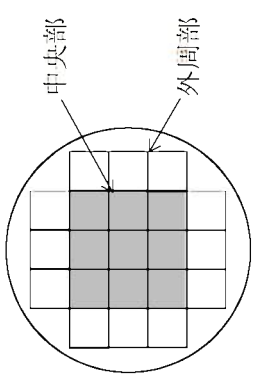
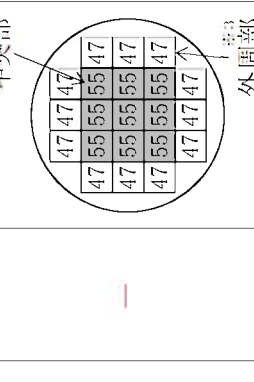
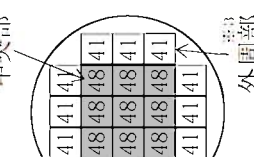


第5-1表 乾式キャスク解析条件の概要 (MSF-21P型)

収 納 物 仕 様	燃料 集合体 1体の 仕様	キャスク収納制限 配置制限				燃料スペック		解析条件		
		17×17型燃料収納時		14×14型燃料収納時		燃料スペック		遮蔽		除熱
		中央部	外周部	中央部	外周部	17×17型 (A/B型)	14×14型 (A/B型)	中央部	外周部	
燃料タイプ	17×17型 (A/B型)	14×14型 (A/B型)	14×14型 (A/B型)	17×17型 (A型)	14×14型 (A/B型)	17×17型 (A型)	14×14型 (B型)	中央部	外周部	17×17型 (A型)
初期ウラン濃縮度 (wt%)	≤4.2	≤4.9	≤4.8	4.1	4.8					
ウラン重量 (kg)	≤44	≤55	≤47	≤55	≤55	0	55	47 ^{※3}	48	41 ^{※2} 41 ^{※3}
最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)	≤48	≤55	≤47	≤55	≤55	0	55	47 ^{※3}	48	41 ^{※2} 41 ^{※3}
SFPでの冷却期間 (年)	A型: ≥15 B型: ≥20	≥15	≥15	≥15	≥15	—	—	15	15	15
最高燃焼度 (GWd/t)	≤46	≤90	—	≤90	—	—	—	90	—	—
SFPでの冷却期間 (年)	A型: ≥15 B型: ≥20	≥15	—	≥15	—	—	—	15	—	—
キャスク 1基あたり	≤44	≤43	—	—	—	0	—	—	—	44
配置 ^{※4}										

※1：臨界解析において14×14型燃料はA型及びB型で仕様が同じとなるため、解析条件としてA型とB型の区別をしない。

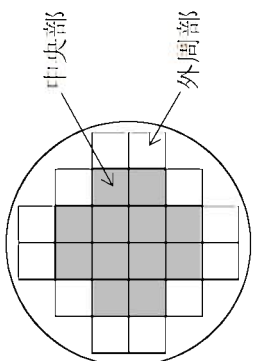
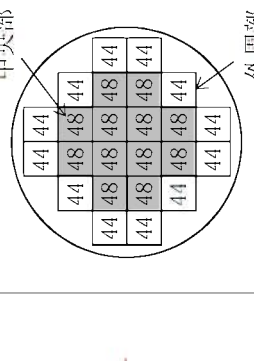
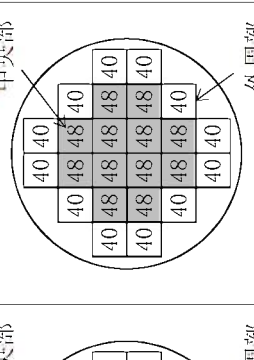
※2：外周部12体は、乾式キャスク全体の発熱量が平均44GWd/tになるよう41GWd/tとしている。

※3：48GWd/t型燃料を収納する条件とする。実際燃焼度が同じであれば、55GWd/t型燃料に比べ48GWd/t型燃料のほうが、線源強度及び発熱量が厳しい条件となる。

※4：数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

「」：商業機密に係る事項のため公開できません

第5-2表 乾式キャスク解析条件の概要 (MSF-24P型)

	キャスク収納制限 配置制限		燃料スペース	解析条件		
	中央部	外周部		臨界	遮蔽	除熱
燃料 集合体 1体の 仕様	燃料タイプ	17×17型 (A/B型)	17×17型 (A/B型)	17×17型 (A型)	17×17型 (A型)	17×17型 (A型)
	初期ウラン濃縮度 (wt%)	≤4.2	4.1			
取 納 物 仕 様	ウラン重量 (kg)	≤44	≤48	0	48	40 ^{※1}
	最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)	≤48	≤48			
	SFPでの冷却期間 (年)	A型: ≥15 B型: ≥17	—	—	15	15
	最高燃焼度 (GWd/t)	≤90	—	—	90	—
パ ー プ ル モ イ ン	SFPでの冷却期間 (年)	≥15	—	—	15	—
	平均燃焼度 (GWd/t)	≤44	—	0	—	44
配置 ^{※2}						

※1：外周部12体は、乾式キャスク全体の燃焼度が平均44GWd/tになるよう40GWd/tとしている。

※2：数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

〔 〕：商業機密に係る事項のため公開できません

なお、各解析については、第5-3表及び第5-4表のとおり、三菱重工業㈱が型式設計特定容器等の型式指定を受けたMSF-21P型での設計等で使用した解析コード及びライブラリと同等のものを使用しており、特殊性及び新規性はない。

第5-3表 解析コード（ライブラリ含む）比較

評価項目	解析コード	
	型式指定を受けたMSF-21P型	本申請のMSF-21P型及びMSF-24P型
臨界	SCALE 4.4a (KENO-V.a) ／ (燃料領域均質化) (断面積ライブラリ： ENDF/B-V 238群)	SCALE 6.2.1 (KENO-VI) ／ (燃料ピンモデル化) (断面積ライブラリ： ENDF/B-VII 252群)
遮蔽	ORIGEN2 DOT3.5 (断面積ライブラリ：MATXSLIB-J33)	ORIGEN2 (ORIGEN2.2UPJ) DOT3.5 (断面積ライブラリ：MATXSLIB-J33)
除熱	ORIGEN2 ABAQUS	ORIGEN2 (ORIGEN2.2UPJ) ABAQUS

第5-4表 解析における変更箇所

	変更項目	型式指定を受けたMSF-21P型	本申請のMSF-21P型 及びMSF-24P型
臨界	・コード ／モデル化 ・断面積 ライブラリ	SCALE 4.4a (KENO-V.a) ／ (燃料領域均質化) ENDF/B-V 238群	SCALE 6.2.1 (KENO-VI) ／ (燃料ピンモデル化) ENDF/B-VII 252群
遮蔽	・断面積 ライブラリ	MATXSLIB-J33	MATXSLIB-J33
除熱	・解析モデル	2Dモデル (モデル検証に3Dモデルを適用)	3Dモデル

- 5.1 使用済燃料乾式貯蔵容器の閉じ込め機能について
乾式キャスクの閉じ込め機能を別添1に示す。
- 5.2 使用済燃料乾式貯蔵容器の臨界防止機能について
乾式キャスクの臨界防止機能を別添2に示す。
- 5.3 使用済燃料乾式貯蔵容器の遮蔽機能について
乾式キャスクの遮蔽機能を別添3に示す。
- 5.4 使用済燃料乾式貯蔵容器の除熱機能について
乾式キャスクの除熱機能を別添4に示す。

6. 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について

6.1 要求事項

材料・構造健全性に関する要求事項は、以下のとおりである。

(1) 設置許可基準規則要求事項

①設置許可基準規則第 16 条第 2 項一号イ

- ・燃料体等の落下により燃料体等が破損して放射性物質の放出により公衆に放射線障害を及ぼすおそれがある場合において、放射性物質の放出による公衆への影響を低減するため、燃料貯蔵設備を格納するもの及び放射性物質の放出を低減するものとする。

②設置許可基準規則第 16 条第 2 項一号ハ

- ・燃料体等が臨界に達するおそれがないものとする。

③設置許可基準規則第 16 条第 4 項一号

- ・使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽能力を有するものとする。

④設置許可基準規則第 16 条第 4 項二号

- ・使用済燃料の崩壊熱を適切に除去することができるものとする。

⑤設置許可基準規則第 16 条第 4 項三号

- ・使用済燃料が内包する放射性物質を適切に閉じ込めることができ、かつ、その機能を適切に監視することができるものとする。

⑥設置許可基準規則解釈別記 4 第 16 条 5 項

- ・第 16 条第 2 項第 1 号ハ及び同条第 4 項各号を満たすため、兼用キャスクは、当該兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計とすること。ここで、「兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計」とは、以下を満たす設計をいう。
- ・設計貯蔵期間を明確にしていること。
- ・設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境条件下での経年変化を考慮

した材料及び構造であること。

(2) 原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド確認事項

「4. 自然現象等に対する兼用キャスクの設計 4.5 材料・構造健全性」には以下のように記載されている。

【審査における確認事項】

『
設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及び当該環境下での兼用キャスクの経年変化に対して十分な信頼性を有する材料及び構造であること。また、貯蔵建屋を設置しない場合は、雨水等により兼用キャスクの安全機能が喪失しないよう対策が講じられていること。輸送荷姿等の緩衝体を装着した状態で貯蔵を行う場合は、緩衝体の経年変化についても考慮していること。』

【確認内容】

- 『
- (1) 安全機能を維持する上で重要な兼用キャスクの構成部材は、兼用キャスクの最低使用温度における低温脆性を考慮したものであること。また、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及び当該環境下での腐食、クリープ、応力腐食割れ等の経年変化の影響を、設計入力値（例えば、寸法、形状、強度及び材料物性値）又は設計基準値の算定に際し考慮していること。さらに、必要に応じて防食措置等が講じられていること。
 - (2) 兼用キャスク内部の不活性環境を維持し、温度を制限される範囲に収めることにより、兼用キャスクに収納される使用済燃料の経年変化を低減又は防止する設計であること。

』

6.2 適合性について

審査ガイドでは、設置（変更）許可に係る審査において、兼用キャスクの有する4つの安全機能（臨界防止機能、遮蔽機能、除熱機能及び閉じ込め機能）に係る設計の基本方針の妥当性を確認することが定められており、乾式キャスクの材料・構造健全性については、以下のとおり審査ガイドの確認内容に適合している。

〔確認内容〕

- (1) 安全機能を維持する上で重要な兼用キャスクの構成部材は、兼用キャスクの最低使用温度における低温脆性を考慮したものであること。また、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及び当該環境下での腐食、クリープ、応力腐食割れ等の経年変化の影響を、設計入力値（例えば、寸法、形状、強度及び材料物性値）又は設計基準値の算定に際し考慮していること。さらに、必要に応じて防食措置等が講じられていること。
- (2) 兼用キャスク内部の不活性環境を維持し、温度を制限される範囲に収めることにより、兼用キャスクに収納される使用済燃料の経年変化を低減又は防止する設計であること。

乾式キャスクの主要な構成部材は、設計貯蔵期間中（60年）の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食等の経年変化に対して必要な耐食性のある材料を選定し、安全機能を維持する設計とする。使用済燃料は、設計貯蔵期間（60年）の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食、クリープ、応力腐食割れ等の経年劣化に対して、健全性を確保する設計とする。

これらの経年変化要因に対する乾式キャスクの主要な構成部材及び使用済燃料被覆管の健全性評価を以下に示す。

なお、本評価においては、以下の点について保守性を有している。

- ・評価に適用する中性子照射量は、減衰を考慮せず初期の照射量が60年間継続する条件で算出している。（乾式キャスク各部材の中性子照射量は第6-1表のとおり。）

(1) 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルト

【照射影響】

胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルトに使用する炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン鋼については、中性子照射量が 10^{16} n/cm² までは、顕著な機械的特性変化は見られない¹⁾ ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 6.5×10^{14} n/cm² であることから照射脆化の影響はない。

【熱的影響】

胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルトに使用する炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン鋼は、設計用強度・物性値が規定²⁾ されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。

【化学的影響】

乾式キャスク内部の使用済燃料を閉じ込める空間は、使用済燃料収納時にその空間を真空乾燥するとともに、不活性ガスであるヘリウムを封入し、貯蔵する設計としている。したがって、不活性雰囲気は維持されるため、残留水分 (10 wt%) を考慮しても腐食の影響はない³⁾。また、胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルトに使用する炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン鋼は、設計貯蔵期間中の温度条件において、仮に燃料破損率 1 % 相当の燃料棒内ガスの存在を考慮しても、腐食の影響はない⁴⁾。

一次蓋と二次蓋の間の空間部 (以下「蓋間空間」という。) には不活性ガスであるヘリウムを封入し、不活性雰囲気が維持されるため、腐食の影響はない。また、胴外面及び一次蓋は中性子遮蔽材 (レジン) に接しており、中性子遮蔽材の熱劣化により水が生じるが、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため腐食の影響はない。なお、大気に触れる部分については、塗装等の防食措置により腐食を防止する。

(2) バスケット

【照射影響】

バスケットプレート及びバスケットサポートに使用するアルミニウム合金は、中性子照射量が 10^{16} n/cm² まで顕著な機械的特性変化は見られない^{1)、5)} ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 1.6×10^{15} n/cm² であることから照射脆化の影響はない。また、中性子吸収材に使用するほう素添加アルミニウム合金については、中性子吸収材中のほう素の設計貯蔵期間中の減損割合は 10^{-5} 程度^{*}であり無視し得るほど小さいため、臨界防止機能への影響はない。

※：以下のとおり算出。

$$B-10 \text{ 減損割合} = \sigma \times \phi \times t \quad (\text{n})$$

ここで、

$$\sigma : B-10 \text{ の熱中性子領域 (0.025eV) での全断面積 (3840barn} = 3.840 \times 10^{-21} \text{ (cm}^2\text{))} \quad 6)$$

ϕ : 全中性子束

$$8.117 \times 10^5 \text{ [MSF-21P 型] (n/cm}^2\text{/s)}$$

$$7.977 \times 10^5 \text{ [MSF-24P 型] (n/cm}^2\text{/s)}$$

遮蔽解析結果(燃料集合体領域の最大値)。保守的に貯蔵初期の値を60年一定とする。

$$t : \text{照射期間 (60年間} = 1.9 \times 10^9 \text{ (s))}$$

(計算結果)

$$\textcircled{1} \text{MSF-21P 型} : 3.840 \times 10^{-21} \times 8.117 \times 10^5 \times 1.9 \times 10^9 = 5.93 \times 10^{-6}$$

($\Rightarrow 10^{-5}$ 以下であり、 10^{-5} 程度と設定)

$$\textcircled{2} \text{MSF-24P 型} : 3.840 \times 10^{-21} \times 7.977 \times 10^5 \times 1.9 \times 10^9 = 5.83 \times 10^{-6}$$

($\Rightarrow 10^{-5}$ 以下であり、 10^{-5} 程度と設定)

【熱的影響】

バスケットプレート及びバスケットサポートに使用するアルミニウム合金は、貯蔵状態における温度において、設計用強度・物性値が規定²⁾、⁵⁾されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。

なお、バスケットプレート及びバスケットサポートに使用するアルミニウム合金の設計用強度は、設計貯蔵期間中の熱ばく露条件 (250°C) を模擬した条件での材料試験により得られた材料特性を保守的に包絡するように設定しており、クリープによる設計貯蔵期間中の熱ばく露による強度低下を適切に考慮している⁵⁾、⁷⁾。また、貯蔵時にバスケットプレートに発生する応力は 1MPa 未満と小さく、設計貯蔵期間中のバスケットプレートのクリープ変形量は無視し得る⁵⁾。

【化学的影響】

バスケットが置かれた空間は、使用済燃料収納時にその空間を真空乾燥するとともに、不活性ガスであるヘリウムを封入する設計としている。したがって、不活性雰囲気は維持されるため、残留水分 (10 wt%) を考慮しても腐食の影響はない。⁴⁾、⁸⁾

(3) トラニオン

【照射影響】

トラニオンに使用するステンレス鋼は、中性子照射量が 10^{17} n/cm² までは、顕著な機械的特性変化は見られない⁹⁾ ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 6.5×10^{14} n/cm² であることから照射脆化の影響はない。

【熱的影響】

トラニオンに使用するステンレス鋼は、貯蔵状態における温度において、設計用強度・物性値が規定²⁾ されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。

【化学的影響】

トラニオンの内面は中性子遮蔽材 (レジン) に接しており、中性子遮蔽材の熱劣化により水が生じるが、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため腐食の影響はない。¹⁰⁾

(4) 外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバー

【照射影響】

外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバーに使用する炭素鋼は、中性子照射量が 10^{16} n/cm² までは、顕著な機械的特性変化は見られない¹⁾ ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は、外筒では 3.5×10^{12} n/cm²、蓋部中性子遮蔽材カバーでは 6.5×10^{14} n/cm² であることから照射脆化の影響はない。

【熱的影響】

外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバーに使用する炭素鋼は、設計用強度・物性値が規定²⁾ されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。

【化学的影響】

外筒の内面及び蓋部中性子遮蔽材カバーの内面は中性子遮蔽材（レジン）に接しており、中性子遮蔽材の熱劣化により水が生じるが、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため腐食の影響はない。¹⁰⁾ また、蓋間空間には不活性ガスであるヘリウムを封入し、蓋部中性子遮蔽材カバーの外表面は不活性雰囲気維持されるため、腐食の影響はない。なお、外筒の外表面については、塗装等の防食措置により腐食を防止する。

(5) 下部端板及び底部中性子遮蔽材カバー

【照射影響】

下部端板及び底部中性子遮蔽材カバーに使用するステンレス鋼は、中性子照射量が 10^{17} n/cm² までは、顕著な機械的特性変化は見られない⁹⁾ ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 8.2×10^{13} n/cm² であることから照射脆化の影響はない。

【熱的影響】

下部端板及び底部中性子遮蔽材カバーに使用するステンレス鋼は、設計用強度・物性値が規定²⁾ されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。

【化学的影響】

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）に接しており、中性子遮蔽材の熱劣化により水が生じるが、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため腐食の影響はない。¹⁰⁾

(6) 中性子遮蔽材

【照射影響】

中性子遮蔽材（レジン）は、中性子照射量が 10^{15} n/cm² までは、顕著な質量減損は見られないことが示されており^{11)、12)}、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 1.6×10^{14} n/cm² であることから照射脆化の影響はない。

【熱的影響、化学的影響】

中性子遮蔽材は、設計貯蔵期間中の熱的（化学的）影響により質量減損（2%程度）が発生¹¹⁾ 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。

(7) 金属ガスケット

【照射影響】

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^{13)、14)} ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 2.0×10^{14} n/cm² であることから照射脆化の影響はない。

【熱的影響】

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¹⁵⁾。さらに、設計貯蔵期間中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¹⁶⁾。

【化学的影響】

蓋間空間には不活性ガスであるヘリウムを封入し、その圧力を監視する設計としている。閉じ込め境界である一次蓋の金属ガスケット及び圧力監視境界である二次蓋の金属ガスケットの内側は不活性雰囲気であり、腐食を考慮する必要はない。

大気と接触する二次蓋金属ガスケットの外側については、約3年間の塩水噴霧試験を実施し、実機の使用環境より厳しい塩水噴霧環境においても漏えい率に変化のないことが確認されている¹⁷⁾。また、10年間海浜条件で大気ばく露させた際の平均浸食深さ及び最大孔食深さ³⁾を用い、設計貯蔵期間中の浸食深さと孔食深さを評価した結果、それぞれ約0.025mm及び約0.33mmであり、外被材の製造公差*を含めても、板厚0.5mmより小さいため、閉じ込め機能に影響はない。

※：金属ガスケットの製造公差の例（ノミナル寸法：0.5mm、製造公差： $\left[\begin{array}{c} \square \\ \square \\ \square \\ \square \end{array} \right]$ ， $\left[\begin{array}{c} \square \\ \square \\ \square \end{array} \right]$ ）

(8) 伝熱フィン

【照射影響】

伝熱フィンに使用する銅は、中性子照射量が 10^{16} n/cm²までは、顕著な機械的特性変化は見られない¹⁸⁾ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 1.6×10^{14} n/cm²であることから照射脆化の影響はない。

【熱的影響】

銅は、設計貯蔵期間中の温度条件において、設計用強度・物性値が規定¹⁹⁾されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。

【化学的影響】

銅の電極電位は炭素鋼に比べて高く、イオン化傾向の低い金属である²⁰⁾ことから、銅は腐食することはなく、炭素鋼が選択的に腐食される。また、中性子遮蔽材（レジン）に接しており、中性子遮蔽材の熱劣化により水が生じるが、酸化鉄の生成により酸素の拡散障壁が形成されること、及び中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため、腐食の影響はない。

$\left[\begin{array}{c} \square \\ \square \\ \square \end{array} \right]$ ：商業機密に係る事項のため公開できません

伝熱フィンと胴及び外筒の接合部において異種金属接触による腐食促進の可能性があるが、密閉静止した淡水環境における銅が接続した鋼の腐食試験において鋼単独の場合の腐食速度と同程度になることが確認されている²¹⁾。また、中性子遮蔽材の熱劣化により生じる水分量は限定的であり、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため、異種金属接触による接合部への腐食促進の影響は小さく、腐食の影響はない。

(9) 使用済燃料被覆管

【照射影響】

燃料被覆管に使用するジルコニウム合金は、設計貯蔵期間中の中性子照射量が $1.6 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2$ であり、炉内の中性子照射量 ($10^{21} \sim 10^{22} \text{ n/cm}^2$) に対して十分低いことから、照射の影響は無視し得る²²⁾。

【熱的影響】

熱による経年変化としては、クリープひずみの進行による燃料被覆管の破損、照射硬化の回復による燃料被覆管強度の低下、燃料被覆管中の水素化物再配向による燃料被覆管の脆化、及び応力腐食割れについて評価する必要がある²²⁾。

クリープひずみの進行については、予測式に基づく累積クリープひずみが 1 % 以下となるよう制限することで防止できる²²⁾ ことが示されており、燃料被覆管中の水素化物再配向に係る制限以内では、クリープひずみが 1% を超えることはない。

照射硬化の回復については、国内軽水炉で照射された PWR 照射済被覆管を用いた照射硬化回復試験の結果では、硬化の回復のしきい値は 55 GWd/t 燃料では 270℃ 近傍²²⁾ であり、また、48GWd/t 燃料では 300℃ 近傍²²⁾ であり、しきい値以下であれば照射硬化の回復の可能性は小さいため、使用済燃料被覆管の温度を制限することにより防止する。

燃料被覆管中の水素化物再配向については、国内の軽水炉で照射された PWR 燃料の燃料被覆管を用いた水素化物再配向試験及び機械的特性試験の結果、被覆管の周方向機械的特性が低下しない燃料被覆管の温度が 55 GWd/t 燃料では 250℃ 以下、周方向応力が 90 MPa 以下²³⁾ と求められており、また、48 GWd/t 燃料では 275℃ 以下、周方向応力が 100MPa 以下²²⁾ と求められており、燃料被覆管温度と周方向応力を制限するこ

とによって、機械的特性の劣化を防止する。

応力腐食割れについては、燃料棒ペレットの温度上昇による腐食性核分裂生成ガスの放出はなく、また、原子炉運転中に燃料棒ペレットから放出されたヨウ素はヨウ化セシウムとして安定に存在することから応力腐食割れが発生する化学的雰囲気となっていない²²⁾。なお、腐食性雰囲気での応力腐食割れ試験でジルコニウム合金の応力腐食割れのしきい応力は 55Gwd/t 燃料では 150MPa であり、また、48Gwd/t 燃料では 200 MPa であり、設計貯蔵期間中の応力はこれに比べて十分低い²²⁾。

上記に示す通り、燃料被覆管中の水素化物再配向を防止することにより、他の発生も同時に防ぐことができる。設計貯蔵期間中の燃料被覆管の温度及び周方向応力は、55 GWd/t 燃料では 250°C 及び 90MPa を超えず、48 GWd/t 燃料では 275°C 及び 100MPa を超えないことから、熱による経年変化を考慮する必要はない。

【化学的影響】

残留水分が 10 wt% 以下の不活性雰囲気にある燃料被覆管の酸化量及び水素吸収量は無視し得るほど小さい⁸⁾ ため、健全性に影響はない。

第6-1表 乾式キャスク主要な構成部位の中性子照射量

主要な構成部位	構造材中最大となる 全中性子照射量 (n/cm ²) ※1		判定基準 (n/cm ²)
	MSF-21P型	MSF-24P型	
胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルト※2	6.5×10 ¹⁴	5.9×10 ¹⁴	<10 ¹⁶
バスケット※3	1.6×10 ¹⁵	1.5×10 ¹⁵	<10 ¹⁶
トラニオン※2	6.5×10 ¹⁴	5.9×10 ¹⁴	<10 ¹⁷
外筒	3.5×10 ¹²	3.3×10 ¹²	<10 ¹⁶
蓋部中性子遮蔽材カバー※2	6.5×10 ¹⁴	5.9×10 ¹⁴	<10 ¹⁶
下部端板及び底部中性子遮蔽材カバー	1.6×10 ¹³	8.2×10 ¹³	<10 ¹⁷
中性子遮蔽材※4	1.6×10 ¹⁴	1.6×10 ¹⁴	<10 ¹⁵
金属ガスケット	2.0×10 ¹⁴	2.0×10 ¹⁴	<10 ¹⁹
伝熱フィン※4	1.6×10 ¹⁴	1.6×10 ¹⁴	<10 ¹⁶

※1：遮蔽解析結果から得られた中性子束が60年間一定であると仮定して算出した値。

※2：最大となる胴領域の値を記載。

※3：最大となるキャビティ内領域（使用済燃料領域）の値を記載。

※4：最大となる側部中性子遮蔽材領域の値を記載。

6.3 参考文献

- 1) K. Farrell, S. T. Mahmood, R. E. Stoller, L. K. Mansur, “An Evaluation of Low Temperature Radiation Embrittlement Mechanisms in Ferritic Alloys”, Journal of Nuclear Materials, Vol. 210, (1994).
- 2) (一社)日本機械学会, 「発電用原子力設備規格 材料規格 (2012年版) (JSME S NJ1-2012)」, (2012).
- 3) 日本アルミニウム協会, 「アルミニウムハンドブック第7版」, (2007).
- 4) (独)原子力安全基盤機構, 「平成15年度 金属キャスク貯蔵技術確証試験 報告書 最終報告」, (2004).
- 5) 三菱重工業(株), 「型式設計特定容器等の型式指定申請書 本文及び添付書類の一部補正について」, (2017).
- 6) T. Nakagawa, H. Kawasaki, K. Shibata, “Curves and Tables of Neutron Cross Sections in JENDL-3.3”, JAERI-Data/Code 2002-020, (2002).
- 7) 前口貴治、川原慶幸、山本隆一、崎間公久、玉置廣紀, 「A3004-H112合金の機械的性質に及ぼす長時間加熱および焼きなましの影響」, 軽金属, 第68巻 第12号, (2018).
- 8) (一社)日本原子力学会標準委員会, 「使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準:2010 (AESJ-SC-F002:2010)」, (2010).
- 9) 土肥謙次, 秀耕一郎, 黛正己, 恩地健雄, 大岡紀一, 「304 ステンレス鋼の SCC 特性に及ぼす中性子照射効果 (その2) -熱鋭敏化材の SCC 感受性に及ぼす照射影響-」, (一財)電力中央研究所, (1997).
- 10) (公社)腐食防食協会編, 「腐食・防食ハンドブック CD-ROM版 第2版」, 丸善(株), (2005).
- 11) (財)原子力発電技術機構, 「平成14年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 (金属キャスク貯蔵技術確証試験) 報告書」, (2003).
- 12) T. Ichihashi, D. Ishiko, A. Ogawa, M. Morishima, “Verification Tests of Neutron Shielding Materials and Shielding Assessment”, Proceedings of the 15th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, (2007).
- 13) H. Yoshida, et al., “Reactor Irradiation Effects on Al 1100”, Proc. Jpn. Congr. Mater. Res., Vol.24, (1981).
- 14) T. T. Claudson, “Cladding and Structural Materials Semi-Annual Progress Report”, HEDL-TME 75-77, (1975).

- 15) 加藤治, 伊藤千浩, 三枝利有, 「使用済燃料貯蔵キャスクの長期密封性能評価手法の開発」, 日本原子力学会誌, Vol. 38, No. 6, (1996).
- 16) (一財)電力中央研究所, 「平成 21 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 報告書」, (2010).
- 17) 小崎明朗, 「使用済燃料貯蔵中の耐久性に関する海外動向他」, (株)日本原子力情報センター主催セミナー「使用済燃料貯蔵技術の現状と課題」, (1998).
- 18) S. J. Zinkle, G. L. Kulcinski, “Low-Load Microhardness Changes in 14-MeV Neutron Irradiated Copper Alloys”, ASTM STP888, (1986).
- 19) (一財)日本規格協会, 「圧力容器の設計 (JIS B 8267 : 2015)」, (2015).
- 20) (公社)腐食防食協会編, 「材料環境学入門」, 丸善 (株), (1993).
- 21) 能登谷武紀, 密閉系淡水における鋼-銅系のガルバニック腐食, 伸銅技術研究会誌 33 巻, (1994).
- 22) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 核燃料サイクル安全小委員会 中間貯蔵ワーキンググループ 輸送ワーキンググループ, 「金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式キャスクとその収納物の長期健全性について」, (2009).
- 23) (独)原子力安全基盤機構, 「平成 20 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 (中間貯蔵設備等長期健全性等試験のうち貯蔵燃料健全性等調査に関する試験成果報告書)」, (2009).

7. 使用済燃料乾式貯蔵容器を通常に取り扱う場合の設計上想定される事象について

7.1 燃料取扱棟内及び乾式貯蔵施設内での取扱いフロー

燃料取扱棟（以下、「FH/B」という）内及び乾式貯蔵施設内における乾式キャスクの取扱いについて説明する。

乾式キャスクをFH/B内に搬入後、緩衝体取外しから燃料装荷、搬出までの取扱いフローを第7-1図に示す。また、乾式貯蔵施設内に搬入後、緩衝体取外しから貯蔵までの取扱いフローを第7-2図に、貯蔵から緩衝体取付、搬出までの取扱いフローを第7-3図に示す。

ここで、乾式キャスクとは、兼用キャスクであり、発電所敷地内に貯蔵及び発電所敷地外への運搬に使用できるものである。また、使用済燃料輸送容器（以下、「輸送キャスク」という）は、発電所敷地外への運搬に使用できるものである。

参考として、輸送キャスクのうち、水を収納する湿式キャスクについて、FH/B内に搬入後、緩衝体取外しから燃料装荷、搬出までの取扱いフローを第7-4図に示す。乾式キャスクと湿式キャスクの取扱いについては、キャスクの内部雰囲気（乾式、湿式）が異なることから、乾式キャスクでは水抜き・真空乾燥作業が追加となるが、基本的な様態や取扱作業は共通である。

また、乾式キャスクを取扱うFH/Bクレーン、乾式貯蔵建屋天井クレーン及び搬送台車については、「3. 自然現象等に対する使用済み燃料乾式貯蔵施設の設計方針」にて説明しているとおり、クレーン構造規格等に基づき、一般産業施設や公衆施設と同等の安全性を有していることから、通常取扱い時において想定すべき事象としては、作業員の誤操作を想定する。

以上を踏まえ、設計上想定される事象に関連する様態を作業毎に抜粋したフローをそれぞれ第7-5図～第7-7図に示す。

(1) FH/B内における取扱いフロー

以下に第7-5図に記載する番号に応じた各取扱いモードを説

明する。

1-1：燃料装荷、一次蓋取付

キャスクピットにて乾式キャスクに使用済燃料を装荷し、一次蓋を取付ける。

1-2：容器吊上げ・移動・吊降し

FH/Bクレーンを用いて乾式キャスクをキャスクピットから吊上げ、除染場ピット内に設置した仮設架台まで移動して吊降し、設置する。

1-3：排水・真空乾燥・不活性ガス充填・一次蓋密封確認

仮設架台において乾式キャスクの除染・内部水排水・真空乾燥・不活性ガス充填・一次蓋の密封確認を行う。

1-4：二次蓋取付・一次二次蓋間圧力調整・二次蓋密封認

FH/Bクレーンを用いて二次蓋を取付け、一次-二次蓋間の圧力を調整した後、二次蓋の密封性能を確認する。

1-5：三次蓋取付け・三次蓋密封確認

FH/Bクレーンを用いて三次蓋を取付け後、三次蓋の密封性能を確認する。

1-6：トラックアクセスエリアへの移動

FH/Bクレーンを用いて乾式キャスクをトラックアクセスエリアへ移動する。

1-7：トレーラ上へ横倒し

1-6に引き続き、FH/Bクレーンを用いて乾式キャスクをトレーラ上の輸送架台に横倒す。

1-8：緩衝体取付

FH/Bクレーンを用いて乾式キャスクに緩衝体を取り付ける。

FH/B内での乾式キャスクの取扱いに使用するキャスクピット、FH/Bクレーン及び除染場ピットについては、既設の設備

であり、第7-1表のとおり、乾式キャスクを取扱える能力を有している。

(2) 乾式貯蔵施設内での取扱いフロー

第7-6図に記載する番号に応じた各取扱いモードを説明する。なお、貯蔵後、乾式キャスクを乾式貯蔵施設から搬出する場合は、同図に示すNo. 2-1～No. 2-7の逆手順（第7-7図 No. 3-1～No. 3-6の手順）にて取り扱う。

2-1：緩衝体取外し

乾式貯蔵建屋天井クレーンを用いて乾式キャスクから緩衝体を取外す。

2-2：キャスク立起こし

乾式貯蔵建屋天井クレーンを用いて乾式キャスクを立て起こす。

2-3：検査架台への移送

乾式貯蔵建屋天井クレーンを用いて乾式キャスクを検査架台へ移送する。

2-4：貯蔵架台上への設置

乾式貯蔵建屋天井クレーンを用いて乾式キャスクを検査架台内に設置した貯蔵架台（搬送台車上に設置）に吊り降ろす。下部トラニオンと貯蔵架台を固定する。

2-5：三次蓋取外し・監視装置の取付

乾式貯蔵建屋天井クレーンを用いて三次蓋を取外し、監視装置を取付ける。

2-6：貯蔵エリアへの移動

搬送台車を用いて乾式キャスクを貯蔵エリアへ移動する。

2-7：乾式キャスクの固定

所定の位置にて貯蔵架台を乾式貯蔵施設の床面にボルトで固縛する。

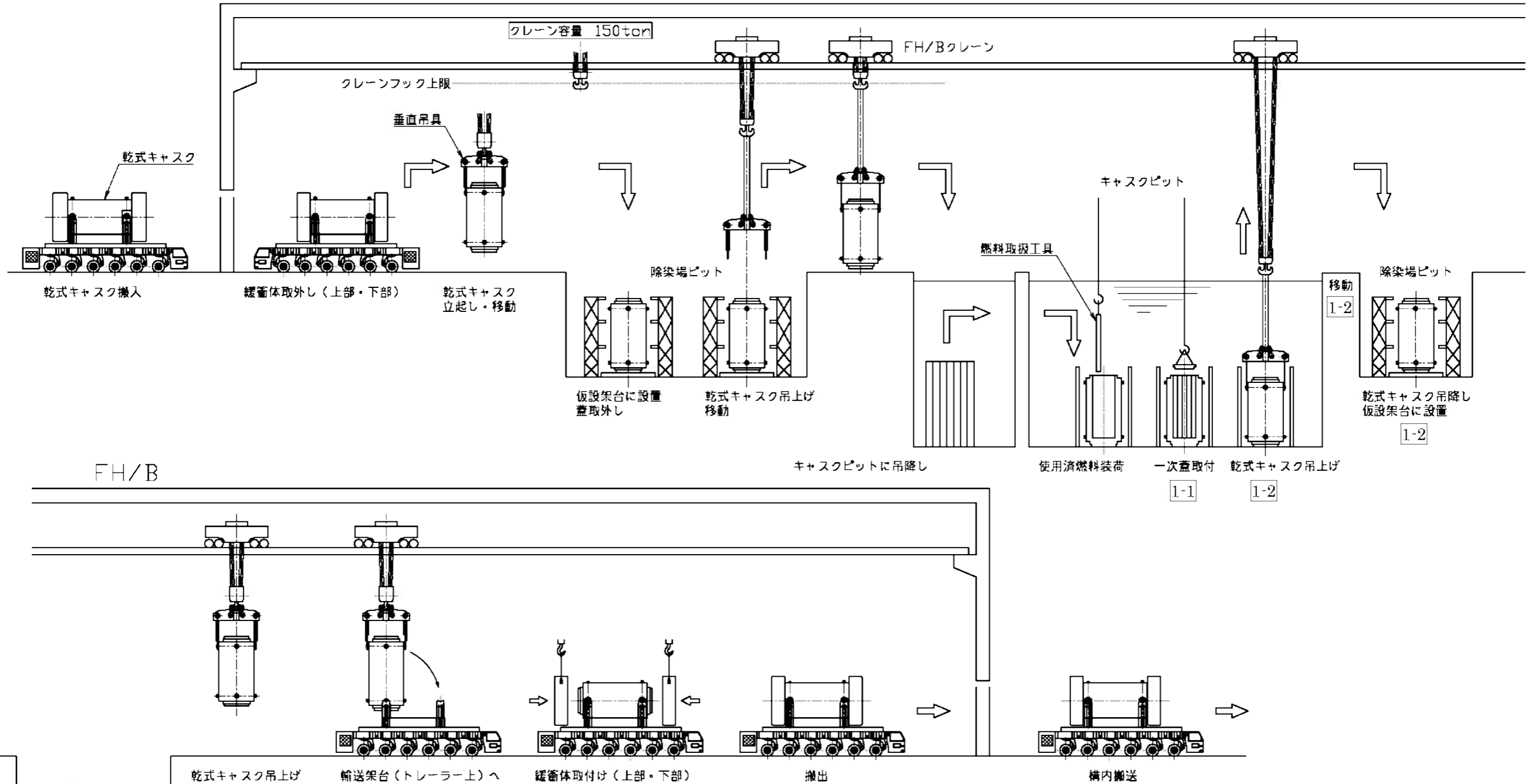
第7-1表 評価で使用する設備の仕様

既設設備		使用済燃料輸送容器 (湿式キャスク) 仕様 (NFT-14P 型)	乾式キャスク仕様		備考
名称	仕様		MSF-21P 型	MSF-24P 型	
FH/B クレーン	容量 (吊荷重) 150 (t)	約 114 (t)	約 120 (t)	約 123 (t)	乾式キャスク重量は、FH/B クレーンの容量 (吊荷重) の範囲内
キャスクピット	寸法 約 4 (m) × 約 4 (m) × 高さ約 12.7 (m)	外寸約 2.5 (m) × 高さ約 5.4 (m)	外寸約 2.9 (m) × 高さ約 5.2 (m)	外寸約 2.9 (m) × 高さ約 5.2 (m)	乾式キャスク寸法は、キャスクピット寸法の範囲内
除染場ピット	寸法 約 8.0 (m) × 約 9.7 (m) × 高さ約 7.6 (m)	外寸約 2.5 (m) × 高さ約 5.4 (m)	外寸約 2.9 (m) × 高さ約 5.2 (m)	外寸約 2.9 (m) × 高さ約 5.2 (m)	乾式キャスク寸法、除染場ピット寸法の範囲内

FH/B 内フロー図

使用済燃料乾式貯蔵容器
燃料取扱フロー（燃料装荷・容器搬出）

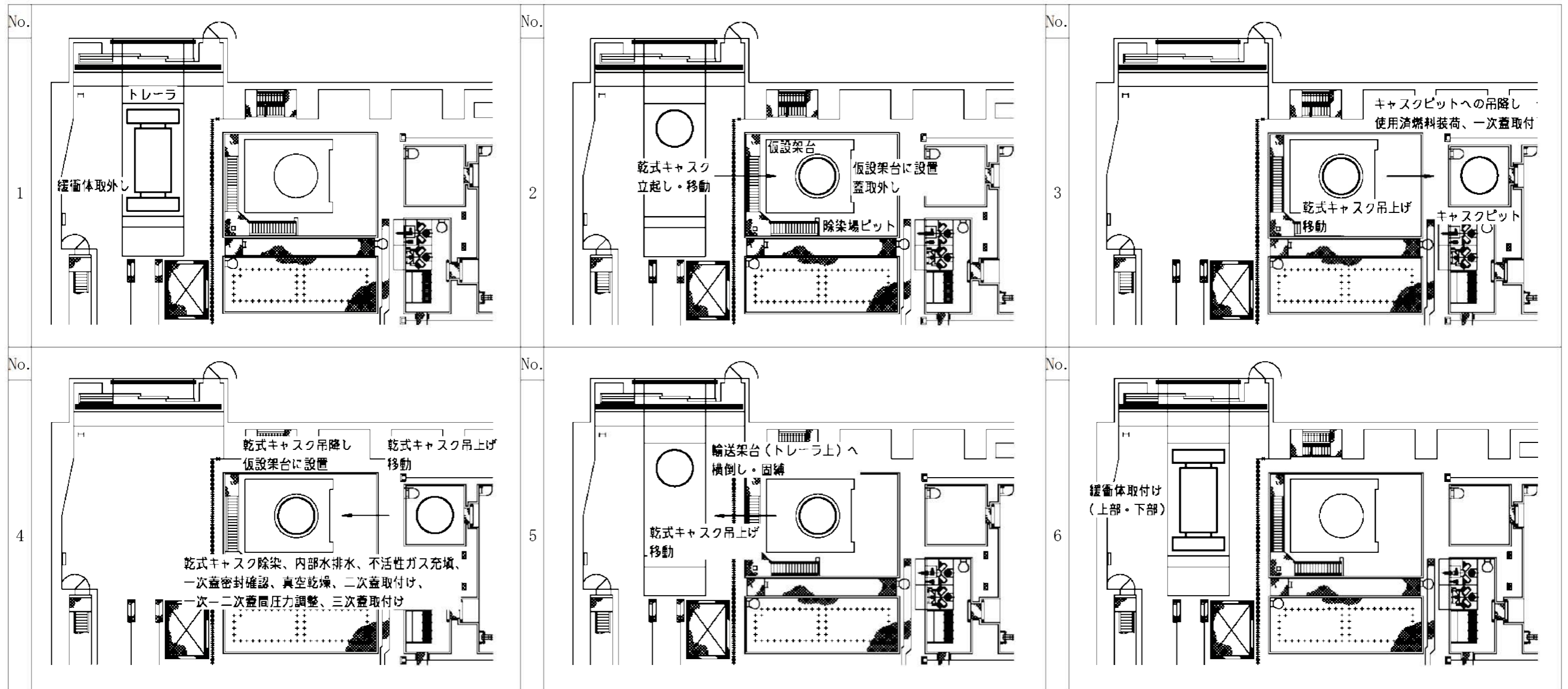
FH/B



		FH/B クレーン	評価で使用する値
容量 (ton)		主巻：150	—
巻上/巻下速度 (m/分)		低速 / 中速 / 高速 0.12 / 0.6 / 1.2	巻き下げ最大速度の 1.2 m/分を適用
移動速度 (m/分)	走行	0.9 / 6.0 / 18	走行最大速度の 18 m/分を適用
	横行	0.6 / 1.5 / 6.0	
		乾式キャスク	
寸法 (m)		MSF-21P 型 MSF-24P 型 φ2.6×5.2 (緩衝体無)	—
重量 (ton)		約 123 (吊具含む)	重量の大きい 24P を適用
キャスク吊上高さ (m)		約 4 (車両積付時)	—

- 1-3 { 乾式キャスク除染
内部水排水
真空乾燥
不活性ガス充填
一次蓋密封確認
- 1-4 { 二次蓋取付け
一次-二次蓋間圧力調整
二次蓋密封確認
- 1-5 { 三次蓋取付け
三次蓋密封確認

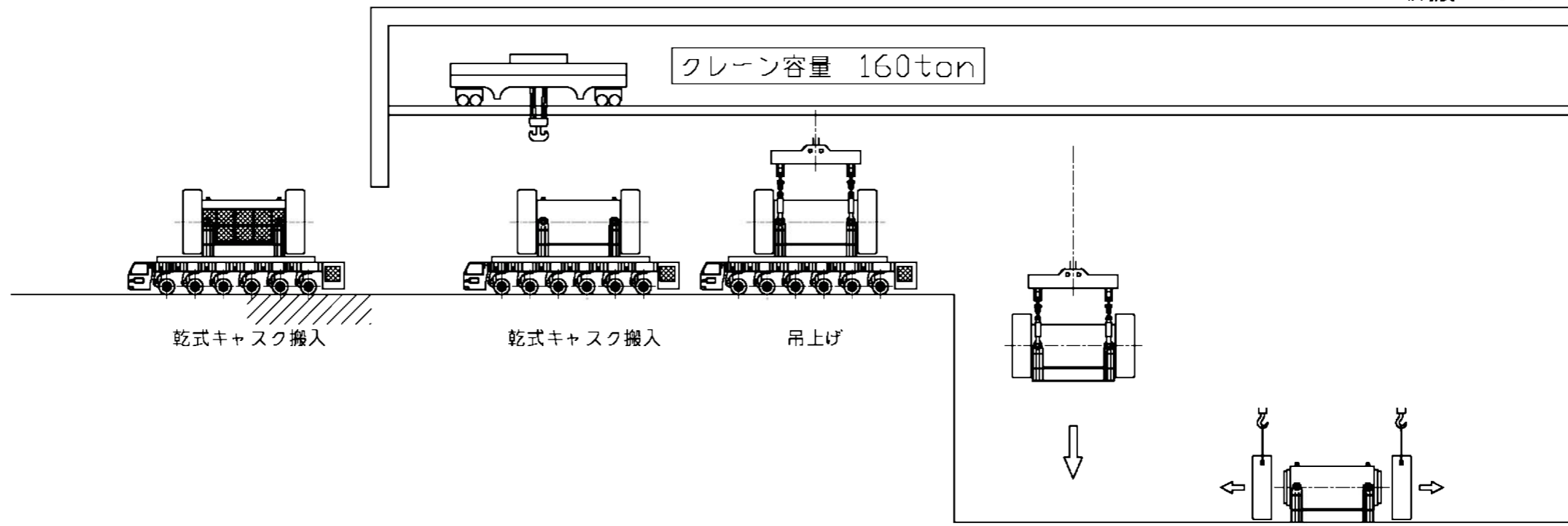
第 7-1 図 FH/B 内の乾式キャスク運用手順【断面図】



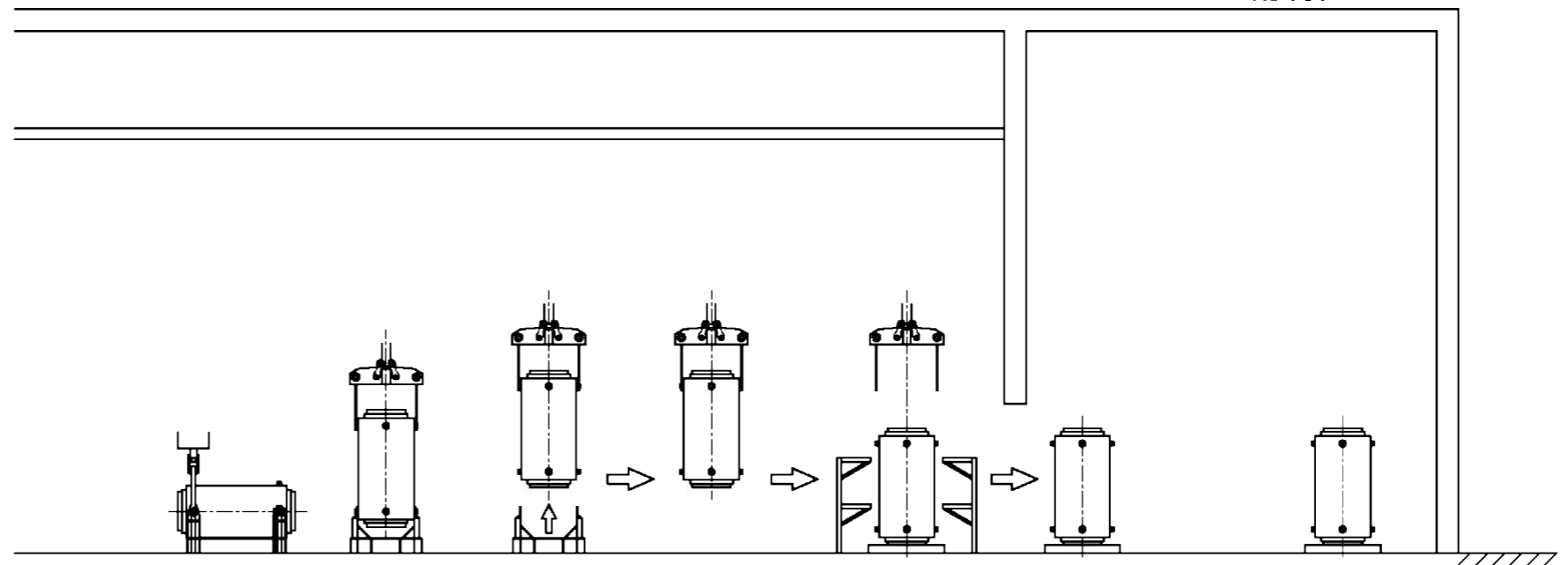
第 7-1 図 FH/B 内の乾式キャスク運用手順【平面図】

乾式貯蔵建屋フロー図（受入）

取扱エリア



2-1 貯蔵エリア



2-2

2-3

2-4 2-5

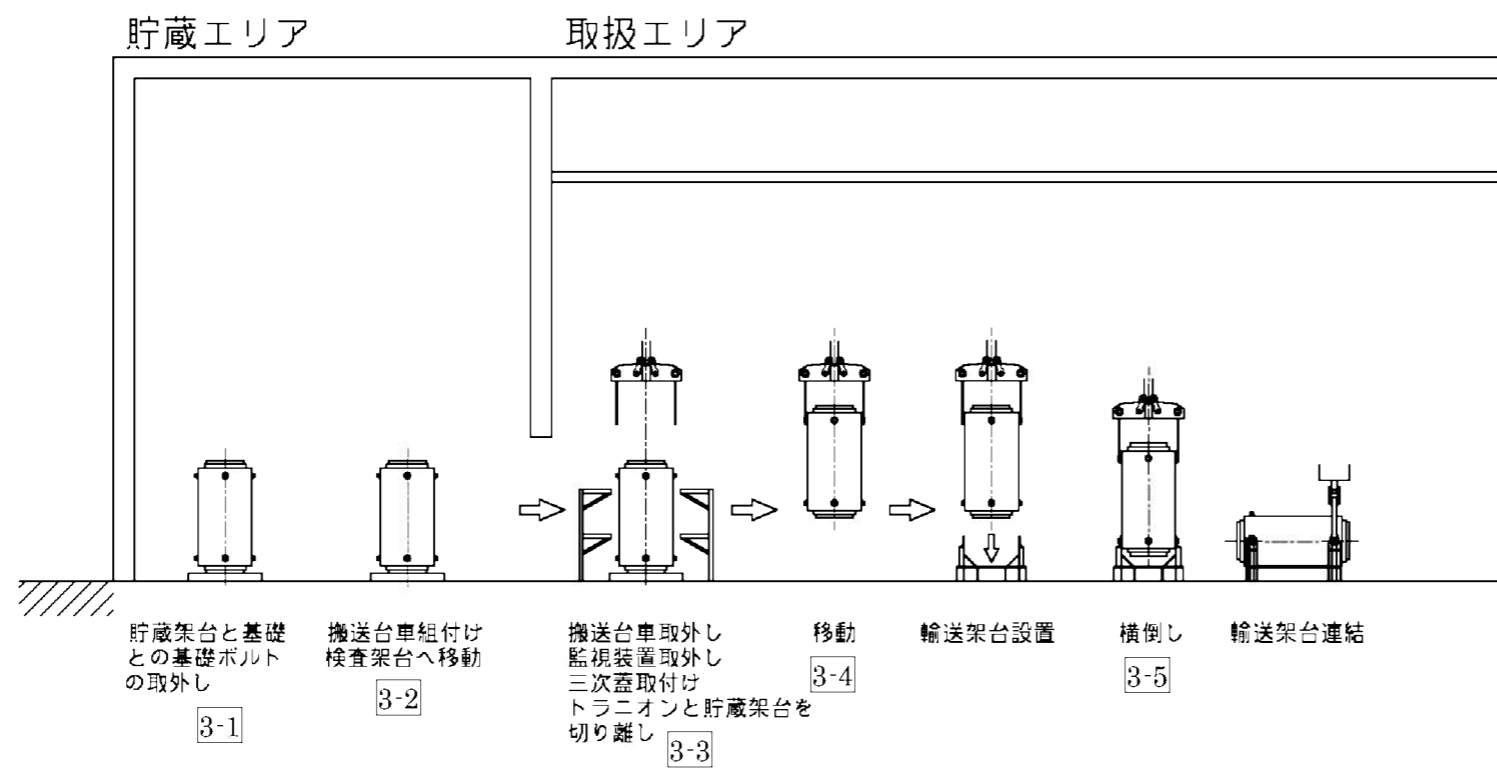
2-6

2-7

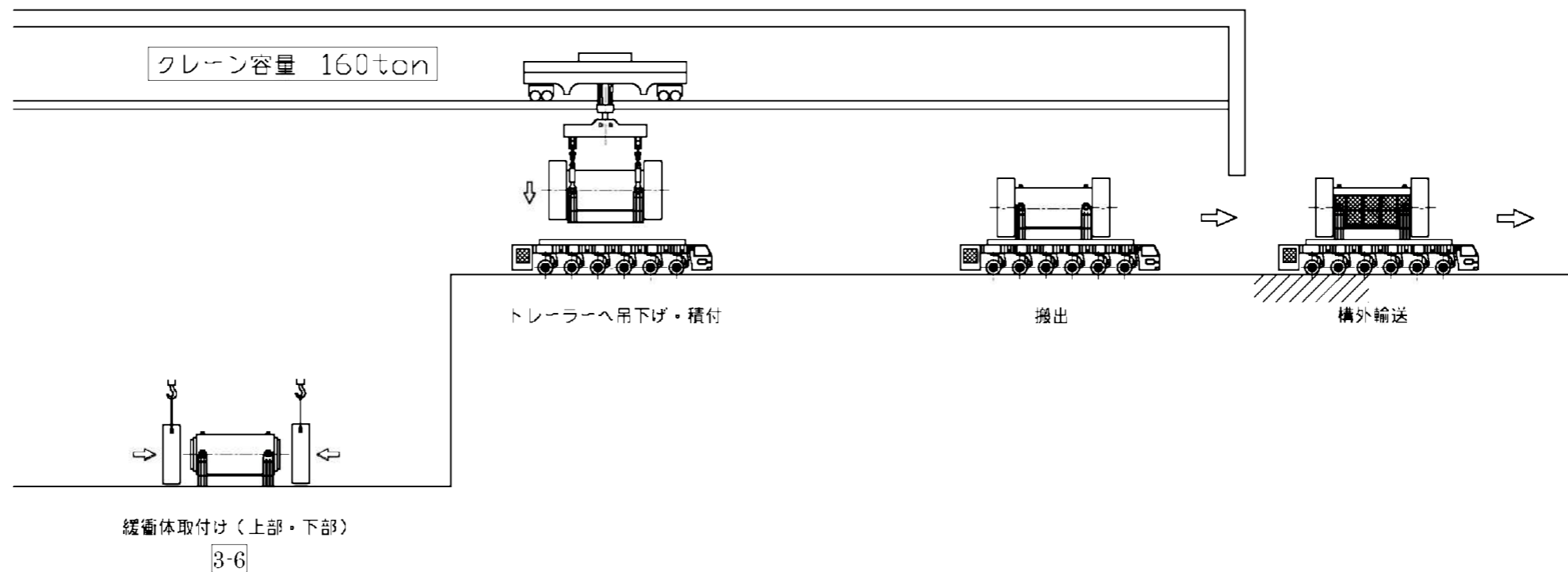
		乾式貯蔵建屋 天井クレーン	評価で使用する値
容量 (ton)		主巻：160	—
巻上/巻下速度 (m/分)		低速 / 中速 / 高速 0.12 / 0.6 / 1.2	巻き下げ最大速度の 1.2 m/分を適用
移動速度 (m/分)	走行	0.9 / 6.0 / 18	走行最大速度の 18 m/分を適用
	横行	0.6 / 1.5 / 6.0	
		搬送設備	
容量 (ton)		160	—
移動速度 (m/分)		低速/高速 0.6 / 2	—
		乾式キャスク	
寸法 (m)		MSF-21P 型 MSF-24P 型 φ 3.6 × 6.8 (緩衝体含む)	—
重量 (ton)	吊上	約 147 (吊具、緩衝体含む)	重量の大きい 24P を 適用
	搬送	約 136 (架台含む)	
キャスク吊上 高さ (m)	垂直	約 2 (縦起し時)	—
	水平	約 2 (車両積降し時)	—

第 7-2 図 乾式キャスク取扱い時及び貯蔵時の運用手順（受入）【断面図】

乾式貯蔵建屋フロー図（搬出）



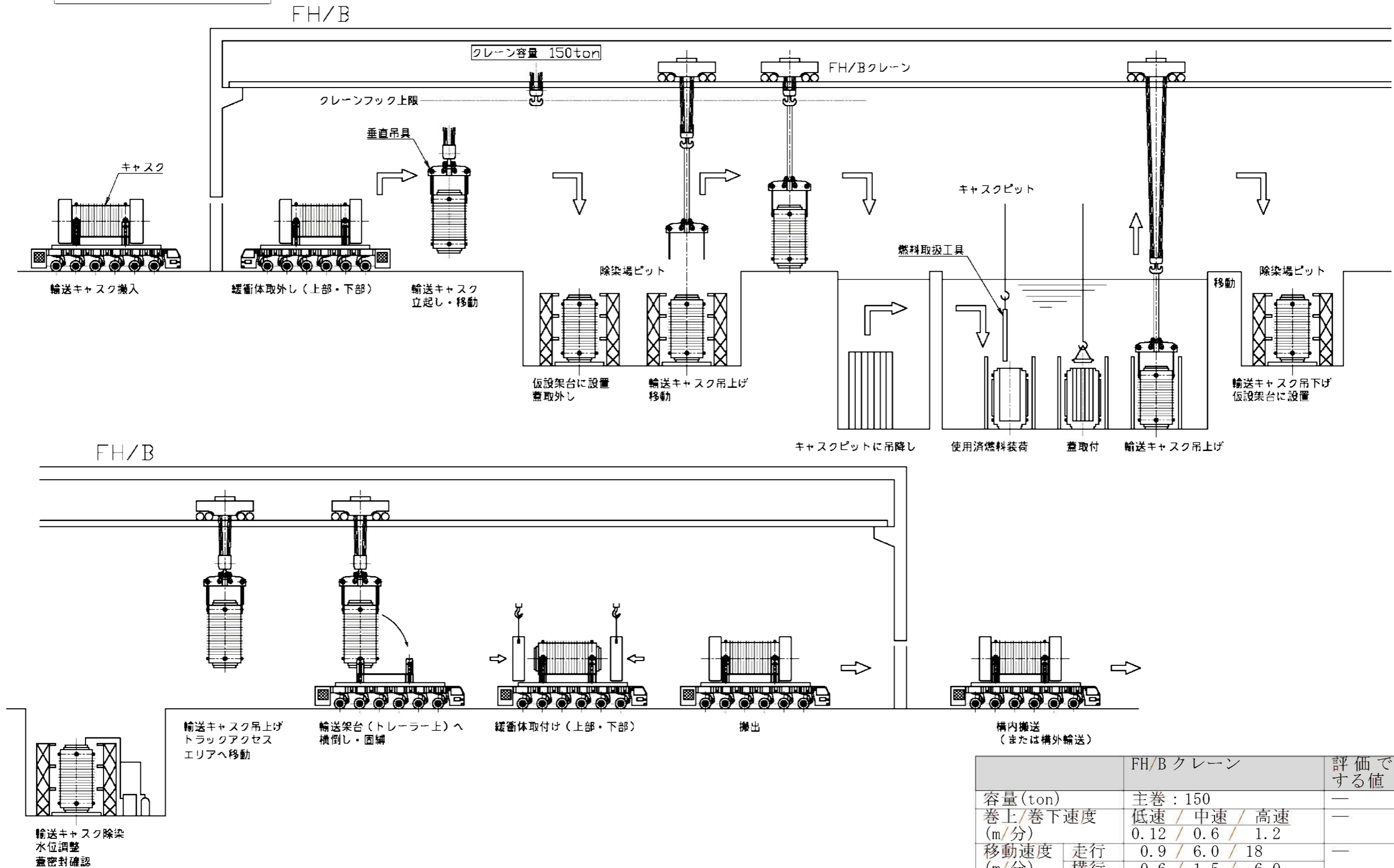
		乾式貯蔵建屋天井クレーン	評価で使用する値
容量 (ton)		主巻：160	—
巻上/巻下速度 (m/分)		低速 / 中速 / 高速 0.12 / 0.6 / 1.2	巻き下げ最大速度の1.2 m/分を適用
移動速度 (m/分)	走行	0.9 / 6.0 / 18	走行最大速度の18 m/分を適用
	横行	0.6 / 1.5 / 6.0	
		搬送設備	
容量 (ton)		160	—
移動速度 (m/分)		低速/高速 0.6 / 2	—
		乾式キャスク MSF-21P型 MSF-24P型	
寸法 (m)		φ3.6×6.8 (緩衝体含む)	—
重量 (ton)	吊上	約147 (吊具、緩衝体含む)	重量の大きい24Pを適用
	搬送	約136 (架台含む)	
キャスク吊上高さ (m)	垂直	約2 (横倒し時)	—
	水平	約2 (車両積付時)	—



第7-3 図 乾式キャスク取扱い時及び貯蔵時の運用手順（搬出）【断面図】

FH/B 内フロー図

使用済燃料運搬用容器
燃料取扱フロー（燃料装荷・容器搬出）



第7-4 図 FH/B 内の湿式キャスク運用手順【断面図】

	FH/B クレーン	評価で使用 する値
容量 (ton)	主巻 : 150	—
巻上/巻下速度 (m/分)	低速 / 中速 / 高速 0.12 / 0.6 / 1.2	—
移動速度 (m/分)	走行	0.9 / 6.0 / 18
	横行	0.6 / 1.5 / 6.0
	湿式キャスク NFT-14P 型	
寸法 (m)	φ 2.6 × 5.3 (緩衝体無)	—
重量 (ton)	約 120 (吊具含む)	重量の大きい 24P を適用
キャスク吊上高さ (m)	約 4 (車両積付時)	—

第 7-2 表 評価で使用する設備の重量

設備	部材	重量 (トン)	
		MSF-21P 型	MSF-24P 型
乾式キャスク	① 本体	83.1	83.7
	② 一次蓋	5.2	5.6
	③ 二次蓋	4.3	4.5
	④ 三次蓋	3.5	3.3
	⑤ バスケット	5.9	5.6
緩衝体	⑥ 上部緩衝体	8.6	8.7
	⑦ 下部緩衝体	6.0	6.2
	⑧ 燃料集合体	14.6	16.7
関連工具類	⑨ 垂直吊具	約 4	約 4
	⑩ 水平吊具	約 8	約 8
	⑪ 貯蔵架台	約 20	約 20
	⑫ 輸送架台	約 5	約 5
FH/B 容器吊り上げ重量 (① ② ③ ④ ⑤ ⑧ ⑨)		約 121	約 123
乾式貯蔵施設 容器吊り上げ重量 (① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑩ ⑫)		約 144	約 147
乾式貯蔵施設 搬送重量 (① ② ③ ⑤ ⑧ ⑪)		約 133	約 136

第 7-3 表 評価で使用する設備の仕様

	FH/B クレーン	乾式貯蔵建屋 天井クレーン
容量 (ton) : 主巻	150	160
巻上/巻下速度 (m/分)	1.2	1.2
移動速度 (m/分) 走行	18	18

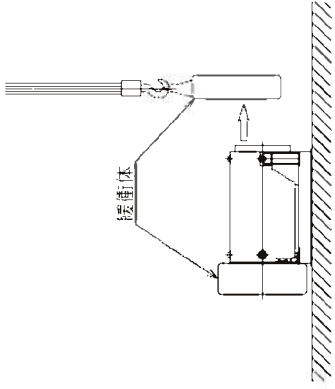
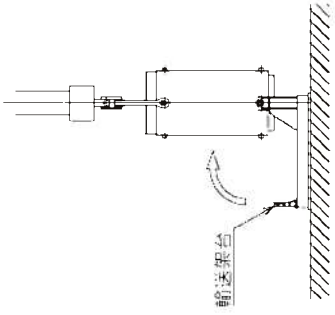
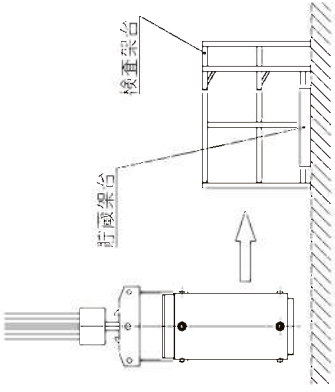
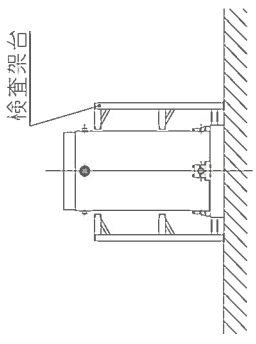
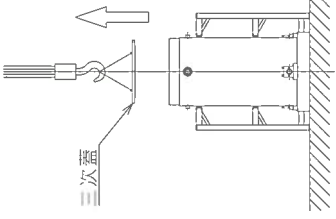
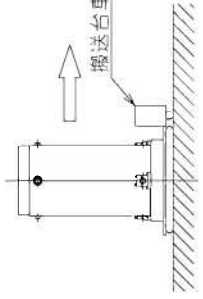
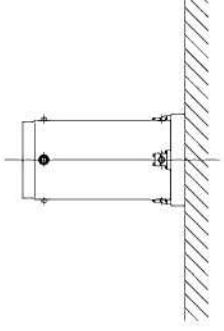
<乾式キヤスクの燃料装荷～緩衝体取付>

No.	取扱いモード	No.	取扱いモード	No.	取扱いモード	No.	取扱いモード
1-1	燃料装荷・一次蓋取付	1-2	容器吊上げ・移動・吊降し	1-3	排水・真空乾燥*・不活性ガス充填・一次蓋密封確認	1-4	二次蓋取付・二次蓋間圧力調整・二次蓋密封確認
想定 事象	—	想定 事象	検査架台への衝突 (第7-8図(a)) 貯蔵架台への衝突 (第7-8図(b))	想定 事象	—	想定 事象	二次蓋の衝突 (第7-8図(e))
1-5	三次蓋取付・三次蓋密封確認	1-6	トレーラエアへの移動	1-7	トレーラ上へ横倒し	1-8	緩衝体取付け
想定 事象	三次蓋の衝突	想定 事象	—	想定 事象	横倒し時の衝突 (第7-8図(d))	想定 事象	緩衝体の衝突 (第7-8図(f))

※：真空乾燥作業は、収納する使用済燃料の崩壊熱による温度上昇を踏まえ、作業時間等を管理することにより、使用済燃料の温度制限範囲内で実施する。

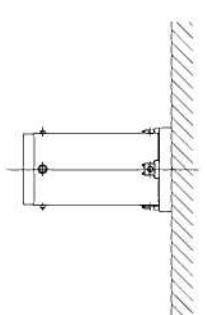
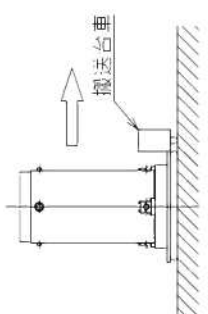
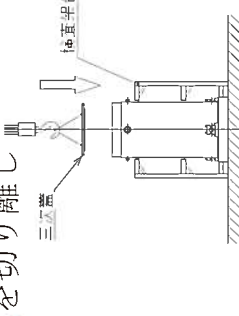
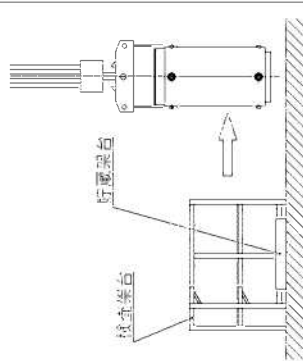
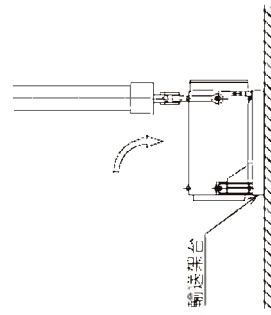
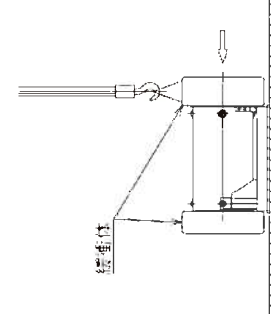
第7-5図 FH/B内における取扱いフロー（燃料装荷～緩衝体取付け）

＜乾式キャスクの緩衝体取外し～貯蔵＞

No.	取扱いモード	No.	取扱いモード	No.	取扱いモード	No.	取扱いモード
2-1	緩衝体取外し 	2-2	乾式キャスク立て起こし 	2-3	検査架台への移送 	2-4	取扱いモード 貯蔵架台上への設置 下部トラニオンと貯蔵架台を固定 
想定 事象	—	想定 事象	—	想定 事象	検査架台への衝突 (第7-8図(a)) ・貯蔵架台と基礎を基礎 ボルトで固定	想定 事象	貯蔵架台への衝突 (第7-8図(b))
2-5	三次蓋取外し ・監視装置取付け 	2-6	貯蔵エリアへの移動 	2-7	— 	—	—
想定 事象	三次蓋の衝突	想定 事象	搬送台車で搬送中の衝 突 (第7-8図(c))	想定 事象	—	—	—

第7-6図 乾式貯蔵施設内における取扱いフロー (緩衝体取外し～貯蔵)

＜乾式キャスクの貯蔵～緩衝体取付＞

No.	取扱いモード	No.	取扱いモード	No.	取扱いモード	No.	取扱いモード
3-1	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵架台と基礎との基礎ボルトの取外し 	3-2	検査架台へ移動 	3-3	<ul style="list-style-type: none"> 監視装置取外し 三次蓋取付け 下部トランニオンと貯蔵架台を切り離し 	3-4	作業エリアへの移送 
想定 事象	-	想定 事象	搬送台車で搬送中の衝突 (第7-8図(c))	想定 事象	-	想定 事象	検査架台への衝突 (第7-8図(a))
3-5	乾式キャスク横倒し 	3-6	緩衝体取付け 				
想定 事象	横倒し時の衝突 (第7-8図(d))	想定 事象	緩衝体の衝突 (第7-8図(f))				

第7-7図 乾式貯蔵施設内における取扱いフロー（貯蔵後～緩衝体取付）

7.2 通常取扱い時に想定すべき事象の抽出

第7-1図～第7-7図の取扱いフローを踏まえ、通常取扱い時に想定すべき事象を第7-4表に示す。

第7-4表 通常取扱い時において想定すべき事象（1/2）

原因	想定事象	作業エリア	具体的な想定
作業員の誤操作	a. 検査架台への衝突 (第7-8図(a))	FH/B	乾式キャスクを吊上げ移送中に、クレーン走行速度(18m/分)で仮設架台に衝突する。
		乾式貯蔵施設	乾式キャスクを吊上げ移送中に、クレーン走行速度(18m/分)で検査架台に衝突する。
	b. 貯蔵架台への衝突 (第7-8図(b))	FH/B	乾式キャスクを仮設架台へ設置時に、クレーン巻き下げ速度(1.2m/分)でキャスク底部が衝突する。
		乾式貯蔵施設	乾式キャスクを貯蔵架台へ設置時に、クレーン巻き下げ速度(1.2m/分)で貯蔵架台に衝突する。
	c. 搬送台車で搬送中の衝突 (第7-8図(c))	FH/B	搬送台車による作業はない。
		乾式貯蔵施設	乾式キャスク搬送中に、搬送台車が建屋壁及び他の乾式キャスク貯蔵架台等へ衝突した場合においても、搬送中の乾式キャスクは幾何学的に傾き角度を制限しており、壁及び他の乾式キャスク等へ衝突しない。詳細は参考4参照。
	d. 横倒し時の衝突 (第7-8図(d))	FH/B	乾式キャスクをトレーラー上で輸送架台へ横倒しする際に、クレーン巻き下げ速度(1.2m/分)で輸送架台に衝突する。
		乾式貯蔵施設	乾式キャスクを輸送架台へ横倒しする際に、クレーン巻き下げ速度(1.2m/分)で輸送架台に衝突する。
	e. 蓋の衝突 (第7-8図(e))	FH/B	乾式キャスクへの二次蓋及び三次蓋取付け作業時に、クレーン巻き下げ速度(1.2m/分)で二次蓋(4.5t)が乾式キャスクに衝突する ^(注1) 。
		乾式貯蔵施設	乾式キャスクへの三次蓋取付け作業時に、クレーン巻き下げ速度(1.2m/分)で三次蓋(3.3t)が乾式キャスクに衝突する ^(注1) 。

第 7-4 表 通常取扱い時において想定すべき事象 (2/2)

原因	想定事象	作業エリア	具体的な想定
作業員の誤操作	f. 緩衝体の衝突 (第 7-8 図 (f))	FH/B	乾式キャスクへ緩衝体取付け作業時にクレーン走行速度 (18m/分) で乾式キャスクに衝突する。
		乾式貯蔵施設	乾式キャスクへ緩衝体取付け作業時にクレーン走行速度 (18m/分) で乾式キャスクに衝突する。

(注1) 二次蓋及び三次蓋の衝突時は、胴フランジ上端が一次蓋及び二次蓋上面より高い位置にあることから、二次蓋及び三次蓋は胴フランジ上端に衝突する。

第 7-4 表のとおり抽出した事象のうち、以下の理由から評価対象事象を第 7-5 表のとおりとし、評価条件を第 7-6 表に示す。

- ・ FH/B クレーンと乾式貯蔵建屋天井クレーンの仕様速度（走行・横行及び巻き上げ・巻き下げ）が同じであることから、乾式貯蔵施設での事象を代表事象とする。
- ・ FH/B 仮設架台よりも、乾式貯蔵施設の検査架台（常設）のほうが剛構造であるため、乾式貯蔵施設の評価に包絡される。
- ・ 乾式キャスク横倒し作業については、立起こし架台が設置される床条件は、床を剛体とし、乾式貯蔵施設及び FH/B の床条件（輸送車両上）に依らず包絡する条件としている。
- ・ 蓋の衝突については、乾式キャスク胴フランジ部に衝突し、密封境界部へ荷重が付加される挙動は二次蓋及び三次蓋でも同じであり、影響度合いは荷重に概ね比例するため、重量の大きい二次蓋（4.5t）の衝突を評価事象とする。

第 7-5 表 通常取扱い時において想定すべき事象の抽出結果（1/2）

原因	想定事象	具体的な想定
作業員の誤操作	キャスクの衝突 a. 検査架台への衝突 (第 7-8 図(a))	乾式キャスクを吊上げ移送中に、乾式貯蔵建屋天井クレーン走行速度（18m/分）で検査架台に衝突する。
	b. 貯蔵架台への衝突 (第 7-8 図(b))	乾式キャスクを貯蔵架台へ設置時に、乾式貯蔵建屋天井クレーン巻き下げ速度（1.2m/分）で貯蔵架台に衝突する。
	c. 搬送台車で搬送中の衝突 (第 7-8 図(c))	乾式キャスク搬送中に、搬送台車が建屋壁及び他の乾式キャスク貯蔵架台等へ衝突した場合においても、搬送中の乾式キャスクは幾何学的に傾き角度を制限しており、壁及び他の乾式キャスク等へ衝突しない。
	d. 横倒し時の衝突 (第 7-8 図(d))	乾式キャスクの横倒し時に、乾式貯蔵建屋天井クレーン巻き下げ速度（1.2m/分）で輸送架台に衝突する。

第 7-5 表 通常取扱い時において想定すべき事象の抽出結果 (2/2)

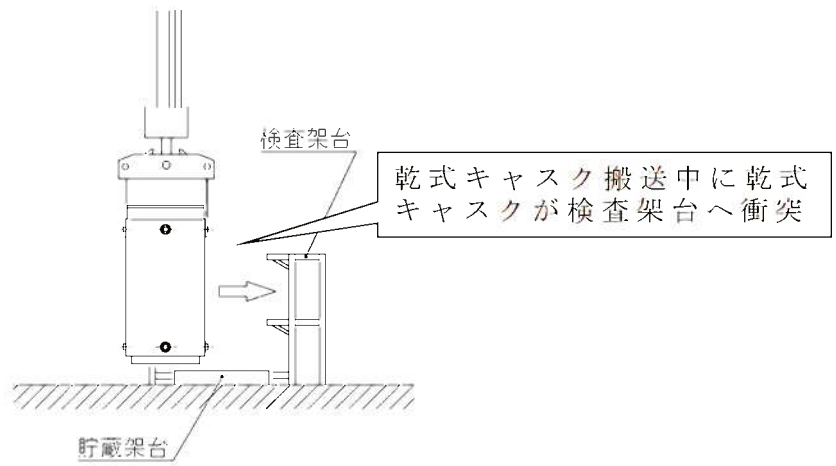
原因	想定事象	具体的な想定
作業員の誤操作	キャスクへの衝突	e. 二次蓋の衝突 (第 7-8 図 (e)) 乾式キャスクへの二次蓋取付け作業時に、FH/B クレーン巻き下げ速度 (1.2m/分) で二次蓋が乾式キャスクに衝突する (注 1)。
		f. 緩衝体の衝突 (第 7-8 図 (f)) 乾式キャスクへ緩衝体取付け作業時に乾式貯蔵建屋天井クレーン走行速度 (18m/分) で乾式キャスクに衝突する。

(注 1) 二次蓋の異常衝突時は、胴フランジ (二次蓋部) が一次蓋上面より高い位置にあることから、二次蓋は胴フランジ上端に衝突する。

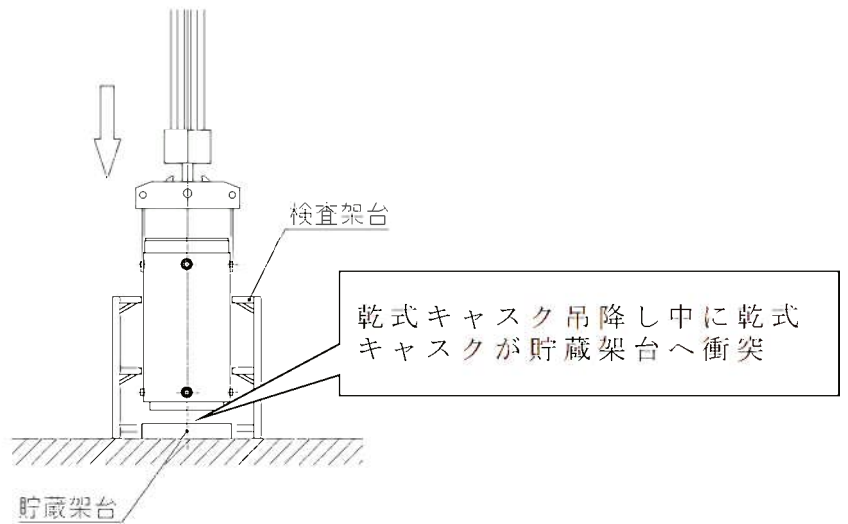
第 7-6 表 想定事象の評価条件

想定事象 (注 1)	被衝突物	衝突物	評価で使用する衝突物の仕様	
			質量	速度
a. 検査架台への衝突	検査架台	乾式キャスク	119.4ton	18 m/分
b. 貯蔵架台への衝突	貯蔵架台	乾式キャスク	119.4ton	1.2 m/分
d. 横倒し時の衝突	輸送架台	乾式キャスク	119.4ton	1.2 m/分
e. 二次蓋の衝突	乾式キャスク	二次蓋	4.5ton	1.2 m/分
f. 緩衝体の衝突	乾式キャスク	上部緩衝体	8.7ton	18 m/分
		下部緩衝体	6.2ton	18 m/分

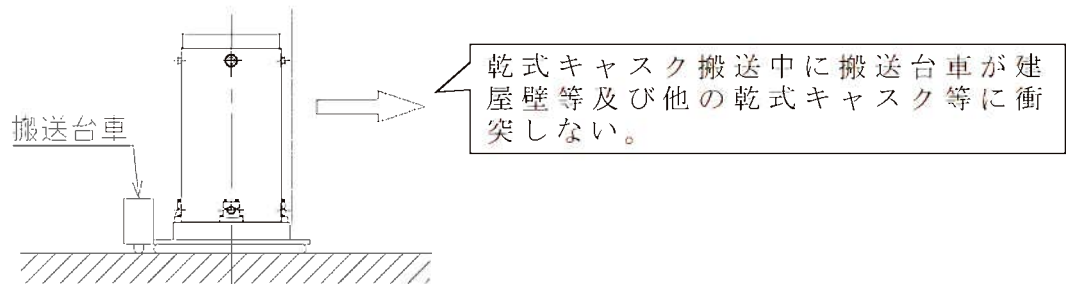
(注 1) c. 搬送台車で搬送中の衝突は、幾何学的に傾き角度が制限され、壁及び他の乾式キャスク等へ衝突しないため、除外する。



(a) 検査架台への衝突

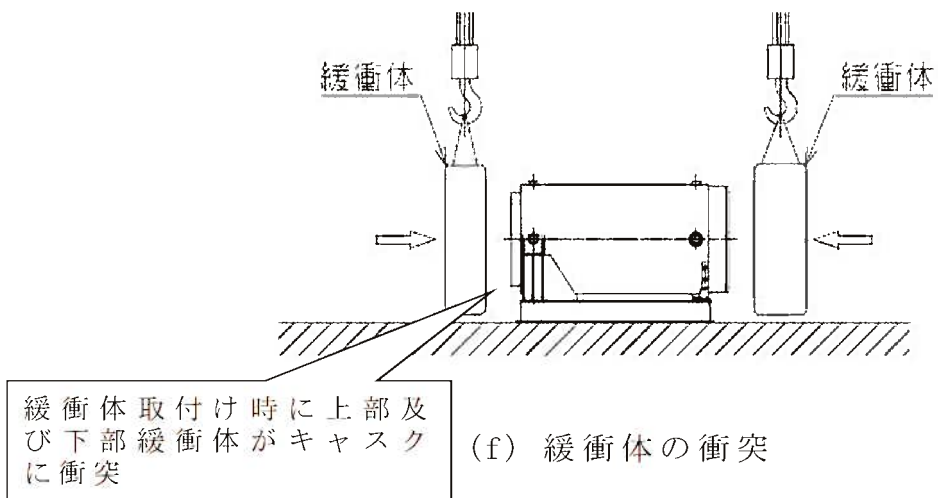
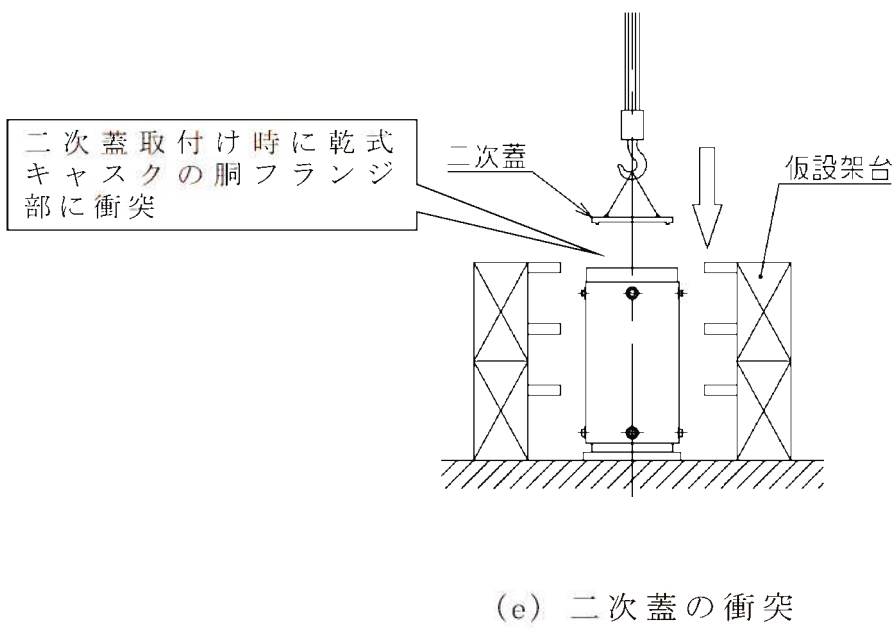
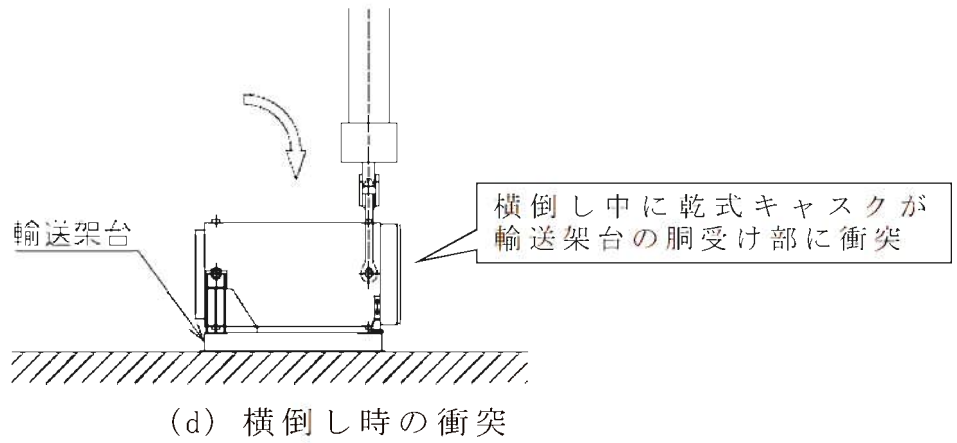


(b) 貯蔵架台への衝突



(c) 搬送台車で搬送中の衝突

第 7-8 図 想定される事象の衝撃荷重の算出体系 (1/2)



第7-8図 想定される事象の衝撃荷重の算出体系 (2/2)

7.3 通常取扱い時に想定すべき事象の評価

7.2で抽出した想定事象が万一発生した場合でも、乾式キャスクの安全機能が維持可能であることを評価する。

7.3.1 衝撃荷重の算出

(1) 衝突方向と重力が同じ方向の場合(想定事象 b. 及び e.)

誤作動による衝突により乾式キャスクに作用する衝撃荷重 F は、衝突物の運動エネルギーが被衝突物の変形によって全て吸収されるものとして、下式により算出される。

エネルギー保存則より、衝突物の運動エネルギーと位置エネルギーが被衝突物の変形エネルギーと釣り合うとして、

$$\frac{1}{2}mv^2 + mg\delta = \frac{1}{2}k\delta^2$$

また、運動方程式より、

$$F = mg\alpha = k\delta$$

以上より、

$$\alpha = 1 + \sqrt{1 + \frac{kV^2}{mg^2}}$$

したがって、衝撃荷重 F は、

$$F = mg\alpha = mg \left(1 + \sqrt{1 + \frac{kV^2}{mg^2}} \right) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

- gα : 衝撃加速度 (m/s²)
- k : 被衝突物のバネ定数 (N/m)
- V : 衝突物の衝突速度 (m/s)
- m : 衝突物の質量 (kg)
- g : 重力加速度 = 9.80665 (m/s²)
- δ : 被衝突物の変形量 (m)

(2) 衝突方向と重力が直行する場合 (想定事象 a. 及び f.)

誤作動による衝突により乾式キャスクに作用する衝撃荷重 F は、衝突物の運動エネルギーが被衝突物の変形によって全て吸収されるものとして、下式により算出される。

エネルギー保存則より、衝突物の運動エネルギーが被衝突物の変形エネルギーと釣り合うとして、

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}k\delta^2$$

また、運動方程式より、

$$F = mg \alpha = k \delta$$

以上より、

$$\alpha = \sqrt{\frac{kV^2}{mg^2}}$$

したがって、衝撃荷重 F は、

$$F = mg \alpha = mg \sqrt{\frac{kV^2}{mg^2}} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、

- $g \alpha$: 衝撃加速度 (m/s²)
- k : 被衝突物のバネ定数 (N/m)
- V : 衝突物の衝突速度 (m/s)
- m : 衝突物の質量 (kg)
- g : 重力加速度 = 9.80665 (m/s²)
- δ : 被衝突物の変形量 (m)

(3) 横倒し時 (想定事象 d.)

横倒し時の衝突により乾式キャスクに作用する衝撃荷重 F は、下部トラニオンを中心とした回転の運動エネルギーが被衝突物の変形によって全て吸収されるものとして、下式により算出される。

エネルギー保存則より、衝突物の運動（回転）エネルギーと位置エネルギーが被衝突物の変形エネルギーと釣り合うとして、

$$\frac{1}{2}I\omega^2 + \frac{1}{2}mg\left(\frac{L_1}{L_2}\delta\right) = \frac{1}{2}k\delta^2$$

また、運動方程式より、

$$F = k\delta$$

以上より、衝撃荷重 F は、

$$F = \frac{mgL_1 + \sqrt{(mgL_1)^2 + 4L_2^2 k I \omega^2}}{2L_2} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

- ω : 横倒し時の角速度 (V/r) (rad/s)
- V : 衝突物の衝突速度 (m/s)
- r : 回転半径=3.860 m (下部トラニオンから上部トラニオンまでの距離)
- I : 下部トラニオン周りの慣性モーメント (kg・m²)
- k : 被衝突物のバネ定数 (N/m)
- δ : 被衝突物の変形量 (m)
- L₁ : 下部トラニオンから重心までの距離 (2.152 m)
- L₂ : 下部トラニオンから衝撃荷重の作用点までの距離 (4.170 m)
- m : 乾式キャスクの質量 (kg)

(1)～(3)で使用した計算条件及び衝撃荷重計算結果をそれぞれ第7-7表及び第7-8表に示す。

第7-7表 各想定事象時の衝撃荷重の計算条件

分類	想定事象						
	項目	適用式	k ^(注9) [N/m]	V [m/分]	m [kg]	I [kg・m ²]	ω [rad/s]
キヤスクの 衝突	a. 検査架台への衝突	(2)	1.410×10^9 ^(注1)	18 ^(注6)	119400 (乾式キヤスク)		
	b. 貯蔵架台への衝突	(1)	1.016×10^{11} ^(注2)	1.2 ^(注7)	119400 (乾式キヤスク)		
	d. 横倒し時の衝突	(3)	3.620×10^{10} ^(注3)	1.2 ^(注7)	119400 (乾式キヤスク)	8.92×10^5 ^(注8)	0.00518
キヤスクへ の衝突	e. 二次蓋の衝突	(1)	6.692×10^{10} ^(注4)	1.2 ^(注7)	4500 (二次蓋)		
	f. 緩衝体（上部）の衝突	(2)	4.646×10^9 ^(注5)	18 ^(注6)	8720 (上部緩衝体)		
	f. 緩衝体（下部）の衝突	(2)	4.643×10^9 ^(注5)	18 ^(注6)	6240 (下部緩衝体)		

(注1)検査架台の足場の梁をモデル化し、乾式キヤスク衝突荷重により、検査架台の足場の梁が変形するとしてばね剛性を算出。

(注2)貯蔵架台全体をモデル化し、乾式キヤスク衝突荷重により、貯蔵架台が変形するとしてばね剛性を算出。

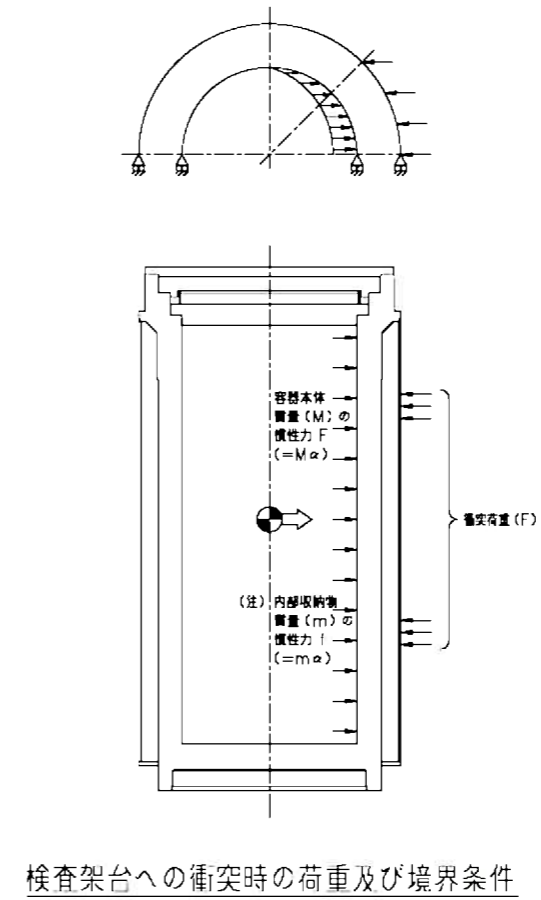
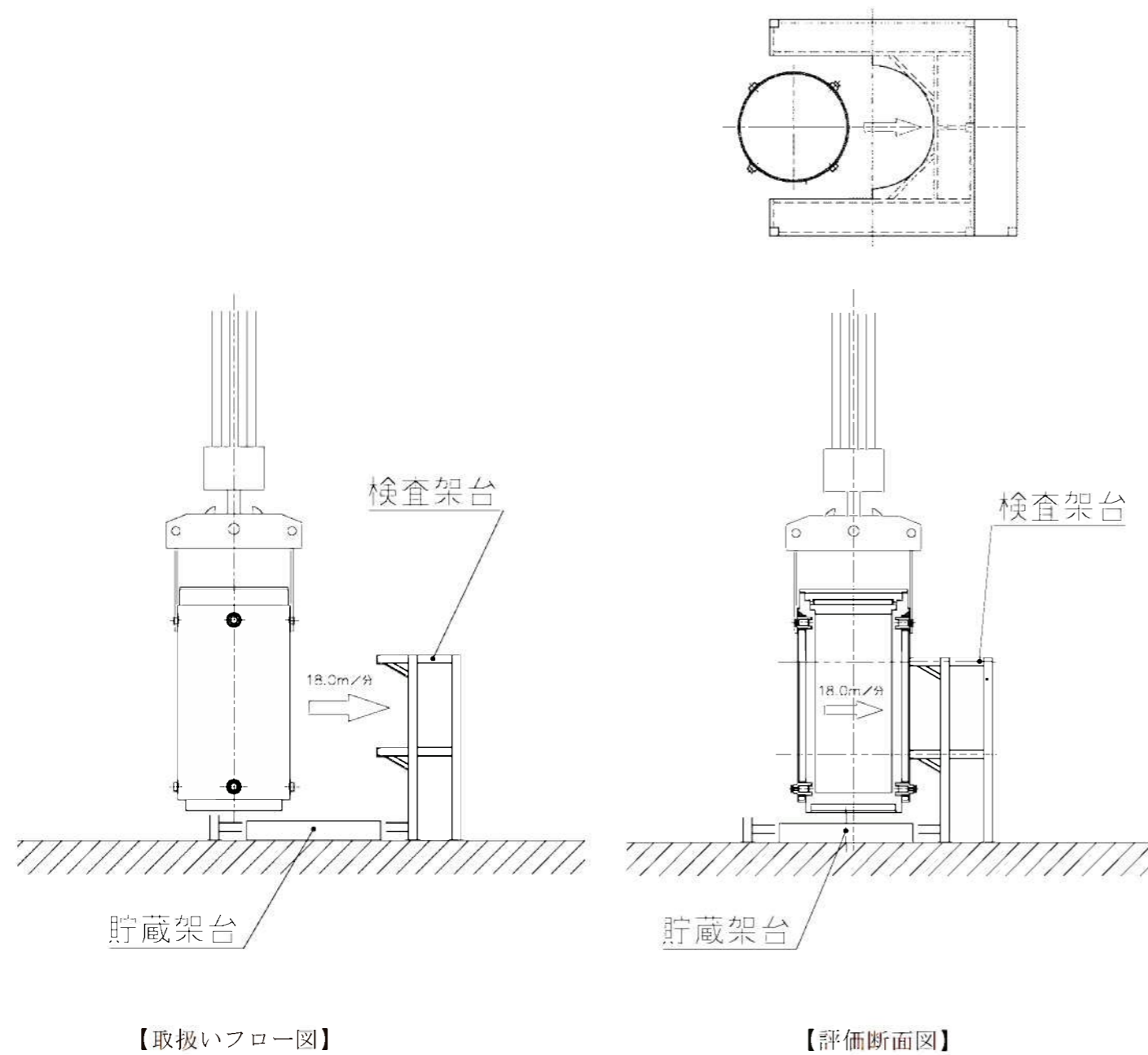
(注3)輸送架台の胴受け部をモデル化し、乾式キヤスク衝突荷重により、輸送架台の胴受け部が変形するとしてばね剛性を算出。

(注4)乾式キヤスク全体をモデル化し、二次蓋衝突荷重により、乾式キヤスクが変形するとしてばね剛性を算出。

- (注5) 乾式キヤスク全体をモデル化し、緩衝体衝突荷重により、乾式キヤスクが変形するとしてばね剛性を算出。
- (注6) 設計上のクレーン走行最大速度
- (注7) 設計上のクレーン巻き下げ最大速度
- (注8) 乾式キヤスクの各部材質量、形状、回転軸（下部トラニオン）から各部材の重心までの距離から算出。
- (注9) ばね定数の算出方法は7.3.6項で説明する。

第 7-8 表 各想定事象時の衝撃荷重

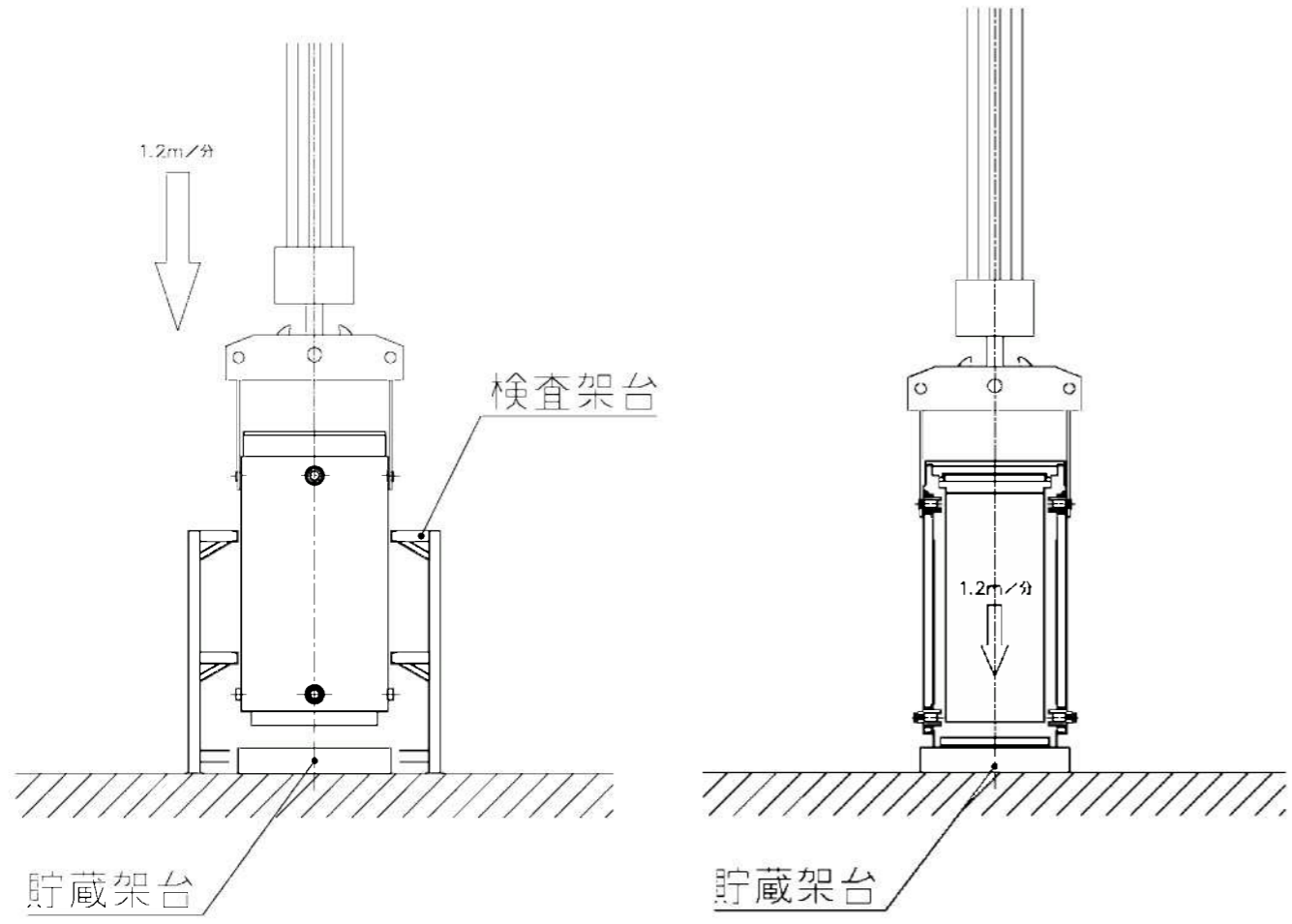
分類	想定事象	
	項目	衝撃荷重 (N)
キャスクの衝突	a. 検査架台への衝突	3.893×10^6
	b. 貯蔵架台への衝突	3.666×10^6
	d. 横倒し時の衝突	1.281×10^6
キャスクへの衝突	e. 二次蓋の衝突	3.940×10^5
	f. 緩衝体（上部）の衝突	1.910×10^6
	f. 緩衝体（下部）の衝突	1.615×10^6



(注) α は衝撃加速度 ($\alpha = \text{衝突荷重} / (\text{容器本体質量 } M + \text{内部収納物質量 } m)$) を示す。
 内部収納物 (バスケット及び燃料集合体) は形状をモデル化しないため、内部収納物の質量に衝撃加速度を乗じた荷重を内部収納物の慣性力として、胴内面に作用させる。

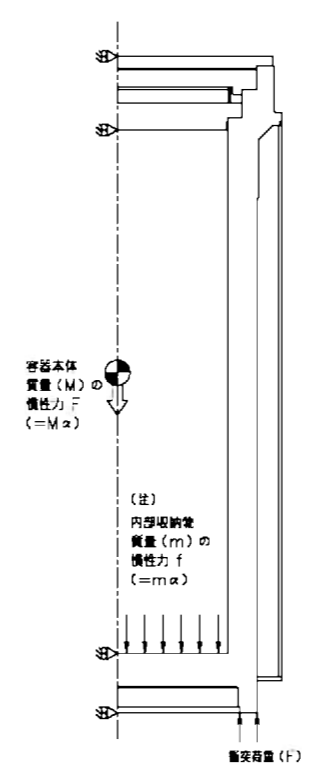
【評価モデル図】

第 7-9 図 (a) 検査架台への衝突



【取扱いフロー図】

【評価断面図】

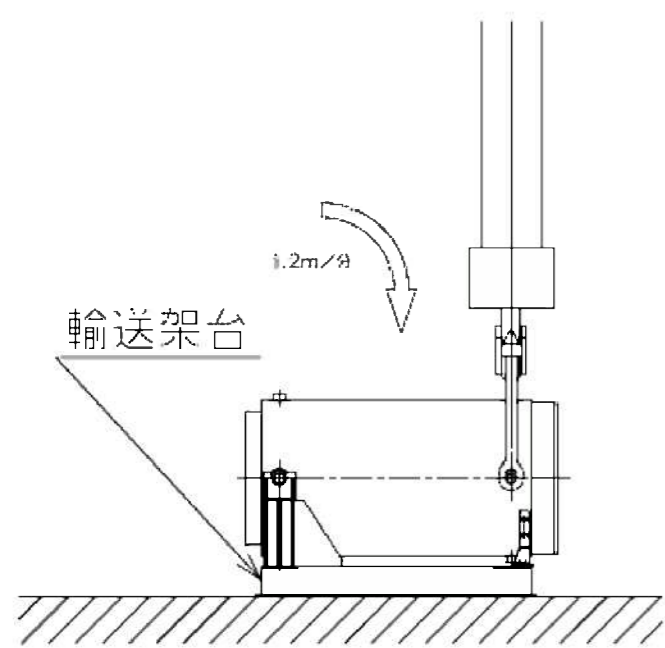


貯蔵架台への底部垂直落下時の荷重及び境界条件

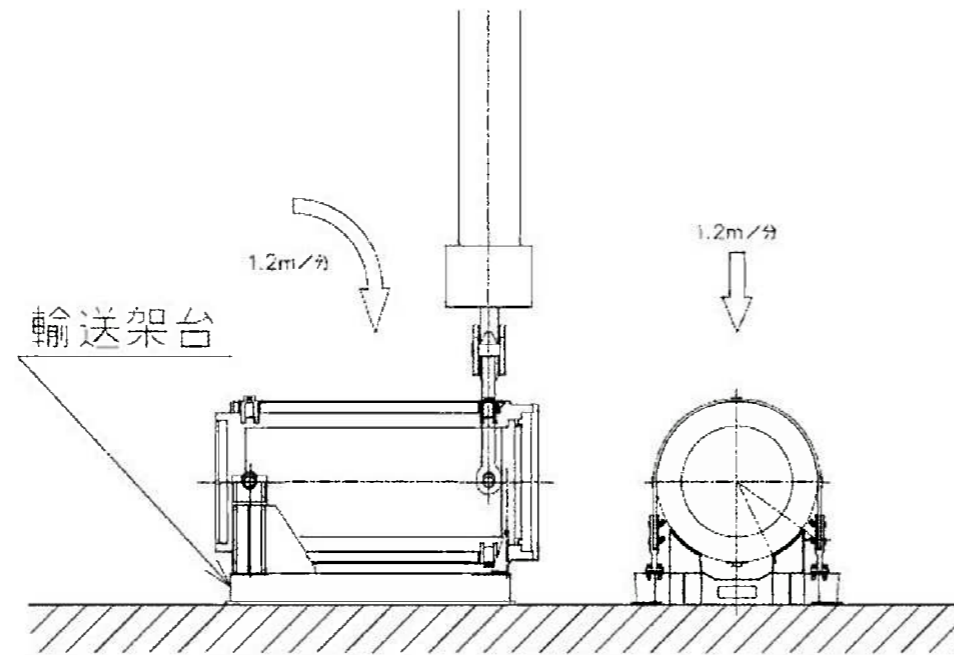
(注) α は衝撃加速度 ($\alpha = \text{衝突荷重} / (\text{容器本体質量 } M + \text{内部収納物質量 } m)$) を示す。
 内部収納物 (バスケット及び燃料集合体) は形状をモデル化しないため、内部収納物の質量に衝撃加速度を乗じた荷重を内部収納物の慣性力として、胴内面に作用させる。

【評価モデル図】

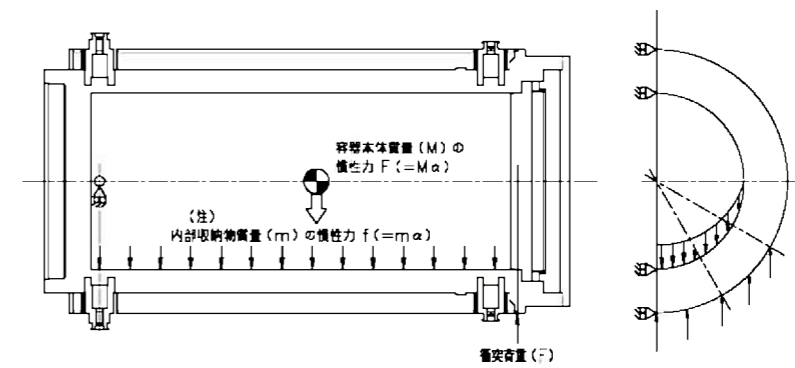
第 7-9 図 (b) 貯蔵架台への衝突



【取扱いフロー図】



【評価断面図】

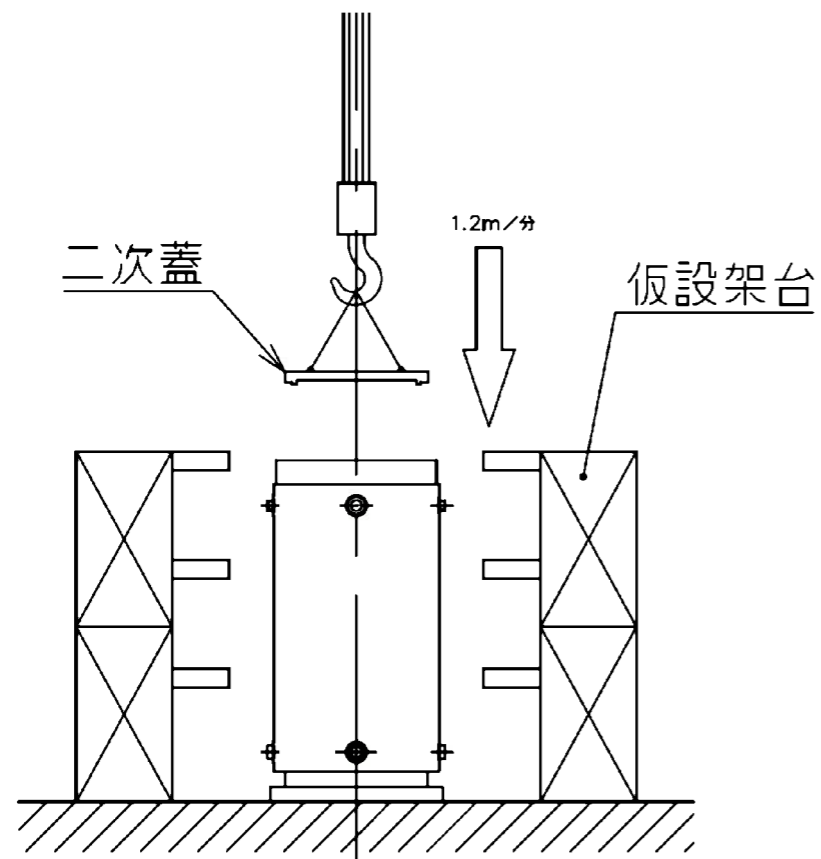


横倒し時の衝突時の荷重及び境界条件

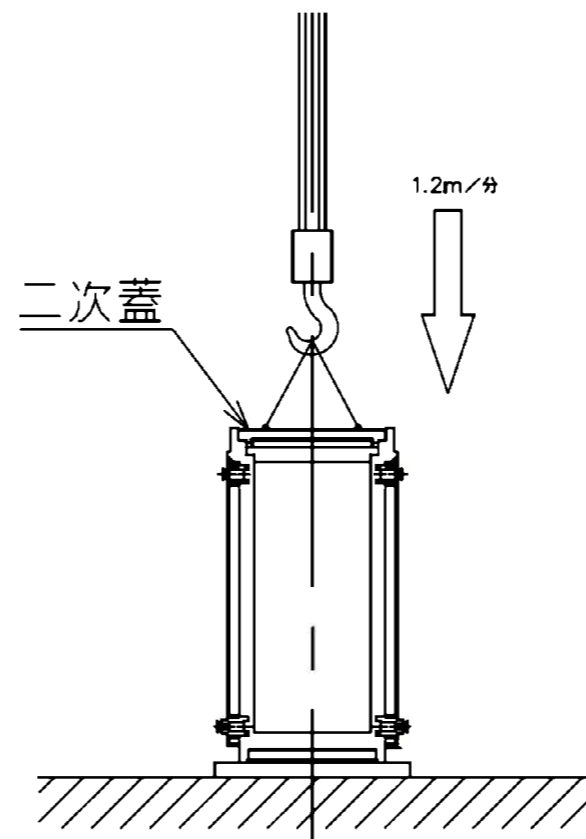
(注) α は衝撃加速度 ($\alpha = \text{衝突荷重} / (\text{容器本体質量 } M + \text{内部収納物質量 } m)$) を示す。
 内部収納物 (バスケット及び燃料集合体) は形状をモデル化しないため、内部収納物の質量に衝撃加速度を乗じた荷重を内部収納物の慣性力として、胴内面に作用させる。

【評価モデル図】

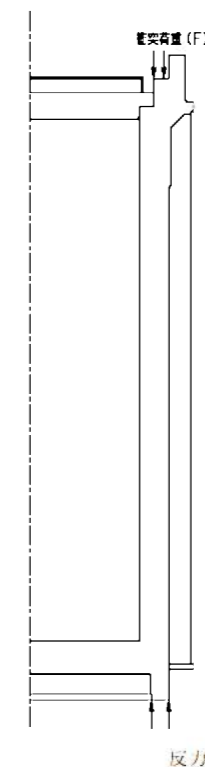
第7-9図 (d) 横倒し時の衝突



【取扱いフロー図】



【評価断面図】

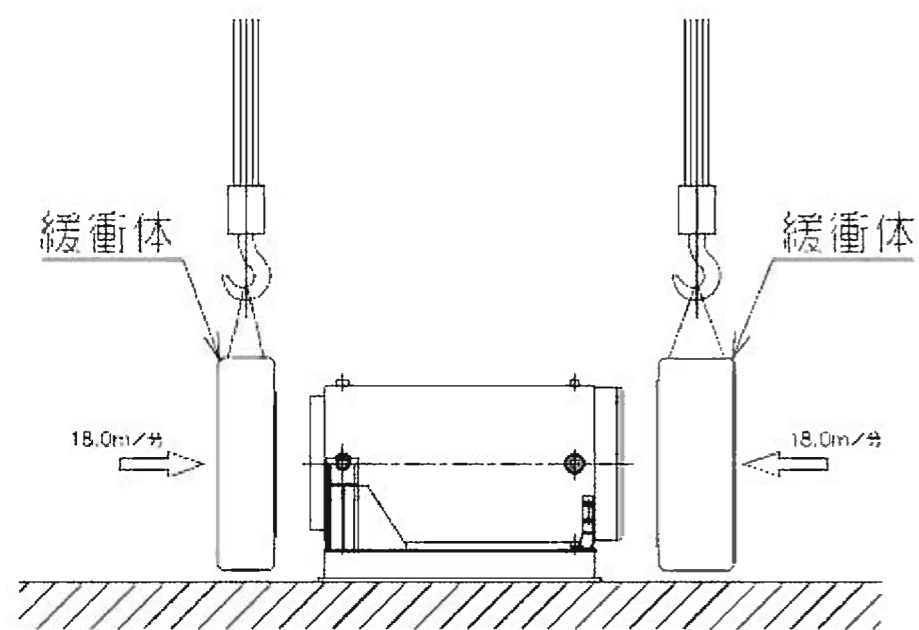


二次蓋の衝突時の荷重及び境界条件

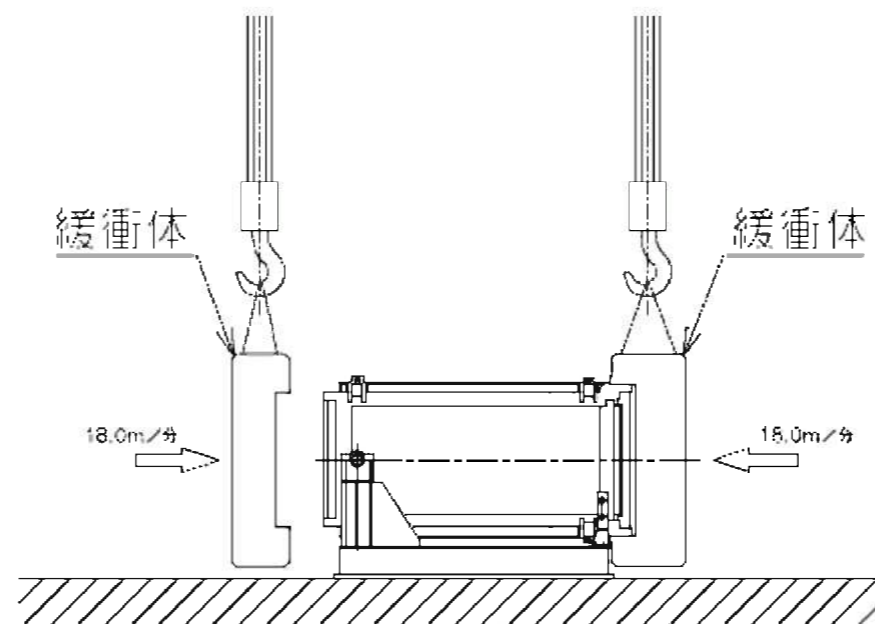
【評価モデル図】

(注) 二次蓋装着時は、二次蓋ボルト穴に位置決めピンを設置し、胴フランジからずれないように吊り下ろすため、胴フランジに一樣に荷重が作用するものとして評価を行う。

第 7-9 図 (e) 二次蓋の衝突

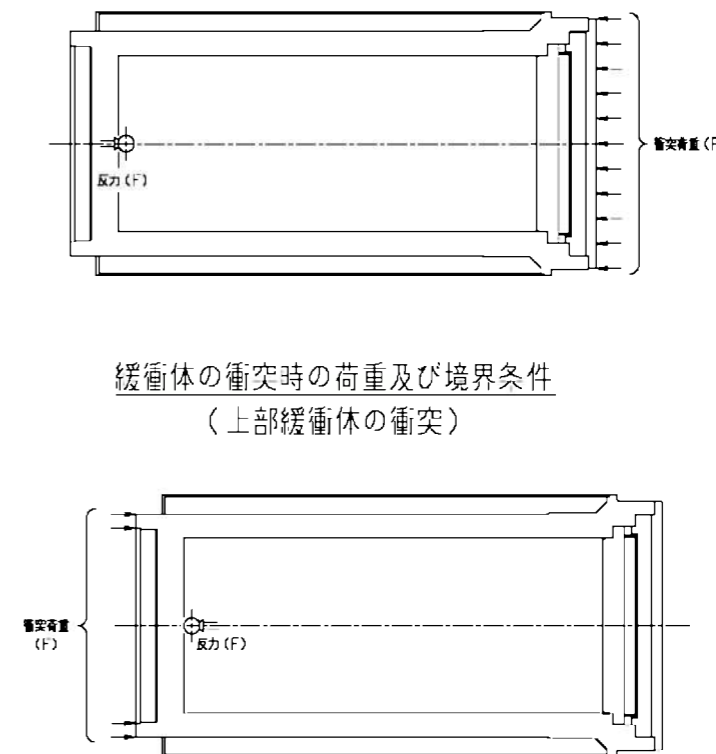


【取扱いフロー図】



【評価断面図】

(注) 緩衝体装着時は、緩衝体取付ボルト穴に位置決めピンを設置し、
 胴からずれないように取り付けるため、三次蓋又は胴底面に一様に荷重が作用するものとして評価を行う。



緩衝体の衝突時の荷重及び境界条件
 (上部緩衝体の衝突)

緩衝体の衝突時の荷重及び境界条件
 (下部緩衝体の衝突)

【評価モデル図】

第 7-9 図 (f) 緩衝体の衝突

7.3.3 応力評価の方針

乾式キャスクへ求められる4つの安全機能は未臨界、閉じ込め、遮蔽、除熱であり、想定事象時においてもこれら乾式キャスクの機能を維持する部位の構造健全性を維持する必要がある。ここで、各想定事象における衝突により乾式キャスクへ発生する加速度によりキャスクの各部材（胴、胴（底板）、外筒、中性子遮蔽材カバー、一次蓋、二次蓋、伝熱フィン、バスケット）へ発生する応力については、各部材の代表部位について評価を行い、各部材が構造健全性を維持することを確認する。

胴、胴（底板）、外筒、中性子遮蔽材カバー、一次蓋、二次蓋は、三次元FEMモデルを用いて評価を行う。なお、解析モデルは保守的に伝熱フィンをモデル化していないが、伝熱フィンに荷重が作用する場合は材料力学の公式を用いて評価を行う。また、バスケット及び胴（脚部）は、材料力学の公式及び核燃料輸送物設計承認申請で用いている式により評価を行う。評価基準は、乾式キャスクの除熱解析から得られた各評価部位の最高温度から設定した値を用いる。

各安全機能を維持する部材及び評価基準を表7-9に示す。胴、胴（底板）、一次蓋、二次蓋は、核燃料輸送物設計承認申請の0.3m落下（一般の試験条件）と同様に、使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格(2007年版)の密封容器の供用状態Bの評価基準とする。外筒、中性子遮蔽材カバーは、胴、胴（底板）、一次蓋の中性子遮蔽材を支持する部材であって、圧力保持を目的としないことから、核燃料輸送物設計承認申請の0.3m落下（一般の試験条件）と同様に、発電用原子力設備規格 設計・建設規格(2012年版)の支持構造物の供用状態Bの基準を準用して評価基準とする。バスケットは、臨界評価上の有意な変形を起こさないことを評価基準とする。伝熱フィンは、除熱機能を維持するための基準として弾性範囲内とする。また、乾式キャスクの応力評価位置を第7-10図に示す。

また、各想定事象において、衝突部近傍の評価を行い、衝突部近傍の構造健全性を確認し、安全機能が損なわれないことを確認する。

表 7-9 キャスクが担保すべき安全機能及び評価基準

想定事象時にキャスクが担保すべき安全機能	安全機能を維持する部材	安全機能を維持するための基準	左記に該当する応力評価基準
未臨界	バスケット (注 3)	臨界評価上の有意な変形を起ささない	$\sigma_m \leq S_y$ $\sigma_b \leq S_y$ $\tau \leq S_y / \sqrt{3}$
閉じ込め (閉じ込め境界)	一次蓋シール部 (注 2)	供用状態 B(金属キャスク構造規格)	$P_m \leq S_y$ $P_l \leq S_y$ $P_l + P_b \leq S_y$ $P_l + P_b + Q \leq S_y$
	一次蓋ボルト、二次蓋ボルト (注 2)	供用状態 B(金属キャスク構造規格)	$\sigma_m \leq 2S_m$ $\sigma_m + \sigma_b \leq 3S_m$
遮蔽	胴、一次蓋、二次蓋 (注 2)	供用状態 B(金属キャスク構造規格)	$P_m \leq S_m$ $P_l \leq 1.5S_m$ $P_l + P_b \leq 1.5S_m$
	外筒、中性子遮蔽材カバー (注 1) (注 2)	供用状態 B(設計・建設規格)	引張応力 $\leq F/1.5$ せん断応力 $\leq F/(1.5 \times \sqrt{3})$ 圧縮応力 $\leq F/1.5$ 曲げ応力 $\leq F/1.5$
除熱	バスケット (注 3)	未臨界と同様とする	$\sigma_m \leq S_y$ $\sigma_b \leq S_y$ $\tau \leq S_y / \sqrt{3}$
	胴、一次蓋、二次蓋 (注 2)	供用状態 B(金属キャスク構造規格)	$P_m \leq S_m$ $P_l \leq 1.5S_m$ $P_l + P_b \leq 1.5S_m$
	伝熱フィン (注 4)	弾性範囲内	$\sigma_b \leq 1.5S_y$ $\tau \leq S_y / \sqrt{3}$
	外筒、中性子遮蔽材カバー (注 1) (注 2)	供用状態 B(設計・建設規格)	引張応力 $\leq F/1.5$ せん断応力 $\leq F/(1.5 \times \sqrt{3})$ 圧縮応力 $\leq F/1.5$ 曲げ応力 $\leq F/1.5$

(注 1) F の値は以下のとおり

(a) 使用温度が 40℃を超えるオーステナイト系ステンレス鋼

$$F = \text{MIN}[1.35S_y, 0.7S_u, S_y(\text{RT})]$$

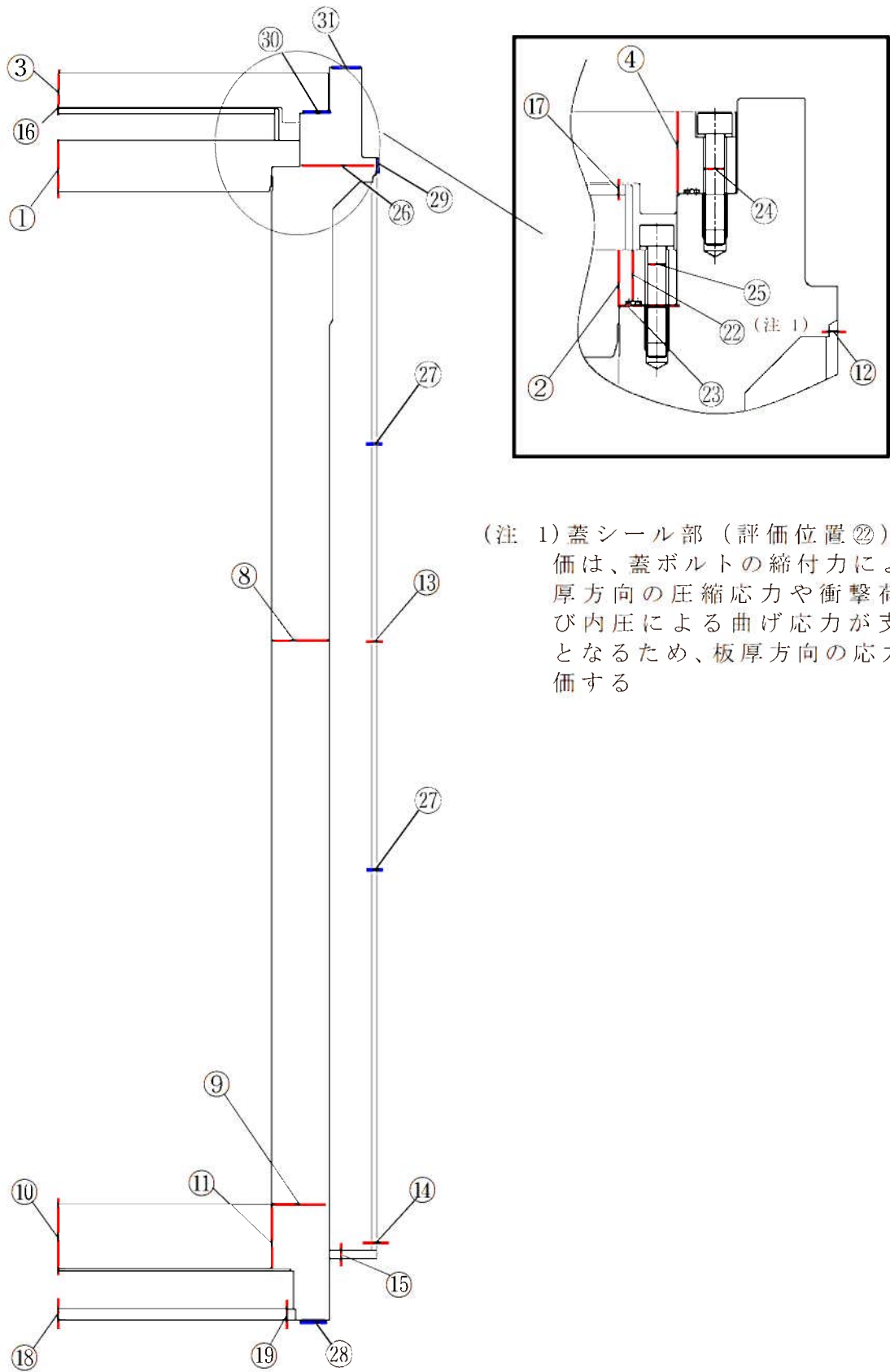
(b) 上記 (a) に示すもの以外

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

(注 2) 評価基準を定める物性値は、発電用原子力設備規格 材料規格 (2012 年版) を適用。

(注 3) 評価基準を定める物性値は、メーカー保証値 (MSF-21P 型及び MSF-24P 型の核燃料輸送物設計承認申請と同様) を適用。

(注 4) 評価基準を定める物性値は、2007 ASME Boiler & Pressure Vessel Code を適用。



(注 1) 蓋シール部 (評価位置②) の評価は、蓋ボルトの締付力による板厚方向の圧縮応力や衝撃荷重及び内圧による曲げ応力が支配的となるため、板厚方向の応力を評価する

第 7-10 図 キヤスクの応力評価位置
(赤線は評価断面、青線は衝突面/衝突箇所を示す)

評価断面	部 位	4つの安全機能	想定事象	備考
①	一次蓋中央部	閉/遮/熱	○	
②	一次蓋端部	閉/遮/熱	○	
③	二次蓋中央部	遮/熱	○	
④	二次蓋端部	遮/熱	○	
⑤	三次蓋中央部	閉	×	三次蓋は輸送時のみ装着のため、想定事象時は評価対象外
⑥	三次蓋端部	閉	×	
⑦	胴上部	閉	×	
⑧	胴中央部	閉/遮/熱	○	
⑨	胴下部	閉/遮/熱	○	
⑩	胴（底板）中央部	閉/遮/熱	○	
⑪	胴（底板）端部	閉/遮/熱	○	
⑫	外筒上部	遮/熱	○	
⑬	外筒中央部	遮/熱	○	
⑭	外筒下部	遮/熱	○	
⑮	下部端板端部	遮	○	
⑯	蓋部中性子遮蔽材カバー中央部	遮	○	
⑰	蓋部中性子遮蔽材カバー端部	遮	○	
⑱	底部中性子遮蔽材カバー中央部	遮	○	
⑲	底部中性子遮蔽材カバー端部	遮	○	
⑳	二次蓋シール部（蓋）	閉	×	輸送時のみ二重の水密性で要求のため、想定事象時は評価対象外
㉑	二次蓋シール部（胴）	閉	×	
㉒	一次蓋シール部（蓋）	閉	○	
㉓	一次蓋シール部（胴）	閉	○	

評価断面	部 位	4つの安全機能	想定事象	備考
㉔	二次蓋ボルト	閉	○	輸送時のみ二重の水事 密性では要求、健全性の 維持で要求
㉕	一次蓋ボルト	閉	○	
㉖	胴上部 (vs 横倒し架台)	閉/遮/熱	○	衝突・荷重負荷される部位を評価対象に選定
㉗	外筒 (vs 検査架台)	遮/熱	○	
㉘	胴底板 (vs 貯蔵架台、下部緩衝体)	—	○	
㉙	胴上部 (vs 横倒し架台)	遮	○	
㉚	胴フランジ (vs 二次蓋)	閉	○	
㉛	胴フランジ (vs 上部緩衝体)	—	○	
—	バスケット	臨/熱	○	
—	伝熱フィン	熱	○	

(1) バスケットプレートの圧縮応力の算出式

貯蔵架台への衝突時及び二次蓋の衝突時に最下段のバスケットプレート（第 7-11 図参照）には、それより上部にあるバスケットプレート等の自重及び鉛直方向の慣性力が作用し、圧縮による膜応力 σ_c (MPa)が生じる。

$$\sigma_c = \frac{W_b \times G_v}{A_1} \quad (1)$$

ここで、

W_b : バスケットプレート、バスケットサポート、中性子吸収材の合計

質量 (kg)

G_v : 自重及び鉛直方向の加速度 (m/s^2)

A_1 : バスケットプレートと胴の接触面積 (mm^2)

バスケットプレートと胴の接触面積 A_1 は、以下の式で与えられる。計算に用いた寸法を第 7-11 図に示す。

$$A_1 = (b_1 - b_2) \times L_1 \times n \quad (2)$$

ここで、

b_1 : バスケットプレート幅 1 (mm)

b_2 : バスケットプレート幅 2 (mm)

L_1 : バスケットプレート長さ (mm)

N : 胴に接触するバスケットプレート L_1 部の個数 (-)

(2) バスケットプレート縦板の圧縮応力の算出式

検査架台への衝突時、横倒し時の衝突時、及び緩衝体の衝突時にバスケットプレート縦板切欠部には、第 7-12 図に示すように、領域 I の範囲にあるバスケットプレート、バスケットサポート及び燃料集合体に生じる水平方向の慣性力並びに、領域 II のバスケットプレートに生じる水平方向の慣性力により、圧縮による膜応力 σ_c (MPa)が生じる。

$$\sigma_c = \frac{W_I + W_{II}}{A \times N} G_H \quad (3)$$

ここで、

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

W_{II} ：領域Ⅱのバスケットプレート及び中性子吸収材の質量 (kg)

G_H ：水平方向の加速度 (m/s^2)

N ：バスケットプレートの数 (枚)

A ：バスケットプレート縦板の断面積 (mm^2)

バスケットプレート縦板の断面積 A は、以下の式で与えられる。計算に用いた寸法を第7-13図に示す。

$$A = (b_1 + b_2 \times 2) \times h_1 - (b_3 + b_4 \times 2) \times h_2 \quad (4)$$

ここで、

b_1 ：バスケットプレート幅1 (mm)

b_2 ：バスケットプレート幅2 (mm)

h_1 ：バスケットプレート高さ1 (mm)

b_3 ：バスケットプレート幅3 (mm)

b_4 ：バスケットプレート幅4 (mm)

h_2 ：バスケットプレート高さ2 (mm)

(3) バスケットプレート横板の曲げ応力及びせん断応力の算出式

検査架台への衝突時、横倒し時の衝突時、及び緩衝体の衝突時にバスケットプレート横板切欠部には、第7-14図に示すようにバスケットプレート、中性子吸収材及び燃料集合体に生じる慣性力により曲げ応力 σ_b 及びせん断応力 τ が生じる。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} \quad (5)$$

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (6)$$

ここで、

- σ_b : 曲げ応力 (MPa)
- τ : せん断応力 (MPa)
- M : 曲げモーメント (N・mm)
- Z : 断面係数 (mm³)
- F : せん断荷重 (N)
- A : 断面積 (mm²)

曲げモーメントMは、以下の式で与えられる。

$$M = \frac{w \times \ell^2}{12} G_H \quad (7)$$

ここで、

- w : 分布荷重 (kg/mm)
- ℓ : バスケットセルの内幅 (mm)
- G_H : 水平方向の加速度 (m/s²)

分布荷重wは、以下の式で与えられる。

$$w = \frac{W_f + W_b \times N}{\ell \times N} \quad (8)$$

ここで、

- W_f : 燃料集合体の質量 (kg)
- W_b : バスケットプレート及び中性子吸収材の質量 (kg)
- N : バスケットプレートの数 (段)

断面係数Zは、以下の式で与えられる。計算に用いた寸法を第 7-15 図に示す。

$$Z = \frac{h_1^3 \times b_1 - h_2^3 \times (b_2 + b_3 \times 2)}{6h_1} \quad (9)$$

ここで、

- h_1 : バスケットプレート高さ 1 (mm)
- b_1 : バスケットプレート幅 1 (mm)
- b_2 : バスケットプレート幅 2 (mm)

h_2 : バスケットプレート高さ 2 (mm)

b_3 : バスケットプレート幅 3 (mm)

断面積 A は、以下の式で与えられる。計算に用いた寸法を第 7-15 図に示す。

$$A = b_1 \times h_1 - h_2 \times (b_2 + b_3 \times 2) \quad (10)$$

せん断荷重 F は、以下の式で与えられる。

$$F = \frac{w \times \ell}{2} G_H \quad (11)$$

(4) 伝熱フィンの曲げ応力及びせん断応力の算出式

検査架台への衝突時に伝熱フィン溶接部には、衝突時の外筒の変形により伝熱フィンに曲げ応力 σ_b 及びせん断応力 τ が生じる。なお、第7-16図に示すとおり、伝熱フィン溶接部は伝熱フィンに対して両側に隅肉溶接を施すが、保守側の評価として伝熱フィン溶接部のど部の面積は片側の隅肉のみを考慮して評価する。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} \quad (12)$$

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (13)$$

ここで、

σ_b : 曲げ応力 (MPa)

M : 曲げモーメント (N・mm)

Z : 断面係数 (mm³)

τ : せん断応力 (MPa)

F : 作用荷重 (N)

A : フィン溶接部のど部の断面積 (mm²)

ここで、曲げモーメントMは、以下の式で求められる。

$$M = F \times \ell \quad (14)$$

ℓ : フィンの長さ (mm)

ここで、作用荷重Fは、以下の式で求められる。

$$F = \frac{3EI}{\ell^2} v \quad (15)$$

E : 縦弾性係数 (MPa)

I : 断面二次モーメント (mm⁴)

v : 外筒の変形量 (mm)

また、貯蔵架台への衝突時、二次蓋の衝突時、緩衝体の衝突時に伝熱フィン溶接部には、伝熱フィン及び中性子遮蔽材に生じる慣性力によりせん断応力 τ が生じる。なお、第7-16図に示すとおり、伝熱フィン溶接部は伝熱フィンに対して両側に隅肉溶接を施すが、保守側の評価として伝熱フィン溶接部のど部の面積は片側の隅肉のみを考慮して評価する。

$$\tau = \frac{(W_1+W_2)G_v}{A} \quad (16)$$

ここで、

τ : せん断応力 (MPa)

W_1 : 伝熱フィンの軸方向単位長さ当たり重量 (kg/mm)

W_2 : 中性子遮蔽材の軸方向単位長さ当たり重量 (kg/mm)

G_v : 鉛直方向の加速度 (m/s^2)

A : フィン溶接部のど部の軸方向単位長さ当たりの面積 (mm^2/mm)

(5) 胴（脚部）の圧縮応力の算出式

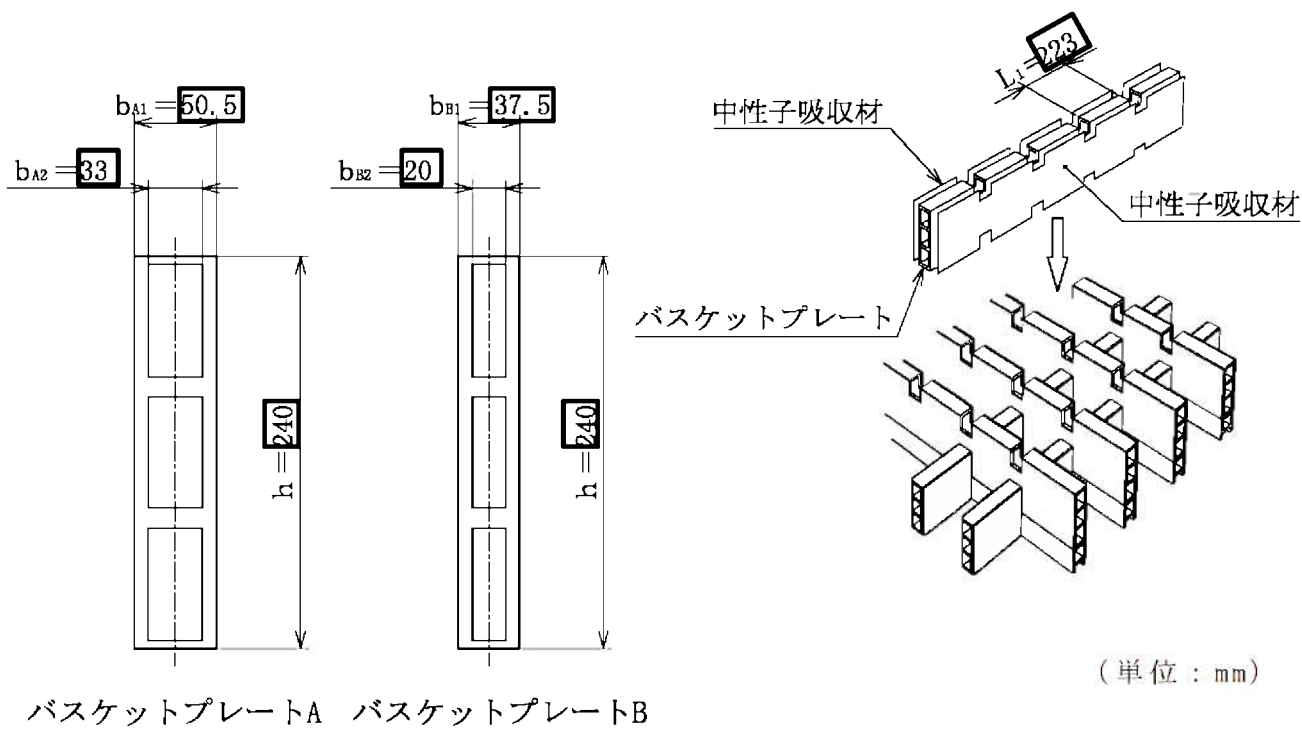
底面衝突時には、乾式キャスクの慣性力が作用し、衝突部近傍に圧縮応力 σ_c が生じる。

$$\sigma_c = \frac{F_v}{A_c} \quad (17)$$

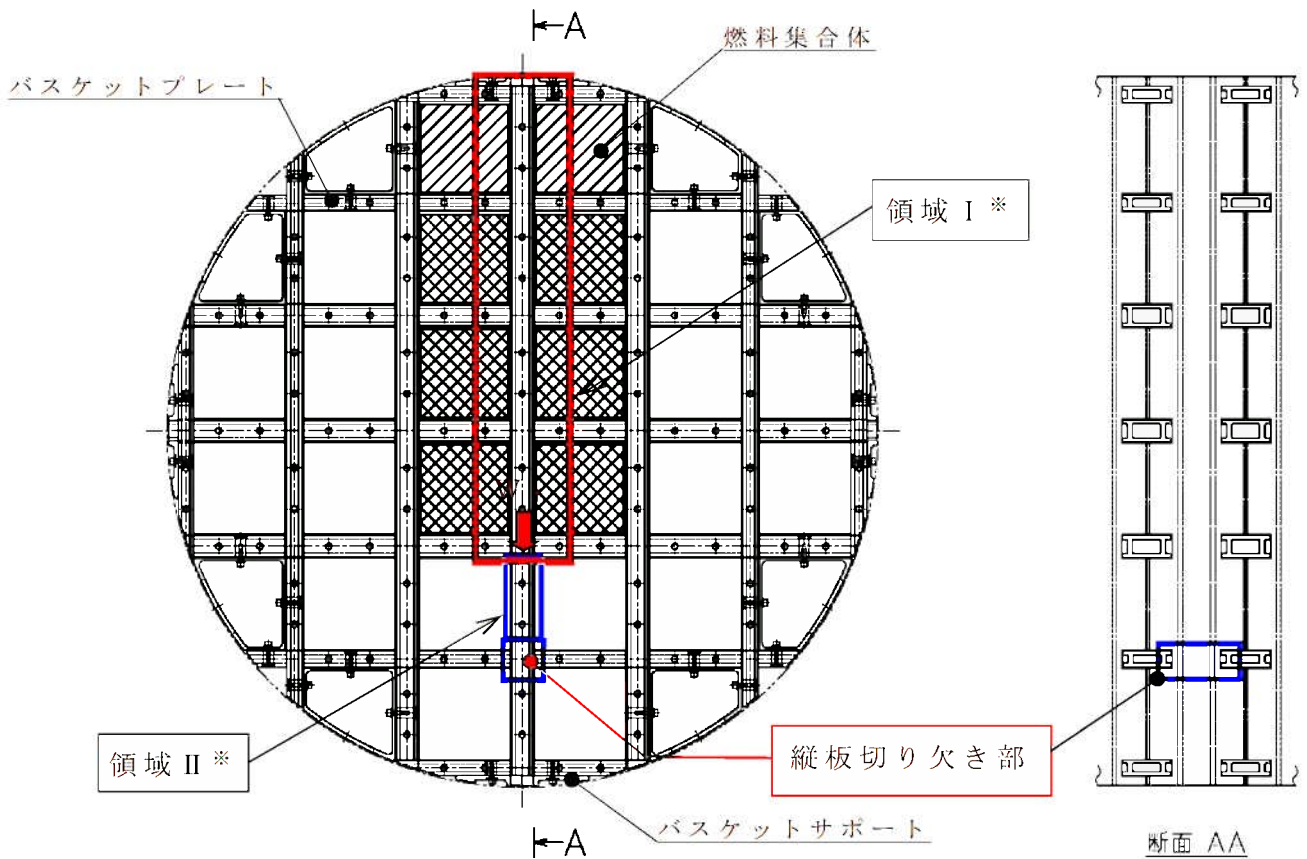
ここで、

F_v : 乾式キャスクに作用する鉛直方向荷重 (N)

A_c : 胴（脚部）の圧縮面積 (mm^2)

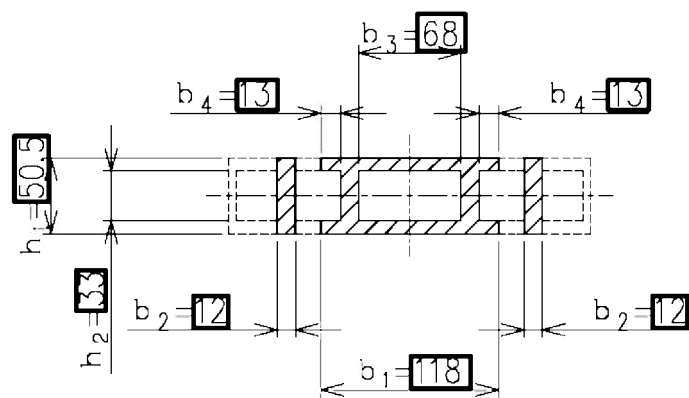


第 7-11 図 バスケットプレートのモデル図

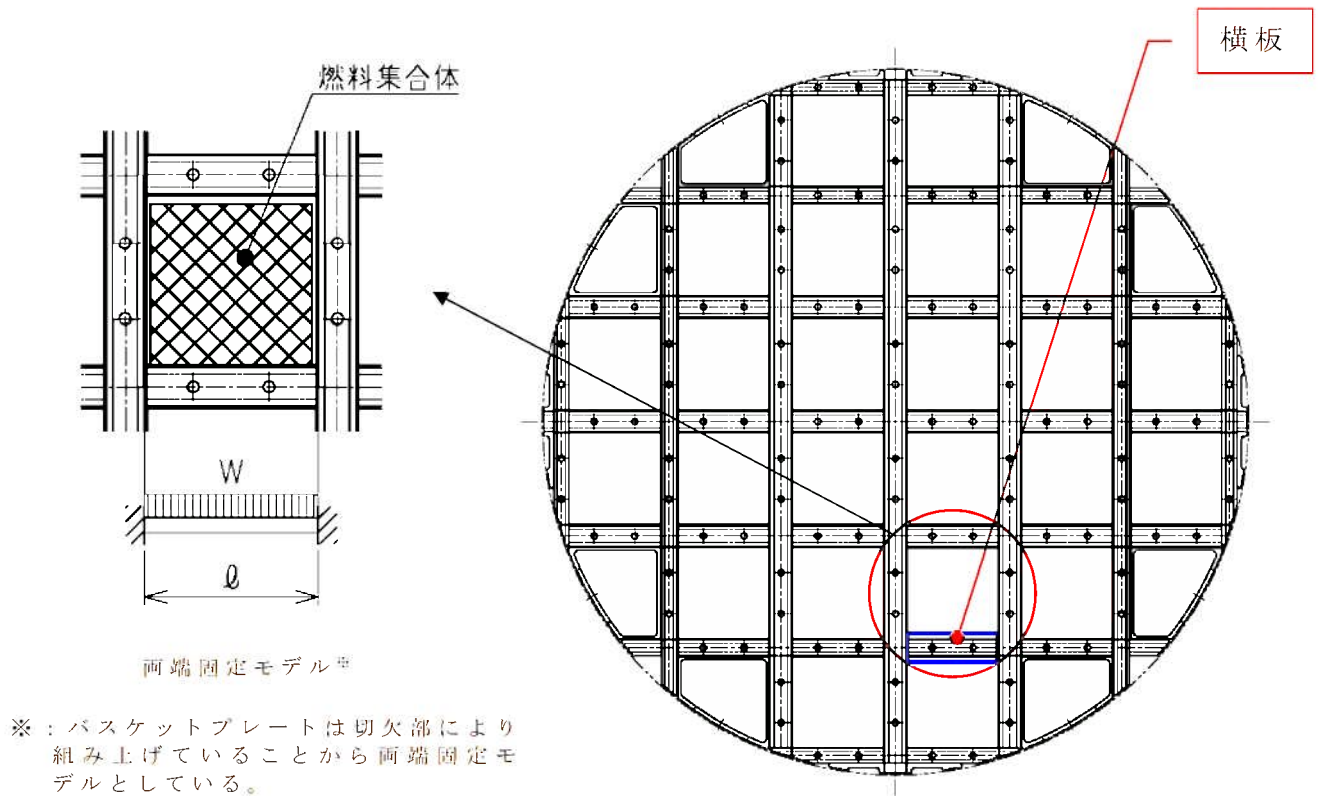


※：バスケットプレート最下段の縦板切欠部は、切欠部にかかる質量は最も大きくなる一方、バスケットサポートの支持により荷重を受ける断面積が大きくなり、発生する圧縮応力は最下段から2段目の切欠部と比較して低減され、最下段から2段目の切欠部において圧縮応力が最大となることから、領域 I 及び領域 II を選定している。

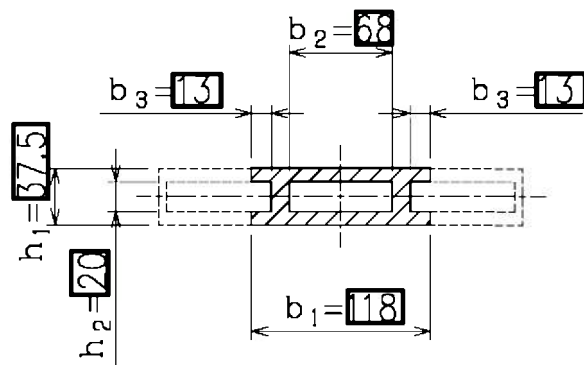
第 7-12 図 バスケットプレート縦板のモデル図



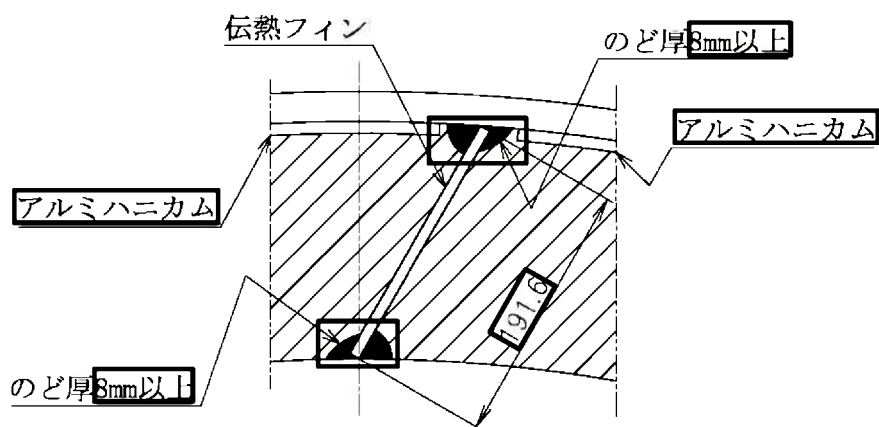
第 7-13 図 バスケットプレート縦板の断面



第 7-14 図 バスケットプレート横板のモデル図



第 7-15 図 バスケットプレート横板の断面



第7-16図 伝熱フィン溶接部のモデル図

7.3.4 応力評価(各部材の構造健全性の確認)

(1) 検査架台への衝突(第7-9図(a.))

i. 評価事象

検査架台への衝突として、乾式貯蔵建屋天井クレーンの誤操作により、乾式キャスクの側部が最大速度(18m/分)で検査架台に衝突することを想定した評価を行う。

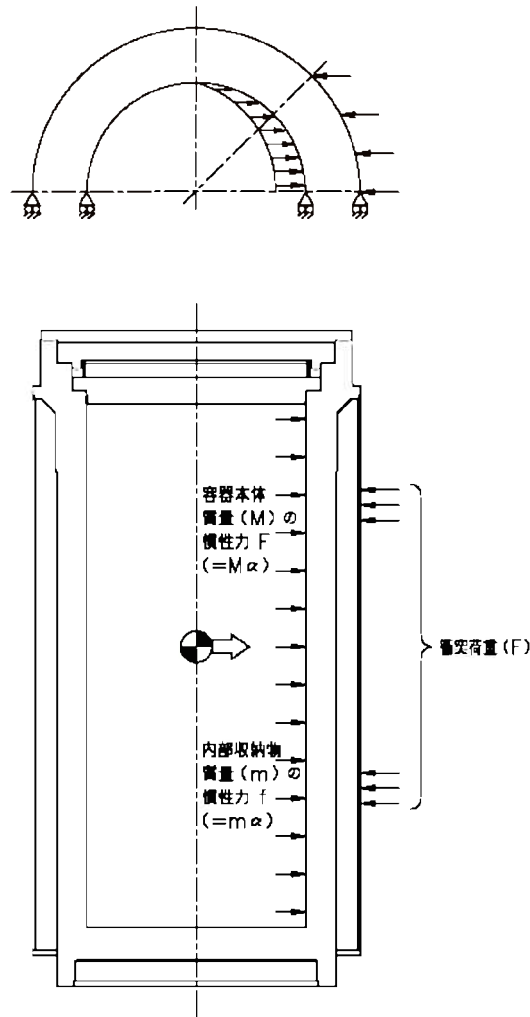
ii. 評価条件

検査架台への衝突時における容器本体の応力の算出にはABAQUSコードを用いる。応力解析モデルは、容器本体(胴、外筒、一次蓋、一次蓋ボルト、二次蓋、二次蓋ボルト、三次蓋、三次蓋ボルト)を三次元でモデル化する。

荷重条件及び境界条件を第7-17図に示す。乾式キャスクの有する運動エネルギーが全て検査架台のひずみエネルギーで吸収されるとして算出される乾式キャスクに生じる衝撃荷重(第7-8表に示す 3.893×10^6 N)に対応する慣性力を乾式キャスクに作用させるとともに、衝突荷重を外筒の2箇所作用させる。

また、外筒と検査架台の衝突位置は、外筒の変形量が大

きくなるよう（後で述べる衝突部近傍の評価において、保守側の評価となるよう）、外筒の中央付近に検査架台が衝突する条件を代表として解析を実施する。



第 7-17 図 検査架台への衝突時の荷重条件及び境界条件

iii. 基準値

評価基準は表 7-9 に示すとおりとする。

iv. 評価結果

検査架台への衝突時における応力解析結果を第 7-10 表に示す。検査架台への衝突時において、各評価部位に発生する応力は、iii. 項に示す解析基準値を満足していること

から、安全機能が維持されることを確認した。

また、一次蓋及び二次蓋は弾性範囲内にとどまることから、開放可能であり、再取出性に問題はない。

第 7-10 表 検査架台への衝突時における応力解析結果

評価部位	材質	温度 (°C)	解析結果 (MPa)	解析基準	解析基準値 (MPa)
一次蓋	GLF1	115	7	1.5Sm	186
二次蓋	GLF1	110	13	1.5Sm	186
胴	GLF1	130	8	1.5Sm	184
胴（底板）	GLF1	140	3	1.5Sm	183
外筒	SGV480	120	43	F/1.5	156
下部端板	SUS304	120	23	F/1.5	136
蓋部中性子 遮蔽材カバー	SGV480	115	6	F/1.5	157
底部中性子 遮蔽材カバー	SUS304	125	29	F/1.5	136
一次蓋シール部 （蓋側）	GLF1	115	60	Sy	185
一次蓋シール部 （胴側）	GLF1	120	16	Sy	185
一次蓋ボルト	SNB23-3	115	249	2Sm	562
二次蓋ボルト	SNB23-3	110	207	2Sm	564
バスケット	MB-A3004-H112	185	2	Sy	56
伝熱フィン	H3100 C1020P	120	60	1.5Sy	82

(注 1) Sy：設計降伏応力（規格値又は文献値）、Sm：設計応力強さ（規格値）

$F = \text{MIN}[1.35S_y, 0.7S_u, S_y(\text{RT})]$ （使用温度が 40°C を超えるオーステナイト系ステンレス鋼）

$F = \text{MIN}[0.7S_u, S_y]$ （上記示すもの以外）

(注 2) 各評価位置の解析結果は、解析基準値に対しての裕度が最も小さい値を記載。

(2) 貯蔵架台への衝突（第 7-9 図（b.））

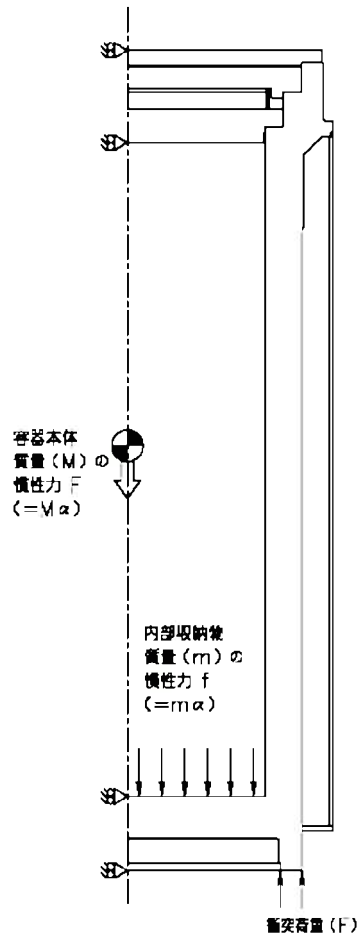
i. 評価事象

貯蔵架台への衝突として、乾式貯蔵建屋天井クレーンの誤操作により、乾式キャスクの底部が最大速度（1.2m/分）で貯蔵架台に衝突することを想定した評価を行う。

ii. 評価条件

貯蔵架台への衝突時における容器本体の応力の算出には ABAQUS コードを用いる。応力解析モデルは、容器本体（胴、外筒、一次蓋、一次蓋ボルト、二次蓋、二次蓋ボルト、三次蓋、三次蓋ボルト）を三次元でモデル化する。

荷重条件及び境界条件を第 7-18 図に示す。乾式キャスクの有する運動エネルギーが全て貯蔵架台のひずみエネルギーで吸収されるとして算出される衝撃荷重（第 7-8 表に示す 3.666×10^6 N）から保守側に設定した約 5.9×10^6 N（5G 相当）に対応する慣性力を乾式キャスクに作用させるとともに、衝突荷重を胴の下端部に作用させる。



第 7-18 図 貯蔵架台への衝突時の荷重条件及び境界条件

iii. 基準値

(1) iii. 項と同じとする。

iv. 評価結果

貯蔵架台への衝突時における応力解析結果を第 7-11 表に示す。

貯蔵架台への衝突時において、各評価部位に発生する応力は、iii. 項に示す解析基準値を満足していることから、安全機能が維持されることを確認した。

また、一次蓋及び二次蓋は弾性範囲内にとどまることから、開放可能であり、再取出性に問題はない。

第 7-11 表 貯蔵架台への衝突時における応力解析結果

評価部位	材質	温度 (°C)	解析結果 (MPa)	解析基準	解析基準値 (MPa)
一次蓋	GLF1	115	9	1.5Sm	186
二次蓋	GLF1	110	9	1.5Sm	186
胴	GLF1	130	3	1.5Sm	184
胴（底板）	GLF1	140	6	1.5Sm	183
外筒	SGV480	120	34	F/1.5	156
下部端板	SUS304	120	4	F/1.5	136
蓋部中性子 遮蔽材カバー	SGV480	115	4	F/1.5	157
底部中性子 遮蔽材カバー	SUS304	125	34	F/1.5	136
一次蓋シール部 （蓋側）	GLF1	115	60	Sy	185
一次蓋シール部 （胴側）	GLF1	120	16	Sy	185
一次蓋ボルト	SNB23-3	115	249	2Sm	562
二次蓋ボルト	SNB23-3	110	203	2Sm	564
バスケット	MB-A3004-H112	185	2	Sy	56
伝熱フィン	H3100 C1020P	120	1	Sy/√3	31

(注 1) Sy : 設計降伏応力 (規格値又は文献値)、Sm : 設計応力強さ (規格値)

$F = \text{MIN}[1.35S_y, 0.7S_u, S_y(\text{RT})]$ (使用温度が 40°C を超える
オーステナイト系ステンレス鋼)

$F = \text{MIN}[0.7S_u, S_y]$ (上記示すもの以外)

(注 2) 各評価位置の解析結果は、解析基準値に対しての裕度が最も小さい値を記載。

(3) 横倒し時の衝突（第 7-9 図（d.））

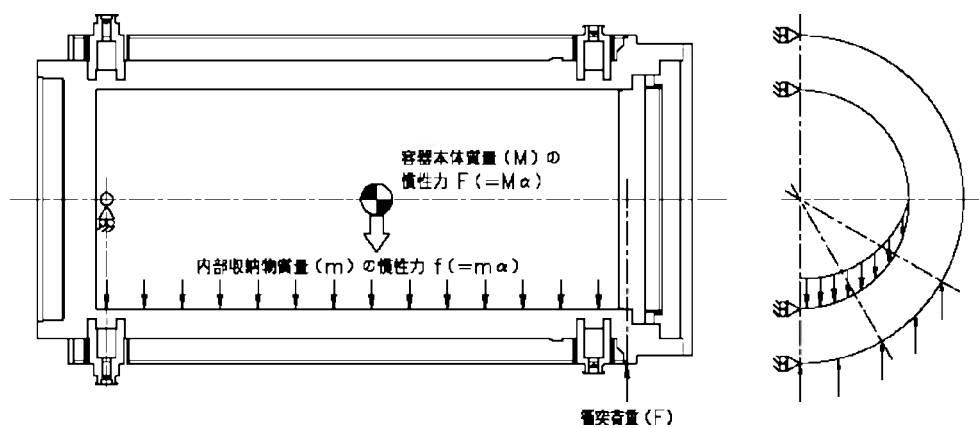
i. 評価事象

横倒し時の衝突として、乾式貯蔵建屋天井クレーンの誤操作により、乾式キャスクの胴上部が最大速度（1.2m/分）で縦起こし架台に衝突することを想定した評価を行う。

ii. 評価条件

横倒し時の衝突時における容器本体の応力の算出には ABAQUS コードを用いる。応力解析モデルは、容器本体（胴、外筒、一次蓋、一次蓋ボルト、二次蓋、二次蓋ボルト、三次蓋、三次蓋ボルト）を三次元でモデル化する。

荷重条件及び境界条件を第 7-19 図に示す。乾式キャスクの有する運動エネルギーが全て輸送架台のひずみエネルギーで吸収されるとして算出される衝撃荷重（第 7-8 表に示す $1.281 \times 10^6 \text{ N}$ ）に対応する慣性力を乾式キャスクに作用させるとともに、衝撃荷重を本体胴フランジ部に作用させる。



第 7-19 図 横倒し時の衝突時の荷重条件及び境界条件

iii. 基準値

(1) iii. 項と同じとする。

iv. 評価結果

横倒し時の衝突時における応力解析結果を第 7-12 表に示す。

横倒し時の衝突時において、各評価部位に発生する応力は、iii. 項に示す解析基準値を満足していることから、安全機能が維持されることを確認した。

また、一次蓋及び二次蓋は弾性範囲内にとどまることから、開放可能であり、再取出性に問題はない。

第 7-12 表 横倒し時の衝突時における応力解析結果

評価部位	材質	温度 (°C)	解析結果 (MPa)	解析基準	解析基準値 (MPa)
一次蓋	GLF1	115	7	1.5Sm	186
二次蓋	GLF1	110	13	1.5Sm	186
胴	GLF1	130	3	Sm	123
胴（底板）	GLF1	140	2	1.5Sm	183
外筒	SGV480	120	40	F/1.5	156
下部端板	SUS304	120	12	F/1.5	136
蓋部中性子 遮蔽材カバー	SGV480	115	4	F/1.5	157
底部中性子 遮蔽材カバー	SUS304	125	29	F/1.5	136
一次蓋シール部 （蓋側）	GLF1	115	63	Sy	185
一次蓋シール部 （胴側）	GLF1	120	34	Sy	185
一次蓋ボルト	SNB23-3	115	249	2Sm	562
二次蓋ボルト	SNB23-3	110	207	2Sm	564
バスケット	MB-A3004-H112	185	1	Sy	56
伝熱フィン	H3100 C1020P	-	-	-	-

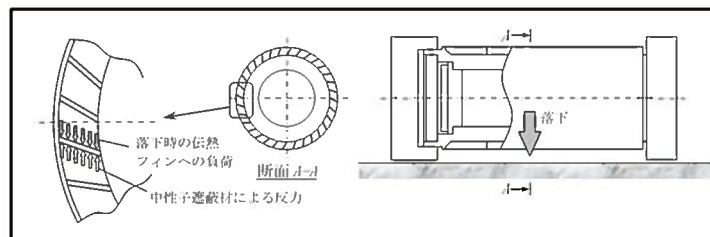
(注 1) S_y : 設計降伏応力 (規格値又は文献値)、 S_m : 設計応力強さ (規格値)

$F = \text{MIN}[1.35S_y, 0.7S_u, S_y(\text{RT})]$ (使用温度が 40°C を超えるオーステナイト系ステンレス鋼)

$F = \text{MIN}[0.7S_u, S_y]$ (上記示すもの以外)

(注 2) 各評価位置の解析結果は、解析基準値に対しての裕度が最も小さい値を記載。

(注 3) 横倒し時には、伝熱フィンの鉛直上側に位置する中性子遮蔽材の慣性力が伝熱フィンに作用するが、伝熱フィンは鉛直下側の中性子遮蔽材により支えられるため、伝熱フィンに慣性力による応力は発生しない。したがって、構造強度評価は行わない。



(4) 二次蓋の衝突（第 7-9 図（e.））

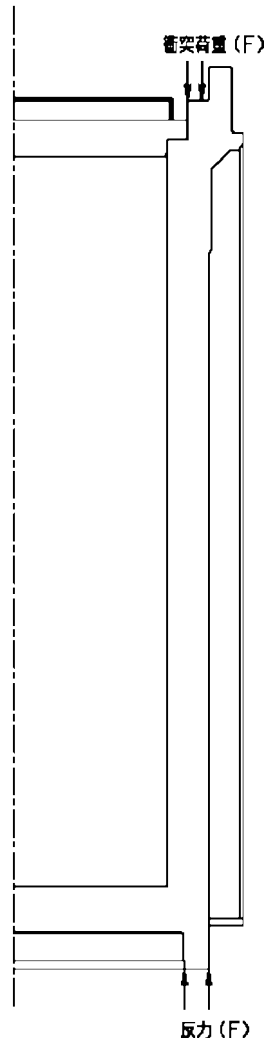
i. 評価事象

二次蓋の衝突として、FH/B クレーンの誤操作により、二次蓋が最大速度（1.2m/分）で乾式キャスクの胴上面に衝突することを想定した評価を行う。

ii. 評価条件

二次蓋の衝突時における容器本体の応力の算出には ABAQUS コードを用いる。応力解析モデルは、容器本体（胴、外筒、一次蓋、一次蓋ボルト）を三次元でモデル化する。

荷重条件及び境界条件を第 7-20 図に示す。二次蓋の有する運動エネルギーが全て乾式キャスクのひずみエネルギーで吸収されるとして算出される衝撃荷重（第 7-8 表に示す $3.940 \times 10^5 \text{ N}$ ）を胴上面に作用させるとともに、衝撃荷重の反力を胴の下端部に作用させる。



第 7-20 図 二次蓋衝突時の荷重条件及び境界条件

iii. 基準値

(1) iii. 項と同じとする。

iv. 評価結果

二次蓋の衝突時における応力解析結果を第 7-13 表に示す。なお、二次蓋の衝突時には、内部収納物の慣性力が作用せず、バスケットには応力は発生しないため、自重による応力を記載している。

二次蓋の衝突時において、各評価部位に発生する応力は、iii. 項に示す解析基準値を満足していることから、安全機能が維持されることを確認した。

また、一次蓋は弾性範囲内にとどまることから、開放可能であり、再取出性に問題はない。

第 7-13 表 二次蓋の衝突時における応力解析結果 (1/2)

評価部位	材質	温度 (°C)	解析結果 (MPa)	解析基準	解析基準値 (MPa)
一次蓋	GLF1	115	4	1.5Sm	186
二次蓋	GLF1	110	-	-	-
胴	GLF1	130	3	1.5Sm	184
胴 (底板)	GLF1	140	1	Sm	122
外筒	SGV480	120	34	F/1.5	156
下部端板	SUS304	120	10	F/1.5	136
蓋部中性子 遮蔽材カバー	SGV480	115	51	F/1.5	157
底部中性子 遮蔽材カバー	SUS304	125	31	F/1.5	136
一次蓋シール部 (蓋側)	GLF1	115	60	Sy	185
一次蓋シール部 (胴側)	GLF1	120	14	Sy	185
一次蓋ボルト	SNB23-3	115	250	2Sm	562

第 7-13 表 二次蓋の衝突時における応力解析結果 (2/2)

評価部位	材質	温度 (°C)	解析結果 (MPa)	解析基準	解析基準値 (MPa)
二次蓋ボルト	SNB23-3	110	-	-	-
バスケット	MB-A3004-H112	185	1	Sy	56
伝熱フィン	H3100 C1020P	120	1	$Sy/\sqrt{3}$	31

(注 1) Sy : 設計降伏応力 (規格値又は文献値)、Sm : 設計応力強さ (規格値)

$F = \text{MIN}[1.35S_y, 0.7S_u, S_y(\text{RT})]$ (使用温度が 40°C を超えるオーステナイト系ステンレス鋼)

$F = \text{MIN}[0.7S_u, S_y]$ (上記示すもの以外)

(注 2) 各評価位置の解析結果は、解析基準値に対しての裕度が最も小さい値を記載。

(5) 緩衝体 (上部及び下部) の衝突 (第 7-9 図 (f.))

i. 評価事象

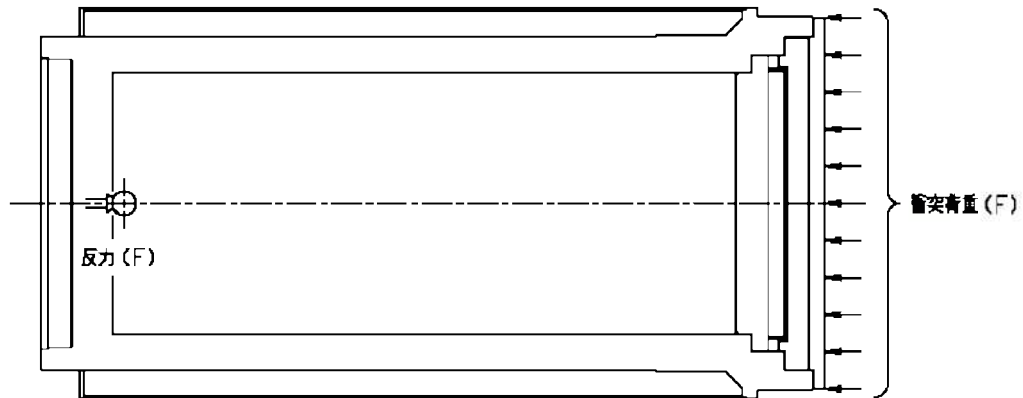
緩衝体 (上部及び下部) の衝突として、乾式貯蔵建屋天井クレーンの誤操作により、上部緩衝体が最大速度 (18m/分) で乾式キャスクの三次蓋上面に衝突することを想定した評価、並びに、下部緩衝体が乾式キャスクの胴底面に衝突することを想定した評価を行う。

ii. 評価条件

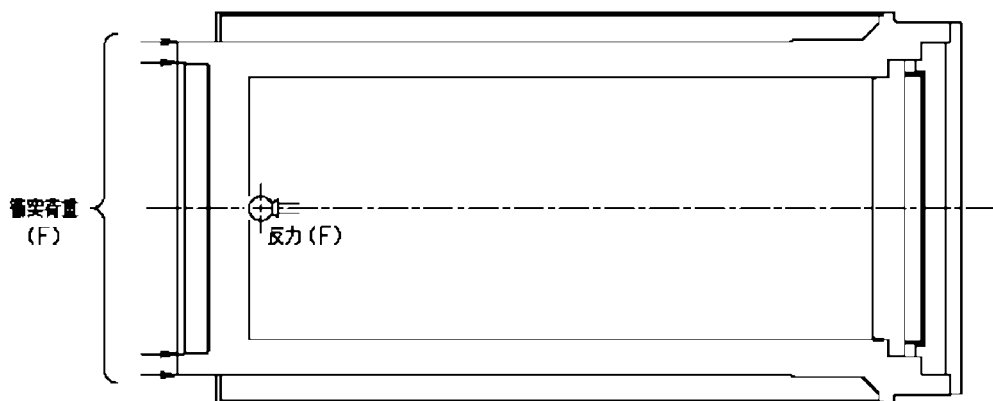
緩衝体の衝突時における容器本体の応力の算出には ABAQUS コードを用いる。応力解析モデルは、容器本体 (胴、外筒、一次蓋、一次蓋ボルト、二次蓋、二次蓋ボルト、三次蓋、三次蓋ボルト) を三次元でモデル化する。

荷重条件及び境界条件を第 7-21 図及び第 7-22 図に示す。緩衝体の有する運動エネルギーが全て乾式キャスクのひずみエネルギーで吸収されるとして算出される衝撃荷重

(第 7-8 表に示す上部： $1.910 \times 10^6 \text{ N}$ 、下部： $1.615 \times 10^6 \text{ N}$)
 を三次蓋上面又は胴底面に作用させるとともに、衝撃荷重
 の反力を下部トラニオンに作用させる。



第 7-21 図 上部緩衝体衝突時の荷重条件及び境界条件



第 7-22 図 下部緩衝体衝突時の荷重条件及び境界条件

iii. 基準値

(1) iii. 項と同じとする。

iv. 評価結果

緩衝体の衝突時における応力解析結果を第 7-14 表及び
 第 7-15 表に示す。なお、緩衝体の衝突時には、内部収納
 物の慣性力が作用せず、バスケットには応力は発生しない

ため、自重による応力を記載している。

緩衝体の衝突時において、各評価部位に発生する応力は、iii.項に示す解析基準値を満足していることから、安全機能が維持されることを確認した。

また、一次蓋及び二次蓋は弾性範囲内にとどまることから、開放可能であり、再取出性に問題はない。

第 7-14 表 上部緩衝体の衝突時における応力解析結果

評価部位	材質	温度 (°C)	解析結果 (MPa)	解析基準	解析基準値 (MPa)
一次蓋	GLF1	115	7	1.5Sm	186
二次蓋	GLF1	110	13	1.5Sm	186
胴	GLF1	130	10	1.5Sm	184
胴 (底板)	GLF1	140	9	1.5Sm	183
外筒	SGV480	120	35	F/1.5	156
下部端板	SUS304	120	13	F/1.5	136
蓋部中性子 遮蔽材カバー	SGV480	115	6	F/1.5	157
底部中性子 遮蔽材カバー	SUS304	125	29	F/1.5	136
一次蓋シール部 (蓋側)	GLF1	115	64	Sy	185
一次蓋シール部 (胴側)	GLF1	120	32	Sy	185
一次蓋ボルト	SNB23-3	115	249	2Sm	562
二次蓋ボルト	SNB23-3	110	206	2Sm	564
バスケット	MB-A3004-H112	185	1	Sy	56
伝熱フィン	H3100 C1020P	120	1	Sy/√3	31

(注 1) Sy : 設計降伏応力 (規格値又は文献値)、Sm : 設計応力強さ (規格値)

$F = \text{MIN}[1.35S_y, 0.7S_u, S_y(\text{RT})]$ (使用温度が 40°C を超えるオーステナイト系ステンレス鋼)

$F = \text{MIN}[0.7S_u, S_y]$ (上記示すもの以外)

(注 2) 各評価位置の解析結果は、解析基準値に対しての裕度が最も小さい値を記載。

第 7-15 表 下部緩衝体の衝突時における応力解析結果

評価部位	材質	温度 (°C)	解析結果 (MPa)	解析基準	解析基準値 (MPa)
一次蓋	GLF1	115	7	1.5Sm	186
二次蓋	GLF1	110	13	1.5Sm	186
胴	GLF1	130	10	1.5Sm	184
胴（底板）	GLF1	140	8	1.5Sm	183
外筒	SGV480	120	37	F/1.5	156
下部端板	SUS304	120	9	F/1.5	136
蓋部中性子 遮蔽材カバー	SGV480	115	3	F/1.5	157
底部中性子 遮蔽材カバー	SUS304	125	29	F/1.5	136
一次蓋シール部 （蓋側）	GLF1	115	63	Sy	185
一次蓋シール部 （胴側）	GLF1	120	33	Sy	185
一次蓋ボルト	SNB23-3	115	249	2Sm	562
二次蓋ボルト	SNB23-3	110	207	2Sm	564
バスケット	MB-A3004-H112	185	1	Sy	56
伝熱フィン	H3100 C1020P	120	1	Sy/√3	31

(注 1) Sy：設計降伏応力（規格値又は文献値）、Sm：設計応力強さ（規格値）

$F = \text{MIN}[1.35S_y, 0.7S_u, S_y(\text{RT})]$ （使用温度が 40°C を超えるオーステナイト系ステンレス鋼）

$F = \text{MIN}[0.7S_u, S_y]$ （上記示すもの以外）

(注 2) 各評価位置の解析結果は、解析基準値に対しての裕度が最も小さい値を記載。

7.3.5 衝突部位近傍の評価

(1) 検査架台への衝突

検査架台への衝突時には、外筒の衝突部近傍にせん断応力が発生することから、せん断により変形しないことを評価する。衝突部近傍に発生するせん断応力は、衝撃荷重を衝突部の断面積で除して算出する。衝突部近傍の応力解析結果を第7-16表に示す。発生するせん断応力は、基準を満足しており、安全機能への影響はない。

(2) 貯蔵架台への衝突、横倒し時の衝突、二次蓋の衝突及び緩衝体の衝突

貯蔵架台への衝突時、横倒し時の衝突時、二次蓋の衝突時及び緩衝体の衝突時には、衝突部近傍に圧縮応力が発生することから、圧縮により変形しないことを評価する。衝突部近傍に発生する圧縮応力は、衝撃荷重を衝突部の断面積で除して算出する。衝突部近傍の応力解析結果を第7-16表に示す。発生する圧縮応力は、基準を満足しており、安全機能への影響は生じない。

第 7-16 表 各想定事象時の衝突部位近傍の応力解析結果

項目	衝撃荷重 (N)	衝突部の 断面積 (mm ²)	衝突部に発 生する応力 (MPa)	解析 基準 (注 1)	解析 基準値 (MPa)
a. 検査架台への 衝突	3.893×10^6	1.970×10^5 (注 2)	20 (せん断)	$S_y / \sqrt{3}$	135
b. 貯蔵架台への 衝突	3.666×10^6	9.448×10^5 (注 3)	4 (圧縮)	S_y	183
d. 横倒し時の衝 突	1.281×10^6	4.522×10^4 (注 4)	29 (圧縮)	S_y	185
e. 二次蓋の衝突	3.940×10^5	7.556×10^5 (注 5)	1 (圧縮)	S_y	185
f. 緩衝体 (上部) の衝突	1.910×10^6	9.377×10^5 (注 6)	3 (圧縮)	S_y	185
f. 緩衝体 (下部) の衝突	1.615×10^6	9.448×10^5 (注 3)	2 (圧縮)	S_y	183

(注 1) S_y : 設計降伏点 (規格値)。検査架台への衝突における解析基準値は、せん断ひずみエネルギー説に基づき S_y の $1/\sqrt{3}$ とした。検査架台への衝突を除く衝突事象の解析基準は S_y とした。

(注 2) 外筒のせん断断面積

(注 3) 胴底部の圧縮断面積

(注 4) 胴上部の圧縮断面積

(注 5) 胴フランジ (二次蓋部) の圧縮断面積

(注 6) 胴フランジ (三次蓋部) の圧縮断面積

7.3.6 使用済燃料集合体の評価

7.2で抽出した想定事象が万一発生した場合でも、使用済燃料集合体に発生する応力は弾性範囲内であり、使用済燃料集合体に過度な変形が生じず、燃料ペレットが燃料被覆管から脱落しないことから、使用済燃料集合体の再取出性に問題ないことを評価する。

第7-17表に示すとおり、核燃料輸送物設計承認申請の0.3m落下（一般の試験条件）において使用済燃料集合体に発生する応力は弾性範囲内である。想定事象における衝撃加速度は、0.3m落下における衝撃加速度以下であるため、想定事象において使用済燃料集合体に発生する応力も弾性範囲内となる。なお、使用済燃料集合体は乾式キャスク内部にあつて結合されていないため、a.、b.及びd.の事象では使用済燃料集合体に発生する加速度は乾式キャスクの衝突等の事象によって発生する方向の加速度と同等である。一方、e.及びf.の事象では、衝突時に内部収納物の慣性力が作用しないため、使用済燃料集合体に発生する衝撃加速度は自重のみとなる。

したがって、各想定事象において、使用済燃料集合体に過度な変形が生じず、燃料ペレットが燃料被覆管から脱落しないことから、使用済燃料集合体の再取出性に問題はない。

第 7-17 表 使用済燃料集合体の応力評価結果

項目	想定事象 における 衝撃加速度	0.3m 落下 における 衝撃加速度	0.3m 落下 における 発生応力	解析 基準	解析基準値 (MPa)
a. 検査架台への衝突	3.3g ^(注 1)	21.4g (水平落下)	141 MPa	Sy	589 MPa ¹⁾ (ジルコニウム、 215°C)
b. 貯蔵架台への衝突	3.1g ^(注 1)	27.5g (頭部垂直 落下)	105 MPa		
d. 横倒し時の衝突	1.1g ^(注 1)	21.4g (水平落下)	141 MPa		
e. 二次蓋の衝突	1g ^(注 2)	27.5g (頭部垂直 落下)	105 MPa		
f. 緩衝体(上部)の衝突	1g ^(注 2)	21.4g (水平落下)	141 MPa		
f. 緩衝体(下部)の衝突	1g ^(注 2)	21.4g (水平落下)	141 MPa		

(注 1) 第 7-8 表に記載する衝撃荷重と第 7-6 表に記載する質量から、
以下式により算出。

$$\text{衝撃加速度 (g)} = \frac{\text{衝撃荷重 (N)}}{\text{質量 (kg)} \times g (9.80665 \text{m/s}^2)}$$

(注 2) 二次蓋の衝突時及び緩衝体の衝突時には、内部収納物の慣性力が作用しないため、使用済燃料集合体に発生する衝撃加速度は自重とする。

7.3.7 各想定事象時の衝撃荷重のばね定数の算出方法について

(1) 検査架台への衝突

検査架台への衝突時には、第 7-23 図に示す 2 枚の足場板の梁が圧縮変形するとして検査架台衝突部のばね剛性 K_1 は次式²⁾より算出する。

$$K_1 = E_1 A_1 / L_1 \dots \dots \dots (1)$$

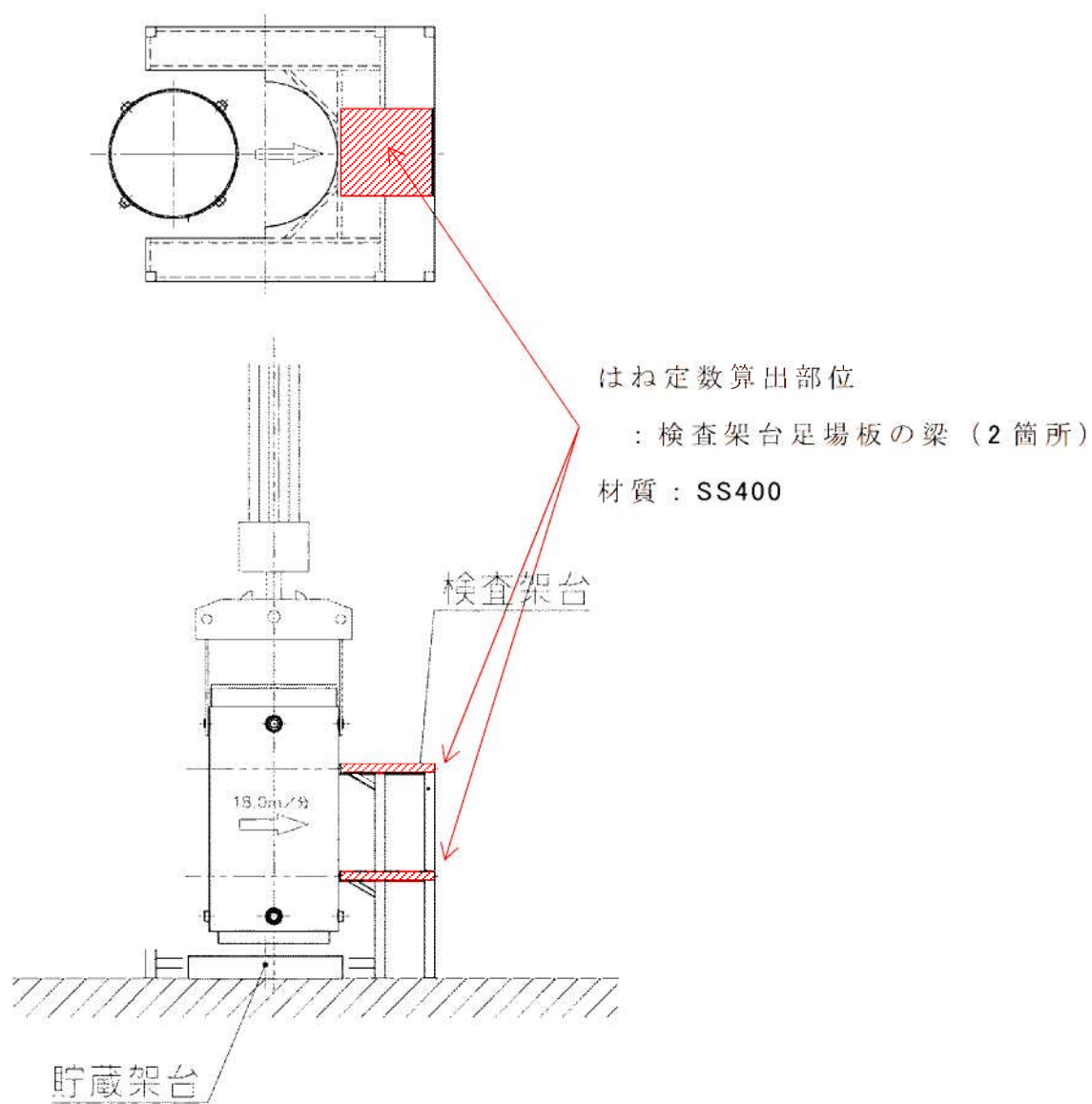
$$= 1.410 \times 10^6 \text{ N/mm} \quad (1.410 \times 10^9 \text{ N/m})$$

ここで、

E_1 : 梁の縦弾性係数 = 202000 MPa

A_1 : 梁の断面積 = 11400 mm² (※1)

L_1 : 梁の全長 = 1640 mm



第 7-23 図 検査架台への衝突時のばね定数の算出モデル

(※1) 梁の断面積(A₁) 設計根拠

衝突範囲内にある Lアングルの断面積と個数より算出する。

Lアングル(100×100) 断面積

$$A = 19\text{cm}^2$$

[JIS G 3192]

衝突範囲内の Lアングル個数

$$N = 3 \text{ 個/段} \times 2 \text{ 段} = 6 \text{ 個}$$

[下図参照]

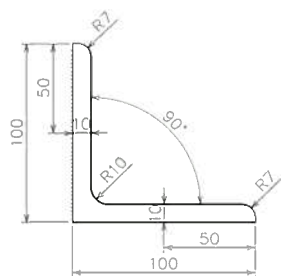
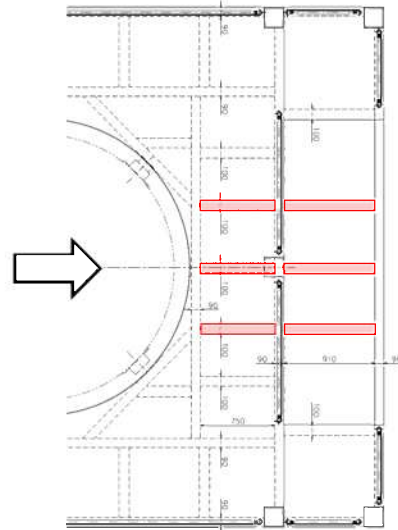
梁の断面積

$$A_1 = A \times N$$

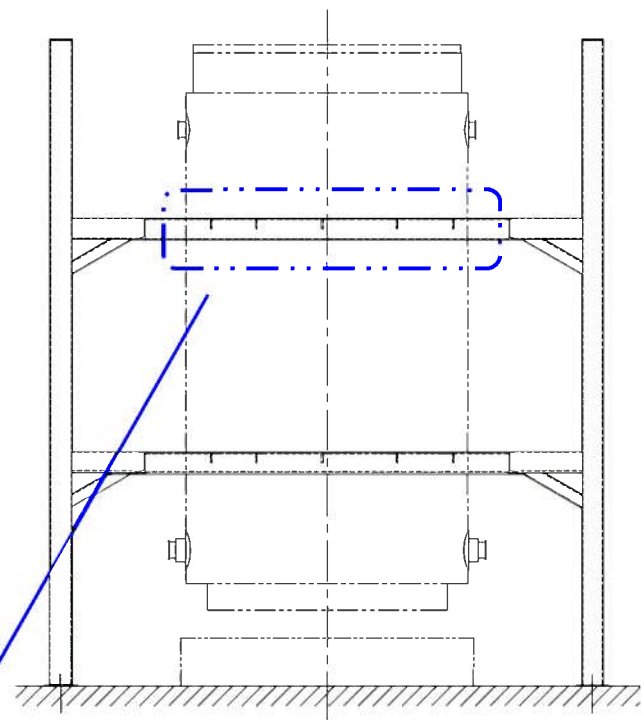
$$= 19 \times 6$$

$$= 114 \text{ cm}^2$$

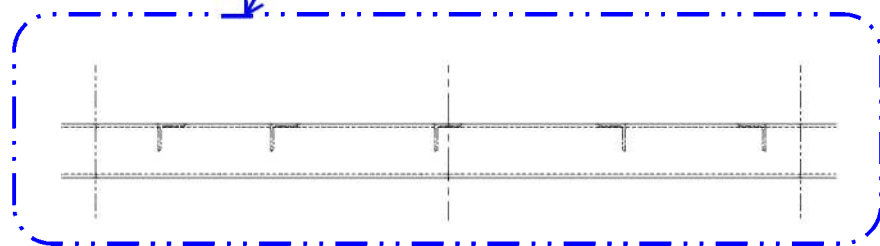
$$= 11,400 \text{ mm}^2$$



Lアングル詳細寸法



矢視

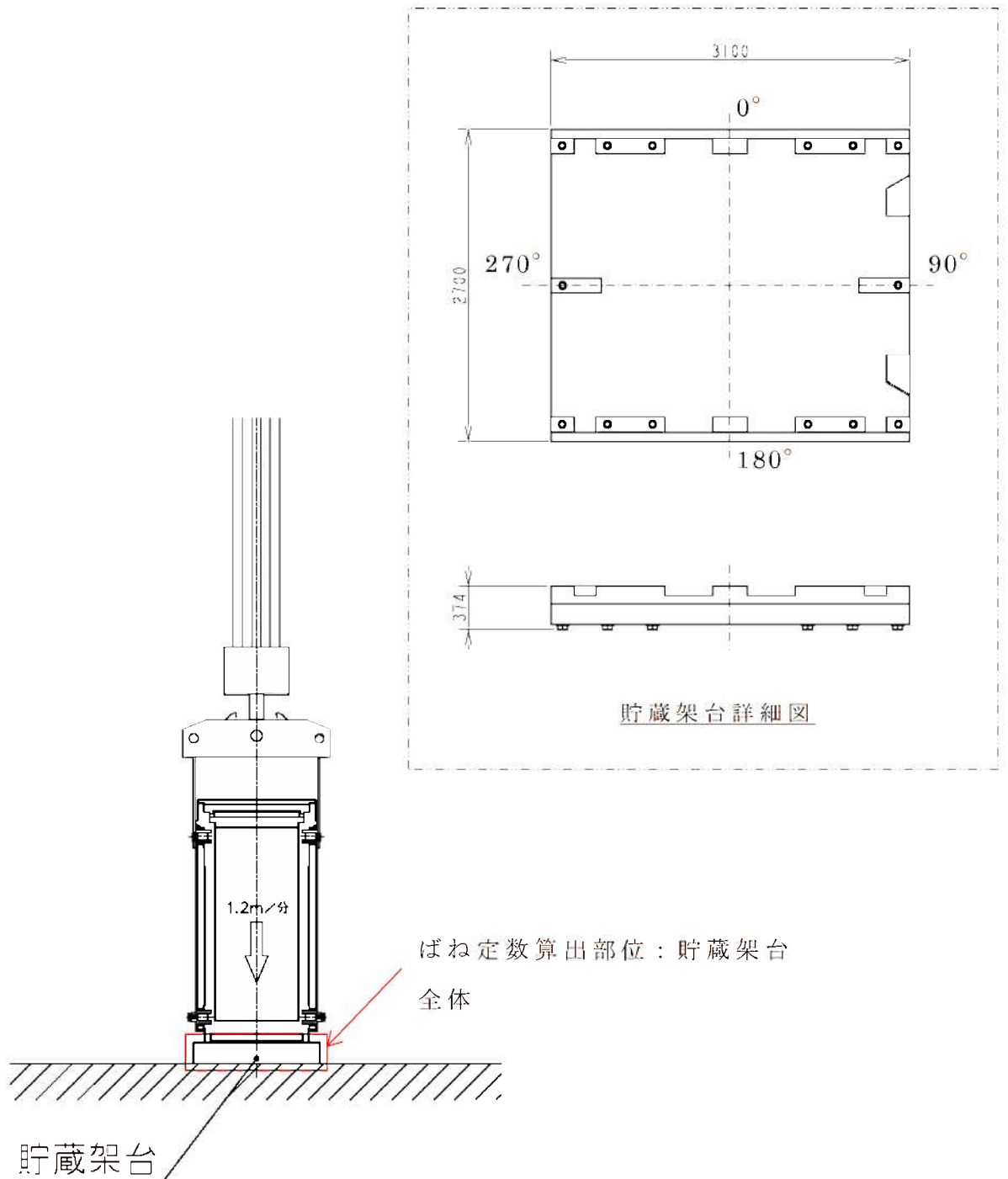


詳細図

(2) 貯蔵架台への衝突

貯蔵架台への衝突時には、第 7-24 図に示す貯蔵架台が圧縮及び曲げ変形するとして貯蔵架台のばね剛性 K_2 は FEM により貯蔵架台形状をモデル化し算出する。

$$K_2 = 1.016 \times 10^{11} \text{ N/m} \dots \dots \dots (2) \quad 0^\circ$$



第 7-24 図 貯蔵架台への衝突時のばね定数の算出モデル

(3) 横倒し時の衝突

横倒し時の衝突時には、第 7-25 図に示すたて起こし架台の胴受け部が圧縮変形するとして輸送架台衝突部のばね剛性 K_3 は次式²⁾より算出する。

$$K_3 = E_3 A_3 / L_3 \dots \dots \dots (3)$$

$$= 3.620 \times 10^7 \text{ N/mm} \quad (3.620 \times 10^{10} \text{ N/m})$$

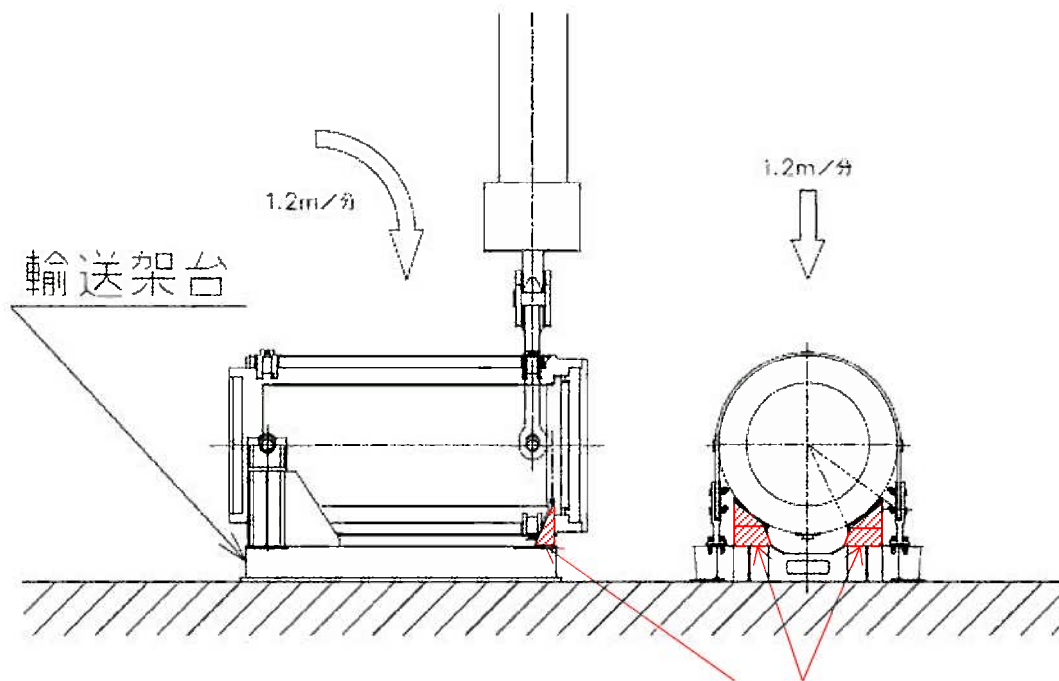
ここで、

E_3 : たて起こし架台の縦弾性係数 = 202000 MPa

A_3 : たて起こし架台の胴受け部の断面積 = 56924 mm²

(※2)

L_3 : たて起こし架台の胴受け部の代表全長 = 318 mm



ばね定数算出部位

: たて起こし架台の胴受け部

材質: SHY685

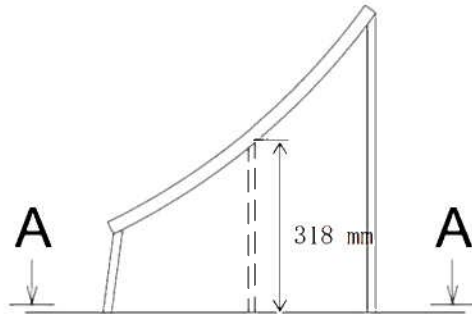
第 7-25 図 横倒し時の衝突時のばね定数の算出モデル

(※2) たて起こし架台の胴受け部の断面積(A₃) 設計根拠

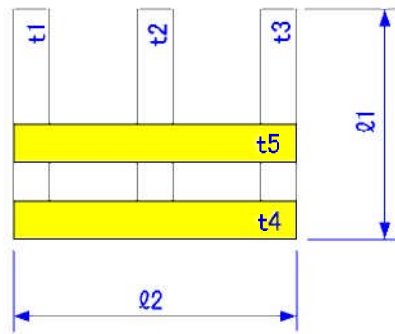
右の簡易断面図より胴受け部の断面積を算出する。

$$\begin{aligned}
 A_3 &= [\{ (t_1+t_2+t_3) \times (\ell_1 - (t_4+t_5)) \} + \{ (t_4+t_5) \times \ell_2 \}] \times 2 \\
 &= [\{ (12+12+12) \times (285 - (19+19)) \} + \{ (19+19) \times 515 \}] \times 2 \\
 &= 28,462 \times 2 \\
 &= 56,924 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

- t1=12
- t2=12
- t3=12
- t4=19
- t5=19
- ℓ1=285
- ℓ2=515



たて起こし架台胴受け部正面図

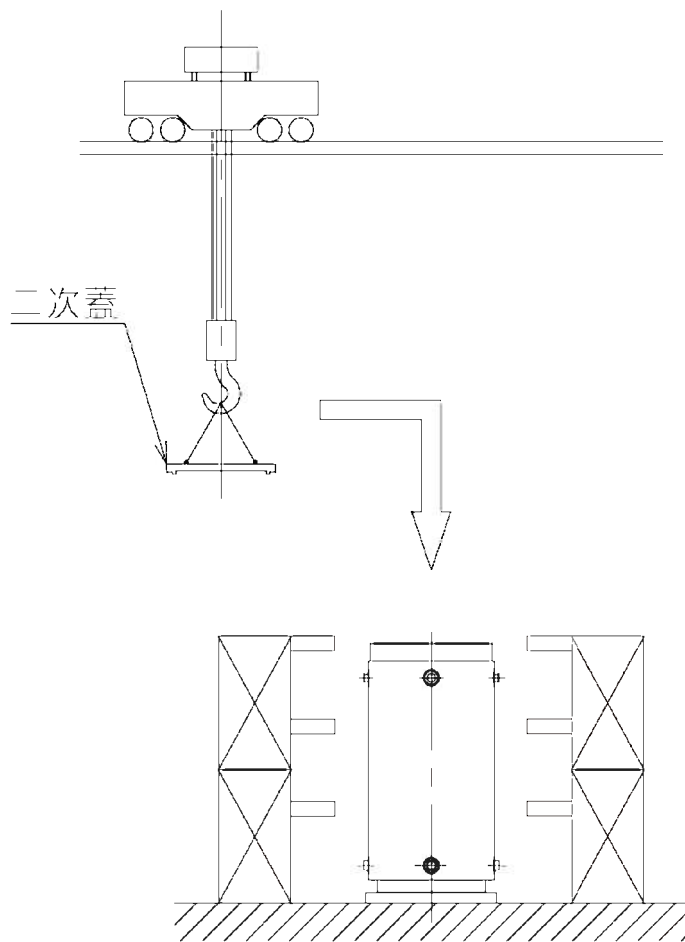


簡易断面図 (AA 断面)

(4) 二次蓋の衝突

二次蓋の衝突時には、第 7-26 図に示すように乾式キャスク底面を基準として、乾式キャスク全体が圧縮変形するとして FEM により乾式キャスク形状をモデル化し、二次蓋の衝突時のばね剛性 K_4 を算出する。

$$K_4 = 6.692 \times 10^{10} \text{ N/m} \dots\dots\dots (4)$$



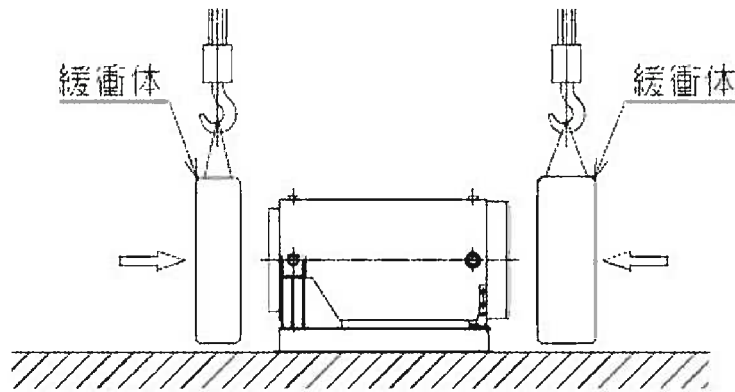
第 7-26 図 二次蓋衝突時のばね定数の算出モデル

(5) 緩衝体の衝突

上部緩衝体及び下部緩衝体の衝突時には、第 7-27 図に示すように下部トラニオンを支点として、下部トラニオン接続部が曲げ変形及び乾式キャスク全体が圧縮変形するとして FEM により下部トラニオンを含む乾式キャスク形状をモデル化し、上部緩衝体及び下部緩衝体の衝突時のばね剛性 K_5 及び K_6 をそれぞれ算出する。

$$K_5 = 4.646 \times 10^9 \text{ N/m} \dots\dots\dots (5)$$

$$K_6 = 4.643 \times 10^9 \text{ N/m} \dots\dots\dots (6)$$



第 7-27 図 緩衝体衝突時のばね定数の算出モデル

7.3.8 まとめ

以上のことから、想定事象について評価した結果、評価対象部位に発生する応力は、解析基準値より十分低く、安全機能を維持できる。したがって、一次蓋及び二次蓋が弾性範囲内にとどまること、使用済燃料集合体に過度な変形が生じず、燃料ペレットが燃料被覆管から脱落しないことから、使用済燃料の再取出性に問題はない。

7.4 参考資料

- 1) “Proving Test on the Reliability of PWR 15×15 Fuel Assemblies Through Three Reactor Cycles in Japan”、Proceeding of the International Topical Meeting on LWR Fuel Performance April 17-20、(1988).
- 2) (株)培風館、材料力学の基礎、(1991).

8. 使用済燃料乾式貯蔵容器蓋間圧力等の監視について

8.1 設置許可基準規則要求事項および原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド確認事項

(1) 設置許可基準規則要求事項

使用済燃料乾式貯蔵容器に関する要求事項は、以下のとおりである。

① 設置許可基準規則第16条第4項第三号

- ・使用済燃料が内包する放射性物質を適切に閉じ込めることができ、かつ、その機能を適切に監視することができるものとする。

② 設置許可基準規則解釈別記4第16条第3項

- ・第16条第4項第2号に規定する「崩壊熱を適切に除去することができる」とは、第5項に規定するもののほか、貯蔵事業許可基準規則解釈第6条並びに第17条第1項第2号（貯蔵建屋を設置する場合に限る。）及び第3号に規定する金属キャスクの設計に関する基準を満たすことをいう。
- ・貯蔵事業許可基準規則解釈第17条第1項第2号
 - ・貯蔵建屋内の雰囲気温度が異常に上昇していないことを監視できること。

(2) 原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド確認事項

使用済燃料乾式貯蔵容器に関する要求事項は、以下のとおりである。

「2. 安全機能の確保 2.4 閉じ込め機能」には以下のように記載されている。

【審査における確認事項】

『

- (1) 設計上想定される状態において、兼用キャスクが内包する放射性物質を適切に閉じ込めることができること。

』

【確認内容】

『

- (1) 長期間にわたって閉じ込め機能を維持する観点から、耐熱性、耐食性等を有し耐久性の高い金属ガスケット等のシールを採用するとともに、蓋部を一次蓋と二次蓋の二重とし、一次蓋と二次蓋との間の圧力（以下「蓋間圧力」という。）を監視することにより、蓋部が有する閉じ込め機能を監視できること。

』

また、「4. 自然現象等に対する兼用キャスクの設計 4.4 監視機能」には以下のように記載されている。

【審査における確認事項】

『

蓋間圧力及び兼用キャスク表面温度について、適切な頻度での監視をすること。

』

【確認内容】

『

- (1) 蓋間圧力を適切な頻度で監視すること。ここで、適切な頻度とは、閉じ込め機能が低下しても、FP ガス等の放出に至る前に、密封シール部の異常を検知できる頻度をいう。頻度の設定に当たっては、設計貯蔵期間中の兼用キャスク発熱量

- の低下、周囲環境の温度変化及び蓋間圧力の変化を考慮する。
- (2) 兼用キャスク表面温度を適切な頻度で監視すること。ここで、適切な頻度とは、除熱機能が低下しても、兼用キャスクや燃料被覆管が健全であるうちに異常を検知できる頻度をいう。

』

(3) 要求事項および確認事項の整理

監視項目	基準規則等における要求事項	審査ガイドにおける確認事項	審査ガイドにおける確認内容
蓋間圧力	<ul style="list-style-type: none"> 使用済燃料が内包する放射性物質を適切に閉じ込めることができ、かつ、その機能を適切に監視すること 	<ul style="list-style-type: none"> 設計上想定される状態において、兼用キヤスクが内包する放射性物質を適切に閉じ込めることができること。 蓋間圧力及び兼用キヤスク表面温度について、適切な頻度での監視をすること。 	<ul style="list-style-type: none"> 長期間にわたって閉じ込め機能を維持する観点から、耐熱性、耐食性等を有し耐久性の高い金属ガスケット等のシールを採用するとともに、蓋部を一次蓋と二次蓋の二重とし、一次蓋と二次蓋との間の圧力(以下「蓋間圧力」という。)を監視することにより、蓋部が有する閉じ込め機能を監視すること。 蓋間圧力を適切な頻度で監視すること。ここで、適切な頻度とは、閉じ込め機能が低下しても、FP ガス等の放出に至る前に、密封シール部の異常を検知できる頻度をいう。頻度の設定に当たっては、設計貯蔵期間中の兼用キヤスク発熱量の低下、周囲環境の温度変化及び蓋間圧力の変化を考慮する。
兼用キヤスク表面温度	-	<ul style="list-style-type: none"> 蓋間圧力及び兼用キヤスク表面温度について、適切な頻度での監視をすること。 	<ul style="list-style-type: none"> 兼用キヤスク表面温度を適切な頻度で監視すること。ここで、適切な頻度とは、除熱機能が低下しても、兼用キヤスクや燃料被覆管が健全であるうちに異常を検知できる頻度をいう。
貯蔵建屋内の雰囲気温度	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵建屋内の雰囲気温度が異常に上昇していないことを監視すること。 	-	-

8.2 適合性について

(1) 審査ガイド

審査ガイドでは、設置（変更）許可に係る審査において、兼用キャスクの有する4つの安全機能（臨界防止機能、遮蔽機能、除熱機能及び閉じ込め機能）に係る設計の基本方針の妥当性を確認することが定められており、乾式キャスクの監視機能については、以下のとおり審査ガイドの確認内容に適合している。

[確認内容]

- (1) 蓋間圧力を適切な頻度で監視すること。ここで、適切な頻度とは、閉じ込め機能が低下しても、FP ガス等の放出に至る前に、密封シール部の異常を検知できる頻度をいう。頻度の設定に当たっては、設計貯蔵期間中の兼用キャスク発熱量の低下、周囲環境の温度変化及び蓋間圧力の変化を考慮する。
- (2) 兼用キャスク表面温度を適切な頻度で監視すること。ここで、適切な頻度とは、除熱機能が低下しても、兼用キャスクや燃料被覆管が健全であるうちに異常を検知できる頻度をいう。

玄海原子力発電所の使用済燃料乾式貯蔵施設に貯蔵する乾式キャスク（タイプ1：MSF-21P 及びタイプ2：MSF-24P）の一次蓋および二次蓋間の圧力（以下、「蓋間圧力」という。）および乾式キャスク表面温度について、適切な頻度で監視する。詳細は、8.2.1 および 8.2.2 参照。

(2) 設置許可基準規則等

設置許可基準規則解釈別記4第16条第3項で規定される貯蔵建屋内の雰囲気温度の監視については、以下のとおり要求事項に適合している。

[要求事項]

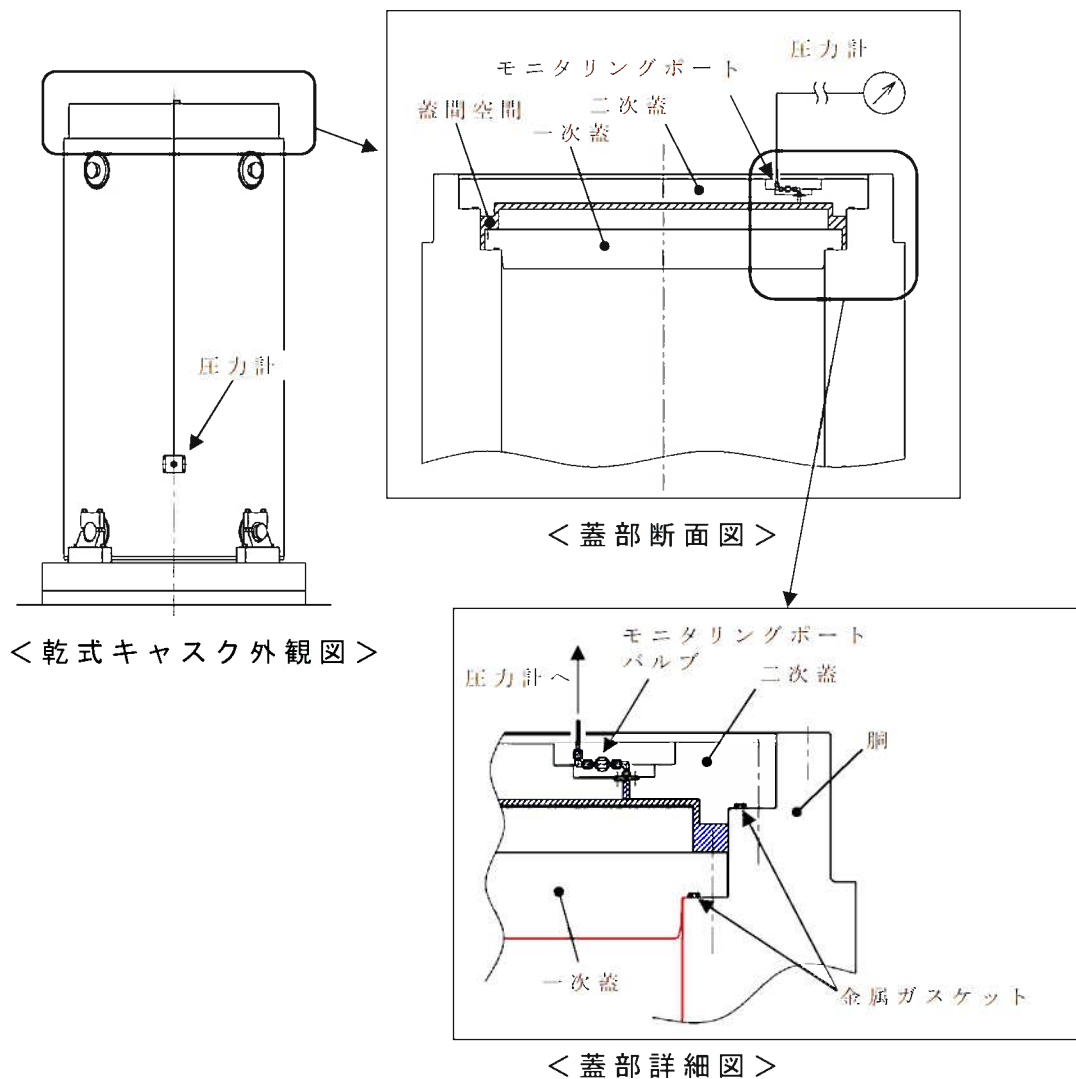
貯蔵建屋内の雰囲気温度が異常に上昇していないことを監視できること。

貯蔵建屋内に温度計を設置し、雰囲気温度を監視することで、雰囲気温度が異常に上昇していないことを監視できる設計とする。詳細は、8.2.3 参照。

8.2.1 乾式キャスク蓋間圧力

(1) 監視方法

乾式キャスクが内包する放射性物質を適切に閉じ込めることができていることを監視するために、乾式キャスクの蓋間圧力を監視する。蓋間圧力は、第 8-1 図に示すとおり、乾式キャスクの二次蓋に貫通部を設け、蓋間空間の圧力を圧力計により監視できる設計とする。



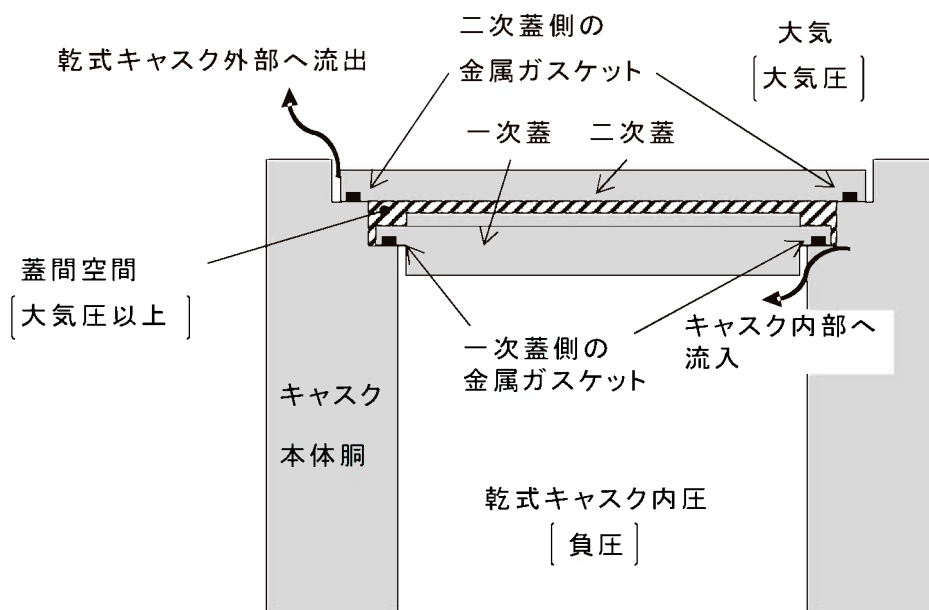
第 8-1 図. 乾式キャスク蓋間圧力の監視方法 (イメージ図)

ここで、第 8-2 図に示すように、一次蓋側の金属ガスケットから漏えいが生じた場合は、蓋間のヘリウムガスが乾式キャスク内部に流入し、蓋間圧力は低下するとともに、乾式キャスク内部の圧力（乾式キャスク内圧）は次第に上昇し、大気圧以下で均圧する。

また、二次蓋側の金属ガスケットから漏えいが生じた場合は、蓋間のヘリウムガスが外部へ流出するとともに、蓋間圧力は次第に低下し、大気圧となる。

よって、一次蓋側、二次蓋側の金属ガスケットからの漏えいによらず、蓋間圧力が大気圧以上の間は、蓋間空間からヘリウムガスがアウトリークする。

以上より、乾式キャスクの蓋間圧力が大気圧以上であることを監視することで、乾式キャスクが内包する放射性物質を適切に閉じ込めることができていることを監視できる。



第 8-2 図 乾式キャスク蓋間空間からの漏えい（イメージ）

(2) 監視頻度

基準規則及び審査ガイドの要求事項を踏まえ、審査ガイドに定められている「密封シール部の異常」及び「適切な頻度」を

以下のとおり定義する。

- ・密封シール部の異常：乾式キャスクの蓋間圧力が管理値を下回ること。
- ・適切な頻度：閉じ込め機能が低下しても、FP ガス等の放出に至る前（蓋間圧力が大気圧になる前）に、密封シール部の異常（乾式キャスクの蓋間圧力が管理値を下回ること）を検知できる頻度のこと。

蓋間圧力の監視頻度を定めるため、次のとおり保守的に閉じ込め機能の低下を想定する。（蓋間圧力が最も早く低下する想定とする。）

- ① 金属ガスケットの漏えい率を基準漏えい率とする。
- ② 乾式キャスクの蓋間空間のヘリウムガスが、一次蓋側（キャスク内部）および二次蓋側（キャスク外部）の二方向から漏えいする。
- ③ 想定される全ての発熱量条件での圧力変動幅を包絡するよう、蓋間圧力は崩壊熱量を考慮する場合*と崩壊熱量を考慮しない場合（崩壊熱量 0 kW の場合）を想定する。
- ④ 貯蔵開始後は、周囲環境温度が $-6\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ の範囲で変動すると想定する。
- ⑤ 圧力計の計器誤差を $\pm 1.6\%$ とする。

*：MSF-24P 型キャスクの収納制限最大の発熱量となる場合

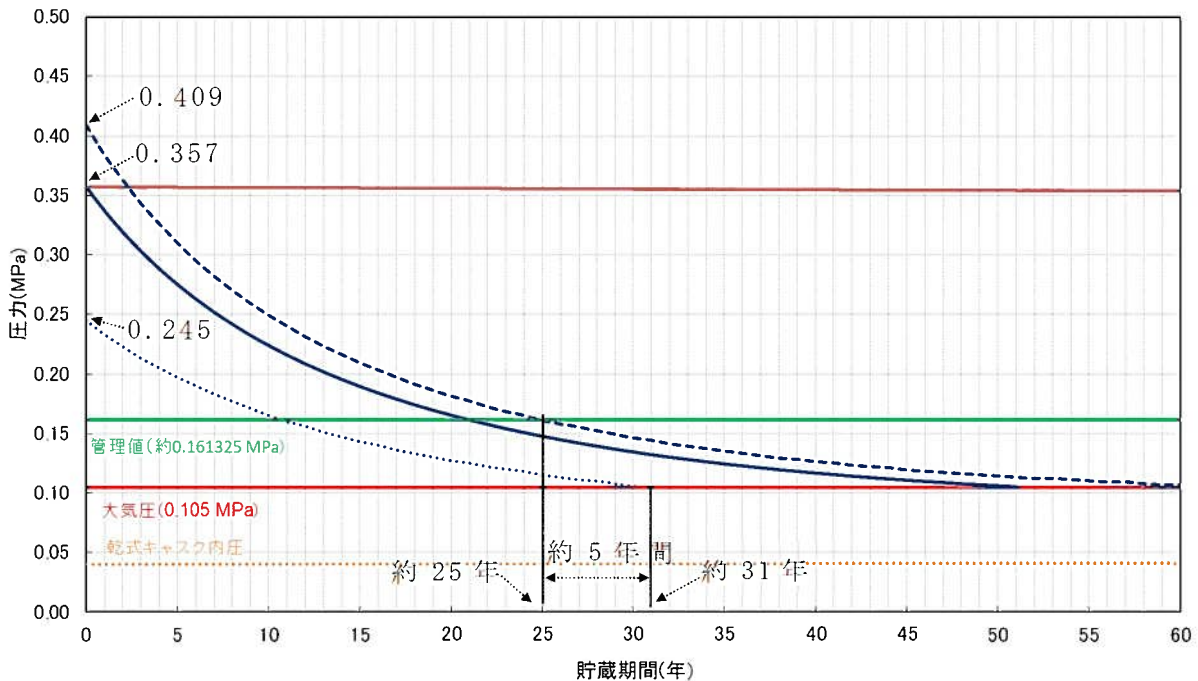
上記想定での設計貯蔵期間（60 年）中の蓋間圧力の経時変化を第 8-3 図に示す。

ここで、以下の理由から設計貯蔵期間中において、金属ガスケットの漏えい率は、基準漏えい率を上回ることはない。

- ・乾式キャスクは、設計貯蔵期間中（60 年間）の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食等の経年変化に対して必要な耐食性のある材料を選定し、その必要とされる強度及び

性能を維持するため、乾式キャスクの閉じ込め機能を担保している金属ガスケットの漏えい率に影響を与えない。

- ・ 乾式キャスクは輸送時の落下事象に耐える堅牢性を有しており、設計貯蔵期間中に想定される基準地震動 S_s に対しても安全機能を維持できることから、乾式キャスクの閉じ込め機能を担保している金属ガスケットの漏えい率に影響を与えない。
- ・ 乾式キャスクを頑健な建屋内に貯蔵し、外郭防護することで、貯蔵中に想定される外部事象に対しても乾式キャスクの閉じ込め機能を担保している金属ガスケットの漏えい率に影響を与えない。



凡例	圧力条件
— (Solid Blue)	蓋間圧力(周囲環境温度25°C、崩壊熱量考慮、計器誤差なし)
- - - (Dashed Blue)	蓋間圧力(周囲環境温度50°C、崩壊熱量考慮、計器誤差あり、ヘリウム充填時の温度影響考慮)
⋯ (Dotted Blue)	蓋間圧力(周囲環境温度-6°C、崩壊熱量考慮しない、計器誤差あり、ヘリウム充填時の温度影響考慮)
— (Solid Red)	金属ガスケットの設計漏えい率による現実的な評価(周囲環境温度25°C、崩壊熱量考慮、計器誤差なし)
— (Solid Green)	管理値(約0.161MPa)
— (Solid Red)	大気圧(0.105MPa)
⋯ (Dotted Orange)	乾式キャスク内圧(周囲環境温度-6°C、崩壊熱量考慮しない)

第 8-3 図 貯蔵期間中における蓋間圧力等の経時変化（二方向からの漏えいを考慮）

第8-3図に示すとおり、周囲環境の温度変化(−6℃～50℃)による圧力変動を考慮すると、周囲環境が−6℃で崩壊熱量を考慮しない場合(崩壊熱量0kWの場合)に最も蓋間圧力は低くなり、蓋間圧力は貯蔵開始から約31年後に大気圧(0.105MPa・abs)に到達する。ここで、蓋間圧力は、管理値(約0.161MPa・abs)を設定し、管理値に到達した場合は、ヘリウムガスを充填することとするため、管理値に最も遅く到達した場合(約25年)でも大気圧に至るまでは、約5年間時間がかかる。

よって、第8-4図に示すとおり、管理値(約0.161MPa・abs)を定め、1年に1回の圧力監視を行うことで、乾式キャスクが内包する放射性物質が乾式キャスク外部に放出される前に密封シール部の異常を検知することができる。これを踏まえて、3ヶ月に1回の頻度で圧力監視を行う。

(3) 監視頻度の妥当性

a. 実機大スケール落下試験からの考察

第8-3図のように、基準漏えい率で2方向の漏えいを想定した後、管理値到達後に急に基準漏えい率の22倍($2.49 \times 10^{-6} \times 22 = 5.60 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$)で2方向に漏えい量が増加する場合を想定すると、以下のとおりとなる。(第8-4図参照)

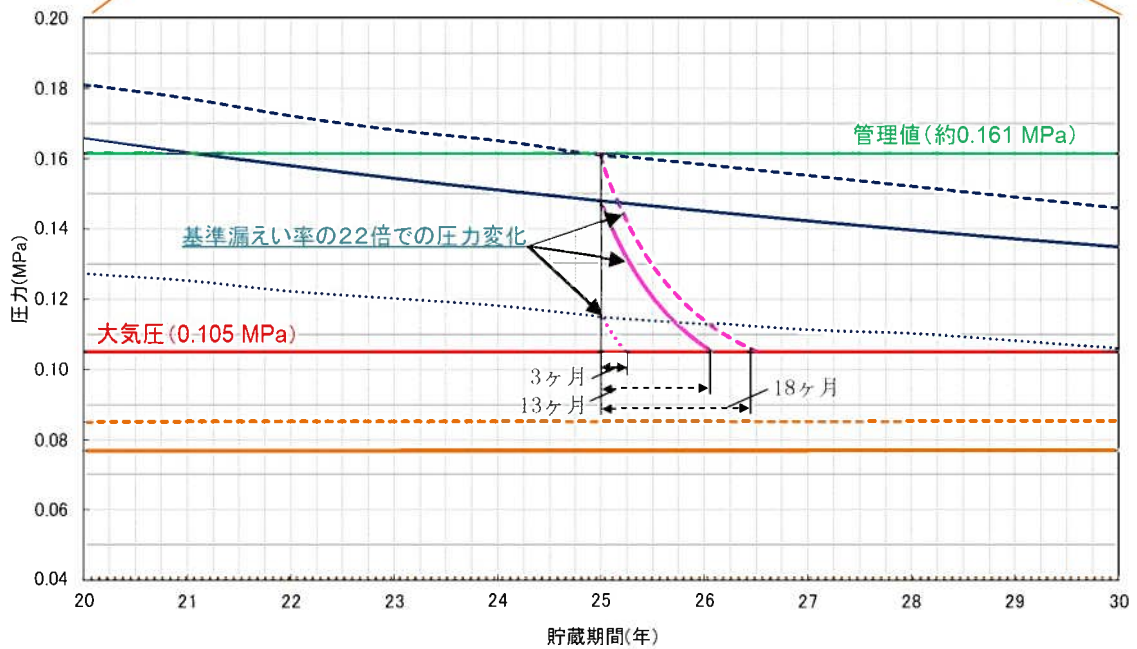
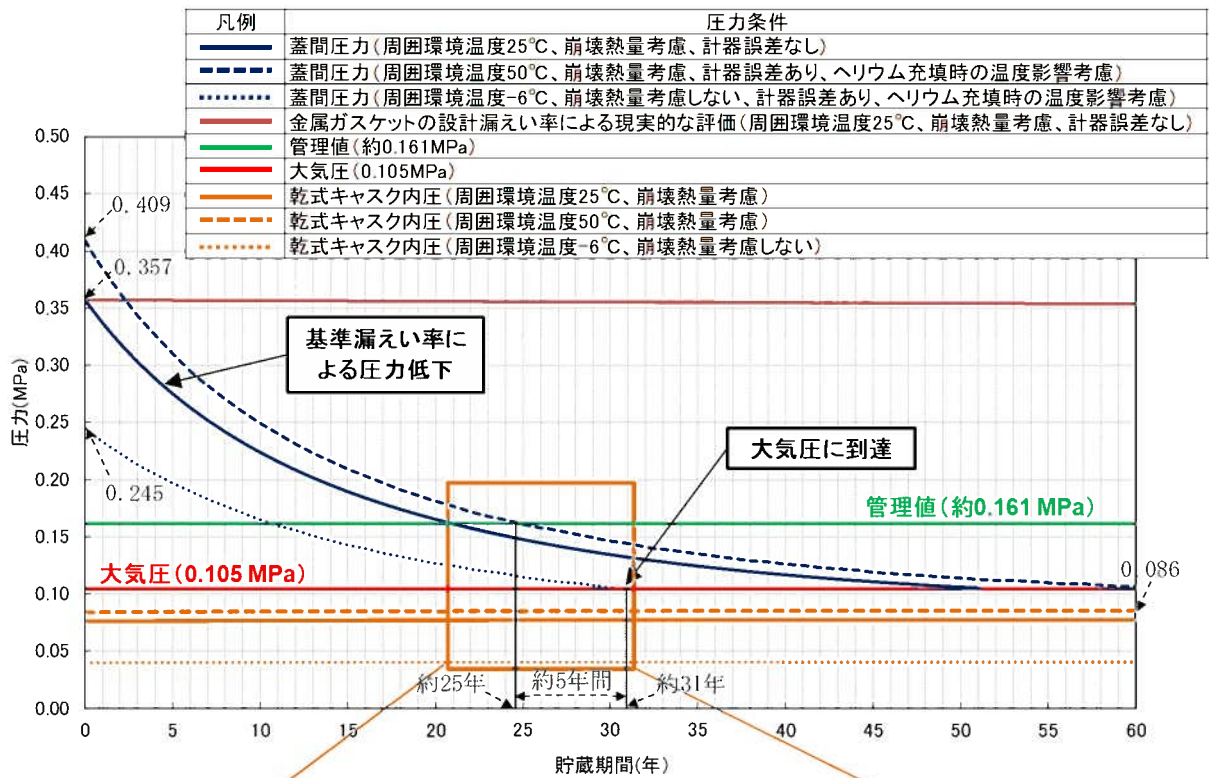
- ・周囲温度−6℃の場合：約22倍の漏洩率 3ヶ月で大気圧に到達
- ・周囲温度+25℃の場合：約22倍の漏洩率 13ヶ月で大気圧に到達
- ・周囲温度+50℃の場合：約22倍の漏洩率 18ヶ月で大気圧に到達

以下の実機大スケール落下試験を踏まえても、基準漏えい率の22倍($5.60 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$)に至ることはなく、3ヶ月に

1 回の監視頻度は妥当である。

- ・ 別途申請中の核燃料輸送物設計承認申請（以下、「設計承認」という）で説明している実規模相当での 9.3m 傾斜落下試験による衝撃力（約 $4.8 \times 10^7 \text{ N}$ ）を受けても、第 8-1 表及び第 8-2 表に示すとおり、試験後の漏えい率は最大でも $1.6 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$ である。

なお、9.3m 傾斜落下試験と同じ衝撃力（約 $4.8 \times 10^7 \text{ N}$ ）を、竜巻飛来物での衝突荷重に換算すると、鋼製材では 267 m/s の衝突速度となり、玄海原子力発電所で想定している設計竜巻（ 100 m/s ）を大きく超えるものであり、想定し得ない条件である。



第 8-4 図 基準漏えい率の 22 倍で漏えいした場合の蓋間圧力変化

第 8-1 表 落下試験ケース及び条件

試験 No.	試験条件	特記事項
Seq. 1	9.3m 傾斜落下 (180° 下向き)	<ul style="list-style-type: none"> 傾斜角度は、二次衝突速度が最大となる 10° に設定 0.3m 落下と 9m 落下の積み重ねと比較し、衝突速度の観点でより厳しい条件である 9.3m 落下を選定
Seq. 2	1m 水平貫通 (180° 下向き)	<ul style="list-style-type: none"> 事前評価により、二次蓋の蓋ずれが最も大きくなると考えられる貫通位置として、二次蓋側面中央を貫通位置に設定
Seq. 3	9.3m 頭部垂直落下	<ul style="list-style-type: none"> 0.3m 落下と 9m 落下の積み重ねと比較し、衝突速度の観点でより厳しい条件である 9.3m 落下を選定
Seq. 4	0.3m 傾斜落下 (270° 下向き)	<ul style="list-style-type: none"> 傾斜角度は、二次衝突速度が最大となる 10° に設定
	9m 傾斜落下 (270° 下向き)	<ul style="list-style-type: none"> 9.3m 落下との比較のために、0.3m 落下と 9m 落下を個別に実施

第 8-2 表 傾斜落下試験前後の漏えい率

試験 No.	部位	落下試験前 (Pa m ³ /s)	落下試験後 (Pa m ³ /s)
Seq. 4-1 (0.3m)	一次蓋	2.5×10^{-11}	1.0×10^{-11}
	二次蓋	1.5×10^{-11}	$< 1 \times 10^{-11}$
Seq. 4-2 (9m)	一次蓋	1.0×10^{-11}	$< 1 \times 10^{-11}$
	二次蓋	$< 1 \times 10^{-11}$	3.0×10^{-7}
Seq. 1 (9.3m)	一次蓋	$< 1 \times 10^{-11}$	$< 1 \times 10^{-11}$
	二次蓋	7.4×10^{-9}	<u>1.6×10^{-6}</u>

b. 海外事例及び文献を踏まえた考察

以下の海外事例及び文献を踏まえても、基準漏えい率の 22 倍に至ることはなく、3 ヶ月に 1 回の監視頻度は妥当である。

- ・サリー発電所における密封異常（アメリカ）¹⁾

乾式キャスク蓋部の防護カバーを貫通している電気ケーブル

ル周囲の金属シール部分から雨水が防護カバー内に入り、蓋部の金属ガスケット*の外側が腐食したことにより、金属ガスケットの外側がリークしたものの。なお、金属ガスケットの内側にはリークはなかった。

※：当該乾式キャスクは一次蓋のみで構成されており、圧力監視境界に接する金属ガスケット（金属ガスケットの二次側）は大気と接している。

一方、玄海原子力発電所では、乾式キャスクを乾式貯蔵建屋内に設置すること、また、圧力監視境界に接する金属ガスケット（一次蓋ガスケットの二次側と二次蓋ガスケットの一次側）は、ヘリウム雰囲気であるため、同様の事象は起こらない。また、2.6項に記載しているとおおり、大気と触れる二次蓋金属ガスケットの外側については、設計貯蔵期間中を通じて閉じ込め機能を維持できることを確認している。

・航空機エンジンの衝突における評価（電力中央研究所）²⁾

本評価では、玄海原子力発電所と同様に、二重の蓋をそれぞれ金属ガスケットでシールする構造の乾式キャスクに対して、航空機エンジンを衝突させた際の漏えい率を評価しているものである。

評価の結果、航空機衝突後の金属ガスケットからの漏えい率は、 $3.5 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$ であり、基準漏えい率の22倍 ($5.60 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$) には至っていない。

・乾式キャスク落下時の漏えい評価（電力中央研究所）³⁾

本評価では、玄海原子力発電所と同様に、二重の蓋をそれぞれ金属ガスケットでシールする構造の乾式キャスクをコンクリート床面に落下、及び下部トラニオンを中心に蓋部を回転衝突させた際の漏えい率を評価しているものである。

評価の結果、金属ガスケットからの漏えい率は、一次蓋で $3.9 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 、二次蓋で $8.4 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ であり、基準漏えい率 ($2.49 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$) には至っていない。

c. 敷地境界線量への影響

仮に乾式キャスクに装荷されている使用済燃料集合体燃料被覆管が設計承認の評価条件である 0.1%破損し、閉じ込め機能の喪失に伴い内包する放射性物質が瞬時に全量漏洩したと想定した場合においても、敷地境界線量への影響は事象当たり $1 \mu\text{Sv}$ 未満であり、審査ガイドに要求される通常貯蔵時の線量限度 ($1\text{mSv}/\text{y}$) に影響はない。

以上のことから、仮に、基準漏えい率の 22 倍の漏えいを 2 方向想定しても、3 ヶ月に 1 回の頻度で監視することで、蓋間圧力が大気圧に至る前に密封シール部の異常（乾式キャスクの蓋間圧力が管理値を下回ることを）を検知できるため、管理値を定めたうえで、3 ヶ月に 1 回の頻度で監視する（蓋間圧力を測定する）ことは適切であると考えられる。

8.2.2 乾式キャスク表面温度

(1) 監視方法

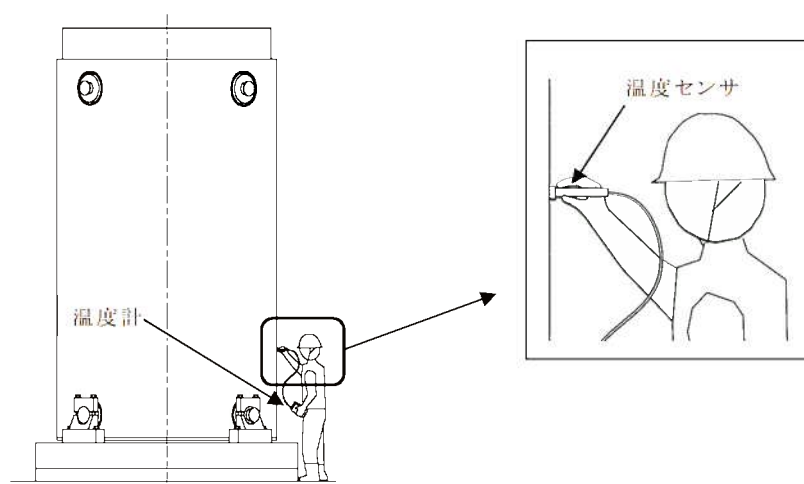
乾式キャスク内の使用済燃料の崩壊熱が適切に除去できていることを監視するために、乾式キャスクの表面温度を監視する。

乾式キャスクの表面温度は、第 8-5 図に示すとおり、温度センサを乾式キャスク外筒の外表面に接触させ、外筒外表面の温度を温度計により監視できる設計とする。

ここで、別添 4「使用済燃料乾式貯蔵容器の 4 つの安全機能について（除熱機能）」における乾式キャスクの除熱解析に示すとおり、外筒外表面の温度が設計温度*以下であれば、乾式キャスクおよび燃料被覆管が健全であることが確認できる。

以上より乾式キャスク表面温度が設計温度*以下であることを監視することで、乾式キャスクおよび燃料被覆管が健全であり、乾式キャスク内の使用済燃料の崩壊熱が適切に除去できていることが監視できる。

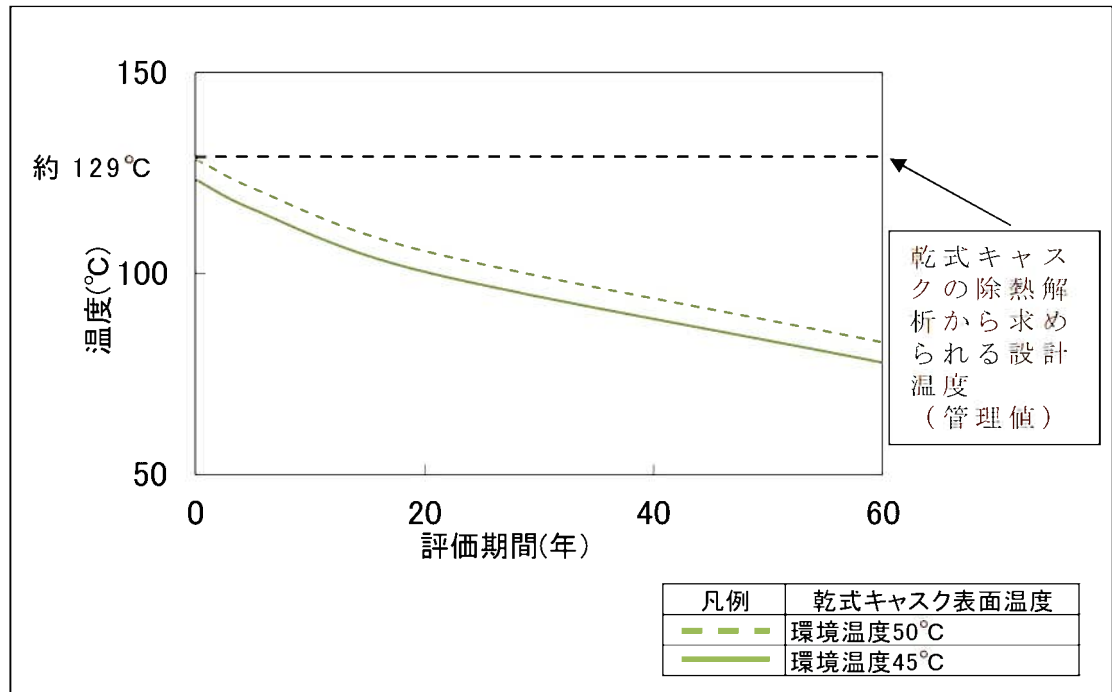
※MSF-21P 型：120℃、MSF-24P 型：129℃



第 8-5 図 乾式キャスク表面温度の監視方法（イメージ図）

(2) 監視頻度

乾式キャスク表面温度の監視頻度を定めるため、設計貯蔵期間（60年）中の表面温度の経時変化を第8-6図に示す。



第8-6図 乾式キャスク表面（外筒）温度の変化（MSF-24P型の例）

第8-6図に示すとおり、乾式キャスク表面温度は、貯蔵開始直後が最も高く、使用済燃料の発熱量低下とともに乾式キャスクの表面温度は低下する。

ここで、以下の理由から設計貯蔵期間中において、乾式キャスクの除熱機能は低下しない。

- ・ 乾式キャスクは、設計貯蔵期間中（60年間）の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食等の経年変化に対して必要な耐食性のある材料を選定し、その必要とされる強度及び性能を維持するため、乾式キャスクの除熱機能は低下しない。
- ・ 乾式キャスクは輸送時の落下事象に耐える堅牢性を有しており、貯蔵中に想定される基準地震動 S_s に対しても安全機

能を維持できることから、乾式キャスクの除熱機能は低下しない。

- ・ 乾式キャスクを頑健な建屋内に貯蔵することで、貯蔵中に想定される外部事象に対しても乾式キャスクの除熱機能は低下しない。なお、乾式貯蔵建屋の給排気口は、積雪等により閉塞しないことから、乾式貯蔵建屋の除熱機能は低下しない。

以上より、乾式キャスク内の使用済燃料の崩壊熱が適切に除去できていることは、設計貯蔵期間の 60 年間にわたり維持できるものの、蓋間圧力を 3 ヶ月に 1 回の頻度で監視することとしており、これに合わせて乾式キャスク表面温度を 3 ヶ月に 1 回の頻度で監視する。

8.2.3 貯蔵建屋内雰囲気温度

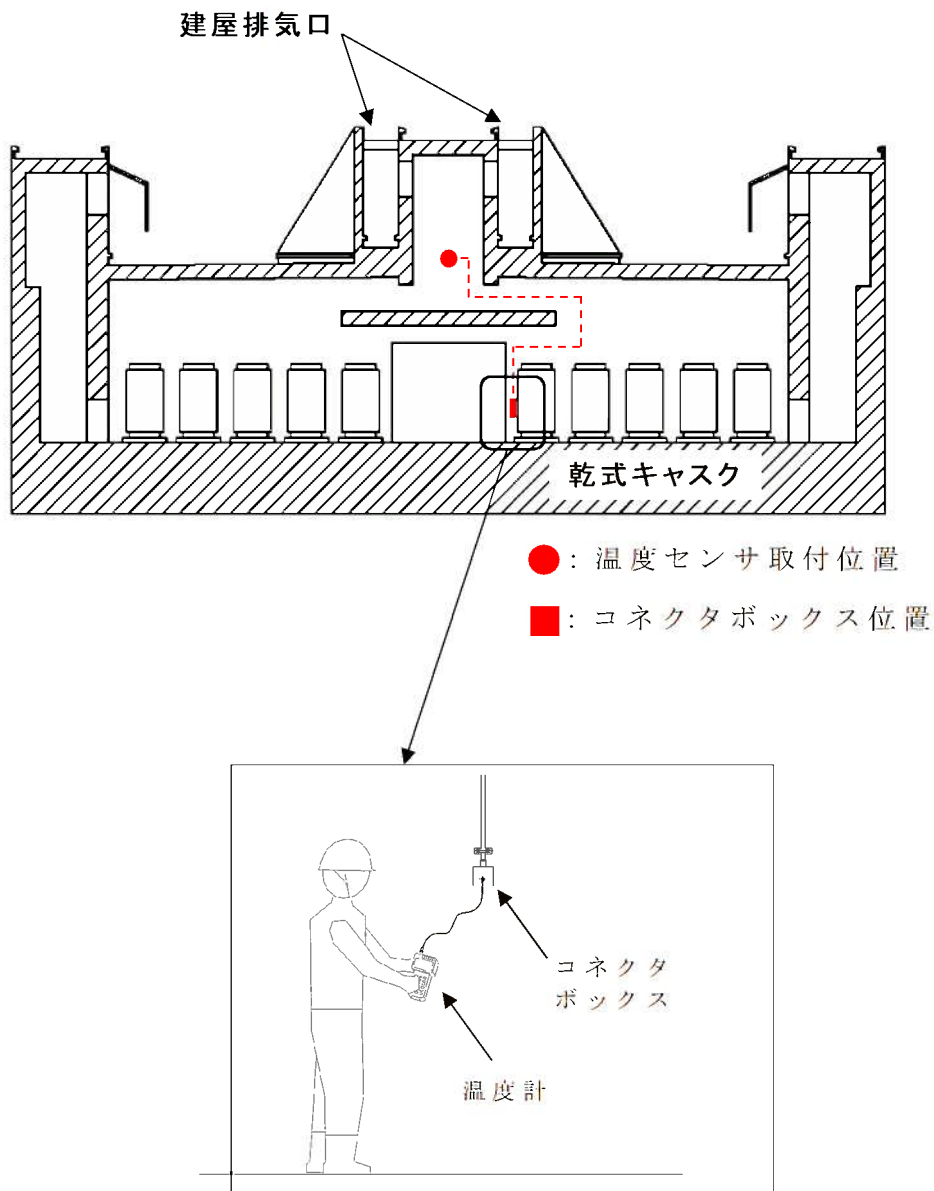
(1) 監視方法

貯蔵建屋内の雰囲気温度が異常に上昇していないことを監視するため、建屋内の雰囲気温度として、建屋排気口付近の温度（建屋排気温度）を監視する。

建屋排気温度は、第 8-7 図に示すとおり、温度センサを貯蔵エリアの 2 つの区画（乾式キャスク 20 基分）の排気口付近に 1 箇所ずつ（計 2 箇所）設置し温度を監視できる設計とする。

ここで、別添 4 「使用済燃料乾式貯蔵容器の 4 つの安全機能について（除熱機能）」における乾式キャスクの除熱解析において、貯蔵建屋内雰囲気温度を最高 50℃と設定し、評価しているため、貯蔵建屋内の雰囲気温度が 50℃以下であれば、乾式キャスクの健全性は担保される。

以上より、建屋排気温度が 50℃以下であることを監視することで、貯蔵建屋内の雰囲気温度が異常に上昇していないことを監視する。



第 8-7 図 貯蔵建屋内雰囲気温度の監視方法（イメージ図）

（ 2 ） 監視頻度

8.2.2 で示したように設計貯蔵期間の 60 年間に於いて、乾式キャスクの除熱機能は維持されることおよび別添 4 「使用済燃料乾式貯蔵容器の 4 つの安全機能について（除熱機能）」における乾式貯蔵建屋の除熱評価に示すように、乾式キャスク 40 基を貯蔵した場合においても、貯蔵建屋内雰囲気温度は 50℃ を超えないことから、設計貯蔵期間の 60 年間に於いて、貯蔵建屋内雰囲気温度は 50℃ を超えないものの、乾式キャス

ク表面温度の監視に合わせて、貯蔵建屋内雰囲気温度を3ヶ月に1回の頻度で監視する。

8.3 参考文献

- 1) 使用済燃料乾式貯蔵施設（中間貯蔵施設）に係る技術検討報告書、資源エネルギー庁、（2000）.
- 2) 航空機エンジンの水平衝突荷重に対する金属キャスクの密封性能評価、（一財）電力中央研究所、（2010）.
- 3) 金属キャスク落下時瞬時漏えい評価、（一財）電力中央研究所、（2006）.

9. 自然現象等に対する使用済燃料乾式貯蔵施設の設計方針

兼用キャスクの安全機能の喪失及びそれに続く公衆への放射線による影響を防止する観点から、使用済燃料乾式貯蔵施設の設備ごとの設計方針を示す。

9.1 使用済燃料乾式貯蔵施設の設備の分類及び担保すべき機能について

乾式貯蔵施設は、兼用キャスク及び周辺施設等から構成されるため、乾式貯蔵施設を構成する設備を以下の考えに基づき第9-1表のとおり分類するとともに、兼用キャスクの安全機能を維持するために、各設備が担保すべき機能をまとめる。

ここで、地盤及び周辺斜面については、兼用キャスクに影響を及ぼさないよう第3条2項、3項及び第4条第7項に基づき、安定な地盤及び周辺斜面に乾式貯蔵施設を設置する設計とする。詳細については、地盤に係る安全審査資料に示す。

兼用キャスクは、安全機能を維持するために、それ自体で以下の必要な機能を有しており、乾式キャスクが該当する。

- ・ 兼用キャスクを地震による損傷の防止（第4条第1項、第2項、第6項及び第7項）
- ・ 兼用キャスクを津波による損傷から防護するもの（第5条第2項）
- ・ 兼用キャスクを外部からの衝撃による損傷から防護するもの（第6条第4項及び第6項）
- ・ 兼用キャスクを火災による損傷の防止（第8条第1項）
- ・ 兼用キャスクを溢水による損傷の防止（第9条第1項）
- ・ 兼用キャスクの安全機能の維持（第16条第2項及び第4項）

周辺施設は、兼用キャスクである乾式キャスクの安全機能を維持するために必要な機能を有するものと考えられることから、

- ・ 兼用キャスクを地震による損傷から防止するもの : 貯蔵架台、
(兼用キャスクと相まって耐震性を確保するもの) 基礎ボルト、
(第4条第1項、第2項、第6項及び第7項) 基礎、
乾式貯蔵建屋^{*1}
- ・ 兼用キャスクを津波による損傷から防護するもの : 乾式貯蔵建屋
(第5条第2項)
- ・ 兼用キャスクを外部からの衝撃による損傷から防護するもの (第6条第1項及び第3項) : 乾式貯蔵建屋
- ・ 兼用キャスクを火災による損傷から防護するもの : 乾式貯蔵建屋
(第8条第1項)
- ・ 兼用キャスクの安全機能の維持を監視するもの : 乾式キャスク圧力計、
(第16条第4項) 乾式キャスク表面温度計、
乾式貯蔵建屋内雰囲気温度計
- ・ 兼用キャスクの遮蔽機能を補完するもの : 乾式貯蔵建屋
(第29条第1項、第30条第1項～第3項)
- ・ 兼用キャスクを通常に取扱うために必要なもの : 乾式貯蔵建屋天井クレーン、
(第16条第2項) 乾式キャスク搬送台車
が該当する。

※1 乾式キャスクに波及的影響を及ぼさないよう設計とするもの

ここで、周辺施設のうち、貯蔵架台、基礎ボルト及び基礎は、乾式キャスクの直接支持構造物及び間接支持構造物として、基準地震動 S_s による地震力に対して乾式キャスクの安全機能が損なわれるおそれがないように、特段の機能を有する設備^{*2}として設計する。また、乾式貯蔵建屋についても、基準地震動 S_s による地震力に対して、貯蔵中の乾式キャスクへ波及的影響を防止するように、特段の機能を有する設備^{*2}として設計する。

一方、周辺施設のうち、乾式キャスク蓋間圧力計、乾式キャスク表面温度計、乾式貯蔵建屋内雰囲気温度計、乾式貯蔵建屋天井クレーン及び乾式キャスク搬送台車は、乾式キャスクの安全機能を維持するために、特段の機能を要しないことから、一般産業施設や公衆施設と同等の設計とする。

なお、周辺施設へのユーティリティ設備は、周辺施設へ電気・圧縮空気等を供給する設備であり、乾式キャスクの安全機能を維持するために必要な設備ではない。また、点検用架台は、乾式キャスクの点検等に用いる足場であり、乾式キャスクの安全機能を維持するために必要な設備ではない。よって、周辺施設へのユーティリティ設備及び点検用架台は、周辺施設に該当しない。

※2 特段の機能を有する設備：乾式キャスクの安全機能を維持するために、一般産業施設や公衆施設以上の耐震性を有する設備

また、乾式キャスク及び乾式貯蔵建屋は、1、2、3、4号炉の使用済燃料を貯蔵した場合でも乾式キャスクの安全機能を損なわない設計とするとともに、安全施設（第12条第1、3、4、5、7項）に適合する設計とする。

さらに、乾式貯蔵建屋は、発電用原子炉施設であるため、発電用原子炉施設への人の不法な侵入等の防止（第7条）を講じ、安全避難通路等（第11条第1項）を設ける設計とする。

第9-1表 乾式貯蔵施設の設備の分類及び担保すべき機能

設備	名称	分類	特段の機能 (周辺施設)		耐震重要 度分類	地震による 損傷防止		津波に よる損 傷防止	外部からの衝撃による 損傷防止		火災に よる損 傷防止	溢水に よる損 傷防止	兼用キャスクの 安全機能維持及 び監視		遮蔽機能を補完		設計 基準 対象 施設	安全施設	備考		
			有無	機能		第4条			第5条 第2項	第6条			第16条 ^{※8}		第29条 第1項	第30条 第1項～ 第3項					
						第1項 第2項	第6項 第7項			第1項 第3項			第4項 第6項	第2項						第4項	
兼用キャスク	使用済燃料乾式貯蔵 容器 (乾式キャスク)	兼用 キャスク	-	-	S ^{※1}	○	○	○	-	○ ^{※9}	○	○	○	○	○	○	○	○	○	乾式キャスクは、1、2、 3、4号炉の使用済燃料を 貯蔵した場合でも乾式 キャスクの安全機能を 損なわない設計とする。	
兼用キャスク支持部 ・ 架台 ・ 基礎ボルト	・ 貯蔵架台 ^{注記} ・ 基礎ボルト	周辺施設	○	-	S ^{※1}	○ ^{※6}	○ ^{※6}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	PS-2	
基礎(兼用キャスクの間 接支持構造物)	基礎	周辺施設	○	-	- ^{※2}	○ ^{※6}	○ ^{※6}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
貯蔵建屋等 ・ 貯蔵建屋(遮蔽壁含 む)	使用済燃料乾式貯蔵 建屋 (遮蔽壁及び火災区 域・区画構造物含 む)	周辺施設	○	-	C ^{※3}	○	○	○	○	-	○	-	○ ^{※7}	○	○	○	○	○	○	○	・第7条及び第11条第1 項についても適合さ せる設計とする。 ・貯蔵建屋は、1、2、3、 4号炉の使用済燃料を 貯蔵した場合でも乾 式キャスクの除熱機 能を阻害しない設計 とする。
計装設備 ・ 兼用キャスク圧力計 ・ 兼用キャスク表面温度 計 ・ 建屋内雰囲気温度計	・ 乾式貯蔵容器蓋間 圧力計 ・ 乾式貯蔵容器表面 温度計 ・ 乾式貯蔵建屋内雰 囲気温度計	周辺施設	×	-	- ^{※4}	- ^{※4}	-	-	-	-	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	
クレーン類 ・ 天井クレーン ・ エアパレット	・ 乾式貯蔵建屋天井 クレーン ・ 乾式貯蔵容器搬送 台車	周辺施設	×	-	- ^{※4}	- ^{※4}	-	-	-	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	
周辺施設へのユーティリ ティ設備 ・ 電気供給設備 ・ 空気供給設備 ・ 換気空調設備	・ 乾式貯蔵建屋電源 設備 ・ 搬送台車用コンプ レッサ、空気供給 配管等 ・ 乾式貯蔵建屋給排 気ファン	- ^{※5}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
点検用架台 ・ 点検用歩廊 ・ 検査架台	・ 点検用歩廊 ・ 検査架台	- ^{※5}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

※1: 耐震重要度分類Sクラス施設として分類し、基準地震動Ssによる地震力に対して乾式キャスクの安全機能が損なわれるおそれがないように設計する。
 ※2: 耐震重要度分類Sクラス施設の間接支持構造物として分類し、基準地震動Ssによる地震力に対して乾式キャスクの支持機能を維持できる設計とする。
 ※3: 耐震重要度分類Cクラス施設に分類し、当該クラスに応じた地震力に対しておおむね弾性範囲に留まる設計とする。(但し、遮蔽機能を有する部位に限る。
 当該部位以外については、耐震重要度分類Cクラス施設と同様の設計とする。)また、乾式キャスクに波及的影響を及ぼさない設計とする。
 ※4: 耐震重要度分類Cクラス施設と同様の設計とする。
 ※5: 乾式キャスクの安全機能を維持するために必要な機能を有していないもの。(乾式キャスクに直接関わらないもの)
 ※6: 乾式キャスクに貯蔵架台、基礎ボルト及び基礎を含めて適合性を確認する。
 ※7: 乾式貯蔵施設は、十分余裕を持たせた使用済燃料貯蔵容量を有する設計とする。
 ※8: 設計上想定される状態における兼用キャスクの安全機能維持、監視機能、材料、構造健全性及び設計貯蔵期間については、2章設計方針に記載する。
 ※9: 乾式貯蔵建屋に内包することにより、乾式キャスクが安全機能を損なわない設計とする。
 注記: 乾式キャスクと貯蔵架台を固定する固定装置を含む。

上表以外の設備として、屋内消火栓等については、プラントと同様の設計とする。火災感知器は、消防法に基づき設計する。

9.2 兼用キャスク及び周辺施設の設計方針

兼用キャスク及び周辺施設について、乾式キャスクの安全機能を維持するために、各設備が担保すべき機能を確保できるよう、第9-1表に示す設置許可基準規則の条項の要求を満足するように設計する。具体的な設計方針を以下に示す。

9.2.1 兼用キャスクの設計方針

兼用キャスクの設計方針を次の項目ごとに示す。

9.2.1.1 地震

兼用キャスクである乾式キャスクは、第4条第6項に規定する地震力^{*}に対して安全機能が損なわれない設計とする。

具体的には、乾式キャスク（支持部及び基礎を含む）は、耐震重要度分類をSクラスとして分類し、基準地震動 S_s による地震力に対して乾式キャスクの安全機能が損なわれるおそれがないように設計する。詳細については、第4条に係る安全審査資料に示す。

※ 基準地震動による地震力

9.2.1.2 津波

兼用キャスクである乾式キャスクは、津波による作用力^{*}に対して安全機能が損なわれない設計とする。

具体的には、乾式キャスクを津波防護対象設備として分類し、乾式キャスクを設置する乾式貯蔵建屋を浸水防護重点化範囲に設定する。詳細については、第5条に係る安全審査資料に示す。

※ 基準津波による作用力（荷重）

9.2.1.3 竜巻

兼用キャスクである乾式キャスクは、竜巻による作用力^{*}に対して安全機能が損なわれない設計とする。

具体的には、乾式キャスクを竜巻防護施設として分類し、乾式貯蔵

建屋にて防護する設計とする。詳細については、第 6 条に係る安全審査資料に示す。

※ 設計竜巻による作用力（荷重）

9.2.1.4 外部火災

兼用キャスクである乾式キャスクは、第 6 条第 4 項及び第 6 項において想定される森林火災及び想定される爆発、近隣工場等の火災に対して安全機能を損なわない設計とする。

具体的には、乾式キャスクを「クラス 1 及びクラス 2 に属する外部火災防護施設」等に分類し、乾式貯蔵建屋にて防護する設計とする。詳細については、第 6 条に係る安全審査資料に示す。

9.2.1.5 内部火災

兼用キャスクである乾式キャスクは、火災により乾式キャスクの安全機能が損なわれないよう、火災発生防止の措置を講じる設計とする。

具体的には、乾式キャスクは不燃性材料を使用した設計とする。詳細については、第 8 条に係る安全審査資料に示す。

9.2.1.6 溢水

兼用キャスクである乾式キャスクは、乾式貯蔵施設内における溢水が発生した場合においても、安全機能を損なわない設計とする。具体的には、乾式キャスクを防護対象設備とし、溢水事象を想定しても安全機能を損なわない単純で頑丈な構造の金属製の静的機器（容器）で、外部からの動力の供給を必要としない設計とする。詳細については、第 9 条に係る安全審査資料に示す。

9.2.2 周辺施設の設計

周辺施設の設計方針を次の設備ごとに示す。

9.2.2.1 機器・配管系（兼用キャスクの支持部、計装設備及びクレーン類）

機器・配管系のうち計装設備（乾式キャスク蓋間圧力計、乾式キャスク表面温度計及び乾式貯蔵建屋内雰囲気温度計）及びクレーン類（乾式貯蔵建屋天井クレーン及び乾式キャスク搬送台車）は、一般産業施設や公衆施設と同等の静的地震力に対して、必要な機能が維持される設計とする。

具体的には、耐震重要度分類Cクラス施設と同様の設計とするとともに、第9.2-1表に示す一般産業規格等に基づいた一般産業品を用いる設計とする。

第9.2-1表．計装設備及びクレーン類に適用する一般産業規格等※

設備名	一般産業規格等
乾式キャスク蓋間圧力計	JIS B7505（アネロイド型圧力計 ブルドン管圧力計）、圧力センサ 等
乾式キャスク表面温度計	JIS C1602（熱電対） JIS C1605（シース熱電対） 等
乾式貯蔵建屋内雰囲気温度計	
乾式貯蔵建屋天井クレーン	クレーン等安全規則、クレーン構造規格 等
乾式キャスク搬送台車	JIS G3101（一般構造用圧延鋼材） エアベアリング（カタログ品） 等

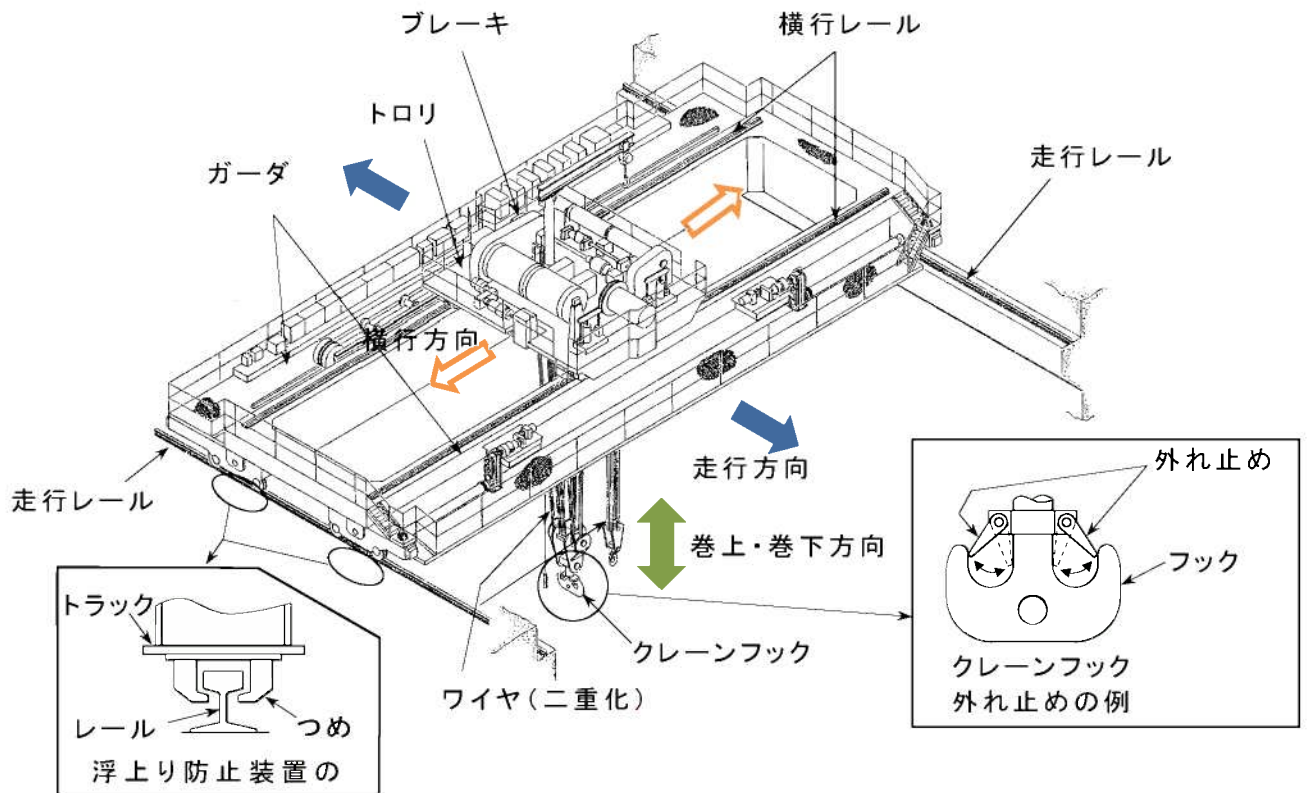
※ JIS規格等の国内規格類に基づいた部材、部品およびカタログ品により構成される一般産業品を用いる。

機器・配管系のうち乾式キャスク支持部（貯蔵架台及び基礎ボルト）

については、乾式キャスクを含めて耐震重要度分類をSクラスとして分類し、基準地震動 S_s による地震力に対して、乾式キャスクの安全機能が損なわれるおそれがないように設計する。詳細については、第4条に係る安全審査資料に示す。

クレーン類のうち、乾式貯蔵建屋天井クレーンは、乾式貯蔵建屋の取扱エリアの壁に設置された走行レール上をガーダが東西方向に移動（走行）し、ガーダ上の横行レール上を南北方向にトロリが移動（横行）する。横行レール上の移動及びクレーンワイヤの巻上・巻下は、ガーダ上にあるトロリにより行う。乾式貯蔵建屋天井クレーンの構造イメージを第9.2-1図に、概略仕様を第9.2-2表に示す。ここで、乾式貯蔵建屋天井クレーンは、一般産業施設を用い、クレーン等安全規則、クレーン構造規格等に基づき、以下に示す吊荷の落下防止措置等およびクレーンの落下防止対策を講じることから、乾式キャスクの移動を安全かつ確実にできる設計となっている。

- ・ 電源遮断時に自動的にブレーキが作動することでワイヤが巻き下げられることを防止し吊荷を保持する。
- ・ ワイヤがフックから外れることを防止するための外れ止めを設ける。
- ・ 巻過ぎによるワイヤの破断を防止する巻過防止装置を設ける。
- ・ 吊荷の安定化のためワイヤを二重化する。
- ・ 乾式貯蔵建屋天井クレーンの走行及び横行レールには、浮き上がり防止機能を設ける設計としており、走行及び横行レールからガーダ及びトロリが浮き上がらない。



第 9.2-1 図. 乾式貯蔵建屋天井クレーンの構造イメージ図

第 9.2-2 表 乾式貯蔵建屋天井クレーンの概略仕様

項目	仕様
容量 (ton)	主巻 : 160
巻上 / 巻下速度 (m/分)	低速 / 中速 / 高速 0.12 / 0.6 / 1.2
移動速度 (m/分)	走行 0.9 / 6.0 / 18
	横行 0.6 / 1.5 / 6.0

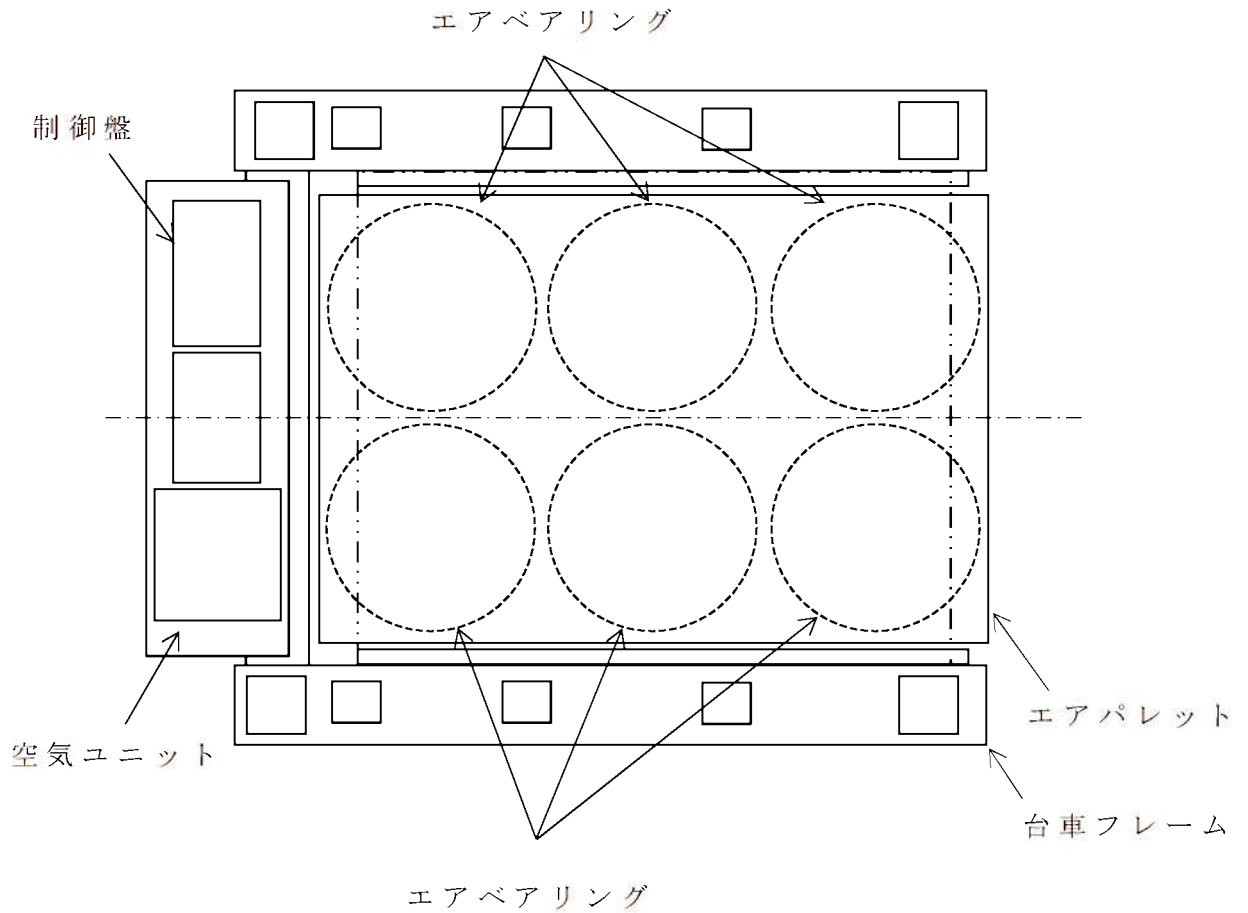
クレーン類のうち、乾式キャスク搬送台車は、乾式キャスクを設置した貯蔵架台をエアパレットで浮上させることにより、床面との摩擦力を低減して乾式キャスクを搬送するものである。エアパレットは、エアベアリングに空気を供給し、エアベアリングの小穴から漏れ出す空気によって、床面とエアベアリングの間に薄いエアフィルムを形成させることにより、床面との摩擦係数を低減させるものである。乾式キャスク搬送台車の概要図を第9.2-2図に示す。

また、乾式キャスク搬送台車は、モータによる駆動装置、制御盤、油圧ジャッキ及びエアパレット等によって構成されており、建屋内の空気供給配管からエアホースを通じて搬送台車に空気を供給する構造とする。乾式キャスク搬送台車の概略仕様を第9.2-3表に示す。

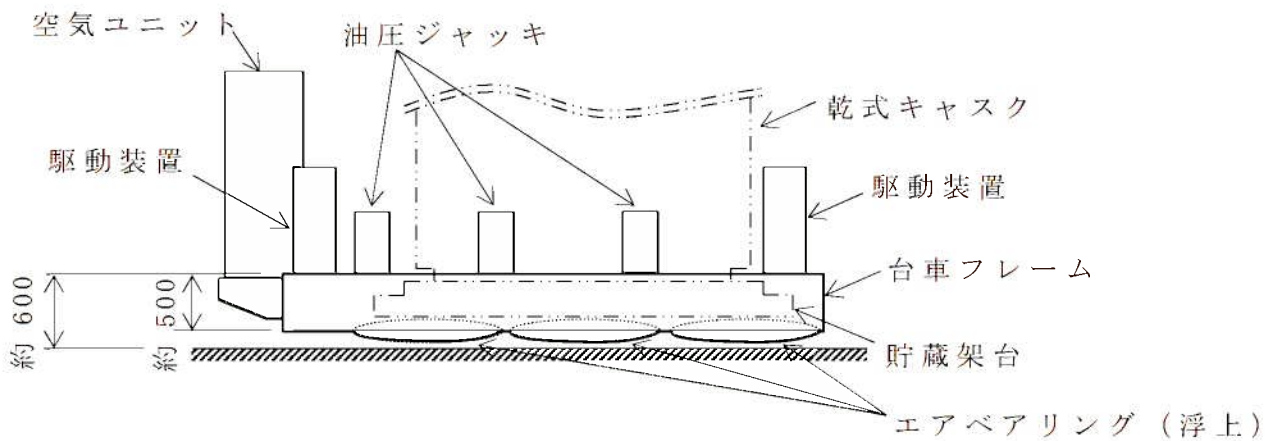
乾式キャスク搬送台車は、第9.2-3表に示す走行速度以上の速度は出ない構造であり、第16条安全審査資料参考4に示すように、搬送中に搬送台車が仮に逸走し、建屋壁及び他の乾式キャスク貯蔵架台等へ衝突した場合でも、乾式キャスクは壁及び他の乾式キャスク等へ衝突しない設計となっているため、乾式キャスクの移動を安全かつ確実にできる設計となっている。

なお、乾式キャスク搬送台車は、一般産業品として、以下に示す機能を有している。

- ・ 搬送台車による乾式キャスクの移送を安全かつ確実にを行うために、操作員による誤操作等を想定し、補助員によっても緊急停止できる機構を設けるとともに、他の乾式キャスク、構築物等への衝突を防止する対策を講じる。
- ・ 空気の遮断時には、エアベアリングへの圧縮空気の供給が停止されて乾式キャスク搬送台車が床に着座し、駆動装置の能力を超える摩擦力が発生するため、乾式キャスク搬送台車は停止する。



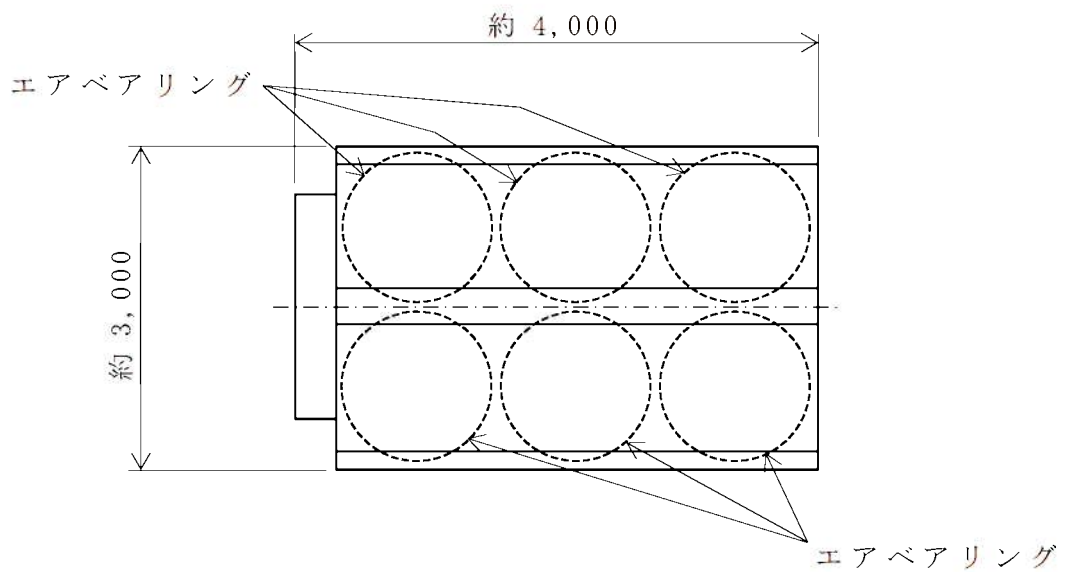
＜乾式キャスク搬送台車 平面図＞



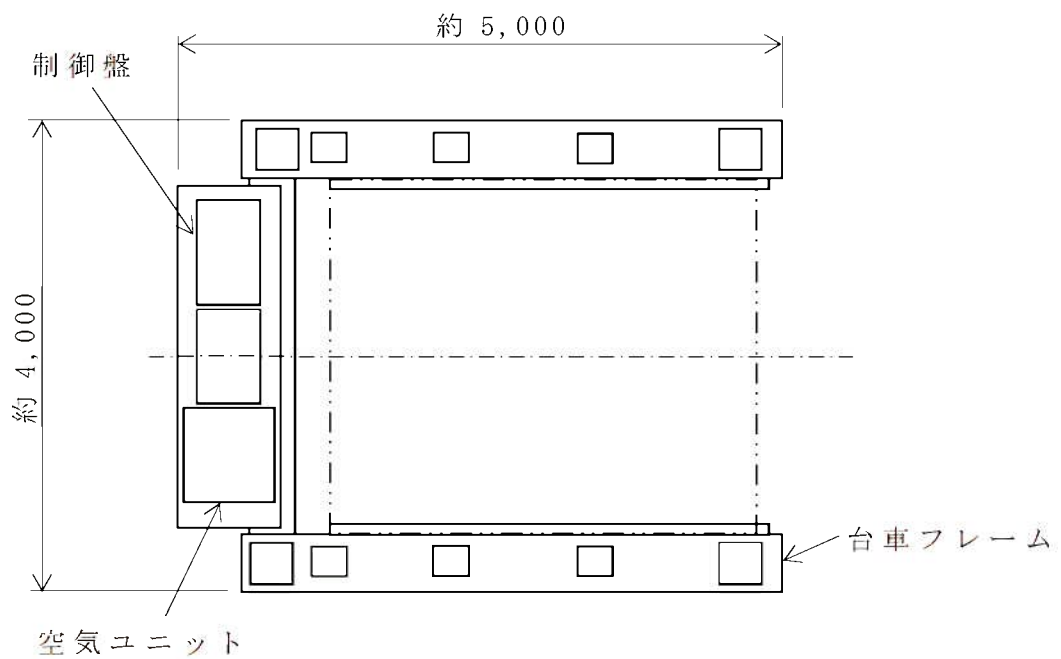
＜乾式キャスク搬送台車 側面図＞

(単位 : mm)

第 9.2-2 図. 乾式キャスク搬送台車 概要図 (1 / 2)



<エアパレット平面図>



<台車フレーム平面図>

(単位 : mm)

第 9.2-2 図. 乾式キャスク搬送台車 概要図 (2 / 2)

第 9.2-3 表. 乾式キャスク搬送台車の概略仕様

項 目	仕 様
定格荷重 (kN) [(ton)]	1,470 [150]
走行速度 (m/分)	0.6/2

9.2.2.2 乾式貯蔵建屋等（貯蔵建屋）

乾式貯蔵建屋の設計方針を次の項目ごとに示す。

(1) 地震

乾式貯蔵建屋は、耐震重要度分類 C クラス施設として分類し、地震力に十分耐えることができる設計とする。また、乾式キャスクに波及的影響を及ぼさない設計とする。

詳細については、第 4 条に係る安全審査資料に示す。

(2) 津波

津波防護対象設備である乾式キャスクを設置する乾式貯蔵建屋の設置された敷地において、基準津波による遡上波を地上部から到達又は流入させない設計とし、浸水防護重点化範囲である乾式貯蔵建屋は、津波による影響を受けない位置に設置する設計とする。詳細については、第 5 条に係る安全審査資料に示す。

(3) 竜巻

竜巻防護施設である乾式キャスクを内包する乾式貯蔵建屋は、構造健全性を維持することにより、乾式キャスクが安全機能を損なわない設計とする。詳細については、第 6 条に係る安全審査資料に示す。

(4) 外部火災

外部火災防護施設である乾式キャスクを内包する乾式貯蔵建屋

は、建屋のコンクリート壁の耐性評価を実施し、乾式キャスクの安全機能を損なわない設計とする。詳細については、第 6 条に係る安全審査資料に示す。

(5) その他の外部事象

周辺施設である乾式貯蔵建屋は、安全重要度分類 PS-3 として分類し、その他の外部事象により安全機能を損なわない設計とする。詳細については、第 6 条に係る安全審査資料に示す。

(6) 内部火災

乾式貯蔵建屋は、放射性物質の貯蔵機能を有する構築物、系統及び機器を設置する火災区域として設定する設計とする。詳細については、第 8 条に係る安全審査資料に示す。

(7) 遮蔽機能

<工場等周辺における直接線等からの防護>

乾式貯蔵建屋は、乾式キャスクの遮蔽機能と相まって、既設を含めた原子炉施設からの直接線及びスカイシャイン線による敷地周辺の空間線量率を合理的に達成できる限り小さい値となるように設計する。具体的には、年間 50 マイクロシーベルトを超えない設計とする。詳細については、第 29 条に係る安全審査資料に示す。

<放射線からの放射線業務従事者の防護>

乾式貯蔵建屋は、乾式キャスクの遮蔽機能と相まって、放射線業務従事者の受ける放射線量を低減できるよう、遮蔽、乾式キャスクの配置等放射線防護上の措置を講じた設計とする。詳細については、第 30 条に係る安全審査資料に示す。

使用済燃料乾式貯蔵容器の
4つの安全機能について
(閉じ込め機能)

<目 次>

1. 要求事項
2. 適合性について
3. 参考文献

1. 要求事項

乾式キャスクの閉じ込め機能に関する要求事項は、以下のとおりである。

(1) 設置許可基準規則要求事項

①設置許可基準規則第 16 条第 2 項一号イ

- ・燃料体等の落下により燃料体等が破損して放射性物質の放出により公衆に放射線障害を及ぼすおそれがある場合において、放射性物質の放出による公衆への影響を低減するため、燃料貯蔵設備を格納するもの及び放射性物質の放出を低減するものとする。

②設置許可基準規則第 16 条第 4 項三号

- ・使用済燃料が内包する放射性物質を閉じ込めることができ、かつ、その機能を適切に監視することができるものとする。

③設置許可基準規則解釈別記 4 第 16 条第 4 項

- ・第 16 条第 4 項第 3 号に規定する「放射性物質を適切に閉じ込めることができ、かつ、その機能を適切に監視することができる」とは、次項に規定するもののほか、使用済燃料貯蔵施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈（以下「貯蔵事業許可基準規則解釈」という）第 5 条第 1 項第 1 号及び第 2 号並びに第 17 条第 1 項第 1 号に規定する金属キャスクの設計に関する基準を満たすことをいう。

③-1 貯蔵事業許可基準規則解釈第 5 条第 1 項

第 5 条に規定する「限定された区域に適切に閉じ込めることができるもの」とは、以下の設計をいう。

- 一 金属キャスクは、設計貯蔵期間を通じて、使用済燃料等を内封する空間を負圧に維持できる設計であること。

二 金属キャスクは、多重の閉じ込め構造を有する蓋部により、使用済燃料等を内封する空間を容器外部から隔離できる設計であること。

③-2 貯蔵事業許可基準規則解釈第 17 条第 1 項

第 1 項に規定する「適切に監視することができる」とは、以下の設計をいう。

一 蓋部が有する閉じ込め機能を監視できること。

④ 設置許可基準規則解釈別記 4 第 16 条 5 項

第 16 条第 2 項第 1 号ハ及び同条第 4 項各号を満たすため、兼用キャスクは、当該兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計とすること。ここで、「兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計」とは、以下を満たす設計をいう。

- ・ 設計貯蔵期間を明確にしていること。
- ・ 設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境条件下での経年変化を考慮した材料及び構造であること。

(2) 原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド確認事項

「2.安全機能の確保 2.4 閉じ込め機能」には、以下のように記載されている。

【審査における確認事項】

『

- (1) 設計上想定される状態において、兼用キャスクが内包する放射性物質を適切に閉じ込めることができること。
- (2) 密封境界部は、設計上想定される衝撃力に対して、おお

むね弾性範囲内にとどまること。

- (3) 閉じ込め機能の異常に対して、その修復性が考慮されていること。

』

【確認内容】

『

- (1) 長期間にわたって閉じ込め機能を維持する観点から、耐熱性、耐食性等を有し耐久性の高い金属ガスケット等のシールを採用するとともに、蓋部を一次蓋と二次蓋の二重とし、一次蓋と二次蓋との間の圧力（以下「蓋間圧力」という。）を監視することにより、蓋部が有する閉じ込め機能を監視できること。
- (2) 兼用キャスクの内部の放射性物質が外部へ漏えいしないよう、設計貯蔵期間中、兼用キャスク内部の負圧を維持できること。
- (3) 密封境界部の漏えい率は、(2)を満たすものであること。また、使用する金属ガスケット等のシールの性能は、当該漏えい率以下であること。
- (4) 閉じ込め機能評価では、密封境界部の漏えい率が、設計貯蔵期間、内部初期圧力及び自由空間容積（兼用キャスク内部容積から収納物及びバスケットを減じた容積をいう。）、初期の蓋間圧力及び蓋間の容積、温度等を条件として、適切な評価式を用いて求められていること。
- (5) 兼用キャスクの衝突評価
- 1) 兼用キャスクを床等に固定せず設置するとき
- ① 転倒モードの設定
- 兼用キャスクを縦置き又は横置きにした貯蔵状態で第6項地震力（設置許可基準規則第4条第6項に規定する地震力をいう。以下同じ。）を入力し、兼用キャ

スクの転倒、兼用キャスク同士の衝突及び兼用キャスクと周辺施設との衝突のうち、設計上想定するものを設定すること。

② 兼用キャスクの衝突評価

①で抽出した転倒等による兼用キャスクへの衝突荷重に対して、密封境界部がおおむね弾性範囲内であること。この際「4.3.1 地震に対する設計方針」を参考にしていること。

2) 貯蔵建屋等を設置するとき

① 貯蔵建屋等の損壊モードの設定

損壊モードに応じた衝突物又は落下物を抽出し、そのうち兼用キャスクの閉じ込め機能に及ぼす影響が最大であるものを設定すること。

② 兼用キャスクの衝突評価

①で抽出した衝突物又は落下物による兼用キャスクへの衝突荷重に対して、密封境界部がおおむね弾性範囲内であること。

3) 使用済燃料の再取出性の評価

- a. 兼用キャスクに収納される使用済燃料を取り出すために、一次蓋及び二次蓋が開放できること。
- b. 使用済燃料の燃料ペレットが燃料被覆管から脱落せず、かつ、使用済燃料集合体の過度な変形を生じないこと。

- (6) 閉じ込め機能の異常に対し、適切な期間内で使用済燃料の取出しや詰替え及び使用済燃料貯蔵槽への移送を行うこと、これらの実施に係る体制を適切に整備すること等、閉じ込め機能の修復性に関して考慮がなされていること。

』

2. 適合性について

乾式キャスクの閉じ込め機能については、以下のとおり審査ガイドの確認内容に適合している。

〔確認内容〕

- (1) 長期間にわたって閉じ込め機能を維持する観点から、耐熱性、耐食性等を有し耐久性の高い金属ガスケット等のシールを採用するとともに、蓋部を一次蓋と二次蓋の二重とし、一次蓋と二次蓋との間の圧力（以下「蓋間圧力」という。）を監視することにより、蓋部が有する閉じ込め機能を監視できること。

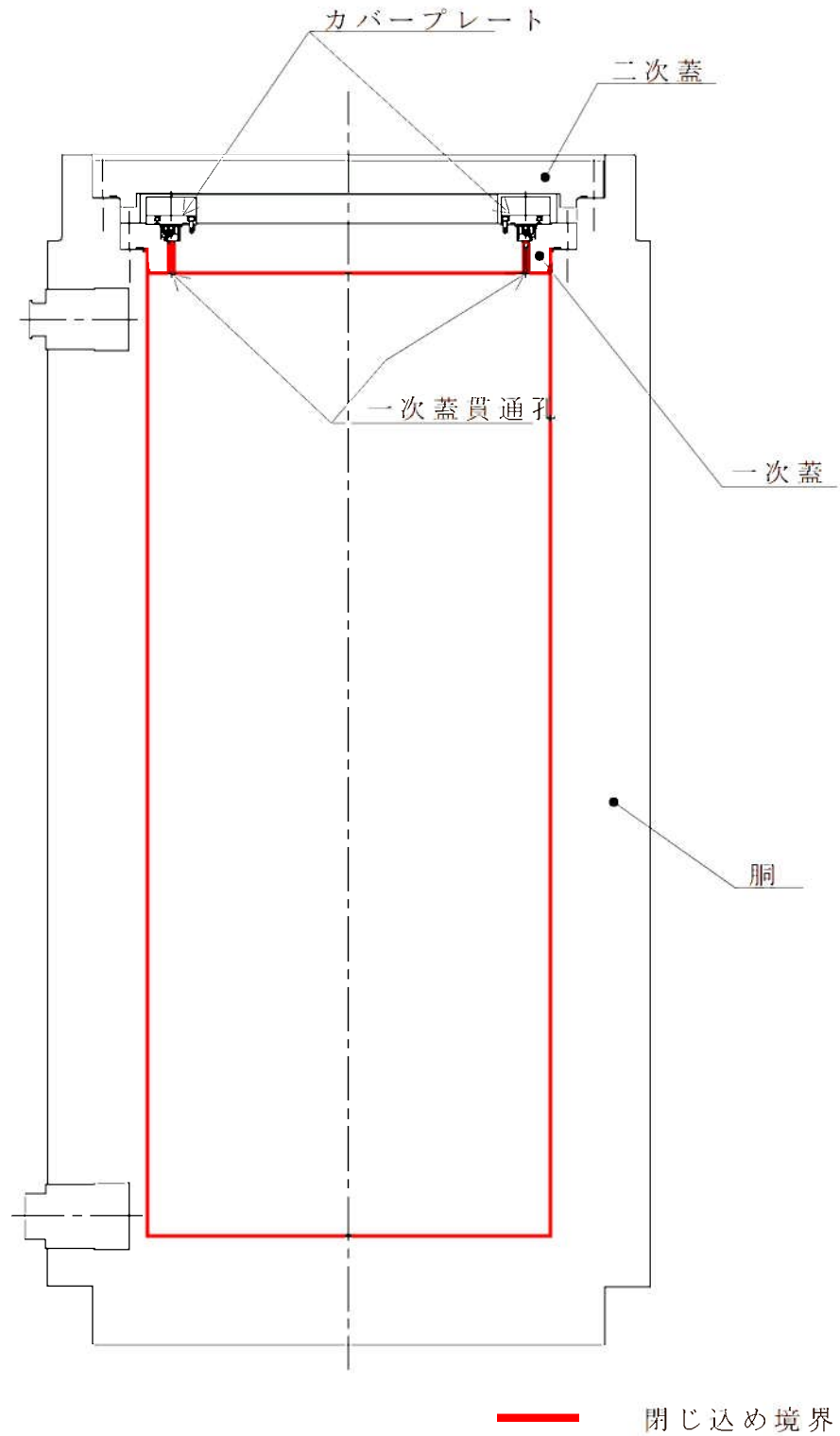
乾式キャスクの閉じ込め構造を第 2-1 図に、シール部詳細を第 2-2 図に示す。

乾式キャスクは、乾式キャスク本体及び一次蓋により使用済燃料を封入する空間を設計貯蔵期間（60 年）を通じて負圧（ 9.7×10^4 Pa）に維持する。乾式キャスクは、一次蓋と二次蓋の蓋間をあらかじめ正圧とし圧力障壁を形成することにより、放射性物質を乾式キャスク内部に閉じ込める。蓋及び蓋貫通孔のシール部には、長期にわたって閉じ込め機能を維持する観点から金属ガスケットを使用し、金属ガスケットは、設計貯蔵期間中に乾式キャスク内部を負圧に維持できる漏えい率（以下、「基準漏えい率」という）を満足するものを使用する。

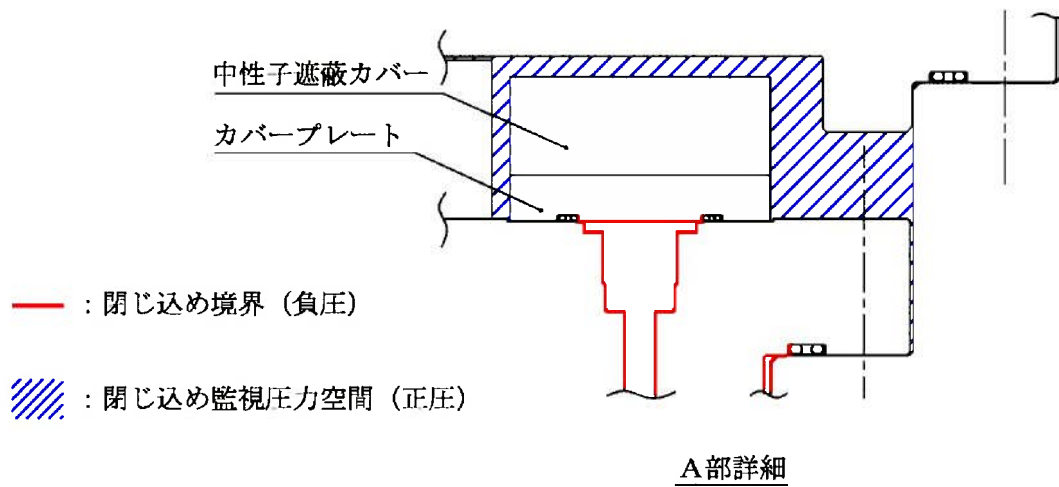
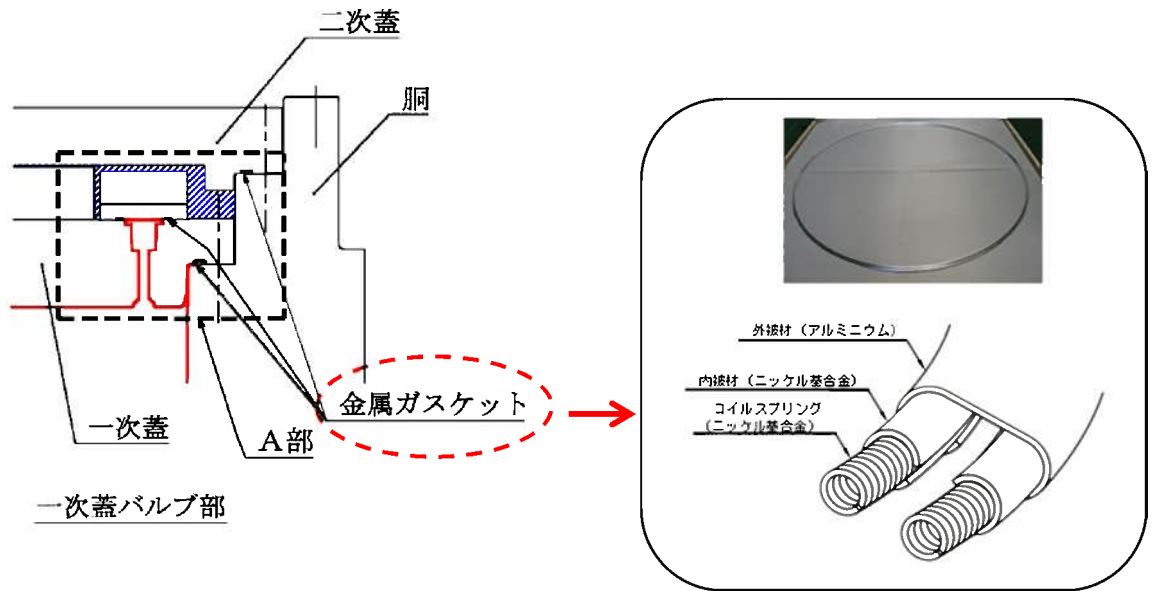
一次蓋と二次蓋との蓋間圧力を監視することにより、蓋部が有する閉じ込め機能を監視できる設計とする。

乾式貯蔵施設内では、乾式キャスクの閉じ込め境界を有する一次蓋は開放せず、内包する放射性物質の閉じ込めを乾式キャスクのみで担保する設計とする。

使用済燃料を限定された区域に閉じ込めるため、設計貯蔵期間を通じて使用済燃料を封入する空間を負圧（ 9.7×10^4 Pa）に維持する設計とする。



第2-1図 乾式キャスクの閉じ込め構造



第2-2 図 乾式キャスクのシール部詳細

〔確認内容〕

- (2) 兼用キャスクの内部の放射性物質が外部へ漏えいしないよう、設計貯蔵期間中、兼用キャスク内部の負圧を維持できること。
- (3) 密封境界部の漏えい率は、設計貯蔵期間中、兼用キャスク内部の負圧を維持できるものであること。また、使用する金属ガスケット等のシールの性能は、当該漏えい率以下であること。
- (4) 閉じ込め機能評価では、密封境界部の漏えい率が、設計貯蔵期間、内部初期圧力及び自由空間容積（兼用キャスク内部容積から収納物及びバスケットを減じた容積をいう。）、初期の蓋間圧力及び蓋間の容積、温度等を条件として、適切な評価式を用いて求められていること。

乾式キャスク漏えい率の考え方を第 2-3 図、閉じ込め評価フローを第 2-4 図、閉じ込め評価に係る構造図を第 2-5 図に示す。

閉じ込め評価では、基準漏えい率を求め、基準漏えい率よりも漏えい率の小さい金属ガスケットを使用することを説明する。

基準漏えい率は、設計貯蔵期間中に乾式キャスク内部を負圧に維持できる漏えい率である。

また、基準漏えい率は、蓋間圧力と乾式キャスク内部圧力の圧力差のもとで、シール部を通して乾式キャスク内部へ流入する気体の漏えい量を積分することによって、乾式キャスク内部圧力が大気圧となるまでの圧力変化を求めた際の漏えい率として計算する。

なお、基準漏えい率を求めるにあたっては、蓋間圧力は保守的に初期圧力で一定とし、蓋間空間のガスは乾式キャスク内部側にのみ漏えいするものとして漏えい計算を行う。また、大気圧は、気象変化による圧力変動を保守的に考慮した値として 9.7×10^4 Pa とする。乾式キャスク本体内部空間の圧力の算定にあたっては、使用済燃料の破損率として、米国の使用済燃料の乾式貯蔵中における漏えい燃料発生率（約 0.01 %）、及び日本の軽水炉における漏えい燃料発生率（約 0.01 % 以下）を考慮し、保守的な値として 0.1 %¹⁾を想定

する。

a. 基準漏えい率の計算

a) 乾式キャスク本体内部圧力の変化は、ボイル・シャルルの法則に基づき、以下のように求める。

$$\frac{dP_d}{dt} = \frac{Q}{V_d} \times \frac{T_d}{T} \dots \dots \dots (3.1)$$

ここで、

P_d : 乾式キャスク本体内部圧力 (Pa)

T_d : 乾式キャスク本体内部温度 (K)

Q : 乾式キャスク本体内部圧力 P_d のときのシール部の漏えい率
(Pa・m³/s)

T : 漏えい気体の温度 (K)

V_d : 乾式キャスク本体内部の空間容積 (m³)
(乾式キャスク内部容積から収納物及びバスケットを減じた容積)

t : 時間 (s)

また、ここで漏えい率 Q は、以下のクヌッセンの式²⁾で求められる。

$$\left. \begin{aligned} Q &= L \cdot P_u \\ L &= (F_c + F_m) \cdot (P_u - P_d) \\ F_c &= \frac{\pi}{128} \times \frac{D_0^4}{a \cdot \mu} \\ F_m &= \frac{\sqrt{2 \pi \cdot R_0}}{6} \times \frac{D_0^3 \sqrt{T}}{a \cdot P_u} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3.2)$$

ここで、

- Q : 漏えい率 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)
 L : 圧力 P_a における体積漏えい率 (m^3/s)
 F_c : 連続流のコンダクタンス係数 ($\text{m}^3/(\text{Pa} \cdot \text{s})$)
 F_m : 自由分子流のコンダクタンス係数 ($\text{m}^3/(\text{Pa} \cdot \text{s})$)
 P_u : 上流側 (蓋間) の圧力 (Pa)
 P_d : 下流側 (乾式キャスク本体内部) の圧力 (Pa)
 D_0 : 相当漏えい孔径 (m)
 a : 漏えい孔長 (m)
 P_a : 流れの平均圧力 (Pa)

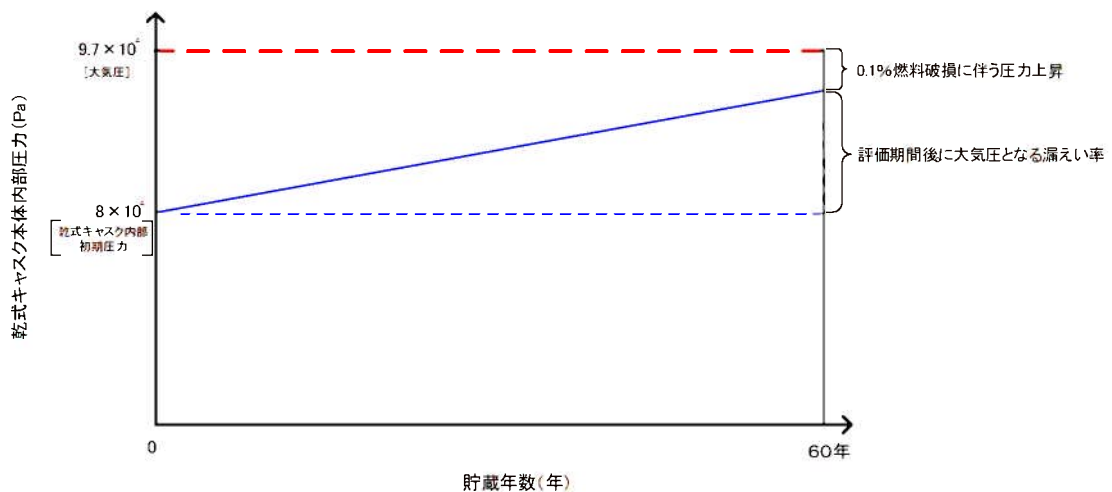
$$P_a = \frac{P_u + P_d}{2}$$

- μ : 漏えい気体の粘性係数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
 T : 漏えい気体の温度 (K)
 M : 漏えい気体の分子量 (kg/mol)
 R_0 : ガス定数 ($\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)

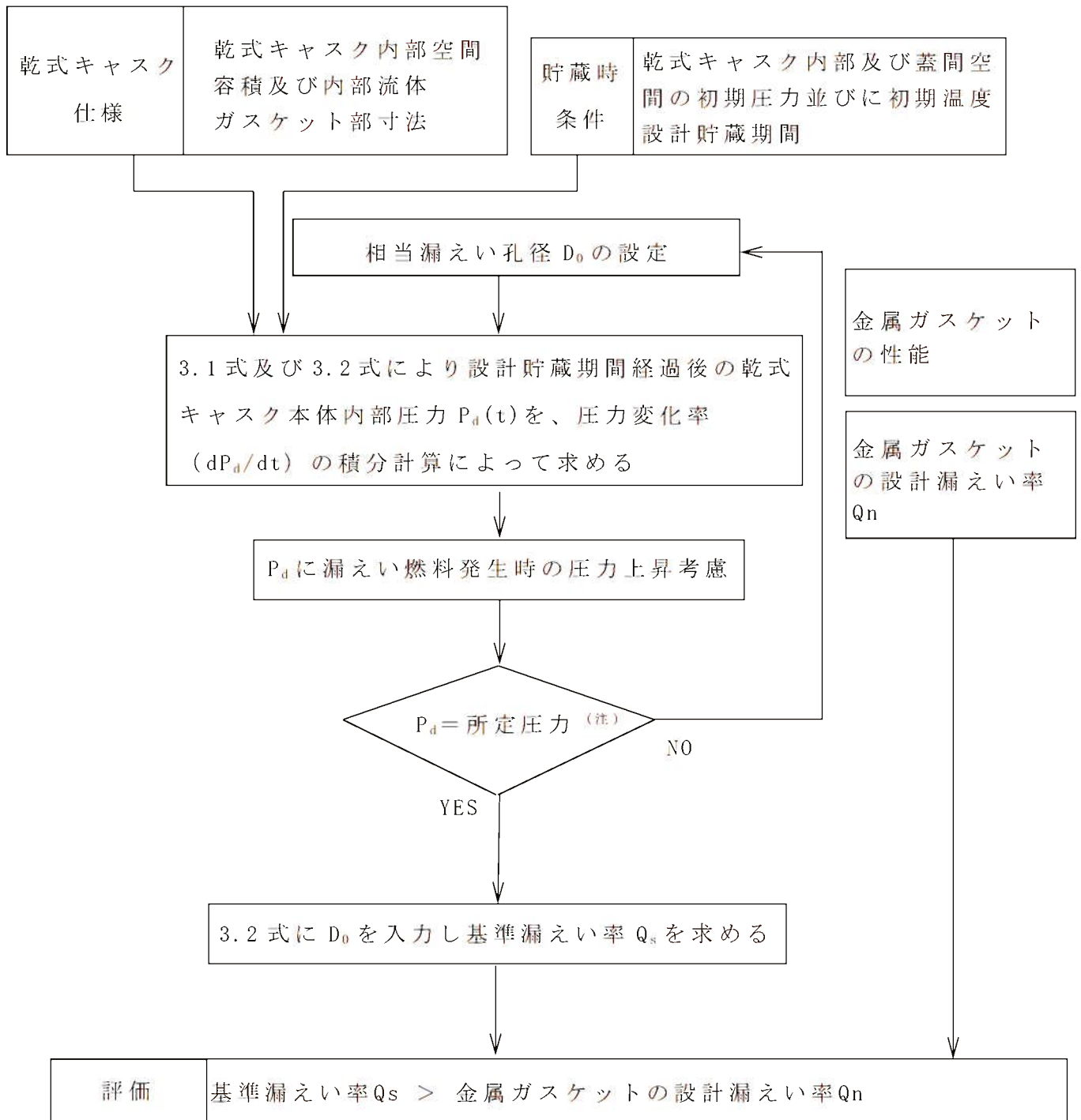
- b) 漏えい孔径 D_0 を設定し (3.2) の式により漏えい率 Q を求める。 Q を (3.1) の式に入力し、時間 t で積分することにより、設計貯蔵期間経過後の乾式キャスク本体内部圧力 P_d を求める。
- c) b) により求めた P_d が正圧の場合はより小さな漏えい孔径 D_0 を、負圧の場合はより大きい漏えい孔径 D_0 を設定して、a) ~ b) を繰り返し、 P_d が大気圧 ($9.7 \times 10^4 \text{ Pa}$) となる漏えい孔径 D_0 を求める。
- d) 判定基準である金属ガスケットの漏えい率と比較するため、c) により求めた D_0 を固定し、(3.2) の式に金属ガスケットの漏えい率を求めた試験条件 ($P_u = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、 $P_d = 0 \text{ Pa}$ 、 $T = 298.15 \text{ K}$) を入力し、基準漏えい率 Q_s を求める。

なお、本評価においては、以下の点について保守性を有している。

- ・設計貯蔵期間中において使用済燃料の崩壊熱は低下していくが、使用済燃料の崩壊熱低下による乾式キャスク本体内部温度の温度低下を考慮せず、乾式キャスク本体内部温度は初期温度で一定とする。
- ・設計貯蔵期間中において上流側（蓋間）の圧力は漏えいにより低下していくが、漏えいによる圧力低下を考慮せず、初期圧力で一定とする。



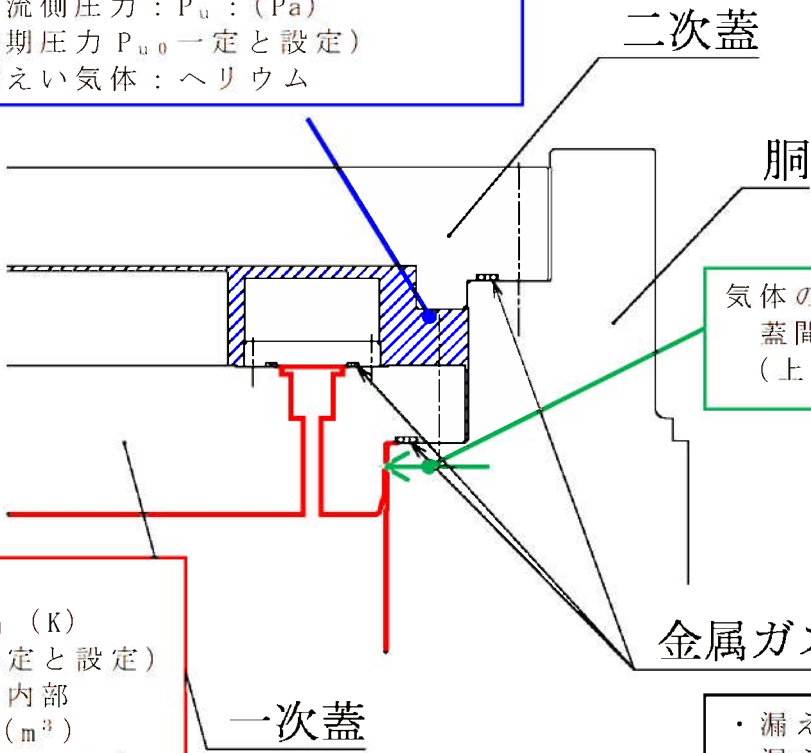
第 2-3 図 乾式キャスク漏えい率の考え方



(注)所定圧力は、大気圧の変動を考慮し、 9.7×10^4 Pa とする。

第 2-4 図 基準漏えい率の計算フロー図

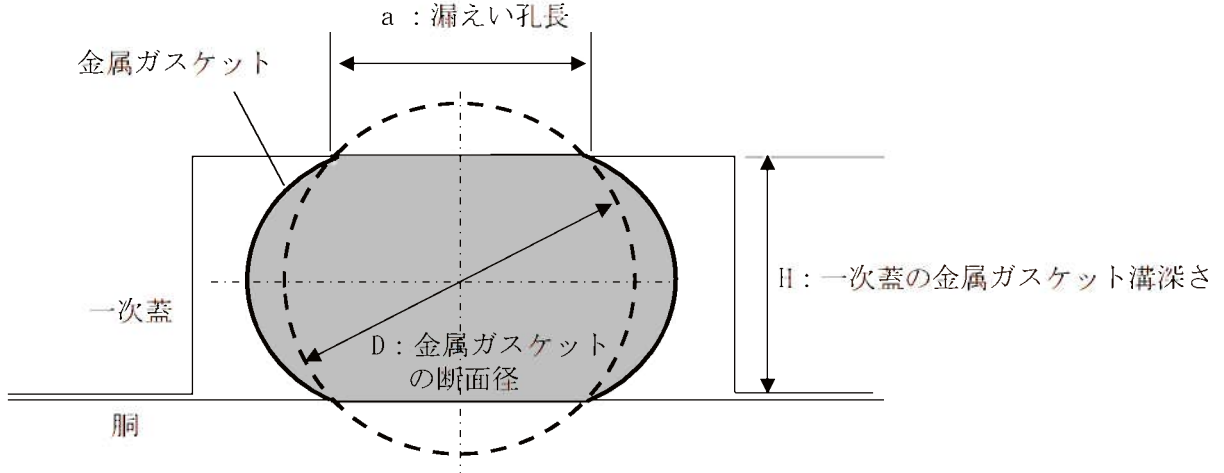
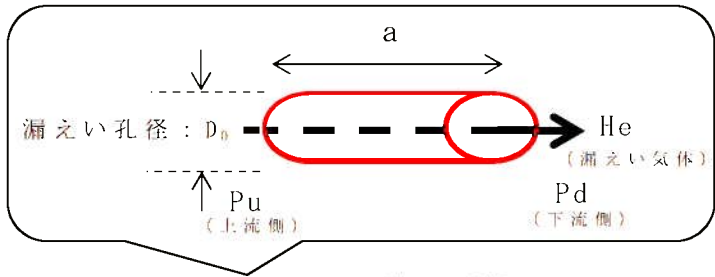
- ・漏えい気体の温度： T (K)
(周囲環境温度の最低温度で一定と設定)
- ・上流側圧力： P_u (Pa)
(初期圧力 P_{u0} 一定と設定)
- ・漏えい気体：ヘリウム



気体の漏えい方向
蓋間空間→キャスク本体内部
(上流側) (下流側)

- ・キャスク本体
内部温度： T_d (K)
(初期温度で一定と設定)
- ・キャスク本体内部
空間容積 V_d (m^3)
- ・下流側圧力： P_d (Pa)

- ・漏えい率： Q ($Pa \cdot m^3 / s$)
- ・漏えい孔径： D_0 (m)
- ・漏えい孔長： a (m)



第 2-5 図 閉じ込め評価に係る構造図

閉じ込め設計の評価条件及び評価結果を第 2-1 表に示す。使用する金属ガスケットの漏えい率が基準漏えい率より小さいことを確認した。

第2-1表 閉じ込め評価条件及び評価結果

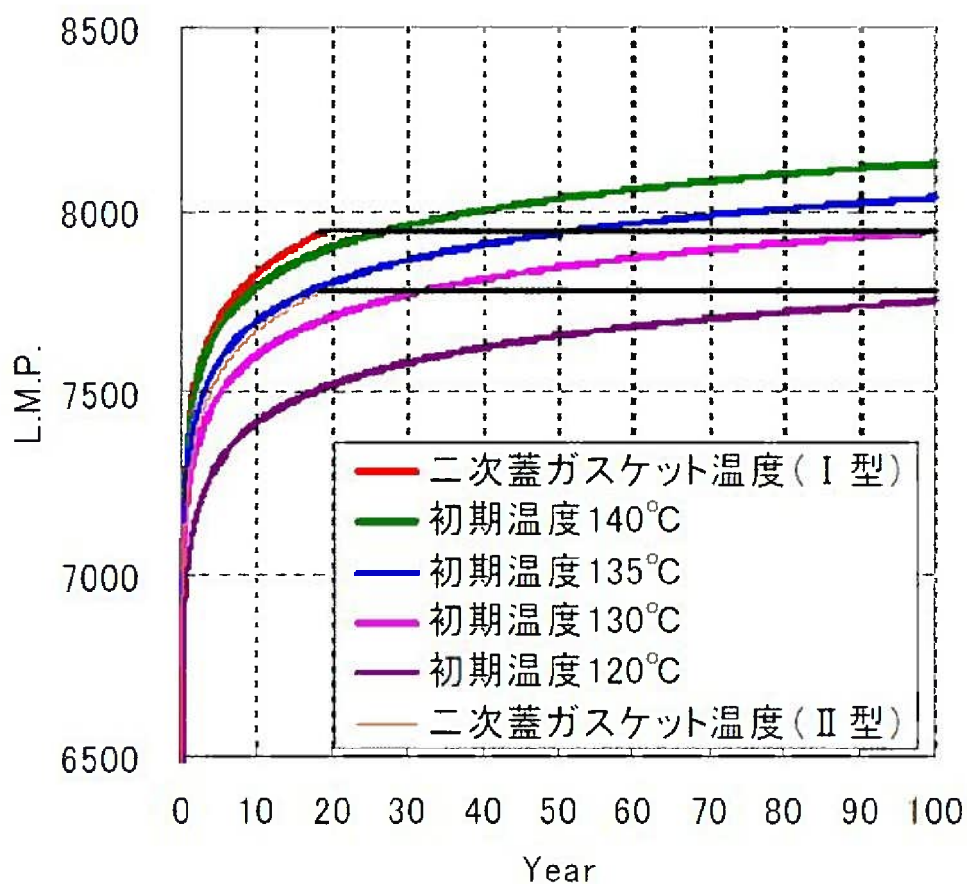
	MSF-21P 型 ^(注)	MSF-24P 型
D_0 : 漏えい孔径 (m)	5.40×10^{-6}	5.51×10^{-6}
a : 漏えい孔長 (m)	4.56×10^{-3}	
μ : 漏えい気体 (ヘリウム) の 粘性係数 (Pa·s)	1.985×10^{-5} (25°C)	
R_0 : ガス定数 (J/(mol·K))	8.3144598	
T : 漏えい気体の温度 (K)	298.15	
M : 漏えい気体 (ヘリウム) の 分子量 (kg/mol)	0.004002602	
P_a : 流れの平均圧力 (Pa)	5.05×10^4	
P_{u0} : 上流側の初期圧力 (Pa)	1.01×10^5 (大気圧)	
P_{d0} : 下流側の初期圧力 (Pa)	0 (真空)	
Q_s : 基準漏えい率 (Pa·m ³ /s)	2.32×10^{-6}	2.49×10^{-6}
金属ガスケットの漏えい率 ^{3), 4)}	1×10^{-8} Pa·m ³ /s 以下	

(注) 基準漏えい率がより低くなる 17×17 燃料の場合を代表して記載する。

平成 21 年度の (一財) 電力中央研究所研究において、金属ガスケットの長期密封機能について試験を実施し、試験と解析で得られた乾式キャスクの温度と時間をラーソン・ミラー・パラメータ (以下「LMP」という。) により長期密封性能について検討を行っている⁴⁾。第 2-6 図は当該試験結果の二次蓋ガスケット温度から得られた LMP を示しており、LMP が 7942 以下であれば密封性は健全であることが

示されている。また、第 2-7 図には、LMP=7942 となる場合の、蓋初期温度と評価年数の関係が示されており、評価年数（貯蔵期間）を 60 年とすると、その期間健全性を担保するためには、初期温度を 134℃以下にすればよいことが示されている⁴⁾。

MSF-21P 型、MSF-24P 型の除熱評価の結果から、金属ガスケット部の温度は約 110℃であるため、金属ガスケットは設計貯蔵期間を通じて初期の漏えい率を維持できると判断される。

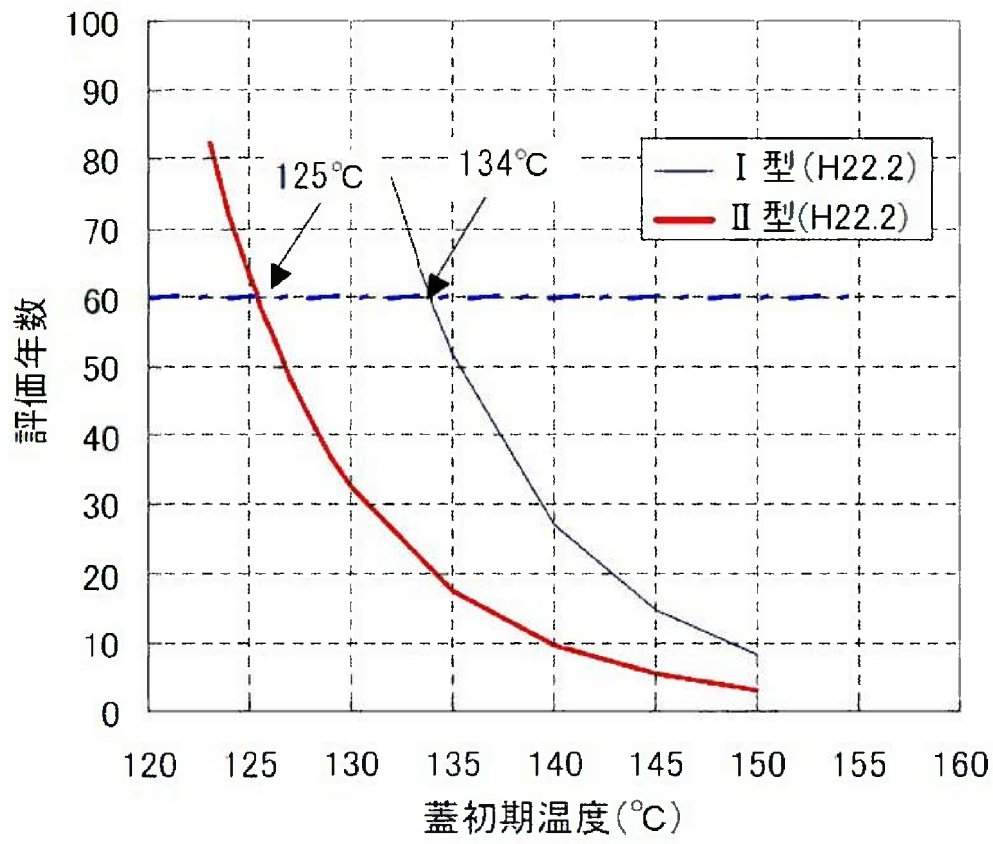


$$LMP = T \cdot (14 + \log t)$$

T: 温度 (K)

t: 時間 (h)

第 2-6 図 蓋部温度をもとに計算した LMP⁴⁾



第 2-7 図 蓋初期温度と評価年数の関係 ⁴⁾

[確認内容]

(5) 兼用キャスクの衝突評価

1) 兼用キャスクを床等に固定せず設置するとき

① 転倒モードの設定

兼用キャスクを縦置き又は横置きにした貯蔵状態で第6項地震力（設置許可基準規則第4条第6項に規定する地震力をいう。以下同じ。）を入力し、兼用キャスクの転倒、兼用キャスク同士の衝突及び兼用キャスクと周辺施設との衝突のうち、設計上想定するものを設定すること。

② 兼用キャスクの衝突評価

①で抽出した転倒等による兼用キャスクへの衝突荷重に対して、密封境界部がおおむね弾性範囲内であること。この際「4.3.1 地震に対する設計方針」を参考にしていること。

2) 貯蔵建屋等を設置するとき

① 貯蔵建屋等の損壊モードの設定

損壊モードに応じた衝突物又は落下物を抽出し、そのうち兼用キャスクの閉じ込め機能に及ぼす影響が最大であるものを設定すること。

② 兼用キャスクの衝突評価

①で抽出した衝突物又は落下物による兼用キャスクへの衝突荷重に対して、密封境界部がおおむね弾性範囲内であること。

3) 使用済燃料の再取出性の評価

a. 兼用キャスクに収納される使用済燃料を取り出すために、一次蓋及び二次蓋が開放できること。

b. 使用済燃料の燃料ペレットが燃料被覆管から脱落せず、かつ、使用済燃料集合体の過度な変形を生じないこと。

乾式キャスクは床等に固定して設置する設計とする。

貯蔵建屋等（貯蔵建屋（兼用キャスク、兼用キャスク取扱設備等を収納する建物）又は遮蔽壁）は、地震（4条）、津波（5条）、外部

からの衝撃（6条）による損傷の防止が図られ、損壊しない設計とする。詳細は、4条、5条、6条まとめ資料で説明する。

また、地盤（3条）及び周辺斜面（4条）も基準地震動に対して、安定性が確保されることから、貯蔵建屋等は損壊しない。なお、地盤及び周辺斜面の安定性に関しては地盤審査において確認されている。

〔確認内容〕

(6) 閉じ込め機能の異常に対し、適切な期間内で使用済燃料の取出しや詰替え及び使用済燃料貯蔵槽への移送を行うこと、これらの実施に係る体制を適切に整備すること等、閉じ込め機能の修復性に関して考慮がなされていること。

閉じ込め機能の異常に対し、適切な期間内で使用済燃料の取出しや詰替え及び使用済燃料ピットへの移送を行うこと、これらの実施に係る体制を適切に整備すること等、閉じ込め機能の修復性に関して考慮する設計とする。

なお、貯蔵中の乾式キャスク閉じ込め機能異常時は、体制を整備の上、第2-8図のフローにより対応する。

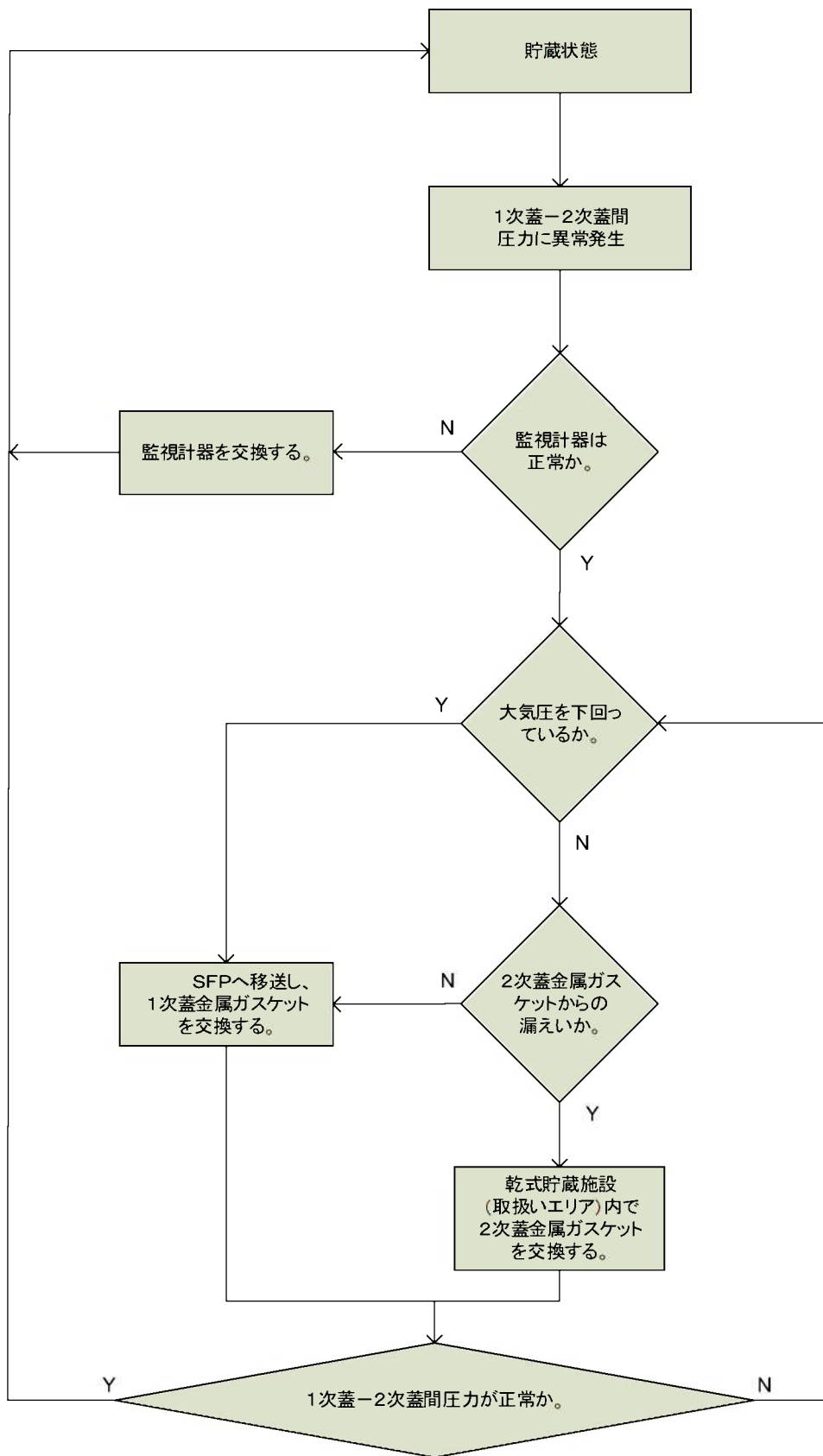
蓋間圧力が管理値を下回っている場合、まず、監視計器の確認を行い、監視計器異常の場合には監視計器を交換し、貯蔵を再開する。

監視計器異常ではない場合、一次蓋金属ガスケットの漏えいの場合には、乾式キャスク内部を負圧管理しているため、蓋間圧力は負圧まで低下する。二次蓋金属ガスケットの漏えいの場合には、蓋間のヘリウムガスが大気へ放出され、大気圧までしか低下しない。このため、蓋間圧力が大気圧を下回っている場合は、乾式キャスクを使用済燃料ピットエリアのキャスクローディングピットへ移送し、一次蓋を開放して一次蓋金属ガスケットを交換し、蓋間圧力に異常がないことを確認したうえで、乾式貯蔵建屋へ移送し、貯蔵を再開する。

蓋間圧力が大気圧を下回っていない場合は、二次蓋金属ガスケットの漏えい確認を行い、二次蓋金属ガスケットからの漏えいが認められた場合は、取扱エリアにて二次蓋を開放して二次蓋金属ガスケットを交換し、蓋間圧力に異常がないことを確認したうえで貯蔵を再開する。このとき、仮に一次蓋金属ガスケットが漏えいしていた場合でも、乾式キャスク内部を負圧管理していることから、乾式キャスク内部へインリークするため、放射性物質が外部へ漏えいする

恐れはない。二次蓋金属ガスケットからの漏えいが認められない場合は、乾式キャスクを使用済燃料ピットエリアのキャスクローディングピットへ移送し、一次蓋を開放して一次蓋金属ガスケットを交換し、蓋間圧力に異常がないことを確認したうえで、乾式貯蔵建屋へ移送し、貯蔵を再開する。

なお、使用済燃料ピットにおける乾式キャスクの取扱い時には、既存の設備を使用して乾式キャスクを取扱う。



第 2-8 図 乾式キャスク閉じ込め機能異常時の対応フロー

3. 参考文献

- 1) (一社)日本原子力学会, 「使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準:2010」, (2014).
- 2) International Organization for Standardization, “Safe Transport of Radioactive Materials - Leakage Testing on Packages”, ISO 12807, (1996).
- 3) “METAL SEALS TECHNICAL CATALOG”, Technetics Group. , (2017).
- 4) (一財)電力中央研究所, 平成 21 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 報告書 , (2010) .

使用済燃料乾式貯蔵容器の
4つの安全機能について
(臨界防止機能)

<目 次>

1. 要求事項
2. 適合性について
3. 使用する解析コード
4. 参考文献

1. 要求事項

乾式キャスクの臨界防止機能に関する要求事項は、以下のとおりである。

(1) 設置許可基準規則要求事項

① 設置許可基準規則第 16 条第 2 項一号ハ

- ・燃料体等が臨界に達するおそれがないものとする。

② 設置許可基準規則解釈別記 4 第 16 条 1 項

- ・第 16 条第 2 項第 1 号ハに規定する「臨界に達するおそれがない」とは、第 5 項に規定するもののほか、貯蔵事業許可基準規則解釈第 3 条に規定する金属キャスクの設計に関する基準を満たすことをいう。

- ・貯蔵事業許可基準規則解釈第 3 条第 1 項四号

臨界評価において、以下の事項を含め、未臨界性に有意な影響を与える因子が考慮されていること。

④ 燃焼度クレジット

燃焼度クレジット（臨界評価において、使用済燃料の燃焼に伴う反応度低下を考慮することをいう。）を採用する場合には、以下の事項を含め、適切な安全裕度を有する設計であることが確認されていること。

- a) 燃料集合体の燃焼度及び同位体組成並びにそれらの分布の計算精度

- b) 貯蔵する燃料集合体の燃焼度等の管理

- ・貯蔵事業許可基準規則解釈第 3 条第 1 項五号

使用済燃料を金属キャスクに収納するに当たっては、臨界評価で考慮した因子についての条件又は範囲を逸脱しないよう必要な措置が講じられること。

③ 設置許可基準規則解釈別記 4 第 16 条 5 項

- ・第16条第2項第1号ハ及び同条第4項各号を満たすため、兼用キャスクは、当該兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計とすること。ここで、「兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計」とは、以下を満たす設計をいう。
 - ・設計貯蔵期間を明確にしていること。
 - ・設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境条件下での経年変化を考慮した材料及び構造であること。

(2) 原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド確認事項

「2.安全機能の確保 2.1 臨界防止機能」には、以下のように記載されている。

【審査における確認事項】

『

- (1) 設計上想定される状態において、使用済燃料が臨界に達するおそれがないこと。
- (2) 兼用キャスクの臨界防止機能をバスケットで担保している場合は、設計上想定される状態において、バスケットが臨界防止上有意な変形を起こさないこと。

』

【確認内容】

『

以下を踏まえ臨界防止設計が妥当であること。

1) 配置・形状

兼用キャスクの配置、バスケットの形状、バスケット格子内の使用済燃料集合体の配置等において、適切な安全裕度を

考慮するとともに、設計貯蔵期間を通じてバスケットの構造健全性が維持されること。

兼用キャスクが滑動する可能性がある場合は、滑動等による兼用キャスクの配置の変化に伴う中性子実効増倍率の増加についても適切に考慮すること。

2) 中性子吸収材の効果

中性子吸収材の効果に関して、以下について適切な安全裕度を考慮すること。

- a. 製造公差（濃度、非均質性、寸法等）
- b. 中性子吸収に伴う原子個数密度の減少

3) 減速材（水）の影響

使用済燃料を兼用キャスクに収納する際、当該使用済燃料が冠水することを、設計上適切に考慮すること。

4) 検証され適用性が確認された臨界解析コード及びデータライブラリを使用すること。

5) 設計上、バスケットの塑性変形が想定される場合は、塑性変形したバスケットの形状及び使用済燃料の状態を考慮しても未臨界が維持されること。

』

2. 適合性について

乾式キャスクの臨界防止機能については、以下のとおり審査ガイドの確認内容に適合している。

[確認内容]

1) 配置・形状

兼用キャスクの配置、バスケットの形状、バスケット格子内の使用済燃料集合体の配置等において、適切な安全裕度を考慮するとともに、設計貯蔵期間を通じてバスケットの構造健全性が維持されること。

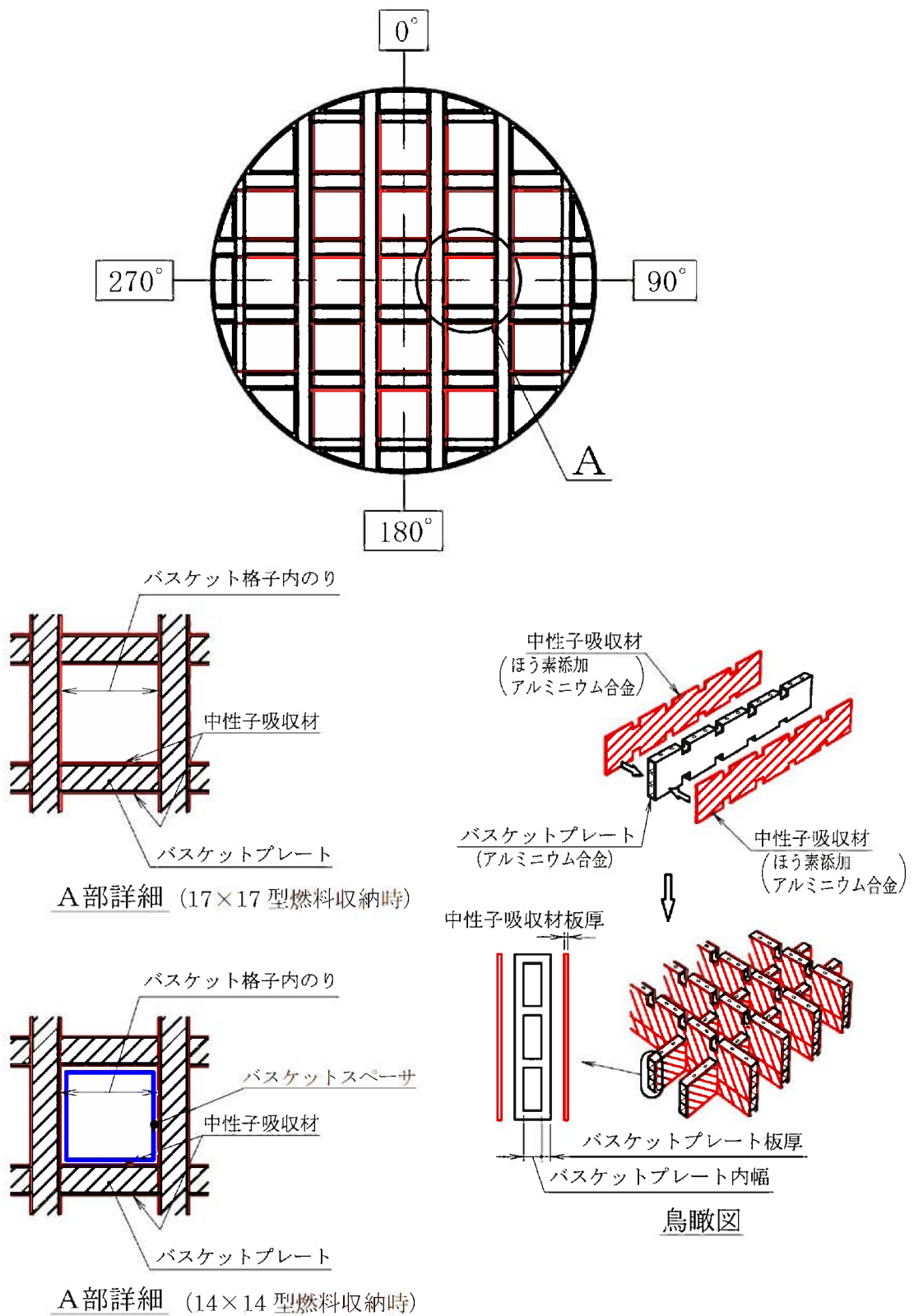
兼用キャスクが滑動する可能性がある場合は、滑動等による兼用キャスクの配置の変化に伴う中性子実効増倍率の増加についても適切に考慮すること。

乾式キャスクの乾式貯蔵施設への搬入から搬出までの乾燥状態、及び乾式キャスクに使用済燃料を収納する際の冠水状態において、技術的に想定されるいかなる場合でも、臨界を防止する設計とする。

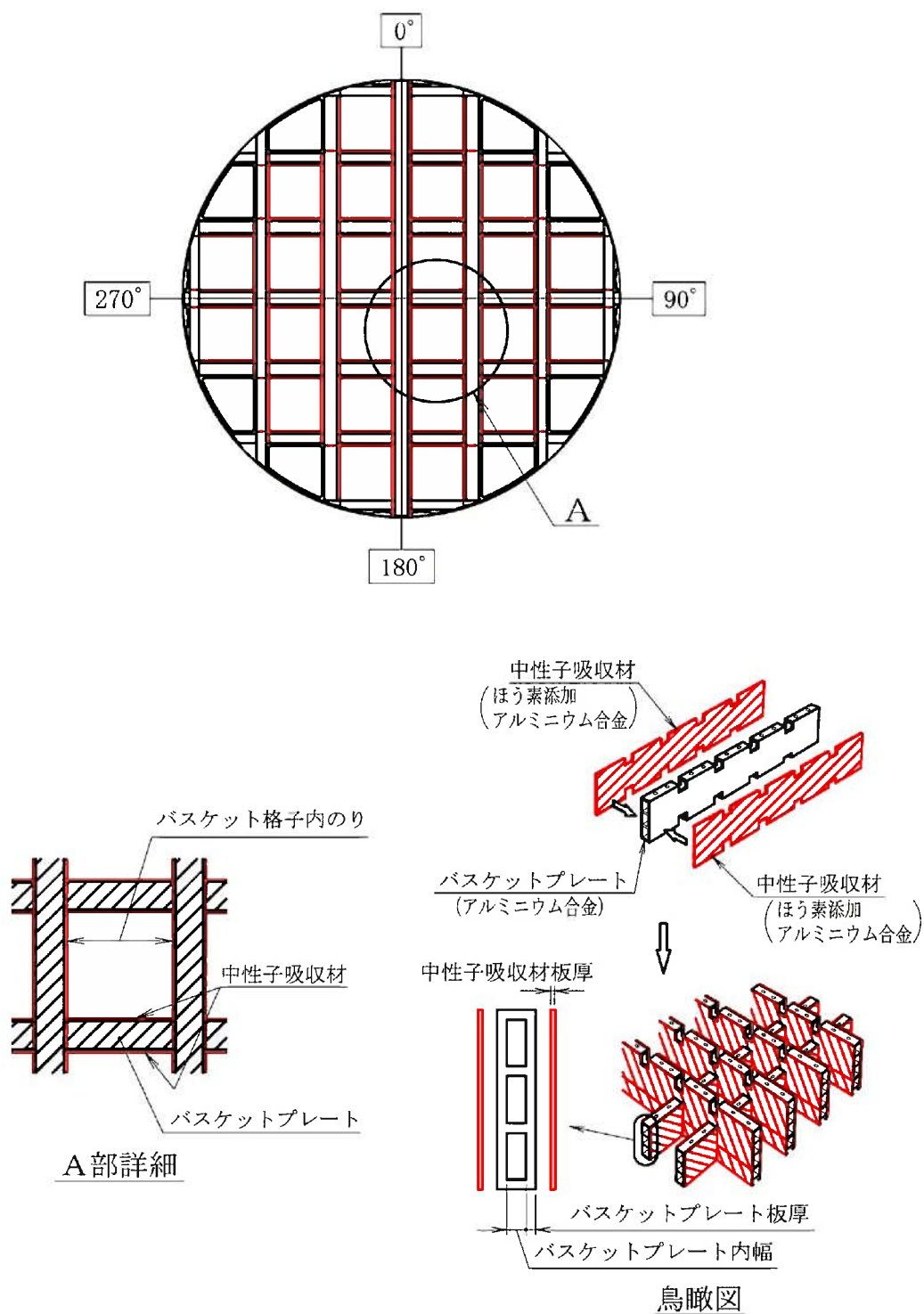
乾式キャスクのバスケットは、断面形状が中空状であるアルミニウム合金製のバスケットプレートで構成された格子構造であり、個々の使用済燃料を乾式キャスク本体内部の所定の位置に収納する。また、バスケットプレートと中性子吸収材を併せて配置することで臨界を防止する構造とする。(第2-1図, 第2-2図参照)

また、設計貯蔵期間を通じてバスケットの構造健全性を維持する設計とする。詳細は6. に示す。

なお、乾式キャスクは床等に固定するため、滑動等しない設計としており、乾式キャスクの配置の変化はない。



第 2-1 図 MSF-21P 型のバスケット構造図



第 2-2 図 MSF-24P 型のバスケット構造図

[確認内容]

2) 中性子吸収材の効果

中性子吸収材の効果に関して、以下について適切な安全裕度を考慮すること。

- a. 製造公差（濃度、非均質性、寸法等）
- b. 中性子吸収に伴う原子個数密度の減少

3) 減速材（水）の影響

使用済燃料を兼用キャスクに収納する際、当該使用済燃料が冠水することを、設計上適切に考慮すること。

4) 検証され適用性が確認された臨界解析コード及びデータライブラリを使用すること。

解析条件は第 2-1 表及び第 2-2 表のとおりとする。

乾式キャスクの臨界解析フローを第 2-3 図に示す。

臨界解析では、乾式キャスク及び燃料集合体の実形状を三次元でモデル化し（第 2-4 図～第 2-21 図参照）、解析コードとして SCALE コードシステムを用いる。

なお、乾燥状態での臨界解析に加え、乾式キャスク内は使用済燃料を収納する際の冠水状態を考慮し、水密度範囲 $0.0 \sim 1.0 \text{ g/cm}^3$ で解析した結果（第 2-22 図～第 2-24 図）、実効増倍率は水密度 1.0 g/cm^3 で最も大きくなる。

また、3. の使用済燃料乾式貯蔵容器の収納条件に記載しているとおり、臨界評価では、収納する使用済燃料は濃縮度 $[\] \text{ wt\%}$ 及び $[\] \text{ wt\%}$ の燃料の濃縮度上限値を用いて臨界評価を実施しており、燃焼度クレジットは採用しない。

本評価においては、以下の点について保守性を有している。

・ 収納制限に対する解析条件の保守性

- － 乾式キャスクに収納する使用済燃料のウラン濃縮度は照射により減損しているが、燃焼度 0GWd/t の減損していない新燃料のウラン濃縮度 $4.1 \pm [\] \text{ wt\%}$ 及び $4.8 \pm [\] \text{ wt\%}$ を保


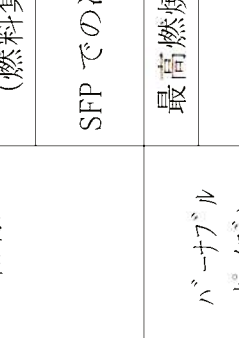

$[\]$ ：商業機密に係る事項のため公開できません

守的に〔 〕wt%及び〔 〕wt%とする。

- － 収納する使用済燃料には可燃性毒物としてガドリニウムを添加した燃料棒が含まれる場合があるが、中性子吸収効果のあるガドリニウムの存在を無視し、すべて通常のウラン新燃料とする。
- － 使用済燃料とともにバーナブルポイズン集合体を収納する場合もあるが、中性子吸収効果のあるバーナブルポイズン集合体を無視する。
- ・ モデル化の保守性
 - － 乾式キャスクが無限に配列した体系（完全反射）とする。これにより、建屋内の乾式キャスクの配置制限は必要なく、乾式キャスク相互の中性子干渉も包絡する評価となる。
 - － バスケット格子内で使用済燃料が偏ることにより実効増倍率が変化するため、バスケット内の使用済燃料の配置は実効増倍率が最も大きくなる配置とする。
具体的には、乾燥状態では、外周部及び中心部の使用済燃料ともに、中心偏向配置とし、冠水状態で、外周部の使用済燃料は外周、中央部の使用済燃料は中心偏向配置とする。
 - － バスケットプレート、中性子吸収材及びバスケットスペーサは第2-3表に示す通り、製作公差を考慮し、実効増倍率が最も大きくなる寸法とする。
 - － 中性子吸収材中のほう素の均質性は製造管理により担保し、ほう素添加量は仕様上の下限値とする。
 - － 中性子遮蔽材は無視する。
 - － バスケットプレート及び中性子吸収材は、中性子の吸収が小さくなるように、燃料有効部に相当する部分のみモデル化することとし、それ以外の部分は水または真空に置換する。

〔 〕：商業機密に係る事項のため公開できません

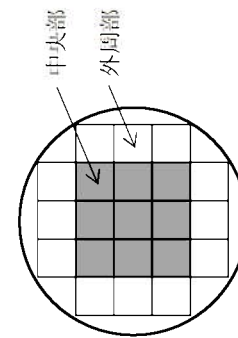
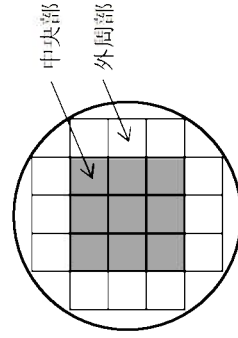
第2-1表 (1/2) MSF-21P型 乾式キャスク解析条件の概要 (17×17型燃料収納時)

収納物仕様	燃料タイプ	キャスク収納制限 配置制限		燃料スペック	解析条件	
		中央部	外周部		中央部	外周部
燃料 集合体 1体の 仕様	燃料タイプ	17×17型(A/B型)		17×17型(A/B型)	17×17型(A型)	
	初期ウラン濃縮度 (wt%)	≤4.2		4.1		
	ウラン重量 (kg)					
	最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)	≤48	≤44	≤48	0	
	SFPでの冷却期間 (年)	A型: ≥15 B型: ≥20			-	
バーナブル ポイズン	最高燃焼度 (GWd/t)	≤46	-	-	-	
	SFPでの冷却期間 (年)	A型: ≥15 B型: ≥20			-	
	平均燃焼度 (GWd/t)	≤44		-	0	
キャスク 1基あたり						
配置						

【注】：商業機密に係る事項のため公開できません

第2-1表 (2/2) MSF-21P型 乾式キャスク解析条件の概要 (14×14型燃料収納時)

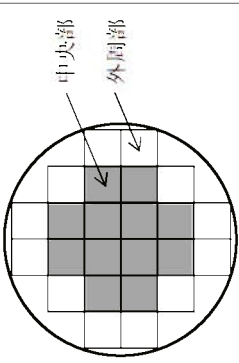
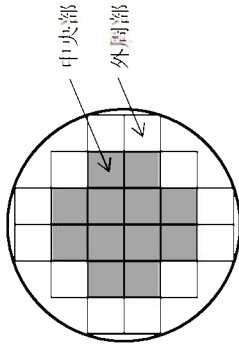
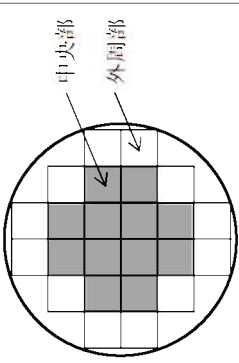
収納物仕様	キャスク収納制限 配置制限		燃料スペック	解析条件	
	中央部	外周部		中央部	外周部
燃料 集合体 1体の 仕様	燃料タイプ	14×14型(A/B型)	14×14型(A/B型)	14×14型 ^{※1}	
	初期ウラン濃縮度 (wt%)	≤4.9	4.8		
	ウラン重量 (kg)				
	最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)	≤55	≤47	≤55	0
	SFPでの冷却期間 (年)	≥15		—	—
	最高燃焼度 (GWd/t)	≤90	—	—	—
	SFPでの冷却期間 (年)	≥15	—	—	—
	平均燃焼度 (GWd/t)	≤43		—	0
	配置				
	キャスク 1基あたり				



※1: 臨界解析において14×14型燃料はA型及びB型で仕様が同じとなるため、解析条件としてA型とB型の区別をしない。

【 】: 商業機密に係る事項のため公開できません

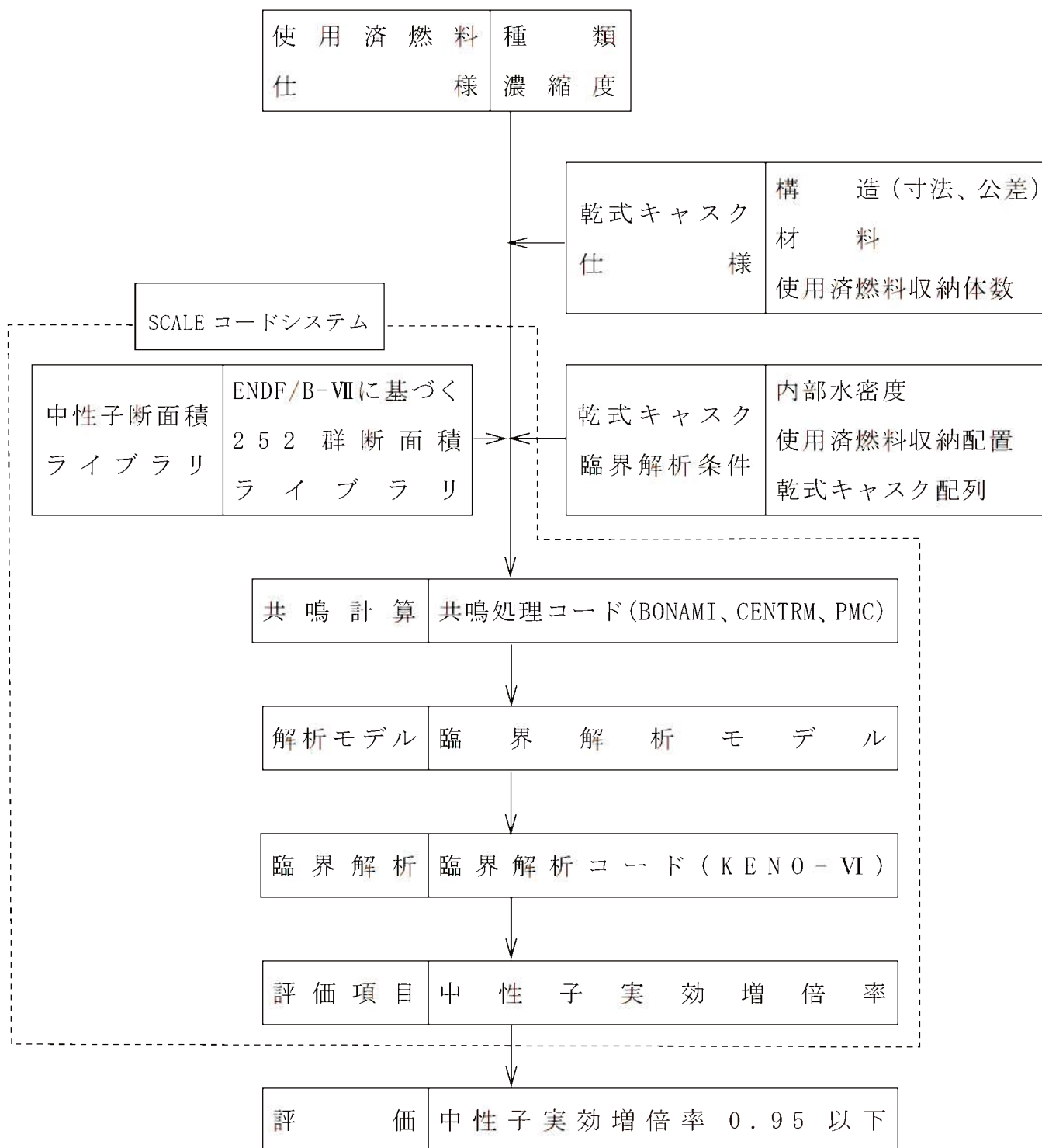
第2-2表 MSF-24P型 乾式キャスク解析条件の概要

燃料 集合体 1体の 仕様	キャスク収納制限 配置制限		燃料スペック	解析条件	
	中央部	外周部		中央部	外周部
燃料 集合体 1体の 仕様	燃料タイプ	17×17型(A/B型)	17×17型(A/B型)	17×17型(A型)	
	初期ウラン濃縮度 (wt%)	≤4.2	4.1		
	ウラン重量 (kg)				
	最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)	≤48	≤44	≤48	
バーナブル ポイズン	SFPでの冷却期間 (年)	A型: ≥15 B型: ≥17			-
	最高燃焼度 (GWd/t)	≤90			-
	SFPでの冷却期間 (年)	≥15			-
キャスク 1基あたり	平均燃焼度 (GWd/t)	≤44			0
	配置				

「」: 商業機密に係る事項のため公開できません

第2-3表 乾式キャスク臨界解析モデル寸法条件

	寸法条件		条件設定根拠
	乾燥状態	冠水状態	
バスケットプレート幅 (アルミニウム合金)	最小	最小	・隣接する燃料との距離が短くなるように乾燥状態、冠水状態共に最小としている。
バスケットプレート内幅 (アルミニウム合金)	最大	最小	・乾燥状態ではバスケットプレートでの中性子吸収効果が小さくなるように最大としている(バスケットプレート幅を固定して内幅を最大とすることでバスケットプレート板厚が最小となる)。 ・冠水状態ではバスケットプレート内幅領域での中性子の減速効果を小さくし、中性子吸収材での中性子吸収効果が小さくなるように、バスケットプレート内幅を最小としている。
バスケット格子内のり	最小	最大	・乾燥状態では隣接燃料との距離が短くなるように最小としている。 ・冠水状態では燃料領域での熱中性子が増加するように最大としている。
中性子吸収材板厚 (ほう素添加 アルミニウム合金)	最小	最小	・隣接する燃料との距離が短くなるように乾燥状態、冠水状態共に中性子吸収材板厚を最小としている。なお、中性子吸収材のほう素添加量は板厚に係わらず仕様上の下限値で一定としている。
バスケットスペーサ外寸 (アルミニウム合金)	最小	最大	・乾燥状態では隣接する燃料との距離が短くなるように外寸、板厚ともに最小としている。
バスケットスペーサ板厚 (アルミニウム合金)	最小	最小	・冠水状態では燃料周囲の水の量が多くなるように外寸は最大、板厚は最小としている。



第2-3図 乾式キャスクの臨界解析フロー図



第 2-4 図 臨界解析モデル（縦断面図）
（MSF-21P 型 17×17 型燃料収納時）（冠水状態）

〔 〕：商業機密に係る事項のため公開できません



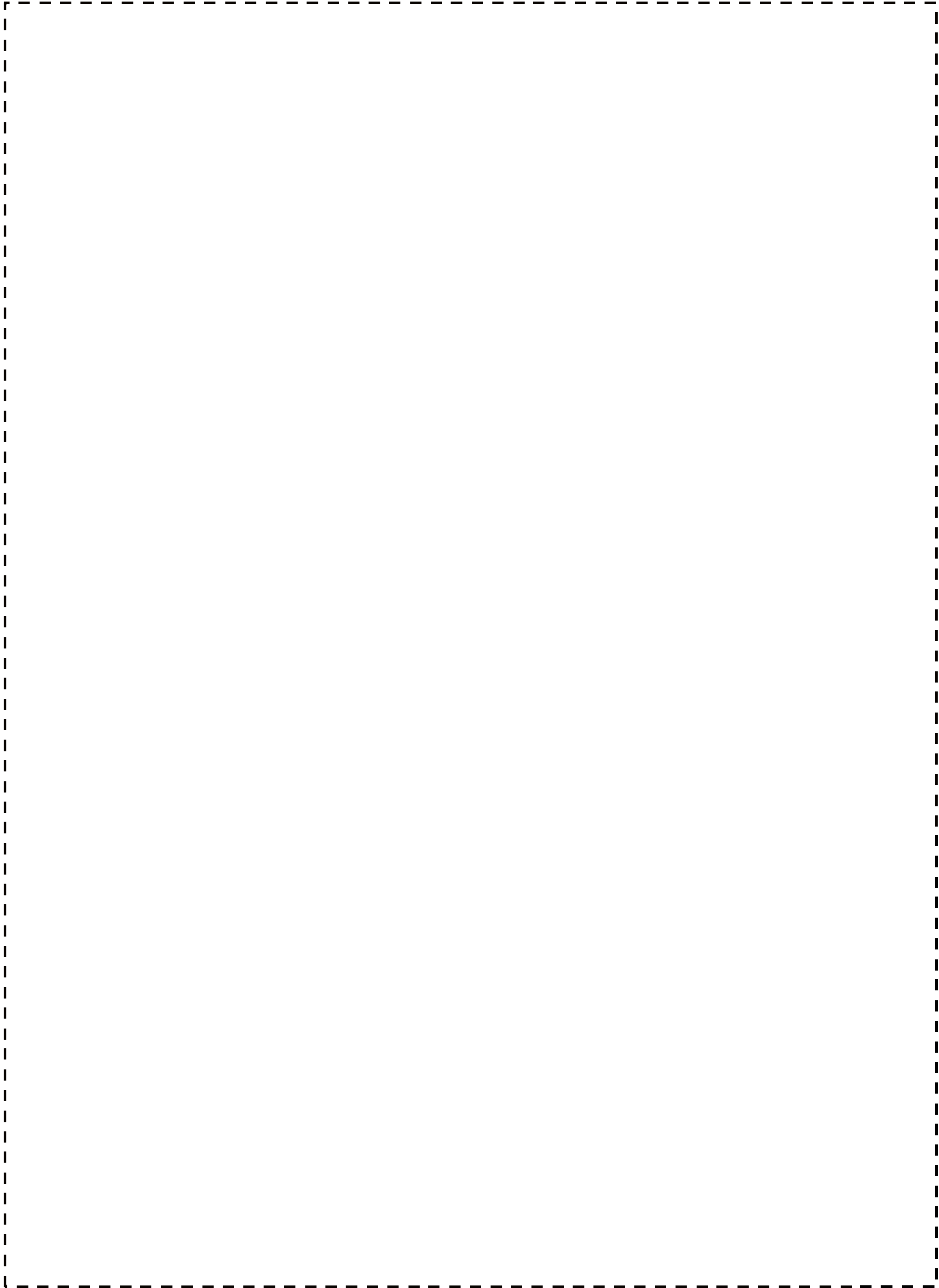
第 2-5 図 臨界解析モデル（燃料領域横断面図）
（MSF-21P 型 17×17 型燃料収納時）（冠水状態）

〔 〕：商業機密に係る事項のため公開できません



第 2-6 図 臨界解析モデル（燃料領域拡大図）
（MSF-21P 型 17×17 型燃料収納時）（冠水状態）

【 〇 】：商業機密に係る事項のため公開できません



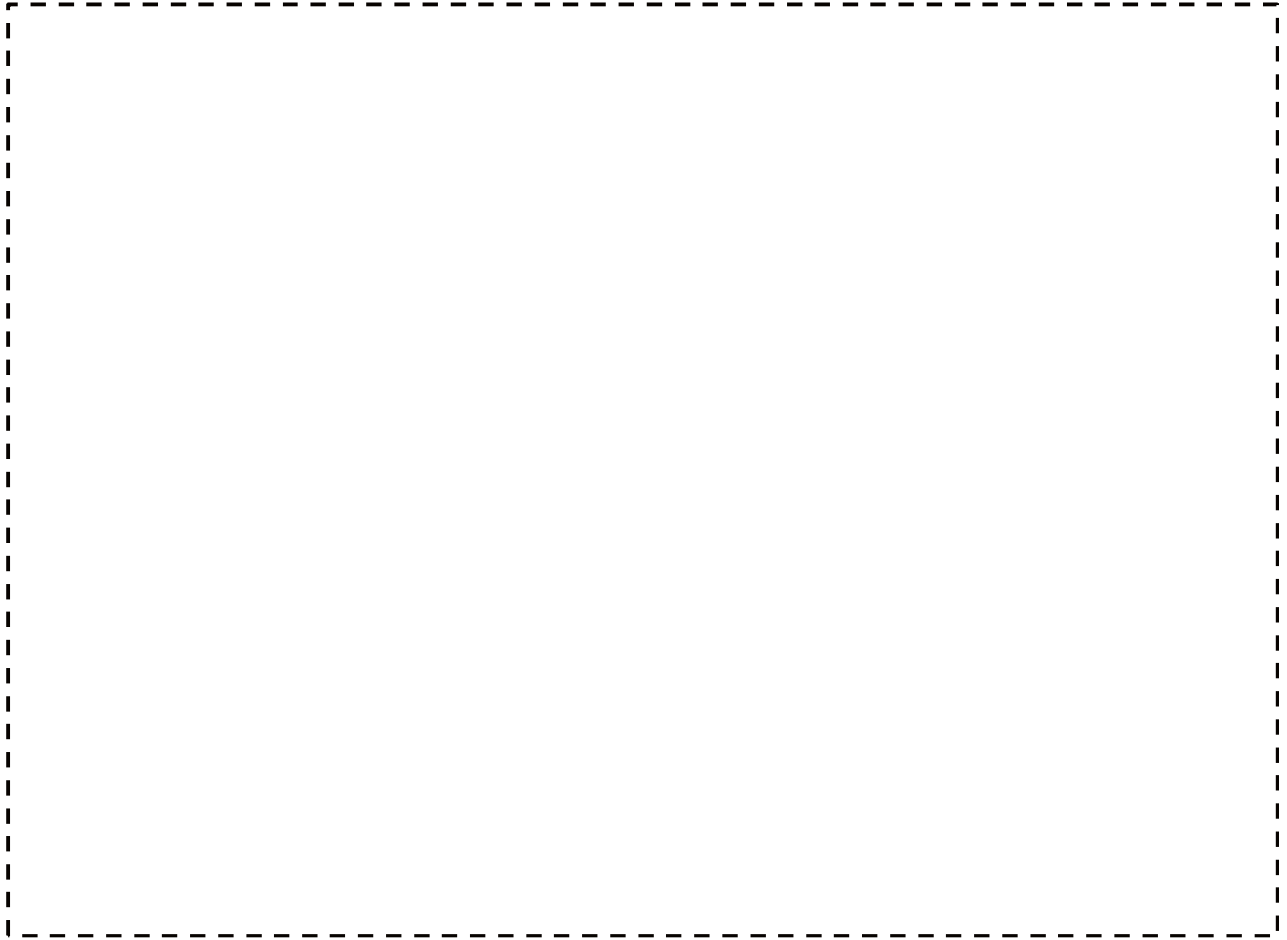
第 2-7 図 臨界解析モデル（縦断面図）
（MSF-21P 型 14×14 型燃料収納時）（冠水状態）

【 〇 】：商業機密に係る事項のため公開できません



第 2-8 図 臨界解析モデル (燃料領域横断面図)
(MSF-21P 型 14×14 型燃料収納時) (冠水状態)

〔 〕 : 商業機密に係る事項のため公開できません



第 2-9 図 臨界解析モデル（燃料領域拡大図）
（MSF-21P 型 14×14 型燃料収納時）（冠水状態）

〔 〕：商業機密に係る事項のため公開できません



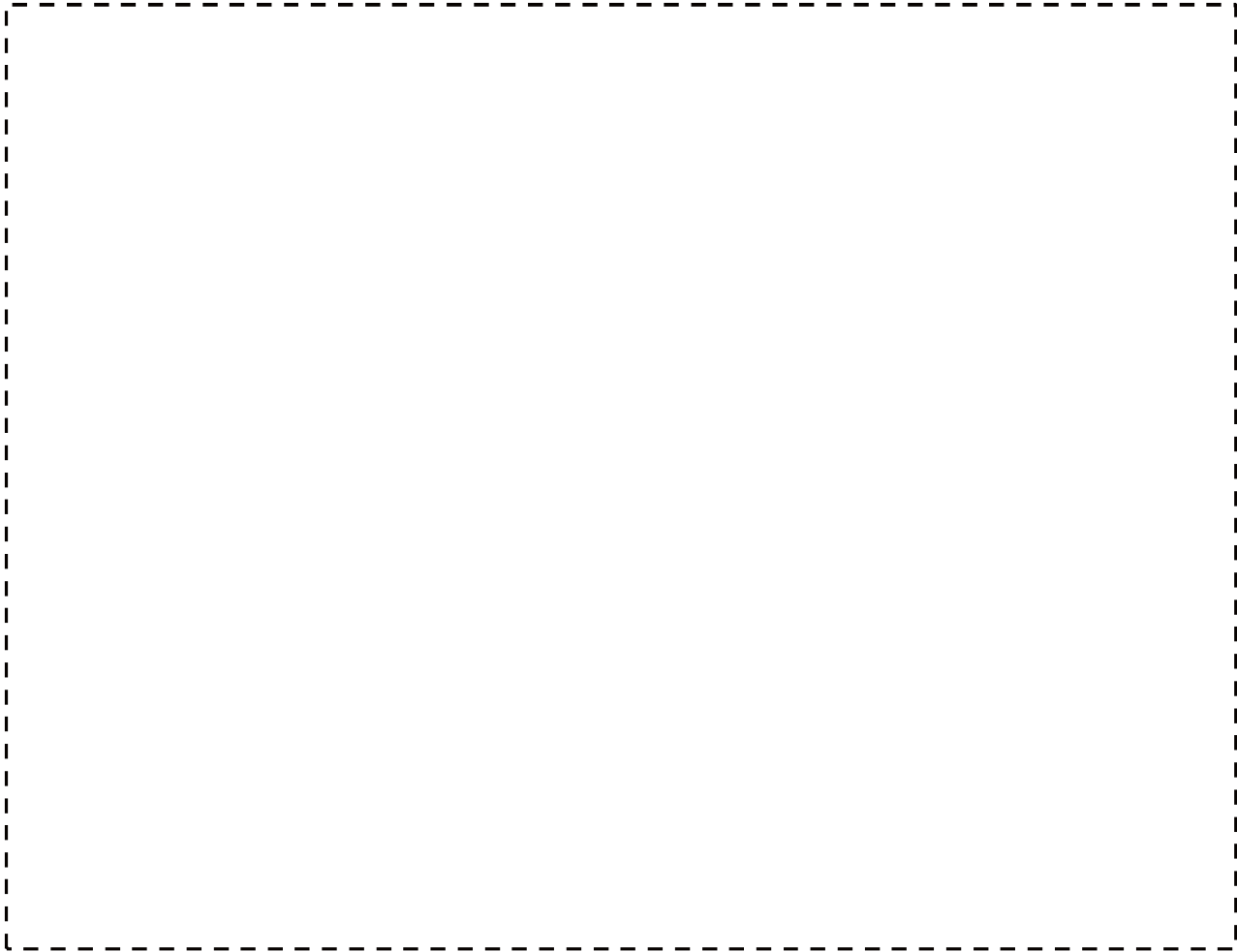
第 2-10 図 臨界解析モデル（縦断面図）（MSF-24P 型）（冠水状態）

〔 〕：商業機密に係る事項のため公開できません



第 2-11 図 臨界解析モデル（燃料領域横断面図）（MSF-24P 型）（冠水状態）

〔 〕：商業機密に係る事項のため公開できません



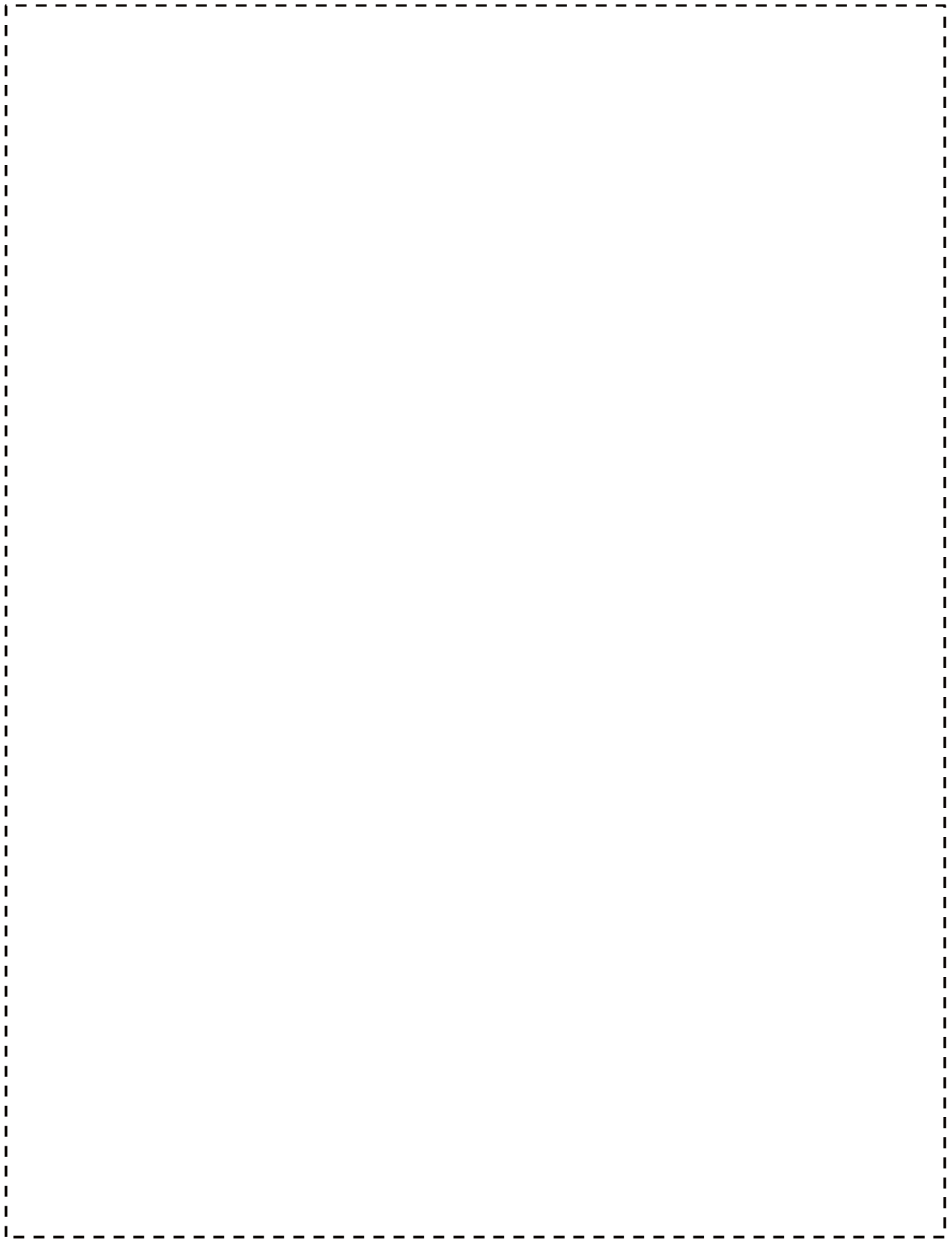
第 2-12 図 臨界解析モデル（燃料領域拡大図）（MSF-24P 型）（冠水状態）

〔 〕：商業機密に係る事項のため公開できません



第 2-13 図 臨界解析モデル（縦断面図）
（MSF-21P 型 17×17 型燃料収納時）（乾燥状態）

〔 〕：商業機密に係る事項のため公開できません



第 2-14 図 臨界解析モデル（燃料領域横断面図）
（MSF-21P 型 17×17 型燃料収納時）（乾燥状態）

【 〇 】：商業機密に係る事項のため公開できません



第 2-15 図 臨界解析モデル（燃料領域拡大図）
（MSF-21P 型 17×17 型燃料収納時）（乾燥状態）

〔 〕：商業機密に係る事項のため公開できません



第 2-16 図 臨界解析モデル（縦断面図）
（MSF-21P 型 14×14 型燃料収納時）（乾燥状態）

【 〇 】：商業機密に係る事項のため公開できません



第 2-17 図 臨界解析モデル（燃料領域横断面図）
（MSF-21P 型 14×14 型燃料収納時）（乾燥状態）

〔 〕：商業機密に係る事項のため公開できません



第 2-18 図 臨界解析モデル（燃料領域拡大図）
（MSF-21P 型 14×14 型料収納時）（乾燥状態）

〔 〕：商業機密に係る事項のため公開できません



第2-19 図 臨界解析モデル（縦断面図）（MSF-24P 型）（乾燥状態）

〔 〕：商業機密に係る事項のため公開できません



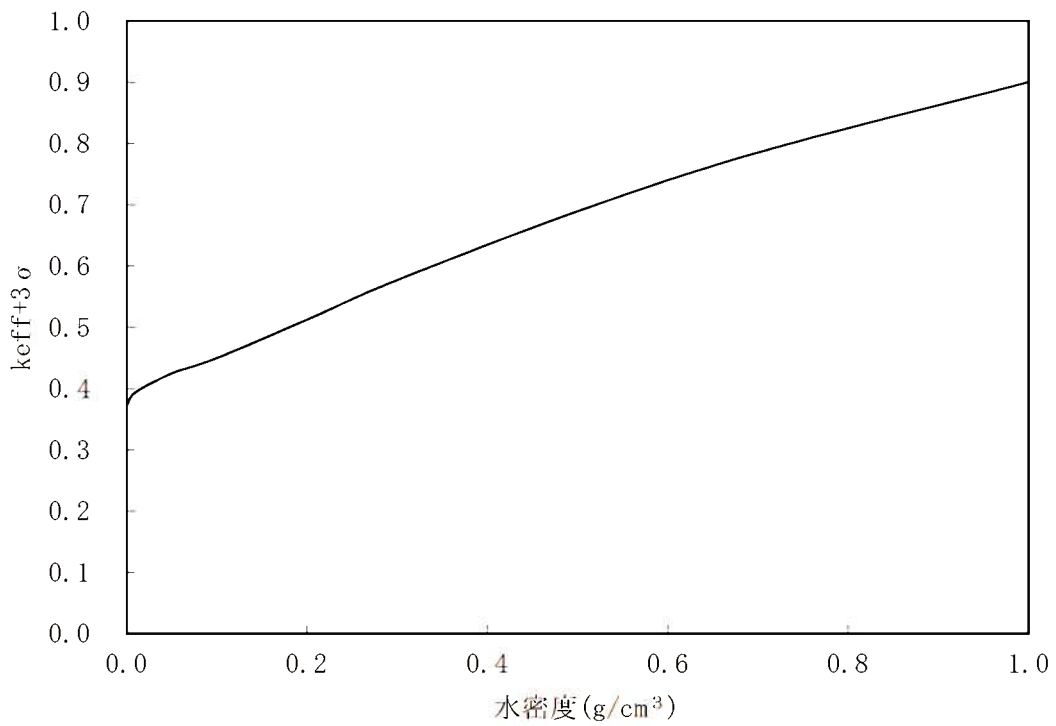
第 2-20 図 臨界解析モデル（燃料領域横断面図）（MSF-24P 型）（乾燥状態）

〔 〕：商業機密に係る事項のため公開できません

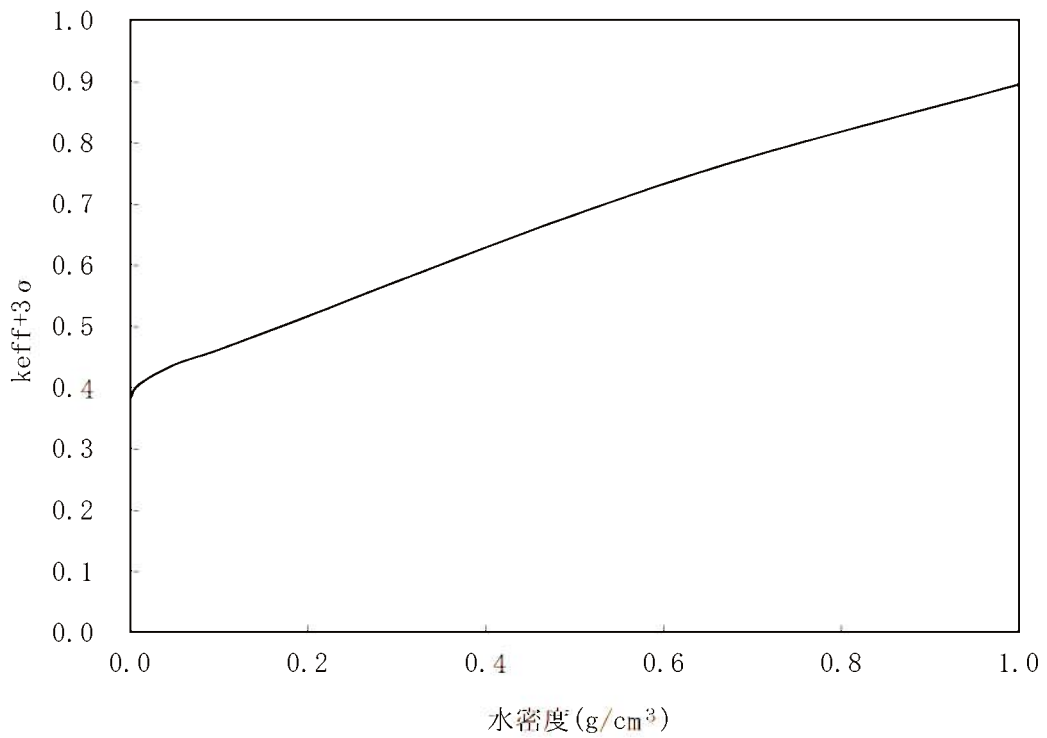


第 2-21 図 臨界解析モデル（燃料領域拡大図）（MSF-24P 型）（乾燥状態）

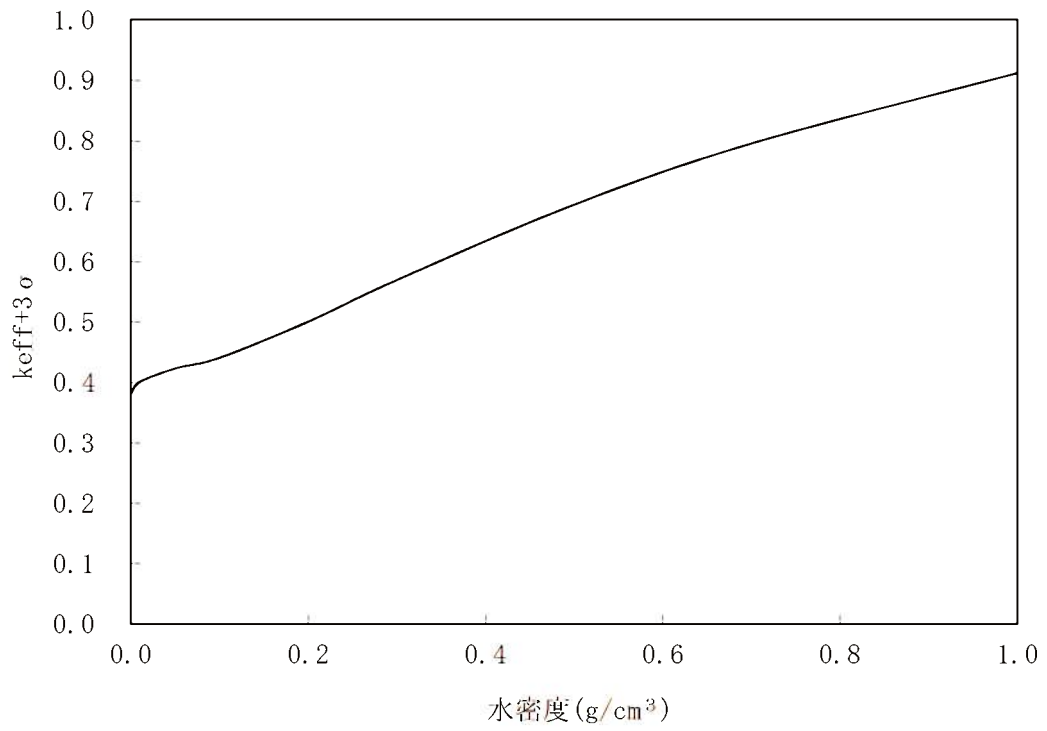
〔 〕：商業機密に係る事項のため公開できません



第 2-22 図 MSF-21P 型内雰囲気による臨界解析結果 (17×17 型燃料収納時)



第 2-23 図 MSF-21P 型内雰囲気による臨界解析結果 (14×14 型燃料収納時)



第 2-24 図 MSF-24P 型内雰囲気による臨界解析結果

技術的に想定されるいかなる場合においても、第 2-4 表に示すとおり、評価基準を満たしている。

評価結果は、MSF-21P 型と MSF-24P 型の乾式キャスクそれぞれを無限に配列した体系（完全反射）で解析した結果であり、MSF-21P 型と MSF-24P 型の乾式キャスクが乾式貯蔵建屋内で混在した場合でも、MSF-24P 型の評価結果に包絡されるため、乾式貯蔵建屋内での乾式キャスクの配置制限は不要である。

第 2-4 表 評価結果

項目	評価結果			評価基準	備考
	MSF-21P 型		MSF-24P 型		
	17×17 型燃料 収納時	14×14 型燃料 収納時			
中性子実効増倍率	冠水状態 0.91 (3σ : 0.00156)	0.89 (3σ : 0.00120)	0.92 (3σ : 0.00135)	0.95 以下 ¹⁾	なお、SCALE コードシステムはモンテカルロ法であり統計誤差を伴うため、本評価結果は解析コードの精度等を考慮して、統計誤差(σ)の3倍(3σ)を加味した値である。
乾燥状態	0.38 (3σ : 0.00039)	0.39 (3σ : 0.00039)	0.39 (3σ : 0.00039)		

〔確認内容〕

5) 設計上、バスケットの塑性変形が想定される場合は、塑性変形したバスケットの形状及び使用済燃料の状態を考慮しても未臨界が維持されること。

7. に示すとおり、乾式キャスク通常貯蔵時において、バスケットの塑性変形が想定されない設計とする。

また、設計上考慮すべき自然現象において、乾式貯蔵建屋等の損壊及び兼用キャスクの転倒が生じない設計とし、バスケットの塑性変形が想定されない設計とする。詳細は設置許可基準第 4 条及び 6 条まとめ資料で説明する。

3. 使用する解析コード

a. 解析コード

乾式キャスクの臨界防止設計に用いる解析コードについて、その機能、計算方法、使用実績及び検証結果について説明する。

(a) SCALE コードシステム

i 概要

臨界解析には、米国のオークリッジ国立研究所（ORNL）で開発された公開の SCALE コードシステム²⁾を用い、実効増倍率の計算には同コードシステムに含まれる KENO-VI コードを用いる。

SCALE コードシステムは、米国 NRC により認証された標準解析コードであり、国内外の臨界解析の分野で幅広く使用されている。

ii 機能

SCALE コードシステムは、臨界解析に際して以下の特徴を有している。

- a) 燃料及び構造材の材質組成と幾何形状を与えることにより、断面積作成から実効増倍率評価まで一連の解析を実行できる。
- b) 三次元輸送計算コードであり、複雑な幾何形状における臨界計算が可能である。

iii 解析フロー

SCALE コードシステムの解析フローを第 2-25 図に示す。

iv 使用実績及び検証

臨界解析で使用した SCALE コードシステムに対しては、乾式キャスクを模擬した多数の臨界実験のベンチマーク試験解析が実施され、その妥当性が示されている。

文献 3) に示す実験について、収納物である使用済燃料の仕様並びに下記①～⑥の条件を考慮し、ベンチマーク試験解析を実施する臨界実験を選定した。第 2-5 表に示すとおりベン

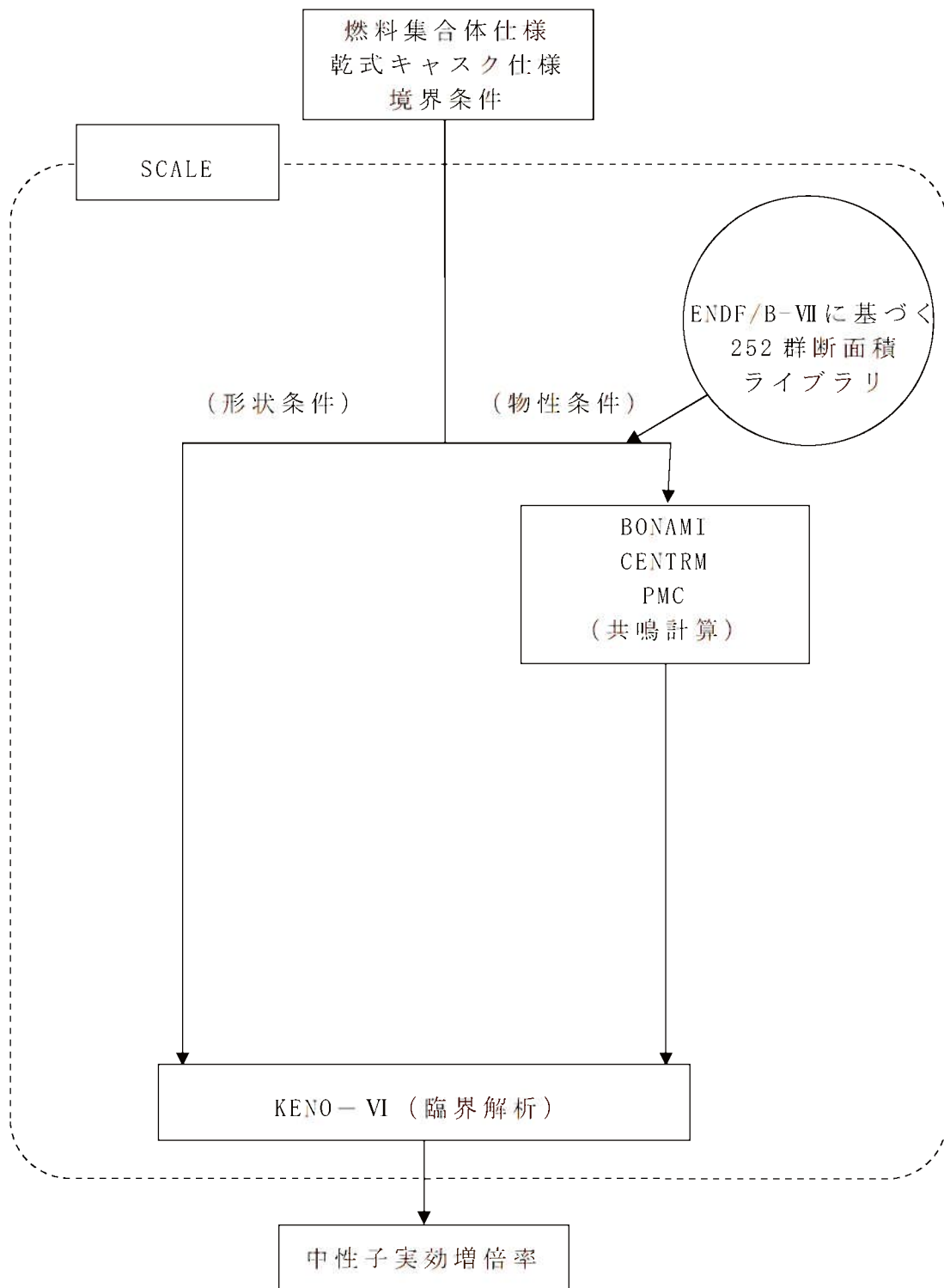
チマーク試験解析は実験を良く再現しており、妥当な結果が得られている。

- ①燃料棒を配列した集合体が水中に単独で存在する場合
- ②複数の集合体が近接して配列する場合
- ③この集合体の配列の間に鋼板、中性子吸収材（ほう素）を含む板が存在する場合
- ④集合体に近接して反射体（鋼板、鉛）を配置した場合
- ⑤水中に中性子吸収材（ほう素）が溶解している場合
- ⑥乾式貯蔵の条件を模擬し、減速材を用いない場合

第 2-5 表 ベンチマーク試験解析結果

	ケース数	平均値	標準偏差	最大値	最小値
臨界実験 (1)		0.99961	0.00304	1.01172	0.99651
臨界実験 (2)		0.99776	0.00264	1.00055	0.99363
臨界実験 (3)		1.00279	0.00259	1.00452	0.99981
臨界実験 (4)		0.99514	0.00219	0.99895	0.99202
合計		0.99880	0.00332	1.01172	0.99202

□□：商業機密に係る事項のため公開できません



第 2-25 図 SCALE コードシステムの解析フロー図

4. 参考文献

- 1) 日本原子力研究所, 「臨界安全ハンドブック第2版」, JAERI 1340, (1999).
- 2) B. T. Rearden and M. A. Jessee, Eds., “SCALE Code System”, ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.1, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee (2016).
- 3) Organisation for Economic Co-operation and Development Nuclear Energy Agency, “International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments”, NEA/NSC/DOC(95)03, (2006).

使用済燃料乾式貯蔵容器の
4つの安全機能について
(遮蔽機能)

<目 次>

1. 要求事項
2. 適合性について
3. 使用する解析コード
4. 参考文献

1. 要求事項

乾式キャスクの遮蔽機能に関する要求事項は、以下のとおりである。

(1) 設置許可基準規則要求事項

①設置許可基準規則第16条第4項一号

- ・使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽能力を有するものとする。

②設置許可基準規則解釈別記4第16条2項

第16条第4項第1号に規定する「適切な遮蔽能力を有する」とは、第5項に規定するもののほか、以下をいう。

- ・貯蔵事業許可基準規則解釈第4条第1項第3号に規定する金属キャスクの設計に関する基準を満たすこと。
- ・兼用キャスク表面の線量当量率が1時間当たり2ミリシーベルト以下であり、かつ、兼用キャスク表面から1メートル離れた位置における線量当量率が1時間当たり100マイクロシーベルト以下であること。
- ・貯蔵建屋（工場等内において兼用キャスクを収納する建物をいう。以下この条において同じ。）を設置する場合には、当該貯蔵建屋の損傷によりその遮蔽機能が著しく低下したときにおいても、工場等周辺の実効線量は周辺監視区域外における線量限度を超えないこと。

なお、当該貯蔵建屋が損傷したときからその遮蔽機能の応急の復旧が完了するまでの間は、第29条に規定する「通常運転時」には当たらない。

③設置許可基準規則解釈別記4第16条5項

- ・第16条第2項第1号ハ及び同条第4項各号を満たすため、兼用キャスクは、当該兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確

保する設計とすること。ここで、「兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計」とは、以下を満たす設計をいう。

- ・設計貯蔵期間を明確にしていること。
- ・設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境条件下での経年変化を考慮した材料及び構造であること。

(2) 原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド確認事項

「2.安全機能の確保 2.2 遮蔽機能」には、以下のように記載されている。

【審査における確認事項】

『

- (1) 設計上想定される状態において、使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽機能を有すること。
- (2) 通常貯蔵時の兼用キャスク表面の線量当量率を 2mSv/h 以下とし、かつ、兼用キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率を $100\ \mu\text{Sv/h}$ 以下とすること。
- (3) 通常貯蔵時の直接線及びスカイシャイン線について、原子力発電所敷地内の他の施設からのガンマ線と兼用キャスクからの中性子及びガンマ線とを合算し、ALARA の考え方の下、敷地境界において実効線量で $50\ \mu\text{Sv/y}$ 以下となることを目標に、線量限度 (1mSv/y) を十分下回る水準とすること。
- (4) 貯蔵建屋等の損傷によりその遮蔽機能が著しく低下した場合においても、工場等周辺の実効線量が線量限度 (1mSv/y) を超えないこと。

』

【確認内容】

『

以下を踏まえ遮蔽設計が妥当であること。

1) 使用済燃料の放射線源強度評価

使用済燃料の放射線源強度は、検証され適用性が確認された燃焼計算コードを使用して求めること。また、燃料型式、燃焼度、濃縮度、冷却年数等を条件とし、核種の生成及び崩壊を計算して求めること。

2) 兼用キャスクの遮蔽機能評価

a. 兼用キャスクからの線量当量率は、兼用キャスクの実形状を適切にモデル化し、及び1)で求めた放射線源強度に基づき、検証され適用性が確認された遮蔽解析コード及び断面積ライブラリ（以下、「遮蔽解析コード等」と総称する。）を使用して求めること。その際、設計貯蔵期間中の兼用キャスクのガンマ線遮蔽材及び中性子遮蔽材の熱劣化による遮蔽機能の低下を考慮すること。

b. 兼用キャスク表面の線量当量率を 2mSv/h 以下とし、かつ、兼用キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率を $100\mu\text{Sv/h}$ 以下とすること。

3) 敷地境界における実効線量評価

① 直接線及びスカイシャイン線の評価

兼用キャスクが敷地境界に近い場所に設置される場合等に、使用済燃料から放出される中性子の敷地境界線量への寄与が大きくなる可能性があることを適切に考慮した上で、通常貯蔵時の直接線及びスカイシャイン線（ガンマ線及び中性子）による実効線量について評価すること。

② ソースターム

兼用キャスクの遮蔽機能データ又は兼用キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率が $100\mu\text{Sv/h}$ となるよう放射線源強度を規格化したものを用いること。こ

ここで、放射線源強度を規格化して用いる場合は、中性子100%又はガンマ線100%のいずれか保守的な線量評価とすること。また、中性子及びガンマ線の表面エネルギースペクトルは、保守的な線量評価となるものを使用すること。

③ 遮蔽解析コード等

検証され適用性が確認された遮蔽解析コード等を使用すること。なお、モンテカルロコードを用いる場合は、相互遮蔽効果、ストリーミング及びコンクリート深層透過の観点から検証され適用性が確認されたものであること。

④ 通常貯蔵時の線量

通常貯蔵時の直接線及びスカイシャイン線について、原子力発電所敷地内の他の施設からのガンマ線と兼用キャスクからの中性子及びガンマ線とを合算し、ALARAの考え方の下、敷地境界において実効線量で $50\mu\text{Sv/y}$ 以下となることを目標に、線量限度(1mSv/y)を十分下回る水準とすること。

なお、兼用キャスク以外の施設の線量は、既評価の空気カーマ(Gy/y)を実効線量(Sv/y)へ換算し、又は新たに実効線量(Sv/y)を評価するものとする。換算に当たっては、係数を1とすること。

4) 応急復旧

貯蔵建屋等を設置する場合は、貯蔵建屋等の損傷によりその遮蔽機能が著しく低下した場合においても、必要に応じて土嚢による遮蔽の追加等の適切な手段による応急復旧を行うことにより、工場等周辺の実効線量が敷地全体で線量限度(1mSv/y)を超えないこと。この場合において、応急復旧による遮蔽機能の回復を期待する場合には、その実施に係る体制を適切に整備すること。

』

2. 適合性について

審査ガイドでは、設置（変更）許可に係る審査において、兼用キャスクの有する4つの安全機能（臨界防止機能、遮蔽機能、除熱機能及び閉じ込め機能）に係る設計の基本方針の妥当性を確認することが定められており、乾式キャスクの遮蔽機能については、以下のとおり審査ガイドの確認内容に適合している。

〔確認内容〕

1) 使用済燃料の放射線源強度評価

使用済燃料の放射線源強度は、検証され適用性が確認された燃焼計算コードを使用して求めること。また、燃料型式、燃焼度、濃縮度、冷却年数等を条件とし、核種の生成及び崩壊を計算して求めること。

2) 兼用キャスクの遮蔽機能評価

- a. 兼用キャスクからの線量当量率は、兼用キャスクの実形状を適切にモデル化し、及び1) で求めた放射線源強度に基づき、検証され適用性が確認された遮蔽解析コード及び断面積ライブラリ（以下、「遮蔽解析コード等」と総称する。）を使用して求めること。その際、設計貯蔵期間中の兼用キャスクのガンマ線遮蔽材及び中性子遮蔽材の熱劣化による遮蔽機能の低下を考慮すること。
- b. 兼用キャスク表面の線量当量率を 2mSv/h 以下とし、かつ、兼用キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率を $100\ \mu\text{Sv/h}$ 以下とすること。

使用済燃料からの放射線をガンマ線遮蔽材及び中性子遮蔽材により遮蔽する設計とする。

また、乾式キャスクは、事業所外運搬に使用する輸送容器の機能を持つため、「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則」（以下、「外運搬規則」という。）に示される要求事項を満足する設計とする。

乾式キャスクは、使用済燃料からの放射線を乾式キャスク本体及び蓋部により遮蔽する。ガンマ線遮蔽材には、鋼製の材料を用い、

中性子遮蔽材には、水素を多く含有するレジンを用いる。

乾式キャスクの遮蔽解析フローを第 2-1 図に示す。解析条件は第 2-1 表及び第 2-2 表のとおりとし、遮蔽解析モデル化の概要を第 2-2 図、解析モデル図を第 2-3 図～第 2-10 図に示す。

a. 使用済燃料の線源強度評価方法

使用済燃料の型式、燃焼度（集合体平均）、濃縮度及び冷却期間等を条件に燃焼計算コード ORIGEN2 を使用して核種の生成、崩壊及びそれに基づく放射線源強度（以下、「線源強度」という。）を計算する。

b. 乾式キャスクの線量当量率評価方法

乾式キャスクの線量当量率は、乾式キャスクの実形状を適切にモデル化し、使用済燃料の線源強度を条件として、遮蔽解析コード DOT3.5 を使用して求める。線量当量率の算定にあたっては、設計貯蔵期間（60 年）中における熱による中性子遮蔽材の遮蔽性能の低下を考慮する。

なお、本評価においては、以下の点について保守性を有している。

・ 収納制限に対する解析条件の保守性

－ウラン濃縮度 $4.1 \pm [\]$ wt% 及び $4.8 \pm [\]$ wt% を保守的に $[\]$ wt% 及び $[\]$ wt% とする。

－遮蔽評価においては、局所的な表面線量を評価する必要があるため、使用済燃料の燃焼度（集合体平均）は中央部、外周部共に当該配置の収納制限の最高燃焼度を設定している。

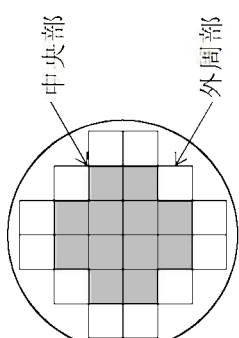
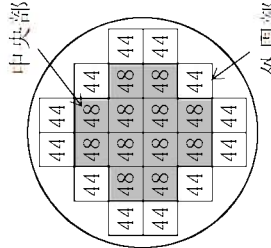
－使用済燃料は、使用済燃料ごとに軸方向の燃焼度分布に基づく線源強度分布を有するが、線源強度計算にあたっては、軸方向燃焼度分布を第 2-11 図及び第 2-12 図のとおりとし、実際の燃焼度分布より保守的に計算している。

・ モデル化の保守性

$[\]$ ：商業機密に係る事項のため公開できません

- － 中性子遮蔽材は、評価期間中の熱的影響により質量減損（2%程度）が発生するため、遮蔽評価上、保守的に 2.5 % の質量減損を考慮（原子個数密度で考慮）する。
- － 使用済燃料について胴内で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ており、線源である使用済燃料が評価点により近くなる設定としている。
- － バーナブルポイズン集合体は、放射化による線源強度については考慮するが、構造材としての遮蔽効果は無視する。

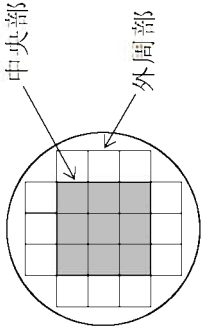
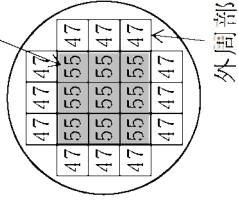
第2-1表 乾式キャスク (MSF-24P型) 解析条件の概要

収納物仕様	燃料タイプ	キャスク収納制限 配置制限		燃料スペック	解析条件	
		中央部	外周部		中央部	外周部
燃料 集合体 1体の 仕様	燃料タイプ	17×17型(A/B型)		17×17型(A/B型)	17×17型(A型)	
	初期ウラン濃縮度 (wt%)	≤4.2		4.1	[]	
	ウラン重量 (kg)	[]		[]	[]	
	最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)	≤48	≤44	≤48	48	44
	SFPでの冷却期間 (年)	A型: ≥15 B型: ≥17		—	15	
バーナブル ポイズン キャスク 1基あたり	最高燃焼度 (GWd/t)	≤90	—	—	90	—
	SFPでの冷却期間 (年)	≥15	—	—	15	—
	平均燃焼度 (GWd/t)	≤44		—	—	
配置*			—			

※: 数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

[]: 商業機密に係る事項のため公開できません

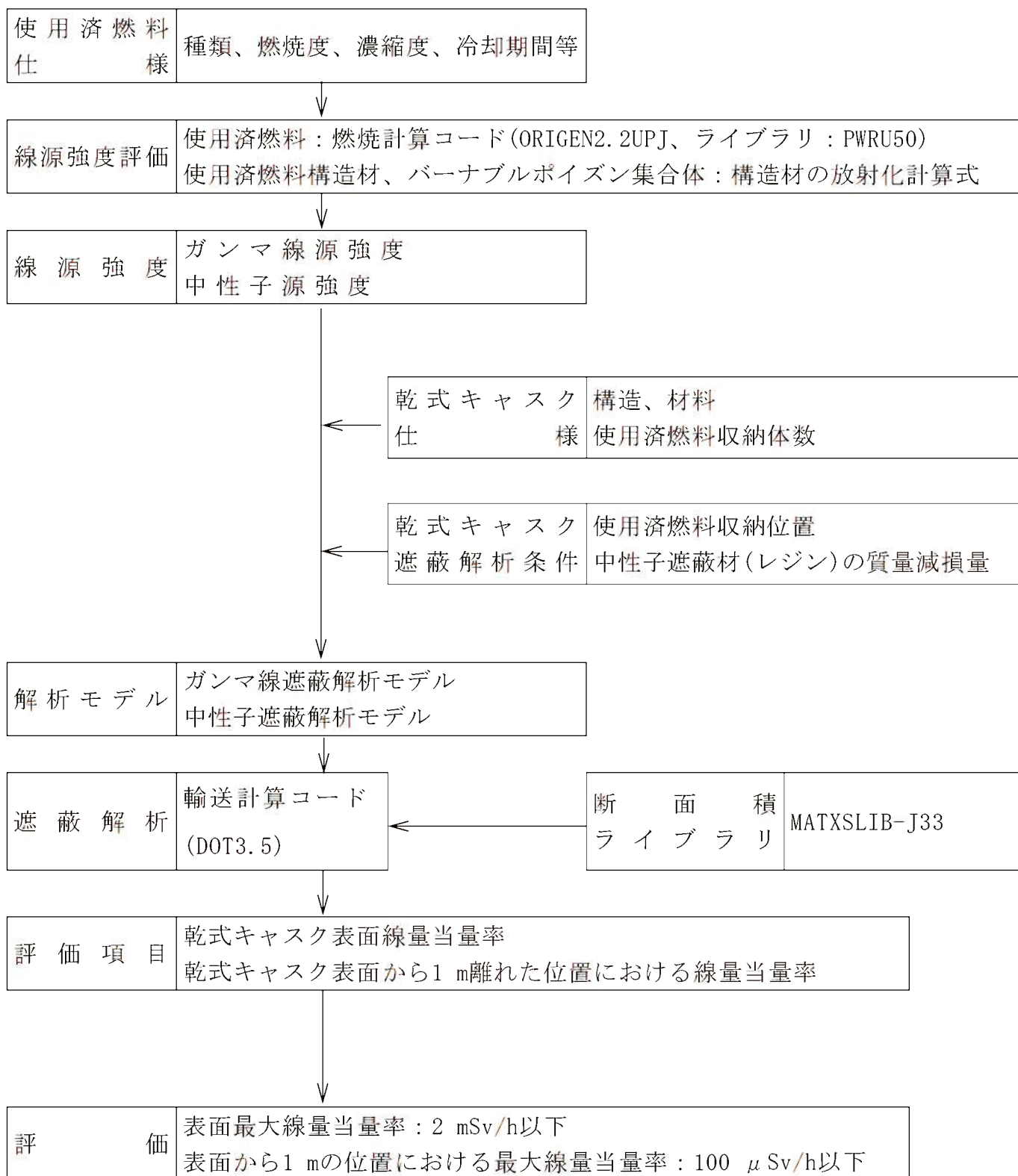
第2-2表 乾式キャスク (MSF-21P型) 解析条件の概要

燃料 集合体 1体の 仕様	キャスク収納制限				燃料スペック	解析条件	
	17×17型燃料収納時		14×14型燃料収納時			中央部	外周部
	中央部	外周部	中央部	外周部			
燃料タイプ	17×17型 (A/B型)		14×14型 (A/B型)		17×17型 (A/B型)	14×14型 (A/B型)	14×14型 (B型)
初期ウラン濃縮度 (wt%)	≤4.2		≤4.9		4.1	4.8	
ウラン重量 (kg)	≤48		≤44		≤55	≤47	≤55
最高燃焼度 (Gwd/t) (燃料集合体平均)	A型: ≥15 B型: ≥20		≥15		≥15	—	15
SFPでの冷却期間 (年)	≤46		—		≤90	—	90
最高燃焼度 (Gwd/t)	A型: ≥15 B型: ≥20		≥15		≥15	—	15
SFPでの冷却期間 (年)	≤44		—		≤43	—	—
平均燃焼度 (Gwd/t)	—		—		—	—	—
キャスク 1基あたり	—		—		—	—	—
収納物仕様	配置※2						

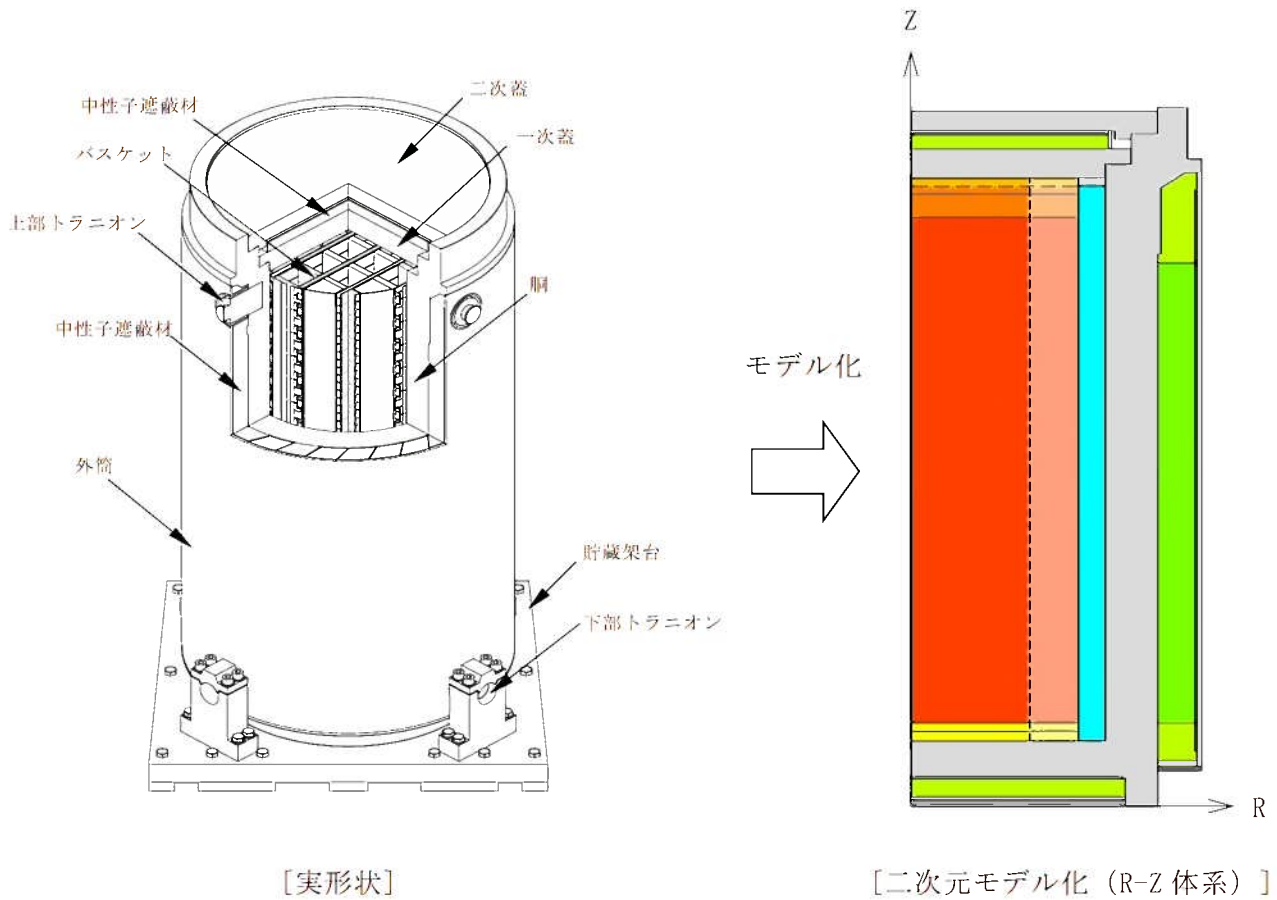
※1: 48Gwd/t型燃料を収納する条件とする。実燃焼度が同じであれば、55Gwd/t型燃料に比べ48Gwd/t型燃料のほうが、厳しい条件となる。

※2: 数値は燃焼度 (Gwd/t) を示す。

□□: 商業機密に係る事項のため公開できません



第2-1図 乾式キャスクの遮蔽解析フロー図



	燃料有効部中央+バスケット均質化領域		燃料有効部外周+バスケット均質化領域
	燃料上部構造材中央+バスケット均質化領域		燃料上部構造材外周+バスケット均質化領域
	燃料上部構造材中央		燃料上部構造材外周
	燃料下部構造材中央+バスケット均質化領域		燃料下部構造材外周+バスケット均質化領域
	バスケット外周部		胴、外筒、一次蓋、二次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー領域
	中性子遮蔽材領域		底部中性子遮蔽材カバー、下部端板領域
	中性子遮蔽材+伝熱フィン均質化領域		真空

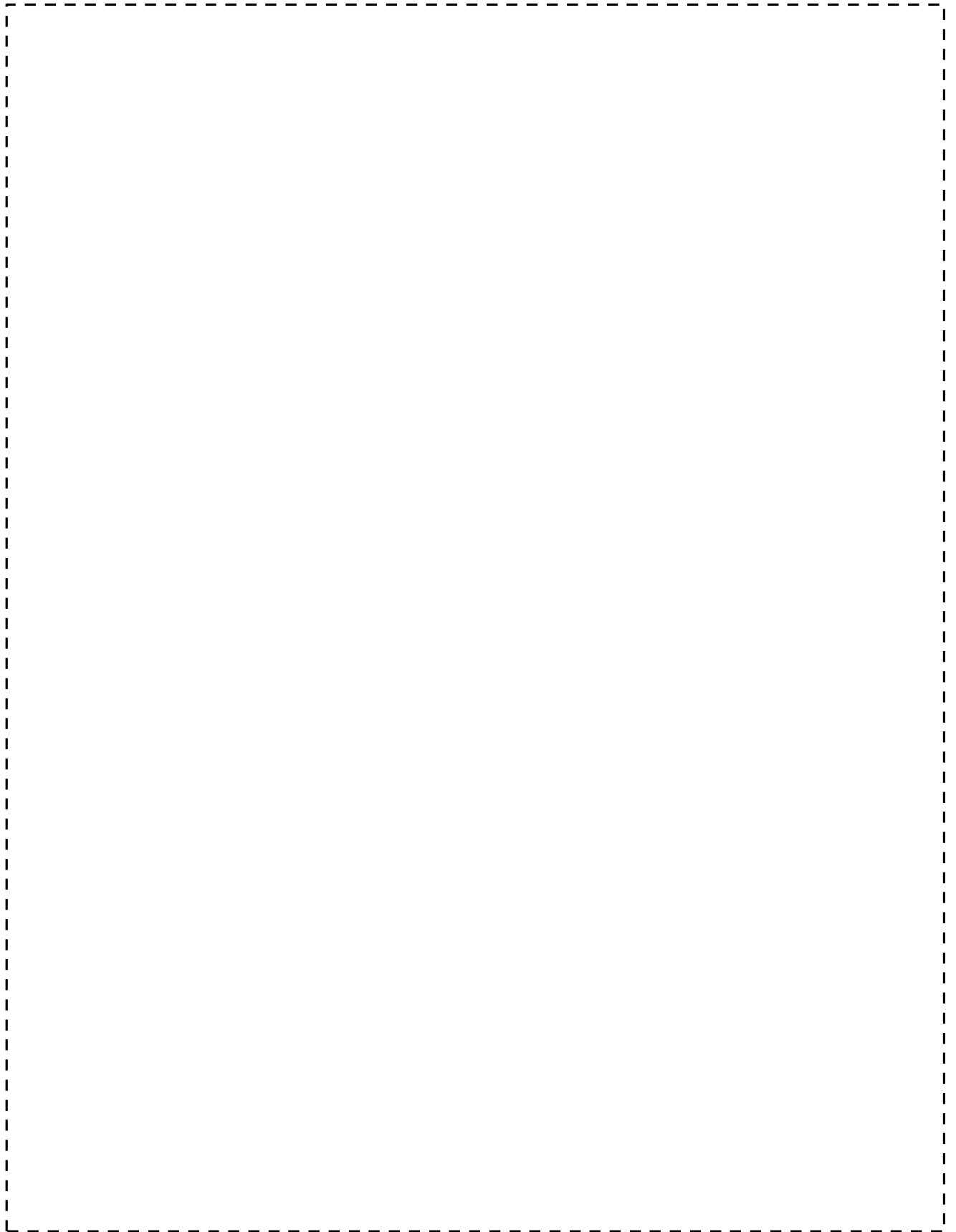
第 2-2 図 遮蔽解析モデル化の概要 (MSF-24P 型の例)



第 2-3 図 貯蔵時の解析モデル（頭部）（MSF-24P 型）

16 条-別添 3（遮蔽）-12

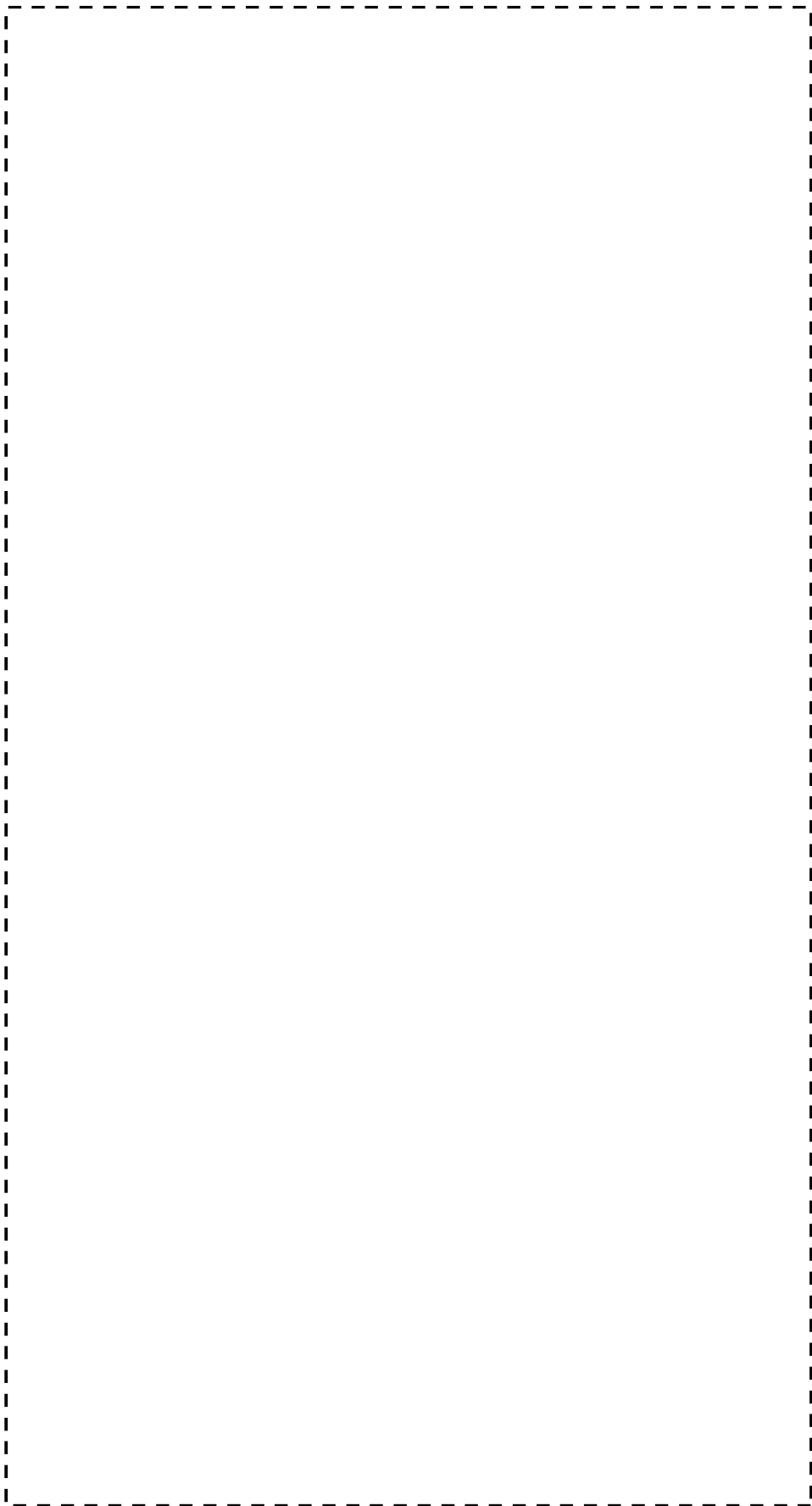
〔 〕：商業機密に係る事項のため公開できません



第 2-4 図 貯蔵時の解析モデル（底部）（MSF-24P 型）

16 条-別添 3（遮蔽）-13

〔 〕：商業機密に係る事項のため公開できません



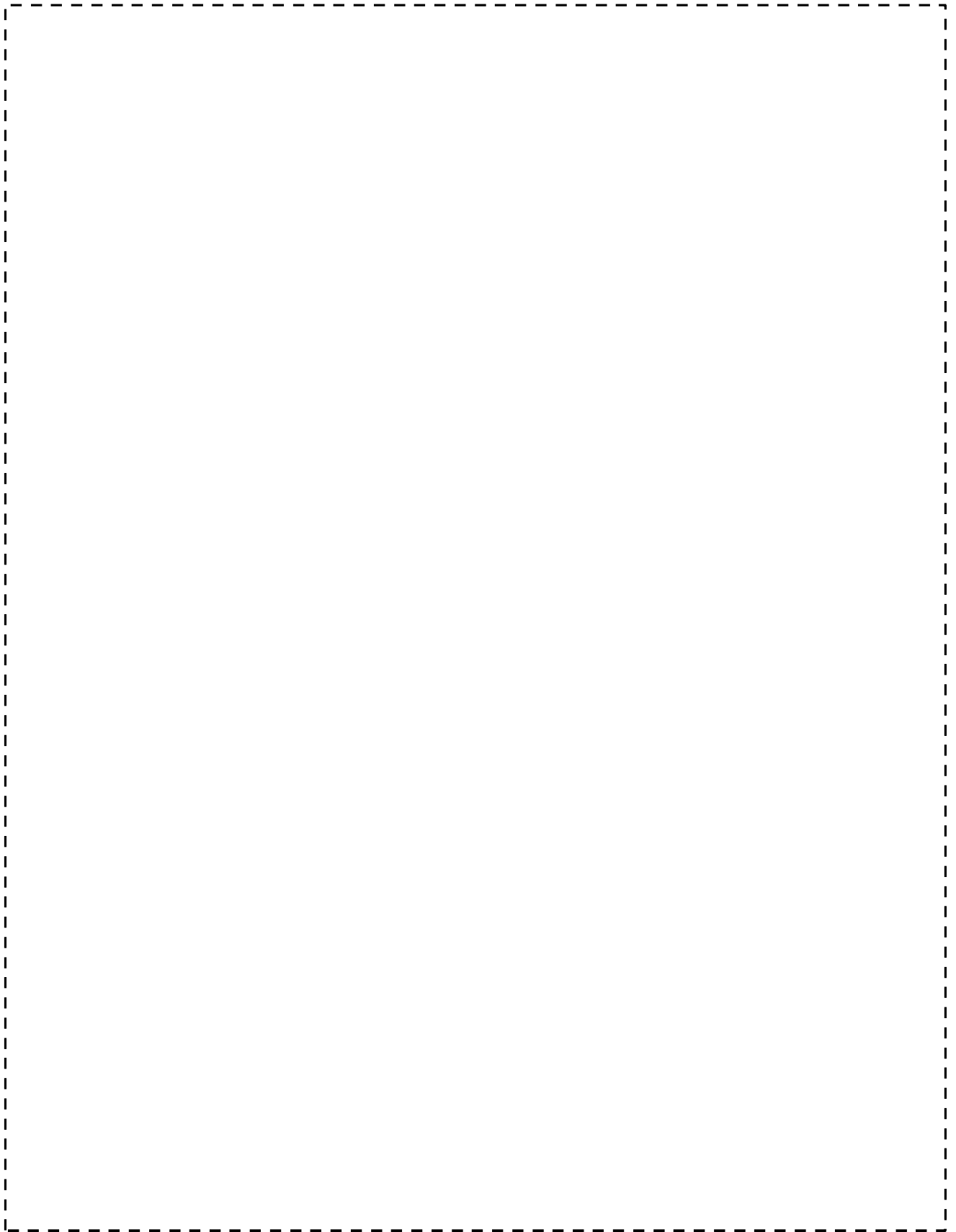
第2-5図 貯蔵時の解析モデル（上部トラニオン部）（MSF-24P型）

【 】：商業機密に係る事項のため公開できません



第2-6 図 貯蔵時の解析モデル（下部トラニオン部）（MSF-24P 型）

「」：商業機密に係る事項のため公開できません



第 2-7 図 貯蔵時の解析モデル（頭部）（MSF-21P 型）

16 条-別添 3（遮蔽）-16

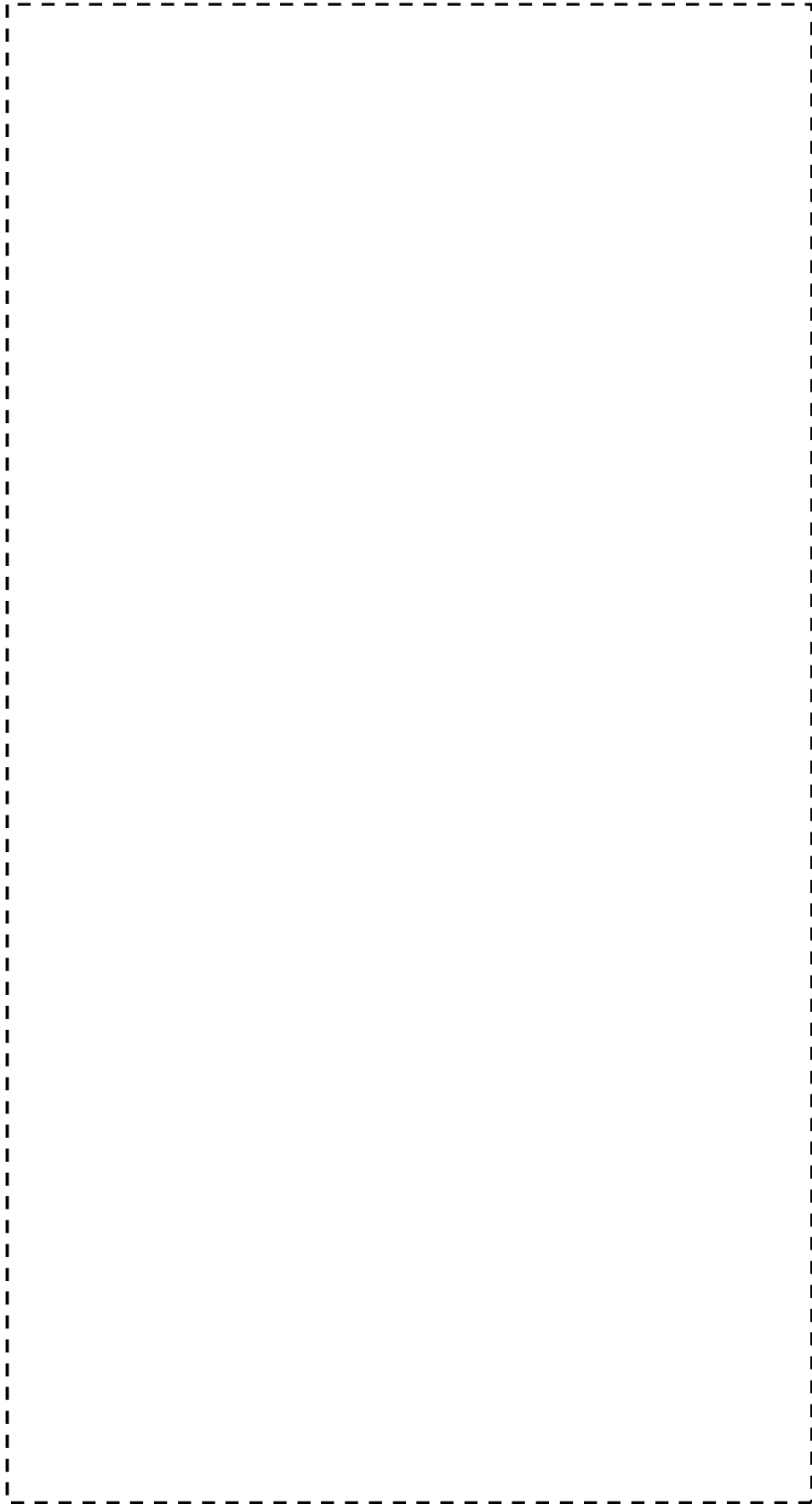
〔 〕：商業機密に係る事項のため公開できません



第 2-8 図 貯蔵時の解析モデル（底部）（MSF-21P 型）

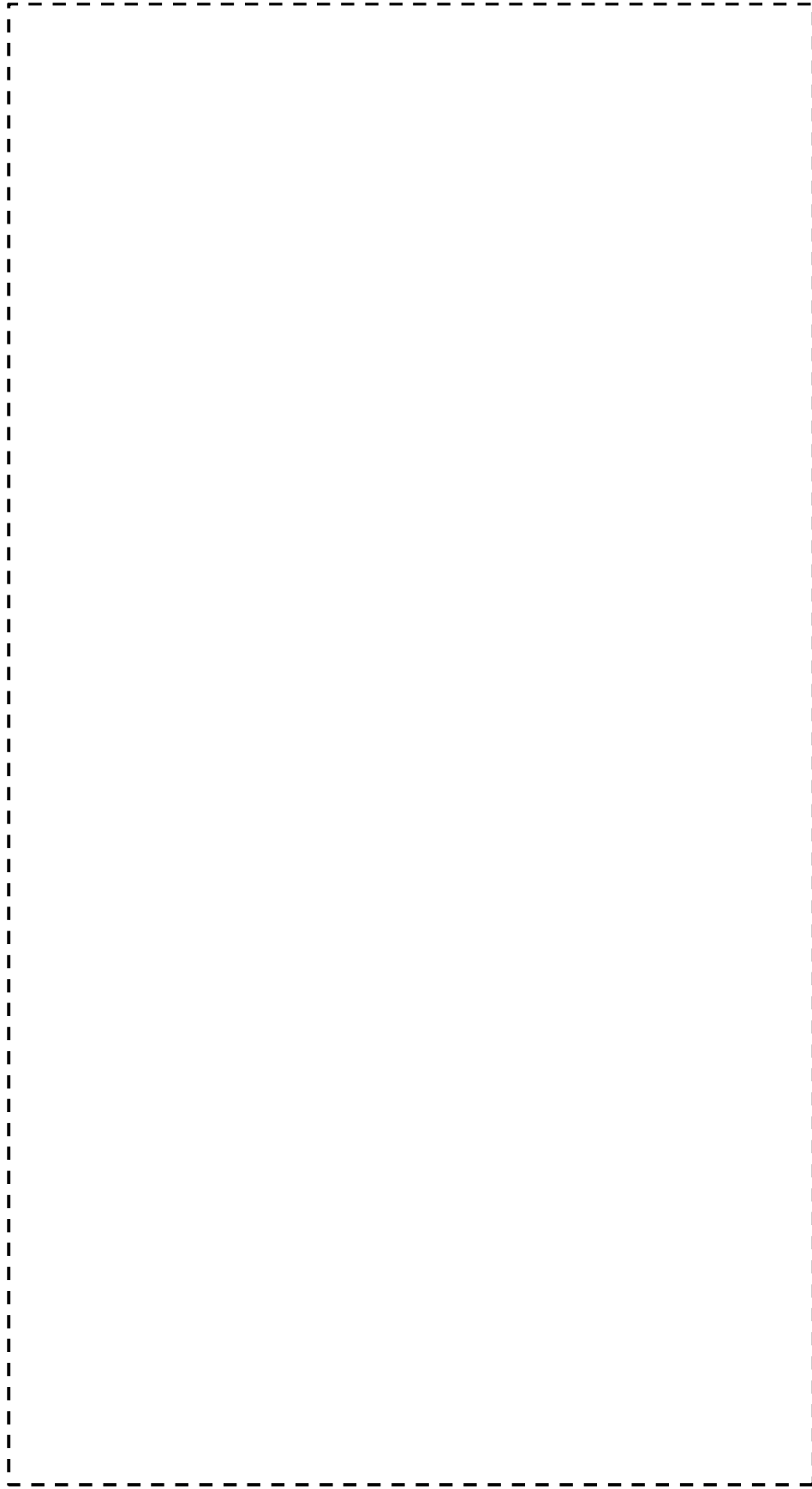
16 条-別添 3（遮蔽）-17

〔 〕：商業機密に係る事項のため公開できません



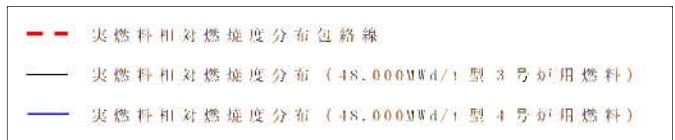
第2-9 図 貯蔵時の解析モデル（上部トラニオン部）（MSF-21P 型）

【注】：商業機密に係る事項のため公開できません



第2-10 図 貯蔵時の解析モデル（下部トランニオン部）（MSF-21P 型）

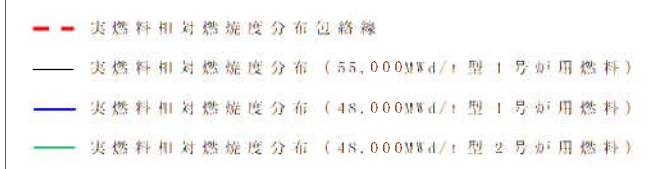
【注】：商業機密に係る事項のため公開できません



補足：実線は、燃料集合体平均燃焼度に対する燃焼度の相対値を、軸方向燃焼度分布測定データを用いて算出している。

第 2-11 図 軸方向燃焼度分布の設定 (MSF-24P 型収納燃料)

--- : 商業機密に係る事項のため公開できません



補足：実線は、燃料集合体平均燃焼度に対する燃焼度の相対値を、軸方向燃焼度分布測定データを用いて算出している。

第 2-12 図 軸方向燃焼度分布の設定 (MSF-21P 型収納燃料)

□□□ : 商業機密に係る事項のため公開できません

最も厳しい評価となる燃料仕様を収納した場合において、第 2-3 表に示すとおり評価基準を満たしている。

第 2-3 表 評価結果

項 目	評 価 結 果		評 価 基 準	備 考
	MSF-24P 型	MSF-21P 型		
表面線量当量率	1.83 mSv/h	1.73 mSv/h	2 mSv/h 以下	各部位の評価結果は、 第 2-4 表及び 第 2-5 表に示す。 出力位置は、 第 2-13 図及び 第 2-14 図に示す。
表面から 1 m の 位置における 線量当量率	86 μ Sv/h	78 μ Sv/h	100 μ Sv/h 以下	

第2-4表 線量当量率評価結果 (MSF-24P型)

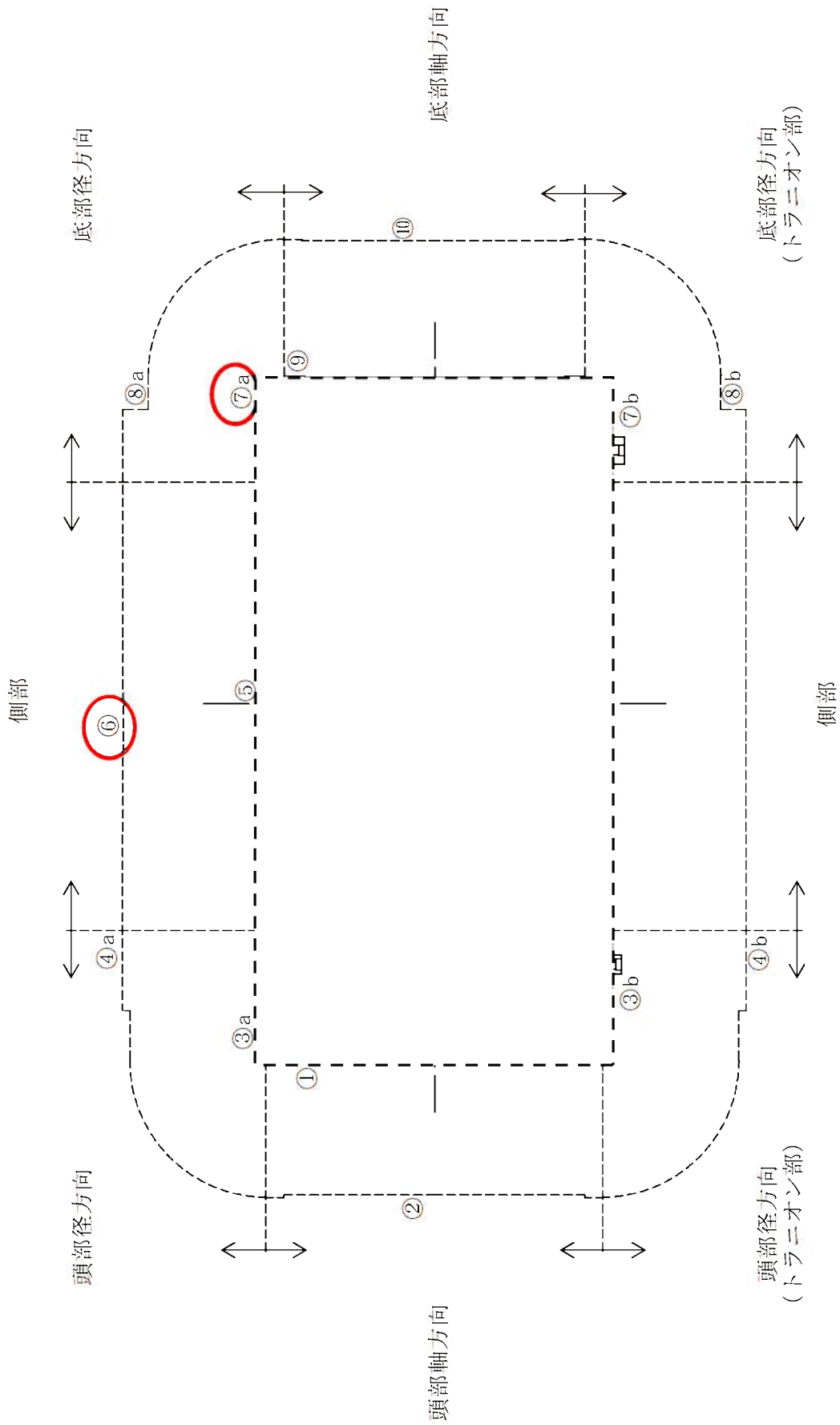
(単位: μ Sv/h)

評価点	頭部			側部	底部			
	軸方向	径方向	径方向 (トランニオン部)		径方向	径方向 (トランニオン部)	軸方向	
	①	③a	③b		⑦a	⑦b	⑨	
表面	燃料有効部	<0.1	8.0	100.7	4.0	5.4	<0.1	
	構造材放射化	0.4	103.0	25.9	6.6	13.4	0.3	
	二次ガンマ線	0.8	5.7	25.7	7.4	4.8	0.9	
中性子	333.7	804.2	741.4	45.1	1807.3	1108.3	222.6	
合計	335.0	807.7	858.1	197.4	1825.3	1131.9	223.9	
表面から1m	評価点	②	④a	④b	⑥	⑧a	⑧b	⑩
	燃料有効部	0.3	22.5	22.6	44.8	9.0	7.9	4.9
	構造材放射化	3.5	20.1	20.9	12.5	7.4	6.1	28.8
二次ガンマ線	0.4	5.4	5.4	10.4	3.0	2.8	3.6	
中性子	64.8	23.2	32.7	18.3	56.6	66.3	23.1	
合計	69.0	71.2	81.6	86.0	76.0	83.1	60.4	

第2-5表 線量当量率評価結果 (MSF-21P型)

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

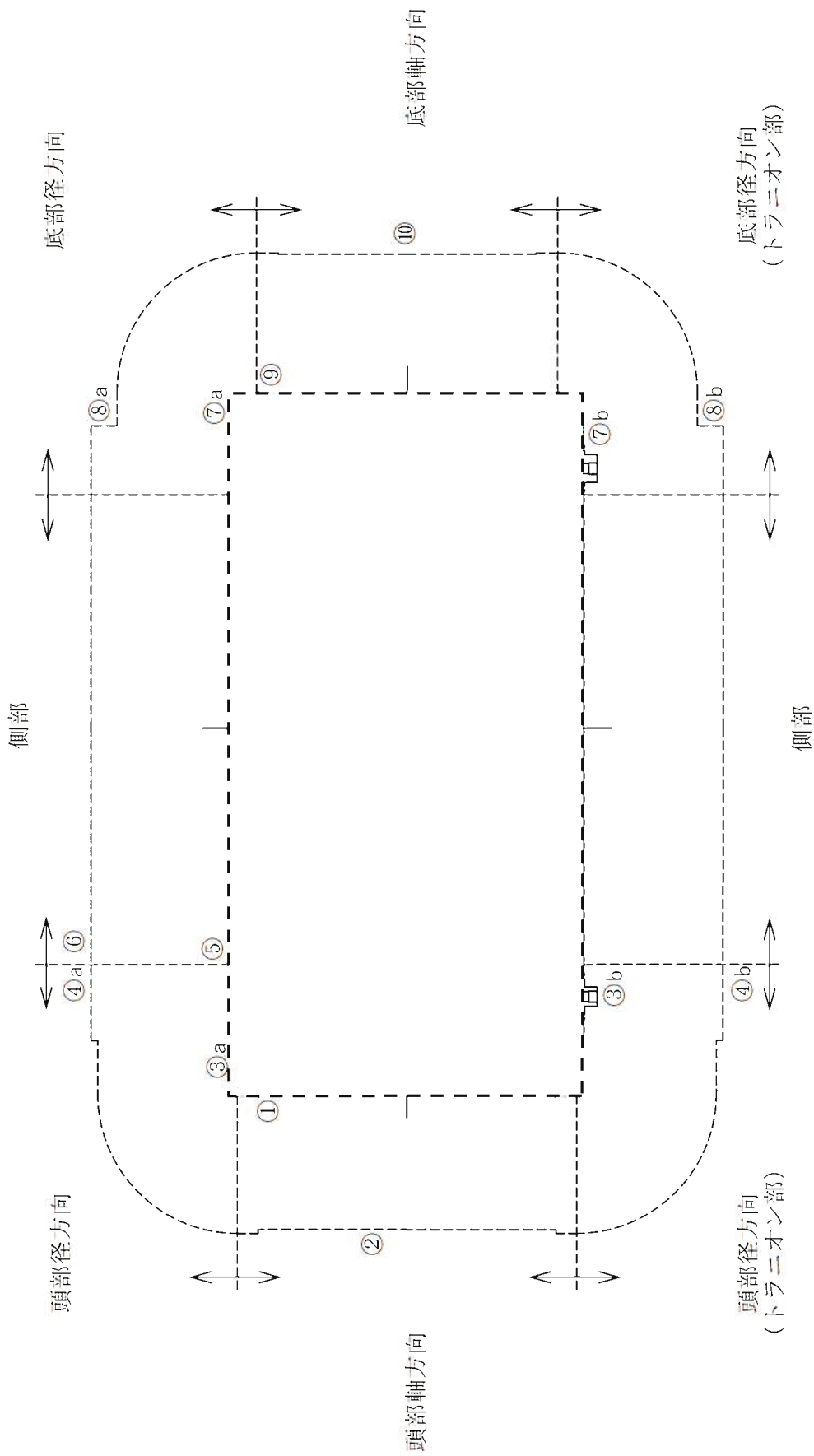
評価点	頭部			側部	底部			
	軸方向	径方向	径方向 (トランニオン部)		径方向	径方向 (トランニオン部)	軸方向	
	①	③a	③b		⑦a	⑦b	⑨	
表面	燃料有効部	<0.1	10.0	34.3	2.5	3.0	<0.1	
	構造材放射化	0.4	41.7	107.0	7.1	11.9	0.5	
	二次ガンマ線	0.7	9.7	10.9	7.4	5.3	1.0	
中性子	283.0	554.0	580.9	18.1	1711.0	1067.8	252.9	
合計	284.2	558.5	642.3	170.3	1728.0	1088.0	254.5	
表面から1m	評価点	②	④a	④b	⑥	⑧a	⑧b	⑩
	燃料有効部	0.2	15.5	15.0	17.5	6.0	4.8	3.8
	構造材放射化	4.9	25.6	17.7	25.3	6.6	4.7	40.5
二次ガンマ線	0.4	5.7	5.6	6.2	3.2	3.0	3.7	
中性子	52.5	20.1	30.6	19.4	54.1	64.8	26.4	
合計	58.0	66.9	68.9	68.4	69.9	77.3	74.4	



(注) ①～⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。

第2-13図 線量当量率評価点及び最大線量当量率位置 (MSF-24P型)

〔 〕 : 商業機密に係る事項のため公開できません



(注) ①～⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。

第2-14図 線量当量率評価点及び最大線量当量率位置 (MSF-2IP型)

「」 : 商業機密に係る事項のため公開できません

[確認内容]

3) 敷地境界における実効線量評価

① 直接線及びスカイシャイン線の評価

兼用キャスクが敷地境界に近い場所に設置される場合等に、使用済燃料から放出される中性子の敷地境界線量への寄与が大きくなる可能性があることを適切に考慮した上で、通常貯蔵時の直接線及びスカイシャイン線（ガンマ線及び中性子）による実効線量について評価すること。

② ソースターム

兼用キャスクの遮蔽機能データ又は兼用キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率が $100 \mu\text{Sv/h}$ となるよう放射線源強度を規格化したものを用いること。ここで、放射線源強度を規格化して用いる場合は、中性子 100%又はガンマ線 100%のいずれか保守的な線量評価とすること。また、中性子及びガンマ線の表面エネルギースペクトルは、保守的な線量評価となるものを使用すること。

③ 遮蔽解析コード等

検証され適用性が確認された遮蔽解析コード等を使用すること。なお、モンテカルロコードを用いる場合は、相互遮蔽効果、ストリーミング及びコンクリート深層透過の観点から検証され適用性が確認されたものであること。

④ 通常貯蔵時の線量

通常貯蔵時の直接線及びスカイシャイン線について、原子力発電所敷地内の他の施設からのガンマ線と兼用キャスクからの中性子及びガンマ線とを合算し、ALARA の考え方の下、敷地境界において実効線量で $50 \mu\text{Sv/y}$ 以下となることを目標に、線量限度 (1mSv/y) を十分下回る水準とすること。

なお、兼用キャスク以外の施設の線量は、既評価の空気カーマ

(Gy/y) を実効線量 (Sv/y) へ換算し、又は新たに実効線量 (Sv/y) を評価するものとする。換算に当たっては、係数を 1 とすること。

敷地境界における実効線量評価については、設置許可基準第 29 条まとめ資料において説明する。

〔確認内容〕

4) 応急復旧

貯蔵建屋等を設置する場合は、貯蔵建屋等の損傷によりその遮蔽機能が著しく低下した場合においても、必要に応じて土嚢による遮蔽の追加等の適切な手段による応急復旧を行うことにより、工場等周辺の実効線量が敷地全体で線量限度 (1mSv/y) を超えないこと。この場合において、応急復旧による遮蔽機能の回復を期待する場合には、その実施に係る体制を適切に整備すること。

設計上考慮すべき自然現象において、貯蔵建屋等の損壊が生じない設計であることについて、地盤審査及び 4 条、5 条、6 条まとめ資料で説明することとし、遮蔽機能が著しく低下しない設計とする。

3. 使用する解析コード

a. 解析コード

乾式キャスクの遮蔽設計に用いられる解析コードについて、その機能、計算方法、使用実績及び検証結果について説明する。

(a) ORIGEN2 コード

i 概要

ORIGEN2 コード¹⁾は、米国のオークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発された燃焼計算コードである。ORIGEN2 コードは公開コードであり、輸送容器の崩壊熱計算等に広く用いられている。

ii 機能

ORIGEN2 コードは、燃焼計算に際して以下の機能を有している。

- a) 燃料の炉内での燃焼計算、炉取出後の減衰計算により、冷却期間に対応した崩壊熱、放射線の強度、各核種の放射エネルギー等が求められる。
- b) 原子炉の炉型と燃料の組合せに対し、中性子エネルギースペクトルの違いにより重みをつけた断面積ライブラリデータが内蔵されており、任意に選択できる。
- c) 計算結果は、放射化生成物、アクチニド、核分裂生成物に分類して出力される。
- d) 燃焼計算に必要な放射性核種のデータ（崩壊熱、ガンマ線のエネルギー分布、自発核分裂と (α, n) 反応により発生する中性子源強度等）は、ライブラリデータとしてコードに内蔵されている。

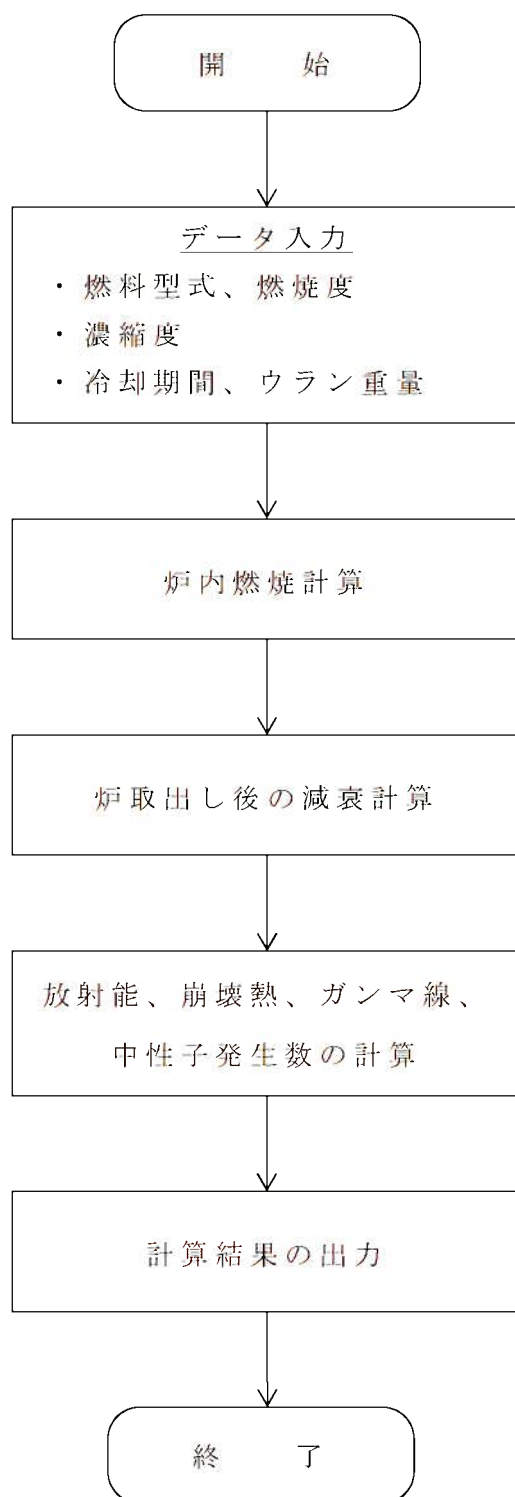
iii 計算フロー

ORIGEN2 コードの計算フローを第 2-15 図に示す。

iv 使用実績及び検証

ORIGEN2 コードは、輸送キャスク、原子燃料施設の崩壊熱計算に広く使用されている。また、ORNL では ORIGEN2 コードの崩壊熱計算結果を ANS 標準崩壊熱の値と比較し、ORIGEN2 コードの妥当性を検証している²⁾。

ORIGEN2 コードの検証例を第 2-16 図に示す。



第2-15 図 ORIGIN2 コードの計算フロー図

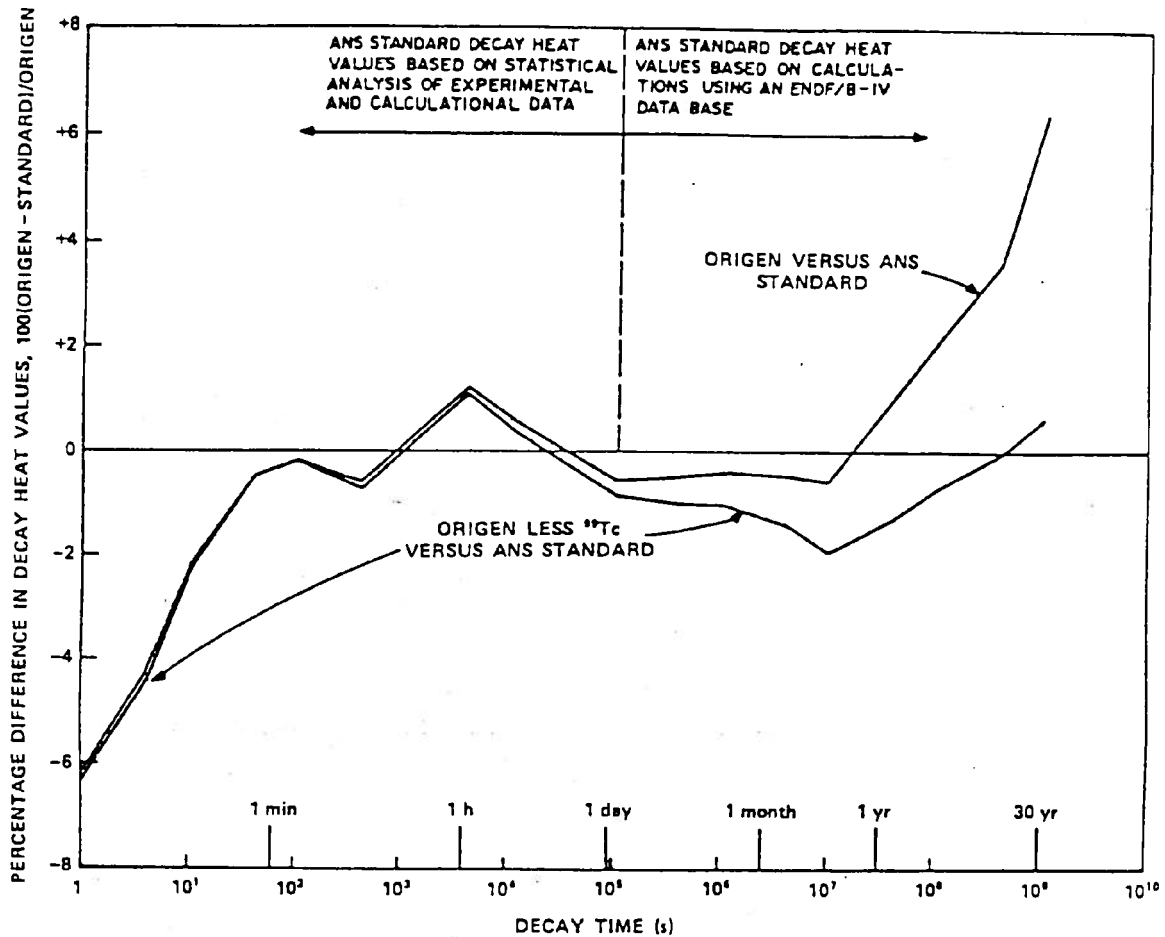


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for 10¹³-s irradiation of ²³⁵U.

(注)ORIGEN2 コードの崩壊熱は、ANS 標準崩壊熱と比較して、15 年以上（乾式キャスクに収納される燃料の冷却期間）の年数に対して高めの値となっている。この理由は、ANS 標準崩壊熱は ⁹⁹Tc を考慮していないためである。ORIGEN2 コードの解析結果より ⁹⁹Tc を除いた崩壊熱を比較するとよい一致を示している。

第2-16 図 ORIGEN2 コードの検証例²⁾

(b) DOT3.5 コード

i 概要

DOT3.5 コード³⁾ (以下、「DOT コード」という。)は、米国のオークリッジ国立研究所(ORNL)で開発された二次元輸送コードである。

ii 機能

DOT コードは、遮蔽解析に関して以下の機能を有する。

a) ガンマ線や中性子に対するボルツマン輸送方程式を Sn 法により解く解析コードであり、放射線の挙動を追跡するのに重要な非等方性が表現できる。

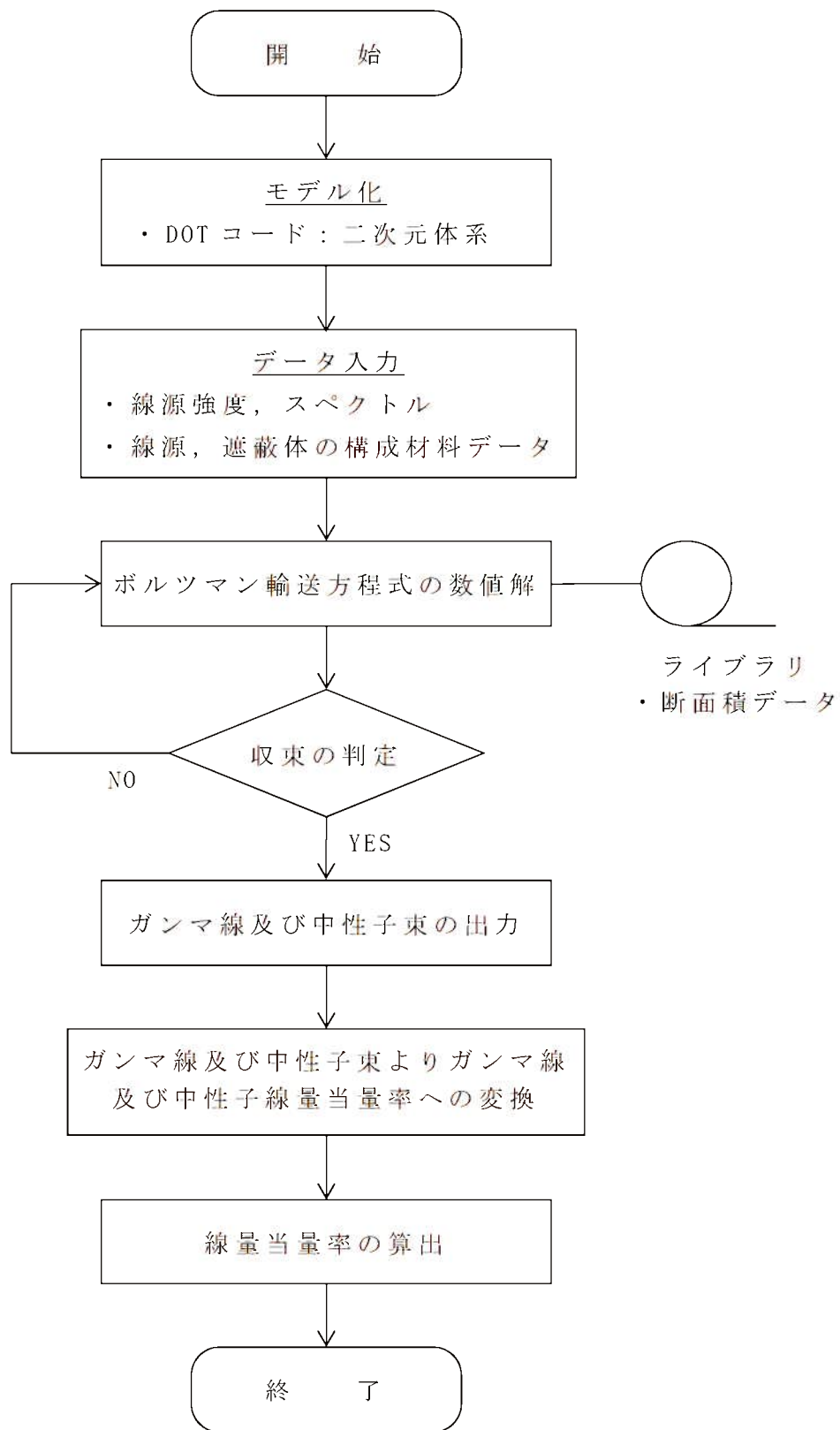
b) DOT コードは、二次元の体系を扱うことができる。

iii 解析フロー

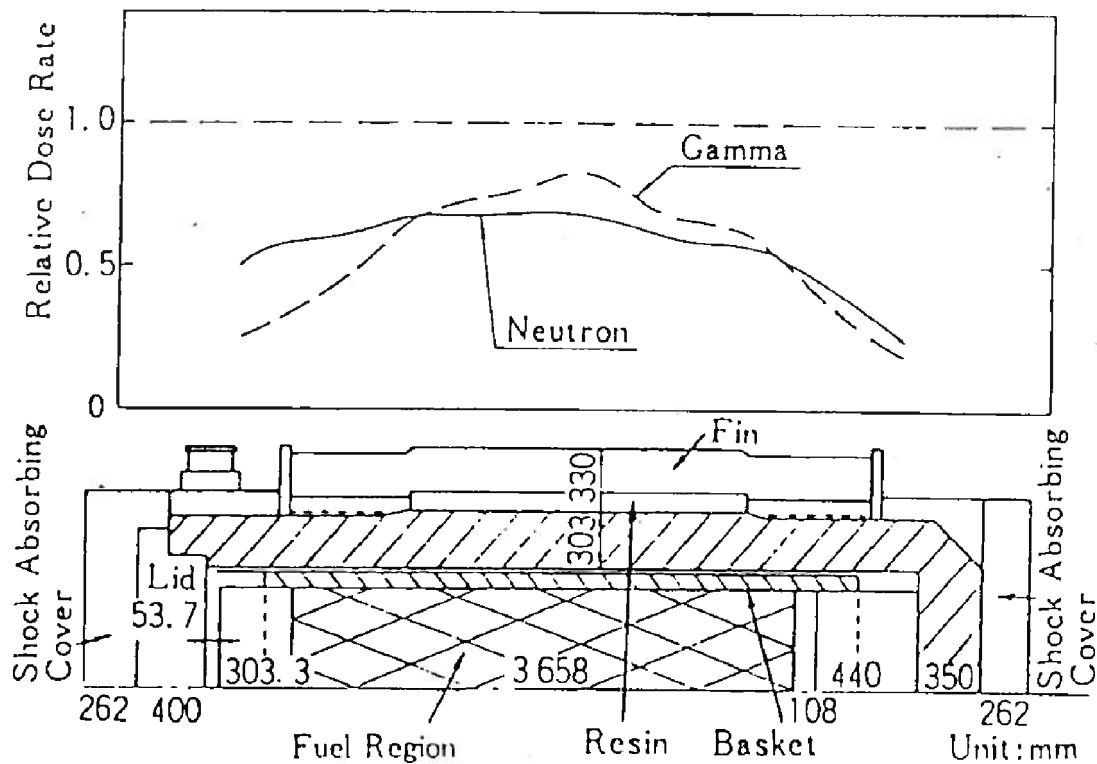
DOT コードの解析フローを第 2-17 図に示す。

iv 使用実績及び検証

DOT コードは、原子力施設の遮蔽計算に広く用いられており、輸送キャスクの遮蔽解析の豊富な実績がある。使用済燃料輸送容器の解析事例と測定値を第 2-18 図に示す。測定値はすべて解析値よりも低い値を示しており、解析コードが信頼できることを示している⁴⁾。



第2-17 図 DOT コードの解析フロー図



(注) 中性子及び二次ガンマ線を DOT 及び ANISN (一次元輸送コードで計算法上の差はない)、燃料有効部のガンマ線を QAD (点減衰核積分法によるもので、原子力施設の遮蔽計算に広く用いられており、建屋の遮蔽解析の豊富な実績がある。) の各コードで解析した結果である。

第2-18 図 DOT コードの検証例⁴⁾

v 断面積ライブラリ MATXSLIB-J33

MATXSLIB-J33 は、DOT3.5 等の輸送計算コード用に、JENDL-3.3 に基づく断面積ライブラリとして、日本原子力研究所にて整備されたものである。MATXSLIB-J33 を用いた断面積