

(ロ)B 熱解析

B.1 概要

(1) 熱設計

輸送容器は、外容器と内容器から取出し可能な内容容器から構成される。外容器及び内容容器の主要構造材は全てステンレス鋼材であり、熱膨張率が異なる異種材料は構造材に使用していないため、温度上昇により変形することはない。

外容器はフレームに内外板を溶接した2重構造となっており、外板-内板の間には、セラミックファイバー製の断熱材を充填して、収納物を収納する内容容器への熱の伝達を防ぐ構造となっている。本断熱材は、アルミナ・シリカを主成分とした人造鉱物繊維で、最高使用温度は□□℃以上である。セラミックファイバーは、ブランケット状で軽量且つ必要な寸法への成形が容易であり、圧縮変形しても断熱性能が低下しない特徴がある。外容器表面には可融栓を設けており、高温下では可融部のハンダが溶けて外板-内板の間の圧力上昇を防ぐ。

外容器蓋裏面には、耐火ゴムを取付けている。耐火ゴムは、約□□℃で膨張を開始し、外容器本体頂部と蓋の隙間を塞ぎ、火炎の進入を防ぐ機能をもつ。

特別な補助冷却装置や膨張タンク等は設けられていない。

(2) 熱解析

本解析では、本輸送物が規則及び告示に規定されるA型核分裂性輸送物に係る技術上の基準に適合することを示す。

(a) 一般の試験条件

本輸送物はA型輸送物であるため、B型輸送物の一般の試験条件下で要求される条件「38℃で太陽ふく射を12時間ごとに受ける環境下に1週間置く」は該当しない。しかし、核分裂性輸送物であるため、特別の試験条件下における耐火試験前に要求される同様の条件「38℃で太陽ふく射を12時間ごとに受ける環境下に温度が一定になるまで置く」に該当することから、非損傷モデルを用いて一般の試験条件について評価する。

(b) 特別の試験条件

- イ. 38℃で太陽ふく射を12時間ごとに受ける環境下に温度が一定になるまで置いた後、0.9の周囲放射率を持つ800℃の熱放射環境に30分間さらされる。この場合、試験中も輸送物は太陽熱ふく射を受ける。この際設計上最大となる内部発熱を考慮する。
- ロ. 試験後の輸送物は、38℃の大気中において12時間ごとに太陽熱ふく射を受ける。この際設計上最大となる内部発熱を考慮し、人為的な冷却は行わない。

規則では、耐火試験で最大の破損を受けるよう落下試験Ⅰ及びⅡを実施する必要がある。熱的に厳しくなるのは、容器の構造上熱の進入経路になりやすいフランジ部近傍が損傷を受けるコーナー落下である。原型試験では、落下試験Ⅰ及びⅡで重畳効果を与えるために同一箇所をコーナー落下させているが、さらに保守的となることから、落下試験Ⅰ及びⅡに先立ち、一般の試験条件における自由落下として同一箇所をコーナー落下させている。この原型容器を用いて耐火試験を実施しており、熱解析では、原型容器の変形及び温度測定結果を保守的に包絡したモデルを用いた解析計算により評価を行う。原型容器を用いた耐火試験の結果については「(ロ)B 付属資料 1」に示す。

解析は、非定常の伝熱解析で、非線形材料定数やふく射を取扱う非線形解析の適用となる。解析計算で用いる解析コードは、有限要素法に基づく汎用有限要素法解析コード「ANSYS ver.11」を用いて行う。本解析に先立ち、耐火試験結果を基に解析モデル妥当性確認のための合わせ込み解析を実施している。「(ロ)B 付属資料 2」に妥当性確認結果を示す。

(3) 最大崩壊熱量

本輸送物に収納するウランの崩壊熱量は、極めて微少であり無視する。

B.2 材料の熱的性質

本輸送物の熱解析に使用する材料の熱的性質を(ロ)B-第1表～(ロ)B-第4表に示す。

(ロ)B-第1表 収納物の熱的物性値

温度 (K)	密度 (g/cm ³)	比熱 (J/kg·K)	熱伝導率 (W/m·K)	温度 (K)	密度 (g/cm ³)	比熱 (J/kg·K)	熱伝導率 (W/m·K)
293	3.646	462	4.83	693	3.598	535	5.28
313	3.644	466	4.82	713	3.595	539	5.33
333	3.643	470	4.82	733	3.592	542	5.38
353	3.641	473	4.81	753	3.589	546	5.43
373	3.638	477	4.81	773	3.586	549	5.49
393	3.636	480	4.82	793	3.583	552	5.55
413	3.634	484	4.83	813	3.581	555	5.61
433	3.631	487	4.84	833	3.578	557	5.67
453	3.629	491	4.86	853	3.575	560	5.73
473	3.626	494	4.88	873	3.572	562	5.80
493	3.624	498	4.90	893	3.569	564	5.87
513	3.621	502	4.93	913	3.566	566	5.94
533	3.619	505	4.96	933	3.563	567	6.01
553	3.616	509	4.99	953	3.560	568	6.08
573	3.614	513	5.02	973	3.556	569	6.15
593	3.611	517	5.06	993	3.553	569	6.23
613	3.608	521	5.10	1013	3.550	570	6.31
633	3.606	524	5.14	1033	3.547	569	6.39
653	3.603	528	5.18	1053	3.544	569	6.47
673	3.600	532	5.23	1073	3.541	567	6.55

(注)収納物は内容器内部に含まれる物質を体積比で均質化した。体積比は空気 46.2%、二酸化ウラン 16.6%、ステンレス鋼 21.8%、ネオプレンゴム 15.4%。二酸化ウランは MATPRO-Version11 及び自社データより引用。その他は伝熱工学資料 改訂 4 版より引用

(ロ)B-第2表 アルミハニカムの熱的物性値

温度 (K)	密度 (g/cm ³)	比熱 (J/kg·K)	熱伝導率(W/m·K)		
			X	Y	Z

(注)アルミハニカムの熱的性質は計算による。「(ロ)B 付属資料 2」を参照。

(ロ)B-第3表 断熱材の熱的物性値

温度 (K)	密度 (g/cm ³)	比熱 (J/kg·K)	熱伝導率 (W/m·K)

(注)メーカー公表値を補完して採用。「(ロ)B 付属資料 2」を参照。

(ロ)B-第4表 熱解析に使用する材料の熱的性質

部品名	材料名	温度 (K)	密度 (g/cm ³)	比熱 (J/kg·K)	熱伝導率 (W/m·K)
外容器 内容器	ステンレス鋼 ⁽¹⁾	300	7.92	449	16.0
		400	7.89	511	16.5
		600	7.81	556	19.0
		800	7.73	620	22.5
		1000	7.64	644	25.7
ゴム類	耐火ゴム ⁽¹⁾⁽²⁾	300	0.86	2200	0.36
		シリコンゴム ⁽¹⁾	293	0.97	1600
	シリコンゴム ⁽¹⁾	400	0.97	1500	0.19
	ネオプレンゴム ⁽¹⁾	293	1.23	2200	0.25
		400	1.23	2200	0.23

(1) 伝熱工学資料 改訂第4版 1986年

(2) 主成分であるエチレンプロピレンゴムの物性値で代用。

B.3 構成要素の仕様

本輸送物の収納物は固体でウラン酸化物（ペレット）又はガドリニア入りウラン酸化物（ペレット）を収納したステンレス鋼製ペレット保管箱を組立てたステンレス鋼製のペレット保管箱組立体であるため、安全解析上想定される温度の範囲では安定的に固体でかつガス等の放出はない。このため、弁及び安全弁は設けられていない。また、収納物を加圧もしくは減圧して収納する必要がないことから、最大使用圧力に関する要件は該当しない。内容器のフランジ部に使用しているOリングの仕様は以下のとおりである。

- ・材 質 シリコンゴム
- ・使用耐寒耐熱温度 □°C ~ □°C
- ・耐熱老化性試験 □°C × □時間で著しい劣化がないこと。
- ・引張り強さ □MPa 以上
- ・硬 さ □ ~ □(タイプ A デュロメータ)
- ・伸 び □% 以上
- ・線 径 φ□mm

B.4 一般の試験条件

本輸送物は A 型核分裂性輸送物であるため、B 型輸送物に要求される一般の試験条件下の熱的試験は該当しない。ただし、核分裂性輸送物に要求される特別の試験条件下の耐火試験に供する前の条件として、環境温度 38℃ 太陽ふく射下で輸送物表面温度が一定になるまで置くことが求められるため、本項では環境温度 38℃ 太陽ふく射下で 1 週間置くとした条件で評価を行う。

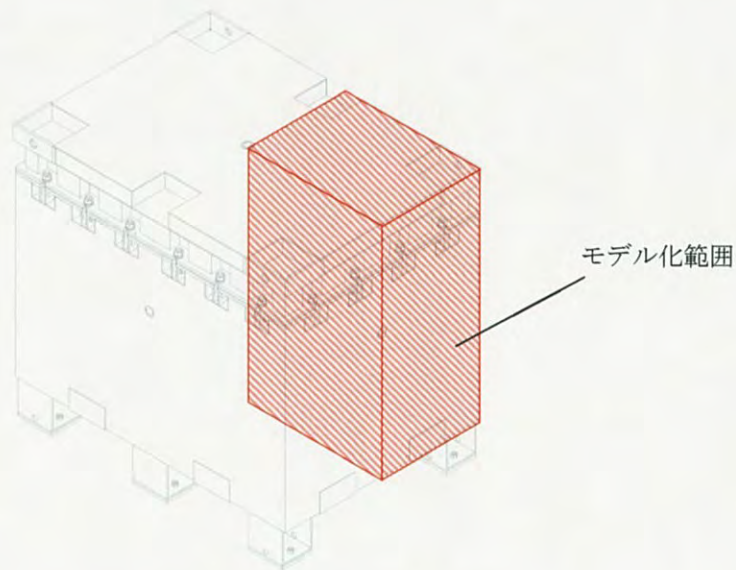
B.4.1 熱解析モデル

B.4.1.1 解析モデル

(1) 形状モデル

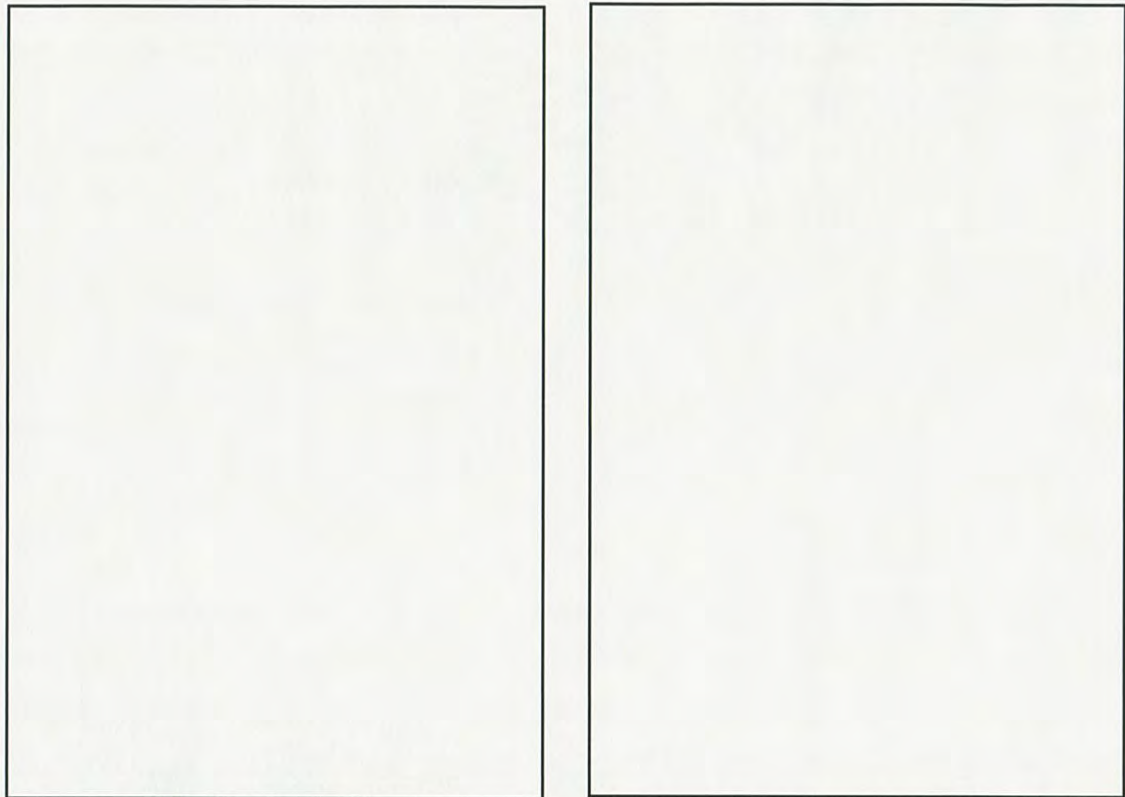
原型容器 2 号機の試験では、一般の試験条件の 1.2m 自由落下としてコーナー部を落下させている。「(ロ)A 付属資料 1」参照。このときの変形はコーナー部の吊部が変形したが、本体にはほとんど変形は生じなかった。事前に実施した合わせ込み解析における解析モデルは、保守的に断熱材領域を限定したもので、さらに特別の試験条件下における変形を考慮したものとなっている。この解析モデルは 1.2m 自由落下による変形を十分に包絡したものとなることから、同様の解析モデルから、特別の試験条件下における変形を除外した解析モデルを使用した。「(ロ)B 付属資料 2」を参照。ただし、合わせ込み解析では、原型容器と条件を整合させるため、収納物を鉛としているが、本解析では、実機の状態を模擬するため、収納物にウランを考慮している。

本解析では対称性を考慮し、(ロ)B-第 1 図に示すハッチング範囲をモデル化(1/4 対称)の対象範囲としている。モデル化にあたっては、微小な部品等は熱的な影響が無視できると考えられることからモデル化から除外している。



(ロ)B-第 1 図 解析モデル化範囲

外容器蓋については、フレームより外側を無視し、積重ね時に脚と嵌合する凹みが連続的に存在する保守的なモデルとなっている。また、外容器の本体のボルト座についても同様にボルト座が連続的に存在するモデルとしている。アルミハニカムは、内容器により多くの熱を伝える伝熱パスとなることから変形が無いものとした。(ロ)B-第2図に解析モデル図を示す。



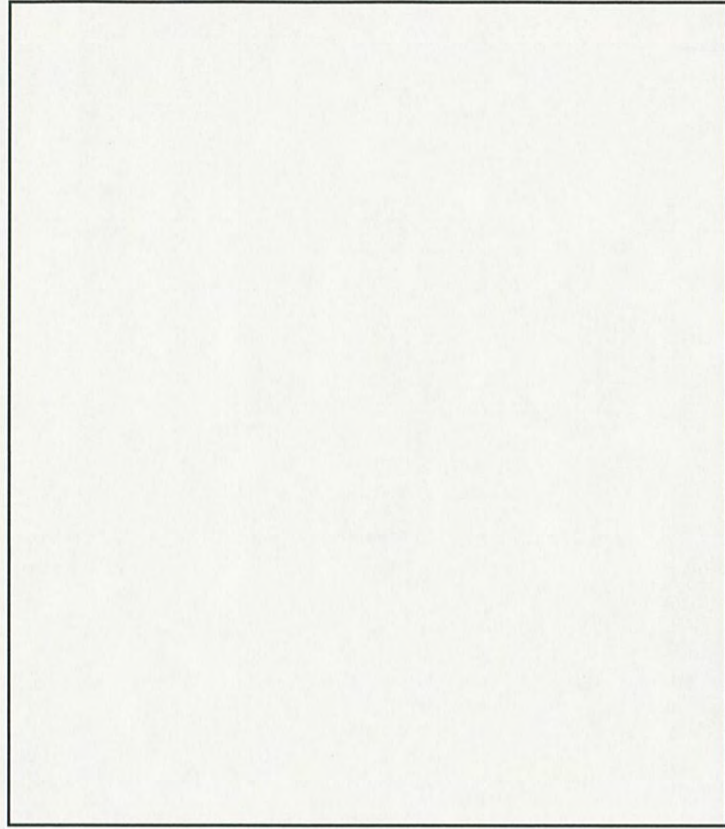
(a)-Y 方向から見た図

(b)+Y 方向から見た図

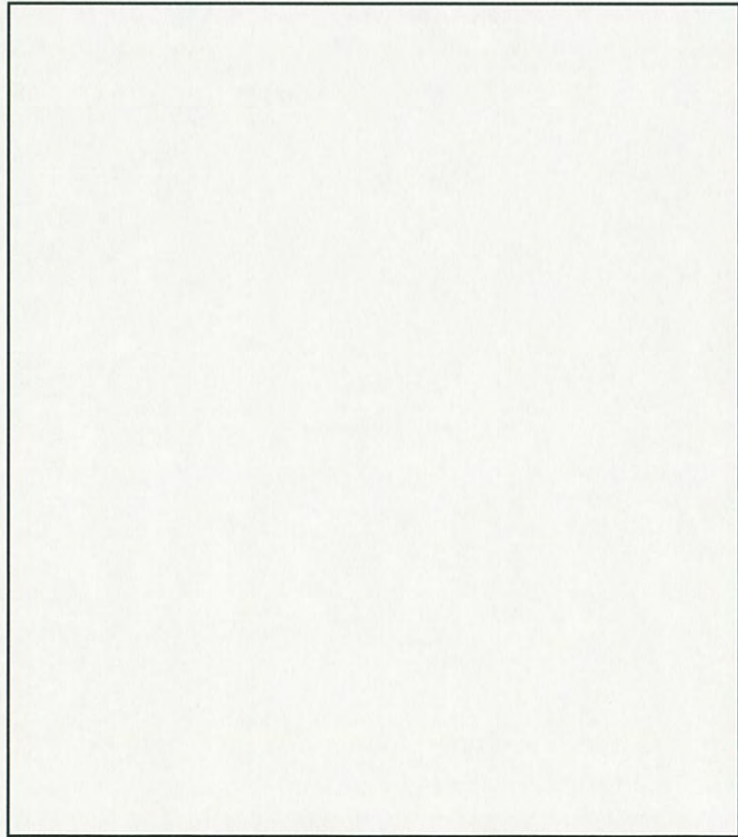
(ロ)B-第2図 解析モデル/全体図

解析モデルでは、構造物外表面を覆うように3重の要素を作成しており、それぞれ、空気との熱伝達解析用、自然冷却時のふく射伝熱解析用、火災時の炎とのふく射伝熱解析用とした。また、内部空気と周辺構造物との境界には、ふく射伝熱を考慮している。

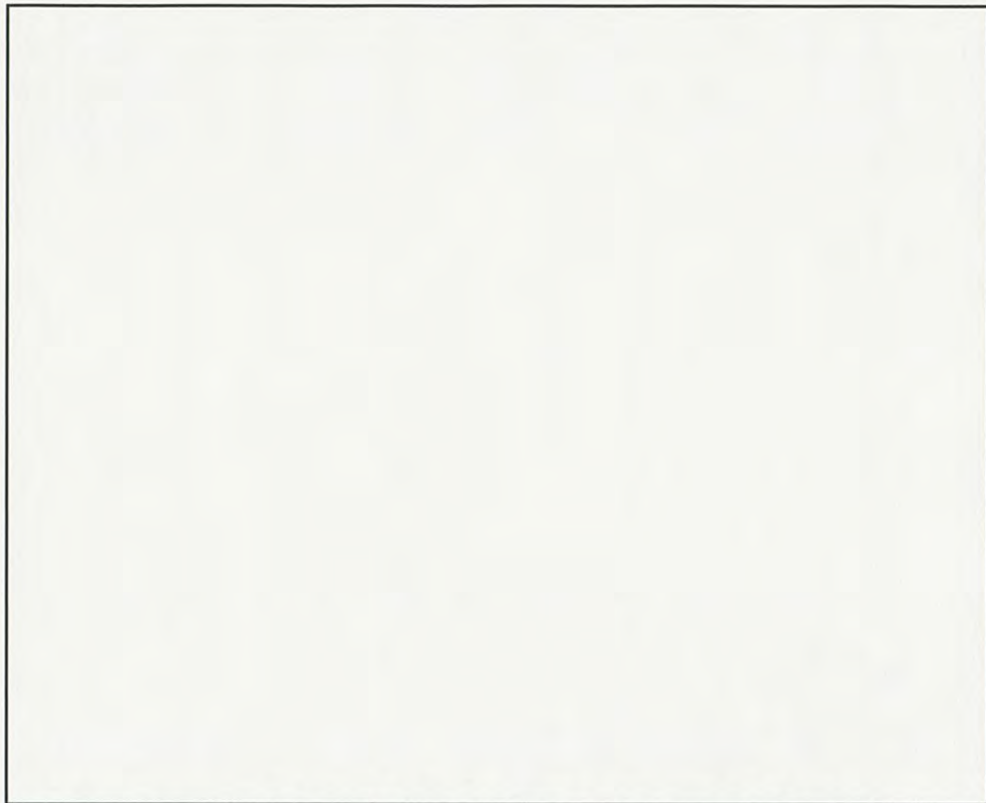
全節点数は 、全要素数は である。(ロ)B-第3図~(ロ)B-第5図に有限要素モデルを示す。



(ロ)B-第3図 有限要素モデル(全体)



(ロ)B-第4図 有限要素モデル(表面効果要素)



(ロ)B-第5図 有限要素モデル(表面効果要素 容器内部のふく射計算用)

(2) 解析条件

本解析においては、規則に従った熱的境界条件を設定する必要がある。解析条件を以下に整理する。

(a) 部材間の伝熱

幾何学的に接触している各部材間は完全に密着して接しているとする。解析においては、有限要素モデルのモデル作成時に節点を共有化してモデル化しており、伝熱のロスが発生しない。

(b) 告示別記第四第一号による伝熱

以下に示す2つの条件を12時間ごとに繰り返す。繰り返し回数は7日間とした。

イ. 日中相当の条件として、規定の熱流束による入熱及びふく射による放熱を定義

- ・別記第四第一号に示す表より、容器の外表面のうち

水平な面上向きの面 : 800W/m^2

垂直の面 : 200W/m^2

を負荷する。これらは容器外表面の該当面に、熱流束として直接定義する。

- ・外容器外表面から、外部空間へ(雰囲気温度 38°C)のふく射を定義する。外容器はステンレス鋼製であるため、ふく射率は「伝熱工学資料改定第4版(日本機械学会)」P184 図1(a)におけるステンレス鋼のふく射率 ($\square^\circ\text{C}$ において $\square\sim\square$) から、保守的に \square とした。ふく射の定義には ANSYS の表面効果要素を利用する。

- . 夜間相当の条件として、ふく射による放熱を定義する
- 前項と同様に、外容器外表面から、外部空間（雰囲気温度 38℃）へのふく射を定義する。ふく射率は前項と同様に とする。ふく射の定義には ANSYS の表面効果要素を利用する。

- (c) 外部流体の対流による容器外表面への伝熱
- 38℃の外部流体の対流により、容器外表面では熱の収支が行われるため、これを定義する。熱伝達係数 α はヌセルト数の関数とし、ヌセルト Nu は IAEA 輸送規則 TS-G1.1 728.31 に基づいた。熱伝達の定義には ANSYS の表面効果要素を利用する。熱伝達係数 α 、ヌセルト Nu は下記の式で表される。

熱伝達係数 α

$$\alpha = Nu \cdot \lambda / l \quad (\lambda: \text{熱伝導率}, l: \text{代表長さ (脚を除く外容器の全高0.915m)})$$

Nu (IAEA 輸送規則 TS-G1.1 728.31 より)

$$Nu = 0.13(PrGr)^{1/3}$$

なお、

プラントル数 $Pr = \nu / \kappa$ (ν : 動粘度、 κ : 熱拡散率(= $\lambda / \rho c$), ρ : 密度、 c : 比熱)

グラスホフ数 $Gr = g \times \beta (T_w - T_\infty) l^3 / \nu^2$

(g : 重力加速度、 β : 体積膨張率(= $1/T$), T_w : 壁面温度、 T_∞ : 空気温度)

(□)B-第 5 表に熱伝達係数の計算結果を示す。

(□)B-第 5 表 熱伝達係数

温度 (K)	熱伝達係数 (W/m ² ·K)	温度 (K)	熱伝達係数 (W/m ² ·K)

(d) 容器内部の空気部におけるふく射伝熱

外容器内面と内容器外面の間、および内容器内面とペレット保管箱組立体外面の間には空気が存在している。これら内部の空気には対流が存在しないとし、空気は熱伝導物体として取り扱う(空気に相当する物性値を定義した固体と仮定する)。また、空気に接する容器内面ではふく射による伝熱を定義する。外容器内面はアルミハニカムがその面積の大半を占めているため、ふく射率は「伝熱工学資料改定第4版(日本機械学会)」P184 図1(a)における、アルミニウムのふく射率(約□~□)から保守的に□とする。対称性のあるモデルの解析であるためラジオシティ法を使用することとした。

(e) 対称境界条件

各対称面は、断熱条件として取り扱われる。伝熱解析では、何も条件を設定していない面は断熱条件として取り扱われる。

(f) 初期温度条件

一般の試験条件では解析対象物が 38°C均一の状態から解析がスタートする。

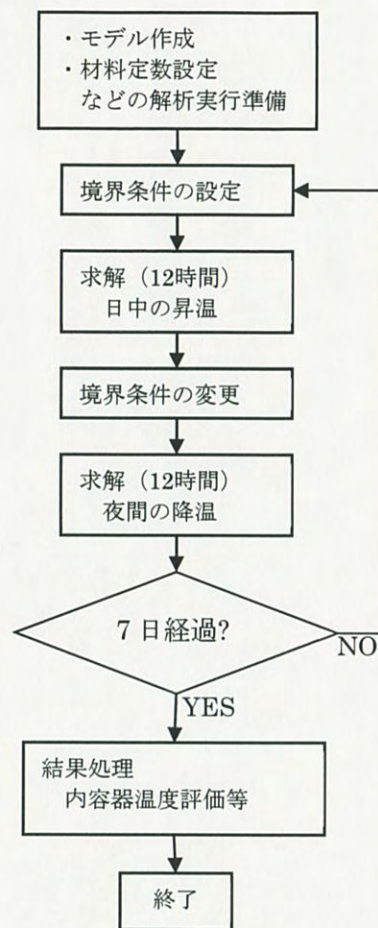
(ロ)B-第6表に伝熱条件をまとめて示す。

(ロ)B-第6表 伝熱条件一覧 (一般の試験条件)

試験条件		外部空気との熱伝達 (熱伝達条件定義)	太陽ふく射の流入 (熱流束定義)	炎とのふく射 (ふく射伝熱定義)	外部空気とのふく射 (ふく射伝熱定義)	容器内部空気部のふく射 (外容器内面⇄内容器外面、 内容器内面⇄収納容器外面)
一般	日中 太陽による昇温	ON 外部温度 38°C、温度 依存の熱伝達係数	ON 水平上向き面 800 垂直面 200 水平下向き面 0	OFF	ON (容器外面 $\epsilon = \square$)	ON ($\epsilon = \square$)
	夜間 自然冷却		OFF			

(3) 解析フロー

解析フローを(ロ)B-第6図示す。



(ロ)B-第6図 一般の試験条件解析フロー

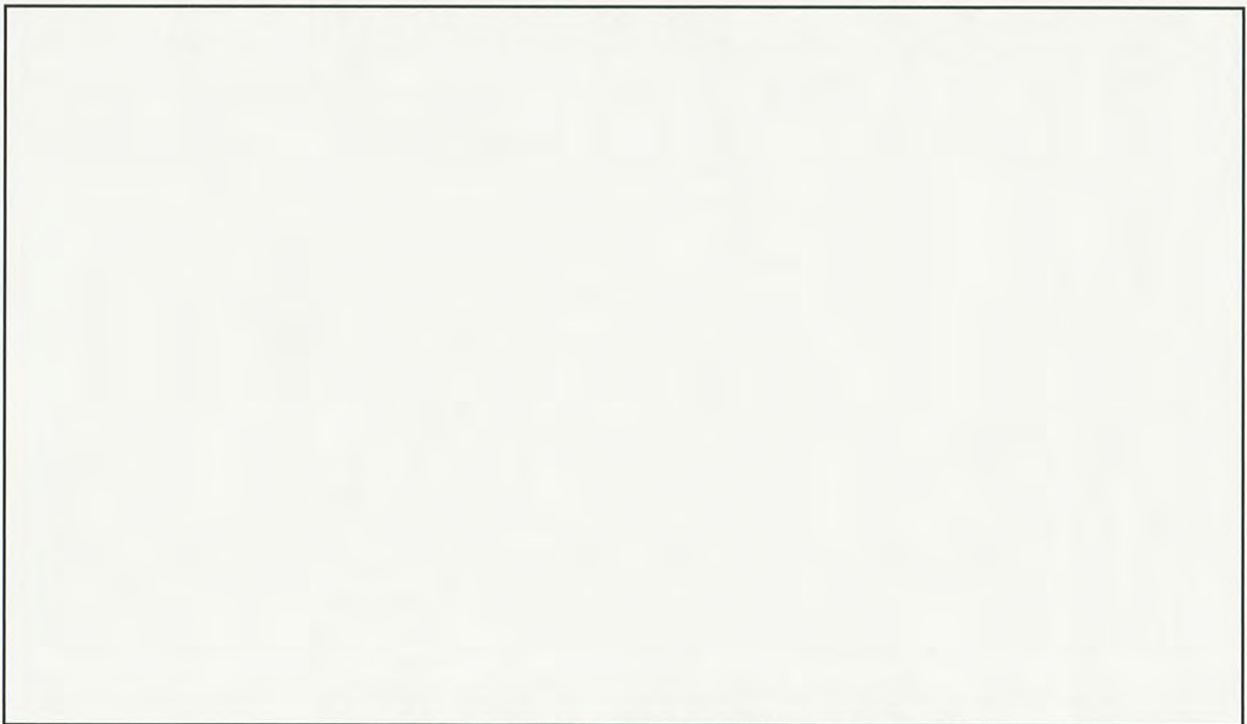
B.4.1.2 試験モデル

原型容器を用いた一般の試験条件における熱的試験は実施していないため、該当しない。

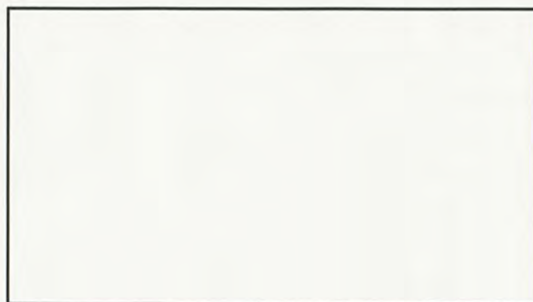
B.4.2 最高温度

「B.4.1.1 解析モデル」で説明した解析モデル及び解析条件において、解析コード「ANSYS」を用いて一般の試験条件における輸送物の温度を評価した。温度評価は、輸送物の密封境界である内容物の各部位のうち、熱の影響による劣化が生じやすいフランジ部のOリングに注目しておこなった。(ロ)B-第7図に温度履歴を示す。また、(ロ)B-第8図に評価箇所を示す。太陽ふく射による昇温はほぼ5日目からほぼ平衡状態となっている。Oリングの最高温度は、7日目の入熱後に生じており、68°Cであり、常用上限温度の□°Cを下回るものであった。輸送物全体における最高温度は外容器蓋中央付近の断熱材中で生じており、114°Cとなった。(ロ)B-第9図及び(ロ)B-第10図に最高温度到達時の解析モデル全体及びOリングとスペーサの温度分布を示す。輸送容器の主要構造材はステンレス鋼であり、解析により得られた温度上昇により劣化等は生じない。

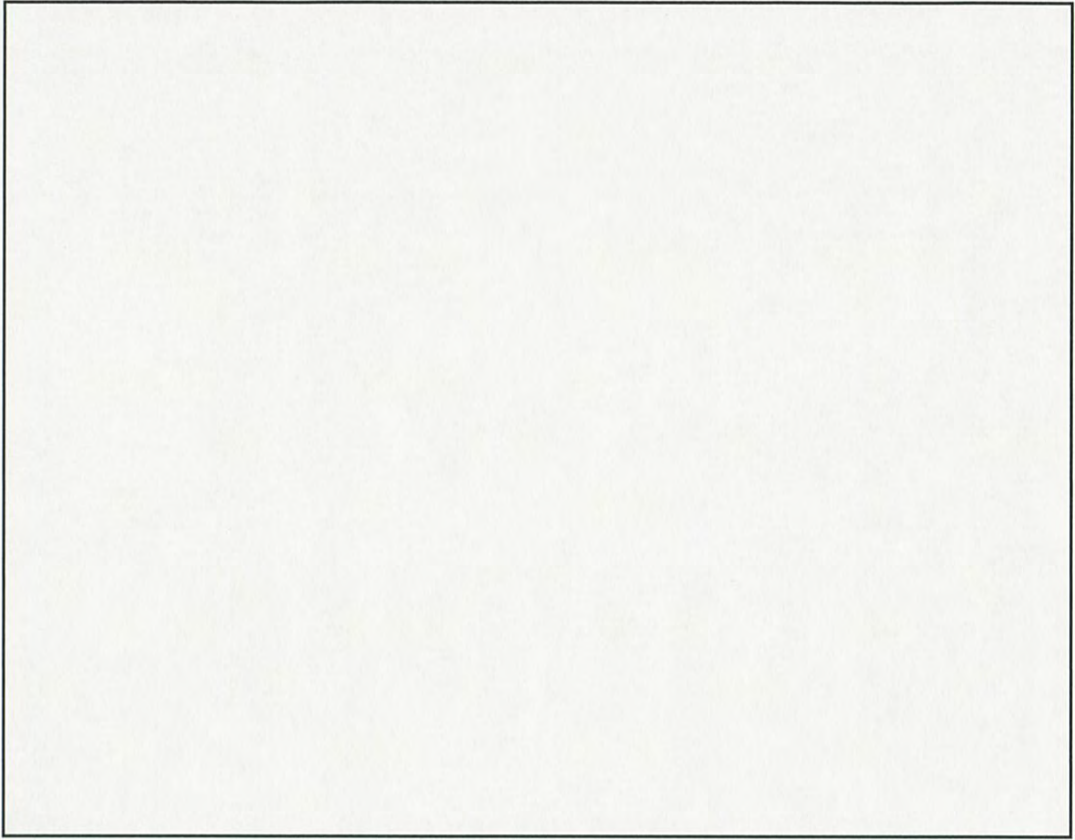
なお、内容物の最高温度は、内容物蓋の中央付近で、74.5°Cである。また、このときの内容物内平均温度は59°Cである。(ロ)B-第11図に温度分布を示す。



(ロ)B-第7図 一般の試験条件における温度履歴



(ロ)B-第8図 温度評価箇所



(ロ)B-第9図 容器全体の温度分布(7日経過後、単位[K])



(ロ)B-第10図 Oリング付近のゴムの温度分布(7日経過後、単位[K])



(ロ)B-第 11 図 内容物の温度分布(6.5 日経過後、単位[K])

B.4.3 最低温度

最低周囲温度は -40°C を想定する。本輸送物の収納物は未照射のウラン酸化物（ペレット）又はガドリニア入りウラン酸化物（ペレット）であるため、崩壊熱の発生は無視し、太陽ふく射についても考慮しない場合、輸送物の最低温度は周囲温度と等しく、 -40°C である。

輸送物温度が -40°C となっても、容器に使用されている材質に使用上の問題はない。また、Oリングの常用最低温度も $\square^{\circ}\text{C}$ であるため、問題ない。

B.4.4 最大内圧

一般の試験条件における解析結果では、内容器内平均温度は 59°C であった。ここでは、内容器が 59°C のときの最大内圧を求める。

内容器の初期圧力は 0°C のもとで絶対圧 101kPa であるとすると、太陽ふく射熱により 59°C まで上昇した内容器の内容器内圧は、

$$P = \frac{273+59}{273+0} \times 101 = 123 \text{ kPa}$$

となる。したがって、内容器には内外圧力差分のゲージ圧 $22\text{kPa}(=123-101)$ が作用することになる。

B.4.5 最大熱応力

本輸送容器の主要構造材は熱伝導性の良いステンレス鋼製材であり、(ロ)B-第9図及び(ロ)B-第11図に示すように、一般の試験条件下においてステンレス鋼製構造材には急激な温度勾配はなく、緩やかなものとなっている。また、内容器は、外容器に固定されないため、熱膨張しても、拘束による熱応力は内容器に発生せず、収納物の漏出等の原因となる変形は発生しない。また、異種金属の溶接はないので、熱膨張差による応力は発生しない。

B.4.6 結果の要約及びその評価

一般の試験条件下における輸送物各部の最高温度は「B.4.2 最高温度」に示したとおりである。容器本体の最高温度は114℃となるが、容器の主要構成部材であるステンレス鋼製材に劣化等の問題はない。また、シリコンゴム製Oリングの最高温度は68℃となり、常用上限温度を下回るものであった。

輸送物の最低温度は-40℃を考慮するが、容器に使用されている材質に使用上の問題はない。また、シリコンゴム製Oリングの常用最低温度を下回ることはない。

内容器の内圧は内容器内平均温度59℃のとき22kPaの内圧が作用することになる。内圧上昇により発生する応力の影響については、「A.5.1.3 応力計算」で評価しているように輸送物に与える影響は問題ない。

一般の試験条件下における熱解析結果の要約と評価を(ロ)B-第7表に示す。

(ロ)B-第7表 一般の試験条件下における輸送物の総合的評価

項目	基準値	結果	評価
最高温度			
Oリング	□℃	68℃	基準に合致
容器全体	—	114℃	—
内容器	—	75℃	—
内容器内部	—	59℃	—
最低温度			
Oリング	□℃	-40℃	基準に合致
最大内圧	—	22kPa (g)	—
最大熱応力	—	—	問題なし

B.5 特別の試験条件

特別の試験条件では、原型容器を用いた 800℃×30 分の耐火試験により得た温度測定結果に対しておこなった合わせ込み解析(「(ロ)B 付属資料 2」参照)により、妥当性を確認した解析モデルを実際の試験要件に適合するように条件を変更した解析計算により評価を行う。

解析計算は、以下の 3 つの状態を連続して実施して輸送物の温度変化を評価する。

(1) 耐火試験の初期条件

輸送物を 38℃で太陽ふく射を 12 時間ごとに受ける環境下に温度が一定になるまで置く。

(2) 耐火試験の条件

輸送物を 800℃の熱放射環境に 30 分間置く。この場合、試験中も輸送物は 12 時間ごとに太陽熱ふく射を受ける。

(3) 耐火試験後の条件

輸送物を 38℃で太陽ふく射を 12 時間ごとに受ける環境下に置いて冷却する。期間は、評価上着目する部位が最高温度に到達することが確認できるものとする。

B.5.1 熱解析モデル

B.5.1.1 解析モデル

(1) 形状モデル

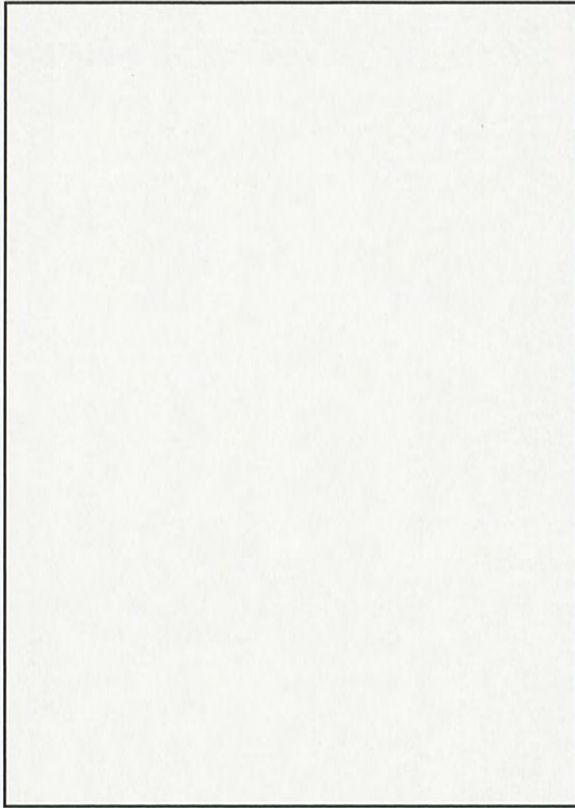
一般の試験条件に用いた解析モデルに、落下試験による変形を考慮したものであり、形状は合わせ込み解析に使用したものと同一である。ただし、収納物には合わせ込み解析時の鉛に替えてウランを考慮している。

形状モデルは保守的に外容器蓋の断熱材領域を簡素化しており、落下試験における変形も殆どが簡素化した範囲に含まれることとなった。変形箇所は断熱材が圧縮され単位量あたりの断熱性は向上するが、形状モデルでは変形部の断熱材の熱的性質に変化はなく単純に削除したものとなっている。

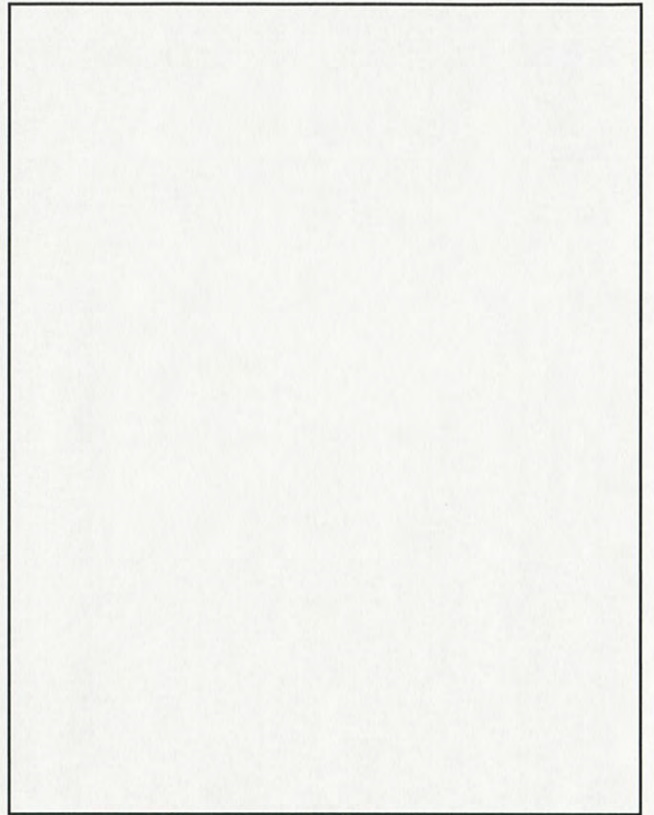
また、内部のアルミハニカムは、内容器により多くの熱を伝える伝熱パスとなることからアルミハニカムは変形が無いものとした。

(ロ)B-第 12 図に解析モデル図を示す。また、(ロ)B-第 13 図～(ロ)B-第 16 図に損傷モデルの切断イメージを示す。

全節点数は 、全要素数は である。(ロ)B-第 17 図～(ロ)B-第 19 図に有限要素モデルを示す



(a)-Y 方向から見た図

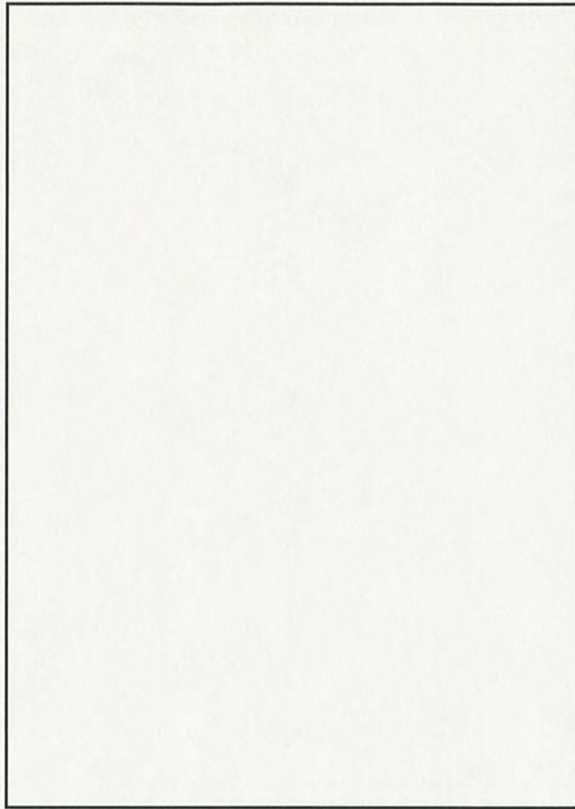


(b)+Y 方向から見た図

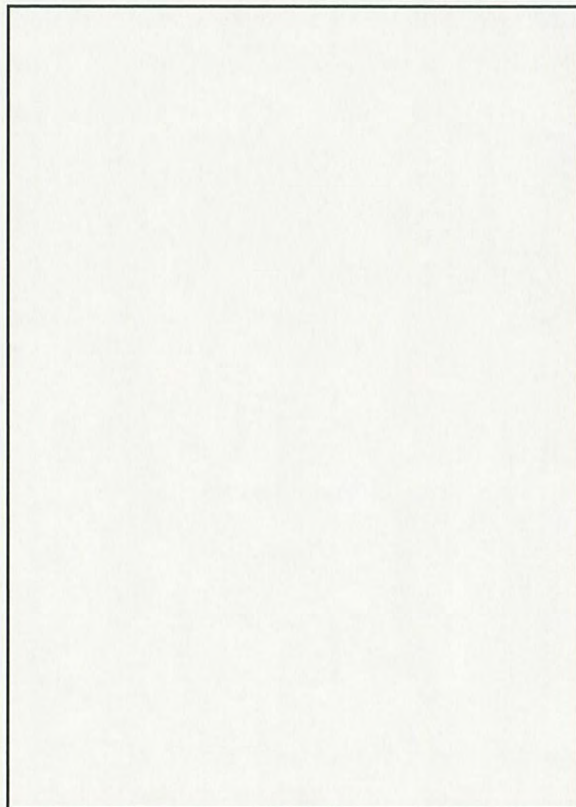
(ロ)B-第 12 図 解析モデル (損傷モデル) / 全体図



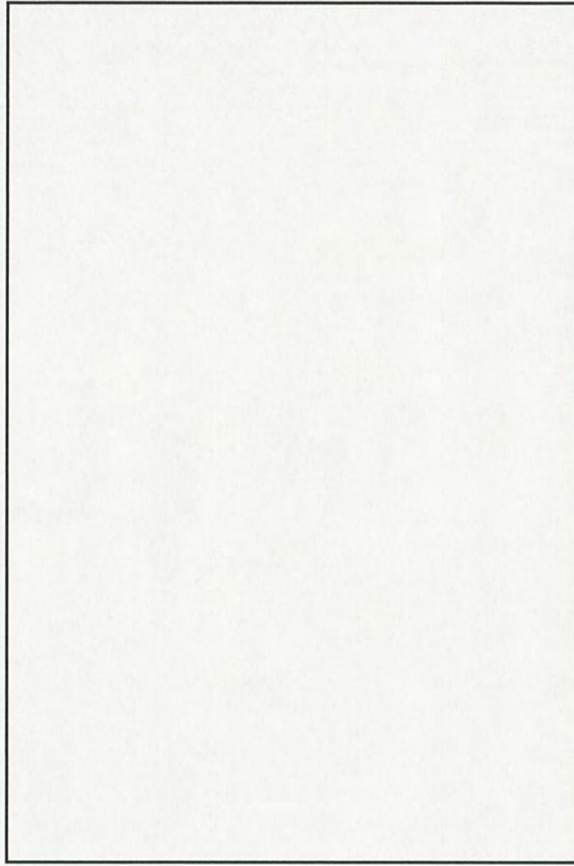
(ロ)B-第 13 図 損傷モデルの切断イメージ(1/4)



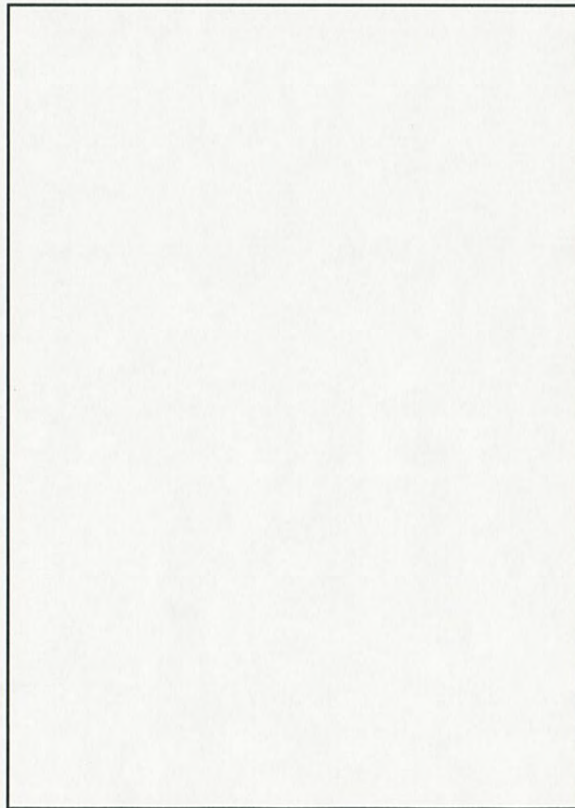
(ロ)B-第 14 図 損傷モデルの切断イメージ(2/4) ①方向



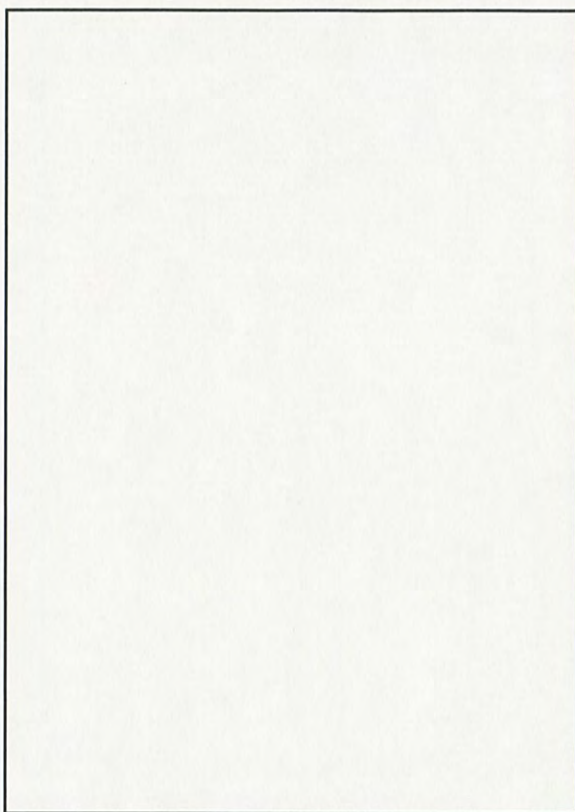
(ロ)B-第 15 図 損傷モデルの切断イメージ(3/4) ②方向



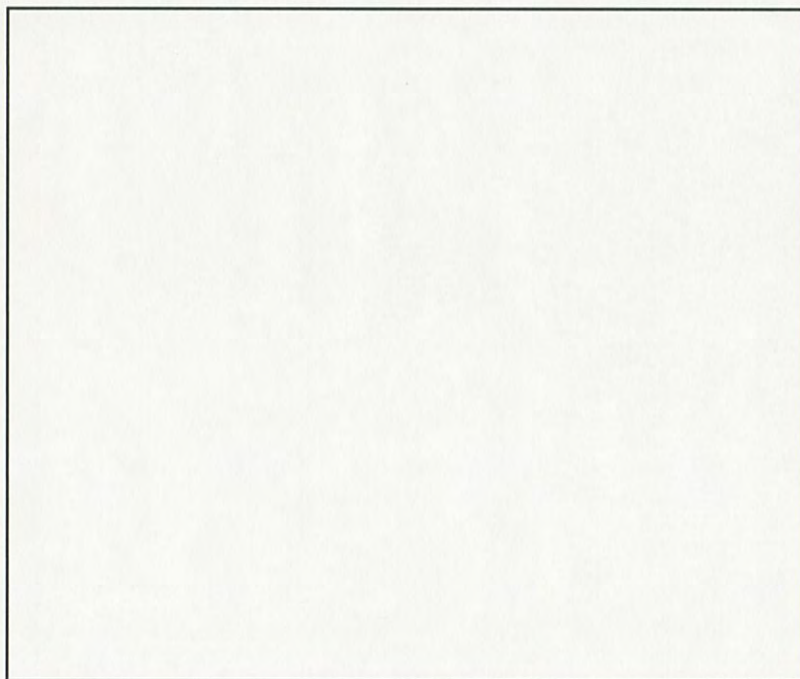
(ロ)B-第 16 図 損傷モデルの切断イメージ(4/4) ③方向



(ロ)B-第 17 図 有限要素モデル(全体)



(ロ)B-第 18 図 有限要素モデル(表面効果要素)



(ロ)B-第 19 図 有限要素モデル(表面効果要素 容器内部のふく射計算用)

(2) 解析条件

解析条件においても、基本的に一般の試験条件と同様であるが、特別の試験条件として下記の点について異なる。

(a) 告示別記第五第二号による伝熱

以下に示す3つの条件を連続して行う。

イ. 摂氏 38 度の環境に表面温度が一定になるまで置く

- ・次項の「(b)告示別記第四第一号による伝熱」を、12 時間ごとに繰り返す。繰り返しは十分に平衡となる 10.5 日間とした。

ロ. 耐火試験の条件として、800°Cの環境下に 30 分置く

- ・800°Cの外部流体の対流による熱伝達を定義する。熱伝達係数 α は IAEA 輸送規則 TS-G1.1 728.30 により $10\text{W}/(\text{m}^2\text{C})$ を使用した。熱伝達の定義には ANSYS の表面効果要素を利用した。
- ・外容器外表面から、外部空間（雰囲気温度 800°C）へのふく射を定義する。ふく射率は IAEA 輸送規則 TS-G1.1 728.28,29 により火炎面で \square 、容器外表面で \square とする。ANSYS ではふく射率が一つしか定義できないので、次式による等価値として定義した。ふく射の定義には ANSYS の表面効果要素を利用する。

$$\text{放射係数 } F_e = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{1 - (1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2)}$$

ハ. 火災後の自然冷却を定義する

- ・38°Cの外部流体の対流による熱伝達を定義する。熱伝達係数 α はヌセルト Nu 数の関数とし、Nu は IAEA 輸送規則 TS-G1.1 728.31 を使用した。（ α の算出については、「B.2 材料の熱的性質」参照）。熱伝達の定義には ANSYS の表面効果要素を利用する。

(b) 告示別記第四第一号による伝熱

以下に示す2つの条件を前項のイ.の条件に利用し、またロ.とハ.の条件には日中の条件のみを加えて定義する

イ. 日中相当の条件として、規定の熱流束による入熱、かつふく射による放熱を定義する。

- ・別記第四第一号に示す表より、容器の外表面のうち

水平な面上向きの面 : $800\text{W}/\text{m}^2$

垂直の面 : $200\text{W}/\text{m}^2$

その他の表面 : $400\text{W}/\text{m}^2$

を負荷する。これらは容器外表面の該当面に、熱流束として直接定義する。損傷部の斜面はその他の表面の条件を適用する。

- ・外容器外表面から、外部空間（雰囲気温度 38°C）へのふく射を定義する。外容器はステンレス鋼製であるため、ふく射率は「伝熱工学資料改定第4版(日本機械学会)」P184 図1(a)におけるステンレス鋼のふく射率（0~800°Cにおいて $\square \sim \square$ ）から、保守的に \square とした。ふく射の定義には ANSYS の表面効果要素を利用する。

- . 夜間相当の条件として、ふく射による放熱を定義する
 - ・前項と同様に、外容器外表面から、外部空間（雰囲気温度 38℃）へのふく射を定義する。ふく射率は前項と同様に とする。ふく射の定義には ANSYS の表面効果要素を利用する。

(c) 熱伝達係数

火災中の外容器表面と周囲流体との間の熱伝達係数 α は IAEA 輸送規則 TS-G1.1 728.30 により $10W/(m^2C)$ を使用した。

それ以外の状態の熱伝達係数 α は 38℃ の外部流体の対流により、容器外表面では熱の収支が行われるものとし、「B.4.1.1 解析モデル (2) 解析条件 (c) 外部流体の対流による容器外表面への伝熱」に示すとおりとした。

(ロ)B-第 8 表に伝熱条件をまとめて示す。

(ロ)B-第 8 表 伝熱条件一覧 (特別の試験条件)

試験条件		外部空気との熱伝達 (熱伝達条件定義)	太陽ふく射の流入 (熱流束定義)	炎とのふく射 (ふく射伝熱定義)	外部空気とのふく射 (ふく射伝熱定義)	容器内部空気部のふく射 (外容器内面⇄内容器外面、 内容器内面⇄収納容器外面) ※2次元解析のみ考慮
火災前	日中 太陽による昇温	ON 外部温度 38℃、 温度依存の熱伝達係数	ON 水平上向き面 800 垂直面 200 水平下向き面 0	OFF	ON (容器外面 $\epsilon = \square$)	ON ($\epsilon = \square$)
	夜間 自然冷却		OFF			
火災	火災の発生中	ON (熱伝達係数=10、 外部温度 800℃)	ON (水平上向き面 800 垂直面 200 水平下向き面 0)	ON (炎 $\epsilon = \square$ 、 容器外面 $\epsilon = \square$)	OFF	
火災後	火災後の自然冷却	ON (外部温度 38℃、 温度依存の熱伝達係数)		OFF	ON (容器外面 $\epsilon = \square$)	

(3) 解析フロー

解析フローを(ロ)B-第 20 図示す。



(ロ)B-第 20 図 特別の試験条件解析フロー

B.5.1.2 試験モデル

温度評価は解析モデルにより行うが、解析モデルの妥当性確認のための温度履歴の取得及び解析モデルでは確認できない耐火試験時の実機の挙動を確認する目的で、原型容器を用いた耐火試験を行っている。「(ロ)B 付属資料 1」に原型容器耐火試験結果の詳細を示す。

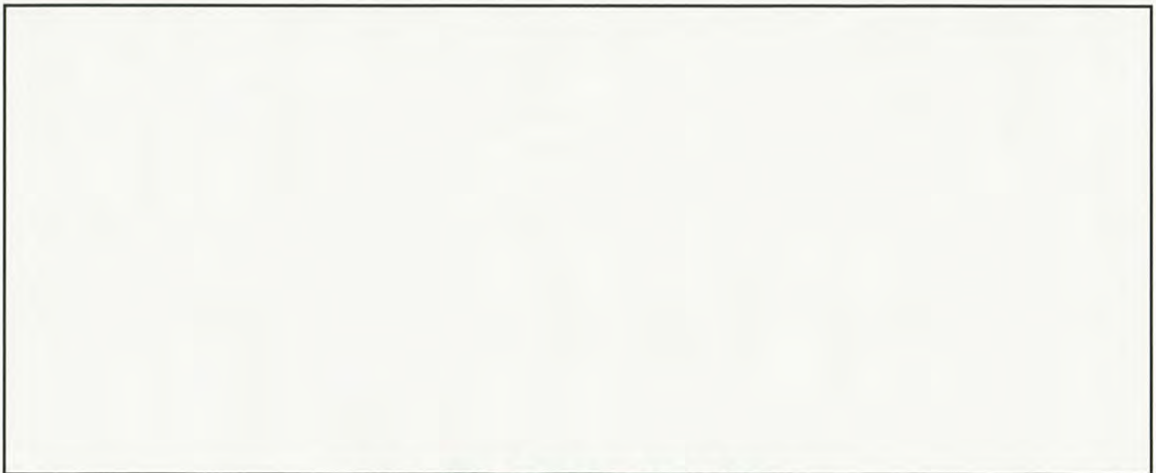
(1) 原型容器

耐火試験に用いた原型容器は、耐火試験前に落下試験を実施している。落下試験では、原型容器を 2 基用いて試験しており、1 号機は落下姿勢検討用、2 号機は本試験用としている。耐火試験には本試験を実施した 2 号機を用いた。2 号機は最大の損傷を与える落下姿勢として上部側コーナーを落下させている。上部側コーナー落下はエネルギーが集中して外観上有意な変形をすること及び耐火試験において熱の進入経路となると考えられるフランジ部付近に変形を及ぼす可能性がある。

落下試験では、変形はフランジ部にまで及んだが、フランジ部に開口や締付け用ロッドボルトの外れや破断は無く、外容器蓋が所定の位置から動くことはなかった。吊部の溶接部が割れて断熱材が見えたが喪失はない。外容器内部はアルミハニカムが部分的に変形した程度であり、内容器及びペレット保管箱組立体には有意な変形は見られなかった。「(ロ)A 付属資料 1」に原型容器落下試験結果の詳細を示す。

耐火試験に使用した原型容器は、落下試験に引き続き使用しており、基本的に実用機と同一構造及び同一の製造方法であるが、耐火試験に使用するために以下の点で異なっている。なお、落下試験で重量が重くなることから、収納物はペレット保管箱組立体(A)2 基としており、耐火試験でも引き続き同じ収納物を使用する。

- ・重量模擬鉛棒を代替収納物に使用。ウランと鉛の熱的性質は解析計算で考慮。
- ・温度測定用の熱電対、サーモラベル及びサーモペイントを取付け。熱電対取付け箇所を (ロ)B-第 21 図に示す。
- ・熱電対取付け用にアルミハニカムを一部切除し、外容器には貫通孔を設置。
- ・通常のステンレス鋼でボロン入りステンレス鋼を代用。



(ロ)B-第 21 図 熱電対取付け箇所

(2) 耐火試験方法

核分裂性輸送物の特別の試験条件では耐火試験前に 38℃ 太陽ふく射条件下で輸送物の温度が一定になるまで置くことになっているが、原型容器を用いた試験で完全に実現することは困難である。したがって、当試験では、原型容器を 800℃×30 分環境下に置いた後自然冷却し、採取したデータを下に構築した解析モデルの合わせ込み解析を実施し、解析計算によって必要条件を再現し輸送物の温度を求める。

試験はあらかじめ、予備昇温試験および搬入手順確認リハーサルを実施して策定した方法に基づき以下の手順で実施した。

- ①試験炉を□℃に昇温し□時間以上保持する。
- ②原型容器を試験炉の前にフォークリフトで吊り上げて待機し、試験炉扉を開放して台車を引き出す。
- ③原型容器を台車上の予め定めた位置に設置し、速やかに台車を炉内に戻し扉を閉める。
- ④設定温度を□℃±□とし、炉内温度及び原型容器に取付けた炉内温度測定用熱電対が全て 800℃以上となった時点から 30 分間維持。
- ⑤30 分経過後、搬入時と反対の手順で原型容器を取り出し、翌日まで屋内で自然冷却する。

(3) 試験結果

耐火試験の結果、ゴム類は焼失し外表面は変色したが、輸送物形状に有意な変形はなかった。外容器内部及び内容器外表面は変色したが有意な変形はなく、発火の形跡もなかった。内容器内部及び収納物は変色、変形を含めて試験前後で変化は認められなかった。試験後の詳細な確認結果を「(ロ)B 付属資料 1」に示す。

内容器フランジ部のシリコンゴム製 O リングの温度は最高で約 144℃であり、試験後の確認でも十分に弾力性を残していた。使用している O リングは、常用上限温度が□℃であり、さらに JIS に定められた耐熱老化性試験 (□℃×□時間) で著しい劣化が無いことが確認されたものである。

内容器内部のサーモラベルは全て 125℃が未反応であったことから収納物の温度は 125℃を超えることは無く、内部確認でも明らかなように耐火試験の影響はない。

(ロ)B-第 9 表に試験時の各部位の最高温度を示す。また、(ロ)B-第 21 図に温度測定時刻暦結果を示す。

(ロ)B-第9表 熱電対測定結果 最高温度

測定箇所		熱電対 記号	最高温度(°C)	到達時間 (終了宣言後から)
炉内温度		(a)	818.6	—
外容器外表面		(b)	794.8	0:00:20
外容器	フランジ幅広側	(e)	407.1	0:06:10
	フランジコーナー	(d)	343.8	0:08:44
	フランジ幅狭側	(c)	394.6	0:07:46
内容器	フランジ幅広側	(h)	127.1	1:51:54
	フランジコーナー	(g)	143.7	1:24:50
	フランジ幅狭側	(f)	141.9	1:48:16



(ロ)B-第21図 原型容器耐火試験温度測定時刻暦

B.5.2 輸送物の評価条件

強度試験により生じる輸送物の主要な損傷状態として、コーナー落下による変形状況を考慮する。本輸送物は箱型であるため、各面の交接部は落下エネルギーが集中して大きく変形しやすい。したがって、コーナーが最初に接地する落下姿勢が輸送物に対して最も顕著な変形を与えることになる。また、外容器及び内容器とも、耐火試験時の火炎の影響を受けるフランジは上部側にあることから、上部側のコーナーを損傷させる落下姿勢とすることが、落下試験後及びその後の実施する耐火試験において、最も大きな損傷を生じ且つ熱的影響が大きく現れる。

原型容器 1 号機及び 2 号機で実施した落下試験 I におけるコーナー落下では、ともにフランジ部にまで変形が及んでいる。「(ロ)A 付属資料 1」参照。2 号機を用いた本試験では、重畳効果を与えるために一般の試験条件における自由落下(1.2m)、特別の試験条件における落下試験 I (9m)及び落下試験 II (1mターゲット)において、同一箇所をコーナー落下させた後、耐火試験に供している。

また、解析モデルでは 2 号機の変形を考慮しているが、「B.5.1.1 解析モデル」で述べたように、変形体積の大半は、外容器蓋の保守的に簡素化した領域に含まれることとなった。

B.5.3 輸送物温度

「B.5.1.1 解析モデル」で記述した条件により、特別の試験条件における温度履歴結果を(ロ)B-第 22 図に示す。また、(ロ)B-第 23 図に耐火試験前の 38℃太陽ふく射環境下における温度履歴結果及び(ロ)B-第 24 図に耐火試験中及び試験後の冷却時の温度履歴結果を示す。評価位置を(ロ)B-第 25 図に示す。耐火試験前の 38℃太陽ふく射環境下では、外容器の頂部はおよそ 3 日目に□℃で平衡に到達した。外容器側面はおよそ 5 日で平衡となり、約 62℃となった。一方内容器の O リングもおよそ 5 日で平衡となったが、温度は外容器側面より高く約 66℃である。

内容器の O リングは耐火試験中から上昇を始め、耐火試験後 2 時間程度で最高温度(約 170℃)に到達している。(ロ)B-第 10 表に特別の試験条件下における各部位の最高温度を示す。また、(ロ)B-第 26 図～(ロ)B-第 29 図に 800℃×30 分の耐火試験終了直後と内容器 O リング最高温度到達時の解析モデル全体と O リングとスペーサの温度分布を示す。

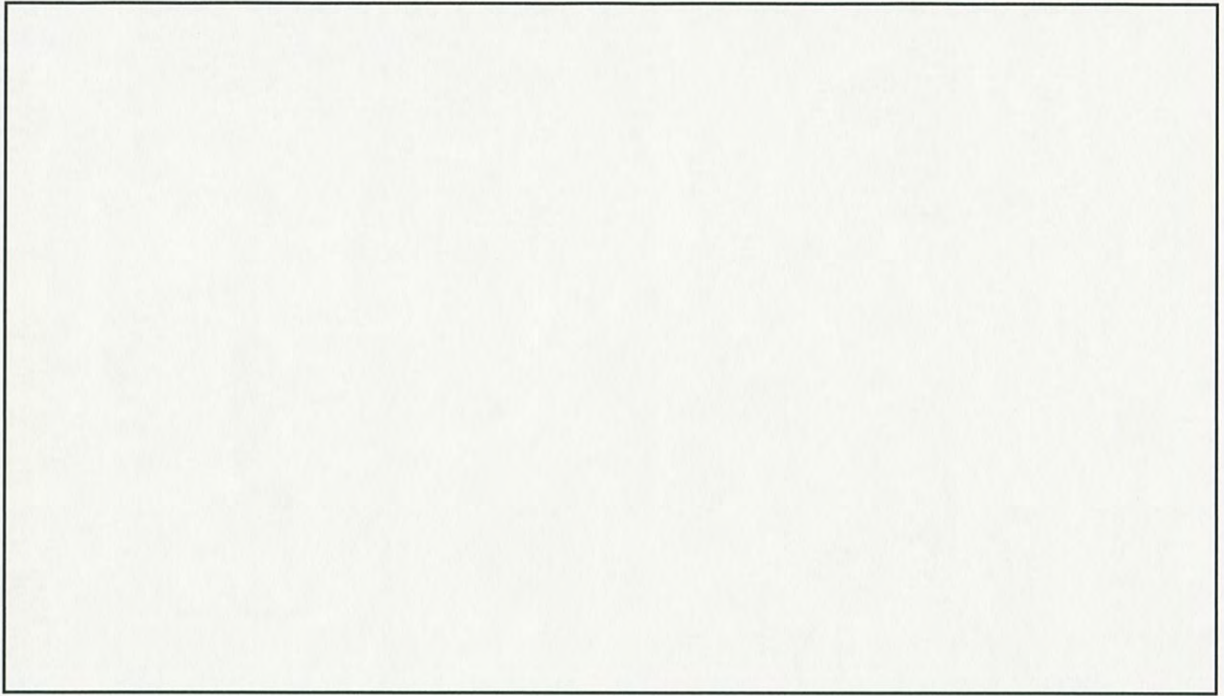
原型容器試験を用いた耐火試験では、収納物であるペレット保管箱組立体や、中性子吸収材には試験前後で状態に変化は全くなく、サーモラベルの示温結果(125℃未反応)から、内容器フランジ部(約 144℃)よりも、到達温度が低いことは明らかである。したがって、内容器内部の温度は、保守的にフランジ部の O リングと同じ 170℃になるものとして取り扱う。

(ロ)B-第 10 表 特別の試験条件下における各部位の最高温度

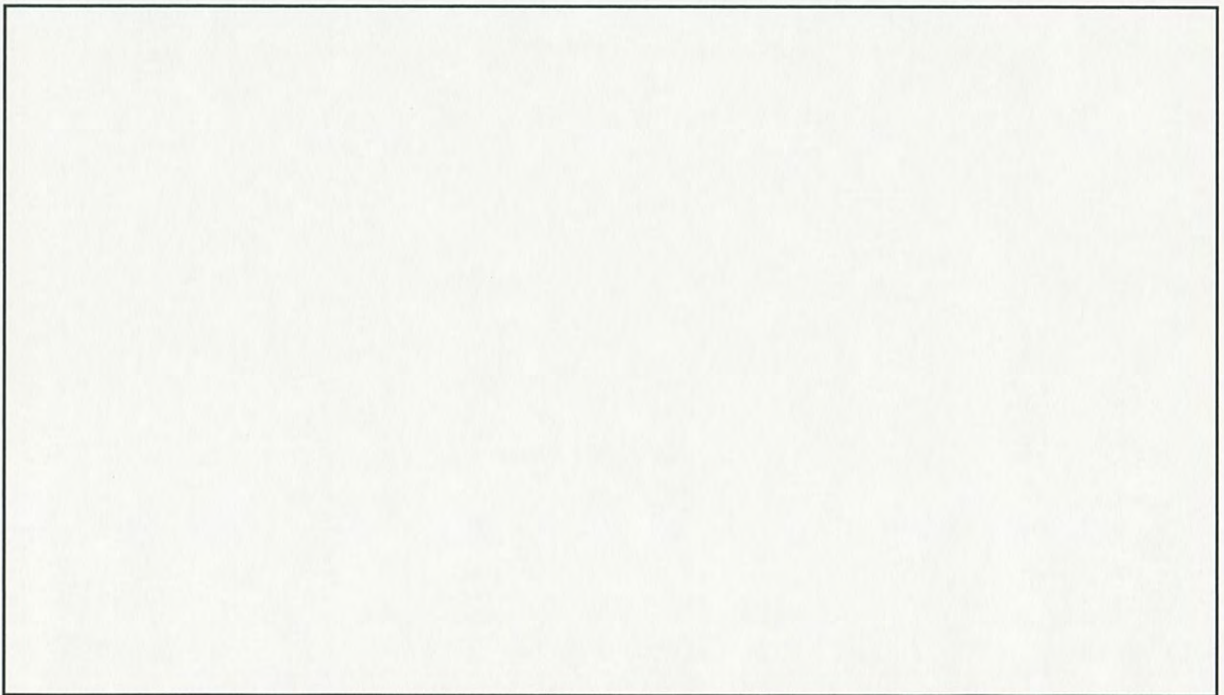
部位	最高温度 (°C)	
	耐火試験前	耐火試験中後
外容器頂部	129.0	798.2
外容器コーナー	80.4	800.7
外容器側面幅広	61.8	736.1
外容器側面幅狭	62.2	737.4
内容器 O リングコーナー	65.8	169.3
内容器 O リング幅広	66.2	155.3
内容器 O リング幅狭	66.5	169.7



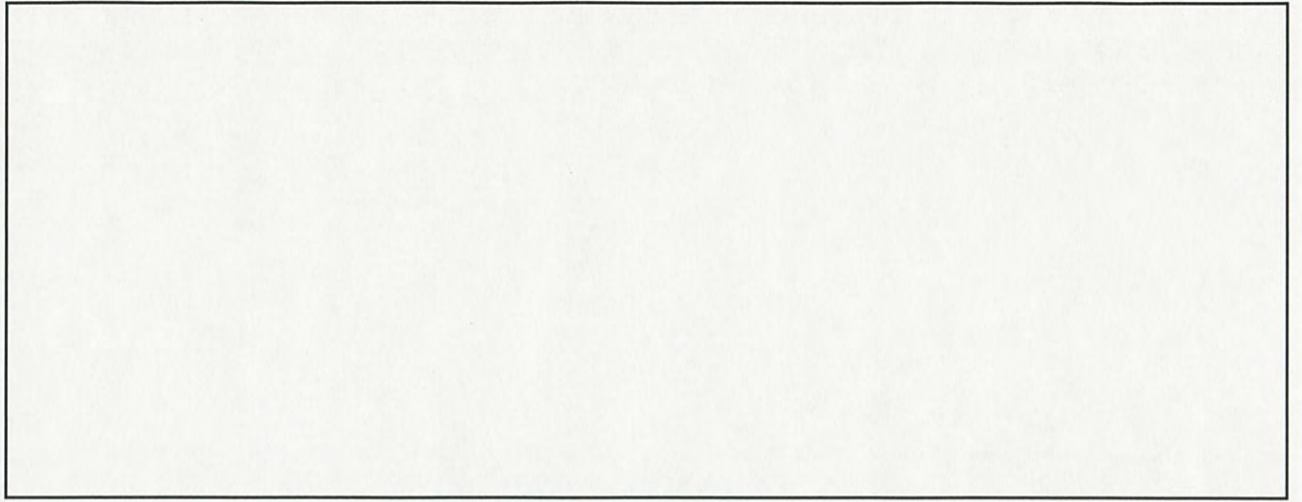
(ロ)B-第 22 図 特別の試験条件下における温度履歴(全体)



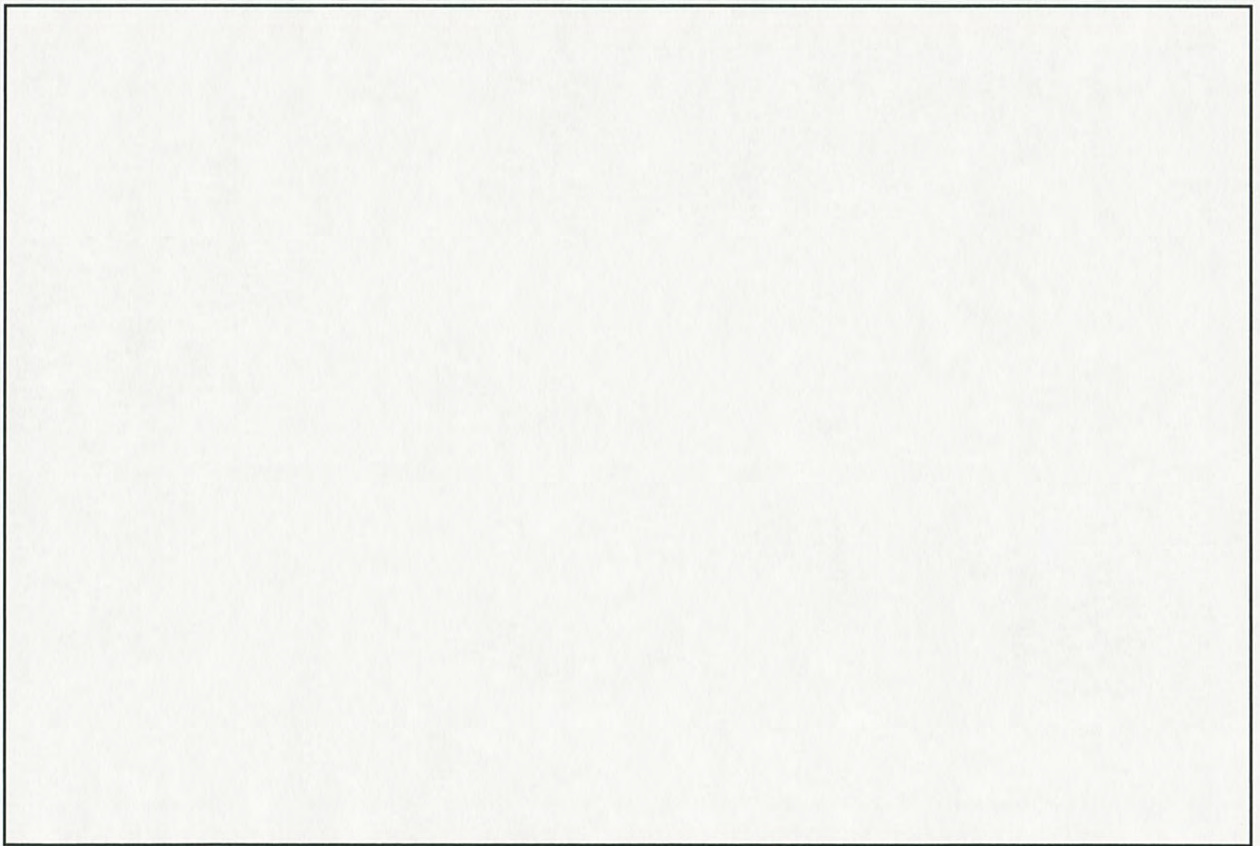
(ロ)B-第 23 図 特別の試験条件下における温度履歴(耐火試験前)



(ロ)B-第 24 図 特別の試験条件下における温度履歴(耐火試験中後)



(ロ)B-第 25 図 温度評価箇所



(ロ)B-第 26 図 容器全体の温度分布(耐火試験終了時、単位[K])



(ロ)B-第 27 図 O リング付近のゴムの温度分布(耐火試験終了時、単位[K])



(ロ)B-第 28 図 容器全体の温度分布(O リング最高温度到達時、単位[K])



(ロ)B-第 29 図 O リング付近のゴムの温度分布(O リング最高温度到達時、単位[K])

B.5.4 最大内圧

「B.5.3 輸送物温度」に記載したように、特別の試験条件下における解析結果では、保守的に内容器内部が一様に 170°C になったものとし、内容器に気密性が維持されているとして内容器の最大内圧を求める。内容器は熱膨張によりわずかに内部体積が膨張するが、保守的となることから熱膨張は無視する。

内容器の初期圧力は 0°C のもとで絶対圧 101kPa であるとする、170°C まで上昇した内容器の内容器内圧は、

$$P = \frac{273+170}{273+0} \times 101 = 164 \text{ kPa}$$

となる。したがって、内容器には内外圧力差分のゲージ圧 63kPa(=164-101)が作用することになる。

B.5.5 最大熱応力

耐火試験直後では(ロ)B-第 26 図からわかるように、輸送物に大きな温度差を生じるが、原型容器を用いた耐火試験の前後で原型容器に変形が無かったことからで明らかのように、熱応力による変形や破損は発生しない。

また、内容器は、外容器に固定されないため、熱膨張しても、拘束による熱応力は内容器に発生しない。また、熱膨張による寸法変化も僅かであるため、収納物の移動や漏出等の原因となる変形は発生しない。また、異種金属の溶接はないので、熱膨張差による応力は発生しない。

B.5.6 結果の要約及びその評価

特別の試験条件下における輸送物各部の最高温度は「B.5.3 輸送物温度」に示したとおりである。

特別の試験条件下では、外容器の外表面は、700～800℃程度となるが、輸送容器の主要構造材であるステンレス鋼製材に著しい劣化を生じることは無く、溶解(融点 1398℃)や燃焼もしくは劣化等により臨界評価に影響を与えるような変形はない。また、収納物の移動や輸送物外への漏出は生じない。

内容器フランジ部の O リングは約 170℃となるが、使用している O リングは、常用上限温度が□℃であり、さらに JIS に定められた耐熱老化性試験 (□℃×□時間) で著しい劣化が無いことが確認されたものであるため問題ない。

内容器内部の中性子吸収材であるボロン入りステンレス鋼製板は保守的に 170℃に到達したとしても、臨界評価に影響を与えるような変形や劣化は生じない。また、収納物であるペレット保管箱組立体についても同様に、臨界評価に影響をあたえるような、核燃料物質の移動や放出は生じない。

内容器の内圧は気密が維持され内部が内容器最高温度で均一となったと仮定して最大で 63 kPa の内圧が作用することになる。内圧上昇により発生する応力の影響については、「A.9.2.3 熱的試験」で評価しているように問題ない。

特別の試験条件下における熱解析結果の要約と評価を(ロ)B-第 11 表に示す。

(ロ)B-第 11 表 特別の試験条件下における輸送物の総合的評価

項目	基準値	結果	評価
最高温度			
容器全体	—	801 °C	変形なし
O リング*	□ °C	170 °C	基準に合致
中性子吸収材	—	170 °C	性能劣化なし
最大内圧	—	63 kPa (g)	—
最大熱応力	—	原型容器の耐火試験後に変形なし	影響なし

* 耐熱老化性試験 □℃×□時間 () で著しい劣化がない。

参考文献

- ・ IAEA Safety Standards Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material 2005 Edition Safety Requirements No. TS-R-1
- ・ IAEA Safety Standards Series Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material Safety Guide No. TS-G-1.1
- ・ ステンレス鋼便覧 ステンレス協会編
- ・ 新版機械工学便覧（日本機械学会編）
- ・ 伝熱工学資料改訂第4版（日本機械学会）
- ・ D.L. Hargman, G.A. Reymann and R.E. Mason, "MATPRO-VERSION 11(REVISION 2) A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior", NUREG/CR-0497, TREE-1280. Rev.2(1981)
- ・ 日本機械学会論文集(B編)65巻639号(1999-11)論文No.99-0011 「ハニカム材料の直交異方性熱伝導率評価」 小笠原永久、白鳥正樹、于強、藏原鉄二 著

(口)B 付属資料 1

原型容器耐火試験結果

1. はじめに

原子燃料工業株式会社が5wt%以下のウラン酸化物(ペレット)又はガドリニア入りウラン酸化物(ペレット)を運搬するために開発したGP-01型輸送容器の原型容器耐火試験の結果について示す。耐火試験に使用する原型容器は、事前に落下試験を実施したものであり、最大の損傷を与える条件としてコーナー落下させている。

2. 輸送容器の概要

(1) 輸送容器の名称 GP-01型

(2) 輸送物の種類 A型核分裂性輸送物

(3) 最大濃縮度 5.0wt%

(4) 収納物 ペレット保管箱組立体(A)又は(B)を各2基

(5) 装荷制限

- ・ペレット保管箱組立体(A)2基収納時・・・264kg-UO₂以下
- ・ペレット保管箱組立体(B)2基収納時・・・200kg-UO₂以下

(6) 寸法 W:830 単位(mm)

L:1144 単位(mm)

H:1060 単位(mm)

(注) 脚および容器表面から突出した吊部の一部を含む。

(7) 重量

- ・輸送容器の総重量 730 kg 以下
- ・輸送物の総重量 1300 kg 以下

(8) 主要材料

- ・構造材料 ステンレス鋼、
- ・断熱材 セラミックファイバー
- ・中性子吸収材 ボロン入りステンレス鋼
- ・衝撃緩衝材 アルミハニカム
- ・ロッドボルト クロムモリブデン鋼
- ・ナット ステンレス鋼
- ・スペーサ、スキッド等 シリコンゴム、ネオプレンゴム、ウレタンゴム

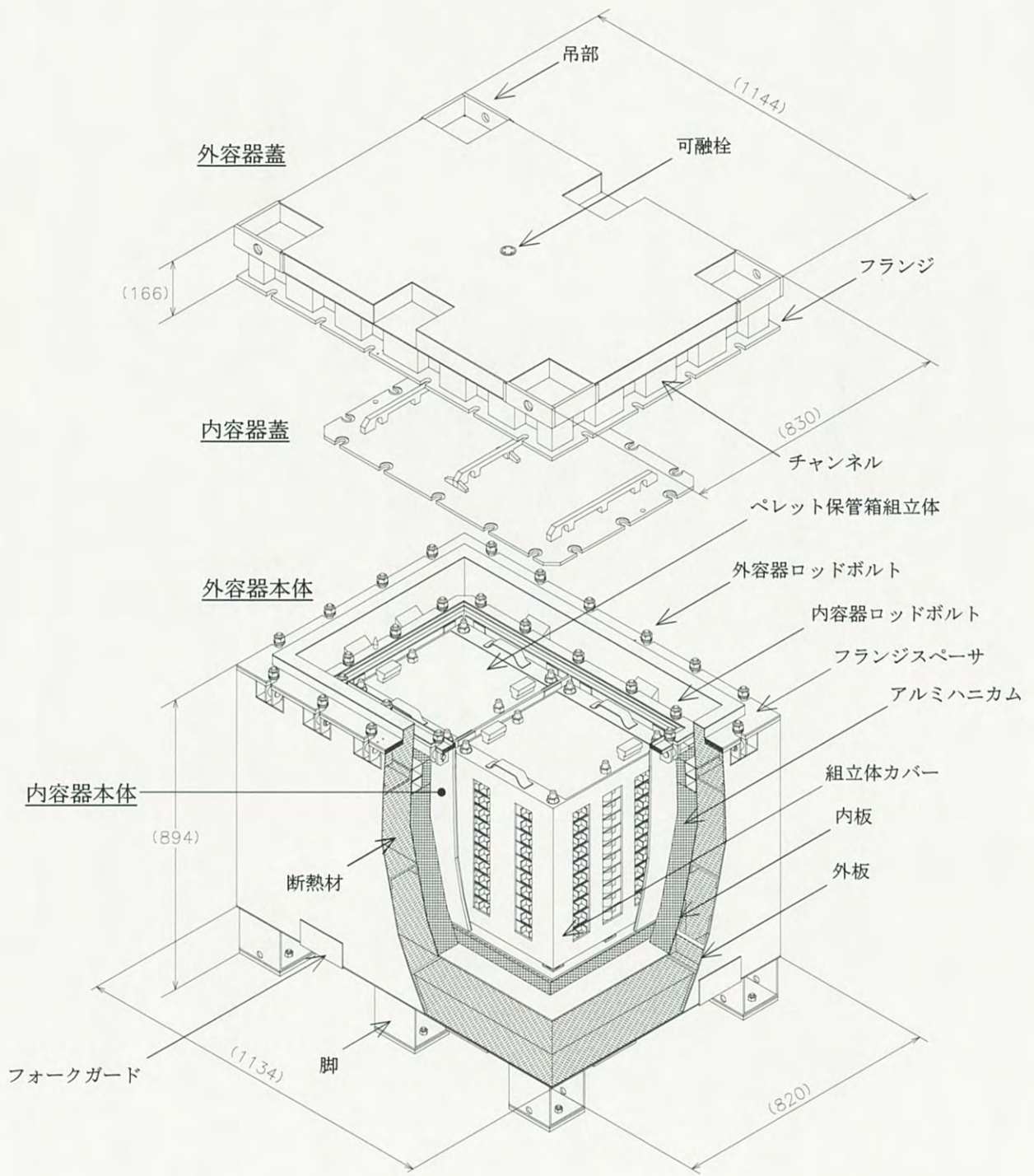
(9) 概要

本輸送物の全体図を(ロ)B付1-第1図に示す。本輸送容器は、外容器と外容器から取出し可能な内容器から構成される。外容器本体は箱型2重構造となっており、内外板間にセラミックファイバー製の断熱材を充填する。外容器蓋も本体と同様の構造であり、ロッドボルトで本体と連結固定する。外容器蓋裏面には、高温時に膨張して隙間を塞ぐ機能を持つ耐火ゴムを取付けている。

内容器本体及び内容器蓋ともに厚手のステンレス鋼製板からなる箱型1重構造となっている。フランジ面には密閉用のOリングを配置し、外容器と同様に内容器蓋と内容器本体はロッドボルトで連結固定される。中性子吸収材であるボロン入りステンレス鋼製板は内容器内面と収納物である2基のペレット保管箱組立体の間に仕切りとして配置している。

本輸送物の収納物は、ペレットを収納したペレット保管箱を支柱に通した仕切板と交互に積重ね、支柱頂部のネジ部をナットで締付けて組立てたペレット保管箱組立体2体である。ペレット保管箱組立体の最上部と最下部の仕切板を除いた仕切板は中性子吸収材となるボロン入りステンレス鋼製板としている。

ペレット保管箱組立体は、最大11kg-UO₂/箱を収納するペレット保管箱を12箱で組立てたペレット保管箱組立体(A)と最大20kg-UO₂/箱を収納するペレット保管箱を5箱で組立てたペレット保管箱組立体(B)の2種類がある。ペレット保管箱組立体(A)の最大UO₂重量は132kg-UO₂であり、ペレット保管箱組立体(B)の最大UO₂重量は100kg-UO₂である。



(単位：mm)

(口)B付1-第1図 GP-01型輸送物外観図

3. 試験

3.1 原型容器

落下試験では、原型容器を2基用いて試験しており、1号機は落下姿勢検討用、2号機は本試験用としている。耐火試験には本試験を実施した2号機を用いる。2号機は落下試験前の検討結果及び1号機の試験結果から、最大の損傷を与える落下姿勢として上部側コーナーを落下させている。上部側コーナー落下はエネルギーが集中して外観上有意な変形をすること及び耐火試験において熱の進入経路となると考えられるフランジ部付近に変形を及ぼす可能性がある。

「(ロ)A 付属資料1」に原型容器落下試験結果の詳細を示す。落下試験では、変形はフランジ部にまで及んだが、フランジ部に開口や締付け用ロッドボルトの外れや破断は無く、外容器蓋が所定の位置から動くことはなかった。吊部の溶接部が割れて断熱材が見えたが喪失はない。(B付1-写真1~B付1-写真3参照)

外容器内部はアルミハニカムが部分的に変形した程度であり、内容器及びペレット保管箱組立体には有意な変形は見られなかった。(B付1-写真4~B付1-写真6参照)

耐火試験に使用した原型容器は、落下試験に引き続き使用しており、基本的に実用機と同一構造及び同一の製造方法であるが、耐火試験に使用するために以下の点で異なっている。なお、落下試験で重量が重くなることから、収納物はペレット保管箱組立体(A)2基としており、耐火試験でも引き続き同じ収納物を使用する。

(1) 代替収納物

原型容器には、実物の酸化ウランから加工されたペレットを収納して試験することが出来ないため、ペレット収納時の最大収納量と同等以上となるよう重量を調整した、重量模擬鉛棒をペレット保管箱に収納している。ウランと鉛では熱的な性質が異なることから、耐火試験の結果に基づき実施する熱解析ではこれを補正する。

(2) 熱電対取付け (B付1-写真7~B付1-写真14参照)

落下試験終了後の2号機を坂口製作所に搬入し、落下試験用の加速度計を取外し、温度測定用の熱電対、サーモラベル及びサーモペイントを取付けている。取付け作業実施のために外容器蓋を開ける必要があったが、変形部周辺の締付け用ロッドボルトが外れないためグラインダーにより切断している。内容器蓋はボルトを緩めることで作業可能であった。

熱電対取付け位置を(ロ)B付1-第2図に示す。サーモラベルは比較的低温になると予想される内容器フランジを中心に配置し、サーモペイントは比較的高温になると予想される外容器内側フランジ部に塗布した。

熱電対の測定温度上限は °C以上あり、本耐火試験の温度測定に適している。シース部の加熱によるショートが発生しないように径の太いものを使用している。また、試験前には、炉内で火炎に曝されるシース部については、セラミックファイバー製断熱材で養生し、熱的な影響から保護した。

サーモラベルは1枚で5つの温度変化ポイントを示温できるもので3つのレンジを準備した。サーモペイントは、より高温側に塗布するもので、5種類準備した。

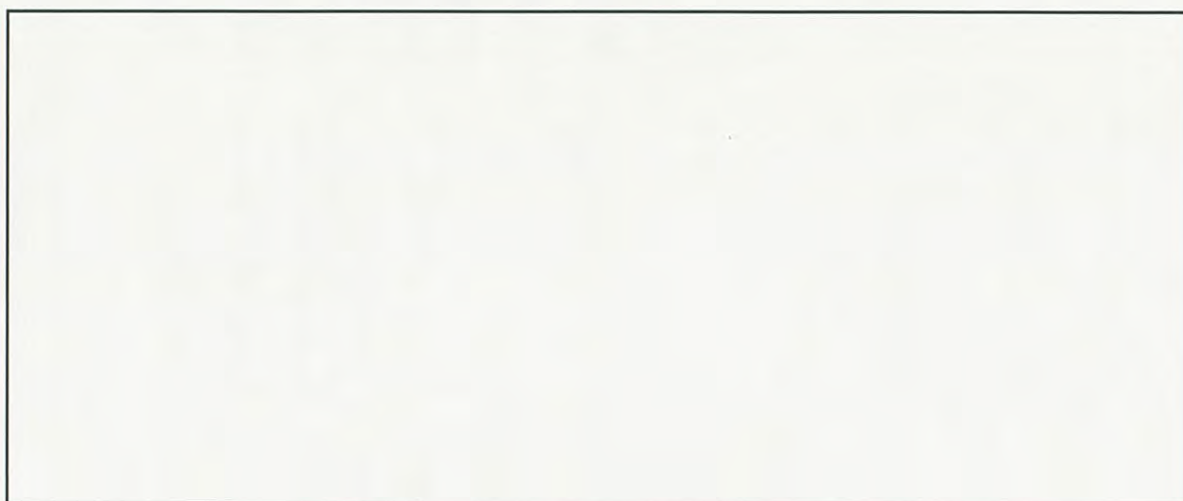
熱電対、サーモラベル及びサーモペイントの仕様を以下に示す。

<熱電対仕様>

- ・製造元 :
- ・型式及び種類 :
- ・シース寸法 : mm×mm

<サーモラベル及びサーモペイント仕様>

- ・製造元 :
- ・サーモラベル種類 :
- ・サーモペイント種類 :



(ロ)B付1-第2図 熱電対取付け箇所

(3) 熱電対取付けに掛かる追加工

落下試験時に加速度計との干渉を避けるために取り外していたアルミハニカムは、熱電対取り回し用の端をカットして取付け、内容物の加速度計取付け用台座は取外した。

熱電対取出し用の貫通孔は、加速度計ケーブル取出し孔と共用であり、内径mmで貫通部の断熱材を除去してステンレス鋼製パイプを溶接している。(B付1-写真15参照)試験時は、同貫通孔に輸送容器に使用しているセラミックファイバー製断熱材の残材を充填し、火炎の進入を防いでいる。

熱電対のシース部は、固定するため、薄いステンレス鋼製板の小片を容器にスポット溶接して固定している。内容物のOリングに取付けた熱電対のシース部は、ステンレス鋼製角パイプを小さく切断してペレット保管箱組立体上にスポット溶接で固定し、その上にステンレス鋼製板の小片で固定している。これらの固定用部材の量はごく僅かで、熱的な影響は無視できるものである。

(4) 中性子吸収材の代用

内容器およびペレット保管箱組立体の中性子吸収材であるボロン入りステンレス鋼製板の代用として、同一寸法のステンレス鋼製板を使用した。本代用板を使用することによる熱的な影響はない。

(5) その他

落下試験に使用した重量調整用ウェイトは熱電対取付け時に取外している。

(6) 生産型との違い

原型容器製作後に判明した取扱い上の改善事項や、試験の結果から生じた小改善を反映したものを最終生産型とする。変更箇所を(ロ)B付1-第1表に示す。これらの変更は、原型容器を用いた試験結果に非安全側の考慮が必要な熱的影響をもたらすものではない。

(ロ)B付1-1表 原型容器・生産型変更箇所

部位	変更箇所	解決した点	影響
外容器フランジスペーサ	スペーサ幅を減少し、溶接脚上から排除 ロッドボルト部付近の寸法を拡大	製造時の接着性の改善 干渉を排除し作業性を改善	外容器フランジスペーサに期待する機能に影響はない。
吊部	コーナー下端鋭利箇所に面取り加工を追加 平面加工追加	作業安全性の向上	強度に影響しない変更。
外容器位置決めピン	フランジ裏面にナットを溶接→フランジに直接ネジ加工	締付け時の作業性を改善 製造時作業性向上	外容器位置決めピンに期待する機能に影響はない。 外容器位置決めピンに期待する機能に影響はない。
アルミハニカム	アルミハニカム固定を接着剤からアルミ製ハニカムカバリーによるビス固定に変更 固定方法変更により、各ブロック間の隙間を排除。 固定方法変更によりハニカム両面のアルミ板接着を排除。 幅狭側面ハニカム幅を変更	メンテナンス性向上 補修性の向上 隙間に異物が混入する可能性を排除 メンテナンス性向上 補修性向上	アルミハニカム本体の仕様に変更はなく落下試験結果に影響しない。
ウレタンゴムガイド	ウレタンゴムガイド先端部にMCナイロンを取付け	機能しない領域を削除	機能しない部位であるため試験結果に影響しない。
外容器蓋	中フレーム間隔を変更し、補強板を追加。通気孔間隔の変更 フランジ部クリアランスの見直し	内容器装荷取出し時の摺動性改善 過酷状況下での強度を向上	ウレタンゴムガイドに期待する機能に影響はない。 外容器蓋フレーム強度が増加する。
フランジ部		製造時の作業性を向上 作業性の向上	強度に影響しない。
脚	下端コーナーを面取り 長さを短小化	2段階み時の位置決め性向上 2段階み時の位置決め性向上	脚に期待する機能に影響はない。
スキッド寸法	脚にナットを溶接→ネジボスを組込み 面取りの追加	メンテナンス性、補修性の向上 作業性向上 作業安全性向上	スキッドに期待する機能に影響はない。 スキッドに期待する機能に影響はない。 強度に影響しない変更。
内容器蓋縁及び蓋バー	鏡面仕上げを廃止	メンテナンス性向上	強度に影響しない変更
内容器外表面	外容器蓋フレーム間隔変更に伴う変更	衝突時の干渉防止	強度に影響しない変更
内容器ロッドボルト座	ボルト座の長穴化	作業性向上	強度に影響しない変更
ペレット保管箱組立支柱ねじ部	ねじ部を長くする。	締付け時寸法の最適化	組立強度に影響しない変更。
ペレット保管箱組立支柱固定方法	溶接はめ殺し→脱着可能構造に変更	メンテナンス性向上 補修性向上	組立強度に影響しない変更。
ペレット保管箱組立吊上げ方法	専用ネジ穴へのアイボルト挿入を支柱へのアイナット取付けに変更	構造の簡略化	組立強度に影響しない変更。
アイナットホルダ・ペレット保管箱位置決めゴムブロック	組立体上部にアイナットホルダを追加 両端に突起を追加	作業性の向上 作業性の向上	輸送物総重量に影響しない部品追加。 ペレット保管箱の保持機能に影響しない変更。
組立体カバー	取手幅を狭小化	作業性の向上	組立体カバーに期待する機能に影響はない。

* 全ての変更は輸送物の熱的性能を変化させざるものではないため、試験結果の有効性は維持される。

3.2 試験施設

耐火試験に用いた試験炉は、熱処理炉である。には熱処理炉が大きさによって幾つかあるが、オーバーシュート、ダウンシュート時の復帰の時間軸が短くなること、寸法的に原型容器を十分収納可能であることから、小型のを使用することとした。小型炉は予熱後開放時の降温幅が大きい短時間で昇温が可能となるコントロール上の利点がある。(B付1-写真16参照)

<試験炉の仕様()>

- ・炉内寸法 : Wm×Hm×Lm(有効寸法 Wm×Hm×Lm)
- ・燃料 : 都市ガス
- ・処理温度 : 常用 °C~°C 最高 °C
- ・温度公差 : ±°C
- ・処理能力 : 重量 MAX t / charge

3.3 試験方法

(1) 試験方法

核分裂性輸送物の特別の試験条件では告示別記第十二での以下の条件下に置くことになっている。

- ・ 雰囲気 38°C 太陽ふく射環境下に温度が一定になるまで置く
- ↓
- ・ 800°C×30分 太陽ふく射環境下に置く
- ↓
- ・ 雰囲気 38°C 太陽ふく射環境下で冷却

原型容器を用いた試験で太陽ふく射等の条件を完全に実現することは困難であるため、当試験では、原型容器を 800°C×30分環境下に置いた後自然冷却し、採取したデータを下に構築した解析モデルの合わせ込み解析を実施し、解析計算によって上記条件における輸送物の温度を求める。

試験はあらかじめ、予備昇温試験および搬入手順確認リハーサルを実施して策定した方法に基づき実施した。手順を以下に示す。(B付1-写真17参照)

- ①試験炉を °Cに昇温し1時間以上保持する。
- ②原型容器を試験炉の前にフォークリフトで吊り上げて待機し、試験炉扉を開放して台車を引き出す。
- ③原型容器を台車上の予め定めた位置に設置し、速やかに台車を炉内に戻し扉を閉める。
- ④設定温度を °C±とし、炉内温度及び原型容器に取付けた炉内温度測定用熱電対が全て 800°C以上となった時点から 30分間維持。
- ⑤30分経過後、搬入時と反対の手順で原型容器を取り出し、翌日まで屋内で自然冷却する。

(2) 温度データの取得

温度測定は原型容器に取付けた熱電対 8 点及び周辺温度測定用熱電対 1 点の合計 9 点で実施。温度測定は炉内搬入前から開始し、翌朝まで実施した。サンプリング間隔は各点とも 2 秒毎とした。(B 付 1-写真 18 参照)

3.4 試験状況 (B 付 1-写真 19~B 付 1-写真 26 参照)

原型容器を台車に設置した直後に、脚裏のウレタンゴムが激しく燃焼した。原型容器に取付けた炉内温度測定用熱電対は試験炉扉を閉めた後およそ□分程度で 800℃に到達しその時点から 30 分間維持した。炉制御用の熱電対の温度は、原型容器に取付けたものより早くに 800℃に到達していることから、炉内が均等に 800℃以上となっていると考えられる。

試験終了後、試験炉から取出した原型容器は、真っ赤に焼けていたが、すぐに冷えて表面が黒く酸化していることが判別できた。また、フランジ付近から上部側には白色の付着物があり、ゴム類の燃焼後の灰と考えられる。

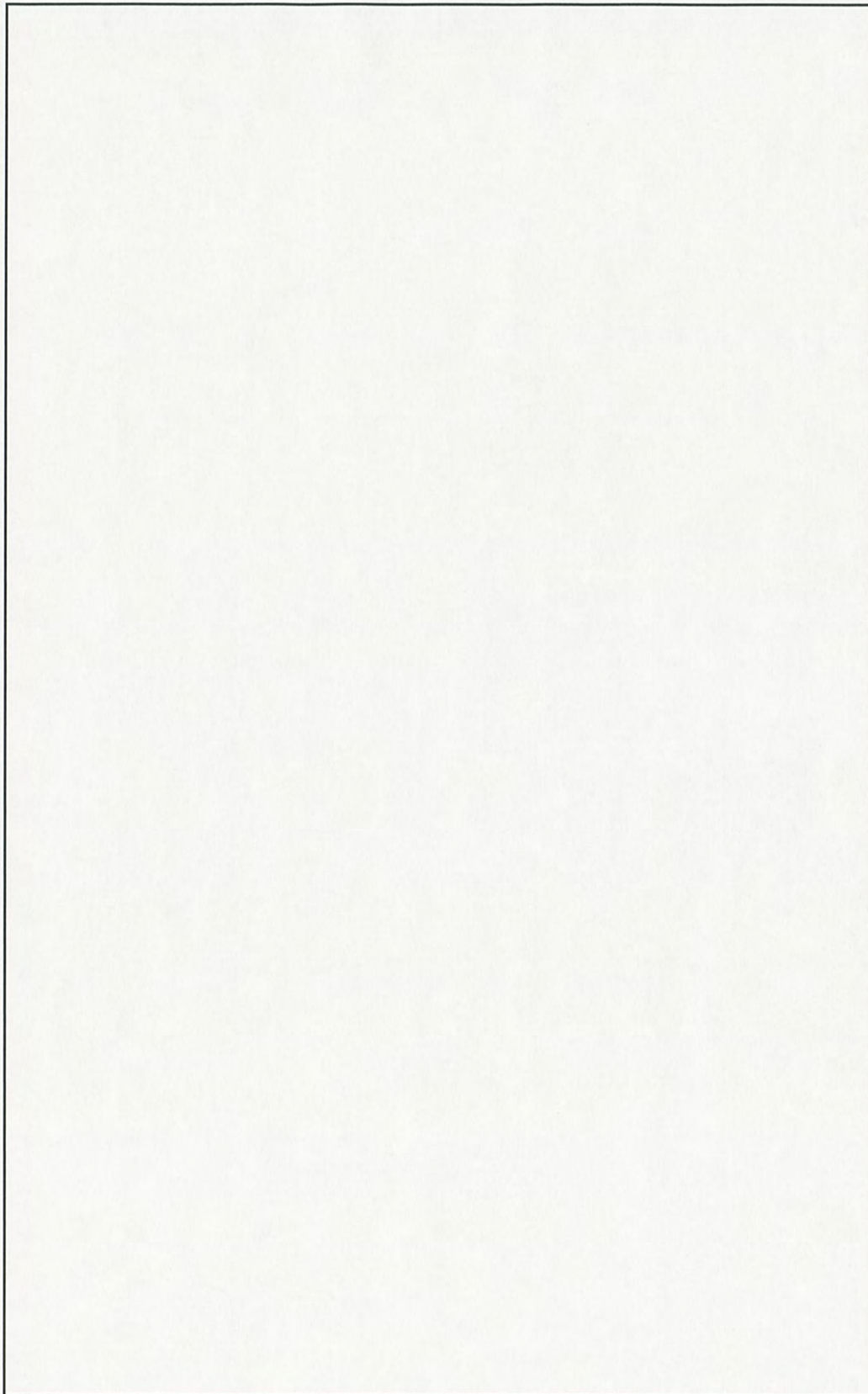
外観上を観察した限り試験前後で形状に変化はなく、燃焼に起因するような部材の溶解や変形はない。可融栓はハンダ部分が溶けており所定の機能を果たしたと思われる。熱電対取り出し用に底部に設けた貫通孔から炎が少し見えていたが、すぐに立ち消えた。これは、貫通孔に断熱材を充填した際に使用したテープが燃焼したのと考えられる。

(ロ)B 付 1-第 2 表に試験時の各部位の最高温度を示す。また、(ロ)B 付 1-第 3 図に温度測定履歴結果を示す。

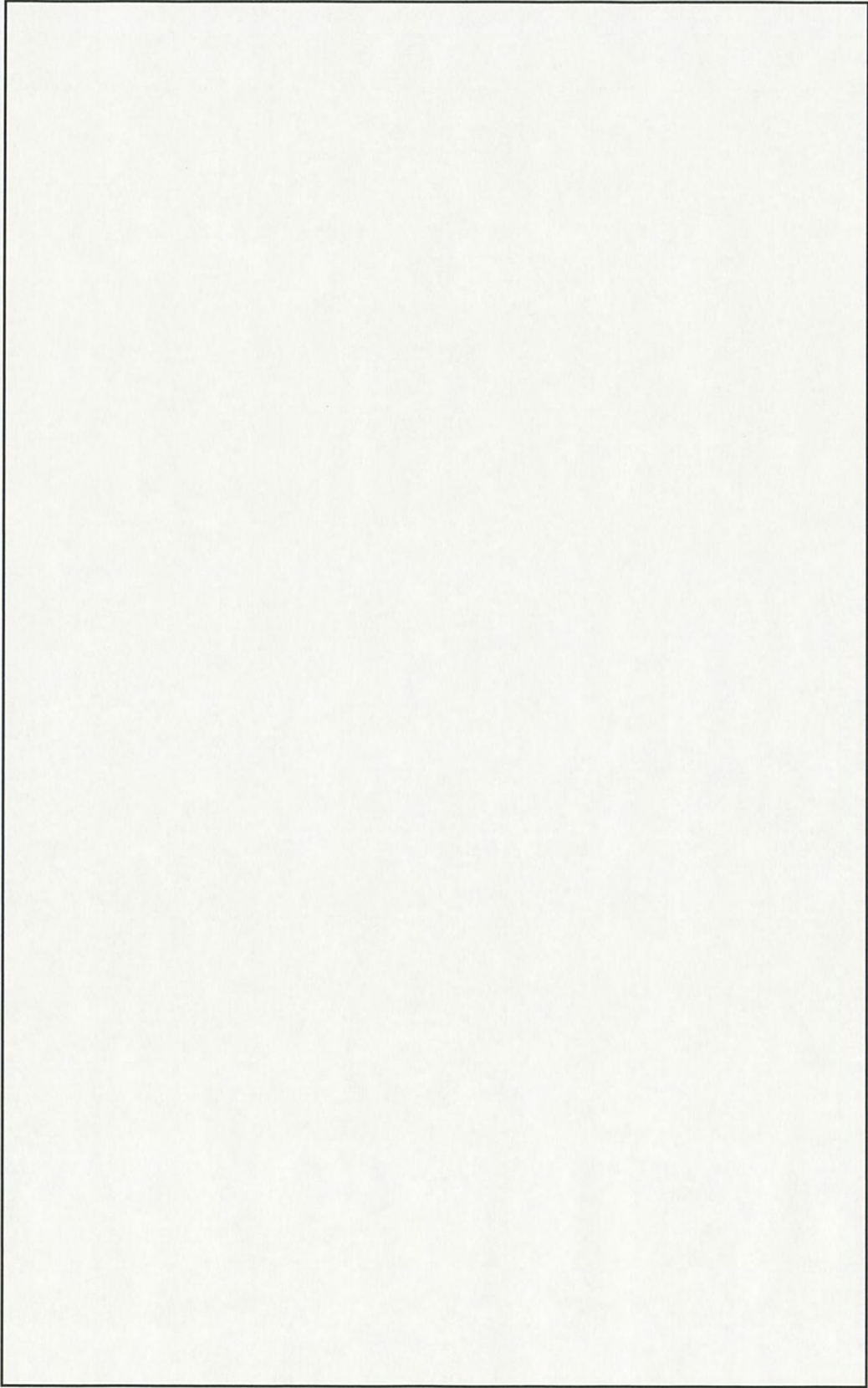
(ロ)B 付 1-第 2 表 熱電対測定結果 最高温度

測定箇所		熱電対 記号	最高温度(℃)	到達時間 (終了宣言後から)
炉内温度		(a)	818.6	—
外容器外表面		(b)	794.8	0:00:20
外容器	フランジ幅広側	(e)	407.1	0:06:10
	フランジコーナー	(d)	343.8	0:08:44
	フランジ幅狭側	(c)	394.6	0:07:46
内容器	フランジ幅広側	(h)	127.1	1:51:54
	フランジコーナー	(g)	143.7	1:24:50
	フランジ幅狭側	(f)	141.9	1:48:16





(口)B付1-第3図(1/2) 温度測定履歴



(口)B 付 1-第 3 図(2/2) 温度測定履歴

4. 試験後確認

試験終了後、熊取事業所で蓋開け等を行い、内部の状況確認を実施した。熱電対の取付けのため、試験前に一部ボルトを切断して外容器蓋を開けている。また、試験後の外観がそうであったように耐火試験による変形は認められなかったことから、容易に蓋を開けることが可能であった。

- (1) 外容器フランジ部のシリコンゴムは燃焼により完全に炭化又は灰化していた。(B付1-写真27参照)
- (2) 内容器外表面は茶褐色に変色し、外容器内面は灰色かかった色となっているが、内部に火炎が進入した痕跡はない。(B付1-写真28参照)
- (3) 内容器蓋に塗布したサーモペイント(□~□°C)上にも茶褐色の変色が及んでおり、変色していないとも取れるが、正確な変色状況は不明である。(B付1-写真29参照)
- (4) 外容器本体上部には、膨張変質した耐火ゴムが付着しており、有効に機能した(膨張により隙間をふさぐ)と考えられる。(B付1-写真30~B付1-写真34参照)
- (5) 外容器内側に塗布したサーモペイントは各部において □°Cのペイントが変色しているが、□°Cは変色していない。ただし、部位によっては、温度領域に関係なくペイントの上側が変色したものがあつた。これは、外容器フランジ部に採用した耐火ゴムが膨張後外容器内側に覆いかぶさつたことが原因と考えられる。耐火ゴムは高温に熱せられていると考えられることから、耐火ゴムと接触したペイントが変色したと推定でき、これが原因で熱電対測定結果 c,d,e(□°C~□°C)とサーモペイントの示温結果が異なつたと考えられる。また、耐火ゴムはコーナーの熱電対には覆いかぶさつていなかったことから、コーナー部の温度が他より低かつたと考えられる。(B付1-写真33,B付1-写真35参照)
- (6) 内容器フランジ部の板ゴムに貼付けていたサーモラベル(□~□°C)は、殆どが内容器蓋の裏に密着して剥れた。試験中は板ゴムにも接触はしていたが、ラベルが示す温度は内容器蓋の温度と考えてよい。確認した結果、ラベルは全て □°C又は □°Cまで到達したことを示していた。ラベルは内容器フランジ部の全周に渡って貼付けていたが、示温状態は同じであり、内容器の温度分布は大きく偏りはなく、熱電対挿入用の貫通孔の影響はなかつたと推察される。(B付1-写真36~B付1-写真39参照)
- (7) 内容器フランジのシリコンゴム板スペーサは弾力を十分に残していたが、外周部が内容器表面と同じように茶褐色に変色している。(B付1-写真40)
- (8) 内容器フランジ部の O リングについても十分に弾力があり、変色及び変質もなく健全な状態であつた。(B付1-写真41~B付1-写真44参照)

(9) 内容器内部は収納物も含め変色変質はなく高温になったとの物証はない。(B 付 1-写真 40 参照)

(10) 収納物及び内容器中央の中性子吸収材模擬ステンレス鋼製板に貼付けたサーモラベルは一切反応がなく、125℃に到達していないことが確認できた。(B 付 1-写真 45~B 付 1-写真 48 参照)

4.3 試験結果まとめ

耐火試験の結果、外容器外表面は変色したが、変形や落下試験における損傷の拡大、貫通孔の発生等形状の変化は無く、締付け用ロッドボルトにも損傷はなかった。外容器蓋は所定の位置から移動していない。フランジ部のシリコンゴム製スペーサは炭化、灰化した。

外容器内部及び内容器外表面も含めて変色したが有意な変形はなく、発火の形跡もない。

内容器内部及び収納物は変色、変形を含めて試験前後で変化はみとめられない。内容器フランジ部のシリコンゴム製 O リングの温度は最高で約 144℃以下であり、試験後でも弾力性を十分に残していた。使用している O リングは、常用上限温度が ℃であり、さらに JIS に定められた耐熱老化性試験 (℃×時間) で著しい劣化が無いことが確認されたものである。

収納物の温度は 125℃を超えることは無く耐火試験の影響はない。

5 まとめ

落下試験後の原型容器を用いて 800℃×30 分耐火試験を実施した。試験の結果、外部のゴム類が焼失したが、有意な変化は無く、本輸送物の耐熱性が確認された。実施した試験は、告示に要求される周囲温度や太陽ふく射等の要件と一部相違するため、温度測定結果を熱解析により補正し、その結果を評価に適用することとする。

以上

<p>B付1-写真1 輸送容器落下試験 後外観</p>		<p>B付1-写真2 輸送容器落下試験 後外観</p>	
<p>B付1-写真3 コーナ溶接部割れ (○)</p>		<p>B付1-写真4 外容器内部</p>	
<p>B付1-写真5 内容器外観</p>		<p>B付1-写真6 ペレット保管箱組 立体外観</p>	
<p>B付1-写真7 熱電対 (外容器表面、雰囲気)</p>		<p>B付1-写真8 熱電対、サーモハ[°]ル、 サーモ[°]イント (外容器コーナ、内容 器コーナ)</p>	
<p>B付1-写真9 熱電対、サーモハ[°]ル、 サーモ[°]イント (外容器幅狭フランジ[°]、 内容器幅狭フランジ[°])</p>		<p>B付1-写真10 熱電対、サーモハ[°]ル、 サーモ[°]イント (外容器幅広フランジ[°]、 内容器幅広フランジ[°])</p>	

B 付 1-写真 11 熱電対内部配置		B 付 1-写真 12 熱電対取り出し部	
B 付 1-写真 13 取付け終了後容器 内部全景		B 付 1-写真 14 取付け終了後全景	
B 付 1-写真 15 貫通孔		B 付 1-写真 16 試験炉内部（昇温 前）	
B 付 1-写真 17 試験リハーサル(原 型容器設置位置確 認)		B 付 1-写真 18 測定器	
B 付 1-写真 19 試験炉昇温後 台 車引出し		B 付 1-写真 20 原型容器設置作業	

<p>B付1-写真21 原型容器設置直後</p>		<p>B付1-写真22 試験炉へ搬入</p>	
<p>B付1-写真23 試験終了直後</p>		<p>B付1-写真24 台車引出し</p>	
<p>B付1-写真25 試験後後全景</p>		<p>B付1-写真26 表面熱電対及び可融栓</p>	
<p>B付1-写真27 外容器フランジ</p>		<p>B付1-写真28 外容器内面</p>	
<p>B付1-写真29 内容器蓋サモント状態</p>		<p>B付1-写真30 外容器内面耐火コート状況及びサモント状態</p>	

<p>B 付 1-写真 31 外容器内面及び 耐火ｺﾞﾑ状況</p>		<p>B 付 1-写真 32 外容器内面及び 耐火ｺﾞﾑ状況</p>	
<p>B 付 1-写真 33 外容器内面 耐火ｺﾞﾑ状況及び サｰﾓｰｲﾝﾄ状況</p>		<p>B 付 1-写真 34 耐火ｺﾞﾑ状況</p>	
<p>B 付 1-写真 35 外容器内面 耐火ｺﾞﾑ除去後のサ ｰﾓｰｲﾝﾄ状況 写真 33 と同一箇 所</p>		<p>B 付 1-写真 36 内容器ﾌﾗﾝｼﾞ部 サｰﾓｰﾊﾞﾙ</p>	
<p>B 付 1-写真 37 内容器ﾌﾗﾝｼﾞ部 サｰﾓｰﾊﾞﾙ</p>		<p>B 付 1-写真 38 内容器ﾌﾗﾝｼﾞ部 サｰﾓｰﾊﾞﾙ</p>	
<p>B 付 1-写真 39 内容器ﾌﾗﾝｼﾞ部 サｰﾓｰﾊﾞﾙ</p>		<p>B 付 1-写真 40 内容器内部全景</p>	

<p>B付1-写真41 内容器フランジ[*]コナ部 Oリング[*]</p>		<p>B付1-写真42 内容器フランジ[*]幅広 側Oリング[*]</p>	
<p>B付1-写真43 内容器フランジ[*]幅狭 側Oリング[*]</p>		<p>B付1-写真44 内容器コナ部Oリン グ[*]取外し後</p>	
<p>B付1-写真45 収納物上面サ-モラ[*]へ[*] ル(落下コナ-側)</p>		<p>B付1-写真46 収納物上面サ-モラ[*]へ[*] ル(熱電対取出し用 貫通孔側)</p>	
<p>B付1-写真47 中性子吸収材模擬 ステンレス鋼製板 サ-モラ[*]へ[*]ル</p>		<p>B付1-写真48 収納物上面サ-モラ[*]へ[*] ル(熱電対取出し用 貫通孔側)</p>	

(ロ)B 付属資料 2

熱解析モデルの合わせ込み解析結果

1. はじめに

原子燃料工業株式会社が 5wt%以下のウラン酸化物(ペレット)又はガドリニア入りウラン酸化物(ペレット)を運搬するために開発した GP-01 型輸送容器は A 型核分裂性輸送物に類別される。核分裂性輸送物は告示別記第十二に則り耐火試験を行う必要があり、原型容器を用いた耐火試験を実施している。しかし、太陽ふく射の適用など試験では実現できない要件があることから、最終的な評価は解析計算によるものとし、原型容器の耐火試験結果を保守的に包絡する熱解析モデルを構築し、一般の試験条件および特別の試験条件における熱解析をおこなう。

解析モデルの妥当性を確立し、より精度の高い熱解析を行うために、原型試験による耐火試験結果を下に解析モデルの合わせ込みを実施した。ここでは合わせ込み解析の結果について記述する。

2. 原型容器と原型試験結果

2.1 原型容器

耐火試験に使用した原型容器は、落下試験に引続いて使用しており、基本的に実用機と同一構造及び同一の製造方法であるが、耐火試験に使用するために以下の点で異なっている。なお、落下試験で重量が重くなることから、収納物はペレット保管箱組立体(A)2 基としており、耐火試験でも引続き同じ収納物を使用している。

(1) 代替収納物

原型容器には、重量模擬鉛棒をペレット保管箱に収納している。ウランと鉛との熱的な性質については、耐火試験の結果に基づき実施する解析計算で補正する。

(2) 熱電対取付け

落下試験終了後の原型容器から落下試験用の加速度計を取外し、温度測定用の熱電対を取付けている。取付け作業実施のために外容器蓋を開ける際、変形部周辺の締付け用ロッドボルトを切断している。切断した締付け用ロッドボルトは取外したが、代替品は取付けていない。

熱電対取付け位置を(ロ)B 付 2-第 1 図に示す。そのほか、サーモラベル及びサーモペイントを内容器フランジ及び外容器内側フランジ部にそれぞれ貼付・塗布した。

解析計算では熱電対位置の温度をシミュレートしている。



(ロ)B 付 2-第 1 図 熱電対取付け箇所

(3) 熱電対取付けに掛かる追加工

熱電対取出し用の貫通孔は、内径□mm で貫通部の断熱材を除去してステンレス鋼製パイプを溶接している。試験時は、同貫通孔に輸送容器に使用しているセラミックファイバー製断熱材の残材を充填し、火炎の進入を防いでいる。

熱電対挿入用貫通孔付近のアルミハニカムは、熱電対取回しのため、端をカットして取付けている。

(4) 中性子吸収材の代用

内容器およびペレット保管箱組立体の中性子吸収材であるボロン入りステンレス鋼製板の代用として、同一寸法のステンレス鋼板を使用した。本代用板を使用することによる熱的な影響はない。

(5) その他

原型容器製作後に判明した取扱い上の改善事項や、試験の結果から生じた小改善を反映したものを最終生産型とする。これらの変更は、原型容器を用いた試験結果に非安全側の考慮が必要な熱的影響をもたらすものではない。

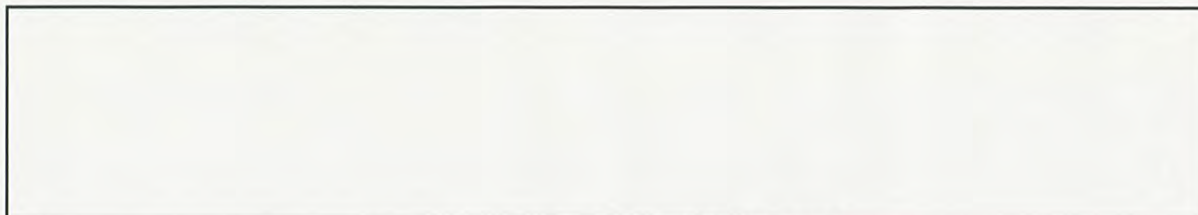
2.2 原型試験結果

(1) 落下試験

落下試験では、原型容器を 2 基用いて試験しており、1 号機は落下姿勢検討用、2 号機は本試験用としている。耐火試験には本試験を実施した 2 号機を用いる。2 号機は落下試験前の検討結果及び 1 号機の試験結果から、最大の損傷を与える落下姿勢として上部側コーナーを落下させている。上部側コーナー落下はエネルギーが集中して外観上有意な変形をすること及び耐火試験において熱の進入経路となると考えられるフランジ部付近に変形を及ぼす可能性があることから選択した。

「(ロ)A 付属資料 1」に原型容器落下試験結果の詳細を示す。落下試験では、変形はフランジ部にまで及んだが、フランジ部に開口や締付け用ロッドボルトの外れや破断は無く、外容器蓋が所定の位置から動くことはなかった。吊部の溶接部が割れて断熱材が見えたが喪失はない。変形量を(ロ)B付2-第2図に示す。

外容器内部はアルミハニカムが部分的に変形した程度であり、内容器及びペレット保管箱組立体には有意な変形は見られなかった。



(ロ)B付2-第2図 落下試験後変形量

(2) 耐火試験

原型容器2号機を用いた耐火試験では、炉内温度測定用熱電対は炉蓋閉め後およそ□分程度で800℃に到達しその時点から30分間維持している。試験炉から取出した原型容器は、真っ赤に焼けていたが、すぐに冷えて表面が黒く酸化していることが判別できた。外観上は試験前後で形状に変化はなく、燃焼に起因するような部材の溶解や変形はない。

外容器外表面は変色したが、変形や落下試験における損傷の拡大、貫通孔の発生等形状の変化は無く、締付けボルトにも損傷もなかった。外容器蓋は所定の位置から移動していない。フランジ部のシリコンゴム製スペーサは炭化、灰化した。

外容器内部及び内容器外表面も含めて変色したが有意な変形はなく、発火の形跡もない。

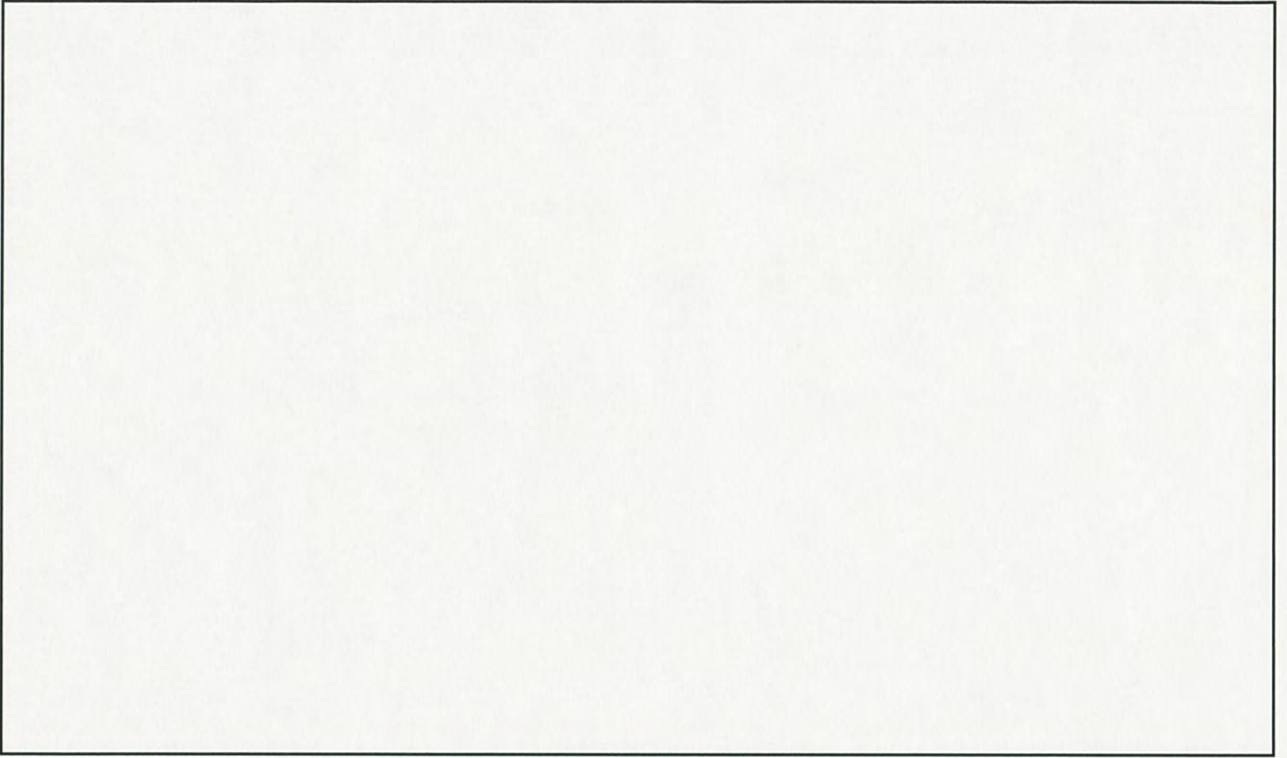
内容器内部及び収納物は変色、変形を含めて試験前後で変化はみとめられない。内容器フランジ部のシリコンゴム製Oリングの温度は最高で約144℃であり、試験後でも弾力性を十分に残していた。使用しているOリングは、常用上限温度が□℃であり、さらにJISに定められた耐熱老化性試験(□℃×□時間)で著しい劣化が無いことが確認されたものである。

収納物の温度は125℃を超えることは無く耐火試験の影響はない。

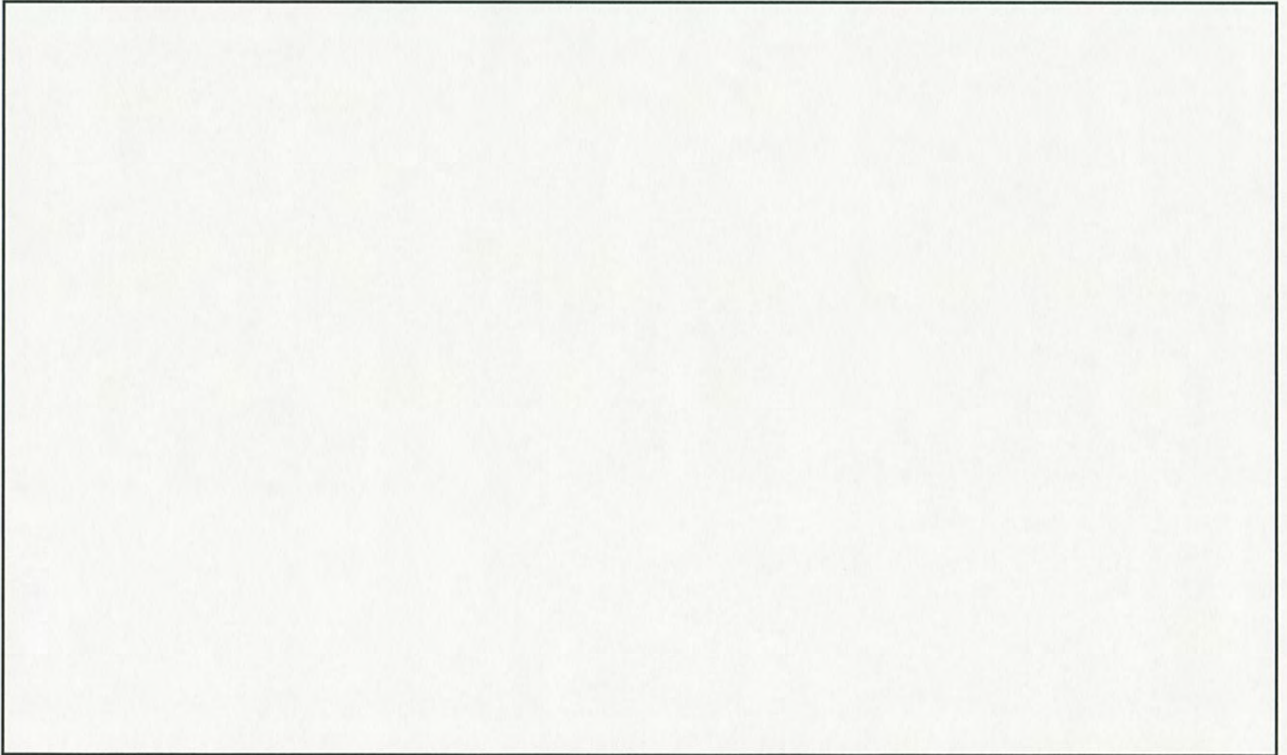
(ロ)B付2-第1表に各部位の最高到達温度を示す。また、(ロ)B付2-第3図に温度の時刻歴変化を示す。

(ロ)B付2-第1表 熱電対測定結果 最高温度

測定箇所		熱電対 記号	最高温度(℃)	到達時間 (終了宣言後から)
炉内温度		(a)	818.6	—
外表面		(b)	794.8	0:00:20
外容器	フランジ幅広側	(e)	407.1	0:06:10
	フランジコーナー	(d)	343.8	0:08:44
	フランジ幅狭側	(c)	394.6	0:07:46
内容器	フランジ幅広側	(h)	127.1	1:51:54
	フランジコーナー	(g)	143.7	1:24:50
	フランジ幅狭側	(f)	141.9	1:48:16



(口)B 付 2-第 3 図(1/2) 温度測定履歴



(口)B 付 2-第 3 図(2/2) 温度測定履歴

3. 解析手法の検討

3.1 形状のモデル化

事前に検討した結果、本輸送物のように比較的小型で箱型形状のものは、円筒形輸送物の熱解析で多用される軸対称モデルやスライスモデルのような2次元モデルとすると、モデルに現れない側面の入熱の影響が大きく過小評価となってしまうことが判明したため、3次元モデルで解析を行うこととした。

原型容器は「2.2 原型試験結果 (1) 落下試験」に示すように、自由落下、落下試験Ⅰ及びⅡを実施した結果変形しているが、潰れた形状を現実に即してモデル化することは困難であるので、非損傷の解析モデルから、(ロ)B付2-第2図に示すような三角錐状の変形箇所を切りとることにより作成した。単に切断しただけでは切断により生じた断面は、断熱材がむき出しの状態となってしまうため、当該部には、厚さ□mmのステンレスを設置することとした。

原型容器にはウラン酸化物(ペレット)又はガドリニア入りウラン酸化物(ペレット)に代えて重量模擬した鉛棒を収納していることから、合わせ込み解析では、材料の熱的物性値に鉛を考慮している。

3.2 解析条件の設定

熱的境界条件を以下に示す。また、(ロ)B付2-第2表に境界条件をまとめて示す。

(1) 部材間の伝熱

幾何学的に接触している各部材間は完全に密着して接しているとする。解析においては、有限要素モデルのモデル作成時に節点を共有化してモデル化しており、伝熱のロスが発生しない。

(2) 耐火試験条件を模擬した伝熱

以下に示す条件を連続して行う。

(a) 火災発生前は、室温相当の等温状態であるとする。

(b) 耐火試験の条件下におく。

火災中の炎の温度(=外気温度)は、耐火試験結果の炉内温度((ロ)B付2-第3図)をデータとして引用する。熱伝達係数 α はIAEA輸送規則TS-G1.1 728.30により $10\text{W}/(\text{m}^2\text{C})$ を使用した。熱伝達の定義にはANSYSの表面効果要素を利用した。

外容器外表面から、外部空間へのふく射を定義する。ふく射率はIAEA輸送規則TS-G1.1 728.28,29により火炎面で□、容器外表面で□とする。ANSYSではふく射率が一つしか定義できないので、次式による等価値として定義した。ふく射の定義にはANSYSの表面効果要素を利用する。

$$\text{放射係数 } F_{\epsilon} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{1 - (1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2)}$$

(c) 火災後の自然冷却を定義する

室温の外部流体の対流による熱伝達を定義する。熱伝達係数 α はヌセルト Nu 数の関数とし、Nu は IAEA 輸送規則 TS-G1.1 728.31 を使用した。(α の算出については、後述の材料物性の章を参照)。熱伝達の定義には ANSYS の表面効果要素を利用する。原型容器は室内に置かれて冷却されたため太陽による入熱は無いものとする。

(3) 容器内部の空気部におけるふく射伝熱

容器内面と内容器外面の間、および内容器内面と収納容器外面の間には空気が存在している。これら内部の空気には対流が存在しないとし、空気は熱伝導物体として取り扱う（空気に相当する物性値を定義した固体と仮定する）。また、空気に接する容器内面ではふく射による伝熱を定義する。外容器内面はアルミハニカムがその面積の大半を占めているため、ふく射率は「伝熱工学資料改定第 4 版(日本機械学会)」P184 図 1 (a) における、アルミニウムのふく射率（約 ～ ）から保守的に とする。対称性のあるモデルの解析であるためラジオシティ法を使用することとした。

(4) 対称境界条件

各対称面は、断熱条件として取り扱われる。伝熱解析では、何も条件を設定していない面は断熱条件として取り扱われる。

(5) 初期温度条件

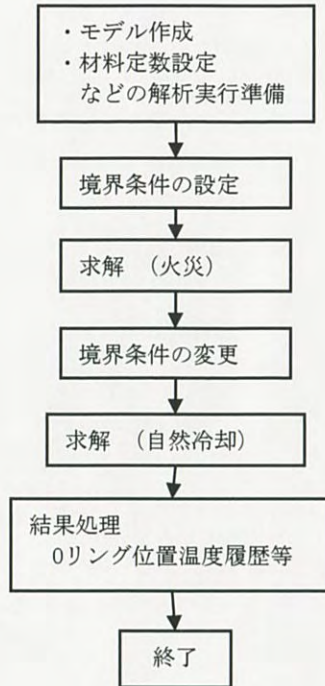
一般の試験条件、特別の試験条件では、解析対象物が 38℃均一の状態から解析がスタートするが、本合わせ込み解析では、耐火試験結果の初期温度と一致させるため 25℃均一の状態から解析がスタートする。

(ロ)B 付 2-第 2 表 熱的境界条件

試験条件	外部空気との熱伝達 (熱伝達条件定義)	太陽ふく射の流入 (熱流束定義)	炎とのふく射 (ふく射伝熱定義)	外部空気とのふく射 (ふく射伝熱定義)	容器内部空気部のふく射 外容器内面⇄内容器外面、 内容器内面⇄収納容器外面
火災の発生中	ON 外部温度：測定温度 熱伝達係数=10	OFF 原型容器の条件	ON (炎 ϵ = <input type="text"/> 、 容器外面 ϵ = <input type="text"/>)	OFF	ON (ϵ = <input type="text"/>)
火災後の自然冷却	ON 外部温度：室温 温度依存の熱伝達係数		OFF	ON 容器外面 ϵ = <input type="text"/>	

3.3 解析の流れ

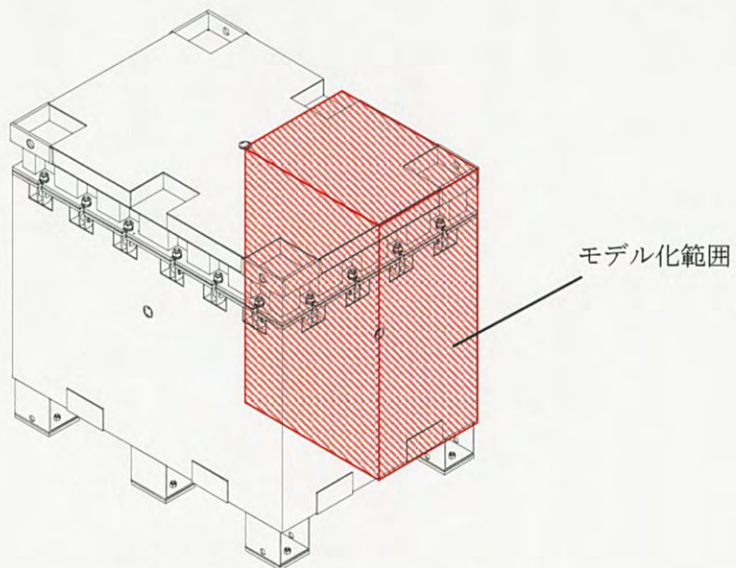
解析フローを(ロ)B付2-第4図示す。



(ロ)B付2-第4図 合わせ込み解析フロー

4. 解析モデル

本解析では対称性を考慮し、(ロ)B付2-第5図に示すハッチング範囲をモデル化(1/4対称)の対象範囲とした。モデル化にあたっては、微小な部品等は熱的な影響が無視できると考えられることからモデル化から除外している。



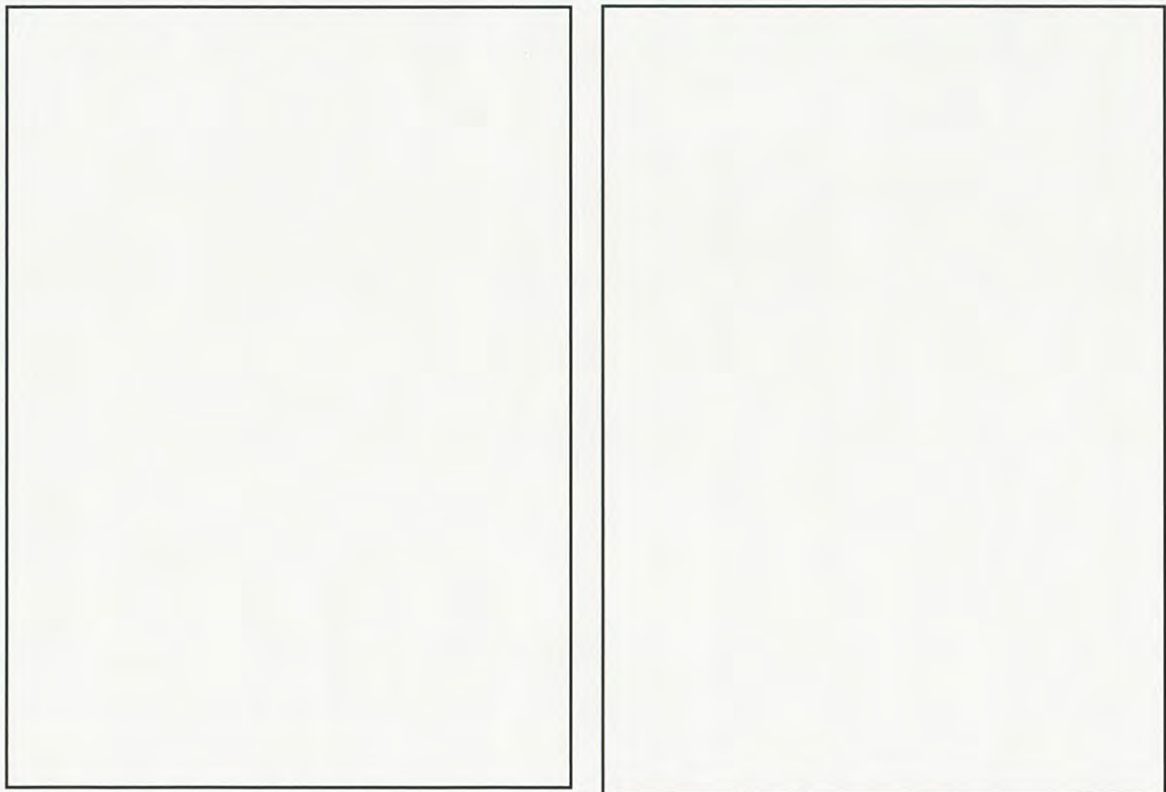
(ロ)B付2-第5図 3次元解析モデル化範囲

断熱材は、外容器蓋の外周フレームより外側及び積重ね時に脚と嵌合する凹み 6 箇所(吊部を兼ねたコーナー4箇所を含む)には存在しない。また、事前の検討では、外容器の凹みは内容器温度分布に有意な影響を与えないことが判明していたため、モデル化にあたっては、保守的及びモデル規模の低減につながることから、フレームより外側を無視し、凹みは蓋の外周に連続的に存在するモデルとした。外容器の本体のボルト座についても同じ考えに基づきボルト座が連続的に存在するものとしてモデル化している。

原型容器試験では、アルミハニカムは、若干変形したが完全な圧潰には至らなかった。モデル化においては、内容器により多くの熱を伝える伝熱パスとなることからアルミハニカムは変形が無いものとした。

「3.1 形状のモデル化」で述べたように、解析に用いる損傷モデルは落下後の容器形状を模擬するため、外容器の一部を切断した形状としてモデル化した。解析モデルは、既に保守的及びモデル規模低減の観点から外形を簡素化しており、原型容器試験の結果生じた変形量も大半が簡素化された範囲に含まれたものとなった。(ロ)B付2-第6図に解析モデルを示す。(ロ)B付2-第7図～(ロ)B付2-第10図に損傷モデルの切断イメージを示す。本解析モデルは1/4対称モデルであるため、作成した損傷モデルはフルモデルに置き換えると四隅を損傷しているモデルに相当する。変形箇所は断熱材が圧縮され単位量あたりの断熱性は向上するが、形状モデルでは変形部の断熱材の熱的性質に変化はなく単純に削除したものとなっている。

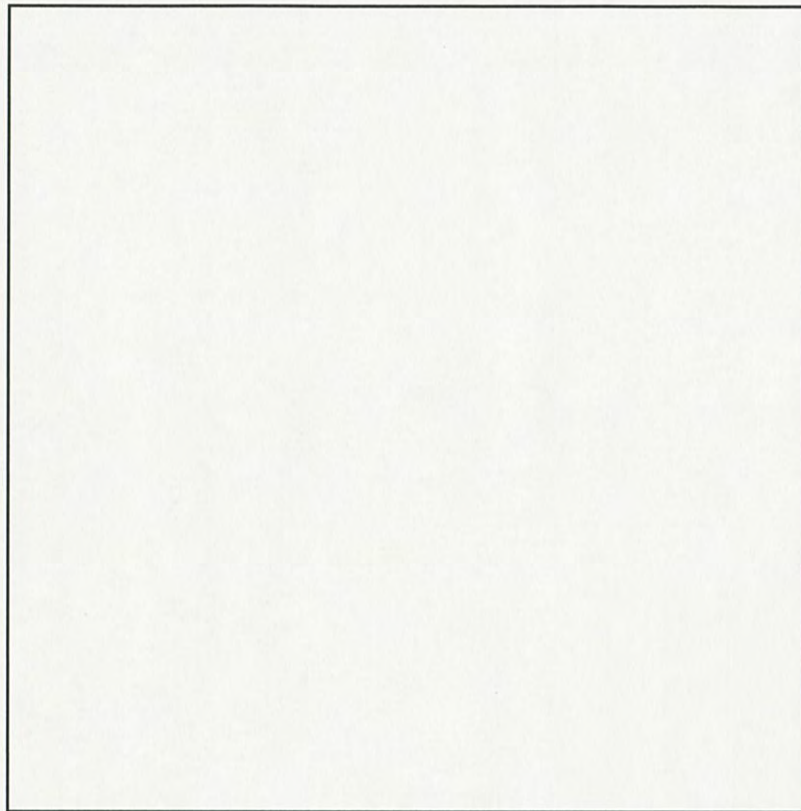
収納物であるペレット収納箱組立体の領域については、その領域に含まれる物質を均質化したモデルで取り扱う。



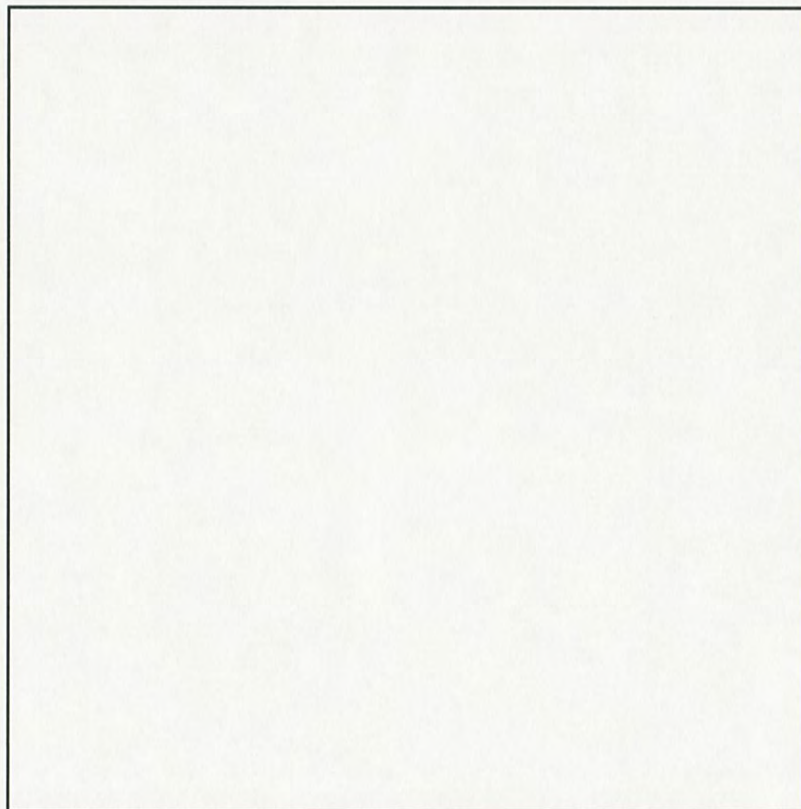
(a)-Y方向から見た図

(b)+Y方向から見た図

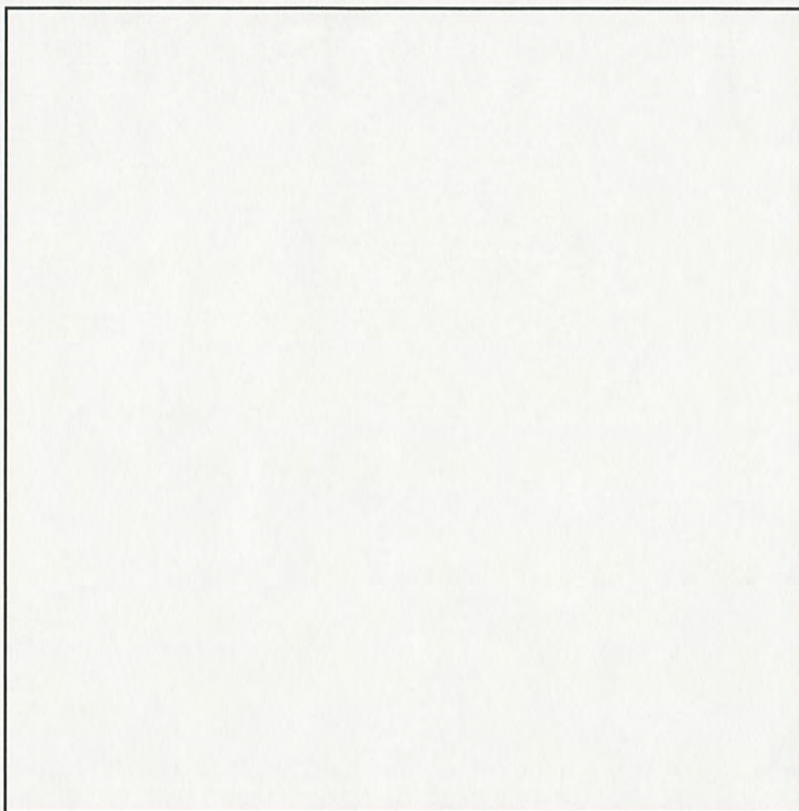
(ロ)B付2-第6図 解析モデル (損傷モデル) /全体図



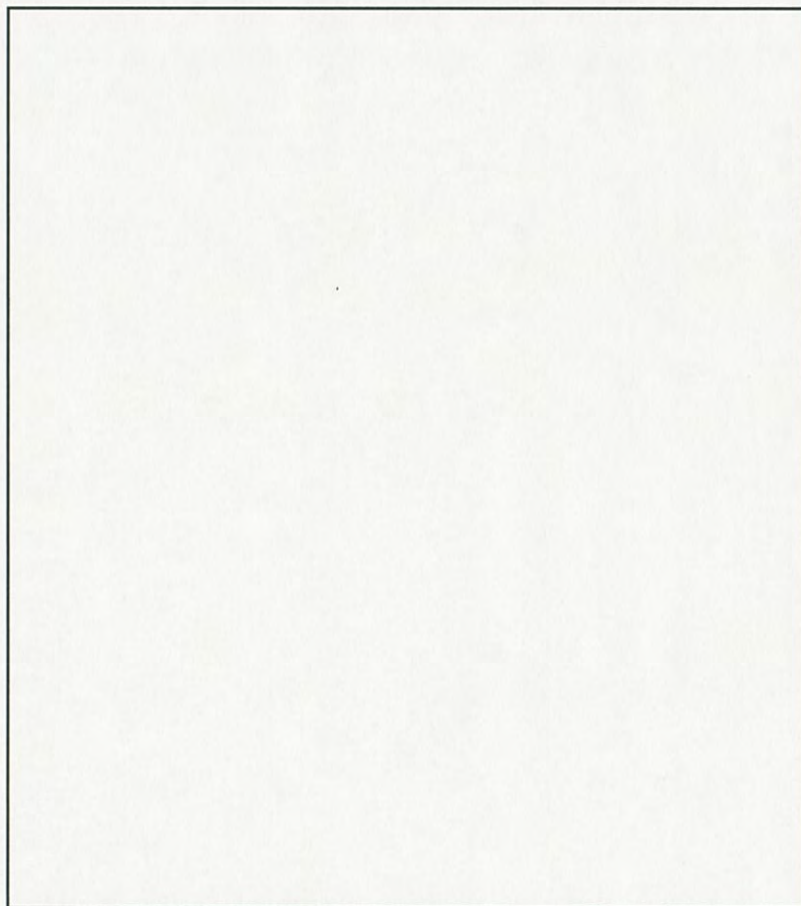
(ロ)B 付 2-第 7 図 損傷モデルの切断イメージ(1/4)



(ロ)B 付 2-第 8 図 損傷モデルの切断イメージ(2/4) ①方向



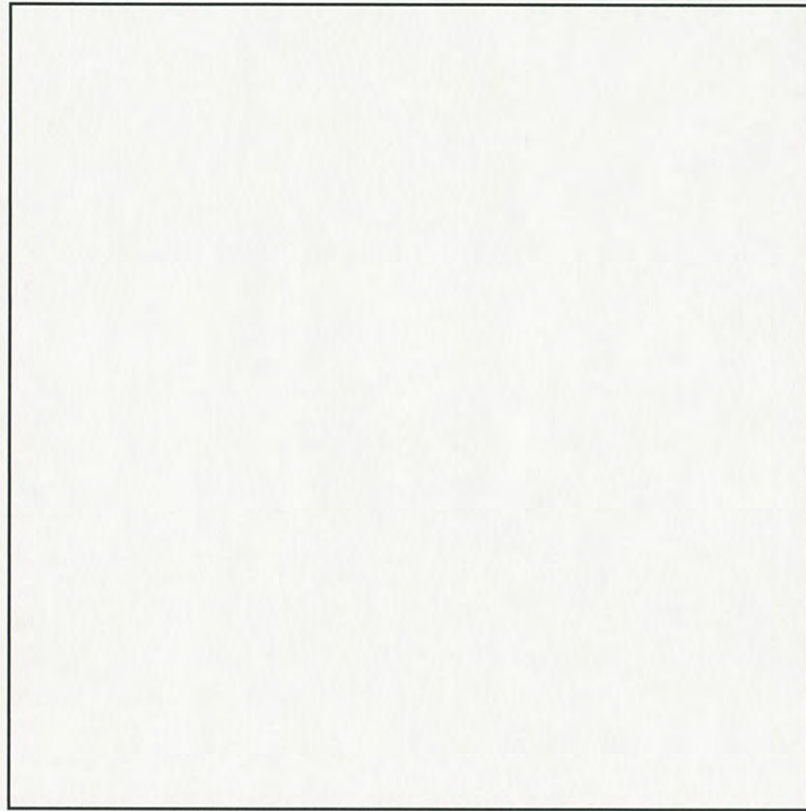
(ロ)B 付 2-第 9 図 損傷モデルの切断イメージ(3/4) ②方向



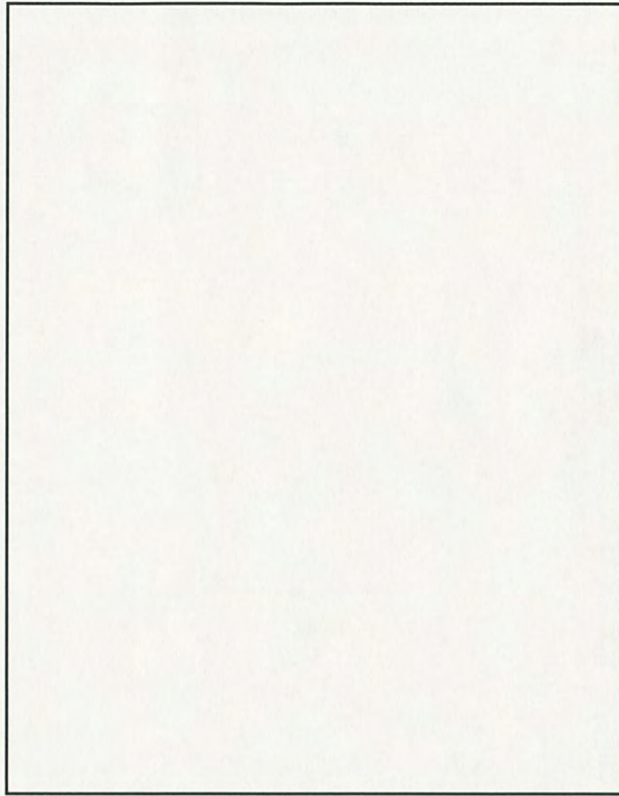
(ロ)B 付 2-第 10 図 損傷モデルの切断イメージ(4/4) ③方向

解析モデルでは、構造物外表面を覆うように3重の要素を作成しており、それぞれ、空気との熱伝達解析用、自然冷却時のふく射伝熱解析用、火災時の炎とのふく射伝熱解析用とした。また、内部空気と周辺構造物との境界には、ふく射伝熱を考慮している。

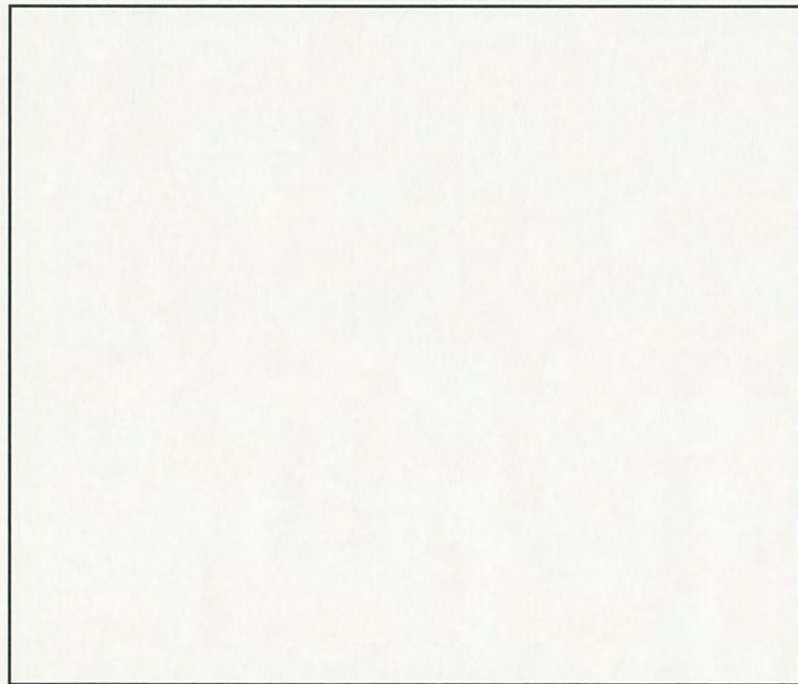
有限要素モデルの作成は、非損傷モデルと同様である。全節点数は 、全要素数は である。(ロ)B付2-第11図～(ロ)B付2-第13図に有限要素モデルを示す。



(ロ)B付2-第11図 有限要素モデル(全体)



(ロ)B 付 2-第 12 図 有限要素モデル(表面効果要素)



(ロ)B 付 2-第 13 図 有限要素モデル(表面効果要素 容器内部のふく射計算用)

5. 材料物性

(1) 収納物の熱的物性値

原型容器には、ウラン酸化物（ペレット）又はガドリニア入りウラン酸化物（ペレット）に替えて重量模擬した鉛棒を使用していることから、合わせ込み解析では鉛の熱的物性値を用いている。

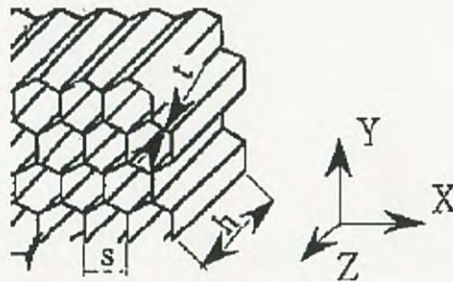
収納物であるペレット保管箱組立体は、気密性を有していないため温度上昇による内圧の増加の影響はない。また、核燃料物質であるウラン酸化物（ペレット）又はガドリニア入りウラン酸化物（ペレット）及びペレット保管箱組立体の構成材についても、温度上昇による融解や気化及びガスの放出等について無視可能であるため、収納物の温度分布を得る必要性は低い。したがって、収納物の領域は均質化したモデルとし、熱的物性値は物質の体積比から等価物性値を算出して使用した。

密度、熱伝導率については、各材料物性に比率を掛けた後足し合わせて算出した。比熱については、 $\sum \rho_i \cdot c_i / \rho$ (ρ_i , c_i はそれぞれ各物質の密度と比熱、 ρ は平均化した密度) により算出した。

解析に使用した収納物の熱的物性値を(ロ)B付2-第3表に示す

(2) アルミハニカムの熱的物性値

アルミハニカムは、(ロ)B付2-第14図のような形状をしており、蜂の巣状の形状が周期的に並んだ構造をしている。従って、マクロ的に見ればこの伝導体は等価物性を持つ均質材料として取り扱うことが可能である。しかし、各方向性により伝熱の特性が異なることに注意する必要がある。



(ロ)B付2-第14図アルミハニカム

この構造物に関して、既往の文献（小笠原、白鳥、于、藏原、日本機械学会論文集（B編）、65巻639号、「ハニカム材料の直交異方性熱伝導率評価」）によれば、各方向の熱伝導率は次式で表される。

$$\lambda_x = \lambda_{air} + \lambda_{al} R$$

$$\lambda_y = \lambda_{air} + \frac{3}{2} \lambda_{al} R$$

$$\lambda_z = \lambda_{air} + \frac{8}{3} \lambda_{al} R$$

$$R = \frac{t}{s}$$

本解析においては、ハニカム材料の設置方向を考慮し、ハニカムの場所毎にその方向性を考慮した熱伝導率 λ_x 、 λ_y 、 λ_z を定義した。

等価密度および等価比熱は下式より求めた。

$$\rho = \rho_{air} + 8/3 \rho_{al} R$$
$$C = (C_{air} \rho_{air} + 8/3 C_{al} \rho_{al} R) / \rho$$

(ロ)B付2-第4表に解析に使用したアルミハニカムの熱的物性値を示す。

(3) 断熱材の熱的物性値

事前解析における断熱材の熱的物性値はメーカー公表値を保守的に包絡した値としたが、温度が高くなる解析結果となり耐火試験の結果と整合しなかった。検討した結果、断熱材の熱的物性値をメーカー公表値に補完したものとしたところ、整合の取れた解析結果となった。解析結果は後述のように保守的なものであることから、全体として保守性を維持しながら、整合性の高い解析モデルとすることが出来ている。(ロ)B付2-第5表に断熱材の熱的物性値を示す。

(4) その他材質の熱的物性値

その他の熱的物性値(ロ)B付2-第6表に示す。

(5) 熱伝達係数の算出

火災中の外容器表面と周囲流体との間の熱伝達係数 α はIAEA輸送規則TS-G1.1 728.30により $10W/(m^2C)$ を使用した。

それ以外の状態での熱伝達係数 α はヌセルトNu数の関数

$$\alpha = Nu \cdot \lambda / l \quad (\lambda: \text{熱伝導率、} l: \text{代表長さ (脚を除く外容器の全高} 0.915\text{m)})$$

とし、はIAEA輸送規則TS-G1.1 728.31による下記の数式により算出した。

$$Nu = 0.13(PrGr)^{1/3}$$

なお、

プラントル数 $Pr = \nu / \kappa$ (ν : 動粘度、 κ : 熱拡散率($= \lambda / \rho c$)、 ρ : 密度、 c : 比熱)

グラスホフ数 $Gr = g \times \beta (T_w - T_\infty) l^3 / \nu^2$

(g : 重力加速度、 β : 体積膨張率($= 1/T$)、 T_w : 壁面温度、 T_∞ : 空気温度)

(ロ)B付2-第7表に計算した熱伝達係数を示す。

(ロ)B 付 2-第 3 表 収納物の熱的物性値

温度 (K)	密度 (g/cm ³)	比熱 (J/kg·K)	熱伝導率 (W/m·K)	温度 (K)	密度 (g/cm ³)	比熱 (J/kg·K)	熱伝導率 (W/m·K)

(ロ)B 付 2-第 4 表 アルミハニカムの熱的物性値

温度 (K)	密度 (g/cm ³)	比熱 (J/kg·K)	熱伝導率(W/m·K)		
			X	Y	Z

(ロ)B 付 2-第 5 表 断熱材の熱的物性値

温度 (K)	密度 (g/cm ³)	比熱 (J/kg·K)	熱伝導率 (W/m·K)
291	0.16	1050	0.031
373	0.16	1050	0.036
473	0.16	1050	0.044
573	0.16	1050	0.053
673	0.16	1050	0.064
773	0.16	1050	0.081
873	0.16	1050	0.098
973	0.16	1050	0.120
1073	0.16	1050	0.145
1173	0.16	1050	0.173

(注)メーカー公表値を補完して採用。

(ロ)B 付 2-第 6 表 熱解析に使用する材料の熱的性質

部品名	材料名	温度 (K)	密度 (g/cm ³)	比熱 (J/kg·K)	熱伝導率 (W/m·K)
外容器 内容器	ステンレス鋼 ⁽¹⁾	300	7.92	449	16.0
		400	7.89	511	16.5
		600	7.81	556	19.0
		800	7.73	620	22.5
		1000	7.64	644	25.7
ゴム類	耐火ゴム ⁽²⁾	300	0.86	2200	0.36
	シリコンゴム	293	0.97	1600	0.20
		400	0.97	1500	0.19
	ネオプレンゴム	293	1.23	2200	0.25
		400	1.23	2200	0.23

(1) 伝熱工学資料 改訂第 4 版 1986 年

(2) 主成分であるエチレンプロピレンゴムの物性値で代用。

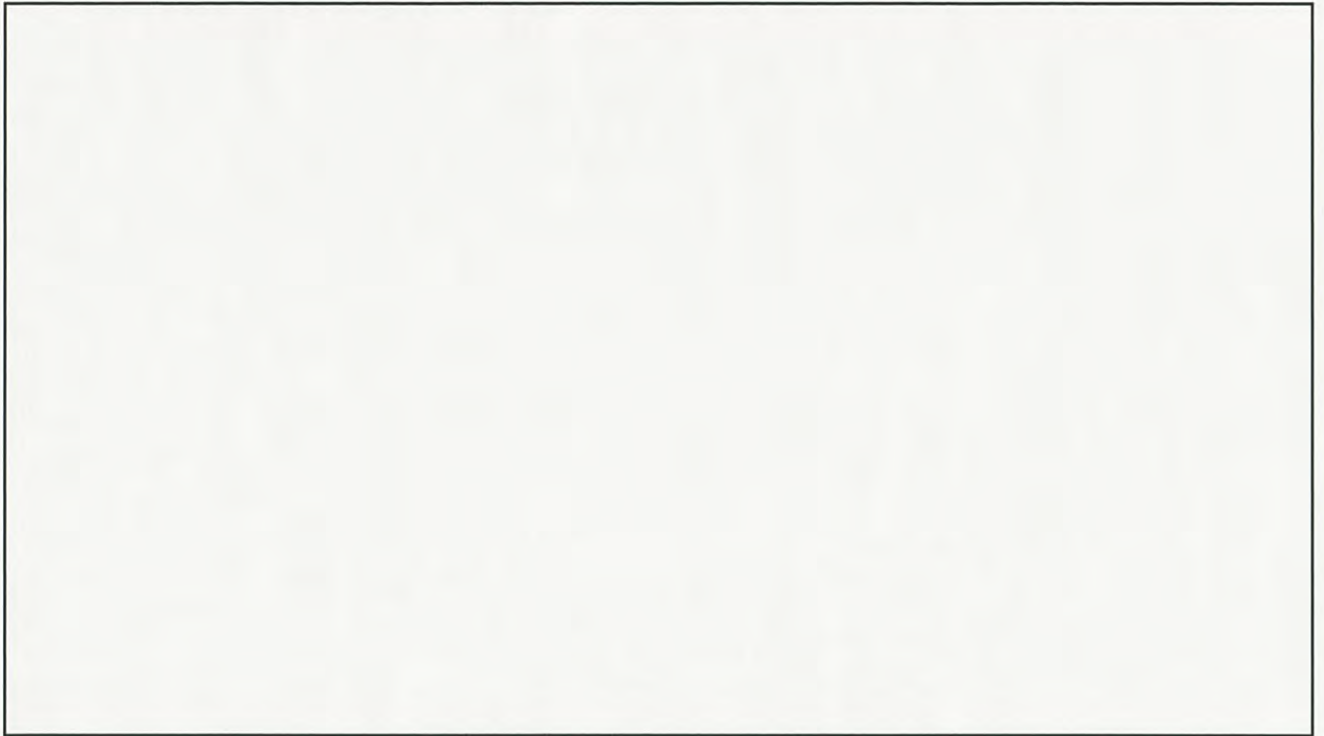
(ロ)B 付 2-第 7 表 熱伝達係数

温度 (K)	熱伝達係数 (W/m ² ·K)	温度 (K)	熱伝達係数 (W/m ² ·K)

6. 合わせ込み結果

合わせ込み解析の結果を(ロ)B付2-第15図に示す。耐火試験終了時と内容器フランジ部の最高温度到達時のコンター図を(ロ)B付2-第16図～(ロ)B付2-第19図に示す。

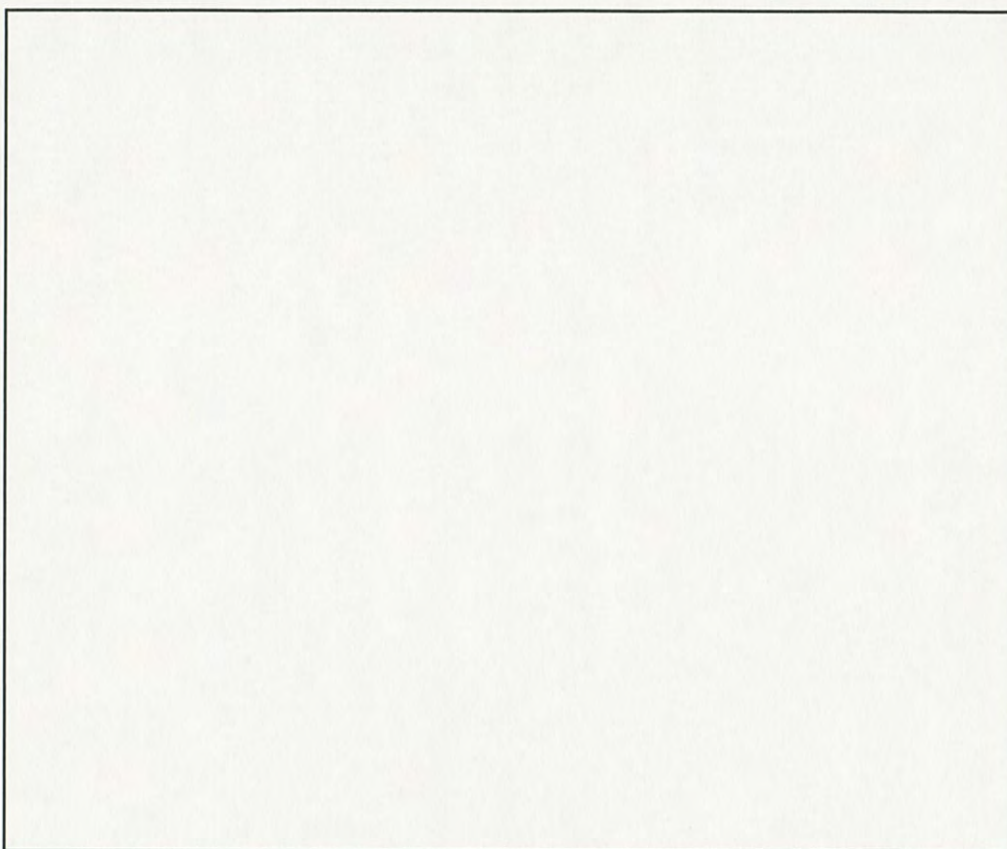
解析では、耐火試験で温度測定を実施した外容器フランジ部及び内容器のフランジ部と対応するポイントについて評価している。耐火試験結果の(ロ)B付2-第3図と比較して、温度変化の傾向がよく一致したものとなっている。試験結果と解析結果の各部位の最高温度を比較すると、内容器のフランジ部で約□%～□%、外容器フランジ部で約□%～□%程度保守的な解析結果を得ることができた。最高温度の比較結果を(ロ)B付2-第8表に示す。外容器フランジの解析結果と試験結果のバラツキが内容器より大きいのが、本解析では内容器について着目するため、試験結果に対して保守性を維持しながら整合がとれた解析モデルが確立できたとして、一般の試験条件及び特別の試験条件における熱解析を実施することとした。



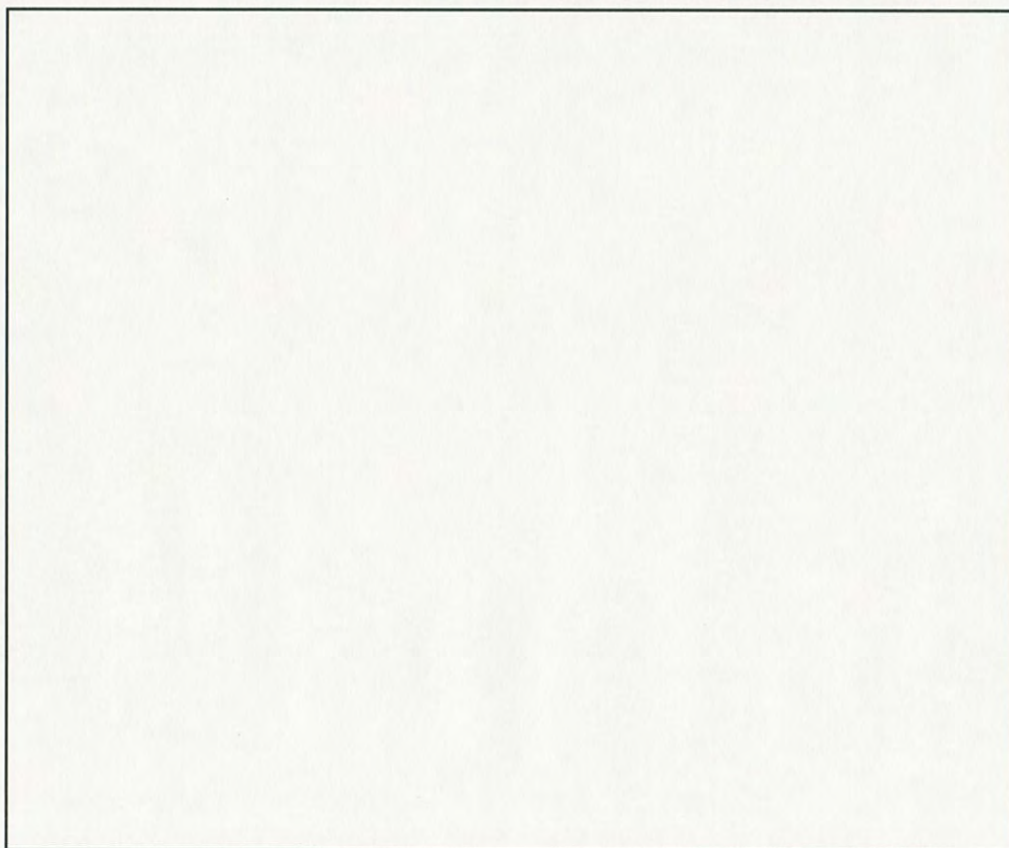
(ロ)B付2-第15図 合わせ込み解析結果

(ロ)B付2-第8表 耐火試験結果と解析結果の最高温度比較

	内容器フランジ			外容器フランジ		
	幅狭側	コーナー	幅広側	幅狭側	コーナー	幅広側
試験結果						
解析結果						
増加率						



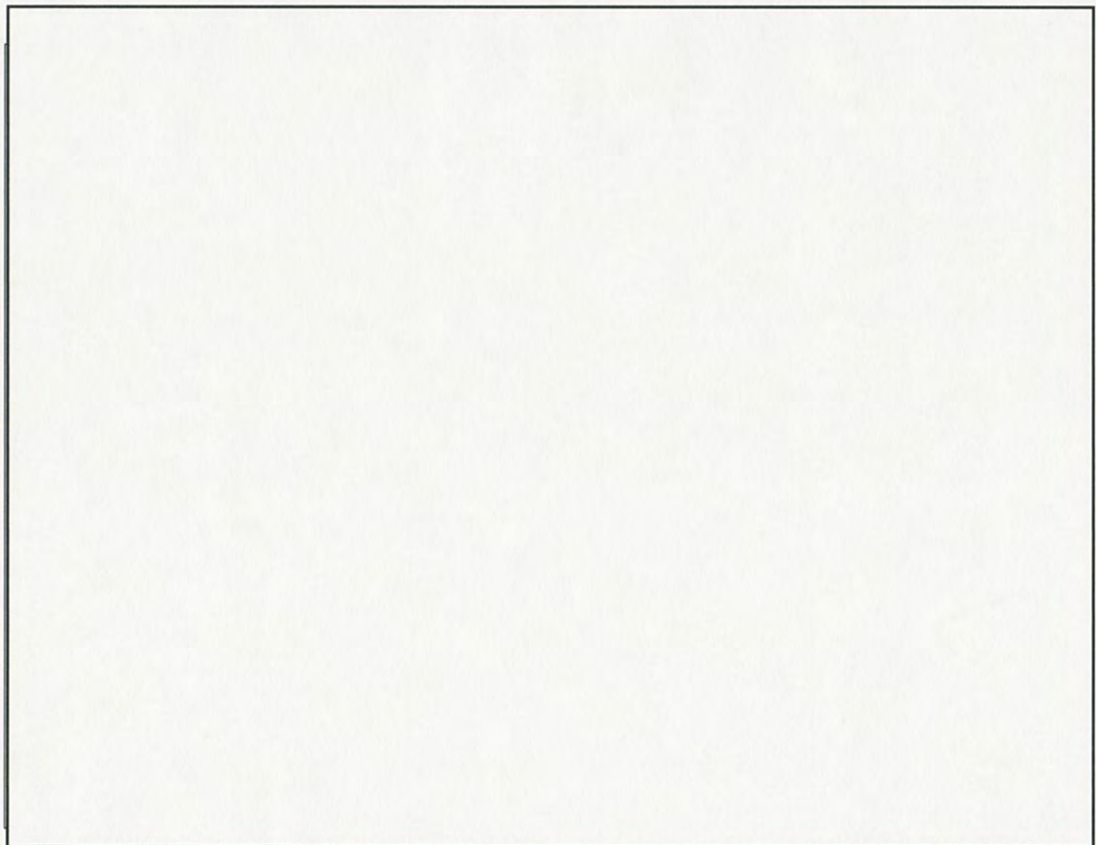
(ロ)B-第 16 図 容器全体の温度分布(耐火試験終了時、単位[K])



(ロ)B-第 17 図 O リング付近のゴムの温度分布(耐火試験終了時、単位[K])



(ロ)B-第 18 図 容器全体の温度分布(O リング最高温度到達時、単位[K])



(ロ)B-第 19 図 O リング付近のゴムの温度分布(O リング最高温度到達時、単位[K])

(ロ)-C 密封解析

C.1 概要

本輸送容器は、外容器と外容器から取出し可能な内容容器から構成され、内容容器には収納物であるペレット保管箱組立体2基を収納する。外容器の主要な機能は、内包する内容容器の保護であり、内容容器は本輸送物の密封境界となっている。

収納物であるペレット保管箱組立体を垂直に装荷又は取出しするために、密封境界である内容容器の上面側が蓋となっており、ロッドボルトで内容容器本体と蓋を連結固定する構造となっている。フランジ部には密閉用のシリコンゴム製Oリングを配置しており、内容容器の本体、蓋とともに密封境界を形成する。

本輸送物の収納物は、ウラン酸化物(ペレット)又はガドリニア入りウラン酸化物(ペレット)を収納したステンレス鋼製のペレット保管箱を支柱に通した仕切板と交互に積重ね、支柱頂部のネジ部をナットで締付けて組立てたペレット保管箱組立体である。ペレットは、酸化ウラン粉末をプレス成型後、1000℃以上で焼結してセラミックとした非散逸性の固体である。本輸送物には液体状又は気体状の核燃料物質等は収納しない。

本輸送物の密封境界は内容容器であるが、収納物であるペレット保管箱組立体にはペレットが漏出可能な隙間はなく、また組立体も非常に堅牢な構造となっている。

(1) 一般の試験条件

本輸送物はA型輸送物であるため、規則第五条第九号イにもとづき一般の試験条件下において、放射性物質の漏出が無いことを説明する。

(2) 特別の試験条件

本輸送物はB型輸送物に該当しないため、特別の試験条件下における密封性は要求されないが、特別の試験条件下において密封境界である内容容器内に放射性物質が封じ込められることを説明する。

C.2 密封装置

C.2.1 密封装置

密封装置である内容容器は、内容容器蓋と内容容器本体で構成される。内容容器蓋は板厚□mmの1枚のステンレス鋼製板であり、内容容器本体は板厚□~□mmのステンレス鋼製板を箱型に溶接したもので、上部に厚さ□mmのステンレス鋼製棒材を加工・溶接してフランジを形成する。密封境界を形成する接合部は全て連続溶接となっている。

また、内容容器蓋と内容容器本体の境界面には、直径□mmのシリコンゴム製のOリングを接触面が平滑な内容容器蓋を介してロッドボルトで締付けることにより、密封性を保持する構造としている。

製作時には、水深1m以上もしくは同等以上の水圧下に1時間以上置いて、内部に浸水しないことを確認する。

C.2.2 密封装置の貫通部

密封装置である内容器は、収納物であるペレット保管箱組立体を収納するために、上面の全面が蓋となっており、16本のロッドボルトで蓋を締付けることで密封境界を形成する。本輸送物には液体又は気体を収納しないことから、弁又はバルブ等はなく、貫通部に該当するものはない。

C.2.3 密封装置のガスケット及び溶接部

内容器フランジ部の O リングの材質であるシリコンゴムは -50°C までの耐寒性及び 180°C までの耐熱性を有しており、環境温度 $-40^{\circ}\text{C}\sim 38^{\circ}\text{C}$ の間で著しい劣化が生じることはない。また、内容器は、ステンレス鋼製板を連続溶接したものであり、環境温度 $-40^{\circ}\text{C}\sim 38^{\circ}\text{C}$ で密封性に影響を受けるような変形等は生じない。

収納物の装荷は常温常圧で行われるため、内容器内部に大きな内外圧力差は生じないことから、O リングや溶接部が影響を受けることはない。

C.2.4 蓋

内容器蓋は、板厚 \square mm のステンレス鋼製板 1 枚より成型されており、周囲 16 本のロッドボルトで内容器本体と連結することで、密封境界を形成する。

一般の試験条件下においては、ロッドボルトによって内容器蓋と本体の連結が維持されることで密封性が保たれる。

本輸送物は A 型核分裂性輸送物であるため、特別の試験条件下における密封性は要件に該当しないが、ロッドボルトによって内容器蓋と本体の連結が維持されることで、収納物であるペレット保管箱組立体を内容器内部に封じ込める。

C.3 一般の試験条件

「A.5.7 結果の要約及びその評価」に示したように、一般の試験条件について評価した結果、以下に示すように内容器の密封性は維持されるため、放射性物質の漏出はない。

(1) 熱的試験

本輸送物は A 型核分裂性輸送物であるため熱的試験は本来該当しないが、「B.4.6 結果の要約及びその評価」に示すように、O リングの最高温度は 68°C となり、常用上限温度の $\square^{\circ}\text{C}$ を下回るものであり劣化は生じない。また、内容器内平均温度は 59°C であり、「A.5.1.3 応力計算」に示すように、温度上昇により内圧が上昇しても内容器の各部材の健全性は保たれることから、熱的試験による密封性への影響はない。

(2) 水噴霧

「A.5.2 水噴霧」に示すように、主要構造材はステンレス鋼製であるため材料劣化はなく、また、水の浸透及び内部への浸水は発生しない構造となっていることから、水噴霧による密封性への影響はない。

(3) 自由落下

「A5.3.1 原型試験」に示すように、自由落下では外容器に局所的な変形を及ぼすが「A5.3.2 密封境界の健全性」に示すように密封境界の健全性が維持されることから、自由落下による密封境界への健全性に影響はない。

(4) 積み重ね試験

「A.5.4 積み重ね試験」に示すように、積み重ね試験では、輸送物に発生する応力は許容応力の基準値を十分下回っており輸送容器が変形することはない。また、内容物は積み重ね時の荷重を受けないことから、密封性に影響はない。

(5) 貫通試験

「A.5.5 貫通」に示すように貫通試験では、貫通試験用鋼棒は外容器外板を貫通しない。

C.3.1 放射性物質の漏えい

原型容器試験及び構造解析の結果から、一般の試験条件下においても内容物の密封性が維持されていることを確認しており、放射性物質の漏出はない。

C.3.2 密封装置の加圧

内容物の温度は太陽ふく射熱を考慮したとしても最高 75℃であり、この温度では内容物内のゴム類やステンレス鋼製部材から気体が発生することはない。また、ウラン酸化物（ペレット）又はガドリニア入りウラン酸化物（ペレット）からの気体放出もないため、密封装置の加圧は内容物中の空気の温度上昇による内圧増加のみである。温度上昇による内圧増加による影響は「A.5.1.3 応力計算」に示したように内容物の健全性に影響を与えない。

C.3.3 冷却材汚染

冷却材を使用していないため、冷却材汚染はない。

C.3.4 冷却材損失

冷却材を使用していないため、冷却材損失はない。

C.4 特別の試験条件

本輸送物は A 型核分裂性輸送物であり、特別の試験条件下における密封性は要求されないが、特別の試験条件下において、収納物は漏出することなく内容物に保持される。以下に特別の試験条件下における結果について要約する。

(1) 落下試験 I

「A.9.2.1.5 原型試験結果の要約」に示したように、外容器には内部に通じる亀裂、破損及び貫通孔等はなく、外容器蓋も所定の位置から動くことはなかった。またフランジ部も内容物が露出するような開口は無い。

内容器本体及び蓋は変形し、締付け用ロッドボルトも一部変形したが、破断や外れたものではなく、蓋は所定の位置から動くことはなかった。

収納物であるペレット保管箱組立体は内容器内に留まり、ペレット保管箱の初期位置からずれはなく、ペレット保管箱からのウラン酸化物（ペレット）又はガドリニア入りウラン酸化物（ペレット）の漏出はない。

原型試験では、合計 5 回の落下試験 I を同一の原型容器に対して実施するという極めて過酷な条件であったにも係わらず、収納物は内容器内部に保持されることから、十分な保守性をもって内容器の収納物保持機能性が維持されることが説明される。

(2) 落下試験 II

「A.9.2.2.1 落下試験 II の結果の要約」に示したように、外容器外表面に凹みが生じたが、貫通や外表面の亀裂、開口は生じなかった。外容器内部には本試験の影響による変形や損傷はなく、内容器及び収納物に与える影響はない。

(3) 熱的試験

「B.5.6 結果の要約及びその評価」に示したように、輸送物に著しい劣化は無く、溶解や燃焼もしくは劣化等による変形はない。また、収納物の移動や輸送物外への漏出は生じない。

内容器フランジ部の O リングは約 170°C となるが、常用上限温度が °C 以下であり問題ない。内容器内部は保守的に 170°C に到達したとしても、核燃料物質の移動や放出は生じない。

(4) 浸漬

臨界解析において内容器内部への水の浸入を考慮に入れているため、告示に基づく 0.9 m の水頭下の浸漬試験は実施していないが、浸水したとしても、収納する核燃料物質であるウラン酸化物（ペレット）又はガドリニア入りウラン酸化物（ペレット）は不溶性かつ非散逸性であるため、内容器内部に浸入した水が内容器外へ漏出したとしても、核燃料物質は水に溶けないため、容器外に放出されることはない。

C.4.1 核分裂生成ガス

収納物は未照射のウラン酸化物（ペレット）又はガドリニア入りウラン酸化物（ペレット）であり、核分裂生成ガスの発生はない。

C.4.2 放射性物質の漏えい

特別の試験条件後においても収納物は内容器内に封じ込められる。

C.5 結果の要約及びその評価

一般の試験条件下における輸送物の密封性について評価した。この結果、密封境界である内容物の密封境界の健全性が維持されることを確認した。

参考のため、特別の試験条件下における輸送物の密封性について評価した。この結果、密封境界である内容物は健全であり、臨界に影響を及ぼすような著しい漏えいはないことが確認できた。

このことから、臨界解析では収納物が常に内容物内にとどまるものとして解析を行う。ただし、保守的な仮定として、内容物内には水が浸入するものとして解析を行う。

(ロ)D 遮蔽解析

D.1 概 要

本輸送容器に収納する核燃料物質は、未照射の濃縮度 5 wt%以下のウラン酸化物（ペレット）又はガドリニア入りウラン酸化物（ペレット）であり、その線源強度は低いため遮蔽を目的とした構成部材や装置は設けていない。

本輸送物からの放射線量のほとんどは、ウラン及びその娘核種がアルファ崩壊またはベータ崩壊する際に放出するガンマ線によるものである。

本輸送物の遮蔽解析にあたり、線源は保守的に線源強度が最も高くなる濃縮度 5 wt%のウラン酸化物（ペレット）を最大量 264 kg 収納するものとした。通常輸送時及び一般の試験条件下の輸送物の線量当量率は、以下のような条件で点減衰核積分プログラム QAD-CGGP2R コードを用いて求めた。本コードは国際放射線防護委員会（ICRP）の 1990 年報告（Publication. 74）の取り入れにより国内法令で採用された実効線量当量の計算が可能となっている。

- ① 解析モデルは、ウラン酸化物 264 kg が内容器内に均質に存在するものとした。
- ② 解析モデルには、輸送容器の外容器及び内容器の主要構成部材であるステンレス鋼製板を考慮している。
- ③ 一般の試験条件下の解析モデルは、輸送容器の外容器が長さ、幅、高さそれぞれの方向に□mm ずつ縮んだモデルとした。
- ④ 線源領域にはウラン酸化物のみが存在するものとして、保守的にペレット保管箱を含むペレット保管箱組立体及びボロン入りステンレス鋼製板は存在しないものとした。
- ⑤ 線源強度はウランの娘核種を考慮して ORIGEN 2 コードを用いて求めた。

以上のような解析条件のもとで得られた計算結果を(ロ)D-第 1 表に示す。計算の結果、通常輸送時における輸送物表面の最大線量当量率は 2.80×10^{-2} mSv/h であり、また表面から 1 m の位置における最大線量当量率は 2.56 μ Sv/h であるため、基準の線量当量率（表面で 2 mSv/h 以下、表面から 1 m の位置で 100 μ Sv/h 以下）を満足している。

一般の試験条件下においては、輸送物表面の最大線量当量率は 3.26×10^{-2} mSv/h であり、基準の線量当量率（表面で 2 mSv/h 以下）を満足している。なお、一般の試験条件下における線量当量率の増加割合は約 17%である。

(ロ)D-第1表 輸送物の最大線量当量率

	輸送物表面	表面から 1 m の位置
通常輸送時	2.80×10^{-2} mSv/h	2.56 μ Sv/h
基準	≤ 2 mSv/h	≤ 100 μ Sv/h
一般の試験条件下	3.26×10^{-2} mSv/h	—————
基準	≤ 2 mSv/h	—————

D.2 線源仕様

本輸送物の最大収納量はウラン酸化物（ペレット）又はガドリニア入りウラン酸化物（ペレット）264 kg であり内容容器内に収納することから、解析モデルでは線源として内容容器内にウラン酸化物 264 kg が均質に収納されるものとした。

D.2.1 ガンマ線源

収納物は濃縮度が 5 wt%以下の未照射濃縮ウランで、その主要構成核種は ^{232}U 、 ^{234}U 、 ^{235}U 、 ^{236}U 、 ^{238}U 及び ^{99}Tc である。線源仕様の詳細を以下に示す。

(1) 収納物に含まれる放射性物質

本収納物では、放射性物質として ^{232}U 、 ^{234}U 、 ^{235}U 、 ^{236}U 、 ^{238}U 及び ^{99}Tc の合計 6 核種を考慮した。組成は ^{232}U 1.0×10^{-8} wt%、 ^{234}U 5.0×10^{-2} wt%、 ^{235}U 5.0 wt%、 ^{236}U 2.5×10^{-2} wt%、 ^{99}Tc 1.0×10^{-6} wt%、残りはすべて ^{238}U とした。

(2) 線源強度

「D.2.1(1)」に示した放射性物質について ORIGEN 2 コードを用いて、を考慮し ガンマ線源スペクトル及び放射エネルギーを求めた。(ロ)D-第 2 表にガンマ線源スペクトルの計算結果を、(ロ)D-第 3 表に放射エネルギーの計算結果を示す。

(ORIGEN 2 コードについては(ロ)D 付属資料 1 を参照のこと。)

D.2.2 中性子源

該当せず。

(ロ)D-第2表 ガンマ線源スペクトルの計算結果 (ウラン酸化物 264 kg あたり)

平均γ線エネルギー (MeV)	線源スペクトル (Photons/s)
0.01	6.376×10^9
0.025	4.440×10^8
0.0375	1.999×10^8
0.0575	4.417×10^8
0.085	5.190×10^8
0.125	2.837×10^8
0.225	6.788×10^8
0.375	7.184×10^7
0.575	4.431×10^7
0.85	2.760×10^7
1.25	1.758×10^7
1.75	3.249×10^6
2.25	1.235×10^3
2.75	5.706×10^6
3.5	4.031×10^2
5	1.719×10^2
7	1.973×10^1
9.5	2.264×10^0

(ロ)D-第3表 放射エネルギーの計算結果 (ウラン酸化物 264 kg あたり)

	^{232}U	^{234}U	^{235}U	^{236}U	^{238}U	^{99}Tc	合計
放射エネルギー (Bq)	1.34×10^8	2.70×10^{10}	1.87×10^9	1.40×10^8	8.26×10^9	1.46×10^6	3.75×10^{10}

D.3 モデル仕様

D.3.1 解析モデル

D.3.1.1 通常輸送時

解析モデルを(ロ)D-第1図に示す。

本輸送容器は箱型の外容器と内容器から構成され、内容器内にウラン酸化物（ペレット）又はガドリニア入りウラン酸化物（ペレット）を収納したペレット保管容器を段積みして組立てたペレット保管箱組立体及びボロン入りステンレス鋼製板を収納する構造となっている。外容器にはセラミックファイバー製断熱材が充填されており、外容器と内容器の間には緩衝材であるアルミハニカムを配置している。

解析モデルでは、主要構成部材である外容器及び内容器のステンレス鋼製板をモデル化しており、それぞれの外殻寸法は外容器が長さ mm、幅 mm、高さ mm、内容器が長さ mm、幅 mm、高さ mm の直方体としている。なお、断熱材及び緩衝材等の構成部品は無視している。

線源領域は 264 kg のウラン酸化物が内容器内に均質に存在するものとしてモデル化している。なお、内容器に収納するペレット保管箱組立体等の構成部材であるステンレス鋼製材及びボロン入りステンレス鋼製板は無視している。

評価地点は、輸送物の表面及び表面から 1 m の位置とした。

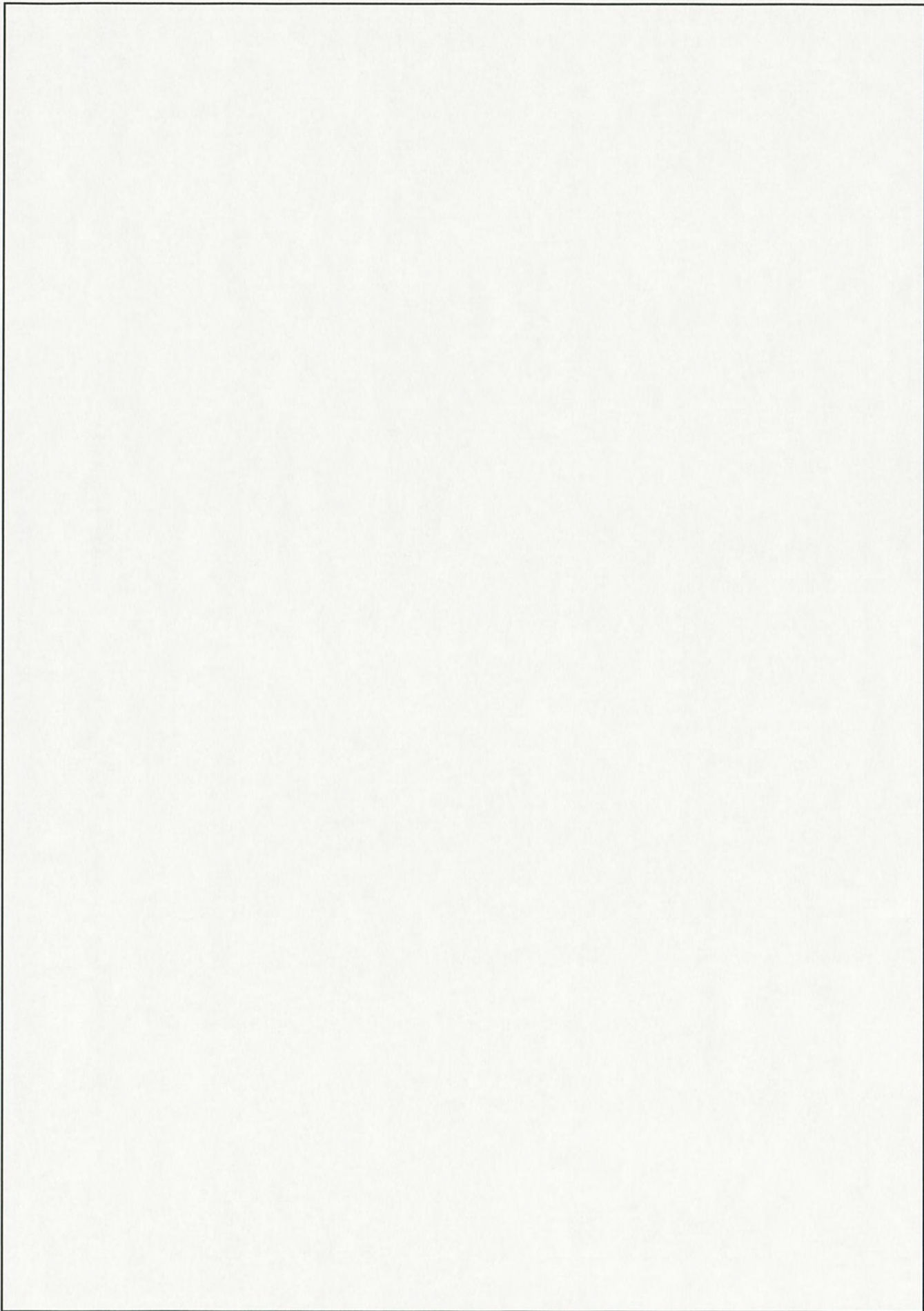
D.3.1.2 一般の試験条件下

解析モデルを(ロ)D-第2図に示す。

一般の試験条件下において、「A.5.7」に記述したように輸送容器に著しい変形は無く、 mm を超える変形量は認められなかった。なお、コーナー落下による変形は、局部的かつ最大線量当量率位置を包含しないことから無視した。

上記のことから、通常輸送時の解析モデルに対して、輸送容器の変形量を保守的に外容器の外板のみ長さ、幅、高さの各方向に mm 圧縮変形するものとしてモデル化している。

また、線源領域は、緩衝材が完全に圧縮されたと保守的に仮定し、線源領域を内包する内容器を外容器の内板表面に密着するように移動させており、線源領域が輸送物表面に近くなることから保守的なモデルとしている。



(ロ)D-第2図 一般の試験条件下の遮蔽解析モデル
(ロ)D-7

D.3.2 解析モデル各領域における原子個数密度

遮蔽解析モデルにおける領域は、線源及び輸送容器本体に分けられる。各領域の密度、組成、原子個数密度及び体積比を(ロ)D-第4表に示す。

線源及び輸送容器本体以外の領域はすべて空気として計算した。

(ロ)D-第4表 各領域の密度、組成、原子個数密度及び体積比

領域	密度 (g/cm ³)	組成	原子個数密度 (atoms/barn·cm)	体積比
線源 (ウラン酸化物)	1.41	U	3.15×10^{-3}	1.0
		O	6.30×10^{-3}	
輸送容器本体 (ステンレス鋼)	7.90* ¹	Fe	5.66×10^{-2}	1.0
		Cr	1.83×10^{-2}	
		Ni	8.51×10^{-3}	
		Si	1.69×10^{-3}	
		Mn	1.73×10^{-3}	

* 1 JIS G 4305 に示される SUS304 の密度(7.93 g/cm³)を元に保守的に設定

D.4 遮蔽評価

D.4.1 評価方法

(ロ)D-第 1 図及び第 2 図に示した遮蔽計算モデルについて QAD-CGGP2R コードを用いて遮蔽解析を行った。

QAD コードは点減衰核積分プログラムであり、減衰係数、再生係数等のデータは、ライブラリとしてコードに内蔵されている。本コードでは ICRP1990 年勧告 (Publication. 74) を採用した日本国内法令に定められた実効線量当量を求めるために、空気の吸収線量への変換係数と、空気の吸収線量から線量当量率への換算を容易且つ合理的に行うための補正係数が導入されている。

(QAD-CGGP2R コードについては(ロ)D 付属資料 2 を参照のこと。)

D.4.2 評価結果

本輸送容器に濃縮度が 5 wt% の未照射濃縮ウランのウラン酸化物 264 kg を収納した場合の評価結果を(ロ)D-第 5 表に示す。その結果、通常輸送時及び一般の試験条件下における輸送物表面の最大値は共に底面で与えられた。また、通常輸送時の表面から 1 m の位置における最大値は側面で与えられた。

なお、各評価値は最大値を与える評価地点を予めサーベイして決定している。

(最大線量当量率を与える評価地点の検討結果については(ロ)D 付属資料 3 を参照のこと。)

(ロ)D-第 5 表 遮蔽解析結果

輸送物の 評価面	通常輸送時		一般の試験条件下
	輸送物表面	表面から 1 m の位置	輸送物表面
底面	2.80×10^{-2} mSv/h	2.37 μ Sv/h	3.26×10^{-2} mSv/h
側面	2.51×10^{-2} mSv/h	2.56 μ Sv/h	3.19×10^{-2} mSv/h

このように通常輸送時及び一般の試験条件下における輸送物表面と輸送物表面から 1 m の点における最大線量当量率は、いずれの値も基準値を満足している。また、通常輸送時と一般の試験条件下における輸送物表面での線量当量率の増加割合は約 17%であった。

D.5 結果の要約及びその評価

本輸送物の通常輸送時及び一般の試験条件下における遮蔽解析を実施した。

この結果、(ロ)D-第 1 表に示すように、各条件における最大線量当量率は法令に規定されている値を超えることはなく、本輸送容器は十分な遮蔽性能を有している。

参考文献

- International Commission on Radiological Protection, "Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation: ICRP Publication 74" (1996).
- Y.Sakamoto, S.Tanaka, "QAD-CGGP2 AND G33-GP2 : REVISED VERSIONS OF QAD-CGGP AND G33-GP" ,JAERI-M 90-110 (1990).
- S.B.Ludwig, A.G.Croff, "Revision to ORIGEN2-Version 2.2," Transmittal memo of CCC-0371/17, Oak Ridge National Laboratory (2002).

ORIGEN 2 コードの概要

ORIGEN コードは米国オークリッジ国立研究所で 1973 年に開発されたコードで、原子炉の運転履歴に従って核分裂生成物(FP)、アクチナイド、構造材の組成、放射能強度、発熱量等を計算するためのコードである。

一般に核種の生成崩壊過程は次式によって記述される。

$$dX_i/dt = \sum_{j=1}^N l_{ij} \lambda_j X_j + \phi \sum_{k=1}^N f_{ik} \sigma_k X_k - (\lambda_i + \phi \sigma_i) X_i \quad \text{—————} \quad \text{①}$$

(i = 1, \dots, N)

X_i : 核種 i の個数(原子密度)

N : 核種の数

l_{ij} : 核種 j が崩壊して核種 i を生成する割合

λ_j : 核種 j の崩壊定数

X_j : 崩壊して核種 j を生成する核種 j の個数

ϕ : 位置及びエネルギーについて平均化した中性子束

f_{ik} : 核種 k が中性子を吸収して核種 i を生成する割合

σ_k : スペクトルについて平均化した核種 k の中性子吸収断面積

X_k : 核種 k の個数

λ_i : 核種 i の崩壊定数

σ_i : 核種 i の中性子吸収断面積

①式において、短い時間区分内では核種の原子数密度 X の変化にかかわらず ϕ が一定であると仮定すると、この方程式は連立一次常微分方程式をとり、次式のように書ける。

$$\dot{\underline{X}} = \underline{A} \underline{X} \quad \text{—————} \quad \text{②}$$

②式において、 \underline{X} は X_i を成分に持つベクトルであり \underline{A} は定数マトリックスである。

②式は

$$\underline{X}(t) = \exp(\underline{A} t) \underline{X}(0) \quad \text{—————} \quad \text{③}$$

と解くことができる。ただし $\exp(\underline{A} t)$ は

$$\exp(\underline{A} t) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(\underline{A} t)^m}{m!} \quad \text{—————} \quad \text{④}$$

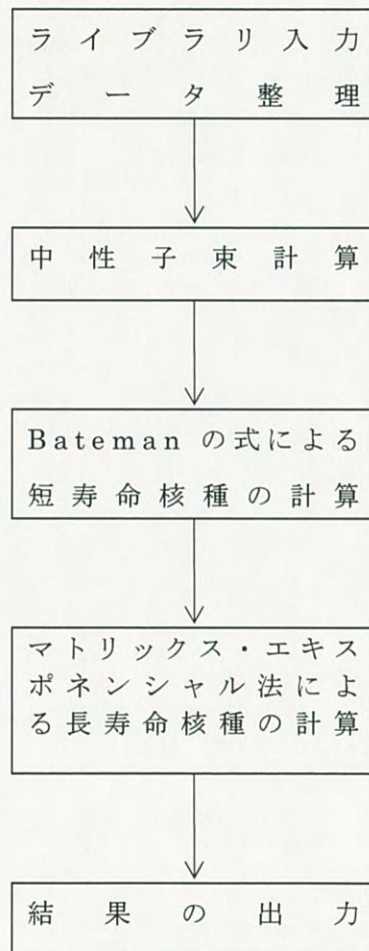
と定義する。このような解法はマトリックス・エクスポネンシャル法と呼ばれ、④式の右辺を数値的に求めれば、初期条件 $X(0)$ が与えられているから③式により時刻 t における原子数密度 X が求められる。なお、短寿命の核種については①式の解析解である Bateman の式を併用して解を求める。

ORIGEN コードには以下のバージョンがある。

- ORIGEN-73 (original)
- ORIGEN-79 (ORIGEN-73 のライブラリ変更)
- ORIGEN2 (ORIGEN-79 の計算手法改良)
- ORIGEN2-82 (ORIGEN2 のライブラリ変更)
- ORIGEN2-86 (ORIGEN2-82 のライブラリ変更)
- ORIGEN2.1 (ORIGEN2-86 にライブラリ追加)
- ORIGEN2.2 (ORIGEN2.1 の不具合修正)

本解析では、ORIGEN2.2 を使用した。

ORIGEN コードの概略フローチャートを以下に示す。



ORIGEN コードのフローチャート

QAD-CGGP2R コードの概要

1 概要

QAD-CGGP2R コードは、米国ロスアラモス国立研究所 LANL (Los Alamos National Laboratory) で開発された三次元点減衰核積分法計算コード QAD-CG を、日本原子力研究所が改良したコード QAD-CGGP2 コードをもとに、実効線量を計算できるようさらに改良したコードである。この実効線量は、平成 12 年 10 月 23 日に公布された ICRP1990 年勧告の取り入れ等による放射線障害防止法関係法令の改正により、平成 13 年 4 月 1 日以降遮蔽計算で評価すべき線量となった。

QAD の解法は、一般に点減衰核法と呼ばれるもので体積線源を幾つかの微小体積に分割し、これから計算点までのガンマ線の減衰を物質による指数減衰および距離の逆二乗減衰により計算する。直接線以外の散乱線の寄与は、ビルドアップ係数により近似される。線源全体から計算点における寄与 (線束、線量率等) は、各微小体積の合計により求めるものである。

2 特長

点減衰核法では、散乱線はビルドアップ係数を用いて考慮されるが、エネルギースペクトル変化およびガンマ線の角度分布は考慮できない。QAD-CGGP2R コードは三次元形状の入力が比較的容易であること、ビルドアップ係数計算方法が幾何学的級数方程式 (G-P 法) を用いていること、および ICRP Publication 74 に準拠した線量率が計算できることが主な特長である。

QAD-CGGP2R コードでは線源および遮蔽体形状として三次元の取扱いが可能で、線源形状は円筒形、直方体および球の 3 種類、遮蔽体は直方体、球、円柱、楕円柱、円すい台、楕円体、くさび形、箱および任意の六面体の、9 種類の立体の組み合わせで表現することが可能である。

入力データは、線源のエネルギー・形状・強度・分割数、体系形状・領域の指定、物質の密度、ビルドアップ係数の選択および計算点の位置よりなる。出力情報は、入力データおよび各計算点での線束と空気カーマ率もしくは実効線量・1 cm 線量当量である。

計算に必要な質量吸収係数、照射線量ビルドアップ係数および ICRP Publication 74 および ICRP Publication 51 に対応した線量率算出時に必要な実効換算係数はコードに内蔵されている。

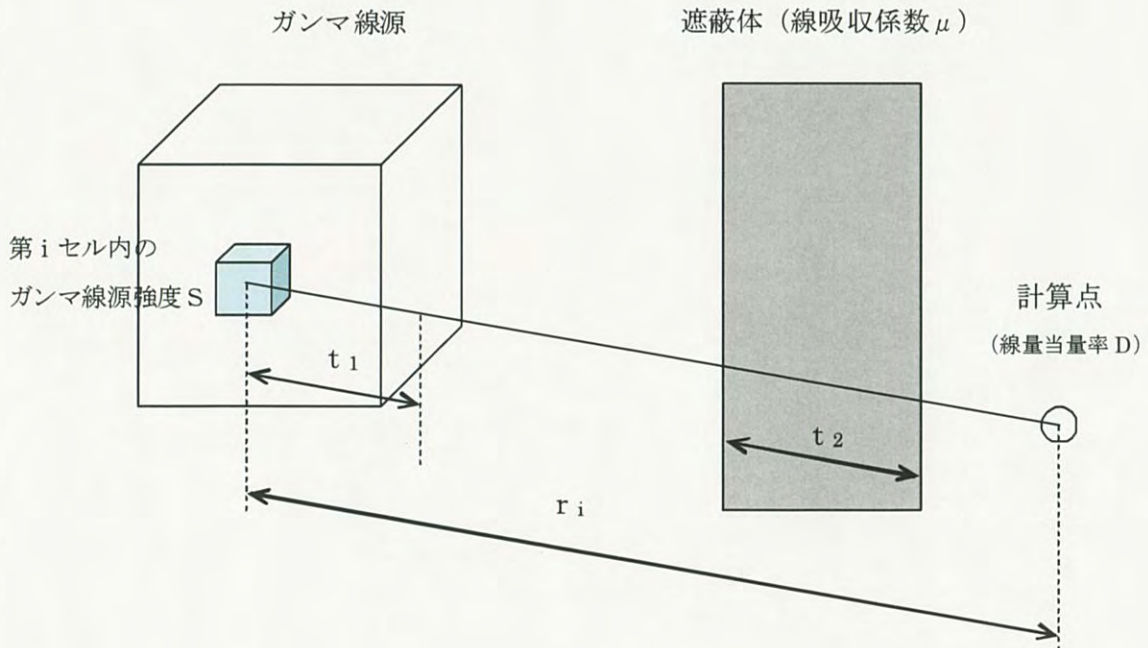
3 計算方法

点減衰核法は有限な広がりをもつ体積線源を体積要素（以下、線源要素と呼ぶ）に分割し、その各々を点状線源とみなして空間積分により計算点での寄与を求めるものである。以下に、計算点における線量当量率（D）の算出式を示す。

$$D = \sum_j K_j \sum_i \frac{B \left(\sum_k \mu_{jk} \cdot t_k, E_j \right) \cdot f_x \left(\sum_k \mu_{jk} \cdot t_k, E_j \right) \cdot S_{0ij} \cdot e^{-\sum_k \mu_{jk} \cdot t_k}}{4\pi r_i^2}$$

ここで、

- i : 線源の各線源要素に対する添字
- j : 線源のエネルギーに対する添字
- k : 空間を分割した後の各領域に対する添字
- K_j : エネルギーjに対する吸収線量率変換係数 (Gy/hr) / (photons/cm²/sec)
- B : 照射線量ビルドアップ係数
- f_x : 実効換算係数
- S_{0ij} : 線源要素iにおけるエネルギーjに対する線源強度 (photons/sec)
- μ_{jk} : エネルギーjにおける領域kに対する線吸収係数 (cm⁻¹)
- E_j : j番目のガンマ線入射エネルギー (MeV)
- t_k : 空間内の領域kに対するガンマ線の通過距離 (cm)
- r_i : 線源要素iから計算点までの距離 (cm)



(ロ)D 付属資料 3

最大線量当量率を与える評価地点の検討

本輸送物の上面、底面、幅狭側面及び幅広側面について、それぞれの面において輸送物表面及び表面から 1 m の位置での最大線量当量率を与える位置のサーベイを行った上で、本輸送物において最大線量当量率を与える評価地点を決定した。

上記の検討の結果、最大線量当量率を与える評価地点として、輸送物表面では底面、表面から 1 m の位置では幅広側面となることを確認した。

以下に検討の内容を示す。

1. 輸送物の各面での線量当量率計算

(1)通常輸送時

サーベイを行った各面の評価地点を(ロ)D 付一第 1 図に示す。

評価地点は線源の中心点から面に直交する位置を通過する 2 方向について線量当量率を計算した。計算結果を(ロ)D 付一第 2～9 図に示す。

上記の計算の結果、全ての面において最大線量当量率を与えるのは、線源の中心点から面に直交する位置となることを確認した。

(ロ)D 付一第 1 表に示す各面の最大線量当量率を比較した結果、本輸送物の最大線量当量率を与える評価地点としては、輸送物表面では底面、表面から 1 m の位置では幅広側面となった。

(2)一般の試験条件下

一般の試験条件下の輸送物においても上記(1)項と同様の計算を行った結果、同じ傾向となった。

(ロ)D 付一第 1 表に示す各面の最大線量当量率を比較した結果、本輸送物の輸送物表面で最大線量当量率を与える評価地点としては底面となった。

(ロ)D 付一第 1 表 輸送物各面における最大線量当量率

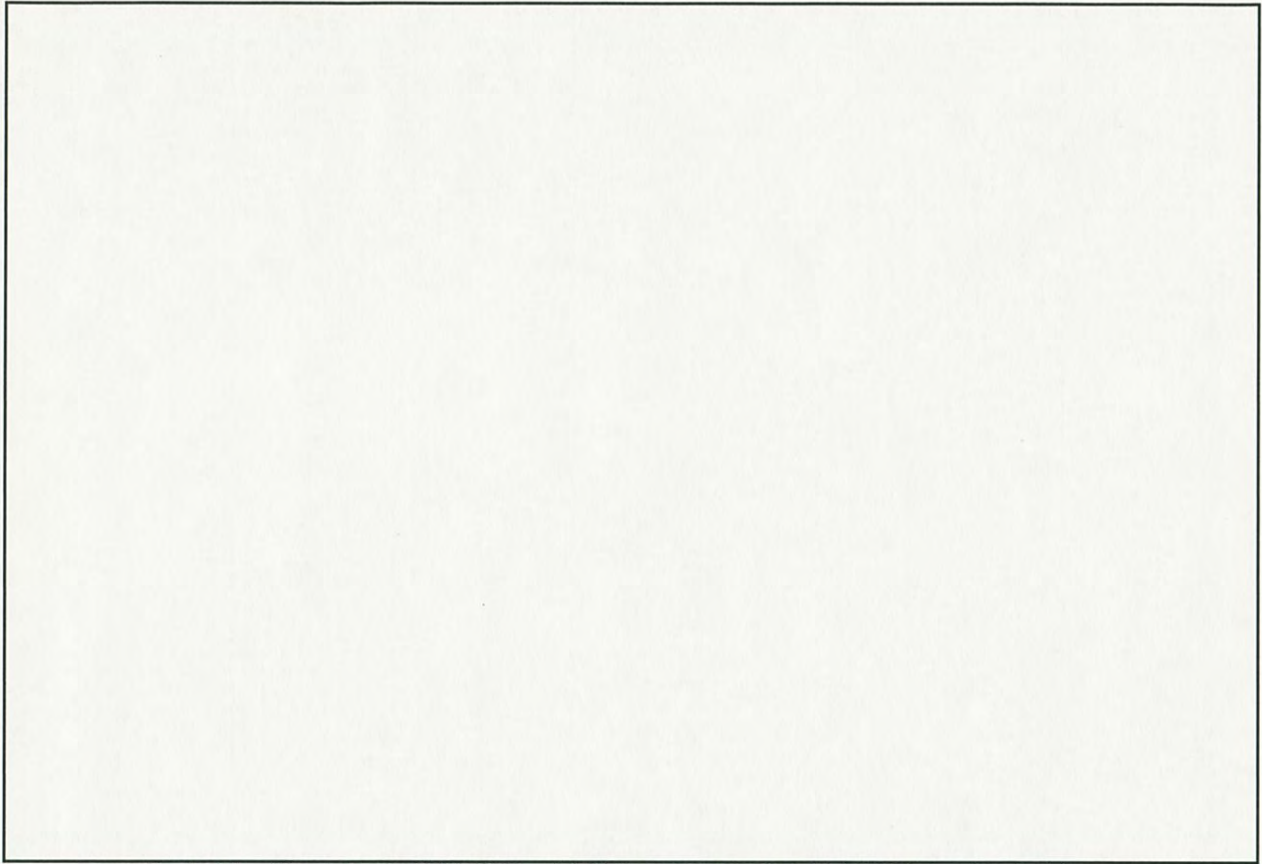
評価面	通常輸送時		一般の試験条件下
	輸送物表面	表面から 1 m の位置	輸送物表面
上面	1.86×10^{-2} mSv/h	1.88 μ Sv/h	1.63×10^{-2} mSv/h
底面	<u>2.80×10^{-2}</u> mSv/h	2.37 μ Sv/h	<u>3.26×10^{-2}</u> mSv/h
幅狭側面	2.15×10^{-2} mSv/h	1.68 μ Sv/h	3.02×10^{-2} mSv/h
幅広側面	2.51×10^{-2} mSv/h	<u>2.56</u> μ Sv/h	3.19×10^{-2} mSv/h

2. まとめ

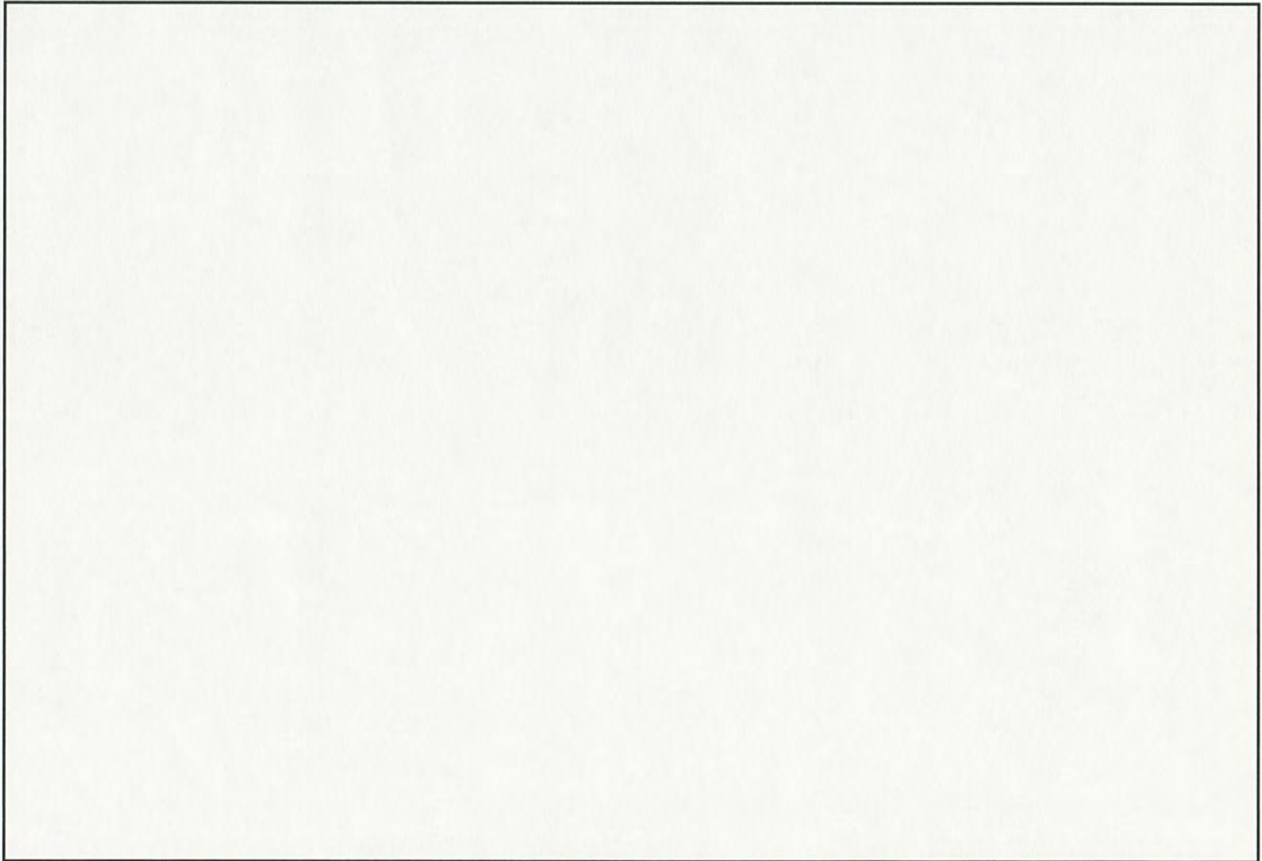
最大線量当量率を与える評価地点としては、通常輸送時における輸送物表面では底面で線量当量率は 2.80×10^{-2} mSv/h となり、表面から 1 m の位置では幅広側面で線量当量率は $2.56 \mu\text{Sv/h}$ となった。また、一般の試験条件下における輸送物表面では底面で線量当量率は 3.26×10^{-2} mSv/h となった。

(ロ)D付一第1図 通常輸送時の遮蔽解析モデルにおける線量当量率サーベイ範囲の概略図

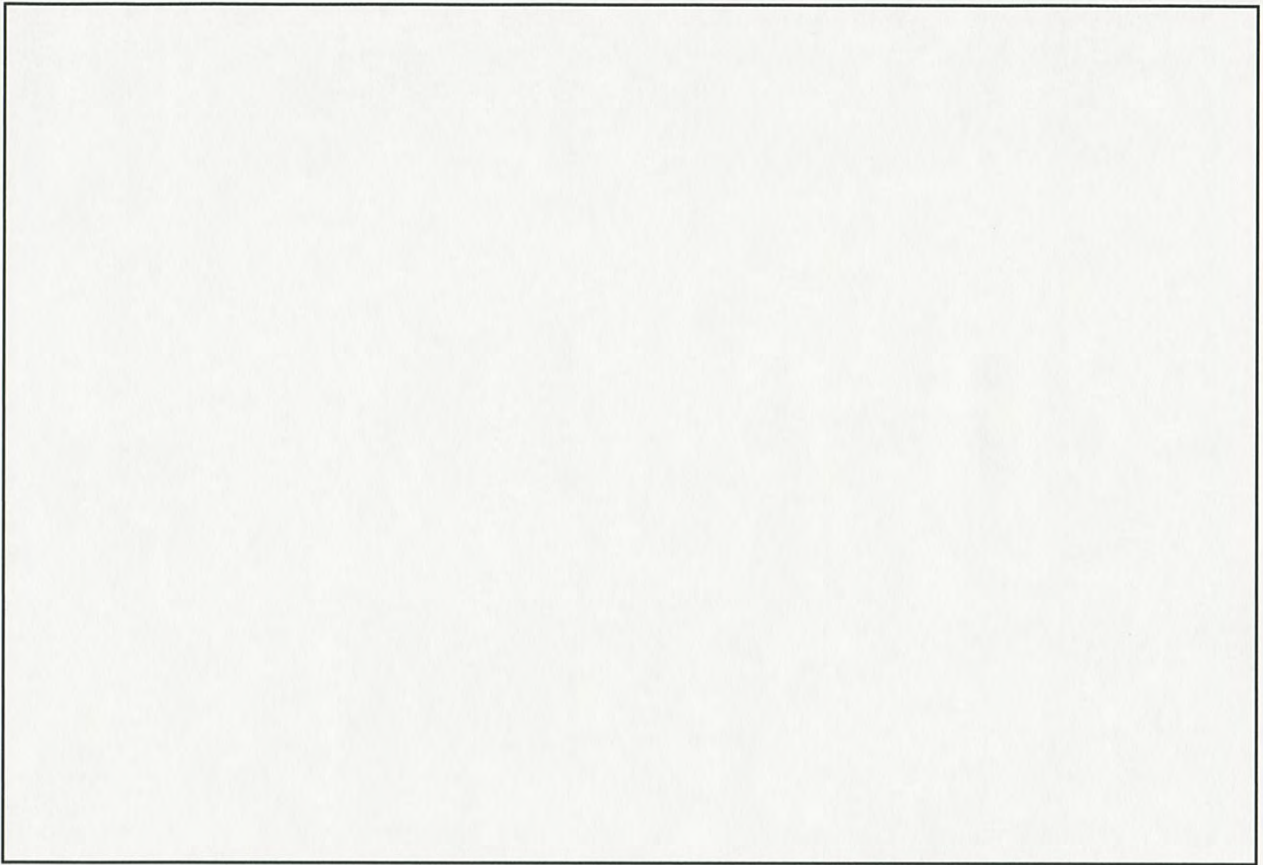




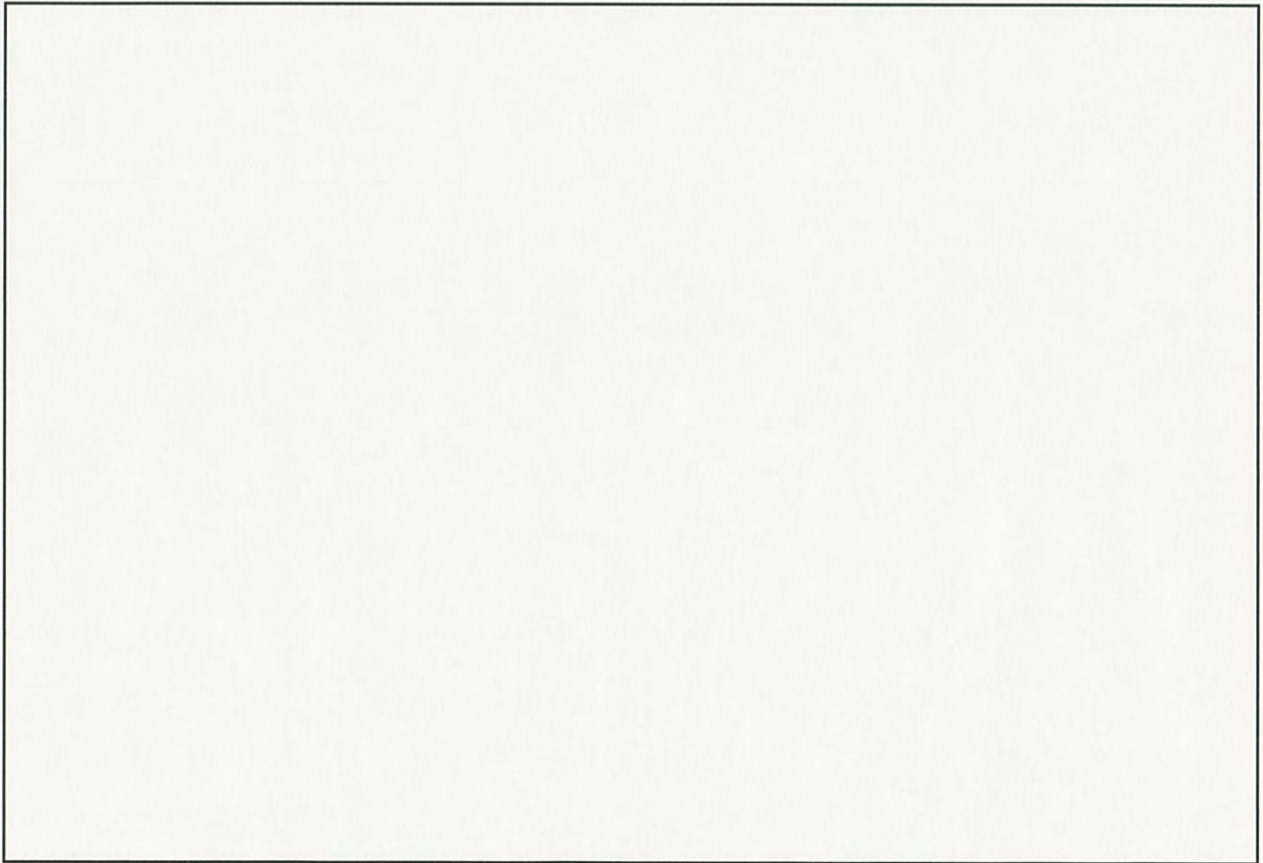
(ロ)D付一第2図 通常輸送時の輸送物上面における線量当量率 (①方向)



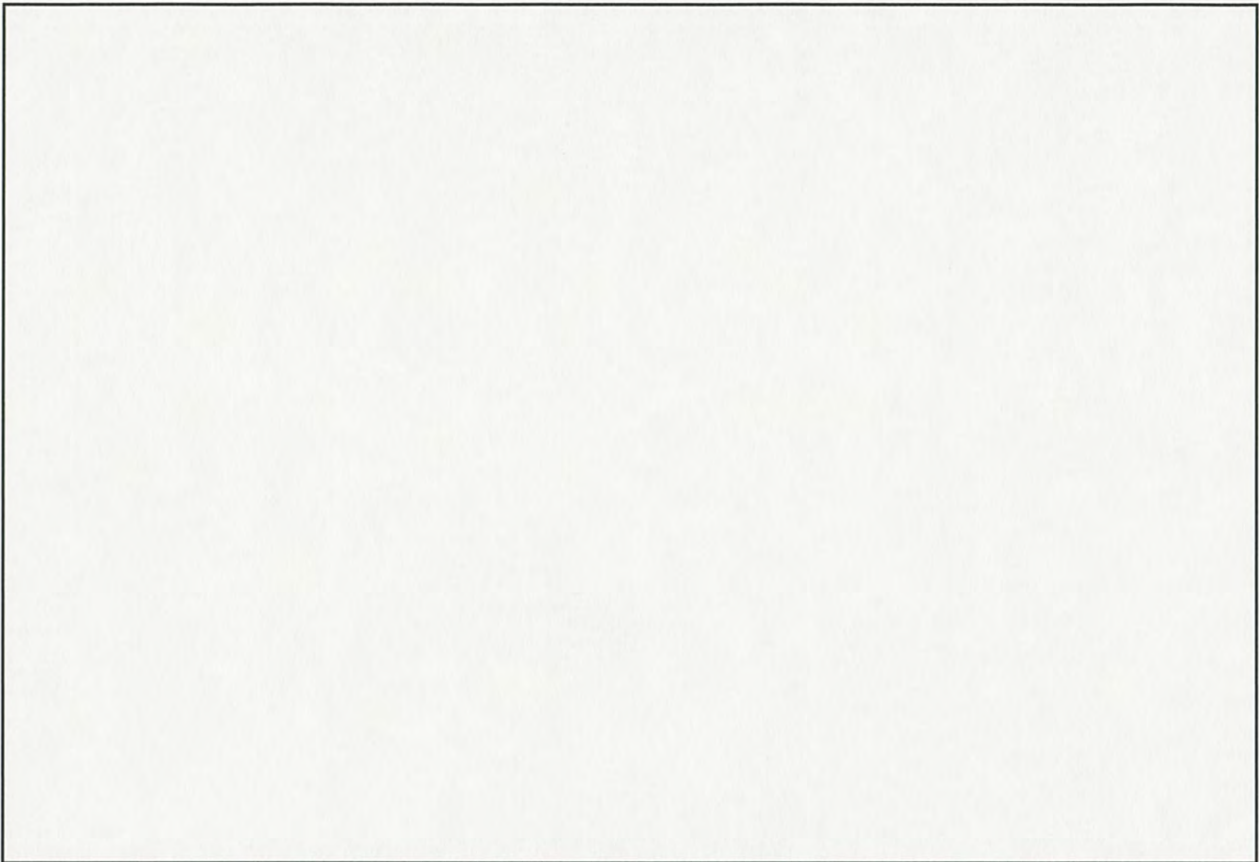
(ロ)D付一第3図 通常輸送時の輸送物上面における線量当量率 (②方向)



(口)D付一第4図 通常輸送時の輸送物底面における線量当量率 (③方向)



(口)D付一第5図 通常輸送時の輸送物底面における線量当量率 (④方向)



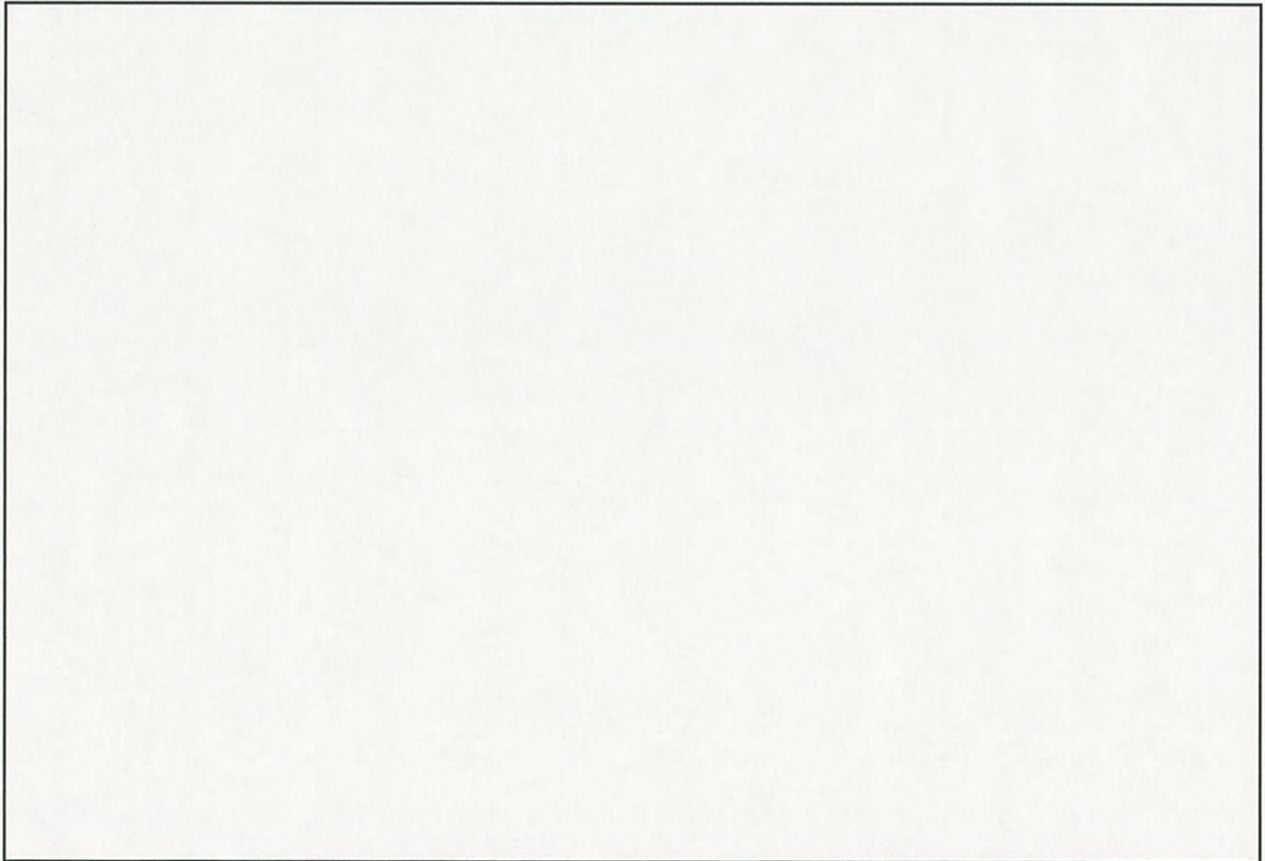
(ロ)D付一第6図 通常輸送時の輸送物幅狭側面における線量当量率 (⑤方向)



(ロ)D付一第7図 通常輸送時の輸送物幅狭側面における線量当量率 (⑥方向)



(ロ)D付一第8図 通常輸送時の輸送物幅広側面における線量当量率 (⑦方向)



(ロ)D付一第9図 通常輸送時の輸送物幅広側面における線量当量率 (⑧方向)

(ロ)E 臨界解析

E.1 概要

本輸送物は、輸送制限個数を無限個として、通常輸送時はもちろんのこと一般および特別の試験条件下においても臨界に達することがないように設計されている。

臨界解析では、以下のいずれの条件においても臨界に達しないことを評価する。

- ① 輸送物を孤立系の条件に置く場合
- ② 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件の下に置いた輸送物を孤立系の条件に置く場合
- ③ 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件の下に置いた輸送物を孤立系の条件に置く場合
- ④ 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件の下に置いた輸送物を配列系の条件に置く場合
- ⑤ 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件の下に置いた輸送物を配列系の条件に置く場合

なお、本解析においては上記のうち評価上最も厳しい条件である、特別の試験条件下に置いた輸送物を配列系の条件に置く場合について、臨界計算コード KENO V.a コードを用いた解析を行い、未臨界であることを確認する。

E.2 解析対象

E.2.1 収納物

本輸送物の収納物は、濃縮度 5wt%以下のウラン酸化物（ペレット）又はガドリニア入りウラン酸化物（ペレット）を収納したペレット保管箱を仕切板と交互に積重ねて組立てた、ペレット保管箱組立体 2 体である。また、ペレット保管箱組立体には、ペレット保管箱の型式によって、最大 11kg-UO₂/箱を収納するペレット保管箱を 12 箱で組立てたペレット保管箱組立体(A)と、最大 20kg-UO₂/箱を収納するペレット保管箱を 5 箱で組み立てたペレット保管箱組立体(B)の 2 種類がある。よって、本輸送物の核燃料物質の装荷量は、ペレット保管箱組立体(A)2 体を収納する場合は最大 264kg-UO₂であり、ペレット保管箱組立体(B)2 体を収納する場合は最大 200kg-UO₂である。

一般の試験条件下および特別の試験条件下で得られる収納物の性質の変化等は特になく、また、一般の試験条件下における形状の変化は軽微であり、特別の試験条件下で得られる形状の変化に包絡される。特別の試験条件下で得られる収納物の形状の変化については、耐火試験、浸漬試験では特になく、落下試験では以下のとおりである。

- ・ ペレット保管箱組立体の支柱およびナットの破損はなく、ペレット保管箱の形状、仕切板の間隔は維持される。
- ・ ペレット保管箱を保持するための位置決めブロックおよび位置決めブロック支持具に破損や有意な変形はなく、ペレット保管箱は位置決めブロックの内側に保持される。
- ・ ペレット保管箱の本体および蓋には内部からペレットが漏出するような開口部は生じず、核燃料物質はペレット保管箱内に留まる。
- ・ 重量模擬棒を用いた落下試験により、落下の衝撃がペレットの収納状況に極端な影響を与えないことは確認されたが、ペレットの破碎は必ずしも否定されるものではない。

E.2.2 輸送容器

本輸送容器は、外容器および外容器から取り出し可能な内容容器から構成される。通常輸送時は内容容器 1 体が外容器に装着され、内容容器には収納物としてペレット保管箱組立体 2 体が収納される。

外容器は、フレーム及び内板と外板で構成された箱型 2 重構造となっており、内外板間に断熱材を充填することにより耐熱性を確保する。外容器の内面には、内容容器への衝撃を緩和するアルミハニカムを取付けている。

内容容器は厚手のステンレス鋼製板からなる箱型 1 重構造となっている。本体と蓋のフランジ面に配置したリングにより内容容器の内部は密閉される。

一般の試験条件下および特別の試験条件下で得られる輸送容器の性質の変化等は特になく、また、一般の試験条件下における形状の変化は軽微であり、特別の試験条件下で得られる形状の変化に包絡される。特別の試験条件下で得られる輸送容器の形状の変化については、耐火試験、浸漬試験では特になく、落下試験では以下のとおりである。

- ・ 落下の衝撃により外容器の外板は変形し、外容器外寸は、高さ方向に最大約□mm、水平方向の幅狭側に最大約□mm、幅広側に最大約□mm、それぞれ減少する。
- ・ 外容器の内外板間の間隔は概ね保持される。
- ・ 落下の衝撃による内容容器への衝撃は外容器内面のアルミハニカム等の変形により吸収され、外容器外板表面からアルミハニカムの内側表面までの距離は減少する。即ち、通常輸送時は□mm であるが、落下試験により幅狭側に約□mm、幅広側に約□mm となる。これより、アルミハニカムで囲まれた内部に内容容器が装荷されることから、内容容器のクリアランスが増加する。
- ・ 内容容器は収納物の衝突により若干膨らむ変形をする。
- ・ 内容容器の本体と蓋とを取付ける締付け用ロッドボルトの破断はなく、燃料領域は内容容器の内部に限定される。なお、耐火試験条件下においてもリングの耐熱温度を超えない。
- ・ 内容容器内側面に貼付けたボロン入りステンレス鋼製板の損傷、変形、移動はない。
- ・ 内容容器の中央部において 2 体のペレット保管箱組立体を仕切るように取付けたボロン入りステンレス鋼製板の損傷、変形は軽微であるが留具は破損する。従って、ボロン入りステンレス鋼製板は、ペレット保管箱組立体を仕切る位置関係を保持しつつ、内容容器内部での移動が可能となる。

E.2.3 中性子吸収材

中性子吸収材として、板厚□mm、ボロン濃度□wt%のボロン入りステンレス鋼製板を使用し、内容容器内側の幅狭側面に各 1 枚、幅広側面に各 2 枚の合計 6 枚、及び、収納物である 2 体のペレット保管箱組立体の間に仕切りとして 2 枚重ねで配置している。

一般の試験条件下および特別の試験条件下の輸送物における中性子吸収材の形状、性質の変化等は特になく、位置の移動については「E.2.2」に述べたとおりである。

E.3 モデル仕様

E.3.1 解析モデル

本輸送物の輸送制限個数は無限個である。孤立系の評価は、配列系の評価において、水の侵入を考慮した評価を実施することから、孤立系の評価は配列系の評価に包含される。そのため、孤立系の評価は実施せず、配列系の評価を代表とする。解析モデルの外部境界は鏡面反射条件とし、無限個の配列系モデルとする。

一般の試験条件下に置いた輸送物と特別の試験条件下に置いた輸送物の形状モデルを (ロ) E - 第 1 図 及び (ロ) E - 第 2 図 に、それぞれ示す。

また、一般の試験条件下に置いた輸送物の形状の変化は軽微であり臨界モデルとしては損傷がないものとして取り扱うことができる。そのため、一般の試験条件下に置いた輸送物のモデル化においては、形状、寸法は通常輸送時の実物のおりである。ただし、フレーム、フランジ、ボルト、アルミハニカム、スペーサ等の微細な形状の構造部材及び断熱材の材質は無視し、中性子吸収効果を考慮しない保守的な解析モデルとしている。また、外容器の脚については寸法、材質ともに無視した、保守的な解析モデルとしている。

なお、内容器内のクリアランスにより収納物は若干移動可能であるが、臨界計算結果へ与える影響はきわめて小さいため、(ロ) E - 第 1 図に示すように、内容器内の中央に収納したモデルとする。

特別の試験条件下に置いた輸送物のモデル化は以下のとおりである。

- ・ 外容器外寸について、実物が高さ方向に最大約 \square mm 減少することに対して、モデル化では高さ方向を一律 \square mm 減少させた直方体とする。同様に、実物の水平方向の幅狭側最大約 \square mm 減に対しては一律 \square mm 減、幅広側最大約 \square mm に対しては一律 \square mm 減とする。なお、外容器外寸の減少は輸送物間の核的相互作用を高め保守的評価を与えることから、本モデル化は妥当である。
- ・ 外容器外板表面からアルミハニカムの内側表面までの距離は、実物では幅狭側が約 \square mm へと減少することに対してモデル化では \square mm とする。同様に、幅広側約 \square mm に対しては \square mm とする。高さ方向についてはアルミハニカム等の変形を最大限考慮して、下部側アルミハニカムの厚さ \square mm、即ち、外容器外板表面からアルミハニカムの内側表面までの距離 \square mm とする。なお、上側の蓋部より薄い下側において変形を考慮することで、輸送物間の核的相互作用の高まる効果を最大限保守的に考慮するモデル化としている。このように、特別の試験条件下に置いた輸送物の内容器内クリアランスは一般の試験条件下に置いた輸送物よりも増加し、クリアランス内における収納物の移動により配列系での輸送物間の核的相互作用が高まることを考慮して、(ロ) E - 第 2 図に示すモデルとしている。ただし、クリアランス内における収納物の移動が臨界計算結果に与える影響は比較的小さい。
- ・ アルミハニカムの内側における内容器および仕切板の移動は、最も増倍率が高まる配置となるように考慮する。
- ・ 実物では収納物の衝突により内容器は若干膨らむが、収納物および中性子吸収材である仕切板の配置に影響しないため無視する。
- ・ フレーム、フランジ、ボルト、アルミハニカム、スペーサ等の微細な形状をした構造

部材及び断熱材の材質は一般の試験条件下に置いた輸送物と同様に無視し、中性子吸収効果を考慮しない保守的な解析モデルとしている。これにより、輸送容器は、直方体形状を基本とした単純化されたモデルにおいて、寸法、形状、収納物の配置について前述のとおり保守的に考慮する。

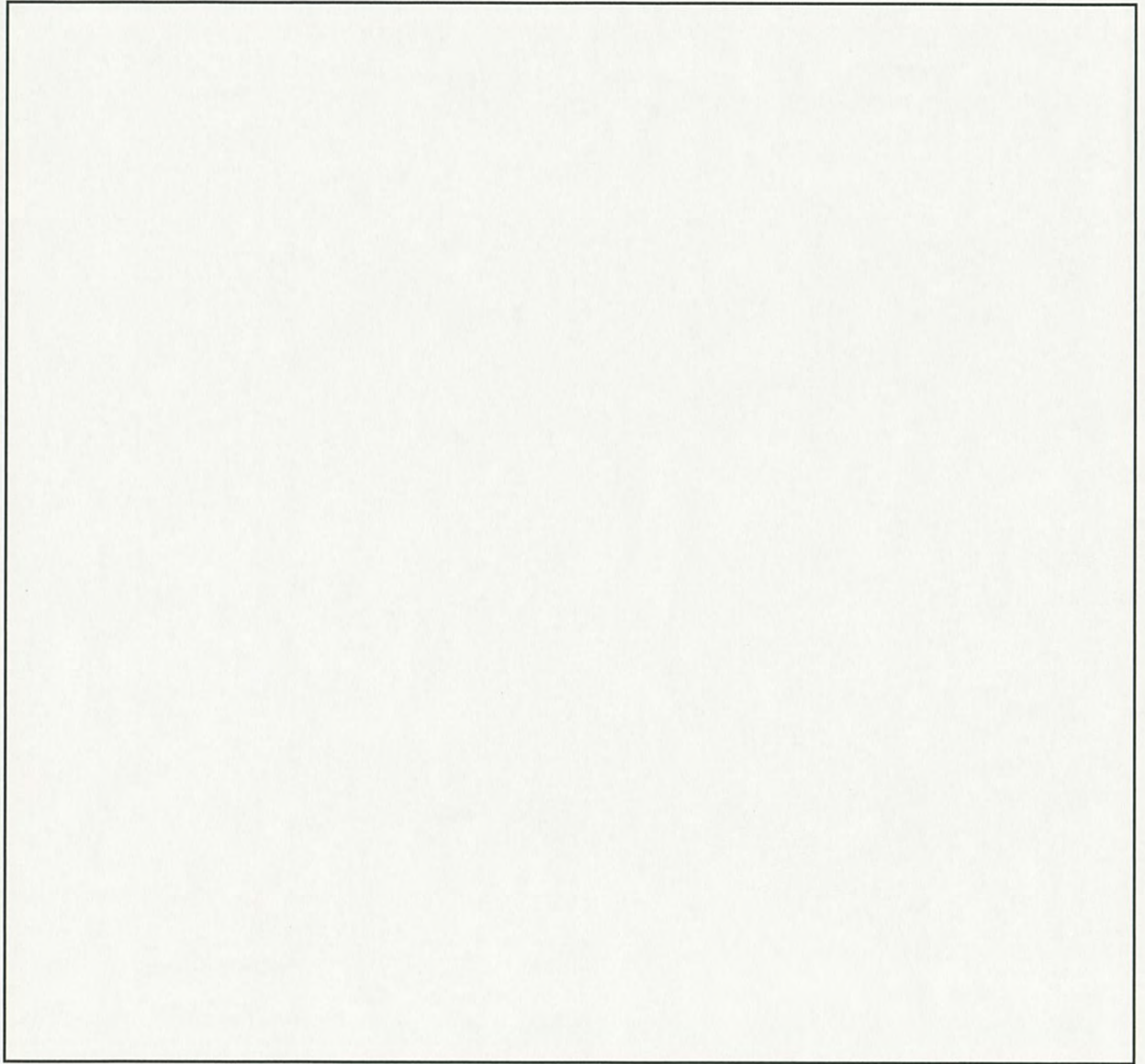
- ・ 外容器の脚については寸法、材質ともに無視し、配列系の輸送物間の核的相互作用が最も高まる保守的モデル化としている。

なお、一般の試験条件下に置いた輸送物および特別の試験条件下に置いた輸送物とも、核燃料物質の収納状態については増倍率が最も高くなる最適な減速状態とするとともに、配列系の輸送物間の核的相互作用が最も高まるモデル化（具体的には、外容器の内外板間に充填された断熱材の中性子吸収効果を考慮しない）としている。これらのモデル化によって、配列系は孤立系を包絡した保守的評価結果を与える。

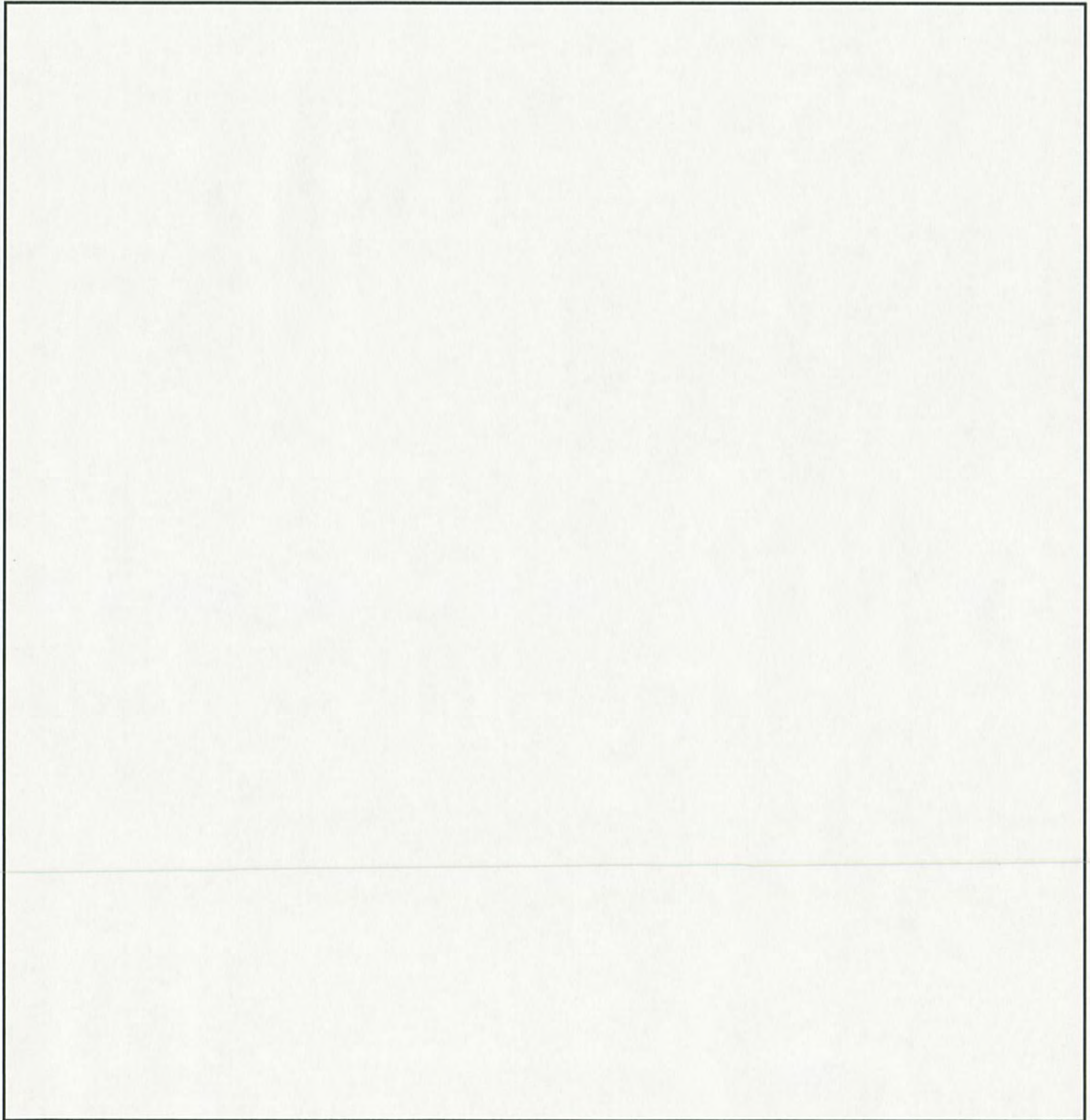
次に、収納物（ペレット保管箱組立体）の形状モデルを（ロ）E-第3図に示す。

収納物のモデル化においては、ペレット保管箱組立体2体を模擬する。ペレット保管箱組立体には、 UO_2 ペレットが最大収納量収納されたペレット保管箱と仕切板とを交互に最大段数を積重ねた状態で組立体カバーが設置される。ここで、ペレット保管箱及びペレット保管箱の内部に収納されたペレットの配置については、次のような保守的モデルとしている。

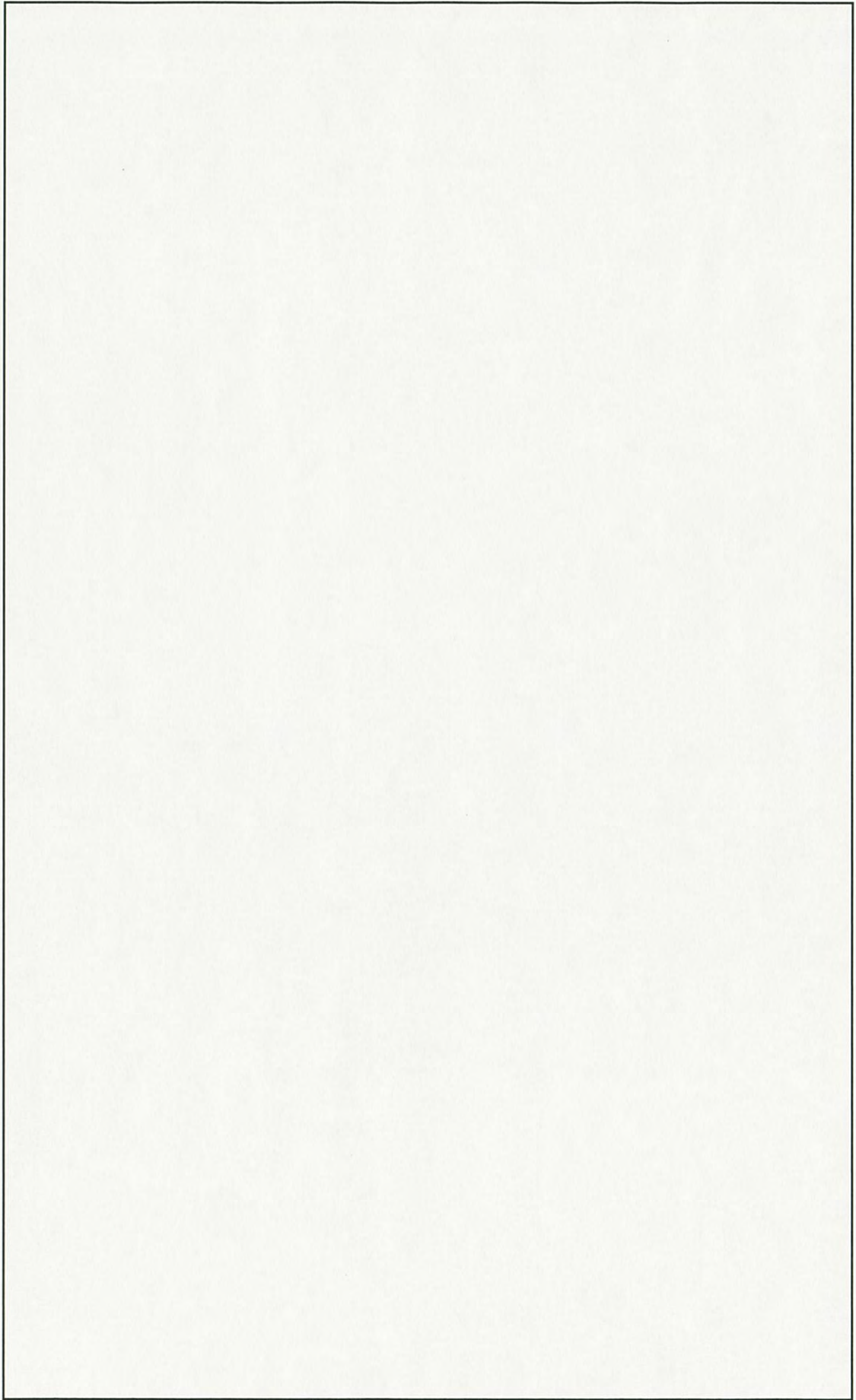
- ・ ペレット保管箱は位置決めブロックの内側に保持されること及び UO_2 ペレットはペレット保管箱内に留まることから、 UO_2 ペレットの存在する領域は位置決めブロックの内側（ \square mm \times \square mm）とする。この UO_2 ペレットの存在する領域においては、ペレット保管箱の材質及びその他の材質（波板等）は無視する。これにより、中性子吸収効果を考慮しない保守的な解析モデルとしている。
- ・ UO_2 ペレットは、保管箱の中で波板上に載せて整然と収納されるため、ペレット形状は横置きされた円筒形状とする。この円筒の長さは波板上に横置き並べられる方向の位置決めブロック間隔（ \square mm）とする。
- ・ 燃料タイプを特定しない UO_2 ペレットを収納するため、形状寸法については、一般の試験条件下に置いた輸送物のペレット直径を \square mm \sim \square mmの範囲とする。特別の試験条件下に置いた輸送物のペレット直径については UO_2 ペレットの破碎を考慮し、保守的な評価条件としてスラッジ状を想定した \square mmから \square mmの範囲とする。また材質は、濃縮度の上限5wt%、ペレット密度は理論密度10.96g/cm³とする。
- ・ ペレット保管箱の UO_2 装荷量を最大としつつペレット直径変化をサーベイするために、ペレット保管箱内の燃料の配列数を増減させる（（ロ）E 付属資料1参照）。
- ・ ペレット保管箱内の燃料の各配列に対して、増倍率が最大となるようにペレットピッチ（中心間隔）をサーベイする（（ロ）E 付属資料1参照）。
- ・ ペレット間を水（密度1g/cm³）で満たす。なお、水分の減少に対して増倍率が減少することは計算により確認する（（ロ）E 付属資料1参照）。



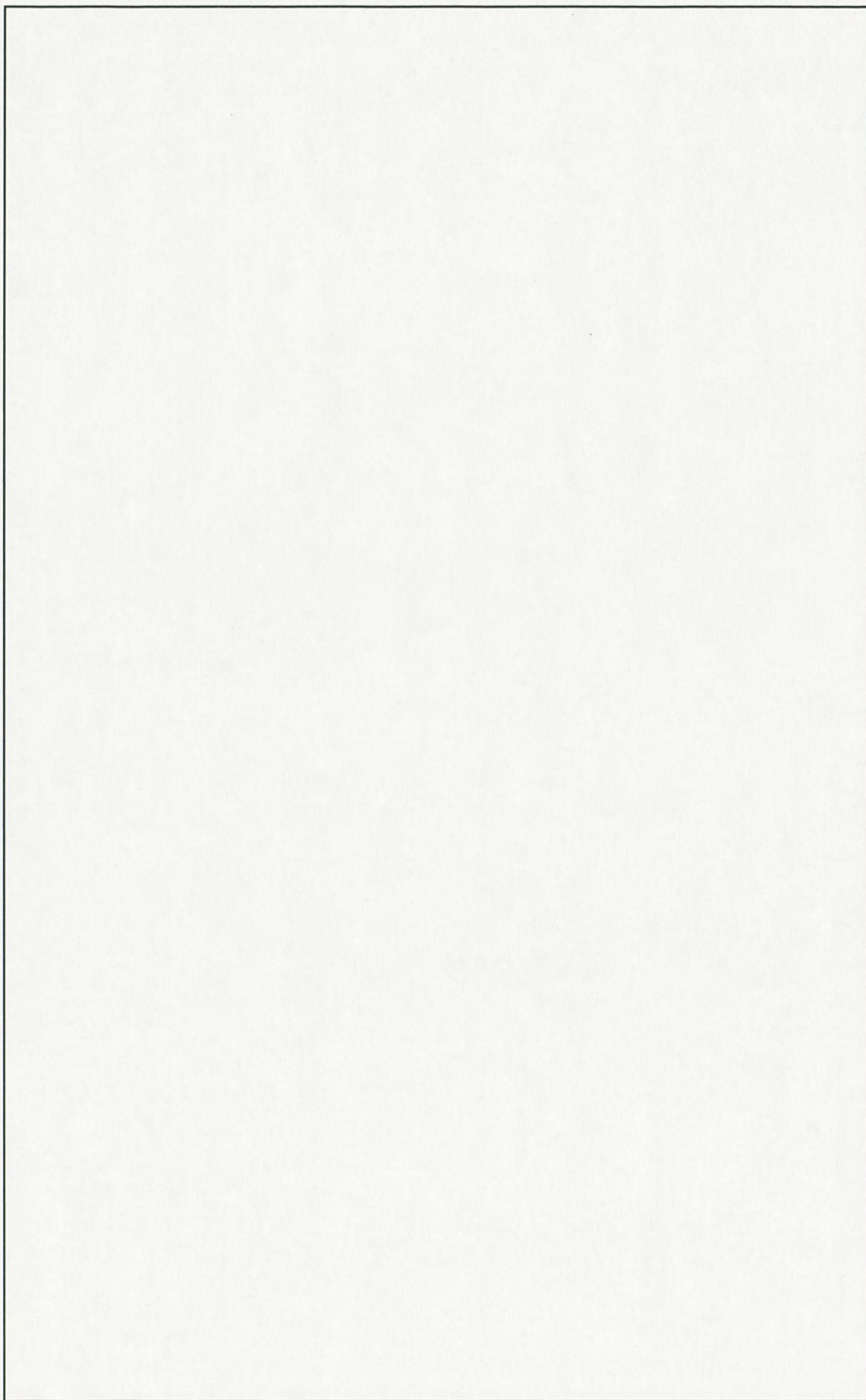
(ロ) E - 第 1 図 [1/2] 一般の試験条件下に置いた輸送物の形状モデル



(ロ) E - 第 1 図 [2/2] 一般の試験条件下に置いた輸送物の形状モデル



(ロ) E - 第 2 図 特別の試験条件下に置いた輸送物の形状モデル



(ロ) E - 第 3 図 ペレット保管箱組立体の形状モデル

E.3.2 解析モデル各領域における原子個数密度

本解析に使用した輸送物の各領域の原子個数密度を(ロ)E-第1表に示す。

UO₂ペレットについては、濃縮度の上限 5wt%、密度は理論密度 10.96g/cm³である。水の密度は、常温での最大を考慮して 1g/cm³としている。ステンレス鋼の密度は JIS G 4305 に示される SUS304 の密度(7.93 g/cm³)を元に保守的に 7.9 g/cm³とし、組成は SCALE コードシステムの標準組成ライブラリを用いている。ボロン入りステンレス鋼のボロン添加量は wt%であるが、保守的評価条件としてボロン添加量を wt%とし、ボロンと 99.25wt%のステンレス鋼からなる密度 7.8 g/cm³の物質としている。

(ロ) E - 第 1 表 計算に使用した各材質の原子個数密度

材質	核種	原子個数密度 (atoms/barn·cm)

E.4 未臨界評価

E.4.1 計算条件

本輸送物では、濃縮度 5wt%以下のウラン酸化物（ペレット）又はガドリニア入りウラン酸化物（ペレット）を収納可能である。ペレットのモデル化においては、中性子吸収材であるガドリニアを考慮せず、全てウランペレットとしている。また、増倍率が最も高まるように、濃縮度は上限の 5wt%、ペレット密度は上限である理論密度 (10.96g/cm^3) としている。

収納物のモデル化において考慮したペレット以外の材質は、組立体カバーと仕切板のみである。このうち、中間仕切板はボロン入りステンレス鋼製板であり、中性子吸収材であるボロンの含有割合は \square wt%であるが、モデル化においては安全側に \square wt%としている。なお、ペレットを収納するペレット保管箱（本体及び蓋）及びペレットを整然と並べるための波板、仕切板に設置された位置決めブロック支持具、組立体の支柱やナット、組立体カバー取手など、モデル化において考慮していない材質は、中性子吸収効果を生じ得るものであり、これらを考慮しないことは、安全側のモデル化である。

輸送物のモデル化において考慮したものは、本体及び蓋を含む外容器の内外板及び内容器のステンレス鋼製板と、内容器の内側に貼付したボロン入りステンレス鋼製板である。収納物と同様に、ボロン入りステンレス鋼製板のボロンの含有割合は \square wt%であるが、モデル化においては安全側に \square wt%としている。なお、フレーム、脚、断熱材、フランジ構造、アルミハニカム、保護用角パイプ、防振ゴムなど、モデル化において考慮していない材質は、中性子吸収効果を生じ得るものであり、これらを考慮しないことは、安全側のモデル化である。

以上のようなモデル化は、輸送物の増倍率を安全側に評価できるものである。

E.4.2 輸送物への水の浸入等

解析においては、輸送物の損傷の有無にかかわらず、容器内に水が浸入するものとしている。モデル化において考慮したステンレス鋼製板、ボロン入りステンレス鋼製板、及び、ペレットが占める空間（前述 E.4.1 参照）には水は存在しない。これらの間隙のうち、ペレットが存在する領域（ペレット保管箱の内部）において水を考慮する。これは、最適な減速状態とするためであり、「(ロ)E 付属資料 1」に示すように当該部分の水分割合(%)を変化させた解析を行なって、その影響を確認している。それ以外の間隙（ペレット保管箱の外部）については真空であるが、これは、配列系における輸送物間の核的相互作用を最も高めた保守的評価とするためである。ただし、解析においては、ペレット保管箱外部の間隙に水が浸入した場合も評価し、「(ロ)E 付属資料 1」に示すように当該部分の水分割合(%)を変化させた解析を行なって、外容器の外板と内板の間、及び、内板の内側（内容器が存在する間隙）への浸水の影響も確認している。

E.4.3 計算方法

本計算に使用したコードは KENO V.a である。

KENO V.a は、米国オークリッジ国立研究所で開発された多群モンテカルロコードであり、複雑な 3次元幾何形状を正確に取り扱える利点を持ち、体系の中性子増倍率の計算を行なう臨界計算コードである。

計算に使用した微視的核断面積は、ENDF-B/V をマスタライブラリとする 44 群ライブラリである。

E.4.4 計算結果

「E4.1」から「E4.3」にて述べた条件で実施した一般の試験条件下に置いた輸送物及び特別の試験条件下に置いた輸送物を配列系の条件に置いた場合の計算結果を (ロ) E - 第 2 表に示す。

(ロ) E - 第 2 表 中性子増倍率の計算結果

評価体系	ペレット保管箱組立体(A)	ペレット保管箱組立体(B)
一般の試験条件下に置いた輸送物、配列系	0.918	0.878
	0.920	0.880
特別の試験条件下に置いた輸送物、配列系	0.925	0.879
	<u>0.928</u>	0.882

(注) 上段は、モンテカルロ計算の中心値。

下段は、中心値に統計の標準偏差の 3 倍を加えた評価値。

E.5 ベンチマーク試験

OECD/NEA の国際臨界安全ベンチマーク評価プロジェクト (ICSBEP) では、評価済み臨界ベンチマーク実験ハンドブック (ICSBEP ハンドブック) を発行している。

ICSBEP ハンドブックでは、各種パラメータによって臨界実験が分類されて掲載されている。そこで、本輸送物の臨界評価に関連する分類 (LEU-COM-THERM : 低濃縮・化合物・熱中性子スペクトル) から ケースのベンチマーク試験を抽出し、本輸送物の臨界評価で使用した計算方法と同じ計算方法を用いて実験解析を行なった。計算結果を (ロ) E - 第 4 図に示す。また、(ロ) E - 第 4 図に示した ケースの計算結果に対する統計処理結果を (ロ) E - 第 3 表に示す。

(ロ) E - 第 3 表より、本輸送物の臨界評価で使用した計算方法は、中性子増倍率を十分な精度で評価できることが分かる。

(ロ) E - 第 3 表 ベンチマーク実験解析結果のまとめ

ケース数	<input type="checkbox"/>
平均誤差 ($\Delta k : 1 - k$ の平均値)	
標準偏差 (σ)	
信頼係数 ($f : 97.5\%$ 信頼度・ 97.5% 確率)	
推定臨界下限増倍率 ($1 - \Delta k - f\sigma$)	
制限値	



(ロ) E - 第 4 図 ベンチマーク実験解析結果

E.6 結果の要約及びその評価

GP - 01 型輸送物の臨界解析を実施した。

解析においては、モデル化等で様々な安全側の条件設定を行なったが、(ロ) E - 第 2 表に示すとおり、統計上の偏差値を考慮した中性子増倍率の最大値は、0.928 である。

この値は 0.95 未満であり、臨界安全上問題はない。

参考文献

- SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluations, ORNL/TM-2005/39, Version 5, Vols. I-III, April 2005. Available from Radiation Safety Information Computational Center at Oak Ridge National Laboratory as CCC-725.
- International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project (ICSBEP) Working Group, <http://www.nea.fr/html/science/wpncs/icsbep/welcome.html>.
- International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03.

サーベイ計算の結果

1. ペレット直径と中性子増倍率

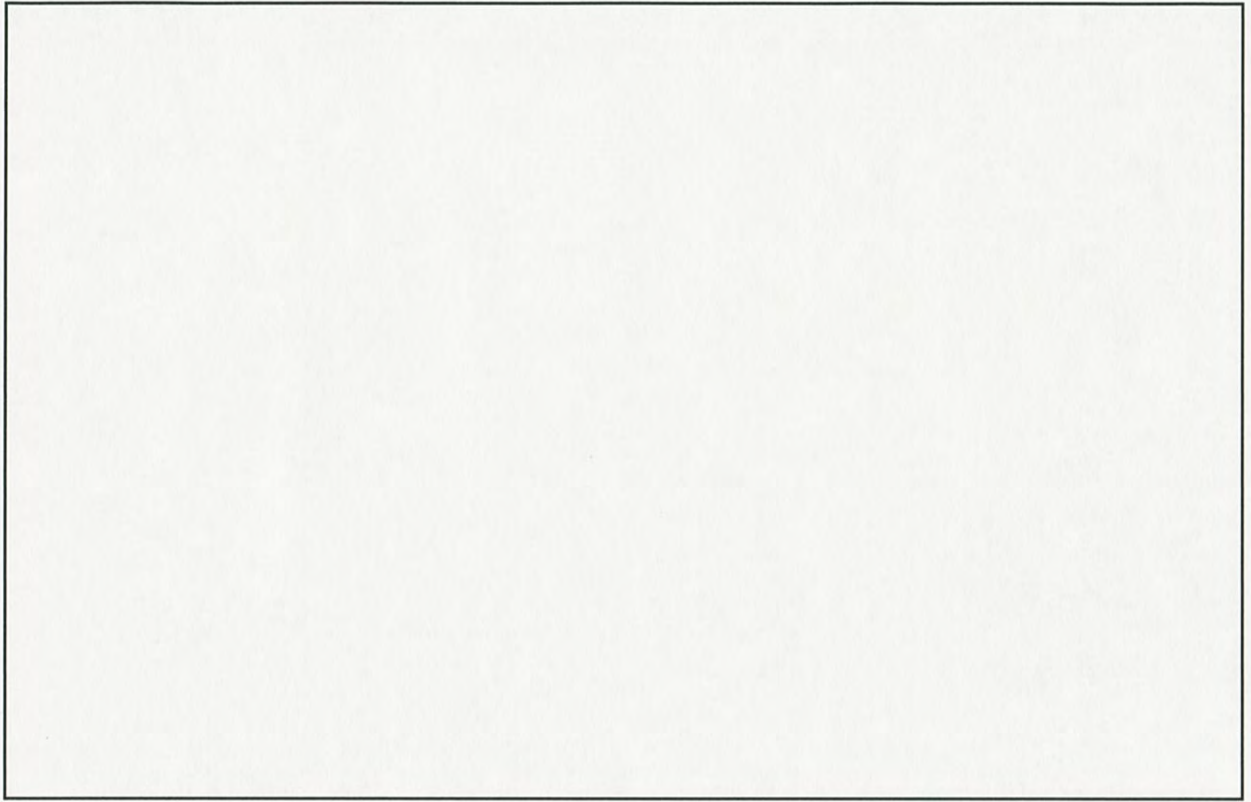
本輸送物は、燃料タイプを特定しない UO_2 ペレットを収納するため、一般の試験条件下に置いた輸送物のペレット直径を $\square\text{mm} \sim \square\text{mm}$ 、特別の試験条件下に置いた輸送物のペレット直径は UO_2 ペレットの破碎を考慮し、保守的な評価条件としてスラッジ状を想定した $\square\text{mm} \sim \square\text{mm}$ の範囲としている。このためペレット保管箱内のペレットの配列数を増減させるとともに、ペレット保管箱の最大の UO_2 装荷量とすることによって、ペレット直径変化させて、サーベイ計算を行なっている。なおペレット保管箱内の波板についてはモデル化していない。一般の試験条件下に置いた輸送物及び特別の試験条件下に置いた輸送物の計算結果を (ロ) E 付 - 第 1 図及び (ロ) E 付 - 第 2 図にそれぞれ示す。なお、参考まで、(ロ) E 付 - 第 2 図について、(ロ) E 付 - 第 1 図と同じペレット直径範囲に拡大して (ロ) E 付 - 第 3 図に示す。

(ロ) E 付 - 第 1 図及び (ロ) E 付 - 第 2 図の最大値により、(ロ) E - 第 2 表に示す計算結果が得られる。

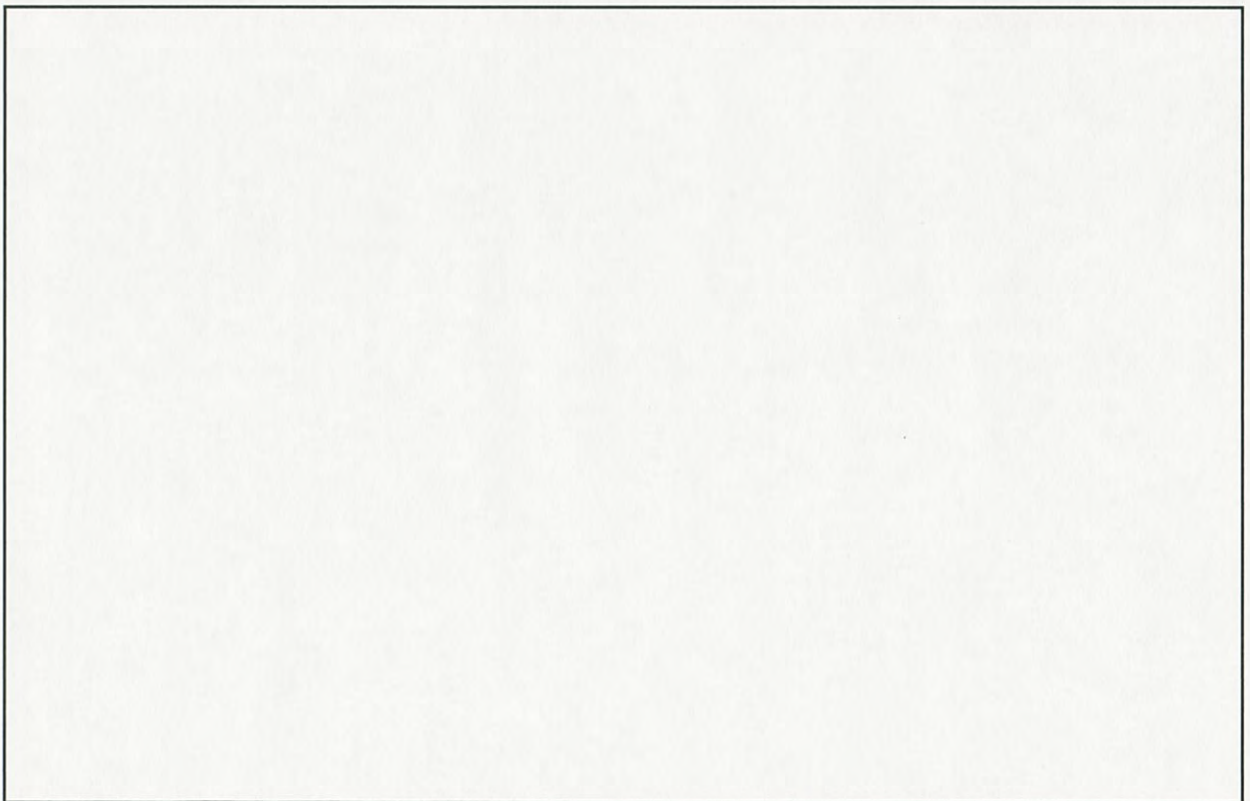
なお、ペレット直径範囲を合せた (ロ) E 付 - 第 1 図と (ロ) E 付 - 第 3 図を比較すると、特別の試験条件下に置いた輸送物は一般の試験条件下に置いた輸送物と比較して、増倍率は僅かに高くなるのみであり、両評価体系の増倍率評価値の違いは主にペレット直径範囲の違いに起因するものであることが分かる。



(ロ) E 付 - 第 1 図 ペレット直径サーベイ結果 (一般の試験条件下に置いた輸送物)



(ロ) E 付 - 第 2 図 ペレット直径サーベイ結果 (特別の試験条件下に置いた輸送物)



(ロ) E 付 - 第 3 図 ペレット直径サーベイ結果 (特別の試験条件下に置いた輸送物の拡大図)

2. ペレットピッチ変化による増倍率への影響

(ロ) E 付 - 第 1 図から (ロ) E 付 - 第 3 図の評価に際して、高さ方向のペレットピッチを最大としている。これは、高さ方向にはボロン入りステンレス鋼製板で仕切られた \square mm の保管箱内において高さ方向のペレットピッチを減少させると、ペレット間の水排除の効果によって増倍率が単調に減少するためである。高さ方向のペレットピッチに対する増倍率の計算結果を (ロ) E 付 - 第 4 図に示す。



(ロ) E 付 - 第 4 図 高さ方向のペレットピッチに対する増倍率

これに対して水平方向は \square mm \times \square mm の範囲であるため、ペレットピッチを最大にすると減速過剰となって、ペレットピッチ変化に対して増倍率のピークを生じる可能性がある。

そのため (ロ) E 付 - 第 1 図から (ロ) E 付 - 第 3 図の評価に際しては、各ペレット配列において、水平方向のペレットピッチを変化させて増倍率のピークを求めている。計算例として、高さ方向 4 段の場合の各ペレット配列において水平方向のペレットピッチを変化させた結果を (ロ) E 付 - 第 5 図に示す。

このように、ペレット直径範囲のサーベイにおいては、ペレット保管箱内におけるペレットの配列数とピッチを様々に変化させて、増倍率が最大となるように最適化している。従って、ペレット保管箱内でのペレットの収納状態に因らない保守的増倍率評価となっている。



(ロ) E 付 - 第 5 図 水平方向のペレットピッチに対する増倍率

3. ペレット領域（ペレット保管箱内）の水分変化による増倍率への影響

ペレットの存在する範囲においては、最適な減速状態とするために、水の浸入を考慮している。この水分割合を変化させた場合の増倍率計算結果を (ロ) E 付 - 第 6 図に示す。

(ロ) E 付 - 第 6 図より、水分割合の増加に対して増倍率は単調に増加することが分かる。



(ロ) E 付 - 第 6 図 ペレット領域（ペレット保管箱内）の水分変化に対する増倍率

4. ペレット領域以外（ペレット保管箱外）の水分変化による増倍率への影響

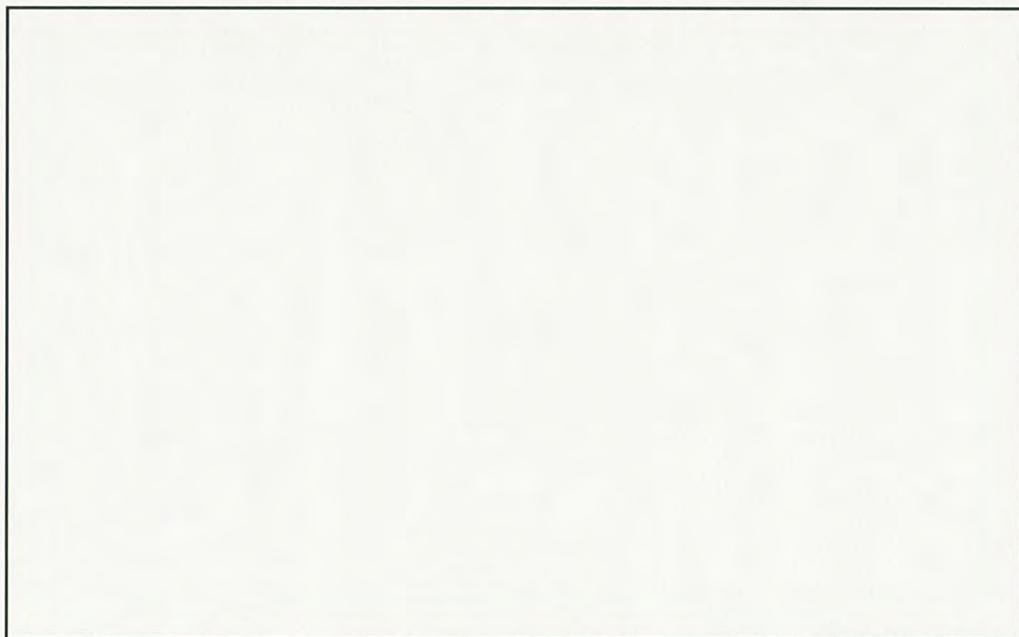
配列系の評価に際して、ペレット存在範囲の外側の空隙は真空としている。これは、以下に示す結果から核的相互作用が最も大きくなる評価モデルとするためである。

当該領域である外容器の外板と内板の間、及び、内板の内側（内容器が存在する間隙）への浸水を考慮して、各領域の水分割合を変化させた場合の増倍率計算結果を（ロ）E付 - 第7図及び（ロ）E付 - 第8図にそれぞれ示す。

（ロ）E付 - 第7図及び（ロ）E付 - 第8図より、当該領域を真空とすることが安全側評価であることが分かる。



（ロ）E付 - 第7図 外容器の外板と内板の間の水分変化に対する増倍率



（ロ）E付 - 第8図 外容器の内板と内容器の間の水分変化に対する増倍率

(ロ)F 核燃料輸送物の経年変化の考慮

F.1 考慮すべき経年変化要因

本章では、本輸送物について使用を予定する期間中に想定される使用状況及びそれに伴う経年変化について考慮する。

本輸送容器の使用予定期間は80年であり、使用期間を通しての輸送予定回数は計160回、また1回の輸送期間は通常最長4ヶ月である。

本輸送物の使用期間中に想定される経年変化の要因としては、容器保管中や使用中における温度変化(熱)、収納物から発生する放射線、腐食等の化学変化及び繰り返し応力が生じることによる疲労が考えられる。そこで、これらの経年変化を生じさせる要因について、本輸送容器の構成部品と繰り返し使用する収納物に関して評価を実施する。

熱、放射線、化学変化の評価においては、使用予定より保守的な条件として80年の連続使用を考慮する。また、疲労の評価においては、吊り上げによる応力は実際より保守的な条件として輸送1回あたり10回、輸送とは別に年間5回発生すると想定し、 $160 \times 10 + 80 \times 5 =$ 計2,000回の発生を考慮する。また、内圧による応力は、使用予定より保守的な条件として80年間毎日1日1回の輸送を実施すると想定し、 $80 \times 365 = 29,200$ 回発生すると考慮する。

F.2 安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価

経年変化を考慮する本輸送容器の構成部品として、安全機能を担う構成部品とその使用材料を下記に示す。

輸送容器の構成部品	材料
輸送容器構造材	ステンレス鋼
ロッドボルト	クロムモリブデン鋼
衝撃緩衝材(アルミハニカム)	アルミニウム合金
中性子吸収材	ボロン入りステンレス鋼

Oリングについては輸送実施前に新しいものと取替えるため、経年変化は考慮しない。

次に、経年変化を考慮する収納物として、繰り返し使用する収納物とその使用材料を下記に示す。

収納物	材料
ペレット保管箱	ステンレス鋼
ペレット保管箱組立体構造材	
中間仕切り板(中性子吸収材)	ボロン入りステンレス鋼

以上を纏めると、輸送容器、及び収納物において経年変化を考慮する材料は下記の4つである。

- ・ステンレス鋼
- ・クロムモリブデン鋼
- ・アルミニウム合金
- ・ボロン入りステンレス鋼

以下に、各材料の経年変化の考慮について、熱、放射線、化学及び疲労の観点から示す。

(1)ステンレス鋼

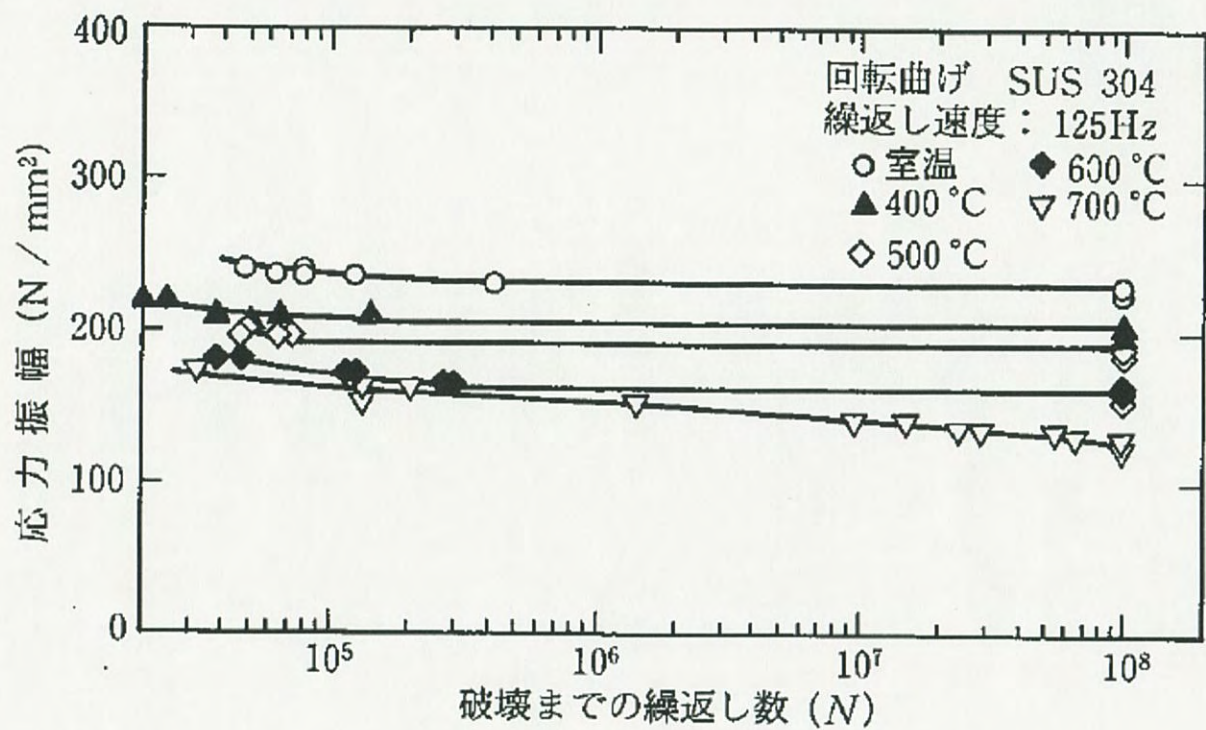
ステンレス鋼の経年変化の考慮について、(ロ)F-第1表に示す。

(ロ)F-第1表 ステンレス鋼の経年変化の考慮[1/2]

材料	経年変化要因	経年変化の評価	経年変化の有無
ステンレス鋼	熱	使用期間中に想定されるステンレス鋼の温度範囲である-40℃から114℃((ロ)B.4.6参照)までを考慮する。クリープの影響を受ける温度はステンレス鋼の融点(1300℃以上)の三分の一である433℃であり、運搬中に予想される最高温度(114℃)と比較して十分に高いことから、仮にステンレス鋼を使用期間中、継続して上記温度環境下に置いた場合でも、組織変化、クリープ、割れ等の経年変化の影響は受けない。以上のことから輸送物が規則に定める技術基準に適合していることへの影響はない。	無し
	放射線	80年の使用期間において、最大収納量(264kg)の濃縮度5%の二酸化ウランを内容器内に収納するものとして条件を定める。使用期間における中性子の累積照射量は 6×10^{11} n/cm ² 以下であり、ステンレス鋼の材料強度に影響を与えるとされる中性子照射量 10^{16} n/cm ² と比較して十分に小さいことから、放射線照射による経年変化の影響は受けない。以上のことから輸送物が規則に定める技術基準に適合していることへの影響はない。	無し
	化学	ステンレス鋼は材料の表面に不動態膜を形成することから腐食は発生しにくい。また、輸送容器外面、ペレット保管箱組立体、及びペレット保管箱の腐食については発送前検査や定期自主検査にて外観にて確認可能であり、確認された場合には補修又は交換される。このため、使用期間内に腐食等の経年変化の影響は受けない。以上のことから輸送物が規則に定める技術基準に適合していることへの影響はない。	無し

(ロ)F-第1表 ステンレス鋼の経年変化の考慮[2/2]

材料	経年変化要因	経年変化の評価	経年変化の有無
ステンレス鋼	疲労	<p>輸送容器構造材については、0℃から59℃までの温度変化による内外圧力差により、最大 <input type="text"/> MPa (N/mm²)の応力、<input type="text"/> ÷ 2 = <input type="text"/> MPa の応力振幅が内容器胴体部に生じる（「(ロ)-A.4.6.3 内圧による繰り返し応力の評価」参照）。(ロ)F-第1図のステンレス鋼の疲労曲線によると、100 N/mm²以下の応力振幅では室温から700℃の環境下において10⁷回以上繰り返し応力が発生しても疲労破壊が生じることはない。保守的に年間365回温度変化による応力が発生すると仮定し、使用期間の80年間を考慮しても、応力の繰り返し回数は80(年)×365(回)=29,200回であり、許容繰り返し回数と比較して十分に小さい。</p> <p>また、ペレット保管箱、ペレット保管箱組立体には、内外圧力差や取扱いに起因する応力は生じない。</p> <p>そのため、疲労による経年変化は発生しない。以上のことから輸送物が規則に定める技術基準に適合していることへの影響はない。</p>	無し



(ロ)F-第1図 ステンレス鋼疲労曲線

(出典) ステンレス鋼便覧-第3版-ステンレス協会(1995年1月)

(2)クロムモリブデン鋼

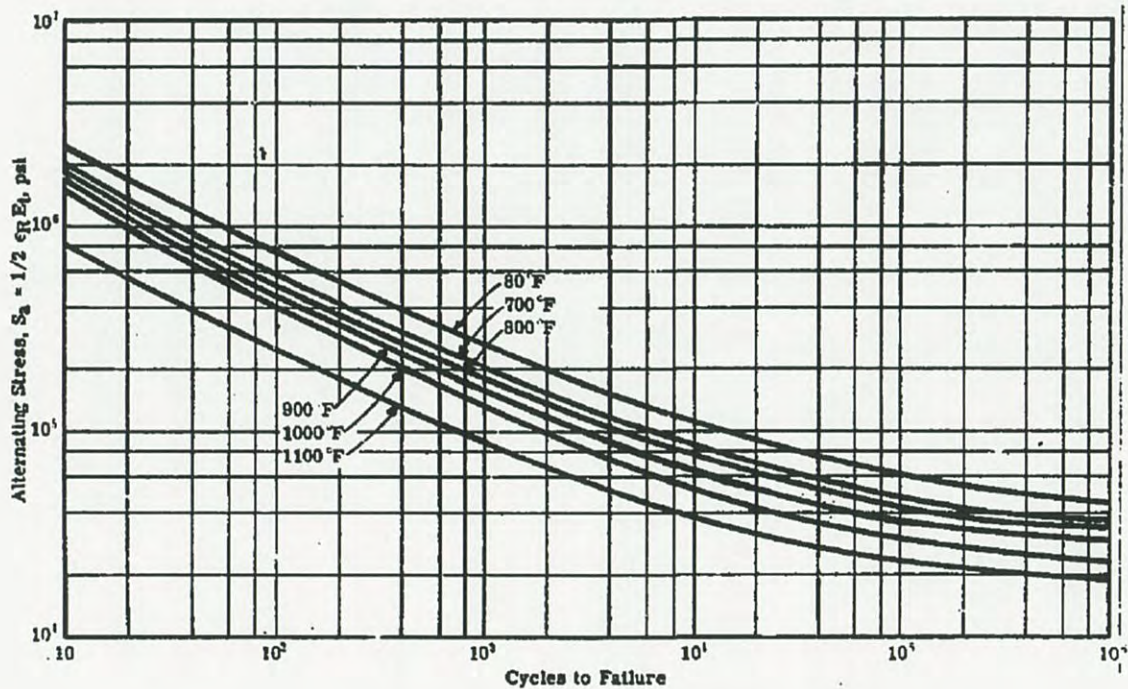
クロムモリブデン鋼の経年変化の考慮について、(ロ)F-第2表に示す。

(ロ)F-第2表 クロムモリブデン鋼の経年変化の考慮[1/2]

材料	経年変化要因	経年変化の評価	経年変化の有無
クロムモリブデン鋼	熱	使用期間中に想定されるクロムモリブデン鋼の温度範囲である-40℃から 114℃ ((ロ)B.4.6 参照) までを考慮する。クリープの影響を受ける温度はクロムモリブデン鋼の融点 (900℃以上) の三分の一である 300℃であり、運搬中に予想される最高温度(114℃)と比較して十分に高いことから、仮にクロムモリブデン鋼を使用期間中、継続して上記温度環境下に置いた場合でも、使用期間に想定される温度範囲においては組織変化、クリープ、割れ等の経年変化の影響は受けない。以上のことから輸送物が規則に定める技術基準に適合していることへの影響はない。	無し
	放射線	80年の使用期間において、最大収納量(264kg)の濃縮度5%の二酸化ウランを内容器内に収納するものとして条件を定める。使用期間における中性子の累積照射量は 6×10^{11} n/cm ² 以下であり、クロムモリブデン鋼の材料強度に影響を与えるとされる中性子照射量 10^{18} n/cm ² と比較して十分に小さいことから、放射線照射による経年変化の影響は受けない ²⁾ 。以上のことから輸送物が規則に定める技術基準に適合していることへの影響はない。	無し
	化学	クロムモリブデン鋼はクロムが添加されていることにより、材料の表面に不動態膜を形成することから腐食は発生しにくい。また、ロッドボルトの腐食については発送前検査や定期自主検査にて外観にて確認可能であり、確認された場合には補修又は交換される。このため、使用期間内に腐食等の経年変化の影響は受けない。以上のことから輸送物が規則に定める技術基準に適合していることへの影響はない。	無し

(ロ)F-第2表 クロムモリブデン鋼の経年変化の考慮[2/2]

材料	経年変化要因	経年変化の評価	経年変化の有無
クロムモリブデン鋼	疲労	<p>クロムモリブデン鋼が使用されるロッドボルトには、つり上げによる繰返し応力により、最大 \square MPa (N/mm²)の応力、$\square \div 2 = \square$ MPa の応用振幅がロッドボルトに生じる（「(ロ)-A.4.4.10 吊り上げによる繰返し応力の評価」参照）。(ロ)F-第2図のクロムモリブデン鋼の疲労曲線によると、206MPa(3.0×10⁴ psi)以下の応力振幅では室温から 371℃ (700 F)の環境下において 10⁶ 回以上繰返し応力が発生しても疲労破壊が生じることはない。保守的に使用期間を通しての輸送予定回数は計 160 回であり、輸送 1 回あたり 10 回の吊上げ、輸送とは別に年間 5 回吊上げを想定すると、繰返し応力の発生回数は 160×10 + 80×5(回)=2,000 回であり、許容繰返し回数と比較して十分に小さい。以上のことから輸送物が規則に定める技術基準に適合していることへの影響はない。</p>	無し



(ロ)F-第2図 クロムモリブデン鋼疲労曲線

(出典) 多目的高温ガス実験炉用 2 1/4 Cr-Mo 鋼の機械的性質に関するデータの調査 (1978 年 11 月) 奥達雄、菊山 紀彦、深谷 清、古平 恒夫著

(3)アルミニウム合金

アルミニウム合金の経年変化の考慮について、(ロ)F-第3表に示す。

(ロ)F-第3表 アルミニウム合金の経年変化の考慮

材料	経年変化要因	経年変化の考慮の評価	経年変化の有無
アルミニウム合金	熱	使用期間中に想定されるアルミニウム合金の温度範囲である-40℃から 114℃ ((ロ)B.4.6 参照) までを考慮する使用期間中に想定される温度範囲は、アルミニウム合金の強度が低下する温度(150℃以上)と比較し十分に低い。また、アルミニウム合金の使用箇所は輸送容器内部に使用されているため、熱による経年変化を促進させる外気・水分との接触がない。よって、熱による経年変化の影響は受けない。以上のことから輸送物が規則に定める技術基準に適合していることへの影響はない。	無し
	放射線	80年の使用期間において最大収納量(264kg)の濃縮度5%の二酸化ウランを内容器内に収納するものとして条件を定める。 使用期間における中性子の累積照射量は 6×10^{11} n/cm ² 以下であり、アルミニウム合金の材料強度に影響を与えるとされる中性子照射量 10^{21} n/cm ² と比較して十分小さい ³⁾ 。よって、放射線照射による経年変化の影響は受けない。以上のことから輸送物が規則に定める技術基準に適合していることへの影響はない。	無し
	化学	アルミニウム合金は材料の表面に酸化皮膜を形成することから腐食は発生しにくい。またアルミニウム合金は輸送容器内部に使用され、輸送中日光や雨に直接さらされることはないため、腐食等の経年変化の影響は受けない。以上のことから輸送物が規則に定める技術基準に適合していることへの影響はない。	無し
	疲労	アルミニウム合金の使用箇所には、内外圧差や取扱いに起因する応力が生じないため、疲労による経年変化は発生しない。以上のことから輸送物が規則に定める技術基準に適合していることへの影響はない。	無し

(4)ボロン入りステンレス鋼

ボロン入りステンレス鋼の経年変化の考慮について、(ロ)F-第4表に示す。

(ロ)F-第4表 ボロン入りステンレス鋼の経年変化の考慮

材料	経年変化要因	経年変化の評価	経年変化の有無
ボロン入り ステンレス鋼	熱	使用期間中に想定されるボロン入りステンレス鋼の温度範囲である-40℃から 114℃ ((ロ) B.4.6 参照) までを考慮する。ボロン入りステンレス鋼は□%のステンレス鋼と□%のボロンからなるので、基本的な性質はステンレス鋼と変わらない。そのため、ボロン入りステンレス鋼はステンレス鋼と同様に、使用期間中に想定される温度範囲では、組織変化、クリープ、割れ等の経年変化の影響は受けない。以上のことから輸送物が規則に定める技術基準に適合していることへの影響はない。	無し
	放射線	80年の使用期間において、最大収納量(264kg)の濃縮度5%の二酸化ウランを内容器内に収納するものとして条件を定める。 ボロン入りステンレス鋼は□%のステンレス鋼と□%のボロンからなるので、中性子照射に対する性質はステンレス鋼と同等である。使用期間における中性子の累積照射量は $6 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$ 以下であり、ステンレス鋼の材料強度に影響を与えるとされる中性子照射量 10^{16} n/cm^2 と比較して十分に小さい ¹⁾ 。加えて累積の中性子照射による ¹⁰ Bの減損率は 8×10^{-10} 未満であり、中性子吸収性能への影響はない。よって、放射線照射による経年変化の影響は受けない。以上のことから輸送物が規則に定める技術基準に適合していることへの影響はない。	無し
	化学	ボロン入りステンレス鋼はステンレス鋼と同様に材料の表面に不動態膜を形成することから腐食は発生しにくい。またボロン入りステンレス鋼は内容器の側面とペレット保管箱組立体間の仕切り、及びペレット保管箱組立体に使用され、輸送中日光や雨に直接さらされることはないため、腐食等の経年変化の影響は受けない。以上のことから輸送物が規則に定める技術基準に適合していることへの影響はない。	無し
	疲労	ボロン入りステンレス鋼の使用箇所には、内外圧差や取扱いに起因する応力は生じないため、疲労による経年変化は発生しない。以上のことから輸送物が規則に定める技術基準に適合していることへの影響はない。	無し

F.3 安全解析における経年変化の考慮内容

前節に示した通り、本輸送物に係る安全機能を担う構成部品及び繰り返し使用する収納物の材料を対象に、経年変化の考慮の必要性について評価を行った。その結果、構成部品及び繰り返し使用する収納物について、安全解析において使用期間中の経年変化を考慮する必要がないことがわかった。

参考文献

- (1) R. K. Nanstad, K. Farrell, D. N. Braski, and W. R. Corwin "Accelerated Neutron Embrittlement of Ferritic Steels at Low Fluence: Flux and Spectrum Effects" (1988)
- (2) 奥 達雄、菊山 紀彦、深谷 清、古平 恒夫著「多目的高温ガス実験炉用 2 1/4 Cr-Mo 鋼の機械的性質に関するデータの調査」(1978 年 11 月)
- (3) David J. Alexander "Material for Neutron Sources: Cryogenic and Irradiation Effects" (1990)

(ロ)G 規則及び告示に対する適合性の評価

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各条文ごとに説明する。

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第三条 第一項 第二号	第四条 及び 別表第一	<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる収納物に変更はない。</p> <p>したがって、既認可と同じく、本輸送物に収納される放射性物質は「特別形核燃料物質等以外のもの」に該当することから、A_2値は無制限である。</p> <p>以上のことから、当該輸送物が技術基準における A 型輸送物に該当することに変更はない。</p>	(イ)－A (イ)－B (イ)－D
第三条 第三項		<p>本輸送容器の使用予定期間は 80 年であり、使用期間を通しての輸送予定回数は計 160 回、1 回の輸送期間は通常最長 4 ヶ月を想定している。輸送物の安全機能を担う構成部品と繰り返し使用する収納物の材料(ステンレス鋼、クロムモリブデン鋼、アルミニウム合金、ボロン入りステンレス鋼)を対象に、技術上の基準に適合性を確認する上で考慮が必要となる経年変化に係り、その影響について評価した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・80 年間連続して構成部品等が使用中に想定される最高温度であるとした保守側の条件の下で、組織変化、クリープ、割れ、熱分解は発生せず、熱による経年変化の影響は受けない。 ・保守的な条件として、80 年間連続して最大収納量 (264kg) の濃縮度 5% の二酸化ウランを内容器内に収納した場合における放射線の累積照射量は、主要材料に影響の与える照射量と比較して十分に小さいことから、放射線による経年変化の影響は受けない。 ・ステンレス鋼、クロムモリブデン鋼については材料の表面に不動態膜を形成することから腐食は発生しにくく、輸送容器外面、クロムモリブデン鋼製のロッドボルト、及びステンレス鋼製の収納物については、発送前検査や定期自主検査にて外観確認が可能で確認された場合には補修又は交換する。また、ボロン入りステンレス鋼、アルミニウム合金は輸送容器内部に使用するため日光や雨に直接さらされることはなく、化学変化による経年変化の影響は受けない。 ・輸送容器構造材に用いているステンレス鋼について、保守的に年間 365 回温度変化による応力が発生すると仮定し、想定される最大応力から求めた許容繰り返し回数と比較すると、使用期間中に想定される応力の繰り返し回数は十分に小さい。またロッドボルトに使用されるクロムモリブデン鋼について、吊上げによる繰り返し応力が使用期間中に 2000 回発生すると仮定し、想定される最大応力から求めた許容繰り返し回数と比較すると、使用期間中に想定される応力の繰り返し回数は十分に小さい。アルミニウム合金、ボロン入りステンレス鋼については内外圧力差や取扱いに起因する応力は生じない。以上のことから疲労による経年変化の影響は受けない。 <p>以上のことから、経年変化に対する輸送物への影響はなく、規則に定める技術基準の適合に影響しない。</p>	(ロ)－F
第四条 第一号		<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる輸送容器の材質、構造に変更はない。</p> <p>したがって、既認可と同じく、輸送物総重量は 1300kg 以下であり、本輸送容器の外容器蓋のコーナー部には吊部を設けており、クレーンやチェーンブロック等により容易かつ安全に吊上げることが出来る。また、フォークリフトやパレットトラック等の運搬機器で外容器本体底部の脚間を支持して容易かつ安全に運搬こともできる。</p> <p>以上のことから、当該輸送物が規則に定める技術基準に適合することに変更はない。</p>	(イ)－C(12)

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第四条 第二号		<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる輸送容器の材質、構造に変更はない。そのため、以下に示すように運搬中に予想される輸送容器の温度・内圧の変化及び振動を考慮しても、技術基準が適合することに変更はない。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・輸送時の周囲温度は-40℃～38℃である。輸送容器の最低温度は周囲温度と同じ-40℃、最高温度は太陽熱放射の影響を考慮し、ANSYSコードによる解析結果から、外容器の最高温度は114℃、内容器の最高温度は75℃、内容器内平均温度は59℃である。 ・運搬中に予想される周囲温度の変化によって、輸送物の温度上昇は小さく、また構造材が金属で熱伝導が良いので、輸送容器各部の温度差は小さく、温度差による熱膨張差は発生しない。また、外容器本体、外容器蓋、内容器本体および内容器蓋について、内外板、フレーム、フランジといった主要の構造材料や収納物であるペレット保管箱組立体はいずれもステンレス鋼から成るため、異種材料による熱膨張差は発生しない。 ・梱包時温度を0℃、内容器内平均温度を59℃とし、周囲の圧力が絶対圧で60kPaまで低下した場合の内容器の最大内外圧差は63kPaであるが、内容器自身及び内容器の本体と蓋を締結しているロッドボルトに発生する応力は、いずれも基準値より小さいことから、内容器にき裂、破損等は生じない。 ・輸送中は運搬中、車両等に固定され、輸送物の最大重量及び運搬中に予想される加速度を考慮しても輸送物の健全性は確保される構造となっている。また、輸送物の固有振動数は車両から受ける励振力の周波数域と差があり、応答振幅の影響を考慮しても輸送物の構造健全性は確保され亀裂、破損を生じることおそれはない。 	<p>(ロ)－B.4.6</p> <p>(ロ)－A.5.1.2</p> <p>(ロ)－A.4.6</p> <p>(ロ)－A.4.7</p>
第四条 第三号		<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる輸送容器の材質、構造に変更はない。</p> <p>したがって、既認可と同じく、輸送物の外面の突起物は外容器表面の脚のみであるが、この脚は輸送物を積み重ねる際の位置決めのものであり、不要な突起物ではない。また、輸送物表面はステンレス鋼製板で構成されているため除染は容易である。</p> <p>以上のことから、当該輸送物が規則に定める技術基準に適合することに変更はない。</p>	<p>(イ)－C(11)</p> <p>(イ)－C(6)</p>
第四条 第四号		<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる輸送容器の材質、構造に変更はなく、輸送容器の構成部品は化学的に安定した材料を使用していることから、材料相互の接触による危険な物理的作用又は化学反応が生じることおそれないことに変更はない。</p> <p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる収納物に変更はない。したがって、既認可と同じく、収納物であるペレット保管箱組立体は容器の構造材と同じくステンレス鋼製であり、熱膨張によって内容器と接触することはない。そのため、危険な物理的作用が生じることおそれないことに変更はない。</p> <p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる収納物に変更はない。したがって、既認可と同じく、収納物であるペレット保管箱組立体は、ステンレス鋼であり、化学的に安定した材料であるため、輸送容器との間に腐食等、危険な化学的反応が生じることおそれないことに変更はない。</p> <p>以上のことから、当該輸送物は規則に定める技術基準に適合することに変更はない。</p>	<p>(ロ)－A.4.1</p> <p>(ロ)－A.5.1.2</p> <p>(ロ)－A.4.1</p>
第四条 第五号		<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる輸送容器の構造に変更はない。</p> <p>したがって、既認可と同じく、本輸送物には弁やバルブに相当するものはないため、規則に定める技術基準に該当しない。</p>	<p>(イ)－C(10)</p>

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第四条 第八号	第九条	<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる表面密度限度に変更はない。</p> <p>したがって、既認可と同じく、収納物の表面の放射性物質の密度は任意の場所をとっても告示第九条で定められた表面密度限度（α線を放出する核種：0.4Bq/cm²、α線を放出しない核種：4Bq/cm²）を超えないことを確認することになっている。</p> <p>以上のことから、当該輸送物が規則に定める技術基準に適合することに変更はない。</p>	(ハ)－A.2
第四条 第十号		<p>設計変更においては、既認可と同じく、核燃料物質等の使用等に必要物品以外のものを収納していないことを確認の上で輸送を行う。</p> <p>以上のことから、当該輸送物は規則に定める技術基準に適合することに変更はない。</p>	(ハ)－A.2
第五条 第二号		<p>設計変更においては、適合性判断を行う条件となる輸送容器の構造に変更はない。</p> <p>したがって、既認可と同じく、本輸送物の外寸法は、次のとおり10cm以上である。</p> <p>(長さ)1144mm × (幅)830mm × (高さ)1060mm</p> <p>以上のことから、当該輸送物が規則に定める技術基準に適合することに変更はない。</p>	(イ)－C(6)
第五条 第三号		<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる輸送容器の構造及び封印の運用方法に変更はない。</p> <p>したがって、既認可と同じく、本輸送物の外容器及び内容物の蓋はロッドボルトにより締付けており、ロッドボルトを外すにはレンチ等の工具が必要となり、更に外容器蓋を外すには揚重機が必要となるため、誤操作により開かれる恐れはない。また、外容器本体に蓋を取付けた後に本体と蓋を通した封印を施すことにより、開封された場合に開封されたことが明らかになるようになっている。</p> <p>以上のことから、当該輸送物が規則に定める技術基準に適合することに変更はない。</p>	(ロ)－A.4.3 (ハ)－A.1
第五条 第四号		<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる輸送容器の材料に変更はない。そのため、既認可と同じく、本輸送物における運転中に予想される温度範囲は-40℃～114℃であり、構成部品に使用する材料（ステンレス鋼、アルミニウム、シリコンゴム、セラミックファイバー等）は、運搬中に予想される温度範囲（-40℃から114℃）において、著しい強度の低下や脆化等がなく、必要とされる材料強度等に影響しないため、亀裂・破損が生じるおそれはない。</p> <p>以上のことから、当該輸送物が規則に定める技術上の基準に適合することに変更はない。</p>	(ロ)－B.4.6 (ロ)－A.4.2 (ロ)－B.3
第五条 第五号		<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる輸送容器の材料、構造に変更はない。</p> <p>したがって、既認可と同じく、周囲の圧力が絶対圧で60kPaまで低下した場合の内容器の最大内外圧差は63kPaであるが、内容器自身及び内容器の本体と蓋を締結しているロッドボルトに発生する応力は、いずれも基準値より小さいことから、内容器にき裂、破損等は生じない。そのため、輸送物から放射性物質が漏れいするおそれはない。</p> <p>以上のことから、当該輸送物が規則に定める技術基準に適合することに変更はない。</p>	(ロ)－A.4.6
第五条 第六号		<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる収納物に変更はない。</p> <p>したがって、既認可と同じく、本輸送容器には液体状の核燃料物質等を収納しないため、技術基準に該当しない。</p>	(イ)－D

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第五条 第七号		<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる輸送容器の材料・構造、及び収納物に変更はない。</p> <p>したがって、既認可と同じく、最も線源強度が高くなる条件として、最大収納量（264kg）の濃縮度 5%の二酸化ウランを内容器内に収納し、保守的にペレット保管箱を含むペレット保管箱組立体及びボロン入りステンレス鋼製板は存在しないものとし、線源強度が最も高くなるウラン同位体条件を考慮した上で、QAD-CGGP2R コードによる遮蔽解析を実施したところ、輸送物表面の線量当量率は 0.028 mSv/h 以下であり、2 mSv/h を超えることはない。</p> <p>以上のことから、当該輸送物が規則に定める技術基準に適合することに变更はない。</p>	(ロ)-D.1
第五条 第八号		<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる輸送容器の材料・構造、及び収納物に変更はない。</p> <p>したがって、既認可と同じく、最も線源強度が高くなる条件として、最大収納量（264kg）の濃縮度 5%の二酸化ウランを内容器内に収納し、保守的にペレット保管箱を含むペレット保管箱組立体及びボロン入りステンレス鋼製板は存在しないものとし、線源強度が最も高くなるウラン同位体条件を考慮した上で、QAD-CGGP2R コードによる遮蔽解析を実施したところ、輸送物表面から 1m 離れた位置における線量当量率は 2.56μSv/h 以下であり、100μSv/h を超えることはない。</p> <p>以上のことから、当該輸送物が規則に定める技術基準に適合することに变更はない。</p>	(ロ)-D.1

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第五 第九号 (イ)	第十三条 及び 別記第三	<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる輸送容器の構造、総重量に変更はない。</p> <p>したがって、既認可と同じく、下記に示す通り外運搬告示第十三条に掲げる条件下に置いた場合でも、放射性物質の漏えいはない。</p> <p>以上のことから、当該輸送物が規則に定める技術基準に適合することに変更はない。</p> <p><u>別記第三の第一号 (イ)</u> 本輸送容器の外殻はステンレス鋼板で覆われ、接合部は全て溶接されている。また、外容器本体のフランジ部はその内側が1段高くなる形状となっており、本体と蓋の隙間からの雨水の浸入を防止する構造となっている。したがって、水噴霧による輸送容器内への水の浸透はなく、材料劣化は生じない。そのため、本条件下に置いた場合でも密封境界も含めた輸送容器全体には材料劣化による破損、亀裂が生じず、放射性物質が漏えいするおそれはない。</p> <p><u>別記第三の第一号 (ロ) (1)</u> 原型容器に対する落下高さ 1.2m の自由落下試験において、原型容器の変形は衝突面のみの局所的なものであり、健全性は保たれていた。そのため、本条件下に置いた場合でも密封境界も含めた輸送容器全体に破損、亀裂が生じず、放射性物質が漏えいするおそれはない。</p> <p><u>別記第三の第一号 (ロ) (2)</u> 本輸送物の材料、重量は本告示の項目に該当しない。</p> <p><u>別記第三の第一号 (ロ) (3)</u> 総重量の5倍に相当する荷重条件で構造解析を実施した結果、各部位の負荷荷重は座屈荷重を下回り、輸送容器に変形は生じない。そのため、本条件下に置いた場合でも、密封境界も含めた輸送容器全体に破損、亀裂が生じず、放射性物質が漏えいするおそれはない。</p> <p><u>別記第三の第一号 (ロ) (4)</u> 原型容器に対して6kg丸棒を1m高さから落下させる貫通試験を実施した結果、輸送容器に大きな損傷は見られず、健全性を保っていた。そのため、本条件下に置いた場合でも、密封境界も含めた輸送容器全体に破損、亀裂が生じず、放射性物質の漏えいするおそれはない。</p>	<p>(ロ)ーA.5.2</p> <p>(ロ)ーA.5.3</p> <p>(イ)ーC</p> <p>(ロ)ーA.5.4</p> <p>(ロ)ーA.5.5</p>
第五 第九号 (ロ)	第十三条 及び 別記第三	<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる輸送容器の材料・構造、及び収納物に変更はない。</p> <p>したがって、既認可と同じく、下記に示す通り外運搬告示第十三条に掲げる条件下に置いた場合でも、表面における最大線量当量率は著しく増加せず、かつ2mSv/hを超えることはない。</p> <p>以上のことから、当該輸送物が規則に定める技術基準に適合することに変更はない。</p> <p>最も線源強度が高くなる条件として、最大収納量(264kg)の濃縮度5%の二酸化ウランを内容器内に収納し、保守的にペレット保管箱を含むペレット保管箱組立体及びボロン入りステンレス鋼製板は存在しないものとし、線源強度が最も高くなるウラン同位体条件を考慮し、一般の試験条件下における寸法変更として保守的に各方向に□mm圧縮変形するものとした上で、QAD-CGGP2Rコードによる遮蔽解析を実施したところ、輸送物表面の線量当量率は0.0326mSv/h以下であり、2mSv/hを超えることはない。また、線量当量率の増加割合は約17%である。</p>	<p>(ロ)ーD.1</p> <p>(ロ)ーD.3.1.2</p>
第十一条		<p>第三条第三項の技術上の基準に対する説明の通り、経年変化に対する輸送物への影響はなく、規則に定める技術基準の適合に影響しない。</p>	(ロ)ーF

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
	第二十三条	<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる収納物に変更はない。</p> <p>したがって、既認可と同じく、本輸送物は、15 g 以上のウラン 235 を輸送することから、本輸送物が技術基準における核分裂性輸送物に該当することに変更はない。</p>	(イ)－D
<p>第十一条 第一号 (イ)</p> <p>第二十四条 及び 別記第十一</p>		<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる輸送容器の構造、総重量に変更はない。したがって、既認可と同じく、下記に示す通り外運搬告示第二十四条に掲げる条件下に置いた場合でも、容器の構造部に一辺 10cm の立方体を包含するようなくぼみは生じない。</p> <p>以上のことから、当該輸送物が規則に定める技術基準に適合することに変更はない。</p> <p><u>別記第三の第一号 (イ)</u> 第五条第九号(イ)において説明の通り、水噴霧による輸送物内外の材料劣化は生じない。そのため、本条件下に置いた場合でも外接する長方体の各辺は 10 cm 以上である。</p> <p><u>別記第三の第一号 (ロ) (1)</u> 第五条第九号(イ)において説明の通り、原型容器に対する落下高さ 1.2m の自由落下試験において、輸送容器の変形は局所的であり 1 辺 10cm の立方体を包含するようなくぼみは生じなかった。そのため、本条件下に置いた場合でも外接する長方体の各辺は 10 cm 以上である。</p> <p><u>別記第三の第一号 (ロ) (3)</u> 第五条第九号(イ)において説明の通り、総重量の 5 倍に相当する荷重条件でも輸送容器に変形は生じない。そのため、本条件下に置いた場合でも外接する長方体の各辺は 10 cm 以上である。</p> <p><u>別記第三の第一号 (ロ) (4)</u> 第五条第九号(イ)において説明の通り、原型容器に対して 6kg 丸棒を 1m 高さから落下させる貫通試験を実施した結果、輸送容器に大きな損傷は見られず、健全性を保っていた。そのため、本条件下に置いた場合でも外接する長方体の各辺は 10 cm 以上である。</p>	(ロ)－A.9.1.4

規則の項目	告示の項目	説 明	申請書記載 対応項目
第十一条 第三号		<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる輸送容器の材料に変更はない。</p> <p>したがって、既認可と同じく、外運搬規則第五条第四号における説明で述べた通り、$-40\sim 114^{\circ}\text{C}$の温度範囲において、き裂、破損等を生じないことに変更はない。</p> <p>以上のことから、当該輸送物が規則に定める技術基準に適合することに変更はない。</p>	(口)-A.4.2 (口)-B.4.6

(ハ)章 輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱い方法

(ハ)－A 輸送物の取扱い方法

輸送物の代表的な取扱い方法を以下に示す。輸送物は取扱施設に適用される法令、規定及び設備上の制限に従った運用を行わなければならないことから、必要により下記取扱い方法と異なる運用を行う場合もある。代表的な取扱いフローを(ハ)A－第1図に示す。

A.1 装荷方法

(1)輸送容器、機材等の準備

使用する輸送容器は、機能が損なわれていないことが確認されたものを使用する。使用するペレット保管箱及びペレット保管箱組立体の構成部材は、機能が損なわれていないことが確認されたものを使用する。

(2)ウラン酸化物（ペレット）又はガドリニア入りウラン酸化物（ペレット）の準備

収納予定のウラン酸化物（ペレット）又はガドリニア入りウラン酸化物（ペレット）が輸送物の仕様に合致していることを確認する。

(3)ペレット保管箱の準備

波板にウラン酸化物（ペレット）又はガドリニア入りウラン酸化物（ペレット）を並べ必要枚数をペレット保管箱内に重ねて入れる。この際、緩衝及び防振の目的で、必要に応じてネオプレンゴムや発泡ウレタンなどの有機高分子系スペーサをペレット保管箱の蓋と波板の間や波板間に挟みこむ。

ペレット保管箱の蓋をした後、取扱施設の運用上の要求等の必要に応じてポリ袋等にペレット保管箱を入れ、シーラーやテープ類で開口しないように封をする。

(4)ペレット保管箱組立体の組立

最下部および中間部仕切板とペレット保管箱を交互に重ねて、上部仕切板を重ねた後、支柱頂部をナットで締付けて組立てる。ペレット保管箱の輸送中の振動を抑える目的で、必要に応じてネオプレンゴムや発泡ウレタンなどの有機高分子系スペーサをペレット保管箱と仕切板の間に挟みこむ場合がある。

ペレット保管箱はペレット保管箱組立体(A)で12箱、(B)で5箱までを最大組み込む。ペレットを収納したペレット保管箱が最大数に満たない場合は、空のペレット保管箱を組み込むか又はペレット保管箱を組み込まず、仕切板のみを重ねて組立てる。

ペレット保管箱組立体(A)は、最上部仕切板及び最下部仕切板各1枚と中間部仕切板11枚で構成される。ペレット保管箱組立体(B)は、最上部仕切板及び最下部仕切板各1枚と中間部仕切板4枚で構成される。支柱頂部のナットを締付けて組立体を完成させるためには、構造上、所定数の仕切板を組み込む必要がある。

なお、内容器本体内でペレット保管箱組立体の組立を行ってもよい。この場合、「(5)ペレット保管箱組立体の装荷」は省略される。さらに内容器本体があらかじめ外容器本体内にある場合には「(7)内容器の装荷」が省略される。

(5)ペレット保管箱組立体の装荷

ペレット保管箱組立体の支柱にアイナットを取付け、クレーン等の揚重機を用いて内容器本体内にペレット保管箱組立体 2 基を装荷する。装荷後にアイナットを取外し、組立体カバーを被せる。

ペレット保管箱組立体は、ペレットの有無に関わらず 2 基装荷する必要がある。したがって、ペレットを収納した組立体が 1 基のみの場合、空のペレット保管箱を組み込んだペレット保管箱組立体もしくは仕切板のみで組立てたペレット保管箱組立体 1 基を併せて装荷する必要がある。

(6)内容器の組立

ペレット保管箱組立体 2 基を装荷した内容器のフランジ部に O リングが正しく設置されていることを確認した後、クレーン等の揚重機もしくは作業員が直接持ち上げて蓋をする。蓋はフランジ部の 16 本のロッドボルトで締付ける。ロッドボルトは初期締付けトルク $44.1\text{N}\cdot\text{m}$ ($450\text{kg}\cdot\text{cm}$)で均等に締付ける。

(7)内容器の装荷

吊部を兼用した内容器蓋バーを利用してクレーン等の揚重機を用いて外容器本体内に内容器を装荷する。

なお、あらかじめ内容器を外容器内に収納して蓋を外しておき、「(5)ペレット保管箱組立体の装荷」及び「(6)内容器の組立」を実施してもよい。

(8)外容器の組立

内容器が正しく装荷されたことを確認後、クレーン等の揚重機を用いて蓋をしたのち、フランジ部の 20 本のロッドボルトで締付ける。ロッドボルトは初期締付けトルク $44.1\text{N}\cdot\text{m}$ ($450\text{kg}\cdot\text{cm}$)で均等に締付ける。また、外容器フランジ部の封印取付け箇所 2 箇所に封印を取付ける。

(9)一時保管もしくは出荷

フォークリフトまたはパレットトラック等の運搬機器又はクレーン等の揚重機を用いて出荷までの一時保管場所もしくは出荷場所まで慎重に移動し、一時保管もしくは出荷の為の積付けをおこなう。

(注) ペレット保管箱、ペレット保管箱組立体、波板等の収納物構成部材は、取扱施設において「ペレット貯蔵容器、ペレット貯蔵容器組立体、波皿トレイ」等の施設固有の別称で呼ばれる場合がある。

A.2 輸送物の発送前検査

輸送物を輸送する際には、あらかじめ(ハ)A-第1表に示す発送前検査を装荷作業の前中後に適時実施する。

(ハ)A-第1表 輸送物発送前検査要領

検査項目	検査方法	基準
外観検査	輸送物の外観を目視により検査する。	輸送物の機能を損なう著しい変形や破損等がないこと。
吊上げ検査	外容器蓋吊部の外観を目視で検査する。	吊部の強度を損なうような変形や溶接部の割れがないこと。
重量検査	ウラン酸化物(ペレット)又はガドリニア入りウラン酸化物(ペレット)の秤量結果にペレット保管箱、ペレット保管箱組立体構成部材、同梱する備品類の保守的な基準重量もしくは秤量結果と輸送容器の保守的な基準重量を加算して輸送物総重量を求める。	輸送物総重量：1300kg以下。
表面密度検査	スマヤ法等の適切な方法により輸送物外表面における α 線を放出する核種および α 線を放出しない核種の表面密度を検査する。	α 線を放出する核種：0.4 Bq/cm ² 以下 α 線を放出しない核種：4 Bq/cm ² 以下
線量当量率検査	サーベイメーター等の線量当量率測定に適した機器を用いて、輸送物外表面及び表面から1m離れた位置の γ 線量率を測定する。	輸送物外表面：2 mSv/h以下 輸送物外表面から1m離れた位置：100 μ Sv/h以下
未臨界検査	1. 収納物収納前に内容物のボロン入りステンレス鋼製板の外観を目視により検査する。 2. 輸送物の外観を目視により検査する。	1. 著しい変形や破損等及び所定位置からのズレがないこと。 2. 隣接する輸送物との燃料領域間隔が著しく減少するような変形がないこと。
収納物検査	基準を満足していることを、検査記録、測定記録、証明書、現物確認等の適切な方法によって確認する。	1. 濃縮度 5wt%以下 2. 濃縮ウランの種類 濃縮ウラン(再生濃縮ウランを除く：ASTM C996-04 ECGUに準拠) $^{232}\text{U} \leq 0.0001 \mu\text{g/gU}$ $^{234}\text{U} \leq 10 \times 10^3 \mu\text{g/g}^{235}\text{U}$ $^{236}\text{U} \leq 250 \mu\text{g/gU}$ $^{99}\text{Tc} \leq 0.01 \mu\text{g/gU}$ 但し、 $^{236}\text{U} < 125 \mu\text{g/gU}$ の場合は、 ^{232}U 及び ^{99}Tc は適用外 3. ウラン酸化物(ペレット)又はガドリニア入りウラン酸化物(ペレット)重量が下記を満足すること。 ペレット保管箱組立体(A)の場合：264kg-UO ₂ 以下 ペレット保管箱組立体(B)の場合：200kg-UO ₂ 以下 4. 外観 中間仕切板(ボロン入ステンレス鋼)に著しい変形や破損等がないこと。 ペレット保管箱組立体の構成部材に著しい変形や破損等がなく、確実に組立てられていること。 核燃料物質等の使用等に必要な物品以外のものが収納されていないこと。 5. 収納基数 ペレット保管箱組立体が2基収納されていること。 6. その他 ペレット保管箱、及びペレット保管箱組立体の使用期間が80年を超えていないこと。

A.3 取出し方法

(1)入荷

到着した輸送物は、クレーン等の揚重機もしくはフォークリフト等の運搬機器によって開梱までの一時保管場所もしくは開梱場所まで慎重に移動する。

(2)外容器の蓋開け

外容器蓋と本体を連結するロッドボルトを緩めて外し、クレーン等の揚重機を外容器蓋吊部に連結して外容器蓋を吊上げて外す。

(3)内容物の吊出し

クレーン等の揚重機を内容物蓋の吊部に連結して内容物を外容器から慎重に吊出す。なお、「(4)内容物の蓋開け」を外容器本体内で実施する場合は、本項は省略される。

(4)内容物の蓋開け

内容物蓋と本体を連結するロッドボルトを緩めて外し、クレーン等の揚重機もしくは作業員が直接持ち上げて蓋を外す。

(5)ペレット保管箱組立体の吊出し

ペレット保管箱組立体の支柱頂部にアイナットを取付けて、クレーン等の揚重機と連結して慎重に吊出す。なお、「(6)ペレット保管箱組立体の解体」を内容物本体内で実施する場合、本項は省略される。

(6)ペレット保管箱組立体の解体

組立体カバーを外した後、ペレット保管箱組立体の支柱のナットを緩めて取り外し、仕切り板とペレット保管箱を交互に取り出す。取り出したペレット保管箱は、取扱施設の所定の場所に保管される。

(7)再組立

空のペレット保管箱と仕切り板もしくは仕切り板のみでペレット保管箱組立体を組み立て、クレーン等の揚重機を用いて内容物内本体内に収納し、組立体カバーを被せる。内容物内でペレット保管箱組立体を組み立ててもよい。

クレーン等の揚重機もしくは作業員が直接持ち上げて内容物の蓋をしてロッドボルトを締付ける。(締付けトルクの管理は不要)

クレーン等の揚重機を用いて、内容物を外容器本体内に収納し、外容器の蓋をした後ロッドボルトを締付ける。(締付けトルクの管理は不要) 内容物本体があらかじめ外容器本体内にある場合は、内容物の収納作業は省略される。

輸送容器をクレーン等の揚重機もしくはフォークリフト等の運搬機器によって保管場所もしくは整備場所まで慎重に移動する。

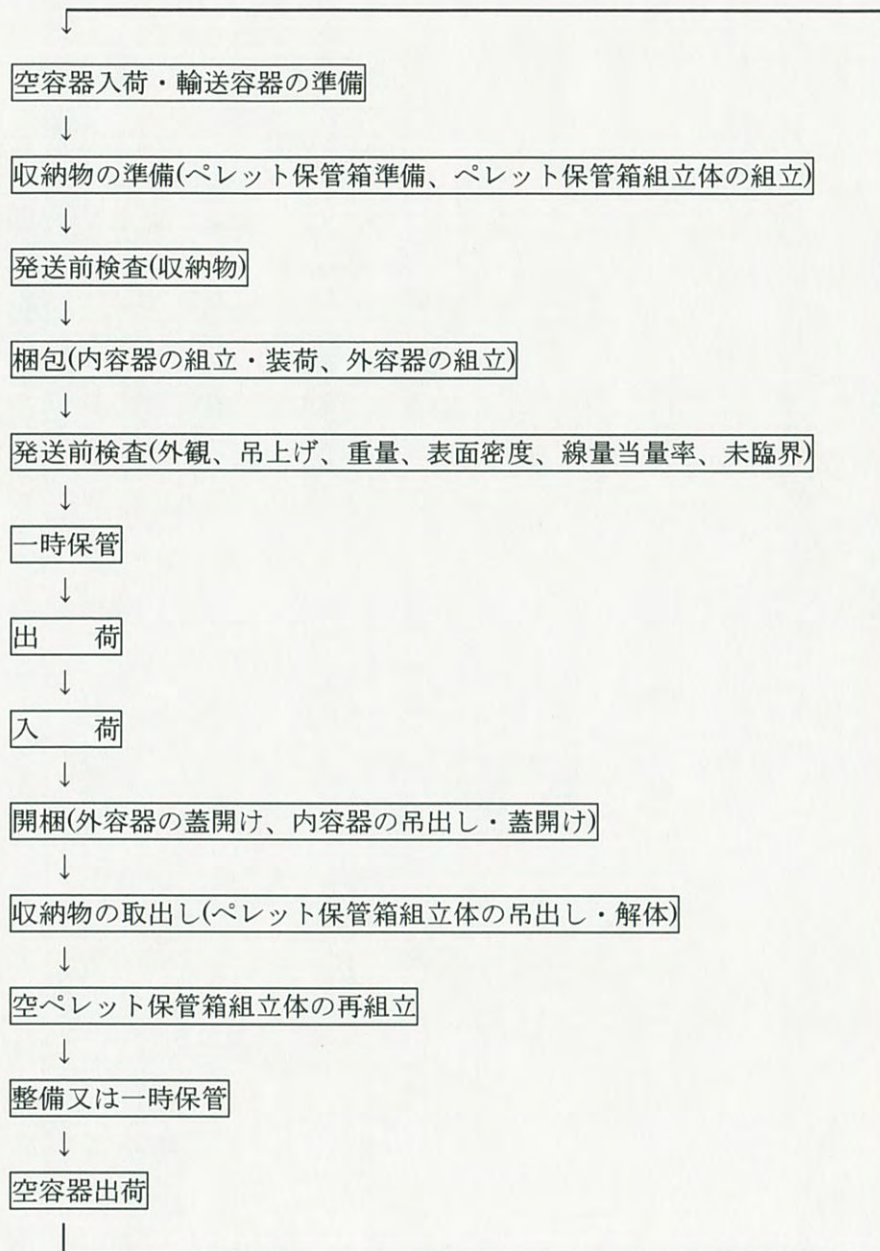
(注) ペレット保管箱、ペレット保管箱組立体、波板等の収納物構成部材は、取扱施設において「ペレット貯蔵容器、ペレット貯蔵容器組立体、波皿トレイ」等の施設固有の別称で呼ばれる場合がある。

A.4 空容器の準備

- (1) 輸送容器は使用後、取扱施設における持出し手順等に従って表面汚染等の検査を実施し、必要があれば除染等を実施して、保管・整備場所まで移動して保管・整備する。
- (2) 輸送容器は、屋内で保管するかもしくは止むを得ず屋外で保管する場合については、輸送容器が直接雨風に曝されないよう配慮する。
- (3) 輸送容器を使用前に一時的保管する場合は、内容器及び外容器の蓋をして保管する。ロックボルトは輸送容器の取扱上必要な本数を締付ける。また、焼付き防止のため、不要に過大な締付け力とならないよう注意する。
- (4) 輸送容器を使用する場合は、梱包作業前に目視により機能が維持されていることを確認する。

A.5 その他

施設に適用される法令及び規定に適合する場合には、必要に応じて収納物を収納した内容器は、密封性を有する構内運搬容器として、フォークリフトやパレットトラック等の運搬機器又はクレーン等の揚重機を用いて構内運搬することがある。



(ハ)A-第1図 輸送物の取扱いフロー例

(ハ)－B 保守条件

輸送容器は定期自主検査を1年に1回以上(1年に10回以上輸送に使用する場合は、輸送10回につき1回)行う。定期自主検査要領を(ハ)B－第1表に示す。なお、輸送容器を1年以上の長期間にわたって使用せず、連続的に同じ場所に保管する場合の定期自主検査要領を(ハ)B－第2表に示す。

ボルト・ナット類、スペーサ類及びアルミハニカム等の輸送容器の脱着可能な構成部品は、輸送容器の機能維持や保守整備等の理由により必要があれば随時同一規格品と取替える。

輸送容器本体と蓋は、輸送容器の機能維持や保守整備等の理由により必要があれば随時修理を行う。なお、Oリングについては輸送実施前に新しいものと取替える。

B.1 外観検査

定期自主検査毎に以下の項目について、目視により検査する。

- ・外容器と内容器の本体及び蓋の内外表面に輸送容器の機能を損なうような著しい変形や破損等がないこと。
- ・各溶接部の割れがないこと。
- ・ボルト・ナット類の変形や破損もしくは欠落がないこと。
- ・スペーサやスキッド等のゴム類の著しい劣化、有害な欠損及び位置ズレがないこと。

輸送容器を1年以上の長期間にわたって使用せず、連続的に同じ場所に保管する場合は、輸送容器内部を除いた部位を対象とする上記検査を実施し、保管が終了し輸送に使用する前に上記の検査を実施する。

B.2 耐圧検査

該当しない

B.3 気密漏えい検査

該当しない

B.4 遮蔽検査

該当しない

B.5 未臨界検査

定期自主検査毎に以下の項目について、目視により検査する。

- ・内容器のボロン入りステンレス鋼製板に著しい変形や破損等及び所定位置からのズレがないこと。
- ・内容器及び外容器の本体に隣接する輸送物との燃料領域間隔が著しく減少するような変形がないこと。

輸送容器を1年以上の長期間にわたって使用せず、連続的に同じ場所に保管する場合は、当該検査は対象外とし、保管が終了し輸送に使用する前に上記の検査を実施する。

B.6 熱検査

該当しない

B.7 吊上検査

定期自主検査毎に外容器および内容物の蓋吊部の強度を損なうような変形や溶接部の割れがないことを目視により検査する。

輸送容器を 1 年以上の長期間にわたって使用せず、連続的に同じ場所に保管する場合は、当該検査は対象外とし、保管が終了し輸送に使用する前に上記の検査を実施する。

B.8 作動確認検査

該当しない

B.9 補助系の保守

該当しない

B.10 密封装置の弁、ガスケット等の保守

定期自主検査毎に内容物フランジ部に密封性を損なうような著しい劣化や欠損がないことを目視により検査する。

輸送容器を 1 年以上の長期間にわたって使用せず、連続的に同じ場所に保管する場合は、当該検査は対象外とし、保管が終了し輸送に使用する前に上記の検査を実施する。

なお、O リングについては輸送実施前に新しいものと取替える。

B.11 輸送容器の保管

輸送容器を 1 年以上の長期間にわたって使用せず、連続的に同じ場所に保管する場合は屋内保管とする。長期保管が終了もしくは保管場所変更等により一時的に保管が中断した場合は、保管中の定期検査の実施間隔にかかわらず、「B.1 外観検査」、「B.5 未臨界検査」、「B.7 吊上げ検査」及び「B.10 密封装置の弁、ガスケット等の保守」の各検査を実施する。

B.12 記録の保管

製作時検査記録及び定期自主検査記録は、当該輸送容器の使用予定がなく承認登録を廃止するまで保管する。

B.13 その他

特になし。

(ハ)B-第1表 定期自主検査要領

検査項目	検査方法	基準
外観検査	<ol style="list-style-type: none"> 1. 外容器と内容器の本体及び蓋の内外表面を目視により検査する。 2. 各溶接部を目視により検査する。 3. ボルト・ナット類を目視により検査する。 4. スペーサやスキッド等のゴム類を目視により検査する。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 輸送容器の機能を損なうような著しい変形や破損等がないこと。 2. 割れがないこと。 3. 変形や破損もしくは欠落がないこと。 4. 著しい劣化、有害な欠損及び位置ズレがないこと
未臨界検査	<ol style="list-style-type: none"> 1. 内容器のボロン入りステンレス鋼製板の外観を目視により検査する。 2. 輸送容器の外観を目視により検査する。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 著しい変形や破損等及び所定位置からのズレがないこと。 2. 隣接する輸送物との燃料領域間隔が著しく減少するような変形がないこと。
吊上検査	外容器及び内容器蓋吊部の外観を目視で検査する。	吊部の強度を損なうような変形や溶接部の割れがないこと。
密封装置の弁、ガスケット等の保守	内容器フランジ部を目視により検査する。	密封性を損なうような著しい劣化や欠損がないこと

(ハ)B-第2表 長期保管時定期自主検査要領

検査項目	検査方法	基準
外観検査	<ol style="list-style-type: none"> 1. 外容器の本体外表面を目視により検査する。 2. 外容器外表面の各溶接部を目視により検査する。 3. 外容器のボルト・ナット類を目視により検査する。 4. 外容器外部のスペーサやスキッド等のゴム類を目視により検査する。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 輸送容器の機能を損なうような著しい変形や破損等がないこと。 2. 割れがないこと。 3. 変形や破損もしくは欠落がないこと。 4. 著しい劣化、有害な欠損及び位置ズレがないこと

(輸送容器を1年以上使用せず連続的に同じ場所に長期保管する場合のみ)

(二)章 安全設計及び安全輸送に関する特記事項

特になし

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

(イ)-A 品質マネジメントシステム

申請者である原子燃料工業株式会社（以下、当社と云う。）は、核燃料輸送物設計承認申請書（令和4年6月20日付熊原第22-004号）により申請した輸送容器に関し、法令に定める技術上の基準並びに運搬に関する確認の申請書又は容器承認の申請書に示された設計仕様及び製作方法に適合して製作するため、以下のとおり品質マネジメントシステムを当社内に確立し、文書化し、実施し、かつ、維持する。

A.1 品質マニュアル

品質マネジメントシステムにおけるトップマネジメントは社長より権限移譲を受け、熊取事業所長、東海事業所長及びエンジニアリング事業部長の3事業部門長が共同で担う。（以下、トップマネジメントと云う。）トップマネジメントは品質マネジメントシステムの適用範囲、品質マネジメントシステムについて確立され文書化された手順及び品質マネジメントシステムのプロセス間の相互関係に関する記述を含む品質マニュアルを作成、維持させる。なお、品質マネジメントシステム業務を規定する品質管理計画はこの品質マニュアルとその下位規定により構築される。

A.2 文書管理

品質マニュアル及びその下位規定により品質マネジメントシステムで必要とされる文書について、承認及びレビュー並びに識別に関する手順を定める。

A.3 品質記録の管理

品質マニュアル及びその下位規定により、読みやすく、識別可能で、検索可能な品質記録を作成、維持するために、品質記録の識別、保管、保護、検索、保管期間及び廃棄に関して必要な管理手順を定める。なお、品質記録には、容器製造者等から提出される品質記録を含むとともに、容器承認及び設計承認の有効期間を考慮した保管期間を定める。

(イ)－B 申請者の責任

B.1 品質マネジメントシステムにおけるトップマネジメント

トップマネジメントは輸送容器の製作に係る最高責任者として、品質方針を設定し、それを基に(イ)B－第1図に示す関係各部に品質目標を設定させる。また、マネジメントレビューを実施し、品質マネジメントシステムの実施状況をレビューするとともに、その有効性を継続的に改善する責任を負う。

B.2 管理責任者

トップマネジメントは、熊取事業所、東海事業所及びエンジニアリング事業部からそれぞれ管理責任者を任命する。それら管理責任者は本来の職務とは関係なく、各事業部において次の事項の責任と権限を有す。

- (1) 品質マネジメントシステムを確立し、実行し、維持することを確実にする。
- (2) 品質マネジメントシステムの実施状況をトップマネジメントへ報告する。

B.3 熊取事業所品質保証部（以下、熊取品質保証部と云う。）

熊取品質保証部長は、下記の責任及び権限を有する。

- (1) 品質マネジメントシステムの立案と推進
- (2) 内部品質監査及び容器製造者等調達先の品質監査の実施、審査並びに是正処置の指示
- (3) 輸送容器の製造時受入検査、定期自主検査及び発送前検査の実施
- (4) 製造時検査記録の作成
- (5) 是正処置の効果の確認及び報告

B.4 熊取事業所燃料製造部（以下、熊取燃料製造部と云う。）

熊取燃料製造部長は、次の責任及び権限を有する。

- (1) 輸送容器の製作、取扱い、保守等に関する文書の作成
- (2) 容器製造者等調達先の技術能力評価及び承認
- (3) 容器製造者等調達先への発注仕様書の作成
- (4) 容器製造者等調達先から提出させる文書の審査及び承認
- (5) 輸送容器の製作の管理
- (6) 核燃料輸送物の輸送の管理

B.5 エンジニアリング事業部燃料サイクル技術部（以下、燃料サイクル技術部と云う。）

燃料サイクル技術部長は、次の責任及び権限を有する。

- (1) 輸送容器の設計及び許認可取得
- (2) 輸送容器の設計に関する文書の作成
- (3) 輸送容器の試作、評価及び品質確認試験の管理

B.6 エンジニアリング事業部炉心・安全技術部（以下、炉心・安全技術部と云う。）

炉心・安全技術部長は、次の責任及び権限を有する。

- (1) 輸送容器の臨界・遮蔽解析

B.7 熊取事業所環境安全部（以下、熊取環境安全部と云う。）

熊取環境安全部長は、次の責任及び権限を有する。

- (1) 核燃料物質の計量管理に関する計画立案及び実施
- (2) 計量管理規定及び関連基準類の策定及び遵守状況の管理

B.8 熊取事業所設備管理部（以下、熊取設備管理部と云う。）

熊取設備管理部長は、次の責任及び権限を有する。

- (1) 計測器の定期検査

B.9 大阪営業部

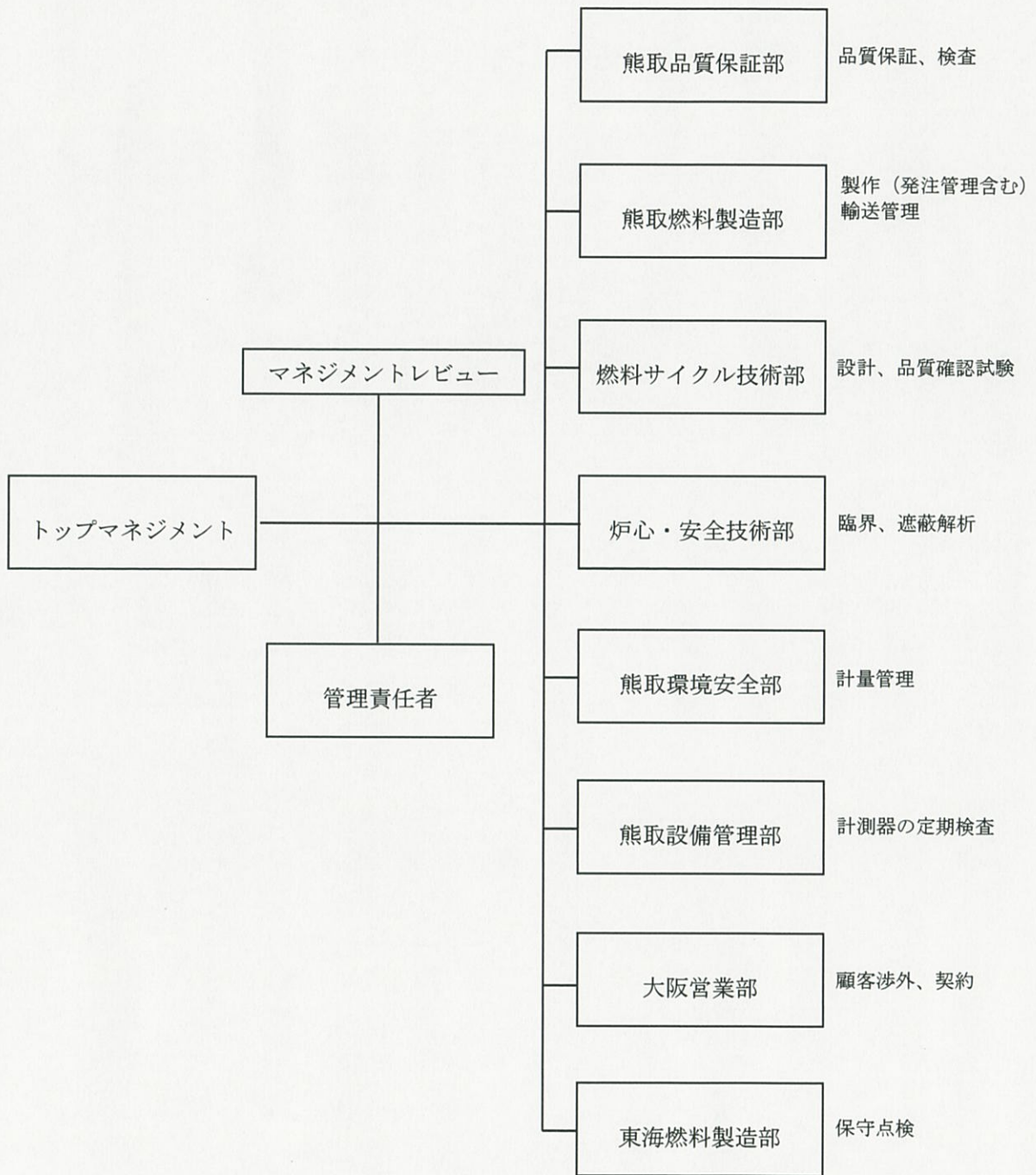
大阪営業部長は、次の責任及び権限を有する。

- (1) 顧客への渉外、契約の実施

B.10 東海事業所燃料製造部（以下、東海燃料製造部と云う。）

東海燃料製造部長は、次の責任及び権限を有する。

- (1) 輸送容器の取扱い・保守の実施



(イ) B-第1図 原子燃料工業（株）輸送容器の設計及び製作に係る組織

(イ)－C 教育・訓練

熊取品質保証部長、熊取燃料製造部長、燃料サイクル技術部長、炉心・安全技術部長、熊取環境安全部長、熊取設備管理部長、大阪営業部長及び東海燃料製造部長は輸送容器の製作に関連する教育、訓練、技能及び経験を判断の根拠として力量がある要員に従事させる。そのために以下の事項を実施する。

- (1) 輸送容器の製作に係る品質に影響する活動に従事する要員に必要な力量を明確にする。
- (2) 必要な力量がもてるように教育・訓練し、又は他の処置をとる。
- (3) 教育・訓練又は他の処置の有効性を評価する。
- (4) 部内の要員が、自らの活動の持つ意味と重要性を認識し、品質目標の達成に向けて自らどのように貢献できるかを認識することを確実にする。
- (5) 教育・訓練、技能及び経験について該当する記録を維持する。

(イ)－D 設計管理

燃料サイクル技術部長は、設計が設計要求事項に適合することを確実にするため、次の事項を実施する。

D.1 設計管理

- (1) 顧客の要求事項、法令の技術上の基準、性能・機能上の要求事項を明確にし、設計を実施する。設計の一部を外部に委託する場合は、顧客の要求事項、法令の技術上の基準、性能・機能上の要求事項等を踏まえた設計要求事項を発注仕様書で明確にし、委託先に提示する。
- (2) 新設計・新技術又は特殊材料を採用する場合には、当社の設計要求事項を設計者に十分理解させるため、必要に応じ設計者及び材料メーカーとの間で、安全性と仕様との関連、仕様決定の背景等についての情報交換を行う。
- (3) 設計文書（図面、計算書、解析書等）に設計要求事項が適切に反映されていることを審査し、承認する。

D.2 設計検証

上記の設計結果に基づき、新設計・新技術又は特殊材料を採用する場合は、必要に応じ実証試験、代替計算等により設計検証を行う。

D.3 設計変更

設計仕様を変更する場合、変更の内容を明確に文書化し、審査し、承認する。設計仕様の変更に伴い、設計者に設計変更をさせる場合、又は設計の委託先に設計を変更させる場合、設計者又は設計の委託先が作成する設計文書（図面、計算書、解析書等）に要求事項が適切に反映されていることを審査し、承認する。また、関係する各部へ設計変更に関する内容を文書により伝達する。

D.4 設計委託先の評価

輸送容器の設計を外部に委託する場合は、委託先が適切な人員、技術能力及び品質マネジメントシステムを有していることを確認する。なお、品質マネジメントシステムについては、熊取品質保証部長が燃料サイクル技術部長の依頼を受け、委託先が適切な品質マネジメントシステムを有していることを資格審査で確認する。

(イ)－E 輸送容器の製造発注

輸送容器が顧客の要求事項、法令の技術上の基準、設計承認申請書の設計仕様、容器承認申請書の製作方法等の調達要求事項に適合することを確実にするため、次の事項を実施する。

E.1 容器製造者の評価

熊取燃料製造部長は、容器製造者の選定に際して、容器製造者の技術能力、組織、品質保証体制等を評価する。評価に当たっては、必要に応じて次の事項を考慮する。

- (1) 輸送容器の製造に関する技術・要員及び製造設備
- (2) 容器製造者の品質方針、品質計画及びそれらの実施状況
- (3) 輸送容器又は類似のものに関する供給実績
- (4) 輸送容器又は類似のものに関する使用実績及び品質に関する記録
- (5) 試作品、サンプル等の評価

E.2 容器製造者への品質マネジメントシステムの要求事項

熊取燃料製造部長は、輸送容器の製造発注に当たって、容器製造者に対して、適切な品質を確保させるために、次の事項を発注仕様書で明確に指示し、実施させる。

- (1) 容器製造者の業務範囲
- (2) 設計、製作、検査、適用法令等の技術的要求事項
- (3) 品質計画の提出に関する事項
- (4) 品質監査、検査等のための容器製造者への立ち入りに関する事項
- (5) 文書の提出、並びに記録の提出及び保管に関する事項
- (6) 不適合の処置に関する事項
- (7) 調達要求事項の適用を供給者まで及ぼすための事項

さらに、次の事項についても具体的に発注仕様書に明記する。

- ① ISO 9001 等に適合する品質管理が行われること。
- ② 当社及び規制当局が、容器製造者及び容器製造者の供給者等において、輸送容器の製造時の検査や品質管理状況の確認を行うことができること。
- ③ 当社が容器製造者の供給者の選定基準について審査し、承認できるように措置すること。
- ④ 輸送容器の製造に携わる事業者間の責任関係を契約等により明確にするための措置を講じること。また、当社が容器製造者の供給者の選定状況を確認できるよう措置すること。
- ⑤ 当社が示す安全上重要な材料仕様値等について、容器製造者及び容器製造者の供給者にその数値の意味と重要性を十分理解させるための措置を講じること。
- ⑥ 輸送容器の製造に当たって、安全上重要度の高い特殊材料を使用する場合は、あらかじめ製造に係わる施工・分析・検査方法について、輸送容器の製造に携わる各事業者間における情報交換や技術的検討が十分行われるための措置を講じること。
- ⑦ 輸送容器の製造に携わる複数の事業者間にまたがる工程では、作業指示や納期などの

取決めを明確にし、緊密な連携を図るための措置を講じること。

- ⑧ 不適合品が発生し手直し等により使用する場合は、熊取燃料製造部長に文書で通知し、取扱いの指示を受けるように措置すること。
- ⑨ 容器製造者の製造工程において重要な変更があった場合は、熊取燃料製造部長に速やかに報告し、承認を受けるように措置すること。
- ⑩ 容器製造者がその供給者に対して、次の事項を行うよう措置すること。
 - (a) E.1項に準じて、下請負を行う能力の評価を行うこと。
 - (b) E.2項(1)～(7)に準じて、当社が容器製造者に要求した事項をその供給者に指示し、実施させること。
 - (c) E.3項に準じて、容器製造者がその供給者に対して、品質監査及び検査により検証すること。

ただし、容器製造者の供給者が、次の場合は、この限りではない。

- (i) 容器承認申請書の検査項目と関係のないと認められる下請負である場合。
- (ii) 容器製造者等が立会検査を行うことにより、直接管理する場合。
- (iii) JIS等の公的規格や公的資格制度により製造が行われる場合。
- (iv) 検査の確認項目が簡易なものや汎用品であって、受入時の検収で十分と認められる場合。

E.3 輸送容器の製造の検証

輸送容器が調達要求事項に適合していることを検証するために、次の事項を実施する。

- (1) 熊取品質保証部長は、品質監査に当たって、品質監査計画及び品質監査要領を策定し、これに従い実施する。また、熊取燃料製造部長は、輸送容器の検査に当たって、検査計画及び検査要領を策定する。熊取品質保証部長は、策定された検査要領に基づき輸送容器の検査を実施する。
- (2) 熊取品質保証部長は、容器製造者の品質監査を行うとともに、必要に応じ容器製造者の供給者に対し品質監査を行う。
- (3) 熊取燃料製造部長は、輸送容器の検査に当たって、安全上の重要性などを考慮しつつ、公的規格及び公的資格制度の有無、容器製造者及びその供給者の品質管理状況等を勘案し、立会確認又は記録確認等の確認要領を策定する。

(イ)‑F 取扱い及び保守

東海燃料製造部長は、核燃料輸送物に関する法令の技術上の基準、設計承認申請書の設計仕様を維持するため、以下のとおり、安全解析書(ハ)章の記載に則した要領を策定し、取扱い、保守を行う。

F.1 取扱い

核燃料輸送物の取扱い作業に関する手順を策定するとともに、関係する各部に周知徹底し、輸送中の輸送物の安全性を確保する。

- ・“梱包作業手順”
- ・“受入作業手順”
- ・“納入作業手順”

F.2 発送前検査

核燃料輸送物の発送前検査の要領を策定するとともに、関係する各部に周知徹底し、輸送中の核燃料輸送物の安全性を確保する。

- (1) 発送前検査を実施するに当たり、“発送前検査標準”や検査記録様式として具体化する。
- (2) 発送前検査を実施した結果は、輸送容器の種類ごとに定めた検査記録様式に従い必要な事項を記入して保管する。

F.3 保管及び保守点検

輸送容器の保管及び保守点検について、輸送容器の“管理要領”を策定、実施し、継続的に輸送容器の性能維持を図る。

F.4 定期自主検査

輸送容器の定期自主検査の要領を策定するとともに、関係する組織に周知徹底し、性能維持を確認する。

- (1) 承認容器は、安全解析書に記載の内容に則り必要な定期自主検査項目について 1 年に 1 回以上（年間の使用回数が 10 回を超える場合には使用回数 10 回ごとに 1 回以上）実施する。
- (2) 輸送容器の定期自主検査は、有効期限内に確実に実施するように、輸送容器の運用状況等を考慮して事前に実施予定を立案する。
- (3) 定期自主検査を実施するに当たり、“定期自主検査標準”や検査記録様式として具体化する。
- (4) 定期自主検査を実施した結果は、輸送容器の種類ごとに定めた検査記録様式に従い必要な事項を記入して保管する。

F.5 取扱い及び保守の委託

F.1 項～F.4 項の取扱い及び保守に関しては、ペレット製造委託先等に委託する場合がある。熊取燃料製造部長はそれら委託先に対して、取扱い及び保守に必要な要求仕様を明確にするとともに、委託先で実施された取扱い及び保守に関する記録を確認し、維持する。

(イ)－G 測定、分析及び改善

G.1 内部品質監査

熊取品質保証部長は、品質マネジメントシステムが効果的に実施され、維持されているかを明確にするため、定期的に内部品質監査を実施する。監査の計画及び実施について、手順書で規定する。監査員は、自らの仕事は監査しない。被監査領域の責任者は、発見された不適合及びその原因を除去するために遅滞なく処置する。

G.2 不適合品の管理

熊取燃料製造部長は、不適合品を識別し管理する。不適合品の処理に関する管理及びそれに関連する責任及び権限を手順書に規定する。

G.3 是正処置及び予防処置

(1) 是正処置

当社は、再発防止のため、不適合の原因を除去する処置をとる。不適合の内容確認、原因の特定、再発防止処置、処置の結果の記録等に関する要求事項を規定する手順書を定める。

(2) 予防処置

当社は、起こりうる不適合が発生することを防止するため、その原因を除去する処置を決める。起こりうる不適合及びその原因の特定、発生防止処置、処置の結果の記録等に関する要求事項を、手順書に定める。