

# 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 (審査会合コメント回答)

2023.2.1  
日立造船株式会社

# 目次

---

1. 指摘事項（コメント）リスト
2. 指摘事項（コメント）への回答
3. 補正申請における主な変更点について
4. 補正申請における記載の適正化について
5. 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。

# 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asket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asket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。

# 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"> <li>・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</li> <li>・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</li> <li>・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</li> </ul>	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、<math>-40^{\circ}\text{C}</math>～<math>200^{\circ}\text{C}</math>の範囲で破壊靱性試験を実施し、取得した<math>J_Q</math>値及び<math>J_{IC}</math>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。



# 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"> <li>・燃料装荷後の排水時</li> <li>・燃料取出し前の注水時</li> </ul> <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て、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。
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時間まで実施することのだが、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、現時点までのデータを用いて、許容引張応力（ <u>S値</u> ）を補正する。 本件については、「2.指摘事項への回答」で詳しく説明する。	次回審査会合で回答予定。
12	2022/11/28 審査会合	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。	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、伝熱機能への影響はない。 本件については、「2.指摘事項への回答」で詳しく説明する。	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
13	2022/11/28 審査会合	材料の強度についての基準について、妥当性を説明するためにMgの固溶量により、固溶強化等の強化機構の低下が強度に影響すると考えられること、これと不純物の関係が、強度に対しどのように考慮されているかを文献、シミュレーション及び機械試験の結果を用いて説明されているが、その説明をわかりやすく整理すること。	全般	<p>バスケット用アルミニウム合金の経年変化について、以下の通り整理した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Mg固溶量の減少に伴ってMgの固溶強化が低下し、材料強度が低下すること。</u></li> <li>• <u>設計貯蔵期間経過後のMg固溶量を計算材料科学に基づく計算で推定していること。</u></li> <li>• <u>MnやFeがAl<sub>6</sub>(Mn,Fe)として析出し、設計貯蔵期間経過後も分散強化が期待できることを組織観察で確認していること。</u></li> <li>• <u>添加許容値を低く設定することで、Si、Cu、Zn等の不純物元素が強度特性にほとんど影響を与えないこと。</u></li> <li>• <u>以上を考慮して、過時効熱処理した機械試験用供試材を材料試験に用いることにより、保守的な設計用強度を規定している。</u></li> </ul> <p>本件については、「2.指摘事項への回答」で詳しく説明する。</p>	次回審査会合で回答予定。
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、「2.指摘事項への回答」で詳しく説明する。</p>	次回審査会合で回答予定。

## 2. 指摘事項（コメント）への回答

指摘事項No.11

指摘事項No.12

指摘事項No.13

指摘事項No.14

### 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。

## 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 $\sigma$ [MPa]	破断時間 [hr]	LMP/1000 (C=14.71)	供試材 符号	試験温度 [°C]	応力 $\sigma$ [MPa]	破断時間 [hr]	LMP/1000 (C=14.71)	供試材 符号	試験温度 [°C]	応力 $\sigma$ [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

## 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)

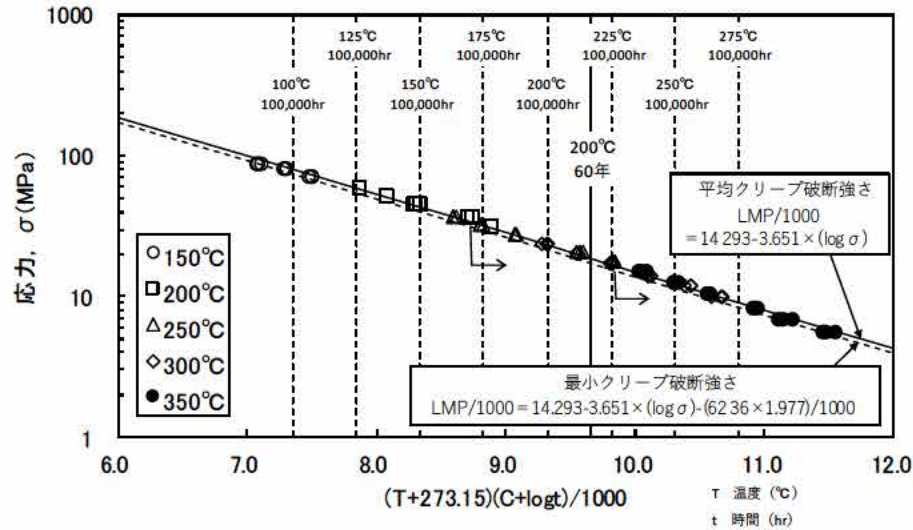


図1 応力-破断時間プロット

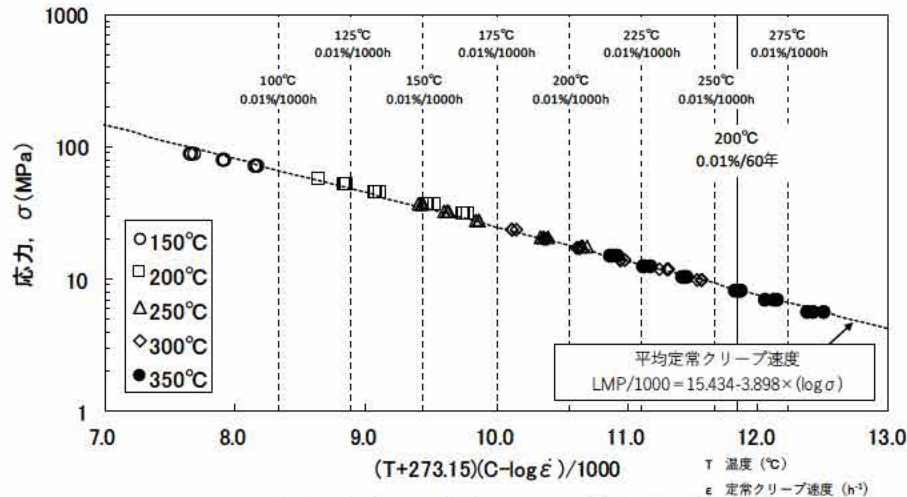


図2 応力-定常クリープ速度プロット



## 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3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4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)

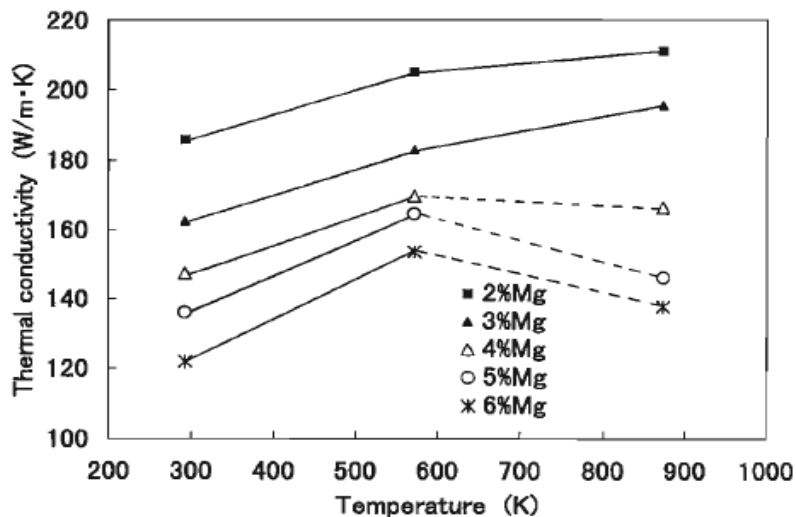


図3 Al-Mg合金の熱伝導率と温度の関係に及ぼすMg添加量の影響 [2]

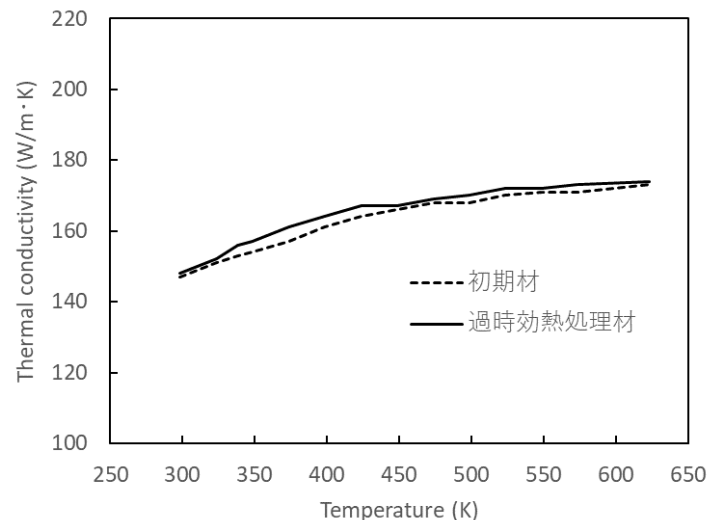


図4 HZ-A3004-H112の初期材と過時効熱処理材の熱伝導率と温度の関係

## 2. 指摘事項（コメント）への回答

### 指摘事項No.13

材料の強度についての基準について、妥当性を説明するためにMgの固容量により、固溶強化等の強化機構の低下が強度に影響すると考えられること、これと不純物の関係が、強度に対しどのように考慮されているかを文献、シミュレーション及び機械試験の結果を用いて説明されているが、その説明をわかりやすく整理すること。

### （回答）

材料強度の基準を設定する上で考慮した、Mg固容量の減少による固溶強化等の強化機構の低下による材料強度への影響、材料強度に対する経年変化に伴う不純物元素の影響、計算材料科学に基づく計算により設計貯蔵期間経過後のMg固容量を推定する方法の妥当性などについて、次ページ以降に整理し、参考文献を用いて説明する。

## 2. 指摘事項（コメント）への回答

（つづき）

### バスケット用アルミニウム合金の課題

#### 【バスケット用アルミニウム合金の長期健全性の課題】

- ・使用温度環境：200℃→100℃
- ・設計貯蔵期間：60年
- ・アルミニウム合金の経年変化による強度低下（過時効、析出等）

#### 【JSME 金属カスクバスケット用アルミニウム合金事例規格の廃止】

- ・破壊靱性及び耐衝撃特性に関する懸念
- ・強度設定に関する懸念
- ・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および事例規格廃止

#### 【3000系アルミニウム合金の経年変化の課題】

- ・200℃→100℃×60年の条件は過時効を考慮する必要がある
- ・母相中のMg固溶量が減少するとMgによる固溶強化が低下する
- ・平衡固溶度を超えたMgの析出によりMg固溶量が減少する
- ・Mgの平衡固溶度は温度に依存し、固相では温度の上昇に伴って増加する → 高温では平衡固溶度が増加するため加速試験が困難
- ・Mn系析出物のAl<sub>6</sub>(Mn,Fe)は、過時効熱処理で模擬することが可能だが、析出物が粗大化すると分散強化が期待できない  
→ 組織観察でMn系析出物の粗大化を確認する必要がある
- ・析出物が粗大化すると靱性や強度が劣化する恐れがある
- ・Si,Cu,Zn等の不純物元素はMg固溶量を減少させる要因になる  
→ 不純物元素の添加許容値を低く設定する必要がある

### バスケット用アルミニウム合金の設計用強度

#### 【HZ-A3004（規格材）】

- ・過時効後もMgによる固溶強化とMn系析出物による分散強化が期待できる
- ・JIS H 4000規格の範囲内の化学成分を設定  
→ 製造性の合理性確保
- ・Mgの固溶量を減少させる恐れがあることから、Si、Cu、Zn等の不純物元素の添加許容値を低く設定

#### 【機械試験用供試材】

- ・設計貯蔵期間経過後のMg固溶量を推定し、設計貯蔵期間経過後に固溶強化として寄与すると推定されるMgが最小値となるMg添加量に調整
- ・設計貯蔵期間の熱ばく露に伴う過時効条件（200℃→100℃×60年）を過時効熱処理 [ ] により模擬

#### 【材料試験】

- ・設計用強度の指標となる常温および高温引張試験の試験片に機械試験用供試材を用いて保守的な試験データを取得
- ・その他の物性試験やJ<sub>1C</sub>破壊靱性試験等では規格材の初期材および規格材に過時効熱処理を施したものを使用
- ・J<sub>1C</sub>破壊靱性試験で靱性を有することを確認

#### 【設計用強度の規定】

- ・JSME新規材料採用ガイドラインに準拠

#### 【設計貯蔵期間経過後のMg固溶量の推定】

- ・計算材料科学 [ ] によりMg固溶量を推定  
→ 既知試験文献および過時効熱処理実験により妥当性を確認

#### 【過時効熱処理条件の設定】

- ・Mnの再固溶を懸念し加熱温度を300℃未満に設定
- ・LMPにより加熱温度、加熱時間を設定

## 2. 指摘事項（コメント）への回答

（つづき）

### 【計算材料科学による設計貯蔵期間経過後のMg固容量の推定①】

計算材料科学における [ ] に基づいて、 [ ]  
 [ ] 状態図を予測する手法である。

**実験値を模擬した状態図を計算することが可能**である。 [3]

以下の例は、Al-Mg二元系平衡状態図について、 [ ] による計算結果と実験結果の比較を示しており [4]、計算状態図が実験値とよく一致していることから、 [ ] による平衡状態図の計算は妥当と考えられる。

HZ-A3004-H112は、 [ ] により析出物の種類や生成温度を推定している。

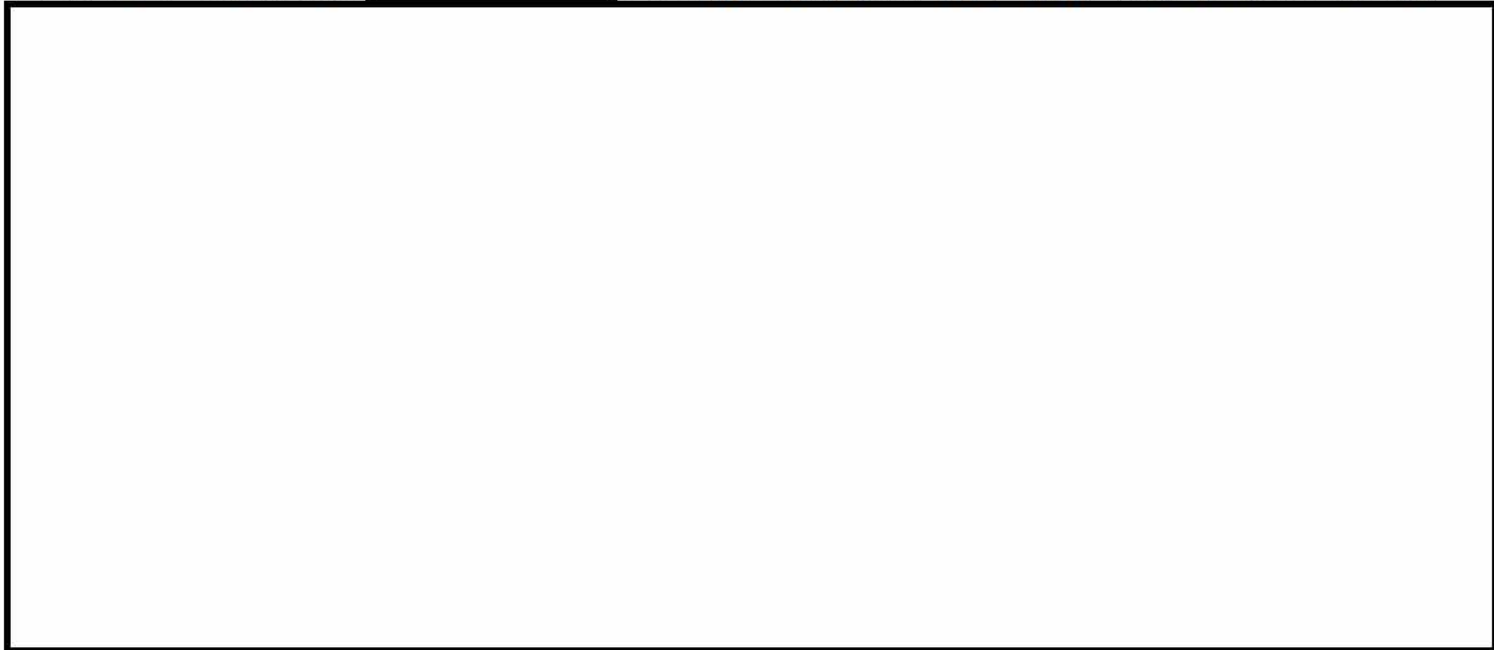


図5 Al-Mg二元系平衡状態図における計算状態図と実験結果の比較 [4]

## 2. 指摘事項（コメント）への回答

（つづき）

### 【計算材料科学による設計貯蔵期間経過後のMg固容量の推定②】

計算材料科学における [5] [6]

[ ]

[ ] 析出物の核生成、成長および粗大化を予測する手法であり [7]、 [ ]

[ ] 状態図に基づいて、合金成分、保持温度及び時間などから、析出物の核生成、成長、粗大化を計算することにより、母相における元素の固容量や析出物の体積率などの時間変化が得られる。 [7]

以下の例は、10.5mass%Cr耐熱鋼における炭化物 ( $M_{23}C_6$ ) について、 [ ]

[ ] と実験結果の比較を示している。 [8]

[ ] 長時間の熱処理に伴う析出物の成長予測は実験値をよく模擬できており、 [ ] 析出物の成長予測は妥当と考えられる。



## 2. 指摘事項（コメント）への回答

（つづき）

### 【計算材料科学による設計貯蔵期間経過後のMg固容量の推定③】

図7は、HZ-A3004-H112における200℃の過時効熱処理に伴うMg固容量の変化を示しており、3,000時間の過時効熱処理において、Mg固容量の変化を予測する計算結果は、実験値をよく模擬できている。

HZ-A3004-H112の経年変化の評価では、析出物の生成、成長および粗大化によるMg固容量の変化の計算において、

妥当性を有する金属組織変化を予測し、設計貯蔵期間を経たHZ-A3004-H112と過時効熱処理を施した機械試験用供試材が、保守的に同等となる化学成分（Mg添加量）を推定している。



図7 HZ-A3004-H112の200℃過時効熱処理に伴うMg固容量の変化（実験結果と計算結果の比較）

図8 HZ-A3004-H112及び機械試験用供試材の熱処理に伴うMg固容量変化に関する計算結果



## 2. 指摘事項（コメント）への回答

（つづき）

### 【過時効熱処理の条件設定におけるLMPについて】

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。

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。

$$LMP = T \text{ [温度]} \times (\log t \text{ [時間]} + C \text{ [材料定数]})$$

過時効熱処理の条件設定におけるLMPの材料定数Cは、（独）原子力安全基盤機構が実施した試験の値を参考に14.0としている。また、設計貯蔵期間の熱履歴は、アルミニウム母相中の構成元素に生じる拡散の影響を保守的に考慮して200℃×60年とし、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℃未満に設定した。

### 【LMPの材料定数Cについて】

LMPの材料定数Cについて、（独）原子力安全基盤機構は、図9に示す通り、A1100-O材のクリープデータから14を導出している。<sup>[9]</sup> LMPの材料定数Cの値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は純アルミニウムより強度を高めたAl-Mn系合金であるが、母相がアルミニウムであるため、過時効熱処理の条件設定では反応速度論を保守的に考慮し、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C = 14を採用することとしている。



図9 アルミ材のクリープデータに基づくLMP定数の同定<sup>[9]</sup>

## 2. 指摘事項（コメント）への回答

（つづき）

項目	考え方の説明	参考文献の記載内容
Mg固容量の減少による固溶強化等の強化機構の低下による材料強度への影響	<p>アルミニウム合金に添加されたMgは母相中に固溶され、固溶限を超えるMgは、<math>Mg_2Si</math>等の金属間化合物を形成して析出し、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する。</p> <p>過飽和から平衡固溶度までMg固容量が減少することに伴い、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。</p>	<p>文献 [10] 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合金の鑄塊の組織から<math>Mg_2Si</math>と<math>Al_6(Mn,Fe)</math>相が観察されている。</p> <p>文献 [11] 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。</p> <p>文献 [12] では、固溶強化元素が長時間の熱処理により析出し、平衡固容量程度まで減少することが説明されている。</p>
Mgによる固溶強化以外の強化機構に対する経年変化の影響	<p>アルミニウム合金に添加されたMnとFeは、製造過程において<math>Al_6(Mn,Fe)</math>として析出し、析出した<math>Al_6(Mn,Fe)</math>は、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><math>Al_6(Mn,Fe)</math>は過時効熱処理（300℃未満）による模擬が可能であるが、<math>Al_6(Mn,Fe)</math>等の析出物が粗大化すると、材料の強度や靱性が劣化する恐れがあるため、60年の設計貯蔵期間を経ても粗大化しないことを過時効熱処理後の組織観察で確認する必要がある。</p>	<p>文献 [10] 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二元系状態図から<math>Al_6(Mn)</math>などのMn系析出物は、300℃以下で平衡相であることが読み取れる。</p> <p>文献 [12] 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>
材料強度に対する経年変化に伴う不純物元素の影響	<p>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等の不純物元素が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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p>	<p>文献 [10] では、3004合金の鑄塊の組織からMgとSiで形成される金属間化合物の<math>Mg_2Si</math>が観察されている。</p> <p>文献 [13] では、Al-Zn-Mg-Cu系合金における、<math>Mg_3Zn_3Al_2</math>や<math>Al_2CuMg</math>等のMgを含む金属間化合物の生成が説明されている。</p>

## 2. 指摘事項（コメント）への回答

（つづき）

項目	考え方の説明	参考文献の記載内容
<p>計算材料科学に基づく計算により設計貯蔵期間経過後のMg固容量を推定する方法</p>	<p>計算材料科学における [ ] [ ] [ ] [ ] であり、実験値を模擬した状態図を計算することが可能である。 また、 [ ] [ ] 析出物の核生成、成長及び粗大化を予測する手法であり、 [ ] [ ] 状態図に基づいて、合金成分、保持温度及び時間などから母相における元素の固容量や析出物の体積率などの時間変化を得ることができる。 したがって、HZ-A3004-H112の設計貯蔵期間経過後のMg固容量は、MgやMnなどの合金成分、熱ばく露から想定される保持温度及び設計貯蔵期間などから、推定することが可能であると考えられる。</p>	<p>文献 [3] では、 [ ] [ ] 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。 文献 [4] では、Al-Mg二元系状態図について、 [ ] 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。 文献 [8] では、 [ ] [ ] 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>
<p>材料の経年変化に基づく長期健全性を考慮した保守的な設計用強度の設定方法</p>	<p>60年の設計貯蔵期間における熱ばく露（200℃→100℃×60年）を模擬するため、LMPにより加熱条件を設定した加熱処理が過時効熱処理であり、300℃未満の過時効熱処理により、T相（Al-Cu-Mg-Zn）を除く、Mg<sub>2</sub>SiやAl<sub>6</sub>(Mn,Fe)等の設計貯蔵期間経過後の析出状態の模擬が可能であると考えられる。 HZ-A3004-H112は、60年の設計貯蔵期間経過後のMg固容量を計算材料科学に基づく計算により推定し（詳細については補足説明資料1-1 別紙1を参照）、設計貯蔵期間経過後に固溶強化に寄与するMg固容量が最小値となるMg添加量に調整した機械試験用供試材に対し、過時効熱処理を施したものを供試材として材料試験に用いることにより、保守的な設計用強度を規定する。</p>	<p>文献 [14] 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。 文献 [9] では、工業用純アルミニウムのクリープデータからLMPの材料定数Cの値に14を使用したことが説明されている。 文献 [10] では、Al-Mn二元系状態図からAl<sub>6</sub>(Mn)などのMn系析出物は、300℃以下で平衡相であることが読み取れる。</p>

### 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 $Mg_2Si$ 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。<sup>[10]</sup> <sup>[11]</sup>（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について、設計貯蔵期間中の熱ばく露に伴う過時効条件（200℃→100℃×60年）に伴って、Mgによる固溶強化の低下を模擬したものが、機械試験用供試材に過時効熱処理  を施したものであり、設計用強度の設定については、過時効条件を模擬した機械試験用供試材を材料試験に用いることにより、Mgによる固溶強化が低下した（過時効）HZ-A3004の強度を包絡できるものと考えられる。

したがって、HZ-A3004-H112の長期健全性に係る説明では、「HZ-A3004の設計用強度は、設計貯蔵期間中の熱ばく露に伴う過時効による強度低下を考慮し、設計貯蔵期間中の熱ばく露に伴う過時効条件（200℃→100℃×60年）を模擬した機械試験用供試材の材料試験により得られた機械的性質を保守的に包絡するように設定する。」との記載を追記する。

## 2. 指摘事項（コメント）への回答

(つづき)

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]	
[4]	
[5]	
[6]	
[7]	
[8]	

## 2. 指摘事項（コメント）への回答

(つづき)

No.	参考文献
[9]	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]	鈴木寛, 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
[11]	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
[12]	茂山治久, 高橋由紀夫, 三浦直樹, 巨真澄, 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）
[13]	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
[14]	（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

### 3. 補正申請における主な変更点について

### 3. 補正申請における主な変更点について

補正申請における主な変更点を以下に示す。

No.	申請書の内容	補正での変更内容	変更理由	対応状況
1	貯蔵施設における特定兼用キャスク 周囲温度 最低温度 -11℃	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℃	特定の施設を前提としない条件とするため	次回審査会合で説明（P.25 参照）
2	—	No. 1 の最低温度の変更を反映した 閉じ込め機能の評価	最低温度を変更したため	次回審査会合で説明（P.26 参照）
3	設計貯蔵期間中に本体内部が負 圧維持されることを評価	設計貯蔵期間中に本体内部を負 圧維持できる漏えい率が金属ガス ケットの設計漏えい率を満足するこ とを評価	基準適合性説明の適正化 （貯蔵前の漏えい検査の判定 基準として確認可能な漏えい 率であることを確認するため）	第15回審査会合で説明済み
4	—	設計飛来物の追記	評価条件の明確化のため	第16回審査会合で説明済み



### 3. 補正申請における主な変更点について

#### 第13回審査会合 資料 1 – 1 「貯蔵施設における特定兼用キャスク周囲温度 最低温度」の 変更箇所

- 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。

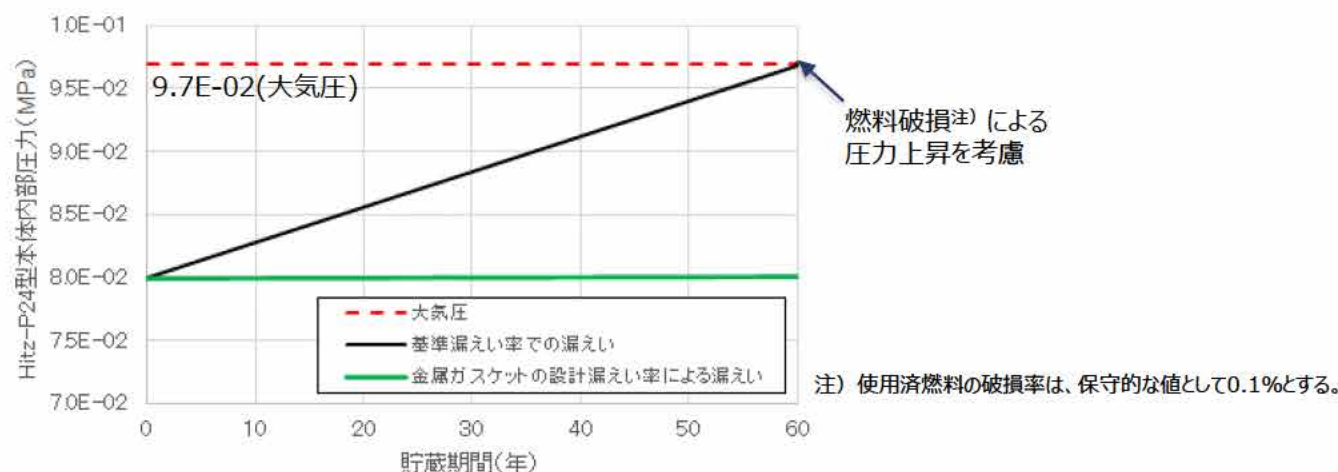
項目	範囲又は条件
特定兼用キャスクの設計貯蔵期間	60年以下
特定兼用キャスクの貯蔵場所	貯蔵建屋内
特定兼用キャスクの貯蔵姿勢	基礎等に固定する設置方法（縦置き）
特定兼用キャスクの固定方法	下部トラニオン固定
貯蔵施設における特定兼用キャスク 周囲温度	最低温度 <u>-20°C</u> 最高温度 50°C
貯蔵施設における貯蔵建屋壁面温度	最高温度 65°C
地震力	加速度 水平2300Gal及び鉛直1600Gal 又は 速度 水平2m/s及び鉛直1.4m/s
津波荷重の算出条件	浸水深 10m 流速 20m/s 漂流物質量 100t
竜巻荷重の算出条件	風速 100m/s

#### 第15回審査会合 資料 1 – 1 最低温度の変更に伴う閉じ込め機能の評価の変更箇所

##### ● 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 <sup>3</sup> /s)	金属ガスケットの性能 (Pa・m <sup>3</sup> /s)
<u>2.31</u> ×10 <sup>-6</sup>	1.0×10 <sup>-8</sup> 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。

## 4. 補正申請における記載の適正化について

## 4. 補正申請における記載の適正化について

補正申請におけるバスケットに適用するアルミニウム合金（HZ-A3004-H112）の製造管理規定に定める機械的性質の記載の適正化

### ● 製造管理規定に定める機械的性質と常温における引張試験結果

材料名称	項目	試験方向	n数	試験結果 平均値	標準偏差	99%信頼 下限値
HZ-A3004-H112 (初期材)	引張強さ(MPa)	L	18	188	2.7	180
		T	18	184	2.8	176
	0.2%耐力(MPa)	L	18	89	1.5	84
		T	18	92	1.6	87
	伸び(%)	L	18	22	0.5	20
		T	18	20	0.4	18
機械試験用供試材 (過時効熱処理材)	引張強さ(MPa)	L	18	175	1.2	172
		T	18	170	1.0	166
	0.2%耐力(MPa)	L	18	81	0.8	78
		T	18	82	0.6	81
	伸び(%)	L	18	24	0.4	22
		T	18	22	0.5	20

申請書において、バスケットに適用するアルミニウム合金（HZ-A3004-H112）の製造管理規定に定める機械的性質には、上表の全ての試験結果に基づく99%信頼下限値の最小値を適用していたが、製造管理値としては、HZ-A3004-H112の初期材におけるJIS H 4000に定められた試験方向（L方向）の試験結果に基づく99%信頼下限値を適用することが製造管理上の取扱いとして適切であり、別添1（別添1-1-8ページ）の記載を次の通り適正化する。

表4.1 機械的性質

引張強さ MPa	耐力 MPa	伸び %
166以上	78以上	15以上



表4.1 機械的性質








引張強さ MPa	耐力 MPa	伸び %
180以上	84以上	15以上

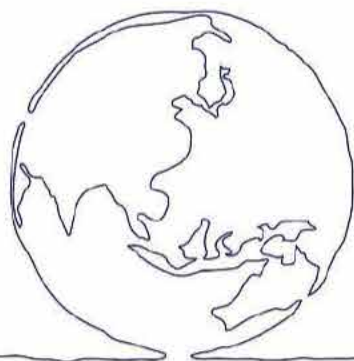
---

## 5. 今後の説明スケジュール

## 5. 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	1月～3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						▼11/29 審査会合
4条 地震による損傷の防止						▼6/30 審査会合
5条 津波による損傷の防止						▼6/30 審査会合
6条 外部からの衝撃による 損傷の防止						▼6/30 審査会合
16条 燃料体等の取扱施設 及び貯蔵施設						▼11/29 審査会合
		▼2/8 審査会合	▼3/29 審査会合	▼6/30 審査会合		



# 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/>

無断複製・転載禁止 日立造船株式会社