

島根原子力発電所 2号炉 津波による損傷の防止

浸水防止設備のうち機器・配管系の
基準地震動 S_s に対する許容限界

令和 2 年 12 月
中国電力株式会社

浸水防止設備のうち機器・配管系に属する隔離弁，ポンプ及び配管系の設計方針

- 島根 2 号炉の浸水防止設備には，機器・配管系に属する隔離弁，ポンプ及び配管系があるが，これらの設備は，先行プラントにおいて浸水防止設備として該当するものはない。
- 浸水防止設備のうち隔離弁，ポンプ及び配管系の基準地震動 S_s に対する許容限界について，耐震重要施設として基準地震動 S_s に対する弾性解析を用いた耐震設計の実績が十分にあることから，従来からの耐震設計と同様の許容限界である許容応力状態 $IV_A S$ の許容限界を適用する。
- 基準地震動 S_s に対する浸水防止機能保持の信頼性を高めるために，従来からの S クラス設備の耐震設計と同様に，弾性設計用地震動 S_d による地震力に対しておおむね弾性状態にとどまる設計とする。
(許容応力状態 $III_A S$ の許容限界を適用)
- 浸水防止設備に該当する隔離弁，ポンプ及び配管系の耐震設計にあたっては，浸水防止機能保持の観点で適切な評価部位を選定する。
- 隔離弁，ポンプ及び配管系を地震後に再使用する場合は，点検，評価等を実施し，その健全性を確認のうえで使用する。

基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイドより抜粋
(浸水防止設備については，津波防護施設と同様に確認することとされているため，津波防護施設の許容限界に係る記載を抜粋する。)

5.1 津波防護施設の設計
【確認内容】
③許容限界
a) 津波防護機能に対する機能保持限界として、当該構造物全体の变形能力（終局耐力時の变形）に対して十分な余裕を有し、津波防護機能を保持すること。（なお、機能損傷に至った場合、補修に、ある程度の期間が必要となることから、地震、津波後の再使用性に着目した許容限界にも留意する必要がある。）

浸水防止設備のうち機器・配管系に属する隔離弁，ポンプ及び配管系

➤ 島根 2 号炉の浸水防止設備のうち機器・配管系に属する隔離弁，ポンプ及び配管系を下表に示す。

浸水防止設備のうち機器・配管系に属する隔離弁，ポンプ及び配管系

系統	設備
タービン補機海水系	ポンプ
	ポンプ出口弁，第二出口弁，放水側逆止弁
	配管系（ポンプ～第二出口弁） 配管系（放水槽～逆止弁）
液体廃棄物処理系 （ランドリドレン系）	逆止弁
	配管系（放水槽～逆止弁）
循環水系	ポンプ
	配管系（取水槽循環水ポンプエリア内）
原子炉補機海水系 高圧炉心スプレイ補機海水系	配管系（放水槽～熱交出口）
除じん系	ポンプ
	配管系（取水槽海水ポンプエリア内）

浸水防止設備に該当する各設備の基準地震動 S s に対する許容限界

- 島根 2 号炉の浸水防止設備に関して、各設備の基準地震動 S s に対する許容限界を以下に示す。
- 浸水防止設備のうち機器・配管系に属する隔離弁、ポンプ及び配管系の許容限界は、これらの設備を構成する鋼製部材の特性や損傷モードを踏まえて設定する。

浸水防止設備に該当する各設備の基準地震動 S s に対する許容限界

区分	設備	基準地震動 S s に対する許容限界	許容限界設定の考え方
建物・構築物	防水壁及び水密扉	構成する部材が弾性域内に収まることを基本とし、浸水防止機能を保持していることを確認する。	鋼製の構造物であるが、大きな変形が生じた場合はその取付部、閉止部等（防水壁の鋼板の繋ぎ目、水密扉のフレームと扉の間隙等）が津波の浸水経路となり得るため、おおむね弾性状態にとどまる設計とし、浸水防止機能を保持する。
建物・構築物	屋外排水路逆止弁	構成する部材が弾性域内に収まることを基本とし、浸水防止機能を保持していることを確認する。	鉄筋コンクリート製の建物・構築物に直接設置され、当該設備に大きな変形が生じて躯体との取付部に間隙が生じた場合は津波の浸水経路となり得るため、おおむね弾性状態にとどまる設計とし、浸水防止機能を保持する。
機器・配管系	床ドレン逆止弁		
機器・配管系	隔離弁、ポンプ及び配管系	塑性ひずみが生じる場合であってもその量が小さなレベルにとどまることを基本とし、浸水防止機能を保持していることを確認する。	延性に優れた鋼製部材で構成されており、延性破断、塑性崩壊、疲労破損等の損傷モードを考慮して応力等を制限する許容限界が規格・基準に定められていることから、これを満足する設計とし、浸水防止機能を保持する。

適用実績及び適用性

- 耐震重要施設の基準地震動 S_s に対する許容限界について、設置許可基準規則の解釈別記－2において以下のとおり規定されており、浸水防止設備のうち隔離弁、ポンプ及び配管系の地震荷重に対する許容限界はこれと同等の内容である。

設置許可基準規則の解釈 別記－2より抜粋

6 第4条第3項に規定する「安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない」ことを満たすために、基準地震動に対する設計基準対象施設の設計に当たっては、以下の方針によること。

一 耐震重要施設のうち、二以外のもの

(中略)

・機器・配管系については、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び事故時に生じるそれぞれの荷重と基準地震動による地震力を組み合わせた荷重条件に対して、その施設に要求される機能を保持すること。なお、上記により求められる荷重により塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が小さなレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有し、その施設に要求される機能に影響を及ぼさないこと。

(以下省略)

- 具体的な許容限界としては、「耐震設計に係る工認審査ガイド」において「安全上適切と認められる規格及び基準等」とされている J E A G 4 6 0 1 に基づき許容応力状態 $IV_A S$ の許容限界を設定する。
J E A G 4 6 0 1 は従来から機器・配管系の耐震設計に広く用いられており、原子炉冷却材圧力バウンダリ、原子炉格納容器バウンダリ等の安全上重要な設備を含めて適用実績がある。
- 内部流体に対する水密性又は気密性を確保するというバウンダリ機能は、浸水防止設備と他の耐震重要施設で同等であり、浸水防止設備のうち隔離弁、ポンプ及び配管系に対して、耐震重要施設のバウンダリ機能保持に適用される許容応力状態 $IV_A S$ の許容限界を適用することは妥当である。

評価部位ごとの許容限界の妥当性

(1) ポンプ、配管及び隔離弁（弁箱部のバウンダリ機能）

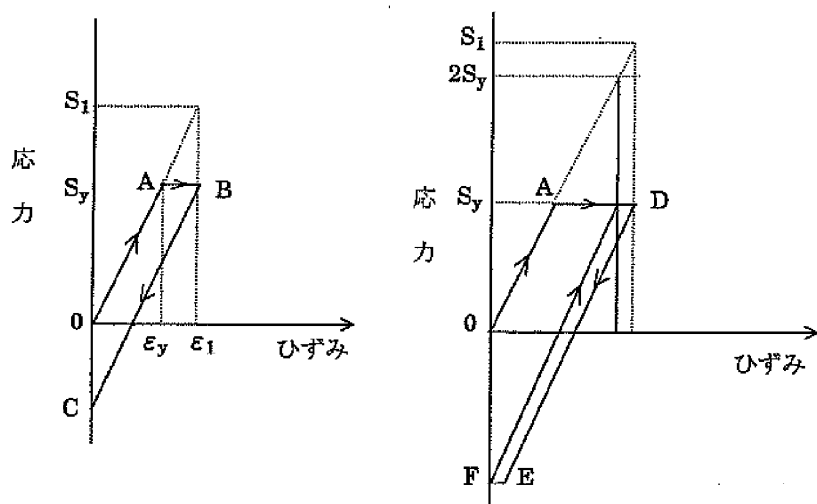
- ポンプ（ディスチャージケーシング他）、配管及び隔離弁（弁箱部のバウンダリ機能）は、バウンダリ機能の喪失に至るおそれのある損傷モードを考慮して応力等を制限するように許容限界が定められている。
- 許容応力状態 $IV_A S$ の許容限界は、構造物が塑性変形した場合であっても、過大な変形等が生じて当該施設の機能に影響を及ぼすことがないこととされている。したがって、基準地震動 S_s に対して許容応力状態 $IV_A S$ の許容限界を満足する設計とすることにより、地震後においてもバウンダリ機能を保持することができる。
- 鋼製材料は延性に優れているため、荷重を加えて塑性ひずみが生じた後に、再度、荷重を負荷した場合であっても、構造物に生じる応力が降伏点を超えない範囲ではおおむね弾性的な挙動となる。これをシェイクダウンという。
- 津波荷重（余震荷重含む。以下同じ。）に対しては構成する材料が弾性にとどまることを許容限界とするため、基準地震動 S_s による地震力が作用した後に津波荷重が作用することを想定したとしても、繰り返し作用する津波荷重に対してシェイクダウンによりおおむね弾性的な挙動となることから、ラチェット変形が進行してバウンダリ機能を喪失することはない。

評価部位ごとの許容限界の妥当性

(参考) シェイクダウンとは

鋼製材料に降伏応力を超過する応力が生じた場合、塑性変形が発生するものの、荷重を除荷して再度負荷すると弾性的な挙動を繰り返す。このような鋼製材料の特性をシェイクダウンという。

シェイクダウンに係る解説を以下に引用して示す。



(a) $S_y < S_1 \leq 2S_y$

(b) $S_1 > 2S_y$

解説図 3112-1 降伏点を越える場合のひずみ履歴

(a)において、降伏点を越えるひずみ $\epsilon_1 (> \epsilon_y)$ を生じる荷重をかけた後 (0→A→B) この荷重を減じていくと B→C に沿って変わる。このとき計算上の弾性応力は $S_1 = E \epsilon_1$ である。

ここでは二次応力について考えているので、荷重のかかり方としては、応力が0から S_1 へ、そして S_1 から0へと繰り返すのではなく、ひずみが0から ϵ_1 、そして ϵ_1 から0へと繰り返す。ひずみが ϵ_1 から0へ戻った時、材料には $S_1 - S_y$ の大きさの残留圧縮応力が発生することになる (C点)。2回目以上の荷重に対しては、応力が引張りになる前にこの残留圧縮応力を取り除くことになり、 $S_1 - S_y$ だけ弾性領域が増大したようになる。もし、 $S_1 = 2S_y$ であるならば、弾性領域は $2S_y$ となるが、それを越えると(b)におけるEFに示すように圧縮側に降伏してしまい、それ以降の全てのサイクルにおいては塑性ひずみを生じる。従って、 $2S_y$ が弾性的挙動にシェイクダウンする二次応力の計算上の最大値となる。

この応力強さの限界を供用状態Aおよび供用状態Bについてのみに限定する理由は、疲労解析が必要であり、その前提条件として、一次応力と二次応力を加えて求めた応力強さの評価を行うためである。

供用状態Cおよび供用状態Dについては、発電設備の寿命中において、発生する回数が非常に少なく、疲労破壊には顕著な影響を与えないため、あらかじめ疲労解析は不要とされており、従って、一次応力と二次応力を加えて求めた応力強さの評価も必要なくなる。

評価部位ごとの許容限界の妥当性

(2) 隔離弁（弁閉止機能）

- 隔離弁（弁閉止機能）については、基準地震動 S_s による応答加速度が加振試験等の既往の研究によって機能維持を確認した加速度（以下「機能確認済加速度」という。）を超えないことを確認する。
- 機能確認済加速度は、ヨーク部等の構造上の弱部においても隔離弁の機能に影響を及ぼす変形が生じないこと、弁座からの漏えいが無いことを含めて機能維持することを加振試験等により確認して設定されたものである。したがって、基準地震動 S_s による応答加速度がこれを満足することにより、地震後においても隔離弁の弁閉止機能を保持することができる。
- 津波荷重に対しては構成する材料が弾性にとどまることを許容限界とするため、基準地震動 S_s による地震力が作用した後に津波荷重が作用することを想定したとしても、繰り返し作用する津波荷重に対してシェイクダウンによりおおむね弾性的な挙動となることから、ラチェット変形が進行して弁閉止機能を喪失することはない。

(3) 支持構造物

- 支持構造物は、支持機能の喪失に至るおそれのある損傷モードを考慮して応力等を制限するように許容限界が定められているため、基準地震動 S_s に対して許容応力状態 $IV_A S$ の許容限界を満足するよう設計することにより、支持機能を保持することができる。
- なお、支持構造物はバウンダリ機能を有するものではなく、その機能は支持機能である。

評価部位ごとの許容限界の妥当性

(4) 立形ポンプ取付部

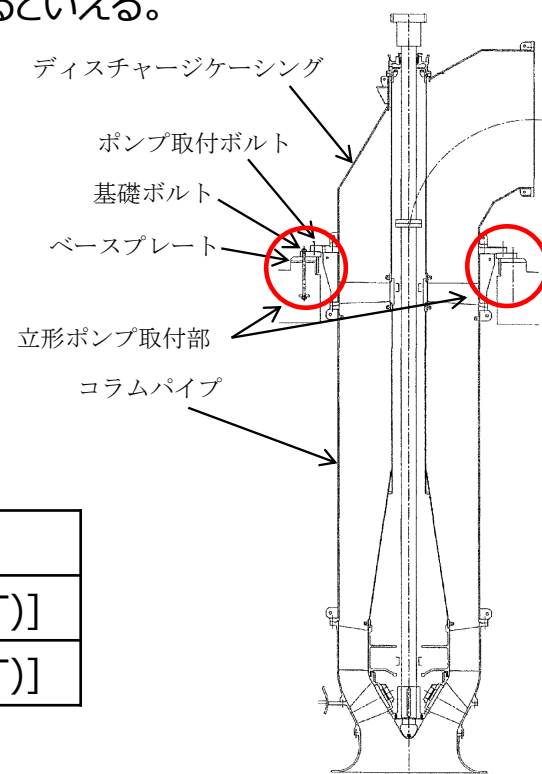
- 立形ポンプ取付部は、その構造的な特徴から、構成部材が塑性域に至り大変形が生じる場合、バウナリ機能を保持できないおそれがある。
- 立形ポンプ取付部のボルト材は、材質がオーステナイト系ステンレス鋼であるが、J E A G 4 6 0 1のその他の支持構造物の規定においてオーステナイト系ステンレス鋼の許容応力は許容応力状態Ⅲ_ASとⅣ_ASで同一の値となる。したがって、許容応力状態Ⅳ_ASの許容応力を満足する設計とすることにより、基礎ボルト及びポンプ取付ボルトはおおむね弾性状態にとどまるといえる。

浸水防止設備に該当する立形ポンプのボルト材

設備	基礎ボルト	ポンプ取付ボルト
循環水ポンプ	SUS304	SUS304
タービン補機海水ポンプ	SUS304	SUS304

支持構造物の許容応力（オーステナイト系ステンレス鋼の場合）

設備区分	許容応力状態	許容応力算出に用いるF値
クラス3支持構造物	Ⅲ _A S	$\min[1.35S_y, 0.7S_u, S_y(RT)]$
その他の支持構造物	Ⅳ _A S	$\min[1.35S_y, 0.7S_u, S_y(RT)]$



立形ポンプの構造（循環水ポンプ）