

柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画審査資料	
資料番号	KK7補足-024-2 改2
提出年月日	2020年5月21日

耐震性に関する説明書に係る補足説明資料

(耐震評価対象の網羅性, 既工認との手法の相違点の整理について)

2020年5月

東京電力ホールディングス株式会社

目 次

1.	柏崎刈羽原子力発電所7号機における耐震評価について	1
1.1	耐震Sクラス施設の評価（耐震Sクラス施設への波及的影響評価及び非常用取水設備の評価を含む）	3
1.1.1	基準地震動 S_s による評価	3
(1)	別表第二を踏まえた対象設備の網羅性について	3
(2)	対象設備の評価部位の網羅性について	3
(3)	対象設備の評価項目（応力分類）の網羅性について	6
(4)	対象設備の耐震重要度分類の区分（主要設備等）を踏まえた整理について	7
(5)	別表第二の対象外である耐震Sクラス施設の耐震安全性評価	7
(6)	地震応答解析が記載されていない設備の扱いについて	7
1.1.2	弾性設計用地震動 S_d による評価	8
1.1.3	静的地震力による評価	9
1.2	耐震Bクラス施設の評価	10
1.3	耐震Cクラス施設の評価	10
1.4	耐震Sクラス設備の間接支持構造物の評価	10
1.5	耐震Bクラス設備の間接支持構造物の評価	10
1.6	耐震Cクラス設備の間接支持構造物の評価	10
2.	既工認との手法の相違点の整理について	11
2.1	既工認との手法の整理一覧	11
2.2	相違点及び適用性の説明	11
2.2.1	機器・配管系	11
2.2.1.1	手法の相違点	11
(1)	原子炉本体基礎への非線形復元力特性について	11
(2)	原子炉建屋クレーンの時刻歴応答解析の適用について	12
(3)	たて軸ポンプの解析モデルの精緻化について	12
(4)	最新知見として得られた減衰定数について	12
(5)	水平方向と鉛直方向の動的地震力の二乗和平方根（SRSS）法による組合せについて	12
(6)	回転体の回転により働くモーメント及び回転体の振動による加速度の考慮について	12
(7)	鉛直方向応答解析モデルの追加について	13
(8)	排除水体積質量減算について	13
2.2.1.2	手法の変更項目に対する柏崎刈羽原子力発電所7号機への適用性	13
(1)	先行プラントの知見反映を基本として変更する手法	13

(2) 鉛直方向地震の動的な取扱いを踏まえて適用する手法	13
(3) より現実的な応答を模擬する観点から採用する手法	14
2.2.2 建物・構築物，屋外重要土木構造物	16
2.2.2.1 建物・構築物	16
(1) 地震応答解析における解析手法	16
(2) 耐震性についての計算書における解析手法	17
2.2.2.2 屋外重要土木構造物	19
(1) 地震応答解析における解析手法	19
(2) 耐震性についての計算書における解析手法	19
2.2.2.3 浸水防護施設	20

添 付 資 料

添付-1 別表第二を踏まえた対象設備の網羅性について

添付-2 対象設備の評価部位の網羅性について

 添付 2-1 原子炉補機冷却水系熱交換器基礎ボルトの評価省略理由について

 添付 2-2 補機類のアンカー定着部の評価について

 添付 2-3 鉛直方向動的地震力の導入による影響検討について

添付-3 対象設備の評価項目（応力分類）の網羅性について

添付 4-1 対象設備の耐震重要度分類の区分（主要設備等）を踏まえた整理について

添付 4-2 既施設（建物・構築物及び土木構造物）の耐震評価フロー並びに評価対象一覧

添付-5 別表第二に記載のない耐震Sクラス施設の耐震安全性評価

添付-6 既工認との手法の整理一覧表

 添付 6-1 原子炉建屋クレーンの時刻歴応答解析の適用について

 添付 6-2 たて軸ポンプの解析モデルの精緻化について

 添付 6-3 最新知見として得られた減衰定数について

 添付 6-4 水平方向と鉛直方向の動的地震力の二乗和平方根（SRSS）法による組合せについて

 添付 6-5 回転体の回転により働くモーメント及び回転体の振動による加速度の考慮について

添付-7 耐震計算書に地震応答解析が記載されていない設備の整理

: 今回提出範囲

1. 柏崎刈羽原子力発電所7号機における耐震評価について

工事計画認可申請書の添付書類V-2「耐震性に関する説明書」（以下「今回工認」という。）においては、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則別表第二に基づく対象施設のうち、耐震Sクラス施設及び、耐震B、Cクラス施設のうち耐震Sクラス施設への波及的影響を及ぼすおそれのある施設について耐震評価結果を示しており、その他の耐震B、Cクラス施設については耐震評価方針を示している。本資料は、評価対象施設及び評価項目・部位の網羅性、代表性を示すとともに柏崎刈羽原子力発電所第7号機における既工認（以下「既工認」という。）との評価手法の相違点を整理したものである。

本資料においては、柏崎刈羽原子力発電所第7号機の建設工認及び改造工認を「既工認」、新規規制基準施行後に認可となった工認（川内1・2号機、伊方3号機、高浜1・2号機、高浜3・4号機、美浜3号機、大飯3・4号機、玄海3・4号機及び東海第二）を「新規規制基準対応工認」と記載する。

上記以外の工認実績については対象のプラントに加え、建設工認か改造工認であるかを個別に記載する。

申請施設の網羅性に関する確認手順を図1に示す。

【評価手順の説明】

①別表第二に照らした施設の選定

- ・柏崎刈羽原子力発電所第7号機の別表第二に該当する施設を抽出した。
- ・別表第二に該当する施設のうち、耐震Sクラス設備であるものについて、評価対象設備として選定し、添付-1に整理した。
- ・別表第二に該当する施設のうち、耐震Sクラス設備への波及的影響がある設備（以下「波及的影響設備」という。）及び非常用取水設備についても、評価対象設備として選定し、添付-1に整理した。

②重要度分類表による整理

- ・①にて選定した設備について、耐震重要度分類表による整理を行った。その結果を添付4-1に示す。
- ・①にて選定した設備に関連する間接支持構造物及び別表第二対象施設ではないが耐震Sクラス設備へ波及的影響がある設備についても、併せて添付4-1に整理した。その整理結果については添付-1にフィードバックし、評価対象設備として整理している。

③評価の実施

- ・選定した設備及びそれに関連する設備について、評価部位を添付-2、応力分類を添付-3に整理し、評価を実施した。
- ・間接支持構造物については、基準地震動 S_s による評価を実施した。
- ・なお、上記に該当しない別表第二の耐震Bクラス及び耐震Cクラス施設（波及的影響設備を除く。）については、今回工認において評価の方針を示した。

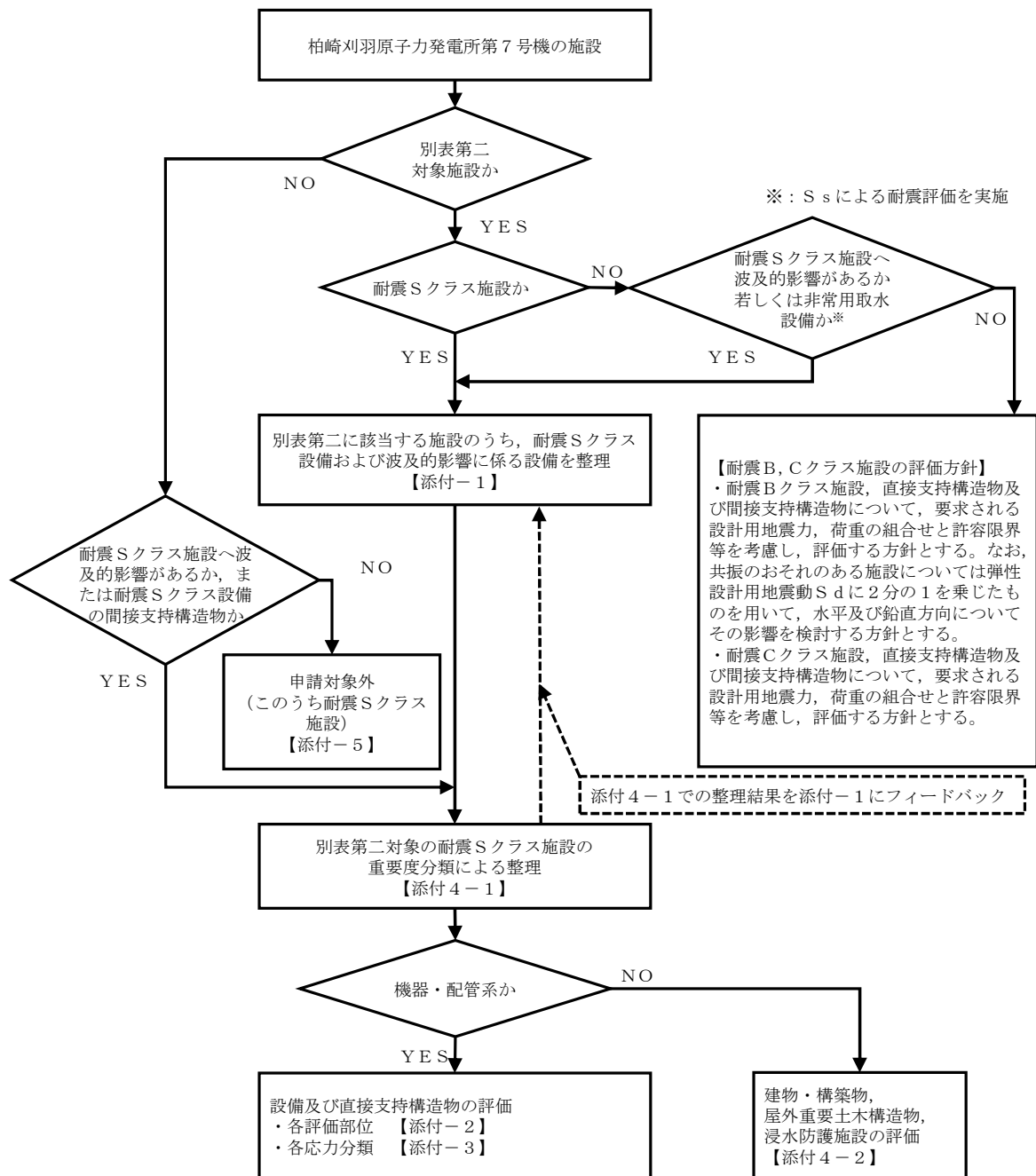


図1 申請施設の網羅性に関する確認手順

1.1 耐震Sクラス施設の評価（耐震Sクラス施設への波及的影響評価及び非常用取水設備の評価を含む）

1.1.1 基準地震動S_sによる評価

評価の対象設備は、別表第二の対象設備の分類に基づき、既工認での評価対象設備をベースに選定しており、それらに対して、基準地震動S_sによる評価を実施する。

さらに、波及的影響設備及び非常用取水設備についても、検討すべき地震動（基準地震動S_s）にて評価を実施する。

評価部位については、既工認における評価部位及び最新プラントである大間1号機の建設工認における評価部位をベースにして選定する。

評価の結果については、機器類は設備毎に評価上最も厳しい部位や設備の代表的な部位を、配管類は系統毎、弁類は型式毎に最も厳しいものを選定し、記載する。建物・構築物の評価結果は、既工認における評価部位を全て記載する。

評価対象施設が実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則別表第二に照らして網羅されていること及びそれらの評価項目が既往の評価等と比べて必要な項目が網羅されていることの確認を以下のとおり行った。

(1) 別表第二を踏まえた対象設備の網羅性について

別表第二を踏まえた対象設備について整理した結果を添付-1に示す。

ここでは、左欄に記載分類として別表第二の記載項目を示し、今回工認記載内容の欄に該当する柏崎刈羽原子力発電所第7号機の耐震Sクラス施設名称及び波及的影響施設の名称を記載した。

「一」とした項目については、別表第二の記載項目に施設が該当しないものなど、備考の欄にその旨を記載した。

以上の整理により、評価対象設備が別表第二に照らして網羅されていることを確認した。

(2) 対象設備の評価部位の網羅性について

a. 機器・配管系

機器・配管系における対象設備の評価部位について、今回評価する評価部位と既工認及び最新プラントである大間1号機の建設工認にて実施していた評価部位とを比較したものを添付-2に示す。

ここでは、既工認における評価部位及び大間1号機の建設工認における評価部位を左欄に記載しており、それぞれ該当するところに「○」を示した。

更にその右欄には、今回工認における評価部位を「○」で示し、評価部位の選定理由についても併せて記載した。

「今回工認における評価」の欄で「一」で示した部位は、下記①から④に記載の理由により評価を省略し、一番右の欄に該当する番号を記載した。

① 構造上他の部位で代表可能

- ・基礎ボルト（原子炉補機冷却水系熱交換器）

耐震強化工事として耐震強化サポート及びアンカボルトを設置しており、荷重は耐震強化サポート及びアンカボルトにて全て受け持つため、アンカボルトの評価で代表できる（添付2-1）。

② 過去の評価実績から他の部位で代表可能

対象設備なし

③ 過去の評価実績から裕度を十分に有する

対象設備なし

④ 該当する部位がない

対象設備なし

評価部位のうち支持構造物のコンクリート定着部について原子炉本体基礎、クエンチャサポート基礎、配管類及び補機類についてそれぞれ評価を実施した内容について説明する。

原子炉本体基礎及びクエンチャサポート基礎に関しては、支持構造物の評価の中でコンクリート定着部の耐震評価を実施する。

また、配管類に関しても埋込金物（ベースプレート及びスタッド）とコンクリート定着部の評価をJ E A G 4 6 0 1に基づき耐震評価を実施している。

補機類については、基礎ボルトの耐震評価を行っており、コンクリート定着部は直接評価していないが、補機類の基礎ボルト及びコンクリート定着部の設計では、基礎ボルトよりもコンクリート定着部の方が高い耐震性を有する設計を基本としている。即ち、ボルトの引張許容値から定めた限界引き抜き力に対して、必要な埋込深さを算定していることから、基礎ボルトに着目した耐震評価を行うことでコンクリート定着部の健全性も確認できる（添付2-2）。

なお、鉛直方向の考慮すべき地震力条件について、既工認は静的地震力と基準地震動（ S_1 及び S_2 ）の最大加速度振幅の1/2から求めた震度を用いていたが、今回工認では動的地震力も考慮するよう変更になっており、鉛直地震力の増大が考えられる。鉛直地震力が1Gを超えた場合に従来評価とは別に新たな評価が必要となる部位がないかを検討した（添付2-3）。

Sクラス設備及び地震時の波及的影響設備について分類化し、各分類について、鉛直地震に対して剛な設備と柔な設備の2つの観点から検討を実施した。

まず、剛な設備については、鉛直地震力（1.2ZPA）が1Gを超える場合、浮き上がりなどの挙動が発生する可能性があるため、各建屋床面の鉛直地震力（1.2ZPA）を整理した結果、1Gを超える床面に設置される設備は主蒸気逃がし安全弁逃がし弁機能用アキュム

レータ，ほう酸水注入系ポンプ，使用済燃料貯蔵ラック等であった。

主蒸気逃がし安全弁逃がし弁機能用アキュムレータ，ほう酸水注入系ポンプ，使用済燃料貯蔵ラック等は，構造上浮上りは発生しないため，それに伴う衝撃等は発生しない。また，自重は下向きに働くことから，地震動についても下向きに考慮する従来の評価が厳しい条件となるため，従来の評価で問題ない。

次に，柔な設備についても，鉛直地震力が1Gを超える場合，浮き上がりなどの挙動について検討が必要になる。柔な設備の場合は，鉛直方向の固有周期に相当する応答加速度が入力となるため，鉛直地震力が1Gを超えることが否定できないが，その場合でも，例えば，脱線防止が必要な燃料取替機には脱線防止ラグがついているなど，鉛直上向きに生じる変位を拘束する部材が備わっており，従来から当該部材を評価している設備については従来どおりの評価が可能である。また，鉛直上向きに生じる変位を拘束する部材が備わっていない原子炉建屋クレーンについては，浮上り挙動を模擬した解析により浮上り量及び接触時の荷重を算出し，発生する応力及び浮上り量が許容値を下回ることを確認している。

その他，従来，十分裕度があり主要な評価部位ではないものや，鉛直地震力の影響を受けにくいものについても抽出し，念のため鉛直地震力の増大に伴う影響がないか個別に検討を実施した。

以上の検討を踏まえ，鉛直地震加速度の増大により，一部の設備については浮上り等の影響が生じる可能性があるが，浮上り等による衝撃荷重や浮上り量を適切に評価していること，または衝撃荷重や浮上り等は生じないことを確認した。

b. 建物・構築物

耐震Sクラスの建物・構築物（非常用取水設備含む）の対象設備について，既工認，最新プラントである大間の建設工認，東海第二の新規制基準対応工認及び今回工認の評価部位の比較を添付4-2に示す。建物・構築物は，既工認，大間の建設工認及び東海第二の新規制基準対応工認にて評価を実施している以下の部位について，すべて評価を行う。

原子炉建屋原子炉区域（二次格納施設）及び中央制御室遮蔽の耐震壁については原子炉建屋及びコントロール建屋の一部であり，構築物全体としての変形能力を層レベルで評価し，鉄筋コンクリート造耐震壁の最大せん断ひずみが許容限界を超えないことを確認する。

原子炉建屋原子炉区域（二次格納施設）の原子炉建屋の屋根スラブ，床スラブ及び屋根トラス，大物搬入建屋のフレーム及び屋根スラブ，中央制御室遮蔽の天井スラブ及び床スラブ，使用済燃料貯蔵プール（キャスクピット含む），主排気筒（内筒），原子炉格納容器（コンクリート部），原子炉建屋機器搬出入口，原子炉建屋エアロック，原子炉建屋基礎スラブ，取水槽閉止板，水密扉並びに補機冷却用海水取水槽については，地震力と地震力以外の荷重を組み合わせ，その結果発生する応力（又はひずみ）が許容限界を超えないことを確認する。

また、建物・構築物の基礎地盤の支持性能について、基準地震動 S_s による接地圧が地盤の極限支持力度に対して妥当な安全余裕を有することを確認する。

c. 屋外重要土木構造物（耐震Cクラス）

既工認、最新プラントである大間1号機の建設工認、東海第二の新規制基準対応工認及び今回工認の評価部位の比較を添付4-2に示す。屋外重要土木構造物の各部材（頂版、底版、側壁、隔壁、基礎版、鋼管杭等）について評価を行い、これらが許容限界以下であることを確認する。

なお、耐震評価断面については、構造物の配置、荷重条件、周辺地盤状況及び土木構造物の形状を考慮し、保守的な断面選定を行う。詳細については、補足説明資料「KK7 補足-027-1 工事計画に係る説明資料（屋外重要土木構造物の耐震性についての計算書）資料1 屋外重要土木構造物の耐震安全性について」に示す。

d. 浸水防護施設

浸水防護施設の対象設備について、既工認、最新プラントである大間の建設工認、東海第二の新規制基準対応工認及び今回工認の評価部位の比較を添付4-2に示す。浸水防護施設は、各設備について機能・構造上の特徴を踏まえたうえで必要となる以下の構造部材を評価対象部位とし、これらに生じる応力度、荷重及び変形量が許容限界以下であることを確認する。

なお、海水貯留堰の耐震評価断面については、構造物の配置、荷重条件、周辺地盤状況及び構造物の形状を考慮し、保守的な断面選定を行う。詳細については、補足説明資料「KK7 補足-028-08 浸水防護施設の耐震性に関する説明書の補足説明資料」に示す。

この結果、既工認等における評価部位を踏まえて評価部位を網羅的に選定していることを確認した。

(3) 対象設備の評価項目（応力分類）の網羅性について

対象設備の評価項目（応力分類）の網羅性について添付-3に示す。

ここでは、今回工認に評価結果を記載している設備について、J E A G 4 6 0 1・補-1984等にて要求されている評価項目を左欄に示しており、その右側に各項目の評価実施有無を整理し、実施するものを「○」で示した。

なお、評価を省略した項目が一部あるが、それらは既工認から以下の理由により省略するものであり、今回工認にて新たに省略した項目ではない。

- ①設備の構造上、当該応力が生じる部位がない。
- ②規格基準上、省略が可能。
- ③他の応力分類にて代表可能。

この結果、J E A G 4 6 0 1・補-1984等にて要求されている評価項目を網羅的に評価していることを確認した。

(4) 対象設備の耐震重要度分類の区分（主要設備等）を踏まえた整理について

対象設備について、耐震重要度分類ごとに主要設備，補助設備，直接支持構造物，間接支持構造物，波及的影響を検討すべき設備に区分して整理した結果を添付 4-1 に示す。

添付 4-1 では、左欄に記載分類として別表第二の記載項目を示し、その右側に別表第二に該当する柏崎刈羽原子力発電所第 7 号機の耐震 S クラス設備を主要設備，補助設備，直接支持構造物に記載するとともに、間接支持構造物及び波及的影響を検討すべき設備についても記載した。

添付 4-1 に記載する建物・構築物，屋外重要土木構造物及び浸水防護施設の評価については、添付 4-2 にその詳細を示し、対象施設ごとに表及びフロー図を整理した。

(5) 別表第二の対象外である耐震 S クラス施設の耐震安全性評価

図 1 の評価手順に従い、別表第二に記載がなく申請対象外と整理された施設のうち、耐震 S クラス設備について、技術基準規則への適合性の観点から、これらの設備についても評価を実施しており、その結果を添付-5 に示す。

(6) 地震応答解析が記載されていない設備の扱いについて

今回工認における耐震計算書においては、基本的に地震応答解析モデル，応力解析モデル，方法，結果を記載する。しかしながら、炉心支持構造物等については、地震応答解析のモデル，結果を記載しない。地震応答解析が記載されていない設備の扱いについて、添付-7 に示す。

1.1.2 弾性設計用地震動 S d による評価

(1) 機器・配管系

機器・配管系の評価対象設備が弾性設計用地震動 S d に対して概ね弾性状態にあることを確認するために、弾性設計用地震動 S d による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力（以下、S d * という。）と、地震力以外の荷重を組み合わせ、その結果発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。

原子炉格納容器の S d * 評価において、J E A G 4 6 0 1 ・ 補 - 1984 では LOCA 時荷重を考慮する記載があることから、LOCA 時最大内圧を包絡した最高使用圧力を組み合わせた評価も実施している。

また、残留熱除去系ストレーナ及び高压炉心注水系ストレーナの S d * 評価においては、「非常用炉心冷却設備又は格納容器熱除去設備に係るろ過装置の性能評価等について（内規）」（平成 20 年 2 月 27 日付け平成 20 ・ 02 ・ 12 原院第 5 号）の規定に基づき、異物荷重を組み合わせた評価を実施する。

(2) 建物・構築物

耐震 S クラスの建物・構築物の対象設備について、既工認、最新プラントである大間の建設工認、東海第二の新規制基準対応工認及び今回工認の評価部位の比較を添付 4-2 に示す。建物・構築物は、既工認、大間の建設工認及び東海第二の新規制基準対応工認にて評価を実施している以下の部位について評価を行う。

原子炉建屋原子炉区域（二次格納施設）の大物搬入建屋の耐震壁及びフレーム、燃料取替床ブローアウトパネル、主蒸気系ブローアウトパネル、中央制御室遮蔽、使用済燃料貯蔵プール（キャスクピット含む）、主排気筒（内筒）、原子炉格納容器（コンクリート部）並びに原子炉建屋基礎スラブについては、弾性設計用地震動 S d による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方と地震力以外の荷重を組み合わせ、その結果発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。

原子炉建屋原子炉区域（二次格納施設）の原子炉建屋については、常時荷重が設計時と同一であること、また、応答に対して支配的となる水平方向の弾性設計用地震動 S d による地震力及び静的地震力がいずれも平成 3 年 8 月 23 日付け 3 資庁第 6675 号にて認可された工事計画の添付資料「IV-2-7-1 原子炉建屋の耐震性についての計算書」の設計用地震力よりも小さいことから、S d 地震時に対する評価は行わない。

中央制御室遮蔽の耐震壁については、常時荷重が設計時と同一である。しかしながら、水平方向の弾性設計用地震動 S d による地震力が、平成 4 年 10 月 13 日付け 4 資庁第 8732 号にて認可された工事計画の添付資料「IV-2-2-1 コントロール建屋の耐震性についての計算書」の設計用地震力よりも大きいことから、S d 地震時に対する評価を行う。

また、建物・構築物の基礎地盤の支持性能について、弾性設計用地震動 S d による接地圧が地盤の短期許容支持力度に対して妥当な安全余裕を有することを確認する。

1.1.3 静的地震力による評価

既設の設備については、建設工認時より「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」（原子力規制委員会）で求められている現在の建築基準法に基づく静的震度（Ci）に対する評価を実施している。

今回工認において、弾性設計用地震動S_dによる耐震評価については、弾性設計用地震動S_dによる地震力と静的地震力（3.6Ci）のいずれか大きい方の地震力を用いて評価を行う。

建物・構築物の静的地震力による評価については、1.1.2項を参照。

1.2 耐震Bクラス施設の評価

耐震Bクラス設備及び直接支持構造物について、要求される設計用地震力、荷重の組合せと許容限界等を考慮し、評価する方針とする。なお、共振のおそれのある設備については弾性設計用地震動 S_d に2分の1を乗じたものを用いて、水平及び鉛直方向について評価する方針とする。

1.3 耐震Cクラス施設の評価

耐震Cクラス設備及び直接支持構造物について、要求される設計用地震力、荷重の組合せと許容限界等を考慮し、評価する方針とする。

1.4 耐震Sクラス設備の間接支持構造物の評価

添付4-1に記載した間接支持構造物となる建物・構築物及び屋外重要土木構築物について、基準地震動 S_s による評価を実施する。原子炉建屋、タービン建屋及びコントロール建屋について、構造物全体としての変形能力を層レベルで評価し、耐震壁の最大せん断ひずみが許容限界を超えないことを確認する。主排気筒（外筒）の鉄塔部及び筒身部について、地震力と地震力以外の荷重を組み合わせ、その結果発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。

基礎の評価として、タービン建屋及びコントロール建屋について、地震力と地震力以外の荷重を組み合わせ、その結果発生する応力が許容限界を超えないこと及び接地圧が許容限界以下であることを確認する。主排気筒の基礎については、地震力と地震力以外の荷重を組み合わせ、その結果発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。屋外重要土木構造物については、基準地震動 S_s による動的地震力に対して、構造部材に生じる応力または変形が許容限界値以下であることを確認する。上記について、添付4-2にその詳細を示し、対象施設ごとに表及びフロー図を整理する。また、建物・構築物の保有水平耐力が必要保有水平耐力に対して妥当な安全余裕を有することを確認する。

1.5 耐震Bクラス設備の間接支持構造物の評価

耐震Bクラス設備の間接支持構造物について、要求される設計用地震力、荷重の組合せと許容限界等を考慮し、評価する方針とする。共振のおそれのある設備については弾性設計用地震動 S_d に2分の1を乗じたものを用いて、水平及び鉛直方向について、その影響を検討する。

1.6 耐震Cクラス設備の間接支持構造物の評価

耐震Cクラス設備の間接支持構造物については、要求される設計用地震力、荷重の組合せと許容限界等を考慮し、評価する方針とする。

鉛直方向動的地震力の導入による影響検討について

1. 概要

耐震評価に用いる鉛直地震力について、従来の静的地震力と基準地震動（ S_1 及び S_2 ）の最大加速度振幅の1/2から求めた震度（0.29G）に加えて、今回工認では水平方向同様に床応答曲線等に基づく動的地震動入力が入力され、鉛直地震力が増大することとなった。そこで、鉛直地震力が増大した場合の従来評価手法への影響を検討した。また、従来、十分裕度があり主要な評価部位ではないものや、鉛直地震力の影響を受けにくいものについても抽出し、念のため、鉛直地震力増大に伴う影響がないか検討を実施した。検討においては、設備の鉛直方向の応答性状及び支持条件等を考慮した。

2. 検討区分

Sクラス設備及び地震時の波及的影響を考慮すべき設備の全設備は、①～⑩の設備である。

- ① 建屋機器連成解析関連設備（燃料集合体，原子炉圧力容器，原子炉圧力容器内構造物，原子炉格納容器，制御棒駆動機構，原子炉圧力容器支持構造物，原子炉圧力容器スタビライザ，制御棒駆動機構ハウジングレストレントビーム，原子炉冷却材再循環ポンプ，真空破壊弁，原子炉本体基礎，原子炉遮蔽壁，ダイヤフラムフロア）
- ② 容器類（原子炉圧力容器，原子炉格納容器を除く）
- ③ 配管類（ダクト含む）
- ④ 横軸ポンプ，非常用ディーゼル発電装置
- ⑤ たて軸ポンプ
- ⑥ 使用済燃料貯蔵ラック，制御棒・破損燃料貯蔵ラック
- ⑦ ECCSストレーナ（残留熱除去系，高圧炉心注水系，原子炉隔離時冷却系）
- ⑧ 空調設備
- ⑨ 電気・計装品
- ⑩ クレーン類

これらの設備について、鉛直方向に対する応答特性の観点から、鉛直方向に剛な設備と柔な設備の2つに分類し、検討を実施した。

鉛直方向に剛な設備（固有周期 ≤ 0.05 秒）

- ② 容器類（原子炉圧力容器，原子炉格納容器を除く）
- ④ 横軸ポンプ，非常用ディーゼル発電機
- ⑤ たて軸ポンプ
- ⑥ 使用済燃料貯蔵ラック，制御棒・破損燃料貯蔵ラック
- ⑦ ECCS ストレーナ（残留熱除去系，高圧炉心注水系，原子炉隔離時冷却系）

- ⑧ 空調設備
- ⑨ 電気・計装品

鉛直方向に柔な設備（固有周期>0.05秒）及び建屋機器連成解析関連設備

- ① 建屋機器連成解析関連設備（燃料集合体，原子炉压力容器，原子炉压力容器内構造物，原子炉格納容器，制御棒駆動機構，原子炉压力容器支持構造物，原子炉压力容器スタビライザ，制御棒駆動機構ハウジングレストレントビーム，原子炉冷却材再循環ポンプ，真空破壊装置，原子炉本体基礎，原子炉遮蔽壁，ダイヤフラムフロア）
- ③ 配管類（ダクト含む）
- ⑩ クレーン類

さらには，従来，十分余裕があり主要な評価部位でないものや，鉛直地震力の影響を受けないものについても抽出し，念のため，鉛直地震力増大に伴う影響がないか検討を実施した。具体的項目として以下を示す。

- 制御棒挿入性
- たて軸ポンプモータ スラスト軸受（軸受健全性）
- クレーン類吊部（吊荷の落下防止）
- スロッシング評価

3. 各区分の影響検討

3.1 鉛直方向に剛な設備の鉛直動的地震力評価

鉛直方向に剛な設備の評価では，鉛直地震力が1Gを超える場合に設備が浮上って落下した場合の衝撃荷重の検討等が必要となる可能性があるため，鉛直地震力の大きさを確認する。

鉛直方向に剛な設備は，鉛直方向の最大応答加速度（ZPA）の1.2倍（1.2ZPA）を入力加速度として用いている。

まず，鉛直方向の固有周期が0.05秒以下となる設備のうち鉛直地震力のみで1Gを超える設備について整理した。鉛直地震力の大きさを確認するため，各建屋の基準地震動 S_s に対する各床面の最大応答加速度の1.2倍（1.2ZPA）を整理し，1.2ZPAが1Gを上回る設備を抽出した（表1参照）。

上記の設備については，基礎ボルト等で鉛直方向に固定されており，構造上浮上りは発生しないため，それに伴う衝撃等は発生しない。また，転倒モーメントや鉛直方向荷重算出において，各評価部位が厳しく評価されるように，鉛直地震動の作用する方向を設定していることから，従来評価と同様の評価手法に基づく評価が可能である。

次に，鉛直方向の固有周期が0.05秒以下となる設備のうち鉛直地震力では1Gを超えない設備については，鉛直地震力が1Gを超えない場合でも，水平地震力によるモーメントとの発生との組合せにより，設備の部分的な浮上りが生じる可能性もあるが，鉛直上向

きに生じる変位を拘束する構造となっており、従来から当該部材は水平及び鉛直地震力を適切に組み合わせて評価している。

以上より、1.2ZPAが1Gを超えない床面に設置されている設備については、従来の鉛直静的震度よりも鉛直地震力の絶対値は増加することになるが、従来評価と同様の評価手法及び評価対象部位等に基づく評価が可能である。

よって、鉛直方向の固有周期が0.05秒以下となる設備②、④、⑤、⑥、⑦、⑧、⑨、については、従来評価にて問題ないことを確認した。

3.2 鉛直方向に柔な設備の鉛直動的地震力評価及び建屋機器連成解析関連設備

鉛直方向に剛な設備と同様に、鉛直地震力が1Gを超える場合には浮上り、落下した場合の衝撃荷重の検討等が必要となる可能性がある。

鉛直方向に柔な設備の評価には、鉛直方向の固有周期に相当する震度が入力となることから、鉛直地震力が1Gを超えることが否定できない。

ただし、鉛直地震力が1Gを超える場合であっても、鉛直上向きに生じる変位を拘束する部材が備わっており、従来評価から当該部材を評価している設備については、鉛直方向加速度を適切に考慮して従来評価と同様の評価手法及び評価対象部位等に基づく評価が可能である。①、③、⑩設備の具体的な検討結果については、以下のとおりである。

- ① 建屋機器連成解析設備（燃料集合体，原子炉压力容器，原子炉压力容器内構造物，原子炉格納容器，制御棒駆動機構，原子炉压力容器支持構造物，原子炉压力容器スタビライザ，制御棒駆動機構ハウジングレストレイントビーム，原子炉冷却材再循環ポンプ，真空破壊装置，原子炉本体基礎，原子炉遮蔽壁，下部ドライウェルアクセストンネル，ダイヤフラムフロア）

燃料集合体を除く原子炉压力容器等の建屋機器連成解析設備は、基礎ボルト、ブラケット等の支持構造物を介して原子炉本体基礎等により鉛直方向に支持される構造であり、鉛直地震力によって衝撃荷重を生じるような部位はない。

また、燃料集合体は、鉛直方向に固定されていないため、上下方向の加速度レベルによっては浮上りが生じる可能性があるが、炉心支持板位置（表1の気水分離器，スタンドパイプ及び炉心シュラウドT.M.S.L. 10.161）の鉛直1.0ZPAは0.88と1G以下であり、浮上りは生じない。

鉛直方向の入力地震動が静的から動的に変わることによって鉛直地震力は大きくなるが、応力評価方法の観点で問題となるものではない。

③ 配管類

配管類は3次元的に配置されているため、地震時には3次元的な挙動を示すが、応答評価上、このような3次元的な挙動を踏まえたモデル化・応答解析を実施しており、鉛直方向の入力地震動が静的から動的に変わることによる影響はない。

また、鉛直方向の入力地震動が静的から動的に変わることによって配管に作用する水平

方向と鉛直方向の地震力の合計は大きくなるが、単に地震力の絶対値が増えるだけであり、配管本体の応力評価方法の観点で問題となるものではない。

⑪ クレーン類

クレーン類は、鉛直方向の入力地震動が静的から動的に変わり、鉛直地震力が1Gを超えた場合、クレーン本体がレールから浮上り、脱線する可能性がある。

なお、水平方向地震動によってもこのような脱線が生じるおそれがあることから、鉛直地震力を静的としていた既往の設計・評価においては、脱線防止ラグによりクレーンの脱線防止を図っており、クレーンの耐震評価部位として脱線防止ラグを選定している。

非線形時刻歴応答解析を適用するクレーン類（原子炉建屋クレーン）については、このような浮上り挙動を模擬した解析により浮上り量及び接触時の荷重を算出し、発生する応力及び浮上り量が許容値を下回ることを確認している。

スペクトルモーダル解析を適用するクレーン類（燃料取替機）については、鉛直地震力により脱線防止ラグとレールが接触し、脱線防止ラグへ地震力が直接作用することを前提とした評価を行い、脱線防止ラグに発生する応力が許容値を下回ることを確認している。

以上より、鉛直方向に柔な設備についても、従来の鉛直静的震度よりも鉛直地震力の絶対値は増加することにはなるが、構造上浮上りが発生しない設備については、従来評価と同様の評価手法及び評価対象部位に基づく評価が可能である。また、浮上り等の影響が生じる可能性がある設備については、浮上り等による衝撃荷重を適切に考慮して評価している。

3.3 鉛直地震力増大に伴い影響検討を実施する設備等

前項までに記載の検討に加えて、従来、十分余裕があり主要な評価部位ではないものや、鉛直地震力の影響を受けにくいものについても抽出し、念のため、鉛直地震力増大に伴う影響がないか検討を実施した。具体的項目及び検討結果については以下のとおりである。

○制御棒挿入性

地震スクラム等による制御棒挿入時に鉛直下向きの地震力が加わることにより、制御棒挿入時間の遅れが生じる可能性がある。本検討については、「KK7 補足-028 機電分耐震計算書の補足について 制御棒の挿入評価について」に示すとおり、鉛直地震力が増大したことによる制御棒の挿入性への影響は小さく、問題がないことを確認した。

○クレーン類吊部

鉛直地震力の増大により、吊荷の浮上りによる吊部（ワイヤロープ、フック、ブレー

キ)への影響が懸念される。吊荷落下防止の観点から、鉛直動的地震力の影響評価を実施し、問題ないことを確認した。

○たて軸ポンプモータ軸受

たて軸ポンプモータのスラスト軸受については、ポンプ主軸に加わる鉛直地震力の増大により、スラスト軸受に作用する荷重が増加し、ポンプの軸固着が生じる可能性がある。本検討については、下記の通り鉛直地震力が増大したことによる評価上の影響がないことを確認した。

- ・ECCSポンプ及び原子炉補機冷却海水系ポンプのモータスラスト軸受

残留熱除去系ポンプ、高圧炉心注水系ポンプ、原子炉補機冷却海水系ポンプについては、表1の設置位置（原子炉建屋T.M.S.L.-8.200及びタービン建屋T.M.S.L.4900）の鉛直1.0ZPAが0.84G及び0.75Gであり、1Gを超えないこと、スラスト荷重は下向きに働いていることから、原動機のスラスト荷重を受ける軸受部に発生する荷重の向きは常に下向きとなっている。また、原動機の評価用加速度は機能確認済加速度以下となり、地震時の機能維持を確認しているため問題ないことを確認した。

- ・原子炉冷却材再循環ポンプのモータスラスト軸受

原子炉冷却材再循環ポンプについて、「KK7 補足-028-10-7 機電分耐震計算書の補足について 再循環系ポンプの軸固着に対する評価について」に示すとおり、地震の影響で軸固着が生じることはないことを確認した。

○スロッシング荷重

使用済燃料貯蔵プールにおけるスロッシングについては、鉛直方向の動的地震力が加わることで溢水量評価への影響がある可能性があるが、流動解析に基づく溢水量の評価では、水平方向と鉛直方向の地震力を同時入力して溢水量を算出している。

4. 検討結果まとめ

鉛直動的地震力の導入による設備評価への影響について検討した結果を表2に示す。一部の設備については浮上り等の影響が生じる可能性があるが、浮上り等による衝撃荷重を適切に考慮して評価していること、または、衝撃荷重や浮上り等は生じないことを確認することにより、鉛直動的地震力の導入による設備への影響を考慮した評価を実施していることを確認した。

表1 各建屋の鉛直方向最大応答加速度 (1.2ZPA) 及び設置設備の整理表(1/2)

建屋名称	質点番号	T. M. S. L. (m)	1.0ZPA*	1.2ZPA*	検討対象床	評価設備(鉛直方向に剛な設備)	
燃料集合体 及び 制御棒案内管	1	14.433	0.90	—	×	—	
	2	13.721	0.90	—	×	—	
	3	13.009	0.90	—	×	—	
	4	12.297	0.90	—	×	—	
	5	11.585	0.89	—	×	—	
	6	10.873	0.89	—	×	—	
	7	10.161	0.89	—	×	—	
制御棒駆動機構 ハウジング (内側)	16	5.066	0.88	1.05	○	(該当設備なし)	
	20	1.655	0.88	1.06	○		
	21	0.934	0.88	1.06	○		
	22	0.184	0.88	1.06	○		
制御棒駆動機構 ハウジング (外側)	23	5.817	0.88	1.05	○	(該当設備なし)	
	28	1.655	0.88	1.05	○		
	29	0.934	0.88	1.05	○		
	30	0.184	0.88	1.05	○		
気水分離器, スタンドパイプ 及び 炉心シュラウド	31	19.472	0.90	1.08	○	(該当設備なし)	
	32	18.716	0.90	1.08	○		
	33	17.179	0.90	1.08	○		
	34	16.506	0.90	1.08	○		
	35	15.641	0.89	1.07	○		
	36	15.266	0.89	1.06	○		
	37	14.433	0.89	1.06	○		
	38	13.721	0.89	1.06	○		
	39	13.009	0.89	1.06	○		
	40	12.297	0.88	1.06	○		
	41	11.585	0.88	1.06	○		
	42	10.873	0.88	1.06	○		
	43	10.161	0.88	1.06	○		
	44	9.645	0.88	1.06	○		
	45	9.402	0.88	1.06	○		
原子炉冷却材 再循環ポンプ	51	6.253	0.88	1.05	○	(該当設備なし)	
	原子炉圧力容器 スカート	72	9.402	0.87	1.04	○	(該当設備なし)
		82	8.200	0.87	1.04	○	
	原子炉圧力容器	55	26.013	0.88	1.05	○	(該当設備なし)
		56	23.553	0.88	1.05	○	
		57	22.163	0.88	1.05	○	
		58	20.494	0.88	1.05	○	
		59	18.716	0.88	1.05	○	
		61	16.506	0.88	1.05	○	
		63	15.266	0.88	1.05	○	
67		12.297	0.87	1.05	○		
72		9.402	0.87	1.04	○		
75		6.795	0.87	1.05	○		
51		6.253	0.88	1.05	○		
50		5.783	0.88	1.05	○		
23		5.817	0.88	1.05	○		
16		5.066	0.88	1.05	○		
原子炉遮蔽壁 及び 原子炉本体基礎		76	21.200	0.88	1.06	○	
	77	18.440	0.88	1.06	○	・主蒸気逃がし安全弁逃がし弁機能用アキュムレータ ・主蒸気逃がし安全弁自動減圧機能用アキュムレータ	
	78	17.020	0.88	1.06	○		
	79	15.600	0.88	1.05	○	(該当設備なし)	
	80	13.950	0.87	1.05	○		
	81	12.300	0.87	1.04	○		
	82	8.200	0.87	1.04	○		
	83	7.000	0.87	1.04	○	・ベント管	
	84	4.500	0.86	1.03	○		
	85	3.500	0.86	1.03	○	(該当設備なし)	
	86	1.700	0.85	1.02	○		
87	-2.100	0.84	1.01	○			
88	-4.700	0.84	1.00	×			
89	-8.200	0.84	1.00	×	—		

注記*: V-2-1-7「設計用床応答曲線の作成方針」に基づき設定した設計用最大応答加速度 I の値を記載。

表1 各建屋の鉛直方向最大応答加速度 (1.2ZPA) 及び設置設備の整理表(2/2)

建屋名称	質点番号	T. M. S. L. (m)	1.0ZPA*	1.2ZPA*	検討対象床	評価設備(鉛直方向に剛な設備)
原子炉建屋	90	49.700	1.02	1.23	○	(該当設備なし)
	91	38.200	0.99	1.18	○	・燃料取替エリア排気放射線モニタ
	92	31.700	0.96	1.15	○	・原子炉補機冷却水系サージタンク ・格納容器内圧力 ・格納容器内酸素濃度 ・格納容器内水素濃度 ・原子炉区域換気空調系排気放射線モニタ
	93	23.500	0.93	1.12	○	・制御棒・破損燃料貯蔵ラック ・使用済燃料貯蔵ラック ・主蒸気管トンネル温度 ・ほう酸水注入系ポンプ ・ほう酸水注入系ポンプ用原動機 ・ほう酸水注入系貯蔵タンク ・地震加速度 ・主蒸気管放射線モニタ ・非常用ガス処理系排風機 ・非常用ガス処理系排風機用原動機 ・非常用ガス処理系乾燥装置 ・非常用ガス処理系フィルタ装置 ・空気圧縮機 ・空気圧縮機用電動機 ・燃料デイツタンク ・非常用ディーゼル発電設備制御盤
	94	18.100	0.90	1.08	○	・格納容器内雰囲気放射線モニタ (D/W) ・格納容器内雰囲気放射線モニタ (S/C)
	95	12.300	0.87	1.05	○	・可燃性ガス濃度制御系再結合装置ブロワ ・可燃性ガス濃度制御系再結合装置ブロワ用電動機 ・可燃性ガス濃度制御系再結合装置 ・ディーゼル機関 ・空気だめ ・発電機
	96	4.800	0.84	1.00	×	—
	97	-1.700	0.83	1.00	×	—
	98	-8.200	0.84	1.00	×	—
	99	-13.700	0.84	1.00	×	—
タービン建屋	1	44.300	1.91	2.30	○	(該当設備なし)
	2	38.600	1.62	1.94	○	
	3	30.900	0.85	1.02	○	
	4	25.800	0.84	1.01	○	
	5	20.400	0.83	0.99	×	—
	6	12.300	0.79	0.95	×	—
	7	4.900	0.75	0.90	×	—
	8	-1.100	0.74	0.89	×	—
	9	-5.100	0.75	0.89	×	—
コントロール建屋	1	24.100	0.96	1.15	○	・中央制御室天井照明
	2	17.300	0.93	1.12	○	・中央制御室送風機 ・中央制御室送風機用電動機 ・中央制御室排風機 ・中央制御室排風機用電動機 ・中央制御室換気空調系ダクト ・中央制御室換気空調系ダクトサポート
	3	12.300	0.91	1.09	○	・中央制御室再循環送風機 ・中央制御室再循環送風機用電動機 ・中央制御室再循環フィルタ装置 ・中央制御室換気空調系ダクト ・中央制御室換気空調系ダクトサポート
	4	6.500	0.87	1.05	○	・バイタル交流電源装置 ・直流125V蓄電池
	5	1.000	0.84	1.01	○	(該当設備なし)
	6	-2.700	0.81	0.98	×	—
軽油タンク基礎	2125 3155 4302 2904 4038 5130 6158 7291	12.000	0.85	1.02	○	・燃料移送ポンプ ・燃料移送ポンプ用電動機 ・軽油タンク
燃料移送系配管ダクト(原子炉建屋側)	2988 3289 3596 3611 3298 3003 1451 2719 4040 4045 2724 1456	8.000~10.750	0.68	0.81	×	—
燃料移送系配管ダクト(軽油タンク側)	2961 3226 3496 3479 3218 2945 4227 5484 6648 6653 5489 4232	7.900~10.650	0.78	0.94	×	—

注記*: V-2-1-7「設計用床応答曲線の作成方針」に基づき設定した設計用最大応答加速度1の値を記載。

水平方向と鉛直方向の動的地震力の二乗和平方根（SRSS）法による組合せについて

1. 概要

今回工認の耐震設計では、これまで静的な取扱いのみであった鉛直方向の地震力について、動的な地震力を考慮することとなるとともに、水平方向及び鉛直方向の動的な地震力による荷重を適切に組み合わせることが必要となる。

従来の水平方向及び鉛直方向の荷重の組み合わせは、静的な地震力による鉛直方向の荷重には地震継続時間や最大加速度の生起時刻のような時間の概念がなかったことから、水平方向及び鉛直方向の地震力による荷重の最大値同士の絶対値の和としていた。（以下「絶対値和法」という。）

一方、水平方向及び鉛直方向の両者がともに動的な地震力である場合、両者の最大加速度の生起時刻に差があるという実挙動を踏まえると、従来と同じように絶対値和法を用いるのではなく、時間的な概念を取り入れた荷重の組み合わせ法を検討する必要がある。

本資料では、水平方向及び鉛直方向の動的な地震力の組み合わせに関する既往研究⁽¹⁾をもとに、二乗和平方根法（以下「SRSS法（Square Root of the Sum of the Squares）」という。）による組み合わせ法の妥当性について説明するものである。

なお、SRSS法による組み合わせは、大間1号機の建設工認において適用実績のある手法である。

2. 柏崎刈羽原子力発電所7号機で用いる荷重の組み合わせ法

柏崎刈羽原子力発電所7号機では、静的な地震力による荷重の組合せ（静的な地震力と動的な地震力を組み合わせる場合も含む。）については、従来どおり絶対値和法を用いて評価を行う。また、動的な地震力同士による荷重の組合せについては、既往知見に基づき、SRSS法を用いて評価を行うことも可能である。

3. 水平方向及び鉛直方向の地震力による荷重の組み合わせ法に関する研究の成果

3.1 荷重の組み合わせ法の概要

絶対値和法と SRSS 法の概要を以下に示す。

(1) 絶対値和法

本手法は、水平方向及び鉛直方向の地震力による最大荷重（又は応力）※を絶対値和で組み合わせる方法である

この方法は、水平方向及び鉛直方向の地震力による最大荷重が同時刻に同位相で生じることを仮定しており、組合せ法の中で最も大きな荷重を与える。本手法は、主に地震力について時間の概念がない静的地震力による荷重の組合せに使用する。

$$\text{組合せ荷重（又は応力）} = |M_H|_{\max} + |M_V|_{\max}$$

M_H ：水平方向地震力による荷重（又は応力）

M_V ：鉛直方向地震力による荷重（又は応力）

(2) SRSS 法

本手法は、水平方向及び鉛直方向の地震力による最大荷重（又は応力）※を二乗和平方根で組み合わせる方法である。

この方法は、水平方向及び鉛直方向の地震力による最大荷重の生起時刻に時間的なずれがあるという実挙動を考慮しており、水平方向及び鉛直方向地震動の同時入力による時刻歴応答解析結果との比較において平均的な荷重を与える。本手法は、動的な地震力による荷重同士の組合せに使用する。

$$\text{組合せ荷重（又は応力）} = \sqrt{(M_H)_{\max}^2 + (M_V)_{\max}^2}$$

M_H ：水平方向地震力による荷重（又は応力）

M_V ：鉛直方向地震力による荷重（又は応力）

※：荷重の段階で組み合わせる場合と、荷重により発生した応力の段階で組み合わせる場合がある。（次頁の「補足」参照）

応力で組み合わせる場合は、妥当性を確認した上で適用する。

(補足) 荷重または応力による組み合わせについて

水平方向及び鉛直方向の動的地震力を SRSS 法で組み合わせる際、評価対象の機器の形状や部位に応じて荷重の段階で組み合わせる場合と、荷重により発生した応力の段階で組み合わせる場合がある。ここでは、その使い分けについて具体例を用いて説明する。

A. 荷重の段階で組み合わせを行う場合

横形ポンプの基礎ボルトの引張応力の評価を例とすると、以下の式 1、式 2 で示すように水平方向地震力と鉛直方向地震力の組み合わせは、荷重である水平方向地震力によるモーメント ($m \cdot g \cdot C_H \cdot h$) と鉛直方向地震力によるモーメント ($m \cdot g \cdot C_V \cdot \lambda_1$) を組み合わせる (図 1)。

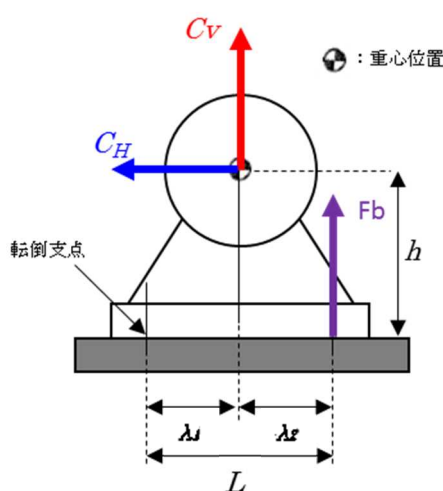
本手法については、非同時性を考慮する地震荷重についてのみ SRSS 法で組み合わせしており、実績のある妥当な手法である。

【絶対和】

$$F_b = \frac{1}{L} \{ mg(C_H h + C_V \lambda_1) + mgC_p(h + \lambda_1) + M_p - mg\lambda_1 \} \quad \dots (式 1)$$

【SRSS 法】

$$F_b = \frac{1}{L} \{ mg\sqrt{(C_H h)^2 + (C_V \lambda_1)^2} + mgC_p(h + \lambda_1) + M_p - mg\lambda_1 \} \quad \dots (式 2)$$



F_b	: 基礎ボルトに生じる引張力
C_H	: 水平方向震度
C_V	: 鉛直方向震度
C_p	: ポンプ振動による震度
g	: 重力加速度
h	: 据付面から重心までの距離
λ_1, λ_2	: 重心と基礎ボルト間の水平方向距離 ($\lambda_1 \leq \lambda_2$)
L	: 支点としている基礎ボルトより最大引張応力がかかる基礎ボルトまでの距離
m	: 機器の運転時質量
M_p	: ポンプ回転により働くモーメント

図 1 横形ポンプに作用する震度

B. 応力による組み合わせを行う場合

横置円筒容器の脚の組合せ応力の評価を例とすると、脚には、水平方向地震力による曲げモーメント $M_{\lambda 1}$ 及び鉛直方向荷重 P_{λ} 、鉛直方向地震力による鉛直荷重 $(R_1+m_{s1}g) C_v$ が作用する。(図 2)

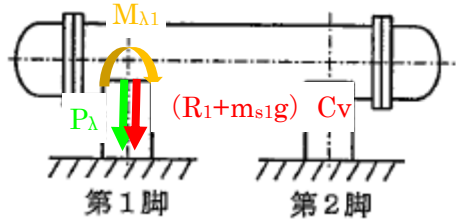


図 2 横置円筒容器の脚部に作用する荷重

水平地震力による圧縮応力 σ_{s2} 及び鉛直方向地震力による圧縮応力 σ_{s4} は式 3、式 4 で表され、脚の組合せ応力の評価の際はこれらの応力を SRSS 法により組み合わせる式 B-4 を用いて評価を行う。

$$\sigma_{s2} = \frac{M_{\lambda 1}}{Z_{sy}} + \frac{P_{\lambda}}{A_s} \quad \dots \text{ (式 3)}$$

σ_{s2} : 水平方向地震力により脚に生じる曲げ及び
圧縮応力の和
 $M_{\lambda 1}$: 水平方向地震力により脚底面に作用する曲げモーメント
 P_{λ} : 水平方向地震力により脚の脚つけ根部に作用する
鉛直方向荷重
 Z_{sy} : 脚の断面係数
 A_s : 脚の断面積

$$\sigma_{s4} = \frac{R_1 + m_{s1}g}{A_s} C_v \quad \dots \text{ (式 4)}$$

σ_{s4} : 鉛直方向地震力により脚に生じる圧縮応力
 R_1 : 脚が受ける自重による荷重
 m_{s1} : 脚の質量
 g : 重力加速度
 C_v : 鉛直方向震度

【絶対和】

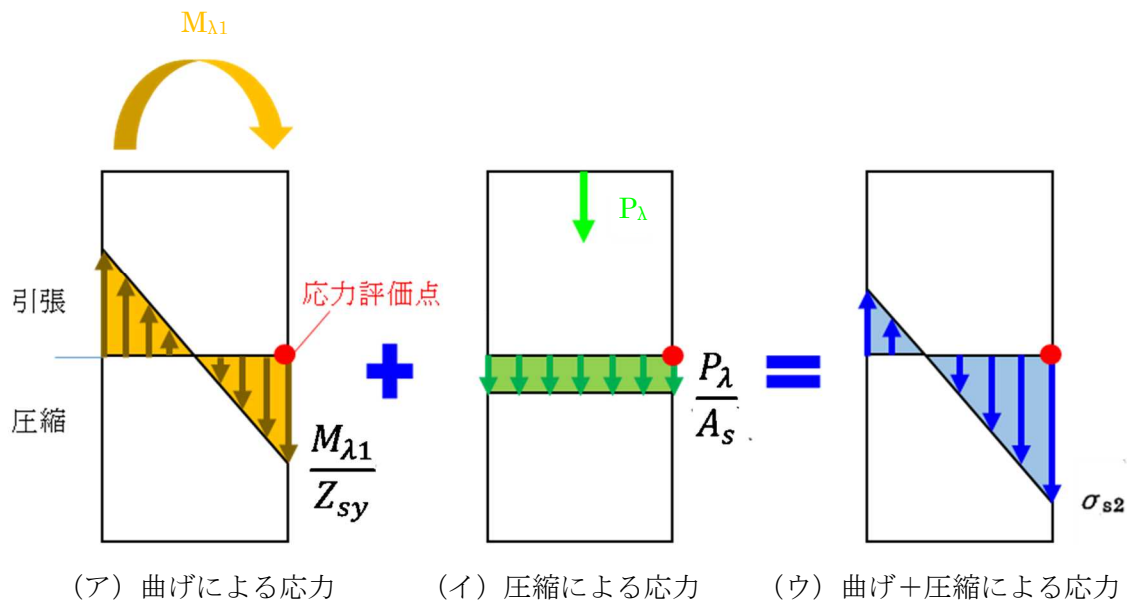
$$\sigma_{s\lambda} = \sqrt{(\sigma_{s1} + \sigma_{s2} + \sigma_{s4})^2 + 3\tau_{s2}^2} \quad \dots \text{ (式 5)}$$

【SRSS 法】

$$\sigma_{s\lambda} = \sqrt{(\sigma_{s1} + \sqrt{\sigma_{s2}^2 + \sigma_{s4}^2})^2 + 3\tau_{s2}^2} \quad \dots \text{ (式 6)}$$

$\sigma_{s\lambda}$: 水平方向地震力及び鉛直方向地震力が作用した
場合の脚の組合せ応力
 σ_{s1} : 運転時質量により脚に生じる圧縮応力
 τ_{s2} : 水平方向地震力により脚に生じるせん断応力

ここで、水平地震力による圧縮応力 σ_{s2} 及び鉛直方向地震力による圧縮応力 σ_{s4} は図 3 に示すように、ともに脚の外表面の圧縮応力を表すものであり、脚の同一評価点、同一応力成分であることから、これらの組み合わせを SRSS 法により行うことは妥当である。



(a) 水平地震力による応力評価点の圧縮応力

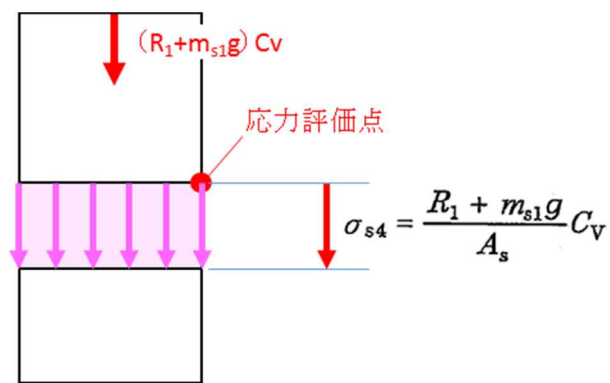


図 4 横置円筒容器の脚部に作用する地震力による応力概念図

3.2 SRSS 法の妥当性

既往研究では、実機配管系に対して、水平及び鉛直地震動による最大荷重を SRSS 法により組み合わせた場合と水平及び鉛直地震動の同時入力による時刻歴応答解析法により組み合わせた場合との比較検討を以下の通り行っている。

(1) 解析対象配管系モデル

解析対象とした配管は、代表プラントにおける格納容器内の配管系で給水系 (FDW) × 2 本、残留熱除去系 (RHR) 及び主蒸気系 (MS) の計 4 本の配管モデルである。当該配管系は、耐震 S クラスに分類されるものである。

(2) 入力地震動

解析に用いた入力地震動は、地震動の違いによる影響を確認するため、兵庫県南部地震 (松村組観測波)、人工波及びエルセントロ波の 3 波を用いた。機器・配管系への入力地震動となる原子炉建屋中間階の応答波の例を図 5～図 7 に示す。

(3) 解析結果

解析結果を図 8～図 11 に示す。図 8～図 11 は、水平方向及び鉛直方向の応力に対して、同時入力による時刻歴応答解析法及び SRSS 法により組み合わせた結果をまとめたものであり、参考までに絶対値和法による結果も併記した。

図 8～図 11 より、いずれの配管系においても最大応力発生点においては、時刻歴応答解析法に対して SRSS 法の方が約 1.1 倍から約 1.4 倍の比率で上回る結果となった。最大応力発生点における SRSS 法と同時入力による時刻歴応答解析法との評価結果の比較を表 1 に示す。また、最大応力発生点の部位を第図 12～図 15 に示す。

さらに、配管系全体の傾向を確認するため、配管系の主要な部位における発生応力の比較を図 16 に示す。図 16 は、図 8～図 11 に基づき、各配管モデルの節点の応力値をプロットしたものである。図 16 より、SRSS 法は発生応力の低い領域では同時入力による時刻歴応答解析法に対して平均的な結果を与え、発生応力の増加に伴い保守的な結果を与える傾向にあることが確認できる。

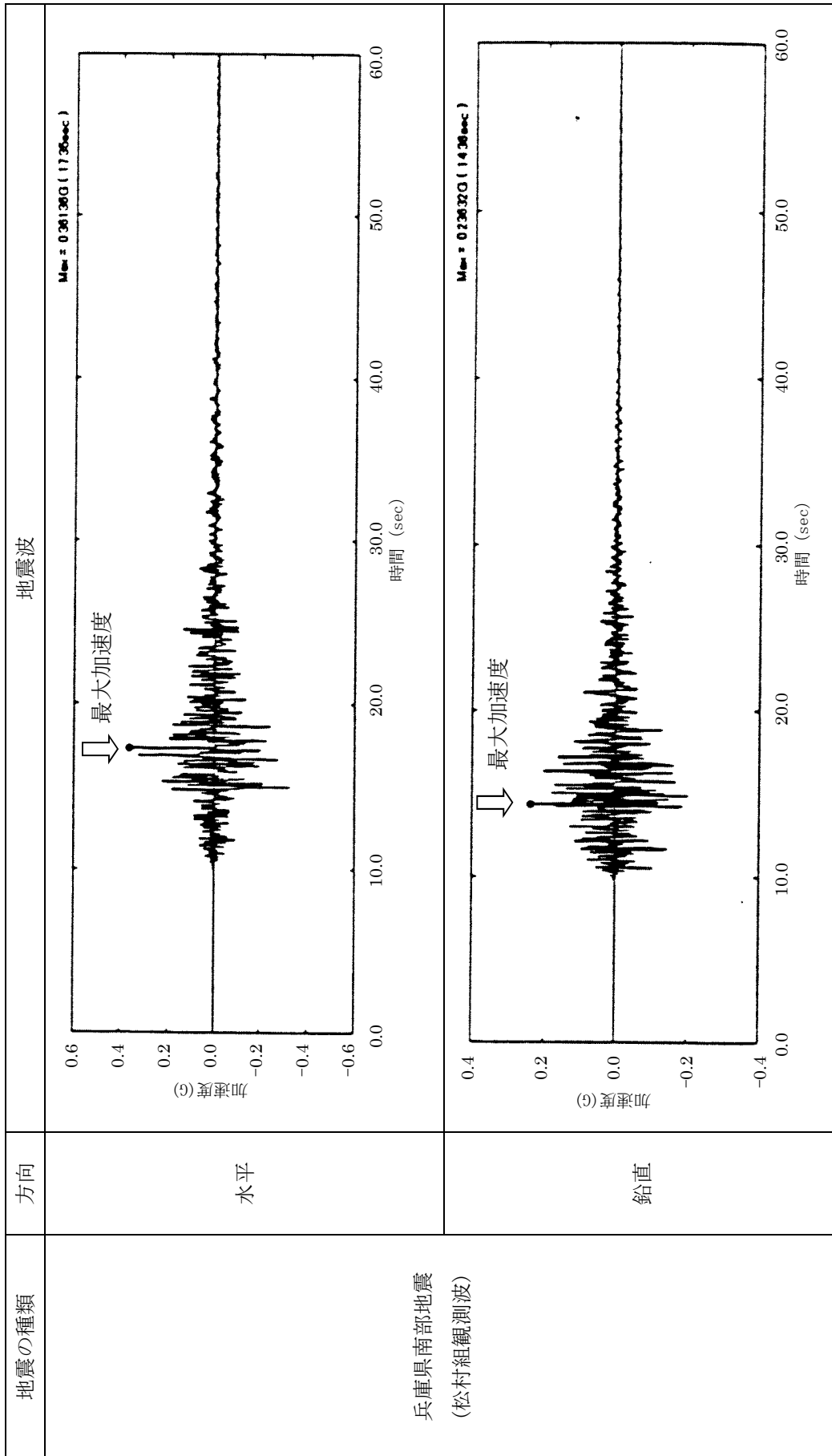


図5 機器・配管系への入力地震動 (兵庫県南部地震)

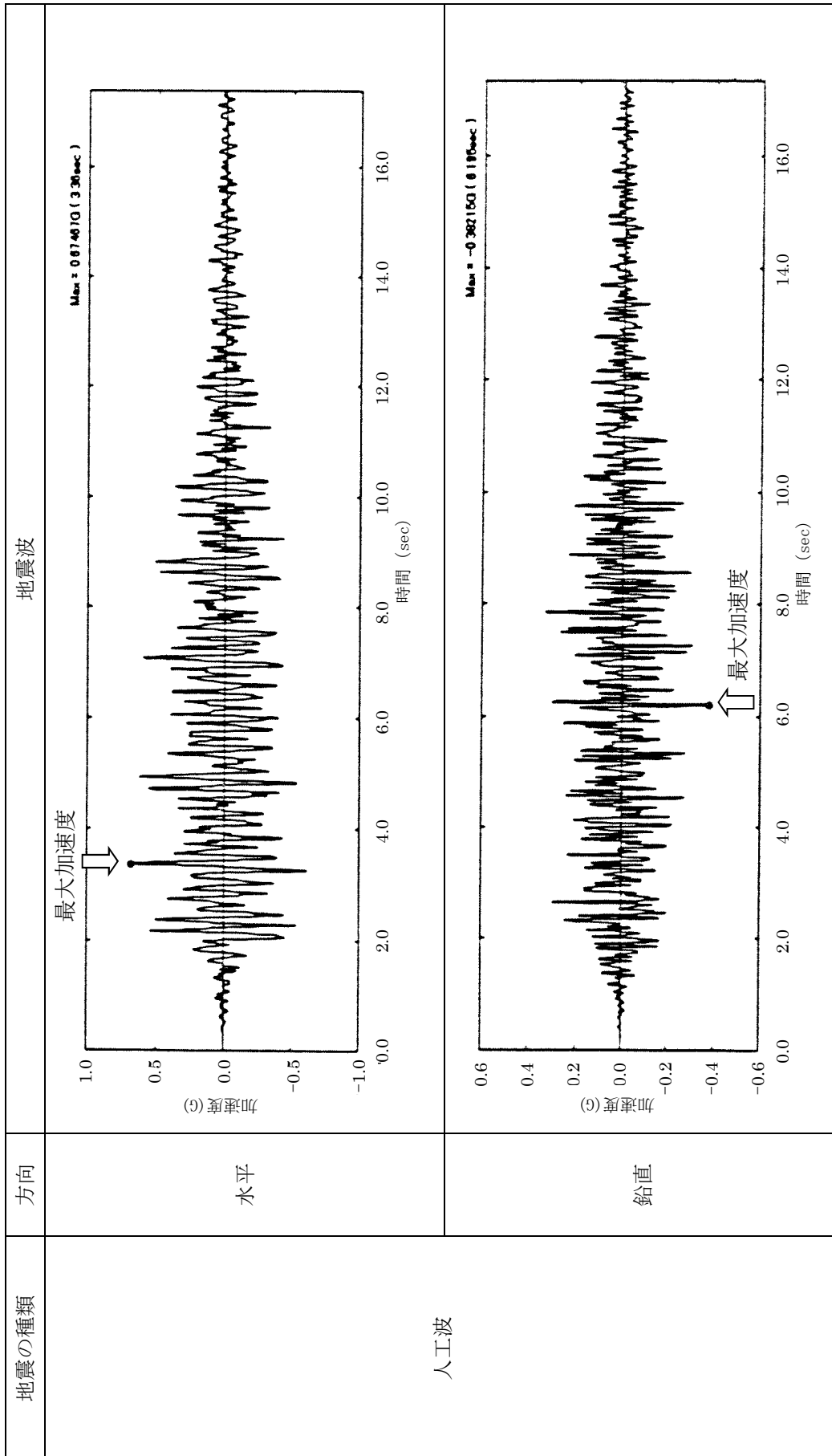


図6 機器・配管系への入力地震動（人工波）

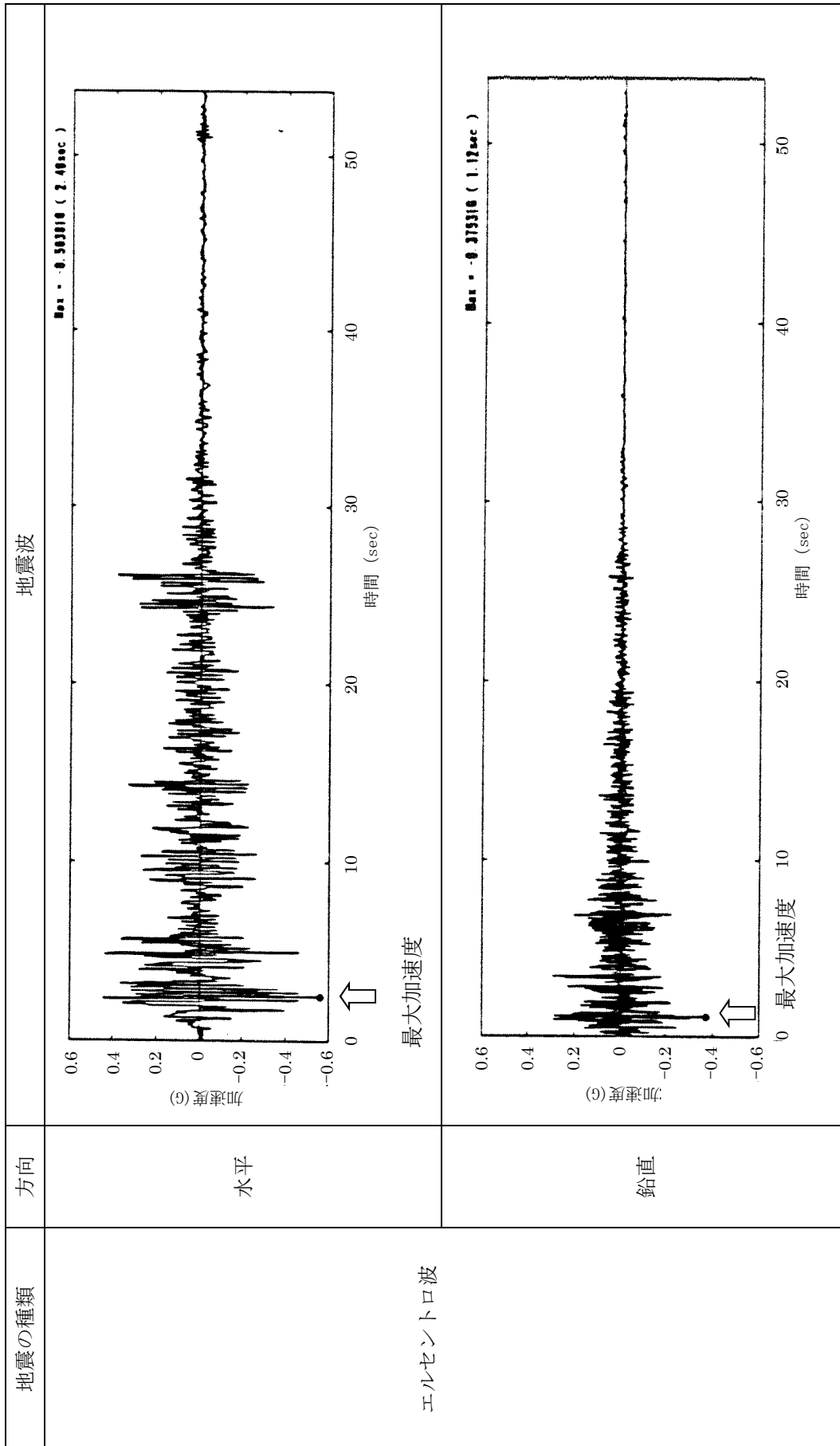
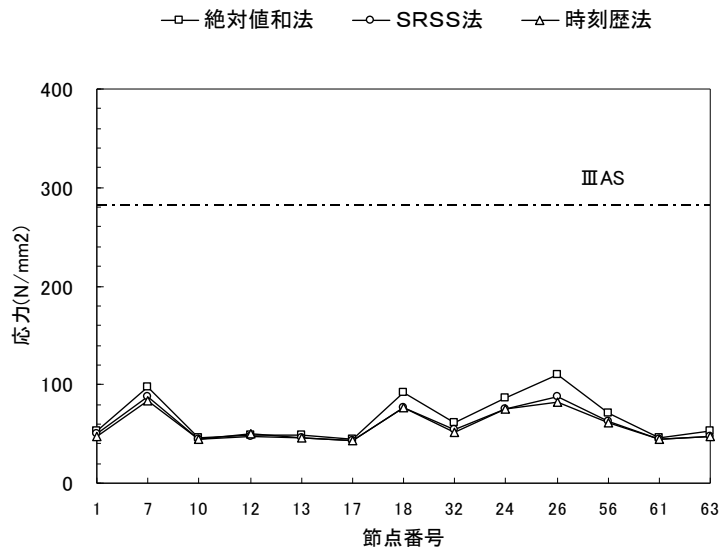
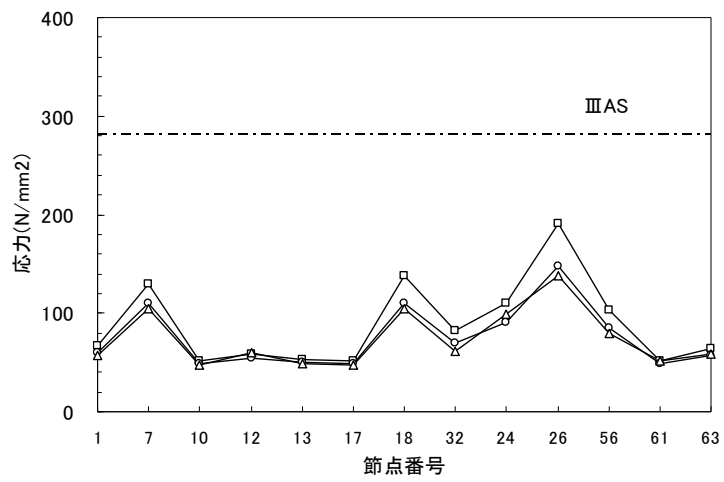


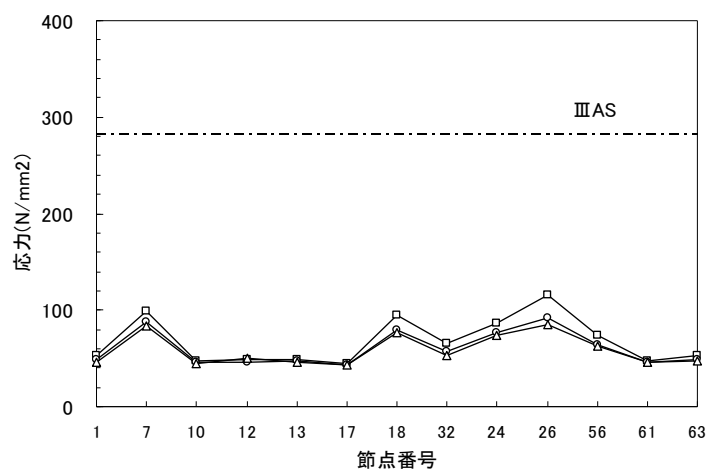
図7 機器・配管系への入力地震動 (エルセントロ波)



兵庫県南部地震（松村組観測波）



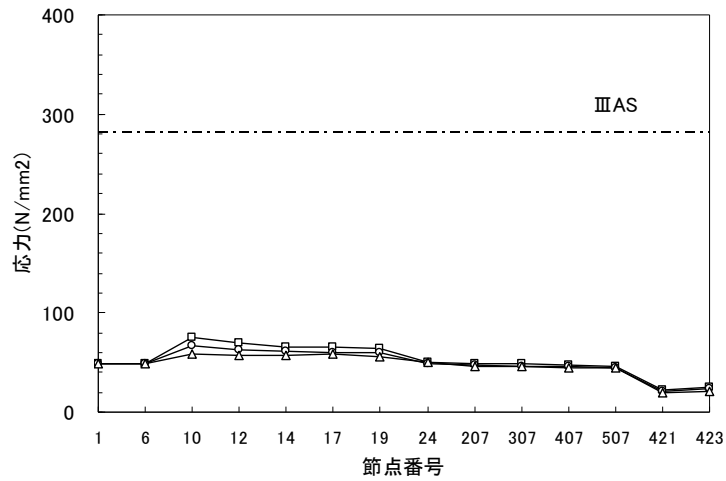
人工波



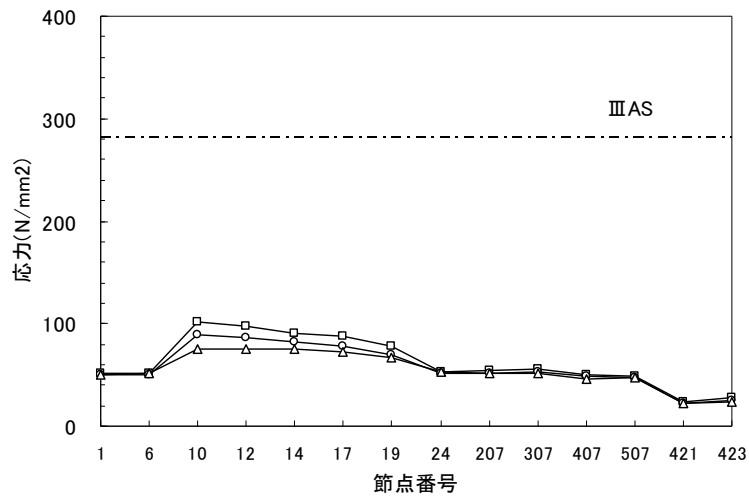
エルセントロ波

図8 主要な部位における発生応力 (FDW-001 Aプラント)

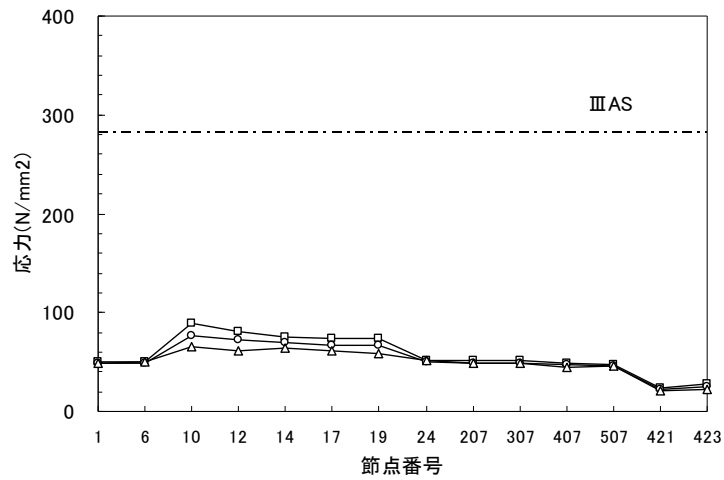
—□— 絶対値和法 —○— SRSS法 —△— 時刻歴法



兵庫県南部地震（松村組観測波）



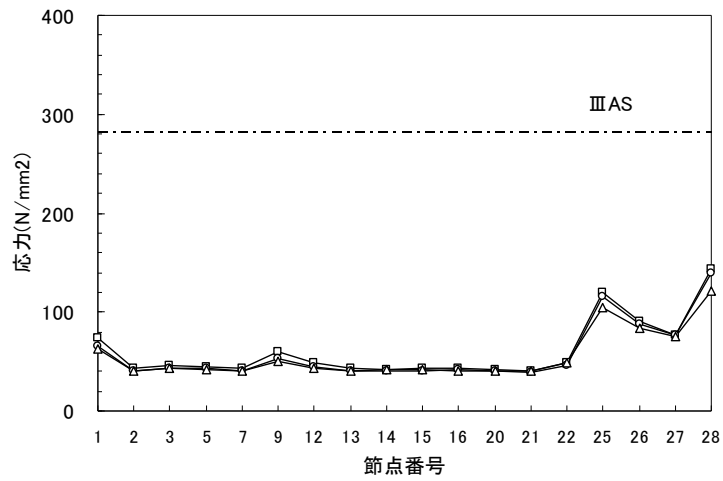
人工波



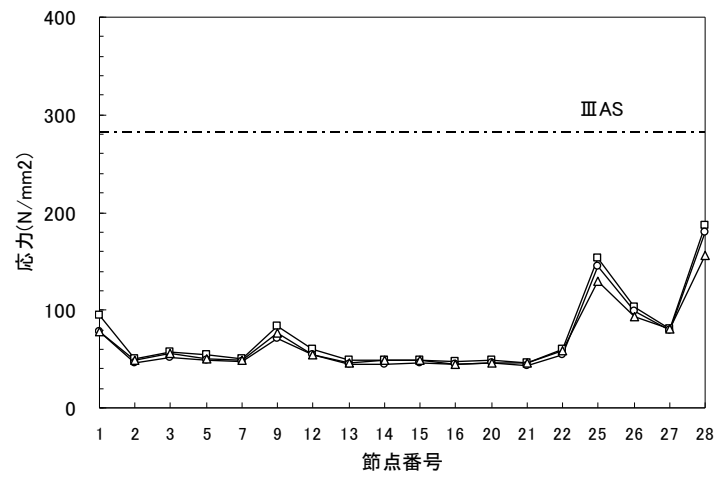
エルセントロ波

図9 主要な部位における発生応力 (MS-001 Aプラント)

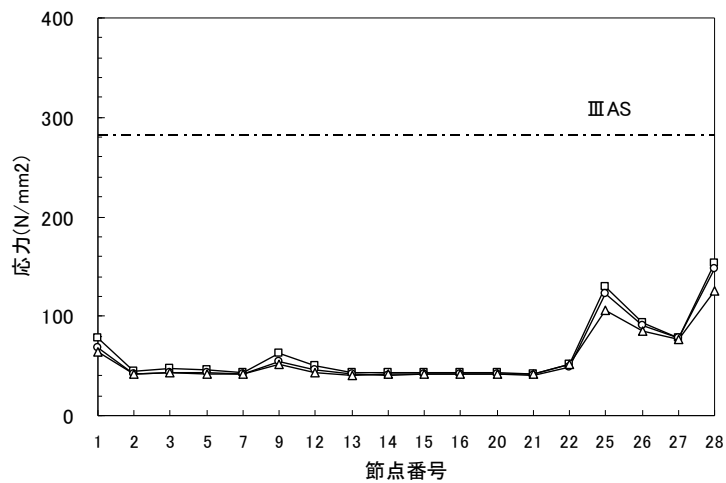
—□— 絶対値和法 —○— SRSS法 —△— 時刻歴法



兵庫県南部地震（松村組観測波）



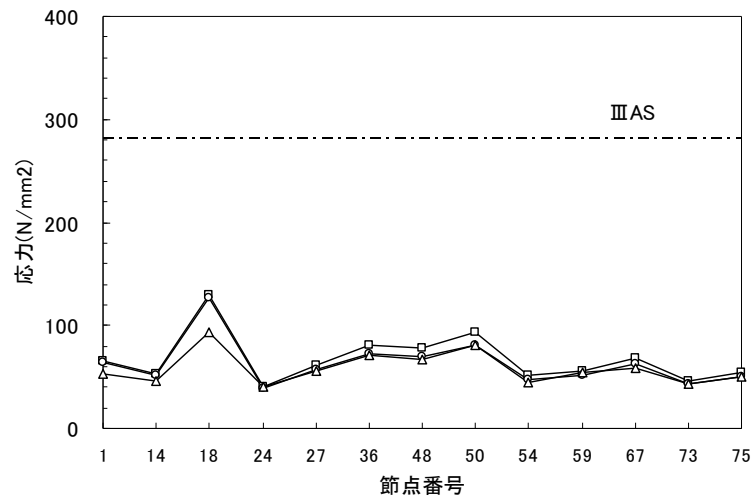
人工波



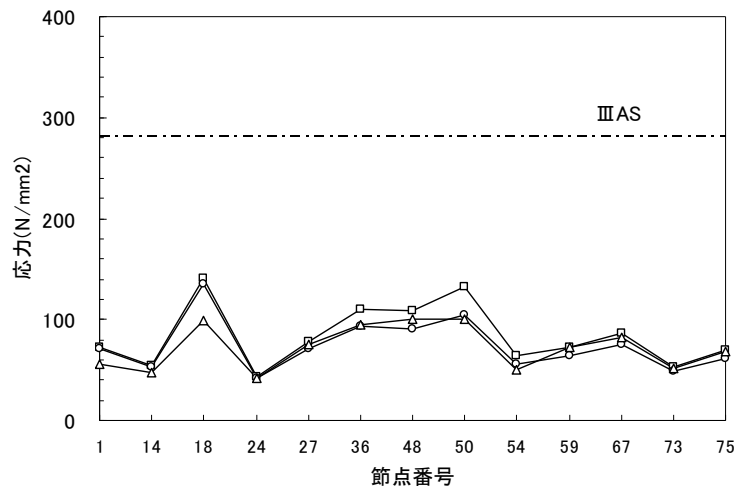
エルセントロ波

図 10 主要な部位における発生応力（RHR-001 Aプラント）

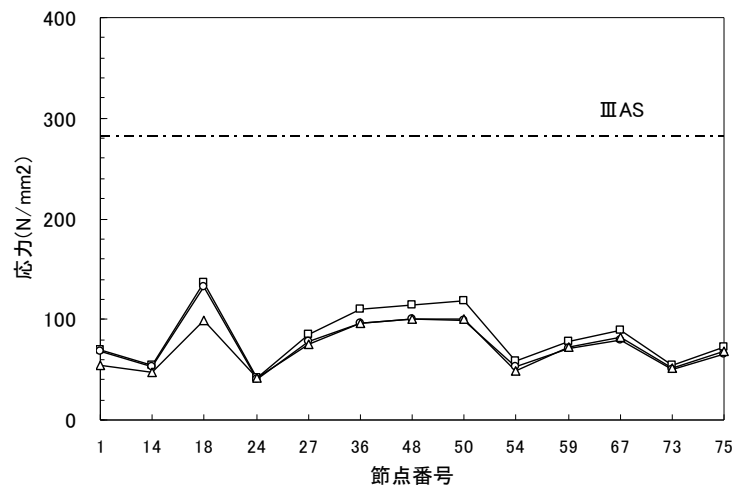
□ 絶対値和法 ○ SRSS法 △ 時刻歴法



兵庫県南部地震 (松村組観測波)



人工波



エルセントロ波

図 11 主要な部位における発生応力 (FDW-001 Bプラント)

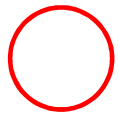
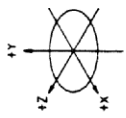
表1 SRSS法と同時入力による時刻歴応答解析法との比較（最大応力発生点）

解析対象配管	入力地震波	最大応力発生点	SRSS法/同時入力
FDW-001 (Aプラント)	松村組観測波	分岐部(節点 No26)	1.08
	人工波	分岐部(節点 No26)	1.08
	エルセントロ波	分岐部(節点 No26)	1.08
MS-001 (Aプラント)	松村組観測波	分岐部(節点 No10)	1.15
	人工波	分岐部(節点 No10)	1.20
	エルセントロ波	分岐部(節点 No10)	1.18
RHR-001 (Aプラント)	松村組観測波	拘束点(節点 No28)	1.15
	人工波	拘束点(節点 No28)	1.15
	エルセントロ波	拘束点(節点 No28)	1.18
FDW-001 (Bプラント)	松村組観測波	拘束点(節点 No18)	1.35
	人工波	拘束点(節点 No18)	1.37
	エルセントロ波	拘束点(節点 No18)	1.34

FDW：給水系配管

MS：主蒸気系配管

RHR：残留熱除去系配管



最大応力発生点

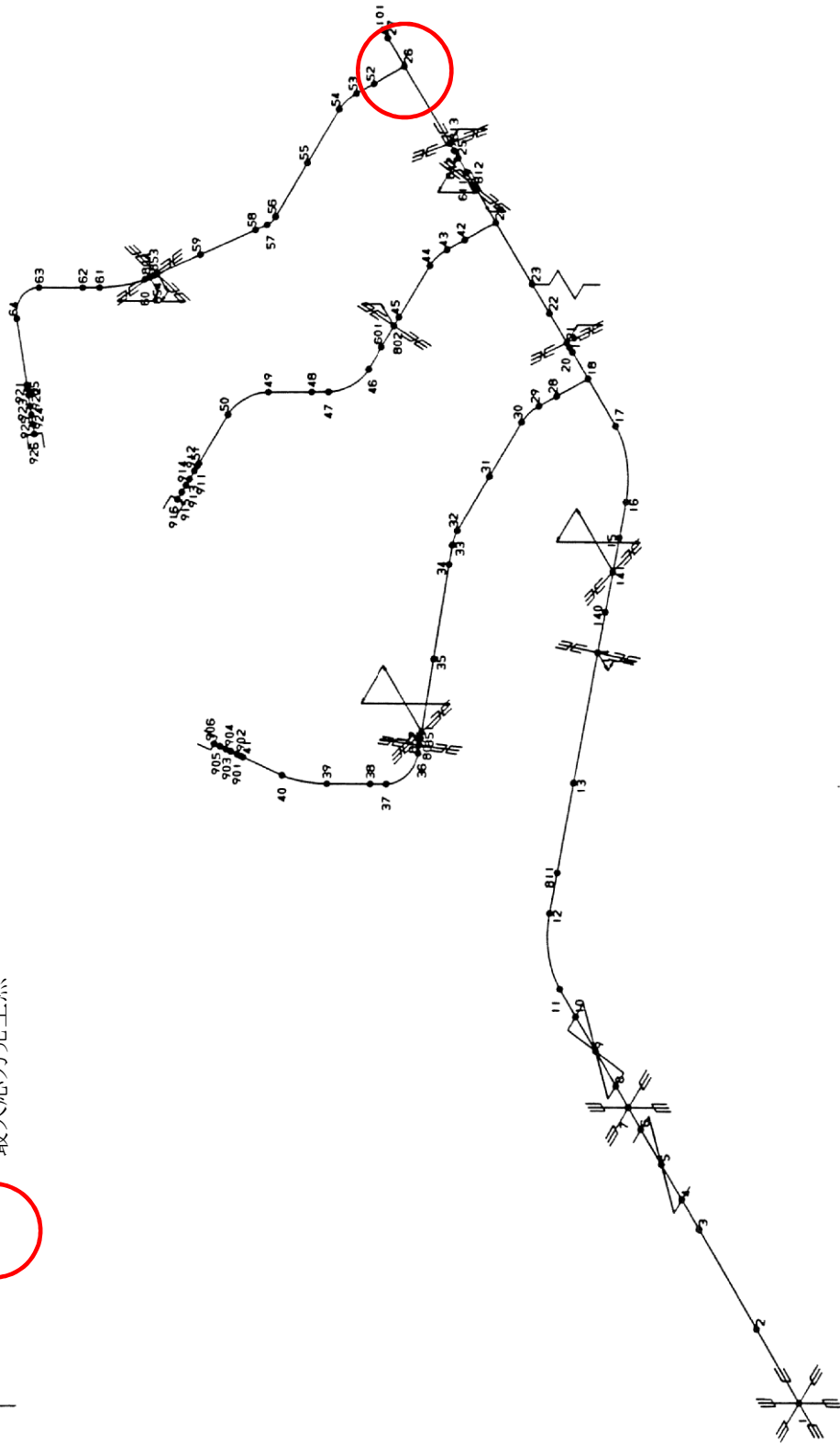
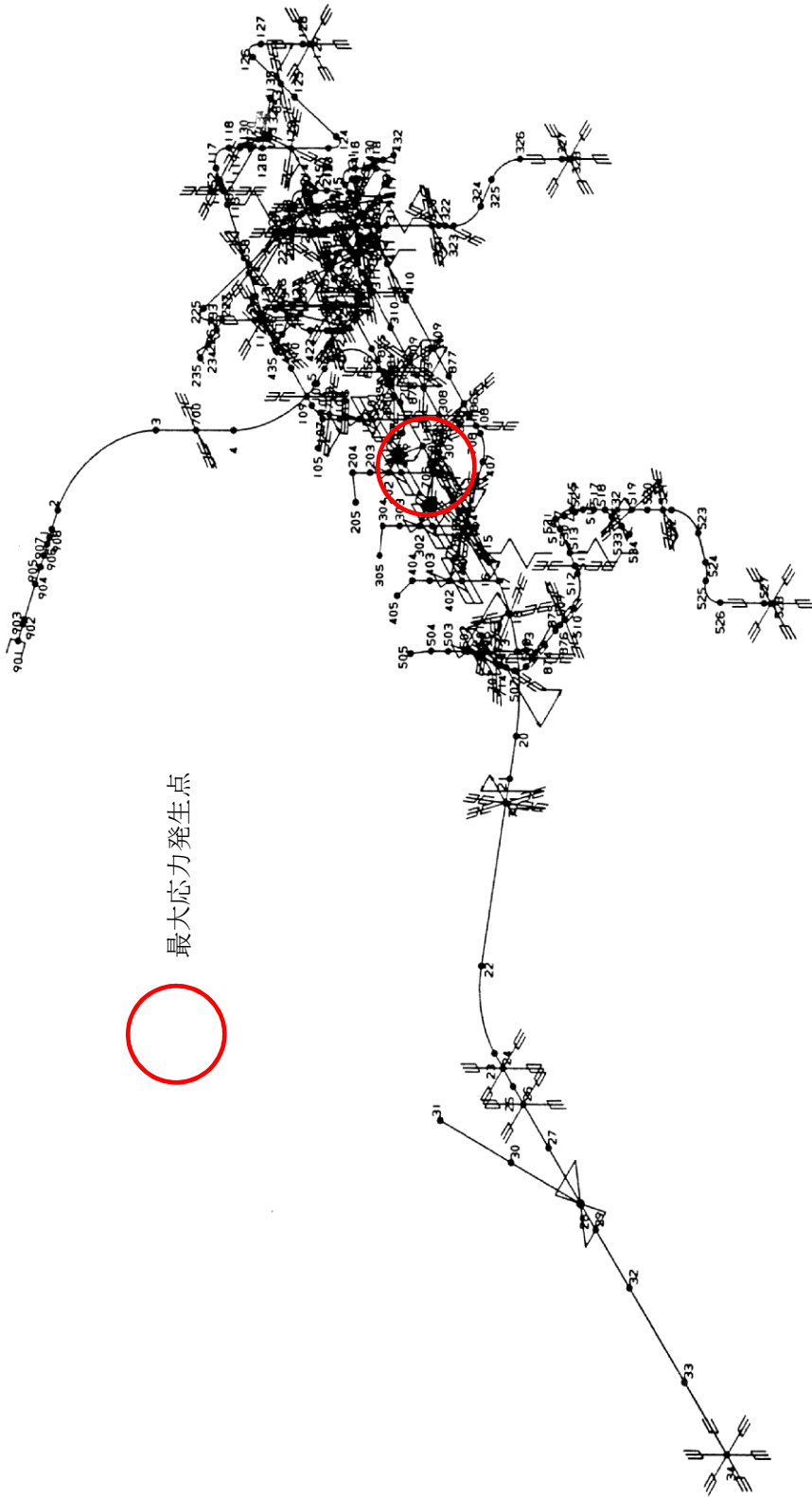
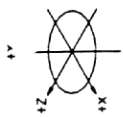


図 12 給水系配管 (FDW-001 A プラント)



最大応力発生点

図 13 主蒸気系配管 (MS-001 A プラント)

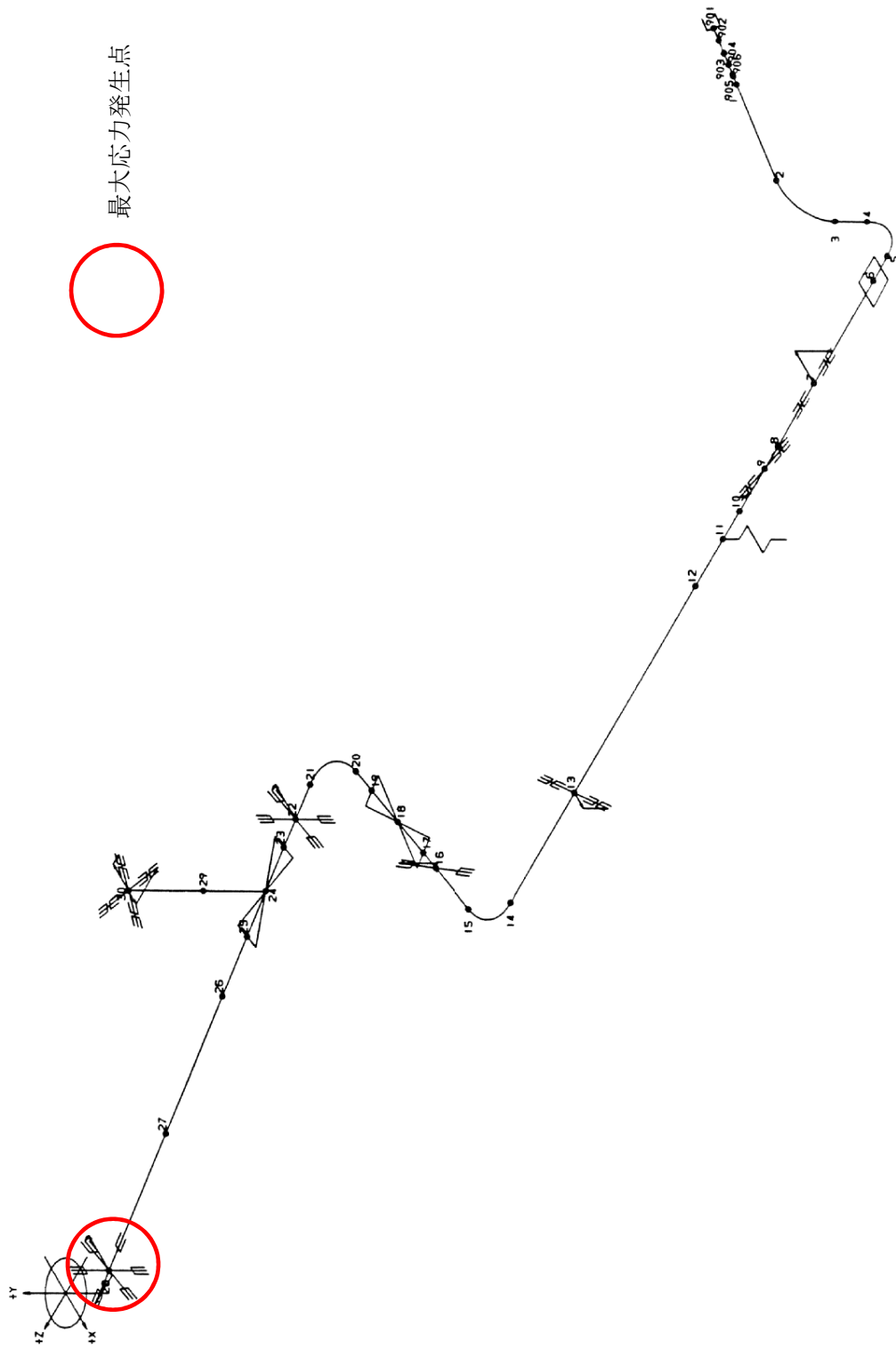
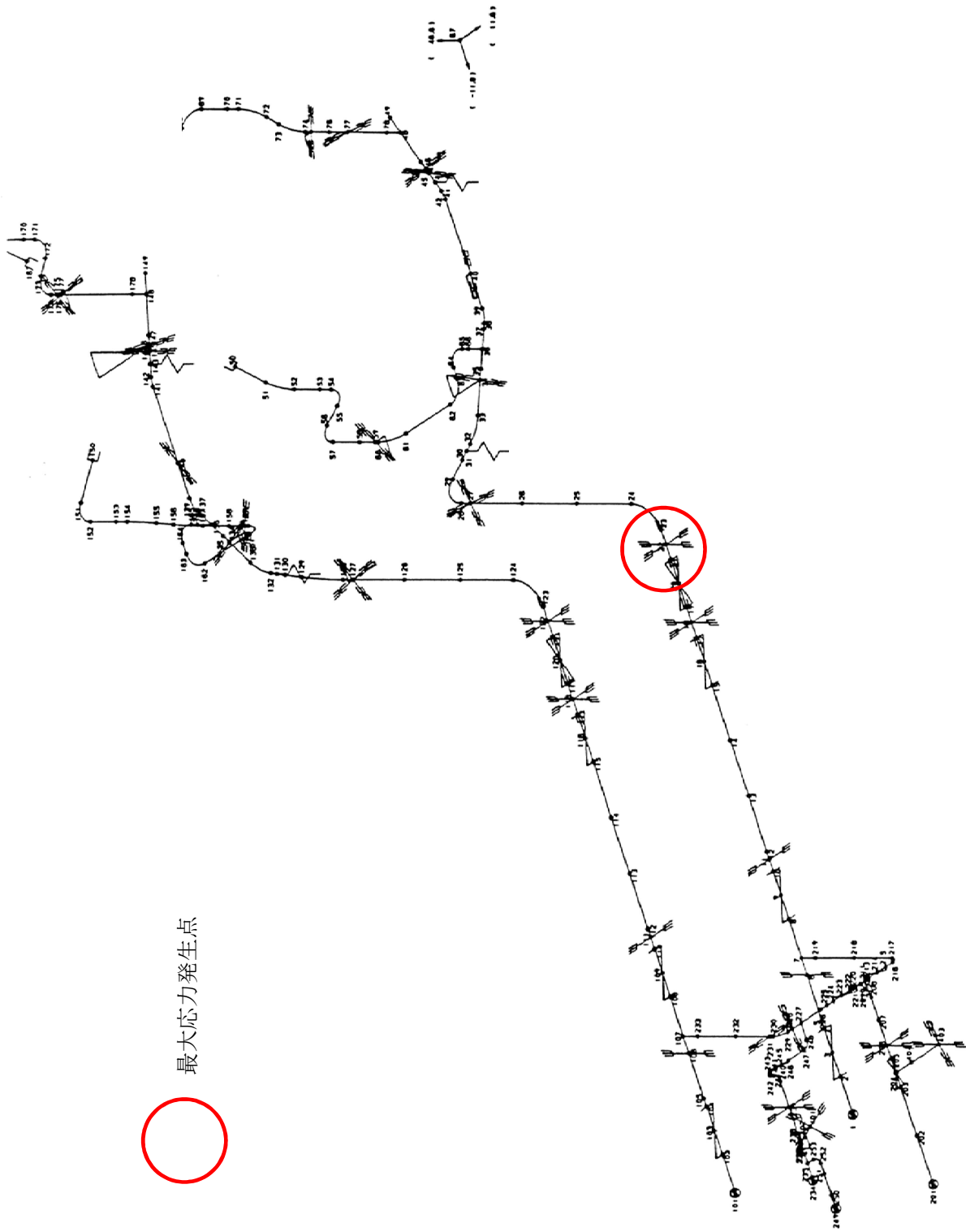
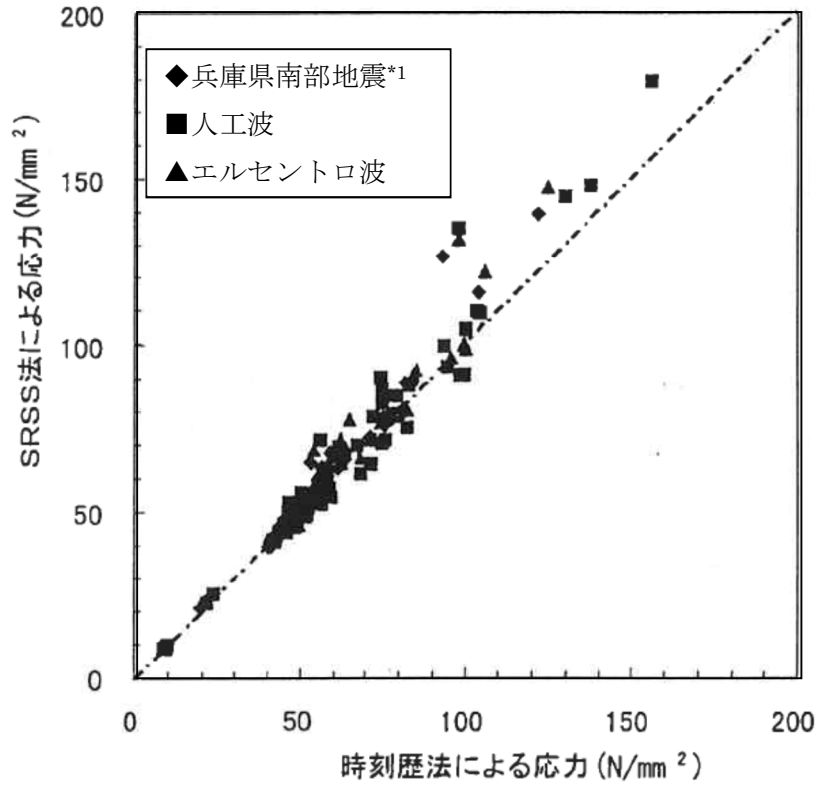


図 14 残留熱除去系配管 (RHR-001 A プラント)



最大応力発生点

図 15 給水系配管 (FDW-001 B プラント)



注記

* 1 : 松村組観測波

図 16 SRSS 法による応力と時刻歴応答解析法による応力の比較(主要部位)

4. 柏崎刈羽原子力発電所における水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻の差について

柏崎刈羽原子力発電所における水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻の差について、7号機の原子炉建屋を例に、柏崎刈羽原子力発電所の施設の耐震性評価において支配的な地震動である基準地震動 Ss-1, 2 に対する水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻の差を確認した。ここで、機器・配管系の耐震評価に用いる水平方向の設計用震度は、全ての地震動に対する南北方向と東西方向の最大応答加速度を包絡した値を用いることを踏まえ、水平方向の最大応答値の生起時刻については、Ss-1, 2 並びに南北方向及び東西方向を通じた最大応答加速度の生起時刻を用いた。

図 17 及び表 2 に示すように、水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻には約 6 秒～約 17 秒の差があり、柏崎刈羽原子力発電所においても水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻には差があることを確認した。

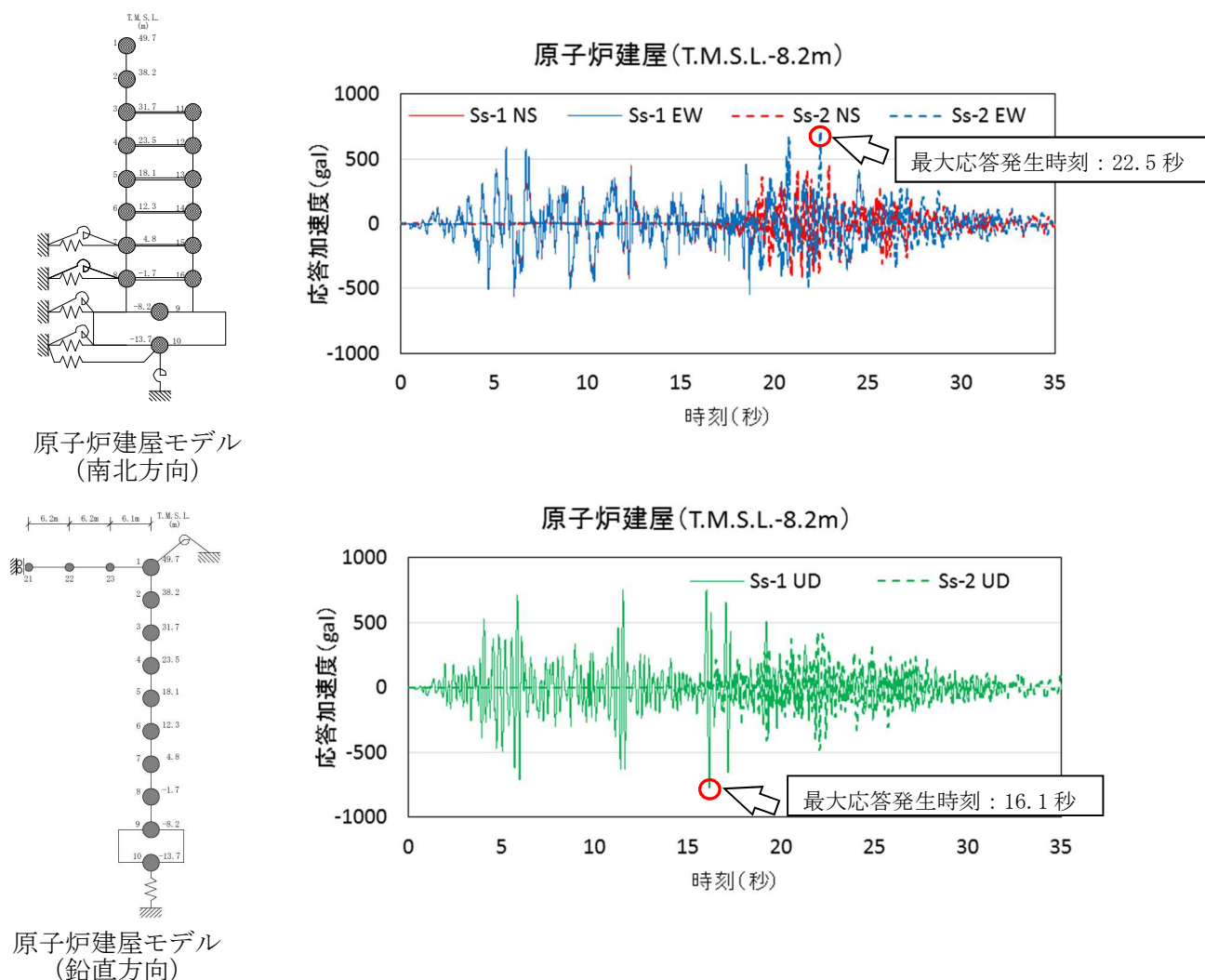


図 17 7号機原子炉建屋の応答値 (T.M.S.L.-8.2m の例)

表 2 最大応答値の生起時刻の差（7号機原子炉建屋）

位 置 (m)	最大応答値の生起時刻（秒）		生起時刻の差（秒）
	水平方向	鉛直方向	
49.7	18.7	6.0	12.7
38.2	18.7	6.0	12.7
31.7	22.5	6.0	16.5
23.5	22.5	6.0	16.5
18.1	22.5	6.0	16.5
12.3	22.5	16.1	6.4
4.8	22.4	16.1	6.3
-1.7	22.4	16.1	6.3
-8.2	22.5	16.1	6.4
-13.7	22.5	16.1	6.4

5. まとめ

以上から、柏崎刈羽原子力発電所では、水平方向及び鉛直方向の動的な地震力の荷重の組み合わせ法として SRSS 法を用いることとする。

6. 参考文献

- (1) 電力共通研究「鉛直地震動を受ける設備の耐震評価手法に関する研究(ステップ2)」
(平成7年～平成10年)

7. 参考資料

(参考) 新潟県中越沖地震による柏崎刈羽原子力発電所の水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻の差について

(参考) 新潟県中越沖地震による柏崎刈羽原子力発電所の水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻の差について

1. はじめに

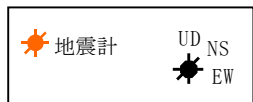
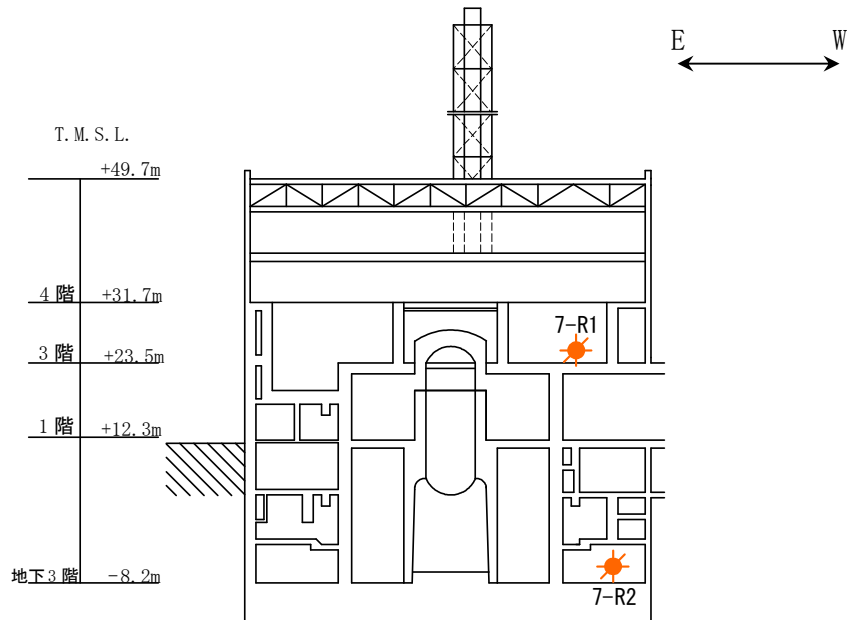
柏崎刈羽原子力発電所では、平成 19 年 7 月 16 日に新潟県中越沖地震による観測記録が得られている。本資料では、新潟県中越沖地震による柏崎刈羽原子力発電所の水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻の差について参考として確認する。

2. 確認結果

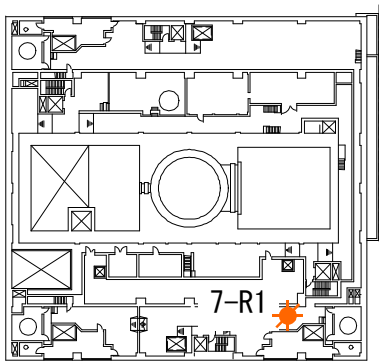
参考表 1 に示すように、水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻には約 1 秒～約 4 秒の差があり、柏崎刈羽原子力発電所において観測された実地震についても、水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻には差があることを確認した。

参考表 1 新潟県中越沖地震の観測記録における最大応答値の生起時刻の差

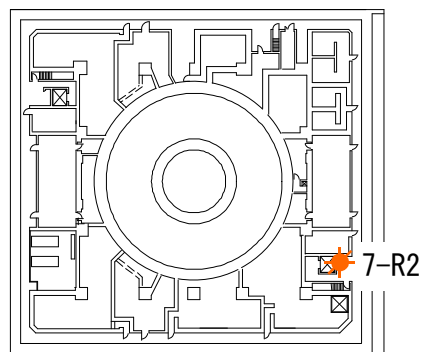
位 置 (m)	最大応答値の生起時刻 (秒)			生起時刻の差 (秒)	
	南北方向 (NS)	東西方向 (EW)	鉛直方向 (UD)	NS-UD	EW-UD
7号機 -8.2	33.0	39.7	35.3	2.3	4.4



※T.M.S.L.とは、東京湾平均海面のことを指す。

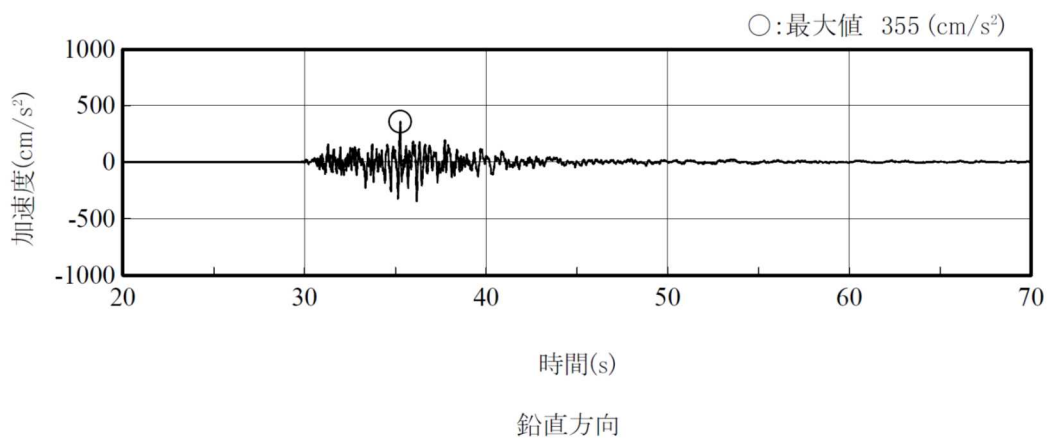
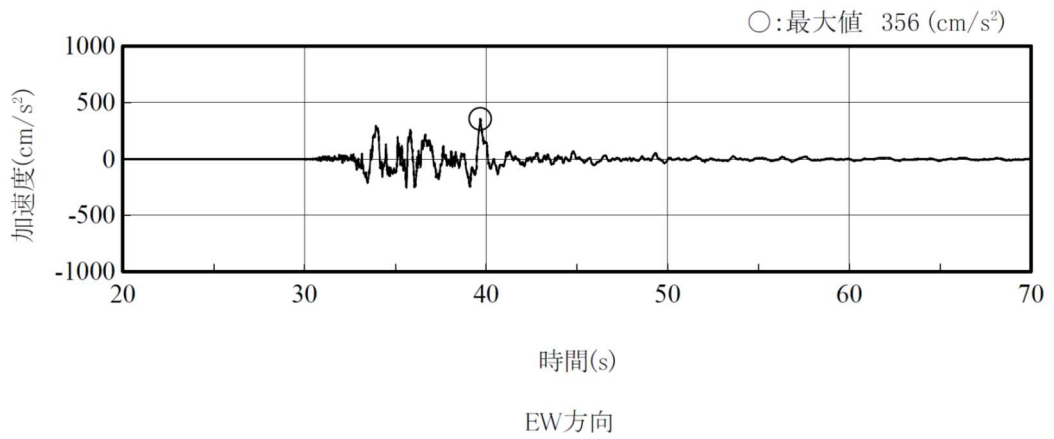
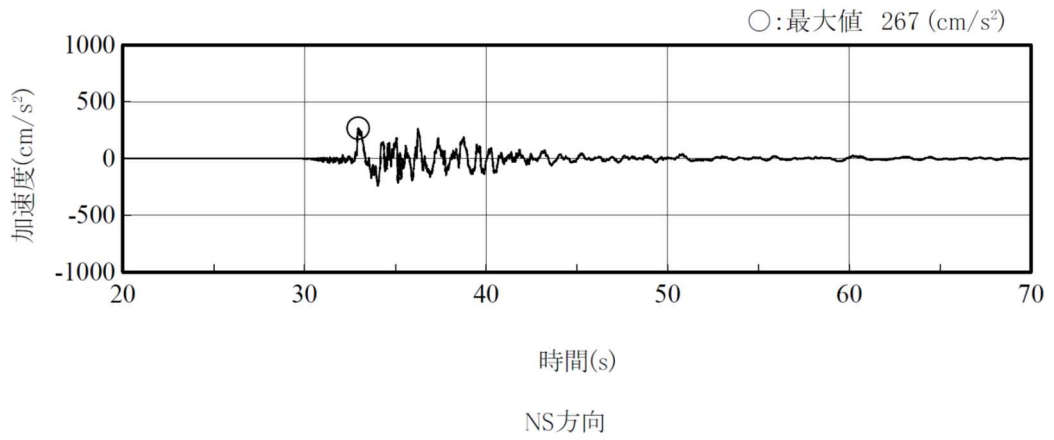


3階 (T.M.S.L.+23.5m)



地下3階 (基礎版上)
(T.M.S.L.-8.2m)

参考図 1-1 7号機原子炉建屋 地震計設置位置



(記録の主要動を含む 50 秒間を表示)

参考図 1-2 原子炉建屋基礎版上の地震観測記録 加速度時刻歴波形 (7号機)

(7-R2 : T. M. S. L. -8. 2m)