

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

## 1. はじめに

MSF-21P 型のバスケットに適用するバスケットプレート用材料アルミニウム合金 (MB-A3004) の破壊靱性に係る特性をまとめたものである。

## 2. 設計の考え方

MSF-21P 型は、バスケットに変形が生じない設計（技術的に想定されるいかなる場合でも未臨界機能を維持するため、臨界評価体系に影響するバスケットに塑性変形を許容しない設計）であり、設計降伏点 ( $S_y$ ) を重視した設計としている。

## 3. 材料特性（破壊靱性）

## 3.1 材料特性（破壊靱性）

アルミニウム合金は、面心立方格子構造 (fcc : face-centered cubic) であり、体心立方格子構造 (bcc : body-centered cubic) に見られるへき開破壊及び温度変化に伴う脆性-延性遷移現象は無いことが知られている。<sup>(1)</sup>

## (1) シャルピー衝撃試験

材料特性確認として、初期材及び長時間過時効熟処理材に対して、JIS Z 2242 : 2005 に準拠しシャルピー衝撃試験を行った。その結果を別紙 2-1 表、別紙 2-1 図及び別紙 2-2 図に示す。

別紙 2-1 表、別紙 2-1 図及び別紙 2-2 図に示すとおり、初期材において横膨出量のばらつきが大きいものの、キャスク供用期間の熟劣化現象（過時効）を模擬した長時間過時効熟処理材において有意な特性変化が無く、衝撃特性が安定していることを確認した。

## (2) 破壊靱性試験

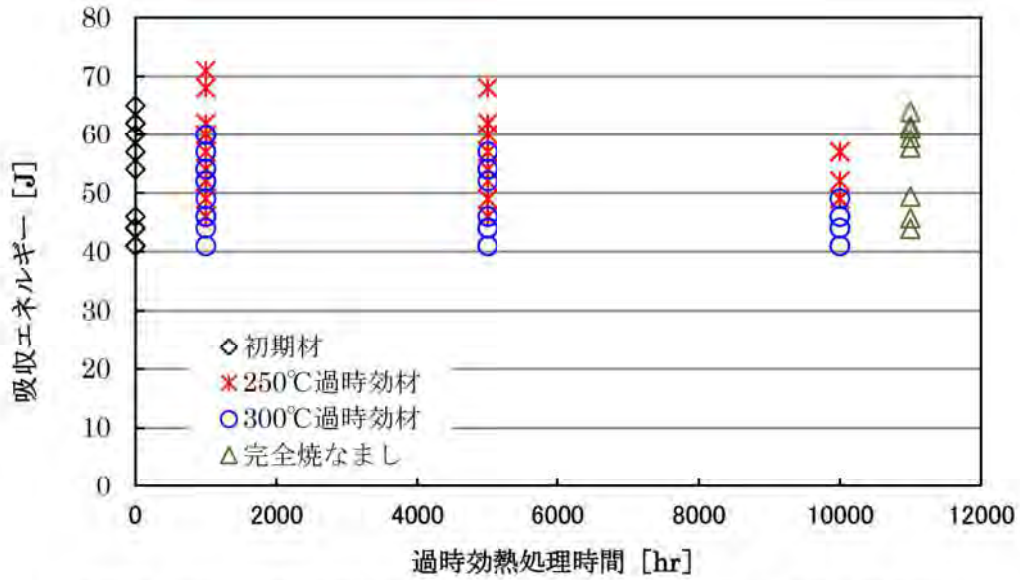
初期材に対して ASTM E1820-09 に準拠し、 $-40^{\circ}\text{C}$ 、 $25^{\circ}\text{C}$  及び  $200^{\circ}\text{C}$  の温度条件において破壊靱性試験を実施した。その結果を別紙 2-2 表に、別紙 2-3 図に試験片写真、別紙 2-4 図に荷重-変位の関係、別紙 2-5 図に破壊靱性値 (J) -き裂進展の関係を示す。

また、破壊靱性特性における負荷速度依存性の有無を確認するため、常温での破壊靱性試験を実施し、別紙 2-6 図に負荷速度と開口変位との関係を、別紙 2-7 図に試験片の試験前後の状況写真を示す。別紙 2-6 図より、負荷速度依存性がほとんどないことを確認した。

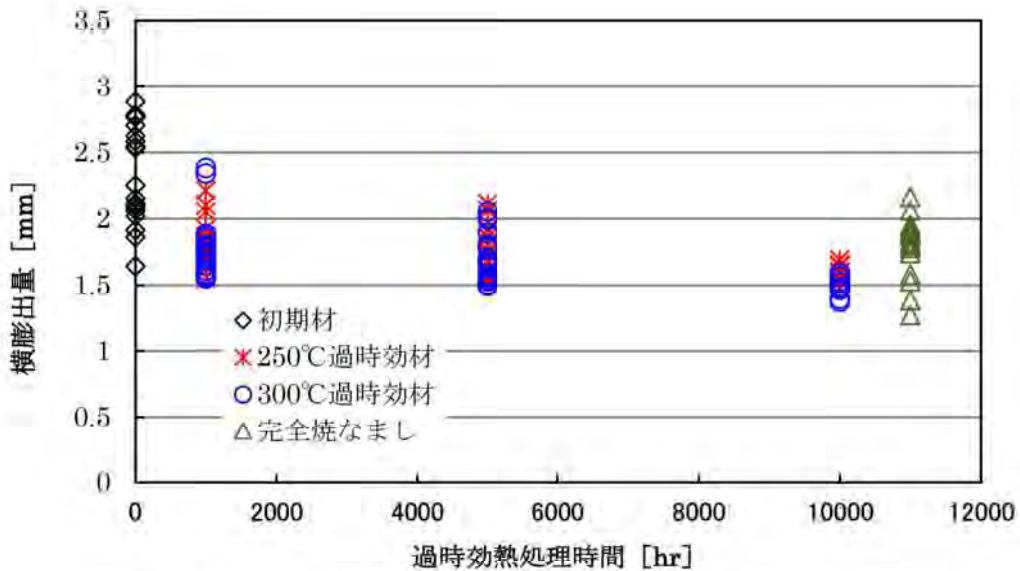
別紙 2-1 表 初期材及び熱処理材によるシャルピー衝撃試験結果 (平均値) (注1)

試験温度 -40 (°C)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm <sup>2</sup> )	横膨出量 (mm)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm <sup>2</sup> )	横膨出量 (mm)
処理温度 処理時間	250°C			300°C		
0hr (初期材)	51.4	64.2	2.3	—	—	—
1,000hr	57.4	71.4	1.8	52.9	65.8	1.8
5,000hr	55.6	69.5	1.7	48.9	61.3	1.7
10,000hr	52.3	65.0	1.6	44.2	55.3	1.5
完全焼なまし 処理	52.0	65.0	1.8	—	—	—

(注1) 試験片はVノッチシャルピー衝撃試験片 (幅 10mm) であり、試験温度は-40°Cである。



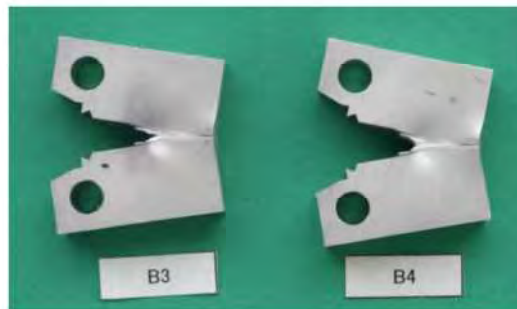
別紙 2-1 図 過時効熱処理時間と吸収エネルギーの関係 (L、T方向)  
(試験温度：-40°C)



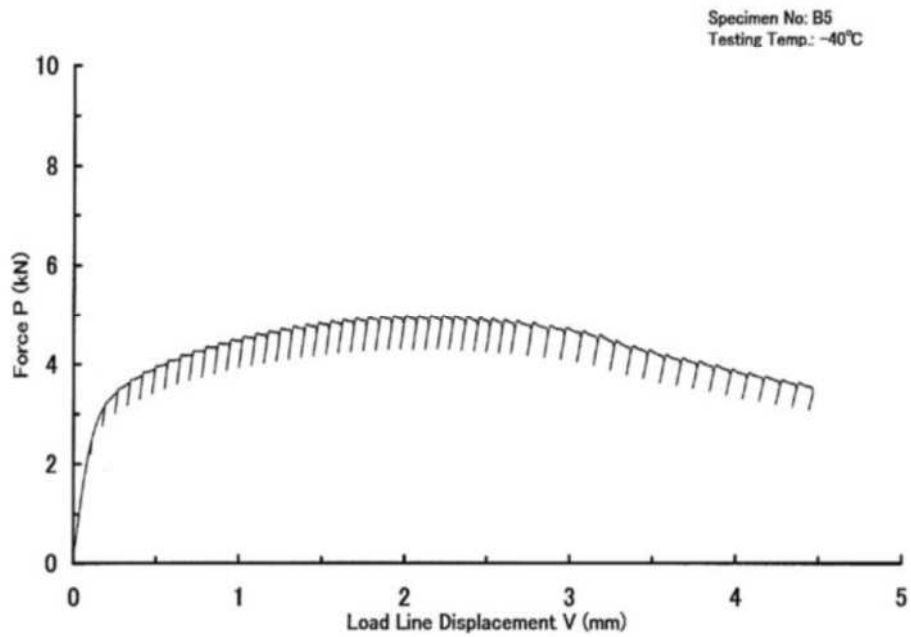
別紙 2-2 図 過時効熱処理時間と横膨出量の関係 (L、T方向)  
(試験温度：-40°C)

別紙 2-2 表 MB-A3004 における破壊靱性試験結果

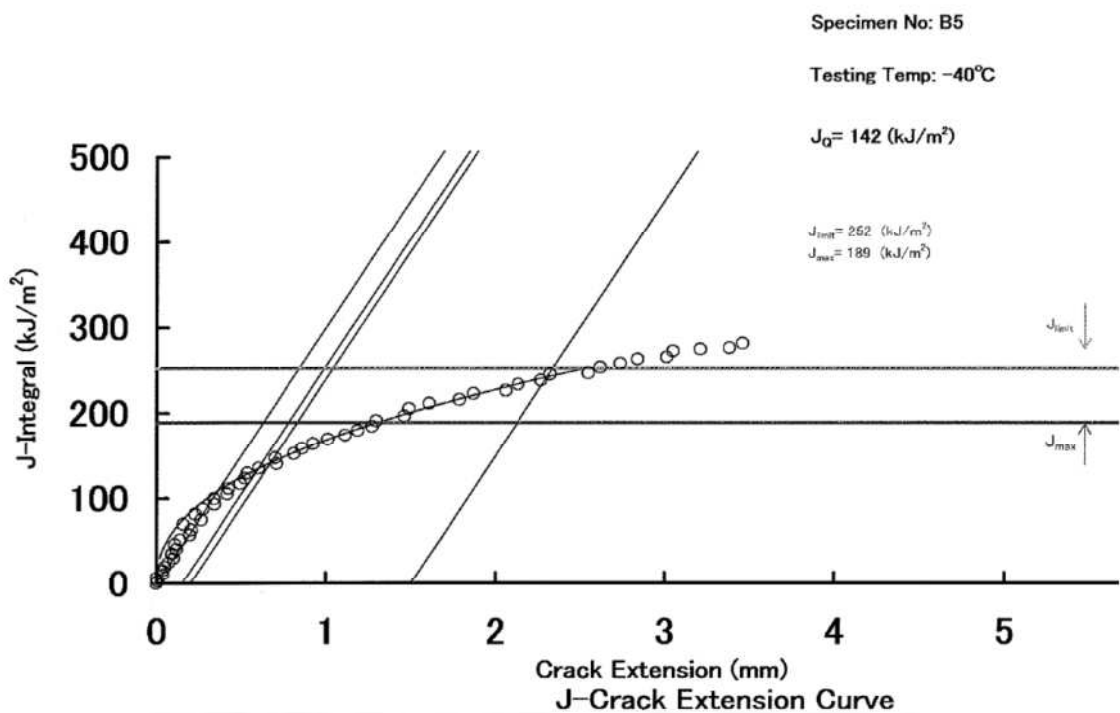
状態	供試材 符号	方向	試験 温度 (°C)	試験片寸法 (mm)				試験結果		破壊靱性値	
				幅	板厚	正味 板厚	初期 き裂 長さ	最大 試験 力 (kN)	$J_Q$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$K_{JQ}$ MPa√m	
完全焼 なまし 材	B	L	-40	25.4	12.7	10.16	12.7	4.46	≥ 162	≥ 118	
		L	22	25.4	12.7	10.17	13.4	3.94	139	109	
		L	200	25.4	12.0	9.52	13.3	2.51	≥ 118	≥ 97.3	
	A	L	22	25.4	12.5	10.02	13.0	4.14	≥ 148	≥ 113	
	C	L	22	25.4	12.7	10.19	12.9	4.07	126	102	
初期材	B	L	-40	25.5	12.7	10.20	12.9	4.98	142	111	
		L	-40	25.4	12.7	10.20	12.9	4.94	133	107	
		L	25	25.4	12.7	10.20	13.0	4.73	159	116	
		L	25	25.5	12.7	10.20	12.8	4.89	165	118	
		L	200	25.4	12.7	10.20	12.9	4.45	> 151	—	
		L	200	25.5	12.7	10.20	12.8	4.00	> 152	—	



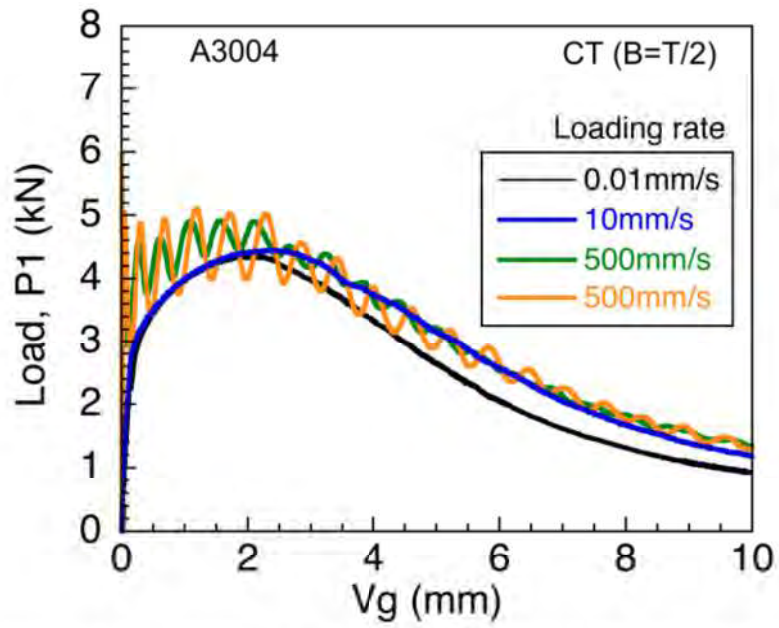
別紙 2-3 図 試験片写真 (初期材 200°C 試験)



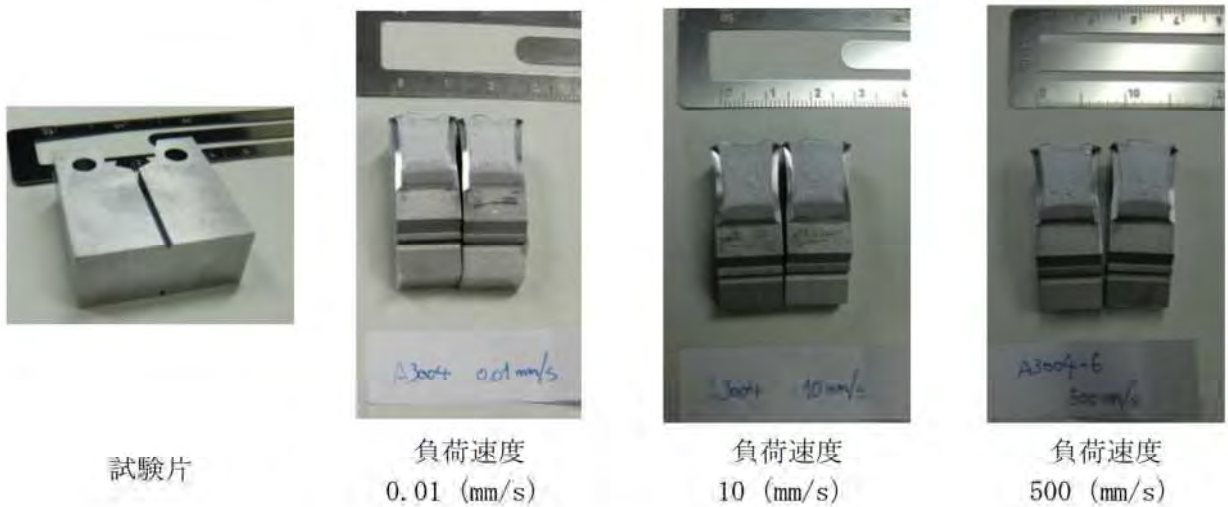
別紙 2-4 図 荷重-変位曲線 (初期材-40°C)



別紙 2-5 図 破壊靱性値 (J) - き裂進展 (初期材-40°C)



別紙 2-6 図 破壊靱性特性における負荷速度と開口変位の関係  
(試験温度：常温)



別紙 2-7 図 試験片写真  
(試験温度：常温)

### 3.2 許容欠陥寸法評価

本材料の製造方法には熱間押出法を用いている。本材料の主たる欠陥は金型との摩擦等による製造由来の傷である。そこで、一様線状の欠陥を想定し、3.1 項に示す破壊靱性値を基に、別紙 2-8 図に示す方法により許容欠陥寸法評価を行った。別紙 2-9 図に想定欠陥深さと  $J_0$  値との関係を示す。

別紙 2-9 図に示すとおり、想定欠陥深さ  $1/2t$  (板厚の半分) 程度まで許容する結果となった。

また、バスケットプレートには各種検査に合格した材料を用いるため、許容欠陥寸法を超える欠陥を含む材料を用いることはないことから、問題ない。

- (a) 想定欠陥 : 一様深さの表面き裂 (線状欠陥)
- (b) 荷重 : 仮想的に設計降伏応力 ( $S_y=57\text{MPa}(200^\circ\text{C})$ ) の引張応力を想定
- (c) 評価方法 : 別紙 2-8 図に示す評価式

$$J = \frac{K(a_e)^2}{E'} + \alpha \alpha_0 \epsilon_0 c(a/t) H_1 (P/P_0)^{n+1}$$

$$a_e = a + \phi \gamma_y$$

$$\gamma_y = \frac{1}{\beta \pi} \left( \frac{n-1}{n+1} \right) \left( \frac{K}{\sigma_0} \right)^2$$

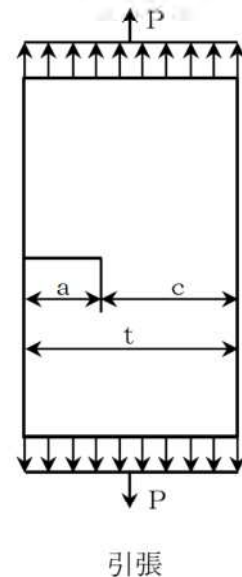
$$\phi = \frac{1}{1 + (P/P_0)^2}$$

$$\beta = \begin{cases} 2 & \text{(平面応力)} \\ 6 & \text{(平面ひずみ)} \end{cases}$$

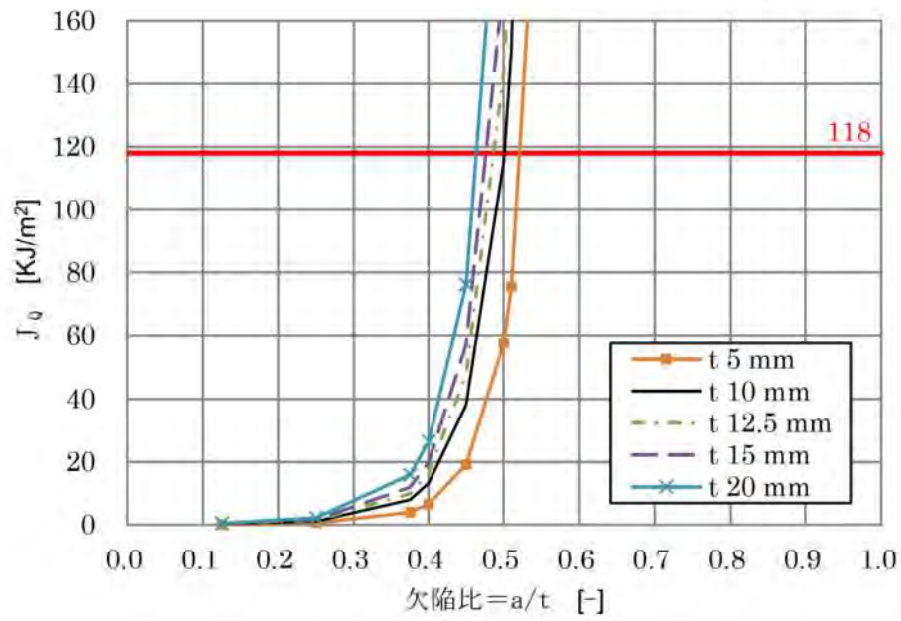
$$E' = \begin{cases} E & \text{(平面応力)} \\ E/(1-\nu^2) & \text{(平面ひずみ)} \end{cases}$$

$$P_0 = \begin{cases} 1.072 \eta c \sigma_0 & \text{(平面応力)} \\ 1.445 \eta c \sigma_0 & \text{(平面ひずみ)} \end{cases}$$

$$\eta = [1 + (a/c)^2]^{1/2} - a/c$$



別紙 2-8 図 許容欠陥寸法評価モデル及び評価式<sup>(2)</sup>



別紙 2-9 図 想定欠陥深さと  $J_Q$  値の関係

(注) 200℃試験結果 (完全焼なまし材) の  $J_Q$  値が最低値のため 118kJ/m<sup>2</sup>を設定



#### 4. 引用文献

- (1) 小林俊郎ら、アルミニウム合金の強度、内田老鶴圃、(2001)
- (2) 小林英男ら、構造健全性評価ハンドブック、共立出版、(2005)

バスケットプレート用材料  
アルミニウム合金 (MB-A3004-H112) のクリープ特性について

## 1. はじめに

MSF-21P 型のバスケットに適用するバスケットプレート用材料アルミニウム合金 (MB-A3004) のクリープ特性をまとめたものである。

## 2. 材料特性 (クリープ特性)

## 2.1 材料特性 (クリープ特性)

MB-A3004 の初期材及び長時間過時効熱処理材のクリープ試験結果について、応力を下式で示されるラーソン・ミラー・パラメータ (以下「LMP」という。) で整理した結果を別紙 3-1 図に、応力と破断時間の関係を別紙 3-2 図に示す。

$$LMP = (T + 273.15)(C + \log tr)$$

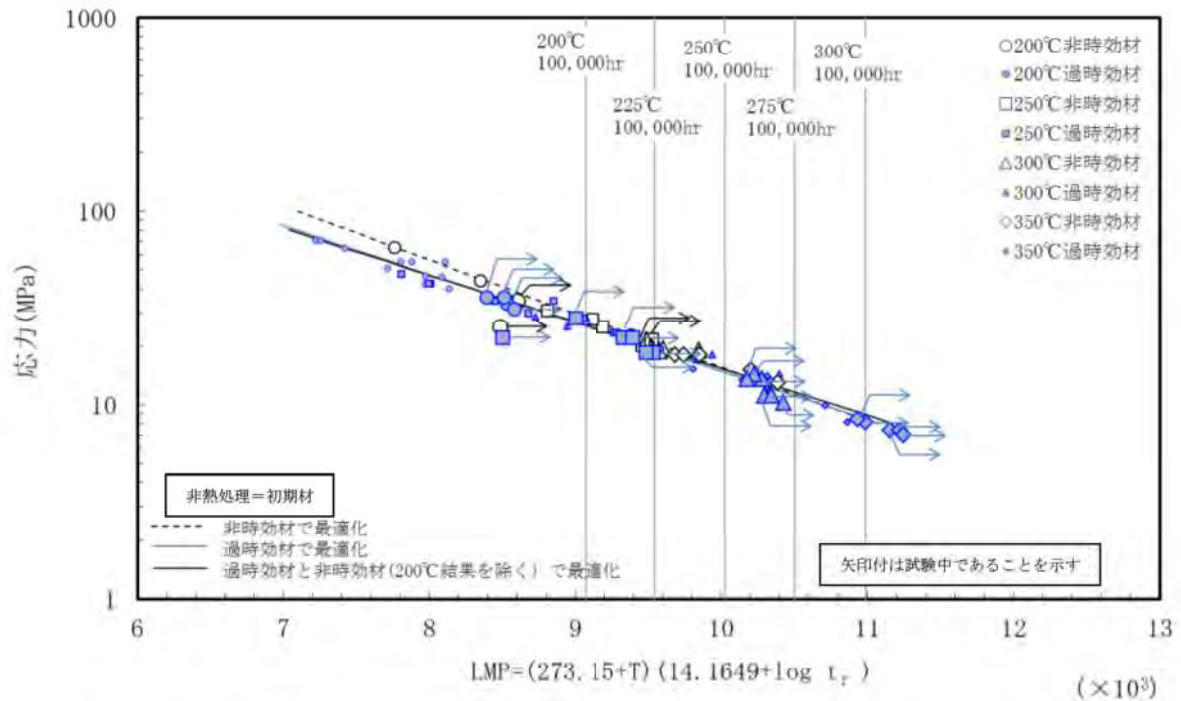
ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

T : 温度 (°C)

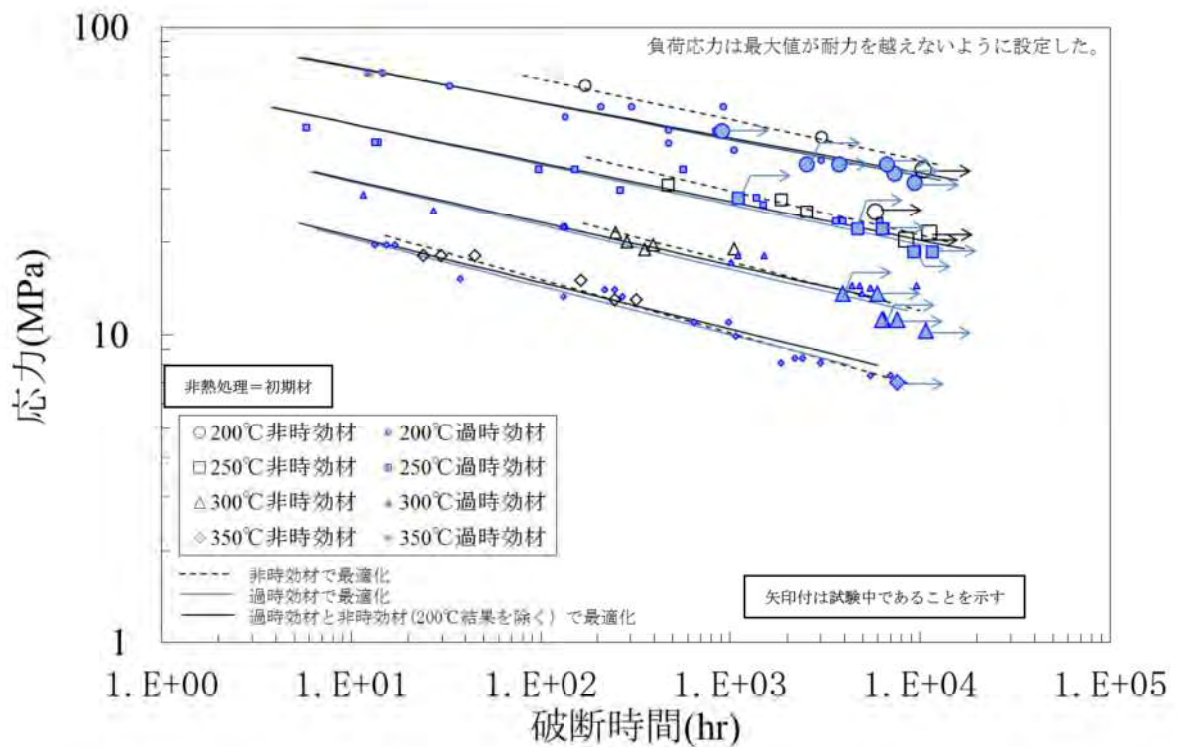
C : 定数

tr : 破断時間 (hr)

別紙 3-1 図及び別紙 3-2 図に示すとおり、初期材と長時間過時効熱処理材のクリープ試験結果が同等であることから、供用期間 (60 年間) 中においてクリープ特性の有意な変化はないと判断される。したがって、初期材の試験データを用いてクリープ特性を評価することに問題はない。



別紙 3-1 図 初期材データ（白抜）と長時間過時効材データ（青点）における応力と LMP との関係



別紙 3-2 図 初期材データ（白抜）と長時間過時効材データ（青点）における応力と破断時間との関係

## 2.2 クリープの影響

別紙 3-3 図に示すように、バスケットに適用される種々のアルミニウム合金において 0.1 から 1% 程度のクリープひずみが予め付与されている場合でも、クリープひずみが材料の機械的性質に影響を与えることはないことが報告されている。

また、別紙 3-4 図に示す MB-A3004 の応力-一定常クリープ速度の関係より、保守的に初期温度 180°C が 60 年間継続すると仮定した場合のクリープひずみが 0.1% に到達するためには、以下に示すとおり 14MPa 以上の応力環境下に置かれ続ける必要がある。

$$12.77 - 2.51(\log \sigma) = (273.15 + T)(13 - \log \dot{\epsilon}) \times 10^{-3}$$

ここで、以下のクリープ速度及び温度

$$\dot{\epsilon} = \frac{0.1}{100 \times 60 \times 365.25 \times 24}$$

$$= 1.9 \times 10^{-9} \text{ (hr}^{-1}\text{)}$$

$$T = 180 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

を上式に代入すると、右辺(LMP)は、

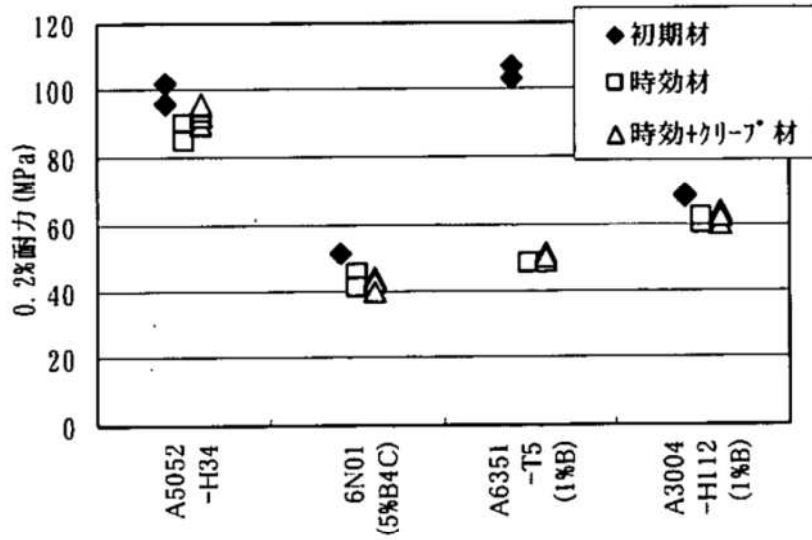
$$\text{LMP} = 9843$$

となり、

$$\sigma = 14.6 \text{ (MPa)}$$

となる。

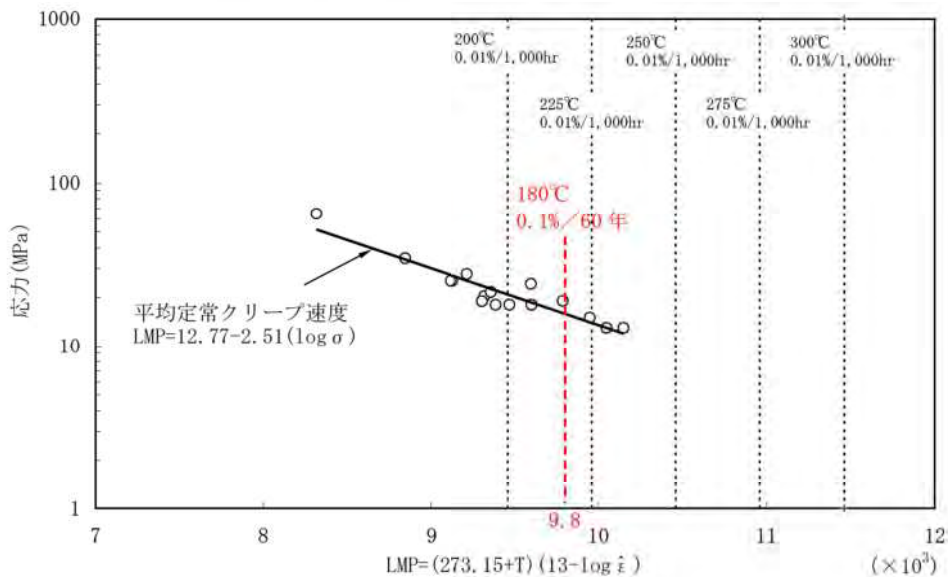
MSF-21P 型のバスケットは、複数の切り込みを施したバスケットプレートを 1 層ごとに 90° 回転させた状態で菓子折状に組立てる構造である。バスケットプレートどうしの嵌合部には組立に支障のないよう適度な隙間を有しており、また、バスケット外周部も拘束していないため、温度上昇時に熱応力が発生することはない。したがって、貯蔵期間中に考慮すべき長期荷重はバスケット自重のみであり、「添付資料 8-2-2 バスケットの応力計算書」第 2-1 表の貯蔵時の計算結果に示すように、バスケットに発生する応力は極めて小さい (1 MPa 以下) ことから、クリープが設計上の制約条件とならない。



各材料のクリープ歪み量 (単位：%)

材料	クリープ歪み量
A5052-H34	0.220~0.998
A6N01 (5%B4C)	0.065~0.428
A6351-T5 (1%B)	0.105~0.340
A3004-H112 (1%B)	0.157~0.992

別紙 3-3 図 引張試験特性の比較 (0.2%耐力) (1)



別紙 3-4 図 MB-A3004 の応力-定常クリープ速度プロット例

### 3. 引用文献

- (1) (独)原子力安全基盤機構、「平成 15 年度 金属キャスト貯蔵技術確証試験 報告書」、(独)原子力安全基盤機構、(2004)

バスケットプレート用材料  
アルミニウム合金 (MB-A3004-H112) の物性について

## 1. はじめに

MSF-21P 型のバスケットに適用するバスケットプレート用材料アルミニウム合金 (MB-A3004) の物性についてまとめたものである。

## 2. 材料特性 (物性)

MB-A3004 の初期材、 $250^{\circ}\text{C} \times 5,000\text{hr}$  及び  $300^{\circ}\text{C} \times 5,000\text{hr}$  の長時間過時効熱処理材及び  $520^{\circ}\text{C} \times 10\text{hr}$  保持後に  $0.3^{\circ}\text{C}/\text{hr}$  で制御冷却した完全焼なまし処理材の各物性が同等であることを確認した。また、供用期間 (60 年間) 中において縦弾性係数、熱物性及び線膨張係数について有意な物性変化が無いと判断されることから、初期材の試験結果を基にキャスク設計に適用する物性を設定することに問題は無いと判断される。

## (1) 縦弾性係数

初期材、 $250^{\circ}\text{C} \times 5,000\text{hr}$  及び  $300^{\circ}\text{C} \times 5,000\text{hr}$  の長時間過時効熱処理材及び  $520^{\circ}\text{C} \times 10\text{hr}$  保持後に  $0.3^{\circ}\text{C}/\text{hr}$  で制御冷却した完全焼なまし処理材の縦弾性係数測定結果を別紙 4-1 図に示す。

別紙 4-1 図に示すとおり、初期材、長時間過時効熱処理材及び完全焼なまし処理材において、熱処理の有無による差異はなく、また、L 方向及び T 方向における有意な異方性もなく、同等の値を示していることを確認した。

## (2) 熱物性

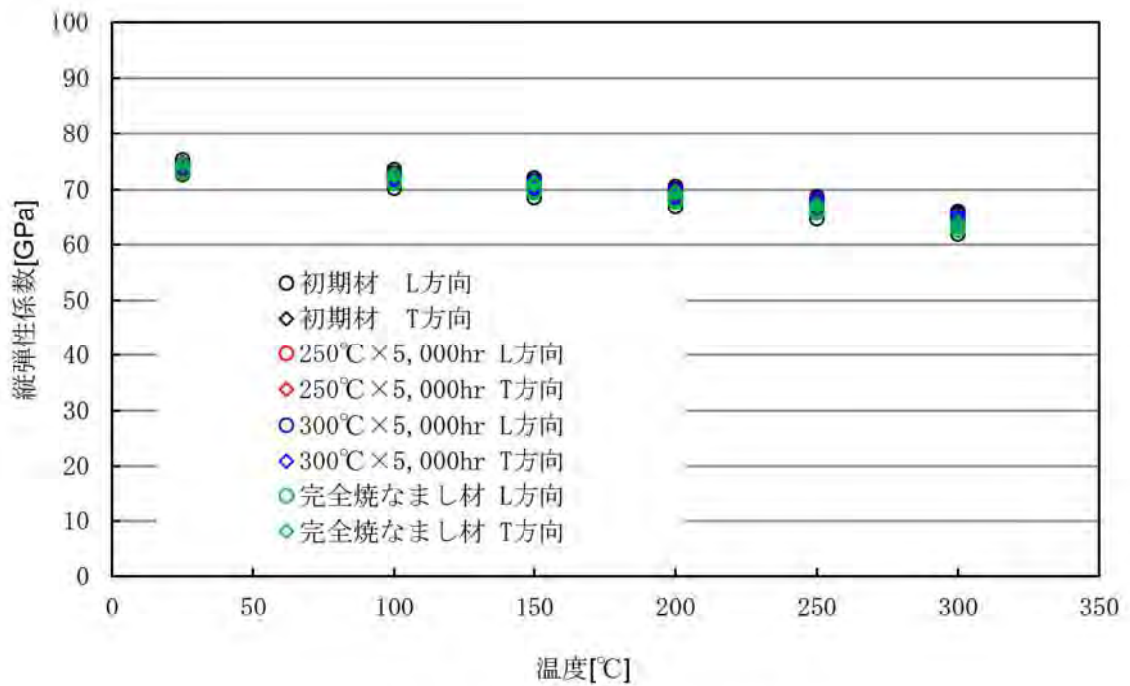
初期材、 $250^{\circ}\text{C} \times 5,000\text{hr}$  及び  $300^{\circ}\text{C} \times 5,000\text{hr}$  の長時間過時効熱処理材及び  $520^{\circ}\text{C} \times 10\text{hr}$  保持後に  $0.3^{\circ}\text{C}/\text{hr}$  で制御冷却した完全焼なまし処理材の熱物性試験結果について、比熱を別紙 4-2 図に、熱拡散率を別紙 4-3 図に、熱伝導率を別紙 4-4 図に示す。

別紙 4-2 図から別紙 4-4 図に示すとおり、初期材、長時間過時効熱処理材及び完全焼なまし処理材において、熱処理の有無による差異はなく、また、L 方向及び T 方向における有意な異方性もなく、同等の値を示していることを確認した。

## (3) 線膨張係数

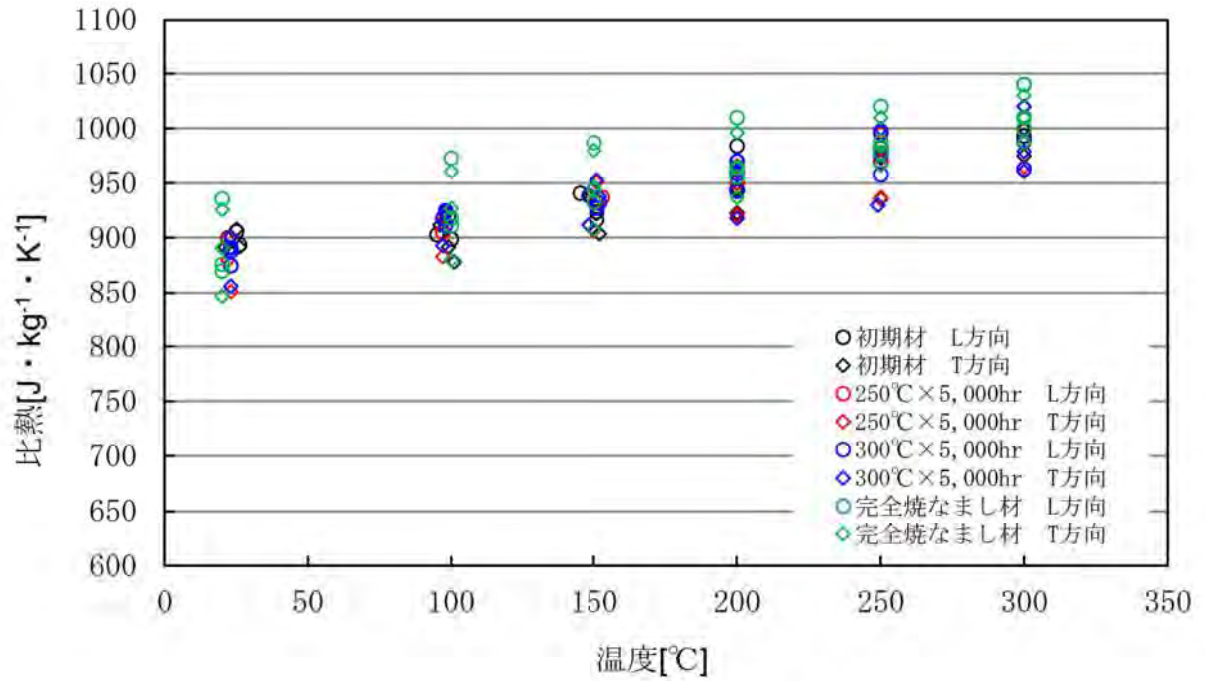
初期材、 $250^{\circ}\text{C} \times 5,000\text{hr}$  及び  $300^{\circ}\text{C} \times 5,000\text{hr}$  の長時間過時効熱処理材及び  $520^{\circ}\text{C} \times 10\text{hr}$  保持後に  $0.3^{\circ}\text{C}/\text{hr}$  で制御冷却した完全焼なまし処理材の線膨張係数試験結果を別紙 4-1 表に示す。

別紙 4-1 表に示すとおり、初期材、長時間過時効熱処理材及び完全焼なまし処理材において、熱処理の有無による差異はなく、また、L方向及びT方向における有意な異方性もなく、同等の値を示していることを確認した。

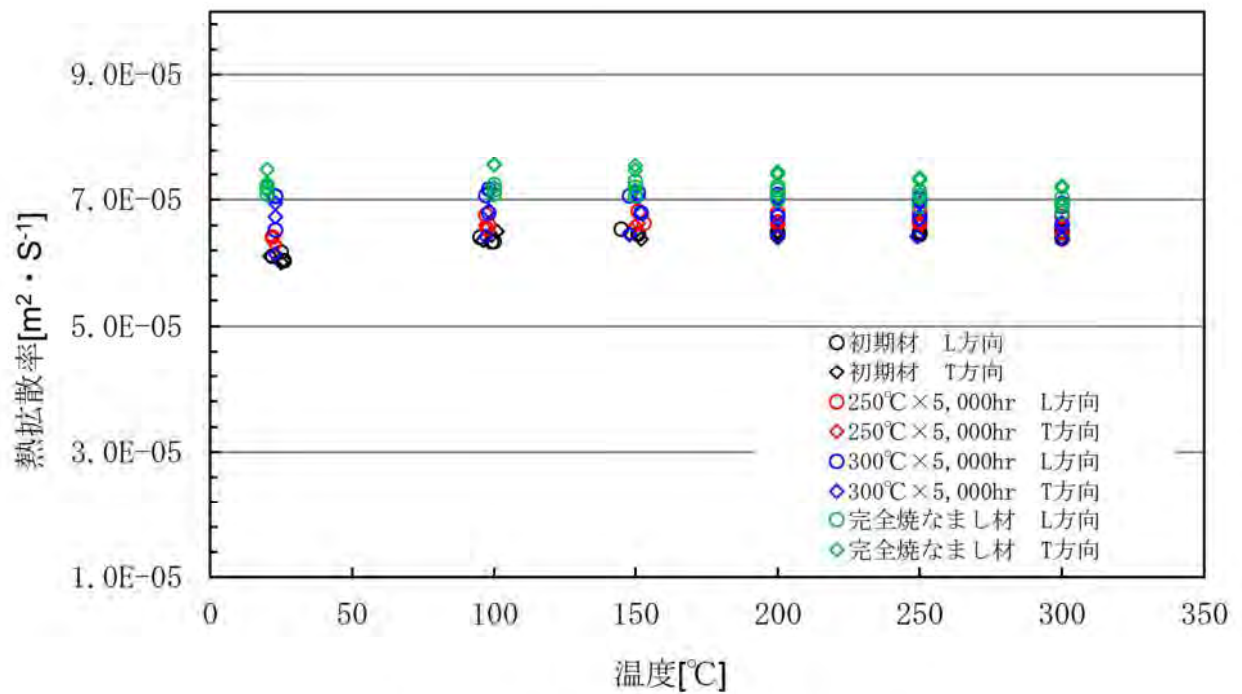


別紙 4-1 図 各温度における縦弾性係数

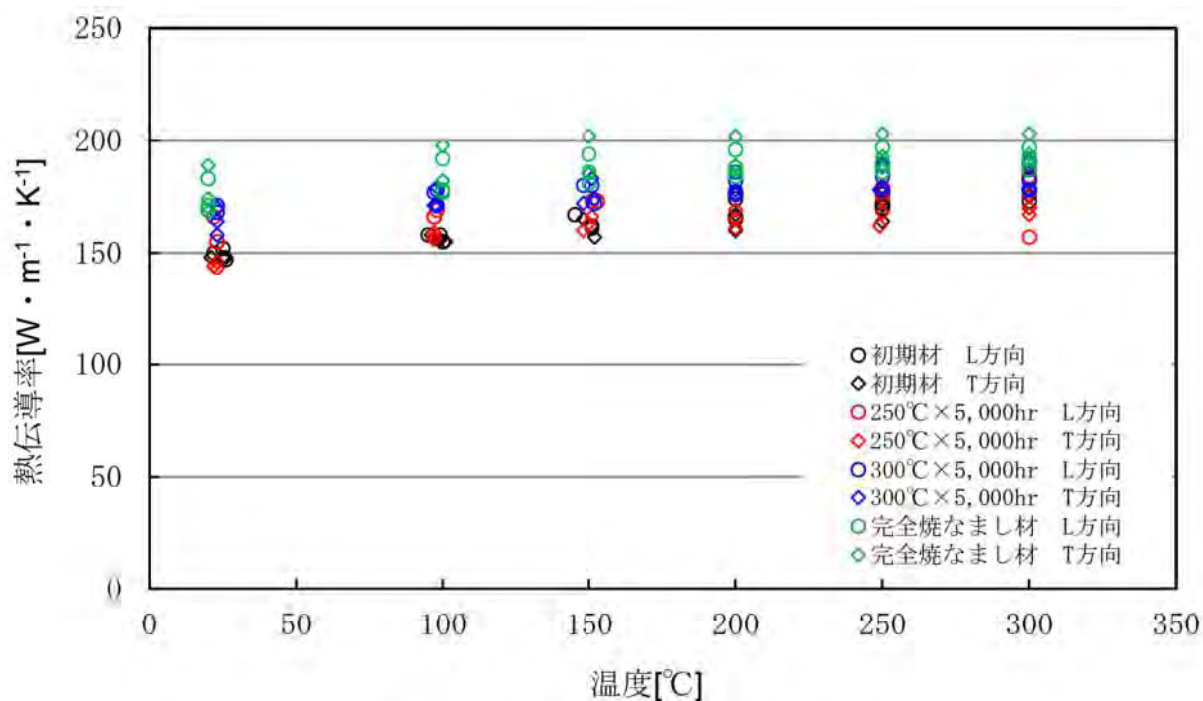




別紙 4-2 図 各温度における比熱



別紙 4-3 図 各温度における熱膨散率



別紙 4-4 図 各温度における熱伝導率

別紙 4-1 表 MB-A3004 の各温度における線膨張係数 (注1)

(単位：1/°C)

温度 (°C)	初期材	長時間過時効 熱処理材 250°C × 5,000hr	長時間過時効 熱処理材 300°C × 5,000hr	完全焼なまし材 520°C × 10hr 保持、 0.3°C/hr 冷却
50	$23.13 \times 10^{-6}$	$23.13 \times 10^{-6}$	$23.03 \times 10^{-6}$	—
100	$23.76 \times 10^{-6}$	$23.77 \times 10^{-6}$	$23.73 \times 10^{-6}$	$23.33 \times 10^{-6}$
150	$24.16 \times 10^{-6}$	$24.17 \times 10^{-6}$	$24.10 \times 10^{-6}$	$23.73 \times 10^{-6}$
200	$24.46 \times 10^{-6}$	$24.47 \times 10^{-6}$	$24.40 \times 10^{-6}$	$24.07 \times 10^{-6}$
250	$24.80 \times 10^{-6}$	$24.80 \times 10^{-6}$	$24.67 \times 10^{-6}$	$24.37 \times 10^{-6}$
300	$25.23 \times 10^{-6}$	$25.23 \times 10^{-6}$	$25.03 \times 10^{-6}$	$24.73 \times 10^{-6}$

(注1) 常温から各温度までの平均線膨張係数を示す。

バスケットプレート用材料  
アルミニウム合金 (MB-A3004-H112) の製造管理について

1. はじめに

MSF-21P 型のバスケットに適用するバスケットプレート用材料アルミニウム合金 (MB-A3004) の製造管理についてまとめたものである。

2. 製造管理について

MB-A3004 は、JIS H 4100 等の関連規格を参照し、別紙 5-1 表に示す製造管理項目リストに従い、安定した品質となるよう管理し、製造している。

別紙 5-1 表 MB-A3004 の製造管理項目

工程		工程管理項目	検査項目	管理程度 <sup>(注1)</sup>		
概要	細目			材料保証	製造管理	
①	合金溶解	溶解/検査	成分分析	化学組成	○ —	
②	ピレット成型 (鋳造)	鋳造	—	外観、寸法	— ○	
③	熱間 押出	製造条件	押出比	押出比	○ —	
			ピレット温度	ピレット温度	— ○	
			金型温度	金型温度	— ○	
			押出速度	押出速度	— ○	
			押出圧力	押出圧力	— ○	
			押出冷却条件	押出材冷却条件 (自然放冷)	押出材冷却条件 (自然放冷)	— ○
			整直	引き代	引き代	— ○
質別	質別	—	○ —			
④	切断・加工	切断	寸法	寸法	— ○	
		検査	—	寸法、外観	— ○	
		試験片採取	採取位置と採取数	採取位置と採取数	— ○	
		製品加工	加工条件	—	— ○	
		梱包	マーキング	マーキング	— ○	
⑤	検査	製品検査	—	寸法、外観、員数	— ○	
		材料特性 (初期材)	非破壊検査 (必要に応じ)	—	欠陥	— ○
			材料試験	引張試験	0.2%耐力、引張強さ、伸び 絞り	— ○
				シャルピー衝撃試験	吸収エネルギー	— ○
					横膨出量、衝撃値	— ○
組織試験	—	—	— ○			

(注1) メーカー自主管理項目を含む。

添付書類 8-2-5 バスケットの設計基準値

## 目次

1. 概要	1
2. バスケットの構造、材料及び使用環境	2
3. 設計基準の設定方針	3
4. 設計基準の設定根拠	8
4.1 供用状態A	8
4.2 供用状態B	9
4.3 供用状態C	9
4.4 供用状態D	10

## 図表目次

第 3-1 表	MSF-21P 型のバスケット設計に適用する設計基準	4
第 3-2 表	一次一般膜応力強さに対する設計基準	5
第 3-3 表	一次一般膜+一次曲げ応力強さに対する設計基準	5
第 3-4 表	一次+二次応力に対する設計基準	6
第 3-5 表	せん断応力に対する設計基準	6
第 3-6 表	支圧応力に対する設計基準	7
第 3-7 表	圧縮応力に対する設計基準	7
第 4-1 図	供用状態 A 及び B における引張り及び曲げによる崩壊応力及び設計限界	12
第 4-2 図	曲げ荷重作用時の断面応力分布模式図	12
第 4-3 図	降伏点を超える場合のひずみ履歴	13
第 4-4 図	供用状態 C における引張り及び曲げによる崩壊応力及び設計限界	13
第 4-5 図	限界細長比と座屈限度（許容圧縮荷重又は座屈耐力）の関係	14
第 4-6 図	矩形梁の究極強さ及び各供用状態の設計基準	15
第 4-7 図	矩形梁の究極強さ及び MSF-21P 型の特別規定の設計基準	15

## 1. 概要

金属製の乾式キャスク（以下「キャスク」という。）は、貯蔵時、取扱い時及び地震時、さらに輸送法令に定める通常輸送時、BM型輸送物に係る一般の試験条件下及び特別の試験条件下、核分裂性輸送物に係る一般の試験条件下及び特別の試験条件下を含め技術的に想定されるいかなる場合においても、使用済燃料の臨界を防止することを含めた4つの基本的安全機能の維持が求められる。

キャスクを構成する要素のうちバスケットは、キャスク内に配置され、使用済燃料の崩壊熱を適切に除去する機能を有するとともに、使用済燃料を支持し、かつ燃料間距離を保つことにより、使用済燃料の支持機能及び臨界防止機能を併せ持つ構成要素である。

本書は、上記の機能を考慮したMSF-21P型のバスケットの設計基準の設定根拠についてまとめたものである。



## 2. バスケットの構造、材料及び使用環境

MSF-21P 型のバスケットは、本文中の第 1 図に示すようにアルミニウム合金 (MB-A3004-H112) 製の断面形状が中空状のバスケットプレートで構成されており、設計貯蔵期間 (60 年以下) を通じて使用済燃料を所定の幾何学的配置に維持するためにバスケット格子の構造健全性を保つ必要がある。

MSF-21P 型のバスケットは、貯蔵期間中、ヘリウム雰囲気で使用され、最高使用温度約 180℃ から徐々に温度が低下し、最大 60 年の熱負荷を受ける。

バスケットの耐食性については、「添付書類 8-5 金属キャスクの耐食性に関する説明書」に示す。

### 3. 設計基準の設定方針

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）（日本機械学会 2007 年 12 月）（以下「構造規格」という。）では、過度の変形・破損を生じて臨界に至らしめないことを目標として、バスケットの設計基準が定められている。

MSF-21P 型のバスケットの設計基準としては、構造規格のバスケットの考え方を基本とし、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、クリープを考慮した発電用原子力設備規格（設計・建設規格 <第 II 編 高速炉規格> JSME S NC2-2005）（日本機械学会 2005 年 9 月）（以下「高速炉規格」という。）の規定の考え方を取り入れることとした。さらに、技術的に想定されるいかなる場合においても使用済燃料が臨界に達することを防止するため、落下等の衝撃荷重が作用した場合においても、バスケット格子に未臨界体系に影響する塑性変形が残らないよう、MSF-21P 型の特別規定を設けることとした。

具体的には、供用状態 A、B、C 及び D に対応してバスケットが維持すべき安全機能の観点から設計基準をそれぞれ設定した。MSF-21P 型のバスケットの設計基準の設定方針及び設計基準を第 3-1 表に示すとともに、設計基準の設定根拠を 4 章に示す。

なお、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、「添付書類 8-2-3 バスケットプレート用材料 アルミニウム合金（MB-A3004-H112）に関する説明書」に示された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、設計基準での考慮は不要である。

設計基準の設定においては、構造規格のバスケット及び密封容器の設計基準、並びに発電用原子力設備規格（設計・建設規格 <第 I 編 軽水炉規格> JSME S NC1-2005）（日本機械学会 2005 年 9 月）（2007 年追補版含む）（以下「設計・建設規格」という。）の炉心支持構造物の設計基準を参考として比較した。それぞれの設計基準を第 3-2 表から第 3-7 表に示す。第 3-2 表から第 3-7 表に示すとおり、MSF-21P 型のバスケットの設計基準は、構造規格のバスケット及び密封容器、並びに設計・建設規格の炉心支持構造物の設計基準と同等又は保守的な基準となっている。

第3-1表 MSF-21P型のバスケット設計に適用する設計基準

供用状態		A		B	C		D		
評価事象	貯蔵施設内	貯蔵時	吊上げ時	衝撃荷重作用時	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)		
	輸送時	—	通常輸送時	0.3m落下等	—		9m落下等		
設計基準の設定方針		<ul style="list-style-type: none"> <li>クリープによる破断及び変形の進展を防止</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>短期荷重による表面塑性を防止 (変形を防止)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>短期荷重による全断面降伏を防止 (形状を維持)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>短期荷重による破断を防止</li> </ul>			
設計基準		$P_m \leq S$ $P_m + P_b \leq K_0 S$ $\tau \leq 0.6 S$ $\sigma_p \leq S$ $\sigma_c(\text{一次}) \leq f_c$ $\sigma_c(\text{一次+二次}) \leq 1.5 f_c$ $\epsilon_c \leq 0.001$ (注4)	4.1(1) 4.1(1) 4.1(1) 4.1(1) 4.1(1) 4.1(1)	$P_m \leq S_m$ $P_m + P_b \leq \alpha S_m$ $P_m + P_b + Q \leq 1.5 S_m$ $\tau \leq 0.6 S_m$ $\sigma_p \leq S_y (1.5 S_y)$ (注1) $\sigma_c(\text{一次}) \leq f_c$ $\sigma_c(\text{一次+二次}) \leq 1.5 f_c$	4.1(3) 4.1(3) 4.1(4) 4.1(3) 4.1(3) 4.1(3) 4.1(5) 4.1(5)	$P_m \leq 1.2 S_m$ $P_m + P_b \leq 1.2 \alpha S_m$ $P_m + P_b + Q \leq 1.5 S_m$ $\tau \leq 0.9 S_m$ $\sigma_p \leq 1.5 S_y (2.25 S_y)$ (注1) $\sigma_c(\text{一次}) \leq 1.5 f_c$ $\sigma_c(\text{一次+二次}) \leq 1.5 f_c$	4.3(1) 4.3(1) 4.3(2) 4.3(3) 4.3(4) 4.3(5) 4.3(5)	$P_m \leq 2/3 S_u$ $P_m + P_b \leq 2/3 \alpha S_u$ $P_m + P_b + Q \leq 3 S_m$ $\tau \leq 1.2 S_m$ $\sigma_p \leq 2 S_y (3 S_y)$ (注1) $\sigma_c(\text{一次}) \leq 1.5 f_c^*$ (注3) $\sigma_c(\text{一次+二次}) \leq 1.5 f_c$	4.4(1) 4.4(1) 4.4(2) 4.4(3) 4.4(4) 4.4(5) 4.4(5)
MSF-21P型特別規定						バスケット格子の塑性変形を防止 (設計降伏点以下) (注2)	4.3(1)	バスケット格子の塑性変形を防止 (設計降伏点以下) (注2)	4.4(1)

$S_m$  : 設計応力強さ、 $S_u$  : 設計引張強さ、 $S_y$  : 設計降伏点、 $S$  : 許容引張応力、 $P_m$  : 一次一般膜応力、 $P_b$  : 一次曲げ応力、 $Q$  : 二次応力、 $\tau$  : 平均せん断応力、

$\sigma_p$  : 平均支圧応力、 $\sigma_c$  : 圧縮応力、 $f_c$  及び  $f_c^*$  : 許容圧縮応力 ( $S_y$  又は  $S_u$  の関数)、 $\epsilon_c$  : 長期荷重によるクリープひずみ

$K_0$  :  $K_0 = 1 + k_s (1 - P_m/S)$ 、 $k_s$  :  $k_s = 0.5(\alpha - 1)$

$\alpha$  : 純曲げによる全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比又は 1.5 のいずれかの小さい方の値

(注1) ( ) 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2) MSF-21P型では、供用状態C及びDにおいて未臨界機能維持の重要性を考慮し、設計降伏点以下を適用。

(注3)  $f_c^*$ の値は、 $f_c$ の値を算出する際に  $S_y$  とあるのを  $1.2 S_y$  と読み替えて算出した値。

(注4) MSF-21P型のバスケットにおけるクリープひずみ評価は別紙1参照。

第3-2表 一次一般膜応力強さに対する設計基準

供用状態	MSF-21P 型	構造規格 バスケット MCD-2000	構造規格 密封容器 MCD-1000	設計・建設規格 炉心支持構造物 CSS-3000
A (貯蔵時)	S	—	—	—
A (吊上げ時) B	$S_m$	$S_m$	$S_m$	$S_m$
C	$1.2 S_m$	$1.5 S_m$	$\text{MIN}[S_y, 2/3 S_u]$ <sup>(注1)</sup> $1.2 S_m$ <sup>(注2)</sup>	$1.5 S_m$
D	$2/3 S_u$	$2/3 S_u$ <sup>(注1)</sup> $\text{MIN}[2.4 S_m, 2/3 S_u]$ <sup>(注2)</sup>	$2/3 S_u$ <sup>(注1)</sup> $\text{MIN}[2.4 S_m, 2/3 S_u]$ <sup>(注2)</sup>	$2/3 S_u$ <sup>(注1)</sup> $\text{MIN}[2.4 S_m, 2/3 S_u]$ <sup>(注2)</sup>

(注1) オーステナイト系ステンレス鋼以外の材料の場合

(注2) オーステナイト系ステンレス鋼の材料の場合

第3-3表 一次一般膜+一次曲げ応力強さに対する設計基準

供用状態	MSF-21P 型	構造規格 バスケット MCD-2000	構造規格 密封容器 MCD-1000	設計・建設規格 炉心支持構造物 CSS-3000
A (貯蔵時)	$K_0 S$	—	—	—
A (吊上げ時) B	$\alpha S_m$	$1.5 S_m$	$\alpha S_m$	$1.5 S_m$
C	$1.2 \alpha S_m$	$2.25 S_m$	$\text{MIN}[\alpha S_y, 2/3 \alpha S_u]$ <sup>(注1)</sup> $1.2 \alpha S_m$ <sup>(注2)</sup>	$2.25 S_m$
D	$2/3 \alpha S_u$	$S_u$ <sup>(注1)</sup> $\text{MIN}[3.6 S_m, S_u]$ <sup>(注2)</sup>	$2/3 \alpha S_u$ <sup>(注1)</sup> $\text{MIN}[2.4 \alpha S_m, 2/3 \alpha S_u]$ <sup>(注2)</sup>	$S_u$ <sup>(注1)</sup> $\text{MIN}[3.6 S_m, S_u]$ <sup>(注2)</sup>

$\alpha$  : 純曲げによる全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比又は 1.5 のいずれかの小さい方の値

$K_0$  :  $K_0 = 1 + k_s (1 - P_m/S)$ 、 $k_s$  :  $k_s = 0.5(\alpha - 1)$

(注1) オーステナイト系ステンレス鋼以外の材料の場合

(注2) オーステナイト系ステンレス鋼の材料の場合

第3-4表 一次+二次応力に対する設計基準

供用状態	MSF-21P型	構造規格 バスケット MCD-2000	構造規格 密封容器 MCD-1000	設計・建設規格 炉心支持構造物 CSS-3000
A (貯蔵時)	$\varepsilon_c \leq 0.001$	—	—	—
A (吊上げ時) B	$1.5 S_m$	$3 S_m$	$3 S_m$	$3 S_m$
C	$1.5 S_m$	—	$3 S_m$ (注1)	—
D	$3 S_m$	—	$3 S_m$ (注1)	—

(注1) 短期繰り返し荷重（地震力を想定）のみによる応力振幅について評価する。

第3-5表 せん断応力に対する設計基準

供用状態	MSF-21P型	構造規格 バスケット MCD-2000	構造規格 密封容器 MCD-1000	設計・建設規格 炉心支持構造物 CSS-3000
A (貯蔵時)	$0.6 S$	—	—	—
A (吊上げ時) B	$0.6 S_m$	$0.6 S_m$	$0.6 S_m$	$0.6 S_m$
C	$0.9 S_m$	$0.9 S_m$	$0.6 S_m$	$0.9 S_m$
D	$1.2 S_m$	$1.2 S_m$	$0.4 S_u$	$1.2 S_m$

第3-6表 支圧応力に対する設計基準

供用状態	MSF-21P型	構造規格 バスケット MCD-2000	構造規格 密封容器 MCD-1000	設計・建設規格 炉心支持構造物 CSS-3000
A (貯蔵時)	S	—	—	—
A (吊上げ時) B	$S_y$ ( $1.5 S_y$ )	$S_y$ ( $1.5 S_y$ )	$S_y$ ( $1.5 S_y$ )	$S_y$ ( $1.5 S_y$ )
C	$1.5 S_y$ ( $2.25 S_y$ )	$1.5 S_y$ ( $2.25 S_y$ )	$S_y$ ( $1.5 S_y$ )	$1.5 S_y$ ( $2.25 S_y$ )
D	$2 S_y$ ( $3 S_y$ )	$2 S_y$ ( $3 S_y$ )	$S_u$ ( $1.5 S_u$ )	$2 S_y$ ( $3 S_y$ )

(注1) ( ) 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。

第3-7表 圧縮応力に対する設計基準

供用状態	MSF-21P型	構造規格 バスケット MCD-2000	構造規格 密封容器 MCD-1000	設計・建設規格 炉心支持構造物 CSS-3000
A (貯蔵時)	$\sigma_c(\text{一次}) \leq f_c$ $\sigma_c(\text{一次+二次}) \leq 1.5 f_c$	—	—	—
A (吊上げ時) B	$\sigma_c(\text{一次}) \leq f_c$ $\sigma_c(\text{一次+二次}) \leq 1.5 f_c$	$\sigma_c(\text{一次}) \leq f_c$ $\sigma_c(\text{一次+二次}) \leq 1.5 f_c$	— $\sigma_c(\text{一次+二次}) \leq \text{MIN}[S_m, B]$	$\sigma_c(\text{一次}) \leq f_c$ $\sigma_c(\text{一次+二次}) \leq 1.5 f_c$
C	$\sigma_c(\text{一次}) \leq 1.5 f_c$ $\sigma_c(\text{一次+二次}) \leq 1.5 f_c$	$\sigma_c(\text{一次}) \leq 1.5 f_c$ $\sigma_c(\text{一次+二次}) \leq 1.5 f_c$	$\sigma_c(\text{一次}) \leq \text{MIN}[1.2 S_m, 1.2 B]$ —	$\sigma_c(\text{一次}) \leq 1.5 f_c$ —
D	$\sigma_c(\text{一次}) \leq 1.5 f_c^*$ $\sigma_c(\text{一次+二次}) \leq 1.5 f_c$	$\sigma_c(\text{一次}) \leq 1.5 f_c^*$ $\sigma_c(\text{一次+二次}) \leq 1.5 f_c$	$\sigma_c(\text{一次}) \leq \text{MIN}[1.5 S_m, 1.5 B]$ —	$\sigma_c(\text{一次}) \leq 1.5 f_c^*$ —

(注1)  $f_c^*$ の値は、 $f_c$ の値を算出する際に $S_y$ とあるのを $1.2 S_y$ と読み替えて算出した値。

(注2) Bは、構造規格の別図により求めた値。

## 4. 設計基準の設定根拠

### 4.1 供用状態A

供用状態Aは、貯蔵時及び吊上げ時が該当し、長期的な荷重又は吊上げ時の衝撃荷重が作用する状態である。貯蔵時は、長期荷重がバスケット格子へ作用する事象である。吊上げ時は、通常使用状態又は繰り返し作業による荷重（短期繰り返し荷重）がバスケット格子へ作用する事象である。

これらの事象に対しては、長期荷重に対してクリープによる破断及び変形の進展を防止、また、短期荷重に対しては表面塑性を防止するよう基準を設定する。

- (1) 長期荷重による一次一般膜応力 ( $P_m$ )、一次一般膜＋一次曲げ応力 ( $P_m + P_b$ )、せん断応力 ( $\tau$ )、支圧応力 ( $\sigma_p$ ) 及び圧縮応力 ( $\sigma_c$ )

長期荷重による一次一般膜応力 ( $P_m$ )、一次一般膜＋一次曲げ応力 ( $P_m + P_b$ )、せん断応力 ( $\tau$ ) 及び支圧応力 ( $\sigma_p$ ) に対しては、クリープ強度を考慮した許容値として許容引張応力  $S$  に基づく設計基準を採用した。なお、MSF-21P 型のバスケットにおいて、係数  $K_0$  は 1.0 を適用した。

長期荷重による圧縮応力 ( $\sigma_c$ ) に対しては、構造規格の MCD-2000 (バスケット) と同様の設計基準を採用した。

- (2) 長期荷重によるクリープひずみ ( $\varepsilon_c$ )

長期荷重によるクリープひずみ ( $\varepsilon_c$ ) に対しては、「添付書類 8-2-4 バスケットプレート用材料 アルミニウム合金 (MB-A3004-H112) について」別紙 3 に示す通り材料特性に影響のない範囲のクリープひずみとして、十分な裕度を考慮して 0.1% を設計基準とする。

- (3) 長期＋短期荷重による一次一般膜応力 ( $P_m$ )、一次一般膜＋一次曲げ応力 ( $P_m + P_b$ )、せん断応力 ( $\tau$ )、支圧応力 ( $\sigma_p$ ) 及び圧縮応力 ( $\sigma_c$ )

長期＋短期荷重による一次一般膜応力 ( $P_m$ )、一次一般膜＋一次曲げ応力 ( $P_m + P_b$ )、せん断応力 ( $\tau$ )、支圧応力 ( $\sigma_p$ ) 及び圧縮応力 ( $\sigma_c$ ) に対しては、クリープ支配ではないことから、設計応力強さ  $S_m$  に基づく設計基準を採用した。設計応力強さ  $S_m$  に基づく設計基準は、構造規格の MCD-2000 (バスケット) と同様である。ただし、一次一般膜＋一次曲げ応力に対しては、バスケットプレートの断面形状が中空状であることを考慮し、構造規格の MCD-1000 (密封容器) と同様に係数として  $\alpha$  (純曲げによる全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比又は 1.5 のいずれかの小さい方の値) を適用した。なお、MSF-21P 型のバスケットについては、評価位置①、②及び③における  $\alpha$  はそれぞれ 1.0、1.26 及び 1.30 を適用した。

供用状態Aにおいて、引張荷重と曲げ荷重が同時に作用した時の部材を単純な矩形断面梁と仮定した設計限界との関係を第4-1図に示す。同図に示すとおり、崩壊応力に対して、 $P_m$ については安全率を1.5とし、 $P_m + P_b$ に対しては安全率が一定ではないものの、十分安全側に設計限界を定めている。ここで、崩壊応力とは、第4-2図(c)に示すように塑性領域が全断面に発達し、崩壊に至る応力である。

(4) 長期+短期荷重による一次+二次応力 ( $P_m + P_b + Q$ )

長期+短期荷重による一次+二次応力 ( $P_m + P_b + Q$ ) に対しては、第4-3図(a)に示すように、 $1.5 S_m (= S_y)$  を設計基準とし、弾性挙動に制限した。

(5) 長期+短期荷重による圧縮応力 ( $\sigma_c$ )

長期+短期荷重による圧縮応力の評価は、構造規格のMCD-2317に示された格子板等に圧縮荷重を受ける部分に生じる圧縮応力に対する設計基準を適用した。

限界細長比と圧縮限度の関係を第4-5図に示す。供用状態Aにおいて、圧縮応力に対する設計基準 ( $f_c$ ) は、座屈耐力 ( $\sigma_{cr}$ ) に対して安全率 $\nu$ をとったものとした。なお、MSF-21P型のバスケットにおいて、安全率 $\nu$ は約1.5である。

#### 4.2 供用状態B

供用状態Bは、衝撃荷重作用時や0.3m落下が該当する。本事象は、通常使用状態又は繰り返し作業による荷重（短期繰り返し荷重）がバスケット格子へ作用する事象である。

この事象に対しては、短期荷重に対して表面塑性を防止するよう基準を設定することとし、供用状態Aの長期+短期荷重時と同じ設計基準とした。

#### 4.3 供用状態C

供用状態Cは、 $S_d$ \*相当地震力がバスケット格子へ作用する事象であり、本事象は、設計評価期間中、まれにしか生じる可能性がない事象である。

この事象に対しては、臨界機能維持のため、バスケット格子形状が維持されるよう、短期荷重による全断面降伏を防止するための設計基準を設定するものとする。さらに、MSF-21P型のバスケットに対しては、バスケット格子の塑性変形を防止するための設計基準も設定した。

(1) 一次一般膜応力 ( $P_m$ ) 及び一次一般膜+一次曲げ応力 ( $P_m + P_b$ )

一次一般膜応力 ( $P_m$ ) 及び一次一般膜+一次曲げ応力 ( $P_m + P_b$ ) の設計基準は、供用状態A及びBと同様に $S_m$ をベースとした。その割増係数は、構造規格のMCD-1311.2（密封容器）とMCD-2313（バスケット）の値とを比較し、より保守的に1.2を採用した。供用状態Cにおいて、引張荷重と曲げ荷重が同時に作用した時の部材を単純な矩形断面梁



と仮定した設計限界との関係を第 4-4 図に示す。同図に示すとおり、崩壊応力に対して、 $P_m$ については安全率を 1.25 とし、 $P_m + P_b$ に対しては安全率が一定ではないが、十分安全側に設計限界を定めており、バスケット格子が全断面降伏することはない。

さらに、MSF-21P 型のバスケットプレートの断面形状が中空状であることから、一次一般膜+一次曲げ応力に対しても梁が塑性変形しないように、降伏応力  $S_y$  とする設計基準を追加した。

#### (2) 一次+二次応力 ( $P_m + P_b + Q$ )

一次+二次応力 ( $P_m + P_b + Q$ ) の評価については、供用状態 A 及び B と同様に第 4-2 図(a)に示すように、 $1.5 S_m (= S_y)$  を設計基準とし、弾性挙動に制限した。

#### (3) 平均せん断応力 ( $\tau$ )

平均せん断応力に対する設計基準としては、構造規格の MCD-2315 (バスケット) に基づき、供用状態 A 及び B に対する設計基準の 1.5 倍である  $0.9 S_m$  とした。これは、せん断ひずみエネルギー説に基づく降伏条件 (ミーゼスの降伏条件) に従うと、引張応力とせん断降伏応力との比は  $1:1/\sqrt{3}$  であることから、平均せん断応力の設計基準は、 $0.6 (\approx 1/\sqrt{3}) S_m$  の 1.5 倍である  $0.9 S_m$  となる。

#### (4) 平均支圧応力 ( $\sigma_p$ )

平均支圧応力に対する設計基準も構造規格と同様に供用状態 A 及び B に対する設計基準の 1.5 倍である  $2.25 S_y$  (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) 又は  $1.5 S_y$  (それ以外の場合) を適用した。

#### (5) 圧縮応力 ( $\sigma_c$ )

圧縮荷重の評価は、構造規格の MCD-2317 に示された格子板等に圧縮荷重を受ける部分に生じる圧縮応力に対する設計基準を適用した。

限界細長比と圧縮限度 (許容圧縮荷重又は座屈耐力) の関係を第 4-5 図に示す。供用状態 C における圧縮応力に対する設計基準 ( $1.5 f_c$ ) は、同図に示すとおり座屈耐力以内であることから、バスケット格子形状は維持可能である。

### 4.4 供用状態 D

供用状態 D は、 $S_s$  相当地震力が作用する場合又は 9 m 落下時である。本事象は、設計評価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。

この事象に対しては、一般公衆の放射線被ばく防止の観点から、基本的安全機能を著しく損

なうことが無いよう、バスケット格子の破断を防止するよう設計基準を設定する。さらに、MSF-21P型のバスケットでは、保守側の評価とすべく、バスケット格子の塑性変形を防止するための特別規定も設けている。

(1) 一次一般膜応力 ( $P_m$ ) 及び一次一般膜＋一次曲げ応力 ( $P_m + P_b$ )

究極状態である供用状態Dにおける一次一般膜応力 ( $P_m$ ) 及び一次一般膜＋一次曲げ応力 ( $P_m + P_b$ ) の設計基準は、構造規格のMCD-2324 (バスケット) に従い、材料の究極強度である設計引張強さ  $S_u$  をベースとした。参考として、究極強さと各供用状態の設計基準との関係を第4-6図に示す。同図に示すとおり、供用状態Dにおいては、 $P_m + P_b$  に対する設計基準  $S_u$  は、究極強さに対して余裕がなくなる。そこで、MSF-21P型の特別規定として、降伏応力  $S_y$  とする設計基準を追加し、究極強さに対して十分な安全率を確保するとともに、断面形状が中空状であるバスケットプレートの塑性変形を防止する。究極強さとMSF-21P型の特別規定として設定した設計基準との関係を第4-7図に示す。

(2) 一次＋二次応力 ( $P_m + P_b + Q$ )

一次＋二次応力 ( $P_m + P_b + Q$ ) の評価については、第4-3図(b)に示す  $3S_m (=2S_y)$  を設計基準とし、変形が累積しないよう制限した。

(3) 平均せん断応力 ( $\tau$ )

平均せん断応力 ( $\tau$ ) に対する設計基準は、構造規格のMCD-2315 (バスケット) に基づき供用状態A及びBの  $0.6S_m$  の2倍である  $1.2S_m$  とした。

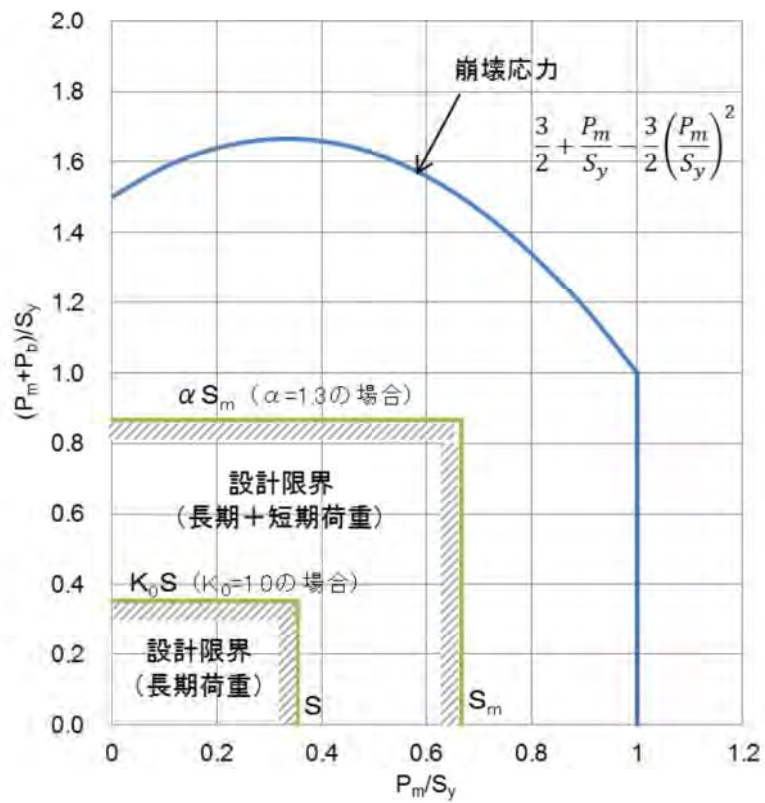
(4) 平均支圧応力 ( $\sigma_p$ )

平均支圧応力に対する設計基準 ( $\sigma_p$ ) は、構造規格のMCD-2316 (バスケット) に基づき供用状態A及びBの  $S_y$  の2倍である  $2S_y$  とした。

(5) 圧縮応力 ( $\sigma_c$ )

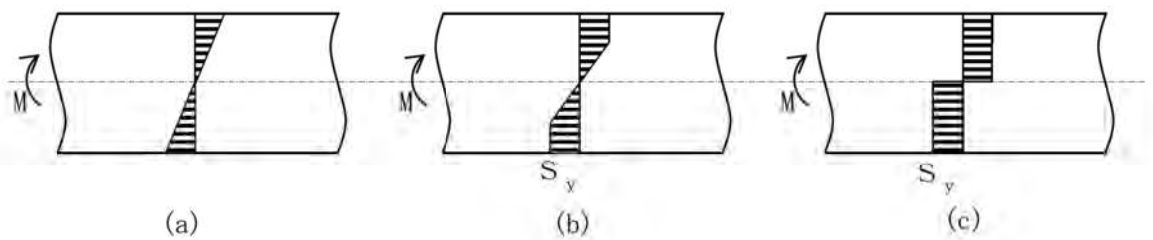
圧縮荷重の評価は、構造規格のMCD-2317に示された格子板等に圧縮荷重を受ける部分に生じる圧縮応力に対する設計基準を適用した。

なお、供用状態Dの荷重は事故時の衝撃荷重が主でひずみ速度が大であること及び通常材料の実降伏点は設計値に対して余裕があることを考慮して、圧縮応力 (一次) の  $f_c$  の値を算出する際は、 $S_y$  とあるのを  $1.2S_y$  と読み替える。



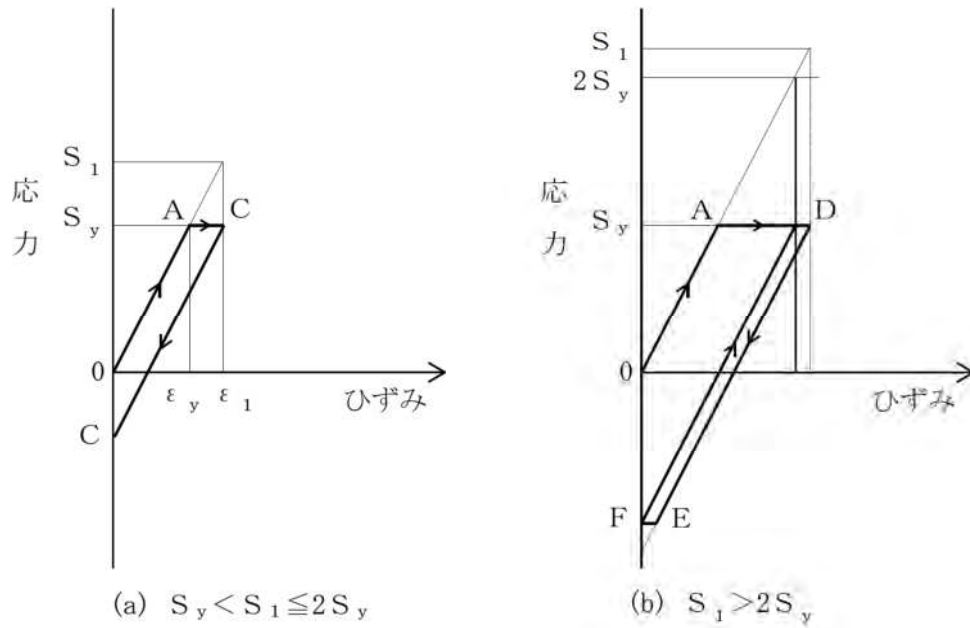
(注) 長期荷重の設計限界は、使用温度 180℃における設計降伏点  $S_y$  と許容引張応力  $S$  との比とした。

第 4-1 図 供用状態 A 及び B における引張り及び曲げによる崩壊応力及び設計限界

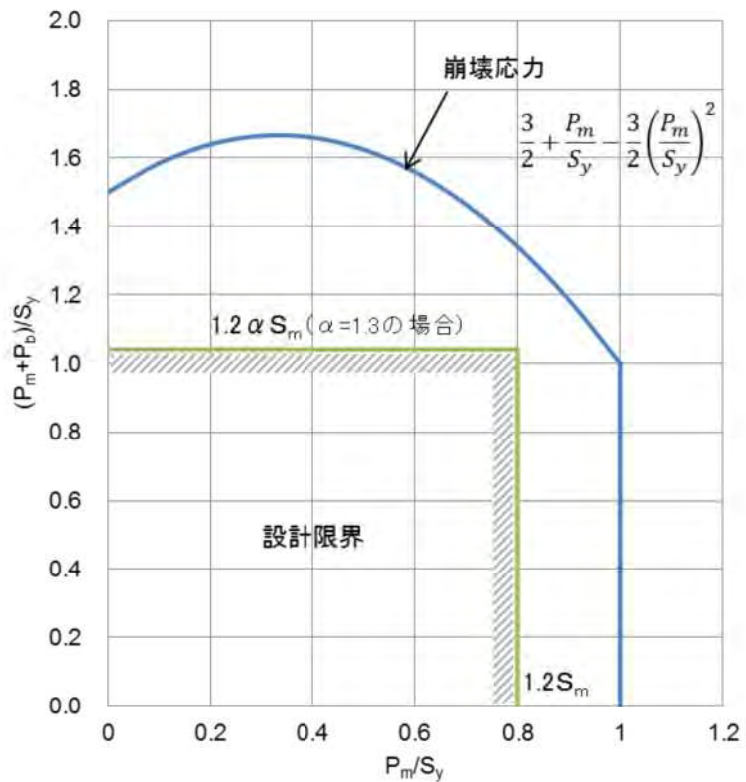


(a) の場合は、応力は中心軸からの距離及び曲げモーメントの大きさに比例し増大する。  
 (b) の場合は、材料の表面が降伏点に達し、塑性領域が断面の内部へと進行してくる。  
 (c) の場合は、塑性領域が全断面に到達し、崩壊に至る。

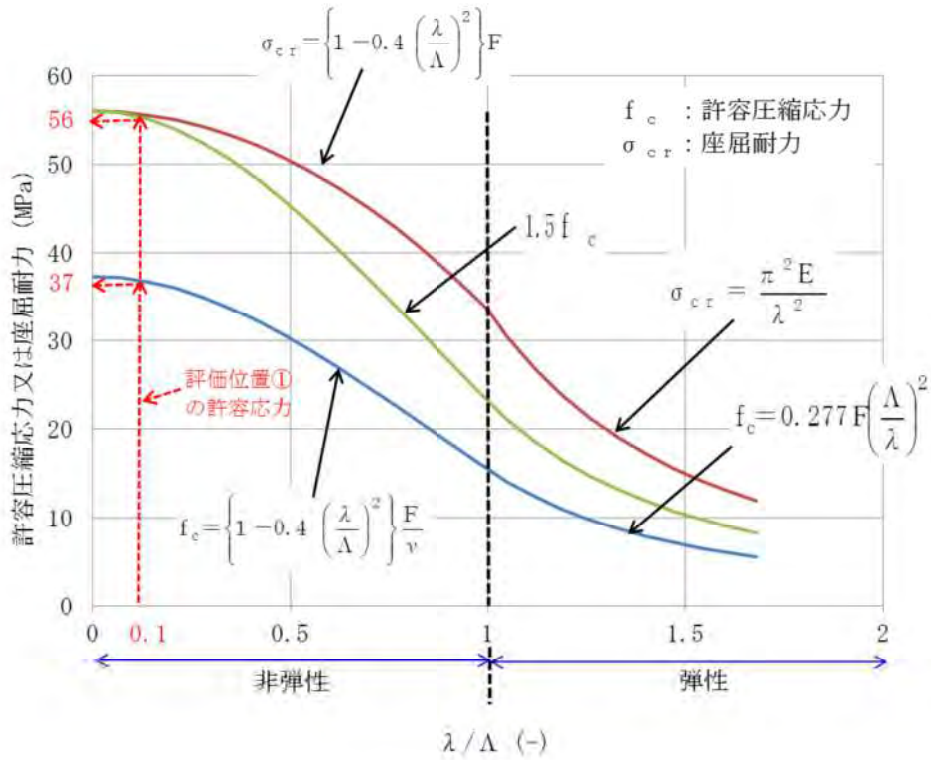
第 4-2 図 曲げ荷重作用時の断面応力分布模式図



第4-3図 降伏点を超える場合のひずみ履歴

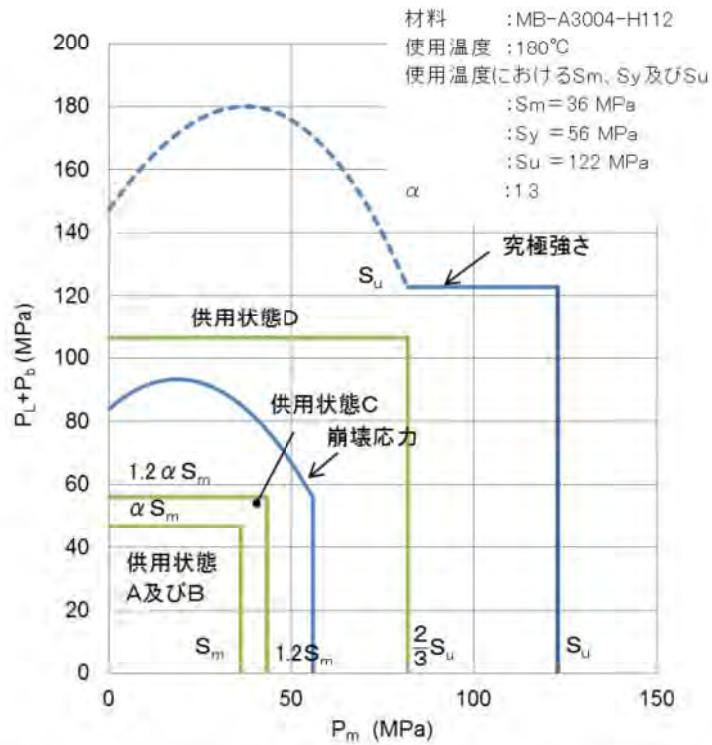


第4-4図 供用状態Cにおける引張り及び曲げによる崩壊応力及び設計限界

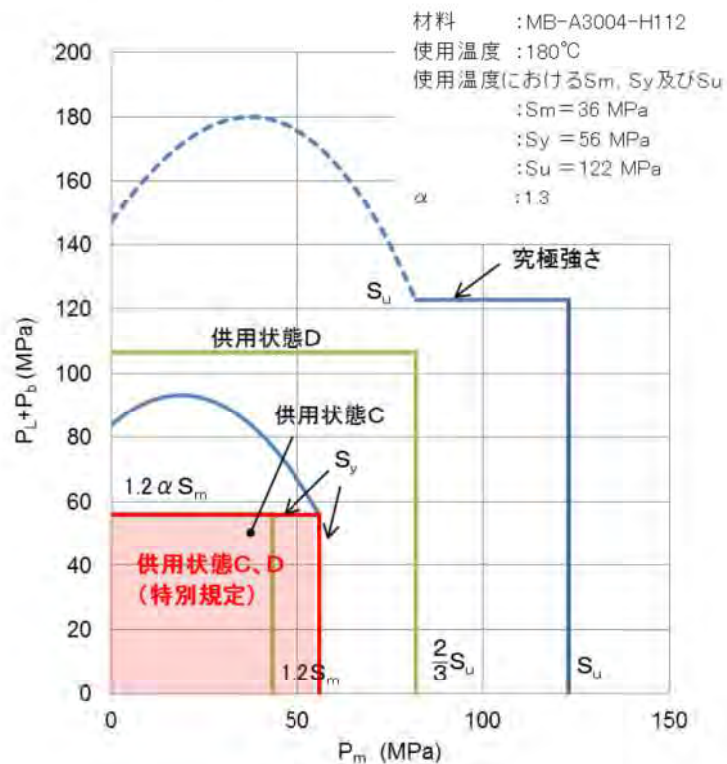


$\lambda / \Lambda$	0~1 (非弾性座屈範囲)	1~ (弾性座屈領域)
項目		
許容圧縮応力 $f_c$	$f_c = \left\{ 1 - 0.4 \left( \frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{\nu}$	$f_c = 0.277 F \left( \frac{\Lambda}{\lambda} \right)^2$
座屈耐力 $\sigma_{cr}$	$\sigma_{cr} = \left\{ 1 - 0.4 \left( \frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} F$	$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$

第 4-5 図 限界細長比と座屈限度（許容圧縮荷重又は座屈耐力）の関係



第 4-6 図 矩形梁の究極強さ及び各供用状態の設計基準



第 4-7 図 矩形梁の究極強さ及び MSF-21P 型の特別規定の設計基準