

福島第一原子力発電所

使用済燃料乾式貯蔵容器用バスケットの強度及び
破壊靱性・耐衝撃特性に係る性能評価について

平成 28 年 1 月

東京電力株式会社

【目次】

1.	はじめに	1
2.	乾式貯蔵容器について	1
3.	事例規格の廃止の理由について	3
4.	これまでの乾式貯蔵容器の許容値の設定等の考え方	4
5.	日本機械学会の指摘に対する考察	5
6.	健全性評価の方法	6
7.	健全性評価結果	6
8.	添付資料	7

は、商業機密又は核物質防護上の観点から公開できません。

1. はじめに

本書は、平成 27 年 12 月 16 日付原規規発第 1512167 号で発出された「金属キャスクバスケット用アルミニウム合金に係る事例規格の廃止に伴う対応について（指示）」に従い、福島第一原子力発電所で使用中の使用済燃料乾式貯蔵容器（以下「乾式貯蔵容器」という）について、強度及び破壊靱性・耐衝撃特性に係る性能について評価を実施し健全性を確認するとともに、新たに安全を確保するための対策を講じることは不要であることを確認したものである。

2. 乾式貯蔵容器について

(1) 乾式貯蔵容器

アルミニウム製バスケット材を使用している乾式貯蔵容器の仕様を下表に示す。

表 1 乾式貯蔵容器の仕様

項目	使用済燃料乾式貯蔵容器（中型）	使用済燃料乾式貯蔵容器（大型）
収納体数		
全長		
胴、底板		
中性子遮へい材		
一次蓋		
二次蓋		
バスケット		

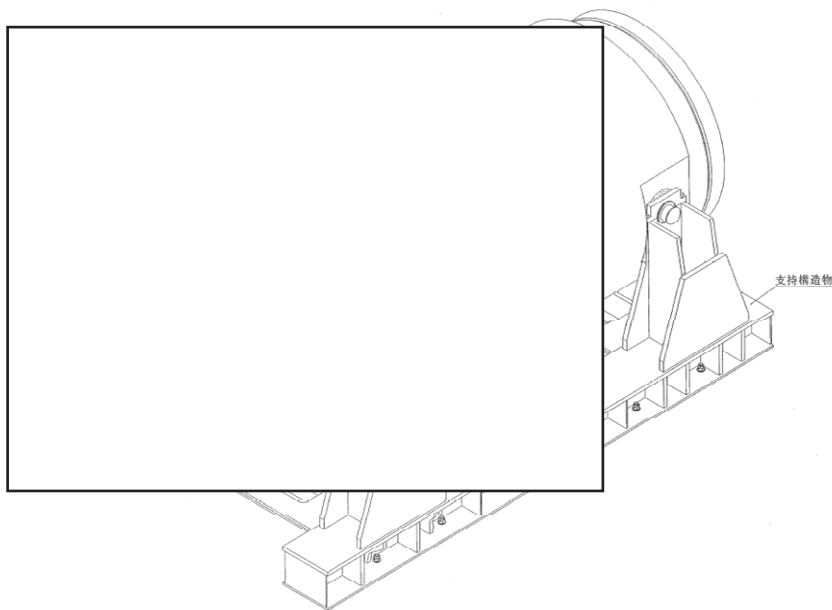


図 1 乾式貯蔵容器構造図

(2) 福島第一原子力発電所での使用状況

福島第一原子力発電所では 20 基の乾式貯蔵容器が使用されているが、設置の時期や容器の種類がそれぞれ異なっている。下表に整理した結果を示す。

表 2 福島第一原子力発電所での乾式貯蔵容器使用状況

		4号機	5号機	6号機
第1期 工事	基数	4基 ^{※1}	—	5基 ^{※2}
	使用 開始日	H7.8.29 (ホ項使用前検査 合格)	—	H7.8.29 (ホ項使用前検査 合格)
第2期 工事	基数	4基 ^{※1}	4基 ^{※1}	3基 ^{※2}
	使用 開始日	H25.7.3/9/15/27 (据付日)	H25.7.30、 H25.8.6/13/19 (据付日)	H25.8.30、 H25.10.8/14 (据付日)

※1：37体収納、※2：52体収納

(3) 乾式貯蔵容器のバスケット材について

福島第一原子力発電所の乾式貯蔵容器で使用しているバスケット材は、強度部材として 1%B-A6061-T651、A6061-T651 の 2 種類の材料を用いている。一般にアルミニウム合金はアルミニウムに様々な金属元素を添加することで強度を向上させているが、一般的な強化機構である固溶強化、析出強化、粒子分散強化、加工硬化、結晶粒微細化のうち、A6061-T651 は Mg、Si を添加させて人工時効硬化処理を行うことで Mg₂Si を細かく析出させる析出強化が主な強化機構となっている。但し、Mg₂Si は貯蔵中の加熱により粗大化するため、強度は減少することとなる。(添付資料 1)

表 3 に 1%B-A6061-T6/T651、A6061-T6/T651 の事例規格の化学成分を示す。

表 3 1%B-A6061-T6/T651、A6061-T6/T651 の事例規格の化学成分

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	B	その他	
										個々	合計
1%B-A6061-T6/T651	0.40 ~0.8	0.7 以下	0.15 ~ 0.40	0.15 以下	0.8~ 1.2	0.04 ~ 0.35	0.25 以下	0.15 以下	0.8 ~ 1.2	0.05 以下	0.15 以下
A6061-T6/T651	0.40 ~0.8	0.7 以下	0.15 ~ 0.40	0.15 以下	0.8~ 1.2	0.04 ~ 0.35	0.25 以下	0.15 以下	—	0.05 以下	0.15 以下

3. 事例規格の廃止の理由について

日本機械学会は廃止の理由について、事例規格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ていないこと、またバスケット用アルミニウム合金の設計手法や同事例規格の制定方法等を規定した金属キャスク構造規格 2007 年版添付 3-3 等も、鉄鋼材料とアルミニウム合金の相違点に対する配慮やアルミニウム合金を高温で使用する場合の問題点に対する考慮等が十分ではないためとしている。

具体的な懸念事項は、廃止された事例規格に共通のものや個別事例規格毎のものがあるが、福島第一原子力発電所で使用している乾式貯蔵容器に用いられている A6061 系 (1% B-A6061-T651、A6061-T651) に係る事項は以下の見解の通りである。

(1) 強度 (S_y 、 S_u 設定値) について

A6061 系材料の強化機構は主に、 Mg_2Si の析出強化であり、他にも Al_2CuMg により析出強化が期待されるが、長時間の入熱による析出物の粗大化により効果は失われ、加えて Mg が Si、Cu 析出物に取られて Mg 固溶強化も期待できないので、60 年後の状態を期待する強化機構は何もない (純アルミと大差なし)。

(2) 破壊靱性・耐衝撃特性について

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・耐衝撃特性の指標として鉄鋼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り、破壊靱性・耐衝撃特性の判定指標としては J_{IC} のほうが適切である。また A6061 系については、60 年後の状態を強度メカニズム的に純アルミと大差なしなので、エネルギー吸収能や過大変形防止の点では期待できない。特に強度の高い初期状態では、析出強化に伴う破壊靱性値の低下が予想されるが J_{IC} 値等のデータがない。

4. これまでの乾式貯蔵容器の許容値の設定等の考え方

乾式貯蔵容器の第1期工事での工事計画の申請においては、使用済燃料乾式貯蔵容器技術基準による評価、第2期工事は金属キャスク構造規格 添付 3-3 に準じた評価（事例規格と同じ）を実施している。材料強度について前者は告示 501 号と許容値の設定方法を合わせているため、過時効による強度低下については考慮されたものとなっていないが、後者の事例規格は過時効による強度低下を考慮したものとなっている。また、破壊靱性評価については、使用済燃料乾式貯蔵容器技術基準は要求がないが、事例規格では設計建設規格で破壊靱性評価が免除されていない材料（ボロン入りアルミニウム合金等）について破壊靱性評価が要求されている。以下に事例規格における規定の考え方を示す。

(1) 事例規格における設計引張強さ (S_u)、設計降伏点 (S_y) の設定について

事例規格における S_u 、 S_y の設定方法については、試験材に過時効熱処理を行った上で引張試験を実施している。過時効熱処理の条件は、60 年間に使用済燃料から受ける熱をそのまま模擬することはできないため、ラーソンミラーパラメータ（以下「LMP」という）が適用できるものとして、実際よりも高温となるように熱を試験材に与えて試験時間を短くしている。（添付資料 2-1）

(2) 事例規格における許容引張応力 (S) の設定について

事例規格における S の設定方法については、試験材は過時効熱処理を行わない材料を用いてクリープ破断試験を実施している。クリープ破断試験の条件として温度と引張荷重を設定するが、温度の条件として使用済燃料から受ける熱を模擬して試験を行うと破断まで長期間を要することになるため LMP が適用できるものとして、実際よりも高温となるように熱を試験材に与えて試験時間を短くしている。（添付資料 2-2）

(3) 破壊靱性

事例規格の申請時に、初期材について日本機械学会から問題とされた判定基準を用いてシャルピー試験を行っているが、横膨出量が判定基準を満たさない結果となっている。このため、実際の乾式貯蔵容器の申請段階では動的破壊靱性試験による評価が必要となるが、事例規格では、動的破壊靱性試験を最低使用温度で行い、脆性破壊を引き起こすことなく安定的延性破壊することを確認している。

なお、乾式貯蔵容器の許認可申請においては金属キャスク構造規格 添付 3-3 に準じて応力拡大係数 K 値による動的破壊靱性評価を行い、問題ないことを説明している。

5. 日本機械学会の指摘に対する考察

LMP の適用は、原則として大きな組織変化が生じていないことであり、A6061 材は前項の通り過時効による組織変化を引き起こしている途中段階で許容値を内挿で求めている。A6061 についてはこれまで多くのデータを採取して LMP の適用性については確認を行っており、また LMP の設定においても実際には温度低下するところを初期温度一定として保守性を考慮しているが、高温で 60 年に及ぶ長期間加熱されるということがアルミニウム合金において他に実績がない使用環境であることを鑑み、許容値の設定にあたっては組織変化が生じない領域まで過時効熱処理を行う等、慎重な姿勢が必要であったと考える。

また破壊靱性においては、アルミニウム合金は FCC 金属であるため、BCC 金属に見られるようなへき開破壊及び温度変化に伴う脆性－延性遷移現象はなく、延性破壊であることが文献等で明らかなることから、脆性材の評価である K_{IC} 値によるものでなく、弾塑性破壊靱性評価 (J_{IC}) による方法が適切と考える。

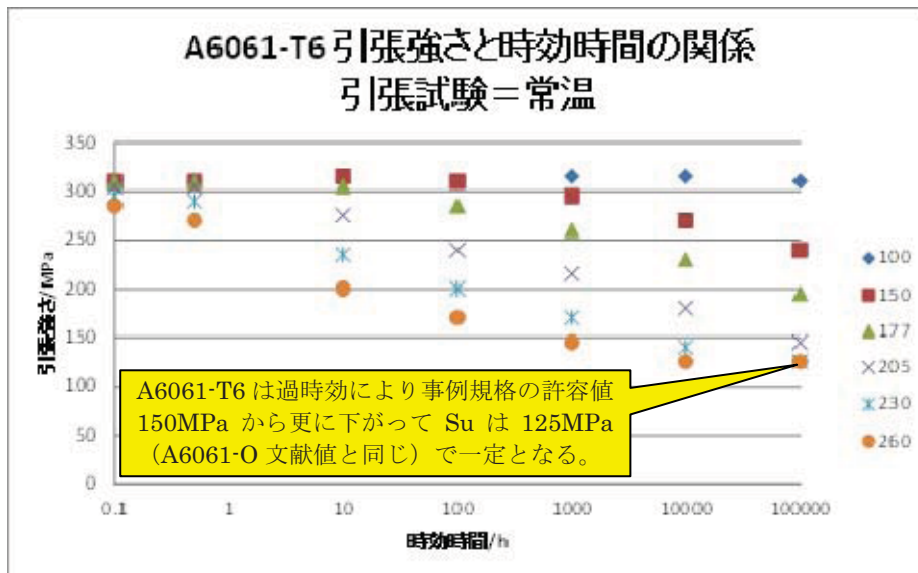


図 2 引張強さと過時効時間の関係

6. 健全性評価の方法

(1) 強度について

日本機械学会の指摘を踏まえ、純アルミ系合金 A1000 系材料で健全性評価を実施する。具体的には、一般的に普及されてデータも多い A1100-0 材を使用して評価を実施する。以下に A1100-0 並びに A6061 系の事例規格の許容値を表 4 に示す。(添付資料 3)

表 4 最高使用温度 225°Cにおける各許容応力 [MPa]

材料	Sy	Su	Sm	S
A1100-0	15 ^{※1}	30 ^{※1}	10 ^{※2}	4.8 ^{※3}
1%B-A6061	68	98	33	15
A6061	66	100	33	22

※1 : PROPERTIES OF ALUMINIUM ALLOYS、ASM International、1999.

※2 : 上記※1 の文献データを用いて日本機械学会 材料規格 添付 1 の付録 3 に基づき設定

※3 : Table 1B ASME Sec. II, Part D (Metric), 2013.

(2) 破壊靱性、耐衝撃特性

破壊靱性については、日本機械学会の指摘を踏まえ、最も厳しい初期の 1%B-A6061-T6/T651 について J_{IC} による評価を実施する。

また、エネルギー吸収能や過大変形防止については、例えば 9m 落下時にバスケットが塑性変形した後に臨界防止機能上問題となる過大変形 (破断含む) しないかどうかという点になるが、本乾式貯蔵容器については、9m 落下事象のような厳しい事象はなく、後述するとおり、純アルミ系合金による評価でもバスケットにかかる応力は弾性範囲内であることから、エネルギー吸収能や過大変形について問題ないことを確認した。

7. 健全性評価結果

(1) 強度評価結果

福島第一第 4 号機、第 5 号機、第 6 号機の工事計画認可申請書のバスケットの応力計算書を添付資料 4-1~4-3 に示す。いずれも許容値を満足することを確認した。

(2) 破壊靱性評価結果

バスケット格子の中央に長手方向全体に亘って欠陥を仮定し、バスケットにかかる最大荷重を用いて算出した J 積分値と試験を実施して求めた弾塑性破壊靱性値 J_{IC} との比較を行った結果、 J_{IC} を下回りバスケットが破壊されないことを確認した。(添付資料 5)

以上から、福島第一原子力発電所のアルミニウム製バスケットを使用している乾式貯蔵容器について、安全を確保するための新たな対策は不要であることを確認した。

8. 添付資料

- 添付資料 1 乾式貯蔵容器のバスケット材の強化メカニズム
- 添付資料 2-1 事例規格における設計引張強さ (S_u) 及び設計降伏点 (S_y) の設定方法
- 添付資料 2-2 事例規格における許容引張応力 (S) の設定方法
- 添付資料 3 A1100-0 の文献値に基づく設計引張強さ (S_u)、設計降伏点 (S_y) 及び許容引張応力 (S) の設定
- 添付資料 4-1 福島第一第 4 号機のバスケットの応力計算結果
- 添付資料 4-2 福島第一第 5 号機のバスケットの応力計算結果
- 添付資料 4-3 福島第一第 6 号機のバスケットの応力計算結果
- 添付資料 5 乾式貯蔵容器用アルミバスケットの破壊靱性評価

以上

乾式貯蔵容器のバスケット材の強化メカニズム

強化機構	主な因子物質	初期材	貯蔵末期
固溶強化	Mg	○ アルミ母相中に固溶している量は、固溶強化に寄与する。時効処理により、Mg の大半は、微細析出物 (Mg ₂ Si 等) として析出しており、初期材の強化機構として寄与は小さい。	○ 貯蔵期間 60 年後のバスケット温度は 100℃程度まで低下するが、この状態で固溶している量は、固溶強化に寄与する。
析出強化	Mg ₂ Si, Al ₂ CuMg	○ 時効処理により、微細析出物が生成し、初期材の強化機構に寄与する。	× 貯蔵期間中に微細析出物が粗大化する。粗大化した析出物は粒子分散強化としての強度への寄与はあるが、60 年後の強化機構として析出強化は期待できない。
粒子分散強化	Al ₆ Mn	○ 材料製造時に微量の Mn 系分散粒子が生成し、初期材の強化機構に寄与する。	○ Mn 系分散粒子は熱安定性が高く、貯蔵期間中にその強化寄与の程度は変化しない。微量含まれる Mn 系分散粒子は、60 年後の強化機構として寄与する。
加工硬化	転位拘束	○ 引張矯正による加工硬化が初期材の強化機構に寄与する。	× 貯蔵期間中に加工硬化が回復するため、60 年後の強化機構としては期待できない。
結晶粒微細化	添加元素、転位等による組織微細化等	○ 製造時の結晶粒微細化により、初期材の強化機構に寄与する。	× 結晶粒の再結晶により、60 年後の強化機構としては期待できない。

事例規格における設計引張強さ (Su) 及び設計降伏点 (Sy) の設定方法

事例規格では、過時効による強度低下を踏まえ、設計引張強さ (Su) 及び設計降伏点 (Sy) を設定している。60 年後における過時効の状態を求めるために、実際に 60 年間加熱をすることは不可能であるため、加熱温度と加熱時間に一定の関係がある場合に適用可能な LMP による手法を用いてより高温で試験を行い、その分試験時間を短縮する手法を用いている。

すなわち、60 年間に相当する LMP を算出し、同様な LMP になるよう実機よりも高温の条件で、時間は短縮して加熱試験を行って試験材を製作し、引張試験で Su、Sy を求めて非時効材との強度低下率を算出している。LMP の式を以下に示す。

$$LMP = (273.15 + T) \times (C + \log(t))$$

ここで、T: 温度 (°C)、t: 時間 (h) とし、定数 C については 20 を使用した。

以下に 1%B-A6061-T6/T651 材の降伏点 (0.2%耐力) を一例にした許容値の設定手順を示す。

手順 1) 60 年間における LMP の算出

実機におけるバスケットの初期温度はおよそ 200°C 程度であり、60 年後に 100°C 程度まで低下する。この温度低下を考慮した 60 年間の LMP として 12000 と設定した。なお、この値は以下に示すとおりバスケットの温度低下を無視して、初期温度 195°C 一定で 60 年間継続するとした場合のとして LMP に相当する。

$$LMP = (273.15 + 195) \times (20 + \text{Log}(365 \times 24 \times 60)) = 12041 \div 12000$$

手順 2) 過時効処理条件の設定と過時効材の強度低下率の算出 (過時効材)

過時効熱処理の条件は、実機よりも高い温度として 250°C を選定、過時効熱処理時間は、手順 1 の LMP (12000) が包含されるよう設定する。過時効熱処理時間を 300h、1000h、3000h、5000h と設定すると、LMP は 11759、12032、12282、12398 となり、実機における LMP=12000 は内挿される。

縦軸の強度低下率の算出は、過時効材の常温引張試験結果と非過時効材の常温引張結果と比較し、過時効熱処理における強度低下率 A_1 を算出する。



図 1 過時効熱処理による強度低下傾向

手順 3) 温度による強度低下率の算出

過時効材を用いて常温から 250℃まで 50℃ピッチで引張試験を行い、プロットした値から近似曲線を設定、温度による強度低下率 A_2 を設定する。



図 2 トレンドカーブ

手順4) 過時効材の設計降伏点（もしくは引張強さ）の算出

手順2及び手順3で求めた強度低下率 A_1 及び A_2 を常温の降伏点の規格値を掛け合わせることで各温度における過時効後の設計降伏点（もしくは引張強さ）を算出する。

表1 材料の各温度における設計降伏点 S_y (MPa)

温度 (°C)	20	75	100	125	150	175	200	225	250*
常温の降伏点の規格値 ; S_{y0}	270	270	270	270	270	270	270	270	270
時効による低下係数 ; A_1									
温度による低下係数 ; A_2									
設計降伏点(MPa) ; S_y	96	93	90	87	82	78	73	68	64

以上

事例規格における許容引張応力 (S) の設定方法

事例規格の S 値の設定方法は、下表の最小の値を S 値として設定することとなっている。

	引張強さ		降伏点		クリープ 破断強さ		クリープ 速度
常温 以下	$\frac{1}{3.5}S_T$		$\frac{2}{3}S_{y0}$		—		—
常温 以上	$\frac{1}{3.5}S_T$	$\frac{1.1}{3.5}S_T\bar{R}_T$	$\frac{2}{3}S_{y0}$	$\frac{2}{3}S_{y0}\bar{R}_Y$	$F_{avg}S_{Ravg}$	$0.8S_{Rmin}$	$1.0S_C$

S_T : 常温の引張強さの規格値

R_T : (温度 T の引張強さ) / (常温の引張強さ)

S_{y0} : 常温の降伏点の規格値

R_Y : (温度 T の降伏点) / (常温の降伏点)

S_{Ravg} : 100,000 時間での破断を生じる平均応力

S_{Rmin} : 100,000 時間での破断を生じる最小応力

S_C : 0.01%/1,000 時間のクリープ速度を生じる応力の平均値

F_{avg} : S_{Ravg} に適用する係数。ただし、0.67 を超えない値とする

上記のうち 10,000h におけるクリープ破断並びにクリープ速度で求める際、加熱温度と加熱時間に一定の関係がある場合に適用可能な LMP による手法を用いてより高温でクリープ試験を行い、その分試験時間を短縮する手法を用いている。

すなわち、温度と引張応力をパラメータとしてクリープ試験を行い、破断時間及び定常クリープ速度を算出し、温度と破断時間、温度と定常クリープ速度を下記の式を用いて LMP を一つの変数として破断応力との関係をプロットする。

以下に 1%B-A6061-T6/T651 材における許容値の設定手順を示す。

手順 1) クリープ試験の実施

試験温度、クリープ試験応力を設定して、クリープ試験を実施する。クリープ試験の試験条件としては温度と荷重のマトリックスとなるが、1%B-A6061-T6/T651 の例としては、温度は 150℃～300℃、荷重は約 10 MPa～約 200MPa 程度として試験を実施した。

手順2) クリープ試験で得られたデータを元に LMP を用いてデータを整理する。

温度と引張応力をパラメータとしてクリープ試験の結果から、破断時間及び定常クリープ速度を算出。100,000h でクリープ破断が生じる応力については、温度と破断時間を下記の式を用いて LMP を一つの変数として応力との関係をプロットする。

$$LMP = (273.15 + T) \times (C + \log(t)) \quad T: \text{温度 } (^{\circ}\text{C}), t: \text{時間 } (\text{h})$$

また、0.01%/1000h を生じる応力については、温度と定常クリープ速度を下記の式を用いて LMP を一つの変数として応力との関係をプロットする。

$$LMP = (273.15 + T) \times (C - \log(\dot{\epsilon})) \quad T: \text{温度 } (^{\circ}\text{C}), t: \text{時間 } (\text{h})$$

定数 C については、ここでは 20 を使用した。



図1 クリープ破断特性

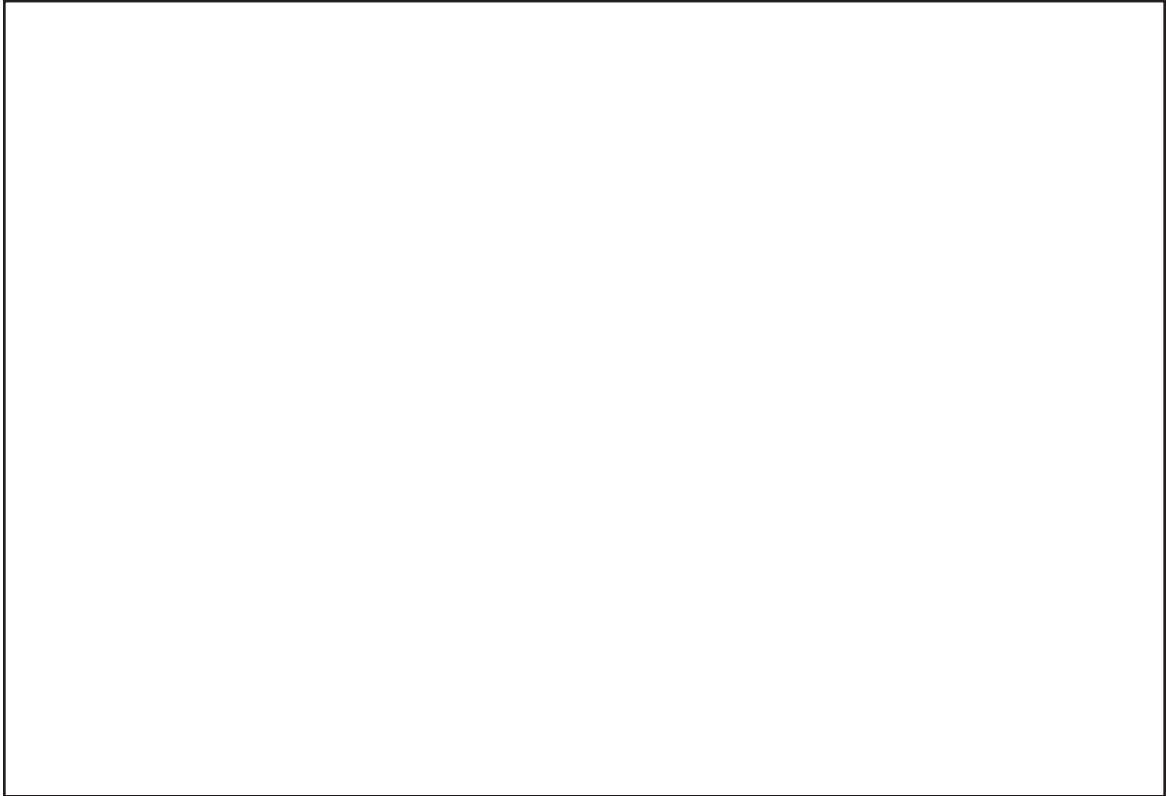


図2 定常クリープ速度特性

手順3) クリープ破断応力、定常クリープ速度の算出

手順2で整理したグラフから各温度における100,000hでクリープ破断を生じる応力、0.01%/1000時間の定常クリープ速度を生じる応力を算出する。また、引張強さ、降伏点における値も含めて S_T 、 R_T 、 S_{y0} 、 R_Y を算定、これらの値を比較して最小の値を S として設定する。

表2 材料の各温度における許容引張応力 S (MPa)

温度 (°C)	20	75	100	125	150	175	200	225	250*
$1/3.5 \times S_T$	90	90	90	90	90	90	90	90	90
$1.1/3.5 \times S_T \times R_T$									
$2/3 \times S_{y0}$	180	180	180	180	180	180	180	180	180
$2/3 S_{y0} \times R_Y$									
$F_{avg} \times S_{Ravg}$									
$0.8 \times S_{Rmin}$									
S_c									
許容引張応力 ; S	48	43	41	39	36	33	26	15	8.5

以上

A1100-0 の文献値に基づく設計引張強さ (Su)、
設計降伏点 (Sy) 及び許容引張応力 (S) の設定

1. Sy 値の設定

(1) A1100-0 の耐力

A1100-0 の Sy (設計降伏点) を設定するには、文献^{*1}に記載の耐力を用いる。当該文献においては、過時効時間 0.5~10,000 時間までの耐力が記載されている。このデータを表 1 にまとめる。また、当該データを図 1 にグラフ化して示す。表 1 及び図 1 では、過時効時間 0.5~10,000 時間の範囲で耐力に変化は見られない。このため、これ以上過時効時間を増加させても耐力に変化が表れることは考え難い。したがって、本資料では表 1 の値を用いて、キャスク設計評価期間末期 (40 年後) の Sy を、発電用原子力設備規格 材料規格 (2012 年版) に基づいて設定することとした。

表 1 A1100-0 の耐力 (MPa)

		温度 (°C)								
		25	100	150	177	205	230	260	315	370
過時 効時 間 (h)	0	34	—	—	—	—	—	—	—	—
	0.5	—	32	29	26	24	21	18	14	11
	10	—	32	29	26	24	21	18	14	11
	100	—	32	29	26	24	21	18	14	11
	1,000	—	32	29	26	24	21	18	14	11
	10,000	—	32	29	26	24	21	18	14	11

※1: PROPERTIES OF ALUMINIUM ALLOYS、ASM International、1999.

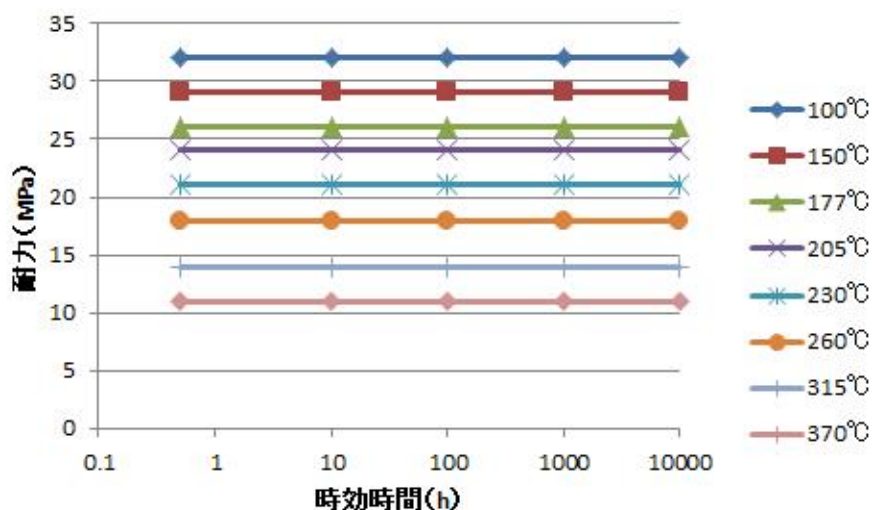


図 1 A1100-0 の耐力 (MPa)

(2) Sy 値の計算

発電用原子力設備規格 材料規格 (2012 年版) 添付 1 の付録 1 に基づき、Sy 値を設定する。

- ① 各温度における耐力を表 2 にまとめる (常温 (25°C) における耐力は過時効無し材料の値)。

表 2 各温度における耐力

温度 (°C)	25	100	150	177	205	230	260	315	370
耐力 (MPa)	34	32	29	26	24	21	18	14	11

- ② 各温度における耐力を常温 (25°C) における耐力で規格化する。この結果を表 3 にまとめる。

表 3 各温度における Ry

温度 (°C)	25	100	150	177	205	230	260	315	370
Ry (-)	1	0.9412	0.8529	0.7647	0.7059	0.6176	0.5294	0.4118	0.3235

- ③ 表 2 で得られた Ry に対し、多項式近似を行う (図 2)。ここでは、三次式で近似した。

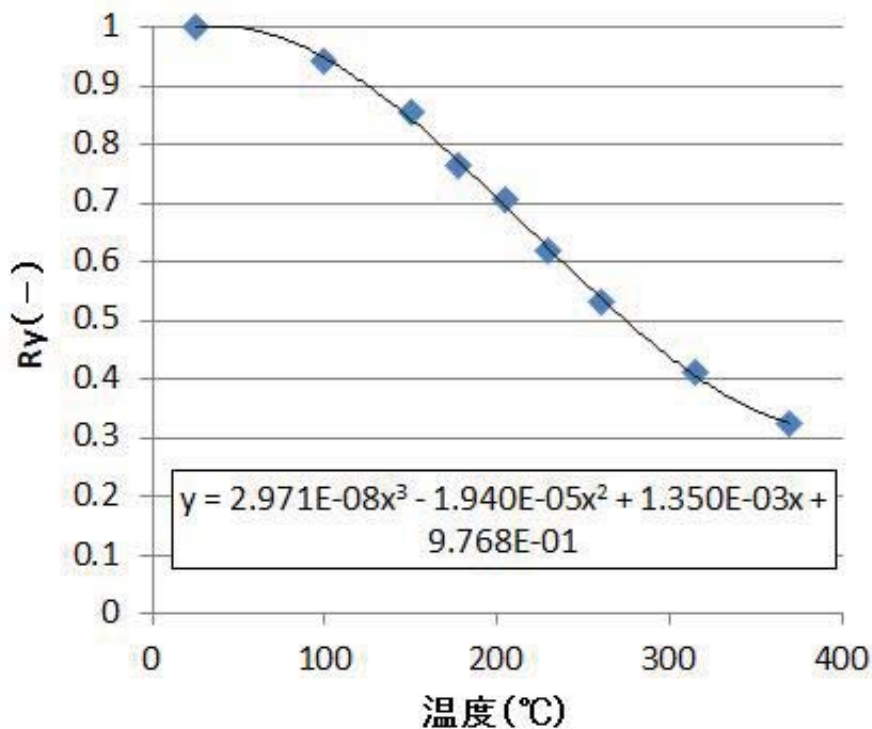


図 2 Ry のトレンド曲線

④25～300℃における耐力比を、③で得られたトレンド曲線により算出する（表4）。

表4 25～300℃における R_Y

温度 (°C)	R_Y (—)
	設定値
25	1.0000
50	0.9995
100	0.9475
150	0.8431
200	0.7085
225	0.6368
250	0.5660
300	0.4380

⑤25～300℃の各温度における S_y は、 R_Y (設定値) と常温の規格値の積により求められる。その結果を表5に纏める。なお、常温の規格値は、A1100P-0の耐力25 MPa (JIS H4000) とした。

表5 25～300℃における S_y

温度 (°C)	S_y 値 (MPa)	
	計算値	設定値
25	25.00	25
50	24.99	24
100	23.69	23
150	21.08	21
200	17.71	17
225	15.92	15
250	14.15	14
300	10.95	10

2. Su 値の設定

(1) A1100-0 の引張強さ

A1100-0 の Su (設計引張強さ) 設定するには、文献^{※2}に記載の引張強さを用いる。当該文献においては、過時効時間 0.5～10,000 時間までの引張強さが記載されている。このデータを表 6 にまとめる。また、当該データをグラフ化して図 3 に示す。表 6 及び図 3 では、過時効時間 0.5～10,000 時間の範囲で引張強さに変化は見られない。このため、これ以上過時効時間を増加させても引張強さに変化が表れることは考え難い。したがって、本資料では表 6 の値を用いて、キャスク設計評価期間末期 (40 年後) の Su を、発電用原子力設備規格 材料規格 (2012 年版) に基づいて設定することとした。

表 6 A1100-0 の引張強さ (MPa)

		温度 (°C)								
		25	100	150	177	205	230	260	315	370
過時効時間 (h)	0	90	—	—	—	—	—	—	—	—
	0.5	—	75	59	52	41	34	28	20	14
	10	—	75	59	52	41	34	28	20	14
	100	—	75	59	52	41	34	28	20	14
	1,000	—	75	59	52	41	34	28	20	14
	10,000	—	75	59	52	41	34	28	20	14

※2 : PROPERTIES OF ALUMINIUM ALLOYS、ASM International、1999.

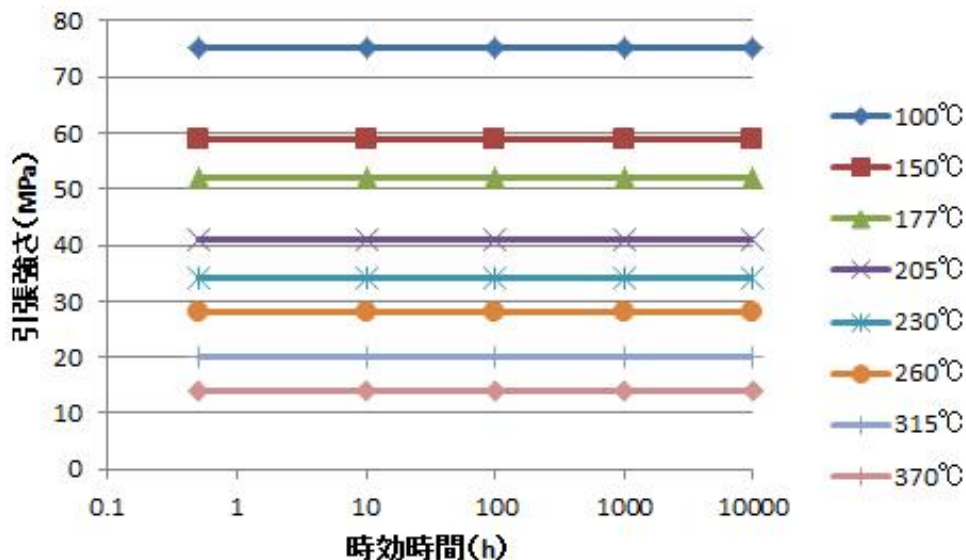


図 3 A1100-0 の引張強さ (MPa)

(2) Su 値の計算

発電用原子力設備規格 材料規格 (2012 年版) 添付 1 の付録 2 に基づき、Su 値を設定する。

- ① 温度における引張強さを表 7 にまとめる (常温 (25℃) における引張強さは過時効無し材料の値)。

表 7 各温度における引張強さ

温度 (°C)	25	100	150	177	205	230	260	315	370
耐力 (MPa)	90	75	59	52	41	34	28	20	14

- ② 温度における引張強さを常温 (25℃) における引張強さで規格化する。この結果を表 8 にまとめる。

表 8 各温度における R_T

温度 (°C)	25	100	150	177	205	230	260	315	370
R_T (-)	1	0.8333	0.6556	0.5778	0.4556	0.3778	0.3111	0.2222	0.1556

- ③ 2 で得られた R_T に対し、多項式近似を行う (図 2)。ここでは、三次式で近似した。

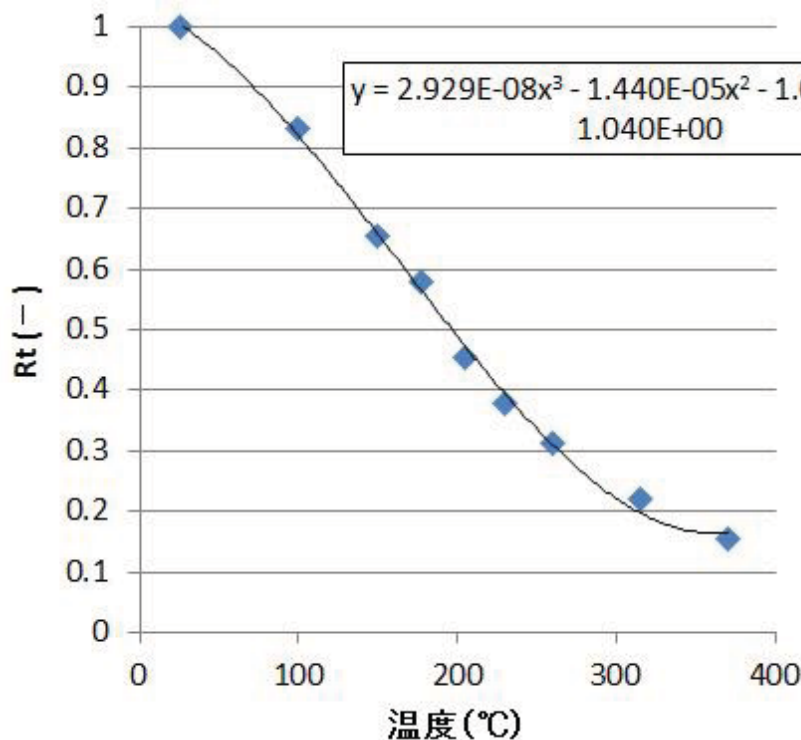


図 4 R_T のトレンド曲線

④ 25～300℃における R_T を、③で得られたトレンド曲線により算出する（表9）。

表9 25～300℃における R_T

温度 (°C)	RT (-)
	設定値
25	1
50	0.9555
100	0.8209
150	0.6583
200	0.4895
225	0.4097
250	0.3367
300	0.2216

⑤ 25～300℃の各温度における S_u は、 R_T （設定値）と常温の規格値の積により求められる。その結果を表10に纏める。なお、常温の耐力の規格値は、A1100P-0の引張強さ75 MPa（JIS H4000）とした。

表10 25～300℃における S_u

温度 (°C)	Su 値 (MPa)	
	計算値	設定値
25	75.40	75
50	71.66	71
100	61.57	61
150	49.37	49
200	36.71	36
225	30.73	30
250	25.25	25
300	16.62	16

3. Sm 値の設定

発電用原子力設備規格 材料規格（2012 年版）添付 1 の付録 3 に基づき、Sm 値を設定する（表 11）。

表 11 A1100-0 の Sm 値の設定

	温度 (°C)							
	室温	50	100	150	200	225	250	300
$S_T^{※3}$	75							
$S_{Y0}^{※3}$	25							
$R_T^{※4}$	1	0.9555	0.8209	0.6583	0.4895	0.4097	0.3367	0.2216
$R_Y^{※4}$	1	0.9995	0.9475	0.8431	0.7085	0.6368	0.5660	0.4380
$1/3 \times S_T$	25	25	25	25	25	25	25	25
$1.1 \times 1/3 \times S_T \times R_T$	27.5	26.28	22.57	18.1	13.46	11.27	9.26	6.09
$2/3 \times S_{Y0}$	16.67	16.67	16.67	16.67	16.67	16.67	16.67	16.67
$2/3 \times S_{Y0} \times R_Y$	16.67	16.66	15.79	14.05	11.81	10.61	9.43	7.3
最小値	16.67	16.66	15.79	14.05	11.81	10.61	9.26	6.09
Sm	16	16	15	14	11	10	9.2	6.0

※3 S_T 、 S_{Y0} はそれぞれ JIS H4000 に記載の A1100P-0 の引張強さ、耐力。

※4 R_T 、 R_Y は Su 値、 S_y 値の設定から引用。

4. S 値の設定

S 値については、ASME に規定されている A1100-0 の S 値を用いることとする（表 12）。

表 12 A1100-0 の S 値

温度 (°C)	-30~40	65	100	125	150	175	200	225
S 値 (MPa)	15.9	15.9	15.9	15.6	12.3	9.80	7.35	4.84

出典：Table 1B, ASME Sec. II, Part D (Metric), 2013.

以上

Ⅱ バスケットの応力計算書
(4号機)

表 1-2 (1) 計算結果の概要

(単位：N/mm²)

部 位	材 料	設計事象	一次一般膜応力強さ		一次膜+一次曲げ応力強さ		一次+二次応力強さ	
			評価点 (面)	計算値 許容応力 ¹⁾	評価点 (面)	計算値 許容応力 ¹⁾	評価点 (面)	計算値 許容応力 ¹⁾
バスケット プレート	A6061P 及び B-A0 (A1100 -0の許 容値を 下段に 記載)	設計時						
		I, II						
		I + S ₁ *						
		I + S ₂						
バスケット サポーター	SUS304	設計時						
		I, II						
		I + S ₁ *						
		I + S ₂						

表 4-1 バスケットの応力評価（設計条件，設計事象 I 及び II）

(単位：N/mm²)

部位	応力の種類	設計時		運搬時		異常着床		キャスク支持架台への衝突		許容 応力 ¹⁾
		評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	計算値	
バスケットプレート	P_m									
	$P_m + P_b$									
	$P_m + P_b + Q$									
	σ_s									
	σ_p									
	σ_b (一次)									
	σ_b (一次+二次)									
バスケットサポート	P_m									
	$P_m + P_b$									
	$P_m + P_b + Q$									
	σ_s									
	σ_p									
バスケットサポート 取付けボルト	P_m									
	$P_m + Q_m$									
	$P_m + Q_m + P_b + Q_b$									

表 4-2 バスケットの応力評価（貯蔵時：S₁*地震力が作用する場合）

（単位：N/mm²）

部 位		応力の種類	評価点（面）	計算値	許容応力 ¹⁾
軸方向 水平地震力 + 鉛直方向 地震力 + 自重	バスケット プレート	P _m	[]	[]	[]
		P _m + P _b			
		σ _s			
		σ _p			
		σ _b			
	バスケット サポート	P _m			
		P _m + P _b			
		σ _s			
		σ _p			
	バスケット サポート 取付けボルト	P _m			
		P _m + P _b			
軸直角方向 水平地震力 + 鉛直方向 地震力 + 自重	バスケット プレート	P _m	[]	[]	[]
		P _m + P _b			
		σ _s			
		σ _p			
		σ _b			
	バスケット サポート	P _m			
		P _m + P _b			
		σ _s			
		σ _p			
	バスケット サポート 取付けボルト	P _m			
		P _m + P _b			

表 4-3 バスケットの応力評価（貯蔵時：S₂ 地震力が作用する場合）

（単位：N/mm²）

部 位		応力の種類	評価点(面)	計算値	許容応力 ¹⁾				
軸方向 水平地震力 + 鉛直方向 地震力 + 自重	バスケット プレート	P_m							
		$P_m + P_b$							
		σ_s							
		σ_p							
		σ_b							
	バスケット サポート	P_m							
		$P_m + P_b$							
		σ_s							
		σ_p							
	バスケット サポート 取付けボルト	P_m							
		$P_m + P_b$							
	軸直角方向 水平地震力 + 鉛直方向 地震力 + 自重	バスケット プレート				P_m			
						$P_m + P_b$			
						σ_s			
σ_p									
σ_b									
バスケット サポート		P_m							
		$P_m + P_b$							
		σ_s							
		σ_p							
バスケット サポート 取付けボルト		P_m							
		$P_m + P_b$							

表 6-1 (1) バスケットプレートの応力評価 (構造規格のみに準じる評価)

(単位 : N/mm² 又は mm/mm)

設計事象	応力の種類	貯蔵時		許容応力 又は 許容値
		評価点 (面)	計算値	
I, II	P_m (長期荷重のみ)			
	$P_m + P_b$ (長期荷重のみ)			
	$P_m + P_b + Q^{1)}$			
	σ_s (長期荷重のみ)			
	σ_p (長期荷重のみ)			
	ε_{mC} (長期荷重のみ)			
	$\varepsilon_{mC} + \varepsilon_{bC}$ (長期荷重のみ)			

表 6-1 (2) バスケットプレートの応力評価 (構造規格のみに準じる評価)

(単位 : N/mm² 又は mm/mm)

設計事象	応力の種類	軸方向 ²⁾		軸直角方向 ³⁾		許容応力 又は 許容値
		評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	計算値	
I + S ₁ [*]	σ_b (一次+二次)					
	$P_m + P_b + Q^{1)}$					
	ε_{mC} (長期荷重のみ)					
	$\varepsilon_{mC} + \varepsilon_{bC}$ (長期荷重のみ)					
I + S ₂	σ_b (一次+二次)					
	$P_m^* + P_b^* + Q^*$					

Ⅱ バスケットの応力計算書 (5号機)

表 1-2 (1) 計算結果の概要

(単位 : N/mm²)

部 位	材 料	設計事象	一次一般膜応力強さ		一次膜+一次曲げ応力強さ		一次+二次応力強さ	
			評価点 (面)	許容応力 ¹⁾	評価点 (面)	許容応力 ¹⁾	評価点 (面)	許容応力 ¹⁾
バスケット プレート	A6061P 及び B-A0 (A1100 -0の許 容値を 下段に 記載)	設計時						
		I, II						
		I + S ₁ *						
		I + S ₂						
バスケット サポーター	SUS304	設計時						
		I, II						
		I + S ₁ *						
		I + S ₂						

表 4-1 バスケットの応力評価（設計条件，設計事象 I 及び II）

（単位：N/mm²）

部位	応力の種類	設計時		運搬時		異常着床		キャスク支持架台への衝突		許容 応力 ¹⁾
		評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	計算値	
バスケットプレート	P_m									
	$P_m + P_b$									
	$P_m + P_b + Q$									
	σ_s									
	σ_p									
	σ_b （一次）									
	σ_b （一次＋二次）									
バスケットサポート	P_m									
	$P_m + P_b$									
	$P_m + P_b + Q$									
	σ_s									
	σ_p									
バスケットサポート 取付けボルト	P_m									
	$P_m + Q_m$									
	$P_m + Q_m + P_b + Q_b$									

--

表 4-2 バスケットの応力評価（貯蔵時： S_1 *地震力が作用する場合）

(単位：N/mm²)

部 位		応力の種類	評価点 (面)	計算値	許容応力 ¹⁾
軸方向 水平地震力 + 鉛直方向 地震力 + 自重	バスケット プレート	P_m			
		$P_m + P_b$			
		σ_s			
		σ_p			
		σ_b			
	バスケット サポート	P_m			
		$P_m + P_b$			
		σ_s			
		σ_p			
	バスケット サポート 取付けボルト	P_m			
		$P_m + P_b$			
	軸直角方向 水平地震力 + 鉛直方向 地震力 + 自重	バスケット プレート	P_m		
$P_m + P_b$					
σ_s					
σ_p					
σ_b					
バスケット サポート		P_m			
		$P_m + P_b$			
		σ_s			
		σ_p			
バスケット サポート 取付けボルト		P_m			
		$P_m + P_b$			

表 4-3 バスケットの応力評価（貯蔵時：S₂ 地震力が作用する場合）

(単位：N/mm²)

部 位		応力の種類	評価点 (面)	計算値	許容応力 ¹⁾
軸方向 水平地震力 + 鉛直方向 地震力 + 自重	バスケット プレート	P _m			
		P _m + P _b			
		σ _s			
		σ _p			
		σ _b			
	バスケット サポート	P _m			
		P _m + P _b			
		σ _s			
		σ _p			
	バスケット サポート 取付けボルト	P _m			
		P _m + P _b			
	軸直角方向 水平地震力 + 鉛直方向 地震力 + 自重	バスケット プレート			
P _m + P _b					
σ _s					
σ _p					
σ _b					
バスケット サポート		P _m			
		P _m + P _b			
		σ _s			
		σ _p			
バスケット サポート 取付けボルト		P _m			
		P _m + P _b			

表 6-1 (1) バスケットプレートの応力評価 (構造規格のみに準じる評価)

(単位 : N/mm² 又は mm/mm)

設計事象	応力の種類	貯蔵時		許容応力 又は 許容値
		評価点 (面)	計算値	
I, II	P_m (長期荷重のみ)			
	$P_m + P_b$ (長期荷重のみ)			
	$P_m + P_b + Q^{1)}$			
	σ_s (長期荷重のみ)			
	σ_p (長期荷重のみ)			
	ε_{mC} (長期荷重のみ)			
	$\varepsilon_{mC} + \varepsilon_{bC}$ (長期荷重のみ)			

表 6-1 (2) バスケットプレートの応力評価 (構造規格のみに準じる評価)

(単位 : N/mm² 又は mm/mm)

設計事象	応力の種類	軸方向 ²⁾		軸直角方向 ³⁾		許容応力 又は 許容値
		評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	計算値	
I + S ₁ *	σ_b (一次+二次)					
	$P_m + P_b + Q^{1)}$					
	ε_{mC} (長期荷重のみ)					
	$\varepsilon_{mC} + \varepsilon_{bC}$ (長期荷重のみ)					
I + S ₂	σ_b (一次+二次)					
	$P_m^* + P_b^* + Q^*$					

Ⅱ バスケットの応力計算書
(6号機)

表 1-2 (1) 計算結果の概要

(単位 : N/mm²)

部 位	材 料	設計事象	一次一般膜応力強さ			一次膜+一次曲げ応力強さ			一次+二次応力強さ				
			評価点 (面)	計算値	許容応力 ¹⁾	評価点 (面)	計算値	許容応力 ¹⁾	評価点 (面)	計算値	許容応力 ¹⁾		
バスケット プレート	A6061P 及び B-A0 (A1100 -0の許 容値を 下段に 記載)	設計時											
		I, II											
		I + S ₁ *											
		I + S ₂											
バスケット サポーター	SUS304	設計時											
		I, II											
		I + S ₁ *											

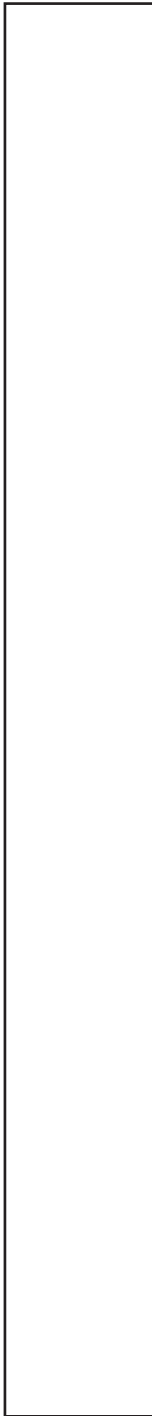


表 4-1 バスケットの応力評価（設計条件，設計事象 I 及び II）

（単位：N/mm²）

部位	応力の種類	設計時		運搬時		異常着床		キャスク支持架台への衝突		許容 応力 ¹⁾
		評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	計算値	
バスケットプレート	P_m									
	$P_m + P_b$									
	$P_m + P_b + Q$									
	σ_s									
	σ_p									
	σ_b (一次)									
	σ_b (一次+二次)									
バスケットサポート	P_m									
	$P_m + P_b$									
	$P_m + P_b + Q$									
	σ_s									
	σ_p									
バスケットサポート 取付けボルト	P_m									
	$P_m + Q_m$									
	$P_m + Q_m + P_b + Q_b$									

表 4-2 バスケットの応力評価（貯蔵時： S_1 *地震力が作用する場合）

(単位：N/mm²)

部 位		応力の種類	評価点 (面)	計算値	許容応力 ¹⁾
軸方向 水平地震力 + 鉛直方向 地震力 + 自重	バスケット プレート	P_m	[]		
		$P_m + P_b$			
		σ_s			
		σ_p			
	バスケット サポート	P_m			
		$P_m + P_b$			
		σ_s			
		σ_p			
	バスケット サポート 取付けボルト	P_m			
		$P_m + P_b$			
		σ_s			
		σ_p			
軸直角方向 水平地震力 + 鉛直方向 地震力 + 自重	バスケット プレート	P_m	[]		
		$P_m + P_b$			
		σ_s			
		σ_p			
	バスケット サポート	P_m			
		$P_m + P_b$			
		σ_s			
		σ_p			
	バスケット サポート 取付けボルト	P_m			
		$P_m + P_b$			
		σ_s			
		σ_p			

表 4-3 バスケットの応力評価（貯蔵時：S₂ 地震力が作用する場合）

(単位：N/mm²)

部 位		応力の種類	評価点 (面)	計算値	許容応力 ¹⁾				
軸方向 水平地震力 + 鉛直方向 地震力 + 自重	バスケット プレート	P_m	[Large empty box for stress evaluation]						
		$P_m + P_b$							
		σ_s							
		σ_p							
		σ_b							
	バスケット サポート	P_m							
		$P_m + P_b$							
		σ_s							
		σ_p							
	バスケット サポート 取付けボルト	P_m							
		$P_m + P_b$							
	軸直角方向 水平地震力 + 鉛直方向 地震力 + 自重	バスケット プレート				P_m	[Large empty box for stress evaluation]		
						$P_m + P_b$			
						σ_s			
σ_p									
σ_b									
バスケット サポート		P_m							
		$P_m + P_b$							
		σ_s							
		σ_p							
バスケット サポート 取付けボルト		P_m							
		$P_m + P_b$							

表 6-1 (1) バスケットプレートの応力評価 (構造規格のみに準じる評価)

(単位: N/mm² 又は mm/mm)

設計事象	応力の種類	貯蔵時		許容応力 又は 許容値
		評価点 (面)	計算値	
I, II	P_m (長期荷重のみ)			
	$P_m + P_b$ (長期荷重のみ)			
	$P_m + P_b + Q^{1)}$			
	σ_s (長期荷重のみ)			
	σ_p (長期荷重のみ)			
	ϵ_{mC} (長期荷重のみ)			
	$\epsilon_{mC} + \epsilon_{bC}$ (長期荷重のみ)			

表 6-1 (2) バスケットプレートの応力評価 (構造規格のみに準じる評価)

(単位: N/mm² 又は mm/mm)

設計事象	応力の種類	軸方向 ²⁾		軸直角方向 ³⁾		許容応力 又は 許容値
		評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	計算値	
I + S ₁ [*]	σ_b (一次+二次)					
	$P_m + P_b + Q^{1)}$					
	ϵ_{mC} (長期荷重のみ)					
	$\epsilon_{mC} + \epsilon_{bC}$ (長期荷重のみ)					
I + S ₂	σ_b (一次+二次)					
	$P_m^* + P_b^* + Q^*$					

乾式貯蔵容器用アルミバスケットの破壊靱性評価

1. 評価方法

(1) 前提条件

破壊靱性評価の前提条件を表 1 に示す。

表 1 評価条件

項目	具体的条件	備考
バスケットの材料	1%B-A6061-T651	
バスケットの板厚	<input type="text"/>	強度部材最小厚さ
時効条件	時効前（初期材）、0 材	0 材は 415°C16 時間加熱
荷重条件	乾式運搬時の評価値	最大荷重条件
仮想欠陥寸法	格子中央にバスケット長手方向全長に亘ってき裂を仮定。	図 1 参照

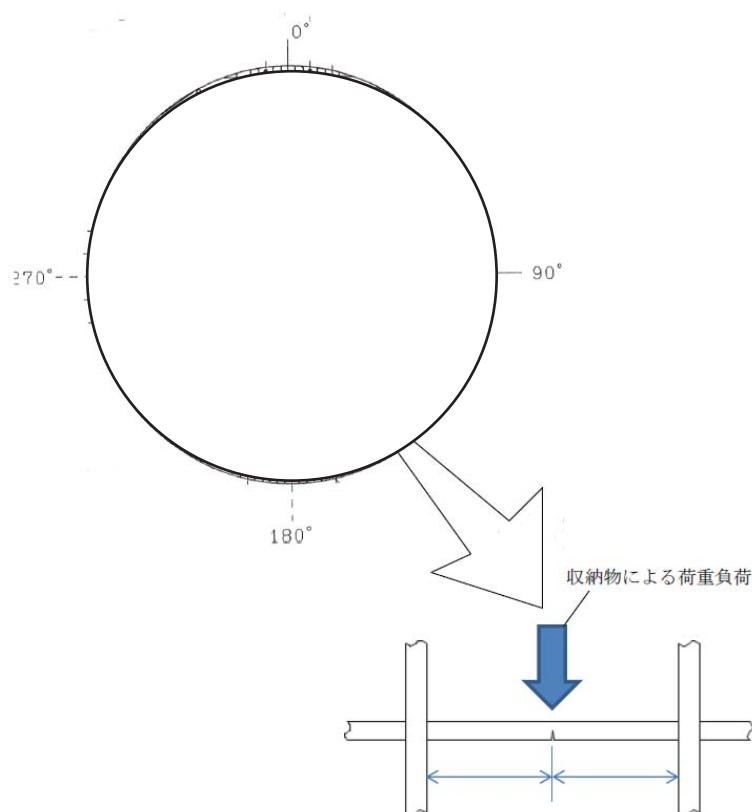
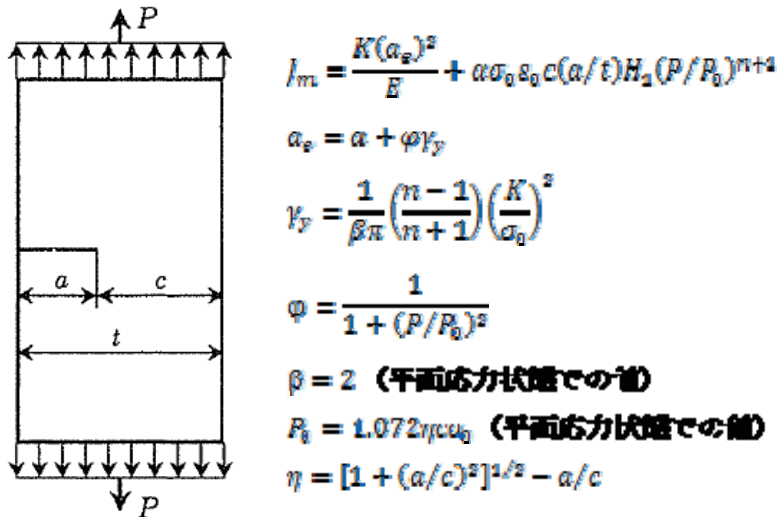


図 1 想定する欠陥のイメージ

(2) 評価方法

J積分値は、平板に長い片側表面き裂がある場合の適用する Kumar らの解を用いて求めた引っ張り荷重による J_m と曲げモーメントによる J_b を合計してもとめる。なお、ここでは保守的に曲げ応力は膜応力として算出した。

(引張荷重による J 積分値)



小林英男、構造健全性評価ハンドブック（共立出版）より転載

一方、上記と比較する弾塑性破壊靱性値 J_{IC} については、ASTM E1820-05a に基づいて初期材、0 材ともに J_{IC} 試験を実施し、得られた荷重-変位曲線から J-R 曲線を求め、 J_Q 値を求める。なお、ここでは実製品と同じ厚さの試験片を用いているため、 J_Q 値を J_{IC} 値として評価に用いる。

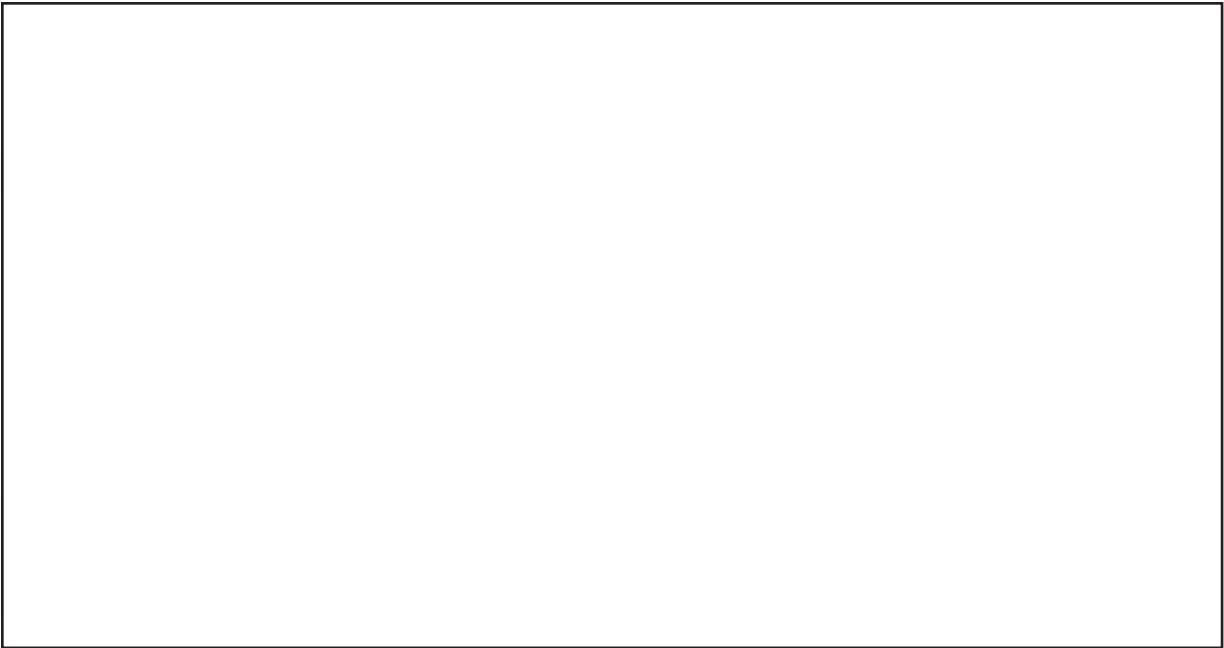


図 2. J-R 曲線 (材質 : 1%B-A6061-T651)

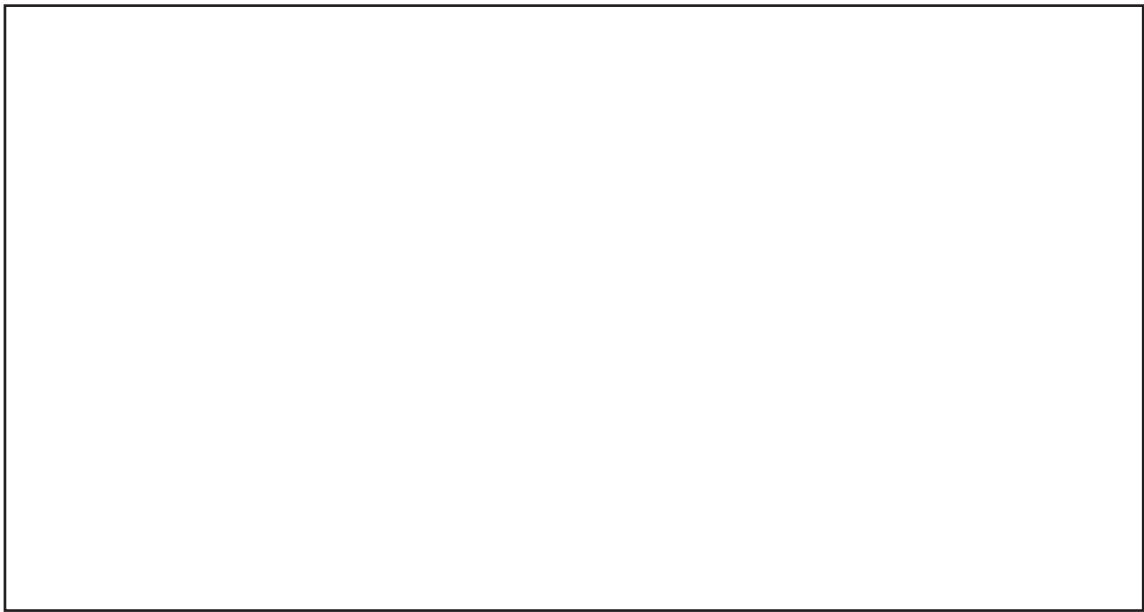


図 3. J-R 曲線 (材質 : 1%B-A6061-0)

表 2. 弾塑性破壊靱性値

	初期材	O 材
J _{IC} [N/mm]		

2. 評価結果

き裂の深さを変えた場合の J 積分値と、J_{IC} 試験で求めた初期材と O 材の弾塑性破壊靱性値をプロットしたデータを図に示す。板厚に対して大きなき裂（例えば、板厚の 1/4）を仮定しても J_{IC} を上回ることはないことを確認した。



図 4. き裂深さ（想定値）と J 積分値の関係

以上