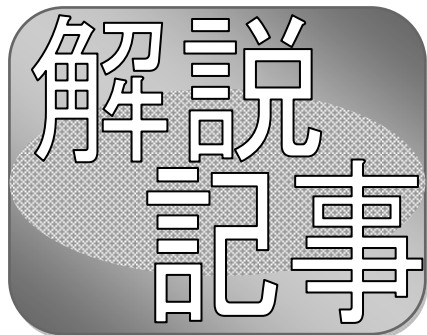


規格基準動向



## 日本機械学会発電用原子力設備規格 「材料規格」について

日本機械学会 発電用設備規格委員会 原子力専門委員会 材料分科会  
(社)日本原子力学会 **村上 弘良** Hiroyoshi MURAKAMI

### 1. はじめに

原子力発電所に用いられる材料は、告示 501 号発電用原子力設備に関する構造等の技術基準（経済産業省）の一部に材料関係諸表図として定められ運用されていた。告示 501 号の後継規格を日本機械学会において民間規格として整備することとなりどのような規格体系が良いのか検討された時代があった。検討の結果は、ASME Boiler and Pressure Vessel Code の体系と同様とし材料関係は材料規格として独立させることとなった。独立させるにあたり、材料規格に盛り込むべく内容を検討したところ告示 501 号の特殊事情もあることから当初より材料規格とすることが困難であるとされた。

一方、ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II は 1999 年の Addenda で許容引張応力 (S 値) の設計引張強さ (Su 値) に対する設計係数 3.5 を採用するとともにさらに設計係数を低下させる検討を開始した。

国内では、電気事業法、ガス事業法、高圧ガス保安法及び労働安全衛生法による圧力容器設計の統一を図るため圧力容器関係日本工業規格の再整備が行われることとなった。

このような背景を踏まえ告示 501 号（昭和 55 年公布版）及び設計・建設規格（2001 年版）の材料に関する箇所を国際規格及び圧力容器関係日本工業規格と可能な限り整合性もたせた JSME S NJ1-2008 発電用原子力設備規格材料規格が 2008 年 12 月に日本機械学会より発行された。本解説では、材料規格の①規格策定の基本方針、②規格の構成と内容、及び③許容引張応力 (S 値) の設定における設計係数 3.5 の採用について紹介する。

### 2. 材料規格の構成と内容

材料規格は、ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II Materials にならい、原子力施設に用いられる材料について、適用可能な材料の範囲、使用する材料

への要求事項、原子力施設にのみ使用される材料仕様、設計降伏点 (Sy 値)、設計引張強さ (Su 値)、Sy 値及び Su 値から導かれる設計応力強さ (Sm 値) 及び許容引張応力 (S 値)、線膨張係数などの物理的性質並びに外圧チャートを取りまとめたものである。告示 501 号及び設計・建設規格の材料関係の規格部分の後継規格と位置づけられる。

材料規格を取りまとめる際には、圧力容器関係強制法規 4 法（電気事業法、ガス事業法、高圧ガス保安法及び労働安全衛生法）及び国内圧力容器関係の JIS 規格（JIS B8265-2003、B8266-2003 及び B8267-2008）並びに ASME B&PV Code Section II Materials 2001Ed. 及び 2004Ed.（以下、ASME Sec. II）、告示 501 号及び設計・建設規格と可能な限り整合を図ることとした。

材料規格は、設計・建設規格付録材料図表の部分で独立させた規格であるが、将来、他の規格類からも引用されることおよび発電用火力設備規格にある材料関係の部分と統合することなども想定し設計・建設規格の材料以外の内容に強く依存するような箇所の掲載をしていない。材料規格の構成を表 1 に示す。

表 1 材料規格の構成

本文	Part 1 総則 第 1 章 総則 Part 2 材料仕様 第 1 章 機器等の区分と使用する材料の規格 第 2 章 材料への特別要求事項 第 3 章 原子力発電用規格材料仕様 Part 3 設計応力強さ、許容引張応力、設計降伏点、設計引張強さ、縦弾性係数、線膨張係数及び外圧チャート 第 1 章 設計応力強さ、設計引張応力、設計降伏点及び設計引張強さ 第 2 章 縦弾性係数及び線膨張係数 第 3 章 外圧チャート
添付	1 新規材料採用ガイドライン
解説	(本文及び添付の解説)

また、材料規格の主な特徴を設計・建設規格及び告示 501 号と比較して以下に示すとともに各改定内容について述べる。

## 2.1 Part 1 総則

設計・建設規格の付録材料図表の箇所を規格として独立させたことから総則を設けた。総則の適用範囲では、材料規格を引用する規格側で材料規格に追加して要求を追加することができる。すなわち、材料規格は、原子力施設に自動的に適用されるのではなく設計・建設規格等で引用されることによりはじめて材料規格が規格として使用される。

## 2.2 Part 2 材料仕様

第 1 章には、原子力施設に用いる材料について機器区分との関係を示すとともに、規格に記載されていない材料を使用する際の考え方及び高温強度が定められていない材料を材料規格に登録する方法などがまとめられている。第 2 章には JIS 材料についての特別要求事項が、また、第 3 章には原子力発電用規格材料の仕様がまとめられている。

第 1 章表1使用する材料の規格は、設計・建設規格Part 1表1と告示501号別表1の内容を参考にして定めた。第 1 章表1は、規格で記載されているJIS規格材及び原子力発電所規格材料がどのクラスに使用可能かがすぐにわかるようにとりまとめたものである。この表は、2006年3月31日までに発行および改正されたJIS規格について反映している。さらに以下の内容の追加及び削除を行った。

- (1) JIS G5705「可鍛鉄品」は、適切な品質管理が行われない場合、片状黒鉛が析出し用途を間違えた場合破損につながる。労働安全衛生法の压力容器では事故が多発したため使用禁止となった。このような状況から本規格から削除した。
- (2) 原子力発電用規格「熱交換器用ステンレス鋼鋼管」は、技術研究組合原子力用次世代機器開発研究所 ANERI において、オーステナイトの強度を持つフェライト系ステンレス鋼が開発されたことから実機への適用ができるように追加した。
- (3) 原子力用 SUS316 及び原子力用 SUS304 と呼ばれていた BWR 用ステンレス鋼をユーザーでも容易に理解できるように原子力発電用規格「耐食ステンレス鋼」として追加した。
- (4) ニオブが添加されたインコネル 600 合金が長期に

渡り使用されていたことから、ユーザーでも容易に理解できるように原子力発電用規格「耐食耐熱超合金」を追加した。

- (5) JIS G3101「一般構造用圧延鋼材」の改訂に合わせ 100mm 以上の板厚の場合、機械的性質は降伏点 215MPa 以上に限るように明記した。
- (6) JIS G3106「溶接構造用圧延鋼材」SM490B 及び SM490C は、設計・建設規格では、75mm 以下の制限があったが、告示 501 号の改正作業履歴を調査した結果、旧告示 501 号（昭和 45 年公布）から告示 501 号（昭和 55 年公布）への改正作業中に 100mm 以下とすべきところを誤って 75mm 以下としたことから材料規格では 100mm 以下と訂正した。
- (7) JIS G3204「压力容器用調質型合金鋼鍛鋼品」の SFVQ1B は、SFVQ1A の熱処理を変えて強度を高めた材料であり、取替 SG の胴材として多くの国内製造実績がある。これらの製品は全て輸出用であるが、海外で使用されている SFVQ1B の使用実績は好ましいもので不具合事例の報告はないため、国内でも使用できるように規格化した。

## 2.3 Part 3 設計強度

ASME Sec. II を参照としている压力容器関係の JIS と可能な限り整合性を持たせて設計に用いる材料強度の表を作成した。溶接管について、溶接の品質係数 0.85 を採用した。これは、添付 1 の新規材料採用ガイドラインと整合性を持たせたためである。0.85 以外の溶接の品質係数を選択する際には本規格を引用する側の規格で非破壊検査を追加要求することで独自に溶接の品質係数を定めることができる。

今回溶接の品質係数を 0.85 とした材料については、新たに製造方法の欄を設け、ユーザーが容易に分かるようにした。Part 3 設計強度に係わる表 1 から 7 までの内容を表 2 に示す

## 2.4 添付 新規材料採用ガイドライン

発電用火力設備規格の新規材料の設計強度の決定方法及び ASME B&PV Code Sec. II Part D Appendix を参照して作成した。本ガイドラインでは原子力の実績を考慮し、通常国家規格もしくは国家規格に準ずる規格に対してのみ高温強度を決定するのに加えて特殊設計認可申請をする材料についても対象とした。

また、告示 501 号との違いは、許容引張応力を求めるための設計降伏応力に対する係数が、告示 501 号では 5/8 であるのに対して、本ガイドラインでは 2/3 を採用

表 2 Part 3 設計強度に係わる表の内容一覧

表番号	項 目	内 容
1	材料の各温度における設計応力強さ (Sm値)	JIS B8266-2003に整合化した。 JIS B8266-2003にない材料は設計・建設規格 (2001年版) から変更なし。
2	ボルト材の各温度における設計応力強さ (Sm値)	原則として設計・建設規格から変更なし。
3	鉄鋼材料の各温度における許容引張応力 (S値)	JIS B8267-2008 (引張強さに対する設計係数3.5を採用) に整合化した。 JIS B8267-2008にない材料は設計・建設規格から変更されていない。 化学成分や評価情報が不十分なものは従来通り引張強さに対する設計係数を4とした。 4となっている材料は、JIS G3101、G3452、G4051、G3214、G4053、G4303、G4304、G4305、G4305、G4317、G5101、G5101、G5102、G5121、G5151、G5152、G5202、G55502、G5526並びにJSME-N3、N4、N5、N6、N9、N10、N11、N12、N13、N14である。なお、上記のJISではJISに掲載されているすべての材料が4となっているもの他に一部材料のみが4となっているものがあるので注意すること。 本規格では、設計係数として3.5を採用した材料の表と4のままとした材料の表は分離されている。各ページの表の右上に3.5であるのか4となっているか表記されている。
4	非鉄材料の各温度における許容引張応力 (S値)	JIS B8267-2008 (引張強さに対する設計係数3.5を採用) に整合化した。 JIS B8267-2008にない材料は設計・建設規格から変更されていない。 化学成分や評価情報が不十分なものは従来通り引張強さに対する設計係数を4とした。 引張強さに対する設計係数が4となっている材料は、JIS H3100、H3250、H3300、H4040、H4080、H5120、H5121である。なお、上記のJISではJISに掲載されているすべての材料が4となっているもの他に一部材料のみが4となっているものがあるので注意すること。 本規格では、設計係数として3.5を採用した材料の表と4のままとした材料の表は分離されている。各ページの表の右上に3.5であるのか4となっているか表記されている。
5	ボルト材の各温度における許容引張応力 (S値)	原則として設計・建設規格から変更なし。
6	材料の各温度における設計降伏点 (Sy値)	JIS B8266-2003及びJIS B8265-2003に整合化した。 JISに規定されてない材料は原則として設計・建設規格から変更なし。
7	材料の各温度における設計引張強さ (Su値)	告示501号、設計・建設規格及びASME B&PV Codeを参照して制定した。 ASME B&PV Codeを参考としたことから約10%強度が高いことが特徴。

していることである。この差異は、告示 501 号を定める時に参照された ASME Code Sec. III 1974 年版が 5/8 であったものが、1980 年代には 2/3 に変わったが、告示 501 号改正時に変更されなかったためである。なお、5/8 のケースと 2/3 のケースの差異について評価を行った結果、両者のさが、0.042 と小さなことなどから影響

はなかった。

### 3. 許容引張応力の設計係数 3.5 の採用

設計・建設規格では、許容引張応力 (S 値) を求める際に、設計引張強さに対する設計係数として 4 を採

用していた。材料規格策定に当たっては、ASME 規格及び JIS 規格等の開発状況を検討し設計引張強さに対する設計係数 3.5 の導入を図るべき検討が行われた。この検討では、海外規格の動向、国内規格の動向、設計において防止すべき破損モードへの影響の有無、国内の材料製造技術の進歩の各観点から行い、設計引張強さに対する設計係数として 3.5 を導入しても問題ないと結論した。以下にその概要を示す。

### (1) 海外規格の動向

ASMEでは当初設計係数を5としていたが、第2次世界大戦中の対応として、4が採用された。戦後すぐに従来の5へと戻したが、4で設計した容器類は特に問題もなく使用された。このため、産業界から設計係数を4へ引き下げる要求があり、4が再度採用された。ASMEではその後長い間設計係数の引き下げを行なわなかったが、約50年経過し、再び設計係数を合理化するための検討を行い、1999年に4を3.5に引き下げた。<sup>(1)</sup> ASMEはWRC Bulletin 435の報告内容を設計係数3.5導入の根拠としており、その主張は、材料に起因する破局的な事故はなかったこと、技術的進歩により良い材料が製造可能となったこと、経年劣化への対応の一つである非破壊検査技術も向上していること等を総合的に判断すれば設計係数3.5を導入できるというものである。<sup>(1) (2)</sup>

一方、ヨーロッパでは、1997年にヨーロッパ圧力機器指令 (PED) が公布された。PEDを用いて圧力容器を設計するとASME規格で設計するよりも肉厚が薄くできる等ASME規格よりも有利な規格になっている。これに呼応して、ASMEでは一般圧力容器の規格 (ASME Sec. VIII Division 2解析による設計) 全体の改訂を行うことが計画された。この改訂では、上述のように許容引張応力について、設計引張強さの設定における設計係数を従来の4から3.5へ引き下げるとともに、設計応力強さについて、設計引張強さの設定における設計係数を従来の3から2.4へ引き下げられた。

材料規格策定に当たり、ASME規格、ドイツのKTA規格 (ドイツ原子力技術委員会規格)<sup>(3)</sup> 及びフランスのRCC-M規格<sup>(4)</sup> におけるS値、Sm値等の設定方法について比較検討を行った。その結果、いずれの規格もSy値とSu値の両方に基づきS値及びSm値を定める方法を採用しており、基本的に同じ内容となっているが、原子炉格納容器についてASME規格とドイツKTA規格を比較すると、ドイツKTA規格の方がASME規格よりも許容値が高くなっていることが明らかになった。こ

の事実は、ASME規格には合理化の余地が残されていることを示している。

### (2) 国内他規格の動向

#### ① 告示501号への製造技術の進歩の反映

昭和45年(1970年)に制定された告示501号(旧告示)では、JIS材料への特別要求事項として、「電気炉もしくは平炉で製造すること」という要求が規定されていた。これは、旧告示が1963年版ASME規格を参照していたことによる。当時日本では、既に転炉が採用され、良質な鋼材の製造が可能となっていたが、参照している規格が米国国内産業の実状を考慮していたことから、平炉などの技術が盛り込まれていた。一方、昭和55年(1980年)に制定された告示501号では、JIS材料への特別要求事項として旧告示のような要求はなくなった<sup>(5)</sup>。これは昭和45年からの10年間にわたる製造技術の進歩が反映されたことによるものである。

#### ② 高圧ガス保安法

「(1) 海外の規格の動向」で示した動向を受け、日本においても国際規格との整合性の観点から設計引張強さに対する設計係数3.5を採用するための検討が実施された。経済産業省原子力安全・保安院は、欧米等における圧力容器に係る規格・基準の動向及び国際動向を踏まえた我が国の高圧ガス設備の技術基準の在り方を検討するために「高圧ガス設備に係る技術基準国際統合化研究会」(座長：中桐滋横浜国立大学教授)を設置した。その結果、実機の損傷経験、日本の鋼材製造技術の発展、非破壊検査技術の発展等を総合的に判断すると、Su値に対する設計係数を3.5へと変更しても問題がないとの結論が得られた。<sup>(6)</sup>

上記研究会の検討結果を受け高圧ガス保安法は、設計引張強さに対する設計係数3.5を適用できるように改正された。<sup>(7)</sup>

圧力容器関係 JIS においては強制 4 法 (電気事業法、ガス事業法、高圧ガス保安法、労働安全衛生法) の引用規格を整備するための事業の一環として、Su 値に対する設計係数 3.5 の規格が整備され、JIS B8267 として 2008 年に発行された。

### (3) 設計において防止すべき破損モードへの影響

許容引張応力の設定における設計係数を 4 から 3.5 に引き下げるのが影響を及ぼす可能性のある破損モードについて検討を行った。

#### ①塑性崩壊の防止及び延性破壊の防止

許容引張応力（以下、S値）は、以下のように定められる。まず、材料の引張試験で得られる応力-歪み線図（荷重-伸び線図）からSy値及びSu値が求められる。このSy値に2/3を乗じた値とSu値に1/3.5を乗じた値を比較して小さな方をS値とする。

このことから、設計引張強さに対する設計係数 3.5 を採用する意味は、現在の設計の枠組みを変更せずに結果的に Su 値の項を大きくして降伏点設計に近い設計を採用することであると言える。すなわち、設計係数 3.5 の採用は、一次応力制限の基本的な考え方を変更するものではなく、塑性崩壊及び延性破断の防止に有意な影響を与えるとは考えられない。

#### ②脆性破壊の防止

脆性破壊防止については、材料の製造技術の進歩により、不純物が著しく低減されていることから、著しい低温以外では脆性破壊が生じる可能性はなく、原子力発電所の機器の設計温度は脆性破壊が生ずるような温度に至らないように設定しているため、Su 値に対する設計係数に関わらず脆性破壊は生じないと判断できる。

#### ③疲労破損の防止

疲労限界と引張強さとの関係については古くから多くの検討が実施された結果、経験的に次式のような関係にあることが知られている。<sup>(8)</sup>

$$\text{疲労限界} \propto \sigma_u$$

この関係から引張強さに対する設計係数が 4 の場合でも 3.5 の場合でも S 値は上式に対応する応力 ( $\sigma_u/2$ ) よりも小さく設定されることから特に影響を与えるものではないことがわかる。

### (4) 材料製造技術の進歩

国内の材料メーカーにおける製造技術の進歩についても調査を行った。<sup>(9) (10) (11) (12)</sup> この結果、近年、ユーザーからより厳しい環境で使用するため、より高品質の材料が要求されようになり、不純物が少なく、強度と靱性のバランスに優れ、品質も良い材料を製造する技術開発が行われた。国内鉄鋼メーカーの炭素、硫黄、燐、窒素など不純物元素の低減技術が進歩し、1985年頃から不純物の量がある一定の値以下となるような管理技術がメーカーによらず確立された。

不純物を低減させる製造技術が完成した1985年前後からは、化学成分と常温の機械的性質から靱性と強度

のバランスの良い材料が製造されていると判断できる。このことも設計係数として3.5を採用する妥当性を示すものと言える。

## 4. 材料規格の使用上の注意事項

材料規格を使用する際に注意を要する点がある点があるので以下に解説を行う。

#### ① Part 2第1章表1使用する材料の規格

表1は、材料規格に掲載されているかどうかすぐわかるようにした早見表であり表に掲載されていない材料を禁止していることではないことに注意を要する。

#### ② JISの年版の取扱について

材料規格で引用したJIS規格には、年版を併記している。これは、材料を原子力施設へ使用する観点からJIS規格の内容について技術評価を実施した結果である。一方、原子力に使用する材料の納期は長い材料発注後にJIS規格及び本規格が変更される場合もあり得る。材料については、品質管理・品質保証の観点から検査することもあり、規格との整合性が問われることが懸念される。このようなことを回避するために、案件が出た段階でその都度（社）日本機械学会へ問い合わせを行い、回答を得ることを勧める。

#### ③ JISの最新年版の適用について

工業標準化法に従うとJISが改訂され最新版が発行されている場合には最新版を使用することとなっているが、材料規格の材料についても最新版のJISを使用しても良いかとの質問がある。

回答は、日本機械学会へ質問することである。材料関係のJISは、購買などの売買契約に使用することを想定しているが、原子力発電所での使用についての要求事項が考慮されていないことも多いためメーカーなどで単独に判断するのは好ましくない。是非、日本機械学会へ質問を出していただきたい。

#### ④ 告示501号の要求に基づき購入した保管材料

告示501号は平成18年1月1日に廃止された。告示501号の要求を満足している材料がメーカーもしくは発電所で保管されている場合、使用可能かとの質問がある。これは、告示501号に基づき購入され保管されていたとの事実が証明できれば使用可能である。

⑤ ASME材の使用について

材料規格にはASME材の記述がないが、告示501号と同様に使用可能かということに関しては、以下のように考える。

告示501号と同様に解釈している。すなわち、設計・建設規格の付録材料図表もしくは材料規格に記載されている材料に相当材があった場合に限り使用できる。なお、設計に際に使用する強度は、ASME材の強度ではなく規格にある相当材の強度となる。

⑥ 規格に記載された寸法制限を超えた場合の処理

Part 3 第1章 表7 材料の各温度における設計引張強さ (Su 値) の表中の JIS G4051 (2005)「機械構造用炭素鋼鋼材」及び JIS G4053 (2003)「機械構造用合金鋼鋼材」にあつては、熱処理時の質量効果のため、「昭和31年 JIS 機械構造用炭素鋼と構造用合金鋼解説」に基づき、寸法制限を設けたものであるが、それぞれの材料が表中の寸法制限を超えた場合等新たに設計引張強さを定めるためには添付1「新規材料採用ガイドライン」を参照としてデータを整備し日本機械学会へ申請していただきたい。

## 5. おわりに

材料規格は、原子力施設に使用される材料の規定であり今後多くの設計に係る規格から引用されることが望まれる。近い将来、発電用火力設備規格に含まれる材料関係の内容を取り込むこと、工業標準化法などの運用経験の反映、ASME規格材の取り込み、ASTM規格材の取り込むこと等規格を改訂する必要があると考える。また、設計引張強さに対する設計係数を従来の3.0から2.4にまで引き下げること検討する必要がある。このため、適宜国内外の状況を踏まえ継続的に改訂をはかることが必要である。

### 参考文献

- (1) WRC Bulletin 435 “Evaluation of Design Margins for Section VIII Div. 1 and 2 of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code” E. Uptis and K. Mokhtarian, September 1998
- (2) WRCレポートの検討について 経済産業省 原子力安全・保安院 「高圧ガス設備に係る技術基準国際整合化研究会」第5回会合平成13年6月8日資料 5-2

- (3) KTA 3201.2、Komponenten des primaerkreises von Leichtwasserreaktoren、Teil2: Auslegung、Konstruktion und Berechnung、KTA 3201.1、Komponenten des Primaerkreises von Leichtwasserreaktoren、Teil 1: Werkstoffe und Erzeugnisformen
- (4) AFCEN RCC-M、Design and Construction Rules for Nuclear Power generating Stations、Design and Construction Rules for Mechanical Components of Nuclear Islands、Subsection I - Subsection Z: Technical Appendices
- (5) 解説「原子力設備の技術基準」通産省資源エネルギー庁公益事業部原子力発電安全管理課編 (株) エネルギーフォーラム
- (6) 高圧ガス設備に係る技術基準国際整合化研究会報告書 経済産業省 原子力安全・保安院 保安課 平成13年6月
- (7) 経済産業省告示第97号平成15年3月31日「高圧ガス保安法施行令第2条第3項の規定に基づき高圧ガス保安法施行令関係告示の一部を改正する件 <http://www.nisa.meti.go.jp/text/hoanka/150331.htm>
- (8) 西島 敏：疲労試験データの統計的整理 材料、Vol. 29 (1980) pp24-29
- (9) 不純物元素低減の機械的性質、加工性への影響 大内 千秋(社)日本鉄鋼協会 第90回第91回 西山記念技術講座
- (10) 製錬技術の進歩と不純物元素の低減 雀部 実(社)日本鉄鋼協会 第143回第144回 西山記念技術講座
- (11) 高性能厚鋼板の技術動向—一介在物制御の進歩とともに—植森 龍治(社)日本鉄鋼協会 第182回第183回 西山記念技術講座
- (12) 圧力容器用厚鋼板の品質に関連する主要技術の進歩 経済産業省 原子力安全・保安院 「高圧ガス設備に係る技術基準国際整合化研究会」第3回会合平成13年3月28日資料3-2 (平成21年6月14日)