

発電用原子炉施設に係る特定機器の設計の 型式証明申請

設置許可基準規則への適合性について (概要版一式)

2023.6.30
日立造船株式会社

目次

1. 設置許可基準規則への適合性概要
2. Hitz-P24型の仕様
3. Hitz-P24方を使用することができる範囲又は条件
4. 安全設計に関する評価概要
5. 設置許可基準規則への適合性（第四条）
6. 設置許可基準規則への適合性（第五条）
7. 設置許可基準規則への適合性（第六条）
8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）
9. バスケット用アルミニウム合金について
10. 指摘事項（コメント）への回答

1. 設置許可基準規則への適合性概要

1. 設置許可基準規則への適合性概要

● 設置許可基準規則の要件と審査事項

設置許可基準規則		特定兼用キャスク安全機能				長期健全性	構造強度	波及的影響
		臨界防止	遮蔽	除熱	閉じ込め			
第三条								
第四条	地震による損傷の防止	—	—	—	—	—	◎	—
第五条	津波による損傷の防止	—	—	—	—	—	◎	—
第六条	外部からの衝撃による損傷の防止	—	—	—	—	—	◎	—
第七条～第十五条								
第十六条	燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設	◎	◎	◎	◎	◎	◎	—
第十七条～第三十六条								

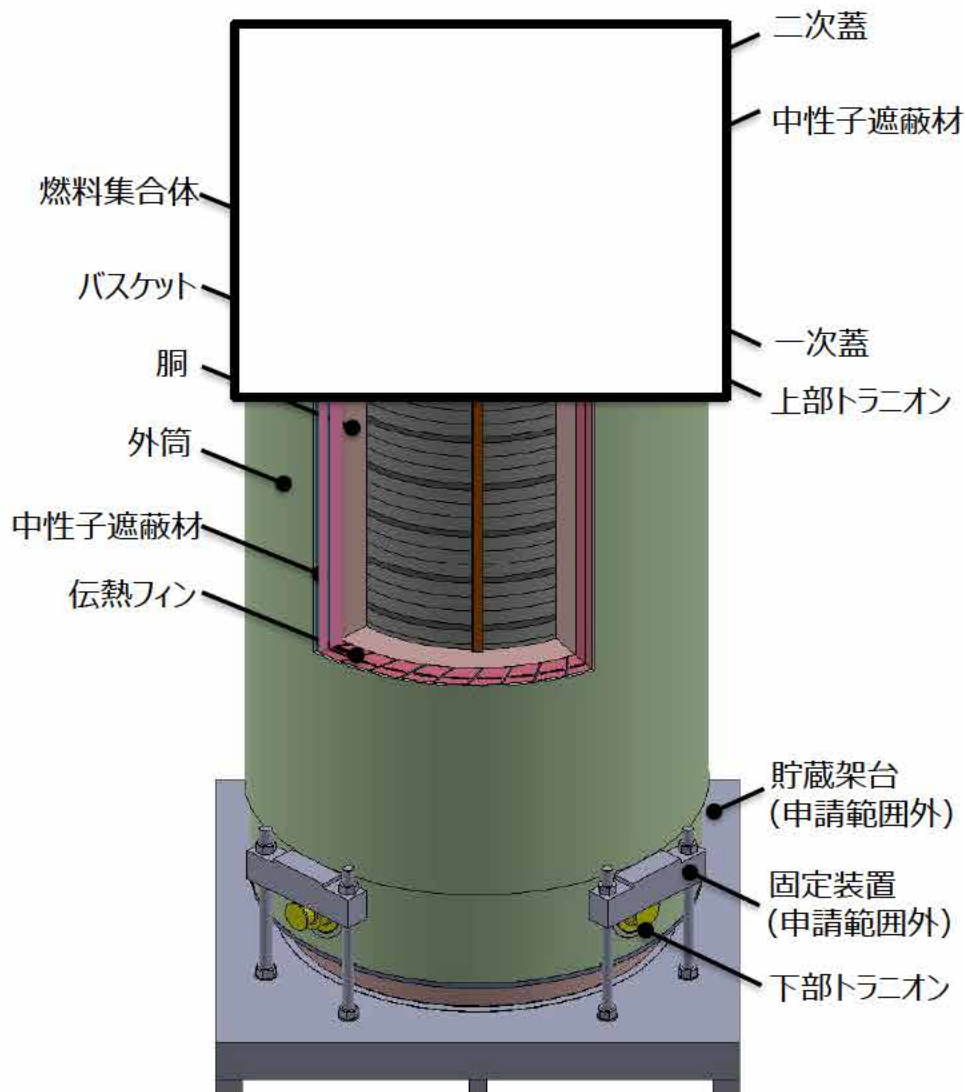
◎ : 設計方針及び設計方針の妥当性（安全評価結果）を説明する項目

□ : 申請の範囲外

2. Hitz-P24型の仕様

2. Hitz-P24型の仕様

● Hitz-P24型の概要



Hitz-P24型構造図

項目	範囲又は条件
特定兼用キャスクの設計貯蔵期間	60年以下
特定兼用キャスクの貯蔵場所	貯蔵建屋内
特定兼用キャスクの設置方法	基礎等に固定する設置方法
特定兼用キャスクの貯蔵姿勢	縦置き
特定兼用キャスクの固定方法	下部トリニオン固定
全質量	119t以下 (使用済燃料集合体を含む)
寸法	全長：約5.0m 外径：約2.7m
収納体数	24体

使用済燃料貯蔵施設の特定容器として型式証明を受けたHitz-B52型 (M-DPC20002) とバスケットを除き、類似の設計である。

Hitz-P24型に特有の構造 (バスケット以外) は以下のとおりである。

- ・トリニオンが [] である
- ・側部レジンの径方向に膨張代を設けている

● Hitz-P24型の設置方法

別表 兼用キャスクの設置方法に応じた評価の例

設置方法	地盤、基礎、支持部等の評価	蓋部の金属部への衝突評価	兼用キャスク本体評価	備考	
地盤の十分な支持を想定しない 基礎等に固定しない	①輸送荷姿 	-	-	*1	
	②蓋部の金属部への衝突が生じない設置方法 	-	○ (加速度)		
	③蓋部の金属部への衝突が生じる設置方法 	-	○ (速度)	○ (加速度)	*2
④基礎等に固定する 	○ (基準地震動)	/	○ (加速度)		
水想定する 地盤の十分な支持	⑤基礎等に固定する 	○ (基準地震動)	/	○ (加速度)	*3

➤ 地盤の十分な支持を想定し、縦置き姿勢で基礎等に固定する方式を採用

○：評価要
-：評価不要

*1~*3：「6.1 安定性評価の基本方針」参照

(出典)「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」抜粋

2. Hitz-P24型の仕様

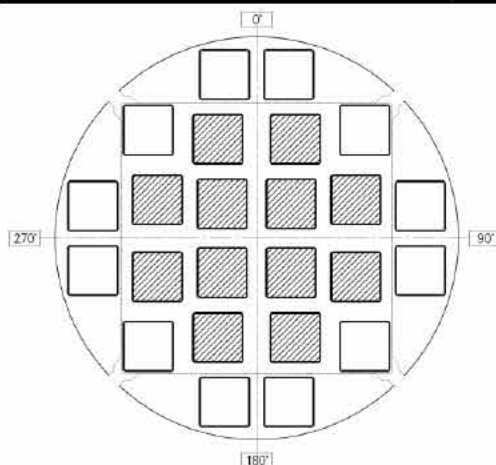
● Hitz-P24型の仕様

項目	仕様		
全質量	約119t（使用済燃料集合体を含む）		
寸法	全長：約5.0m、外径：約2.7m		
収納体数	24体		
最大崩壊熱量	15.9kW		
主要材料	特定兼用 キャスク本体	胴／底板	低合金鋼
		外筒	炭素鋼
		トラニオン	析出硬化系ステンレス鋼
		中性子遮蔽材	樹脂
		伝熱フィン	銅
	蓋部	一次蓋、二次蓋	低合金鋼
		蓋ボルト	合金鋼
	バスケット	バスケットプレート	アルミニウム合金（中性子吸収材を配置）
		リーマピン	析出硬化系ステンレス鋼
		タイロッド	析出硬化系ステンレス鋼
		固定金具	ステンレス鋼
	内部充填ガス	ヘリウムガス	
シール材	金属ガスケット		
閉じ込め監視方式	圧力センサ（圧力計）による蓋間圧力監視		

2. Hitz-P24型の仕様

● Hitz-P24型の収納物の仕様（収納条件）

使用済燃料集合体の種類と型式（注1）			中央部		外周部	
			17×17燃料（PWR使用済燃料）			
			A型	B型	A型	B型
燃料集合体	1体当たり	初期濃縮度（wt%以下）	[]			
		最高燃焼度（MWd/t以下）	48,000		44,000	
		冷却期間（年以上）	15	17	15	17
	特定兼用キャスク 1基当たり	平均燃焼度（MWd/t以下）	44,000			
		最大崩壊熱量（kW以下）	15.9			
バーナブルポイズン集合体 1体当たり	照射期間（日以下）	[]				
	冷却期間（年以上）（注2）					



（注1） A型燃料とB型燃料は区別なく混載することが可能。

（注2） []

- [] : 中央部（12体） 最高燃焼度以下の使用済燃料集合体 [] の収納範囲
- [] : 外周部（12体） 平均燃焼度以下の使用済燃料集合体の収納範囲

- 本体の構造

- キャスク本体の主要部は、胴（■）、底板（■）、中性子遮蔽材（■）及び外筒（■）等で構成されている。（Hitz-B52型と同様の構造）
- 胴及び底板は低合金鋼製であり、密封容器として設計されている。また、胴と外筒の間及び底板には主要な中性子遮蔽材として樹脂が充填されており、また、胴及び底板の低合金鋼は、主要なガンマ線遮蔽材となっている。（Hitz-B52型と同様の構造）



本体縦断面図

2. Hitz-P24型の仕様

- 本体の構造（つづき）
 - 胴と外筒の間には、伝熱フィン（■）が設けられている。（Hitz-B52型と同様の構造）
 - キャスク本体の取り扱い及び貯蔵中の固定のために、上部及び下部にそれぞれ2対のトラニオン（■）が取り付けられている。（）であり、Hitz-B52型と異なる）
 - 側部中性子遮蔽材には、径方向に膨張代としてスペーサ（■）を設けている。（Hitz-B52型と異なる構造）

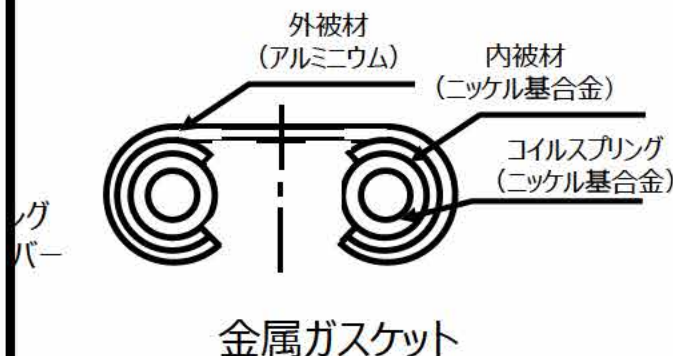
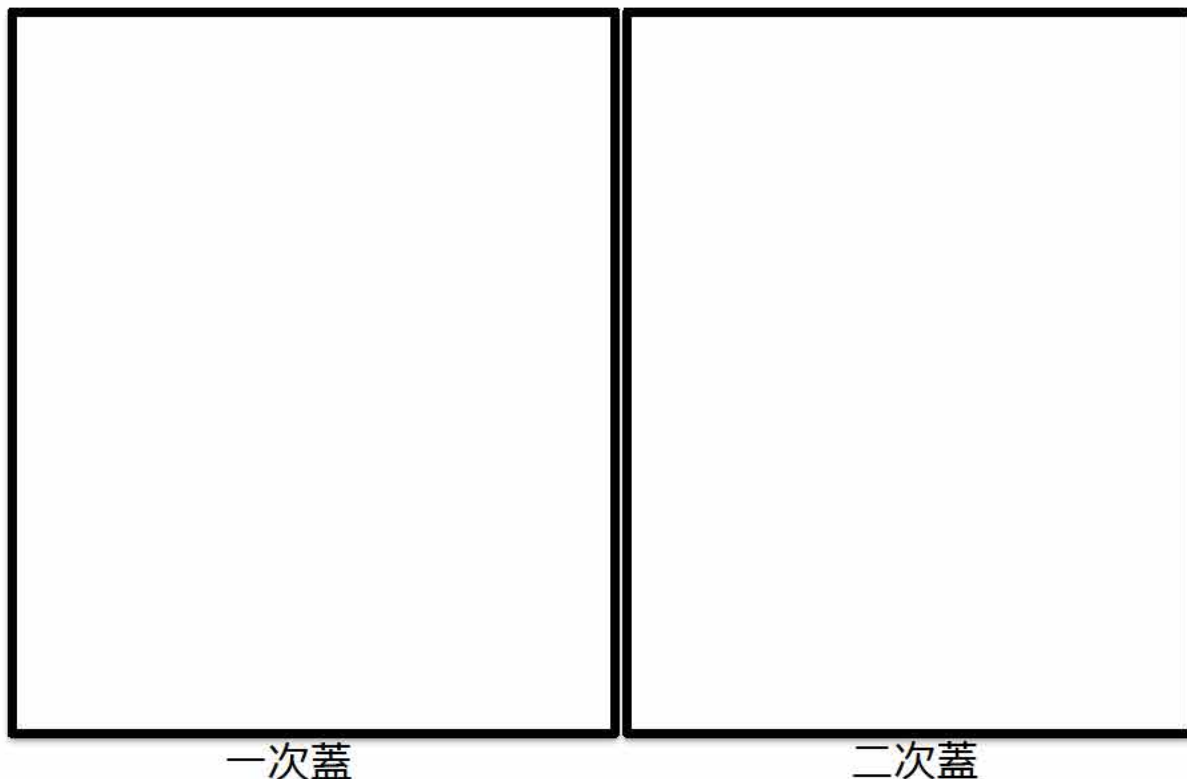


本体横断面図

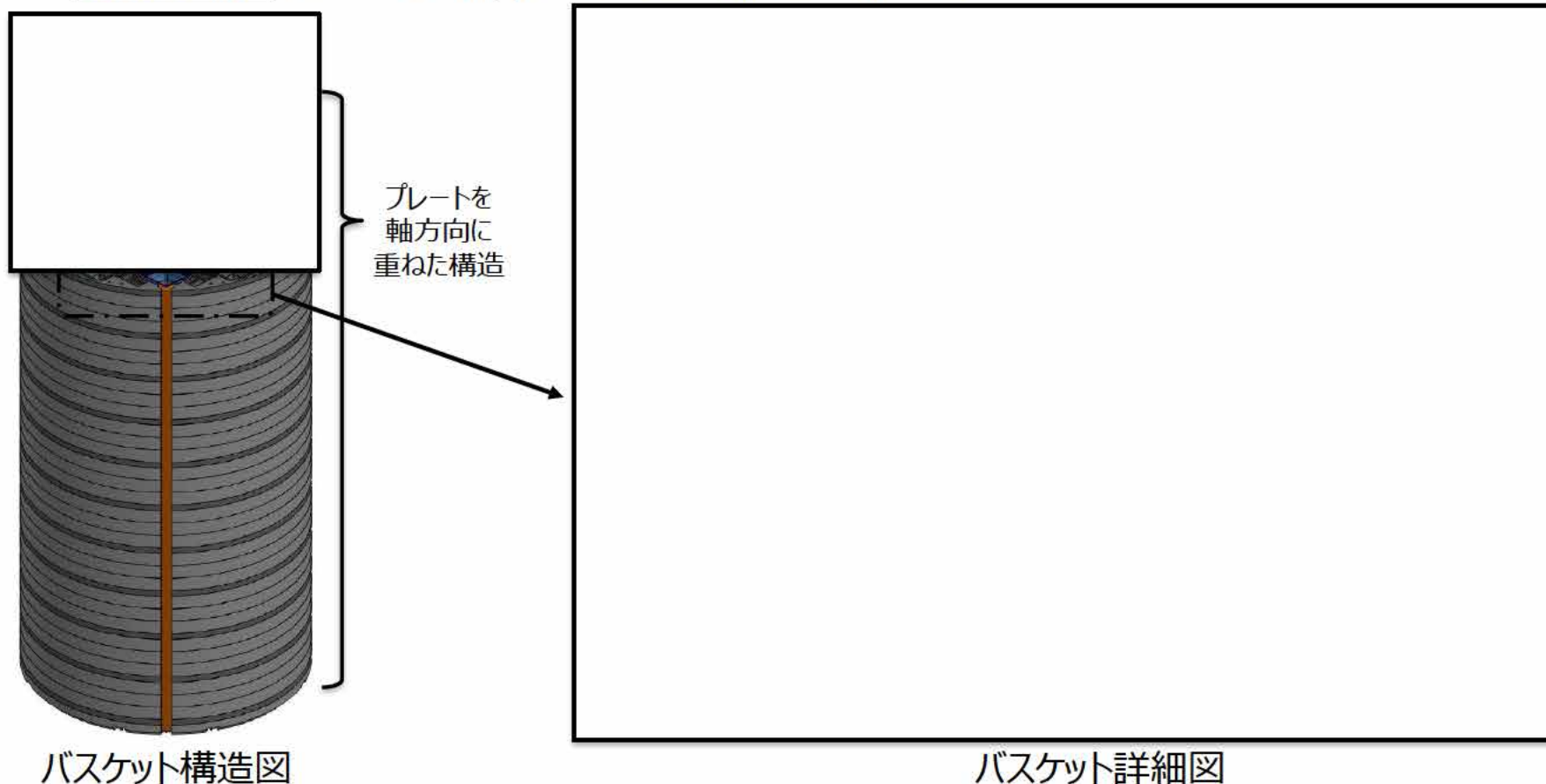
2. Hitz-P24型の仕様

● 蓋部の構造（Hitz-B52型と同様の構造）

- 蓋部は、一次蓋（■）及び二次蓋（■）で構成されており、低合金鋼製の円板状で、ボルトでキャスク本体上面に取り付けられ、主要なガンマ線遮蔽材となっている。
- 一次蓋は、胴及び底板と共に閉じ込め境界を形成している。一次蓋には主要な中性子遮蔽材（■）として樹脂（レジン）が充填されている。
- 二次蓋には、蓋間にヘリウムを充填するため及び蓋間の圧力を測定するための貫通孔が設けられており、モニタリングポートバルブが設置されている。貯蔵時には、その外側にモニタリングポートカバーが取り付けられる。
- 一次蓋及び二次蓋のシール部には、長期にわたって閉じ込め機能を維持するために金属ガスケット（■）が取り付けられている。




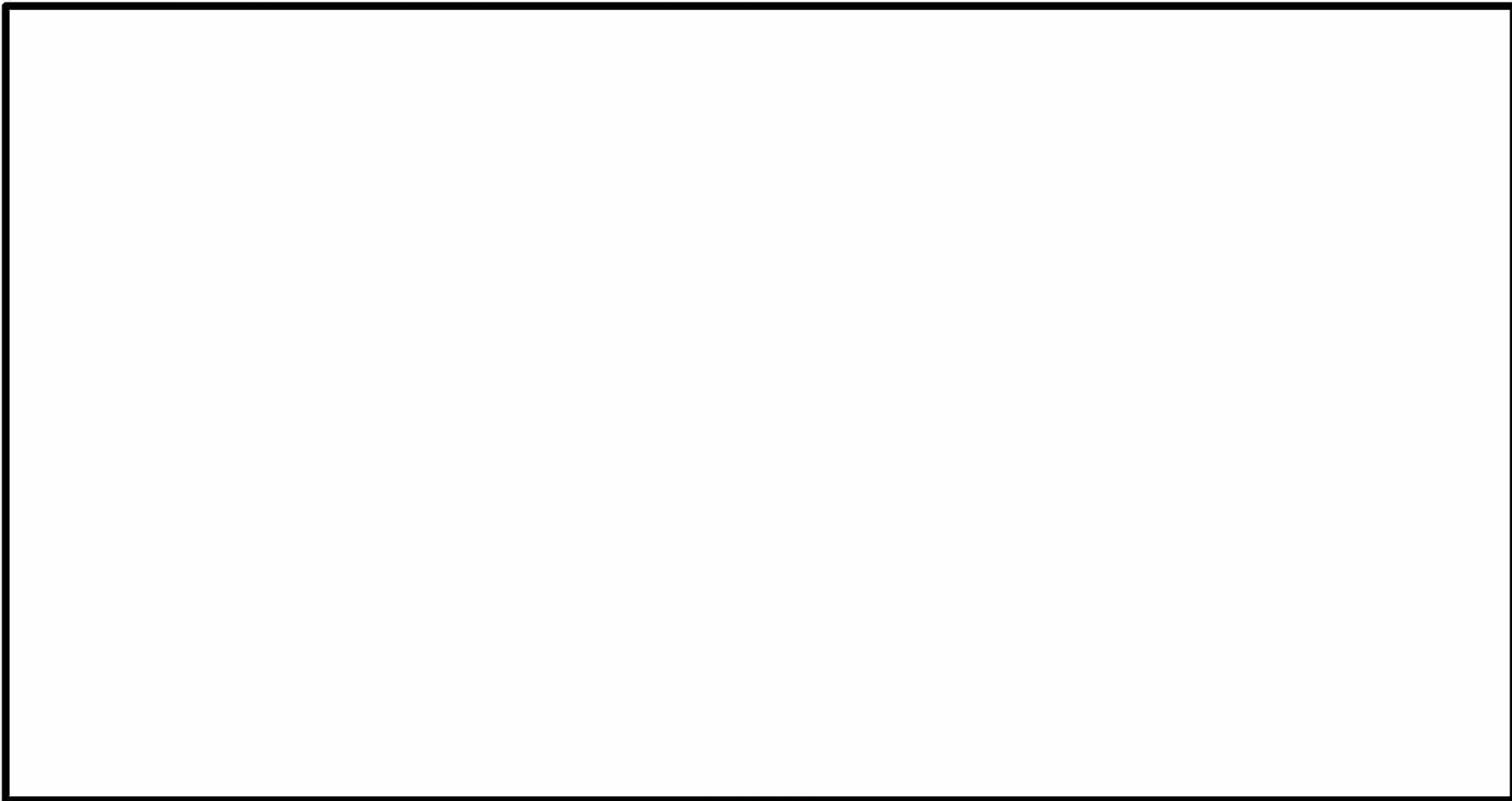
- バスケットの構造（全体の構造について）
 - 個々の使用済燃料集合体が、バスケットの所定の格子内に収納される。
 - バスケットは**内側部（■及び■）と外側部（■及び■）に分割（詳細はP.14参照）**されており、それぞれアルミニウム合金製の**プレートを軸方向に重ねた構造（詳細はP.13参照）**であり、タイロッド（■）で軸方向に連結されており、径方向はリーマピン（●）で位置決めされている。
 - ほう素を添加したアルミニウム合金等の**中性子吸収材（■及び■）をプレートに設けたスリットに配置（詳細はP.15参照）**することにより、臨界に達することを防止する設計とする。



2. Hitz-P24型の仕様

- バスケットの構造（プレートを軸方向に重ねた構造）

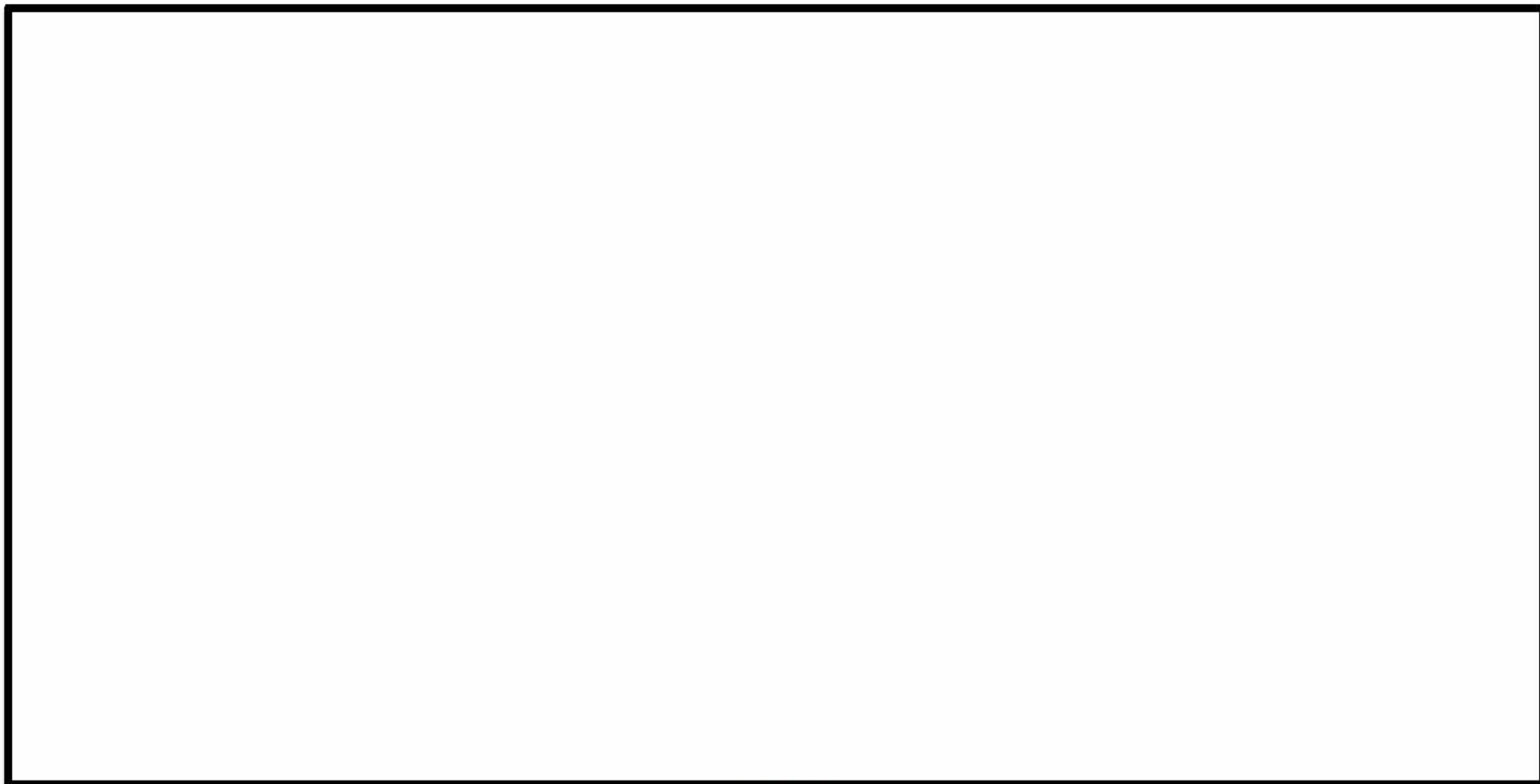
-  を軸方向に重ねた構造であり、軸方向に重ねたプレートは、タイロッド（■）で軸方向に連結されており、径方向はリーマピン（■）で位置決めされている。（Hitz-P24型に特有の構造）



バスケット

2. Hitz-P24型の仕様

- バスケットの構造（内側部（■及び■）と外側部（■及び■）に分割された構造）
 - 外側部（■及び■）は、固定金具（■）によりキャスク本体内部面に固定されており、固定された4つの外側部により囲まれた空間に内側部（■及び■）が挿入される。（Hitz-P24型に特有の構造）



バスケット

2. Hitz-P24型の仕様

- バスケットの構造（中性子吸収材（■及び■）をプレートに設けたスリットに配置）
 - プレートには [] があり、それぞれのプレートは、中性子を効率的に減速させることで中性子吸収材による中性子の吸収を促進させる役割 [] と、水ギャップ（■）内における中性子吸収材の位置を制限する役割 [] を持つ。（Hitz-P24型に特有の構造）
 - 最上部及び最底部のプレートにはスリットは設けられておらず、中性子吸収材の軸方向位置を制限する役割を持つ。（Hitz-P24型に特有の構造）

バスケット

2. Hitz-P24型の仕様

- 審査対象とする部品/設備
特定兼用キャスク及び周辺施設について、後段審査を含めた各審査段階において審査対象となる部品/設備を以下に示す。

部品/設備				審査対象					
分類	名称	貯蔵時	輸送時	型式証明	設置(変更)許可	型式指定		設計承認	設工認
				貯蔵時	貯蔵時	貯蔵時	輸送時 (注2)	輸送時	貯蔵時
特定兼用キャスク	キャスク本体	◎	◎	○	○	○	○	○	○
	バスケット	◎	◎	○	○	○	○	○	○
	一次蓋	◎	◎	○	○	○	○	○	○
	二次蓋	◎	◎	○	○	○	○	○	○
	三次蓋	—	◎	— (注1)	—	—	○	○	—
周辺施設	緩衝体	—	◎	—	—	—	○	○	—
	固定装置	◎	—	—	○	—	—	—	○
	貯蔵架台	◎	—	—	○	—	—	—	○
	圧力センサ/温度センサ	◎	—	—	○	—	—	—	○
	貯蔵建屋	◎	—	—	○	—	—	—	○

◎：供用時に使用するもの。 ○：審査対象となるもの。

(注1) 特定兼用キャスクを構成する機器だが輸送時のみに使用する部品であるため、型式証明の審査対象とならない。

(注2) 外運搬規則第6条又は第7条及び第11条に定める技術上の基準に適合すること（既に設計承認を受けているものにあつては設計承認を受けていること）を示す。

3. 特定機器（Hitz-P24型）を使用することができる範囲又は条件

3. 特定機器（Hitz-P24型）を使用することができる範囲又は条件

- Hitz-P24型を使用することができる範囲又は条件
以下に示す条件により設計された特定兼用キャスクを使用することができる貯蔵施設であること。

項目	範囲又は条件
特定兼用キャスクの設計貯蔵期間	60年以下
特定兼用キャスクの貯蔵場所	貯蔵建屋内
特定兼用キャスクの設置方法	基礎等に固定する設置方法
特定兼用キャスクの設置方式	貯蔵架台上に設置
特定兼用キャスクの貯蔵姿勢	縦置き
特定兼用キャスクの固定方法	下部トラニオン固定
貯蔵施設における特定兼用キャスク 周囲温度	最低温度 -20℃ 最高温度 50℃
貯蔵施設における貯蔵建屋壁面温度	最高温度 65℃
貯蔵建屋の壁面放射率	0.8以上
地震力	加速度 水平2300Gal及び鉛直1600Gal 又は 速度 水平2m/s及び鉛直1.4m/s
津波荷重の算出条件	浸水深 10m 流速 20m/s 漂流物質量 100t
竜巻荷重の算出条件	風速 100m/s 設計飛来物 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド 解説表4.1に示される飛来物

4. 安全設計に関する評価概要

4. 安全設計に関する評価概要

- 設計貯蔵期間における構成部材の経年変化の影響を考慮しても、安全機能（臨界防止・遮蔽・除熱、閉じ込め）の評価結果は設計基準値を満たすことから、Hitz-P24型の安全機能は維持される。

項目			評価結果 (注1)		設計基準値
			A型	B型	
臨界防止	中性子実効増倍率	乾燥状態	0.36		0.95
		冠水状態	0.91		
遮蔽	表面最大線量当量率		1.5mSv/h	1.4mSv/h	2mSv/h
	表面から1m離れた位置における最大線量当量率		84μSv/h	85μSv/h	100μSv/h
除熱	燃料被覆管最高温度		203℃		275℃
	構成部材最高温度	胴、蓋部	156℃		350℃
		外筒	122℃		350℃
		中性子遮蔽材（樹脂）	138℃		149℃
		金属ガスケット	107℃		130℃
		バスケット格子	171℃		250℃
閉じ込め	金属ガスケットの漏えい率		1.70×10 ⁻⁶ Pa・m ³ /s		2.31×10 ⁻⁶ Pa・m ³ /s

(注1) 遮蔽以外の各評価結果は、厳しい条件となる17×17燃料（A型）を収納した条件の結果。

4. 安全設計に関する評価概要

- 自然現象（地震・津波・竜巻）に対しても設計基準値を満足することから、Hitz-P24型の安全機能は維持される。

項目		評価結果	設計基準値	
地震	トラニオン		302MPa	591MPa
	トラニオン接続部		36MPa	175MPa
	閉じ込め	一次蓋密封シール部	23MPa	231MPa
		一次蓋ボルト	260MPa	913MPa
	臨界防止	バスケット	2MPa	87MPa
	遮蔽・除熱	外筒	58MPa	340MPa
	除熱	伝熱フィン	1MPa	86MPa
津波 及び 竜巻	閉じ込め	一次蓋密封シール部	75MPa	230MPa
		一次蓋ボルト	405MPa	913MPa
	臨界防止	バスケット	8MPa	57MPa
	遮蔽・除熱	外筒	36MPa	187MPa
竜巻	貫通限界厚さ		8.9mm	20mm

5. 設置許可基準規則への適合性（第四条）

5. 設置許可基準規則への適合性（第四条）（地震による損傷の防止）

● 設置許可基準規則の要求事項

設置許可基準規則^(注1) 第4条（地震による損傷の防止）の要求事項に対するHitz-P24型の設計方針を下表に示す。

規則等	要求事項	設計方針	特記事項
設置許可基準規則 ^(注1) 第4条第6項	兼用キャスクは、次のいずれかの地震力に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。 一 兼用キャスクが地震力により安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかにかわらず判断するために用いる合理的な地震力として原子力規制委員会が別に定めるもの 二 基準地震動による地震力	原子力規制委員会が別に定めるもの（兼用キャスク告示 ^(注3) で定める地震力）を考慮。	MSF-24P(S)型（C-SE-2110271 ^(注4) ）及びHDP-69BCH(B)型（C-SE-2201261 ^(注5) ）と同様。
設置許可基準規則 ^(注1) 第4条第7項	兼用キャスクは、地震の発生によって生ずるおそれがある斜面の崩壊に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。	型式証明申請の範囲外とする。	—
設置許可基準規則解釈 ^(注2) 別記4 第4条第2項	第6項に規定する地震力に対して、その安全機能が損なわれるおそれがないものであること。	基礎等に固定する設置方法（縦置き）とし、地震力に対してその安全機能が損なわれないよう設計する。	HDP-69BCH(B)型（C-SE-2201261 ^(注5) ）と同様。

(注1) 「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」

(注2) 「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」

(注3) 「兼用キャスクが安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかにかわらず判断するために用いる地震力等を定める告示」

(注4) 発電用原子炉施設に係る特定機器として型式証明を受けたMSF-24P(S)型（C-SE-2110271）を示す。
ただし、MSF-24P(S)型に関する記載は公開情報に基づくものである。

(注5) 発電用原子炉施設に係る特定機器として型式証明を受けたHDP-69BCH(B)型（C-SE-2201261）を示す。
ただし、HDP-69BCH(B)型に関する記載は公開情報に基づくものである。

5. 設置許可基準規則への適合性（第四条）（地震による損傷の防止）

● 設置許可基準規則の要求事項（つづき）

規則等	要求事項	設計方針	特記事項
設置許可基準規則解釈（注2） 別記4第4条第2項	<ul style="list-style-type: none"> 自重その他の貯蔵時に想定される荷重と第6項地震力を組み合わせた荷重条件を考慮すること。 塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が小さなレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有すること。 兼用キャスクの閉じ込め機能を担保する部位は、おおむね弾性状態に留まる範囲で耐えること。 	<ul style="list-style-type: none"> 自重その他の貯蔵時に想定される荷重と第6項地震力を組み合わせた荷重条件を考慮する。 閉じ込め機能を担保する部位は、おおむね弾性状態に留まるよう設計する。 臨界防止機能を担保するバスケットは、臨界防止上有意な変形が生じないよう設計する。 その他の部位については、塑性ひずみが生じる場合であっても、破断延性限界に十分な余裕を有するよう設計する。 	HDP-69BCH(B)型（C-SE-2201261（注5））と同様。
	兼用キャスクは、周辺施設からの波及的影響によって、その安全機能を損なわないように設計すること。	型式証明申請の範囲外とする。	—
設置許可基準規則解釈（注2） 別記4第4条第3項	水平地震力及び鉛直地震力については、同時に不利な方向の組合せで作用させること。	水平地震力及び鉛直地震力が同時に不利な方向の組合せで作用することを考慮する。	MSF-24P(S)型（C-SE-2110271（注4））及びHDP-69BCH(B)型（C-SE-2201261（注5））と同様。

（注2）「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」

（注4）発電用原子炉施設に係る特定機器として型式証明を受けたMSF-24P(S)型（C-SE-2110271）を示す。

ただし、MSF-24P(S)型に関する記載は公開情報に基づくものである。

（注5）発電用原子炉施設に係る特定機器として型式証明を受けたHDP-69BCH(B)型（C-SE-2201261）を示す。

ただし、HDP-69BCH(B)型に関する記載は公開情報に基づくものである。

5. 設置許可基準規則への適合性（第四条）（地震による損傷の防止）

● 審査ガイドの確認内容

審査ガイド^(注1)の確認内容に対するHitz-P24型の地震による損傷の防止に対する設計方針を下表に示す。

確認内容		地震による損傷の防止に対する設計方針	先行型式との比較 ^(注4)
地震力		兼用キャスク告示 ^(注2) で定める加速度を考慮。 ・水平2300Gal ・鉛直1600Gal	承認を受けたMSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型と同じ
基本方針	安全機能維持	基礎等に固定する設置方法（縦置き）とし、地震力に対してその安全機能が損なわれないよう設計する。	承認を受けたHDP-69BCH(B)型と同じ
	波及的影響	型式証明申請の範囲外とする。	—
	基礎地盤及び周辺斜面	型式証明申請の範囲外とする。	—
荷重及び荷重の組合せ	地震力以外の荷重	金属キャスク構造規格 ^(注3) に基づいて、貯蔵時に想定される荷重を考慮。	承認を受けたMSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型と同じ考え方
	荷重の組合せ	兼用キャスクに作用する地震力と地震力以外の荷重による組合せを考慮。	承認を受けたMSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型と同じ考え方

(注1) 「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」

(注2) 「兼用キャスクが安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかにかわらず判断するために用いる地震力等を定める告示」

(注3) 「日本機械学会 使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格（JSME S FA1-2007）」

(注4) 詳細は、「参考. 承認を受けたキャスクとの違い（Hitz-B52型・MSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型）」参照

5. 設置許可基準規則への適合性（第四条）（地震による損傷の防止）

● 審査ガイドの確認内容（つづき）

確認内容		地震による損傷の防止に対する設計方針		先行型式との比較 ^(注4)
許容限界	規格等	金属キャスク構造規格 ^(注3) に基づき、許容限界を設定。		承認を受けたMSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型と同じ
	閉じ込め機能	密封境界部がおおむね弾性範囲内となる許容限界。		承認を受けたMSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型と同じ
	臨界防止機能	バスケットが臨界防止上有意な変形をおこさない許容限界。		承認を受けたHDP-69BCH(B)型と同じ
静的解析及び地震応答解析	解析モデル及び解析手法	①下部トラニオン	工学式	承認を受けたHDP-69BCH(B)型と同じ考え方
		②特定兼用キャスク本体	有限要素法【ABAQUS】	承認を受けたHitz-B52型 ^(注5) と同じ考え方
		③バスケット	工学式	承認を受けたMSF-24P(S)型と同じ考え方
		④伝熱フィン	工学式	
	地震力の組合せ	水平地震力及び鉛直地震力を同時に不利な方向に作用。		承認を受けたMSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型と同じ考え方
耐震性評価	応力評価	地震力と地震力以外の荷重を組合せて得られる応力等が許容限界を超えないことを確認。		承認を受けたMSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型と同じ考え方
	疲労評価	金属キャスク構造規格 ^(注3) に基づき、疲労解析不要の条件を満たすことを確認。		承認を受けたHDP-69BCH(B)型と同じ考え方

(注1) 「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」

(注3) 「日本機械学会 使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格 (JSME S FA1-2007)」

(注4) 詳細は、「参考2. 承認を受けたキャスクとの違い」参照

(注5) 使用済燃料貯蔵施設の特定容器として型式証明を受けたHitz-B52型を示す。

5. 設置許可基準規則への適合性（第四条）（地震による損傷の防止）

● 基本方針

- ▶ 水平地震力及び鉛直地震力が同時に不利な方向に作用した場合の評価を行い、Hitz-P24型の安全機能が損なわれるおそれがないことを示す。
- ▶ 安全機能を担保する構成部材のうち、評価部位及び評価基準を下表に示す。

表 評価部位及び評価基準

安全機能	評価部位	評価基準
閉じ込め機能	一次蓋密封シール部	金属キャスク構造規格の密封容器の供用状態Dの許容応力
	一次蓋ボルト	
臨界防止機能	バスケットプレート	補足説明資料1-2「バスケット基準値について」に定める供用状態Dにおける許容応力
遮蔽機能	外筒（注1）	金属キャスク構造規格の中間胴の供用状態Dの許容応力
除熱機能	伝熱フィン（注2）	破断しないこと（注3）

（注1）ガンマ線遮蔽材で最も板厚が薄く、中性子遮蔽材を支持する部位であるため

（注2）主要な伝熱部材であるため

（注3）伝熱フィンの評価基準としては、破断しないことを確認するための基準としてSuを適用

5. 設置許可基準規則への適合性（第四条）（地震による損傷の防止）

● 解析モデル及び解析手法（②特定兼用キャスク本体：有限要素法【ABAQUS】）

(1) 荷重条件

- 水平地震力と鉛直地震力を組み合わせた評価を実施
- 鉛直地震力については、上方向と下方向の2ケースを実施

a. 地震力

F_{iw} : 内部収納物（内側部及び外側部3箇所のバスケット及び燃料集合体）の慣性力

F_{ir} : 内部収納物（外側部1箇所のバスケット及び燃料集合体）の慣性力

F_{tw} : 蓋部中性子遮蔽材の慣性力

F_{bw} : 底部中性子遮蔽材の慣性力

b. 地震力以外による荷重

P_i : 胴内圧

P_{ii} : 一二次蓋間圧力

P_w : 側部中性子遮蔽材部圧力

P_{tr} : 蓋部中性子遮蔽材部圧力

P_{br} : 底部中性子遮蔽材部圧力

(2) 境界条件

- 貯蔵架台との接触面となる底板底面（ $0^\circ \sim 90^\circ$ 範囲）のキャスク軸方向変位を拘束
- 径方向の拘束面となる底板側面の径方向変位を拘束
- トラニオン（ 270° 側）の固定位置におけるキャスク軸方向の変位を拘束

図 水平方向地震力及び鉛直上方向地震力による荷重条件及び境界条件

● 解析モデル及び解析手法（②特定兼用キャスク本体：有限要素法【ABAQUS】）

（3）内部収納物による荷重の伝達経路

- バasketプレート（外側部/270°）からの荷重は、固定金具（Basket側）、固定ボルト及び固定金具（キャスク側）を介してキャスク本体胴の切り欠き部に作用する。
- Basketプレート（内側部）からの荷重は、直接又は固定金具を介してBasketプレート（外側部/90°）に伝達され、Basketプレート（外側部/90°）による荷重と合わせてキャスク本体胴内面に作用する。
- Basketプレート（外側部/0°及び180°）からの荷重は、キャスク本体胴内面に作用する。

5. 設置許可基準規則への適合性（第四条）（地震による損傷の防止）

● 解析モデル及び解析手法（②特定兼用キャスク本体：有限要素法【ABAQUS】）

（4）内部収納物による荷重条件の考え方

- バasketプレート（外側部/270°）からの荷重（ F_{ir} ）をキャスク本体胴の切り欠き部に作用
- キャスク本体胴内面に作用する荷重は、0°方向では小さく、90°方向に近づくにつれて大きくなることから、内側部及び外側部3箇所のBasket及び燃料集合体からの荷重（ F_{iw} ）をCOS分布荷重として考慮

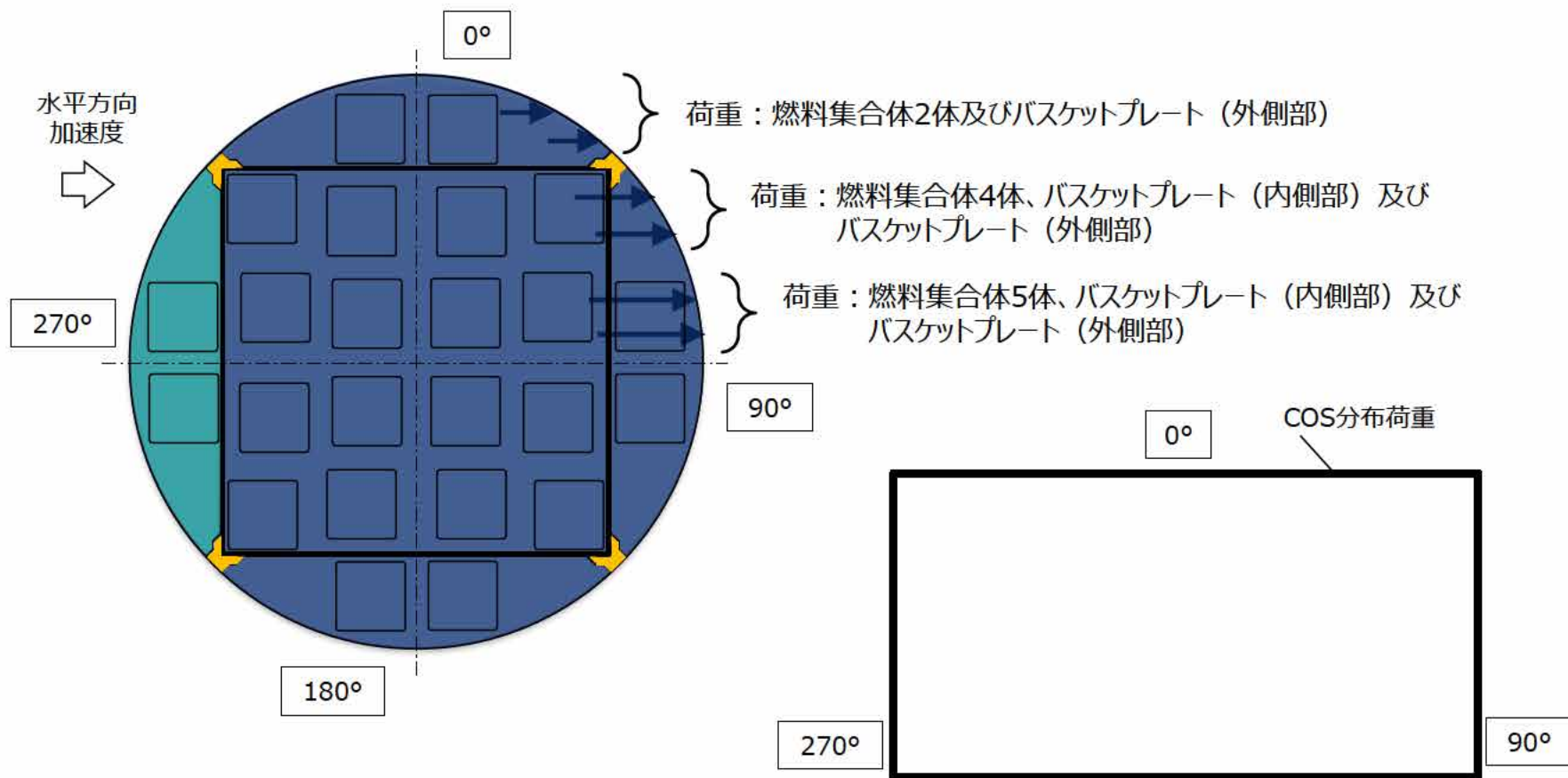


図 キャスク本体胴に作用する荷重の分布

5. 設置許可基準規則への適合性（第四条）（地震による損傷の防止）

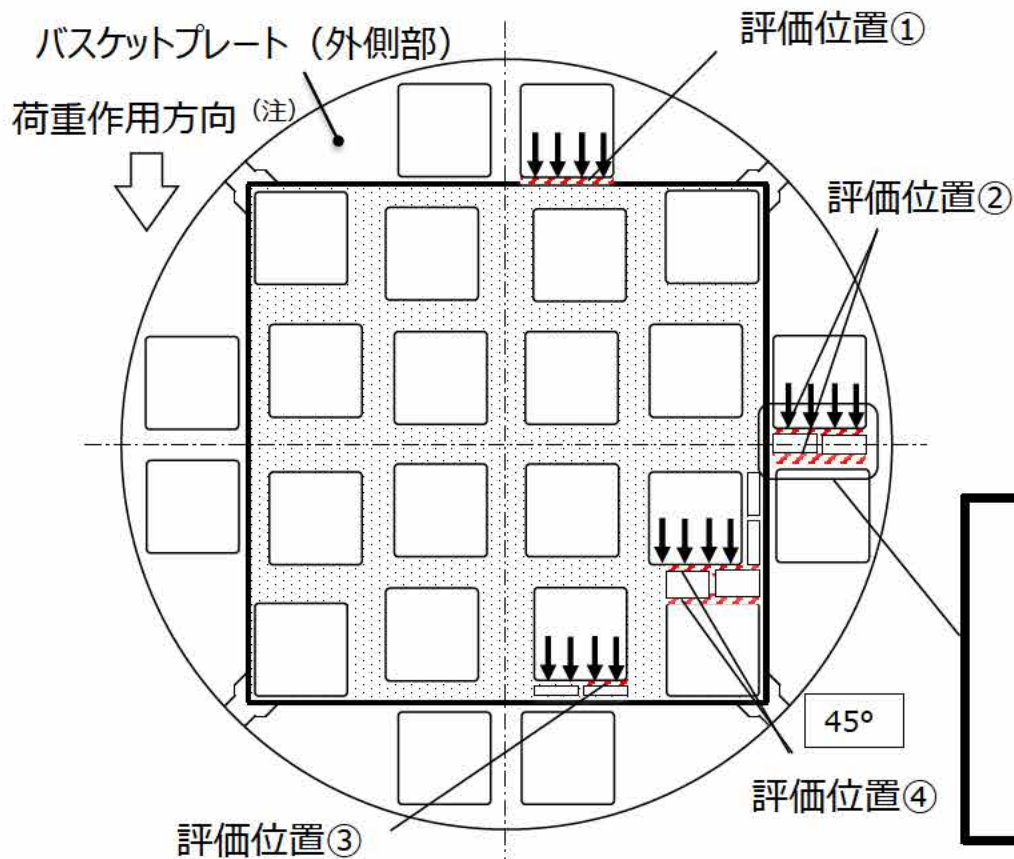
● 解析モデル及び解析手法（③バスケット：工学式）

(1) バスケットプレート格子板（曲げ応力）

➤ に対して評価を行う。

a. 曲げ応力

➤ 曲げ応力が生じるバスケットプレート格子板（評価位置①～④）を評価する。



評価位置の選定理由

- 評価位置①：燃料集合体の荷重をバスケットプレート格子板1枚で負担
- 評価位置②：燃料集合体の荷重をバスケットプレート格子板2枚で負担する部位のうち、最も板厚が小さい
- 評価位置③：バスケットプレート格子板のうち最も板厚が小さい
- 評価位置④：当該評価位置の上段の格子位置のずれにより、局所的な荷重が作用

図 曲げ応力が生じるバスケットプレート格子板の評価位置

(注) 45°方向に水平方向加速度が作用する場合の荷重は、0°方向に作用する場合の約0.7倍（ $=1/\sqrt{2}$ ）となるため、0°方向の評価に包絡される。

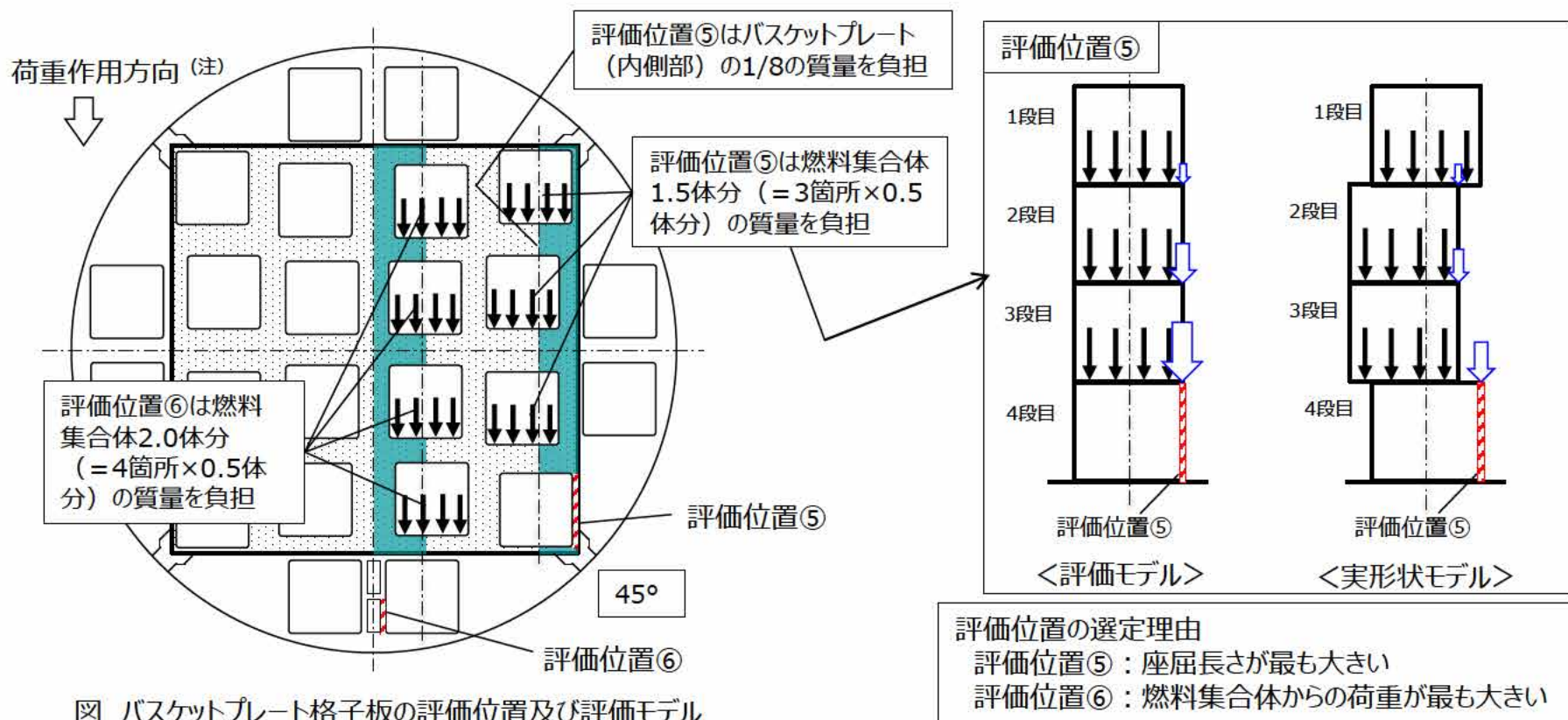
5. 設置許可基準規則への適合性（第四条）（地震による損傷の防止）

● 解析モデル及び解析手法（③バスケット：工学式）

(1) バスケットプレート格子板

b. 圧縮応力

- 圧縮応力が生じるバスケットプレート格子板（評価位置⑤～⑥）を評価する。
- 評価位置⑤において負担する燃料集合体の質量は、2段目及び3段目の格子位置のずれにより、ずれがない場合と比較して小さいため、保守的に1.5体分の質量を負担する評価モデルとする。



（注）45°方向に水平方向加速度が作用する場合の荷重は、0°方向に作用する場合の約0.7倍（ $=1/\sqrt{2}$ ）となるため、0°方向の評価に包絡される。

5. 設置許可基準規則への適合性（第四条）（地震による損傷の防止）

● 解析モデル及び解析手法（③バスケット：工学式）

(2) 固定金具

- バスケットプレート（外側部）からの荷重により、固定金具に曲げ応力が生じる。固定金具を端部固定とする片持ち梁として曲げ応力を評価する。
- バスケットプレート（内側部）からの荷重は、固定金具を介してバスケットプレート（外側部）に伝達されるため、固定金具の健全性に影響はない。

(3) 固定ボルト

- バスケットプレート（外側部）からの荷重により、固定ボルトに引張応力が生じる。

図 固定金具の評価位置及び評価モデル

図 固定ボルトの評価位置及び評価モデル

5. 設置許可基準規則への適合性（第四条）（地震による損傷の防止）

● 評価結果（1/3）

（1）トラニオン

トラニオン本体及びトラニオン接続部に生じる応力は評価基準を満足しており、トラニオンの構造健全性は維持される。

表 地震時のトラニオンの強度評価結果

(a) トラニオン本体及びトラニオン接続部（おねじ部）

評価位置	応力の種類		応力 ^(注1) (MPa)	評価基準値 ^(注2) (MPa)
トラニオン本体 (断面A-A)	一次応力	組合せ応力	302	591
トラニオン本体 (断面B-B)	一次応力	組合せ応力	182	591
トラニオン接続部 (おねじ部)	一次応力	せん断応力	67	341

(注1) 各評価断面のうち、評価基準値に対する余裕が最も少ない結果を記載。

(注2) 金属キャスク構造規格のトラニオンの供用状態Dの許容応力。

(b) トラニオン接続部（めねじ部）

評価位置	応力の種類	応力 ^(注1) (MPa)	評価基準値 ^(注2) (MPa)
トラニオン接続部 (めねじ部)	せん断応力	36	175

(注1) 各評価断面のうち、評価基準値に対する余裕が最も少ない結果を記載。

(注2) 金属キャスク構造規格の密封容器の供用状態Dの許容応力。

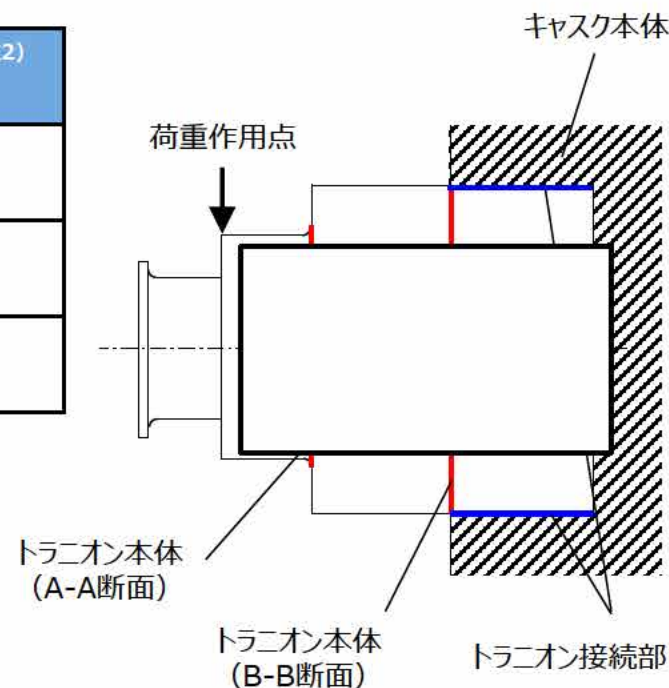


図 トラニオンの応力評価位置

5. 設置許可基準規則への適合性（第四条）（地震による損傷の防止）

● 評価結果（2/3）

(2) 特定兼用キャスク本体、バスケット及び伝熱フィン

- 特定兼用キャスクを構成する部材のうち、密封境界部、外筒、バスケット及び伝熱フィンに生じる応力は評価基準を満足する。

表 地震時の構成部材の応力評価結果

安全機能	評価部位		応力の種類	応力 (注1) (MPa)	評価基準値 (注2) (MPa)
閉じ込め機能	一次蓋密封シール部		$P_L + P_b + Q$	23	231
	一次蓋ボルト		$\sigma_m + \sigma_b$	260	913
臨界防止機能	バスケット	バスケットプレート	応力強さ	3	143
		固定金具	応力強さ	2	425
		固定ボルト	引張	10	563
遮蔽機能	外筒		引張	58	340
除熱機能	伝熱フィン	溶接部のど部	応力強さ	1	86

(注1) 各評価部位のうち、荷重条件（鉛直上地震力及び鉛直下地震力）を含めて評価基準値に対する余裕が最も少ない結果を記載。

(注2) 一次蓋密封シール部及び一次蓋ボルトの評価基準は、金属キャスク構造規格の密封容器の供用状態Dの許容応力。
バスケットプレートの評価基準は、補足説明資料1-2「バスケット基準値について」に定める供用状態Dにおける許容応力。
固定金具及び固定ボルトの評価基準は、金属キャスク構造規格のバスケットの供用状態Dの許容応力。
外筒の評価基準は、金属キャスク構造規格の中間胴の供用状態Dの許容応力。
伝熱フィンの評価基準は、破断しないことを確認するための基準としてSuを適用。

● 評価結果（3/3）

- 地震時に一次蓋に生じる慣性力は一次蓋ボルトの締付による摩擦力より小さいため、一次蓋に横ずれは生じない。

表 地震時の密封境界部の横ずれ評価結果

項目	計算結果 (N)	評価基準 (N) (注)
一次蓋の慣性力	1.39×10^5	2.01×10^6

(注) 評価基準は一次蓋ボルトの締付による摩擦力である。

以上のとおり、地震力と地震力以外の荷重を組合せて得られる応力等が許容限界を超えないことから、Hitz-P24型の安全機能が損なわれるおそれはない。したがって、Hitz-P24型は地震による損傷の防止に係る設置許可基準規則の要求事項を満足している。

設置変更許可申請において別途確認を要する条件

- Hitz-P24型を使用した場合に、貯蔵施設の貯蔵架台が、原子力規制委員会が別に定める地震力に対しておおむね弾性状態に留まる範囲で耐え得る設計であること。
- 地震時に貯蔵施設の周辺施設等からの波及的影響評価によりHitz-P24型の安全機能が損なわれるおそれがないこと。

6. 設置許可基準規則への適合性（第五条）

6. 設置許可基準規則への適合性（第五条）（津波による損傷の防止）

● 設置許可基準規則の要求事項

設置許可基準規則^(注1) 第五条（津波による損傷の防止）の要求事項に対するHitz-P24型の設計方針を下表に示す。

規則等	要求事項	設計方針	特記事項
設置許可基準規則 ^(注1) 第五条第2項	兼用キャスクは、次のいずれかの津波に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。 一 兼用キャスクが津波により安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかにかわらず判断するために用いる合理的な津波として原子力規制委員会が別に定めるもの 二 基準津波	原子力規制委員会が別に定めるもの（兼用キャスク告示 ^(注3) で定める津波）を考慮。	MSF-24P(S)型（C-SE-2110271 ^(注4) ）及びHDP-69BCH(B)型（C-SE-2201261 ^(注5) ）と同様。
設置許可基準規則解釈 ^(注2) 別記4 第五条第2項	津波による遡上波の波力及び漂流物の衝突に対して、その安全機能が損なわれるおそれがないこと。	津波による遡上波の波力及び漂流物の衝突に対して、その安全機能が損なわれないよう設計する。	
	質量100トンの漂流物の衝突とすること。	質量100トンの漂流物の衝突を考慮。	
	波力及び衝突による荷重については、同時に作用させること。	波力及び衝突による荷重を同時に作用。	

(注1) 「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」

(注2) 「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」

(注3) 「兼用キャスクが安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかにかわらず判断するために用いる地震力等を定める告示」

(注4) 発電用原子炉施設に係る特定機器として型式証明を受けたMSF-24P(S)型（C-SE-2110271）を示す。
ただし、MSF-24P(S)型に関する記載は公開情報に基づくものである。

(注5) 発電用原子炉施設に係る特定機器として型式証明を受けたHDP-69BCH(B)型（C-SE-2201261）を示す。
ただし、HDP-69BCH(B)型に関する記載は公開情報に基づくものである。

6. 設置許可基準規則への適合性（第五条）（津波による損傷の防止）

● 審査ガイドの確認内容

審査ガイド^(注1)の確認内容に対するHitz-P24型の津波による損傷の防止に対する設計方針を下表に示す。

確認内容		津波による損傷の防止に対する設計方針	先行型式との比較 ^(注3)
津波による作用力		兼用キャスク告示 ^(注2) で定める津波を考慮。 ・浸水深10m ・流速20m/s ・漂流物質量100トン	承認を受けたMSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型と同じ
基本方針	安全機能維持	津波による作用力に対してその安全機能が損なわれないよう設計する。	承認を受けたMSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型と同じ
設計・評価 の方針	津波波力	「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針」に基づき津波波力を設定。	承認を受けたMSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型と同じ
	漂流物衝突荷重	「道路橋示方書・同解説（I 共通編・IV 下部構造編）」に基づき漂流物の衝突荷重を設定。	承認を受けたMSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型と同じ
	荷重の組合せ	津波波力及び漂流物衝突荷重を組み合わせ、兼用キャスクの最も厳しくなる位置に作用。	承認を受けたMSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型と同じ
	評価方法	既往の研究事例や機能確認試験等の結果との対比、FEM解析に基づく応力評価等により実施。	承認を受けたMSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型と同じ考え方

(注1) 「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」

(注2) 「兼用キャスクが安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかにかわらず判断するために用いる地震力等を定める告示」

(注3) 詳細は、「参考. 承認を受けたキャスクとの違い（Hitz-B52型・MSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型）」参照。

6. 設置許可基準規則への適合性（第五条）（津波による損傷の防止）

● 基本方針

- 津波荷重が各評価部位に対して最も厳しくなる位置に作用した場合の評価を行い、Hitz-P24型の安全機能が損なわれるおそれがないことを示す。
- 安全機能を担保する構成部材のうち、評価部位及び評価基準を下表に示す。なお、規則適合性（第四条）における評価部位及び評価基準と同じ。

表 評価部位及び評価基準

安全機能	評価部位	評価基準
閉じ込め機能	一次蓋密封シール部	金属キャスク構造規格の密封容器の供用状態Dの許容応力
	一次蓋ボルト	
臨界防止機能	バスケットプレート	補足説明資料1-2「バスケット基準値について」に定める供用状態Dにおける許容応力
遮蔽機能	外筒（注1）	金属キャスク構造規格の中間胴の供用状態Dの許容応力
除熱機能	伝熱フィン（注2）	破断しないこと

（注1）ガンマ線遮蔽材で最も板厚が薄く、中性子遮蔽材を支持する部位であるため

（注2）主要な伝熱部材であるため

6. 設置許可基準規則への適合性（第五条）（津波による損傷の防止）

● 評価方法（1/2）

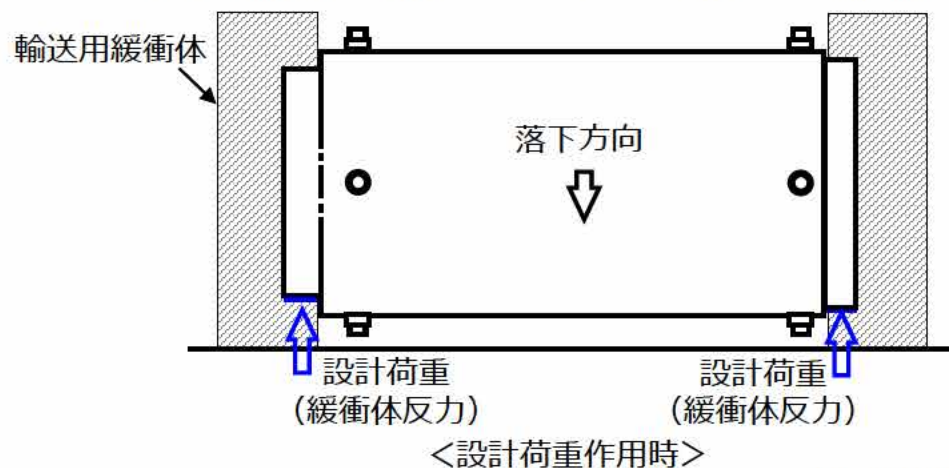
（1）一次蓋密封シール部及び一次蓋ボルト

- 津波荷重を包絡する設計荷重を設定し、設計荷重が作用した場合の一次蓋密封シール部及び一次蓋ボルトを有限要素法を用いたABAQUSコードにより評価する。
- 設計荷重の作用状態としては、輸送用緩衝体を装着したHitz-P24型が落下した場合に、設計荷重が緩衝体反力としてフランジ側面及び底板側面に作用した状態を想定する。
- 津波荷重($5.75 \times 10^3 \text{kN}$)がすべてフランジ側面に作用する保守的な条件を想定しても、設計荷重によりフランジ側面に作用する荷重($1.25 \times 10^4 \text{kN}$)に包絡される^(注)。

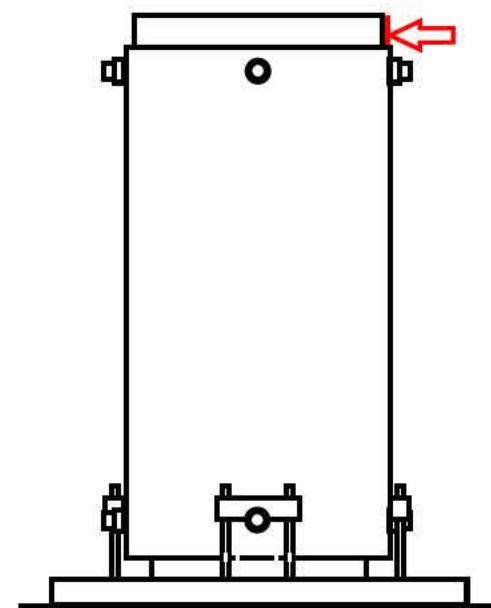
表 津波荷重と設計荷重の比較

項目	津波荷重 (kN)	設計荷重 (kN)
数値	5.75×10^3	2.37×10^4 (フランジ側面： 1.25×10^4) ^(注1) 底板側面： 1.12×10^4)

(注1) 設計荷重作用時のモーメントのつり合いにより算出した値



津波荷重^(注2)



(注2) 津波荷重（津波波力+漂流物衝突荷重）がすべてフランジ側面に作用する保守的な条件を想定

<津波荷重作用時>

図 荷重作用状態の比較

(注) 想定する漂流物によりフランジ側面に作用する荷重の作用範囲を考慮しても津波荷重は設計荷重に包絡される。

6. 設置許可基準規則への適合性（第五条）（津波による損傷の防止）

● 評価方法（2/2）

(2) 外筒

- 津波波力及び漂流物衝突荷重が同時に外筒に作用した場合の評価を行う。
- 津波荷重作用時の外筒に生じる応力を工学式により評価する。

(3) バスケット

- 津波荷重を包絡する設計荷重が作用した場合のバスケットに生じる応力を工学式により評価する。

(4) 伝熱フィン

- 伝熱フィンの外側に取付けられる外筒が破断した場合、伝熱フィンの除熱機能に影響を及ぼすことから、外筒の評価結果をふまえて伝熱フィンが破断しないことを確認する。

● 評価結果（1/2）

(1) 一次蓋密封シール部、一次蓋ボルト及びバスケット

- 津波荷重を包絡する設計荷重作用時に生じる応力は評価基準を満足する。

表 津波荷重を包絡する設計荷重作用時の応力評価結果

安全機能	評価部位	応力の種類	応力 ^(注1) (MPa)	評価基準 ^(注2) (MPa)
閉じ込め機能	一次蓋密封シール部	$P_L + P_b + Q$	75	230
	一次蓋ボルト	$\sigma_m + \sigma_b$	405	913
臨界防止機能	バスケットプレート	圧縮応力	8	57

(注1) 各評価部位のうち、評価基準に対する余裕が最も少ない結果を記載。

(注2) 一次蓋密封シール部及び一次蓋ボルトの評価基準は、金属キャスク構造規格における密封容器の供用状態Dの許容応力。
バスケットプレートの評価基準は、補足説明資料1-2「バスケット基準値について」に定める供用状態Dにおける許容応力。

6. 設置許可基準規則への適合性（第五条）（津波による損傷の防止）

● 評価結果（2/2）

(2) 外筒

- 外筒に生じる応力は評価基準を満足する。

表 外筒の評価結果

安全機能	評価部位	応力の種類	応力 ^(注1) (MPa)	評価基準 ^(注2) (MPa)
遮蔽機能	外筒	曲げ応力	25MPa	324MPa
		せん断応力	36MPa	187MPa

(注1) 各評価部位のうち、評価基準に対する余裕が最も少ない結果を記載。

(注2) 外筒の評価基準は、金属カスク構造規格における中間胴の供用状態Dの許容応力。

(3) 伝熱フィン

- 外筒に生じる応力が評価基準を満足するため、伝熱フィンが破断することはない。

以上のとおり、津波荷重が作用した場合に生じる応力等が評価基準を超えないことから、Hitz-P24型の安全機能が損なわれるおそれはない。したがって、Hitz-P24型は津波による損傷の防止に係る設置許可基準規則の要求事項を満足している。

設置変更許可申請において別途確認を要する条件

- なし。

7. 設置許可基準規則への適合性（第六条）

7. 設置許可基準規則への適合性（第六条）（外部からの衝撃による損傷の防止）

● 設置許可基準規則の要求事項

設置許可基準規則^(注1) 第6条（外部からの衝撃による損傷の防止）の要求事項に対するHitz-P24型の設計方針を下表に示す。

規則等	要求事項	設計方針	特記事項
設置許可基準規則 ^(注1) 第6条第4項	兼用キャスクは、次に掲げる自然現象が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。 一 兼用キャスクが竜巻により安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかんにかかわらず判断するために用いる合理的な竜巻として原子力規制委員会が別に定めるもの	原子力規制委員会が別に定めるもの（兼用キャスク告示 ^(注3) で定める竜巻）を考慮。	MSF-24P(S)型（C-SE-2110271 ^(注4) ）及びHDP-69BCH(B)型（C-SE-2201261 ^(注5) ）と同様。
設置許可基準規則 ^(注1) 第6条第6項	兼用キャスクは、次に掲げる人為による事象に対して安全機能を損なわないものでなければならない。 一 工場等内又はその周辺において想定される兼用キャスクの安全性を損なわせる原因となるおそれがある爆発 二 工場等の周辺において想定される兼用キャスクの安全性を損なわせる原因となるおそれがある火災	型式証明申請の範囲外とする。	—
設置許可基準規則解釈 ^(注2) 別記4 第6条第2項	竜巻による飛来物の衝突に対して、その安全機能を損なわないものであること。	竜巻による飛来物の衝突に対してその安全機能が損なわれないよう設計する。	MSF-24P(S)型（C-SE-2110271 ^(注4) ）及びHDP-69BCH(B)型（C-SE-2201261 ^(注5) ）と同様。

(注1) 「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」

(注2) 「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」

(注3) 「兼用キャスクが安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかんにかかわらず判断するために用いる地震力等を定める告示」

(注4) 発電用原子炉施設に係る特定機器として型式証明を受けたMSF-24P(S)型（C-SE-2110271）を示す。
ただし、MSF-24P(S)型に関する記載は公開情報に基づくものである。

(注5) 発電用原子炉施設に係る特定機器として型式証明を受けたHDP-69BCH(B)型（C-SE-2201261）を示す。
ただし、HDP-69BCH(B)型に関する記載は公開情報に基づくものである。

7. 設置許可基準規則への適合性（第六条）（外部からの衝撃による損傷の防止）

● 審査ガイドの確認内容

審査ガイド^(注1)の確認内容に対するHitz-P24型の外部からの衝撃による損傷の防止に対する設計方針を下表に示す。

確認内容		外部からの衝撃による損傷の防止に対する設計方針	先行型式との比較 ^(注3)
竜巻による作用力		兼用キャスク告示 ^(注2) で定める竜巻を考慮。 ・最大風速100m/sとして設計荷重を設定 ・設計飛来物は「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」解説表4.1に基づき、兼用キャスクに与える影響が最大となるものを選定	承認を受けたMSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型と同じ 承認を受けたMSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型と同じ
基本方針	安全機能維持	竜巻による作用力に対してその安全機能が維持されるよう設計する。	承認を受けたMSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型と同じ
設計方針	飛来物の衝突荷重	飛来物の圧潰挙動を無視し、Rieraの式を用いて算出	承認を受けたMSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型と同じ
	評価方法	既往の研究事例や機能確認試験等の結果との対比、FEM解析に基づく応力評価等により実施。	承認を受けたMSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型と同じ考え方

(注1) 「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」

(注2) 「兼用キャスクが安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかにかわらず判断するために用いる地震力等を定める告示」

(注3) 詳細は、「参考. 承認を受けたキャスクとの違い（Hitz-B52型・MSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型）」参照。

● 基本方針

- 竜巻荷重が各評価部位に対して最も厳しくなる位置に作用した場合の評価を行い、Hitz-P24型の安全機能が損なわれるおそれがないことを示す。
- 安全機能を担保する構成部材のうち、評価部位及び評価基準を下表に示す。なお、規則適合性（第四条）における評価部位及び評価基準と同じ。

表 評価部位及び評価基準

安全機能	評価部位	評価基準
閉じ込め機能	一次蓋密封シール部	金属キャスク構造規格の密封容器の供用状態Dの許容応力
	一次蓋ボルト	
臨界防止機能	バスケットプレート	補足説明資料1-2「バスケット基準値について」に定める供用状態Dにおける許容応力
遮蔽機能	外筒（注1）	金属キャスク構造規格の中間胴の供用状態Dの許容応力
除熱機能	伝熱フィン（注2）	破断しないこと

（注1）ガンマ線遮蔽材で最も板厚が薄く、中性子遮蔽材を支持する部位であるため

（注2）主要な伝熱部材であるため

7. 設置許可基準規則への適合性（第六条）（外部からの衝撃による損傷の防止）

● 評価方法（1/2）

(1) 一次蓋密封シール部及び一次蓋ボルト

- 竜巻荷重($8.55 \times 10^3 \text{kN}$)がすべてフランジ側面に作用する条件を想定しても、設計荷重（規則適合性（第五条）で設定したものと同一）によりフランジ側面に作用する荷重($1.25 \times 10^4 \text{kN}$)に包絡される（注）。
- 竜巻荷重以外の条件は、規則適合性（第五条）で示した津波荷重が作用する場合と同じである。
- したがって、設計荷重に対して安全機能が維持されることを確認する。

表 竜巻荷重及び設計荷重の比較

項目	竜巻荷重 (注1) (kN)	設計荷重 (kN)
数値	8.55×10^3	2.37×10^4 〔フランジ側面： 1.25×10^4 〕 (注2) 〔底板側面： 1.12×10^4 〕

(注1) 「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」解説表4.1に示される設計飛来物のうち、衝突荷重が最大となるトラックの衝突荷重と風圧力による荷重を組み合わせた荷重を示す。
 (注2) 設計荷重作用時のモーメントのつり合いにより算出した値。

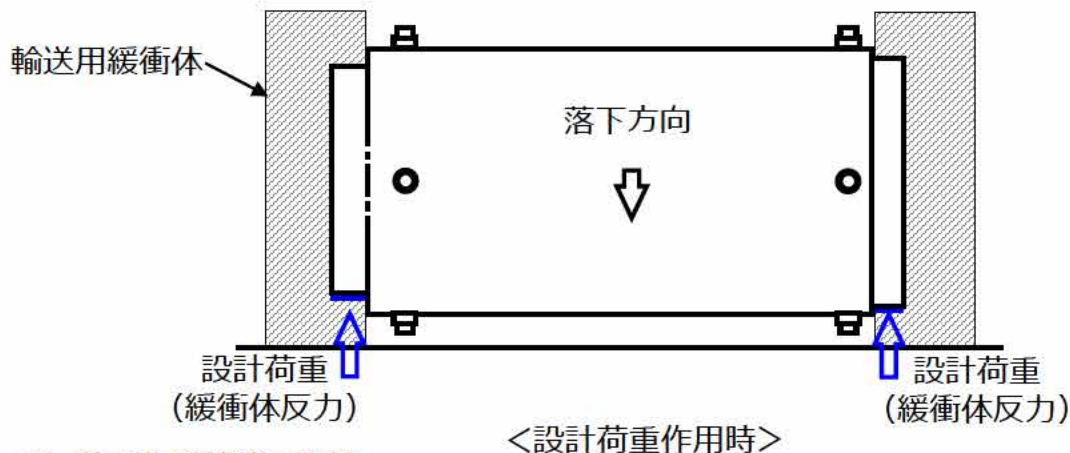
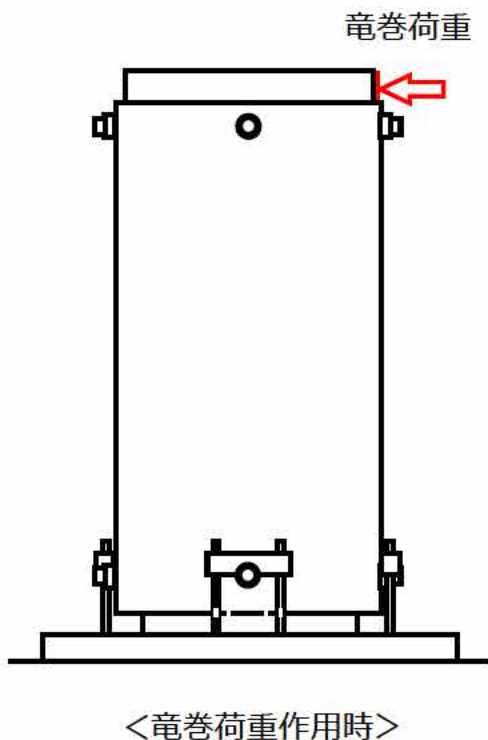


図 荷重作用状態の比較

(注) 想定する飛来物によりフランジ側面に作用する荷重の作用範囲を考慮しても竜巻荷重は設計荷重に包絡される。

- 評価方法（2/2）
 - (2) 外筒
 - 竜巻荷重作用時の外筒に生じる応力を工学式により評価する。
 - (3) バスケット
 - 竜巻荷重を包絡する設計荷重に対して、安全機能が維持されることを確認する。
 - (4) 伝熱フィン
 - 伝熱フィンの外側に取付けられる外筒が破断した場合、伝熱フィンの除熱機能に影響を及ぼすことから、外筒の評価結果をふまえて伝熱フィンが破断しないことを確認する。
- 評価結果
 - (1) 一次蓋密封シール部、一次蓋ボルト及びバスケット
 - 設計荷重が作用した場合にHitz-P24型の安全機能が維持されることが規則適合性（第5条）にて確認されている。
 - (2) 外筒
 - 外筒に生じる応力は評価基準を満足する。

表 外筒の評価結果

安全機能	評価部位	応力の種類	応力 (MPa)	評価基準 (注1) (MPa)
遮蔽機能	外筒	曲げ応力	47MPa	324MPa
		せん断応力	54MPa	187MPa

(注1) 外筒の評価基準は、金属キャスク構造規格における中間胴の供用状態Dの許容応力。

- (3) 伝熱フィン
 - 外筒に生じる応力が評価基準を満足するため、伝熱フィンが破断することはない。

以上のとおり、飛来物の衝突荷重が作用した場合に生じる応力等が評価基準を超えないことから、Hitz-P24型の安全機能が損なわれるおそれはない。したがって、Hitz-P24型は外部からの衝撃による損傷の防止に係る設置許可基準規則の要求事項を満足している。

設置変更許可申請において別途確認を要する条件

- 火災及び外部からの衝撃については、貯蔵施設で想定される条件においてHitz-P24型の安全機能が損なわれないこと。

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）

● 設置許可基準規則の要件に対する適合性の概要（まとめ）

要求項目		要件	設計方針（概要）	設計方針の妥当性 （安全評価結果概要）
条・項	安全機能			
第2項 一号八	臨界防止	燃料体等が臨界に達するおそれがないものとする。	臨界を防止する構造により、貯蔵施設への搬入から搬出までの乾燥状態、及び使用済燃料を収納する際に冠水状態になること等、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。	乾燥状態及び冠水状態における臨界評価により、中性子実効増倍率は0.95を下回ることから臨界に達するおそれはない。
第4項 一号	遮蔽	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。	ガンマ線遮蔽材及び中性子遮蔽材により、使用済燃料からの放射線を適切に遮蔽する設計とする。	使用済燃料を線源とした遮蔽評価により、通常貯蔵時の特定兼用キャスク表面の線量当量率が2mSv/h以下、及び表面から1m離れた位置における線量当量率が100μSv/h以下となることから適切な遮蔽能力を有している。
第4項 二号	除熱	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。	動力を用いずに使用済燃料の崩壊熱を適切に除去するため、使用済燃料の崩壊熱を特定兼用キャスクの外表面に伝え、周囲空気等に伝達し除熱する設計とする。	使用済燃料を熱源とした除熱評価により、貯蔵状態の燃料被覆管及び特定兼用キャスクの構成部材の温度が健全性を維持できる温度以下となることから崩壊熱を適切に除去できる。
第4項 三号	閉じ込め	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。	蓋シール部に金属ガスケットを用いることにより、使用済燃料を内封する空間を設計貯蔵期間を通じて負圧に維持するとともに、一次蓋及び二次蓋の二重の閉じ込め構造とし、蓋間を正圧に維持することにより、圧力障壁を形成し、使用済燃料を内封する空間を外部から隔離する設計とする。また、蓋間空間の圧力を測定することで閉じ込め機能を監視できる設計とする。	設計貯蔵期間中に特定兼用キャスク内部を負圧に維持できる金属ガスケットを用いることから放射性物質を適切に閉じ込めることができる。また、蓋間空間の圧力を監視できる構造であり、閉じ込め機能を監視できる。
解釈 別記4 第16条 第5項	長期 健全性 （経年 変化の 考慮）	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。	設計貯蔵期間中の温度、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変化に対して十分な信頼性を有する材料を選定し、その必要とされる強度及び性能を維持することで使用済燃料の健全性を確保する設計とする。	使用環境における温度、放射線照射、腐食に係る長期健全性評価により、経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を維持できる。

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（臨界防止機能）

- ◆ 燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設（第十六条第2項第一号八）（臨界防止機能）
 - 設置許可基準規則の要求事項

設置許可基準規則^(注1)の要求事項に対するHitz-P24型の臨界防止設計の方針を下表に示す。

規則等	要求事項	臨界防止設計の方針	特記事項
設置許可基準規則 ^(注1) 第十六条第2項第一号八	燃料体等が臨界に達するおそれがないものとする。	中性子実効増倍率が0.95以下となるように設計する。	Hitz-B52型（M-DPC20002 ^(注3) ）及びMSF-24P(S)型（C-SE-2110271 ^(注4) ）と同様。
貯蔵事業許可基準規則解釈 ^(注2) 第3条	使用済燃料を収納した条件下で、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であること。	Hitz-P24型の貯蔵施設への搬入から搬出までの乾燥状態、及びHitz-P24型に使用済燃料集合体を収納する際の冠水状態においても臨界を防止する設計とする。	Hitz-B52型（M-DPC20002 ^(注3) ）及びMSF-24P(S)型（C-SE-2110271 ^(注4) ）と同様。
	設計貯蔵期間を通じてバスケットの構造健全性が保たれる設計であること。	バスケットプレートは、設計貯蔵期間中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とすることで、構造健全性を維持できる設計とする。	詳細は長期健全性の資料で別途説明。
	キャスク相互の中性子干渉を考慮し、技術的に想定されるいかなる場合でも臨界を防止する対策が講じられていること。	Hitz-P24型が無限に配列した体系（完全反射）とすることでHitz-P24型相互の中性子干渉を考慮。	Hitz-B52型（M-DPC20002 ^(注3) ）及びMSF-24P(S)型（C-SE-2110271 ^(注4) ）と同様。

(注1) 「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」

(注2) 「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」

(注3) 使用済燃料貯蔵施設の特定期間として型式証明を受けたHitz-B52型（M-DPC20002）を示す。

(注4) 発電用原子炉施設に係る特定機器として型式証明を受けたMSF-24P(S)型（C-SE-2110271）を示す。

ただし、MSF-24P(S)型に関する記載は公開情報に基づくものである。

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（臨界防止機能）

● 設置許可基準規則の要求事項（続き）

規則等	要求事項	臨界防止設計の方針	特記事項
貯蔵事業 許可基準 規則解釈 (注2)第3 条	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。 ①配置・形状 <ul style="list-style-type: none"> キャスクの配置、バスケットの形状、バスケット格子内の燃料集合体の配置等 滑動等によるキャスクの配置の変化に伴う中性子実効増倍率の増加 事故時にバスケット及び使用済燃料集合体の変形(破損) 	以下の項目について、中性子実効増倍率が最も大くなる条件を適用。なお、Hitz-P24型は床等に固定するため、滑動等は生じず、配置の変化はない。 <ul style="list-style-type: none"> Hitz-P24型が無限に配列した体系（完全反射） 水ギャップ(*)、バスケット格子内のり等の寸法公差 バスケット格子内の使用済燃料の配置、中性子吸収材及びバスケット内側部の配置 (*) バスケットプレートに設けられた、冠水時に水で満たされるスペース	Hitz-B52型（M-DPC20002(注3)）と同様、滑動等が生じない設計。Hitz-P24型の設計に特有の中性子吸収材及びバスケット内側部の配置、寸法設定について影響評価を実施。 上記以外の基本的な考え方はHitz-B52型（M-DPC20002(注3)）及びMSF-24P(S)型（C-SE-2110271(注4)）と同様。
		設計上考慮すべき自然現象（地震、津波及び竜巻）に対しては、バスケットに塑性変形は生じない。	MSF-24P(S)型（C-SE-2110271(注4)）と同様。
	②中性子吸収材の効果 <ul style="list-style-type: none"> 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 	以下の項目について、中性子実効増倍率が最も大くなる条件を適用。なお、ほう素の均質性は製造管理により担保。 <ul style="list-style-type: none"> 中性子吸収材の濃度（ほう素添加量） 中性子吸収材の寸法公差 設計貯蔵期間経過後の中性子吸収材に含まれるほう素の減損割合は、保守的に評価しても 10^{-6} 程度であるため無視。	Hitz-B52型（M-DPC20002(注3)）及びMSF-24P(S)型（C-SE-2110271(注4)）と同様。 なお、ほう素の減損割合は長期健全性の資料で別途説明。

(注2)「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」

(注3) 使用済燃料貯蔵施設の特定容器として型式証明を受けたHitz-B52型（M-DPC20002）を示す。

(注4) 発電用原子炉施設に係る特定機器として型式証明を受けたMSF-24P(S)型（C-SE-2110271）を示す。

ただし、MSF-24P(S)型に関する記載は公開情報に基づくものである。

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（臨界防止機能）

● 設置許可基準規則の要求事項（続き）

規則等	要求事項	臨界防止設計の方針	特記事項
貯蔵事業許可基準規則解釈（注2）第3条	③減速材(水)の影響	冠水状態（水密度1.0g/cm ³ ）を考慮。	Hitz-B52型（M-DPC20002 ^(注3) ）及びMSF-24P(S)型（C-SE-2110271 ^(注4) ）と同様。
	④燃焼度クレジット	採用しない。	MSF-24P(S)型（C-SE-2110271 ^(注4) ）と同様に新燃料（燃焼度0GWd/t）として評価。
	使用済燃料をキャスクに収納するにあたっては、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。	型式証明申請の範囲外とする。	—
設置許可基準規則解釈別記4第16条第5項 ^(注5)	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 設計貯蔵期間は60年とする。 Hitz-P24型は、構成部材について、設計貯蔵期間中の温度、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変化に対して信頼性を有する材料を選定し、その必要とされる強度及び性能を確保する設計とする。 	Hitz-B52型（M-DPC20002 ^(注3) ）及びMSF-24P(S)型（C-SE-2110271 ^(注4) ）と同様。詳細は長期健全性の資料で別途説明。

（注2）「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」

（注3）使用済燃料貯蔵施設の特定容器として型式証明を受けたHitz-B52型（M-DPC20002）を示す。

（注4）発電用原子炉施設に係る特定機器として型式証明を受けたMSF-24P(S)型（C-SE-2110271）を示す。

ただし、MSF-24P(S)型に関する記載は公開情報に基づくものである。

（注5）「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（臨界防止機能）

● 審査ガイドの確認内容

審査ガイド^(注)の確認内容に対するHitz-P24型の臨界防止設計の方針を下表に示す。

確認内容		臨界防止設計の方針	先行型式との比較
配置・形状	特定兼用カスクの配置	・無限配列（完全反射境界）	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型の考え方と同じ
	バスケットの形状	・実効増倍率が最大となるようバスケット（水ギャップ、格子内のり等）の製造公差を考慮 【バスケット内の部材の配置】 ・実効増倍率が最大となる中性子吸収材の配置を考慮 ・実効増倍率が最大となるバスケット内側部の配置を考慮	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型の考え方と同じ
	バスケット格子内の燃料集合体配置	・実効増倍率が最大となる使用済燃料の偏りを考慮	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型の考え方と同じ
中性子吸収材の効果	製造公差	・実効増倍率が最大となる、下限値のほう素添加量に設定 ・実効増倍率が最大となる、最小値の寸法に設定	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型の考え方と同じ
	原子個数密度の減少	・ほう素の減損が無視できることを確認	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型の考え方と同じ
減速材（水）の影響		・乾燥状態から冠水状態までを考慮 ・容器内・外の水密度の影響を考慮 ・容器内の水位変動の影響を考慮	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型の考え方と同じ
解析コード及びデータライブラリ	臨界計算コード	・SCALE6.2.1 (KENO-V.a)	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型と同じ
	断面積ライブラリ	・ENDF/B-VIIに基づく252群ライブラリ	

(注記) 黄色着色箇所は、Hitz-P24型に特有の考慮を含む事項。

(注) 「原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式カスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド」

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（臨界防止機能）

- 臨界評価における解析モデル（配置・形状）

解析モデルは以下のとおり、特有のバスケット構造も含め、配置・形状等を適切に考慮し、実効増倍率が最大となる保守的な条件とする。

項目		寸法条件	
		乾燥状態	冠水状態
バスケット水ギャップ	幅（下図a）	最大	最小
	長さ（下図b）	最大	最大
中性子吸収材 （ほう素添加アルミニウム合金、 ほう素添加ステンレス鋼）	厚さ（下図c）	最小	最小
	長さ（下図d）	最小	最小
バスケット格子内のり		最大	最大

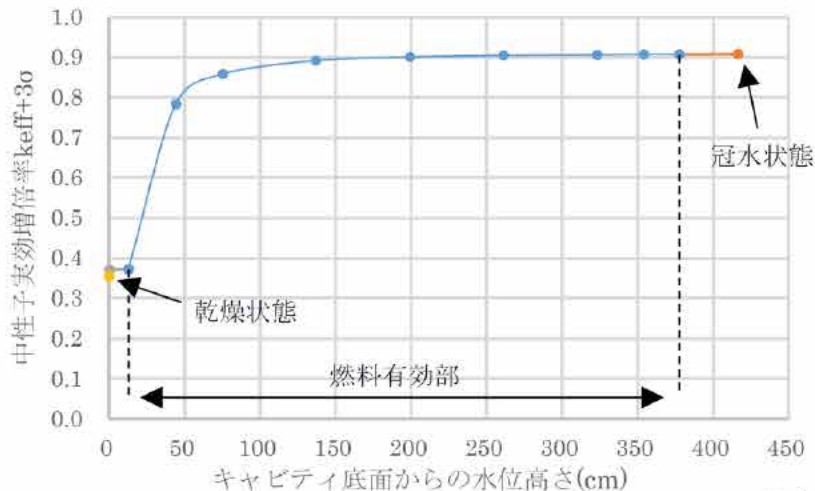
項目	配置条件
中性子吸収材配置	厚さ方向（下図e）：中性子吸収材間距離を最小 長さ方向（下図f）：中性子吸収材間距離を最大
バスケット内側部の配置	Hitz-P24型の中心



8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（臨界防止機能）

● 減速材（水）の影響

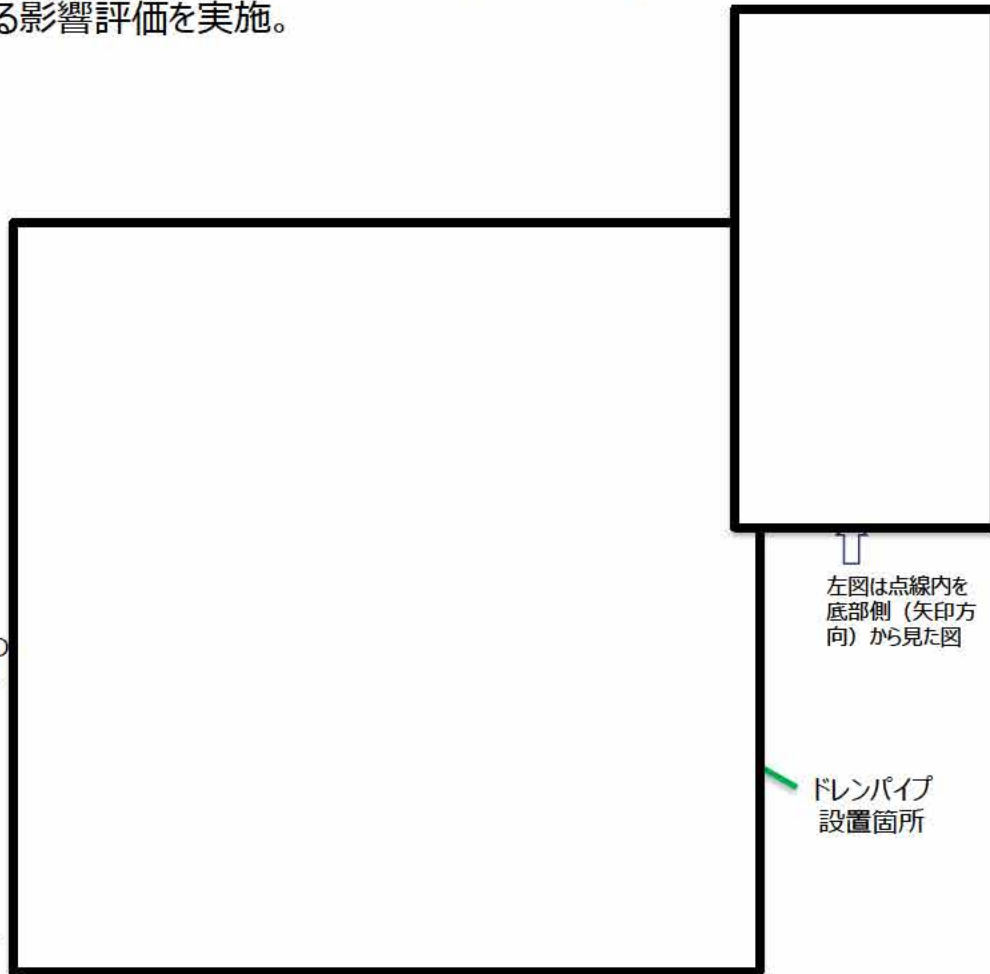
- Hitz-P24型のバスケットは、注排水時に格子内や水ギャップにおいて水位差が生じない設計としている。
- 設計を踏まえ水位一様の条件で、水位変動による影響評価を実施。
- 冠水状態に包絡されることを確認。



Hitz-P24型の水位変動による影響評価結果

最底部の
プレート

底部側のバスケットプレートに溝が設けてあり、ドレンパイプからの注排水時にバスケット（格子、水ギャップ）内で水位差が生じない構造になっている。



左図は点線内を
底部側（矢印方
向）から見た図

ドレンパイプ
設置箇所

バスケット構造図（底部側）
※黄色矢印は排水時の水の流れの例

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（臨界防止機能）

● 臨界評価結果

Hitz-P24型の貯蔵施設への搬入から搬出までの乾燥状態、及びHitz-P24型に使用済燃料集合体を収納する際の冠水状態における臨界評価を実施し、中性子実効増倍率が0.95を下回ることを確認した。

項目		評価結果（注1）	評価基準
中性子実効増倍率	冠水状態	0.908	0.95以下
	乾燥状態	0.356	

（注1）統計誤差（ σ ）の3倍（ 3σ ）を加えた値である。

以上のとおり、技術的に想定される状態においても、燃料体等が臨界に達するおそれはない。したがって、Hitz-P24型の臨界防止機能に係る設置許可基準規則の要求事項を満足している。

設置（変更）許可申請において別途確認を要する条件

- 使用済燃料集合体を収納するに当たり、臨界防止機能に関する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。

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（遮蔽機能）

- ◆ 燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設（第十六条第4項第一号）（遮蔽機能）
 - 設置許可基準規則の要求事項

設置許可基準規則^(注1)の要求事項に対するHitz-P24型の遮蔽設計の方針を下表に示す。

規則等	要求事項	遮蔽設計の方針	特記事項
設置許可基準規則 ^(注1) 第十六条第4項第一号	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。	Hitz-P24型は、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設計とする。	Hitz-B52型（M-DPC20002 ^(注3) ）及びMSF-24P(S)型（C-SE-2110271 ^(注4) ）と同様。
貯蔵事業許可基準規則解釈 ^(注2) 第4条第1項第3号	使用済燃料を金属キャスクに収納するに当たっては、遮蔽評価で考慮した燃焼度に応じた配置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。	型式証明申請の範囲外とする。	—
設置許可基準規則解釈 ^(注5) 別記4第16条第2項	表面の線量当量率が2mSv/h以下、かつ、表面から1m離れた位置における線量当量率が100μSv/h以下であること。	Hitz-P24型は、使用済燃料集合体からの放射線を本体及び蓋部の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し、Hitz-P24型表面の線量当量率を2mSv/h以下、かつ、Hitz-P24型表面から1メートル離れた位置における線量当量率を100μSv/h以下となる設計とする。	Hitz-B52型（M-DPC20002 ^(注3) ）及びMSF-24P(S)型（C-SE-2110271 ^(注4) ）と同様。

(注1) 「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」

(注2) 「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」

(注3) 使用済燃料貯蔵施設の特定期間として型式証明を受けたHitz-B52型（M-DPC20002）を示す。

(注4) 発電用原子炉施設に係る特定期間として型式証明を受けたMSF-24P(S)型（C-SE-2110271）を示す。
ただし、MSF-24P(S)型に関する記載は公開情報に基づくものである。

(注5) 「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（遮蔽機能）

● 設置許可基準規則の要求事項（続き）

規則等	要求事項	遮蔽設計の方針	特記事項
設置許可基準規則解釈(注5)別記4第16条第2項	貯蔵建屋を設置する場合には、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。	型式証明申請の範囲外とする。	—
設置許可基準規則解釈(注5)別記4第16条第5項	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 設計貯蔵期間は60年とする。 Hitz-P24型は、構成部材について、設計貯蔵期間中の温度、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変化に対して信頼性を有する材料を選定し、その必要とされる強度及び性能を確保する設計とする。 	Hitz-B52型（M-DPC20002(注3)）及びMSF-24P(S)型（C-SE-2110271(注4)）と同様。詳細は長期健全性の資料で別途説明。

(注3) 使用済燃料貯蔵施設の特定容器として型式証明を受けたHitz-B52型（M-DPC20002）を示す。

(注4) 発電用原子炉施設に係る特定機器として型式証明を受けたMSF-24P(S)型（C-SE-2110271）を示す。
ただし、MSF-24P(S)型に関する記載は公開情報に基づくものである。

(注5)「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（遮蔽機能）

● 審査ガイドの確認内容

審査ガイド(注1)の確認内容に対するHitz-P24型の遮蔽設計の方針を下表に示す。

確認内容		遮蔽設計の方針	先行型式との比較(注2)
使用済燃料の放射線源強度	評価条件	以下のように放射線源強度が保守的になる条件を設定 <ul style="list-style-type: none"> ・中央部、外周部のそれぞれの収納制限の最高の燃焼度を設定 ・ウラン濃縮度は最小値を設定 ・使用済燃料の軸方向の燃焼度分布を考慮 	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型の考え方と同じ
	燃焼計算コード	ORIGEN2 (ORIGEN2.2UPJ) (ライブラリ：PWRU50)	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型と同じ
特定兼用キャスクの遮蔽機能評価	実形状を適切にモデル化	実形状をR-Z体系の有限円筒モデル（以下「二次元モデル」）でモデル化 以下のように配置形状を適切に考慮し、保守的な条件を設定 <ul style="list-style-type: none"> ・材料密度は最小値を設定 ・各構成部材の寸法は公称寸法とするが、密度を密度係数(注3)で補正 ・使用済燃料の軸方向の移動を保守的に考慮 	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型の考え方と同じ
	均質化	二次元モデルにおいて実形状のままモデル化できない以下の領域は均質化 <ul style="list-style-type: none"> ・燃料領域 ・バスケット最外周部 ・側部中性子遮蔽材 	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型の考え方と同じ
	トランオン部	別途モデル化し、線束接続により評価	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型の考え方と同じ
	遮蔽材の劣化	設計貯蔵期間中の熱影響による中性子遮蔽材の質量減損を考慮	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型の考え方と同じ
	解析コード、ライブラリ	DOT3.5コード ライブラリ：MATXSLIB-J33	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型と同じ(注4)

(注1) 「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」

(注2) 詳細は、「参考. 承認を受けたキャスクとの違い（Hitz-B52型・MSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型）」参照

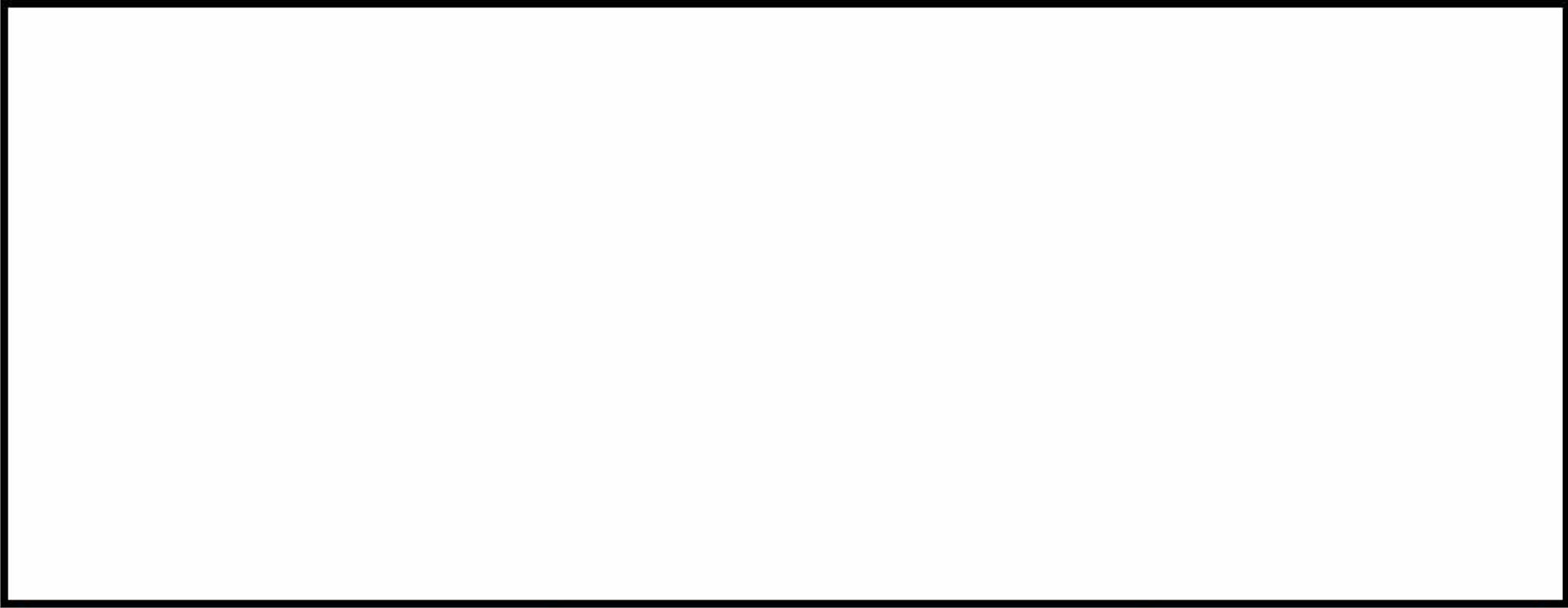
(注3) 密度係数 = 公差を考慮した最小厚さ / 公称厚さ

(注4) Hitz-B52型において断面積ライブラリにDLC-23/CASKを使用（ただし、MATXSLIB-J33でも別途評価）

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（遮蔽機能）

- 遮蔽機能評価における解析モデル

審査ガイドに要求される【兼用キャスクの実形状を適切にモデル化】に適合するよう、Hitz-P24型の実形状を以下のように考慮することで、線量当量率を保守的に評価できるモデルとする。（バスケット構造の詳細は参考 1 P12～15参照）

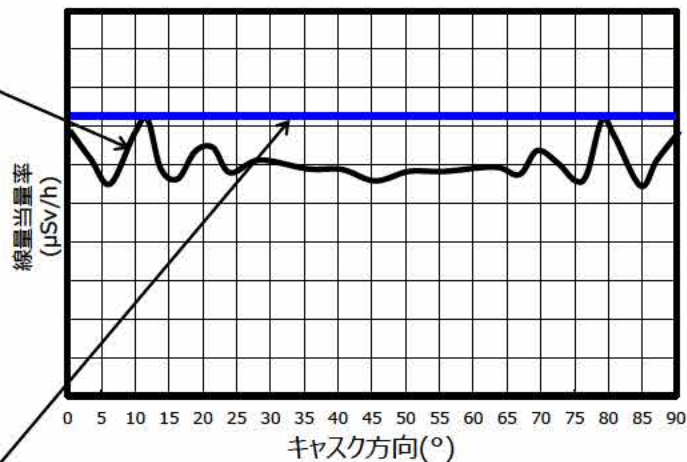


Hitz-P24型の実形状		遮蔽評価のモデル化	特記事項
バスケット	軸方向：[] プレーンを重ねた構造	[] として考慮： アルミニウム合金が少なくモデル化され、保守的	Hitz-P24型の設計を考慮した保守的なモデル化
	径方向：燃料格子、ギャップ、中性子吸収材の配置・形状	燃料領域：均質化 バスケット最外周部：実形状の線量当量率分布(X-Yモデル)を包絡する、保守的な密度を設定（→次ページ参照）	Hitz-B52型の評価手法と同じ

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（遮蔽機能）

- 遮蔽機能評価における解析モデル（バスケット外周部の密度設定の考え方）

(実形状相当)の
分布を算出する。



③ 調整した
二次元モデル
のバスケット外
周部を算出する。

- ② バスケット外周部の密度係数*を調整し、X-Yモデルの最大線量当量率と同等となる密度係数を求める。

*バスケット最外周部のアルミニウム合金の密度に乘じる
補正係数(<1)

二次元モデル(R-Z体系)

以上のとおり、Hitz-P24型の実形状を適切にモデル化しており、
審査ガイドのモデル化に関する要求事項に適合している。

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（遮蔽機能）

● 遮蔽評価結果

遮蔽評価により、特定兼用キャスク表面及び表面から1m離れた位置における線量当量率は、評価基準を下回ることを確認した。

項目	評価結果		評価基準
	使用済燃料集合体の型式		
	A型	B型	
表面線量当量率	1.5mSv/h	1.4mSv/h	2mSv/h以下
表面から1m離れた位置 における線量当量率	84 μ Sv/h	85 μ Sv/h	100 μ Sv/h以下

以上のとおり、Hitz-P24型は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設計であり、遮蔽機能に係る設置許可基準規則の要求事項を満足している。

設置（変更）許可申請において別途確認を要する条件

- 遮蔽評価で考慮した使用済燃料集合体の燃焼度に応じた使用済燃料集合体の配置の条件又は範囲を逸脱しないような措置が講じられること。
- 貯蔵建屋内で貯蔵する場合において、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場合においても、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。

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（除熱機能）

◆ 燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設(第十六条第4項第二号)（除熱機能）

● 設置許可基準規則の要求事項

設置許可基準規則^(注1)の要求事項に対するHitz-P24型の除熱設計の方針を下表に示す。

規則等	要求事項	除熱設計の方針	特記事項
設置許可基準規則 ^(注1) 第16条第4項第二号	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	動力を用いずに使用済燃料の崩壊熱を適切に除去するため、使用済燃料の崩壊熱を特定兼用キャスクの外表面に伝え、周囲空気等に伝達することにより除熱する設計とする。	基本的な考え方はHitz-B52型（M-DPC20002 ^(注3) ）及びMSF-24P(S)型（C-SE-2110271 ^(注4) ）と同様。
貯蔵事業許可基準規則解釈 ^(注2) 第6条	使用済燃料の温度を、被覆管のクリープ破損及び被覆管の機械的特性の低下を防止する観点から制限される値以下に維持できる設計であること	燃料被覆管の温度に制限値を設定し、燃料被覆管の温度が制限値以下となる設計とする。	基本的な考え方はHitz-B52型（M-DPC20002 ^(注3) ）及びMSF-24P(S)型（C-SE-2110271 ^(注4) ）と同様。ただし、バスケット構造の差異を考慮した除熱解析モデル化。
	金属キャスクの温度を、基本的安全機能を維持する観点から制限される値以下に維持される値以下に維持できる設計であること	特定兼用キャスク各部の温度に制限値を設定し、特定兼用キャスク各部の温度が制限値以下となる設計とする。	
	貯蔵建屋は、金属キャスクの除熱機能を阻害しない設計であること。また、貯蔵建屋の吸排気口は積雪等により閉塞しない設計であること	型式証明申請の範囲外とする。	—

(注1)「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」

(注2)「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」

(注3) 使用済燃料貯蔵施設の特定容器として型式証明を受けたHitz-B52型（M-DPC20002）を示す。

(注4) 発電用原子炉施設に係る特定機器として型式証明を受けたMSF-24P(S)型（C-SE-2110271）を示す。
ただし、MSF-24P(S)型に関する記載は公開情報に基づくものである。

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（除熱機能）

● 設置許可基準規則の要求事項（続き）

規則等	要求事項	除熱設計の方針	特記事項
貯蔵事業許可基準規則解釈(注2)第17条第1項	使用済燃料を金属キャスクに収納するに当たっては、除熱機能に関する評価で考慮した使用済燃料の燃焼度に応じた配置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	型式証明申請の範囲外とする。	—
	貯蔵建屋内の雰囲気温度が異常に上昇しないことを監視できること	型式証明申請の範囲外とする。	—
	使用済燃料及び金属キャスクの温度が制限される値以下に維持されていることを評価するために必要なデータを測定等により取得できること	特定兼用キャスク外表面の温度を測定できる設計とする。	Hitz-B52型（M-DPC20002(注3)）及びMSF-24P(S)型（C-SE-2110271(注4)）と同様。
設置許可基準規則解釈(注5)別記4第16条第5項	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> 設計貯蔵期間は60年である。 設計貯蔵期間中の温度、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変化に対して十分な信頼性を有する材料を選定し、その必要とされる強度及び性能を維持することで使用済燃料の健全性を確保する設計とする。 	詳細は長期健全性の資料で説明。

(注2)「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」

(注3) 使用済燃料貯蔵施設の特定容器として型式証明を受けたHitz-B52型（M-DPC20002）を示す。

(注4) 発電用原子炉施設に係る特定機器として型式証明を受けたMSF-24P(S)型（C-SE-2110271）を示す。

ただし、MSF-24P(S)型に関する記載は公開情報に基づくものである。

(注5)「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（除熱機能）

● 審査ガイドの確認内容

審査ガイド^(注)の確認内容に対するHitz-P24型の除熱設計の方針を下表に示す。

確認内容		除熱設計の方針	先行型式との比較
使用済燃料の崩壊熱評価	燃焼計算コード	・ORIGEN2 (ORIGEN2.2UPJ) (ライブラリ：PWRU50)	承認を受けたMSF-24P(S)型と同じ
	評価条件	・崩壊熱量が保守的になるように燃焼度、濃縮度、冷却期間等を設定	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型の考え方と同じ
兼用キャスク各部の温度評価	伝熱解析コード	・ABAQUS	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型と同じ
	評価条件	・使用済燃料の崩壊熱、周囲温度等を設定	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型の考え方と同じ
	モデル化	・Hitz-P24型の実形状を適切にモデル化 (軸方向二次元軸対称全体モデル及び半径方向輪切りモデル)	承認を受けたHitz-B52型の考え方と同じ
	安全機能及び構造強度の維持	・安全機能を維持する構造健全性及び性能を維持できる温度を制限値（設計基準値）に設定	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型の考え方と同じ
燃料被覆管の温度評価	伝熱解析コード	・ABAQUS	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型と同じ
	評価条件	・使用済燃料の崩壊熱、境界条件となるバスケットの温度を設定	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型の考え方と同じ
	モデル化	・使用済燃料集合体の実形状を適切にモデル化 (径方向断面二次元でモデル化)	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型の考え方と同じ
	クリープ破損及び機械的特性の低下の防止	・燃料被覆管の構造健全性を維持できる温度（設計基準値）を制限値に設定	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型の考え方と同じ

(注記) 黄色着色箇所は、Hitz-P24型に特有の考慮を含む事項。

(注) 「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」

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（除熱機能）

- 兼用キャスク各部の温度評価のモデル化

Hitz-P24型の実形状を適切に考慮し、特定兼用キャスク各部の温度を保守的に評価できるモデル化とする。



Hitz-B52型と異なる構造		温度評価のモデル化	特記事項
バスケット	①内側部、外側部の分割構造	内側部と外側部間のギャップはヘリウム熱伝導及び放射により伝熱するモデル化	Hitz-B52型のバスケットと本体胴間のモデル化と同じ
	②外側部を本体胴へ固定	外側部と本体胴間にギャップを設けてヘリウム熱伝導及び放射により伝熱するモデル化	Hitz-B52型の構成部材間のモデル化と同じ
	③プレートを軸方向に重ねた構造	各部温度を保守的に評価できるようにプレート間のギャップを考慮したモデル化	Hitz-P24型の設計を考慮したモデル化

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（除熱機能）

● 除熱評価結果

Hitz-P24型の貯蔵施設における除熱評価を実施し、特定兼用キャスク各部及び燃料被覆管の温度が設計基準値を下回ることを確認した。

主な評価部位		評価結果（℃）	設計基準値（℃）
Hitz-P24型	胴・底板	156	375
	一次蓋	124	375
	一次蓋ボルト	108	350
	中性子遮蔽材	138	149
	金属ガスケット	107	130
	バスケット	171	250
	伝熱フィン	129	200
燃料被覆管		203	275

以上のとおり、燃料被覆管及び特定兼用キャスク各部の温度は設計基準値以下であり、Hitz-P24型は使用済燃料の崩壊熱を適切に除去できる設計である。したがって、Hitz-P24型の除熱機能に係る設置許可基準規則の要求事項を満足している。

● 設置（変更）許可申請において別途確認を要する条件

- 除熱機能の評価で考慮した使用済燃料集合体の燃焼度に応じた使用済燃料集合体の配置の条件又は範囲を逸脱しないような措置が講じられること。
- 貯蔵建屋は、特定兼用キャスクの除熱機能を阻害しない設計であること。貯蔵建屋の吸排気口は、積雪等により閉塞しない設計であること。
- 特定兼用キャスクの周囲温度が-20℃以上50℃以下であること。また、貯蔵建屋壁面温度が65℃以下であること。

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（閉じ込め機能）

◆ 燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設(第十六条第4項第三号)（閉じ込め機能）

● 設置許可基準規則の要求事項

設置許可基準規則^(注1)の要求事項に対するHitz-P24型の閉じ込め設計の方針を下表に示す。

規則等	要求事項	閉じ込め設計の方針	特記事項
設置許可基準規則 ^(注1) 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	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設計とする	Hitz-B52型 (M-DPC20002 ^(注3)) 及び MSF-24P(S)型 (C-SE-2110271 ^(注4)) と同様。
貯蔵事業許可基準規則解釈 ^(注2) 第5条第1項	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	蓋及び蓋貫通孔のシール部に金属ガスケットを用いることにより、設計貯蔵期間を通じて、使用済燃料を内封する空間を負圧に維持する設計とする	Hitz-B52型 (M-DPC20002 ^(注3)) 及び MSF-24P(S)型 (C-SE-2110271 ^(注4)) と同様。
	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	一次蓋及び二次蓋による二重の閉じ込め構造とし、蓋間を正圧に維持することにより圧力障壁を形成し、使用済燃料を内封する空間を特定兼用キャスク外部から隔離する設計とする	
	金属キャスクは、貯蔵期間中及び貯蔵終了後において、収納された使用済燃料の検査等のために金属製の乾式キャスクの蓋等を開放しないことを前提としているため、万一の蓋部の閉じ込め機能の異常に対して、蓋を追加装着できる構造を有する設計とすること等、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	(型式証明申請の範囲外)	—

(注1)「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」

(注2)「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」

(注3) 使用済燃料貯蔵施設の特定容器として型式証明を受けたHitz-B52型 (M-DPC20002) を示す。

(注4) 発電用原子炉施設に係る特定機器として型式証明を受けたMSF-24P(S)型 (C-SE-2110271) を示す。

ただし、MSF-24P(S)型に関する記載は公開情報に基づくものである。

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（閉じ込め機能）

● 設置許可基準規則の要求事項（続き）

規則等	要求事項	閉じ込め設計の方針	特記事項
貯蔵事業許可基準規則解釈(注2)第17条第1項	蓋部が有する閉じ込め機能を監視できること	蓋間空間の圧力を測定することで閉じ込め機能を監視できる設計とする	Hitz-B52型（M-DPC20002(注3)）及びMSF-24P(S)型（C-SE-2110271(注4)）と同様。
設置許可基準規則解釈(注5)別記4第16条第5項	設計貯蔵期間を明確にしていること	設計貯蔵期間は60年である	Hitz-B52型（M-DPC20002(注3)）及びMSF-24P(S)型（C-SE-2110271(注4)）と同様。
	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	設計貯蔵期間中の温度、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変化に対して十分な信頼性を有する材料を選定し、その必要とされる強度及び性能を維持することで使用済燃料の健全性を確保する設計とする	Hitz-B52型（M-DPC20002(注3)）及びMSF-24P(S)型（C-SE-2110271(注4)）と同様。詳細は長期健全性の資料で別途説明。

(注2)「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」

(注3) 使用済燃料貯蔵施設の特定容器として型式証明を受けたHitz-B52型（M-DPC20002）を示す。

(注4) 発電用原子炉施設に係る特定機器として型式証明を受けたMSF-24P(S)型（C-SE-2110271）を示す。

ただし、MSF-24P(S)型に関する記載は公開情報に基づくものである。

(注5)「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（閉じ込め機能）

● 審査ガイドの確認内容

審査ガイド^(注)の確認内容に対するHitz-P24型の閉じ込め設計の方針を下表に示す。

確認内容		閉じ込め設計の方針	先行型式との比較
閉じ込め構造及び監視	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、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こと。	一次蓋と二次蓋の二重構造とし、蓋及び蓋貫通孔のシール部には金属ガスケットを使用する。また、蓋間空間の圧力を測定することで閉じ込め機能を監視できる構造とする。	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型と同じ
負圧維持	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。	使用済燃料を収納する空間を設計貯蔵期間を通じて負圧に維持する。	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型と同じ
密封境界部の漏えい率	密封境界部の漏えい率は、兼用キャスク内部の負圧を維持できること。また、使用する金属ガスケット等のシール部は当該漏えい率以下であること。	密封境界部の漏えい率は、設計貯蔵期間中に特定兼用キャスク内部の負圧を維持できる漏えい率（以下「基準漏えい率」という。）とし、金属ガスケットは、その漏えい率を満足するものを使用する。	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型の考え方と同じ
閉じ込め機能評価	密封境界部の漏えい率が、設計貯蔵期間、内部初期圧力、自由空間容積、初期の蓋間圧力、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ること。	密封境界部の漏えい率は、設計貯蔵期間、内部初期圧力、自由空間容積、初期の蓋間圧力、蓋間の容積、温度等を条件として、漏えい孔中の流れの形態を考慮した適切な評価式を用いて求める。	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型と同じ
兼用キャスクの衝突評価	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。また、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、使用済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。	(型式証明申請の範囲外)	—
閉じ込め機能の修復性	閉じ込め機能の異常に対し、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。	(型式証明申請の範囲外)	—

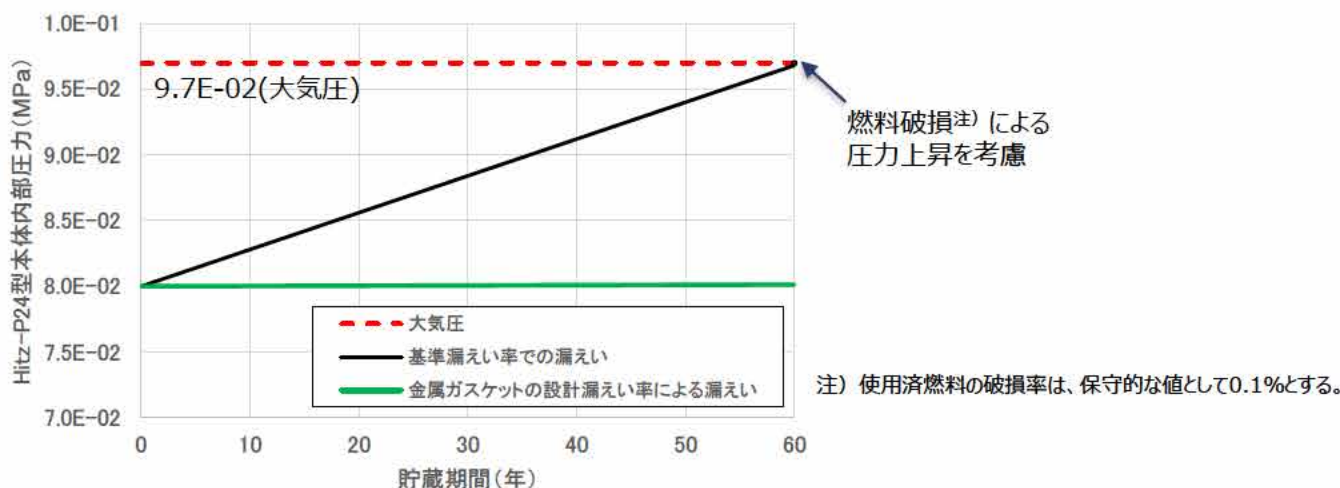
(注) 「原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド」

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（閉じ込め機能）

● 閉じ込め評価結果

Hitz-P24型に用いる金属ガスケットの漏えい率は基準漏えい率に対し、小さいことを確認した。

基準漏えい率 (Pa・m ³ /s)	金属ガスケットの性能 (Pa・m ³ /s)
2.31×10 ⁻⁶	1.0×10 ⁻⁸ 以下



Hitz-P24型本体内部圧力の経時変化

以上のとおり、設計貯蔵期間中に特定兼用キャスク本体内部を負圧に維持できる設計としている。また、一次蓋と二次蓋の間の圧力を監視できる構造としている。したがって、Hitz-P24型の閉じ込め機能に係る設計方針は妥当である。

設置（変更）許可申請において別途確認を要する条件

- 万一の閉じ込め機能の異常に対する修復性の考慮がなされていること。

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（長期健全性）

◆ 燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設（解釈別記4第16条第5項）（長期健全性）

● 設置許可基準規則の要求事項

設置許可基準規則^(注1)の要求事項に対するHitz-P24型の長期健全性維持の方針を下表に示す。

規則等	要求事項	長期健全性維持の方針	特記事項
設置許可基準規則 ^(注1) 第十六条第2項第一号八	燃料体等が臨界に達するおそれがないものとする。	Hitz-P24型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。	Hitz-B52型（M-DPC20002 ^(注2) ）及びMSF-24P(S)型（C-SE-2110271 ^(注3) ）と同様。
設置許可基準規則 ^(注1) 第十六条第4項第一号	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。		
設置許可基準規則 ^(注1) 第十六条第4項第二号	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。		
設置許可基準規則 ^(注1) 第十六条第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。		

(注1) 「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」

(注2) 使用済燃料貯蔵施設の特定期器として型式証明を受けたHitz-B52型（M-DPC20002）を示す。

(注3) 発電用原子炉施設に係る特定期器として型式証明を受けたMSF-24P(S)型（C-SE-2110271）を示す。

ただし、MSF-24P(S)型に関する記載は公開情報に基づくものである。

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（長期健全性）

● 設置許可基準規則の要求事項（続き）

規則等	要求事項	長期健全性維持の方針	特記事項
設置許可基準規則解釈別記4第16条第5項 ^(注4)	<p>各安全機能に対する要求事項を満たすため、以下を満たす設計とすること。</p> <ul style="list-style-type: none"> 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 設計貯蔵期間は60年とする。 Hitz-P24型は、構成部材について、設計貯蔵期間中の温度、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変化に対して信頼性を有する材料を選定し、その必要とされる強度及び性能を確保する設計とする。 Hitz-P24型は、本体内面、バスケット及び使用済燃料集合体の腐食等を防止するために、使用済燃料を不活性ガスであるヘリウムガスとともに封入する。さらに、本体及び蓋部表面の必要な箇所には、塗装等による防錆措置を講じる。 	Hitz-B52型（M-DPC20002 ^(注2) ）及びMSF-24P(S)型（C-SE-2110271 ^(注3) ）と同様。

(注2) 使用済燃料貯蔵施設の特定容器として型式証明を受けたHitz-B52型（M-DPC20002）を示す。

(注3) 発電用原子炉施設に係る特定機器として型式証明を受けたMSF-24P(S)型（C-SE-2110271）を示す。

ただし、MSF-24P(S)型に関する記載は公開情報に基づくものである。

(注4) 「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（長期健全性）

● 審査ガイドの確認内容

審査ガイド^(注)の確認内容に対するHitz-P24型の長期健全性維持の方針を下表に示す。

確認内容	長期健全性維持の方針	先行型式との比較
低温脆性の考慮	・最低使用温度における低温脆性破壊のおそれがない材料を使用	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型の考え方と同じ
設計入力値又は設計基準値の算定に際しての経年変化の影響の考慮	・中性子遮蔽材の質量減損を考慮	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型の考え方と同じ
	・温度影響を考慮してバスケット（アルミニウム合金材）の設計基準値を設定	承認を受けたMSF-24P(S)型の考え方と同じ
防食措置等	・大気に触れる部分は塗装等の防錆措置により腐食を防止	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型の考え方と同じ
使用済燃料の経年変化の低減又は防止	・不活性ガスであるヘリウムとともに封入することで、使用済燃料の腐食等を防止 ・温度を制限される範囲に収めることで、使用済燃料の健全性を維持	承認を受けたHitz-B52型・MSF-24P(S)型の考え方と同じ

(注) 「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」

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（長期健全性）

● 特定兼用キャスク及び使用済燃料の健全性評価

(1) 温度影響

特定兼用キャスクの構成部材は、最低使用温度において低温脆化しない材料を用いるとともに、各部位の最高温度は文献等に示される健全性を維持できる範囲内であるため、熱による経年変化の影響はない。

主要な評価部材		温度（℃）	基準値（℃）
特定兼用キャスク 構成部材	胴、底板、外筒	156	350
	一次蓋、二次蓋	124	350
	中性子遮蔽材（注1）	138	149
	金属ガスケット（注2）	107	130
	バスケット（バスケットプレート）	171	250
	伝熱フィン	129	200
使用済燃料（燃料被覆管）		203	275

(注1) 設計貯蔵期間中の熱影響により質量減損が生じるため、設置許可基準規則第十六条遮蔽機能の設計方針の妥当性確認として実施した遮蔽評価において、中性子遮蔽材の質量減損（最大部位で2.0%）を考慮し、遮蔽機能が維持されることを確認している。

(注2) 電中研で実施された金属ガスケットの密封性能に関する試験結果において、漏えい率とラーソン・ミラー・パラメータ（以下「LMP」という）の関係が整理されており、 $LMP=11.0 \times 10^3$ （定数：C=20）以下において、初期の閉じ込め機能を維持できることが確認されている⁽¹⁾。一方、Hitz-P 24型において設計貯蔵期間（60年）に相当する金属ガスケットのLMPは約 9.6×10^3 （定数：C=20）であり、上記の 11.0×10^3 （定数：C=20）を下回ることから、設計貯蔵期間を通じて初期の閉じ込め機能は維持される（承認を受けたHitz-B52型の考え方と同じ）。なお、別途、電中研で実施されている金属ガスケットの長期密封性能試験⁽²⁾において130℃～140℃で19年以上、閉じ込め機能が維持されていることから、LMPによる基準に加えて、温度の基準値として130℃を設定している。

(1) 加藤治ほか、「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、（1996）

(2) (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（中間貯蔵設備等長期健全性等試験）報告書」、（2010）

8. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（長期健全性）

● 特定兼用キャスク及び使用済燃料の健全性評価

(2) 放射線の照射影響

設計貯蔵期間中の特定兼用キャスク構成部材及び使用済燃料の照射量は、文献等に示される機械的特性変化が見られない範囲内であるため、照射による経年変化の影響はない。

主要な評価部材		中性子照射量 ^(注1) (n/cm ²)	基準値 (n/cm ²)
特定兼用キャスク 構成部材	胴、底板、外筒	5.0×10^{14}	10^{16}
	一次蓋、二次蓋	1.8×10^{14}	10^{16}
	中性子遮蔽材	5.0×10^{14}	10^{15}
	金属ガスケット	1.8×10^{14}	10^{17}
	バスケット（バスケットプレート）	1.3×10^{15}	10^{19}
	伝熱フィン	5.0×10^{14}	10^{16}
使用済燃料（燃料被覆管）		1.3×10^{15}	$10^{21} \sim 10^{22}$

(注1) 貯蔵初期の中性子束が設計貯蔵期間中（60年間）一定であると仮定して算出した値。

(3) 腐食による影響

特定兼用キャスク外面のうち、大気に触れる部分で腐食による影響がある範囲は塗装等による防錆措置により腐食を防止する。また、特定兼用キャスク内部及び一次蓋と二次蓋の間には不活性ガスであるヘリウムを封入する設計としており、使用済燃料の腐食の影響はない。

以上のとおり、Hitz-P24型の主要な構成部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、その必要とされる強度及び性能を維持することで、使用済燃料の健全性を確保する設計としている。

設置（変更）許可申請において別途確認を要する条件

➤ なし。

9. バスケット用アルミニウム合金について

9.1 事例規格が廃止された理由

9.2 考え方と評価方法

9.3 材料試験の項目

9.4 物性および機械的性質

9.5 設計基準

9.6 参考文献

9.1 事例規格が廃止された理由（1／3）

【「金属キャスクバスケット用アルミニウム合金事例規格の廃止」について】

（一社）日本機械学会は、「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格（2007年版）」（JSME S FA1-2007）を2008年2月に発行しており、その中でバスケット用アルミニウム合金の規格として、添付3-3「バスケット材料としてアルミニウム合金及びボロン添加アルミニウム合金を使用する場合の規定」を定め、その中に新規アルミニウム合金をバスケット材料として登録するための「アルミニウム合金バスケット用新規材料採用ガイドライン」も含まれており、このガイドラインに基づき、7件の事例規格が登録されていた。

しかし、これまで登録された事例規格のバスケット用アルミニウム合金について、強度及び破壊靱性・耐衝撃特性に係る性能が必ずしも十分な保守性を担保できないことから、添付3-3及び事例規格を2015年10月1日に廃止している。

事例規格番号	標題	発行時期
JSME S FA-CC-001	バスケット用ボロン添加アルミニウム合金 1%B-A6061-T6, 1%B-A6061-T651 に関する規定	2009年4月
JSME S FA-CC-002	バスケット用アルミニウム合金 A6061-T6, A6061-T651 に関する規定	2009年4月
JSME S FA-CC-003	バスケット用アルミニウム合金 A5083FH-0 に関する規定	2009年4月
JSME S FA-CC-005	バスケット用ボロン添加アルミニウム合金 BC-A6N01SS-T1 に関する規定	2009年4月
JSME S FA-CC-008	バスケット用ほう素添加アルミニウム合金 1%B-A3004N-H112 に関する規定	2013年6月
JSME S FA-CC-009	バスケット用アルミニウム合金 A3004N-H112 に関する規定	2013年6月
JSME S FA-CC-010	バスケット用アルミニウム合金 A3004-H112 に関する規定	2013年6月

9.1 事例規格が廃止された理由（2/3）

【添付3-3及び事例規格が廃止された理由（懸念事項）及びそれに対する考え方】

（1）強度（設計降伏点[Sy値]、設計引張強さ[Su値]の設定）

【懸念事項】

合金系ごとの強度に関する懸念事項は下表の通り。

合金系	懸念事項
6000系 (Al-Mg-Si系合金)	Si、Cuの析出強化は長期間の入熱による粗大化の進行に伴い効果を失うと予想され、MgがSi-Cu析出物に取りられてMg固溶強化も期待できないため、60年後の状態を期待する合金元素の強化機構はないと判断される。また、材料試験時の過時効熱処理が不適切で強度の過大評価となっている。
5000系 (Al-Mg系合金)	長期間の入熱により過飽和Mgが析出するとMgの溶解度が減少しその時点のMg溶解度相当の強度しかなくなるが、事例規格値は、Mg過飽和が解消されていない状態での数値であり、過大評価となっている。
3000系 (Al-Mn系合金)	強化機構はMg固溶強化とMn析出強化なので60年後でも効果は期待できるが、試験にCu等が高い濃度の供試材が使用されており、Cu析出強化効果による嵩上げが含まれている可能性が高い。

【懸念事項に対する考え方】

バスケット用材料 アルミニウム合金（HZ-A3004-H112）は、実機と同条件で製作した規格材と、設計貯蔵期間（60年）の熱ばく露による経年変化を計算材料科学に基づくシミュレーションとLMPにより模擬した機械試験用供試材の機械試験データを用いることにより、長期健全性を有する設計強度を設定する。

9.1 事例規格が廃止された理由 (3/3)

(2) 破壊靱性及び耐衝撃特性

【懸念事項】

金属キャスク構造規格では、アルミニウム合金の破壊靱性及び耐衝撃特性の指標として、鉄鋼材料に準じた横膨出量を採用しているが、その根拠が不十分であることが判明した。(アルミニウム合金の場合は鉄鋼材料のような脆性破壊は生じないが、横膨出量に対応した吸収エネルギーは鉄鋼材料より1桁小さく、同じ横膨出量でもエネルギー吸収能は鉄鋼材料より数段低い。)

そのため、アルミニウム合金に適した独自の破壊靱性及び耐衝撃特性の判定指標を新たに制定する必要がある。

【懸念事項に対する考え方】

バスケット用アルミニウム合金 (HZ-A3004-H112) は、シャルピー衝撃試験に加えて、規格材と機械試験用供試材を用いた J_{IC} 破壊靱性試験を -40°C 、常温、 200°C で実施し、 J_Q 値及び J_{IC} 値を取得する。

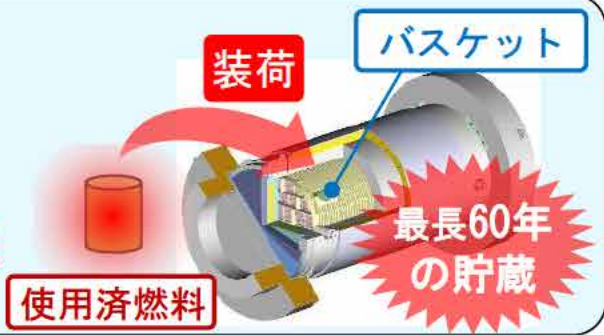
バスケット用アルミニウム合金 (HZ-A3004-H112) は、使用温度域で靱性を有しているため、靱性不足による破壊に対して特別な配慮は不要である。

【確認すべき課題】

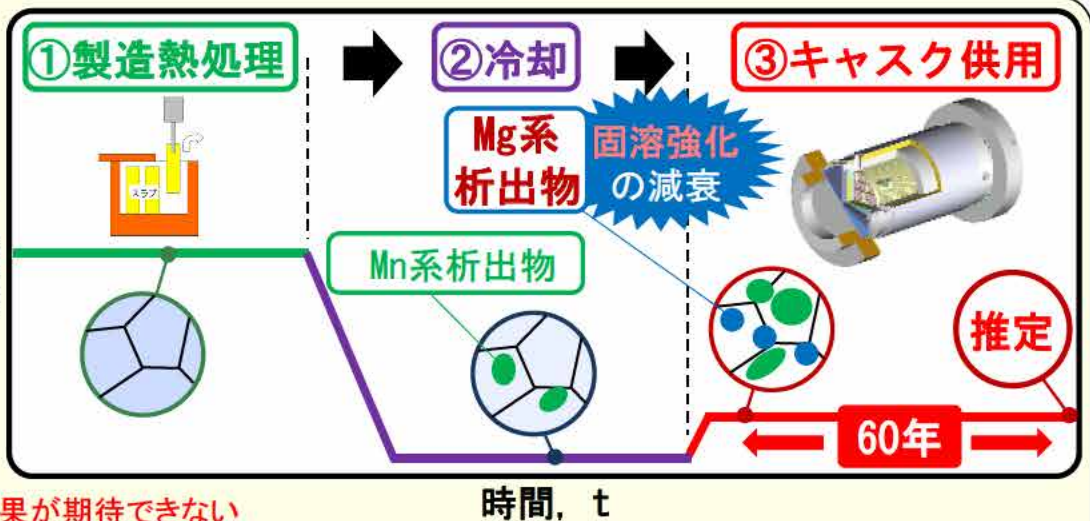
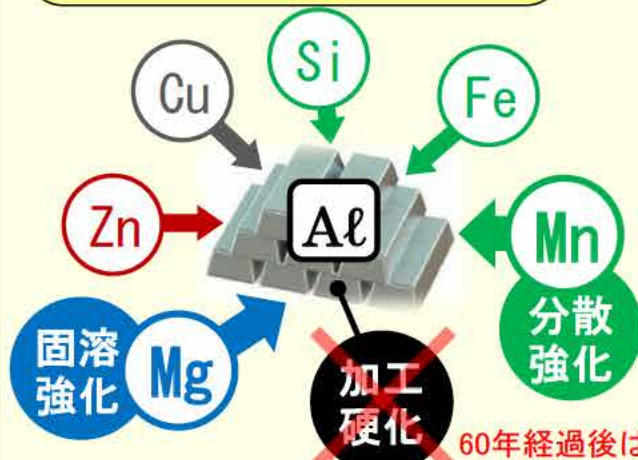
60年間の供用期間経過後における使用済燃料の崩壊熱の熱ばく露による強度低下（強化機構のキャンセル）を適切に考慮したアルミニウム合金の設計強度を規定する必要がある。

課題の概要

- バスケットは100℃～200℃の温度環境下で供用される。
- アルミニウム合金は過時効を迎えると機械的特性が低下する。
- ➡バスケット用アルミニウム合金は過時効（熱ばく露に伴う金属組織変化）を適切に評価する必要がある。



アルミニウム合金の特性



アルミニウム合金の添加元素と強化機構

アルミニウム合金の時効による金属組織変化

Mg系析出物が生じ固溶量低下 ➡ 母材中のMg固溶量が減少し強度低下 ➡ 60年経過後の強度評価が必要

目的

60年後の金属組織変化を推定し、適切な強度評価を行う。

9.2 バスケット用アルミニウム合金の考え方と評価方法 (2/21)

バスケット材料の設計用強度は、設計貯蔵期間の強度低下を模擬した機械試験用供試材の材料試験結果に基づき規定する。以下には、「設計貯蔵期間の強度低下を模擬する際の主な課題」と「当社の考え方」を示す。

主な課題

【課題①】：「Mg固溶強化」の低下

- (①-1) : 不純物元素(Si,Cu,Zn)は、設計貯蔵期間の熱ばく露でMgと析出物を形成することでMgの固容量を低下させる。
- (①-2) : Mgの平衡固溶度は温度の上昇とともに増加するため、高温の過時効熱処理で設計貯蔵期間のMg固容量の低下を模擬できない。

【課題②】：「Mn系分散相による分散強化」の低下

- (②) : 設計貯蔵期間の熱ばく露に伴うMn系分散相($Al_6(Fe,Mn)$)の粗大化による強度低下の模擬。

【課題③】：「析出物の粗大化による靱性」の低下

- (③) : 設計貯蔵期間の熱ばく露に伴う析出物の粗大化による靱性低下の模擬。

当社の考え方

- (①-1) → Si、Cu、Zn等の不純物元素の添加許容値を低く設定
- (①-2) → 計算材料科学により、設計貯蔵期間経過後のMg固容量を計算し、設計貯蔵期間経過後を保守的に模擬できる機械試験用供試材のMg添加量を決定
(1.00 →)

- (②) → ラーソン・ミラー・パラメータに基づき設計貯蔵期間の熱ばく露と保守的に同等な機械試験用供試材の過時効熱処理条件を決定

- (③) → 機械試験用供試材よりもMg添加量が多く析出物の粗大化しやすい規格材に過時効熱処理を施したものに対して J_{1C} 破壊靱性試験を行うことにより、靱性を有することを確認

指摘事項



9.2 バスケット用アルミニウム合金の考え方と評価方法 (3/21)

バスケット用アルミニウム合金の金属組織		バスケット用アルミニウム合金における「主な課題」	
元素	形態	①固溶強化の低下	②分散強化や析出強化の低下(分散相や析出物の粗大化)
Mg	Al-Mg 固溶体	<p>Mgと析出物を形成するSi, Cu, Zn等の不純物元素の添加許容値を低く設定 → 補足説明資料1-1(7.1 供試材_6P)で説明、指摘事項(コメント)への回答No.13で補足説明 計算材料科学により、設計貯蔵期間経過後のMg固溶量を計算し、設計貯蔵期間経過後を保守的に模擬できる機械試験用供試材のMg添加量を決定 (1.00 →) → 補足説明資料1-1_別紙1(3.設計貯蔵期間を経たHZ-A3004の模擬_別紙1-8P)で説明、指摘事項(コメント)への回答No.13、14、18で補足説明</p>	
	析出物	Mg ₂ Si	
		T相 (AlCuMgZn)	<p>機械試験用供試材は、HZ-A3004-H112材よりもMgの添加量を減らすことで、T相析出に伴う強度低下(Cu, Mg, Znによる固溶強化の低下)を保守的に模擬できる。 → 指摘事項(コメント)への回答No.18で説明</p>
Mn	Al-Mn 固溶体	<p>設計貯蔵期間よりも過時効熱処理のほうがMnが多く析出するため、過時効熱処理により「Mn固溶量の低下に伴う固溶強化の低下」を保守的に模擬できる。 → 補足説明資料1-1_別紙4(別紙4-7P)で説明、指摘事項(コメント)への回答No.16で説明</p>	
	析出物	<p>LMPは、元素の拡散を扱うことができるアレニウスの式から導出されるものであり、LMPを用いて過時効熱処理条件を設定した。分散相や析出物の粗大化は、元素の拡散が支配的な現象であり、LMPに基づき設計貯蔵期間の熱ばく露と保守的に同等な機械試験用供試材の過時効熱処理条件()で模擬した。</p> <p>機械試験用供試材のMn系分散相の数密度は、過時効熱処理で増えないことをTEM観察で確認した。したがって、設計貯蔵期間を経たHZ-A3004-H112材および過時効熱処理した機械試験用供試材の材料強度に対する分散強化の寄与は同等である。 → 補足説明資料1-1_別紙1(3.1(2)過時効熱処理条件へのLMPの適用妥当性_別紙1-11P)で説明、指摘事項(コメント)への回答No.16で補足説明</p>	

◎:「指摘事項(コメント)への回答」および「補足説明資料」で説明 ○:「指摘事項(コメント)への回答」で説明

【HZ-A3004主な化学成分】

3000系アルミニウム合金の強化機構であるMn系分散相による分散強化及びMgによる固溶強化は、60年経過後も効果が期待でき、バスケット用アルミニウム合金に適していると考えられる。

したがって、HZ-A3004-H112（以下「HZ-A3004」という。）は、JIS H 4000に規定されているA3004の化学成分範囲内で合金元素の添加量を制限した3000系アルミニウム合金とする。

材料名称	化学成分（質量%）								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	その他		Al
							個々	合計	
HZ-A3004	0.15 以下	0.7 以下	0.05 以下	1.1 ～1.5	1.0 ～1.3	0.05 以下	0.05 以下	0.15 以下	残部
(参考) JIS H 4000 A3004	0.30 以下	0.7 以下	0.25 以下	1.0 ～1.5	0.8 ～1.3	0.25 以下	0.05 以下	0.15 以下	残部

【HZ-A3004の主な強化機構】

HZ-A3004において、60年の設計貯蔵期間経過後に強化機構として期待できるものは、過時効後の固溶量まで減少したMgによる固溶強化と析出した Al_6Mn の分散強化である。60年の設計貯蔵期間経過後においては、加工硬化は回復によりその効果を失い、結晶粒微細化による強化機構は低減するものの一部が残存するものと考えられる。

HZ-A3004の設計強度は、これら強化機構を機械試験用供試材で保守的に模擬することにより考慮している。

		供用初期	供用終期（60年経過後）	機械試験用供試材での模擬方法
強化機構	固溶強化	Mg	Mg（過時効後固溶量）	Mg添加量の低減 過時効熱処理 (O材処理含む) の付与
	析出強化	Al_6Mn ※1	Al_6Mn ※1	
	加工硬化	あり	なし	
	結晶粒微細化	圧延組織※2	圧延組織又は回復再結晶組織※2	

※1 共晶温度は658.5℃であり、かつ熱的に安定。

※2 「圧延組織」は圧延により伸長したファイバー状組織を指し、「回復再結晶組織」は、加熱により再結晶した結晶粒組織を指す。回復再結晶組織は転位を含まないため圧延組織より強度に劣ると考えられる。

【Mg固容量の減少に伴うMg固溶強化の低下による材料強度への影響】

<p>考え方</p>	<p>アルミニウム合金の母相中に過飽和に固溶されたMgは、時間の経過とともに固溶限まで減少する。Mg固容量の減少に伴いMg固溶強化が低下し、材料強度が低下する恐れがある。また、固溶限を越えるMgは、Mg_2Siなどの金属間化合物を形成して析出する。</p> <p style="text-align: right;">3004合金のマイクロ組織 (参考文献 [1])</p> <p style="text-align: center; background-color: #90EE90; padding: 5px;">Mg固容量の減少によるMg固溶強化の低下を考慮する必要がある</p>
<p>参考文献</p>	<p>文献 [1] では、3003合金に1%程度Mgを固溶強化させたものが3004合金であり、3004合金の鋳塊の組織からMg_2Siと$Al_6(Mn,Fe)$相が観察されている。 文献 [2] では、長時間の熱処理によりMgの固容量が減少すること、及び平衡固溶度の温度依存性が説明されている。 文献 [3] では、固溶強化元素が長時間の熱処理により析出し、平衡固溶量程度まで減少することが説明されている。</p>

【Mg固溶強化以外の強化機構の経年変化による材料強度への影響】

<p>考え方</p>	<p>アルミニウム合金に添加されたMnとFeから生成する$Al_6(Mn,Fe)$は、製造過程で析出し、粗大化しなければ、設計貯蔵期間経過後も分散強化として材料強度に寄与することが期待できる。</p> <p>$Al_6(Mn,Fe)$は、過時効熱処理（300℃未満）による模擬が可能であり、粗大化しないことをHZ-A3004-H112の熱処理有無の組織観察で確認している。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div data-bbox="309 542 927 956"> <p>Al-Mn平衡状態図 (参考文献 [1])</p> </div> <div data-bbox="985 528 1835 971"> <p>色の濃い部分が$Al_6(Mn,Fe)$などのMn系析出物</p> <p>粗大化しない</p> <p>100μm</p> <p>100μm</p> </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;"> <p>$Al_6(Mn,Fe)$の分散強化が期待できる</p> </div>
<p>参考文献</p>	<p>文献 [1] では、3003合金において製造時の熱処理終了段階までに固溶Mnの大半がMn系金属間化合物として析出することが説明されている。また、Al-Mn二元系平衡状態図からMnは300℃以下でほとんど固溶しないため、Mn系析出物が平衡相となることが読み取れる。</p> <p>文献 [3] では、析出物の粗大化により強化機構が失われること、及びMn系金属間化合物の分散析出による強化が、長時間熱時効後も有効であることが説明されている。</p>

【不純物元素の経年変化による材料強度への影響】

HZ-A3004-H112は、不純物元素 (Si、Fe、Cu、Zn) による強化に期待しておらず、**Si、Cu、Znなどの不純物元素がMgと金属間化合物を形成**する場合、不用意に母相中の**Mg固容量が減少し、材料強度が低下**する恐れがある。

したがって、**不純物元素の添加許容値は、製造可能な範囲で低く設定**している。

微量の不純物元素からなる金属間化合物の体積率は、Si、Cu、Znの添加量に律速されることから微小であり、**強度特性に与える影響は無視し得るほどに小さい**と考えられる。

考え方

JIS H 4000 A3004 化学成分 (質量%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	その他		Al
						個々	合計	
0.30 以下	0.7 以下	0.25 以下	1.0 ~1.5	0.8 ~1.3	0.25 以下	0.05 以下	0.15 以下	残部



不純物元素の
添加許容値を
低く設定

HZ-A3004-H112 化学成分 (質量%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	その他		Al
						個々	合計	
0.15 以下	0.7 以下	0.05 以下	1.1 ~1.5	1.0 ~1.3	0.05 以下	0.05 以下	0.15 以下	残部



HZ-A3004-H112の析出物の体積変化
(200°C×60年)

不純物元素の体積率は微小で影響は小さい

参考文献

文献 [1] では、3004合金の鋳塊の組織からMgとSiで形成される金属間化合物のMg₂Siが観察されている。
文献 [4] では、Al-Zn-Mg-Cu系合金における、Mg₃Zn₃Al₂やAl₂CuMg等のMgを含む金属間化合物の生成が説明されている。

【 計算材料科学による、経年変化に伴って減少するMg固溶量の推定方法 (1/4) 】

<p>考え方</p>	<p>計算材料科学における [] 実験データに基づく熱力学データベースと平衡論に基づいた理論計算を組み合わせ、実験値を模擬した多元系の計算状態図を計算することが可能である。 []</p> <p>[] 析出物の核生成、成長及び粗大化を予測する手法であり、 [] 計算状態図に基づいて、合金成分、保持温度及び時間などから元素の固溶量や析出物の体積率の時間変化を計算することが可能である。</p> <p>したがって [] HZ-A3004-H112の設計貯蔵期間経過後のMg固溶量を推定することが可能であると考えられる。</p> <div style="border: 1px solid black; height: 150px; width: 100%;"></div> <p style="display: flex; justify-content: space-between;"> HZ-A3004-H112の200℃過時効熱処理に伴うMg固溶量の変化 (実験結果と計算結果の比較) HZ-A3004-H112及び機械試験用供試材の熱処理に伴うMg固溶量変化に関する計算結果 </p>
<p>参考文献</p>	<p>文献 [5] では、 [] により実験データに基づいた様々な材料定数から、実験値を模擬した状態図を計算することが可能であることが記載されている。</p> <p>文献 [6] では、Al-Mg二元系状態図について、 [] で得られた計算状態図と実験結果がよく一致することを確認している。</p> <p>文献 [7] では、 [] により金属中の析出物の成長の時間依存性を計算し、実験と比較した結果が説明されており、 [] 長時間の熱処理に伴う析出物の成長予測が実験値をよく模擬できていることを確認している。</p>

【計算材料科学による、経年変化に伴って減少するMg固容量の推定方法 (2/4)】

特定兼用キャスクのバスケット用アルミニウム合金は、60年の設計貯蔵期間にわたって、使用済燃料の崩壊熱により200℃から100℃程度まで徐々に低下する温度環境下にはく露される。Mgの平衡固溶度は温度に比例し、母相中へ過飽和に固溶したMgは、その温度の平衡固溶度まで減少し固溶強化は低下することが予想される。

したがって、供用終期のHZ-A3004の設計強度の評価は、バスケットの温度低下に伴う母相中のMg固容量の減少を適切に評価する必要がある。

他方、材料の経年変化を評価するために一般的に行われる加速試験は、使用温度より高温で材料を加熱するため、Mg固容量の減少を適切に評価することはできない。

このため、

シミュレーションにより、供用終期の析出相と母相中のMg固容量を推定することとした。

【 計算材料科学による、経年変化に伴って減少するMg固容量の推定方法（3/4） 】

(1) HZ-A3004の供用終期のシミュレーション概要

アルミニウム合金は、時効に伴って母相中の固溶元素が析出し、金属組織が変化する。

HZ-A3004では主にSi、Fe、Mn、Mgが析出し、 Al_6Mn や Mg_2Si などの生成が予想される。

60年の設計貯蔵期間に常時200℃で熱ばく露される条件、及び200℃から100℃に徐々に低下する温度環境下で熱ばく露される条件において、HZ-A3004の母相中の合金元素固容量をシミュレーションにより推定する。

(2) HZ-A3004のシミュレーション結果

- 図aに示す通り、MnとSiは、析出する。
- 図bに示す通り、金属組織変化のシミュレーション結果では「200℃×60年」と「200→100℃×60年」の加熱条件における
- 図bに示す通り、製造時に添加下限値1.0mass%のMgは、母相中へ過飽和に固溶するが、60年経過後の母相中のMg固容量は減少する。



図a HZ-A3004の母相中の合金元素固容量変化(200℃×60年)



図b HZ-A3004の母相中のMg固容量変化

【 計算材料科学による、経年変化に伴って減少するMg固容量の推定方法（4/4） 】

金属組織変化の推定に対する計算材料科学に基づくシミュレーションの適用の妥当性については、次の方法で確認した。

(1) 既知試験文献による確認

既知試験文献^[8]では、時効処理に伴う5083アルミニウム合金のMg固容量の減少を実験的に評価した結果が報告されている。

この既知試験文献で報告されている化学組成および加熱条件による時効をシミュレーションし、実験で報告されたMg固容量と比較することにより、アルミニウム合金に対しシミュレーションが適用可能なことを確認した。（補足説明資料1-1 別紙1-12ページ参照）

(2) HZ-A3004に対する過時効熱処理実験による確認

HZ-A3004を用いた過時効熱処理実験（加熱条件：200°C×3,000h）を実施し、HZ-A3004のMg固容量の変化がシミュレーション結果と概ね一致することを確認した。



HZ-A3004の熱処理実験に伴うMg固容量の変化

【LMPを用いた過時効熱処理条件の設定（1/2）】

<p>考え方</p>	<p>アレニウスの式は、ある温度での化学反応の速度を予測する式であり、この式に基づく Larson-Miller パラメータ（以下「LMP」という。）は、金属材料のクリープ試験の評価などに用いられている。</p> <p>過時効熱処理条件は、60年の設計貯蔵期間に相当するLMPを求め、このLMPから供用温度より高い温度の加熱時間を求める。LMPは以下により与えられる。</p> $\text{LMP} = T [\text{温度}] \times (\log t [\text{時間}] + C [\text{材料定数}])$ <p>材料定数Cに14を用いた計算の結果から、200℃×60年のLMPは9331であり、200→100℃×60年のLMPは8899となった。</p> <p>過時効熱処理温度は、300℃以上になるとMnが母相中に再固溶する可能性があるため、加熱温度を300℃未満の <input type="text"/> とし、保守的に200℃×60年のLMP = 9331に基づいて計算した結果、<input type="text"/> で等価となる加熱時間は <input type="text"/> だったことから、保持時間を保守的に <input type="text"/> とした。この過時効熱処理により、T相（Al-Cu-Mg-Zn）を除く、Mg₂Siや Al₆(Mn,Fe)などの析出状態が模擬可能であると考えられる。</p> <p style="text-align: center;">過時効熱処理条件 <input type="text"/> を設定</p>
<p>参考文献</p>	<p>文献 [9] では、アレニウスの式は温度の上昇とともに増大する化学反応や拡散などの輸送現象の速度、及び活性化エネルギーの関係から、ある化学反応の速度を予測する式であり、LMPは反応速度論の観点から温度と時間を一つのパラメータで整理する方法であることが説明されている。</p> <p>文献 [1] では、3003合金において製造時の熱処理終了段階までに固溶Mnの大半がMn系金属間化合物として析出することが説明されている。また、Al-Mn二元系平衡状態図からMnは300℃以下でほとんど固溶しないため、Mn系析出物が平衡相となることが読み取れる。</p>

【LMPを用いた過時効熱処理条件の設定（2／2）】

<p>考え方</p>	<p>【LMPの材料定数Cについて】 （独）原子力安全基盤機構は、A1100-O材のクリープデータからLMPの材料定数$C = 14$を導出している。^[10] 材料定数Cは鉄鋼材料などでは一般的に20が用いられ、材料強度が高くなるほど大きくなる傾向がある。 HZ-A3004-H112の材料定数Cは、クリープ試験の結果、14.71～15.31程度と考えられるが、過時効熱処理の条件設定においては、反応速度論を保守的に考慮し、強度の低い工業用純アルミニウムであるA1100-O材のクリープデータから導出された材料定数$C = 14$を採用することとしている。</p> <div data-bbox="629 651 1340 1125" style="border: 1px solid black; width: 368px; height: 332px; margin: 20px auto;"></div> <p style="text-align: center;">アルミ材のクリープデータに基づく LMP定数の同定^[11]</p>
<p>参考文献</p>	<p>文献 [10] では、A1100-OのクリープデータからLMPの材料定数Cの値に14を導出したことが説明されている。</p>

【規格材及び機械試験用供試材の考え方】

60年間の設計貯蔵期間を想定した実機供用のシミュレーションの結果（27ページ）から、母相中のMg固容量は60年経過後に [] まで減少することを推定している。

平衡状態図に示す通り、Mn系析出物に対しMg系析出物は析出温度が低いことから、加熱条件（加熱温度、加熱時間）が異なると母相中のMg固容量の模擬は困難となる。

したがって、機械試験用供試材のMg添加量は、シミュレーションで推定した設計貯蔵期間経過後の母相中のMg固容量 [] に保守的な裕度を考慮して、 [] [] することとする。



HZ-A3004の平衡状態図

強化機構に寄与する化学成分		
成分規定（mass%）		
試験用供試材	規格材	
	機械試験用供試材	

※各試験用供試材の化学成分は、機械試験用供試材 [] 設定している。

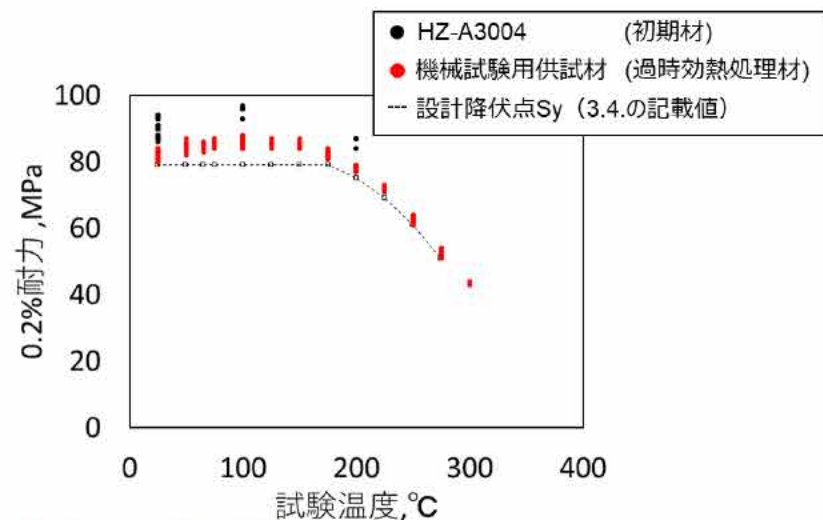
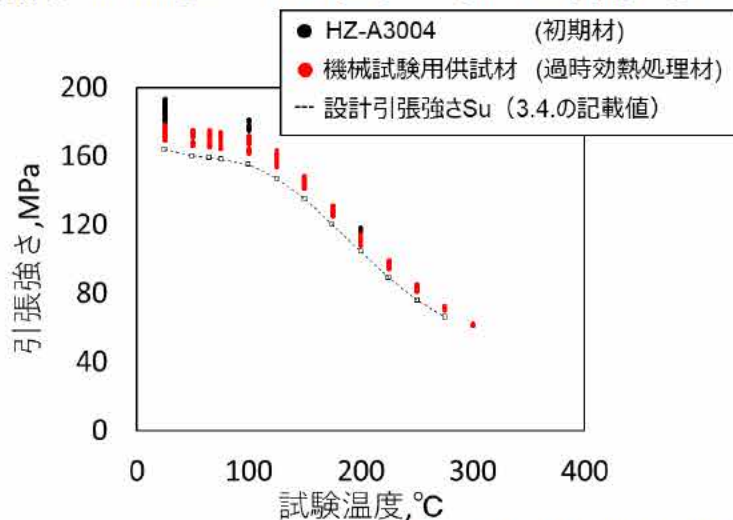
【設計強度 Sy値, Su値, Sm値】

(1) 機械試験用供試材の機械試験【指標：強度特性】

設計強度の規定については、設計貯蔵期間経過後の金属組織を模擬した過時効熱処理済み（O材処理含む）の機械試験用供試材の常温及び高温引張試験の結果を用いる。

機械試験用供試材は、O材処理により加工硬化を回復させた後、200°C×60年のLMPを包絡する[]の過時効熱処理を施すことにより、設計貯蔵期間を考慮した加熱の影響による金属組織（析出物及び結晶粒組織）の変化を模擬する。

また、HZ-A3004と機械試験用供試材の強度特性を比較し、設計強度の規定に機械試験用供試材の機械試験結果を用いることが保守的であることを確認する。



HZ-A3004及び機械試験用供試材の引張試験結果

材 料		引張強さ[MPa]		
		20°C	100°C	200°C
HZ-A3004	- 初期材	184.3	177.9	115.8
機械試験用供試材	- 過時効熱処理材	170.1	163.1	109.2

(2) 参考確認評価

機械試験用供試材のミルシート化学成分を用いて、O材処理 + 過時効熱処理によるシミュレーション（紫線）を実施し、過時効熱処理後（O材処理含む）の機械試験用供試材の方が設計貯蔵期間経過後のHZ-A3004より、Mg固溶量が低いことを確認する。



HZ-A3004及び機械試験用供試材の過時効熱処理（O材処理含む）に伴うMg固溶量変化に関するシミュレーション結果

(3) 評価（強度設定）

機械試験用供試材を用いてJSME新規材料採用ガイドラインに準じた各設計強度を規定する。

(4) 製品検査

- ① 化学成分
- ② 質別（H112）
- ③ 製造時初期材の機械特性※

※参考検査

設計には過時効後の強度を使用するため、初期材の機械試験結果は、直接設計強度を確認するためのものではないが、製品材料の初期特性と供試材に有意な差異がないことを確認するために実施する。

【破壊靱性】

(1) 考え方

- ① HZ-A3004の結晶構造は、単位胞が面心立方格子（face-centered cubic lattice, fcc）であり、バスケットの使用条件において延性を失わず脆性破壊を生じない。
- ② HZ-A3004は、使用温度域において靱性を有する。
したがって、HZ-A3004は靱性不足による破壊に対して特別な配慮は不要。

(2) 参考確認試験

使用温度域の延性、靱性及び許容欠陥寸法を確認するため、HZ-A3004のシャルピー衝撃試験及び破壊靱性試験を実施する。

(2-1) シャルピー衝撃試験

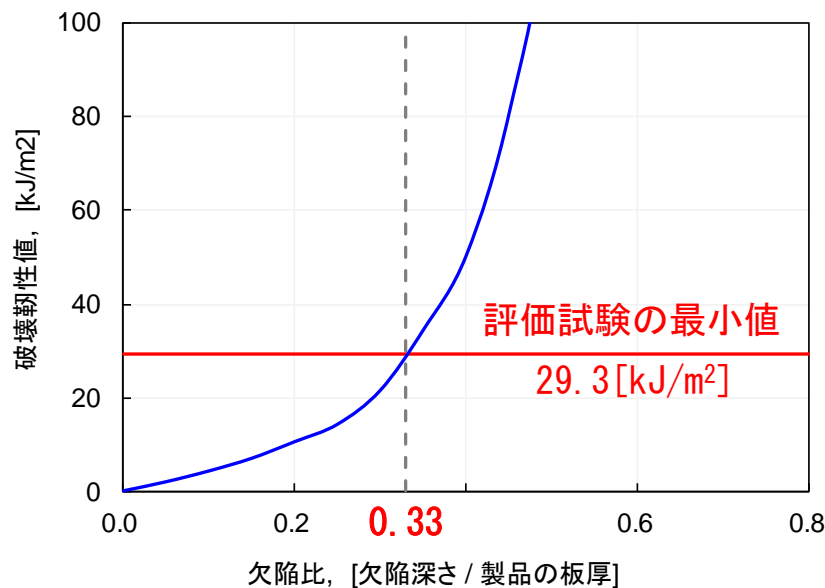
HZ-A3004の初期材と過時効熱処理材のシャルピー衝撃試験を実施し、初期材と過時効熱処理材の衝撃吸収特性に有意な差はない。

材料	熱処理	試験温度	試験方向	吸収エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	横膨出量 (mm)	延性破面率 (%)
HZ-A3004	初期材 (H112材)	常温	L	43	55	2.49	100
		常温	T	25	32	1.61	100
		250°C	L	44	55	2.61	100
		250°C	T	28	35	1.95	100
	過時効熱処理材 (O材→275°C×1,500時間)	常温	L	41	52	2.05	100
		常温	T	28	34	1.58	100
		250°C	T	25	31	2.05	100

(2-2) 破壊靱性試験

HZ-A3004の過時効熱処理材の常温の J_{Ic} 値の評価結果から許容欠陥寸法は板厚の33%までとなった。

HZ-A3004はMg添加量が最大1.3%と低いため加工性が良好であり、許容欠陥寸法を超える欠陥は製造工程では生じないと考えられる。また、許容欠陥寸法を超える欠陥が生じたとしても、外観検査で十分に検出が可能であり、製品に許容値を超える深さの欠陥が含まれることはない。



想定欠陥寸法と J_{Ic} 値の関係

(注) 過時効熱処理材、常温、T-L方向の J_{Ic} 値が最小値のため、29.3kJ/m²を設定した。

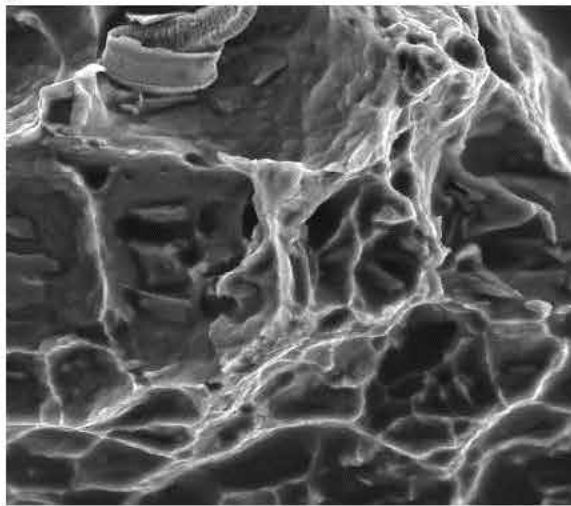
(3) 評価

-40℃、常温、200℃とも、HZ-A3004は、破壊靱性試験後の破面の全面に延性破壊の特徴的な破面模様であるディンプルが観察され、バスケットの使用条件において延性を失わず脆性破壊を生じないと考えられる。

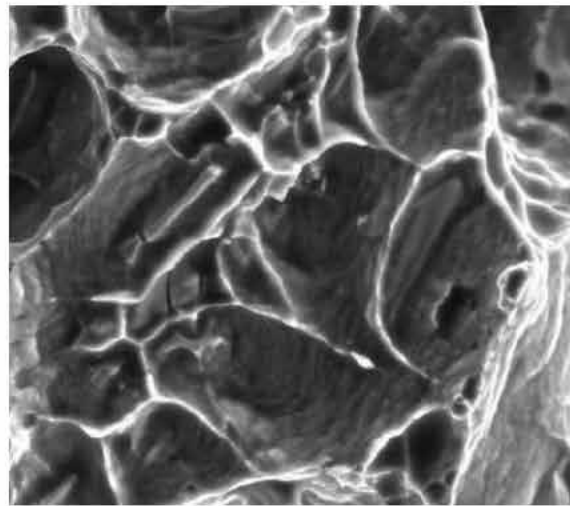
HZ-A3004の初期材と過時効熱処理材（O材処理含む）のシャルピー衝撃試験と J_{IC} 破壊靱性試験の結果から、HZ-A3004は-40、常温、200℃で靱性を有し、許容欠陥寸法は過時効熱処理材の常温の J_{IC} 値の評価結果から板厚の33%までであり、外観検査で十分に検出が可能と考えられる。

したがって、HZ-A3004は靱性不足による破壊に対して特別な配慮は不要である。

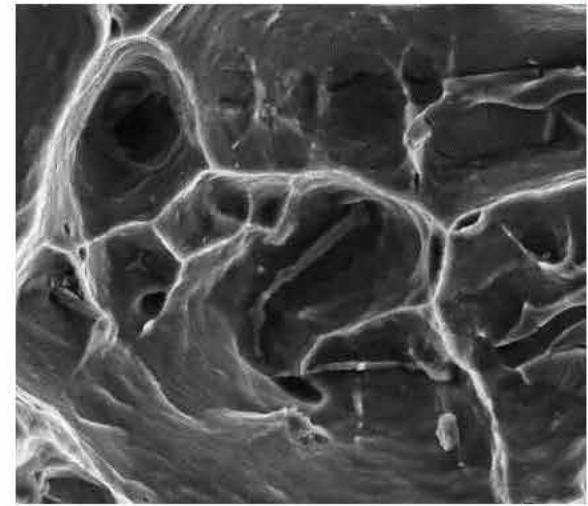
延性破壊の特徴的な破面模様 (ディンプル)



(a) -40℃



(b) 常温



(c) 200℃

10µm

破壊靱性試験体の破面SEM像

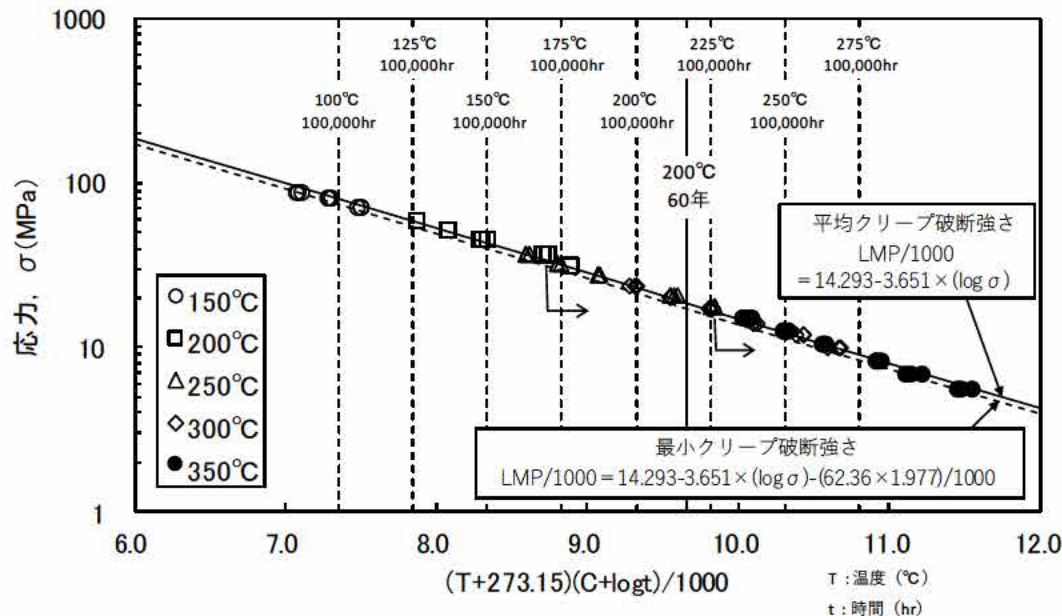
(4) 製品検査

- ①外観検査（必要に応じて非破壊検査）
- ②シャルピー衝撃試験（参考／供試材との同等性確認）

【許容引張応力 S値】

(1) 機械試験用供試材のクリープ試験

○材処理および の過時効熱処理を施した機械試験用供試材のクリープ試験により、設計貯蔵期間経過後のHZ-A3004におけるクリープ特性を確認する。



HZ-A3004の応力－破断時間プロット

(2) 評価

JSME新規材料採用ガイドラインに準じたS値（許容引張応力）を規定する。S値の規定にはクリープ特性を考慮する必要があり、クリープ試験で求めた値を評価に用いる。

S値は200°Cにおいて15MPaを有し、貯蔵中のバスケットの発生応力が1MPa未満であるのに対して十分な安全裕度を有している。

【腐食・長期劣化】

特定兼用キャスクのキャビティ内は、不活性ガスであるヘリウムガスを充填しており、不活性雰囲気は維持される限り、Basketは腐食しない。

なお、特定兼用キャスク内部に残留する酸素を考慮しても、腐食による構造強度への影響はない。

【試験に適用する供試材の考え方】

HZ-A3004の材料試験に使用する供試材には、HZ-A3004規格材（以下「規格材」という。）と機械試験用供試材がある。

機械試験用供試材は、HZ-A3004の設計貯蔵期間の熱ばく露による経年変化を模擬した材料であり、規格材は供用前の経年変化していない材料である。

（1）試験に適用する規格材の考え方

規格材は、供用前のHZ-A3004の基本物性の指標を示す供試材であり、各物性試験、その他物性試験に適用している。

なお、機械試験においては、常温引張試験、ビッカース硬さ試験及びシャルピー衝撃試験に使用しており、常温引張試験では、規格材と機械試験用供試材の引張強度や降伏点の違いを確認し、規格材より機械試験用供試材の方が強度が低いことを確認する。また、ビッカース硬さ試験は、規格材の方が機械試験用供試材より硬いことを確認し、より硬い規格材の靱性をシャルピー衝撃試験で確認する。

（2）試験に適用する機械試験用供試材の考え方

機械試験用供試材は、60年の設計貯蔵期間における熱ばく露を模擬した材料であり、経年変化により加工硬化やMgによる固溶強化などの強化機構が消失又は減少し、強度が低下したHZ-A3004の強度指標を示す供試材である。

機械試験用供試材は、マイクロ組織観察、常温引張試験、高温引張試験及びビッカース硬さ試験に使用しており、マイクロ組織観察では結晶粒や晶出物の大きさに違いがないことを確認し、常温引張試験及び高温引張試験の評価結果は、経年変化したHZ-A3004の設計強度を規定するために使用する。

9.3 材料試験の項目 (2/2)

- 物性試験
 - ミクロ組織観察 (規格材／機械試験用供試材)
 - 縦弾性係数 (規格材、25℃～350℃)
 - せん断弾性係数 (規格材、25℃～350℃)
 - ポアソン比 (規格材、25℃～350℃)
 - 線膨張係数 (規格材、20℃～300℃)

- 機械試験
 - 常温引張試験 (規格材／機械試験用供試材)
 - 高温引張試験 (機械試験用供試材、常温～300℃)
 - ビッカース硬さ試験 (規格材／機械試験用供試材)
 - シャルピー衝撃試験 (規格材、常温／250℃)
 - クリーブ試験 (機械試験用供試材、150℃～350℃)

- その他物性試験
 - 熱拡散率 (規格材、25℃～350℃)
 - 比熱 (規格材、25℃～350℃)
 - 密度 (規格材、25℃～350℃)
 - 熱伝導率 (規格材、25℃～350℃)

- 参考試験
 - 破壊靱性試験 (規格材／機械試験用供試材、-40℃／常温／200℃)

- 材料の各温度における設計降伏点 S_y (MPa)

材料名称	温度 (°C)											
	-40 ~40	50	65	75	100	125	150	175	200	225	250	275
HZ-A3004	78	78	78	78	78	78	78	78	74	67	59	49

- 材料の各温度における設計引張強さ S_u (MPa)

材料名称	温度 (°C)											
	-40 ~40	50	65	75	100	125	150	175	200	225	250	275
HZ-A3004	166	162	162	162	159	151	138	122	106	92	79	69

- 材料の各温度における設計応力強さ S_m (MPa)

材料名称	温度 (°C)											
	-40 ~40	50	65	75	100	125	150	175	200	225	250	275
HZ-A3004	52	52	52	52	52	52	47	42	36	31	27	23

➤ 材料の各温度における許容引張応力 S

(MPa)

材料名称	温度 (°C)											
	-40 ~40	50	65	75	100	125	150	175	200	225	250	275
HZ-A3004	47	46	46	46	45	38	28	20	15	11	8	6

➤ 材料の各温度における縦弾性係数

($\times 10^3$ MPa)

材料名称	温度 (°C)											
	20	50	65	75	100	125	150	175	200	225	250	275
HZ-A3004	73.4	72.9	72.7	72.5	72.0	71.4	70.7	69.9	69.1	68.1	67.1	65.9

➤ 材料の各温度における線膨張係数

($\times 10^{-6}$ mm/mm°C)

材料名称	区分 (注)	温度 (°C)											
		20	50	65	75	100	125	150	175	200	225	250	275
HZ-A3004	A	22.9	23.6	23.9	24.1	24.6	24.9	25.3	25.8	26.2	26.6	27.0	27.4
	B	22.9	23.4	23.5	23.6	23.8	24.0	24.2	24.5	24.7	24.9	25.1	25.3

(注) 区分Aは瞬時線膨張係数、区分Bは常温から各温度までの平均線膨張係数を示す。

Hitz-P24型のバスケット（アルミニウム合金）に適用する評価基準

(1) 評価基準の考え方

金属キャスク構造規格で定められる供用状態A、B、C及びDに対して、バスケットが維持すべき安全機能の観点からバスケット（アルミニウム合金）の評価基準を以下の考え方に従いそれぞれ設定した。

供用状態	A	B		C	D
具体的な設計事象	貯蔵時	通常取扱時 (吊上げ時等)	衝撃荷重作用時 (異常着床等)	貯蔵時 (S_d *相当地震力が作用する場合)	貯蔵時 (S_s 相当地震力が作用する場合) 及び衝撃荷重作用時 (津波荷重作用時等)
	—	通常輸送時	0.3m落下等	—	9m落下等
評価基準の考え方	本事象は、長期荷重がバスケットに作用する事象である。Hitz-P24型のバスケットは、クリープ特性を無視できない温度領域で使用することから、クリープ破断及びクリープ変形を防止するよう設計基準を設定する。	本事象は、通常使用状態又は繰り返しによる荷重（短期荷重）がバスケットに作用する事象である。本事象では、臨界防止機能維持のため、バスケットプレートの変形を防止するよう設計基準を設定する。		本事象は、設計貯蔵期間中、まれにしか生じる可能性がない事象である。本事象では、臨界防止機能維持のため、バスケットの形状が維持されるよう設計基準を設定する。	本事象は、設計貯蔵期間中に発生することは予想されないが、技術的に見れば発生が想定され得る事象である。本事象では、一般公衆の放射線被ばく防止の観点から、安全機能を著しく損なうことがないよう、バスケットの破断を防止するよう設計基準を設定する。ただし、塑性変形が生じる場合はバスケットの変形量を考慮した臨界解析により臨界防止上有意な変形が生じていないことを確認する。

Hitz-P24型のバスケット（アルミニウム合金）に適用する評価基準

(2) 評価基準

(1)項の考え方に従い設定した評価基準を以下に示す。

アルミニウム合金は、設計貯蔵期間中の熱ばく露（過時効条件：200℃→100℃×60年）に伴う強度低下を考慮する必要があるが、「補足説明資料1-1 バスケット用アルミニウム合金（HZ-A3004-H112）について」に示す材料規定の設定において設計貯蔵期間中の経年変化を考慮しているため、評価基準での考慮は不要である。

供用状態	A	B	C	D
具体的な設計事象	貯蔵時	通常取扱時 (吊上げ時等)	衝撃荷重作用時 (異常着床等)	貯蔵時 (Sd*相当地震力が作用する場合) 及び衝撃荷重作用時 (津波荷重作用時等)
	—	通常輸送時	0.3m落下等	—
評価基準	$P_m \leq S$ $P_m + P_b \leq K_o S$ $\tau \leq 0.6S$ $\sigma_p \leq S$ $\sigma_c \text{ (一次)} \leq f_c$ $\sigma_c \text{ (一次+二次)} \leq 1.5f_c$ $\epsilon_{mc} \leq 0.002$ $\epsilon_{mc} + \epsilon_{bc} \leq 0.004$	$P_m \leq S_m$ $P_m + P_b \leq 1.5S_m$ $P_m + P_b + Q \leq 1.5S_m$ (注1) $\tau \leq 0.6S_m$ $\sigma_p \leq S_y \text{ (1.5}S_y\text{)}$ (注2) $\sigma_c \text{ (一次)} \leq f_c$ $\sigma_c \text{ (一次+二次)} \leq 1.5f_c$	$P_m \leq 1.2S_m$ $P_m + P_b \leq 1.8S_m$ $P_m + P_b + Q \leq 1.5S_m$ (注1) $\tau \leq 0.9S_m$ $\sigma_p \leq 1.5S_y \text{ (2.25}S_y\text{)}$ (注2) $\sigma_c \text{ (一次)} \leq 1.5f_c$ $\sigma_c \text{ (一次+二次)} \leq 1.5f_c$	$P_m \leq 2/3S_u$ $P_m + P_b \leq S_u$ $P_m + P_b + Q \leq 3S_m$ (注3) $\tau \leq 1.2S_m$ $\sigma_p \leq 2S_y \text{ (3}S_y\text{)}$ (注2) $\sigma_c \text{ (一次)} \leq 1.5f_c^*$ (注4) $\sigma_c \text{ (一次+二次)} \leq 1.5f_c$

(注1) 1.5Smを超える場合は、短期荷重のみによる一次+二次応力強さに対して $P_m + P_b + Q \leq 3S_m$ を制限とし、短期荷重作用後の部材内応力再配分により生じる促進クリープを含む累積クリープ膜ひずみ、曲げひずみに対して $\epsilon_{mec} \leq 0.002$ 、 $\epsilon_{mec} + \epsilon_{bec} \leq 0.004$ を制限とする。

(注2) () 内は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値。

(注3) 短期繰返し荷重（地震力を想定）のみによる応力振幅について評価する。

(注4) f_c^* の値は、 f_c の値を算出する際の S_y を1.2 S_y と読み替えて算出した値。

No.	参考文献
[1]	鈴木覚, Al-Mn系合金, 軽金属, アルミニウムの組織と性質, (1991), 付録p119-p130
[2]	天野英隆, 小松伸也, 池田勝彦, 河本知広, アルミニウム中のMgの523K以下での平衡固溶度, 軽金属, 第52巻 第5号, (2002), p210-p215
[3]	茂山治久, 高橋由紀夫, 三浦直樹, 亘真澄, 金属キャスクバスケット用アルミニウム合金の強度特性と熱時効の影響に関する基礎的検討, (一財) 電力中央研究所, Q17007, (2018.4)
[4]	小椋智, 里達雄, Al-Zn-Mg系合金, 軽金属, アルミニウムの組織と性質, (1991), 付録p196-p207
[5]	
[6]	
[7]	
[8]	中山栄浩, 鷹合徹也, 金 大洲, 山田雄司, Al-5, 10 mass%Mg合金の時効処理に伴う組織変化, 日本金属学会誌 第61巻 第1号, (1997), p34-p40
[9]	(社) 日本熱処理技術協会, 熱処理用語辞典, 日刊工業新聞社, (2002), p10-p11 p453
[10]	金属キャスク貯蔵技術確証試験報告書 (1 / 3), (独) 原子力安全基盤機構, (2004), p269 p292

10.指摘事項（コメント）への回答

10.1 指摘事項（コメント）リスト

10.2 指摘事項（コメント）への回答

10.1 指摘事項（コメント）リスト

No.	受領日	コメント内容	該当条文	コメント回答	対応状況
1	2021/11/11 審査会合	特定機器を使用することができる原子炉施設の条件の記載については、条件が明確に記載されていないものがあるので、今後審査の中で整理して説明すること。	全般	臨界防止機能、除熱機能に係る条件については、第14回審査会合資料1-1の中の「2. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）」の説明で回答する。	臨界防止機能、除熱機能に対する条件については、第14回審査会合で回答。
				閉じ込め機能に係る条件については、第15回審査会合資料1-1の中の「2. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）」の説明で回答する。	閉じ込め機能に対する条件については、第15回審査会合で回答。
				遮蔽機能に係る条件については、第16回審査会合資料1-1の中の「2. 設置許可基準規則への適合性（第十六条、第四条）」の説明で回答する。	遮蔽機能に対する条件については、第16回審査会合で回答。
2	2021/11/11 審査会合	評価に用いた解析のコードについて、それぞれの適用性について、検証の方法や適用性を整理して説明すること。既許可で使用したコードであっても、バージョンや核定数の違いがある場合はそれを含めて適用性を説明すること。	4条,5条, 6条,16条	<p>臨界防止機能の評価にはSCALEコードシステム（SCAL6.2.1）（臨界計算はKENO-V.a、断面積ライブラリはENDF/B-VIIに基づく252群の多群断面積ライブラリ）を用いている。</p> <p>SCALEコードシステムについては、Hitz-P24型の評価条件に類似する複数の臨界実験ベンチマーク解析を実施して、適用性を確認している。</p> <p>除熱機能評価では、崩壊熱計算にORIGEN2（ORIGEN2.2UPJ）、温度計算にABAQUSを用いている。</p> <p>ORIGEN2については、ANS標準崩壊熱データにより検証され、Hitz-P24型に収納する使用済燃料と同等の冷却条件における適用性を確認している。</p> <p>ABAQUSについては、Hitz-P24型と同等の伝熱形態を有する兼用キャスクの伝熱試験により検証され適用性が確認されている。</p>	臨界防止機能、除熱機能の評価に用いた解析コードについては、第14回審査会合で回答。

10.1 指摘事項（コメント）リスト

No.	受領日	コメント内容	該当条文	コメント回答	対応状況
2	2021/11/11 審査会合	評価に用いた解析のコードについて、それぞれの適用性について、検証の方法や適用性を整理して説明すること。既許可で使用したコードであっても、バージョンや核定数の違いがある場合はそれを含めて適用性を説明すること。	4条,5条, 6条,16条	遮蔽防止機能の評価では線源強度評価にORIGEN2（ORIGEN2.2UPJ）、線量当量率計算にDOT3.5コードを用いている。 ORIGEN2については、ANS標準崩壊熱データにより検証され、Hitz-P24型に収納する使用済燃料と同等の冷却条件における適用性を確認している。 DOT3.5コードについては、使用済燃料輸送容器において、測定値と解析値の比較により妥当性の確認を行っている。 また、断面積ライブラリには、遮蔽性能に関するベンチマーク解析で信頼性が確認されているJENDL-3.3に基づくMATXSLLIB-J33を用いる。	遮蔽機能に対する条件については、第16回審査会合で回答。

10.1 指摘事項（コメント）リスト

No.	受領日	コメント内容	該当条文	コメント回答	対応状況
3	2021/11/11 審査会合	バスケットは複雑な構造をしているので、バスケットプレート及びバスケットを支持する部分にどのように力が伝わっていくか説明すること。	4条,5条, 6条,16 条	バスケット構造の詳細については、第14回審査会合資料1-1の中の「参考1. Hitz-P24型の概要（構造・収納条件等）」に示す。（P.30～34参照） バスケットは内側部と外側部に分割されており、それぞれアルミニウム合金製のプレートを軸方向に重ねた構造である。プレートはタイロッドで軸方向に連結されており、径方向はリーマピンで位置決めされている。 内側部は外側部に囲まれた空間に挿入される（固定はされていない。）。内側部が径方向に移動する場合は、外側部に平面で支持される構造であり、内側部（燃料集合体含む）の荷重は外側部に伝達される。 外側部は本体胴に支持され、また固定金具により径方向には本体胴に固定されており、外側部（燃料集合体含む）の荷重は内側部から伝達されるものも含めて、本体胴に直接伝達するか、固定金具を介して本体胴に伝達する。	第14回審査会合で回答。
4	2021/11/11 審査会合	地震、津波、竜巻の評価では、一部の部材の応力評価結果のみが示されているが、基準要求事項としては、告示の条件に対してキャスクの安全機能が損なわれないことであるので、4つの安全機能を担保するキャスクの部材の応力評価結果を示し、安全機能の維持の成立性を定量的に説明すること。また、設計基準値の考え方も説明すること。 さらに、津波、竜巻については、外運搬規則の0.3m落下の衝突荷重と比較している考え方や適切性についても説明すること。	4条,5条, 6条	地震、津波、竜巻の評価については、第16回審査会合資料1-1の中の「2. 設置許可基準規則への適合性（第十六条、第四条、第五条、第六条）」の説明で回答する。	第16回審査会合で回答。

10.1 指摘事項（コメント）リスト

No.	受領日	コメント内容	該当条文	コメント回答	対応状況
5	2021/11/11 審査会合	臨界評価における「技術的に想定されるいかなる場合」について、例えば燃料装荷時の満水状態や、排水時の水位変化などの状態をすべて考慮して臨界防止できることの説明をすること。	16条	<p>Hitz-P24型への燃料装荷から貯蔵施設への搬入、搬出、燃料取出しまでのハンドリングフローを整理し、各取扱いモードにおけるHitz-P24型の条件を踏まえた臨界防止機能の成立性を確認しており、例えば燃料装荷時の満水状態や、排水時の水位変化などの状態等の使用済燃料を収納した条件下で、技術的に想定されるいかなる場合でも中性子実効増倍率が0.95以下となる設計となっていることを確認している。</p> <p>詳細は、第14回審査会合資料1-1の中の「2. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）」の説明の中で回答する。（P.9～12参照）</p>	第14回審査会合で回答。
6	2021/11/11 審査会合	金属ガスケットの長期健全性について、公開知見などのような技術的根拠を使ったのかを明確にした上で説明すること。	16条	<p>電中研で実施された金属ガスケットの密封性能に関する試験結果において、漏えい率とラーソン・ミラー・パラメータ（以下「LMP」という）の関係が整理されており、初期の閉じ込め機能を維持できる限界のLMPが確認されている。Hitz-P24型に対して評価したLMPが上記の限界のLMPを下回ることから、設計貯蔵期間を通じて初期の閉じ込め機能は維持される。評価の詳細及び使用した参考文献については、本資料の中の「2. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（長期健全性）」の箇所で説明する。（P.15参照）</p>	第20回審査会合で回答。

10.1 指摘事項（コメント）リスト

No.	受領日	コメント内容	該当条文	コメント回答	対応状況
7	2021/11/11 審査会合	<p>バスケット用アルミニウム合金の設計用強度を決めるまでの一連の流れについて、以下の点を明確にすること。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・考え方、評価方法を含め国内でどのような許認可実績を持っているか ・評価方法、評価結果を使うにあたって具体的にどのような検証がなされてきているか ・今回本申請にこの考え方を適用することについて、どのように適用性を整理し、どのような根拠があるか 	全般	<p>バスケット用アルミニウム合金の設計用強度を決める上で、計算材料科学に基づくシミュレーションとLMPを用いて経年変化を模擬した機械試験用供試材により強度評価を行っている。</p> <p>この手法には許認可実績がないため、妥当性を確認するための試験を実施し、有効性を確認している。</p> <p>評価方法、評価結果については、基本的にJSME新規材料採用ガイドラインに準じ、貯蔵施設の型式指定を受けた先行例を参考にしている。</p> <p>破壊靱性については、-40°C～200°Cの範囲で破壊靱性試験を実施し、取得したJ_Q値及びJ_{IC}値から問題のないこと確認している。</p> <p>今回の申請でこの考え方を適用することに係る適用性や根拠については、補足説明資料1-1 別紙2にて説明する。</p>	第20回審査会合で回答。

10.1 指摘事項（コメント）リスト

No.	受領日	コメント内容	該当条文	コメント回答	対応状況
8	2022/2/8 審査会合	臨界防止機能については、減速材（水）がキャスク内に偏在することなく均一に排出できる構造であるとしていることについて、バスケットプレートの構造面の特性等を踏まえて、詳細に説明すること。	16条	<p>Hitz-P24型の取扱いにおいて、使用済燃料を収納した状態での容器内水の水位の変動が想定されるのは、以下の場合である。</p> <ul style="list-style-type: none">・燃料装荷後の排水時・燃料取出し前の注水時 <p>Hitz-P24型のバスケットは、燃料格子は軸方向に貫通しており、最底部のバスケットプレートの下面側には、燃料格子間及び燃料格子からバスケット外周部につながる溝が設けてあり、ドレンパイプから容器外へ排水される流路となっている。また、水ギャップ部については、最上部及び最下部のバスケットプレートを除く、その間のプレートは軸方向に貫通しており、最上部のバスケットプレートの下面側及び最底部のバスケットプレートの上面側には、水ギャップから近傍の燃料格子につながる溝が設けてあり、燃料格子内の水と同じ流路で排水される設計となっている。</p> <p>そのため、注排水時にバスケット格子内部と水ギャップとの水位差はほとんど生じない。</p> <p>詳細は、「10.2 指摘事項（コメント）への回答」で説明する。</p>	第15回審査会合で回答。

10.1 指摘事項（コメント）リスト

No.	受領日	コメント内容	該当条文	コメント回答	対応状況
9	2022/2/8 審査会合	除熱機能については、伝熱解析コード（ABAQUS）の適用性について、本申請の特定兼用キャスクと ABAQUS コードの解析機能の検証に用いた定常伝熱試験用供試体との伝熱形態の比較等を踏まえ、詳細に説明すること。	16条	Hitz-P24型と定常伝熱試験用供試体は、主要な構造及び収納物仕様は同等であり、伝熱形態（伝導、放射、対流）は同様である。そのため、定常伝熱試験用供試体の伝熱試験により検証された伝熱解析コード（ABAQUS）の Hitz-P24型への適用性は確認されている。 詳細は、「10.2 指摘事項（コメント）への回答」で説明する。	第15回審査会合で回答。
10	2022/2/8 審査会合	第14回審査会合資料1-4の別紙1に記載されている除熱解析の保守性について、保守的となる理由を、感度解析の結果等を踏まえ、より詳細に説明すること。	16条	詳細は、「10.2 指摘事項（コメント）への回答」で説明する。	第15回審査会合で回答。
11	2022/11/28 審査会合	許容引張応力S値を設定する上で実施されているクリープ試験について、3000時間までの試験が完了し、10,000時間まで実施するとのことだが、終了する見通しは立っているのか。 一部の試験が継続中であると型式の承認に影響すると思われる。 クリープ特性の考慮に試験結果が影響する場合は、今後の会合で説明し、申請書のS値を変更する場合は補正すること。	全般	クリープ試験は一部の試験片が未破断であるが、残存する全ての試験片が10,000時間を越えていることから、試験結果を未破断として取扱い、 <u>現時点までのデータを用いて、許容引張応力（S値）を補正する。</u> 本件については、「10.2 指摘事項（コメント）への回答」で詳しく説明する。	第23回審査会合で回答。
12	2022/11/28 審査会合	60年の設計貯蔵期間を経てもHZ-A3004-H112はMn系分散相による分散強化とMgによる固溶強化が期待できるとあるが、強度とは別に伝熱機能への影響はないか。	全般	HZ-A3004-H112の熱物性値は、経年変化で有意な影響が生じないため、 <u>伝熱機能への影響はない。</u> 本件については、「10.2 指摘事項（コメント）への回答」で詳しく説明する。	第23回審査会合で回答。

10.1 指摘事項（コメント）リスト

No.	受領日	コメント内容	該当条文	コメント回答	対応状況
13	2022/11/28 審査会合	材料の強度基準の妥当性に対して、Mg固容量の減少により固溶強化などの強化機構の低下が強度に影響すると考えられること、Mg固容量と不純物元素の関係が強度に対してどのように考慮されているかについて、文献、シミュレーションおよび機械試験の結果を用いた説明を整理すること。	全般	<p>バスケット用アルミニウム合金の設計用強度（強度基準）の妥当性の説明について、次のように分類して整理した。</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mg固容量の減少に伴うMg固溶強化の低下による材料強度への影響 • Mg固溶強化以外の強化機構の経年変化による材料強度への影響 • 不純物元素の経年変化による材料強度への影響 • 計算材料科学による、経年変化に伴って減少するMg固容量の推定方法 • L M Pを用いた過時効熱処理条件の設定 	第23回審査会合で回答。
14	2022/11/28 審査会合	バスケットの長期健全性について、熱的に温度に耐えるという記載があるが、強度においてMgの強化機構が長期的に低減すること及びMgの固溶強化の低減が設計強度に反映されているという記載がないので説明を追記すること。	全般	<p>バスケットの長期健全性については、バスケット用アルミニウム合金の設計用強度を規定する際に、経年変化でMgによる固溶強化が低下した状態を模擬している機械試験用供試材を材料試験に用いることにより、保守的に設定することとしている。</p> <p>本件については、「10.2 指摘事項（コメント）への回答」で詳しく説明する。</p>	第23回審査会合で回答。
				<p>これまでのコメントを考慮し、強度においてMgの強化機構が長期的に低減すること及びMgの固溶強化の低減が設計用強度に反映されているということについて、説明を追加し記載を改める。</p> <p>本件については、「10.2 指摘事項（コメント）への回答」で詳しく説明する。</p>	第25回審査会合で回答。

10.1 指摘事項（コメント）リスト

No.	受領日	コメント内容	該当条文	コメント回答	対応状況
15	2023/2/16 審査会合	設計貯蔵期間ではバスケットの温度低下が生じるが、冷却速度がバスケット材料の金属組織変化にあたる影響について、どのように考慮されているかを示すこと。	全般	設計貯蔵期間中にバスケット材料の温度が低下しない場合(200℃×60年)におけるMgの固溶強化およびMn系分散相の分散強化は、温度が低下する場合と比較して同等ないしは保守的と推察される。そのため、材料強度は温度が低下しない条件(200℃×60年)によって保守的に評価できる。 本件については、「10.2 指摘事項（コメント）への回答」で詳しく説明する。	第25回審査会合で回答。
16	2023/2/16 審査会合	過時効熱処理条件の設定にラーソン・ミラー・パラメータを適用しているが、その妥当性を示すこと。	全般	ラーソン・ミラー・パラメータは、元素の拡散を扱うことができるアレニウスの式から導出されるものであり、ラーソン・ミラー・パラメータを過時効熱処理条件の設定に適用することは妥当である。 本件については、「10.2 指摘事項（コメント）への回答」で詳しく説明する。	第25回審査会合で回答。
17	2023/2/16 審査会合	設計貯蔵期間の保持されたバスケット用材料におけるMn系分散相の粗大化が過時効熱処理で模擬できることを説明すること。	全般	Mn系分散相の粗大化は、ラーソン・ミラー・パラメータに基づいて設定された過時効熱処理条件により模擬できる。 また、拡散距離の観点からも、Mn系分散相の粗大化については設計貯蔵期間を過時効熱処理で模擬できることを確認している。 本件については、「10.2 指摘事項（コメント）への回答」で詳しく説明する。	第25回審査会合で回答。

10.1 指摘事項（コメント）リスト

No.	受領日	コメント内容	該当条文	コメント回答	対応状況
18	2023/2/16 審査会合	HZ-A3004-H112において設計貯蔵期間にT相(AlCuMgZn)が析出することによる強度への影響を定量的に示すこと。	全般	Mgの添加量を減らすとともに過時効熱処理した機械試験用供試材により、設計貯蔵期間を経たHZ-A3004-H112材のT相析出を含む強度低下を保守的に模擬できる。したがって、T相析出による強度の低下について特別な配慮は不要である。 本件については、「10.2 指摘事項（コメント）への回答」で詳しく説明する。	第25回審査会合で回答。

指摘事項No.8

臨界防止機能については、減速材（水）がキャスク内に偏在することなく均一に排出できる構造であるとしていることについて、バスケットプレートの構造面の特性等を踏まえて、詳細に説明すること。

（回答）

(1) 水位の変動が生じ得る事象

Hitz-P24型の取扱いにおいて、使用済燃料を収納した状態での容器内水の水位の変動が想定されるのは、以下の場合である。

- ・燃料装荷後の排水時
- ・燃料取出し前の注水時

(2) 排水、注水時の水の流路の設計（P.123～124の図参照）

Hitz-P24型のバスケットは、燃料格子は軸方向に貫通しており、最下部のバスケットプレートの下面側（断面D-D）には、燃料格子間及び燃料格子からバスケット外周部につながる溝が設けてあり、ドレンパイプから容器外へ排水される流路となっている。

また、水ギャップ部については、最上部及び最下部のバスケットプレートを除く、その間のプレートは軸方向に貫通しており、最上部のバスケットプレートの下面側（断面A-A）及び最下部のバスケットプレートの上面側（断面C-C）には、水ギャップから近傍の燃料格子につながる溝が設けてあり、燃料格子内の水と同じ流路で排水される設計となっている。

(3) 排水、注水作業時の水位差

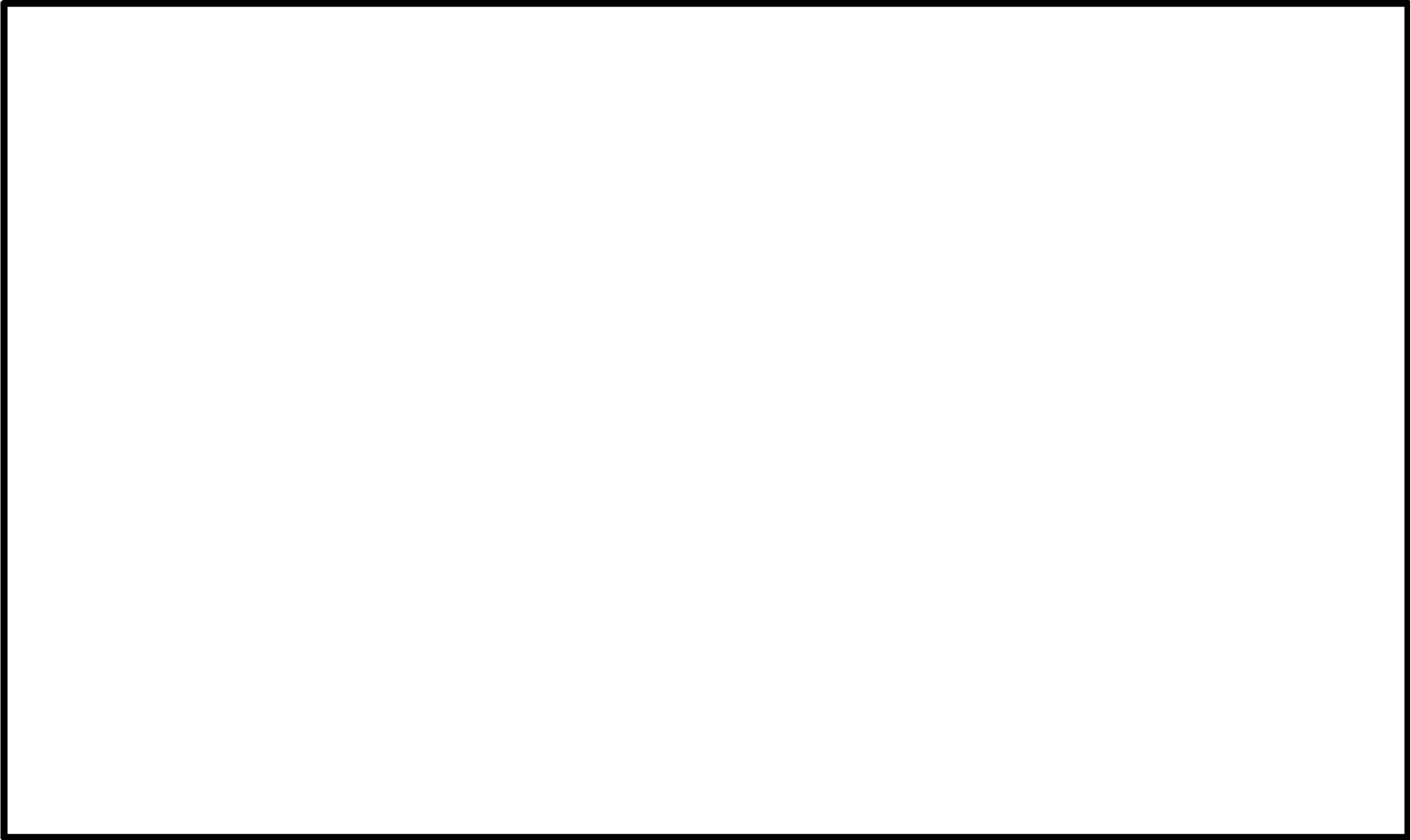
燃料集合体を収納した状態での注排水時の流量を [] とした場合、燃料集合体を収納した状態でのバスケット全長 [] 分を水で充填する場合におけるバスケット格子内部と水ギャップとの水位差を評価した結果、水位差は1mm以下であり、水がキャスク内に偏在することなく均一に排出できる構造である。

10.2 指摘事項（コメント）への回答

10.2 指摘事項（コメント）への回答

（回答（つづき））

Hitz-P24型の排水時の水の流れの模式図



指摘事項No.9

除熱機能については、伝熱解析コード（ABAQUS）の適用性について、本申請の特定兼用キャスクと ABAQUS コードの解析機能の検証に用いた定常伝熱試験用供試体との伝熱形態の比較等を踏まえて、詳細に説明すること。

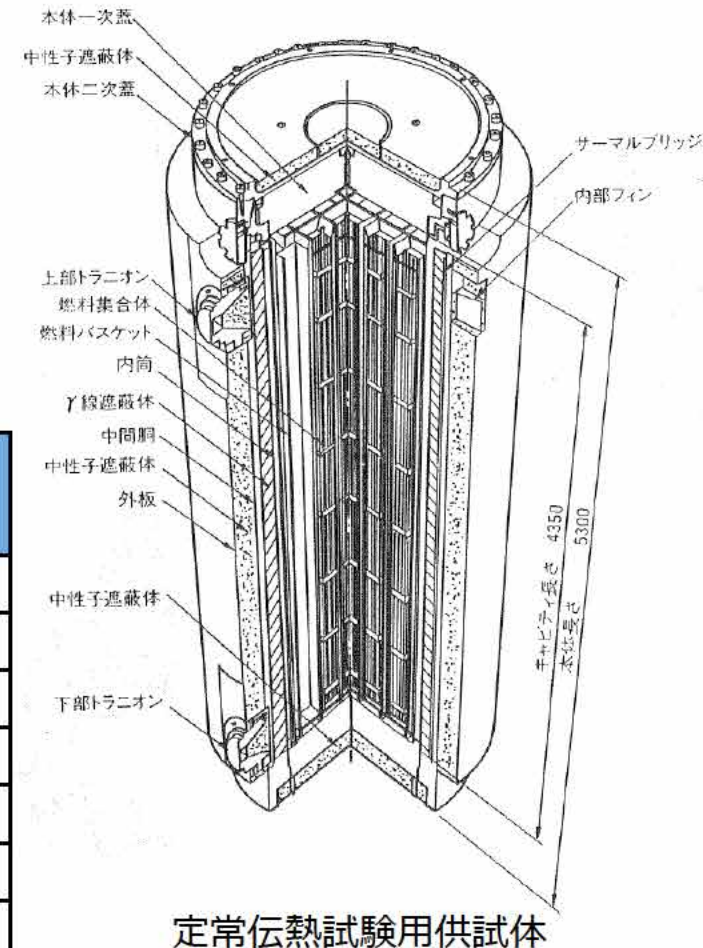
（回答）

Hitz-P24型と定常伝熱試験用供試体は、

- ▶ 主要な構造及び収納物仕様は下表に示すように同等である。
（材質の違いは熱物性値で考慮可能）
- ▶ 伝熱形態は次ページに示すように、構成部材（鋼材）の伝導、内部気体（ヘリウム）の伝導、構成部材間の放射、周囲空気への放射及び対流であり、同じである。

以上より、定常伝熱試験用供試体の伝熱試験により検証された伝熱解析コード（ABAQUS）のHitz-P24型への適用性は確認されている。

項目	Hitz-P24型 (構造は「2. Hitz-P24型の仕様」参照)	定常伝熱試験用供試体 (構造は右図参照)
本体胴内雰囲気	乾式（ヘリウム充填）	乾式（ヘリウム充填）
収納燃料型式	PWR用燃料（17×17型）	PWR用燃料（17×17型）
収納体数(体)	24	21
崩壊熱量(kW)	18.1	23
外径(mm)	2659	2400
容器の材質	低合金鋼	ステンレス鋼
バスケットの材質	アルミニウム合金	ステンレス鋼



事項No.10

除熱解析の保守性について、保守的となる理由を、感度解析の結果等を踏まえ、より詳細に説明すること。

（回答）

第14回審査会合の資料1-4の別紙1に示す除熱解析の保守性について、保守的となる理由を以下に示す。なお、これらの保守性については、定性的な評価及びこれまでの設計経験を踏まえて設定している。

項目	保守性の内容	保守的となる理由
収納制限に対する解析条件の保守性	ウラン濃縮度を最小値である [] とする。	濃縮度が小さい方が核分裂性核種（U235）が少なく、同じ出力を得るためにはより多くの中性子を照射しなければならないことから、U238等の中性子吸収量が増加して超ウラン元素の生成量が増加するため、崩壊熱量を保守的に高めに評価する。
	中央部12体の使用済燃料は最高燃焼度（48GWd/t）の崩壊熱量とし、外周部12体は、特定兼用キャスク全体の総崩壊熱が平均燃焼度（44GWd/t）燃料を24体収納した場合と等しくなるように調整した崩壊熱量を設定する。	使用済燃料は燃焼度が高いほど崩壊熱量が高くなることから、中央部の使用済燃料の燃焼度を高く設定することにより、中央部の崩壊熱量が高くなる。 崩壊熱はキャスク中央部からキャスク外表面へ伝達されるため、中央部の崩壊熱量を高くすることにより、使用済燃料及びバスケットの最高温度を保守的に高めに評価できる。
モデル化の保守性	特定兼用キャスク本体内のバスケット及びバスケット内の使用済燃料は空間の中央に配置する。	接触による部材間の直接の伝熱がない方が燃料集合体の温度を高めに評価するため。
	バーナブルポイズン集合体はモデル化しない。	バーナブルポイズン集合体は伝熱体となるため、無視する方が熱伝導性が低下し保守側の評価となる。
	燃料集合体モデルは、軸方向への熱移動を考慮しない二次元モデルとする。	伝熱方向（面積）が限定される方が燃料集合体の温度を高めに評価するため。

（回答（つづき））

項目	保守性の内容	保守的となる理由
モデル化の保守性（つづき）	輪切りモデルにおいて、燃料集合体領域で軸方向への熱移動を考慮するのは外周部に収納される燃料集合体のみとする。上記以外の領域では軸方向への熱の流れを無視している。（断熱としている。）	<p>実際には外周部に収納される燃料集合体以外の領域でも軸方向への熱の流れがあるが、伝熱方向（面積）が径方向のみに限定される方が燃料集合体及びバスケットの最高温度を高め評価するため。</p>
全体モデルの燃料集合体とバスケットの均質化領域において、軸方向の平均熱伝導率を保守的に設定している。（バスケットプレート間のギャップを保守的に設定している。）	<p>軸方向（端部）温度評価に用いる全体モデルでは、軸方向に熱が伝わりやすくなるように、ギャップを考慮しないで軸方向の平均熱伝導率を大きく設定し、軸方向端部温度を高め評価するため。</p> <p>軸方向の熱移動量の設定注) に用いる全体モデルでは、軸方向に熱が伝わりにくくなるように、ギャップを考慮して軸方向の平均熱伝導率を小さく設定し、燃料集合体及びバスケットの最高温度を高め評価するため。</p> <p>注) 全体モデルの結果より、輪切りモデルの軸方向の熱移動量を設定している。</p>	

指摘事項No.11

許容引張応力S値を設定する上で実施されているクリープ試験について、3000時間までの試験が完了し10,000時間まで実施するとのことだが、終了する見通しは立っているのか。
一部の試験が継続中であると型式の承認に影響すると思われる。クリープ特性の考慮に試験結果が影響する場合は、今後の会合で説明し、申請書のS値を変更する場合は補正すること。

（回答）

クリープ試験は一部の試験片が未破断であるが、残存する全ての試験片が**10,000時間を経過**しており、クリープ速度が定常クリープ域から加速クリープ域に遷移していることから、許容引張応力の評価に**必要な定常クリープ域のクリープ速度**（定常クリープ速度）の**取得が完了**しているものと判断できるため、2023年1月17日（試験時間：12,648h）までのデータを用いて整理し、**許容引張応力（S値）を補正**する。（一部の試験片を未破断として試験を終了）

なお、仮にクリープ試験を試験片が破断するまで継続した場合、試験時間が想定した破断時間を既に超えていることから、このデータを用いて許容引張応力（S値）を評価すると評価値が上昇することとなる。

しかし、バスケットに生じる貯蔵時の発生応力は1MPa未満であり、HZ-A3004-H112は最高使用温度の200℃において15MPa以上の許容引張応力を有することから、**試験結果の一部を未破断として取り扱ったとしても特に設計上の問題とはならない。**

10.2 指摘事項（コメント）への回答

(つづき)

クリープ試験結果（破断時間）

供試材 符号	試験温度 [°C]	応力 σ [MPa]	破断時間 [hr]	LMP/1000 (C=14.71)	供試材 符号	試験温度 [°C]	応力 σ [MPa]	破断時間 [hr]	LMP/1000 (C=14.71)	供試材 符号	試験温度 [°C]	応力 σ [MPa]	破断時間 [hr]	LMP/1000 (C=14.71)
D	150	85.5	108.2	7.09	E	150	85.5	133.4	7.12	F	150	85.5	114.6	7.10
	150	77.4	339.3	7.30		150	77.4	370.6	7.31		150	77.4	350.8	7.30
	150	69.3	1152.1	7.52		150	69.3	1000.4	7.49		150	69.3	1125.1	7.52
	200	56.5	91.3	7.89		200	56.5	87.0	7.88		200	56.5	88.8	7.88
	200	50.3	250.4	8.09		200	50.3	247.9	8.09		200	50.3	249.6	8.09
	200	44.3	731.1	8.32		200	44.3	881.7	8.35		200	44.3	686.9	8.30
	200	35.8	5300.2	8.72		200	35.8	6223.5	8.76		200	35.8	5240.7	8.72
	200	30.7	12648(未破断)	8.90		200	30.7	12648(未破断)	8.90		200	30.7	12648(未破断)	8.90
	250	36.7	51.9	8.59		250	36.7	56.8	8.61		250	36.7	51.4	8.59
	250	32.2	133.9	8.81		250	32.2	133.2	8.81		250	32.2	143.5	8.82
	250	27.7	440.5	9.08		250	27.7	448.3	9.08		250	27.7	419.9	9.07
	250	20.5	3962.1	9.58		250	20.5	4301.9	9.60		250	20.5	3585.4	9.56
	250	17.4	12648(未破断)	9.84		250	17.4	12648(未破断)	9.84		250	17.4	11785.6	9.83
	300	23.5	36.6	9.33		300	23.5	34.9	9.32		300	23.5	30.9	9.29
	300	20.1	91.1	9.55		300	20.1	90.2	9.55		300	20.1	88.4	9.55
	300	17.0	281.9	9.84		300	17.0	259.4	9.81		300	17.0	248.9	9.80
	300	11.8	3104.7	10.43		300	11.8	3197.7	10.44		300	11.8	2539.7	10.38
	300	9.8	8304.2	10.68		300	9.8	8116.9	10.67		300	9.8	6036.5	10.60
	300	14.0	843.3	10.11		300	14.0	927.6	10.13		300	14.0	814.9	10.10
	350	14.7	31.0	10.10		350	14.7	26.7	10.06		350	14.7	25.4	10.04
350	12.3	76.9	10.34	350	12.3	67.8	10.31	350	12.3	66.7	10.30			
350	10.2	178.9	10.57	350	10.2	194.2	10.59	350	10.2	176.2	10.57			
350	5.5	5256.3	11.49	350	8.1	744.3	10.96	350	8.1	639.3	10.91			
350	8.1	691.4	10.94	350	5.5	6741.6	11.55	350	6.8	1360.0	11.12			
350	6.8	1538.9	11.15	350	6.8	2021.8	11.23	350	5.5	4689.7	11.45			

注：表中の で囲う試験データは未破断の試験片を示す

10.2 指摘事項（コメント）への回答

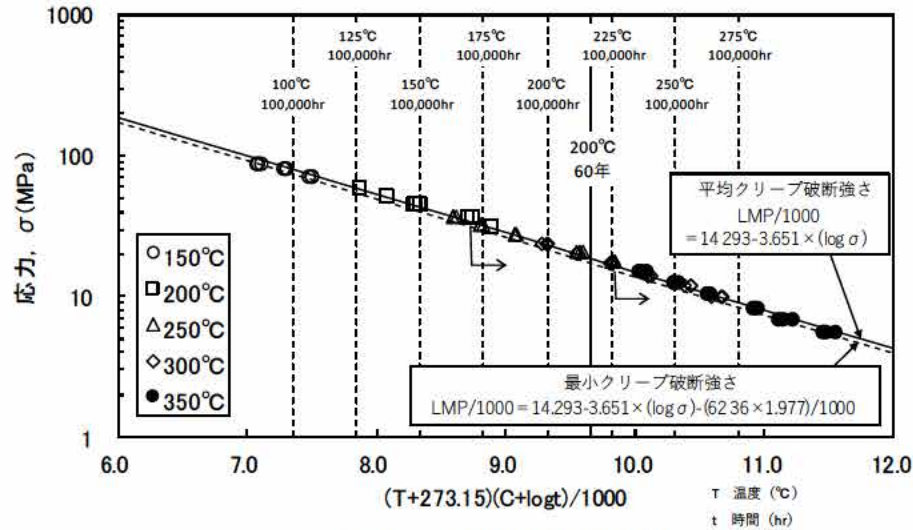
(つづき)

クリープ試験結果（定常クリープ速度）

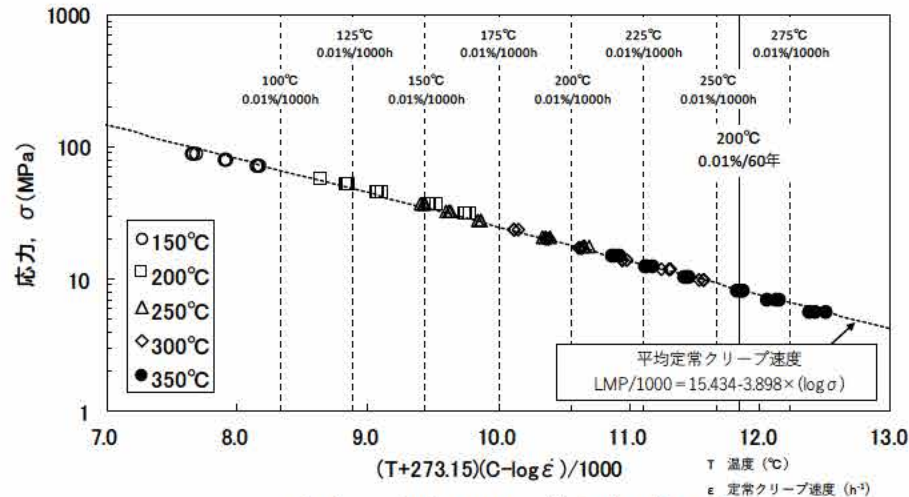
供試材 符号	試験温度 [°C]	応力σ [MPa]	定常クリープ速度 [1/hr]	LMP/1000 (C = 15.31)	供試材 符号	試験温度 [°C]	応力σ [MPa]	定常クリープ速度 [1/hr]	LMP/1000 (C = 15.31)	供試材 符号	試験温度 [°C]	応力σ [MPa]	定常クリープ速度 [1/hr]	LMP/1000 (C = 15.31)
D	150	85.5	1.5.E-03	7.67	E	150	85.5	1.3.E-03	7.70	F	150	85.5	1.6.E-03	7.66
	150	77.4	4.1.E-04	7.91		150	77.4	3.9.E-04	7.92		150	77.4	4.0.E-04	7.92
	150	69.3	9.3.E-05	8.18		150	69.3	1.1.E-04	8.15		150	69.3	1.0.E-04	8.17
	200	56.5	1.1.E-03	8.64		200	56.5	1.1.E-03	8.64		200	56.5	1.1.E-03	8.64
	200	50.3	4.2.E-04	8.84		200	50.3	4.0.E-04	8.85		200	50.3	3.8.E-04	8.86
	200	44.3	1.3.E-04	9.08		200	44.3	1.1.E-04	9.12		200	44.3	1.4.E-04	9.07
	200	35.8	2.0.E-05	9.47		200	35.8	1.5.E-05	9.53		200	35.8	1.9.E-05	9.48
	200	30.7	4.8.E-06(未破断)	9.76		200	30.7	4.4.E-06(未破断)	9.78		200	30.7	5.0.E-06(未破断)	9.75
	250	36.7	2.2.E-03	9.40		250	36.7	1.9.E-03	9.43		250	36.7	2.0.E-03	9.42
	250	32.2	8.5.E-04	9.62		250	32.2	9.0.E-04	9.60		250	32.2	8.1.E-04	9.63
	250	27.7	2.8.E-04	9.87		250	27.7	2.8.E-04	9.87		250	27.7	3.1.E-04	9.84
	250	20.5	3.3.E-05	10.35		250	20.5	2.8.E-05	10.39		250	20.5	3.6.E-05	10.33
	250	17.4	9.0.E-06(未破断)	10.65		250	17.4	7.3.E-06(未破断)	10.70		250	17.4	8.60E-06	10.66
	300	23.5	4.0.E-03	10.15		300	23.5	4.6.E-03	10.11		300	23.5	4.5.E-03	10.12
	300	20.1	1.6.E-03	10.38		300	20.1	1.7.E-03	10.36		300	20.1	1.6.E-03	10.38
	300	17.0	5.6.E-04	10.64		300	17.0	5.7.E-04	10.63		300	17.0	6.3.E-04	10.61
	300	11.8	3.9.E-05	11.30		300	11.8	3.7.E-05	11.32		300	11.8	4.8.E-05	11.25
	300	9.8	1.3.E-05	11.58		300	9.8	1.30E-05	11.58		300	9.8	1.5.E-05	11.54
	300	14.0	1.6.E-04	10.95		300	14.0	1.4.E-04	10.98		300	14.0	1.6.E-04	10.95
	350	14.7	5.8.E-03	10.93		350	14.7	6.6.E-03	10.90		350	14.7	7.3.E-03	10.87
350	12.3	2.3.E-03	11.18	350	12.3	2.7.E-03	11.14	350	12.3	2.8.E-03	11.13			
350	10.2	8.3.E-04	11.46	350	10.2	8.8.E-04	11.44	350	10.2	9.6.E-04	11.42			
350	5.5	2.3.E-05	12.43	350	8.1	1.8.E-04	11.87	350	8.1	2.1.E-04	11.83			
350	8.1	1.9.E-04	11.86	350	5.5	1.70E-05	12.51	350	6.8	9.2.E-05	12.06			
350	6.8	7.0.E-05	12.13	350	6.8	6.4.E-05	12.15	350	5.5	2.7.E-05	12.39			

注：表中の で囲う試験データは未破断の試験片を示す

(つづき)



応力-破断時間プロット



応力-定常クリーブ速度プロット

10.2 指摘事項（コメント）への回答

(つづき)

材料の各温度における許容引張応力 S (申請時)

試験温度[°C] 材料名称	-40 ~ 40	50	65	75	100	125	150	175	200	225	250	275
HZ-A3004	47	46	46	46	45	37	27	20	15	11	8	6



材料の各温度における許容引張応力 S (補正值)

試験温度[°C] 材料名称	-40 ~ 40	50	65	75	100	125	150	175	200	225	250	275
HZ-A3004	47	46	46	46	45	38	28	20	15	11	8	6

指摘事項No.12

60年の設計貯蔵期間を経てもHZ-A3004はMn系分散相による分散強化とMgによる固溶強化が期待できるとあるが、強度とは別に伝熱機能への影響はないか。

（回答）

アルミニウムの導電率、熱伝導率などの物理的性質は、アルミニウムの純度の影響が大きく、純度が高くなるほど、導電率、熱伝導率は高くなる。[1]

図aにAl-Mg合金の熱伝導率と温度の関係に及ぼすMg添加量の影響を示す。

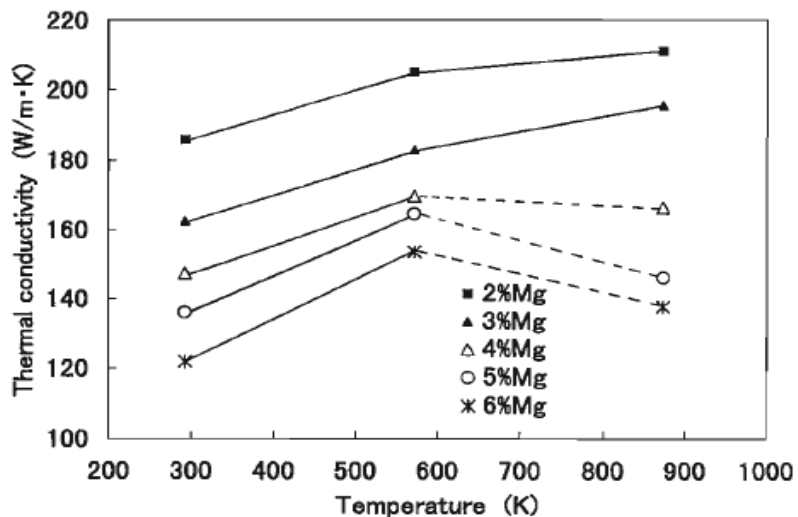
経年変化によりアルミニウム合金の純度が変化することはなく、熱伝導率などの物理的性質に有意な変化は生じない。

また、熱物性に対する60年の設計貯蔵期間における熱ばく露に伴う過時効の影響については、補足説明資料1-1 9.1項においてHZ-A3004-H112の初期材と過時効熱処理材の熱物性値が試験で確認されており、試験結果から**初期材と過時効熱処理材の熱物性値に有意な差のないことを確認している。**

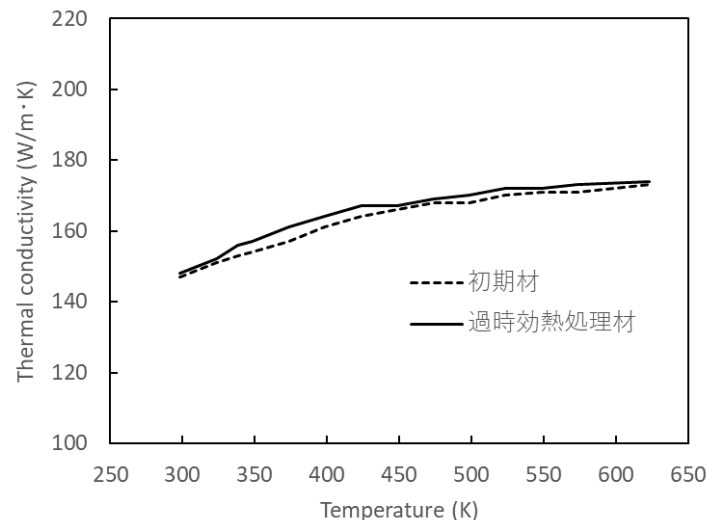
図bにHZ-A3004-H112の初期材と過時効熱処理材の熱伝導率と温度の関係を示す。

したがって、熱物性に対する60年の設計貯蔵期間における熱ばく露に伴う過時効の影響は、無視し得るほどに小さいと推察されることから**伝熱機能への影響はない。**

(つづき)



図a Al-Mg合金の熱伝導率と温度の関係に及ぼすMg添加量の影響 [2]



図b HZ-A3004-H112の初期材と過時効熱処理材の熱伝導率と温度の関係

指摘事項No.14

バスケットの長期健全性について、熱的に温度に耐えるという記載があるが、強度においてMgの強化機構が長期的に低減すること及びMgの固溶強化の低減が設計強度に反映されているという記載がないので説明を追記すること。

【回答】

アルミニウム合金に添加されたMgは母相中に固溶され、過飽和に固溶されたMgは時間の経過とともに平衡固溶度まで徐々に減少し、固溶限を超えるMgはMg₂Si等の金属間化合物を形成して析出する。これに伴い、過飽和から平衡固溶度まで**Mg固溶量が減少**することにより、**Mgによる固溶強化が低下**し、材料強度が低下する恐れがある。[3] [4]
(時間の経過に伴って強度が低下する現象を過時効という)

HZ-A3004は、**計算材料科学の計算結果に基づく化学成分の調整（Mg添加量の制限）及び過時効熱処理（）**により、設計貯蔵期間中の熱ばく露に伴う過時効条件（200℃→100℃×60年）を保守的に模擬した機械試験用供試材を製作し、その機械試験用供試材の材料試験から取得した材料特性を保守的に包絡するように設計用強度を設定することにより、過時効によりMgによる固溶強化が低下したHZ-A3004-H112の強度を包絡できる。

以上の説明を補正に盛り込むこととする。

【補足】

化学成分の調整は、Mg系析出物に関係している。

過時効熱処理条件は、Mg系析出物及びMnに関係している。

指摘事項No.15

設計貯蔵期間ではバスケットの温度低下が生じるが、冷却速度がバスケット材料の金属組織変化にあたる影響について、どのように考慮されているかを示すこと。

【回答】

設計貯蔵期間中にバスケット材料の温度が低下しない場合(200℃×60年)におけるMgの固溶強化およびMn系分散相の分散強化は、温度が低下する場合(200℃→100℃×60年)と比較して同等ないしは保守的と推察される。そのため、**材料強度は温度が低下しない条件(200℃×60年)によって保守的に評価できる。**

【説明】 Mg固溶量およびMn系分散相に対する冷却速度の影響の考え方

【Mg固溶量に対する冷却速度の影響】

図aは、計算材料科学を用いて設計貯蔵期間の熱ばく露を受けたHZ-A3004-H112材のMg固溶量を推定した結果を示す。200℃→100℃×60年保持後におけるHZ-A3004-H112材のMg固溶量は200℃×60年保持後と同等かわずかに低く、**Mgによる固溶強化は200℃×60年の熱ばく露によって保守的に評価できる。**

【Mn系分散相の粗大化に対する冷却速度の影響】

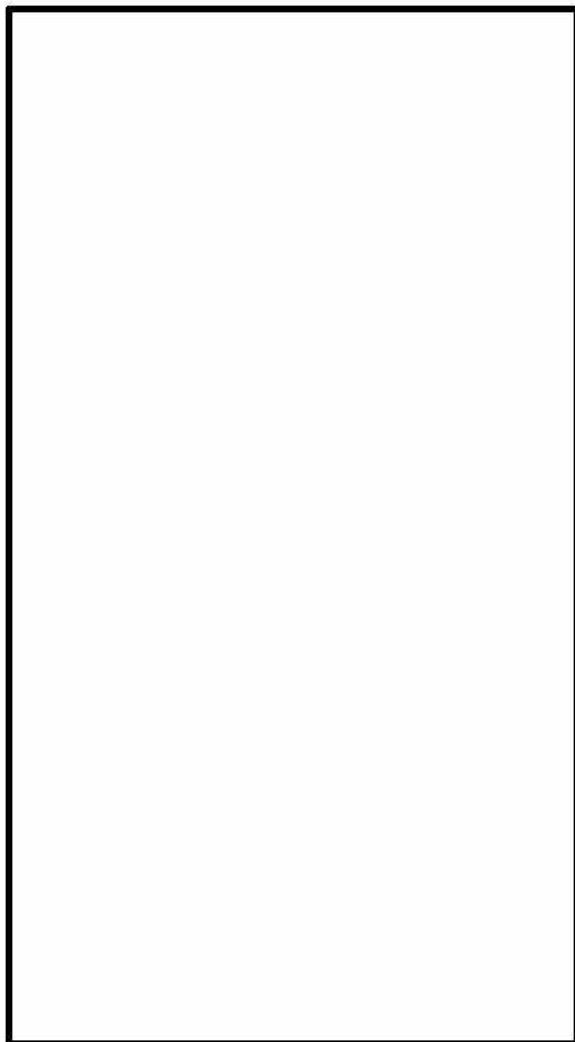
Mn系分散相の粗大化は、Al中のMnの拡散に律速される。200℃×60年保持後のMnの拡散距離は、200℃→100℃×60年保持後よりも大きく(図b、表c)、**Mn系分散相の粗大化による分散強化は、200℃×60年の熱ばく露の方が、温度が低下する場合よりも保守的に評価できる。**

(つづき)

設計貯蔵期間の保持条件	保持後のMg固溶量 [mass%]
200°C × 60年	<input type="text"/>
200°C → 100°C × 60年	<input type="text"/>

図a 計算材料科学による設計貯蔵期間を経過したHZ-A3004-H112のMg固溶量の推定結果

(つづき)



金属間化合物の粗大化は、化合物を形成する元素のなかで拡散係数が最も小さい元素に律速される。

Mn系分散相はAl、Fe、Mnで構成されるが、分散相を構成する元素の中でMnの拡散係数が最も小さい。（図b）

200℃×60年保持したときのMnの拡散距離は、200℃→100℃×60年よりも大きい。（c表）

以上より、**Mn系分散相の粗大化による分散強化は、バスケット材料の温度が低下するよりも、200℃×60年の熱ばく露が保守的な評価になる。**

表c 設計貯蔵期間および過時効熱処理によるMnの拡散距離（注1）

設計貯蔵期間の熱ばく露条件	拡散距離[nm]
200℃×60年	<input type="text"/>
200℃→100℃×60年	<input type="text"/>

大きい

（注1）：拡散距離の導出方法は、指摘事項No.17の回答で説明

図b Alの自己拡散係数およびAl中における不純物元素の拡散係数^[5]

指摘事項No.16

過時効熱処理条件の設定にラーソン・ミラー・パラメータを適用しているが、その妥当性を示すこと。

【回答】

設計貯蔵期間におけるHZ-A3004-H112材の金属組織変化は、**アルミニウム中の原子が拡散することによって生じるが、拡散の温度依存性はアレニウスの関係に従う。**

ラーソン・ミラー・パラメータは、アレニウスの式から導出されるものであり、ラーソン・ミラー・パラメータを用いた過時効熱処理条件の設定は妥当である。

アルミニウムの金属組織変化やクリープ特性をLMPで整理できることを確認しており、アルミニウム中の元素の拡散が支配的になる現象については、LMPによる温度-時間の換算が可能である。

次頁以降で詳細を述べる。

【補足】

設計貯蔵期間(200℃×60年)では、T相(AlMgCuZn)が析出してMg固容量が低下する。「**Mgの固容量**」については、**過時効熱処理のみでは模擬できない**ため、計算材料科学により設計貯蔵期間後のMg固容量を予測し、**機械試験用供試材のMg添加量を保守的に低減することで模擬している。**

(つづき)

【説明】 ラーソン・ミラー・パラメータの適用の妥当性に関する説明

23Pは、“アレニウスの式”と“金属における拡散係数”の関係を示す。金属の相変態、析出、回復、再結晶における拡散の役割は大きく、拡散のしやすさを表す**拡散係数の温度依存性は、理論的にも実験的にもアレニウスの関係に従う**と言われている^[6]。

24Pは、ラーソン・ミラー・パラメータ（以下「LMP」）とアレニウスの式の関係を示す。LMPは、反応速度論に基づくアレニウスの式から導出される**温度と時間を一つのパラメータで整理するもの**であり^[7]、**金属中の元素の拡散を扱うことができる**。

図aに示すHZ-A3004-H112材の応力－定常クリープ速度プロットは、LMPで整理した予測線とよく一致しており、LMP、つまり**アレニウスの関係に従うことが明らか**である。

図bおよび図cは、様々の温度で熱処理した純アルミニウムの再結晶率を示す。LMPでよく整理できており、**熱処理に伴う金属組織変化に対しても、LMPによる整理は有効**である。

したがって、アルミニウム合金の熱処理で生じる析出、固溶、再結晶などの拡散が関わる金属組織の変化に対してアレニウスの式を適用することは妥当であり、**過時効熱処理条件の設定にLMPを適用することができる**。

参考文献

文献[6]では、熱処理に関連する現象における拡散の役割は大きく、拡散係数の温度依存性は、理論的または実験的にもアレニウスの関係に従うことが示されている。

文献[7]では、アレニウスの式は温度の上昇とともに増大する化学反応や拡散などの輸送現象の速度、及び活性化エネルギーの関係から、ある化学反応の速度を予測する式であり、LMPは反応速度論の観点から温度と時間を一つのパラメータで整理する方法であることが示されている。

(つづき)

【説明】“アレニウスの式” と “金属における拡散係数” の関係

アレニウスの式 [8]

$$k = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \dots\dots ①$$

k : 反応速度定数
A : 頻度因子
Q : 活性化エネルギー
R : 気体定数
T : 保持温度

金属における拡散係数と温度の関係式 [9]

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \dots\dots ②$$

アレニウス型の温度依存性

D : 拡散係数
D₀ : 振動数項
Q : 活性化エネルギー
R : 気体定数
T : 保持温度

アレニウスの式(①式)は、化学反応のほかに**拡散**や粘性などの**輸送反応**や各種機械的特性の温度依存性を表すのにも適用される。

金属中の元素の拡散係数は、アレニウス型の温度依存性を示す(②式)。

➔ **アレニウスの式は金属における元素の拡散を扱うことができる。**

参考文献

文献[8]では、アレニウス式が示されている。

文献[9]では、金属における拡散係数と温度の関係の式が示されている。

10.2 指摘事項（コメント）への回答

(つづき)

【説明】 ラーソン・ミラー・パラメータとアレニウスの式の関係

LMPは、アレニウスの式から導出される温度と時間を一つのパラメータで整理するものであり[7]、導出過程を以下に示す。

アレニウスの式 $k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \cdots (1)$

時間tにおける反応率
(金属組織変化など) $\ln \Delta P = k \cdot t \cdots (2)$

(2)式に(1)式を代入すると、

$$t = A' \exp\left(\frac{E}{RT}\right)$$

自然対数
に変換

$$\ln t = \underbrace{\ln A'}_B + \frac{E}{RT}$$

常用対数
に変換

$$\log t = \frac{B}{2.303} + \frac{E}{2.303R} \times \frac{1}{T}$$

-Cとする Pとする

$$\log t = -C + P \times \frac{1}{T}$$

移項

$$P = T(\log t + C)$$

ラーソン・ミラー・パラメータ

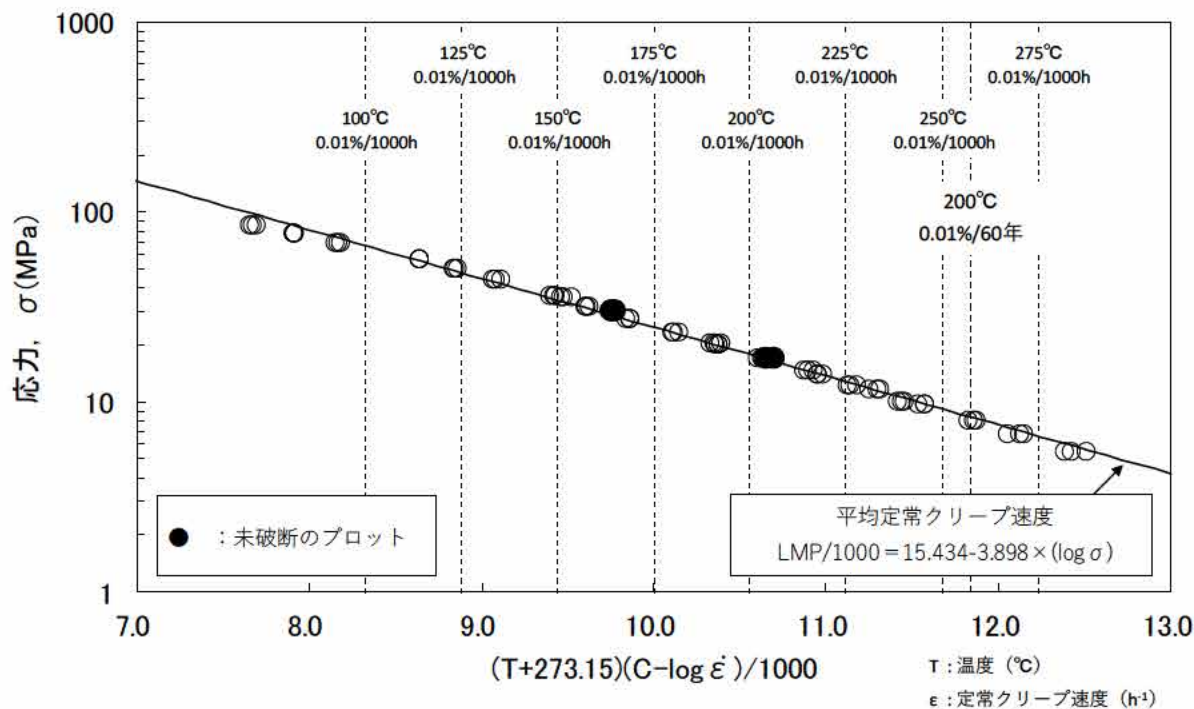
ここで、

k : 反応速度定数	A : 頻度因子
T : 絶対温度	A' : $1/A \ln(\Delta P)$
E : 活性化エネルギー	t : 時間
R : 気体定数	ΔP : 時間tにおける反応率

ラーソン・ミラー・パラメータは、アレニウスの式から導出される。

➔ LMPは金属中の元素の拡散を扱うことができる。

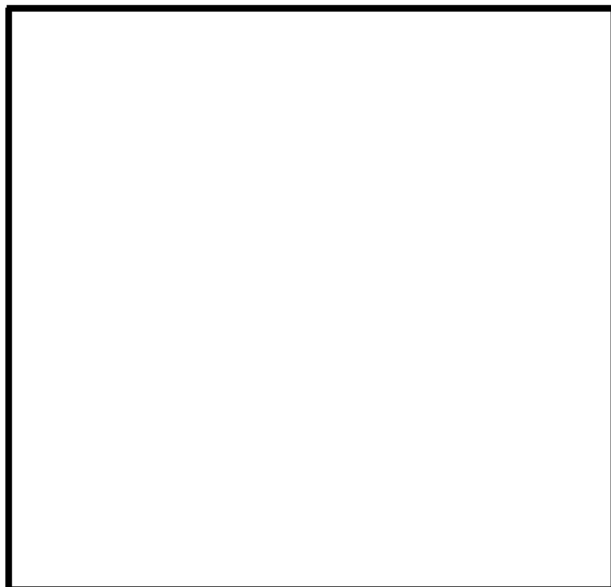
(つづき)



図a LMPで整理したHZ-A3004-H112材の応力-定常クリープ速度プロット

(つづき)

【説明】 アルミニウムの熱処理に伴う金属組織変化のLMPによる整理



図b アルミニウムの再結晶率と時間との関係[10]



図c アルミニウムの再結晶率と時間のLMPプロット

様々の温度で熱処理した**純アルミニウムの再結晶率**は、LMPでよく整理できる。

熱処理に伴う金属組織変化に対しても、LMPによる整理は有効である。

参考文献

文献[10]では、アルミニウムの再結晶率と時間との関係が図示されている。

(つづき)

【説明】 設計貯蔵期間とLMPが等価な熱処理した後のMg固溶量

設計貯蔵期間とLMPが等価な熱処理を行ったHZ-A3004-H112材のMg固溶量の計算結果

- 計算材料科学による計算の結果、LMPが等価な熱処理を施したHZ-A3004-H112材のMg固溶量はほぼ等しく、過時効熱処理におけるMg固溶量の変化はLMPで模擬できてくる。
- 設計貯蔵期間(200℃×60年)のみ、T相(AlMgCuZn)が析出してMg固溶量が低下しており、LMPでは整理できない。

(つづき)

これまでの検討を踏まえ、設計貯蔵期間に生じる金属組織変化の模擬方法を整理して以下に示す。

設計貯蔵期間に生じる金属組織変化およびその模擬方法

設計貯蔵期間に生じる金属組織変化	金属組織変化の模擬方法
① Mg固容量の低下	<p>LMPに基づいた過時効熱処理のみでは模擬できない。</p> <ul style="list-style-type: none">●設計貯蔵期間の熱ばく露において、T相(AlMgCuZn)が析出してMg固容量が低下するため、LMPによる整理ができない。➔計算材料科学により設計貯蔵期間後のMg固容量を予測し、機械試験用供試材のMg添加量を低減することで保守的に模擬した。
② Mn系分散相の粗大化	<p>LMPに基づいた過時効熱処理により模擬した。</p> <ul style="list-style-type: none">●②、③、④はアルミニウム中の元素の拡散が支配的になる現象であり、LMPによる温度-時間の換算が可能
③ 転位密度の低下	<ul style="list-style-type: none">●「②Mn系分散相の粗大化」については、拡散距離の観点からも、設計貯蔵期間を過時効熱処理で模擬できることを確認している。
④ 結晶粒の粗大化	<ul style="list-style-type: none">➔LMPに基づいた過時効熱処理条件は、②、③、④の金属組織変化に対し保守的である。

指摘事項No.17

設計貯蔵期間保持されたバスケット用材料におけるMn系分散相の粗大化が過時効熱処理で模擬できることを説明すること。

【回答】

Mn系分散相の粗大化は、Mnの拡散により生じる。過時効熱処理条件は、拡散の温度依存性を扱うLMPに基づいて設定しており、**過時効熱処理によるMn系分散相の粗大化の模擬は妥当である。**

【補足】

・ Mn系分散相の粗大化は、拡散距離の観点からも、**設計貯蔵期間よりも過時効熱処理の方が保守的**であることを確認した。

次頁以降で詳細を述べる。

Mn系分散相の粗大化
LMPに基づいた過時効熱処理で模擬



**Mn系分散相の粗大化は、
拡散距離の観点からも、過時効熱
処理が保守的であることを確認**

【説明】 過時効熱処理によるMn系分散相の粗大化の模擬に関する妥当性

拡散距離の観点からも設計貯蔵期間を経たHZ-A3004-H112材のMn系分散相の粗大化は、**過時効熱処理で保守的に模擬できている。**

金属間化合物の粗大化は、化合物を構成する元素の拡散によって生じ、熱ばく露中の元素の**拡散距離**が大きいほど粗大化は生じやすい。

金属間化合物の粗大化は、化合物を構成する元素のなかで**拡散係数が最も小さい元素に律速される**と考えられる。Mn系分散相($Al_6(Fe,Mn)$)はAl、Fe、Mnで構成されるが、図bに示すように、分散相を構成する元素の中で**Mnは拡散係数が最も小さい**。したがって、設計貯蔵期間熱ばく露されたものよりも過時効熱処理した材料の方がMnの拡散距離が大きければ、Mn系分散相の粗大化による分散強化の低下を保守的に模擬できているといえる。

なお、拡散距離はLMPで評価できないため、文献に基づき評価した。

次ページに示す①式および②式を用いて、設計貯蔵期間を経たHZ-A3004-H112材および過時効熱処理を施した機械試験用供試材におけるMnの拡散距離を評価した。ここで、①式はある温度Tにおける**拡散係数D**を示し、②式はある保持時間tにおける**拡散距離X**を示す^{[9][11]}。なお、Al中におけるMnの振動数項 D_0 および活性化エネルギーQは文献[5]の値を引用した。

参考文献	文献[9]では、拡散係数Dを表す式が示されている。
	文献[11]では、拡散距離Xを表す式が示されている。
	文献[5]では、Al中における元素の拡散に関するデータが系統的にまとめられている。

(つづき)

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \dots\dots\dots \textcircled{1} \text{ [9]}$$

$$X = \sqrt{2D \cdot t} \dots\dots\dots \textcircled{2} \text{ [11]}$$

ここで、

X : 拡散距離	R : 気体定数
D : 拡散係数	T : 保持温度
D ₀ : 振動数項	t : 保持時間
Q : 活性化エネルギー	

表aより、Mnの拡散距離は、**設計貯蔵期間の熱ばく露よりも過時効熱処理の方が大きい**ことがわかる。したがって、拡散距離の観点からも設計貯蔵期間を経たHZ-A3004-H112材のMn系分散相の粗大化は、**過時効熱処理で保守的に模擬できる**といえる。

表a 設計貯蔵期間および過時効熱処理によるMnの拡散距離

熱ばく露の条件	拡散距離[nm]
設計貯蔵期間 (200°C × 60年)	7.6
過時効熱処理 (<input style="display: inline-block; vertical-align: middle;" type="text"/>)	<input style="width: 50px; height: 20px; border: 1px solid black;" type="text"/>

(つづき)



図b AIの自己拡散係数およびAI中における不純物元素の拡散係数^[5]（注1）

【参考】 設計貯蔵期間経過したHZ-A3004-H112材および過時効熱処理された機械試験用供試材におけるMnおよびMgの固容量の変化について

表c 計算材料科学による設計貯蔵期間経過したHZ-A3004-H112材および過時効熱処理された機械試験用供試材におけるMnおよびMgの固容量の変化の計算結果

材料	熱ばく露の条件	添加元素の固容量 [mass%]	
		Mn	Mg
HZ-A3004-H112材	・ 設計貯蔵期間 (200°C→100°C×60年)経過後	<input type="text"/> (注1)	<input type="text"/>
機械試験用供試材	・ 過時効熱処理 (<input type="text"/>)後	<input type="text"/>	<input type="text"/>

大
▼
小
保守的
大
▼
小
保守的

(注1) : 200°C×60年熱ばく露されたHZ-A3004-H112材のMnの固容量は、200°C→100°C×60年とほぼ等しい。

過時効熱処理した機械試験用供試材は、設計貯蔵期間を経たHZ-A3004-H112材よりもMnおよびMgの固容量が小さく、固溶強化が保守的になる。

指摘事項No.18

HZ-A3004-H112材において設計貯蔵期間にT相(AlCuMgZn)が析出することによる強度への影響を定量的に示すこと。

【回答】

Mgの添加量を減らすとともに過時効熱処理した機械試験用供試材により、設計貯蔵期間を経たHZ-A3004-H112材のT相析出を含む強度低下を保守的に模擬できる。したがって、**T相析出による強度の低下について特別な配慮は不要**である。

次頁以降で詳細を述べる。

【説明】 T相の析出に伴う強度への影響に関する説明

【T相による析出強化について】

設計貯蔵期間を経たHZ-A3004-H112材は、定性的にT相の析出による析出強化が見込まれる。一方、過時効熱処理した機械試験用供試材は、T相が析出しておらず、**T相の析出強化に対して保守的**である。

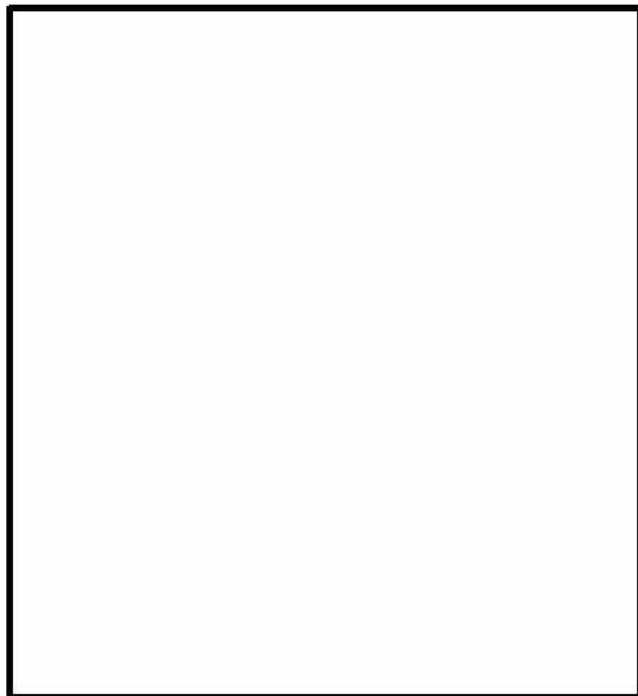
【T相の析出による固溶強化の変化について】

設計貯蔵期間を経たHZ-A3004-H112材は、T相(AlMgCuZn)が析出することで、母相におけるCu、Zn、Mgによる固溶強化が低下する。

表aの換算表を用いてCu、Zn、Mgの固溶強化への寄与を計算した。結果は表bおよび表cに示す通りであり、機械試験用供試材(初期材、Cu,Zn,Mgは全て固溶していると仮定)は、設計貯蔵期間を経たHZ-A3004-H112材よりも耐力に対するCu、Zn、Mgの固溶強化への寄与が**小さく保守的**である。

10.2 指摘事項（コメント）への回答

表a アルミニウムの固溶強化に対する
いろいろな元素の寄与^[12]



機械試験用供試材は、HZ-A3004-H112材よりもMgの添加量を減らすことで、T相析出に伴う強度低下を保守的に模擬できる。

表b 設計貯蔵期間(200℃×60年)保持された
HZ-A3004-H112材のCu、Zn、Mgの
固溶量および固溶強化への寄与^(注1)

		Cu	Zn	Mg
①	設計貯蔵期間経過後の固溶量[mass%]	[Redacted]		
②	①が固溶強化におよぼす寄与[MPa]	[Redacted]		
		合計 19.28 [MPa]		

(注1)：本表における不純物元素の固溶量は計算材料科学の計算結果を記載している。

表c 機械試験用供試材に添加されたCu、Zn、Mgの
固溶強化への寄与^{(注2)(注3)}

		Cu	Zn	Mg
③	添加量[mass%]	[Redacted]		
④	③が固溶強化におよぼす寄与[MPa]	0.47	0.05	18.57
		合計 19.09 [MPa]		

(注2)：本表における不純物元素の添加量は機械試験用供試材のミルシート3標本の平均値を記載している。

(注3)：Cu,Zn,Mgは全て固溶していると仮定した。

大
▽
小

保守的

参考文献 文献[12]では、アルミニウム中に固溶した様々の不純物元素が耐力におよぼす寄与が記載されている。

（つづき）

【説明】 T相の析出に伴う脆化について（補足）

HZ-A3004-H112材は、T相の析出による脆化はほとんどないと推察される。

【アルミニウム合金の靱性】

・アルミニウム合金の結晶構造は、単位胞が面心立方格子であり、へき開強度が高く、ぜい性破壊が生じにくいことが知られており、HZ-A3004-H112材は靱性に優れた材料といえる。

【脆化におよぼす析出物の大きさの影響】

・図dはAl-Zn-Mg-Cu合金のTEM組織^[13]の例を示すが、析出物の大きさは数nmである。
一方、図eに示すHZ-A3004-H112材のMn系晶出物の大きさは25 μ m程度である。
図fは欠陥寸法の大きさと材料の靱性の関係（模式図）を示す。析出物を欠陥（材料に生じた穴）と考えた場合、T相はMn系晶出物に比べてはるかにサイズが小さく、脆化はほとんどないと推察される。

【T相が析出した材料の破面】

・図gはAl-9.1%Zn-2.2%Mg-2.4%Cu合金を120 $^{\circ}$ Cで24hr時効したSEM組織を示す^[14]。
・表hに示す通り、多量のCu、Zn、Mgを含みT相が粗大化した材料においても、シャルピー試験後の破面は、析出物を核としたデンプルが全面に生じており、一般的な延性破壊である。

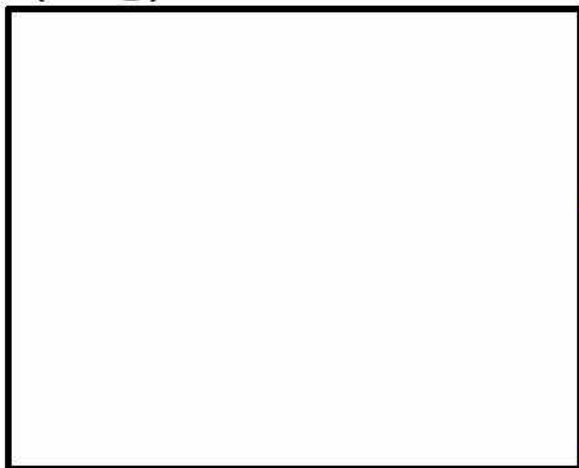
以上より、**HZ-A3004-H112材は、Cu、Zn、Mgの添加量が少なく、T相の析出による脆化はほとんどないと推察される。**

参考文献

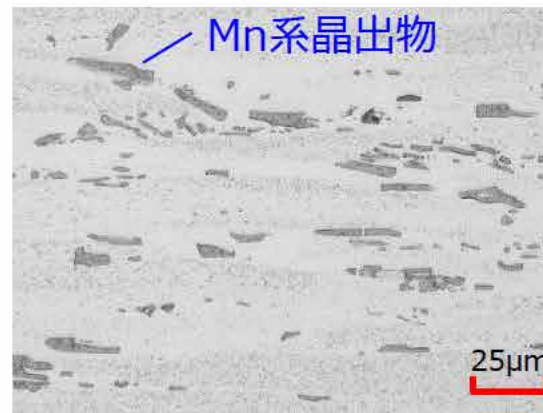
文献[13]では、AlCuMgZn合金の析出物についてTEM組織が示されている。

文献[14]では、AlCuMgZn合金の析出物のSEM組織や衝撃試験結果が示されている。

(つづき)



多量の不純物元素が添加された合金においても、析出物の大きさは**数nm**である。



Mn系晶出物の大きさは約**25µm**である。

図d Al-2.7%Zn-3.2%Mg-0.2%Cu合金を150℃で60,000sec時効したTEM組織^[13]

図e HZ-A3004-H112材のミクロ組織

文献とHZ-A3004-H112における不純物元素の量の比較

[mass%]

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Al
文献[11]	-	-	0.20	-	3.20	2.70	残り
			↓		↓	↓	
HZ-A3004-H112	0.15 以下	0.7 以下	0.05 以下	1.1 ~1.5	1.0 ~1.3	0.05 以下	残り

文献の
1/4以下

文献の
1/2以下

文献の
1/50以下

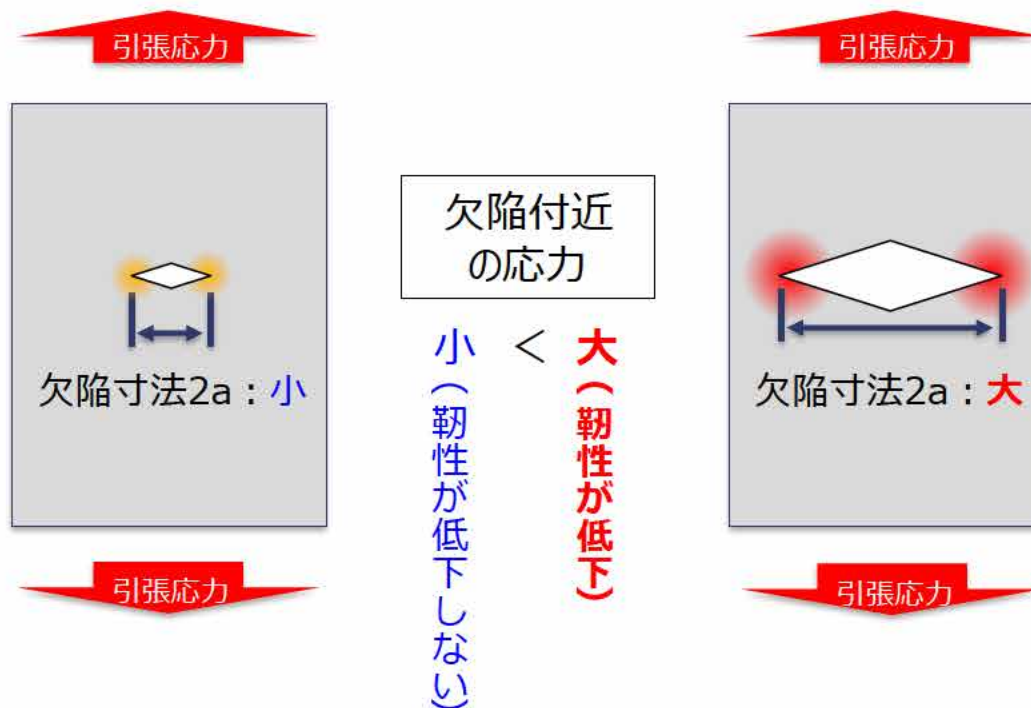
(つづき)

応力拡大係数

$$K = \sigma \times \sqrt{\pi a}$$

※ σ : 応力
 a : 欠陥寸法

材料に付与される欠陥（材料に生じた穴）の寸法が大きくなると、欠陥付近の応力も大きくなる。



図f 材料に付与された欠陥の大きさと材料の靱性の関係（模式図）

材料に大きな欠陥が付与された場合、欠陥付近の応力が高くなり、材料の靱性が低下する。

析出物を欠陥（材料に生じた穴）として考えた場合、T相はMn系晶出物に比べてはるかにサイズが小さく、脆化はほとんどないと推察される。

(つづき)

図g Al-2.4%Cu-2.2%Mg-9.1%Zn合金を120℃で24hr
時効した断面組織と衝撃試験片のSEM破面^[14]

表h 文献とHZ-A3004-H112材における不純物元素の量の比較

	Cu	Zn	Mg
文献[13]	2.4 %	9.10 %	2.2 %
HZ-A3004-H112	0.05 %以下	0.05 %以下	1.0～1.3 %

多量のCu、Zn、Mgを含みT相が粗大化した材料においても、シャルピー衝撃試験後は一般的な延性破面を呈している。
HZ-A3004-H112材は、文献[13]よりもCu、Zn、Mgの量が少なく、T相の析出による脆化はほとんどないと推察される。

【参考】 設計貯蔵期間経過したHZ-A3004-H112材および過時効熱処理された機械試験用供試材における析出物の体積率変化について

表 計算材料科学による設計貯蔵期間および過時効熱処理後における析出物の体積率の計算結果

材料	熱ばく露の条件	析出物の体積率 [%]		
		Al ₆ (Fe,Mn)	Mg ₂ Si	T相_AlCuMgZn
HZ-A3004-H112材	・ H112材 (初期材)			
	・ 設計貯蔵期間 (200°C→100°C×60年)経過後			
機械試験用供試材	・ 過時効熱処理 () 後			

【補足：Mn系分散相Al₆(Fe,Mn)の分散強化への寄与について】

Mn系分散相が新しく生成して数密度が高くなると分散強化が大きくなって材料強度が向上するが、HZ-A3004-H112材の初期材と設計貯蔵期間熱ばく露された材料のAl₆(Fe,Mn)の量はほぼ等しく、Mn系分散相の分散強化による強度への寄与は設計貯蔵期間の熱ばく露で増加しないと予測される。

過時効熱処理した機械試験用供試材は、設計貯蔵期間を経たHZ-A3004-H112材よりもMnが多く析出すると予測される(上表および図i)が、機械試験用供試材のMn系分散相は、過時効熱処理で数密度が増えないことをTEM観察により確認している(図j)。



設計貯蔵期間を経たHZ-A3004-H112材および過時効熱処理した機械試験用供試材の**材料強度に対する分散強化の寄与は同等**である。

(つづき)



図i 設計貯蔵期間（200℃→100℃×60年）熱ばく露されたHZ-A3004-H112材および過時効熱処理した機械試験用供試材のMn固溶量の時間変化の計算結果

HZ-A3004-H112材	機械試験用供試材	
H112材(初期材)	H112材(初期材)	過時効熱処理材
Mn系分散相(視野内の濃い斑点)		

機械試験用供試材のMn系分散相の数密度は、過時効熱処理で増えていない。

図j HZ-A3004-H112材および機械試験用供試材のTEM組織観察結果

10.2 指摘事項（コメント）への回答

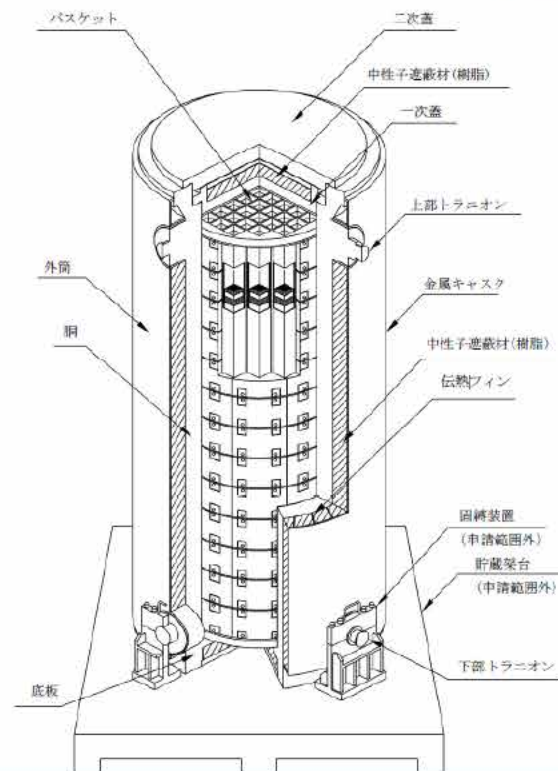
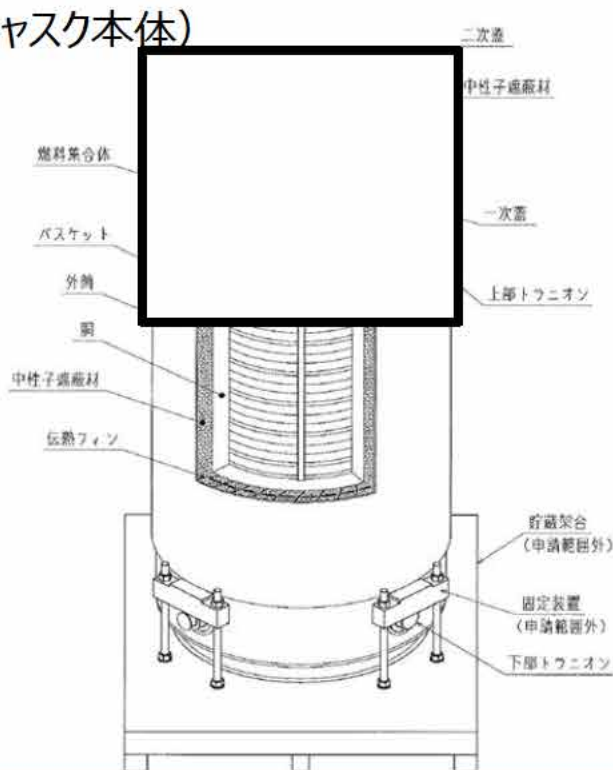
No.	参考文献
[1]	遠藤昌也, 渡辺英雄, 高純度アルミニウム, 軽金属, 第61巻 第5号, (2011), p226-p236
[2]	長海博文, Al-Mg合金の高温物性値に及ぼすMg添加量の影響, 軽金属, 第50巻 第2号, (2000), p49-p53
[3]	鈴木覚, Al-Mn系合金, 軽金属, アルミニウムの組織と性質, (1991), 付録p119-p130
[4]	天野英隆, 小松伸也, 池田勝彦, 河本知広, アルミニウム中のMgの523K以下での平衡固溶度, 軽金属, 第52巻 第5号, (2002), p210-p215
[5]	平野賢一, アルミニウム中の拡散, 軽金属 Vol.29, No.6, (1979), p249-262.
[6]	平野賢一, アルミニウムおよびアルミニウム合金中の拡散, 軽金属 Vol.19, No.12, (1969), p577-590.
[7]	(社) 日本熱処理技術協会, 熱処理用語辞典, 日刊工業新聞社, (2002), p10-p11 p453.
[8]	加茂ら, 初歩の化学反応速度理論, 化学と教育 第44巻 第2号(1996), p114-118
[9]	藤川辰一郎, 拡散の基礎, 軽金属 Vol.46 No.4, (1996), p202-215.
[10]	里達雄ら, アルミニウム大全, 日刊工業新聞社, (2016) ,p144.

10.2 指摘事項（コメント）への回答

No.	参考文献
[11]	飯島嘉明, 平野賢一, 金属中の水素の拡散, 日本金属学会会報 第14巻 第8号, (1975), p599-620.
[12]	(一社) 日本軽金属学会, アルミニウムの組織と性質, (1991), p160.
[13]	松田健二, 里達雄ほか, Al-Mg-X(X=Si,Ge,Zn)合金の時効初期における微細析出物に対するCuの影響, 軽金属 第67巻 第5号, (2017), p186-192.
[14]	岩村信吾, 箕田正, 吉田英雄, 「Al-Zn-Mg-Cu合金の強度および靱性に及ぼす成分の影響」, 軽金属 60巻 2号, (2010), p75-p80

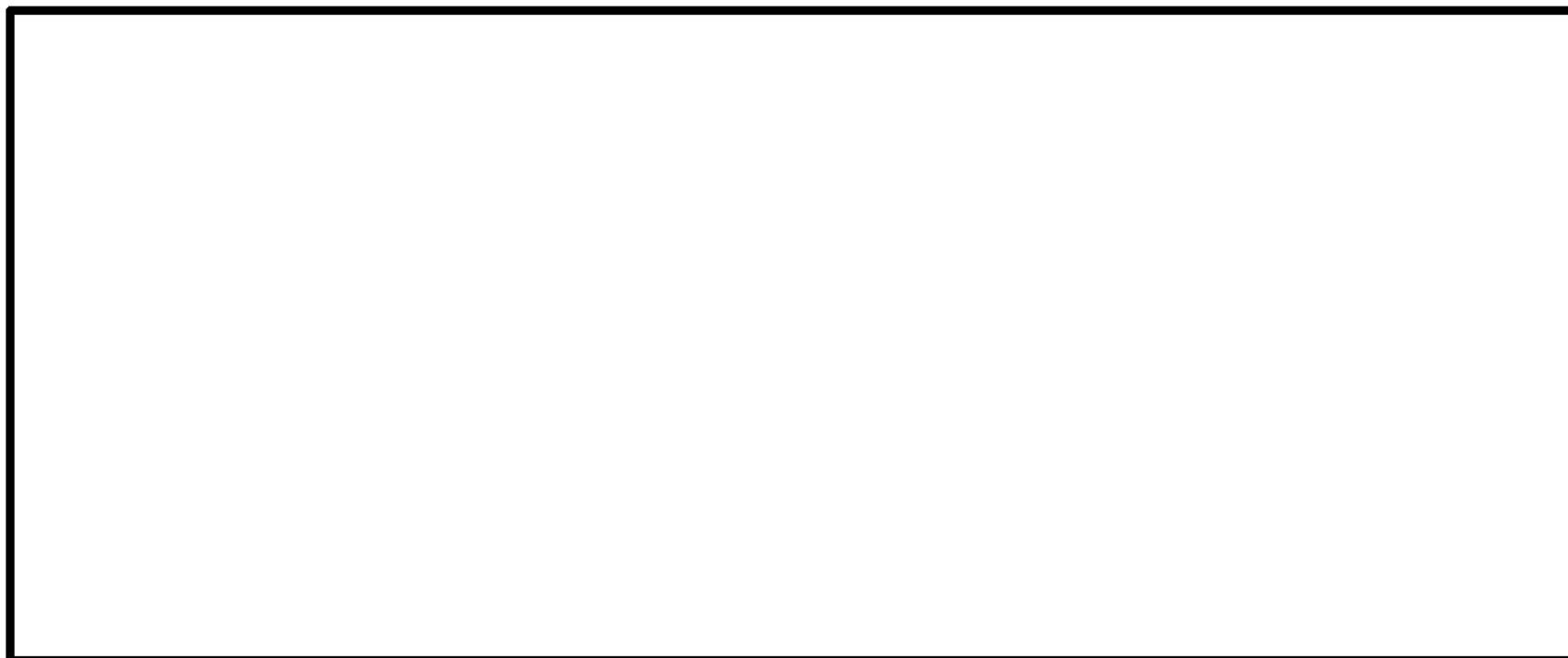
**参考. 承認を受けたキャスクとの違い
(Hitz-B52型・MSF-24P(S)型・HDP-69CB(B)型)**

● 構造の比較 (キャスク本体)



項目	Hitz-P24型	Hitz-B52型
胴/底板	・低合金鋼 (レジンカバーはステンレス鋼)	・炭素鋼
外筒	・炭素鋼	・炭素鋼
一次蓋/二次蓋	・低合金鋼	・鍛造ステンレス鋼 (一次蓋)、炭素鋼 (二次蓋)
外筒	・炭素鋼	・炭素鋼
伝熱フィン	・銅	・銅
バスケット	・アルミニウム合金、ステンレス鋼、析出硬化系ステンレス鋼、ほう素添加アルミニウム合金 (中性子吸収材)、ほう素添加ステンレス鋼 (補助遮蔽体兼中性子吸収材)	・炭素鋼、アルミニウム合金 (除熱用)、ほう素添加アルミニウム合金 (中性子吸収材)

- 構造の比較 (バスケット)



項目	Hitz-P24型	Hitz-B52型
構造	<p> プレート (アルミ合金製) を軸方向に連結 ・内側部と外側部に分割され、外側部は本体へ固定 ・中性子吸収材 (B-Al, B-SUS) はプレートに設けたスリットに挿入 ・水ギャップを設置 (PWR用では一般的な構造) </p>	<p> ・炭素鋼製のコンパートメント (角チューブ) 、スペーサ及びサポートプレートで構成された格子構造 ・バスケットは一体組立構造で容器本体に挿入 ・中性子吸収材 (B-Al) はコンパートメント間に設置されたスペーサによる間隙に配置 ・水ギャップなし (BWR用では一般的な構造) </p>

参考. 承認を受けたキャスクとの違い（地震による損傷の防止）

● 地震による損傷の防止に対する設計方針の比較

確認内容		設計方針				差異
		Hitz-P24型	Hitz-B52型	MSF-24P(S)型	HDP-69BCH(B)型	
地震力		水平：2300Gal 鉛直：1600Gal	水平：1.4G 鉛直：0.87G	水平：2300Gal 鉛直：1600Gal	水平：2300Gal 鉛直：1600Gal	MSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型と同じ
設計方針	安全機能維持	・基礎等に固定する設置方法（縦置き）とし、地震力に対してその安全機能が損なわれないよう設計	・基礎等に固定する設置方法（縦置き）とし、地震力に対してその安全機能が損なわれないよう設計	・蓋部が金属部へ衝突しない設置方法（横置き）とし、地震力に対してその安全機能が損なわれないよう設計	・基礎等に固定する設置方法（縦置き及び横置き）及び蓋部が金属部へ衝突しない設置方法（横置き）とし、地震力に対してその安全機能が損なわれないよう設計	Hitz-B52 型 ・ HDP-69BCH(B)型と同じ
荷重及び荷重の組合せ	地震力以外の荷重	貯蔵時に想定される荷重	貯蔵時に想定される荷重	貯蔵時に想定される荷重	貯蔵時に想定される荷重	同じ考え方
	荷重の組合せ	地震力と地震力以外の荷重による組合せ	地震力と地震力以外の荷重による組合せ	地震力と地震力以外の荷重による組合せ	地震力と地震力以外の荷重による組合せ	同じ考え方
許容限界	規格等	金属キャスク構造規格等	金属キャスク構造規格等	金属キャスク構造規格等	金属キャスク構造規格等	同じ考え方（材料の違いによる許容限界の違いあり）
	閉じ込め機能	密封境界部がおおむね弾性範囲	密封境界部が弾性範囲	密封境界部がおおむね弾性範囲	密封境界部がおおむね弾性範囲	MSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型と同じ
	臨界防止機能	バスケットが臨界防止上有意な変形をおこさない	弾性状態に留まること	弾性状態に留まること	バスケットが臨界防止上有意な変形をおこさない	HDP-69BCH(B) 型 と同じ

● 地震による損傷の防止に対する設計方針の比較（つづき）

確認内容		設計方針				差異
		Hitz-P24型	Hitz-B52型	MSF-24P(S)型	HDP-69BCH(B)型	
静的解析 及び地震 応答解析	解析モデル 及び解析手 法	①下部トラニオン				HDP-69BCH(B)型と同じ
		工学式 (ねじ込み)	工学式 (ボルト固定)	工学式 (しまり嵌め)	工学式 (ねじ込み)	
		②兼用キャスク本体				Hitz-B52型と同じ考え方 (設計の違いによる差異あり)
		有限要素法 【ABAQUS】	有限要素法 【ABAQUS】 又は工学式	工学式	0.3m落下で代表 【ABAQUS】	
		③バスケット				MSF-24P(S)型・HDP- 69BCH(B)型と同じ考え 方（設計の違いによる差 異あり）
		工学式	有限要素法 【ABAQUS】 又は工学式	工学式	工学式	
	④伝熱フィン				MSF-24P(S)型と同じ	
工学式	-	工学式	-			
	地震力の組 合せ	水平地震力及び 鉛直地震力を不 利な方向に同時 に作用	水平地震力及び 鉛直地震力を不 利な方向に同時 に作用	水平地震力及び 鉛直地震力を不 利な方向に同時 に作用	水平地震力及び 鉛直地震力を不 利な方向に同時 に作用	同じ考え方
耐震性評 価	応力評価	許容限界を超えな いこと	許容限界を超えな いこと	許容限界を超えな いこと	許容限界を超えな いこと	同じ考え方
	疲労評価	-	-	-	疲労解析不要の 条件を満たすこと	Hitz-B52型・MSF- 24P(S)型と同じ考え方

● 津波による損傷の防止に対する設計方針の比較

確認内容		設計方針			差異
		Hitz-P24型	MSF-24P(S)型	HDP-69BCH(B)型	
津波による作用力		兼用キャスク告示で定める津波を考慮。 ・浸水深：10m ・流速：20m/s ・漂流物質量：100トン	兼用キャスク告示で定める津波を考慮。 ・浸水深：10m ・流速：20m/s ・漂流物質量：100トン	兼用キャスク告示で定める津波を考慮。 ・浸水深：10m ・流速：20m/s ・漂流物質量：100トン	同じ
基本方針	安全機能維持	津波による作用力に対して、安全機能を維持	津波による作用力に対して、安全機能を維持	津波による作用力に対して、安全機能を維持	同じ
設計・評価の方針	津波波力	「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針」に基づき設定	「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針」に基づき設定	「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針」に基づき設定	同じ
	漂流物の衝突荷重	「道路橋示方書・同解説（I 共通編・IV 下部構造編）」に基づき設定	「道路橋示方書・同解説（I 共通編・IV 下部構造編）」に基づき設定	「道路橋示方書・同解説（I 共通編・IV 下部構造編）」に基づき設定	同じ
	荷重の組合せ	・津波荷重 ・漂流物の衝突荷重	・津波荷重 ・漂流物の衝突荷重	・津波荷重 ・漂流物の衝突荷重	同じ

● 津波による損傷の防止に対する設計方針の比較（つづき）

確認内容		設計方針			差異
		Hitz-P24型	MSF-24P(S)型	HDP-69BCH(B)型	
設計・評価 の方針	評価手法	①一次蓋密封シール部及び一次蓋ボルト			
		有限要素法【ABAQUS】 ・津波荷重を包絡する設計荷重作用時評価	工学式 ・津波荷重作用時評価	有限要素法【ABAQUS】 ・津波荷重を包絡する0.3m落下荷重作用時評価	HDP-69BCH(B)型と同じ考え方（設計の違いによる差異あり）
		②外筒			
		工学式 ・応力評価 ・押し抜きせん断評価	工学式 ・応力評価	工学式 ・押し抜きせん断評価	MSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型と同じ考え方（設計の違いによる差異あり）
		③バスケット			
		工学式 ・津波荷重を包絡する設計荷重作用時評価	工学式 ・津波荷重作用時評価	工学式 ・津波荷重を包絡する0.3m落下荷重作用時評価	MSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型と同じ考え方（設計の違いによる差異あり）
		④伝熱フィン			
・外筒の評価結果をふまえて伝熱フィンが破断しないことを確認（注1）	・外筒の評価結果をふまえて伝熱フィンが破断しないことを確認（注1） ・応力評価（注2）	・外筒の評価結果をふまえて伝熱フィンが破断しないことを確認（注1）	MSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型と同じ		

（注1）キャスク径方向に荷重が作用した場合の評価方法

（注2）キャスク軸方向に荷重が作用した場合の評価方法

参考. 承認を受けたキャスクとの違い（外部からの衝撃による損傷の防止）

● 外部からの衝撃による損傷の防止に対する設計方針の比較

確認内容		設計方針			差異
		Hitz-P24型	MSF-24P(S)型	HDP-69BCH(B)型	
竜巻による作用力	最大風速	最大風速100m/sとして設計荷重を設定	最大風速100m/sとして設計荷重を設定	最大風速100m/sとして設計荷重を設定	同じ
	設計飛来物	トラック (注1)	トラック (注1)	トラック (注1)	同じ
基本方針	安全機能維持	竜巻による作用力に対して安全機能を維持	竜巻による作用力に対して安全機能を維持	竜巻による作用力に対して安全機能を維持	同じ
設計方針	飛来物の衝突荷重	飛来物の圧潰挙動を無視し、Rieraの式を用いて算出	飛来物の圧潰挙動を無視し、Rieraの式を用いて算出	飛来物の圧潰挙動を無視し、Rieraの式を用いて算出	同じ

(注1) 「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」解説表4.1に基づき、特定兼用キャスクに与える影響が最大となるものを選定

参考. 承認を受けたキャスクとの違い（外部からの衝撃による損傷の防止）

● 外部からの衝撃による損傷の防止に対する設計方針の比較（つづき）

確認内容		設計方針			差異
		Hitz-P24型	MSF-24P(S)型	HDP-69BCH(B)型	
設計方針 (つづき)	評価方法	①一次蓋密封シール部及び一次蓋ボルト			
		有限要素法【ABAQUS】 ・竜巻荷重を包絡する設計荷重作用時評価	工学式 ・竜巻荷重を包絡する津波荷重作用時評価	有限要素法【ABAQUS】 ・竜巻荷重を包絡する0.3m落下荷重作用時評価	HDP-69BCH(B)型と同じ考え方（設計の違いによる差異あり）
		②外筒			
		工学式 ・貫通厚さ評価(BRL式)	工学式 ・応力評価	工学式 ・貫通厚さ評価(BRL式)	HDP-69BCH(B)型と同じ
		③バスケット			
		工学式 ・竜巻荷重を包絡する設計荷重作用時評価	工学式 ・竜巻荷重を包絡する津波荷重作用時評価	工学式 ・竜巻荷重を包絡する0.3m落下荷重作用時評価	HDP-69BCH(B)型と同じ考え方（設計の違いによる差異あり）
		④伝熱フィン			
・外筒の評価結果をふまえて伝熱フィンが破断しないことを確認 ^(注2)	・外筒の評価結果をふまえて伝熱フィンが破断しないことを確認 ^(注2) ・応力評価 ^(注3)	・外筒の評価結果をふまえて伝熱フィンが破断しないことを確認 ^(注2)	MSF-24P(S)型・HDP-69BCH(B)型と同じ		

(注2) キャスク径方向に荷重が作用した場合の評価方法

(注3) キャスク軸方向に荷重が作用した場合の評価方法

● 臨界防止設計の方針の比較

確認内容		臨界防止設計の方針			差異
		Hitz-P24型	Hitz-B52型	MSF-24P(S)型	
配置・形状	特定兼用キャスクの配置	・無限配列 (完全反射境界)	・無限配列 (完全反射境界)	・無限配列 (完全反射境界)	考え方は同じ
	バスケットの形状	・実効増倍率が最大となるようバスケット (水ギャップ、格子内のり等) の製造公差を考慮 【バスケット内の部材の配置】 ・実効増倍率が最大となる中性子吸収材の配置を考慮 ・実効増倍率が最大となるバスケット内側部の配置を考慮	・実効増倍率が最大となるようバスケット (格子内のり等) の製造公差を考慮	・実効増倍率が最大となるようバスケット (水ギャップ、格子内のり等) の製造公差を考慮	考え方は同じ
	バスケット格子内の燃料集合体配置	・実効増倍率が最大となる使用済燃料の偏りを考慮	・実効増倍率が最大となる使用済燃料の偏りを考慮	・実効増倍率が最大となる使用済燃料の偏りを考慮	考え方は同じ
中性子吸収材の効果	製造公差	・実効増倍率が最大となる、下限値のほう素添加量に設定 ・実効増倍率が最大となる、最小値の寸法に設定	・実効増倍率が最大となる、下限値のほう素添加量に設定 ・実効増倍率が最大となる、最小値の寸法に設定	・実効増倍率が最大となる、下限値のほう素添加量に設定 ・実効増倍率が最大となる、最小値の寸法に設定	考え方は同じ
	原子個数密度の減少	・ほう素の減損が無視できることを確認	・ほう素の減損が無視できることを確認	・ほう素の減損が無視できることを確認	考え方は同じ

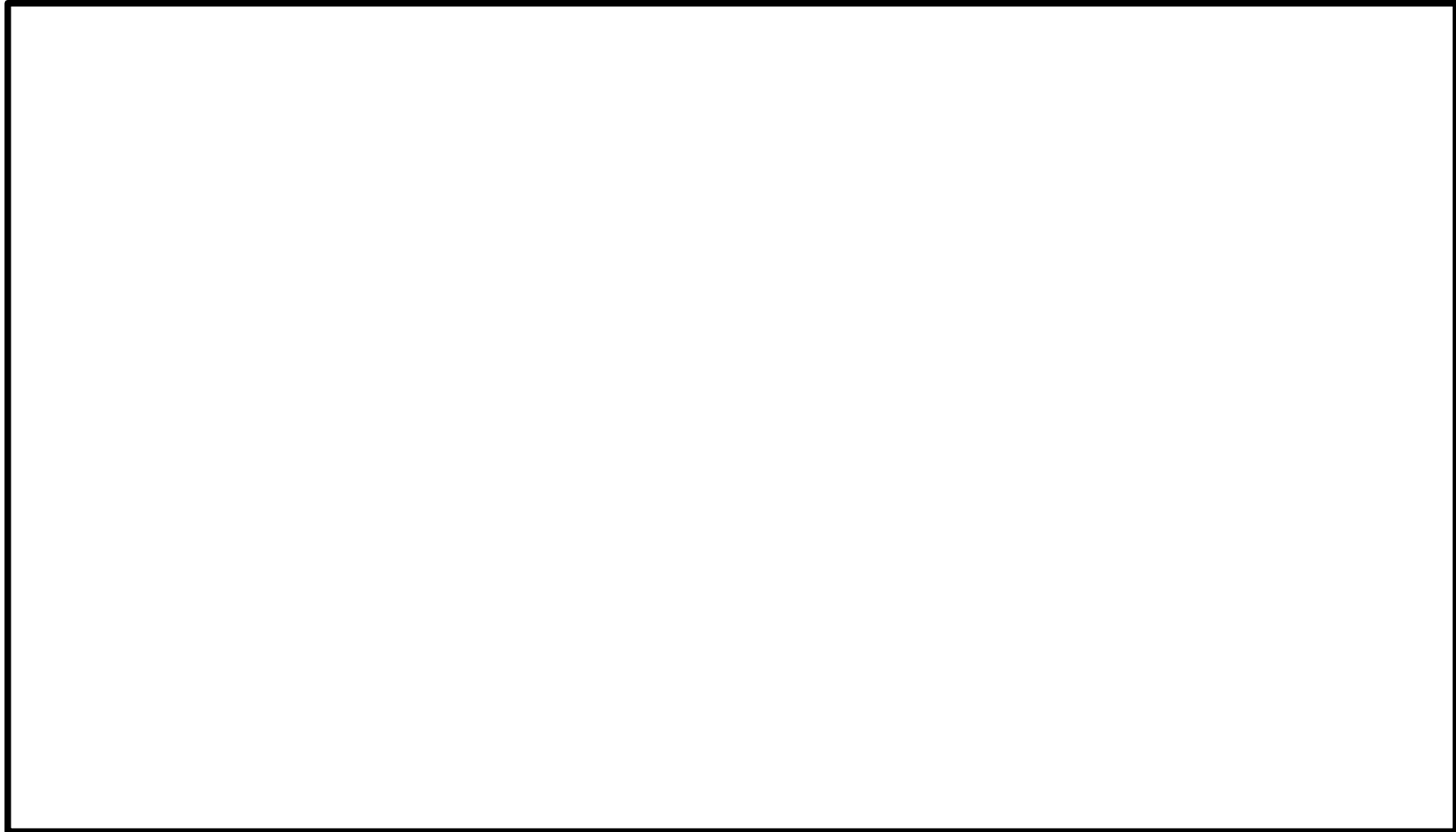
● 臨界防止設計の方針の比較

確認内容		臨界防止設計の方針			差異
		Hitz-P24型	Hitz-B52型	MSF-24P(S)型	
減速材（水）の影響		<ul style="list-style-type: none"> ・乾燥状態から冠水状態までを考慮 ・容器内・外の水密度の影響を考慮 ・容器内の水位変動の影響を考慮 	<ul style="list-style-type: none"> ・乾燥状態から冠水状態までを考慮 ・容器内の水密度の影響を考慮 	<ul style="list-style-type: none"> ・乾燥状態から冠水状態までを考慮 ・容器内・外の水密度の影響を考慮 ・容器内の水位変動の影響を考慮 	考え方は同じ
解析コード及びデータライブラリ	コードシステム	SCALE6.2.1	SCALE4.4a	SCALE6.2.1	MSF-24P(S)と同じ
	臨界計算	KENO-V.a	KENO-V.a	KENO-VI	Hitz-B52と同じ
	共鳴計算	BONAMI CENTRM PMC	BONAMI NITAWL- II	BONAMI CENTRM PMC	MSF-24P(S)と同じ
	均質化 群定数計算	—	XSDRNPM	—	MSF-24P(S)と同じ (均質化せず)
	断面積ライブラリ	252群ライブラリ (ENDF/B-VIIベース)	238群ライブラリ (ENDF/B-Vベース)	252群ライブラリ (ENDF/B-VIIベース)	MSF-24P(S)と同じ

(注) 解析コード及びライブラリについては、ベンチマーク解析を実施し妥当性を確認している。

- 臨界設計方針の比較

臨界解析モデルの比較



Hitz-P24型

Hitz-B52型

● 遮蔽設計の方針の比較

確認内容		遮蔽設計の方針			差異
		Hitz-P24型	Hitz-B52型	MSF-24P(S)型	
使用済燃料の放射線源強度	評価条件	以下のように放射線源強度が保守的になる条件を設定 ・中央部、外周部のそれぞれの収納制限の最高の燃焼度を設定 ・ウラン濃縮度は最小値を設定 ・使用済燃料の軸方向の燃焼度分布を考慮	以下のように放射線源強度が保守的になる条件を設定 ・中央部、外周部のそれぞれの収納制限の最高の燃焼度を設定 ・ウラン濃縮度は最小値を設定 ・使用済燃料の軸方向の燃焼度分布を考慮	以下のように放射線源強度が保守的になる条件を設定 ・中央部、外周部のそれぞれの収納制限の最高の燃焼度を設定 ・ウラン濃縮度を保守的に設定 ・使用済燃料の軸方向の燃焼度分布を考慮	考え方は同じ
	燃焼計算コード	ORIGEN2 (ORIGEN2.2UPJ) (ライブラリ: PWRU50)	ORIGEN2 (ORIGEN2-82) (ライブラリBWRU)	ORIGEN2 (ORIGEN2.2UPJ) (ライブラリ: PWRU50, PWRU)	

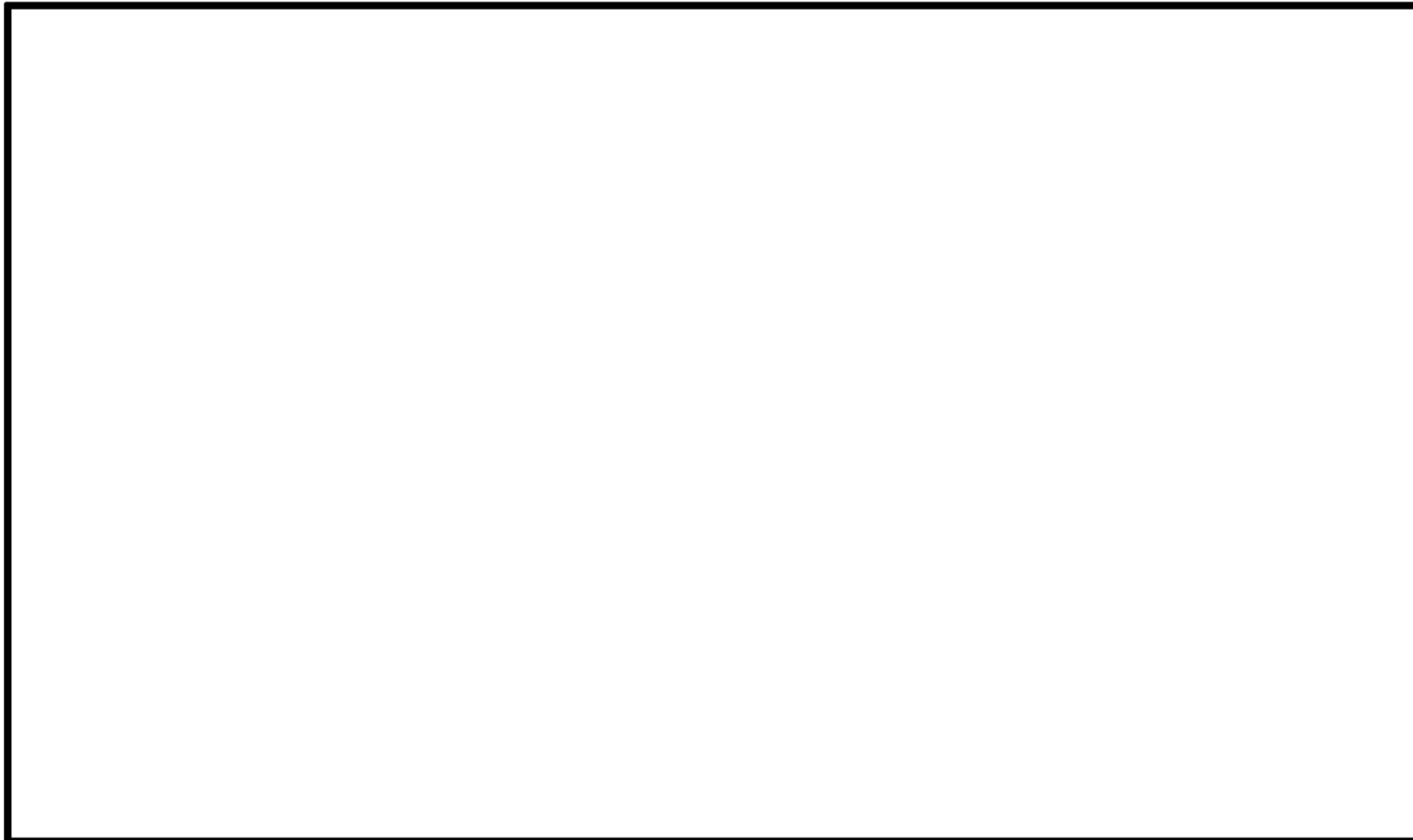
● 遮蔽設計の方針の比較

確認内容		遮蔽設計の方針			差異
		Hitz-P24型	Hitz-B52型	MSF-24P(S)型	
特定兼用 キャスクの 遮蔽機能評価	実形状を適切にモデル化	以下のように配置形状を適切に考慮し、保守的な条件を設定 ・材料密度は最小値を設定 ・各構成部材の寸法は公称寸法とし、密度を密度係数※1で補正 ・使用済燃料の軸方向の移動を保守的に考慮	以下のように配置形状を適切に考慮し、保守的な条件を設定 ・材料密度は最小値を設定 ・各構成部材の寸法は公称寸法とし、密度を密度係数※1で補正 ・使用済燃料の軸方向の位置は縦置き時を考慮	以下のように配置形状を適切に考慮し、保守的な条件を設定 ・材料密度は最小値を設定 ・各構成部材の寸法は公称寸法とし、密度を密度係数※1で補正 ・使用済燃料の軸方向の移動を保守的に考慮	考え方は同じ
	均質化	有限円筒モデルで直接モデル化できない以下の領域は均質化 ・燃料領域 ・バスケット外周部 ・側部中性子遮蔽材	有限円筒モデルで直接モデル化できない以下の領域は均質化 ・燃料領域 ・バスケット外周部 ・側部中性子遮蔽材	有限円筒モデルで直接モデル化できない以下の領域は均質化 ・燃料領域 ・バスケット外周部 ・側部中性子遮蔽材	考え方は同じ (先行型式の考え方の詳細は次々頁参照。)
	トランシオン部	別途モデル化し、線束接続により評価	別途モデル化し、線束接続により評価	別途モデル化し、線束接続により評価	考え方は同じ
	遮蔽材の劣化	設計貯蔵期間中の熱影響による中性子遮蔽材の質量減損を考慮	設計貯蔵期間中の熱影響による中性子遮蔽材の質量減損を考慮	設計貯蔵期間中の熱影響による中性子遮蔽材の質量減損を考慮	考え方は同じ
	解析コード、ライブラリ	DOT3.5コード ライブラリ：MATXSLIB-J33	DOT3.5コード ライブラリ： DLC-23/CASK (MATXSLIB-J33)	DOT3.5コード※2 ライブラリ：MATXSLIB-J33	解析コード(DOT3.5)は3型式とも同じ。 ライブラリはMSF-24P(S)型と同じ。

※1：密度係数 = 公差を考慮した最小厚さ / 公称厚さ

※2：MSF-24P(S)型はMCNP5コードによる評価も実施しているが、本表ではHitz-P24型と同じDOT3.5コードでの評価内容のみを比較

- 遮蔽設計方針の比較
遮蔽解析モデルの比較例



Hitz-P24型

Hitz-B52型

● 遮蔽設計の方針の比較

解析モデル上の均質化について、承認を受けた実績のあるキャスクの評価手法では以下の手法を用いている。

均質化部位	実績のある評価手法
燃料領域	<ul style="list-style-type: none">・使用済燃料とバスケットを均質化・中央部の最高燃焼度燃料領域と、外周部の平均燃焼度燃料領域・各燃料領域の断面積と等価な面積となる円（円筒）にモデル化
バスケット最外周部	<ul style="list-style-type: none">・燃料領域より外側から胴内面までを均質化し、円筒形状にモデル化・密度を密度係数で調整

Hitz-P24型

Hitz-B52型

● 除熱設計の方針の比較

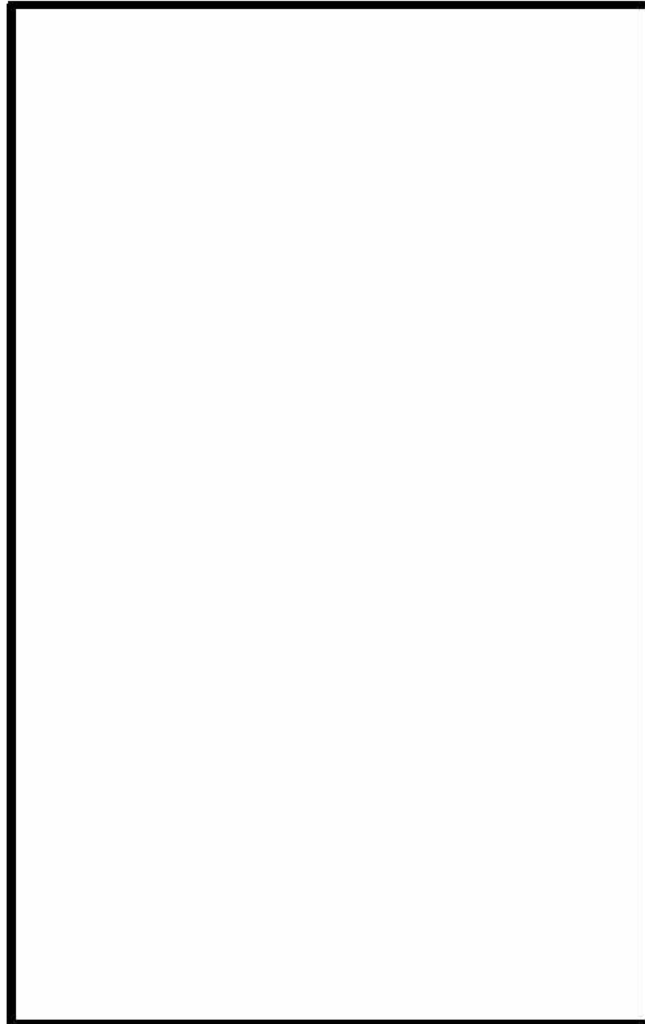
確認内容		除熱設計の方針			差異
		Hitz-P24型	Hitz-B52型	MSF-24P(S)型	
使用済燃料の崩壊熱評価	燃焼計算コード	・ORIGEN2 (ORIGEN2.2UPJ) (ライブラリ: PWRU50)	・ORIGEN2 (ORIGEN2-82) (ライブラリ: BWR-U)	・ORIGEN2 (ORIGEN2.2UPJ) (ライブラリ: PWRU50)	BWR燃料用であるHitz-B52Bとは同じコードだがバージョン及びライブラリが異なる。PWR燃料用であるMSF-24 P(S)型とは同じコード(バージョン含む)及びライブラリである。
	評価条件	・崩壊熱量が保守的になるように燃焼度、濃縮度、冷却期間等を設定	・崩壊熱量が保守的になるように燃焼度、濃縮度、冷却期間等を設定	・崩壊熱量が保守的になるように燃焼度、濃縮度、冷却期間等を設定	考え方は同じ
兼用キャスク各部の温度評価	伝熱解析コード	・ABAQUS	・ABAQUS	・ABAQUS	同じ
	評価条件	・使用済燃料の崩壊熱、周囲温度等を設定	・使用済燃料の崩壊熱、周囲温度等を設定	・使用済燃料の崩壊熱、周囲温度等を設定	考え方は同じ
	モデル化	・Hitz-P24型の実形状を適切にモデル化 (二次元全体モデル及び二次元輪切りモデル)	・Hitz-B52型の実形状を適切にモデル化 (二次元全体モデル及び三次元輪切りモデル)	・MSF-24P型の実形状を適切にモデル化 (三次元全体モデル)	考え方は同じ (二次元モデルと三次元モデルの違いあり) ただし、設計の違いをそれぞれ考慮してモデル化
	安全機能及び構造強度の維持	・安全機能を維持する構造健全性及び性能を維持できる温度を制限値に設定	・安全機能を維持する構造健全性及び性能を維持できる温度を制限値に設定	・安全機能を維持する構造健全性及び性能を維持できる温度を制限値に設定	考え方は同じ (使用している材料の違いによる制限温度の違いあり)

● 除熱設計の方針の比較

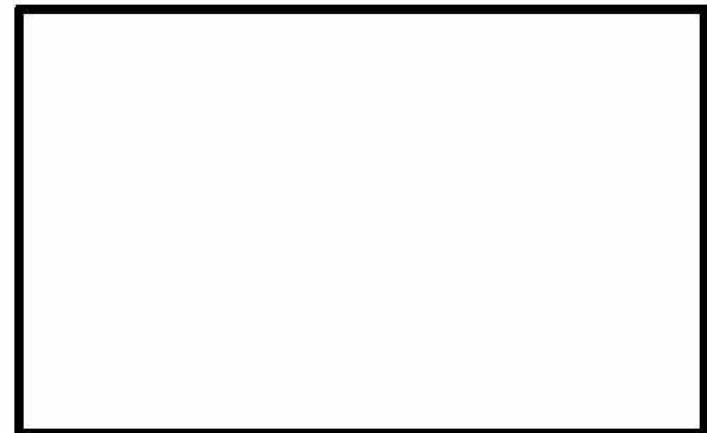
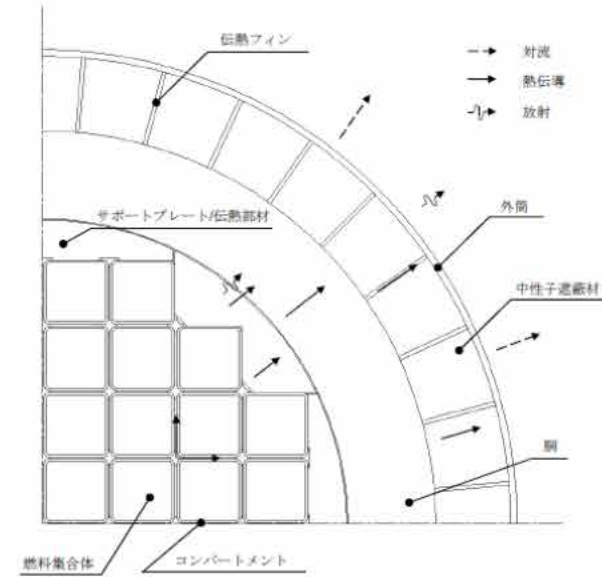
確認内容		除熱設計の方針			差異
		Hitz-P24型	Hitz-B52型	MSF-24P(S)型	
燃料被覆管の温度評価	伝熱解析コード	・ABAQUS	・ABAQUS	・ABAQUS	同じ
	評価条件	・使用済燃料の崩壊熱、境界条件となるバスケットの温度を設定	・使用済燃料の崩壊熱、境界条件となるバスケットの温度を設定	・使用済燃料の崩壊熱、境界条件となるバスケットの温度を設定	考え方は同じ
	モデル化	・使用済燃料集合体の実形状を適切にモデル化 (径方向断面二次元でモデル化)	・使用済燃料集合体の実形状を適切にモデル化 (径方向断面二次元でモデル化)	・使用済燃料集合体の実形状を適切にモデル化 (径方向断面二次元でモデル化)	考え方は同じ
	クリープ破損及び機械的特性の低下の防止	・燃料被覆管の構造健全性を維持できる温度を制限値に設定	・燃料被覆管の構造健全性を維持できる温度を制限値に設定	・燃料被覆管の構造健全性を維持できる温度を制限値に設定	考え方は同じ (制限値はPWR燃料用のMSF-24 P型と同じ)

● 除熱設計方針の比較

伝熱形態の比較



Hitz-P24型



Hitz-B52型

- 除熱設計方針の比較

輪切りモデルの比較



Hitz-P24型
(二次元輪切りモデル)

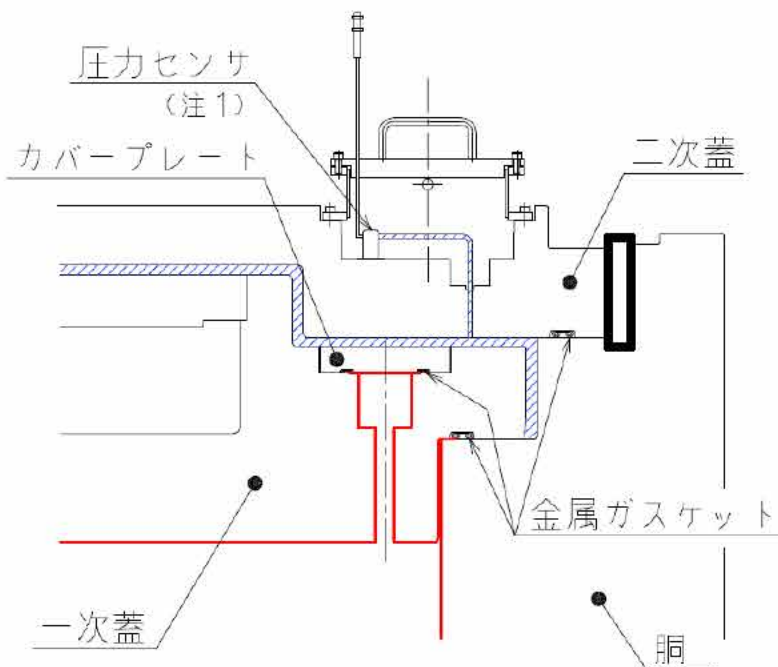
Hitz-B52型
(三次元輪切りモデル)

● 閉じ込め設計の方針の比較

確認内容		閉じ込め設計の方針			差異
		Hitz-P24型	Hitz-B52型	MSF-24P(S)型	
閉じ込め構造及び監視	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、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こと。	一次蓋と二次蓋の二重構造とし、蓋及び蓋貫通孔のシール部には金属ガスケットを使用する。また、蓋間空間の圧力を測定することで閉じ込め機能を監視できる構造とする。	一次蓋と二次蓋の二重構造とし、蓋及び蓋貫通孔のシール部には金属ガスケットを使用する。また、蓋間空間の圧力を測定することで閉じ込め機能を監視できる構造とする。	一次蓋と二次蓋の二重構造とし、蓋及び蓋貫通孔のシール部には金属ガスケットを使用する。また、蓋間空間の圧力を測定することで閉じ込め機能を監視できる構造とする。	同じ
負圧維持	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。	使用済燃料を収納する空間を設計貯蔵期間を通じて負圧に維持する。	使用済燃料を収納する空間を設計貯蔵期間を通じて負圧に維持する。	使用済燃料を収納する空間を設計貯蔵期間を通じて負圧に維持する。	同じ
密封境界部の漏えい率	密封境界部の漏えい率は、兼用キャスク内部の負圧を維持できること。また、使用する金属ガスケット等のシール部は当該漏えい率以下であること。	密封境界部の漏えい率は、設計貯蔵期間中に特定兼用キャスク内部の負圧を維持できる漏えい率とし、金属ガスケットは、その漏えい率を満足するものを使用する。	密封境界部の漏えい率は、設計貯蔵期間中に金属キャスク内部の負圧を維持できる漏えい率とし、金属ガスケットは、その漏えい率を満足するものを使用する。	密封境界部の漏えい率は、設計貯蔵期間中に特定兼用キャスク内部の負圧を維持できる漏えい率とし、金属ガスケットは、その漏えい率を満足するものを使用する。	考え方は同じ
閉じ込め機能評価	密封境界部の漏えい率が、設計貯蔵期間、内部初期圧力、自由空間容積、初期の蓋間圧力、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ること。	密封境界部の漏えい率は、設計貯蔵期間、内部初期圧力、自由空間容積、初期の蓋間圧力、蓋間の容積、温度等を条件として、漏えい孔中の流れの形態を考慮した適切な評価式を用いて求める。	密封境界部の漏えい率は、設計貯蔵期間、内部初期圧力、自由空間容積、初期の蓋間圧力、蓋間の容積、温度等を条件として、漏えい孔中の流れの形態を考慮した適切な評価式を用いて求める。	密封境界部の漏えい率は、設計貯蔵期間、内部初期圧力、自由空間容積、初期の蓋間圧力、蓋間の容積、温度等を条件として、漏えい孔中の流れの形態を考慮した適切な評価式を用いて求める。	同じ

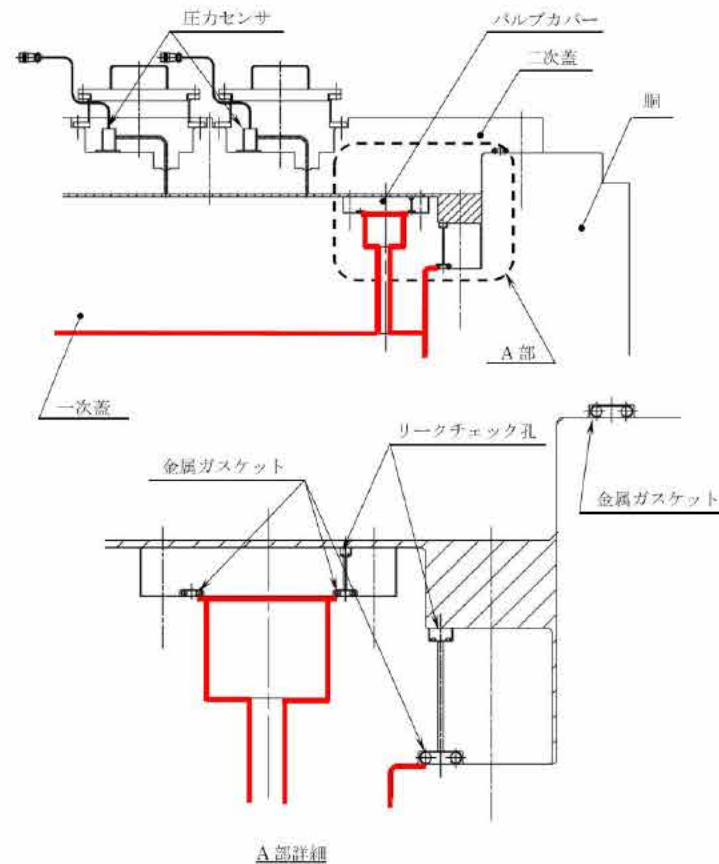
● 閉じ込め設計の方針の比較

閉じ込め機能の監視構造の比較



(注1) 圧力センサの取付位置は限定しない。

Hitz-P24型



— : 閉じ込め境界 (負圧)
 // : 閉じ込め監視圧力境界 (正圧)

Hitz-B52型

● 長期健全性維持の方針の比較

確認内容	長期健全性維持の方針			差異
	Hitz-P24型	Hitz-B52型	MSF-24P(S)型	
低温脆性の考慮	<ul style="list-style-type: none"> 最低使用温度における低温脆性破壊のおそれがない材料を使用 	<ul style="list-style-type: none"> 最低使用温度における低温脆性破壊のおそれがない材料を使用 	<ul style="list-style-type: none"> 最低使用温度における低温脆性破壊のおそれがない材料を使用 	考え方は同じ
設計入力値又は設計基準値の算定に際しての経年変化の影響の考慮	<ul style="list-style-type: none"> 中性子遮蔽材の質量減損を考慮 	<ul style="list-style-type: none"> 中性子遮蔽材の質量減損を考慮 	<ul style="list-style-type: none"> 中性子遮蔽材の質量減損を考慮 	考え方は同じ
	<ul style="list-style-type: none"> 温度影響を考慮してバスケット（アルミニウム合金材）の設計基準値を設定 	<ul style="list-style-type: none"> 構造強度部材としてアルミニウム合金を使用していないため、アルミニウム合金について強度の設計基準値はない。 	<ul style="list-style-type: none"> 温度影響を考慮してバスケット（アルミニウム合金材）の設計基準値を設定 	考え方は同じ
防食措置等	<ul style="list-style-type: none"> 大気に触れる部分は塗装等の防錆措置により腐食を防止 	<ul style="list-style-type: none"> 大気に触れる部分は塗装等の防錆措置により腐食を防止 	<ul style="list-style-type: none"> 大気に触れる部分は塗装等の防錆措置により腐食を防止 	考え方は同じ
使用済燃料の経年変化の低減又は防止	<ul style="list-style-type: none"> 不活性ガスであるヘリウムとともに封入することで、使用済燃料の腐食等を防止 温度を制限される範囲に収めることで、使用済燃料の健全性を維持 	<ul style="list-style-type: none"> 不活性ガスであるヘリウムとともに封入することで、使用済燃料の腐食等を防止 温度を制限される範囲に収めることで、使用済燃料の健全性を維持 	<ul style="list-style-type: none"> 不活性ガスであるヘリウムとともに封入することで、使用済燃料の腐食等を防止 温度を制限される範囲に収めることで、使用済燃料の健全性を維持 	考え方は同じ



地球と人のための技術をこれからも

日立造船はつないでいきます。かけがえのない自然と私たちの未来を。

Hitz
Hitachi Zosen

日立造船株式会社 <https://www.hitachizosen.co.jp/>