

# 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)

2023.3.31  
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. 今後の説明スケジュール
4. 参考資料

# 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。	第23回(今回)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、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。	第23回(今回)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
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"> <li>• 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</li> <li>• 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</li> <li>• 不純物元素の経年変化による材料強度への影響</li> <li>• 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</li> <li>• L M Pを用いた過時効熱処理条件の設定</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>	第23回(今回)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、「2.指摘事項への回答」で詳しく説明する。</p>	第23回(今回)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
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	バスケット用アルミニウム合金の材料強度は、設計貯蔵期間にバスケット材料の温度が低下しない方が、温度が低下するよりも保守的であるため、温度が低下する場合の強度検討は不要である。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。
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、アレニウスの式から導出されるものであり、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、「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。
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	過時効熱処理条件は、ラーソン・ミラー・パラメータに基づいて設定されており、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。また、拡散距離の観点においても妥当である。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。
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、「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。

## 2. 指摘事項（コメント）への回答

指摘事項No.15

指摘事項No.16

指摘事項No.17

指摘事項No.18

## 2. 指摘事項（コメント）への回答

### 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条件（200℃×60年）は、温度が低下する条件（200℃→100℃×60年）よりも、材料強度を保守的に評価できる。そのため、**温度が低下する場合の強度検討は不要**である。

### 【説明】 Mg固容量およびMn系分散相に対する冷却速度の影響の考え方

#### 【Mg固容量に対する冷却速度の影響】

図1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固容量を推定した結果を示す。200℃×60年の熱ばく露を行ったHZ-A3004-H112材は、Mg固容量が200℃→100℃×60年と比較して同等かわずかに低く、**Mgによる固溶強化は200℃×60年の熱ばく露で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。
- ・高温に保持されるほどAl中のMnの拡散速度は速い。

以上より、**Mn系分散相の粗大化については、バスケット材料の温度が低下するよりも、200℃×60年の熱ばく露で保守的に評価できる。**

## 2. 指摘事項（コメント）への回答

(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1 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

## 2. 指摘事項（コメント）への回答

### 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。**

**したがって、アレニウスの式から導出されるラーソン・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。**

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出来ない**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。**



## 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・パラメータの適用の妥当性に関する説明

アルミニウム合金を含む金属の相変態、析出、回復、再結晶など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[1]。

ラーソン・ミラー・パラメータ（以下「LMP」という）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方法**であり[2]、クリープ試験で頻繁に用いられている。

クリープ試験における高温定常クリープ速度は、格子拡散の活性化エネルギーと密接な関係があり[3]、**格子拡散がアレニウスの関係に従う**ことから、クリープ試験はLMPを用いて整理することができる。

図2に示す応力-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。

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、再結晶などの拡散に関わる反応においてアレニウスの式の適用は妥当であり、**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[1]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[2]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。
	文献[3]では、高温定常クリープ速度が格子拡散の活性化エネルギーと密接な関係を有していることが示されている。

## 2. 指摘事項 (コメント) への回答

(つづき)

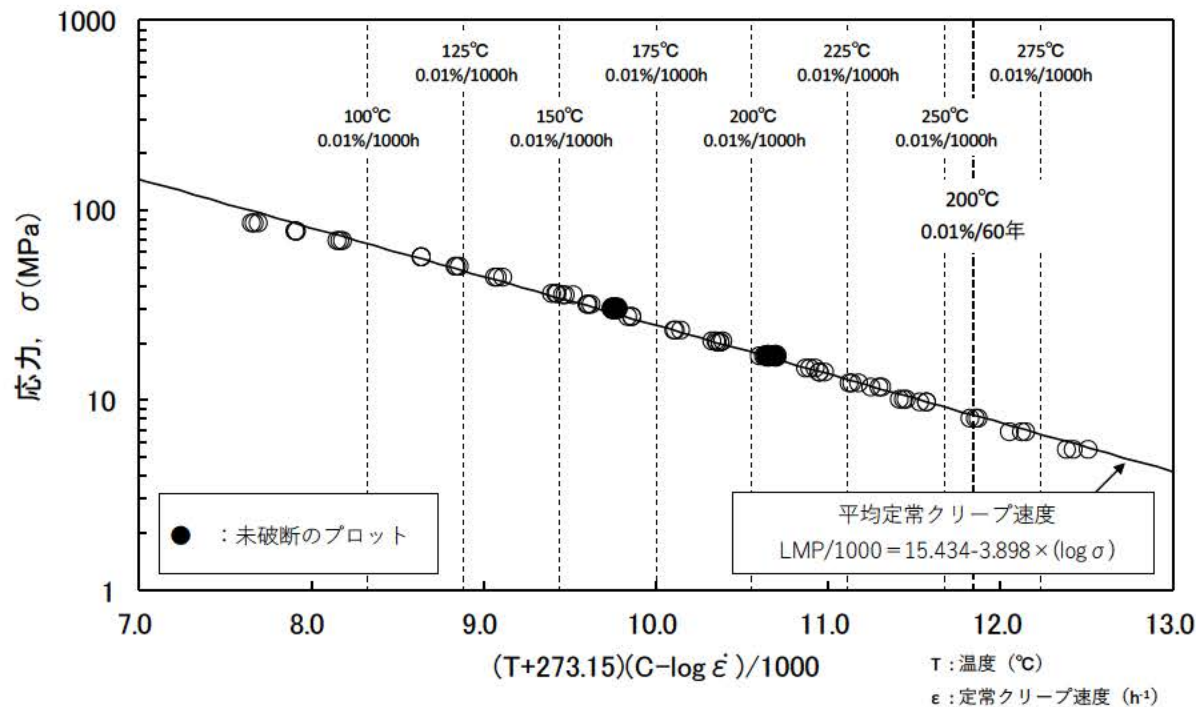


図2 LMPで整理した応力－定常クリープ速度プロット

## 2. 指摘事項（コメント）への回答

（つづき）

【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

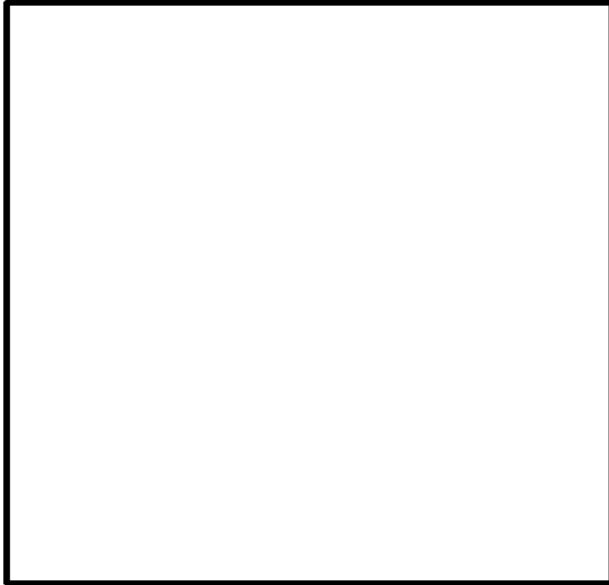


図3 アルミニウムの再結晶率と時間との関係[4]

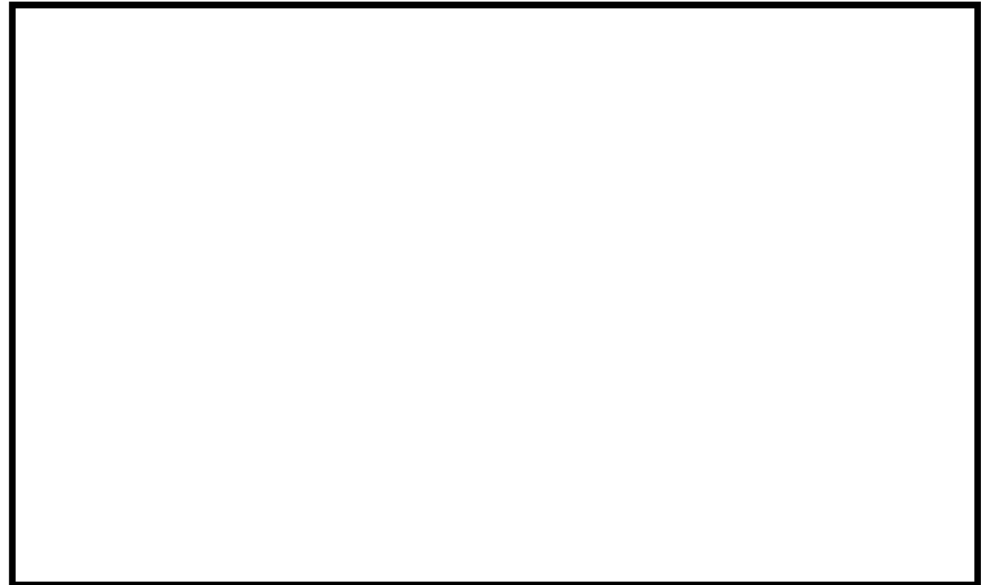


図4 アルミニウムの再結晶率と時間のLMPプロット

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[4]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



図5 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が適用できる。
- 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による整理ができない。

(つづき)

### 【説明】 設計貯蔵期間に生じる金属組織変化の模擬方法

表 1 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><b>LMPのみでは模擬出来ない。</b></p> <p>●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。</p> <p>→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。</p>
② Mn系分散相の粗大化	<p><b>LMPで模擬できる。</b></p> <p>●LMPに基づいた設計貯蔵期間と保守的に等価な過時効熱処理を機械試験用供試材に施すことで模擬</p>
③ 転位密度の低下	<p>→②、③、④はアルミニウム中の元素の拡散によって生じる現象であり、LMPによる温度-時間の換算が可能(17P_指摘事項No.16の回答で説明)</p>
④ 結晶粒の粗大化	<p>→「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(23P_指摘事項No.17の回答で説明)。</p>

## 2. 指摘事項（コメント）への回答

### 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いるため、**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】

・拡散距離の観点からも、Mn系分散相の粗大化に対しては、**設計貯蔵期間よりも過時効熱処理のほうが保守的**であることを確認している。

次頁以降で詳細を述べる。

**Mn系分散相の粗大化**  
LMPで模擬できることを説明

さらに補足として



**拡散距離の観点からも**  
**妥当性を確認**

## 2. 指摘事項（コメント）への回答

### 【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。**

拡散距離の観点からMn系分散相の粗大化について検討した。

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る。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。

また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8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、**設計貯蔵期間よりも過時効熱処理の方がMnの拡散距離が大きければ、Mn系分散相の粗大化を保守的に模擬できている**といえる。

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[5][6]。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[7]の値を引用した。

参考文献	文献[5]では、拡散係数Dを表す式が示されている。
	文献[6]では、拡散距離Xを表す式が示されている。
	文献[7]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。



## 2. 指摘事項（コメント）への回答

(つづき)

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \dots\dots\dots \textcircled{1} [5]$$

$$X = \sqrt{2D \cdot t} \dots\dots\dots \textcircled{2} [6]$$

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

表 2 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**ことが分かる。  
 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ている**といえる。

表 2 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="width: 100px; height: 20px;" type="text"/>	<input style="width: 50px; height: 20px;" type="text"/>



(つづき)



図6 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[7]

## 2. 指摘事項（コメント）への回答

### 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】

- ・過時効熱処理した機械試験用供試材はT相が析出していないと考えられる。
- ・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。

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り、特別な配慮は不要**である。

#### 【T相の析出による固溶強化の変化について】

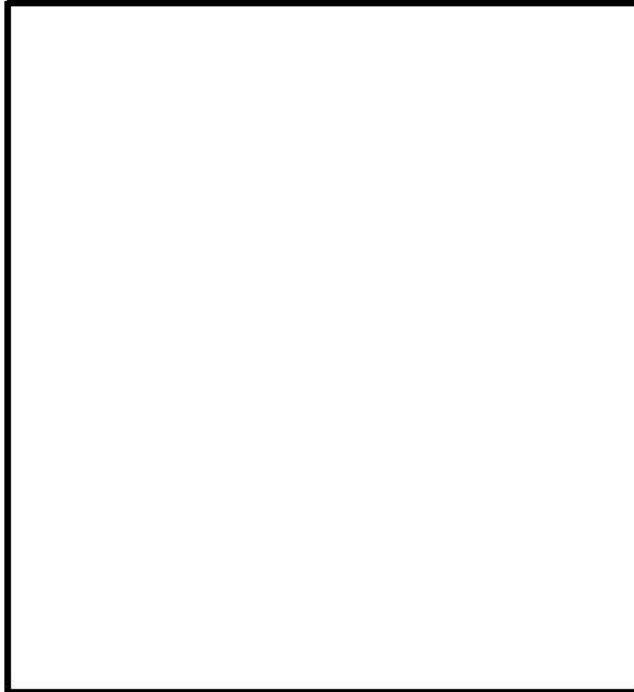
設計貯蔵期間を経たHZ-A3004-H112材は、T相(AlMgCuZn)が析出することで、母相におけるCu、Zn、Mgによる固溶強化が低下する。

表3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4および表5に示す通りであり、機械試験用供試材(初期材)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**小さく保守的であり、T相析出による固溶強化の低減について特別な配慮は不要**である。

## 2. 指摘事項（コメント）への回答

表3 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[8]



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包絡した成分設計になっている。

表4 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%]			
②	①が固溶強化におよぼす寄与[MPa]			
		<b>合計 19.28 [MPa]</b>		

(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5 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)

		Cu	Zn	Mg
③	添加量[mass%]	0.0100	0.0100	0.9467
④	③が固溶強化におよぼす寄与[MPa]	0.47	0.05	18.57
		<b>合計 19.09 [MPa]</b>		

(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。

大  
▽  
小

保守的

参考文献 文献[8]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。

## 2. 指摘事項（コメント）への回答

（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7はAl-Zn-Mg-Cu合金のTEM組織[9]の例を示すが、析出物の大きさは数nmである。一方、図8に示すHZ-A3004-H112材のMn系晶出物の大きさは25 $\mu$ m程度である。析出物を欠陥寸法として考えた場合、T相はサイズが小さく、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衝撃値】

- ・図9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[10]。
- ・表7に示す通り、多量のCu、Mg、Znが含まれて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延性破壊を呈している。

以上より、**HZ-A3004-H112材は、Cu、Mg、Zn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[9]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[10]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。



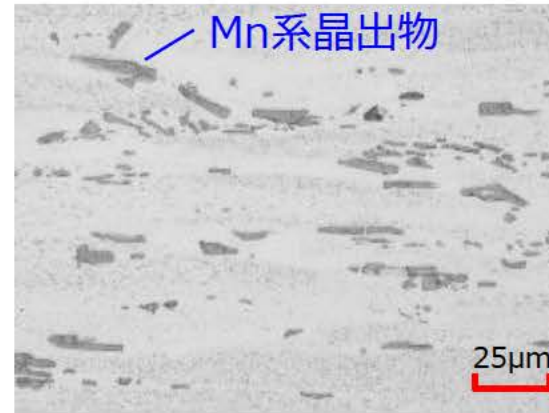
## 2. 指摘事項（コメント）への回答

(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。

図7 Al-2.7%Zn-3.2%Mg-0.2%Cu合金を150℃で60,000sec時効したTEM組織[9]



Mn系晶出物の大きさは約**25μm**である。

図8 HZ-A3004-H112材のミクロ組織

表6 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[7]	-	-	<b>0.20</b>	-	<b>3.20</b>	<b>2.70</b>	残り
			↓		↓	↓	
HZ-A3004-H112	0.15 以下	0.7 以下	<b>0.05</b> 以下	1.1 ~1.5	<b>1.0</b> ~1.3	<b>0.05</b> 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

## 2. 指摘事項（コメント）への回答

(つづき)



図9 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[10]

表7 文献とHZ-A3004-H112材における不純物元素の量の比較

	Cu	Mg	Zn
文献[11]	2.4 %	2.2 %	9.10 %
HZ-A3004-H112	0.05 %以下	1.0～1.3 %	0.05 %以下

多量のCu、Mg、Znが含まれて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延性破面を呈している。  
HZ-A3004-H112材は、文献[11]よりもCu、Mg、Zn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。

## 2. 指摘事項（コメント）への回答

(つづき)

No.	参考文献
[1]	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.
[2]	(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]	門間改三, 須藤一, 及川洪, 合金における高温クリープと拡散との関連性, 日本金属学会誌 第28巻 6号, (1964), p308-312.
[4]	里達雄ら, アルミニウム大全, 日刊工業新聞社, (2016) ,p144.
[5]	藤川辰一郎, 拡散の基礎, 軽金属 Vol.46 No.4, (1996), p202-215.
[6]	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.
[7]	平野賢一, アルミニウム中の拡散, 軽金属 Vol.29, No.6, (1979), p249-262.
[8]	(一社) 日本軽金属学会, アルミニウムの組織と性質, (1991), p160.
[9]	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.
[10]	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










---

### 3. 今後の説明スケジュール

### 3. 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				2023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	4月～6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			 ▼6/30 審査会合		11/29 ▼ 審査会合	▼2/16 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	 2/8 審査会合	▼3/29 審査会合	▼6/30 審査会合		 ▼11/29 審査会合		

---

## 4. 参考資料

第23回審査会合（2023年2月16日）において、機械試験用供試材の過時効熱処理条件へのLMPの適用性についてコメントがあった。ここでは、クリープ強度がLMPで単純に整理できない事例（高Crフェライト系耐熱鋼）として、高Crフェライト系耐熱鋼の余寿命評価について説明する。

### 【説明】

高Crフェライト系耐熱鋼において、**長時間側のクリープ強度が想定よりも低くなる**ことが明らかとなり、寿命評価式の改正が何度か行われてきた。

長時間側でクリープ強度が低くなる要因としては、クリープ試験中の**材料劣化機構に違いがある**こと（ラスの粗大化や消滅、金属組織の回復など）が挙げられている。

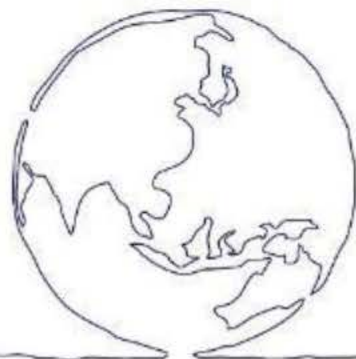
図10は高Crフェライト系耐熱鋼のLMPによる余寿命評価した結果を示す[11]。**現在、クリープ強度は、図10のとおり短時間側と長時間側の2本のLMPで評価されているが、材料劣化機構が同じ範囲に対しては1本のLMPで整理できている。**

図10 高Crフェライト系耐熱鋼のLMPによる余寿命評価[11]

参考文献 文献[11]では、高Crフェライト系耐熱鋼の余寿命評価がLMPで行われていることが示されている。

(つづき)

No.	参考文献
[11]	経済産業省,「発電用火力設備に関する技術基準の解釈及び発電用火力設備における高クロム鋼に対する寿命評価式について」の一部改正（令和元年7月9日）



# 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