

本資料のうち、枠囲みの内容は、商業機密
あるいは防護上の観点から公開できません。

核燃料輸送物設計変更承認申請書

原発本第90号
令和5年8月31日

原子力規制委員会 殿

住 所 福岡市中央区渡辺通二丁目1番82号
氏 名 九州電力株式会社
代表取締役 社長執行役員
池 辺 和 弘

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年科学技術庁告示第5号）第41条第1項の規定により、下記のとおり申請します。

記

- 核燃料輸送物の名称
MSF-24P型
- 核燃料輸送物設計承認番号
J/2035/B(M)F-96

3 変更内容

- 原規規発第 20122314 号（令和 2 年 12 月 23 日付）により承認を受けた核燃料輸送物設計承認申請書（以下「既承認申請書」という。）記載事項について別記のとおり変更する。
- 既承認申請書別紙（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）について以下の変更を行う。
 - ・ (イ) 章「核燃料輸送物の説明」において使用予定年数、輸送容器の使用予定回数及び貯蔵予定期間について追記する。
 - ・ 核燃料輸送物の経年変化に関しては、(ホ) 章「安全設計及び安全輸送に関する特記事項」に自主的に記載していたが、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（以下「外運搬規則」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（以下「外運搬告示」という。）の改正を踏まえ、改めて使用予定期間中の経年変化の評価を行った。その結果を(ロ) 章 F「核燃料輸送物の経年変化の考慮」（追加）及び(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」（従前の(ロ) 章 F）に記載する。なお、(ホ) 章に記載していた経年変化に係る説明は削除する。
 - ・ (ハ) 章「輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱い方法」において貯蔵期間中検査の実施頻度を明確化する。
 - ・ (ハ) 章「品質マネジメントの基本方針」を削除し、「輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱い方法」を(ハ) 章に、「安全設計及び安全輸送に関する特記事項」を(ニ) 章に変更する。
- 「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」を追加する。
- その他記載の見直しを行う。

4 変更理由

- 外運搬規則及び外運搬告示が改正されたため。
- 貯蔵期間中検査に係る運用を明確化するため。
- 記載を適正化するため。

[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
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

以 上

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℃ ～ 38℃

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

アルミニウム合金製のバスケットプレートから構成された格子構造状のバスケットにより、個々の燃料集合体を輸送容器の所定の位置に収納するとともに、バスケット内に中性子吸収材を配置することで臨界を防止する構造としている。

8 臨界安全評価における浸水の領域に関する事項

輸送容器は浸水及び漏水を防止する特別な措置として、二次蓋及び三次蓋による多重の防水機能を有しているため、臨界安全評価においては微量の浸水のみを考慮して評価している。

なお、防水機能を有する部位の水密性に留意した品質管理を実施する。

9 収納物の密封性に関する事項

輸送容器の密封境界は胴、三次蓋及びリリーフバルブカバープレートから構成されており、三次蓋と胴の上部フランジとの接合面及びリリーフバルブカバープレートと三次蓋との接合面にはゴムOリングが設けられている。

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

環境温度として摂氏零下20度までを考慮している。

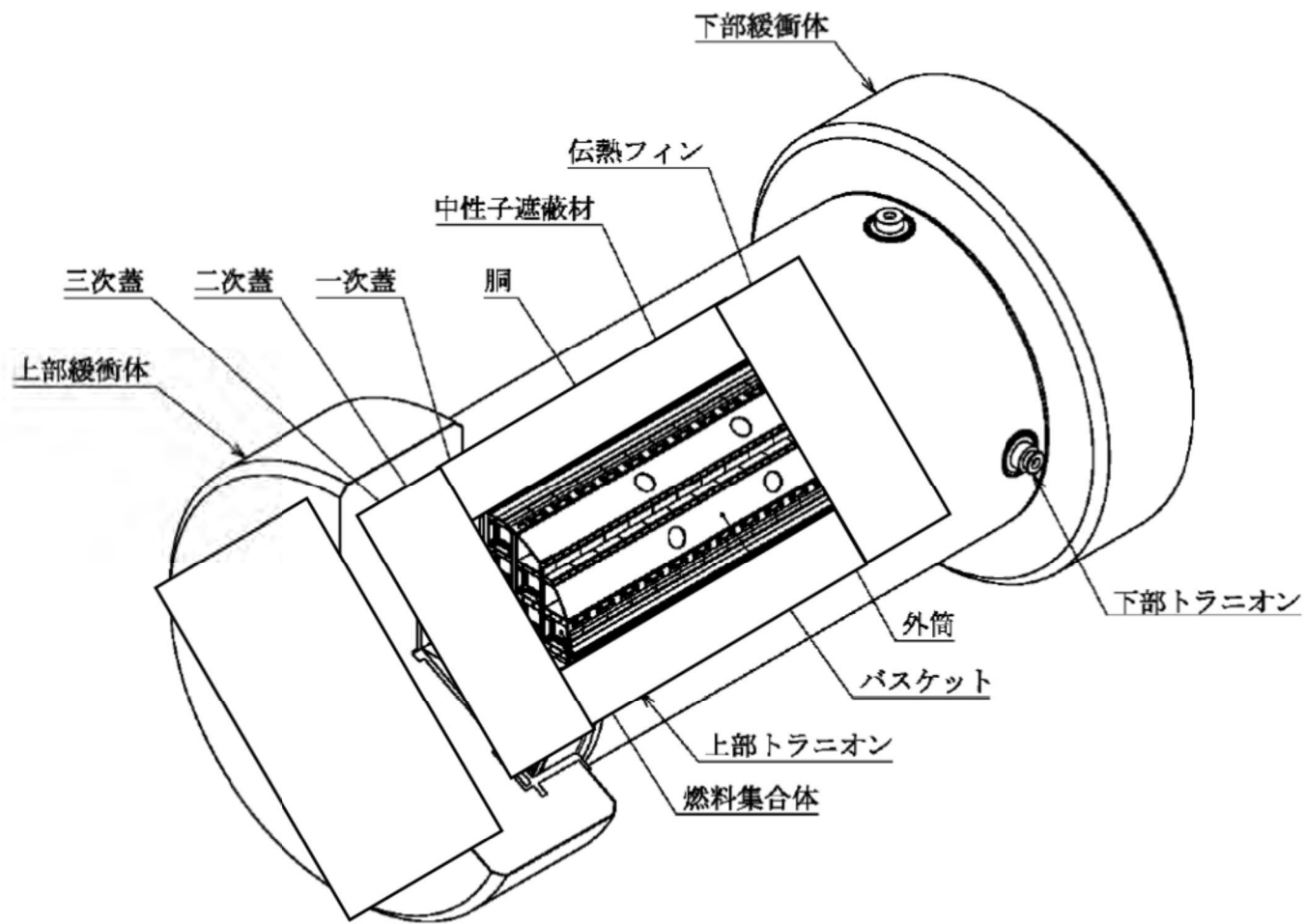
11 輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱いに関する事項

本輸送容器は兼用キャスクであり、貯蔵予定期間における経年変化を考慮した本輸送容器の保守及び本核燃料輸送物の取扱いについては、申請書に係る別紙1のとおり。

また、本核燃料輸送物の運搬は、周囲の温度-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、申請書に係る別紙2のとおり。



添付図-1 輸送物全体図 (鳥瞰図)

添付表-1 収納する核燃料物質等の種類、性状、重量及び放射能の量

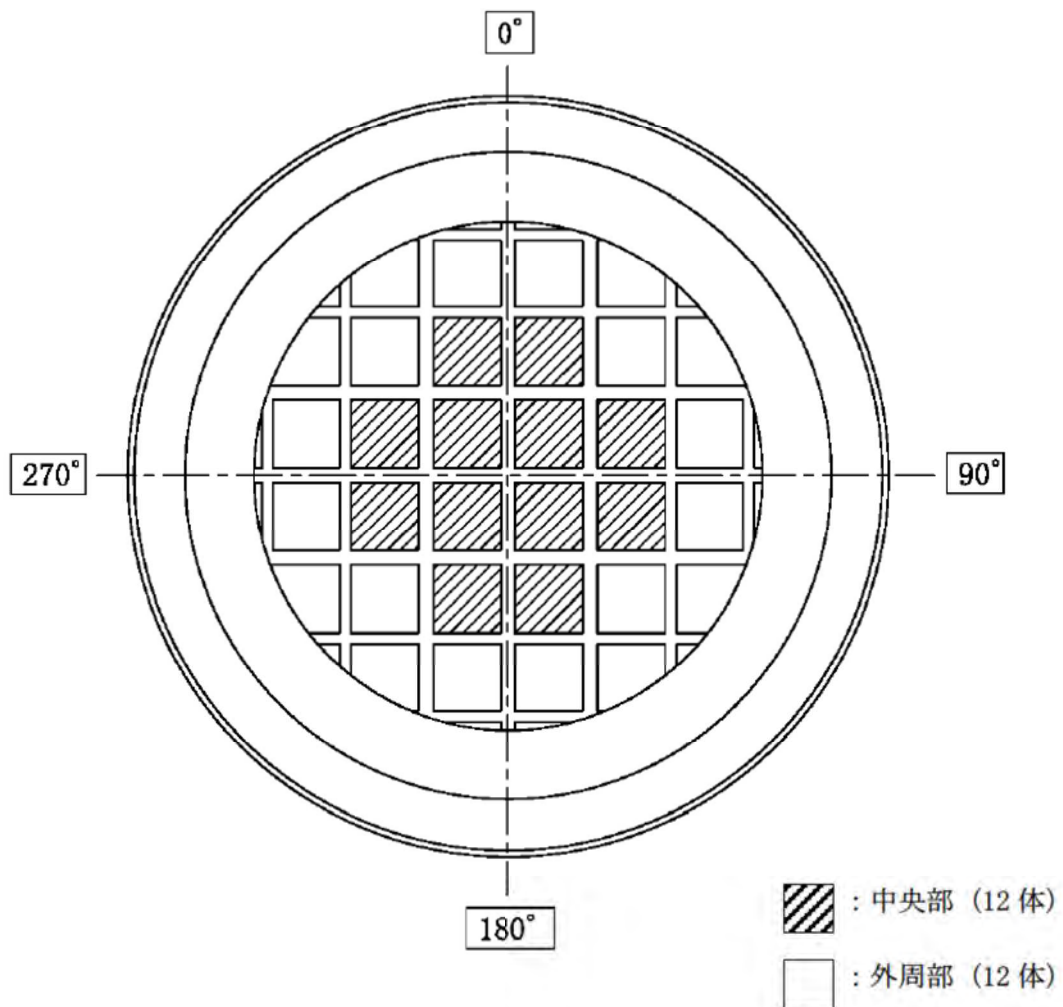
項目		燃料集合体の種類と形式		中央部 ^(注1)				外周部 ^(注1)			
		17×17 燃料									
		48,000MWd/t 型		39,000MWd/t 型		48,000MWd/t 型		39,000MWd/t 型			
		A型	B型	A型	B型	A型	B型	A型	B型		
種類		軽水炉 (PWR) 使用済燃料 ^(注2)									
性状		固体 (二酸化ウラン粉末焼結体)									
燃料集合体1体の仕様	集合体重量 (kg 以下)	680									
	ウラン重量 (kg 以下)	<input type="text"/>									
	放射能の量 (収納物平均) (PBq 以下)	<input type="text"/>									
	初期濃縮度 (wt%以下)	4.2		3.7		4.2		3.7			
	最高燃焼度 (MWd/t 以下)	<input type="text"/>									
	冷却日数 (日以上)										
輸送容器1基当たりの仕様	収納体数 ^(注1) (体以下)	12				12					
		24									
	平均燃焼度 (MWd/t 以下)	<input type="text"/>									
	放射能の量 ^(注3) (PBq 以下)	<input type="text"/>									
	最大崩壊熱量 (kW 以下)	15.8									
	収納物重量 (トン以下)	16.7									

(注1) 燃料集合体は添付図-2 に示すとおり収納位置が制限される。

(注2) 表面から1メートルの距離における空気吸収線量率は1グレイを超える。

(注3) 主要な核種は次のとおりである。

主要な核種	放射能強度 (PBq)
Cs-137	
Ba-137m	
Sr-90	
Y-90	
Eu-154	



添付図-2 燃料集合体の収納位置

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

(記載事項)

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

参考 輸送容器の製作の方法の概要に関する説明

注) 本資料における「輸送物」は「核燃料輸送物」を指すものとする。

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)-4
C. 輸送容器	(イ)-4
D. 輸送容器の収納物	(イ)-27
(ロ)章 核燃料輸送物の安全解析	(ロ)-1
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-23
A.3 材料の機械的性質	(ロ)-A-24
A.4 輸送物の要件	(ロ)-A-40
A.4.1 化学的及び電気的反応	(ロ)-A-40
A.4.2 低温強度	(ロ)-A-42
A.4.3 密封装置	(ロ)-A-44
A.4.4 吊上装置	(ロ)-A-44
A.4.4.1 応力評価	(ロ)-A-44
A.4.4.2 上部トラニオンの疲労評価	(ロ)-A-51
A.4.5 固縛装置	(ロ)-A-53
A.4.6 圧力	(ロ)-A-59
A.4.7 振動	(ロ)-A-59
A.4.8 輸送物の要件に対する評価結果の要約	(ロ)-A-61
A.5 一般の試験条件	(ロ)-A-62
A.5.1 熱的試験	(ロ)-A-62
A.5.1.1 温度及び圧力の要約	(ロ)-A-62
A.5.1.2 熱膨張	(ロ)-A-64

A. 5. 1. 3	応力計算	(p)-A-64
A. 5. 1. 4	許容応力との比較	(p)-A-73
A. 5. 2	水噴霧	(p)-A-73
A. 5. 3	自由落下	(p)-A-74
A. 5. 3. 1	落下時の緩衝体の変形量と衝撃加速度	(p)-A-74
A. 5. 3. 2	落下時の応力計算	(p)-A-83
A. 5. 4	積み重ね試験	(p)-A-116
A. 5. 5	貫通	(p)-A-119
A. 5. 6	角又は縁落下	(p)-A-120
A. 5. 7	結果の要約及びその評価	(p)-A-120
A. 6	特別の試験条件	(p)-A-128
A. 6. 1	強度試験・落下試験Ⅰ（9 m落下時）	(p)-A-128
A. 6. 1. 1	垂直落下	(p)-A-131
A. 6. 1. 2	水平落下	(p)-A-140
A. 6. 1. 3	コーナー落下	(p)-A-147
A. 6. 1. 4	傾斜落下	(p)-A-149
A. 6. 1. 5	結果の要約	(p)-A-150
A. 6. 2	強度試験・落下試験Ⅱ（1 m落下時）	(p)-A-150
A. 6. 2. 1	結果の要約	(p)-A-153
A. 6. 3	熱的試験	(p)-A-154
A. 6. 3. 1	温度及び圧力の要約	(p)-A-154
A. 6. 3. 2	熱膨張	(p)-A-156
A. 6. 3. 3	許容応力との比較	(p)-A-158
A. 6. 4	浸漬	(p)-A-161
A. 6. 5	結果の要約及びその評価	(p)-A-162
A. 7	強化浸漬試験	(p)-A-167
A. 8	放射性収納物	(p)-A-170
A. 9	核分裂性輸送物	(p)-A-171
A. 9. 1	核分裂性輸送物に係る一般の試験条件	(p)-A-171
A. 9. 2	核分裂性輸送物に係る特別の試験条件	(p)-A-173
A. 10	付属書類	(p)-A-178
B.	熱解析	(p)-B-1
B. 1	概要	(p)-B-1
B. 2	材料の熱的性質	(p)-B-3
B. 3	構成要素の仕様	(p)-B-7
B. 4	一般の試験条件	(p)-B-8

B. 4. 1	熱解析モデル	(p) -B-8
B. 4. 1. 1	解析モデル	(p) -B-8
B. 4. 1. 2	試験モデル	(p) -B-19
B. 4. 2	最高温度	(p) -B-19
B. 4. 3	最低温度	(p) -B-24
B. 4. 4	最大内圧	(p) -B-24
B. 4. 5	最大熱応力	(p) -B-28
B. 4. 6	結果の要約及びその評価	(p) -B-29
B. 5	特別の試験条件	(p) -B-32
B. 5. 1	熱解析モデル	(p) -B-32
B. 5. 1. 1	解析モデル	(p) -B-32
B. 5. 1. 2	試験モデル	(p) -B-38
B. 5. 2	輸送物の評価条件	(p) -B-38
B. 5. 3	輸送物温度	(p) -B-39
B. 5. 4	最大内圧	(p) -B-45
B. 5. 5	最大熱応力	(p) -B-49
B. 5. 6	結果の要約及びその評価	(p) -B-50
B. 6	付属書類	(p) -B-53
C.	密封解析	(p) -C-1
C. 1	概要	(p) -C-1
C. 2	密封装置	(p) -C-1
C. 2. 1	密封装置	(p) -C-1
C. 2. 2	密封装置の貫通部	(p) -C-1
C. 2. 3	密封装置のガスケット及び溶接部	(p) -C-1
C. 2. 4	蓋	(p) -C-2
C. 3	一般の試験条件	(p) -C-2
C. 3. 1	放射性物質の漏えい	(p) -C-2
C. 3. 2	密封装置の加圧	(p) -C-6
C. 3. 3	冷却材汚染	(p) -C-6
C. 3. 4	冷却材損失	(p) -C-6
C. 4	特別の試験条件	(p) -C-6
C. 4. 1	核分裂生成ガス	(p) -C-6
C. 4. 2	放射性物質の漏えい	(p) -C-6
C. 5	結果の要約及びその評価	(p) -C-8
C. 6	付属書類	(p) -C-9

D.	遮蔽解析	(p)-D-1
D.1	概要	(p)-D-1
D.2	線源仕様	(p)-D-1
D.2.1	ガンマ線源	(p)-D-4
D.2.2	中性子源	(p)-D-8
D.3	モデル仕様	(p)-D-14
D.3.1	解析モデル	(p)-D-14
D.3.2	解析モデル各領域における原子個数密度	(p)-D-22
D.4	遮蔽評価	(p)-D-28
D.5	結果の要約及びその評価	(p)-D-34
D.6	付属書類	(p)-D-36
E.	臨界解析	(p)-E-1
E.1	概要	(p)-E-1
E.2	解析対象	(p)-E-1
E.2.1	収納物	(p)-E-1
E.2.2	輸送容器	(p)-E-3
E.2.3	中性子吸収材	(p)-E-3
E.3	モデル仕様	(p)-E-4
E.3.1	解析モデル	(p)-E-4
E.3.2	解析モデル各領域における原子個数密度	(p)-E-12
E.4	未臨界評価	(p)-E-13
E.4.1	計算条件	(p)-E-13
E.4.2	核燃料輸送物への水の浸入等	(p)-E-13
E.4.3	計算方法	(p)-E-14
E.4.4	計算結果	(p)-E-14
E.5	ベンチマーク試験	(p)-E-16
E.6	結果の要約及びその評価	(p)-E-24
E.7	付属書類	(p)-E-25
F.	核燃料輸送物の経年変化の考慮	(p)-F-1
F.1	考慮すべき経年変化要因	(p)-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	(p)-F-1
F.3	安全解析における経年変化の考慮内容	(p)-F-15
F.4	付属資料	(p)-F-22
G.	外運搬規則及び外運搬告示に対する適合性の評価	(p)-G-1

(ハ)章	輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱い方法	(ハ)-1
A.	核燃料輸送物の取扱い方法	(ハ)-1
A.1	装荷方法	(ハ)-1
A.2	貯蔵方法	(ハ)-3
A.3	取出し方法	(ハ)-3
A.4	空容器の準備	(ハ)-5
A.5	核燃料輸送物の発送前検査	(ハ)-7
A.6	使用済燃料の長期健全性に関する状況調査	(ハ)-17
B.	保守条件	(ハ)-19
B.1	外観検査	(ハ)-19
B.2	耐圧検査	(ハ)-19
B.3	気密漏えい検査	(ハ)-19
B.4	遮蔽検査	(ハ)-19
B.5	未臨界検査	(ハ)-19
B.6	熱検査	(ハ)-19
B.7	吊上検査	(ハ)-19
B.8	作動確認検査	(ハ)-20
B.9	補助系の保守	(ハ)-20
B.10	密封装置の弁、ガスケット等の保守（定期保守）	(ハ)-20
B.11	輸送容器の保管	(ハ)-20
B.12	記録の保管	(ハ)-20
B.13	その他	(ハ)-20
(ニ)章	安全設計及び安全輸送に関する特記事項	(ニ)-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

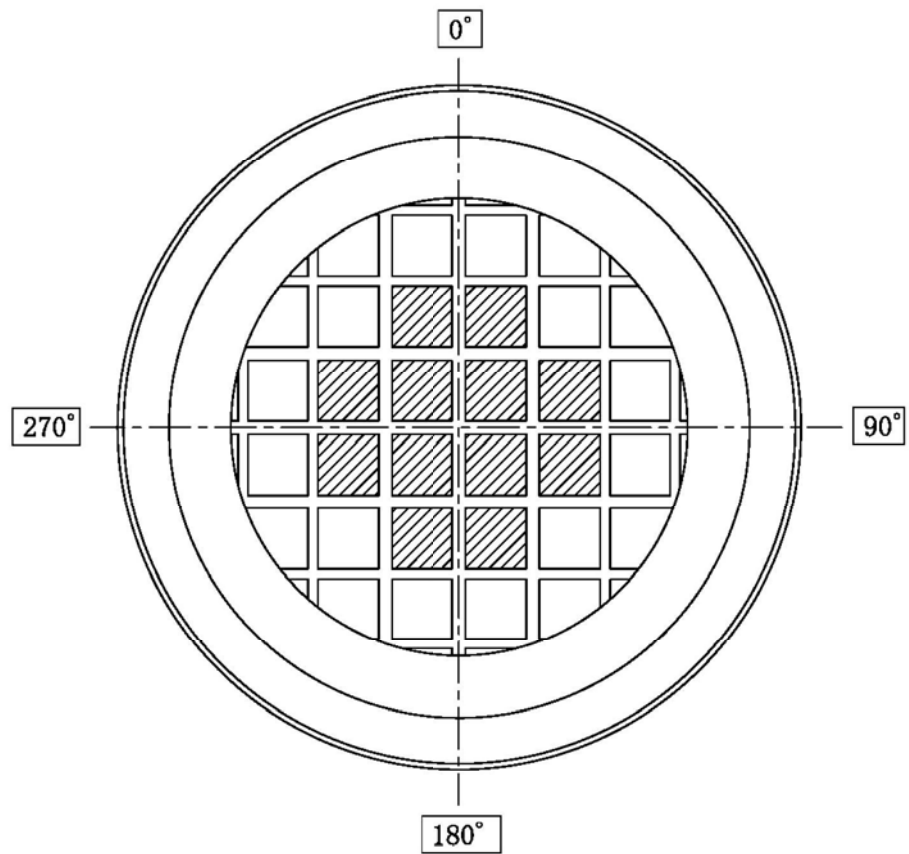
A. 目的及び条件



- | | |
|-----------------------|---|
| 1. 使用目的 | 軽水炉型原子力発電所（PWR）の使用済燃料を、原子力発電所から再処理工場に輸送するため。 |
| 2. 輸送容器の型名 | MSF-24P 型 |
| 3. 輸送物の種類 | BM 型核分裂性輸送物 |
| 4. 輸送制限個数 | 任意 |
| 5. 輸送指数 | 10 以下 |
| 6. 臨界安全指数 | 0 |
| 7. 輸送物の総重量 | 134.4 トン以下（輸送架台は含まず） |
| 8. 輸送容器の外形寸法 | 外径約 3.6 m、長さ約 6.8 m（上・下部緩衝体を含む） |
| 9. 輸送容器の重量 | 117.7 トン以下（輸送架台は含まず） |
| 10. 輸送容器の材質 | 胴—炭素鋼
外筒—炭素鋼
一次蓋—炭素鋼
二次蓋—炭素鋼
三次蓋—ステンレス鋼
中性子遮蔽材—レジン
伝熱フィン—銅
バスケット—ほう素添加アルミニウム合金
及びアルミニウム合金
緩衝体—ステンレス鋼及び木材 |
| 11. 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 <u>(イ)-第 A.1 表</u> に示す。 |
| 12. 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 |
| 13. 冷却方法 | 自然空気冷却 |
| 14. 使用予定年数 | 60 年（設計評価期間） |
| 15. 輸送容器の使用予定回数 | 10 回 |
| 16. 貯蔵予定期間 | 60 年（設計貯蔵期間） |

(イ)-第 A.1 表 輸送容器 1 基に収納する核燃料物質の仕様

燃料集合体の種類と型式 項 目		中央部 ^(注)				外周部 ^(注)			
		17×17 燃料							
		48,000MWd/t 型		39,000MWd/t 型		48,000MWd/t 型		39,000MWd/t 型	
		A 型	B 型	A 型	B 型	A 型	B 型	A 型	B 型
種 類		軽水炉 (PWR) 使用済燃料							
性 状		固体 (二酸化ウラン粉末焼結体)							
燃料集合体 1 体の仕様	ウラン重量 (kg 以下)	□							
	放射能の量 (収納物平均) (PBq 以下)	□							
	初期濃縮度 (wt% 以下)	4.2		3.7		4.2		3.7	
	最高燃焼度 (MWd/t 以下)	□							
	冷却日数 (日以上)	□							
輸送容器 1 基当たりの仕様	収納体数 ^(注) (体以下)	12				12			
		24							
	平均燃焼度 (MWd/t 以下)	□							
	放射能の量 (PBq 以下)	□							
	発熱量 (kW 以下)	15.8							

(注) 燃料集合体は(イ)-第 A.1 図に示すとおり収納位置が制限される。



 : 中央部 (12 体)
 : 外周部 (12 体)

(イ)-第 A.1 図 燃料集合体の収納位置

B. 核燃料輸送物の種類

BM 型核分裂性輸送物

B. 輸送容器

1. 設計の概要

輸送物の全体図を(イ)-第 C.1 図に、断面図を(イ)-第 C.2 図に示す。

輸送容器外形は円筒形状である。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よこ置き状態に保持され、固縛装置で固定される。落下衝撃を緩和するため、容器の上部及び下部に緩衝体に取り付けられている。

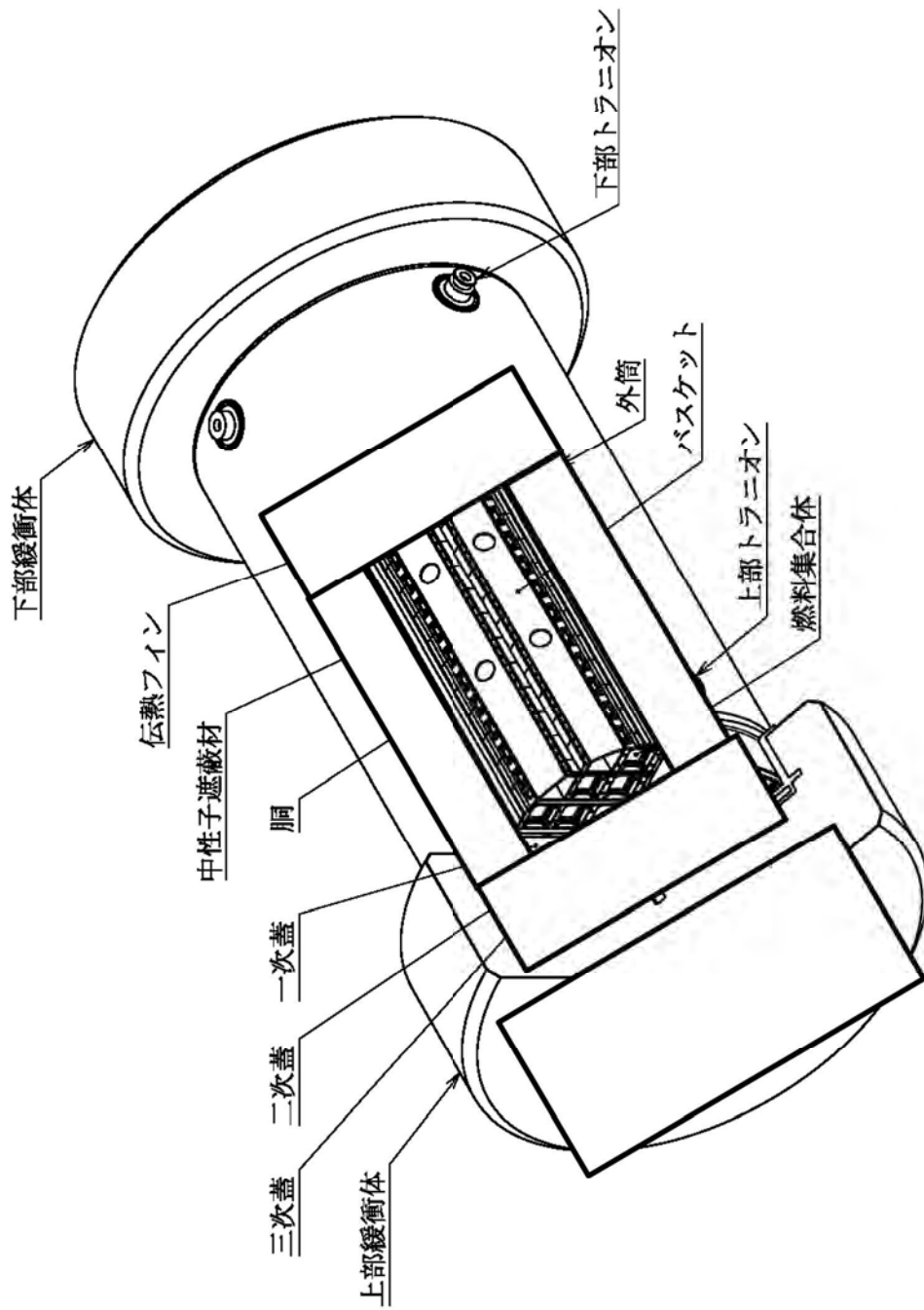
輸送容器は原子力発電所での取り扱い時にはよこ置き又はたて置き状態に保持される。燃料集合体の出し入れは、原子力発電所内の所定場所においてたて置き状態に保持された容器の上部から行われる。輸送容器の取り扱いは容器に設けられたトランニオンを使用して行われる。

輸送容器は、一次蓋、二次蓋及び三次蓋を有し、三重の密封構造となっている。輸送容器における密封装置は胴、三次蓋及びリリーフバルブカバープレートで構成され、密封境界は(イ)-第 C.4 図に示すとおりである。

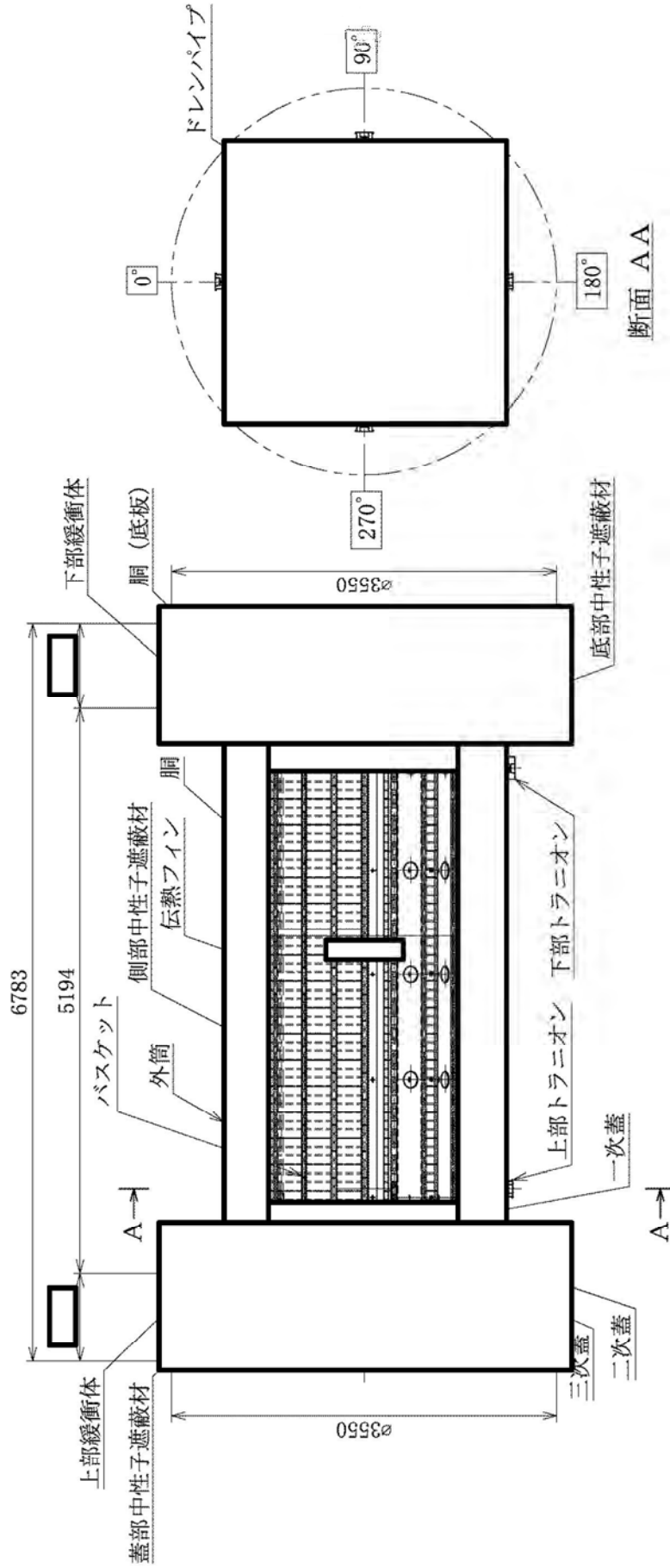
輸送容器の主な遮蔽材は、炭素鋼及びレジンである。炭素鋼は主にガンマ線遮蔽材、レジン中性子遮蔽材として用いられている。胴と外筒の間に中性子遮蔽材であるレジンが充填されている。また、レジンがキャスク本体下部及び一次蓋部にも充填されている。

一次蓋と胴に囲まれる空間（以下「胴内」という。）には、燃料集合体より発生する崩壊熱の除去を容易にするため、ヘリウムが約 0.05 MPa 充填される。また、燃料集合体を輸送中に保持するために胴内にバスケットが収納されている。

バスケットは、断面形状が中空状のアルミニウム合金製のバスケットプレートから構成された格子構造であり、個々の使用済燃料集合体がキャスク本体内部に配置されたバスケットの所定の格子内に収納される。また、使用済燃料の未臨界性を維持するために、中性子吸収材を併せて配置している。



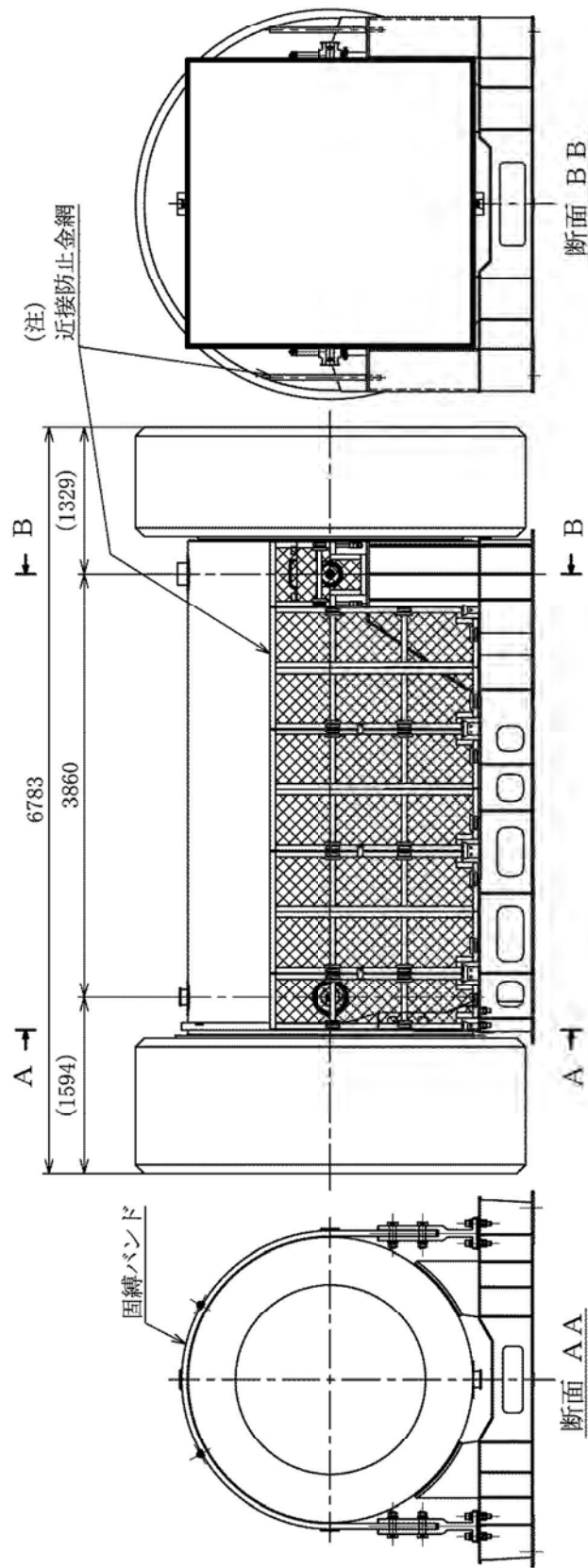
(イ)-第B.1図 輸送物全体図 (鳥瞰図)



(単位：mm)

(注)各部品を一断面に集約したものであり、実際の断面形状とは異なる。

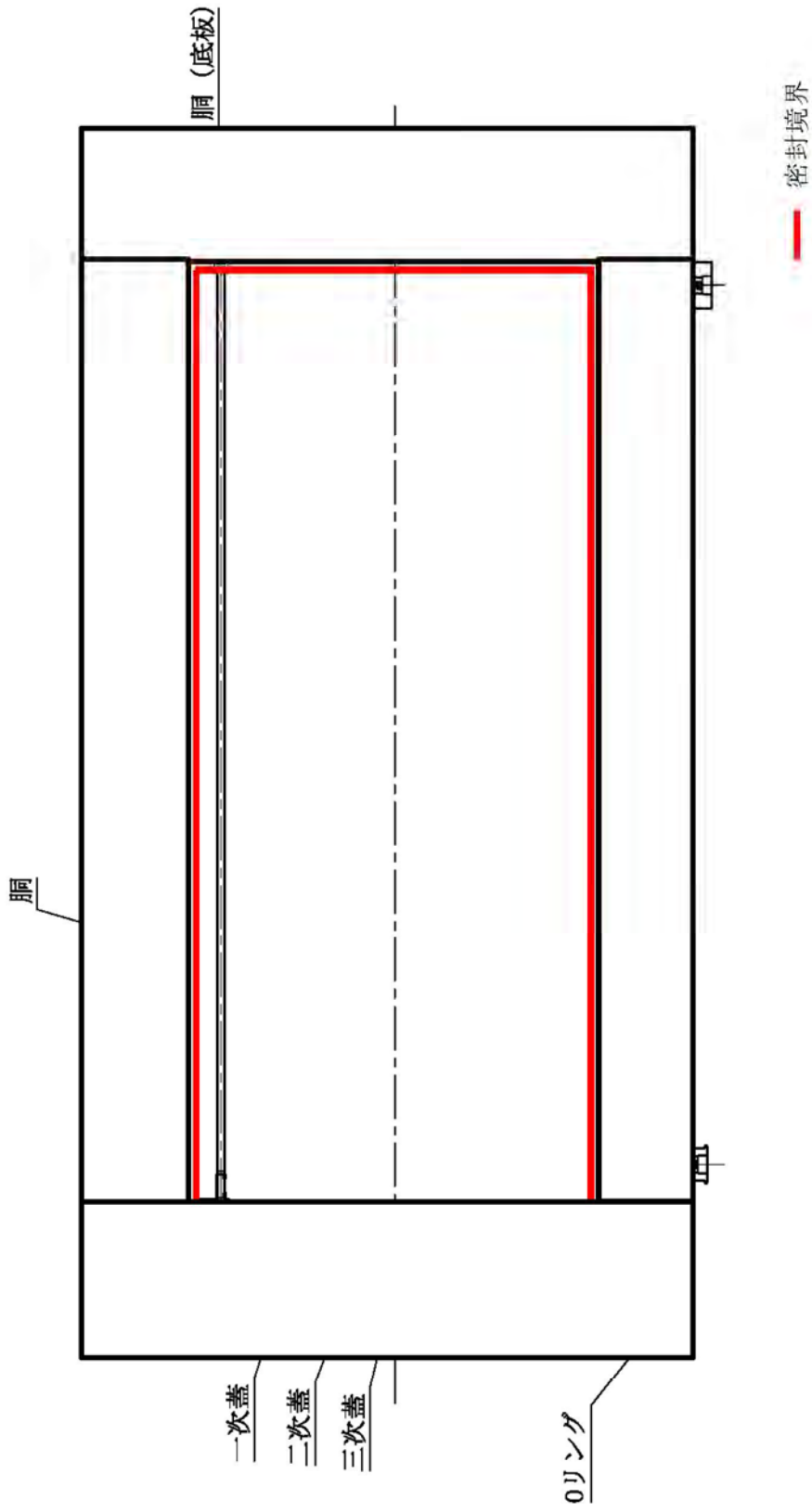
(イ)-第 B. 2 図 輸送容器断面図



(単位：mm)

(注) 取り付けない場合がある。

(1)-第B.3図 輸送荷姿



(注)各部品を一断面に集約したものであり、実際の断面形状とは異なる。

(イ)-第B.4図 密封境界

2. 構造

輸送容器は(イ)-第 C. 1 図及び(イ)-第 C. 2 図に示すようにキャスク本体、一次蓋、二次蓋、三次蓋、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、輸送架台には近接防止金網を取り付ける場合がある。

(1) キャスク本体

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。

キャスク本体の主要部は胴、中性子遮蔽材及び外筒等で構成されている。

輸送容器の密封境界を形成する胴は炭素鋼製の単層構造であり、胴の炭素鋼は主要なガンマ線遮蔽材である。胴内面には []、胴の表面のうち、一次蓋、二次蓋及び三次蓋との接触面には []、胴外面のうち、外気接触面には塗装が施されている。

外筒は、上部が胴に溶接され、下部は下部端板に溶接されている。外筒は炭素鋼製であり、外表面には塗装が施されている。

下部端板はステンレス鋼製であり、胴の下部に溶接され、外筒及び胴とともに中性子遮蔽材（レジン）を保持している。胴と外筒の間には除熱を促進するための伝熱フィンを設けている。

胴（底板）と底部中性子遮蔽材カバーで形成されている空間には中性子遮蔽材（レジン）が充填されている。

また、胴内には、一次蓋に設けられた貫通孔を介して胴内の加圧並びに水抜きが可能のようにドレンパイプが設けられている。ドレンパイプの上端部は、ゴムパッキンを介して一次蓋に設けられた貫通孔へ接続されている。

キャスク本体上部には、垂直吊りに使用する上部トラニオンが二対設けられている。上部トラニオンの構造は(イ)-第 C. 7 図に示すとおりである。

キャスク本体下部には、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、水平吊り及び輸送架台への積載に使用する吊上、固縛兼用のトラニオン並びにたて置き時の固縛に使用可能な固縛専用のトラニオンがあり、これらのトラニオンが各一対ずつ設けられている。下部トラニオンの構造は(イ)-第 C. 7 図に示すとおりである。

輸送容器又は輸送物は原子力発電所において、垂直吊り又は水平吊りで取り扱われる。輸送船及びトレーラへの積み降ろしでは輸送架台の付いた状態で水平吊りされる。輸送時には輸送架台に固縛され、輸送架台は船倉やトレーラ荷台に固定される。

輸送容器を単体で垂直吊りする場合には、一対の上部トラニオンの外径 $\phi 140$ mm の部分が使用される。

輸送容器又は輸送物を単体で水平吊りする場合には、上・下部トラニオンの 90° 、

270 ° 方向の二対の外径φ140 mmの部分が使用される。

輸送架台に固縛した輸送容器又は輸送物を水平吊りする場合には、単体の水平吊りと同様に上・下部トラニオンの90 °、270 ° 方向の二対の外径φ140 mmの部分が使用される。

輸送架台への固縛は、輸送容器のキャスク本体上部、並びに下部トラニオンの90 °、270 ° 方向の一对の外径φ200 mmの部分が使用される。

(2) 一次蓋

一次蓋の構造を(イ)-第 C.8 図に示す。一次蓋は炭素鋼製であり、本の一次蓋ボルトでキャスク本体上面に取り付けられる。一次蓋の炭素鋼は、主要なガンマ線遮蔽材である。

また、一次蓋には、頭部側の中性子遮蔽のために、中性子遮蔽材（レジン）が充填されており、炭素鋼製の蓋部中性子遮蔽材カバーで覆われている。

一次蓋のシール部には金属ガスケットが取り付けられている。

胴との接触面及びシール部には、また、その他の表面及び蓋部中性子遮蔽材カバーの外表面にはが施されている。

一次蓋には内水の排水、真空乾燥及びヘリウム充填のために貫通孔が2ヶ所設けられており、それぞれの貫通孔にはベントバルブ及びドレンバルブが設置されている。ベントバルブ及びドレンバルブの構造を(イ)-第 C.9 図に示す。これらの貫通孔上にはステンレス鋼製のカバープレートが取り付けられる。カバープレートのシール部には金属ガスケットが取り付けられている。

なお、一次蓋は外側を二次蓋に覆われており、不用意に一次蓋ボルトが外されないようになっている。

(3) 二次蓋

二次蓋の構造を(イ)-第 C.10 図に示す。二次蓋は炭素鋼製であり、本の二次蓋ボルトでキャスク本体上面に取り付けられる。二次蓋の炭素鋼は、主要なガンマ線遮蔽材である。

二次蓋のシール部には金属ガスケットが取り付けられている。

胴との接触面及びシール部には、その他の表面にはが施されている。

二次蓋には、一次蓋と二次蓋で形成される空間にヘリウムを充填するための貫通孔と、この空間の圧力を検出するための貫通孔が設けられており、それぞれの貫通孔にはモニタリングポートバルブが設置されている。モニタリングポートバルブの構造を(イ)-第 C.11 図に示す。輸送中はその外側にモニタリングポートカバープレートが取

り付けられる。モニタリングポートカバープレートのシール部には O リングが設けられている。

なお、二次蓋は外側を三次蓋に覆われており、不用意に二次蓋ボルトが外されないようになっている。

(4) 三次蓋

三次蓋の構造を(イ)-第 C. 12 図に示す。三次蓋はステンレス鋼製であり、本の三次蓋ボルトでキャスク本体上面に取り付けられる。三次蓋のステンレス鋼は、主要なガンマ線遮蔽材である。

三次蓋には、二次蓋と三次蓋で形成される空間の圧力を開放するための貫通孔が設けられており、貫通孔にはリリーフバルブが設置されている。リリーフバルブの構造を(イ)-第 C. 13 図に示す。輸送中はその外側にリリーフバルブカバープレートが取り付けられる。

三次蓋及びリリーフバルブカバープレートのシール部には二重の 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 リングにより輸送中の密封境界を形成する。

なお、三次蓋は外側を緩衝体に覆われており、不用意に三次蓋ボルトが外されないようになっている。

(5) バスケット

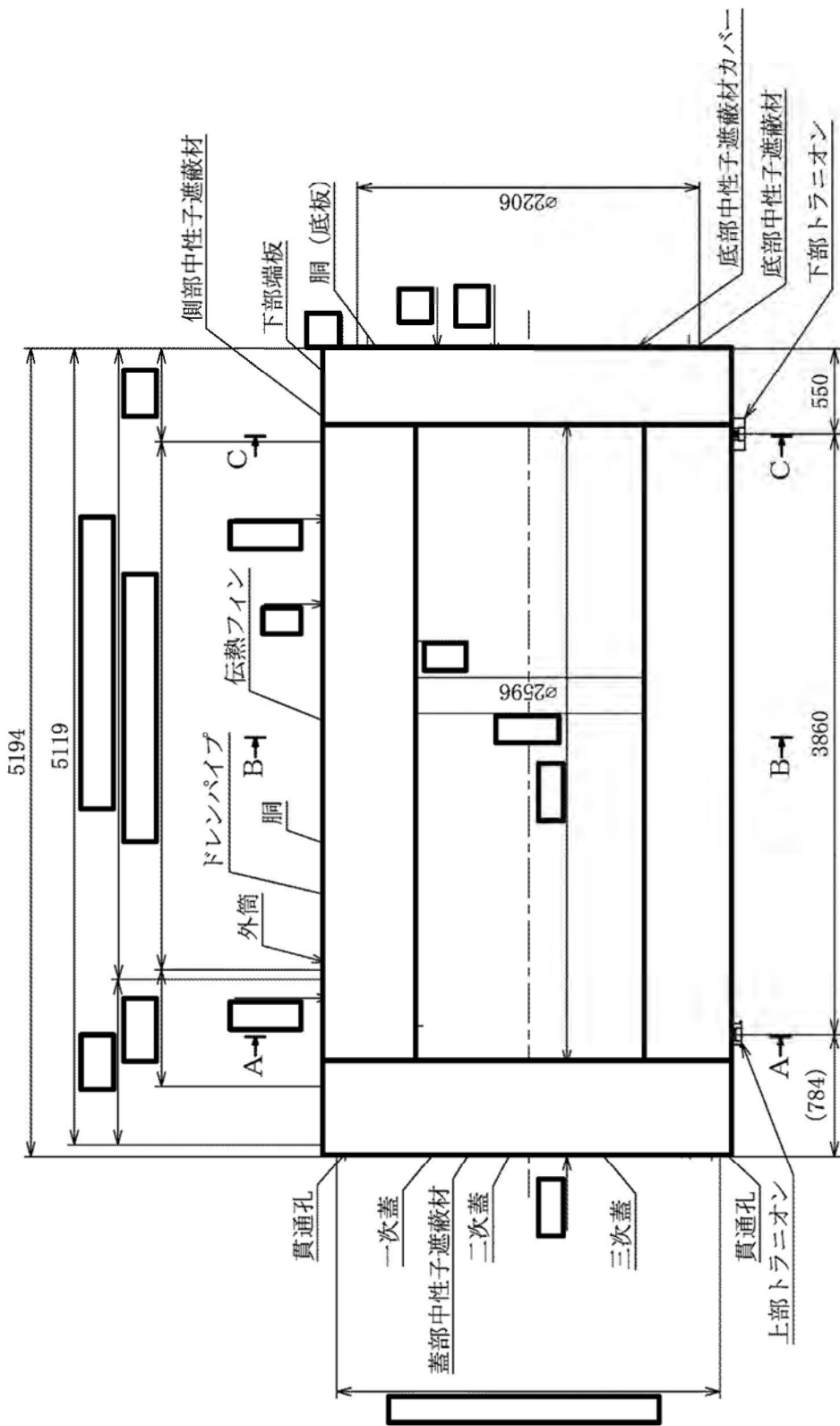
バスケットは、個々の燃料集合体がキャスク本体内部の所定の格子内に収納できるよう設けられる。バスケットの構造を(イ)-第 C. 14 図に示す。バスケットは、断面形状が中空状のアルミニウム合金製のバスケットプレートで構成されたバスケットと、アルミニウム合金製のバスケットサポートにより構成される。また、燃料集合体の未臨界性を維持するために、中性子吸収材を併せて配置している。

(6) 緩衝体

上部緩衝体はキャスク本体上部に、下部緩衝体はキャスク本体下部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. 15 図に、下部緩衝体を(イ)-第 C. 16 図に示す。

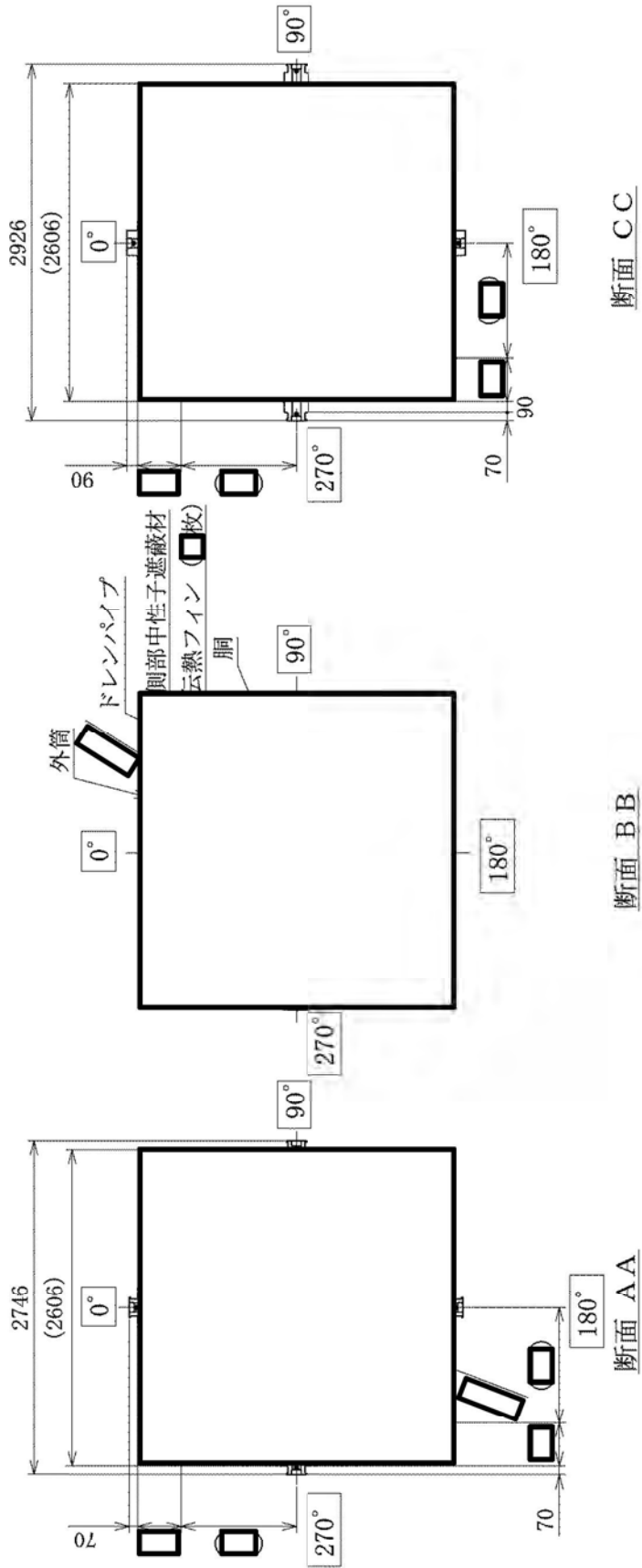
上部及び下部緩衝体は、ステンレス鋼のカバープレートとリブから構成される溶接構造物の内部に、緩衝材である木材 () を充填したものである。



(単位：mm)

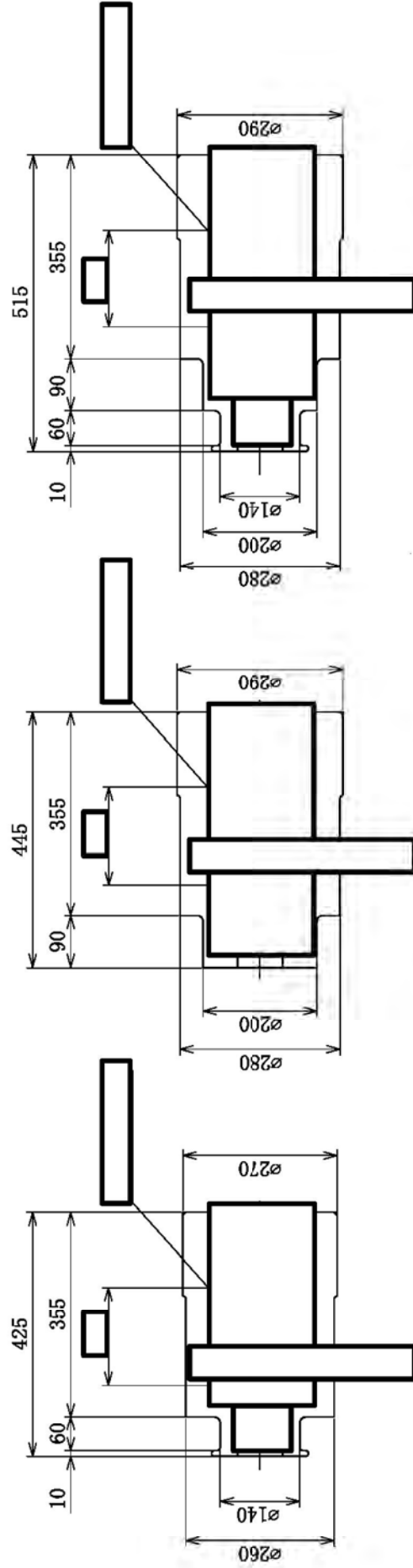
(注)各部品を一断面に集約したものであり、実際の断面形状とは異なる。

(イ)-第B.5図 本体縦断面図



(単位：mm)

(イ)-第 B. 6 図 本体横断面図



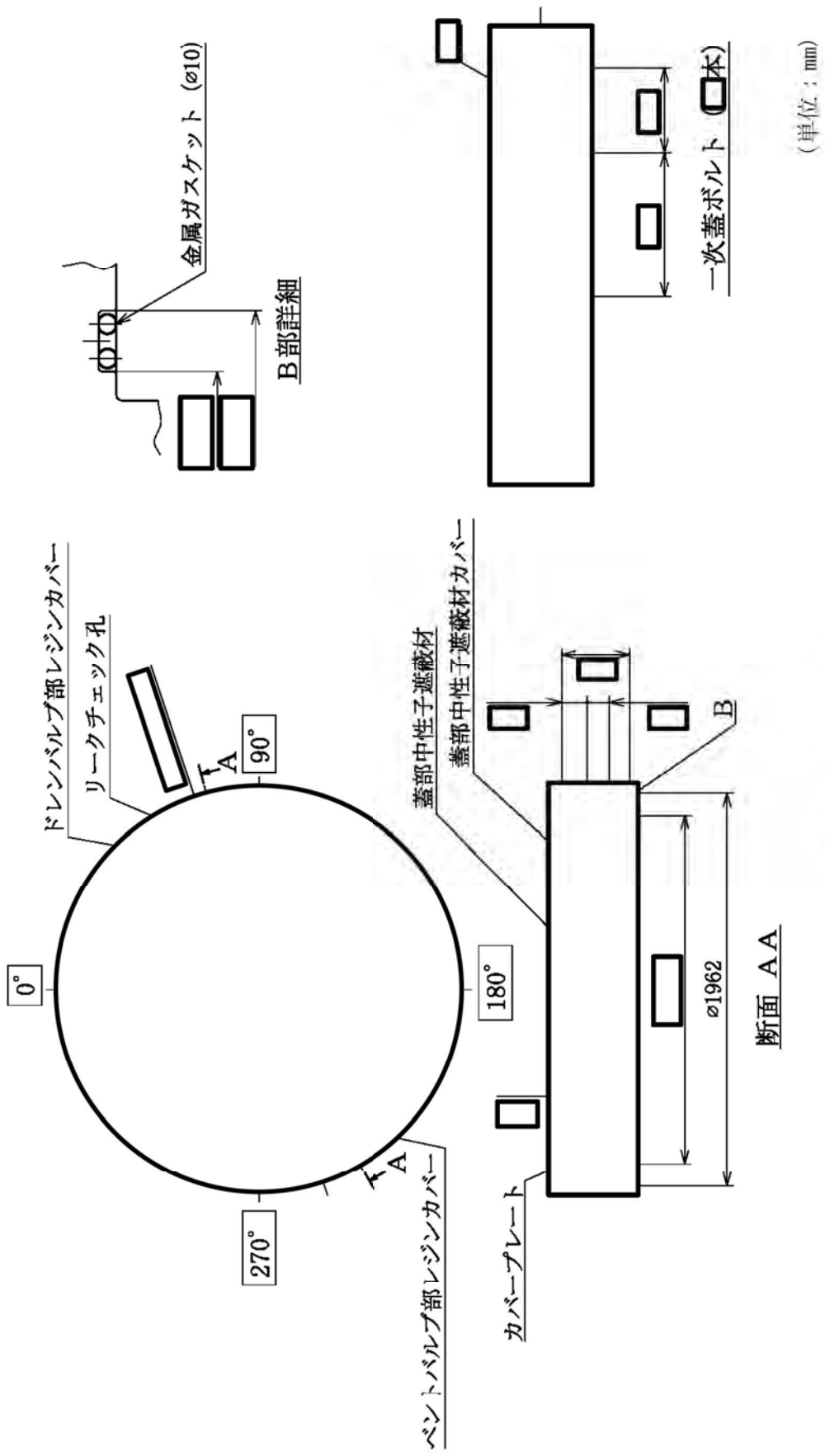
上部トラニオン (吊上専用)
(0°, 90°, 180°, 270°)

下部トラニオン (固縛専用)
(0°, 180°)

下部トラニオン (吊上・固縛兼用)
(90°, 270°)

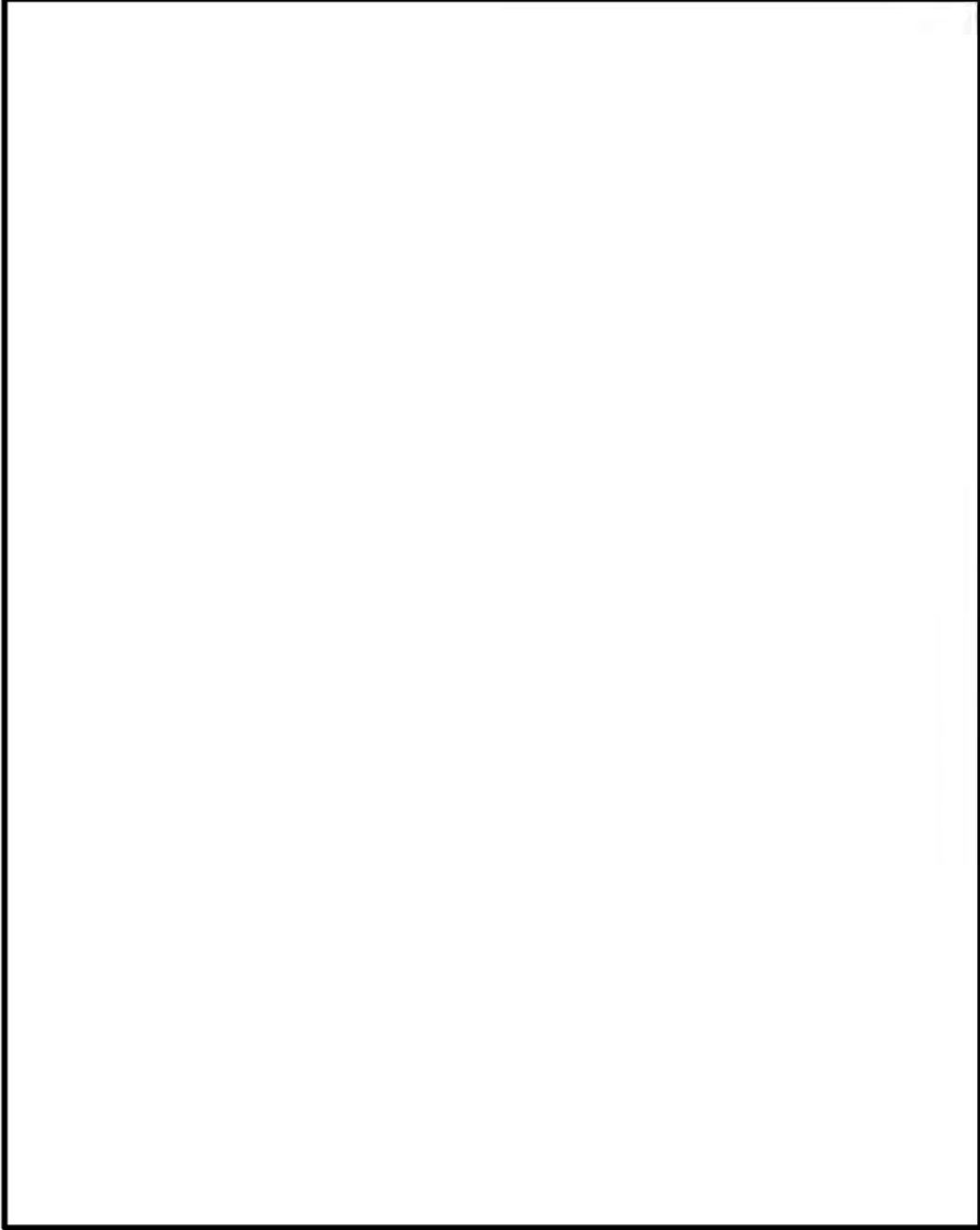
(単位: mm)

(イ)-第 B.7 図 トラニオン



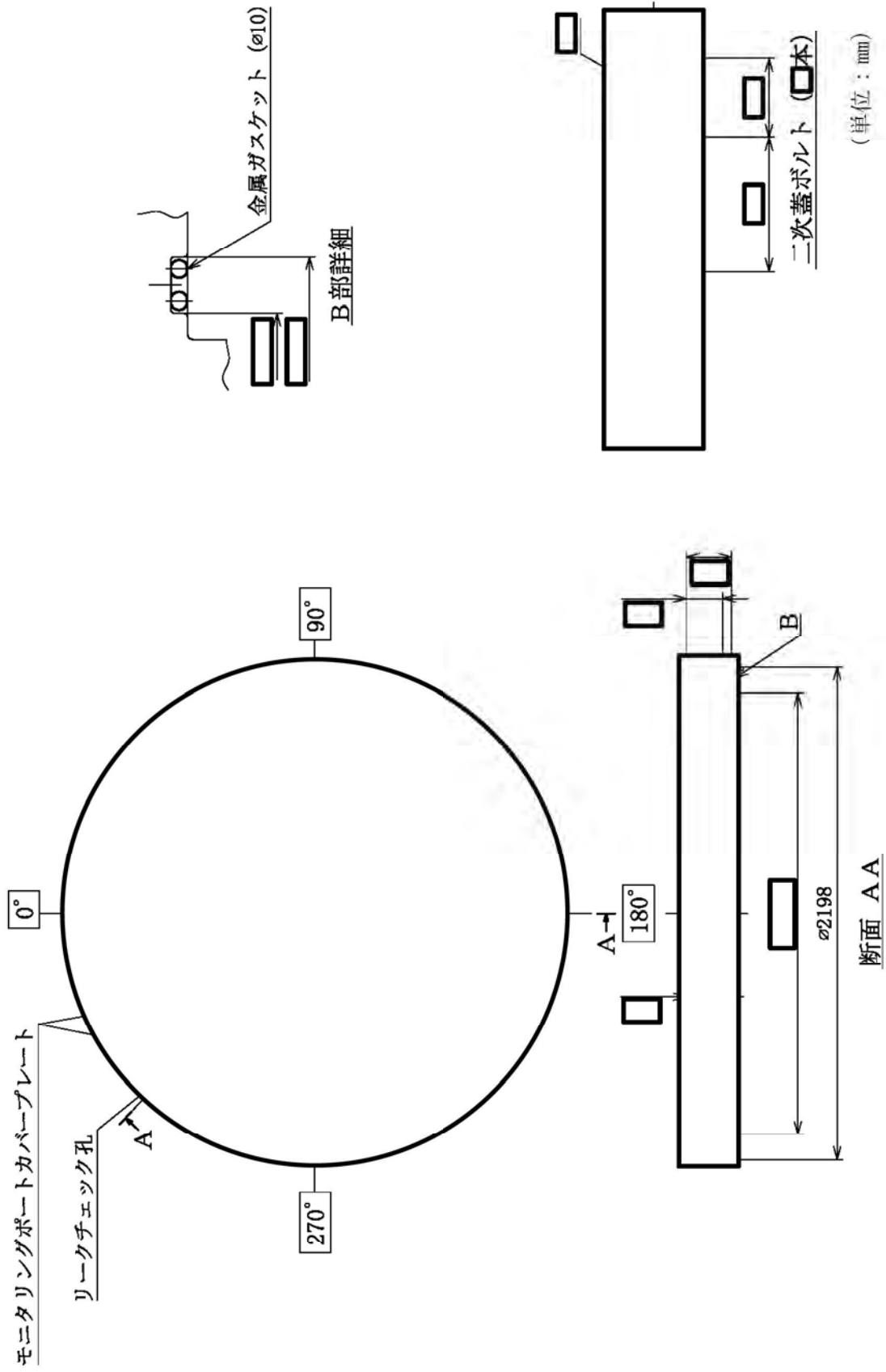
(単位：mm)

(イ)-第B.8図 一次蓋

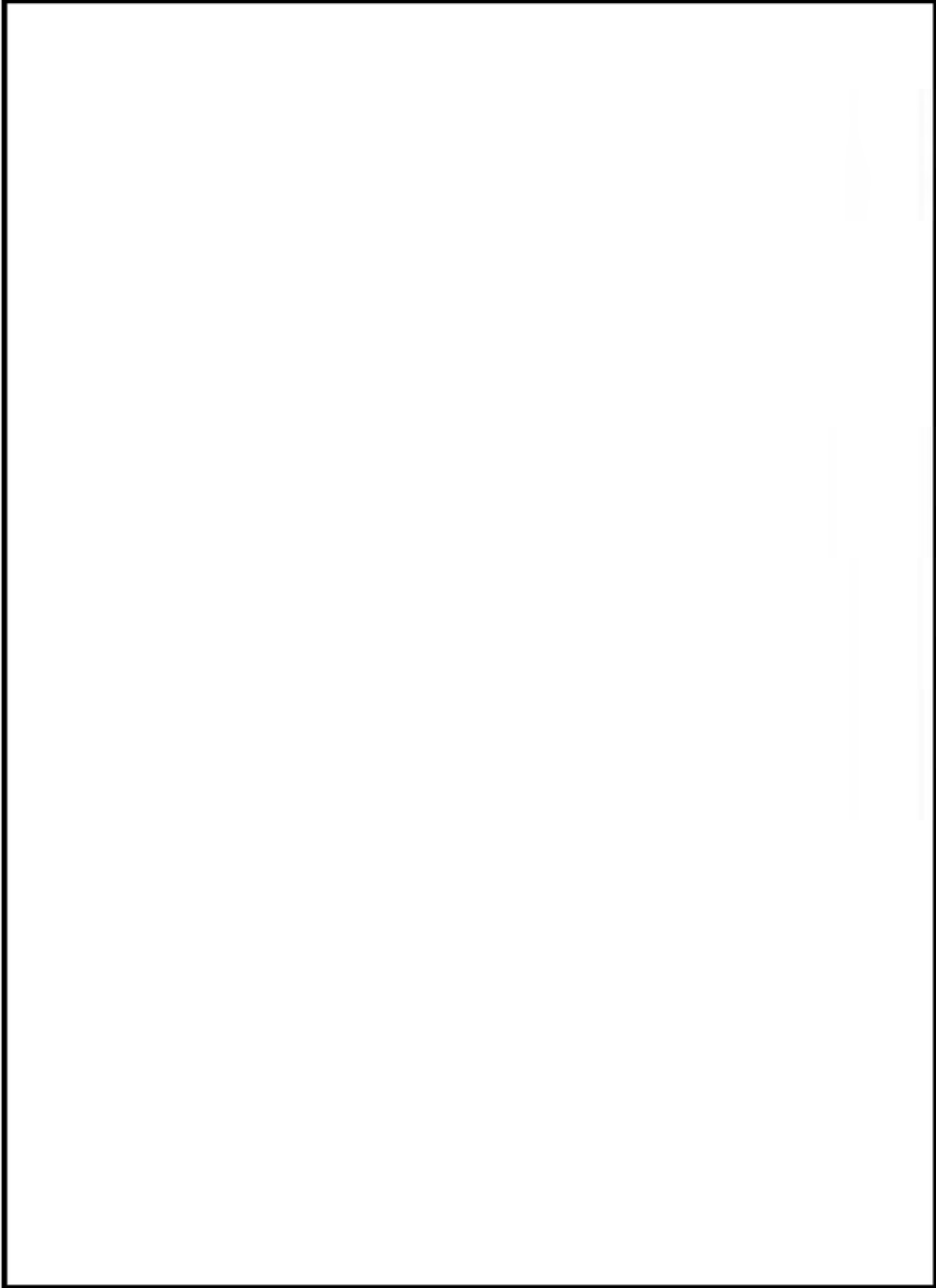


(单位：mm)

(4)-第B.9图 一次盖贯通孔

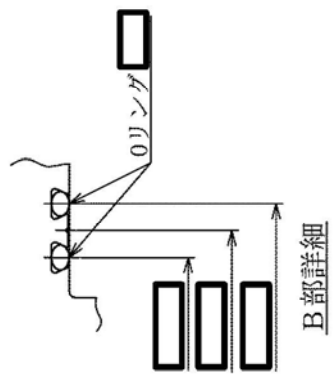
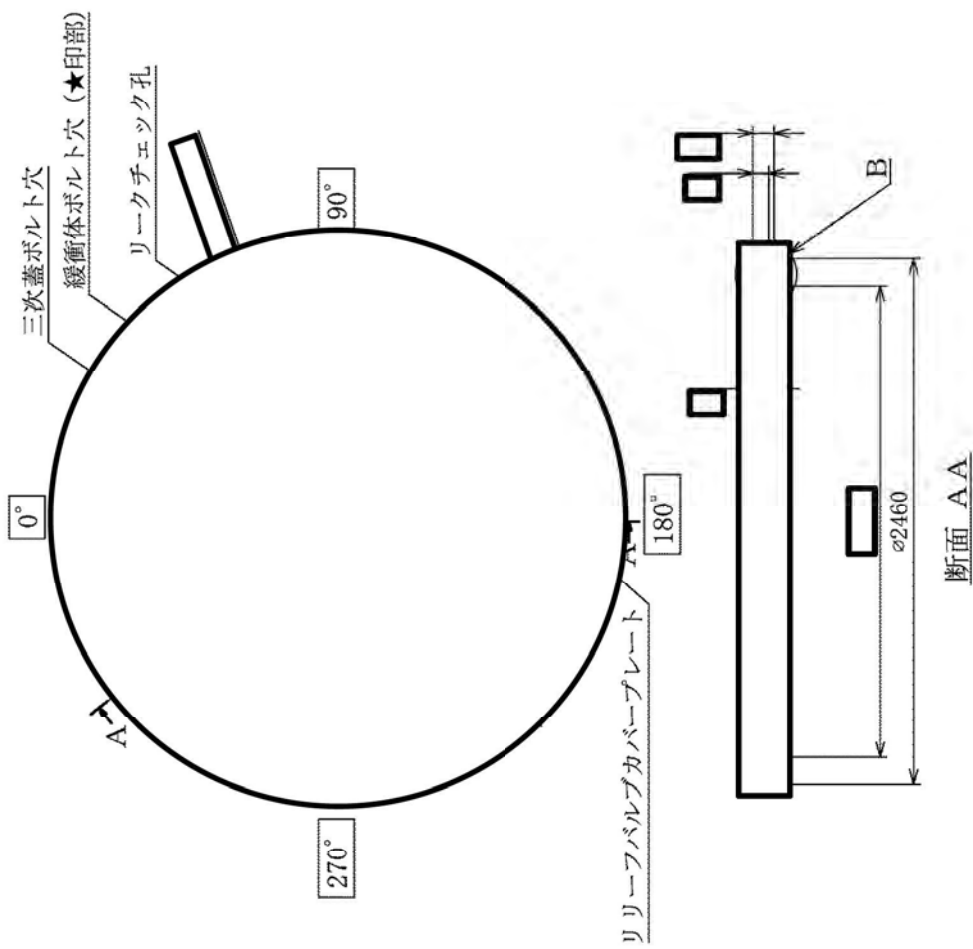


(4)-第B.10図 二次蓋



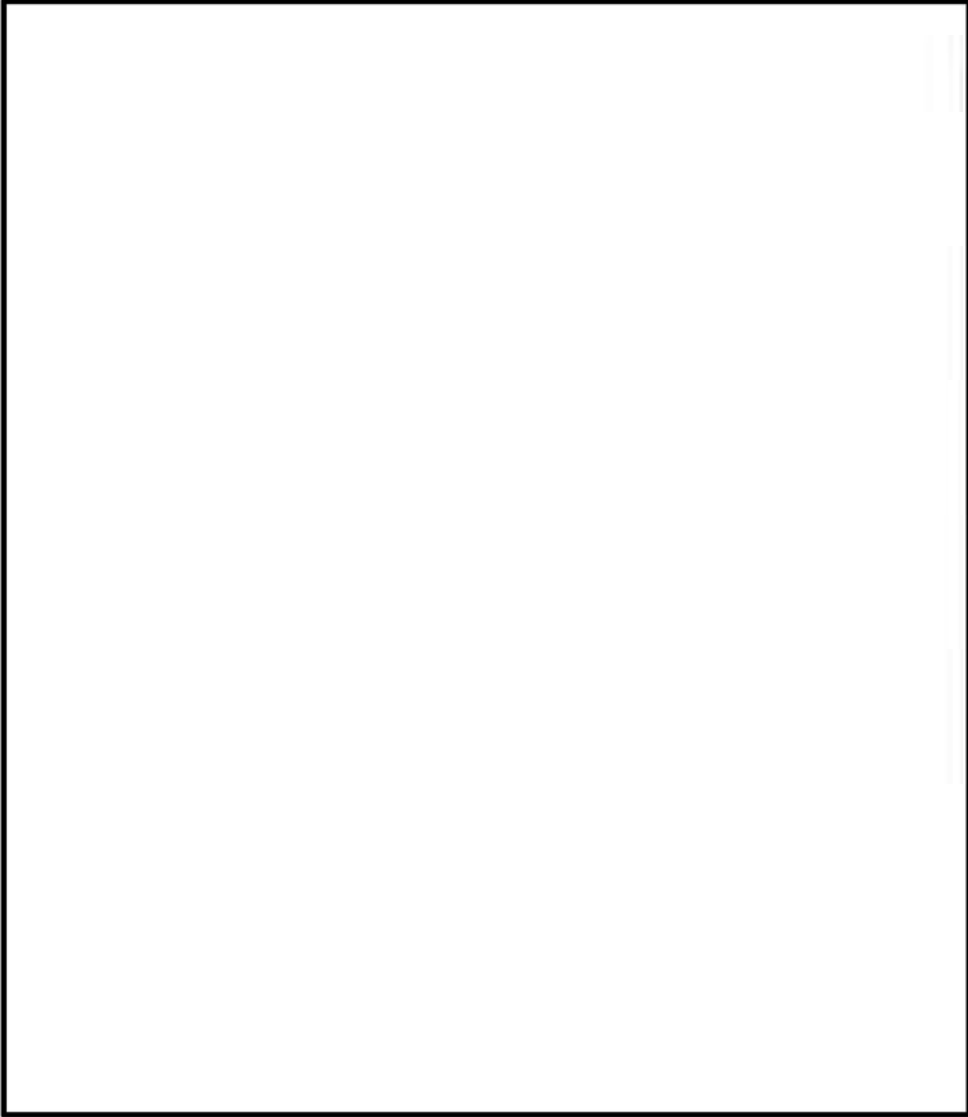
(单位：mm)

(f)-第 B.11 图 二次盖贯通孔



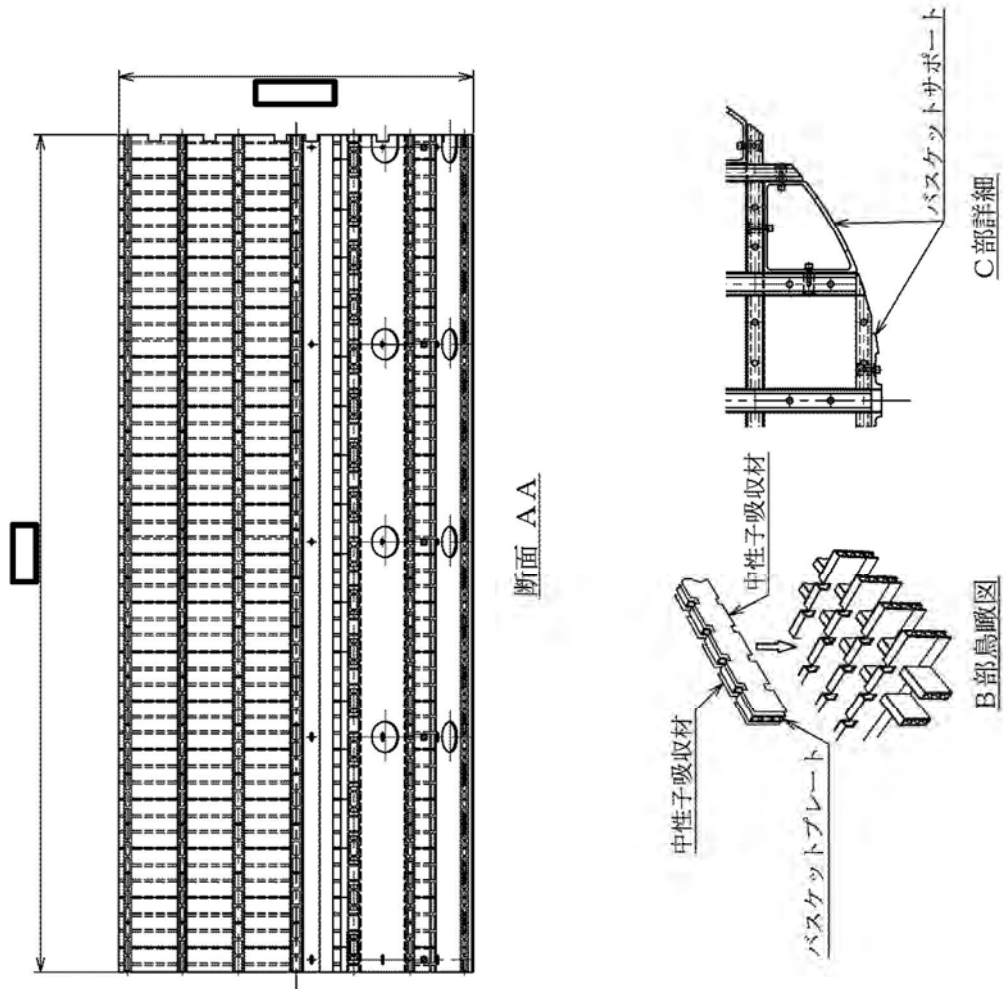
(単位：mm)

(4)-第 B.12 図 三次蓋



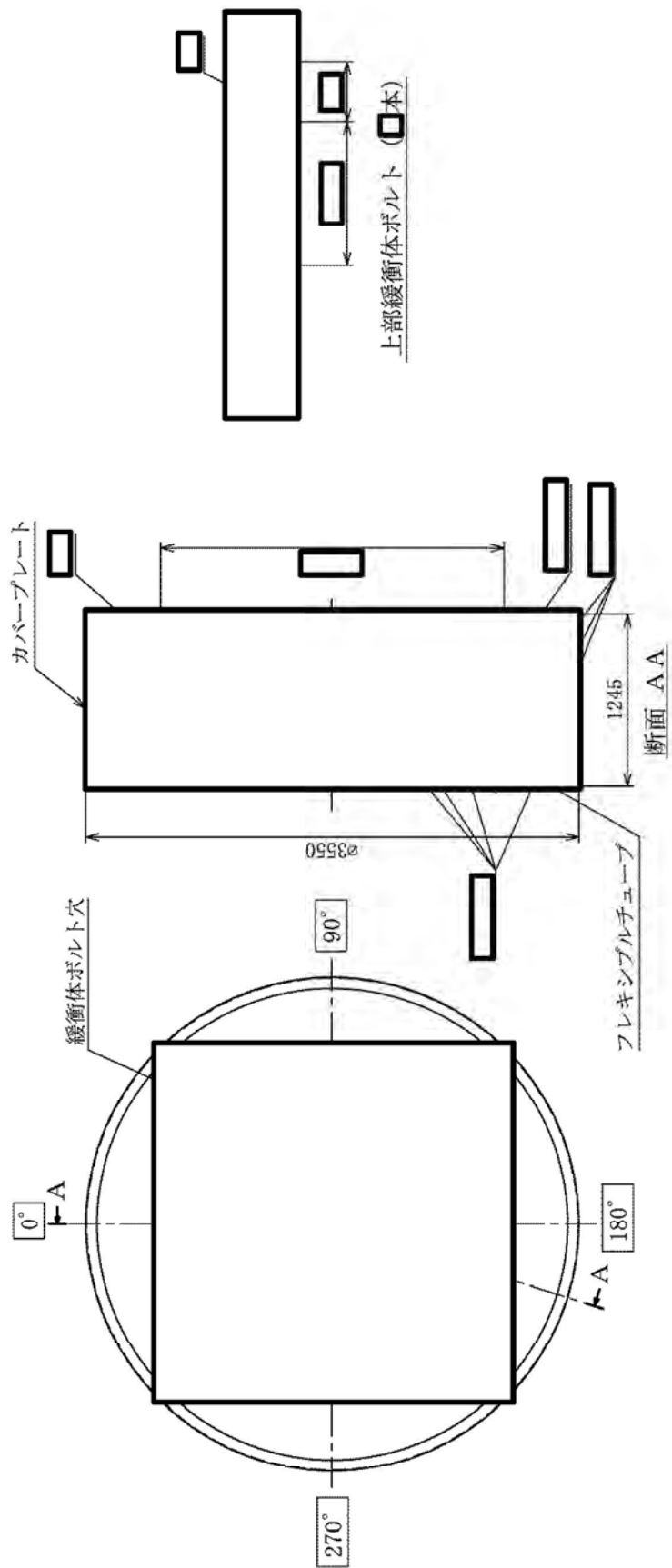
(単位：mm)

(イ)-第B.13図 三次蓋貫通孔



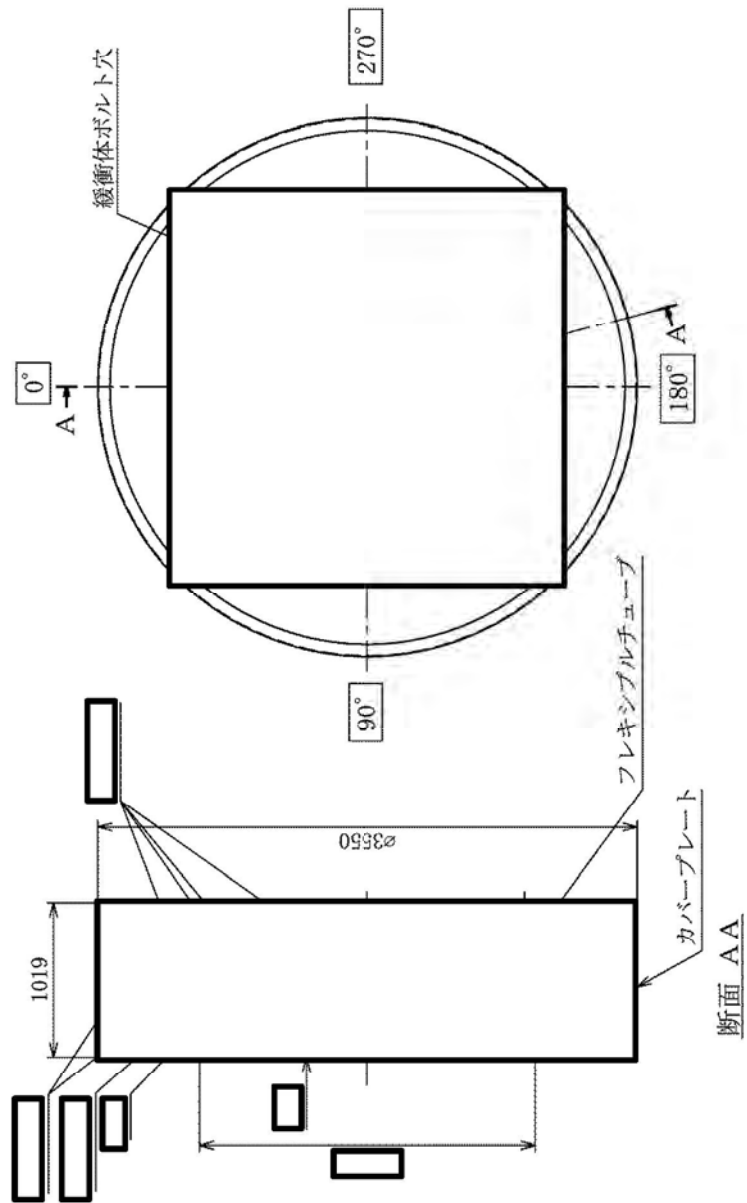
(単位：mm)

(イ)-第 B.14 図 バスケット



(単位: mm)

(イ)-第 B.15 図 上部緩衝体



(単位 : mm)

(イ)-第 B.16 図 下部緩衝体

3. 材質

下記(イ)-第B.1表のとおりである。

(イ)-第B.1表 材質

部位	部品	材料	規格 (注)
キャスク 本体	胴 外筒 下部端板 側部中性子遮蔽材 底部中性子遮蔽材 伝熱フィン	炭素鋼 炭素鋼 ステンレス鋼 レジン (エポキシ系樹脂) レジン (エポキシ系樹脂) 銅	— — JIS H3100 C1020 又は JIS H 3140 C1020 JIS G 4303 SUS630-H1150
	トラニオン 底部中性子遮蔽材カバー	析出硬化系ステンレス鋼 ステンレス鋼	—
一次蓋	蓋板 蓋部中性子遮蔽材カバー カバープレート	炭素鋼 炭素鋼 ステンレス鋼	—
	蓋部中性子遮蔽材 蓋ボルト 金属ガスケット	レジン (エポキシ系樹脂) ニッケルクロムモリブデン鋼 アルミニウム/ニッケル基合金	—
二次蓋	蓋板 モニタリングポートカバープレート	炭素鋼 ステンレス鋼	—
	Oリング 蓋ボルト 金属ガスケット	EPDM ニッケルクロムモリブデン鋼 アルミニウム/ニッケル基合金	—
三次蓋	蓋板	ステンレス鋼	—
	蓋ボルト リリースバルブカバープレート Oリング	ニッケルクロムモリブデン鋼 ステンレス鋼 EPDM	—
バスケット	中性子吸収材 バスケットプレート バスケットサポート	ほう素添加アルミニウム合金 アルミニウム合金 アルミニウム合金	— MB-A3004-H112 MB-A3004-H112
	緩衝体	緩衝材 上部緩衝体ボルト 下部緩衝体ボルト カバープレート リブ	— — — ニッケルクロムモリブデン鋼 ニッケルクロムモリブデン鋼 ステンレス鋼 ステンレス鋼

(注)記載の規格材料又は相当品を使用する。

4. 寸法（公称）

下記(イ)-第 B. 2 表に各部品の代表寸法を示す。

(イ)-第 B. 2 表 輸送容器各部の寸法

部品名	寸法(mm)	参照図
<u>キャスク本体</u>		(イ)-第 C. 5 図
胴内径		(イ)-第 C. 6 図
板厚		(イ)-第 C. 7 図
外筒外径	2596	
板厚		
下部端板厚さ		
側部中性子遮蔽材厚さ		
伝熱フィン板厚		
枚数		
上部トラニオン外径	140	
下部トラニオン外径 (90° , 270°)	140 / 200	
下部トラニオン外径 (0° , 180°)	200	
底部中性子遮蔽材厚さ		
底部中性子遮蔽材カバー厚さ		
底板厚さ		
全長	5119	
全幅	2926	
<u>一次蓋</u>		(イ)-第 C. 8 図
蓋外径	1962	(イ)-第 C. 9 図
厚さ		
蓋ボルト径		
金属ガスケット断面径	10	
蓋部中性子遮蔽材厚さ		
<u>二次蓋</u>		(イ)-第 C. 10 図
蓋外径	2198	(イ)-第 C. 11 図
厚さ		
蓋ボルト径		
金属ガスケット断面径	10	
<u>三次蓋</u>		(イ)-第 C. 12 図
蓋外径	2460	(イ)-第 C. 13 図
厚さ		
蓋ボルト径		
Oリング断面径 蓋板用 カバープレート用		
<u>バスケット</u>		(イ)-第 C. 14 図
外径		
長さ		
格子数	24 個	
格子内幅		
<u>緩衝体</u>		(イ)-第 C. 15 図
外径	3550	(イ)-第 C. 16 図
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	1245	
下部緩衝体長さ	1019	

5. 重量

本輸送物の総重量は 134.4 トン以下であり、その詳細を (イ)-第 B.3 表に示す。

(イ)-第 B.3 表 輸送物重量

輸送容器各部及び収納物	重量 (トン)
A. キャスク本体	83.7 以下
B. 一次蓋	5.6 以下
C. 二次蓋	4.5 以下
D. 三次蓋	3.3 以下
E. バスケット	5.6 以下
F. 緩衝体	
① 上部緩衝体	8.72 以下
② 下部緩衝体	6.24 以下
G. 燃料集合体	16.7 以下
H. 輸送容器総重量 A+B+C+D+E+F	117.7 以下
I. 輸送物総重量 A+B+C+D+E+F+G	134.4 以下

C. 輸送容器の収納物

輸送容器の収納物は、使用済燃料集合体である。

輸送容器に収納可能な PWR 燃料集合体の仕様を (イ)-第 C. 1 表 に示す。

(イ)-第 C. 1 図 は本輸送容器に収納する燃料集合体 (17×17 燃料) の代表的な全体図である。17×17 燃料 (A 型) 及び 17×17 燃料 (B 型) の断面図を (イ)-第 D. 2 図 及び (イ)-第 D. 3 図 に示す。これらの図及び表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。

燃料集合体は燃料集合体単独あるいは、バーナブルポイズン集合体 (容器当たり最大 12 体) を挿入した状態で本輸送容器に収納することができる。バーナブルポイズン集合体を挿入した燃料集合体は、(イ)-第 A. 1 図 に示す中央部に収納する。バーナブルポイズン集合体の仕様例を (イ)-第 C. 2 表 に示す。

(イ)-第 D. 4 図 は、バーナブルポイズン集合体 (17×17 燃料用) の断面図であり、(イ)-第 D. 5 図 は、燃料集合体へのバーナブルポイズン集合体の代表的な挿入図である。

収納物の燃焼条件及び冷却日数は、(イ)-第 C. 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。

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 C. 4 表 に示すとおりである。

また、輸送容器 1 基あたりの最大崩壊熱量は (イ)-第 A. 1 表 に示すとおり 15.8 kW に制限される。


燃料集合体は (イ)-第 C. 14 図 に示したバスケットに格納して胴内に収納され、胴内は水抜き、乾燥された上、不活性ガスのヘリウムが充填される。

(イ)-第 C.1 表 燃料集合体の型式及び仕様

燃料集合体の種類と型式	17×17 燃料			
	48,000MWd/t 型		39,000MWd/t 型	
	A 型	B 型	A 型	B 型
主要な燃料諸元				
材質				
燃料	UO ₂ (注)	UO ₂ (注)	UO ₂ (注)	UO ₂ (注)
被覆管	ジルカロイ-4	ジルカロイ-4	ジルカロイ-4	ジルカロイ-4
燃料密度 (理論密度比 %)	約 95	約 95	約 95	約 95
初期濃縮度 (U-235 wt%)	4.2 以下 (集合体平均)	4.2 以下 (集合体平均)	3.7 以下 (集合体平均)	3.7 以下 (集合体平均)
形状				
集合体長さ (mm)	約 4100	約 4100	約 4100	約 4100
燃料有効長 (mm)	3648	3648	3648	3648
燃料棒直径 (mm)	9.5	9.5	9.5	9.5
燃料棒ピッチ (mm)	12.6	12.6	12.6	12.6
集合体幅 (mm)	214	214	214	214
重量				
集合体重量 (kg)	680 以下	680 以下	680 以下	680 以下
UO ₂ 重量 (kg)				
ウラン重量 (kg)				

(注) 可燃性毒物として Gd₂O₃ を含むものがある。

(イ)-第C.2表 バーナブルポイズン集合体の仕様例

諸 元	型 式
<p>①形状、全長等 バーナブルポイズン集合体 外形 (mm) 全長 (mm) バーナブルポイズン棒 吸収材有効長 (mm) 外径 (mm) 内径 (mm)</p> <p>②重 量 総重量 (kg)</p> <p>③材 料 吸収材 被覆管 シンプルプラグ ホールドダウンアセンブリ</p>	<p>17×17 燃料用</p> <p>161×161 3961</p>  <p>ホウケイ酸ガラス ステンレス鋼 ステンレス鋼 ステンレス鋼 インコネル</p>

(イ)-第 C.3 表 収納物の燃焼条件

燃焼条件		燃料集合体の種類と型式		17×17 燃料			
				48,000MWd/t 型		39,000MWd/t 型	
				A 型	B 型	A 型	B 型
燃料集合体	最高燃焼度 ^(注1) (MWd/t)	中央部					
		外周部					
	平均燃焼度 ^(注2) (MWd/t)						
	平均比出力 (MW/t)						
	冷却日数						
バーナブル ポイズン 集合体	照射日数						
	冷却日数						

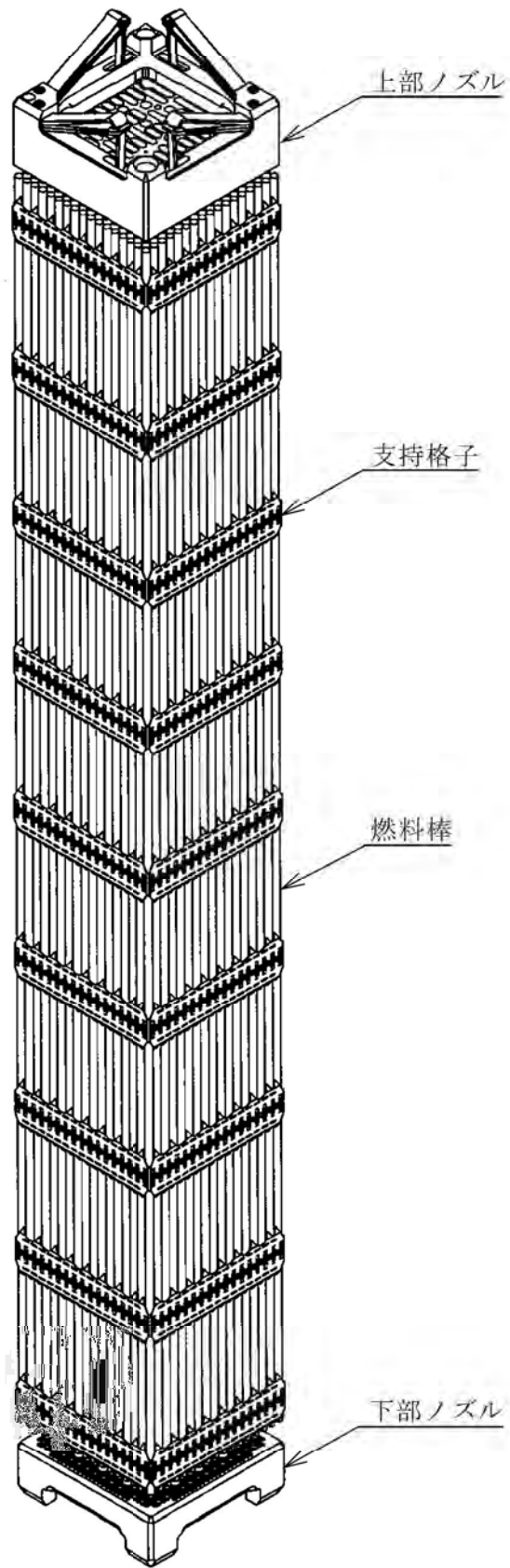
(注 1) 最高燃焼度は燃料集合体 1 体の燃焼度の最大値を示す。

(注 2) 平均燃焼度は収納する全燃料集合体の燃焼度の平均値を示す。

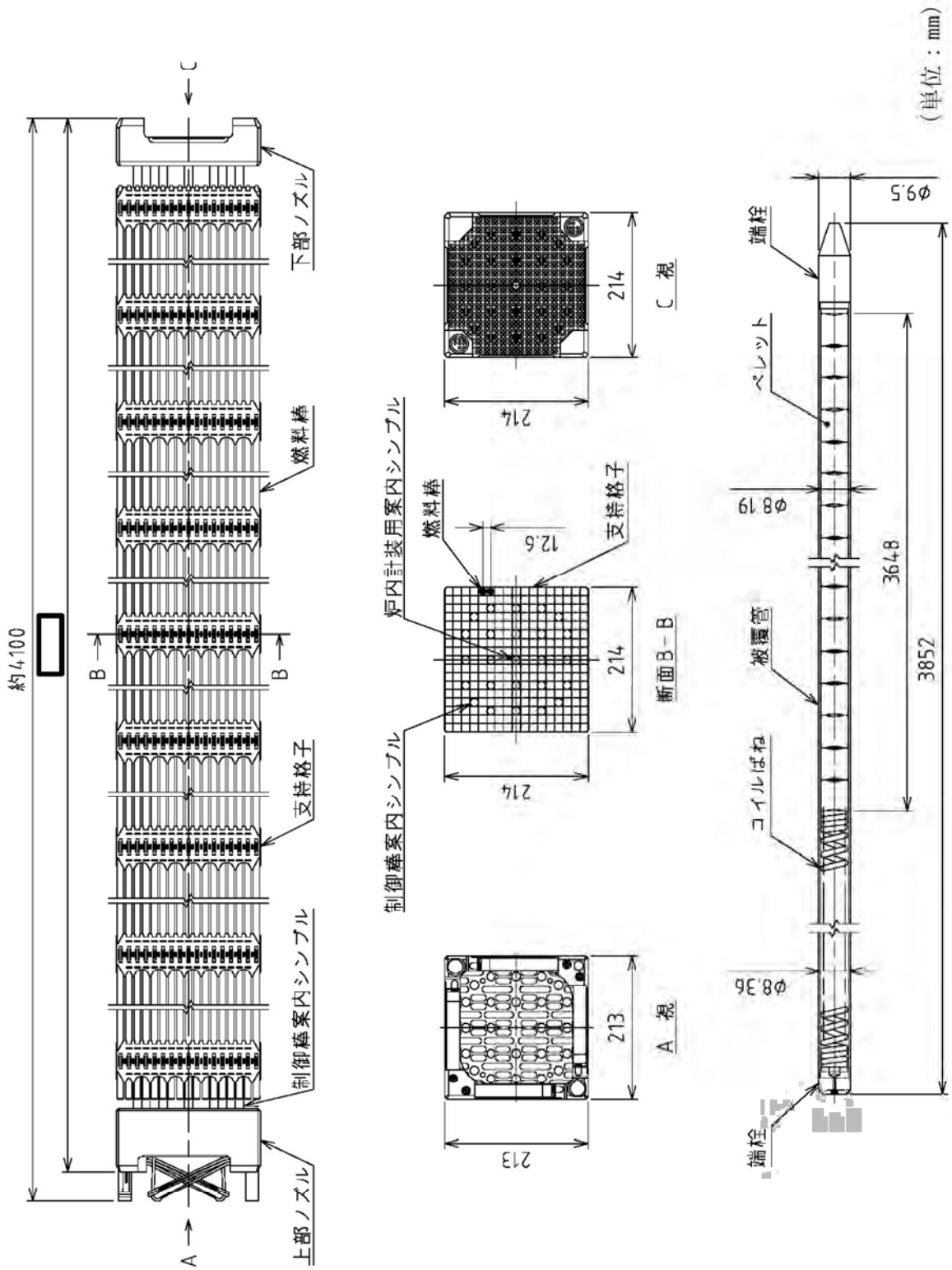
(イ)-第 C.4 表 主要核種の種類及び量 (注)

項目	燃料集合体の種類と型式 17×17 燃料 (A型)
① 燃料集合体収納体数 (体)	24
② 最大放射能強度 (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]	
⁷⁹ Se	
⁹⁰ Sr	
⁹⁰ Y	
⁹³ Zr	
^{93m} Nb	
⁹⁹ Tc	
¹⁰⁶ Ru	
¹⁰⁶ Rh	
¹⁰⁷ Pd	
^{113m} Cd	
^{121m} Sn	
¹²⁵ Sb	
^{125m} Te	
¹²⁶ Sn	
¹²⁶ Sb	
^{126m} Sb	
¹³⁴ Cs	
¹³⁵ Cs	
¹³⁷ Cs	
^{137m} Ba	
¹⁴⁴ Ce	
¹⁴⁴ Pr	
¹⁴⁶ Pm	
¹⁴⁷ Pm	
¹⁵¹ Sm	
¹⁵² Eu	
¹⁵⁴ Eu	
¹⁵⁵ Eu	
³ H	
⁸⁵ Kr	
その他	
合計	

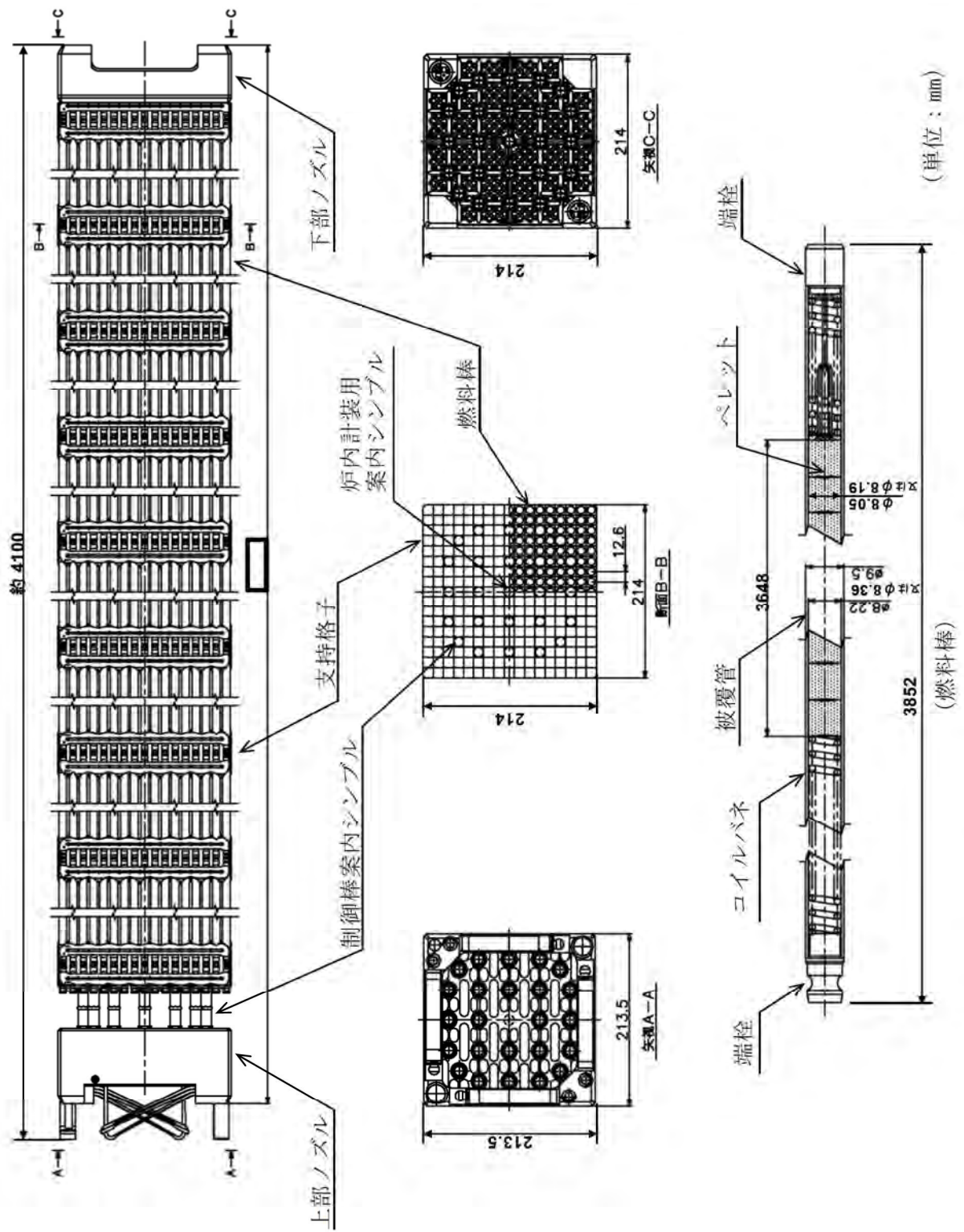
(注)放射能強度は平均燃焼度に対する ORIGEN2 コードによる計算値である。



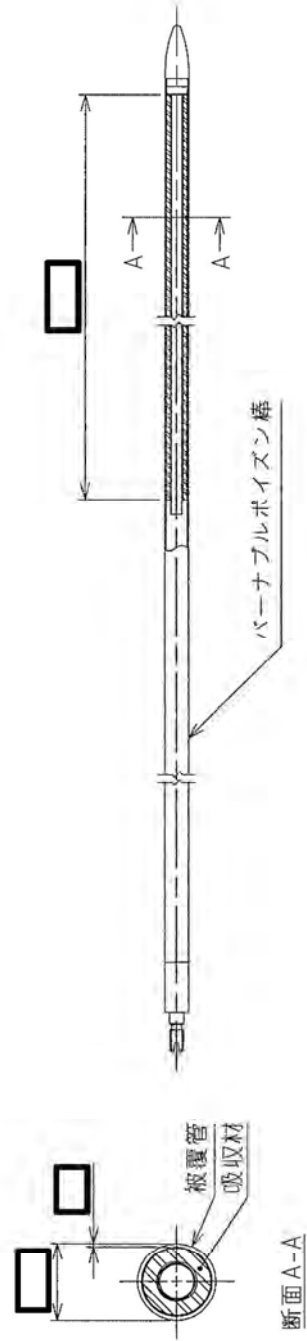
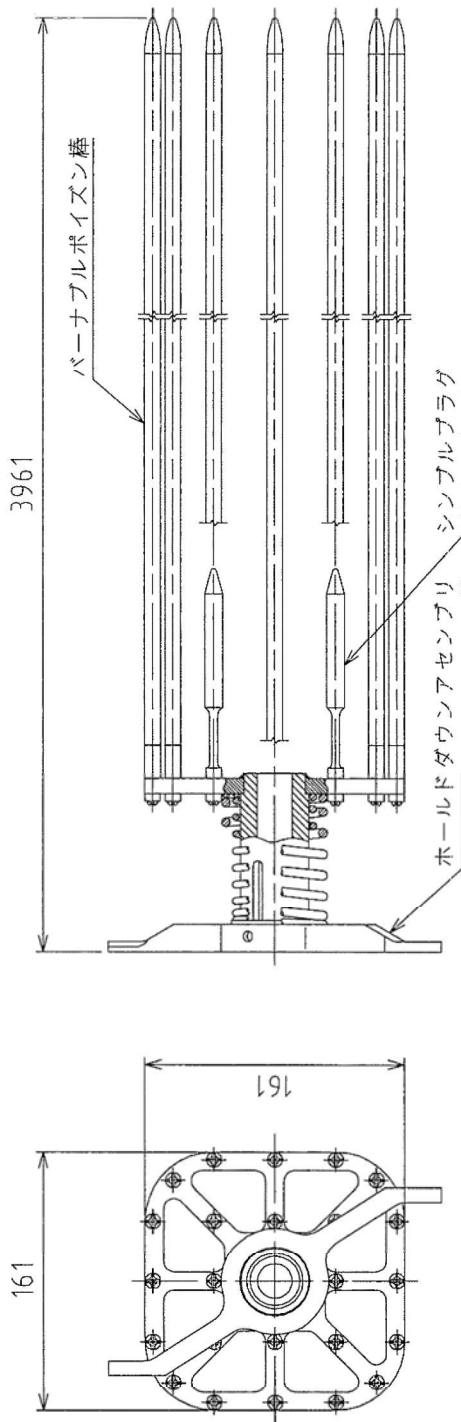
(1)-第 C. 1 図 PWR 燃料集合体全体図 (17×17 燃料 代表例)



(イ)-第 C.2 図 PWR 燃料集合体 (17×17 燃料 (A 型) 代表例)

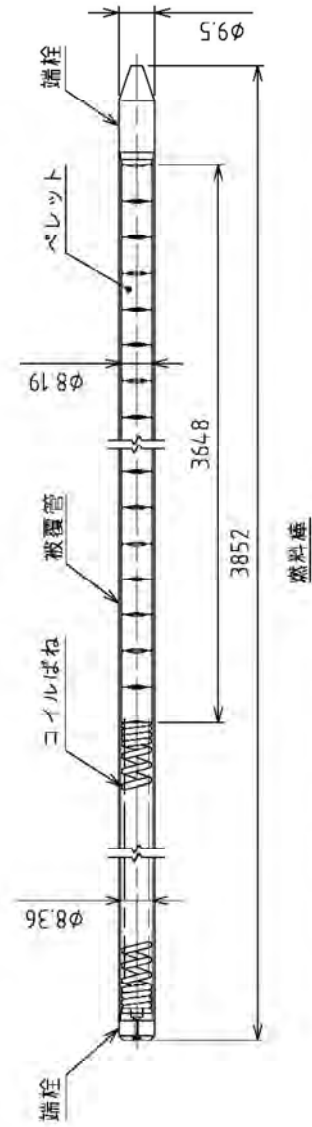
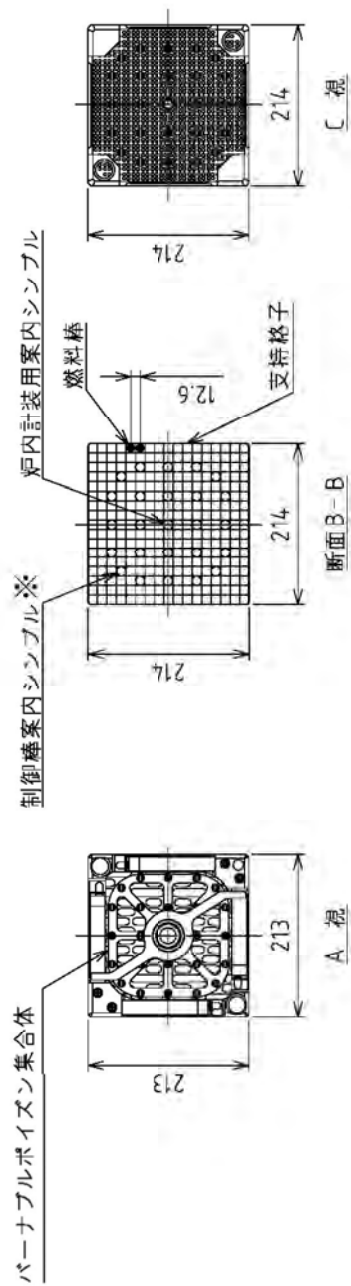
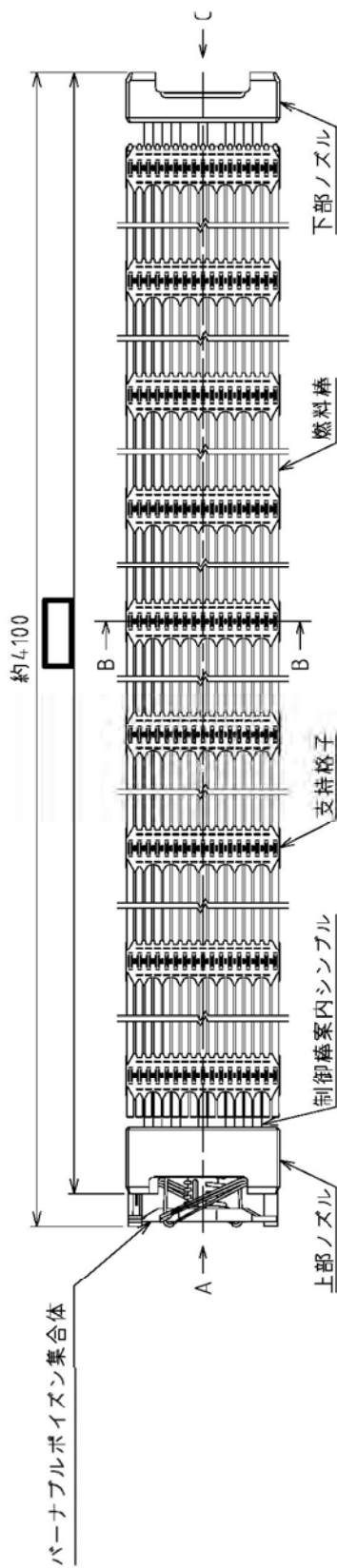


(イ)-第 C.3 図 PWR 燃料集合体 (17×17 燃料 (B 型) 代表例)



(単位：mm)

(イ)-第C.4 図 バーナブルポイズン集合体 (17×17 燃料用 代表例)



※バーナポリズン棒は、制御棒案内シンブル内に挿入される。
 (イ)-第C.5図 バーナポリズン集合体挿入図 (17×17燃料 (A型) 代表例)

(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

本輸送物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（昭和五十三年十二月二十八日付、総理府令第五十七号）」（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。

本解析の概要は以下のとおりである。

A. 構造解析

構造解析では、通常輸送時において輸送物のき裂、破損等の生じないことを確認するほか、密封解析の前提となる密封装置の健全性を一般及び特別の試験条件において確認している。

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ている。

さらに、本輸送物はBM型核分裂性輸送物であるため、未臨界評価のために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ている。

B. 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、構造、密封、遮蔽及び臨界解析の評価条件を与えている。

また、一般の試験条件における輸送物の近接表面温度基準(85℃)に適合することを確認している。

C. 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示している。

D. 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あるいは表面から 1 m 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示している。

E. 臨界解析

臨界解析では、構造解析の評価結果に基づいて、通常輸送時並びに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示している。

F. 核燃料輸送物の経年変化の考慮

本輸送容器は、使用済燃料乾式貯蔵施設における貯蔵後の輸送にも用いられるため、設計評価期間（60 年）中の輸送容器の構成部材及び収納物の経年変化について考慮する事項を示している。

G. 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)章の核燃料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示している。

以下、(ロ)章 A～G に各解析、評価の詳細を示す。

(v) 章 A 構造解析

A. 構造解析

A.1 構造設計

A.1.1 概要

輸送容器は、(イ)-第 C.1 図及び(イ)-第 C.2 図に示すようにキャスク本体、バスケット、一次蓋、二次蓋及び三次蓋等により構成される。胴は、(イ)-第 C.4 図に示すように三次蓋とともに密封境界を構成しており、胴内の圧力に耐えられる構造になっている。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。

一次蓋は、(イ)-第 C.8 図に示すように一次蓋ボルトによってキャスク本体に固定される。キャスク本体との密封は金属ガスケットを用いて行い、通常の輸送時における圧力等の負荷に耐え密封性能を維持できる構造になっている。

二次蓋は、(イ)-第 C.10 図に示すように二次蓋ボルトによってキャスク本体に固定される。キャスク本体との密封は金属ガスケットを用いて行い、圧力等の負荷に耐え密封性能を維持できる構造になっている。

三次蓋は、(イ)-第 C.12 図に示すように三次蓋ボルトによってキャスク本体に固定される。キャスク本体との密封は O リングを用いて行い、密封境界として圧力等の負荷に耐えられる構造になっている。三次蓋は、(イ)-第 C.2 図に示すように上部緩衝体によって覆われている。

(イ)-第 C.14 図に示すバスケットは、胴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。

(イ)-第 C.15 図及び(イ)-第 C.16 図に示す上部及び下部緩衝体は、キャスク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.7 図に示す上部トラニオンは、輸送容器の吊上げ荷重に耐えられる構造になっている。下部トラニオンは、輸送容器のたて起し及びよこ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、胴上部及び下部トラニオンにより輸送架台に固定され、輸送中の加速度に耐えられる。

A.1.2 設計基準

1. 設計で考慮する条件

本輸送容器の構造設計では「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放射性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のないこと。
- 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及び輸送方向加速度2g及び左右方向1gの加速度に耐えること。
- e. 輸送容器の構成部品は、運搬中に予想される周囲温度 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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. $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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. 0.3 m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. 6 kg棒貫通試験に耐えること。

(3) 特別の試験条件

- a. 9 m落下試験に耐えること。
- b. 1 m貫通試験に耐えること。
- c. 上記の試験条件に置いた後、火災試験に耐えること。
- d. 15 mの水中浸漬(0.15 MPa G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核燃料輸送物に係る追加条件

- a. 200 mの水中浸漬(2 MPa G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下に置いた後の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. 0.3 m 自由落下試験
 - (b) 積み重ね試験
 - (c) 6 kg 棒貫通試験
- b. 次の核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下に順次置いた後の輸送物の損傷状態を評価すること。
 - (a) 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件
 - (b) 9 m 落下試験
 - (c) 1 m 貫通試験
 - (d) 火災試験
 - (e) 0.9 m 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 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ の周囲温度範囲を考慮する。

2. 設計基準

各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。

この中で、輸送容器の胴、一次蓋、二次蓋、三次蓋、蓋ボルト、蓋密封シール部及びトラニオンに発生する応力の設計基準値は、金属キャスク構造規格¹⁾を適用した。

金属キャスク構造規格に設計基準値の記載がない、外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーは、中性子遮蔽材を保持する構造物であることを考慮し、設計・建設規格²⁾〈第I編 軽水炉規格〉のクラス1支持構造物の規定を適用した。アルミニウム合金製のバスケットについては、金属キャスク構造規格のバスケットの考え方を基本として設計基準値を設定した。また、燃料被覆管については、一般の試験条件における荷重負荷時の変形を防止するため、設計基準値を降伏応力以下とした。

三次蓋とキャスク本体の0リング取付位置の相対口開き変形量については、0リングが閉じ込め機能を維持できる設計基準値とした。

各試験条件に対しての応力及び変形量の設計基準値を以下に示す。また、設計条件及び解析方法の要約を(□)-第A.1表に示す。

(1) 通常の輸送条件（吊上装置及び固縛装置）

- a. トラニオン本体は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. トラニオン接続部は以下に示す一次支圧応力 f_p' を超えないこと。一次+二次支圧応力については f_p' の1.5倍を超えないこと。

$$f_p' = 1.25S_y$$

ここで、

S_y : 金属キャスク構造規格¹⁾別表第5-8に示される設計降伏点

- c. 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（熱的試験及び自由落下試験）

- a. 蓋ボルト以外の輸送容器の胴、一次蓋、二次蓋、三次蓋は発生応力を分類し、各応力が以下に示す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

P_L : 一次局部膜応力

P_b : 一次曲げ応力

Q : 二次応力

S_m : 金属キャスク構造規格¹⁾別表第5-1に示される設計応力強さ

- b. 蓋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 : 金属キャスク構造規格¹⁾別表第5-2に示される設計応力強さ

- c. 一次蓋密封シール部及び二次蓋密封シール部は発生応力を分類し、各応力が以下に示す基準値以下であること。

$$P_m \leq S_y$$

$$P_L \leq S_y$$

$$P_L + P_b \leq S_y$$

$$P_L + P_b + Q \leq S_y$$

ここで、

S_y : 金属キャスク構造規格¹⁾別表第5-8に示される設計降伏点

- d. 三次蓋とキャスク本体のOリング取付位置での相対口開き変形量が、Oリングの初期締め付け代より小さいこと。
- e. 外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー、底部中性子遮蔽材カバーにおいては以下の基準を適用する。ただし、各溶接部については、各構成部材と同じ基準を適用する。

- (a) 各部位の一次引張応力は以下に示す f_t を超えないこと。一次+二次応力については、(b)の圧縮応力との差が f_t の3倍を超えないこと。

$$f_t = \frac{F}{1.5}$$

ここで、

$$F = \text{MIN}[0.7S_u, S_y] \text{ (オーステナイト系ステンレス鋼以外)}$$

$$F = \text{MIN}[1.35S_y, 0.7S_u, S_y(\text{RT})] \text{ (オーステナイト系ステンレス鋼)}$$

S_u : 金属キャスク構造規格¹⁾別表5-9に示される設計引張強さ

$S_y(\text{RT})$: 金属キャスク構造規格¹⁾別表5-8に示される40℃における設計降伏点

- (b) 各部位の一次圧縮応力は以下に示す f_c を超えないこと。

$$f_c = \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{\nu}$$

ここで、

λ : 有効細長比

Λ : 限界細長比

$$v : v = 1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$$

- (c) 各部位の一次せん断応力は以下に示す f_s を超えないこと。一次＋二次応力については f_s の 3 倍を超えないこと。

$$f_s = \frac{F}{1.5\sqrt{3}}$$

- (d) 各部位の一次曲げ応力は以下に示す f_b を超えないこと。一次＋二次応力については f_b の 3 倍を超えないこと。

$$f_b = \frac{F}{1.5}$$

- f. バスケットにおいては、以下の基準を適用する。

- (a) 各部位の応力が以下に示す基準値以下であること。

$$P_m \leq S_m$$

$$P_m + P_b \leq \alpha S_m$$

$$\tau \leq 0.6S_m$$

$$(\text{一次圧縮応力}) \leq f_c$$

$$f_c = \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{v}$$

ここで、

S_m : 付属書類 A. 10.5 (E)-第 A. 94 表に示される設計応力強さ

P_m : 一次一般膜応力

P_b : 一次曲げ応力

α : 純曲げによる全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比又は 1.5 のいずれかの小さい方の値

τ : 平均せん断応力

λ : 有効細長比

Λ : 限界細長比

$$v : v = 1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$$

- g. 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。

(3) 一般の試験条件（積み重ね試験及び6 kg 棒貫通試験）

- a. 積み重ね試験に対しては胴に発生する応力強さが設計降伏点を超えないこと。
- b. 6 kg 棒貫通試験に対しては、せん断で破壊しないこと。

(4) 特別の試験条件

- a. 蓋ボルト以外の輸送容器の胴、二次蓋及び三次蓋は以下の基準を適用する。
 - (a) 各部位について発生応力を分類し、各応力が以下に示す基準値以下であること。

i) オーステナイト系ステンレス鋼以外

$$P_m \leq 2/3S_u$$

$$P_L \leq S_u$$

$$P_L + P_b \leq S_u$$

ii) オーステナイト系ステンレス鋼

$$P_m \leq \text{MIN}[2.4S_m, 2/3S_u]$$

$$P_L \leq \text{MIN}[3.6S_m, S_u]$$

$$P_L + P_b \leq \text{MIN}[3.6S_m, S_u]$$

- b. 二次蓋ボルト及び三次蓋ボルトに対しては以下の基準を適用する。

$$(\text{平均引張応力}) \leq S_y$$

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

- c. 二次蓋密封シール部に対しては各部位について発生応力を分類し、各応力が以下に示す基準値以下であること。

$$P_m \leq S_y$$

$$P_L \leq S_y$$

$$P_L + P_b \leq S_y$$

$$P_L + P_b + Q \leq S_y$$

- d. 三次蓋とキャスク本体のOリング取付位置の相対口開き変形量が、Oリングの初期締め付け代より小さいこと。
- e. 外筒、下部端板及び底部中性子遮蔽材カバーにおいては以下の基準を適用する。ただし、各溶接部については、各構成部材と同じ基準を適用する。
 - (a) 各部位の一次引張応力は以下に示す f_t の1.5倍を超えないこと。

$$f_t = \frac{F}{1.5}$$

ここで、

$$F = \text{MIN}[0.7S_u, 1.2S_y] \text{ (オーステナイト系ステンレス鋼以外)}$$

$$F = \text{MIN}[1.35S_y, 0.7S_u, 1.2S_y(\text{RT})] \text{ (オーステナイト系ステンレス鋼)}$$

(b) 各部位の一次圧縮応力は以下に示す f_c の 1.5 倍を超えないこと。

$$f_c = \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{v}$$

ここで、

$$F = \text{MIN}[0.7S_u, 1.2S_y] \text{ (オーステナイト系ステンレス鋼以外)}$$

$$F = \text{MIN}[1.35S_y, 0.7S_u, 1.2S_y(\text{RT})] \text{ (オーステナイト系ステンレス鋼)}$$

(c) 各部位の一次せん断応力は以下に示す f_s の 1.5 倍を超えないこと。

$$f_s = \frac{F}{1.5\sqrt{3}}$$

(d) 各部位の一次曲げ応力は以下に示す f_b の 1.5 倍を超えないこと。

$$f_b = \frac{F}{1.5}$$

f. バスケットにおいては、以下の基準を適用する。

(a) 各部位の応力が以下に示す基準値以下であること。

$$P_m \leq 2/3S_u$$

$$P_m + P_b \leq 2/3\alpha S_u$$

$$\tau \leq 1.2S_m$$

ここで、

S_u : 付属書類 A. 10.5 (f)-第 A. 97 表に示される設計引張強さ

(b) 各部位の一次圧縮応力は f_c^* の 1.5 倍を超えないこととする。 f_c^* の値は、以下に示す f_c の値を算出する際に S_y とあるのを $1.2S_y$ と読み替えて算出した値。

$$f_c = \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{v}$$

ここで、

$$F = \text{MIN}[0.7S_u, S_y]$$

g. 1 m 貫通試験に対しては、せん断で破断しないこと。

(5) 強化浸漬試験

a. 輸送容器の胴（底板）及び蓋部は以下の基準を適用する。

$$P_L + P_b \leq S_u \text{ (オーステナイト系ステンレス鋼以外)}$$

$$P_L + P_b \leq \text{MIN}[3.6S_m, S_u] \text{ (オーステナイト系ステンレス鋼)}$$

- b. 外圧を受ける胴にあつては、外面に受ける圧力が金属キャスク構造規格¹⁾に示される胴の厚さ等によって定まる許容外圧 P_a の 1.5 倍以下であること。

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 A.3 に示す材料の機械的性質及び B. に示す温度等に基づいて決定する。^(注)

(注)設計降伏点、設計引張強さ、縦弾性係数等の値は、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 (1/13)

条件	解析項目及びその評価	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			
通常の輸送条件	<u>化学的及び電気的反応</u>									
	1) 化学的反応	(ロ)-第 A.3 表	表による	—	腐食	—	活性	活性の有無	無	
	2) 電気的反応	(ロ)-第 A.3 表	表による	—	腐食	—	電位差	反応の有無	無	
	<u>低温強度</u>									
	1) 構成部品	(ロ)-第 A.4 表	表による	—	材質	—	き裂・破損	-20℃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	—	材質	—	脆性破壊	-20℃での脆化の有無	無	
	<u>密封装置</u>									
三次蓋	(イ)-第 C.2 図	—	—	誤操作による開放	—	誤操作の可否	緩衝体等に覆われての誤操作の可否	否		

(ロ)-第 A.1 表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (2/13)

条件	解析項目及びその評価	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			
通常の輸送条件	吊上装置			[Redacted]						
	トランニオン本体	(ロ)-第 A.10 図	SUS630		吊上荷重	3 1.3	曲げとせん断 疲労評価	$S = \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau^2}$ N_c	S_y N_a	(注 1)
	トランニオン接続部 (トランニオン側)	(ロ)-第 A.10 図	SUS630		吊上荷重	3 1.3	支圧 疲労評価	$\sigma_p = \text{MAX}[\sigma_{p11}, \sigma_{p12}]$ $\sigma_p = \text{MAX}[\sigma_{p11}, \sigma_{p12}] + \sigma_{p2}$ N_c	$1.25S_y$ $1.5 \times 1.25S_y$ N_a	(注 2)
	トランニオン接続部 (胴側)	(ロ)-第 A.10 図	[Redacted]		同上	同上	同上	同上	同上	
	固縛装置									
	トランニオン本体	(ロ)-第 A.14 図	SUS630		上下、前後 2g (下方向は自重を 考慮し、3g)	1	曲げとせん断	$S = \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau^2}$	S_y	
	トランニオン接続部 (トランニオン側)	(ロ)-第 A.14 図	SUS630		上下、前後 2g (下方向は自重を 考慮し、3g)	1	支圧	$\sigma_p = \text{MAX}[\sigma_{p11}, \sigma_{p12}]$ $\sigma_p = \text{MAX}[\sigma_{p11}, \sigma_{p12}] + \sigma_{p2}$	$1.25S_y$ $1.5 \times 1.25S_y$	
	トランニオン接続部 (胴側)	(ロ)-第 A.14 図	[Redacted]		同上	同上	同上	同上	同上	
圧力	—	—	周囲圧力の降下	—	内圧	密封性	良			
振動	(ロ)-第 A.15 図	[Redacted]	振動による力	—	振動	固有振動数	加振源の 振動数	(注 3)		

(注 1) S : 応力強さ、 σ_b : 曲げ応力、 τ : せん断応力、 S_y : 設計降伏点、 N_c : 使用計画回数、 N_a : 許容繰返し回数(注 2) σ_p : 支圧応力、 σ_{p11} 、 σ_{p12} : 吊上げ荷重による支圧応力 (一次応力)、 σ_{p2} : しまり嵌め荷重による支圧応力 (二次応力)

(注 3) 輸送容器の胴、一次蓋及び二次蓋の材質は、[Redacted] である。

(ロ)-第A.1表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (3/13)

条件	解析項目及びその評価	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			
一般の試験条件	熱的試験									
	1) 応力計算									
	胴	(ロ)-第A.17図		内圧、熱膨張及び初期締付トルク	1	応力強さ	P_m P_L P_L+P_b P_L+P_b+Q	S_m $1.5S_m$ $1.5S_m$ $3S_m$	(注4)	
	胴(底板)	—		同上	1	同上	同上	同上		
	一次蓋	—		同上	1	同上	同上	同上		
	二次蓋	—		同上	1	同上	同上	同上		
	三次蓋	—		同上	1	同上	同上	同上		
	外筒	—		同上	1	応力	引張応力 圧縮応力 せん断応力 曲げ応力	f_t f_c f_s f_b	(注5)	
	下部端板	—		同上	1	同上	同上	同上		
	蓋部中性子遮蔽材カバー	—		同上	1	同上	同上	同上		
	底部中性子遮蔽材カバー	—		同上	1	同上	同上	同上		
	一次蓋シール部(蓋)	—		同上	1	応力強さ	P_L P_L+P_b+Q	S_y S_y		
	一次蓋シール部(胴)	—		同上	1	同上	同上	同上		
	二次蓋シール部(蓋)	—		同上	1	同上	同上	同上		
	二次蓋シール部(胴)	—		同上	1	同上	同上	同上		
	一次蓋ボルト	—		同上	1	引張 引張と曲げ	σ_m $\sigma_m+\sigma_b$	$2S_m$ $3S_m$	(注6)	
	二次蓋ボルト	—		同上	1	同上	同上	同上		
	三次蓋ボルト	—		同上	1	同上	同上	同上		
ガスケットの密封性	—	EPDM		—	同上	1	変形量	口開き変形量	初期締付け代	

(注4) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部応力、 P_b : 一次曲げ応力、 Q : 二次応力、 S_m : 設計応力強さ(注5) f_t : 許容引張応力、 f_c : 許容圧縮応力、 f_s : 許容せん断応力、 f_b : 許容曲げ応力(注6) σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力

(ロ)-第A.1表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (4/13)

条件	解析項目及びその評価	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				
一般の試験条件	水噴霧	—		—	水噴霧	—	吸水による脆化、水溜	吸水性 水切	無良		
	自由落下										
	1) 緩衝体の変形量と衝撃加速度										
	垂直落下	(ロ)-第A.23図 (ロ)-第A.24図		—	落下エネルギー	1	エネルギー吸収	$E_a = \sum \sigma_c V$	$E_k = mgH$	(注7)	
	水平落下	(ロ)-第A.25図		—	落下エネルギー	1	エネルギー吸収	$E_a = \sum \sigma_c V$	$E_k = mgH$		
	コーナー落下	(ロ)-第A.26図 (ロ)-第A.27図		—	落下エネルギー	1	エネルギー吸収	$E_a = \sum \sigma_c V$	$E_k = mgH$		
	2) 垂直落下										
	胴	(ロ)-第A.28図 (ロ)-第A.29図			内圧、慣性力 熱膨張及び 初期締付トルク	1	応力強さ	P_m P_L $P_L + P_b$ $P_L + P_b + Q$	S_m $1.5S_m$ $1.5S_m$ $3S_m$		
	胴(底板)	—			同上	1	同上	同上	同上		
	一次蓋	—			同上	1	同上	同上	同上		
	二次蓋	—			同上	1	同上	同上	同上		
	三次蓋	—			同上	1	同上	同上	同上		
	外筒	—			同上	1	応力	引張応力 圧縮応力 せん断応力 曲げ応力	f_t f_c f_s f_b		
	下部端板	—			同上	1	同上	同上	同上		
	蓋部中性子遮蔽材カバー	—			同上	1	同上	同上	同上		
底部中性子遮蔽材カバー	—		同上	1	同上	同上	同上				

(注7) E_a : 吸収エネルギー、 σ_c : 圧縮応力、 V : 変形量、 E_k : 輸送物の落下エネルギー、 m : 輸送物最大総質量、 g : 重力加速度、 H : 落下高さ

(ロ)-第A.1表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (5/13)

条件	解析項目及びその評価	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			
一般の試験条件	2) 垂直落下 (続き)									
	一次蓋シール部 (蓋)	—			同上	1	応力強さ	P_L P_L+P_b+Q	S_y S_y	
	一次蓋シール部 (胴)	—			同上	1	同上	同上	同上	
	二次蓋シール部 (蓋)	—			同上	1	同上	同上	同上	
	二次蓋シール部 (胴)	—			同上	1	同上	同上	同上	
	一次蓋ボルト	—			同上	1	引張 引張と曲げ	σ_m $\sigma_m + \sigma_b$	$2S_m$ $3S_m$	
	二次蓋ボルト	—			同上	1	同上	同上	同上	
	三次蓋ボルト	—			同上	1	同上	同上	同上	
	ガスケットの密封性	—	EPDM		同上	1	変形量	口開き変形量	初期縮 付け代	
	バスケット	(ロ)-第A.31図	アルミニウム合金		慣性力	1	圧縮	$\sigma_c = \frac{W_b \cdot G_v}{A}$	S_m f_c	(注8)
	燃料被覆管	—	ジルカロイ		内圧及び慣性力	1	応力強さ	S	σ_y	(注9)
	3) 水平落下									
	胴	(ロ)-第A.32図			内圧、慣性力 熱膨張及び 初期縮付トルク	1	応力強さ	P_m P_L P_L+P_b P_L+P_b+Q	S_m $1.5S_m$ $1.5S_m$ $3S_m$	
胴 (底板)	—			同上	1	同上	同上	同上		
一次蓋	—			同上	1	同上	同上	同上		
二次蓋	—			同上	1	同上	同上	同上		
三次蓋	—			同上	1	同上	同上	同上		
外筒	—			同上	1	応力	引張応力 圧縮応力 せん断応力 曲げ応力	f_t f_c f_s f_b		

(注8) W_b : バスケット合計質量、 G_v : 垂直落下時の衝撃加速度、 A : バスケットプレートと胴の接触面積(注9) σ_y : 設計降伏点

(ロ)-第 A.1 表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (6/13)

条件	解析項目及びその評価	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			
一般の試験条件	3) 水平落下 (続き)									
	下部端板	—			同上	1	同上	同上	同上	
	蓋部中性子遮蔽材カバー	—			同上	1	同上	同上	同上	
	底部中性子遮蔽材カバー	—			同上	1	同上	同上	同上	
	一次蓋シール部 (蓋)	—			同上	1	応力強さ	P_L P_L+P_b+Q	S_y S_y	
	一次蓋シール部 (胴)	—			同上	1	同上	同上	同上	
	二次蓋シール部 (蓋)	—			同上	1	同上	同上	同上	
	二次蓋シール部 (胴)	—			同上	1	同上	同上	同上	
	一次蓋ボルト	—			同上	1	引張 引張と曲げ	σ_m $\sigma_m + \sigma_b$	$2S_m$ $3S_m$	
	二次蓋ボルト	—			同上	1	同上	同上	同上	
	三次蓋ボルト	—			同上	1	同上	同上	同上	
	ガスケットの密封性	—	EPDM	—	同上	1	変形量	口開き変形量	初期締付け代	
	バスケット	(ロ)-第 A.33 図 (ロ)-第 A.34 図 (ロ)-第 A.35 図 (ロ)-第 A.36 図	アルミニウム合金		慣性力	1	圧縮 曲げ せん断	$\sigma_c = (W_I + W_{II}) \cdot \frac{G_H}{A \cdot N}$ $\sigma_b = \frac{M}{Z}$ $\tau = \frac{F}{A}$	S_m αS_m $0.6S_m$	(注 10)
燃料被覆管	—	ジルカロイ		内圧及び慣性力	1	応力強さ	S	σ_y		
4) コーナー落下	— 垂直及び水平落下の結果並びに特別の試験条件の結果を引用して評価 —									

(注 10) W_I, W_{II} : バスケットプレート、中性子吸収材、バスケットサポート及び燃料集合体の質量、 G_H : 水平落下時の衝撃加速度、 A : 断面積、 N : バスケットプレートの数、 M : 曲げモーメント、 Z : 断面係数、 F : せん断力、 α : 純曲げによる全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比又は 1.5 のいずれか小さい方の値

(ロ)-第 A.1 表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (7/13)

条件	解析項目及びその評価	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			
一般の試験条件	積み重ね 1) 軸に直角方向 2) 軸方向	(ロ)-第 A. 37 図 (ロ)-第 A. 38 図			輸送物質量の 5 倍	1	曲げ 圧縮	$\sigma_b = \frac{M_{\max} d_o}{2I}$ $\sigma_c = \frac{W}{A}$	S _y S _y	(注 11)
	貫通	(ロ)-第 A. 39 図			落下エネルギー	1				

(注 11) 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、W : 荷重(注 12) E_s : せん断エネルギー、d : 直径、t : 板厚、S : せん断強さ

(ロ)-第A.1表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (8/13)

条件	解析項目及びその評価	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				
特別の試験条件	9 m 落下試験										
	1) エネルギー吸収と衝撃力										
	垂直落下	(ロ)-第 A. 23 図 (ロ)-第 A. 24 図		—	落下エネルギー	1	エネルギー吸収	$E_a = \Sigma \sigma_c V$	$E_k = mgH$		
	水平落下	(ロ)-第 A. 25 図		—	落下エネルギー	1	エネルギー吸収	$E_a = \Sigma \sigma_c V$	$E_k = mgH$		
	コーナー落下	(ロ)-第 A. 26 図 (ロ)-第 A. 27 図		—	落下エネルギー	1	エネルギー吸収	$E_a = \Sigma \sigma_c V$	$E_k = mgH$		
	2) 垂直落下										
	胴	(ロ)-第 A. 40 図 (ロ)-第 A. 41 図				内圧、慣性力及び初期締付トルク	1	応力強さ	P_m P_L $P_L + P_b$	$2/3S_u$ S_u S_u	(注 13)
	胴 (底板)	—				同上	1	同上	同上	同上	
	二次蓋	—				同上	1	同上	同上	同上	
	三次蓋	—				同上	1	同上	P_m P_L $P_L + P_b$	$\text{MIN}[2.4S_u, 2/3S_u]$ $\text{MIN}[3.6S_u, S_u]$ $\text{MIN}[3.6S_u, S_u]$	
	外筒	—				同上	1	応力	引張応力 圧縮応力 せん断応力 曲げ応力	$1.5f_t$ $1.5f_c$ $1.5f_s$ $1.5f_b$	
	下部端板	—				同上	1	同上	同上	同上	
	底部中性子遮蔽材カバー	—				同上	1	同上	同上	同上	
	二次蓋シール部 (蓋)	—				同上	1	応力強さ	P_L $P_L + P_b + Q$	S_y S_y	
二次蓋シール部 (胴)	—				同上	1	同上	同上	同上		

(注 13) S_u : 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 (9/13)

条件	解析項目及びその評価	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			
特別の試験条件	2) 垂直落下 (続き)									
	二次蓋ボルト	—			同上	1	引張 引張と曲げ	σ_m $\sigma_m + \sigma_b$	S_y S_y	
	三次蓋ボルト	—			同上	1	同上	同上	同上	
	ガスケットの密封性	—	EPDM		同上	1	変形量	口開き変形量	初期締付け代	
	バスケット	—	アルミニウム合金		慣性力	2.6	圧縮	$\sigma_c = \frac{W_b \cdot G_y}{A}$	$2/3S_u$ $1.5f_c^*$	(注 14)
	3) 水平落下									
	胴	(ロ)-第 A.42 図			内圧、慣性力及び 初期締付トルク	1	応力強さ	P_m P_L $P_L + P_b$	$2/3S_u$ S_u S_u	
	胴 (底板)	—			同上	1	同上	同上	同上	
	二次蓋	—			同上	1	同上	同上	同上	
	三次蓋	—			同上	1	同上	P_m P_L $P_L + P_b$	$\text{MIN}[2.4S_m, 2/3S_u]$ $\text{MIN}[3.6S_m, S_u]$ $\text{MIN}[3.6S_m, S_u]$	
	外筒	—			同上	1	応力	引張応力 圧縮応力 せん断応力 曲げ応力	$1.5f_t$ $1.5f_c$ $1.5f_s$ $1.5f_b$	
	下部端板	—			同上	1	同上	同上	同上	
	底部中性子遮蔽材カバー	—			同上	1	同上	同上	同上	
	二次蓋シール部 (蓋)	—			同上	1	応力強さ	P_L $P_L + P_b + Q$	S_y S_y	
	二次蓋シール部 (胴)	—			同上	1	同上	同上	同上	
	二次蓋ボルト	—			同上	1	引張 引張と曲げ	σ_m $\sigma_m + \sigma_b$	S_y S_y	
三次蓋ボルト	—			同上	1	同上	同上	同上		

(注 14) f_c^* : f_c の値を算出する際に S_y とあるのを $1.2S_y$ と読み替えて算出した値

(ロ)-第 A.1 表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (10/13)

条件	解析項目及びその評価	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				
特別の試験条件	3) 水平落下 (続き)										
	ガスケットの密封性	—	EPDM	—	同上	1	変形量	口開き変形量	初期締付け代		
	バスケット	—	アルミニウム合金		慣性力	1.2	圧縮 曲げ せん断	$\sigma_c = (W_1 + W_2) \cdot \frac{G_H}{A \cdot N}$ $\sigma_b = \frac{M}{Z}$ $\tau = \frac{F}{A}$	$2/3S_u$ $2/3\alpha S_u$ $1.2S_m$		
	4) コーナー落下	— 垂直及び水平落下の結果を引用して評価 —									
	二次蓋ボルト	—			内圧、慣性力及び初期締付トルク	1	引張	$\sigma_t = \sigma_{t1} + \phi \sigma_{t2}$	S_y	(注 15)	
	三次蓋ボルト	—			同上	1	同上	同上	同上		
	5) 傾斜落下	— 垂直及び水平落下の結果及び 10.3 項を引用して評価 —									
	1 m 貫通試験										
	1) 垂直落下										
	三次蓋	—			軟鋼棒圧潰荷重	1	せん断	$F_{bar} = \sigma_u \cdot A$ $F = \pi \cdot d \cdot t \cdot S$	F	(注 16)	
底部中性子遮蔽材カバー	—			軟鋼棒圧潰荷重	1	せん断	$F_{bar} = \sigma_u \cdot A$ $F = \pi \cdot d \cdot t \cdot S$	F			
2) 水平落下											
胴	—			軟鋼棒圧潰荷重	1	せん断	$F_{bar} = \sigma_u \cdot A$ $F = \pi \cdot d \cdot t \cdot S$	F			

(注 15) σ_t : 各荷重によりボルトに生じる引張応力、 σ_{t1} : 初期締付力、熱応力、胴内圧及び蓋間圧力により生じる引張応力、 ϕ : ボルト内力係数、 σ_{t2} : 慣性力により生じる引張応力

(注 16) F_{bar} : 最大荷重、 σ_u : SS400 の設計引張強さ、F: 貫通荷重

(ロ)-第 A.1 表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (11/13)

条件	解析項目及びその評価	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				
特別の試験条件	熱的試験										
	1) 応力計算										
	胴	(ロ)-第 A.43 図	[Redacted]	-	内圧、熱膨張及び初期締付トルク	1	応力強さ	P_m P_L P_L+P_b	$2/3S_u$ S_u S_u		
	胴 (底板)	—			同上	1	同上	同上	同上		
	二次蓋	—			同上	1	同上	同上	同上		
	三次蓋	—			同上	1	同上	同上	P_m P_L P_L+P_b	MIN[2.4S _m , 2/3S _u] MIN[3.6S _m , S _u] MIN[3.6S _m , S _u]	
	外筒	—			同上	1	応力	引張応力 圧縮応力 せん断応力 曲げ応力	1.5f _t 1.5f _c 1.5f _s 1.5f _b		
	下部端板	—			同上	1	同上	同上	同上	同上	
	底部中性子遮蔽材カバー	—			同上	1	同上	同上	同上	同上	
	二次蓋シール部 (蓋)	—			同上	1	応力強さ	P_L P_L+P_b+Q	S_y S_y		
	二次蓋シール部 (胴)	—			同上	1	同上	同上	同上	同上	
	二次蓋ボルト	—			同上	1	引張 引張と曲げ	σ_m $\sigma_m+\sigma_b$	S_y S_y		
	三次蓋ボルト	—			同上	1	同上	同上	同上	同上	
	ガスケットの密封性	—			EPDM	—	同上	1	変形量	口開き変形量	初期締付け代
	15 m 浸漬										
三次蓋	(ロ)-第 A.44 図	[Redacted]	外圧	1	応力強さ (曲げ)	$S = \sigma_b = 0.75 \frac{P \cdot a^2}{t^2}$	MIN[3.6 S _m , S _u]	(注 17)			

(注 17)P : 差圧、a : 円板の半径

(ロ)-第 A.1 表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (12/13)

条件	解析項目及びその評価	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			
使用済核燃料輸送物の追加試験条件	強化浸漬									
	1) 胴	—			外圧	1	圧力	P_o	$1.5P_a$	(注 18)
	2) 胴 (底板)	—			外圧	1	応力強さ (曲げ)	$S = \sigma_b = 0.75 \frac{P \cdot a^2}{t^2}$	S_u	
	3) 三次蓋	(ロ)-第 A.45 図			外圧	1	応力強さ (曲げ)	$S = \sigma_b = 0.75 \frac{P \cdot a^2}{t^2}$	S_u	

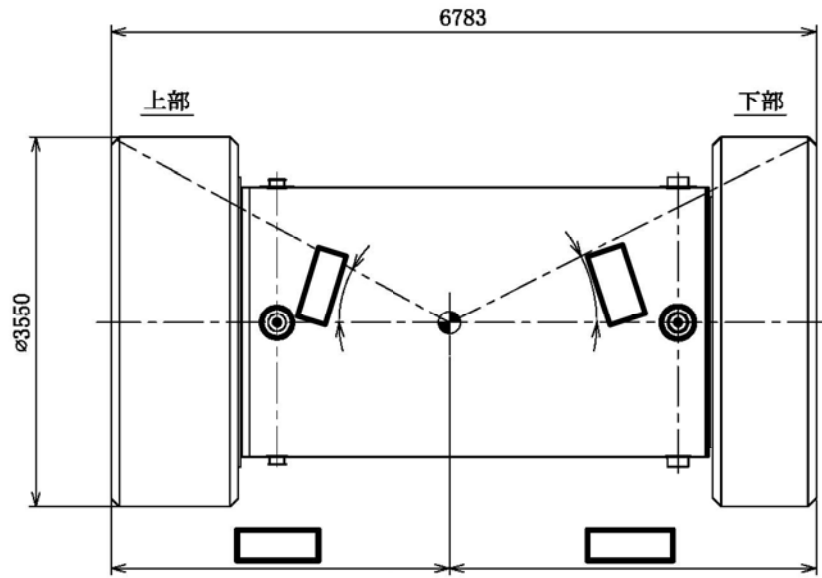
(注 18) P_o : 外圧、 P_a : 許容外圧

(□)-第 A.1 表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (13/13)

条件	解析項目及びその評価	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			
核分裂性輸送物に係る試験条件	一般の試験条件		}	前述の一般の試験条件に対する解析結果を引用して評価						
	1) 水噴霧									
	2) 0.3 m 自由落下									
	3) 積み重ね									
	4) 6 kg 棒貫通									
	特別の試験条件	(□)-第 A.46 図	}	前述の 9 m 落下に対する設計条件及び解析方法と同一						
	1) 9 m 落下									
	2) 1 m 落下									
3) 火災試験										
4) 0.9 m 浸漬			前述の特別の試験条件に対する解析結果を引用して評価							

A.2 重量及び重心

通常時における輸送物の質量は、(イ)章 C の 5. に記載したとおり 134.4 トン以下である。また、輸送物の重心の位置は、(ロ)-第 A.1 図 に示すとおりである。



(単位 : mm)

(ロ)-第 A.1 図 重心の位置

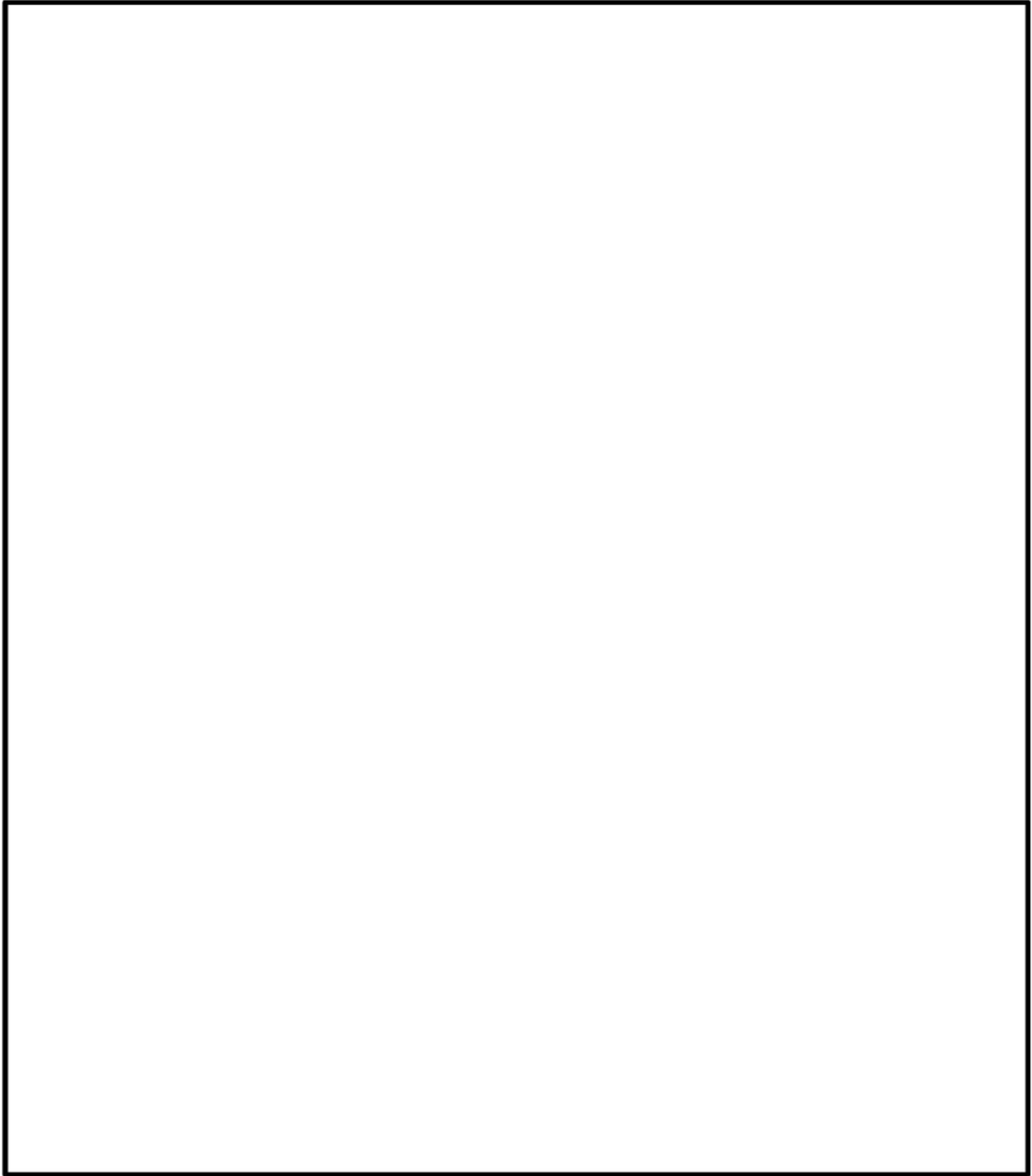
A.3 材料の機械的性質

解析に用いる材料の機械的性質を(□)-第 A.2 表に示す。ステンレス鋼、炭素鋼、析出硬化系ステンレス鋼、ニッケルクロムモリブデン鋼、アルミニウム合金及びジルカロイの温度に対する機械的性質の変化を(□)-第 A.2 図～(□)-第 A.9 図に示す。これらは、主に金属キャスク構造規格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、A.5.3に示す。

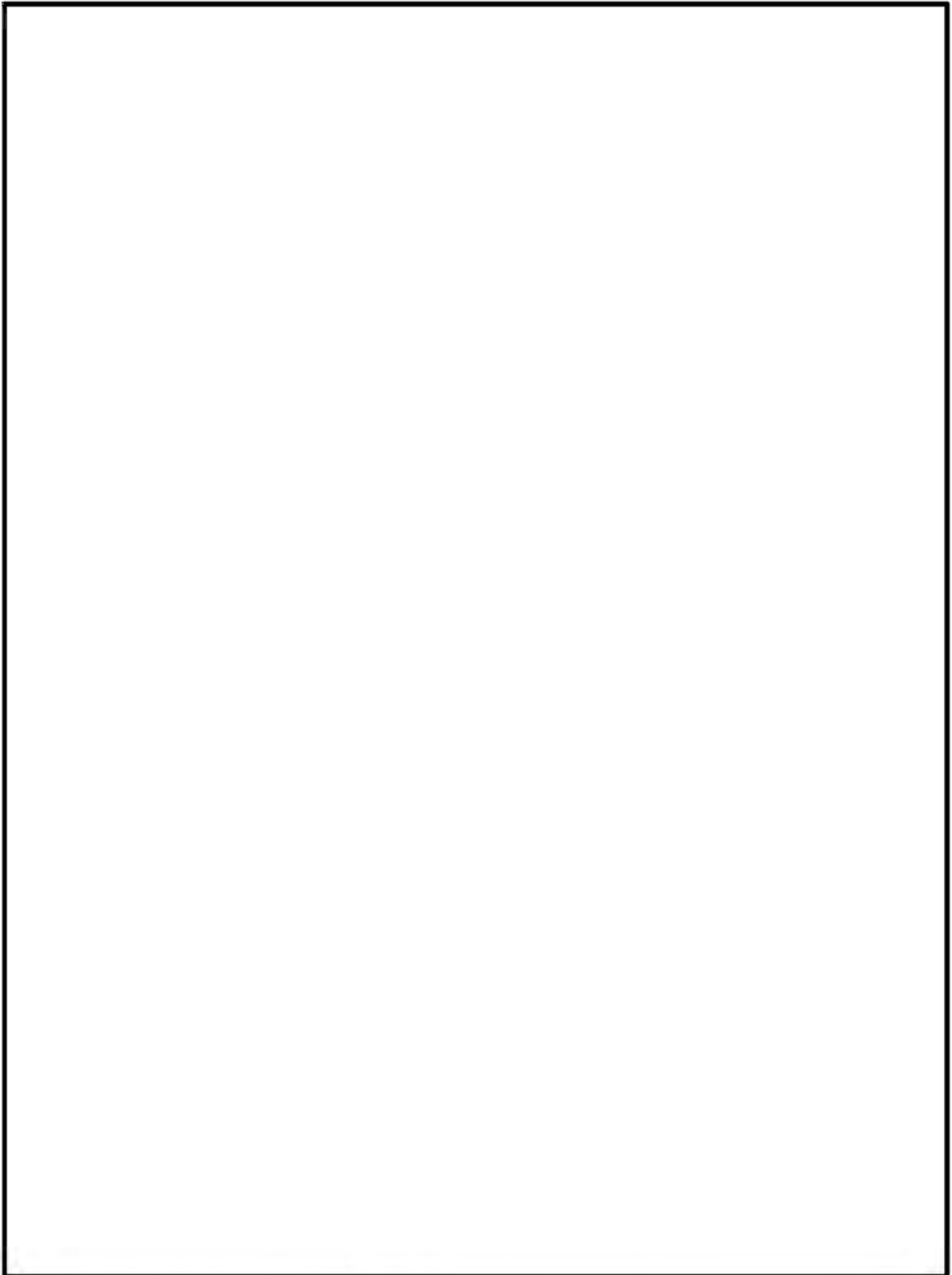
(□)-第 A.2 表 材料の機械的性質 (常温)

材料	設計引張強さ (MPa)	設計降伏点 (MPa)	熱膨張係数 (mm/mm°C)	ポアソン比	縦弾性係数 (MPa)
ステンレス鋼 ^{1), 3)} (□)	□			0.3	□
ステンレス鋼 ^{1), 3)} (□)				0.3	
炭素鋼 ^{1), 3)} (□)				0.3	
析出硬化系ステンレス鋼 ^{1), 3)} (SUS630-H1150)	930	725	11.10×10^{-6}	0.3	1.96×10^5
ニッケルクロムモリブデン鋼 ^{1), 3)} (□)	□			0.3	□
炭素鋼 ^{1), 3)} (□)				0.3	
アルミニウム合金 ^(注1) (MB-A3004-H112)	153	56	22.61×10^{-6}	—	7.39×10^4
ジルカロイ-4 ⁴⁾	—	735	—	—	—

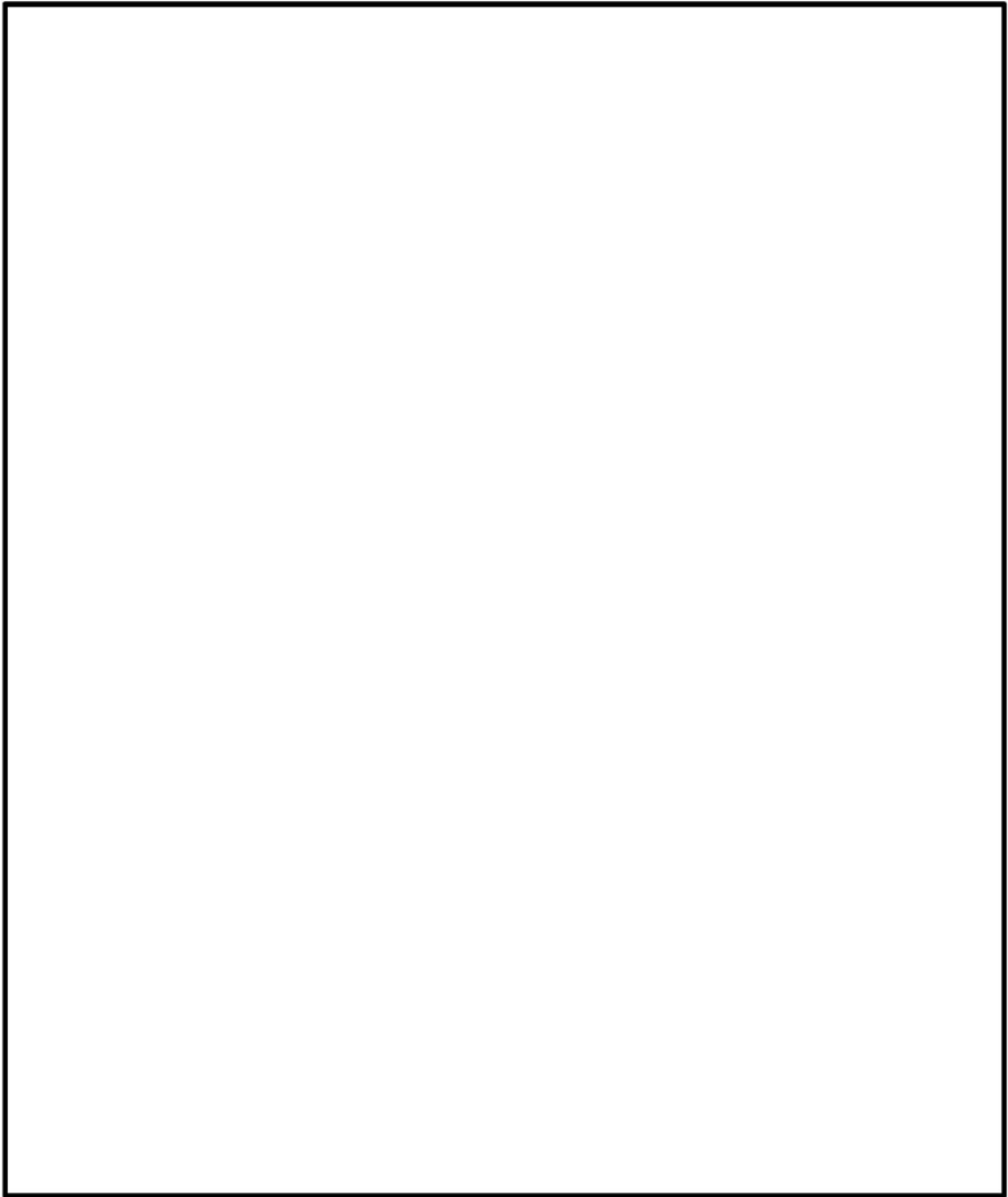
(注1) アルミニウム合金の機械的性質の詳細については付属書類 A.10.4 を参照。



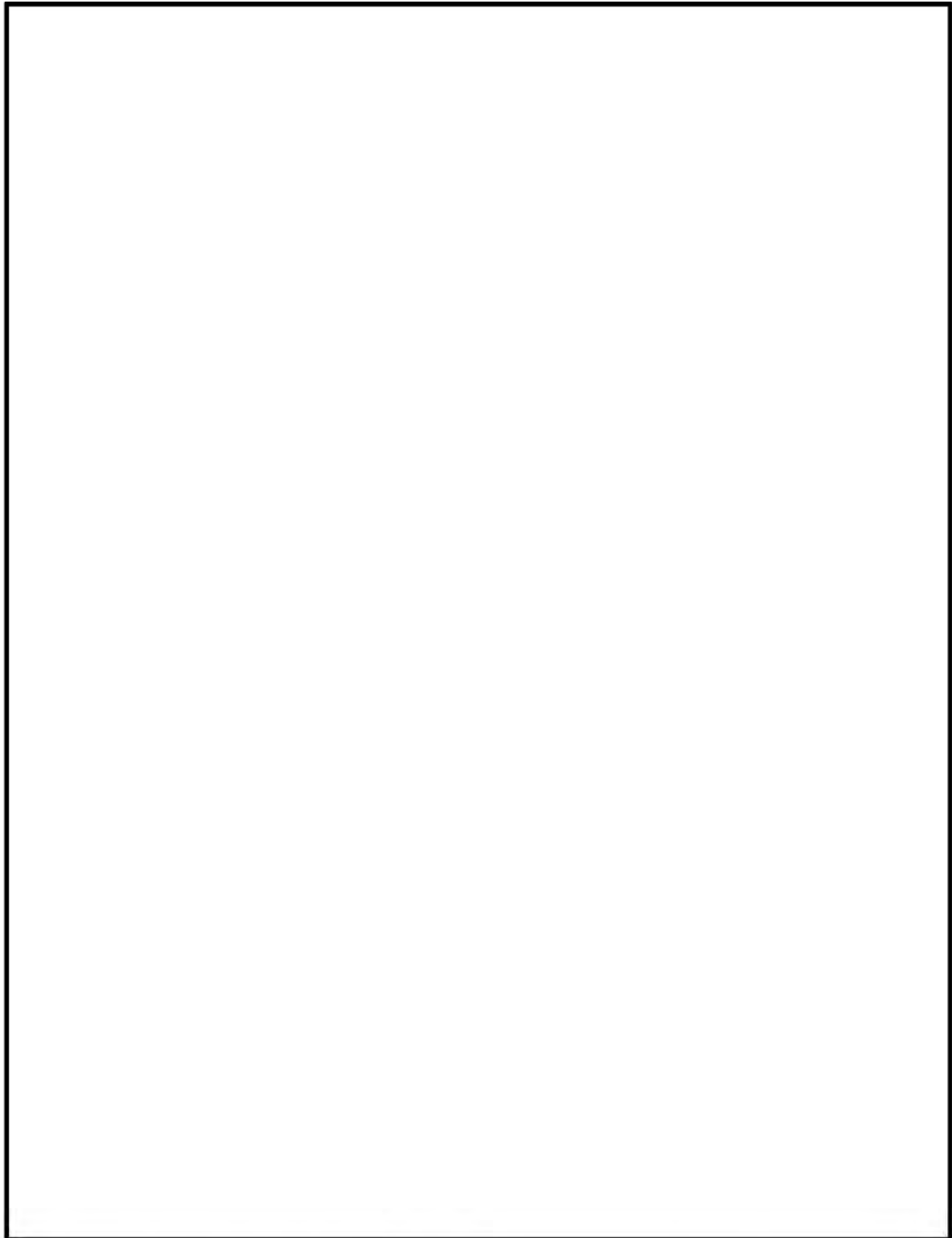
(□)-第 A.2 図 ステンレス鋼 (□) の温度に対する機械的性質の変化 (1/2) ^{1), 3)}



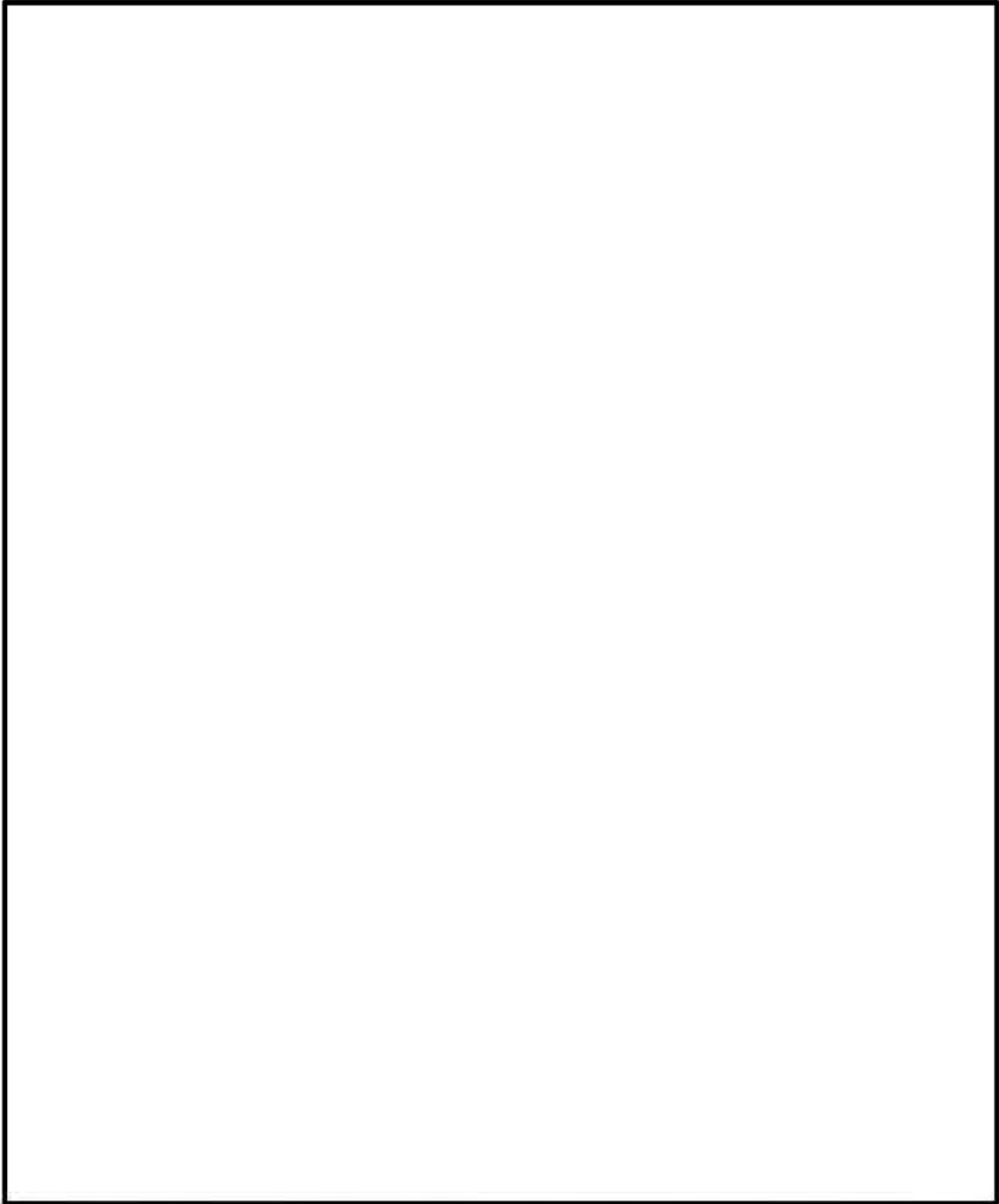
(ロ)-第 A. 2 図 ステンレス鋼 () の温度に対する機械的性質の変化(2/2) ^{1), 3)}



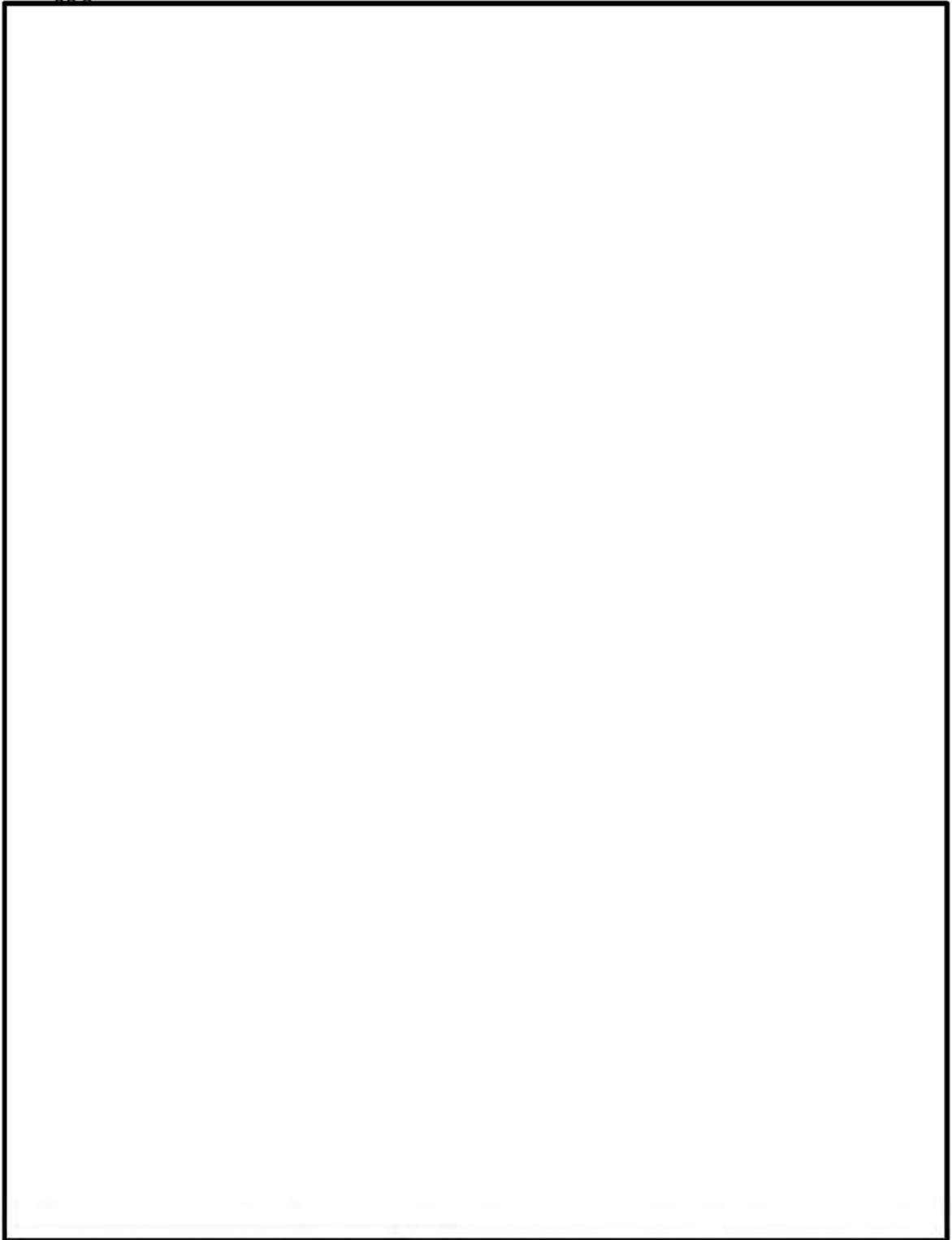
(ロ)-第 A.3 図 ステンレス鋼 () の温度に対する機械的性質の変化(1/2) ^{1), 3)}



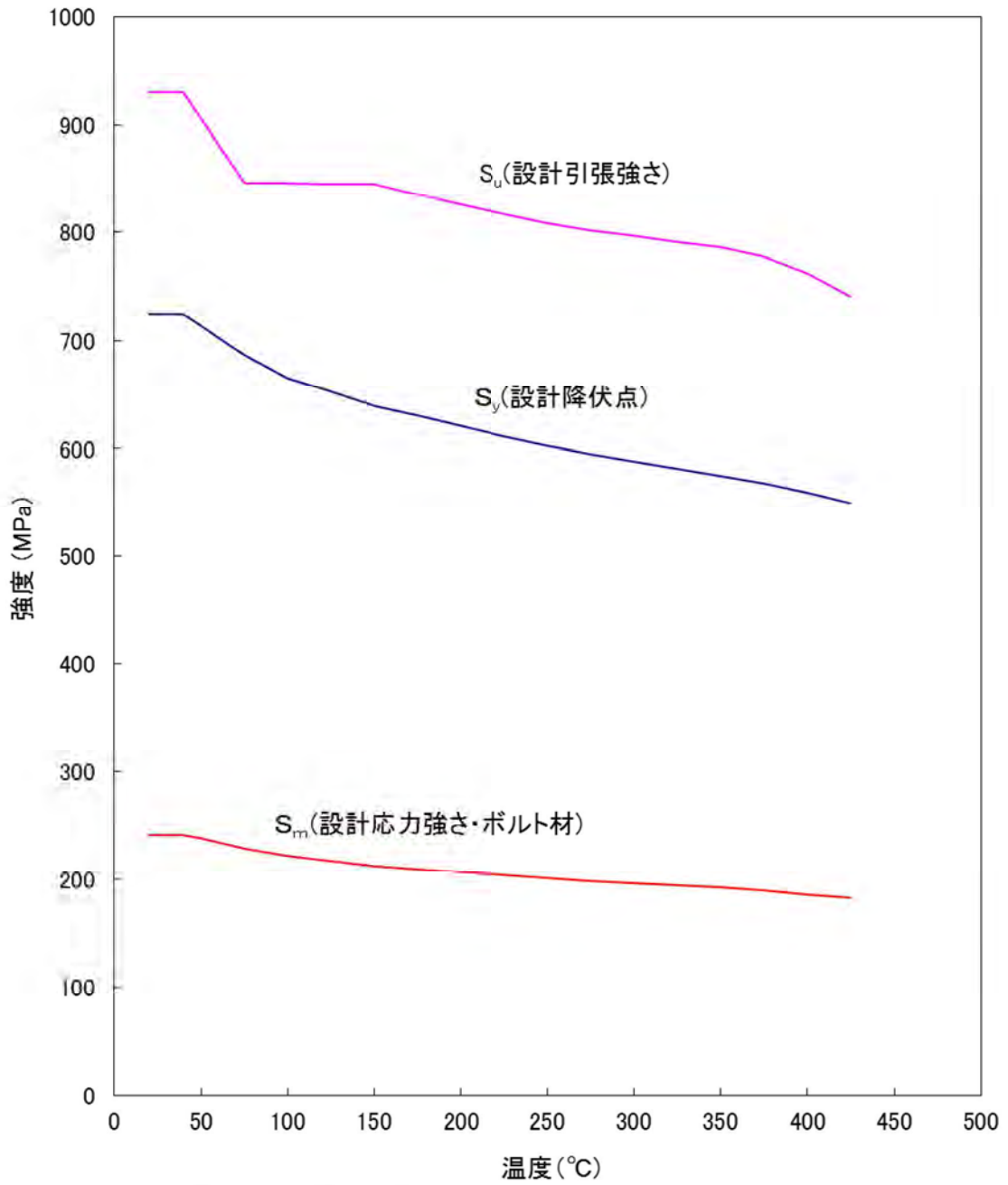
(ロ)-第 A.3 図 ステンレス鋼 () の温度に対する機械的性質の変化(2/2) ^{1), 3)}



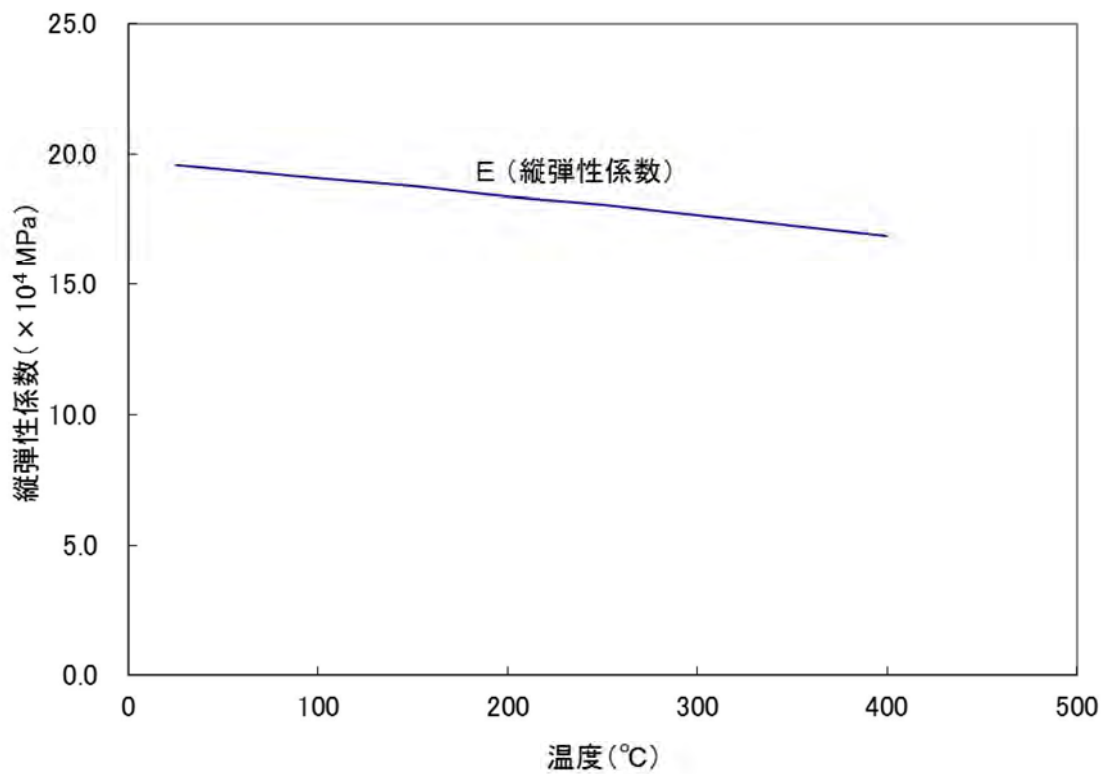
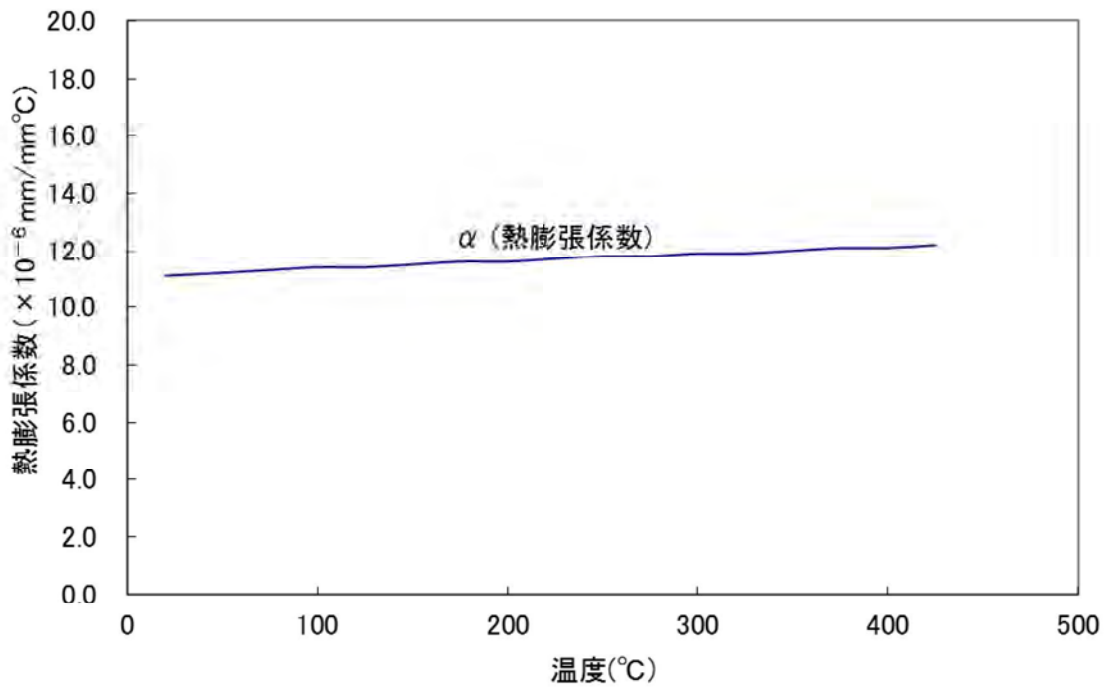
(□)-第 A. 4 図 炭素鋼 (□) の温度に対する機械的性質の変化(1/2) ^{1), 3)}



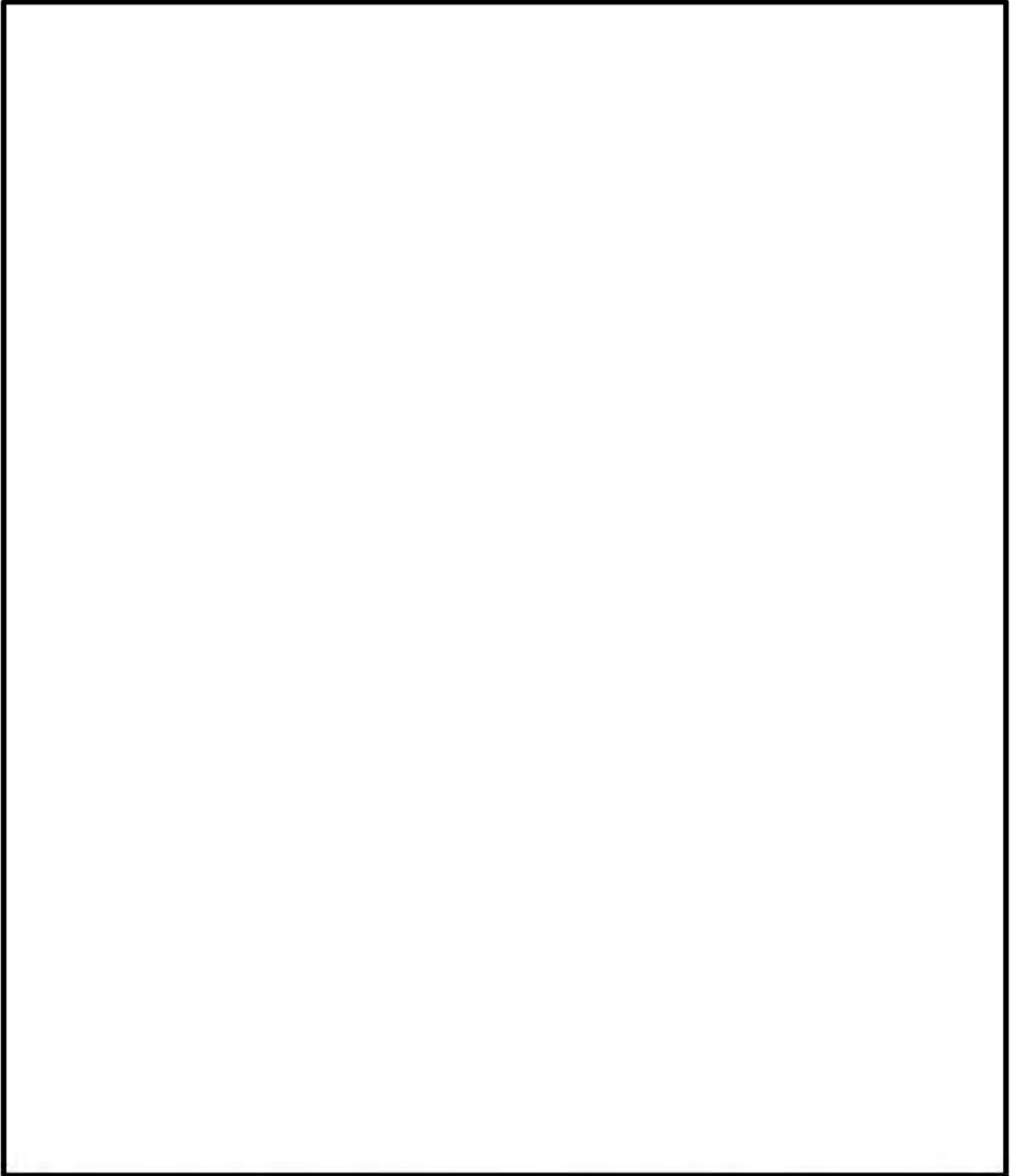
(B)-第 A.4 図 炭素鋼 () の温度に対する機械的性質の変化(2/2) ^{1), 3)}



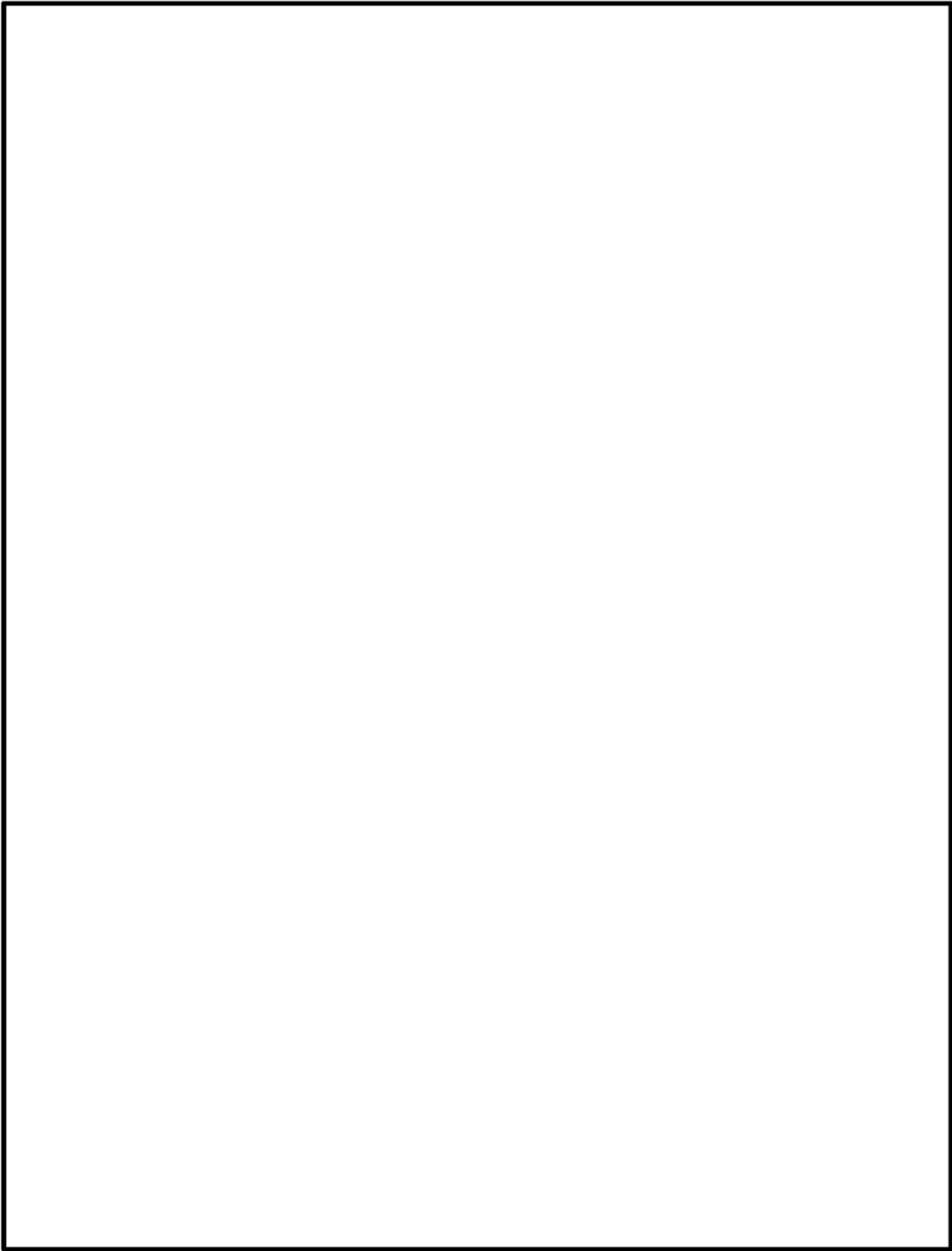
(□)-第 A. 5 図 析出硬化系ステンレス鋼 (SUS630-H1150) の
温度に対する機械的性質の変化(1/2) ^{1), 3)}



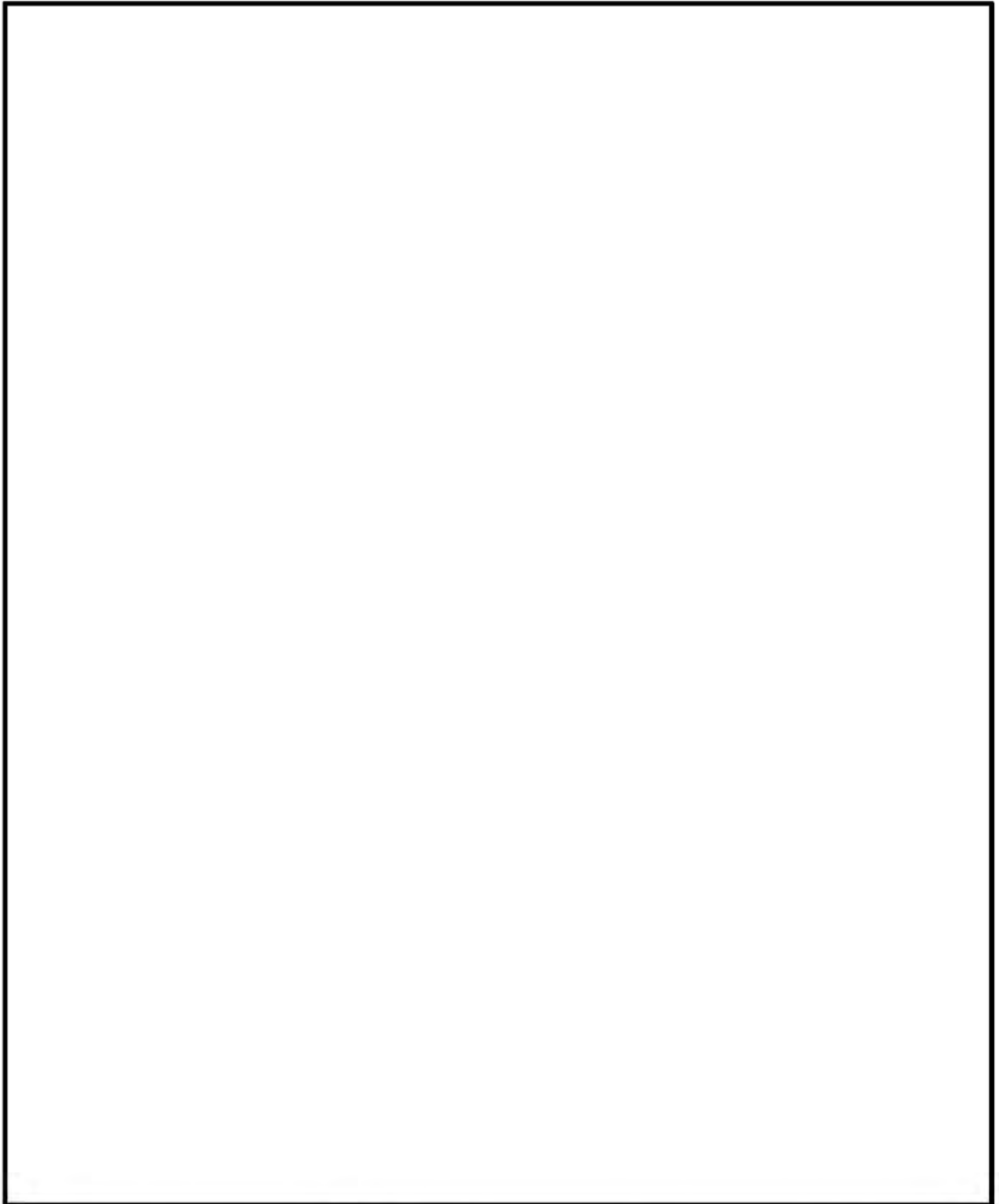
(ロ)-第 A. 5 図 析出硬化系ステンレス鋼 (SUS630-H1150) の
温度に対する機械的性質の変化(2/2) ^{1), 3)}



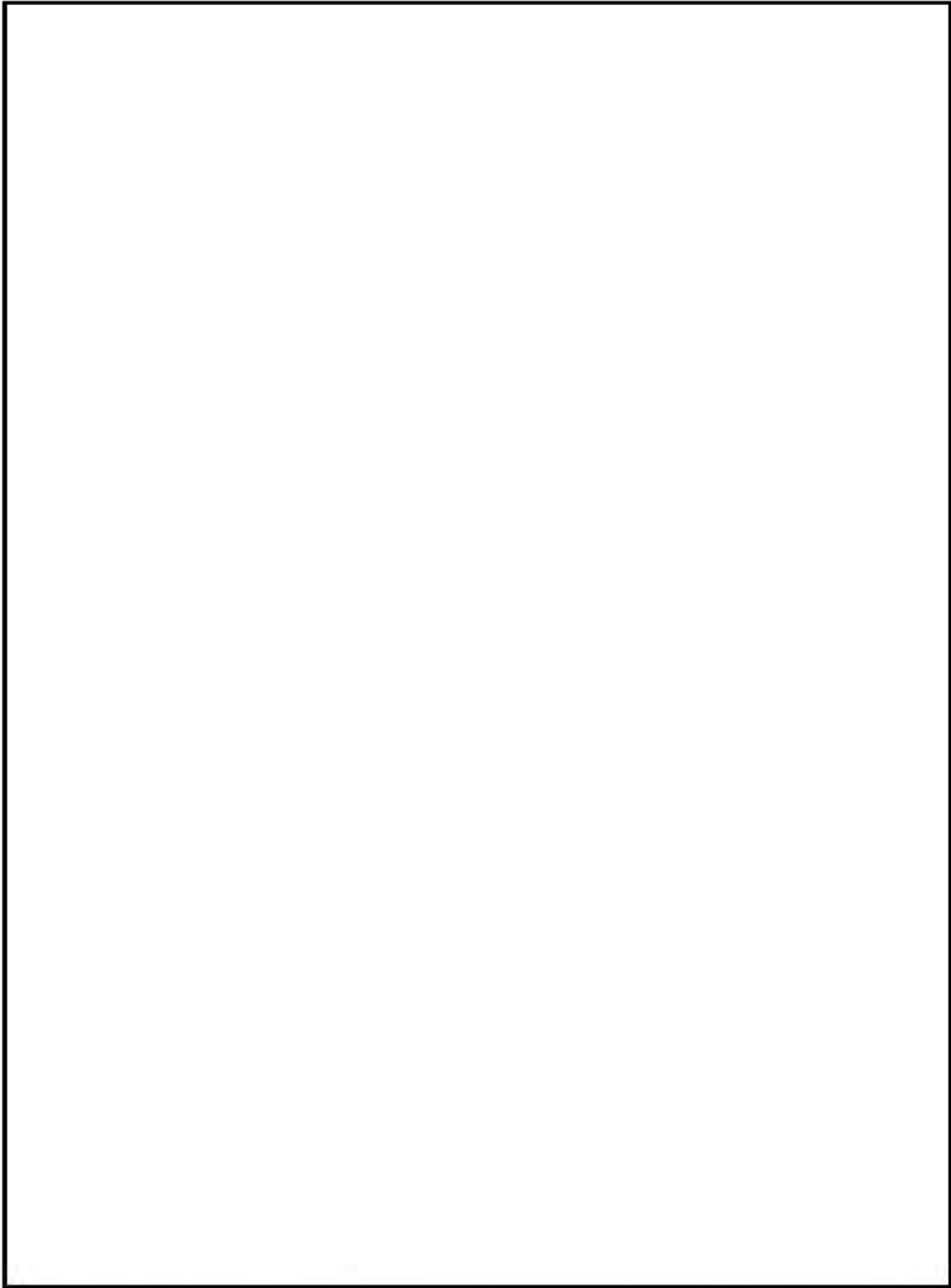
(□)-第 A. 6 図 ニッケルクロムモリブデン鋼 (□)
の温度に対する機械的性質の変化(1/2) ^{1), 3)}



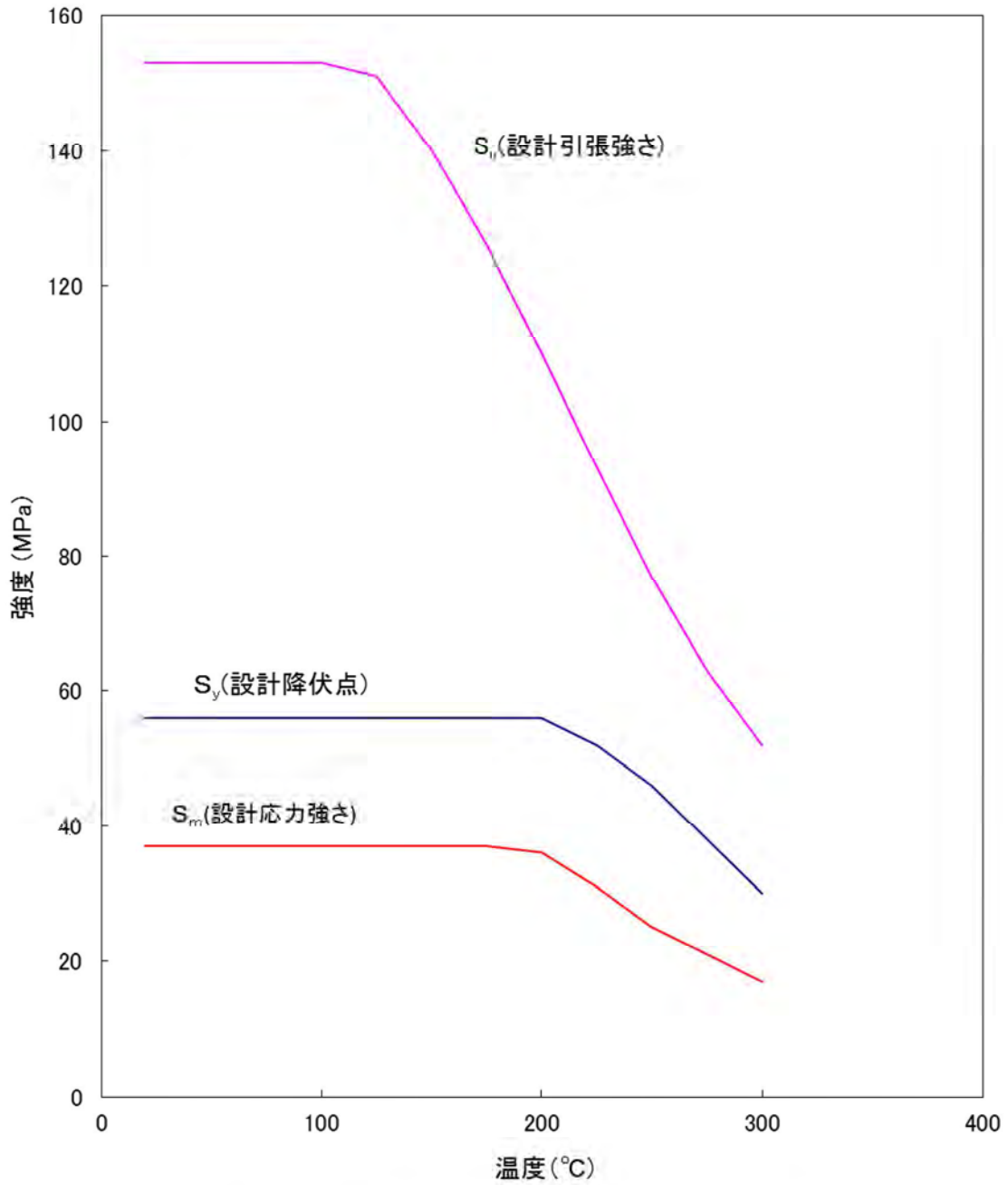
(□)-第 A.6 図 ニッケルクロムモリブデン鋼 (□) の
温度に対する機械的性質の変化(2/2) ^{1), 3)}



(□)-第 A. 7 図 炭素鋼 (□) の温度に対する機械的性質の変化(1/2) ^{1), 3)}

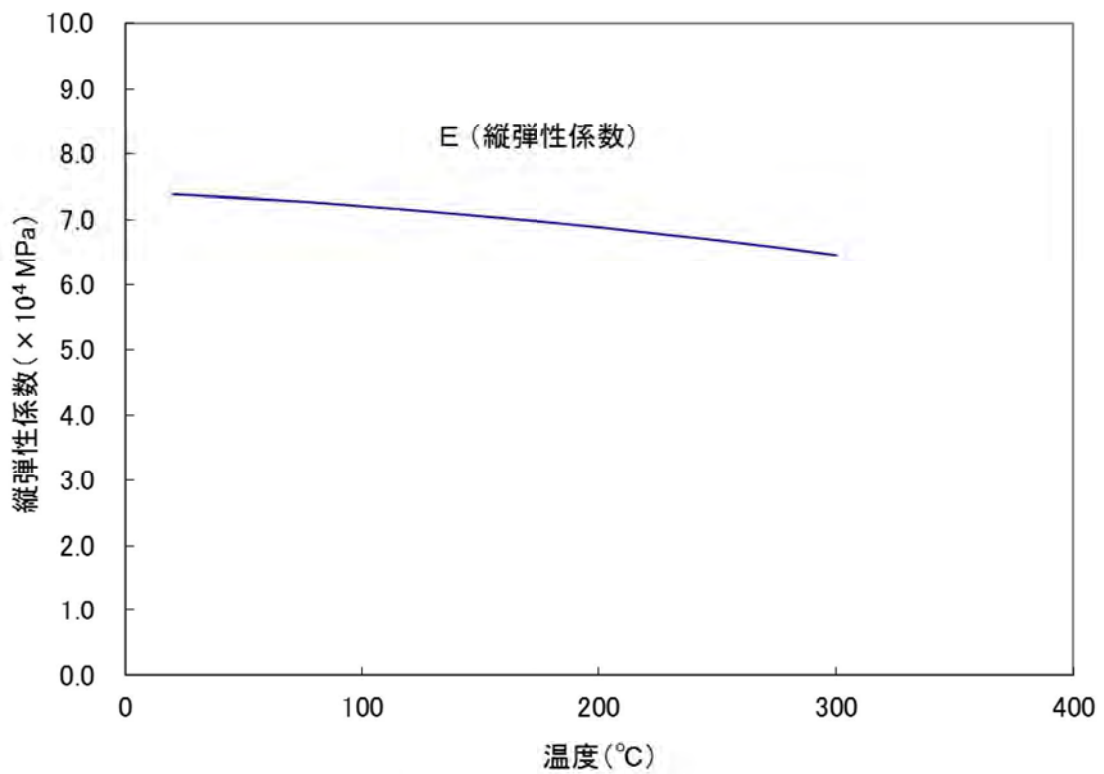
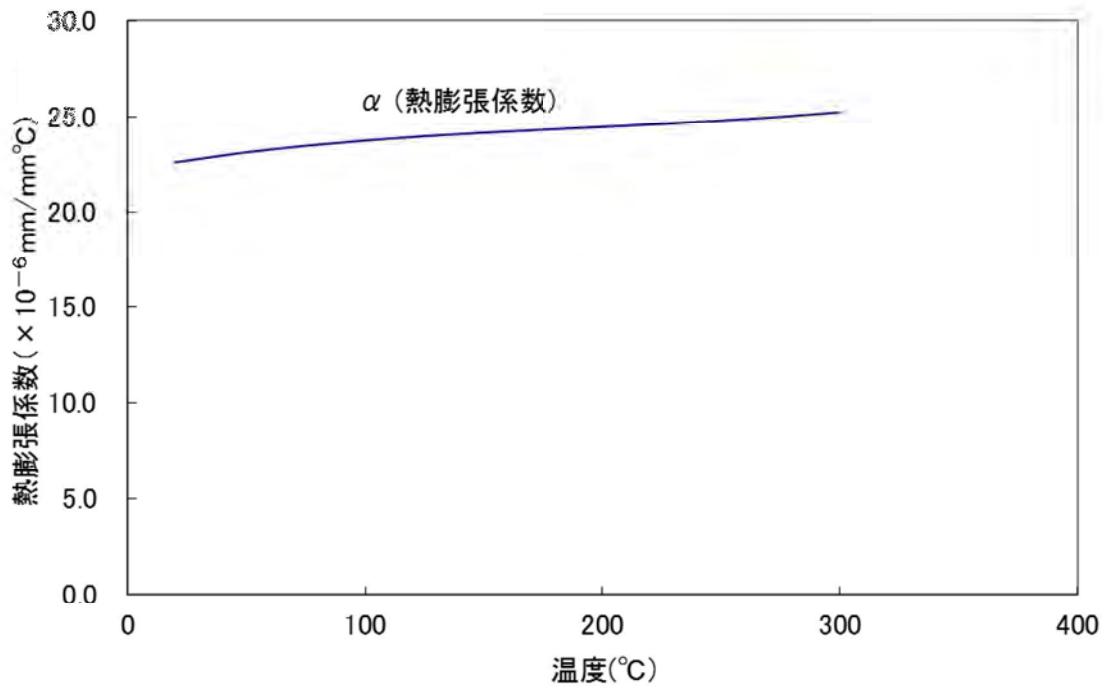


(□)-第 A.7 図 炭素鋼 (□) の温度に対する機械的性質の変化(2/2) ^{1), 3)}



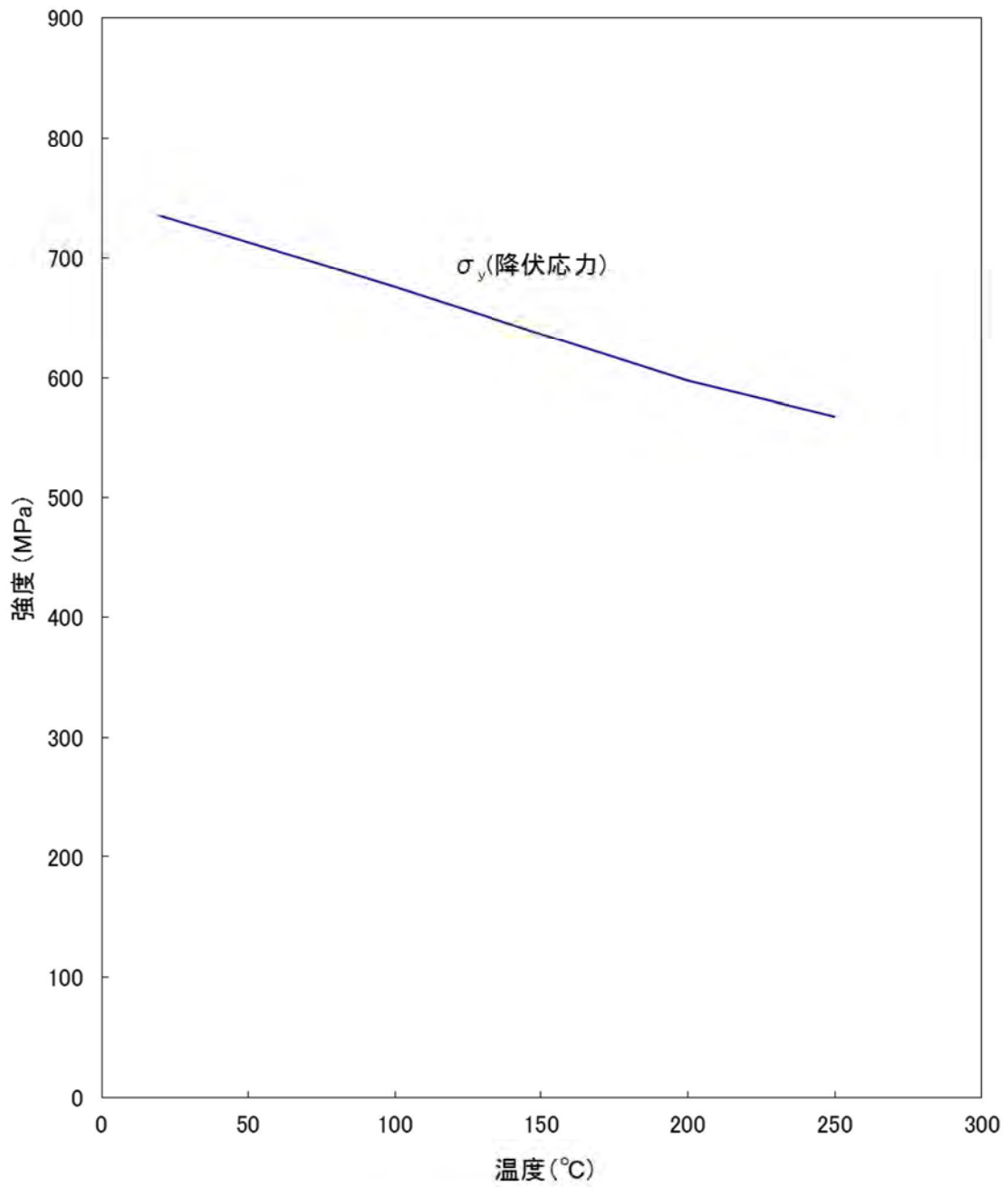
(ロ)-第 A. 8 図 アルミニウム合金 (MB-A3004-H112) の
 温度に対する機械的性質の変化(1/2) (注1)

(注1) アルミニウム合金の機械的性質の詳細については A. 10. 4 を参照。



(ロ)-第 A. 8 図 アルミニウム合金 (MB-A3004-H112) の
 温度に対する機械的性質の変化(2/2) (注1)

(注1)アルミニウム合金の機械的性質の詳細については付属書類 A. 10. 4 を参照。



(ロ)-第 A.9 図 ジルカロイ-4 の温度に対する機械的性質の変化⁴⁾

A.4 輸送物の要件

A.4.1 化学的及び電氣的反応

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、輸送容器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。


レジンは、一次蓋及び蓋部中性子遮蔽材カバー、底板及び底部中性子遮蔽材カバー、胴、外筒及び下部端板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氣的に反応することはない。

一次蓋、二次蓋、三次蓋と各蓋ボルト、金属ガスケット及び O リング等の間では、化学的及び電氣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。

伝熱フィンと胴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、化学的及び電氣的な反応による腐食の影響はない。

なお、収納物は胴内でヘリウム雰囲気にあるため収納物に対する化学的影響はない。

(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			
材質	部位	材質	部位
炭素鋼	胴 一次蓋	レジン	中性子遮蔽材
炭素鋼	外筒 蓋部中性子遮蔽材カバー		
ステンレス鋼	底部中性子遮蔽材カバー 下部端板		
析出硬化系 ステンレス鋼	トラニオン		
銅	伝熱フィン		
炭素鋼	胴 一次蓋 二次蓋	ニッケルクロム モリブデン鋼	一次蓋ボルト 二次蓋ボルト 三次蓋ボルト
ステンレス鋼	三次蓋		
ステンレス鋼 (注)	胴 一次蓋 二次蓋	アルミニウム合金 /ニッケル基合金	金属ガスケット
ステンレス鋼	三次蓋	EPDM	Oリング
ステンレス鋼	緩衝体カバープレート		緩衝体内部
炭素鋼	胴	ほう素添加 アルミニウム合金	中性子吸収材
		アルミニウム合金	バスケットプレート バスケットサポート
炭素鋼	胴	析出硬化系 ステンレス鋼	トラニオン
炭素鋼	胴	銅	伝熱フィン
炭素鋼	外筒		

(注) 

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の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。

2. 低温時の強度

構造評価に用いる主要材料は、金属キャスク構造規格¹⁾のじん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。

(ロ)-第 A. 4 表 輸送容器使用材料の-20 °C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
緩衝体カバープレート 緩衝体リブ ベントバルブ及びドレンバルブ バルブカバープレート モニタリングポートカバープレート 底部中性子遮蔽材カバー 下部端板 リリースバルブ リリースバルブカバープレート	ステンレス鋼 ()	-20 °Cにおいて 使用可能	原子力学会標準 AESJ-SC-F006 :2013 ⁵⁾
三次蓋蓋板	ステンレス鋼 ()	-20 °Cにおいて 使用可能	同上
胴 一次蓋蓋板 二次蓋蓋板	炭素鋼 ()	-20 °Cにおいて 使用可能	同上
蓋部中性子遮蔽材カバー 外筒	炭素鋼 ()	-20 °Cにおいて 使用可能	同上
蓋ボルト	ニッケルクロムモリブデン鋼 ()	-20 °Cにおいて 使用可能	同上
伝熱フィン	銅 (C1020)	-20 °Cにおいて 使用可能	同上
中性子吸収材	ほう素添加アルミニウム合金	-20 °Cにおいて 使用可能	メーカー資料 ⁶⁾
バスケットプレート バスケットサポート	アルミニウム合金 (MB-A3004-H112)	-20 °Cにおいて 使用可能	A. 10. 4 参照
トラニオン	析出硬化系ステンレス鋼 (SUS630-H1150)	-20 °Cにおいて 使用可能	材料規格 ³⁾
金属ガスケット	アルミニウム合金/ ニッケル基合金	-20 °Cにおいて き裂、破損なし	メーカー資料 ⁷⁾
中性子遮蔽材	レジン	-20 °Cにおいて き裂、破損なし	原燃輸送株式会社 報告書 ⁸⁾
緩衝体緩衝材	()	-20 °Cにおいて き裂、破損なし ^(注1)	木材工業ハンド ブック ⁹⁾
Oリング	EPDM	-20 °Cにおいて き裂、破損なし	複合材料技術集成 ¹⁰⁾

(注1) 緩衝体緩衝材の () は、-20°Cでは常温時に対して強度が16~29%上昇する。A. 10. 4 に示すように、-20°C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. 19 表及び(ロ)-第 A. 37 表に示す設計加速度に対して最大11%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。

A.4.3 密封装置

輸送容器の二次蓋、二次蓋ボルト、リリースバルブカバープレート及びそのボルトは、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、がされているので不用意に開けられることはない。そのため、リリースバルブカバープレート内部のリリースバルブは誤って操作されることはない。

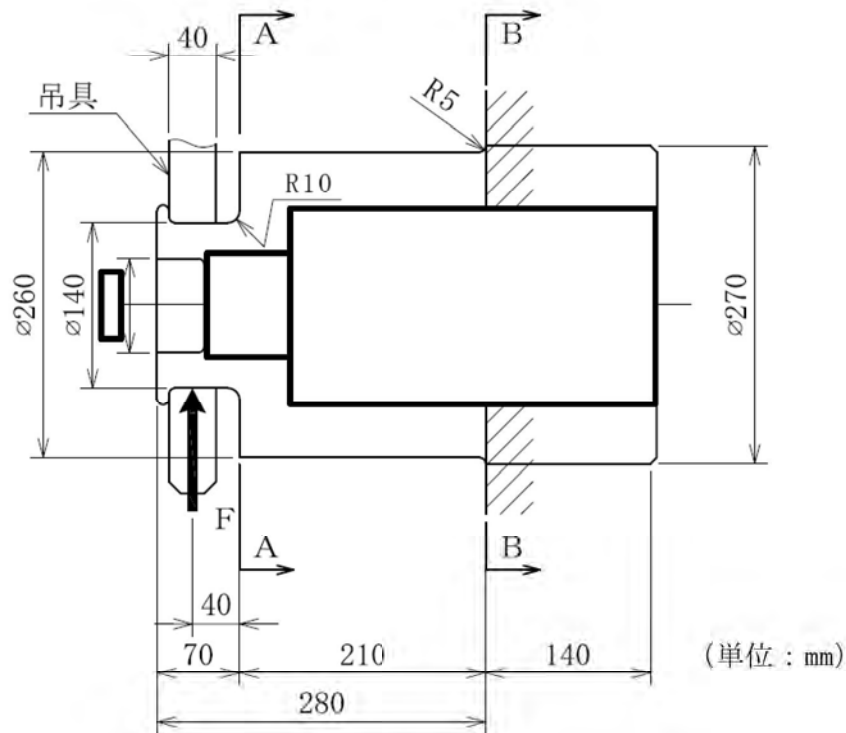
A.4.4 吊上装置

輸送容器の吊上装置は、(イ)-第 C.5 図及び(イ)-第 C.6 図に示す位置に取り付けられているトラニオンであり、その構造は(イ)-第 C.7 図に示すとおりである。トラニオンは、嵌め合いにより容器に取り付けられている。垂直吊りは上部トラニオンにより行われ、90°、270° 側の一対の下部トラニオンは輸送架台上で輸送容器をたて起し又はよこ倒しする際の支点となり、上部トラニオンに作用する以上の荷重が下部トラニオンには作用しない。一方、水平吊りは上部及び下部トラニオンにより行われる。したがって、荷重が最大となる垂直吊りにおける上部トラニオンを対象とし、トラニオン本体及びトラニオン接続部の応力評価を行う。

構造解析では各トラニオンの温度を として評価する。

A.4.4.1 応力評価

トラニオンの解析モデル図を(ロ)-第 A.10 図に示す。



(ロ)-第 A.10 図 上部トラニオン解析モデル図

垂直吊り時（緩衝体なし）の輸送物吊上質量は、119.4 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するので1個のトラニオンに作用する荷重F(N)は、次式により求められる。

$$F = \frac{Wag}{n}$$

ここで、

F : 垂直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 : 容器の質量 (垂直吊り時) (1.194×10^5 kg)

a : 安全係数 (3)

g : 重力加速度 (9.80665 m/s²)

したがって、

$$F = \frac{1.194 \times 10^5 \times 3 \times 9.80665}{2}$$

$$= 1.757 \times 10^6 \text{ N}$$

となる。

1. トラニオン本体

(1) 曲げ応力

(ロ)-第 A.10 図に示すトラニオン本体の断面に発生する曲げ応力 σ_b (MPa) は次式で与えられる。

$$\sigma_b = \frac{MC}{I}$$

$$M = FX$$

ここで、

M : 曲げモーメント (N・mm)

F : 最大荷重 (N)

X : モーメントアーム (mm)

C : 中立軸からの距離 (mm)

I : 断面二次モーメント (mm⁴)

ここに、

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

d_o : トラニオン外径 (mm)

d_i : トラニオン内径 (mm)

(2) せん断応力

(ロ)-第 A. 10 図に示すトラニオン本体の断面に発生するせん断応力 τ (MPa) は次式で与えられる。

$$\tau = \frac{F}{A}$$

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

(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。

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

トラニオン本体の各断面の計算条件と計算結果を (ロ)-第 A. 5 表に示す。

(ロ)-第 A. 5 表 トラニオン本体の応力計算条件及び計算結果

評価位置	最大荷重 : F (N)	モーメント アーム : X (mm)	中立軸から の距離 : C (mm)	トラニオン 外径 : d_o (mm)	トラニオン 内径 : d_i (mm)
A-A 断面	1.757×10^6	40	70	140	<input type="text"/> (注)
B-B 断面	1.757×10^6	250	130	260	<input type="text"/>

評価位置	曲げ応力 : σ_b (MPa)	せん断応力 : τ (MPa)	応力強さ : S (MPa)	基準値 : S_y (MPa)	余裕率 (-)
A-A 断面	<input type="text"/>	<input type="text"/>	449	653	0.45
B-B 断面	<input type="text"/>	<input type="text"/>	304	653	1.14

(注) A-A 断面は中実であるが、近傍では中空となっているため保守的に近傍と同じ内径をもつ中空として評価。

2. トラニオン接続部

(1) 吊上げ荷重による支圧応力（一次応力）

(v)-第 A.11 図に吊上げ時の上部トラニオンに作用する荷重の関係を示す。(r)-第 A.11 図に示す各荷重は以下の関係がある。

① Y 軸方向の力のつり合い

$$R_1 = F + R_2$$

ここで、

F : 垂直吊り時の上部トラニオン 1 個に作用する荷重 (N)

R₁ : 上部トラニオンに作用する反力 (N)

R₂ : 上部トラニオンに作用する反力 (N)

② 0 点回りのモーメントのつり合い

$$F \cdot L_1 - R_2 \cdot L_2 - (f_1 + f_2) \cdot d/2 = 0$$

ここで、

f₁ : 上部トラニオンに作用する摩擦力 (N)

f₂ : 上部トラニオンに作用する摩擦力 (N)

L₁ : 0 点から荷重作用点までの距離 (mm)

L₂ : 0 点から反力 R₂ の作用点までの距離 (mm)

d : 上部トラニオン接続部の外径 (mm)

③ 摩擦力と垂直抗力の関係

$$f_1 = \mu R_1, \quad f_2 = \mu R_2$$

ここで、

μ : 摩擦係数 (—)

①、②及び③の関係より荷重 F 作用時の反力 R₁ 及び R₂ は次式で与えられる。

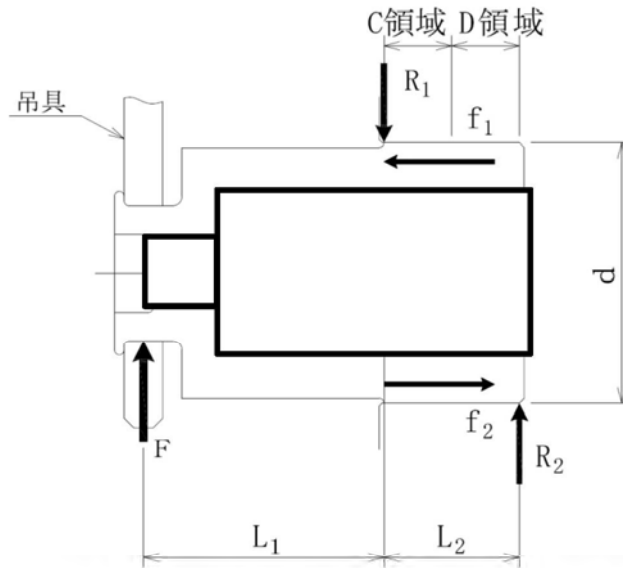
$$R_1 = \frac{FL_1 + \mu F(d/2) + FL_2}{\mu d + L_2}$$

$$R_2 = \frac{FL_1 - \mu F(d/2)}{\mu d + L_2}$$

吊上げ荷重による支圧応力 σ_{P11} (MPa)、σ_{P12} (MPa) は次式で与えられる。

$$\sigma_{P11} = R_1 / (d \cdot L_2 / 2)$$

$$\sigma_{P12} = R_2 / (d \cdot L_2 / 2)$$



(ロ)-第 A. 11 図 上部トラニオン解析モデル図

(2) しまり嵌め荷重による支圧応力 (二次応力)

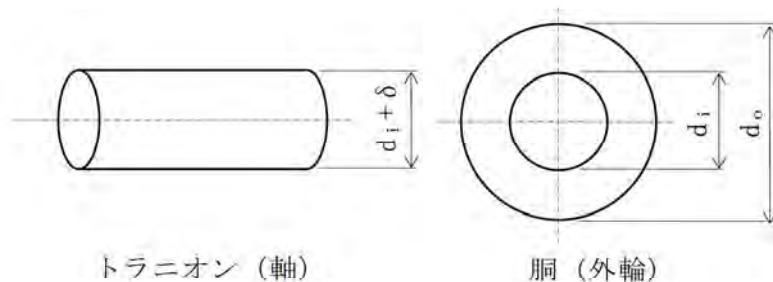
(ロ)-第 A. 12 図にしまり嵌め荷重による支圧応力の解析モデルを示す。

しまり嵌め荷重による支圧応力は次式¹¹⁾により与えられる。

$$\sigma_{p2} = \frac{\alpha}{\left(\frac{1-\nu}{E} + \frac{1+\nu}{E'}\right) + \frac{2}{E'} \frac{d_i^2}{d_o^2 - d_i^2}}$$

ここで、

- ν : ポアソン比 (-)
- α : しまり嵌め比 (δ / d_i)
- δ : 胴と上部トラニオンの締め代 (直径差)
- d_i : 上部トラニオン接続部の外径 (mm)
- d_o : 上部トラニオン接続部の外輪外径 (mm)
- E : 上部トラニオンの縦弾性係数 (MPa)
- E' : 胴の縦弾性係数 (MPa)



トラニオン (軸)

胴 (外輪)

(ロ)-第 A. 12 図 しまり嵌め荷重による支圧応力の解析モデル

(3) 支圧応力（一次＋二次）応力

支圧応力 σ_P (MPa) は次式で与えられる。

$$\sigma_P = \text{MAX}[\sigma_{P11}, \sigma_{P12}] + \sigma_{P2}$$

支圧応力の計算条件と計算結果を(□)-第 A.6 表に示す。(□)-第 A.6 表より、上部トラニオン接続部に発生する応力は評価基準値を満たす。

(ロ)-第 A.6 表 上部トラニオン接続部の応力計算条件及び計算結果

評価位置	上部トラニオンに作用する荷重 : F (N)	0点から荷重作用点までの距離 : L ₁ (mm)	0点から反力 R ₂ の作用点までの距離 : L ₂ (mm)	上部トラニオン接続部の外径 : d (mm)	摩擦係数 : μ (-) ¹⁵⁾
C領域	1.757×10 ⁶	250	140	270	0.35
D領域	1.757×10 ⁶	250	140	270	0.35

評価位置	上部トラニオンに作用する反力 : R ₁ 又は R ₂ (N)	吊上げ荷重による支圧応力(一次応力) : σ _{P11} 又は σ _{P12} (MPa)	評価基準値 ^(注1) : 1.25S _y (MPa)	余裕率
C領域	3.277×10 ⁶	174	231	0.32
D領域	1.520×10 ⁶	81		1.85

(注1) 胴の方が許容応力は小さいため、胴の評価基準値を示す。

評価位置	ポアソン比 : ν (-)	胴と上部トラニオンの縮め代 : δ ₀ (mm)	上部トラニオン接続部の外径 : d _i (mm)	上部トラニオン接続部の外輪外径 : d _o (mm)
C及びD領域	0.3		270	

(注2) d_oの大きい方がしまり嵌めによる応力を保守的に評価できるため、キャスク外径より大きい d_iの とした。

評価位置	上部トラニオンの縦弾性係数 : E (MPa)	胴の縦弾性係数 : E' (MPa)	しまり嵌め荷重による支圧応力(二次応力) : σ _{P2} (MPa)
C及びD領域	1.90×10 ⁵		45

評価位置	支圧応力(一次+二次応力)		余裕率(-)
	σ _P (MPa)	評価基準値 ^(注3) : 1.5×1.25S _y (MPa)	
C領域	219	346	0.57
D領域	126		1.74

(注3) 胴の方が許容応力は小さいため、胴の評価基準値を示す。

A.4.4.2 上部トラニオンの疲労評価

上部トラニオンは垂直吊り時に荷重が作用する。

上部トラニオン段付部及び接続部の応力強さについて、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評価を行う。

1. 繰返しピーク応力強さ

上部トラニオン段付部及び接続部の繰返しピーク応力強さ S_a (MPa) はそれぞれ次式で求める。

① 上部トラニオン段付部

$$S_{a1} = \frac{SK_t K_r \frac{E_0}{E_t}}{2}$$

② 上部トラニオン接続部

$$S_{a2} = \frac{SK_t \frac{E_0}{E_t}}{2}$$

ここで、

S_{a1} : 上部トラニオン段付部の繰返しピーク応力強さ (MPa)

S_{a2} : 上部トラニオン接続部の繰返しピーク応力強さ (MPa)

S : 応力強さ (垂直吊り時) (MPa)

K_t : 応力集中係数 (-)

K_r : 表面粗さ係数 (-)

E_0 : 設計疲労線図^{1) 12)}の基本縦弾性係数

E_t : 材料の使用温度における縦弾性係数 (MPa)

上部トラニオン段付部の応力集中係数は応力集中係数線図¹³⁾より、表面粗さ係数は表面粗さ係数線図¹²⁾より、(ロ)-第A.7表に示すように与えられる。また、上部トラニオン接続部の応力集中係数は金属キャスク構造規格¹⁾より4.0とする。

(ロ)-第A.7表 上部トラニオン段付部の応力集中係数

評価位置	丸み半径 :r (mm)	小径部 :d (mm)	大径部 :D (mm)	2r/d	D/d	応力集中 係数 :K _t (-)	表面粗 さ係数 :K _r (-)
A-A 断面	10	140	260	0.14	1.86	2.0	1.24
B-B 断面	5	260	270	0.04	1.04	2.3	1.24

(1) 上部トラニオンに作用する荷重

上部トラニオンに作用する荷重 F(N)は、疲労評価については実際に作用する荷重をベースとし、クレーン構造規格より想定される負荷係数¹⁴⁾を用いて、次式で求める。

$$F = \frac{Wag}{n}$$

ここで、

W : 容器の垂直吊り時の質量 (1.194×10⁵ kg)

n : 上部トラニオンの数 (2)

a : 負荷係数 (1.3)

g : 重力加速度 (9.80665 m/s²)

したがって、

$$F = 7.611 \times 10^5 \text{ N}$$

(2) 繰返しピーク応力強さ

繰返しピーク応力強さ S_a(MPa)は、A.4.4.1と同様に求めた応力強さ S を用いて求める。

上部トラニオン段付部の各断面及び上部トラニオン接続部の計算条件及び評価結果を(ロ)-第A.8表に示す。

(ロ)-第A.8表 トラニオンの繰返しピーク応力計算条件及び計算結果

評価位置	最大荷重 :F(N)	モーメントアーム :X (mm)	中立軸からの距離 :C(mm)	トラニオン外径 :d _o (mm)	トラニオン内径 :d _i (mm)	応力強さ :S (MPa)	基本縦弾性係数 :E _o (MPa)	縦弾性係数 :E _t (MPa)	繰返しピーク応力強さ :S _a (MPa)
A-A断面	7.611×10 ⁵	40	70	140		195	2.00×10 ⁵	1.90×10 ⁵	255
B-B断面	7.611×10 ⁵	250	130	260		132	2.00×10 ⁵	1.90×10 ⁵	199

(注1)A-A断面は中実であるが、近傍では中空となっているため保守的に近傍と同じ内径をもつ中空として評価。

評価位置	最大荷重 :F(N)	応力強さ :S (MPa)	応力集中係数 :K _t (-)	基本縦弾性係数 :E _o (MPa)	縦弾性係数 :E _t (MPa)	繰返しピーク応力強さ :S _a (MPa)
接続部 (トラニオン側)	7.611×10 ⁵	121	4.0	2.00×10 ⁵	1.90×10 ⁵	316
接続部 (胴側)	7.611×10 ⁵	121	4.0	2.07×10 ⁵		255

2. 許容繰返し回数

設計疲労線図¹⁾²⁾より許容繰返し回数 N_a は以下となる。

A-A 断面 : 約 6.8×10^6 回

B-B 断面 : 約 1.0×10^7 回

トラニオン接続部 (トラニオン側) : 約 4.2×10^5 回以上

トラニオン接続部 (胴側) : 約 1.0×10^4 回以上

3. 使用計画回数

本吊上装置の使用計画回数 N_c は次のようになる。

輸送回数 : 10 回

輸送時吊上回数 : 20 回 (輸送ごと)

なお、上記の輸送時吊上回数は、(ハ)章「輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱い方法」の「A. 核燃料輸送物の取扱い方法」に示す標準的な取扱いとして想定される吊上回数であり、燃料装荷、乾式貯蔵施設での貯蔵、再処理工場への輸送における取扱いを含む。

したがって、

$$N_c = 10 \times 20 = 200 \text{ 回}$$

以上より、使用計画回数は許容繰返し回数を十分下回っており、トラニオンの疲労強度は十分である。

A.4.5 固縛装置

本輸送物は、(イ)-第 C.3 図に示すように胴上部及び下部のトラニオンを使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胴上部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 $2 \text{ g}^{1)}$ の加速度が作用し、左右方向に $1 \text{ g}^{1)}$ の加速度が作用する場合を考える。また、下方向は自重を考慮し $3 \text{ g}^{1)}$ の加速度が作用すると考える。

1. 胴上部及び下部トラニオンに作用する荷重

胴上部及び下部トラニオンに作用する荷重は、(□)-第 A. 13 図に示す荷重状態図から、次のように与えられる。

$$F_V = \frac{b}{a+b} V$$

$$R_V = \frac{a}{a+b} V$$

$$R_L = H$$

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

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

ここで、

F_V : 胴上部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 : 胴上部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

$$= 1.344 \times 10^5 \times 2 \times 9.80665 = 2.637 \times 10^6 \text{ N (上方向)}$$

$$= 1.344 \times 10^5 \times 3 \times 9.80665 = 3.955 \times 10^6 \text{ N (下方向)}$$

H : 前後方向慣性力

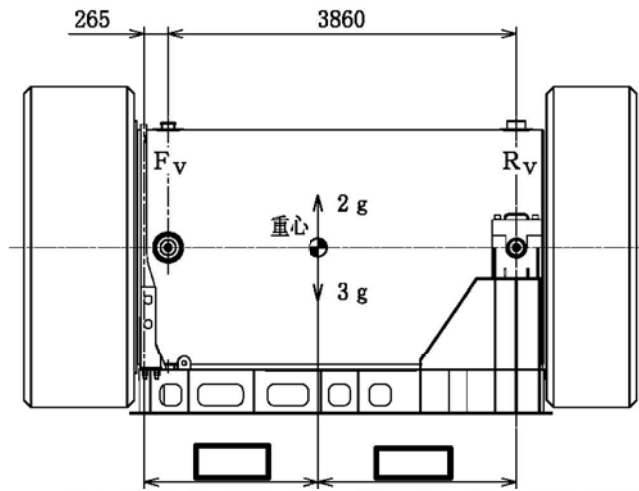
$$= 1.344 \times 10^5 \times 2 \times 9.80665 = 2.637 \times 10^6 \text{ N (上方向)}$$

L : 左右方向慣性力

$$= 1.344 \times 10^5 \times 1 \times 9.80665 = 1.319 \times 10^6 \text{ N}$$

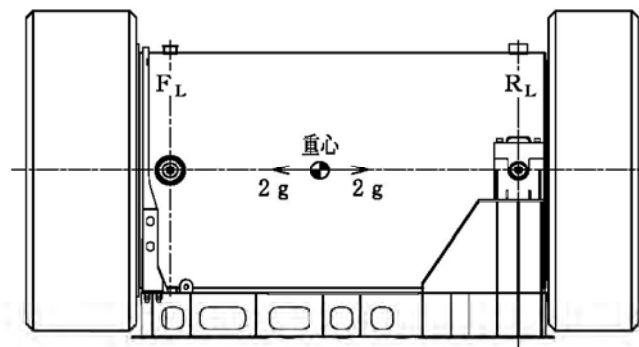
a : 重心より胴上部固縛位置中心までの距離 (mm)

b : 重心より下部トラニオン中心までの距離 (mm)

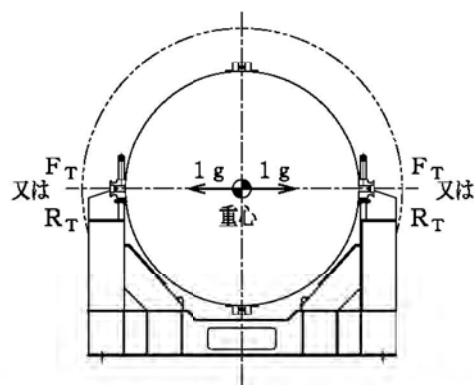


(単位 : mm)

(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. 13 図 各方向に加速度が作用する場合の胴上部及び下部トラニオンに作用する荷重

(ロ)-第 A.9 表に以上の式を用いて求めた各方向の荷重を示す。輸送固縛時には上部トラニオンに荷重は作用せず下部トラニオンのみに荷重が作用する。また、胴上部は剛な構造であるので、下部トラニオンを対象としてトラニオン本体及びトラニオン接続部の応力評価を行う。なお、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。

(ロ)-第 A.9 表 胴上部及び下部トラニオンに作用する荷重

(単位： N)

荷重 ^(注1)	胴 上 部			下部トラニオン		
	F _V	F _L	F _T	R _V	R _L	R _T
加速度方向						
上 (2g)						
下 (3g)						
前後 (2g) ^(注2)		0			2.637 × 10 ⁶	
左右 (1g)						

(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荷重

(注2) 胴上部は前後方向に固定していないため、胴上部に前後方向の荷重は作用しない。

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。

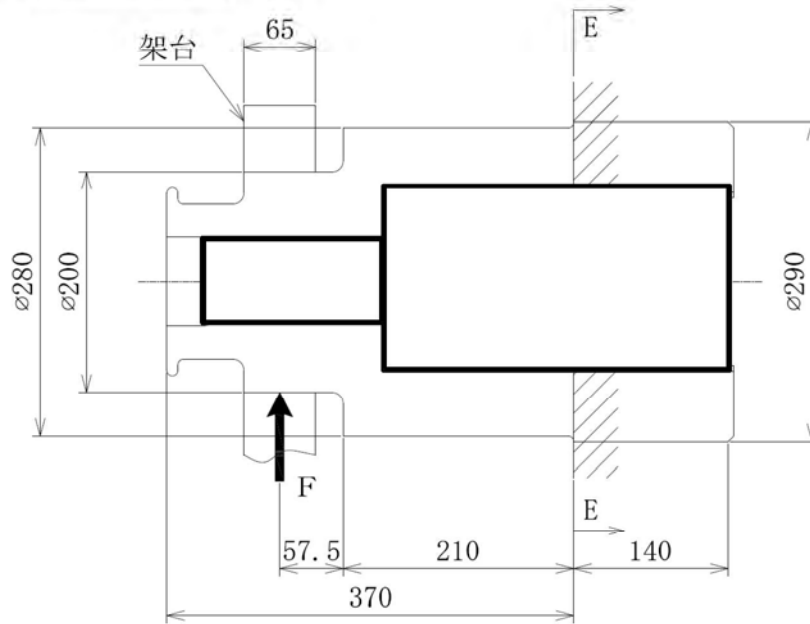
$$F = \frac{\sqrt{R_V^2 + R_L^2}}{n}$$

$$= 1.612 \times 10^6 \text{ N}$$

ここで、

n : 荷重を受けもつトラニオンの数 (2)

トラニオン本体には、(ロ)-第 A. 14 図に示す断面 E-E に最大曲げ応力が生じる。曲げ応力 σ_b (MPa) は、吊上装置に対する強度評価と同様に求められる。計算条件と計算結果を(ロ)-第 A. 10 表に示す。



(ロ)-第 A. 14 図 輸送架台固縛状態解析モデル図

(単位 : mm)

(ロ)-第 A. 10 表 トラニオン本体の応力計算条件及び計算結果

評価位置	最大荷重 : F (N)	モーメント アーム : X (mm)	中立軸から の距離 : C (mm)	トラニオン 外径 : d_o (mm)	トラニオン 内径 : d_i (mm)
E-E 断面	1.612×10^6	267.5	140	280	

評価位置	曲げ応力 : σ_b (MPa)	せん断応力 : τ (MPa)	応力強さ : S (MPa)	基準値 : S_y (MPa)	余裕率 (-)
E-E 断面			232	653	1.81

3. トラニオン接続部

下部トラニオン接続部は、上部トラニオン接続部に対する強度評価と同様に求められる（A.4.4.1の上部トラニオン接続部の評価方法について「上部トラニオン」を「下部トラニオン」に読み替える）。計算条件と計算結果を(ロ)-第A.11表に示す。(ロ)-第A.11表より、下部トラニオン接続部の本体胴側に発生する応力は基準値を満たす。

(ロ)-第A.11表 下部トラニオン接続部の応力計算条件及び計算結果

評価位置	下部トラニオンに作用する荷重 : F (N)	0点から荷重作用点までの距離 : L ₁ (mm)	0点から反力R ₂ の作用点までの距離 : L ₂ (mm)	下部トラニオン接続部の外径 : d (mm)	摩擦係数 : μ (-) ¹⁵⁾
C領域	1.612×10 ⁶	267.5	140	290	0.35
D領域	1.612×10 ⁶	267.5	140	290	0.35

評価位置	下部トラニオンに作用する反力 : R ₁ 又は R ₂ (N)	吊上げ荷重による支圧応力(一次応力) : σ _{P11} 又は σ _{P12} (MPa)	評価基準値(注1) : 1.25S _y (MPa)	余裕率
C領域	3.059×10 ⁶	151	231	0.52
D領域	1.447×10 ⁶	72		2.20

(注1) 胴の方が許容応力は小さいため、胴の評価基準値を示す。

評価位置	ポアソン比 : ν (-)	胴と下部トラニオンの締め代 : δ ₀ (mm)	下部トラニオン接続部の外径 : d _i (mm)	下部トラニオン接続部の外輪外径 : d _o (mm)
C及びD領域	0.3		290	

(注2) d_oの大きい方がしまり嵌めによる応力を保守的に評価できるため、キャスク外径より大きいd_iの とした。

評価位置	下部トラニオンの縦弾性係数 : E (MPa)	胴の縦弾性係数 : E' (MPa)	しまり嵌め荷重による支圧応力(二次応力) : σ _{P2} (MPa)
C及びD領域	1.90×10 ⁵		44

評価位置	支圧応力(一次+二次応力)		余裕率(-)
	σ _P (MPa)	評価基準値(注3) : 1.5×1.25S _y (MPa)	
C領域	195	346	0.77
D領域	116		1.98

(注3) 胴の方が許容応力は小さいため、胴の評価基準値を示す。

A.4.6 圧力

本輸送物の一般の試験条件での胴内の最大内圧は 0.0780 MPa であり、外気圧が 60 kPa (0.060 MPa) まで降下した場合には、差圧は 0.0180 MPa G となる。また、胴、二次蓋と三次蓋に囲まれた空間（以下、二三次蓋間という。）の最大内圧は 0.253 MPa であり、外気圧が 60 kPa (0.060 MPa) まで降下した場合には、差圧は 0.193 MPa G となる。

後述するように、一般の試験条件の熱的試験において、胴内と外気圧との差圧を 0.101325 MPa G、二三次蓋間の最大内圧と外気圧との差圧を 0.19 MPa G とした条件下で構造健全性を確認しており、十分な裕度がある。したがって、上記の圧力降下が生じた場合にも輸送容器の健全性を損なうことはない。

A.4.7 振動

本輸送物は(イ)章 C の 1. で述べたように固縛装置によって 2 ヶ所で輸送架台に固定されている（(イ)-第 C.3 図参照）。本輸送物を(ロ)-第 A.15 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。¹⁵⁾

$$f_n = \frac{\lambda^2}{2\pi \ell^2} \sqrt{\frac{EIg}{w}}$$

ここで、

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 : 単位長さ当たりの荷重 (N/mm)

$$w = \frac{W \times 9.80665}{L}$$

W : 輸送物質量 (kg)

L : 容器本体全長 (mm)

また、断面二次モーメントとしては胴のみを考えると、

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

ただし、

d_2 : 胴外径 (mm)

d_1 : 胴内径 (mm)

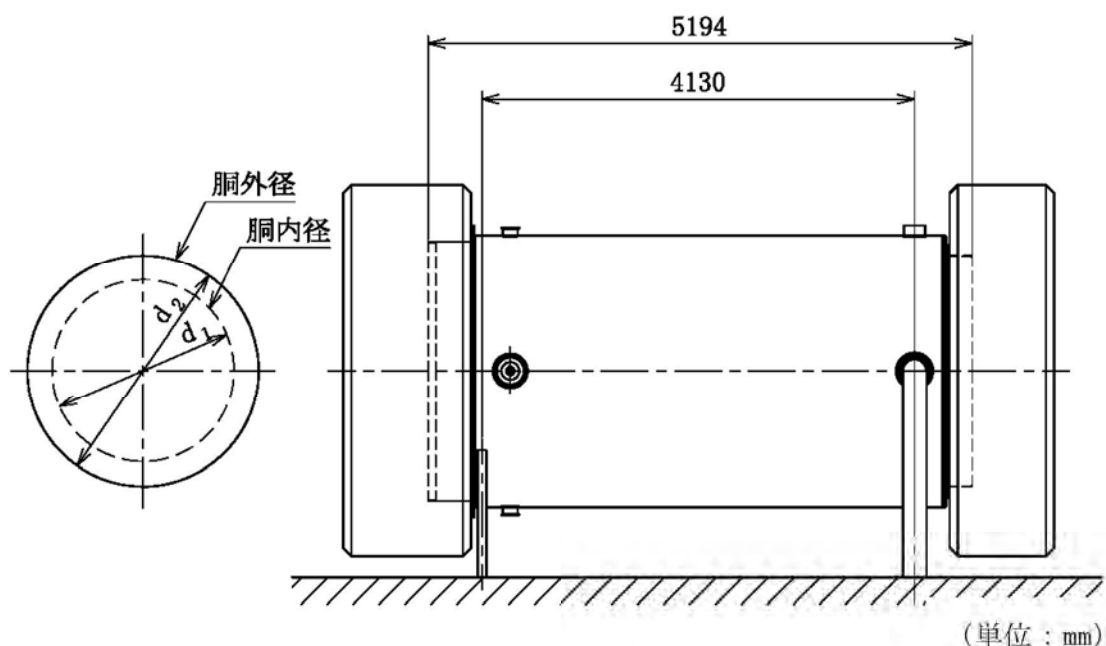
ここで、最も振動数の低い一次の固有振動数を計算する。 $\lambda = \pi$ （両端支持の一次固有振動に対する定数）として、計算条件と計算結果を(ロ)-第 A. 12 表に示す。一方、輸送中に車両の最大加速度と振動数の関係において、輸送中の振動により輸送物に作用する励振力の振動数域は大部分が 10 Hz 以下であり、十分離れた固有振動数を有しているため、励振力による輸送物の応答増幅の影響はなく、輸送中の振動による荷重は A. 5. 3 の一般の試験条件の 0. 3m 落下事象に包絡されることから、輸送物は予想される振動等によってき裂、破損等の生じるおそれはない。

また三次蓋は振動等により緩まないよう、A. 4. 5 にて考慮した左右方向加速度 1 g と下方向加速度 3 g による三次蓋の慣性力 ($1. 024 \times 10^5$ N) より十分大きい摩擦力 が生じるようにボルトによって強固に締め付けられており、振動等によって緩むことはない。

(ロ)-第 A. 12 表 固有振動数計算条件及び計算結果

項目	無次元定数： λ (-)	縦弾性係数： E (MPa)	胴外径： d_2 (mm)	胴内径： d_1 (mm)	輸送容器 支持間長さ： ℓ (mm)
数値等	π	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	4130

項目	輸送物総質量： W (kg)	重力加速度： g (mm/s^2)	輸送容器本体 全長：L (mm)	固有振動数： f_n (Hz)
数値等	$1. 344 \times 10^5$	$9. 80665 \times 10^3$	5194	215



(ロ)-第 A. 15 図 輸送容器振動解析モデル図

A. 4. 8 輸送物の要件に対する評価結果の要約

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.13表に示す。

(ロ)-第A.13表 輸送物の要件に対する評価結果の要約

解析及びその詳細	解析基準	解析基準値	解析結果等	余裕率等 (MS)
・ 化学的及び電気的反応 化学的反応 電気的反応	反応のないこと 反応のないこと	— —	反応なし 反応なし	基準に合致 基準に合致
・ 低温強度 構成部品の低温特性	-20℃でのき裂、 破損のないこと 低温脆化温度	—	き裂、破損なし	基準に合致
低温時の強度		-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 三次蓋	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				
トラニオン本体	S_y	653 MPa	449 MPa	0.45
トラニオン接続部 (一次応力)	$1.25S_y$	231 MPa	174 MPa	0.32
(一次応力+二次応力)	$1.5 \times 1.25S_y$	346 MPa	219 MPa	0.57
2. 疲労評価				
トラニオン本体	許容繰返し回数以 下であること	許容繰返し回数 6.8×10^6 回	使用計画回数 200 回	基準に合致
トラニオン接続部	許容繰返し回数以 下であること	許容繰返し回数 1.0×10^4 回	使用計画回数 200 回	基準に合致
・ 固縛装置				
トラニオン本体	S_y	653 MPa	232 MPa	1.81
トラニオン接続部 (一次応力)	$1.25S_y$	231 MPa	151 MPa	0.52
(一次応力+二次応力)	$1.5 \times 1.25S_y$	346 MPa	195 MPa	0.77
・ 圧力	密封性	—	良	基準に合致
・ 振動	振動性	固有振動数 (215 Hz) と輸送による振動数 (10 Hz) 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、破損等は生じない。		

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. 温度

一般の試験条件における輸送物各部の温度分布は(ロ)章 B の熱解析から求まる。各部位の最高温度と解析基準値を定める温度を(ロ)-第 A.14 表に示す。

(ロ)-第 A.14 表 一般の試験条件における最高温度の要約

(単位：℃)

部位	熱解析結果	解析基準値設定温度
胴 (本体部)	121	
胴 (フランジ部)	111	
胴 (底板)	133	
一次蓋	110	
二次蓋	105	
三次蓋	103	
一次蓋ボルト	109	
二次蓋ボルト	105	
三次蓋ボルト	103	
外筒	114	
下部端板	115	
蓋部中性子遮蔽材カバー	108	
底部中性子遮蔽材カバー	117	
トラニオン	118	
バスケット	177	
燃料集合体	206	

2. 圧力

(ロ)章 B の熱解析から求まる一般の試験条件における輸送容器各部の圧力及び構造解析で使用する圧力を(ロ)-第 A. 15 表に示す。

(ロ)-第 A. 15 表 一般の試験条件の熱解析の要約と評価

項目	熱解析結果	構造解析使用圧力	圧力設定方法
胴内圧	0.0780 MPa (-0.0233 MPa G)	0 MPa (-0.101325 MPa G)	内外圧力差が最大となるように最低圧(真空)を仮定
一二次蓋間 ^(注1) 圧力	0.390 MPa (0.289 MPa G)	0.411325 MPa (0.31 MPa G)	内外圧力差が最大となるように熱解析に余裕を取った値を使用
二三蓋間圧力	0.253 MPa (0.152 MPa G)	0.291325 MPa (0.19 MPa G)	三次蓋に対して安全側になるように熱解析結果に余裕を取った値を使用

(注1) 胴、一次蓋及び二次蓋に囲まれた空間をいう。

なお、蓋部中性子遮蔽材充填空間は、当該空間の水の存在による圧力上昇を考慮して、 MPa G (MPa) とする。この圧力は製造時の周囲温度が仮に-20℃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最大 11%増加する可能性がある。この圧力上昇による蓋部中性子遮蔽材カバーの応力増加は 1MPa であり、A. 5. 3 の一般の試験条件の 0. 3m 落下事象において解析基準値に対して 1MPa 以上の余裕を有していることを確認している。

側部中性子遮蔽材充填空間は、外筒部を MPa G (MPa)、端板部を MPa G (MPa)、底部中性子遮蔽材充填空間は、 MPa G (MPa) とする。側部中性子遮蔽材充填空間及び底部中性子遮蔽材充填空間の圧力は輸送前の保守により圧力が開放される。この圧力は、圧力開放時の周囲温度が-20℃であった場合、温度上昇により圧力開放時の周囲温度が 38℃であった場合に比べて側部中性子遮蔽材空間の外筒部で最大 29%、端板部で最大 67%、底部中性子遮蔽材空間で最大 20%増加する可能性がある。この圧力上昇による応力増加は外筒で 10MPa、下部端板で 8MPa、底部中性子遮蔽材カバーで 6MPa であり、A. 5. 3 の一般の試験条件の 0. 3m 落下事象において解析基準値に対して外筒で 10MPa、下部端板で 8MPa、底部中性子遮蔽材カバーで 6MPa 以上の余裕を有していることを確認している。

A. 5. 1. 2 熱膨張

輸送容器には熱膨張により応力が発生する。発生応力の計算を A. 5. 1. 3 に示す。

なお、本輸送物は周囲温度 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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胴においても隙間が \square 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。

A. 5. 1. 3 応力計算

1. 容器本体

本項では、一般の試験条件におけるキャスク本体（本体（胴、外筒及び底部中性子遮蔽材カバー）、一次蓋（蓋板及び蓋部中性子遮蔽材カバー）、二次蓋、三次蓋及び蓋ボルトからなる構成体をいう。）各部の応力計算を行う。B. 4. 2 に示す温度分布及び輸送容器に作用する圧力を荷重条件とし、解析は有限要素法による ABAQUS コードを用いて行う。

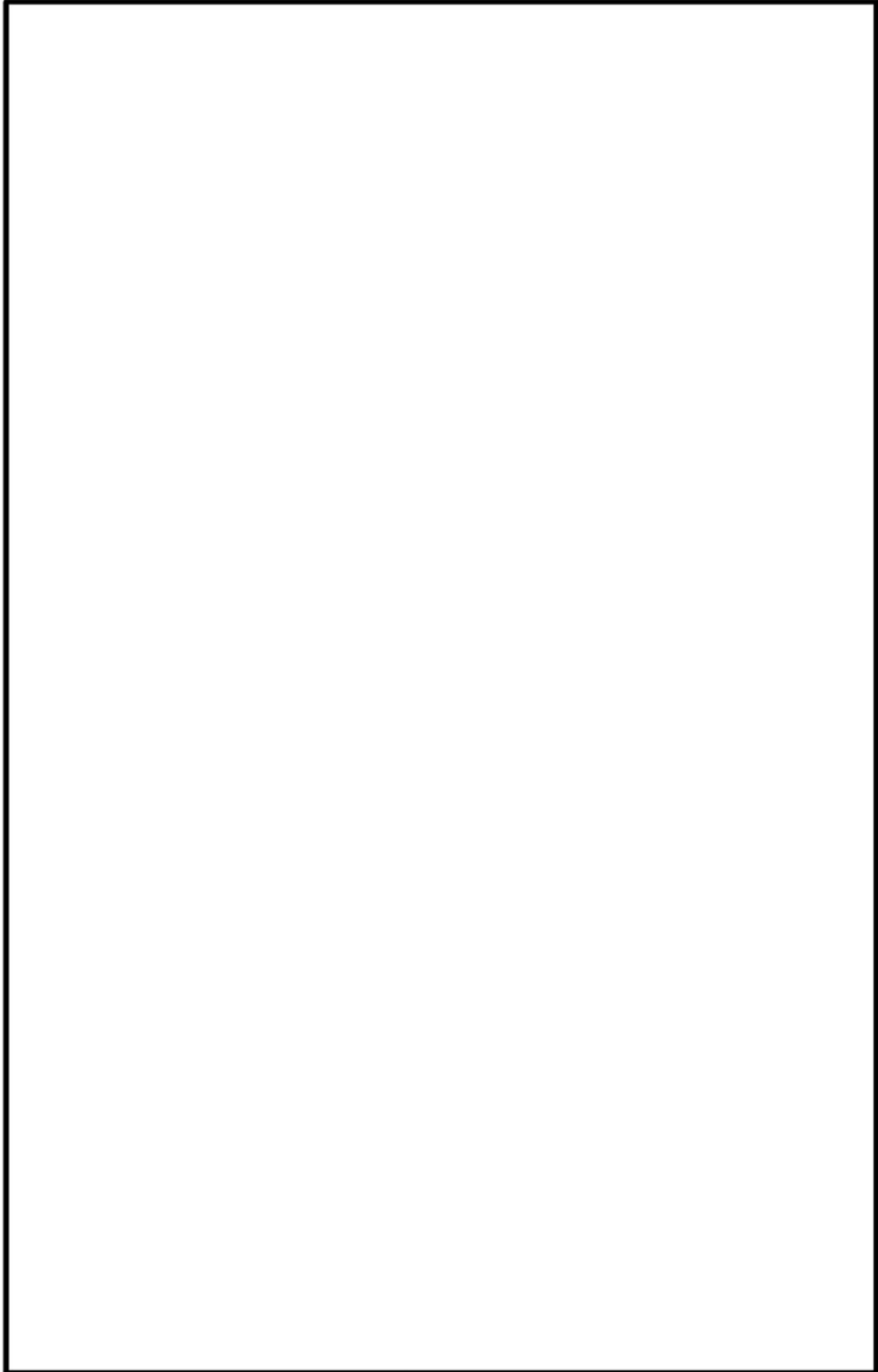
(1) 解析モデル

解析モデルとして(イ)-第 C. 5 図に基づいて作成した(ロ)-第 A. 16 図に示す三次元 180° 対称モデルを用いる。

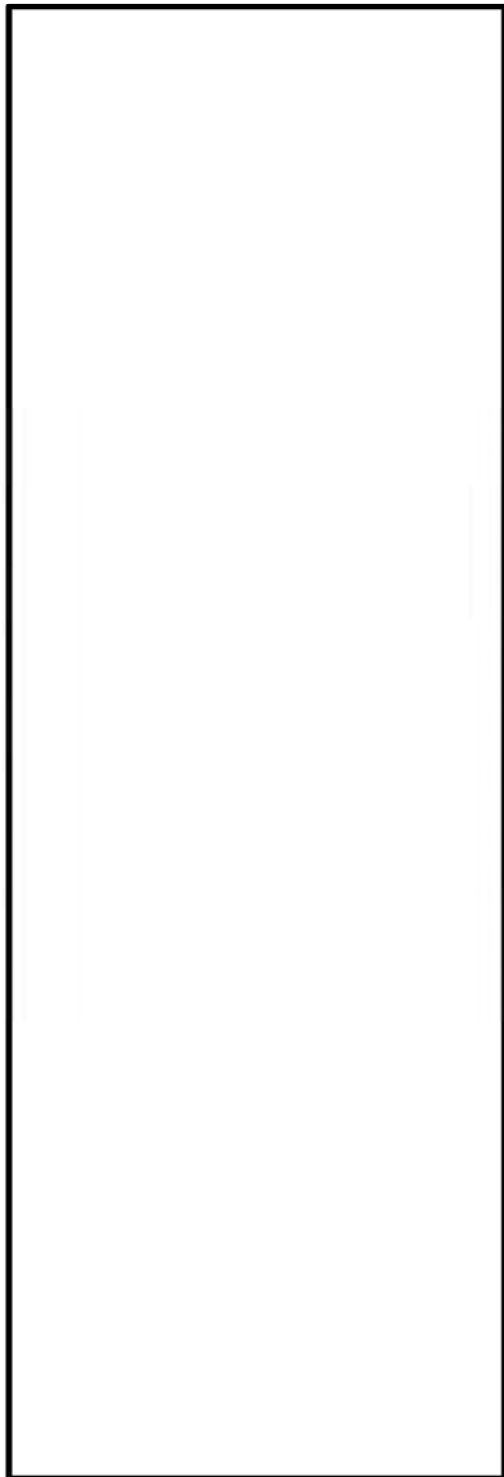
本解析モデルは、胴、外筒、下部端板、中性子遮蔽材、一次蓋、二次蓋、三次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバー等より構成される。なお、一次蓋、二次蓋及び三次蓋は蓋ボルトにより胴に接続され、蓋と胴との接触が考慮されている。

(2) 荷重条件及び境界条件

荷重条件及び境界条件を(ロ)-第 A. 17 図に示す。



(ロ)-第 A. 16 図 三次元 180 ° 対称モデル



P_i : 胴内圧 (-0.101325 MPa G)

P_{ii} : 一二次蓋間圧力 (0.31 MPa G)

P_{iii} : 二三次蓋間圧力 (0.19 MPa G)

P_{sr} : 側部中性子遮蔽材部 (外筒側面) 圧力
(MPa G)

P_{sr} : 側部中性子遮蔽材部 (端板面) 圧力
(MPa G)

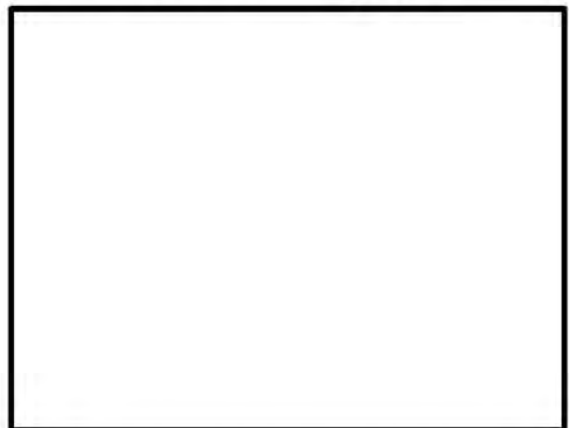
P_{tr} : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)

P_{br} : 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)

P_{bi} : 一次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

P_{bii} : 二次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

P_{biii} : 三次蓋ボルト初期締付力 (MPa)



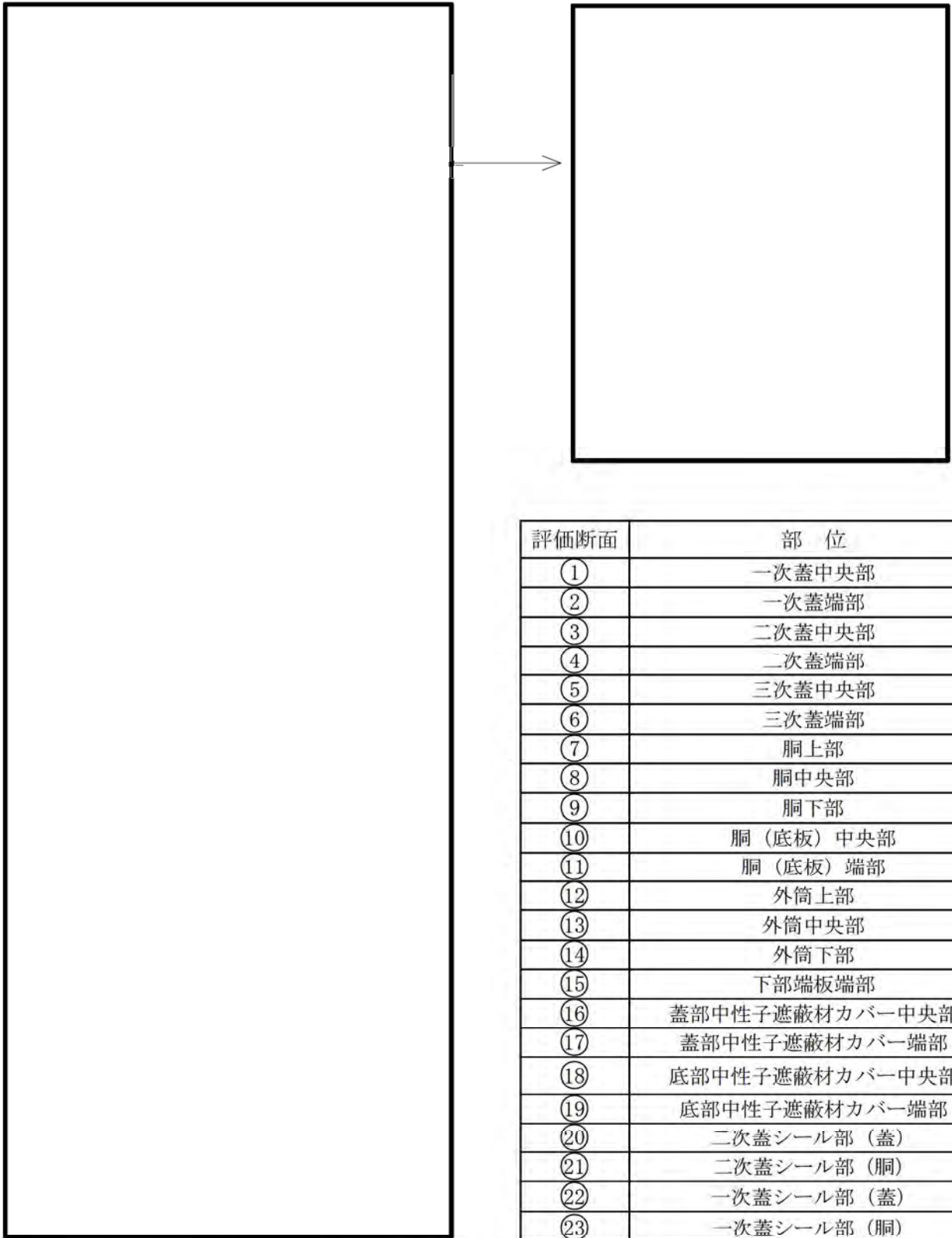
(ボルト初期締付力：一次蓋ボルトの例)

(□)-第 A. 17 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

(3) 解析結果

a. 胴内圧等による応力解析結果

(ロ)-第 A.18 図に示す主要な評価位置における胴内圧等による応力の評価結果を(ロ)-第 A.16 表に示す。表に示すように、いずれの応力も A.1.2 に定めた解析基準値以下である。



(注) 評価断面⑨-2 は下部トランニオンを取り付けていない断面を含む。

(a)-第 A. 18 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. 16 表 一般の試験条件における圧力による容器本体の一次応力の評価 (1/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
一次蓋	①	P_m	—	1		124	123
		P_L+P_b	内	7		186	25.5
	外		6	186		30.0	
	②	P_L	—	5		186	36.2
二次蓋	③	P_m	—	2		124	61.0
		P_L+P_b	内	11		186	15.9
	外		13	13.3			
④	P_L	—	4	186		45.5	
三次蓋	⑤	P_m	—	4		137	33.2
		P_L+P_b	内	19		205	9.78
	外		18	10.3			
	⑥	P_L	—	6		205	33.1
胴	⑦	P_L	—	2		186	92.0
	⑧	P_m	—	2		123	60.5
		P_L+P_b	内	3	184	60.3	
	外		2	91.0			
	⑨-1	P_L	—	2	184	91.0	
⑨-2	P_L	—	2	91.0			
胴 (底板)	⑩	P_m	—	1	122	121	
		P_L+P_b	内	1	183	182	
	外		1	182			
⑪	P_L	—	1	183	182		
外筒	⑫	引張	—	10	156	14.6	
		圧縮	—	—	156	—	
		せん断	—	7	90	11.8	
		曲げ	—	33	156	3.72	
	⑬	引張	—	21	156	6.42	
		圧縮	—	1	156	155	
		せん断	—	1	90	89.0	
		曲げ	—	2	156	77.0	
	⑭	引張	—	6	156	25.0	
		圧縮	—	2	156	77.0	
		せん断	—	8	90	10.2	
		曲げ	—	35	156	3.45	

(注1) (ロ)-第 A. 18 図参照

(注2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力(注3) 断面①～⑪の 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。断面⑫～⑭における引張応力に対する基準値は f_t 、圧縮応力に対する基準値は f_c 、せん断応力に対する基準値は f_s 、曲げ応力に対する基準値は f_b である。

(ロ)-第 A. 16 表 一般の試験条件における圧力による容器本体の一次応力の評価 (2/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
下部端板	⑮	引張	—	2		136	67.0
		圧縮	—	1		136	135
		せん断	—	3		78	25.0
		曲げ	—	12		136	10.3
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	—		157	—
		圧縮	—	1		157	156
		せん断	—	1		90	89.0
		曲げ	—	2		157	77.5
	⑰	引張	—	—		157	—
		圧縮	—	1		157	156
		せん断	—	1		90	89.0
		曲げ	—	3		157	51.3
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	2		136	67.0
		圧縮	—	1		136	135
		せん断	—	3		78	25.0
		曲げ	—	8		136	16.0
	⑲	引張	—	4		136	33.0
		圧縮	—	—		136	—
		せん断	—	5		78	14.6
		曲げ	—	29		136	3.68
二次蓋 シール部	⑳	P_L	—	13	186	13.3	
	㉑	P_L	—	12	185	14.4	
一次蓋 シール部	㉒	P_L	—	33	185	4.60	
	㉓	P_L	—	14	185	12.2	

(注1) (ロ)-第 A. 18 図参照

(注2) P_a : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力(注3) 断面⑮～⑲における引張応力に対する基準値は f_t 、圧縮応力に対する基準値は f_c 、せん断応力に対する基準値は f_s 、曲げ応力に対する基準値は f_b である。断面⑳～㉓の P_L に対する基準値は S_y である。

b. 圧力による応力と熱応力との組合せに対する容器本体の（一次＋二次）応力と蓋ボルトの応力評価結果

A. 5. 1. 3 で求めた圧力による応力と熱応力との組合せに対する容器本体の（一次＋二次）応力と蓋ボルトの応力評価結果を(□)-第 A. 17 表に示す。この表に示すように、容器本体及び蓋ボルトは A. 1. 2 の解析基準値以下である。

(□)-第 A. 17 表 一般の試験条件における熱及び圧力による容器本体の
（一次＋二次）応力及び蓋ボルトの評価 (1/2)

部位	断面 No. (注1)	応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注2)	余裕率 (MS)
一次蓋	①	—	内	6	372	372	61.0
			外	9			40.3
	②	—	内	8		372	45.5
			外	9			40.3
二次蓋	③	—	内	11		372	32.8
			外	12			30.0
	④	—	内	9		372	40.3
			外	11			32.8
三次蓋	⑤	—	内	21		411	18.5
			外	15			26.4
	⑥	—	内	24		411	16.1
			外	27	14.2		
胴	⑦	—	内	14	372	25.5	
			外	19		18.5	
	⑧	—	内	13	369	27.3	
			外	9		40.0	
	⑨-1	—	内	12	369	29.7	
			外	14		25.3	
	⑨-2	—	内	19		18.4	
			外	20		17.4	
胴(底板)	⑩	—	内	27	366	12.5	
			外	3		121	
	⑪	—	内	18	366	19.3	
			外	23		14.9	

(注1) (□)-第 A. 18 図参照

(注2) 断面①～⑪における基準値は $3S_m$ である。

(ロ)-第 A.17 表 一般の試験条件下における熱及び圧力による容器本体の
(一次+二次) 応力及び蓋ボルトの評価 (2/2)

部位	断面 No. (注1)	応力の 種類 (注2)	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
外筒	⑫	引張	—	47		470	9.00
		せん断	—	6		271	44.1
		曲げ	—	27		470	16.4
	⑬	引張	—	30		470	14.6
		せん断	—	2		271	134
		曲げ	—	5		470	93.0
	⑭	引張	—	82		470	4.73
		せん断	—	17		271	14.9
		曲げ	—	82		470	4.73
下部端板	⑮	引張	—	48		410	7.54
		せん断	—	24		236	8.83
		曲げ	—	109		410	2.76
蓋部中性子 遮蔽材カ バー	⑯	引張	—	2		472	235
		せん断	—	2		272	135
		曲げ	—	3		472	156
	⑰	引張	—	4		472	117
		せん断	—	1		272	271
		曲げ	—	2		472	235
底部中性子 遮蔽材カ バー	⑱	引張	—	34	410	11.0	
		せん断	—	3	236	77.6	
		曲げ	—	10	410	40.0	
	⑲	引張	—	29	410	13.1	
		せん断	—	4	236	58.0	
		曲げ	—	21	410	18.5	
二次蓋 シール部	⑳	—	内	22	186	7.45	
			外	10		17.6	
	㉑	—	内	18	185	9.27	
			外	16		10.5	
一次蓋 シール部	㉒	—	内	27	185	5.85	
			外	60		2.08	
	㉓	—	内	14	185	12.2	
			外	15		11.3	
一次蓋 ボルト	—	σ_m	—	249	562	1.25	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	251	843	2.35	
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	206	564	1.73	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	219	846	2.86	
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	229	564	1.46	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	320	846	1.64	

(注1) (ロ)-第 A.18 図参照

(注2) σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力

(注3) 断面⑫～⑱における引張応力に対する基準値は $3f_t$ 、せん断応力に対する基準値は $3f_s$ 、曲げ
応力に対する基準値は $3f_b$ である。断面⑳～㉓に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準
値は σ_m に対して $2S_m$ 、 $\sigma_m + \sigma_b$ に対して $3S_m$ である。なお、蓋ボルトの $2S_m$ 及び $3S_m$ の値は、 S_y
より小さい。

A.5.1.4 許容応力との比較

一般の試験条件の熱的試験において輸送容器に発生する応力は、A.5.1.3に示すように解析基準値を満足しており、健全性は維持される。

なお、三次蓋ボルトは三次蓋と異なる材質のため、運搬中に予想される $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ の周囲温度の変化により軸力が変化する。仮に周囲温度 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ で三次蓋ボルトを締め付けた後 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ に置かれた場合は、ステンレス鋼製の三次蓋と合金鋼製の三次蓋ボルトの熱膨張係数の差により三次蓋ボルトの軸力が約5%増加するものの余裕率が0.05以上あるため、また周囲温度 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ で締め付けた後 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ に置かれた場合には、軸力が約10%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、三次蓋ボルトにゆるみや破損を生じることはない。一方、一次蓋ボルトと二次蓋ボルトは、それぞれ一次蓋と二次蓋との温度の差及び熱膨張係数の差が小さいため、軸力の変化は二次蓋ボルトに比べ軽微であることから、ゆるみや破損を生じることはない。

また、三次蓋とキャスク本体のOリング取付位置での相対口開き変形量は 0.08 mm であり、Oリングの初期締め付け代 $\square\text{ mm}$ より小さく、密封性が損なわれることはない。

次に、疲労強度について評価する。評価は、密封境界を構成する部材で発生応力が比較的高く、複数容器間で共用するため使用計画回数が最も多い三次蓋及び三次蓋ボルトを代表として行う。設計疲労線図^リより、三次蓋の許容繰返し回数は 1×10^{11} 回、三次蓋ボルトの許容繰返し回数は 9.3×10^2 回である。一方で、使用期間中に想定される三次蓋及び三次蓋ボルトの使用計画回数は160回（輸送回数：80回、輸送時使用回数：2回（輸送ごと））であり、許容繰返し回数を十分下回っていることから、三次蓋及び三次蓋ボルトの疲労強度は十分である。

A.5.2 水噴霧

本輸送容器の外側はステンレス鋼又は塗装を施した炭素鋼であり、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たり、水溜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

A.5.3.1 落下時の緩衝体の変形量と衝撃加速度

ここでは、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。本輸送物の最大総質量は134.4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は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。(□)-第A.19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及び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質量に関する数値は、(イ)章C.5で示した通常輸送時における輸送物最大総質量134.4トンを用いる。

落下エネルギーは次式で与えられる。

$$E_k = mgH$$

ただし、

E_k : 輸送物の落下エネルギー (N・mm)

m : 輸送物最大総質量 (kg)

g : 重力加速度 (m/s^2)

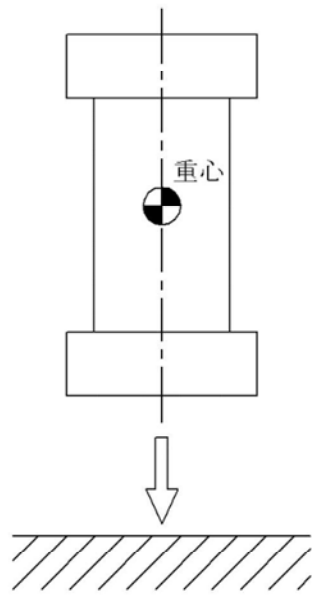
H : 落下高さ (mm)

計算条件と計算結果を(□)-第A.18表に示す。

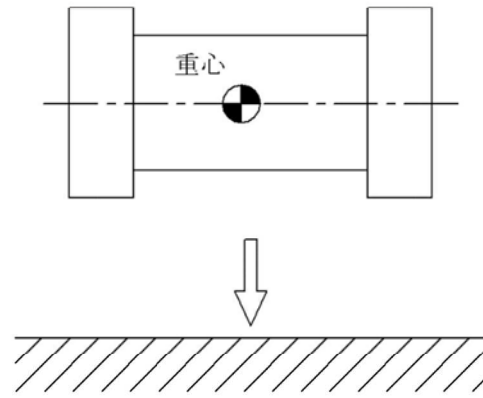
(ロ)-第 A. 18 表 輸送物落下エネルギー計算条件及び計算結果

項目	輸送物最大 総質量 : m(kg)	重力加速度 : g (m/s ²)	落下高さ : H(mm)	輸送物の 落下エネルギー : E _k (N・mm)
数値	1.344×10 ⁵	9.80665	300	3.955×10 ⁸

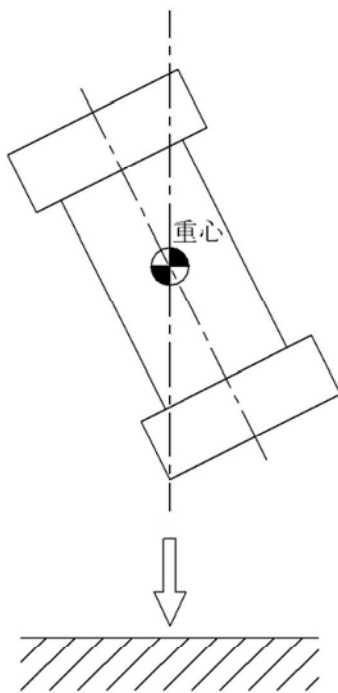
- ③ 緩衝体の変形量と衝撃力の計算は CRUSH コード¹⁶⁾ を用いて行う。このコードにおいてはエネルギー吸収に寄与する部材は安全側に内部の木材のみとして、緩衝体の変形量を単軸変形法 (UDM) により求めている。
- ④ 衝撃力については解析と実験との比較検証により得られた誤差±20 %を考慮した負荷係数 1.2¹⁶⁾ を③で求められる衝撃力に乗じる。
- ⑤ 木材は、木目 (又は積層) 方向と、木目 (又は積層) と直角方向で圧潰特性が異なる。各々の方向における特性を(ロ)-第 A. 20 図～(ロ)-第 A. 22 図に示す。木目 (又は積層) 方向とある角度を持つ落下方向に対しては、異方性の影響を考慮する。
- ⑥ 水平落下においては、上部緩衝体と下部緩衝体の吸収エネルギー比を 50% ずつとして解析している。また、緩衝体の変形量は、上部緩衝体と下部緩衝体の変形が大きい方の値としている。



垂直落下
(頭部及び底部)



水平落下



コーナー落下
(頭部及び底部)

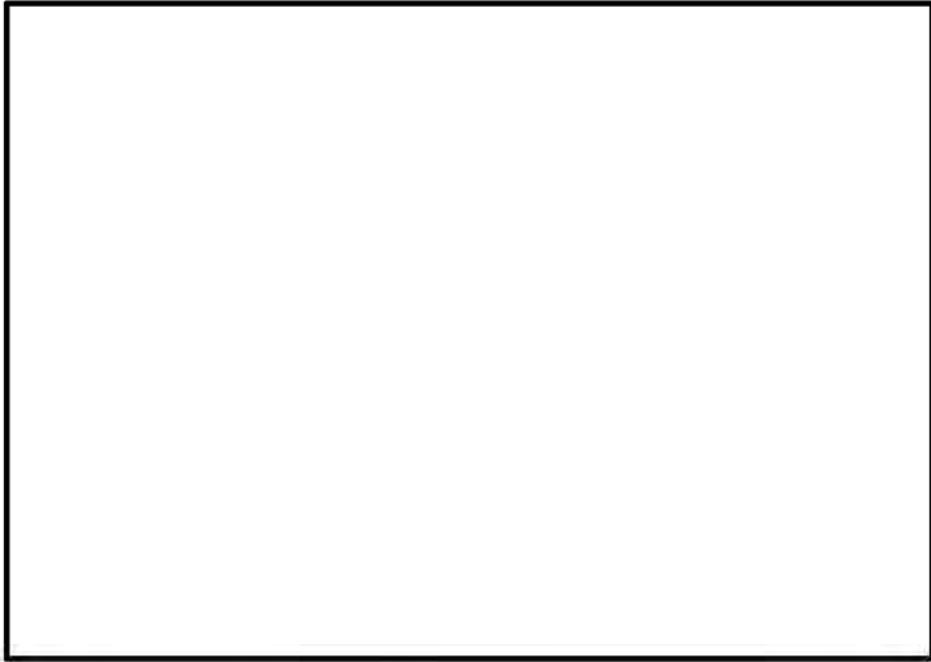
(a)-第 A. 19 図 0.3 m 落下試験での落下姿勢



(□)-第 A. 20 図 □ の圧潰特性



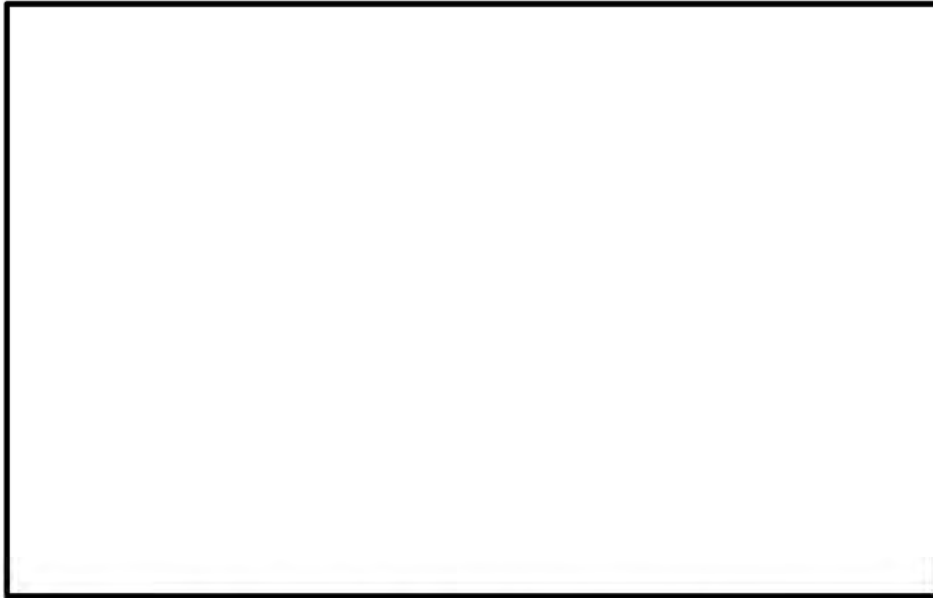
(□)-第 A. 21 図 □ の圧潰特性



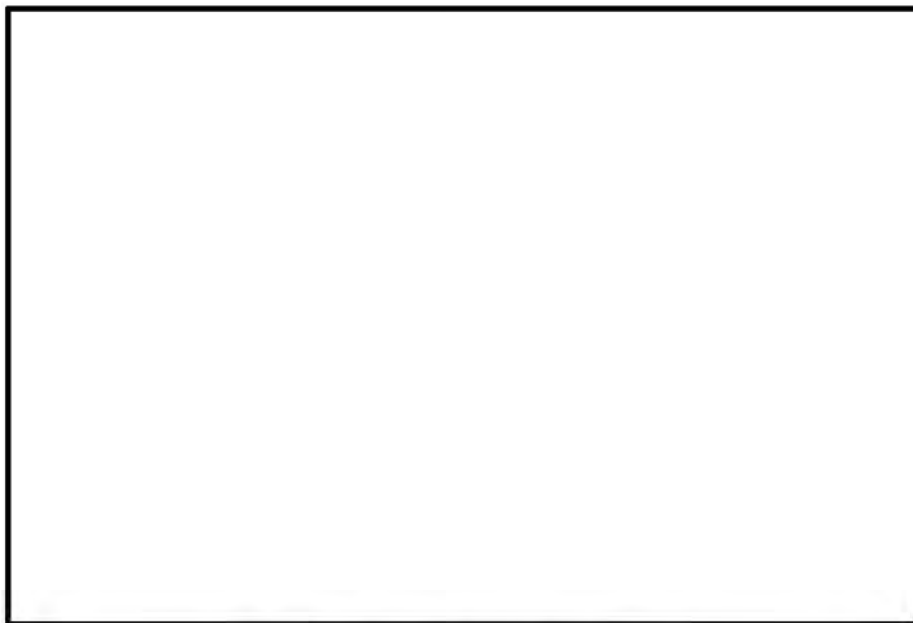
(□)-第 A. 22 図 □ の圧潰特性

(3) 各落下方向解析モデル

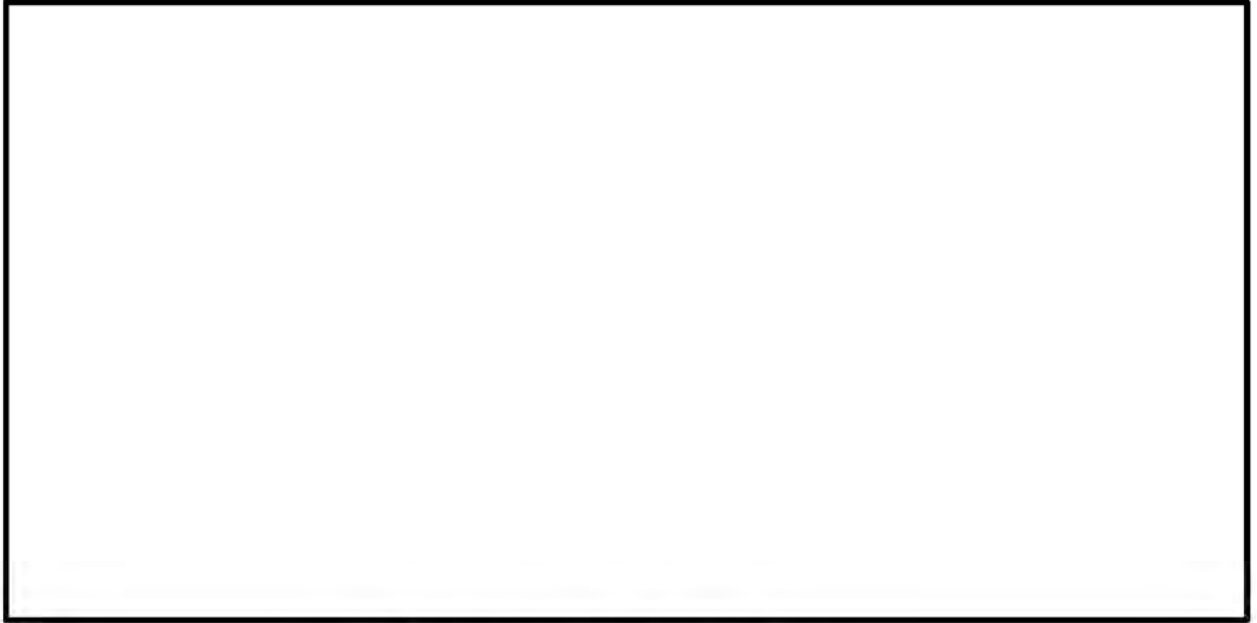
各落下方向の解析モデルを(ロ)-第 A. 23 図～(ロ)-第 A. 27 図に示す。斜線を施した部分、すなわち緩衝体内の木材が深さ δ だけ圧潰して落下エネルギーを吸収するものとする。



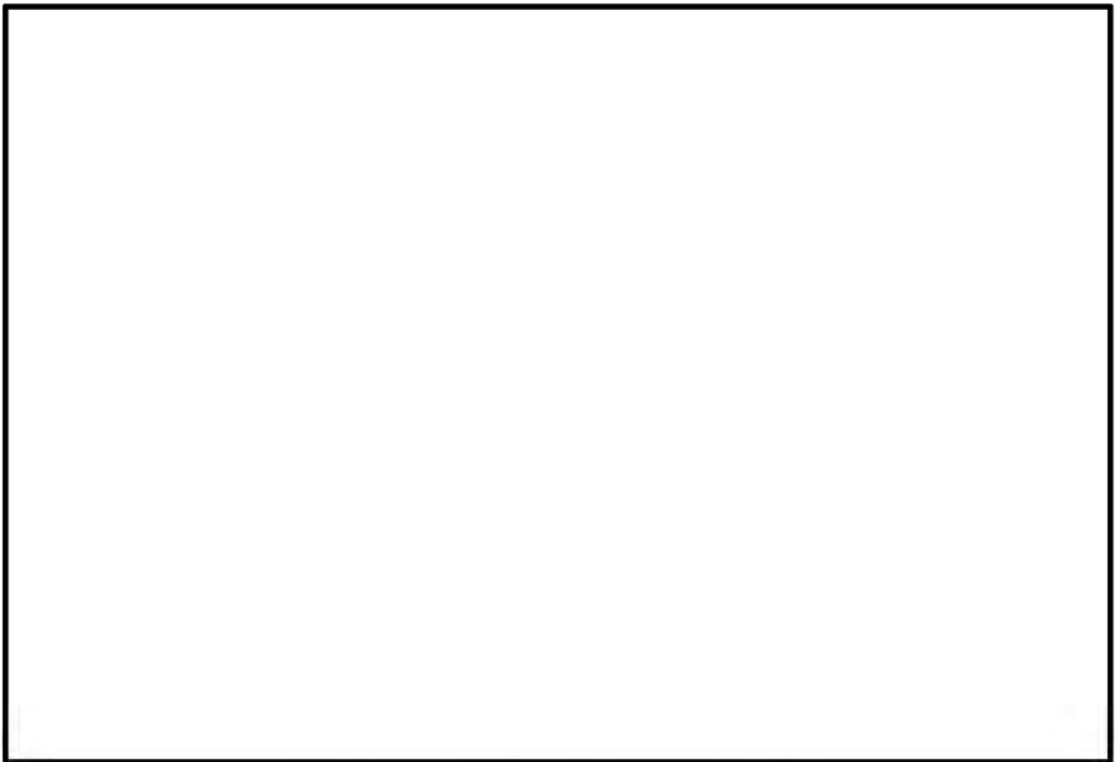
(ロ)-第 A. 23 図 頭部垂直落下解析モデル



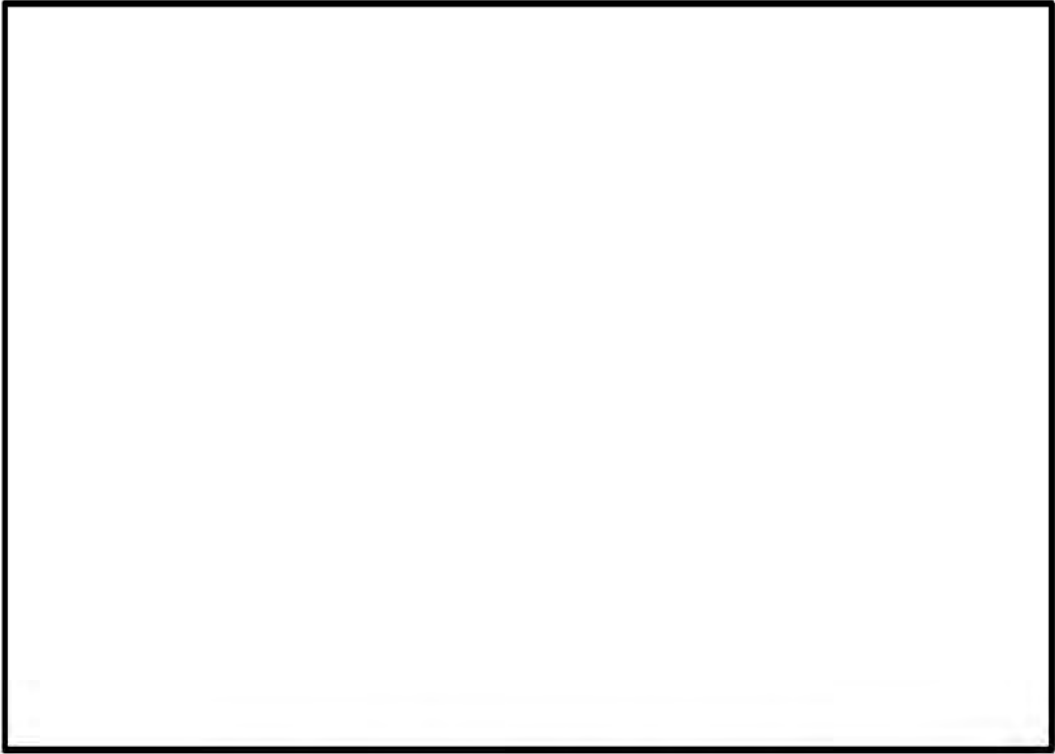
(ロ)-第 A. 24 図 底部垂直落下解析モデル



(ロ)-第 A. 25 図 水平落下解析モデル



(ロ)-第 A. 26 図 頭部コーナー落下解析モデル



(ロ)-第 A. 27 図 底部コーナー落下解析モデル

2. 落下時の緩衝体の変形量と衝撃加速度

1. に示した方法により求めた落下エネルギー E_k に対応する変形量 δ と衝撃加速度 G を(□)-第A.19表に示す。

ここで、衝撃加速度 G は次式で求めている。

$$G = \frac{F}{m}$$

F : 解析で求めた衝撃力 (N)

m : 輸送物質量 (kg)

(□)-第A.19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		衝撃力 : F(N)	衝撃 加速度 G : (m/s ²)	設計 加速度 ^(注1) (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	3.555×10^7	265	270	26	684
	底部	3.417×10^7	255	260	27	608
水平落下		2.686×10^7	200	210	42	374.5
コーナー 落下	頭部	4.611×10^6	35	—	309	826
	底部	4.234×10^6	32	—	324	827

(注1)設計加速度とは、得られた衝撃加速度に裕度を考慮した値である。

(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。

A.5.3.2 落下時の応力計算

0.3 m 落下時の衝撃力に対して、容器本体は十分な強度で密封性を保持することを示す。また、胴内のバスケット及び燃料集合体が健全性を維持することを示す。

1. 垂直落下

(1) 容器本体

垂直落下時の衝撃力に対する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。

a. 解析モデル

A.5.1.3 と同様に、三次元有限要素を用いた (a)-第 A.16 図に示す三次元 180 ° 対称モデルを用いる。

b. 荷重条件及び境界条件

(a) ①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 (270 m/s²) 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胴 (底板) 外面に働く。
- ・ 内部の収納物等 (バスケット、燃料集合体) の慣性力が一次蓋内面に働く。
- ・ 落下時の上部緩衝体反力が三次蓋外面に働く。

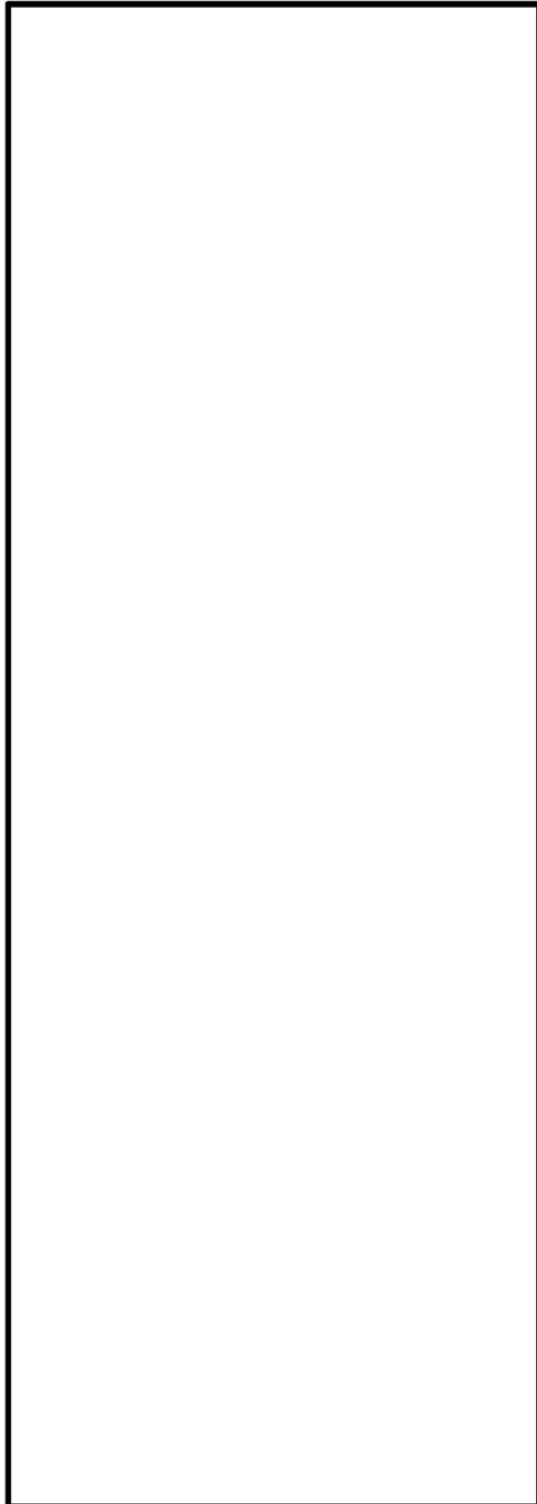
底部垂直落下時に作用する荷重は次のとおりである。

- ・ 衝撃加速度 (260 m/s²) による自重の慣性力が落下方向に働く。
- ・ 上部緩衝体の自重による慣性力が三次蓋上面に働く。
- ・ 内部の収納物等 (バスケット、燃料集合体) の慣性力が胴 (底板) 内面に働く。

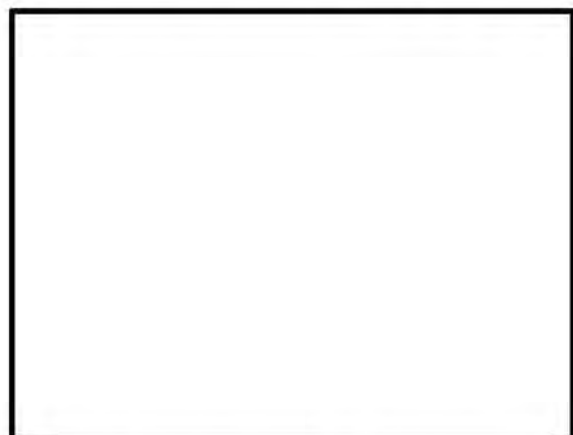
(b) ②境界条件

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節点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 (a)-第 A.28 図及び (a)-第 A.29 図に示す。

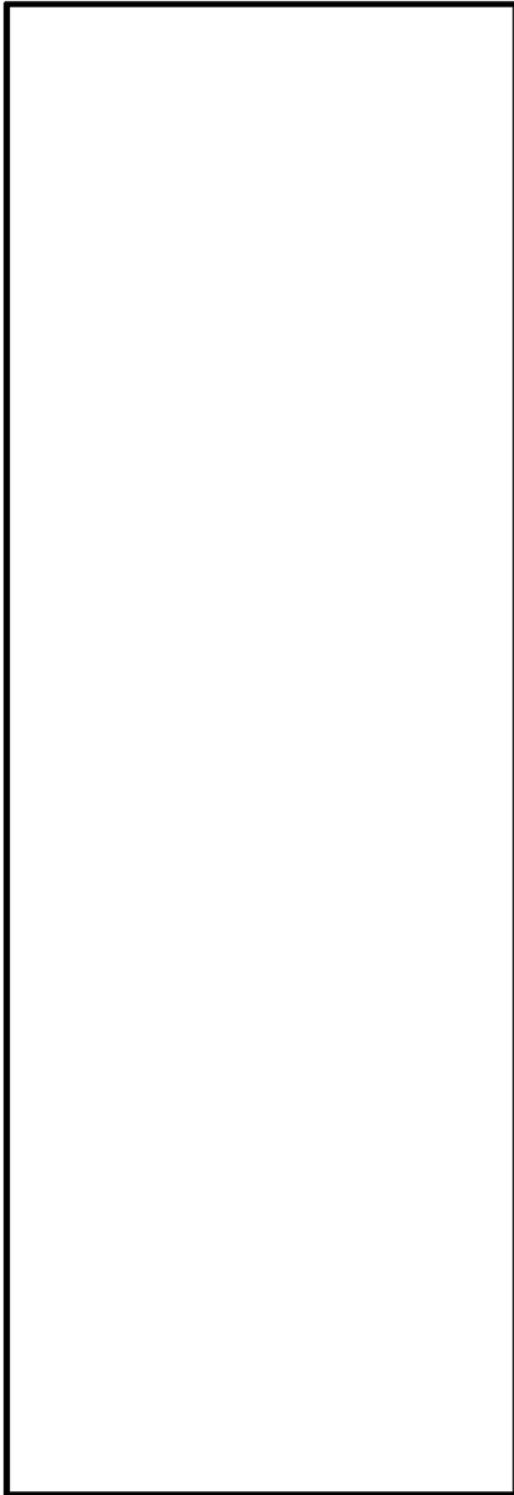


- F_{ab} : 下部緩衝体の慣性力
- P_i : 胴内圧 (-0.101325 MPa G)
- P_{ii} : 一二次蓋間圧力 (0.31 MPa G)
- P_{iii} : 二三次蓋間圧力 (0.19 MPa G)
- F_{iw} : 内部の収納物等 (バスケット、燃料集合体)の慣性力
- P_{sr} : 側部中性子遮蔽材部 (外筒側面) 圧力 (MPa G)
- P_{er} : 側部中性子遮蔽材部 (端板面) 圧力 (MPa G)
- P_{tr} : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)
- P_{br} : 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)
- F_{rw} : 上部緩衝体反力
- P_{bi} : 一次蓋ボルト初期締付力 (MPa)
- P_{bii} : 二次蓋ボルト初期締付力 (MPa)
- P_{biii} : 三次蓋ボルト初期締付力 (MPa)



(ボルト初期締付力：一次蓋ボルトの例)

(□)-第 A. 28 図 頭部 0.3 m 垂直落下時の荷重条件及び境界条件



F_{ab} : 上部緩衝体の慣性力

P_i : 胴内圧 (-0.101325 MPa G)

P_{ii} : 一二次蓋間圧力 (0.31 MPa G)

P_{iii} : 二三次蓋間圧力 (0.19 MPa G)

F_{iw} : 内部の収納物等 (バスケット、燃料集合体) の慣性力

P_{sr} : 側部中性子遮蔽材部 (外筒側面) 圧力 (MPa G)

P_{er} : 側部中性子遮蔽材部 (端板面) 圧力 (MPa G)

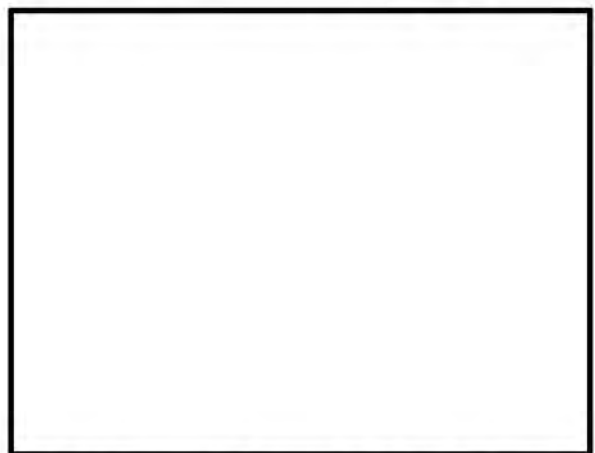
P_{tr} : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)

P_{br} : 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)

P_{bi} : 一次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

P_{bii} : 二次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

P_{biii} : 三次蓋ボルト初期締付力 (MPa)



(ボルト初期締付力：一次蓋ボルトの例)

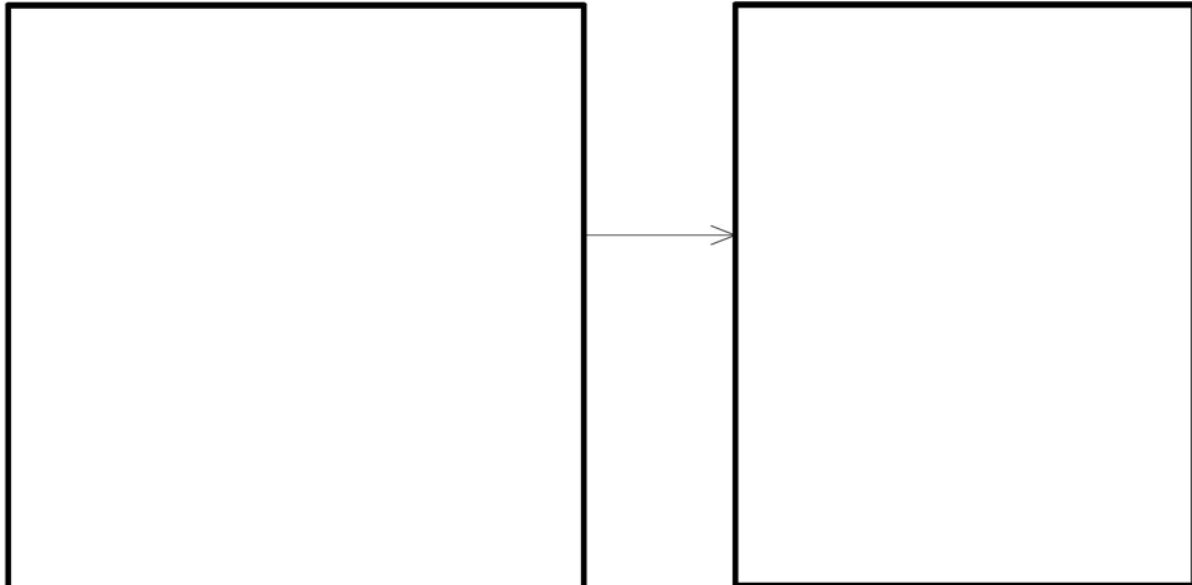
(□)-第 A. 29 図 底部 0.3 m 垂直落下時の荷重条件及び境界条件

c. 解析結果

主要な位置（(□)-第 A. 30 図参照）に対する頭部垂直落下時の一次応力の評価結果を(□)-第 A. 20 表に、（一次＋二次）応力及び蓋ボルトの応力の評価結果を(□)-第 A. 21 表に、また、底部垂直落下時の一次応力の評価結果を(□)-第 A. 22 表に、（一次＋二次）応力及び蓋ボルトの評価結果を(□)-第 A. 23 表に示す。

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

また、三次蓋とキャスク本体の O リング取り付け位置での相対口開き変形量は 0.01 mm 以下であり、O リングの初期締め付け代 mm より小さく、密封性が損なわれることはない。



評価断面	部位
①	一次蓋中央部
②	一次蓋端部
③	二次蓋中央部
④	二次蓋端部
⑤	三次蓋中央部
⑥	三次蓋端部
⑦	胴上部
⑧	胴中央部
⑨	胴下部
⑩	胴（底板）中央部
⑪	胴（底板）端部
⑫	外筒上部
⑬	外筒中央部
⑭	外筒下部
⑮	下部端板端部
⑯	蓋部中性子遮蔽材カバー中央部
⑰	蓋部中性子遮蔽材カバー端部
⑱	底部中性子遮蔽材カバー中央部
⑲	底部中性子遮蔽材カバー端部
⑳	二次蓋シール部（蓋）
㉑	二次蓋シール部（胴）
㉒	一次蓋シール部（蓋）
㉓	一次蓋シール部（胴）

(注) 評価断面⑨-2 は下部トラニオンを取り付けていない断面を含む。

(ロ)-第 A. 30 図 自由落下時の応力評価位置

(ロ)-第 A. 20 表 頭部 0.3 m 垂直落下時の容器本体に対する一次応力の評価 (1/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
一次蓋	①	P_m	—	7		124	16.7
		P_L+P_b	内	64		186	1.90
	外		65	1.86			
	②	P_L	—	33		186	4.63
二次蓋	③	P_m	—	5		124	23.8
		P_L+P_b	内	30		186	5.20
	外		34	4.47			
④	P_L	—	6	186		30.0	
三次蓋	⑤	P_m	—	7		137	18.5
		P_L+P_b	内	26		205	6.88
	外		16	11.8			
⑥	P_L	—	36	205		4.69	
胴	⑦	P_L	—	43		186	3.32
	⑧	P_m	—	9		123	12.6
		P_L+P_b	内	9	184	19.4	
	外		9	19.4			
	⑨-1	P_L	—	5	184	35.8	
⑨-2	P_L	—	6	29.6			
胴(底板)	⑩	P_m	—	1	122	121	
		P_L+P_b	内	6	183	29.5	
	外		6	29.5			
⑪	P_L	—	5	183	35.6		
外筒	⑫	引張	—	7	156	21.2	
		圧縮	—	24	156	5.50	
		せん断	—	14	90	5.42	
		曲げ	—	45	156	2.46	
	⑬	引張	—	39	156	3.00	
		圧縮	—	4	156	38.0	
		せん断	—	1	90	89.0	
		曲げ	—	1	156	155	
	⑭	引張	—	7	156	21.2	
		圧縮	—	2	156	77.0	
		せん断	—	9	90	9.00	
		曲げ	—	37	156	3.21	

(注1) (ロ)-第 A. 30 図参照

(注2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力(注3) 断面①～⑪の 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。断面⑫～⑭における引張応力に対する基準値は f_t 、圧縮応力に対する基準値は f_c 、せん断応力に対する基準値は f_s 、曲げ応力に対する基準値は f_b である。

(ロ)-第 A. 20 表 頭部 0.3 m 垂直落下時の容器本体に対する一次応力の評価 (2/2)

部位	断面 No. (注 1)	応力 分類 (注 2) 又は 応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注 3)	余裕率 (MS)
下部端板	⑮	引張	—	2		136	67.0
		圧縮	—	1		136	135
		せん断	—	4		78	18.5
		曲げ	—	12		136	10.3
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	7		157	21.4
		圧縮	—	1		157	156
		せん断	—	8		90	10.2
		曲げ	—	18		157	7.72
	⑰	引張	—	17		157	8.23
		圧縮	—	—		157	—
		せん断	—	10		90	8.00
		曲げ	—	70		157	1.24
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	1		136	135
		圧縮	—	1		136	135
		せん断	—	2		78	38.0
		曲げ	—	4		136	33.0
	⑲	引張	—	2		136	67.0
		圧縮	—	1		136	135
		せん断	—	3		78	25.0
		曲げ	—	16		136	7.50
二次蓋 シール部	⑳	P_L	—	16	186	10.6	
	㉑	P_L	—	31	185	4.96	
一次蓋 シール部	㉒	P_L	—	48	185	2.85	
	㉓	P_L	—	14	185	12.2	

(注 1) (ロ)-第 A. 30 図参照

(注 2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力(注 3) 断面⑮～⑲における引張応力に対する基準値は f_t 、圧縮応力に対する基準値は f_c 、せん断応力に対する基準値は f_s 、曲げ応力に対する基準値は f_b である。断面⑳～㉓の P_L に対する基準値は S_y である。

(ロ)-第 A. 21 表 頭部 0.3 m 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)	応力の 種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注2)	余裕率 (MS)
一次蓋	①	—	内	66	[Redacted]	372	4.63
			外	63			4.90
	②	—	内	48		372	6.75
			外	49			6.59
二次蓋	③	—	内	30		372	11.4
			外	34			9.94
	④	—	内	18		372	19.6
			外	21			16.7
三次蓋	⑤	—	内	26		411	14.8
			外	22			17.6
	⑥	—	内	85		411	3.83
			外	36	10.4		
胴	⑦	—	内	76	372	3.89	
			外	37		9.05	
	⑧	—	内	22	369	15.7	
			外	9		40.0	
	⑨-1	—	内	9	369	40.0	
			外	17		20.7	
	⑨-2	—	内	24		14.3	
			外	23		15.0	
胴(底板)	⑩	—	内	21	366	16.4	
			外	4		90.5	
	⑪	—	内	21	366	16.4	
			外	23		14.9	

(注1) (ロ)-第 A. 30 図参照

(注2) 断面①~⑪における基準値は $3S_m$ である。

(ロ)-第 A. 21 表 頭部 0.3 m 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)	応力の 種類 (注2)	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
外筒	⑫	引張	—	28	470	470	15.7
		せん断	—	14		271	18.3
		曲げ	—	14		470	32.5
	⑬	引張	—	44		470	9.68
		せん断	—	1		271	270
		曲げ	—	3		470	155
	⑭	引張	—	82		470	4.73
		せん断	—	18		271	14.0
		曲げ	—	85		470	4.52
下部端板	⑮	引張	—	48		410	7.54
		せん断	—	24		236	8.83
		曲げ	—	107		410	2.83
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	8		472	58.0
		せん断	—	11		272	23.7
		曲げ	—	23		472	19.5
	⑰	引張	—	11		472	41.9
		せん断	—	8		272	33.0
		曲げ	—	64		472	6.37
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	35	410	10.7	
		せん断	—	2	236	117	
		曲げ	—	6	410	67.3	
	⑲	引張	—	29	410	13.1	
		せん断	—	3	236	77.6	
		曲げ	—	9	410	44.5	
二次蓋 シール部	⑳	—	内	24	186	6.75	
		—	外	21		7.85	
	㉑	—	内	43	185	3.30	
		—	外	38		3.86	
一次蓋 シール部	㉒	—	内	25	185	6.40	
		—	外	96		0.92	
	㉓	—	内	14	185	12.2	
		—	外	14		12.2	
一次蓋 ボルト	—	σ_m	—	289	562	0.94	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	323	843	1.60	
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	212	564	1.66	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	323	846	1.61	
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	204	564	1.76	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	216	846	2.91	

(注1) (ロ)-第 A. 30 図参照

(注2) σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力(注3) 断面⑫~⑱における引張応力に対する基準値は $3f_t$ 、せん断応力に対する基準値は $3f_s$ 、曲げ応力に対する基準値は $3f_b$ である。断面⑳~㉓に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準値は σ_m に対して $2S_m$ 、 $\sigma_m + \sigma_b$ に対して $3S_m$ である。なお、蓋ボルトの $2S_m$ 及び $3S_m$ の値は、 S_y より小さい。

(ロ)-第 A. 22 表 底部 0.3 m 垂直落下時の容器本体に対する一次応力の評価 (1/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
一次蓋	①	P_m	—	2	[Redacted]	124	61.0
		P_L+P_b	内	16		186	10.6
	外		15	11.4			
	②	P_L	—	12		186	14.5
二次蓋	③	P_m	—	1		124	123
		P_L+P_b	内	5		186	36.2
	外		4	45.5			
④	P_L	—	5	186		36.2	
三次蓋	⑤	P_m	—	8		137	16.1
		P_L+P_b	内	39		205	4.25
	外		35	4.85			
⑥	P_L	—	28	205		6.32	
胴	⑦	P_L	—	6		186	30.0
	⑧	P_m	—	11		123	10.1
		P_L+P_b	内	11	184	15.7	
	外		11	15.7			
	⑨-1	P_L	—	16	184	10.5	
⑨-2	P_L	—	23	7.00			
胴(底板)	⑩	P_m	—	5	122	23.4	
		P_L+P_b	内	24	183	6.62	
	外		30	5.10			
⑪	P_L	—	11	183	15.6		
外筒	⑫	引張	—	12	156	12.0	
		圧縮	—	—	156	—	
		せん断	—	8	90	10.2	
		曲げ	—	39	156	3.00	
	⑬	引張	—	37	156	3.21	
		圧縮	—	1	156	155	
		せん断	—	1	90	89.0	
		曲げ	—	1	156	155	
	⑭	引張	—	12	156	12.0	
		圧縮	—	5	156	30.2	
		せん断	—	7	90	11.8	
		曲げ	—	27	156	4.77	

(注1) (ロ)-第 A. 30 図参照

(注2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力(注3) 断面①～⑪の 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。断面⑫～⑭における引張応力に対する基準値は f_t 、圧縮応力に対する基準値 f_c 、せん断応力に対する基準値は f_s 、曲げ応力に対する基準値は f_b である。

(ロ)-第 A. 22 表 底部 0.3 m 垂直落下時の容器本体に対する一次応力の評価 (2/2)

部位	断面 No. (注 1)	応力 分類 (注 2) 又は 応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度(°C)	解析 基準値 (MPa) (注 3)	余裕率 (MS)
下部端板	⑮	引張	—	7		136	18.4
		圧縮	—	2		136	67.0
		せん断	—	11		78	6.09
		曲げ	—	43		136	2.16
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	—		157	—
		圧縮	—	2		157	77.5
		せん断	—	2		90	44.0
		曲げ	—	4		157	38.2
	⑰	引張	—	—		157	—
		圧縮	—	3		157	51.3
		せん断	—	2		90	44.0
		曲げ	—	9		157	16.4
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	13		136	9.46
		圧縮	—	1		136	135
		せん断	—	6		78	12.0
		曲げ	—	20		136	5.80
	⑲	引張	—	14		136	8.71
		圧縮	—	2		136	67.0
		せん断	—	8		78	8.75
		曲げ	—	57		136	1.38
二次蓋 シール部	⑳	P_L	—	12		186	14.5
	㉑	P_L	—	14		185	12.2
一次蓋 シール部	㉒	P_L	—	36		185	4.13
	㉓	P_L	—	25	185	6.40	

(注 1) (ロ)-第 A. 30 図参照

(注 2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力(注 3) 断面⑮～⑲における引張応力に対する基準値は f_t 、圧縮応力に対する基準値は f_c 、せん断応力に対する基準値は f_s 、曲げ応力に対する基準値は f_b である。断面⑳～㉓の P_L に対する基準値は S_y である。

(ロ)-第 A. 23 表 底部 0.3 m 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)	応力の 種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注2)	余裕率 (MS)
一次蓋	①	—	内	15	[]	372	23.8
			外	17			20.8
	②	—	内	22		372	15.9
			外	14			25.5
二次蓋	③	—	内	5		372	73.4
			外	4			92.0
	④	—	内	6		372	61.0
			外	8			45.5
三次蓋	⑤	—	内	37		411	10.1
			外	37			10.1
	⑥	—	内	37		411	10.1
			外	55	6.47		
胴	⑦	—	内	26	372	13.3	
			外	15		23.8	
	⑧	—	内	24	369	14.3	
			外	11		32.5	
	⑨-1	—	内	13	369	27.3	
			外	29		11.7	
	⑨-2	—	内	21	369	16.5	
			外	44		7.38	
胴(底板)	⑩	—	内	49	366	6.46	
			外	34		9.76	
	⑪	—	内	20	366	17.3	
			外	34		9.76	

(注1) (ロ)-第 A. 30 図参照

(注2) 断面①～⑪における基準値は $3S_m$ である。

(ロ)-第 A. 23 表 底部 0.3 m 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)	応力の 種類 (注2)	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度(°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
外筒	⑫	引張	—	51	[]	470	8.21
		せん断	—	7		271	37.7
		曲げ	—	19		470	23.7
	⑬	引張	—	44		470	9.68
		せん断	—	1		271	270
		曲げ	—	3		470	155
	⑭	引張	—	87		470	4.40
		せん断	—	15		271	17.0
		曲げ	—	49		470	8.59
下部端板	⑮	引張	—	40		410	9.25
		せん断	—	11		236	20.4
		曲げ	—	58		410	6.06
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	—		472	—
		せん断	—	4		272	67.0
		曲げ	—	9		472	51.4
	⑰	引張	—	3		472	156
		せん断	—	2		272	135
		曲げ	—	11		472	41.9
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	33	410	11.4	
		せん断	—	8	236	28.5	
		曲げ	—	26	410	14.7	
	⑲	引張	—	15	410	26.3	
		せん断	—	9	236	25.2	
		曲げ	—	61	410	5.72	
二次蓋 シール部	⑳	—	内	22	186	7.45	
			外	9		19.6	
	㉑	—	内	21	185	7.80	
			外	18		9.27	
一次蓋 シール部	㉒	—	内	28	185	5.60	
			外	63		1.93	
	㉓	—	内	25	185	6.40	
			外	24		6.70	
一次蓋 ボルト	—	σ_m	—	249	562	1.25	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	250	843	2.37	
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	196	564	1.87	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	202	846	3.18	
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	234	564	1.41	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	326	846	1.59	

(注1) (ロ)-第 A. 30 図参照

(注2) σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力(注3) 断面⑫~⑱における引張応力に対する基準値は $3f_t$ 、せん断応力に対する基準値は $3f_s$ 、曲げ応力に対する基準値は $3f_b$ である。断面⑳~㉓に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準値は σ_m に対して $2S_m$ 、 $\sigma_m + \sigma_b$ に対して $3S_m$ である。なお、蓋ボルトの $2S_m$ 及び $3S_m$ の値は、 S_y より小さい。

(2) バスケット

バスケットは、頭部側と底部側で同様な構造である（(ロ)-第 A. 31 図参照）。設計加速度は頭部落下の方が大きいため、頭部落下の値を用いて評価する。

垂直落下時に最下段のバスケットプレートには、それより上部にあるバスケットプレートを含む自重による慣性力が作用し、圧縮による膜応力 σ_c (MPa) が生じる。

$$\sigma_c = \frac{W_b \cdot G_V}{A_1}$$

ここで、

W_b : バスケットプレート、バスケットサポート、中性子吸収材の合計質量 (kg)

G_V : 垂直落下時の衝撃加速度 (m/s^2)

A_1 : バスケットプレートと胴の接触面積 (mm^2)

$$A_1 = (b_{A1} - b_{A2}) L_1 \cdot n_A + (b_{B1} - b_{B2}) L_1 \cdot n_B$$

b_{A1} : バスケットプレート A 幅 1 (mm)

b_{A2} : バスケットプレート A 幅 2 (mm)

b_{B1} : バスケットプレート B 幅 1 (mm)

b_{B2} : バスケットプレート B 幅 2 (mm)

L_1 : バスケットプレート長さ (mm)

n_A : 胴に接触するバスケットプレート A L_1 部の個数 (-)

n_B : 胴に接触するバスケットプレート B L_1 部の個数 (-)



(ロ)-第 A. 31 図 バスケットプレートの解析モデル図

計算条件と計算結果を(ロ)-第 A. 24 表に示す。表に示すように、評価位置において A. 1. 2 に示す解析基準値を満足する。なお、バスケットに生じる応力は、設計降伏点 (56 MPa) より低いので、バスケットは塑性変形しない。

(ロ)-第 A. 24 表 バスケット格子の応力計算条件及び計算結果

項目	バスケット 合計質量 : W_b (kg)	垂直落下時の 衝撃加速度 : G_v (m/s ²)
数値	5600	270

項目	バスケット プレートの タイプ	バスケット プレート 全厚さ : b_1 (mm)	バスケット プレート 内幅 : b_2 (mm)	バスケット プレート長 さ : L_1 (mm)	胴に接触す るバスケット プレート L_1 部の個数 : n (-)	バスケット プレートと胴 の接触面積 : A_1 (mm ²)
数値	A					
	B					

項目	バスケット プレートの タイプ	圧縮応力 : σ_c (MPa)	基準値 : S_m (MPa)	余裕率 (-)
数値	A	7	36	4.14
	B	7		4.14

次に、一次圧縮応力について検討する。

バスケットプレートの有効細長比 λ は、次式で与えられる。

$$\lambda = \frac{\ell_k}{i}$$

ここで、

ℓ_k : 座屈長さ (一端支持、他端固定) (mm)

i : 座屈軸についての断面二次半径 (mm)

$$i = \sqrt{\frac{I}{A_2}}$$

I : 断面二次モーメント (mm⁴)

$$I = \frac{1}{12}(b_1^3 - b_2^3)L$$

A_2 : バスケットプレートの断面積 (mm²)

$$A_2 = (b_1 - b_2)L$$

L : バスケットプレート長さ (mm)

また、バスケットプレートの限界細長比 Λ は、次式により与えられる。

$$\Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6F}}$$

ここで、

E : 縦弾性係数 (MPa)

F : 設計降伏点又は設計引張強さの 0.7 倍の値のいずれか小さい方の値 (MPa)

バスケットプレートの有効細長比は、限界細長比より小さいので、許容圧縮応力 f_c は、次式で与えられる。

$$f_c = \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{\nu}$$

ここで、

$$\nu : \nu = 1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$$

計算条件と計算結果を (ロ)-第 A. 25 表に示す。なお、許容圧縮応力は、バスケットプレート B の方が小さいため、バスケットプレート B を評価対象とする。

(ロ)-第 A. 25 表 バスケットプレートの一次圧縮応力の計算条件及び計算結果

項目	バスケットプレート長さ : L (mm)	バスケットプレートの断面積 : A ₂ (mm ²)	バスケットプレートの縦弾性係数 : E (MPa)
数値			6.94 × 10 ⁴

項目	座屈長さ : l_k (mm)	設計降伏点又は設計引張強さの 0.7 倍の値のいずれか小さい方の値 : F (MPa)	圧縮応力 : σ_c (MPa)	許容圧縮応力 : f_c (MPa)	余裕率 (-)
数値			7	37	4.28

(3) 燃料集合体

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 S (MPa) 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。

a. 落下衝撃により生じる圧縮応力

落下衝撃により生じる圧縮応力は、次式で与えられる。

$$\sigma_c = -\frac{WG_y}{A}$$

ここで、

W : 燃料被覆管最下端における質量 (kg)

G_y : 垂直落下時の衝撃加速度 (m/s^2)

A : 燃料被覆管の断面積 (mm^2)

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

d_o : 燃料被覆管の外径 (mm)

d_i : 燃料被覆管の内径 (mm)

b. 内圧による各方向応力

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。

$$\sigma_z = \frac{1}{K^2 - 1} P_o$$

$$\sigma_r = -\frac{\frac{K^2}{R^2} - 1}{K^2 - 1} P_o$$

$$\sigma_\theta = \frac{\frac{K^2}{R^2} + 1}{K^2 - 1} P_o$$

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)

$$K = \frac{b}{a}$$

b : 燃料被覆管外半径 (mm)

$$b = \frac{d_o}{2}$$

a : 燃料被覆管内半径 (mm)

$$a = \frac{d_i}{2}$$

P_o : 内圧 (MPa)

$$R = \frac{r}{a} \quad (\text{内面においては } R=1)$$

r : 評価位置 ($a \leq r \leq b$)

c. 応力強さ

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、以下の式で与えられる。

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

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-4) の °C における照射後の降伏応力 σ_y は、589 MPa⁴⁾ であるので、余裕率 MS は、次式で与えられる。

$$MS = \frac{\sigma_y}{S} - 1$$

以上の諸式を用いて燃料に対して計算した結果を (ロ)-第 A. 26 表に示す。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. 26 表 垂直落下時の燃料被覆管の強度評価結果

燃料タイプ	A型	B型
燃料被覆管最下端における質量 : W (kg)		
衝撃加速度 : G _v (m/s ²)	270	270
燃料被覆管外径 : d _o (mm)	9.50	9.50
燃料被覆管内径 : d _i (mm)	8.36	8.36
内圧 : P _o (MPa)	11.77	11.38
応力強さ : S (MPa)	105	102
降伏応力 : σ_y (MPa)	589	589
余裕率 : MS (-)	4.60	4.77

2. 水平落下

(1) 容器本体

水平落下時の衝撃力に対する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。

a. 解析モデル

A. 5. 1. 3 と同様に、三次元有限要素を用いた (p)-第 A. 16 図に示す三次元 180° 対称モデルを用いる。

b. 荷重条件及び境界条件

(a) 荷重条件

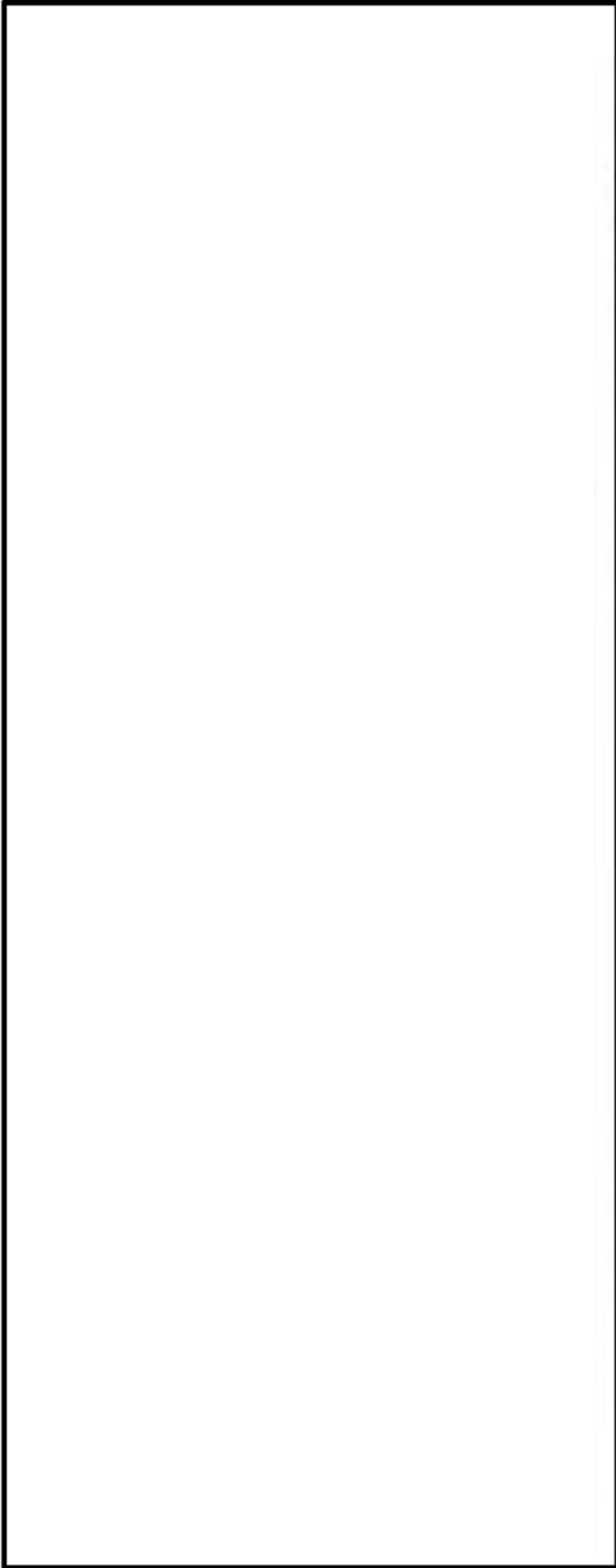
水平落下時に作用する荷重は次のとおりである。

- ・ 衝撃加速度 (210 m/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、燃料集合体) の慣性力が胴内面へ働く。
- ・ 落下時の上・下部緩衝体反力が胴フランジ面及び底板に働く。

(b) 境界条件

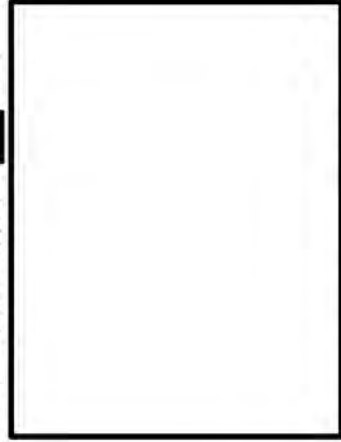
上・下部緩衝体を取り付く面 (反力を受ける面) の上・下 1 箇所 X 方向変位を拘束した。また、 $0^\circ - 180^\circ$ 面の対称面において Y 方向の変位を拘束した。

水平落下時に作用する荷重条件及び境界条件を (p)-第 A. 32 図に示す。



P_i : 胴内圧 (-0.101325 MPa G)
 P_{ii} : 一二次蓋間圧力 (0.31 MPa G)
 P_{iii} : 二三次蓋間圧力 (0.19 MPa G)
 P_{sr} : 側部中性子遮蔽材部 (外筒側面) 圧力 (MPa G)
 P_{er} : 側部中性子遮蔽材部 (端板面) 圧力 (MPa G)
 P_{tr} : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)
 P_{br} : 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)
 F_{iw} : 内部の収納物等 (バスケット、燃料集合体) の慣性力
 F_{tr} : 上部緩衝体反力
 F_{br} : 下部緩衝体反力

P_{bi} : 一次蓋ボルト初期締付力 (MPa)
 P_{bii} : 二次蓋ボルト初期締付力 (MPa)
 P_{biii} : 三次蓋ボルト初期締付力 (MPa)



(ボルト初期締付力：一次蓋ボルトの例)

(ロ)-第A.32図 0.3m水平落下時の荷重及び境界条件

c. 解析結果

水平落下時の主要な位置（(□)-第 A. 30 図参照）に対する一次応力の評価結果を（□）-第 A. 27 表に、（一次+二次）応力の評価結果を（□）-第 A. 28 表に示す。表に示すように、すべての評価位置において A. 1. 2 に示す解析基準値を満足する。また、三次蓋とキャスク本体の O リング取り付け位置での相対口開き変形量は 0.18 mm であり、O リングの初期締め付け代 mm より小さく、密封性が損なわれることはない。

(ロ)-第 A. 27 表 0.3 m 水平落下時の容器本体に対する一次応力の評価 (1/2)

部位	断面 No. (注 1)	応力 分類 (注 2) 又は 応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注 3)	余裕率 (MS)
一次蓋	①	P_m	—	3		124	40.3
		P_L+P_b	内	8		186	22.2
	外		10	17.6			
②	P_L	—	10	186		17.6	
二次蓋	③	P_m	—	6		124	19.6
		P_L+P_b	内	15		186	11.4
	外		20	8.30			
④	P_L	—	19	186		8.78	
三次蓋	⑤	P_m	—	13		137	9.53
		P_L+P_b	内	23		205	7.91
	外		22	8.31			
⑥	P_L	—	24	205		7.54	
胴	⑦	P_L	—	66		186	1.81
	⑧	P_m	—	21		123	4.85
		P_L+P_b	内	20	184	8.20	
	外		29	5.34			
	⑨-1	P_L	—	20	184	8.20	
⑨-2	P_L	—	31	4.93			
胴(底板)	⑩	P_m	—	11	122	10.0	
		P_L+P_b	内	12	183	14.2	
	外		13	13.0			
⑪	P_L	—	18	183	9.16		
外筒	⑫	引張	—	77	156	1.02	
		圧縮	—	20	156	6.80	
		せん断	—	30	90	2.00	
		曲げ	—	87	156	0.79	
	⑬	引張	—	41	156	2.80	
		圧縮	—	13	156	11.0	
		せん断	—	3	90	29.0	
		曲げ	—	7	156	21.2	
	⑭	引張	—	14	156	10.1	
		圧縮	—	18	156	7.66	
		せん断	—	20	90	3.50	
		曲げ	—	86	156	0.81	

(注 1) (ロ)-第 A. 30 図参照

(注 2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力(注 3) 断面①～⑪の 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。断面⑫～⑭における引張応力に対する基準値は f_t 、圧縮応力に対する基準値は f_c 、せん断応力に対する基準値は f_s 、曲げ応力に対する基準値は f_b である。

(ロ)-第 A. 27 表 0.3 m 水平落下時の容器本体に対する一次応力の評価 (2/2)

部位	断面 No. (注 1)	応力 分類 (注 2) 又は 応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度(°C)	解析 基準値 (MPa) (注 3)	余裕率 (MS)
下部端板	⑮	引張	—	8		136	16.0
		圧縮	—	13		136	9.46
		せん断	—	16		78	3.87
		曲げ	—	63		136	1.15
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	2		157	77.5
		圧縮	—	1		157	156
		せん断	—	6		90	14.0
		曲げ	—	13		157	11.0
	⑰	引張	—	14		157	10.2
		圧縮	—	5		157	30.4
		せん断	—	6		90	14.0
		曲げ	—	24		157	5.54
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	5		136	26.2
		圧縮	—	30		136	3.53
		せん断	—	17		78	3.58
		曲げ	—	11		136	11.3
	⑲	引張	—	12		136	10.3
		圧縮	—	56		136	1.42
		せん断	—	16		78	3.87
		曲げ	—	67		136	1.02
二次蓋 シール部	⑳	P_L	—	15	186	11.4	
	㉑	P_L	—	67	185	1.76	
一次蓋 シール部	㉒	P_L	—	40	185	3.62	
	㉓	P_L	—	57	185	2.24	

(注 1) (ロ)-第 A. 30 図参照

(注 2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力(注 3) 断面⑮～⑲における引張応力に対する基準値は f_t 、圧縮応力に対する基準値は f_c 、せん断応力に対する基準値は f_s 、曲げ応力に対する基準値は f_b である。断面⑳～㉓の P_L に対する基準値は S_y である。

(ロ)-第 A. 28 表 0.3 m 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)	応力の 種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注2)	余裕率 (MS)
一次蓋	①	—	内	7		372	52.1
			外	12			30.0
	②	—	内	15		372	23.8
			外	13			27.6
二次蓋	③	—	内	14		372	25.5
			外	18			19.6
	④	—	内	54		372	5.88
			外	32			10.6
三次蓋	⑤	—	内	25		411	15.4
			外	25			15.4
	⑥	—	内	43		411	8.55
			外	64	5.42		
胴	⑦	—	内	101	372	2.68	
			外	78		3.76	
	⑧	—	内	23	369	15.0	
			外	36		9.25	
	⑨-1	—	内	25	369	13.7	
			外	24		14.3	
	⑨-2	—	内	43		7.58	
			外	32		10.5	
胴(底板)	⑩	—	内	33	366	10.0	
			外	11		32.2	
	⑪	—	内	39	366	8.38	
			外	45		7.13	

(注1) (ロ)-第 A. 30 図参照

(注2) 断面①～⑪における基準値は $3S_m$ である。

(ロ)-第A.28表 0.3 m 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)	応力の 種類 (注2)	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度(°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
外筒	⑫	引張	—	99	—	470	3.74
		せん断	—	26		271	9.42
		曲げ	—	72		470	5.52
	⑬	引張	—	64		470	6.34
		せん断	—	3		271	89.3
		曲げ	—	5		470	93.0
	⑭	引張	—	86		470	4.46
		せん断	—	30		271	8.03
		曲げ	—	134		470	2.50
下部端板	⑮	引張	—	60		410	5.83
		せん断	—	33		236	6.15
		曲げ	—	146		410	1.80
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	3		472	156
		せん断	—	2		272	135
		曲げ	—	5		472	93.4
	⑰	引張	—	12		472	38.3
		せん断	—	6		272	44.3
		曲げ	—	25		472	17.8
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	64	410	5.40	
		せん断	—	17	236	12.8	
		曲げ	—	8	410	50.2	
	⑲	引張	—	80	410	4.12	
		せん断	—	16	236	13.7	
		曲げ	—	59	410	5.94	
二次蓋 シール部	⑳	—	内	36	186	4.16	
		—	外	25		6.44	
	㉑	—	内	61	185	2.03	
		—	外	62		1.98	
一次蓋 シール部	㉒	—	内	28	185	5.60	
		—	外	70		1.64	
	㉓	—	内	57	185	2.24	
		—	外	56		2.30	
一次蓋 ボルト	—	σ_m	—	251	562	1.23	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	590	843	0.42	
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	241	564	1.34	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	596	846	0.41	
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	285	564	0.97	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	468	846	0.80	

(注1) (ロ)-第A.30図参照

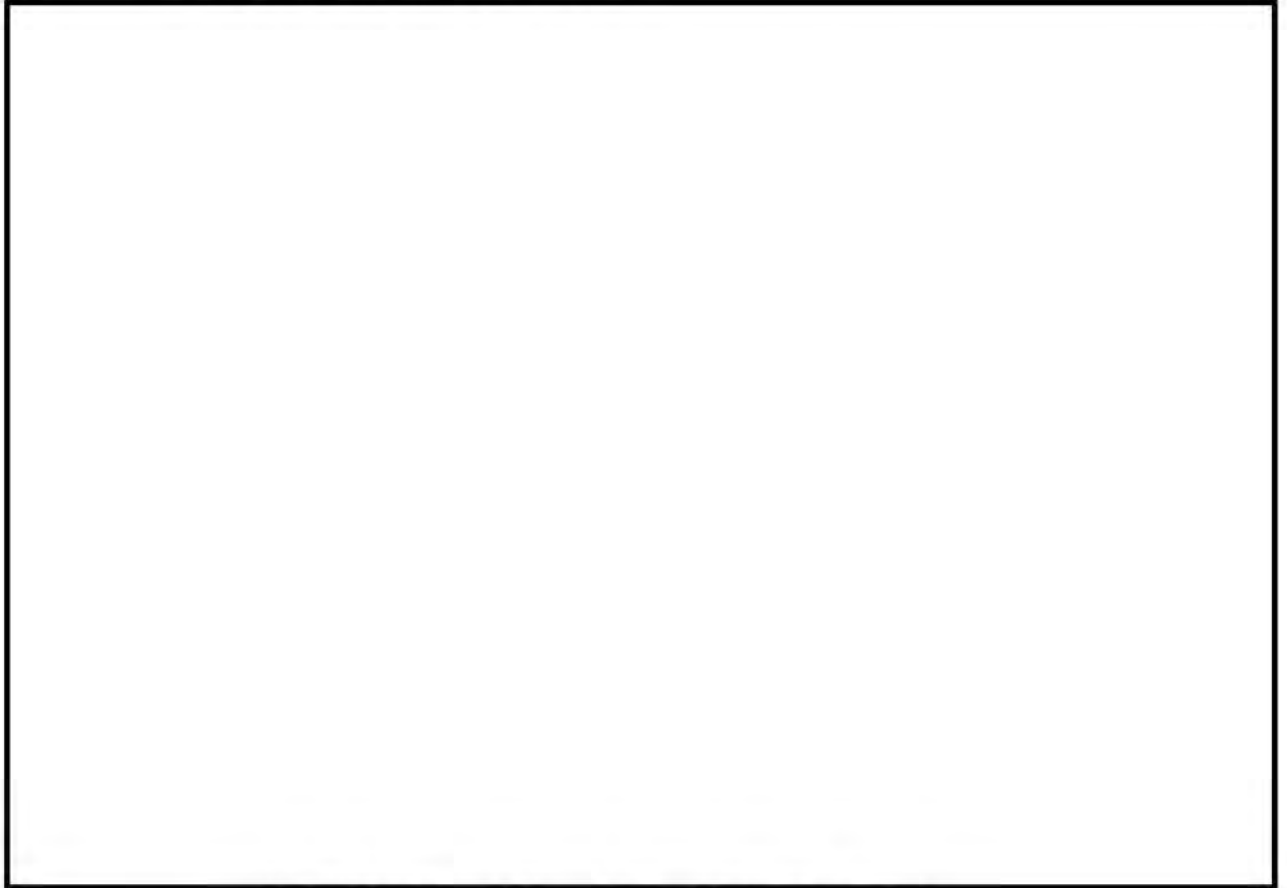
(注2) σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力

(注3) 断面⑫～⑱における引張応力に対する基準値は $3f_t$ 、せん断応力に対する基準値は $3f_s$ 、曲げ
応力に対する基準値は $3f_b$ である。断面⑳～㉓に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準
値は σ_m に対して $2S_m$ 、 $\sigma_m + \sigma_b$ に対して $3S_m$ である。なお、蓋ボルトの $2S_m$ 及び $3S_m$ の値は、 S_y
より小さい。

(2) バスケット

a. バスケットプレート縦板

水平落下時にバスケットプレート縦板切欠部には(ロ)-第 A. 33 図に示すように、領域Ⅰの範囲にあるバスケットプレート、バスケットサポート及び燃料集合体の自重による慣性力並びに、領域Ⅱのバスケットプレートの自重による慣性力が作用し、圧縮による膜応力 σ_c (MPa)が生じる。



(ロ)-第 A. 33 図 バスケットプレート縦板の解析モデル

$$\sigma_c = \frac{W_I + W_{II}}{A \cdot N} G_H$$

ここで、

W_I : 領域Ⅰのバスケットプレート、中性子吸収材、バスケットサポート及び燃料集合体の質量 (kg)

W_{II} : 領域Ⅱのバスケットプレート及び中性子吸収材の質量 (kg)

W_f : 燃料集合体の質量 (kg)

N_f : 領域Ⅰの範囲にある燃料集合体の数 (体)

G_H : 水平落下時の衝撃加速度 (m/s^2)

N : バスケットプレートの数 (枚)

A : 断面積 (mm²)

$$A = (b_1 + b_2 \times 2) \times h_1 - (b_3 + b_4 \times 2) \times h_2$$

b₁ : バスケットプレート幅 1 (mm)

b₂ : バスケットプレート幅 2 (mm)

h₁ : バスケットプレート高さ 1 (mm)

b₃ : バスケットプレート幅 3 (mm)

b₄ : バスケットプレート幅 4 (mm)

h₂ : バスケットプレート高さ 2 (mm)



(ロ)-第 A. 34 図 バスケットプレート解析モデル図

計算条件と計算結果を (ロ)-第 A. 29 表 に示す。表に示すように、評価位置において A. 1. 2 に示す解析基準値を満足する。なお、180 ° 側以外の任意の角度で落下する場合も健全性は維持される。また、バスケットに生じる応力は、設計降伏点 (56 MPa) より低いので、バスケットは塑性変形しない。

(ロ)-第 A. 29 表 バスケットプレート縦板の応力計算条件及び計算結果

項目	燃料集合体の質量(BP 無, BP 有) : W_f (kg)	領域 I の範囲にある燃料集合体の数(BP 無, BP 有) : N_f (体)	領域 I のバスケットプレート、中性子吸収材、バスケットサポート及び燃料集合体の質量(注 1) : W_I (kg)	領域 II のバスケットプレート及び中性子吸収材の質量(注 2) : W_{II} (kg)	水平落下時の衝撃加速度 : G_H (m/s ²)
数値	680,				210

項目	バスケットプレート幅 1 : b_1 (mm)	バスケットプレート幅 2 : b_2 (mm)	バスケットプレート高さ 1 : h_1 (mm)	バスケットプレート幅 3 : b_3 (mm)	バスケットプレート幅 4 : b_4 (mm)	バスケットプレート高さ 2 : h_2 (mm)	断面積 : A (mm ²)
数値							

項目	バスケットプレートの数 : N (枚)	圧縮応力 : σ_c (MPa)	基準値 : S_m (MPa)	余裕率 (-)
数値		12	36	2.00

(注 1) 領域 I のバスケットプレート、中性子吸収材、バスケットサポート及び燃料集合体の各質量の内訳は、以下のとおりである。

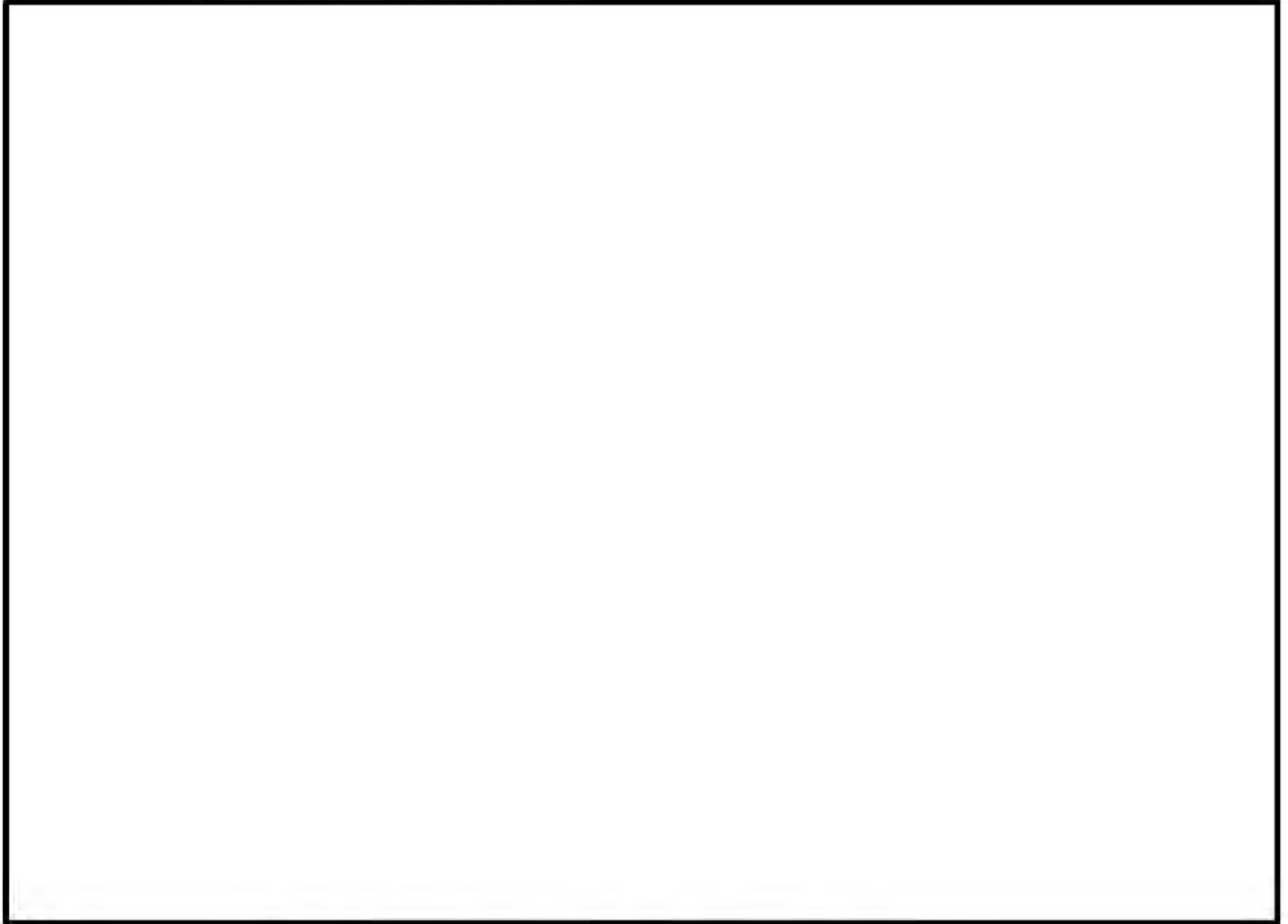
バスケットプレートの質量 : () (kg)
 中性子吸収材の質量 : () (kg)
 バスケットサポートの質量 : () (kg)
 燃料集合体の合計質量 : $680 \times$ () (kg)

(注 2) 領域 II のバスケットプレート及び中性子吸収材の各質量の内訳は以下のとおりである。

バスケットプレートの質量 : () (kg)
 中性子吸収材の質量 : () (kg)

b. バスケットプレート横板

水平落下時にバスケットプレート横板切欠部には、(ロ)-第 A. 35 図に示すようにバスケットプレート、中性子吸収材及び燃料集合体の自重による慣性力により曲げ応力 σ_b 及びせん断応力 τ が生じる。



(ロ)-第 A. 35 図 バスケットプレート横板の解析モデル

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

$$\tau = \frac{F}{A}$$

ここで、

σ_b : 曲げ応力 (MPa)

τ : せん断応力 (MPa)

M : 曲げモーメント (N・mm)

$$M = \frac{w \cdot \ell^2}{12} G_H$$

Z : 断面係数 (mm³)

$$Z = \frac{h_1^3 \times b_1 - h_2^3 \times (b_2 + b_3 \times 2)}{6h_1}$$

A : 断面積 (mm²)

$$A = b_1 \times h_1 - h_2 \times (b_2 + b_3 \times 2)$$

F : せん断力 (N)

$$F = w \times \ell / 2 \times G_H$$

w : 分布荷重 (kg/mm)

$$w = \frac{W_f + W_b \times N}{\ell \times N}$$

ℓ : バスケットセルの内幅 (mm)

G_H : 水平落下時の衝撃加速度 (m/s²)

W_f : 燃料集合体の質量 (kg)

W_b : バスケットプレート及び中性子吸収材の質量 (kg)

N : バスケットプレートの数 (段)

h_1 : バスケットプレート高さ 1 (mm)

b_1 : バスケットプレート幅 1 (mm)

b_2 : バスケットプレート幅 2 (mm)

h_2 : バスケットプレート高さ 2 (mm)

b_3 : バスケットプレート幅 3 (mm)



(ロ)-第 A. 36 図 バスケットプレート解析モデル図

計算条件と計算結果を (ロ)-第 A. 30 表に示す。表に示すように、評価位置において A. 1. 2 に示す解析基準値を満足する。なお、180 ° 側以外の任意の角度で落下する場合も健全性は維持される。なお、バスケットに生じる応力は、設計降伏点 (56 MPa) より低いので、バスケットは塑性変形しない。

(ロ)-第 A. 30 表 バスケットプレート横板の応力計算条件及び計算結果

項目	燃料集合体の質量(BP有) : W_f (kg)	バスケットプレート及び中性子吸収材の質量 : W_b (kg)	バスケットプレートの数 : N (枚)	バスケットセルの内幅 : l (mm)	分布荷重 : w (kg/mm)	水平落下時の衝撃加速度 : G_H (m/s ²)
数値						210

項目	バスケットプレート高さ1 : h_1 (mm)	バスケットプレート幅1 : b_1 (mm)	バスケットプレート幅2 : b_2 (mm)	バスケットプレート高さ2 : h_2 (mm)	バスケットプレート幅3 : b_3 (mm)
数値					

項目	曲げモーメント : M (N・mm)	断面係数 : Z (mm ³)	曲げ応力 : σ_b (MPa)	基準値 : αS_m (MPa)	余裕率 (-)
数値			8	46	4.75

項目	せん断力 : F (N)	断面積 : A (mm ²)	せん断応力 : τ (MPa)	基準値 : $0.6S_m$ (MPa)	余裕率 (-)
数値			2	21	9.50

(3) 燃料集合体

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 S (MPa)は、外面に生じるので外面のみ評価する。

a. 落下衝撃により生じる曲げ応力

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。

$$\sigma_b = \frac{Md_o}{2I}$$

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

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

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 (m/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質量 (kg/mm)

W_c : 燃料被覆管単位長さ当たり質量 (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)

b. 内圧による各方向応力

内圧 P_o により生じる各方向応力は、1.(3)と同じである。

c. 応力強さ

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応力強さは、以下の式で与えられる。

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

ここで、

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

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

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

燃料被覆管材料（ジルカロイ-4）の□℃における照射後の降伏応力 σ_y は、589 MPa⁴⁾ であるので、余裕率 MS は、次式で与えられる。

$$MS = \frac{\sigma_y}{S} - 1$$

以上の諸式を用いて各燃料に対して計算した結果を (p)-第 A. 31 表に示す。燃料被覆管に発生する応力強さは基準値以下である。

(p)-第 A. 31 表 水平落下時の燃料被覆管の強度評価結果

燃料タイプ	A型	B型
ペレット単位長さ当たり質量： W_f (kg/mm)		
燃料被覆管単位長さ当たり質量： W_c (kg/mm)		
衝撃加速度： G_H (m/s ²)	210	210
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)	9.50	9.50
内圧： P_o (MPa)	8.36	8.36
応力強さ： S (MPa)	11.77	11.38
降伏応力： σ_y (MPa)	141	140
余裕率：MS (-)	589	589
	3.17	3.20

3. コーナー落下

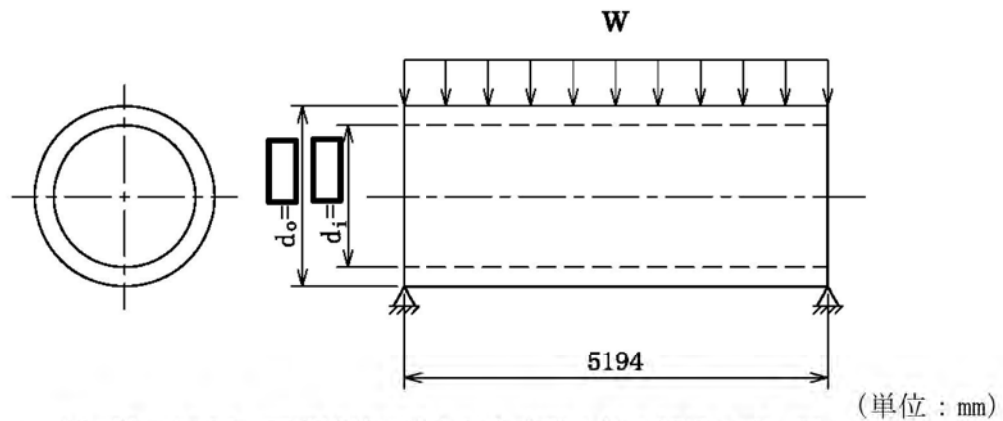
(p)-第 A. 19 表に示すように、コーナー落下時の衝撃加速度は垂直落下及び水平落下時に比べて小さく、垂直及び水平落下時に比べて条件が厳しくない。ただし、頭部コーナー落下時は、頭部垂直落下時と違い蓋部に作用する緩衝体の圧潰力が蓋全面に作用せず内部の収納物等による慣性力が蓋を介して蓋ボルトに作用する。この蓋ボルトへの荷重については、より衝撃加速度の大きい特別の試験条件で評価し、蓋ボルトの応力が設計降伏点より低いことを確認している。したがって、コーナー落下時に輸送容器及び収納物の構造健全性が損なわれることはない。

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 1.3×10^{-2} MPa のいずれか厳しい方を負荷することになっている。本輸送物の場合、輸送物の構造解析上での総質量 1.344×10^5 kg の5倍に相当する 6.720×10^5 kg (6.591×10^6 N) の荷重の方が、本輸送容器の鉛直投影面積に 1.3×10^{-2} MPa を乗じて得た値に相当する荷重より大きいので、 6.720×10^5 kg (6.591×10^6 N) の荷重が輸送容器の軸に垂直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

本輸送物では、容器本体を円筒構造とみなして、最も厳しい条件として(□)-第 A.37 図に示すように、長さ L 、外径 d_o (胴外径)、内径 d_i (胴内径) の円筒 (胴) をよこ置きにして両端を単純支持し、鉛直方向に 6.591×10^6 N の等分布荷重が負荷する場合について解析する。



(□)-第 A.37 図 両端単純支持された容器本体の解析モデル図

この場合、荷重を受けるのは容器本体であり、緩衝体が両端支持として働く。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。

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

ここで、

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、胴部をこの円筒とみなして曲げ応力を計算した場合の計算条件と計算結果を、(p)-第 A. 32 表に示す。本輸送物は、軸に垂直な方向の荷重により圧潰することはない。

(p)-第 A. 32 表 容器本体の軸に垂直方向の積み重ね応力計算条件及び計算結果

評価位置	輸送物総質量の 5倍の荷重 : W (N)	容器本体の 全長 : L (mm)	胴外径 : d_o (mm)	胴内径 : d_i (mm)	最大 曲げ応力 : σ_b (MPa)	基準値 : S_y (MPa)	余裕率 (-)
容器 本体	6.591×10^6	5194			7	184	25.2

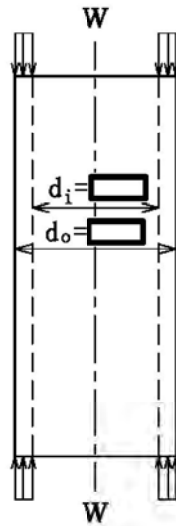
2. 軸方向の荷重の場合

(ロ)第 A. 38 図に示すように、円筒をたて置きにし、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。

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

ここで、

- W : 荷重 (N)
- d_i : 円筒内径 (mm)
- d_o : 円筒外径 (mm)



(単位 : mm)

(ロ)第 A. 38 図 両端より圧縮される容器本体の解析モデル図

ここで、胴部をこの円筒とみなして圧縮応力を計算した場合の計算条件と計算結果を (ロ)第 A. 33 表に示す。本輸送物は、軸方向の荷重により圧潰することはない。

(ロ)第 A. 33 表 容器本体の軸方向の積み重ね応力計算条件及び計算結果

評価位置	輸送物総質量の 5 倍の荷重 : W (N)	胴外径 : d_o (mm)	胴内径 : d_i (mm)	圧縮応力 : σ_c (MPa)	基準値 : S_y (MPa)	余裕率 (-)
容器本体	6.591×10^6			5	184	35.8

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、外筒や蓋部及び底部中性子遮蔽材カバー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

破損は生じない。一方、緩衝体は、最大 20mm 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は包絡される。

A.5.5 貫通

本項では、質量 6 kg、直径 3.2 cm の軟鋼棒が 1 m の高さから本輸送物外表面で最も板厚の薄い緩衝体カバープレート（板厚□mm）へ落下するとした場合に、緩衝体カバープレートが破断せず軟鋼棒は内部に貫通しないことを示す。

6 kg の軟鋼棒が 1 m 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。

$$E = mgH$$

ここで、

m : 軟鋼棒の質量 (kg)

g : 重力加速度 (m/s^2)

H : 落下高さ (mm)

一方、軟鋼棒が緩衝体カバープレートへ落下した際、貫通するためには落下エネルギーが(ロ)-第 A.39 図に示すようにカバープレートのせん断に必要なエネルギーより大きい場合である。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。

$$E_s = \frac{\pi}{2} dt^2 S$$

ここで、

d : 軟鋼棒の直径 (mm)

t : 緩衝体カバープレートの板厚 (mm)

S : カバープレートのせん断強さ (MPa)

(せん断強さはせん断ひずみエネルギー説に基づき、カバープレートの設計引張強さの $1/\sqrt{3}$ とする。)

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、計算条件と計算結果は(ロ)-第 A.34 表に示すように $E < E_s$ となり、カバープレートは軟鋼棒の落下によりせん断破壊せず、軟鋼棒は緩衝体カバープレートを貫通しない。

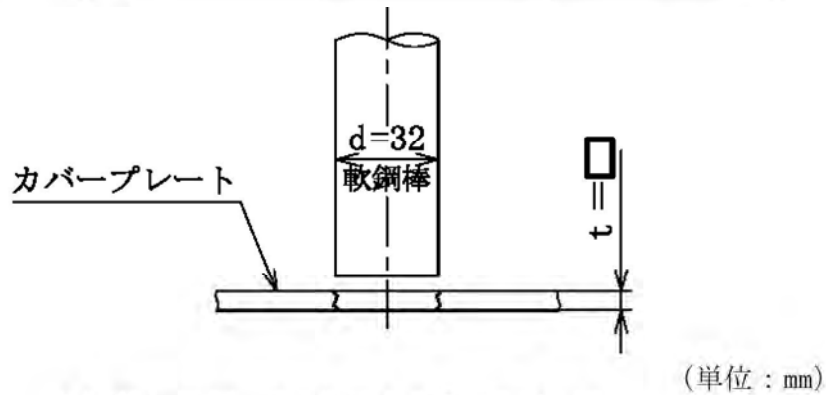
その他の箇所のせん断に要するエネルギーは、緩衝体カバープレートより大きいため、せん断破壊はおこらず、密封部の健全性が維持され、また、熱解析及び遮蔽解析への影響は無視できる。

(ロ)-第 A. 34 表 軟鋼棒の落下エネルギー及びカバープレートせん断エネルギー

計算条件及び計算結果

項目	軟鋼棒の質量 : m (kg)	重力加速度 : g (m/s ²)	落下高さ : H (mm)	落下エネルギー : E (N・mm)
数値等	6	9. 80665	1000	5. 884 × 10 ⁴

項目	軟鋼棒の直径 : d (mm)	緩衝体 カバープレート の板厚 : t (mm)	カバープレートの 設計引張強さ : S _u (MPa)	カバープレートの せん断強さ : S (MPa)	せん断 エネルギー : E _s (N・mm)
数値等	32				4. 505 × 10 ⁵



(ロ)-第 A. 39 図 せん断による貫通モデル図

A. 5. 6 角又は縁落下

本輸送物は、鋼製の円筒形で質量は 134. 4 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

一般の試験条件における輸送物に対する解析結果の要約を (ロ)-第 A. 35 表に示す。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、表に示すように、各試験条件下において輸送物各部は 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。また、三次蓋の口開き変形が基準を満足していることから、密封性能も維持される。

なお、頭部 0. 3m 垂直落下時には、一次蓋内面、バスケット及び燃料集合体に、底部 0. 3m 垂直落下時には、胴底部内面、バスケット及び燃料集合体に、衝撃加速度を上回る加速度が発生すると考えられるが、それらの部材に加速度割増を考慮しても健全性に影響はない。

(注) A. 10. 1 に示す MSF-24P 型輸送容器のプロトタイプである MSF キャスクの 9. 3m 頭部垂直落下試験で計測された内部収納物の加速度割増を基に、0. 3m 垂直落下時には 1. 4 倍程度の加速度割増が生じると考えられるが、輸送物の各部材は 0. 4 以上の余裕率を有する。

(ロ)-第 A. 35 表 一般の試験条件における構造解析結果の要約 (1/7)

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等 (-)
熱的試験				
(1) 容器本体 一次応力				
一次蓋 (P _L +P _b)	1. 5S _m	186	7	25. 5
二次蓋 (P _L +P _b)	1. 5S _m	186	13	13. 3
三次蓋 (P _L +P _b)	1. 5S _m	205	19	9. 78
胴 (P _L +P _b)	1. 5S _m	184	3	60. 3
胴 (底板) (P _m)	S _m	122	1	121
外筒 (引張)	f _t	156	21	6. 42
外筒 (圧縮)	f _c	156	2	77. 0
外筒 (せん断)	f _s	90	8	10. 2
外筒 (曲げ)	f _b	156	35	3. 45
下部端板 (引張)	f _t	136	2	67. 0
下部端板 (圧縮)	f _c	136	1	135
下部端板 (せん断)	f _s	78	3	25. 0
下部端板 (曲げ)	f _b	136	12	10. 3
蓋部中性子遮蔽材カバー (引張)	f _t	157	—	—
蓋部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	f _c	157	1	156
蓋部中性子遮蔽材カバー (せん断)	f _s	90	1	89. 0
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	f _b	157	3	51. 3
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	f _t	136	4	33. 0
底部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	f _c	136	1	135
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	f _s	78	5	14. 6
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	f _b	136	29	3. 68
一次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	185	33	4. 60
二次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	186	13	13. 3
(一次+二次) 応力				
一次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	9	40. 3
二次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	12	30. 0
三次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	411	27	14. 2
胴 (P _L +P _b +Q)	3S _m	369	20	17. 4
胴 (底板) (P _L +P _b +Q)	3S _m	366	27	12. 5
外筒 (引張)	3f _t	470	82	4. 73
外筒 (せん断)	3f _s	271	17	14. 9
外筒 (曲げ)	3f _b	470	82	4. 73
下部端板 (引張)	3f _t	410	48	7. 54
下部端板 (せん断)	3f _s	236	24	8. 83
下部端板 (曲げ)	3f _b	410	109	2. 76
蓋部中性子遮蔽材カバー (引張)	3f _t	472	4	117
蓋部中性子遮蔽材カバー (せん断)	3f _s	272	2	135
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	3f _b	472	3	156
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	3f _t	410	34	11. 0
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	3f _s	236	4	58. 0
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	3f _b	410	21	18. 5
一次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	60	2. 08
二次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	186	22	7. 45
一次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	562	249	1. 25
一次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	843	251	2. 35
二次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	564	206	1. 73
二次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	846	219	2. 86
三次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	564	229	1. 46
三次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	846	320	1. 64
三次蓋相対口開き変形量	—	□ mm	0. 08 mm	基準に合致
水噴霧試験				
	吸水性	無	無	基準に合致
	水切り	有	有	基準に合致

(ロ)-第 A. 35 表 一般の試験条件における構造解析結果の要約 (2/7)

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等 (-)
自由落下試験				
1. 垂直落下				
(1) 容器本体 (頭部垂直落下)				
一次応力				
一次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	186	65	1.86
二次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	186	34	4.47
三次蓋 (P _L)	1.5S _m	205	36	4.69
胴 (P _L)	1.5S _m	186	43	3.32
胴 (底板) (P _L +P _b)	1.5S _m	183	6	29.5
外筒 (引張)	f _t	156	39	3.00
外筒 (圧縮)	f _c	156	24	5.50
外筒 (せん断)	f _s	90	14	5.42
外筒 (曲げ)	f _b	156	45	2.46
下部端板 (引張)	f _t	136	2	67.0
下部端板 (圧縮)	f _c	136	1	135
下部端板 (せん断)	f _s	78	4	18.5
下部端板 (曲げ)	f _b	136	12	10.3
蓋部中性子遮蔽材カバー (引張)	f _t	157	17	8.23
蓋部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	f _c	157	1	156
蓋部中性子遮蔽材カバー (せん断)	f _s	90	10	8.00
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	f _b	157	70	1.24
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	f _t	136	2	67.0
底部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	f _c	136	1	135
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	f _s	78	3	25.0
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	f _b	136	16	7.50
一次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	185	48	2.85
二次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	185	31	4.96
(一次+二次) 応力				
一次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	66	4.63
二次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	34	9.94
三次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	411	85	3.83
胴 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	76	3.89
胴 (底板) (P _L +P _b +Q)	3S _m	366	23	14.9
外筒 (引張)	3f _t	470	82	4.73
外筒 (せん断)	3f _s	271	18	14.0
外筒 (曲げ)	3f _b	470	85	4.52
下部端板 (引張)	3f _t	410	48	7.54
下部端板 (せん断)	3f _s	236	24	8.83
下部端板 (曲げ)	3f _b	410	107	2.83
蓋部中性子遮蔽材カバー (引張)	3f _t	472	11	41.9
蓋部中性子遮蔽材カバー (せん断)	3f _s	272	11	23.7
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	3f _b	472	64	6.37
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	3f _t	410	35	10.7
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	3f _s	236	3	77.6
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	3f _b	410	9	44.5
一次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	96	0.92
二次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	43	3.30
一次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	562	289	0.94
一次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	843	323	1.60
二次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	564	212	1.66
二次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	846	323	1.61
三次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	564	204	1.76
三次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	846	216	2.91
三次蓋相対口開き変形量	—	□ mm	0.01 mm以下	基準に合致

(ロ)-第 A. 35 表 一般の試験条件における構造解析結果の要約 (3/7)

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等 (-)
(2) 容器本体 (底部垂直落下)				
一次応力				
一次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	186	16	10.6
二次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	186	5	36.2
三次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	205	39	4.25
胴 (P _L)	1.5S _m	184	23	7.00
胴 (底板) (P _L +P _b)	1.5S _m	183	30	5.10
外筒 (引張)	f _t	156	37	3.21
外筒 (圧縮)	f _c	156	5	30.2
外筒 (せん断)	f _s	90	8	10.2
外筒 (曲げ)	f _b	156	39	3.00
下部端板 (引張)	f _t	136	7	18.4
下部端板 (圧縮)	f _c	136	2	67.0
下部端板 (せん断)	f _s	78	11	6.09
下部端板 (曲げ)	f _b	136	43	2.16
蓋部中性子遮蔽材カバー (引張)	f _t	157	—	—
蓋部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	f _c	157	3	51.3
蓋部中性子遮蔽材カバー (せん断)	f _s	90	2	44.0
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	f _b	157	9	16.4
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	f _t	136	14	8.71
底部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	f _c	136	2	67.0
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	f _s	78	8	8.75
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	f _b	136	57	1.38
一次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	185	36	4.13
二次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	185	14	12.2
(一次+二次) 応力				
一次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	22	15.9
二次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	8	45.5
三次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	411	55	6.47
胴 (P _L +P _b +Q)	3S _m	369	44	7.38
胴 (底板) (P _L +P _b +Q)	3S _m	366	49	6.46
外筒 (引張)	3f _t	470	87	4.40
外筒 (せん断)	3f _s	271	15	17.0
外筒 (曲げ)	3f _b	470	49	8.59
下部端板 (引張)	3f _t	410	40	9.25
下部端板 (せん断)	3f _s	236	11	20.4
下部端板 (曲げ)	3f _b	410	58	6.06
蓋部中性子遮蔽材カバー (引張)	3f _t	472	3	156
蓋部中性子遮蔽材カバー (せん断)	3f _s	272	4	67.0
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	3f _b	472	11	41.9
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	3f _t	410	33	11.4
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	3f _s	236	9	25.2
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	3f _b	410	61	5.72
一次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	63	1.93
二次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	186	22	7.45
一次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	562	249	1.25
一次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	843	250	2.37
二次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	564	196	1.87
二次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	846	202	3.18
三次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	564	234	1.41
三次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	846	326	1.59
三次蓋相対口開き変形量	—	□ mm	0.01 mm以下	基準に合致

(p)-第 A. 35 表 一般の試験条件における構造解析結果の要約 (4/7)

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等 (-)
(3) バスケット バスケットプレート (σ_c)	S_m	36	7	4.14
	f_c	37	7	4.28
(4) 燃料集合体 燃料被覆管	σ_y	589	105	4.60

(ロ)-第 A. 35 表 一般の試験条件における構造解析結果の要約 (5/7)

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等 (-)
2. 水平落下				
(1) 容器本体				
一次応力				
一次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	186	10	17.6
二次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	186	20	8.30
三次蓋 (P _L)	1.5S _m	205	24	7.54
胴 (P _L)	1.5S _m	186	66	1.81
胴 (底板) (P _L)	1.5S _m	183	18	9.16
外筒 (引張)	f _t	156	77	1.02
外筒 (圧縮)	f _c	156	20	6.80
外筒 (せん断)	f _s	90	30	2.00
外筒 (曲げ)	f _b	156	87	0.79
下部端板 (引張)	f _t	136	8	16.0
下部端板 (圧縮)	f _c	136	13	9.46
下部端板 (せん断)	f _s	78	16	3.87
下部端板 (曲げ)	f _b	136	63	1.15
蓋部中性子遮蔽材カバー (引張)	f _t	157	14	10.2
蓋部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	f _c	157	5	30.4
蓋部中性子遮蔽材カバー (せん断)	f _s	90	6	14.0
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	f _b	157	24	5.54
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	f _t	136	12	10.3
底部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	f _c	136	56	1.42
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	f _s	78	17	3.58
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	f _b	136	67	1.02
一次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	185	57	2.24
二次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	185	67	1.76
(一次+二次) 応力				
一次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	15	23.8
二次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	54	5.88
三次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	411	64	5.42
胴 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	101	2.68
胴 (底板) (P _L +P _b +Q)	3S _m	366	45	7.13
外筒 (引張)	3f _t	470	99	3.74
外筒 (せん断)	3f _s	271	30	8.03
外筒 (曲げ)	3f _b	470	134	2.50
下部端板 (引張)	3f _t	410	60	5.83
下部端板 (せん断)	3f _s	236	33	6.15
下部端板 (曲げ)	3f _b	410	146	1.80
蓋部中性子遮蔽材カバー (引張)	3f _t	472	12	38.3
蓋部中性子遮蔽材カバー (せん断)	3f _s	272	6	44.3
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	3f _b	472	25	17.8
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	3f _t	410	80	4.12
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	3f _s	236	17	12.8
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	3f _b	410	59	5.94
一次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	70	1.64
二次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	62	1.98
一次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	562	251	1.23
一次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	843	590	0.42
二次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	564	241	1.34
二次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	846	596	0.41
三次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	564	285	0.97
三次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	846	468	0.80
三次蓋相対口開き変形量	—	□ mm	0.18 mm	基準に合致

(ロ)-第 A. 35 表 一般の試験条件における構造解析結果の要約 (6/7)

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等 (-)
(2) バスケット				
バスケットプレート縦板(σ_c)	S_m	36	12	2.00
バスケットプレート横板(σ_b)	αS_m	46	8	4.75
バスケットプレート横板(τ)	$0.6S_m$	21	2	9.50
(3) 燃料集合体 燃料被覆管	σ_y	589	141	3.17

(ロ)-第 A. 35 表 一般の試験条件における構造解析結果の要約 (7/7)

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等 (-)
3. コーナー落下	衝撃加速度が垂直落下及び水平落下に比べ小さいので、垂直落下及び水平落下の結果より厳しくない。			
積み重ね試験				
半径方向	S _y	184	7	25.2
軸方向	S _y	184	5	35.8
貫通				
緩衝体	せん断 エネルギー	4.505×10^5 N・mm	5.884×10^4 N・mm	基準に合致

A.6 特別の試験条件

本節では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、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つづいて火災試験が行われるとする。火災試験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係る緩衝体の変形である。9 m 落下試験と 1 m 貫通試験の試験順序の違いによってこれらの破損または変形に有意な差は生じないので、これらに引きつづく火災試験においては、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 9 m 落下試験に続いて 1 m 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 (9 m 落下時)

連続しておこる特別の試験条件の第 1 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 9 m 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 9 m 落下した場合、その落下エネルギーが、容器本体端部に取り付けられた緩衝体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検討する。

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

(2) 解析方法

緩衝体の変形量と衝撃力の計算方法は A. 5. 3. 1 の 1. に示す方法と同様に行う。

落下エネルギーの計算条件と計算結果を(□)-第 A. 36 表に示す。

(□)-第 A. 36 表 輸送物落下エネルギー計算条件及び計算結果

項目	輸送物最大 総質量 :m (kg)	重力加速度 :g (m/s ²)	落下高さ :H (mm)	輸送物の 落下エネルギー :E _k (N・mm)
数値	1. 344×10 ⁵	9. 80665	9000	1. 187×10 ¹⁰

(3) 各落下方向解析モデル

各落下方向の解析モデルは(□)-第 A. 23 図～(□)-第 A. 27 図に示したとおりである。

2. 落下時の緩衝体の変形量と衝撃加速度

落下エネルギーE_kに対応する変形量δと衝撃加速度Gは(□)-第 A. 37 表に示すようになる。

なお、衝撃加速度Gは次式で求めている。

$$G = \frac{F}{m}$$

ここで、

F : 解析で求めた衝撃力 (N)

m : 輸送物質量 (kg)

(□)-第 A. 37 表に示すとおり、9 m 落下試験時において輸送物の緩衝体に圧潰変形が生じる。

(ロ)-第 A. 37 表 9 m 落下試験時の衝撃加速度と緩衝体の変形量

落下姿勢		衝撃力 : F(N)	衝撃加速度 : G (m/s ²)	設計加速度 ^(注1) (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	7.449 × 10 ⁷	555	600	262	684
	底部	6.472 × 10 ⁷	482	500	302	608
水平落下		9.299 × 10 ⁷	692	710	273	374.5
コーナー 落下	頭部	6.130 × 10 ⁷	457	480	760	826
	底部	6.057 × 10 ⁷	451	—	754	827

(注1)設計加速度とは、得られた衝撃加速度に裕度を考慮した値である。

(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。

A. 6. 1. 1 垂直落下

9 m 垂直落下時の衝撃力に対して、容器本体は十分な強度で密封性を保持し、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。また、胴内のバスケットは破損しないことを示す。

1. 容器本体

垂直落下時の衝撃力に対する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

A. 5. 3. 2 と同様に、三次元有限要素を用いた (p)-第 A. 16 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。

- ・ 容器本体には、衝撃加速度 (600 m/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板外面に働く。
- ・ 一次蓋内面には、衝撃加速度 (600 m/s^2) に加速度割増係数として 2.6^{17} を乗じた加速度による内部収納物等 (バスケット及び燃料集合体) の慣性力が働く。
- ・ 落下時の上部緩衝体反力が蓋部に働く。

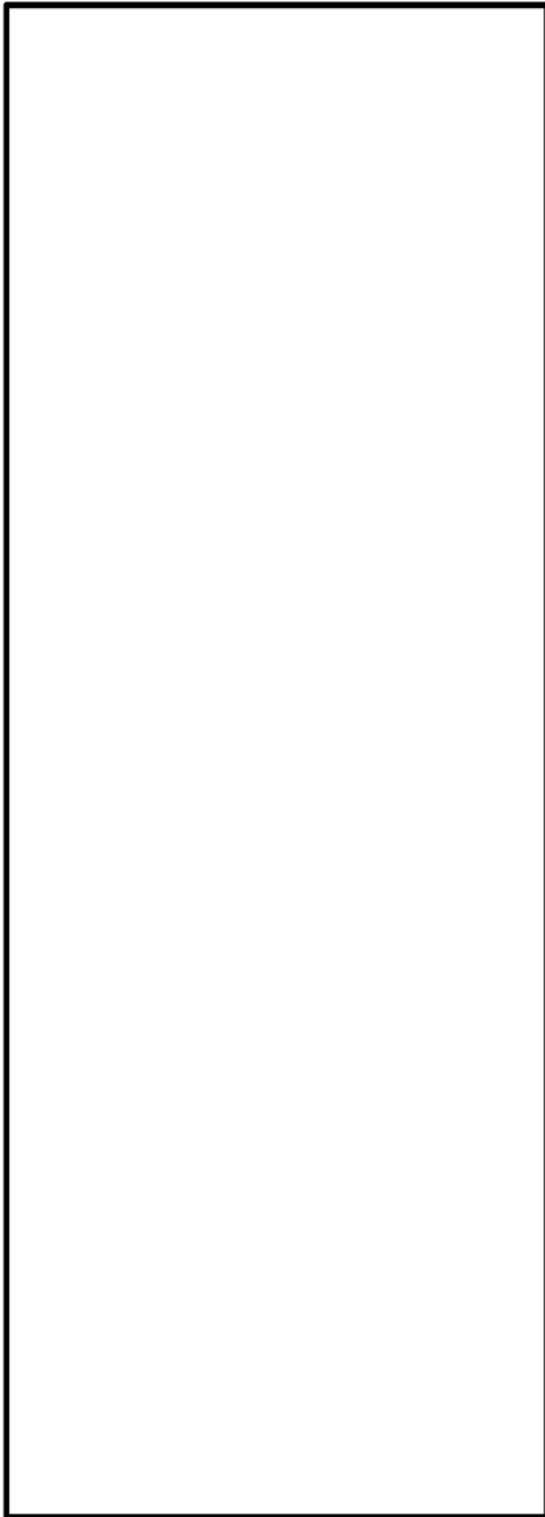
底部垂直落下時に作用する荷重は次のとおりである。

- ・ 容器本体には、衝撃加速度 (500 m/s^2) による自重の慣性力が落下方向に働く。
- ・ 上部緩衝体の自重による慣性力が三次蓋外面に働く。
- ・ 胴底部内面には、衝撃加速度 (500 m/s^2) に加速度割増係数として 2.6^{17} を乗じた加速度による内部収納物等 (バスケット及び燃料集合体) の慣性力が働く。

b. 境界条件

境界条件は緩衝体の衝撃力を受ける面の節点の軸方向変位及び対称面上の節点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 (p)-第 A. 40 図及び (p)-第 A. 41 図に示す。



F_{ab} : 下部緩衝体の慣性力

P_i : 胴内圧 (-0.101325 MPa G)

P_{ii} : 一二次蓋間圧力 (0.31 MPa G)

P_{iii} : 二三次蓋間圧力 (0.19 MPa G)

F_{iw} : 内部の収納物等 (バスケット、燃料集合体)
の慣性力

P_{sr} : 側部中性子遮蔽材部 (外筒側面) 圧力
(MPa G)

P_{er} : 側部中性子遮蔽材部 (端板面) 圧力
(MPa G)

P_{tr} : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)

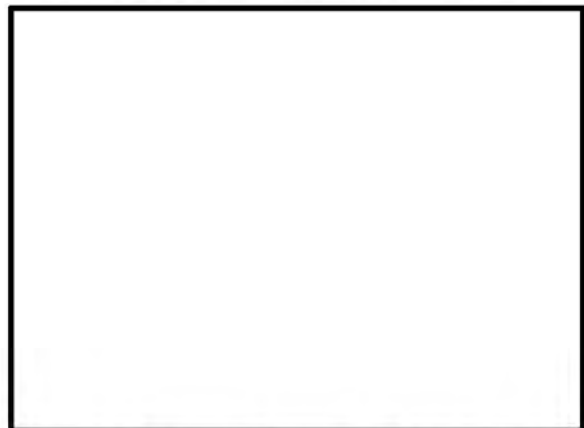
P_{br} : 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)

F_{rw} : 上部緩衝体反力

P_{bi} : 一次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

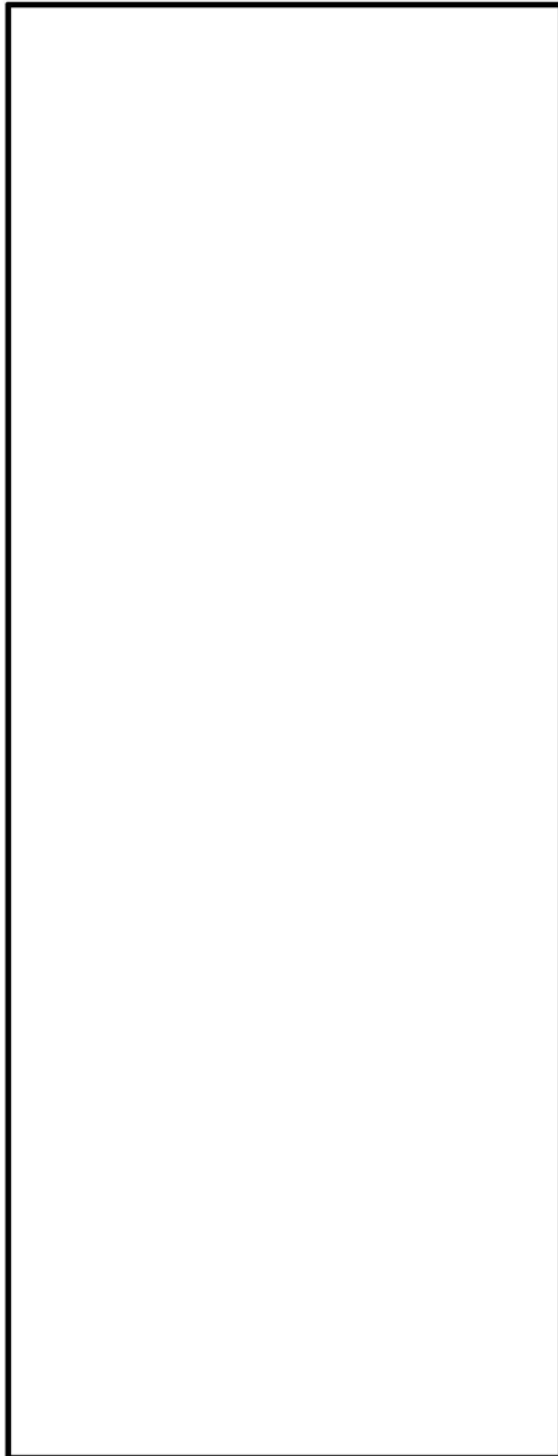
P_{bii} : 二次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

P_{biii} : 三次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

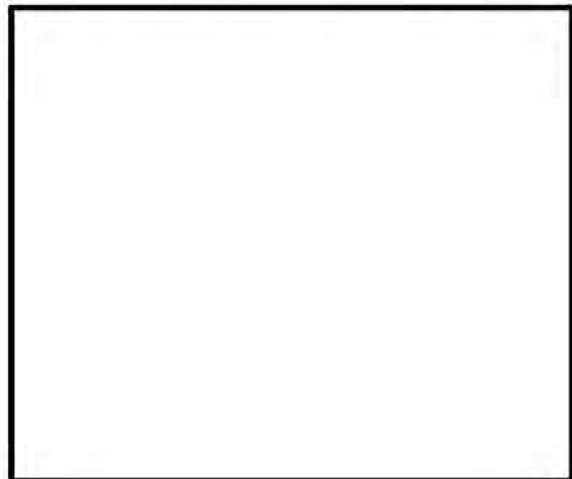


(ボルト初期締付力：一次蓋ボルトの例)

(□)-第 A. 40 図 頭部 9 m 垂直落下時の荷重条件及び境界条件



- F_{ab} : 上部緩衝体の慣性力
- P_i : 胴内圧 (-0.101325 MPa G)
- P_{ii} : 一二次蓋間圧力 (0.31 MPa G)
- P_{iii} : 二三次蓋間圧力 (0.19 MPa G)
- F_{iw} : 内部の収納物等 (バスケット、燃料集合体) の慣性力
- P_{sr} : 側部中性子遮蔽材部 (外筒側面) 圧力 (MPa G)
- P_{er} : 側部中性子遮蔽材部 (端板面) 圧力 (MPa G)
- P_{tr} : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)
- P_{br} : 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)
- P_{bi} : 一次蓋ボルト初期締付力 (MPa)
- P_{bii} : 二次蓋ボルト初期締付力 (MPa)
- P_{biii} : 三次蓋ボルト初期締付力 (MPa)



(□)-第 A. 41 図 底部 9 m 垂直落下時の荷重条件及び境界条件

(3) 解析結果

主要な位置 ((□)-第 A. 30 図参照) に対する頭部垂直落下時の一次応力及び蓋ボルトの評価結果を(□)-第 A. 38 表に、また、底部垂直落下時の一次応力及び蓋ボルトの評価結果を(□)-第 A. 39 表に示す。

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

また、三次蓋とキャスク本体の O リング取り付け位置での相対口開き変形量は 0. 01mm 以下であり、O リングの初期締め付け代 mm より小さく、密封性が損なわれることはない。

(□)-第 A. 38 表 頭部 9 m 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 (1/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の 種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
二次蓋	③	P_m	—	22	[]	251	10.4
		P_L+P_b	内	91		377	3.14
	外		124	2.04			
④	P_L	—	18	377		19.9	
三次蓋	⑤	P_m	—	26		270	9.38
		P_L+P_b	内	39		406	9.41
	外		78	4.20			
⑥	P_L	—	86	406		3.72	
胴	⑦	P_L	—	106		377	2.55
	⑧	P_m	—	19		251	12.2
		P_L+P_b	内	20		377	17.8
	外		18	19.9			
	⑨-1	P_L	—	11		377	33.2
⑨-2	P_L	—	13	28.0			
胴 (底板)	⑩	P_m	—	2	251	124	
		P_L+P_b	内	13	377	28.0	
	外		12	30.4			
⑪	P_L	—	9	377	40.8		
外筒	⑫	引張	—	25	282	10.2	
		圧縮	—	50	282	4.64	
		せん断	—	45	162	2.60	
		曲げ	—	170	282	0.65	
	⑬	引張	—	99	282	1.84	
		圧縮	—	7	282	39.2	
		せん断	—	1	162	161	
		曲げ	—	3	282	93.0	
	⑭	引張	—	11	282	24.6	
		圧縮	—	3	282	93.0	
		せん断	—	14	162	10.5	
		曲げ	—	62	282	3.54	

(注1) (□)-第 A. 30 図参照

(注2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力(注3) 断面③~④及び⑦~⑪の P_m に対する基準値は $2/3S_u$ 、 P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は S_u である。

断面⑤及び⑥の P_m に対する基準値は $\text{MIN}[2.4S_m, 2/3S_u]$ 、 P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は $\text{MIN}[3.6S_m, S_u]$ である。断面⑫~⑭に示す引張応力に対する基準値は $1.5f_t$ 、圧縮応力に対する基準値は $1.5f_c$ 、せん断応力に対する基準値は $1.5f_s$ 、曲げ応力に対する基準値は $1.5f_b$ である。

(□)-第 A. 38 表 頭部 9 m 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 (2/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の 種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度(°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
下部端板	⑮	引張	—	3	[Redacted]	218	71.6
		圧縮	—	1		218	217
		せん断	—	8		126	14.7
		曲げ	—	26		218	7.38
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	—		217	—
		圧縮	—	1		217	216
		せん断	—	1		125	124
		曲げ	—	2		217	107
	⑲	引張	—	1		217	216
		圧縮	—	2		217	107
		せん断	—	1		125	124
		曲げ	—	1		217	216
二次蓋 シール部	⑳	P_L+P_b+Q	内	72	186	1.58	
		P_L+P_b+Q	外	77		1.41	
	㉑	P_L+P_b+Q	内	79	185	1.34	
		P_L+P_b+Q	外	72		1.56	
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	311	848	1.72	
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	663	848	0.27	
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	180	848	3.71	
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	216	848	2.92	

(注1) (□)-第 A. 30 図参照

(注2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力 Q : 二次応力、 σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力(注3) 断面⑮、⑱及び⑲における引張応力に対する $1.5f_t$ 、圧縮応力に対する基準値は $1.5f_c$ 、せん断応力に対する基準値は $1.5f_s$ 、曲げ応力に対する基準値は $1.5f_b$ である。断面⑳及び㉑に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準値は S_y である。

(□)-第 A. 39 表 底部 9 m 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 (1/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の 種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
二次蓋	③	P_m	—	7	[Redacted]	251	34.8
		P_L+P_b	内	52		377	6.25
	外		50	6.54			
④	P_L	—	17	377		21.1	
三次蓋	⑤	P_m	—	5		270	53.0
		P_L+P_b	内	21		406	18.3
	外		22	17.4			
⑥	P_L	—	50	406		7.12	
胴	⑦	P_L	—	10		377	36.7
	⑧	P_m	—	20		251	11.5
		P_L+P_b	内	21		377	16.9
	外		20	17.8			
	⑨-1	P_L	—	31		377	11.1
⑨-2	P_L	—	60	5.28			
胴 (底板)	⑩	P_m	—	17	251	13.7	
		P_L+P_b	内	100	377	2.77	
	外		123	2.06			
⑪	P_L	—	49	377	6.69		
外筒	⑫	引張	—	17	282	15.5	
		圧縮	—	—	282	—	
		せん断	—	9	162	17.0	
		曲げ	—	43	282	5.55	
	⑬	引張	—	53	282	4.32	
		圧縮	—	1	282	281	
		せん断	—	1	162	161	
		曲げ	—	2	282	140	
	⑭	引張	—	27	282	9.44	
		圧縮	—	15	282	17.8	
		せん断	—	20	162	7.10	
		曲げ	—	85	282	2.31	

(注1) (□)-第 A. 30 図参照

(注2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力(注3) 断面③~④及び⑦~⑪の P_m に対する基準値は $2/3S_u$ 、 P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は S_u である。

断面⑤及び⑥の P_m に対する基準値は $\text{MIN}[2.4S_m, 2/3S_u]$ 、 P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は $\text{MIN}[3.6S_m, S_u]$ である。断面⑫~⑭に示す引張応力に対する基準値は $1.5f_t$ 、圧縮応力に対する基準値は $1.5f_c$ 、せん断応力に対する基準値は $1.5f_s$ 、曲げ応力に対する基準値は $1.5f_b$ である。

(□)-第 A. 39 表 底部 9 m 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 (2/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の 種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度(°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
下部端板	⑮	引張	—	18	[Redacted]	218	11.1
		圧縮	—	7		218	30.1
		せん断	—	26		126	3.84
		曲げ	—	107		218	1.03
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	42		217	4.16
		圧縮	—	1		217	216
		せん断	—	14		125	7.92
		曲げ	—	44		217	3.93
	⑲	引張	—	43		217	4.04
		圧縮	—	6		217	35.1
		せん断	—	14		125	7.92
		曲げ	—	99		217	1.19
二次蓋 シール部	⑳	P_L+P_b+Q	内	30		186	5.20
		P_L+P_b+Q	外	19			8.78
	㉑	P_L+P_b+Q	内	45	185	3.11	
		P_L+P_b+Q	外	35		4.28	
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	200	848	3.24	
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	209	848	3.05	
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	302	848	1.80	
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	436	848	0.94	

(注1) (□)-第 A. 30 図参照

(注2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力 Q : 二次応力、 σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力(注3) 断面⑮、⑱及び⑲における引張応力に対する基準値は $1.5f_t$ 、圧縮応力に対する基準値は $1.5f_c$ 、せん断応力に対する基準値は $1.5f_s$ 、曲げ応力に対する基準値は $1.5f_b$ である。断面⑳及び㉑に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準値は S_y である。

2. バスケット

垂直落下時にバスケットに生じる応力は A. 5. 3. 2 と同様に求める。ここで、垂直落下時の衝撃加速度には、加速度割増係数として $2.6^{17)}$ を衝撃加速度 (600 m/s^2) に乗じる。計算条件と計算結果を(□)-第 A. 40 表及び(□)-第 A. 41 表に示す。表に示すように、評価位置において A. 1. 2 に示す解析基準値を満足する。なお、バスケットに生じる応力は、設計降伏点 (56 MPa) より低いのでバスケットは塑性変形しない。

(□)-第 A. 40 表 バスケットの応力計算条件及び計算結果

項目	バスケット 合計質量 : W_b (kg)	垂直落下時の 衝撃加速度 : G_v (m/s^2)
数値	5600	1560

項目	バスケット プレートの タイプ	バスケット プレート 全厚さ : b_1 (mm)	バスケット プレート 内幅 : b_2 (mm)	バスケット プレート長さ : L_1 (mm)	胴に接触するバスケット プレート L_1 部の個数 : n (-)	バスケット プレートと胴 の接触面積 : A_1 (mm^2)
数値	A					
	B					

項目	バスケット プレートの タイプ	圧縮応力 : σ_c (MPa)	基準値 : $2/3S_u$ (MPa)	余裕率 (-)
数値	A	38	79	1.07
	B	38		1.07

(□)-第 A. 41 表 バスケットプレートの一次圧縮応力の計算条件及び計算結果

項目	バスケット プレート長さ : L (mm)	バスケット プレートの 断面積 : A_2 (mm^2)	バスケット プレートの 縦弾性係数 : E (MPa)
数値			6.94×10^4

項目	座屈長さ : l_k (mm)	設計降伏点又は設計 引張強さの 0.7 倍の 値のいずれか小さい 方の値 : F (MPa)	圧縮応力 : σ_c (MPa)	許容圧縮 応力: $1.5f_c$ (MPa)	余裕率 (-)
数値			38	66	0.73

A. 6. 1. 2 水平落下

9 m 水平落下時の衝撃力に対して、容器本体は十分な強度で密封性を保持し、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。また、胴内のバスケットは破損しないことを示す。

1. 容器本体

水平落下時の衝撃力に対する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

A. 5. 3. 2 と同様に、三次元有限要素を用いた (a)-第 A. 16 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

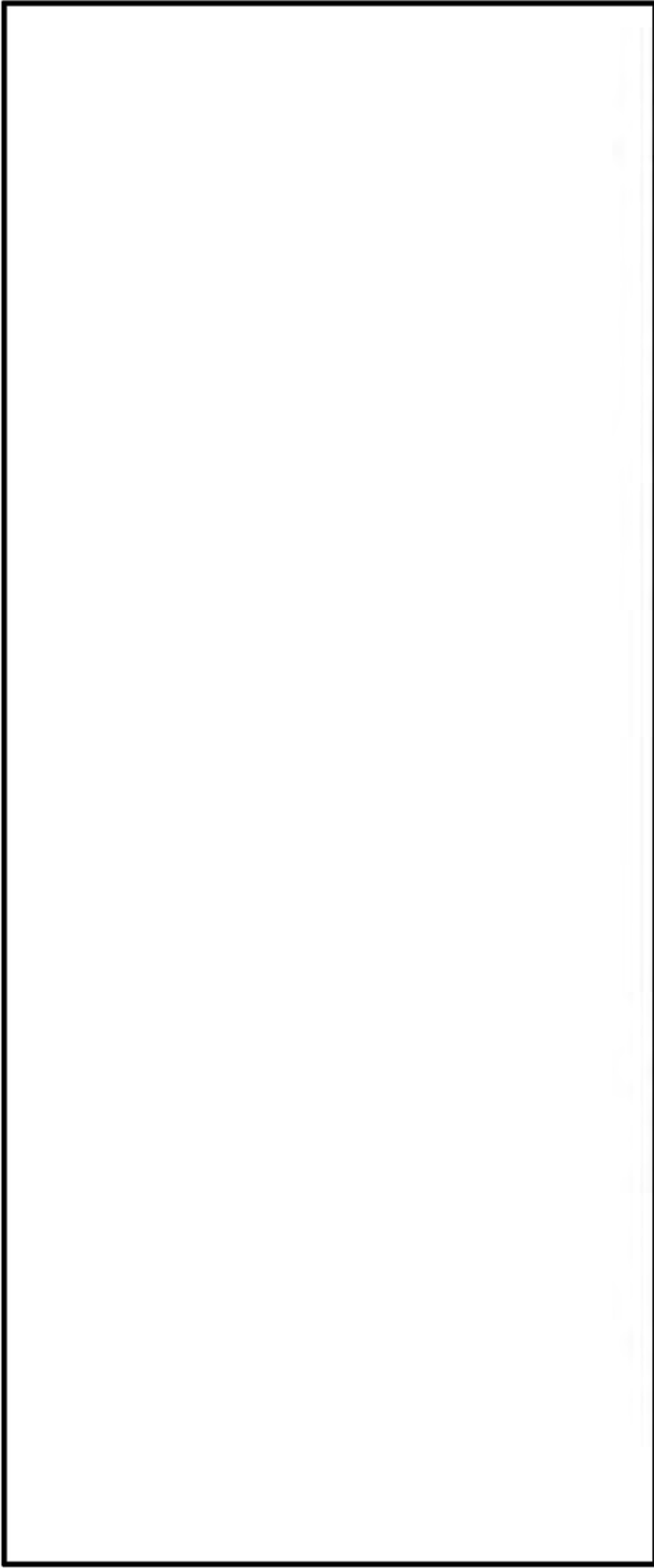
水平落下時に作用する荷重は次のとおりである。

- ・ 容器本体には、衝撃加速度 (710 m/s^2) による自重の慣性力が落下方向に働く。
- ・ 胴内面には、衝撃加速度 (710 m/s^2) に加速度割増係数として $1.2^{17)}$ を乗じた加速度による内部収納物等 (バスケット及び燃料集合体) の慣性力が働く。
- ・ 落下時の上・下部緩衝体木材反力が胴フランジ面及び底板へ働く。

b. 境界条件

上・下部緩衝体を取り付く面 (反力を受ける面) の上・下 1 箇所の X 方向変位を拘束した。また、 $0^\circ - 180^\circ$ 面の対称面において Y 方向の変位を拘束した。

水平落下時に作用する荷重条件及び境界条件を (a)-第 A. 42 図に示す。



P_i : 胴内圧 (-0.101325 MPa G)

P_{ii} : 一二次蓋間圧力 (0.31 MPa G)

P_{iii} : 二三次蓋間圧力 (0.19 MPa G)

P_{sr} : 側部中性子遮蔽材部 (外筒側面) 圧力 (MPa G)

P_{er} : 側部中性子遮蔽材部 (端板面) 圧力 (MPa G)

P_{tr} : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)

P_{br} : 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)

F_{iw} : 内部収納物等 (バスケット、燃料集合体) の慣性力

F_{tr} : 上部緩衝体反力

F_{br} : 下部緩衝体反力

P_{bi} : 一次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

P_{bii} : 二次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

P_{biii} : 三次蓋ボルト初期締付力 (MPa)



(ボルト初期締付力：一次蓋ボルトの例)

(ロ)-第 A. 42 図 9 m 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（(p)-第 A. 30 図参照）に対する一次応力の評価結果を(p)-第 A. 42 表に示す。表に示すように、すべての評価位置において A. 1. 2 に示す解析基準値を満足する。

また、三次蓋とキャスク本体の O リング取り付け位置での相対口開き変形量は 0. 39 mm であり、O リングの初期締め付け代 mm より小さく、密封性が損なわれることはない。

(□)-第 A. 42 表 9 m 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 (1/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の 種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
二次蓋	③	P_m	—	18	[]	251	12.9
		P_L+P_b	内	29		377	12.0
	外		40	8.42			
	④	P_L	—	57		377	5.61
三次蓋	⑤	P_m	—	48		270	4.62
		P_L+P_b	内	45		406	8.02
	外		76	4.34			
	⑥	P_L	—	60		406	5.76
胴	⑦	P_L	—	172		377	1.19
	⑧	P_m	—	67		251	2.74
		P_L+P_b	内	66		377	4.71
	外		94	3.01			
	⑨-1	P_L	—	68		377	4.54
⑨-2	P_L	—	108	2.49			
胴 (底板)	⑩	P_m	—	27	251	8.29	
		P_L+P_b	内	28	377	12.4	
	外		38	8.92			
⑪	P_L	—	56	377	5.73		
外筒	⑫	引張	—	185	282	0.52	
		圧縮	—	51	282	4.52	
		せん断	—	95	162	0.70	
		曲げ	—	174	282	0.62	
	⑬	引張	—	119	282	1.36	
		圧縮	—	53	282	4.32	
		せん断	—	7	162	22.1	
		曲げ	—	18	282	14.6	
	⑭	引張	—	33	282	7.54	
		圧縮	—	50	282	4.64	
		せん断	—	69	162	1.34	
		曲げ	—	205	282	0.37	

(注1) (□)-第 A. 30 図参照

(注2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力(注3) 断面③~④及び⑦~⑪の P_m に対する基準値は $2/3S_u$ 、 P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は S_u である。断面⑤及び⑥の P_m に対する基準値は $\text{MIN}[2.4S_m, 2/3S_u]$ 、 P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は $\text{MIN}[3.6S_m, S_u]$ である。断面⑫~⑭に示す引張応力に対する基準値は $1.5f_t$ 、圧縮応力に対する基準値は $1.5f_c$ 、せん断応力に対する基準値は $1.5f_s$ 、曲げ応力に対する基準値は $1.5f_b$ である。

(□)-第 A.42 表 9 m 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 (2/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の 種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度(°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
下部端板	⑮	引張	—	22	[Redacted]	218	8.90
		圧縮	—	35		218	5.22
		せん断	—	41		126	2.07
		曲げ	—	171		218	0.27
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑰	引張	—	5		217	42.4
		圧縮	—	89		217	1.43
		せん断	—	46		125	1.71
		曲げ	—	21		217	9.33
	⑱	引張	—	36		217	5.02
		圧縮	—	142		217	0.52
		せん断	—	47		125	1.65
		曲げ	—	140		217	0.55
二次蓋 シール部	⑳	P_L+P_b+Q	内	127		186	0.46
		P_L+P_b+Q	外	63			1.95
	㉑	P_L+P_b+Q	内	149	185	0.24	
		P_L+P_b+Q	外	155		0.19	
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	314	848	1.70	
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	809	848	0.04	
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	420	848	1.01	
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	767	848	0.10	

(注1) (□)-第 A.30 図参照

(注2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力 Q : 二次応力、 σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力(注3) 断面⑮、⑰及び⑱における引張応力に対する基準値は $1.5f_t$ 、圧縮応力に対する基準値は $1.5f_c$ 、せん断応力に対する基準値は $1.5f_s$ 、曲げ応力に対する基準値は $1.5f_b$ である。断面⑳及び㉑に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準値は S_y である。

2. バスケット

水平落下時にバスケットに生じる応力は A. 5. 3. 2 と同様に求める。ここで、水平落下時の衝撃加速度には加速度割増係数として $1.2^{17)}$ を衝撃加速度 (710 m/s^2) に乗じる。計算条件と計算結果を(□)-第 A. 43 表及び(□)-第 A. 44 表に示す。表に示すように、評価位置において A. 1. 2 に示す解析基準値を満足する。なお、 180° 側以外の任意の角度で落下する場合も健全性は維持される。なお、バスケットに生じる応力は、設計降伏点 (56 MPa) より低いので、バスケットは塑性変形しない。

(□)-第 A. 43 表 バスケットプレート縦板の応力計算条件及び計算結果

項目	燃料集合体の質量(BP 無, BP 有) : W_f (kg)	領域 I の範囲にある燃料集合体の数 (BP 無, BP 有) : N_f (体)	領域 I のバスケットプレート、中性子吸収材、バスケットサポート及び燃料集合体の質量 ^(注 1) : W_I (kg)	領域 II のバスケットプレート及び中性子吸収材の質量 ^(注 2) : W_{II} (kg)	水平落下時の衝撃加速度 : G_{II} (m/s^2)
数値	680,				852

項目	バスケットプレート幅 1 : b_1 (mm)	バスケットプレート幅 2 : b_2 (mm)	バスケットプレート高さ 1 : h_1 (mm)	バスケットプレート幅 3 : b_3 (mm)	バスケットプレート幅 4 : b_4 (mm)	バスケットプレート高さ 2 : h_2 (mm)	断面積 : A (mm^2)
数値							

項目	バスケットプレートの数 : N (枚)	圧縮応力 : σ_c (MPa)	基準値 : $(2/3)S_u$ (MPa)	余裕率 (-)
数値		46	79	0.71

(注 1) 領域 I のバスケットプレート、中性子吸収材、バスケットサポート及び燃料集合体の各質量の内訳は、以下のとおりである。

バスケットプレートの質量 : (kg)
 中性子吸収材の質量 : (kg)
 バスケットサポートの質量 : (kg)
 燃料集合体の合計質量 : $680 \times$ (kg)

(注 2) 領域 II のバスケットプレート及び中性子吸収材の各質量の内訳は以下のとおりである。

バスケットプレートの質量 : (kg)
 中性子吸収材の質量 : (kg)

(ロ)-第 A. 44 表 バスケットプレート横板の応力計算条件及び計算結果

項目	燃料集合体の質量 (BP 有) : W_f (kg)	バスケットプレート及び中性子吸収材の質量 : W_b (kg)	バスケットプレートの数 : N (枚)	バスケットセルの内幅 : l (mm)	分布荷重 : w (kg/mm)	水平落下時の衝撃加速度 : G_H (m/s ²)
数値						852

項目	バスケットプレート高さ 1 : h_1 (mm)	バスケットプレート幅 1 : b_1 (mm)	バスケットプレート幅 2 : b_2 (mm)	バスケットプレート高さ 2 : h_2 (mm)	バスケットプレート幅 3 : b_3 (mm)
数値					

項目	曲げモーメント : M (N・mm)	断面係数 : Z (mm ³)	曲げ応力 : σ_b (MPa)	基準値 : $(2/3) \alpha S_u$ (MPa)	余裕率 (-)
数値			32	103	2.21

項目	せん断力 : F (N)	断面積 : A (mm ²)	せん断応力 : τ (MPa)	基準値 : $1.2S_m$ (MPa)	余裕率 (-)
数値			8	43	4.37

A. 6. 1. 3 コーナー落下

(ロ)-第 A. 19 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も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せず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ため蓋ボルトの健全性を評価する。

1. 二次蓋ボルト

頭部コーナー落下時に、二次蓋ボルトには、二次蓋自重及び蓋間圧力による引張応力が生じる。ここで、初期締付トルク、熱応力及び蓋間圧力によってボルト引張力とフランジ部とは釣合った状態になっているが、コーナー落下時、二次蓋ボルトには二次蓋自重の慣性力が外力としてボルトに加わる。

(1) 初期締付力、熱応力、胴内圧及び蓋間圧力により生じる引張応力

初期締付力、熱応力、胴内圧及び蓋間圧力により二次蓋ボルトに生じる引張応力 σ_{t1} (MPa) は、 MPa である。

(2) 慣性力により生じる引張応力

慣性力によりボルトに生じる引張応力 σ_{t2} (MPa) は、次式で与えられる。

$$\sigma_{t2} = \frac{WG_c \cos \theta}{\frac{\pi}{4} d^2 n}$$

ここで、

W : 二次蓋の質量 (kg)

G_c : 衝撃加速度 (m/s^2)

θ : 落下角度 ($^\circ$)

d : ボルト軸径 (mm)

n : ボルトの数 (本)

計算条件と計算結果を(ロ)-第 A. 45 表に示す。

(ロ)-第 A. 45 表 慣性力によりボルトに生じる引張応力計算条件及び計算結果

項目	二次蓋の 質量 : W (kg)	衝撃加速度 : G_c (m/s^2)	落下角度 : θ ($^\circ$)	ボルト軸径 : d (mm)	ボルトの数 : n (本)	引張応力 : σ_{t2} (MPa)
数値	4.5×10^3	480	28.6			44

(3) ボルトに生じる引張応力

各荷重によりボルトに生じる引張応力 σ_t (MPa) の合計は、次式で与えられる。

$$\sigma_t = \sigma_{t1} + \phi \sigma_{t2}$$

ここで、

ϕ : ボルト内力係数(-)

計算条件と計算結果を (ロ)-第 A. 46 表に示す。

(ロ)-第 A. 46 表 ボルトに生じる引張応力計算条件及び計算結果

項目	初期締付力、熱応力、 胴内圧及び蓋間圧力 により生じる引張応 力： σ_{t1} (MPa)	ボルト 内力係数 ： ϕ (-)	慣性力により 生じる 引張応力 ： σ_{t2} (MPa)	ボルトに 生じる 引張応力 ： σ_t (MPa)	解析基準値 ： S_y (MPa)	余裕率 (-)
数値			44	214	848	2.96

2. 三次蓋ボルト

頭部コーナー落下時に、三次蓋ボルトには、三次蓋自重及び蓋間圧力による引張応力が生じる。ここで、初期締付トルク、熱応力及び蓋間圧力によってボルト引張力とフランジ部とは釣合った状態になっているが、コーナー落下時、三次蓋ボルトには三次蓋自重の慣性力が外力としてボルトに加わる。

(1) 初期締付力、熱応力及び蓋間圧力により生じる引張応力

初期締付力、熱応力及び蓋間圧力により三次蓋ボルトに生じる引張応力 σ_{t1} (MPa) は、(ロ)-第 A. 17 表より 229 MPa である。

(2) 慣性力により生じる引張応力

慣性力によりボルトに生じる引張応力 σ_{t2} (MPa) は、W を三次蓋の質量として二次蓋と同様に求める。

計算条件と計算結果を (ロ)-第 A. 47 表に示す。

(ロ)-第 A. 47 表 慣性力によりボルトに生じる引張応力計算条件及び計算結果

項目	三次蓋の 質量： W (kg)	衝撃加速度 ： G_c (m/s ²)	落下角度 ： θ (°)	ボルト軸径 ： d (mm)	ボルトの数 ： n (本)	引張応力 ： σ_{t2} (MPa)
数値	3.3×10^3	480	28.6			47

(3) ボルトに生じる引張応力

各荷重によりボルトに生じる引張応力 σ_t (MPa)の合計は、二次蓋と同様に求める。
計算条件と計算結果を(□)-第A.48表に示す。

(□)-第A.48表 ボルトに生じる引張応力計算条件及び計算結果

項目	初期締付力、熱応力及び蓋間圧力により生じる引張応力： σ_{t1} (MPa)	ボルト内力係数： ϕ (-)	慣性力により生じる引張応力： σ_{t2} (MPa)	ボルトに生じる引張応力： σ_t (MPa)	解析基準値： S_y (MPa)	余裕率(-)
数値			47	236	848	2.59

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せ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運動エネルギーとなり二次衝撃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。A.10.3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

9 m 落下試験の衝撃加速度と緩衝体変形量の要約は(□)-第 A. 37 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。

また、本試験では、緩衝体は変形するが、緩衝体は容器本体からはずれることはない。

2. 結果の検討

9 m 落下試験による塑性変形は、緩衝体に生じるが、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 °C 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、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。

A. 6. 2 強度試験・落下試験Ⅱ（1 m 落下時）

本項では、9 m 落下試験に引き続いて 1 m 貫通試験が起こるとして輸送物が 1 m 高さから直径 150 mm の軟鋼棒へ落下した場合に対して、輸送物の構造の健全性を解析によって示す。

1 m 貫通試験は、輸送物が最大破損をうけるよう垂直及び水平方向に落下し、衝突時に輸送物の重心の真下に軟鋼棒があるとして解析した。

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。

解析は垂直方向落下において蓋部及び底部について行う。また、水平方向落下においては胴について行う。

なお、三次蓋のリリーフバルブカバープレート上への垂直方向落下、及び三次蓋シール部への垂直方向落下又は水平方向落下では、過大な圧縮力により塑性変形が生じ、O リングと三次蓋又は胴フランジのシール面との間に生じた隙間が原因で密封性能を損なう恐れがあるが、MSF-24P 型輸送容器のプロトタイプである MSF キャスクの落下試験モデルの緩衝体は、A. 10. 1 に示すとおり当該部への直接的な荷重入力を防止するために緩衝体内部のカバープレートの剛性を高める設計としており、1m 貫通試験で密封性能が維持されることを確認している。MSF-24P 型の緩衝体は落下試験モデルと同じ構造であり、かつ、A. 10. 3 に示すとおり MSF-24P 型は落下試験モデルに比べ高い密封性能を有しているため、密封性能が損なわれることはない。

1. 垂直落下

(1) 蓋部の貫通強度

蓋部については、三次蓋が貫通しないことを示す。

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) は以下のとおり求められる。

$$F_{\text{bar}} = \sigma_u A$$

ここで、

σ_u : 軟鋼棒の設計引張強さ (MPa)

A : 軟鋼棒の断面積 (mm^2)

$$A = \frac{\pi}{4} d^2$$

d : 軟鋼棒の直径 (mm)

計算条件と計算結果を(ロ)-第 A. 49 表に示す。

(ロ)-第 A. 49 表 輸送容器に加わる最大荷重計算条件及び計算結果

項目	軟鋼棒直径 : d (mm)	軟鋼棒の設計引張強さ : σ_u (MPa)	最大荷重 : F_{bar} (N)
数値	150	400	7.068×10^6

押抜きせん断によって板にせん断破壊を引き起すのに必要な力 F (N) は、次式で表わされる。

$$F = \pi dtS$$

ここで、

d : 軟鋼棒直径 (mm)

t : 板厚 (mm)

S : せん断強さ (MPa)

計算条件と計算結果を(ロ)-第 A. 50 表に示す。三次蓋が貫通されることはない。したがって、これらに覆われる二次蓋、これに付属するモニタリングポートカバープレート、二次蓋に覆われる一次蓋及びバルブカバープレートは貫通されることなく健全性は担保される。また、三次蓋は胴フランジ部に押付けられ、O リング取り付け位置での口開きは生じない。

(ロ)-第 A. 50 表 せん断破壊を引き起こすのに必要な力の計算条件及び計算結果

項目	軟鋼棒直径 : d (mm)	板厚 : t (mm)	せん断強さ : S (MPa)	せん断破壊に 必要な力 : F (N)	最大荷重 : F _{bar} (N)	余裕率 (-)
数値	150	<input type="text"/> (注 1)	<input type="text"/> (注 2)	1.323×10 ⁷	7.068×10 ⁶	0.87

(注 1)

(注 2) 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 S_u の $1/\sqrt{3}$ とする。ここで、(ロ)-第 A. 2 図及び(ロ)-第 A. 3 図より上部緩衝体カバープレートの材料 の MPa であるので、低い方の設計引張強さ MPa を使用し、せん断強さ S は、 $S = \text{}$ MPa。

(2) 底部（底部中性子遮蔽材カバー）の貫通強度

底部については底部中性子遮蔽材カバーが貫通しないことを蓋部と同様に示す。

計算条件と計算結果を(ロ)-第 A. 51 表に示す。底部（底部中性子遮蔽材カバー）が貫通されることはない。

(ロ)-第 A. 51 表 せん断破壊を引き起こすのに必要な力の計算条件及び計算結果

項目	軟鋼棒直径 : d (mm)	板厚 : t (mm)	せん断強さ : S (MPa)	せん断破壊に 必要な力 : F (N)	最大荷重 : F _{bar} (N)	余裕率 (-)
数値	150	<input type="text"/> (注 1)	<input type="text"/> (注 2)	7.596×10 ⁶	7.068×10 ⁶	0.07

(注 1)

(注 2)

2. 水平落下

(1) 胴の貫通強度

水平落下の場合、軟鋼棒には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、水平落下では胴に対して検討する。

押抜きせん断によって胴がせん断破壊を引き起こすのに必要な力 $F(N)$ は、1. の (1) と同様の式で与えられる。計算条件と計算結果を (ロ)-第 A. 52 表に示す。胴が貫通されることはない。

(ロ)-第 A. 52 表 せん断破壊を引き起こすのに必要な力の計算条件及び計算結果

項目	軟鋼棒直径 : $d(\text{mm})$	板厚 : $t(\text{mm})$	せん断強さ : $S(\text{MPa})$	せん断破壊に 必要な力 : $F(N)$	最大荷重 : $F_{\text{bar}}(N)$	余裕率 (-)
数値	150	<input type="text"/>	<input type="text"/> ^(注1)	2.403×10^7	7.068×10^6	2.39

(注1) であるので、せん断強さ S は、

$$S = \text{ MPa}。$$

A. 6. 2. 1 結果の要約

1 m 貫通試験においては緩衝体、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、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 °C 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、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に問題はない。

A. 6. 3 熱的試験

A. 6. 3. 1 温度及び圧力の要約

1. 温度

輸送物各部の最高温度は(□)章 B の熱解析から求まる。各部位の最高温度と解析基準値を定める温度を(□)-第 A. 53 表に示す。

(□)-第 A. 53 表 特別の試験条件における最高温度の要約

(単位：℃)

部位	熱解析結果	解析基準値設定温度
胴 (本体部)	206	
胴 (フランジ部)	224	
胴 (底板)	175	
二次蓋	137	
三次蓋	186	
二次蓋ボルト	137	
三次蓋ボルト	153	
外筒	714	
下部端板	655	
底部中性子遮蔽材カバー	161	

2. 圧力

(□)章 B の熱解析から求まる特別の試験条件における輸送容器各部の圧力及び構造解析で使用する圧力を(□)-第 A. 54 表に示す。

(□)-第 A. 54 表 特別の試験条件の熱解析の要約と評価

項目	熱解析結果	構造解析使用圧力	圧力設定方法
胴内圧	0.307 MPa (0.206 MPa G)	0.351325 MPa (0.25 MPa G)	内外圧力差が最大となるように熱解析結果に余裕を取った値を使用
一二次蓋間圧力	0.420 MPa (0.319 MPa G)	0.441325 MPa (0.34 MPa G)	内外圧力差が最大となるように熱解析結果に余裕を取った値を使用
二三次蓋間圧力	0.272 MPa (0.171 MPa G)	0.371325 MPa (0.27 MPa G)	三次蓋に対して安全側となるように熱解析結果(二三次蓋間圧力)に余裕を取った値を使用

なお、蓋部中性子遮蔽材充填空間については、当該空間の水の存在による圧力上昇を考慮して、 MPa G (MPa) とする。

側部中性子遮蔽材充填空間は、外筒部を MPa G (MPa)、端板部を MPa G (MPa) とする。底部中性子遮蔽材充填空間は、 MPa G (MPa) とする。

A. 6. 3. 2 熱膨張

1. 応力計算

本項では、特別の試験条件下における容器本体各部の熱応力と胴内圧による応力の計算を行う。B. 5. 3 及び B. 5. 4 に示す温度分布と胴内圧を荷重条件とし、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

A. 5. 1. 3 と同様に、三次元有限要素を用いた(□)-第 A. 16 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

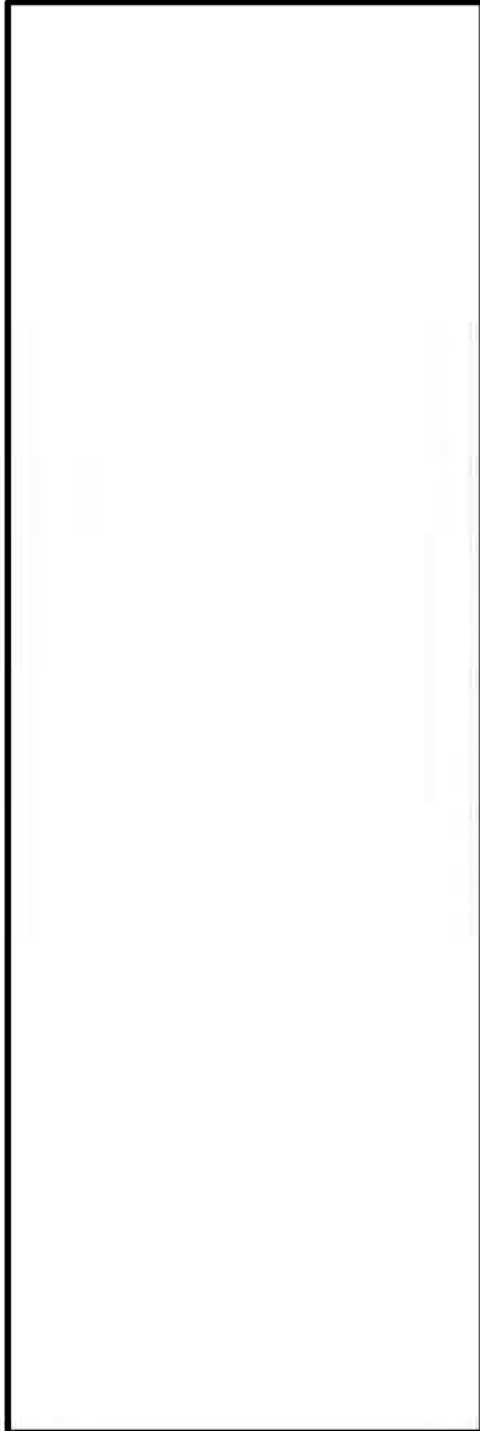
B. 5. 3 に示される容器本体の温度差が一番大きくなる火災後 30 分における温度分布(□)-第 B. 12 図参照)、胴内圧 (0. 25 MPa G)、一二次蓋間圧力 (0. 34 MPa G)、二次三次蓋間圧力 (0. 27 MPa G) を荷重条件とする。

蓋部中性子遮蔽材充填空間は、当該空間の水の存在による圧力上昇を考慮して、□ MPa G とする。

側部中性子遮蔽材充填空間は、外筒部を□ MPa G、端板部を□ MPa G、底部中性子遮蔽材充填空間は、□ MPa G とする。

b. 境界条件

(□)-第 A. 43 図に示すように、底部の 1 箇所軸方向変位及び対称面の法線方向変位を拘束し、他は変位自由とする。



P_i : 胴内圧 (0.25 MPa G)

P_{ii} : 一二次蓋間圧力 (0.34 MPa G)

P_{iii} : 二三次蓋間圧力 (0.27 MPa G)

P_{sr} : 側部中性子遮蔽材部 (外筒側面) 圧力
(MPa G)

P_{or} : 側部中性子遮蔽材部 (端板面) 圧力
(MPa G)

P_{cr} : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)

P_{br} : 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)

P_{bi} : 一次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

P_{bii} : 二次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

P_{biii} : 三次蓋ボルト初期締付力 (MPa)



(ボルト初期締付力：一次蓋ボルトの例)

(□)-第 A. 43 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

(□)-第 A. 30 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応力の評価結果を(□)-第 A. 55 表に示す。表に示すように、いずれの応力も A. 1. 2 に定めた解析基準値以下である。

なお、三次蓋ボルトは三次蓋と異なる材質のため、運搬中に予想される $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ の周囲温度の変化により軸力が変化する。仮に周囲温度 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ で三次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、ステンレス鋼製の三次蓋と合金鋼製の三次蓋ボルトの熱膨張係数の差により三次蓋ボルトの軸力が約 5%増加するものの余裕率が 0.05 以上あるため、また周囲温度 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 2%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、三次蓋ボルトにゆるみや破損を生じることはない。一方、一次蓋ボルトと二次蓋ボルトは、それぞれ一次蓋と二次蓋との温度の差及び熱膨張係数の差が小さいため、軸力の変化は三次蓋ボルトに比べ軽微であることから、ゆるみや破損を生じることはない。

また、三次蓋とキャスク本体の Oリング取り付け位置での相対口開き変形量は 0.32 mm であり、Oリングの初期締め付け代 mm より小さく、密封性が損なわれることはない。

(ロ)-第 A. 55 表 特別の試験条件における胴内圧による容器本体に対する

一次応力及び蓋ボルトの評価 (1/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の 種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
二次蓋	③	P_m	—	2	[]	251	124
		P_L+P_b	内	8		377	46.1
			外	9			40.8
	④	P_L	—	4		377	93.2
三次蓋	⑤	P_m	—	6		251	40.8
		P_L+P_b	内	28		377	12.4
			外	26			13.5
	⑥	P_L	—	8		377	46.1
胴	⑦	P_L	—	2		377	187
	⑧	P_m	—	1		251	250
		P_L+P_b	内	1		377	376
			外	1			376
	⑨-1	P_L	—	2		377	187
⑨-2	P_L	—	2	187			
胴 (底板)	⑩	P_m	—	1	251	250	
		P_L+P_b	内	2	377	187	
			外	3		124	
⑪	P_L	—	1	377	376		
外筒	⑫	引張	—	11	124	10.2	
		圧縮	—	—	124	—	
		せん断	—	8	72	8.00	
		曲げ	—	34	124	2.64	
	⑬	引張	—	21	124	4.90	
		圧縮	—	1	124	123	
		せん断	—	1	72	71.0	
		曲げ	—	2	124	61.0	
	⑭	引張	—	6	124	19.6	
		圧縮	—	1	124	123	
		せん断	—	8	72	8.00	
		曲げ	—	35	124	2.54	

(注1) (ロ)-第 A. 30 図参照

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

(注3) 断面③~④及び⑦~⑪の P_m に対する基準値は $2/3S_u$ 、 P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は S_u である。
断面⑤及び⑥の P_m に対する基準値は $\text{MIN}[2.4S_m, 2/3S_u]$ 、 P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は $\text{MIN}[3.6S_m, S_u]$ である。断面⑫~⑭に示す引張応力に対する基準値は $1.5f_t$ 、圧縮応力に対する基準値は $1.5f_c$ 、せん断応力に対する基準値は $1.5f_s$ 、曲げ応力に対する基準値は $1.5f_b$ である。

(ロ)-第 A. 55 表 特別の試験条件における胴内圧による容器本体に対する

一次応力及び蓋ボルトの評価 (2/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の 種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度(°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
下部端板	⑮	引張	—	2	[Redacted]	144	71.0
		圧縮	—	1		144	143
		せん断	—	3		83	26.6
		曲げ	—	12		144	11.0
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	3		201	66.0
		圧縮	—	1		201	200
		せん断	—	6		116	18.3
		曲げ	—	19		201	9.57
	⑲	引張	—	8		201	24.1
		圧縮	—	—		201	—
		せん断	—	11		116	9.54
		曲げ	—	70		201	1.87
二次蓋 シール部	⑳	P_L+P_b+Q	内	27		183	5.77
		P_L+P_b+Q	外	20			8.15
	㉑	P_L+P_b+Q	内	115	174	0.51	
		P_L+P_b+Q	外	112		0.55	
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	307	833	1.71	
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	766	833	0.08	
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	391	825	1.10	
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	669	825	0.23	

(注1) (ロ)-第 A. 30 図参照

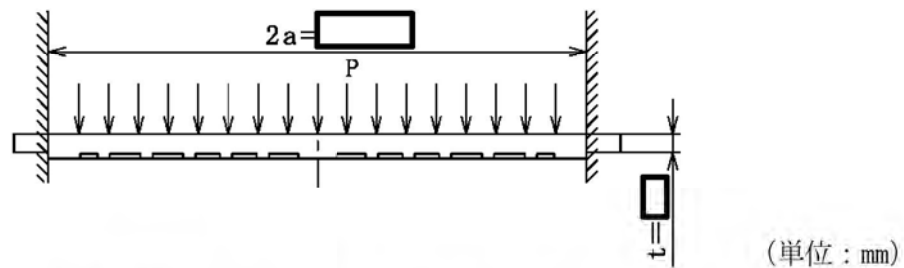
(注2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力 Q : 二次応力、 σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力(注3) 断面⑮、⑱及び⑲における引張応力に対する基準値は $1.5f_t$ 、圧縮応力に対する基準値は $1.5f_c$ 、せん断応力に対する基準値は $1.5f_s$ 、曲げ応力に対する基準値は $1.5f_b$ である。断面⑳及び㉑に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準値は S_y である。

A. 6. 4 浸漬

本輸送物の収納物は、最大放射エネルギーが A₂ 値の 10 万倍を超えるので、A. 7 において 200 m 浸漬に相当する水頭圧で解析を行い、胴、底板及び三次蓋に破損のないことを確認している。

特別の試験条件の 15 m 浸漬試験においては、200 m 浸漬試験の負荷条件より厳しくないため密封装置は 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 15 m 浸漬試験における三次蓋の強度を確認する。

三次蓋の強度解析モデルを(□)-第 A. 44 図に示す。



(□)-第 A. 44 図 三次蓋の強度解析モデル図

三次蓋を端部固定の円板としてモデル化すると、その最大曲げ応力 σ_b (MPa) は、次式で与えられる。¹⁵⁾

$$\sigma_b = 0.75 \frac{Pa^2}{t^2}$$

ここで、

a : 円板の半径 (mm)

P : 差圧 (MPa)

t : 板厚 (mm)

計算条件と計算結果を(□)-第 A. 56 表に示す。三次蓋は、外圧に対して十分な強度を有する。なお、上記の発生応力値は □ °C における三次蓋の材料の設計降伏点 ($S_y = 166$ MPa) より低く、また、外圧は蓋を胴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 15 m 浸漬時において保持される。

(□)-第 A. 56 表 三次蓋の曲げ応力計算条件及び計算結果

項目	円板の半径 : a (mm)	差圧 : P (MPa)	板厚 : t (mm)	最大 曲げ応力 : σ_b (MPa)	三次蓋の 温度 (°C)	基準値 : MIN[3. 6S _m , S _u] (MPa)	余裕率 (-)
数値	□	0. 251325	□	41	□	406	8. 90

また、外筒及び底部中性子遮蔽材カバーは内部空間にそれぞれ \square MPa G 及び \square MPa G の内圧が生じているが、水深 15m の水圧 (0.15 MPa) 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

特別の試験条件における輸送物に対する評価結果の要約を(□)-第 A.57 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 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。

(□)-第 A.57 表 特別の試験条件における構造解析結果の要約 (1/4)

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等 (-)
9 m落下試験				
1. 垂直落下				
(1) 容器本体 (頭部垂直落下)				
二次蓋 (P _L +P _b)	S _u	377	124	2.04
三次蓋 (P _L)	S _u	406	86	3.72
胴 (P _L)	S _u	377	106	2.55
胴 (底板) (P _L +P _b)	S _u	377	13	28.0
外筒 (引張)	1.5f _t	282	99	1.84
外筒 (圧縮)	1.5f _c	282	50	4.64
外筒 (せん断)	1.5f _s	162	45	2.60
外筒 (曲げ)	1.5f _b	282	170	0.65
下部端板 (引張)	1.5f _t	218	3	71.6
下部端板 (圧縮)	1.5f _c	218	1	217
下部端板 (せん断)	1.5f _s	126	8	14.7
下部端板 (曲げ)	1.5f _b	218	26	7.38
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	1.5f _t	217	1	216
底部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	1.5f _c	217	2	107
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	1.5f _s	125	1	124
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	1.5f _b	217	2	107
二次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	79	1.34
二次蓋ボルト (σ _m)	S _y	848	311	1.72
二次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	S _y	848	663	0.27
三次蓋ボルト (σ _m)	S _y	848	180	3.71
三次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	S _y	848	216	2.92

(ロ)-第 A. 57 表 特別の試験条件における構造解析結果の要約 (2/4)

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等 (-)
(2) 容器本体 (底部垂直落下)				
二次蓋 (P _L +P _b)	S _u	377	52	6.25
三次蓋 (P _L)	S _u	406	50	7.12
胴 (P _L)	S _u	377	60	5.28
胴 (底板) (P _L +P _b)	S _u	377	123	2.06
外筒 (引張)	1.5f _t	282	53	4.32
外筒 (圧縮)	1.5f _c	282	15	17.8
外筒 (せん断)	1.5f _s	162	20	7.10
外筒 (曲げ)	1.5f _b	282	85	2.31
下部端板 (引張)	1.5f _t	218	18	11.1
下部端板 (圧縮)	1.5f _c	218	7	30.1
下部端板 (せん断)	1.5f _s	126	26	3.84
下部端板 (曲げ)	1.5f _b	218	107	1.03
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	1.5f _t	217	43	4.04
底部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	1.5f _c	217	6	35.1
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	1.5f _s	125	14	7.92
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	1.5f _b	217	99	1.19
二次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	45	3.11
二次蓋ボルト (σ _m)	S _y	848	200	3.24
二次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	S _y	848	209	3.05
三次蓋ボルト (σ _m)	S _y	848	302	1.80
三次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	S _y	848	436	0.94
三次蓋相対口開き変形量	—	□ mm	0.01 mm以下	基準に合致
(3) バスケット				
バスケットプレート (σ _c)	2/3S _u	79	38	1.07
	1.5f _t	66	38	0.73

(ロ)-第 A. 57 表 特別の試験条件における構造解析結果の要約 (3/4)

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等 (-)
2. 水平落下				
(1) 容器本体				
二次蓋 (P _L)	S _u	377	57	5.61
三次蓋 (P _L +P _b)	S _u	406	76	4.34
胴 (P _L)	S _u	377	172	1.19
胴 (底板) (P _L)	S _u	377	56	5.73
外筒 (引張)	1.5f _t	282	185	0.52
外筒 (圧縮)	1.5f _c	282	53	4.32
外筒 (せん断)	1.5f _s	162	95	0.70
外筒 (曲げ)	1.5f _b	282	205	0.37
下部端板 (引張)	1.5f _t	218	22	8.90
下部端板 (圧縮)	1.5f _c	218	35	5.22
下部端板 (せん断)	1.5f _s	126	41	2.07
下部端板 (曲げ)	1.5f _b	218	171	0.27
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	1.5f _t	217	36	5.02
底部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	1.5f _c	217	142	0.52
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	1.5f _s	125	47	1.65
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	1.5f _b	217	140	0.55
二次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	155	0.19
二次蓋ボルト (σ _m)	S _y	848	314	1.70
二次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	S _y	848	809	0.04
三次蓋ボルト (σ _m)	S _y	848	420	1.01
三次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	S _y	848	767	0.10
三次蓋相対口開き変形量	—	□ mm	0.39 mm	基準に合致
(2) バスケット				
バスケットプレート 縦板 (σ _o)	2/3S _u	79	46	0.71
バスケットプレート 横板 (σ _b)	2/3 α S _u	103	32	2.21
(τ)	1.2S _m	43	8	4.37
3. コーナー落下				
二次蓋ボルト	S _y	848	214	2.96
三次蓋ボルト	S _y	848	236	2.59
1 m貫通試験				
(1) 垂直落下				
蓋部	許容貫通強度	1.323×10 ⁷ N	7.068×10 ⁶ N	0.87
底部	許容貫通強度	7.596×10 ⁶ N	7.068×10 ⁶ N	0.07
(2) 水平落下				
胴	許容貫通強度	2.403×10 ⁷ N	7.068×10 ⁶ N	2.39

(ロ)-第 A. 57 表 特別の試験条件における構造解析結果の要約 (4/4)

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等 (-)
熱的試験				
二次蓋 (P _L +P _b)	S _u	377	9	40.8
三次蓋 (P _L +P _b)	S _u	377	28	12.4
胴 (P _L)	S _u	377	2	187
胴 (底板) (P _L +P _b)	S _u	377	3	124
外筒 (引張)	1.5f _t	124	21	4.90
外筒 (圧縮)	1.5f _c	124	1	123
外筒 (せん断)	1.5f _s	72	8	8.00
外筒 (曲げ)	1.5f _b	124	35	2.54
下部端板 (引張)	1.5f _t	144	2	71.0
下部端板 (圧縮)	1.5f _c	144	1	143
下部端板 (せん断)	1.5f _s	83	3	26.6
下部端板 (曲げ)	1.5f _b	144	12	11.0
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	1.5f _t	201	8	24.1
底部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	1.5f _c	201	1	200
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	1.5f _s	116	11	9.54
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	1.5f _b	201	70	1.87
二次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	174	115	0.51
二次蓋ボルト (σ _m)	S _y	833	307	1.71
二次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	S _y	833	766	0.08
三次蓋ボルト (σ _m)	S _y	825	391	1.10
三次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	S _y	825	669	0.23
三次蓋相対口開き変形量	—	□ mm	0.32 mm	基準に合致
15 m 浸漬				
三次蓋	S _u	406	41	8.90

2. 破損の要約

特別の試験条件における輸送物の主な破損の要約を(□)-第 A. 58 表に示す。

各解析で考慮するこれらの影響の具体的評価は、(□)章各項で検討する。

(□)-第 A. 58 表 特別の試験条件における輸送物破損の評価

(備考) ○印は破損有り, -印は破損無し

試験	部位	本体	緩衝体	バスケット	備考
9 m落下試験		-	○	-	・緩衝体が塑性変形する。最大変形は頭部コーナー落下時に上部緩衝体に生じ、最大760 mm圧潰する。緩衝体は変形するが、容器本体からはずれることはない。
1 m貫通試験		○	○	-	・緩衝体及び外筒には貫通または変形が生じる。
熱的試験		-	-	-	—
浸漬試験		-	-	-	—

A.7 強化浸漬試験

1. 外圧に対する胴の耐圧強度

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、200 m 浸漬に相当する水頭圧で解析を行う。

金属キャスク構造規格¹⁾においては、本試験条件における円筒の許容外圧 $1.5P_a$ (MPa) は、次の式のいずれか小さい方で与えられる。

$$1.5P_{a1} = 1.5 \times \left(\frac{2.167t}{D_o} - 0.0833 \right) B$$

$$1.5P_{a2} = 1.5 \times \frac{2St}{D_o} \left(1 - \frac{t}{D_o} \right)$$

ここで、

t : 胴板厚 (mm)

D_o : 胴外径 (mm)

B : L/D_o 、 D_o/t 及び温度で定まる値 (MPa)

L : 胴支持間隔 (mm)

S : 設計応力強さの 1.5 倍又は設計降伏点の 0.9 倍の小さい方 (MPa)

計算条件と計算結果を(□)-第 A.59 表に示す。胴の耐圧強度は十分である。

(□)-第 A.59 表 胴の許容外圧計算条件及び計算結果

項目	胴板厚 : t (mm)	胴外径 : D_o (mm)	L/D_o 、 D_o/t 及び温度で 定まる値 : B (MPa)	胴支持 間隔 : L (mm)	許容外圧 : $1.5P_a$ (MPa)	外圧 : P_o (MPa)	余裕率 (-)
数値	□	□	90 (注1)	□	19 (注2)	2.101325	8.04

(注1) 金属キャスク構造規格¹⁾ 別図 7-1 と別図 7-2 により、□°C における炭素鋼に対する B 値は、 $L/D_o = \square$ 、 $D_o/t = \square$ であるから、 $B = 90$ MPa

(注2) □であり、 $1.5P_{a1} = \square$ MPa、 $1.5P_{a2} = \square$ となるため、□を許容外圧 $1.5P_a$ として採用

2. 外圧に対する底板の強度

胴 (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。¹⁵⁾

$$\sigma_b = 0.75 \frac{Pa^2}{t^2}$$

ここで、

a : 円板の半径 (mm)

P : 差圧 (MPa)

t : 板厚 (mm)

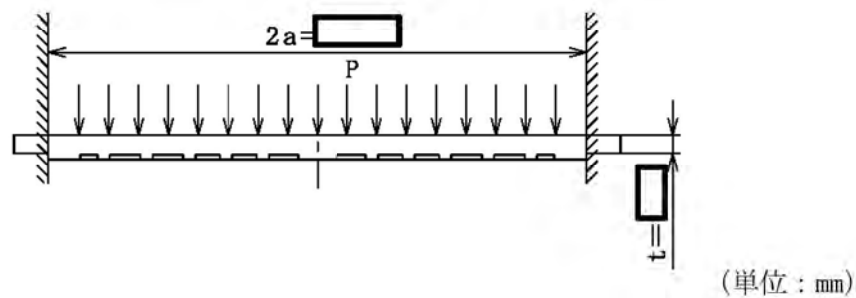
計算条件と計算結果を(□)-第 A. 60 表に示す。胴 (底板) は、外圧に対して十分な強度を有する。

(□)-第 A. 60 表 胴 (底板) の曲げ応力計算条件及び計算結果

項目	円板の半径 : a (mm)	差圧 : P (MPa)	板厚 : t (mm)	最大 曲げ応力 : σ_b (MPa)	胴 (底板) の温度 (°C)	設計 引張強さ : S_u (MPa)	余裕率 (-)
数値	□	2.101325	□	29	□	377	12.0

3. 外圧に対する三次蓋の強度

三次蓋の強度解析モデルを(□)-第 A. 45 図に示す。



(□)-第 A. 45 図 外圧に対する三次蓋の解析モデル

三次蓋の最大応力は蓋端部に生じる。この半径方向曲げ応力 σ_b (MPa) は次式で与えられる。

$$\sigma_b = 0.75 \frac{Pa^2}{t^2}$$

ここで、

a : 三次蓋半径 (mm)

P : 差圧 (MPa)

t : 板厚 (mm)

計算条件と計算結果を(□)-第 A. 61 表に示す。三次蓋は、外圧に対して十分な強度を有する。

(□)-第 A. 61 表 三次蓋の曲げ応力計算条件及び計算結果

項目	三次蓋半径 : a (mm)	差圧 : P (MPa)	板厚 : t (mm)
数値	<input type="text"/>	2.101325	<input type="text"/>

項目	最大曲げ応力 : σ_b (MPa)	三次蓋の 温度 (°C)	基準値 : MIN[3. 6S _m , S _u] (MPa)	余裕率 (-)
数値	340	<input type="text"/>	406	0.19

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、一般の試験条件である 0.3 m 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、燃料被覆管の強度上の余裕は十分あり、燃料被覆管内の核分裂生成物は、外部に放散されることはない。

なお、特別の試験条件において、燃料集合体の強度評価は行っていないが、9 m 落下時には上・下部ノズル及び燃料棒の変形が想定される¹⁸⁾ ことから、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.62 表に示すように設定して評価を行う。

(ロ)-第 A.62 表 各安全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
熱解析	燃料棒ピッチの変化及び上下部ノズルの変形が輸送容器及び燃料棒の温度に与える影響は小さいので、変形を無視する。ただし、保守的に全ての燃料棒の密封機能が失われたと仮定し、容器内部のガスの熱伝導率に核分裂生成ガスの影響を考慮する。
密封解析	全燃料棒の密封性が失われたと仮定する。
遮蔽解析	燃料棒ピッチの変化や燃料有効部の移動の可能性があるが、線量当量率の最大値は 1 m 貫通落下による側部中性子遮蔽材の損傷により本体側部に生じ、これらの燃料の変形等が影響を与えないため、考慮しない。

A.9 核分裂性輸送物

本輸送物は核分裂性輸送物に該当する。したがって、本項では、(ρ)章 E. 臨界解析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。

なお、本輸送物は周囲温度-20℃以上で使用し、A.4.2に示すとおり、周囲温度-20～38℃の温度条件でき裂、破損等の生じるおそれはない。

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、(i)については連続条件となる。

(i) 落下試験

① 水噴霧

② 0.3 m自由落下

(ii) 積み重ね試験

(iii) 6 kg 棒貫通試験

(ρ)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 A.5 の解析結果をもとに評価すると次のようになる。

1. 落下試験

(1) 水噴霧

A.5.2 と同一であり、輸送物に損傷はない。

(2) 0.3 m自由落下

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

A.5.4 と同一であり、輸送容器に損傷はない。

3. 6 kg 棒貫通試験

A.5.5 と同一であり、軟鋼棒は緩衝体カバープレートを貫通しない。

以上の結果より、核分裂性輸送物に係る一般の試験条件における輸送物の損傷状態は(ρ)-第 A.63 表のようにまとめられる。本輸送物は、(ρ)-第 A.64 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。

(□)-第 A. 63 表 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件における輸送物の損傷状態

試験条件		輸送物の損傷状態	備考
落下試験	水噴霧	損傷なし	—
	0.3 m落下	緩衝体の変形	緩衝体は臨界解析では無視する。
積み重ね		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		損傷なし	—

(□)-第 A. 64 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10 cmの立方体を包含するようなくぼみが生じないこと。	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ような変形ではない。

A.9.2 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件

A.9.1の一般の試験条件に続いて15 m浸漬試験が実施される場合には、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 A.9.1の一般の試験条件
- ② 9 m落下試験
- ③ 1 m貫通試験
- ④ 熱的試験（火災）
- ⑤ 0.9 m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(ρ)-第A.63表に示すように損傷がある落下試験を採用する。

(ρ)章E.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のうち落下試験

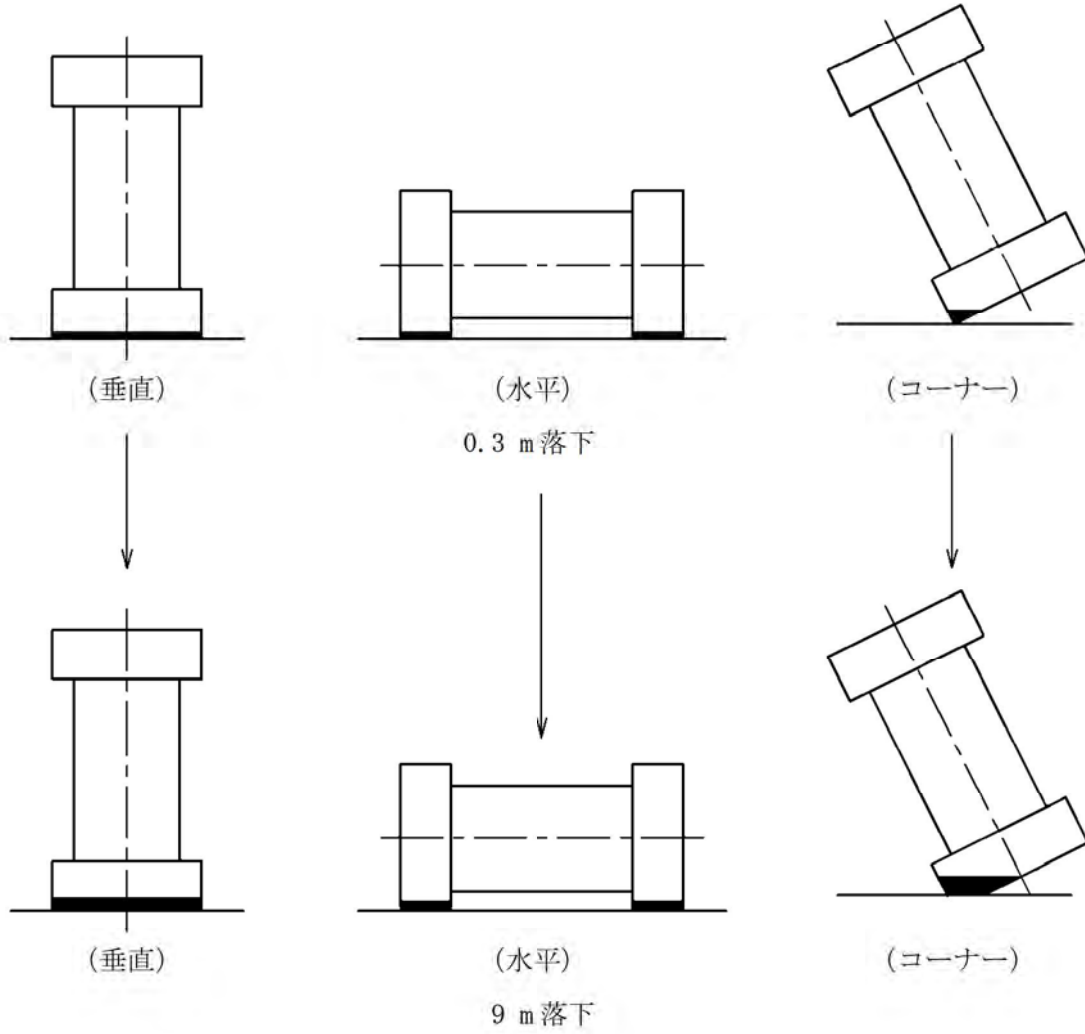
本試験条件における輸送物の損傷状態は(ρ)-第A.63表に示すとおりである。

2. 9 m落下試験

(1) 落下姿勢と落下試験の順序

(ρ)-第A.46図に落下姿勢と落下試験の順序を示す。

A.9.1の0.3 m落下と9 m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。



(□)-第 A. 46 図 落下姿勢と試験の順序

(2) 9 m 落下試験時の変形量と衝撃加速度

落下高さとしては、0.3 m 落下と 9 m 落下の合計 9.3 m を与える。A. 6. 1 の 1. と同様に、落下エネルギー E_k は与えられる。計算条件と計算結果を(□)-第 A. 65 表に示す。

(□)-第 A. 65 表 輸送物落下エネルギー計算条件及び計算結果

項目	輸送物 最大総重量 : m (kg)	重力加速度 : g (m/s ²)	落下高さ : H (mm)	輸送物の 落下エネルギー : E_k (N・mm)
数値	1.344×10^5	9.80665	9300	1.226×10^{10}

A. 6. 1 の 1. に示す手法を用いて、変形量 δ 及び衝撃加速度 G を求める。評価結果の緩衝体の累積変形量及び最大衝撃加速度は(□)-第 A. 66 表に示すとおりである。

(□)-第 A. 66 表 9 m 落下試験における緩衝体の累積変形量と衝撃加速度

落下姿勢		緩衝体の 累積変形量 (mm)	設計基準 変形量 ^(注1) (mm)	衝撃加速度 (A) (m/s ²)	9 m 落下試験時 設計加速度 (B) (m/s ²)	加速度の 比 (A/B)
垂直 落下	頭部	268	684	568	600	0.95
	底部	309	608	490	500	0.98
水平落下		279	374.5	704	710	0.99
コーナー 落下	頭部	766	826	469	480	0.98
	底部	760	827	464	—	—

(注 1) 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。

(3) 容器本体及びバスケットの構造健全性評価

本落下試験時の衝撃加速度は(□)-第 A. 66 表に示すように A. 6. 1 の設計加速度と比較して 1 以下であり、A. 6. 1 の評価より小さい。また、累積変形量は、設計基準変形量以下であるので、本落下試験においても容器本体及びバスケットの構造健全性は維持される。

(4) 三次蓋 O リングの密封性能の評価（歪レベルの評価）

(ロ)-第 A. 57 表に示したように、9 m 落下試験の O リング位置での蓋とキャスク本体との相対口開き変形量は基準値に対して十分な余裕を有しており、本試験条件においても密封性能が損なわれることはない。

(5) 二次蓋防水機能の評価

(ロ)-第 A. 67 表に示すように、特別の試験条件における二次蓋金属ガスケットの横ずれ量は基準値に対して十分な余裕を有しており、また二次蓋ボルトに生じる応力は S_y 以下で締付力は維持されており二次蓋の残留口開きは生じないため、本試験条件においても防水機能が損なわれることはない。なお、二次蓋貫通孔のモニタリングポートカバープレートは O リングで密封されており、本落下試験条件においても防水機能が維持される。

(ロ)-第 A. 67 表 特別の試験条件における二次蓋部金属ガスケットの密封性能の評価

条件		二次蓋ガスケットの横ずれ量(mm)	密封性能 (5×10^{-3} ref cm^3/s) を維持する基準値(mm) ^{17), 19)}
9 m 落下	垂直落下	0.66	3
	水平落下	0.34	3
熱的試験		0.46	3

3. 1 m 貫通試験

1. 及び 2. の落下試験において緩衝体に変形するが、これらは 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 A. 6. 2 の結果 (A. 6. 5 に示す要約参照) と同一である。

4. 熱的試験

1. 及び 2. の落下試験における緩衝体の累積変形量は、A. 6. 1 に示す 9 m 落下試験の各落下試験時の変形量に対して若干増加しているが、特別の試験条件の熱解析モデルに考慮する緩衝体変形量 (B. 5. 2 参照) は、1. 及び 2. の落下試験における緩衝体の累積変形量を包絡した値としている。したがって、本熱的試験における輸送物の損傷評価は A. 6. 5 の 2. と同一となる。

5. 0.9 m 浸漬試験

0.9m 浸漬試験の条件及び評価結果は、A. 6. 4 に示す 15 m 浸漬試験の条件及び評価結果に包絡されるため、0.9 m 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

(□)-第 A. 68 表に特別の試験条件における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集合体の強度評価は行っていないが、9 m 落下時には、上・下部ノズルの変形及び燃料棒の変形が想定される¹⁸⁾ことから、燃料集合体については、臨界解析において(□)-第 A. 69 表に示すように条件を設定する。

(□)-第 A. 68 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
9 m落下	緩衝体の変形	緩衝体は臨界解析では無視。
1 m貫通	緩衝体、外筒及び中性子遮蔽材の変形	緩衝体及び中性子遮蔽材は臨界解析では無視。
熱的試験 (火災時)	中性子遮蔽材の一部焼損 各部位の温度が上昇	臨界解析上は中性子遮蔽材を無視し、燃料温度を20℃としている。
0.9 m浸漬	損傷なし	密封装置及び二次蓋の密封性が健全であるので、胴内に浸水することはない。

(□)-第 A. 69 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	支持格子1スパン間の燃料棒ピッチの拡大及び縮小を仮定する。

A.10 付属書類

A.10.1 MSF キャスクの落下試験

1. 試験目的

本試験は、MSF-24P 型輸送容器のプロトタイプである MSF キャスクの落下試験モデルを用いて 9.3 m 落下試験（垂直及び傾斜）を実施し、容器の胴及び蓋に取り付けた加速度計によりデータを取得するとともに、落下後の緩衝体の変形量等を測定した。

2. 試験項目

(1) 頭部垂直落下

9.3 m の高さから落下試験モデル頭部を下側にして、垂直姿勢にて落下させた。

(2) 傾斜落下

9.3 m の高さから 10 ° 傾斜させた状態で水平方向に落下させる。なお、底部側が一次衝突、頭部側が二次衝突するよう傾斜させ、落下させた。

3. 試験装置

(1) 落下試験モデル

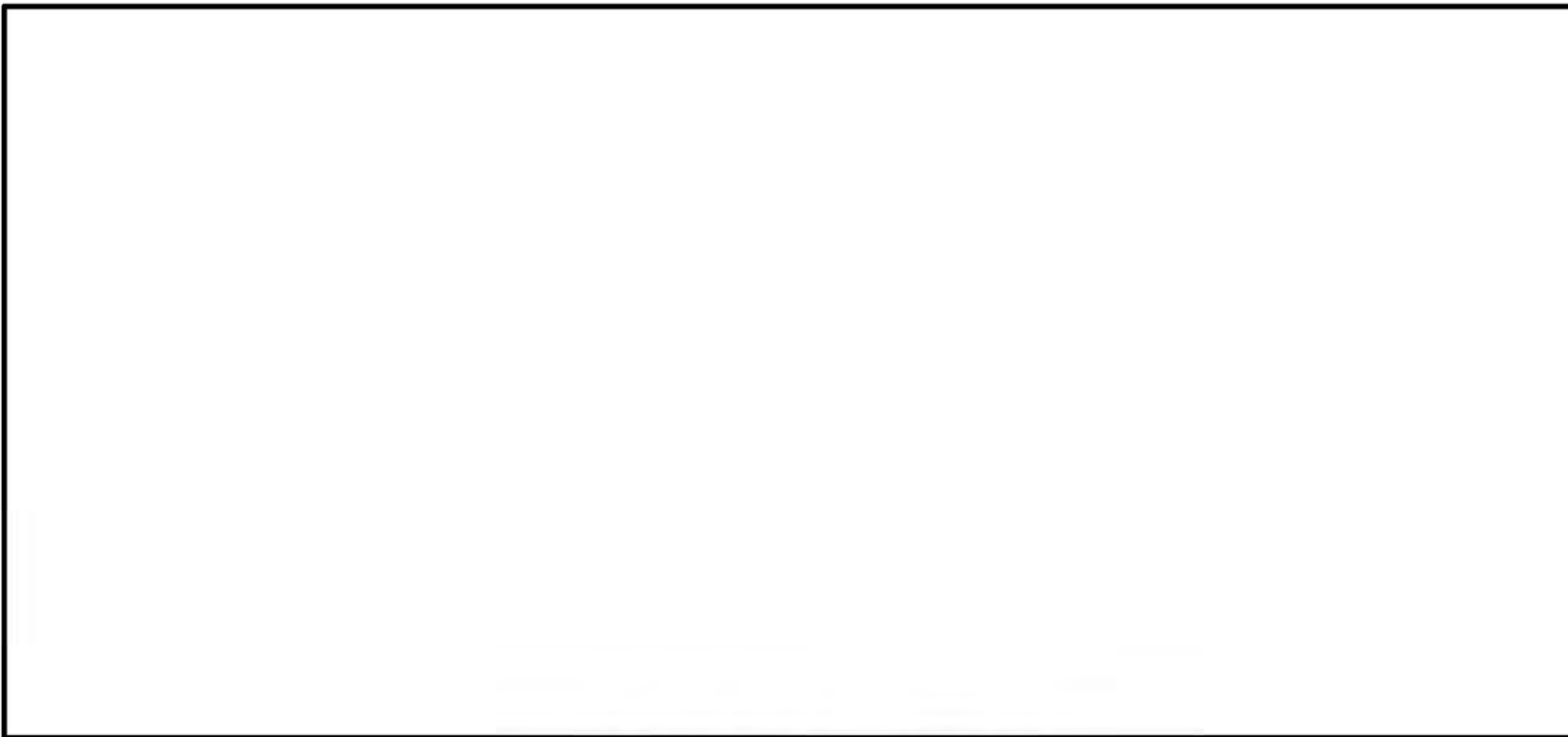
落下試験モデルは、BWR 燃料集合体を 69 体収納する設計である。本体は、胴（鍛造材）、中性子遮蔽材及び外筒（炭素鋼）から構成され、胴と外筒の間には銅製の伝熱フィンが溶接されている。

蓋部は、一次蓋と二次蓋の二重構造とし、本体胴フランジに、金属ガスケットを取り付けた一次蓋及び二次蓋をボルトにより締結することで密封性を維持する構造としている。

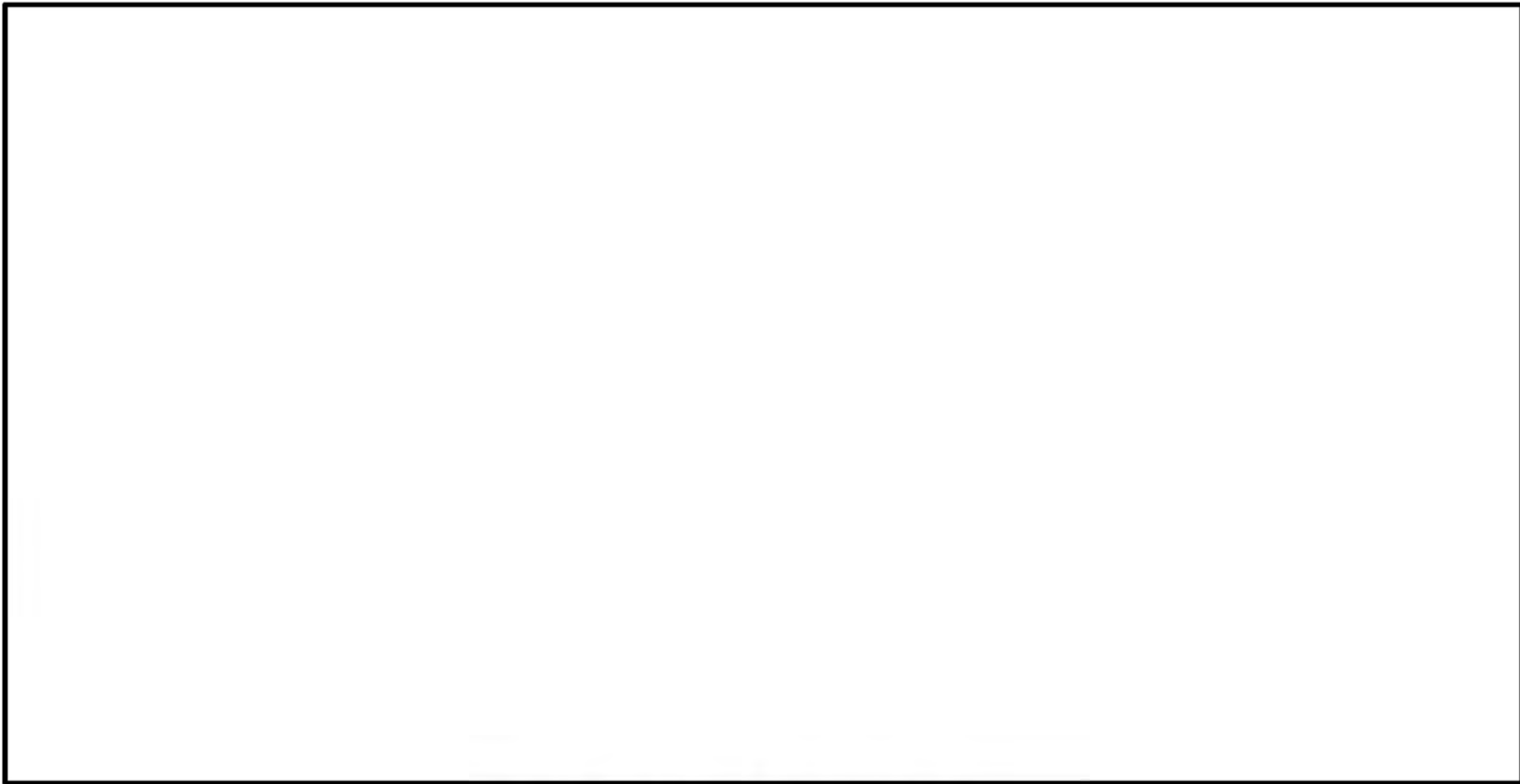
バスケットはアルミニウム合金の角パイプからなる構造とし、キャビティ内において燃料集合体を分散・集合させないように支持する構造としている。落下試験時には、独立した 69 個のバスケットセルに燃料集合体を模擬した重量体を挿入した。

材質は基本的に実機と同じ又は相当材である。また、胴内、一二次蓋間は計装配線の関係から開放されており、大気圧である。

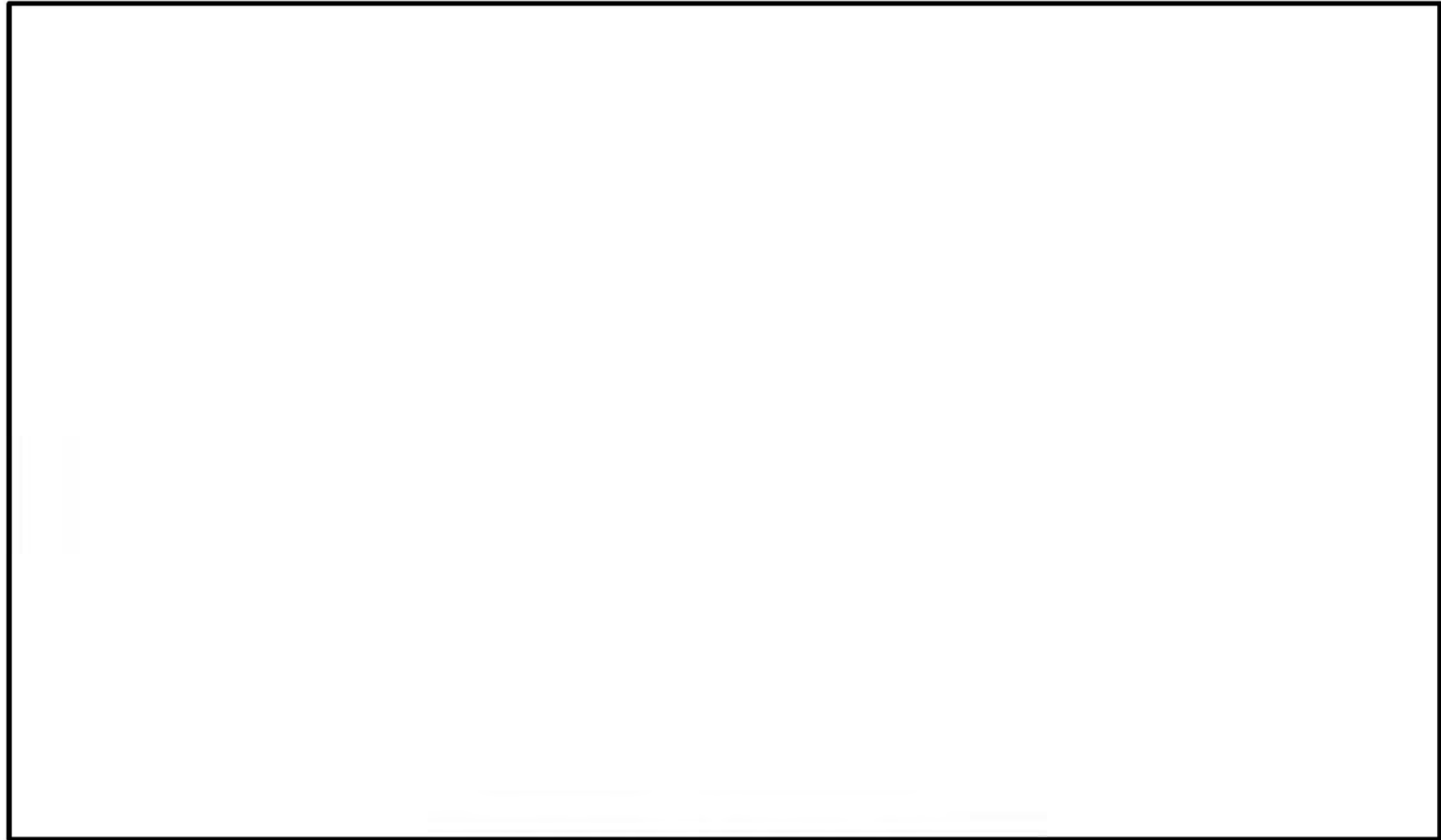
落下試験モデルの概要図を (p)-第 A. 47 図～(p)-第 A. 51 図に示す。



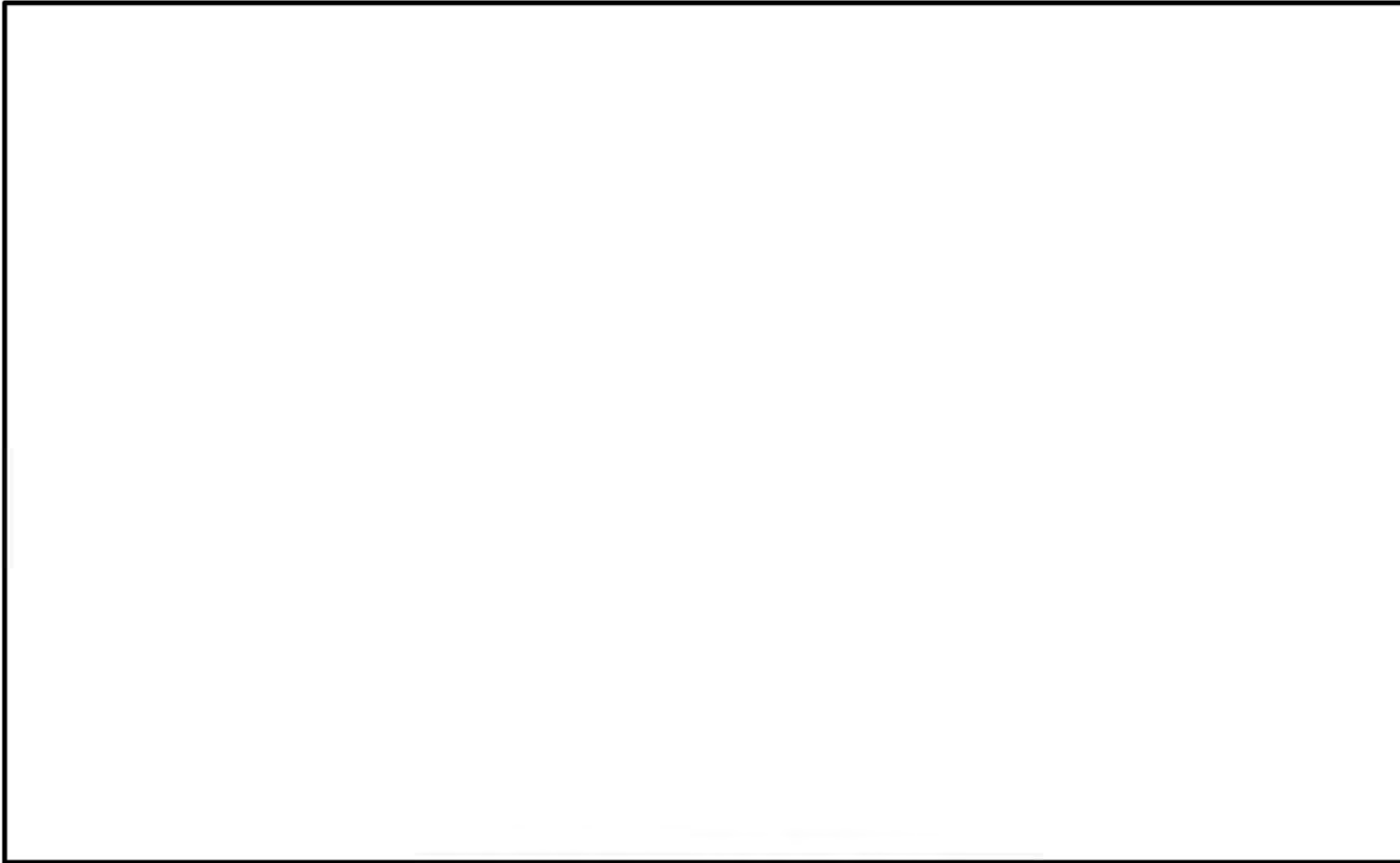
(ロ)-第 A. 47 図 落下試験モデル全体図



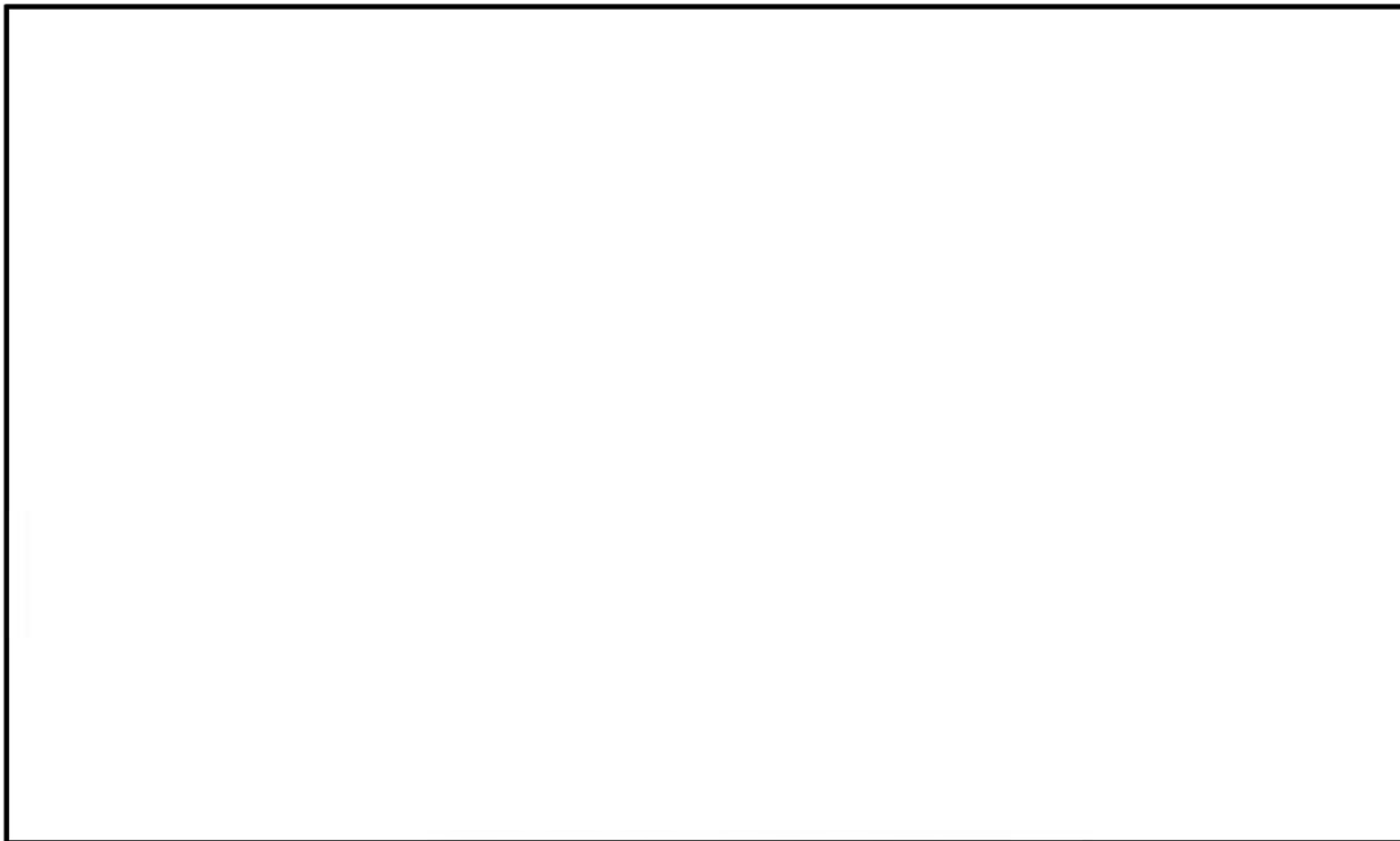
(□)-第 A. 48 図 一次蓋 (落下試験モデル)



(ロ)-第 A. 49 図 二次蓋 (落下試験モデル)



(ロ)-第 A. 50 図 上部緩衝体 (落下試験モデル)



(ロ)-第 A. 51 図 下部緩衝体 (落下試験モデル)

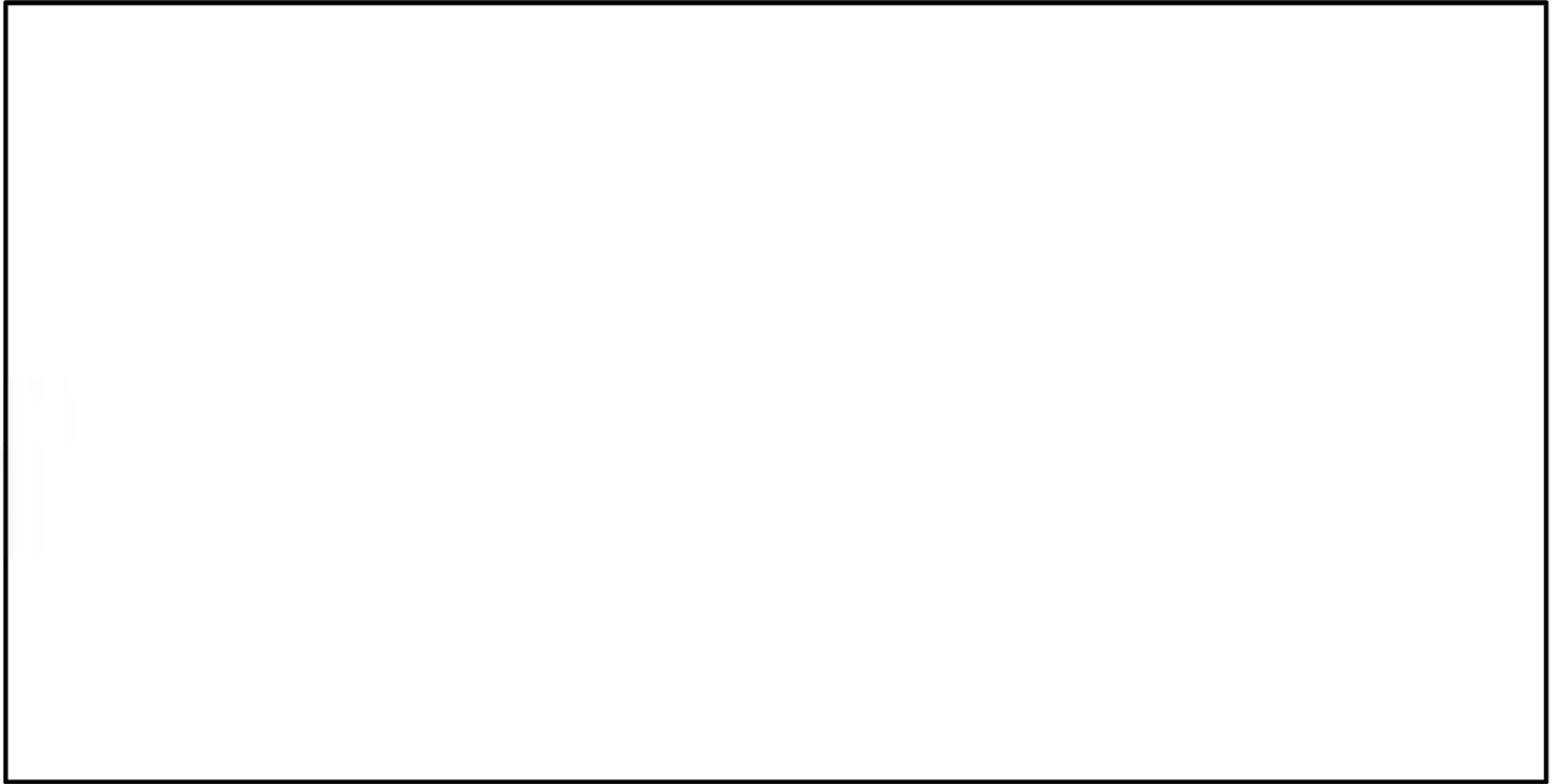
(2) 測定項目及び測定方法

a. 測定項目

落下試験モデルを用いた落下試験において測定した主な測定項目と測定部位及び測定器等について(□)-第 A. 70 表に示す。また、加速度計及びひずみゲージの取付位置を(□)-第 A. 52 図に示す。

(□)-第 A. 70 表 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
緩衝体変形量	上部・下部緩衝体	スケール
加速度	胴、一次蓋、二次蓋	加速度計
ひずみ (参考値)	一次蓋ボルト、二次蓋ボルト	ひずみゲージ
蓋の横ずれ (参考値)	一次蓋、二次蓋	隙間ゲージ デプスゲージ



(ロ)-第 A. 52 図 加速度計及びひずみゲージの取付位置

4. 試験結果

(1) 頭部 9.3 m 垂直落下

(□)-第 A. 53 図に頭部 9.3 m 垂直落下試験前後の落下試験モデルの写真を示す。以下に頭部 9.3 m 垂直落下試験結果の概要を示す。

a. 緩衝体変形量

(□)-第 A. 71 表に緩衝体変形量を示す。緩衝体変形量は、許容変形量を満足している。

b. 加速度履歴

(□)-第 A. 54 図に胴中央の加速度履歴を示す。(□)-第 A. 72 表に各部位の最大加速度を示す。

c. 蓋の横ずれ量 (参考値)

(□)-第 A. 73 表に各蓋の横ずれ量を示す。一次蓋については蓋の横ずれが確認され、横ずれ量は最大 0.24 mm であった。二次蓋については、蓋の横ずれは生じなかった。

d. ボルトに作用する応力 (参考値)

(□)-第 A. 74 表に各ボルトに作用する最大応力を示す。なお、応力は、落下衝撃負荷時にボルトに生じたひずみから算出した。一次蓋ボルト、二次蓋ボルトともに、基準値に対して十分に余裕があった。

e. 落下試験前後の漏えい率 (参考値)

(□)-第 A. 75 表に落下試験前後の一次蓋及び二次蓋の漏えい率を示す。一次蓋の落下試験後の漏えい率は、落下試験前に比べ 2~3 桁程度増加したが、密封性能を維持する基準値 ($5 \times 10^{-4} \text{ Pa m}^3/\text{s}$ [$=5 \times 10^{-3} \text{ ref cm}^3/\text{s}$]) を満足した。また、二次蓋の漏えい率は落下試験前後で同程度であった。

(□)-第 A. 71 表 9.3 m 頭部垂直落下時の緩衝体変形量

部位	変形量 (mm)	許容変形量 (mm)
上部緩衝体	259	<input type="text"/>

(□)-第 A. 72 表 9.3 m 頭部垂直落下時の最大加速度

計測位置	方向	最大加速度 (G)
胴上部 (0°)	落下方向	59
胴上部 (180°)	落下方向	63
胴中央	落下方向	72
一次蓋	落下方向	448
二次蓋	落下方向	533

(□)-第 A. 73 表 9.3 m 頭部垂直落下時の蓋の横ずれ量 (参考値)

部位	位置	横ずれ量 ^(注1) (mm)
一次蓋	0° 側	-0.24
	90/270° 側	0.02 / -0.15
	180° 側	-0.04
二次蓋	0° 側	0.0
	90/270° 側	0.0 / 0.0
	180° 側	0.0

(注1) 横ずれ量の符号は、各蓋が胴フランジに対し、内側へずれる場合を+、外側へずれる場合を-として示す。

(ロ)-第 A. 74 表 9.3 m 頭部垂直落下時の最大応力 (参考値)

部位	位置	応力成分	最大応力 ^(注1) (MPa)	基準値 ^(注2) (MPa)
一次蓋ボルト	0° 側	膜	468	890
		曲げ	164	890
	90° 側	膜	508	890
		曲げ	216	890
	180° 側	膜	413	890
		曲げ	201	890
二次蓋ボルト	0° 側	膜	-29	890
		曲げ	14	890
	90° 側	膜	-27	890
		曲げ	11	890
	180° 側	膜	-50	890
		曲げ	32	890

(注1) 膜応力の符号は、引張を+、圧縮を-として示す。

(注2) 一次蓋ボルト及び二次蓋ボルトの基準値は、 S_y (RT) とした。

(ロ)-第 A. 75 表 9.3 m 頭部垂直落下時の落下試験前後の漏えい率 (参考値)

部位	落下試験前 (Pa m ³ /s)	落下試験後 (Pa m ³ /s)
一次蓋	1.0×10^{-8}	3.9×10^{-6}
二次蓋	2.0×10^{-11}	1.7×10^{-11}

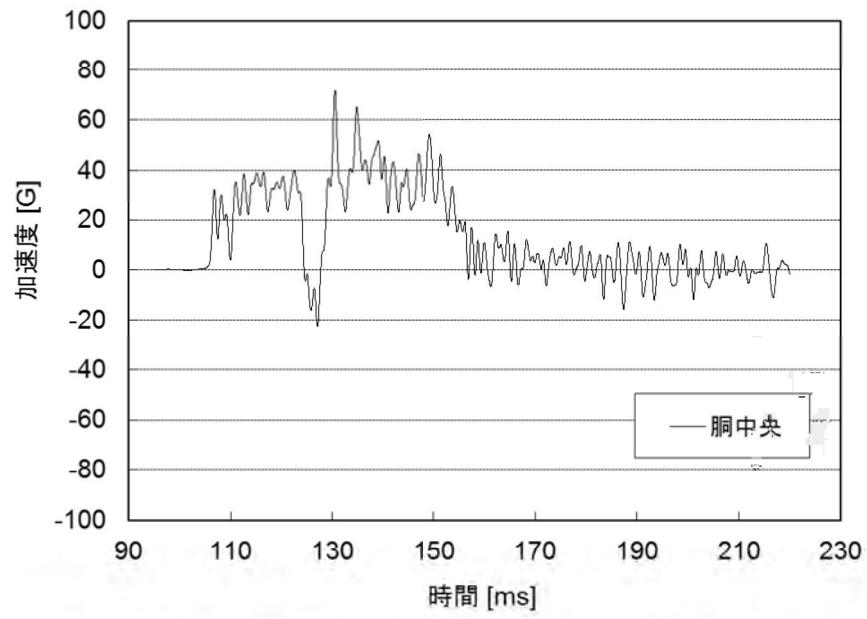


(1) 落下試験前



(2) 落下試験後

(ロ)-第 A. 53 図 9.3 m 頭部垂直落下試験時の落下試験モデル写真



(㉓)-第 A. 54 図 9.3 m 頭部垂直落下時の落下方向加速度履歴

(2) 9.3 m 傾斜落下

(p)-第 A. 55 図に 9.3 m 傾斜落下試験前後の落下試験モデルの写真を示す。以下に 9.3 m 傾斜落下試験結果の概要を示す。

a. 緩衝体変形量

(p)-第 A. 76 表に各緩衝体変形量を示す。緩衝体変形量は、許容変形量を満足している。

b. 加速度履歴

(p)-第 A. 56 図に胴上部、胴中央及び胴下部の加速度履歴を示す。(p)-第 A. 77 表に各部位の最大加速度を示す。

c. 蓋の横ずれ量 (参考値)

(p)-第 A. 78 表に各蓋の横ずれ量を示す。一次蓋及び二次蓋ともに落下側及び反落下側のずれ量が大きく、最大の横ずれ量は一次蓋の落下側の 0.81 mm であった。

d. ボルトに作用する応力 (参考値)

(p)-第 A. 79 表に各ボルトに作用する最大応力を示す。なお、応力は、落下衝撃負荷時にボルトに生じたひずみから算出した。一次蓋ボルト、二次蓋ボルトともに、基準値に対して十分に余裕があった。

e. 落下試験前後の漏えい率 (参考値)

(p)-第 A. 80 表に落下試験前後の一次蓋及び二次蓋の漏えい率を示す。一次蓋の漏えい率は落下試験前後で同程度であった。二次蓋の落下試験後の漏えい率は、落下試験前に比べ 2~3 桁程度増加したが、密封性能を維持する基準値 (5×10^{-4} Pa m^3/s [= 5×10^{-3} ref cm^3/s]) を満足した。

(ロ)-第 A. 76 表 9.3 m 傾斜落下時の緩衝体変形量

部位	変形量 (mm)	許容変形量 (mm)
上部緩衝体	253	
下部緩衝体	174	

(ロ)-第 A. 77 表 9.3 m 傾斜落下時の最大加速度

計測位置	方向	最大加速度 (G)
胴上部 (0°)	落下方向	150
胴中央	落下方向	85
胴下部	落下方向	77
一次蓋	落下方向	149
二次蓋	落下方向	148

(ロ)-第 A. 78 表 9.3 m 傾斜落下時の蓋の横ずれ量 (参考値)

部位	位置	横ずれ量 ^(注1) (mm)
一次蓋	落下側	-0.81
	側面	0.14 / 0.21
	反落下側	-0.07
二次蓋	落下側	0.09
	側面	0.02 / -0.01
	反落下側	-0.79

(注1) 横ずれ量の符号は、各蓋が胴フランジに対し、内側へずれる場合を+、外側へずれる場合を-として示す。

(□)-第 A. 79 表 9.3 m 傾斜落下時の最大応力 (参考値)

部位	位置	応力成分	最大応力 ^(注1) (MPa)	基準値 ^(注2) (MPa)
一次蓋ボルト	反落下側	膜	-5	890
		曲げ	4	890
	側面	膜	3	890
		曲げ	21	890
	落下側	膜	74	890
		曲げ	82	890
二次蓋ボルト	反落下側	膜	-14	890
		曲げ	141	890
	側面	膜	-18	890
		曲げ	181	890
	落下側	膜	178	890
		曲げ	243	890

(注1)膜応力の符号は、引張を+、圧縮を-として示す。

(注2)一次蓋ボルト及び二次蓋ボルトの基準値は、 S_y (RT)とした。

(□)-第 A. 80 表 9.3 m 傾斜落下時の落下試験前後の漏えい率 (参考値)

部位	落下試験前 (Pa m ³ /s)	落下試験後 (Pa m ³ /s)
一次蓋	$< 1 \times 10^{-11}$	$< 1 \times 10^{-11}$
二次蓋	7.4×10^{-9}	1.6×10^{-6}

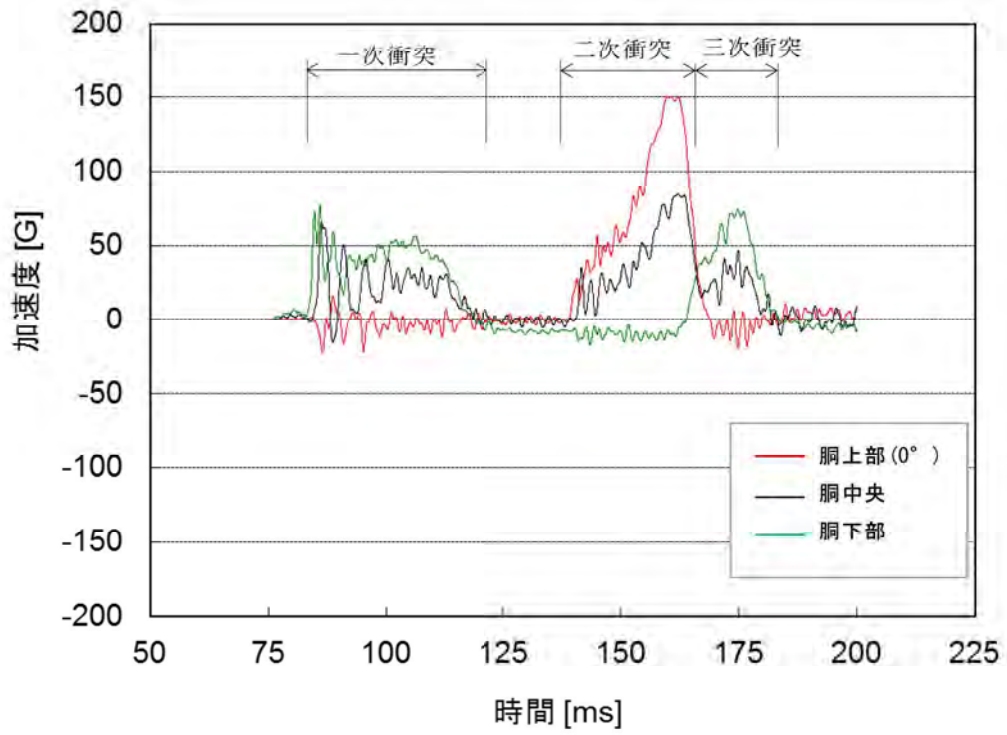


(1) 落下試験前



(2) 落下試験後

(ロ)-第 A. 55 図 9.3 m 傾斜落下試験時の落下試験モデル写真



(□)-第 A. 56 図 9.3 m 傾斜落下時の落下方向加速度履歴

A. 10.2 CRUSH 及び ABAQUS 解析による評価手法の検証

MSF-24P 型輸送容器の構造設計は、緩衝体性能及び密封性能の維持の観点から、落下試験モデルをベースに、基本構造が同様となるよう設計している。

本項では、上述の落下試験で得られた試験結果 (A. 10.1 4. 参照) に基づき、MSF-24P 型輸送容器の落下解析で使用している CRUSH 及び ABAQUS 解析による評価手法の妥当性を確認した。

1. CRUSH 解析手法の検証

落下試験モデルの落下試験結果 (A. 10.1 4. 参照) と CRUSH 解析の結果を比較し、CRUSH 解析による評価手法の妥当性を確認した。比較結果を (ロ)-第 A. 81 表及び (ロ)-第 A. 82 表に示す。CRUSH による加速度及び緩衝体変形量の解析結果は落下試験と同等であり、CRUSH 解析による評価手法の妥当性を確認した。

(ロ)-第 A. 81 表 落下試験結果と CRUSH コードの比較(最大衝撃加速度)

試験条件	最大衝撃加速度 (m/s ²)	
	落下試験 (注1)	CRUSH
9.3 m 頭部垂直落下	598 (61G)	618 (63G)
9.3 m 傾斜落下	1451 (148G)	1510 (154G)

(注1) 落下試験での計測結果 (A. 10.1 4. 参照)

- ・ 9.3 m 頭部垂直落下 : 胴上部の落下方向加速度の平均値
- ・ 9.3 m 傾斜落下 : 二次蓋の落下方向加速度

(ロ)-第 A. 82 表 落下試験結果と CRUSH コードの比較(緩衝体変形量)

試験条件	緩衝体変形量 (mm)	
	落下試験 (注1)	CRUSH
9.3 m 頭部垂直落下	259	308
9.3 m 傾斜落下	253	314

(注1) 落下試験での計測結果 (A. 10.1 4. 参照)

2. ABAQUS 解析手法の検証

落下試験で計測された蓋部のひずみを基に、MSF-24P 型と落下試験モデルの寸法差等を考慮して算出した MSF-24P 型輸送容器に発生する応力と、A. 6. 1 に記載される ABAQUS 解析結果とを比較し、ABAQUS 解析による評価手法の妥当性を検証した。

(1) 検証手順

以下に ABAQUS による解析手法の検証手順を示す。(□)-第 A. 57 図参照)

- a. MSF-24P 型輸送容器と落下試験モデルの蓋部を構成する各部位の寸法を抽出する。
- b. 各部位の設計条件（材質、設計温度、縦弾性係数）を抽出する。
- c. 抽出した寸法及び設計条件を基に、MSF-24P 型輸送容器と落下試験モデルの各部位の強度比を算出する。
- d. 落下衝撃力を決定する設計条件（キャスク重量、落下時の衝撃加速度）を抽出し、MSF-24P 型輸送容器と落下試験モデルの落下時に作用する荷重比を算出する。
- e. 荷重比、各部位の強度比および落下試験モデルの各部位に作用した応力（落下試験で計測したひずみから算出）を用いて、MSF-24P 型輸送容器の各部位に作用する応力を算出する。
- f. e. で算出した応力と、解析結果を比較し、ABAQUS による解析手法を検証する。

(2) 評価結果及びまとめ

9 m 頭部垂直落下時及び 9 m 水平落下時に MSF-24P 型輸送容器に発生する応力について、落下試験結果より算出した結果と解析結果の比較を(□)-第 A. 83 表及び(□)-第 A. 84 表に示す。

9 m 頭部垂直落下時及び 9 m 水平落下時の各蓋ボルトの応力は、落下試験結果より算出した応力が解析結果より小さく、ABAQUS 解析による評価手法は妥当である。

(ロ)-第 A. 83 表 9.3 m 頭部垂直落下時の各蓋ボルトの応力評価結果

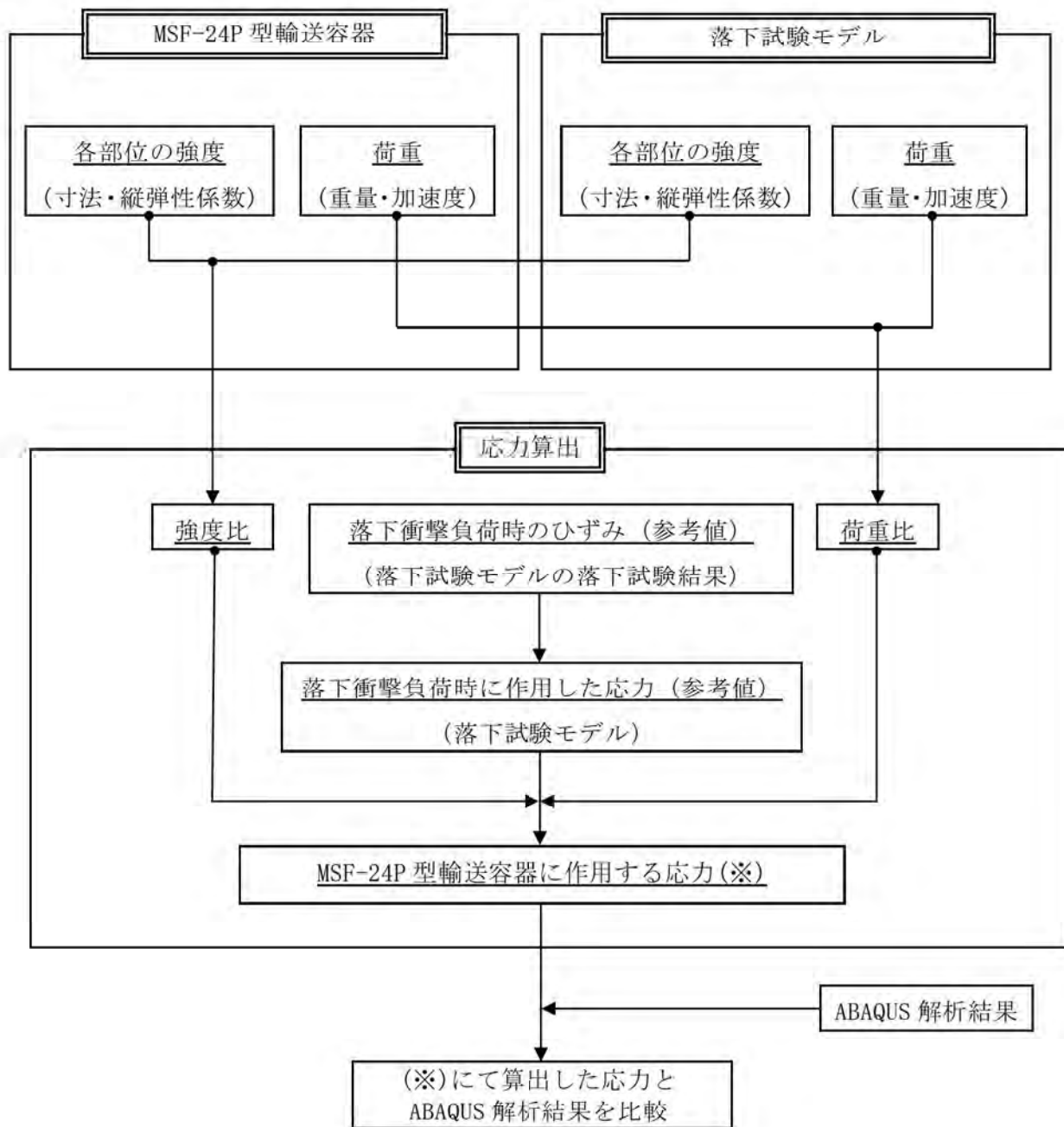
部位	変形モード	試験結果より 算出した応力 (MPa)	ABAQUS 解析結果 ^(注1) (MPa)	評価基準 (MPa)
二次蓋ボルト	引張+曲げ	47	201	848
三次蓋ボルト	引張+曲げ	51	53	848

(注 1) 落下試験結果のひずみ測定位置が蓋ボルトの中央位置（軸方向）であるため、解析結果に記載する応力も蓋ボルトの中央位置（軸方向）の応力とした。また、落下試験結果は、蓋ボルト締付後のひずみを 0 として測定しているが、ABAQUS 解析結果には初期締付力が含まれているため、記載する値は解析結果と初期締付力の差とした。

(ロ)-第 A. 84 表 9.3 m 水平落下時の各蓋ボルトの応力評価結果

部位	変形モード	試験結果より 算出した応力 (MPa)	ABAQUS 解析結果 ^(注1) (MPa)	評価基準 (MPa)
二次蓋ボルト	引張+曲げ	92	181	848
三次蓋ボルト	引張+曲げ	273	368	848

(注 1) 落下試験結果のひずみ測定位置が蓋ボルトの中央位置（軸方向）であるため、解析結果に記載する応力も蓋ボルトの中央位置（軸方向）の応力とした。また、落下試験結果は、蓋ボルト締付後のひずみを 0 として測定しているが、ABAQUS 解析結果には初期締付力が含まれているため、記載する値は解析結果と初期締付力の差とした。



(p)-第 A. 57 図 ABAQUS 解析手法の検証手順

A.10.3 MSF-24P 型輸送容器の落下試験結果に基づく密封性能の検証

MSF-24P 型輸送容器の 9.3 m 傾斜落下条件下における密封性能について落下試験結果に基づき評価・検証を行った。

1. MSF-24P 型輸送容器の密封設計

落下試験結果に基づき落下時の蓋密封部挙動について考察し、蓋密封部の漏えいメカニズムを分析した。それら結果に基づき、MSF-24P 型輸送容器の蓋密封部設計に反映した項目を(ロ)-第 A.85 表に示す。また、(ロ)-第 A.58 図に MSF-24P 型輸送容器及び落下試験モデルの蓋部構造の比較を示す。

2. MSF-24P 型輸送容器の密封性能評価

9.3 m 傾斜落下において、MSF-24P 型輸送容器の密封性能が維持することを、落下試験により密封性能が維持することが実証されている落下試験モデル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金属ガスケットまたはゴム O リングと胴フランジ面との口開き量の増加、金属ガスケットの相対横ずれ量の増加、金属ガスケットまたはゴム O リングの圧縮量の増加及び蓋ボルトの締付力の低下に起因するリークパスの発生と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、MSF-24P 型輸送容器の蓋、胴フランジ及び蓋ボルトの変形量が落下試験モデルに比べて小さいことを示すことにより、MSF-24P 型輸送容器の密封性能を検証する。

また、MSF-24P 型輸送容器の三次蓋構造に対して落下試験モデルは二次蓋構造であるが、荷重の伝達経路と蓋密封部の構造について、MSF-24P 型輸送容器の三次蓋周辺部（最外の蓋）と落下試験モデルの二次蓋周辺部（最外の蓋）は同様であり、MSF-24P 型輸送容器の二次蓋周辺部及び一次蓋周辺部（内側の蓋）と落下試験モデルの一次蓋周辺部（内側の蓋）で同様である。したがって、MSF-24P 型輸送容器の蓋密封部（三次蓋）は落下試験モデルの蓋密封部（二次蓋）と、MSF-24P 型輸送容器の蓋密封部（二次蓋及び一次蓋）は落下試験モデルの蓋密封部（一次蓋）と比較する。

(1) 評価手順

密封性能評価方法の手順を以下に示す。(□)-第 A. 59 図参照)

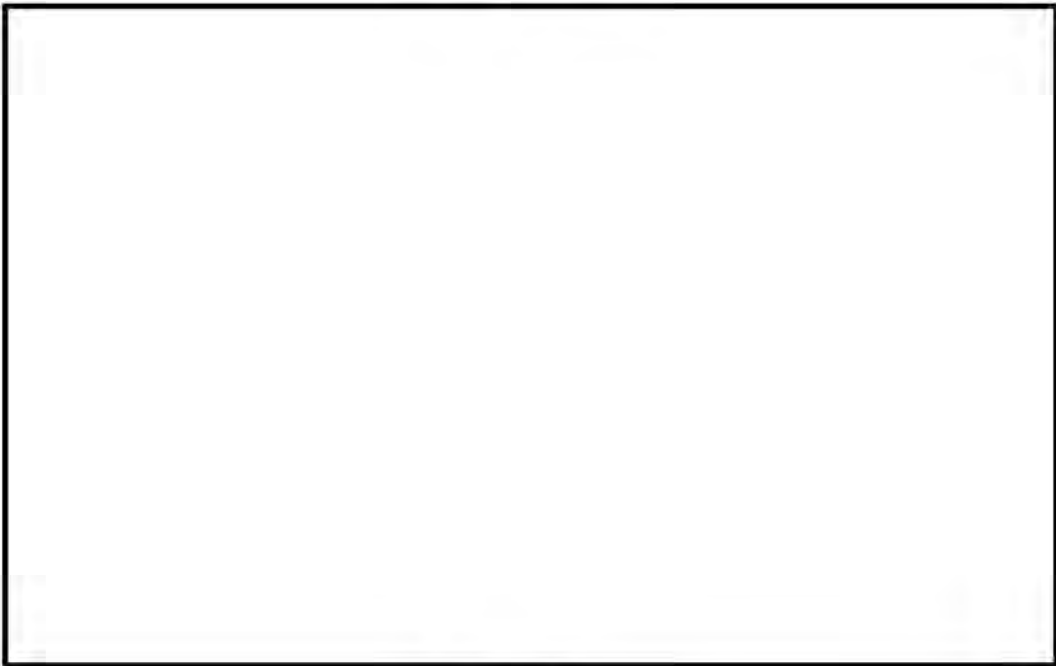
- a. MSF-24P 型輸送容器と落下試験モデルの蓋部を構成する各部位(胴フランジ、一次蓋、一次蓋ボルト、二次蓋、二次蓋ボルト、三次蓋、三次蓋ボルト)の各変形モード(曲げ、圧縮、引張、オーバル変形)の剛性に影響する寸法を抽出する。
- b. 各部位の剛性に影響する設計条件(材質、設計温度、縦弾性係数)を抽出する。
- c. 抽出した寸法及び設計条件を基に、MSF-24P 型輸送容器と落下試験モデルの各部位の剛性比を算出する。
- d. 落下衝撃力を決定する設計条件(キャスク重量、落下時の衝撃加速度)を抽出し、MSF-24P 型輸送容器と落下試験モデルの落下時に作用する荷重比を算出する。
- e. 各部位の剛性比と落下時に作用する荷重比から、落下衝撃負荷時の変形量比を算出する。
- f. e. で算出した変形量比が 1 以下(MSF-24P 型輸送容器の方が小さい)であれば、落下試験モデルに比べて、より高い密封性能を有していることが示される。

(ロ)-第 A. 85 表 MSF-24P 型輸送容器の蓋密封部設計に反映した項目

部位	落下試験等の結果	蓋密封部設計に反映した項目
蓋密封部	<p>(1) 落下衝撃荷重が胴フランジ及び蓋側面に作用し、胴フランジ、二次蓋及び二次蓋ボルトが曲げ及び引張変形し、蓋の横ずれ及び口開きが生じた。</p> <p>(2) 上記(1)により、落下試験では、二次蓋(最外蓋)の 9.3m 落下試験後の漏えい率は基準値を満足したものの、試験前より 2~3 桁程度増加した。</p>	<p>以下に示す反映により、落下試験モデルよりも密封性能を向上させる。</p> <p>(1) 胴フランジ、一次蓋及び二次蓋の剛性を落下試験モデルよりも高めることで蓋密封部の変形量を低減させる。</p> <p>(2) 落下試験モデルの二次蓋(最外蓋)に加えて三次蓋(最外蓋)を追加し、密封機能の向上を図る。</p>
緩衝体	<p>(1) 緩衝体の厚肉内鋼板構造による木材保持機能が有効に機能したため、緩衝体の変形量は許容量以下であることを確認した(但し、許容変形量に対する余裕は小さい)。</p>	<p>(1) 緩衝体の厚肉内鋼板構造による木材保持機能を維持するため、輸送容器の緩衝体構造は、落下試験により検証された基本構造を採用する。</p> <p>(2) 緩衝材高温時の強度低下を考慮した上で、比較的固い木材を適用した上で、外形制限寸法内の範囲内で緩衝体を径方向に大型化し、緩衝性能を向上させる。</p>



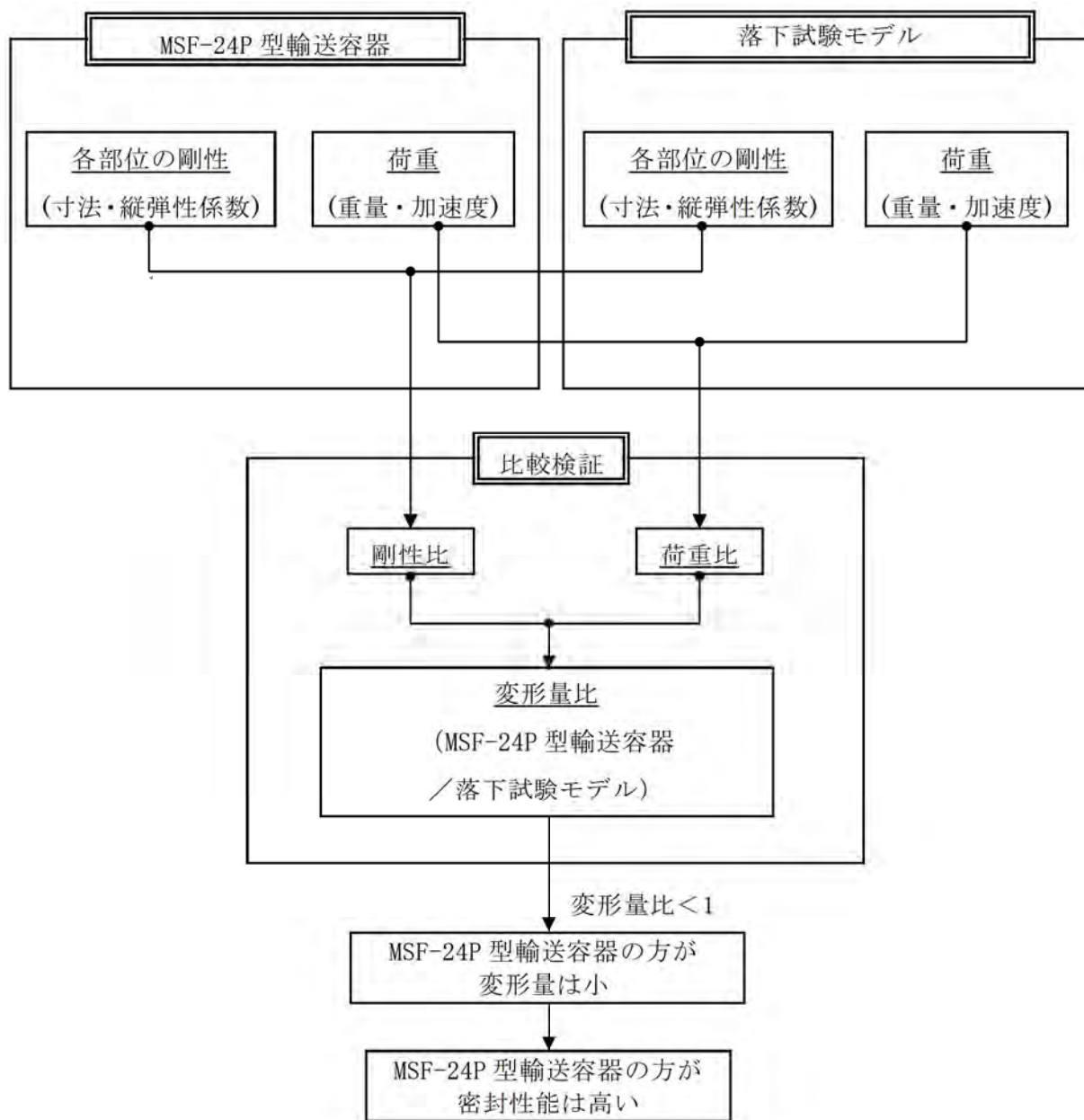
MSF-24P 型輸送容器



落下試験モデル

(単位 : mm)

(ロ)-第 A. 58 図 MSF-24P 型輸送容器及び落下試験モデルの蓋密封部構造の比較



(□)-第 A. 59 図 密封性能評価手順

(2) 評価結果及びまとめ

9 m 傾斜落下において、MSF-24P 型輸送容器の密封性能が維持されていることを落下試験結果を用いて検証した。検証結果を以下に示す。

a. 9 m 傾斜落下

9 m 傾斜落下時の蓋部の変形量比較結果を(ρ)-第 A. 86 表に示す。全ての評価部位において変形量比は 1 以下であり、MSF-24P 型輸送容器の蓋部の変形量は落下試験モデルに比べ小さい。したがって、MSF-24P 型輸送容器は、落下試験モデルに比べて高い密封性能を有している。

(ρ)-第 A. 86 表 9 m 傾斜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)
一次蓋	曲げ	0.57	1.58	0.36
一次蓋ボルト	引張	0.57	0.98	0.58
	曲げ	0.57	0.98	0.58
二次蓋	曲げ	0.46	3.86	0.12
二次蓋ボルト	引張	0.46	0.86	0.53
	曲げ	0.46	0.86	0.53
三次蓋	曲げ	0.52	0.53	0.98
三次蓋ボルト	引張	0.52	1.00	0.52
	曲げ	0.52	1.41	0.37
胴フランジ (二次蓋側)	曲げ	0.83	1.16	0.71
胴フランジ (三次蓋側)	曲げ	0.83	1.25	0.66

(注1) 部位は、MSF-24P 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、落下試験モデルに対する MSF-24P 型輸送容器の比を示す。

A. 10.4 緩衝材低温時の強度評価

MSF-24P 型輸送容器の緩衝体緩衝材には木材 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°C では常温時に対して強度が 16%~29%上昇する。 -20°C の木材強度を用いて評価を行った場合にキャスクへ発生する衝撃加速度は、(□)-第 A. 19 表及び(□)-第 A. 37 表に示す設計加速度（常温時の解析結果に裕度を考慮した値）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、キャスク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。

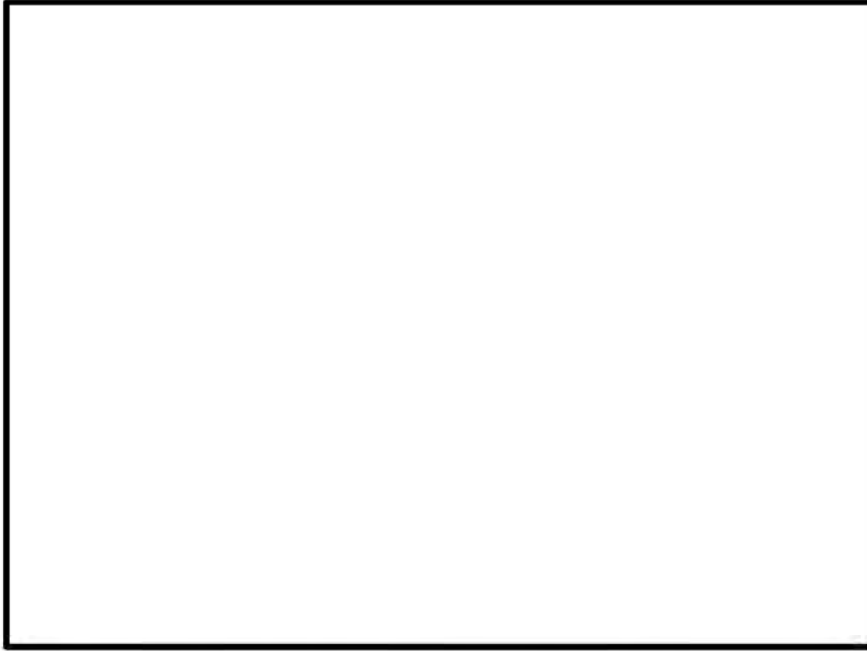
1. -20°C における木材強度の上昇割合

木材は温度が低くなると強度が上昇する。その特性を CRUSH 解析で考慮するために、温度係数として緩衝材の応力-ひずみ特性に考慮する。各木材の温度と温度係数の関係を(□)-第 A. 60 図~(□)-第 A. 62 図に示す。

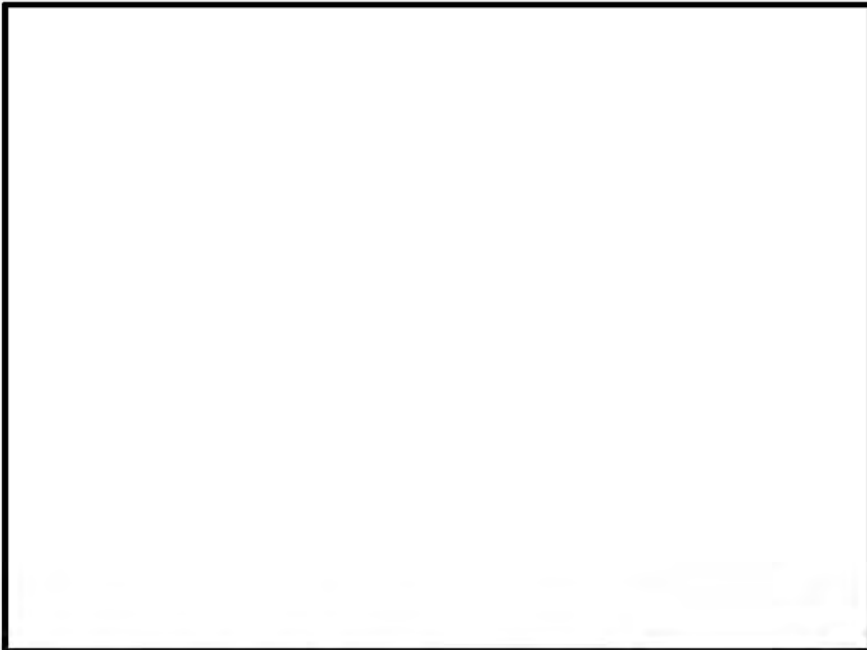
その関係式から、木材の温度を本輸送物の周囲温度 -20°C とした場合の温度係数を求めた。木材低温時に木材の応力-ひずみ特性に考慮する温度係数を(□)-第 A. 87 表に示す。

(□)-第 A. 87 表 木材の応力-ひずみ特性に考慮する温度係数（低温時： -20°C ）

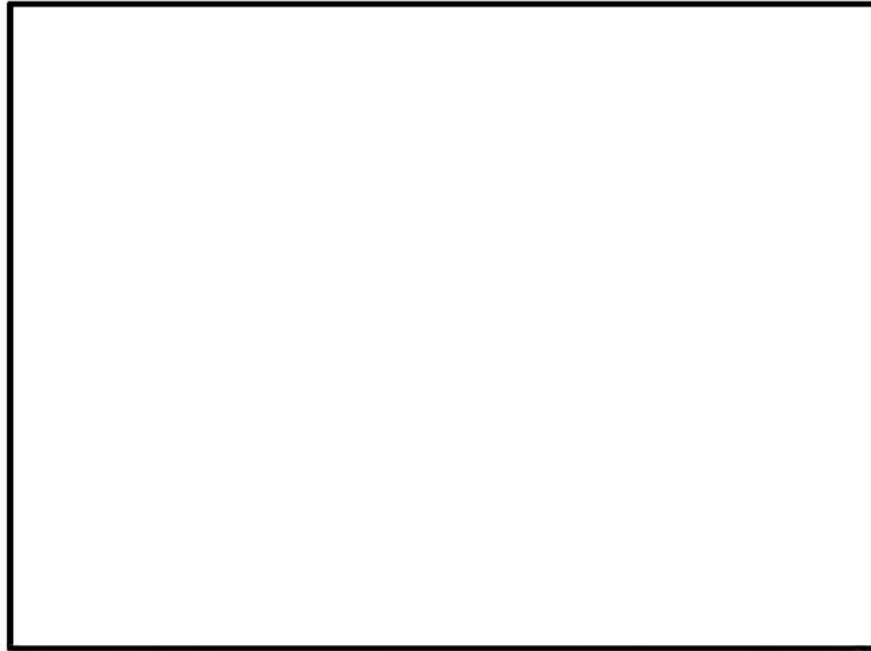
木材種	温度係数



(□)-第 A. 60 図 温度と温度係数の関係



(□)-第 A. 61 図 温度と温度係数の関係



(□)-第 A. 62 図 温度と温度係数の関係

2. -20℃における衝撃加速度

1 項に示す木材強度の上昇割合を考慮して CRUSH 解析を行った結果を(□)-第 A. 88 表 (0.3m 落下時) 及び(□)-第 A. 89 表 (9m 落下時) に示す。その他解析条件は A. 5. 3. 1 及び A. 6. 1 に示す条件と同様である。

木材温度が低くなると木材の強度は上昇するため、(□)-第 A. 88 表及び(□)-第 A. 89 表に示すとおり、落下時の衝撃加速度は常温時に比べて大きくなる。

(ρ)-第 A. 88 表 0.3m 落下時の衝撃加速度計算結果

落下姿勢	木材温度	衝撃加速度 (m/s ²)		
		計算結果 ^(注1) (A)	設計加速度 ^(注1) (B)	(A)/(B)
頭部垂直	常温	265	270	0.99
	低温	299		1.11
底部垂直	常温	255	260	0.99
	低温	288		1.11
水平	常温	200	210	0.96
	低温	220		1.05
頭部コーナー	常温	35	—	—
	低温	37		—
底部コーナー	常温	32	—	—
	低温	34		—

(注1) 計算結果(常温)と設計加速度は、(ρ)-第 A. 19 表に記載する値。

(ρ)-第 A. 89 表 9m 落下時の衝撃加速度計算結果

落下姿勢	木材温度	衝撃加速度 (m/s ²)		
		計算結果 ^(注1) (A)	設計加速度 ^(注1) (B)	(A)/(B)
頭部垂直	常温	568	600	0.95
	低温	617		1.03
底部垂直	常温	490	500	0.98
	低温	548		1.10
水平	常温	704	710	1.00
	低温	762		1.08
頭部コーナー	常温	469	480	0.98
	低温	481		1.01
底部コーナー	常温	464	—	—
	低温	473		—

(注1) 計算結果(常温)と設計加速度は、(ρ)-第 A. 66 表に記載する値(落下高さを 0.3m 落下と 9m 落下の合計 9.3m とした場合の解析結果)。また、計算結果(低温)は、落下高さを 0.3m 落下と 9m 落下の合計 9.3m とした場合の解析結果。

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。

(□)-第 A. 88 表及び(□)-第 A. 89 表に示すとおり、木材低温時の衝撃加速度は、(□)-第 A. 19 表及び(□)-第 A. 37 表に示す設計加速度（構造評価に入力する加速度）から増加する。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 : 0.3m 又は 9m 落下時の設計加速度において評価部位に発生する応力 (MPa)

σ_f : 二次蓋ボルト又は三次蓋ボルトの初期締付応力 (MPa)

α_1 : 木材低温時の衝撃加速度 (m/s^2)

α_2 : 0.3m 又は 9m 落下時の設計加速度 (m/s^2)

評価条件及び評価結果を(□)-第 A. 90 表及び(□)-第 A. 91 表に示す。(□)-第 A. 90 表及び(□)-第 A. 91 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。

(v)-第 A. 90 表 0.3m 落下時の強度評価

落下姿勢	0.3m 頭部垂直落下		0.3m 底部垂直落下		0.3m 水平落下	
評価部位	蓋部中性子 遮蔽材 カバー	二次蓋 ボルト	底部中性子 遮蔽材 カバー	三次蓋 ボルト	外筒	二次蓋 ボルト
σ_2	70 MPa	323 MPa	57 MPa	234 MPa	87 MPa	596 MPa
σ_f	-	200 MPa	-	190 MPa	-	200 MPa
α_1	299 m/s ²		288 m/s ²		220 m/s ²	
α_2	270 m/s ²		260 m/s ²		210 m/s ²	
σ_1	78 MPa	337 MPa	64 MPa	239 MPa	92 MPa	615 MPa
評価 基準 ^(注1)	168 MPa (f_b : <input type="text"/>)	885 MPa ($3S_m$: <input type="text"/>)	164 MPa (f_b : <input type="text"/>)	590 MPa ($2S_m$: <input type="text"/>)	166 MPa (f_b : <input type="text"/>)	885 MPa ($3S_m$: <input type="text"/>)

(注 1) 評価基準を設定する温度 (キャスク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°C から -20°C へ約 60°C 低下) するとし、「低温時温度 = (設計温度) - 60°C」とした。

(v)-第 A. 91 表 9m 落下時の強度評価

落下姿勢	9m 頭部垂直落下		9m 底部垂直落下		9m 水平落下		9m コーナー 落下
評価部位	外筒	二次蓋 ボルト	下部端板	三次蓋 ボルト	二次蓋 シール部	二次蓋 ボルト	三次蓋 ボルト
σ_2	170 MPa	663 MPa	107 MPa	436 MPa	155 MPa	809 MPa	236 MPa
σ_f	-	200 MPa	-	190 MPa	-	200 MPa	190 MPa
α_1	617 m/s ²		548 m/s ²		762 m/s ²		481 m/s ²
α_2	600 m/s ²		500 m/s ²		710 m/s ²		480 m/s ²
σ_1	175 MPa	677 MPa	118 MPa	460 MPa	167 MPa	854 MPa	237 MPa
評価 基準 ^(注1)	249 MPa ($1.5f_b$: <input type="text"/>)	884 MPa (S_y : <input type="text"/>)	246 MPa ($1.5f_b$: <input type="text"/>)	884 MPa (S_y : <input type="text"/>)	199 MPa (S_y : <input type="text"/>)	884 MPa (S_y : <input type="text"/>)	884 MPa (S_y : <input type="text"/>)

(注 1) 評価基準を設定する温度 (キャスク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°C から -20°C へ約 60°C 低下) するとし、「低温時温度 = (設計温度) - 60°C」とした。

A. 10.5 MSF-24P 型輸送容器のバスケットプレート用材料

アルミニウム合金 (MB-A3004-H112) に関する説明書

1. 概要

本書は、MSF-24P 型輸送容器のバスケットプレートに適用するアルミニウム合金 (MB-A3004-H112) の材料規定及び製造管理規定について説明するものである。

2. 適用範囲

本材料を MSF-24P 型のバスケットプレートに適用するにあたり、本材料及びこれを使用するバスケットは以下の事項に適合すること。

- (1) 供用期間は 60 年以下であること。
- (2) バスケットが収納されるキャスク本体内部には、ヘリウムガスを封入し、不活性ガス雰囲気は維持されていること。
- (3) バスケットは耐圧構造でないこと。
- (4) バスケットは溶接部がない構造とすること。
- (5) 本材料はボルト材として使用しないこと。
- (6) 供用状態によらずバスケットプレートの発生応力は、弾性範囲内であること。
- (7) 供用状態によらずバスケットは長期間にわたる熱応力を生じない構造とすること。

3. 材料規定

本規定は、設計評価に適用する材料規定である。なお、本規定を適用する材料は、4. に示す製造管理規定を満足しなければならない。

(1) 材料名称

材料の規定名称は (a)-第 A. 92 表 に示すものであること。

(2) 化学成分

化学成分は (a)-第 A. 93 表 に示す百分率の値の範囲内にあること。

(3) 設計応力強さ

設計応力強さは (a)-第 A. 94 表 の規定によること。

(4) 許容引張応力

許容引張応力は (a)-第 A. 95 表 の規定によること。

(5) 設計降伏点

設計降伏点は(ρ)-第 A. 96 表の規定によること。

(6) 設計引張強さ

設計引張強さは(ρ)-第 A. 97 表の規定によること。

(7) 縦弾性係数

縦弾性係数は(ρ)-第 A. 98 表の規定によること。

(8) 熱膨張係数

熱膨張係数は(ρ)-第 A. 99 表の規定によること。

4. 製造管理規定

本規定は、製造管理に係る規定である。

- (1) 化学成分は、(ρ)-第 A. 93 表に示す百分率の値の範囲内にあること。この場合において、化学成分は溶湯成分分析によること。化学成分の分析試験は、JIS H 4100「アルミニウム及びアルミニウム合金の押出型材」（以下「JIS H 4100」という。）によること。
- (2) 材料の製造は、(ρ)-第 A. 63 図に示す製造フローに従い、熱間押出成形加工されたものであること。
- (3) 材料は、熱間押出成形加工後、熱処理は行わず、空冷されたものであること。熱間加工によって得られるか又はごくわずかな冷間加工を加えただけの状態であること。質別 H112 は、JIS H 0001「アルミニウム、マグネシウム及びそれらの合金－質別記号」によること。
- (4) 機械的性質は、(ρ)-第 A. 100 表に示す値に適合すること。
- (5) 製品の寸法の許容差は、以下及び JIS H 4100 によること。これを逸脱する寸法を適用する場合、機械的性質が(ρ)-第 A. 100 表を満足することを確認すること。
 - ・肉厚 : 16mm 以下
 - ・押出比^(注1) : 10 以上

(注1) ピレットの押出方向に垂直な断面積と押出材の押出方向に垂直な断面積の比
- (6) 本材料は、耐食性向上等を目的として表面処理を行う場合がある。表面処理を行う場合、機械的性質が(ρ)-第 A. 100 表を満足することを確認すること。
- (7) 本材料は、(ρ)-第 A. 63 図の製造フローの各段階において、(ρ)-第 A. 101 表に示す品質管理を行う。

- (8) 上記規定以外の規定については、JIS H 4100 又は EN 755-1「Aluminium and aluminium alloys- Extruded rod/bar, tube and profiles - Part 1: Technical conditions for inspection and delivery」によること。

(㍀)-第 A. 92 表 材料の規定名称

材料の名称	記号	質別
バスケットプレート用材料 アルミニウム合金 (MB-A3004-H112)	MB-A3004	H112

(㍀)-第 A. 93 表 化学成分規定

記号	化学成分 (mass%)											
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ga, V, Ni, B, Zr など	Ti	その他		Al
										個々	合計	
MB-A3004	0.30 以下	0.7 以下	0.25 以下	1.1 以上 1.5 以下	1.0 以上 1.3 以下	—	0.25 以下	—	—	0.05 以下	0.15 以下	残部

(ロ)-第 A. 94 表 材料の各温度における設計応力強さ S_m (注1)(注2)

単位：MPa

記号	温 度 (°C)										
	-40 ~40	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
MB-A3004	37	37	37	37	37	37	36	31	25	21	17

(注1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

(注2) 時効による強度低下を考慮した値である。

(ロ)-第 A. 95 表 材料の各温度における許容引張応力 S (注1)(注2)

単位：MPa

記号	温 度 (°C)									
	-40 ~40	75	100	125	150	175	200	225	250	250
MB-A3004	37	37	37	37	29	21	15	11	8	8

(注1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

(注2) 時効による強度低下を考慮した値である。

(ロ)-第 A. 96 表 材料の各温度における設計降伏点 S_y (注1)(注2)

単位：MPa

記号	温 度 (°C)										
	-40 ~40	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
MB-A3004	56	56	56	56	56	56	56	52	46	38	30

(注1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

(注2) 時効による強度低下を考慮した値である。

(ロ)-第 A. 97 表 材料の各温度における設計引張強さ S_u (注1)(注2)

単位：MPa

記号	温 度 (°C)										
	-40 ~40	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
MB-A3004	153	153	153	151	140	126	110	93	77	63	52

(注1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

(注2) 時効による強度低下を考慮した値である。

(□)-第 A. 98 表 材料の各温度における縦弾性係数^(注 1)

単位：MPa

記号	温 度 (°C)											
	20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
MB-A3004	73900	73300	72800	72100	71400	70600	69800	68900	67900	66900	65800	64600

(注 1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

(□)-第 A. 99 表 材料の各温度における熱膨張係数^(注 1)単位： $\times 10^{-6}$ mm/mm \cdot °C

記号	区分 (注 2)	温 度 (°C)											
		20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
MB-A3004	A	22.75	23.52	24.02	24.42	24.76	25.05	25.35	25.68	26.06	26.54	27.14	27.91
	B	22.61	23.14	23.48	23.76	23.99	24.17	24.33	24.48	24.63	24.79	24.99	25.24

(注 1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

(注 2) 区分 A は瞬時熱膨張係数、区分 B は常温から当該温度までの平均熱膨張係数を表す。

(ロ)-第 A. 100 表 機械的性質^(注 1)

記号	引張試験 (試験温度：常温)			シャルピー衝撃試験 ^(注 2) (試験温度：-40 °C)
	引張強さ (MPa)	耐力 (MPa)	伸び (%)	吸収エネルギー (J)
MB-A3004	185 以上	85 以上	15 以上	41 以上

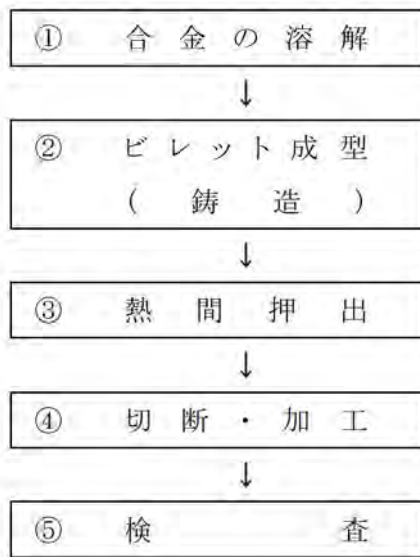
(注 1) 時効による強度低下を考慮しない供用開始前の製造管理値である。

(注 2) 吸収エネルギーの規定は JIS Z 2242 の V ノッチ試験で得られる押出方向に平行な L 方向及び垂直な T 方向各 3 試験片の個々の値である。

(ロ)-第 A. 101 表 管理程度表

製造工程 ^(注 1)	管理項目	材料保証 (規定)	製造管理 (参考)
①合金の溶解	化学成分(溶湯)	○	—
⑤検査	材料特性 (初期材)	引張強度特性	—
		シャルピー 衝撃特性	—
		組織観察	—
③熱間押出	製造条件	押出比	○
		押出条件	—
		押出冷却条件	—
		整直条件	—
		質別	○

(注 1) 製造工程は(ロ)-第 A. 63 図の製造フローに対応する。



(ロ)-第 A. 63 図 製造フロー

A.10.6 参考文献

- 1) (一社)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).
- 2) (一社)日本機械学会, 「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2012)」, (2012).
- 3) (一社)日本機械学会, 「発電用原子力設備規格 材料規格 (JSME S NJ1-2012)」, (2012).
- 4) “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).
- 5) (一社)日本原子力学会, 「使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準 (AESJ-SC-F006:2013)」, (2014).
- 6)
- 7)
- 8) 原燃輸送株式会社, 「高性能使用済燃料輸送容器の安全性に関する技術調査 (PWR) H5 年度上半期 (最終報告書)」, (1993).
- 9) 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).
- 10) 産業技術センター, 「複合材料技術集成」(1976).
- 11) 機械設計便覧編集委員会, 「機械設計便覧 (第3版)」, (1992).
- 12) The American Society of Mechanical Engineers, “ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII Division 3”, (2015).
- 13) 西田正孝, 「応力集中 増補版」, (1973).
- 14) 「クレーン構造規格」, 平成7年労働省告示第134号, (1995).
- 15) (一社)日本機械学会編, 「機械工学便覧 新版」, (1984).
- 16) 幾島, 浅田, 「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).
- 17) (独)原子力安全基盤機構, 「金属キャスク貯蔵技術確証試験報告書 1/3 最終報告」, (2004).
- 18) 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”, (2015).
- 19) (独)原子力安全基盤機構, 「中間貯蔵施設健全性評価手法等調査報告書最終報告」, (2005).