

資料 1-3

Doc No. GK04-SC-Z03 Rev.2

2024 年 2 月 8 日

日立造船株式会社

補足説明資料 1-2

バスケット材料 (HZ-SG295HAR) と設計方針の関係について

## 目 次

1. 概要	1
2. 安全設計の基本方針	2
3. バスケット材料（HZ-SG295HAR）の基本方針	3
4. 材料試験の方針	7
5. 材料規定の方針	10
6. 製造管理規定の方針	14
7. 長期健全性の考え方	16
8. 伝熱性能に対する考え方	18
9. 設計評価基準の考え方	19
10. 型式指定への引継ぎ事項	21
11. 参考文献	21

別紙 1 材料試験の結果及び設計用強度の評価結果

別紙 2 バスケット材料の冷間加工に伴う脆化とその対策について

別紙 3 ASME 新規材料承認ガイドラインについて

別紙 4 バスケット材料のオーステナイト結晶粒度と全アルミニウム量及び酸可溶性アルミニウム量の関係について

別紙 5 バスケット材料のひずみ時効対策を目的とした応力除去焼鈍の有効性確認試験について

## 1. 概要

特定兼用キャスクは、安全機能を満足するとともに安全機能を担保するための構造強度と長期健全性を有し、貯蔵時のみならず法令に定められた輸送時の各試験条件に耐え得る設計が求められることから、**Hitz-B69** 型のバスケットは、安全機能に対する安全設計の基本方針に従って設計している。

本補足説明資料は、**Hitz-B69** 型のバスケットの主たる構造部材として、格子状に配置した使用済燃料集合体を収納する角パイプ状の部材（以下、「コンパートメント」という。）の材料（以下、「バスケット材料」という。）である **HZ-SG295HAR** <sup>(注)</sup> について、設計方針との関係及び適用の考え方を説明するものである。

---

注：**HZ-SG295HAR** は、バスケット材料として使用するにあたり、冷間加工後にひずみ時効対策として応力除去焼鈍を施すこととしている。（14 及び 17 ページ参照）  
したがって、**HZ-SG295HAR** の製造管理規定上の熱処理は「圧延のまま」であり、応力除去焼鈍は冷間加工後の製造過程で施工する加工（熱処理）のひとつと定義する。

## 2. 安全設計の基本方針

Hitz-B69 型は、安全機能及び安全機能を担保する構造強度と長期健全性を有する設計であり、バスケットの安全機能に対する安全設計の基本方針は次のとおり。

**臨 界 防 止 機 能：** Hitz-B69 型は、技術的に想定されるいかなる場合においても、核燃料物質が臨界に達するおそれのない設計であり、バスケットは臨界防止機能を維持するため、使用済燃料集合体を所定の幾何学的配置に維持するとともに適切な中性子吸収材の配置を維持する機械的強度と長期健全性を有する設計とする。

**除 熱 機 能：** Hitz-B69 型は、使用済燃料集合体の崩壊熱を特定兼用キャスク表面に伝え周囲空気等に伝達することにより、動力を用いることなく使用済燃料集合体の崩壊熱を適切に除去できる設計であり、バスケットは適切に使用済燃料集合体の崩壊熱を容器本体に伝える伝熱性能を有する設計とする。

**閉 じ 込 め 機 能：** Hitz-B69 型は、使用済燃料集合体を内封する空間を負圧に維持することにより、使用済燃料集合体を内封する空間を特定兼用キャスク外部から隔離する設計であり、バスケットは使用済燃料集合体を内封する空間と同一の空間にあるため、閉じ込め機能に対してバスケットの設計は有意な影響を及ぼさないと考えられることから、Hitz-B69 型はバスケットの設計に係わらず閉じ込め機能を有する設計とする。

**遮 蔽 機 能：** Hitz-B69 型は、設置される工場等の周辺及び管理区域その他工場等内の人が立ち入る場所の放射線量を低減できるように使用済燃料から放出される放射線を特定兼用キャスクの本体胴及び蓋部により遮蔽する設計であり、バスケットは本体胴及び蓋部の内側に位置するため、遮蔽機能に対してバスケットの設計は有意な影響を及ぼさないと考えられることから、Hitz-B69 型はバスケットの設計に係わらず遮蔽機能を有する設計とする。

### 3. バスケット材料（HZ-SG295HAR）の基本方針

Hitz-B69 型のバスケットは、臨界防止機能と除熱機能の各安全機能及び各安全機能を担保する構造強度と長期健全性を有する設計とする必要がある。

また、必要な本体容器の遮蔽材厚さを確保すると共に施設の取扱重量制限を両立させるため、可能な限りバスケット外径を小型化し軽量化を図る設計が求められる。

その要求を実現するために Hitz-B69 型のバスケットの主たる構造部材となるコンパートメントは、伝熱性能と強度が期待できる厚さの薄い炭素鋼鋼板が望ましい。

日本機械学会規格「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格（2007 年版）」（JSME S FA1-2007）（以下、「金属キャスク構造規格」という。）では、金属キャスクに使用できる材料が規定されており、この規定においてバスケット材料として使用できる炭素鋼鋼板は、日本産業規格「中・常温圧力容器用鋼板」（JIS G 3118：2017）（以下、「JIS G 3118」という。）に規定されている SGV410、SGV450 及び SGV480 のみとなっているが、JIS G 3118 に規定された材料厚さは 6 ～ 200 mm であり、この材料厚さの範囲ではバスケット外径の小型化と軽量化が困難であり、Hitz-B69 型が必要とする遮蔽材の厚さを確保することが難しいと考えられる。

一方、日本産業規格「高圧ガス容器用鋼板及び鋼帯」（JIS G 3116：2020）（以下、「JIS G 3116」という。）には、1.6 ～ 6.0 mm の厚さの SG255、SG295、SG325 及び SG365 という 4 つの炭素鋼が規定されている。

使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器等の設計の型式証明（M-DPC20002）を受けた類似構造の先行例（Hitz-B52 型）のバスケット材料として使用している JIS G 3118 に規定された SGV410 は、バスケットに使用できる材料として金属キャスク構造規格に規定されている。また、JIS G 3116 に規定された SG295 は、表 2 及び表 3 に示すとおり、JIS G 3118 に規定された SGV410 と類似の化学成分及び製造方法の熱間圧延鋼であり、概ね同等の機械的性質を有している。

しかし、JIS G 3116 には、靱性や長期健全性に係る製造方法、熱処理、オーステナイト結晶粒度及び品質管理の規定がないため、バスケット材料として使用するためには、これらの要件を追加する必要がある。したがって、Hitz-B69 型に使用するバスケット材料は、JIS G 3116 に定められた炭素鋼に靱性や長期健全性に係る追加の要件を課すこととし、HZ-SG295HAR と称することとする。

バスケット材料（HZ-SG295HAR）の設計方針に対する考え方は次のとおり。

#### (1) 適用範囲の基本方針

Hitz-B69 型のバスケット材料及び本材料を使用するバスケットは、以下の事項に適合することとする。

- ・ 設計貯蔵期間（供用期間）は 60 年以下とする。

- ・ バスケットが収納される特定兼用キャスク本体内部はヘリウムガスを封入し、設計貯蔵期間中の全期間を通じて、不活性ガス雰囲気は維持されることとする。
- ・ バスケットの最高使用温度は 300℃以下とする。
- ・ 供用状態によらずバスケットは、設計貯蔵期間中の全期間を通じて、熱応力を生じない構造とする。
- ・ 本材料は耐圧構造で使用してはならないものとする。
- ・ 本材料はボルト材として使用してはならないものとする。

## (2) 材料試験の基本方針

日本機械学会規格の「発電用原子力設備規格 材料規格 (2012 年版/2013 年追補) (JSME S NJ-2012/JSME S NJ-2013) (以下、「材料規格」という。)に付随する添付 1. 新規材料採用ガイドライン (以下、「新規材料採用ガイドライン」という。)に準じた材料試験で機械的性質等の必要な材料特性を取得する。

## (3) 材料規定の基本方針 (設計用強度)

材料試験で取得した機械的性質等の材料特性から新規材料ガイドラインに従った設定方法に基づき、バスケット材料の設計用強度として設計降伏点 ( $S_y$  値)、設計引張強さ ( $S_u$  値)、設計応力強さ ( $S_m$  値) 及び許容引張応力 ( $S$  値) を設定する。

このとき、HZ-SG295HAR の設計用強度は、JIS G 3116 に定められた SG295 の常温の降伏点及び引張強さを基準とし、材料試験で取得した材料特性を包絡するように保守的に設定する。また、各温度の設計用強度は、保守的に設定した常温の強度で規準化したトレンド曲線による方法を用いて設定することとする。

材料規格の新規材料採用ガイドラインに従って設計用強度を設定することにあたっては、アメリカ機械学会 (The American Society of Mechanical Engineers) 規格の新規材料承認ガイドライン (ASME Section II Part D, Mandatory Appendix, Guidelines on the Approval of New Materials under the ASME Boiler and Pressure Vessel Code) を考慮することとする。(別紙 3 参照)

以上に従って設定した設計降伏点 ( $S_y$  値)、設計引張強さ ( $S_u$  値)、設計応力強さ ( $S_m$  値) 及び許容引張応力 ( $S$  値) を材料規定として定める。

## (4) 製造管理規定の基本方針

JIS G 3116 には、バスケット材料として必要と考えられる靱性や長期健全性に係る製造方法、熱処理、オーステナイト結晶粒度及び品質管理の規定がない。

このため、製造方法、熱処理、オーステナイト結晶粒度及び品質管理の規定については、バスケットに使用できる材料として金属キャスク構造規格に規定された SGV410 等の規格である JIS G 3118 を準用し、製造管理規定を定める。

表 1 JIS G 3116 と JIS G 3118 の比較

項目	JIS G 3116	JIS G 3118
適用範囲	この規格は、 <u>LPガス、アセチレンなどの各種高圧ガスを充填する内容積 500 L 以下の溶接容器に用いる熱間圧延鋼板及び鋼帯</u> （以下、それぞれ鋼板、鋼帯という。）について規定する。	この規格は、 <u>主に中温から常温で使用される圧力容器に用いる熱間圧延炭素鋼鋼板</u> （以下、鋼板という。）について規定する。
引用規格	JIS G 0320、JIS G 0404、JIS G 0415、JIS G 3193、 JIS Z 2241、JIS G 2248	JIS G 0320、 <u>JIS G 0321</u> 、JIS G 0404、JIS G 0415、 <u>JIS G 0551</u> 、JIS G 3193、JIS Z 2241、JIS G 2248
種類の記号及び厚さ	鋼板及び鋼帯で 4 種、厚さ 1.6 mm ~ 6.0mm	鋼板で 3 種、厚さ 6 ~ 200 mm
製造方法	規定なし	鋼板は、細粒キルド鋼から製造する
熱処理	規定なし	38mm を超える鋼板は規定あり、他は圧延のまま
化学成分	(表 2 参照)	(表 2 参照)
炭素当量及び溶接割れ感受性塑性	規定なし	熱加工制御 (TMCP) を行う SGV450 及び SGV480 について規定あり
機械的性質	(表 3 参照)	(表 3 参照)
オーステナイト結晶粒度	規定なし	5 以上 (注)
形状、寸法、質量及びその許容差	JIS G 3193 による	JIS G 3193 による
試験	溶鋼分析、機械試験	溶鋼分析、製品分析、機械試験
検査	JIS G 0404 による	JIS G 0404 に加えて炭素当量及び溶接割れ感受性組成、オーステナイト結晶粒度を検査
再検査	JIS G 0404 の 9.8 (再検査) による	JIS G 0404 の 9.8 (再検査) による
表示	規定あり (JIS G 3118 とほぼ同じ)	規定あり
報告	規定あり (JIS G 3118 とほぼ同じ)	規定あり

(注) 結晶粒度試験は、全アルミニウム分析値が、0.020 %以上又は酸可溶性アルミニウムの分析値が 0.015%以上の場合は、省略しても良い。

表 2 化学成分

規格	種類の記号	化学成分(%)				
		C	Si	Mn	P	S
JIS G 3116	SG295	≦0.20	≦0.35	≦1.00	≦0.020	≦0.020
JIS G 3118 (≦12.5mm)	SGV410	≦0.21	0.15~0.40	0.85~1.20	≦0.020	≦0.020
	SGV450	≦0.24	0.15~0.40	0.85~1.20	≦0.020	≦0.020
	SGV480	≦0.27	0.15~0.40	0.85~1.20	≦0.020	≦0.020

表 3 機械的性質

規格	種類の記号	降伏点又は耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	曲げ性	
					曲げ角度	内側半径
JIS G 3116	SG295	≧295	≧440	≧26	180°	厚さの 1.5 倍
JIS G 3118 (≦25mm)	SGV410	≧225	410~490	≧19	180°	厚さの 0.5 倍
	SGV450	≧245	450~540	≧17	180°	厚さの 0.75 倍
	SGV480	≧265	480~590	≧15	180°	厚さの 1.0 倍



#### 4. 材料試験の方針

HZ-SG295HAR の設計用強度の設定に用いる材料特性は、新規材料採用ガイドラインに準じた材料試験によって、機械的性質等を取得する。また、材料試験の項目は、新規材料採用ガイドラインの要求項目に沿って必要と考えられるものを実施する。

表 4 に材料試験の項目及び新規材料ガイドラインの要求項目を示す。

この方針に基づいて実施した材料試験の結果を別紙 1 に示す。

表 4 材料試験の項目及び新規材料ガイドライン要求項目

新規材料ガイドライン要求項目	材料試験の項目 注1	JIS G 3116 を 適用するもの 注2	備 考
(1) 材料の基本化学成分及び用途			用途：金属キャスク
(2) 材料の仕様	a.適合規格		JIS G 3116 : 2020
	b.化学成分制限		○
	c.機械的性質 (常温の規格値)		○
	d.寸法制限(径、厚さ)		○
	e.形状寸法 (寸法公差)		○
(3) 使用条件	a.適用範囲		バスケット材料
	b.温度範囲(最高温度、最低使用温度)		-22.4℃～300℃
	c.外圧設計が必要な機器等への適用の有無		なし
(4) 特徴及び使用上の留意事項	a.特徴		熱間圧延による 6mm 以下の炭素鋼鋼板及び鋼帯
	b.新規材料に関する特許及びライセンスの有無		なし
(5) 製造工程及び製造条件	a.製造方法		鋼板及び鋼帯は、細粒キルド鋼から製造
	b.熱処理		圧延のまま
	c.検査		○
(6) 化学成分 (溶鋼分析又は溶湯分析、製品分析)	○		
(7) マクロ及びミクロ組織	—		特殊な添加元素による強化機構がない普通鋼のため不要
(8) 実用試験 (へん平試験、押し広げ試験)	—		普通鋼に分類される炭素量 0.2%以下の軟鋼であるため不要
(9) 加工性、加工条件		○	
(10) 機械的性質	a.引張特性	○	
	b.靱性	—	炭素量が 0.2%以下の軟鋼であり、かつ、脆性破壊が生じにくい 16mm 以下の薄い鋼板であるため不要[1][2]
	c.硬さ	—	炭素量が 0.2%以下の軟鋼であり、厚さ 6mm 以下の薄い鋼板で、かつ、使用条件に硬さが求められないため不要

表 4 材料試験の項目及び新規材料ガイドライン要求項目 (つづき)

新規材料ガイドライン要求項目	材料試験の項目 注 1	JIS G 3116 を 適用するもの 注 2	備 考
(11) 応力-ひずみ特性	○		
(12) 高温及び低温引張	○		室温/65°C/100°C/150°C/200°C/250°C/300°C/350°C/400°Cの各温度で実施
(13) クリープ及びクリープ破断特性	—		使用温度がクリープ温度域に達しないため不要 <sup>[3][4]</sup>
(14) 時効後靱性	—		時効性材料でないため不要
(15) 溶接性 (溶接性、溶接区分)	—		炭素量が 0.22%以下の炭素鋼であるため不要 <sup>[2][5][6]</sup>
(16) 耐食性	—		不活性ガス環境下での使用のため不要
(17) 設計降伏点	○		材料試験の結果から、新規材料ガイドラインに基づいて設定
(18) 設計引張強さ	○		
(19) 設計応力強さ	○		
(20) 許容引張応力	○		
(21) 疲労	—		材料規格 設計疲労線図 (炭素鋼) を適用
(22) その他特性 注 3	a.線膨張係数	○	20°C/100°C/150°C/200°C/250°C/300°C/350°C/400°Cの各温度で実施 (設計に用いる線膨張係数の規格値は材料規格[TE1]を適用)
	b.熱伝導率	○	
	c.温度伝導率	○	-75°C/20°C/100°C/150°C/200°C/250°C/300°C/350°C/400°Cの各温度で実施 (設計に用いる縦弾性係数値の規格値は材料規格[E1-1]を適用)
	d.縦弾性係数	○	
	e.ポアソン比※	○	

注 1 表中の斜線部は非該当部を示し、“○”は材料試験によりデータの取得を必要とする項目を示し、“—”は備考に記載した理由から特に材料試験のデータが必要ないと判断する項目を示す。

注 2 表中の斜線部は非該当部を示し、“○”は JIS G 3116 を適用する項目を示す。

注 3 線膨張係数、熱伝導率、温度伝導率、縦弾性係数及びポアソン比については、材料規格と取得データを比較し、材料規格が適用できることを確認する。

## 5. 材料規定の方針

HZ-SG295HAR の材料規定は、新規材料ガイドラインに従った設定方法に基づいて、材料試験で取得した機械的性質等の材料特性を包絡するように保守的に設定した設計用強度から、以下のように定めるものとする。

### (1) 材料名称

材料名称は表 5 による。

### (2) 材料規格

適用する材料規格は表 5 による。

### (3) 化学成分

化学成分は表 6 の規定による。

### (4) 設計応力強さ

設計応力強さは表 7 の規定による。

### (5) 許容引張応力

許容引張応力は表 8 の規定による。

### (6) 設計降伏点

設計降伏点は表 9 の規定による。

### (7) 設計引張強さ

設計引張強さは表 10 の規定による。

### (8) 縦弾性係数

縦弾性係数は、材料規格の Part3 第 2 章 表 1 E1-1 炭素量 0.3 %以下の炭素鋼の規定による。(表 11 参照)

### (9) 線膨張係数

線膨張係数は、材料規格の Part3 第 2 章 表 2 TE1 炭素鋼、合金鋼 [区分 I] の規定による。(表 12 参照)

表 5 材料名称及び材料規格

材料名称	材料規格	記号
バスケット材料 炭素鋼	高圧ガス容器用鋼板及び鋼帯 JIS G 3116:2020	HZ-SG295HAR

表 6 化学成分

記号	化学成分 (質量%)				
	C	Si	Mn	P	S
HZ-SG295HAR	0.20 以下	0.35 以下	1.00 以下	0.020 以下	0.020 以下

表 7 材料の各温度における設計応力強さ  $S_m$  (注)

単位 : MPa

記号	温度 (°C)												
	-30 ~40	65	75	100	125	150	200	225	250	275	300	325	350
HZ- SG295 HAR	146	146	146	146	144	143	143	143	143	143	143	143	143

(注) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

表 8 材料の各温度における許容引張応力 S<sup>(注)</sup>

単位：MPa

記号	温度 (°C)												
	-30 ~40	65	75	100	125	150	200	225	250	275	300	325	350
HZ- SG295 HAR	125	125	125	125	123	123	123	123	123	123	123	—	—

(注) 温度の間における値は、比例法によって計算する。

表 9 材料の各温度における設計降伏点 S<sub>y</sub><sup>(注)</sup>

単位：MPa

記号	温度 (°C)												
	-30 ~40	65	75	100	125	150	200	225	250	275	300	325	350
HZ- SG295 HAR	295	283	280	273	268	266	266	266	266	266	266	266	260

(注) 温度の間における値は、比例法によって計算する。

表 10 材料の各温度における設計引張強さ S<sub>u</sub><sup>(注)</sup>

単位：MPa

記号	温度 (°C)												
	-30 ~40	65	75	100	125	150	200	225	250	275	300	325	350
HZ- SG295 HAR	440	416	410	399	393	391	391	391	391	391	391	391	391

(注) 温度の間における値は、比例法によって計算する。

表 11 材料の各温度における縦弾性係数（材料規格）<sup>[1]</sup>単位： $\times 10^3$  MPa

記号	分類名称	温度（℃）									
		-75	25	100	150	200	250	300	350	400	450
E1-1	炭素量が 0.3%以下の炭素鋼	209	202	198	195	192	189	185	179	171	162

表 12 材料の各温度における線膨張係数（材料規格）<sup>[1]</sup> $\times 10^{-6}$  mm/mm℃

記号	分類名称	区分 (注)	温度（℃）																
			20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425
TE1	炭素鋼、合金鋼 〔区分 I〕	A	11.5	12	12.3	12.7	12.9	13.2	13.5	13.8	14.0	14.3	14.6	14.9	15.1	15.4	15.7	15.9	16.1
		B	11.5	11.8	11.9	12.1	12.3	12.4	12.6	12.7	12.9	13.0	13.2	13.3	13.4	13.6	13.7	13.8	14.0

(注) 区分 A は瞬時線膨張係数、区分 B は常温から各温度までの平均線膨張係数を示す。

## 6. 製造管理規定の方針

HZ-SG295HAR の製造管理規定は、JIS G 3116 の規定に靱性や長期健全性に係る製造方法、熱処理、オーステナイト結晶粒度及び品質管理を追加したものとし、以下のように定める。

なお、靱性や長期健全性に係る製造方法、熱処理、オーステナイト結晶粒度及び品質管理の規定は JIS G 3118 を準用する。

### (1) 化学成分

化学成分は、表 6 による。

溶鋼分析方法は JIS G 0320:2017 「鋼材の溶鋼分析方法」による。

### (2) 製造方法

鋼板及び鋼帯は、細粒キルド鋼から製造する。

製造は、図 1 に示す製造フローによる。

### (3) 熱処理

圧延のままとする。

注記：ひずみ時効に起因する脆化を抑制するため、冷間加工した部材については、冷間加工後に応力除去焼鈍を施すこととする。(図 2 参照)

### (4) 機械的性質

機械的性質は、JIS G 3116 の規定による。

### (5) オーステナイト結晶粒度

オーステナイト結晶粒度は 5 以上とする。

なお、結晶粒度試験は、全アルミニウム分析値が、0.020 %以上又は酸可溶性アルミニウムの分析値が 0.015%以上の場合は、省略しても良い。

### (6) 形状、寸法、質量及びその許容差

鋼板及び鋼帯の形状、寸法、質量及びその許容差は、JIS G 3116 の規定による。

### (7) 品質管理

外観、試験、検査、再検査、表示及び報告は、JIS G 3118 の規定による。

ただし、試験片については JIS G 3116 の規定による。



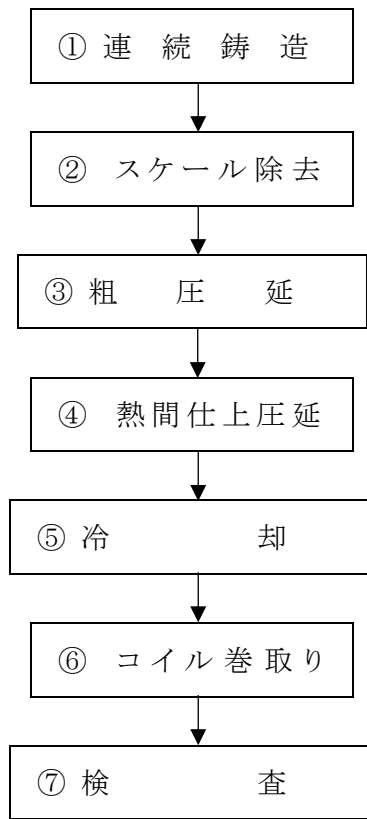


図1 材料（鋼板及び鋼帯）の製造フロー

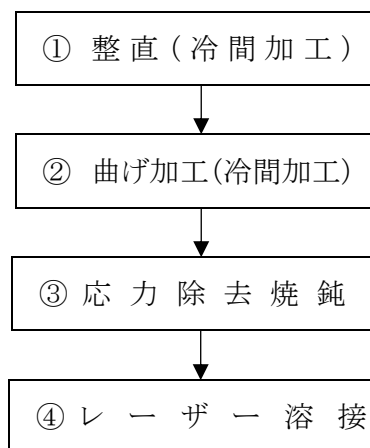


図2 コンパートメントの製造フロー

## 7. 長期健全性の考え方

Hitz-B69 型の設計貯蔵期間は 60 年間であり、貯蔵時並びに貯蔵後の輸送時に必要とされる機能の健全性を、設計貯蔵期間を通じて維持することが求められることから、Hitz-B69 型の構成部材は設計貯蔵期間の経年変化の要因を考慮し、必要とされる強度、性能を維持する必要がある。

バスケット材料として、炭素鋼である HZ-SG295HAR を使用するにあたって期待する機能は、臨界防止機能を維持するために使用済燃料集合体を所定の幾何学的配置に維持するとともに適切な中性子吸収材の配置を維持する機械的強度であるため、経年変化による機械的強度の劣化を考慮する必要がある。

したがって、設計貯蔵期間である 60 年間にわたり、経年変化の要因と考えられる熱的影響、放射線照射による影響及び腐食の影響を受けた HZ-SG295HAR の機械的強度に対する長期健全性の考え方を以下に示す。

### (1) 熱的影響

補足説明資料 16-4 に示すとおり、Hitz-B69 型に収納する使用済燃料の制限温度は 300℃以下であり、バスケット材料の最高使用温度は同程度の温度と考えられる。短期的な影響は 400℃までの高温引張試験の結果から、別紙 1 に示すとおり 400℃までの範囲では機械的強度が著しく劣化しないことを確認している。

また、その他にも考えられる熱的影響を以下に示す。

#### a) クリープによる機械的強度の劣化

一般に炭素鋼は約 400℃を超えるとクリープによる破壊が問題となり<sup>[7]</sup>、クリープによる変形を考慮すべき温度は、一般に融点（絶対温度）の約 1/3 といわれている<sup>[3]</sup>。炭素量が 0.2%以下の炭素鋼は、融点が 1490℃（1763 K）<sup>[4]</sup>と考えられることから 314℃（587 K）まではクリープによる破断及び変形を考慮する必要はなく、HZ-SG295HAR の適用範囲は 300℃以下であるため、クリープを考慮する必要はない。

#### b) セメンタイト（Fe<sub>3</sub>C）の黒鉛化に伴う機械的強度の劣化

炭素鋼はセメンタイトと呼ばれる Fe<sub>3</sub>C の炭化物によって、機械的性質が大きく変化することが知られており、一般的に生成するセメンタイトの量が多くなると炭素鋼は硬くなるといわれている。このセメンタイトが黒鉛化することによって、炭素鋼の機械的強度は劣化する。

しかし、炭素鋼のセメンタイト（Fe<sub>3</sub>C）の黒鉛化は長期的に 480℃以上の温度環境下に置かれる場合に生じるものであり<sup>[8]</sup>、HZ-SG295HAR の適用範囲は 300℃以下であるため、炭素鋼のセメンタイト（Fe<sub>3</sub>C）の黒鉛化による強度への影響はない。

### c) 冷間加工に伴うひずみ時効による脆化

ひずみ時効は、母相に固溶した侵入型固溶原子の C（炭素）や N（窒素）が冷間加工で増殖された転位などの内部欠陥に集合し、転位を固着させる硬化現象である。<sup>[9]</sup>

ひずみ時効が生じた局部は、硬化によって脆性破壊のリスクが高まる可能性があることから冷間加工で生じた残留応力を応力除去焼鈍で除去し延性及び靱性を回復させる。

したがって、バスケット材料に使用する HZ-SG295HAR は、冷間加工後に図 2 に示す工程従って応力除去焼鈍を施すことにより、材料の延性及び靱性を回復させる処置を講ずることとする。

なお、応力除去焼鈍によって母材の機械的性質が劣化することはないと考えられ、冷間加工に伴ってひずみが生じた部分の機械的性質は、応力除去焼鈍により母材と同程度まで回復するものと考えられる。（別紙 2 参照）

## (2) 放射線照射による影響

使用済燃料から放出される放射線は中性子線及び  $\gamma$  線であり、放射線の種類及びそのエネルギーによって金属材料の性質に作用する形態は異なると考えられるが、バスケット材料の劣化機構としては、中性子照射による脆化が考えられる。

Hitz-B69 型は、使用済燃料 69 体を収納した条件において、中心付近のコンパートメントに対する 60 年間の累積中性子照射量は  $2.2 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2$  以下であり、炭素鋼と低合金鋼は鋼種によらず  $1 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2$  以下であれば顕著な脆化がないといわれていることから<sup>[10]</sup>、使用環境の累積中性子照射量が  $1 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2$  以下であれば、機械的強度に対する中性子照射の影響はない。

## (3) 腐食による影響

使用済燃料及びバスケットが収納される Hitz-B69 型の密封境界内部は、使用済燃料装荷時に真空乾燥を行い、不活性ガスであるヘリウムが封入されることで残留水分が 10%以下（質量）の不活性ガス雰囲気となるように管理されるため、設計貯蔵期間中の全期間を通じて、この不活性ガス環境が維持されていれば、腐食による劣化を考慮する必要はない。<sup>[11]</sup>

また、貯蔵期間中の燃料被覆管の破損を考慮する場合において、 $20 \text{ g/m}^3$  程度のヨウ素ガス濃度となる燃料破損率（1%燃料破損相当）以下であれば鉄系材料の最大腐食速度は 60 年間の腐食量を保守的に推定しても  $0.5 \text{ mm}^{[12]}$  程度であり、仮に 1%燃料破損相当の燃料棒内ガス中のヨウ素ガスの存在を考慮してもバスケット材料の腐食による構造強度への影響はない。

8. 伝熱性能に対する考え方

除熱機能の評価で期待される伝熱性能として、一般的な炭素鋼の常温の熱伝導率は 43.0 W/(m・K)以上であり<sup>[13]</sup>、別紙 1 表 別 1-16 に示す材料試験の熱伝導率の結果は、常温の平均値で 58.0 W/(m・K)、300℃の平均値でも 48.0 W/(m・K)であることから、HZ-SG295HAR は除熱機能として期待される伝熱性能を有する。

表 13 一般的な炭素鋼の物性値<sup>[13]</sup>

--

## 9. 設計評価基準

金属キャスク構造規格で定められる供用状態 A、B、C 及び D に対して、バスケットが維持すべき安全機能における設計評価基準の考え方を表 14 に示す。

なお、設計に用いる供用状態 A、B、C 及び D のそれぞれの評価基準については、金属キャスク構造規格の「バスケット」に従うものとする。

表 14 設計評価基準の考え方

供用状態	A	B		C	D
具体的な設計事象	貯蔵時	通常取扱時 (吊上げ時等)	衝撃荷重作用時 (異常着床等)	貯蔵時 (Sd*相当地震力が作用する場合)	貯蔵時 及び (Ss 相当地震力が作用する場合) 衝撃荷重作用時 (津波荷重作用時等)
	—	通常輸送時	0.3m 落下等	—	9m 落下等
設計評価基準の考え方	<p>本事象は、長期荷重がバスケットに作用する事象である。</p> <p>Hitz-B69 型のバスケットは、クリープ特性を考慮する必要のない温度領域で使用するため、設計基準の設定にクリープ破断及びクリープ変形を考慮しない。</p>	<p>本事象は、通常使用状態又は繰り返しによる荷重(短期荷重)がバスケットに作用する事象である。</p> <p>本事象では、臨界防止機能維持のため、バスケットの変形を防止するよう設計基準を設定する。</p>	<p>本事象は、設計貯蔵期間中、まれにしか生じる可能性がない事象である。</p> <p>本事象では、臨界防止機能維持のため、バスケットの形状が維持されるよう設計基準を設定する。</p>	<p>本事象は、設計貯蔵期間中に発生することは予想されないが、技術的に見れば発生が想定され得る事象である。</p> <p>本事象では、一般公衆の放射線被ばく防止の観点から、安全機能を著しく損なうことがないように、バスケットの破断を防止するように設計基準を設定する。</p> <p>ただし、塑性変形が生じる場合はバスケットの変形量を考慮した臨界解析により臨界防止上有意な変形が生じないことを確認する。</p>	

## 10. 型式指定への引継ぎ事項

Hitz-B69 型のバスケット材料として使用する HZ-SG295HAR は、図 2 に示すとおり、ひずみ時効対策として冷間加工後に応力除去焼鈍を施すこととしているが、HZ-SG295HAR に対する応力除去焼鈍の知見が十分ではないため、型式指定申請前までに別紙 5 に示す追加の材料試験を実施し、ひずみ時効に対する焼鈍の有効性及び設計用強度の設定の妥当性を検証する。

## 11. 参考文献

- [1] JSME S NJ1-2012/JSME S NJ1-2013 “発電用原子力設備規格 材料規格 (2012 年版/2013 年追補)”, 日本機械学会, (2012/2013)
- [2] 伊藤慶典,大森靖也, “普通鋼”, 溶接学会誌 第 47 卷 第 11 号, P728-P734, (1978)
- [3] 木村一弘, “耐熱鋼のクリープ破断寿命予測”, 日本機械学会誌, 第 73 卷, 5 号, p.323-333, (2009)
- [4] 田中良平, “最近の鉄-炭素系平衡状態図について”, 鉄と鋼 第 53 卷 第 14 号, p.1586-p.1604, (1967)
- [5] 川崎成人, 竹内宥公, “機械構造用鋼の溶接割れ感受性に及ぼす炭素及び合金元素の影響”, 電気製鋼 第 55 卷 第 1 号, (1984), p31-p36
- [6] 伊藤慶典,別所清, “高張力鋼の溶接割れ感受性指示数について”, 溶接学会誌 第 37 卷 第 9 号, (1968), p983-p991
- [7] JIS B 8267 : 2015, “圧力容器の設計”, 日本産業規格, 日本規格協会, (2015)
- [8] 手塚 則雄, 米山 猛, “設計者に必要な材料の基礎知識”, 日刊工業新聞社, (2003)
- [9] 日本熱処理技術協会, “入門・金属材料の組織と性質”, 大河出版, p137, (2004)
- [10] K.Ferrell, S.T.Mahmood, R.E.SStoller, L.K.Mansur, “An evaluation of low temperature radiation embrittlement mechanisms in ferritic alloys”, Journal of Nuclear Materials, vol.210, 3, (1994), pp.268-281
- [11] AESJ-SC-F002 : 2021, “使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準 : 2021”, (社) 日本原子力学会, (2022)
- [12] 原子力安全基盤機構, “平成 15 年度 金属キャスク貯蔵技術確証試験 最終報告”, (2004)
- [13] (一社) 日本機械学会, “伝熱工学資料 改訂第 4 版”, (1986)

材料試験の結果及び設計用強度の評価結果

## 1. 概要

Hitz-B69 型は、バスケットの構造部材に日本機械学会規格「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格」等に規定されていない炭素鋼である HZ-SG295HAR を使用する。

したがって、HZ-SG295HAR の設計降伏点 ( $S_y$  値)、設計引張強さ ( $S_u$  値)、設計応力強さ ( $S_m$  値) 及び許容引張応力 ( $S$  値) は、日本機械学会規格「発電用原子力設備規格 材料規格 (2012 年版/2013 年追補)」(JSME S NJ-2012/JSME S NJ-2013) に付随する添付 1. 新規材料採用ガイドライン (以下、「新規材料採用ガイドライン」という。) に準じた材料試験で機械的性質等の必要な材料特性を取得し、新規材料採用ガイドラインに従った設定方法に基づいて、試験で取得した材料特性を包絡するように保守的に設定することとしている。

HZ-SG295HAR は、表 別 1-1 及び表 別 1-2 に示すとおり、日本産業規格「中・常温圧力容器用鋼板」(JIS G 3118 : 2017) (以下、「JIS G 3118」という。) に規定されている SGV410 と類似の化学成分及び製造方法の熱間圧延鋼で概ね同等の機械的性質を備えた日本産業規格「高圧ガス容器用鋼板及び鋼帯」(JIS G 3116 : 2020) (以下、「JIS G 3116」という。) に規定されている SG295 に準ずるものであり、靱性や長期健全性に係る製造方法、熱処理、オーステナイト結晶粒度が適合することを確認した SG295 を HZ-SG295HAR の供試材として使用する。

本別紙は、材料試験の試験結果、材料試験で取得した機械的強度から設定した設計用強度及び温度依存の材料物性の規格適合性の確認結果を示す。



表 別 1-1 JIS G 3116 及び JIS G 3118 の化学成分<sup>[2][3]</sup>

規格	種類の 記号	化学成分(%)				
		C	Si	Mn	P	S
JIS G 3116	SG255	≦0.20	—	≧0.30	≦0.020	≦0.020
	SG295	≦0.20	≦0.35	≦1.00	≦0.020	≦0.020
	SG325	≦0.20	≦0.55	≦1.50	≦0.020	≦0.020
	SG365	≦0.20	≦0.55	≦1.50	≦0.020	≦0.020
JIS G 3118	SGV410	≦0.21	0.15~0.40	0.85~1.20	≦0.020	≦0.020
	SGV450	≦0.24	0.15~0.40	0.85~1.20	≦0.020	≦0.020
	SGV480	≦0.27	0.15~0.40	0.85~1.20	≦0.020	≦0.020

注記：JIS G 3118 は板厚 12.5 mm 以下の値を示す。

表 別 1-2 JIS G 3116 及び JIS G 3118 の機械的性質<sup>[2][3]</sup>

規格	種類の 記号	降伏点 又は耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	曲げ性	
					曲げ角度	内側半径
JIS G 3116	SG255	≧255	≧400	≧28	180°	厚さの 1.0 倍
	SG295	≧295	≧440	≧26	180°	厚さの 1.5 倍
	SG325	≧325	≧490	≧22	180°	厚さの 1.5 倍
	SG365	≧365	≧540	≧20	180°	厚さの 1.5 倍
JIS G 3118	SGV410	≧225	410~490	≧19	180°	厚さの 0.5 倍
	SGV450	≧245	450~540	≧17	180°	厚さの 0.75 倍
	SGV480	≧265	480~590	≧15	180°	厚さの 1.0 倍

注記：JIS G 3118 について伸びは板厚 6 mm の値、曲げ性内側半径は板厚 25 mm 以下の値を示す。

日本産業規格において、SG295 の曲げ性の内側半径は厚さの 1.5 倍、SGV410 の曲げ性の内側半径は厚さの 0.5 倍と規定されている。これは、SGV410 に比べて SG295 は降伏点が高く、その分、曲げ性を保守的に規定しているものと考えられる。C、Si 及び Mn の合金元素は、いずれも曲げ性を劣化させるといわれ、このうち C の影響が最も大きく、Si、Mn の影響は比較的少ないといわれている。<sup>[4]</sup> したがって、SG295 は C の値が SGV410 と同程度であることから、曲げ性も概ね同等と考えられる。

## 2. 試験方法

### 2.1 試験項目

試験内容は、材料規格の新規材料採用ガイドラインに準じ、新規材料採用ガイドラインで定められた新規材料を採用する場合に要求される項目のうち、バスケット材料への適用性を判断する上で情報が不足している項目を試験項目とする。

JIS G 3116 は「LP ガス、アセチレンなどの各種高压ガスを充填する内容積 500 L 以下の溶接容器に用いる熱間圧延鋼板及び鋼帯」として規定されており<sup>[3]</sup>、当該規格を引用する JIS B 8267「圧力容器の設計」では、100 °C までの許容引張応力が示されている<sup>[5]</sup>が、高温の設計用強度は規定されていない。

新規材料採用ガイドラインでは、高温の設計強度が規定されていない材料については、化学成分や機械的性質など、表 別 1-3 に示す 22 項目から用途に応じて必要な資料を提出することが求められている<sup>[6]</sup>。

表 別 1-3 新規材料採用ガイドライン要求項目

(1) 材料の基本化学成分及び用途	<u>(12) 高温及び低温引張特性</u>
(2) 材料の仕様	(13) クリープ及びクリープ破断特性
(3) 使用条件	(14) 時効後靱性
(4) 特徴及び使用上の留意事項	(15) 溶接性 (溶接性、溶接区分)
(5) 製造工程及び製造条件	(16) 耐食性
(6) 化学成分 (溶鋼分析又は溶湯分析、製品分析)	<u>(17) 設計降伏点</u>
(7) マクロ及びマイクロ組織	<u>(18) 設計引張強さ</u>
(8) 実用試験 (へん平試験、押し広げ試験)	<u>(19) 設計応力強さ</u>
(9) 加工性、加工条件	<u>(20) 許容引張応力</u>
(10) 機械的性質	(21) 疲労
<u>(11) 応力-ひずみ特性</u>	<u>(22) その他特性*</u>

注：本試験で着目する項目を下線で示す。

※：温度依存の材料物性データ。(線膨張係数、熱伝導率、温度伝導率、縦弾性係数、ポアソン比)

バスケット材料への適用性を判断する上で必要な項目は、JIS G 3116 に規定のある項目を除くと、表 別 3 の (11) 以降の項目が該当する。

前述のとおり SG295 は溶接性が考慮された炭素鋼材料であり、材料規格における縦弾性係数及び線膨張係数の分類では、それぞれ「炭素量が 0.3%以下の炭素鋼」及び「炭素鋼、合金鋼[区分 I]」に該当し、時効、クリープ、耐食性、及び疲労については一般的な知見が活用できると考えられる。

一方、応力ひずみ特性及び高温引張特性の情報は不足しており、高温引張特性から得られる設計降伏点（ $S_y$  値）、設計引張強さ（ $S_u$  値）、設計応力強さ（ $S_m$  値）及び許容引張応力（ $S$  値）も同様に不足している。

また、(22) のその他特性とは、要求があれば提出する必要がある温度依存の材料物性データ（線膨張係数、熱伝導率、温度伝導率、縦弾性係数、ポアソン比）であり、材料規格における分類の妥当性を判断する根拠となる。

なお、低温での使用は想定していないため低温引張特性は不要と考えられる。

以上のことから、試験項目としては高温引張試験及び温度依存の材料物性測定を実施することとし、高温引張試験としては、新規材料採用ガイドラインで「最高使用温度よりも  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  高い温度までの  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  ごとのデータ」が要求されており<sup>[6]</sup>、収納する使用済燃料の制限温度が  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下であることから、最高試験温度を  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  とする。

なお、一般に炭素鋼は約  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  を超えるとクリープによる破壊が問題となる<sup>[7]</sup>が、想定している使用温度域においてクリープを考慮する必要はない。

## 2.2 供試材

本試験の供試材として使用する炭素鋼は、JIS G 3116 の規定に従って製造した SG295 に適合する材料である。この供試材は、細粒キルド鋼となるアルミキルド鋼から製造したものであり、特別な熱処理を施していない圧延のままの材料である。

また、表 別 1-4 に示すとおり、全アルミニウムの分析値が  $0.020\%$  以上であることから、靱性に係るオーステナイト結晶粒度は 5 以上と考えられる。（別紙 4 参照）

以上のことから本供試材は、製造管理規定の方針に従った材料であると判断できるため、HZ-SG295HAR として取り扱うこととする。

新規材料採用ガイドラインにより、供試材標本数は最小 3 標本（標本とは、同一溶解、同一板厚及び同一熱処理条件を同時に満足するもの）とすることから<sup>[6]</sup>、供試材は、厚さ  $6\text{ mm}$ 、幅  $1219\text{ mm}$ 、長さ  $1000\text{ mm}$  の SG295 鋼板 3 体を、それぞれヒート番号の異なる鋼帯から製作したものを用いる。

試験片の採取は JIS G 3116 の規定に基づいて、引張試験片の中心は供試材の幅方向の縁から  $1/4$  付近またはそれに近い位置とし、圧延方向に対して平行に採取することとする。試験片採取位置を図 別 1-1 に示す。

表 別 1-4 に示す各供試材の試験片採取位置における化学成分及び機械的性質は、全て JIS G 3116 の SG295 の規定値の範囲内である。各供試材のミルシートの記載値も合わせて示す。

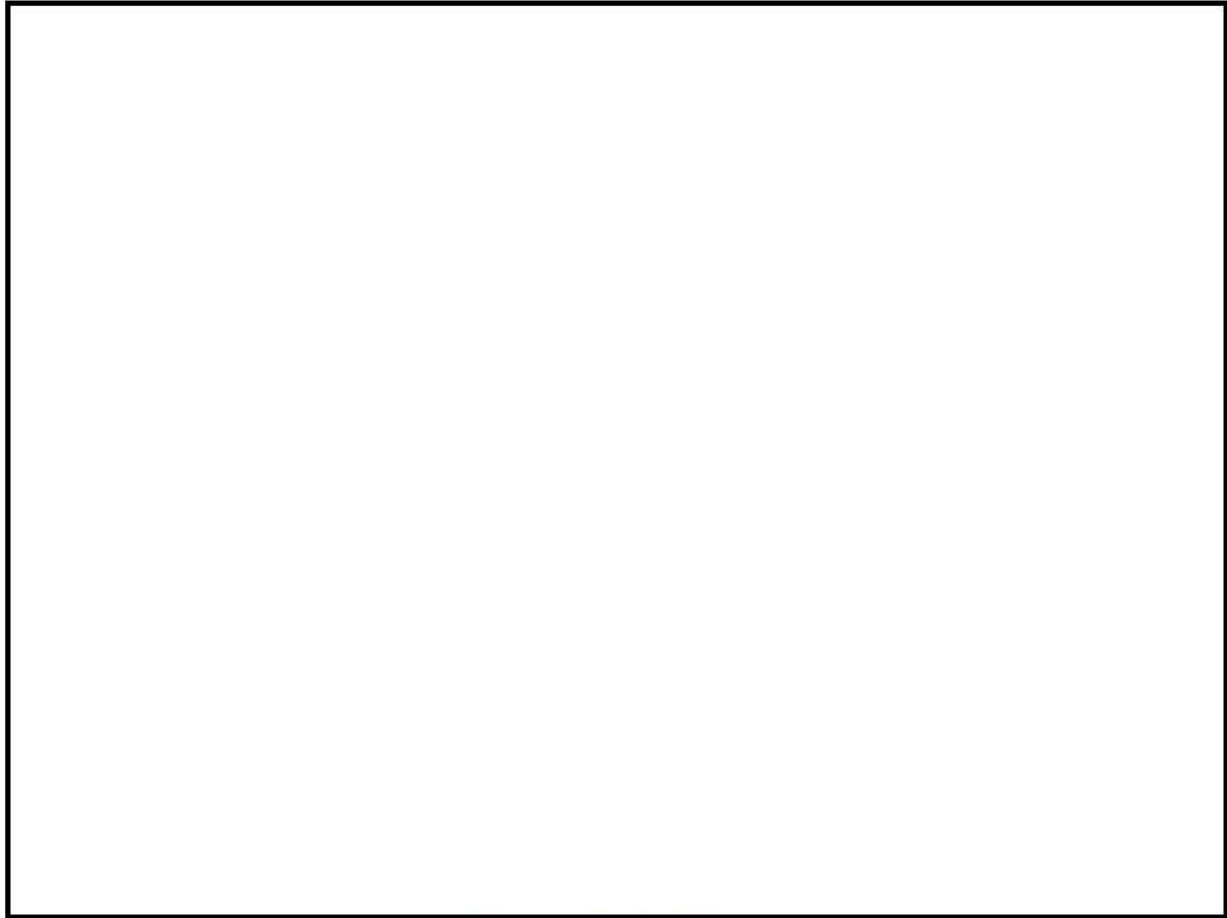


図 別 1-1 試験片採取位置

表 別 1-4 供試材の化学成分及び機械的性質

供試材		化学成分 (%) ※1						機械的性質※2		
		C	Si	Mn	P	S	Al	耐力※3 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
1	A	0.08	0.01	0.82	0.019	0.002	—	337	467	39
	B	0.08	0.01	0.84	0.019	0.002	0.026	362	461	37
2	A	0.08	0.02	0.83	0.016	0.002	—	330	453	38
	B	0.08	0.02	0.85	0.016	0.002	0.030	339	443	37
3	A	0.08	0.01	0.83	0.018	0.002	—	338	458	39
	B	0.08	0.01	0.84	0.018	0.002	0.024	347	454	39
HZ- SG295HAR		≦0.20	≦0.35	≦1.00	≦0.020	≦0.020	≧0.020	≧295	≧440	≧26

注：A 欄は製品分析値。B 欄はミルシート記載値。

※1：A 欄は、燃焼-赤外線吸収法 (C、S) 及びスパーク放電発光分光分析法 (Si、Mn、P) による。

※2：A 欄は、長手方向に採った 5 号試験片 (JIS Z 2241) による。

※3：A 欄は、ひずみゲージを用いて得た弾性範囲内の応力-ひずみ線図から測定した 0.2%耐力。

別紙 1-5

内は商業機密のため、非公開とします。

## 2.3 試験方法及び条件

### 2.3.1 高温引張試験の試験方法及び試験条件

日本産業規格「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」(JIS G 0567 : 2012) を参考とし、高温引張試験を実施した。高温引張試験の試験条件を以下に示す。

- ・ 試験片形状：図 別 1-2 参照 (ひずみ測定には伸び計を使用する。)
- ・ 試験片採取方向：圧延方向
- ・ 試験温度 (°C) : 室温 (10~35)、65、100、150、200、250、300、350、400
- ・ 各供試材、各試験温度の試験片数 : 3
- ・ 測定項目 : 0.2 %耐力、引張強さ、破断伸び

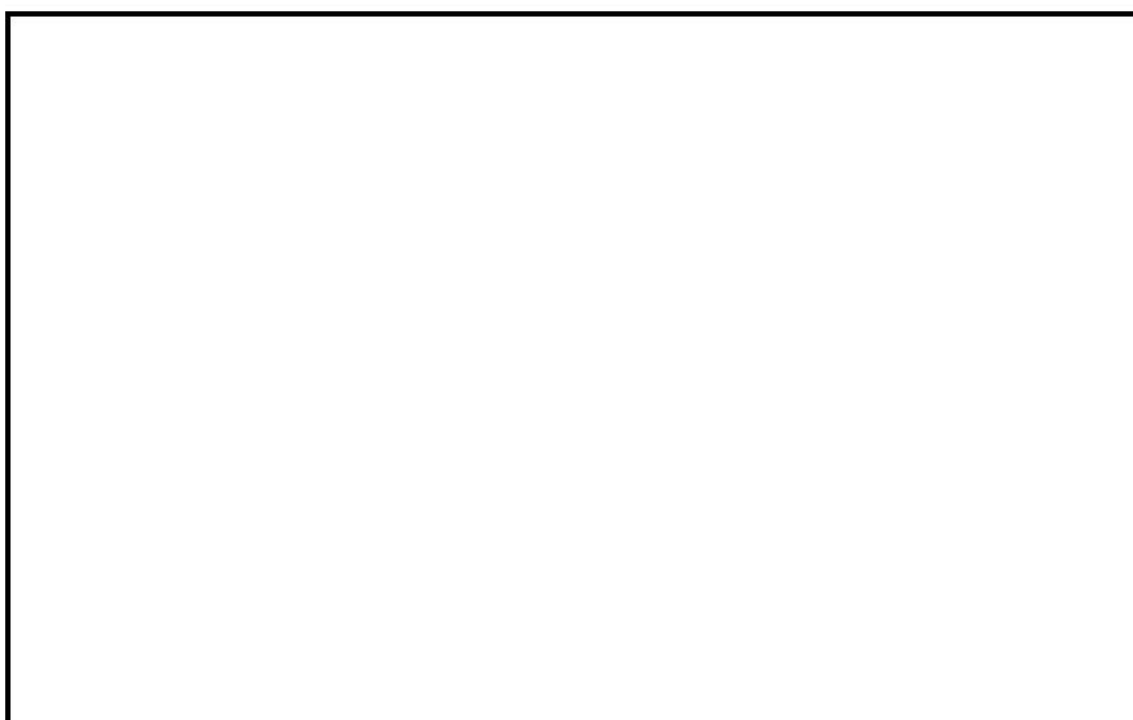


図 別 1-2 高温引張試験片形状

### 2.3.2 温度依存の材料物性測定 of 試験方法及び試験条件

温度依存の材料物性測定条件を以下に示す。なお、(1) 及び (2) の測定のために必要となる、室温における供試材の密度はアルキメデス法により測定した。

#### (1) 縦弾性係数及びポアソン比

- ・ 測定方法 : 超音波パルス法 (JIS Z 2280)
- ・ 測定雰囲気 : Ar ガスフロー
- ・ 試験片形状 : 厚さ 5 mm、直径 16 mm
- ・ 測定温度 (°C) : -75、25、100、150、200、250、300、350、400

(2) 比熱、温度伝導率及び熱伝導率

- ・比熱測定方法：断熱型連続法
- ・比熱測定雰囲気：Ar ガス
- ・比熱試験片形状：厚さ 6 mm、幅約 13 mm、長さ約 25 mm（質量約 15 g）
- ・温度伝導率測定方法：レーザーフラッシュ法
- ・温度伝導率測定雰囲気：真空
- ・温度伝導率試験片形状：厚さ 2 mm、直径 10 mm
- ・測定温度（℃）：20、25、100、150、200、250、300、350、400

熱伝導率は、測定した比熱、温度伝導率から次式で求められる。

$$\lambda = \alpha \cdot C_p \cdot \rho$$

ここで、

$\lambda$	： 熱伝導率	[W/(m·K)]
$\alpha$	： 温度伝導率	[m <sup>2</sup> /s]
$C_p$	： 比熱	[J/(kg·K)]
$\rho$	： 密度	[kg/m <sup>3</sup> ]

(3) 線膨張係数

- ・測定方法：押棒式変位検出法（JIS Z 2285）
- ・測定雰囲気：Ar ガス
- ・試験片形状：厚さ 4 mm、幅 4 mm、長さ 20 mm
- ・測定温度（℃）：20、100、150、200、250、300、350、400

### 3. 高温引張試験の結果と設計用強度の設定

#### 3.1 高温引張試験の結果

高温引張試験の結果について、0.2%耐力の結果を表 別 1-5 に、引張強さの結果を表 別 1-6 に、伸びの結果を表 別 1-7 に示し、各試験結果をプロットしたグラフを図 別 1-3～図 別 1-5 に示す。

表 別 1-5 高温引張試験結果：0.2%耐力（単位：MPa）

供試材	試験片	温度（℃）								
		室温	65	100	150	200	250	300	350	400
1	1	337	325	312	305	302	305	301	282	266
	2	335	321	313	304	302	309	304	285	267
	3	340	330	316	306	300	310	302	287	270
	平均	337	325	314	305	301	308	302	285	268
2	1	325	309	303	289	290	305	299	292	270
	2	327	310	304	293	297	305	305	290	268
	3	327	310	307	294	294	307	302	294	270
	平均	326	310	305	292	294	306	302	292	269
3	1	334	319	309	302	307	317	315	301	278
	2	335	319	310	303	306	313	310	304	280
	3	333	318	312	306	306	317	311	304	282
	平均	334	319	310	304	306	316	312	303	280
全試験片平均		333	318	310	300	300	310	305	293	272

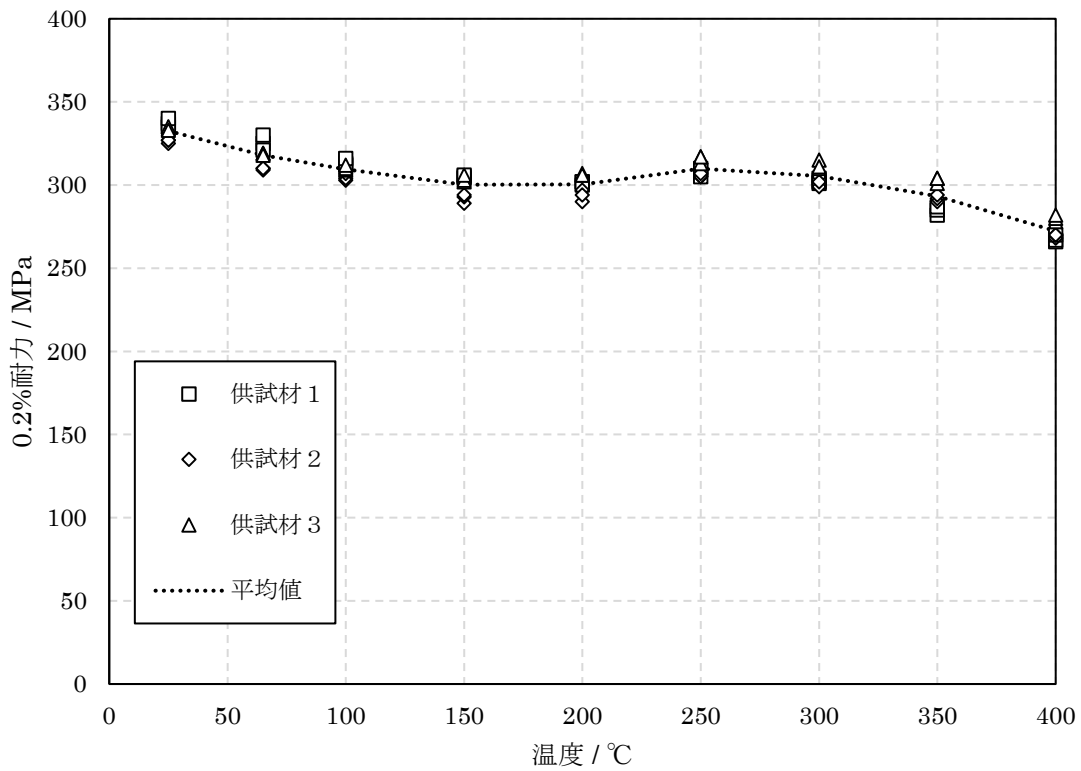


図 別 1-3 高温引張試験結果：0.2%耐力



表 別 1-6 高温引張試験結果：引張強さ（単位：MPa）

供試材	試験片	温度（℃）								
		室温	65	100	150	200	250	300	350	400
1	1	468	443	426	421	426	445	461	432	393
	2	465	441	427	420	427	448	462	432	390
	3	470	446	428	421	427	448	461	433	393
	平均	468	443	427	421	427	447	461	432	392
2	1	451	424	413	400	402	424	433	420	381
	2	450	424	412	400	403	421	435	423	381
	3	451	423	414	400	403	421	433	422	382
	平均	451	424	413	400	403	422	434	422	381
3	1	458	429	412	412	416	430	453	432	393
	2	458	429	413	411	413	428	450	432	391
	3	458	429	416	413	415	430	452	429	390
	平均	458	429	414	412	415	429	452	431	391
全試験片平均		459	432	418	411	415	433	449	428	388

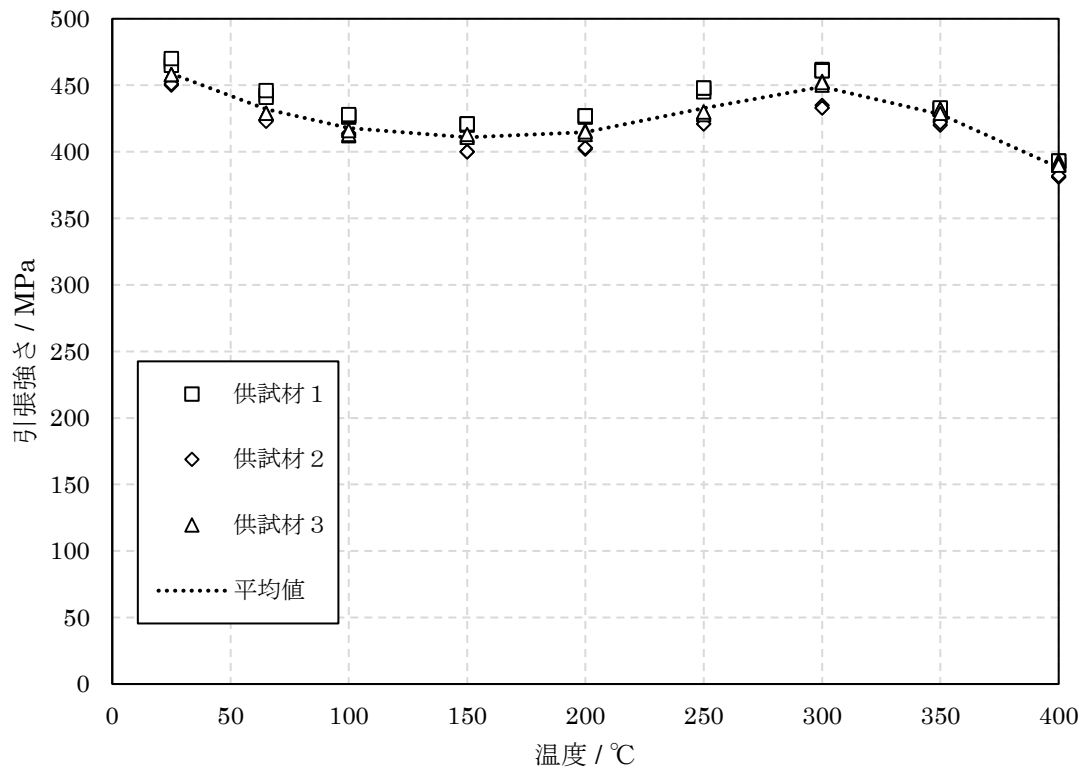


図 別 1-4 高温引張試験結果：引張強さ

表 別 1-7 高温引張試験結果：伸び（単位：％）

供試材	試験片	温度（℃）								
		室温	65	100	150	200	250	300	350	400
1	1	38	38	36	32	32	30	34	38	40
	2	38	38	36	33	32	30	34	38	38
	3	38	38	36	32	32	30	34	38	38
	平均	38	38	36	32	32	30	34	38	39
2	1	38	38	37	34	32	30	32	38	40
	2	38	38	36	34	32	31	32	37	38
	3	38	38	36	34	32	30	31	39	36
	平均	38	38	36	34	32	30	32	38	38
3	1	37	36	34	32	32	30	32	37	36
	2	37	38	35	32	32	30	32	38	36
	3	37	38	35	32	32	30	32	38	35
	平均	37	37	35	32	32	30	32	38	36
全試験片平均		38	38	36	33	32	30	33	38	37

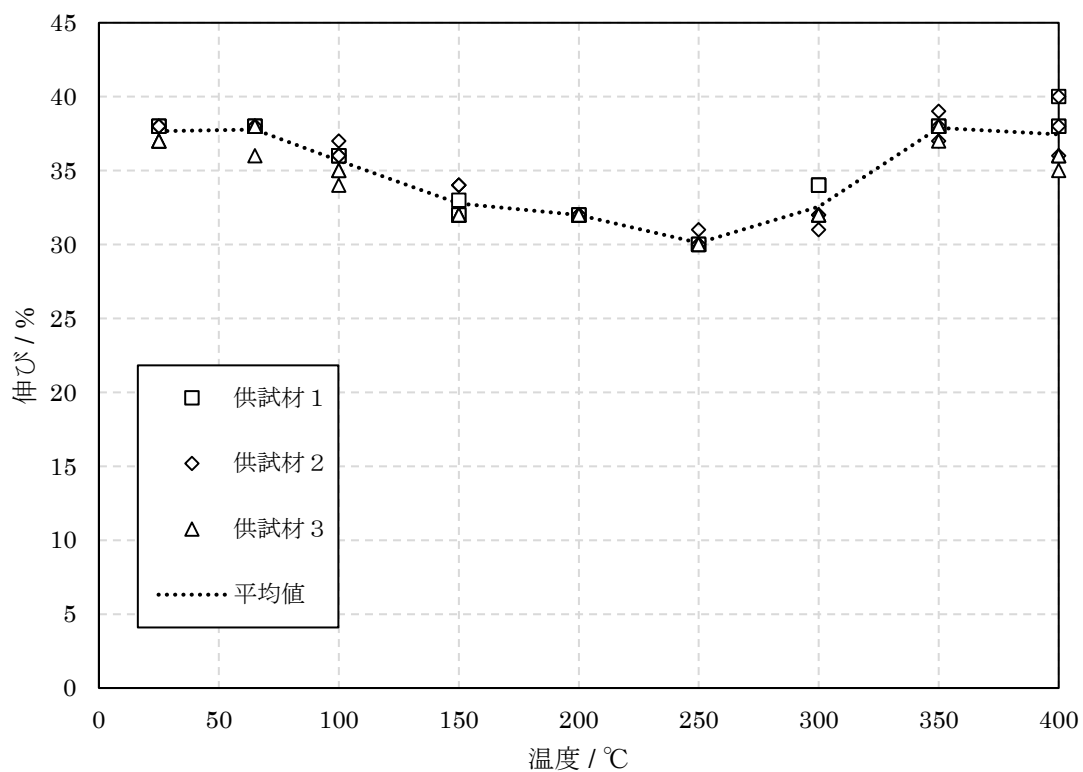


図 別 1-5 高温引張試験結果：伸び

### 3.2 高温引張試験結果の確認

例として、供試材 1 の室温、100 °C、200 °C、250 °C、300 °C 及び 400 °C における応力-ひずみ線図を図 別 1-6 に示す。

室温から温度が上昇するに伴い耐力及び引張強さは減少するが、200～300 °C あたりで回復して極大となり、伸びが極小となる青熱脆性現象が確認できる。

しかし、伸びの極小値は SG295 の規格値である 26 % を上回ることから、SG295 の機械的性質において青熱脆性が問題となることはない。



図 別 1-6 応力-ひずみ線図の例：供試材 1

### 3.3 設計用強度の設定

SG295 の高温引張特性から、設計降伏点 (Sy 値)、設計引張強さ (Su 値)、設計応力強さ (Sm 値) 及び許容引張応力 (S 値) をそれぞれ新規材料採用ガイドラインに従った設定方法に基づき設定する。設定方法を以下に示す。

なお、設定値の計算は汎用表計算ソフト (Microsoft Excel) で行い、計算過程における数値の丸めは行わないが、最終的に MPa 単位で算出される値は保守的に小数点以下を切り捨てるものとする。

#### 3.3.1 設計降伏点の設定

新規材料採用ガイドラインでは、設計降伏点 (Sy 値) の設定方法を次のように規定している。

##### 付録 1. 新規材料の設計降伏点 (Sy 値) の設定方法

#### 1. 基本事項

標本数は 3 標本とする。

高温強度を各標本について求める。

各温度における強度を常温の強度で基準化したトレンド曲線による方法を用いて設計降伏点を求める。

#### 2. Sy 値の設定方法

①：常温の降伏点 (耐力) の規格値

②： $R_Y$  × 常温の降伏点 (耐力) の規格値

$$R_Y = \text{当該温度での降伏点 (耐力)} / \text{常温の降伏点 (耐力)}$$

各温度での値はそれより低温での値を超えないように修正する。

上記①と②の小さい方の値を設計降伏点 (Sy 値) とする。

#### 3. 留意事項

新規材料の Sy 値は、当該材料のデータセットから上記方法により定まるが、ASME B&PV Code Sec.II Materials、JIS B 8265 「压力容器の構造—一般事項」、JIS B 8266 「压力容器の構造—特定規格」等の国内外の規格を調査し相当材がある場合には、それらの規格との整合性を図る。

したがって、具体的に次のように設定する。

a) 標本 (供試材) ごとに、測定温度ごとの 0.2 % 耐力の平均値を求める。

(表 別 1-5 参照)

- b) 標本ごとに、室温（20 °Cと仮定する）における 0.2 %耐力を基準 (=1) として、各温度における 0.2 %耐力の比を求める。(表 別 1-8 参照)
- c) 各温度における 0.2 %耐力/室温における 0.2 %耐力を温度  $T$  の関数  $f_Y(T)$  として、最小二乗法により次式にフィッティングし、トレンド曲線を求める。  
(図 別 1-7 参照)

$$f_Y(T) = a_5 \cdot T^5 + a_4 \cdot T^4 + a_3 \cdot T^3 + a_2 \cdot T^2 + a_1 \cdot T + a_0$$

ここで、 $a_i$  ( $i = 0, 1, \dots, 5$ )はフィッティングパラメータ（定数）である。

- d) 常温（20 °C）における設計降伏点を JIS 規格値の 295 MPa<sup>[3]</sup>とし、トレンド曲線  $f_Y(T)$  の  $T$  に規定温度を代入して得られる  $RY$ を乗じた値を算出する。  
その値を当該温度よりも低い温度における値と比較し、小さい方を設計降伏点とする。(表 別 1-10 参照)

表 別 1-8 室温における引張強さを基準とした各温度の引張強さの比

供試材	温度 (°C)								
	20	65	100	150	200	250	300	350	400
1	1	0.9644	0.9298	0.9042	0.8933	0.9130	0.8962	0.8439	0.7935
2	1	0.9489	0.9336	0.8948	0.8999	0.9367	0.9254	0.8948	0.8253
3	1	0.9541	0.9291	0.9092	0.9172	0.9451	0.9341	0.9072	0.8383

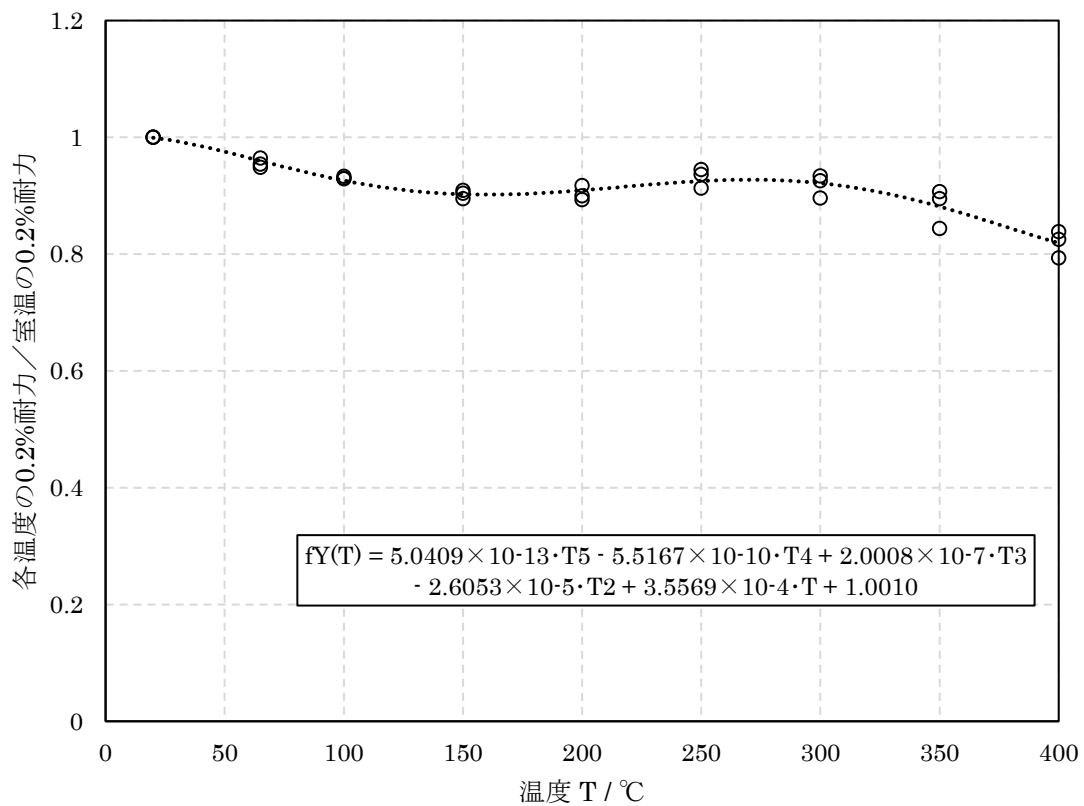


図 別 1-7 SG295 の 0.2%耐力 (降伏点) トレンド曲線

### 3.3.2 設計引張強さの設定

新規材料採用ガイドラインでは、設計引張強さ（Su 値）の設定方法を次のように規定している。

#### 付録 2. 新規材料の設計引張強さ（Su 値）の設定方法

##### 1. 基本事項

標本数は 3 標本とする。

高温強度を各標本について求める。

各温度における強度を常温の強度で基準化したトレンド曲線による方法を用いて設計引張強さを求める。

##### 2. Su 値の設定方法

①：常温の引張強さの規格値

②： $R_T$ ×常温の引張強さの規格値

$$R_T = \text{当該温度での引張強さ} / \text{常温の引張強さ}$$

各温度での値はそれより低温での値を超えないように修正する。

上記①と②の小さい方の値を設計引張強さ（Su 値）とする。

##### 3. 留意事項

新規材料の Su 値は、当該材料のデータセットから上記方法により定まるが、ASME B&PV Code Sec.II Materials 等の国内外の規格を調査し相当材がある場合には、それらの規格との整合性を図る。

したがって、具体的に次のように設定する。

a) 標本（供試材）ごとに、測定温度ごとの引張強さの平均値を求める。

（表 別 1-6 参照）

b) 標本ごとに、室温（20 °Cと仮定する）における引張強さを基準（=1）として、各温度における引張強さの比を求める。（表 別 1-9 参照）

c) 各温度における引張強さ／室温における引張強さを温度  $T$  の関数  $f_T(T)$  として、最小二乗法により次式にフィッティングし、トレンド曲線を求める。

（図 別 1-8 参照）

$$f_T(T) = a_5 \cdot T^5 + a_4 \cdot T^4 + a_3 \cdot T^3 + a_2 \cdot T^2 + a_1 \cdot T + a_0$$

ここで、 $a_i$  ( $i = 0, 1, \dots, 5$ )はフィッティングパラメータ（定数）である。

- d) 常温 (20 °C) における設計引張強さを JIS 規格値 440 MPa<sup>[3]</sup>とし、トレンド曲線  $f_T(T)$  の  $T$  に規定温度を代入して得られる  $RT$  を乗じた値を算出する。その値と当該温度よりも低い温度における値を比較し、小さい方を設計引張強さとする。(表 別 1-11 参照)



表 別 1-9 室温における引張強さを基準とした各温度の引張強さの比

供試材	温度 (°C)								
	20	65	100	150	200	250	300	350	400
1	1	0.9644	0.9298	0.9042	0.8933	0.9130	0.8962	0.8439	0.7935
2	1	0.9489	0.9336	0.8948	0.8999	0.9367	0.9254	0.8948	0.8253
3	1	0.9541	0.9291	0.9092	0.9172	0.9451	0.9341	0.9072	0.8383

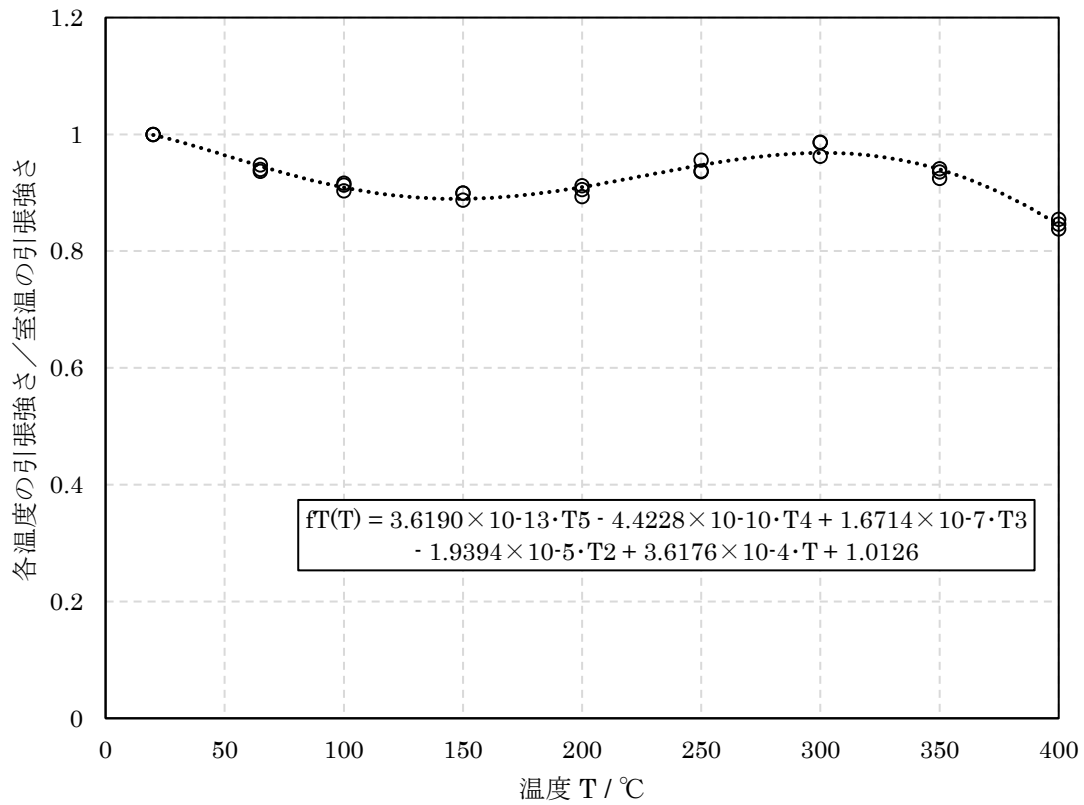


図 別 1-8 SG295 の引張強さのトレンド曲線

### 3.3.3 設計応力強さの設定

新規材料採用ガイドラインでは、設計応力強さ（ $S_m$  値）の設定方法を次のように規定している。なお、引用に際して、ここでは無関係の記載（管材及びオーステナイト系ステンレス鋼に関する規定）は省略することとする。

#### 付録 3. ボルト材を除くクラス 1 機器の設計応力強さ（ $S_m$ 値）の設定方法

付録 1 及び付録 2 と同様に、下表に従い各温度ごとに求まる値の小さい方の値を設計応力強さ（ $S_m$  値）とする。

製品／材料	引張強さ		降伏点（耐力）	
	常温	高温	常温	高温
鉄鋼材料（鍛錬品又は鋳鋼品）及び非鉄材料	$1/3 \times ST$	$(1.1)/3 \times ST \times RT$	$2/3 \times SY$	$2/3 \times SY \times RY$

$SY$ ：常温における降伏点（耐力）の規格値

$RY$ ：当該温度での降伏点（耐力）／常温の降伏点（耐力）

$ST$ ：常温における引張強さの規格値

$RT$ ：当該温度での引張強さ／常温の引張強さ

各温度での値はそれよりも低温での値を超えないように修正する。

したがって、具体的に次のように設定する。

- $SY$  及び  $ST$  をそれぞれ JIS 規格値 295 MPa 及び 440 MPa<sup>[3]</sup> とする。
- 常温における設計応力強さを、 $1/3 \times ST$  と  $2/3 \times SY$  の小さい方の値とする。
- 高温域の規定温度における  $RY$  及び  $RT$  を設計降伏点の設定のため求めた値及び設計引張強さの設定のため求めた値とする。
- 高温域の規定温度における  $(1.1)/3 \times ST \times RT$  と  $2/3 \times SY \times RY$  の値を算出し、小さい方の値を求める。その値と当該温度よりも低い温度における値を比較し、小さい方を設計応力強さとする。（表 別 1-12 参照）

### 3.3.4 許容引張応力の設定

新規材料採用ガイドラインでは、許容引張応力（S 値）の設定方法を次のように規定している。なお、引用に際して、ここでは無関係の記載（クリープ、管材及びオーステナイト系ステンレス鋼に関する規定）は省略することとする。

#### 付録 5. ボルト材を除く材料の許容引張応力（S 値）の設定方法

付録 1 及び付録 2 と同様に、下表に従い各温度ごとに求まる値の最も小さい値を許容引張応力（S 値）とする。

製品／材料	常温以下		高温			
	引張強さ	降伏点	引張強さ		降伏点	
鉄鋼材料及 び非鉄材料	$1/3.5 \times$ $ST$	$2/3 \times$ $SY$	$1/3.5$ $\times ST$	$(1.1)/3.5 \times$ $ST \times RT$	$2/3 \times$ $SY$	$2/3 \times$ $SY \times RY$

高温での値はそれよりも低温での値を超えないように修正する。

$SY$ ：常温における降伏点（耐力）の規格値

$RY$ ：当該温度での降伏点（耐力）／常温の降伏点（耐力）

$ST$ ：常温における引張強さの規格値

$RT$ ：当該温度での引張強さ／常温の引張強さ

したがって、具体的に次のように設定する。

- $SY$  及び  $ST$  をそれぞれ JIS 規格値 295 MPa 及び 440 MPa<sup>[3]</sup> とする。
- 常温における設計応力強さを、 $1/3.5 \times ST$  と  $2/3 \times SY$  の小さい方の値とする。
- 高温域の規定温度における  $RY$  及び  $RT$  を設計降伏点の設定のため求めた  $RY$  及び設計引張強さの設定のため求めた  $RT$  とする。
- $1/3.5 \times ST$  と  $2/3 \times SY$  と、高温域の規定温度における  $(1.1)/3.5 \times ST \times RT$  と  $2/3 \times SY \times RY$  の値を算出し、それらの内で最も小さい値と当該温度よりも低い温度における値を比較し、小さい方を設計応力強さとする。（表 別 1-13 参照）

表 別 1-10 設計降伏点の設定

	温度 (°C)														
	-30~40	65	75	100	125	150	200	225	250	275	300	325	350	375	400
① : 常温の規格値 (MPa)	295	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
$R_Y$	1	0.9597	0.9493	0.9260	0.9099	0.9024	0.9093	0.9179	0.9252	0.9273	0.9215	0.9061	0.8815	0.8505	0.8190
② : $R_Y \times \text{①}$ (MPa)	/	283	280	273	268	266	268	270	272	273	271	267	260	250	241
設計降伏点 ( $S_y$ 値) (MPa)	295	283	280	273	268	266	266	266	266	266	266	266	260	250	241

別紙 1-21

表 別 1-11 設計引張強さの設定

	温度 (°C)														
	-30~40	65	75	100	125	150	200	225	250	275	300	325	350	375	400
① : 常温の規格値 (MPa)	440	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
$R_T$	1	0.9456	0.9338	0.9090	0.8939	0.8896	0.9098	0.9284	0.9474	0.9622	0.9683	0.9620	0.9401	0.9012	0.8453
② : $R_T \times \text{①}$ (MPa)	/	416	410	399	393	391	400	408	416	423	426	423	413	396	371
設計引張強さ ( $S_u$ 値) (MPa)	440	416	410	399	393	391	391	391	391	391	391	391	391	391	371

表 別 1-12 設計応力強さの設定

	温度 (°C)														
	-30~40	65	75	100	125	150	200	225	250	275	300	325	350	375	400
常温の規格値 $S_Y$ (MPa)	295	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
$2/3 \times S_Y$ (MPa)	196	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
$R_Y$	1	0.9597	0.9493	0.9260	0.9099	0.9024	0.9093	0.9179	0.9252	0.9273	0.9215	0.9061	0.8815	0.8505	0.8190
$2/3 \times S_Y \times R_Y$ (MPa)	/	188	186	182	178	177	178	180	181	182	181	178	173	167	161
常温の規格値 $S_T$ (MPa)	440	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
$1/3 \times S_T$ (MPa)	146	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
$R_T$	1	0.9456	0.9338	0.9090	0.8939	0.8896	0.9098	0.9284	0.9474	0.9622	0.9683	0.9620	0.9401	0.9012	0.8453
$(1.1)/3 \times S_T \times R_T$ (MPa)	/	152	150	146	144	143	146	149	152	155	156	155	151	145	136
設計応力強さ ( $S_m$ 値) (MPa)	146	146	146	146	144	143	143	143	143	143	143	143	143	143	136

別紙 1-22

表 別 1-13 許容引張応力の設定

	温度 (°C)														
	-30~40	65	75	100	125	150	200	225	250	275	300	325	350	375	400
常温の規格値 $S_Y$ (MPa)	295	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
$2/3 \times S_Y$ (MPa)	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196
$R_Y$	1	0.9597	0.9493	0.9260	0.9099	0.9024	0.9093	0.9179	0.9252	0.9273	0.9215	0.9061	0.8815	0.8505	0.8190
$2/3 \times S_Y \times R_Y$ (MPa)	/	188	186	182	178	177	178	180	181	182	181	178	173	167	161
常温の規格値 $S_T$ (MPa)	440	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
$1/3.5 \times S_T$ (MPa)	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125
$R_T$	1	0.9456	0.9338	0.9090	0.8939	0.8896	0.9098	0.9284	0.9474	0.9622	0.9683	0.9620	0.9401	0.9012	0.8453
$(1.1)/3.5 \times S_T \times R_T$ (MPa)	/	130	129	125	123	123	125	128	131	133	133	133	130	124	116
許容引張応力(S 値) (MPa)	125	125	125	125	123	123	123	123	123	123	123	123	123	123	116

別紙 1-23

表 別 1-14 SG295 の設計用強度

単位 : MPa	温度 (°C)														
	-30~40	65	75	100	125	150	200	225	250	275	300	325	350	375※	400※
設計降伏点 (Sy 値)	295	283	280	273	268	266	266	266	266	266	266	266	260	(250)	(241)
設計引張強さ (Su 値)	440	416	410	399	393	391	391	391	391	391	391	391	391	(391)	(371)
設計応力強さ (Sm 値)	146	146	146	146	144	143	143	143	143	143	143	143	143	(143)	(136)
許容引張応力 (S 値)	125	125	125	125	123	123	123	123	123	123	123	(123)	(123)	(123)	(116)

※：最高試験温度が 400 °C のため、最高使用温度は 350 °C 以下とする。375 °C 及び 400 °C の値は参考として” ( ) ”を付けて示す。また、SG295 のクリープ温度域は 314 °C 以上であり、設定にクリープの考慮が必要となる許容引張応力 (S 値) の 325°C~400°C の値は参考として” ( ) ”を付けて示す。

#### 4. 温度依存の材料物性測定の結果と規格適合性の確認

縦弾性係数及びポアソン比の測定結果を表 別 1-15 に、比熱容量、温度伝導率及び熱伝導率測定結果を表 別 1-16 に、線膨張係数の測定結果を表 別 1-17 に示す。また、供試材の密度を表 別 1-18 に示す。

なお、平均値は表示桁未満の最上位を四捨五入した値を示す。

縦弾性係数及び線膨張係数について、材料規格における「[E1-1] 炭素量が 0.3%以下の炭素鋼」の縦弾性係数規格値及び「[TE1] 炭素鋼、合金鋼[ 区分 I ]」の線膨張係数規格値に対する比を図 別 1-9 及び図 別 1-10 に示す。

なお、測定温度の中間温度における値は線形補間した値を示す。

材料規格分類 [E1-1] の規格値と比較して、SG295 の縦弾性係数はやや大きく、高温になるほど差が拡大する傾向を示しているが、使用温度域において 5%程度の差異であることから、概ね同等と考えられる。したがって、Hitz-B69 型のバスケット材料の縦弾性係数は、材料規格分類 [E1-1] の規格値を適用するものとする。

また、材料規格分類 [TE1] の規格値と比較して、SG295 との線膨張係数の差は 5%程度であることから、概ね同等と考えられる。したがって、Hitz-B69 型のバスケット材料の線膨張係数は、材料規格分類 [TE1] の規格値を適用するものとする。

補足説明資料 16-4 (Doc No. GK04-SC-B01 Rev.2) の除熱評価に用いる同別紙 1 別紙 1-1 表に示すコンパートメントの常温の熱伝導率は、一般的な炭素鋼の熱伝導率として保守的に  $43.0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  と設定しており、表 別 1-16 に示す常温の熱伝導率は、平均値で  $58.0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  であることから、HZ-SG295HAR の熱伝導率は一般的な炭素鋼と比較して、概ね同等と考えられる。



表 別 1-15 縦弾性係数及びポアソン比測定結果

測定項目	供試材	測定温度 (°C)								
		-75	20	100	150	200	250	300	350	400
縦弾性係数 ( $\times 10^3$ MPa)	1	213	209	206	203	201	198	195	192	189
	2	213	209	206	203	201	198	195	192	189
	3	219	215	212	209	207	204	201	197	194
	平均	215	211	208	205	203	200	197	194	191
ポアソン比	1	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
	2	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
	3	0.29	0.28	0.28	0.28	0.28	0.29	0.29	0.29	0.29
	平均	0.30	0.29	0.29	0.29	0.29	0.30	0.30	0.30	0.30

表 別 1-16 比熱容量、温度伝導率及び熱伝導率測定結果

測定項目	供試材	測定温度 (°C)							
		20	100	150	200	250	300	350	400
比熱容量 (J/(kg · K))	1	467	510	526	543	560	578	599	621
	2	466	497	515	535	550	570	590	609
	3	465	501	513	524	542	557	576	601
	平均	466	503	518	534	551	568	588	610
温度伝導率 ( $\times 10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s)	1	15.81	14.44	13.35	12.59	11.75	10.77	10.02	9.26
	2	15.80	14.42	13.40	12.47	11.56	10.67	9.90	9.16
	3	15.91	14.45	13.49	12.60	11.72	10.83	10.02	9.27
	平均	15.84	14.44	13.41	12.55	11.68	10.76	9.98	9.23
熱伝導率 (W/(m · K))	1	58.1	57.9	55.2	53.7	51.7	48.9	47.2	45.2
	2	57.9	56.4	54.3	52.5	50.0	47.8	45.9	43.9
	3	58.1	56.9	54.4	51.9	49.9	47.4	45.4	43.8
	平均	58.0	57.1	54.6	52.7	50.5	48.0	46.2	44.3

表 別 1-17 線膨張係数測定結果

測定項目	供試材	測定温度 (°C)							
		20	100	150	200	250	300	350	400
瞬時線膨張係数 ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	1	12.1	13.2	13.6	14.1	14.7	15.2	15.6	15.9
	2	12.1	13.2	13.6	14.1	14.7	15.1	15.5	15.6
	3	11.9	13.0	13.4	14.0	14.5	15.0	15.5	15.9
	平均	12.0	13.1	13.5	14.1	14.6	15.1	15.5	15.8
平均線膨張係数 ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	1	12.1	12.8	13.0	13.2	13.5	13.7	14.0	14.2
	2	12.1	12.8	13.1	13.3	13.5	13.8	14.0	14.2
	3	11.9	12.6	12.8	13.1	13.4	13.6	13.9	14.1
	平均	12.0	12.7	13.0	13.2	13.5	13.7	14.0	14.2

注：平均線膨張係数は、室温（20 °C）を基準温度とした値。

表 別 1-18 供試材の密度

供試材	密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
1	7862
2	7865
3	7860

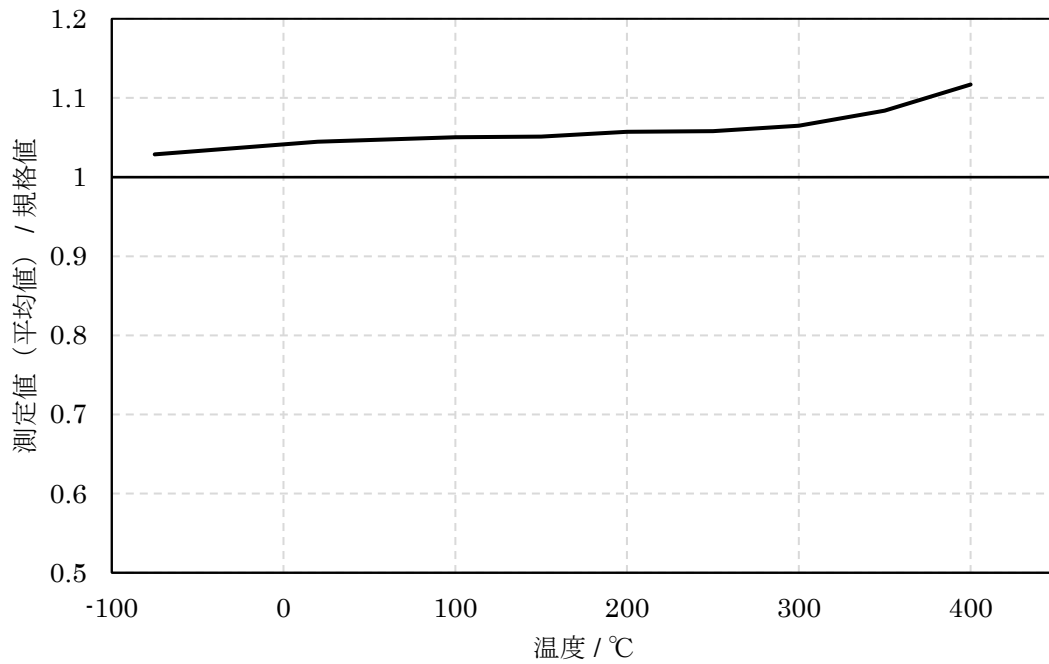


図 別 1-9 縦弾性係数の比較：供試材と材料規格分類〔E1-1〕  
(炭素量が 0.3%以下の炭素鋼)

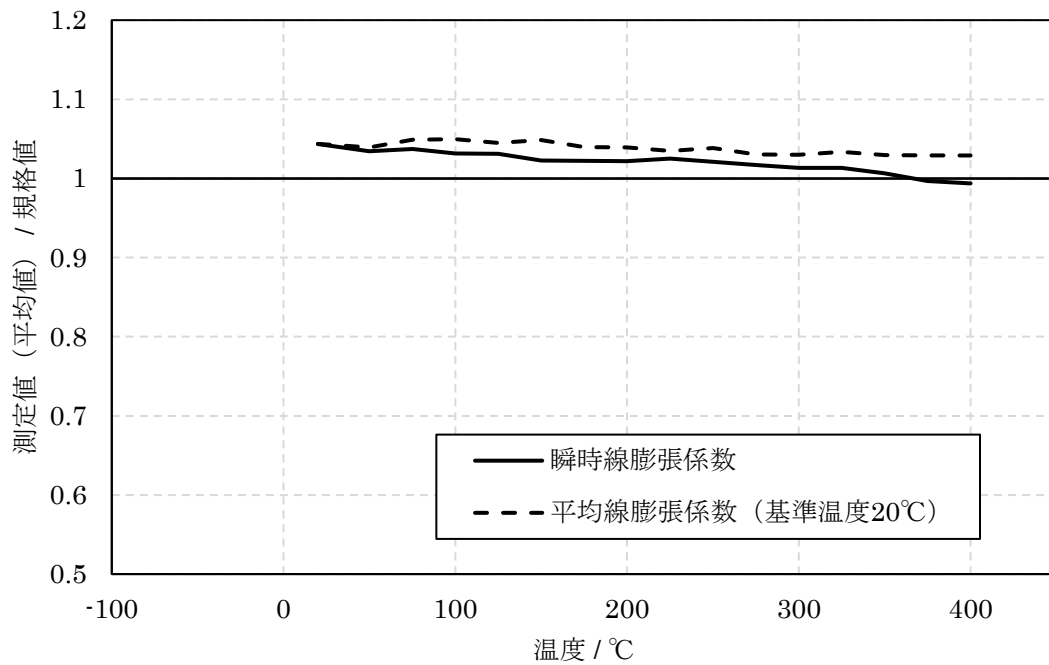


図 別 1-10 線膨張係数（瞬間及び室温からの平均）の比較：供試材と  
材料規格分類〔TE1〕（炭素鋼、合金鋼〔区分 I〕）

## 5. 参考文献

- [1] JSME S FA1-2007“使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格(2007年版)”, 日本機械学会, (2007)
- [2] JIS G 3118 : 2017, “中・常温圧力容器用炭素鋼鋼板”, 日本産業規格, 日本規格協会, (2017)
- [3] JIS G 3116 : 2020, “高圧ガス容器用鋼板及び鋼帯”, 日本産業規格, 日本規格協会, (2020)
- [4] 岩宮久,角谷卓爾,入谷喜雄, “熱延帯鋼の機械的性質,冷間成型性におよぼす合金元素の影響”, 鉄と鋼 第51年 第11号,p.71-p.74,(1965)
- [5] JIS B 8267 : 2015, “圧力容器の設計”, 日本産業規格, 日本規格協会, (2015)
- [6] JSME S NJ1-2012/JSME S NJ1-2013 “発電用原子力設備規格 材料規格 (2012年版/2013年追補)”, 日本機械学会, (2012/2013)
- [7] 木村一弘, “耐熱鋼のクリープ破断寿命予測”, 日本機械学会誌, 第73巻, 5号, p.323-333, (2009)

## バスケット材料の冷間加工に伴う脆化とその対策について

### 1. 概要

Hitz-B69 型キャスクに用いられるバスケット材料である HZ-SG295HAR は、コンパートメントへの成型時に、冷間曲げ加工を受ける。さらに、このバスケットはキャスク供用時にひずみ時効によって脆化することが懸念される。

この別紙 2 では、炭素鋼板におけるひずみ時効メカニズム及びバスケットへの影響を文献により調査するとともに、ひずみ時効対策としての焼鈍の効果を検討した結果を述べる。

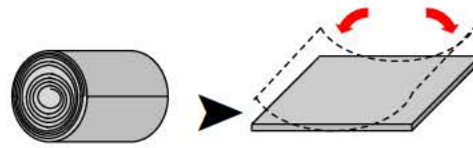
### 2. 炭素鋼板におけるひずみ時効

鋼は冷間加工によって硬化し、逆に、靱性は低下することが知られている<sup>[1]</sup>。また、冷間加工後 100 ～250 °C に加熱する、いわゆる人工時効処理を行うと短時間で硬化・脆化が完了するとの報告<sup>[1]</sup>があり、ひずみ時効と呼ばれる現象である。ひずみ時効が生じる原因は冷間加工によって増殖された転位などの内部欠陥に、侵入型固溶元素である C（炭素）や N（窒素）が集合し、その動きを拘束する結果、硬化し、脆化するものと報告されている<sup>[1]</sup>。すなわち、転位<sup>[2][3]</sup>は金属の塑性変形の 1 つであるすべり変形を担っており、原子配列が乱れた線状の欠陥である。冷間加工により増殖された転位を侵入型固溶元素で埋めると、エネルギー的に安定な状態になるので、強く固着される<sup>[4]</sup>。このようになると、転位を動かすためにはより大きな外力が必要になるため、材料的には硬化が生じる。

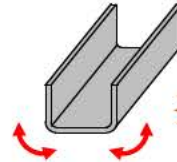
### 3. バスケット用炭素鋼板に対するひずみ時効の可能性

コンパートメントの製作及び供用のフローを図 別 2-1 に示す。バスケット用炭素鋼板は、①コイル材から板材に整直された後、②冷間で曲げ加工を受けるとともに、③レーザー溶接でコンパートメントが製作される。さらに、④キャスク供用において使用済核燃料の崩壊熱を受けることで、ひずみ時効が懸念される温度域に長期間曝される。これらの製作及び供用過程において、バスケット用炭素鋼板の曲げ R 部はひずみ時効により脆化する可能性がある。

① 整直 (冷間加工)



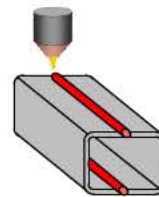
② 曲げ加工 (冷間加工)



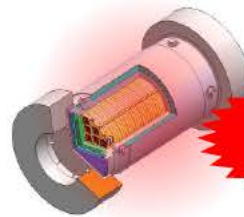
曲げR部への  
ひずみ付与



③ レーザー溶接



④ 供用 (300℃以下)



ひずみ時効に  
よる脆化

図 別 2-1 コンパートメントの製作及び供用のフロー

#### 4. バスケット用炭素鋼板のひずみ時効対策

ひずみ時効で脆化した鋼は、600℃前後の応力除去焼鈍（SR）である程度韌性は回復することが報告されている<sup>[1]</sup>。ひずみ時効は、鋼が冷間加工後 100～250℃に加熱された際、冷間加工によって増殖された転位などの内部欠陥に侵入型元素が集合することによって生じる現象であるため、熱処理によって鋼に内在する転位の量を少なくすれば、ひずみ時効を防止できると考えられる。

鋼に冷間加工を施すと硬さが増し、結晶粒は変形する。このような加工材を加熱すると、再びひずみのない組織に戻ることが知られている<sup>[5]</sup>。一例として、冷間加工した極軟鋼の加熱温度による機械的性質の変化を示したものを図別 2-2 に示す<sup>[6]</sup>。冷間圧延率の大小で多少の差はあるが、いずれも 400℃を超えると引張強さの急激な低下と伸びの回復が起こり、600℃以上の温度でほぼ一定の値に落ち着いていることがわかる。これは、回復・再結晶によるものである。回復<sup>[7]</sup>とは、加工を受けた金属が加熱された際、結晶粒の形やサイズを保持したまま、結晶粒内のひずみが除去され、転位の少ない組織となる現象である。一方、再結晶とは、回復組織の中からひずみのない新しい結晶粒が発生し、それらが成長する現象である<sup>[8]</sup>。回復・再結晶の工業的重要性としては、①機械加工や溶接などにより発生した残留応力の除去（ひずみ取り焼鈍）、②冷間圧延などの加工材の軟化（焼なまし処理）などがある<sup>[9]</sup>。

以上より、バスケット用炭素鋼板におけるひずみ時効対策としては、コンパートメント製作時における冷間曲げ加工の後、焼鈍を施すことで曲げ R 部の転位の量を少なくすることが有効と考えられる。

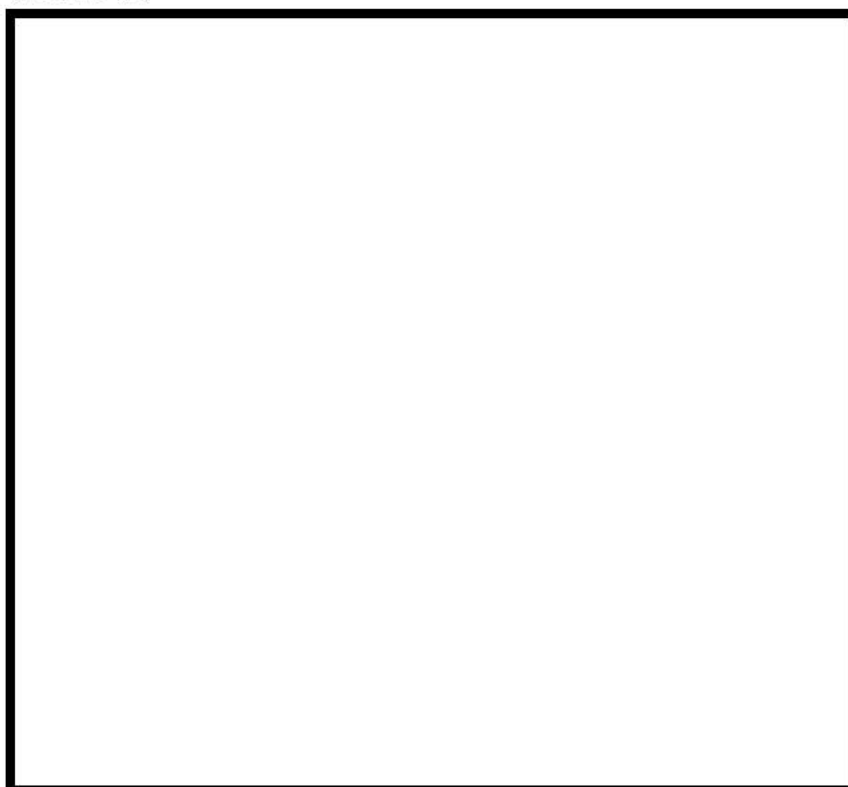


図 別 2-2 冷間圧延した 0.08% C の極軟鋼の焼なましによる機械的性質の変化<sup>[6]</sup>

## 5. バスケット用炭素鋼板の強度に及ぼす焼鈍条件の影響

ひずみ時効対策の焼鈍を施すことにより、バスケット用炭素鋼板における曲げ加工部以外の部位で金属組織が変化し、強度が低下する懸念がある。そこで、強度低下に及ぼす焼鈍条件の影響を調査するため、冷間加工を行っていないバスケット用炭素鋼板を対象として熱処理実験を行った。

供試材の化学成分及び機械的性質を表 別 2-1 に示す。強度を保守的に評価するため、作製した 3 標本の鋼板のうち、最も強度の低い標本 2 を熱処理実験に用いた。なお、供試材の板厚は、JIS G 3116 : 2020 の SG295 における最大厚さの 6 mm としており、コンパートメントの 4.5 mm よりも厚めとした。これは、強度を保守的に評価するためである。すなわち、板の厚さの厚い方が熱間圧延後に冷めにくく、結晶粒が成長する時間が長くなるため、結果的に結晶粒が大きくなって強度が低くなると考えられる。

厚さ 6 mm (供試材の元厚)、幅 20mm、長さ 20 mm の試験片を供試材から採取し、表 別 2-2 に示す 4 条件の熱処理を付与した。熱処理条件は、温度と時間を整理したパラメータとして知られている焼戻しパラメータ  $M^{[10]}$  を変化させた。また、焼戻しパラメータ  $M$  は下式の通りであり、材料定数  $C$  は 20 を用いた。

$$\text{焼戻しパラメータ } M = T (C + \log t) \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (1)$$

[  $T$  : 熱処理温度 (K :  $^{\circ}\text{C} + 273$ )、 $t$  : 熱処理時間、 $C$  : 定数 ]

熱処理材の強度はビッカース硬さにより評価した。ビッカース硬さ試験は、ダイヤモンド製の圧子を試験片の表面に押し込んでくぼみを形成させて、そのくぼみの大きさから硬さを測定する方法である。試験は、保持時間を 15 秒、押し込み荷重を 5 kgf の条件の下で室温において行った。7 点の測定を行い、最大と最小の値を除き、5 点の平均値を試験片のビッカース硬さとした。また、硬さ平均値より SAE J 417 <sup>[11]</sup> を用いて引張強さに換算した。

受入材と熱処理材のビッカース硬さ測定結果を図 別 2-3 に示す。受入材における硬さ (139HV) を引張強さに換算すると 453 MPa となり、表 別 2-1 の引張強さと一致することから、硬さにより強度を評価することは妥当である。また、受入材と比較して、 $650^{\circ}\text{C} \times 2 \text{ h}$  まで (焼戻しパラメータ  $M$  で 18.7 以下) の熱処理では硬さは低下していない。受入材と熱処理材の金属組織を光学顕微鏡及び走査型電子顕微鏡で観察した結果を図 別 2-4 に示す。 $650^{\circ}\text{C} \times 2 \text{ h}$  までの熱処理では金属組織変化は認められない。受入材では、フェライトとパーライトの混合組織であり、パーライトにおけるセメンタイトは層状になっており、一般的な低炭素鋼の金属組織を呈している。一方、 $675^{\circ}\text{C} \times 2 \text{ h}$  の熱処理材では、パーライトの形態が変化しており、球状化したセメンタイトなどが見られる。この結果は、過去の報告<sup>[12]</sup>と概ね一致するものである。

以上より、供試材の SG295 に対し、温度を  $650^{\circ}\text{C}$  以下、時間を 2 h 以下 (焼戻しパラメータ  $M$  で 18.7 以下) の焼鈍を実施した場合、受入材と比較して強度低下や金属組織変化は認められない。したがって、この条件範囲での応力除去焼鈍は、バスケット用炭素鋼板の曲げ R 部におけるひずみ時効対策として有効と考えられる。



表 別 2-1 供試材の化学成分及び機械的性質

標本	化学成分(mass%)					機械的性質		
	C	Si	Mn	P	S	耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
1	0.08	0.01	0.82	0.019	0.002	337	467	39
2	0.08	0.02	0.83	0.016	0.002	330	453	38
3	0.08	0.01	0.83	0.018	0.002	338	458	39

備考：供試材の化学成分及び機械的性質は別紙 1 より抜粋

表 別 2-2 試験片の熱処理条件

条件	①	②	③	④
保持温度(°C)	600	625	650	675
保持時間(h)	1	2	2	2

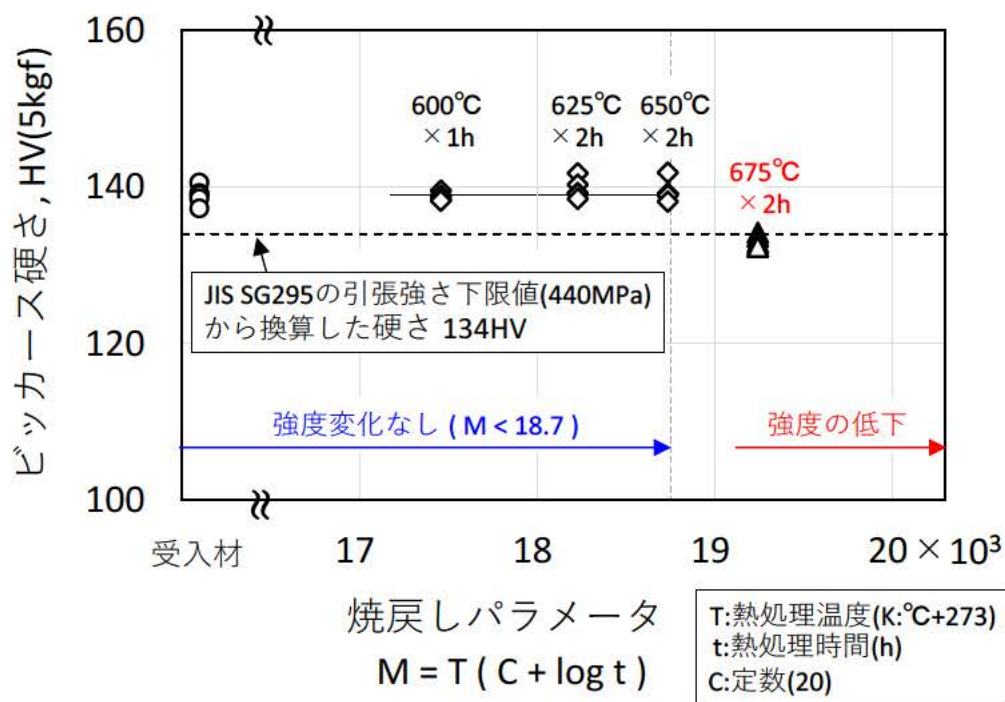


図 別 2-3 受入材と熱処理材のビッカース硬さ

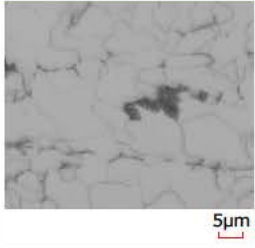
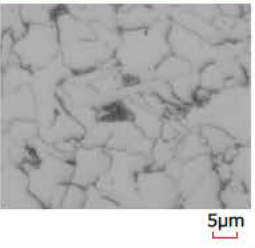
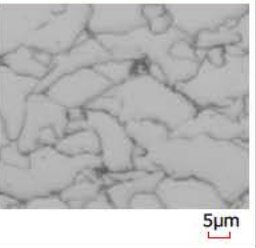
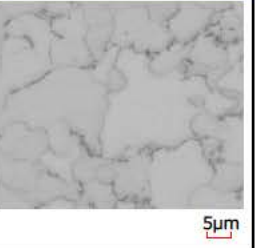
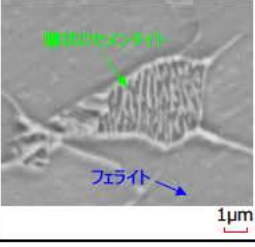
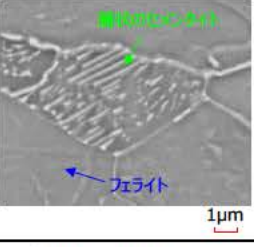
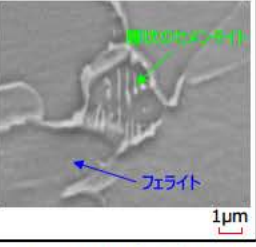
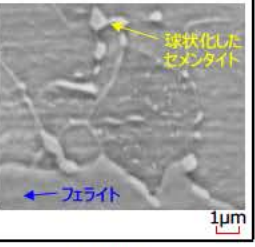
	熱間圧延まま材	焼鈍材		
		625°C×2h	650°C×2h	675°C×2h
低倍率				
高倍率		金属組織の変化なし		金属組織変化
				

図 別 2-4 各種の条件で焼鈍したバスケット用炭素鋼板のマイクロ組織

## 6. 参考文献

- [1] (社) 日本熱処理技術協会, 入門・金属材料の組織と性質, p137, 大河出版(2004).
- [2] 牧, 鉄鋼の組織制御, p18, 内田老鶴圃(2015).
- [3] 金属材料技術研究所, 図解 金属材料技術用語辞典, p303, 日刊工業新聞社(1988).
- [4] 矢島ら, 若い技術者のための機械・金属材料, p76, 丸善出版(2017).
- [5] 牧, 鉄鋼の組織制御, p29, 内田老鶴圃(2015).
- [6] (社) 日本熱処理技術協会, 入門・金属材料の組織と性質, p50, 大河出版(2004).
- [7] 金属材料技術研究所, 図解 金属材料技術用語辞典, p69, 日刊工業新聞社(1988).
- [8] 金属材料技術研究所, 図解 金属材料技術用語辞典, p170, 日刊工業新聞社(1988).
- [9] 牧, 鉄鋼の組織制御, p30, 内田老鶴圃(2015).
- [10] (社) 日本熱処理技術協会, 入門・金属材料の組織と性質, p81, 大河出版(2004).
- [11] (財) 日本規格協会, JIS ハンドブック 鉄鋼 I, pp.1199-1200(2000).
- [12] 木下ら, 高温用鋼の長時間過熱による諸性質の変化, 日本鋼管技報, No.62(1973),pp53-80.

## ASME 新規材料承認ガイドラインについて

### 1. 概要

原子力規制委員会の『日本機械学会「発電用原子力設備規格 材料規格（2012年版）」（JSME S NJ-1-2012）に関する技術評価書の策定について』（平成26年8月6日 原規技発第1408062号）の『日本機械学会「発電用原子力設備規格 材料規格（2012年版）」（JSME S NJ-1-2012）に関する技術評価書』において、日本機械学会規格の「発電用原子力設備規格 材料規格（2012年版）」（JSME S NJ-2012）（以下、「材料規格」という。）に付随する添付1. 新規材料採用ガイドライン（以下、「JSME 新規材料ガイドライン」という。）に対して「ASME 規格や JIS B 8267 では、ボルト材を除く材料の許容引張応力  $S$  の設定方法について、オーステナイト系ステンレス鋼等として 2 種類の許容引張応力  $S$  を示し、フランジ等のひずみが大きく影響するものには高い方の値を用いるべきではない旨規定しているのに対し、JSME 新規材料ガイドラインには該当規定がない等、必ずしも ASME 規格と整合したものとなっていない」との評価が記載されている。

しかし、この評価の対象となる 2 種類の許容引張応力  $S$  が規定されている材料はオーステナイト系ステンレス鋼であり、今回、バスケット材料に適用しようと考えている日本産業規格「高圧ガス容器用鋼板及び鋼帯」（JIS G 3116 : 2020）（以下、「JIS G 3116」という。）の SG295 は炭素鋼であるため該当しない。

次に、JSME 新規材料ガイドラインに相当するアメリカ機械学会（The American Society of Mechanical Engineers）規格の新規材料承認ガイドライン（ASME Section II Part D, Mandatory Appendix, Guidelines on the Approval of New Materials under the ASME Boiler and Pressure Vessel Code）（以下、「ASME 新規材料ガイドライン」という。）によれば、設計降伏点（又は 0.2 %耐力）（ $S_y$  値）の設定は JSME 新規材料ガイドラインと同じだが、設計引張強さ（ $S_u$  値）の設定については以下に示す係数の違いがある。

JSME 新規材料ガイドライン：各温度での設計引張強さ =  $R_T \times S_T$

ASME 新規材料ガイドライン：各温度での設計引張強さ =  $1.1R_T \times S_T$

ここで、

$R_T$ ：当該温度での引張強さ/常温の引張強さ（ASME では、常温引張強さに対する引張強さの平均温度依存トレンド曲線の割合と定義されており、同義）

$S_T$ ：常温の引張強さの規格値

SG295 の設計用強度の設定は、JSME 新規材料ガイドラインに従っているため、ASME 新規材料ガイドラインで規定されている 1.1 倍を考慮していないが、前述の計算式から

JSME 新規材料ガイドラインに従って設定した設計引張強さ (Su 値) は、ASME 新規材料ガイドラインの設計引張強さ (Su 値) の  $1/1.1$  倍となり、1 割程度保守的な設定であることから問題となることはない。

設計応力強さ (Sm 値) の設定について、JSME 新規材料ガイドラインと ASME 新規材料ガイドラインは同じである。

各設計応力強さ (Sm 値) の設定方法の比較を表 別 3-1 に示す。

JSME 新規材料ガイドラインにおける許容引張応力 (S 値) の安全率は、ASME 新規材料ガイドラインにならって 3.5 が採用されており、許容引張応力 (S 値) の設定について、JSME 新規材料ガイドラインと ASME 新規材料ガイドラインは同じである。

各許容引張応力 (S 値) の設定方法の比較を表 別 3-2 に示す。

表 別 3-1 設計応力強さ (Sm 値) の設定方法の比較

(1) JSME 新規材料ガイドライン

製品/材料	引張強さ		降伏点 (耐力)	
	常温	高温	常温	高温
鉄鋼製品 (鍛錬品又は鋳鋼品) 及び非鉄材料	$1/3 \times S_T$	$(1.1)/3 \times S_T \times R_T$	$2/3 \times S_Y$	$2/3 \times S_Y \times R_Y$ 又は $0.9^{*1} \times S_Y \times R_Y$
鉄鋼及び非鉄の溶接管又は細管	$0.85/3 \times S_T$	$1.1 \times 0.85/3 \times S_T \times R_T$	$0.85/1.5 \times S_Y$	$0.85/1.5 \times S_Y$ 又は $0.9^{*1} \times 0.85 \times S_Y \times R_Y$

\*1: 降伏点において 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。

Sy: 常温における降伏点 (耐力) の規格値 (JIS 規格、ASTM 規格等の値) [MPa]

RY: 当該温度での降伏点 (耐力) / 常温の降伏点 (耐力)

ST: 常温における引張強さの規格値 (JIS 規格、ASTM 規格等の値) [MPa]

RT: 当該温度での引張強さ / 常温の引張強さ

各温度での値はそれより低温での値を超えないように修正する。

(2) ASME 新規材料ガイドライン

製品/材料	引張強さ		降伏点 (耐力)	
	常温	高温	常温	高温
鉄鋼製品 (鍛錬品又は鋳鋼品) 及び非鉄材料	$1/3 \times S_T$	$(1.1)/3 \times S_T \times R_T$	$2/3 \times S_Y$	$2/3 \times S_Y \times R_Y$ 又は $0.9 \times S_Y \times R_Y^{*1}$
鉄鋼及び非鉄の溶接管又は細管	$0.85/3 \times S_T$	$1.1 \times 0.85/3 \times S_T \times R_T$	$0.85/1.5 \times S_Y$	$2/3 \times 0.85 \times S_Y \times R_Y$ 又は $0.9 \times 0.85 \times S_Y \times R_Y^{*1}$

\*1: オーステナイト系ステンレス鋼及び  $S_Y/S_T$  が 0.625 未満のニッケル合金、銅合金、コバルト合金では、設計応力強さは降伏強度の 2/3 を超える場合があるが、0.9 より高くなることはない。

Sy: 常温における降伏点 (耐力) の規格値[MPa]

RY: 当該温度での降伏点 (耐力) / 常温の降伏点 (耐力)

ST: 常温における引張強さの規格値[MPa]

RT: 当該温度での引張強さ / 常温の引張強さ

表 別 3-2 許容引張応力 (S 値) の設定方法の比較

(1) JSME 新規材料ガイドライン

製品/材料	常温以下		高温						
	引張強さ	降伏点	引張強さ		降伏点		クリープ破断強度		クリープ速度
鉄鋼材料及び 非鉄材料	$1/3.5 \times S_T$	$2/3 \times S_T$	$1/3.5 \times S_T$	$(1.1)/3.5 \times S_T \times R_T$	$2/3 \times S_Y$	$2/3 \times S_Y \times R_Y$ 又は $0.9^{*1} \times S_Y \times S_Y$	$0.67 \times S_{Ravg}$	$0.8 \times S_{Rmin}$	$1.0 \times S_C$
鉄鋼材料及び 非鉄材料の溶 接管又は細管	$0.85/3.5 \times S_T$	$2/3 \times 0.85 \times S_T$	$0.85/3.5 \times S_T$	$1.1 \times 0.85/3.5 \times S_T \times R_T$	$2/3 \times 0.85 \times S_Y$	$2/3 \times 0.85 \times S_Y \times R_Y$ 又は $0.9^{*1} \times 0.85 \times S_Y \times S_Y$	$0.67 \times 0.85 \times S_{Ravg}$	$0.8 \times 0.85 \times S_{Rmin}$	$0.85 \times S_C$

\*1: 降伏点において 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。

別紙 3-4

$S_Y$ : 常温における降伏点 (耐力) の規定値 (JIS 規格、ASTM 規格等の値) [MPa]

$R_Y$ : 当該温度での降伏点 (耐力) / 常温の降伏点 (耐力)

$S_T$ : 常温における引張強さの規格値 (JIS 規格、ASTM 規格等の値) [MPa]

$R_T$ : 当該温度での引張強さ / 常温の引張強さ

$S_{Ravg}$ : 100,000 時間で破断を生じる平均応力

$S_{Rmin}$ : 100,000 時間で破断を生じる最小応力

$S_C$ : 0.01% / 1,000 時間のクリープ速度を生じる応力の平均値

各温度での値はそれより低温での値を超えないように修正する。

表 別 3-2 許容引張応力 (S 値) の設定方法の比較 (つづき)

(2) ASME 新規材料ガイドライン

製品/材料	常温以下		高温						
	引張強さ	降伏点	引張強さ		降伏点		クリープ破断強度		クリープ速度
鉄鋼材料及び 非鉄材料	$1/3.5 \times S_T$	$2/3 \times S_T$	$1/3.5 \times S_T$	$(1.1)/3.5 \times S_T \times R_T$	$2/3 \times S_Y$	$2/3 \times S_Y \times R_Y$ 又は $0.9 \times S_Y \times R_Y^{*1}$	$0.67 \times S_{Ravg}$	$0.8 \times S_{Rmin}$	$1.0 \times S_C$
鉄鋼材料及び 非鉄材料の溶 接管又は細管	$0.85/3.5 \times S_T$	$2/3 \times 0.85 \times S_T$	$0.85/3.5 \times S_T$	$1.1 \times 0.85/3.5 \times S_T \times R_T$	$2/3 \times 0.85 \times S_Y$	$2/3 \times 0.85 \times S_Y \times R_Y$ 又は $0.9 \times 0.85 \times S_Y \times R_Y^{*1}$	$0.67 \times 0.85 \times S_{Ravg}$	$0.8 \times 0.85 \times S_{Rmin}$	$0.85 \times S_C$

\*1: オーステナイト系ステンレス鋼及び  $S_Y/S_T$  が 0.625 未満のニッケル合金、銅合金、コバルト合金では、二種類の許容応力値が示されている。こ許容応力値は降伏点の 2/3 を超えるが、0.9 より高くない。高い方の値は、わずかな変形自体が問題にならない場合のみ使用できる。高い方の値は、フランジの設計やその他ひずみに敏感な用途には用いるべきではない。

$S_Y$ : 常温における降伏点 (耐力) の規定値 [MPa]

$R_Y$ : 当該温度での降伏点 (耐力) / 常温の降伏点 (耐力)

$S_T$ : 常温における引張強さの規格値 [MPa]

$R_T$ : 当該温度での引張強さ / 常温の引張強さ

$S_{Ravg}$ : 100,000 時間で破断を生じる平均応力

$S_{Rmin}$ : 100,000 時間で破断を生じる最小応力

$S_C$ : 0.01% / 1,000 時間のクリープ速度を生じる応力の平均値



## 2. JSME 新規材料ガイドラインと ASME 新規材料ガイドラインの比較

JSME 新規材料ガイドラインと ASME 新規材料ガイドラインの対比表を以下に示す。

JSME 新規材料ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 新規材料ガイドライン)
<p>2.1 提出物に含まれる情報</p> <p>新規材料を定める場合には、(1)から(22)の項目について用途に応じて必要な資料を提出すること。</p> <p>用途に応じて</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 化学成分</li> <li>・ 機械的性質、応力-ひずみ特性、高温及び低温引張特性、クリープ及びクリープ破断特性、時効後特性</li> </ul> <p>供試材標本数は、最小 3 標本とすること。</p> <p>なお、標本とは、同一溶解、同一板厚及び同一熱処理条件を同時に満足するものをいう。</p> <p>供試材標本数は、鋳造品及び鍛錬品の各製品形態に対し、3 標本以上とすること。</p> <p>なお、製品形態とは、「Product Form」に相当する用語で、配管と板とでは別の製品形態となる。</p> <p>製品形態における鍛錬品とは、圧延又は鍛造等の加工法により製造された製品の総称であり、これらを区別する必要はない。</p> <p>使用が予想されるすべての製品形態に対してデータを提出すること。</p> <p>寸法効果がある場合、使用が予想される最大寸法を含め、異なる寸法についての製品データを提出すること。</p> <p>試験方法は、JIS 規格あるいは ISO、ASTM 等の規格によること。</p> <p>適用温度での使用に関する情報があれば付すこと。</p>	<p>[Mandatory Appendix 5]</p> <p>5-700 REQUIRED SAMPLING</p> <p>For all mechanical properties, data shall be provided over the required range of test temperatures from at least three heats of material meeting all of the requirements of the applicable specifications.</p> <p>5-700 必要なサンプリング</p> <p>すべての機械的特性について、データは、適用される仕様のすべての要件を満たす材料の少なくとも 3 つのヒートから、必要な試験温度範囲にわたって提供されるものとします。</p>
(1) 材料の基本化学成分及び用途	
<p>(2) 材料の仕様</p> <p>a. 適合規格</p> <p>適合規格名もしくは申請中又は申請予定の規格</p>	<p>[Mandatory Appendix 5]</p> <p>5-1900 REQUIREMENTS FOR RECOGNIZED NATIONAL OR INTERNATIONAL</p>

JSME 新規材料ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 新規材料ガイドライン)
<p>名を記載すること。</p> <p>b.化学成分制限 適用する機器等に対して成分制限が必要な場合、記載すること。</p> <p>c.機械的性質 常温の規格値。</p> <p>d.寸法制限（径、厚さ他） 適用する機器等に対して寸法制限が必要な場合、記載すること。</p> <p>e.形状寸法（寸法公差）</p>	<p>SPECIFICATIONS</p> <p>Minimum requirements that shall be contained in a material specification for which acceptance is being requested include such items as the name of the national or international organization, scope, reference documents, process, manufacture, conditions for delivery, heat treatment, chemical and tensile requirements, forming properties, testing specifications and requirements, workmanship, finish, marking, inspection, and rejection.</p> <p>5-1900 承認された国内仕様または国際仕様の要件受諾が要求されている材料仕様に含まれる必要がある最小要件には、国内または国際組織の名前、範囲、参照文書、プロセス、製造、配送条件、熱処理、化学的および引張要件、成形特性、試験仕様および要件、仕上がり、仕上げ、マーキング、検査、および不合格などの項目が含まれます。</p> <p>5-200 APPLICATION</p> <p>The inquirer shall identify all product forms, size ranges, and specifications or specification requirements for the material for which approval is desired.</p> <p>提案者は、承認が必要な材料のすべての製品形態、サイズ範囲、および仕様または仕様要件を特定するものとします。</p>
<p>(3) 使用条件</p> <p>a.適用範囲</p> <p>b.温度範囲（最高温度、低温の機器等の場合、最低使用温度）</p> <p>c.外圧設計が必要な機器等への適用の有無</p>	<p>[Mandatory Appendix 5]</p> <p>5-200 APPLICATION</p> <p>The inquirer shall identify to the BPV Committee the following:</p> <p>{a} the Section or Sections and Divisions of the Code in which the new material is to be approved</p> <p>{b} the temperature range of intended application</p>

JSME 新規材料ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 新規材料ガイドライン)
	<p>{c} whether cyclic service is to be considered</p> <p>{d} whether external pressure is to be considered</p> <p>The inquirer shall identify all product forms, size ranges, and specifications or specification requirements for the material for which approval is desired. When available, the inquirer shall furnish information describing service experience in the temperature range requested.</p> <p>5-200 アプリケーション</p> <p>照会者は、BPV 委員会に対して以下を特定するものとします。</p> <p>{a} 新しい資料が承認されるコードのセクションまたはセクションおよびディビジョン</p> <p>{b} 意図する用途の温度範囲</p> <p>{c} サイクリックサービスを考慮するかどうか</p> <p>{d} 外圧を考慮するかどうか</p> <p>照会者は、承認が必要な材料のすべての製品形態、サイズ範囲、および仕様または仕様要件を特定するものとします。利用可能な場合、問い合わせ者は、要求された温度範囲でのサービス経験を説明する情報を提供するものとします。</p>
<p>(4) 特徴および使用上の留意事項</p> <p>a.特徴</p> <p>新規材料の開発経緯、特徴、メリット及び特記すべき物理的性質。</p> <p>b.新規材料に関する特許及びライセンスの有無</p> <p>ライセンスがある場合、製造に関する制約。</p>	
<p>(5) 製造工程及び製造条件</p> <p>a.製造方法（溶解、精錬、製造および加工）</p> <p>b.熱処理（温度、加熱・冷却方法、速度）</p> <p>c.検査（検査方法等）</p>	<p>[Mandatory Appendix 5]</p> <p>5-400 METALLURGICAL STRUCTURE AND HEAT TREATMENT</p> <p>When applicable for the proposed material, the inquirer shall indicate the intended metallurgical structure(s) to be achieved in order to comply with the mechanical properties requirements and, where applicable, fully describe the heat treatment</p>

JSME 新規材料ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 新規材料ガイドライン)
	<p>(including cooling rates) to be applied to achieve this ( or these) structure(s), the mechanical properties, and the expected behavior under service conditions.</p> <p>5-400 冶金構造と熱処理</p> <p>提案された材料に該当する場合、質問者は、機械的特性の要件を満たすために達成される予定の冶金構造を示し、該当する場合は、この（またはこれらの）構造、機械的特性、および使用条件下で予想される挙動に対して達成するために適用される熱処理（冷却速度を含む）を完全に説明する必要があります。</p>
<p>(6) 化学成分（溶鋼分析又は溶湯分析、製品分析） 化学成分範囲、試験用供試材の標本ごとの製品分析値。</p>	<p>[Mandatory Appendix 5]</p> <p>5-300 CHEMICAL COMPOSITION</p> <p>The inquirer shall recommend to the BPV Committee on Materials whether the chemical composition specified in the reference specification applies or whether restrictions to this composition shall be imposed for the intended application. When coverage by a recognized national or international standardization body has been requested but not yet obtained, the inquirer shall indicate the detailed chemical composition in the inquiry. The inquirer shall explain the reasons for the chemistry and chemistry limits, and their relationship to the metallurgical structure (e.g., influence on precipitates and their morphology, grain size, and phases), heat treatment effect (e.g., strengthening mechanisms and their stability), and mechanical properties. Elements that significantly influence strength, ductility, toughness, weldability, and behavior under service conditions should be identified.</p> <p>5-300 化学成分</p> <p>提案者は、参照仕様で指定された化学組成が適用されるかどうか、またはこの組成への制限が意図され</p>

JSME 新規材料ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 新規材料ガイドライン)
	<p>た用途に課されるかどうかを BPV 材料委員会に報告するものとします。認定された国内または国際標準化機関によるカバーが要求されたが、まだ取得されていない場合、提案者は詳細な化学組成を調査で示すものとします。提案者は、化学的および化学的制限の理由、および金属構造との関係（例：析出物とその形態、粒径、相への影響）、熱処理効果（例：強化メカニズムとその安定性）、そして機械的性質を説明しなければなりません。使用条件下での強度、延性、靱性、溶接性、および挙動に大きな影響を与える要素を特定する必要があります。</p>
(7) マクロ及びマイクロ組織	<p>[Mandatory Appendix 5]  <b>5-900 TIME-DEPENDENT PROPERTIES</b>  Additional comments regarding post-test specimen appearance ( e.g., oxidation, necking, intergranular fracture, etc.), as well as photographs and photomicrographs, may be beneficial for the analysis.  5-900 時間依存プロパティ  試験後の試験片の外観（例：酸化、ネッキング、粒界破壊など）に関する追加のコメント、および写真や顕微鏡写真は、分析に役立つ場合があります。</p>
(8) 実用試験（へん平試験、押し広げ試験）	<p>[Mandatory Appendix 5]  <b>5-1700 REQUESTS FOR ADDITIONAL DATA</b>  The Committee may request additional data, including data on properties or material behavior not explicitly treated in the Construction Code for which approval is desired.  5-1700 追加データのリクエスト  委員会は、承認が必要な建設規格で明示的に扱われていない特性または材料の挙動に関するデータを含む、追加のデータを要求する場合があります。</p>
(9) 加工性、加工条件 チューブについては、必要に応じて曲げ加工性についての試験結果。	<p>[Mandatory Appendix 5]  <b>5-700 REQUIRED SAMPLING</b>  For wrought materials and especially for those</p>

JSME 新規材料ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 新規材料ガイドライン)
	<p>materials whose mechanical properties are enhanced by heat treatment, forming practices, or a combination thereof, and for other materials for which the mechanical properties may be reasonably expected to be thickness dependent, data from one additional lot from material of at least 75% of the maximum thickness for which coverage is requested shall be submitted. If no maximum thickness is given, information shall be provided to support the suitability of the thickness used for the tested samples.</p> <p>5-700 必要なサンプリング</p> <p>鍛鋼材料、特に熱処理、成形方法、またはそれらの組み合わせによって機械的特性が強化された材料、および機械的特性が厚さに依存すると合理的に予想されるその他の材料については、材料からの 1 つの追加ロットからのデータ 適用範囲が要求される最大厚さの少なくとも 75% を提出する必要があります。最大厚さが指定されていない場合は、試験サンプルに使用される厚さが適切であることを裏付ける情報を提供する必要があります。</p>
<p>(10) 機械的性質</p> <p>a.引張特性（引張強さ、降伏点又は耐力、伸び、絞り）</p> <p>b.靱性</p> <p>靱性が要求される材料の場合、最低使用温度と板厚範囲に対する切欠靱性データ（溶接構造物の場合、溶接金属、溶接熱影響部のデータを含む。）</p> <p>c.硬さ</p>	<p>[Mandatory Appendix 5]</p> <p>5-500 MECHANICAL PROPERTIES</p> <p>Test methods employed for the properties tested shall be those referenced in or by the material specifications, or shall be the appropriate ASTM test methods, recommended practices, or test methods described in accepted international standards. The test methods used shall be indicated in the data package.</p> <p>It is desired that the data be obtained using material representative of the range of effects of the key variables of composition, thickness, mechanical working, and heat treatment. It is desirable that, when applicable, test data also be</p>

JSME 新規材料ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 新規材料ガイドライン)
	<p>provided for the range of heat treatment exposures that may influence properties such as tensile strength, toughness, and stress rupture behavior. After consideration of the submitted data, the Committee reserves the right to modify the specification requirements.</p> <p>5-500 機械的特性</p> <p>テストされた特性に使用されるテスト方法は、材料仕様書で参照されているもの、または適切な ASTM テスト方法、推奨される方法、または承認された国際規格に記載されているテスト方法でなければなりません。使用した試験方法は、データ パッケージに示すものとします。</p> <p>組成、厚さ、機械加工、および熱処理の重要な変数の効果の範囲を代表する材料を使用してデータを取得することが望まれます。該当する場合は、引張強さ、靱性、応力破断挙動などの特性に影響を与える可能性のある熱処理暴露の範囲についての試験データも提供することが望ましいです。提出されたデータを検討した後、委員会は仕様要件を変更する権利を留保します。</p>
<p>(11) 応力-ひずみ特性</p> <p>応力-ひずみ曲線 (引張、圧縮)。</p> <p>外部から圧力を受ける機器等に使用する場合、設計温度範囲より広い温度範囲までの 50°C ごとの数値データ。</p>	<p>[Mandatory Appendix 5]</p> <p>5-1200 STRESS-STRAIN CURVES</p> <p>Stress-strain data (tension or compression) shall be furnished for each of the three heats of material at 100°F intervals from room temperature up to 100°F above the maximum temperature desired.</p> <p>5-1200 応力-ひずみ曲線</p> <p>応力-ひずみデータ (引張りまたは圧縮) は、室温から必要な最高温度より 100° F 高い温度まで、100° F 間隔で材料の 3 つのヒートのそれぞれについて提供されるものとします。</p>
<p>(12) 高温及び低温引張特性</p> <p>引張特性 (引張強さ、降伏点又は耐力、伸び、絞り)</p>	<p>[Mandatory Appendix 5]</p> <p>5-800 TIME-INDEPENDENT PROPERTIES</p> <p>For time-independent properties at and above</p>

JSME 新規材料ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 新規材料ガイドライン)
<p>a. 常温から最高使用温度より 50°C 高い温度までの 50°C ごとのデータ。</p> <p>b. 常温以下の温度で使用する場合で、低温での設計応力を高くしたい場合は、最低使用温度を含む 50°C ごとの引張特性データ。</p>	<p>room temperature, the required data include values of ultimate tensile strength, 0.2% offset yield strength, reduction of area (when specified in the material specification), and elongation. For steels, nickel alloys, cobalt alloys, and aluminum alloys, data shall be provided at room temperature and 100oF intervals, beginning at 200oF to 100oF above the maximum intended use temperature, unless the maximum intended use temperature does not exceed 100oF.</p> <p>5-800 時間に依存しないプロパティ</p> <p>室温以上での時間に依存しない特性の場合、必要なデータは、極限引張強度、0.2%オフセット降伏強度、断面積の減少（材料仕様で指定されている場合）、および伸びの値が含まれます。鋼、ニッケル合金、コバルト合金、およびアルミニウム合金の場合、データは、最大使用温度が 100° F を超えない場合を除き、室温で、最大使用温度より 200° F から 100° F 高い温度から 100° F 間隔で提供されるものとします。</p> <p>(100°F はメトリックの場合、50°C 相当となります。)</p>
<p>(13) クリープ及びクリープ破断特性</p> <p>必要に応じてクリープ速度、クリープ破断強度</p> <p>a. 最高使用温度より 50°C 高い温度までの 50°C ごとのデータ。</p> <p>b. 溶接金属及び溶接継手に関しては、クリープ破断強度のみ。</p>	<p>[Mandatory Appendix 5]</p> <p>5-900 TIME-DEPENDENT PROPERTIES</p> <p>If approval is desired for temperatures where time-dependent properties may be expected to control design, time-dependent data, as itemized below, shall be provided, starting at temperatures approximately 50oF below the temperature where time-dependent properties may govern and extending at least 100oF above the maximum intended use temperature. Exceptions to this rule are permitted, provided the inquirer provides suitable justification for the deviation. The creep-rupture test method shall be in accordance with</p>



JSME 新規材料ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 新規材料ガイドライン)
	<p>ASTM E139 or other equivalent national or international test standard.</p> <p>5-900 時間依存プロパティ</p> <p>時間依存特性が設計を制御すると予想される温度の承認が必要な場合は、時間依存特性が支配する温度より約 50oF 低い温度から開始し、少なくとも 100° F を超える温度まで、以下に項目別に示す時間依存データを提供する必要があります。この規則の例外は、提案者が逸脱の適切な正当化を提供する場合に許可されます。クリープ破断試験方法は、ASTM E139 またはその他の同等の国内または国際試験規格に従うものとします。</p>
<p>(14) 時効後靱性</p> <p>時効硬化を考慮する必要があると規定される材料については以下の項目を含むこと。</p> <p>a.最高使用温度等を考慮して時効させた材料のシャルピー衝撃試験結果。</p> <p>b.材料が時効脆化する場合は、溶接継手のシャルピー衝撃試験結果。</p>	<p>[Mandatory Appendix 5]</p> <p>5-1700 REQUESTS FOR ADDITIONAL DATA</p> <p>The Committee may request additional data, including data on properties or material behavior not explicitly treated in the Construction Code for which approval is desired.</p> <p>5-1700 追加データのリクエスト</p> <p>委員会は、承認が必要な建設規格で明示的に扱われていない特性または材料の挙動に関するデータを含む、追加のデータを要求する場合があります。</p>
<p>(15) 溶接性（溶接性、溶接区分）</p> <p>a.新規材料を溶接して使用する場合は、材料の溶接性に関するデータを提出すること。（データには、日本機械学会発電用原子力設備規格溶接規格、ASME Sec. IX もしくは、ASME Sec. XI 等による施工法確認試験データを含めること。）</p> <p>b. 後熱処理、硬化性、溶接方法の影響、熱影響部及び溶接金属の切欠靱性、溶接施工実績に関する情報。</p>	<p>[Mandatory Appendix 5]</p> <p>5-1500 DATA REQUIREMENTS FOR WELDS, WELDMENTS, AND WELDABILITY</p> <p>The following three types of welding information are required for a new base metal for use in welded construction in an ASME BPV Construction Code: data on weldability, data on strength and toughness in the time-independent regime, and data on strength in the time-dependent regime.</p> <p>5-1500 溶接、溶接、および溶接性に関するデータ要件</p> <p>次の 3 種類の溶接情報は、ASME BPV 建設コードの溶接構造で使用するための新しい母材に必要で</p>

JSME 新規材料ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 新規材料ガイドライン)
	す: 溶接性に関するデータ、時間に依存しない体制での強度と靱性に関するデータ、および時間に依存する体制での強度に関するデータ。
<p>(16) 耐食性</p> <p>腐食環境下で材料の組織又は機械的性質に及ぼす影響の評価結果。(実験室的腐食試験を行い、腐食損傷量、腐食形態等々を評価する。)</p>	<p>[Mandatory Appendix 5]</p> <p>5-1700 REQUESTS FOR ADDITIONAL DATA</p> <p>The Committee may request additional data, including data on properties or material behavior not explicitly treated in the Construction Code for which approval is desired.</p> <p>5-1700 追加データのリクエスト</p> <p>委員会は、承認が必要な建設規格で明示的に扱われていない特性または材料の挙動に関するデータを含む、追加のデータを要求する場合があります。</p>
<p>(17) 設計降伏点</p> <p>付録 1 に基づく各温度における降伏点又は耐力のデータ。</p> <p>付録 1.新規材料の設計降伏点 (S<sub>Y</sub> 値) の設定方法</p> <p>1.基本事項</p> <p>標本数は、3 標本とする。</p> <p>高温強度を各標本について求める。</p> <p>各温度における強度を常温の強度で規準化したトレンド曲線による方法を用いて設計降伏点を求める。</p> <p>2.S<sub>Y</sub> 値の設定方法</p> <p>①常温の降伏点 (耐力) の規格値</p> <p>②R<sub>Y</sub>×常温の降伏点 (耐力) の規格値</p> <p>R<sub>Y</sub> = 当該温度での降伏点 (耐力) / 常温の降伏点 (耐力)</p> <p>各温度での値はそれより低温での値を超えないように修正する。上記①と②の小さい方の値を設計降伏点 (S<sub>Y</sub> 値) とする。</p>	<p>[Mandatory Appendix 2]</p> <p>2-100 DERIVATION OF STRESS INTENSITY VALUES</p> <p>R<sub>Y</sub> = ratio of the average temperature dependent trend curve value of yield strength to the room temperature yield strength</p> <p>S<sub>Y</sub> = specified minimum yield strength at room temperature</p> <p>2-100 応力強度値の導出</p> <p>R<sub>Y</sub> = 常温降伏点 (耐力) に対する降伏点 (耐力) の平均温度依存トレンド曲線値の比率</p> <p>S<sub>Y</sub> = 常温で規定された最小降伏点 (耐力)</p> <p>2-130 CRITERIA FOR BOLTING MATERIALS IN TABLE 4 FOR USE WITH SECTION VIII, DIVISION 2, PART 5 AND ANNEX 5.F; AND WITH SECTION III, SUBSECTIONS NB AND WB</p> <p>In the application of these criteria, the Committee considers the yield strength at temperature to be S<sub>Y</sub>R<sub>Y</sub>, and the tensile strength at temperature to be 1.1S<sub>T</sub>R<sub>T</sub>.</p>

JSME 新規材料ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 新規材料ガイドライン)
	<p>2-130 セクション VIII, Div. 2, Part 5 および附属書 5.F 並びにセクション III、サブセクション NB および WB で使用する表 4 のボルト材料の基準</p> <p>これらの基準の適用において、委員会は、各温度での降伏点（耐力）を <math>S_{YR_T}</math>、各温度での引張強度を <math>1.1S_{TR_T}</math> と見なします。</p>
<p>(18) 設計引張強さ</p> <p>付録 2 に基づく各温度における引張強さのデータ。</p> <p>付録 2.新規材料の設計引張強さ (<math>S_u</math> 値) の設定方法</p> <p>1.基本事項</p> <p>標本数は、3 標本とする。</p> <p>高温強度を各標本について求める。</p> <p>各温度における強度を常温の強度で規準化したトレンド曲線による方法を用いて設計引張強さを求める。</p> <p>2.<math>S_T</math> 値の設定方法</p> <p>①常温の引張強さの規格値</p> <p>②<math>R_T \times</math> 常温の引張強さの規格値</p> <p><math>R_T =</math> 当該温度での引張強さ / 常温の引張強さ</p> <p>各温度での値はそれより低温での値を超えないように修正する。上記①と②の小さい方の値を設計引張強さ (<math>S_u</math> 値) とする。</p>	<p>[Mandatory Appendix 2]</p> <p>2-100 DERIVATION OF STRESS INTENSITY VALUES</p> <p><math>R_T =</math> ratio of the average temperature dependent trend curve value of tensile strength to the room temperature tensile strength</p> <p><math>S_T =</math> specified minimum tensile strength at room temperature</p> <p>In the application of these criteria, the Committee considers the yield strength at temperature to be <math>S_{YR_T}</math>, and the tensile strength at temperature to be <math>1.1S_{TR_T}</math>.</p> <p>2-100 応力強度値の導出</p> <p><math>R_T =</math> 常温引張強さに対する引張強さの平均温度依存トレンド曲線値の比率</p> <p><math>S_T =</math> 常温で規定された最小引張強さ</p> <p>2-130 CRITERIA FOR BOLTING MATERIALS IN TABLE 4 FOR USE WITH SECTION VIII, DIVISION 2, PART 5 AND ANNEX 5.F; AND WITH SECTION III, SUBSECTIONS NB AND WB</p> <p>In the application of these criteria, the Committee considers the yield strength at temperature to be <math>S_{YR_T}</math>, and the tensile strength at temperature to be <math>1.1S_{TR_T}</math>.</p> <p>2-130 セクション VIII, Div. 2, Part 5 および附属書 5.F 並びにセクション III、サブセクション NB および WB で使用する表 4 のボルト材料の基準</p>

JSME 新規材料ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 新規材料ガイドライン)																			
	これらの基準の適用において、委員会は、各温度での降伏点（耐力）を $S_yR_y$ 、各温度での引張強度を $1.1S_tR_t$ と見なします。																			
<p>(19) 設計応力強さ</p> <p>付録 3 及び必要に応じ付録 4 に基づく各温度における応力強さのデータ。</p> <p>付録 3. ボルトを除くクラス 1 機器の設計応力強さ (<math>S_m</math> 値) の設定方法</p> <p>付録 1 及び付録 2 の方法と同様に、下表に従い各温度ごとに求まる値の小さい方の値を設計応力強さ (<math>S_m</math> 値) とする。</p>	<p>[Mandatory Appendix 2]</p> <p>2-100 DERIVATION OF STRESS INTENSITY VALUES</p> <p>The factors employed to determine design stress intensity values are provided in Tables 2-100(a), 2-100(b), and 2-100(c).</p> <p>The maximum design stress intensity shall be the lowest value obtained from the criteria in Tables 2-100(a), 2-100(b), and 2-100(c). The mechanical properties considered, and the factors applied to establish the maximum allowable stresses, are given in 2-110 and 2-130.</p> <p>2-100 応力強度値の導出</p> <p>設計応力強さを決定するために使用される係数は、表 2-100(a)、2-100(b)、および 2-100(c) に示されています。</p> <p>最大設計応力強さは、表 2-100(a)、2-100(b)、および 2-100(c)の基準から得られる最小値とします。考慮される機械的特性、および最大許容応力を確立するために適用される要因は、2-110 および 2-130 に記載されています。</p> <p>2-110 CRITERIA FOR MATERIALS OTHER THAN BOLTING: TABLES 2A AND 2B</p> <p>The design stress intensity values at any temperature are no larger than the least of the following:</p> <p>(a) one-third of the specified minimum tensile strength at room temperature;</p> <p>(b) one-third of the tensile strength at temperature;</p> <p>(c) two-thirds of the specified minimum yield</p>																			
<table border="1" data-bbox="395 967 646 1848"> <thead> <tr> <th rowspan="2">製品/材料</th> <th colspan="2">引張強さ</th> <th colspan="2">降伏点(耐力)</th> </tr> <tr> <th>常温</th> <th>高温</th> <th>常温</th> <th>高温</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>鉄鋼材料(鍛練品又は鋳鋼品)及び非鉄材料</td> <td><math>1/3 \times S_t</math></td> <td><math>(1.1)/3 \times S_t \times R_t</math></td> <td><math>2/3 \times S_y</math></td> <td><math>2/3 \times S_y \times R_y</math> 又は <math>0.9^* \times S_y \times R_y</math></td> </tr> <tr> <td>鉄鋼及び非鉄の溶接管又は細管</td> <td><math>0.85/3 \times S_t</math></td> <td><math>1.1 \times 0.85/3 \times S_t \times R_t</math></td> <td><math>0.85/1.5 \times S_y</math></td> <td><math>0.85/1.5 \times S_y \times R_y</math> 又は <math>0.9^* \times 0.85 \times S_y \times R_y</math></td> </tr> </tbody> </table> <p>*1: 降伏点において 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。</p>	製品/材料	引張強さ		降伏点(耐力)		常温	高温	常温	高温	鉄鋼材料(鍛練品又は鋳鋼品)及び非鉄材料	$1/3 \times S_t$	$(1.1)/3 \times S_t \times R_t$	$2/3 \times S_y$	$2/3 \times S_y \times R_y$ 又は $0.9^* \times S_y \times R_y$	鉄鋼及び非鉄の溶接管又は細管	$0.85/3 \times S_t$	$1.1 \times 0.85/3 \times S_t \times R_t$	$0.85/1.5 \times S_y$	$0.85/1.5 \times S_y \times R_y$ 又は $0.9^* \times 0.85 \times S_y \times R_y$	
製品/材料		引張強さ		降伏点(耐力)																
	常温	高温	常温	高温																
鉄鋼材料(鍛練品又は鋳鋼品)及び非鉄材料	$1/3 \times S_t$	$(1.1)/3 \times S_t \times R_t$	$2/3 \times S_y$	$2/3 \times S_y \times R_y$ 又は $0.9^* \times S_y \times R_y$																
鉄鋼及び非鉄の溶接管又は細管	$0.85/3 \times S_t$	$1.1 \times 0.85/3 \times S_t \times R_t$	$0.85/1.5 \times S_y$	$0.85/1.5 \times S_y \times R_y$ 又は $0.9^* \times 0.85 \times S_y \times R_y$																

JSME 新規材料ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 新規材料ガイドライン)
	<p>strength at room temperature:</p> <p>( d) two-thirds of the yield strength at temperature, except that for austenitic stainless steels, nickel alloys, copper alloys, and cobalt alloys having an <math>S_y/ST</math> ratio less than 0.625, as indicated in Tables 2A and 2B, this value may be as large as 90% of the yield strength at temperature (but never more than two-thirds of the specified minimum yield strength).</p> <p>2-110 ボルト以外の材料の基準: 表 2A および 2B 任意の温度での設計応力強さは、次の最小値よりも大きくならないこと。</p> <p>(a) 室温で指定された最小引張強さの 3 分の 1。</p> <p>(b) 各温度における引張強さの 3 分の 1。</p> <p>(c) 室温で指定された最小降伏点 (耐力) の 3 分の 2。</p> <p>(d) 各温度における降伏点 (耐力) の 3 分の 2。各温度での降伏点の 90% 程度の大きさであること (ただし、指定された最小降伏点の 3 分の 2 を超えることはありません)。</p>
<p>(20) 許容引張応力</p> <p>付録 5 及び必要に応じ付録 6 に基づく各温度における引張応力のデータ。</p> <p>付録 5.ボルト材を除く材料の許容引張応力 (S 値) の設定方法</p> <p>付録 1 及び付録 2 の方法と同様に、下表に従い各温度ごとに求まる値の小さい方の値を許容引張応力 (S 値) とする。</p>	<p>[Mandatory Appendix 1]</p> <p>1-100 DEVIATION OF ALLOWABLE STRESS VALUES</p> <p>The maximum allowable stress shall be the lowest value obtained from the criteria in Table 1-100.The mechanical properties considered, and the factors applied to establish the maximum allowable stresses, are as given below.</p> <p>(a) At temperatures below the range where creep and stress rupture strength govern the selection of stresses, the maximum allowable stress value is the lowest of the following:</p> <p>(1) the specified minimum tensile strength at room temperature divided by 3.5</p> <p>(2) the tensile strength at temperature divided by</p>

製品/材料	常温以下		高温		クリープ強度	
	引張強さ	降伏点	引張強さ	降伏点	クリープ破断強度	クリープ強度
鉄鋼材料及び非鉄材料	$1/3.5 \times S_T$	$2/3 \times S_T$	$1/3.5 \times S_T$	$2/3 \times S_T$	$0.67 \times S_{avg}$	$1.0 \times S_C$
鉄鋼材料及び非鉄材料の溶接部又は継管	$0.85/3.5 \times S_T$	$2/3 \times 0.85 \times S_T$	$1.1 \times 0.85/3.5 \times S_T \times R_T$	$2/3 \times 0.85 \times S_T$	$0.67 \times 0.85 \times S_{avg}$	$0.85 \times S_C$

注:オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金には係数 0.9 を用いる。

3.5

(3) two-thirds of the specified minimum yield strength at room temperature

(4) two-thirds of the yield strength at temperature  
These stresses exceed two-thirds but do not exceed 90% of the minimum yield strength at temperature.

(b) At temperatures in the range where creep and stress rupture strength govern the selection of stresses, the maximum allowable stress value for all materials is established by the Committee not to exceed the lowest of the following:

- (1) 100% of the average stress to produce a creep rate of 0.01 %/1,000 hr
- (2) 100Favg% of the average stress to cause rupture at the end of 100,000 hr
- (3) 80% of the minimum stress to cause rupture at the end of 100,000 hr

1-100 許容引張応力値の導出

最大許容引張応力は、表 1-100 の基準から得られる最小値とします。考慮される機械的特性、および最大許容引張応力を確立するために適用される係数は、以下のとおりです。

(a) クリープおよび応力破断強度が応力の選択を支配する範囲よりも低い温度では、最大許容引張応力値は次のうちの最小の値となります。

- (1) 室温で指定された最小引張強さを 3.5 で割った値
  - (2) 各温度での引張強さを 3.5 で割った値
  - (3) 室温で指定された最小降伏点 (耐力) の 3 分の 2
  - (4) 各温度における降伏点 (耐力) の 3 分の 2
- これらの応力は 3 分の 2 を超えてもよいが、温度での最小降伏強度の 90% を超えないようにします。

JSME 新規材料ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 新規材料ガイドライン)
	<p>(b) クリープおよび応力破断強度が応力の選択を支配する範囲の温度では、委員会は、すべての材料の最大許容応力値を次の最低値を超えないように設定します。</p> <p>(1) 0.01 %/1,000 時間のクリープ率を生成するための平均応力の 100%</p> <p>(2) 100,000 時間後に破断する平均応力の <math>100 \times F_{avg}\%</math></p> <p>(3) 100,000 時間後に破断する最小応力の 80%</p>
<p>(21) 疲労 疲れ線図作成のためのデータ。</p>	<p>[Mandatory Appendix 5] 5-1300 FATIGUE DATA</p> <p>If the material is to be used in cyclic service and the Construction Code in which adoption is desired requires explicit consideration of cyclic behavior, fatigue data for characterized samples shall also be furnished over the range of design temperatures desired, from <math>10^3</math> to at least <math>10^6</math> cycles.</p> <p>5-1300 疲労データ</p> <p>材料が周期的なサービスで使用され、採用が望まれる建設基準で周期的な挙動を明確に考慮する必要がある場合、特徴付けられたサンプルの疲労データも、<math>10^3</math> サイクルから少なくとも <math>10^6</math> サイクルまでの望ましい設計温度範囲にわたって提供されるものとします。</p>
<p>(22) その他特性 要求があれば以下のデータを提出すること。 要求があれば以下のデータを提出すること。 (使用温度範囲より広い温度範囲までのデータ)</p> <p>a.線膨張係数 b.熱伝導率 c.温度伝導率 d.縦弾性係数 e.ポアソン比</p>	<p>[Mandatory Appendix 5] 5-1400 PHYSICAL PROPERTIES</p> <p>For at least one heat meeting the requirements of the material specification, the inquirer shall furnish to the Boiler and Pressure Vessel Committee on Materials adequate data necessary to establish values for coefficient of thermal expansion, coefficients of thermal conductivity and diffusivity, modulus of elasticity, Poisson's ratio, and density.</p> <p>5-1400 物性</p>

JSME 新規材料ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 新規材料ガイドライン)
	材料仕様の要件を満たす熱が少なくとも 1 つある場合、問い合わせ者は、熱膨張係数、熱伝導率および拡散係数、弾性係数、ポアソン比、密度の値を確立するために必要な適切なデータをボイラーおよび圧力容器材料委員会に提供するものとします。



新規材料採用ガイドライン	ASME Sec.II Part D
<p>2.2 他規格で規定されている材料の場合</p> <p>国内規格、海外規格に規定されている材料については、提案者は次の(1)から(8)の要領に基づき提案すること。それ以外の材料については、2.1項に規定する資料の提出が必要となる。</p>	
<p>(1) 規格は、発行年版又は追補の年版を明示すること。</p>	<p>2.1 (2)を参照のこと</p>
<p>(2) 規格として、次の項目が含まれていること。</p> <p>規格の発行者、適用範囲、製造方法、熱処理、化学成分、機械的性質、実用試験、組織、試験・検査、形状寸法、温度範囲、時効硬化、耐食性、溶接性・溶接区分、加工性・加工条件、設計降伏点、設計引張強さ、設計応力強さ及び許容引張応力。</p>	<p>2.1 の下記項目を参照のこと</p> <p>規格の発行者→2.1 (2)</p> <p>適用範囲→2.1 (3)</p> <p>製造方法→2.1 (5)</p> <p>熱処理→2.1 (5)</p> <p>化学成分→2.1 (6)</p> <p>機械的性質→2.1 (10)</p> <p>実用試験→2.1 (8)</p> <p>組織→2.1 (7)</p> <p>試験・検査→2.1 (5)</p> <p>形状寸法→2.1 (2)</p> <p>温度範囲→2.1 (3)</p> <p>時効硬化→2.1 (14)</p> <p>耐食性→2.1 (16)</p> <p>溶接性・溶接区分→2.1 (15)</p> <p>加工性・加工条件→2.1 (9)</p> <p>設計降伏点→2.1 (17)</p> <p>設計引張強さ→2.1 (18)</p> <p>設計応力強さ及び許容引張応力→2.1 (19)(20)</p>
<p>(3) 4.項「設計降伏点の設定方法」以外の策定方法により設計降伏点を求めている場合にあっては、本規格の策定方法により再試験を行うかもしくは評価を行うこと。</p>	<p>2.1 (17)を参照のこと</p>
<p>(4) 5.項「設計引張強さの設定方法」以外の策定方法により設計引張強さを求めている場合にあっては、本規格の策定方法により再試験を行うかもしくは評価を行うこと。</p>	<p>2.1 (18)を参照のこと</p>

新規材料採用ガイドライン	ASME Sec.II Part D
<p>(5) 6.項「ボルト材以外の設計応力強さの設定方法」以外の策定方法により設計応力強さを求めている場合にあつては、本規格の策定方法により再試験を行うかもしくは評価を行うこと。</p>	<p>2.1 (19)を参照のこと</p>
<p>(6) 7.項「ボルト材の設計応力強さの設定方法」以外の策定方法により設計応力強さを求めている場合にあつては、本規格の策定方法により再試験を行うかもしくは評価を行うこと。</p>	<p>(ボルト材でないため、適用範囲外)</p>
<p>(5) 8.項「ボルト材以外の許容引張応力の設定方法」以外の策定方法により許容引張応力を求めている場合にあつては、本規格の策定方法により再試験を行うかもしくは評価を行うこと。</p>	<p>2.1 (20)を参照のこと</p>
<p>(6) 7.項「ボルト材の許容引張応力の設定方法」以外の策定方法により許容引張応力を求めている場合にあつては、本規格の策定方法により再試験を行うかもしくは評価を行うこと。</p>	<p>(ボルト材でないため、適用範囲外)</p>

バスケット材料のオーステナイト結晶粒度と  
全アルミニウム量及び酸可溶性アルミニウム量の関係について

## 1. 概要

日本産業規格の「鉄鋼用語（試験）」（JIS G 0202：2013）では、オーステナイト結晶粒度番号が5以上の鋼を細粒鋼、5未満の鋼を粗粒鋼としている。一般的に、鋼においては結晶粒が細かいほど強度と靱性に優れることが知られている<sup>[1],[2]</sup>。また、JIS G 3118では、「鋼板のオーステナイト結晶粒度は5以上とする。なお、結晶粒度試験は、全アルミニウム分析値が、0.020%以上又は酸可溶性アルミニウム分析値が0.015%以上の場合は、省略してもよい。」と示されている。したがって、HZ-SG295HARの製造管理規定においては、「オーステナイト結晶粒度は5以上とする。なお、結晶粒度試験は、全アルミニウム分析値が、0.020%以上又は酸可溶性アルミニウム分析値が0.015%以上の場合は、省略してもよい。」としている。

この別紙4では、結晶粒度に係るHZ-SG295HARの製造管理規定の技術的妥当性を確認するため、以下の調査を行った結果を説明する。

- ・鋼の機械的性質に及ぼす結晶粒度の影響
- ・鋼における「全アルミニウム量」とオーステナイト結晶粒度の関係
- ・鋼における「酸可溶性アルミニウム量」とオーステナイト結晶粒度の関係

## 2. 鋼の機械的性質に及ぼす結晶粒度の影響

鋼においては、結晶粒の微細化により強度や靱性が向上することが知られている<sup>[1],[2]</sup>。図 別 4-1 及び図 別 4-2 はその例を示している。結晶粒微細化により降伏強さが上昇している。さらに、結晶粒微細化により延性-脆性遷移温度（延性破壊から脆性破壊に変わる温度）が低くなっており、靱性が高くなっていることが分かる。鋼は一般に強度を上げれば、それにつれて延性、靱性は低下するが、唯一強度を高め、靱性も高める方法が結晶粒の微細化である<sup>[2]</sup>。

結晶粒については、その大小の尺度を結晶粒度といいフェライト結晶粒度、オーステナイト結晶粒度がある<sup>[3]</sup>。鋼が高温から冷却されると変態が生じ、オーステナイトからフェライトやパーライトが生じる<sup>[3]</sup>。この変態で生じる結晶は、オーステナイト結晶粒界あるいは粒内のある核を起点として生じ、成長してお互いがぶつかり合ったり、結晶粒界まで達したところで止まる<sup>[3]</sup>。このため元のオーステナイト粒が小さいと、フェライトやパーライト粒もまた小さくなり、大きければその逆になる<sup>[3]</sup>。このようなことから、オーステナイト結晶粒度は鋼の特性を考えるうえで重要な指標となる<sup>[3]</sup>。したがって、JIS G 3118におけるSGV410においても、十分な機械的性質を確保するために、オーステナイト結晶粒度を5以上に行っていると考えられる。

以上の観点より、バスケット用炭素鋼板 HZ-SG295HAR の製造管理規定においても、オーステナイト結晶粒度を 5 以上とすることとした。



図 別 4-1 低炭素鋼の結晶粒径と降伏強さの関係<sup>[1]</sup>

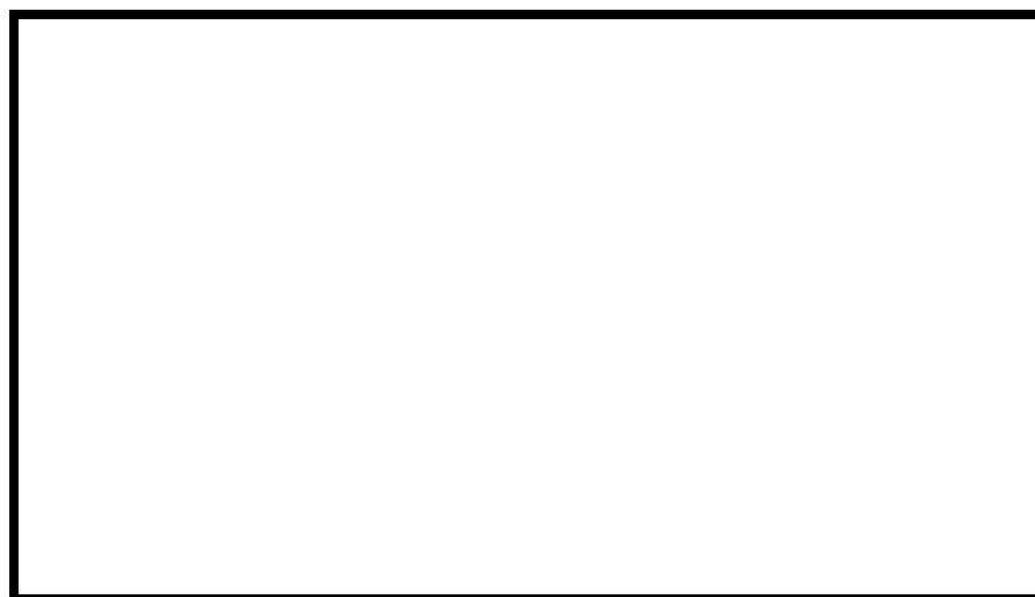


図 別 4-2 低炭素鋼の遷移温度に及ぼす結晶粒径の影響<sup>[2]</sup>

別紙 4-2

内は商業機密のため、非公開とします。

### 3. 鋼の製造プロセスにおけるアルミニウム添加の効果

一般的な鋼の製造フローを図 別 4-3 に示す。製鋼のプロセスにおいては、①高炉に鉄鉱石、コークス、石灰石を投入して精錬を行い<sup>[4]</sup>、②転炉で溶銑に純酸素を吹精して C (炭素)、Si (ケイ素)、Mn (マンガン) などを酸化除去して溶鋼を得る<sup>[5]</sup>。③～⑧連続铸造法では、溶鋼から連続して圧延し、板材や条などを製造する<sup>[6]</sup>。

鋼の製造フローにおいて、溶鋼に含まれる過剰の O (酸素) は、鋼塊における欠陥の要因となる<sup>[7]</sup>。そのため、鋼の製造にあたっては、Fe よりも O と反応しやすい元素を加えて溶鋼中の O を適切に減少させる脱酸を行う<sup>[7]</sup>。溶鋼中に加えられる脱酸剤には、Al (アルミニウム)、Fe-Mn (フェロマンガ) や Fe-Si (フェロシリコン) などがある<sup>[7]</sup>。Al、Mn 及び Si は、Fe よりも O との親和力の強い元素である。

脱酸を主目的として溶鋼に添加されるアルミニウムは、製造される鋼の結晶粒成長を抑制する効果があることが知られている<sup>[8]</sup>。溶鋼中にアルミニウムが添加されるとまず酸素と反応して  $Al_2O_3$  (酸化アルミニウム) を生成し、次いで窒素と反応して  $AlN$  (窒化アルミニウム) が生成される<sup>[9]</sup>。鋼中に生成した  $AlN$  が粒界の移動を阻止することなどにより、結晶粒成長が抑制される<sup>[10],[12]</sup>。

したがって、鋼の製造プロセスにおけるアルミニウム添加は、脱酸と結晶粒微細化の効果がある。

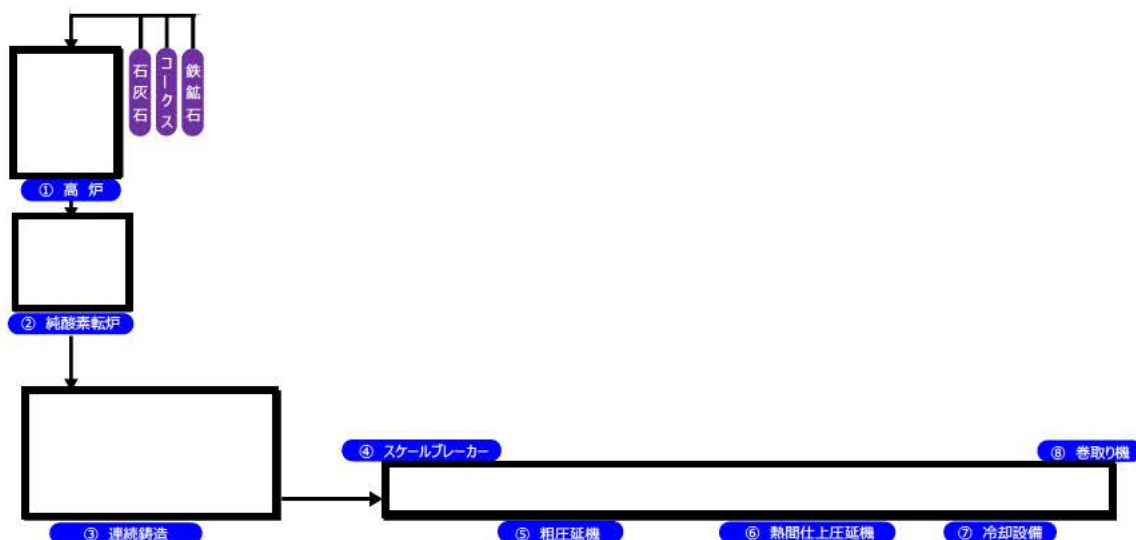
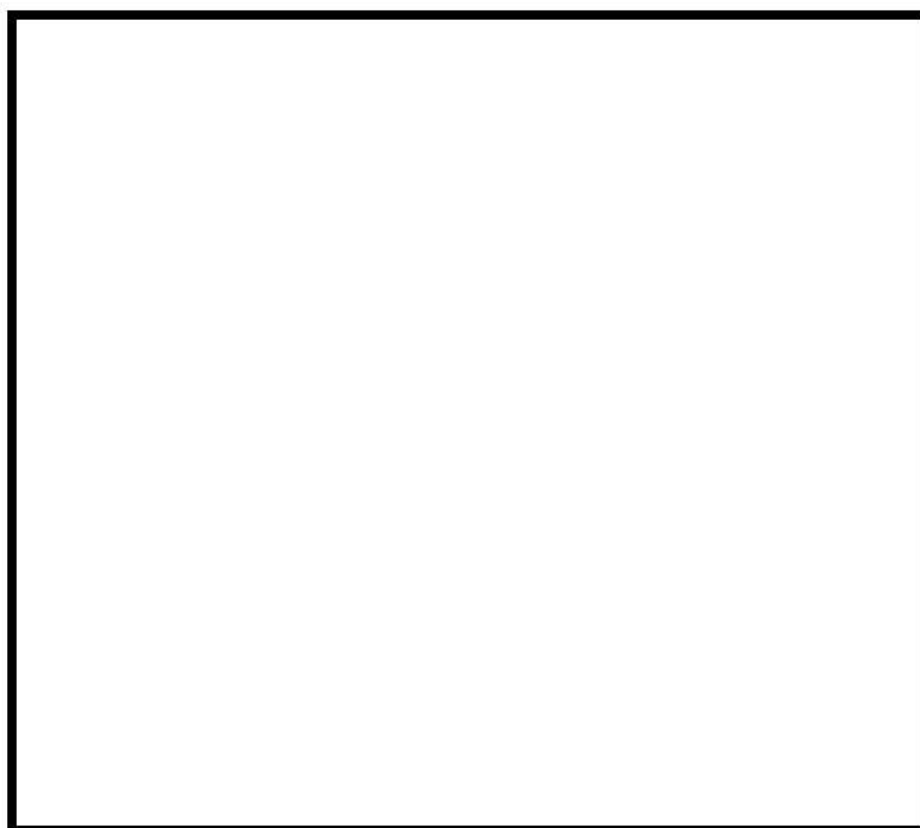


図 別 4-3 鋼（鋼板及び鋼帯）の製造フロー

#### 4. 鋼のオーステナイト結晶粒度と全アルミニウム量及び酸可溶性アルミニウム量の関係

溶鋼に添加されるアルミニウムは、製造される鋼の結晶粒成長を抑制する効果があることが知られている<sup>[8]</sup>。低炭素鋼中のAl結合状態と結晶粒度の関係を図別4-4に示す<sup>[11]</sup>。結晶粒の微細化は、全アルミニウム量が0.020%以上で顕著に現れており、オーステナイト結晶粒度は5以上であることが分かる。一方、鋼における酸可溶性アルミニウム量に着目し、オーステナイト結晶粒度との関係について調査した結果を図別4-5に示す<sup>[12]</sup>。炭素鋼や低合金鋼(JIS規格SNCM420相当)では、酸可溶性アルミニウム量が0.01%以上の場合、オーステナイト結晶粒度は5以上であることが分かる。JIS G 3118では、「結晶粒度試験は、全アルミニウム分析値が、0.020%以上又は酸可溶性アルミニウム分析値が0.015%以上の場合、省略してもよい。」と示されている。

以上より、バスケット用炭素鋼板HZ-SG295HARにおいて、全アルミニウム分析値が、0.020%以上又は酸可溶性アルミニウム分析値が0.015%以上であれば、オーステナイト結晶粒度は5以上を満足できる。



図別4-4 低炭素鋼中のAl結合状態と結晶粒度の関係<sup>[11]</sup>



図 別 4-5 鋼の酸可溶性アルミニウム量とオーステナイト結晶粒度の関係<sup>[12]</sup>

別紙 4-5

内は商業機密のため、非公開とします。

## 5. 参考文献

- [1] (社) 日本熱処理技術協会, 入門・金属材料の組織と性質, p92, 大河出版(2004).
- [2] (社) 日本熱処理技術協会, 入門・金属材料の組織と性質, p126, 大河出版(2004).
- [3] 手塚ら, 設計者に必要な材料の基礎知識, p194, 日刊工業新聞社(2003).
- [4] 金属材料技術研究所, 図解 金属材料技術用語辞典, p459, 日刊工業新聞社(1988).
- [5] 金属材料技術研究所, 図解 金属材料技術用語辞典, p314, 日刊工業新聞社(1988).
- [6] 金属材料技術研究所, 図解 金属材料技術用語辞典, p488, 日刊工業新聞社(1988).
- [7] 金属材料技術研究所, 図解 金属材料技術用語辞典, p266, 日刊工業新聞社(1988).
- [8] 矢島ら, 若い技術者のための機械・金属材料, p181, 丸善出版(2017).
- [9] 足立, オーステナイト結晶粒度, 材料試験, Vol9-83(1960), pp504-507.
- [10] 藤田ら, 鋼のオーステナイト結晶粒度におよぼすアルミニウム、窒素、炭素、けい素、およびマンガンの影響, 鉄と鋼, Vol.59-6(1973), pp764-790.
- [11] 高尾ら, 鋼の結晶粒度調整に関する研究, 鉄と鋼, Vol.40-3(1954), pp216-218.
- [12] 河合ら, オーステナイト結晶粒の成長に関する二, 三の観察, 鉄と鋼, No.41-4(1954), pp435-442.



バスケット材料のひずみ時効対策を目的とした  
応力除去焼鈍の有効性確認試験について

## 1. 概要

Hitz-B69 型キャスクに用いられるバスケット材料である HZ-SG295HAR は、コンパートメントへの成型時に冷間曲げ加工を受けることにより、キャスク供用時にひずみ時効を発生して脆化することが懸念される。ひずみ時効対策としては、コンパートメント製作時に冷間曲げ加工した後、焼鈍を施すことが有効である。(別紙 2 参照)

この別紙 5 では、以下の 2 点を目的とし、それぞれにおける試験内容を説明する。

### ① ひずみ時効に対する焼鈍の有効性検証

- ▶ 受入材に対して予ひずみを付与した試験片に時効処理 (250°C×1h) を実施。  
一方、予ひずみを付与した試験片に焼鈍 (625°C×1h) を行った後、時効処理。  
材料試験で両者を比較し、焼鈍の効果を検証。

### ② 設計用強度の設定の妥当性検証

- ▶ 受入材に焼鈍 (625°C×1h) を実施し、材料試験。

## 2. コンパートメント冷間曲げ加工部を模擬するための予ひずみ付与方法

### 2-1 供試材

供試材の化学成分および機械的性質を表 別 5-1 に示す。強度を保守的に評価するため、製作した 3 標本の鋼板のうち、最も強度の低い標本 2 を供試材とする。なお、供試材の板厚は、日本産業規格の「高圧ガス容器用鋼板及び鋼帯」(JIS G 3116 : 2020) の SG295 における最大厚さの 6 mm としており、コンパートメントの 4.5 mm よりも厚めとした。これは、強度を保守的に評価するためである。すなわち、板の厚さの厚い方が熱間圧延時に冷めにくく、結晶粒が成長する時間が長くなるため、結果的に結晶粒が大きくなって強度が低くなると考えられる。

### 2-2 試験片への予ひずみ付与方法

コンパートメントの冷間曲げ加工により付与される表面ひずみを計算により求め、試験片に付与するひずみ量を決定する。コンパートメントにおける曲げ R 部の模式図を図 別 5-1 に示す。以下では、曲げ外側における表面ひずみ量を導出する。

半径  $\rho$ 、角度  $\theta$  の曲げ変形を受ける板において、板厚中央部 (ひずみ量ゼロとなる中立軸) の長さ  $l_1$  は、

$$l_1 = 2\rho \times \pi \times \theta \quad \dots \dots \dots (1)$$

として表される。また、板厚を  $t$  とすると、曲げ変形により板外側の長さ  $l_2$  は以下で表

される。

$$\ell_2 = 2 \left( \rho + \frac{t}{2} \right) \times \pi \times \theta \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、板外側と板厚中央部における長さの比  $\ell_2 / \ell_1$  は、

$$\frac{\ell_2}{\ell_1} = \frac{2 \left( \rho + \frac{t}{2} \right) \times \pi \times \theta}{2\rho \times \pi \times \theta} = 1 + \frac{t}{2\rho} \quad \dots \dots \dots (3)$$

となる。すなわち、曲げ変形を受ける板外側では、板厚中央部に対して  $t/2\rho$  だけ変形することとなり、これが曲げ外側の表面ひずみ量となる<sup>[1]</sup>。Hitz-B69 型キャスクのコンパートメントにおける板厚  $t$  は 4.5 mm、板厚中央部の曲げ半径  $\rho$  は 10.25 mm である。これらの値を式 (3) に代入すると、曲げ外側の表面ひずみ  $\varepsilon$  は 21.952 % となる。なお、曲げ内側の表面ひずみ量も同じであり、外側が引張であるのに対して、内側が圧縮の違いのみである。試験片に付与する予ひずみ量は 22% とする。

試験片作製方法を図 別 5-2 に示す。大型の引張試験片を用いて予ひずみを付与し、コンパートメントの冷間曲げ加工によるひずみを模擬する。

この模擬試験では、コンパートメント冷間曲げ加工部における内側の圧縮ひずみが考慮できていないとの懸念がある。しかしながら、図 別 5-3 に示すように、冷間圧延した 0.08 %C の極軟鋼では 600 °C 以上の焼鈍（焼なまし）で伸びの回復が起こるとの報告<sup>[2]</sup>があり、圧縮ひずみに対する焼鈍の有効性が示されている。さらに、金属が引張、圧縮いずれの応力を受けた場合でも、塑性変形は原子のすべり（転位の増殖）によって生じる。すなわち、引張、圧縮いずれにおいても、塑性変形のひずみが同じであれば、材料に蓄積される転位の量は等しいといえる。ひずみ時効のメカニズムは、冷間加工によって増殖された転位などの内部欠陥に侵入型固溶元素である C（炭素）や N（窒素）が集合し、その動きを拘束する結果、硬化し、脆化するものと報告されている<sup>[3]</sup>。したがって、コンパートメントの冷間曲げ加工によるひずみは、試験片に引張ひずみを与えることにより模擬できる。

### 3. 熱処理方法

引張試験片に付与する熱処理条件のターゲットを表 別 5-2 に示す。バスケット材料のひずみ時効を模擬するため、試験片に予ひずみを与えた後、250 °C × 1 h の時効処理を施す。鋼のひずみ時効については、冷間加工後に 100~250 °C に加熱する、いわゆる人工時効処理を行うと短時間（30 min 程度）で硬化・脆化が完了するとの報告<sup>[3]</sup>がある。また、約 2~12% の予ひずみを付与した炭素鋼（炭素量 0.24%）に対して 170~250°C の熱処理を行った試験片の時効硬化曲線を図 別 5-4 に示す<sup>[4]</sup>。それぞれの熱処理温度において、硬化は 30min 以内に完了しており、250°C の硬化が最も大きいことがわかる。よって、250 °C × 1 h の時効処理は、鋼のひずみ時効において最も厳しい条件といえる。一方、キャスクの供用では、ひずみ時効は短時間で完了すると予想されるため、250 °C × 1 h の時効処理は長期供用を模擬できる。

ひずみ時効対策を目的とした焼鈍の条件は、625 °C×1 h をターゲットとする。ひずみ時効は、鋼が冷間加工後 100 ~250 °C に加熱された際、冷間加工によって増殖された転位などの内部欠陥に侵入型元素が集合することによって生じる現象であるため、焼鈍によって鋼に内在する転位の量を少なくすれば、ひずみ時効を防止できると考えられる。焼鈍の効果の一例として、冷間圧延した 0.08% C の極軟鋼の焼鈍（焼なまし）による機械的性質の変化を図 別 5-3 に示す。20~74%の冷間圧延した極軟鋼では 600 °C 以上の焼鈍で伸びが回復していることがわかる<sup>[2]</sup>。今後、625 °C×1 h の焼鈍がバスケット材料の曲げ R 部におけるひずみ時効対策として有効であることを検証する。

また、事前検討における予備実験では、HZ-SG295HAR に対して温度を 650 °C 以下、時間を 2 h 以内の焼鈍を実施した場合、受入材と比較して硬さや金属組織が変化しないことを確認している（別紙 2 参照）。今後、625 °C×1 h の焼鈍によりバスケット材料の母材強度が低下しないことを検証する。

#### 4. 材料試験

試験片の内訳を表 別 5-3 に示す。ひずみ時効対策としての焼鈍の有効性については、「A：受入材」、「B：コンパートメントの冷間曲げ加工を模擬した予ひずみを与えたのち時効した材料」、および「C：予ひずみを与えたのち焼鈍、時効した材料」を用いて強度や靱性を確認する。一方、焼鈍による母材強度低下の懸念については、「D：受入材に焼鈍を施した材料」を用いて強度を調査する。

作製した試験片に対する材料試験の概要を表 別 5-4 に示す。以下の材料試験を行い、HZ-SG295HAR におけるひずみ時効の影響を調査するとともに、焼鈍の効果を検証する。さらに、焼鈍に伴う母材強度への影響を調査し、設計用強度の設定の妥当性を検証する。

##### a) 常温および高温引張試験

強度と延性に及ぼすひずみ時効の影響を調査するとともに、焼鈍の効果を検証するため、表 別 5-3 の A 材（受入材）、B 材（予ひずみ付与⇒時効処理）および C 材（予ひずみ付与⇒焼鈍⇒時効処理）を対象として引張試験を行い、それぞれの結果を比較する。

また、設計用強度の設定の妥当性を検証するため、表 別 5-3 の A 材（受入材）と D 材（受入材⇒焼鈍）の引張試験結果を比較する。

試験は、「金属材料の引張試験方法」（JIS Z 2241：2022）および「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」（JIS G 0567：2020）に基づき、各種試験片の降伏強さ・引張強さ・伸びを測定する。試験片形状は図 別 5-5 に示す通りであり、受入材に対して行った試験片形状と同じである（別紙 1 参照）。なお、高温引張試験の温度は、日本機械学会規格の「発電用原子力設備規格 材料規格（2012 年版／2013 年追補）」（JSME S NJ-2012／JSME S NJ-2013）に付随する添付 1. 新規材料採用ガイドラインを参考に決定した。すなわち、キャスクにおける高温強度を保守的に評価するために、バスケット材料の最高使用温度よりも 50 °C 高い 350 °C の条件とする。また、常温と 350 °C の中間の温度として、200 °C の試験を加える。

別紙 1 で確認した受入材の引張強さおよび伸びと試験温度の関係を図 別 5-6 に示

す。常温より試験温度を高くすると、200℃程度までは、引張強さと伸びが低下する傾向にある。200℃以上の温度域では引張強さは一旦上昇しているが、300℃以上で再び低下している。一方、伸びは試験温度 250℃で最低値を示し、それ以上の温度域では上昇する傾向にある。すなわち、200℃および 350℃での引張試験を実施することによって、強度と延性の温度依存性を評価できる。

#### b) ビッカース硬さ試験

前述の引張強さのデータを補足するため、硬さ試験を行う。なお、試験片は前述の引張試験と同じとする。試験は、「ビッカース硬さ試験－第1部：試験方法」(JIS Z 2244 : 2020)に基づき、各種試験片の硬さを測定する。常温にて、圧子の押込み荷重を 5 kgf として保持時間 15 秒の条件にてビッカース硬さを測定する。

#### c) シャルピー衝撃試験

靱性に及ぼすひずみ時効の影響を調査するとともに、焼鈍の効果を検証するため、シャルピー衝撃試験を行う。なお、試験片は前述の引張試験および硬さ試験と同じとする。試験は、「金属材料のシャルピー衝撃試験方法」(JIS Z 2242 : 2023)に基づき、低温靱性を評価する。試験温度はバスケット材料の最低使用温度である-22.4℃を考慮し、-23℃とする。なお、供試材の板厚は 6 mm であり、標準試験片(長さ 55 mm、一辺が 10 mm の正方形断面を持つ形状)が採取できないため、本試験では図 別 5-7 に示す 5 mm サブサイズ試験片(長さ 55 mm、幅 10 mm、厚さ 5 mm の断面をもつ形状)を用いて吸収エネルギーおよび延性破面率を測定する。

#### d) 金属組織観察

金属組織に及ぼすひずみ時効および焼鈍の影響を調査するため、金属組織を観察し、機械的性質との関係性を評価する。なお、試験片は前述の a)～c)の試験と同じとする。試験片の断面をバフ研磨後、ナイトール(硝酸 5 : エチルアルコール 95)を用いた化学エッチングを行い、光学顕微鏡または走査型電子顕微鏡にて金属組織を観察する。

表 別 5-1 供試材の化学成分および機械的性質

標本	化学成分 (mass%)					機械的性質		
	C	Si	Mn	P	S	耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
1	0.08	0.01	0.82	0.019	0.002	337	467	39
2	0.08	0.02	0.83	0.016	0.002	330	453	38
3	0.08	0.01	0.83	0.018	0.002	338	458	39

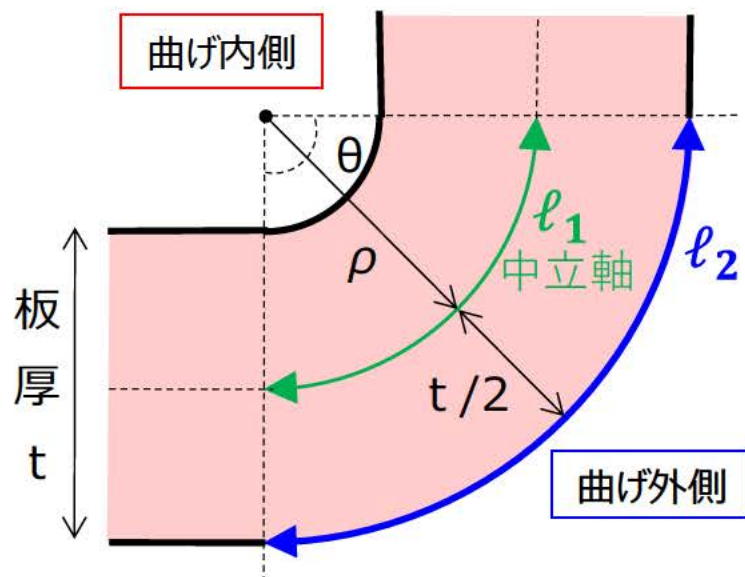
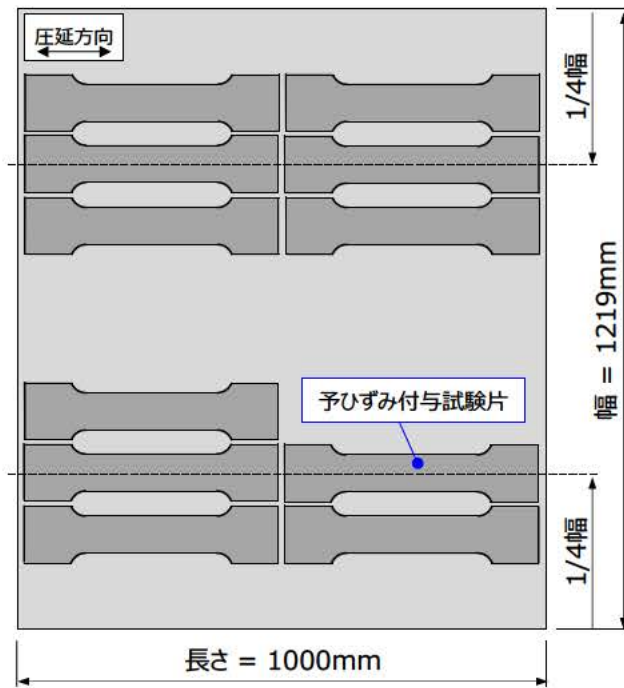


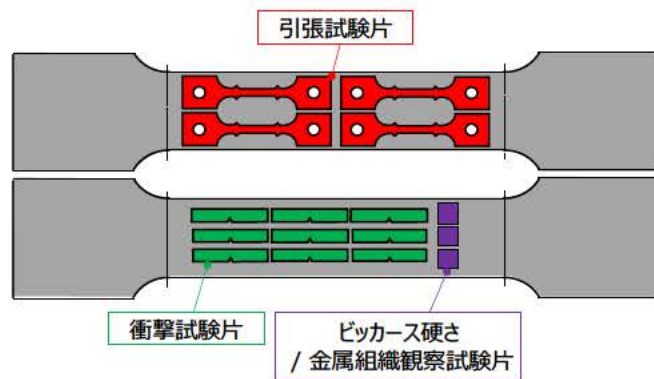
図 別 5-1 コンパートメントにおける曲げ R 部の模式図



(a) 予ひずみ付与試験片の採取



(b) 予ひずみの付与



(c) 各種材料試験片の採取

図 別 5-2 試験片作製方法



図 別 5-3 冷間圧延した 0.08%C の極軟鋼の焼なましによる機械的性質の変化<sup>[2]</sup>

表 別 5-2 熱処理条件のターゲット

時効処理	焼鈍
250 °C×1 h	625 °C×1 h

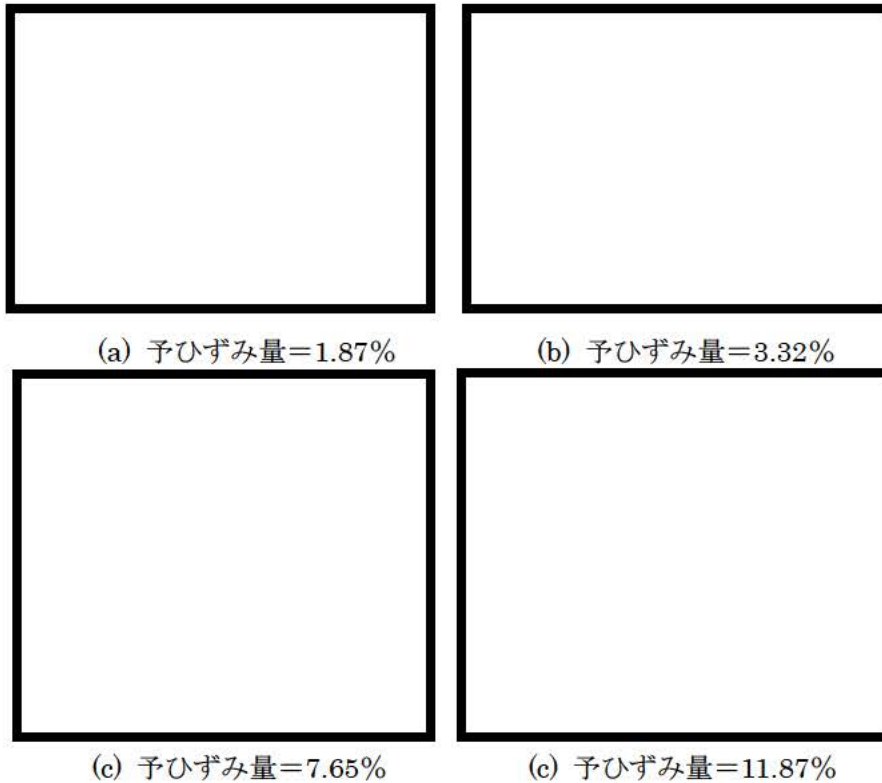


図 別 5-4 予ひずみを与えた 0.24%C 炭素鋼における時効硬化曲線<sup>[4]</sup>

別紙 5-7

内は商業機密のため、非公開とします。

表 別 5-3 試験片の内訳

符号	条件	材料試験				備考
		常温・高温 引張試験	ビッカース 硬さ試験	シャルピー 衝撃試験	金属組織 観察	
A	受入材	済[※]	済[※]	●	済[※]	初期状態を確認
B	予ひずみ付与⇒時効処理	●	●	●	●	A と B の比較により、強度や靱性に及ぼすひずみ時効の影響を調査
C	予ひずみ付与⇒焼鈍⇒時効処理	●	●	●	●	B と C の比較により、ひずみ時効に対する焼鈍の効果を確認
D	受入材⇒焼鈍	●	●	●	●	A と D の比較により、母材強度に及ぼす焼鈍の悪影響を調査

[※] 受入材の引張試験結果は、別紙 1 の結果を用いる。受入材のビッカース硬さと金属組織は、別紙 2 の結果を用いる。



表 別 5-4 作製した試験片に対する材料試験

材料試験	概要
引張試験	常温、200 °Cおよび 350 °Cの温度で実施
ビッカース硬さ試験	常温にて実施
シャルピー衝撃試験	5 mm サブサイズ試験片を用いて-23 °Cにて実施
金属組織観察	金属組織と機械的性質との関係を調査

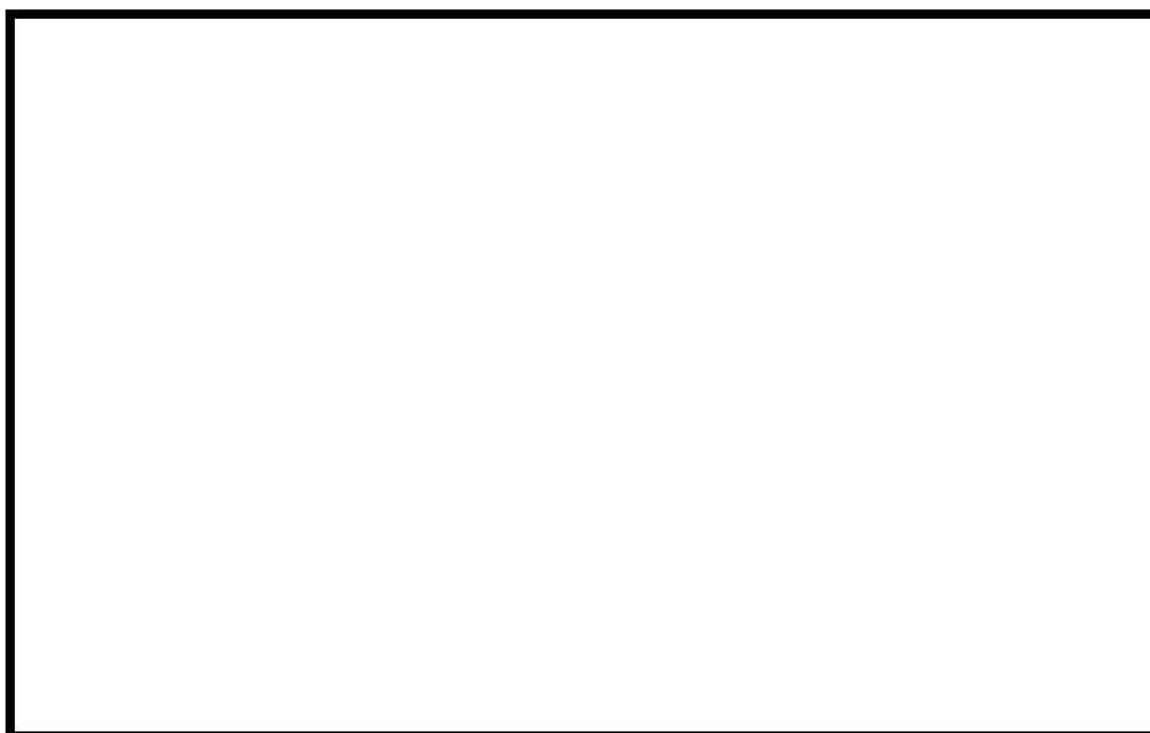
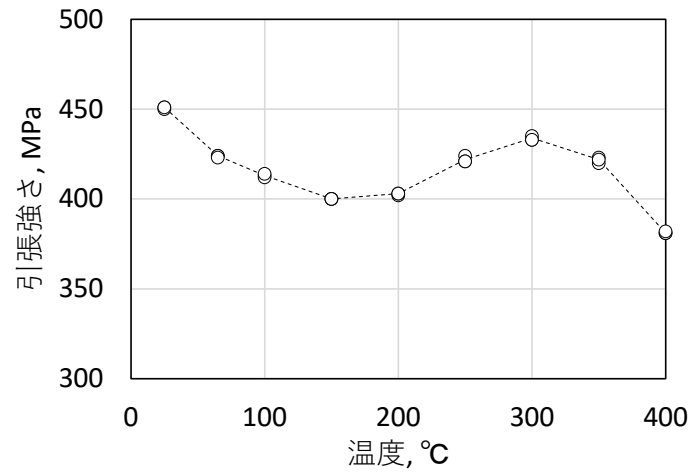


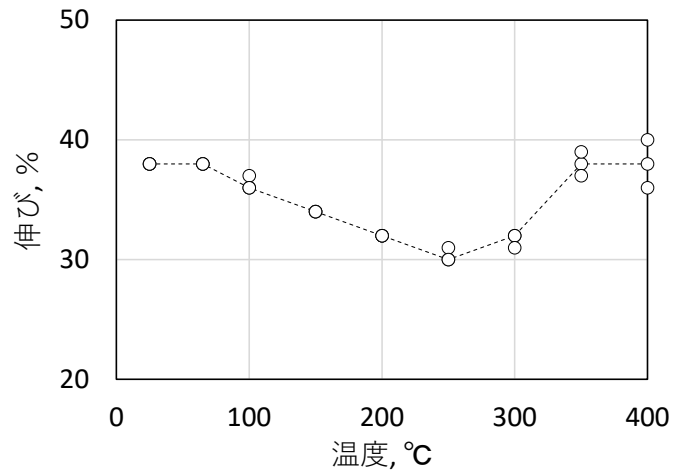
図 別 5-5 常温および高温の引張試験片形状

別紙 5-9

内は商業機密のため、非公開とします。



(a) 引張強さ



(b) 伸び

図 別 5-6 受入材の引張強さおよび伸びと試験温度の関係

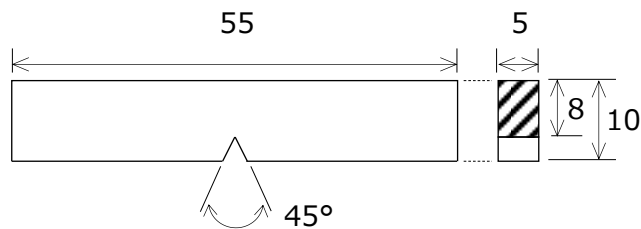


図 別 5-7 シャルピー衝撃試験形状 (JIS Z 2242 5 mm サブサイズ試験片)

### 3. 参考文献

- [1] 小山, 曲げ加工, 軽金属 vol.58(2008),pp81-90.
- [2] (社)日本熱処理技術協会, 入門・金属材料の組織と性質, p50, 大河出版(2004).
- [3] (社)日本熱処理技術協会, 入門・金属材料の組織と性質, p137, 大河出版(2004).
- [4] 武田ら, 炭素鋼のひずみ時効等価則, 日本機械学会論文集(A編)Vol.49-441(1983), pp557-563