

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 (第十六条関連・バスケット用アルミ合金)

2022.10.26
日立造船株式会社

目次

1. 指摘事項（コメント）リスト
2. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（長期健全性）
3. バスケット用アルミニウム合金について
4. 今後の説明スケジュール

1. 指摘事項（コメント）リスト

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。

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MATXSILIB-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。

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。

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>設計貯蔵期間（60年）に相当する金属ガスケットのラーソン・ミラー・パラメータ（LMP）を求め、それが電中研の試験等に基づく限界LMP（初期の閉じ込め機能を維持できるLMP）を下回ることを確認している。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。 ⇒P.15参照</p>	次回審査会合で回答予定。

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、</p> <p> 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、貯蔵施設の型式指定を受けた先例及びJSME新規材料採用ガイドラインに準じており、破壊靱性については、-40℃～200℃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を確認している。</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>	次回審査会合で回答予定。

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	<p>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。</p>	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、第15回審査会合資料1-1（本資料）の中の「4. 指摘事項への回答」の説明で回答する。</p>	第15回審査会合で回答。

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、第15回審査会合資料1-1（本資料）の中の「4. 指摘事項への回答」の説明で回答する。	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、第15回審査会合資料1-1（本資料）の中の「4. 指摘事項への回答」の説明で回答する。	第15回審査会合で回答。

2. 設置許可基準規則への適合性（第十六条）（長期健全性）

2. 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。

2. 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」

2. 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」

2. 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）設計貯蔵期間（60年）に相当する金属ガスケットのラーソン・ミラー・パラメータ（LMP）は以下の通り。

C=14の場合：約 7.2×10^3

C=20の場合：約 9.6×10^3

これらは、電中研の試験等に基づく、初期の閉じ込め機能を保持できる限界LMPである約 8.0×10^3 （C=14）⁽¹⁾及び 11.0×10^3 （C=20）⁽²⁾を下回るため、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）。

(1) (一財)電力中央研究所、「使用済核燃料貯蔵の基礎」、ERC出版、(2014)

(2) 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. 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。

3. バスケット用アルミニウム合金について

- 3.1. バスケット用アルミニウム合金に係る提出資料の概要
- 3.2. バスケット用アルミニウム合金の懸念事項
- 3.3. バスケット用アルミニウム合金の考え方と評価方法
- 3.4. 経年変化の考慮方法の概要
- 3.5. 材料試験の項目
- 3.6. 化学成分、物性および機械的性質
- 3.7. 設計基準

3.1. バスケット用アルミニウム合金に係る提出資料の概要

3.1. バasket用アルミニウム合金に係る提出資料の概要

- 型式証明申請書 別添1-1

Basket用材料 アルミニウム合金 (HZ-A3004-H112) に関する説明書 (提示済み)

- 本書は、特定兼用キャスクのBasketに適用するアルミニウム合金 (HZ-A3004-H112) の材料規定および製造管理規定を説明するものであり、特に材料規定では、化学成分、各温度における設計応力強さ、許容引張応力、設計降伏点、設計引張強さ等、材料の物性及び機械的性質を示しており、製造管理規定では、製造時の機械的性質および製造可能寸法等を示している。

- 補足説明資料1-1 Basket用アルミニウム合金 (HZ-A3004-H112) について

- 本書は、「別添1-1 Basket用材料 アルミニウム合金 (HZ-A3004-H112) に関する説明書」の材料規定における根拠を説明するものであり、経年変化を考慮した材料試験の結果と材料試験から得られた物性および機械的性質を保守的に包括する設計用材料強度を示している。

(1) 別紙 1

Basketに用いるアルミニウム合金(HZ-A3004-H112)の経年変化を考慮した強度特性について

- 本書は、補足説明資料1-1に付随し、Basket用アルミニウム合金の経年変化の考慮について説明するもので、設計貯蔵期間中の熱ばく露において過時効に至ったBasket用アルミニウム合金の強度特性を模擬する機械試験用供試材の製作方法および材料試験の結果を示している。

(2) 別紙 2

Basketに用いるアルミニウム合金(HZ-A3004-H112)の考え方と評価方法について

- 本書は、補足説明資料1-1に付随し、Basket用アルミニウム合金の特性及び要求事項を踏まえた経年変化の模擬方法の考え方、機械試験及び破壊靱性試験などの評価方法を示している。

3.1. バスケット用アルミニウム合金に係る提出資料の概要

(3) 別紙3

バスケット用材料 アルミニウム合金(HZ-A3004-H112)の破壊靱性に係る特性について

- 本書は、補足説明資料1-1に付随し、バスケット用アルミニウム合金の経年変化を考慮した耐衝撃性及び破壊靱性について、検討した結果を示している。

● 補足説明資料1-2 バスケット基準値について

- 本書は、特定兼用キャスクのバスケットについて、貯蔵時、取扱時、地震時および衝撃荷重作用時、さらに輸送法令に定める通常輸送時、BM型輸送物および核分裂性輸送物に係る一般の試験条件下および特別の試験条件下を含めた評価基準の設定根拠を説明するものである。

3.2. バスケット用アルミニウム合金の懸念事項

『別紙2 バスケットに用いるアルミニウム合金(HZ-A3004-H112)の考え方と評価方法について』より

3.2. バasket用アルミニウム合金の懸念事項

- 「金属キャスクBasket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Basket用アルミニウム合金の規格として、添付3-3「Basket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、新規アルミニウム合金をBasket材料として登録するための「アルミニウム合金Basket用新規材料採用ガイドライン」もその中に含まれており、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Basket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	Basket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	Basket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	Basket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	Basket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	Basket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	Basket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	Basket用アルミニウム合金 A3004-H112 に関する規定	2013 年 6 月

3.2. バスケット用アルミニウム合金の懸念事項

- 添付3-3及び事例規格が廃止された理由

- (1) 破壊靱性及び耐衝撃特性に関する懸念

金属カスク構造規格では、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。

- (2) 強度（設計降伏点[Sy値]、設計引張強さ[Su値]の設定）に関する懸念
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析出物に取られてMg固溶強化も期待できないため、60年後の状態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。

3.2. バスケット用アルミニウム合金の懸念事項

● 懸念事項に対する考え方

(1) 破壊靱性及び耐衝撃特性について

バスケット用材料 アルミニウム合金 (HZ-A3004-H112) は、ビッカース硬さ試験、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破壊靱性試験を -40°C ~ 200°C の範囲で実施し、 J_Q 値及び J_{IC} 値を取得している。

バスケット用材料 アルミニウム合金 (HZ-A3004-H112) は、 -40°C ~ 200°C の範囲内で延性を失わないことを確認しているため、破壊靱性及び耐衝撃性について特別な配慮は必要ない。

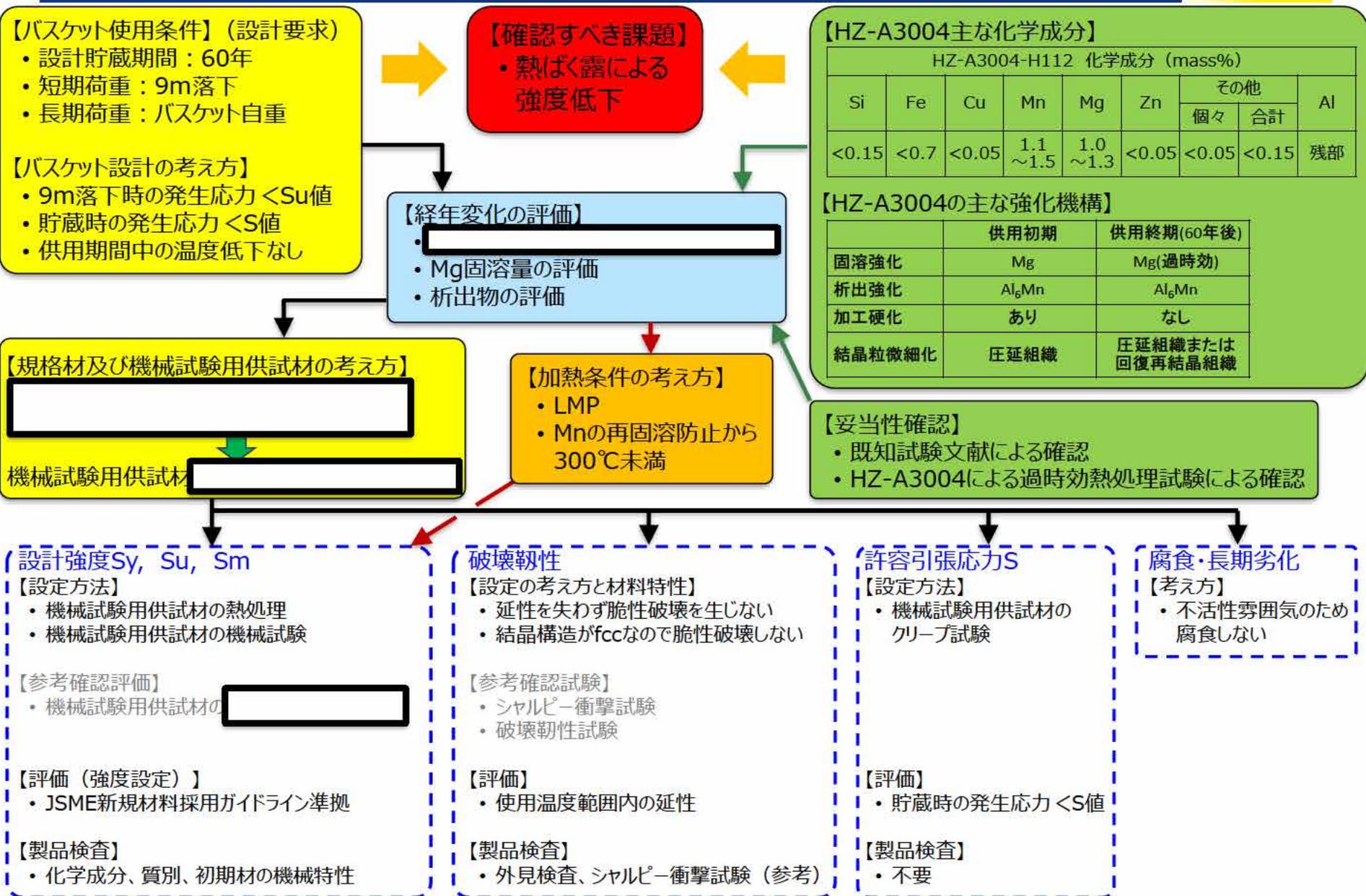
(2) 強度 (設計降伏点[S_y 値]、設計引張強さ[S_u 値]の設定) について

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 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している。

3.3. バスケット用アルミニウム合金の考え方と評価方法

『別紙2 バスケットに用いるアルミニウム合金(HZ-A3004-H112)の考え方と評価方法について』より

3.3. バスケット用アルミニウム合金の考え方と評価方法



【バスケット使用条件】（設計要求）

- 設計貯蔵期間：60年
- 短期荷重：9m落下
- 長期荷重：バスケット自重

【バスケット設計の考え方】

- 9m落下時の発生応力 < Su値
- 貯蔵時の発生応力 < S値
- 供用期間中の温度低下なし

【確認すべき課題】

- 熱ばく露による強度低下

【HZ-A3004主な化学成分】

HZ-A3004-H112 化学成分 (mass%)								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	その他		Al
						個々	合計	
<0.15	<0.7	<0.05	1.1 ~ 1.5	1.0 ~ 1.3	<0.05	<0.05	<0.15	残部

【HZ-A3004の主な強化機構】

	供用初期	供用終期(60年後)
固溶強化	Mg	Mg(過時効)
析出強化	Al ₆ Mn	Al ₆ Mn
加工硬化	あり	なし
結晶粒微細化	圧延組織	圧延組織または回復再結晶組織

【経年変化の評価】

- 〇
- Mg固容量の評価
- 析出物の評価

【加熱条件の考え方】

- LMP
- Mnの再固溶防止から300℃未満

【規格材及び機械試験用供試材の考え方】

〇

機械試験用供試材 〇

【妥当性確認】

- 既知試験文献による確認
- HZ-A3004による過時効熱処理試験による確認

設計強度 Sy, Su, Sm

【設定方法】

- 機械試験用供試材の熱処理
- 機械試験用供試材の機械試験

【参考確認評価】

- 機械試験用供試材の 〇

【評価（強度設定）】

- JSME新規材料採用ガイドライン準拠

【製品検査】

- 化学成分、質別、初期材の機械特性

破壊靱性

【設定の考え方と材料特性】

- 延性を失わず脆性破壊を生じない
- 結晶構造がfccなので脆性破壊しない

【参考確認試験】

- シャルピー衝撃試験
- 破壊靱性試験

【評価】

- 使用温度範囲内の延性

【製品検査】

- 外見検査、シャルピー衝撃試験（参考）

許容引張応力 S

【設定方法】

- 機械試験用供試材のクリープ試験

【評価】

- 貯蔵時の発生応力 < S値

【製品検査】

- 不要

腐食・長期劣化

【考え方】

- 不活性雰囲気のため腐食しない

3.4. 経年変化の考慮方法の概要

『別紙 1 バスケットに用いるアルミニウム合金(HZ-A3004-H112)の経年変化を考慮した強度特性について』より

3.4. 経年変化の考慮方法の概要

概要

- キャスク用バスケットは200～100℃の温度環境で使用される。
- 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。

➡ Al合金製バスケットは過時効を適切に評価する必要がある。

使用済燃料

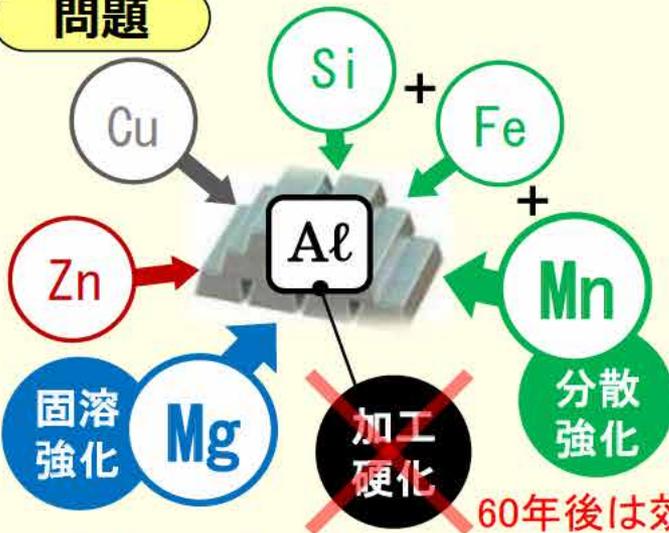
バスケット

装荷

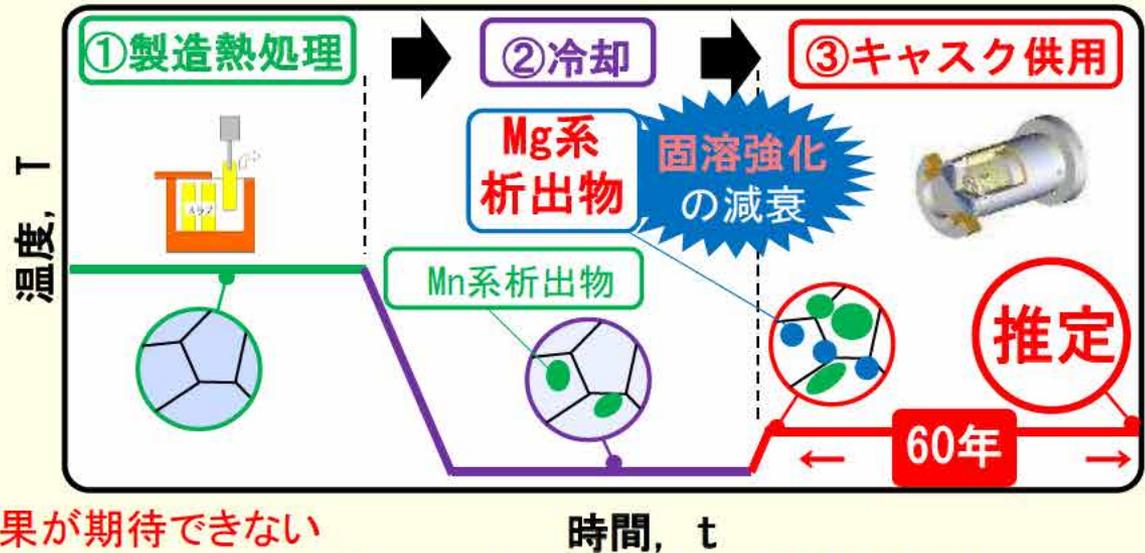
200℃～
100℃

最長60年
の貯蔵

問題



バスケット用Al合金の添加元素と強化機構



バスケット用Al合金の金属組織変化

Mg系析出物が生じ、固溶量が低下 → 母材中のMgの割合が減少し、強度が低下 → 60年供用したAl合金の強度を評価したい

目的

60年間のAl合金の金属組織変化を推定し、適切な強度評価を行う

A_l合金製バスケットにおける金属組織変化の推定に適用

試験手法

確認

試験

60年間の金属組織の
変化を考慮した機械試験

3.4. 経年変化の考慮方法の概要

3.4. 経年変化の考慮方法の概要

3.4. 経年変化の考慮方法の概要

3.4. 経年変化の考慮方法の概要

A3004 規格材（バスケット用Al合金）の強化機構

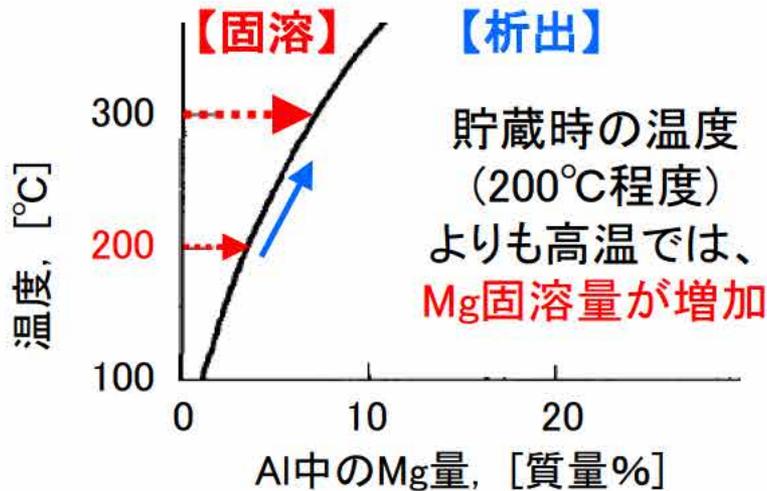
転位強化
(加工硬化)

結晶粒微細化

Mn系分散相
による分散強化

Mgの固溶強化

●実機供用後の材料のMg固溶量について



Al-Mg 平衡状態図

貯蔵時より高温になるとMgの固溶量が増加するため、単純な加速試験では、実機供用後のMg固溶量が適切に模擬できない。

□を用いて、実機供用後の材料のMg固溶量の模擬方法を検討。

【HZ-A3004 規格材】

【機械試験用供試材】

※ 規格材 : 供用前の実機製品に相当する材料
機械試験用供試材 : 60年供用後の機械的性質を保守的に評価するため、に過時効熱処理を施した材料

【HZ-A3004 規格材】

200°C×60年

【機械試験用供試材】

過時効熱処理

引張試験結果

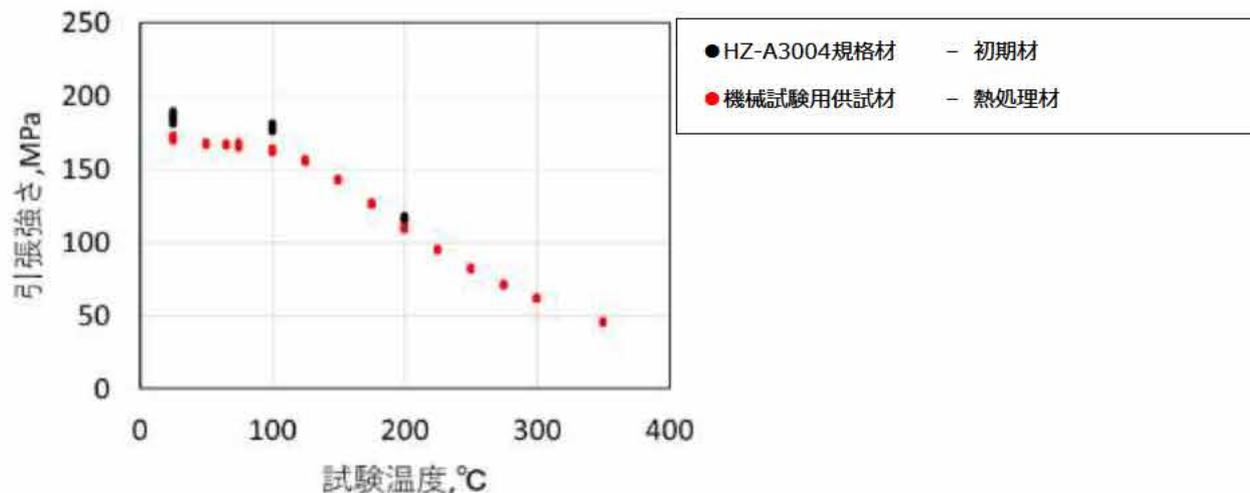


表 引張試験結果の比較

	材料	引張強さ[MPa]		
		20°C	100°C	200°C
当社試験	HZ-A3004規格材 — 初期材	184.3	177.9	115.8
	機械試験用供試材 — 熱処理材	170.1	163.1	109.2

- 設計貯蔵期間の金属組織を模擬した材料に対する試験結果を用いて、当社のバスケット設計強度を確認している。

3.5. 材料試験の項目

『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』より

3.5. 材料試験の項目

- 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℃)
 - クリープ試験 (機械試験用供試材、150℃～350℃) ← 10,000時間のクリープ試験実施中 (3000時間まで試験完了)

- 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℃～200℃)

3.6. 化学成分、物性および機械的性質

『型式証明申請書 別添1-1 バスケット用材料 アルミニウム合金（HZ-A3004-H112）に関する説明書』より

3.6. 化学成分、物性および機械的性質

- 化学成分

材料名称	化学成分 (質量%)								Al
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	その他		
							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

- 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	27	20	15	10	8	5

3.6. 化学成分、物性および機械的性質

- 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	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。

3.7. 設計基準

『補足説明資料1-2 バスケット基準値について』より

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、長時間高温で使用されるので過時効特性（熱劣化に伴う強度低下）の考慮が必要であるが、「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過時効効果を十分に考慮しているため、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	$P_m \leq S$ $P_m + P_b \leq K_o S$ $\tau \leq 0.6S$ $\sigma_p \leq S$ σ_c (一次) $\leq f_c$ σ_c (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) $\tau \leq 0.6S_m$ $\sigma_p \leq S_y$ (1.5S _y) (注2) σ_c (一次) $\leq f_c$ σ_c (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) $\tau \leq 0.9S_m$ $\sigma_p \leq 1.5S_y$ (2.25S _y) (注2) σ_c (一次) $\leq 1.5f_c$ σ_c (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) $\tau \leq 1.2S_m$ $\sigma_p \leq 2S_y$ (3S _y) (注2) σ_c (一次) $\leq 1.5f_c^*$ (注4) σ_c (一次+二次) $\leq 1.5f_c$

(注1) 1.5S_m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。

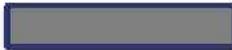
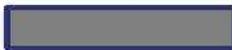
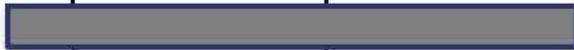
(注3) 短期繰返し荷重（地震力を想定）のみによる応力振幅について評価する。

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

4. 今後の説明スケジュール

4. 今後の説明スケジュール

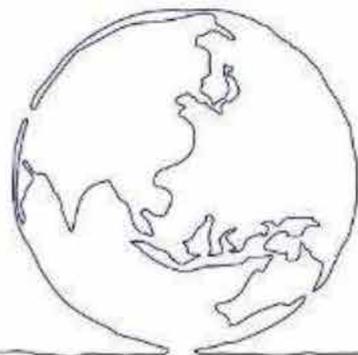
- 審査での説明スケジュールを以下に示す。

条項	2021年度		2022年度		
	9月～12月	1月～3月	4月～6月	7月～9月	10月～12月
全般	▼9/16申請				▽補正
型式証明申請の概要	 ▼11/11 審査会合				
バスケット用材料 アルミニウム合金の説明					
4条 地震による損傷の防止			 ▽5/30 審査会合		
5条 津波による損傷の防止			 ▽5/30 審査会合		
6条 外部からの衝撃による 損傷の防止			 ▽5/30 審査会合		
16条 燃料体等の取扱施設 及び貯蔵施設					 (長期健全性)
		▼2/8 審査会合	▼3/29 審査会合	▽5/30 審査会合	

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