

添付書類 8-2

バスケットの強度に関する説明書

添付書類 8-2-1

バスケットの応力解析の方針

## 目 次

1. 概要	1
2. 適用基準	2
3. 記号	3
3.1 記号の説明	3
4. 設計条件	5
4.1 基本仕様	5
4.2 設計事象	5
4.3 荷重の種類とその組合せ	5
5. 計算条件	6
5.1 解析対象とする事象	6
5.2 解析対象	6
5.3 形状及び寸法	6
5.4 許容応力	6
6. 応力解析の手順	7
6.1 解析手順の概要	7
6.2 荷重条件の選定	7
6.3 応力計算と評価	7
6.3.1 応力計算の方法	7
6.3.2 応力の評価	7
6.3.3 数値の丸め方	8

## 図表目次

図 5-1	応力解析対象	9
図 6-1	バスケットの応力解析フロー図	10
表 4-1	バスケットの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ	11
表 5-1	代表事象	12
表 6-1	バスケット用材料の許容応力	13
表 6-2	数値の丸め方一覧表	14

## 1. 概要

使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能を確保する上で必要な容器等の材料及び構造は「使用済燃料貯蔵施設の技術基準に関する規則」（令和2年3月17日 原子力規制委員会規則第8号）（以下「技術基準規則」という。）第14条に規定されており，適切な材料を使用し，十分な構造及び強度を有することが要求されている。

本書は，金属キャスクのバスケットに関する応力解析の方針を述べるものである。

注記：図表は一括して巻末に示す。

## 2. 適用基準

バスケットの強度評価基準については、(社)日本機械学会「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。)

(事例規格 バスケット用ボロン添加ステンレス鋼板 B-SUS304P-1 に関する規定 (FA-CC-004) を含む。) を適用する。

なお、バスケットプレート用ほう素添加ステンレス鋼 B-SUS304P-1 の材料特性を「添付書類 8-2-3 ほう素添加ステンレス鋼に関する説明書」に示す。

### 3. 記号

#### 3.1 記号の説明

本書及び「添付書類 8-2-2 バスケットの応力計算書」（以下「応力計算書」という。）において、応力評価に関する下記の記号を使用する。ただし、本文中に特記のある場合は、この限りでない。

なお、応力計算書の字体及び大きさについては本書と異なる場合がある。

記号	記号の説明	単位
$A_{bP}$	バスケットプレートの断面積	$\text{mm}^2$
$C_H$	水平方向設計震度	—
$C_V$	鉛直方向設計震度	—
$C_S$	供用状態Aの貯蔵時の状態において、 $S_d^*$ 地震力が作用する場合の供用状態	—
$D_S$	供用状態Aの貯蔵時の状態において、 $S_s$ 地震力が作用する場合の供用状態	—
$f_c$	許容圧縮応力	MPa
$f_c^*$	許容圧縮応力* <sup>1</sup>	MPa
$G$	重力加速度 (=9.80665)	$\text{m/s}^2$
$G_1$	水平方向加速度	$\text{m/s}^2$
$G_2$	鉛直方向加速度	$\text{m/s}^2$
$l_P$	バスケットプレートの内り	mm
$l_W$	バスケットプレートの全長	mm
$M_i$	バスケットプレート格子端部の単位幅当たりの曲げモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}/\text{mm}$
$m_A$	応力計算書で用いる斜線部Aの質量	kg
$m_B$	応力計算書で用いる斜線部Bの質量	kg
$P_b$	一次曲げ応力	MPa
$P_m$	一次一般膜応力	MPa
$Q$	二次応力	MPa
$S_m$	設計応力強さ	MPa
$S_u$	設計引張強さ	MPa
$S_y$	設計降伏点	MPa
$S_d^*$	弾性設計用地震動 $S_d$ による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方	—

注記\*1：  $f_c$  の値を算出する際に、金属キャスク構造規格 MCD-2317(1)a. の (MCD-104) 式において、 $S_y$  (RT) とあるのを  $1.2S_y$  (RT) と読み替えて算出した値

記号	記号の説明	単位
$S_s$	基準地震動 $S_s$ による地震力	—
$Z_i$	バスケットプレートの単位幅当たりの断面係数	$\text{mm}^3/\text{mm}$
$\rho$	バスケットプレートの密度	$\text{kg}/\text{mm}^3$
$\sigma_c$	圧縮応力	MPa
$\sigma_p$	平均支圧応力	MPa
$\sigma_s$	平均せん断応力	MPa
$\sigma_x$	バスケットの鉛直方向の応力 (x 方向)	MPa
$\sigma_y$	バスケットの水平方向の応力 (y 方向)	MPa
$\sigma_z$	バスケットの面に垂直な方向の応力 (z 方向)	MPa
$\tau_{xy}$	せん断応力	MPa
$\tau_{yz}$	せん断応力	MPa
$\tau_{zx}$	せん断応力	MPa



#### 4. 設計条件

バスケットは以下の設計条件に耐えるように設計する。

##### 4.1 基本仕様

バスケットは、バスケットプレートの組み合わせにより、使用済燃料集合体を収納する格子を形成している。バスケットに関する応力計算の基本仕様を以下に示す。

最高使用温度	260 °C* <sup>1</sup>
バスケットプレートの材質	ほう素添加ステンレス鋼 (B-SUS304P-1)
バスケットプレートの密度	$7.93 \times 10^{-6}$ kg/mm <sup>3</sup> * <sup>2</sup>

注記\*1：最高使用温度は、「添付書類5 使用済燃料等の除熱に関する説明書」に示す解析結果から得られた温度を保守側に設定した値である。

\*2：バスケットプレートの材質はB-SUS304P-1であるが、材料密度が保守的となるようにSUS304の密度を使用している。

##### 4.2 設計事象

設計上考慮する事象として、使用済燃料貯蔵施設内における選定事象を以下に示す。

設計事象	供用状態	使用済燃料貯蔵施設内における選定事象* <sup>1</sup>
I	A	<ul style="list-style-type: none"> <li>・貯蔵（貯蔵時）</li> <li>・金属キャスクの吊上げ，吊下げ，移動（吊上げ時）</li> <li>・搬送台車による搬送（台車搬送時）</li> <li>・貯蔵前作業及び搬出前作業（準備作業時）</li> </ul>
II	B	<ul style="list-style-type: none"> <li>・金属キャスクの支持脚への衝突（支持脚への衝突時）</li> <li>・金属キャスクの貯蔵架台への衝突（貯蔵架台への衝突時）</li> <li>・搬送台車による搬送中の急停止（搬送中の急停止時）</li> </ul>
I + S <sub>d</sub> * <sup>1</sup>	C <sub>s</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・S<sub>d</sub>*<sup>1</sup>地震時（貯蔵時（S<sub>d</sub>*<sup>1</sup>地震力が作用する場合））</li> </ul>
I + S <sub>s</sub>	D <sub>s</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・S<sub>s</sub>地震時（貯蔵時（S<sub>s</sub>地震力が作用する場合））</li> </ul>

注記\*1：本書及び応力計算書において、事象を（ ）内の呼称とする場合がある。

##### 4.3 荷重の種類とその組合せ

バスケットの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを表4-1に示す。応力解析に用いる荷重は、応力計算書に記載する。

## 5. 計算条件

### 5.1 解析対象とする事象

4.2節で示した使用済燃料貯蔵施設内における選定事象のうち，表5-1に示すように 荷重条件等を考慮して代表事象を選定し，代表事象について解析を実施する。

### 5.2 解析対象

応力解析の対象は，次のとおりである（図5-1参照）。

(1) バスケットプレート

### 5.3 形状及び寸法

応力解析を行う部位の形状及び寸法は，応力計算書に示す。

### 5.4 許容応力

バスケットの許容値基準は，金属キャスク構造規格 MCD-2300（事例規格を含む。）による。

許容応力は，最高使用温度に対する値を用いる。

## 6. 応力解析の手順

### 6.1 解析手順の概要

バスケットの応力解析フローを図 6-1 に示す。

バスケットの応力解析は、想定される機械的荷重及び熱荷重を基に応力評価式を用いて行う。

### 6.2 荷重条件の選定

荷重条件は 4 章に示しているが、各部の計算においては、その部分について重要な荷重条件を選定して計算を行う。それぞれの部分について考慮した荷重は応力計算書に示す。

### 6.3 応力計算と評価

#### 6.3.1 応力計算の方法

(1) 応力計算は荷重ごとに行う。荷重条件として与えられるものは次の 2 つである。

##### a. 機械的荷重

機械的荷重は、自重（使用済燃料集合体を含む HDP-69B(B) 型（吊上げ時、支持脚への衝突時及び貯蔵架台への衝突時においては三次蓋を含む。）の貯蔵時の設計質量を用いる。）、衝撃荷重及びその他の付加荷重をいう。

##### b. 熱荷重

(2) 伝熱プレートは非構造強度部材として評価対象より除外する。

(3) 構造の不連続性を考慮して、応力評価位置をとる。応力評価位置は、応力計算書に示す。

(4) 応力評価は、この応力評価位置について行う。

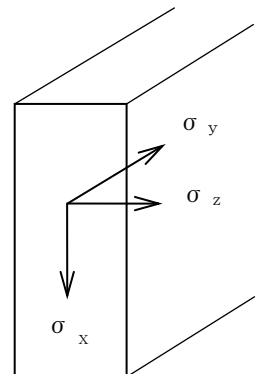
#### 6.3.2 応力の評価

応力の計算結果は、金属キャスク構造規格 MGB-1200 による定義に従い、応力の種類ごとに分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は以下のとおりである。ただし、計算結果は許容応力との比較を行うため、絶対値にて記載する。

- $\sigma_x$  : バスケットの鉛直方向の応力（x 方向）
- $\sigma_y$  : バスケットの水平方向の応力（y 方向）
- $\sigma_z$  : バスケットの面に垂直な方向の応力（z 方向）
- $\tau_{xy}$  : せん断応力
- $\tau_{yz}$  : せん断応力
- $\tau_{zx}$  : せん断応力

バスケット用材料の許容応力を表 6-1 に示す。



(1) バスケット（ボルトを除く。）の応力評価

バスケットの応力評価は、金属キャスク構造規格 MCD-2310 に従い以下の項目を評価する。

- a. 一次応力強さ
- b. 一次＋二次応力強さ
- c. 特別な応力の検討
  - (a) 平均せん断応力
  - (b) 平均支圧応力
  - (c) 圧縮応力

(2) ボルトの応力評価

バスケットにボルトを使用していないのでボルトの応力評価は不要である。

### 6.3.3 数値の丸め方

数値は原則として安全側に丸めて使用する。

また、規格、基準等により決まる数値については丸めず、規格、基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を表 6-2 に示す。

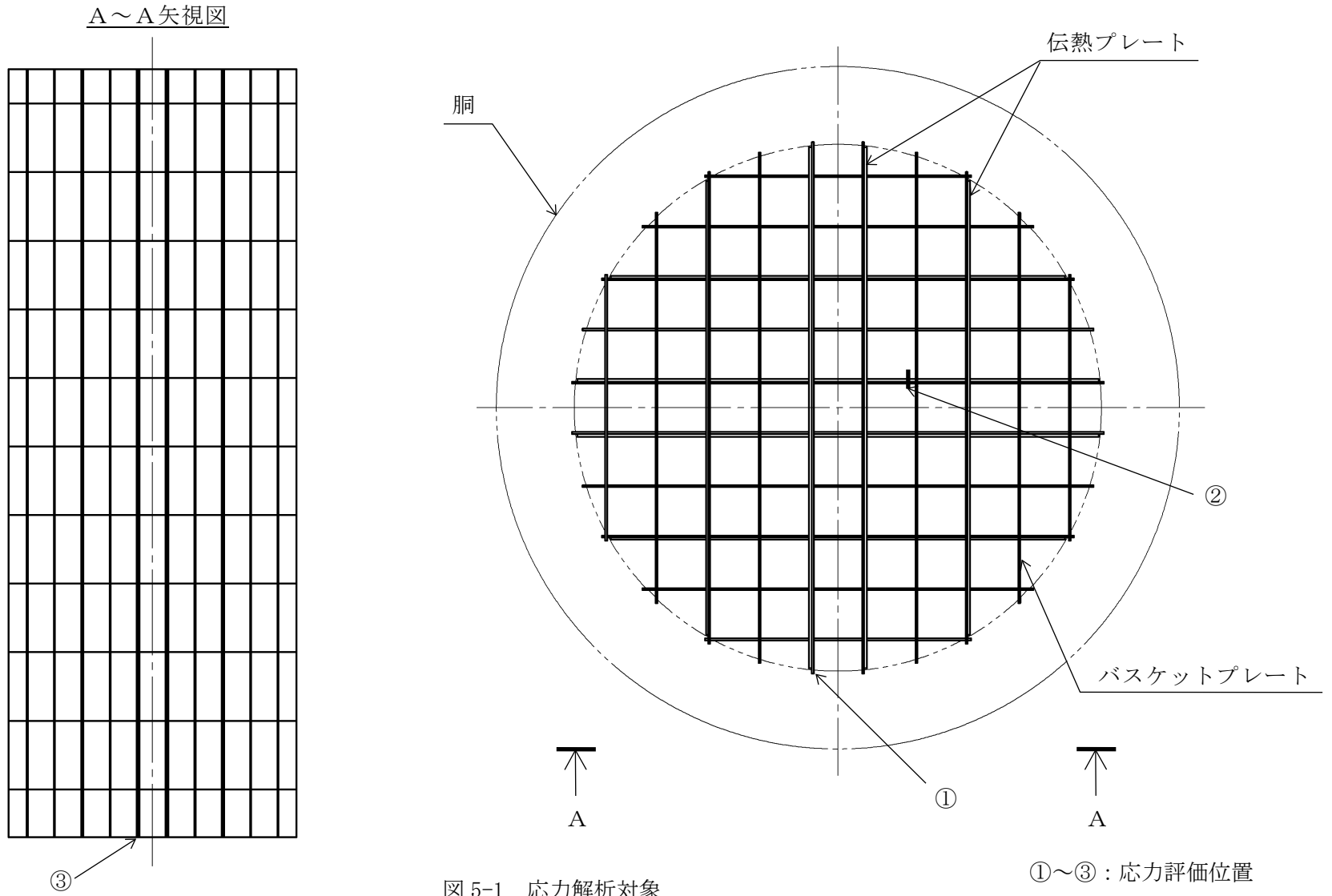


図 5-1 応力解析対象

①~③ : 応力評価位置

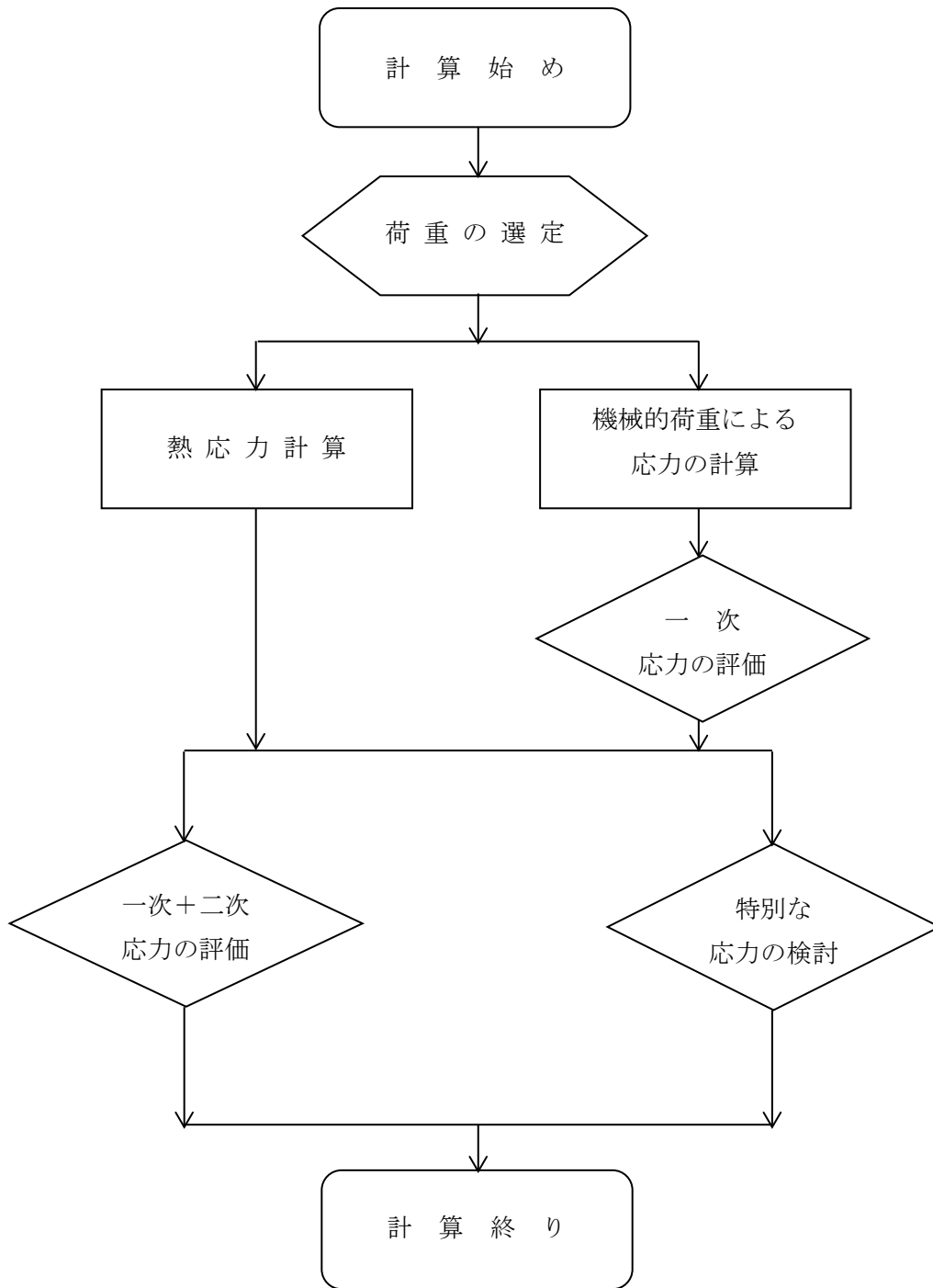


図 6-1 バスケットの応力解析フロー図

表 4-1 バスケットの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計事象			荷 重				
設計事象	供用状態	評価事象	自重による荷重	吊上げ荷重	衝撃荷重	熱荷重	地震荷重
設計条件	設計条件	設計時 <sup>*1</sup>	— <sup>*4</sup>	○	○	—	—
I	A <sup>*2</sup>	貯蔵時 <sup>*3</sup>	○	—	—	○	—
		吊上げ時 <sup>*3</sup>	— <sup>*4</sup>	○	—	○	—
II	B <sup>*2</sup>	衝撃荷重作用時 <sup>*3</sup>	— <sup>*4</sup>	—	○	○	—
I + S <sub>d</sub> <sup>*</sup>	C <sub>S</sub>	S <sub>d</sub> <sup>*</sup> 地震力が作用する場合	○	—	—	○	○
I + S <sub>S</sub>	D <sub>S</sub>	S <sub>S</sub> 地震力が作用する場合	○	—	—	— <sup>*5</sup>	○

注記\*1： 供用状態 A 及び B の一次応力評価を代表する事象

\*2： 評価事象の中で、他の評価事象に包絡される事象や荷重条件については評価を省略する。

\*3： 一次応力評価は、設計時の評価に包絡されるため、評価を省略する。

\*4： 本状態での自重による荷重は、衝撃荷重又は吊上げ荷重の慣性力による荷重に含まれる。

\*5： 変形量の評価時のみ、熱荷重を考慮する。

表 5-1 代表事象

設計事象	供用状態	代表事象*1	包絡される事象	荷重条件	備考
設計条件	設計条件	設計時*2	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>・貯蔵架台への衝突時荷重 鉛直方向加速度（下方向） ：5G（自重考慮）</li> </ul>	供用状態 A 及び B のうち，荷重条件が最も厳しいのは貯蔵架台への衝突時荷重である。
I 及び II	A 及び B	貯蔵架台への衝突時	<ul style="list-style-type: none"> <li>・貯蔵時</li> <li>・吊上げ時</li> <li>・台車搬送時</li> <li>・準備作業時</li> <li>・支持脚への衝突時</li> <li>・搬送中の急停止時</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・貯蔵架台への衝突時荷重 鉛直方向加速度（下方向） ：5G（自重考慮）</li> <li>・熱荷重</li> </ul>	供用状態 A 及び B のうち，荷重条件が最も厳しいのは，貯蔵架台への衝突時である。
I + S <sub>d</sub> *	C <sub>s</sub>	貯蔵時 (S <sub>d</sub> *地震力が作用する場合)	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>・自重</li> <li>・地震力*3 水平方向： 1.40G 鉛直方向： 0.87G</li> <li>・熱荷重</li> </ul>	—
I + S <sub>s</sub>	D <sub>s</sub>	貯蔵時 (S <sub>s</sub> 地震力が作用する場合)	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>・自重</li> <li>・地震力 水平方向： 1.40G 鉛直方向： 0.87G</li> <li>・熱荷重</li> </ul>	—

注記\*1：本事象について応力解析を行う。

\*2：供用状態 A 及び B の一次応力評価を代表する事象

\*3：より高い地震力である S<sub>s</sub>地震力を保守的に設定する。



表 6-1 バスケット用材料の許容応力

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類	許容応力*3	
		ほう素添加 ステンレス鋼	
		B-SUS304P-1	許容値基準
設計 条件	一次一般膜応力強さ $P_m$	146	$S_m$
	一次一般膜+一次曲げ応力強さ $P_m + P_b$	219	$1.5 S_m$
供用状態 A及びB	一次+二次応力強さ $P_m + P_b + Q$	438	$3 S_m$
	平均せん断応力 $\sigma_s$	—	$0.6 S_m$
	平均支圧応力 $\sigma_p$	202	$S_y^{*1}$
	圧縮応力*2 (評価位置③) $\sigma_c$	127	$f_c$
191		$1.5 f_c$	
供用状態 $C_s$	一次一般膜応力強さ $P_m$	219	$1.5 S_m$
	一次一般膜+一次曲げ応力強さ $P_m + P_b$	328	$2.25 S_m$
	平均せん断応力 $\sigma_s$	131	$0.9 S_m$
	平均支圧応力 $\sigma_p$	303	$1.5 S_y^{*1}$
	圧縮応力*2 (評価位置①/③) $\sigma_c$	176/191	$1.5 f_c$
176/191		$1.5 f_c$	
供用状態 $D_s$	一次一般膜応力強さ $P_m$	291	$\text{Min}\{2.4 S_m, 2/3 S_u\}$
	一次一般膜+一次曲げ応力強さ $P_m + P_b$	437	$\text{Min}\{3.6 S_m, S_u\}$
	平均せん断応力 $\sigma_s$	175	$1.2 S_m$
	平均支圧応力 $\sigma_p$	404	$2 S_y^{*1}$
	圧縮応力*2 (評価位置①/③) $\sigma_c$	184/201	$1.5 f_c^*$
176/191		$1.5 f_c$	

注記\*1：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  
以外の値

\*2：上段は一次応力に対する基準，下段は一次+二次応力に対する基準

\*3：評価すべき応力が発生しないか，又は評価上厳しくない項目は「—」とする。

表 6-2 数値の丸め方一覧表

数値の種類	単位	処理桁	処理法	表示桁
最高使用温度	℃	—	—	設計値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
許容応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数位
応力の計算値	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数位
長さ	mm	—	—	設計値
加速度	m/s <sup>2</sup>	—	—	設計値
設計震度	—	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
面積	mm <sup>2</sup>	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
力	N	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
質量	kg	—	—	設計値

添付書類 8-2-2

バスケットの応力計算書

## 目 次

1. 概要	1
1.1 形状・寸法・材料	1
1.2 計算結果	1
2. 応力計算	2
2.1 応力評価位置	2
2.2 設計時	2
2.2.1 荷重条件	2
2.2.2 応力計算	2
2.3 貯蔵架台への衝突時	2
2.3.1 荷重条件	2
2.3.2 応力計算	3
2.4 貯蔵時 ( $S_d$ *地震力が作用する場合)	3
2.4.1 荷重条件	3
2.4.2 応力計算	3
2.5 貯蔵時 ( $S_s$ 地震力が作用する場合)	6
2.5.1 荷重条件	6
2.5.2 応力計算	6
3. 応力の評価	7
3.1 応力強さの評価	7
3.2 特別な応力の評価	7
3.2.1 平均せん断応力	7
3.2.2 平均支圧応力	7
3.2.3 圧縮応力	7

## 図表目次

図 1-1	バスケットの形状・寸法・材料	8
図 2-1	バスケットの応力評価位置	9
図 2-2	各代表事象におけるバスケットの姿勢と荷重方向	10
表 2-1	バスケットプレート下端部に発生する応力の計算条件及び計算結果 (設計時, 貯蔵架台への衝突時)	11
表 2-2	バスケットプレート下端部に発生する応力の計算条件及び計算結果 (貯蔵時 ( $S_d$ *地震力又は $S_s$ 地震力が作用する場合))	11
表 2-3	バスケットプレート端部に発生する応力の計算条件及び計算結果 (貯蔵時 ( $S_d$ *地震力又は $S_s$ 地震力が作用する場合))	11
表 2-4	バスケットプレート格子端部に発生する曲げ応力の計算条件及び計算結果 (貯蔵時 ( $S_d$ *地震力又は $S_s$ 地震力が作用する場合))	12
表 2-5	バスケットプレート格子端部に発生するせん断応力の計算条件及び計算結果 (貯蔵時 ( $S_d$ *地震力又は $S_s$ 地震力が作用する場合))	12
表 3-1	バスケットの応力計算結果と許容応力 (設計条件, 供用状態A及びB)	13
表 3-2	バスケットの応力計算結果と許容応力 (供用状態 $C_s$ )	13
表 3-3	バスケットの応力計算結果と許容応力 (供用状態 $D_s$ )	13

## 1. 概要

本書は、HDP-69B(B)型のバスケットに関する応力計算書である。

### 1.1 形状・寸法・材料

本書で評価するバスケットの形状・寸法・材料を図 1-1 に示す。

### 1.2 計算結果

計算結果を表 3-1, 表 3-2, 表 3-3 に示す。

なお、応力評価位置については、解析上最も厳しい部位を選定し、代表評価位置として本書に記載している。

表中の「-」は、評価すべき応力が発生しない、又は評価上厳しくないため、評価を省略している。

注記：図表は一括して巻末に示す。

## 2. 応力計算

### 2.1 応力評価位置

バスケットの応力評価位置を図 2-1 に示す。

### 2.2 設計時

#### 2.2.1 荷重条件

設計時における荷重は貯蔵架台への衝突時荷重（自重を含む。）とする。荷重の方向を図 2-2 に示す。

#### 2.2.2 応力計算

##### (1) 一次一般膜応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート下端部（図 2-1③部）である。鉛直方向加速度により発生する応力（ $\sigma_x$ ）は、次式で計算する。

$$\sigma_x = \rho \cdot \ell_w \cdot G_2 \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

ここで、

$\rho$  : バスケットプレートの密度（ $=7.93 \times 10^{-6}$  kg/mm<sup>3</sup>）

$\ell_w$  : バスケットプレートの全長（ $=$   mm）

$G_2$  : 鉛直方向加速度（下方向）（ $=5G$ ）

計算条件及び計算結果を表 2-1 に示す。

上記以外の応力成分は零である。

##### (2) 一次一般膜＋一次曲げ応力

バスケットプレート下端部（図 2-1③部）には、衝突によって一次曲げ応力は発生しないため、一次一般膜＋一次曲げ応力は、一次一般膜応力と同じである。

### 2.3 貯蔵架台への衝突時

#### 2.3.1 荷重条件

貯蔵架台への衝突時における荷重は次に示す組合せとする。荷重の方向を図 2-2 に示す。

- ・貯蔵架台への衝突時荷重（自重を含む。）
- ・熱荷重

なお、熱応力については、バスケットプレート間及びバスケットプレートと胴間のはめ合部にはギャップを設けており熱膨張による拘束が生じないことから、著しい熱応力は発生しないため考慮しない。以下、本章において同様である。

## 2.3.2 応力計算

### (1) 一次＋二次応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート下端部（図 2-1③部）である。貯蔵架台への衝突により発生する一次＋二次応力（ $\sigma_x$ ）は，(2.1) 式で計算する。

計算条件及び計算結果を表 2-1 に示す。

### (2) 平均せん断応力

鉛直方向加速度により，バスケットプレート下端部（図 2-1③部）に平均せん断応力（ $\sigma_s$ ）は発生しないため，評価を省略する。

### (3) 平均支圧応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート下端部（図 2-1③部）である。鉛直方向加速度により発生する平均支圧応力（ $\sigma_p$ ）は，(2.1) 式で計算する。

計算条件及び計算結果を表 2-1 に示す。

### (4) 圧縮応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート下端部（図 2-1③部）である。鉛直方向加速度により発生する圧縮応力（ $\sigma_c$ ）は，(2.1) 式で計算する。

計算条件及び計算結果を表 2-1 に示す。

## 2.4 貯蔵時（ $S_d$ \*地震力が作用する場合）

### 2.4.1 荷重条件

貯蔵時において $S_d$ \*地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。荷重の方向を図 2-2 に示す。

- ・地震力
- ・自重
- ・熱荷重

なお、熱応力については 2.3.1 項で述べたように著しい熱応力が発生しないため考慮しない。

### 2.4.2 応力計算

#### (1) 一次一般膜応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート端部（図 2-1①部）の下端部である。

##### a. 鉛直方向加速度により発生する応力

鉛直方向加速度により発生する応力（ $\sigma_x$ ）は，(2.1) 式で計算する。

ただし，

$G_2$  : 鉛直方向加速度 ( $m/s^2$ )  ただし， $G_2 = (1 + C_v) \cdot G$

$C_v$  : 鉛直方向設計震度 (=0.87)

$G$  : 重力加速度 (=9.80665  $m/s^2$ )

計算条件及び計算結果を表 2-2 に示す。



b. 水平方向加速度により発生する応力

水平方向加速度により発生する応力 ( $\sigma_y$ ) は、次式で計算する。

$$\sigma_y = \frac{m_A \cdot G_1}{A_{bp}} \dots\dots\dots (2.2)$$

ここで、

$m_A$  : 図2-1の斜線部Aに含まれる使用済燃料集合体、伝熱プレート及びバスケットプレートの合計質量 (=3790 kg)

$G_1$  : 水平方向加速度 ( $m/s^2$ ) ただし、 $G_1 = C_H \cdot G$

$C_H$  : 水平方向設計震度 (=1.40)

$A_{bp}$  : バスケットプレートの断面積 (=   $mm^2$ )

計算条件及び計算結果を表2-3に示す。

上記a.及びb.以外の応力成分は零である。

(2) 一次一般膜+一次曲げ応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート格子端部 (図2-1②部) の下端部である。

a. 鉛直方向加速度により発生する応力

鉛直方向加速度により、バスケットプレートに一次曲げ応力は発生しないため、(1)a.と同様である。

b. 水平方向加速度により発生する応力

水平方向加速度により発生する応力 ( $\sigma_y$ ) は、バスケットプレートを両端固定梁としてモデル化し、次式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_y &= \frac{M_i}{Z_i} \\ M_i &= \frac{m_B \cdot G_1 \cdot \ell_P}{12 \cdot \frac{\ell_w}{2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.3)$$

ここで、

$M_i$  : バスケットプレート格子端部の単位幅当たりの曲げモーメント ( $N \cdot mm/mm$ )

$Z_i$  : バスケットプレートの単位幅当たりの断面係数 (=   $mm^3/mm$ )

$m_B$  : 図2-1の斜線部Bに含まれる使用済燃料集合体、伝熱プレート及びバスケットプレートの合計質量 (=381 kg)

$\ell_P$  : バスケットプレートの内のり (=   $mm$ )

$l_w$  : バスケットプレートのキャスク容器軸方向長さ (使用済燃料集合体の負荷面の軸方向長さ) (=  mm)  
 ただし、バスケットプレートどうしのはめ合のための切欠きがあるため実際の荷重負荷面の長さを  $l_w/2$  とする。

$G_1$  : (1)と同じ

計算条件及び計算結果を表 2-4 に示す。

水平方向加速度により発生するせん断応力 ( $\tau_{yz}$ ) は、次式で計算する。

$$\tau_{yz} = \frac{m_B \cdot G_1}{2 \cdot \frac{A_{bp}}{2}} \dots\dots\dots (2.4)$$

ここで、

$G_1, A_{bp}$  : (1)と同じ

計算条件及び計算結果を表 2-5 に示す。

上記 a. 及び b. 以外の応力成分は零である。

(3) 平均せん断応力

a. 鉛直方向加速度により発生する応力

鉛直方向加速度により、バスケットプレートにせん断応力は発生しないため、評価を省略する。

b. 水平方向加速度により発生する応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート格子端部 (図 2-1②部) である。水平方向加速度により発生する平均せん断応力 ( $\sigma_s$ ) は、(2.4)式で計算する。

計算条件及び計算結果を表 2-5 に示す。

(4) 平均支圧応力

a. 鉛直方向加速度により発生する応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート下端部 (図 2-1③部) である。鉛直方向加速度により発生する平均支圧応力 ( $\sigma_p$ ) は、(2.1) 式で計算する。

ただし、

$G_2$  : (1)と同じ

計算条件及び計算結果を表 2-2 に示す。

b. 水平方向加速度により発生する応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート端部 (図 2-1①部) である。水平方向加速度により発生する平均支圧応力 ( $\sigma_p$ ) は、(2.2) 式で計算する。

計算条件及び計算結果を表 2-3 に示す。

## (5) 圧縮応力

### a. 鉛直方向加速度により発生する応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート下端部 (図 2-1③部) である。鉛直方向加速度により発生する圧縮応力 ( $\sigma_c$ ) は, (2.1) 式で計算する。

ただし,

$G_2$  : (1)と同じ

計算条件及び計算結果を表 2-2 に示す。

### b. 水平方向加速度により発生する応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート端部 (図 2-1①部) である。水平方向加速度により発生する圧縮応力 ( $\sigma_c$ ) は, (2.2) 式で計算する。

計算条件及び計算結果を表 2-3 に示す。

## 2.5 貯蔵時 ( $S_s$ 地震力が作用する場合)

### 2.5.1 荷重条件

貯蔵時において  $S_s$ 地震力が作用する場合の荷重条件は,  $S_s$ 地震力と  $S_d^*$ 地震力を同じとしているため 2.4.1 項と同様である。

### 2.5.2 応力計算

計算方法及び計算結果は 2.4.2 項と同様である。

### 3. 応力の評価

#### 3.1 応力強さの評価

各供用状態において、応力成分から算出した応力強さの計算結果と許容応力を表 3-1、表 3-2 及び表 3-3 に示す。

表 3-1、表 3-2 及び表 3-3 より、各供用状態における一次一般膜応力強さ ( $P_m$ )、一次一般膜 + 一次曲げ応力強さ ( $P_m + P_b$ ) 及び一次 + 二次応力強さ ( $P_m + P_b + Q$ ) は、金属キャスク構造規格 MCD-2311、MCD-2312、MCD-2313 及び MCD-2314 の各規定を満足する。

#### 3.2 特別な応力の評価

##### 3.2.1 平均せん断応力

各供用状態における応力計算結果と許容応力を表 3-2 及び表 3-3 に示す。

表 3-2 及び表 3-3 より、各供用状態の平均せん断応力 ( $\sigma_s$ ) は、金属キャスク構造規格 MCD-2315 の各規定を満足する。

##### 3.2.2 平均支圧応力

各供用状態における応力計算結果と許容応力を表 3-1、表 3-2 及び表 3-3 に示す。なお、表 3-2 及び表 3-3 においては、計算結果が許容応力に対して最も厳しくなる評価位置での計算結果を示している。

表 3-1、表 3-2 及び表 3-3 より、各供用状態の平均支圧応力 ( $\sigma_p$ ) は、金属キャスク構造規格 MCD-2316 の各規定を満足する。

##### 3.2.3 圧縮応力

各供用状態における応力計算結果と許容応力を表 3-1、表 3-2 及び表 3-3 に示す。なお、表 3-2 及び表 3-3 においては、計算結果が許容応力に対して最も厳しくなる評価位置での計算結果を示している。

表 3-1、表 3-2 及び表 3-3 より、各供用状態の圧縮応力 ( $\sigma_c$ ) は、金属キャスク構造規格 MCD-2317 の各規定を満足する。

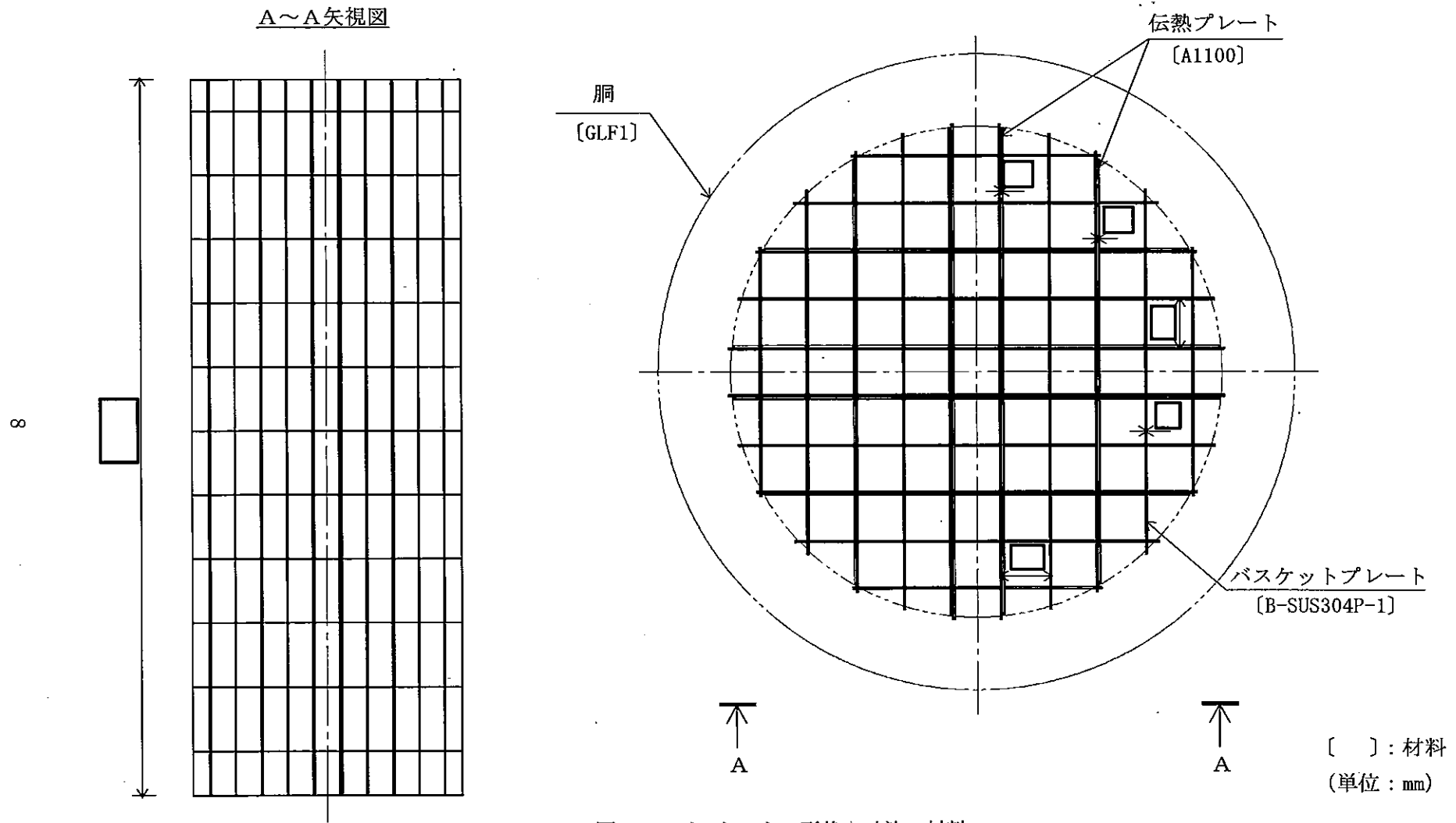


図 1-1 バスケットの形状・寸法・材料

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

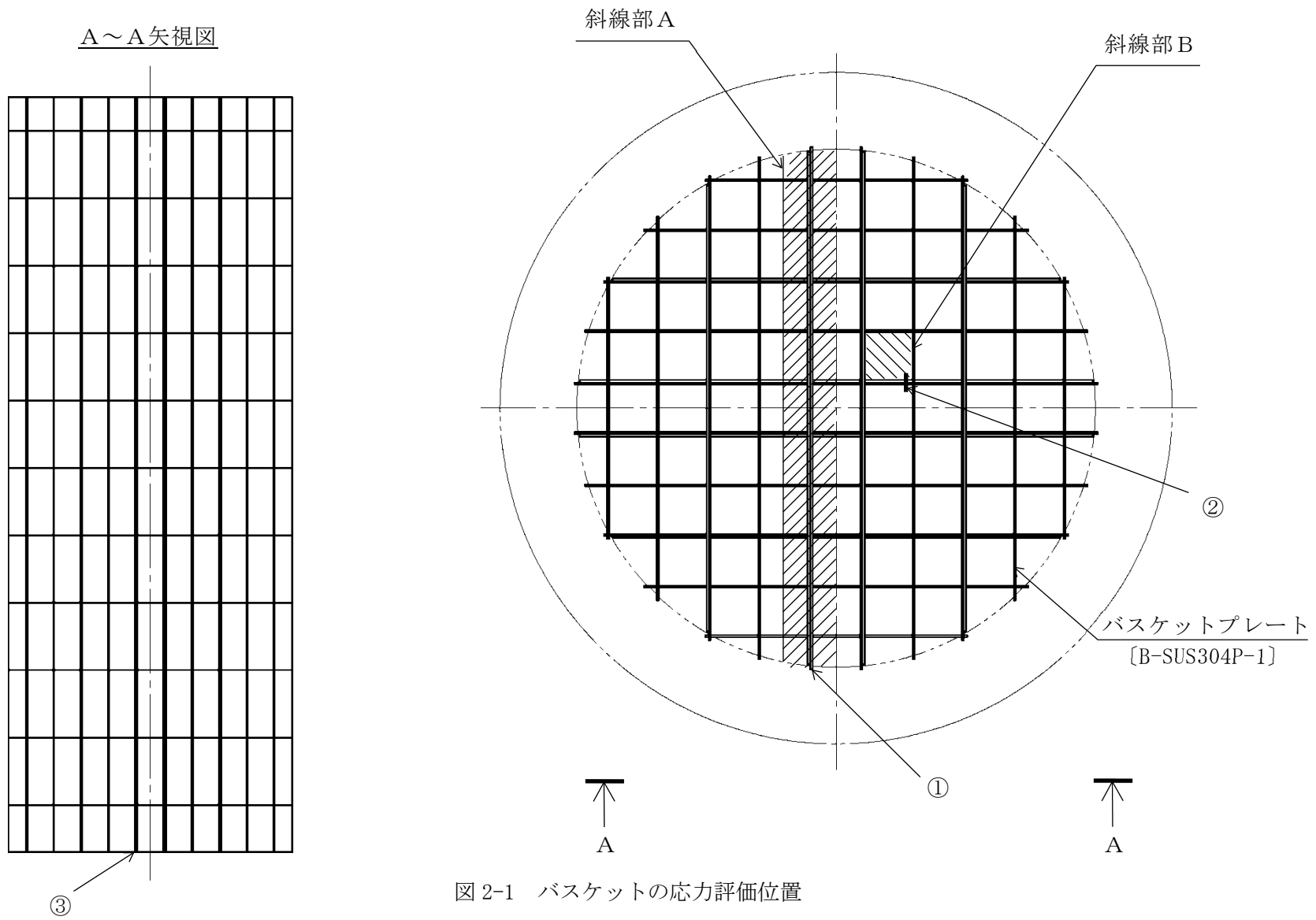
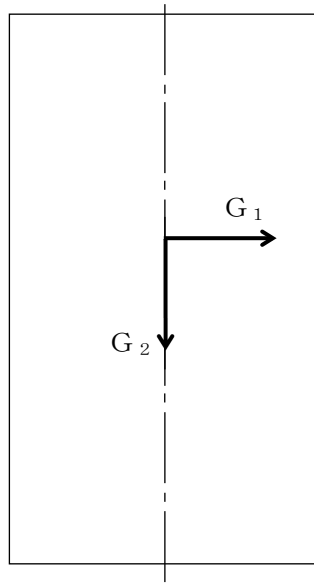
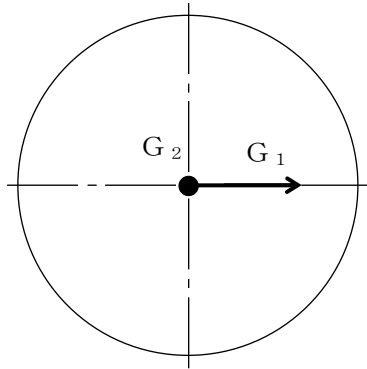


図 2-1 バスケットの応力評価位置



$G_1$  : 水平方向加速度  
 $G_2$  : 鉛直方向加速度

図 2-2 各代表事象におけるバスケットの姿勢と荷重方向

表 2-1 バスケットプレート下端部に発生する応力の計算条件及び計算結果  
(設計時, 貯蔵架台への衝突時)

項目	記号	数値	単位
バスケットプレートの密度	$\rho$	$7.93 \times 10^{-6}$	kg/mm <sup>3</sup>
バスケットプレートの全長	$l_w$		mm
鉛直方向加速度 (下方向)	$G_2$	5G	m/s <sup>2</sup>
重力加速度	G	9.80665	m/s <sup>2</sup>
バスケットプレート下端部に発生する応力	$\sigma_x$	2	MPa

表 2-2 バスケットプレート下端部に発生する応力の計算条件及び計算結果  
(貯蔵時 (S<sub>d</sub>\*地震力又はS<sub>s</sub>地震力が作用する場合))

項目	記号	数値	単位
バスケットプレートの密度	$\rho$	$7.93 \times 10^{-6}$	kg/mm <sup>3</sup>
バスケットプレートの全長	$l_w$		mm
鉛直方向加速度	$G_2$	1.87G	m/s <sup>2</sup>
鉛直方向設計震度	$C_v$	0.87	—
重力加速度	G	9.80665	m/s <sup>2</sup>
バスケットプレート下端部に発生する応力	$\sigma_x$	1	MPa

表 2-3 バスケットプレート端部に発生する応力の計算条件及び計算結果  
(貯蔵時 (S<sub>d</sub>\*地震力又はS<sub>s</sub>地震力が作用する場合))

項目	記号	数値	単位
図 2-1 の斜線部Aに含まれる使用済燃料集合体, 伝熱プレート及びバスケットプレートの合計質量	$m_A$	3790	kg
水平方向加速度	$G_1$	1.40G	m/s <sup>2</sup>
水平方向設計震度	$C_H$	1.40	—
重力加速度	G	9.80665	m/s <sup>2</sup>
バスケットプレートの断面積	$A_{bp}$		mm <sup>2</sup>
バスケットプレート端部に発生する応力	$\sigma_y$	2	MPa



表 2-4 バスケットプレート格子端部に発生する曲げ応力の計算条件及び計算結果  
(貯蔵時 ( $S_d$ \*地震力又は $S_s$ 地震力が作用する場合))

項目	記号	数値	単位
バスケットプレート格子端部の 単位幅当たりの曲げモーメント	$M_i$	<input type="text"/> *1	$N \cdot mm/mm$
バスケットプレートの単位幅当たりの 断面係数	$Z_i$	<input type="text"/>	$mm^3/mm$
図 2-1 の斜線部 B に含まれる使用済燃料集合 体, 伝熱プレート及びバスケットプレートの 合計質量	$m_B$	381	kg
バスケットプレートの内り	$l_p$	<input type="text"/>	mm
バスケットプレートのキャスク容器軸方向長さ (使用済燃料集合体の負荷面の軸方向長さ)	$l_w$	<input type="text"/>	mm
水平方向加速度	$G_1$	1.40G	$m/s^2$
水平方向設計震度	$C_H$	1.40	—
重力加速度	$G$	9.80665	$m/s^2$
バスケットプレート格子端部に発生する 曲げ応力	$\sigma_y$	6	MPa

注記\*1: 表中では有効数字 4 桁としているが, 計算は桁数処理前の数値を使用

表 2-5 バスケットプレート格子端部に発生するせん断応力の計算条件及び計算結果  
(貯蔵時 ( $S_d$ \*地震力又は $S_s$ 地震力が作用する場合))

項目	記号	数値	単位
図 2-1 の斜線部 B に含まれる使用済燃料集合 体, 伝熱プレート及びバスケットプレートの 合計質量	$m_B$	381	kg
バスケットプレートの断面積	$A_{bp}$	<input type="text"/>	$mm^2$
水平方向加速度	$G_1$	1.40G	$m/s^2$
水平方向設計震度	$C_H$	1.40	—
重力加速度	$G$	9.80665	$m/s^2$
バスケットプレート格子端部に発生する せん断応力	$\tau_{yz}$	1	MPa

表 3-1 バスケットの応力計算結果と許容応力（設計条件，供用状態A及びB）

（単位：MPa）

部 位	応力分類	設計時		貯蔵架台 への衝突時		許容 応力
		計算値	評価位置	計算値	評価位置	
バスケット プレート	$P_m$	2	③	—	—	146
	$P_m + P_b$	2	③	—	—	219
	$P_m + P_b + Q$	—	—	2	③	438
	$\sigma_p$	—	—	2	③	202
	$\sigma_c$	—	—	2	③	127

表 3-2 バスケットの応力計算結果と許容応力（供用状態C<sub>s</sub>）

（単位：MPa）

部 位	応力分類	計算値	評価位置	許容応力
バスケット プレート	$P_m$	2	①	219
	$P_m + P_b$	6	②	328
	$\sigma_s$	1	②	131
	$\sigma_p$	2	①	303
	$\sigma_c$	2	①	176

表 3-3 バスケットの応力計算結果と許容応力（供用状態D<sub>s</sub>）

（単位：MPa）

部 位	応力分類	計算値	評価位置	許容応力
バスケット プレート	$P_m$	2	①	291
	$P_m + P_b$	6	②	437
	$\sigma_s$	1	②	175
	$\sigma_p$	2	①	404
	$\sigma_c$	2	①	176

添付書類 8-2-3

ほう素添加ステンレス鋼に関する説明書

## 目 次

1. 概要 .....	1
2. 適用範囲 .....	2
3. 材料規定 .....	3
3.1 材料名称 .....	3
3.2 化学成分 .....	3
3.3 設計応力強さ .....	3
3.4 設計降伏点 .....	3
3.5 設計引張強さ .....	3
3.6 縦弾性係数 .....	3
3.7 熱膨張係数 .....	3
4. 製造管理規定 .....	7

## 図表目次

図 4-1	製造フロー	7
図 4-2	品質管理項目	8
表 3-1	材料の規定名称	4
表 3-2	化学成分規定	4
表 3-3	材料の各温度における設計応力強さ $S_m$	5
表 3-4	材料の各温度における設計降伏点 $S_y$	5
表 3-5	材料の各温度における設計引張強さ $S_u$	5
表 3-6	材料の各温度における縦弾性係数	6
表 3-7	材料の各温度における熱膨張係数	6
表 4-1	機械的性質	7

## 1. 概要

本書は、HDP-69B(B)型のバスケットプレートに適用するほう素添加ステンレス鋼（B-SUS304P-1）の材料規定及び製造管理規定について説明するものである。

なお、本材料は（社）日本機械学会「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。）（事例規格 バスケット用ボロン添加ステンレス鋼板 B-SUS304P-1 に関する規定（FA-CC-004）を含む。）に規定されている。

## 2. 適用範囲

本材料を HDP-69B(B)型のバスケットプレートに適用するに当たり、本材料及びこれを使用するバスケットは、以下の事項に適合すること。

- (1) 設計貯蔵期間（供用期間）は 60 年以下であること。
- (2) バスケットが収納されるキャスク本体内部には、設計貯蔵期間中ヘリウムガスを封入し、不活性ガス雰囲気は維持されていること。
- (3) バスケットは耐圧構造でないこと。
- (4) バスケットは溶接部がない構造とすること。
- (5) 本材料はボルト材として使用しないこと。

### 3. 材料規定

本規定は、設計貯蔵期間における設計評価に適用する材料規定である。なお、本規定を適用する材料は、4章に示す製造管理規定を満足しなければならない。

#### 3.1 材料名称

材料の規定名称は表 3-1 に示すものであること。

#### 3.2 化学成分

化学成分は表 3-2 に示す百分率の値の範囲内にあること。

#### 3.3 設計応力強さ

設計応力強さは表 3-3 の規定によること。

#### 3.4 設計降伏点

設計降伏点は表 3-4 の規定によること。

#### 3.5 設計引張強さ

設計引張強さは表 3-5 の規定によること。

#### 3.6 縦弾性係数

縦弾性係数は表 3-6 の規定によること。

#### 3.7 熱膨張係数

熱膨張係数は表 3-7 の規定によること。



表 3-1 材料の規定名称

材料の名称	記号
バスケットプレート用材料 ほう素添加ステンレス鋼	B-SUS304P-1

表 3-2 化学成分規定

記号	化学成分 (mass%)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	B
B-SUS304P-1	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.040 以下	0.015 以下	8.00 以上 10.50 以下	18.00 以上 20.00 以下	1.00 以上 1.25 以下

表 3-3 材料の各温度における設計応力強さ  $S_m$  (MPa)

記号	最小引張強さ (MPa)	最小降伏点 (MPa)	温度 (°C)								
			-25~40	75	100	150	200	225	250	275	300
B-SUS 304P-1	520	255	170	165	159	152	148	147	146	146	145

注) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

表 3-4 材料の各温度における設計降伏点  $S_y$  (MPa)

記号	最小引張強さ (MPa)	最小降伏点 (MPa)	温度 (°C)								
			-25~40	75	100	150	200	225	250	275	300
B-SUS 304P-1	520	255	255	219	216	215	211	208	204	200	197

注) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

表 3-5 材料の各温度における設計引張強さ  $S_u$  (MPa)

記号	最小引張強さ (MPa)	最小降伏点 (MPa)	温度 (°C)								
			-25~40	75	100	150	200	225	250	275	300
B-SUS 304P-1	520	255	520	495	477	456	443	440	438	437	436

注) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

表 3-6 材料の各温度における縦弾性係数 (MPa)

記号	温 度 (°C)											
	20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
B-SUS 304P- 1	216000	216000	214000	212000	210000	208000	206000	204000	202000	200000	199000	197000

注) 温度の中間における値は, 比例法によって計算する。

表 3-7 材料の各温度における熱膨張係数 ( $\times 10^{-6}$ mm/(mm $\cdot$ °C))

記号	区 分	温 度 (°C)											
		20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
B-SUS 304P-1	A	15.22	15.78	16.22	16.61	16.96	17.28	17.56	17.80	18.01	18.17	18.30	18.39
	B	15.22	15.52	15.88	16.24	16.24	16.24	16.43	16.63	16.83	17.02	17.12	17.22

注) 温度の中間における値は, 比例法によって計算する。区分 A は瞬時熱膨張係数, B は室温からその温度までの平均熱膨張係数を表す。

#### 4. 製造管理規定

本規定は、製造管理に係る規定である。

- (1) 化学成分は、表 3-2 に示す百分率の値の範囲内にあること。
- (2) 材料の製造は図 4-1 に示す製造フローに従い、圧延により製造したものであること。
- (3) 材料は圧延後、固溶化熱処理を行うこと。
- (4) 機械的性質は、表 4-1 に示す値に適合すること。
- (5) 本材料は板厚 5~14mm の範囲で使用すること。寸法許容差は、熱間圧延の場合は「熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯」(JIS G 4304(2005)), 冷間圧延の場合は「冷間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯」(JIS G 4305(2005))によるものとする。
- (6) 本材料の各製造段階で実施する品質管理項目を図 4-2 に示す。

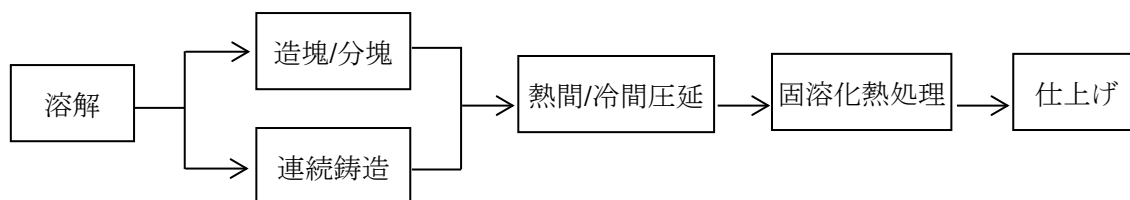


図 4-1 製造フロー

表 4-1 機械的性質

記号	引張試験		
	引張強さ (MPa)	耐力 (MPa)	伸び (%)
B-SUS 304P-1	520 以上	255 以上	10 以上

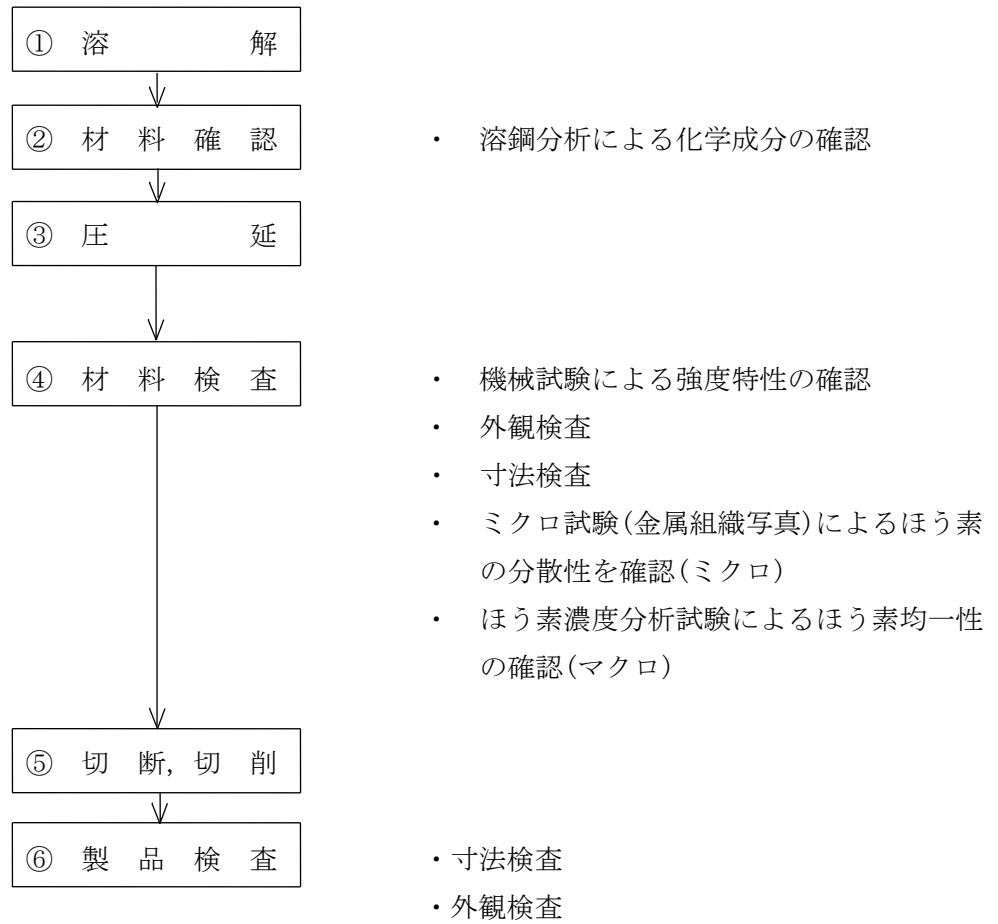


図 4-2 品質管理項目

ほう素添加ステンレス鋼の材料特性に関する説明書

## 目 次

1. 材料の用途	1
1.1 用途	1
2. 材料の仕様	1
2.1 適合規格	1
2.2 化学成分	1
2.3 機械的性質	2
2.4 寸法制限及び寸法許容差	6
3. 使用条件	6
3.1 適用範囲	6
3.2 温度範囲	6
4. 特徴及び使用上の留意事項	6
4.1 特徴	6
4.2 特許及びライセンス	6
5. 製造工程及び製造条件	7
5.1 製造方法	7
5.2 熱処理	7
5.3 品質管理	7
6. 化学成分	8
7. マクロ及びミクロ組織	9
8. 実用試験	13
9. 加工性及び加工条件	13
10. 機械的性質	13
10.1 引張特性	13
10.2 じん性	14
10.3 硬さ (参考)	19
11. 高温及び低温引張特性	20
11.1 高温引張特性	20
11.2 低温引張特性	21
12. クリープ特性及びクリープ破断特性	22
13. じん性 (時効後)	22
14. 耐食性	22
15. 設計降伏点	23
16. 設計引張強さ	24
17. 設計応力強さ	25

18. 設計引張応力	25
19. 疲労	25
20. その他特性	26
20.1 熱膨張係数	26
20.2 熱伝導率	27
20.3 温度伝導率	28
20.4 縦弾性係数	28
20.5 ポアソン比	29
21. 照射影響	30
22. 引用文献	31



## 図表目次

図 2-1	0.2%耐力の正規確率プロット	4
図 2-2	引張強さの正規確率プロット	5
図 5-1	製造フロー	7
図 5-2	品質管理項目	7
図 7-1	マクロ観察結果の例 (標本 7)	9
図 7-2	EPMA 分析結果の例 (標本 7)	12
図 10-1	動的破壊じん性試験における荷重－開口変位線図(試験片番号 7-2)	16
図 10-2	動的破壊じん性試験における荷重－時間線図(試験片番号 7-2)	17
図 10-3	動的破壊じん性試験における荷重－開口変位線図(試験片番号 7-2 を除く。)	18
図 11-1	引張強さの温度依存性	20
図 11-2	0.2%耐力の温度依存性	21
図 11-3	伸びの温度依存性	22
図 15-1	0.2%耐力における $r(T)_y$ のトレンドカーブ	23
図 15-2	各標本データと $S_y$ 設定値	23
図 16-1	引張強さにおける $r(T)_y$ のトレンドカーブ	24
図 16-2	各標本データと $S_u$ 設定値	24
図 20-1	熱膨張係数(平均)の温度依存性	26
図 20-2	熱伝導率の温度依存性	27
図 20-3	縦弾性係数の温度依存性	28
図 20-4	ポアソン比の温度依存性	29
表 2-1	化学成分仕様	1
表 2-2	機械的性質 (常温)	2
表 2-3	試験データと 1%破損確率値	3
表 6-1	各標本の化学成分と板厚	8
表 6-2	各標本と各試験の対応	8
表 7-1	ミクロ組織観察結果	10
表 10-1	常温における引張特性 (平均値(n=3))	13
表 10-2	動的破壊じん性試験結果	15
表 10-3	常温における硬度(Hv)	19
表 15-1	材料の各温度における設計降伏点 $S_y$	23
表 16-1	材料の各温度における設計引張強さ $S_u$	24
表 17-1	材料の各温度における設計応力強さ $S_m$	25
表 20-1	本材料の熱膨張係数	26
表 20-2	本材料の熱伝導率設定値	27

表 20-3	本材料の温度伝導率設定値	28
表 20-4	材料の各温度における縦弾性係数	28

## 1. 材料の用途

### 1.1 用途

本材料は、HDP-69B(B)型の内部に設置される使用済燃料集合体を保持するためのバスケットプレートに適用する。

## 2. 材料の仕様

### 2.1 適合規格

本材料の適合規格はない。

### 2.2 化学成分

本材料の化学成分仕様は、表 2-1 に規定のとおりである。

表 2-1 化学成分仕様

記号	化学成分 (mass%)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	B
B-SUS304P-1	≦0.08	≦1.00	≦2.00	≦0.040	≦0.015	8.00～ 10.50	18.00～ 20.00	1.00～ 1.25
SUS304 (参考)	≦0.08	≦1.00	≦2.00	≦0.045	≦0.030	8.00～ 10.50	18.00～ 20.00	—

### 2.3 機械的性質

ほう素添加ステンレス鋼は、SUS304 にほう素を添加したものであり、ほう素添加に伴い延性が低下する方向となるが、当該添加量程度では母材である SUS304 と同様に延性挙動を示す材料であり、時効の影響はない。

使用温度領域の機械試験の結果からトレンドカーブを評価し、保守的な設計強度を設定した。

常温規格値（引張強さ、耐力及び伸び）については、表 2-2 示す値に適合すること。規格値については、常温の規格値を以下のように定めた。

- (1) 同じ化学成分仕様値及び圧延工程を経て製作された、常温の引張試験データを複数準備する。
- (2) 今回の標本 1~4 については、常温の引張試験を行っているのをこの含む。
- (3) 全データの平均値を求める。
- (4) 全データの平均値との比を求め、累積確率分布を確率分布紙にプロットする。
- (5) 上記の近似直線を最小二乗法によって求め、99%信頼下限(1%破損確率値)を求める。
- (6) 上記 1%破損確率値を下回るように常温仕様値を決定する。

なお、標本 1~4 の常温引張試験のデータ数は n 数=3 の試験であり、全体で 12 点と統計処理を行う上でサンプル数が少ないため、過去に購入した同材料のミルシートに記載の引張試験値 27 点を含める。

表 2-3 に、常温における 0.2%耐力及び引張強さデータと、それらの 1%破損確率値を示す。図 2-1 及び図 2-2 にこれらの分布を示す。

表 2-2 機械的性質(常温)

記号	引張強さ(MPa)	耐力(MPa)	伸び(%)
B-SUS304P-1	520 以上	255 以上	10 以上
SUS304 (参考)	520 以上	205 以上	40 以上

表 2-3 試験データと 1%破損確率値

No.	標本又は 供試材	0.2%耐力値 (MPa)	引張強さ (MPa)	備考
1	標本 1	299	632	A 社
2		303	633	
3		298	634	
4	標本 2	382	618	B 社
5		379	610	
6		367	620	
7	標本 3	371	656	C 社
8		359	653	
9		371	650	
10	標本 4	297	567	A 社
11		383	556	
12		320	555	
13	供試材 1	313	584	A 社 1
14	供試材 2	322	611	A 社 2
15	供試材 3	331	606	A 社 3
16	供試材 4	338	602	A 社 4
17	供試材 5	315	603	A 社 5
18	供試材 6	333	623	A 社 6
19	供試材 7	340	555	A 社 7
20	供試材 8	356	606	A 社 8
21	供試材 9	321	538	A 社 9
22	供試材 10	304	647	B 社 1
23	供試材 11	318	641	B 社 2
24	供試材 12	330	614	B 社 3
25	供試材 13	336	610	B 社 4
26	供試材 14	329	673	B 社 5
27	供試材 15	340	688	B 社 6
28	供試材 16	287	594	B 社 7
29	供試材 17	295	602	B 社 8
30	供試材 18	296	711	B 社 9
31	供試材 19	333	630	C 社 1
32	供試材 20	355	670	C 社 2
33	供試材 21	335	650	C 社 3
34	供試材 22	327	684	C 社 4
35	供試材 23	333	670	C 社 5
36	供試材 24	334	688	C 社 6
37	供試材 25	358	689	C 社 7
38	供試材 26	328	684	C 社 8
39	供試材 27	321	695	C 社 9
—	平均値	332.2	629.5	—
—	1%破損確率値	268.5	521.8	—
—	常温仕様値	255	520	—

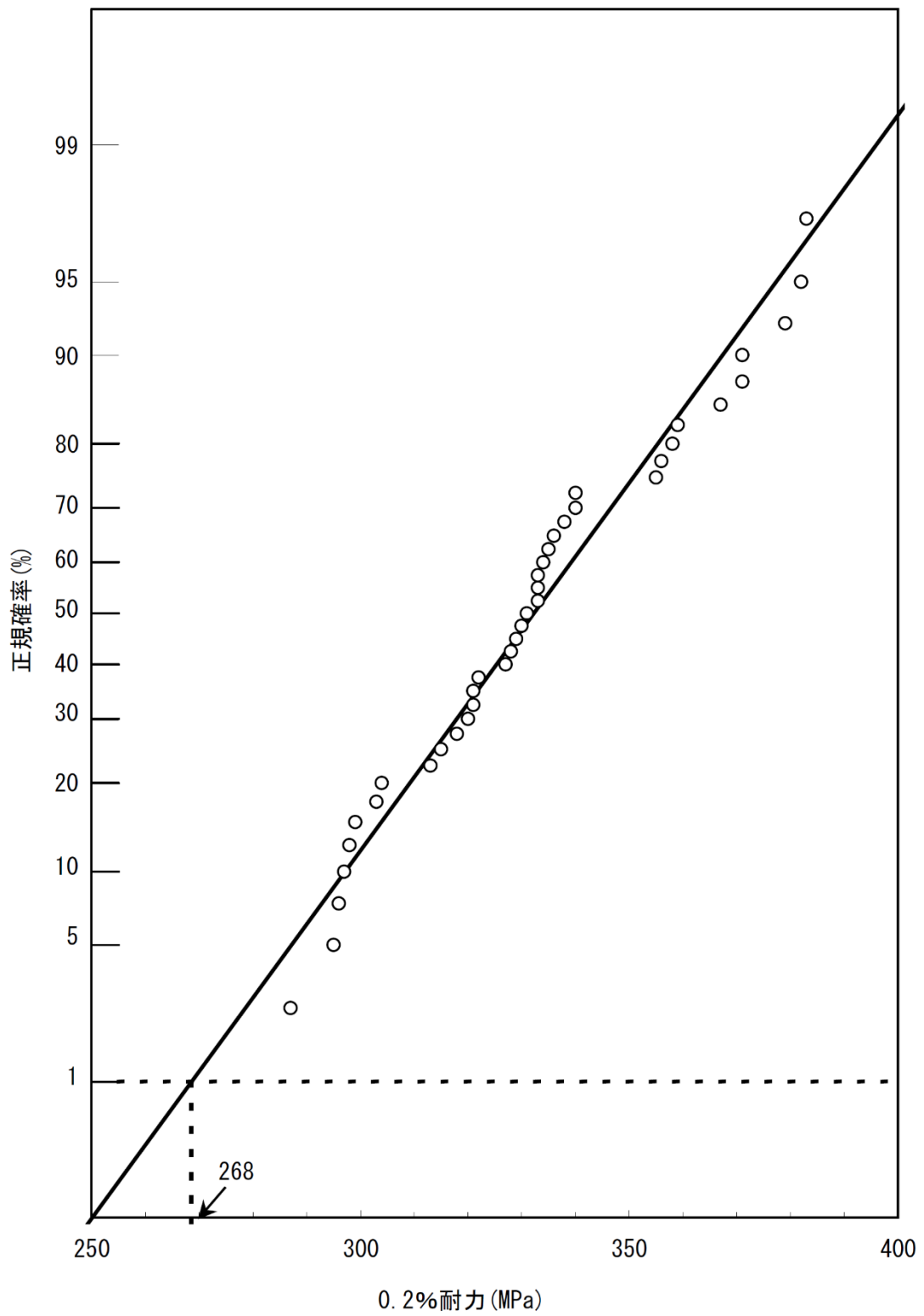


図 2-1 0.2%耐力の正規確率プロット

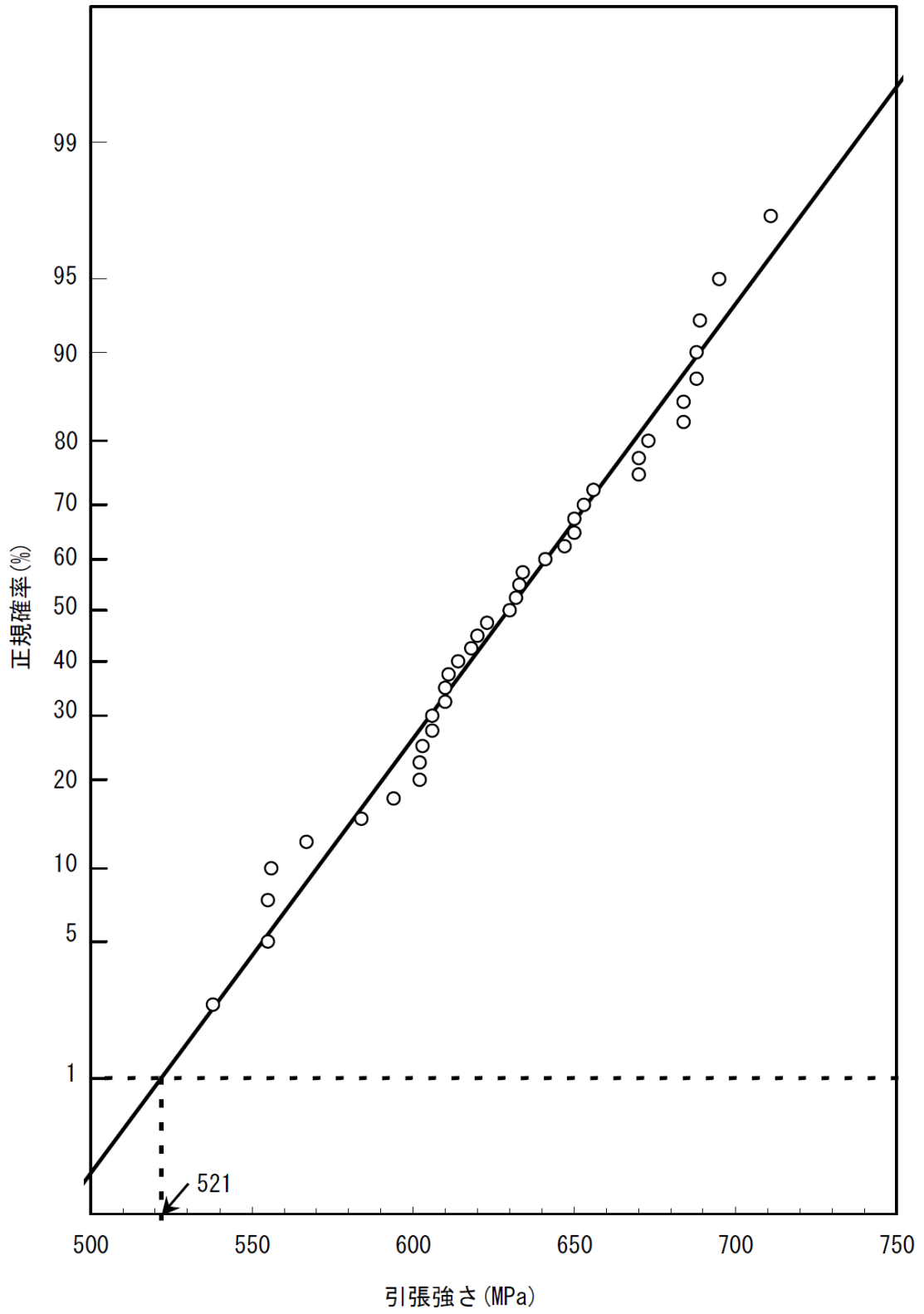


図 2-2 引張強さの正規確率プロット

## 2.4 寸法制限及び寸法許容差

本材料の板厚は、5～14mm とすること。寸法許容差は、熱間圧延の場合は「熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯」(JIS G 4304(2005))、冷間圧延の場合は「冷間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯」(JIS G 4305(2005))によるものとする。

## 3. 使用条件

### 3.1 適用範囲

本材料を HDP-69B(B)型のバスケットプレートに適用するに当たり、本材料及びこれを使用するバスケットは、以下の事項に適合すること。

- (1) 設計貯蔵期間（供用期間）は 60 年以下であること。
- (2) バスケットが収納されるキャスク本体内部には、設計貯蔵期間中ヘリウムガスを封入し、不活性ガス雰囲気は維持されていること。
- (3) バスケットは耐圧構造でないこと。
- (4) バスケットは溶接部がない構造とすること。
- (5) 本材料はボルト材として使用しないこと。

### 3.2 温度範囲

- ・最高使用温度：300℃
- ・最低使用温度：-25℃

## 4. 特徴及び使用上の留意事項

### 4.1 特徴

本材料は SUS304 を基本としてほう素を添加させた材料であり、適切な中性子吸収能力と強度及び耐久性を有する材料である。また、本材料と同様にほう素を添加させたステンレス鋼は国内の使用済燃料貯蔵ラックや輸送容器で使用実績があり、多数の技術文献が公開されている<sup>(1)～(7)</sup>。

ただし、金属キャスクバスケットプレート用のほう素添加ステンレス鋼は、使用済燃料貯蔵ラック材料と比較して使用環境が異なる点があり、新規許容応力の設定等、これらに配慮する必要がある。本書で説明する B-SUS304P-1 は、SUS304 をベースとして、金属キャスクバスケットプレートへの適用性を考慮し、適切なほう素添加量範囲、強度特性を鑑みて各種特性を定めた材料である。

本材料 B-SUS304P-1 は、金属キャスクバスケット材料に適した機械的特性、破壊じん性を有することが報告されている<sup>(8)～(10)</sup>。

### 4.2 特許及びライセンス

なし。



## 5. 製造工程及び製造条件

### 5.1 製造方法

本材料の製造方法は、一般的な鋼板の方法と同様である。本材料の製造フローは図 5-1 に示すとおりである。ほう素は、溶解時にフェロボロンの形で必要量混合される。溶解の後、造塊工程を経て圧延を行う場合と、連続鋳造で圧延される場合がある。圧延後は、SUS304 と同様に固溶化熱処理(約 1000~1150℃, 急冷)を行っている。

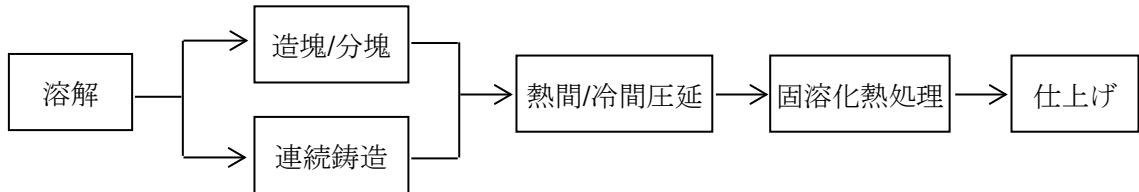


図 5-1 製造フロー

### 5.2 熱処理

本材料は、5.1 節で述べたように、SUS304 と同様に固溶化熱処理を行う。

### 5.3 品質管理

本材料の各製造段階で実施する品質管理項目を図 5-2 に示す。なお、本材料は板厚 14mm 以下の寸法制限のため、金属キャスク構造規格 MCM-2420 で要求される非破壊試験要求(厚さ 19mm 以上の板)の対象ではない。

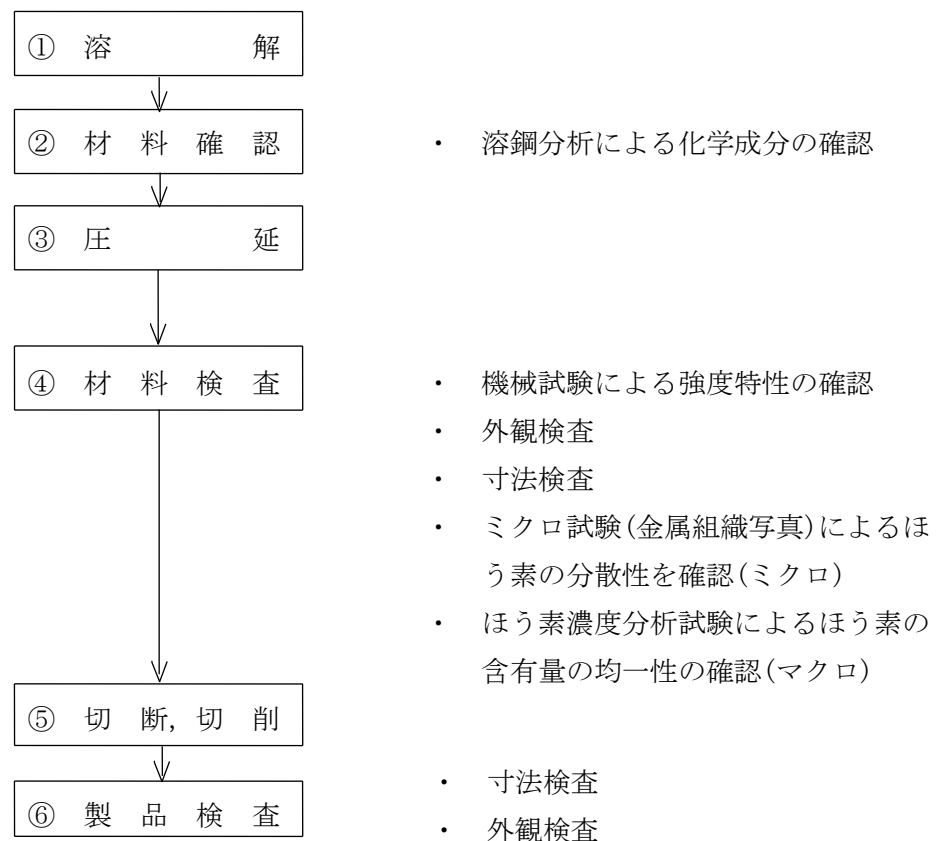


図 5-2 品質管理項目

## 6. 化学成分

各試験に用いられた標本の化学成分及び板厚を表 6-1 に、各標本と試験の対応を表 6-2 に示す。圧延材においては厚板でない限り材料特性への影響は考えにくいだが、引張試験及び衝撃試験においては、それぞれ標本 4 及び標本 7 について比較的厚めの板(14mm)のデータを含めて試験を行った。

衝撃試験においては、実施時期が異なるため、別標本でのデータとなっている。

なお、標本は全て使用済燃料貯蔵ラック等で使用される実製品規模の溶鋼、圧延、熱処理(固溶化熱処理)を行った鋼板より採取した。

表 6-1 各標本の化学成分と板厚

標本 No.	化学成分 (mass%)								板厚 (mm)
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	B	
B-SUS 304P-1 (仕様)	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.015	8.00~10.50	18.00~20.00	1.00~1.25	—
標本 1	0.02	0.79	1.01	0.024	0.000	10.25	19.67	1.14	5
標本 2	0.02	0.36	1.15	0.028	0.001	9.87	18.28	1.22	5
標本 3	0.03	0.64	0.98	0.020	0.001	8.40	19.26	1.06	5
標本 4	0.02	0.72	0.95	0.020	0.002	10.06	18.76	1.16	14
標本 5	0.02	0.20	1.05	0.030	0.001	9.45	19.86	1.05	5
標本 6	0.01	0.75	0.99	0.023	0.000	10.17	19.64	1.09	5
標本 7	0.02	0.79	0.95	0.024	0.001	10.26	19.62	1.14	14

表 6-2 各標本と各試験の対応

標本 No.	引張試験		縦弾性係数	ポアソン比	熱膨張係数	熱伝導率	比熱	衝撃試験	板厚 (mm)
	耐力	引張強さ							
標本 1	○	○	○	○	○	○	○	—	5
標本 2	○	○	○	○	○	○	○	—	5
標本 3	○	○	○	○	○	○	○	—	5
標本 4	○	○	—	—	—	—	—	—	14
標本 5	—	—	—	—	—	—	—	○	5
標本 6	—	—	—	—	—	—	—	○	5
標本 7	—	—	—	—	—	—	—	○	14

## 7. マクロ及びマイクロ組織

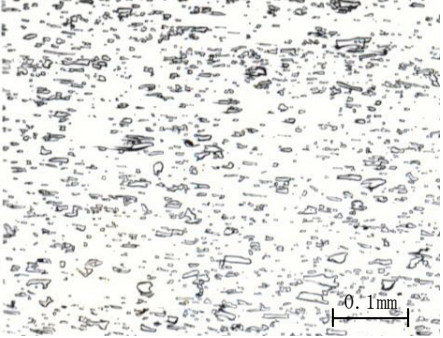
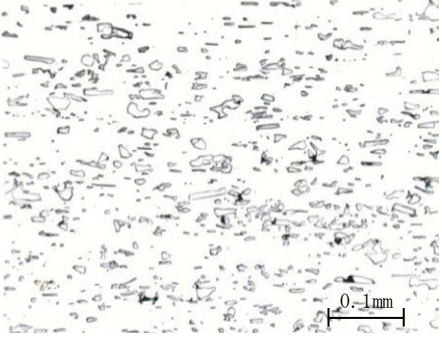
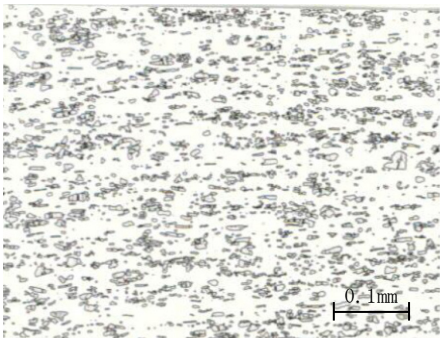
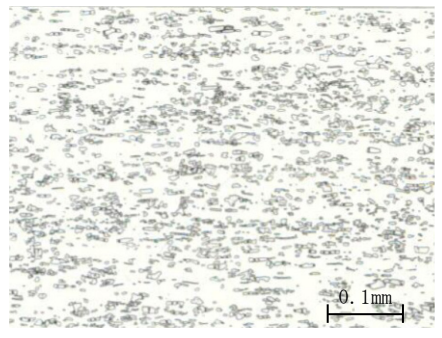
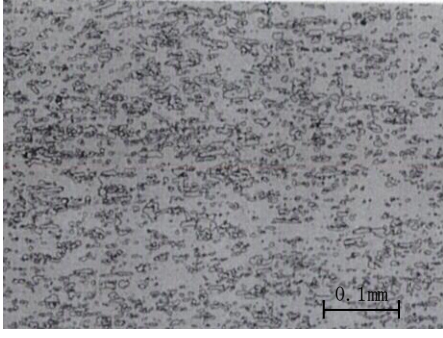
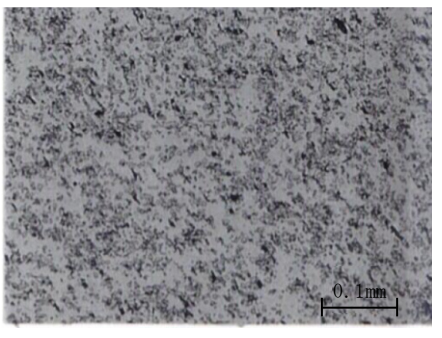
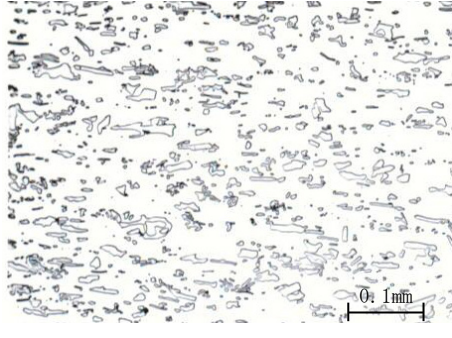
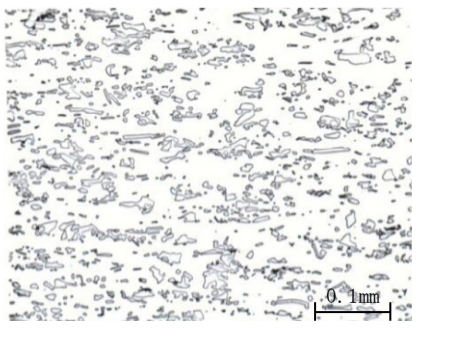
本材料のマクロ写真を図 7-1 に示す。一般的な鉄鋼材料と大きな違いはない。

また、供試材のマイクロ組織観察結果を表 7-1 に示す。なお、ほう素の分散性を確認するため、圧延材の先端と終端でほう素濃度の ICP 分析を実施し、規定を満足していることを確認している。表 7-1 では、各供試材の圧延先端部と後端部のマイクロ組織写真とその位置でのほう素濃度をそれぞれ示した。写真中黒色に見える部分がボライドであり、ほう素と鉄及びクロムの共晶組織である。図 7-2 に、マイクロ写真と元素分析(EPMA)結果との対比を示す。マイクロ組織観察における黒色部には、B, Cr が観察されることから、この部分がボライドであることがわかる。写真及びほう素量分析結果からわかるようにボライドの分布に偏りはない。



図 7-1 マクロ観察結果の例 (標本 7)

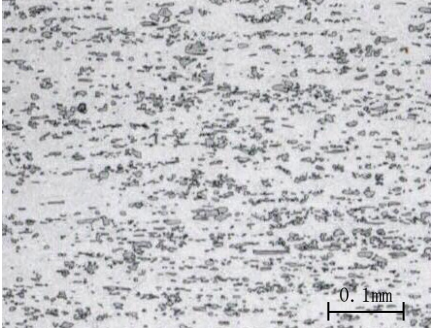
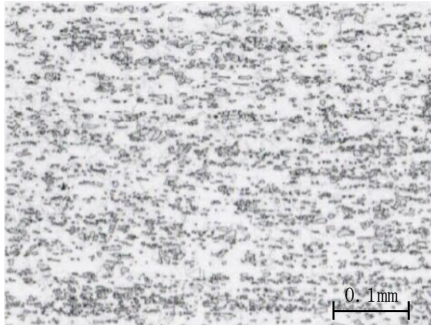
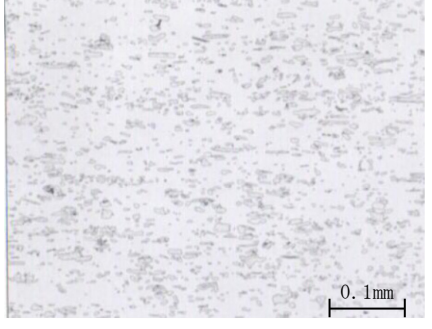
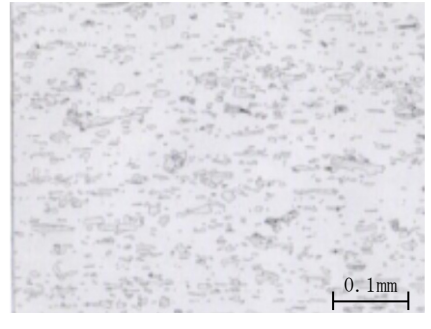

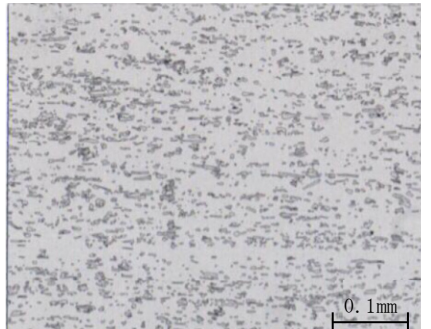
表 7-1(1) ミクロ組織観察結果

標本 No. (B 量*)	圧延方向先端写真 (B 量)	圧延方向後端写真 (B 量)
標本 1 (1.14%)	 <p>(1.13%)</p>	 <p>(1.12%)</p>
標本 2 (1.22%)	 <p>(1.25%)</p>	 <p>(1.24%)</p>
標本 3 (1.06%)	 <p>(1.03%)</p>	 <p>(1.10%)</p>
標本 4 (1.16%)	 <p>(1.15%)</p>	 <p>(1.17%)</p>

\* : 標本 No. 欄の B(ほう素)量は溶鋼分析時の結果を示す。本表の B 量の単位は全て mass% である。



表 7-1 (2) ミクロ組織観察結果

標本 No. (B 量*)	圧延方向先端写真 (B 量)	圧延方向後端写真 (B 量)
標本 5 (1.05%)	 <p>(1.04%)</p>	 <p>(1.04%)</p>
標本 6 (1.09%)	 <p>(1.07%)</p>	 <p>(1.08%)</p>
標本 7 (1.14%)	 <p>(1.11%)</p>	 <p>(1.12%)</p>

\* : 標本 No. 欄の B(ほう素) 量は溶鋼分析時の結果を示す。本表の B 量の単位は全て mass% である。

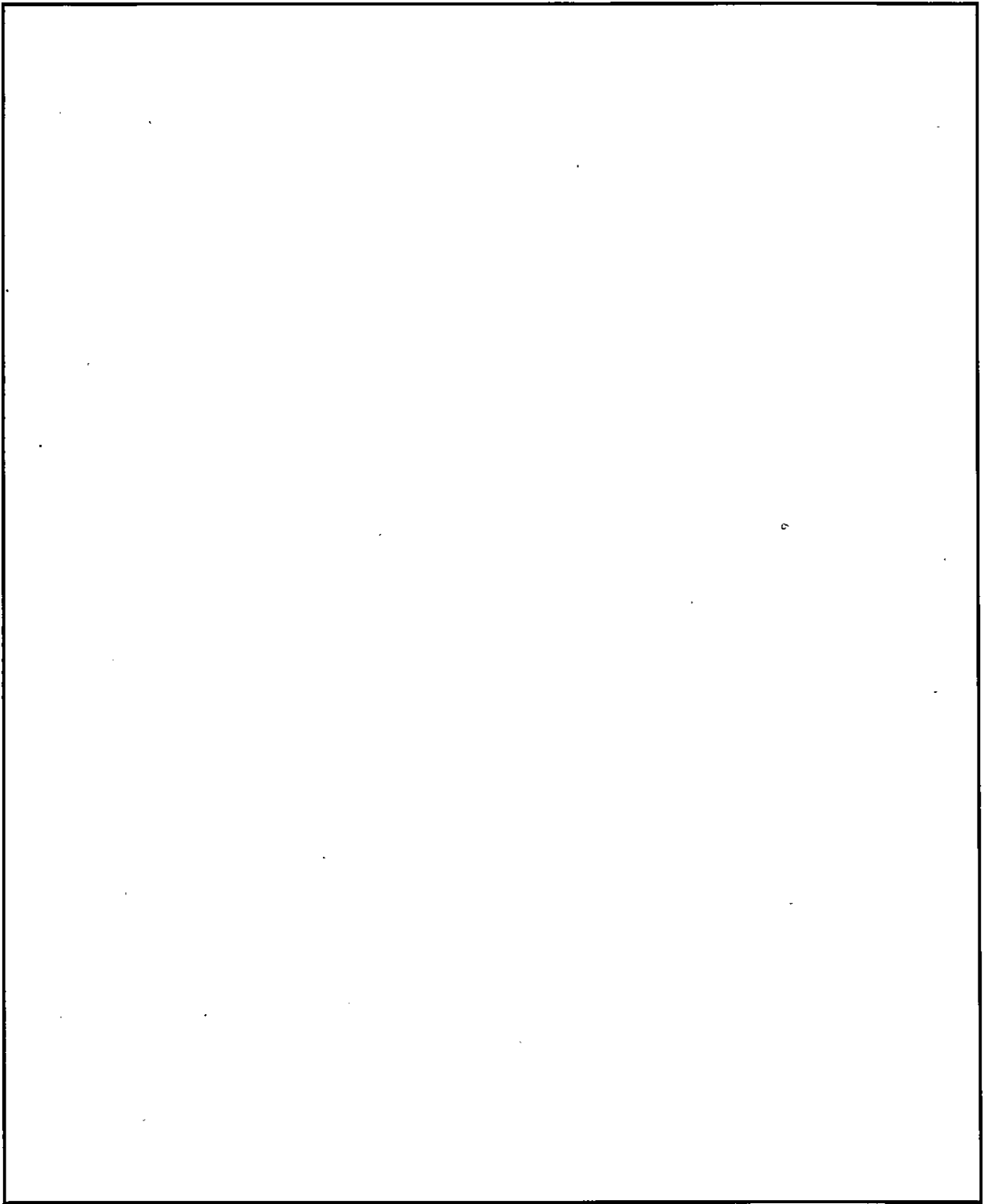


図 7-2 EPMA 分析結果の例(標本 7)

□内は商業機密のため、非公開とします。

## 8. 実用試験

本材料は圧延鋼板として製作され、使用形状は板状で、切断・切削加工しか行わないため、実用試験は不要と考える。

## 9. 加工性及び加工条件

本材料の加工は切断、切削のみとする。切断については、シャー、プラズマ、レーザー、ウォータージェット等の切断機器により、SUS304と同様に切断することができる。切削加工については、ボライドの影響により硬度が高く、工具の磨耗が大きい傾向にあるが十分に切削可能である。

## 10. 機械的性質

### 10.1 引張特性

#### (1) 試験条件

- ・ 供試材 : 表 6-1 に示す標本 1~4 を対象とした。供試材は鋼板端部から少なくとも板厚以上離れた位置から採取した。
- ・ 試験片 : JIS Z 2201「金属材料引張試験片」13B 号又は 5 号試験片を用いた。
- ・ 試験方法 : JIS Z 2241「金属材料引張試験方法」による。高温時は、JIS G 0567「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」による。
- ・ 試験温度 : 常温
- ・ 記録 : 引張強さ、0.2%耐力及び伸びを測定した。

#### (2) 試験結果

表 10-1 に引張試験結果を示す。この結果より、引張強さ、耐力及び伸びの常温の規格値は、試験データの 99%が包絡されるような最低強度として、安全側に丸めた値とした。

表 10-1 常温における引張特性(平均値(n=3))

標本	引張強さ (MPa)	耐力 (MPa)	伸び (%)
標本 1	633	300	22.7
標本 2	616	376	16.9
標本 3	653	367	16.0
標本 4	559	333	20.4
B-SUS304P-1 仕様値(参考)	520	255	10 以上
SUS304 仕様値(参考)	520	205	40 以上

## 10.2 じん性

### (1) 試験条件

- ・ 供試材 : 表 6-1 に示す標本 5~7 を対象とした。
- ・ 試験片 : ASTM E 1820-05a C(T) 試験片を用いた。
- ・ 試験方法 : ASTM E 1820-05a による。
- ・ 試験温度 :  $-25^{\circ}\text{C}$
- ・ 応力拡大係数速度 :  $300 \text{ MPa}\sqrt{\text{m/s}}$  以上
- ・ 記録 :  $K_{\text{Q}}$  値を測定した。

### (2) 試験結果

表 10-2 に動的破壊じん性試験結果を示す。各標本それぞれ 3 回動的破壊じん性試験を実施した結果、 $K_{\text{Q}}$  値は  $38 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  以上であった。図 10-1 に試験時の荷重-開口変位、図 10-2 に荷重-時刻の関係を示す。いずれの試験結果も同様の傾向であるので試験片 7-2 の結果で代表する。同図からわかるように、破壊形態としては脆性破壊が生じた場合に観測される最大荷重に達する前に荷重が急激に低下するような現象は見られず、最大荷重後も安定的に荷重が低下していく安定破壊が観測されている。

本試験より、本材料は典型的な脆性破壊とは様相が異なり、介在物を基点とした延性破壊の進展による安定的な破壊形態と推察される。

なお、試験片 7-2 を除く全試験に対する荷重-開口変位を図 10-3 にまとめて示す。



表 10-2 動的破壊じん性試験結果

試験片記号			5-1	5-2	5-3	6-1	6-2	6-3	7-1	7-2	7-3
試験機ストローク速度 mm/sec											
K値の変化速度 MPa・m <sup>1/2</sup> /sec											
試験片厚さ mm	B										
試験片幅 mm	W										
試験温度 °C											
静的0.2%耐力 MPa	$\sigma_{YS}$										
動的0.2%耐力 <sup>1)</sup> MPa	$\sigma_{YD}$										
P <sub>0</sub> 荷重 kN	P <sub>0</sub>										
最大荷重 kN	P <sub>max.</sub>										
機械切欠長さ mm	M										
疲労き裂長さ mm	0/4・B	a <sub>f0</sub>									
	1/4・B	a <sub>f1</sub>									
	2/4・B	a <sub>f2</sub>									
	3/4・B	a <sub>f3</sub>									
	4/4・B	a <sub>f4</sub>									
	最小値	a <sub>f min.</sub>									
	最大値	a <sub>f max.</sub>									
き裂長さ <sup>2)</sup> mm	a										
係数 f(a/W)											
K <sub>0</sub> 値 MPa・m <sup>1/2</sup>	K <sub>0</sub>		60.6	55.3	54.5	40.1	47.8	54.3	38.8	42.3	42.0
P <sub>max</sub> /P <sub>0</sub> (≦1.10)											
B ≧ 2.5 (K <sub>0</sub> /σ <sub>YD</sub> ) <sup>2</sup>											
a ≧ 2.5 (K <sub>0</sub> /σ <sub>YD</sub> ) <sup>2</sup>											
K <sub>JC</sub> 値 MPa・m <sup>1/2</sup>	K <sub>JC</sub>		-								

1) ASTM-E1820 式 (A13.2) を用いた

2)  $a = M + (a_{f1} + a_{f2} + a_{f3}) / 3$

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

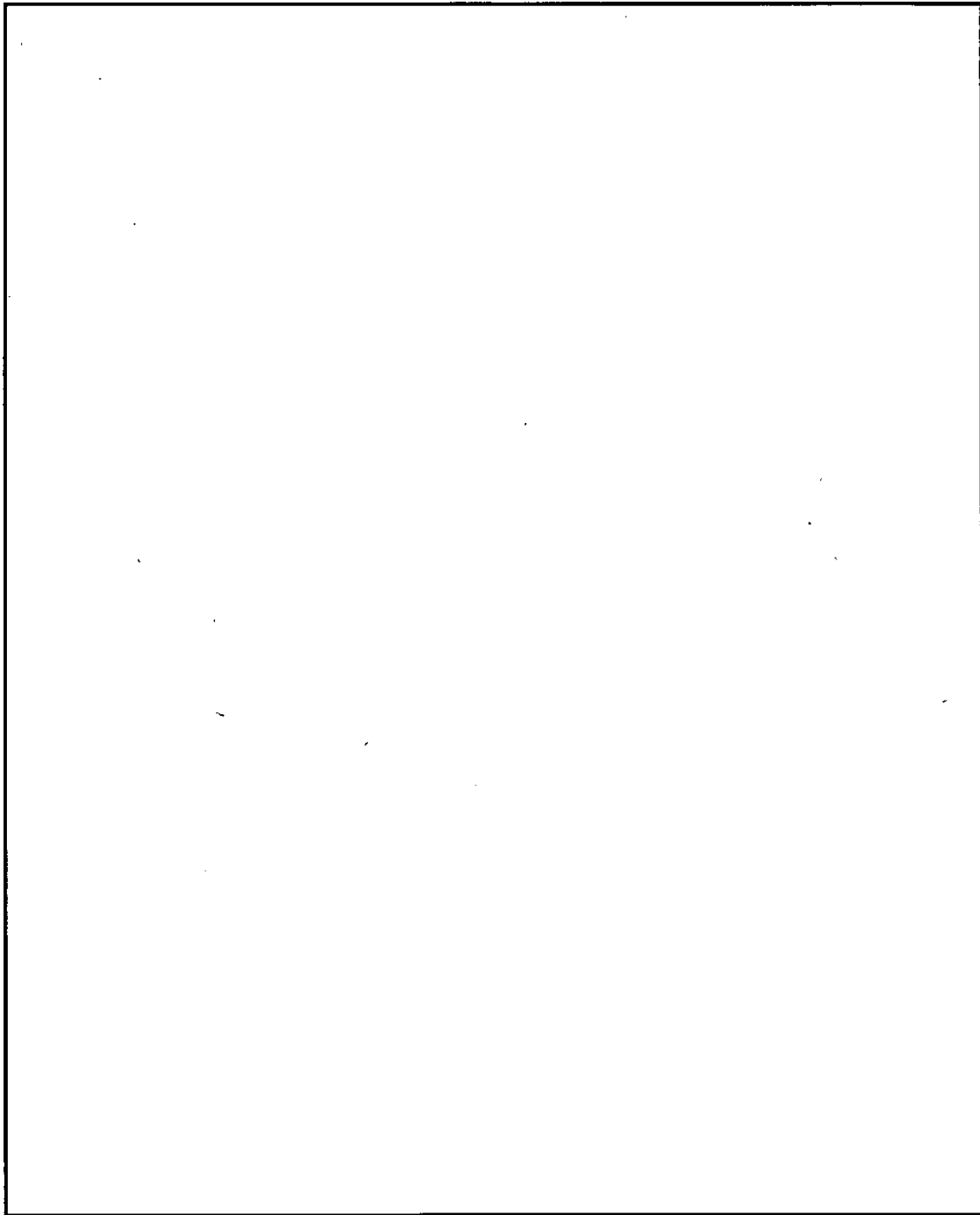


図 10-1 動的破壊じん性試験における荷重－開口変位線図(試験片番号 7-2)

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

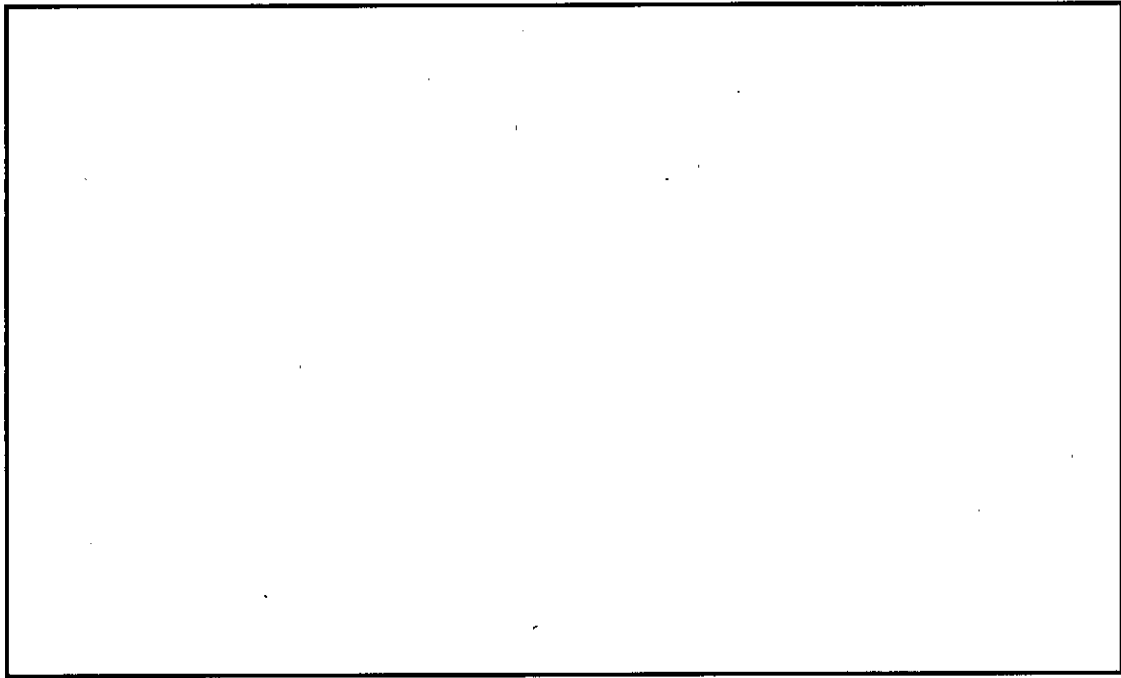


図 10-2 動的破壊じん性試験における荷重—時間線図(試験片番号 7-2)

内は商業機密のため、非公開とします。

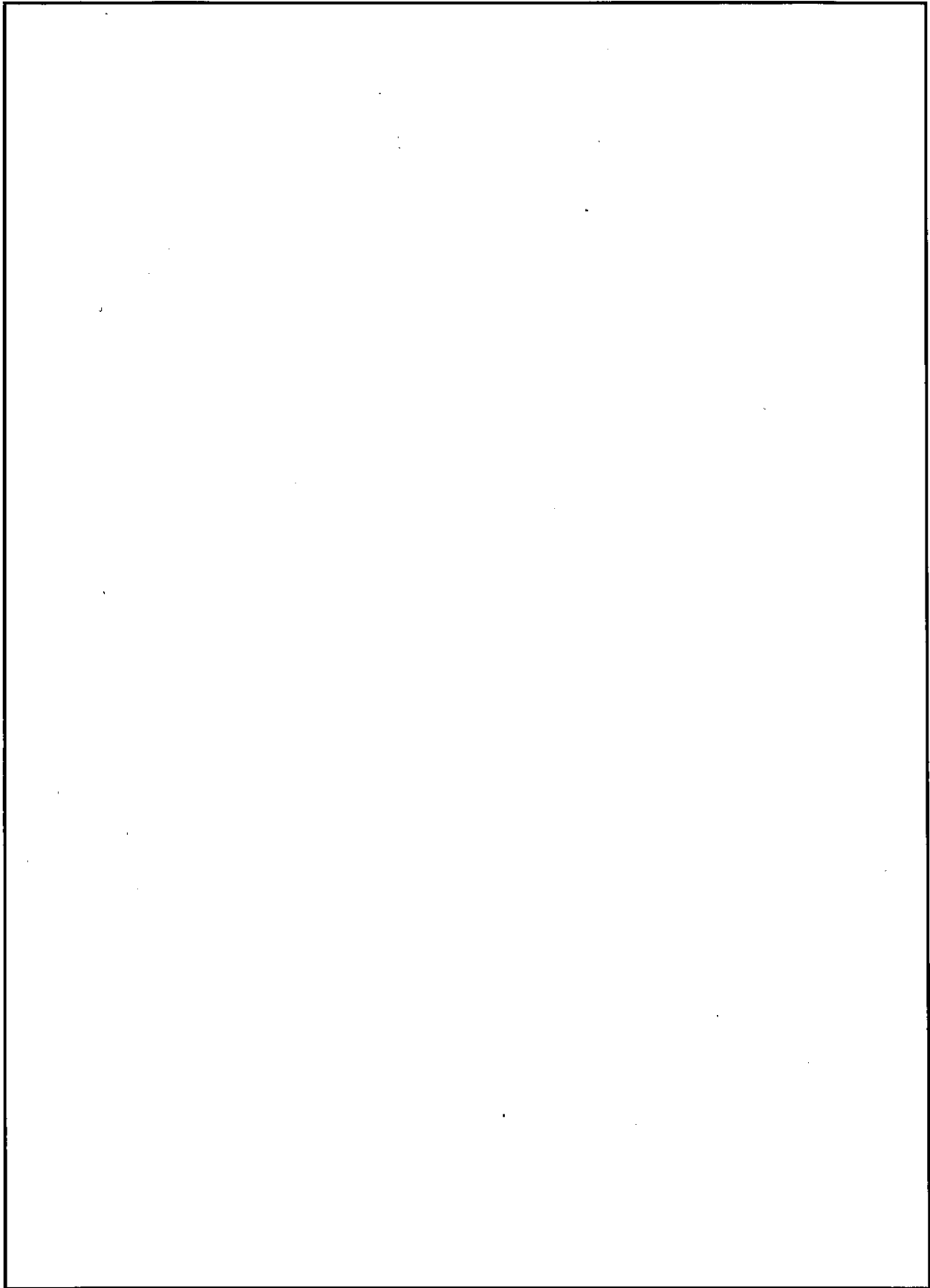


図 10-3 動的破壊じん性試験における荷重-開口変位線図(試験片番号 7-2 を除く。)

内は商業機密のため、非公開とします。

### 10.3 硬さ（参考）

#### (1) 試験条件

- ・ 供試材 : 表 6-1 に示す標本 1~7 を対象とした。
- ・ 試験方法 : JIS Z 2244 「ビッカース硬さ試験」による。
- ・ 試験温度 : 常温
- ・ 記録 : ビッカース硬さを測定した。

#### (2) 試験結果

表 10-3 に硬さ試験結果を示す。本材料は、ほう素を添加していることから、通常のステンレス鋼（規格値： $\leq 200$  (Hv)）より硬度は増すが、9章で示したように製造上及び使用上特に問題となることはない。

表 10-3 常温における硬度 (Hv)

項目	Hv
標本 1	268
標本 2	221
標本 3	230
標本 4	270
標本 5	212
標本 6	224
標本 7	251
平均値	239

## 11. 高温及び低温引張特性

### 11.1 高温引張特性

#### (1) 試験条件

- ・ 供試材 : 表 6-1 に示す標本 1~4 を対象とした。供試材は鋼板端部から少なくとも板厚以上離れた位置から採取した。
- ・ 試験片 : JIS Z 2201「金属材料引張試験片」 13B 号又は 5 号試験片を用いた。
- ・ 試験方法 : JIS Z 2241「金属材料引張試験方法」による。高温時は、JIS G 0567「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」による。
- ・ 試験温度 : 20°C, 50°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C, 300°C及び 350°C
- ・ 記録 : 引張強さ, 0.2%耐力及び伸びを測定した。

#### (2) 試験結果

引張強さ, 0.2%耐力, 伸びについてそれぞれ図 11-1~図 11-3 に引張試験結果を示す。

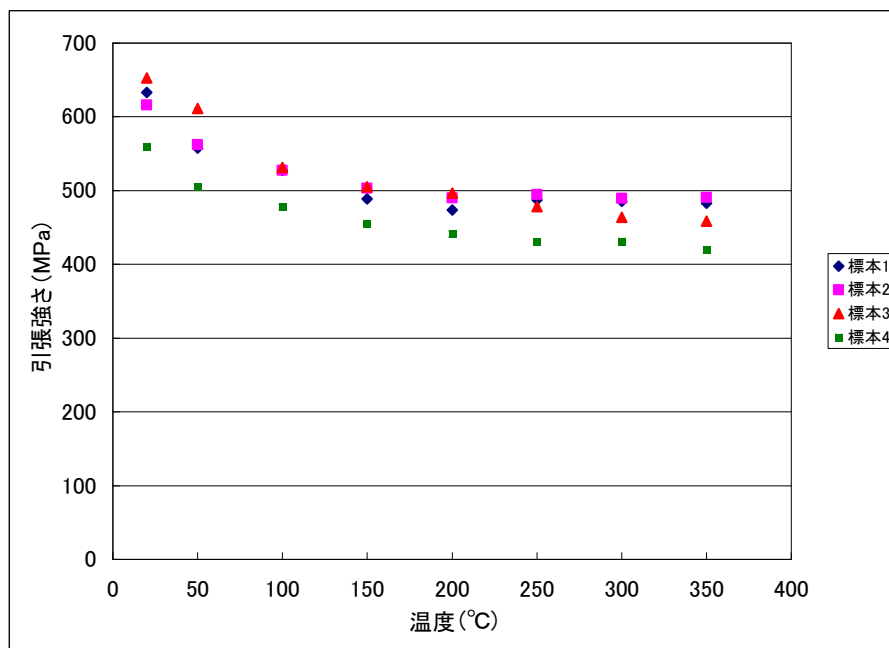


図 11-1 引張強さの温度依存性

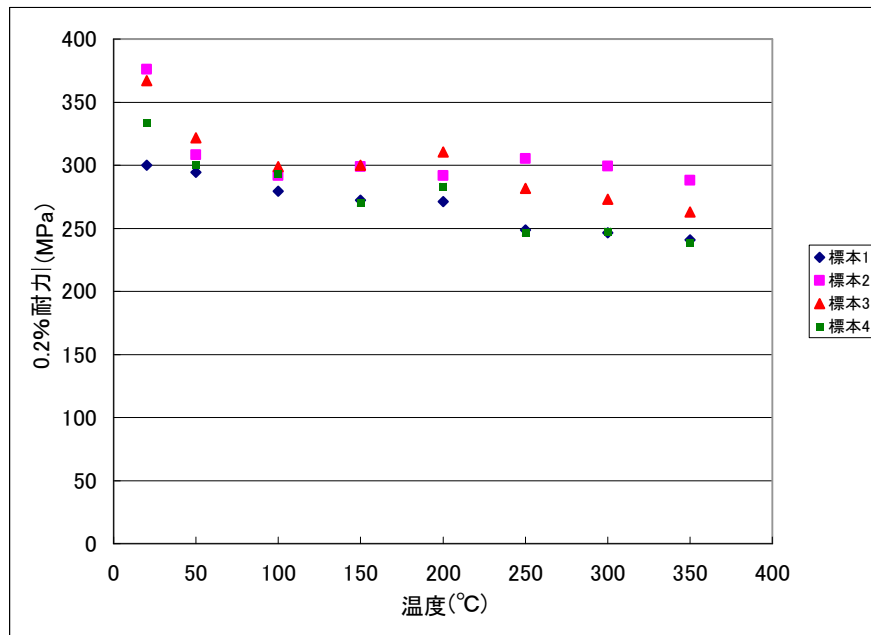


図 11-2 0.2%耐力の温度依存性

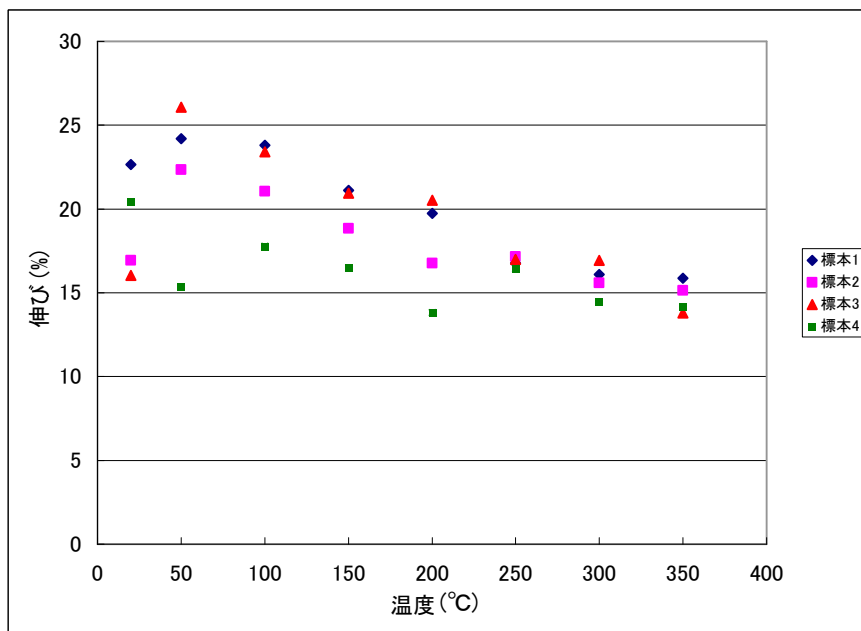


図 11-3 伸びの温度依存性

## 11.2 低温引張特性

常温以下の低温に対しては常温の値を設定することとし、設定応力を高くしないので、低温引張特性データは採取しない。

#### 12. クリープ特性及びクリープ破断特性

バスケットの最高使用温度は 300℃である。本材料の母材である SUS304 は 425℃までクリープの影響を考慮せずに適用される材料であり、かつほう素を添加したことによるボライドの析出硬化により、クリープ特性がより改善されることが知られている。したがって、本材料の使用環境においてはクリープ特性及びクリープ破断特性は考慮不要である。

#### 13. じん性（時効後）

本材料中に存在するボライドの融点(1273℃)に比べ、本材料の最高使用温度の 300℃と比較して十分低く、かつ長期貯蔵中に温度は更に低下するため、ボライドの結晶の成長によるじん性の低下は起こらない。したがって、時効の影響は考慮不要である。

#### 14. 耐食性

バスケットは使用済燃料を装荷する際に燃料プール内に浸漬されるが、同様の環境にて長期間プール内で使用されている使用済燃料貯蔵ラックで十分実績があること、燃料装荷後は脱水し、十分乾燥した後に不活性ガス（ヘリウム）を充填して使用することから、腐食を促進する環境ではないため、耐食性については問題ないと考える。



15. 設計降伏点

11.1 節で示した高温引張データに基づき、以下の要領で設計降伏点を策定した。

- (1) 各温度 T における 0.2%耐力値を、各標本の室温データで除した値を  $r(T)y$  とする。
- (2)  $r(T)y$  を各温度の 5 次の多項式で近似した曲線をトレンドカーブとする。
- (3) 室温の 0.2%耐力の規定値  $\min_{RT}S_y$  に  $r(T)y$  を乗じてその温度の  $S_y$  とする。ただし、高温での強度が低温よりも高くないようにする。

各温度の  $r(T)y$  及び設計降伏点 ( $S_y$ ) 設定値を図 15-1、図 15-2 及び表 15-1 に示す。表 15-1 については、常温より高温域の記載温度を (社) 日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NCI-2005 (2007 年追補版含む。)」(以下「設計・建設規格」という。) 付録材料図表 Part5 表 8 に合わせた。

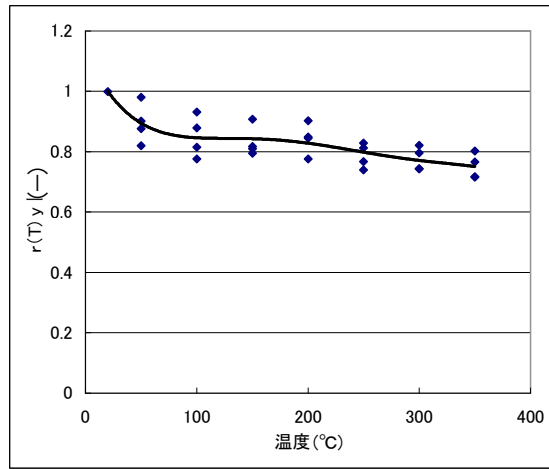


図 15-1 0.2%耐力における  $r(T)y$  のトレンドカーブ

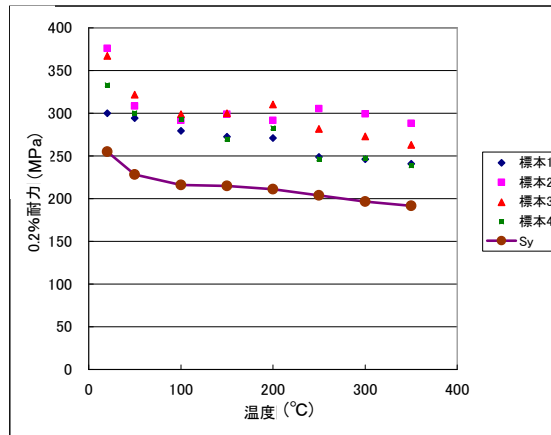


図 15-2 各標本データと  $S_y$  設定値

表 15-1 材料の各温度における設計降伏点  $S_y$  (MPa)

種類	最小引張強さ (MPa)	最小降伏点 (MPa)	温度 (°C)										
			-25 ~ 40	75	100	150	200	225	250	275	300	325	350
B-SUS304P-1 の設計降伏点	520	255	255	219	216	215	211	208	204	200	197	194	191
SUS304(参考)	520	205	205	183	171	155	144	139	135	131	127	125	124

## 16. 設計引張強さ

11.1 節で示した高温引張データに基づき、以下の要領で設計引張強さを策定した。

- (1) 各温度  $T$  における引張強さを、各標本の室温データで除した値  $r(T)_T$  とする。
- (2)  $r(T)_T$  を各温度の 5 次の多項式で近似した曲線のトレンドカーブとする。
- (3) 室温の引張強さの規定値  $\min_{RT} S_B$  に  $1.1 \times r(T)_T$  を乗じてその温度の  $S_u$  とする。ただし、高温での強度が低温よりも高くないようにする。

各温度の  $r(T)_T$  及び設計引張強さ ( $S_u$ ) 設定値を図 16-1、図 16-2 及び表 16-1 に示す。表 16-1 については、常温より高温域の記載温度を設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 9 に合わせた。

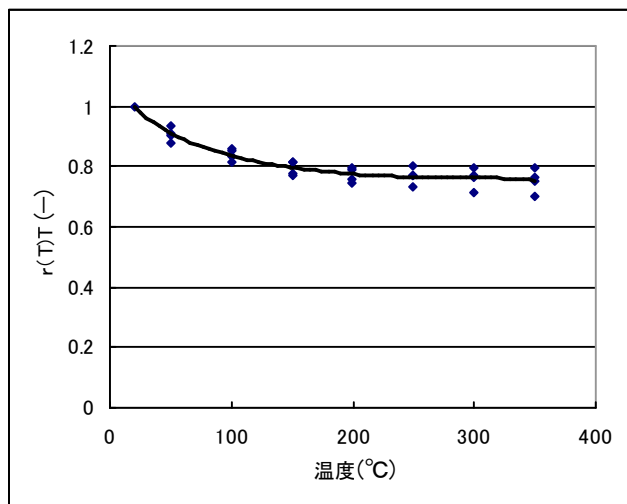


図 16-1 引張強さにおける  $r(T)_T$  のトレンドカーブ

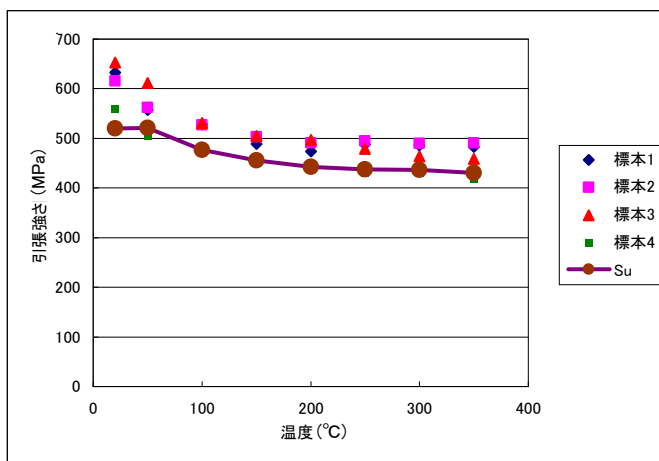


図 16-2 各標本データと  $S_u$  設定値

表 16-1 材料の各温度における設計引張強さ  $S_u$  (MPa)

種 類	最小引張強さ (MPa)	最小降伏点 (MPa)	温 度 (°C)										
			-25 ~ 40	75	100	150	200	225	250	275	300	325	350
B-SUS304P-1 の設計引張強さ	520	255	520	495	477	456	443	440	438	437	436	435	430
SUS304 (参考)	520	205	520	466	441	422	402	400	397	394	391	391	391

## 17. 設計応力強さ

15, 16 章で示した設計降伏点及び設計引張強さに基づき, 下表に示す各温度ごとに求められる数値の小さな値を設計応力強さとした。

製品/材料	引張強さ		降伏点[耐力]	
	常温	高温	常温	高温
鉄鋼及び非鉄	$1/3 \times S_T^*$	$1.1/3 \times S_T^* \times r(T)_T$	$2/3 \times S_y$	$2/3 \times S_y \times r(T)_y$ 若しくは $0.9 \times S_y \times r(T)_y$

\* 常温における引張強さの規格値(JIS, ASTM の規格等の値) (MPa)

ここで, 各温度の値はそれより低温の値を超えないように修正する。なお, 降伏点で 0.9 の係数を用いるのはオーステナイト鋼及び高ニッケル合金である。

本材料はオーステナイト鋼であるから, 上記に従って設定した設計応力強さ ( $S_m$ ) を表 17-1 に示す。表 17-1 については, 常温より高温域の記載温度を設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 1 に合わせた。

表 17-1 材料の各温度における設計応力強さ  $S_m$  (MPa)

種類	最小引張強さ (MPa)	最小降伏点 (MPa)	温度 (°C)										
			-25 ~ 40	75	100	150	200	225	250	275	300	325	350
B-SUS304P-1 の設計応力強さ	520	255	170	165	159	152	148	147	146	146	145	145	143
SUS304(参考)	520	205	137	137	137	137	129	126	122	118	115	113	111

## 18. 許容引張応力

本材料は, 使用温度がクリープ領域でなく, 許容引張応力は使用しないため, 策定しない。

## 19. 疲労

貯蔵時においてバスケットに対する圧力及び熱荷重の繰返しサイクルや, 通常輸送時及び地震時においてバスケットに作用する繰返し応力は微小であるため, 疲労解析が不要であり, 疲労線図作成のためのデータは不要である。

## 20. その他特性

### 20.1 熱膨張係数

標本 1~3 に対して、常温から最高使用温度より 50℃高い温度である 350℃までの熱膨張係数測定試験を実施 (n=3) した。熱膨張係数について図 20-1 に示し、設定値を表 20-1 に示す。表 20-1 については、記載温度を設計・建設規格 付録材料図表 Part6 表 2 に合わせた。

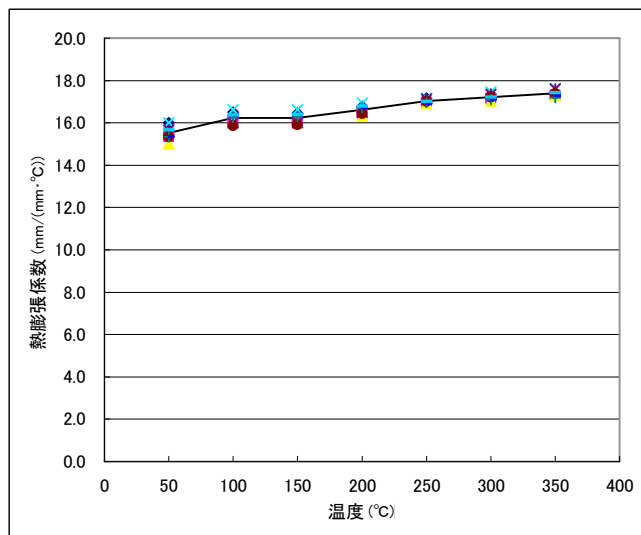


図 20-1 熱膨張係数(平均)の温度依存性

表 20-1 本材料の熱膨張係数 ( $\times 10^{-6}$  mm/(mm·°C))

種 類	温 度 (°C)													
	20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350
B-SUS304P-1 の 瞬時熱膨張係数	15.22	15.78	16.22	16.61	16.96	17.28	17.56	17.80	18.01	18.17	18.30	18.39	18.45	18.46
B-SUS304P-1 の 平均熱膨張係数	15.22	15.52	15.88	16.24	16.24	16.24	16.43	16.63	16.83	17.02	17.12	17.22	17.30	17.39
SUS304 の瞬時 熱膨張係数(参考)	15.21	15.72	16.09	16.43	16.73	17.04	17.33	17.59	17.84	18.08	18.33	18.55	18.76	18.94
SUS304 の平均 熱膨張係数(参考)	15.21	15.49	15.68	15.87	16.05	16.21	16.37	16.52	16.66	16.81	16.94	17.07	17.20	17.33

## 20.2 熱伝導率

標本 1~3 に対して、常温から最高使用温度より 50°C 高い温度である 350°C までの熱伝導率測定試験を実施 (n=3) した。熱伝導率について図 20-2 に示し、設定値を表 20-2 に示す。

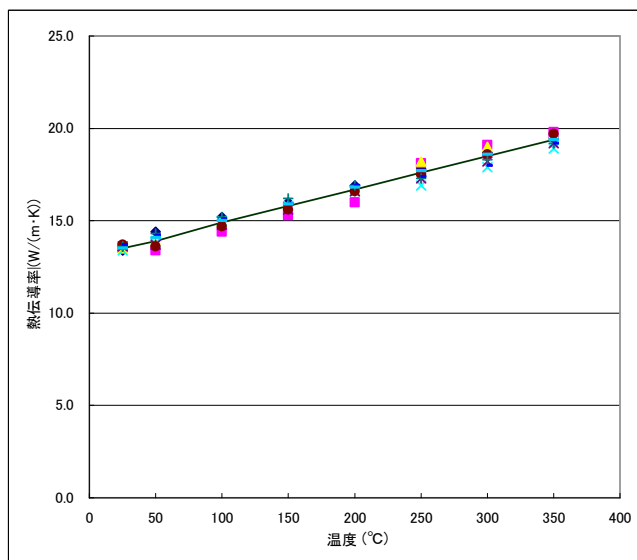


図 20-2 熱伝導率の温度依存性

表 20-2 本材料の熱伝導率設定値 (W/(m·K))

種 類	温 度 (°C)							
	室温	50	100	150	200	250	300	350
B-SUS304P-1 の熱伝導率	13.5	13.9	14.9	15.8	16.7	17.6	18.5	19.4
SUS304 の熱伝導率(参考)*	14.8	15.3	16.2	17.0	17.9	18.6	19.4	20.1

\* ASME Sec II, PartD TABLE TCD より 18Cr-8Ni の値

### 20.3 温度伝導率

温度伝導率については、標本 1~3 に対して、常温から最高使用温度より 50°C 高い温度である 350°C までの比熱測定試験を実施 (n=3) し、材料密度 7.8g/cm<sup>3</sup> として求めた。設定値を表 20-3 に示す。

表 20-3 本材料の温度伝導率設定値 (mm<sup>2</sup>/s)

種 類	温 度 (°C)							
	室温	50	100	150	200	250	300	350
B-SUS304P-1 の温度伝導率	3.67	3.77	3.89	3.99	4.11	4.14	4.23	4.35
SUS304 の温度伝導率(参考)*	3.90	3.94	4.04	4.14	4.24	4.35	4.46	4.57

\* ASME Sec II, PartD TABLE TCD より 18Cr-8Ni の値

### 20.4 縦弾性係数

標本 1~3 に対して、常温から最高使用温度より 50°C 高い温度である 350°C までの縦弾性係数測定試験を実施 (n=3) した。縦弾性係数について図 20-3 に示し、設定値を表 20-4 に示す。表 20-4 については、記載温度を設計・建設規格 付録材料図表 Part6 表 1 に合わせた。

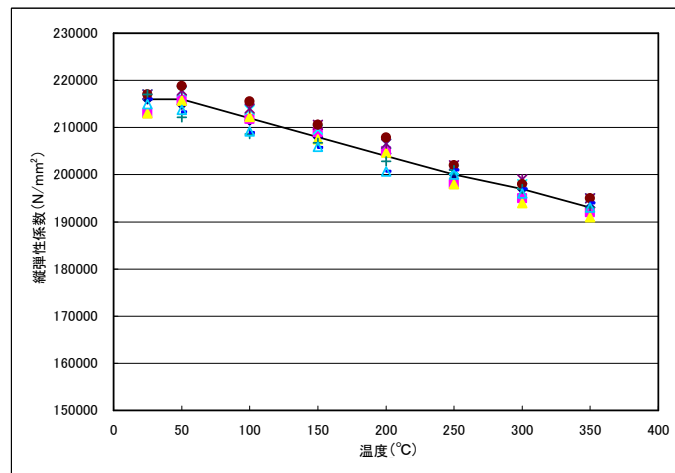


図 20-3 縦弾性係数の温度依存性

表 20-4 材料の各温度における縦弾性係数 (MPa)

種 類	温 度 (°C)													
	20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350
B-SUS304P-1 の縦弾性係数	216000	216000	214000	212000	210000	208000	206000	204000	202000	200000	199000	197000	195000	193000
SUS304 の縦弾性係数(参考)	195000	193000	191000	190000	188000	186000	184000	183000	180000	178000	177000	176000	174000	173000

## 20.5 ポアソン比

標本 1~3 に対して、常温から最高使用温度より 50°C 高い温度である 350°C までのポアソン比測定試験を実施 (n=3) した。ポアソン比について図 20-4 に示す。なお、ポアソン比はばらつきも小さく、設計に大きく影響しないことから、設定値としては常温から 300°C まで一定値 0.3 とする。

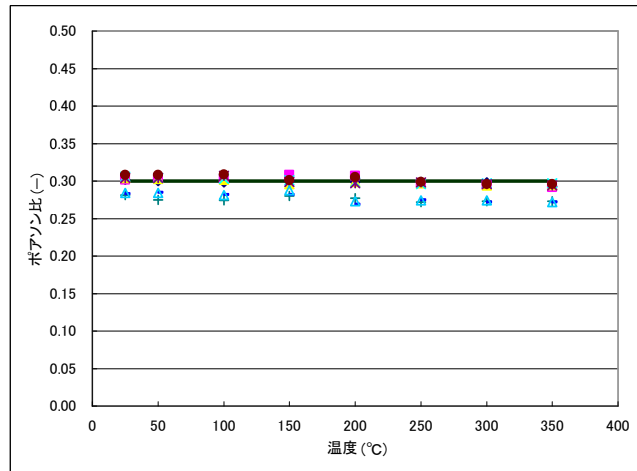


図 20-4 ポアソン比の温度依存性

## 21. 照射影響

B-SUS304P-1 の母材であるステンレス鋼は、従来から原子炉材料として広く使用されており、その機械的性質に及ぼす中性子照射の影響は良く知られている。ステンレス鋼は照射量の増加に伴い耐力及び引張強さが上昇し、伸びが低下するという照射影響が現れる<sup>(11)</sup>。

しかし、今回のバスケットの中性子による 60 年間の累積照射量は  $10^{15}$  n/cm<sup>2</sup> 程度と見積もられ、炉内における  $10^{21} \sim 10^{22}$  n/cm<sup>2</sup> の照射量に比べ極めて少ない量である。ステンレス鋼の機械的性質の変化が顕著に現れるのは  $10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> 程度からであり<sup>(12)</sup>、 $10^{15}$  n/cm<sup>2</sup> 程度では機械的性質にほとんど変化が無いものと考えられる。

一方、B-SUS304P-1 は、ほう素を一定量含有するという点においてステンレス鋼と異なっており、照射影響については  $^{10}\text{B}$  の (n,  $\alpha$ ) 反応による He の挙動を考慮しなければならない。金属内で生成した He はバブルとなって粒界に移動することにより金属の機械的性質に影響を及ぼすことになる。しかし、このような現象は「高温照射脆化」と呼ばれ、約 500°C 以上で著しくなることが知られている<sup>(13)</sup>。これに対し、バスケットの場合、すでに述べたとおり中性子照射量が低く、最高使用温度が 330 °C 以下であることから、高温照射脆化は起こらないと考えられる。これはほう素約 1 % を添加した B-SUS304P-1 の照射データからも確認することができる<sup>(14)</sup>、<sup>(15)</sup>。すなわち、ステンレス鋼の照射影響の程度と特段差がなく、 $10^{15}$  n/cm<sup>2</sup> 程度の中性子照射量においてはほとんど問題がないものと考えられる。

また、バスケットを 60 年間使用した場合の  $^{10}\text{B}$  の劣化量は、初期値の  $10^{-5}$  未満であり、核的な減損は無視できるため中性子吸収能力に変化はない。

したがって、バスケットに用いられる B-SUS304P-1 への照射影響は、中性子による 60 年間の累積照射量が少ないことより問題となることはない。



## 22. 引用文献

- (1) 山本定弘, 本田正春, 小林泰男, 崎山哲雄, 江平義博, 長嶺多加志, 「熱中性子遮蔽用ボロン含有ステンレス鋼板」, 火力原子力発電, Vol. 41, No. 9, pp. 1149-1157, (1990)
- (2) 日立製作所, 「沸騰水型原子力発電所 使用済燃料貯蔵ラックの使用材料としてのボロン添加ステンレス鋼について」, HLR-061, (1998)
- (3) 坪田基司, 及川誠, 「中性子遮蔽用ボロン添加ステンレス鋼板」, ふえらむ, Vol. 10, No. 12, pp. 25-27, (2005)
- (4) ステンレス協会編, 「ステンレス鋼便覧 第3版」, 日刊工業新聞社, (1995)
- (5) 加藤哲男, 藤倉正国, 市川二郎, 「原子力用含Bステンレス鋼の特性」, 電気製鋼, Vol. 49, No. 2, pp. 108-116, (1978)
- (6) 古谷俊直, 金井秀俊, 廣瀬豊, 「ボロン添加ステンレス鋼の材料特性に関する研究」, 火力原子力発電, Vol. 45, No. 11, pp. 1289-1296 (1994)
- (7) 武本敏彦, 山崎和信, 川合裕, 「熱中性子遮蔽用ボロン添加ステンレス鋼の開発」, までりあ, Vol. 35, No. 4, pp. 412-414 (1996)
- (8) 堂守生剛, 川内進司, 平沼健, 「輸送貯蔵キャスク用バスケット材ボロン添加ステンレス鋼板(B-SUS304P-1)の機械的特性」, 日本機械学会論文集(A編), Vol. 76, No. 772, pp. 1834-1836, (2010)
- (9) 宮井悠真, 保高剛, 二杉拓哉, 蓮沼将太, 小川武史, 「オーステナイト系ステンレス鋼の疲労き裂進展特性に及ぼすボロン添加の影響」, 材料, Vol. 65, No. 12, pp. 856-861, (2016)
- (10) 川内進司, 平沼健, 中根一起, 「金属キャスクバスケット用ボロン添加ステンレス鋼(B-SUS304P-1)の強度特性評価」, 日本機械学会 2019 年度年次大会, (2019)
- (11) H. R. Higgy and F. H. Hammad, 「EFFECT OF FAST-NEUTRON IRRADIATION ON MECHANICAL PROPERTIES OF STAINLESS STEELS: AISI TYPES 304, 316 AND 347」, Journal of Nuclear Materials, Vol. 55, No. 2, pp. 177-186, (1975)
- (12) ステンレス協会編, 「ステンレス鋼便覧 第2版」, 日刊工業新聞社, (1973)
- (13) 石野栞, 「照射損傷, 原子力工学シリーズ-8」, 東京大学出版会, (1979)
- (14) 日本原子力研究所材料試験炉部, 「JMTR 試用期間照射報告書 第4部ジルコニウム・その他材料」, JAERI-M-5648, (1974)
- (15) S. E. Soliman, D. L. Youchison, A. J. Baratta and T. A. Balliett, 「NEUTRON EFFECTS ON BORATED STAINLESS STEEL」, Nuclear Technology, Vol. 96, No. 3, pp. 346-352, (1991)

ほう素添加ステンレス鋼の破壊じん性に関する説明書

## 目 次

1. はじめに	1
2. 設計の考え方	1
3. 材料特性（破壊じん性）	1
3.1 破壊じん性試験	1
4. 許容欠陥寸法の評価	5
5. 引用文献	7

## 図表目次

表 1-1	シャルピー衝撃試験結果	2
表 1-2	時効後じん性確認試験条件と試験結果	3
図 1-1	時効後じん性確認試験の結果	4
図 1-2	許容欠陥寸法評価モデル及び評価式	5
図 1-3	想定欠陥深さと破壊じん性値 ( $K_0$ 値) との関係	6

## 1. はじめに

HDP-69B(B)型のバスケットプレートに適用するバスケットプレート用材料ほう素添加ステンレス鋼 (B-SUS304P-1) の破壊じん性に係る特性をまとめたものである。

## 2. 設計の考え方

HDP-69B(B)型は、使用済燃料を所定の幾何学的配置に維持するためのバスケット格子構造、及びバスケットプレートに添加された中性子吸収材により臨界に達することを防止する設計である。

バスケットプレートは、設計貯蔵期間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塑性変形しない、若しくは変形量をわずかに抑える設計であり、設計降伏点 ( $S_y$ ) を重視した設計としている。

## 3. 材料特性 (破壊じん性)

B-SUS304P-1 は、ほう素及びほう素化合物が介在物として材料中に分散している。これらの材料の破壊形態は、介在物を起点として延性破壊が進展するマイクロボイド合体型の延性破壊であり、脆性破壊ではない。しかし、ほう素を添加していない母材と比較して材料の伸びが小さくなり、この影響でじん性が低下する場合があるため、破壊じん性試験を行う。

### 3.1 破壊じん性試験

#### (1) シャルピー衝撃試験

##### (a) 試験条件

- ・ 供試材 : 補足説明資料 1 表 6-1 に示す標本 5~7 を対象とした。
- ・ 試験片 : JIS Z 2202 「金属材料衝撃試験片」 V ノッチシャルピー衝撃試験片を用いた。
- ・ 試験方法 : JIS Z 2242 「金属材料のシャルピー衝撃試験方法」による。
- ・ 試験温度 :  $-25^{\circ}\text{C}$
- ・ 記録 : 横棒出量及び衝撃値を測定した。

##### (b) 試験結果

表 1-1 にシャルピー衝撃試験結果を示す。各標本ごとの試験数は 3 とした。(社) 日本機械学会「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。) 表 MCM-2332-1 に示される、横膨出量の基準値は 0.50mm 以上であり、試験結果は基準値以下となる。しかしながら、本材料は SUS304 を母材としており、衝撃値は低いものの基本的には延性挙動を示す材料であるとともに脆性遷移を示さない材料である。

また、材料特性確認として、初期材及び長時間過時効熱処理材に対して、シャルピー衝撃試験を行った。試験条件と試験結果を表 1-2 に示し、これらを LMP で整理した結果を図 1-1 に示す。表 1-2 からわかるように、各温度とも 100hr までは非時効材と同程度

であった。また、図 1-1 に示すように、LMP で 300℃、60 年相当までじん性低下は見られない。

表 1-1 シャルピー衝撃試験結果

温度(℃)	試験片 No.	横膨出量(mm)	衝撃値(J/cm <sup>2</sup> )	備考
-25				
	平均値	0.24	23	9点の平均

□内は商業機密のため、非公開とします。

表 1-2 時効後じん性確認試験条件と試験結果

時効温度	時効時間 (hr)	衝撃値 (J/cm <sup>2</sup> )	横膨出量 (mm)
最低値			
		22	0.20

※：試験温度は全て-25℃で実施

□内は商業機密のため、非公開とします。

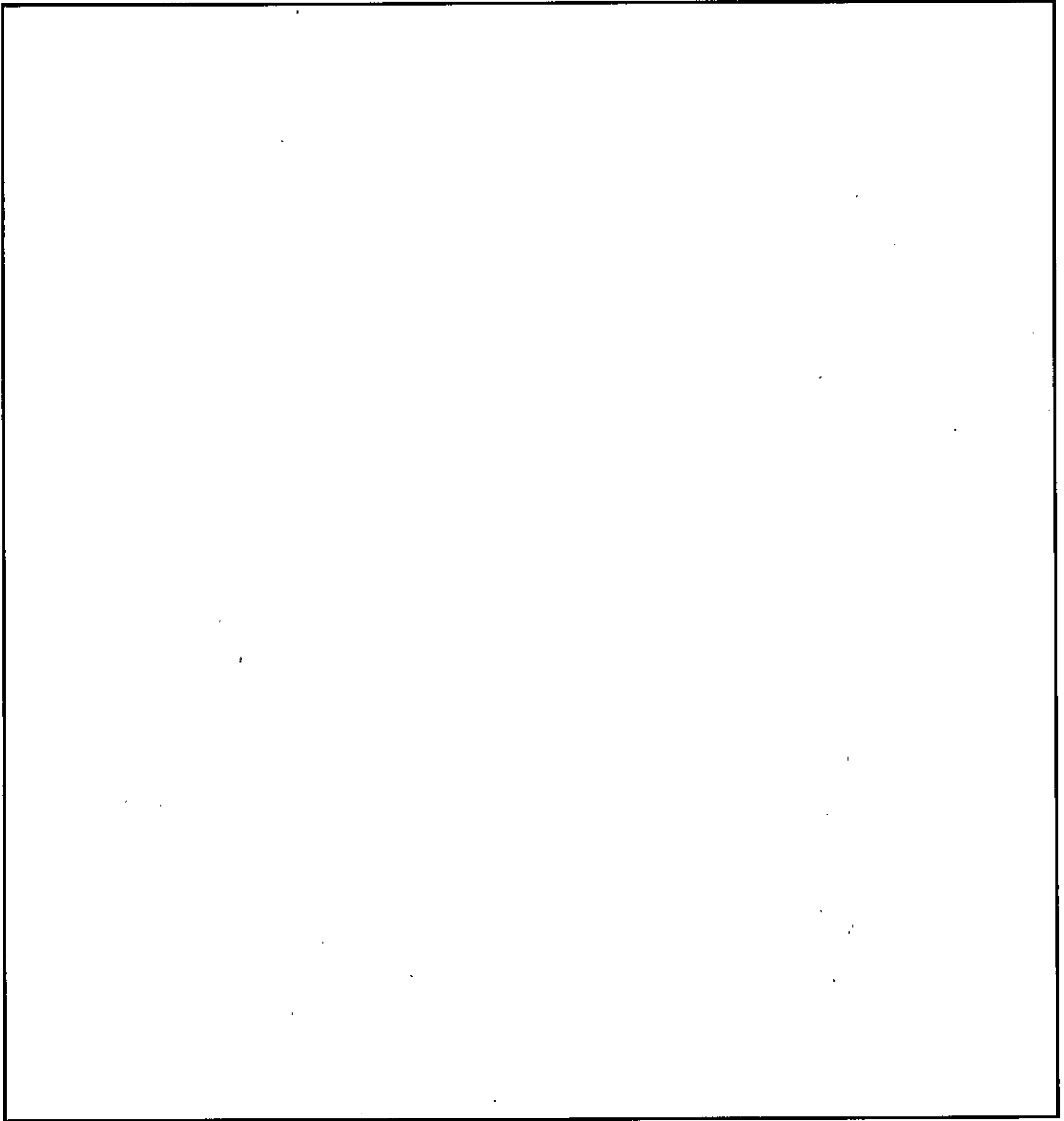


図 1-1 時効後じん性確認試験の結果

内は商業機密のため、非公開とします。



(2) 動的破壊じん性試験

(a) 試験条件

- ・ 供試材 : 補足説明資料 1 表 6-1 に示す標本 5~7 を対象とした。
- ・ 試験片 : ASTM E 1820-05a C(T)試験片を用いた。
- ・ 試験方法 : ASTM E 1820-05a による。
- ・ 試験温度 : -25℃
- ・ 応力拡大係数速度 : 300 MPa√m/s 以上
- ・ 記録 : K<sub>Q</sub> 値を測定した。

(b) 試験結果

補足説明資料 1 表 10-2 の動的破壊じん性試験結果より、K<sub>Q</sub> 値は 38 MPa√m 以上である。

4. 許容欠陥寸法の評価

B-SUS304P-1 に一様線状の欠陥を想定し、3.1 (2) に示す破壊じん性値を基に図 1-2 に示す方法により許容欠陥寸法評価を行った。図 1-3 に想定欠陥深さと破壊じん性値 (K<sub>Q</sub> 値) との関係を示す。

図 1-3 に示すとおり、想定欠陥深さは最大板厚 14mm では板厚の 3 分の 1 程度、最小板厚 5mm では板厚の 2 分の 1 程度まで許容される。当該ほう素添加ステンレス鋼が衝撃荷重負荷時の破断に対して大きな裕度を有している

B-SUS304P-1 は、補足説明資料 1 図 5-2 に示す品質管理を行っており、許容欠陥寸法を超えるような欠陥を含む材料を使用し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：仮想的に設計降伏点（S<sub>y</sub>=255 MPa）の曲げ応力を想定
- (c) 評価方法：図 1-2 に示す評価式

$$K = (F_m \sigma_m + F_b \sigma_b) \sqrt{\pi a}$$

$$\sigma_m = \frac{P}{2bt}, \quad \sigma_b = \frac{3M}{bt^2}$$

$$F_m = \sqrt{\frac{2t}{\pi a} \tan\left(\frac{\pi a}{2t}\right)} \frac{0.752 + 2.02 \frac{a}{t} + 0.37 \left[1 - \sin\left(\frac{\pi a}{2t}\right)\right]^3}{\cos\left(\frac{\pi a}{2t}\right)}$$

$$F_b = \sqrt{\frac{2t}{\pi a} \tan\left(\frac{\pi a}{2t}\right)} \frac{0.923 + 0.199 \left[1 - \sin\left(\frac{\pi a}{2t}\right)\right]^4}{\cos\left(\frac{\pi a}{2t}\right)}$$

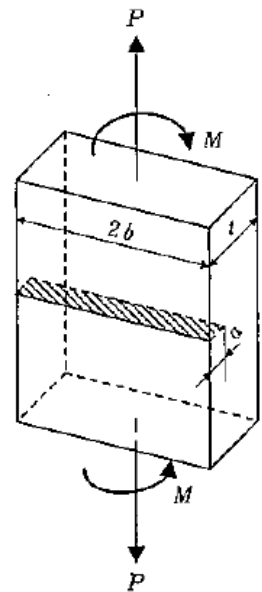


図 1-2 許容欠陥寸法評価モデル及び評価式 <sup>(1)</sup>

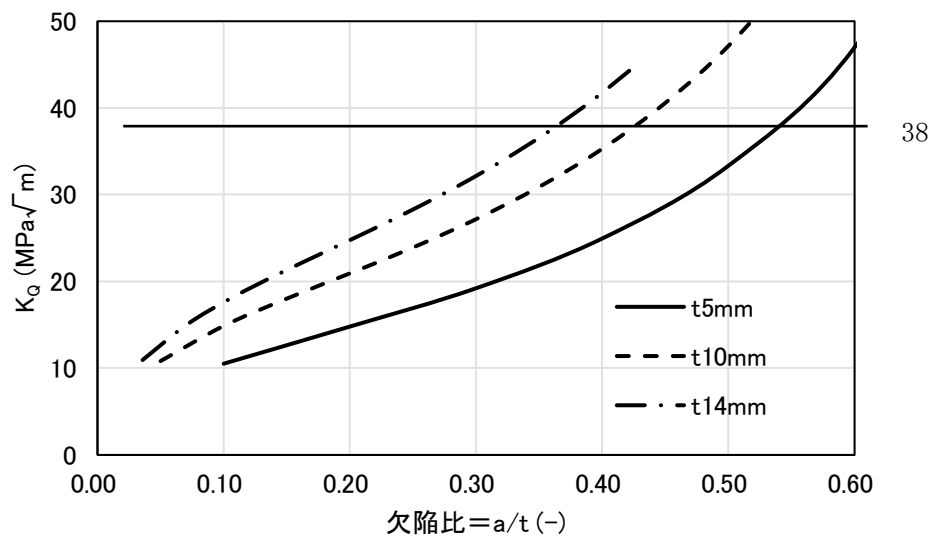


図 1-3 想定欠陥深さと破壊じん性値 ( $K_Q$  値) との関係

5. 引用文献

- (1) 小林英男ら, 「構造健全性評価ハンドブック」, 共立出版, (2005)