

| |
|------------------|
| リサイクル燃料備蓄センター設工認 |
| 設 2-補-006 |
| 2021 年 11 月 29 日 |

リサイクル燃料備蓄センター
設計及び工事の計画の変更認可申請書
(補足説明資料)

使用済燃料貯蔵設備本体の強度及び耐食性について
(BWR用大型キャスク (タイプ2A))

令和3年11月

リサイクル燃料貯蔵株式会社

目次

| | |
|---------------------------|----|
| 1. 概要 | 1 |
| 2. 金属キャスクの強度について | 1 |
| 2.1 密封容器の強度について | 1 |
| 2.2 バスケットの強度について | 16 |
| 2.3 トラニオンの強度について | 20 |
| 2.4 外筒及び中性子遮蔽材カバーの強度について | 30 |
| 2.5 使用済燃料被覆管の強度について | 33 |
| 3. 貯蔵架台の強度について | 36 |
| 3.1 最高使用温度について | 36 |
| 3.2 荷重の種類とその組合せについて | 37 |
| 3.3 代表事象の選定について | 37 |
| 3.4 評価応力の種類及び許容値基準について | 37 |
| 3.5 評価条件について | 38 |
| 4. ボロン添加ステンレス鋼について | 40 |
| 4.1 ボロン添加ステンレス鋼の材料特性について | 40 |
| 4.2 ボロン添加ステンレス鋼の破壊じん性について | 40 |

1. 概要

本資料は評価モデルの妥当性及び強度評価の方法（環境条件，代表事象の選定，考慮すべき荷重及び設計基準値）について補足し，金属キャスク及び貯蔵架台の強度及び耐食性についてより詳しく説明する。

なお，金属キャスク及び貯蔵架台の材料及び構造における評価について，既設工認で用いている評価手法（解析コードや公式計算）からの変更点はない。

2. 金属キャスクの強度について

2.1 密封容器の強度について

使用済燃料貯蔵施設規格（金属キャスク構造規格 J S M E S F A 1 - 2007）については，以下「構造規格」という。

2.1.1 基本仕様について

金属キャスクの最高使用温度及び最高使用圧力の算出方法を以下に示す。

(1) 最高使用温度

最高使用温度については，貯蔵時の熱解析結果から 10 °C ~ 20 °C 単位程度の余裕を持って設定する。設計値を第 2-1-1 表に示す。

第 2-1-1 表 (1/2) 密封容器の最高使用温度

| 評価部位 | 最高温度 評価結果 (除熱解析結果) | 最高使用温度 |
|------|--------------------------|--------|
| 底板 | 142 °C ^{注 1)} | 150 °C |

第 2-1-1 表 (2/2) 二次蓋の最高使用温度

| 評価部位 | 最高温度 評価結果 (除熱解析結果) | 最高使用温度 |
|------|--------------------------|--------|
| 二次蓋 | 97 °C ^{注 1)} | 110 °C |

注 1) 別紙 2-1-1 参照。

(2) 最高使用圧力

最高使用圧力については、密封容器の内外差圧と加圧排水時の圧力との比較で大きい値から余裕を持って設定する。設計値を第 2-1-2 表に示す。

第 2-1-2 表 (1/2) 密封容器の最高使用圧力

| 最高使用圧力 | 設定根拠 |
|---------|---|
| 1.0 MPa | 排水時の加圧圧力 (約 0.7 MPa ^{注 1)}) に余裕をみて設定。 側部中性子遮蔽材充填部圧力は <input type="text"/> MPa ^{注 1)} である。 |

第 2-1-2 表 (2/2) 二次蓋の最高使用圧力

| 最高使用圧力 | 設定根拠 |
|---------|---|
| 0.4 MPa | 蓋間への He 充填圧力 (0.41 MPa abs ^{注 1)}) に余裕をみて設定 |

※0.41 MPa abs = 0.3087 MPa gage

注 1) 別紙 2-1-2 参照。

2.1.2 荷重の種類とその組合せについて

構造規格 3-解説 MCD-1, 2 を参考に選定^{注1)}した。

「その他の付加荷重」とは、内圧、熱荷重、自重、衝撃力を除いた荷重で、地震による荷重、ボルト初期締付け力、吊上げ荷重、固縛力を示している。構造規格では、応力の分類として大きく熱荷重とそれ以外（内圧, 外荷重, ボルト締付け力等）に分けている。構造規格は、構造規格 1-解説 MGB-13 のように構造部位によって各荷重の種類で生じる応力の分類が変わる規格となっているため、このような記載としている。

注 1) 別紙 2-1-3 参照。

2.1.3 代表事象の選定について

代表事象と包絡される事象の関係を第2-1-3表に示す。

供用状態Aについて、密封容器に作用する加速度が大きく、吊上げ時が台車搬送時及び準備作業時よりも荷重条件が厳しいため、代表事象とする。

供用状態Bについて、作用する加速度が大きく、貯蔵架台への衝突時が搬送中の急停止時よりも荷重条件が厳しいため、代表事象とする。

第2-1-3表 代表事象と包絡される事象の関係

| 評価部位 | 設計事象 | 供用状態 | 代表事象 | 包絡される事象 | 備考 |
|------|------|------|-----------|----------------|---|
| 密封容器 | I | A | 吊上げ時 | 台車搬送時 準備作業時 | 準備作業時には1G（自重）作用する。 台車搬送時に発生する加速度は0.04G ^{注1)} 以下である。 吊上げ時には、自重を考慮し1.3G ^{注1)} 作用する。 |
| | II | B | 貯蔵架台への衝突時 | 搬送中の急停止時 | 搬送中の急停止時に発生する加速度は0.055G ^{注1)} 以下である。 貯蔵架台への衝突時には、自重を考慮し5G ^{注1)} 作用する。 |

注1) 第2-1-4表より。

2.1.4 金属キャスクに作用する加速度について

受入れ区域天井クレーンにおける巻上定格速度 1.5m/分で吊上げあるいは支持脚、貯蔵架台に衝突した場合を想定して算出した値から余裕を持って設定する。第2-1-4表に加速度を示す。

第2-1-4表 各事象における金属キャスクに作用する加速度

| 事象 | 加速度 | 設定根拠 |
|-----------|--------|---|
| 吊上げ時 | 1.3G | クレーン構造規格の負荷係数から算出した結果(1.188)に余裕をみて設定。 |
| 支持脚への衝突時 | 2.5G | 解析から得られた結果()G)に余裕をみて設定。 |
| 貯蔵架台への衝突時 | 5G | 解析から得られた結果は()Gであるが、一般の試験条件の加速度(約25~45G)が大きいため、5Gとする。 |
| 搬送中の急停止時 | 0.055G | 実規模実証試験から得られた結果 |
| 台車搬送時 | 0.04G | 実規模実証試験から得られた結果 |

(1) 吊上げ時

負荷係数 = 衝撃係数 × 作業係数 で求められる。

クレーン構造規格第十一条のその他のクレーンの場合^{注1)}より、

衝撃係数： $\Psi = 1 + 0.6v$ ただし 1.10 未満の場合は 1.10

作業係数：1.08

ただし、

・荷重を受ける回数： 6.3×10^4 回未満

回数については、

- ① 車両から仮置架台への移動
- ② 仮置架台からたて起こし架台への移動
- ③ たて起こし
- ④ たて起こし架台から貯蔵架台への移動

$4 \text{ 回} \times 2 \text{ (搬出入)} \times 300 \text{ (基)} = 2.4 \times 10^3 \text{ 回}$

輸送回数が仮に 10 回としても 2.4×10^4 回となり 6.3×10^4 回

を下回る。

・常態として定格荷重の 80%以上の荷重の荷を吊るクレーン

・巻上定格速度 $v : 1.5 \text{ m/min} = 0.025 \text{ m/s}$

よって、負荷係数 = 1.188

(2) 支持脚への衝突時

加速度は、金属キャスクを剛体とし、金属キャスクの運動エネルギー及び位置エネルギーが支持脚に弾性変形エネルギーとして全て吸収されるとすると、以下のように求められる。

垂直方向にキャスクが速度 v で衝突し、支持脚が変形して運動が停止したときの金属キャスクのエネルギーと支持脚の変形エネルギーは次式で表される。

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + m \cdot G \cdot \delta = \frac{1}{2} \cdot k \cdot \delta^2$$

ここで、 m : 金属キャスク質量 ($1.2 \times 10^5 \text{ kg}$)

v : 金属キャスクの吊下ろし速度 (0.025 m/s)

・吊下ろし速度は、(1)の巻上定格速度とする。

G : 重力加速度 (9.80665 m/s^2 注 2))

δ : 支持脚の変形量 (m)

k : 支持脚のばね定数 (N/m)

・ばね定数については支持脚の縦弾性係数から算出^{注 3)}

上式について、支持脚の変形量 δ について解くと、以下となる。

$$\delta = \frac{m \cdot G + \sqrt{m^2 \cdot G^2 + k \cdot m \cdot v^2}}{k}$$

また、金属キャスクに作用する加速度は次式で表される。

$$\alpha = F / m$$

$$F = k \cdot \delta$$

したがって、

$$\alpha = \left(1 + \sqrt{1 + \frac{k \cdot v^2}{m \cdot G^2}} \right) \cdot G$$

よって、 $\alpha = \boxed{} G$

(3) 貯蔵架台への衝突時

加速度は、金属キャスクを剛体とし、金属キャスクの運動エネルギー及び位置エネルギーが貯蔵架台に弾性変形エネルギーとして全て吸収されるとすると、(2)と同様に以下の式で求められる。

$$\alpha = \left(1 + \sqrt{1 + \frac{k \cdot v^2}{m \cdot G^2}} \right) \cdot G$$

ただし、 m : 金属キャスク質量 (1.2×10^5 kg)

v : 金属キャスクの吊下ろし速度 (0.025 m/s)

・吊下ろし速度は、(1)の巻上定格速度とする。

G : 重力加速度 (9.80665 m/s²)

k : 貯蔵架台のばね定数 $\boxed{}$ N/m)

・ばね定数については貯蔵架台のたわみ計算から算出^{注4)}

よって、 $\alpha = \boxed{} G$

注 1) 令和元年厚生労働省告示第四八号 クレーン構造規格(令和元年6月28日改正)

注 2) JIS B 0153 : 2001, “機械振動・衝撃用語”

注 3) 別紙 2-1-4 参照。

注 4) 別紙 2-1-5 参照。

2.1.5 評価応力の種類及び許容値基準について

評価応力の種類及び許容値基準については構造規格 3-解説 MCD-5, 6 より設定した。(許容応力値については構造規格別表参照)

2.1.6 密封容器の解析モデルについて

各モデルの補足説明を次頁以降に示す。

2.1.7 貯蔵時と吊上げ時の金属キャスクの質量について

貯蔵時と吊上げ時の金属キャスクの質量の比較を第 2-1-5 表に示す。

第 2-1-5 表 貯蔵時と吊上げ時の金属キャスクの質量の比較

| 部位 | 貯蔵時 | 吊上げ時 |
|-------|-----------|-----------|
| 本体 | 118300 kg | 118300 kg |
| 三次蓋 | — | 1900 kg |
| 保護カバー | ※1 | ※2 |
| 合計 | 118300 kg | 120200 kg |

※1：本体に含まれる。

※2：実際には保護カバーはつけていないが，本体に含めている。



[設計時]

(1) 組合せる荷重条件

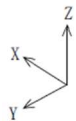
組合せる荷重は、以下とする。

最高使用圧力 + ボルト初期締付け力 + 貯蔵架台への衝突時荷重

(2) 吊上げ状態から密封容器下面（脚部）と衝突する事象である。

(3) ボルト初期締付け力について

- (a) 一次蓋締付けボルト及び二次蓋締付けボルトに生じる応力は、内圧による荷重とガスケット反力を負担するものによる。
- (b) カバープレートには、内圧により円板全体に等分布荷重が作用する。
- (c) カバープレート締付けボルトには、一次蓋締付けボルトと同様の応力が作用する。



第2-1-1図 密封容器及び二次蓋の解析モデル（設計時）

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

[貯蔵時]

(1) 組合せる荷重条件

組合せる荷重は、以下とする。

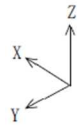
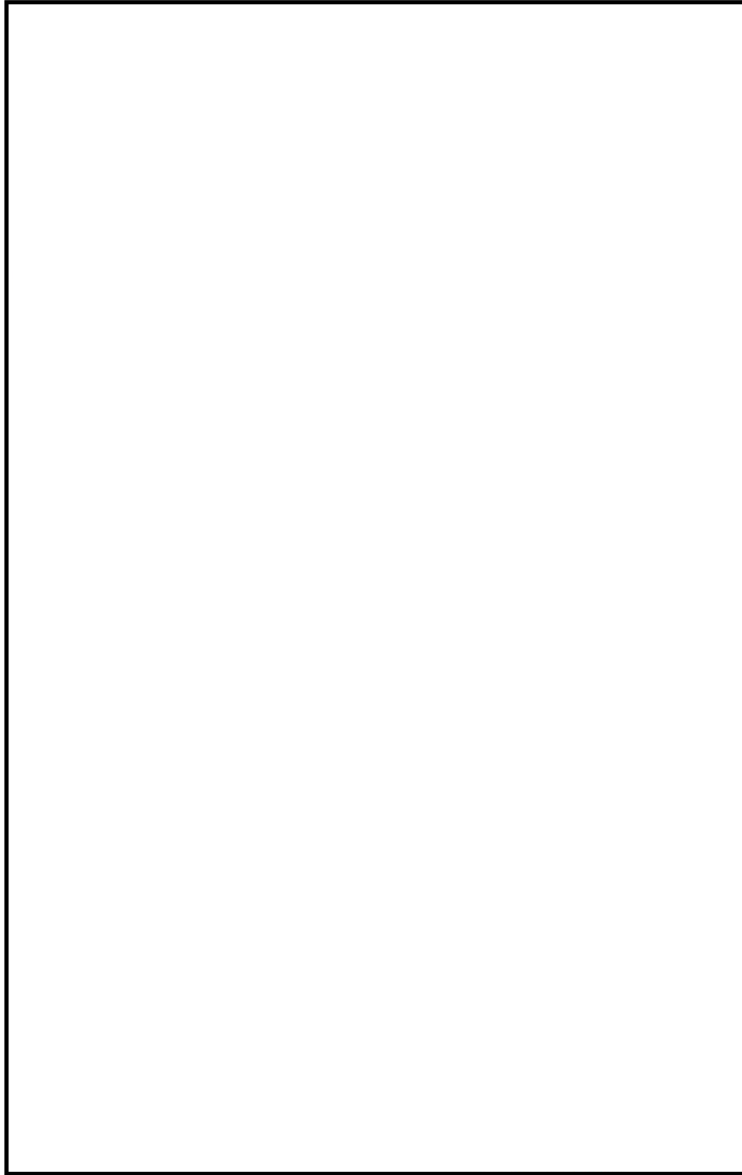
密封容器内圧力^{注1)}(-0.101325 MPa) + 蓋間圧力^{注1)}(0.4 MPa)
+ 蓋部レジン充填部圧力^{注1)}(MPa) + 側部レジン充填部
圧力^{注1)}(MPa) + 底部レジン充填部圧力^{注1)}(MPa) +
ボルト初期締付け力 + 自重 + 熱荷重

(2) 下部トラニオン 4 個で貯蔵架台に固縛された事象である。

(3) カバープレート及びカバープレート締付けボルトの荷重負担の
考え方は、設計時と同様である。ただし、作用する圧力は内圧、
蓋間圧力ともに設計時より低い。

(4) バスケットと底板の接触面でバスケット平均支圧応力を受ける。

注 1) 別紙 2-1-2 参照。



第 2-1-2 図 密封容器及び二次蓋の解析モデル (貯蔵時)

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

[吊上げ時]

(1) 組合せる荷重条件

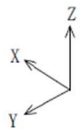
組合せる荷重は、以下としている。

密封容器内圧力^{注1)} (-0.101325 MPa) + 蓋間圧力^{注1)} (0.4 MPa)
+ 蓋部レジン充填部圧力^{注1)} () MPa + 側部レジン充填部圧力^{注1)} () MPa + 底部レジン充填部圧力^{注1)} () MPa + ボルト初期締付け力 + 吊上げ荷重 (自重含む。) + 熱荷重

(2) 上部トラニオン 2 個で吊上げる事象である。

(3) バスケットと底板の接触面でバスケット平均支圧応力を受ける。

注 1) 別紙 2-1-2 参照。



第 2-1-3 図 密封容器及び二次蓋の解析モデル (吊上げ時)

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

[支持脚への衝突時]

(1) 組合せる荷重条件

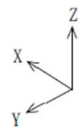
組合せる荷重は、以下とする。

密封容器内圧力^{注1)} (-0.101325 MPa) + 蓋間圧力^{注1)} (0.4 MPa)
+ 蓋部レジン充填部圧力^{注1)} () MPa + 側部レジン充填部
圧力^{注1)} () MPa + 底部レジン充填部圧力^{注1)} () MPa +
ボルト初期締付け力 + 支持脚への衝突時荷重 (自重含む。)
+ 熱荷重

(2) 吊上げ状態から下部トラニオン 2 個と支持脚が衝突する事象である。

(3) バスケットと底板の接触面でバスケット平均支圧応力を受ける。

注 1) 別紙 2-1-2 参照。



第 2-1-4 図 密封容器及び二次蓋の解析モデル (支持脚への衝突時)

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

[貯蔵架台への衝突時]

(1) 組合せる荷重条件

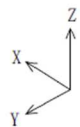
組合せる荷重は、以下とする。

密封容器内圧力^{注1)} (-0.101325 MPa) + 蓋間圧力^{注1)} (0.4 MPa)
+ 蓋部レジン充填部圧力^{注1)} () MPa + 側部レジン充填部
圧力^{注1)} () MPa + 底部レジン充填部圧力^{注1)} () MPa +
ボルト初期締付け力 + 貯蔵架台への衝突時荷重 (自重含む。)
+ 熱荷重

(2) 吊上げ状態から密封容器下面 (脚部) と貯蔵架台が衝突する事象
である。

(3) バスケットと底板の接触面でバスケット平均支圧応力を受ける。

注1) 別紙2-1-2 参照。



第2-1-5図 密封容器及び二次蓋の解析モデル (貯蔵架台への衝突時)

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

[試験時]

(1) 組合せる荷重条件

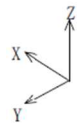
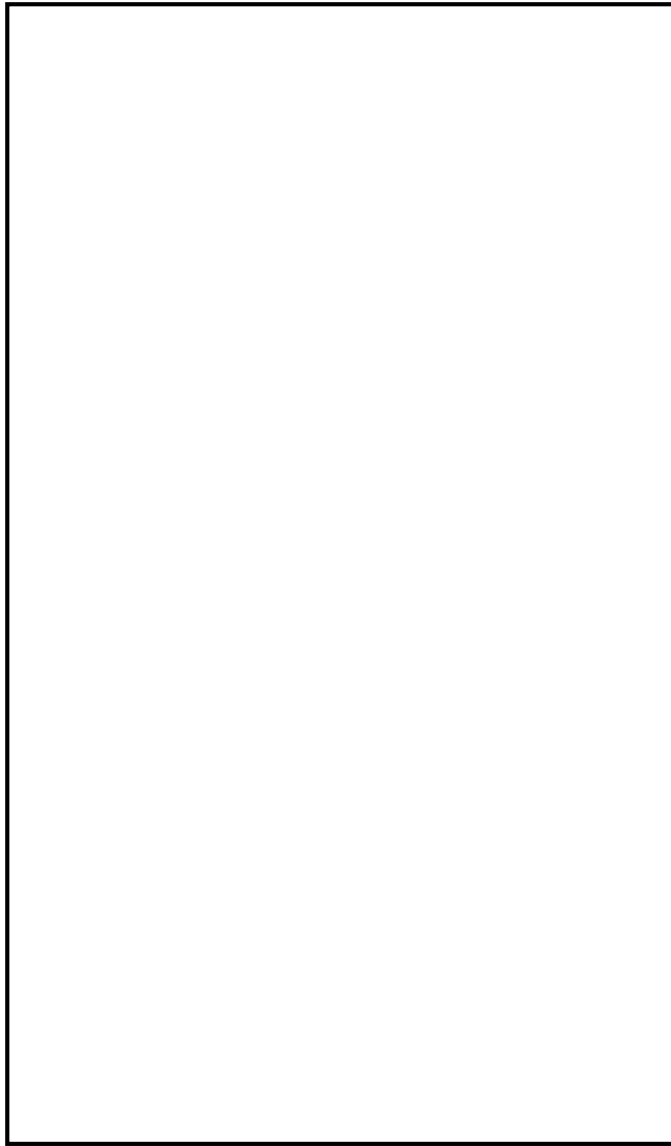
組合せる荷重は、以下とする。

密封容器内圧力^{注1)} (1.25 MPa) + ボルト初期締付け力 + 自重

(2) 工場での耐圧・漏えい試験時を想定した事象である。温度は常温 (20 °C) とする。

(3) カバープレート及びカバープレート締付けボルトの荷重負担の考え方は、設計時と同様である。

注 1) 別紙 2-1-2 参照



第 2 - 1 - 6 図 密封容器及び二次蓋の解析モデル (試験時)

2.2 バスケットの強度について

発電用原子力設備規格（設計・建設規格 JSME S NC 1-2005）（2007追補版を含む。）については、以下「設計・建設規格」という。

2.2.1 最高使用温度等基本仕様について

最高使用温度については、貯蔵時の熱解析結果から 20℃ 単位の余裕を持って設定する。設計値を第 2-2-1 表に示す。その他バスケットに関する応力計算の基本仕様を第 2-2-2 表に示す。

第 2-2-1 表 バスケットの最高使用温度

| 評価部位 | 最高温度 評価結果 (除熱解析結果) | 最高使用温度 |
|-------|--------------------------|--------|
| バスケット | 248℃ ^{注 1)} | 260℃ |

第 2-2-2 表 バスケットの基本仕様

| | |
|--------------|---|
| バスケットプレートの材質 | ボロン添加ステンレス鋼 (B-SUS304P-1) |
| バスケットプレートの密度 | $7.93 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ ^{注 2)} |

注 1) 別紙 2-2-1 参照。

注 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。

2.2.2 荷重の種類とその組合せについて

構造規格 3-解説 MCD-8 を参考に選定^{注 1)}した。

注 1) 別紙 2-2-2 参照。

2.2.3 代表事象の選定について

代表事象と包絡される事象の関係を第2-2-3表に示す。

供用状態A及びBについて，作用する加速度が大きく，貯蔵架台への衝突時が他の事象よりも荷重条件が厳しいため，代表事象とする。

第2-2-3表 代表事象と包絡される事象の関係

| 評価部位 | 設計事象 | 供用状態 | 代表事象 | 包絡される事象 | 備考 |
|-------|---------------|--------------|-----------|---|---|
| バスケット | I 及び II | A 及び B | 貯蔵架台への衝突時 | 貯蔵時 吊上げ時 台車搬送時 準備作業時 支持脚への衝突時 搬送中の急停止時 | 貯蔵時，準備作業時には1G ^{注1)} (自重)作用する。 台車搬送時に発生する加速度は0.04G ^{注1)} 以下である。 吊上げ時には，自重を考慮し1.3G ^{注1)} 作用する。 支持脚への衝突時には，自重を考慮し2.5G ^{注1)} 作用する。 搬送中の急停止時に発生する加速度は0.055G ^{注1)} 以下である。 貯蔵架台への衝突時には，自重を考慮し5G ^{注1)} 作用する。 |

注1) 2.1 密封容器の強度について 第2-1-3表及び第2-1-4表より。

2.2.4 金属キャスクに作用する加速度について

作用する加速度の考え方は「添付 10-2-2-1 密封容器の応力計算書(BWR用大型キャスク(タイプ2A))」と同様である。

2.2.5 評価応力の種類及び許容値基準について

評価応力の種類及び許容値基準については、構造規格 3-解説 MCD-10, 11 より設定した。許容応力値については構造規格別表及び事例規格参照。

2.2.6 材料の S_u 値の算出について

強度部材の S_u 値については構造規格に基づき、設計・建設規格 2005/2007年版の付録材料図表を参照している。

バスケットに使用する材料については、「添付 10-1 別紙 2 ボロン添加ステンレス鋼板の材料特性について」による。

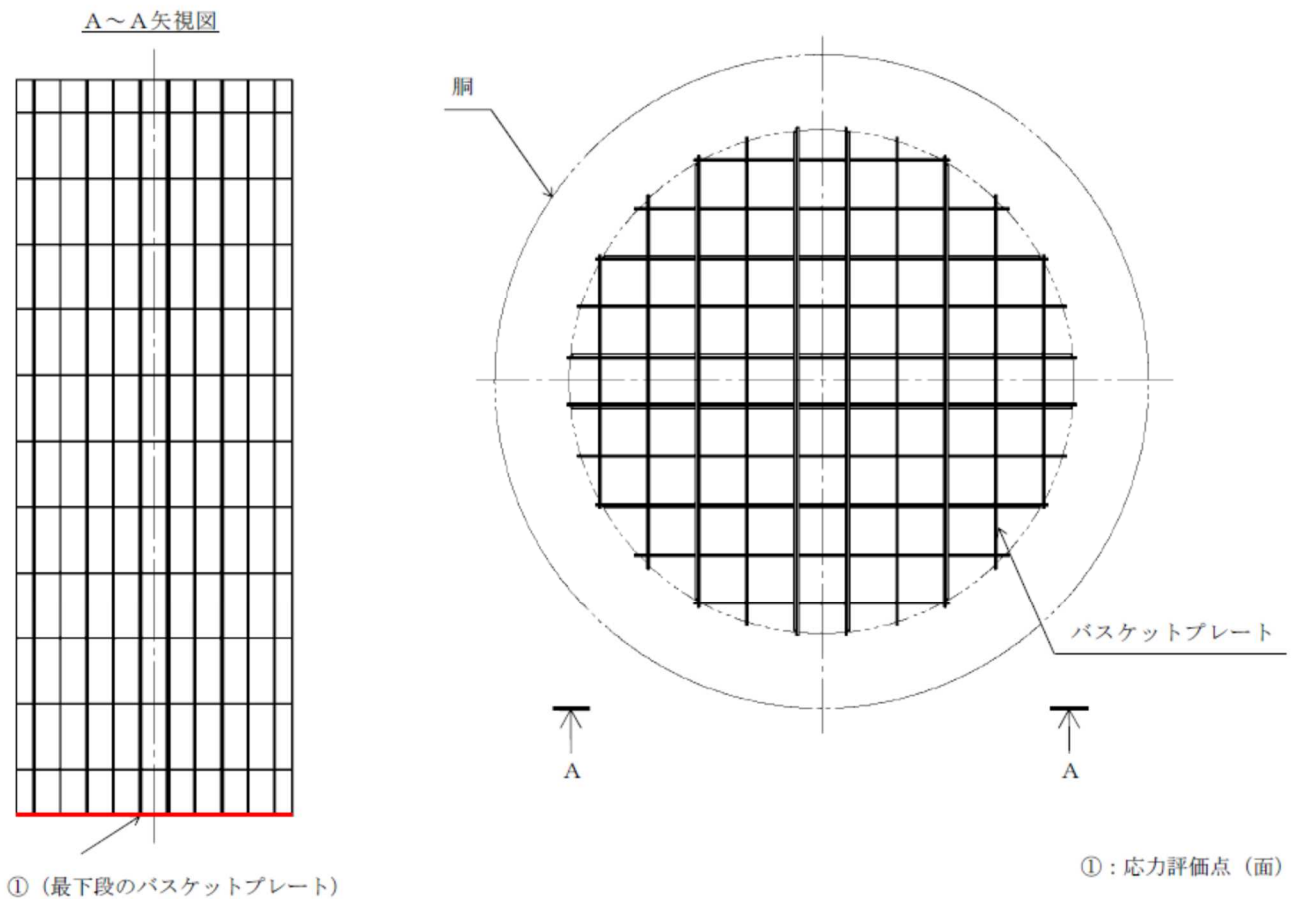
2.2.7 熱応力について

バスケットプレート間及びバスケットプレートと胴の嵌合部には、熱膨張を考慮してギャップを設けている。また、バスケットプレートには熱衝撃に代表される過酷な温度勾配は生じない。以上より、著しい熱応力は発生しないと考える。

2.2.8 応力評価点の選定について

鉛直方向荷重を考慮すると、応力評価点①に最大の圧縮応力が発生するため、評価点①を選定している。

バスケットは対称形になっているため、以上の評価点で評価する。



第 2-2-1 図 バスケットの応力解析箇所

2.3 トラニオンの強度について

2.3.1 最高使用温度について

最高使用温度については、貯蔵時の熱解析結果から 10℃単位程度の余裕を持って設定する。設計値を第 2-3-1 表に示す。

第 2-3-1 表 トラニオンの最高使用温度

| 評価部位 | 最高温度 評価結果 (除熱解析結果) | 最高使用温度 |
|-------|--------------------------|--------|
| トラニオン | 120℃ ^{注 1)} | 130℃ |

注 1) 別紙 2-3-1 参照。

2.3.2 荷重の種類とその組合せについて

構造規格 3-解説 MCD-14 を参考に選定^{注 1)}した。吊上げ時は他の強度計算書と同様に、供用状態 A の通常取扱い時とする。

注 1) 別紙 2-3-2 参照。

2.3.3 代表事象の選定について

代表事象と包絡される事象の関係を第2-3-2表に示す。

供用状態Aについて、台車搬送時には $0.04G$ ^{注1)}以下の加速度が作用するが、(1)に示すように、慣性力による荷重は初期締付け力(1.3×10^6 N)と比較して小さく、また、貯蔵時は供用状態Aの事象の中で大半の期間を占めるため、ここでは貯蔵時を代表事象とする。

供用状態Bについて、(2)及び(3)に示すように、支持脚への衝突時は、貯蔵架台への衝突時よりもトラニオンに作用する荷重が大きくなるため、支持脚への衝突時を代表事象とする。

(1) 台車搬送時における慣性力による荷重

トラニオンの質量による慣性力をトラニオンで受けることから、トラニオン1本当たりに作用する荷重Fを概算すると

$$F = M_t \times G_1$$

ここで、

- ・トラニオンの付け根から先端までの質量： $M_t = 70$ kg
- ・加速度： $G_1 = 0.04 \times 9.80665$ m/s²^{注2)}

よって、 $F = 2.75 \times 10^1$ N

(2) 支持脚への衝突時

金属キャスクの質量をトラニオン2本で受けることから、トラニオン1本当たりに作用する荷重Fを概算すると

$$F = M_c \times G_2 / 2$$

ここで、

- ・金属キャスクの質量： $M_c = 1.2 \times 10^5$ kg
- ・加速度： $G_2 = 2.5 \times 9.80665$ m/s²

よって、 $F = 1.47 \times 10^6$ N

(3) 貯蔵架台への衝突時

トラニオンの質量による慣性力をトラニオンで受けることから、トラニオン1本当たりに作用する荷重Fを概算すると

$$F = M_t \times G_3$$

ここで、

・トラニオンの付け根から先端までの質量： $M_t = 70 \text{ kg}$

・加速度： $G_3 = 5 \times 9.80665 \text{ m/s}^2$

よって、 $F = 3.43 \times 10^3 \text{ N}$

第 2-3-2 表 代表事象と包絡される事象の関係

| 評価部位 | 設計事象 | 供用状態 | 代表事象 | 包絡される事象 | 備考 |
|-------|------|------|-------------------------|-----------------------|---|
| トラニオン | I | A | 貯蔵時 | 準備作業時 台車搬送時 | 準備作業時及び貯蔵時には $1G^{\text{注1)}}$ (自重) 作用する。 台車搬送時に発生する加速度は $0.04G^{\text{注1)}}$ 以下である。 |
| | II | B | 支持脚への衝突時 ^{注3)} | 貯蔵架台への衝突時 搬送中の急停止時 | 貯蔵架台への衝突時には、自重を考慮し $5G^{\text{注1)}}$ 作用する。 搬送中の急停止時に発生する加速度は $0.055G^{\text{注1)}}$ 以下である。 支持脚への衝突時には、自重を考慮し $2.5G^{\text{注1)}}$ 作用する。 |

注 1) 2.1 密封容器の強度について 第 2-1-3 表及び第 2-1-4 表より。

注 2) JIS B0153 : 2001 機械振動・衝撃用語より。

注 3) トラニオンに直接荷重が作用する事象から代表事象を選定。

2.3.4 金属キャスクに作用する加速度について

作用する加速度の考え方は「2.1 密封容器の強度について」と同様である。

2.3.5 評価応力の種類及び許容値基準について

評価応力の種類及び許容値基準のまとめについては構造規格 3-解説 MCD-16, 17 ^{注1)} 参照。許容応力値については構造規格別表参照。

注1) 別紙 2-3-3 参照。

2.3.6 応力評価点について

(1) 上部トラニオン

上部トラニオンの吊上げ時のせん断応力，曲げ応力はともに評価点①'と比較して評価点①の方が大きくなるため，評価点①を選定している。

せん断応力は，作用する荷重が同じ場合，断面積が小さい評価点の方が大きくなることから，評価点①の断面積 A_1 と評価点①'の断面積 $A_{1'}$ を比較する。それぞれの評価点の断面積は次式で求められる。

$$A_1 = \frac{\pi}{4} \times (D_{o1}^2 - D_{i1}^2)$$

$$A_{1'} = \frac{\pi}{4} \times (D_{o1'}^2 - D_{i1'}^2)$$

ここで，

・評価点①の外径： $D_{o1} = 200$ mm

・評価点①の内径： $D_{i1} = \boxed{}$ mm

・評価点①'の外径： $D_{o1'} = 260$ mm

・評価点①'の内径： $D_{i1'} = \boxed{}$ mm

よって， $A_1 = \boxed{}$ mm²， $A_{1'} = \boxed{}$ mm²となり，評価点①の方がせん断応力は大きくなる。

曲げ応力は，作用する荷重が同じ場合，(断面係数) / (荷重作用点までの距離) が小さい評価点の方が大きくなることから，評価点①の(断面係数 Z_1) / (荷重作用点までの距離 L_1) と評価点①'の(断面係数 $Z_{1'}$) / (荷重作用点までの距離 $L_{1'}$) を比較する。それぞれの評価点の断面係数は次式^{注1)}で求められる。

$$Z_1 = \frac{\pi}{32} \times \frac{(D_{o1}^4 - D_{i1}^4)}{D_{o1}}$$

$$Z_{1'} = \frac{\pi}{32} \times \frac{(D_{o1'}^4 - D_{i1'}^4)}{D_{o1'}}$$

よって、 $Z_1 = \boxed{} \text{ mm}^3$ 、 $Z_{1'} = \boxed{} \text{ mm}^3$

ここで、吊上げ時の荷重作用点までの距離は、

- ・評価点①の荷重作用点までの距離： $L_1 = 150 \text{ mm}$
- ・評価点①'の荷重作用点までの距離： $L_{1'} = 290 \text{ mm}$

よって、 $Z_1 / L_1 = \boxed{} \text{ mm}^2$ 、 $Z_{1'} / L_{1'} = \boxed{} \text{ mm}^2$ となり、評価点①の方が曲げ応力は大きくなる。

(2) 下部トラニオン

下部トラニオンの貯蔵時のせん断応力、曲げ応力はともに評価点③と比較して評価点②の方が大きくなるため、評価点②を選定している。

せん断応力の大小は、吊上げ時と同様に、評価点②の断面積 A_2 と評価点③の断面積 A_3 を比較する。評価点②、③の断面積はそれぞれ上部トラニオンの評価点①、①'と同じであることから、 $A_2 = \boxed{} \text{ mm}^2$ 、 $A_3 = \boxed{} \text{ mm}^2$ となり、評価点②の方がせん断応力は大きくなる。

曲げ応力の大小は、吊上げ時と同様に、評価点②の（断面係数 Z_2 ）／（荷重作用点までの距離 L_2 ）と評価点③の（断面係数 Z_3 ）／（荷重作用点までの距離 L_3 ）を比較する。評価点②、③の断面係数はそれぞれ上部トラニオンの評価点①、①'と同じであることから、 $Z_2 = \boxed{} \text{ mm}^3$ 、 $Z_3 = \boxed{} \text{ mm}^3$ となる。

ここで、貯蔵時の荷重作用点までの距離は、

- ・評価点②の荷重作用点までの距離： $L_2 = 90 \text{ mm}$
- ・評価点③の荷重作用点までの距離： $L_3 = 227 \text{ mm}$

よって、 $Z_2 / L_2 = \boxed{} \text{ mm}^2$ 、 $Z_3 / L_3 = \boxed{} \text{ mm}^2$ となり、評価点②の方が曲げ応力は大きくなる。

支持脚への衝突時のせん断応力は、評価点③と比較して評価点②の方が大きくなるため、評価点②を選定しており、曲げ

応力は、評価点②と比較して評価点③の方が大きくなるため、評価点③を選定している。

せん断応力の大小は、貯蔵時と同じであり、評価点②の方がせん断応力は大きくなる。

曲げ応力は、貯蔵時と同様であるが、荷重作用点までの距離が以下となる。

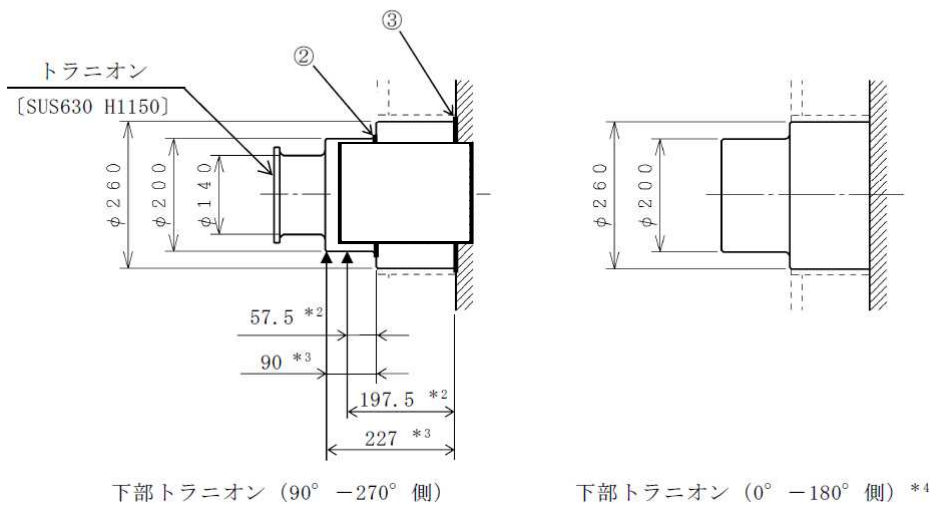
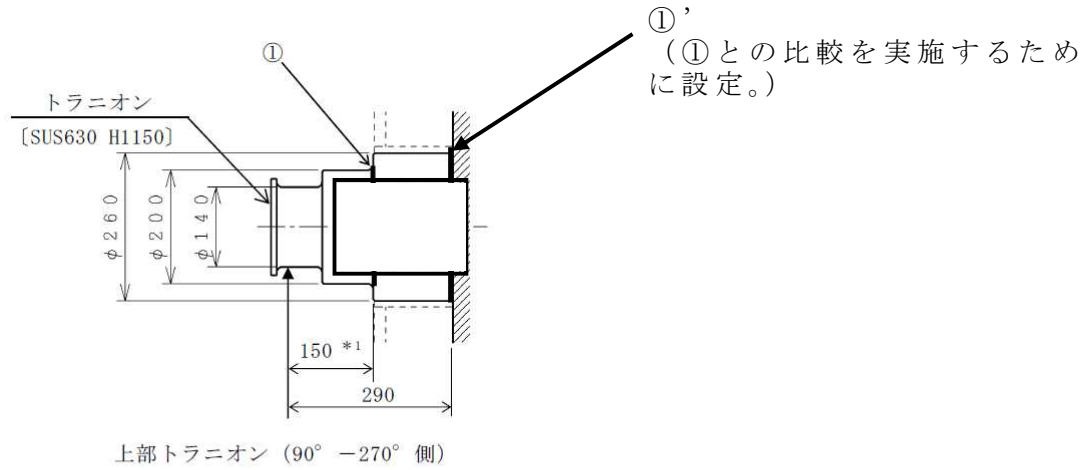
・評価点②の荷重作用点までの距離： $L_2 = 57.5 \text{ mm}$

・評価点③の荷重作用点までの距離： $L_3 = 197.5 \text{ mm}$

よって、 $Z_2 / L_2 = \boxed{} \text{ mm}^2$ 、 $Z_3 / L_3 = \boxed{} \text{ mm}^2$ となり、評価点③の方が曲げ応力は大きくなる。

注1) 日本機械学会：機械工学便覧 A4 材料力学基礎編 新版より。

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。



- 注記 *1: 吊上げ時の荷重作用点までの距離
*2: 支持脚への衝突時の荷重作用点までの距離
*3: 貯蔵時の荷重作用点までの距離
*4: いずれの下部トラニオンも同様の荷重を受けるが、断面の小さい90° -270° 側のトラニオンを評価対象とする。

(単位: mm)

[] : 材料

①~③: 応力評価点 (面)

第 2-3-1 図 トラニオンの応力解析箇所

2.3.7 評価条件について

(1) 一次応力（自重）

トラニオンの質量による慣性力 F を概算すると、

$$F = M_t \times g$$

ここで、

・ トラニオンの質量： $M_t = 150 \text{ kg}$

・ 重力加速度： $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$

よって、 $F = 1.5 \times 10^3 \text{ N}$

となり、初期締付け力 $1.3 \times 10^6 \text{ N}$ と比較して小さく、慣性力が評価断面に全て作用することはないため、無視できると考える。

(2) 熱荷重

胴とトラニオンは、熱膨張係数の差が小さく、また、温度差が生じないため、発生する熱応力は小さく、無視できると考える。

2.3.8 疲労解析について

構造規格では輸送時及び吊上げ時の供用状態 A、B の事象について疲労解析を行うこととなっている。

核燃料輸送物設計承認申請書（HDP-69B 型核燃料輸送物）の疲労解析と同じ回数を考慮するとして、200 回吊上げを行った場合の疲労評価を以下に示す。

(1) トラニオンの疲労解析

吊上げ時の繰り返しピーク応力強さ $S_e = 259 \text{ MPa}$ となり、許容繰り返し回数 $N_a = 1.7 \times 10^4$ 回である。 $N_a > 200$ 回より、トラニオンの疲労強度は十分である。

2.3.9 拘束条件及び吊り状態について

各供用状態の拘束条件や吊り状態については「2.1 密封容器の強度について」の「2.1.6 密封容器の解析モデルについて」及び「2.1.7 貯蔵時と吊上げ時の金属キャスクの質量について」と同様である。

2.4 外筒及び中性子遮蔽材カバーの強度について

2.4.1 最高使用温度について

最高使用温度については、貯蔵時の熱解析結果から 10℃～20℃単位程度の余裕を持って設定する。設計値を第 2-4-1 表及び第 2-4-2 表に示す。

第 2-4-1 表 外筒の最高使用温度

| 評価部位 | 最高温度 評価結果 (除熱解析結果) | 最高使用温度 |
|------|--------------------------|--------|
| 外筒 | 113℃ ^{注1)} | 120℃ |

第 2-4-2 表 中性子遮蔽材カバーの最高使用温度

| 評価部位 | 最高温度 評価結果 (除熱解析結果) | 最高使用温度 |
|-----------------|--------------------------|--------|
| 蓋部中性子 遮蔽材カバー | 96℃ ^{注1)} | 110℃ |

注 1) 別紙 2-4-1 参照。

2.4.2 最高使用圧力について

設計値を第2-4-3表及び第2-4-4表に示す。

第2-4-3表 外筒の最高使用圧力

| 評価部位 | 最高使用圧力 | 設定根拠 |
|------|---------|---|
| 外筒 | 0.65MPa | 熱解析から得られた圧力(0.593MPa ^{注1)})に余裕をみて設定 |

第2-4-4表 中性子遮蔽材カバーの最高使用圧力

| 評価部位 | 最高使用圧力 | 設定根拠 |
|-------------|---------|---|
| 蓋部中性子遮蔽材カバー | 0.40MPa | 蓋間へのHe充填圧力(0.41MPa abs ^{注2)})に余裕をみて設定(二次蓋と同じ) |

※0.41MPa abs=0.3087MPa gage

注1) 別紙2-4-2参照。

注2) 第2-1-2表(2/2)より。

2.4.3 荷重条件について

(1) 外筒

外筒に生じる加速度が比較的大きい事象での慣性力を考慮する。

- ・ 貯蔵架台への衝突時

(2) 蓋部中性子遮蔽材カバー

蓋間圧力に余裕をみて定めた最高使用圧力を考慮する。

(3) 底部中性子遮蔽材カバー

底部中性子遮蔽材カバーに生じる加速度が比較的大きい事象での慣性力を考慮する。

- ・ 貯蔵架台への衝突時

なお、タイプ 2 A における、底部中性子遮蔽材カバーは、「2.1 密封容器の強度について」のなかで評価している。

2.4.4 上部端板の評価について

貯蔵時の金属キャスクは縦姿勢であり、外筒、端板、伝熱フィン及び側部中性子遮蔽材に生じた慣性力は、主に下部端板に支えているため、上部端板の荷重は小さい。このため、上部端板の評価は省略する。

2.5 使用済燃料被覆管の強度について

2.5.1 最高使用温度について

最高使用温度については，貯蔵時の除熱解析結果から 10℃単位程度の余裕を持って設定する。設計値を第 2-5-1 表に示す。

第 2-5-1 表 燃料被覆管の最高使用温度

| 燃料の種類 | 最高温度 評価結果 (除熱解析結果) | 最高 使用温度 |
|-------------------------------------|--------------------------|------------|
| 新型 8×8 燃料 | 189℃ ^{注1)} | 190℃ |
| 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料 及び高燃焼度 8×8 燃料 | 259℃ ^{注1)} | 260℃ |

注 1) 別紙 2-5-1 参照。

2.5.2 荷重の種類とその組合せについて

燃料被覆管内の圧力による荷重及び自重による荷重に加え，事象ごとに加わる荷重を考慮する。

2.5.3 代表事象の選定について

代表事象と包絡される事象の関係を第2-5-2表に示す。

供用状態A及びBについては，作用する加速度が最も大きく，他の事象よりも厳しい荷重条件となる貯蔵架台への衝突時を代表事象とする。

第2-5-2表 代表事象と包絡される事象の関係

| 評価部位 | 設計事象 | 供用状態 | 代表事象 | 包絡される事象 | 備考 |
|-------|---------------|--------------|-----------|---|---|
| 燃料被覆管 | I 及び II | A 及び B | 貯蔵架台への衝突時 | 貯蔵時 吊上げ時 台車搬送時 準備作業時 支持脚への衝突時 搬送中の急停止時 | 貯蔵時，準備作業時には1G（自重） ^{注1)} 作用する。台車搬送時に発生する加速度は0.04G ^{注1)} 以下である。 吊上げ時には，自重を考慮し1.3G ^{注1)} 作用する。支持脚への衝突時には，自重を考慮し2.5G ^{注1)} 作用する。 搬送中の急停止時に発生する加速度は0.055G ^{注1)} 以下である。 貯蔵架台への衝突時には，自重を考慮し5G ^{注1)} 作用する。 |

注1) 2.1 密封容器の強度について 第2-1-3表及び第2-1-4表より

2.5.4 燃料被覆管に作用する加速度について

作用する加速度の考え方は「2.1 密封容器の強度について」と同様である。

3. 貯蔵架台の強度について

3.1 最高使用温度について

金属キャスクはトラニオンを介して貯蔵架台に固縛されることから、貯蔵架台の最高使用温度は、トラニオンの最高使用温度と同等とする。

設計値を第 3-1 表に示す。

第 3-1 表 貯蔵架台の最高使用温度

| 金属キャスク タイプ | トラニオン 最高温度評価結果 (除熱解析結果) | トラニオン 最高使用温度 | 貯蔵架台 最高使用温度 |
|---------------|-------------------------------|-----------------|----------------|
| タイプ 2 A | 120℃ ^{注 1)} | 130℃ | 130℃ |

注 1) 別紙 3-1 参

3.2 荷重の種類とその組合せについて

貯蔵架台の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せは想定される荷重条件を基に設定した。

3.3 代表事象の選定について

代表事象と包絡される事象の関係を第 3-2 表に示す。全ての事象について応力計算を実施するのではなく、各供用状態で厳しい条件のものを選定し、応力計算を行う。

供用状態 A について、台車搬送時には貯蔵時よりも加速度が作用するが、0.04G 以下と小さく、貯蔵時は供用状態 A の事象の中で大半の期間を占めるため、ここでは貯蔵時を代表事象とする。

第 3-2 表 代表事象と包絡される事象の関係

| 評価部位 | 設計事象 | 供用状態 | 代表事象 | 包絡される事象 | 備考 |
|------|------|------|------|---------|--|
| 貯蔵架台 | I | A | 貯蔵時 | 台車搬送時 | 貯蔵時には 1G（自重）作用する。 台車搬送時に発生する加速度は 0.04G ^{注 1)} 以下である。 |

3.4 評価応力の種類及び許容値基準について

許容応力の種類及び許容値基準のまとめについては設計・建設規格クラス 1 支持構造物の基準を準用する。^{注 1)}

注 1) 別紙 3-2 参照。

3.5 評価条件について

(1) 一次応力（自重）

質量が最も大きいトラニオン固定金具の質量は約 70 kg であることから、発生する慣性力 F を概算すると、

$$F = 70 \times 9.80665^{\text{注1)}} = 7 \times 10^2 \text{ N}$$

となり、 $4.8 \times 10^5 \text{ N}^{\text{注2)}} (Sd \text{ 地震時})$ と比較して十分小さく、また、上記の慣性力が評価断面に全て作用することはないため、無視できると考え、評価を省略する。

(2) 熱荷重

初回設置時の温度差に変化がなければ熱応力は発生しない。ただし、その後に温度差が生じると熱応力が発生するが、影響は小さく、無視できると考える。

注 1) JIS B0153 : 2001 機械振動・衝撃用語より。

注 2) 添付 5-4-1 貯蔵架台の耐震性に関する計算書 (BWR 用大型キャスク (タイプ 2A)) (5.9) 式より。

上記 (5.9) 式の計算結果を以下に示す。

$$F_1 = \frac{m_c \cdot (G_1 \cdot h_{CG} - G_2 \cdot a_5)}{a_3 + 2 \cdot \frac{a_4^2}{a_3}}$$

ここで、水平方向加速度 G_1 : $G_1 = C_H \cdot G \text{ m/s}^2$

鉛直方向加速度 G_2 : $G_2 = (1 - C_V) \cdot G \text{ m/s}^2$

水平方向設計震度 C_H : 0.72

鉛直方向設計震度 C_V : 0.37

重力加速度 G : 9.80665 m/s^2

金属キャスク底面から重心までの高さ h_{CG} : 2672 mm

支点 O から固縛装置④のトラニオン固定金具中心までの距離 a_3 : 2288 mm

支点Oから固縛装置①のトラニオン固定金具中心までの距離 a_4 : 990 mm

支点Oから金属キャスク中心までの距離 a_5 : 990 mm

金属キャスクの質量 m_c : 118300 kg

固縛装置に生じる引張力 F_1 : 4.796×10^5 N

4. ボロン添加ステンレス鋼に関する説明書 補足説明資料

4. 1 ボロン添加ステンレス鋼の材料特性について

金属キャスク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ボロン添加ステンレス鋼 B-SUS304P-1 の材料特性について別紙 4-1 に示す。

4. 2 ボロン添加ステンレス鋼の破壊じん性について

金属キャスク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ボロン添加ステンレス鋼 B-SUS304P-1 の破壊じん性について別紙 4-2 に示す。

密封容器及び二次蓋の最高使用温度について

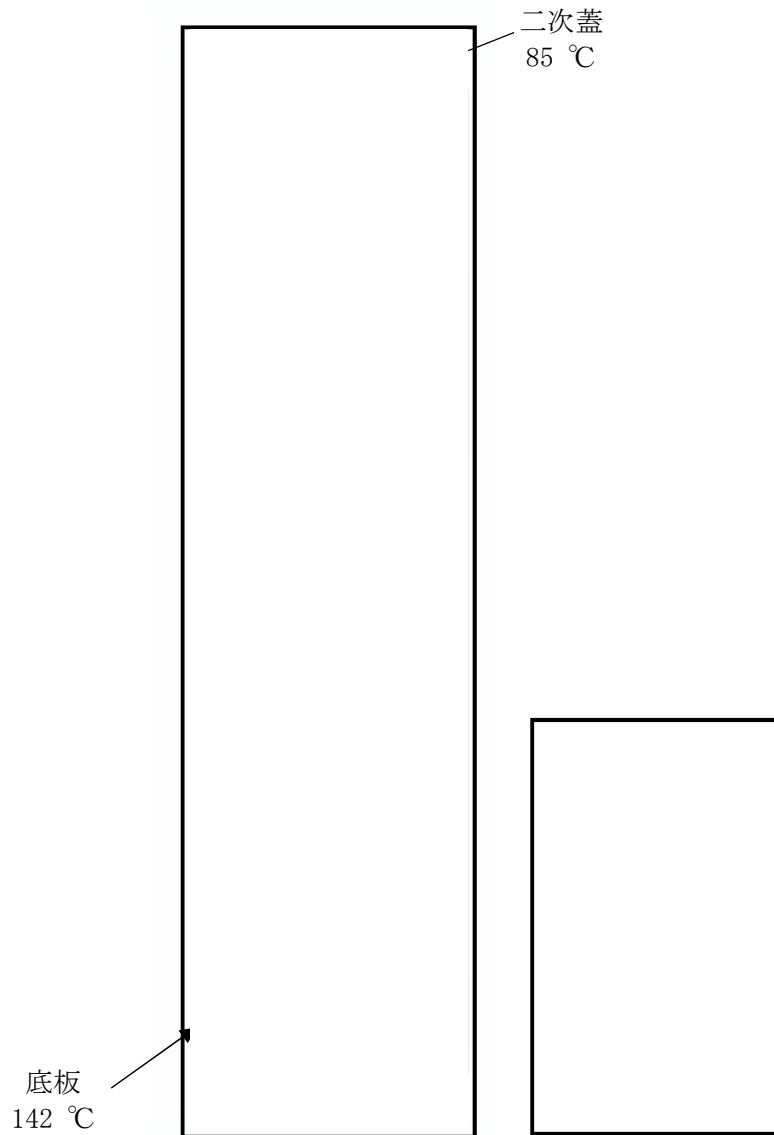
貯蔵時の軸方向除熱解析モデルの解析結果から、温度コンター図を別紙 2-1-1-1 図に、解析結果のまとめを別紙 2-1-1-1 表に示す。解析結果より、密封容器（底板）の最高温度は 142 °C、二次蓋の最高温度は 85 °C である。

貯蔵時の熱解析結果では二次蓋の最高温度は 85 °C であるが、吊上げ時など、評価事象によっては三次蓋の装着を想定するため、さらに高い温度となる。したがって、二次蓋の温度は、貯蔵時よりも高い温度となるため、強度評価において保守的な評価となるように、輸送容器としての熱解析より得られた結果を元にした最高使用温度 97 °C¹⁾ を設定している。

参考文献

- 1) 核燃料輸送物設計変更承認申請書 (HDP-69B 型), (平成 30 年 7 月 20 日申請 東京電力ホールディングス株式会社)

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。



別紙 2-1-1-1 図 軸方向の除熱解析モデルの解析結果

別紙 2-1-1-1 表 評価結果
(単位：°C)

| 部材 | 評価結果 |
|---------|------|
| 燃料被覆管 | 259 |
| 密封容器 | 142 |
| バスケット | 248 |
| トラニオン | 120 |
| 二次蓋 | 85* |
| 金属ガスケット | 89 |

※核燃料輸送物設計変更承認申請書 (HDP-69B 型) における
一般の試験条件の熱解析結果は 97 °C

金属キャスクの設計圧力について

各事象及び部位における圧力を算出した値からある程度の余裕を持った値とする。
別紙 2-1-2-1 表に設計圧力を示す。

別紙 2-1-2-1 表 各項目における金属キャスクの設計圧力

| 項目 | | 圧力 | 設定根拠 |
|-------------|-----------|-----------------------|--|
| 最高使用圧力 | | 1.0 MPa | 排水時の加圧圧力（約 0.7 MPa）に余裕をみて設定 |
| 密封容器内 圧力 | 試験時 | 1.25 MPa | 耐圧試験時の圧力（最高使用圧力の 1.25 倍の水圧） |
| | 試験時 以外 | -0.101325 MPa | 密封容器内は負圧（約 0.08 MPa abs）であるため，内外圧差が大きくなるように余裕をみて設定 |
| 蓋間圧力 | | 0.4 MPa | 蓋間への He 充填圧力 (0.41 MPa abs) に余裕をみて設定 |
| レジン充填部圧力 | | 別紙 2-1-2-2 表 参照 | レジン充填部の気相部分の圧力上昇として，空気温度の上昇，レジンの熱膨張による空气体積の減少及び飽和水蒸気圧を考慮 |

(1) レジン充填部圧力

中性子遮蔽材部には，レジンが充填されており，その空間部には空気が大気圧で封入されている。

エポキシ系レジンについて，貯蔵期間を考慮した経年劣化評価試験が実施されており^{注1), 注2)}，長期貯蔵後の密閉系における中性子遮蔽材部の気相部分の成分は主に水，二酸化炭素及び窒素と考えられる。水については，水の存在による圧力上昇を，飽和水蒸気圧として考慮する。二酸化炭素については，初期に空間部分に存在する酸素によるレジンの酸化反応により発生するため，二酸化炭素は初期に存在した酸素と同量の物質質量に設定する。また，窒素は，不活性ガスであることからレジンへの吸収がないものとし，初期に存在した物質質量とする。よって，空間部分の水を除くガスの物質質量は変化しないものとし，初期に存在する空気として評価するものとする。

したがって、レジン充填部の圧力Pは、以下のとおり求められる。

$$P = P_w + P_G$$

ここで、

P_w : 温度 t の飽和水蒸気圧 (MPa abs)

P_G : 温度 t の空気の分圧 (MPa abs)

$$P_G = P_0 \times \frac{(t + 273.15)}{(20 + 273.15)} \times \frac{n}{1 - (1 - n) \cdot \beta}$$

P_0 : 大気圧 (0.101325 MPa abs)

t : 貯蔵時におけるレジン充填部温度 (°C)

n : レジン充填部の空間割合 (-)

β : 部材間の線膨張係数の差を考慮した体積膨張率 (-)

$$\beta = (1 + \alpha \times (t - 20))^3$$

α : レジンと周囲の部材 (炭素鋼) の線膨張係数の差 (K⁻¹)

レジン充填部の圧力の計算結果を別紙 2-1-2-2 表に示す。別紙 2-1-2-2 表に示すように、構造解析においては、求められた数値に安全側に余裕を持った圧力を設計圧力としている。

別紙 2-1-2-2 表 レジン充填部圧力の計算条件及び計算結果

| 部位 | レジン温度 (°C) | レジン充填部圧力 (MPa abs (MPa)) | 構造解析で使用する レジン充填部の圧力 (MPa) |
|----|---------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 蓋部 | 95 | | |
| 側部 | 117* | | |
| 底部 | 120 | | |

※胴中央部位置での平均温度

参考文献

- 注 1) (一財)原子力発電技術機構, “平成 13 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術
確証試験 (金属キャスク貯蔵技術確証試験) 報告書”, (2002)
- 注 2) (一財)原子力発電技術機構, “平成 15 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術
調査等 (金属キャスク貯蔵技術確証試験) 報告書”, (2003)

設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せについて

設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せは、構造規格 解説表 MCD-1100-1-1 に基づいて設定している。「添付 10-2-1-1 密封容器の応力解析の方針 (BWR用大型キャスク (タイプ 2 A))」における荷重の種類とその組合せを別紙 2-1-3-1 表に示す。

設計条件は、最高使用圧力に対する評価条件で供用状態 A 及び B の一次応力評価を代表する事象と考え、吊上げ荷重及び衝撃荷重も考慮するが、2.1.3 代表事象の選定より、荷重条件は作用する荷重が大きい貯蔵架台への衝突時を評価している。

別紙 2-1-3-1 表 密封容器及び二次蓋の荷重の種類と組合せ「添付 10-2-1-1 密封容器の応力解析の方針 (BWR用大型キャスク (タイプ 2 A))」

| 設計事象 / 供用状態 / 評価事象 | | | 荷重 | 圧力による荷重 | 自重による荷重 | ボルト初期締付け力 | 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*1 | ○ | —*4 | ○ | ○ | ○ | ○ | — | — |
| I | A*2 | 通常貯蔵時 | ○ | ○ | ○ | — | — | ○ | — | — |
| | | 吊上げ時 | ○ | —*4 | ○ | ○ | — | ○ | — | — |
| II | B*2 | 衝撃荷重作用時 | ○ | —*4 | ○ | — | ○ | ○ | — | — |
| 試験状態 | 試験状態 | 試験時 | ○*3 | ○ | ○ | — | — | — | — | — |

注記*1：最高使用圧力に対する評価条件で，供用状態 A 及び B の一次応力評価を代表する事象。

注記*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。

注記*3：耐圧試験圧力（最高使用圧力により定められるもの）とする。

注記*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。

支持脚のばね定数の算出について

支持脚の断面形状は別紙 2-1-4-1 図に示すように高さ方向に変化するため、部材を高さ方向に分割して、それぞれのばねによる反力と部材物性の関係から下式によりばね定数 k を求める。フックの法則から、複数ばねが直列に接続と考え、以下の式により求める。

$$k = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{k_i}}, \quad k_i = E \times \frac{A_i}{L_i} \quad \text{より} \quad k = n \times \frac{E}{\sum_i \frac{L_i}{A_i}}$$

k : 架台支持脚の圧縮変形ばね定数 (N/m)

n : 支持脚の本数 (4) … 4 本全て同一形状・寸法の場合

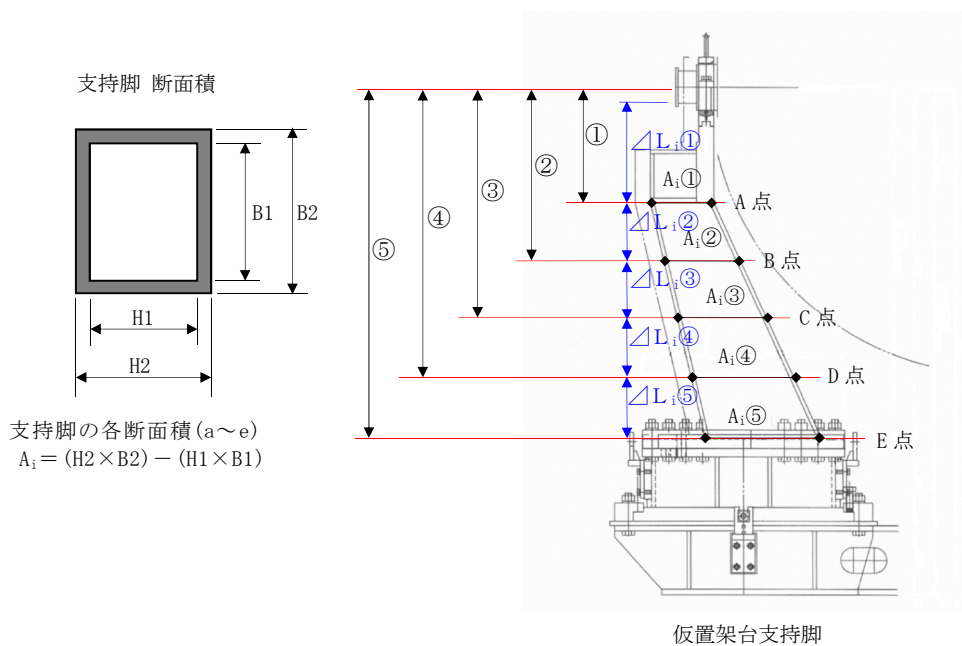
E : 支持脚材料のヤング率 (炭素鋼 : 2.05×10^{11} N/m²)

L_i : 各部材の長さ (m)

A_i : 各部材の断面積 (m²)

別紙 2-1-4-1 表 支持脚に対するばね定数の計算

| | 長さ L_i (m) | 断面積 A_i (m ²) | L_i / A_i (1/m) |
|---|--------------------------------|-----------------------------|---|
| A点 | ①-トラネオン半径 (ΔL_i ①とする) | A_i ① | ΔL_i ①/ A_i ① (α とする) |
| B点 | ②-① (ΔL_i ②とする) | A_i ② | ΔL_i ②/ A_i ② (β とする) |
| C点 | ③-② (ΔL_i ③とする) | A_i ③ | ΔL_i ③/ A_i ③ (γ とする) |
| D点 | ④-③ (ΔL_i ④とする) | A_i ④ | ΔL_i ④/ A_i ④ (δ とする) |
| E点 | ⑤-④ (ΔL_i ⑤とする) | A_i ⑤ | ΔL_i ⑤/ A_i ⑤ (ε とする) |
| $\Sigma L_i / A_i$ (1/m) | | | $\alpha + \beta + \gamma + \delta + \varepsilon$ (Ω とする) |
| 支持脚ばね定数 k (N/m) $\leq n \times (E / \Sigma L_i / A_i) >$ | | | $4 \times (2.05 \times 10^{11} / \Omega)$ |



別紙 2-1-4-1 図 支持脚の断面形状

貯蔵架台のばね定数について

貯蔵架台のばね定数は、以下に示す条件での静解析を実施して妥当性を確認している。

(1) 解析モデル

貯蔵架台はソリッド要素でモデル化し金属キャスクの底面と貯蔵架台上面は接触とする。

(2) 荷重条件及び境界条件

荷重条件及び境界条件を別紙 2-1-5-1 図に示す。

貯蔵架台への垂直落下時の加速度として、金属キャスクの鉛直下向きに 5～50 G の範囲で複数の値を与え、荷重-変位特性からばね定数を求める。なお、貯蔵架台の衝撃荷重による変形を求める観点から、貯蔵架台の自重は考慮していない。

また、貯蔵架台への垂直落下事象時の貯蔵架台脚部は貯蔵建屋床面に固定されていないことから、境界条件として貯蔵架台を荷重と平行な垂直方向に拘束し、水平方向はスライド可能とする。

(3) 解析結果

解析から求めた貯蔵架台の変位を用いてばね定数を求める。変位の評価部位としては安全側に、金属キャスクの底面外半径の位置とする。

ばね定数 k は以下の式により求める。

$$k = F / \delta$$

ここで、 k ：貯蔵架台のばね定数 (N/m)

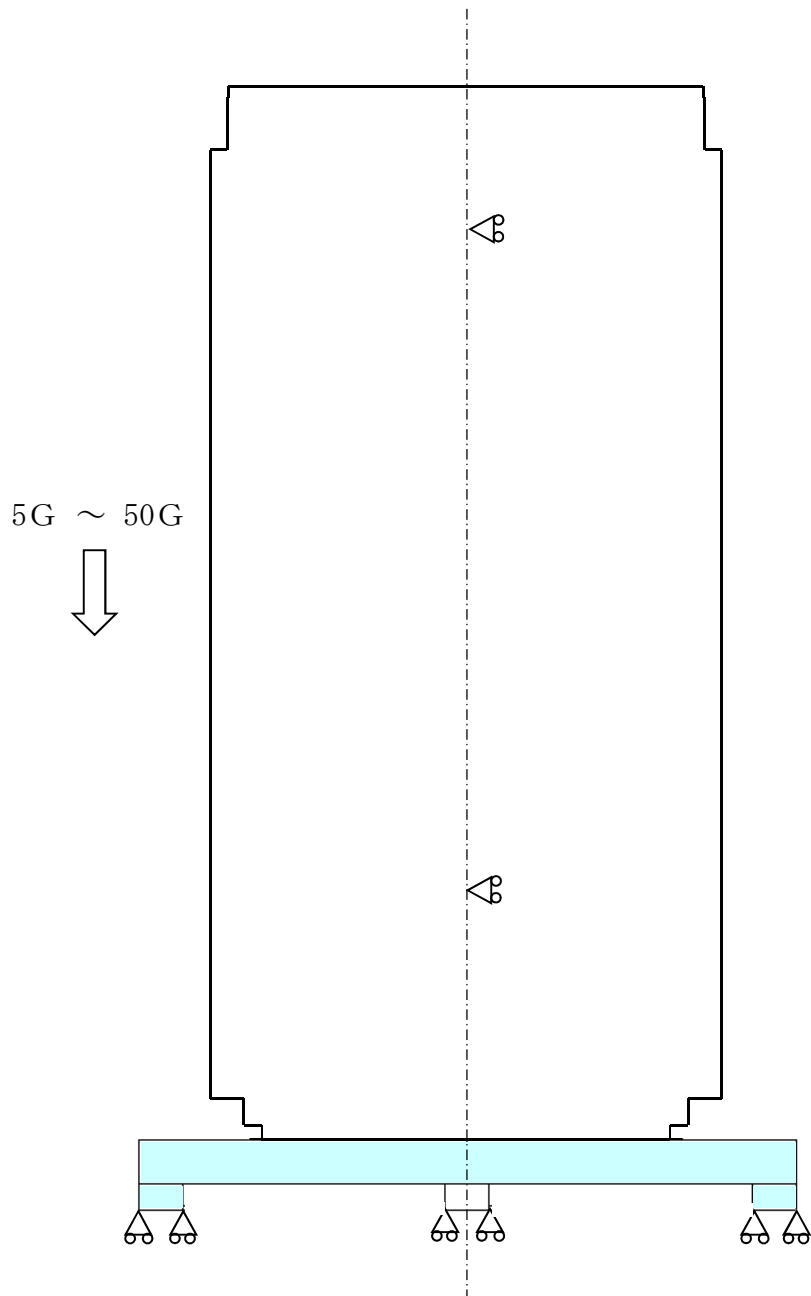
F ：金属キャスクの重量荷重 (N) $= m \times G \times \alpha$

m ：金属キャスクの質量 (1.20×10^5 kg)

G ：重力加速度 (9.80665 m/s²)

α ：加速度 (G)

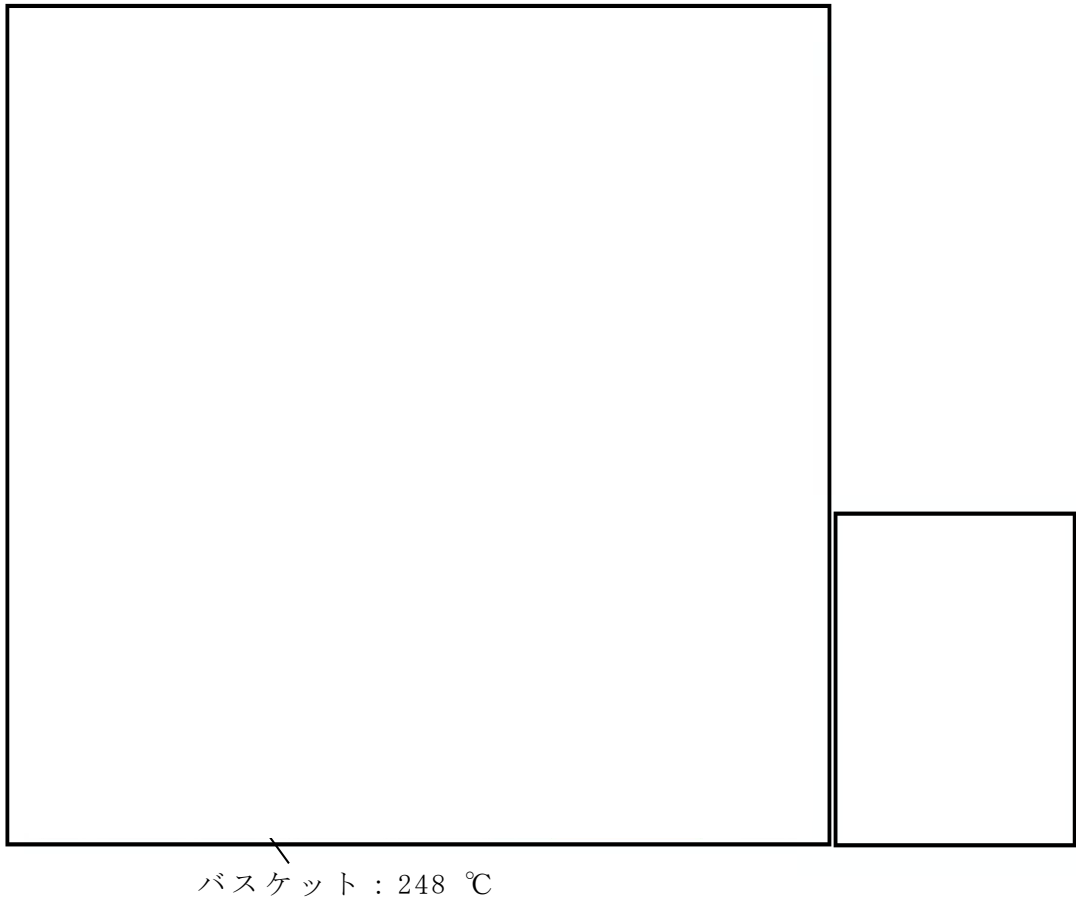
δ ：変位 (m)



別紙 2-1-5-1 図 荷重条件及び境界条件

バスケットの最高使用温度について

径方向の除熱解析モデルの解析結果を別紙 2-2-1-1 図に示す。別紙 2-2-1-1 図から貯蔵中のバスケットの最高温度は 248 °C である。



別紙 2-2-1-1 図 径方向の除熱解析モデルの解析結果

設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せについて

設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せは、構造規格 解説表 MCD-2100-1 に基づいて設定している。「添付 10-2-1-1 密封容器の応力解析の方針（BWR用大型キャスク（タイプ2A））第4-2表」における荷重の種類とその組合せを別紙 2-2-2-1 表に示す。

設計条件は、供用状態 A 及び B の一次応力評価を代表する事象として設定している。バスケットにはボルトを使用していないので、ボルトに関する応力評価は不要である。

別紙 2-2-2-1 表 バスケットの荷重の種類と組合せ「添付 10-2-1-2 バスケットの応力解析の方針（BWR用大型キャスク（タイプ 2 A）） 第 4-2 表」

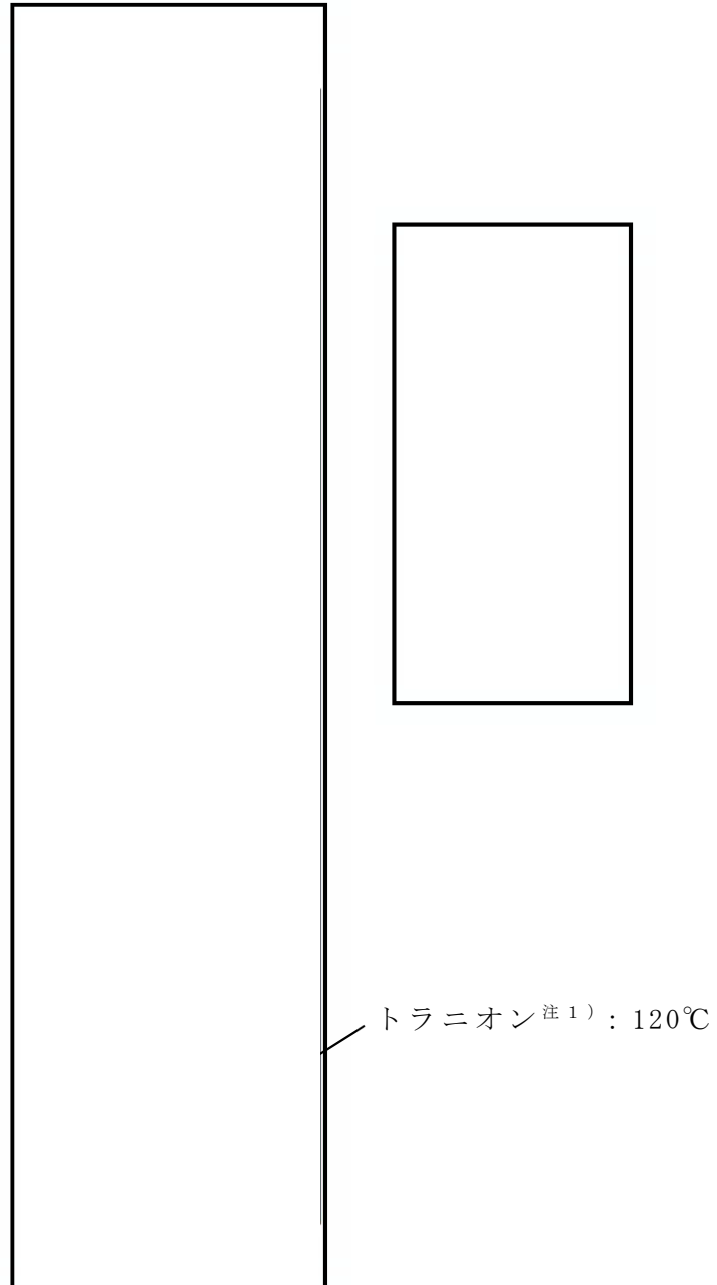
| 荷 重 | | | 自重による荷重 | 吊上げ荷重 | 衝撃荷重 | 熱荷重 | 地震荷重 |
|------|------|---------|---------|-------|------|-----|------|
| 設計事象 | 供用状態 | 評価事象 | | | | | |
| 設計条件 | 設計条件 | 設計時*1 | -*2 | ○ | ○ | - | - |
| I | A | 貯蔵時 | ○ | - | - | ○ | - |
| | | 吊上げ時 | -*2 | ○ | - | ○ | - |
| II | B | 衝撃荷重作用時 | -*2 | - | ○ | ○ | - |

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。

注記*2：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。

トラニオンの最高使用温度について

軸方向の除熱解析モデルの解析結果を別紙 2-1-3-1 図に示す。別紙 2-1-3-1 図から、トラニオンの最高温度は 120℃である。



注 1) トラニオンの温度は、保守的にトラニオン取付部より内側の胴部内面温度としている。

別紙 2-1-3-1 図 軸方向の除熱解析モデルの解析結果

設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せについて

設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せは、構造規格 解説表 MCD-3100-1 に基づいて設定している。本申請書（添付 10-2-1-3 トラニオンの応力解析の方針（BWR用大型キャスク（タイプ 2A）） 第 4-1 表）における荷重の種類とその組合せを別紙 2-3-2-1 表に示す。

ここで、金属キャスクのトラニオンはボルト締付け構造ではないため、ボルト初期締付け力は考慮しない。吊上げ荷重については、供用状態 A の通常取扱い時に発生する荷重を考慮している。

別紙 2-3-2-1 表 トラニオンの荷重の種類と組合せ「添付 10-2-1-3 トラニオンの応力解析の方針（BWR用大型キャスク（タイプ 2A））（BWR用大型キャスク（タイプ 2A）） 第 4-1 表）」

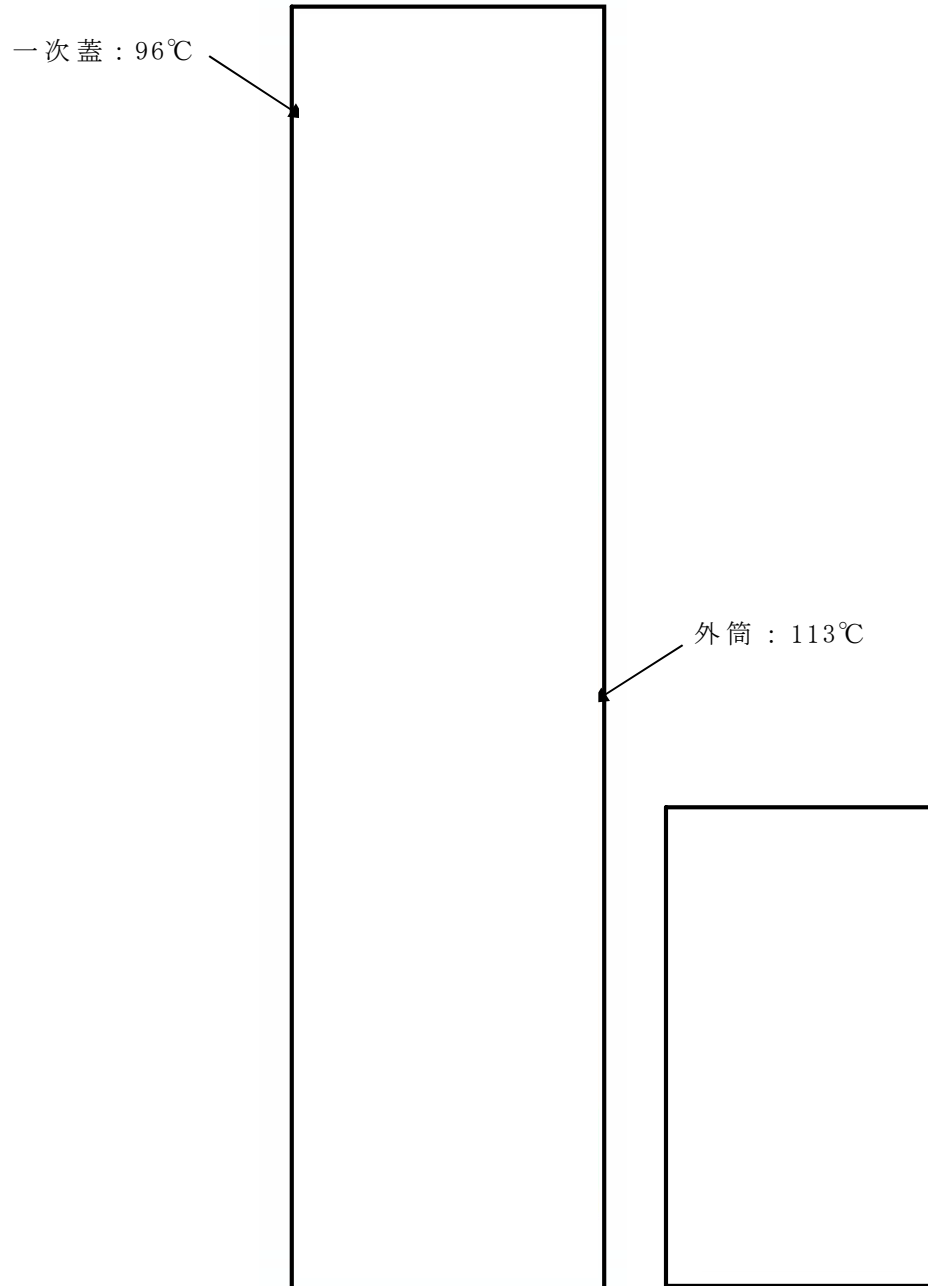
| 設計事象 | 供用状態 | 評価事象 | 荷 重 | | | | | |
|------|------|---------|---------|------|-------|------|------------|------|
| | | | 自重による荷重 | 固縛荷重 | 吊上げ荷重 | 衝撃荷重 | 熱荷重 * 1 | 地震荷重 |
| I | A | 貯蔵時 | ○ | ○ | — | — | ○ | — |
| | | 吊上げ時 | — * 2 | ○ | ○ | — | ○ | — |
| II | B | 衝撃荷重作用時 | — * 2 | ○ | — | ○ | ○ | — |

注記 * 1：キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。

注記 * 2：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。

軸方向の除熱解析モデルの解析結果について

軸方向の除熱解析モデルの解析結果を別紙 2-4-1-1 図に示す。別紙 2-4-1-1 図から、外筒の最高温度は 113℃、一次蓋の最高温度は 96℃である。蓋部中性子遮蔽材カバーの最高温度は、保守側に一次蓋の最高温度としている。



別紙 2-4-1-1 図 軸方向の除熱解析モデルの解析結果

レジン充填部圧力について

中性子遮蔽材部には，レジンが充填されており，その空間部には空気が大気圧で封入されている。

エポキシ系レジンについて，貯蔵期間を考慮した経年劣化評価試験が実施されており^{1), 2)}，長期貯蔵後の密閉系における中性子遮蔽材部の気相部分の成分は主に水，二酸化炭素及び窒素と考えられる。水については，水の存在による圧力上昇を，飽和水蒸気圧として考慮する。二酸化炭素については，初期に空間部分に存在する酸素によるレジンの酸化反応により発生するため，二酸化炭素は初期に存在した酸素と同量の物質質量に設定する。また，窒素は，不活性ガスであることからレジンへの吸収がないものとし，初期に存在した物質質量とする。よって，空間部分の水を除くガスの物質質量は変化しないものとし，初期に存在する空気として評価するものとする。

したがって，レジン充填部の圧力 P (MPa) は，以下のとおり求められる。

$$P = P_w + P_G$$

ここで，

P_w : 温度 t の飽和水蒸気圧 (MPa abs)

P_G : 温度 t の空気の分圧 (MPa abs)

$$P_G = P_0 \times \frac{(t + 273.15)}{(20 + 273.15)} \times \frac{n}{1 - (1 - n) \cdot \beta}$$

P_0 : 大気圧 = 0.101325 (MPa abs)

t : 貯蔵時におけるレジン充填部温度 (°C)

n : レジン充填部の空間割合 (—)

β : 部材間の線膨張係数の差を考慮した体積膨張率 (—)

$$\beta = (1 + \alpha \times (t - 20))^3$$

α : レジンと周囲の部材 (炭素鋼) の線膨張係数の差 (K^{-1})

レジン充填部の圧力の計算結果を別紙 2-4-2-1 表に示す。別紙 2-4-2-1 表に示すように、構造解析においては、求められた数値に安全側に余裕を持った圧力を設計圧力としている。

別紙 2-4-2-1 表 レジン充填部圧力の計算条件及び計算結果

| 部位 | レジン温度 (°C) | レジン充填部圧力 (MPa abs (MPa)) | 構造解析で使用する レジン充填部の圧力 (MPa) |
|----|---------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 蓋部 | 95 | | |
| 側部 | 117 注) | | |
| 底部 | 120 | | |

注) 胴中央部位置での平均温度

< 参考文献 >

- 1) (一財)原子力発電技術機構、“平成 13 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術確証試験(金属キャスク貯蔵技術確証試験)報告書,”(2002)
- 2) (一財)原子力発電技術機構、“平成 15 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(金属キャスク貯蔵技術確証試験)報告書,”(2003)

燃料被覆管の最高使用温度について

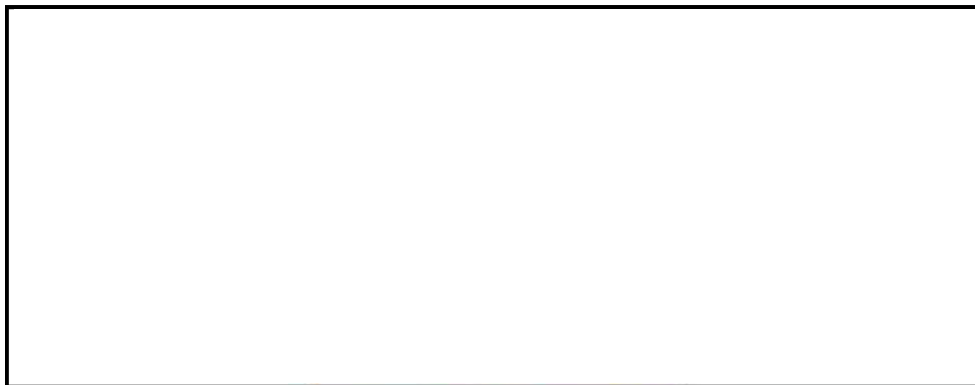
除熱解析結果を別紙 2-5-1-1 図，別紙 2-5-1-2 図及び別紙 2-5-1-3 図に示す。別紙 2-5-1-2 図及び別紙 2-5-1-3 図から貯蔵中の新型 8×8 燃料の最高温度は 189 °C である。また，別紙 2-5-1-1 図から貯蔵中の新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度 8×8 燃料の最高温度は 259 °C である（発熱量の大きい新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料で除熱解析した結果であり，高燃焼度 8×8 燃料の最高温度は別紙 2-5-1-1 図に示す除熱解析結果に含まれる。）。

燃料被覆管：259 °C



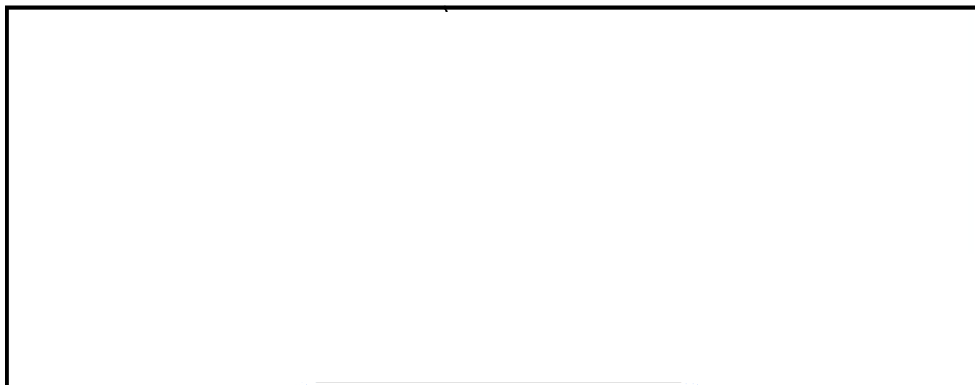
別紙 2-5-1-1 図 除熱解析結果（配置 A：新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度 8 × 8 燃料）

燃料被覆管：189 °C



別紙 2-5-1-2 図 除熱解析結果（配置 B：新型 8 × 8 燃料）

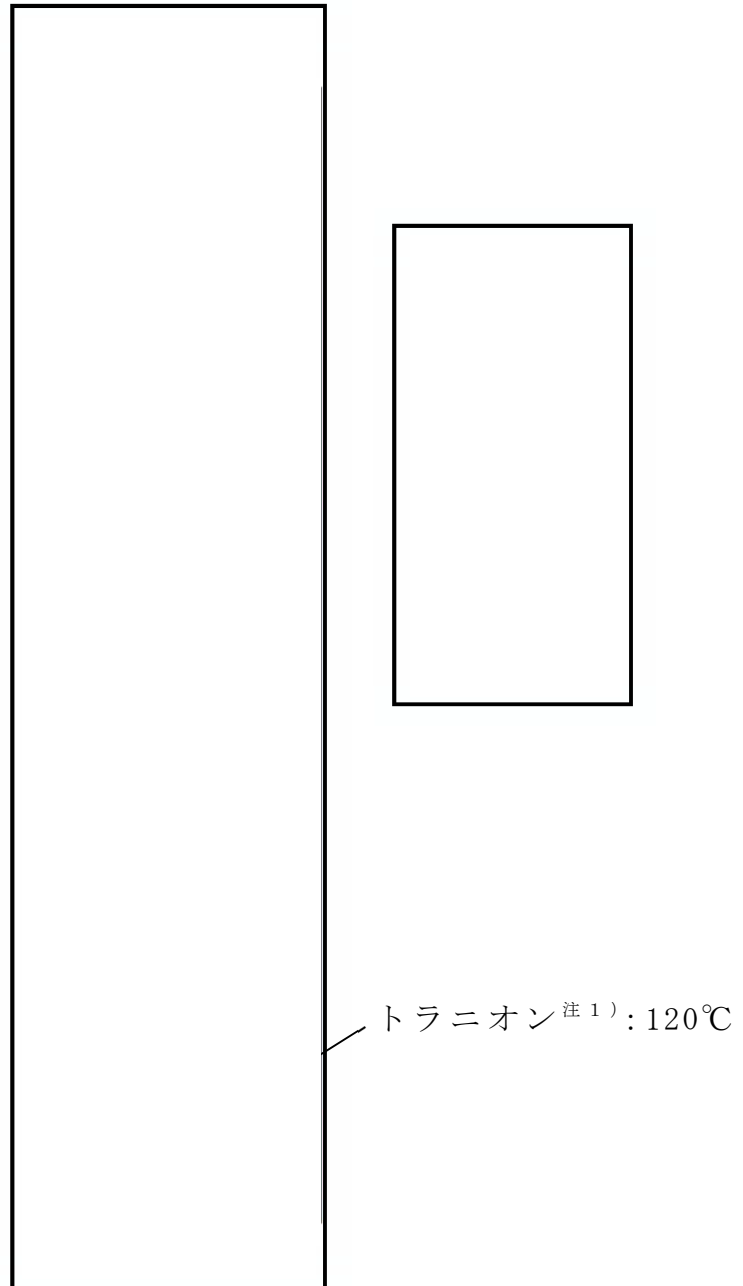
燃料被覆管：185 °C



別紙 2-5-1-3 図 除熱解析結果（配置 C：新型 8 × 8 燃料）

トラニオンの最高使用温度について

軸方向の除熱解析モデルの解析結果を別紙 3-1-1 図に示す。別紙 3-1-1 図から、トラニオンの最高温度は 120℃である。



注 1) トラニオンの温度は、保守的にトラニオン取付部より内側の胴部内面温度としている。

別紙 3-1-1 図 軸方向の除熱解析モデルの解析結果

ボロン添加ステンレス鋼板に関する補足説明

目 次

| | |
|----------------------|-----------|
| 1. 材料の用途 | 別紙 4-1-1 |
| 1.1 用途 | 別紙 4-1-1 |
| 2. 材料の仕様 | 別紙 4-1-1 |
| 2.1 適合規格 | 別紙 4-1-1 |
| 2.2 化学成分 | 別紙 4-1-1 |
| 2.3 機械的性質 | 別紙 4-1-1 |
| 2.4 寸法制限及び寸法許容差 | 別紙 4-1-1 |
| 3. 使用条件 | 別紙 4-1-6 |
| 3.1 適用範囲 | 別紙 4-1-6 |
| 3.2 温度範囲 | 別紙 4-1-6 |
| 4. 特徴及び使用上の留意事項 | 別紙 4-1-6 |
| 4.1 特徴 | 別紙 4-1-6 |
| 4.2 特許及びライセンス | 別紙 4-1-6 |
| 5. 製造工程及び製造条件 | 別紙 4-1-7 |
| 5.1 製造方法 | 別紙 4-1-7 |
| 5.2 熱処理 | 別紙 4-1-7 |
| 5.3 品質管理 | 別紙 4-1-7 |
| 6. 化学成分 | 別紙 4-1-9 |
| 7. マクロ及びミクロ組織 | 別紙 4-1-10 |
| 8. 実用試験 | 別紙 4-1-14 |
| 9. 加工性及び加工条件 | 別紙 4-1-14 |
| 10. 機械的性質 | 別紙 4-1-15 |
| 10.1 引張特性 | 別紙 4-1-15 |
| 10.2 じん性 | 別紙 4-1-15 |
| 10.3 硬さ (参考) | 別紙 4-1-16 |
| 11. 高温及び低温引張特性 | 別紙 4-1-22 |
| 11.1 高温引張特性 | 別紙 4-1-22 |
| 11.2 低温引張特性 | 別紙 4-1-22 |
| 12. クリープ特性及びクリープ破断特性 | 別紙 4-1-24 |
| 13. じん性 (時効後) | 別紙 4-1-24 |
| 14. 耐食性 | 別紙 4-1-24 |
| 15. 設計降伏点 | 別紙 4-1-25 |
| 16. 設計引張強さ | 別紙 4-1-26 |
| 17. 設計応力強さ | 別紙 4-1-27 |
| 18. 設計引張応力 | 別紙 4-1-27 |

| | |
|------------|-----------|
| 19. 疲労 | 別紙 4-1-27 |
| 20. その他特性 | 別紙 4-1-28 |
| 20.1 熱膨張係数 | 別紙 4-1-28 |
| 20.2 熱伝導率 | 別紙 4-1-28 |
| 20.3 温度伝導率 | 別紙 4-1-28 |
| 20.4 縦弾性係数 | 別紙 4-1-28 |
| 20.5 ポアソン比 | 別紙 4-1-28 |
| 21. 照射影響 | 別紙 4-1-32 |
| 22. 引用文献 | 別紙 4-1-33 |

図表目次

| | | |
|----------|---|-----------|
| 第 2-1 図 | 0.2%耐力の正規確率プロット..... | 別紙 4-1-2 |
| 第 2-2 図 | 引張強さの正規確率プロット..... | 別紙 4-1-3 |
| 第 5-1 図 | 製造フロー | 別紙 4-1-8 |
| 第 5-2 図 | 品質管理項目 | 別紙 4-1-8 |
| 第 7-1 図 | マクロ観察結果の例 (標本 7) | 別紙 4-1-10 |
| 第 7-2 図 | EPMA 分析結果の例 (標本 7) | 別紙 4-1-13 |
| 第 10-1 図 | 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)..... | 別紙 4-1-17 |
| 第 10-2 図 | 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)..... | 別紙 4-1-18 |
| 第 10-3 図 | 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。)..... | 別紙 4-1-19 |
| 第 11-1 図 | 引張強さの温度依存性 | 別紙 4-1-22 |
| 第 11-2 図 | 0.2%耐力の温度依存性..... | 別紙 4-1-23 |
| 第 11-3 図 | 伸びの温度依存性 | 別紙 4-1-23 |
| 第 15-1 図 | 0.2%耐力における $r(T)y$ のトレンドカーブ..... | 別紙 4-1-25 |
| 第 15-2 図 | 各標本データと S_y 設定値 | 別紙 4-1-25 |
| 第 16-1 図 | 引張強さにおける $r(T)y$ のトレンドカーブ..... | 別紙 4-1-26 |
| 第 16-2 図 | 各標本データと S_u 設定値 | 別紙 4-1-26 |
| 第 20-1 図 | 熱膨張係数(平均)の温度依存性..... | 別紙 4-1-29 |
| 第 20-2 図 | 熱伝導率の温度依存性 | 別紙 4-1-29 |
| 第 20-3 図 | 縦弾性係数の温度依存性..... | 別紙 4-1-30 |
| 第 20-4 図 | ポアソン比の温度依存性..... | 別紙 4-1-30 |
| | | |
| 第 2-1 表 | 化学成分仕様 | 別紙 4-1-4 |
| 第 2-2 表 | 機械的性質 (常温) | 別紙 4-1-4 |
| 第 2-3 表 | 試験データと 1%破損確率値..... | 別紙 4-1-5 |
| 第 6-1 表 | 各標本の化学成分と板厚..... | 別紙 4-1-9 |
| 第 6-2 表 | 各標本と各試験の対応 | 別紙 4-1-9 |
| 第 7-1 表 | ミクロ組織観察結果 | 別紙 4-1-11 |
| 第 10-1 表 | 常温における引張特性 (平均値 (n=3)) | 別紙 4-1-20 |
| 第 10-2 表 | 動的破壊じん性試験結果..... | 別紙 4-1-20 |
| 第 10-3 表 | 常温における硬度 (Hv) | 別紙 4-1-21 |
| 第 15-1 表 | 材料の各温度における設計降伏点 S_y | 別紙 4-1-25 |
| 第 16-1 表 | 材料の各温度における設計引張強さ S_u | 別紙 4-1-26 |

| | | |
|----------|------------------------------|-----------|
| 第 17-1 表 | 材料の各温度における設計応力強さ S_m | 別紙 4-1-27 |
| 第 20-1 表 | 本材料の熱膨張係数 | 別紙 4-1-31 |
| 第 20-2 表 | 本材料の熱伝導率設定値..... | 別紙 4-1-31 |
| 第 20-3 表 | 本材料の温度伝導率設定値..... | 別紙 4-1-31 |
| 第 20-4 表 | 材料の各温度における縦弾性係数..... | 別紙 4-1-31 |

1. 材料の用途

1.1 用途

本材料は、金属キャスク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

(一社)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「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)

2.2 化学成分

本材料の化学成分仕様は、第2-1表に規定のとおりである。

2.3 機械的性質

ボロン添加ステンレス鋼板は、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、10.2(2)に示すように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、第2-2表示値に適合すること。規格値については、常温の規格値を以下のように定めた。

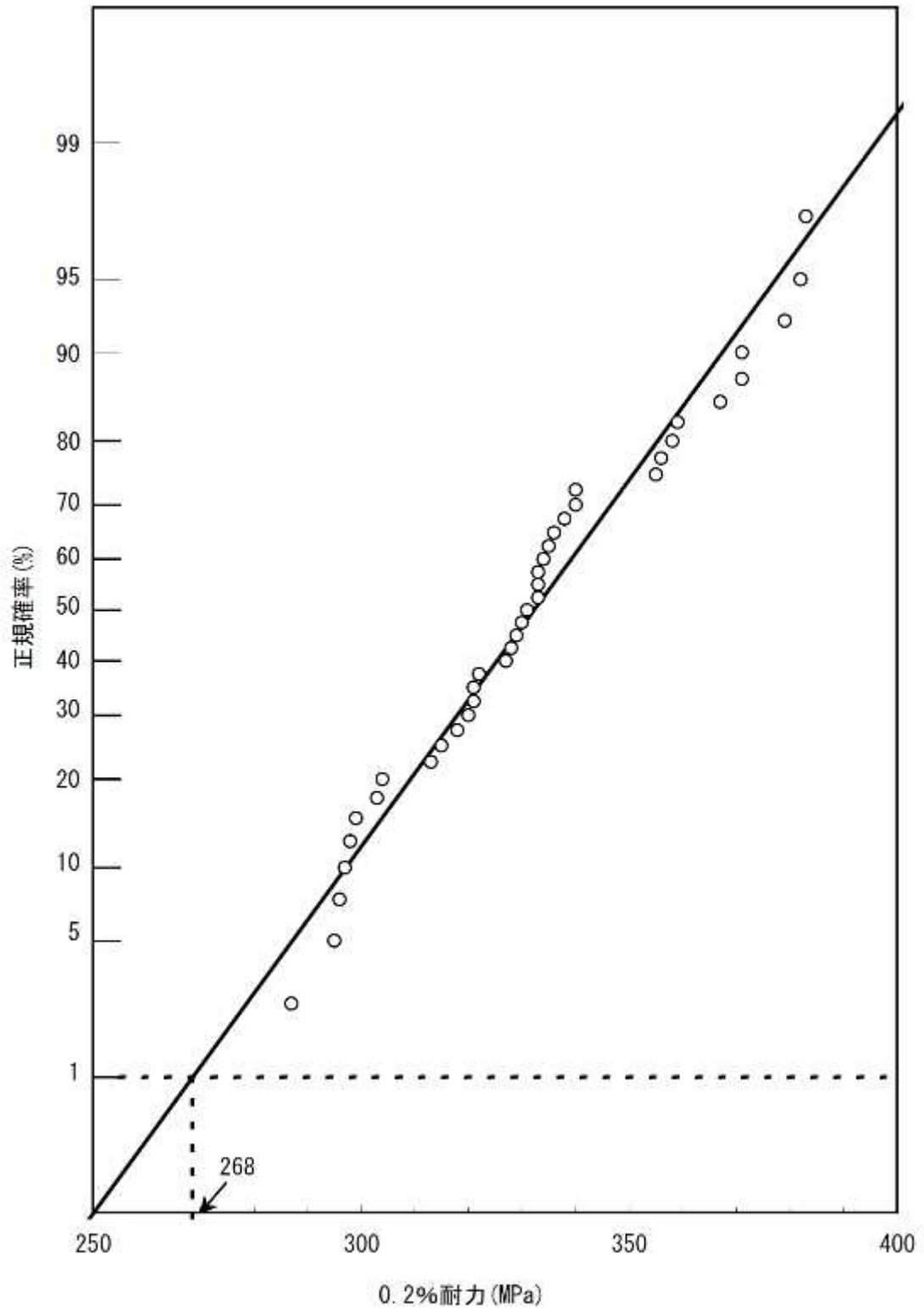
- (1) 同じ化学成分仕様値及び圧延工程を経て製作された、常温の引張試験データを複数準備する。
- (2) 今回の標本1~4については、常温の引張試験を行っているのでこれを含む。
- (3) 全データの平均値を求める。
- (4) 全データの平均値との比を求め、累積確率分布を確率分布紙にプロットする。
- (5) 上記の近似直線を最小二乗法によって求め、99%信頼下限(1%破損確率値)を求める。
- (6) 上記1%破損確率値を下回るように常温仕様値を決定する。

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。

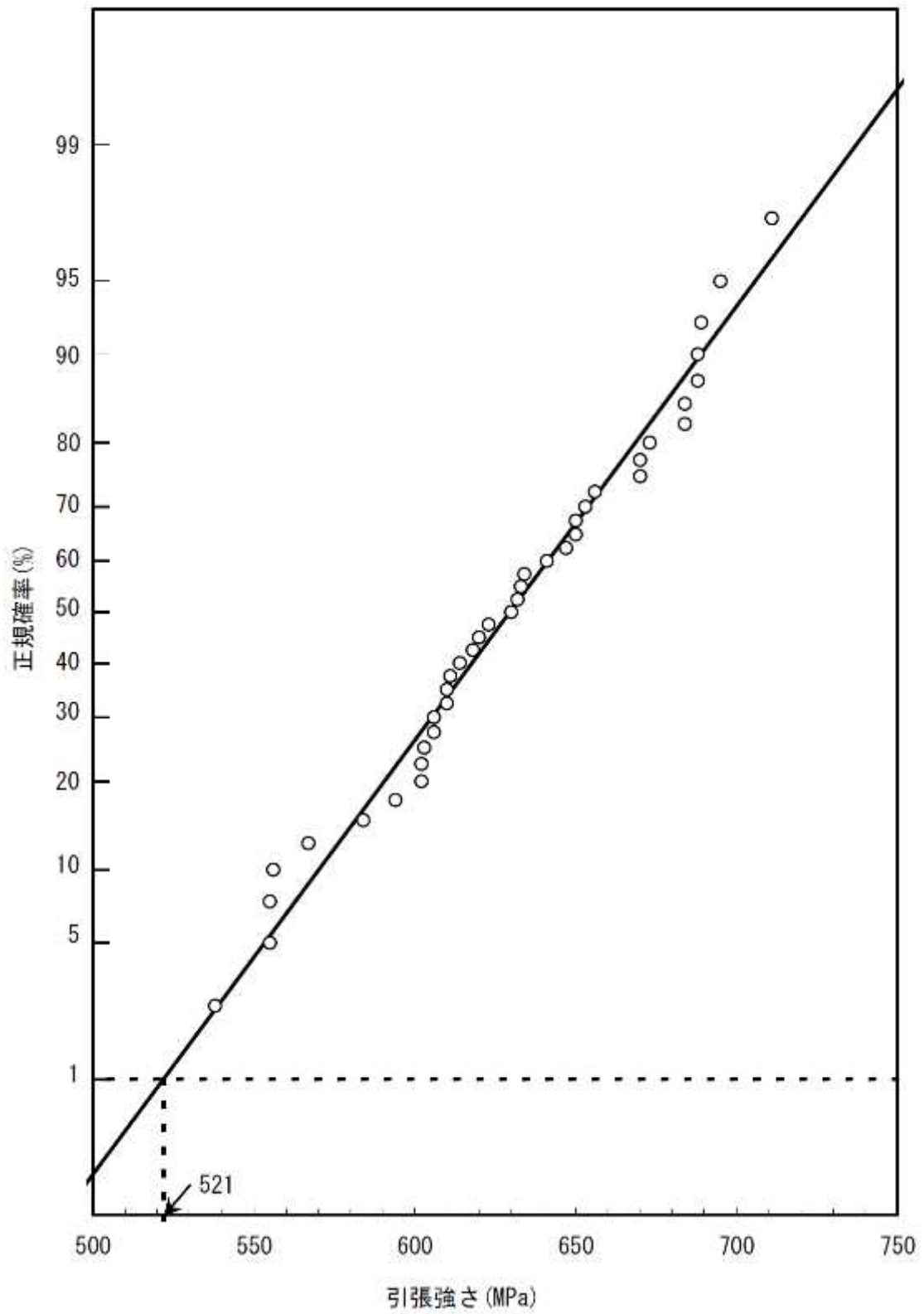
第2-3表に、常温における0.2%耐力及び引張強さデータと、それらの1%破損確率値を示す。第2-1図及び第2-2図にこれらの分布を示す。

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。



第 2-1 図 0.2%耐力の正規確率プロット



第 2-2 図 引張強さの正規確率プロット

第2-1表 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) (JIS G 4304 又は JIS G 4305) | ≦0.08 | ≦1.00 | ≦2.00 | ≦0.045 | ≦0.030 | 8.00~ 10.50 | 18.00~ 20.00 | — |

第2-2表 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) (JIS G 4304 又は JIS G 4305) | 520 以上 | 205 以上 | 40 以上 |

第2-3表 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 | — |

3. 使用条件

3.1 適用範囲

本材料を金属キャスク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^{(1)~(7)}。

ただし、金属キャスクバスケットプレート用のボロン添加ステンレス鋼板は、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。本説明で説明する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^{(8)~(10)}。

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

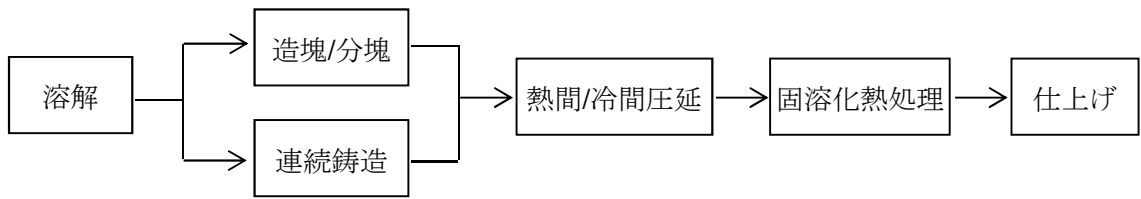
本材料の製造方法は、一般的な鋼板の方法と同様である。本材料の製造フローは第5-1図に示すとおりである。ほう素は、溶解時にフェロボロンの形で必要量混合される。溶解の後、造塊工程を経て圧延を行う場合と、連続鋳造で圧延される場合がある。圧延後は、SUS304と同様に固溶化熱処理(約1000~1150℃, 急冷)を行っている。

5.2 熱処理

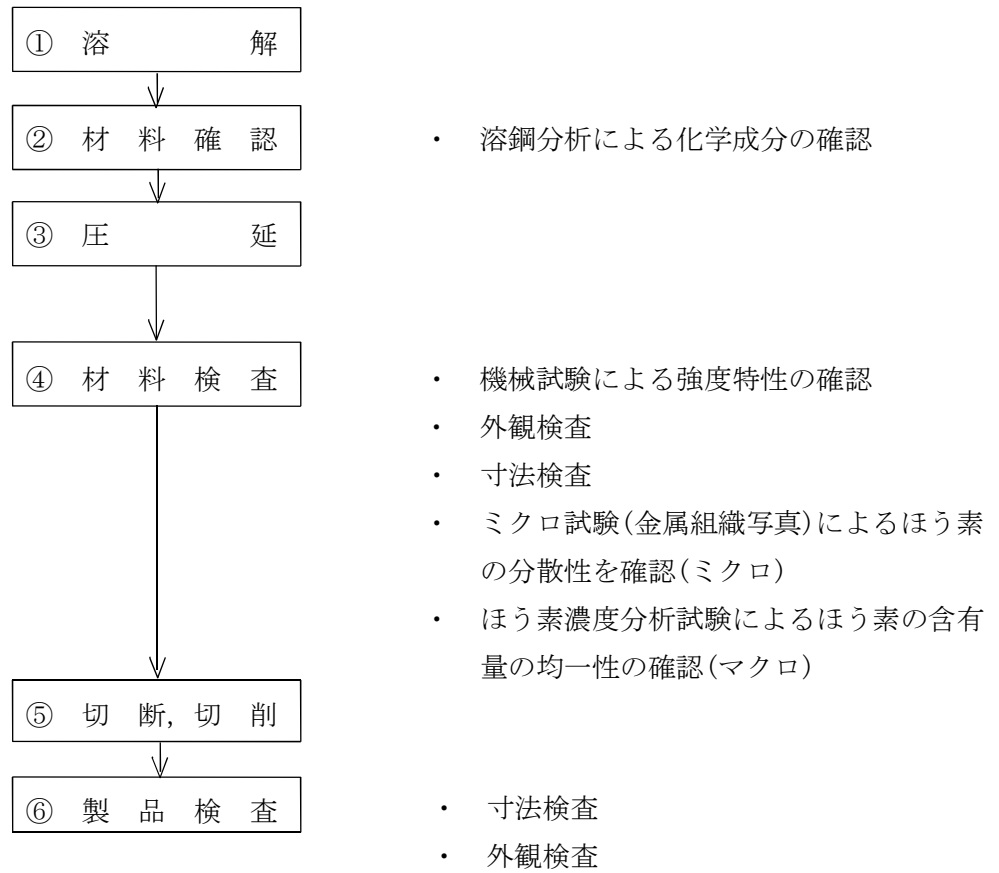
本材料は、5.1節で述べたように、SUS304と同様に固溶化熱処理を行う。

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第5-2図に示す。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。



第5-1図 製造フロー



第5-2図 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第 6-1 表に、各標本と試験の対応を第 6-2 表に示す。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ですが、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。

第 6-1 表 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 |

第 6-2 表 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

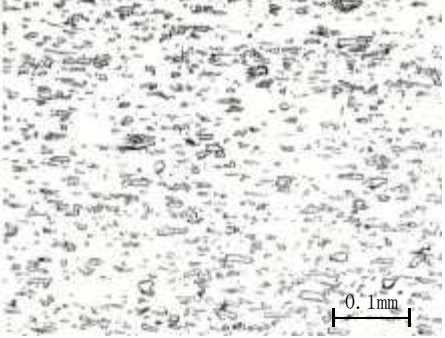
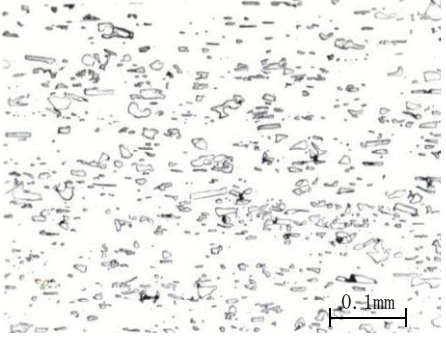
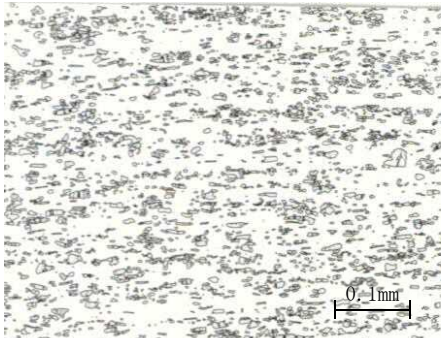
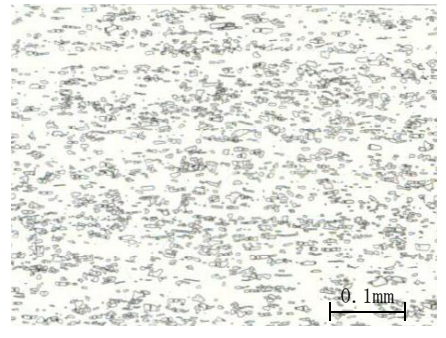
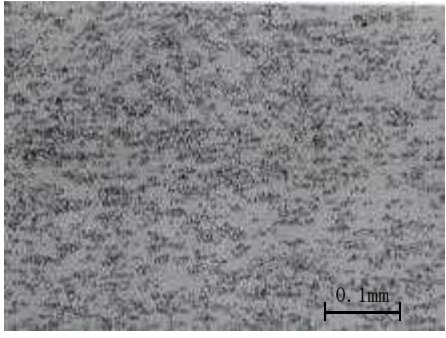
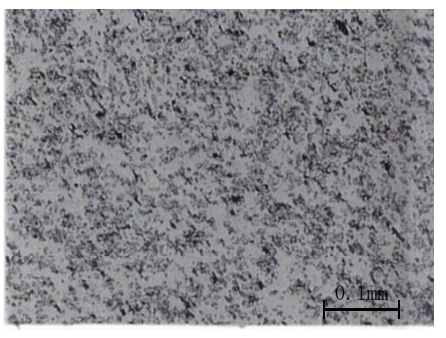
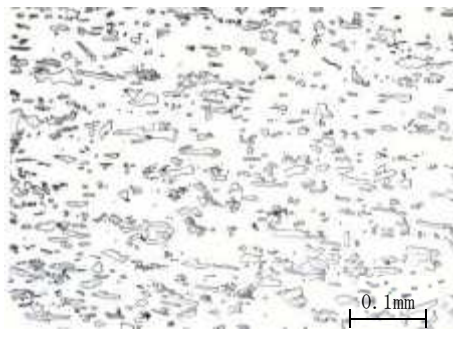
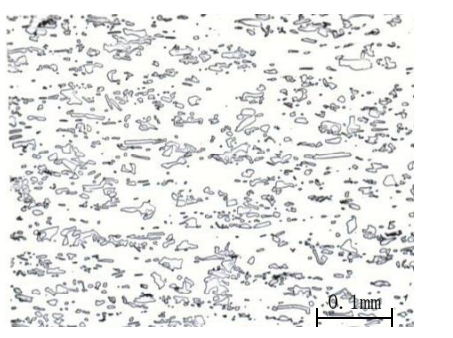
本材料のマクロ写真を第7-1図に示す。一般的な鉄鋼材料と大きな違いはない。

また、供試材のマイクロ組織観察結果を第7-1表に示す。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の濃度の 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。第7-1表では、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。第7-2図に、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。



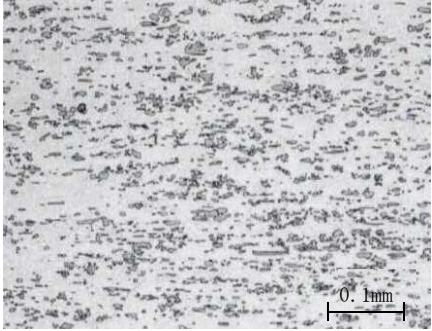
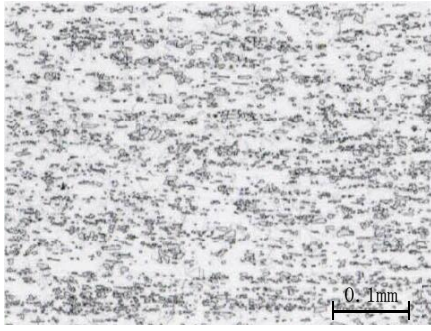
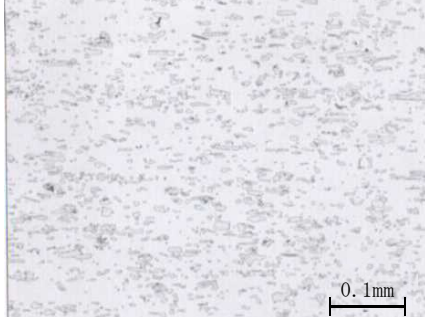
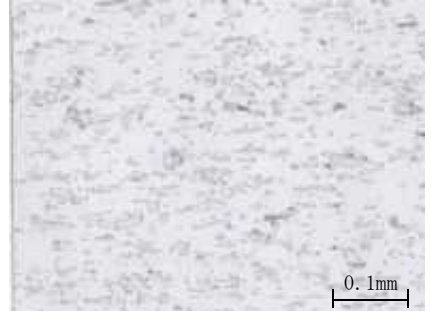

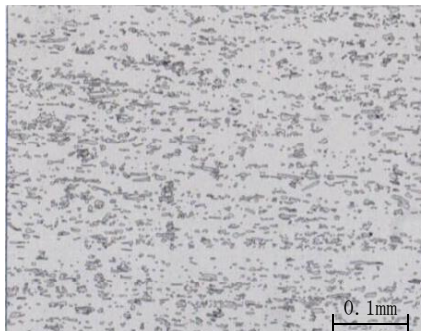
第7-1図 マクロ観察結果の例（標本7）

第7-1表(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> |

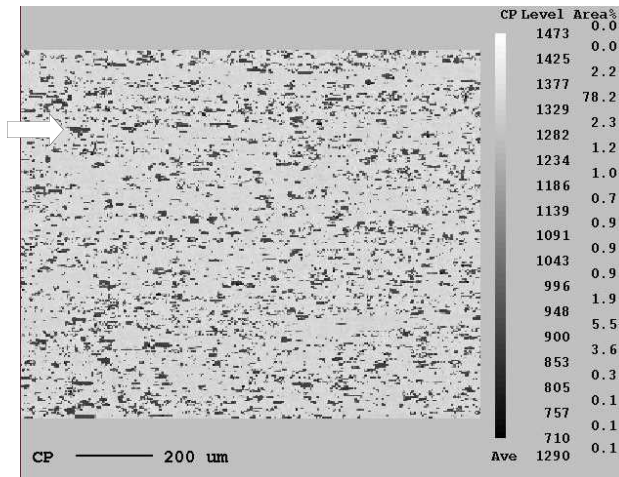
*: 標本 No. 欄の B(ほう素) 量は溶鋼分析時の結果を示す。本表の B 量の単位は全て mass% である。

第7-1表(2) ミクロ組織観察結果

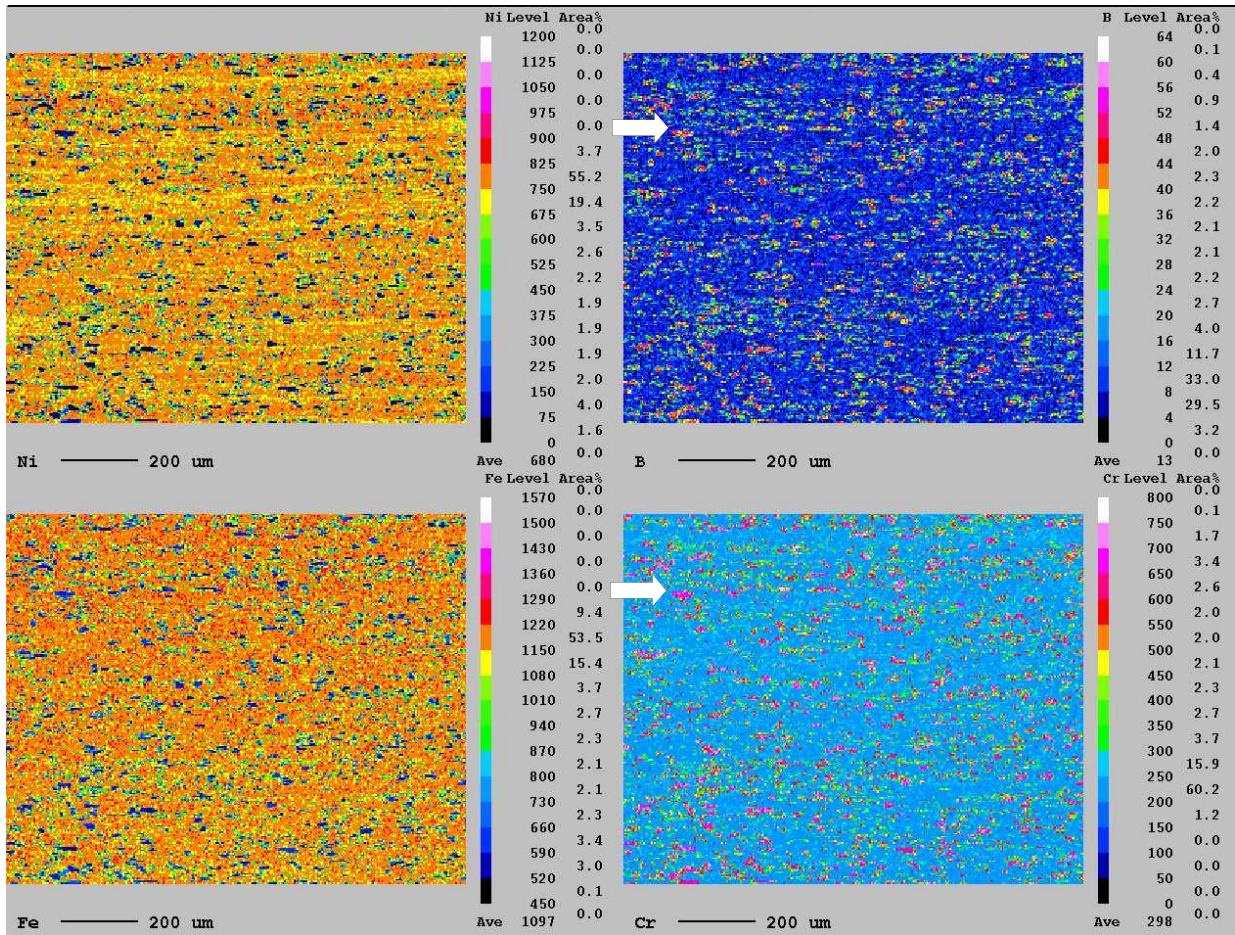
| 標本 No. (B 量*) | 圧延方向先端写真 (B 量) | 圧延方向後端写真 (B 量) |
|------------------|--|---|
| 標本 5 (1.05%) |  <p>(1.04%)</p> |  <p>(1.04%)</p> |
| 標本 6 (1.09%) |  <p>(1.07%)</p> |  <p>(1.08%)</p> |
| 標本 7 (1.14%) |  <p>(1.11%)</p> |  <p>(1.12%)</p> |

*: 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。

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。



(1) ミクロ組織



(2) 各元素分析

⇒ : 着目例

第 7-2 図 EPMA 分析結果の例(標本 7)

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 : 第 6-1 表に示す標本 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

第 10-1 表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、安全側に余裕を持った値とした。

10.2 じん性

(1) 試験条件

- ・ 供試材 : 第 6-1 表に示す標本 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°C
- ・ 応力拡大係数速度 : 300 MPa $\sqrt{\text{m}}$ /s 以上
- ・ 記録 : K_{Q} 値を測定した。

(2) 試験結果

第 10-2 表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_{Q} 値は 38 MPa $\sqrt{\text{m}}$ 以上であった。第 10-1 図に試験時の荷重-開口変位、第 10-2 図に荷重-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-開口変位を第 10-3 図にまとめて示す。

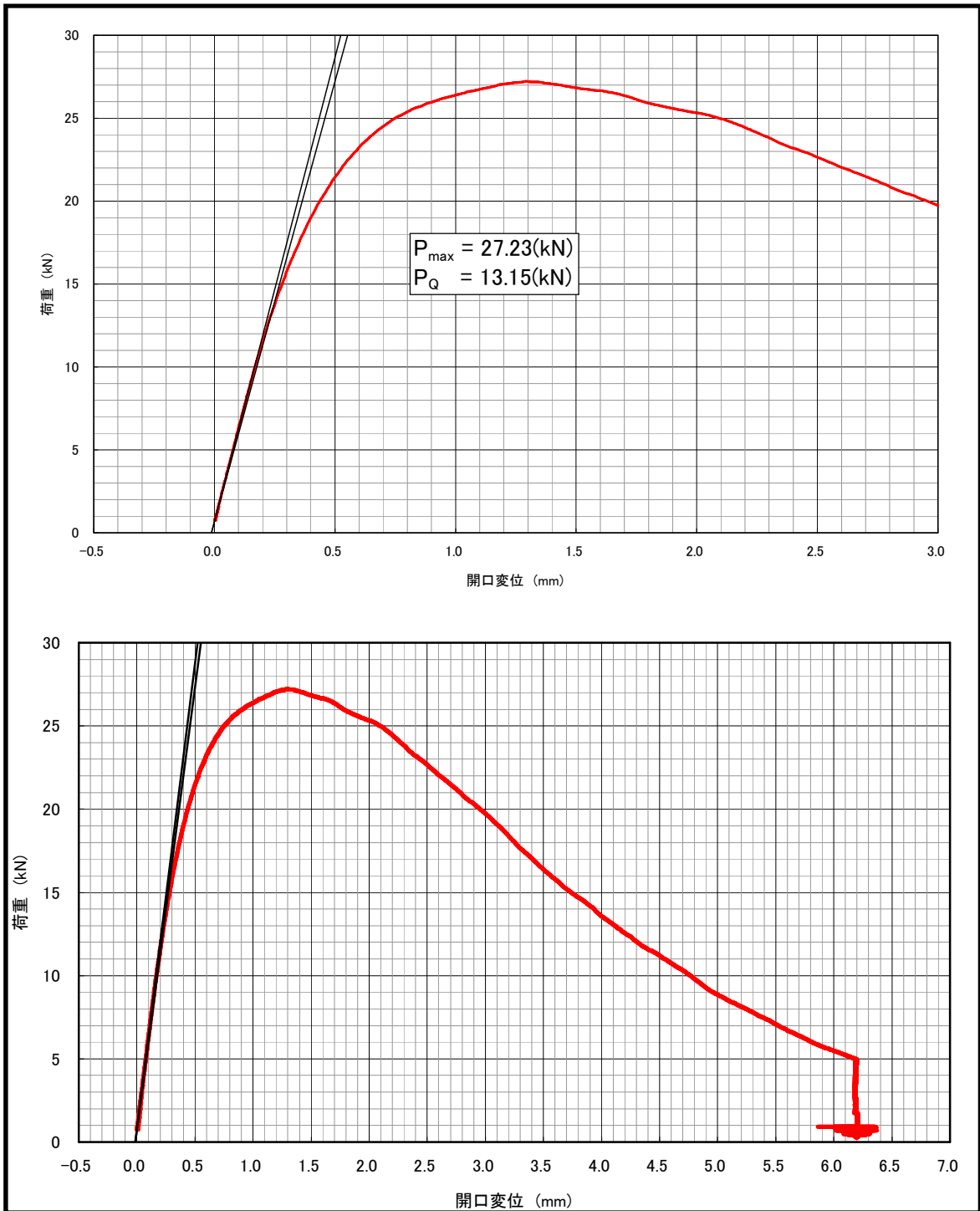
10.3 硬さ（参考）

(1) 試験条件

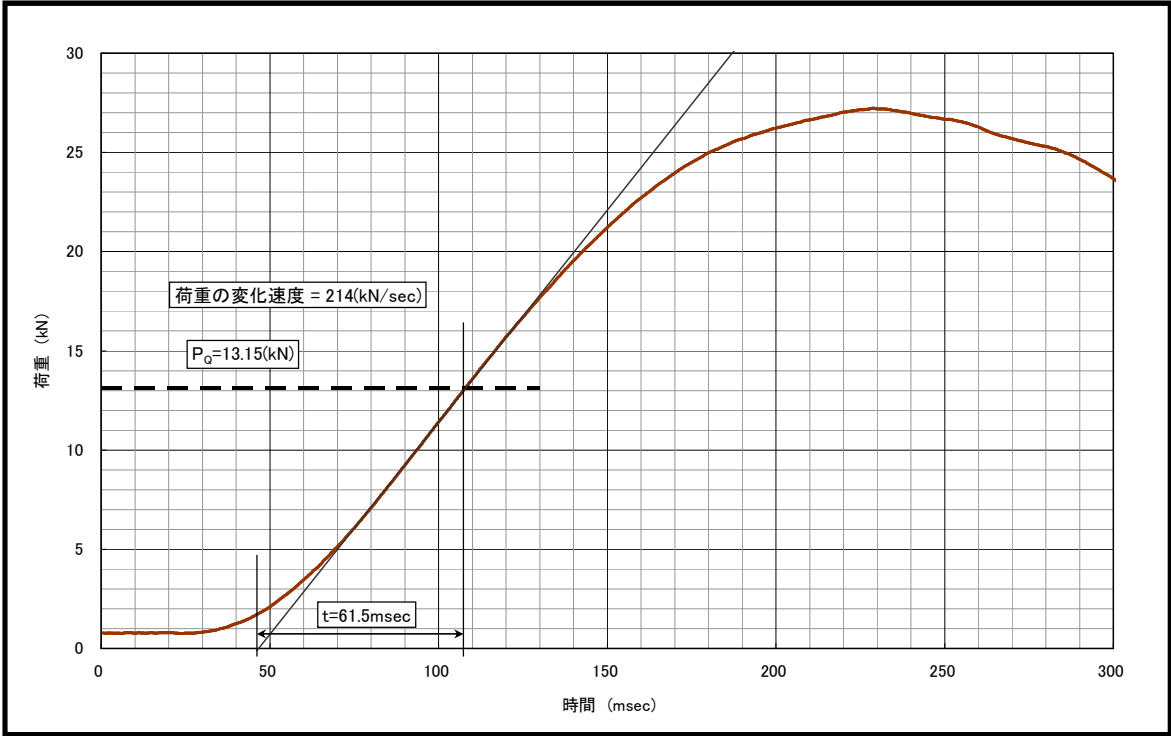
- ・ 供試材 : 第 6-1 表に示す標本 1~7 を対象とした。
- ・ 試験方法 : JIS Z 2244 「ビッカース硬さ試験」による。
- ・ 試験温度 : 常温
- ・ 記録 : ビッカース硬さを測定した。

(2) 試験結果

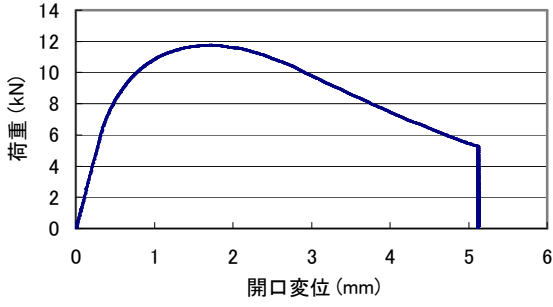
第 10-3 表に硬さ試験結果を示す。本材料は、ほう素を添加していることから、通常のステンレス鋼（規格値： ≤ 200 (Hv)）より硬度は増すが、「9. 加工性及び加工条件」で示したように製造上及び使用上特に問題となることはない。



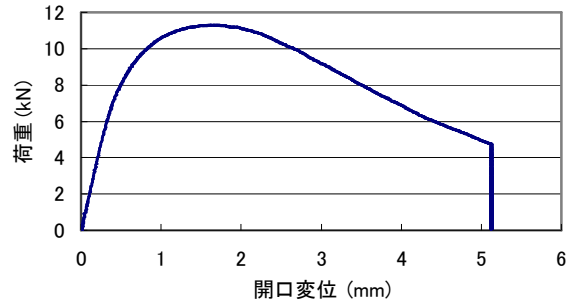
第10-1図 動的破壊じん性試験における荷重-開口変位線図(試験片番号7-2)



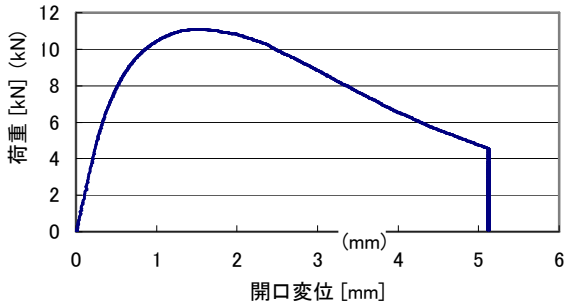
第 10-2 図 動的破壊じん性試験における荷重-時間線図(試験片番号 7-2)



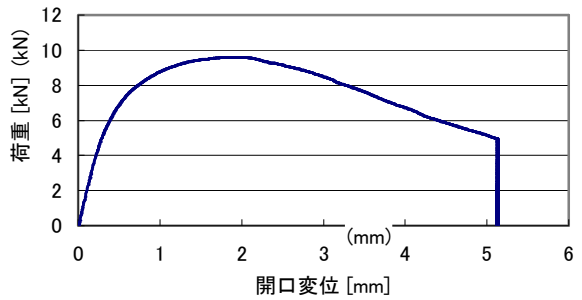
a) 試験片 5-1 (5t) の結果



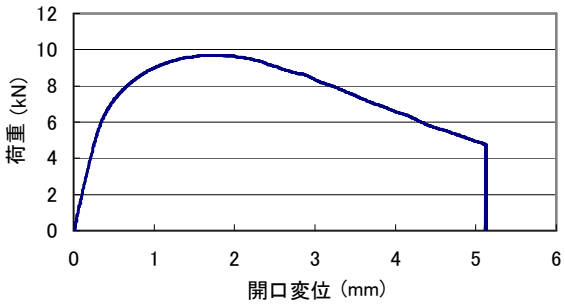
b) 試験片 5-2 (5t) の結果



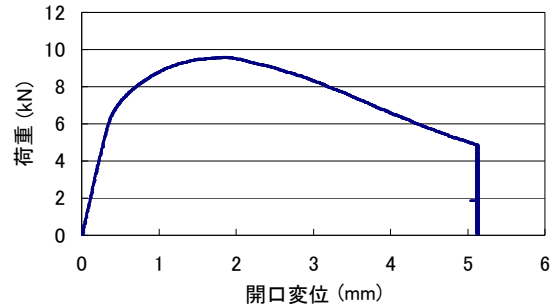
c) 試験片 5-3 (5t) の結果



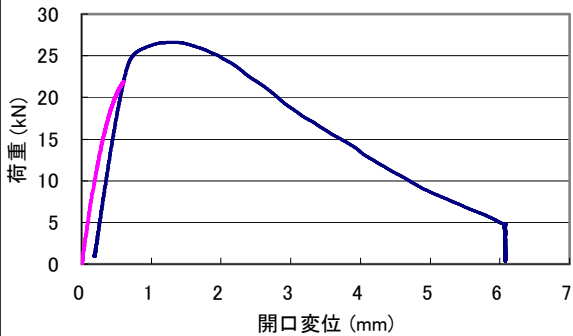
d) 試験片 5-4 (5t) の結果



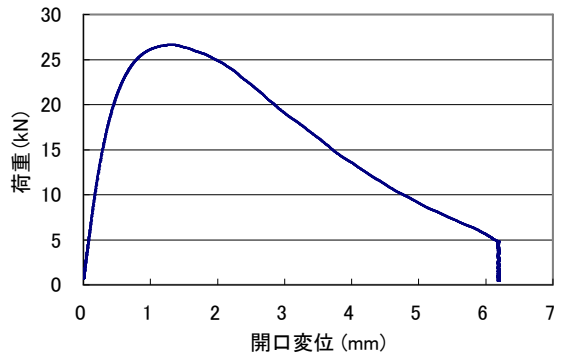
e) 試験片 6-2 (5t) の結果



f) 試験片 6-3 (5t) の結果



g) 試験片 7-1 (14t) の結果※



h) 試験片 7-3 (14t) の結果

※試験片 7-1 は初回の試験で、試験機の荷重不足により破断に至らなかった(左の線図)ため、試験機を変更して実施。このため、2回目の試験は初期変位の補正をかけている。

第 10-3 図 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。)

第10-1表 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 |

第10-2表 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 | |
|--|---------------------|---------------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 試験機スローク速度 mm/sec | | | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10.5 | 11.1 | 11.1 | |
| K値の変化速度 MPa・m ^{1/2} /sec | | | 1289 | 1329 | 1154 | 1392 | 1342 | 1280 | 635 | 640 | 640 | |
| 試験片厚さ mm | B | | 5.10 | 5.11 | 5.07 | 4.95 | 4.94 | 4.86 | 14.0 | 14.0 | 14.0 | |
| 試験片幅 mm | W | | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | |
| 試験温度 °C | | | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | -25 | |
| 静的0.2%耐力 MPa | σ_{YS} | | 341 | 341 | 341 | 283 | 283 | 283 | 302 | 302 | 302 | |
| 動的0.2%耐力 ¹⁾ MPa | σ_{YD} | | 453 | 455 | 453 | 402 | 399 | 396 | 411 | 410 | 411 | |
| P ₀ 荷重 kN | P ₀ | | 7.04 | 6.32 | 6.15 | 4.53 | 5.33 | 6.07 | 12.15 | 13.15 | 12.92 | |
| 最大荷重 kN | P _{max.} | | 11.78 | 11.30 | 11.10 | 9.60 | 9.70 | 9.58 | 26.65 | 27.23 | 26.63 | |
| 機械切欠長さ mm | | | M | 22.91 | 22.92 | 22.92 | 22.82 | 22.92 | 22.89 | 23.00 | 23.00 | 23.00 |
| 疲労き裂長さ mm | 0/4・B | a _{f0} | 2.06 | 2.06 | 2.07 | 2.05 | 1.95 | 2.05 | 1.76 | 1.76 | 1.96 | |
| | 1/4・B | a _{f1} | 2.35 | 2.53 | 2.64 | 2.37 | 2.36 | 2.15 | 2.57 | 2.65 | 2.75 | |
| | 2/4・B | a _{f2} | 2.44 | 2.74 | 2.83 | 2.54 | 2.57 | 2.29 | 2.54 | 2.79 | 2.97 | |
| | 3/4・B | a _{f3} | 2.26 | 2.57 | 2.69 | 2.38 | 2.45 | 2.26 | 2.49 | 2.61 | 2.73 | |
| | 4/4・B | a _{f4} | 1.95 | 2.20 | 2.06 | 2.08 | 2.12 | 2.02 | 1.81 | 1.79 | 1.84 | |
| | 最小値 | a _{f min.} | 1.95 | 2.06 | 2.06 | 2.05 | 1.95 | 2.02 | 1.76 | 1.76 | 1.84 | |
| 最大値 | a _{f max.} | 2.44 | 2.74 | 2.83 | 2.54 | 2.57 | 2.29 | 2.57 | 2.79 | 2.97 | | |
| き裂長さ ²⁾ mm | | | a | 25.26 | 25.53 | 25.64 | 25.25 | 25.38 | 25.12 | 25.53 | 25.68 | 25.82 |
| 係数 f(a/W) | | | | 9.82 | 9.98 | 10.05 | 9.81 | 9.89 | 9.73 | 9.99 | 10.08 | 10.17 |
| K ₀ 値 MPa・m ^{1/2} | | | K ₀ | 60.6 | 55.3 | 54.5 | 40.1 | 47.8 | 54.3 | 38.8 | 42.3 | 42.0 |
| P _{max} /P ₀ (≤1.10) | | | | 1.67; NO | 1.79; NO | 1.80; NO | 2.12; NO | 1.82; NO | 1.58; NO | 2.19; NO | 2.07; NO | 2.06; NO |
| B≥2.5(K ₀ /σ _{YD}) ² | | | | 44.7; NO | 37.0; NO | 36.2; NO | 24.9; NO | 35.8; NO | 47.0; NO | 22.2; NO | 26.5; NO | 26.0; NO |
| a≥2.5(K ₀ /σ _{YD}) ² | | | | 44.7; NO | 37.0; NO | 36.2; NO | 24.9; OK | 35.8; NO | 47.0; NO | 22.2; OK | 26.5; NO | 26.0; NO |
| K _{IC} 値 MPa・m ^{1/2} | | | K _{IC} | - | | | | | | | | |

1) ASTM-E1820 式(A13.2)を用いた

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

第 10-3 表 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

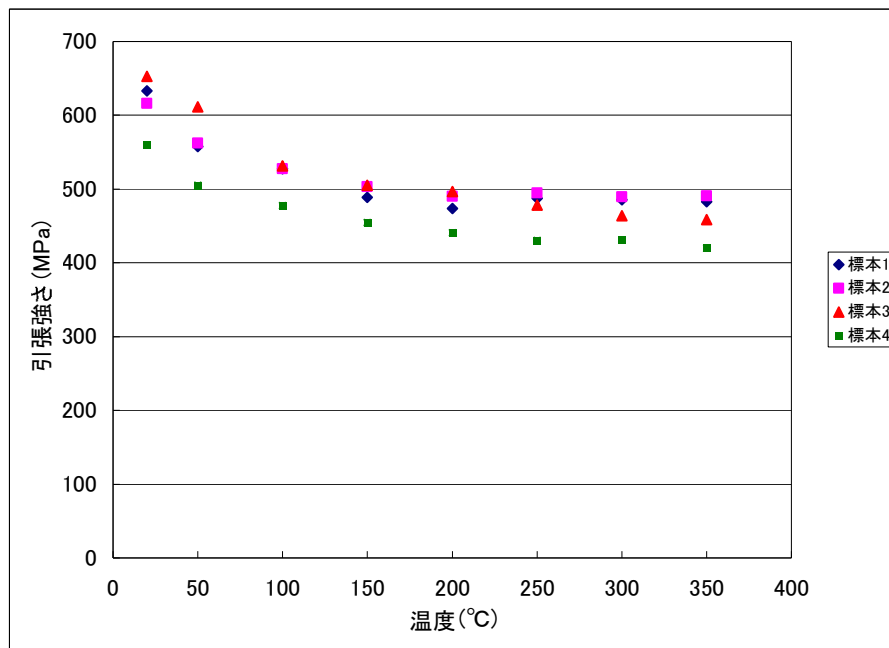
- ・ 供試材 : 第 6-1 表に示す標本 1~4 を対象とした。供試材は鋼板端部から少なくとも板厚以上離れた位置から採取した。
- ・ 試験片 : JIS Z 2201 「金属材料引張試験片」 13B 号又は 5 号試験片を用いた。
- ・ 試験方法 : JIS Z 2241 「金属材料引張試験方法」による。高温時は、JIS G 0567 「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」による。
- ・ 試験温度 : 20°C, 50°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C, 300°C及び 350°C
- ・ 記録 : 引張強さ, 0.2%耐力及び伸びを測定した。

(2) 試験結果

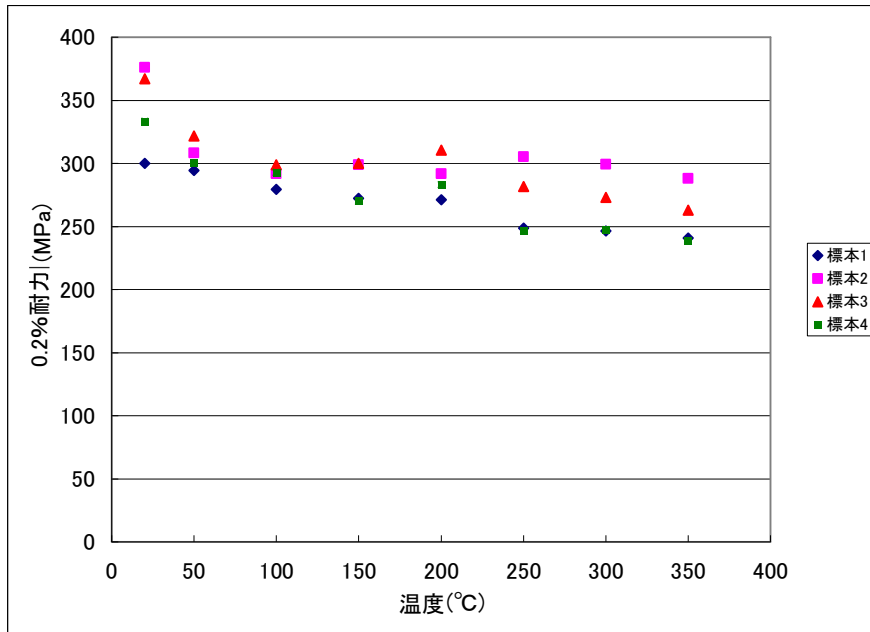
引張強さ, 0.2%耐力, 伸びについてそれぞれ第 11-1 図~第 11-3 図に引張試験結果を示す。

11.2 低温引張特性

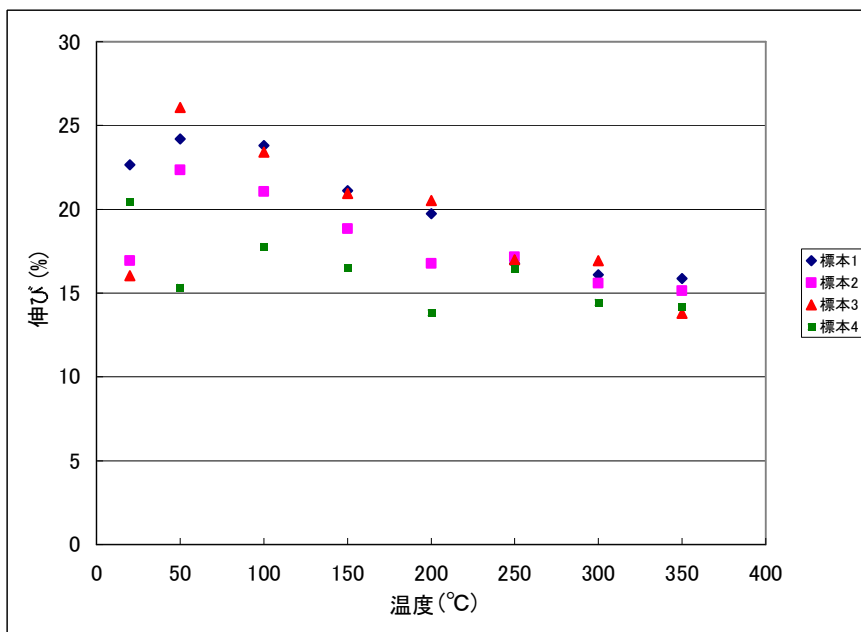
常温以下の低温に対しては常温の値を設定することとし, 設定応力を高くしないので, 低温引張特性データは採取しない。



第 11-1 図 引張強さの温度依存性



第 11-2 図 0.2%耐力の温度依存性



第 11-3 図 伸びの温度依存性

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

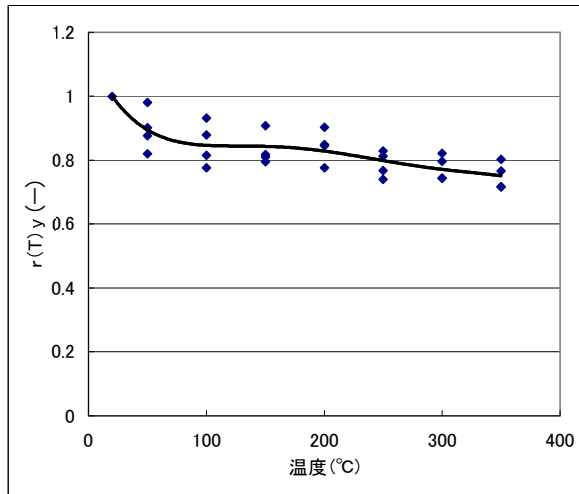
バスケットは使用済燃料を装荷する際に燃料プール内に浸漬されるが、同様の環境にて長期間プール内で使用されている使用済燃料貯蔵ラックで十分実績があること、燃料装荷後は脱水し、十分乾燥した後に不活性ガス（ヘリウム）を充填して使用することから、腐食を促進する環境ではないため、耐食性については問題ないと考える。

15. 設計降伏点

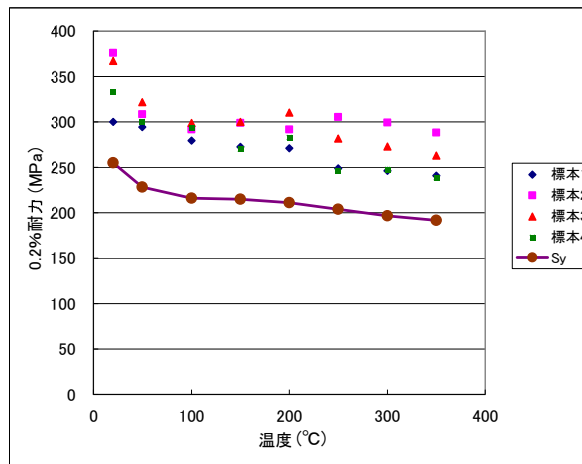
11.1 節で示した高温引張データに基づき、以下の要領で設計降伏点を策定した。

- (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るようにする。

各温度の $r(T)y$ 及び設計降伏点 (S_y) 設定値を第 15-1 図, 第 15-2 図及び第 15-1 表に示す。第 15-1 表については、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 NC1-2005 (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。



第 15-1 図 0.2%耐力における $r(T)y$ のトレンドカーブ



第 15-2 図 各標本データと S_y 設定値

第 15-1 表 材料の各温度における設計降伏点 S_y (MPa)

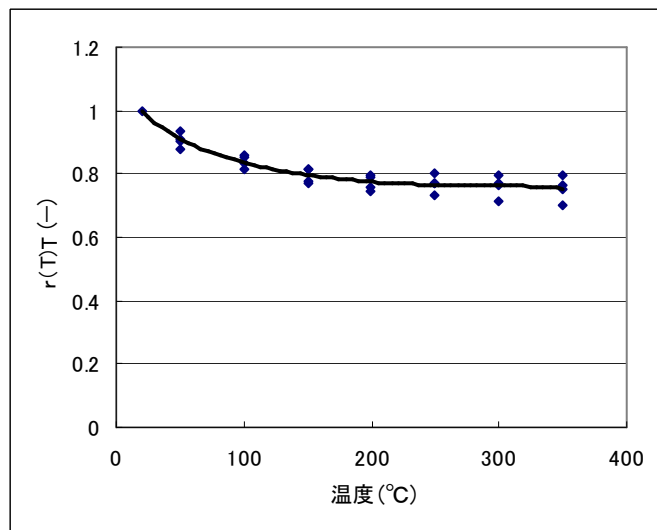
| 種類 | 最小引張強さ (MPa) | 最小降伏点 (MPa) | 温度 (°C) | | | | | | | | | | |
|--------------------|--------------|-------------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | | -25 ~ 40 | 75 | 100 | 150 | 200 | 225 | 250 | 275 | 300 | 325 | 350 |
| B-SUS304P-1 の設計降伏点 | 520 | 255 | 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

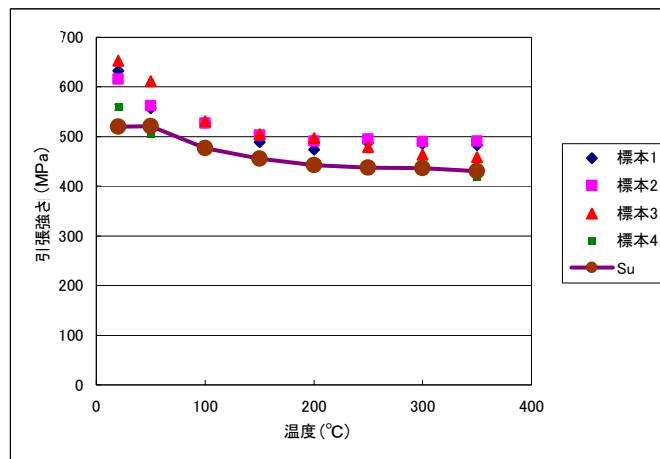
11.1 節で示した高温引張データに基づき、以下の要領で設計引張強さを策定した。

- (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を $r(T)_T$ 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らないようにする。

各温度の $r(T)_T$ 及び設計引張強さ (S_u) 設定値を第 16-1 図、第 16-2 図及び第 16-1 表に示す。第 16-1 表については、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。



第 16-1 図 引張強さにおける $r(T)_T$ のトレンドカーブ



第 16-2 図 各標本データと S_u 設定値

第 16-1 表 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、下表に示す各温度毎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 | $1/3 \times S_T^*$ | $1.1/3 \times S_T^* \times r(T)_T$ | $2/3 \times S_y$ | $2/3 \times S_y \times r(T)_y$ もしくは $0.9 \times S_y \times r(T)_y$ |

* 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) を第 17-1 表に示す。第 17-1 表については、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。

第 17-1 表 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第 20-1 図に示し、設定値を第 20-1 表に示す。第 20-1 表については、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。

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℃高い温度である 350℃までの熱伝導率測定試験を実施 (n=3) した。熱伝導率について第 20-2 図に示し、設定値を第 20-2 表に示す。

20.3 温度伝導率

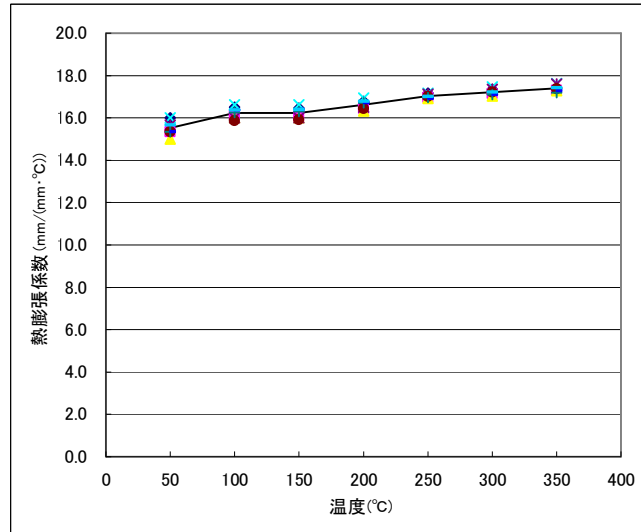
温度伝導率については、標本 1～3 に対して、常温から最高使用温度より 50℃高い温度である 350℃までの比熱測定試験を実施 (n=3) し、材料密度 7.8g/cm^3 として求めた。設定値を第 20-3 表に示す。

20.4 縦弾性係数

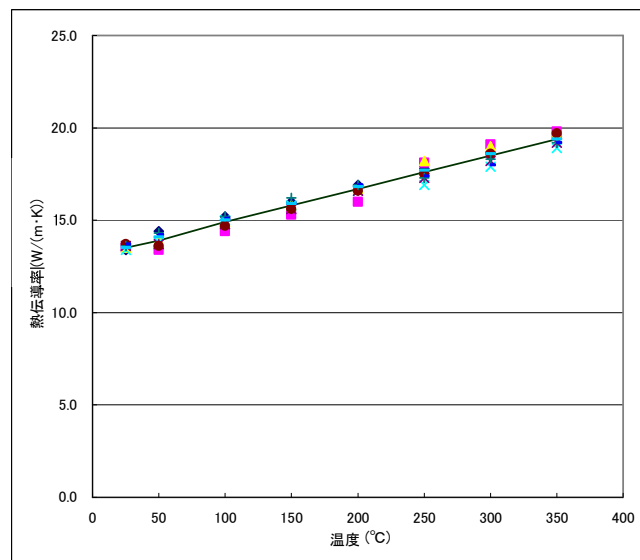
標本 1～3 に対して、常温から最高使用温度より 50℃高い温度である 350℃までの縦弾性係数測定試験を実施 (n=3) した。縦弾性係数について第 20-3 図に示し、設定値を第 20-4 表に示す。第 20-4 表については、記載温度を設計・建設規格 付録材料図表 Part6 表 1 に合わせた。

20.5 ポアソン比

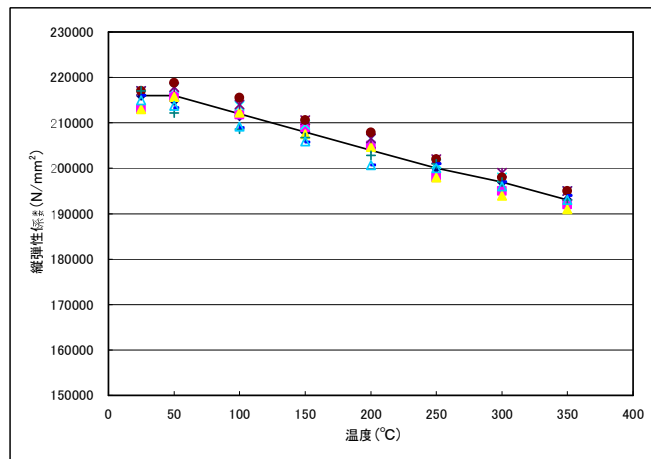
標本 1～3 に対して、常温から最高使用温度より 50℃高い温度である 350℃までのポアソン比測定試験を実施 (n=3) した。ポアソン比について第 20-4 図に示す。なお、ポアソン比はばらつきも小さく、設計に大きく影響しないことから、設定値としては常温から 300℃まで一定値 0.3 とする。



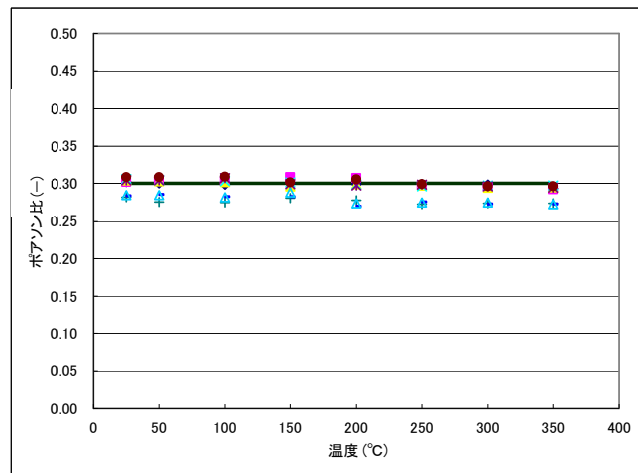
第 20-1 図 熱膨張係数(平均)の温度依存性



第 20-2 図 熱伝導率の温度依存性



第 20-3 図 縦弾性係数の温度依存性



第 20-4 図 ポアソン比の温度依存性

第 20-1 表 本材料の熱膨張係数

 $(\times 10^{-6} \text{ mm}/(\text{mm}\cdot^{\circ}\text{C}))$

| 種 類 | 温 度 ($^{\circ}\text{C}$) | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 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 |

第 20-2 表 本材料の熱伝導率設定値

 $(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$

| 種 類 | 温 度 ($^{\circ}\text{C}$) | | | | | | | |
|-----------------------|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 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

第 20-3 表 本材料の温度伝導率設定値

 (mm^2/s)

| 種 類 | 温 度 ($^{\circ}\text{C}$) | | | | | | | |
|------------------------|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 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

第 20-4 表 材料の各温度における縦弾性係数

 (MPa)

| 種 類 | 温 度 ($^{\circ}\text{C}$) | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 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 |

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⁽¹¹⁾。

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/cm² 程度と見積もられ、炉内における $10^{21} \sim 10^{22}$ n/cm² 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/cm² 程度からであり⁽¹²⁾、 10^{15} n/cm² 程度では機械的性質にほとんど変化がな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}B の (n, α) 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⁽¹³⁾。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⁽¹⁴⁾、⁽¹⁵⁾。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/cm² 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}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」, まてりあ, 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)

ボロン添加ステンレス鋼板の破壊じん性に関する補足説明

目 次

| | |
|----------------------|----------|
| 1. はじめに | 別紙 4-2-1 |
| 2. 設計の考え方 | 別紙 4-2-1 |
| 3. 材料特性（破壊じん性） | 別紙 4-2-1 |
| 3.1 破壊じん性試験 | 別紙 4-2-1 |
| 4. 許容欠陥寸法の評価 | 別紙 4-2-6 |
| 5. 引用文献 | 別紙 4-2-8 |

図表目次

| | | |
|---------|-------------------------------|----------|
| 第 3-1 図 | 時効後じん性確認試験の結果 | 別紙 4-2-3 |
| 第 4-1 図 | 許容欠陥寸法評価モデル及び評価式 | 別紙 4-2-6 |
| 第 4-2 図 | 想定欠陥深さと破壊じん性値 (K_0 値) との関係 | 別紙 4-2-7 |
| 第 3-1 表 | シャルピー衝撃試験結果 | 別紙 4-2-4 |
| 第 3-2 表 | 時効後じん性確認試験条件と試験結果 | 別紙 4-2-5 |

1. はじめに

金属キャスク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ボロン添加ステンレス鋼板 (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

金属キャスクは、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、も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可能性があるため、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 : 別紙 4-1 第 6-1 表に示す標本 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°C
- ・ 記録 : 横棒出量及び衝撃値を測定した。

(b) 試験結果

第 3-1 表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。(一社) 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「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第 3-2 表に示し、これらを LMP で整理した結果を第 3-1 図に示す。第 3-2 表からわかるように、各温度とも 100hr までは非時効材と同程度であった。また、第 3-1 図に示すように、LMP で 300°C 、60 年相当までじん性低下は見られない。

(2) 動的破壊じん性試験

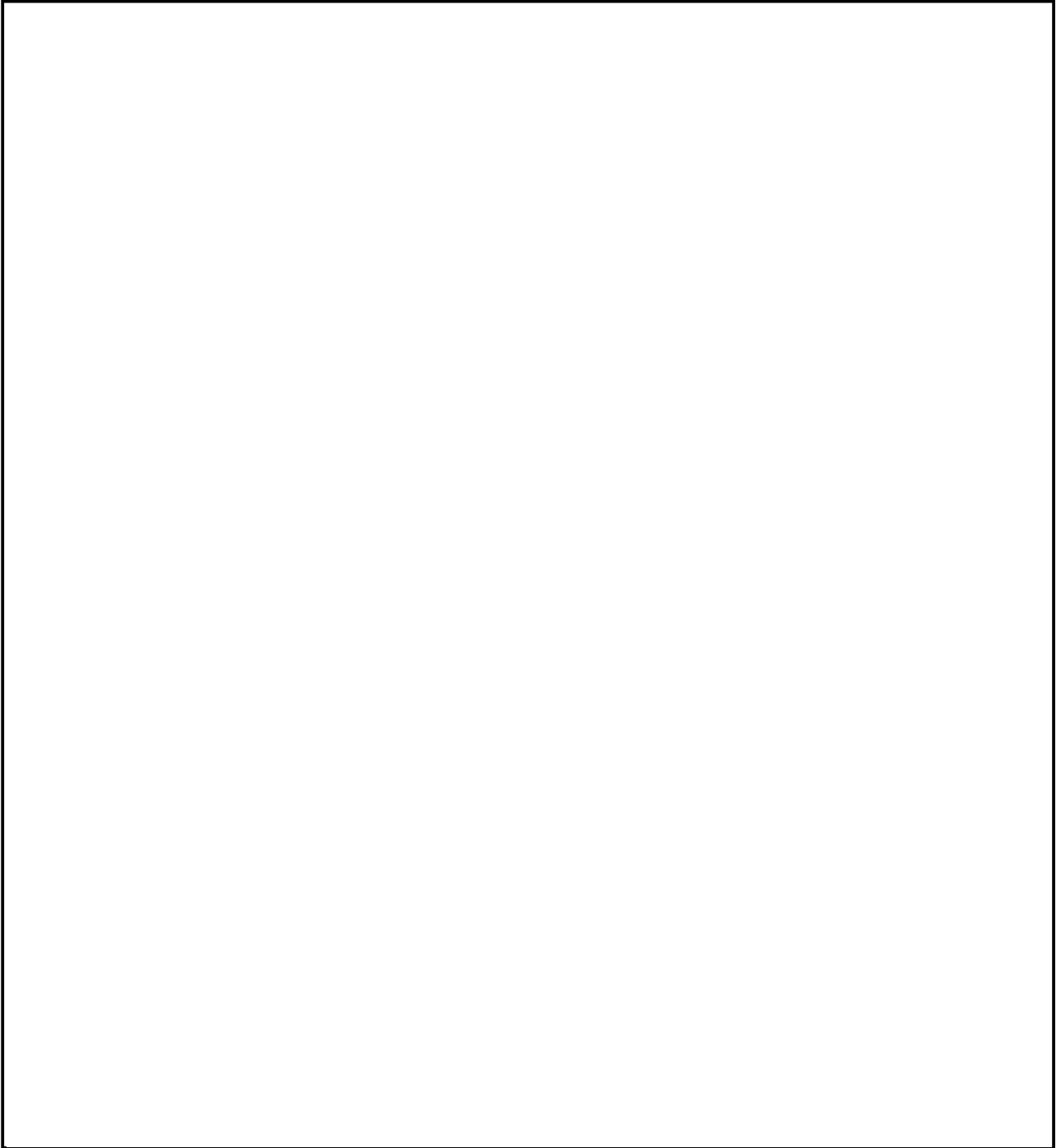
(a) 試験条件

- ・ 供試材 : 別紙 4-1 第 6-1 表に示す標本 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 $\sqrt{m/s}$ 以上
- ・ 記録 : K_Q 値を測定した。

(b) 試験結果

別紙 4-1 第 10-2 表の動的破壊じん性試験結果より, K_Q 値は 38 MPa \sqrt{m} 以上である。

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。



第3-1 図 時効後じん性確認試験の結果

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

第3-1表 シャルピー衝撃試験結果

| 温度(°C) | 試験片 No. | 横膨出量(mm) | 衝撃値(J/cm ²) | 備考 |
|--------|---------|----------|-------------------------|-------|
| -25 | | | | |
| | 平均値 | 0.24 | 23 | 9点の平均 |

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第 4-1 図に示す方法により許容欠陥寸法評価を行った。第 4-2 図に想定欠陥深さと破壊じん性値 (K_Q 値) との関係を示す。

第 4-2 図に示すとおり、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。当該ボロン添加ステンレス鋼板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、別紙 4-1 第 5-2 図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。

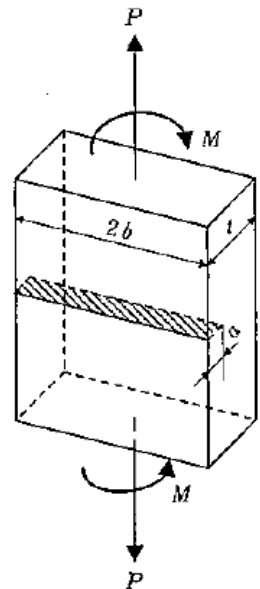
- (a) 想定欠陥：一様深さの表面き裂（線状欠陥）
- (b) 荷重：仮想的に設計降伏点 ($S_y=255$ MPa) の曲げ応力を想定
- (c) 評価方法：第 4-2 図に示す評価式

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

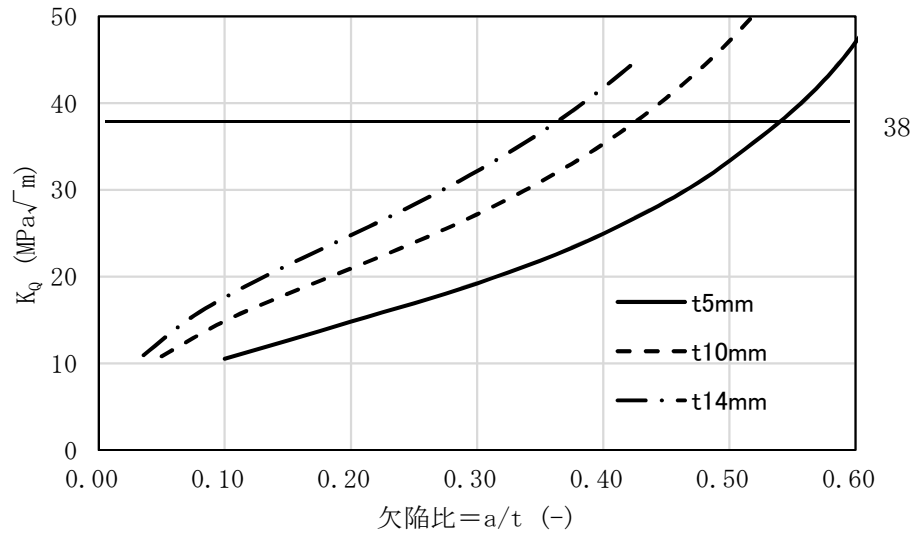
$$\sigma_m = \frac{P}{2bt}, \quad \sigma_b = \frac{3M}{bt^2}$$

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

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



第 4-1 図 許容欠陥寸法評価モデル及び評価式 ⁽¹⁾



第4-2図 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)