

6 臨界安全評価における浸水の領域に関する事項

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

7 収納物の密封性に関する事項

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

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

環境温度として摂氏零下20度までを考慮している。

9 輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱いに関する事項

(1) 輸送容器の保守

- イ 輸送容器の各構成要素は、その損傷の程度に応じて交換又は修理を行う。
- ロ 定期自主検査（1年に1回以上）の実施並びに核燃料輸送物発送ごとの発送前検査の実施により、輸送容器の健全性保持に努める。

(2) 核燃料輸送物の発送に先立って取るべき措置

核燃料輸送物の発送にあつては、あらかじめ外観検査、気密漏えい検査、圧力測定検査、線量当量率検査、未臨界検査、温度測定検査、吊上検査、重量検査、収納物検査及び表面密度検査を行う。

(3) 核燃料輸送物を輸送する場合の積載方法等に関する事項

- イ 使用する揚重機器及び輸送機器が核燃料輸送物の積載に適切であることをあらかじめ確認する。
- ロ 輸送は専用積載で行うこととし、核燃料輸送物の積付けにあつては、輸送中に輸送物の荷くずれ、転落等のないように行う。

(別紙記載事項)

- イ 核燃料輸送物の説明 (イ) 章
- ロ 核燃料輸送物の安全解析 (ロ) 章
- ハ 品質マネジメントの基本方針 (ハ) 章
- ニ 輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱い方法 (ニ) 章
- ホ 安全設計及び安全輸送に関する特記事項 (ホ) 章

(イ) 章 核燃料輸送物の説明

A. 目的及び条件

- | | |
|-----------------------|---|
| 1. 使用目的 | 軽水炉型原子力発電所（PWR）の使用済燃料を、原子力発電所から再処理工場に輸送するため。 |
| 2. 輸送容器の型名 | MSF-24P 型 |
| 3. 輸送物の種類 | BM 型核分裂性輸送物 |
| 4. 輸送制限個数 | なし |
| 5. 輸送指数 | 10 以下 |
| 6. 臨界安全指数 | 0 |
| 7. 輸送物の総重量 | 134.4 トン以下（輸送架台は含まず） |
| 8. 輸送容器の外形寸法 | 外径約 3.6 m、長さ約 6.8 m（上・下部緩衝体を含む） |
| 9. 輸送容器の重量 | 117.7 トン以下（輸送架台は含まず） |
| 10. 輸送容器の材質 | 胴—炭素鋼
外筒—炭素鋼
一次蓋—炭素鋼
二次蓋—炭素鋼
三次蓋—ステンレス鋼
中性子遮蔽材—レジ
ン
伝熱フィン—銅
バスケット—ほう素添加アルミニウム合金
及びアルミニウム合金
緩衝体—ステンレス鋼及び木材 |
| 11. 輸送容器に収納する核燃料物質の仕様 | 核燃料物質の仕様を (イ)-第 A.1 表に示す。 |
| 12. 輸送形態 | 車両による陸上輸送あるいは船による海上輸送
いずれの場合も専用積載として輸送 |
| 13. 冷却方法 | 自然空気冷却 |

(ロ) 章 核燃料輸送物の安全解析

本輸送物に関する安全解析は、本輸送物が「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則（昭和五十三年十二月二十八日付、総理府令第五十七号）」（以下「規則」という。）及び「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目等を定める告示（平成2年11月28日付、科学技術庁告示第5号）」（以下「告示」という。）に基づいて、BM型核分裂性輸送物としての技術上の基準に適合することを示すために行った。

本解析の概要は以下のとおりである。

A. 構造解析

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

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

さらに、本輸送物はBM型核分裂性輸送物であるため、未臨界評価のために核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件における輸送物の状態についても評価している。

B. 熱解析

熱解析では、構造解析の評価結果に基づいて、一般及び特別の試験条件における輸送物各部の温度及び圧力を評価し、構造、密封、遮蔽及び臨界解析の評価条件を与えている。

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

C. 密封解析

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

A. 1. 2 設計基準

1. 設計で考慮する条件

本輸送容器の構造設計では「規則」及び「告示」に基づいて以下の条件等を考慮した。

(1) 通常の輸送条件

- a. 輸送容器の材質間又は輸送容器の材質と放射性収納物間において危険な物理的作用又は化学反応の生じるおそれのないこと。
- b. 密封装置は不用意に開かれないこと。
- c. 輸送容器の吊上装置としてのトラニオンは吊上荷重の3倍に耐えること。
- d. 固縛装置は輸送中発生する上下及び輸送方向加速度2g及び左右方向1gの加速度に耐えること。
- e. 輸送容器の構成部品は、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において、き裂、破損等の生じるおそれがないこと。
- f. 輸送容器は運搬中に予想される周囲温度 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において、き裂、破損等の生じるおそれがないこと。
- g. 輸送容器の振動について考慮すること。

(2) 一般の試験条件

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

(3) 特別の試験条件

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

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

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

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

(5) 核分裂性輸送物に係る試験条件

- a. 次の核分裂性輸送物に係る一般の試験条件下に置いた後の輸送物の損傷状態を評価すること。
 - (a) 以下の連続試験
 - i. 水噴霧試験
 - ii. 0.3 m 自由落下試験
 - (b) 積み重ね試験
 - (c) 6 kg 棒貫通試験
- b. 次の核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下に順次置いた後の輸送物の損傷状態を評価すること。
 - (a) 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件
 - (b) 9 m 落下試験
 - (c) 1 m 貫通試験
 - (d) 火災試験
 - (e) 0.9 m の水中浸漬試験

なお、核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件の中で機械的（強度）試験においては、本輸送物が使用される $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ の周囲温度範囲を考慮する。

(p)-第 A.1 表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (1/13)

条件	解析項目及びその評価	設計条件						解析方法		備考
		参照図表	材質	温度	設計負荷		適用数式又は要素	解析基準		
					種類	負荷係数			要素	
化学的及び電気的反応	1) 化学的反応	(p)-第 A.3 表	表による	-	腐食	-	活性	活性の有無	無	
	2) 電気的反応	(p)-第 A.3 表	表による	-	腐食	-	電位差	反応の有無	無	
低温強度	1) 構成部品	(p)-第 A.4 表	表による	-	材質	-	き裂・破損	-20℃でのき裂・破損の有無	無	
	2) 低温時の強度	(p)-第 A.4 表	表による	-	材質	-	脆性破壊	-20℃での脆化の有無	無	
密封装置	三次蓋	(I)-第 C.2 図	-	-	誤操作による開放	-	誤操作の可否	緩衝体等に覆われての誤操作の可否	否	

A.4.2 低温強度

本輸送物は周囲温度-20℃以上で使用する。

1. 構成部品の低温特性

(イ)章Cの3.に示す本輸送容器の使用材料の低温特性を(ロ)-第A.4表に示す。同表より明らかのように、最低温度-20℃において構成部品はき裂、破損等の生じるおそれはない。

2. 低温時の強度

構造評価に用いる主要材料は、金属キャスク構造規格¹⁾のじん性要求を満足するように製造するので、-20℃において低温脆性破壊を起こすことはない。

A. 4.3 密装置

輸送容器の三次蓋、三次蓋ボルト、リリースバルブカバープレート及びそのボルトは、通常の輸送時には(イ)-第 C. 2 図に示すように上部緩衝体で覆われており、かつ、がされているので不用意に開けられることはない。そのため、リリースバルブカバープレート内部のリリースバルブは誤って操作されることはない。

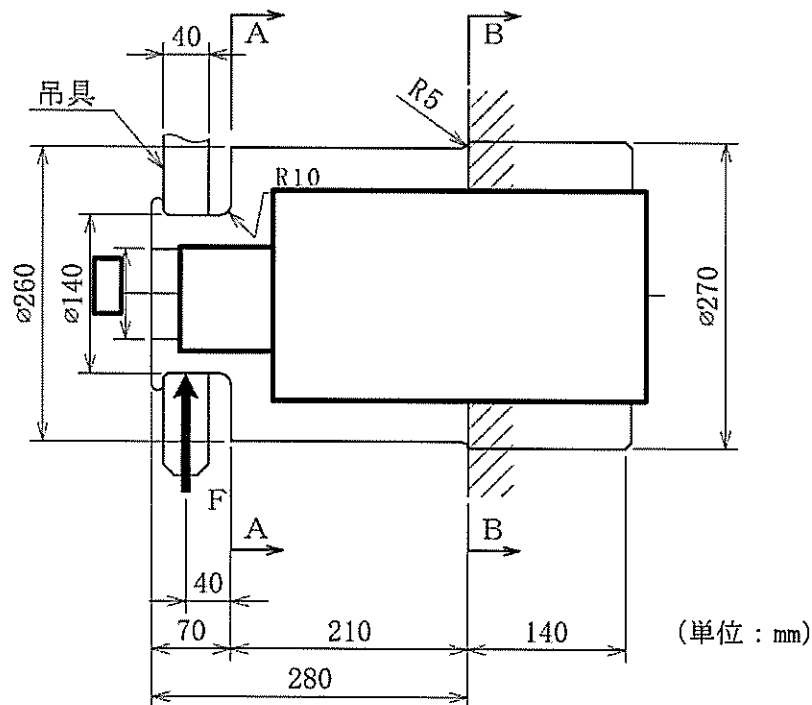
A. 4.4 吊上装置

輸送容器の吊上装置は、(イ)-第 C. 5 図及び(イ)-第 C. 6 図に示す位置に取り付けられているトラニオンであり、その構造は(イ)-第 C. 7 図に示すとおりである。トラニオンは、嵌め合いにより容器に取り付けられている。垂直吊りは上部トラニオンにより行われ、90°、270° 側の一对の下部トラニオンは輸送架台上で輸送容器をたて起し又はよこ倒しする際の支点となり、上部トラニオンに作用する以上の荷重が下部トラニオンには作用しない。一方、水平吊りは上部及び下部トラニオンにより行われる。したがって、荷重が最大となる垂直吊りにおける上部トラニオンを対象とし、トラニオン本体及びトラニオン接続部の応力評価を行う。

構造解析では各トラニオンの温度を°Cとして評価する。

A. 4.4.1 応力評価

トラニオンの解析モデル図を(ロ)-第 A. 10 図に示す。



(ロ)-第 A. 10 図 上部トラニオン解析モデル図

枠囲みの範囲は核物質防護および商業機密に係る事項ですので公開することはできません。

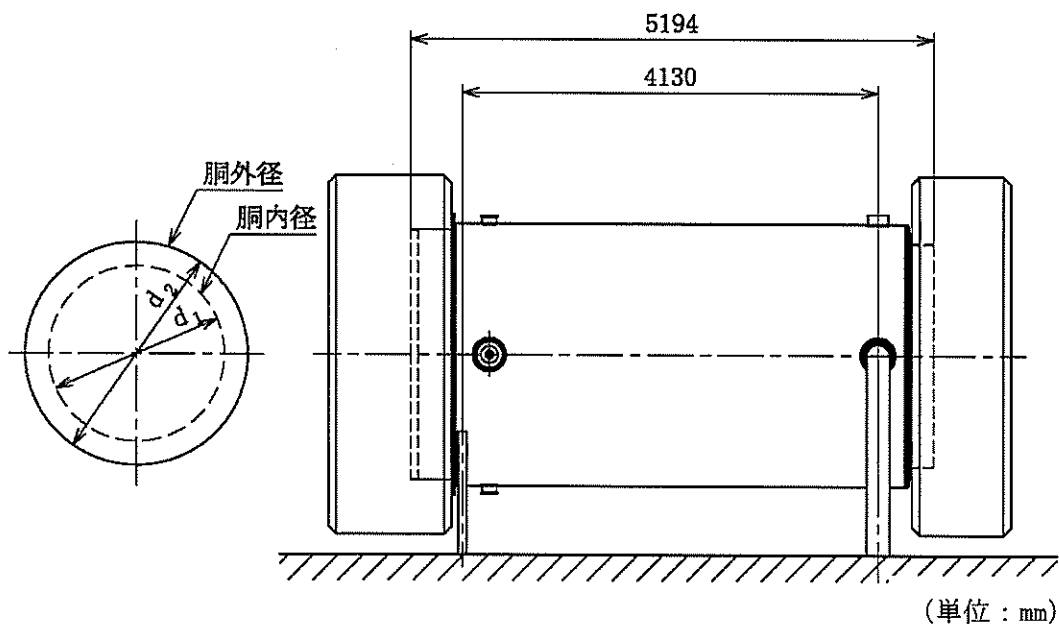
ここで、最も振動数の低い一次の固有振動数を計算する。 $\lambda = \pi$ （両端支持の一次固有振動に対する定数）として、計算条件と計算結果を(ロ)-第 A.12 表に示す。一方、輸送中に車両の最大加速度と振動数の関係において、輸送中の振動により輸送物に作用する励振力の振動数域は大部分が 10 Hz 以下であり、十分離れた固有振動数を有しているため、励振力による輸送物の応答増幅の影響はなく、輸送中の振動による荷重は A.5.3 の一般の試験条件の 0.3m 落下事象に包絡されることから、輸送容器は予想される振動等によってき裂、破損等の生じるおそれはない。

また三次蓋は振動等により緩まないよう、A.4.5 にて考慮した左右方向加速度 1 g と下方向加速度 3 g による三次蓋の慣性力 (1.024×10^5 N) より十分大きい摩擦力 が生じるようにボルトによって強固に締め付けられており、振動等によって緩むことはない。

(ロ)-第 A.12 表 固有振動数計算条件及び計算結果

項目	無次元定数： λ (-)	縦弾性係数： E (MPa)	胴外径： d ₂ (mm)	胴内径： d ₁ (mm)	輸送容器 支持間長さ： l (mm)
数値等	π	<input type="text"/>			4130

項目	輸送物総質量： W (kg)	重力加速度： g (mm/s ²)	輸送容器本体 全長：L (mm)	固有振動数： f _n (Hz)
数値等	1.344×10^5	9.80665×10^3	5194	215



(ロ)-第 A.15 図 輸送容器振動解析モデル図

枠囲みの範囲は核物質防護および商業機密に係る事項ですので公開することはできません。

A. 4. 8 輸送物の要件に対する評価結果の要約

以上の結果より通常の輸送時における輸送物の要件に対する評価結果の要約を(ロ)-
第 A. 13 表に示す。

(ロ)-第 A. 13 表 輸送物の要件に対する評価結果の要約

解析及びその詳細	解析基準	解析基準値	解析結果等	余裕率等 (MS)
・ 化学的及び電氣的反応 化学的反應 電氣的反應	反応のないこと 反応のないこと	— —	反応なし 反応なし	基準に合致 基準に合致
・ 低温強度 構成部品の低温特性	-20 °Cでのき裂、 破損のないこと 低温脆化温度	—	き裂、破損なし	基準に合致
低温時の強度		-20 °C	-20 °Cでは低 温脆化なし	基準に合致
・ 密封装置の誤操作による開放 の可能性 三次蓋	可能性がないこと	—	可能性なし	基準に合致
・ 吊上装置 1. 応力評価				
トラニオン本体	S_y	653 MPa	449 MPa	0.45
トラニオン接続部 (一次応力)	$1.25S_y$	231 MPa	174 MPa	0.32
(一次応力+二次応力)	$1.5 \times 1.25S_y$	346 MPa	219 MPa	0.57
2. 疲労評価				
トラニオン本体	許容繰返し回数以 下であること	許容繰返し回数 6.8×10^6 回	使用計画回数 200 回	基準に合致
トラニオン接続部	許容繰返し回数以 下であること	許容繰返し回数 1.0×10^4 回	使用計画回数 200 回	基準に合致
・ 固縛装置				
トラニオン本体	S_y	653 MPa	232 MPa	1.81
トラニオン接続部 (一次応力)	$1.25S_y$	231 MPa	151 MPa	0.52
(一次応力+二次応力)	$1.5 \times 1.25S_y$	346 MPa	195 MPa	0.77
・ 圧力	密封性	—	良	基準に合致
・ 振動	振動性	固有振動数 (215 Hz) と輸送による振動数 (10 Hz) の差が大であり、輸送物の応答増 幅の影響はなく、輸送中の振動による荷重 は、一般の試験条件の 0.3m 落下事象に包絡 されることから、輸送容器にき裂、破損等 は生じない。		

A.5 一般の試験条件

A.5.1 熱的試験

A.5.1.1 温度及び圧力の要約

1. 温度

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

(ρ)-第 A.14 表 一般の試験条件における最高温度の要約

(単位：°C)

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

なお、本輸送容器の構成部品は A.4.2 で示すよう-20°Cの温度においてき裂、破損等は生じず、かつ B.4.6 で示すよう使用可能温度が 70°Cを超える部材を使用している。したがって構成部品は、-20°C~70°Cの温度範囲において、き裂、破損等の生じるおそれはない。

枠囲みの範囲は核物質防護に係る事項
 ですので公開することはできません。

2. 圧力

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

(ロ)-第 A. 15 表 一般の試験条件の熱解析の要約と評価

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

(注 1) 胴、一次蓋及び二次蓋に囲まれた空間をいう。

なお、蓋部中性子遮蔽材充填空間は、当該空間の水の存在による圧力上昇を考慮して、 MPa G (MPa) とする。この圧力は製造時の周囲温度が仮に-20℃あった場合には空気の密度が大きくなるため、最大約 10%増加する可能性があるが、蓋部中性子遮蔽材カバーは A. 5. 3 の一般の試験条件の 0.3m 落下事象においても余裕率が 0.1 以上あり、強度上十分な余裕を有していることから、室温を基準として圧力を設定している。

側部中性子遮蔽材充填空間は、外筒部を MPa G (MPa)、端板部を MPa G (MPa)、底部中性子遮蔽材充填空間は、 MPa G (MPa) とする。なお、側部中性子遮蔽材充填空間及び底部中性子遮蔽材充填空間の圧力は輸送前の保守により圧力が開放されることを考慮し、当該空間の空気温度の上昇による圧力上昇は無いため、製造時の環境温度による影響は考慮不要である。

枠囲みの範囲は商業機密に係る事項
ですので公開することはできません。

A. 5. 1. 2 熱膨張

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

なお、本輸送物は周囲温度-20 °C~38 °Cの温度範囲において使用するが、当該温度範囲における輸送容器の各部品の熱膨張に伴う寸法変化が 0. 1 %以下と十分小さく、部品同士の干渉が生じないため、周囲温度の変化によりき裂、破損等の生じるおそれはない。

A. 5. 1. 3 応力計算

1. 容器本体

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

(1) 解析モデル

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

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

(2) 荷重条件及び境界条件

荷重条件及び境界条件を(ロ)-第 A. 17 図に示す。

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

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

(注1) (ロ)-第 A. 18 図参照

(注2) σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力

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

(注4) 三次蓋ボルトは三次蓋と異なる材質のため、輸送中に予想される $-20\text{ }^\circ\text{C} \sim 38\text{ }^\circ\text{C}$ の周囲温度の

枠囲みの範囲は核物質防護に係る事項
ですので公開することはできません。

変化により軸力が変化する。仮に周囲温度 -20°C で三次蓋ボルトを締め付けた後 38°C に置かれた場合は、ステンレス鋼製の三次蓋と合金鋼性の三次蓋ボルトの線膨張率の差により三次蓋ボルトの軸力が約5%増加するものの余裕率が0.05以上あるため、また周囲温度 38°C で締め付けた後 -20°C に置かれた場合には、軸力が約10%低下するもののOリングを締め付けるために必要な軸力を維持しているため、三次蓋ボルトにゆるみや破損を生じることはない。

A. 5. 1. 4 許容応力との比較

一般の試験条件の熱的試験において輸送容器に発生する応力は、A. 5. 1. 3 に示すように解析基準値を満足しており、健全性は維持される。また、三次蓋とキャスク本体のOリング取付位置での相対口開き変形量は 0.08 mm であり、Oリングの初期締め付け代 \square mmより小さく、密封性が損なわれることはない。

A. 5. 2 水噴霧

本輸送容器の外側はステンレス鋼又は塗装を施した炭素鋼であり、水噴霧に対して吸水による脆化により密封性が損なわれたり、水溜りによる腐食が発生することがないため線量当量率の増加等を生じることはない。

枠囲みの範囲は商業機密に係る事項
ですので公開することはできません。

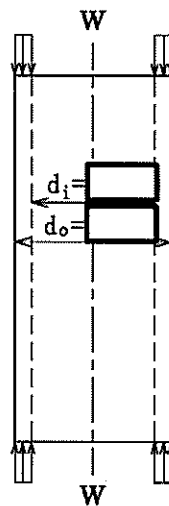
2. 軸方向の荷重の場合

(□)-第 A. 38 図に示すように、円筒をたて置きにし、円筒の軸方向に両端から等分布荷重 W をかけたときに円筒に生じる圧縮応力 σ_c (MPa) は、次式で与えられる。

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

ここで、

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



(単位 : mm)

(□)-第 A. 38 図 両端より圧縮される容器本体の解析モデル図

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

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

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

以上より、容器本体の構造健全性が維持されるので、密封部の健全性が維持される。なお、実際に輸送物を積み重ねた場合には緩衝体部分が積み重なり、外筒や蓋部及び底部中性子遮蔽材カバーには荷重が作用しないため、遮蔽解析に影響を及ぼすような

枠囲みの範囲は商業機密に係る事項
ですので公開することはできません。

破損は生じない。一方、緩衝体は、最大 20mm 程度変形する可能性があるが、ロ章 E の遮蔽解析で考慮している 0.3m 落下で想定される変形量には包絡される。

A. 5. 5 貫通

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

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

$$E = mgH$$

ここで、

m : 軟鋼棒の質量 (kg)

g : 重力加速度 (m/s^2)

H : 落下高さ (mm)

一方、軟鋼棒が緩衝体カバープレートへ落下した際、貫通するためには落下エネルギーが (ロ)-第 A. 39 図に示すようにカバープレートのせん断に必要なエネルギーより大きい場合である。この場合のせん断に要するエネルギー E_s (N・mm) は、次式で与えられる。

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

ここで、

d : 軟鋼棒の直径 (mm)

t : 緩衝体カバープレートの板厚 (mm)

S : カバープレートのせん断強さ (MPa)

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

落下エネルギー E とせん断エネルギー E_s を比較すると、計算条件と計算結果は (ロ)-第 A. 34 表に示すように $E < E_s$ となり、カバープレートは軟鋼棒の落下によりせん断破壊せず、軟鋼棒は緩衝体カバープレートを通らない。

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

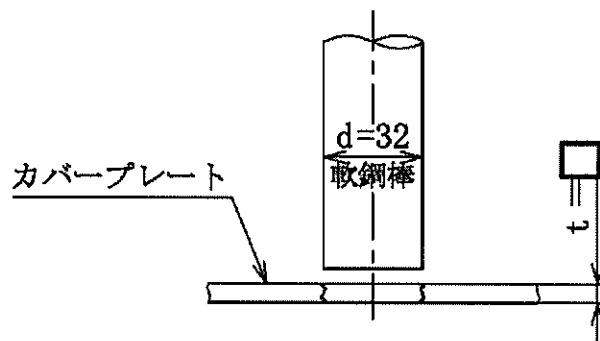
枠囲みの範囲は核物質防護に係る事項
ですので公開することはできません。

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

計算条件及び計算結果

項目	軟鋼棒の質量 : m (kg)	重力加速度 : g (m/s ²)	落下高さ : H (mm)	落下エネルギー : E (N・mm)
数値等	6	9.80665	1000	5.884×10 ⁴

項目	軟鋼棒の直径 : d (mm)	緩衝体 カバープレート の板厚 : t (mm)	カバープレート の設計引張強さ : S _u (MPa)	カバープレート のせん断強さ : S (MPa)	せん断 エネルギー : E _s (N・mm)
数値等	32				4.505×10 ⁵



(単位 : mm)

(ロ)-第 A. 39 図 せん断による貫通モデル図

A. 5.6 角又は縁落下

本輸送物は、鋼製の円筒形で質量は 134.4 トンであり、角又は縁落下は該当しない。

A. 5.7 結果の要約及びその評価

1. 解析結果の要約

一般の試験条件における輸送物に対する解析結果の要約を(ロ)-第 A. 35 表に示す。自由落下試験により緩衝体に永久変形が生じるが、表に示すように、各試験条件下において輸送物各部は A. 1.2 に定めた基準を満足し、構造上の健全性が損なわれることはない。また、三次蓋の口開き変形が基準を満足していることから、密封性能も維持される。

なお、頭部 0.3m 垂直落下時には、一次蓋内面、バスケット及び燃料集合体に、底部 0.3m 垂直落下時には、胴底部内面、バスケット及び燃料集合体に、衝撃加速度を上回る加速度が発生すると考えられるが、それらの部材に加速度割増を考慮しても健全性に影響はない。

(注) A. 10.1 に示す MSF-24P 型輸送容器のプロトタイプである MSF キャスクの 9.3m 頭部垂直落下試験で計測された内部収納物の加速度割増を基に、0.3m 垂直落下時には 1.4 倍程度の加速度割増が生じると考えられるが、輸送物の各部材は 0.4 以上の余裕率を有する。

枠囲みの範囲は核物質防護に係る事項
ですので公開することはできません。

A. 6. 1. 5 結果の要約

1. 結果の要約

9 m 落下試験の衝撃加速度と緩衝体変形量の要約は(ロ)-第 A. 37 表のとおりである。なお、緩衝体変形量は設計基準変形量以下であり、容器本体に発生する衝撃加速度が急激に上昇することはない。

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

2. 結果の検討

9 m 落下試験による塑性変形は、緩衝体に生じるが、容器本体及びバスケットの構造上の健全性が損なわれることはない。

以上の解析及び評価は周囲温度 38 °C の高温側の環境下に対して行った。低温側の環境下に対しては、A. 4. 2 に示すように低温になっても材料は脆化等がなく、機械的性質が低下することがないので、輸送物の構造上の健全性は維持される。

A. 6. 2 強度試験・落下試験Ⅱ (1 m 落下時)

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

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

これ以外の落下は、落下エネルギーが回転モーメントとして作用するので輸送物に対して上記落下より大きな破損を生じることはない。

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

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

2. 圧力

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

(ロ)-第 A. 54 表 特別の試験条件の熱解析の要約と評価

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

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

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

枠囲みの範囲は商業機密に係る事項
ですので公開することはできません。

A. 6. 3. 2 熱膨張

1. 応力計算

本項では、特別の試験条件下における容器本体各部の熱応力と胴内圧による応力の計算を行う。B. 5. 3 に示す温度分布と胴内圧を荷重条件とし、解析は有限要素法による ABAQUS コードを用いて行う。

(1) 解析モデル

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

(2) 荷重条件及び境界条件

a. 荷重条件

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

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

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

b. 境界条件

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

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

一次応力及び蓋ボルトの評価 (2/2)

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

(注1) (ロ)-第 A. 30 図参照

(注2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力 Q : 二次応力、 σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力(注3) 断面⑮、⑱及び⑲における引張応力に対する基準値は $1.5f_t$ 、圧縮応力に対する基準値は $1.5f_c$ 、せん断応力に対する基準値は $1.5f_s$ 、曲げ応力に対する基準値は $1.5f_b$ である。断面⑳及び㉑に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準値は S_y である。(注4) 三次蓋ボルトは三次蓋と異なる材質のため、輸送中に予想される $-20\text{ }^\circ\text{C} \sim 38\text{ }^\circ\text{C}$ の周囲温度の変化により軸力が変化する。仮に周囲温度 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ で三次蓋ボルトを締め付けた後、特別の試験条件下に置かれた場合は、ステンレス鋼製の三次蓋と合金鋼性の三次蓋ボルトの線膨張率の差により三次蓋ボルトの軸力が約 5% 増加するものの余裕率が 0.05 以上あるため、また周囲温度 $38\text{ }^\circ\text{C}$ で締め付けた後、特別の試験条件下に置かれた場合には、軸力が約 2% 低下するものの Oリングを締め付けるために必要な軸力を維持しているため、三次蓋ボルトにゆるみや破損を生じることはない。

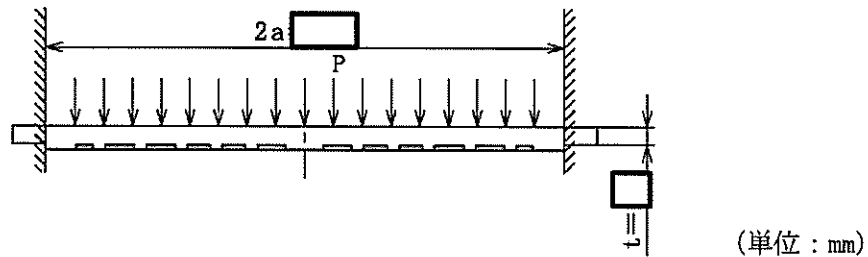
枠囲みの範囲は核物質防護に係る事項
ですので公開することはできません。

A.6.4 浸漬

物は、最大放射エネルギーが A_2 値の 10 万倍を超えるので、A.7 において 200 m 浸漬に相当する水頭圧で解析を行い、胴、底板及び三次蓋に破損のないことを確認している。

特別の試験条件の 15 m 浸漬試験においては、200 m 浸漬試験の負荷条件より厳しくないため密封装置は A.1.2 で定めた基準を満足するが、「規則」及び「告示」に基づいて 15 m 浸漬試験における三次蓋の強度を確認する。

三次蓋の強度解析モデルを (v)-第 A.44 図に示す。



(v)-第 A.44 図 三次蓋の強度解析モデル図

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

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

ここで、

a : 円板の半径 (mm)

P : 差圧 (MPa)

t : 板厚 (mm)

計算条件と計算結果を (v)-第 A.56 表に示す。三次蓋は、外圧に対して十分な強度を有する。なお、上記の発生応力値は °C における三次蓋の材料の設計降伏点 ($S_y = 166$ MPa) より低く、また、外圧は蓋を胴に押し付けるように作用するので蓋 O リングの密封性能は 15 m 浸漬時において保持される。

(v)-第 A.56 表 三次蓋の曲げ応力計算条件及び計算結果

項目	円板の半径 : a (mm)	差圧 : P (MPa)	板厚 : t (mm)	最大 曲げ応力 : σ_b (MPa)	三次蓋の 温度 (°C)	基準値 : MIN[$3.6S_u, S_u$] (MPa)	余裕率 (-)
数値	<input type="text"/>	0.251325	<input type="text"/>	41	<input type="text"/>	406	8.90

枠囲みの範囲は核物質防護および商業機密に係る事項ですので公開することはできません。

また、外筒及び底部中性子遮蔽材カバーは内部空間にそれぞれ0.35MPa・G及び0.21MPa・Gの内圧が生じているが、水深15mの水圧(0.15MPa)が外圧として負荷されることで差圧が緩和されるため、遮蔽解析に影響を及ぼすような破損は生じない。

A.6.5 結果の要約及びその評価

1. 解析結果の要約

特別の試験条件における輸送物に対する評価結果の要約を(ロ)-第A.57表に示す。表に示すように、各試験条件下において輸送物各部はA.1.2に定めた基準を満足し構造上の健全性が損なわれることはない。

(ロ)-第A.57表 特別の試験条件における構造解析結果の要約 (1/4)

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

(4) 三次蓋 O リングの密封性能の評価 (歪レベルの評価)

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

(5) 二次蓋防水機能の評価

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

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

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

3. 1 m 貫通試験

1. 及び 2. の落下試験において緩衝体に変形するが、これらは A. 6. 2 に示すように 1m 貫通試験に対する評価において関係しない。したがって、本試験における輸送物の損傷状態は A. 6. 2 の結果 (A. 6. 5 に示す要約参照) と同一である。

4. 熱的試験

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

5. 0.9 m 浸漬試験

0.9m 浸漬試験の条件及び評価結果は、A. 6. 4 に示す 15 m 浸漬試験の条件及び評価結果に包絡されるため、0.9 m 浸漬試験において輸送物は損傷が拡大することはない。

A. 10.5 MSF-24P 型輸送容器のバスケットプレート用材料

アルミニウム合金 (MB-A3004-H112) に関する説明書

1. 概要

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

2. 適用範囲

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

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

3. 材料規定

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

(1) 材料名称

材料の規定名称は (p)-第 A. 92 表 に示すものであること。

(2) 化学成分

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

(3) 設計応力強さ

設計応力強さは (p)-第 A. 94 表 の規定によること。

(4) 許容引張応力

許容引張応力は (p)-第 A. 95 表 の規定によること。

(ロ)-第 A. 100 表 機械的性質 (注 1)

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

(注 1) 時効による強度低下を考慮しない供用開始前の製造管理値である。

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

(ロ)-第 A. 101 表 管理程度表

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

(注 1) 製造工程は(ロ)-第 A. 63 図の製造フローに対応する。

全体モデルに入力する崩壊熱量は、軸方向の燃焼度分布を考慮する。

燃料集合体の最高温度については、燃料集合体モデルで算出する。燃料集合体モデルでは、燃料棒の領域を構成部材（二酸化ウラン、ジルカロイ）及び封入されていた気体（ヘリウム）の均質化領域としてモデル化する。燃料棒の均質化領域における平均熱伝導率は体積平均値とする。また、制御棒案内シンプル及び炉内計装用案内シンプルについては、燃料棒と同じように均質化領域としてモデル化する。制御棒案内シンプル及び炉内計装用案内シンプルは、燃料棒と同じ形状及び物性値を入力しているが、崩壊熱量は入力しない。

一般の試験条件のうち、水噴霧試験では輸送物は変形しないが、自由落下試験、積み重ね試験及び貫通試験では緩衝体に変形が生じる。ただし、一般の試験条件では、緩衝体に変形しないものとする方が収納物の温度及び緩衝体最高温度を高く評価できる。したがって、一般の試験条件の熱解析では、輸送物の変形は考慮しない。

各解析モデルの形状及び要素分割図を (p)-第 B.1 図～(p)-第 B.4 図 に示す。

3. 二三次蓋間圧力

三次蓋取付け時における二三次蓋間の雰囲気は常温、大気圧の空気とし、一般の試験条件における空気の温度は、保守側に二三次蓋間空気の最高温度とする。また、保守側に二次蓋の密封性が失われ一二次蓋間ヘリウムが二三次蓋間に漏えいすると仮定すると、二三次蓋間圧力は以下のとおり求められる。

$$P_2 = \frac{P_{10} V_1 \frac{T_{1nor}}{T_{10}} + P_{20} V_2 \frac{T_{1nor}}{T_{20}}}{V_1 + V_2}$$

ここで、

- P_2 : 一般の試験条件における二三次蓋間圧力 (MPa)
- P_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力 (MPa)
- P_{20} : 二三次蓋間空気の初期圧力 (大気圧) (MPa)
- V_1 : 一二次蓋間体積 (m^3)
- V_2 : 二三次蓋間体積 (m^3)
- T_{1nor} : 一般の試験条件における一二次蓋間ヘリウムの温度
(一二次蓋間ヘリウムの最高温度) (K)
- T_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期温度 (K)
- T_{20} : 三次蓋取付け時における二三次蓋間空気の初期温度 (K)

計算条件と計算結果を (p)-第 B. 10 表に示す。なお、この圧力は三次蓋取付け時の周囲温度が仮に $-20^{\circ}C$ であった場合には空気の密度が大きくなるため、約 4% 増加する可能性があるが、構造評価は保守的にこれを包絡する圧力で評価している。

(p)-第 B. 10 表 一般の試験条件における二三次蓋間圧力計算条件及び計算結果

項目	記号	単位	数値等
一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力	P_{10}	MPa	0.300
二三次蓋間空気の初期圧力 (大気圧)	P_{20}	MPa	0.101325
一二次蓋間体積	V_1	m^3	
二三次蓋間体積	V_2	m^3	
一般の試験条件における 一二次蓋間ヘリウムの温度	T_{1nor}	K	381.15 (108 °C)
一二次蓋間ヘリウムの初期温度	T_{10}	K	293.15 (20 °C)
三次蓋取付け時における 二三次蓋間空気の初期温度	T_{20}	K	293.15 (20 °C)
一般の試験条件における 二三次蓋間圧力	P_2	MPa	0.253 (0.152 MPaG)

枠囲みの範囲は商業機密に係る事項
ですので公開することはできません。

3. 二三次蓋間圧力

特別の試験条件における空気の温度を保守側に二三次蓋間空気の最高温度とする。また、一般の試験条件と同様に、保守側に二次蓋の密封性が失われ一二次蓋間ヘリウムが二三次蓋間に漏えいすると仮定すると、二三次蓋間圧力は以下のとおり求められる。

$$P_2' = \frac{P_{10}V_1 \frac{T_{1acc}}{T_{10}} + P_{20}V_2 \frac{T_{1acc}}{T_{20}}}{V_1 + V_2}$$

ここで、

P_2' : 特別の試験条件における二三次蓋間圧力 (MPa)

P_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力 (MPa)

P_{20} : 二三次蓋間空気の初期圧力 (大気圧) (MPa)

V_1 : 一二次蓋間体積 (m³)

V_2 : 二三次蓋間体積 (m³)

T_{1acc} : 特別の試験条件における一二次蓋間ヘリウムの温度
(一二次蓋間ヘリウムの最高温度) (K)

T_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期温度 (K)

T_{20} : 三次蓋取付け時における二三次蓋間空気の初期温度 (K)

計算条件と計算結果を(ロ)-第 B. 18 表に示す。なお、この圧力は三次蓋取付け時の周囲温度が仮に-20℃であった場合には空気の密度が大きくなるため、約 4%増加する可能性があるが、構造評価は保守的にこれを包絡する圧力で評価している。

(ロ)-第 B. 18 表 特別の試験条件における二三次蓋間圧力計算条件及び計算結果

項目	記号	単位	数値等
一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力	P_{10}	MPa	0.300
二三次蓋間空気の初期圧力 (大気圧)	P_{20}	MPa	0.101325
一二次蓋間体積	V_1	m ³	
二三次蓋間体積	V_2	m ³	
特別の試験条件における一二次蓋間ヘリウムの温度	T_{1acc}	K	410.15 (137 °C)
一二次蓋間ヘリウムの初期温度	T_{10}	K	293.15 (20 °C)
三次蓋取付け時における二三次蓋間空気の初期温度	T_{20}	K	293.15 (20 °C)
特別の試験条件における二三次蓋間圧力	P_2'	MPa	0.272 (0.171 MPaG)

枠囲みの範囲は商業機密に係る事項
ですので公開することはできません。

D.3 モデル仕様

D.3.1 解析モデル

遮蔽解析モデルは二次元 (R-Z) モデルとし、トラニオンのない方向の断面をモデル化した。

各試験条件下におけるモデル化は以下に示す条件を考慮した。

1. 通常輸送時及び一般の試験条件下

通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデルは、一般の試験条件下において 0.3 m 落下における緩衝体の変形を考慮すること以外は同一とし、以下の条件とした。

解析モデルを (p)-第 D.1 図に示す。

- ① 胴内での燃料集合体の軸方向の移動を考慮し、安全側に蓋方向、底部方向に移動したモデルとした。
- ② 緩衝体は、安全側に空気に置き換え、距離のみ考慮した。
- ③ 各部寸法はノミナル値とし、寸法公差は密度係数として考慮した。
- ④ 蓋部中性子遮蔽材、側部中性子遮蔽材及び底部中性子遮蔽材については保守側の仮定として、中性子遮蔽材の 2.5 % の質量減損を考慮した。⑤ 燃料はバスケットと均質化した。ただし、上部ノズル部の上側についてはバスケット上端より露出するため、バスケットと均質化しない。
- ⑥ バスケットの外周部は均質化した。
- ⑦ パーナブルポイズン集合体の物性値は安全側に考慮しないモデルとした。

本輸送容器では、上部、下部トラニオンが燃料有効部近傍にあり、中性子ストリーミング箇所となっている。この箇所は上述のモデルに含まれないため、頭部及び底部モデルの当該部近傍の線束を用いて、トラニオン部を模擬したモデルとの線束接続計算により解析を行った。トラニオン部モデルを (p)-第 D.2 図に示す。

D.6.2 中性子遮蔽材の構成元素の原子個数密度と製造時の確認

(ロ) 第 D.8 表に記載の解析に用いる中性子遮蔽材の構成元素の原子個数密度は、中性子遮蔽材の元素組成と、製品仕様としての中性子遮蔽材の密度、水素及び B_4C 含有量の最低値から算出した。

製造時には、中性子遮蔽材の元素組成については、中性子遮蔽材が所定の銘柄又はその相当品であることを確認し、中性子遮蔽材の密度、水素及び B_4C 含有量については、サンプルによる中性子遮蔽材の密度測定記録及び成分分析記録を確認する。

D.6.3 参考文献

- 1) M. Ishikawa, T. Jin, J. Katakura, M. Kataoka, H. Matsumoto, Y. Ohkawachi, S. Ohki, A. Onoue, A. Sasahara, K. Suyama, H. Yanagisawa, "ZZ-ORIGEN2.2-UPJ, A Complete Package of ORIGEN2 Libraries Based on JENDL-3.2 and JENDL-3.3", OECD/NEA Databank, (2006).
- 2) Oak Ridge National Laboratory, "DOT3.5-Two Dimensional Discrete Ordinates Radiation Transport Code", CCC-276, (1977).
- 3) K. Kosako, N. Yamano, T. Fukahori, K. Shibata and A. Hasegawa, "The Libraries FSXLIB and MATXSLIB Based on JENDL-3.3", JAERI-Data/Code 2003-011, (2003).
- 4) Brookhaven National Laboratory, "Neutron Cross Sections", BNL-325 Third Edition, (1973).
- 5) ICRP, "Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation", ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26(3-4), (1996).

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目																																																						
(核燃料輸送物としての核燃料物質等の運搬) 第3条 第1項第1号	(L型輸送物として運搬できる核燃料物質等) 第3条	該当しない。																																																							
	(A型輸送物として運搬できる核燃料物質等の放射能の量の限度) 第4条	該当しない。																																																							
	第2号 第3号	本輸送物の収納物は下記のとおりであり、原子力規制委員会の定める量を超える量の放射能を有する核燃料物質等に該当するのでBM型輸送物として輸送する。 <table border="1" data-bbox="646 1055 1257 1910"> <thead> <tr> <th rowspan="3"></th> <th colspan="2">中央部</th> <th colspan="2">外周部</th> </tr> <tr> <th colspan="4">17×17 燃料</th> </tr> <tr> <th>A型</th> <th>B型</th> <th>A型</th> <th>B型</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>燃料集合体の種類</td> <td colspan="4">軽水炉 (PWR) 使用済燃料</td> </tr> <tr> <td>性状</td> <td colspan="4">固体 (二酸化ウラン粉末焼結体)</td> </tr> <tr> <td>ウラン重量 (kg 以下)</td> <td colspan="4" rowspan="2" style="border: 2px solid black;"></td> </tr> <tr> <td>放射能の量 (PBq 以下)</td> </tr> <tr> <td>初期濃縮度 (wt% 以下)</td> <td colspan="4">4.2</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">燃 焼 度</td> <td>収納物最高 (MWD/MTU 以下)</td> <td colspan="3" rowspan="2" style="border: 2px solid black;"></td> </tr> <tr> <td>収納物平均 (MWD/MTU 以下)</td> </tr> <tr> <td>発熱量 (kW 以下)</td> <td colspan="4">15.8</td> </tr> <tr> <td>冷却日数 (日以上)</td> <td colspan="4" style="border: 2px solid black;"></td> </tr> <tr> <td>収納体数 (体)</td> <td>12</td> <td colspan="2"></td> <td>12</td> </tr> </tbody> </table>		中央部		外周部		17×17 燃料				A型	B型	A型	B型	燃料集合体の種類	軽水炉 (PWR) 使用済燃料				性状	固体 (二酸化ウラン粉末焼結体)				ウラン重量 (kg 以下)					放射能の量 (PBq 以下)	初期濃縮度 (wt% 以下)	4.2				燃 焼 度	収納物最高 (MWD/MTU 以下)				収納物平均 (MWD/MTU 以下)	発熱量 (kW 以下)	15.8				冷却日数 (日以上)					収納体数 (体)	12			12
	中央部			外周部																																																					
	17×17 燃料																																																								
	A型	B型	A型	B型																																																					
燃料集合体の種類	軽水炉 (PWR) 使用済燃料																																																								
性状	固体 (二酸化ウラン粉末焼結体)																																																								
ウラン重量 (kg 以下)																																																									
放射能の量 (PBq 以下)																																																									
初期濃縮度 (wt% 以下)	4.2																																																								
燃 焼 度	収納物最高 (MWD/MTU 以下)																																																								
	収納物平均 (MWD/MTU 以下)																																																								
発熱量 (kW 以下)	15.8																																																								
冷却日数 (日以上)																																																									
収納体数 (体)	12			12																																																					

枠囲みの範囲は核物質防護に係る事項
ですので公開することはできません。

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
(L型輸送物に係る技術上の基準) 第4条第1号		<p>本輸送物は、以下に示すように容易に、かつ、安全に取扱うことができる。</p> <p>a. 輸送物は、キャスク本体にトラニオンがあり、吊上げ、吊下しは専用吊具を用い、クレーンを使用して容易に行える。また、輸送物は専用の輸送架台を用いて車輛又は船舶に強固に積付けられる等、安全に取り扱えるものである。</p> <p>b. 輸送物の吊上装置は、公式を用いた計算により安全係数を3としても設計降伏点を下回るよう設計しており、急激な吊上げに耐えられるものである。</p> <p>c. 輸送物には、トラニオンを除いて輸送物を吊上げるおそれのある吊手はない。 また、輸送物は、専用吊具によって容易に、かつ、安全に取り扱うことができる。</p> <p>d. 輸送物の表面は滑らかに仕上げられており、雨水が溜らない構造となっている。</p>	(イ)-C (ロ)-A. 4. 4 (イ)-C (イ)-C
第2号		<p>本輸送物は、以下に示すように運搬中に予想される温度(-20℃~38℃)及び内圧の変化、振動等により、き裂、破損等の生じるおそれはない。</p> <p>a. 輸送容器は周囲温度-20℃~38℃の温度範囲において、各部品の熱膨張に伴う寸法変化が0.1%以下と十分小さく、部品同士の干渉が生じないため、き裂、破損等の生じるおそれはない。</p> <p>b. 輸送容器の運搬中に予想される内圧は胴内圧が0.078MPa、一二次蓋間が0.39MPa、二三次蓋間が0.253MPaであり、構造解析ではその圧力条件を上回る差圧を胴内及び二三次蓋空間に設定した条件で、ABAQUSコードを用いて解析評価している。また、中性子遮蔽材充填空間においても温度上昇に伴う圧力上昇を考慮している。</p>	(ロ)-A. 5. 1. 2 (ロ)-A. 5. 1. 1

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
		<p>c. 軸方向燃焼度分布を考慮し、収納物の崩壊熱量の最大値に裕度を見た 18.1 kW のとき、一般の試験条件の下での輸送物の温度を ABAQUS コードを用いて解析評価している。収納物の最高温度は 206 °C であり、制限温度 275°C より低いため、燃料被覆管の機械的特性に影響はない。</p> <p>d. 三次蓋は輸送時の振動等により緩まないよう、三次蓋ボルトにより強固に締付けられており、輸送中の温度及び内圧の変化を考慮しても、開くことはない。また、輸送物のキャスク本体と三次蓋の接合部の密封境界には Oリングを設けており、密封を保っている。</p> <p>e. 収納物の崩壊熱量の最大値に裕度を見た 18.1 kW のときの一般の試験条件の下での輸送物の温度を ABAQUS コードを用いて解析評価している。本輸送物の主要な中性子遮蔽材であるレジンの温度は 127 °C であり、使用可能温度 149 °C より低いため、遮蔽性能が低下することはない。また、二次蓋金属ガスケット温度は 105 °C であり、金属ガスケットの使用可能温度 130 °C より低く、三次蓋 Oリング温度は 103°C であり、Oリングの使用可能温度 150°C より低いため、密封性能が低下することはない。</p> <p>輸送中の温度変化により予想されるキャスク本体、一次蓋、二次蓋及び三次蓋で構成される容器本体各部の温度差による熱応力や内圧の変化による荷重が負荷されても各部が設計応力強さ等基準値を下回り、構造健全性が維持され、き裂、破損等の生じるおそれはない。また、三次蓋の口開き変形量は Oリングの初期締め付け代より小さく、密封性を損なうことはない。</p>	<p>(ロ)-B. 4. 6</p> <p>(ロ)-A. 4. 7、 (ロ)-C. 2. 4</p> <p>(ロ)-B. 4. 6</p> <p>(ロ)-A. 5. 1</p>

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第4条第2号		<p>f. 本輸送物の胴内は、真空置換によりヘリウムを充填するため残留水はなく、水の放射線分解によってガスが発生しないため、内圧を高めることはなく、密封性を損なうことはない。</p> <p>g. 固縛装置は、公式を用いた計算により輸送中発生する上下及び前後方向加速度2g並びに左右方向加速度1gの負荷時にも設計降伏点を下回るように設計されているため、構造健全性は維持される。また、本輸送物は固有振動数(215 Hz)と輸送による振動数(10 Hz)の差が大きく、励振力による輸送物の応答増幅の影響はなく、輸送中の振動による荷重は0.3m落下事象に包絡される。よって、輸送容器は予想される振動等によって、き裂、破損等の生じるおそれはない。</p>	<p>(ロ)-B. 4. 4</p> <p>(ロ)-A. 4. 5、 (ロ)-A. 4. 7</p>

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第4条第3号		輸送物表面には、吊上装置であるトラニオン以外には不要な突起物がなく、また、輸送物表面は滑らかに仕上げており、除染は容易である。	(イ)-C
第4号		<p>本輸送物には、多種の材料が使われているが、以下に示すように安定的な状態にあり、各々の材料相互の間及び収納物との間では、危険な物理的作用又は化学反応を起こすおそれはない。</p> <p>a. レジンは、外筒等に密閉されて収納されており、これらの金属と化学的及び電氣的に反応することはない。</p> <p>b. 一次蓋、二次蓋、三次蓋と各蓋ボルト、金属ガスケット及びOリング等の間では、化学的及び電氣的に作用して問題になるような腐食を起こすことはない。</p> <p>c. 収納物は胴内で不活性ガスであるヘリウム雰囲気にあるため収納物に対する化学的影響はない。</p>	(ロ)-A. 4. 1
第5号		リリーフバルブカバープレート及びそのボルトは上部緩衝体で覆われており、かつ <input type="checkbox"/> されているので、不用意に開けられることはない。そのため、リリーフバルブカバープレート内部のリリーフバルブは誤って操作されることはない。	(ロ)-A. 4. 3
第6号		該当しない。	
第7号		該当しない。	
	(表面密度限度)		(ニ)-A

枠囲みの範囲は核物質防護に係る事項
ですので公開することはできません。

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第4条第10号 (A型輸送物に係 る技術上の基準)		本輸送物には、所定のもの以外が収納されてい ないことを確認したうえで蓋をするので、本輸送物 の安全性を損なうおそれのあるものを収納する ことはない。	(ニ)-A
第5条第1号		前述のとおり前条(第4条)第1号～第5号、第8 号及び第10号に定める基準に適合している。	
第2号		本輸送容器の仕様は外径 3550mm、長さ 6783mm の 円筒型容器であり、外接する直方体の各辺は 10 cm 以上である。	(イ)-C
第3号		本輸送物の三次蓋は、三次蓋ボルトで強固に締め 付けられており、輸送の際には上部緩衝体で覆わ れるため、不用意に三次蓋ボルトが外されること はない。また、上部緩衝体は取付後 <input type="checkbox"/> されるの で、開放された場合はそれが明らかとなる。	(ロ)-C. 2、 (ニ)-A
第4号		本輸送物は、周囲温度-20℃～38℃で使用する。 本輸送容器の構成部品は、-20℃の温度において もき裂、破損等は生じず、使用可能温度が 70℃ を超える部材を使用している。 したがって、構成部品は、-20℃～70℃の温度範 囲において、き裂、破損等を生じるおそれはない。	(ロ)-A. 4. 2、 (ロ)-B. 4. 6 (ロ)-A. 5. 1. 1
第5号		本輸送物の密封装置は、周囲圧力が 60 kPa の場合 を考慮した差圧を胴内及び二三蓋空間に設定し た解析により、密封装置の健全性を損なうことが ないことを規則第4条第2号 c. の熱解析及び構 造解析において ABAQUS コードを用いて確認して いるため、放射性物質の漏えいはない。	(ロ)-A. 4. 6
第6号		該当しない。	

枠囲みの範囲は核物質防護に係る事項
ですので公開することはできません。

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第7号		<p>本輸送物は、以下に示す保守的な条件を設定し、DOT3.5コードにて解析した結果、通常輸送時の輸送物表面の最大線量当量率は1131.9 μSv/hであり、基準値の2 mSv/hを超えることはない。</p> <p>a. 線源として保守的に中央部に全てバーナブルポイズン集合体を装荷した最高燃焼度の燃料12体を、外周部に全て平均燃焼度の燃料12体を収納するとしている。</p> <p>b. 燃料の燃焼条件を包絡する軸方向燃焼度分布を考慮している。</p> <p>c. 解析モデルについては遮蔽材の最小寸法を使用し、中性子遮蔽材の重量が2.5%減損したとしている。</p>	(ロ)-D.4、 (ロ)-D.5
第8号		<p>本輸送物は、上記と同じ条件にて解析した結果、通常輸送時の輸送物の表面から1mの距離における最大線量当量率は86.1 μSv/hであり、基準値の100 μSv/hを超えることはない。</p>	(ロ)-D.4、 (ロ)-D.5
第9号		該当しない。	
第10号		該当しない。	

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
(BM 型輸送物に係る技術上の基準) 第 6 条第 1 号		前述のとおり前条(第 5 条)第 1 号～第 8 号までに定める基準に適合している。ただし、第 6 号に定められる要件は該当しない。	
第 2 号	(BM 型輸送物に係る一般の試験条件) 第 14 条 別記第 4 第 1 号	一般の試験条件の下での本輸送物の各部温度評価として、規則第 4 条第 2 号 c. の熱解析において、周囲温度 38 °C 及び太陽放射熱を保守的に連続で負荷した条件にて定常状態に達した温度を評価し、各部が使用可能温度を超えないことを確認している。続いて、上記で評価した各部の温度分布を引き継いだ構造解析において、各部が設計応力強さ等基準値を下回り、輸送物の構造健全性及び密封性を損なうことはない。	(p)-B. 4. 1. 1、 (p)-A. 5. 1
	第 2 号	以下のとおり別記第 3 第 1 号の条件の下に置いて評価している。	
	別記第 3 第 1 号	一般の試験条件 イ. 水噴霧試験 本輸送物の表面はステンレス鋼もしくは塗装を施した炭素鋼面であり、水切りは極めてよく、本試験の実施によっても輸送物の構造健全性及び密封性を損なうことはない。	(p)-A. 5. 2

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
<p>第6条第2号</p> <p style="text-align: center;">イ</p>	<p>第14条 別記第3第1号</p> <p style="text-align: center;">第2号</p>	<p>変形する可能性があるが、ロ章Eの遮蔽解析で考慮している0.3m落下で想定される変形量には包絡される。</p> <p>(4) 貫通試験</p> <p>貫通試験は重量6kg、直径3.2cmの棒を輸送物の最も弱い部分に1mの高さから落下させたとしている。試験棒は軟鋼とし、衝撃荷重は輸送物が受け持つものとして公式を用いた計算を行った結果、本試験の実施によっても棒の落下エネルギーは本輸送物外表面で最も板厚の薄い緩衝体カバープレートのせん断エネルギーよりも小さいため、容器本体の構造健全性を損なうことはない。</p> <p>また、遮蔽解析に影響する破損も生じない。</p> <p>該当しない。</p> <p>本輸送物は、第5条第7号の通常輸送時の評価条件に加え、構造解析の結果より得られた緩衝体の各落下方向の変形を重畳させた保守的なモデルを用い、最大放射エネルギーの収納物を収納した条件を設定してDOT3.5コードにて解析した結果、一般の試験条件下の輸送物表面の最大線量当量率は1131.9 μSv/hであり、基準値の2 mSv/hを超えることはない。</p> <p>なお、この緩衝体の変形を考慮しても、通常輸送時に比べ本輸送物の最大線量当量率の著しい増加はない。</p>	<p>(ロ)-A. 5. 5</p> <p>(ロ)-D. 4、 (ロ)-D. 5</p>

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第 6 条第 2 号	(BM 型輸送物に係る一般の試験条件の下における漏えい量)		
□	第 15 条	<p>本輸送物は、一般の試験条件下に置いた場合でも規則第 6 条第 2 号の熱解析で三次蓋 O リングの健全性を、また、同号の構造解析で蓋密封部の健全性が確認されており、密封性を損なうことはない。本輸送物は、一般の試験条件下では負圧を維持するため、放射性物質の環境への漏えいはないが、胴内圧が大気圧上限値まで上昇し、その後大気圧下限値の環境下に置かれたとして公式を用いた放射性物質 (^3H 及び ^{85}Kr) の漏えい計算をしても、各核種の A_2 値より求められる混合物に対する基準値 $A_2 \times 10^{-6} \text{ Bq/h}$ との比率の合計は、9.68×10^{-5} で、1 より小さく、基準値 $A_2 \times 10^{-6} \text{ Bq/h}$ を超えることはない。</p>	(□)-C. 3. 1
ハ		<p>本輸送物は、専用積載として運搬するが、収納物の最大崩壊熱量に余裕をみた 18.1 kW を収納したとして、一般の試験条件下に置いた場合の輸送物の温度を ABAQUS コードを用いて解析した結果、外筒外面及びトラニオン温度が 85℃ を超えるが、必要に応じて近接防止金網 (66℃ 以下) を取り付けて輸送するため、輸送中に人が容易に接近し得る部分の最高温度は日陰において基準値の温度 85℃ を超えることはない。</p>	(□)-B. 4. 1、 (□)-B. 4. 6
ニ	第 9 条	<p>本輸送物は、一般の試験条件下に置いた場合でも密封性が低下することはないことを規則第 6 条第 2 号の構造解析において ABAQUS コードを用いて確認している。また、輸送物表面の放射性物質の密度を発送前検査においても測定により確認するため、表面密度限度を超えることはない。</p>	(□)-A. 5. 1、 (□)-C. 3. 1

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第 3 号	(BM 型輸送物に係る特別の試験条件) 第 16 条 別記第 5 第 1 号	<p>強度試験</p> <p>イ. 落下試験 I</p> <p>本輸送物は、一般の試験条件と同様の方法で最大損傷を受けるよう、垂直、水平及びコーナー方向に剛体平面である落下試験台上に 9 m 高さから落下するとして解析又は評価している。また、この時の容器本体各部の応力を ABAQUS コードを用いて解析評価し、バスケットについては公式を用いた計算により評価している。容器本体及びバスケットは、落下試験 I による衝撃力（内部収納物には、加速度割増係数として垂直落下時 2.6、水平落下時 1.2 を考慮）が負荷されても容器本体各部が設計引張強さ等基準値を下回り、バスケットが塑性変形することはないことから、容器本体は破損せず密封性を損なうことはなく、バスケットは構造健全性を損なうことはない。</p> <p>さらに、本輸送物が傾斜落下するとして、蓋密封部が二次衝撃側となる場合について評価している。落下試験結果を基にした密封性能の評価を行った結果、本輸送物の蓋部の変形量は落下試験で密封健全性維持が確認された落下試験モデルに比べて小さいことから、傾斜落下時に容器本体の密封性を損なうことはない。</p>	(ロ)-A. 6. 1、 (ロ)-A. 10. 3

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第6条第3号	第16条 別記第5第1号	<p>ロ. 落下試験Ⅱ</p> <p>9m 落下試験に引き続いて、以下のように 1m 貫通試験が起こるとして、公式を用いた計算により、蓋部、底部及び胴にせん断が生じないことを確認しているため、容器本体に破損が生じることはなく、密封性を損なうことはない。</p> <p>i. 本輸送物は、最大損傷を受けるよう、垂直方向及び水平方向に輸送物の重心が軟鋼棒直上となる 1m の高さから落下するとして解析している。</p> <p>ii. 軟鋼棒の長さは、輸送物に最大の破損を与えるように十分長いものとして解析している。</p> <p>また、三次蓋のリリーフバルブカバープレート及び三次蓋シール部への垂直方向又は水平方向落下に対しても、密封性能維持が確認された落下試験モデルと同じ緩衝体内部構造を適用しており、密封性を損なうことはない。</p>	(ロ)-A. 6. 2

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第6条第3号	第16条 別記第5第2号	<p>熱的試験(火災試験)</p> <p>i. 本輸送物は、落下試験Ⅰ、Ⅱの落下順序を考慮して火災による入熱量を大きく評価するように、落下試験Ⅰの緩衝体の各落下方向の変形を重畳させた保守的なモデルで解析している。</p> <p>ii. これらの試験は、最大崩壊熱量に余裕をみた18.1kWの設計崩壊熱量があるという条件でABAQUSコードを用いて輸送物各部の温度を解析している。</p> <p>iii. 解析の結果、一部の側部中性子遮蔽材は使用可能温度を超えるが著しく焼損することはない。また、密封境界の三次蓋Oリングやその他の構成部材の温度は、使用可能温度を下回り、熱的健全性及び密封性を損なうことはない。</p> <p>iv. また、この時の各部の応力をABAQUSコードを用いて解析評価している。容器本体は火災による胴内圧及び熱応力が負荷されても各部が設計引張強さ等基準値を下回り、容器本体は破損しない。</p>	(㉞)-A. 6. 3、 (㉞)-B. 5

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第 6 条第 3 号 □	(BM 型輸送物に係 る特別の試験条 件の下における 漏えい量) 第 17 条	<p>本輸送物は、特別の試験条件下に置いた場合、緩衝体及び中性子遮蔽材に変形が生じるが、密封装置は健全であり、火災試験を経た後も密封性は保持できる。ここで安全側に全燃料棒の密封性が失われたと仮定し、燃料が有する放射性ガスが三次蓋一胴内雰囲気中に放出されると仮定している。この条件で、公式を用いた放射性物質 (^3H 及び ^{85}Kr) の漏えい計算をしても、各核種の A_2 値より求められる混合物に対する基準値 A_2 Bq/week との比率の合計は、2.45×10^{-5} で、1 より小さく、基準値 A_2 Bq/week を超えることはない。</p>	(□)-C. 4
第 4 号		<p>本輸送物は、周囲温度 -20 °C 以上で使用する。本輸送容器の材料は、-20 °C の低温下においても機械的性能が低下することはない。また、規則第 4 条第 2 号 c. の熱解析において、周囲温度 38 °C で収納物の崩壊熱量の最大値に裕度を見た 18.1 kW のときの輸送物の各部温度を評価している。続いて、上記で評価した各部の温度分布を引き継いだ構造解析において、各部が設計応力強さ等基準値を下回り、輸送物の構造健全性を損なうことがないことを確認している。なお、落下解析においては、低温時の木材の強度上昇及び高温時の木材の強度低下の影響を考慮している。したがって、本輸送容器は -20 °C ~ 38 °C までの運搬中に予想される温度変化に対してもき裂、破損等の生じるおそれはない。</p>	(□)-A. 4. 2、 (□)-A. 5. 1、 (□)-A. 10. 4、 (□)-B. 4. 6

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
<p>第 5 号</p> <p>第 7 条～第 10 条</p>	<p>(原子力規制委員会の定める量を超える放射能を有する核燃料物質等を収納した核燃料輸送物に係る試験条件)</p> <p>第 18 条 別記第 6</p>	<p>強化浸漬試験(200 m)</p> <p>本輸送物の収納物は、使用済燃料であり、最大放射エネルギーは A_2 値の 10 万倍を超える。公式を用いた計算により 2.101325 MPa の水圧下に置かれたとしても、胴及び蓋は許容外圧や設計引張強さ等の基準を下回るので、密封装置は破損しない。</p> <p>該当しない。</p>	<p>(ロ)-A. 7</p>

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
(核分裂性物質に係る核燃料輸送物の技術上の基準) 第 11 条	第 23 条第 1 号	<p>本輸送物に収納する核分裂性物質量は、^{235}U が約 470 kg であり、本輸送物は核分裂性輸送物として輸送する。</p> <p>本輸送物は、規則第 11 条第 2 号で後述するように SCALE コードシステムを用い、収納する燃料の条件として新燃料条件の初期濃縮度の適用、及び、三次蓋、緩衝体、中性子遮蔽材を無視する等、核的に安全側のモデルを仮定し、無限個の任意配列の場合にも中性子実効増倍率は 0.38704 となり未臨界である。なお、上記の解析では、中性子実効増倍率が最も大きく評価できるよう、バスケット格子内のり寸法の公差及び燃料集合体の配置を設定している。</p>	(イ)-A、 (イ)-B、 (ロ)-E. 4. 4
第 1 号	(核分裂性輸送物に係る一般の試験条件) 第 24 条 別記第 11	<p>本輸送物は、核分裂性輸送物に係る一般の試験条件下に置いた場合、規則第 6 条第 2 号の構造解析により 0.3 m 落下では緩衝体の変形が生じるが、一辺が 10 cm の立方体を包含するようなくぼみが生じるような変形ではない。また、他の試験条件も含めそれ以外の部位に損傷はない。以上より、構造部に 10 cm 立方を包含するようなくぼみを生じることなく、かつ外接する直方体の各辺は 10 cm 以上である。</p>	(ロ)-A. 9. 1

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第 11 条第 2 号 イ、ロ、ハ、ニ、ホ	(核分裂性輸送物に係る孤立系の条件) 第 25 条 第 1、2、3 号 (核分裂性輸送物に係る特別の試験条件) 第 26 条 別記第 12 (核分裂性輸送物に係る配列系の条件) 第 27 条	<p>規則第 6 条第 2 号の熱解析及び、負荷係数 1.2 を考慮した衝撃加速度に対し保守的な設計加速度を設定することで、0.3m 落下後の 9m 落下の衝撃力をも考慮できている規則第 6 条第 3 号の構造解析の結果から本輸送容器は、落下試験等においても臨界解析モデルに影響を与えるような物理的・化学的変化はなく、胴内への浸水もないが、燃料集合体は落下試験において変形する可能性がある。臨界解析では、保守的に、三次蓋の存在を無視した上で、特別の試験条件の影響を考慮した二次蓋からの微量の浸水を考慮するとともに、燃料集合体の下部側支持格子 1 スパン間の拡大／縮小変形を考慮したモデルで解析を行った。また、燃料のウラン濃縮度は保守的に減損していない未照射の値とし、一部の燃料に添加されているガドリニウムや収納する可能性のあるバーナブルポイズンの効果は考慮しない条件で評価している。収納物の温度は常温(20℃)とし、収納物は容器中央に最も近接して配置した。また、中性子遮蔽材、三次蓋及び上・下部緩衝体が存在しない保守的なモデルで、周囲が完全反射の条件で評価している。</p> <p>以上のモデルは規則第 11 条第 2 号のイ、ロ、ハ、ニ及びホに要求される評価条件のいずれよりも厳しい条件とした保守的なモデルであり、SCALE コードシステムを用いた解析の結果、中性子実効増倍率は 0.38745 で未臨界である。したがって、いずれの評価条件に置かれた場合にも臨界に達しない。</p>	(ロ)-E. 2. 2、 (ロ)-E. 3. 1、 (ロ)-E. 4. 1、 (ロ)-E. 4. 2、 (ロ)-E. 4. 4、 (ロ)-E. 6

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第 11 条第 3 号		<p>本輸送物は、周囲温度-20℃以上で使用する。本輸送容器の材料は、-20℃の低温下においても機械的性能が低下することはない。また、規則第 4 条第 2 号 c. にて前述するように、周囲温度 38℃で収納物の崩壊熱量の最大値に裕度を見た 18.1 kW のときの輸送物の各部温度の評価結果及び、同じく前述する構造解析において、各部が設計応力強さ等基準値を下回り、輸送物の構造健全性及び密封性を損なうことはない。なお、落下解析においては、低温時の木材の強度上昇及び高温時の木材の強度低下の影響を考慮している。したがって、本輸送物は、-20℃～38℃までの運搬中に予想される温度変化に対してもき裂、破損等の生じるおそれはない。</p>	<p>(ロ)-A. 9、 (ロ)-B. 4. 6、 (ロ)-A. 5. 1、 (ロ)-A. 10. 4</p>

(ホ)章 安全設計及び安全輸送に関する特記事項

本輸送物の安全設計、安全輸送に関する特記事項は以下のものとする。

1. 近接防止金網の装着

本輸送物は発送前の温度測定検査で、太陽熱放射のない条件において輸送中人が容易に近づくことができる表面温度が 85 °C を超える場合は、近接防止金網を装着して輸送するものとする。

2. 三次蓋及び緩衝体の取扱いについて

本輸送物の三次蓋及び緩衝体は同型式の輸送容器間で共用する。

3. 安全設計において自主的に考慮した事項(輸送容器及び収納される使用済燃料の経年変化について)

本輸送容器は、使用済燃料乾式貯蔵施設における貯蔵後の輸送にも用いられる。ここでは、設計評価期間を 60 年とし、輸送容器の各部材及び使用済燃料の経年変化について、(ロ)章の安全解析で自主的に考慮する事項について示す。

(1) 経年変化の考慮の必要性の評価

a. 考慮すべき経年変化要因

輸送容器の構成部材及び使用済燃料に関して考慮すべき経年変化の要因、並びに必要に応じて安全解析において考慮すべき事項を以下に示す。

(a) 熱的劣化

高温での材料組成・材料組織の変化、強度・延性・脆性・クリープ・その他物性値の変化及び重量減少

(b) 放射線照射による劣化

ガンマ線及び中性子照射による材料組成・材料組織の変化、並びに強度・延性・脆性・その他物性値の変化

(c) 化学的劣化

全面腐食、応力腐食割れ、異種材料接触部の化学的反応及び燃料被覆管材料における水素吸収・酸化

b. 経年変化に対する評価結果

輸送容器の構成部材について、経年変化考慮の必要性を評価した結果を(a)～(h)に示す。また、使用済燃料被覆管について経年変化考慮の必要性を評価した結果を(i)に示す。

おり、使用済燃料貯蔵時の中性子照射量は 10^{14} n/cm² を超えないことから照射脆化の影響はない。また、下部端板及び底部中性子遮蔽材カバーに使用する材料は、設計用強度・物性値が規定^{2)、3)}されており、その温度範囲で使用するため、熱による経年変化を考慮する必要はない。

下部端板の内面及び底部中性子遮蔽材カバーの内面は中性子遮蔽材（レジン）に接するが、実用上問題となる腐食はない。

(f) 中性子遮蔽材

中性子遮蔽材（レジン）は、熱と照射の影響評価が行われ、使用済燃料貯蔵時の照射量による照射の影響は熱に比べ無視し得る^{7)、8)}ことが確認されているため、熱による経年変化のみ考慮するものとする。中性子遮蔽材の温度は、設計基準温度(149 °C)を下回っており、中性子遮蔽材は設計評価期間中利用可能である。ただし、中性子遮蔽材は、設計評価期間中の経年変化により質量減損が発生⁷⁾するため、遮蔽評価上、保守的に 2.5 %の質量減損を考慮する。

(g) 金属ガスケット

金属ガスケットに使用するアルミニウム及びニッケル基合金は、中性子照射量がそれぞれ 10^{19} n/cm² 又は 10^{21} n/cm² までは、顕著な機械的特性変化は見られない^{9)、10)}ことが示されており、使用済燃料貯蔵時の中性子照射量は 10^{15} n/cm² を超えないことから照射脆化の影響はない。また、高温時の健全性についてラーソン・ミラー・パラメータ(LMP)で評価すると 150 °Cでは 100 年以上閉じ込め機能を維持できる¹¹⁾。さらに、使用済燃料貯蔵時の温度条件において長期密封性能試験(19 年以上)が実施され、閉じ込め機能が維持されることが確認されている¹²⁾。

蓋間空間には不活性ガスであるヘリウムを適切に封入し、その圧力を監視する設計としている。一次蓋の金属ガスケットは不活性雰囲気であり、腐食を考慮する必要はない。また、二次蓋の金属ガスケットは、内側が不活性雰囲気、外側が大気となっているが、必要に応じて保守が可能であり、輸送時の水密境界としての健全性は維持される。

なお、構造解析では、設計評価期間(60 年間)における健全性を考慮し設定した基準に対し、二次蓋の金属ガスケット部の口開き及び横ずれの影響評価を行っている。

b. 金属ガスケット

(a) 金属ガスケットの横ずれ／口開き量と漏洩率の関係性

高温で長期間使用する金属ガスケットについては、構造解析において、これまでの知見に基づき経年変化を考慮した金属ガスケットの横ずれ基準値を設定する。

金属ガスケットについては、貯蔵後の輸送時密封性能に関する要素試験として、静的口開き試験、静的横ずれ試験、動的口開き試験、動的横ずれ試験が実施されている。当試験では静的口開きと横ずれが同時に発生した場合に、(ホ)-第1図に示す輸送時の基準漏えい率を確保するための横ずれ量と有効復元量（許容口開き量）の相関関係が得られている²⁰⁾。また、落下試験を想定した動的横ずれと漏えい率の関係についてまとめられ、(ホ)-第2図に示す統計誤差を考慮した安全側の評価線が示されている²⁰⁾。

本輸送容器で使用する金属ガスケットは上述の試験に用いられたものと、外被、内被及びコイルスプリングの材料は同等であり、断面径も10mmと等しい。また、貯蔵終了時（設計評価期間（60年））のラーソン・ミラー・パラメータ（LMP）は7340であり、上述の試験に用いられた試験体のLMP7375を下回っているため、上述の試験以上の密封性能が期待できる。ただし、本輸送容器で使用する金属ガスケットのフープ径は上述の試験の約10倍であるため、漏えい率は試験における漏えい率の10倍として評価する。

上述の試験に基づき、核分裂性輸送物に係る特別の試験条件に対しては、十分な防水機能が得られる密封性能（ 5×10^{-3} ref cm^3/s ）となるよう、構造解析の基準値を、横ずれ量と有効復元量（許容口開き量）の関係より静的横ずれに対して3mm、動的横ずれと漏えい率の関係より動的横ずれに対して3mmと設定した。

(b) 漏水量評価に使用する二次蓋金属ガスケットの密封性能

構造解析において、(a)で定めた基準を満たすことを確認できたことから、核分裂性輸送物に係る特別の試験条件における二次蓋金属ガスケットの密封性能を 5×10^{-3} ref cm^3/s と設定し、口章E 臨界解析 E.7にて胴内の浸水量を評価した。