



発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2020年版） JSME S NC1-2020

設計・建設、材料及び溶接に係る日本機械学会の
規格の技術評価に関する第3回検討チーム会合に
おける日本機械学会への説明依頼事項への回答

2023年7月14日

(一社)日本機械学会 発電用設備規格委員会
原子力専門委員会 設計・建設分科会

目次

1. 設計・建設規格

(1) 他規格等の要求事項を取り込む際の考え方→なし

(2) クラス1支持構造物の極限解析による評価

- (a) 「極限解析による評価」が構造・形状に依存するものではないとする技術的根拠を説明してください。
- (b) クラス1支持構造物の供用状態Dにおける制限値 P_{cr} の技術的妥当性を示してください。
- (c) 弾性解析による耐震解析で得られた応力あるいは荷重を用いて塑性崩壊に対する健全性を評価することが、どのような点で「保守的である」のか説明してください。
- (d) 溶接部の継手形状としてどのような形状を想定しているのか、継手形状毎の溶接設計はどのように行うのか説明して下さい。
- (e) 溶接規格には、クラス1支持構造物に対する要求事項を規定していません。クラス1支持構造物の溶接を行う場合、溶接規格によるのか、よる場合、どの規定か説明して下さい。

(3) クラス1支持構造物に対する曲げ座屈評価式の見直し

- (a) ASME規格NFのLinear typeの支持構造物には高サイクル疲労の規定がありますが、設計・建設規格のクラス1支持構造物の規定に疲労に対する規定を盛り込んでいない理由を説明して下さい。
- (b) 設計・建設規格では、「SSB-3121 供用状態A及びBでの許容応力」の「(4)曲げ応力」のa.の式(以下「a式」という。)の適用材質を圧延形鋼及び溶接組立鋼に制限している理由を説明してください。
- (c) 一般に、横座屈の起こりやすさは断面形状や拘束条件に依存します。設計・建設規格で対象とする支持構造物の断面形状や拘束条件を想定した場合にも、a式により保守性を持って評価できるとする技術的根拠を示してください。

(4) クラス2, 3容器の上位クラス規定の適用→なし

(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

(a) 「極限解析による評価」が構造・形状に依存するものではないとする技術的根拠を説明してください。

<質問の背景>

- 単純なはりの図で説明がありましたが、形状によっては塑性ヒンジの生じ方が異なり崩壊荷重が変わります。その場合、形状によっては現行の許容応力評価よりも大きい荷重が許容される可能性がないでしょうか。
- その場合、極限解析の許容荷重が、現行の許容応力が発生した場合に生じる荷重と等価であるという説明と整合しないので、形状の影響による許容荷重の変化について詳しく説明してほしい。

(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

[回答]

- 極限解析は、材料の応力ひずみ曲線を弾完全塑性と仮定して増分解析により構造物が抵抗できる最大の荷重（崩壊荷重）を求める古典的な考え方に基づいており、この方法が適用できる範囲は構造・形状に依存しません。
- 許容応力による評価結果と極限解析による評価結果との差異は、荷重負荷形態、断面形状、構造によって生じます。
単純引張の荷重負荷形態では、断面全体が同時に降伏するため、許容応力による評価結果と極限解析による評価結果は一致します。単純曲げの荷重負荷形態では、梁形状の部材に対して許容応力による評価結果では、支持構造物の場合は断面最外縁部が降伏に達した時を限界とするのに対して、極限解析による評価では、全断面降伏する状態を限界とすることになるため、評価結果に違いを生じます。その比は従来より圧力容器の設計規準で考慮されている形状係数に相当し、例として、梁形状部材の矩形断面では1.5、H型断面のように応力が外縁部に集中する断面では1.0に近い値になります。

(2) クラス1支持構造物の極限解析による評価

- さらに複雑な構造では、全塑性モーメントが複数の断面で生じて崩壊荷重、又は2倍勾配法により保守的近似的に崩壊荷重とみなされる荷重に達するまで許容されます。
- 上述の通り対象としている設計状態は同じですが、極限解析による評価は、許容応力による評価では考慮されていない断面、構造の違いによりその構造が本来有する塑性崩壊に対する抵抗力を、合理的に考慮する方法です。
- 3次元性を含んだ複雑な形状に対する許容応力ベースでの評価を行う場合に必要で、結果にも影響を及ぼす応力評価断面の選定が不要なことなどにより、より確実に塑性崩壊に対する裕度を評価できるという利点もあると考えられます。
- 実用発電用原子炉及びその付属施設の技術基準に関する規則（以下技術基準規則）の第17条第8号に規定されているクラス1支持構造物の構造に関する規定と、設計・建設規格での支持構造物に対する許容応力による評価、及び、極限解析による評価の比較を次葉に示します。

(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

技術基準規則*1) 第17条第8号 (要求のみ抜粋)		設計・建設規格 許容応力による評価	設計・建設規格 極限解析による評価
運転状態 I、II	(ロ) 全体的な変形を弾性域に抑えること	断面の発生応力が、F値*2)を基準として安全率を2/3とした許容値以下	作用荷重が、降伏点をF値として算出した崩壊荷重の2/3以下
運転状態 III	(ハ) 全体的な塑性変形が生じないこと。ただし、構造上の不連続部における局所的な塑性変形はこの限りでない。	断面の発生応力が、F値*2)を基準として安全率を1とした許容値以下	作用荷重が、降伏点をF値として算出した崩壊荷重以下
運転状態 IV	(ニ) 延性破断に至る塑性変形が生じないこと。	断面の発生応力が、F*値*3)を基準に安全率を1とした許容値以下	作用荷重が、降伏点をF*値として算出した崩壊荷重以下



- ・ 許容応力による評価では、断面レベルで弾性範囲内を規定しているため、全般的に技術基準規則の要求より厳しい規定となっている。
- ・ 極限解析による評価は、技術基準規則の要求に対応している。

*1) 技術基準規則: 実用発電用原子炉及びその付属施設の技術基準に関する規則

*2) F値: 設計・建設規格SSB-3121.1に規定する値。降伏点に相当

*3) F*値: 設計・建設規格SSB-3121.3に規定する、許容応力状態DでのF値

(2) クラス1支持構造物の極限解析による評価

(b) クラス1支持構造物の供用状態Dにおける制限値 P_{cr} の技術的妥当性を示してください。

<質問の背景>

- クラス1支持構造物の供用状態Dの制限値は、例えばSUS304の場合、クラス1容器や炉心支持構造と比べて60～50MPa低い値となっています。安全側に設定されているからよいという説明がありましたたが、逆の見方をすると、クラス1容器と炉心支持構造物の許容値が高くなっているともいえます。同じ規格の同じ材料、同じ温度でこのような差があってよいのか疑問があります。

(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

[回答]

- ・ 極限解析は、材料の応力-ひずみ関係を降伏点までを弾性、それ以降を完全塑性と仮定して崩壊荷重を求めます。現行の各供用状態における許容応力の比率との整合を図るために、極限解析に用いる降伏点を支持構造物の許容応力に基づき設定しています。支持構造物の許容応力は日本建築学会の鋼構造設計規準を参考としています。
- ・ 鋼構造設計規準では、設計状態を長期と短期に分けており、長期は常時の比較的長期間継続する状態を想定しており、設計・建設規格の供用状態A及びBに対応しています。短期については少ない頻度で比較的短期間に発生する状態を想定しており、設計・建設規格の供用状態Cにほぼ対応していると考えます。さらに発生する可能性の低い、大変形を許容する供用状態Dに相当する状態の許容応力については鋼構造設計規準では規定がされていませんが、降伏点を1.2倍して短期の許容値を準用しています。容器、炉心支持構造物の許容応力は圧力容器の設計規準での設計応力強さ S_m に基づき定められていることから、上記の許容応力とは違いが生じています。このように想定される部材の形状や荷重が違うことなどから、必ずしも同一にする必然性はないものと考えます。

(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

(c) 弾性解析による耐震解析で得られた応力あるいは荷重を用いて塑性崩壊に対する健全性を評価することが、どのような点で「保守的である」のか説明してください。

<質問の背景>

- 現行の許容応力の範囲内では、実際のシステムの一部の部材で塑性変形が生じても、応力及び荷重は弾性と仮定した場合より下がる方向であり、実際に部材が受ける荷重や応力は耐震解析で求めたものよりも小さくなるとの説明がありました。荷重、弾塑性解析をやって降伏点を超えると荷重が大きくなるのは当然で、一方で、ひずみが大きくなるので、構造健全性に対して「保守的」であるか疑問があります。

(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

[回答]

- ・ 一般的に、地震時において支持構造物の挙動が線形範囲を超える振動回数及び継続時間は限られており弾性線形応答とみなしても大差はないと考えます。
- ・ また、構造物が塑性化すると、履歴減衰により応答が低減されると共に、塑性化により荷重増加が抑制される傾向にありますが、その影響を考慮せず、弾性解析で地震荷重を求めることで、地震荷重を大きく見積もり評価を行います。
- ・ 塑性崩壊はあくまで応力または荷重ベースで評価することになっており、変形が大きくても荷重や応力が部材の崩壊荷重またはそれに対応した応力に達しなければ崩壊しないので、塑性を考慮することで変形が大きくなっても荷重が小さくなる方向であれば評価上問題はありません。

(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

(d) 溶接部の継手形状としてどのような形状を想定しているのか、継手形状毎の溶接設計はどのように行うのか説明して下さい。

<質問の背景>

- ASME Section III のNF(支持構造物)は、突合溶接継手、部分溶け込溶接継手、隅肉溶接継手それぞれに対して溶接の設計条件を規定している。
- 鋼構造設計規準(JASS6も含む)には極限荷重法は規定されていないが、突合溶接継手、部分溶け込溶接継手及び隅肉溶接継手それぞれに対して溶接の設計条件を規定している。
- 設計・建設規格の支持構造物の規定には溶接の設計条件が規定されておらず、「SSB-3340 接合」規定において、「接合部は、接合される部材の荷重を十分に伝えるものでなければならない。」されている。

(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

[回答]

- 実際の溶接部の設計は個別の事項であるため一般的な説明になりますが、支持構造物に使用される鋼材の形状は、板材または型鋼であるため、溶接部の継手形状およびその設計は、ASME Sec.III NFや、日本建築学会の規準類や仕様書類に記載された一般的な溶接継手となります。

(2) クラス1支持構造物の極限解析による評価

- (e) 溶接規格には、クラス1支持構造物に対する要求事項を規定していません。クラス1支持構造物の溶接を行う場合、溶接規格によるのか、よる場合、どの規定か説明して下さい。

<質問の背景>

- 溶接は機器等の全体の強度に影響を与える重要な要素の一つであり、溶接規格は、溶接部の品質を確保する上で重要な規格です。技術基準規則第17条(材料及び構造)第8号には、クラス1支持構造物の構造・強度として、クラス1機器と同様の要求が規定されています。
- 運転状態Ⅰ及び運転状態Ⅱにおいて、全体的な変形を弾性域に抑えること
- 運転状態Ⅲにおいて、全体的な塑性変形が生じないこと
- 運転状態Ⅳにおいて、延性破断に至る塑性変形が生じないこと

(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

[回答]

- ・ 溶接規格に規定されておられませんので、基本的に溶接規格には依りませんが、SSB-3121.1において溶接規格N-1100の規定に準じて溶接部の非破壊試験に合格していることが許容応力を定める条件として規定されています。
- ・ 具体的な溶接は事業者、製造者によりますが、SSB-3340に規定に従い技術基準規則の要求を満足する設計としていると考えます。

(3) クラス1支持構造物に対する曲げ座屈評価式の見直し

- (a) ASME規格NFのLinear typeの支持構造物には高サイクル疲労の規定がありますが、設計・建設規格のクラス1支持構造物の規定に疲労に対する規定を盛り込んでいない理由を説明して下さい。

<質問の背景>

- ASME規格には、Plate及びShell Typeの支持構造物には疲労の規定はありませんが、Linear Type Supportに高サイクルの規定をとり入れています。
- 設計・建設規格のクラス1支持構造物の規定に疲労に対する規定を盛り込んでいない理由として「実機では共振しないように機器は設置されており、振動による影響は軽微」と説明がありました。共振しないように機器を設置するという要求事項は、設計・建設規格にはありません。

(3) クラス 1 支持構造物に対する曲げ座屈評価式の見直し

[回答]

- ・ これまで設計・建設規格の支持構造物規定において、高サイクル疲労に関する要求は規定されておられません。
- ・ 産業界の実績として、実機では共振しないように機器は設置されており、今日まで、高サイクル疲労で支持構造物が損傷し問題となるようなことはありませんでした。
- ・ ASME B&PV Code Sec. III NFでは20,000サイクル以上の活荷重に対する高サイクル疲労評価が規定されていますが、活荷重が具体的にどのようなものであるかについては規定されていません。
- ・ なお、今後、どのような活荷重を考慮しなければならないかが明確になれば、その内容を確認し、検討します。

(3) クラス 1 支持構造物に対する曲げ座屈評価式の見直し



(b) 設計・建設規格では、「SSB-3121 供用状態A及びBでの許容応力」の「(4)曲げ応力」のa.の式(以下「a式」という。)の適用材質を圧延形鋼及び溶接組立鋼に制限している理由を説明してください。

<質問の背景>

- a式は、「圧延形鋼及び溶接組立鋼」を対象としていますが、鋼構造設計規準の式にはこのような制限が設けられていません。

(3) クラス 1 支持構造物に対する曲げ座屈評価式の見直し



[回答]

- ・ 見直し前の規格式は、H型断面を対象とした簡略式であり、参照元の旧鋼構造設計規準において対象材料が「圧延型鋼、プレートガーダー、その他組立材」となっていたため、支持構造物規定ではそれを反映して適用範囲を「圧延型鋼及び溶接組立鋼」に限定していました。見直し後の式は一般的な断面に適用できるものであり、鋼構造設計規準では対象材料の記載は削除されていましたが、現状、支持構造物で本式を適用する範囲は変わっていないため記載をそのまま残しています。
- ・ 基本的に他の材料(鋳鋼、鍛鋼等)についても現行の許容応力度の式は適用可能と考えますので、今後、規格の改定を検討します。

(3) クラス1支持構造物に対する曲げ座屈評価式の見直し



- (c) 一般に、横座屈の起こりやすさは断面形状や拘束条件に依存します。設計・建設規格で対象とする支持構造物の断面形状や拘束条件を想定した場合にも、a式により保守性を持って評価できるとする技術的根拠を示してください。

<質問の背景>

- クラス1支持構造物と鋼構造設計規準では、対象とする断面形状や拘束条件が異なる可能性があります。a式がクラス1支持構造物全般に保守的な評価が可能であると言えるか疑問があります。

(3) クラス 1 支持構造物に対する曲げ座屈評価式の見直し



[回答]

- ・ 式中で各断面に応じた緒元を入力することになっており、拘束条件は座屈長さで考慮されます。また荷重の分布状況については、両極端の場合である一様と逆対称の分布について保守的であることが鋼構造設計規準解説に示されており、幅広い条件について適用可能と考えます。
- ・ また、今までのところ支持構造物で、当該許容応力式の対象となる断面はH型鋼です。仮に、特殊なものがある場合には、本規格が適用できるものではなく、個別に詳細解析による設計等を行う必要があるものと考えます。