

資料 1-3

Doc. No. MA035B-SC-Z04 Rev.1

2022年10月26日

日立造船株式会社

補足説明資料 1-2

バスケット基準値について

## 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. 評価基準の設定方針 .....	3
4. 評価基準の設定根拠 .....	8
4.1 供用状態 A .....	8
4.2 供用状態 B .....	12
4.3 供用状態 C .....	12
4.4 供用状態 D .....	15
5. 参考文献 .....	17

## 1. 概要

特定兼用キャスクは、貯蔵時、取扱時及び地震時、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つの安全機能の維持が求められる。

特定兼用キャスクを構成する要素のうちバスケットは、特定兼用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。

本資料は、上記の機能を考慮した Hitz-P24 型のバスケットの評価基準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

Hitz-P24 型のバスケットは、図 1 に示すように、主にアルミニウム合金 (HZ-A3004) 製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) 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の構造健全性を保つ必要がある。

Hitz-P24 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、「補足説明資料 16-6 材料・構造健全性 (長期健全性) に関する説明資料」に示す。

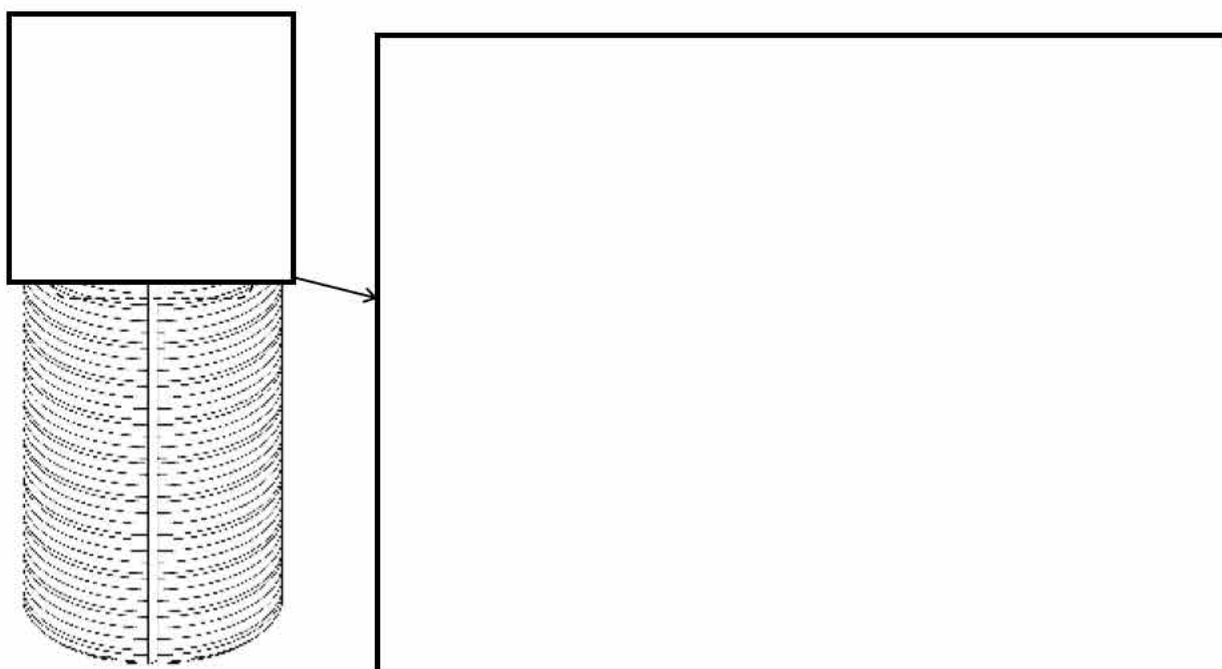


図 1 Hitz-P24 型のバスケット構造

### 3. 評価基準の設定方針

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) (以下「金属キャスク構造規格」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 (アルミニウム合金を除く) の評価基準が定められている。

Hitz-P24 型のバスケットを構成する部材のうち、アルミニウム合金以外の部材については、金属キャスク構造規格のバスケットの評価基準を適用する。アルミニウム合金で構成される部材については、金属キャスク構造規格のバスケットの評価基準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) の規定の考え方を取り入れることとした。

具体的には、金属キャスク構造規格で定められる供用状態 A、B、C 及び D に対して、バスケットが維持すべき安全機能の観点からバスケット (アルミニウム合金) の評価基準をそれぞれ設定した。Hitz-P24 型のバスケット (アルミニウム合金) の評価基準の設定方針及び評価基準を表 1 に示すとともに、評価基準の設定根拠を 4.項に示す。

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、「補足説明資料 1-1 バスケット用アルミニウム合金 (HZ-A3004-H112) について」に示す材料規定の設定において過時効効果を十分に考慮しているため、評価基準での考慮は不要である。

参考として、設定した評価基準と、金属キャスク構造規格のバスケット及び密封容器の評価基準、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) (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評価基準を比較した。それぞれの評価基準との比較を表 2~7 に示す。表 2~7 に示すとおり、Hitz-P24 型のバスケット (アルミニウム合金) の評価基準は、金属キャスク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評価基準と同等又は保守的な基準となっている。

表1 Hitz-P24 型のバスケット（アルミニウム合金）に適用する評価基準

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 (Sd*相当地震力が作用する場合)	貯蔵時 (Ss 相当地震力が作用する場合) 及び衝撃荷重作用時		
	輸送時	—	通常輸送時	0.3m 落下等	—	9m 落下等		
評価基準の設定方針		・クリープによる破断及び変形の進展を防止	・短期荷重による表面の塑性変形を防止 (変形を防止)	・短期荷重による全断面降伏を防止 (形状を維持)	・短期荷重による破断を防止			
		<説明> 本事象は、長期荷重がバスケットプレートに作用する事象である。 Hitz-P24 型のバスケットは、クリープ特性を無視できない温度領域で使用することから、クリープ破断及びクリープ変形を防止するよう評価基準を設定する。	<説明> 本事象は、通常使用状態及び繰り返し作業による荷重（短期荷重）がバスケットプレートに作用する事象である。 本事象では、臨界防止機能維持のため、バスケットプレートの変形を防止するよう評価基準を設定する。	<説明> 本事象は、設計貯蔵期間中、まれにしか生じる可能性がない事象である。 本事象では、臨界防止機能維持のため、バスケットプレートの形状が維持されるよう評価基準を設定する。	<説明> 本事象は、設計貯蔵期間中に発生することは予想されないが、技術的に見れば発生が想定され得る事象である。 本事象では、一般公衆の放射線被ばく防止の観点から、安全機能を著しく損なうことがないように、バスケットプレートの破断を防止するよう評価基準を設定する。 ただし、塑性変形が生じる場合はバスケットの変形量を考慮した臨界解析により臨界防止上有意な変形が生じていないことを確認する。			
評価基準	$P_m \leq S$	4.1(1)	$P_m \leq S_m$	4.1(3)	$P_m \leq 1.2S_m$	4.3(1)	$P_m \leq 2/3S_u$	4.4(1)
	$P_m + P_b \leq K_0 S$	4.1(1)	$P_m + P_b \leq 1.5S_m$	4.1(3)	$P_m + P_b \leq 1.8S_m$	4.3(1)	$P_m + P_b \leq S_u$	4.4(1)
			$P_m + P_b + Q \leq 1.5S_m$ (注1)	4.1(4)	$P_m + P_b + Q \leq 1.5S_m$ (注1)	4.3(2)	$P_m + P_b + Q \leq 3S_m$ (注3)	4.4(2)
	$\tau \leq 0.6S$	4.1(1)	$\tau \leq 0.6S_m$	4.1(3)	$\tau \leq 0.9S_m$	4.3(3)	$\tau \leq 1.2S_m$	4.4(3)
	$\sigma_p \leq S$	4.1(1)	$\sigma_p \leq S_y$ (1.5S <sub>y</sub> ) (注2)	4.1(3)	$\sigma_p \leq 1.5S_y$ (2.25S <sub>y</sub> ) (注2)	4.3(4)	$\sigma_p \leq 2S_y$ (3S <sub>y</sub> ) (注2)	4.4(4)
	$\sigma_c$ (一次) $\leq f_c$	4.1(1)	$\sigma_c$ (一次) $\leq f_c$	4.1(5)	$\sigma_c$ (一次) $\leq 1.5f_c$	4.3(5)	$\sigma_c$ (一次) $\leq 1.5f_c^*$ (注4)	4.4(5)
	$\sigma_c$ (一次+二次) $\leq 1.5f_c$	4.1(1)	$\sigma_c$ (一次+二次) $\leq 1.5f_c$	4.1(5)	$\sigma_c$ (一次+二次) $\leq 1.5f_c$	4.3(5)	$\sigma_c$ (一次+二次) $\leq 1.5f_c$	4.4(5)
	$\epsilon_{mc} \leq 0.002$	4.1(2)						
$\epsilon_{mc} + \epsilon_{bc} \leq 0.004$	4.1(2)							

S<sub>m</sub> : 設計応力強さ、S<sub>u</sub> : 設計引張強さ、S<sub>y</sub> : 設計降伏点、S : 許容引張応力、P<sub>m</sub> : 一次一般膜応力、P<sub>b</sub> : 一次曲げ応力、Q : 二次応力、τ : 平均せん断応力、σ<sub>p</sub> : 平均支圧応力、σ<sub>c</sub> : 圧縮応力、f<sub>c</sub> 及び f<sub>c</sub>\* : 許容圧縮応力 (S<sub>y</sub> 又は S<sub>u</sub> の関数)、ε<sub>mc</sub> : 長期荷重によるクリープ膜ひずみ、ε<sub>bc</sub> : 長期荷重によるクリープ曲げひずみ、K<sub>0</sub> : K<sub>0</sub> = 1 + 0.25 (1 - P<sub>m</sub>/S)

(注1) 1.5S<sub>m</sub> を超える場合は、短期荷重のみによる一次+二次応力強さに対して P<sub>m</sub>+P<sub>b</sub>+Q ≤ 3S<sub>m</sub> を制限とし、短期荷重作用後の部材内応力再配分により生じる促進クリープを含む累積クリープひずみに対して ε<sub>mec</sub> ≤ 0.002、ε<sub>mec</sub>+ε<sub>bec</sub> ≤ 0.004 を制限とする。

ε<sub>mec</sub> : 短期荷重作用後の部材内応力再配分により生じる促進クリープを含む累積クリープ膜ひずみ

ε<sub>bec</sub> : 短期荷重作用後の部材内応力再配分により生じる促進クリープを含む累積クリープ曲げひずみ

(注2) ( ) 内は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値。

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

(注4) f<sub>c</sub>\*の値は、f<sub>c</sub>の値を算出する際の S<sub>y</sub> を 1.2S<sub>y</sub> と読み替えて算出した値。

表 2 一次一般膜応力強さに対する評価基準

供用状態	Hitz-P24 型	金属キャスク 構造規格 バスケット MCD-2000	金属キャスク 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	Sm	Sm	Sm	Sm
C	1.2Sm	1.5Sm	MIN[Sy、 2/3Su] (注 1) 1.2Sm (注 2)	1.5Sm
D	2/3Su	2/3Su (注 1) MIN[2.4Sm、 2/3Su] (注 2)	2/3Su (注 1) MIN[2.4Sm、 2/3Su] (注 2)	2/3Su (注 1) MIN[2.4Sm、 2/3Su] (注 2)

(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

表 3 一次一般膜＋一次曲げ応力強さに対する評価基準

供用状態	Hitz-P24 型	金属キャスク 構造規格 バスケット MCD-2000	金属キャスク 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)	$K_0S$	—	—	—
A (吊上げ時) B	1.5Sm	1.5Sm	$\alpha Sm$	1.5Sm
C	1.8Sm	2.25Sm	MIN[ $\alpha Sy$ 、 2/3 $\alpha Su$ ] (注 1) 1.2 $\alpha Sm$ (注 2)	2.25Sm
D	Su	Su (注 1) MIN[3.6Sm、 Su] (注 2)	2/3 $\alpha Su$ (注 1) MIN[2.4 $\alpha Sm$ 、 2/3 $\alpha Su$ ] (注 2)	Su (注 1) MIN[3.6Sm、 Su] (注 2)

$\alpha$  : 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

$K_0$  :  $K_0 = 1 + 0.25 (1 - Pm/S)$

(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

表 4 一次＋二次応力に対する評価基準

供用状態	Hitz-P24 型	金属キャスク 構造規格 バスケット MCD-2000	金属キャスク 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)	$\varepsilon_{mc} \leq 0.002$ $\varepsilon_{mc} + \varepsilon_{bc} \leq 0.004$	—	—	—
A (吊上げ時) B	1.5Sm (3Sm) (注1) (注2)	3Sm	3Sm	3Sm
C	1.5Sm (3Sm) (注1) (注2)	—	3Sm (注2)	—
D	3Sm (注2)	—	3Sm (注2)	—

(注1) ( )内は一次＋二次応力が 1.5Sm を超える場合の値。この場合、短期荷重作用後の部材内応力再配分により生じる促進クリープを含む累積クリープひずみは以下の制限を満足すること。

$$E_{mec} \leq 0.002$$

$$\varepsilon_{mec} + \varepsilon_{bec} \leq 0.004$$

(注2) 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。

表 5 せん断応力に対する評価基準

供用状態	Hitz-P24 型	金属キャスク 構造規格 バスケット MCD-2000	金属キャスク 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)	0.6S	—	—	—
A (吊上げ時) B	0.6Sm	0.6Sm	0.6Sm	0.6Sm
C	0.9Sm	0.9Sm	0.6Sm	0.9Sm
D	1.2Sm	1.2Sm	0.4Su	1.2Sm



表 6 支圧応力に対する評価基準

供用状態	Hitz-P24 型	金属キャスク 構造規格 バスケット MCD-2000	金属キャスク 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	Sy (1.5Sy) (注 1)	Sy (1.5Sy) (注 1)	Sy (1.5Sy) (注 1)	Sy (1.5Sy) (注 1)
C	1.5Sy (2.25Sy) (注 1)	1.5Sy (2.25Sy) (注 1)	Sy (1.5Sy) (注 1)	1.5Sy (2.25Sy) (注 1)
D	2Sy (3Sy) (注 1)	2Sy (3Sy) (注 1)	Su (1.5Su) (注 1)	2Sy (3Sy) (注 1)

(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。

表 7 圧縮応力に対する評価基準

供用状態	Hitz-P24 型	金属キャスク 構造規格 バスケット MCD-2000	金属キャスク 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)	$\sigma_c$ (一次) $\leq f_c$ $\sigma_c$ (一次+二次) $\leq 1.5f_c$	—	—	—
A (吊上げ時) B	$\sigma_c$ (一次) $\leq f_c$ $\sigma_c$ (一次+二次) $\leq 1.5f_c$	$\sigma_c$ (一次) $\leq f_c$ $\sigma_c$ (一次+二次) $\leq 1.5f_c$	— $\sigma_c$ (一次+二次) $\leq \text{MIN}[S_m、$ B] (注 2)	$\sigma_c$ (一次) $\leq f_c$ $\sigma_c$ (一次+二次) $\leq 1.5f_c$
C	$\sigma_c$ (一次) $\leq 1.5f_c$ $\sigma_c$ (一次+二次) $\leq 1.5f_c$	$\sigma_c$ (一次) $\leq 1.5f_c$ $\sigma_c$ (一次+二次) $\leq 1.5f_c$	$\sigma_c$ (一次) $\leq \text{MIN}[1.2S_m、$ 1.2B] (注 2) —	$\sigma_c$ (一次) $\leq 1.5f_c$ —
D	$\sigma_c$ (一次) $\leq 1.5f_c^*$ (注 1) $\sigma_c$ (一次+二次) $\leq 1.5f_c$	$\sigma_c$ (一次) $\leq 1.5f_c^*$ (注 1) $\sigma_c$ (一次+二次) $\leq 1.5f_c$	$\sigma_c$ (一次) $\leq \text{MIN}[1.5S_m、$ 1.5B] (注 2) —	$\sigma_c$ (一次) $\leq 1.5f_c^*$ (注 1) —

(注 1)  $f_c^*$  の値は、 $f_c$  の値を算出する際の Sy を 1.2Sy と読み替えて算出した値。

(注 2) B は、金属キャスク構造規格の別図により求めた値。

#### 4. 評価基準の設定根拠

##### 4.1 供用状態 A

供用状態 A は、貯蔵時、通常輸送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プレート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（短期荷重）がバスケットプレート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の塑性変形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  $S$  に基づく評価基準を採用した。

長期荷重による圧縮応力 ( $\sigma_c$ ) に対しては、金属キャスク構造規格のバスケット (MCD-2000) と同様の評価基準を採用した。

- (2) 長期荷重によるクリープ膜ひずみ ( $\epsilon_{mc}$ ) 及びクリープ膜＋曲げひずみ ( $\epsilon_{mc} + \epsilon_{bc}$ )

長期荷重によるクリープひずみ ( $\epsilon_{mc}$ ) 及びクリープ膜＋曲げひずみ ( $\epsilon_{mc} + \epsilon_{bc}$ ) に対しては、クリープひずみが 0.1%～1.0%程度の範囲においては、クリープひずみはアルミニウム合金材料の短期機械強度に影響を与えない<sup>(1)</sup>ことから、クリープ膜ひずみに対して 0.2%、クリープ膜＋曲げひずみに対して 0.4%を評価基準とする。

- (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  $S_m$  に基づく評価基準を採用した。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格子板が矩形断面であることを考慮し、 $\alpha$ として 1.5 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図 2 に示す。図 2 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、図 3(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。

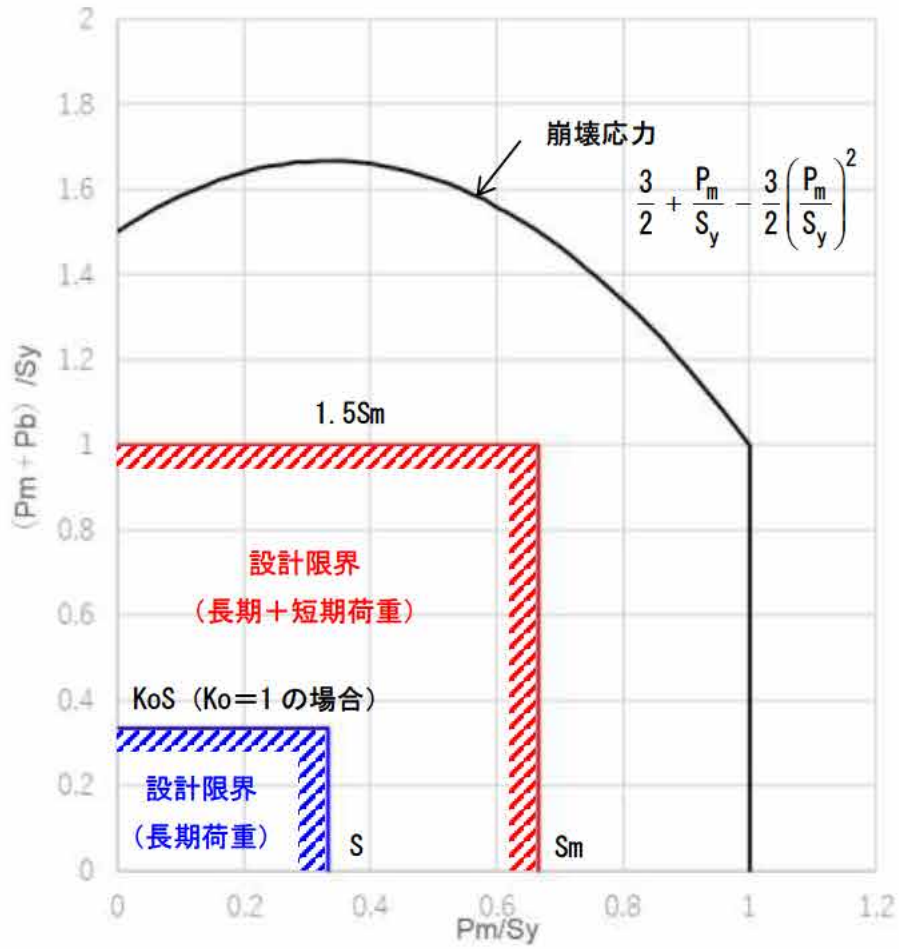
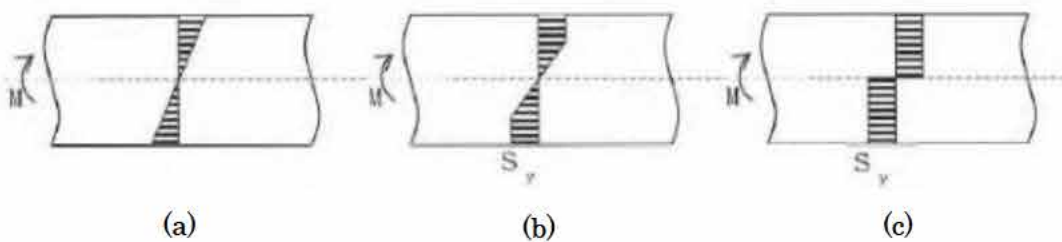


図2 供用状態 A 及び B における引張及び曲げに対する崩壊応力及び設計限界



- (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達し、崩壊に至る。

図3 曲げ荷重作用時の断面応力分布模式図<sup>(2)</sup>

(4) 長期+短期荷重による一次+二次応力 ( $Pm+Pb+Q$ )

長期+短期荷重による一次+二次応力 ( $Pm+Pb+Q$ ) に対しては、図 4(a)に示すように  $1.5S_m (=S_y)$  を評価基準とし、弾性挙動に制限した。

ただし、一次+二次応力が  $1.5S_m$  を超える場合には短期荷重による一次+二次応力の応力振幅 ( $Pm+Pb+Q$ ) に対して図 4(b)に示す  $3S_m$  を評価基準とし、短期荷重作用後の部材内応力再配分により生じる促進クリープを含む累積クリープひずみが以下の制限を満足することとした。

$$\text{累積クリープ膜ひずみ } (\epsilon_{mec}) \leq 0.002$$

$$\text{累積クリープ膜+曲げひずみ } (\epsilon_{mec} + \epsilon_{bec}) \leq 0.004$$

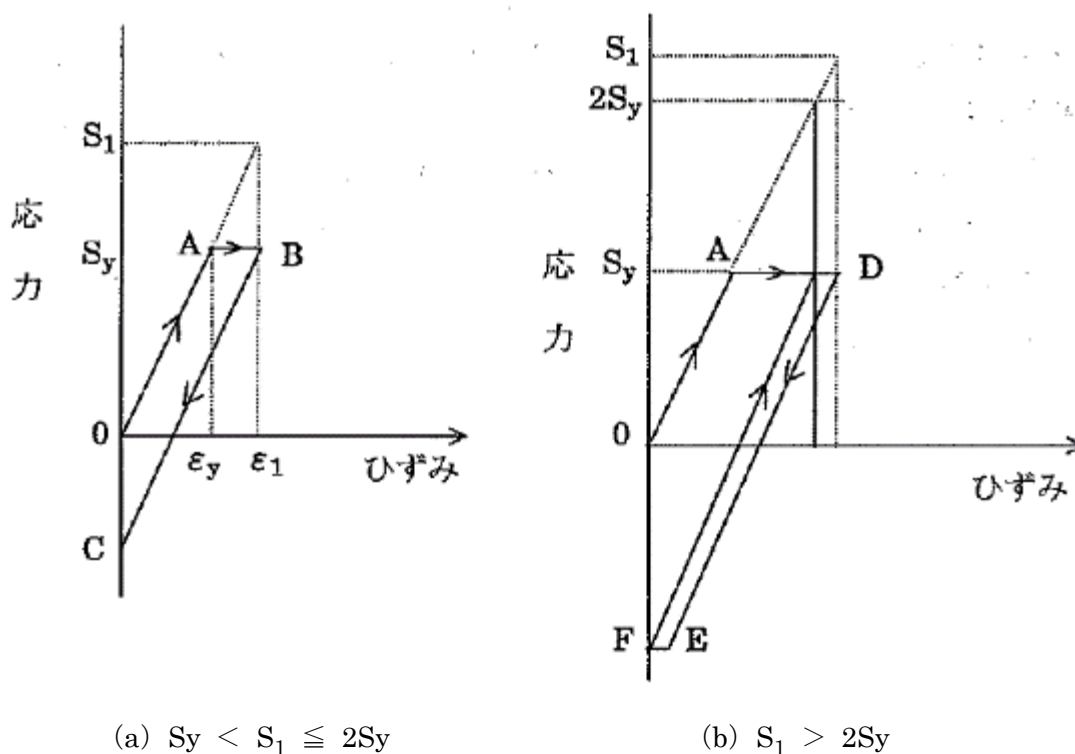
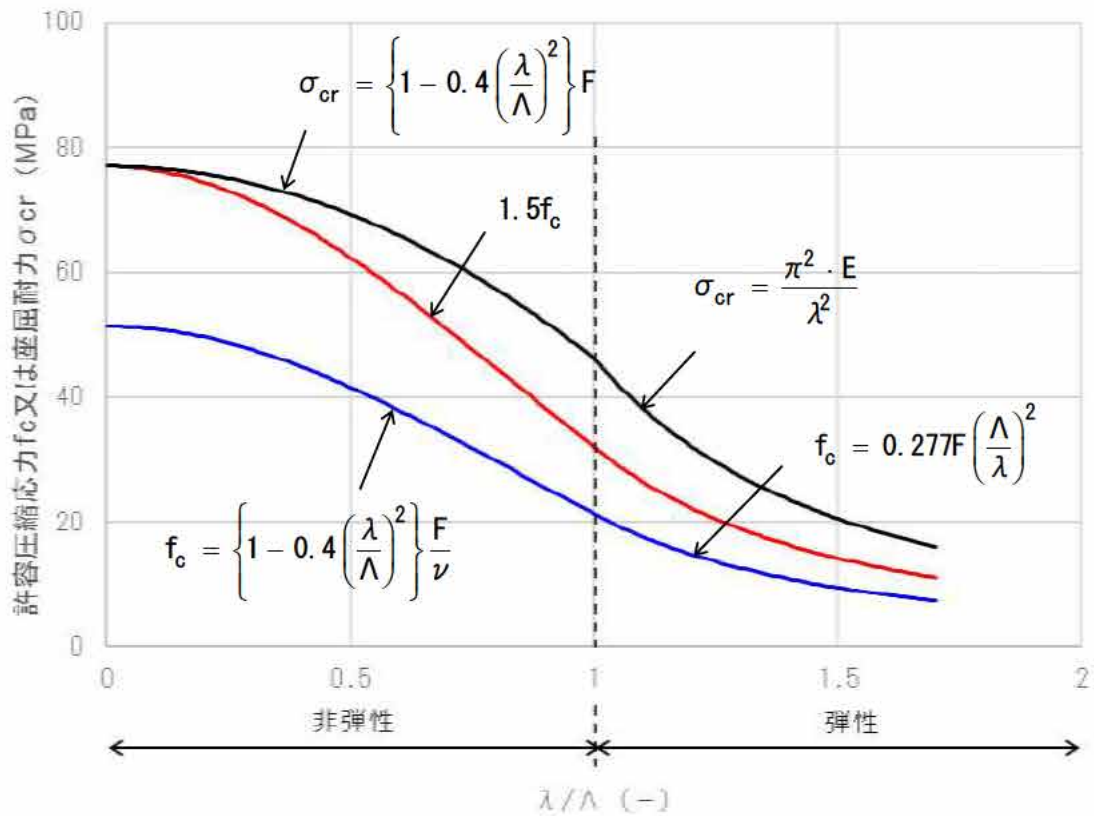


図 4 降伏点を超える場合のひずみ履歴<sup>(2)</sup>

(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、金属キャスク構造規格の 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評価基準を適用した。

限界細長比と圧縮限度の関係を図 5 に示す。供用状態 A において、圧縮応力に対する評価基準 ( $f_c$ ) は、座屈耐力 ( $\sigma_{cr}$ ) に対して安全率  $v$  をとったものとした。



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

図5 限界細長比と座屈限度（許容圧縮応力又は座屈耐力）の関係

#### 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 (短期荷重) がバスケットプレート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の塑性変形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+短期荷重時と同じ評価基準とした。

#### 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プレートへ作用する事象であり、本事象は、設計貯蔵期間中まれにしか生じる可能性がない事象である。

この事象に対しては、臨界防止機能維持のため、バスケットプレートの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評価基準を設定するものとする。

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

一次一般膜応力 ( $P_m$ )、一次一般膜+一次曲げ応力 ( $P_m+P_b$ ) の評価基準は、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、金属キャスク構造規格の 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図 6 に示す。図 6 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、バスケットプレートが全断面降伏することはない。

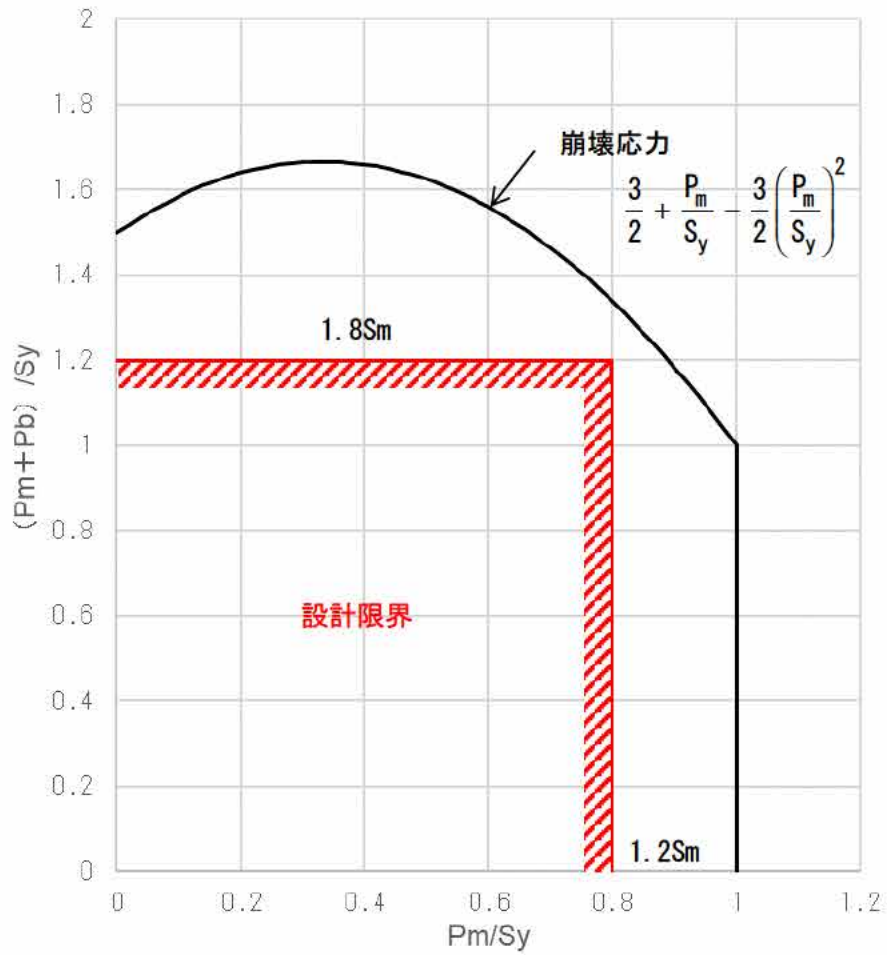


図 6 供用状態 C における引張及びび曲げによる崩壊応力及び設計限界

(2) 一次＋二次応力 ( $P_m + P_b + Q$ )

長期荷重＋短期荷重による一次＋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 と同様に図 3(a)に示すように、 $1.5S_m (=S_y)$  を評価基準とし、弾性挙動に制限した。

ただし、一次＋二次応力が  $1.5S_m$  を超える場合には短期荷重による一次＋二次応力の応力振幅 ( $P_m + P_b + Q$ ) に対して図 4(b)に示す  $3S_m (=2S_y)$  を評価基準とし、短期荷重作用後の部材内応力再配分により生じる促進クリープを含む累積クリープひずみが以下の制限を満足することとした。

$$\text{累積クリープ膜ひずみ } (\varepsilon_{\text{mec}}) \leq 0.002$$

$$\text{累積クリープ膜＋曲げひずみ } (\varepsilon_{\text{mec}} + \varepsilon_{\text{bec}}) \leq 0.004$$

(3) 平均せん断応力 ( $\tau$ )

純せん断荷重を受ける部分に生じる平均せん断応力 ( $\tau$ ) に対する評価基準としては、金属キャスク構造規格の MCD-2315 (バスケット) に基づき、供用状態 A 及び B に対する評価基準の 1.5 倍である  $0.9S_m$  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、平均せん断応力の評価基準は  $0.6 (\simeq 1/\sqrt{3}) S_m$  の 1.5 倍である  $0.9S_m$  となる。

(4) 平均支圧応力 ( $\sigma_p$ )

平均支圧応力 ( $\sigma_p$ ) に対する評価基準としては、金属キャスク構造規格と同様に供用状態 A 及び B に対する評価基準の 1.5 倍である  $2.25S_y$  (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  $1.5S_y$  (それ以外の場合) を適用した。

(5) 圧縮応力 ( $\sigma_c$ )

圧縮応力 ( $\sigma_c$ ) の評価は、金属キャスク構造規格の 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評価基準を適用した。

限界細長比と圧縮限度 (許容圧縮応力又は座屈耐力) の関係を図 5 に示す。供用状態 C における圧縮応力に対する評価基準 ( $1.5f_c$ ) は、図 5 に示すとおり座屈耐力以内であることから、バスケットプレートの形状は維持可能である。



#### 4.4 供用状態 D

供用状態 D は、 $S_g$  相当地震力が作用する場合及び衝撃荷重作用時又は 9m 落下時である。本事象は、設計貯蔵期間中に発生することは予想されないが、技術的に見れば発生が想定され得る事象である。

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、安全機能を著しく損なうことが無いよう、バスケットプレートの破断を防止するよう評価基準を設定する。ただし、塑性変形が生じる場合はバスケットの変形量を考慮した臨界解析により臨界防止上有意な変形が生じていないことを確認する。

##### (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 ( $P_m+P_b$ ) の評価基準は、金属キャスク構造規格の 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、究極強さと供用状態 D の設計基準値との関係を図 7 に示す。図 7 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が、十分安全側に設計限界を定めており、バスケットプレートが破断することはない。

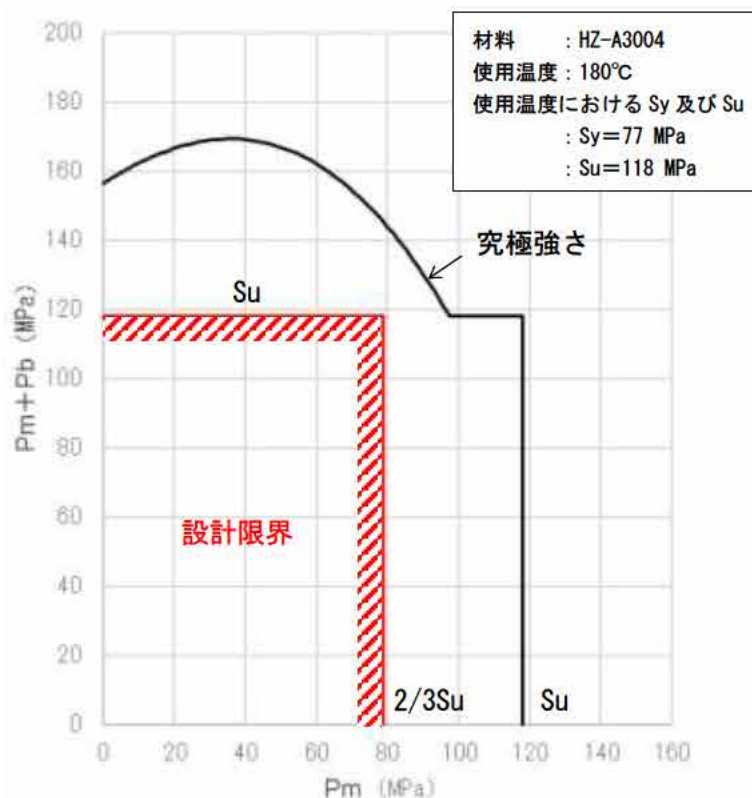


図 7 供用状態 D における引張及び曲げによる崩壊応力及び設計限界

(2) 一次＋二次応力 ( $P_m + P_b + Q$ )

短期繰返し荷重による一次＋二次応力の応力振幅 ( $P_m + P_b + Q$ ) の評価については、図 4(b)に示す  $3S_m (=2S_y)$  を評価基準とし、変形が累積しないよう制限した。

(3) 平均せん断応力 ( $\tau$ )

純せん断荷重を受ける部分に生じる平均せん断応力 ( $\tau$ ) に対する評価基準は、金属キャスク構造規格の 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 ( $\sigma_p$ ) に対する評価基準は、金属キャスク構造規格の 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 ( $\sigma_c$ )

圧縮応力 ( $\sigma_c$ ) の評価は、金属キャスク構造規格の 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評価基準を適用した。

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  $f_c$  の値を算出する際の  $S_y$  を  $1.2S_y$  と読み替える。

## 5. 参考文献

- (1) 独立行政法人原子力安全基盤機構、平成 15 年度 金属キャスク貯蔵技術確証試験報告書、(2004)
- (2) (一社)日本機械学会、「発電用原子炉設備規格 設計・建設規格(JSME S NC1-2005) (2007 追補)」、(2007)