cross Sections Volume 1, Resonance Parameters", BNL925 Third Edition, National Neutron Cross Section Center Brookhaven National Laboratory, (1978).</p> <p>13) (財)原子力発電技術機構, "平成 14 年度 リサイクル燃料資源行蔵技術調査等(金属キャスク貯蔵技術確認試験)報告書", (2003).</p> <p>14) T.Ichihashi, D.Ishiko, A.Ogawa, M.Morishima, "Verification Tests of Neutron</p>

(ロ)-F-22

(ロ)-F-22

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を 〇 で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前	頁番号	補正後
(D)-F-23	<p>スチレン技術確認試験 最終報告書”, (2004).</p> <p>13) (財)日本規格協会, “圧力容器の設計(JIS B 8267: 2015)”, (2015).</p> <p>14) S.J.Zinkle, G.L.Kulcinski, “Low-Load Microhardness Changes in 14-MeV Neutron Irradiated Copper Alloys”, ASTM STP 888, (1988).</p> <p>15) 能登谷武記, “密閉系冷却における鋼-銅系のカルバニック腐食”, 伸銅技術研究会誌 33 巻, (1994).</p> <p>16) S.E.Soliman, et al., “Neutron effects on borated stainless steel”, Nuclear Technology, vol.96, p.346-352, (1991).</p> <p>17) 岡野健, 祖父江信夫, “木材科学ハンドブック”, 朝倉書店, (2006).</p> <p>18) T.Aoki, M.Morimoto, T.Yamada, “Some Physical Properties of Wood and Cellulose Irradiated with Gamma Rays”, Wood research, vol.82, p.19-28, (1977).</p> <p>19) O.Teszler, et al., “The Effect of Nuclear Radiation on Fibrous Materials Part III: Relative Order of Stability of Cellulosic Fibers”, Textile Research Journal, vol.28, p.456-462, (1958).</p> <p>20) 牧広, 島村隆治編, “複合材料技術集成”, (1976).</p> <p>21) (財)電力中央研究所, “輸送キヤスタ密封装置の耐熱劣化性能の評価”, (1998).</p> <p>22) M.Ferrari, et al., “Degradation of EPDM and FPM elastomers irradiated at very high dose rates in mixed gamma and neutron fields”, Polymer Engineering and Science, vol.59, p.2522-2532, (2019).</p> <p>23) W.W.Parkinson, O.Sisman, “The use of plastics and elastomers in nuclear radiation”, (1971).</p> <p>24) 日本バルカ工業株式会社, “原燃輸送(株)原設計条件におけるOリング性能評価試験受託業務結果報告書”, 報告書 No.07080014, (2009).</p> <p>25) 原燃輸送株式会社, “使用済燃料等の輸送容器に用いられる中性子しゃへい材(NS-4-FR)の連続加熱評価試験”, NTR-TR-97001, (1997).</p> <p>26) (財)原子力発電技術機構, “平成19年度リサイクル燃料資源庁審判審議試験(金属キヤスタ技術確認試験)報告書”, (2002).</p> <p>27) (財)原子力発電技術機構, “平成15年度リサイクル燃料資源庁審判審議試験(金属キヤスタ技術確認試験)報告書”, (2006).</p> <p>(D)-F-23</p>	(D)-F-23	<p>Shielding Materials and Shielding Assessment”, Proceedings of the 15th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, (2007).</p> <p>15) (財)原子力発電技術機構, “平成15年度リサイクル燃料資源庁審判審議試験(金属キヤスタ技術確認試験)最終報告書”, (2004).</p> <p>16) (社)日本規格協会, “熱加工材料(改訂第4版)”, 丸善株式会社, (1986).</p> <p>17) (財)日本規格協会, “圧力容器の設計(JIS B 8267: 2015)”, (2015).</p> <p>18) S.J.Zinkle, G.L.Kulcinski, “Low-Load Microhardness Changes in 14-MeV Neutron Irradiated Copper Alloys”, ASTM STP 888, (1988).</p> <p>19) 能登谷武記, “密閉系冷却における鋼-銅系のカルバニック腐食”, 伸銅技術研究会誌 33 巻, (1994).</p> <p>20) S.E.Soliman, et al., “Neutron effects on borated stainless steel”, Nuclear Technology, vol.96, p.346-352, (1991).</p> <p>21) 岡野健, 祖父江信夫, “木材科学ハンドブック”, 朝倉書店, (2006).</p> <p>22) T.Aoki, M.Morimoto, T.Yamada, “Some Physical Properties of Wood and Cellulose Irradiated with Gamma Rays”, Wood research, vol.82, p.19-28, (1977).</p> <p>23) O.Teszler, et al., “The Effect of Nuclear Radiation on Fibrous Materials Part III: Relative Order of Stability of Cellulosic Fibers”, Textile Research Journal, vol.28, p.456-462, (1958).</p> <p>24) (財)電力中央研究所, “輸送キヤスタ密封装置の耐熱劣化性能の評価”, (1998).</p> <p>25) M.Ferrari, et al., “Degradation of EPDM and FPM elastomers irradiated at very high dose rates in mixed gamma and neutron fields”, Polymer Engineering and Science, vol.59, p.2522-2532, (2019).</p> <p>26) W.W.Parkinson, O.Sisman, “The use of plastics and elastomers in nuclear radiation”, (1971).</p> <p>27) 日本バルカ工業株式会社, “原燃輸送(株)原設計条件におけるOリング性能評価試験受託業務結果報告書”, 報告書 No.07080014, (2009).</p>

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前 (前頁参照)	頁番号	補正後
—		(D)-F-24	<p>28) 原燃輸送株式会社, “(使用済燃料等の輸送容器に用いられる中性子しゃへい材(NS-4-FR)の連続加熱再評価試験”, NET-TR-97001, (1987).</p> <p>28) (財)原子力発電技術機構, “平成13年度リサイクル燃料資源貯蔵技術確認試験(金属キヤスク貯蔵技術確認試験)報告書”, (2002).</p> <p>28) (財)原子力発電技術機構, “平成15年度リサイクル燃料資源貯蔵技術確認試験(金属キヤスク貯蔵技術確認試験)報告書”, (2003).</p>

(D)-F-24

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前	頁番号	補正後																																			
(D)-G-6	<table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="263 1792 311 1915">規則の項目</th> <th data-bbox="263 1657 311 1780">告示の項目</th> <th data-bbox="263 1523 311 1646">説</th> <th data-bbox="263 1388 311 1512">明</th> <th data-bbox="263 1198 311 1310">申請書記載対応項目</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="311 1792 343 1915">(第4条第2号)</td> <td data-bbox="311 1657 343 1780"></td> <td data-bbox="311 1523 343 1646">本輸送物は、以下に示すように運輸中に予想される温度(-20℃から38℃)及び内圧の変化、振動等により、き裂、破損等の生じるおそれはない。</td> <td data-bbox="311 1388 343 1512">本輸送物は、以下に示すように運輸中に予想される温度(-20℃から38℃)及び内圧の変化、振動等により、き裂、破損等の生じるおそれはない。</td> <td data-bbox="311 1198 343 1310">(イ)-C</td> </tr> <tr> <td data-bbox="343 1792 375 1915"></td> <td data-bbox="343 1657 375 1780"></td> <td data-bbox="343 1523 375 1646">1. 運輸中に予想される輸送物各部の最低温度は一律-20℃とし、最高温度は一般の試験条件の熱的試験と同様に周囲温度38℃及び太陽放射熱を保持的に運輸で負荷した条件下で、取納物の発熱量が最大である54Wとして輸送物各部の温度をABAQUSコードを用いて解析評価している。</td> <td data-bbox="343 1388 375 1512">1. 運輸中に予想される輸送物各部の最低温度は一律-20℃とし、最高温度は一般の試験条件の熱的試験と同様に周囲温度38℃及び太陽放射熱を保持的に運輸で負荷した条件下で、取納物の発熱量が最大である54Wとして輸送物各部の温度をABAQUSコードを用いて解析評価している。</td> <td data-bbox="343 1198 375 1310">(ロ)-A.4.2、 (ロ)-B.1、 (ロ)-B.4.6</td> </tr> <tr> <td data-bbox="375 1792 406 1915"></td> <td data-bbox="375 1657 406 1780"></td> <td data-bbox="375 1523 406 1646">-20℃までの使用に耐え、低温脆性破壊に対して問題ない。</td> <td data-bbox="375 1388 406 1512">-20℃までの使用に耐え、低温脆性破壊に対して問題ない。</td> <td data-bbox="375 1198 406 1310"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="406 1792 438 1915"></td> <td data-bbox="406 1657 438 1780"></td> <td data-bbox="406 1523 438 1646">一方、高温環境において、取納物の最高温度は184℃であり、燃料配管の機械的特性に影響はない。また、本輸送物の主要な遮熱材である鉛の温度は上記の状態でも171℃であり、鉛の融点である327.5℃よりはるかに低く、遮熱能力に影響はない。また、同じく主要な中性子遮熱材であるレジンの温度は158℃であり、使用可能温度170℃より低いため、遮熱性能に影響はない。また、0リング温度は184℃であり、0リングの使用可能温度300℃より低いため、密封性能に影響はない。</td> <td data-bbox="406 1388 438 1512">一方、高温環境において、取納物の最高温度は184℃であり、燃料配管の機械的特性に影響はない。また、本輸送物の主要な遮熱材である鉛の温度は上記の状態でも171℃であり、鉛の融点である327.5℃よりはるかに低く、遮熱能力に影響はない。また、同じく主要な中性子遮熱材であるレジンの温度は158℃であり、使用可能温度170℃より低いため、遮熱性能に影響はない。また、0リング温度は184℃であり、0リングの使用可能温度300℃より低いため、密封性能に影響はない。</td> <td data-bbox="406 1198 438 1310">(ロ)-A.5.1</td> </tr> <tr> <td data-bbox="438 1792 470 1915"></td> <td data-bbox="438 1657 470 1780"></td> <td data-bbox="438 1523 470 1646">2. 運輸中に予想される温度の変化に対して、輸送物は周囲温度-20℃から38℃の温度範囲において、各部品の熱膨張に伴う寸法変化は十分に小さく、部品同士の干渉が生じないため、き裂、破損等の生じるおそれはない。また、下記のABAQUSコードを用いた評価により、発生する熱応力を含めた各部の応力が設計応力強さ等の基準値を下回ることを確認しており、構造健全性は維持され、き裂、破損等の生じるおそれはない。</td> <td data-bbox="438 1388 470 1512">2. 運輸中に予想される温度の変化に対して、輸送物は周囲温度-20℃から38℃の温度範囲において、各部品の熱膨張に伴う寸法変化は十分に小さく、部品同士の干渉が生じないため、き裂、破損等の生じるおそれはない。また、下記のABAQUSコードを用いた評価により、発生する熱応力を含めた各部の応力が設計応力強さ等の基準値を下回ることを確認しており、構造健全性は維持され、き裂、破損等の生じるおそれはない。</td> <td data-bbox="438 1198 470 1310"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="470 1792 502 1915"></td> <td data-bbox="470 1657 502 1780"></td> <td data-bbox="470 1523 502 1646">3. 運輸中に予想される内圧の変化に対して、本輸送物の内圧に運輸中に予想される周囲の温度変化(-20℃から38℃)を考慮した場合の内圧は、1.89MPaGとなる。一方、外圧が0.06MPaに減少した場合の内圧は、1.43MPaGとなる。輸送物の運輸中に予想される最大内圧は内筒内圧が</td> <td data-bbox="470 1388 502 1512">3. 運輸中に予想される内圧の変化に対して、本輸送物の内圧に運輸中に予想される周囲の温度変化(-20℃から38℃)を考慮した場合の内圧は、1.38MPaGとなる。一方、外圧が0.06MPaに減少した場合の内圧は、1.43MPaGとなる。輸送物の運輸中に予想される最大内圧は内筒内圧が</td> <td data-bbox="470 1198 502 1310">(ロ)-A.5.1、 (ロ)-B.4.4</td> </tr> </tbody> </table>	規則の項目	告示の項目	説	明	申請書記載対応項目	(第4条第2号)		本輸送物は、以下に示すように運輸中に予想される温度(-20℃から38℃)及び内圧の変化、振動等により、き裂、破損等の生じるおそれはない。	本輸送物は、以下に示すように運輸中に予想される温度(-20℃から38℃)及び内圧の変化、振動等により、き裂、破損等の生じるおそれはない。	(イ)-C			1. 運輸中に予想される輸送物各部の最低温度は一律-20℃とし、最高温度は一般の試験条件の熱的試験と同様に周囲温度38℃及び太陽放射熱を保持的に運輸で負荷した条件下で、取納物の発熱量が最大である54Wとして輸送物各部の温度をABAQUSコードを用いて解析評価している。	1. 運輸中に予想される輸送物各部の最低温度は一律-20℃とし、最高温度は一般の試験条件の熱的試験と同様に周囲温度38℃及び太陽放射熱を保持的に運輸で負荷した条件下で、取納物の発熱量が最大である54Wとして輸送物各部の温度をABAQUSコードを用いて解析評価している。	(ロ)-A.4.2、 (ロ)-B.1、 (ロ)-B.4.6			-20℃までの使用に耐え、低温脆性破壊に対して問題ない。	-20℃までの使用に耐え、低温脆性破壊に対して問題ない。				一方、高温環境において、取納物の最高温度は184℃であり、燃料配管の機械的特性に影響はない。また、本輸送物の主要な遮熱材である鉛の温度は上記の状態でも171℃であり、鉛の融点である327.5℃よりはるかに低く、遮熱能力に影響はない。また、同じく主要な中性子遮熱材であるレジンの温度は158℃であり、使用可能温度170℃より低いため、遮熱性能に影響はない。また、0リング温度は184℃であり、0リングの使用可能温度300℃より低いため、密封性能に影響はない。	一方、高温環境において、取納物の最高温度は184℃であり、燃料配管の機械的特性に影響はない。また、本輸送物の主要な遮熱材である鉛の温度は上記の状態でも171℃であり、鉛の融点である327.5℃よりはるかに低く、遮熱能力に影響はない。また、同じく主要な中性子遮熱材であるレジンの温度は158℃であり、使用可能温度170℃より低いため、遮熱性能に影響はない。また、0リング温度は184℃であり、0リングの使用可能温度300℃より低いため、密封性能に影響はない。	(ロ)-A.5.1			2. 運輸中に予想される温度の変化に対して、輸送物は周囲温度-20℃から38℃の温度範囲において、各部品の熱膨張に伴う寸法変化は十分に小さく、部品同士の干渉が生じないため、き裂、破損等の生じるおそれはない。また、下記のABAQUSコードを用いた評価により、発生する熱応力を含めた各部の応力が設計応力強さ等の基準値を下回ることを確認しており、構造健全性は維持され、き裂、破損等の生じるおそれはない。	2. 運輸中に予想される温度の変化に対して、輸送物は周囲温度-20℃から38℃の温度範囲において、各部品の熱膨張に伴う寸法変化は十分に小さく、部品同士の干渉が生じないため、き裂、破損等の生じるおそれはない。また、下記のABAQUSコードを用いた評価により、発生する熱応力を含めた各部の応力が設計応力強さ等の基準値を下回ることを確認しており、構造健全性は維持され、き裂、破損等の生じるおそれはない。				3. 運輸中に予想される内圧の変化に対して、本輸送物の内圧に運輸中に予想される周囲の温度変化(-20℃から38℃)を考慮した場合の内圧は、1.89MPaGとなる。一方、外圧が0.06MPaに減少した場合の内圧は、1.43MPaGとなる。輸送物の運輸中に予想される最大内圧は内筒内圧が	3. 運輸中に予想される内圧の変化に対して、本輸送物の内圧に運輸中に予想される周囲の温度変化(-20℃から38℃)を考慮した場合の内圧は、1.38MPaGとなる。一方、外圧が0.06MPaに減少した場合の内圧は、1.43MPaGとなる。輸送物の運輸中に予想される最大内圧は内筒内圧が	(ロ)-A.5.1、 (ロ)-B.4.4	(D)-G-6	(イ)-C
規則の項目	告示の項目	説	明	申請書記載対応項目																																		
(第4条第2号)		本輸送物は、以下に示すように運輸中に予想される温度(-20℃から38℃)及び内圧の変化、振動等により、き裂、破損等の生じるおそれはない。	本輸送物は、以下に示すように運輸中に予想される温度(-20℃から38℃)及び内圧の変化、振動等により、き裂、破損等の生じるおそれはない。	(イ)-C																																		
		1. 運輸中に予想される輸送物各部の最低温度は一律-20℃とし、最高温度は一般の試験条件の熱的試験と同様に周囲温度38℃及び太陽放射熱を保持的に運輸で負荷した条件下で、取納物の発熱量が最大である54Wとして輸送物各部の温度をABAQUSコードを用いて解析評価している。	1. 運輸中に予想される輸送物各部の最低温度は一律-20℃とし、最高温度は一般の試験条件の熱的試験と同様に周囲温度38℃及び太陽放射熱を保持的に運輸で負荷した条件下で、取納物の発熱量が最大である54Wとして輸送物各部の温度をABAQUSコードを用いて解析評価している。	(ロ)-A.4.2、 (ロ)-B.1、 (ロ)-B.4.6																																		
		-20℃までの使用に耐え、低温脆性破壊に対して問題ない。	-20℃までの使用に耐え、低温脆性破壊に対して問題ない。																																			
		一方、高温環境において、取納物の最高温度は184℃であり、燃料配管の機械的特性に影響はない。また、本輸送物の主要な遮熱材である鉛の温度は上記の状態でも171℃であり、鉛の融点である327.5℃よりはるかに低く、遮熱能力に影響はない。また、同じく主要な中性子遮熱材であるレジンの温度は158℃であり、使用可能温度170℃より低いため、遮熱性能に影響はない。また、0リング温度は184℃であり、0リングの使用可能温度300℃より低いため、密封性能に影響はない。	一方、高温環境において、取納物の最高温度は184℃であり、燃料配管の機械的特性に影響はない。また、本輸送物の主要な遮熱材である鉛の温度は上記の状態でも171℃であり、鉛の融点である327.5℃よりはるかに低く、遮熱能力に影響はない。また、同じく主要な中性子遮熱材であるレジンの温度は158℃であり、使用可能温度170℃より低いため、遮熱性能に影響はない。また、0リング温度は184℃であり、0リングの使用可能温度300℃より低いため、密封性能に影響はない。	(ロ)-A.5.1																																		
		2. 運輸中に予想される温度の変化に対して、輸送物は周囲温度-20℃から38℃の温度範囲において、各部品の熱膨張に伴う寸法変化は十分に小さく、部品同士の干渉が生じないため、き裂、破損等の生じるおそれはない。また、下記のABAQUSコードを用いた評価により、発生する熱応力を含めた各部の応力が設計応力強さ等の基準値を下回ることを確認しており、構造健全性は維持され、き裂、破損等の生じるおそれはない。	2. 運輸中に予想される温度の変化に対して、輸送物は周囲温度-20℃から38℃の温度範囲において、各部品の熱膨張に伴う寸法変化は十分に小さく、部品同士の干渉が生じないため、き裂、破損等の生じるおそれはない。また、下記のABAQUSコードを用いた評価により、発生する熱応力を含めた各部の応力が設計応力強さ等の基準値を下回ることを確認しており、構造健全性は維持され、き裂、破損等の生じるおそれはない。																																			
		3. 運輸中に予想される内圧の変化に対して、本輸送物の内圧に運輸中に予想される周囲の温度変化(-20℃から38℃)を考慮した場合の内圧は、1.89MPaGとなる。一方、外圧が0.06MPaに減少した場合の内圧は、1.43MPaGとなる。輸送物の運輸中に予想される最大内圧は内筒内圧が	3. 運輸中に予想される内圧の変化に対して、本輸送物の内圧に運輸中に予想される周囲の温度変化(-20℃から38℃)を考慮した場合の内圧は、1.38MPaGとなる。一方、外圧が0.06MPaに減少した場合の内圧は、1.43MPaGとなる。輸送物の運輸中に予想される最大内圧は内筒内圧が	(ロ)-A.5.1、 (ロ)-B.4.4																																		

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を で示す。

補正内容一覧

頁番号		補正前		補正後															
(D)-G-12	(D)-G-12	<table border="1"> <thead> <tr> <th>規則の項目</th> <th>告示の項目</th> <th>説明</th> <th>申請書記載対応項目</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>第6条第2号</td> <td>(DM型輸送物に係る一般の試験条件) 第14条 別記第4第1号</td> <td> <p>日陰において38℃の大气中に、本輸送物に最大崩壊熱を発生する燃料集合体を収納した場合においてABAQUSコードを用いて求めた。</p> <p>本条件下における解析で得られた人が容易に近づくことができる表面における最高温度は、バッキングリングで78℃である。したがって、本輸送物の表面温度は技術基準に定める気温38℃の日陰において85℃を超えることはない。</p> <p>また、一般の試験条件の下での本輸送物の各部温度評価として、規則第4条第2号1.の熱解析において、周囲温度38℃及び太陽放射熱を保守的に連続で負荷した条件にて定常状態に達した温度を評価し、バスケケットで188℃であり、ステンレス鋼の規格等で定められる使用可能温度の範囲内であることを確認している。</p> <p>続いて、上記で評価した各部の温度分布を引き継いだABAQUSコードによる構造解析において、各部が設計応力強さ等基準値を下回ることを確認しているため、構造健全性が維持され、き裂、破損等の生じるおそれはないこと及び0リング取付位置での相対開口変形量が0リングの初期解付代より小さいことを確認している。</p> </td> <td>(D)-A.5.1. (D)-B.4</td> </tr> </tbody> </table>	規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載対応項目	第6条第2号	(DM型輸送物に係る一般の試験条件) 第14条 別記第4第1号	<p>日陰において38℃の大气中に、本輸送物に最大崩壊熱を発生する燃料集合体を収納した場合においてABAQUSコードを用いて求めた。</p> <p>本条件下における解析で得られた人が容易に近づくことができる表面における最高温度は、バッキングリングで78℃である。したがって、本輸送物の表面温度は技術基準に定める気温38℃の日陰において85℃を超えることはない。</p> <p>また、一般の試験条件の下での本輸送物の各部温度評価として、規則第4条第2号1.の熱解析において、周囲温度38℃及び太陽放射熱を保守的に連続で負荷した条件にて定常状態に達した温度を評価し、バスケケットで188℃であり、ステンレス鋼の規格等で定められる使用可能温度の範囲内であることを確認している。</p> <p>続いて、上記で評価した各部の温度分布を引き継いだABAQUSコードによる構造解析において、各部が設計応力強さ等基準値を下回ることを確認しているため、構造健全性が維持され、き裂、破損等の生じるおそれはないこと及び0リング取付位置での相対開口変形量が0リングの初期解付代より小さいことを確認している。</p>	(D)-A.5.1. (D)-B.4	<table border="1"> <thead> <tr> <th>規則の項目</th> <th>告示の項目</th> <th>説明</th> <th>申請書記載対応項目</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>第6条第2号</td> <td>(DM型輸送物に係る一般の試験条件) 第14条 別記第4第1号</td> <td> <p>日陰において38℃の大气中に、本輸送物に最大崩壊熱を発生する燃料集合体を収納した場合においてABAQUSコードを用いて求めた。</p> <p>一般の試験条件下での人が容易に近づくことができ表面における最高温度は、バッキングリングで78℃である。したがって、本輸送物の表面温度は技術基準に定める気温38℃の日陰において85℃を超えることはない。</p> <p>また、一般の試験条件の下での本輸送物の各部温度評価として、規則第4条第2号1.の熱解析において、周囲温度38℃及び太陽放射熱を保守的に連続で負荷した条件にて定常状態に達した温度を評価し、バスケケットで188℃であり、ステンレス鋼の規格等で定められる使用可能温度の範囲内であることを確認している。</p> <p>続いて、上記で評価した各部の温度分布を引き継いだABAQUSコードによる構造解析において、各部が設計応力強さ等基準値を下回ることを確認しているため、構造健全性が維持され、き裂、破損等の生じるおそれはないこと及び0リング取付位置での相対開口変形量が0リングの初期解付代より小さいことを確認している。</p> </td> <td>(D)-A.5.1. (D)-B.4</td> </tr> </tbody> </table>	規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載対応項目	第6条第2号	(DM型輸送物に係る一般の試験条件) 第14条 別記第4第1号	<p>日陰において38℃の大气中に、本輸送物に最大崩壊熱を発生する燃料集合体を収納した場合においてABAQUSコードを用いて求めた。</p> <p>一般の試験条件下での人が容易に近づくことができ表面における最高温度は、バッキングリングで78℃である。したがって、本輸送物の表面温度は技術基準に定める気温38℃の日陰において85℃を超えることはない。</p> <p>また、一般の試験条件の下での本輸送物の各部温度評価として、規則第4条第2号1.の熱解析において、周囲温度38℃及び太陽放射熱を保守的に連続で負荷した条件にて定常状態に達した温度を評価し、バスケケットで188℃であり、ステンレス鋼の規格等で定められる使用可能温度の範囲内であることを確認している。</p> <p>続いて、上記で評価した各部の温度分布を引き継いだABAQUSコードによる構造解析において、各部が設計応力強さ等基準値を下回ることを確認しているため、構造健全性が維持され、き裂、破損等の生じるおそれはないこと及び0リング取付位置での相対開口変形量が0リングの初期解付代より小さいことを確認している。</p>	(D)-A.5.1. (D)-B.4
規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載対応項目																
第6条第2号	(DM型輸送物に係る一般の試験条件) 第14条 別記第4第1号	<p>日陰において38℃の大气中に、本輸送物に最大崩壊熱を発生する燃料集合体を収納した場合においてABAQUSコードを用いて求めた。</p> <p>本条件下における解析で得られた人が容易に近づくことができる表面における最高温度は、バッキングリングで78℃である。したがって、本輸送物の表面温度は技術基準に定める気温38℃の日陰において85℃を超えることはない。</p> <p>また、一般の試験条件の下での本輸送物の各部温度評価として、規則第4条第2号1.の熱解析において、周囲温度38℃及び太陽放射熱を保守的に連続で負荷した条件にて定常状態に達した温度を評価し、バスケケットで188℃であり、ステンレス鋼の規格等で定められる使用可能温度の範囲内であることを確認している。</p> <p>続いて、上記で評価した各部の温度分布を引き継いだABAQUSコードによる構造解析において、各部が設計応力強さ等基準値を下回ることを確認しているため、構造健全性が維持され、き裂、破損等の生じるおそれはないこと及び0リング取付位置での相対開口変形量が0リングの初期解付代より小さいことを確認している。</p>	(D)-A.5.1. (D)-B.4																
規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載対応項目																
第6条第2号	(DM型輸送物に係る一般の試験条件) 第14条 別記第4第1号	<p>日陰において38℃の大气中に、本輸送物に最大崩壊熱を発生する燃料集合体を収納した場合においてABAQUSコードを用いて求めた。</p> <p>一般の試験条件下での人が容易に近づくことができ表面における最高温度は、バッキングリングで78℃である。したがって、本輸送物の表面温度は技術基準に定める気温38℃の日陰において85℃を超えることはない。</p> <p>また、一般の試験条件の下での本輸送物の各部温度評価として、規則第4条第2号1.の熱解析において、周囲温度38℃及び太陽放射熱を保守的に連続で負荷した条件にて定常状態に達した温度を評価し、バスケケットで188℃であり、ステンレス鋼の規格等で定められる使用可能温度の範囲内であることを確認している。</p> <p>続いて、上記で評価した各部の温度分布を引き継いだABAQUSコードによる構造解析において、各部が設計応力強さ等基準値を下回ることを確認しているため、構造健全性が維持され、き裂、破損等の生じるおそれはないこと及び0リング取付位置での相対開口変形量が0リングの初期解付代より小さいことを確認している。</p>	(D)-A.5.1. (D)-B.4																
(D)-G-12	(D)-G-12	(D)-G-12	(D)-G-12	(D)-G-12	(D)-G-12														

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

頁番号	補正前	頁番号	補正後																
(D)-G-17	<table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="256 1803 316 1921">規則の項目</th> <th data-bbox="256 1662 316 1803">告示の項目</th> <th data-bbox="256 1294 316 1662">説明</th> <th data-bbox="256 1176 316 1294">申請書記載 対応項目</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="316 1803 336 1921">第6条第3号</td> <td data-bbox="316 1662 448 1803">(BW型輸送物に係る特別の試験条件) 第16条 別記第5第1号イ</td> <td data-bbox="448 1294 922 1662"> <p>強度試験：落下試験 I</p> <p>本輸送物は、一般の試験条件と同様の方法で最大損傷を受けるよう、垂直、水平及びコーナー方向に剛体平面である落下試験台上に9m高さから落下するとして CRUSH コードを用いて緩衝体変形量及び衝撃荷重を解析している。また、このときの容器本体各部の応力を ABAQUS コードを用いて解析評価し、バスケケットについては工学式を用いた計算により評価している。</p> <p>容器本体及びバスケケットは、落下試験 I による衝撃力が負荷されても容器本体各部及びバスケケットに生じる応力が設計引張強さ等の基準値を下回ることから、容器本体及びバスケケットの構造健全性を損なうことはない。さらに、0 リング取付位置での相対口開き変形量が0 リングの初期締付代より小さいことから、容器本体の密封性が損なわれることはない。</p> <p>また、本輸送物が傾斜落下するとして、蓋密封部が二次衝撃側となる場合について評価している。落下試験結果を基にした密封性能の評価を行った結果、本輸送物の蓋部の変形量は落下試験で密封健全性維持が確認された落下試験モデルに比べて小さいことから、傾斜落下時に容器本体の構造健全性を損なうことはない。さらに、落下試験後も漏えい率に有意な増加がないことから、容器本体の密封性が損なわれることはない。</p> </td> <td data-bbox="448 1176 592 1294">(D)-A.6.1、 (D)-A.10.3、 (D)-A.10.4、 (D)-A.10.5、 (D)-A.10.6、 (D)-A.10.7</td> </tr> </tbody> </table>	規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目	第6条第3号	(BW型輸送物に係る特別の試験条件) 第16条 別記第5第1号イ	<p>強度試験：落下試験 I</p> <p>本輸送物は、一般の試験条件と同様の方法で最大損傷を受けるよう、垂直、水平及びコーナー方向に剛体平面である落下試験台上に9m高さから落下するとして CRUSH コードを用いて緩衝体変形量及び衝撃荷重を解析している。また、このときの容器本体各部の応力を ABAQUS コードを用いて解析評価し、バスケケットについては工学式を用いた計算により評価している。</p> <p>容器本体及びバスケケットは、落下試験 I による衝撃力が負荷されても容器本体各部及びバスケケットに生じる応力が設計引張強さ等の基準値を下回ることから、容器本体及びバスケケットの構造健全性を損なうことはない。さらに、0 リング取付位置での相対口開き変形量が0 リングの初期締付代より小さいことから、容器本体の密封性が損なわれることはない。</p> <p>また、本輸送物が傾斜落下するとして、蓋密封部が二次衝撃側となる場合について評価している。落下試験結果を基にした密封性能の評価を行った結果、本輸送物の蓋部の変形量は落下試験で密封健全性維持が確認された落下試験モデルに比べて小さいことから、傾斜落下時に容器本体の構造健全性を損なうことはない。さらに、落下試験後も漏えい率に有意な増加がないことから、容器本体の密封性が損なわれることはない。</p>	(D)-A.6.1、 (D)-A.10.3、 (D)-A.10.4、 (D)-A.10.5、 (D)-A.10.6、 (D)-A.10.7	(D)-G-17	<table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="256 878 316 996">規則の項目</th> <th data-bbox="256 736 316 878">告示の項目</th> <th data-bbox="256 369 316 736">説明</th> <th data-bbox="256 250 316 369">申請書記載 対応項目</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="316 878 336 996">第6条第3号</td> <td data-bbox="316 736 448 878">(BW型輸送物に係る特別の試験条件) 第16条 別記第5第1号イ</td> <td data-bbox="448 369 1086 736"> <p>強度試験：落下試験 I</p> <p>本輸送物は、一般の試験条件と同様の方法で最大損傷を受けるよう、垂直、水平及びコーナー方向に剛体平面である落下試験台上に9m高さから落下するとして CRUSH コードを用いて緩衝体変形量及び衝撃荷重を解析している。また、このときの容器本体各部の応力を ABAQUS コードを用いて解析評価し、バスケケットについては工学式を用いた計算により評価している。</p> <p>容器本体及びバスケケットは、落下試験 I による衝撃力が負荷されても容器本体各部及びバスケケットに生じる応力が設計引張強さ等の基準値を下回ることから、容器本体及びバスケケットの構造健全性を損なうことはない。さらに、0 リング取付位置での相対口開き変形量が0 リングの初期締付代より小さいことから、容器本体の密封性が損なわれることはない。</p> <p>また、本輸送物が傾斜落下するとして、蓋密封部が二次衝撃側となる場合について評価している。落下試験結果を基にした密封性能の評価を行った結果、本輸送物の蓋部の変形量は落下試験で密封健全性維持が確認された落下試験モデルに比べて小さいことから、傾斜落下時に容器本体の構造健全性を損なうことはない。さらに、落下試験後も漏えい率に有意な増加がないことから、容器本体の密封性が損なわれることはない。</p> </td> <td data-bbox="448 250 592 369">(D)-A.6.1、 (D)-A.10.3、 (D)-A.10.4、 (D)-A.10.5、 (D)-A.10.6、 (D)-A.10.7</td> </tr> </tbody> </table>	規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目	第6条第3号	(BW型輸送物に係る特別の試験条件) 第16条 別記第5第1号イ	<p>強度試験：落下試験 I</p> <p>本輸送物は、一般の試験条件と同様の方法で最大損傷を受けるよう、垂直、水平及びコーナー方向に剛体平面である落下試験台上に9m高さから落下するとして CRUSH コードを用いて緩衝体変形量及び衝撃荷重を解析している。また、このときの容器本体各部の応力を ABAQUS コードを用いて解析評価し、バスケケットについては工学式を用いた計算により評価している。</p> <p>容器本体及びバスケケットは、落下試験 I による衝撃力が負荷されても容器本体各部及びバスケケットに生じる応力が設計引張強さ等の基準値を下回ることから、容器本体及びバスケケットの構造健全性を損なうことはない。さらに、0 リング取付位置での相対口開き変形量が0 リングの初期締付代より小さいことから、容器本体の密封性が損なわれることはない。</p> <p>また、本輸送物が傾斜落下するとして、蓋密封部が二次衝撃側となる場合について評価している。落下試験結果を基にした密封性能の評価を行った結果、本輸送物の蓋部の変形量は落下試験で密封健全性維持が確認された落下試験モデルに比べて小さいことから、傾斜落下時に容器本体の構造健全性を損なうことはない。さらに、落下試験後も漏えい率に有意な増加がないことから、容器本体の密封性が損なわれることはない。</p>	(D)-A.6.1、 (D)-A.10.3、 (D)-A.10.4、 (D)-A.10.5、 (D)-A.10.6、 (D)-A.10.7
規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目																
第6条第3号	(BW型輸送物に係る特別の試験条件) 第16条 別記第5第1号イ	<p>強度試験：落下試験 I</p> <p>本輸送物は、一般の試験条件と同様の方法で最大損傷を受けるよう、垂直、水平及びコーナー方向に剛体平面である落下試験台上に9m高さから落下するとして CRUSH コードを用いて緩衝体変形量及び衝撃荷重を解析している。また、このときの容器本体各部の応力を ABAQUS コードを用いて解析評価し、バスケケットについては工学式を用いた計算により評価している。</p> <p>容器本体及びバスケケットは、落下試験 I による衝撃力が負荷されても容器本体各部及びバスケケットに生じる応力が設計引張強さ等の基準値を下回ることから、容器本体及びバスケケットの構造健全性を損なうことはない。さらに、0 リング取付位置での相対口開き変形量が0 リングの初期締付代より小さいことから、容器本体の密封性が損なわれることはない。</p> <p>また、本輸送物が傾斜落下するとして、蓋密封部が二次衝撃側となる場合について評価している。落下試験結果を基にした密封性能の評価を行った結果、本輸送物の蓋部の変形量は落下試験で密封健全性維持が確認された落下試験モデルに比べて小さいことから、傾斜落下時に容器本体の構造健全性を損なうことはない。さらに、落下試験後も漏えい率に有意な増加がないことから、容器本体の密封性が損なわれることはない。</p>	(D)-A.6.1、 (D)-A.10.3、 (D)-A.10.4、 (D)-A.10.5、 (D)-A.10.6、 (D)-A.10.7																
規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目																
第6条第3号	(BW型輸送物に係る特別の試験条件) 第16条 別記第5第1号イ	<p>強度試験：落下試験 I</p> <p>本輸送物は、一般の試験条件と同様の方法で最大損傷を受けるよう、垂直、水平及びコーナー方向に剛体平面である落下試験台上に9m高さから落下するとして CRUSH コードを用いて緩衝体変形量及び衝撃荷重を解析している。また、このときの容器本体各部の応力を ABAQUS コードを用いて解析評価し、バスケケットについては工学式を用いた計算により評価している。</p> <p>容器本体及びバスケケットは、落下試験 I による衝撃力が負荷されても容器本体各部及びバスケケットに生じる応力が設計引張強さ等の基準値を下回ることから、容器本体及びバスケケットの構造健全性を損なうことはない。さらに、0 リング取付位置での相対口開き変形量が0 リングの初期締付代より小さいことから、容器本体の密封性が損なわれることはない。</p> <p>また、本輸送物が傾斜落下するとして、蓋密封部が二次衝撃側となる場合について評価している。落下試験結果を基にした密封性能の評価を行った結果、本輸送物の蓋部の変形量は落下試験で密封健全性維持が確認された落下試験モデルに比べて小さいことから、傾斜落下時に容器本体の構造健全性を損なうことはない。さらに、落下試験後も漏えい率に有意な増加がないことから、容器本体の密封性が損なわれることはない。</p>	(D)-A.6.1、 (D)-A.10.3、 (D)-A.10.4、 (D)-A.10.5、 (D)-A.10.6、 (D)-A.10.7																

注記) 核燃料輸送物施設承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を [] で示す。

補正内容一覧

頁番号		補正前		補正後					
規則の項目	告示の項目	説 明	申請書記載 対応項目	規則の項目	告示の項目	説 明	申請書記載 対応項目		
(b)-G-22	(b)-G-22	第6条第5号	(原子力規制委員会の定める量を超える放射能を有する核燃料物質等を収納した核燃料輸送物に係る試験条件) 第18条 第1項	本輸送物の収納物は使用済燃料であり、最大放射能量はA値の10万倍を超える。 強化浸漏試験(200m) 本輸送物は深さ200mの水中に浸漬させた場合の評価として、中間筒、底板、蓋及びびりルブカバプレートを負荷した条件で工学式を用いて評価している。	(イ)-A、 (イ)-B (ロ)-A、7	第6条第5号	(原子力規制委員会の定める量を超える放射能を有する核燃料物質等を収納した核燃料輸送物に係る試験条件) 第18条 第1項	本輸送物の収納物は使用済燃料であり、最大放射能量はA値の10万倍を超える。 強化浸漏試験(200m) 本輸送物は深さ200mの水中に浸漬させた場合の評価として、中間筒、底板、蓋及びびりルブカバプレートに対して、水頭圧(2MPa)を負荷した条件で工学式を用いて評価している。	(イ)-A、 (イ)-B (ロ)-A、7
第7条から 第10条	第7条から 第10条	第7条から 第10条	第7条から 第10条	本輸送物の構造健全性が満たされることではない。 また、外圧は蓋を押し付ける方向に作用し、Oリングの密封性能は維持されるため、本輸送物の密封性が満たされることではない。 該当しない。	第7条から 第10条	第7条から 第10条	本輸送物の構造健全性が満たされることではない。 また、外圧は蓋を押し付ける方向に作用し、Oリングの密封性能は維持されるため、本輸送物の密封性が満たされることではない。 該当しない。	第7条から 第10条	第7条から 第10条

注記) 核燃料輸送物設計承認申請書(令和5年5月30日付け原設発第6号)申請時からの変更箇所を [] で示す。