

資料 1—2

Doc No. GK04-SC-Z01 Rev.7

2023 年 10 月 20 日

日立造船株式会社

補足説明資料 16-1

16 条

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設

(別紙 2 及び 別紙 3 抜粋)

目 次

1. 特定機器型式証明申請に係る要求事項に対する適合性	1
2. Hitz-B69 型の構造	12
3. Hitz-B69 型の収納条件	25
4. 貯蔵施設の前提条件	32
5. Hitz-B69 型の設計貯蔵期間	34
6. Hitz-B69 型の安全設計	36
7. Hitz-B69 型の蓋間圧力等の監視について	37

別紙 1 Hitz-B69 型のハンドリングフロー例

別紙 2 バスケットの構造について

別紙 3 バスケット材料（JIS G 3116 SG295）の適用について

別紙 4 使用済燃料収納配置の考え方について

別紙 5 Hitz-B69 型の取扱時の構造健全性

バスケットの構造について

1. 概要

本資料は、Hitz-B69 型のバスケット構造について、類似構造である Hitz-B52 型のバスケットとの比較も含めてまとめたものである。

2. 構造の概要

Hitz-B69 型のバスケットは、使用済燃料集合体を収納する炭素鋼製の角パイプ(以下、「コンパートメント」という。)、コンパートメント間の隙間に配置する中性子吸収材、コンパートメント間の隙間を保持するスペーサ、これらを束ねると共に径方向の支持となるサポートプレート、ならびにキャスク蓋側に配置される上部格子枠及びキャスク底板側に配置される底部プレートで構成される。

バスケット外周のコンパートメントに溶接されたサポートプレートは、周方向に分割されており、クランプという部材で周方向に連結されている。(以下、クランプ、クランプボス及びクランプボルトによる締結構造を「クランプ構造」という。)また、上部格子枠及び底部プレートは、コンパートメントの軸方向上端及び下端に溶接されたフランジプレート(サポートプレートと同形状)とそれぞれボルトで締結されている。

先行例(Hitz-B52 型)と Hitz-B69 型の違いは次のとおりである。

先行例(Hitz-B52 型)のバスケットは、使用済燃料集合体の収納部が概ね全長にわたってコンパートメントで構成される。一方で、Hitz-B69 型のバスケットは、使用済燃料集合体の収納部が上部格子枠とコンパートメントの組み合わせで構成されており、図別 2-1 に示すとおり、燃料有効部に対して有効となるように中性子吸収材を配置している。

一般に特定兼用キャスク(以下、「キャスク」という。)の質量は、使用済燃料集合体の収納体数が増える(52 体→69 体)と増加する傾向があるが、一方で使用済燃料を含むキャスクの取扱重量制限は先行例(Hitz-B52 型)と Hitz-B69 型で大きく変わらない。

このため、Hitz-B69 型はキャスク単体としての軽量化が必要であり、その方法としてバスケットの軽量化が有効であると考えられる。

上部格子枠は、燃料有効部よりキャスク蓋側に位置することから、中性子吸収材を配置する必要がなく、主に使用済燃料集合体の幾何学的配置の保持に特化した構造であり、これにより各安全機能及び構造強度性能を低下させることなくバスケットの軽量化を図ることができる。

したがって、Hitz-B69 型のバスケットは、先行例(Hitz-B52 型)で適用したコンパートメントのみで構成する構造ではなく、軽量化が期待できる上部格子枠とコンパートメントを組み合わせる構造とした。

バスケットの構造を図 別 2-2 に示す。

なお、上部格子枠の軸方向高さはキャスク内での使用済燃料集合体の移動、輸送時の一般の試験条件及び特別の試験条件における使用済燃料集合体の上部構造材の変形を考慮しても、燃料有効部に対して中性子吸収材の有効な配置が維持される高さとすることから、臨界防止機能への影響はない。

先行例（Hitz-B52 型）と同様に Hitz-B69 型のバスケットにも適用しているクランプ構造の考え方については、次項で詳細に説明する。

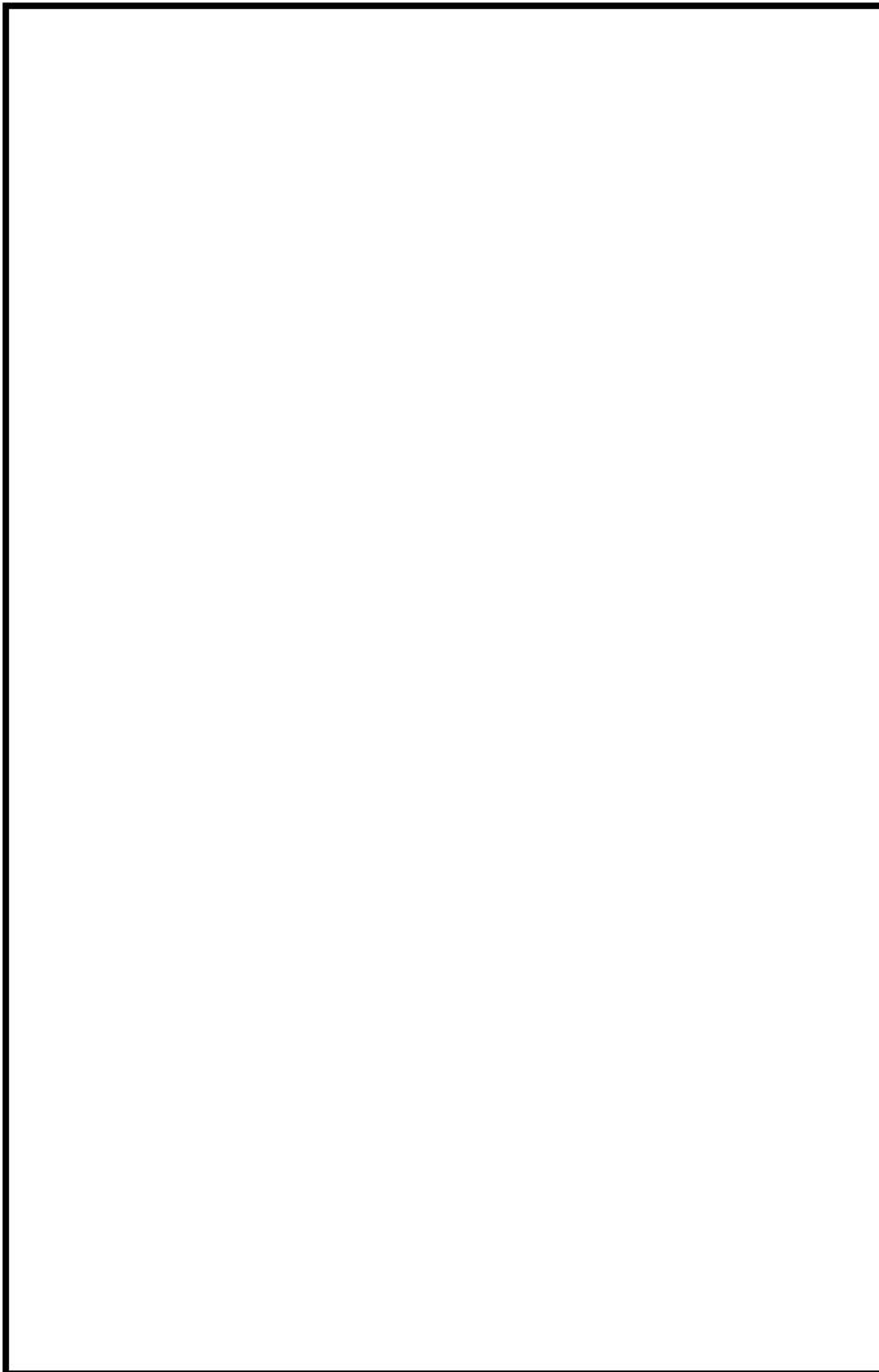



図 別 2-1 バスケットと燃料集合体関係

別紙 2-3

 内は商業機密のため、非公開とします。

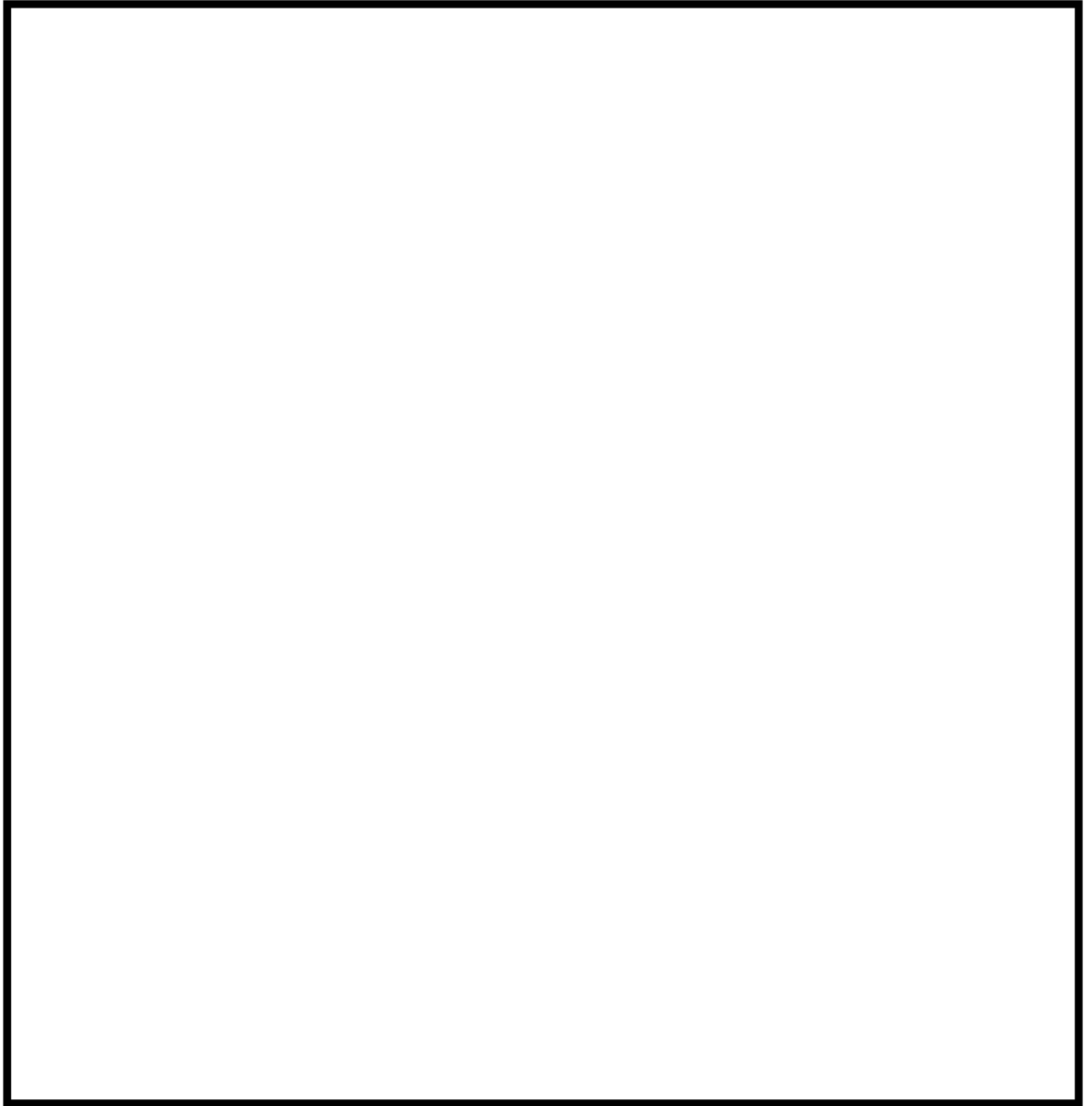


図 別 2-2 (1/2) バスケットの構造

別紙 2-4



内は商業機密のため、非公開とします。

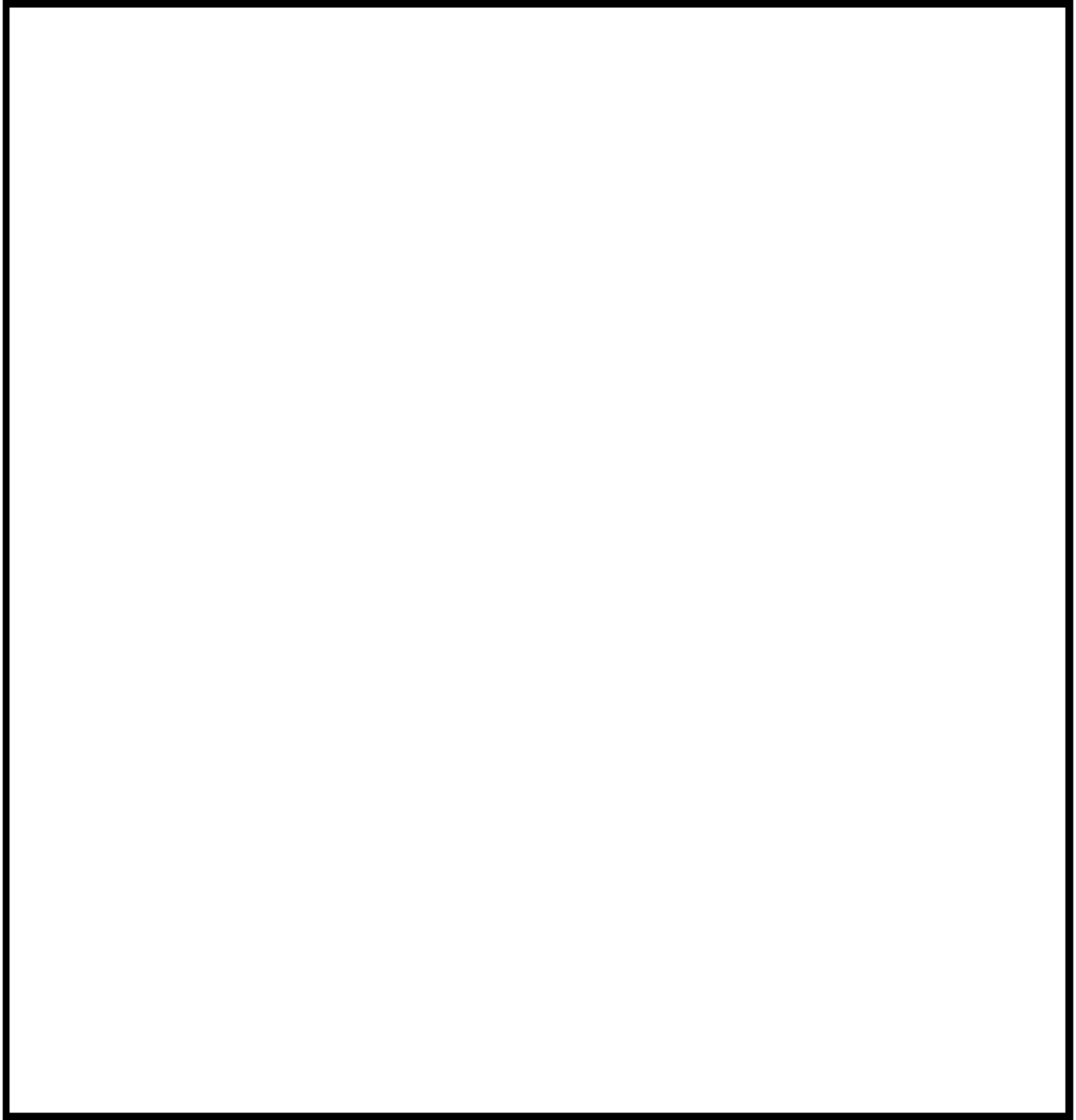


図 別 2-2 (2/2) バスケットの構造

別紙 2-5



内は商業機密のため、非公開とします。

3. クランプ構造について

クランプ構造は、周方向に分割したサポートブロートを連結するための構造であり、クランプ、クランプボスおよびクランプボルトで構成され、サポートブロートに溶接されたクランプボスを上下からコの字型のクランプで挟み込み、クランプ側に設けられたねじ穴を用いてクランプボスを貫通してクランプボルトで固定する構造である。

クランプ構造は、バスケット単体の取扱時において、コンパートメントを束ねてバスケットの外径を調節し、容器本体にバスケットを挿入する際の補助的機能を担っている。バスケットを容器本体に挿入した後は、本体胴とバスケットの隙間が小さいことから、クランプ構造の有無にかかわらず、バスケットは本体胴で保持される。

本申請の範囲外である輸送要件の安全解析では、一般の試験条件及び特別の試験条件において、図別 2-4 に示すとおり、FEM でバスケットの変形挙動が臨界防止機能に対して有意な影響を与えないことを確認している。この際、クランプはばね要素としてモデル化し、クランプの影響も考慮して解析を行っているが、この解析結果から、図別 2-4 に示すとおりクランプ部の相対変位（サポートブロート間の隙間の相対変位）は最大でも 1.3mm であり、一方、図別 2-5 に示すとおり、クランプには取り扱いを考慮した設計上で設定した 1.5mm の隙間があることから、いずれの条件下においてもクランプに有意な応力が生じることはない

また、地震、津波及び竜巻飛来物の外部事象で想定する最大の加速度 は、輸送時の各試験条件下で想定される設計加速度 を大きく下回る。

したがって、外部事象に対してバスケットに生じる応力及び変形挙動の評価において、輸送時と同様のクランプをばね要素とした FEM による確認は必要なく、バスケットの構造強度は、クランプ部を応力及び変形挙動の評価対象としないモデルを用いて、応力評価式による計算で評価することとした。

先行例（Hitz-B52 型）では、Hitz-B69 型と同じく、クランプ構造でサポートブロートを連結する構造を適用している。ただし、先行例（Hitz-B52 型）のクランプ構造は、除熱材であるアルミニウム合金を固定する機能を有しているが、Hitz-B69 型のクランプ構造にはその機能がなく、アルミニウム合金は固定用ボルトでコンパートメントに固定される。

先行例（Hitz-B52 型）と Hitz-B69 型のクランプ構造は、一部の機能に違いがあるものの目的とする基本的機能及び構造解析における考慮方法は同じである。

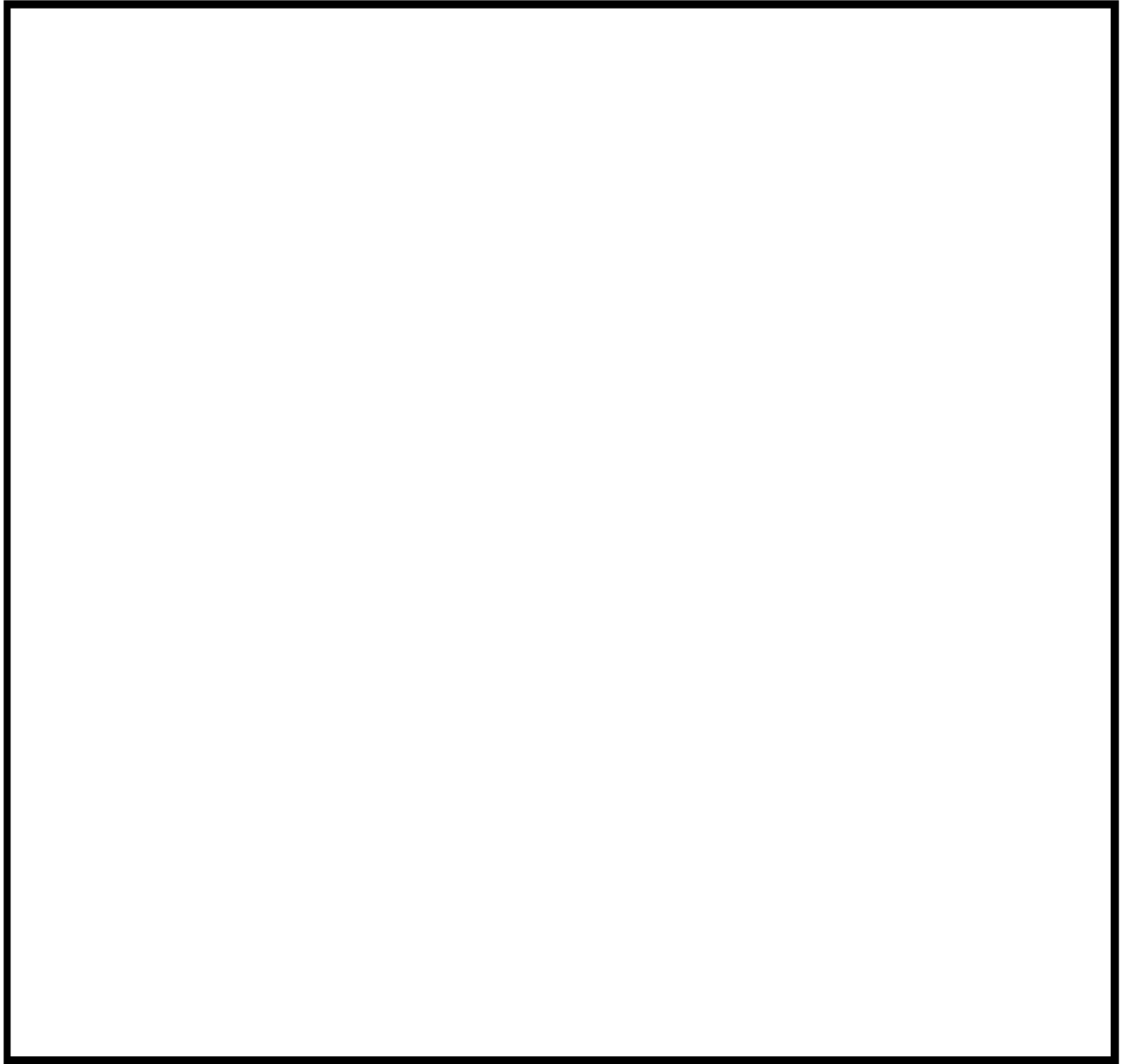
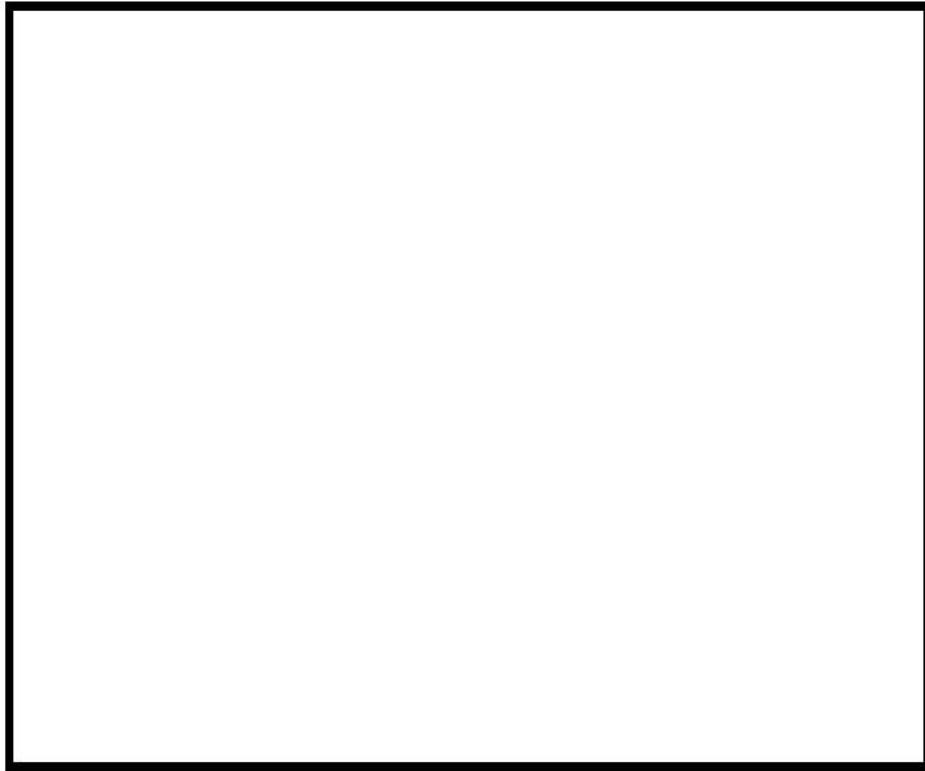


図 別 2-3 クランプ構造の概要

別紙 2-7



a) 水平落下評価モデル（载荷前）



b) 0.3m 水平落下評価モデル

※Max 5.3mm（相対変位 1.3mm）は、9m 水平落下時を含む全解析ケースにおける最大値を示す。

図 別 2-4 FEM による輸送時の水平落下解析モデル例

別紙 2-8




a) クランプ断面図



b) クランプばね反力特性

図 別 2-5 FEM による輸送時の構造解析に用いたクランプの断面図とばね反力特性

別紙 2-9

 内は商業機密のため、非公開とします。

バスケット材料 (JIS G 3116 SG295) の適用について

1. 概要

Hitz-B69 型のバスケットの格子部に使用する材料 (JIS G 3116 SG295) について説明する。

バスケットは、貯蔵時だけでなく輸送時の各試験条件に耐えられる構造強度を持ち、臨界防止をはじめとする各安全機能を満足する設計が要求される。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」(以下、「金属キャスク構造規格」という。)では、バスケット材料に適用できる炭素鋼として JIS G 3118「中・常温圧力容器用炭素鋼鋼板」(以下、「JIS G 3118」という。)が規定されており、先行例(Hitz-B52 型)では、バスケット材料としてコンパートメントの材質に JIS G 3118 の SGV410 を適用している。

SGV410 は、6mm から 200mm までの厚さが規定されており、一方で JIS G 3116「高圧ガス容器用鋼板及び鋼帯」(以下、「JIS G 3116」という。)の SG295 は、厚さ 1.6mm から 6mm までの薄い鋼板が規定されている。

一般に特定兼用キャスク(以下、「キャスク」という。)の質量は、使用済燃料集合体の収納体数が増える(52 体→69 体)と増加する傾向があるが、一方で使用済燃料を含むキャスクの取扱重量制限は先行例(Hitz-B52 型)と Hitz-B69 型で大きく変わらない。

このため、Hitz-B69 型はキャスク単体としての軽量化が必要であり、その方法としてバスケットの軽量化が有効であると考えられる。

Hitz-B69 型は、薄い鋼板が規定されている JIS G 3116 の SG295 をバスケットのコンパートメントに適用することによって、各安全機能及び構造強度性能を低下させることなくバスケットを軽量化することが可能となる。

JSME S NJ1-2012「発電用原子力設備規格 材料規格」(以下、「JSME 材料規格」という。)では、Part 2 第 1 章表 1「使用する材料の規格」に規定されていない材料について、JSME 材料規格への登録を希望する場合は、JSME 材料規格の「添付 1. 新規材料採用ガイドライン」(以下、「JSME 材料規格ガイドライン」という。)に沿って、化学成分や機械的性質等の材料特性を取得し、提出することが求められている。このことから、SG295 は JSME 材料規格ガイドラインに沿って、高温引張特性等の必要な材料特性を取得している。

2. SG295 のバスケット材料への適用性について

Hitz-B69 型のバスケットのコンパートメントに適用している SG295 は、金属キャスク構造規格に規定のない材料であり、JSME 材料規格ガイドラインに従って材料規定を定めることとした。

SG295 は、金属キャスク構造規格の規定からバスケット材料として適用できる JIS G 3118 の SGV410 と同等の化学成分及び製造方法といえる熱間圧延鋼材であり、概ね同等の機械的性質※を有している。

※JIS 規格において、SG295 の曲げ性は厚さの 1.5 倍、SGV410 の曲げ性は厚さの 0.5 倍と規定されている。これは、SGV410 等に比べて 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、いずれも曲げ性を低下させるといわれているが、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。^[1] したがって、SG295 は SGV410 等と比較して C の値が小さいことから、機械的性質の曲げ性において概ね同等と考えられる。

金属キャスク構造規格においてバスケット材料として認められている炭素鋼の規格である JIS G 3118 では、製造方法として「鋼板は、細粒キルド鋼から製造する。」と規定されており、一方、SG295 が規定されている JIS G 3116 では、製造方法の規定がないことから、バスケット材料として使用する SG295 については、製造管理規定において「鋼板及び鋼帯は、細粒キルド鋼から製造する。」を規定することとする。

鋼はオーステナイト結晶粒が微細であるほど強度と靱性が高くなることが知られており、JIS G 0202 ではオーステナイト結晶粒度 5 以上を細粒鋼、5 未満を粗粒鋼としている。JIS G 3118 では「オーステナイト結晶粒度は 5 以上とする」ことが規定されており、オーステナイト結晶粒度試験で確認することが求められる。

また、溶鋼分析における酸可溶性アルミニウムの分析値（溶鋼分析において酸に溶解するアルミニウム成分の分析値）が 0.015% 以上の場合は、オーステナイト結晶粒度試験を省略できることが付記されている。

JIS G 3118 の SGV410 と JIS G 3116 の SG295 は同等の化学成分であり、アルミニウムは結晶粒の粗大化を抑制する効果があることから、SGV410 と同等の酸可溶性アルミニウムを含有していれば、SG295 のオーステナイト結晶粒径は SGV410 と同等と考えられる。

したがって、SG295 が規定されている JIS G 3116 では、オーステナイト結晶粒度の規定がないことから、バスケット材料として使用する SG295 については、金属キャスク構造規格においてバスケット材料として認められている SGV410 と同等の機械的性質を確保するために、製造管理規定において「オーステナイト結晶粒度を 5 以上または酸可溶性アルミニウムの分析値を 0.015% 以上とする。」ことを規定する。

設計貯蔵期間中の経年変化について、SG295 は熱、照射及び腐食等の影響を評価し、長期健全性の観点から構造強度への影響がないことを確認している。

以上のことから、SG295 はバスケット材料への適用性を有するものと考えられる。

表 別 3-2 に JIS G 3116 に規定された SG295 と JIS G 3118 に規定された SGV410、SGV450 及び SGV480 の化学成分を示す。

表 別 3-3 に JIS G 3116 に規定された SG295 と JIS G 3118 に規定された SGV410、SGV450 及び SGV480 の機械的性質を示す。

表 別 3-1 JIS 規格の適用範囲

規格	JIS 規格の適用範囲
JIS G 3116	この規格は、 <u>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（以下、それぞれ鋼板、鋼帯という。）</u> について規定する。
JIS G 3118	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（以下、鋼板という。）</u> について規定する。

表 別 3-2 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 別 3-3 機械的性質

規格	種類の記号	降伏点又は耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	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

3. ASME 規格の考慮について

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 NJ1-2012)に関する技術評価書」(平成 26 年 8 月 6 日 原規技発第 1408062 号 原子力規制委員会決定)の JSME 材料規格ガイドラインに対する評価の中で「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 材料規格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」と記載されているが、二種類の許容引張応力 S が規定されているのは、対象が今回使用する炭素鋼ではなくオーステナイト系ステンレス鋼であることから「高い方の値を用いるべきではない」材料に該当しないものと考えられる。

次に、JSME 材料規格ガイドラインに相当する 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 材料規格ガイドライン」という。)によれば、降伏点(耐力) S_y の設定に関しては JSME 材料規格と同様であるが、設計引張強さ S_u の設定においては、以下に示す係数の違いがある。

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

ASME 材料規格ガイドライン：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については、JSME 材料規格ガイドラインに従っているため、ASME 材料規格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。ただし、設定した S_u 値は、ASME 材料規格ガイドラインの S_u 値よりも 1 割程度保守的な設定となることから特に問題はない。

設計応力強さ S_m については、JSME 材料規格ガイドラインと ASME 材料規格ガイドラインは同様である。各々の設計応力強さ S_m の設定方法を表 別 3-4 に示す。

許容引張応力 S の安全率について、JSME 材料規格ガイドラインは、ASME 材料規格ガイドラインと同様に 3.5 としている。各々の設計応力強さ S の設定方法を表 別 3-5 に示す。

また、JSME 材料規格ガイドラインと ASME 材料規格ガイドラインとの対比表を別添 1 に示す。

表 別 3-4 設計応力強さ S_m の設定方法の比較

(1) JSME 材料規格ガイドライン

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。

S_Y : 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]

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

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 材料規格ガイドライン

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。

S_Y : 常温における降伏点 (耐力) の規格値 [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

表 別 3-5 設計応力強さ S の設定方法の比較

(1) JSME 材料規格ガイドライン

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 3-6

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。

(2) ASME 材料規格ガイドライン

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。この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。

別紙 3-7

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

4. バスケット材料（JIS G 3116 SG295）の材料試験について

設計貯蔵期間における設計の評価に適用するため、JSME 材料規格ガイドラインに基づく材料試験で取得した応力-ひずみ特性及び高温引張特性から、設計用強度（設計応力強さ、許容引張応力、設計降伏点及び設計引張強さ）を規定する。

材料試験の項目を表 別 3-6 に示す。

なお、 S_y 値および S_u 値については、JIS G 3116 に規定された常温の値を規準とし、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求める。

材料試験の結果及び設計用強度の設定について、詳細を別添 2 に示す。

表 別 3-6 材料試験の項目 (JSME 材料規格ガイドライン要求項目)

項目	材料試験で取得 が必要なもの 注 1	JIS G 3116 に 準拠するもの 注 1	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)		-20℃～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		連続鋳造 → スケール除去 → 粗圧延 → 熱間仕上圧延
	b.熱処理		なし
	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、ぜい性破壊が生じにくい 16mm 以下 の薄い鋼板であるため不要 ^{[2][3]}
	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 別 3-6 材料試験の項目 (JSME 材料規格ガイドライン要求項目) (つづき)

項 目	材料試験で取得 が必要なもの 注 1	JIS G 3116 に 準拠するもの 注 1	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 ^{[4][5]}
(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 ^{[3][6][7]}
(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、JSME 材料規格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	—		
(22) その他特性 注 2	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 JSME 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 JSME 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が必要とする項目を“—”は備考に記載した理由から特に材料試験でデータを取得する必要がないと判断した項目を示す。

注 2 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、JSME 材料規格と取得データを比較し、JSME 材料規格が適用できることを確認する。

5. バスケット材料（JIS G 3116 SG295）の適用範囲

本材料を Hitz-B69 型のバスケットに適用するにあたり、本材料およびこれを使用するバスケットの適用範囲について以下に規定する。

- (1) バスケットの最高使用温度は 300℃以下とする。
- (2) バスケットを収納するキャスク本体内部は、設計貯蔵期間に渡ってヘリウムガスを封入し、不活性ガス雰囲気を維持する。
- (3) 設計貯蔵期間（供用期間）は 60 年以下とする。
- (4) バスケットは耐圧構造としない。
- (5) 本材料はボルト材として使用しない。

6. バスケット材料（JIS G 3116 SG295）の材料規定

本材料規定は、設計貯蔵期間における設計評価に適用するものである。

6.1 材料名称

材料名称を表 別 3-7 に示す。

6.2 材料規格

準拠する材料規格は表 別 3-7 の規定による。

6.3 化学成分

化学成分は表 別 3-8 の規定による。

6.4 設計応力強さ

設計応力強さは表 別 3-9 の規定による。

6.5 許容引張応力

許容引張応力は表 別 3-10 の規定による。

6.6 設計降伏点

設計降伏点は表 別 3-11 の規定による。

6.7 設計引張強さ

設計引張強さは表 別 3-12 の規定による。

6.8 縦弾性係数

縦弾性係数は発電用原子力設備規格 材料規格（2012 年版／2013 年追補含む）
JSME S NJ1-2012/2013 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 別 3-13 参照）

6.9 線膨張係数

線膨張係数は発電用原子力設備規格 材料規格（2012 年版／2013 年追補含む）
JSME S NJ1-2012/2013 の Part3 第 2 章 表 2 TE1 炭素鋼、合金鋼 [区分 I] の規定
による。（表 別 3-14 参照）

表 別 3-7 材料名称及び材料規格の規定

材料名称	材料規格	記号
バスケット用材料 炭素鋼	高圧ガス容器用鋼板及び鋼帯 JIS G 3116:2020	SG295

表 別 3-8 化学成分の規定

記号	化学成分（質量%）				
	C	Si	Mn	P	S
SG295	0.20 以下	0.35 以下	1.00 以下	0.020 以下	0.020 以下

表 別 3-9 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（℃）												
	-30 ~40	65	75	100	125	150	200	225	250	275	300	325	350
SG295	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 別 3-10 材料の各温度における許容引張応力 S (注)

単位：MPa

記号	温度 (°C)												
	-30 ~40	65	75	100	125	150	200	225	250	275	300	325	350
SG295	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 別 3-11 材料の各温度における設計降伏点 S_y (注)

単位：MPa

記号	温度 (°C)												
	-30 ~40	65	75	100	125	150	200	225	250	275	300	325	350
SG295	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 別 3-12 材料の各温度における設計引張強さ S_u (注)

単位：MPa

記号	温度 (°C)												
	-30 ~40	65	75	100	125	150	200	225	250	275	300	325	350
SG295	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 別 3-13 材料の各温度における縦弾性係数 (JSME 材料規格) [2]

単位 : $\times 10^3$ MPa

記号	分類名称	温度 (°C)									
		-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 別 3-14 材料の各温度における線膨張係数 (JSME 材料規格) [2]

($\times 10^{-6}$ mm/mm°C)

記号	分類名称	区分 (注)	温度 (°C)																
			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。

7. バケット材料（JIS G 3116 SG295）の製造管理規定

本製造管理規定は、バケット材料（JIS G 3116 SG295）の製造管理に関する規定である。

7.1 化学成分

化学成分は、表 別 3-8 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。

7.2 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 別 3-1 に示す製造フローによる。

7.3 熱処理

圧延のまま。

注記：ひずみ時効に起因する脆性破壊を抑制するため、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 別 3-2 参照）

7.4 機械的性質

JIS G 3116:2020「高圧ガス容器用鋼板及び鋼帯」の規定による。

7.5 オーステナイト結晶粒度

オーステナイト結晶粒度を 5 以上または酸可溶性アルミニウムの分析値を 0.015%以上とする。

7.6 寸法ならびに許容差

JIS G 3116:2020「高圧ガス容器用鋼板及び鋼帯」の規定による。

7.7 品質管理

JIS G 3116:2020「高圧ガス容器用鋼板及び鋼帯」の規定による。

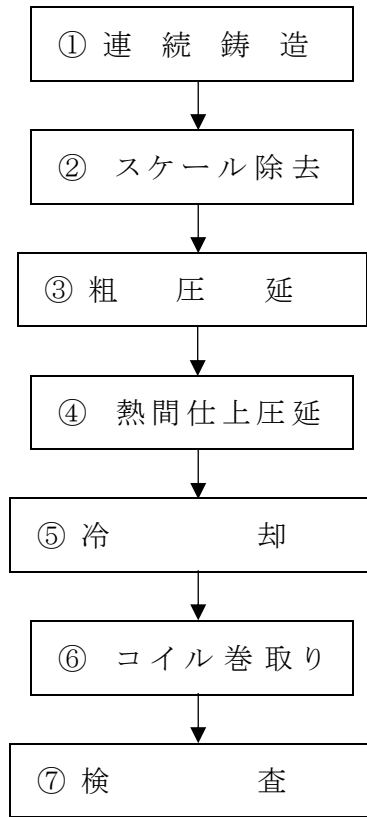


図 別 3-1 材料（鋼板及び鋼帯）の製造フロー

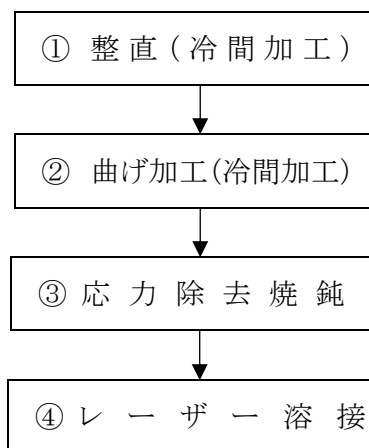


図 別 3-2 コンパートメントの製造フロー

8. 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 別 3-15 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 別 3-15 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>	

9. 基本的な安全機能への影響

構造強度及び各安全機能に対する設計の考え方は次のとおり。

構造強度：設定した設計用強度に基づく構造解析により、設定する荷重条件に対して成立する設計であることを確認する。

臨界防止機能：臨界解析により、臨界防止機能上問題のない設計であることを確認する。なお、当該部の組成は Fe を 100%としているため、鋼種の違いによる影響はない。

遮蔽機能：遮蔽解析により、遮蔽機能上問題のない設計であることを確認する。なお、コンパートメントの材質の組成は Fe を 100%としているため、鋼種の違いによる影響はない。

除熱機能：設定した材料物性に基づく除熱解析により、設定する熱的条件に対して成立する設計であることを確認する。

閉じ込め機能：閉じ込め機能の評価において、バスケット材料の違いによる影響はない。

以上により、JIS G 3118 の SGV410 を使用した場合と同様に、各解析の評価において、適切に各安全機能を満足できることが確認できれば、バスケット材料として SG295 を適用することができる。

参考文献

- [1] 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)
- [2] JSME S NJ1-2012, 発電用原子力設備規格 材料規格 (2012 年版), (社) 日本機械学会.
- [3] 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)
- [4] 木村一弘,“耐熱鋼のクリーブ破断寿命予測”,日本機械学会誌, 第 73 卷, 5 号, p.323-333, (2009)
- [5] 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)
- [6] 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
- [7] 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

JSME S NJ1-2012 材料規格 添付 1. 新規材料採用ガイドラインと ASME Sec. II Part D
Mandatory Appendixes 1, 2 and 5 (ASME 材料規格ガイドライン) との比較

新規材料採用ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 材料規格ガイドライン)
<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"> ・ 化学成分 ・ 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 <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。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	
(2) 材料の仕様 a. 適合規格	<p>[Mandatory Appendix 5]</p> <p>5-1900 REQUIREMENTS FOR RECOGNIZED</p>

新規材料採用ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 材料規格ガイドライン)
<p>適合規格名もしくは申請中又は申請予定の規格名を記載すること。</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>NATIONAL OR INTERNATIONAL 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>

新規材料採用ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 材料規格ガイドライン)
	<p>{b} the temperature range of intended application {c} whether cyclic service is to be considered {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 {b} 意図する用途の温度範囲 {c} サイクリックサービスを考慮するかどうか {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 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 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） b.熱処理（温度、加熱・冷却方法、速度） 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,</p>

新規材料採用ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 材料規格ガイドライン)
	<p>where applicable, fully describe the heat treatment (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</p>

新規材料採用ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 材料規格ガイドライン)
	<p>れるかどうか、またはこの組成への制限が意図された用途に課されるかどうかを BPV 材料委員会に勧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] 5-900 TIME-DEPENDENT PROPERTIES 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] 5-1700 REQUESTS FOR ADDITIONAL DATA 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	<p>[Mandatory Appendix 5] 5-700 REQUIRED SAMPLING</p>

新規材料採用ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 材料規格ガイドライン)
<p>ついでに試験結果。</p>	<p>For wrought materials and especially for those 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</p>

新規材料採用ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 材料規格ガイドライン)
	<p>desirable that, when applicable, test data also be 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</p>	<p>[Mandatory Appendix 5]</p> <p>5-800 TIME-INDEPENDENT PROPERTIES</p>

新規材料採用ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 材料規格ガイドライン)
<p>り)</p> <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>For time-independent properties at and above 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-</p>

<p>新規材料採用ガイドライン</p>	<p>ASME Sec.II Part D (ASME 材料規格ガイドライン)</p> <p>rupture test method shall be in accordance with 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:</p> <p>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</p>

新規材料採用ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 材料規格ガイドライン)
	の溶接構造で使用するための新しい母材に必要です: 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 (Sy 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.Sy 値の設定方法</p> <p>①常温の降伏点 (耐力) の規格値</p> <p>②$R_Y \times$ 常温の降伏点 (耐力) の規格値</p> <p>$R_Y =$ 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 (Sy 値) とする。</p>	<p>[Mandatory Appendix 2]</p> <p>2-100 DERIVATION OF STRESS INTENSITY VALUES</p> <p>$R_Y =$ ratio of the average temperature dependent trend curve value of yield strength to the room temperature yield strength</p> <p>$S_Y =$ specified minimum yield strength at room temperature</p> <p>2-100 応力強度値の導出</p> <p>$R_Y =$ 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>$S_Y =$ 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 $S_Y R_Y$, and the tensile strength at temperature to</p>

新規材料採用ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 材料規格ガイドライン)
	<p>be 1.1StRt.</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> <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 S_yR_y、各温度での引張強度を 1.1StRt 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 (S_u 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.S_T 値の設定方法</p> <p>①常温の引張強さの規格値</p> <p>②$R_T \times$ 常温の引張強さの規格値</p> <p>$R_T =$ 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 (S_u 値) とする。</p>	<p>[Mandatory Appendix 2]</p> <p>2-100 DERIVATION OF STRESS INTENSITY VALUES</p> <p>$R_T =$ ratio of the average temperature dependent trend curve value of tensile strength to the room temperature tensile strength</p> <p>$S_T =$ 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 S_yR_y, and the tensile strength at temperature to be 1.1StRt.</p> <p>2-100 応力強度値の導出</p> <p>$R_T =$ 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>$S_T =$ 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 S_yR_y, and the tensile strength at temperature to be 1.1StRt.</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</p>

<p>新規材料採用ガイドライン</p>	<p>ASME Sec.II Part D (ASME 材料規格ガイドライン)</p> <p>および WB で使用する表 4 のボルト材料の基準 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>																			
<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 (S_m 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 (S_m 値) とする。</p> <table border="1" data-bbox="395 1014 619 1892"> <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(鍛錬品又は鋳鋼品)及び非鉄材料</td> <td>$1/3 \times S_t$</td> <td>$(1.1)/3 \times S_t \times R_t$</td> <td>$2/3 \times S_y$</td> <td>$2/3 \times S_y \times R_y$ 又は $0.9^* \times S_y \times R_y$</td> </tr> <tr> <td>鉄鋼及び非鉄の溶接管又は銅管</td> <td>$0.85/3 \times S_t$</td> <td>$1.1 \times 0.85/3 \times S_t \times R_t$</td> <td>$0.85/1.5 \times S_y$</td> <td>$0.85/1.5 \times S_y \times R_y$ 又は $0.9^* \times 0.85 \times S_y \times R_y$</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 $0.9^* \times S_y \times R_y$	鉄鋼及び非鉄の溶接管又は銅管	$0.85/3 \times S_t$	$1.1 \times 0.85/3 \times S_t \times R_t$	$0.85/1.5 \times S_y$	$0.85/1.5 \times S_y \times R_y$ 又は $0.9^* \times 0.85 \times S_y \times R_y$	<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>
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	$1/3 \times S_t$	$(1.1)/3 \times S_t \times R_t$	$2/3 \times S_y$	$2/3 \times S_y \times R_y$ 又は $0.9^* \times S_y \times R_y$																
鉄鋼及び非鉄の溶接管又は銅管	$0.85/3 \times S_t$	$1.1 \times 0.85/3 \times S_t \times R_t$	$0.85/1.5 \times S_y$	$0.85/1.5 \times S_y \times R_y$ 又は $0.9^* \times 0.85 \times S_y \times R_y$																

新規材料採用ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 材料規格ガイドライン)
	<p>(c) two-thirds of the specified minimum yield 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 S_y/ST 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ること。</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>

製品/材料	常温以下		高温		クリープ破断強度		クリープ強度		
	引張強さ	降伏点	引張強さ		降伏点				
鉄鋼材料及び非鉄材料	$1/3.5 \times S_T$	$2/3 \times S_T$	$1/3.5 \times S_T$	$2/3 \times S_T$	$2/3 \times S_T \times R_T$	$2/3 \times S_T \times R_T$ 又は $0.9 \times S_T \times R_T$ [注]	$0.67 \times S_{avg}$	$0.8 \times S_{Tmin}$	$1.0 \times S_C$
鉄鋼材料及び非鉄材料の溶接管又は継管	$0.85/3.5 \times S_T$	$2/3 \times 0.85 \times S_T$	$1.1 \times 0.85/3.5 \times S_T \times R_T$	$2/3 \times 0.85 \times S_T$	$2/3 \times 0.85 \times S_T \times R_T$	$2/3 \times 0.85 \times S_T \times R_T$ 又は $0.9 \times 0.85 \times S_T \times R_T$ [注]	$0.67 \times 0.85 \times S_{avg}$	$0.8 \times 0.85 \times S_{Tmin}$	$0.85 \times S_C$

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。

- (2) the tensile strength at temperature divided by 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

新規材料採用ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 材料規格ガイドライン)
	<p>す。</p> <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 100 × Favg%</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 10³ to at least 10⁶ 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、10³ サイクルから少なくとも 10⁶ 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>

新規材料採用ガイドライン	ASME Sec.II Part D (ASME 材料規格ガイドライン)
	<p>5-1400 物性</p> <p>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。</p>

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
(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。	2.1 (19)を参照のこと
(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。	(ボルト材でないため、適用範囲外)
(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。	2.1 (20)を参照のこと
(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。	(ボルト材でないため、適用範囲外)

バスケット用炭素鋼 SG295 の評価

1. 概要

1.1 高収納化への取り組み

金属キャスクは、取り扱われる設備によって重量や外寸法に制限が課されるため、高収納化のために不用意に大型化することができない。また、密封容器の内径を拡大して収納体数を増やすことは可能だが、本体胴の板厚が減少することによって遮蔽機能が低下する。

したがって、必要な遮蔽機能を確保しつつ高収納化するためには、バスケットの径を可能な限り小さく設計し、同時にバスケット単体を軽量化する必要がある。

(一社) 日本機械学会 (JSME) の 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」(以下、「金属キャスク構造規格」という。) では、バスケットに適用可能な炭素鋼として JIS G 3118 「中・常温圧力容器用炭素鋼鋼板」(以下、「JIS G 3118」という。) に SGV410、SGV450 及び SGV480 (以下、「SGV 材」という。) が規格として規定されている^[1]。先行例 (Hitz-B52 型) のバスケットでは、金属キャスク構造規格に基づき SGV410 を主要な材料とし、図 別 3.2-1 に示すように、SGV410 を角パイプ状に成形した部品(以下、「コンパートメント」という。) を、隙間を形成するための部品(以下、「スペーサ」という。) を介して並べて格子を形成し、コンパートメント内部に使用済燃料を収納し、コンパートメント間の隙間に中性子吸収材(臨界防止のために必要となる部材) を配置する。

このようなバスケットの径を可能な限り小さく設計し、同時にバスケット単体を軽量化するためには、格子内のり寸法、コンパートメントの板厚、コンパートメント間の隙間を小さくする必要があるが、格子内のり寸法及びコンパートメント間の隙間は使用済燃料や中性子吸収材の寸法による制限があるため、コンパートメントの板厚を薄くすることが有効な手段となる。

一方で、JIS 規格材である SGV 材の板厚は 6 mm から 200 mm までの厚さが規定されており^[2]、先行例 (Hitz-B52 型) では規格における最小板厚 (6 mm) を適用しているため、コンパートメントの板厚を薄くするためには、より薄い新規材料を適用する必要がある。

1.2 実施内容

SGV 材に代わる新規材料の採用を検討するにあたり、SGV 材と化学成分及び機械的性質に近い JIS 規格の鋼板材を調査し、JIS G 3116「高圧ガス容器用鋼板及び鋼帯」に規定される SG 材（厚さ 1.6 mm 以上 6 mm 以下^[3]）を代替材料の候補として選定した。表 別 3.1-1 及び表 別 3.2-2 に、SGV 材と SG 材の化学成分及び機械的性質を示す。なお、SGV 材は厚さにより規定値が変わるため、6 mm の厚さを想定した場合の値を記載する。

SGV 材と SG 材（ただし、SG255 を除く）の化学成分において、SGV 材では Si 及び Mn の下限が規定されているという違いがある。Si については、SGV 材のみ製造方法が細粒キルド鋼からの製造と規定されている^[2]ことから、Si の 0.15%以上という規定は Si キルド鋼を想定しているためと考えられる^[4]。Mn は低温じん性を高める働きがあり^[4]、厚板である SGV 材では溶接時の低温割れに配慮して下限が規定されていると考えられるが、SG 材は薄板であるため下限が規定されていないと考えられる。したがって、Si 及び Mn の下限は、SGV 材と SG 材の化学的及び機械的性質に本質的な差異を生ずるものではない。

表 別 3.2-1 SGV 材及び SG 材の化学成分（規格値）^{[2][3]}

規格	種類の記号	化学成分(%)				
		C	Si	Mn	P	S
JIS G 3118 (SGV 材)	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
JIS G 3116 (SG 材)	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

注：SGV 材は板厚 12.5 mm 以下の値を記載。

表 別 3.2-2 SGV 材及び SG 材の機械的性質（規格値）^{[2][3]}

規格	種類の記号	降伏点 又は耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	曲げ性	
					曲げ角度	内側半径
JIS G 3118 (SGV 材)	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
JIS G 3116 (SG 材)	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

注：SGV 材の伸びは板厚 6 mm の値、曲げ性内側半径は板厚 25 mm 以下の値を記載。

本資料では、材料試験によって材料特性を取得し、バスケット材料として JSME 材料規格で使用を認められている SGV 材と比較することにより、バスケット材料への適用を確認する。ここで、SGV410 と比較して、同等の化学成分であり、曲げ性が劣るものの同等以上の機械的性質^[5]である SG295 を対象とした。また、60 年間程度の供用期間が想定される金属キャスク材料として求められる長期健全性についても考察する。



図 別 3.2-1 Hitz-B52 型バスケットの構造

2. 試験方法

2.1 試験項目

試験内容は JSME S NJ1-2012 「発電用原子力設備規格 材料規格」(以下、「材料規格」という。)の新規材料採用ガイドライン(以下、「JSME 材料規格ガイドライン」という。)を基本とし、JSME 材料規格ガイドラインで定められる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。

SG 材は「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」として規定されており^[3]、当該規格を引用する JIS B 8267 「压力容器の設計」では、100 °C までの許容引張応力が示されている^[6]が、高温の設計強度は規定されていない。JSME 材料規格ガイドラインでは、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 3.2-3 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^[6]。

表 別 3.2-3 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) マクロ及びミクロ組織	<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：本資料で着目する項目を下線で示した。

※：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、SG 材として規定のある項目を除くと、表 別 3.2-3 の (11) 以降の項目が該当する。上述のように、SG 材は溶接性が考慮された炭素鋼材料である。材料規格における縦弾性係数の分類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、設計引張強さ、設計応力強さ、許容引張応力も同様に不足している。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になる。なお、低温での使用は想定しないため、低温引張特性は不要である。

以上より、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。JSME 材料規格ガイドラインでは高温引張特性として「最高使用温度よりも 50 °C 高い温度までの 50 °C ごとのデータ」が要求されており^[7]、収納する使用済燃料の制限温度が 300 °C 程度であることを考慮し、最高試験温度を 400 °C とする。なお、一般に炭素鋼は約 400 °C を超えるとクリープによる破壊が問題となる^[8]が、想定している使用温度域においては、クリープ破断について考慮する必要はない。

2.2 供試材

JSME 材料規格ガイドライン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^[6]ことから、供試材は、厚さ 6 mm、幅 1219 mm、長さ 1000 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を用いた。試験片は JIS G 3116 の規定に基づいて採取することとし、引張試験片については 8.2.3 項（引張試験片及び曲げ試験片の採取位置及び方向）より、供試材の幅方向の縁から 1/4 付近の位置から圧延方向と平行に採取することとした。試験片採取位置を図別 3.2-2 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を表 別 3.2-4 に示す。参考として、各供試材のミルシート記載値を合わせて示した。供試材は全て SG295 の規格値を満たしている。

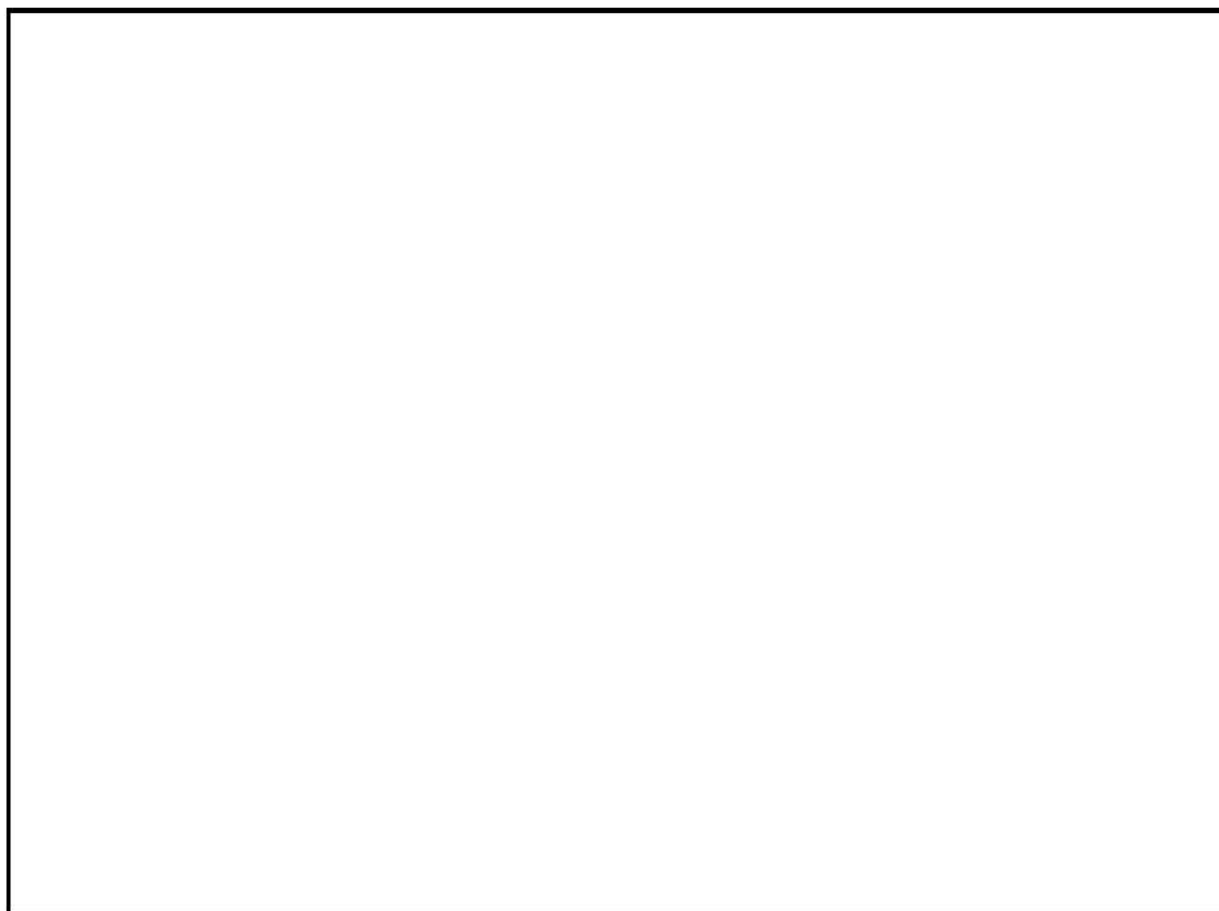


図 別 3.2-2 試験片採取位置

表 別 3.2-4 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	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	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	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	347	454	39
SG295 規格値	≦0.20	≦0.35	≦1.00	≦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。

2.3 試験方法及び条件

2.3.1 高温引張試験

高温引張試験は JIS G 0567 「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」を参考として実施した。高温引張試験の試験条件を以下に示す。

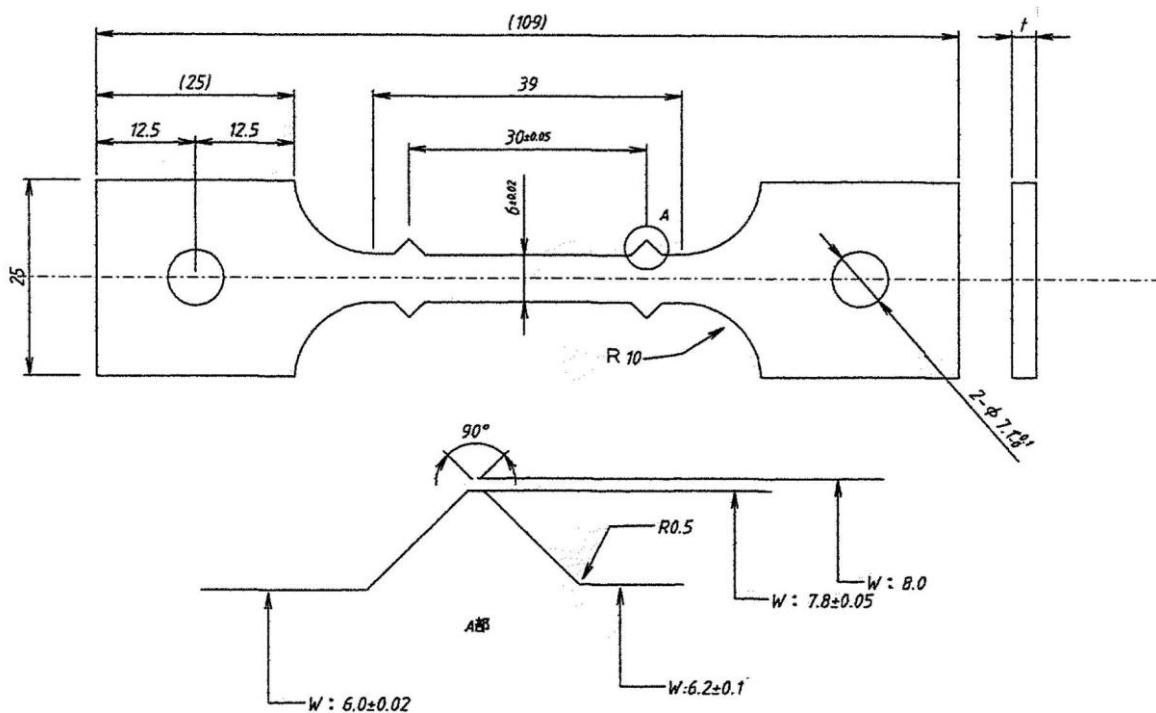


図 別 3.2-3 高温引張試験片形状

- ・試験片形状：図 別 3.2-3 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（℃）：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

2.3.2 温度依存の材料物性測定

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（℃）：-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、

λ	： 熱伝導率	[W/(m·K)]
α	： 温度伝導率	[m ² /s]
C_p	： 比熱	[J/(kg·K)]
ρ	： 密度	[kg/m ³]

(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. 高温引張試験結果及び考察

3.1 試験結果

応力-ひずみ線図の例として、供試材 1 の室温、100 °C、200 °C、250 °C、300 °C、400 °C における応力-ひずみ線図を図 別 3.2-4 に示す。全ての試験片について測定した 0.2 %耐力、引張強さ、伸びをそれぞれ表 別 3.2-5~7 及び図 別 3.2-5~7 に示す。なお、表に記載される平均値は小数第一位を四捨五入した値であるが、図では小数位を丸めていない値をプロットしている。

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、伸びの極小値は約 30 % であり、SG295 の規格値である 26 %を上回ることから、青熱脆性が問題になることはない。

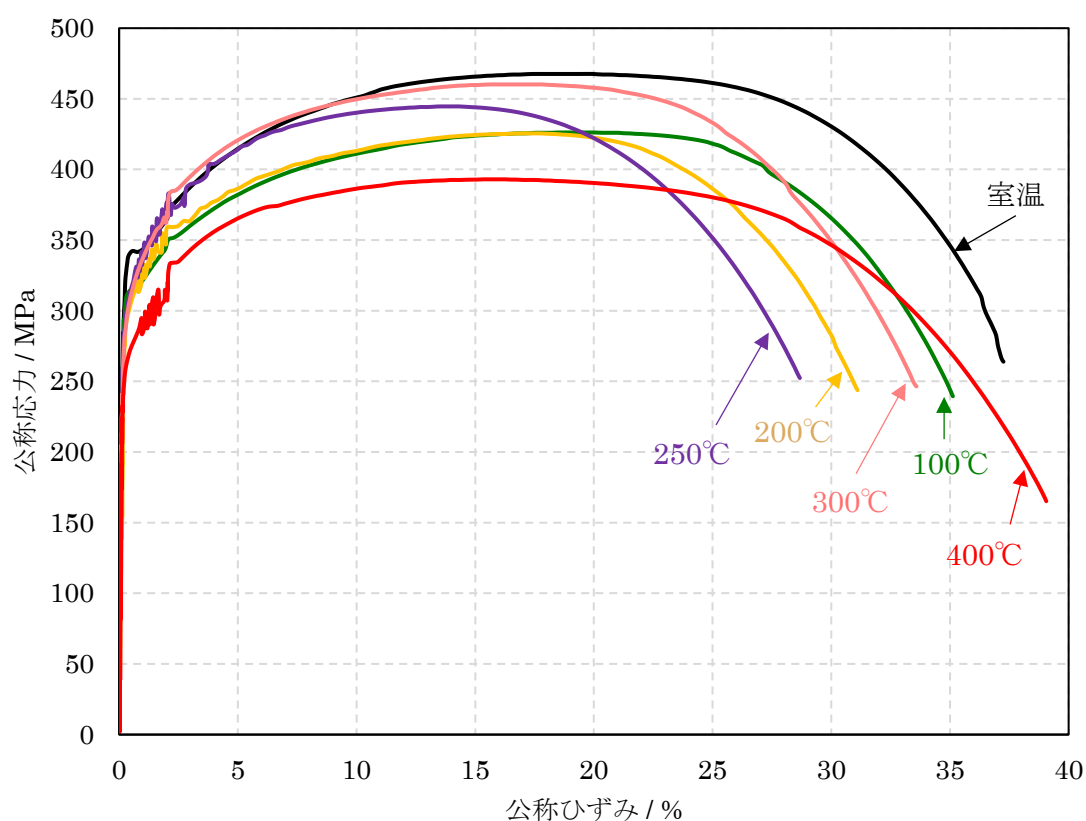


図 別 3.2-4 応力-ひずみ線図の例 (供試材 1)

表 別 3.2-5 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

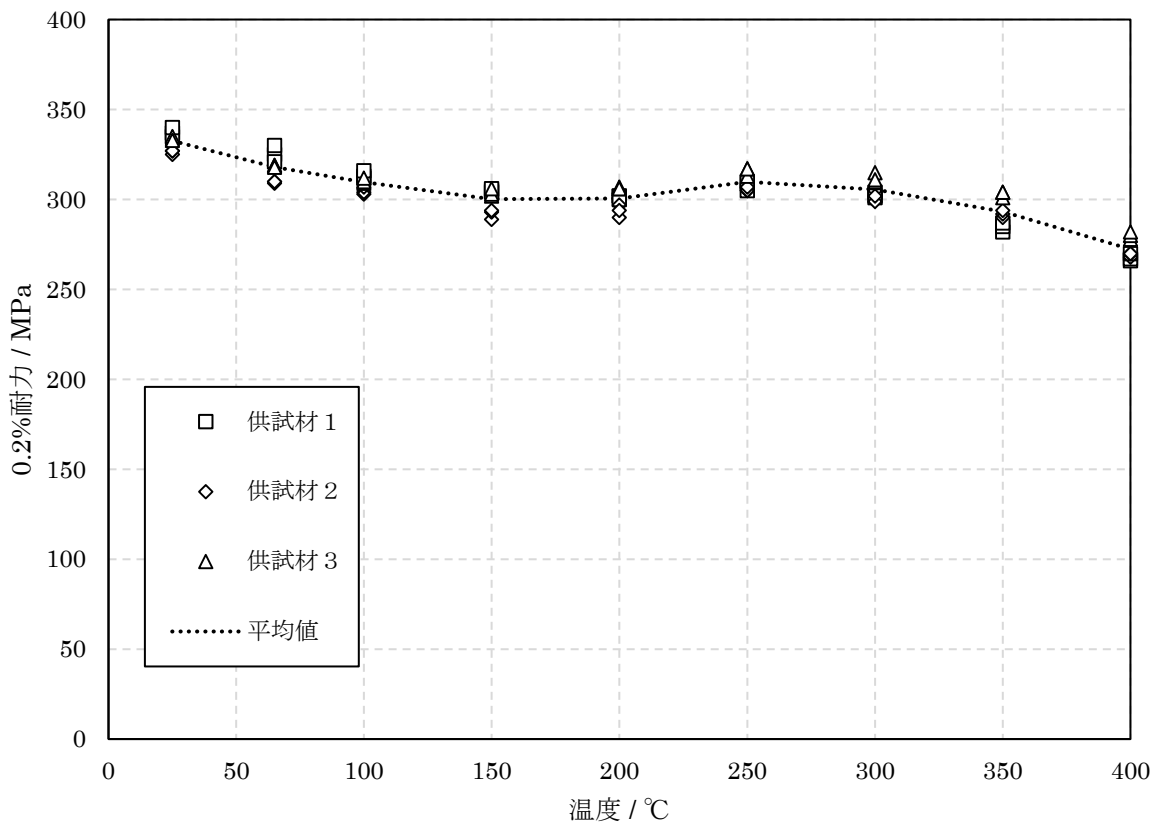


図 別 3.2-5 高温引張試験結果：0.2%耐力

表 別 3.2-6 高温引張試験結果：引張強さ（単位：MPa）

供試材	試験片	温度 (°C)								
		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

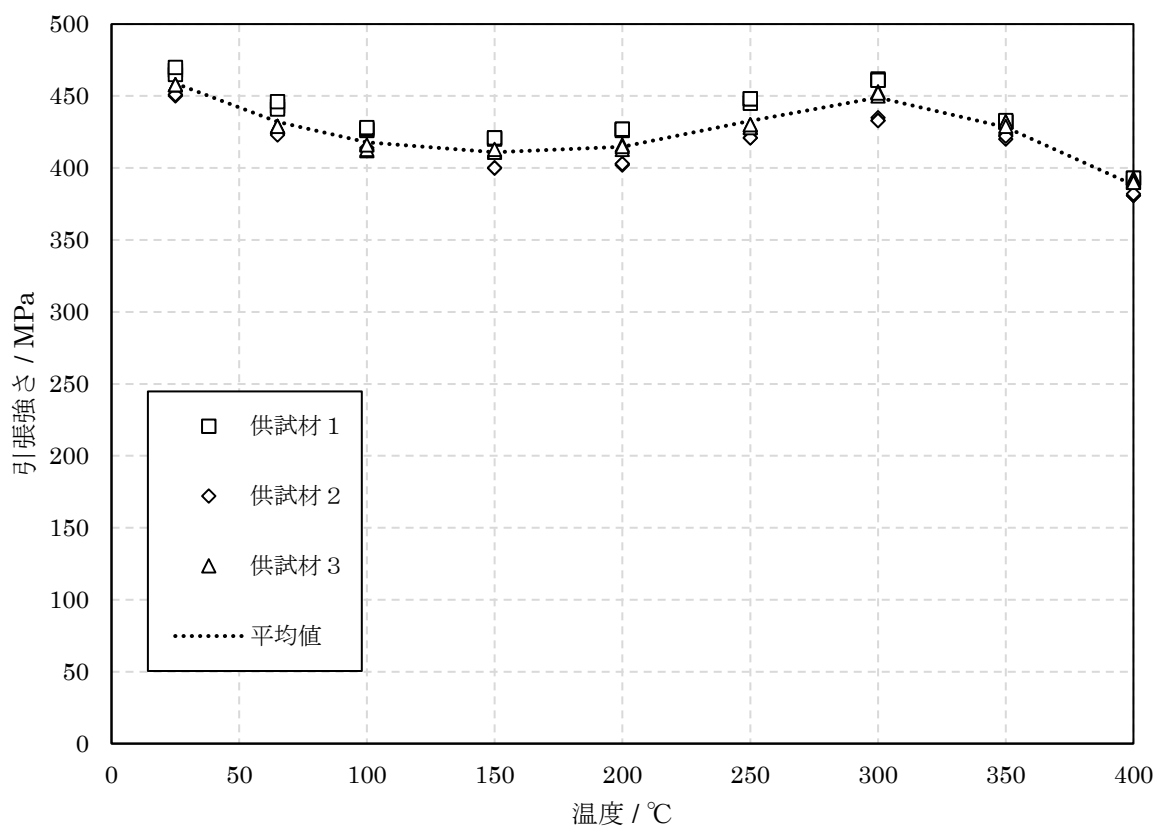


図 別 3.2-6 高温引張試験結果：引張強さ

表 別 3.2-7 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

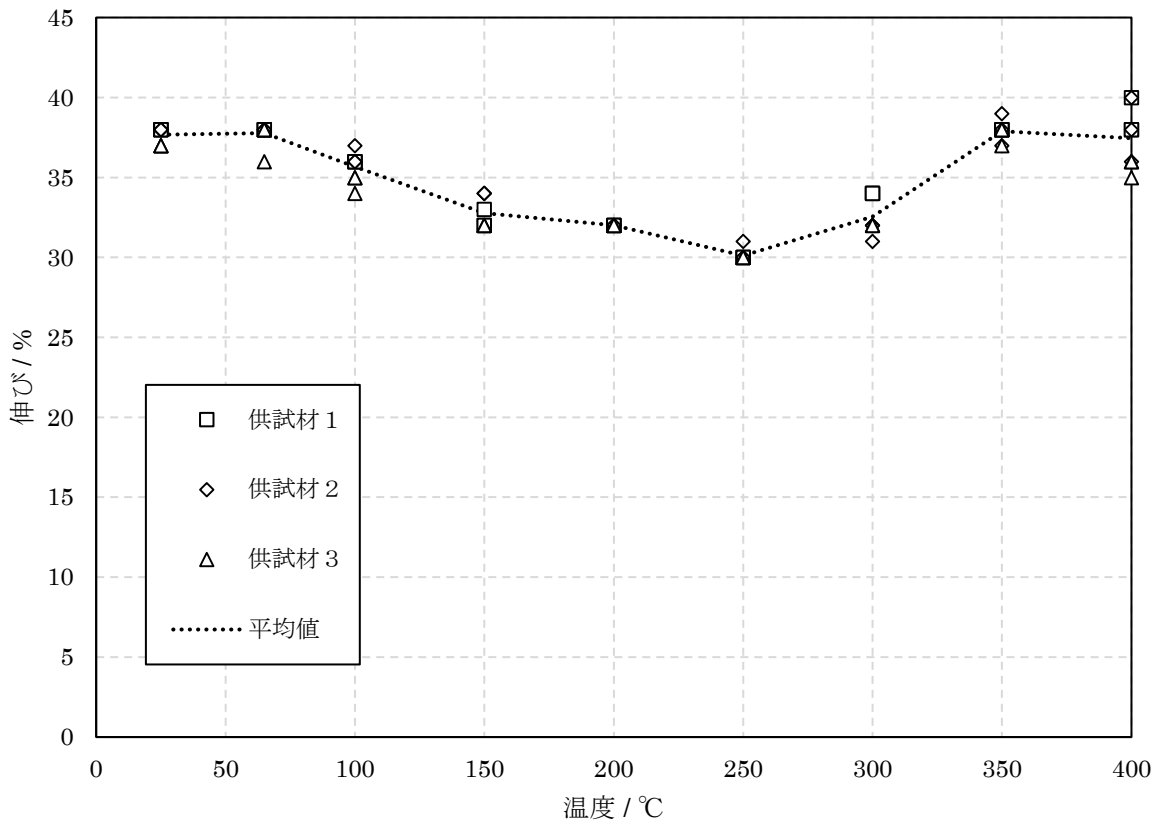


図 別 3.2-7 高温引張試験結果：伸び

3.2 設計降伏点、設計引張強さ、設計応力強さ、許容引張応力の設定

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 JSME 材料規格ガイドラインに基づき設定する。設定方法を以下に示す。なお、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位を切り捨てるものとする。

(1) 設計降伏点

JSME 材料規格ガイドラインでは、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 3.2-5)

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 3.2-8)

- 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 3.2-8)

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

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 295 MPa^[3] 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 3.2-10)

表 別 3.2-8 室温における 0.2%耐力を基準とした各温度の 0.2%耐力の比

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

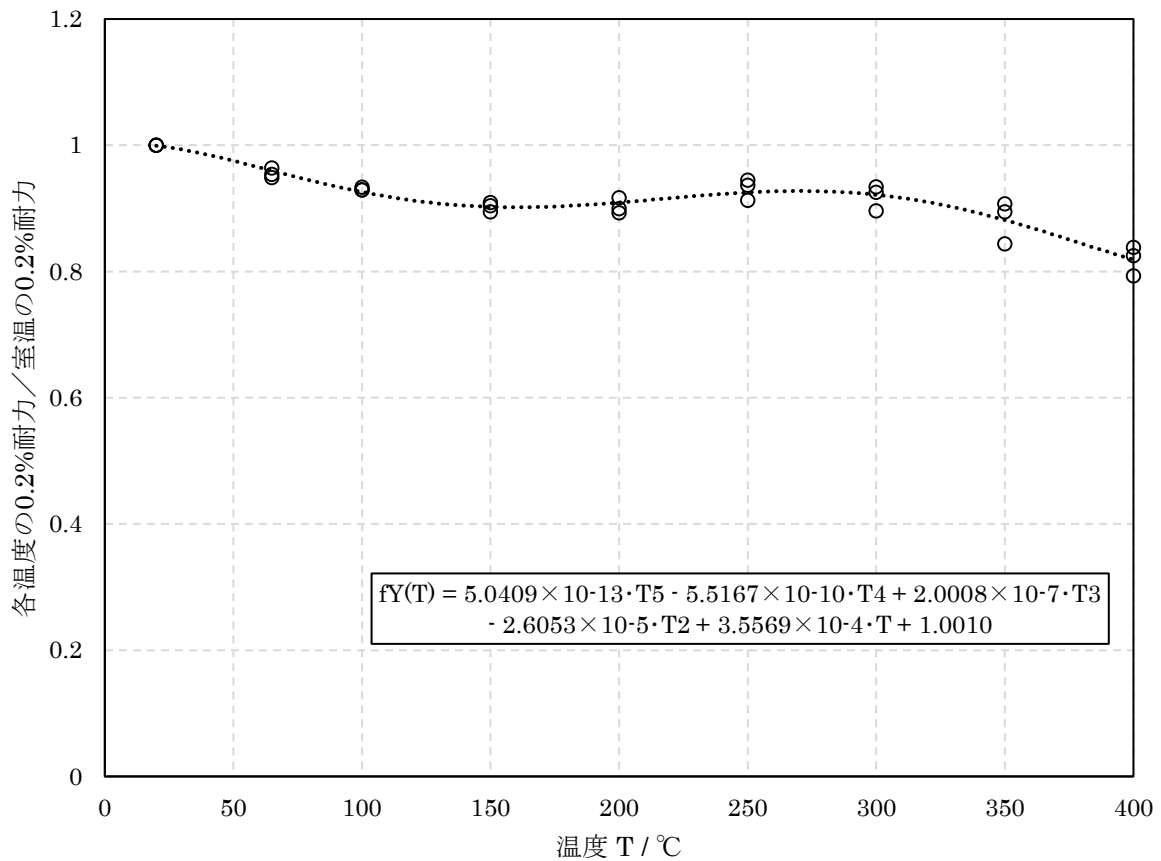


図 別 3.2-8 SG295 の 0.2%耐力 (降伏点)トレンド曲線

(2) 設計引張強さ

JSME 材料規格ガイドラインでは、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 3.2-6 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 3.2-9）

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 3.2-9）

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

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℃）における設計引張強さを JIS 規格値 440 MPa^[3]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 R_T 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 3.2-11）

表 別 3.2-9 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（℃）								
	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

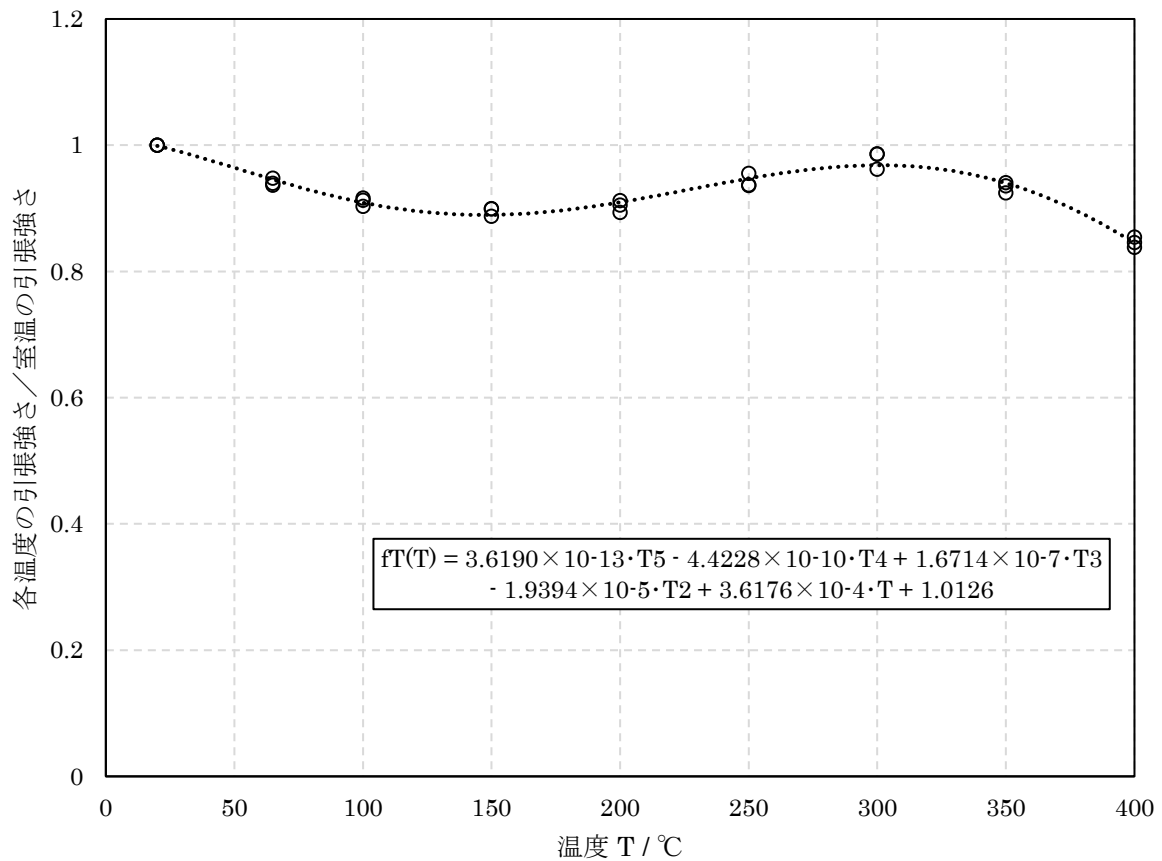


図 別 3.2-9 SG295 の引張強さのトレンド曲線

表 別 3.2-10 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

表 別 3.2-11 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

(3) 設計応力強さ

JSME 材料規格ガイドラインでは、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) は省略した。

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	$1/3 \times S_T$	$(1.1)/3 \times S_T \times R_T$	$2/3 \times S_Y$	$2/3 \times S_Y \times R_Y$

S_Y : 常温における降伏点 (耐力) の規格値

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

R_T : 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。

- S_Y 及び S_T をそれぞれ JIS 規格値 295 MPa 及び 440 MPa^[3] とする。
- 常温における設計応力強さを、 $1/3 \times S_T$ と $2/3 \times S_Y$ の小さい方の値とする。
- 高温域の規定温度における R_Y 及び R_T 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 $(1.1)/3 \times S_T \times R_T$ と $2/3 \times S_Y \times R_Y$ 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 3.2-12)

(4) 許容引張応力

JSME 材料規格ガイドラインでは、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) は省略した。

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^[3] 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 3.2-13)

以上の手順で設定された SG295 の設計降伏点、設計引張強さ、設計応力強さ、及び許容引張応力を表 別 3.2-14 にまとめて示す。最高試験温度が 400 °C であるため、350 °C を超える温度の値については参考とする。

表 別 3.2-14 の値と材料規格に規定される SGV410 の設計降伏点、設計引張強さ、設計応力強さ、及び許容引張応力とを比較し、図 別 3.2-10~13 に示す。室温から 350 °C までの温度域で、SG295 は SGV410 よりも強度の優れた材料といえる。また、設計降伏点 (図 別 3.2-10) 及び設計引張強さ (図 別 3.2-11) に高温引張試験結果をプロットし、設定された値が試験結果に対して保守的であることを確認した。

表 別 3.2-13 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

表 別 3.2-14 SG295 (JIS G 3116) の設計降伏点、設計引張強さ、設計応力強さ、及び許容引張応力

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(S_y 値)	295	283	280	273	268	266	266	266	266	266	266	266	260	(250)	(241)
設計引張強さ(S_u 値)	440	416	410	399	393	391	391	391	391	391	391	391	391	(391)	(371)
設計応力強さ(S_m 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。

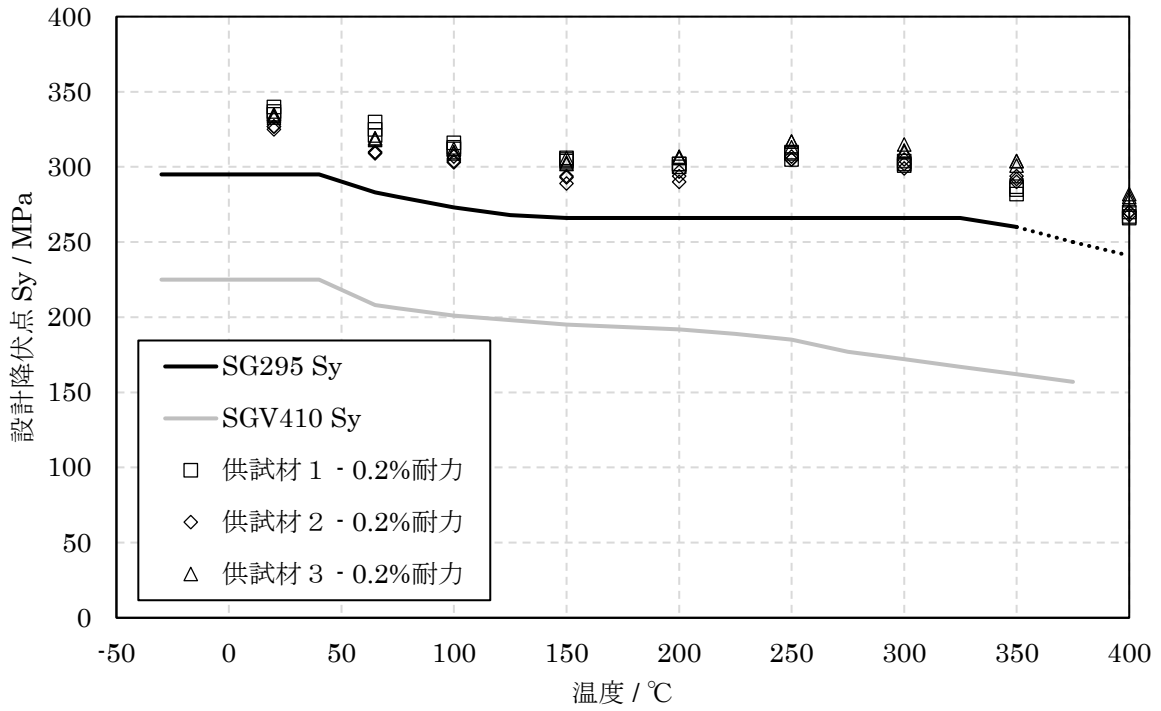


図 別 3.2-10 SG295 と SGV410 の設計降伏点の比較

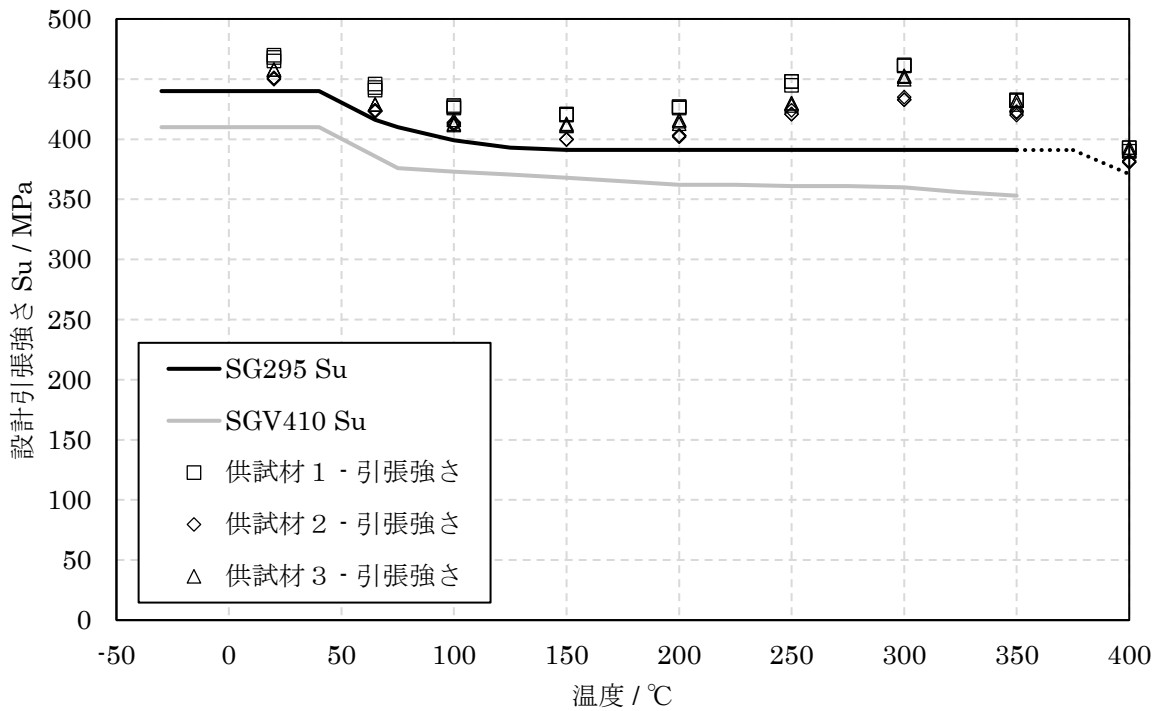


図 別 3.2-11 SG295 と SGV410 の設計引張強さの比較

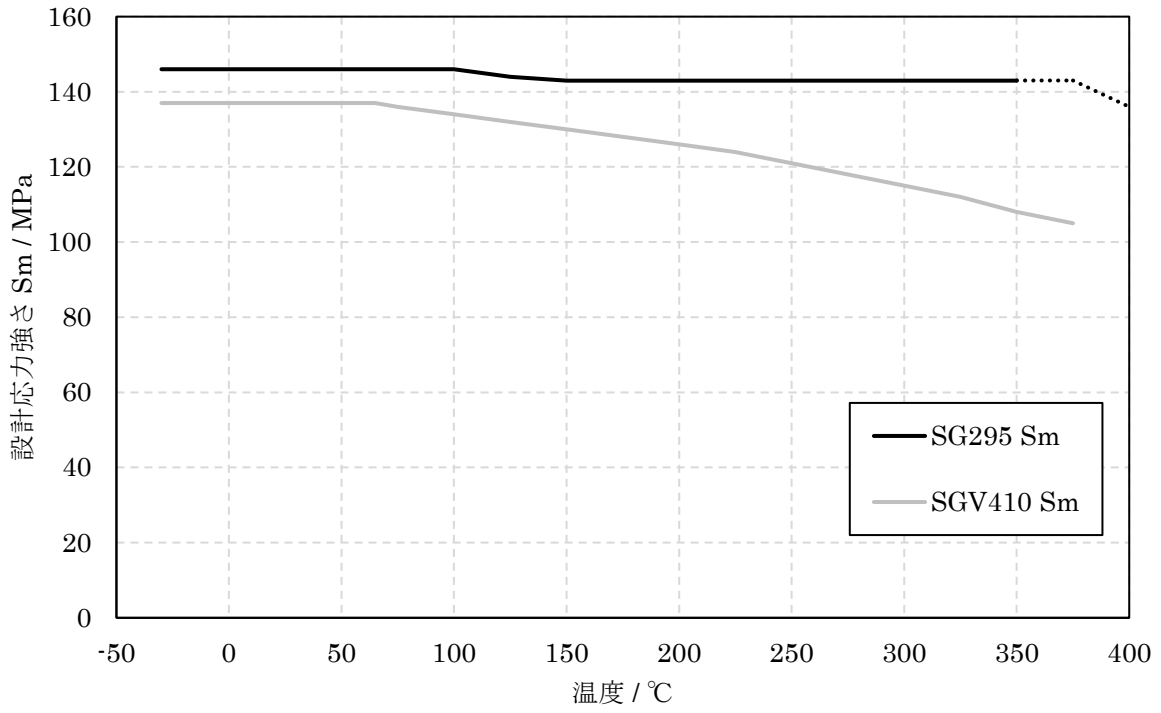


図 別 3.2-12 SG295 と SGV410 の設計応力強さの比較

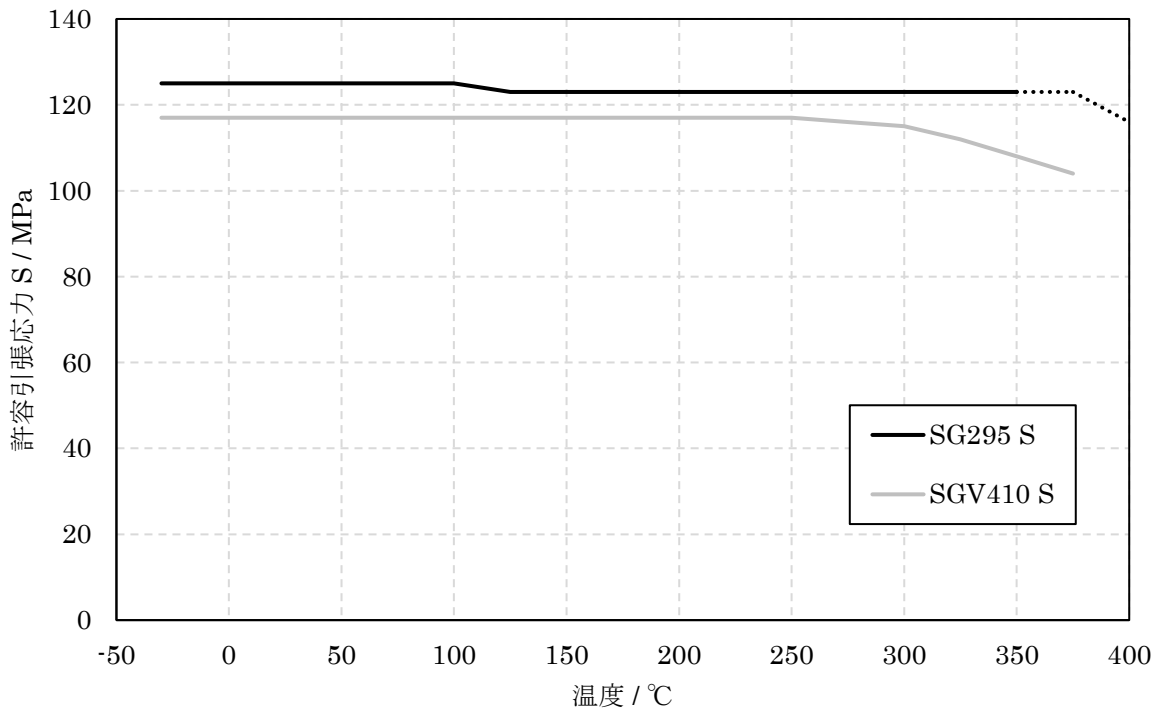


図 別 3.2-13 SG295 と SGV410 の許容引張応力の比較

4. 温度依存の材料物性測定結果及び考察

縦弾性係数及びポアソン比の測定結果を表 別 3.2-15 に、比熱容量、温度伝導率及び熱伝導率測定結果を表 別 3.2-16 に、線膨張係数の測定結果を表 別 3.2-17 に示す。また、供試材の密度を表 別 3.2-18 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である。

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 3.2-14 及び図 別 3.2-15 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である。

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、使用温度域では 5 %程度の差異であり同等である。したがって、縦弾性係数は、材料規格分類 [E1-1] の規格値を適用する。

線膨張係数については、材料規格分類 [TE1] の規格値と SG295 の線膨張係数の差は 5%程度であり同等である。したがって、線膨張係数は、材料規格分類 [TE1] の規格値を適用する。

表 別 3.2-15 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 3.2-16 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 ² /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 3.2-17 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 3.2-18 供試材の密度

供試材	密度 (kg/m ³)
1	7862
2	7865
3	7860

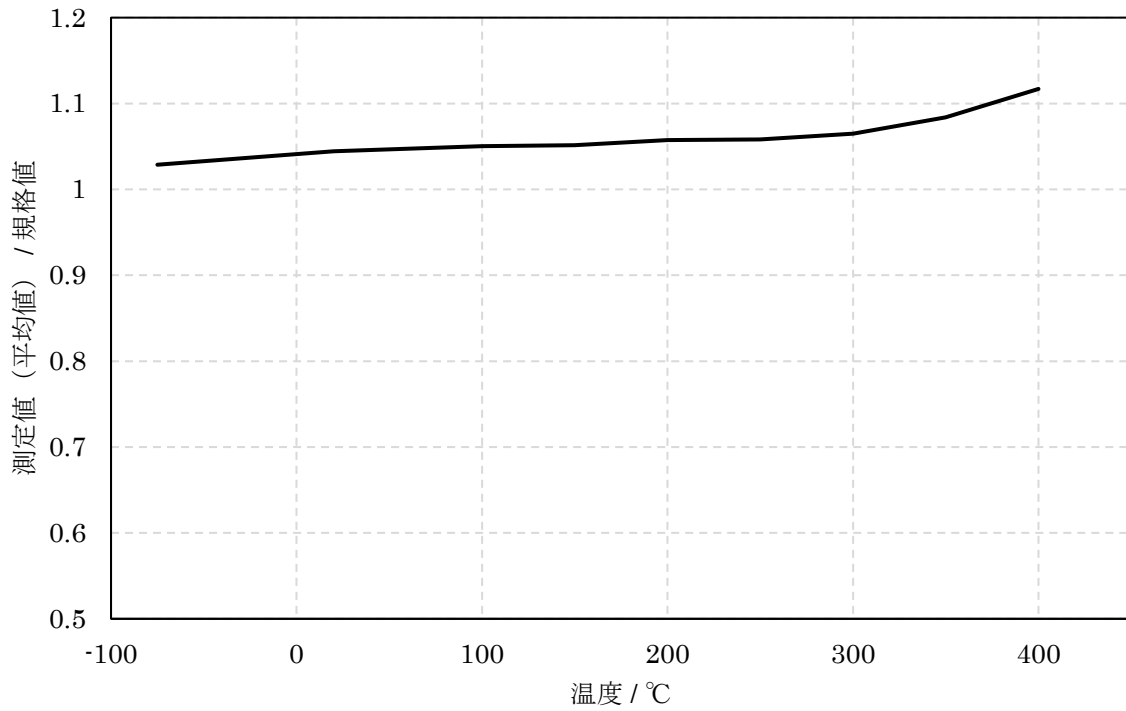


図 別 3.2-14 縦弾性係数の比較 : SG295 と材料規格分類 [E1-1]
(炭素量が 0.3%以下の炭素鋼)

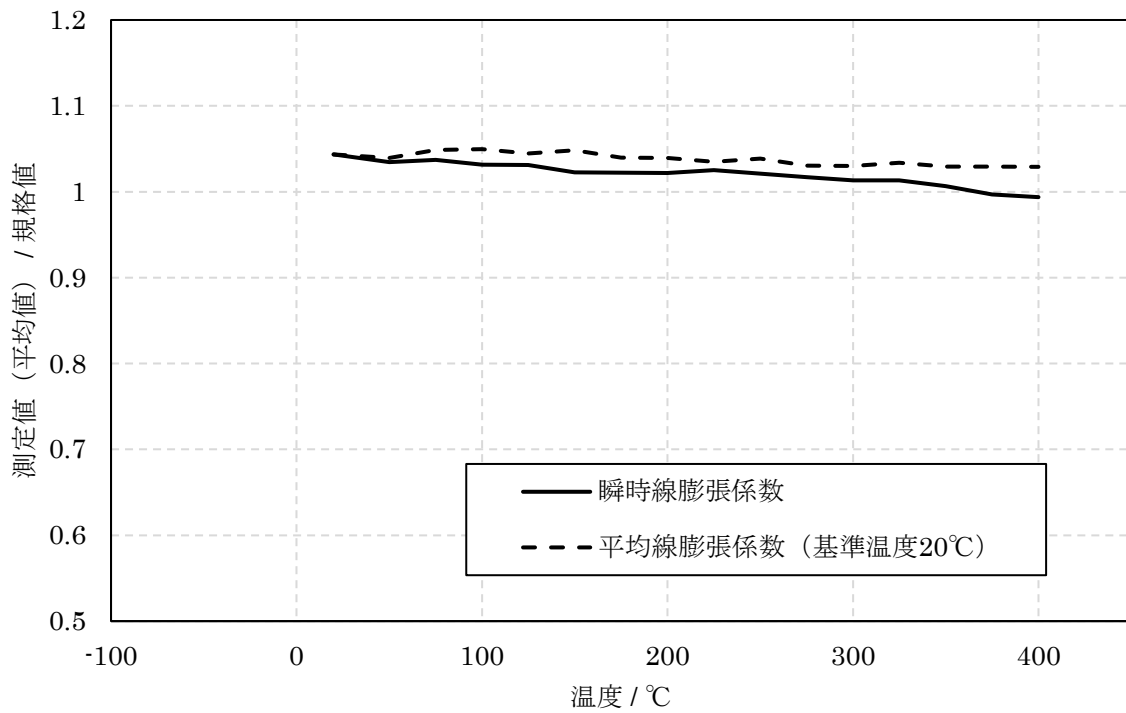


図 別 3.2-15 線膨張係数 (瞬時及び室温からの平均) の比較 :
SG295 と材料規格分類 [TE1] (炭素鋼、合金鋼[区分 I])

5. 長期健全性の評価

金属キャスクの設計貯蔵期間は 60 年間程度に設定され、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。したがって、金属キャスク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。SG295（炭素鋼）をバスケット材料として使用する場合、期待する機能は収納する使用済燃料を保持するための構造強度であるため、経年変化による強度低下について検討する必要がある。

以下のように、経年変化の要因として熱的影響、放射線照射による影響及び腐食の影響を考慮し、SG295 をバスケット材料とした金属キャスクが 60 年間の供用状態にあった場合について評価し、当該期間において構造強度への影響がないことを確認した。

5.1 熱的影響

2.1 項で述べた通り、金属キャスクに収納する使用済燃料の制限温度が約 300 °C であることから、バスケット材料の最高温度は同程度の温度となる。短期的な影響は、3.1 項に示した 400 °C までの高温引張試験結果より、400 °C までの範囲では機械的性質は著しく劣化しないことを確認している。長期健全性の観点からクリープについて検討する。

2.1 項で述べた通り、一般に炭素鋼は約 400 °C を超えるとクリープによる破壊が問題となり^[6]、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^[8]。炭素量 0.2% 以下の炭素鋼（SG 材）は、融点が 1490 °C^[8]であることから、314 °C までクリープによる破断及び変形を考慮する必要はないため、300 °C 以下の使用条件であれば構造強度への影響はない。

5.2 セメンタイト（Fe₃C）の黒鉛化に伴う材料強度の低下

炭素鋼は、セメンタイトと呼ばれる Fe₃C 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、炭素鋼の強度は低下する。

しかし、セメンタイトの黒鉛化は 480 °C から始まるため^[4]、使用温度条件が 480 °C 以下であれば、セメンタイトの黒鉛化に伴う材料強度の低下を考慮する必要はない。

したがって、Hitz-B69 型のバスケットの使用温度域は -22.4 ~ 300 °C であることから、セメンタイトの黒鉛化に伴う材料強度の低下を考慮する必要はない。

5.3 コンパートメントの曲げ成形時の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炭素や窒素が、冷間加工で生じた転位周りの応力場に集積し転位を固着させる硬化現象である。^[10]

ひずみ時効が生じた局部は、エネルギー吸収量が低下するとともに脆性-延性遷移温度が上昇することから脆性破壊のリスクが高まる可能性があり、ひずみ時効に起因する脆性破壊を防止するためには、添加する炭素量を 0.1% 以下に制限するか、冷間加工で生じた材料の残留応力を除去するとともに延性及び靱性を回復する必要がある。

したがって、バスケット材料に使用する SG295 については、冷間加工後に図 別 3-2 に示す応力除去焼鈍により、材料の延性及び靱性を回復させる処置を講ずる。

5.4 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 γ 線である。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。

中性子照射による脆化は、設計貯蔵期間を通じた中性子照射量から評価できる。Hitz-B69 型では、使用済燃料 69 体を収納した条件で、中心付近のコンパートメントの 60 年間の中性子照射量は $2.2 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2$ と評価されている。炭素鋼及び低合金鋼に関しては、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^[11]ため、構造強度への影響はない。

5.5 腐食による影響

通常、金属キャスク（密封容器）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充填される。そのため、不活性ガス環境が貯蔵期間中維持されていれば、腐食による劣化は問題とならないと判断できる。

厳密には、真空乾燥時に水や酸素に起因する腐食や、使用済燃料が破損した場合に放出される腐食性気体による腐食を考慮する必要がある。しかし、前者は残留する濃度を管理することで機能に影響を及ぼさない残留量とすることが可能であり^[12]、後者は 1%燃料破損相当の燃料棒内ガス中のヨウ素ガスを含む実機模擬環境における、鉄系材料の最大腐食速度により、60 年間の腐食量を保守的に推定しても 0.5 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、バスケットの腐食による構造強度への影響はない。

6. まとめ

高収納キャスクのためのバスケット材料の候補である SG295 の材料試験を実施した結果を以下にまとめる。

- ・高温引張特性を取得し、設計降伏点、設計引張強さ、設計応力強さ、及び許容引張応力を設定。
- ・温度依存の材料物性（縦弾性係数、ポアソン比、比熱、温度伝導率、熱伝導率、線膨張率）を取得し、材料規格に示される炭素鋼材料の物性と類似することを確認した。

また、合わせて長期健全性の考察を行い、SG295 がバスケット材料として適用可能であることを確認した。

以上のことから、SG295 材は、金属キャスク構造規格で使用を認められているバスケット材料 (SGV410) と類似の機械的性質を有し、同等以上の機械的強度を有することを確認し、JSME 材料規格ガイドラインに基づいた使用温度における材料規定を定めたことから、SG295 材は薄板のバスケット材料として適用することができる。

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), (社)日本機械学会.
- [2] JIS G 3118:2017, 中・常温圧力容器用炭素鋼鋼板.
- [3] JIS G 3116:2013, 高圧ガス容器用鋼板及び鋼帯.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] JIS B 8267:2015, 圧力容器の設計.
- [7] JSME S NJ1-2012, 発電用原子力設備規格 材料規格 (2012年版), (社)日本機械学会.
- [8] 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, 73 巻, 5 号, p.323-333, 2009.
- [9] 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巻 第14号, p.1586-p.1604, 1967.
- [10] 小林政信,山本恭永,為広博, “基礎 材料学”, コロナ社,(2011),p162-p163
- [11] 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, pp.268-281, 1994.
- [12] AESJ-SC-F002 : 2010, 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 : 2010, (社)日本原子力学会.
- [13] (独)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.