

7. 安全上重要な機器・配管系の耐震安全性評価

【目 次】

7.1. 評価方針.....	7-1
7.1.1 評価対象.....	7-1
7.1.2 耐震安全性評価の概要.....	7-3
7.1.3 構造強度の評価方法.....	7-5
7.1.3.1 応答倍率法による評価.....	7-5
7.1.3.2 詳細評価（スペクトルモーダル解析法等による評価）..	7-6
7.1.4 動的機能維持の評価方法.....	7-9
7.1.4.1 機能確認済加速度との比較.....	7-9
7.1.4.2 詳細評価.....	7-9
7.2. 地震応答解析.....	7-11
7.2.1 地震応答解析モデル.....	7-11
7.2.2 大型機器の地震応答解析.....	7-11
7.2.2.1 大型機器解析モデル.....	7-12
7.2.2.2 炉内構造物解析モデル.....	7-12
7.2.2.3 固有値解析結果.....	7-17
7.2.2.4 地震応答解析結果.....	7-19
7.2.3 床応答スペクトル.....	7-26
7.2.3.1 水平方向.....	7-26
7.2.3.2 鉛直方向.....	7-26
7.2.4 減衰定数.....	7-31
7.3. 荷重の組み合わせ.....	7-32
7.3.1 運転状態と地震動との組み合わせ.....	7-32
7.4. 評価基準.....	7-36
7.4.1 構造強度の評価基準.....	7-36
7.4.2 動的機能維持の評価基準.....	7-37

7.5. 評価結果.....	7-39
7.5.1 構造強度の評価結果.....	7-39
7.5.2 動的機能維持の評価結果.....	7-49
7.6. 参考文献.....	7-53

【添付】

添付 7.1 配管系の減衰定数について

添付 7.2 燃料取替機および原子炉建屋クレーンの減衰定数について

添付 7.3 機器・配管系の構造強度の評価基準値について

添付 7.4 動的機器の地震時機能確認済加速度について

【参考資料】

参考資料 7.1 使用済燃料プールのスロッシングに対する影響検討について

参考資料 7.2 大型機器解析モデルおよび炉内構造物解析モデルによる
地震応答解析結果（詳細）

参考資料 7.3 配管の評価における「ねじり」のみを評価した値について

参考資料 7.4 原子炉格納容器ライナプレートの評価における
最大ひずみ発生点について

参考資料 7.5 原子炉建屋クレーンの減衰定数を測定した試験について

参考資料 7.6 原子炉建屋クレーンの評価について

参考資料 7.7 燃料取替機の減衰定数を測定した試験について

参考資料 7.8 燃料取替機の評価について

参考資料 7.9 動的機能維持評価における鉛直方向の評価基準値加速度に
1.0G を用いている根拠について

参考資料 7.10 非常用ガス処理系排風機およびほう酸水注入系貯蔵タンクにおける
設計と同等の手法による評価結果について

参考資料 7.11 荷重の組合せの評価において、参照すべきスペクトルの
超過発生確率の考え方について

参考資料 7.12 S_d を 0.5 倍の S_s にした理由について

参考資料 7.13 事故時の条件（温度等）の時間変化を考慮した
地震と事故との組合せの考え方について

- 参考資料 7.14 配管支持装置（メカニカルスナッパ）の評価基準値について
- 参考資料 7.15 応答倍率法に用いる応答比について
- 参考資料 7.16 設計時の制御棒挿入試験について
- 参考資料 7.17 主蒸気系配管，残留熱除去系配管の応力分布について
- 参考資料 7.18 配管の地震応答解析における 3 方向の地震動の取り扱いについて

7. 安全上重要な機器・配管系の耐震安全性評価

7.1. 評価方針

7.1.1. 評価対象

「原子炉の緊急停止のために急激に負の反応度を付加する」、「原子炉停止後、または原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故後、炉心から崩壊熱を除去する」、「原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故の際に、圧力障壁となり放射性物質の放散を直接防ぐ」等の安全機能が保持されることを確認するため、Sクラスの設備について構造強度評価を実施するとともに、ポンプ、弁および制御棒等の地震時の動的機能が要求される動的機能については動的機能維持評価を実施する。評価に当たり、同一仕様・同一設計の複数の設備が存在する場合は、代表設備について評価する。また、配管系のように類似設備が多数存在する場合は、仕様、使用条件等の観点から耐震安全評価上適切にグループ化し、その代表設備について評価する。

BクラスおよびCクラス設備のうち、その破損がSクラス設備に波及的破損を生じさせるおそれのある設備については、波及的影響評価を実施する。

Sクラスの設備は具体的には、第7.1.1-1表に示す主要設備に属するポンプ、タービン、容器、熱交換器等の機器、配管系、および補助設備である原子炉補機冷却水系、原子炉補機冷却海水系、電気計装設備等、ならびにそれらの支持構造物である。

BクラスおよびCクラス設備のうち、燃料取替機、原子炉建屋クレーンおよび原子炉遮へい壁は、使用目的上、Sクラス設備の上部を通過する等、その破損がSクラス設備に波及的破損を生じさせる可能性があるため評価を実施する。

第 7.1.1-1 表 柏崎刈羽 7 号機 S クラス主要設備一覧

S クラスの定義		主要設備
i	原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器・配管系	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉圧力容器 原子炉冷却材圧力バウンダリに属する系統^{*1}
ii	使用済燃料を貯蔵するための施設	<ul style="list-style-type: none"> 使用済燃料貯蔵設備
iii	原子炉の緊急停止のために急激に負の反応度を付加するための施設，および原子炉の停止状態を維持するための施設	<ul style="list-style-type: none"> 制御棒 制御棒駆動機構 制御棒駆動系
iv	原子炉停止後，炉心から崩壊熱を除去するための施設	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉隔離時冷却系 高圧炉心注水系 残留熱除去系 サプレッションチェンバ
v	原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故後，炉心から崩壊熱を除去するための施設	<ul style="list-style-type: none"> 高圧炉心注水系 残留熱除去系 自動減圧系 サプレッションチェンバ
vi	原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故の際に，圧力障壁となり放射性物質の放散を直接防ぐための施設	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉格納容器 原子炉格納容器バウンダリに属する系統^{*2}
vii	放射性物質の放出を伴うような事故の際に，その外部放散を抑制するための施設で上記 vi 以外の施設	<ul style="list-style-type: none"> 残留熱除去系 可燃性ガス濃度制御系 非常用ガス処理系 サプレッションチェンバ

※ 1 主蒸気系，給水系，残留熱除去系，ほう酸水注入系，原子炉冷却材浄化系，原子炉隔離時冷却系，高圧炉心注水系

※ 2 主蒸気系，給水系，残留熱除去系，制御棒駆動系，ほう酸水注入系，原子炉冷却材浄化系，原子炉隔離時冷却系，高圧炉心注水系，不活性ガス系，原子炉補機冷却水系，可燃性ガス濃度制御系，放射性ドレン移送系

7.1.2 耐震安全性評価の概要

地震時の安全性評価は、基準地震動 S_s を用いた動的解析によることを基本とし、機器・配管系の応答性状を適切に表現できるモデルを設定した上で応答解析を行い、その結果求められた応力値、または応答加速度値をもとに評価する。基準値地震動 S_s を第 7.1.2-1 表に示す。

原子炉建屋内の大型機器である原子炉格納容器（以下「RCCV」という。）、原子炉圧力容器（以下「RPV」という。）、および炉内構造物等の安全性評価に当たっては、水平地震動と鉛直地震動による建屋・機器連成応答解析を行い、それぞれの応答結果を用いる。また、比較的小型の機器等の安全性評価に当たっては、当該設備の据付床の水平方向および鉛直方向それぞれの床応答を用いた応答解析等を行う。なお、水平方向、鉛直方向それぞれの応答結果を二乗和平方根（SRSS）法等により組み合わせる場合もある。⁽¹⁾

構造強度評価に際しては、当該設備の耐震安全機能を確認する観点から耐震構造上重要な評価箇所を、既往評価の評価箇所を参考に選定する。本報告書には、当該設備の評価箇所のうち、発生値が評価基準値に対して比較的近い箇所を記載している。また、選定した評価箇所に対して、基準地震動 S_s による地震慣性力と、設計時の地震以外の荷重との組合せによる 1 次応力評価を基本として構造強度評価を行う。

動的機能維持評価に際しては、地震時に動的機能が要求される動的機器を選定する。また、選定した動的機器の設置位置における応答加速度と機能確認済加速度との比較を基本として動的機能維持評価を行う。

第 7.1.2-1 表 基準地震動 Ss

地震動	概要
Ss-1	F－B断層による地震 (応答スペクトル法)
Ss-2	F－B断層による地震 (断層モデル)
Ss-3	長岡平野西縁断層帯による地震 (応答スペクトル法, 断層傾斜角 50° /応力降下量 1.5 倍および断層傾斜角 35° /応力降下量 1.0 倍の 2 つのケースを包絡)
Ss-4	長岡平野西縁断層帯による地震 (断層モデル, 断層傾斜角 50° /応力降下量 1.5 倍)
Ss-5	長岡平野西縁断層帯による地震 (断層モデル, 断層傾斜角 35° /応力降下量 1.0 倍)

7.1.3 構造強度の評価方法

構造強度に関する評価は、以下に示す応答倍率法による評価、または詳細評価（スペクトルモーダル解析法等）により実施する。構造強度の評価手順を第 7.1.3-1 図に示す。

7.1.3.1 応答倍率法による評価

大型機器である RCCV, RPV, および炉内構造物等については、基準地震動 S_s による地震力（加速度、せん断力、モーメント、軸力）と設計時における地震力との比を求め、設計時の応力に乗じることにより、発生値を算定し、評価基準値と比較する。

また、比較的小型の機器については、剛構造の場合は基準地震動 S_s による床の最大応答加速度と設計時における床の最大応答加速度の比、剛構造でない場合はそれぞれの床応答スペクトルの比を求め、設計時の応力に乗じることにより、発生値を算定し、評価基準値と比較する。

7.1.3.2 詳細評価（スペクトルモーダル解析法等による評価）

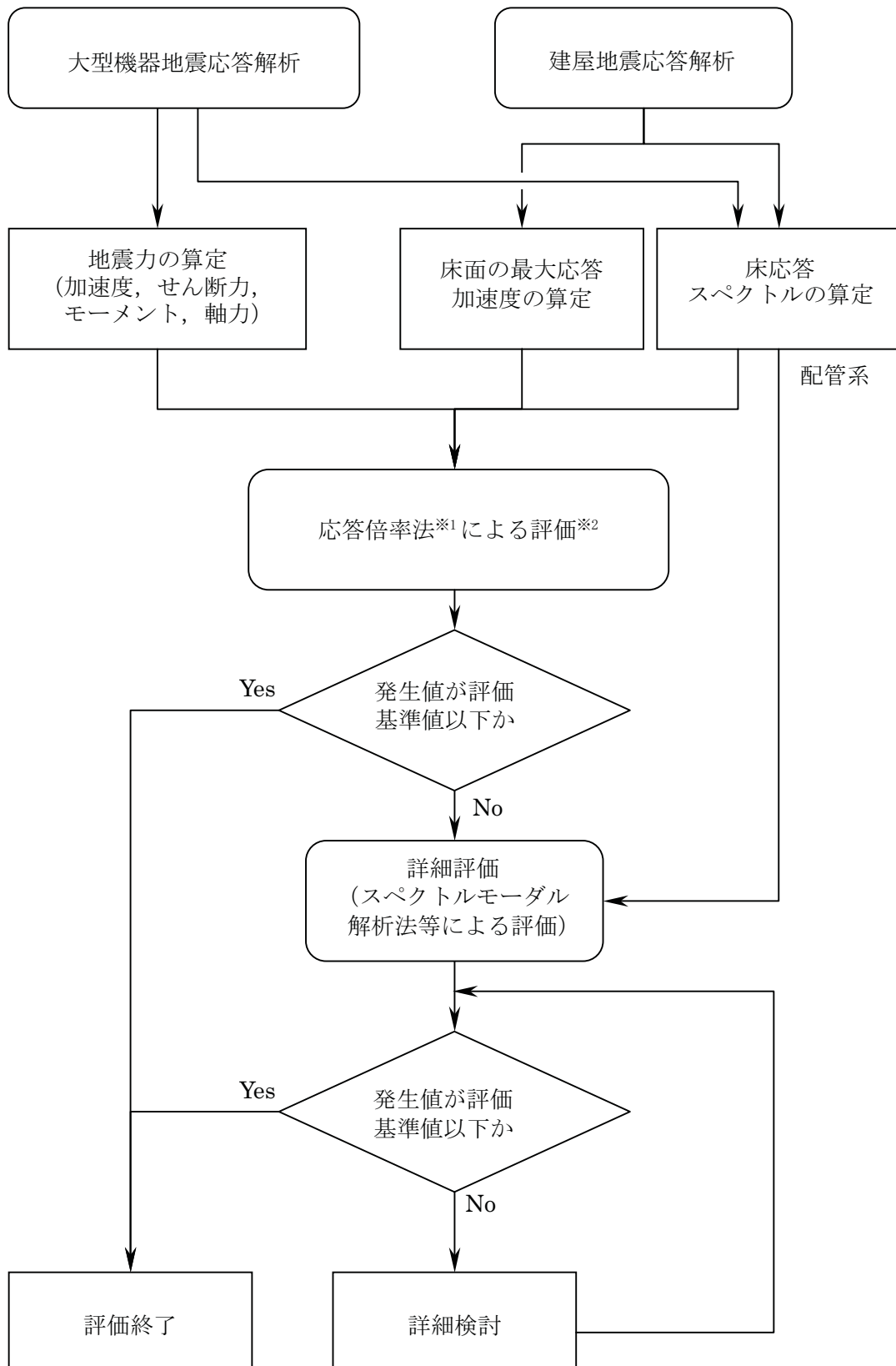
配管系は、スペクトルモーダル解析法等による詳細評価を行い、発生値を算定し評価基準値と比較する。

応答倍率法による評価の結果、詳細評価が必要と判断された設備は、設計時の評価方法を参考に以下の a. ～ c. に示す解析法から選択して評価を行い、発生値を算定し評価基準値と比較する。

また、設備によっては応答倍率法による評価によらず、以下の a. ～ c. に示す解析法から選択して評価を行い、発生値を算定し評価基準値と比較する場合がある。

- a. スペクトルモーダル解析法
- b. 時刻歴応答解析法
- c. 定式化された評価式を用いた解析法（床置き機器等）

なお、上記の詳細評価は、工事計画認可申請時と同等の評価手法である。



※1 次ページに詳細説明を記載。

※2 応答倍率法による評価によらず，詳細評価する場合がある。

第 7.1.3-1 図 構造強度の評価手順

※1 応答倍率法による評価

設計時の耐震計算書等の既往評価条件と基準地震動 S_s の評価条件の比率(応答比)を算定して、その応答比を既往評価値に乗じることにより、基準地震動 S_s に対する評価対象設備の発生値が、評価基準値を上回らないことを確認する。

※応答比

A1：応答荷重比を用いた評価

設備の発生値を算定するにあたり、せん断力、モーメント、軸力を用いる機器は、基準地震動 S_s による地震力と既往評価の地震力との比を応答比とする。

A2：応答加速度比を用いた評価

設備の発生値を算定するにあたり、水平加速度、鉛直加速度を用いる機器は基準地震動 S_s による床応答スペクトル等と、既往評価で用いた床応答スペクトル等から水平加速度と鉛直加速度の比をそれぞれ求め、大きい方の値を応答比とする。

$$\text{応答比} = \text{MAX} \left(\frac{C_H}{C_{H0}}, \frac{C_V}{C_{V0}} \right)$$

C_{H0} ：既往評価による水平加速度

C_H ：基準地震動 S_s による水平加速度

C_{V0} ：既往評価による鉛直加速度

C_V ：基準地震動 S_s による鉛直加速度

7.1.4 動的機能維持の評価方法

動的機能維持に関する評価は、以下に示す機能確認済加速度との比較、または詳細評価により実施する。動的機能維持の評価手順を第 7.1.4-1 図に示す。

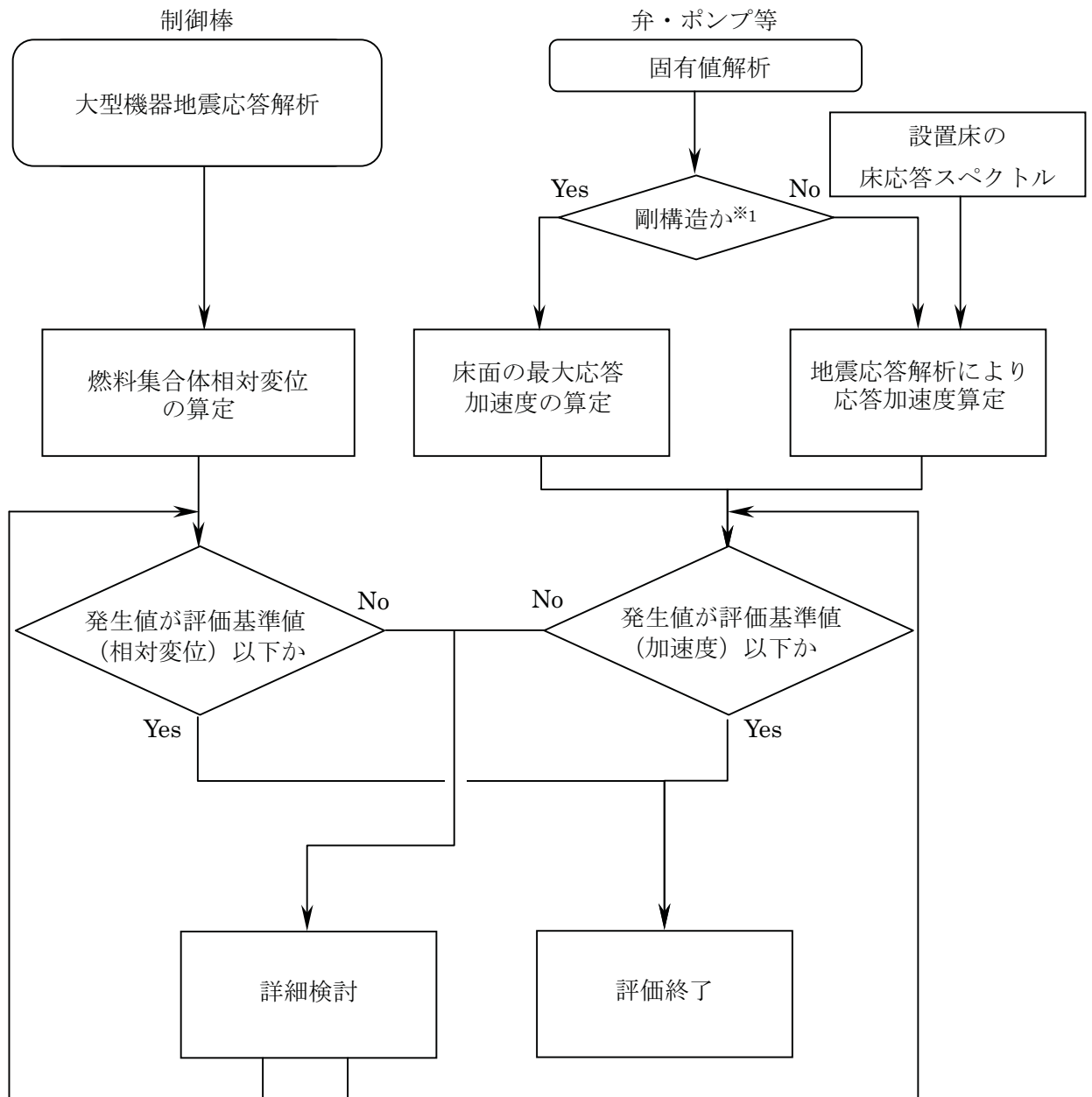
7.1.4.1 機能確認済加速度との比較

基準地震動 S_s による評価対象機器の応答加速度を求め、その加速度が機能確認済加速度以下であることを確認する。なお、機能確認済加速度とは、立形ポンプ、横形ポンプおよびポンプ駆動用タービン等、機種ごとに、試験あるいは解析により、動的機能維持が確認された加速度である。

制御棒の地震時挿入性については、基準地震動 S_s による燃料集合体の相対変位を求め、その相対変位が、試験により挿入性が確認された相対変位以下であることを確認する。

7.1.4.2 詳細評価

基準地震動 S_s による応答加速度が、機能確認済加速度を上回る機器については、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」等を参考に、動的機能維持を確認する上で評価が必要となる項目を抽出し、対象部位ごとの構造強度評価または動的機能維持評価を行い、発生値が評価基準値以下であることを確認する。⁽¹⁾



※1 1次固有周期が0.05 [秒] 以下（固有振動数が20 [Hz] 以上）の場合。

第 7.1.4-1 図 動的機能維持の評価手順

7.2 地震応答解析

7.2.1 地震応答解析モデル

機器・配管系の動的解析のモデルは、その振動特性に応じて、代表的な振動モードが適切に表現でき、応力評価等に用いる地震荷重を適切に算定できるものを使用する。また、解析モデルは既往評価で用いられたものの他、有限要素法等実績がある手法によるモデルを使用する。モデル化に当たって使用する物性値等については、既往評価で用いられたものの他、施設運用上の管理値や実測値等を考慮して設定する。

7.2.2 大型機器の地震応答解析

原子炉建屋内の大型機器（RCCV、RPV および炉内構造物等）は、大規模構造物でしかも建屋から各点で支持されているため、建屋からの各入力をより厳密に評価することを目的とし、地盤・建屋と連成した解析モデルにより基準地震動 S_s による地震応答解析を時刻歴応答解析で実施する。

解析は水平方向（NS および EW の両方向）および鉛直方向について実施する。

地震応答解析モデルは、以下に示す大型機器解析モデルと炉内構造物解析モデルがある。

7.2.2.1 大型機器解析モデル

RCCV, RPV, 原子炉遮へい壁, および原子炉本体の基礎等の地震力を算定する解析モデルである。

水平方向の解析モデルは, 多質点系でモデル化し, それぞれの質点間を曲げ, せん断剛性を有する無質量のはり, またはばねにより結合する。

鉛直方向の解析モデルは, 質点間を軸剛性 (圧縮, 引張りに対する剛性) を有するばねにより結合する。⁽¹⁾

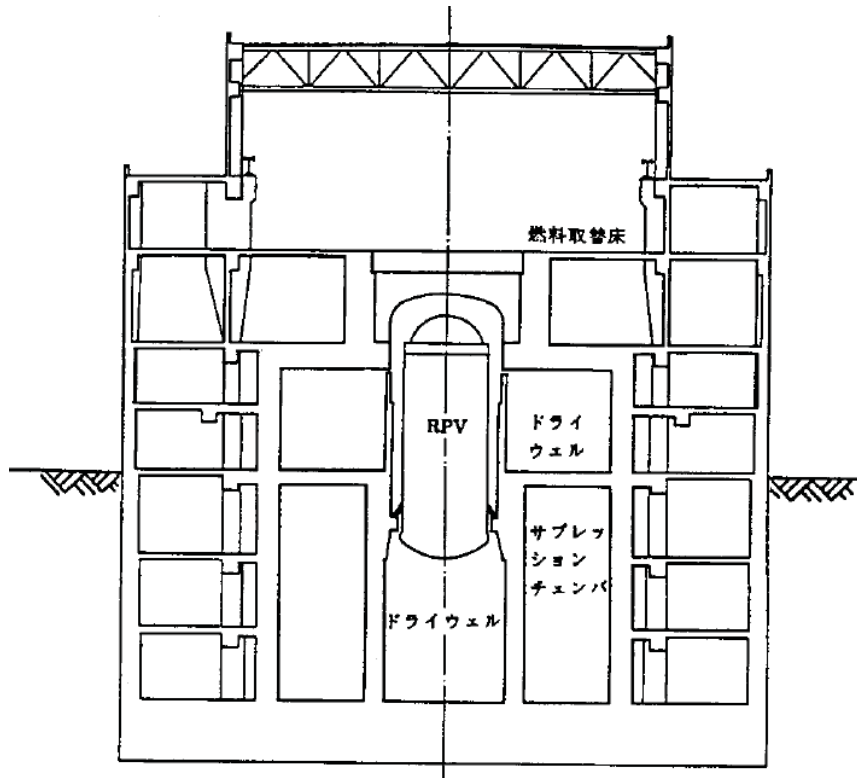
原子炉建屋模式図を第 7.2.2.1-1 図に, 水平方向の解析モデルを第 7.2.2.1-2 図および第 7.2.2.1-3 図に, 鉛直方向の解析モデルを第 7.2.2.1-4 図に示す。

7.2.2.2 炉内構造物解析モデル

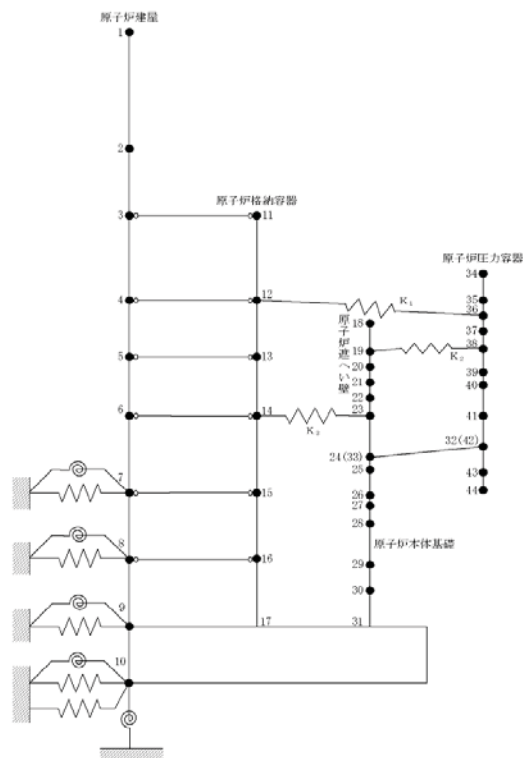
RPV 内の気水分離器, 燃料集合体, 炉心シュラウド, および制御棒案内管等の地震力を算定する解析モデルである。

モデル化の考え方は, 大型機器解析モデルと同じである。

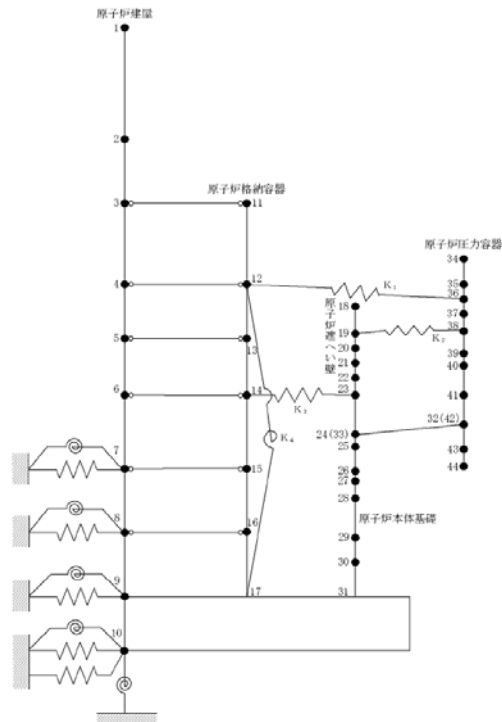
炉内構造物模式図を第 7.2.2.2-1 図に, 水平方向の解析モデルを第 7.2.2.2-2 図および第 7.2.2.2-3 図に, 鉛直方向の解析モデルを第 7.2.2.2-4 図に示す。



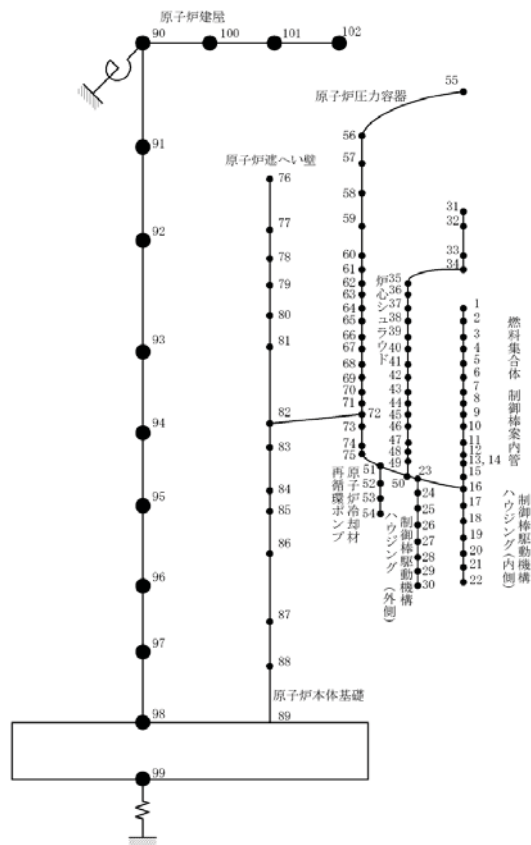
第 7.2.2.1-1 図 原子炉建屋模式図



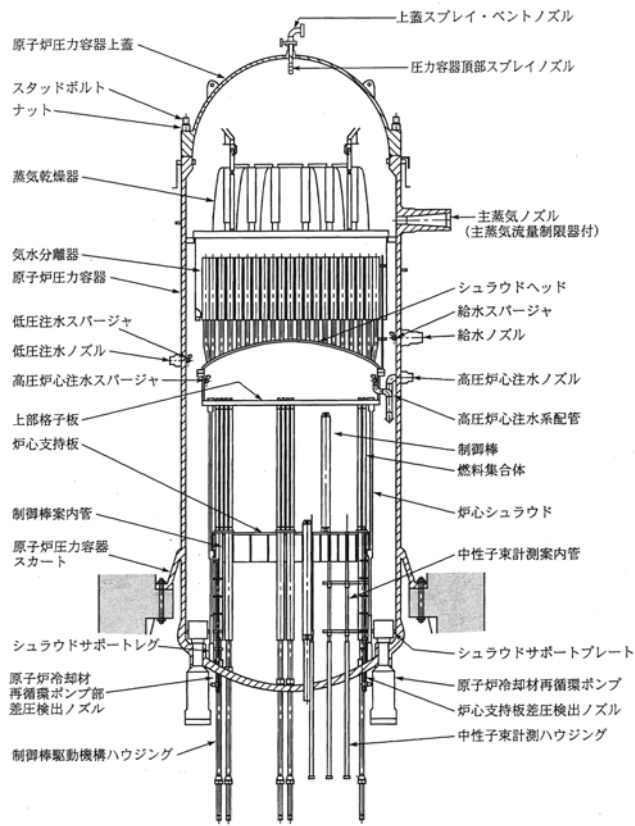
第 7.2.2.1-2 図 大型機器水平方向解析モデル (NS 方向)



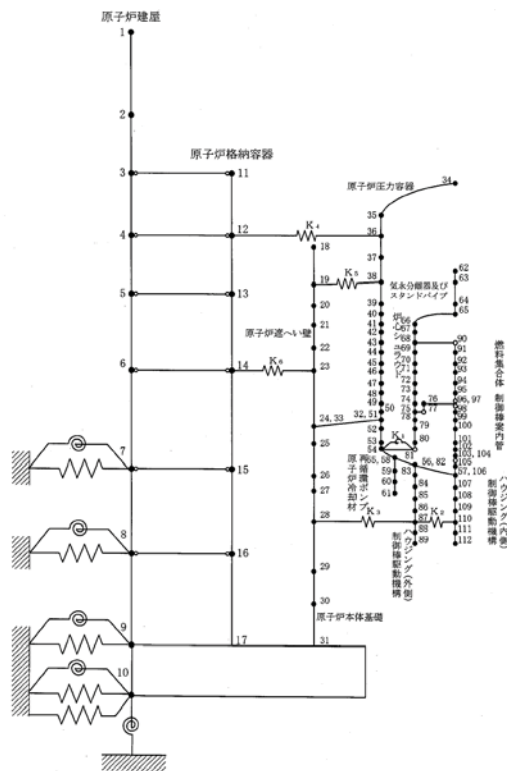
第 7.2.2.1-3 図 大型機器水平方向解析モデル (EW 方向)



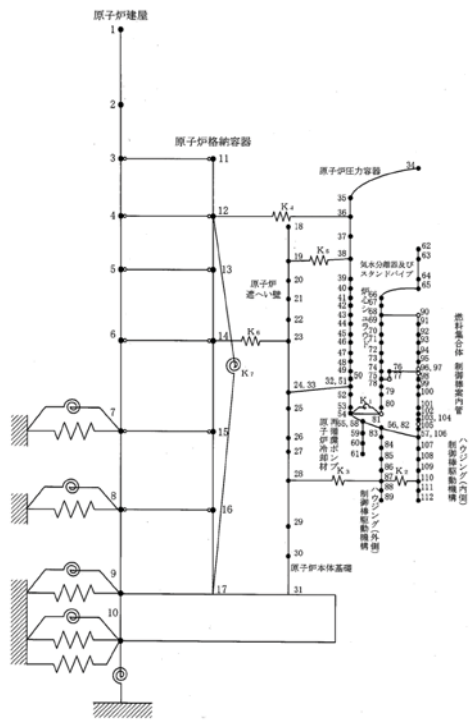
第 7.2.2.1-4 図 大型機器鉛直方向解析モデル



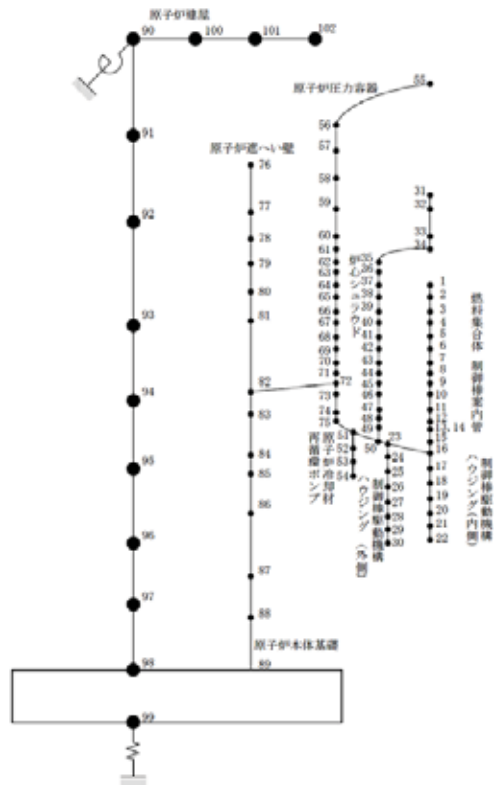
第 7.2.2.2-1 図 炉内構造物模式図



第 7.2.2.2-2 図 炉内構造物水平方向解析モデル (NS 方向)



第 7.2.2.2-3 図 炉内構造物水平方向解析モデル (EW 方向)



第 7.2.2.2-4 図 炉内構造物鉛直方向解析モデル

7.2.2.3 固有値解析結果

炉内構造物解析モデルによる固有値解析結果を以下に示す。

(1) 水平方向 (NS 方向)

水平方向 (NS 方向) の固有周期を第 7.2.2.3-1 表に示す。

第 7.2.2.3-1 表 固有周期 (水平方向 (NS 方向))

次数	固有周期 (秒)	卓越部位
1	0.433	原子炉建屋 1 次
2	0.209	燃料集合体
3	0.190	原子炉建屋 2 次
4	0.141	炉心シュラウド
5	0.103	原子炉冷却材再循環ポンプ
7	0.089	制御棒駆動機構ハウジング
11	0.068	原子炉圧力容器
12	0.065	制御棒案内管

(2) 水平方向 (EW 方向)

水平方向 (EW 方向) の固有周期を第 7.2.2.3-2 表に示す。

第 7.2.2.3-2 表 固有周期 (水平方向 (EW 方向))

次数	固有周期 (秒)	卓越部位
1	0.424	原子炉建屋 1 次
2	0.209	燃料集合体
3	0.189	原子炉建屋 2 次
4	0.141	炉心シュラウド
5	0.103	原子炉冷却材再循環ポンプ
7	0.088	制御棒駆動機構ハウジング
11	0.068	原子炉圧力容器
12	0.066	制御棒案内管

(3) 鉛直方向

鉛直方向の固有周期を第 7.2.2.3-3 表に示す。

第 7.2.2.3-3 表 固有周期（鉛直方向）

次数	固有周期（秒）	卓越部位
1	0.276	原子炉建屋 1 次
2	0.255	原子炉建屋 2 次
4	0.052	原子炉遮へい壁および 原子炉本体基礎

7.2.2.4 地震応答解析結果

大型機器解析モデルおよび炉内構造物解析モデルによる地震応答解析結果を以下に示す。

なお、評価に当たっては、基準地震動 S_s による地震力を包絡させた値を用いる。

(1) 大型機器解析モデルによる解析結果

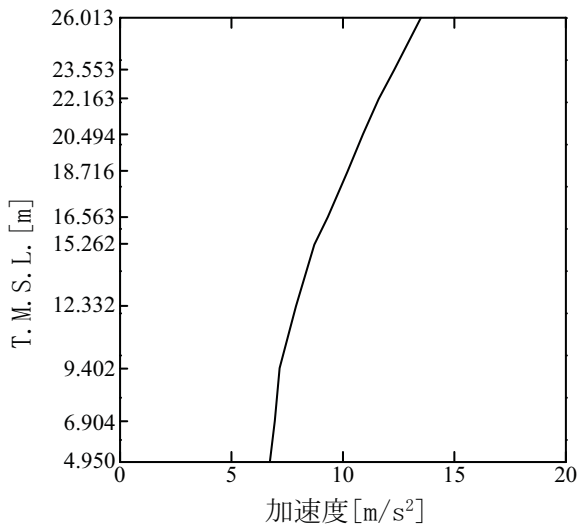
基準地震動 S_s による RPV および原子炉本体基礎の水平方向（NS 方向および EW 方向）の地震応答解析結果を第 7.2.2.4-1 図～第 7.2.2.4-12 図に示す。

また、鉛直方向の地震応答解析結果を第 7.2.2.4-13 図～第 7.2.2.4-16 図に示す。

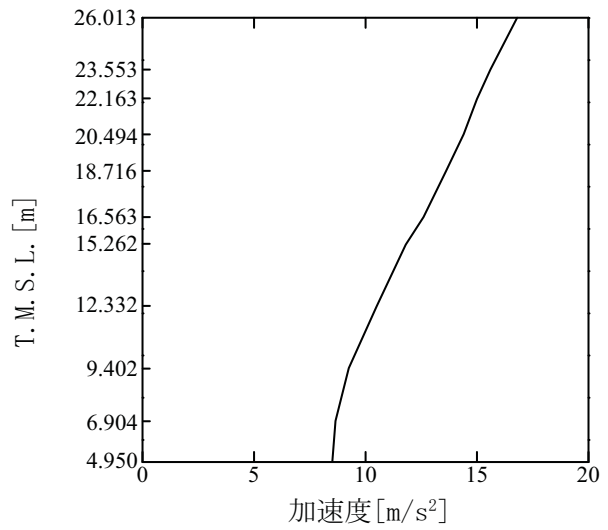
(2) 炉内構造物解析モデルによる解析結果

基準地震動 S_s による炉心シュラウドの水平方向（NS 方向および EW 方向）の地震応答解析結果を第 7.2.2.4-17 図～第 7.2.2.4-22 図に示す。

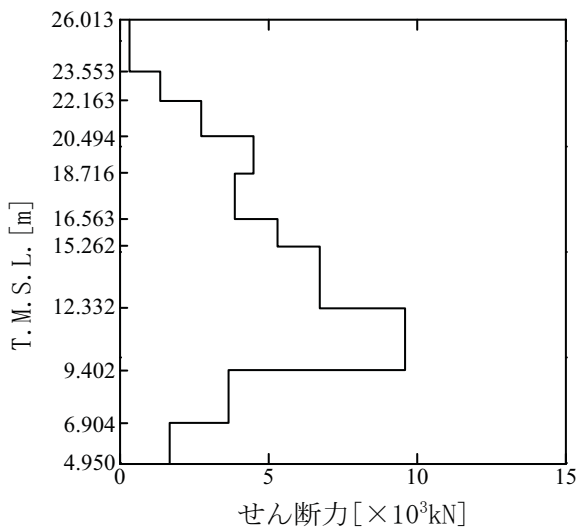
また、鉛直方向の地震応答解析結果を第 7.2.2.4-23 図および第 7.2.2.4-24 図に示す。



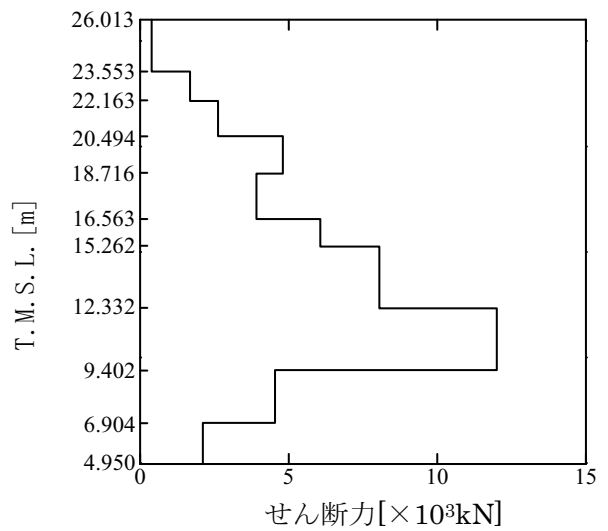
第 7.2.2.4-1 図 RPV 水平方向
最大応答加速度 (NS 方向)



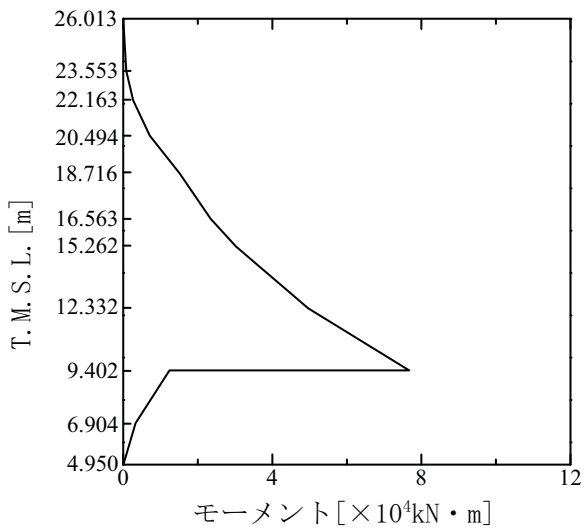
第 7.2.2.4-2 図 RPV 水平方向
最大応答加速度 (EW 方向)



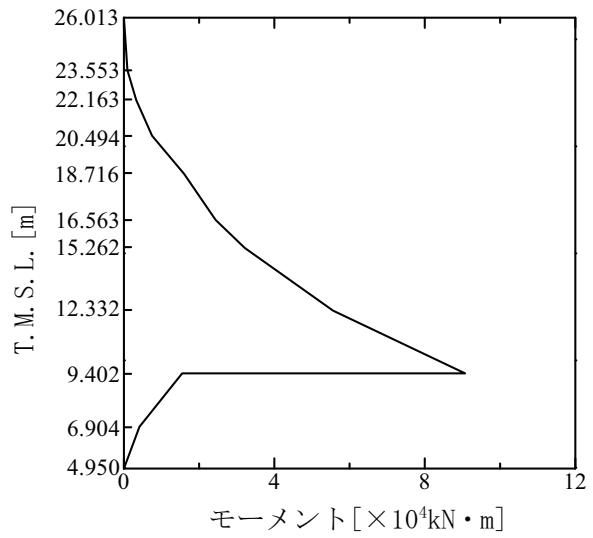
第 7.2.2.4-3 図 RPV 水平方向
最大応答せん断力 (NS 方向)



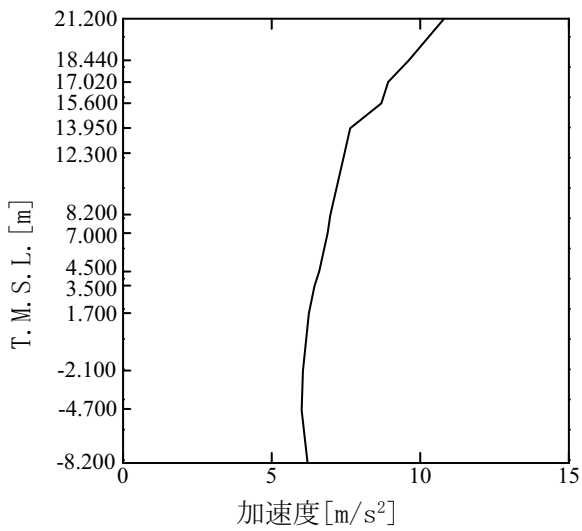
第 7.2.2.4-4 図 RPV 水平方向
最大応答せん断力 (EW 方向)



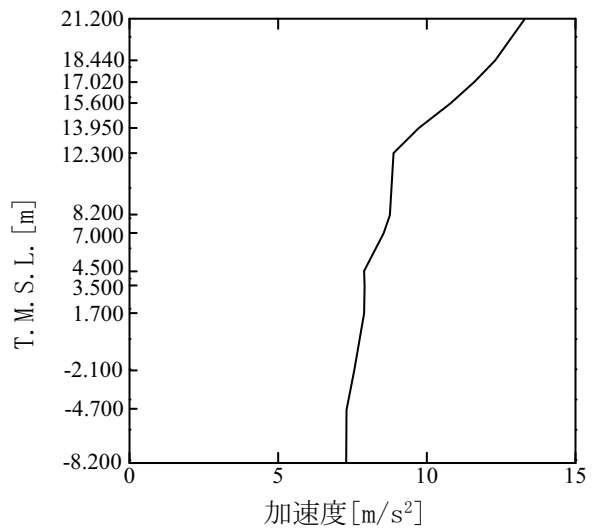
第 7.2.2.4-5 図 RPV 水平方向
最大応答モーメント (NS 方向)



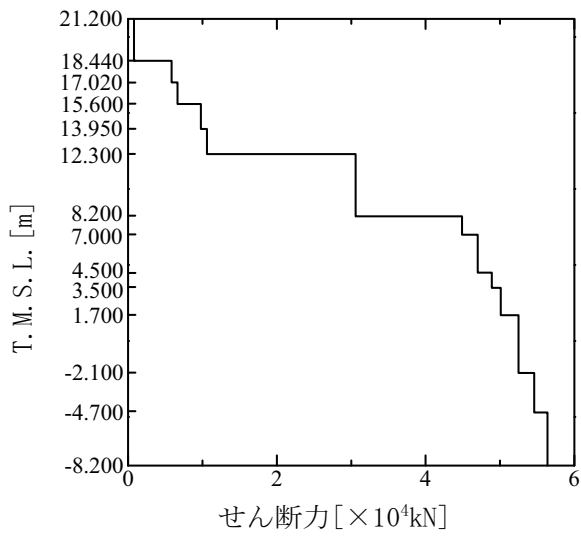
第 7.2.2.4-6 図 RPV 水平方向
最大応答モーメント (EW 方向)



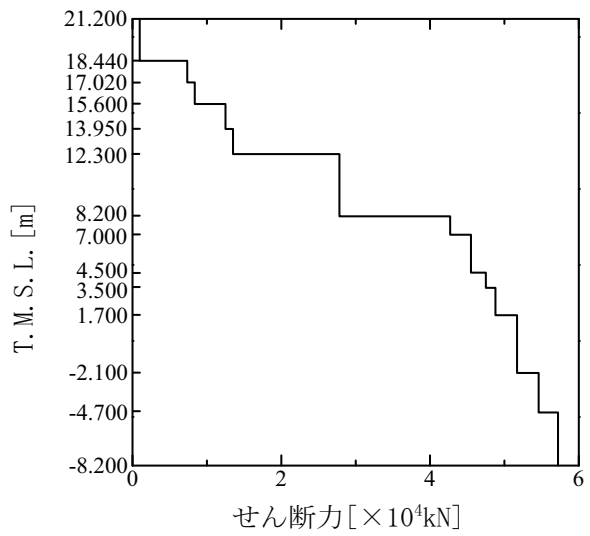
第 7.2.2.4-7 図 原子炉遮へい壁および原子炉本体基礎
水平方向最大応答加速度 (NS 方向)



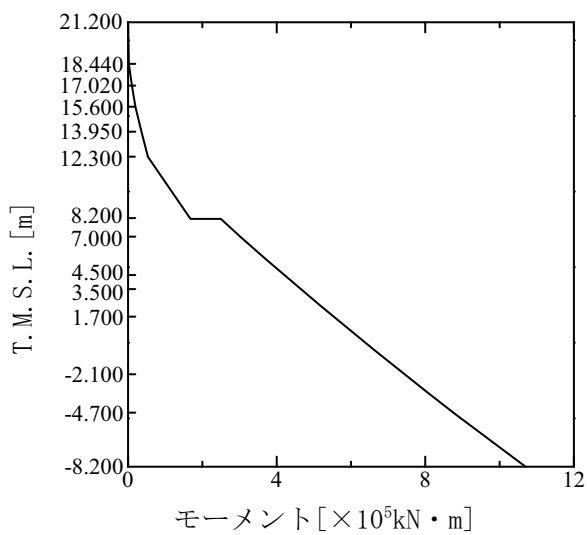
第 7.2.2.4-8 図 原子炉遮へい壁および原子炉本体基礎
水平方向最大応答加速度 (EW 方向)



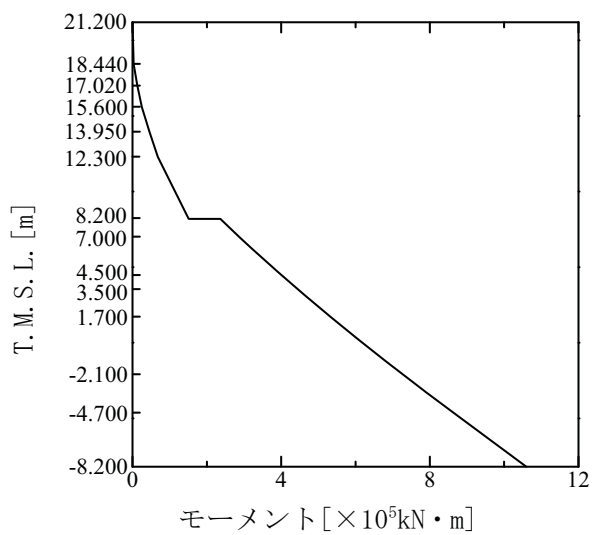
第 7.2.2.4-9 図 原子炉遮へい壁および原子炉本体基礎
水平方向最大応答せん断力 (NS 方向)



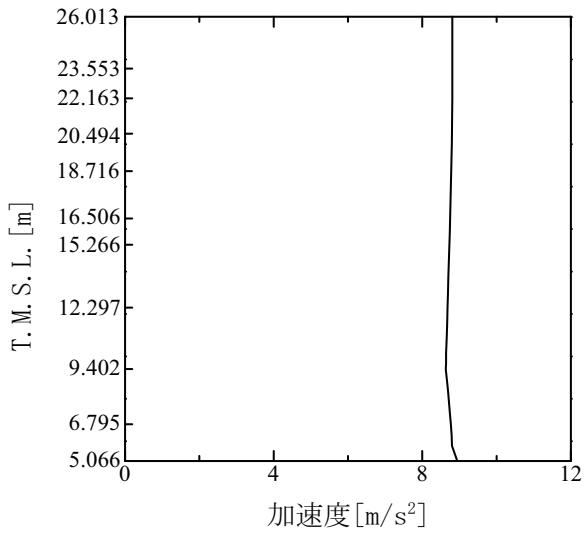
第 7.2.2.4-10 図 原子炉遮へい壁および原子炉本体基礎
水平方向最大応答せん断力 (EW 方向)



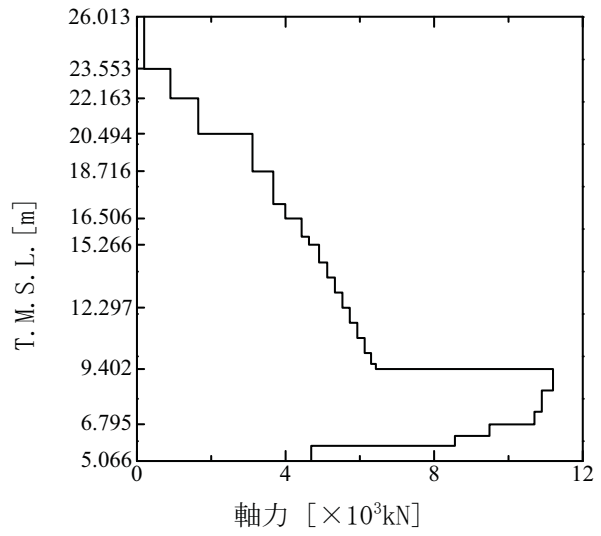
第 7.2.2.4-11 図 原子炉遮へい壁および原子炉本体基礎
水平方向最大応答モーメント (NS 方向)



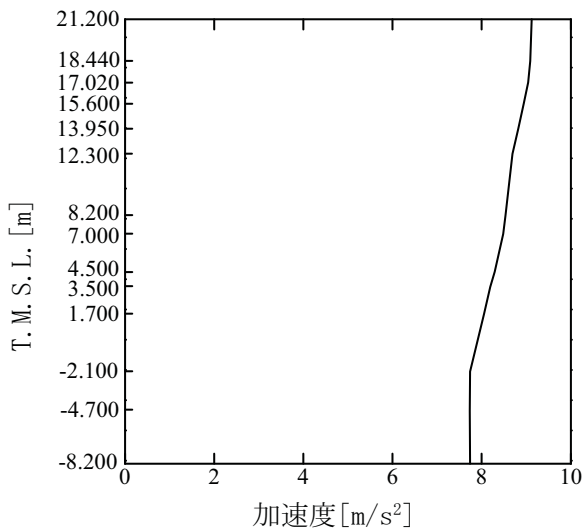
第 7.2.2.4-12 図 原子炉遮へい壁および原子炉本体基礎
水平方向最大応答モーメント (EW 方向)



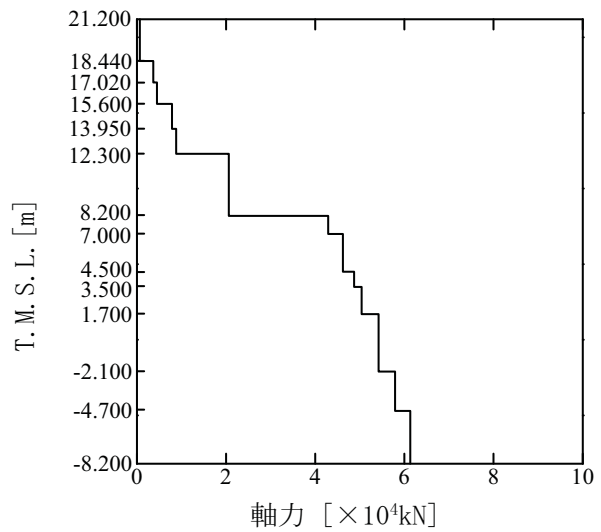
第 7.2.2.4-13 図 RPV 鉛直方向
最大応答加速度



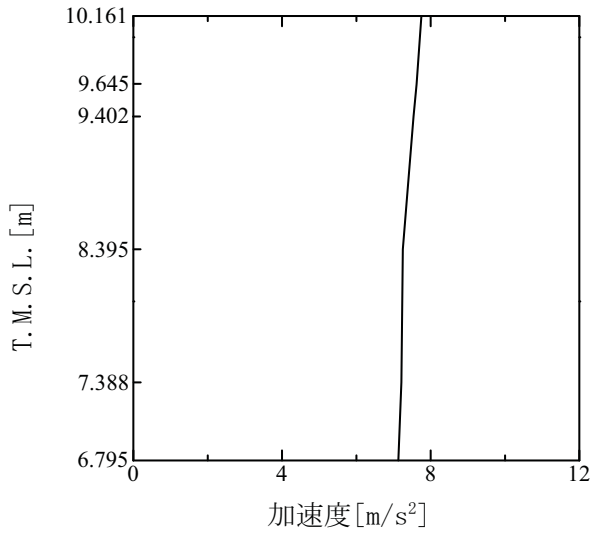
第 7.2.2.4-14 図 RPV 鉛直方向
最大応答軸力



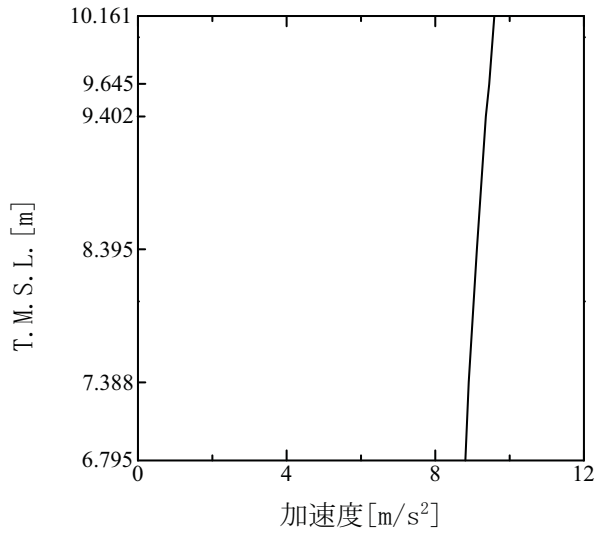
第 7.2.2.4-15 図 原子炉遮へい壁および原子炉本体基礎
鉛直方向最大応答加速度



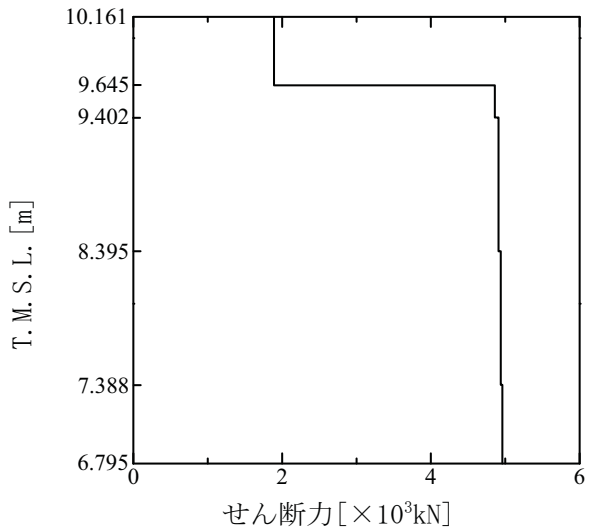
第 7.2.2.4-16 図 原子炉遮へい壁および原子炉本体基礎
鉛直方向最大応答軸力



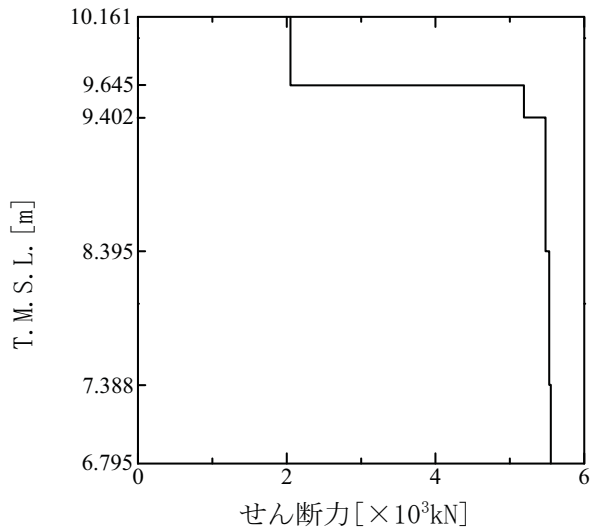
第 7.2.2.4-17 図 炉心シュラウド下部胴水平方向
最大応答加速度 (NS 方向)



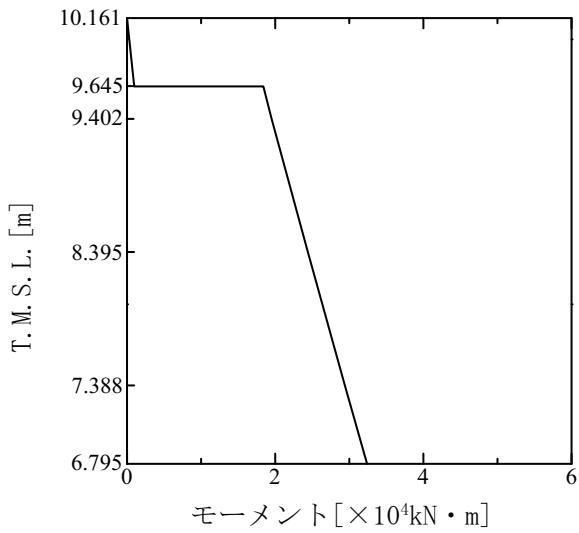
第 7.2.2.4-18 図 炉心シュラウド下部胴水平方向
最大応答加速度 (EW 方向)



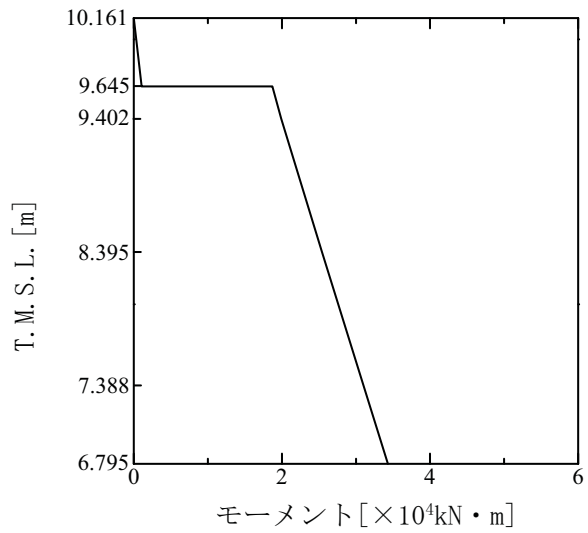
第 7.2.2.4-19 図 炉心シュラウド下部胴水平方向
最大応答せん断力 (NS 方向)



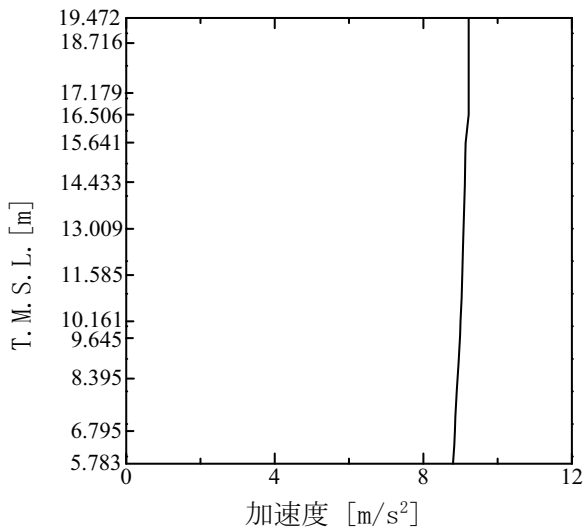
第 7.2.2.4-20 図 炉心シュラウド下部胴水平方向
最大応答せん断力 (EW 方向)



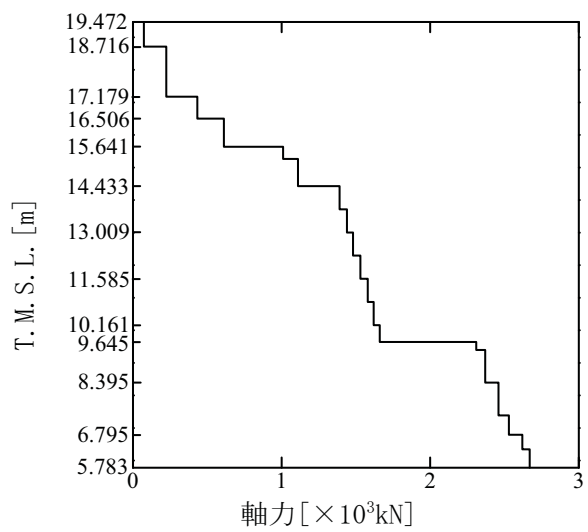
第 7.2.2.4-21 図 炉心シュラウド下部胴水平方向
最大応答モーメント (NS 方向)



第 7.2.2.4-22 図 炉心シュラウド下部胴水平方向
最大応答モーメント (EW 方向)



第 7.2.2.4-23 図 炉心シュラウド鉛直方向
最大応答加速度



第 7.2.2.4-24 図 炉心シュラウド鉛直方向
最大応答軸力

7.2.3 床応答スペクトル

床応答スペクトルは、建物・構築物、大型機器の地震応答解析で得られた床応答時刻歴を用いて水平方向および鉛直方向について算定する。

床応答スペクトルの算定に当たっては、地盤や建屋の物性等のばらつきが床応答に与える影響を考慮し、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601－1987」等を参考に周期軸方向に±10%拡幅する。⁽¹⁾

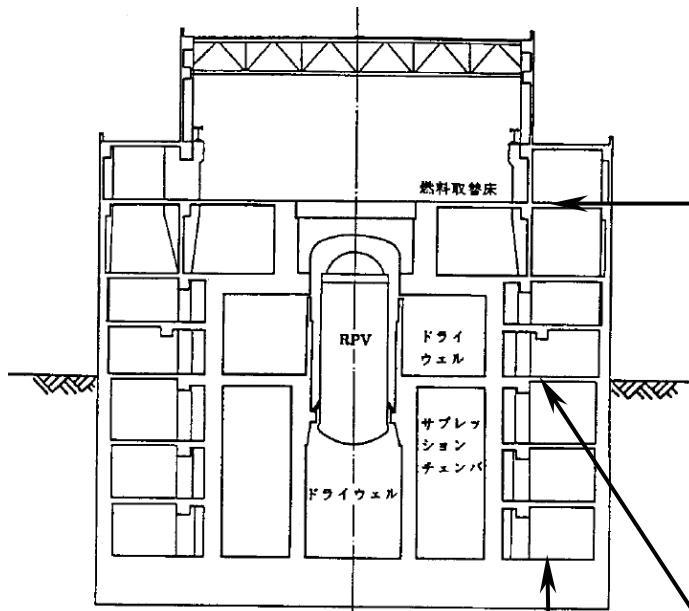
また、配管系等の評価に当たっては、基準地震動 S_s による全ての床応答スペクトルを重ね合わせた包絡スペクトルにより評価を行う。

7.2.3.1 水平方向

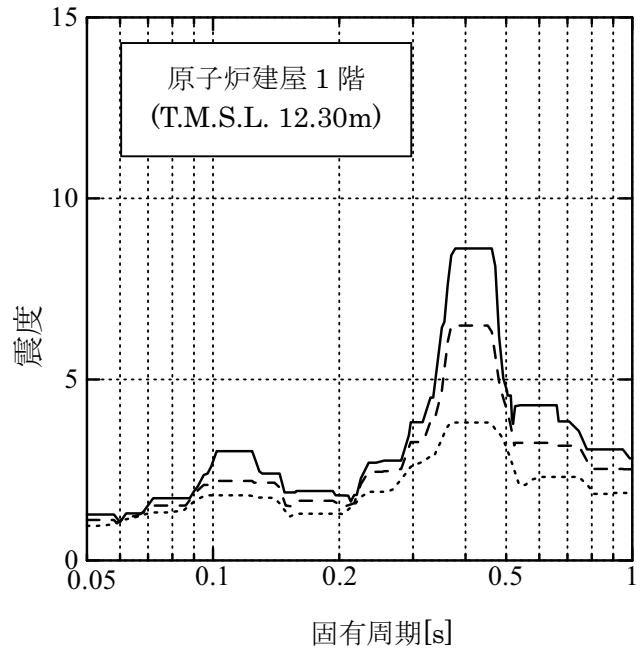
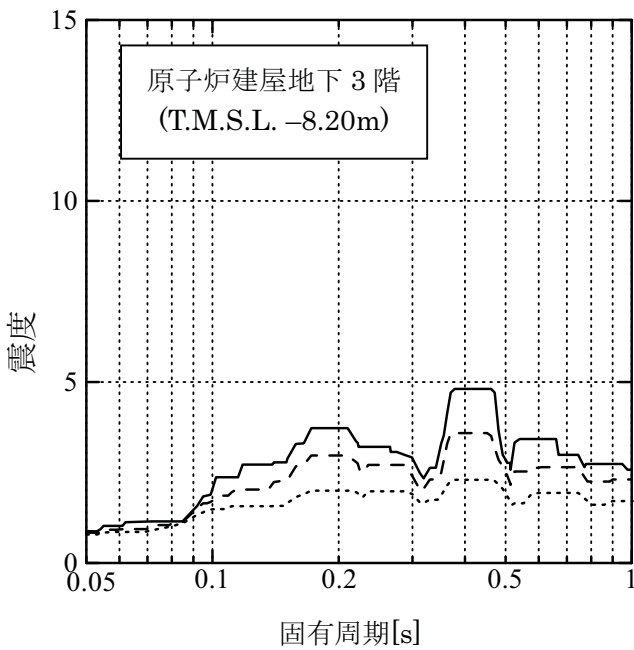
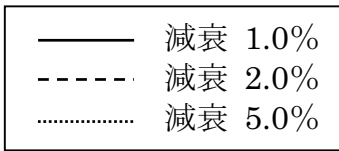
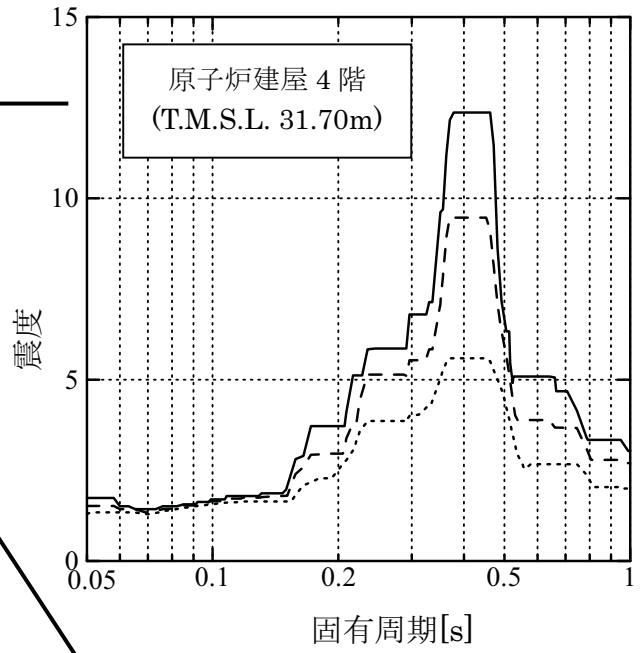
基準地震動 S_s による水平方向の床応答スペクトルの例を第 7.2.3.1-1 図～第 7.2.3.1-2 図に示す。

7.2.3.2 鉛直方向

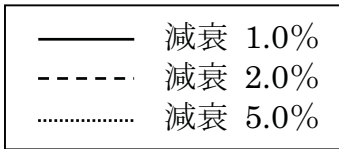
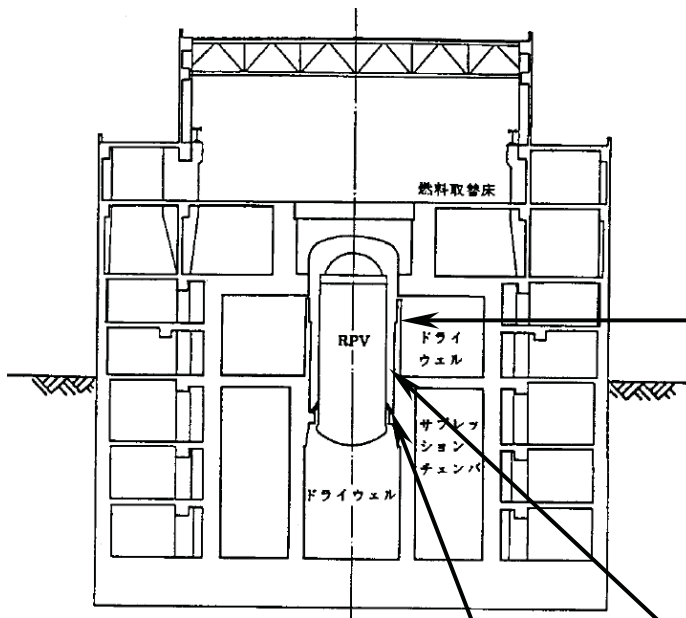
基準地震動 S_s による鉛直方向の床応答スペクトルの例を第 7.2.3.2-1 図～第 7.2.3.2-2 図に示す。



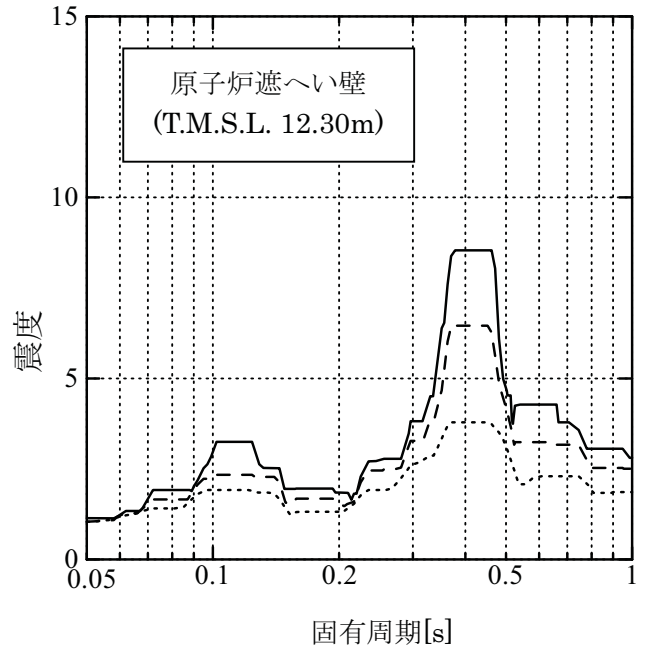
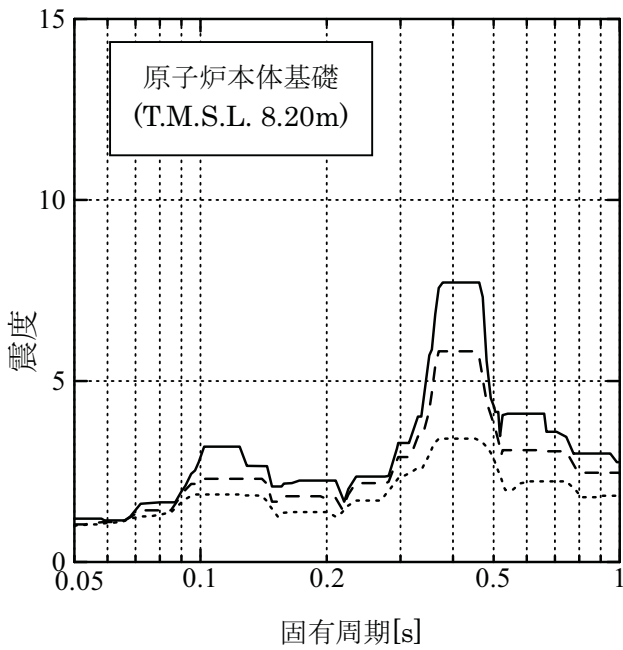
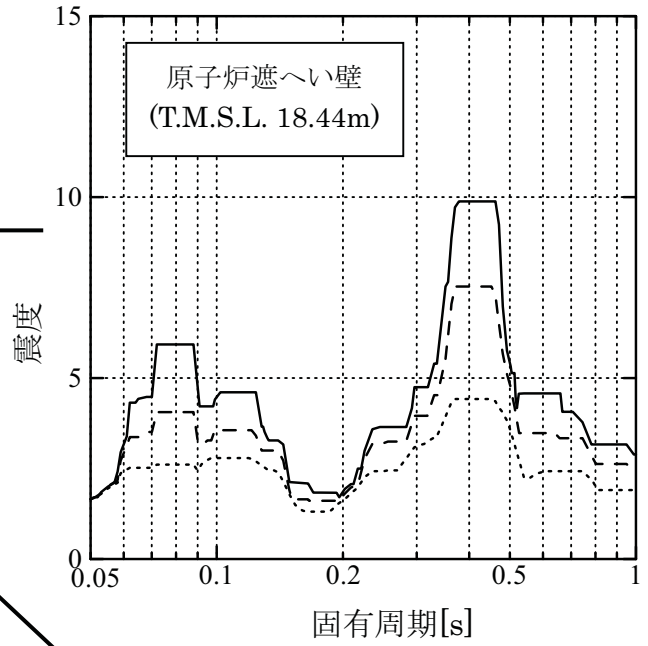
※T.M.S.L. : 東京湾平均海面



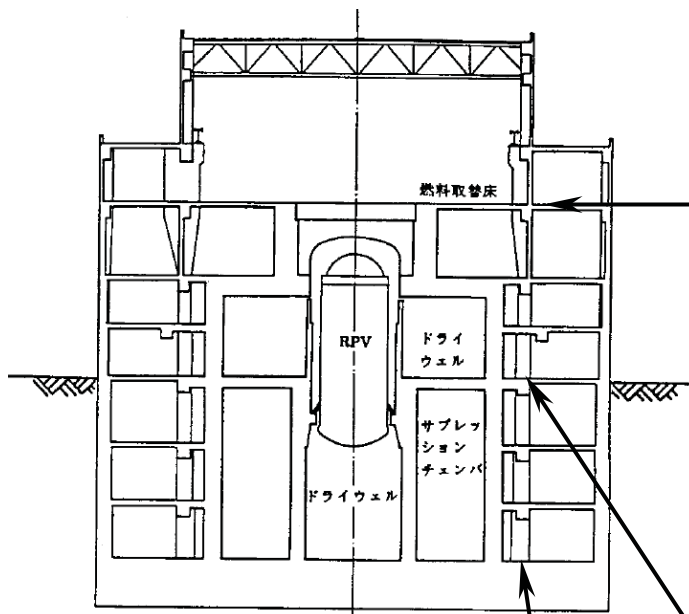
第 7.2.3.1-1 図 原子炉建屋水平方向床応答スペクトル (NS/EW 包絡)



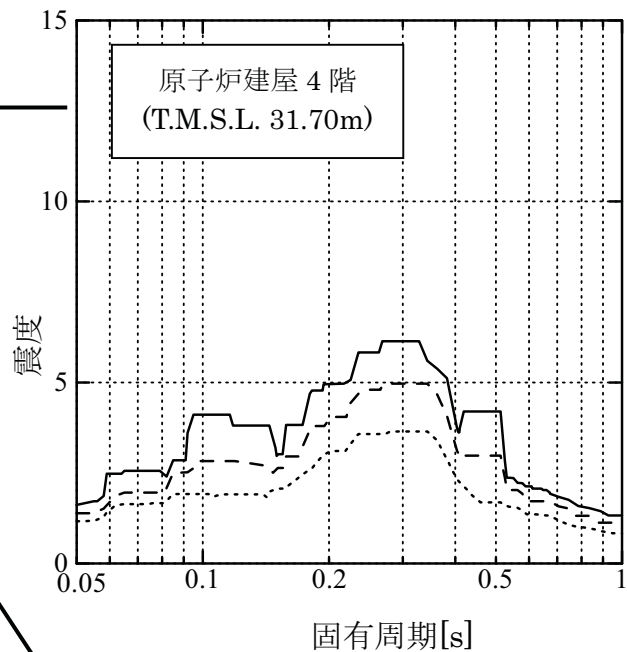
※T.M.S.L. : 東京湾平均海面



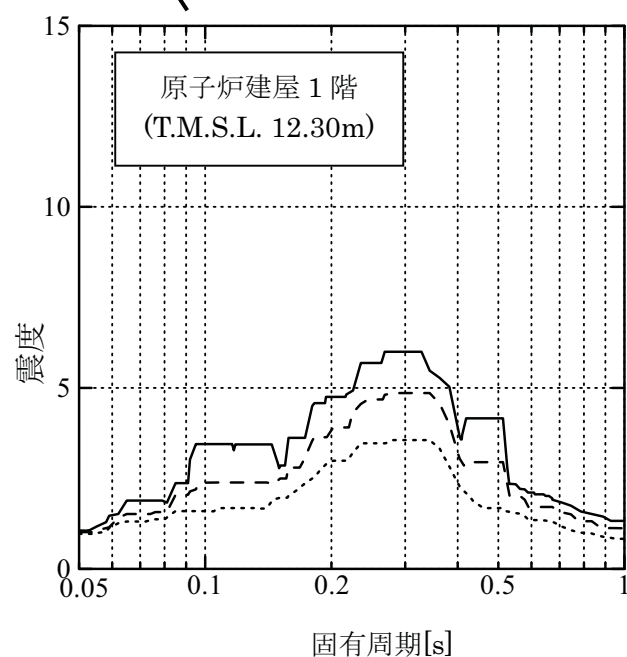
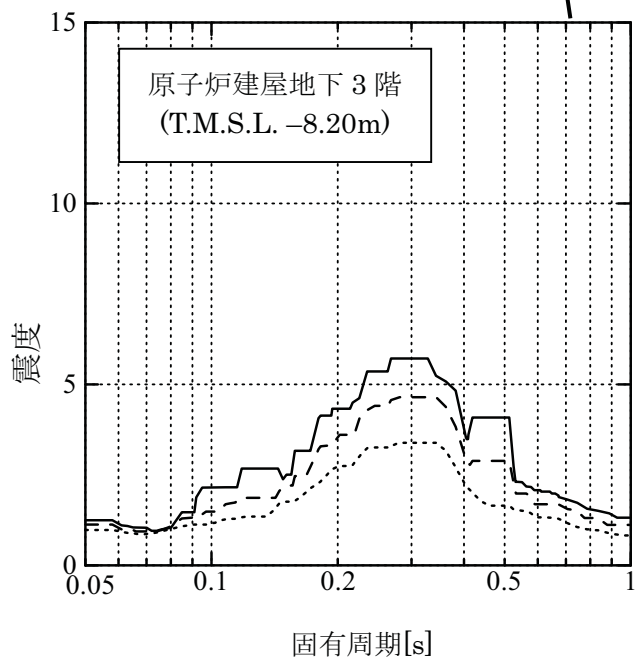
第 7.2.3.1-2 図 原子炉遮へい壁および原子炉本体基礎水平方向床応答スペクトル (NS/EW 包絡)



※T.M.S.L. : 東京湾平均海面

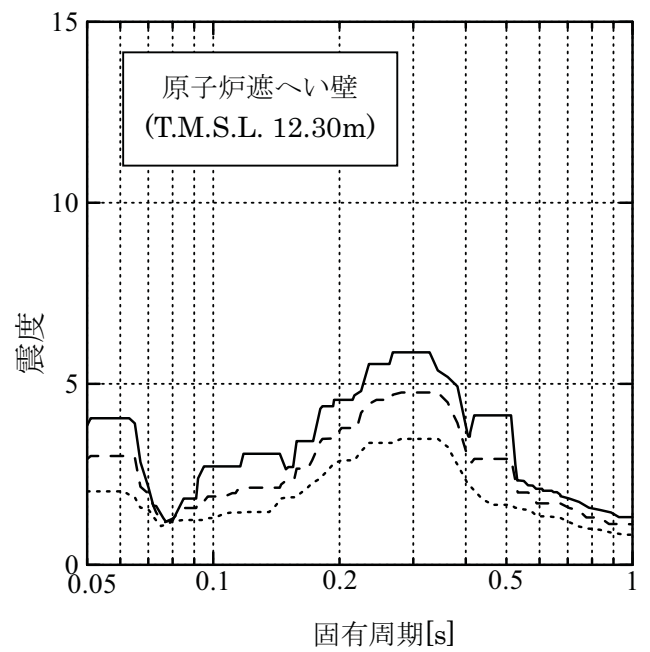
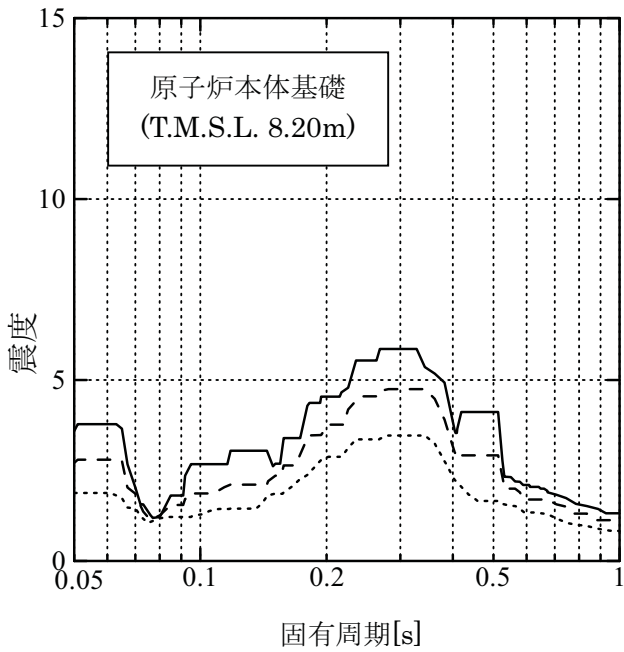
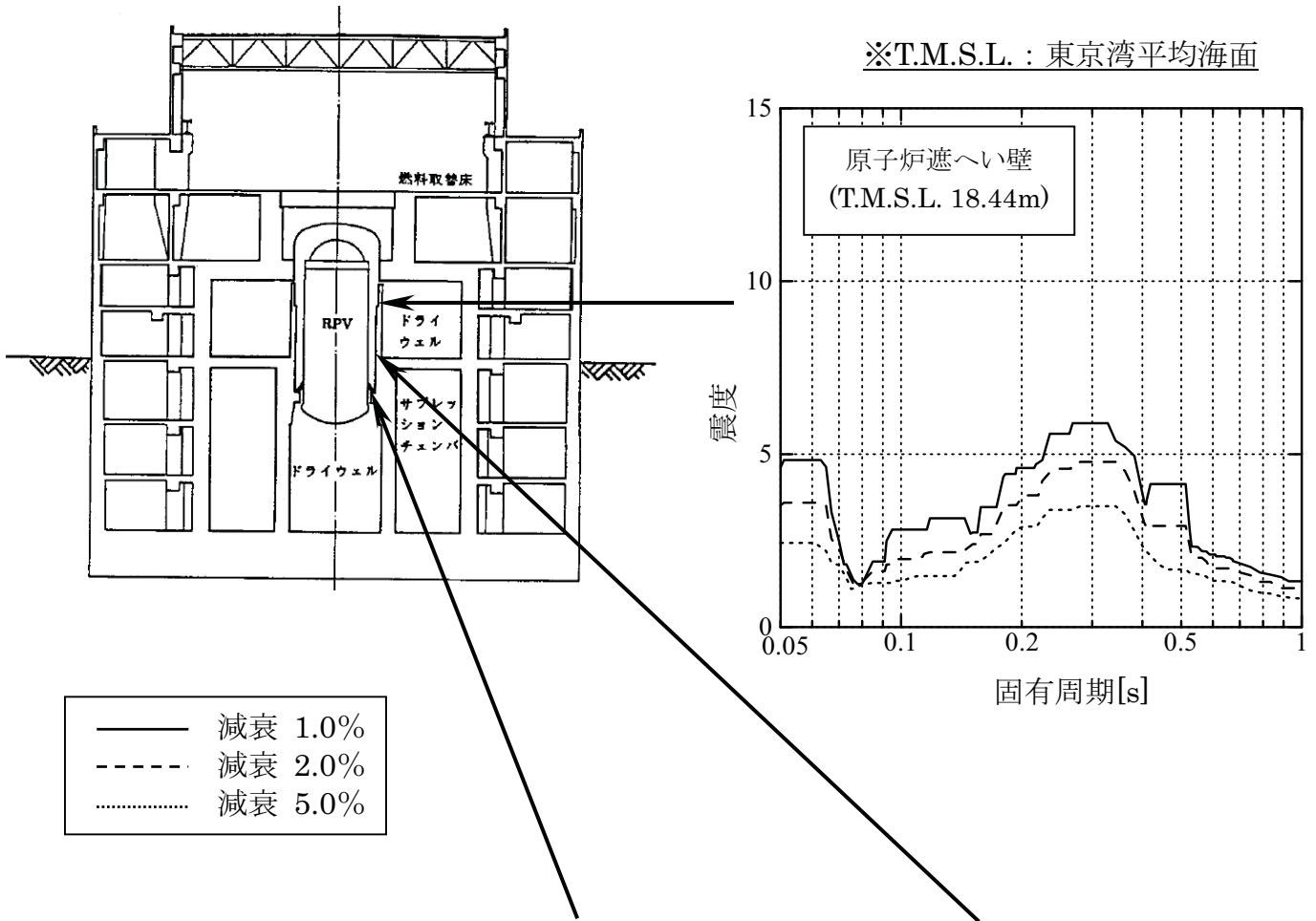


— 減衰 1.0%
 - - - 減衰 2.0%
 減衰 5.0%



第 7.2.3.2-1 図 原子炉建屋鉛直方向床応答スペクトル

※T.M.S.L. : 東京湾平均海面



第 7.2.3.2-2 図 原子炉遮へい壁および原子炉本体基礎鉛直方向床応答スペクトル

7.2.4 減衰定数

機器・配管系の地震応答解析に用いる減衰定数を第 7.2.4-1 表に示す。

水平方向の減衰定数は、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601－1991 追補版」に規定された値を基本とし、配管系、燃料取替機、および原子炉建屋クレーンについては、試験等で妥当性が確認された値も評価に用いる。(添付 7.1～7.2 参照)

鉛直方向の減衰定数は、基本的に水平方向と同様とするが、電気盤や燃料集合体等鉛直地震動に対し剛体挙動する設備は 1%とする。

第 7.2.4-1 表 機器・配管系の減衰定数

対象設備	減衰定数(%)	
	水平方向	鉛直方向
溶接構造物	1.0	1.0
ボルトおよびリベット構造物	2.0	2.0
ポンプ・ファン等の機械装置	1.0	1.0
電気盤	4.0	1.0
燃料集合体	7.0	1.0
制御棒駆動装置	3.5	1.0
配管系	0.5～3.0	0.5～3.0
使用済燃料貯蔵ラック	1.0	1.0
燃料取替機	2.0	1.5～2.0
原子炉建屋クレーン	2.0	2.0

7.3. 荷重の組み合わせ

7.3.1 運転状態と地震動との組み合わせ

通常運転時に生じる荷重および運転時の異常な過渡変化時に生じる荷重と基準地震動 S_s による地震力を組み合わせで評価する。

事故時に生じる荷重と組み合わせる地震動は、事故事象の発生確率と継続時間および基準地震動 S_s の年超過確率を踏まえ、両者が同時に発生する可能性が極めて小さい場合、具体的には「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1984」に基づき 10^{-7} /年以下であれば、基準地震動 S_s ではなく弾性設計用地震動 S_d とする。(第 7.3.1-1 図参照)

柏崎刈羽原子力発電所(5~7号機)における基準地震動 S_s の年超過確率は、第 7.3.1-2 図に示すとおり、試算値において概ね 10^{-4} /年から 10^{-5} /年であることより、事故(「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1984」に基づき、発生確率は 10^{-4} /年以下を想定)の同時発生を想定しても 10^{-7} /年を下回るため、事故時に生じる荷重と組み合わせる地震動は、弾性設計用地震動 S_d とする。

弾性設計用地震動 S_d は、基準地震動 S_s による安全機能保持をより確実なものとする観点から、第 7.3.1-3 図に示すとおり基準地震動 S_s を 0.5 倍した地震動とする。

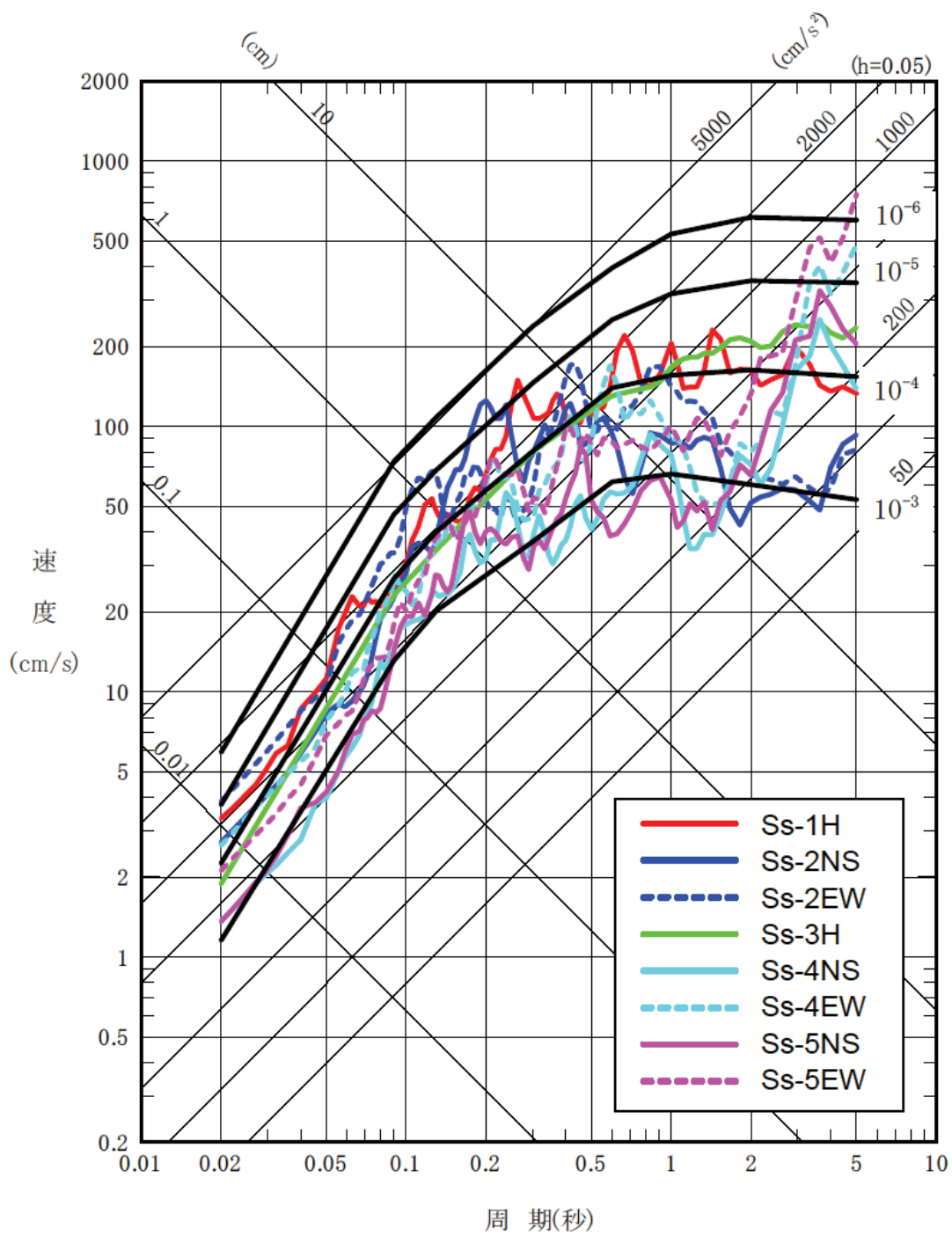
なお、弾性設計用地震動 S_d の年超過確率は、第 7.3.1-3 図に示すとおり試算値において概ね 10^{-3} /年から 10^{-4} /年である。

発生確率		1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
運転状態の発生確率 (1/年)		I	II	III	IV						
基準地震動の発生確率 (1/年)				S_1	S_2						
基準地震動 S_1 との 組合せ	従属事象	S_1 従属									
	独立事象										
	1分以内										$S_1 + II$
	1時間以内						$S_1 + II$			$S_1 + III$	
	1日以内					$S_1 + II$		$S_1 + III$		$S_1 + IV$	
1年以内			$S_1 + II$		$S_1 + III$		$S_1 + IV$				
基準地震動 S_2 との 組合せ	従属事象	S_2 従属									
	独立事象										
	1分以内	($S_2 + II$ は 10^{-9} 以下となる)									
	1時間以内									$S_2 + II$	$S_2 + III$
	1日以内						$S_2 + II$			$S_2 + III$	
1年以内			$S_2 + II$		$S_2 + III$		$S_2 + IV$				

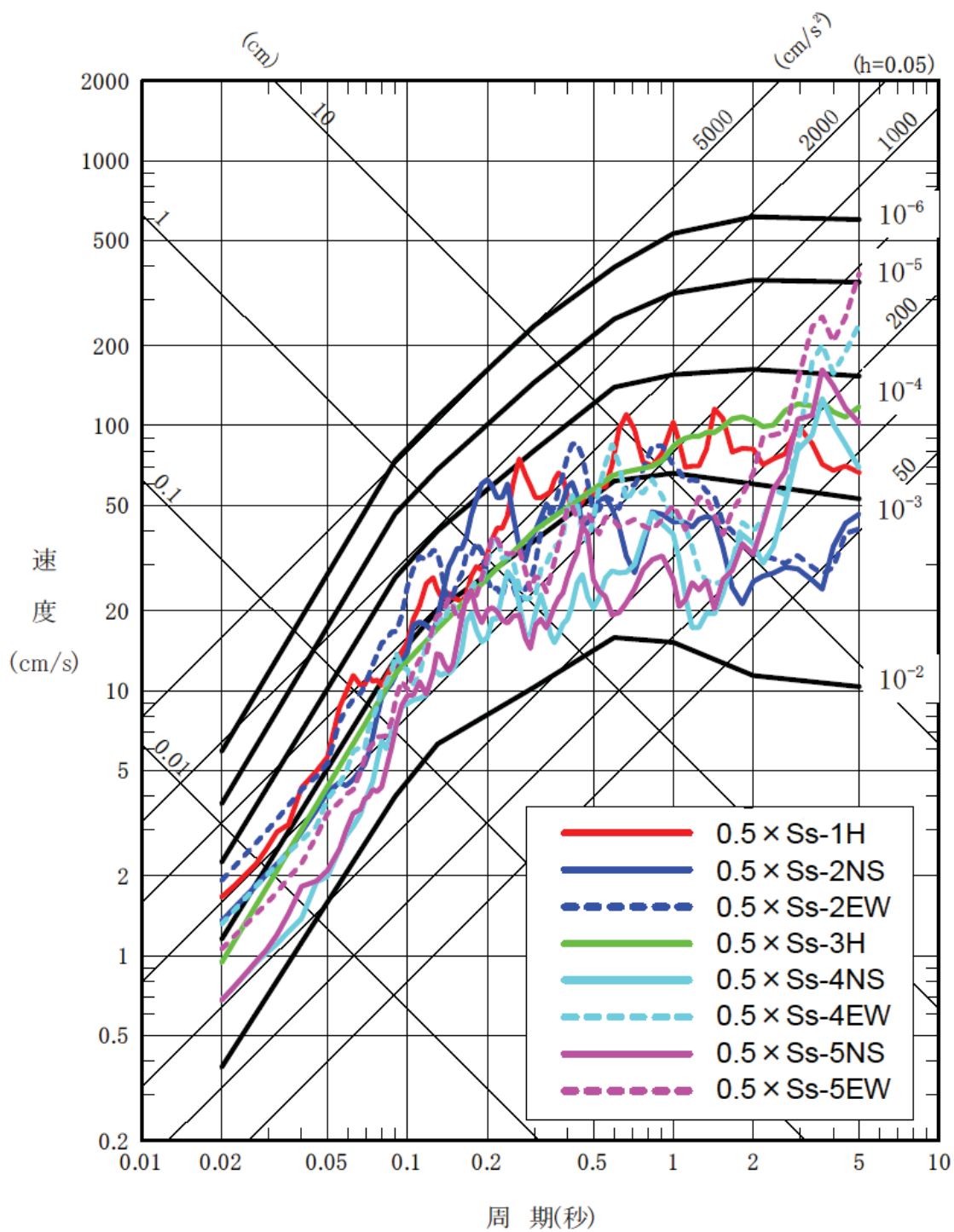
- 注：(1) 発生確率から見て
 ← 組合せが必要なもの。
 ←···· 発生確率が 10^{-7} 以下となり組合せが不要となるもの。
 (2) 基準地震動 S_2 の発生確率は $10^{-4} \sim 10^{-5}$ /サイト・年と推定されるが、ここでは $5 \times 10^{-4} \sim 10^{-5}$ /サイト・年を用いた。
 (3) 表に示す発生確率は現在の知見によるものである。

※ 図中の基準地震動 S_1 および基準地震動 S_2 は、それぞれ弾性設計用地震動 S_d および基準地震動 S_s と読み替える。

第 7.3.1-1 図 運転状態と地震動との組合せの確率的評価
 (原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1984 P.38 より引用)



第 7.3.1-2 図 基準地震動 Ss の年超過確率 (5~7 号機)



第 7.3.1-3 図 弾性設計用地震動 Sd の年超過確率 (5~7 号機)

7.4. 評価基準

7.4.1 構造強度の評価基準

構造強度評価の評価基準値は、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601－補・1984, JEAG4601－1987, JEAG4601－1991 追補版」および「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC1－2005」（以下「設計・建設規格」という。）に準拠するとともに、ほかの規格基準で規定されている値および実験等で妥当性が確認されている値等も用いる。

機器・配管系の評価基準値は、材料の過度な変形や破損に対して裕度をもった値に設定されている。機器・配管系の評価基準値を添付 7.3 に示す。

7.4.2 動的機能維持の評価基準

機能確認済加速度は、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」に準拠するとともに、試験等で妥当性が確認された値も用いる。(添付 7.4)

機能確認済加速度を第 7.4.2-1 図に示す。

詳細評価における構造強度評価の評価基準値は、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」等による。また、部位ごとの動的機能維持の評価基準値は、個別に試験等で妥当性が確認されている値を用いる。

第 7.4.2-1 表 機能確認済加速度 (1/3)

種別	機種	加速度 確認部位	機能確認済加速度	
			水平方向 (G※1)	鉛直方向 (G※1)
立形ポンプ	ピットバレル形ポンプ	コラム 先端部	10.0	1.0
	立形斜流ポンプ			
	立形単段床置形ポンプ	ケーシング 下端部		
横形ポンプ	横形単段遠心式ポンプ	軸位置	3.2 (軸直角方向)	1.0
	横形多段遠心式ポンプ		1.4 (軸方向)	
ポンプ駆動用 タービン	R C I Cタービン	重心位置	2.4	1.0
電動機	横形ころがり軸受電動機	軸受部	4.7	1.0
	横形すべり軸受電動機		2.6	
	立形ころがり軸受電動機		2.5	
	立形すべり軸受電動機			

※1 $G=9.80665(m/s^2)$

第 7.4.2-1 表 機能確認済加速度 (2/3)

種別	機種	加速度 確認部位	機能確認済加速度	
			水平方向 (G ^{※1})	鉛直方向 (G ^{※1})
ファン	遠心直結型ファン	軸受部および メカニカルシールケーシング*	2.3	1.0
	遠心直動型ファン	軸受部	2.6	
	軸流式ファン		2.4	
非常用 ディーゼル 発電機	高速形 ディーゼル機関	機関 重心位置	1.1	1.0
		ガバナ 取付位置	1.8	
往復動式 ポンプ	横形 3 連往復動式ポンプ	重心位置	1.6	1.0
弁 (一般弁およ び特殊弁)	一般弁 (グローブ弁, ゲート弁, バタフライ弁, 逆止弁)	駆動部	6.0	6.0
	主蒸気隔離弁		10.0	6.2
	主蒸気逃がし安全弁		9.6	6.1
	制御棒駆動系スクラム弁		6.0	6.0

※1 G=9.80665(m/s²)

第 7.4.2-1 表 機能確認済加速度 (3/3)

種別	機能確認済相対変位 (mm)
制御棒挿入性	40.0 ^{※1}

※1 確認済相対変位とは、加振時の挿入性試験により、規定時間内に制御棒が挿入されたことが確認された値である。

7.5. 評価結果

7.5.1 構造強度の評価結果

選定した重要な評価箇所に対する構造強度の評価結果を第 7.5.1-1 表に示す。

機器・配管系の発生値は、いずれも評価基準値以下であることを確認した。

なお、耐震強化工事を実施した設備については、工事終了後の状況を反映して評価を実施した。

第 7.5.1-1 表 構造強度評価結果 (1/9)

評価対象設備		評価部位	応力分類	発生値	評価基準値	評価方法 ※1	備考	
				MPa	MPa			
原子炉本体	原子炉圧力容器	RPV 円筒胴	胴板	一次一般膜 応力	177	320	B	
		制御棒駆動機構ハウジング貫通孔	スタブチューブ	軸圧縮 応力	85	124	B	
		原子炉冷却材再循環ポンプ貫通孔 (N1)	ケーシング側 付け根	一次一般膜+一次 曲げ応力	296	442	B	
		主蒸気ノズル (N3)	ノズル セーフエンド	一次一般膜 応力	95	320	B	
		給水ノズル (N4)	ノズル セーフエンド	一次一般膜+一次 曲げ応力	157	391	B	
	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ブラケット	ブラケット 付け根	一次一般膜+一次 曲げ応力	127	490	B	
		支持スカート	スカート	座屈	0.2	1	B	座屈に対する評価式により、発生値は評価基準値に対する比率で示す。
		原子炉圧力容器基礎ボルト	基礎ボルト	引張 応力	215	499	B	
	原子炉圧力容器 付属構造物	原子炉圧力容器スタビライザ	ロッド	引張 応力	237	513	B	
		制御棒駆動機構ハウジングレストレントビーム	プレート	曲げ 応力	111	211	B	
		原子炉冷却材再循環ポンプモータケーシング	ケーシング	軸圧縮 応力	195	207	B	
	炉内構造物	蒸気乾燥器	耐震用 ブロック せん断断面 A	平均せん断 応力	60	242	A1	
		シュラウドヘッド	鏡板	一次一般膜+一次 曲げ応力	95	222	B	
		気水分離器	スタンド パイプ	一次一般膜+一次 曲げ応力	74	205	B	
		給水スパージャ	ヘッド	一次一般膜+一次 曲げ応力	76	342	A2	
		高圧炉心注水スパージャ	ヘッド	一次一般膜+一次 曲げ応力	126	342	A2	

第 7.5.1-1 表 構造強度評価結果 (2/9)

評価対象設備		評価部位	応力分類	発生値	評価基準値	評価方法 ※1	備考	
				MPa	MPa			
原子炉本体	炉内構造物	低圧注水スパージャ	ヘッド	一次一般膜＋一次曲げ応力	62	342	A2	
		高圧炉心注水系配管 (原子炉压力容器内部)	パイプ	一次一般膜＋一次曲げ応力	61	342	A2	
		中性子束計測案内管	中性子束計測案内管	一次一般膜＋一次曲げ応力	19	222	A2	
	炉心支持構造物	炉心シュラウド	下部胴	一次一般膜応力	97	205	A1	
		シュラウドサポート	レグ	軸圧縮応力	51	260	B	
		上部格子板	グリッドプレート	一次一般膜＋一次曲げ応力	109	342	A1	
		炉心支持板	補強ビーム	一次一般膜＋一次曲げ応力	245	342	A1	
		制御棒案内管	下部溶接部	一次一般膜応力	17	148	A1	
	原子炉本体の基礎	外筒	外筒	組合せ応力度	283	427	B	
		アンカボルト	アンカボルト	引抜力	4345	6401	B	単位：kN/4.5°

第 7.5.1-1 表 構造強度評価結果 (3/9)

評価対象設備		評価部位	応力分類	発生値	評価基準値	評価方法 ※1	備考	
				MPa	MPa			
計測制御系統設備	駆動系 制御棒	水圧制御ユニット	フレーム	組合せ 応力	107	253	A2	
	ほう酸水 注入系	ほう酸水注入系 ポンプ	ポンプ取付 ボルト	せん断 応力	47	146	A2	
		ほう酸水注入系 貯蔵タンク	基礎ボルト	せん断 応力	126	159	A2	
	核計測装置	起動領域モニタ ドライチューブ	パイプ	一次一般 膜＋一次 曲げ応力	182	391	B	
		局部出力領域モニタ 検出器集合体	LPRM 検出 器集合体 カバーチューブ	一次一般 膜＋一次 曲げ応力	162	226	B	
	放射線 計測装置 管理用	燃料取替エリア 排気放射線モニタ	検出器 取付ボルト	せん断 応力	4	159	A2	
	盤	ベンチ形制御盤 (運転監視補助盤 1)	取付ボルト	せん断 応力	12	159	A2	
		垂直自立形制御盤 (安全保護系盤区分 I)	取付ボルト	引張 応力	23	207	A2	
		原子炉系 (I 系) 計装ラック	取付ボルト	せん断 応力	4	159	A2	

第 7.5.1-1 表 構造強度評価結果 (4/9)

評価対象設備		評価部位	応力分類	発生値	評価基準値	評価方法 ※1	備考	
				MPa	MPa			
原子炉冷却系統設備	主蒸気系	主蒸気逃がし安全弁逃がし弁機能用アキュムレータ	胴板	一次一般膜応力	83	248	A2	
		主蒸気逃がし安全弁自動減圧機能用アキュムレータ	胴板	一次一般膜応力	105	248	A2	
	残留熱除去系	残留熱除去系熱交換器	胴板	一次応力	288	408	A2	
		残留熱除去系ポンプ	基礎ボルト	せん断応力	14	350	A2	
	原子炉隔離時冷却系	原子炉隔離時冷却系ポンプ	基礎ボルト	引張応力	87	455	A2	
		原子炉隔離時冷却系ポンプ駆動用蒸気タービン	タービン取付ボルト	引張応力	57	444	A2	
	注水系	高圧炉心注水系ポンプ	基礎ボルト	せん断応力	20	350	A2	
	原子炉補機冷却水系	原子炉補機冷却水系熱交換器	サポートアンカボルト	せん断応力	76	159	B	※4
		原子炉補機冷却水系ポンプ	原動機取付ボルト	せん断応力	13	146	A2	
	原子炉補機冷却海水系	原子炉補機冷却海水系ポンプ	原動機取付ボルト	せん断応力	70	118	A2	
		原子炉補機冷却海水系ストレータ	基礎ボルト	せん断応力	7	366	A2	

第 7.5.1-1 表 構造強度評価結果 (5/9)

評価対象設備		評価部位	応力分類	発生値	評価基準値	評価方法 ※1	備考	
				MPa	MPa			
原子炉格納施設	原子炉格納容器	原子炉格納容器 ライナ部	ライナ プレート	圧縮 ひずみ	0.00039	0.005	B	ひずみ量を評価
		上部ドライウエル 所員用エアロック	ガセット プレート	せん断 応力	57	158	B	事故時荷重との組合せ※2
		下部ドライウエル 所員用エアロック	所員用エアロ ック円筒胴と 鏡板との取 付部	一次一般 膜+一次 曲げ応力	46	380	B	
		下部ドライウエルアクセス スリーブおよび鏡板 (所員用エアロック付)	ガセット プレート	せん断 応力	79	158	B	
		原子炉格納容器 スプレイ管	スプレイ管 案内管	一次 応力	54	363	B	
		原子炉格納容器 配管貫通部	スリーブ	一次 一般膜 応力	187	269	B	荷重条件見直しに より発生値変更 245MPa→187MPa
		原子炉格納容器 電気配線貫通部	フランジ プレート	曲げ 応力	256	317	B	
		サプレッションチェン バ出入口	ガセット プレート	せん断 応力	30	164	B	事故時荷重との組合せ※2
		ベント管	リターンラインの 垂直管との 結合部	一次一般 膜+一次 曲げ応力	54	254	B	
		ダイヤフラムフロア	面外 せん断力 (放射方向)	面外 せん断力	1187	2092	B	単位：N/mm

第 7.5.1-1 表 構造強度評価結果 (6/9)

評価対象設備		評価部位	応力分類	発生値	評価基準値	評価方法 ※1	備考		
				MPa	MPa				
放射線管理設備	生体遮へい装置	原子炉遮へい壁	開口集中部	組合せ応力度	104	235	B		
	非常用ガス処理系	非常用ガス処理系排風機	排風機取付ボルト	引張応力	169	177	A2		
		非常用ガス処理系乾燥装置	取付ボルト	せん断応力	108	341	A2		
		非常用ガス処理系フィルタ装置	取付ボルト	せん断応力	141	341	B		
	換気設備	中央制御室送風機	送風機取付ボルト	引張応力	48	189	A2		
		中央制御室排風機	原動機取付ボルト	引張応力	11	206	A2		
		中央制御室再循環送風機	基礎ボルト	引張応力	29	206	A2		
		中央制御室再循環フィルタ装置	基礎ボルト	せん断応力	47	159	A2		
	燃料設備	燃料取扱装置	燃料取替機	ブリッジ脱線防止ラグ取付ボルト	せん断応力	142	158	B	※4
			原子炉建屋クレーン	ガーダ中央部	曲げ応力	280	319	B	弾性設計用地震動Sdによる評価 ※4
使用済燃料貯蔵設備		使用済燃料貯蔵ラック	基礎ボルト	引張応力	165	184	B		
		制御棒・破損燃料貯蔵ラック	基礎ボルト	引張応力	150	184	B		

第 7.5.1-1 表 構造強度評価結果 (7/9)

評価対象設備		評価部位	応力分類	発生値	評価基準値	評価方法 ※1	備考	
				MPa	MPa			
附帯設備	非常用ディーゼル発電設備	ディーゼル機関	基礎ボルト	せん断応力	58	225	A2	
		空気だめ	胴板	一次応力	92	262	B	
		燃料ディタンク	スカート	座屈	0.23	1.0	A2	座屈に対する評価式により、発生値は評価基準値に対する比率で示す。
		発電機	機関側軸受台下部ベース 取付ボルト	引張応力	86	205	A2	
	蓄電池および充電器	蓄電池	取付ボルト	せん断応力	18	159	A2	
		充電器	取付ボルト	せん断応力	11	159	A2	
	バイタル交流電源設備	バイタル交流電源設備	取付ボルト	せん断応力	15	159	A2	

第 7.5.1-1 表 構造強度評価結果 (8/9)

評価対象設備		評価部位	応力分類	発生値	評価基準値	評価方法 ※1	備考	
				MPa	MPa			
配管	主蒸気系	主蒸気系配管本体	配管本体	一次応力	217	374	B	※4
		主蒸気系配管サポート	サポート部材	組合せ応力	167	260	B	※4
	原子炉冷却材浄化系	原子炉冷却材浄化系配管本体	配管本体	一次応力	87	363	B	※4
		原子炉冷却材浄化系配管サポート	サポート部材	スナッパ耐荷重	30	90	B	単位：kN ※4
	残留熱除去系	残留熱除去系配管本体	配管本体	一次応力	206	364	B	※4
		残留熱除去系配管サポート	サポート部材	スナッパ耐荷重	5	27	B	単位：kN ※4
	原子炉隔離時冷却系	原子炉隔離時冷却系配管本体	配管本体	一次応力	131	363	B	※4
		原子炉隔離時冷却系配管サポート	サポート部材	スナッパ耐荷重	17	45	B	単位：kN ※4
	高圧炉心注水系	高圧炉心注水系配管本体	配管本体	一次応力	126	431	B	※4
		高圧炉心注水系配管サポート	サポート部材	組合せ応力	129	280	B	※4
	給水系	給水系配管本体	配管本体	一次応力	195	380	B	※4
		給水系配管サポート	サポート部材	組合せ応力	247	280	B	※4
	放射性ドレン移送系	放射性ドレン移送系配管本体	配管本体	一次応力	92	366	B	
		放射性ドレン移送系配管サポート	サポート部材	組合せ応力	178	280	B	
	原子炉補機冷却水系	原子炉補機冷却水系配管本体	配管本体	一次応力	156	344	B	※4
		原子炉補機冷却水系配管サポート	サポート部材	組合せ応力	0.91	1.0	B	※3 ※4

第 7.5.1-1 表 構造強度評価結果 (9/9)

評価対象設備			評価部位	応力分類	発生値	評価基準値	評価方法 ※1	詳細評価
					MPa	MPa		
配管	冷却海水系 原子炉補機	原子炉補機冷却海水系配管本体	配管本体	一次応力	66	354	B	※4
		原子炉補機冷却海水系配管サポート	サポート部材	組合せ応力	189	280	B	※4
	制御棒駆動系	制御棒駆動系配管本体	配管本体	一次応力	120	318	B	
		制御棒駆動系配管サポート	サポート部材	組合せ応力	228	246	B	
	ほう酸水注入系	ほう酸水注入系配管本体	配管本体	一次応力	76	208	B	
		ほう酸水注入系配管サポート	サポート部材	組合せ応力	0.48	1.0	A1	※3
	非常用ガス処理系	非常用ガス処理系配管本体	配管本体	一次応力	63	363	B	
		非常用ガス処理系配管サポート	サポート部材	組合せ応力	0.63	1.0	B	※3
	可燃性ガス濃度制御系	可燃性ガス濃度制御系配管本体	配管本体	一次応力	117	309	B	
		可燃性ガス濃度制御系配管サポート	サポート部材	組合せ応力	112	160	B	
	不活性ガス系	不活性ガス系配管本体	配管本体	一次応力	128	300	B	※4
		不活性ガス系配管サポート	サポート部材	組合せ応力	171	280	B	※4

※1 「評価方法」の欄に記載されている[A1], [A2], [B]の凡例は、以下のとおり。

A1：応答倍率法において、基準地震動 Ss による地震力と既往評価の地震力との応答比を用いた評価方法

A2：応答倍率法において、基準地震動 Ss による床応答スペクトル等と、既往評価で用いた床応答スペクトル等から水平加速度と鉛直加速度の比をそれぞれ求め、大きい方の値を用いた評価方法

B：詳細評価（スペクトルモーダル解析法等による評価）

※2 事故時荷重と組み合わせる地震動である弾性設計用地震動 Sd による評価結果である。

※3 圧縮力と曲げ応力を受ける部材の組合せ応力は次式を満足しなければならない

$$(\text{圧縮応力}/\text{許容圧縮応力}) + (\text{曲げ応力}/\text{許容曲げ応力}) \leq 1$$

※4 耐震強化工事実施

7.5.2. 動的機能維持の評価結果

動的機能維持の評価結果を第 7.5.2-1 表に示す。

各機器の応答加速度が機能確認済加速度以下であることを確認した。

制御棒の地震時挿入性について、基準地震動 S_s による燃料集合体の相対変位が、試験により挿入性が確認された相対変位以下であることを確認した。

第 7.5.2-1 表 動的機能維持評価結果 (1/3)

評価対象設備	機能確認済加速度との比較					詳細評価 ^{※2}
	加速度 確認部位	水平加速度 (G ^{※1})		上下加速度 (G ^{※1})		
		応答 加速度	機能確認済 加速度	応答 加速度	機能確認済 加速度	
残留熱除去系ポンプ	コラム 先端部	0.76	10.0	0.79	1.0	—
原子炉隔離時冷却系ポンプ	軸位置	0.76	1.4	0.79	1.0	—
原子炉隔離時冷却系ポンプ 駆動用蒸気タービン	重心位置	0.76	2.4	0.79	1.0	—
高压炉心注水系ポンプ	コラム 先端部	0.76	10.0	0.79	1.0	—
原子炉補機冷却水系ポンプ	軸位置	0.86	1.4	0.74	1.0	—
原子炉補機冷却海水系ポンプ	コラム 先端部	0.86	10.0	0.74	1.0	—
ほう酸水注入系ポンプ	重心位置	0.97	1.6	0.88	1.0	—
非常用ガス処理系排風機	軸受部および メカニカルシグ	0.97	2.3	0.88	1.0	—
中央制御室送風機	軸受部および メカニカルシグ	1.26	2.3	0.90	1.0	—
中央制御室排風機	軸受部	1.26	2.6	0.90	1.0	—
中央制御室再循環送風機	軸受部	1.21	2.6	0.87	1.0	—
非常用ディーゼル機関	機関 重心位置	0.89	1.1	0.85	1.0	—
	ガバナ 取付位置	0.89	1.8	0.85	1.0	—

※1 G=9.80665 (m/s²)

※2 応答加速度が機能確認済加速度を上回る場合に実施する。

第 7.5.2-1 表 動的機能維持評価結果 (2/3)

評価対象設備		機能確認済加速度との比較					詳細評価※2
		加速度 確認部位	水平加速度 (G※1)		上下加速度 (G※1)		
			応答 加速度	機能確認済 加速度	応答 加速度	機能確認済 加速度	
弁	主蒸気系 (主蒸気内側隔離弁 (C))	弁駆動部	2.96	10.0	1.12	6.2	—
	主蒸気系 (主蒸気逃がし安全弁 (K))	弁駆動部	6.32	9.6	1.53	6.1	—
	原子炉冷却材浄化系 (CUW 吸込ライン内側隔離弁)	弁駆動部	3.06	6.0	1.22	6.0	—
	残留熱除去系 (RHR 注入弁 (A))	弁駆動部	4.0	6.0	1.0	6.0	—
	原子炉隔離時冷却系 (RCIC 蒸気ライン外側隔離弁)	弁駆動部	2.35	6.0	0.99	6.0	—
	高圧炉心注水系 (HPCF CSP 側吸込弁 (C))	弁駆動部	1.43	6.0	0.97	6.0	—
	給水系 (FDW 原子炉給水ライン 外側隔離弁 (A))	弁駆動部	1.5	6.0	1.0	6.0	—
	原子炉補機冷却水系 (RCW ポンプ (A) 吐出逆止弁)	弁駆動部	1.1	6.0	1.0	6.0	—
	原子炉補機冷却海水系 (RSW 海水ストレーナ (C) ブロー弁)	弁駆動部	1.1	6.0	0.9	6.0	—
	非常用ガス処理系 (SGTS フィルタ装置出口弁 (A))	弁駆動部	1.31	6.0	1.08	6.0	—
	可燃性ガス濃度制御系 (FCS 出口逆止弁 (A))	弁駆動部	2.66	6.0	1.02	6.0	—

※1 $G=9.80665 \text{ (m/s}^2\text{)}$

※2 応答加速度が機能確認済加速度を上回る場合に実施する。

第 7.5.2-1 表 動的機能維持評価結果 (3/3)

評価対象設備	燃料集合体の地震時 相対変位 (mm)	確認済 相対変位 (mm)
制御棒 (地震時の挿入性)	15.9	40.0

7.6. 参考文献

- (1) (財) 原子力発電技術機構(2001)：耐震設計高度化調査原子炉建屋・機器の水平・上下応答評価法の調査報告書
- (2) (社) 日本電気協会(2006)：配管系設計用減衰定数適正化に関する検討，第 9 回機器・配管系検討会資料 No. 9-3-2-2(5)，平成 18 年 5 月 12 日
- (3) (社) 日本電気協会(2006)：クレーン類の設計用減衰定数に関する検討，第 9 回機器・配管系検討会資料 No. 9-3-2-2(2)，平成 18 年 5 月 12 日
- (4) (社) 日本電気協会(2006)：水平・鉛直地震動に対する動的機器の地震時機能維持評価法の改定案について，第 15 回機器・配管系検討会資料 No. 15-4-4-2，平成 18 年 9 月 11 日

配管系の減衰定数について

配管系の設計用減衰定数は、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601－1991 追補版」に規定されているが、新たに実施した振動試験等をもとに、保温材の付加減衰定数およびUボルトを用いた支持具を有する配管系の減衰定数を定め、配管系の耐震安全性評価に用いる（表-1）。

保温材とUボルト支持配管系の減衰定数に関する検討結果⁽²⁾を以下に示す。

(1) 保温材の付加減衰定数

現行の保温材による設計用付加減衰定数(0.5%)を設定するために用いられたデータと、その後実施された無機多孔質保温材を対象とした試験データを再整理した結果、配管強度上問題とならない小変位領域を除き、付加減衰比が1.0%以上確保されていることから、保温材の付加減衰定数として1.0%を使用する。

金属保温材については、原子力工学試験センター（現（財）原子力発電技術機構）の耐震信頼性実証試験において、無機多孔質保温材と金属保温材が混在する配管系の振動試験が行われており、その試験結果を調査したところ、金属保温施工範囲が配管全長の40%以下の場合には付加減衰定数を1.0%として問題ないことを確認したことから、これを使用する。なお、金属保温施工範囲が配管全長の40%を超える配管系については、従来の付加減衰定数0.5%を使用する。

(2) Uボルトを用いた支持具を有する配管系の減衰定数

現行のスナッパ及び架構レストレイント支持主体の配管系の減衰定数は、消散エネルギー評価式を用いた減衰推算法により設定されているが、Uボルト支持配管系についてはこのような検討がされていない。そこで、Uボルト支持配管系の消散エネルギー評価法を用いた減衰推算法を策定し、実規模配管系による振動試験により、その妥当性を確認した。

この減衰推算法により、実機のUボルト支持配管系の解析評価を行った結果、配管の自重を受けるUボルト支持具が4個以上の配管系に対する減衰定数が2.0%であったことから、これを使用する。

表-1 耐震安全性評価に使用する配管系の減衰定数

配管区分		減衰定数 (%) ※1	
		保温材有	保温材無
I	スナッパ及び架構レストレイント支持主体の配管系で、その支持具（スナッパ又は架構レストレイント）の数が4個以上のもの	<u>3.0</u>	2.0
II	スナッパ、架構レストレイント、ロッドレストレイント、ハンガ等を有する配管系で、アンカ及びUボルトを除いた支持具の数が4個以上であり、配管区分Iに属さないもの	<u>2.0</u>	1.0
III	Uボルトを有する配管で、架構で水平配管の自重を受けるUボルトの数が4以上のも	<u>3.0</u>	<u>2.0</u>
IV	配管区分I、IIおよびIIIに属さないもの	<u>1.5</u>	0.5

※1 「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」から変更した箇所を下線で示す。

燃料取替機および原子炉建屋クレーンの減衰定数について

燃料取替機および原子炉建屋クレーンについては、振動試験で得られた減衰比に基づき、水平・鉛直それぞれの方向の減衰定数を定め、耐震安全性評価に用いる。

原子炉建屋クレーンおよび燃料取替機の減衰定数に関する検討結果⁽³⁾を以下に示す。

現行の燃料取替機および原子炉建屋クレーンの減衰定数は、溶接構造物の設計用減衰定数である 1.0%を用いているが、実際には、各構造部材の材料減衰および摩擦やガタに起因する構造減衰が期待できると考えられる。

そこで燃料取替機および原子炉建屋クレーンそれぞれについて、実機構造を模擬した試験体により振動試験を行い、減衰比を確認した。

その結果、鉛直方向については、燃料取替機のトロリがガーダ端部にある場合を除き、振幅の増加に従い減衰比が増加する傾向を示した。また、強度上問題とならない小振幅領域を除き、減衰比は 2.0%以上が確保されていた。燃料取替機のトロリがガーダ端部にある場合では、振幅が増加しても減衰比が大きくなりにくい傾向を示し、その減衰比は 1.5%以上であった。

水平方向については、鉛直方向に比べて大きな減衰比が得られており、またトロリ位置が減衰比に与える影響が小さいことを確認した。

これらの試験結果に基づき、燃料取替機および原子炉建屋クレーンの減衰定数として表-1 に示す値を使用する。

表-1 耐震安全性評価に使用する燃料取替機および
原子炉建屋クレーンの減衰定数

対象設備	減衰定数 (%)	
	水平方向	鉛直方向
燃料取替機	2.0	トリ位置中央 2.0
		トリ位置端部 1.5
原子炉建屋クレーン	2.0	2.0

機器・配管系の構造強度の評価基準値について

機器・配管系の構造強度の評価基準値は、材料の過度な変形や破損に対して裕度をもった値に設定されている。機器・配管系の構造強度の評価基準値を以下に示す。

なお、供用状態および材質の表記については以下とする。

D (IVAS) : 「原子力発電所耐震設計技術指針」において規定される許容応力状態 (「設計・建設規格」の供用状態 D に相当)

C (IIIAS) : 「原子力発電所耐震設計技術指針」において規定される許容応力状態 (「設計・建設規格」の供用状態 C に相当)

ASS : オーステナイト系ステンレス鋼

HNA : 高ニッケル合金

1. 容器の評価基準値

(1) クラス 1 容器の評価基準値

クラス 1 容器の評価基準値を表 1-1 に示す。

表 1-1 クラス 1 容器の評価基準値

応力分類		一次一般膜応力	一次膜応力 + 一次曲げ応力	軸圧縮応力
供用状態	D(IVAS)	<ul style="list-style-type: none"> ・ ASS および HNA : Min[2.4S_m, (2/3)S_u] ・ それ以外の材料 : (2/3)S_u 	左欄の α ^{※1} 倍	1.5Min[S _m , B ^{※2}]

※ 1 α : 形状係数

※ 2 B : 「設計・建設規格」付録材料図表 Part7 より求めた値

(2) クラス MC 容器の評価基準値

クラス MC 容器の評価基準値を表 1-2 に示す。

表 1-2 クラス MC 容器の評価基準値

応力分類		一次一般膜応力	一次膜応力 + 一次曲げ応力
供 用 状 態	D(IV_{AS})	(1) 構造上の連続部 ・ ASS および HNA : $\text{Min}[2S, 0.6S_u]$ ・ それ以外の材料 : $0.6S_u$ (2) 不連続部分 ・ ASS および HNA : $1.2S$ ・ それ以外の材料 : $\text{Min}[S_y, 0.6S_u]$	左欄の α^{*1} 倍

※ 1 α : 形状係数

(3) クラス 2, 3 容器の評価基準値

クラス 2, 3 容器の評価基準値を表 1-3 に示す。

表 1-3 クラス 2, 3 容器の評価基準値

応力分類		一次一般膜応力	一次膜応力 + 一次曲げ応力
供 用 状 態	D(IV_{AS})	$0.6S_u$	左欄の 1.5 倍

2. 管の評価基準値

(1) クラス 1 配管の評価基準値

クラス 1 配管の評価基準値を表 2-1 に示す。

表 2-1 クラス 1 配管の評価基準値

応力分類		一次応力 (膜+曲げ)
供用状態	D(IV _A S)	Min[3S _m , 2S _y]

(2) クラス 2, 3 配管の評価基準値

クラス 2, 3 配管の評価基準値を表 2-2 に示す。

表 2-2 クラス 2, 3 配管の評価基準値

応力分類		一次応力 (膜+曲げ)
供用状態	D(IV _A S)	・地震以外の短期機械的荷重を含む場合 Min[3S _h , 2S _y]
		・地震以外の短期機械的荷重を含まない場合 0.9S _u

(3) クラス 4 配管の評価基準値

非常用ガス処理系のように管を使用する場合については、クラス 2 配管の評価基準値を準用する。

3. 炉心支持構造物の評価基準値

(1) 炉心支持構造物の評価基準値

炉心支持構造物の評価基準値を表 3-1 に示す。

表 3-1 炉心支持構造物の評価基準値

応力分類		一次一般膜応力	一次膜応力 + 一次曲げ応力	平均せん断 応力
供 用 状 態	D(IV _A S)	<ul style="list-style-type: none"> ・ ASS および HNA : Min[2.4S_m, (2/3)S_u] ・ それ以外の材料 : (2/3)S_u 	左欄の 1.5 倍	1.2 S _m

(2) 炉心支持構造物の座屈の防止

軸圧縮荷重と曲げモーメントが負荷されるクラス炉心支持構造物は、供用状態 C(III_AS)および D(IV_AS)において次の不等式を満足しなければならない。

$$\frac{\alpha(P/A)}{f_c} + \frac{\alpha(M/Z)}{f_b} \leq 1$$

上記式は $\ell/R \leq 5$ の場合に適用できる。ただし、強め輪等により $\ell/R \leq 0.5$ となる場合は、強め輪の効果を考慮することができる。ここで、

- P : 軸圧縮荷重 (N)
- A : 断面積 (mm²)
- M : 曲げモーメント (N・mm)
- Z : 断面係数(mm³)
- f_c : 軸圧縮荷重に対する座屈応力(MPa)
- f_b : 曲げモーメントに対する座屈応力 (MPa)
- α : 安全率
- ℓ : 胴長(mm)
- R : 円筒の平均半径(mm)

a. 軸圧縮荷重に対する座屈応力 (f_c)

$$f_c = \begin{cases} F & (\eta \leq \eta_1) \\ F \times \left\{ 1 - \frac{1}{6800g} (F - \Phi_c\{\eta_2\})(\eta - \eta_1) \right\} & (\eta_1 < \eta < \eta_2) \\ \Phi_c\{\eta\} & (\eta_2 \leq \eta \leq 800) \end{cases}$$

ここに,

$$\Phi_c\{\eta\} = 0.6 \frac{E}{\eta} \left[1 - 0.901 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{1}{16}\sqrt{\eta}\right) \right\} \right]$$

b. 曲げモーメントに対する座屈応力 (f_b)

$$f_b = \begin{cases} F & (\eta \leq \eta_1) \\ F \times \left\{ 1 - \frac{1}{8400g} (F - \Phi_b\{\eta_3\})(\eta - \eta_1) \right\} & (\eta_1 < \eta < \eta_3) \\ \Phi_b\{\eta\} & (\eta_3 \leq \eta \leq 800) \end{cases}$$

ここに,

$$\Phi_b\{\eta\} = 0.6 \frac{E}{\eta} \left[1 - 0.731 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{1}{16}\sqrt{\eta}\right) \right\} \right]$$

c. 安全率 (α)

安全率は、供用状態 C(Ⅲ_{AS})および D(Ⅳ_{AS})に対して、

$$\alpha = \begin{cases} 1.0 & (\eta \leq \eta_1) \\ 1.0 + \frac{F}{13600g} (\eta - \eta_1) & (\eta_1 < \eta < \eta_2) \\ 1.5 & (\eta_2 \leq \eta) \end{cases}$$

ここに,

F : 設計・建設規格 SSB-3121.1 において定める F の値(MPa)

E : 材料の縦弾性係数(MPa)

t : 円筒の板厚(mm)

g : 重力加速度(=9.80665m/s²)

$\eta = R/t$, $\eta_1 = 1200g/F$, $\eta_2 = 8000g/F$, $\eta_3 = 9600g/F$

4. 炉内構造物の評価基準値

炉内構造物については、炉心支持構造物の評価基準値を準用する。

5. 支持構造物の評価基準値

支持構造物の評価基準値で使用する記号の意味は以下のとおりである。

$f_t^{(注)}$	：許容引張応力	(MPa)
$f_s^{(注)}$	：許容せん断応力	(MPa)
$f_c^{(注)}$	：許容圧縮応力	(MPa)
$f_b^{(注)}$	：許容曲げ応力	(MPa)
$f_p^{(注)}$	：許容支圧応力	(MPa)

(注) クラス 3 支持構造物およびその他支持構造物に対する f_t , f_s , f_c , f_b , f_p の値の算出においては、F 値として次の値を用いる。

$$F = \text{Min}[S_y, 0.7S_u]$$

ただし、使用温度が 40°C を超える ASS および HNA は、

$$F = \text{Min}[1.35S_y, 0.7S_u, S_y(\text{RT})]$$

f_t^* , f_s^* , f_c^* , f_b^* , f_p^*

：供用状態 D(IV_AS) に対する評価基準値を算出する際に f_t , f_s , f_c , f_b , f_p の値を算出する際において、 S_y および $S_y(\text{RT})$ をそれぞれ $1.2S_y$ および $1.2S_y(\text{RT})$ と読み替えて算出した値(MPa)

クラス 1, 2, 3, MC 支持構造物の評価基準値は以下の(1), (2)によるものとする。

(1) クラス 1 支持構造物の評価基準値

a. 容器に溶接により取付けられる支持構造物

容器に溶接により取付けられる支持構造物であって、その損壊が耐圧部の損壊を生じさせるおそれのあるものについては容器の耐圧部と同じ評価基準値とする。

b. 上記以外の支持構造物(ボルト等を除く)

ボルト等を除く評価基準値を表 6-1 に示す。

なお、座屈に対する評価が必要な場合、クラス MC 容器の座屈に対する評価式を準用することができる。

表 6-1 クラス 1 支持構造物の評価基準値—ボルト等を除く

応力 分類 供用 状態	一 次 応 力 ^{※1}				
	引張	せん断	圧縮	曲げ	支圧
D(IV _{AS})	$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$	$1.5f_c^*$	$1.5f_b^*$	$1.5f_p^*$

※1 応力の組合せが考えられる場合、組合せ応力に対しても評価を行うこと。

c. ボルト等

ボルト等の評価基準値を表 6-2 に示す。

表 6-2 クラス 1 支持構造物の評価基準値—ボルト等

応力 分類 供用 状態	一 次 応 力 ^{※1}	
	引張	せん断
D(IV _{AS})	$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$

※1 応力の組合せが考えられる場合、組合せ応力に対しても評価を行うこと。

(2) クラス MC, 2, 3 支持構造物の評価基準値

前頁(1)クラス 1 支持構造物の評価基準値を準用する。

(3) スナッパの評価基準値

スナッパの評価基準値は、以下に示す①～③のいずれかを用いる。

- ①スナッパメーカーによる保証値
- ②試験による許容基準値
- ③スナッパ構成部品の構造強度評価に基づく許容基準値

(4) 構築物（原子炉本体の基礎，原子炉遮へい壁等）の評価基準値

構築物（原子炉本体の基礎，原子炉遮へい壁等）の評価基準値を表 6-3 に示す。

表 6-3 構築物(原子炉本体の基礎，原子炉遮へい壁等)の評価基準値

施設名	部位	供用状態	評価基準値
原子炉本体の基礎 原子炉遮へい壁 等	鋼材	D(IV _{AS})	「鋼構造設計規準－許容応力度設計法－」(社団法人 日本建築学会(2005年9月))における短期許容応力度

(5) 原子炉本体の基礎（アンカボルト）の評価基準値

コンクリート駆体がコーン状破壊する場合の基礎ボルト 1 本当りの許容引張荷重を以下に示す。

$$1.5K_1A_c\sqrt{F_c}$$

K_1 : コーン状破壊する場合の引張耐力の低減係数

F_c : コンクリートの設計基準強度 (MPa)

A_c : コンクリートのコーン状破壊面の有効投影面積 (mm²)

(6) 原子炉格納容器ライナ部の評価基準値

ライナプレートに生じる強制ひずみは、表 6-4 の左欄に掲げるひずみの種類に応じ、それぞれ右欄に掲げる許容ひずみの値を超えてはならない（「発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格 JSME S NE1-2003」（社団法人 日本機械学会）に準拠）。

表 6-4 ライナプレートの許容ひずみ

ひずみの種類		許容ひずみ	
荷重状態	ひずみの種別	膜	膜と曲げの和
ⅢおよびⅣ	圧縮ひずみ	0.005	0.014
	引張ひずみ	0.003	0.010

(7) 原子炉格納容器ダイヤフラムフロアの評価基準値

各荷重状態においてトップスラブ部および底部に生じる面外せん断力は以下に示す計算式により計算した値を超えてはならない（「発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格 JSME S NE1-2003」（社団法人 日本機械学会）に準拠）。

$$Q_A = b \cdot j \{ \alpha \cdot f_s + 0.5 \cdot w_{ft} (p_w - 0.002) \}$$

Q_A : 許容面外せん断力 (N)

b : 断面の幅(mm)

j : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの 7/8 倍の値(mm)

f_s : コンクリートの許容せん断応力度 (N/mm²)

p_w : 面外せん断力に対する補強筋の鉄筋比

w_{ft} : 面外せん断力に対する補強筋の許容引張応力度(N/mm²)

α : 割増し係数

動的機器の地震時機能確認済加速度について

動的機器の地震時機能確認済加速度は、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」に規定されているが、水平方向のみであり、鉛直方向については規定されていない。

既往の試験研究等をもとに鉛直方向の機能確認済加速度を定めるとともに、水平方向の機能確認済加速度についても見直しを行い、耐震安全性評価に用いる。

動的機器の機能確認済加速度に関する検討結果⁽⁴⁾を以下に示す。

(1) 鉛直方向の機能確認済加速度の設定

a) 弁を除く機器

いずれの機器も鉛直方向の剛性が高く応答増幅が小さいことから、鉛直方向の内部品の浮き上がりによる非線形特性を考慮する必要のない限界値(1.0G)を鉛直方向の機能確認済加速度とする。

b) 一般弁(グローブ弁, ゲート弁, バタフライ弁, 逆止弁)

グローブ弁, ゲート弁およびバタフライ弁は, 配管系の応答増幅により鉛直方向の応答加速度も水平方向と同様に大きくなる。そこで, 既往研究において, 弁最弱部の応力の余裕度が小さい空気作動グローブ弁および空気作動バタフライ弁について振動試験を行い, 鉛直方向については 6.0G を上回る加速度まで機能維持を確認した。従って, グローブ弁, ゲート弁およびバタフライ弁の鉛直方向の機能確認済加速度は 6.0G とする。

逆止弁は、内部流体の圧力により作動状態を維持しようとする力が強く、地震力による影響を受けにくい構造である。構造が単純であることから、水平方向および鉛直方向加速度 6.0G に対して、内部流体の圧力とディスクに作用する地震力との釣り合いを評価し、地震時において開状態または閉状態が維持されることが確認できた。従って、逆止弁の鉛直方向の機能確認済加速度は、6.0G とする。

c) 特殊弁（主蒸気隔離弁，主蒸気逃し安全弁，制御棒駆動系スクラム弁）

主蒸気隔離弁の駆動装置については、水平方向加速度 10G，鉛直方向加速度 6.2G の同時加振試験が行われ、機能維持が確認されている。また、弁全体の機能維持評価として弁の最弱部であるヨークロッド付根部について、上記の駆動装置の健全性が確認された加速度により応力を算出し、許容応力以下であることを確認した。従って、鉛直方向の機能確認済加速度は 6.2G とした。

主蒸気逃し安全弁の鉛直方向の機能確認済加速度は、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」策定時に参照した振動試験結果をもとに 6.1G とした。

制御棒駆動系スクラム弁は、一般弁の空気作動グローブ弁と同様の構造である。そこで、一般弁の機能確認済加速度と同様に、水平方向加速度 6.0G，鉛直方向加速度 6.0G に対して、弁最弱部であるヨーク部の評価を行い、許容応力以下であることを確認した。従って、制御棒駆動系スクラム弁の鉛直方向の機能確認済加速度は、6.0G とする。

(2) 水平方向の機能確認済加速度の見直し

水平方向の機能確認済加速度を設定する際に参照した既往の試験データの精査等を行い、水平方向の機能確認済加速度の見直しが可能である以下の機器について、新たに水平方向の機能確認済加速度を設定した。

a) 非常用ディーゼル発電機（ガバナ部）

原子力発電技術機構で行われた耐震信頼性実証試験にて、ガバナリンク機構の振動試験が行われ、水平方向加速度 1761Gal(約 1.8G)まで機能維持することが確認されている。従って、非常用ディーゼル発電機ガバナ部の水平方向の機能確認済加速度を 1.8G とする。

b) 主蒸気隔離弁

(1) c)に示した弁駆動装置の振動試験結果および弁最弱部の強度評価結果から、水平方向の機能確認済加速度を 10.0G とする。

c) 制御棒駆動スクラム弁

(1) c)に示した弁最弱部の強度評価結果から、水平方向の機能確認済加速度を 6.0G とする。

(3) 機能確認済加速度

各機器の機能確認済加速度を表-1 に示す。

表-1 機能確認済加速度 (1/2)

種別	機種	加速度 確認部位	機能確認済加速度 ^{*1}	
			水平方向 (G ^{*2})	鉛直方向 (G ^{*2})
立形ポンプ	ピットバレル形ポンプ	コラム 先端部	10.0	<u>1.0</u>
	立形斜流ポンプ			
	立形単段床置形ポンプ	ケーシング 下端部		
横形ポンプ	横形単段遠心式ポンプ	軸位置	3.2 (軸直角方向)	<u>1.0</u>
	横形多段遠心式ポンプ		1.4 (軸方向)	
ポンプ駆動用 タービン	R C I Cタービン	重心位置	2.4	<u>1.0</u>
電動機	横形ころがり軸受電動機	軸受部	4.7	<u>1.0</u>
	横形すべり軸受電動機		2.6	
	立形ころがり軸受電動機		2.5	
	立形すべり軸受電動機			
ファン	遠心直結型ファン	軸受部およびメカニカルシール ケーシング ^g	2.3	<u>1.0</u>
	遠心直動型ファン	軸受部	2.6	
	軸流式ファン		2.4	

※1 「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」に追加および変更した箇所を下線で示す。

※2 G=9.80665 (m/s²)

表-1 機能確認済加速度 (2/2)

種別	機種	加速度 確認部位	機能確認済加速度 ^{*1}	
			水平方向 (G ^{*2})	鉛直方向 (G ^{*2})
非常用 ディーゼル 発電機	高速形 ディーゼル機関	機関 重心位置	1.1	<u>1.0</u>
		ガバナ 取付位置	<u>1.8</u>	
往復動式 ポンプ	横形3連往復動式ポンプ	重心位置	1.6	<u>1.0</u>
弁 (一般弁およ び特殊弁)	一般弁 (グローブ弁, ゲート弁, バタフライ弁, 逆止弁)	駆動部	6.0	<u>6.0</u>
	主蒸気隔離弁		<u>10.0</u>	<u>6.2</u>
	主蒸気逃がし安全弁		9.6	<u>6.1</u>
	制御棒駆動系スクラム弁		<u>6.0</u>	<u>6.0</u>

※1 「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」に追加および変更した箇所を下線で示す。

※2 $G=9.80665 \text{ (m/s}^2\text{)}$

使用済燃料プールスロッシングに対する影響検討について

1. 検討方針

基準地震動 S_s による使用済燃料プールのスロッシング評価を行い、使用済燃料プールからの溢水量を推定し、使用済燃料プール内の使用済燃料および下階の安全系機器への影響がないことを確認する。

具体的には、使用済燃料プールスロッシングによる溢水事象に対し、以下の検討を行う。

- ・ 基準地震動 S_s による使用済燃料プールからの溢水量の推定
- ・ 溢水による使用済燃料プール水位低下に対する使用済燃料の冷却能力への影響確認
- ・ 溢水による下階の安全系機器への影響確認

2. 検討結果

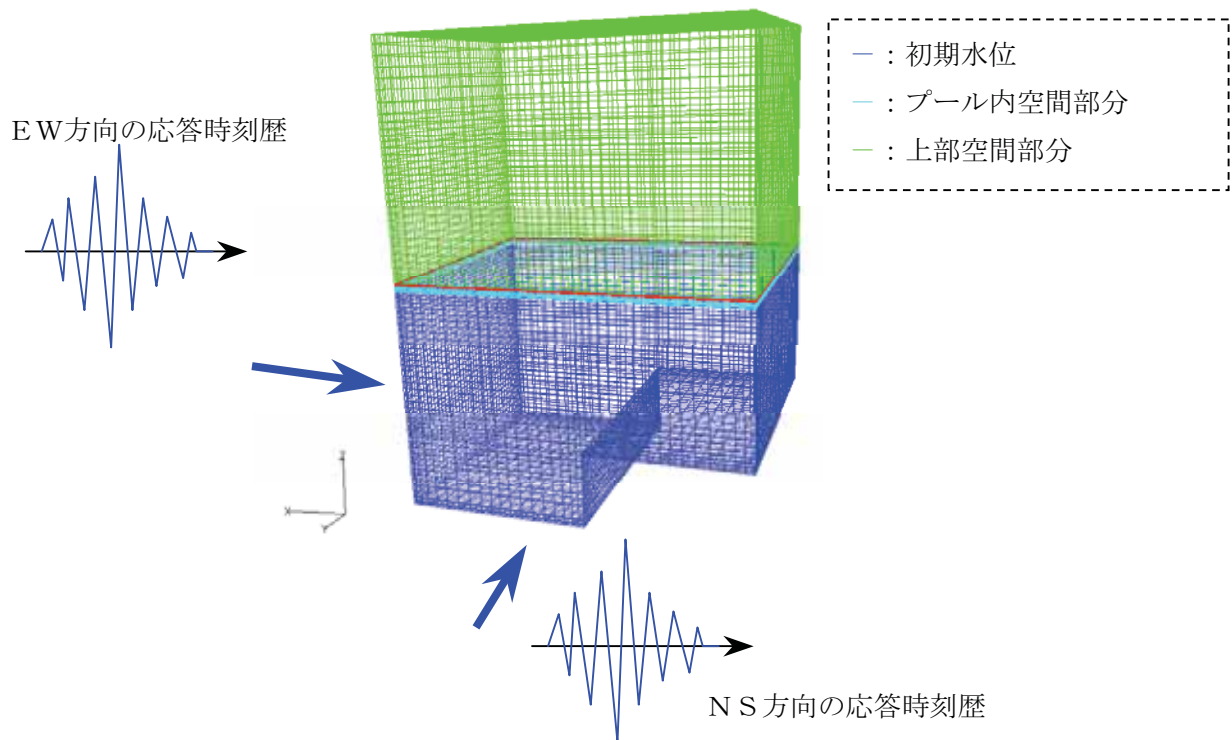
2.1 基準地震動 S_s による溢水量の推定

2.1.1 検討に用いる地震動

使用済燃料プールのスロッシング周期は 3 秒から 5 秒の長周期領域であることから、基準地震動 S_s のうち S_s-5 を検討に用いる。

2.1.2 溢水量の推定方法

使用済燃料プールのスロッシング評価による溢水量は、NS、EWの各方向について、非圧縮性二相流解析コード（解析モデルは参図-7.1.1 参照）にて S_s-5 を入力とした時刻歴解析により算定する。



参図-7.1.1 使用済燃料プールの解析モデル概要

柏崎刈羽原子力発電所 7 号機原子炉建屋 4 階の機器配置および断面、並びに使用済燃料プールの概要をそれぞれ参図-7.1.2～参図-7.1.4 に示す。

2.1.3 溢水量の推定結果

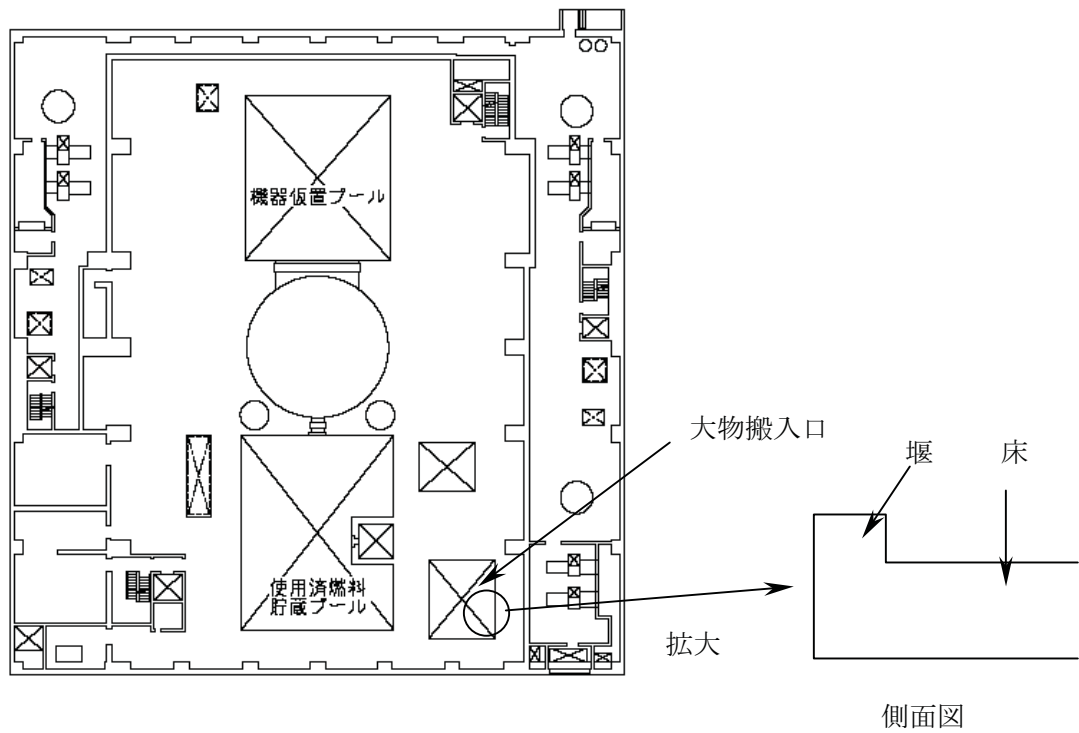
上記方法にて推定した基準地震動 S_s における使用済燃料プールスロッシングによる溢水量を参表-7.1.1 に示す。

参表-7.1.1 基準地震動 S_s における使用済燃料プールスロッシングによる溢水量

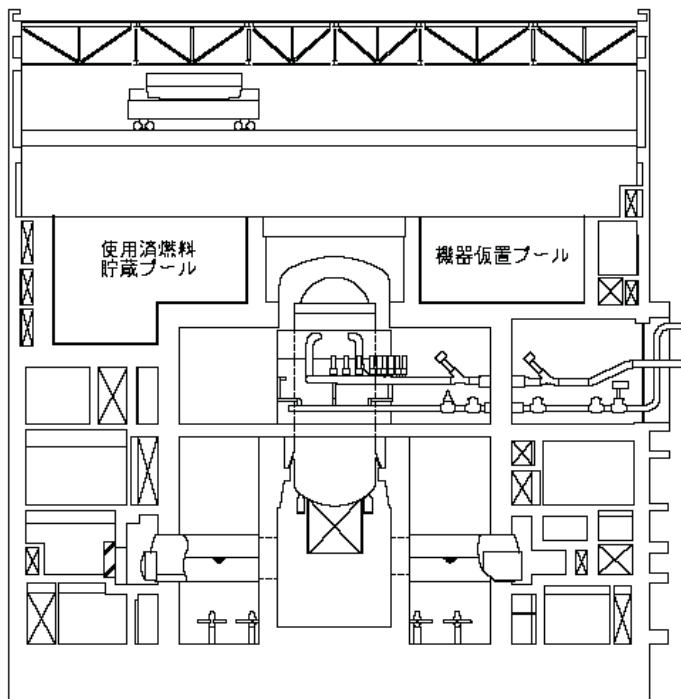
NS 方向	EW 方向
739m ³	237m ³

〈参考〉

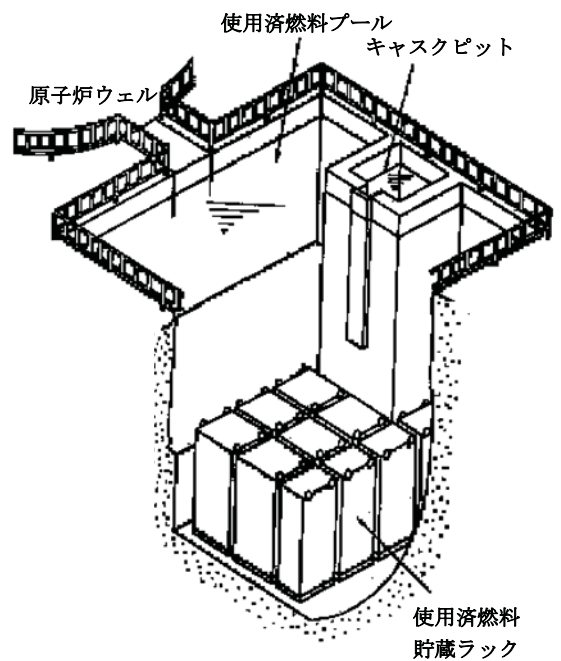
新潟県中越沖地震における溢水量は、簡易的な手法により 178m³ と評価されている。



参図-7.1.2 原子炉建屋4階機器配置図



参図-7.1.3 原子炉建屋断面図 (EW 断面)



参図-7.1.4 使用済燃料プール概要図

2.2 溢水による使用済燃料の冷却能力への影響確認

推定した溢水量は、使用済燃料を冷却する能力に影響を与えない。すなわち、溢水の補給は、サプレッションプールから残留熱除去系を通じて補給可能であり、燃料が露出するものではない。

参表-7.1.2 溢水時の燃料プール水位確認結果

	NS 方向	EW 方向
推定溢水量	739m ³	237m ³
使用済燃料プール面積	約 250.6m ²	約 250.6m ²
通常時使用済燃料プール水位	11.5m	11.5m
水位低下量	約 3.0m	約 1.0m
溢水後使用済燃料プール水位	約 8.5m	約 10.5m
使用済燃料貯蔵ラック高さ	4.49m	4.49m

2.3 溢水による安全系機器への影響確認

2.3.1 溢水に対する設計上の考慮について

安全上重要な系統および機器は多重性、多様性を有するとともに、必要に応じて互いに離隔距離をとる等の配置上の考慮がなされており、その安全機能が喪失しないよう設計されている。

機器、配管系の破損による異常漏えい等の溢水に対しても、安全上重要な系統および機器の安全機能を確保できるように、配置上の考慮や、床カーブ(せき、勾配)の設置、漏えい検出系の設置等がなされている。

2.3.2 溢水に対する安全系機器の影響確認

使用済燃料貯蔵プール内から溢水した水は、床に設定されているファンネルより最下階の高電導度廃液系サンプピットに流入し、流入した水は当該サンプピットに設置されているサンプポンプにて収集タンクへ送水される。万が一、当該サンプポンプが機能せず当該フロアに水が溜まったとしても、安全上重要な設備は水密扉にて隔離されていることから、溢水により安全機能を喪失することはない。なお、溜まった水は必要に応じて拭き取り作業、仮設ポンプにて汲み出す作業により対応することになると考えている。

以上により、スロッシングによる使用済燃料プールからの溢水に対する安全系機器への影響はない。

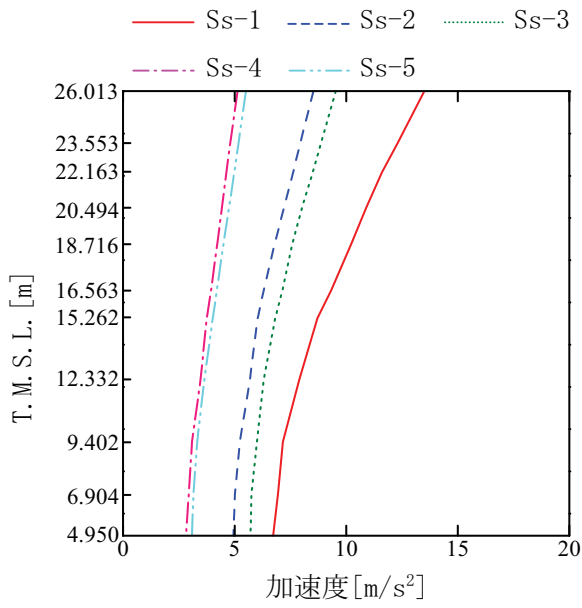
なお、溢水した水が原子炉建屋 4 階大物搬入口から下階に流出し、全て原子炉建屋最地下階に溜まると仮定して水位を試算すると、1.7m 程度となる。(ただし、原子炉建屋 4 階大物搬入口には堰があることから(参図-7.1.2 参照)、溢水した水の一部は原子炉建屋 4 階に溜まると仮定した。)

2.4 溢水による系外放出への影響確認

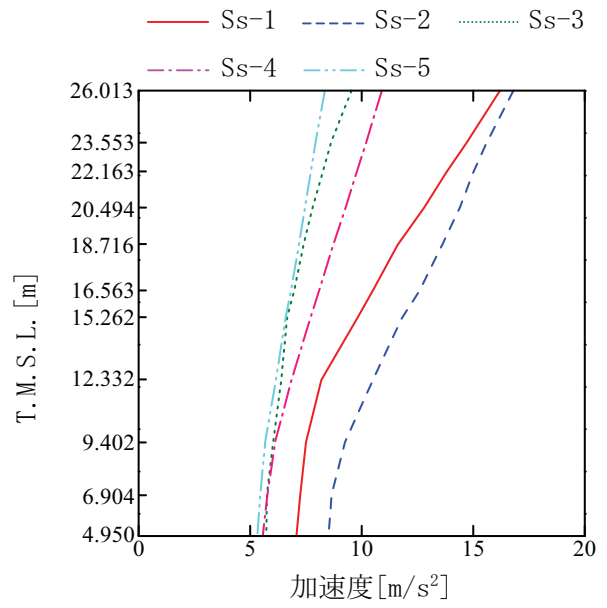
使用済燃料プール水が地震による溢水により漏えいし、非管理区域に至ったことにより系外放出したことに対する対策として、原子炉建屋 4 階に存在する貫通部のうち、高さ 20cm 以下に存在する貫通部について、必要に応じて止水処理を実施している。また、使用済燃料貯蔵プール周囲に柵を設置し、溢水量の低減を図っている。

大型機器解析モデルおよび炉内構造物解析モデルによる
地震応答解析結果（詳細）

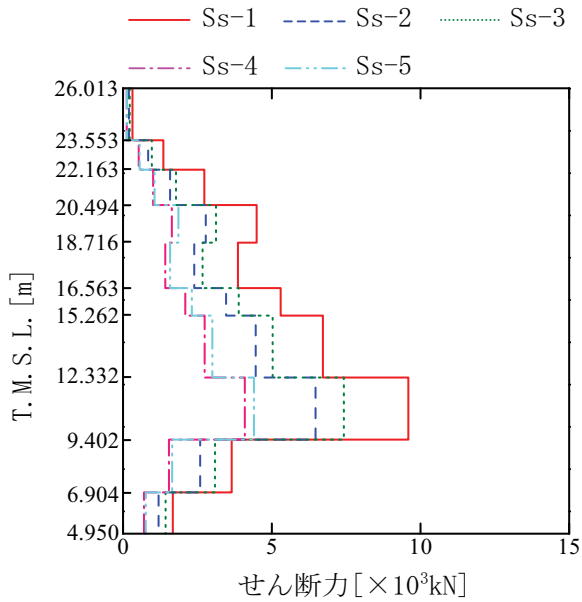
7.2.2.4 項に示した大型機器解析モデルおよび炉内構造物解析モデルによる地震
応答解析結果（第 7.2.2.4-1 図～第 7.2.2.4-24 図）の詳細について、参図-7.2.1～
参図-7.2.24 に示す。



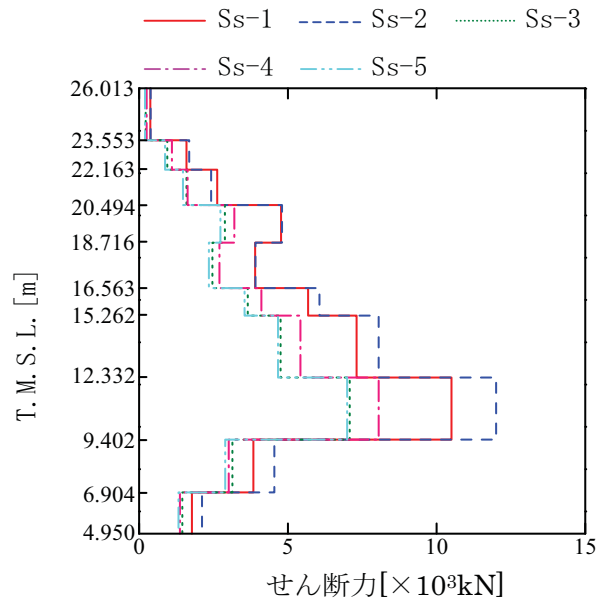
参图-7.2.1 RPV 水平方向
最大応答加速度 (NS 方向)



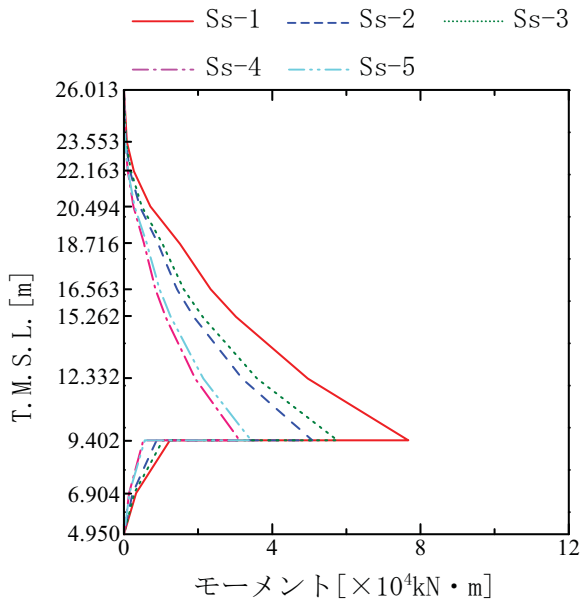
参图-7.2.2 RPV 水平方向
最大応答加速度 (EW 方向)



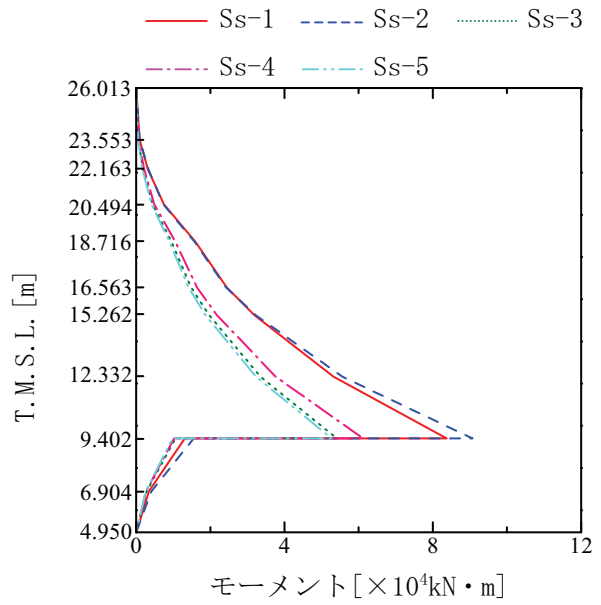
参图-7.2.3 RPV 水平方向
最大応答せん断力 (NS 方向)



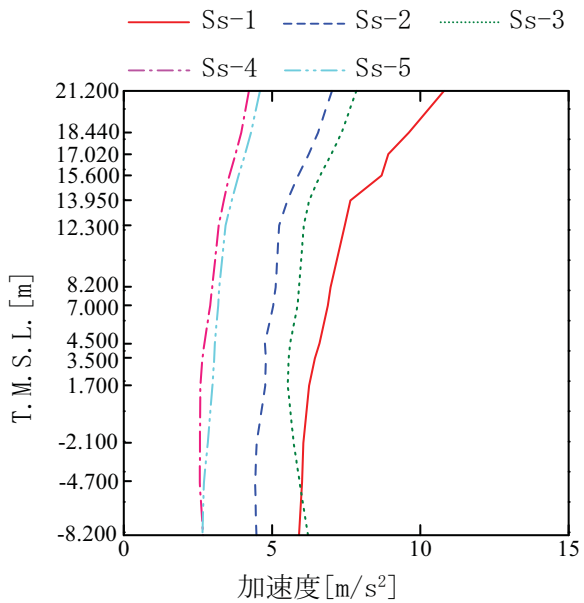
参图-7.2.4 RPV 水平方向
最大応答せん断力 (EW 方向)



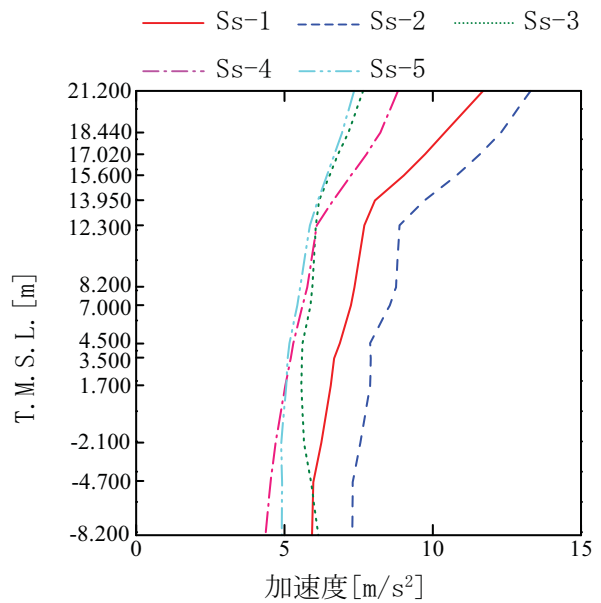
参図-7.2.5 RPV 水平方向
最大応答モーメント (NS 方向)



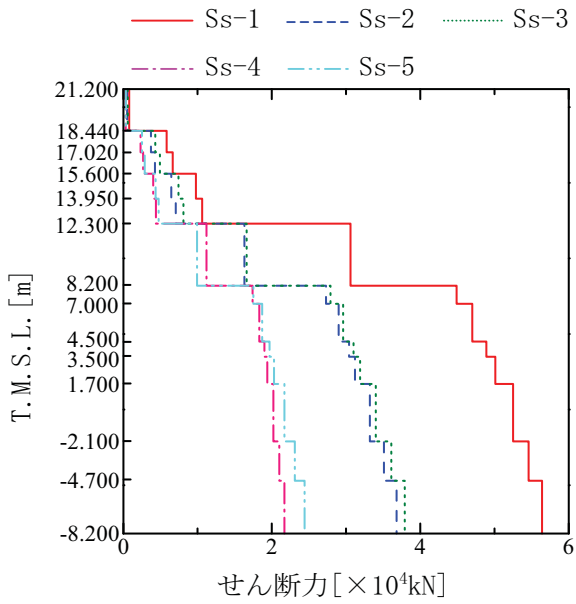
参図-7.2.6 RPV 水平方向
最大応答モーメント (EW 方向)



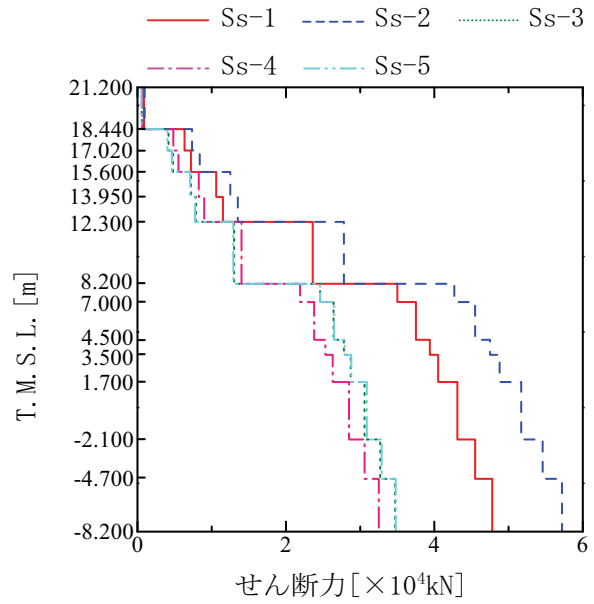
参図-7.2.7 原子炉遮へい壁および原子炉本体基礎
水平方向最大応答加速度 (NS 方向)



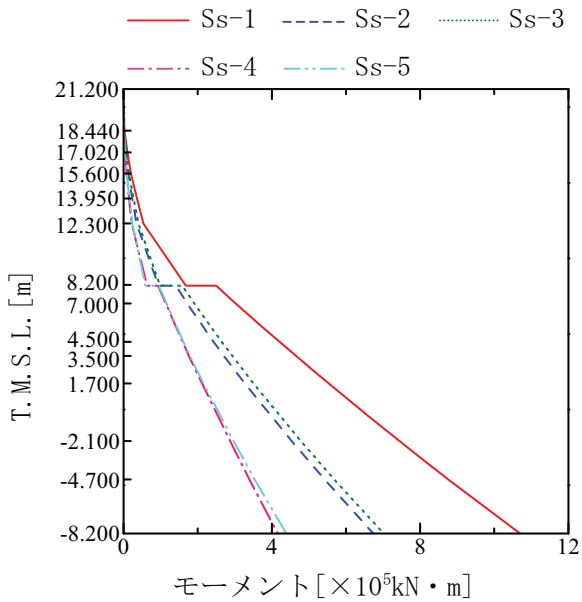
参図-7.2.8 原子炉遮へい壁および原子炉本体基礎
水平方向最大応答加速度 (EW 方向)



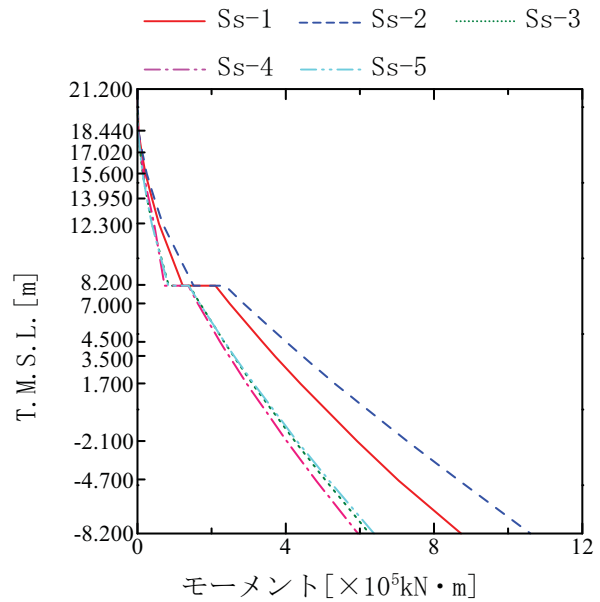
参図-7.2.9 原子炉遮へい壁および原子炉本体基礎
水平方向最大応答せん断力 (NS 方向)



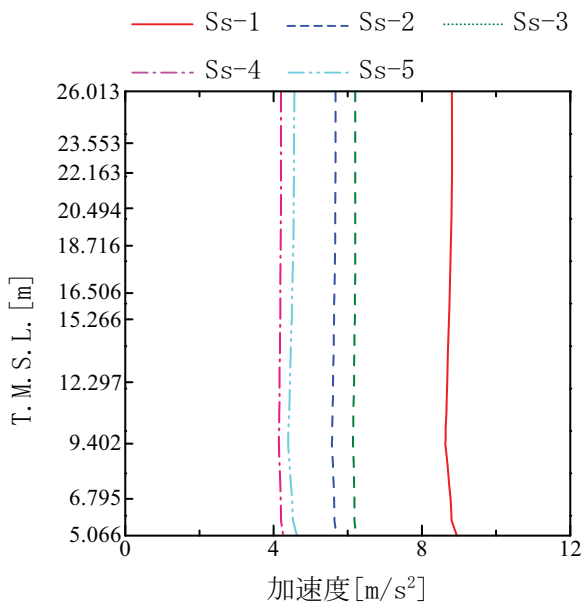
参図-7.2.10 原子炉遮へい壁および原子炉本体基礎
水平方向最大応答せん断力 (EW 方向)



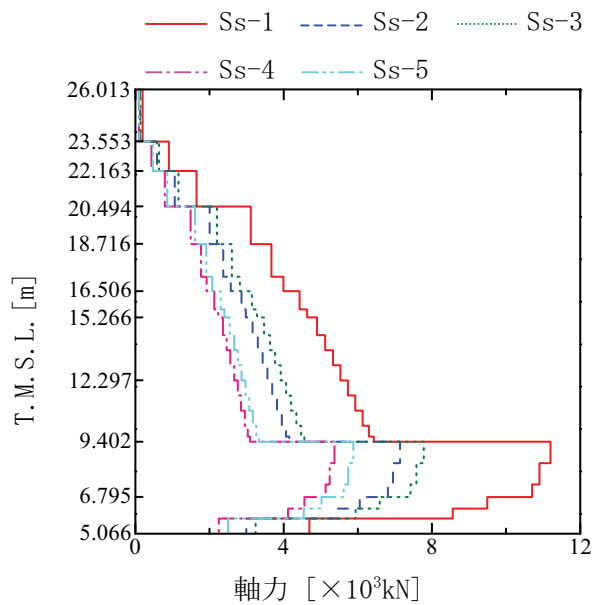
参図-7.2.11 原子炉遮へい壁および原子炉本体基礎
水平方向最大応答モーメント (NS 方向)



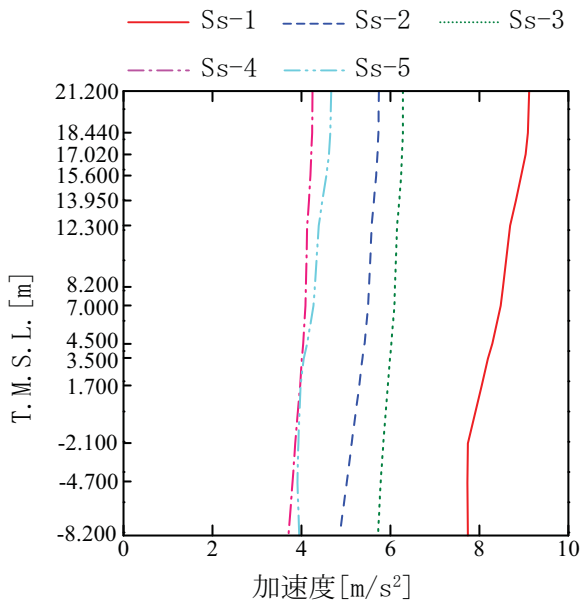
参図-7.2.12 原子炉遮へい壁および原子炉本体基礎
水平方向最大応答モーメント (EW 方向)



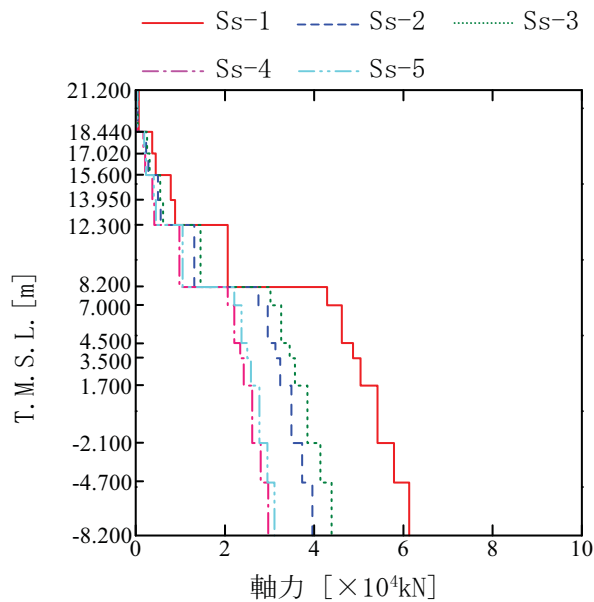
参图-7.2.13 RPV 鉛直方向
最大応答加速度



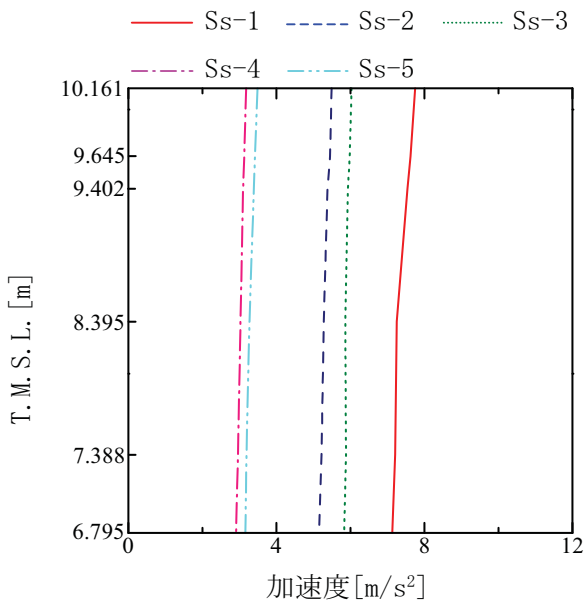
参图-7.2.14 RPV 鉛直方向
最大応答軸力



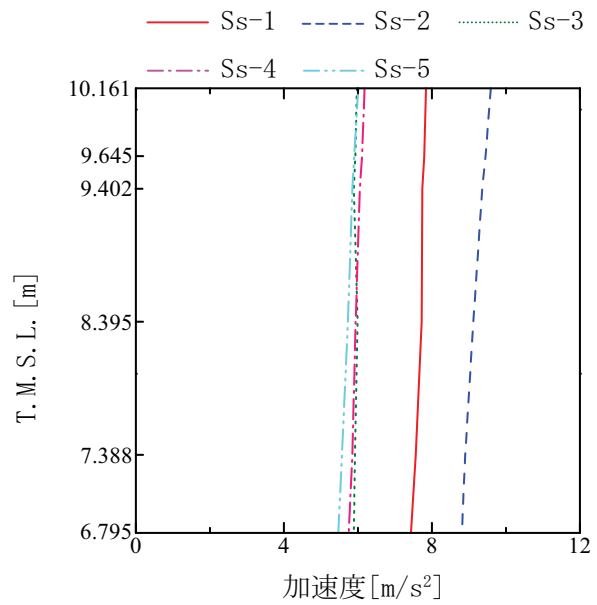
参图-7.2.15 原子炉遮へい壁および原子炉本体基礎
鉛直方向最大応答加速度



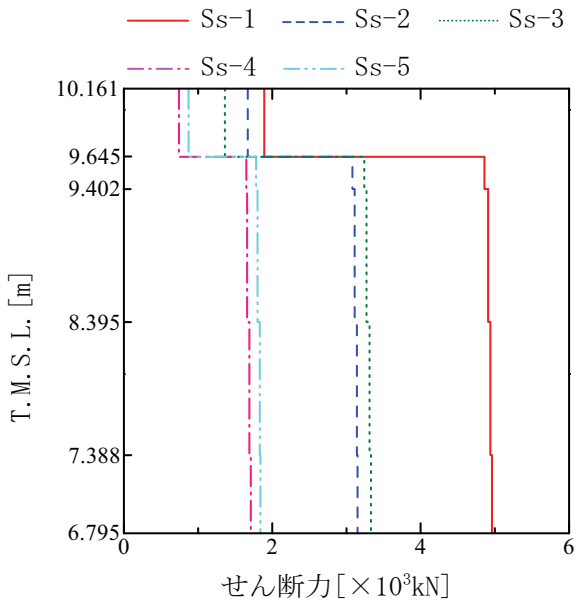
参图-7.2.16 原子炉遮へい壁および原子炉本体基礎
鉛直方向最大応答軸力



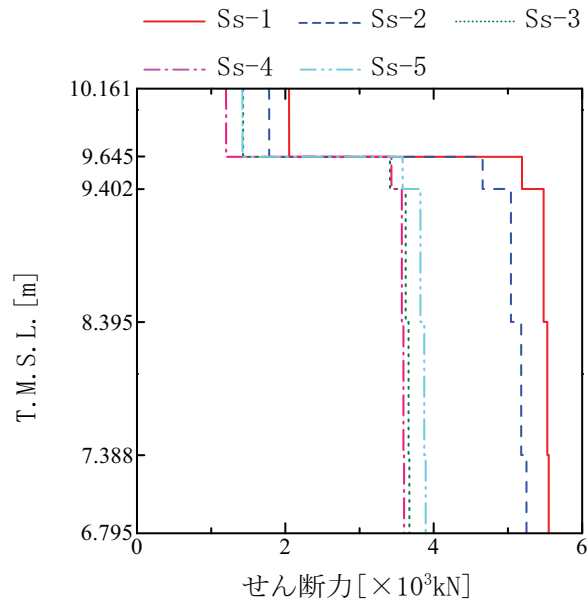
参図-7.2.17 炉心シュラウド下部胴水平方向
最大応答加速度 (NS 方向)



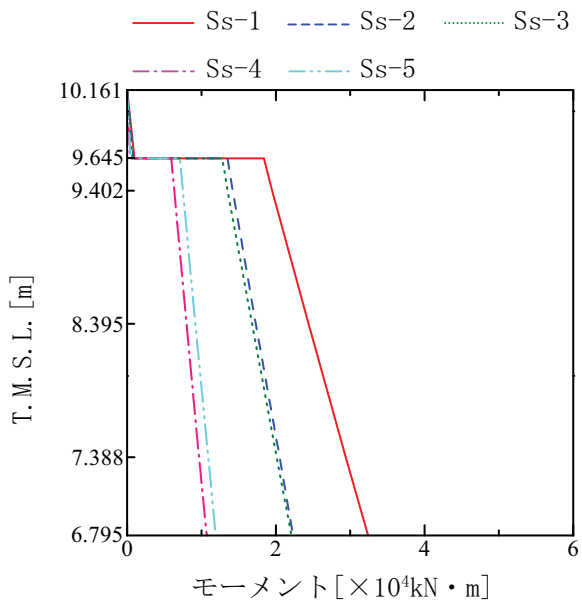
参図-7.2.18 炉心シュラウド下部胴水平方向
最大応答加速度 (EW 方向)



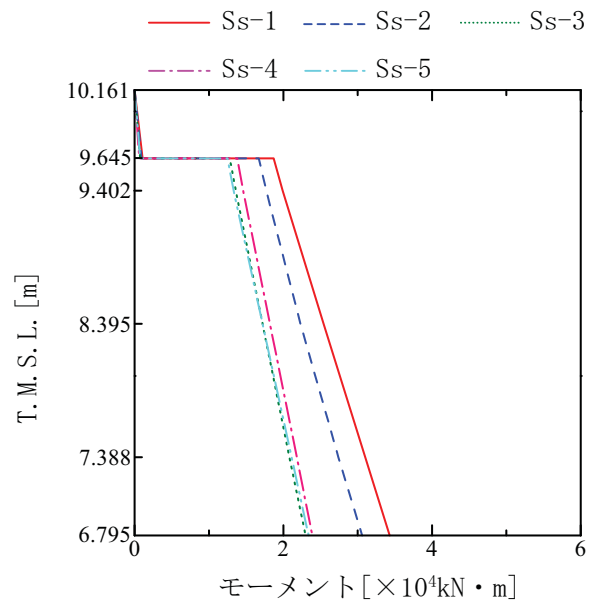
参図-7.2.19 炉心シュラウド下部胴水平方向
最大応答せん断力 (NS 方向)



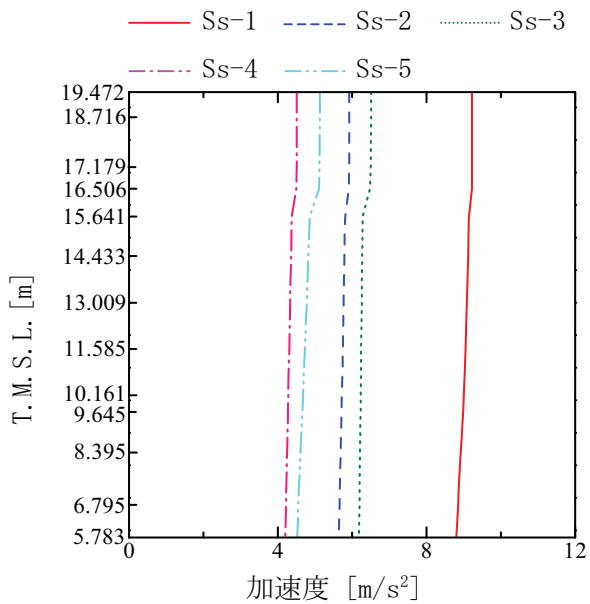
参図-7.2.20 炉心シュラウド下部胴水平方向
最大応答せん断力 (EW 方向)



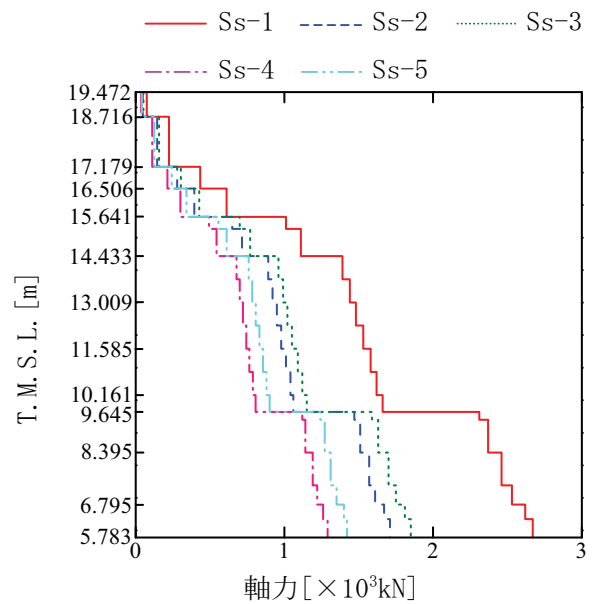
参図-7.2.21 炉心シュラウド下部胴水平方向
最大応答モーメント (NS 方向)



参図-7.2.22 炉心シュラウド下部胴水平方向
最大応答モーメント (EW 方向)



参図-7.2.23 炉心シュラウド鉛直方向
最大応答加速度

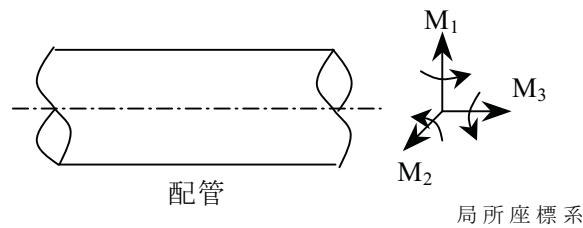


参図-7.2.24 炉心シュラウド鉛直方向
最大応答軸力

配管の評価における「ねじり」のみを評価した値について

1. ねじり応力値

ねじり応力は、計算機コードによるスペクトルモーダル解析法により算出される各方向のモーメント (M_1 , M_2 , M_3) のうち、配管の軸方向に対するモーメント (M_3) を用いて算出される。



参図-7.3.1 配管に作用する各方向のモーメント

参考として、今回の耐震安全性評価で報告した主蒸気系配管および残留熱除去系配管における、ねじりモーメントのみによる応力値を以下に示す。

参表-7.3.1 主蒸気系配管および残留熱除去系配管のねじり応力値

評価対象設備	評価部位	発生値 (MPa)
主蒸気系配管 (参図-7.3.2 参照)	分岐管	55
	主管	8
残留熱除去系配管 (参図-7.3.3 参照)	主管	83

2. 配管の応力評価におけるねじり応力の扱い

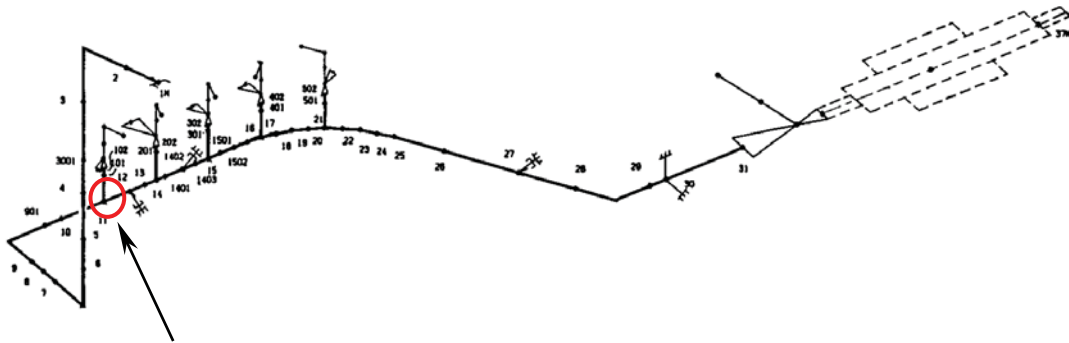
JEAG4601 では、第 1 種管（クラス 1 配管）の一次応力を算定する際に、ねじり応力のみによる制限を設け、それを超える場合には、参表-7.3.2 に示すとおり全体の許容応力を見直すこととしている。（制限値の詳細は 3 項参照）

次頁以降に、主蒸気系配管および残留熱除去系配管における、ねじり応力の評価結果を示す。いずれも、ねじり応力は制限値以下であるため、今回は全体の許容値の見直しは行っていない。

参表-7.3.2 第 1 種管（クラス 1 配管）の許容応力

許容応力状態	一次一般膜応力	一次応力 (曲げ応力を含む)
III _{AS}	1.5Sm	2.25Sm ただし、ねじりによる応力が 0.55Sm を超える場合には、曲げとねじりによる応力について 1.8Sm とする。
IV _{AS}	2Sm	3Sm ただし、ねじりによる応力が 0.73Sm を超える場合には、曲げとねじりによる応力について 2.4Sm とする。

評価対象設備	発生値 (MPa)	制限値 (MPa)
主蒸気系配管	63	91



ねじり応力最大評価点

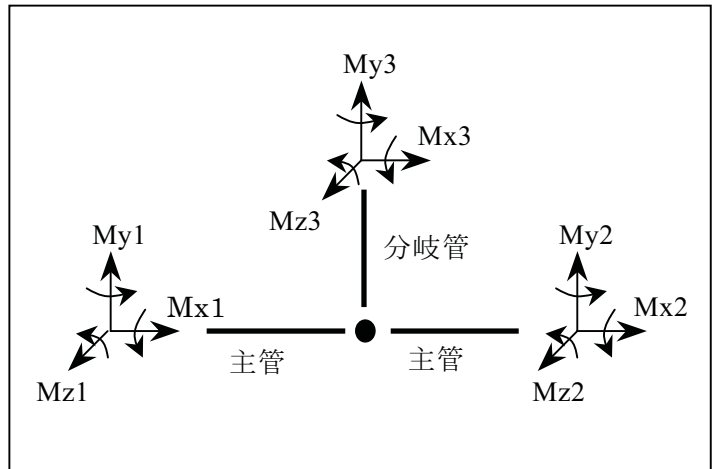
(全体の最大応力発生点と同じ)

参図-7.3.2 配管評価モデル (主蒸気系)

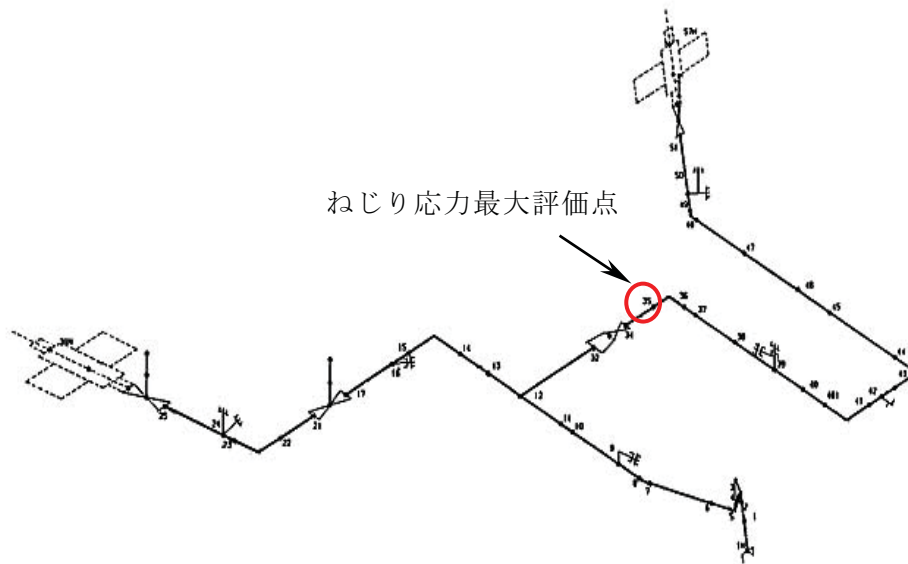
<参考 1>

上記の一部におけるねじり応力の算出方法は以下のとおりである。主管と分岐管では、後者の方が配管径は小さいことから、評価は分岐管で代表して行っている。

右図に示す分岐管のねじり応力は My_3 を用いて算出されるが、保守的に主管側の Mx_1 または Mx_2 (分岐管側とのモーメントの釣り合いを考慮し決定する) を用いたねじり応力を算出し、これらのねじり応力を組み合わせて分岐部の評価用ねじり応力としている。

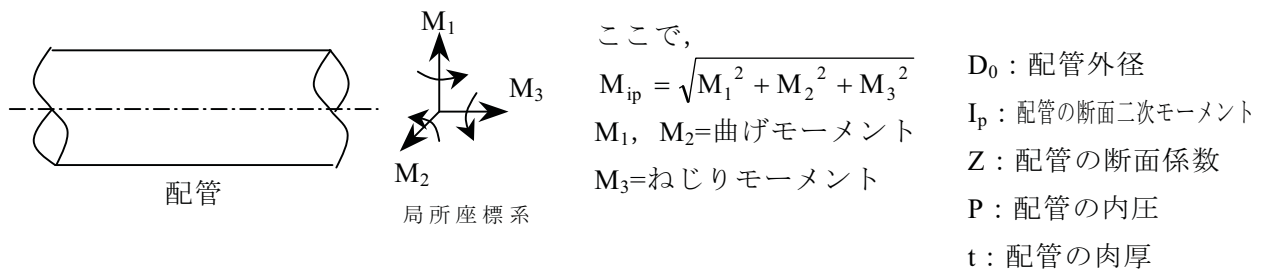


評価対象設備	発生値 (MPa)	制限値 (MPa)
残留熱除去系配管	83	89



参図-7.3.3 配管評価モデル (残留熱除去系)

<参考 2> 配管応力評価とねじりについて



配管の評価部位の座標系を上図のとおり定義し、上記の通りに記号を定義した場合、モーメントによって生じる応力は下記の通りとなる。

(1) 軸方向の応力 $S_1 = \frac{1}{2} \frac{PD_0}{2t} + \frac{M_b}{Z}$ ここで、 $M_b^2 = M_1^2 + M_2^2$

(2) 円周方向の応力 $S_c = \frac{PD_0}{2t}$

(3) ねじり応力
$$S_t = \frac{D_0}{2I_p} M_3 = \frac{M_3}{2Z}$$

これより、応力強さ S を次の通り求めることができる。

$$S = \sigma_1 - \sigma_3 = \frac{1}{2}(S_1 + S_C) + \frac{1}{2}\sqrt{(S_1 - S_C)^2 + 4S_t^2} \leq \frac{1}{2} \frac{PD_0}{2t} + \frac{M_{ip}}{Z} \dots \dots (a)$$

$$S = \sigma_1 - \sigma_2 = \sqrt{(S_1 - S_C)^2 + 4S_t^2} \leq \frac{1}{2} \frac{PD_0}{2t} + \frac{M_{ip}}{Z} \dots \dots \dots (b)$$

ここで、 $\sigma_1 \sim \sigma_3$ は、主応力を示す。

この式 (a) および式 (b) は、配管の一次応力を算出する式（設計・建設規格 PPB-3520 で規定されている）である下記式に対応している。

$S_{prm} = \frac{B_1 PD_0}{2t} + \frac{B_2 M_{ip}}{Z_i}$	S_{prm} : 一次応力	D_0 : 配管外径
	B_1, B_2 : 応力係数	Z_i : 配管の断面係数
	B_1 : 0.5	P : 配管の内圧
	B_2 : 1.0	t : 配管の肉厚

3. 制限値について

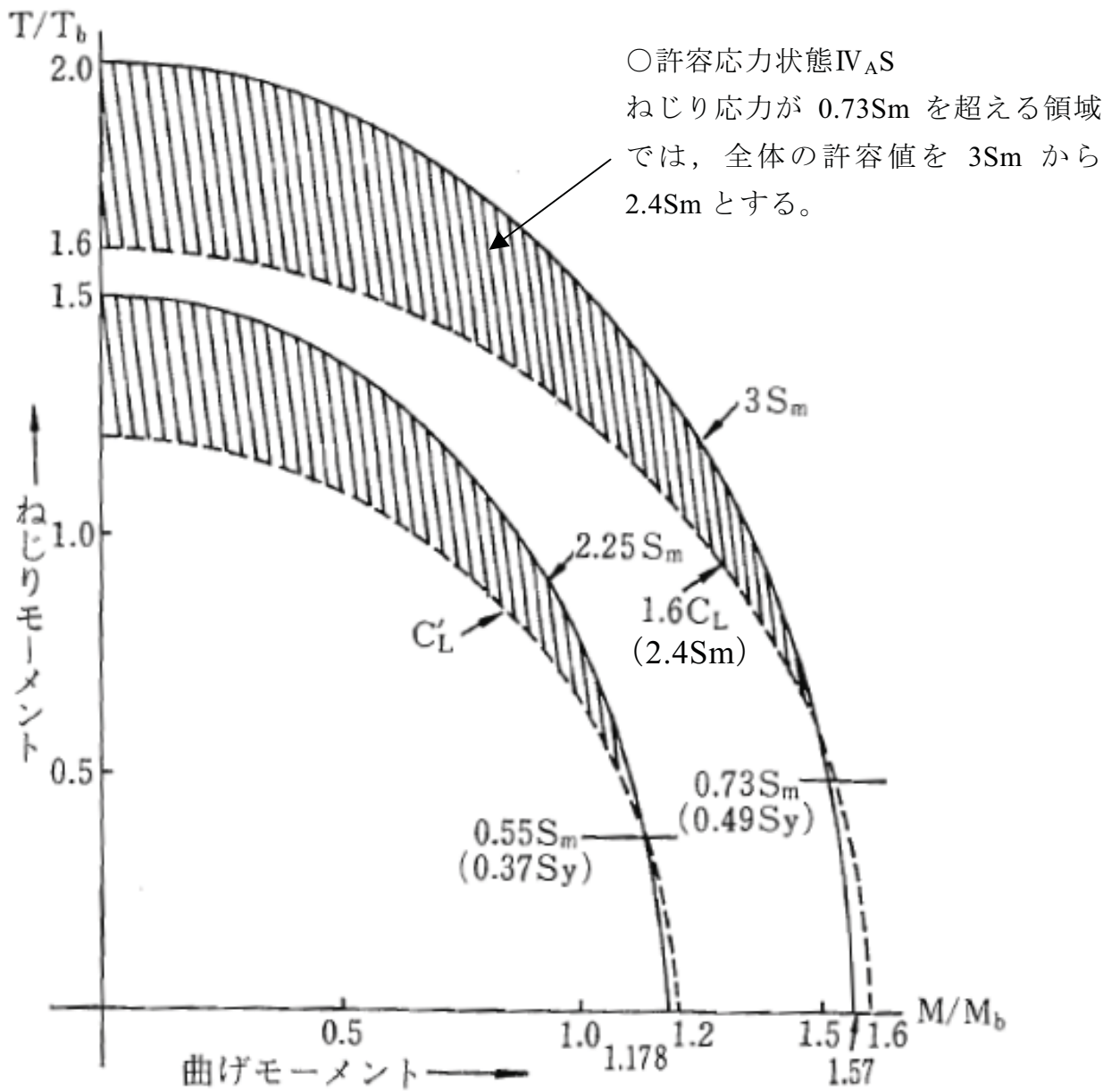
ねじり応力はせん断応力に分類され、全体の応力に対してせん断応力の寄与が大きくなると、引張応力に対しての剛性が低下する現象が見られる。そのため、JEAG4601では、第1種管（クラス1配管）の一次応力を算定する際に、ねじり応力のみによる制限を設け、それを超える場合には全体の許容応力を見直すこととしている。

具体的には、許容応力状態IV_{AS}の許容応力は3Smであるが、ねじりによる応力が0.73Smを超える場合は、曲げとねじりによる応力について許容応力を2.4Smとしている。その根拠はJEAG4601には下記の通り記載されている。

材料の延性に期待した崩壊限界（IV_{AS}に対しては設計降伏点Syの1.6倍）を定め、これと一次応力に対する許容限界との関係を参図-7.3.4に示す。許容応力状態IV_{AS}では、材料の延性に期待した崩壊限界1.6Syと、地震時の一次応力に対する許容値3Smとの交点は、0.73Smとなる。したがって、ねじり応力が0.73Smを超える場合、曲げモーメントとねじりモーメントによる応力は2.4Sm（1.6SyをSm表示）を限界とする。（Sy：設計降伏点，Sm：設計応力強さ）

参表-7.3.3 第1種管（クラス1配管）の許容応力（再掲）

許容応力状態	一次一般膜応力	一次応力 (曲げ応力を含む)
III _{AS}	1.5Sm	2.25Sm ただし、ねじりによる応力が0.55Smを超える場合には、曲げとねじりによる応力について1.8Smとする。
IV _{AS}	2Sm	3Sm ただし、ねじりによる応力が0.73Smを超える場合には、曲げとねじりによる応力について2.4Smとする。



内圧 $P=0$ の場合 $C_L=1.2C_L$ $C_L=S_y$

$M_b=4tr^2 S_y$ =単純曲げの場合の限界曲げモーメント

$T_b=\pi tr^2 S_y$ =単純ねじりの場合の限界ねじりモーメント

参図-7.3.4 直管の崩壊限界荷重と地震時の許容限界との関係

(JEAG4601-1984 P.101 より引用)

原子炉格納容器ライナプレートの評価における
最大ひずみ発生点について

1. 原子炉格納容器ライナプレートの地震荷重について

原子炉冷却材喪失事故などにより原子炉本体から放出される放射性物質等の有害な物質の漏えいを防止するために原子炉格納容器のコンクリート部に内張されている鋼板をライナプレートという(参図-7.4.1 参照)。

原子炉格納容器ライナプレートの荷重算定にあたっては、参図-7.4.2 に示す大型機器水平方向解析モデルを用いて、 S_s 地震荷重に対する解析を行う。その地震応答解析から得られる荷重を用いて、原子炉格納容器の駆体構造解析を行う。その地震荷重の主なものは、以下の通りである。

- (1)原子炉格納容器本体の地震応答荷重(せん断，モーメント等)
- (2)ダイヤフラムフロア^{※1}からの地震応答反力^{※2}

2. 最大ひずみ発生点について

1.で述べた地震荷重に加えて、圧力荷重などの地震以外の荷重も入力した結果、得られたひずみの最大値は原子炉格納容器シェル部のダイヤフラムフロア直下の部分(参図-7.4.3 参照)であった。

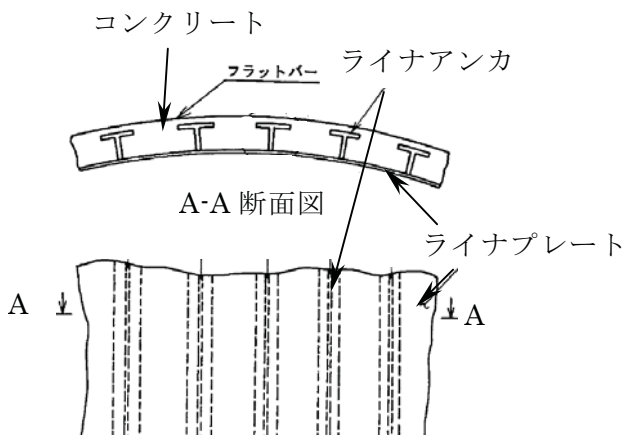
※1 ダイヤフラムフロアについて

ダイヤフラムフロアとは鉄筋コンクリート製原子炉格納容器をドライウェルとサブプレッションチェンバに仕切る構造物である(参図-7.4.2，参図-7.4.3 参照)。この構造物は、鉄筋コンクリートと鉄板から成る厚さ 1.2m のスラブであり、原子炉格納容器及び原子炉本体基礎で支持されている。

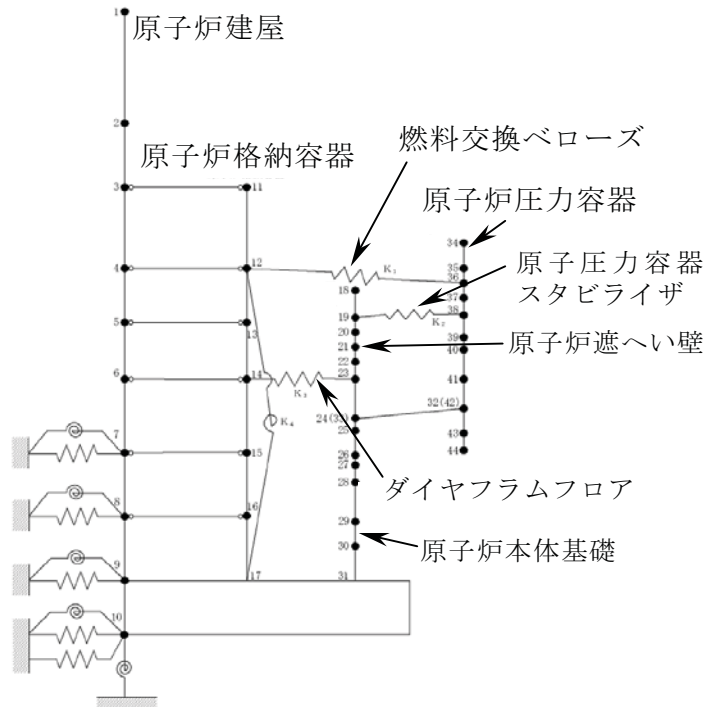
※2 ダイヤフラムフロアからの地震応答反力について

参図-7.4.2 の大型機器水平方向解析モデルは建屋－原子炉格納容器－原子炉遮へい壁－原子炉压力容器の相互作用を考慮したモデルになっている。すなわち、原子炉格納容器は原子炉建屋と一体となって揺れ、ダイヤフラムフロアを介して原子炉遮へい壁に荷重が伝達される。また、原子炉遮へい壁からは原子炉压力容器スタビライザを介して原子炉压力容器にも荷重が伝達される。さらに、原子炉压力容器と原子炉格納容器は、燃料交換ベローズを介して荷重が伝達される。なお、原子炉压力容器はスカート部で基礎ボルトにより原子炉本体基礎に取り付けられており、ここから原子炉本体基礎へも荷重が伝達される。

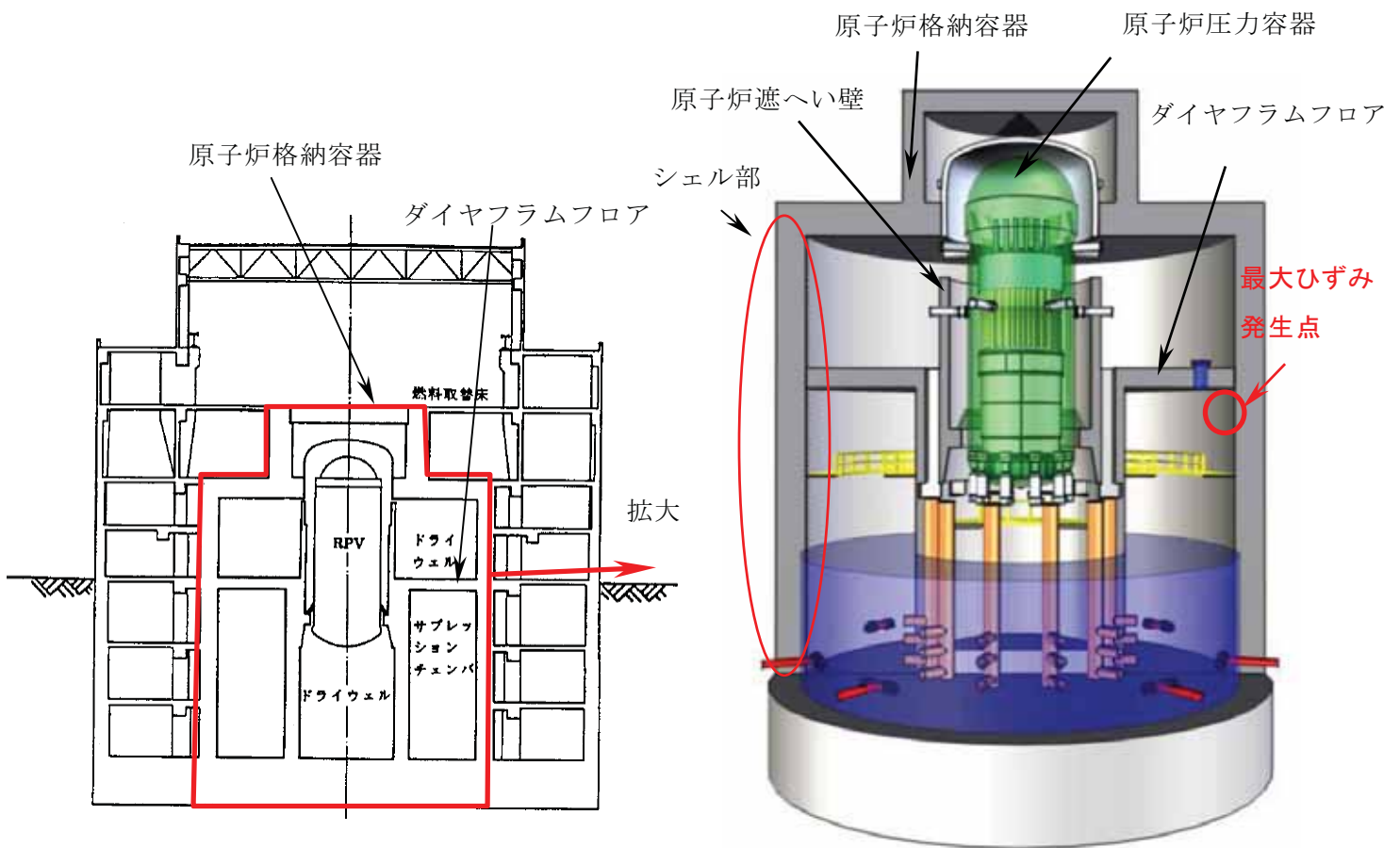
原子炉格納容器の解析にあたっては、原子炉遮へい壁から原子炉格納容器に作用する力として、ダイヤフラムフロアを模擬したばね要素の反力を原子炉格納容器駆体解析に用いている。



参図-7.4.1 シェル部のライナ形状



参図-7.4.2 大型機器水平方向解析モデル(EW 方向)



参図-7.4.3 原子炉建屋，原子炉格納容器模式図

原子炉建屋クレーンの減衰定数を測定した試験について

1. 概要

JEAG4601 におけるクレーン類の水平方向の設計用減衰定数は、溶接構造物として 1%と規定されている。

クレーン類の減衰に寄与する要素には、材料減衰とクレーンを構成する部材間に生じる構造減衰に加え、車輪とレール間のガタや摩擦による減衰があり、溶接構造物としての 1%より大きな減衰定数を有すると考えられる。

そこで、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(H7～H10)」では、実機を試験体とした振動試験が実施され、水平方向及び鉛直方向の設計用減衰定数を見直すための検討を行った。以下に試験方法、試験体、試験結果について示す。

2. 天井クレーンの試験方法

2.1 試験条件

天井クレーンにおいては、参表-7.5.1 に示した方法で試験が行われている。天井クレーンは、ガーダ 2 本上にトロリが設置されている構造であるが、試験時の試験体の状態は、トロリの位置を試験体 No.1, 2 ではクレーンガーダの中央部及び 1/4 位置、試験体 No.3 ではトロリの位置をガーダの中央部、1/4 位置及び端部としている。計測項目は、クレーンガーダ、トロリ、建屋レールの加速度及び応答変位である。

2.2 加振方法

鉛直方向の試験では、天井クレーンに定格荷重相当の吊荷を吊り下げ、吊荷を床から 50mm 程度まで持ち上げた後、最大速度で下降させて床に着地させ、この時の自由振動を計測している。水平方向の試験では、クレーンを 1m 程度走行させ、急停止することにより、この時の自由振動を計測している。

2.3 加振レベル

鉛直方向の試験では、天井クレーンの定格荷重相当の吊荷で加振しており、試験体 No.1, 2 では 150ton, 試験体 No.3 では 200ton で実施している。

参表-7.5.1 天井クレーンの振動試験方法

試験条件	(1) トロリ位置	試験体 No.1, 2 : 中央, 1/4 試験体 No.3 : 中央, 1/4, 及び端部
試験方法	(1) 加振方向	鉛直方向 水平方向 : ガーダ走行方向
	(2) 加振方法	吊荷着地による自由振動(鉛直) 急制動による自由振動(水平)
	(3) 加振波の種類	吊荷の開放(パルス波) 急制動(パルス波)
	(4) 加振レベル	定格荷重(鉛直) 試験体 No.1, 2 : 150ton 試験体 No.3 : 200ton
計測項目		① 試験体の加速度 ② 試験体の応答変位

3. 天井クレーンの試験結果及び評価

3.1 鉛直方向の減衰定数

(1)試験結果

試験結果を参図-7.5.1 に示す。設計応答振幅レベル^{*1}(トロリ中央部：12.2mm，トロリ端部：6.0mm)に対し，試験はほぼ同じレベル(トロリ中央部：12.1mm，トロリ端部：10.1mm)まで実施している。

応答振幅に対する減衰比の傾向は，応答振幅が比較的小さい場合には減衰比のばらつきが大きいですが，応答振幅が大きくなると，減衰比の発生源となる構造減衰^{*2}が増加し，減衰比が徐々に増加するとともに，そのばらつきが小さくなる。天井クレーンでは応答振幅 5.0mm で減衰比 2.0% 以上を得ている。

(2)評価

応答振幅の増加に伴い減衰比は増加傾向にあり，設計応答振幅レベルで減衰比 2.0%以上となっていることから，設計用減衰定数を 2.0%とした。

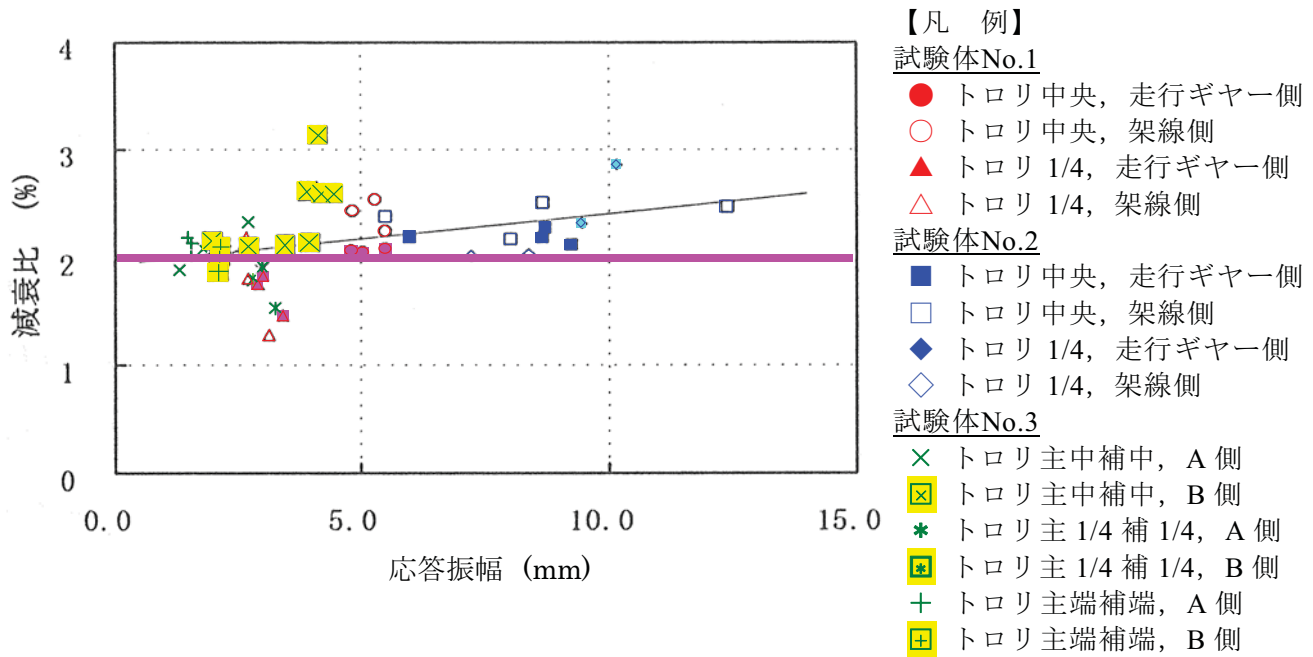
*1：ここで記載した設計応答振幅レベルは，天井クレーンに適用する設計用地震動における応答振幅レベルを示す。

*2：クレーンの減衰に影響する因子は材料減衰・構造減衰があり，減衰影響因子は以下のとおりである。

材料減衰：ガーダ等の骨組構造を構成する鋼材での内部減衰

構造減衰：ガーダ車輪とレールの摩擦・ガタ，及びトロリ車輪とレールの摩擦・

ガタ



参図-7.5.1 鉛直方向の減衰比と応答振幅の関係

3.2 水平方向の減衰定数

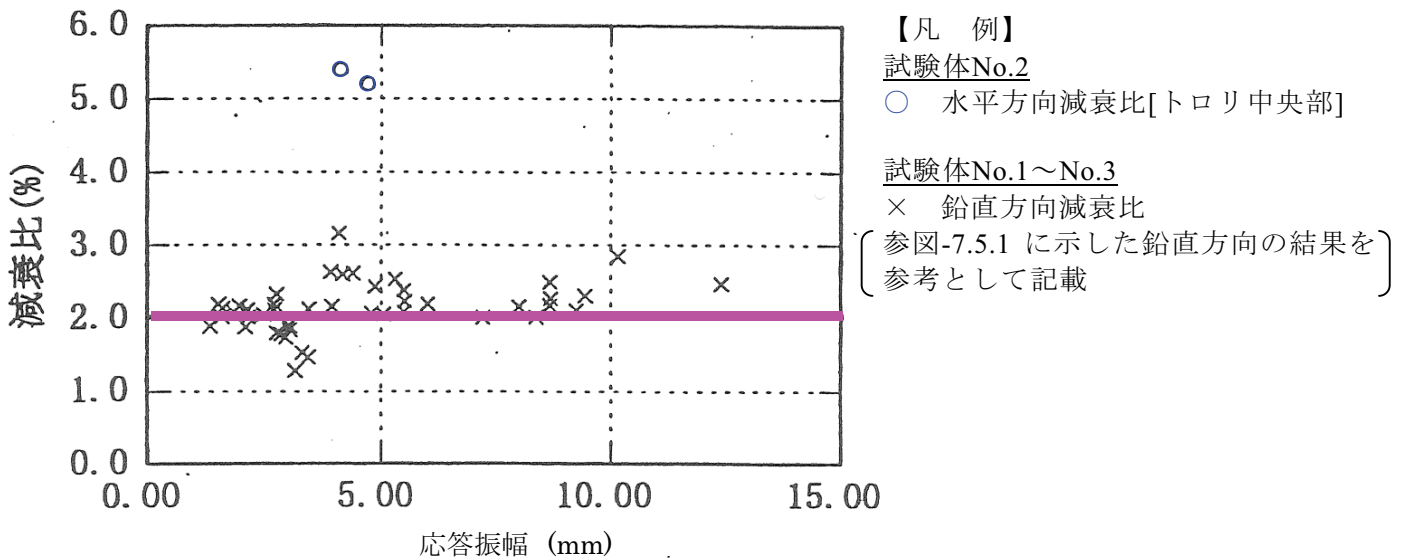
(1) 試験結果

水平方向の試験結果を鉛直方向の結果と合わせて参図-7.5.2 に示す。設計応答振幅レベル(トロリ中央部：8.9mm)に対し、試験は応答振幅レベル(トロリ中央部：4.7mm)まで実施している。

天井クレーンの水平方向の減衰比は、応答振幅 4.7mm において 5.2% という結果を得ている。

(2) 評価

水平方向の減衰比は、参図-7.5.2 のとおり応答振幅レベル 5.0mm でも鉛直方向の減衰比を上回ることが確認されており、参図-7.5.1 の鉛直方向の試験結果から、減衰比は応答振幅の増加とともに大きくなる傾向にあるが、データ点数が少ないため、鉛直方向と同じ 2.0% を水平方向の設計用減衰定数としている。



参図-7.5.2 水平方向の減衰比と応答振幅の関係

3.3 天井クレーン試験における建屋振動について

建屋の振動が、天井クレーンの振動に及ぼす影響としては、以下のことが考えられる。

- (1) 建屋の変形に伴う減衰によりクレーン振動エネルギーが逸散される。
- (2) 建屋ークレーンが連成することによりクレーンの振動が抑制される。

天井クレーンの試験においては、クレーンのガーダの変位と共に、クレーン走行レールにおける振動変位（建屋の変位）を計測している。試験で得られている振幅（片振幅）は、各々以下のとおりである。

天井クレーンガーダの振幅（片振幅）	: 約 9.5 mm
走行レールでの振幅（建屋の振幅）	: 約 0.5 mm

建屋の振動が天井クレーンと連成し減衰効果をもたらす場合には、建屋よ

り天井クレーンの振動を相殺するような荷重，減衰力の伝達が必要となる。減衰力の発生要因としては，建屋側のランウェイガーダ，鋼製柱等の建屋の構造減衰及び建屋と天井クレーンの相対運動における慣性力が挙げられる。しかし，上記のように建屋の振幅は天井クレーンの振幅と比較して小さく，構造減衰及び相対運動は共に小さいと考えられる。

また，本試験での建屋では，試験を実施したクレーンの他に定格荷重425tonの天井クレーン2機（原子炉圧力容器の運搬用）を有しており，建屋の剛性としては極端な柔構造とはなっていない。なお，建屋構造物の内，ランウェイガーダについては，実機天井クレーンにおいても連成による減衰効果が含まれると考えられる。

以上のことから，本試験結果では建屋の振動は生じているものの，その振幅は微小であり，天井クレーンの減衰への影響は小さいものと考えている。

原子炉建屋クレーンの評価について

1. 原子炉建屋クレーンの位置づけ

原子炉建屋クレーンは、耐震 S クラス設備に対して波及的破損を及ぼす可能性のある耐震 B クラス設備である。そのように位置づけられている理由は、本設備の設置場所が、耐震 S クラス設備である使用済燃料貯蔵設備の上部に配置されているためである。なお、同様な位置づけの設備として燃料取替機がある。

2. 原子炉建屋クレーンと組み合わせる地震動

原子炉建屋クレーンは、使用時のみ耐震 S クラス設備の上を走行する場合があるが、通常時は耐震 S クラス設備があるエリア外に待機している。このことから、7号機の原子炉設置許可申請書や工事計画認可申請書においては、原子炉建屋クレーンの耐震重要度分類を、「耐震 B クラス・基準地震動 S1 に対する落下防止」としていた。原子力発電所耐震設計技術指針～重要度分類・許容応力編～JEAG4601・補-1984 でも、原子炉建屋クレーンは基準地震動 S1 に対して落下しないことを確認することと例示している。

一方、燃料取替機は、常時、使用済燃料貯蔵設備の上に待機している。このことから、7号機の原子炉設置許可申請書や工事計画認可申請書においては、燃料取替機の耐震重要度分類を、「耐震 B クラス・基準地震動 S2 に対する落下防止」としていた。原子力発電所耐震設計技術指針～重要度分類・許容応力編～JEAG4601・補-1984 でも、燃料取替機は基準地震動 S2 に対して落下しないことを確認することと例示している。

7号機の耐震安全性評価においては、この考え方を踏襲した。すなわち、

常時、耐震 S クラス設備の上部に設置される燃料取替機の落下防止評価は、基準地震動 S_s を用い、使用時にのみ、一時的に耐震 S クラス設備の上を通過するものについては、弾性設計用地震動 S_d を用いた評価とした。

3. 原子炉建屋クレーンの評価について

原子炉建屋クレーンは、地震時に使用済燃料貯蔵プールに落下しないことを確認するため、以下に示すクレーンガード、脱線防止ラグ、トロリストoppaに着目して評価を実施している。

3.1 計算条件

(1) 走行方向荷重

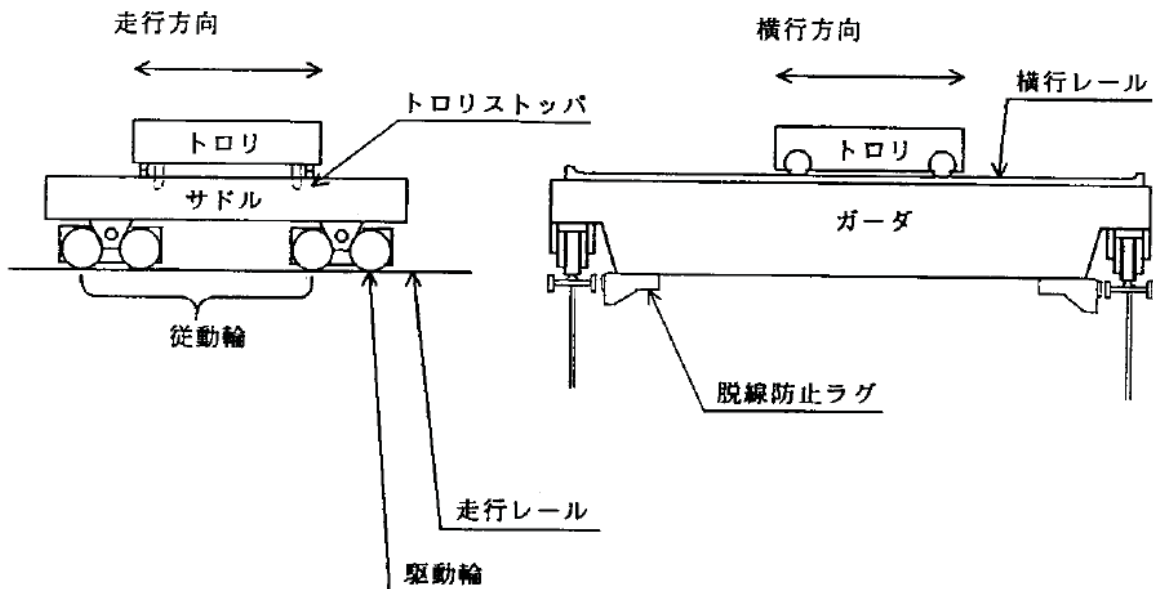
- a. クレーンは走行レールに乗っているだけで、建屋とは固定されていないので、走行方向の荷重がクレーンに加わっても、クレーンはレール上をすべるだけで、クレーン自身にはレールと走行車輪間の最大静止摩擦力以上の水平力は加わらない。
- b. クレーンの走行車輪は 8 個であり、そのうちの 2 個は駆動輪、他の 6 個が従動輪である。
- c. 駆動輪は電動機および減速機等の回転部分と連結されているため、地震の加速度を車輪部に入れると回転部分が追随できず、最大静止摩擦力以上の荷重が加わればレール上をすべる。
- d. 従動輪は回転部分が連結されていないので、駆動輪のみで荷重を受ける。

(2)横行方向荷重

- a. 横行方向は、走行レールに対して直角方向であるため、クレーンは建屋と固定されているものとし、荷重がそのままクレーンに作用する。
- b. トロリは横行レールに乗っているだけでガーダとは固定されていないので、荷重がトロリに加わってもトロリはレール上をすべるだけで、トロリ自身にはレールと横行車輪間の最大静止摩擦力以上の荷重は加わらない。
- c. トロリの横行車輪は4個であり、そのうち2個は駆動輪、他の2個は従動輪である。
- d. トロリ部分は走行方向と同様に駆動輪で荷重を受ける。

(3)評価部材

評価部材は、走行方向荷重に対してはクレーンガーダおよびトロリストップパとし、横行方向荷重に対しては脱線防止ラグとする。

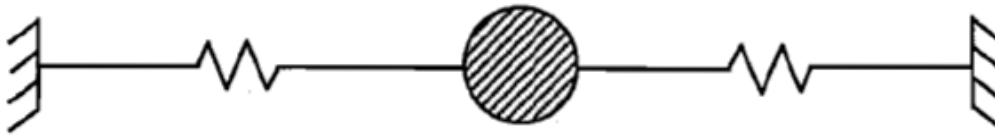


参図-7.6.1 クレーン概要図

3.2 固有周期算出

(1)水平方向

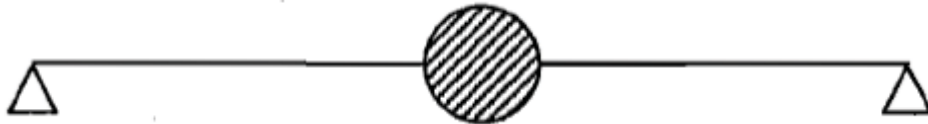
走行方向は3.1節より評価不要である。横行方向は1本のガーダ中央にトロリ質量の半分が2つのばねで支持されていると仮定して算出する。モデル図を参図-7.6.2に示す。



参図-7.6.2 横行方向固有周期計算モデル

(2)鉛直方向

トロリの位置をガーダ中央や端部などに移動させた各条件にて算出する。参図-7.6.3に、1本のガーダ中央にトロリ質量の半分が集中する場合のモデル例を示す。



参図-7.6.3 鉛直方向固有周期計算モデル

(1本のガーダ中央にトロリ質量の半分が集中する場合)

3.3 クレーンガーダの評価

(1) 曲げ応力

クレーンガーダの曲げ応力の評価は、ガーダに加わる鉛直方向のモーメント (M_V) および水平方向のモーメント (M_H) を用いて、以下の式で表される。

$$M_V/Z_X + M_H/Z_Y$$

ここで、

$$M_V = (M_1 + M_2 + M_3) \cdot (1 + C_V)$$

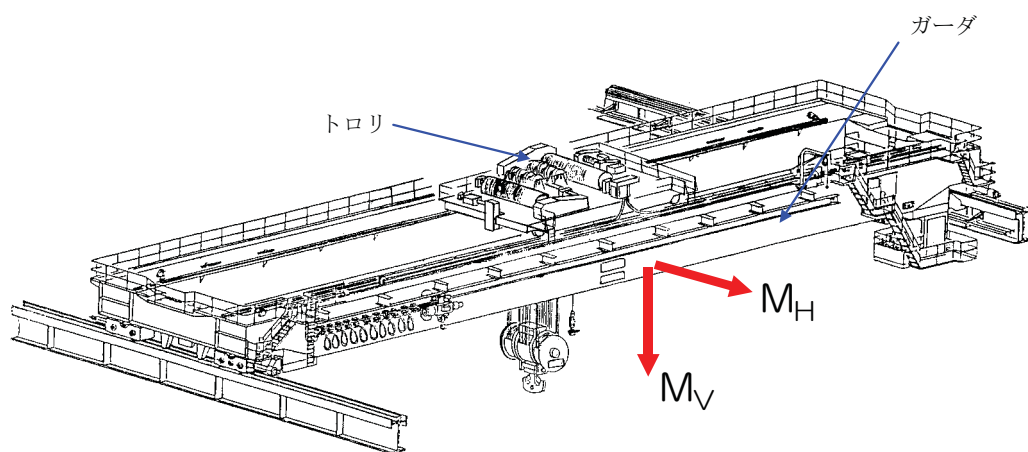
$$M_H = (M_1 + M_2) \cdot C_H$$

M_1, M_2, M_3 : ガーダ重量, トロリ重量, 定格荷重による曲げモーメント

Z_X, Z_Y : ガーダの断面係数

C_V : 鉛直方向震度 (クレーン設置階の床応答スペクトルより読み取り)

C_H : 水平方向震度 (駆動輪における最大静止摩擦係数より算出)



参図-7.6.4 クレーンガーダ概略図 (曲げ応力)

(2) せん断応力

クレーンガーダのせん断応力の評価は、ガーダに加わるせん断力（ Q ）を用いて、以下の式で表される。

$$\tau = Q/A_V$$

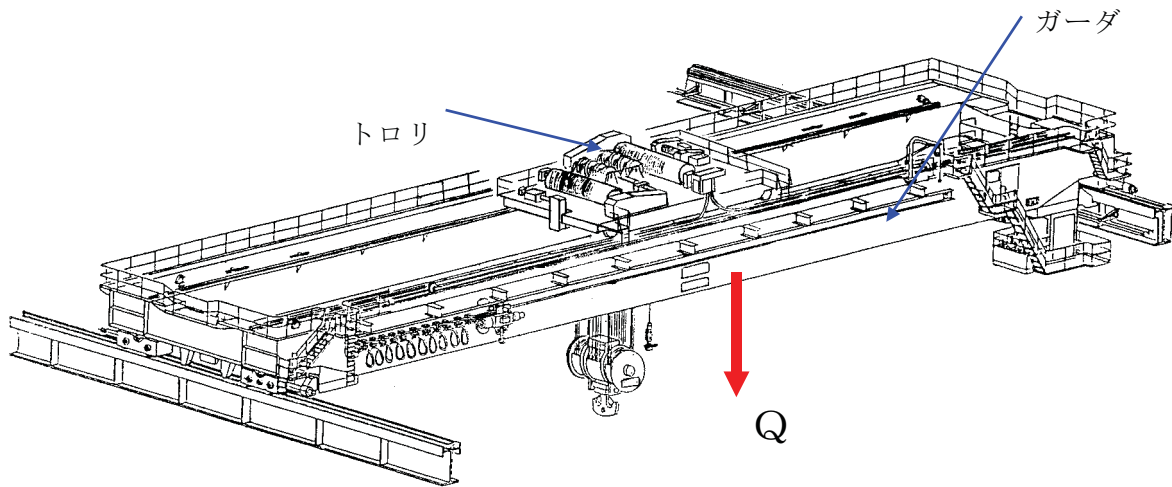
ここで、

$$Q = (Q_1 + Q_2 + Q_3) \cdot (1 + C_V)$$

Q_1 、 Q_2 、 Q_3 ：ガーダ重量，トロリ重量，定格荷重によるせん断力

A_V ：せん断力を受けるガーダの断面積

C_V ：鉛直方向震度（クレーン設置階の床応答スペクトルより読み取り）



参図-7.6.5 クレーンガーダ概略図（せん断応力）

3.4 脱線防止ラグの評価

脱線防止ラグの評価は、クレーンが水平方向に振動することにより、ランウェイガーダ（クレーンおよびレールを支える鉄骨）から受ける反力（ F_1 ）を用いて、以下の式で表される。

$$\text{圧縮応力 } \sigma = F_1 / A_1$$

ここで、

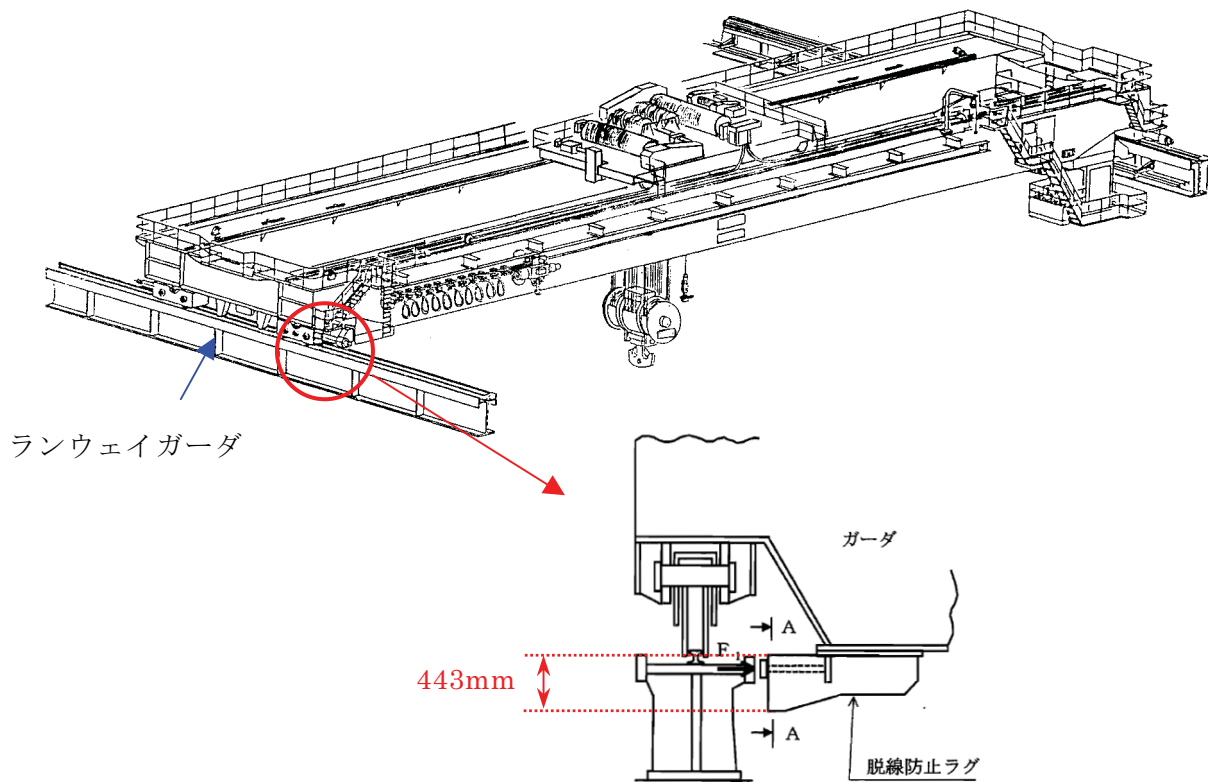
$$F_1 = 1/2 \cdot (m_1 + m_2 + m_3) \cdot g \cdot C_{H1} \text{ (脱線防止ラグ 1 個あたり)}$$

m_1 , m_2 , m_3 : ガーダ重量, トロリ重量, 定格荷重

A_1 : 脱線防止ラグの断面積

C_{H1} : 水平方向設計震度(クレーン設置階の床応答スペクトルより読み取り)

g : 重力加速度



参図-7.6.6 脱線防止ラグ概略図

3.5 トロリストッパの評価

トロリストッパの評価は、トロリが水平方向に振動することにより、クレーンガーダから受ける反力 (F_2) を用いて、以下の式で表される。

$$\text{曲げ応力} \quad \sigma_1 = M_4 / Z$$

$$\text{せん断応力} \quad \tau = F_2 / A_2$$

$$\text{組合せ応力} \quad \sigma_2 = \sqrt{(\sigma_1^2 + 3 \cdot \tau^2)}$$

ここで、

$$F_2 = 1/2 \cdot m_2 \cdot g \cdot C_H \quad (\text{トロリストッパ1個あたり})$$

M_4 : トロリ重量による曲げモーメント

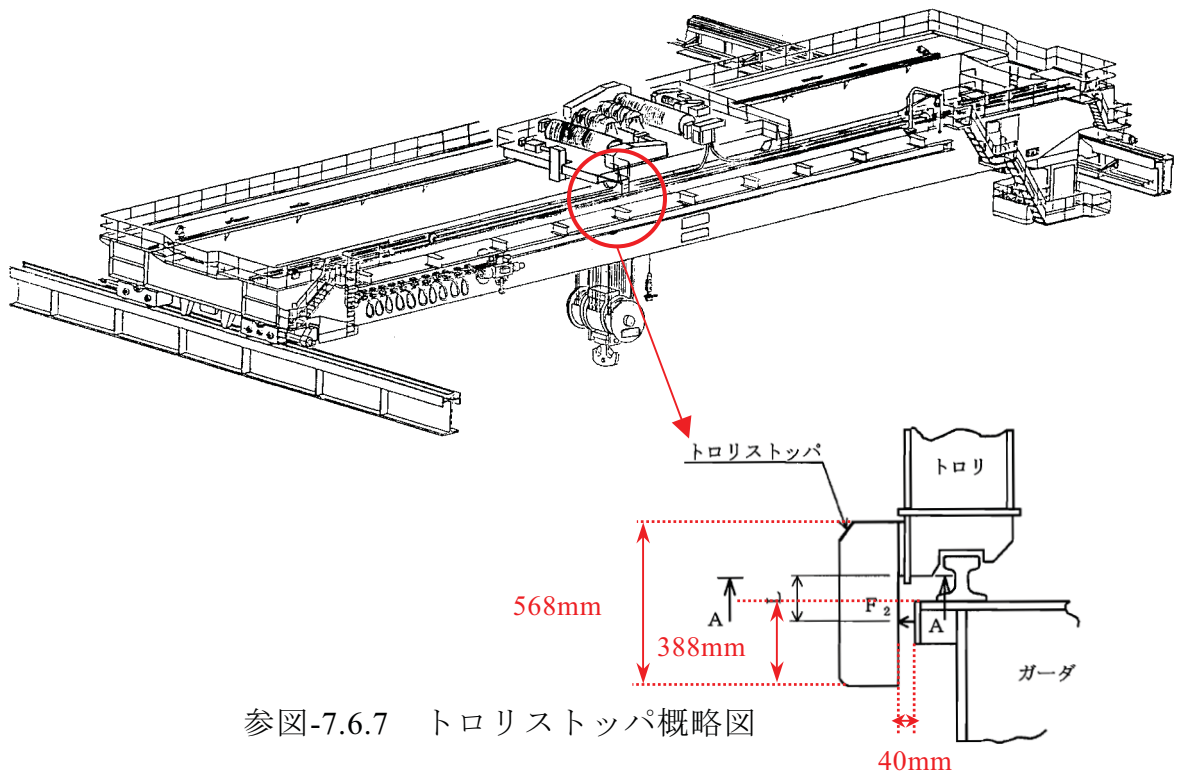
m_2 : トロリ重量

Z : トロリストッパの断面係数

A_2 : トロリストッパの断面積

C_H : 水平方向震度 (駆動輪における最大静止摩擦係数より算出)

g : 重力加速度



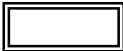
参図-7.6.7 トロリストッパ概略図

3.6 評価結果

クレーンガーダ，脱線防止ラグ，トロリストッパの評価結果を参表-7.6.1 に示す。発生値は，いずれも評価基準値以下であることを確認した。

参表-7.6.1 クレーンガーダ，脱線防止ラグ，トロリストッパの評価結果

部材	応力	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)
クレーンガーダ	曲げ応力	280	319
	せん断応力	70	139
脱線防止ラグ	圧縮応力	69	231
トロリストッパ	曲げ応力	22	231
	せん断応力	7	133
	組合せ応力	26	231

: 最大評価点（報告書本文記載値）

＜参考＞クレーンの浮き上がりを考慮した評価について

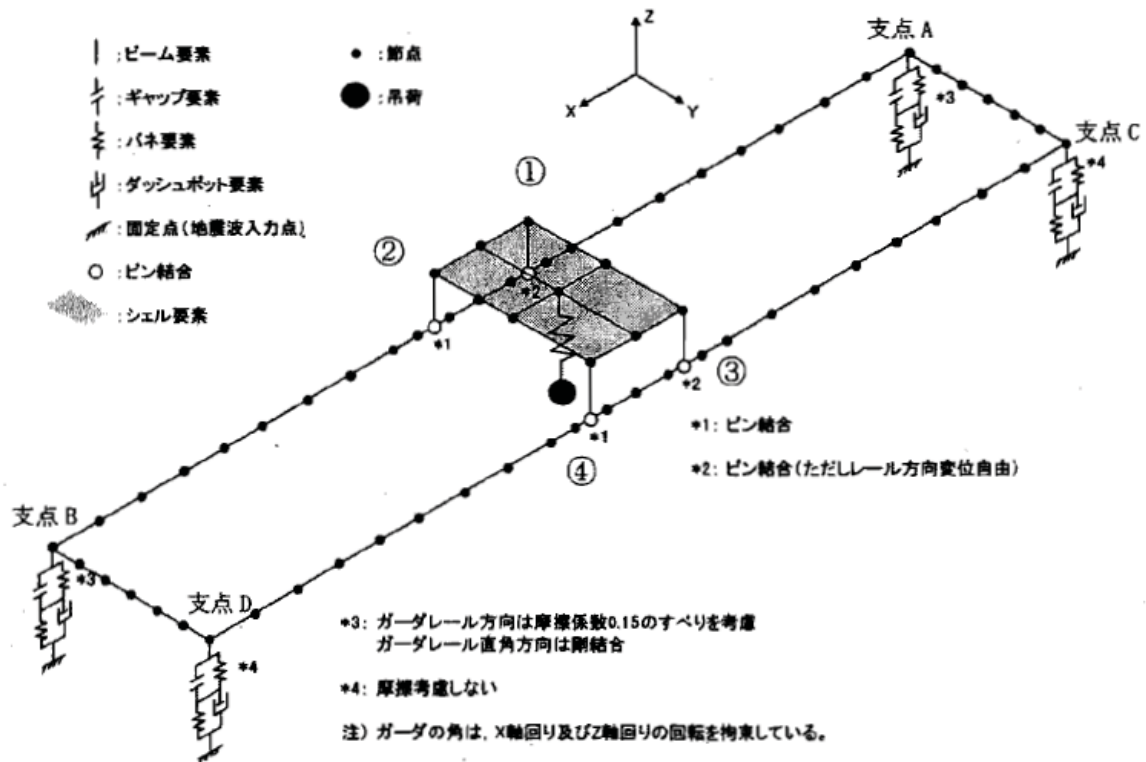
(1) はじめに

クレーン設置レベルにおいて、鉛直方向の設計用震度が 1.0G を超えていることから、地震時にクレーンが浮き上がることが想定される。そのため、クレーンの浮き上がりを考慮した場合の評価について以下に示す。

(2) 評価手法

解析モデルは、クレーンの浮き上がりを考慮するため、参図-7.6.8 に示すような、クレーンガーダの各車輪にギャップ要素を持つ非線形 FEM 解析モデルとした。

なお、計算にあたっては、汎用非線形有限要素解析プログラム ABAQUS を用いた。



参図-7.6.8 クレーンの浮き上がりを考慮した解析モデル

(3) 浮き上がりを考慮した解析モデルによる評価結果

クレーンの浮き上がりを考慮した解析モデルによる評価結果を参表-7.6.2に示す。浮き上がりを考慮した評価の発生値は、浮き上がりを考慮しない評価の発生値と比較して大きな差は見られない。

参表-7.6.2 クレーンの浮き上がりの考慮による評価結果の比較

部材	応力	発生値 (MPa)		評価基準値 (MPa)
		浮き上がり 考慮せず	浮き上がり 考慮	
クレーンガード	曲げ応力	280	260	319
	せん断応力	70	69	139
脱線防止ラグ	圧縮応力	69	69	231
トロリストッパ	曲げ応力	22	22	231
	せん断応力	7	7	133
	組合せ応力	26	25	231

燃料取替機の減衰定数を測定した試験について

1. 概要

JEAG4601 における燃料取替機の水平方向の設計用減衰定数は、溶接構造物として 1%と規定されている。

燃料取替機の減衰に寄与する要素には、材料減衰と燃料取替機を構成する部材間に生じる構造減衰に加え、車輪とレール間のガタや摩擦による減衰があり、溶接構造物としての 1%より大きな減衰定数を有すると考えられる。

そこで、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(H7～H10)」では、実機を試験体とした振動試験が実施され、水平方向及び鉛直方向の設計用減衰定数を見直すための検討を行った。以下に試験方法、試験体、試験結果について示す。

2. 燃料取替機の試験方法

2.1 試験条件

燃料取替機においては、参表-7.7.1 に示した方法で試験が行われている。燃料取替機はブリッジ(ガーダ 2 本)上にトロリが設置されている構造である。

振動試験時の試験体の状態は、トロリの停止位置をブリッジ(ガーダ)の中央部及び端部としている。計測項目は、加振加速度、トロリ、ブリッジ(ガーダ)の加速度、及び応答変位を計測している。

2.2 加振方法

加振方法は、トロリに加振装置を設置して強制加振で実施しており、加

振振動数は 5.0～20Hz としている。

2.3 加振レベル

加振加速度レベルは，製品保護の観点から燃料取替機に発生する応力を許容応力の 1/10 以下，及びレールとガイドローラが接触しないように，燃料取替機の最大応答加速度レベルを上下方向で 200Gal，水平方向で 100Gal 程度を目安に実施している。

参表-7.7.1 燃料取替機の振動試験方法

試験条件	(1) トロリ位置	中央部と端部
	(2) 付加質量の有無	加振装置 : 有
試験方法	(1) 加振方向	鉛直方向 水平方向：ブリッジ走行方向 (ガーダ)
	(2) 加振方法	加振装置による強制加振
	(3) 加振波の種類	強制加振；正弦波 5.0～20Hz
	(4) 加振レベル	許容応力の 1/10 以下(鉛直・水平)
計測項目		① 加振加速度 ② 試験体の加速度 ③ 試験体の応答変位

3. 燃料取替機の試験結果及び評価

3.1 鉛直方向減衰定数

(1)試験結果

試験結果を参図-7.7.1 に示す。設計応答振幅レベル^{*1}(トロリ中央部：3.4mm，トロリ端部：0.8mm) に対し，試験は応答振幅レベル(トロリ中央部：0.49mm，トロリ端部：0.62mm)まで実施されている。

応答振幅に対する減衰比の傾向は，トロリ位置が中央部の場合では，応答振幅の増加にしたがって減衰比は増加する傾向を示している。応答振幅 0.40mm で減衰比 2.0%以上が得られている。トロリ位置が端部の場合では，応答振幅に係らず 1.5%程度の減衰比が得られている。

(2)評価

トロリ位置が中央部の場合では，応答振幅の増加に伴い減衰比は増加傾向にあり，低振幅レベルでも減衰比 2.0%以上となっていること，応答振幅が増加すると取付器具の振動等で構造減衰^{*2}が増加し，設計応答振幅レベルでも減少することはないと考えられることから，設計用減衰定数 2.0%としている。

トロリ位置が端部の場合では，応答振幅に係らず 1.5%程度の減衰比が得られていることから，設計用減衰定数 1.5%としている。

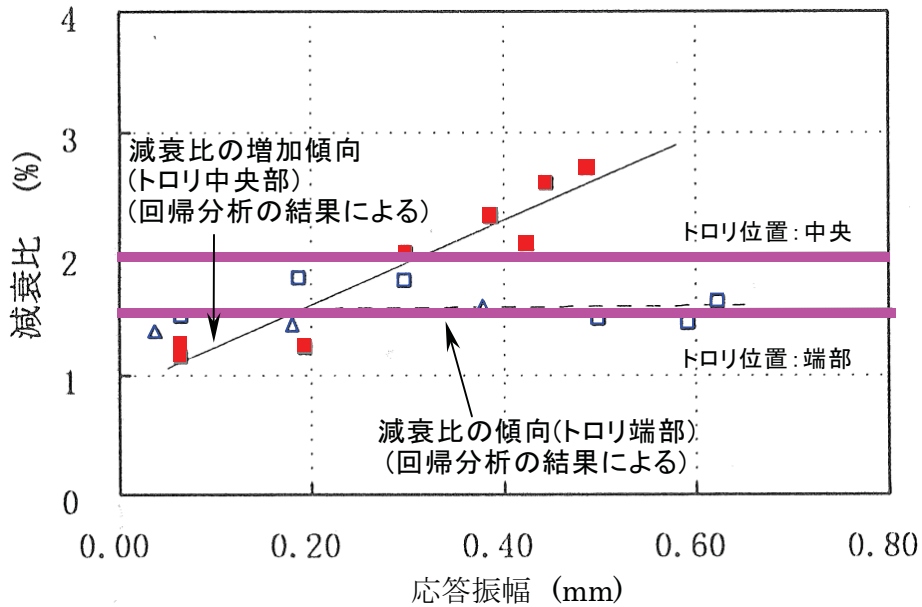
*1：ここで記載した設計応答振幅レベルは，燃料取替機に適用する設計用地震動における応答振幅レベルを示す。

*2：クレーン類の減衰に影響する因子は材料減衰・構造減衰があり，減衰影響因子は以下のとおりである。

材料減衰：ガーダ，トロリフレーム等の骨組構造を構成する鋼材での内部減衰
構造減衰：ガーダ車輪とレールの摩擦・ガタ，及びトロリ車輪とレールの摩擦・ガタ，取付器具(手摺・主ホイスト等)・電気盤パネル(機上補助盤等)の振動，マストチューブの相互作用

【凡 例】

- マスト縮, トロリ中央
- マスト縮, トロリ端
- ▲ マスト縮, トロリ中央
- △ マスト縮, トロリ端



参図-7.7.1 鉛直方向の減衰比と応答振幅の関係

3.2 水平方向減衰定数

(1) 試験結果

水平方向の試験結果を鉛直方向の結果と合わせて参図-7.7.2 に示す。設計応答振幅レベル(トロリ中央部 2.5mm)に対し、試験は応答振幅レベル(トロリ中央部 : 0.07mm, トロリ端部 : 0.07mm)まで実施されている。

燃料取替機の水平方向の減衰比は、トロリ位置が中央部では応答振幅 0.07mm において 3.6%、トロリ位置が端部では応答振幅 0.07mm において 3.1%という結果が得られている。

(2) 評価

水平方向の減衰比は、参図-7.7.2 のとおり応答振幅レベル 0.07mm でも

鉛直方向の減衰比を上回ることが確認されており、参図-7.7.1 の鉛直方向の試験結果から、減衰比は応答振幅の増加とともに大きくなる傾向にあるが、データ点数が少ないため、鉛直方向と同じ 2.0% を水平方向の設計用減衰定数としている。

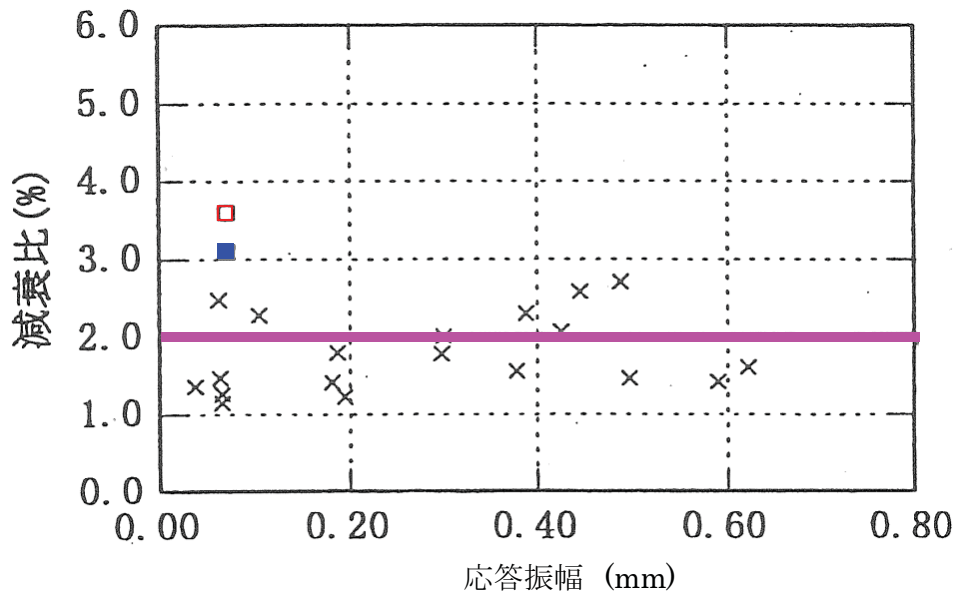
【凡 例】

□ 水平方向減衰比[トロリ中央部]

■ 水平方向減衰比[トロリ端部]

× 鉛直方向減衰比

(参図-7.7.1 に示した鉛直方向の結果を
参考として記載)



参図-7.7.2 水平方向の減衰比と応答振幅の関係

燃料取替機の評価について

1. 燃料取替機の耐震安全性評価

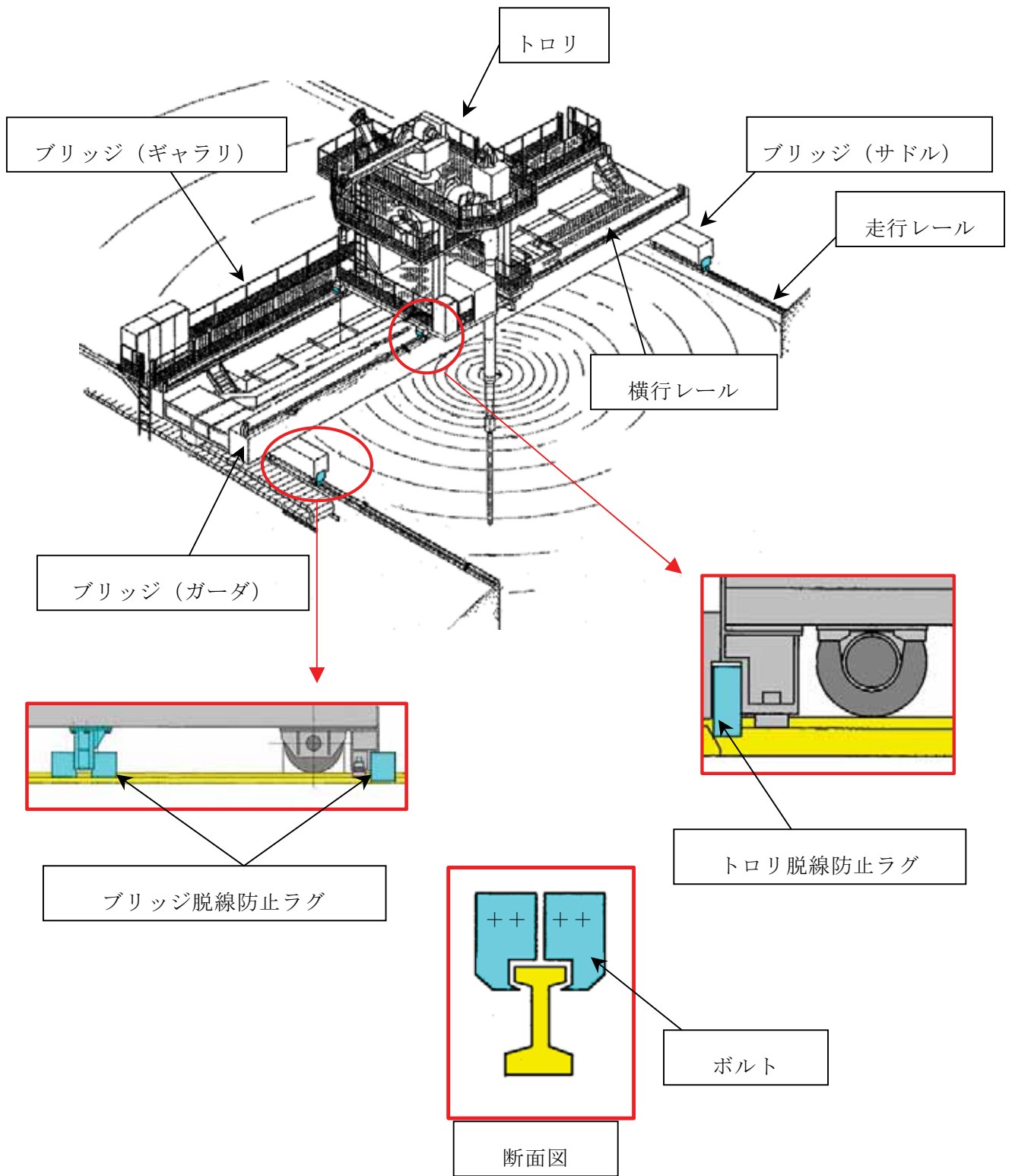
燃料取替機は、地震時に使用済燃料貯蔵プールに落下しないことを確認する必要がある。その観点から、構造物フレーム（ガーダ、サドル、ギャラリ、トロリ）、脱線防止ラグおよびレールに着目して評価を実施している。（参図-7.8.1 参照）以下、個別の部位毎に評価の概要を述べる。

2. 構造物フレームの評価

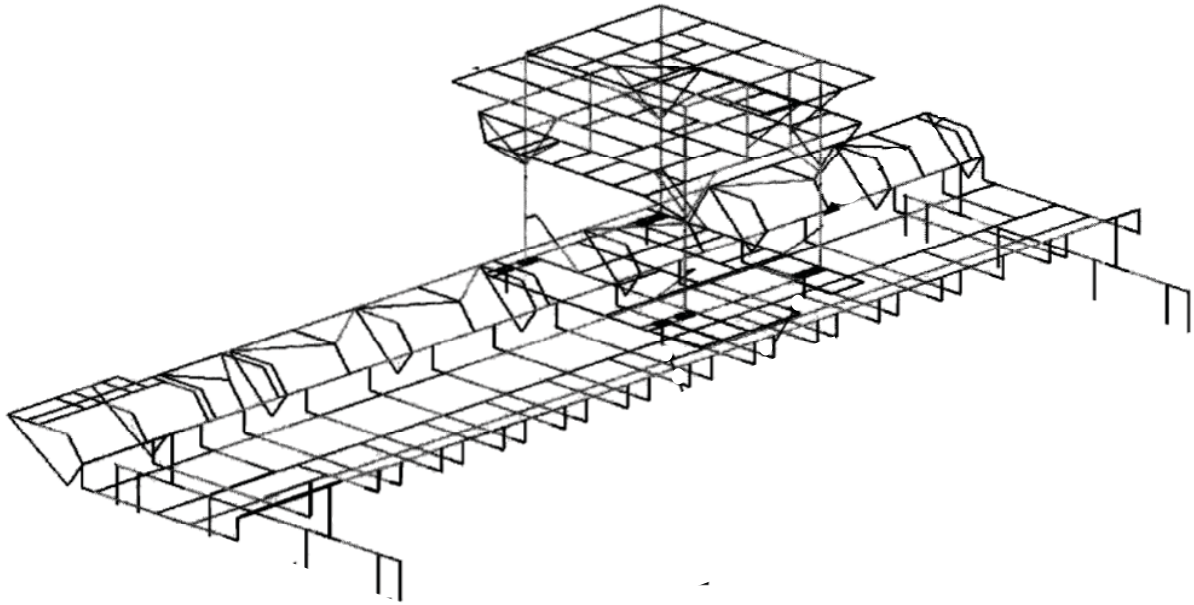
構造物フレームの応力は、燃料取替機をはり要素でモデル化し（参図-7.8.2 参照）、計算機を使用して曲げ応力（ σ_1 ）およびせん断応力（ τ_1 ）を算出する。

なお、組合せ応力は、フレームに加わる曲げ応力（ σ_1 ）およびせん断応力（ τ_1 ）を用いて、下記式で表される。

$$\sigma_{c1} = \sqrt{(\sigma_1)^2 + 3 \cdot (\tau_1)^2}$$



参図-7.8.1 燃料取替機概略図



参図-7.8.2 燃料取替機解析モデル

3. 脱線防止ラグの評価

(1) 脱線防止ラグ（本体）

脱線防止ラグ本体の曲げ応力，せん断応力および組合せ応力は，計算機による計算により得られたラグに加わる曲げモーメント（ M_1 ）およびせん断力（ P_1 ）を用いて，下記式で表される。

$$\text{曲げ応力} \quad \sigma_2 = M_1 / Z_1$$

$$\text{せん断応力} \quad \tau_2 = P_1 / A_1$$

$$\text{組合せ応力} \quad \sigma_{c2} = \sqrt{(\sigma_2^2 + 3 \cdot \tau_2^2)}$$

M_1 ：曲げモーメント

Z_1 ：脱線防止ラグの断面係数

P_1 ：せん断力

A_1 ：脱線防止ラグの断面積

(2) 取付ボルト

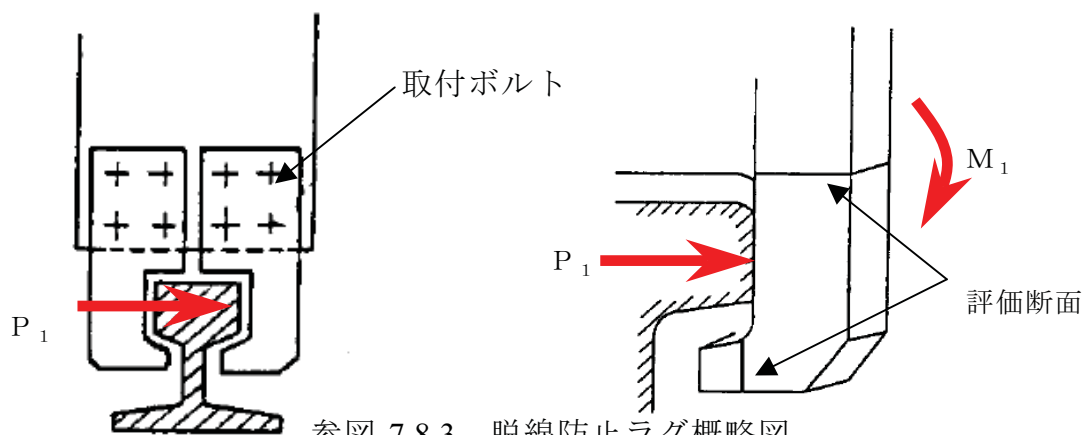
取付ボルトのせん断応力は，計算機による計算により得られたせん断力（ P_1 ）を用いて，下記式で表される。

$$\tau_3 = P_1 / n \cdot A_2$$

P_1 ：せん断力

n ：ボルト本数

A_2 ：ボルト1本の断面積



参図-7.8.3 脱線防止ラグ概略図

4. レールの評価

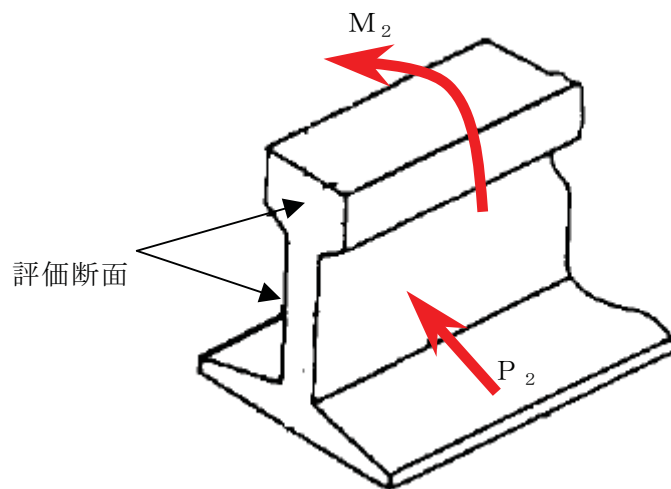
レールの曲げ応力，せん断応力および組合せ応力は，計算機による計算により得られたレールに加わる曲げモーメント (M_2) およびせん断力 (P_2) を用いて，下記式で表される。

$$\text{曲げ応力} \quad \sigma_3 = M_2 / Z_2$$

$$\text{せん断応力} \quad \tau_4 = P_2 / A_3$$

$$\text{組合せ応力} \quad \sigma_{c3} = \sqrt{(\sigma_3^2 + 3 \cdot \tau_4^2)}$$

M_2 : 曲げモーメント
 Z_1 : レールの断面係数
 P_2 : せん断力
 A_3 : レールの断面積



参図-7.8.4 レール概略図

5. 評価結果

各部材の評価結果を参表-7.8.1 に示す。

発生値は、いずれも評価基準値以下であることを確認した。

参表-7.8.1 各部材の評価結果 (1/2)

部材		応力	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)	
構造物フレーム	ブリッジ	ガーダ	引張応力	122	275
			せん断応力	11	158
			組合せ応力	124	275
		サドル	引張応力	154	275
			せん断応力	106	158
			組合せ応力	239	275
		ギャラリ	引張応力	149	275
			せん断応力	2	158
			組合せ応力	149	275
	トロリ	引張応力	185	275	
		せん断応力	19	158	
		組合せ応力	188	275	
脱線防止ラグ	ブリッジ脱線防止ラグ	引張応力	36	253	
		せん断応力	19	146	
		組合せ応力	48	253	
	取付ボルト	せん断応力	142	158	
	トロリ脱線防止ラグ	引張応力	88	253	
		せん断応力	34	146	
		組合せ応力	106	253	
取付ボルト	せん断応力	113	158		

: 最大評価点 (報告書本文記載値)

参表-7.8.1 各部材の評価結果 (2/2)

部材		応力	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)
レール	走行レール	引張/圧縮応力	239	546
		せん断応力	22	315
		組合せ応力	242	546
	横行レール	引張/圧縮応力	372	483
		せん断応力	15	278
		組合せ応力	373	483

動的機能維持評価における鉛直方向の評価基準値加速度に

1.0G を用いている根拠について

1. 概要

平成 18 年 9 月に改訂された耐震設計審査指針において、動的機器に対する地震時機能維持を確認することが明記されるとともに、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も、動的な地震力を考慮することとなった。

耐震設計審査指針改訂以前においても動的機器の地震時機能維持評価^{*1}は行われており、原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版（以下、「JEAG4601-1991」という。）に基づき、動的地震力を考慮する水平方向に対しての評価が行われていた。

一方、耐震設計審査指針改訂に伴い、鉛直方向についても動的な地震力の考慮が必要となったことから、鉛直方向の地震力に対する地震時機能維持評価を行うにあたり、評価で用いる機能確認済加速度^{*2}について、これまでの水平方向に加え、鉛直方向についても設定が必要となった。

柏崎刈羽原子力発電所 7 号機では、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（H10～H13）」（以下、「本研究」という。）の成果に基づき、地震時機能維持評価で必要となる、鉛直方向の機能確認済加速度を採用した。

*1：地震時又は地震後に動作の要求される安全上重要な設備について、ポンプの回転機能や弁の開閉動作機能等の動的機能が維持されることを確認する。なお、JEAG4601-1991 には、以下の 12 機種に対する機能維持評価法が規定されている。

- | | | |
|--------------|-----------|-------------|
| ①立形ポンプ | ②横形ポンプ | ③ポンプ駆動用タービン |
| ④電動機 | ⑤ファン | ⑥冷凍機 |
| ⑦非常用ディーゼル発電機 | ⑧制御用空気圧縮機 | ⑨往復動式ポンプ |
| ⑩弁 | ⑪ダンパ | ⑫制御棒 |

*2：振動試験や解析により、地震時機能維持が確認された加速度

2. 柏崎刈羽原子力発電所7号機で用いる機器の鉛直方向における機能確認済加速度
 機器の内部部品等の浮き上がりを考慮する必要のない限界値（1.0G）に対する
 解析的な検討を行い，許容値に対する余裕が確認されたことから，鉛直方向の機
 能確認済加速度に1.0Gを採用した。次項に残留熱除去系ポンプの機能確認済加速
 度を例として示す。

参表-7.9.1 機能確認済加速度（鉛直方向加速度1.0Gを用いる機器）

種別*1			機能確認済加速度		主な安全上重要な設備
			鉛直方向(G* ³)		
			現行	柏崎刈羽 7号機	
立形ポンプ	ピットバレル形ポンプ		—	<u>1.0</u>	残留熱除去系ポンプ
	立形斜流ポンプ				原子炉補機冷却海水系ポンプ
横形ポンプ	横形単段遠心式ポンプ		—	<u>1.0</u>	原子炉補機冷却水系ポンプ
	横形多段遠心式ポンプ				原子炉隔離時冷却系ポンプ
ポンプ駆動用タービン			—	<u>1.0</u>	原子炉隔離時冷却系ポンプ駆 動用蒸気タービン
電動機	横形ころがり軸受電動機		—	<u>1.0</u>	原子炉補機冷却水系ポンプ用 電動機
	立形すべり軸受電動機				残留熱除去系ポンプ用電動機
ファン	遠心直結型ファン		—	<u>1.0</u>	中央制御室送風機
	遠心直動型ファン				中央制御室排風機
非常用 ディーゼル 発電機	高速形 ディーゼル 機関	機関本体	—	<u>1.0</u>	非常用ディーゼル発電機
		ガバナ			
往復動式ポ ンプ	横形3連往復 動式ポンプ	重心位置	—	<u>1.0</u>	ほう酸水注入系ポンプ

注記 *1：JEAG4601-1991に記載された12機種のうち柏崎刈羽7号機で評価を行う機種を記載

*2：JEAG4601-1991に追加及び変更した箇所を下線で示す。

*3：G=9.80665(m/s²)

3. 残留熱除去系ポンプの機能確認済加速度

残留熱除去系ポンプ（柏崎刈羽原子力発電所7号機では「立形ポンプ（ピットバレル形ポンプ）」を使用）の地震時機能確認済加速度は、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」に規定されているが、水平方向のみであり、鉛直方向については規定されていない。

したがって、鉛直方向の機能確認済加速度については、既往の試験研究⁽¹⁾をもとに定めた。

具体的には、立形ポンプは、鉛直方向の剛性が高く応答増幅が小さいことから、鉛直方向の内部品の浮き上がりによる非線形特性を考慮する必要のない限界値（1.0G）を鉛直方向の機能確認済加速度として設定した。（参表-7.9.2）

参表-7.9.2 機能確認済加速度

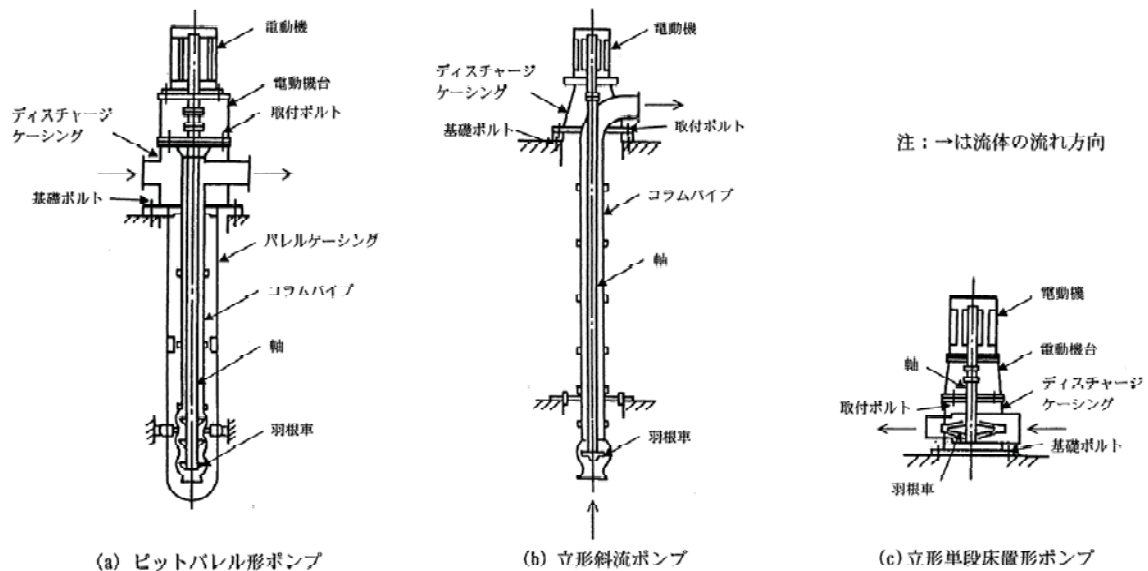
種別	機種	加速度 確認部位	機能確認済加速度	
			水平方向(G* ¹)	鉛直方向(G* ¹)
立形ポンプ	ピットバレル形 ポンプ	コラム 先端部	10.0	<u>1.0</u>

*1 : G=9.80665(m/s²)

この設定にあたり、既往の試験研究⁽¹⁾⁽²⁾においては、当該のピットバレル形ポンプについて解析的な検討を実施した。解析的な検討においては、地震時に水力性能を確保するための水平・鉛直地震動に対する異常要因分析を行い、損傷若しくは異常が生じれば機能喪失に至ると評価される項目を抽出した上で、水平方向の機能確認済加速度（10.0G）及び鉛直方向の機能確認済加速度（1.0G）が加わった場合の健全性評価を実施している。

具体的には、強度確保に係る項目として、長手方向の曲げで影響を受けるポンプケーシング、コラムパイプ、各部取付ボルトと全体の支持部である基礎ボルト

等の強度評価, 及び, 回転機能確保に係る項目として, 水平地震力によるポンプ軸受のラジアル荷重評価, 鉛直地震力による電動機軸受のスラスト荷重評価を実施している。



参図-7.9.1 立形ポンプの構造例

ピットバレル形ポンプの代表ポンプについての評価結果を参表-7.9.3 及び参表-7.9.4 に示す。

ポンプは, 水平方向 10.0G に加えて鉛直方向に 1.0G が作用しても, 各評価部位の発生応力, 軸受の面圧は許容値に対して余裕があり, 水平・鉛直地震動に対して動的機能が維持されることを確認している。

電動機軸受のスラスト荷重についても, 鉛直地震力が上向きである場合, 下向きである場合ともに, 発生荷重はいずれも許容値以下となり問題ないことを確認している。

参表-7.9.3 立形ポンプの機能維持評価結果（水平・鉛直地震動に対する評価）

評価項目	基礎ボルト 取付ボルト	ディスチ ャージケ ーシング	バレルケ ーシング	コラム パイプ	ポンプ 軸受	軸	水力性能
評価方法	解析により 応力を評価	解析により 応力を 評価	解析により バレル の応力を 評価	解析に より応 力を評 価	解析に より面 圧を評 価	解析に より応 力を評 価	ACT 研究* ³ での成果を もとに左記 評価項目に より水力性 能を代替評 価
確認 余裕度 *1 *2	実機 ピット バレル ポンプ形 基礎ボルト 70 ポンプ取付 ボルト 53 電動機取付 ボルト 6.3	42	4.7	10	1.6	13	—
評価結果	許容応力を 下回っている	許容応力を 下回って いる	許容応力を 下回って いる	許容 応 力を下 回って いる	許容 面 圧を下 回って いる	許容 応 力を下 回って いる	左記評価結 果により水 力性能が維 持されると 判断

*1：余裕度の算定は、水平方向加速度 10.0G と鉛直方向加速度 1.0G を使用。

*2：余裕度 = (許容値 - 通常発生値) / 地震による発生値

*3：ACT 研究とは、動的機器の地震時機能維持に関する試験研究であり、JEAG4601-1991 追補版にその成果が反映された。

参表-7.9.4 ピットバレル形ポンプの電動機軸受におけるスラスト荷重

	停止時	起動時	定常運転時
自重 (×10 ³ N)	+46.1	+46.1	+46.1
地震力 (×10 ³ N)	±46.1	±46.1	±46.1
軸推力 (×10 ³ N)	—	+122.5	+39.2
合計 (×10 ³ N)	0 ~ +92.2	+122.5 ~ +214.7	+39.2 ~ +131.4
許容値 (×10 ³ N)	+841.8	+841.8	+841.8

注記 *1：鉛直方向加速度±1.0G を考慮。

*2：+は下方向，-は上方向の荷重を示す。

【参考文献】

- (1)(社)日本電気協会 (2006) : 水平・鉛直地震動に対する動的機器の地震時機能維持評価法の改定案について, 第 15 回機器・配管系検討会資料 No.15-4-4-2, 平成 18 年 9 月 11 日
- (2)共同研究報告書 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 3) 平成 13 年度上半期最終報告書 平成 13 年 9 月

非常用ガス処理系排風機およびほう酸水注入系貯蔵タンクにおける
設計と同等の手法による評価結果について

応答倍率法による発生値が、評価基準値に比較的近い値となっている非常用ガス処理系排風機およびほう酸水注入系貯蔵タンクについて、設計と同等の手法により評価を実施した結果を以下に示す。

1. 非常用ガス処理系排風機の評価

非常用ガス処理系排風機について、設計と同等の手法により耐震安全性評価を実施した結果を参表-7.10.1 に示す。発生値は、評価基準値を下回ることを確認した。

参表-7.10.1 耐震安全性評価結果の比較

評価対象設備	評価部位	応力分類	発生値 [MPa]		評価基準値 [MPa]
			応答倍率法	設計と同等の手法	
非常用ガス処理系排風機	排風機取付ボルト	引張応力	169	67	177

なお、応答倍率法による評価手法、設計と同等の手法による評価手法を以下に示す。

(1) 評価条件

非常用ガス処理系排風機における評価条件を参表-7.10.2 に示す。

参表-7.10.2 評価条件

機器名称	据付場所及び床面高さ [m]	固有周期	水平方向評価震度	鉛直方向評価震度	排風機振動による震度
非常用ガス処理系排風機	原子炉建屋 T.M.S.L.23.5*1	—*2	C _{H0} =0.78 (設計時)	C _{V0} =0.29 (設計時)	C _p =0.21
			C _H =1.18 (耐震安全性評価)	C _V =1.06 (耐震安全性評価)	

*1：基準床レベルを示す

*2：0.05 秒以下であり剛である

(2)機器要目

排風機取付ボルトの評価に必要な機器要目を参表-7.10.3 に示す。

参表-7.10.3 機器要目

部材	運転時重量 W _i [kg]	取付ボルト基準面から重心までの距離 h _i [mm]	重心とボルト間の水平方向距離 l _{1i} [mm]	重心とボルト間の水平方向距離 l _{2i} [mm]
	420	600	40	90
排風機取付ボルト	ボルトの軸断面積 A _{bi} [mm ²]	ボルトの本数 n _i	評価上引張力を受けるとして期待するボルト本数 n _{fi}	転倒方向
	201.0	4	2	軸

1.1 応答倍率法による評価手法

(1) 応答比の算定

設備の発生値を算定するにあたり、非常用ガス処理系排風機においては水平加速度、鉛直加速度を用いる機器に分類されるため、基準地震動 S_s による評価震度と、既往評価で用いた評価震度から水平加速度と鉛直加速度の比をそれぞれ求め、大きい方の値を応答比とした。

$$\begin{aligned} \text{応答比} &= \text{MAX} \left(\frac{C_H}{C_{H0}}, \frac{C_V}{C_{V0}} \right) = \text{MAX} \left(\frac{1.18}{0.78}, \frac{1.06}{0.29} \right) = \text{MAX} (1.52, 3.66) \\ &= 3.66 \end{aligned}$$

(2) 応答倍率法による評価結果

設計時における排風機取付ボルトの引張応力は、 $4.7 [\text{kg}/\text{mm}^2]$ であることから、(1)で求めた応答比 3.66 を乗じた結果、以下のとおりとなる。

$$\text{算定値} = 4.7[\text{kg}/\text{mm}^2] \times 3.66 = 17.20[\text{kg}/\text{mm}^2] \div 169[\text{MPa}]$$

1.2 設計と同等な手法

ボルトの応力は地震による震度、ポンプによる震度およびポンプ回転により作用するモーメントによる引張応力について計算する。

ボルトに対する引張力は最も厳しい条件として参図-7.10.1 で最外列のボルトを支点とする転倒を考え、これを他方の最外列のボルトで受けるものとして計算する。

引張力 (F_{bi})

$$F_{bi} = \frac{W_i \cdot (C_H + C_P) \cdot h_i + M_P - W_i \cdot (1 - C_P - C_V) \cdot \ell_{1i}}{n f_i \cdot (\ell_{1i} + \ell_{2i})}$$

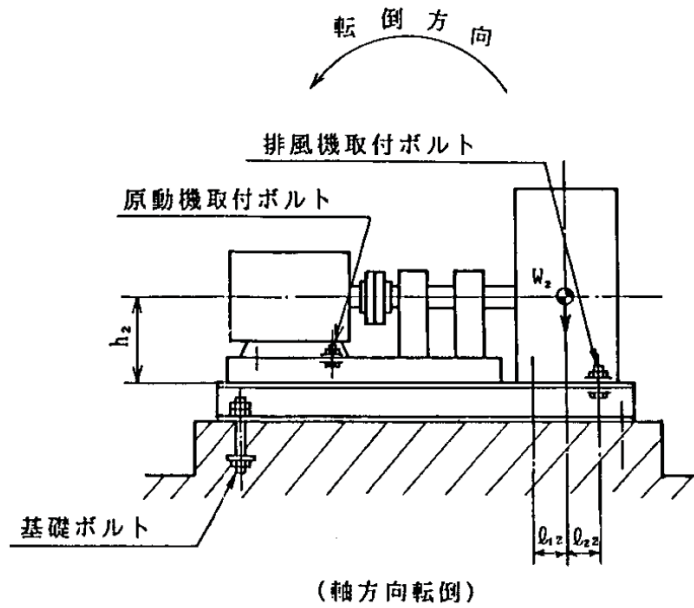
M_P : 排風機の回転により作用するモーメント

$$= \frac{420 \times (1.18 + 0.21) \times 600 + 0 - 420 \times (1 - 0.21 - 1.06) \times 40}{2 \cdot (40 + 90)}$$

$$= 1364.68 [\text{kg}] = 13383 [\text{N}]$$

引張応力 (σ_{bi})

$$\sigma_{bi} = \frac{F_{bi}}{A_{bi}} = \frac{13383}{201.0} \div 67 [\text{N}/\text{mm}^2]$$



参図-7.10.1 計算モデル（軸方向転倒）

2. ほう酸水注入系貯蔵タンクの評価

ほう酸水注入系貯蔵タンクについて、設計と同等の手法により耐震安全性評価を実施した結果を参表-7.10.4 に示す。発生値は、評価基準値を下回ることを確認した。

参表-7.10.4 耐震安全性評価結果の比較

評価対象設備	評価部位	応力分類	発生値 [MPa]		評価基準値 [MPa]
			応答倍率法	設計と同等の手法	
ほう酸水注入系貯蔵タンク	基礎ボルト	せん断応力	126	52	159

なお、応答倍率法による評価手法、設計と同等な手法による評価手法を以下に示す。

(1) 評価条件

ほう酸水注入系貯蔵タンクにおける評価条件を参表-7.10.5 に示す。

参表-7.10.5 評価条件

機器名称	据付場所及び 床面高さ [m]	固有周期	水平方向 評価震度	鉛直方向 評価震度	排風機振動 による震度
ほう酸水注入系貯蔵タンク	原子炉建屋 T.M.S.L.23.5*1	0.032	$C_{H0}=0.78$ (設計時)	$C_{V0}=0.29$ (設計時)	$C_P=0.21$
			$C_H=1.18$ (耐震安全性評価)	$C_V=1.06$ (耐震安全性評価)	

*1：基準床レベルを示す

(2)機器要目

ほう酸水注入系貯蔵タンク（基礎ボルト）の評価に必要な機器要目を参表-7.10.6 に示す。

参表-7.10.6 機器要目

機器名称	運転時重量 W_0 [kg]	ボルトの 軸断面積 A_b [mm ²]	ボルトの本数 n
ほう酸水注入系貯蔵タンク	40200	452.3	20

2.1 応答倍率法による評価手法

(1) 応答比の算定

設備の発生値を算定するにあたり、ほう酸水注入系貯蔵タンクにおいては水平加速度、鉛直加速度を用いる機器に分類されるため、基準地震動 S_s による評価震度と、既往評価で用いた評価震度から水平加速度と鉛直加速度の比をそれぞれ求め、大きい方の値を応答比とした。

$$\begin{aligned} \text{応答比} &= \text{MAX} \left(\frac{C_H}{C_{H0}}, \frac{C_V}{C_{V0}} \right) = \text{MAX} \left(\frac{1.18}{0.78}, \frac{1.06}{0.29} \right) = \text{MAX} (1.52, 3.66) \\ &= 3.66 \end{aligned}$$

(2) 応答倍率法による評価結果

設計時における基礎ボルトのせん断応力は、 $3.5 \text{ [kg/mm}^2\text{]}$ であることから、(1)で求めた応答比 3.66 を乗じた結果、以下のとおりとなる。

$$\text{算定値} = 3.5[\text{kg/mm}^2] \times 3.66 = 12.81[\text{kg/mm}^2] \div 126[\text{MPa}]$$

2.2 設計と同等な手法

ボルトのせん断応力は地震による震度により作用するせん断力について計算する。

せん断応力 (τ_{bi})

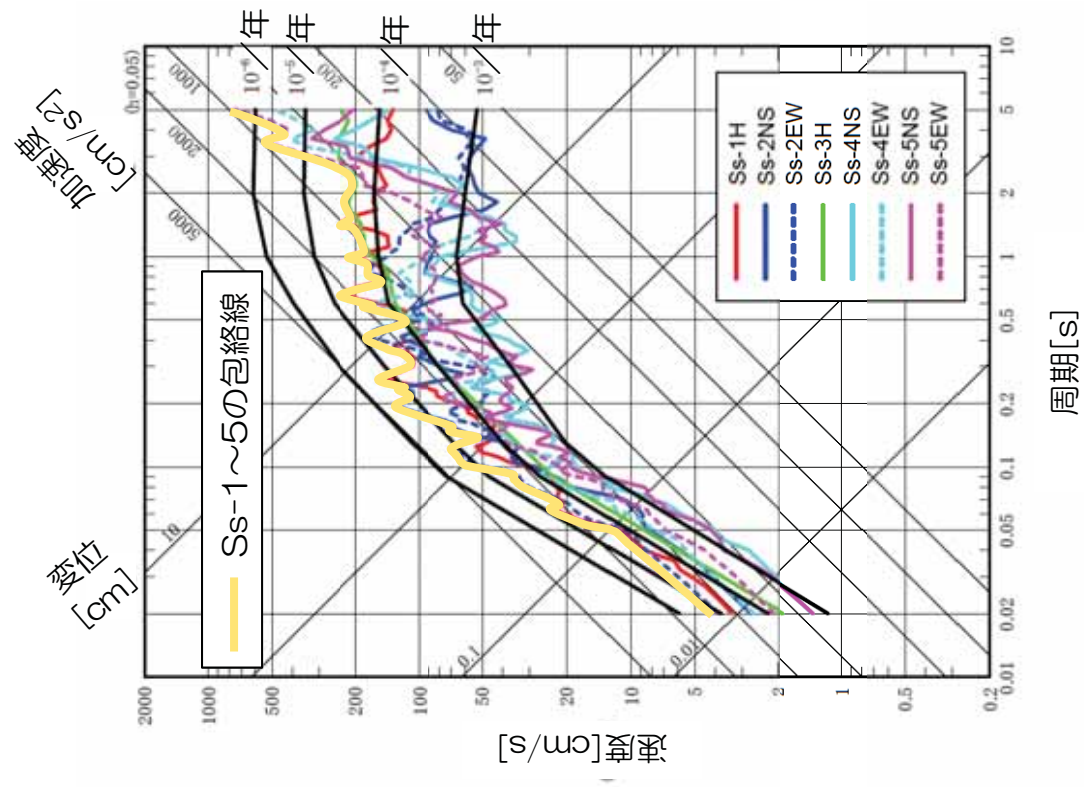
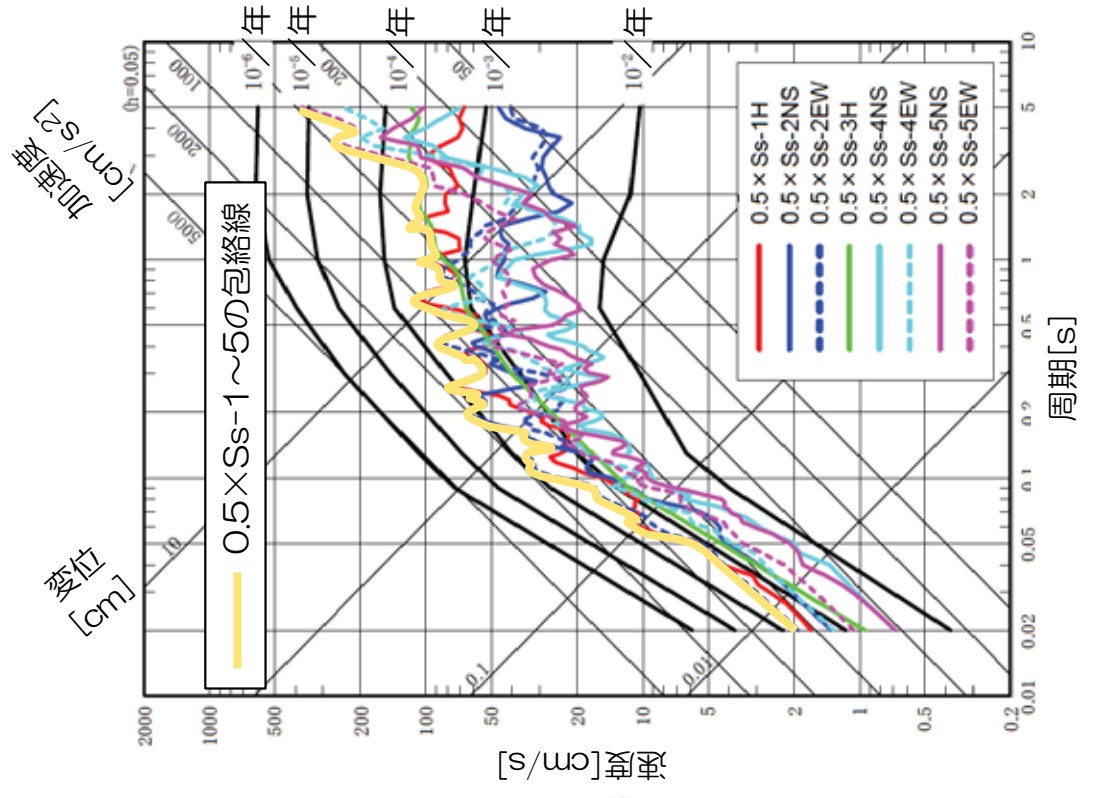
$$\begin{aligned} \tau_{bi} &= \frac{C_H \cdot W_O}{n \cdot A_b} \\ &= \frac{1.18 \times 40200}{20 \times 452.3} = 5.243 \text{ [kg/mm}^2\text{]} \div 52 \text{ [MPa]} \end{aligned}$$

荷重の組合せの評価において、参照すべきスペクトルの
超過発生確率の考え方について

機器・配管系の耐震安全性評価に用いる地震力を求めるのにあたり、複数ある基準地震動 S_s のすべて (S_s -1~5) に対して地震応答解析を実施し、せん断力、モーメント、軸力などの地震応答荷重や地震応答加速度を算定した。構造強度評価に地震応答荷重を用いる場合、せん断力やモーメント、軸力のそれぞれの最大応答荷重を用いて応力解析を行った。一方、構造強度評価に床応答スペクトルを用いる設備については、 S_s -1~5 のすべての床応答スペクトルを全固有周期帯にわたって包絡し、応力解析に用いた。これらにより、基準地震動 S_s に対して発生しうる最大の応力を算定している。

このように、今回の評価については、基準地震動 S_s に対して想定しうる最大荷重に対する評価を行っている。これは、設計で一般的に行われている地震荷重の想定を踏襲したものである。このことを踏まえ、地震との荷重の組合せを考慮する場合は、この最大の地震荷重に組み合わせるべきものは何か、という観点で検討し、すべての基準地震動 S_s の包絡レベルの年超過確率を参照した。

なお、それぞれの個別地震動の発生確率と運転状態の確率との重畳を考慮して、個別地震動ごとに荷重の組合せの可否を判断することも考えられるが、複数の地震動ごとに評価を実施することは、設計ないし評価が煩雑となり合理的ではなく、また、支配的である包絡波について評価を実施しても工学的妥当性は損なわれないと判断されたものと推定する。



参图-7.11.1 Ss, 0.5 × Ss の年超過確率

Sd を 0.5 倍の Ss にした理由について

1. 弾性設計用地震動 Sd に関する整理

「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」で述べられている Sd の設定に関する記述を次の通り整理した。(6. 耐震設計方針 (解説) III(2)より抜粋)

1.1 Sd の設定方法

当該係数の設定に当たっては、基準地震動 Ss の策定の際に参照した超過確率を参考とすることができる。・・・・・・(中略)・・・・・・弾性設計用地震動 Sd と基準地震動 Ss の応答スペクトルの比率 (Sd/Ss) の値は、弾性設計用地震動 Sd に求められる性格上、ある程度以上の大きさであるべきであり、めやすとして、0.5 を下回らないような値で求められることが望ましい。

2. 弾性設計用地震動 Sd の設定

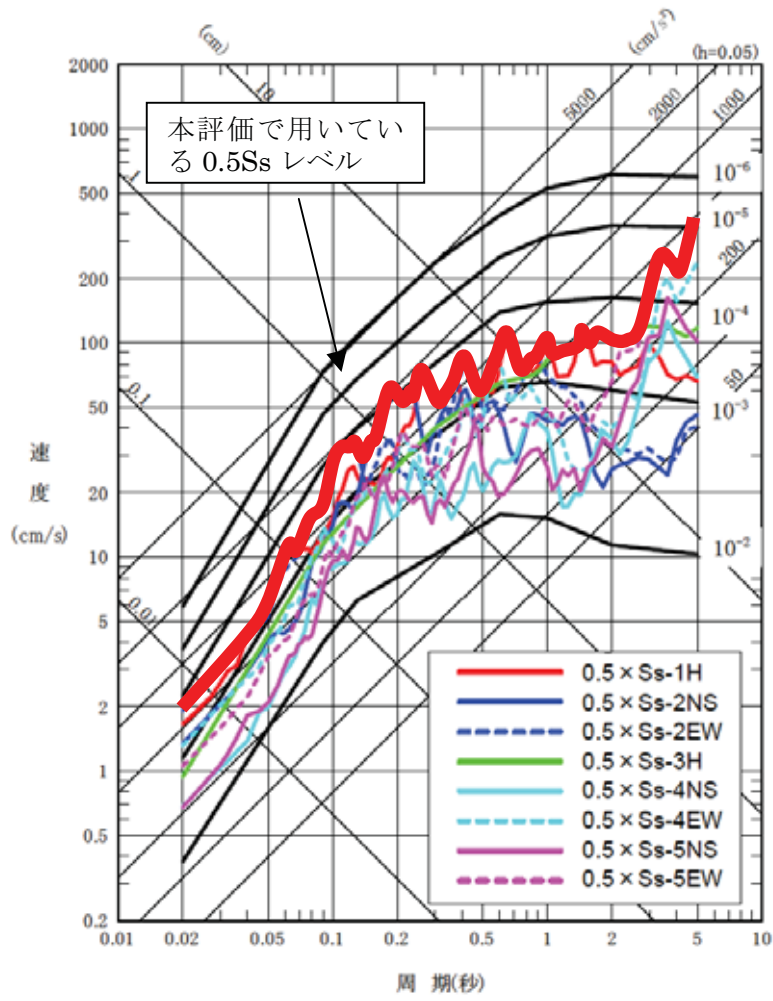
2.1 設定方針

弾性設計用地震動 Sd の設定に際しては、事故時荷重と地震荷重を組み合わせる観点から、原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1984 に記載のある基準地震動 S₁ と事故時荷重の組合せの考え方を参考に設定することとした。

2.2 Sd の設定

Sd/Ss の比率は、0.5 を下回らないこととされている。その 0.5 を採用して年超過確率を参照したところ、全ての 0.5Ss の包絡レベルにおいて、年超過確率が概ね $10^{-3} \sim 10^{-4}$ であった。JEAG4601-1984 で想定している事故発生確率が 10^{-4} /年であることを考慮すると、Sd/Ss の比率を 0.5 を超えて設定すると、地震と事故が同時に発生する確率が 10^{-7} /年を下回り、耐震安全性評価において考慮すべき事象とはいえなくなる。このことから、本評価においては、Sd/Ss の比率を 0.5 と

した。



参図-7.12.1 0.5Ss の年超過確率

事故時の条件（温度等）の時間変化を考慮した

地震と事故との組合せの考え方について

地震と組合せる事故として、冷却材喪失事故を弾性設計用地震動 **Sd** と組合せている。冷却材喪失事故における荷重の組合せを考慮する条件として、長時間作用する圧力、温度を弾性設計用地震動 **Sd** と組合せて評価している。

JEAG4601・補-1984 重要度分類・許容応力編においては、長時間（ 10^{-1} 年以上）継続するものとしており、柏崎刈羽原子力発電所 7 号機の設計においては、事故発生後 30 日（720 時間）後の圧力、温度を長時間継続するものとして組合せている。今回の耐震安全性評価においても、設計と同様に考えて荷重を組合せている。

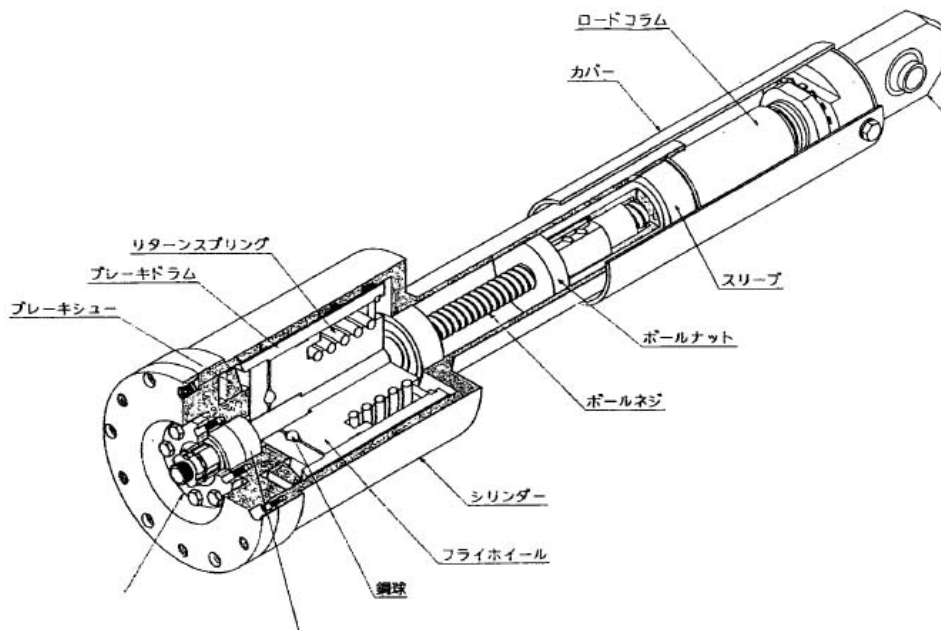
配管支持装置（メカニカルスナッパ）の評価基準値について

1. はじめに

原子力発電施設が建設されはじめた当初は、配管系の防振装置として油圧防振器（オイルスナッパ）が多用されてきた。その後、機械式防振器（メカニカルスナッパ）が開発された。メカニカルスナッパは、オイルスナッパに比べてメンテナンス性が高く、防火対策上の利点があることなどから、現在では、配管の防振器として主流をなしているものである。

1.1 メカニカルスナッパの機能

メカニカルスナッパは、地震によって生じる振動等に対して拘束するとともに、熱膨張などによって生じる低速度移動に対しては拘束せず自由に伸縮する機能を有する支持装置である。参図-7.14.1 にメカニカルスナッパ構造図を示す。



参図-7.14.1 メカニカルスナッパ構造図

1.2 既往の研究

a. メカニカルスナップの実用化の検討

メカニカルスナップが開発されたころ、原子力発電施設への実用化の可否を判断するために、各電力会社と各プラントメーカーの共同研究で、メカニカルスナップの試験が行われた（「メカニカルスナップの実証に関する研究 昭和 55～56 年度」）。そのなかの一環として、メカニカルスナップの負荷振動試験が行われた。

メカニカルスナップには、その製造メーカーが定める定格容量（荷重値）が存在する。スナップ製造メーカーは、定格容量の 1.5 倍までの配管反力であれば、メカニカルスナップの性能を保証している。この当時の共同研究における負荷振動試験では、この 1.5×定格容量の負荷による振動試験を行い、スナップ製造メーカーの性能保証の妥当性を確認した。

b. 耐震設計の高度化に伴う検討

前述したメカニカルスナップの実用化の研究では、スナップ製造メーカーの性能保証値の確認にとどまっていた。その後においても、各電力会社と各プラントメーカーは、メカニカルスナップの知見拡充を図っていた（「耐震設計に関する新知見に対する機器耐震評価法の研究 (Phase2) 平成 12 年」）。その知見拡充の研究では、スナップ製造メーカーの保証値である 1.5×定格容量を超える範囲の負荷による負荷振動試験を行い、配管反力に対するメカニカルスナップの設計上の適用範囲の明確化を図った。本評価では、この知見拡充の研究による成果を許容基準値とした。

知見拡充の研究では、メカニカルスナップの適用範囲について、1) 試験によりその機能が維持される負荷荷重の確認、2) 各部材の構造強度評価に基づく許容荷重の確認、の 2 つの手法を用いて確認を実施して

いる。

前者の試験による確認は、定格容量を超える荷重を段階的に負荷し、その機能が維持される荷重を確認するものであり、後者は規格等に準拠した構造評価を行い許容される荷重を算出するものである。

1.3 耐震安全性評価における許容基準値

7号機の残留熱除去系配管の支持装置については、前述の知見拡充の研究のうち、試験により機能維持が確認された負荷荷重が得られていたため、その値を評価基準値として適用した。参表-7.14.1 に、関連する評価基準値を示す。

参表-7.14.1 メカニカルスナッパの評価基準値と Ss による評価荷重

基準地震動 Ss による評価荷重 [kN] ※	スナッパメーカー保証値[kN]	知見拡充による許容基準値[kN]	
		試験による許容基準値	構造強度評価に基づく許容基準値
5 発生値 4.6 を切り上げ	4 1.5×定格容量である 4.5 を切り捨て	27.09	18.82

* 評価荷重は、残留熱除去系配管の支持装置の耐震安全性評価における発生値（配管反力）を記載

耐震安全性評価のうち、配管支持装置としてのメカニカルスナッパの構造強度評価基準値については、ここまで述べてきたとおり、下記の 3 種類が存在する。

- ①スナッパメーカーによる保証値
- ②試験による許容基準値
- ③スナッパ構成部品の構造強度評価に基づく許容基準値

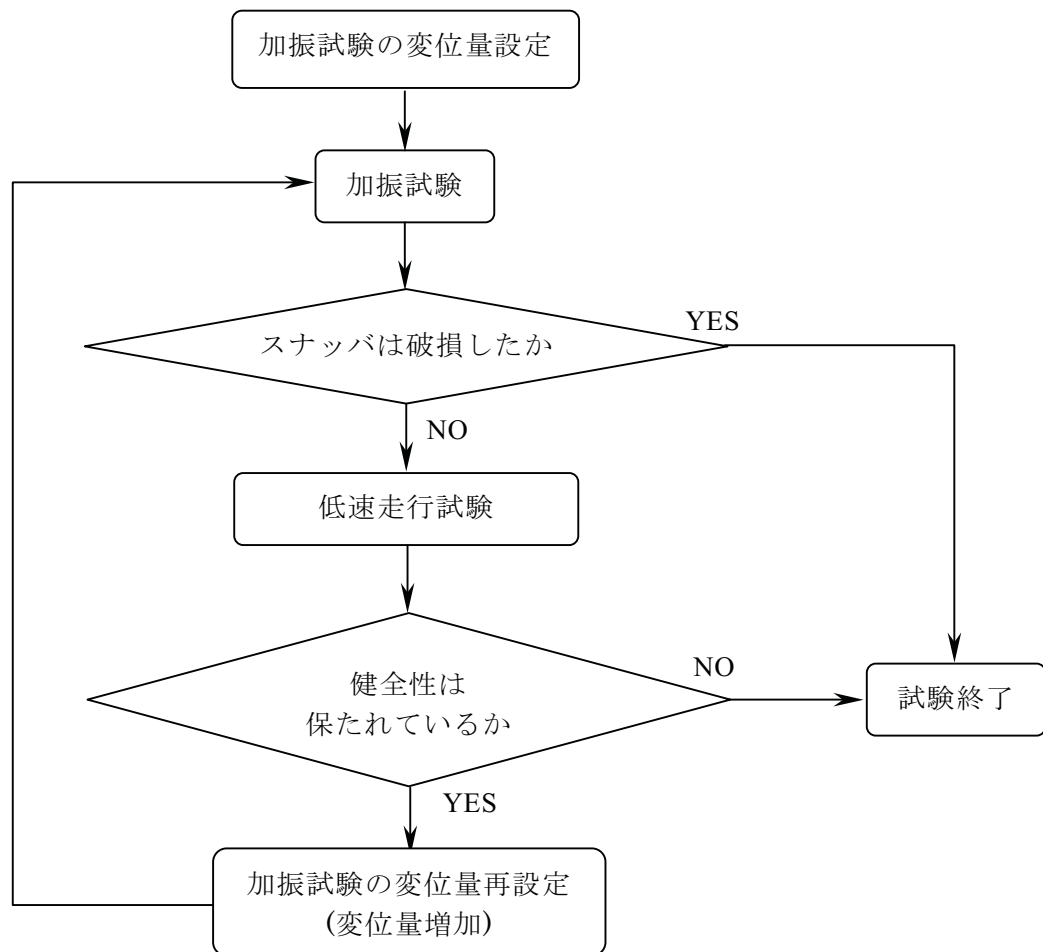
①および②は、ともに試験に基づく許容基準値である。メカニカルスナップの実用化の研究では、①の妥当性を確認した。メカニカルスナップの知見拡充の研究では、①の妥当性を確認した試験方法と同様の試験方法を用いて、①を超える条件でも、スナップ製造メーカーが保証する範囲と同等の性能でメカニカルスナップを使用できることが確認された。また、③については、規格等に基づく構造強度評価から、メカニカルスナップの許容基準値を設定した。

耐震安全性評価においては、これらのどの評価基準値を用いることもできると考えている。

2. メカニカルスナップバの機能確認試験と構造強度評価について

2.1 機能確認試験

試験のフローを参図-7.14.2 に示す。試験は、加振試験と低速走行試験を一連として実施し、設定した変位量（負荷容量）での加振試験を実施したのち、低速走行試験を実施し、健全性が確認されていることを確認する。加振試験での負荷容量を段階的に増加させることにより、機能維持が保たれている負荷容量を確認している。

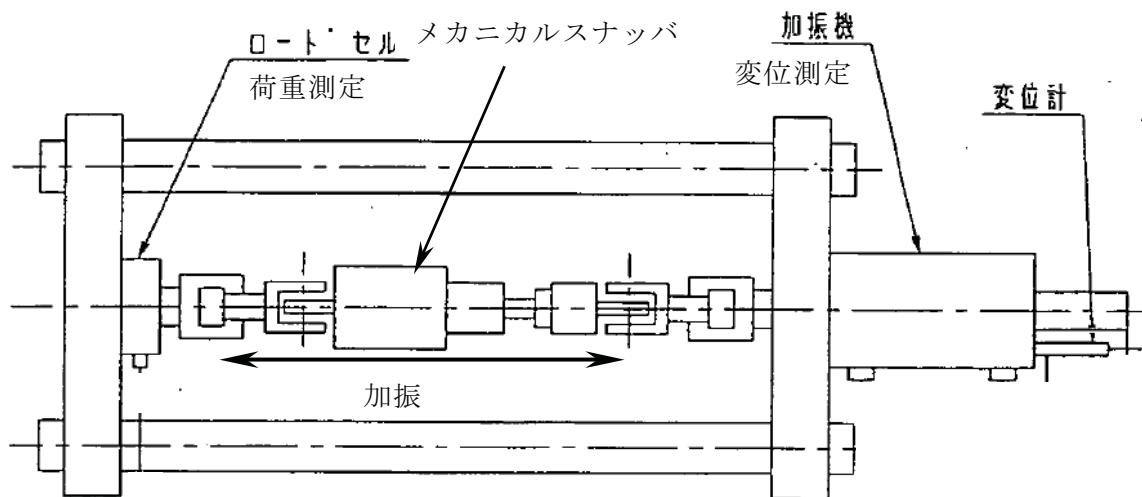


参図-7.14.2 試験フロー

なお、メカニカルスナップのこれらの機能は、通常以下の試験により確認を行っている。

〈加振試験〉

メカニカルスナップに繰り返し荷重（振動荷重）を負荷し、振動に対して拘束していることを確認。



参図-7.14.3 加振試験装置概要

〈低速速走行試験〉

低速での引張り・圧縮試験により抵抗力を測定し、健全性が保たれていることを確認。

2.2 各部材の構造強度評価

メカニカルスナップが機能維持されるためには、各 부품の構造健全性が維持されることが必要である。この観点から、負荷される荷重に対して各 部品の荷重伝達及び損傷形態を想定したうえで規格等に準拠した構造強度 評価に基づく許容荷重を評価する。各部品毎の許容荷重のうち、最も小さ い荷重を、メカニカルスナップの許容荷重として採用する。

メカニカルスナップ部品の評価法について、ベアリング押え板を例とし て以下に示す。ベアリング押え板及びボルト部拡大図を参図-7.14.4 に示す。 当該部品の耐力算出式は下記のように与えられる。

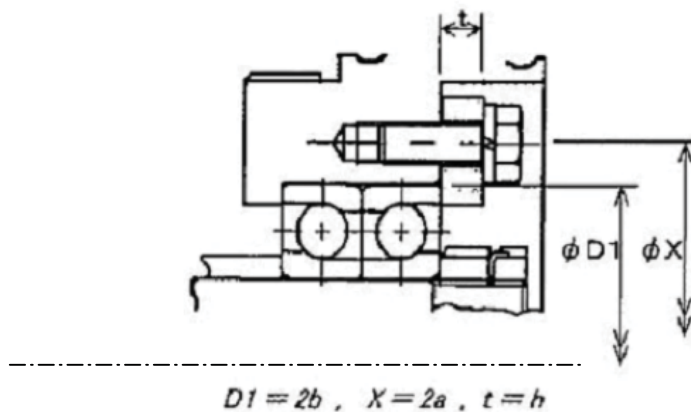
$$F = \frac{0.7Su}{\beta} \times h^2 \times 0.9$$

F : 評価荷重

h : ベアリング押え板の厚さ

β : 応力係数 (機械工学便覧に基づく)

Su : 引張強さ (SMS-3A-100 : 774.2MPa, SMS-6A-100 : 779.1MPa)



参図-7.14.4 ベアリング押え板及びボルト部拡大図

同様の評価を各部品に対してそれぞれ実施し、全部品のうち最小値を許容荷重とするものである。メカニカルスナッパ型式「SMS-03A-100」の評価例を参表-7.14.2 に示す。

参表-7.14.2 メカニカルスナッパ各部品の構造強度評価

部品	評価	構造強度評価に基づく 許容荷重 [kN]		
		...	SMS-03A-100	...
イーヤ	引張		○○○	
ロードコラム	引張		×××	
ベアリングケース	せん断		△△△	
六角ボルト	引張		※※※(最小値)	
ベアリングナット	せん断		□□□	
球面軸受	—		☆☆☆	
座屈			◎◎◎	
最小値 (許容荷重)		...	※※※	...

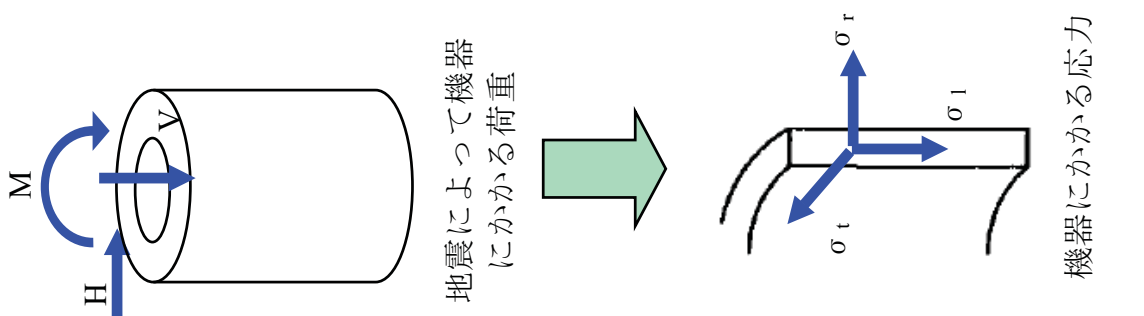
応答倍率法に用いる応答比について

1. 応答倍率法について

設備の構造強度評価については、設計と同等の評価である詳細評価や、応答倍率法による評価を行っている。応答倍率法の評価としては、設計時の耐震計算書等の既往評価条件と基準地震動 S_s の評価条件の比率(応答比)を算定して、その応答比を既往評価に乗じることにより、基準地震動 S_s に対する評価対象設備の応答値が、評価基準値を上回らないことを確認している。応答倍率法による評価に用いた応答比としては、「応答荷重比」と「応答加速度比」の2種類があり、それぞれについて詳細を以下に示す。

2. 応答荷重比を用いた評価例

設備の発生応力値を算定するにあたり、せん断力、モーメント、軸力を用いる機器は、基準地震動 S_s による地震力と既往評価の地震力との比を応答比(応答荷重比)とする。荷重を用いた設計の例を参図-7.15.1 に、応答荷重比を用いた評価の例を参図-7.15.2 に示す。



各成分をそれぞれ
足し合わせる

$$\begin{bmatrix} \sigma_{t0} \\ \sigma_{l0} \\ \sigma_{r0} \\ \tau_{lr0} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \sigma_{10} \\ \sigma_{20} \\ \sigma_{30} \end{bmatrix} \rightarrow \sigma_0$$

主応力の算出

主応力の算出

応力強さの算出

下式の解が主応力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ となる。
 $\sigma^3 - (\sigma_t + \sigma_l + \sigma_r) \cdot \sigma^2 + (\sigma_t \cdot \sigma_l + \sigma_l \cdot \sigma_r + \sigma_t \cdot \sigma_r - \tau_{lr}^2) \cdot \sigma - \sigma_t \cdot \sigma_l \cdot \sigma_r + \sigma_t \cdot \tau_{lr}^2 + 2 \tau_{lr} = 0$

下式により応力強さを算出する。
 $\sigma = \text{MAX} \{ |\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1| \}$

- M : 設計時のモーメント
- H : 設計時の水平力
- V : 設計時の鉛直力
- P : 設計時の地震以外による荷重
- σ_t : 周方向応力
- σ_l : 軸方向応力
- σ_r : 径方向応力
- τ_{lr} : せん断応力
- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: 主応力
- σ : 応力強さ

- ・添字0は設計時の値であることを示す。
- ・添字Mはモーメントによる値, Hは水平力による値, Vは鉛直力による値, Pは地震力以外による値を示す。

- M₀ : $\begin{bmatrix} \sigma_{tM0} \\ \sigma_{lM0} \\ \sigma_{rM0} \\ \tau_{lrM0} \end{bmatrix}$
- H₀ : $\begin{bmatrix} \sigma_{tH0} \\ \sigma_{lH0} \\ \sigma_{rH0} \\ \tau_{lrH0} \end{bmatrix}$
- V₀ : $\begin{bmatrix} \sigma_{tV0} \\ \sigma_{lV0} \\ \sigma_{rV0} \\ \tau_{lrV0} \end{bmatrix}$
- P₀ : $\begin{bmatrix} \sigma_{tP0} \\ \sigma_{lP0} \\ \sigma_{rP0} \\ \tau_{lrP0} \end{bmatrix}$

参図-7.15.1 荷重を用いた設計の例

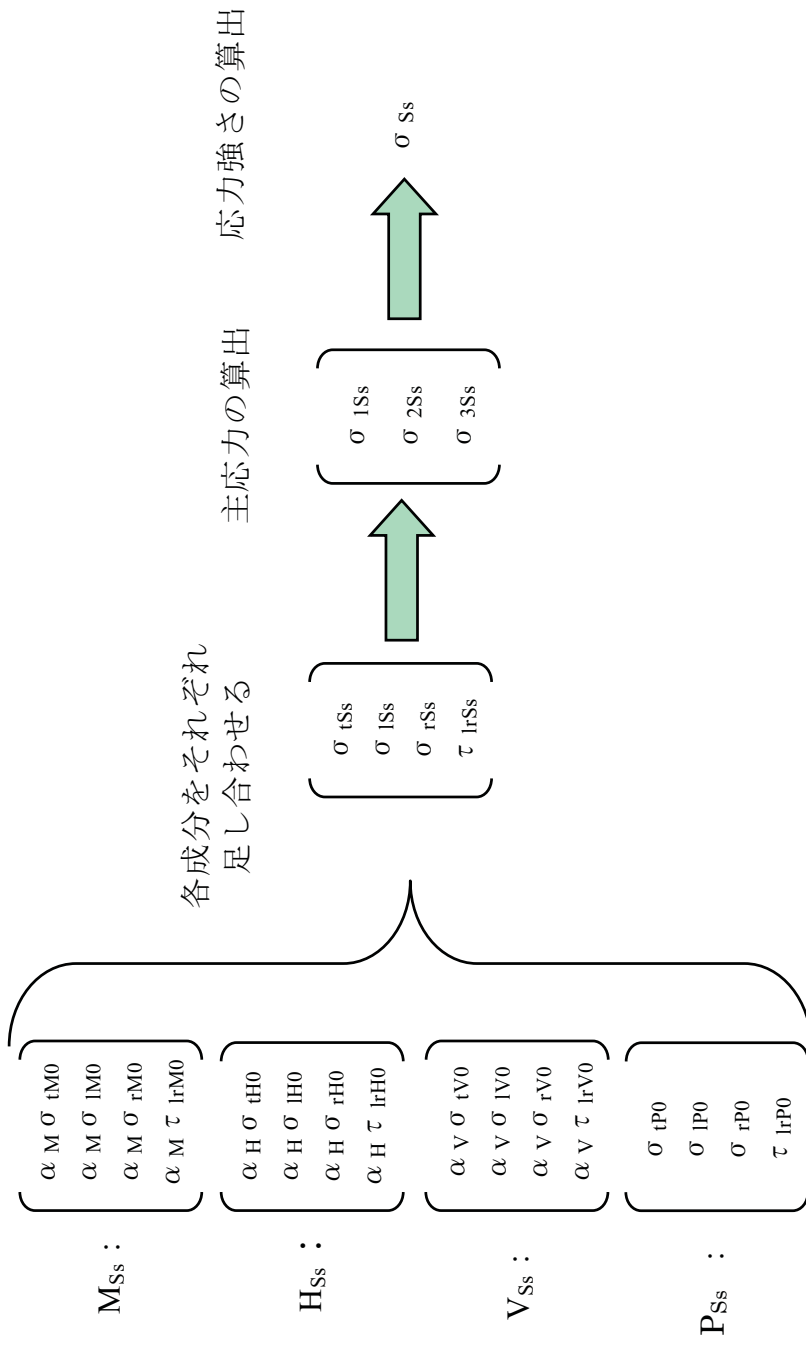
- ケース1：設計と同等な評価の例

応答荷重比を算出

$$\alpha_M = \frac{M_{Ss}}{M_0}$$

$$\alpha_H = \frac{H_{Ss}}{H_0}$$

$$\alpha_V = \frac{V_{Ss}}{V_0}$$



- ケース2：応答荷重比のうち最大倍率(α_{max})を設計時応力強さに乗じる簡便な方法の例

応答荷重比を算出

$$\alpha_{MAX} = \text{MAX}(\alpha_M, \alpha_H, \alpha_V)$$

応力強さの算出

$$\sigma_{Ss} = \alpha_{MAX} \sigma_0$$

α ：応答荷重比
添字SsはSs評価時の値を示す。

参図-7.15.2 応答荷重比を用いた評価例

3. 応答加速度比の例

設備の発生応力値を算定するにあたり，水平加速度，鉛直加速度を用いる機器は基準地震動 S_s による床応答スペクトル等と，既往評価で用いた床応答スペクトル等から水平加速度と鉛直加速度の比をそれぞれ求め，大きい方の値を応答比(応答加速度比)とする。応答加速度比の算出方法を以下に示す。

$$\text{応答加速度比} = \text{MAX}(C_H/C_{H0} , C_V/C_{V0})$$

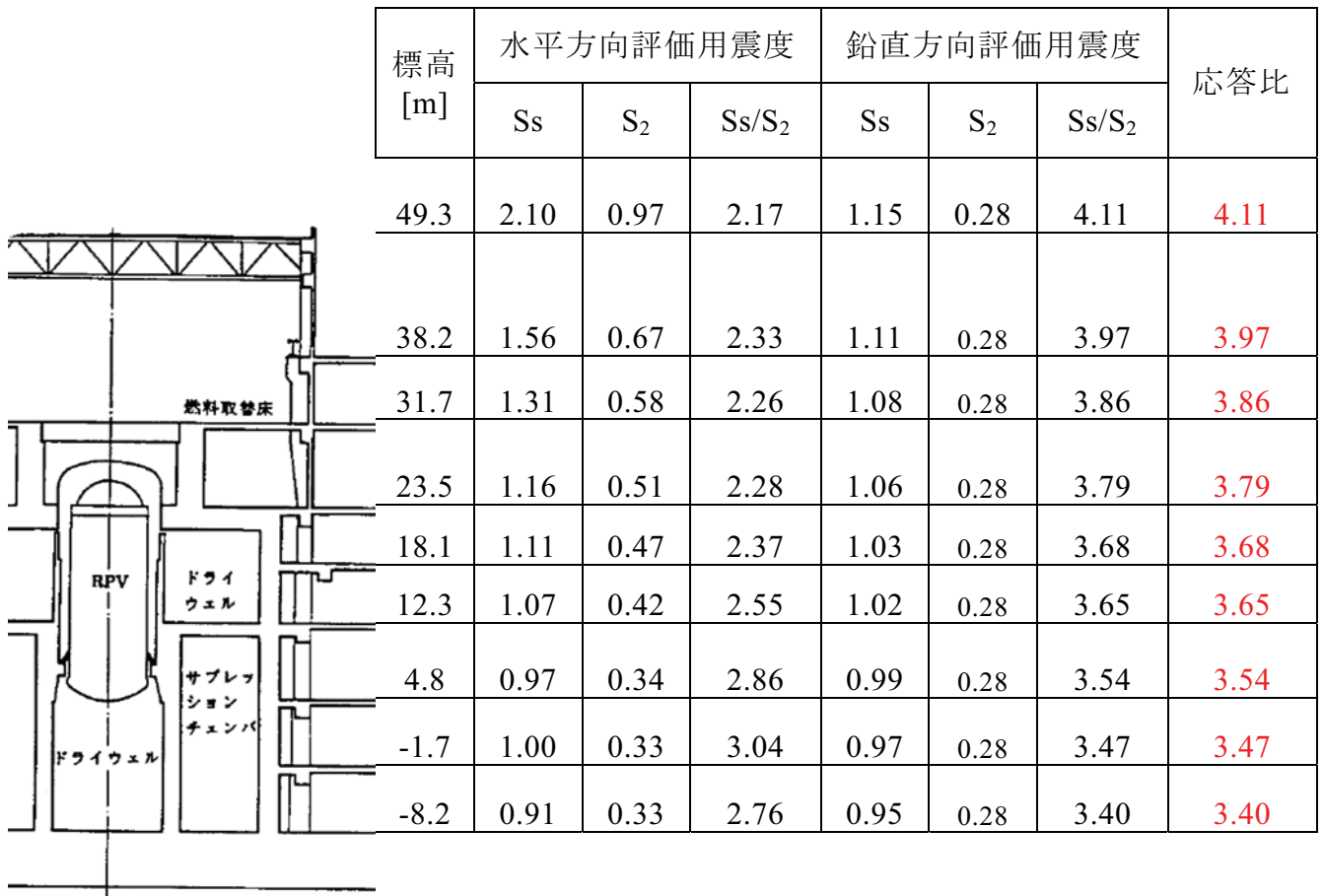
C_{H0} : 既往評価による水平加速度

C_H : 基準地震動 S_s による水平加速度

C_{V0} : 既往評価による鉛直加速度

C_V : 基準地震動 S_s による鉛直加速度

上式により求めた原子炉建屋床面の応答加速度比例を参図-7.15.3 に示す。



参図-7.15.3 原子炉建屋床面の応答加速度比例

設計時の制御棒挿入試験について

地震時は燃料集合体の中央部が変位することにより、制御棒の挿入時間が通常運転時に比べて増加することが予想される。よって、地震時においても規定時間内に制御棒が挿入可能であることを確認するために、設計時に制御棒の挿入性試験を室温条件下にて実施した。本試験において、燃料集合体相対変位と制御棒挿入時間の関係が確認され、健全性が確認された燃料集合体相対変位を制御棒挿入性の許容値とした。

制御棒の耐震安全性評価としては、基準地震動 S_s に対する燃料集合体の相対変位を算定し、上記の試験結果により確認された許容値以内であることを確認した。


以下に、制御棒挿入性の試験方法について示す。

1. 試験条件

試験は実際に用いられている以下の2種類の制御棒について行った。


- ・ ボロンカーバイド型
- ・ ハフニウムフラットチューブ型

試験条件を参図-7.16.1 に、試験装置例を参図-7.16.2 に示す。加振機により装置を加振し、制御棒を挿入することで燃料集合体の相対変位とスクラム時間の関係を確認した。

項 目	条 件
温 度	室 温
圧 力	常 圧*
加 振 条 件	加振方向 : 水平方向  加振振幅 : 燃料集合体の最大振幅が 0～40mmの範囲 加振振動数 : 約 5 Hz (燃料集合体の 水中固有振動数相当) 加振波形 : 正弦波
スクラム開始時 の制御棒位置	全引き抜き状態

注記 * : アキュムレータ圧力の調整により原子炉定格圧力 (7.24MPa[gage])
時のスクラムを模擬

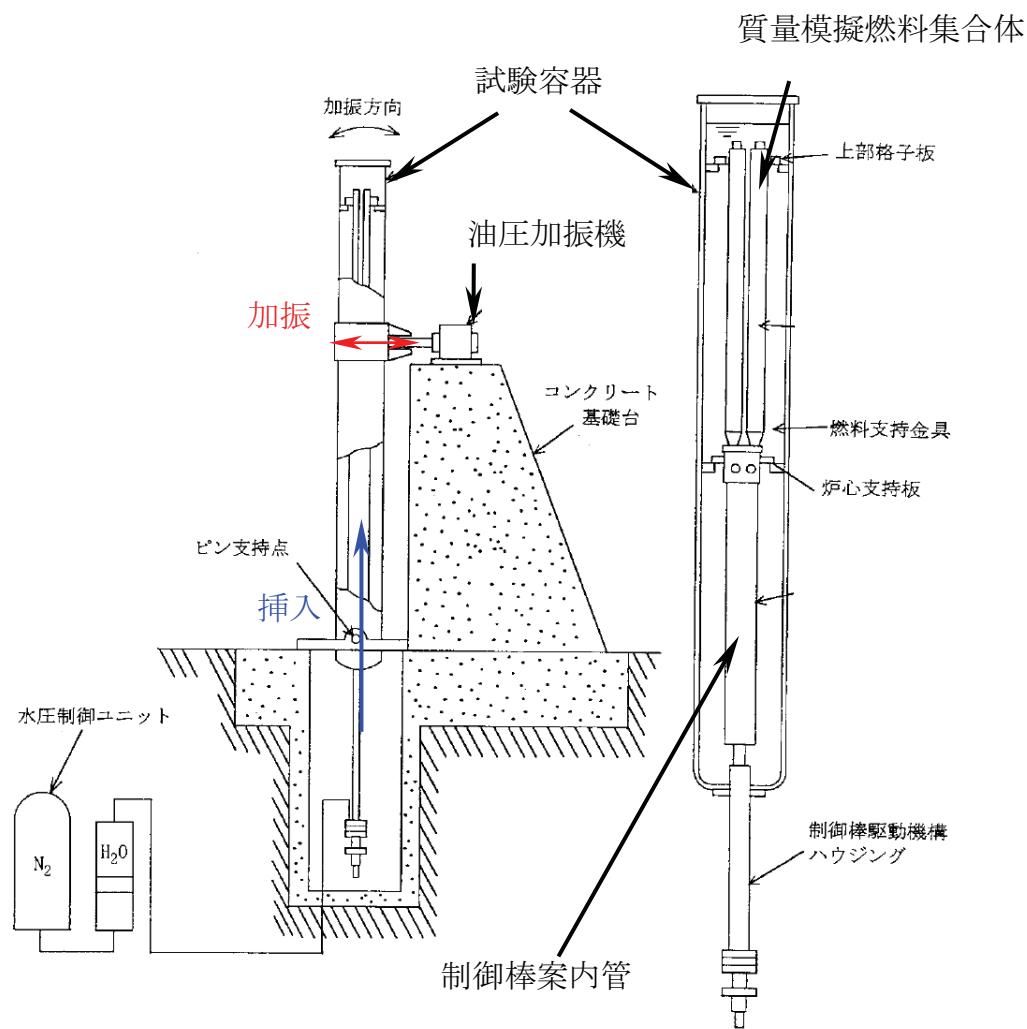
ボロンカーバイド型

項 目	条 件
温 度	室 温
圧 力	常 圧*
加 振 条 件	加振方向 : 水平方向  加振振幅 : 燃料集合体の最大振幅が 0～40mmの範囲 加振振動数 : 約 4～5 Hz (燃料集合体の 水中固有振動数相当) 加振波形 : 正弦波
スクラム開始時 の制御棒位置	全引き抜き状態

注記 * : アキュムレータ圧力の調整により原子炉定格圧力 (7.24MPa[gage])
時のスクラムを模擬

ハフニウムフラットチューブ型

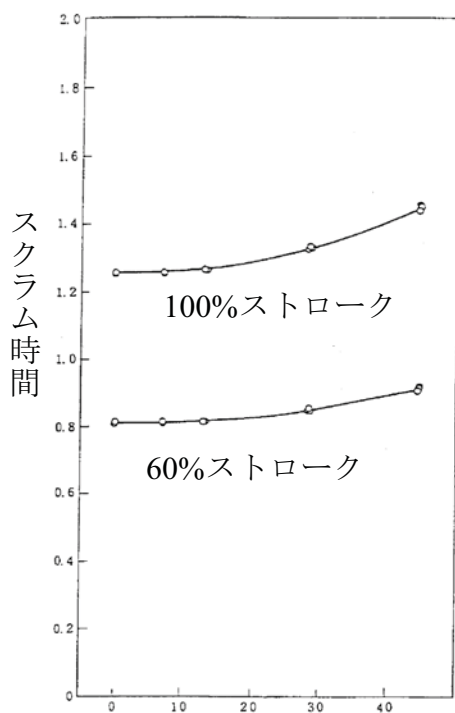
参図-7.16.1 試験条件



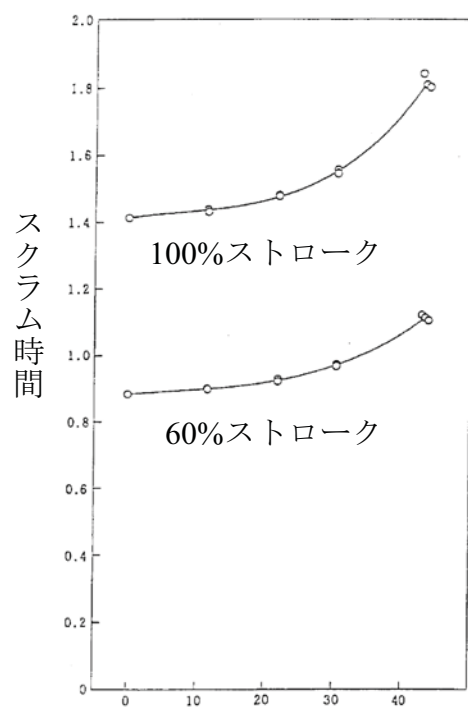
参図-7.16.2 試験装置例

2. 試験結果

試験結果を参図-7.16.3 に示す。燃料集合体の相対変位が約 40mm において、通常のスクラム仕様である 60%ストローク 1.44 秒以内、100%ストローク 2.80 秒以内であることが確認できたので、燃料集合体相対変位 40mm を制御棒挿入性の許容値とした。



燃料集合体相対変位 (mm)
(ボロンカーバイド型)

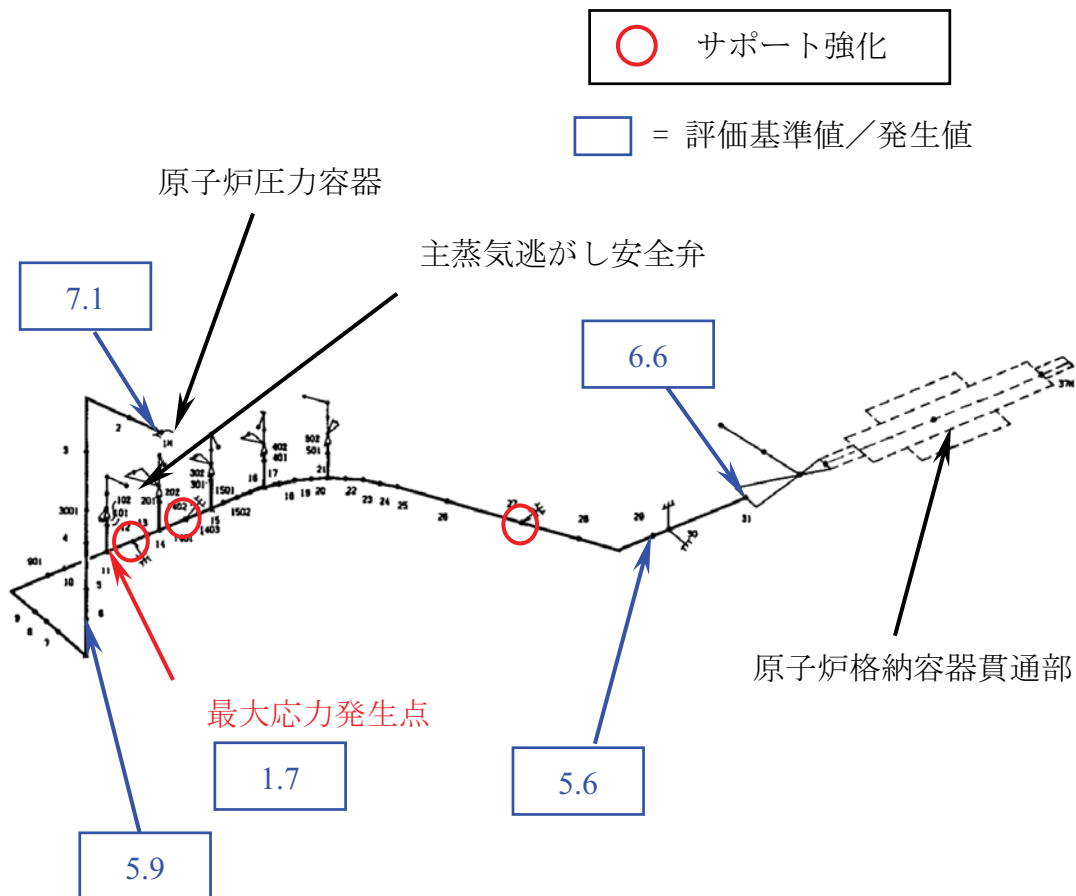


燃料集合体相対変位 (mm)
(ハフニウムフラットチューブ型)

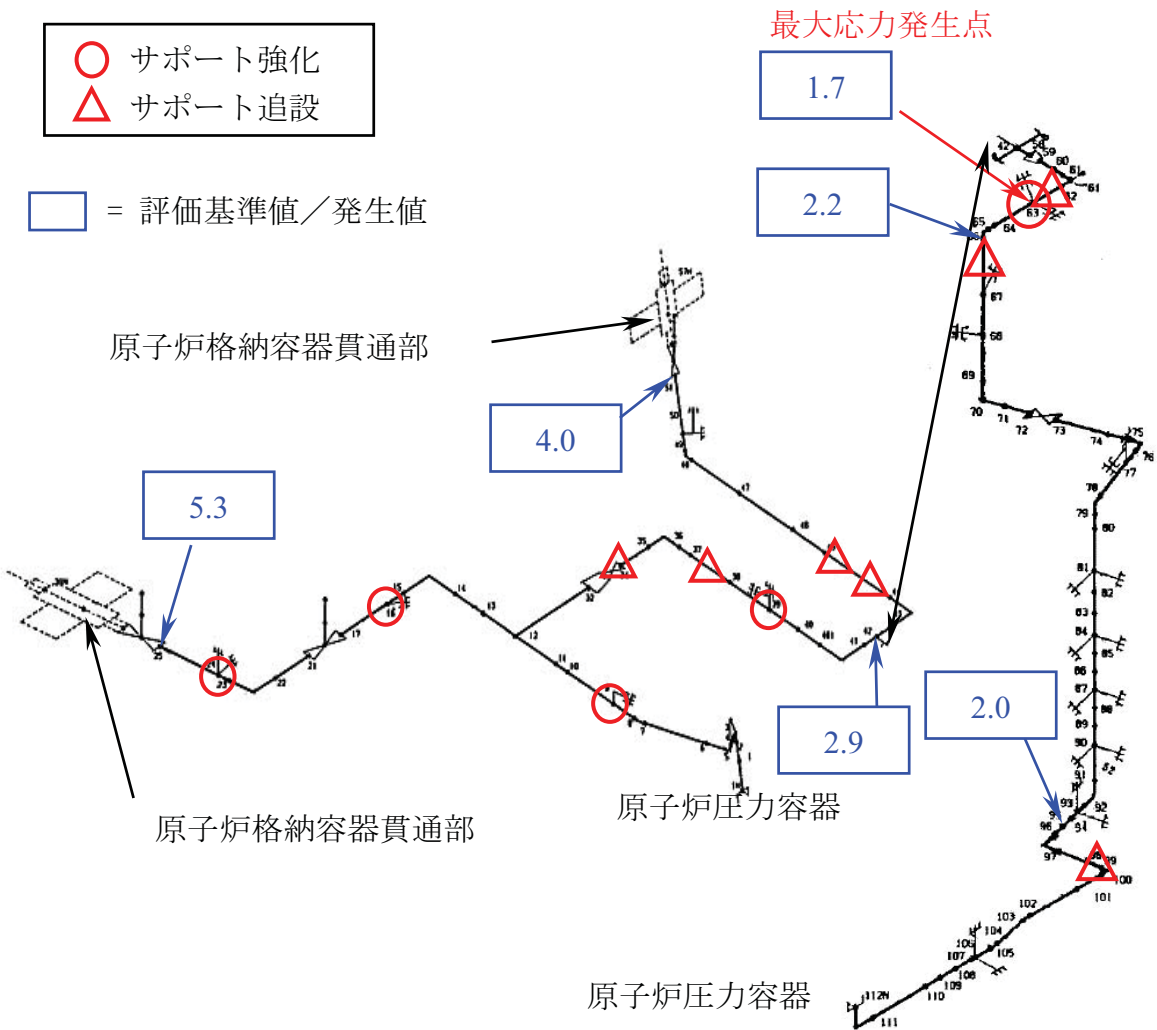
参図-7.16.3 燃料集合体相対変位のスクラム時間に与える影響

主蒸気系配管，残留熱除去系配管の応力分布について

本報告書では，基準地震動 S_s に対する配管の評価値として，最大応力発生点における値を記載している。ここでは，同一モデル内の応力分布を示すため，代表的な配管である主蒸気系配管，残留熱除去系配管について，「評価基準値／発生値」を参図-7.17.1，7.17.2 にそれぞれ示す（耐震強化工事後の値）。



参図-7.17.1 主蒸気系配管モデル(耐震強化工事実施)



参図-7.17.2 残留熱除去系配管モデル(耐震強化工事実施)

配管の地震応答解析における3方向の地震動の取り扱いについて

1. 本報告書における配管の地震応答解析における水平方向，上下方向の組合せ

(1) 解析に用いる水平方向の床応答スペクトル

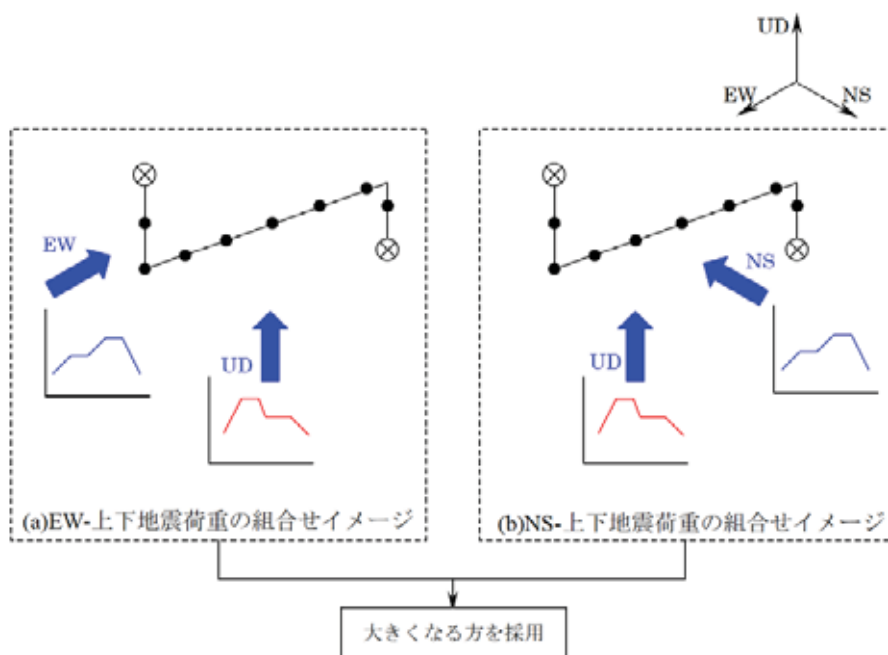
解析に用いる水平方向の床応答スペクトルは， Ss-1～5 全ての地震動の NS, EW 方向を包絡したものである。

(2) 水平方向の地震荷重と上下方向の地震荷重の組合せ

配管の地震応答解析における算出値は， スペクトルモーダル解析により， 水平方向， 上下方向を動的に扱った上で地震荷重を算出し， 下記(a)， (b)の組合せのうち， 大きい方を採用している（参図-7.18.1）。

(a) 水平方向スペクトルを EW 方向に入力した解析結果と上下方向スペクトルを UD 方向に入力した解析結果の組合せ

(b) 水平方向スペクトルを NS 方向に入力した解析結果と上下方向スペクトルを UD 方向に入力した解析結果の組合せ

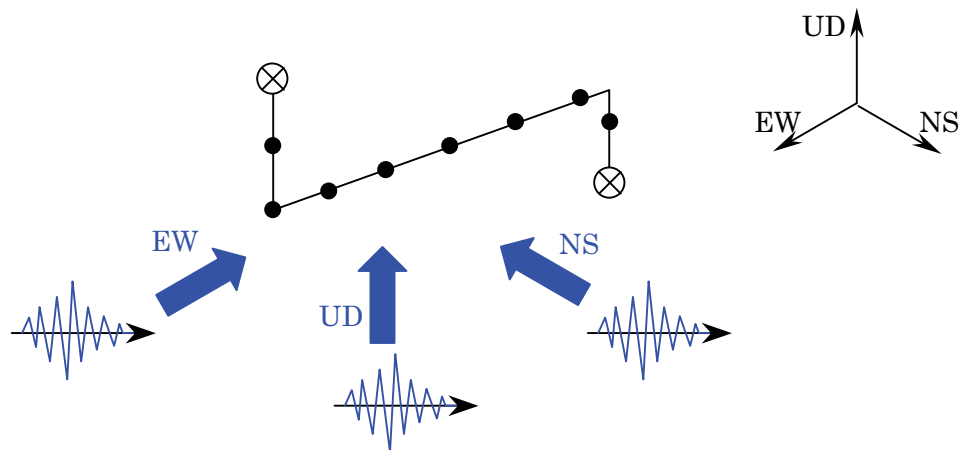


参図-7.18.1 配管の地震応答解析における地震荷重の組合せイメージ（本報告）

2. 3方向（NS, EW, UD）の地震動を考慮した地震応答解析について

改訂された「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」に基づき策定した基準地震動 S_s の中には、断層モデルを用いて策定した地震動（ S_s -2, 4, 5）がある。断層モデルを用いた地震動に対して、より現実的に近い地震応答解析結果を算定することを目的にした場合には、1.で述べた方法ではなく、3方向（NS, EW, UD）の地震動を同時に組合せる方法もあり得る（参図-7.18.2）。

ここでは、本報告書における配管の耐震安全性評価結果のうち、算出値と評価基準値が比較的近い結果となった制御棒駆動系配管およびその支持構造物について、より現実に近い地震応答解析結果を算定するために3方向の同時時刻歴解析を実施した。なお、入力する地震動には、機器・配管系に影響が大きいと考えられる S_s -2 を用いた。



参図-7.18.2 配管の地震応答解析における地震荷重の組合せイメージ
(時刻歴解析)

3. 評価結果

1.にて述べた従来から設計に用いている手法による解析結果、2.にて述べたより現実に近い結果が期待できる手法による解析結果を比較した結果（参表-7.18.1, 7.18.2）、ほぼ同等であることを確認した。

参表-7.18.1 制御棒駆動系における配管本体の評価結果の比較

	算出値	評価基準値
スペクトルモーダル解析	120MPa	318MPa
時刻歴解析	110MPa	318MPa

参表-7.18.2 制御棒駆動系における配管支持構造物の評価結果の比較

	算出値	評価基準値
スペクトルモーダル解析	228MPa	246MPa
時刻歴解析	223MPa	246MPa

8. 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価

【目 次】

8.1. 評価方針	8-1
8.1.1. 対象設備	8-1
8.1.2. 設備概要	8-2
8.2. 耐震安全性評価	8-5
8.2.1. 評価方法	8-5
8.2.2. 地震応答解析	8-11
8.2.3. 評価基準	8-16
8.2.4. 評価結果	8-17
8.3. 軸方向に対する検討	8-19
8.3.1. 検討方針	8-19
8.3.2. 応力度に関する検討	8-21
8.3.3. ブロック間相対変位に関する検討	8-26
8.4. 設置地盤の支持性能に対する検討	8-27
8.4.1. 検討方針	8-27
8.4.2. 検討手法	8-27
8.4.3. 検討結果	8-27

8. 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価

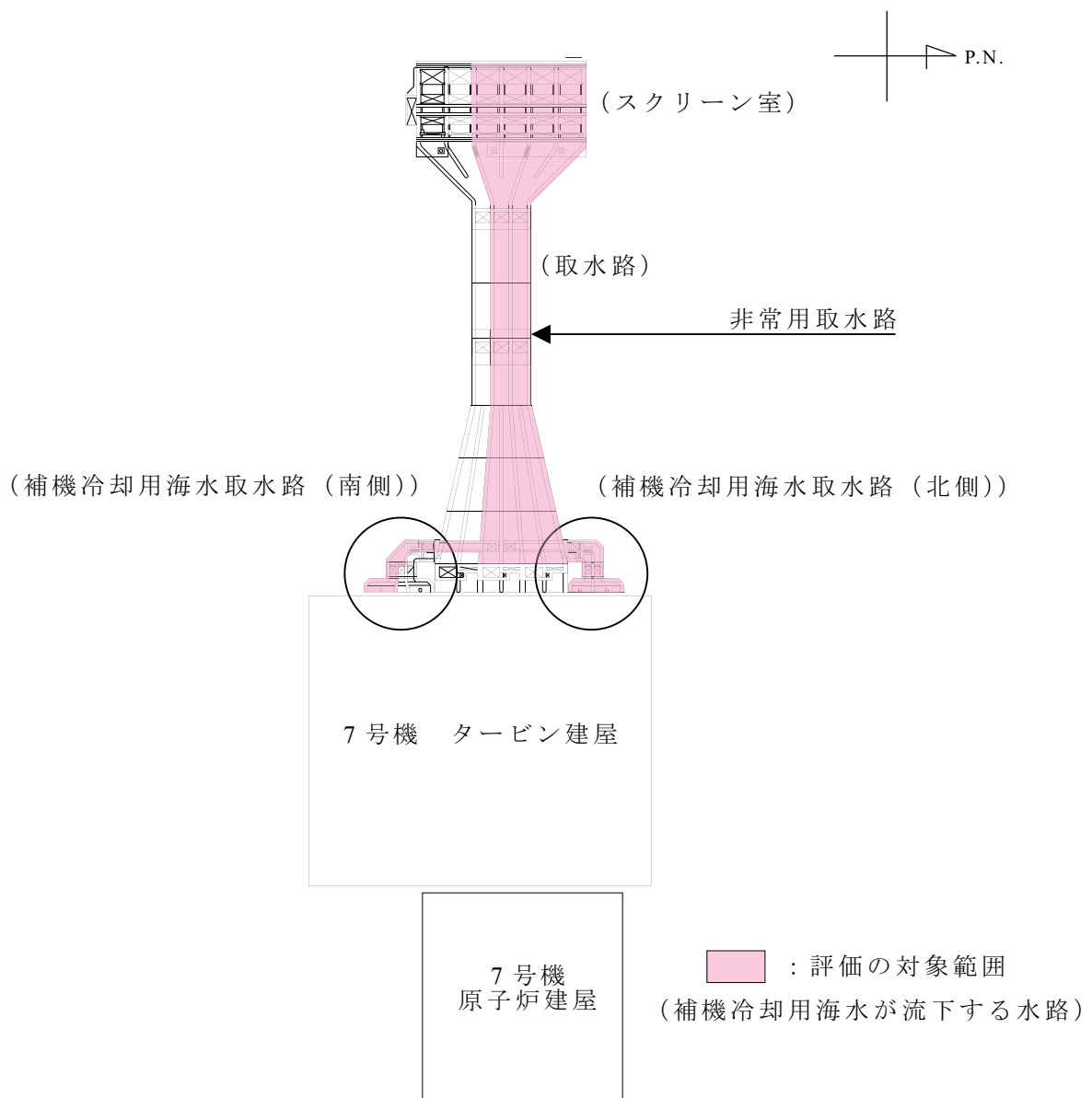
8.1. 評価方針

8.1.1. 対象設備

屋外重要土木構造物について、その機能が保持されることを確認する。

評価対象は非常用取水路とする。非常用取水路はスクリーン室、取水路および補機冷却用海水取水路で構成されている。

屋外重要土木構造物の配置図を第 8.1.1-1 図に示す。

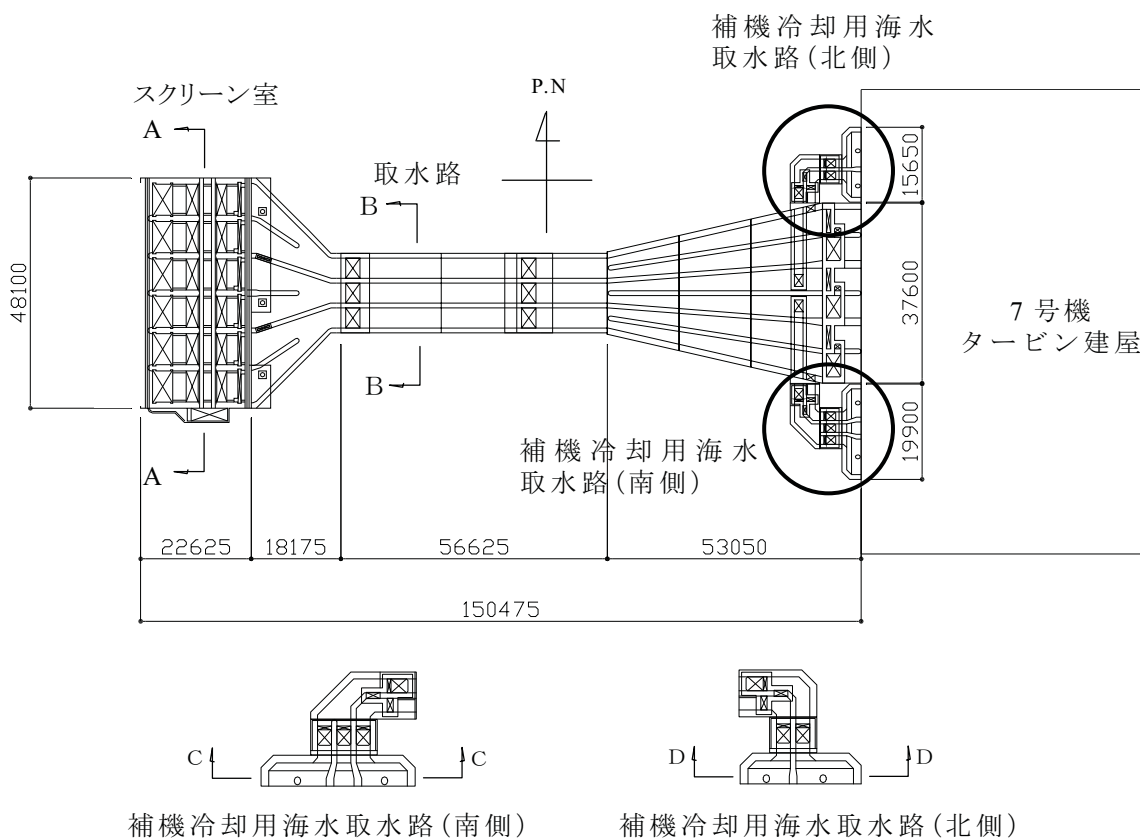


第 8.1.1-1 図 屋外重要土木構造物の配置図

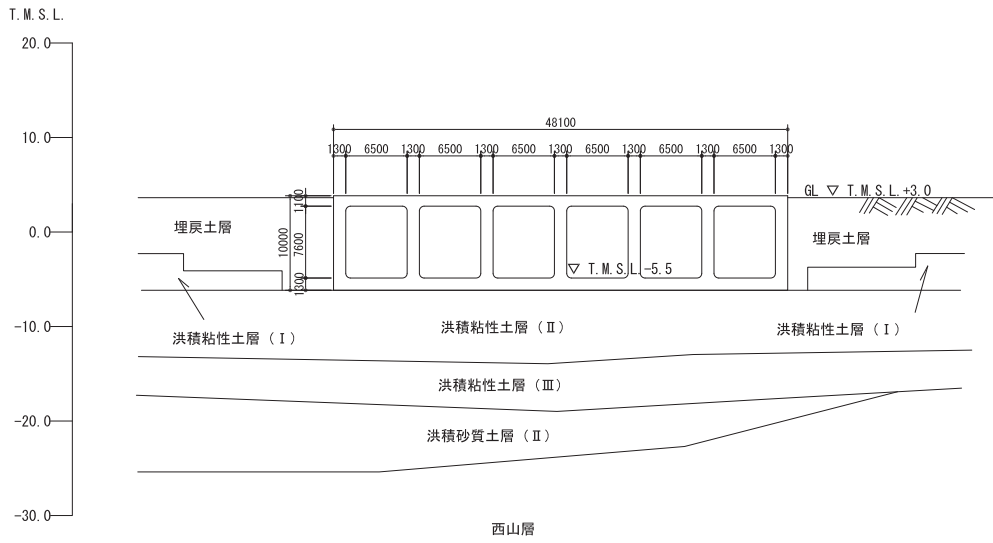
8.1.2. 設備概要

非常用取水路は鉄筋コンクリート造の地中構造物である。非常用取水路のうちスクリーン室および取水路は、新第三紀鮮新世の西山層泥岩の上位に分布する洪積層に直接設置されている。また、補機冷却用海水取水路は、西山層と同等以上の力学的特性を有するマンメイドロックを介して西山層に設置されている。

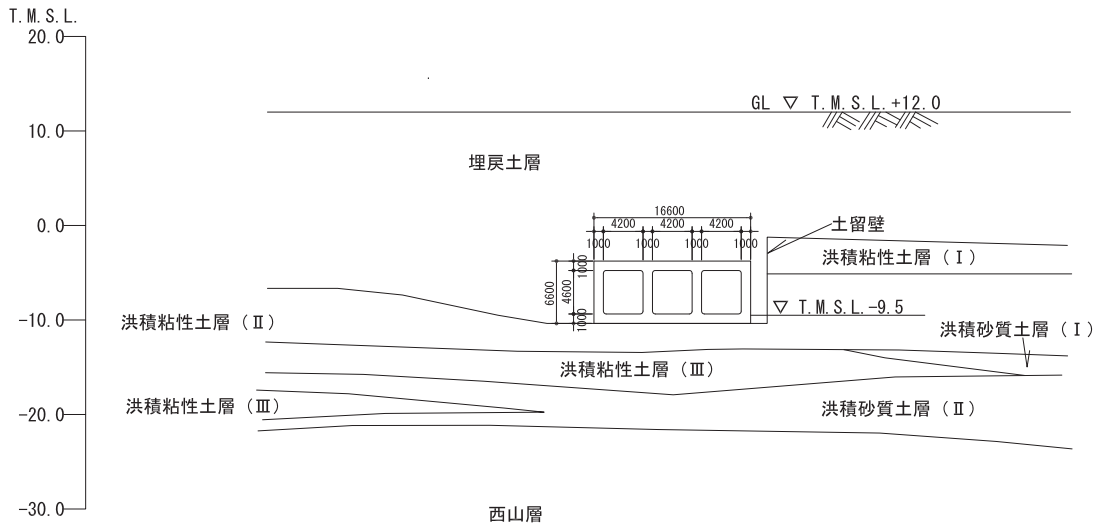
非常用取水路の平面図を第 8.1.2-1 図に、スクリーン室、取水路、補機冷却用海水取水路（南側）および補機冷却用海水取水路（北側）の各断面図を第 8.1.2-2 図～第 8.1.2-5 図に示す。



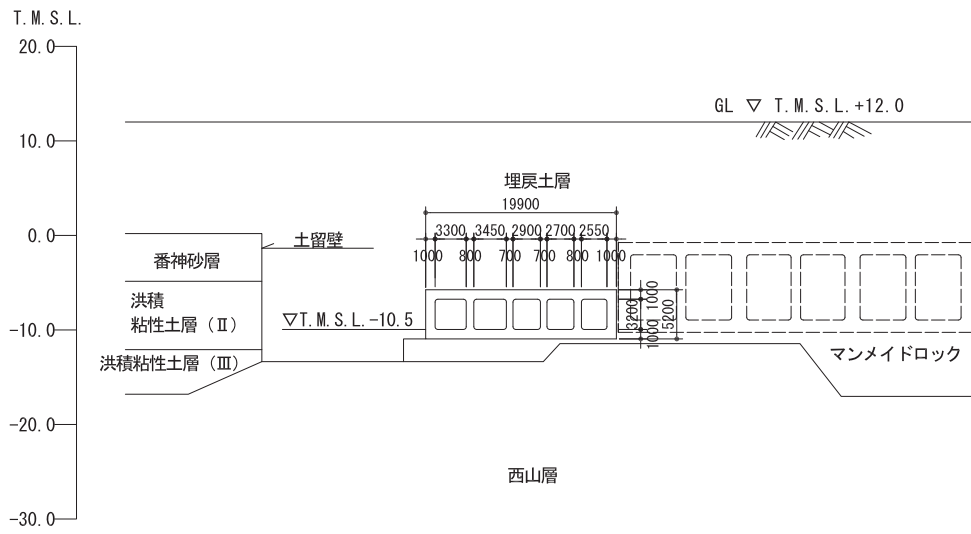
第 8.1.2-1 図 非常用取水路平面図



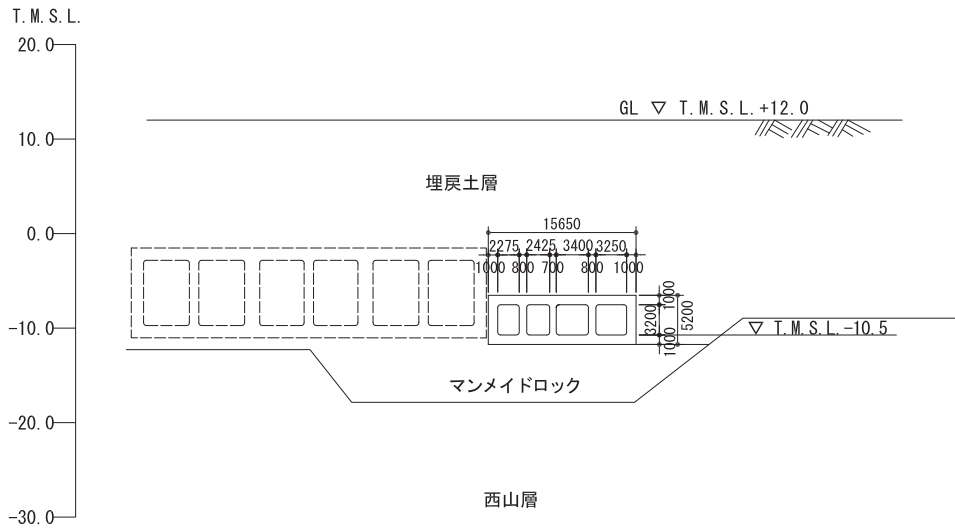
第 8.1.2-2 図 スクリーン室断面図 (A-A 断面)



第 8.1.2-3 図 取水路断面図 (B-B 断面)



第 8.1.2-4 図 補機冷却用海水取水路（南側）断面図（C－C 断面）



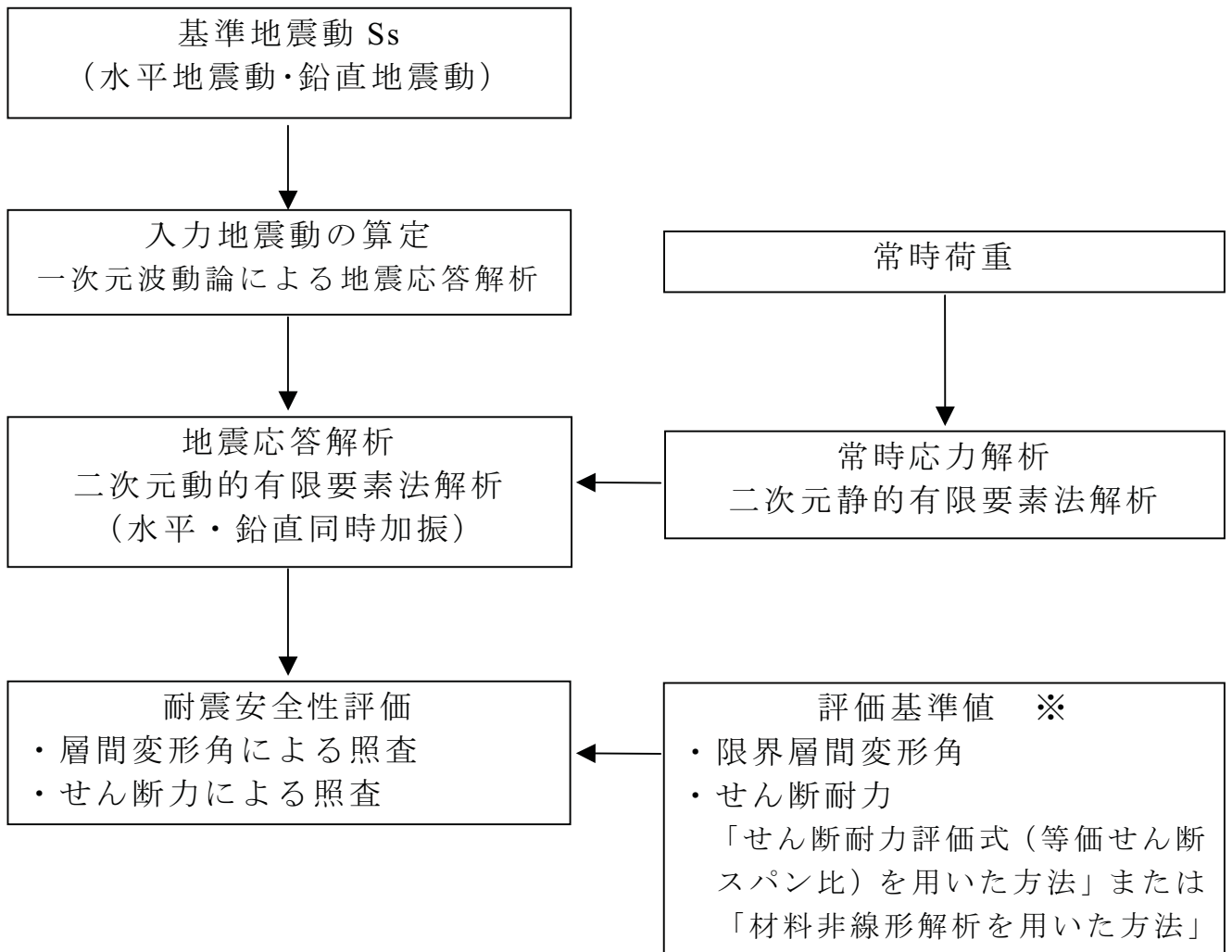
第 8.1.2-5 図 補機冷却用海水取水路（北側）断面図（D－D 断面）

8.2. 耐震安全性評価

8.2.1. 評価方法

8.2.1.1. 一般事項

非常用取水路の耐震安全性評価では，基準地震動 S_s による構造物の層間変形角およびせん断力がそれぞれ評価基準値を下回ることを確認する。非常用取水路の評価フローを第 8.2.1-1 図に示す。



※「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル (土木学会原子力土木委員会, 2005年6月)」による

第 8.2.1-1 図 非常用取水路の評価フロー

8.2.1.2. 評価条件

地震応答解析に必要な地盤および非常用取水路の諸定数は、各種材料試験、地盤調査や文献調査の結果をもとに設定された設計時の値を用いる。

(1) 使用材料

使用材料を第 8.2.1-1 表に示す。

(2) 材料の物性値

材料の物性値を第 8.2.1-2 表に示す。

(3) 地盤の物性値

地盤およびマンメイドロックの物性値をそれぞれ第 8.2.1-3 表、第 8.2.1-4 表に示す。

(4) 荷重

a. 常時荷重

常時荷重として、自重、内水圧、機器荷重、土被り荷重、静止土圧および地下水圧を考慮する。

b. 地震時荷重

地震時荷重として、基準地震動 S_s ($S_{s-1} \sim S_{s-5}$ の 5 波) による地震応答解析により求まる荷重を考慮する。

第 8.2.1-1 表 使用材料

コンクリート	設計基準強度 23.5N/mm^2 (240kg/cm^2)
鉄筋	SD345 相当(SD35)

第 8.2.1-2 表 材料の物性値

材料	単位体積重量(kN/m^3)	ヤング係数(kN/mm^2)	ポアソン比
コンクリート	24 *	25.0	0.2
鉄筋		200	0.3

* 鉄筋コンクリートとしての単位体積重量

第 8.2.1-3 表 地盤の物性値

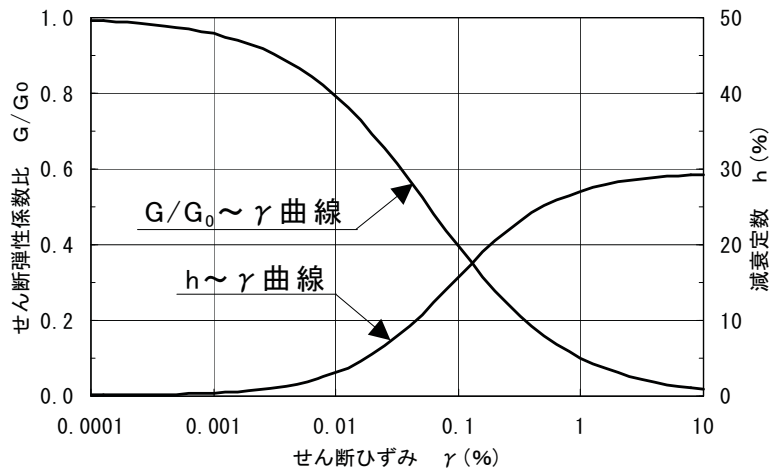
地層区分		単位体積重量 $\gamma_t(\text{kN/m}^3)$	ポアソン比 ν	初期せん断 弾性係数 $G_0(\text{kN/m}^2)$	せん断弾性係数と 減衰定数のひずみ依存性 $G/G_0 \sim \gamma$ $h \sim \gamma$
埋戻土層		19.6 (18.6) ^{*1)}	0.41	^{*2)}	第 8.2.1-2 図①による
洪積粘性土層(I)		17.8	0.49	9.63×10^4	第 8.2.1-2 図②による
洪積粘性土層(II)		17.7	0.49	1.13×10^5	第 8.2.1-2 図③による
洪積粘性土層(III)		18.2	0.48	1.56×10^5	
洪積砂質土層(I)		18.6	0.48	1.83×10^5	第 8.2.1-2 図④による
洪積砂質土層(II)		18.6	0.48	2.07×10^5	
番神砂層		18.0	0.43	1.83×10^5	第 8.2.1-2 図⑤による
西山層	西山層上限面～ T.M.S.L.-33.0m	17.0	0.45	4.15×10^5	第 8.2.1-2 図⑥による
	～T.M.S.L.-90.0m	16.6	0.45	4.75×10^5	
	～T.M.S.L.-136.0m	17.3	0.43	6.13×10^5	
	～T.M.S.L.-155.0m	19.3	0.42	8.32×10^5	
基盤		19.9	0.42	1.05×10^6	—

*1) () は湿潤単位体積重量

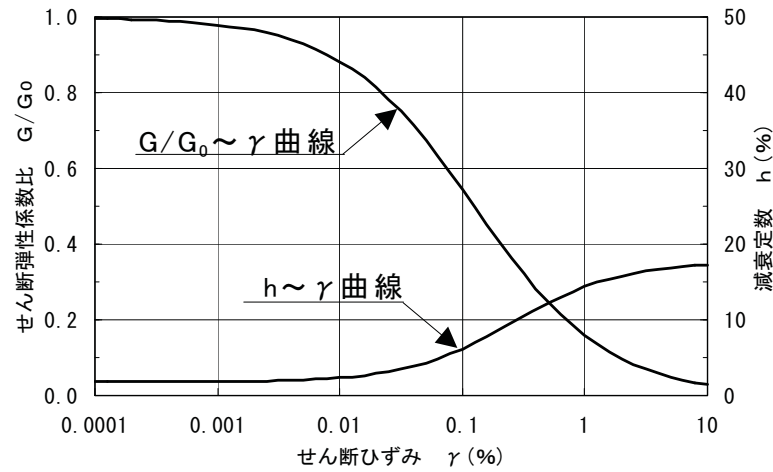
*2) $G_0 = 1980 \times \sigma_v^{0.667}$ (kN/m²) , σ_v : 有効上載圧 (kN/m²) , G_0 の下限値
 2.75×10^4 (kN/m²)

第 8.2.1-4 表 マンメイドロックの物性値

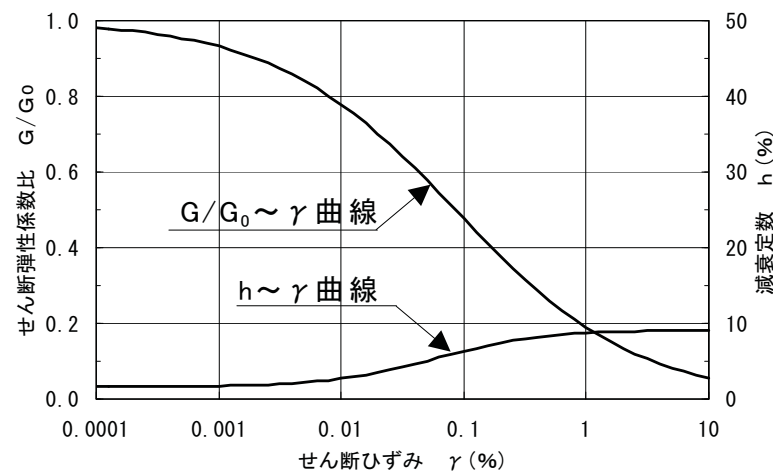
	単位体積重量 $\gamma_t(\text{kN/m}^3)$	ポアソン比 ν	初期せん断 弾性係数 $G_0(\text{kN/m}^2)$	せん断弾性係数と 減衰定数のひずみ依存性 $G/G_0 \sim \gamma$ $h \sim \gamma$
マンメイドロック	17.2	0.36	1.90×10^6	第 8.2.1-3 図による



① 埋戻土層

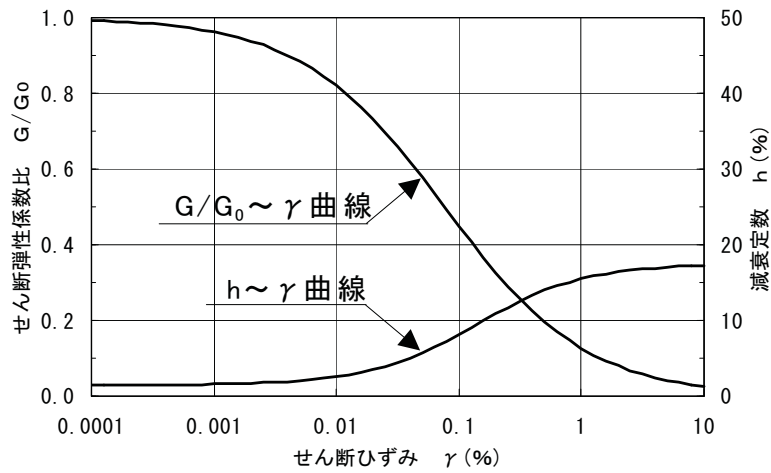


② 洪積粘性土層 (I)

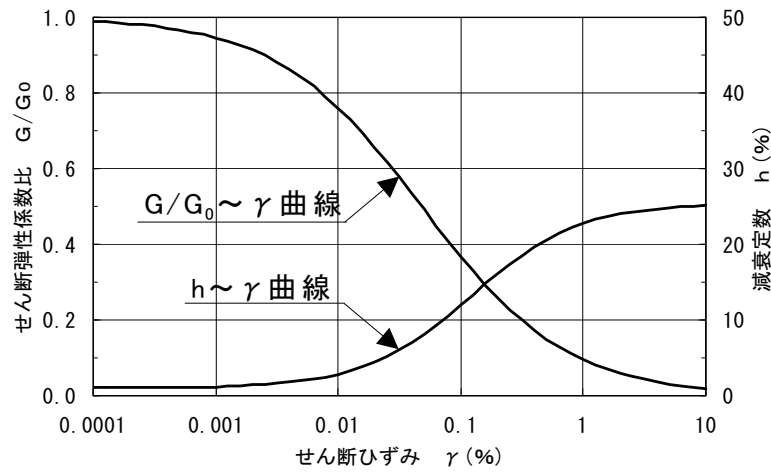


③ 洪積粘性土層 (II), (III)

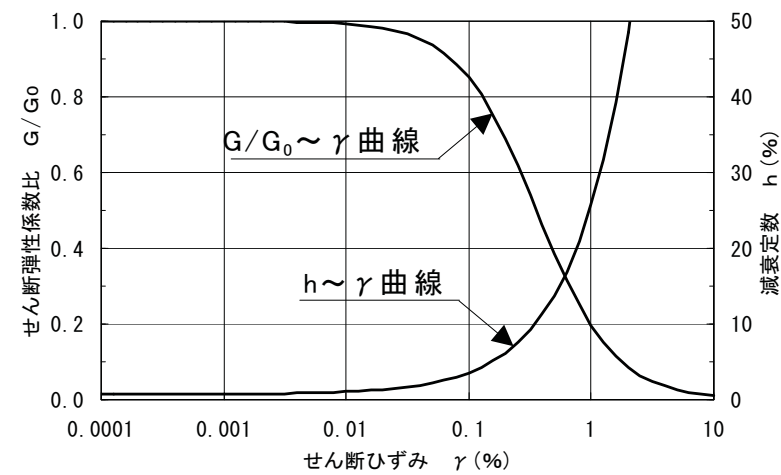
第 8.2.1-2 図(1) 地盤のせん断弾性係数および減衰定数のひずみ依存性



④ 洪積砂質土層 (I), (II)

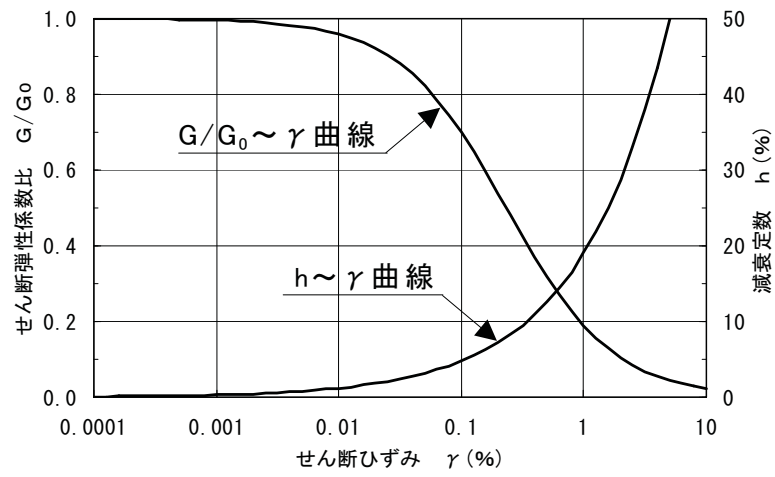


⑤ 番神砂層



⑥ 西山層

第 8.2.1-2 図(2) 地盤のせん断弾性係数および減衰定数のひずみ依存性



第 8.2.1-3 図 マンマイト[®]ロックのせん断弾性係数および減衰定数のひずみ依存性

8.2.2. 地震応答解析

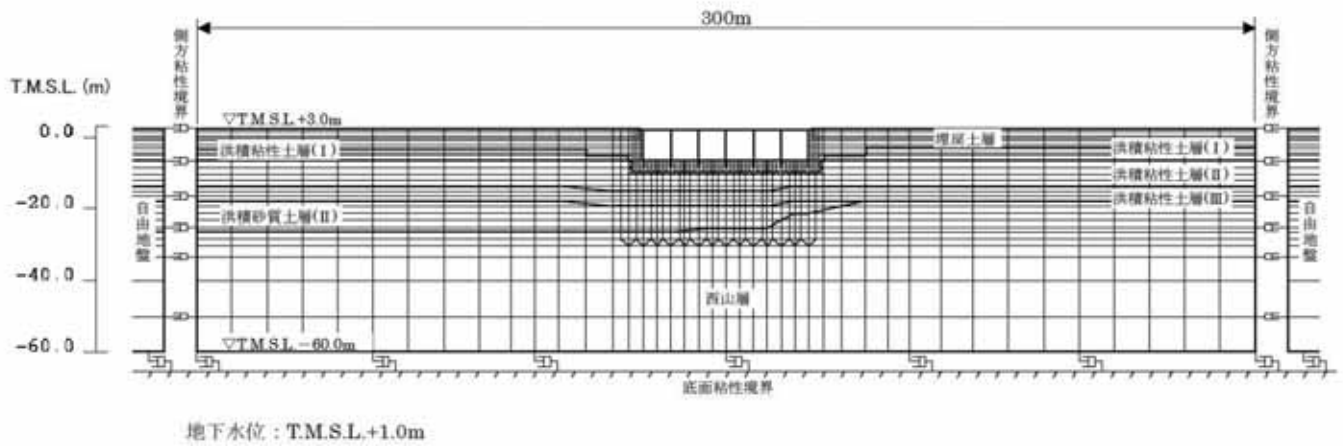
8.2.2.1. 解析手法

地震応答解析手法は、構造物と地盤の動的相互作用を考慮できる二次元動的有限要素法解析（部材非線形解析）を用いる。部材非線形解析では、水平地震動と鉛直地震動を同時入力とした時刻歴応答解析を行う。

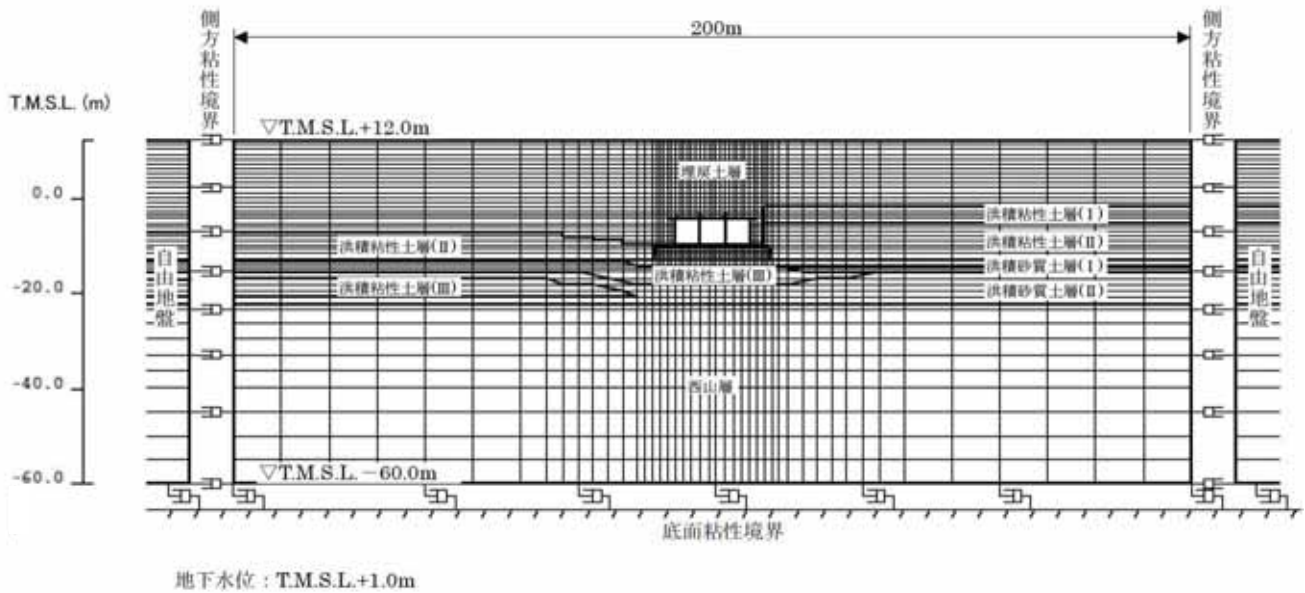
8.2.2.2. 解析モデル

地震応答解析モデルでは、構造物を線材要素（梁要素）でモデル化する。構造物と地盤との境界部分にはジョイント要素を設けることにより、構造物と地盤との剥離等を考慮する。

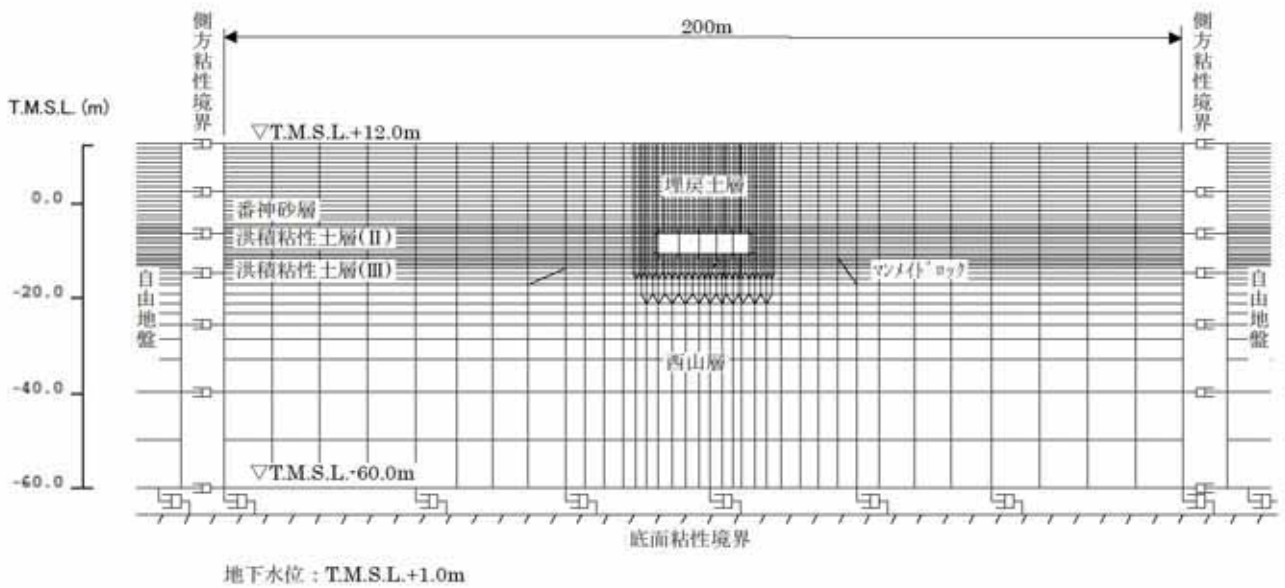
スクリーン室，取水路，補機冷却用海水取水路（南側）および補機冷却用海水取水路（北側）の地震応答解析モデルを第 8.2.2-1 図～第 8.2.2-4 図に示す。



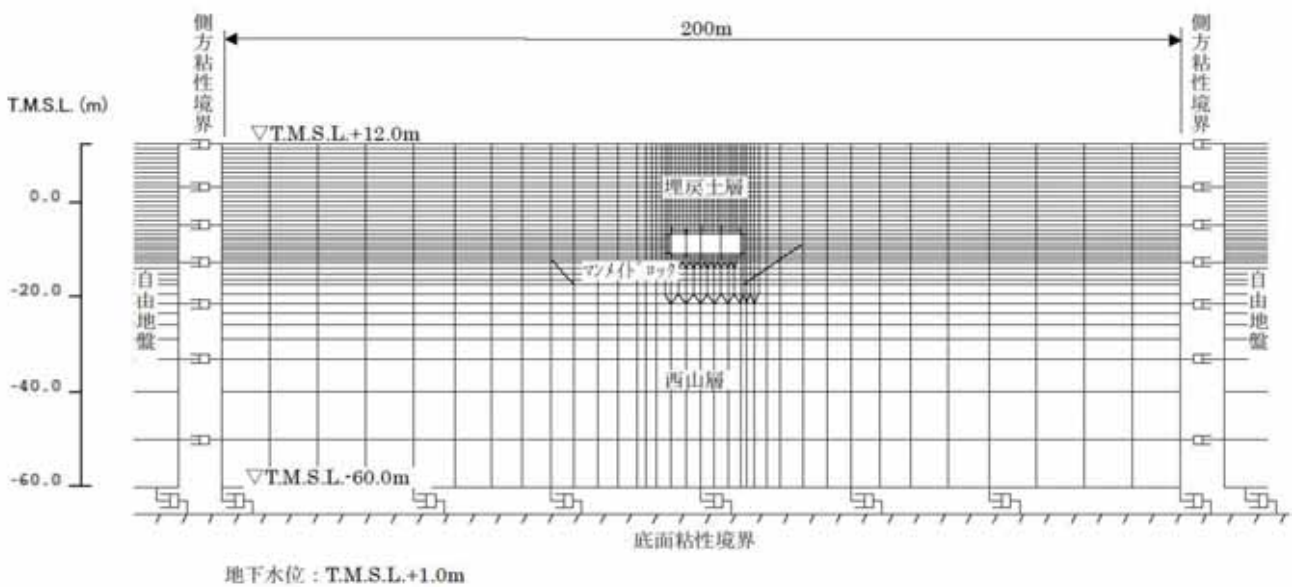
第 8.2.2-1 図 スクリーン室地震応答解析モデル



第 8.2.2-2 図 取水路地震応答解析モデル



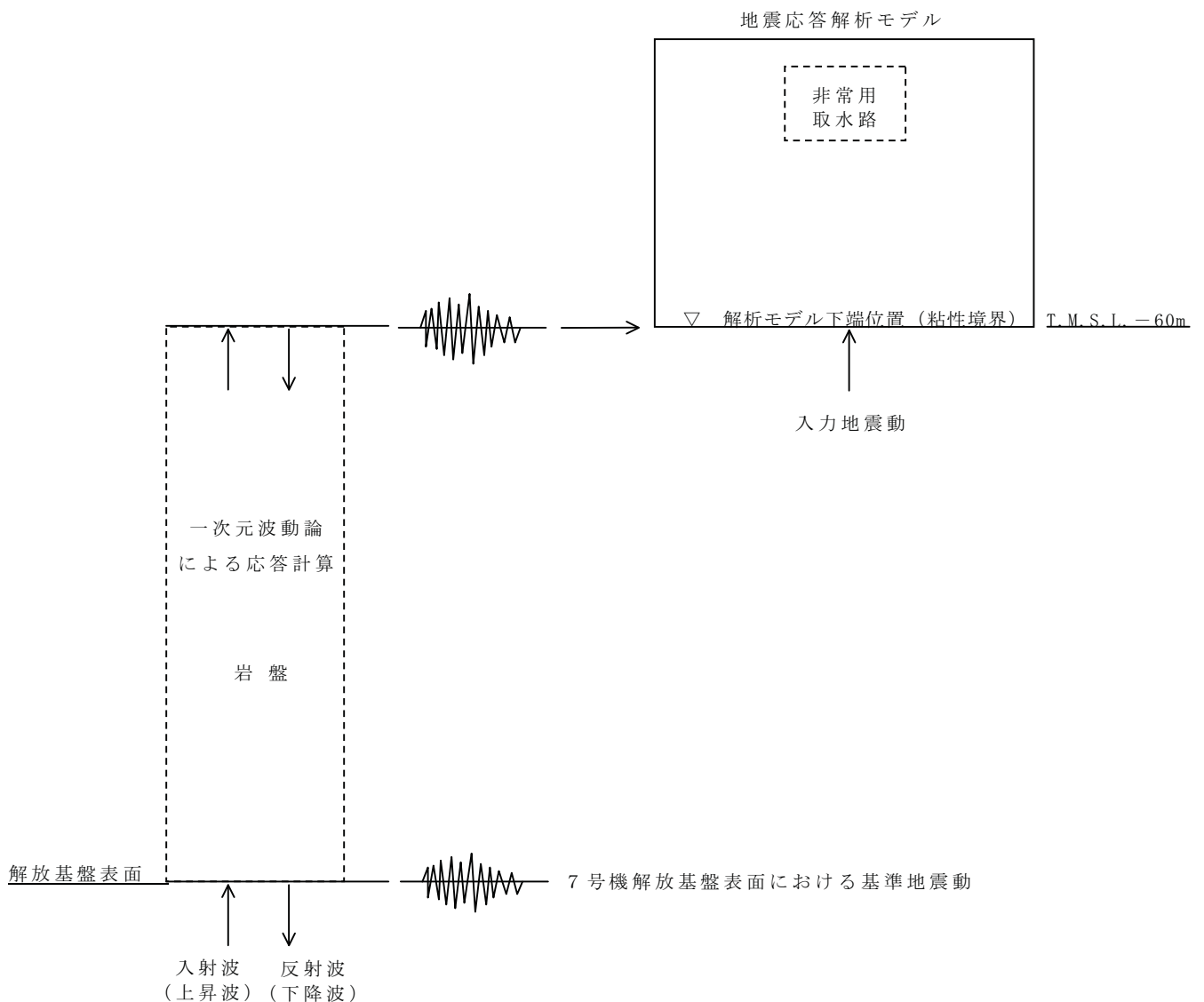
第 8.2.2-3 図 補機冷却用海水取水路（南側）地震応答解析モデル



第 8.2.2-4 図 補機冷却用海水取水路（北側）地震応答解析モデル

8.2.2.3. 入力地震動

地震応答解析モデルへの入力地震動は、解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s を用いて一次元波動論による地震応答解析を行い、地盤－構造物連成系の地震応答解析モデル下端位置で評価したものをを用いる。入力地震動の作成モデルを第 8.2.2-5 図に示す。



第 8.2.2-5 図 入力地震動の作成モデル

8.2.2.4. 解析結果

地震応答解析から求めた構造物頂底版間の最大相対変位および発生時刻を第 8.2.2-1 表に示す。

第 8.2.2-1 表 頂底版間の最大相対変位

地震動	スクリーン室		取水路		補機冷却用海水取水路（南側）		補機冷却用海水取水路（北側）	
	最大相対変位 (mm)	時刻 (秒)	最大相対変位 (mm)	時刻 (秒)	最大相対変位 (mm)	時刻 (秒)	最大相対変位 (mm)	時刻 (秒)
Ss-1	25.2	6.23	24.0	6.57	9.7	5.71	12.4	6.52
Ss-2	10.4	21.87	11.3	21.01	5.3	22.92	4.8	22.42
Ss-3	17.8	17.56	31.9	37.43	15.3	37.37	15.6	37.39
Ss-4	7.9	51.92	9.0	51.71	3.9	51.66	3.9	51.65
Ss-5	4.8	51.91	9.5	46.61	3.5	46.54	3.4	46.55

8.2.3. 評価基準

8.2.3.1. 評価手法

非常用取水路の耐震安全性評価では、基準地震動 S_s を用いた地震応答解析を実施し、変形による評価を行い評価位置において評価基準値を満足することを確認する。応答値の算定にあたっては、スクリーン室、取水路、補機冷却用海水取水路（南側）および補機冷却用海水取水路（北側）について、第 8.2.2-1 表に示す構造物頂底板間の相対変位が最大となる基準地震動 S_s による地震応答解析から求められる応答値を用いる。

8.2.3.2. 評価基準値

耐震安全性評価では、層間変形角およびせん断力について評価を行う。

限界層間変形角は、「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル，土木学会原子力土木委員会，2005 年 6 月」（以下、「耐震性能照査指針」という。）に基づき 1/100 を評価基準値とする。

せん断耐力は、「耐震性能照査指針」のせん断耐力評価法のうち「せん断耐力評価式（等価せん断スパン比）を用いた方法」，または「材料非線形解析を用いた方法」により算定した値を評価基準値とする。

8.2.4. 評価結果

8.2.4.1. 層間変形角による照査結果

層間変形角による照査の結果, 評価位置において照査用層間変形角が限界層間変形角を下回ることを確認した。層間変形角による照査結果を第 8.2.4-1 表に示す。

第 8.2.4-1 表 層間変形角による照査結果

	評価位置	照査用層間 変形角 R_d	限界層間 変形角 R_u	R_d/R_u
スクリーン室	頂版 ～底版	0.344/100	1/100	0.34
取水路	頂版 ～底版	0.684/100	1/100	0.68
補機冷却用海水 取水路 (南側)	頂版 ～底版	0.437/100	1/100	0.44
補機冷却用海水 取水路 (北側)	頂版 ～底版	0.446/100	1/100	0.45

8.2.4.2. せん断力による照査結果

せん断力による照査の結果，評価位置において照査用せん断力がせん断耐力を下回ることを確認した。せん断力による照査結果を第8.2.4-2表に示す。

第 8.2.4-2 表 せん断力による照査結果

	評価位置	照査用せん断力 $V_d(\text{kN})$	せん断耐力 $V_{yd}(\text{kN})$	V_d/V_{yd}
スクリーン室	頂版	330	842 ^{*2}	0.39
	底版	647	1150 ^{*1}	0.56
	側壁	898	1292 ^{*1}	0.70
	隔壁	875	2726 ^{*2}	0.32
取水路	頂版	1005	2664 ^{*1}	0.38
	底版	1009	2577 ^{*1}	0.39
	側壁	838	1231 ^{*1}	0.68
	隔壁	1057	2018 ^{*2}	0.52
補機冷却用海水 取水路（南側）	頂版	859	2043 ^{*1}	0.42
	底版	786	2187 ^{*1}	0.36
	側壁	908	1412 ^{*1}	0.64
	隔壁	1037	1580 ^{*2}	0.66
補機冷却用海水 取水路（北側）	頂版	866	1990 ^{*1}	0.44
	底版	1097	2086 ^{*1}	0.53
	側壁	848	1105 ^{*1}	0.77
	隔壁	952	1685 ^{*2}	0.57

* 1 せん断耐力評価式（等価せん断スパン比）を用いた方法

* 2 材料非線形解析を用いた方法

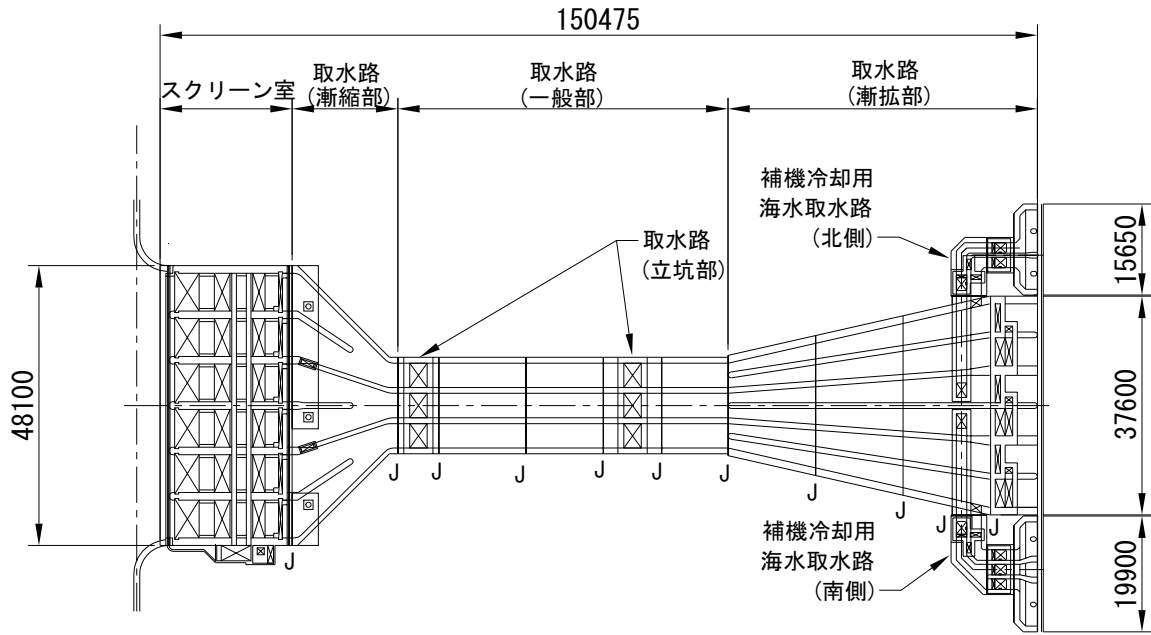
8.3. 軸方向に対する検討

8.3.1. 検討方針

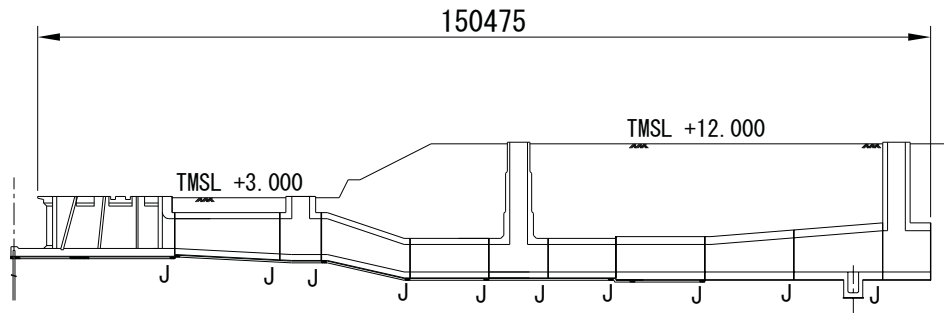
非常用取水路は、軸方向における構造の変化等を考慮してブロック分割し、その間に耐震ジョイントが設置されており(第 8.3.1-1 図)、取水路軸方向について構造的に問題となるような応力が生じないよう設計されているが、念のため、軸方向の応力度とブロック間相対変位について検討する。

検討方法は、「柏崎刈羽原子力発電所 7 号機新潟県中越沖地震後の設備健全性に係る点検・評価報告書（建物・構築物編）（改訂 1）」（東京電力株式会社，平成 20 年 9 月 25 日）にならう。

なお、検討対象とする地震動は、耐震安全性評価結果において、構造物の変位が比較的大きかった基準地震動 Ss-1，Ss-3 とする。

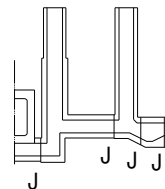
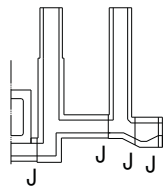


平面図



補機冷却用海水取水路 (北側)

補機冷却用海水取水路 (南側)



J: 耐震ジョイント

縦断面図

第 8.3.1-1 図 非常用取水路のブロック分割

8.3.2. 応力度に関する検討

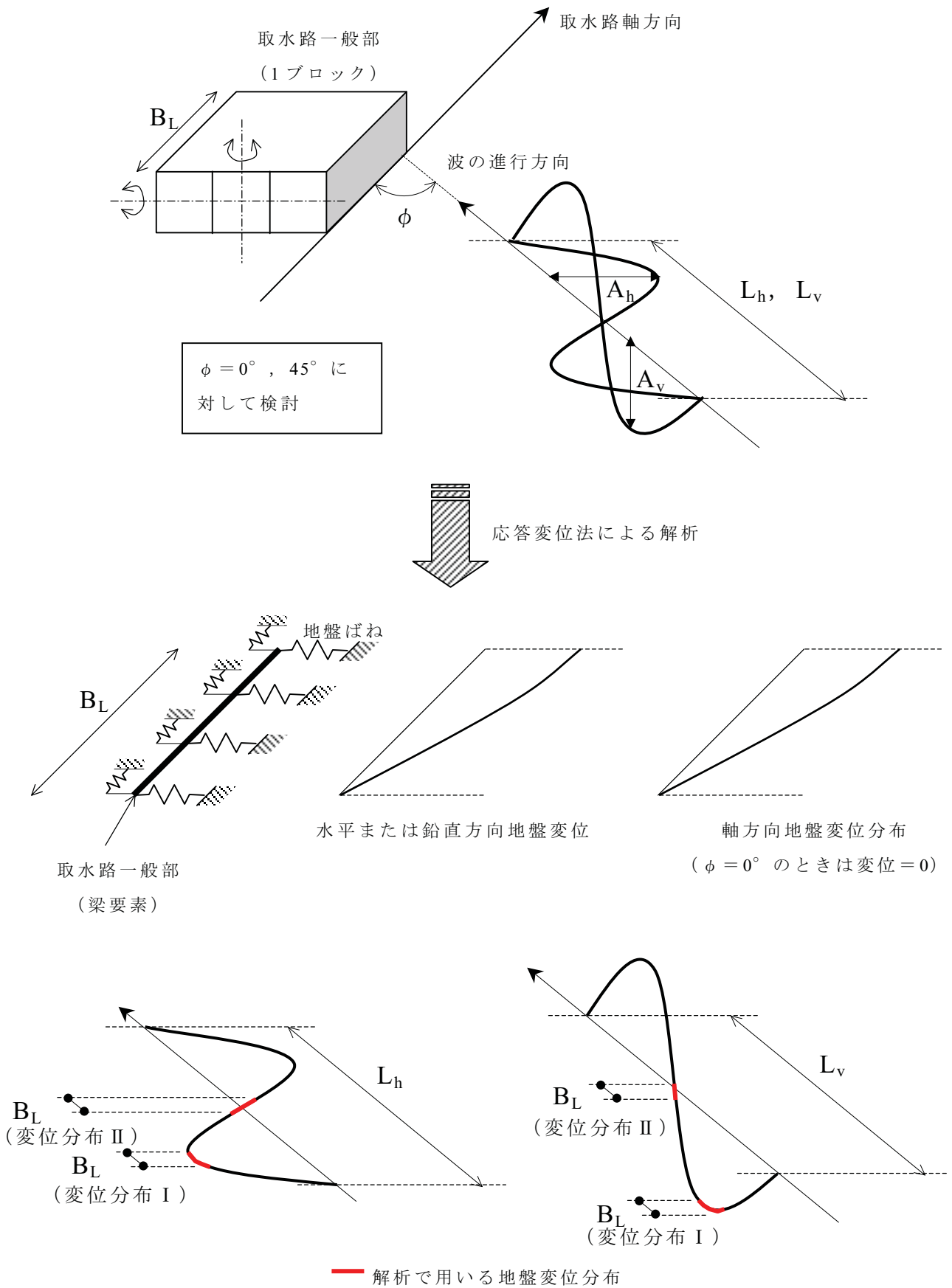
8.3.2.1. 検討手法

非常用取水路の各断面のうち、曲げ剛性が最も低い取水路を対象に、応力度に関する検討を行う。

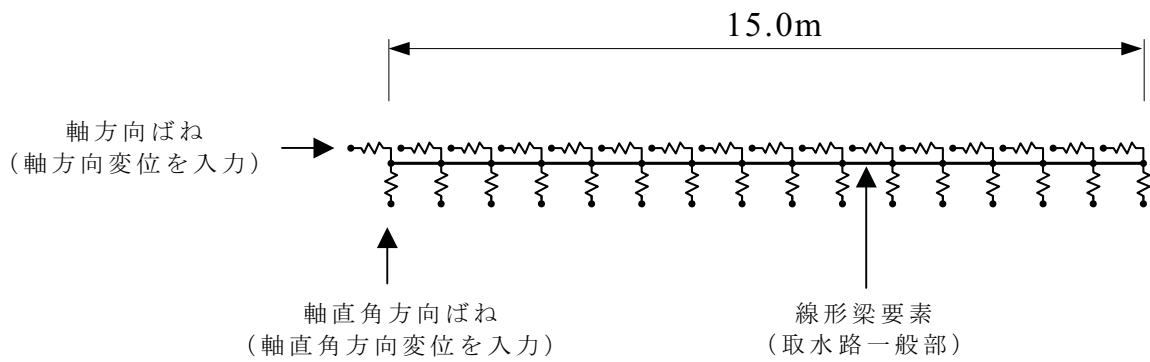
梁要素と地盤ばねからなる解析モデル(第 8.3.2-1 図)を用いて、静的に水平方向および鉛直方向の地盤変位分布を与えて断面力を求め、曲げ・軸力およびせん断力の発生応力度を算出する。このように算出した応力度について、曲げ・軸力については、「耐震性能照査指針」に基づき算出したコンクリート引張強度を、また、せん断力については、「耐震性能照査指針」のせん断耐力評価式による評価値を下回ることを確認する。

解析モデルを第 8.3.2-2 図に、地盤ばねを第 8.3.2-1 表に、地盤の波長と最大変位振幅を第 8.3.2-2 表にそれぞれ示す。

地盤ばねは「道路橋示方書・同解説 下部構造編(日本道路協会、平成 14 年 3 月)」に基づき、地盤物性値から推定される地盤反力係数を用いて経験式から算定する。また、地盤ばねに与える地盤変位は「共同溝設計指針(日本道路協会、昭和 61 年 3 月)」の考え方に従い、地盤の波長と最大変位振幅を用いて算定する。なお、最大変位振幅は、「8.2. 耐震安全性評価」において実施した取水路の地震応答解析結果に基づき、構造物中心—西山層上面間の最大相対変位(水平方向および鉛直方向)とする。



第 8.3.2-1 図 軸方向の検討方法の概念 (水平方向, 鉛直方向)



※ 別途算定した変位分布に従い，軸直角方向変位および軸方向の変位を各節点の地盤ばねを介して入力。

第 8.3.2-2 図 解析モデル

第 8.3.2-1 表 解析に用いた地盤ばね

地震動	方向	軸方向ばね定数 K_1 (kN/m)	軸直角方向ばね定数 K_2 (kN/m)
Ss-1	水平変位 入力モデル	2.28×10^5	2.52×10^5
	鉛直変位 入力モデル	2.28×10^5	3.57×10^5
Ss-3	水平変位 入力モデル	1.79×10^5	1.95×10^5
	鉛直変位 入力モデル	1.79×10^5	2.81×10^5

第 8.3.2-2 表 解析に用いた地盤の波長と最大変位振幅

地震動	方向	波長 L (m)	最大変位振幅 A (cm)
Ss-1	水平変位	247.6	6.67
	鉛直変位	247.6	0.172
Ss-3	水平変位	263.9	8.06
	鉛直変位	263.9	0.206

8.3.2.2. 検討結果

(1) 曲げ・軸力に関する検討

曲げ・軸力については，水平方向および鉛直方向変位に対して軸方向に生じる応力がコンクリート引張強度を下回ることを確認した。

曲げ・軸力による照査結果を第 8.3.2-3 表に示す。

第 8.3.2-3 表 曲げ・軸力に関する検討結果

	構造物と地震波進行方向のなす角度 ϕ (°)	変位分布	発生応力度 σ_d (N/mm ²)	コンクリート引張強度 f_t (N/mm ²)	σ_d / f_t
水平方向変位	0	I	0.00876	1.45	0.0060
		II	0.0000876	1.45	0.000060
	45	I	0.00373	1.45	0.0026
		II	0.105	1.45	0.073
鉛直方向変位	0	I	0.000493	1.45	0.00034
		II	0.00000614	1.45	0.0000042
	45	I	0.000228	1.45	0.00016
		II	0.00271	1.45	0.0019

(2) せん断力に関する検討

せん断力については, 水平方向および鉛直方向変位に対して軸方向に生じるせん断力がせん断耐力を下回ることを確認した。

せん断力による照査結果を第 8.3.2-4 表に示す。

第 8.3.2-4 表 せん断力に関する検討結果

	構造物と地震波進行方向のなす角度 ϕ (°)	変位分布	発生せん断力 V_d (kN)	せん断耐力 V_{yd} (kN)	V_d / V_{yd}
水平方向変位	0	I	295	76100	0.0039
		II	7.55	76100	0.000099
	45	I	105	73700	0.0014
		II	1.98	73700	0.000027
鉛直方向変位	0	I	10.7	54900	0.00020
		II	0.290	54900	0.0000053
	45	I	3.82	52400	0.000073
		II	0.0700	51200	0.0000014

8.3.3. ブロック間相対変位に関する検討

8.3.3.1. 検討手法

スクリーン室，取水路，補機冷却用海水取水路（南側）および補機冷却用海水取水路（北側）を対象に，ブロック間相対変位について検討する。

「8.2. 耐震安全性評価」において実施した地震応答解析結果に基づき，構造物中心－西山層上面間最大相対変位を求め，ブロック間に発生する相対変位が取水機能に影響を及ぼさないことを確認する。

8.3.3.2. 検討結果

各断面における水平方向および鉛直方向の最大相対変位量を第8.3.3-1表に示す。隣接するブロック間の最大相対変位量は，最も大きく見積もっても各位置における最大相対変位量の2倍になるが，中越沖地震後に確認された耐震ジョイントの変位量（最大2.5cm）を加えても，耐震ジョイントの限界性能（伸び30cm，ずれ40cm）を下回ることから，取水機能に影響を及ぼすものではない。

第 8.3.3-1 表 各断面における最大相対変位量

	水平 (cm)	鉛直 (cm)
スクリーン室	9.08	0.672
取水路	8.47	0.209
補機冷却用海水取水路（南側）	0.837	0.0271
補機冷却用海水取水路（北側）	0.928	0.0400

8.4. 設置地盤の支持性能に対する検討

8.4.1. 検討方針

非常用取水路の各断面の等価な単位体積重量は $14.5\sim 17.7\text{kN/m}^3$ であり、埋戻土層の単位体積重量 18.6kN/m^3 と比べて同等かやや小さいことから、設置地盤の支持性能は問題にならないと考えられるが、念のため、「8.2. 耐震安全性評価」において実施した地震応答解析結果に基づき、非常用取水路の設置地盤の支持性能について検討する。

8.4.2. 検討手法

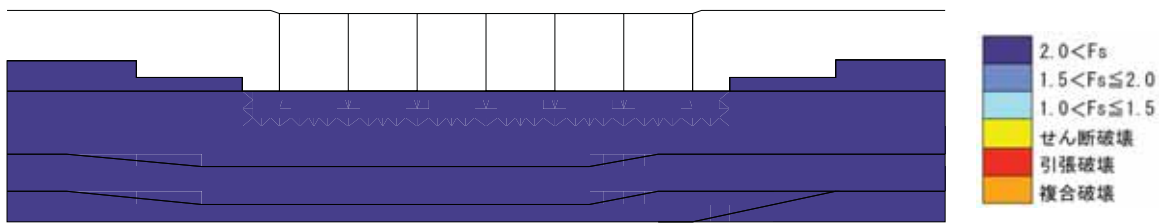
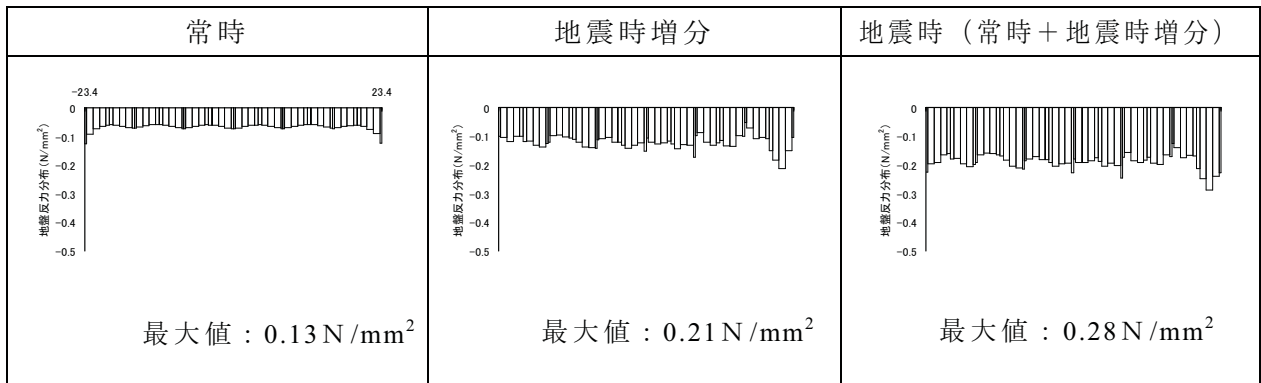
スクリーン室、取水路、補機冷却用海水取水路（南側）および補機冷却用海水取水路（北側）を対象に、各構造物から地盤に作用する鉛直方向の合力（ V ）および各構造物の底版に接する地盤要素の鉛直応力（ σ_v ）が最大となるそれぞれの時刻について、要素ごとの安全係数分布およびモビライズド面から、連続したすべり線が形成されないことを確認する。

また、構造物から地盤に作用する鉛直方向の合力（ V ）が、「道路橋示方書・同解説 下部構造編（日本道路協会，平成 14 年 3 月）」に基づき計算した設置地盤の極限支持力（ Q_u ）を下回ることを確認する。

8.4.3. 検討結果

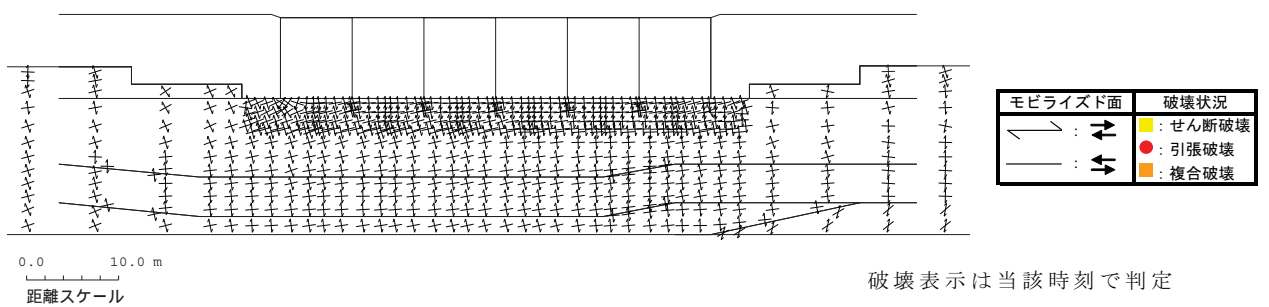
基準地震動 S_s-1 および S_s-3 について、要素ごとの安全係数分布およびモビライズド面から、破壊に至る要素が連続せず、すべり線が形成されないことを確認した。代表的なケースの地盤反力分布、要素ごとの安全係数分布、モビライズド面を第 8.4.3-1 図に示す。

接地圧分布



要素ごとの安全係数

破壊表示は当該時刻で判定

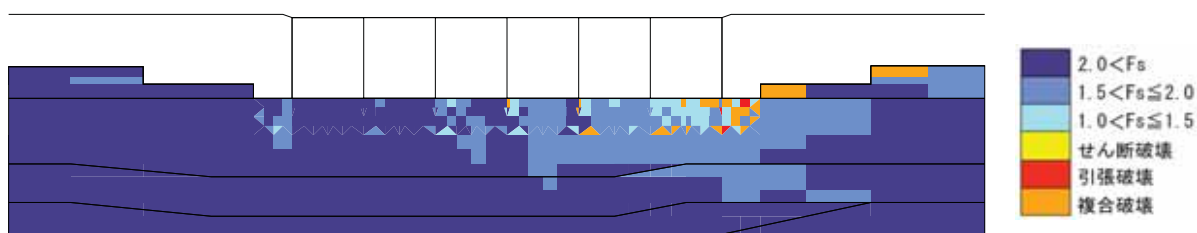
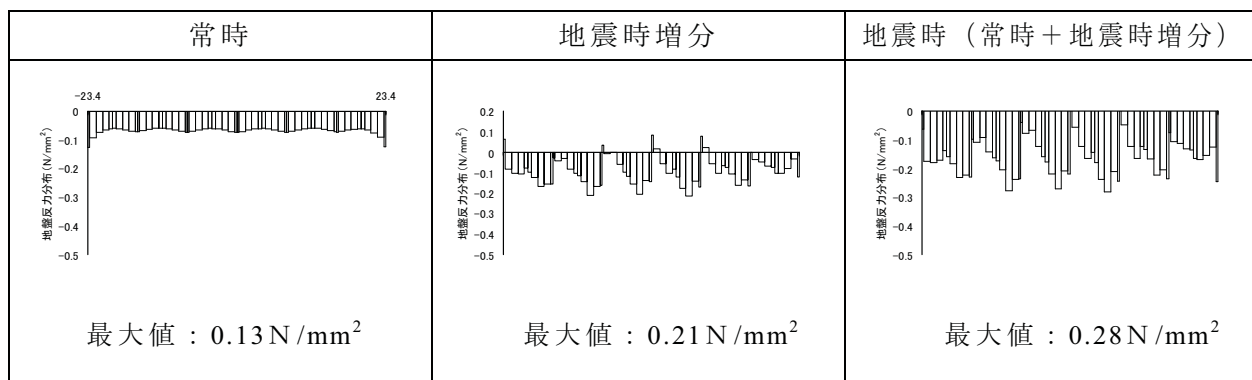


破壊表示は当該時刻で判定

モビライズド面

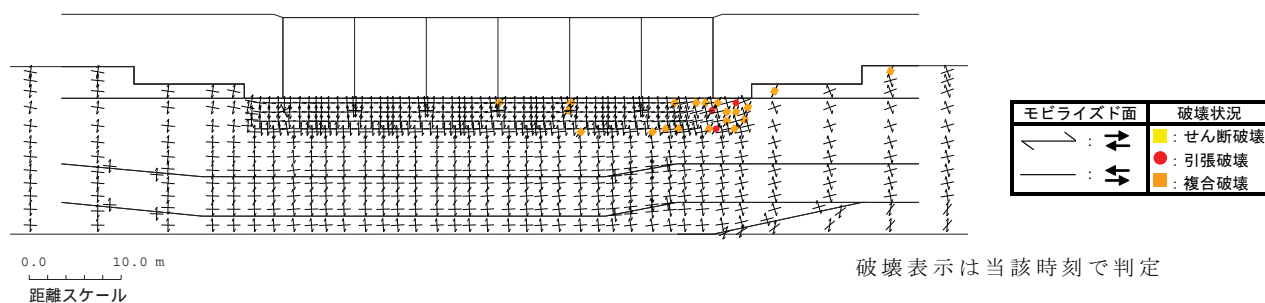
第 8.4.3-1 図(1) 要素ごとの安全係数分布およびモビライズド面
(スクリーン室, Ss-1, 鉛直合力最大時, T=16.21 秒)

接地圧分布



破壊表示は当該時刻で判定

要素ごとの安全係数

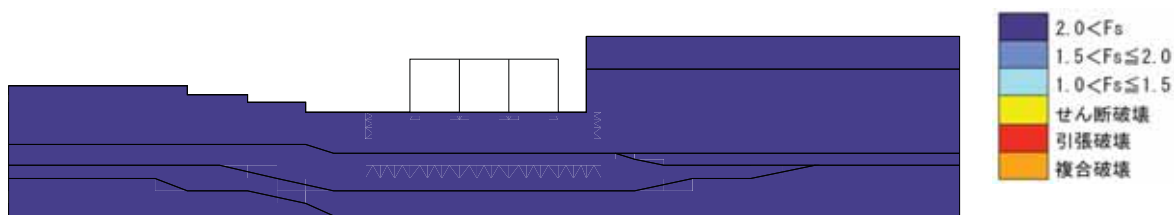
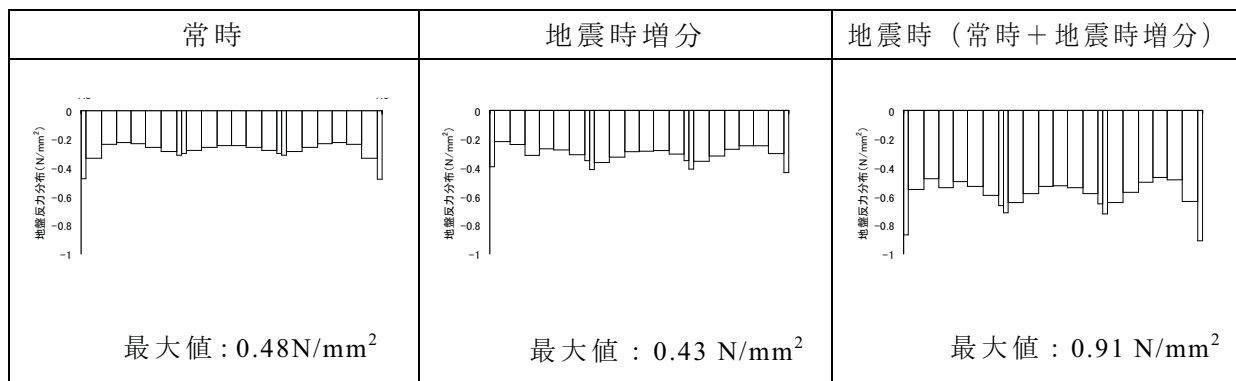


破壊表示は当該時刻で判定

モビライズド面

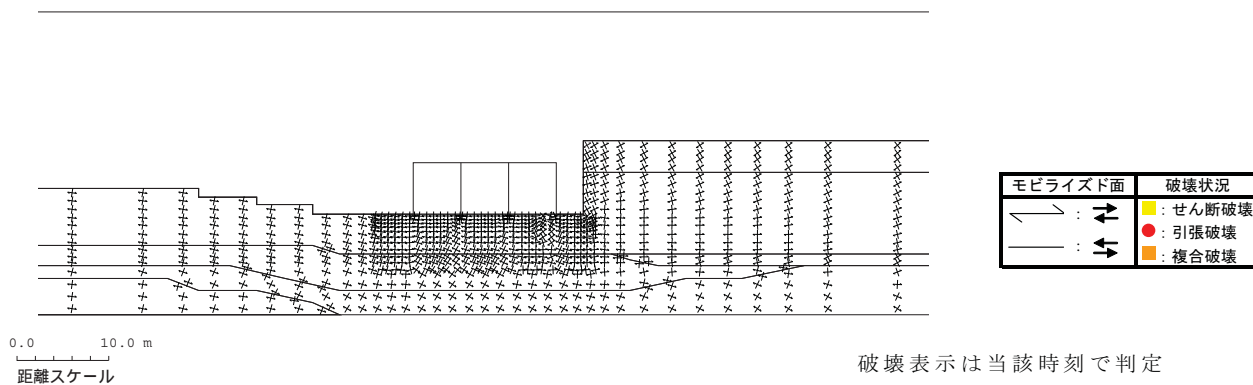
第 8.4.3-1 図(2) 要素ごとの安全係数分布およびモビライズド面
(スクリーン室, Ss-1, 要素鉛直応力最大時, T=5.79 秒)

接地圧分布



破壊表示は当該時刻で判定

要素ごとの安全係数分布



破壊表示は当該時刻で判定

モビライズド面

第 8.4.3-1 図(3) 要素ごとの安全係数分布およびモビライズド面
(取水路, Ss-1, 鉛直合力最大かつ要素応力最大時, T=15.96 秒)

また、基準地震動 Ss-1 および Ss-3 について、構造物から地盤に作用する鉛直方向の合力（V）が極限支持力（ Q_u ）を下回ることを確認した。両者を比較した結果を第 8.4.3-1 表に示す。

第 8.4.3-1 表 極限支持力に関する検討結果

	鉛直力 ※ V (kN)	極限支持力※ Q_u (kN)	Q_u/V
スクリーン室	9400	54200	5.8
取水路	8150	32500	4.0
補機冷却用海水取水路 (南側)	11900	33800	2.8
補機冷却用海水取水路 (北側)	9150	23900	2.6

※ 鉛直力（V）および極限支持力（ Q_u ）は奥行き 1m 当りの値である。

なお、鉛直方向の相対変位量・傾斜に関しては、「8.3.3 ブロック間相対変位に関する検討」に示したとおり、取水機能に影響を及ぼさないことを確認した。

9. 弾性設計用地震動 S_d に対する検討

【目 次】

9.1. 検討方針	9-1
9.2. 弾性設計用地震動 S_d について	9-1
9.2.1. 弾性設計用地震動 S_d の設定方針	9-1
9.3. 原子炉建屋の弾性設計用地震動 S_d による評価	9-4
9.3.1. 地震応答解析	9-4
9.4. 機器・配管系の弾性設計用地震動 S_d による評価	9-36
9.4.1. 弾性設計用地震動 S_d による耐震評価条件について	9-36
9.4.2. 弾性設計用地震動 S_d に対する重要な機器・配管系の耐震性評 価結果	9-41
9.5. まとめ	9-43

9. 弾性設計用地震動 S_d に対する検討

9.1. 検討方針

旧耐震指針において S_1 ないし静的地震力が果たしてきた役割を考慮するため、代表施設について弾性設計用地震動 S_d および静的地震力に対する弾性設計評価を行い、旧耐震指針から新耐震指針への連続性の考察を行う。

建物・構築物については原子炉建屋を代表施設として、弾性設計用地震動 S_d による最大応答値および最大応答せん断力の確認を行う。また、機器・配管系については原子炉を「止める」「冷やす」「閉じ込める」の観点から、代表的な設備を選定し、弾性設計用地震動 S_d に対する応力を確認する。

9.2. 弾性設計用地震動 S_d について

9.2.1. 弾性設計用地震動 S_d の設定方針

「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」で述べられている S_d の設定に関する記述は次の通りである。

(6. 耐震設計方針 (解説) III (2) より抜粋)

当該係数の設定に当たっては、基準地震動 S_s の策定の際に参照した超過確率を参考とすることができる。・・・・・・(中略)・・・・・・弾性設計用地震動 S_d と基準地震動 S_s の応答スペクトルの比率 (S_d/S_s) の値は、弾性設計用地震動 S_d に求められる性格上、ある程度以上の大きさであるべきであり、めやすとして、0.5 を下回らないような値で求められることが望ましい。
--

このことを踏まえ、弾性設計用地震動 S_d の設定に際しては、事故時荷重と地震荷重を組み合わせる観点から、原子力発電所耐震設計技術指針～重要度分類・許容応力編～JEAG4601・補-1984 (以下、JEAG4601 という) に記載のある基準地震動 S_1 と事故時荷重の組合せの考え方を参考に、基準地震動 S_s の超過確率を参照することとした。

9.2.2 耐震安全性評価における弾性設計用地震動 S_d

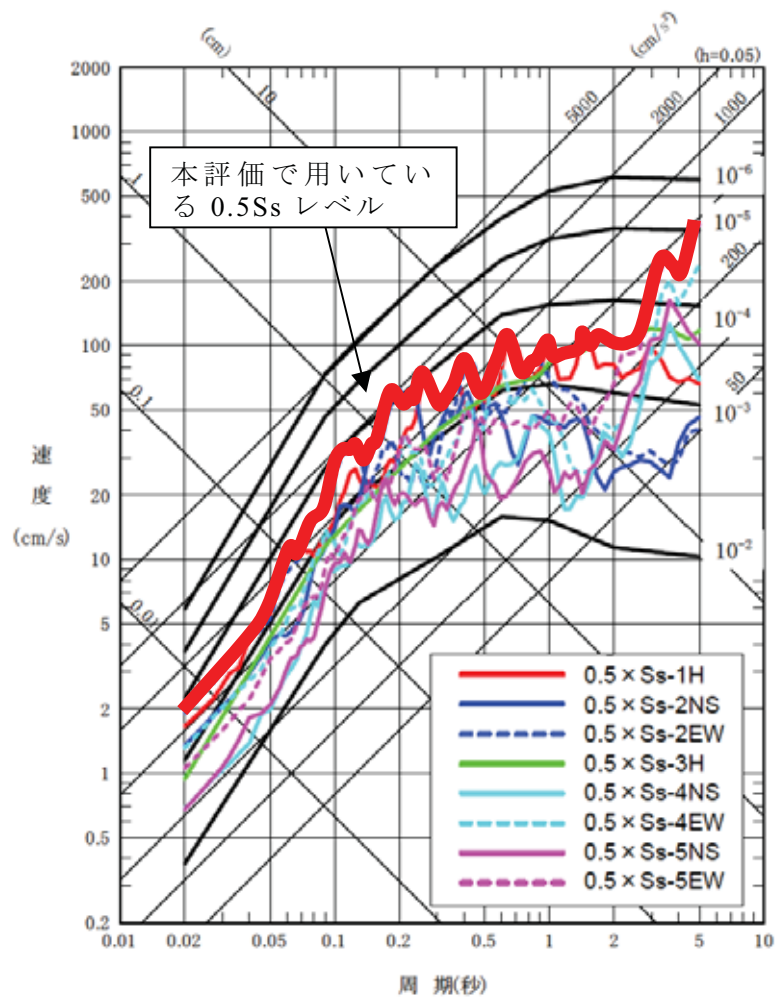
(1) 地震動との組合せを想定すべき荷重状態の考え方

JEAG4601 の参考資料では、運転状態と地震の関連について述べられている。ここでは、地震動と同時に発生する確率が 10^{-7} 回/炉・年を下回ると判断される事象は、地震との組合せが不要となるとしている。

(2) 弾性設計用地震動 S_d の設定

S_d/S_s の比率は、0.5 を下回らないこととされている。その 0.5 を採用して年超過確率を参照したところ、全ての $0.5S_s$ の包絡レベルにおいて、年超過確率が概ね $10^{-3} \sim 10^{-4}$ であった。JEAG4601 で想定している事故発生確率が 10^{-4} /年以下であることを考慮すると、 S_d/S_s の比率を 0.5 を超えて設定すると、地震と事故が同時に発生する確率が 10^{-7} /年を下回り、耐震安全性評価において考慮すべき事象とはいえなくなる。このことから、本評価においては、 S_d/S_s の比率を 0.5 とした。

また、ここで設定した弾性設計用地震動 S_d については、この地震動に基づく耐震性評価条件を算定し、従前の基準地震動 S_1 および静的地震力に基づく耐震性評価条件との比較を行うことで、旧耐震指針と新耐震指針との連続性を確認することとする。



第 9.2.2-1 図 0.5Ss の年超過確率

9.3. 原子炉建屋の弾性設計用地震動 S_d による評価

9.3.1. 地震応答解析

9.3.1.1. 地震応答解析モデル

弾性設計用地震動 S_d による評価に対する地震応答解析モデルは基準地震動 S_s に対する地震応答解析に用いた解析モデルと同様とし、水平方向および鉛直方向の解析ともに建屋剛性は線形とする。

地盤は、弾性設計用地震動 S_d による等価線形解析を実施し、地盤定数を設定する。第 9.3.1-1 表に地盤定数を示す。

地盤ばねは、基準地震動 S_s に対する地震応答解析時と同様に、水平方向解析時は側面および底面地盤ばねともに水平成分と回転成分を考慮する。鉛直方向解析時は底面地盤ばねの鉛直成分を考慮する。第 9.3.1-2 表に地震応答解析に用いる地盤のばね定数と減衰係数を示す。

9.3.1.2. 地震応答解析結果

地震応答解析モデルの固有値（固有周期、固有振動数）および刺激係数を第 9.3.1-3 表および第 9.3.1-4 表に示す。

弾性設計用地震動 S_d （水平）による最大応答値を、それぞれ第 9.3.1-1 図～第 9.3.1-6 図に示す。

弾性設計用地震動 S_d （鉛直）による最大応答値を、それぞれ第 9.3.1-7 図～第 9.3.1-8 図に示す。

弾性設計用地震動 S_d による応答の代表として、 S_d -1、 S_d -2、 S_s -1 および S_s -2 のせん断スケルトン曲線上の最大応答値比較を第 9.3.1-9 図～第 9.3.1-10 図に示す。参考に、工認設計時の動的地震力 S_1 、 S_2 、静的地震力および設計用地震力も併せて示す。

S_d -1 および S_d -2 による最大応答せん断力を、工認設計時の動的地震力 S_1 、 S_2 静的地震力および設計用地震力と比較し、第 9.3.1-11 図～第 9.3.1-12 図に示す。

第 9.3.1-1 表(1) 地盤定数

(Sd-1)

標高 T. M. S. L. (m)	地質	せん断波 速度 Vs (m/s)	単位体積 重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	せん断 弾性係数 G (×10 ⁵ kN/m ²)	初期せん断 弾性係数 G ₀ (×10 ⁵ kN/m ²)	剛性 低下率 G/G ₀	ヤング 係数 E (×10 ⁵ kN/m ²)	減衰 定数 h (%)	層厚 H (m)
+12.0	砂層	150	16.1	0.347	0.14	0.37	0.38	0.38	19	4.0
+8.0		200	16.1	0.308	0.17	0.66	0.26	0.45	23	4.0
+4.0	安田層	330	17.3	0.462	1.26	1.92	0.66	3.68	4	10.0
-6.0	西山層	490	17.0	0.451	4.03	4.16	0.97	11.70	3	27.0
-33.0		530	16.6	0.446	4.51	4.75	0.95	13.04	3	57.0
-90.0		590	17.3	0.432	5.83	6.14	0.95	16.70	3	46.0
-136.0		650	19.3	0.424	7.90	8.32	0.95	22.50	3	19.0
-155.0	解放 基盤	720	19.9	0.416	10.50	10.50	1.00	29.74	-	-

第 9.3.1-1 表(2) 地盤定数

(Sd-2)

標高 T. M. S. L. (m)	地質	せん断波 速度 Vs (m/s)	単位体積 重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	せん断 弾性係数 G (×10 ⁵ kN/m ²)	初期せん断 弾性係数 G ₀ (×10 ⁵ kN/m ²)	剛性 低下率 G/G ₀	ヤング 係数 E (×10 ⁵ kN/m ²)	減衰 定数 h (%)	層厚 H (m)
+12.0	砂層	150	16.1	0.347	0.15	0.37	0.41	0.41	16	4.0
+8.0		200	16.1	0.308	0.14	0.66	0.22	0.38	19	4.0
+4.0	安田層	330	17.3	0.462	1.22	1.92	0.64	3.57	3	10.0
-6.0	西山層	490	17.0	0.451	4.03	4.16	0.97	11.70	3	27.0
-33.0		530	16.6	0.446	4.56	4.75	0.96	13.19	3	57.0
-90.0		590	17.3	0.432	5.95	6.14	0.97	17.04	3	46.0
-136.0		650	19.3	0.424	8.07	8.32	0.97	22.98	3	19.0
-155.0	解放 基盤	720	19.9	0.416	10.50	10.50	1.00	29.74	-	-

第 9.3.1-1 表(3) 地盤定数

(Sd-3)

標高 T. M. S. L. (m)	地質	せん断波 速度 Vs (m/s)	単位体積 重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	せん断 弾性係数 G (×10 ⁵ kN/m ²)	初期せん断 弾性係数 G ₀ (×10 ⁵ kN/m ²)	剛性 低下率 G/G ₀	ヤング 係数 E (×10 ⁵ kN/m ²)	減衰 定数 h (%)	層厚 H (m)
+12.0	砂層	150	16.1	0.347	0.18	0.37	0.49	0.48	15	4.0
+8.0		200	16.1	0.308	0.21	0.66	0.32	0.55	21	4.0
+4.0	安田層	330	17.3	0.462	1.34	1.92	0.70	3.92	3	10.0
-6.0	西山層	490	17.0	0.451	4.03	4.16	0.97	11.70	3	27.0
-33.0		530	16.6	0.446	4.46	4.75	0.94	12.90	3	57.0
-90.0		590	17.3	0.432	5.77	6.14	0.94	16.53	3	46.0
-136.0		650	19.3	0.424	7.90	8.32	0.95	22.50	3	19.0
-155.0		解放 基盤	720	19.9	0.416	10.50	10.50	1.00	29.74	-

第 9.3.1-1 表(4) 地盤定数

(Sd-4)

標高 T. M. S. L. (m)	地質	せん断波 速度 Vs (m/s)	単位体積 重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	せん断 弾性係数 G (×10 ⁵ kN/m ²)	初期せん断 弾性係数 G ₀ (×10 ⁵ kN/m ²)	剛性 低下率 G/G ₀	ヤング 係数 E (×10 ⁵ kN/m ²)	減衰 定数 h (%)	層厚 H (m)
+12.0	砂層	150	16.1	0.347	0.20	0.37	0.53	0.53	11	4.0
+8.0		200	16.1	0.308	0.26	0.66	0.39	0.67	16	4.0
+4.0	安田層	330	17.3	0.462	1.34	1.92	0.70	3.92	3	10.0
-6.0	西山層	490	17.0	0.451	4.07	4.16	0.98	11.81	3	27.0
-33.0		530	16.6	0.446	4.60	4.75	0.97	13.30	3	57.0
-90.0		590	17.3	0.432	5.95	6.14	0.97	17.04	3	46.0
-136.0		650	19.3	0.424	8.07	8.32	0.97	22.98	3	19.0
-155.0		解放 基盤	720	19.9	0.416	10.50	10.50	1.00	29.74	-

第 9.3.1-1 表(5) 地盤定数

(Sd-5)

標高 T. M. S. L. (m)	地質	せん断波 速度 V_s (m/s)	単位体積 重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	せん断 弾性係数 G ($\times 10^5$ kN/m ²)	初期せん断 弾性係数 G_0 ($\times 10^5$ kN/m ²)	剛性 低下率 G/G_0	ヤング 係数 E ($\times 10^5$ kN/m ²)	減衰 定数 h (%)	層厚 H (m)
+12.0	砂層	150	16.1	0.347	0.18	0.37	0.48	0.48	11	4.0
+8.0		200	16.1	0.308	0.21	0.66	0.32	0.55	14	4.0
+4.0	安田層	330	17.3	0.462	1.34	1.92	0.70	3.92	3	10.0
-6.0	西山層	490	17.0	0.451	4.03	4.16	0.97	11.70	3	27.0
-33.0		530	16.6	0.446	4.56	4.75	0.96	13.19	3	57.0
-90.0		590	17.3	0.432	5.83	6.14	0.95	16.70	3	46.0
-136.0		650	19.3	0.424	7.98	8.32	0.96	22.73	3	19.0
-155.0		解放 基盤	720	19.9	0.416	10.50	10.50	1.00	29.74	-

第 9.3.1-2 表(1) 地震応答解析に用いる地盤のばね定数と減衰係数

(NS 方向, Sd-1H)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*1) K _C	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*2) C _C	採用振動数 ^(*3) f ₁ (Hz)
K1	7	側面・並進	1.34×10 ⁶	0.67	4.69×10 ⁵	2.36
K2	7	側面・回転	1.04×10 ⁹	0.01	1.16×10 ⁸	2.36
K3	8	側面・並進	3.55×10 ⁶	0.67	1.25×10 ⁶	2.36
K4	8	側面・回転	2.76×10 ⁹	0.01	3.09×10 ⁸	2.36
K5	9	側面・並進	9.11×10 ⁶	1.21	1.80×10 ⁶	2.36
K6	9	側面・回転	7.17×10 ⁹	0.01	4.13×10 ⁸	2.36
K7	10	側面・並進	4.78×10 ⁶	1.30	8.86×10 ⁵	2.36
K8	10	側面・回転	3.74×10 ⁹	0.01	2.02×10 ⁸	2.36
K9	10	底面・並進	7.70×10 ⁷	0.00	2.90×10 ⁶	2.36
K10	10	底面・回転	7.50×10 ¹⁰	0.00	6.23×10 ⁸	2.36

(*1) K1, K3, K5, K7, K9はkN/m K2, K4, K6, K8, K10はkN・m/rad

(*2) K1, K3, K5, K7, K9はkN・s/m K2, K4, K6, K8, K10はkN・s・m/rad

(*3) f₁は連成系の1次固有振動数

(EW 方向, Sd-1H)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*1) K _C	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*2) C _C	採用振動数 ^(*3) f ₁ (Hz)
K1	7	側面・並進	1.34×10 ⁶	0.67	4.71×10 ⁵	2.42
K2	7	側面・回転	1.04×10 ⁹	0.01	1.17×10 ⁸	2.42
K3	8	側面・並進	3.55×10 ⁶	0.67	1.25×10 ⁶	2.42
K4	8	側面・回転	2.76×10 ⁹	0.01	3.10×10 ⁸	2.42
K5	9	側面・並進	9.11×10 ⁶	1.21	1.80×10 ⁶	2.42
K6	9	側面・回転	7.17×10 ⁹	0.01	4.16×10 ⁸	2.42
K7	10	側面・並進	4.78×10 ⁶	1.30	8.85×10 ⁵	2.42
K8	10	側面・回転	3.74×10 ⁹	0.01	2.03×10 ⁸	2.42
K9	10	底面・並進	7.66×10 ⁷	0.00	2.88×10 ⁶	2.42
K10	10	底面・回転	8.08×10 ¹⁰	0.00	7.29×10 ⁸	2.42

(*1) K1, K3, K5, K7, K9はkN/m K2, K4, K6, K8, K10はkN・m/rad

(*2) K1, K3, K5, K7, K9はkN・s/m K2, K4, K6, K8, K10はkN・s・m/rad

(*3) f₁は連成系の1次固有振動数

(鉛直方向, Sd-1V)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 K _C (kN/m)	採用振動数 (Hz)	減衰係数 C _C (kN・s/m)	採用振動数 ^(*1) f ₁ (Hz)
K1	10	底面・鉛直	1.27×10 ⁸	0.00	6.64×10 ⁶	3.97

(*1) f₁は連成系の1次固有振動数

第 9.3.1-2 表(2) 地震応答解析に用いる地盤のばね定数と減衰係数

(NS 方向, Sd-2H)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*1) K _C	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*2) C _C	採用振動数 ^(*3) f ₁ (Hz)
K1	7	側面・並進	1.29×10 ⁶	0.66	4.62×10 ⁵	2.37
K2	7	側面・回転	1.00×10 ⁹	0.01	1.15×10 ⁸	2.37
K3	8	側面・並進	3.42×10 ⁶	0.66	1.23×10 ⁶	2.37
K4	8	側面・回転	2.66×10 ⁹	0.01	3.04×10 ⁸	2.37
K5	9	側面・並進	9.08×10 ⁶	1.21	1.79×10 ⁶	2.37
K6	9	側面・回転	7.16×10 ⁹	0.01	4.13×10 ⁸	2.37
K7	10	側面・並進	4.78×10 ⁶	1.30	8.86×10 ⁵	2.37
K8	10	側面・回転	3.74×10 ⁹	0.01	2.02×10 ⁸	2.37
K9	10	底面・並進	7.76×10 ⁷	0.00	2.92×10 ⁶	2.37
K10	10	底面・回転	7.56×10 ¹⁰	0.00	6.26×10 ⁸	2.37

(*1) K1, K3, K5, K7, K9はkN/m K2, K4, K6, K8, K10はkN・m/rad

(*2) K1, K3, K5, K7, K9はkN・s/m K2, K4, K6, K8, K10はkN・s・m/rad

(*3) f₁は連成系の1次固有振動数

(EW 方向, Sd-2H)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*1) K _C	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*2) C _C	採用振動数 ^(*3) f ₁ (Hz)
K1	7	側面・並進	1.29×10 ⁶	0.66	4.63×10 ⁵	2.42
K2	7	側面・回転	1.00×10 ⁹	0.01	1.15×10 ⁸	2.42
K3	8	側面・並進	3.42×10 ⁶	0.66	1.23×10 ⁶	2.42
K4	8	側面・回転	2.66×10 ⁹	0.01	3.05×10 ⁸	2.42
K5	9	側面・並進	9.08×10 ⁶	1.21	1.79×10 ⁶	2.42
K6	9	側面・回転	7.16×10 ⁹	0.01	4.16×10 ⁸	2.42
K7	10	側面・並進	4.78×10 ⁶	1.30	8.85×10 ⁵	2.42
K8	10	側面・回転	3.74×10 ⁹	0.01	2.03×10 ⁸	2.42
K9	10	底面・並進	7.72×10 ⁷	0.00	2.89×10 ⁶	2.42
K10	10	底面・回転	8.14×10 ¹⁰	0.00	7.29×10 ⁸	2.42

(*1) K1, K3, K5, K7, K9はkN/m K2, K4, K6, K8, K10はkN・m/rad

(*2) K1, K3, K5, K7, K9はkN・s/m K2, K4, K6, K8, K10はkN・s・m/rad

(*3) f₁は連成系の1次固有振動数

(鉛直方向, Sd-2V)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 K _C (kN/m)	採用振動数 (Hz)	減衰係数 C _C (kN・s/m)	採用振動数 ^(*1) f ₁ (Hz)
K1	10	底面・鉛直	1.28×10 ⁸	0.00	6.68×10 ⁶	3.98

(*1) f₁は連成系の1次固有振動数

第 9.3.1-2 表(3) 地震応答解析に用いる地盤のばね定数と減衰係数

(NS 方向, Sd-3H)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*1) K _C	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*2) C _C	採用振動数 ^(*3) f ₁ (Hz)
K1	7	側面・並進	1.42×10 ⁶	0.69	4.82×10 ⁵	2.37
K2	7	側面・回転	1.10×10 ⁹	0.01	1.20×10 ⁸	2.37
K3	8	側面・並進	3.77×10 ⁶	0.69	1.28×10 ⁶	2.37
K4	8	側面・回転	2.93×10 ⁹	0.01	3.17×10 ⁸	2.37
K5	9	側面・並進	9.15×10 ⁶	1.21	1.80×10 ⁶	2.37
K6	9	側面・回転	7.20×10 ⁹	0.01	4.15×10 ⁸	2.37
K7	10	側面・並進	4.78×10 ⁶	1.30	8.86×10 ⁵	2.37
K8	10	側面・回転	3.74×10 ⁹	0.01	2.02×10 ⁸	2.37
K9	10	底面・並進	7.67×10 ⁷	0.00	2.90×10 ⁶	2.37
K10	10	底面・回転	7.47×10 ¹⁰	0.00	6.26×10 ⁸	2.37

(*1) K1, K3, K5, K7, K9はkN/m K2, K4, K6, K8, K10はkN・m/rad

(*2) K1, K3, K5, K7, K9はkN・s/m K2, K4, K6, K8, K10はkN・s・m/rad

(*3) f₁は連成系の1次固有振動数

(EW 方向, Sd-3H)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*1) K _C	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*2) C _C	採用振動数 ^(*3) f ₁ (Hz)
K1	7	側面・並進	1.42×10 ⁶	0.69	4.83×10 ⁵	2.42
K2	7	側面・回転	1.10×10 ⁹	0.01	1.20×10 ⁸	2.42
K3	8	側面・並進	3.77×10 ⁶	0.69	1.28×10 ⁶	2.42
K4	8	側面・回転	2.93×10 ⁹	0.01	3.18×10 ⁸	2.42
K5	9	側面・並進	9.15×10 ⁶	1.21	1.80×10 ⁶	2.42
K6	9	側面・回転	7.20×10 ⁹	0.01	4.18×10 ⁸	2.42
K7	10	側面・並進	4.78×10 ⁶	1.30	8.85×10 ⁵	2.42
K8	10	側面・回転	3.74×10 ⁹	0.01	2.03×10 ⁸	2.42
K9	10	底面・並進	7.63×10 ⁷	0.00	2.87×10 ⁶	2.42
K10	10	底面・回転	8.05×10 ¹⁰	0.00	7.29×10 ⁸	2.42

(*1) K1, K3, K5, K7, K9はkN/m K2, K4, K6, K8, K10はkN・m/rad

(*2) K1, K3, K5, K7, K9はkN・s/m K2, K4, K6, K8, K10はkN・s・m/rad

(*3) f₁は連成系の1次固有振動数

(鉛直方向, Sd-3V)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 K _C (kN/m)	採用振動数 (Hz)	減衰係数 C _C (kN・s/m)	採用振動数 ^(*1) f ₁ (Hz)
K1	10	底面・鉛直	1.26×10 ⁸	0.00	6.62×10 ⁶	3.96

(*1) f₁は連成系の1次固有振動数

第 9.3.1-2 表(4) 地震応答解析に用いる地盤のばね定数と減衰係数

(NS 方向, Sd-4H)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*1) K _C	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*2) C _C	採用振動数 ^(*3) f ₁ (Hz)
K1	7	側面・並進	1.42×10 ⁶	0.69	4.82×10 ⁵	2.38
K2	7	側面・回転	1.10×10 ⁹	0.01	1.20×10 ⁸	2.38
K3	8	側面・並進	3.77×10 ⁶	0.69	1.28×10 ⁶	2.38
K4	8	側面・回転	2.93×10 ⁹	0.01	3.17×10 ⁸	2.38
K5	9	側面・並進	9.22×10 ⁶	1.21	1.81×10 ⁶	2.38
K6	9	側面・回転	7.26×10 ⁹	0.01	4.17×10 ⁸	2.38
K7	10	側面・並進	4.82×10 ⁶	1.31	8.89×10 ⁵	2.38
K8	10	側面・回転	3.77×10 ⁹	0.01	2.03×10 ⁸	2.38
K9	10	底面・並進	7.82×10 ⁷	0.00	2.93×10 ⁶	2.38
K10	10	底面・回転	7.62×10 ¹⁰	0.00	6.28×10 ⁸	2.38

(*1) K1, K3, K5, K7, K9はkN/m K2, K4, K6, K8, K10はkN・m/rad

(*2) K1, K3, K5, K7, K9はkN・s/m K2, K4, K6, K8, K10はkN・s・m/rad

(*3) f₁は連成系の1次固有振動数

(EW 方向, Sd-4H)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*1) K _C	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*2) C _C	採用振動数 ^(*3) f ₁ (Hz)
K1	7	側面・並進	1.42×10 ⁶	0.69	4.84×10 ⁵	2.44
K2	7	側面・回転	1.10×10 ⁹	0.01	1.20×10 ⁸	2.44
K3	8	側面・並進	3.77×10 ⁶	0.69	1.28×10 ⁶	2.44
K4	8	側面・回転	2.93×10 ⁹	0.01	3.19×10 ⁸	2.44
K5	9	側面・並進	9.22×10 ⁶	1.21	1.81×10 ⁶	2.44
K6	9	側面・回転	7.26×10 ⁹	0.01	4.20×10 ⁸	2.44
K7	10	側面・並進	4.82×10 ⁶	1.31	8.89×10 ⁵	2.44
K8	10	側面・回転	3.77×10 ⁹	0.01	2.05×10 ⁸	2.44
K9	10	底面・並進	7.78×10 ⁷	0.00	2.90×10 ⁶	2.44
K10	10	底面・回転	8.21×10 ¹⁰	0.00	7.35×10 ⁸	2.44

(*1) K1, K3, K5, K7, K9はkN/m K2, K4, K6, K8, K10はkN・m/rad

(*2) K1, K3, K5, K7, K9はkN・s/m K2, K4, K6, K8, K10はkN・s・m/rad

(*3) f₁は連成系の1次固有振動数

(鉛直方向, Sd-4V)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 K _C (kN/m)	採用振動数 (Hz)	減衰係数 C _C (kN・s/m)	採用振動数 ^(*1) f ₁ (Hz)
K1	10	底面・鉛直	1.29×10 ⁸	0.00	6.70×10 ⁶	4.00

(*1) f₁は連成系の1次固有振動数

第 9.3.1-2 表(5) 地震応答解析に用いる地盤のばね定数と減衰係数

(NS 方向, Sd-5H)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*1) K _C	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*2) C _C	採用振動数 ^(*3) f ₁ (Hz)
K1	7	側面・並進	1.42×10 ⁶	0.69	4.82×10 ⁵	2.37
K2	7	側面・回転	1.10×10 ⁹	0.01	1.20×10 ⁸	2.37
K3	8	側面・並進	3.77×10 ⁶	0.69	1.28×10 ⁶	2.37
K4	8	側面・回転	2.93×10 ⁹	0.01	3.17×10 ⁸	2.37
K5	9	側面・並進	9.15×10 ⁶	1.21	1.80×10 ⁶	2.37
K6	9	側面・回転	7.20×10 ⁹	0.01	4.15×10 ⁸	2.37
K7	10	側面・並進	4.78×10 ⁶	1.30	8.86×10 ⁵	2.37
K8	10	側面・回転	3.74×10 ⁹	0.01	2.02×10 ⁸	2.37
K9	10	底面・並進	7.73×10 ⁷	0.00	2.91×10 ⁶	2.37
K10	10	底面・回転	7.56×10 ¹⁰	0.00	6.26×10 ⁸	2.37

(*1) K1, K3, K5, K7, K9はkN/m K2, K4, K6, K8, K10はkN・m/rad

(*2) K1, K3, K5, K7, K9はkN・s/m K2, K4, K6, K8, K10はkN・s・m/rad

(*3) f₁は連成系の1次固有振動数

(EW 方向, Sd-5H)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*1) K _C	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*2) C _C	採用振動数 ^(*3) f ₁ (Hz)
K1	7	側面・並進	1.42×10 ⁶	0.69	4.83×10 ⁵	2.43
K2	7	側面・回転	1.10×10 ⁹	0.01	1.20×10 ⁸	2.43
K3	8	側面・並進	3.77×10 ⁶	0.69	1.28×10 ⁶	2.43
K4	8	側面・回転	2.93×10 ⁹	0.01	3.18×10 ⁸	2.43
K5	9	側面・並進	9.15×10 ⁶	1.21	1.80×10 ⁶	2.43
K6	9	側面・回転	7.20×10 ⁹	0.01	4.18×10 ⁸	2.43
K7	10	側面・並進	4.78×10 ⁶	1.30	8.85×10 ⁵	2.43
K8	10	側面・回転	3.74×10 ⁹	0.01	2.04×10 ⁸	2.43
K9	10	底面・並進	7.69×10 ⁷	0.00	2.88×10 ⁶	2.43
K10	10	底面・回転	8.14×10 ¹⁰	0.00	7.32×10 ⁸	2.43

(*1) K1, K3, K5, K7, K9はkN/m K2, K4, K6, K8, K10はkN・m/rad

(*2) K1, K3, K5, K7, K9はkN・s/m K2, K4, K6, K8, K10はkN・s・m/rad

(*3) f₁は連成系の1次固有振動数

(鉛直方向, Sd-5V)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 K _C (kN/m)	採用振動数 (Hz)	減衰係数 C _C (kN・s/m)	採用振動数 ^(*1) f ₁ (Hz)
K1	10	底面・鉛直	1.28×10 ⁸	0.00	6.67×10 ⁶	3.98

(*1) f₁は連成系の1次固有振動数

第 9.3.1-3 表(1) 固有値（固有周期，固有振動数）および刺激係数
（水平方向）

(NS 方向， Sd-1H)

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数 *	備考
1	0.423	2.36	1.584	地盤建屋連成一次
2	0.186	5.38	-0.692	
3	0.087	11.52	0.066	
4	0.074	13.46	0.062	
5	0.074	13.54	0.039	

(NS 方向， Sd-2H)

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数 *	備考
1	0.423	2.37	1.584	地盤建屋連成一次
2	0.186	5.39	-0.693	
3	0.087	11.52	0.066	
4	0.074	13.46	0.062	
5	0.074	13.54	0.041	

(NS 方向， Sd-3H)

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数 *	備考
1	0.423	2.37	1.584	地盤建屋連成一次
2	0.186	5.37	-0.692	
3	0.087	11.52	0.066	
4	0.074	13.45	0.062	
5	0.074	13.54	0.037	

注*：各モードごとに固有ベクトルの最大値を 1 に基準化して得られる刺激係数を示す。

第 9.3.1-3 表(2) 固有値（固有周期，固有振動数）および刺激係数
（水平方向）

(NS 方向, Sd-4H)

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数 *	備考
1	0.420	2.38	1.585	地盤建屋連成一次
2	0.185	5.41	-0.695	
3	0.087	11.52	0.067	
4	0.074	13.46	0.063	
5	0.074	13.56	0.041	

(NS 方向, Sd-5H)

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数 *	備考
1	0.421	2.37	1.584	地盤建屋連成一次
2	0.186	5.39	-0.693	
3	0.087	11.52	0.066	
4	0.074	13.46	0.062	
5	0.074	13.55	0.038	

注*：各モードごとに固有ベクトルの最大値を 1 に基準化して得られる刺激係数を示す。

第 9.3.1-3 表(3) 固有値（固有周期，固有振動数）および刺激係数
（水平方向）

(EW 方向, Sd-1H)

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数 *	備考
1	0.413	2.42	1.546	地盤建屋連成一次
2	0.185	5.41	-0.614	
3	0.079	12.69	-0.028	
4	0.074	13.53	0.135	
5	0.068	14.65	-0.045	

(EW 方向, Sd-2H)

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数 *	備考
1	0.413	2.42	1.546	地盤建屋連成一次
2	0.184	5.42	-0.614	
3	0.079	12.70	-0.028	
4	0.074	13.53	0.136	
5	0.068	14.65	-0.045	

(EW 方向, Sd-3H)

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数 *	備考
1	0.413	2.42	1.546	地盤建屋連成一次
2	0.185	5.41	-0.614	
3	0.079	12.70	-0.027	
4	0.074	13.52	0.135	
5	0.068	14.64	-0.045	

注*：各モードごとに固有ベクトルの最大値を 1 に基準化して得られる刺激係数を示す。

第 9.3.1-3 表(4) 固有値（固有周期，固有振動数）および刺激係数
（水平方向）

(EW 方向, Sd-4H)

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数 *	備考
1	0.410	2.44	1.547	地盤建屋連成一次
2	0.184	5.45	-0.616	
3	0.079	12.70	-0.028	
4	0.074	13.53	0.137	
5	0.068	14.66	-0.045	

(EW 方向, Sd-5H)

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数 *	備考
1	0.412	2.43	1.546	地盤建屋連成一次
2	0.184	5.43	-0.615	
3	0.079	12.70	-0.028	
4	0.074	13.53	0.135	
5	0.068	14.65	-0.045	

注*：各モードごとに固有ベクトルの最大値を 1 に基準化して得られる刺激係数を示す。

第 9.3.1-4 表(1) 固有値(固有周期, 固有振動数)および刺激係数
(鉛直方向)

(Sd-1V)

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数 *	備考
1	0.275	3.63	8.361	屋根トラス一次
2	0.252	3.97	-7.424	地盤建屋連成一次
3	0.077	12.97	0.091	
4	0.051	19.47	-0.085	
5	0.045	22.19	-0.088	

(Sd-2V)

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数 *	備考
1	0.275	3.63	8.158	屋根トラス一次
2	0.251	3.98	-7.221	地盤建屋連成一次
3	0.077	12.97	0.092	
4	0.051	19.47	-0.085	
5	0.045	22.19	-0.088	

(Sd-3V)

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数 *	備考
1	0.276	3.63	8.570	屋根トラス一次
2	0.253	3.96	-7.632	地盤建屋連成一次
3	0.077	12.97	0.090	
4	0.051	19.47	-0.084	
5	0.045	22.18	-0.087	

注*: 各モードごとに固有ベクトルの最大値を 1 に基準化して得られる刺激係数を示す。

第 9.3.1-4 表(2) 固有値(固有周期, 固有振動数)および刺激係数
(鉛直方向)

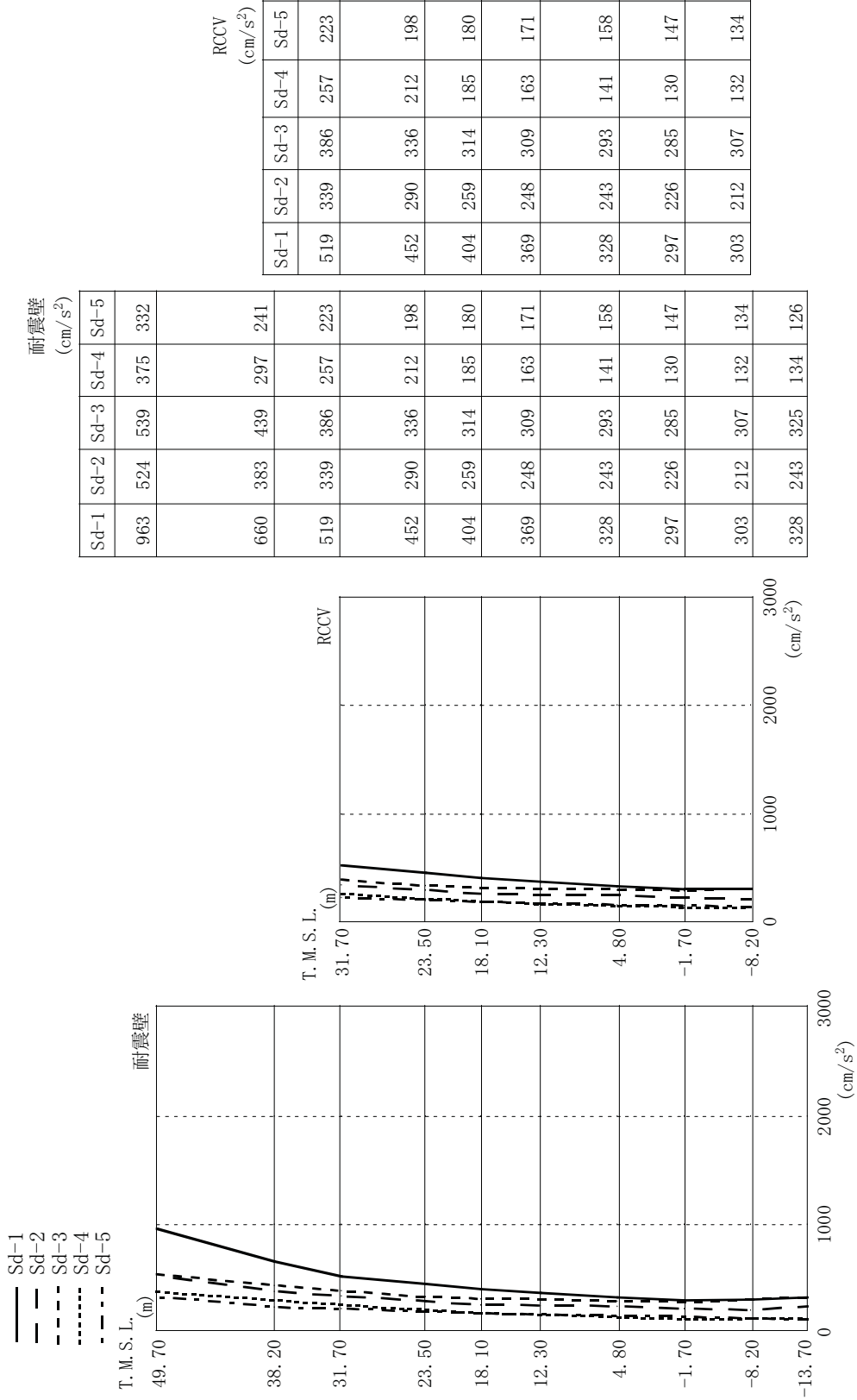
(Sd-4V)

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数 *	備考
1	0.275	3.64	7.960	屋根トラス一次
2	0.250	4.00	-7.024	地盤建屋連成一次
3	0.077	12.97	0.093	
4	0.051	19.47	-0.086	
5	0.045	22.19	-0.089	

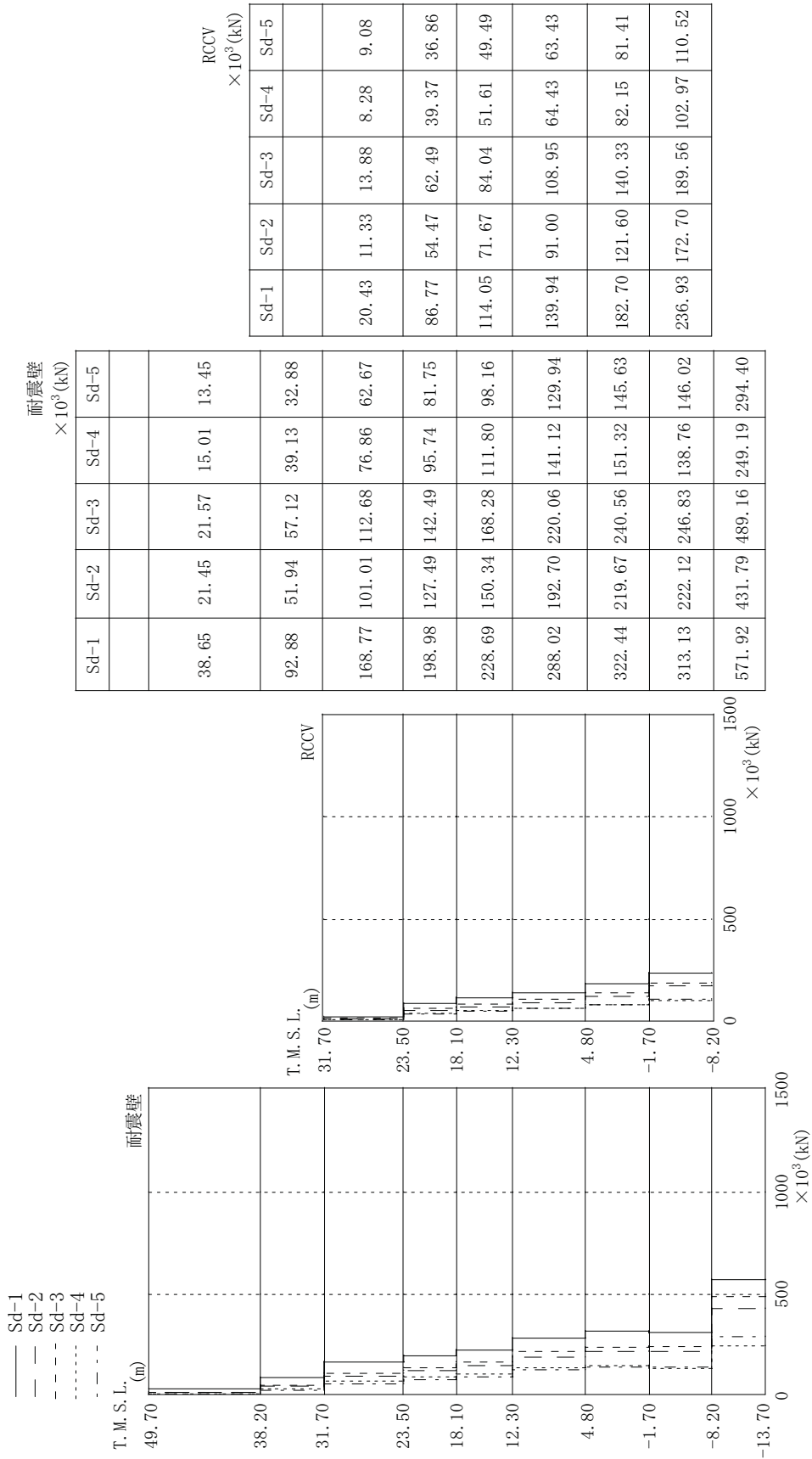
(Sd-5V)

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数 *	備考
1	0.275	3.63	8.158	屋根トラス一次
2	0.251	3.98	-7.221	地盤建屋連成一次
3	0.077	12.97	0.092	
4	0.051	19.47	-0.085	
5	0.045	22.19	-0.088	

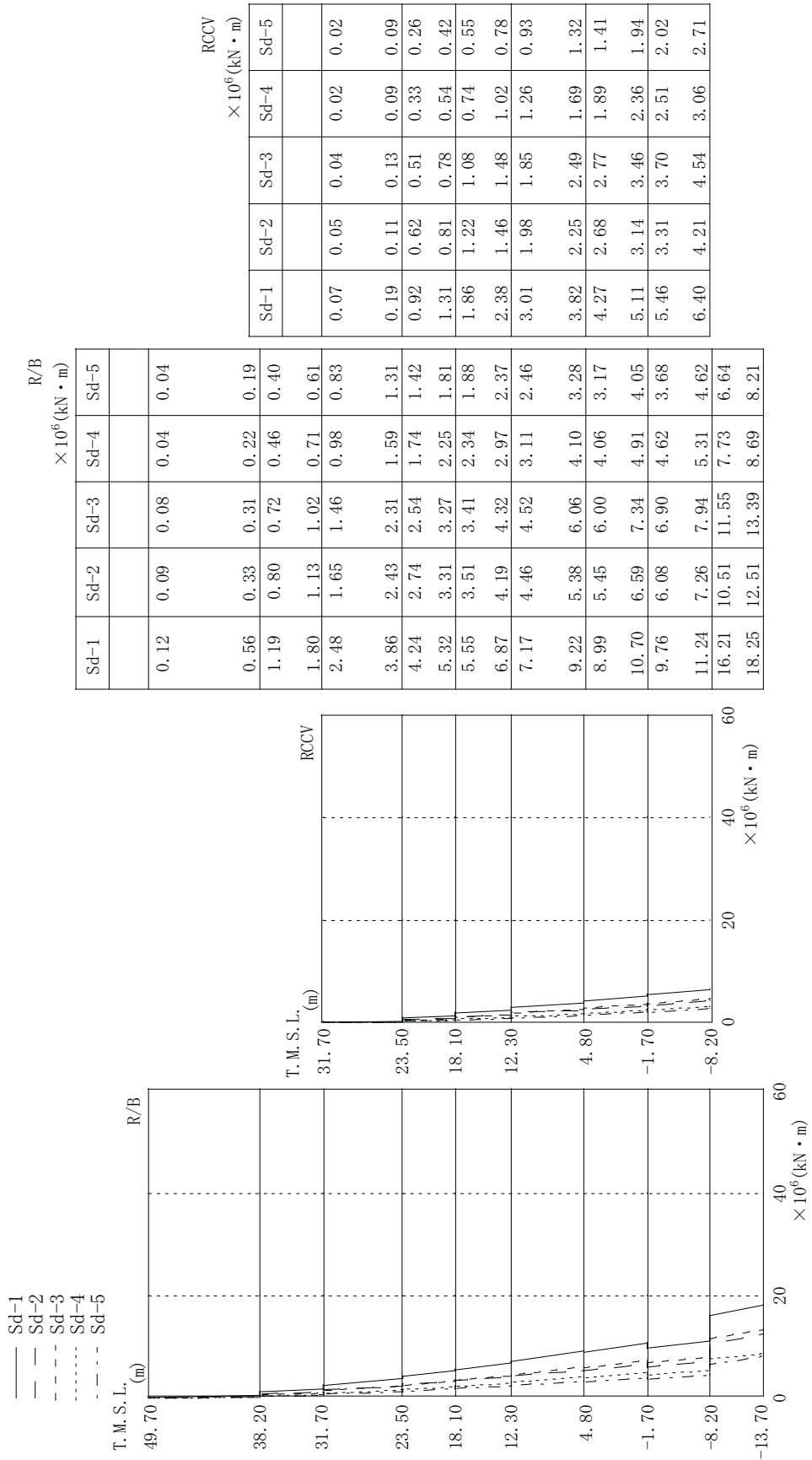
注*: 各モードごとに固有ベクトルの最大値を 1 に基準化して得られる刺激係数を示す。



第 9.3.1-1 图 最大芯筒加速度 (NS 方向)

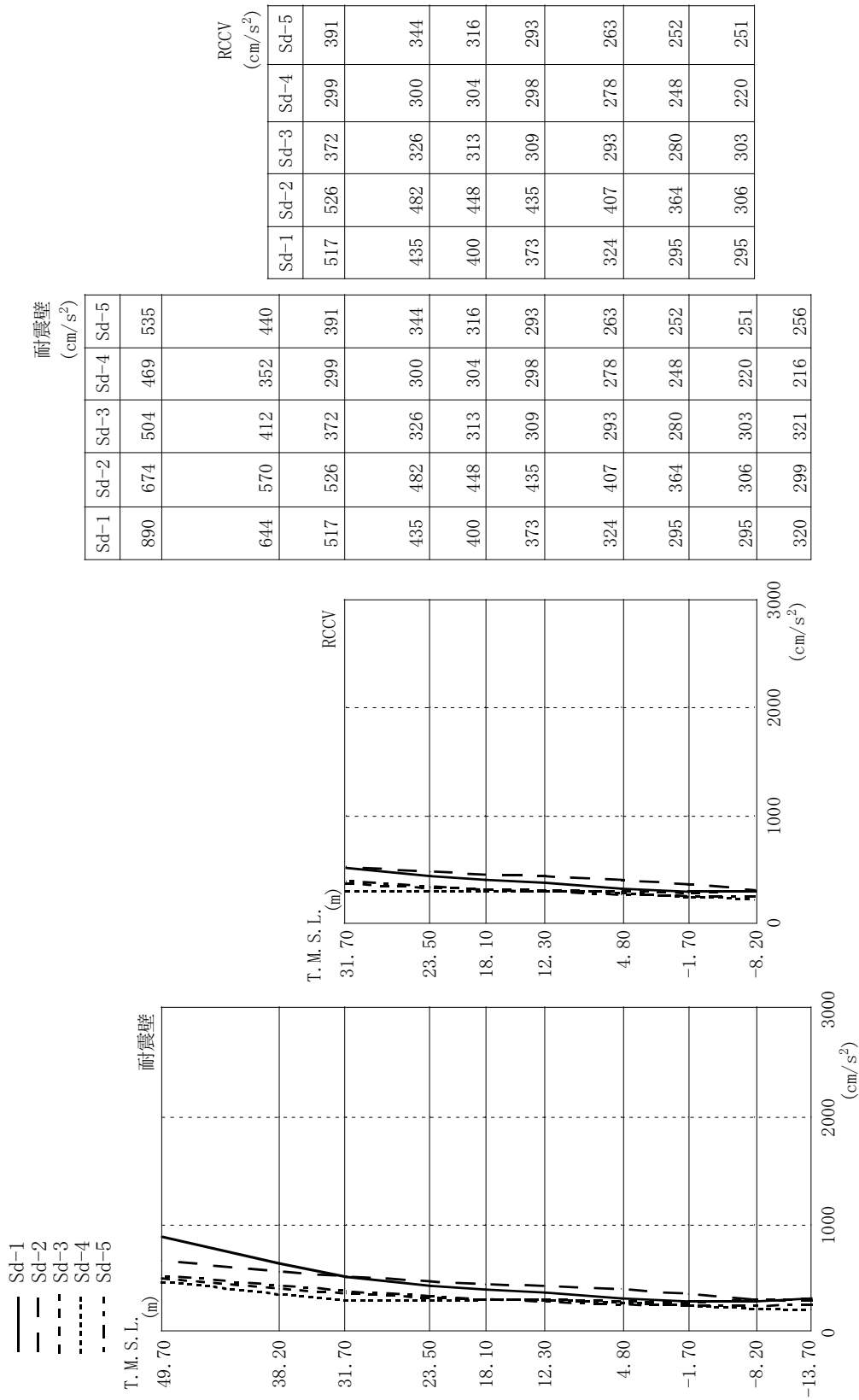


第 9.3.1-2 図 最大応答せん断力 (NS 方向)

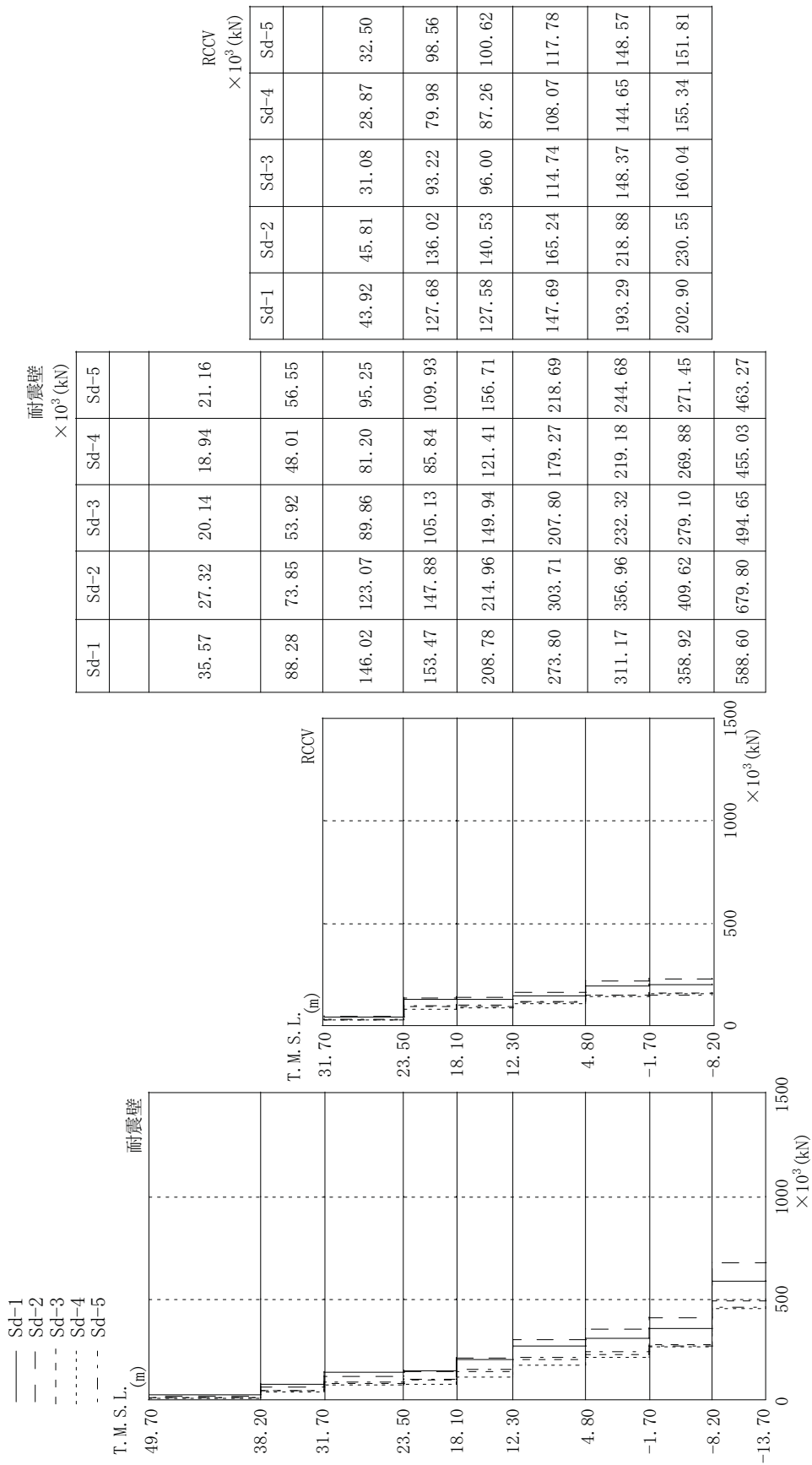


		R/B					RCCV				
		$\times 10^6 (kN \cdot m)$					$\times 10^6 (kN \cdot m)$				
	T. M. S. L. (m)	Sd-1	Sd-2	Sd-3	Sd-4	Sd-5	Sd-1	Sd-2	Sd-3	Sd-4	Sd-5
	49.70										
	38.20	0.12	0.09	0.08	0.04	0.04					
	31.70	0.56	0.33	0.31	0.22	0.19	0.07	0.05	0.04	0.02	0.02
	23.50	1.19	0.80	0.72	0.46	0.40	0.19	0.11	0.13	0.09	0.09
	18.10	1.80	1.13	1.02	0.71	0.61	0.92	0.62	0.51	0.33	0.26
	12.30	2.48	1.65	1.46	0.98	0.83	1.31	0.81	0.78	0.54	0.42
	4.80	3.86	2.43	2.31	1.59	1.31	1.86	1.22	1.08	0.74	0.55
	-1.70	4.24	2.74	2.54	1.74	1.42	2.38	1.46	1.48	1.02	0.78
	-8.20	5.32	3.31	3.27	2.25	1.81	3.01	1.98	1.85	1.26	0.93
		5.55	3.51	3.41	2.34	1.88	3.82	2.25	2.49	1.69	1.32
		6.87	4.19	4.32	2.97	2.37	4.27	2.68	2.77	1.89	1.41
		7.17	4.46	4.52	3.11	2.46	5.11	3.14	3.46	2.36	1.94
		9.22	5.38	6.06	4.10	3.28	5.46	3.31	3.70	2.51	2.02
		8.99	5.45	6.00	4.06	3.17	6.40	4.21	4.54	3.06	2.71
		10.70	6.59	7.34	4.91	4.05					
		9.76	6.08	6.90	4.62	3.68					
		11.24	7.26	7.94	5.31	4.62					
		16.21	10.51	11.55	7.73	6.64					
		18.25	12.51	13.39	8.69	8.21					

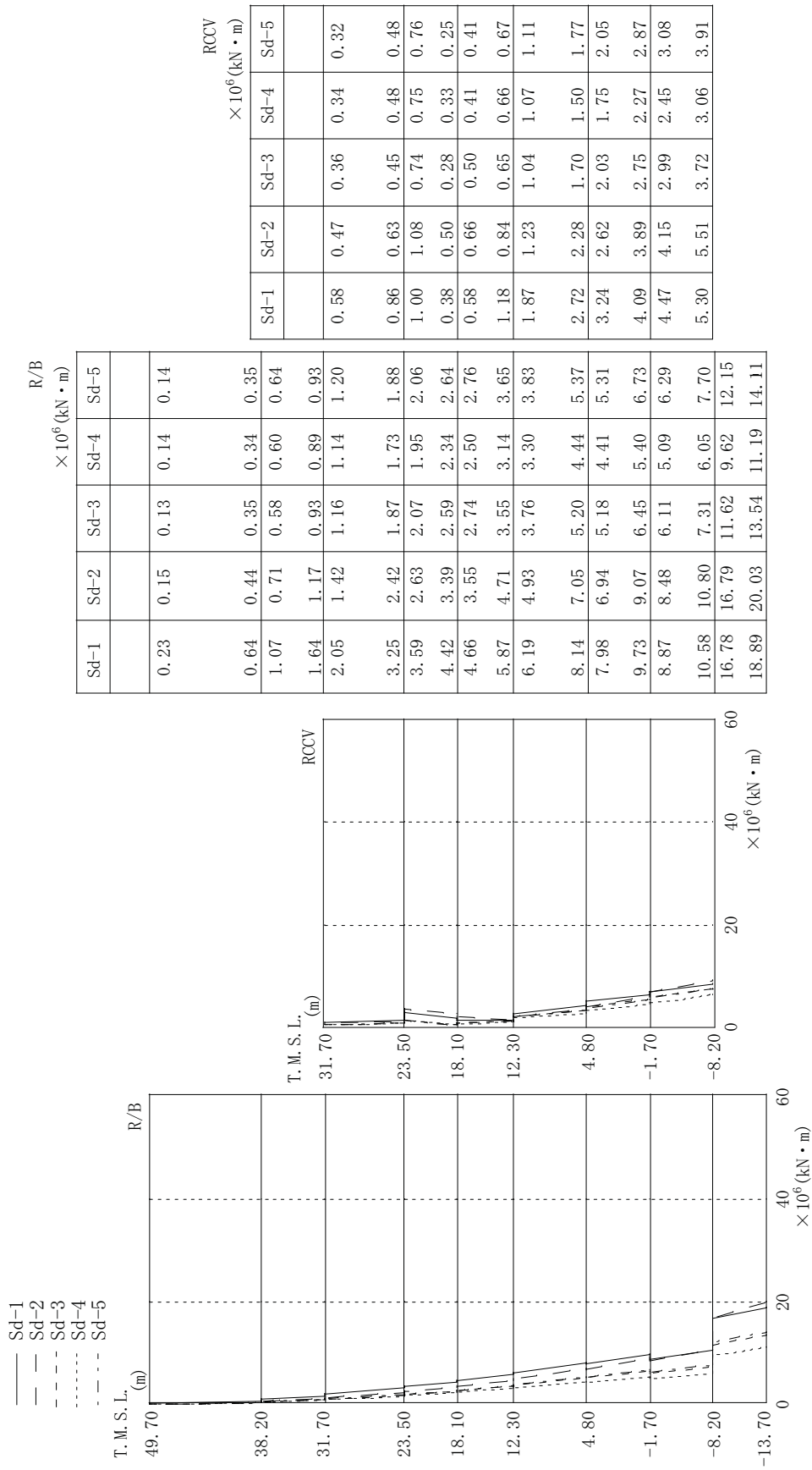
第 9.3.1-3 図 最大応答曲げモーメント (NS 方向)



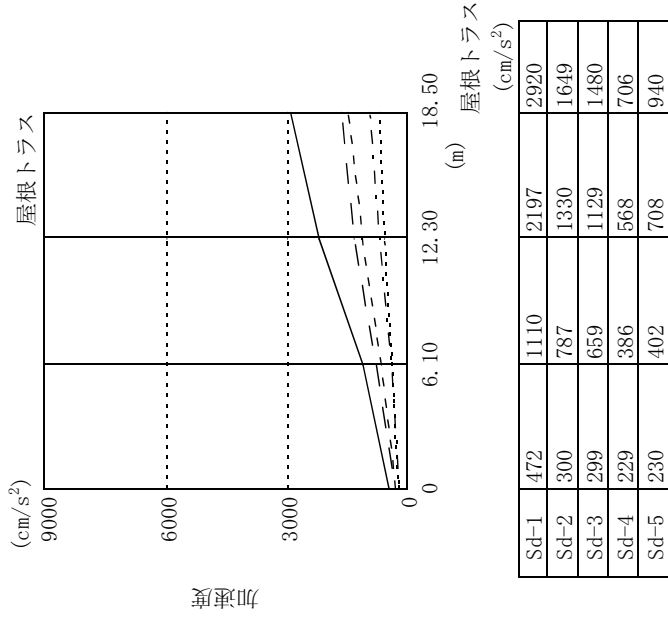
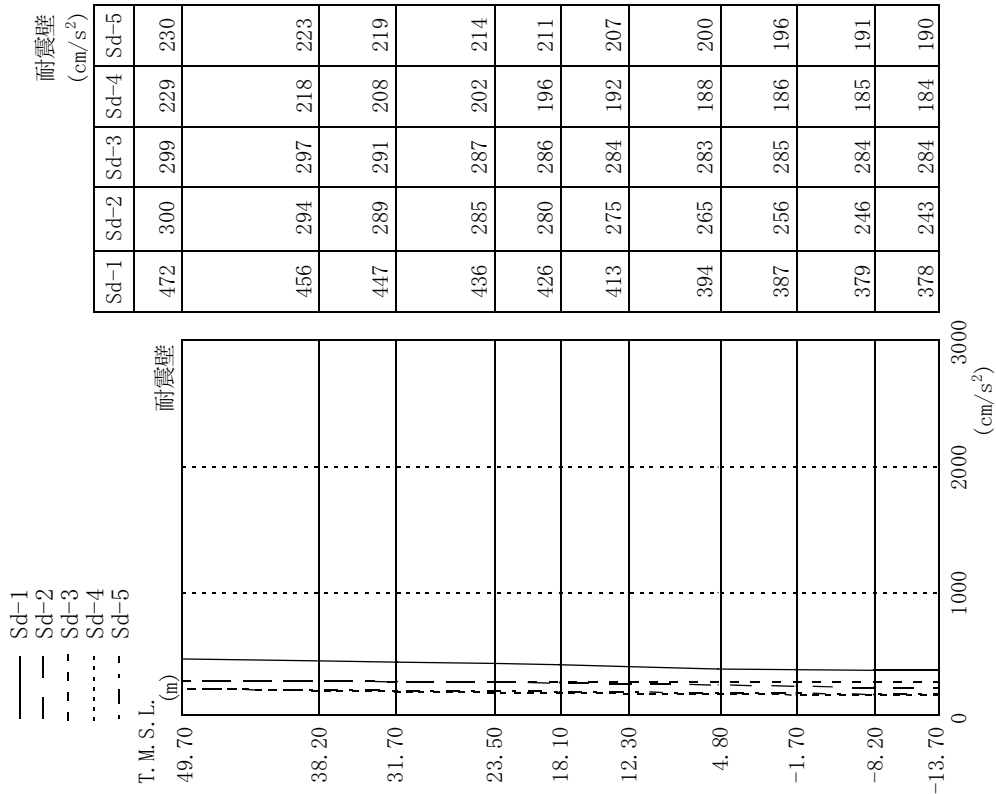
第 9.3.1-4 図 最大応答加速度 (EW 方向)



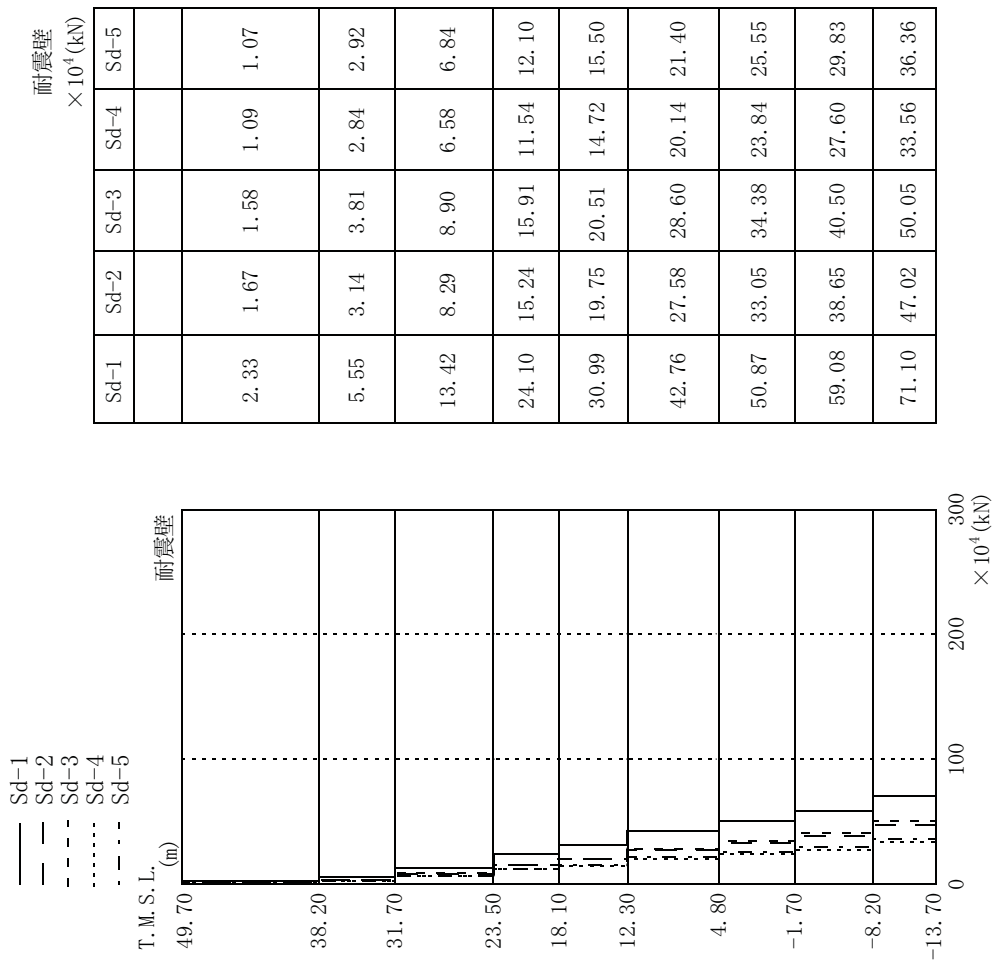
第 9.3.1-5 図 最大応答せん断力 (EW 方向)



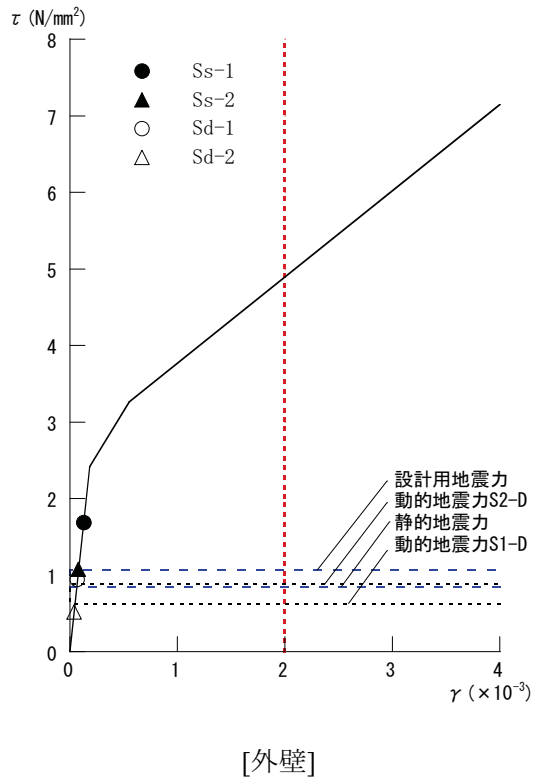
第 9.3.1-6 図 最大応答曲げモーメント (EW 方向)



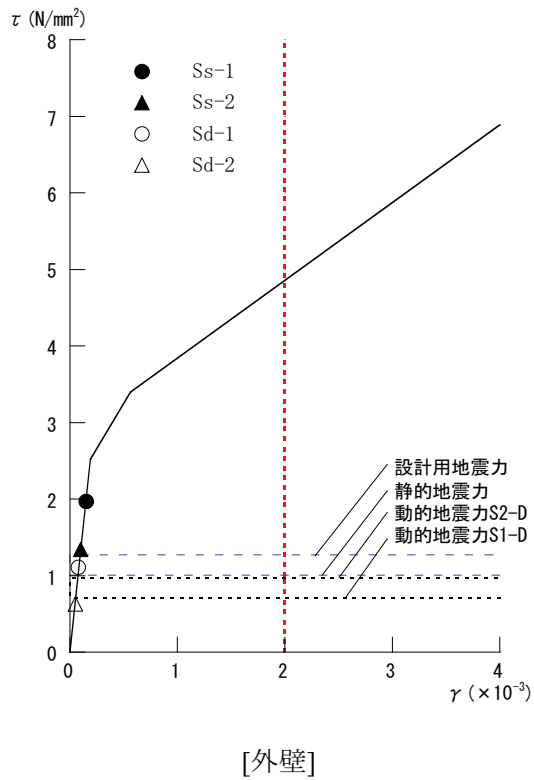
第 9.3.1-7 図 最大応答加速度 (鉛直方向)



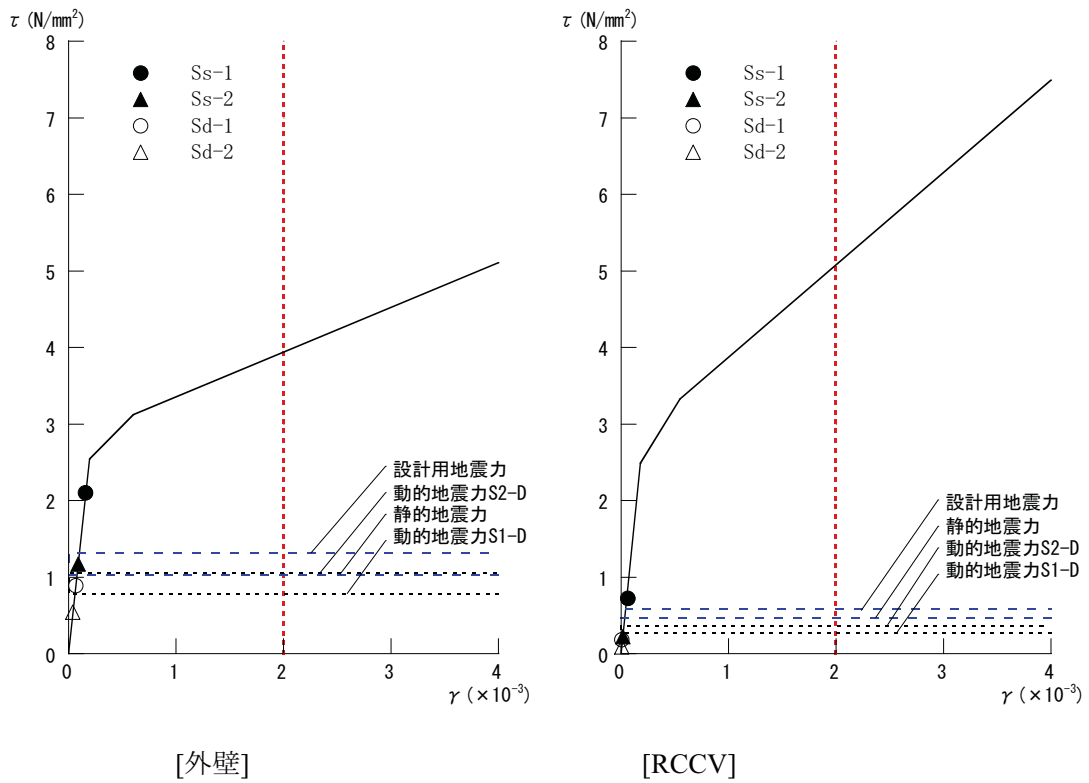
第 9.3.1-8 図 最大応答軸力 (鉛直方向)



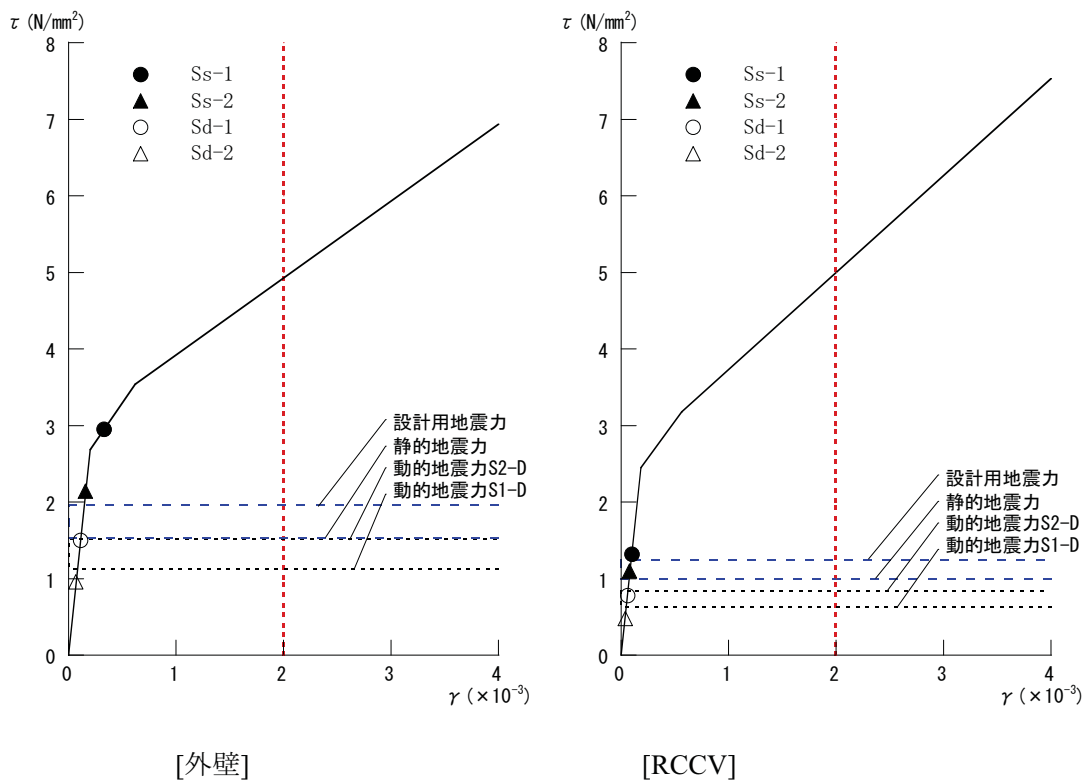
第 9.3.1-9 図(a) せん断スケルトン曲線上の最大応答値(NS 方向,CRF)



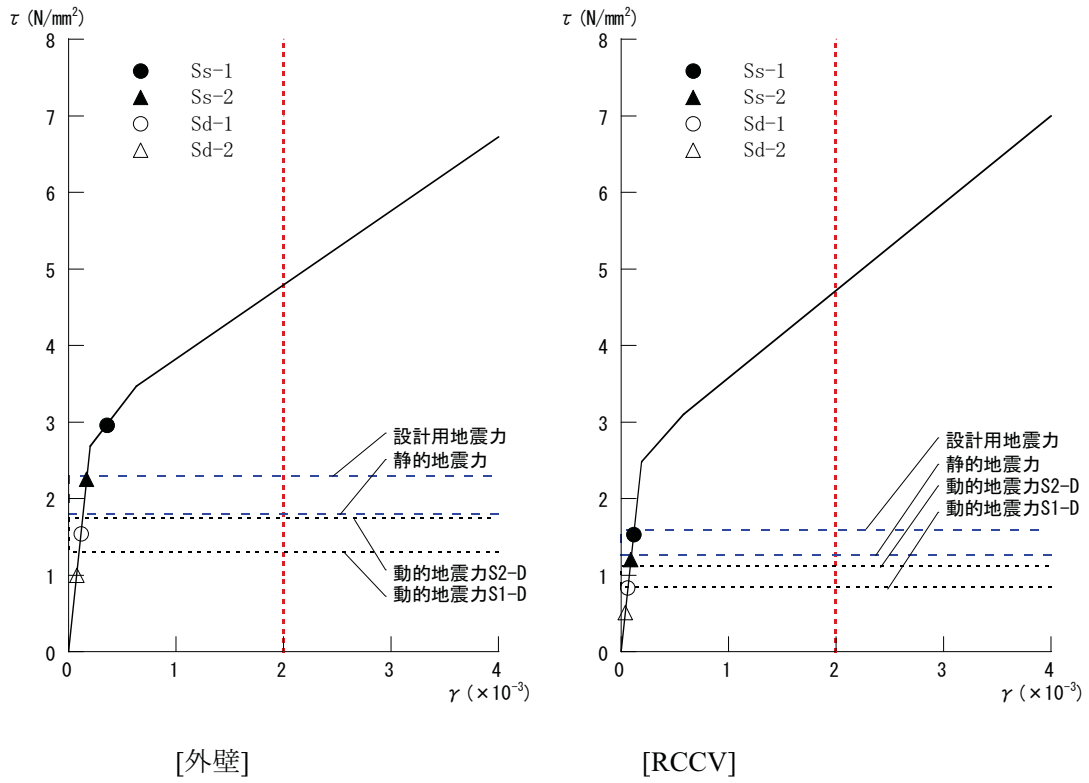
第 9.3.1-9 図(b) せん断スケルトン曲線上の最大応答値(NS 方向,4F)



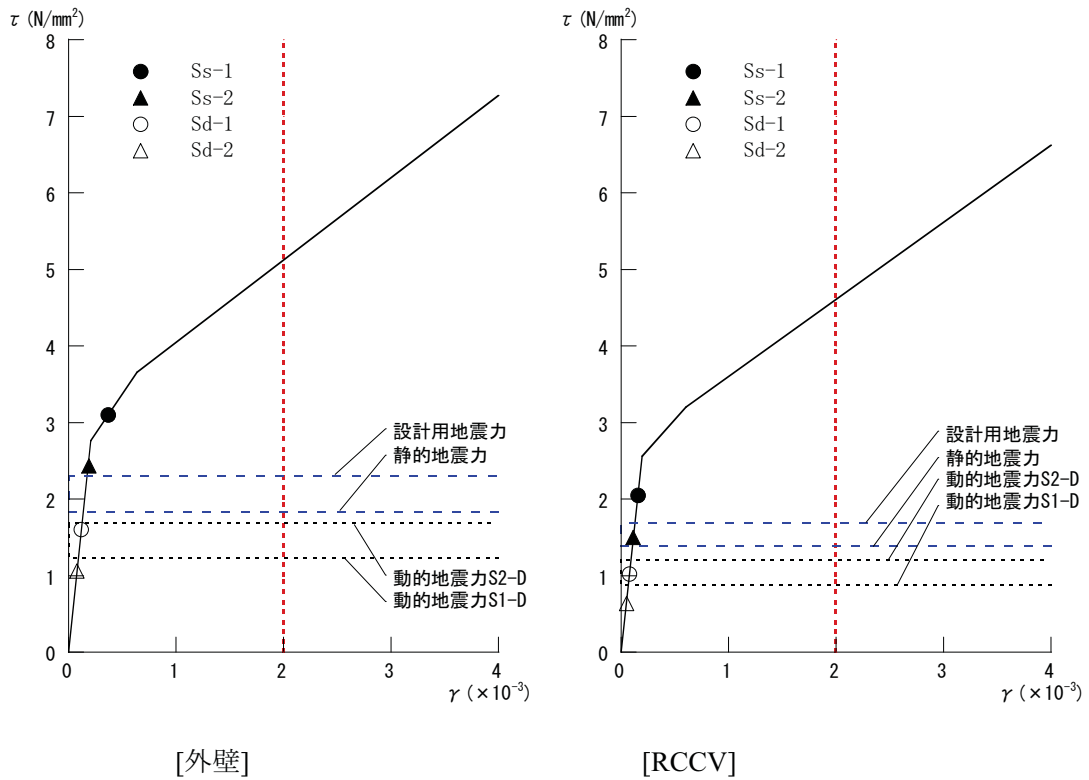
第 9.3.1-9 図(c) せん断スケルトン曲線上の最大応答値(NS 方向,3F)



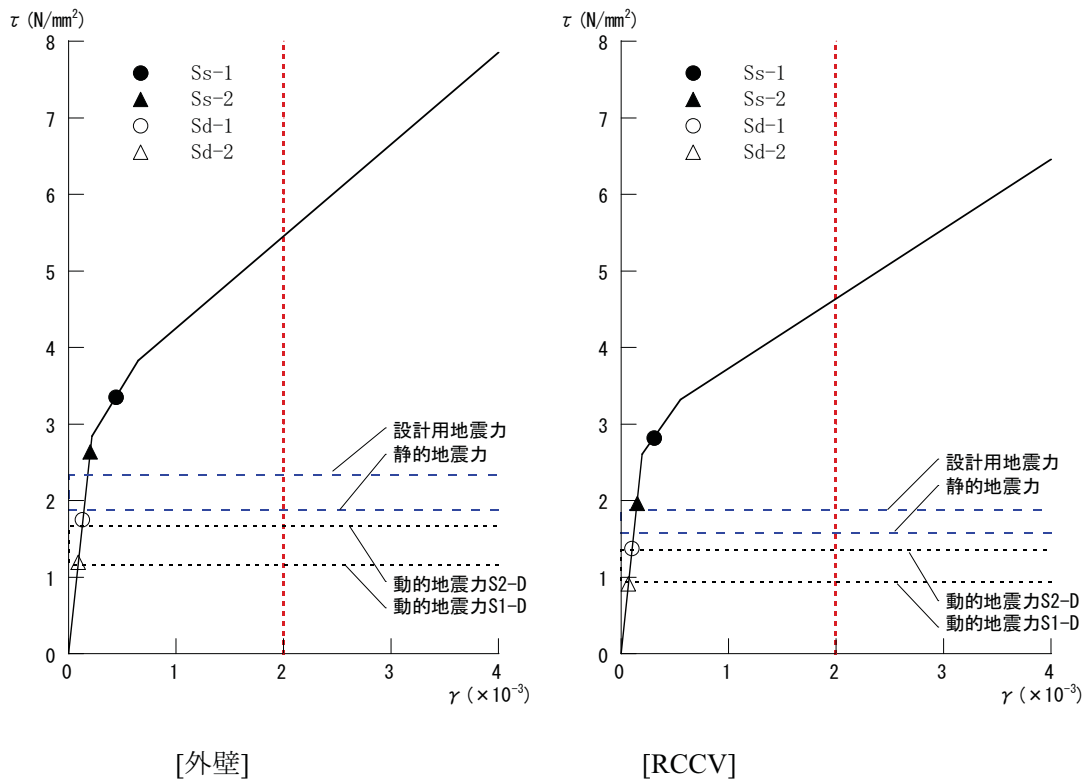
第 9.3.1-9 図(d) せん断スケルトン曲線上の最大応答値(NS 方向,2F)



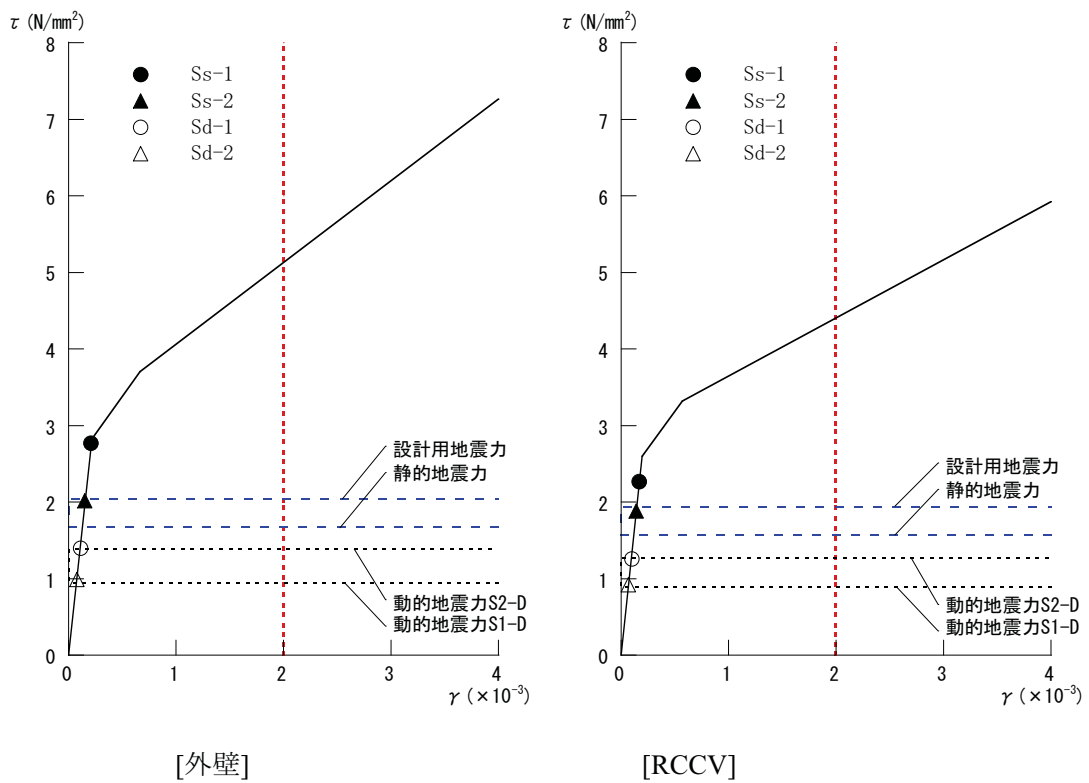
第 9.3.1-9 図(e) せん断スケルトン曲線上の最大応答値(NS 方向,1F)



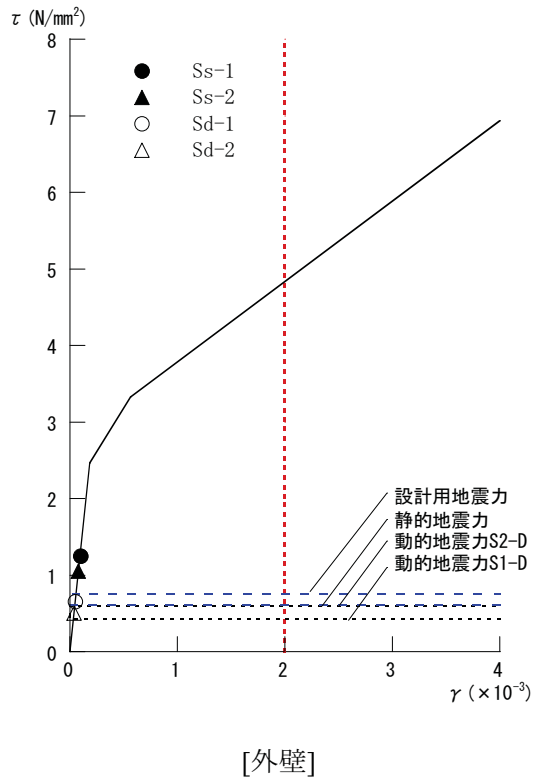
第 9.3.1-9 図(f) せん断スケルトン曲線上の最大応答値(NS 方向,B1F)



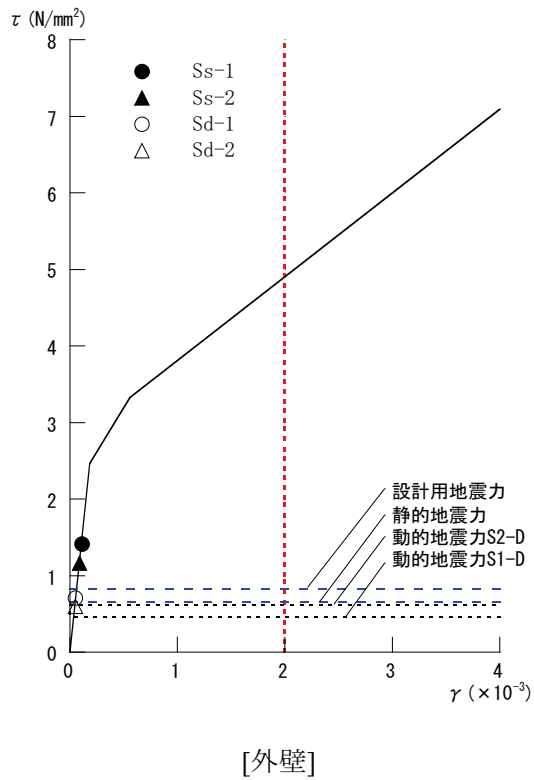
第 9.3.1-9 図(g) せん断スケルトン曲線上の最大応答値(NS 方向,B2F)



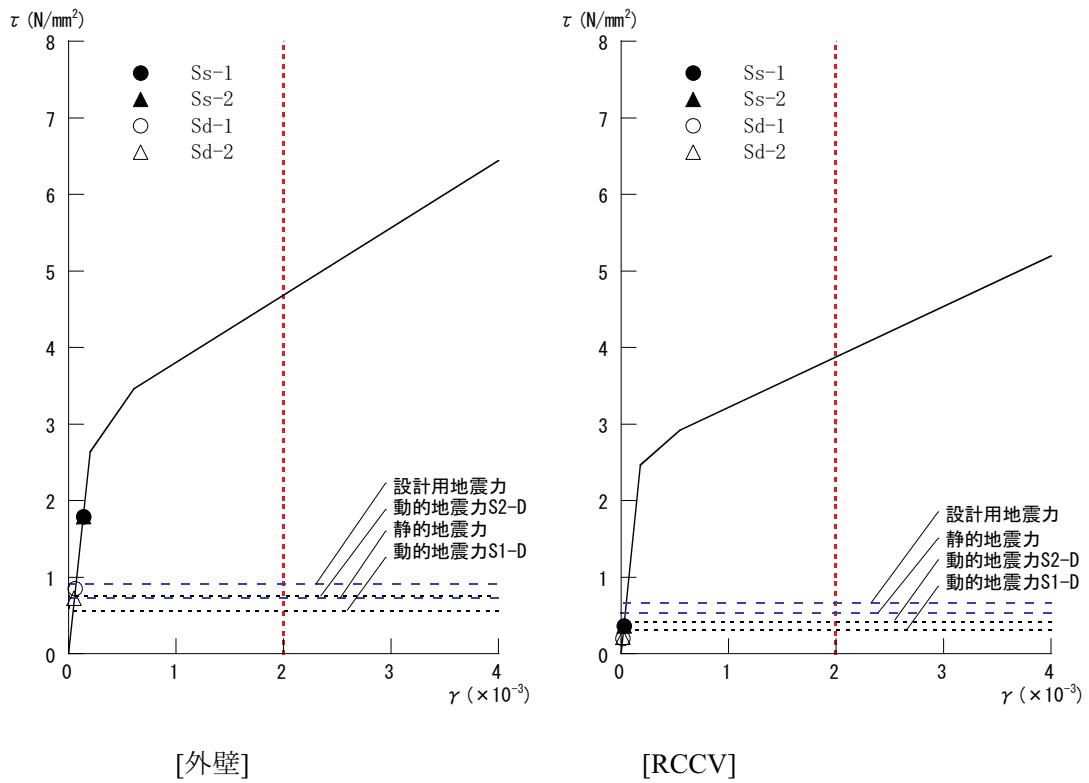
第 9.3.1-9 図(h) せん断スケルトン曲線上の最大応答値(NS 方向,B3F)



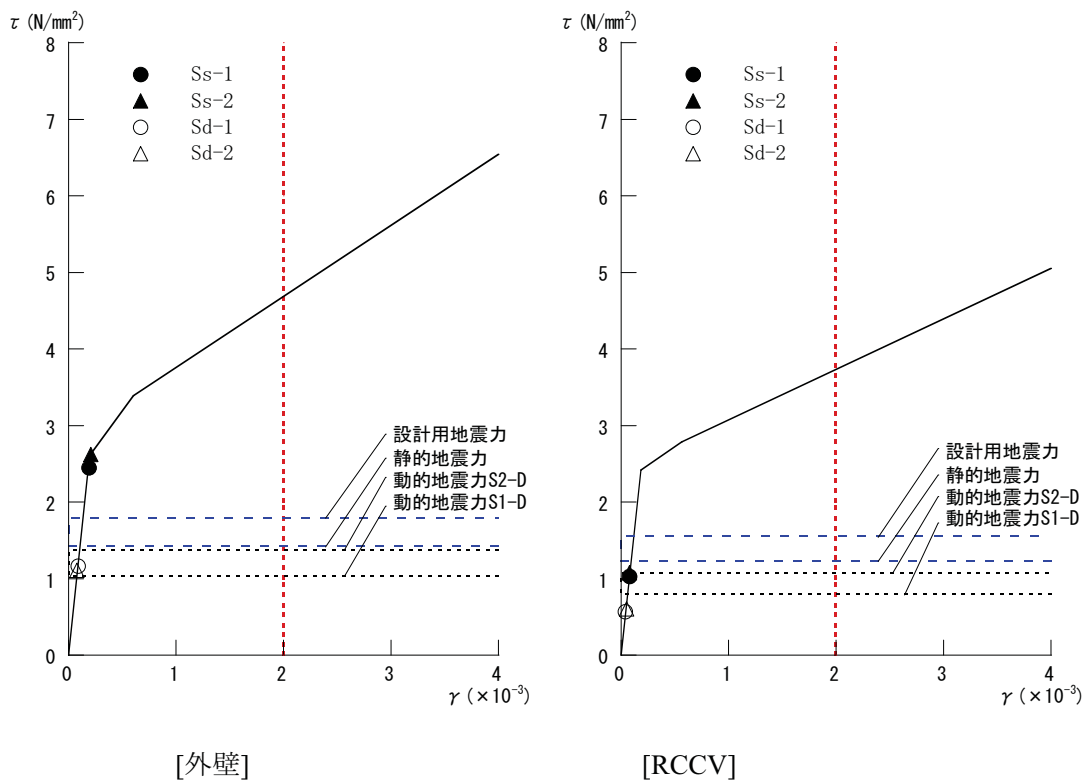
第 9.3.1-10 図(a) せん断スケルトン曲線上の最大応答値(EW 方向,CRF)



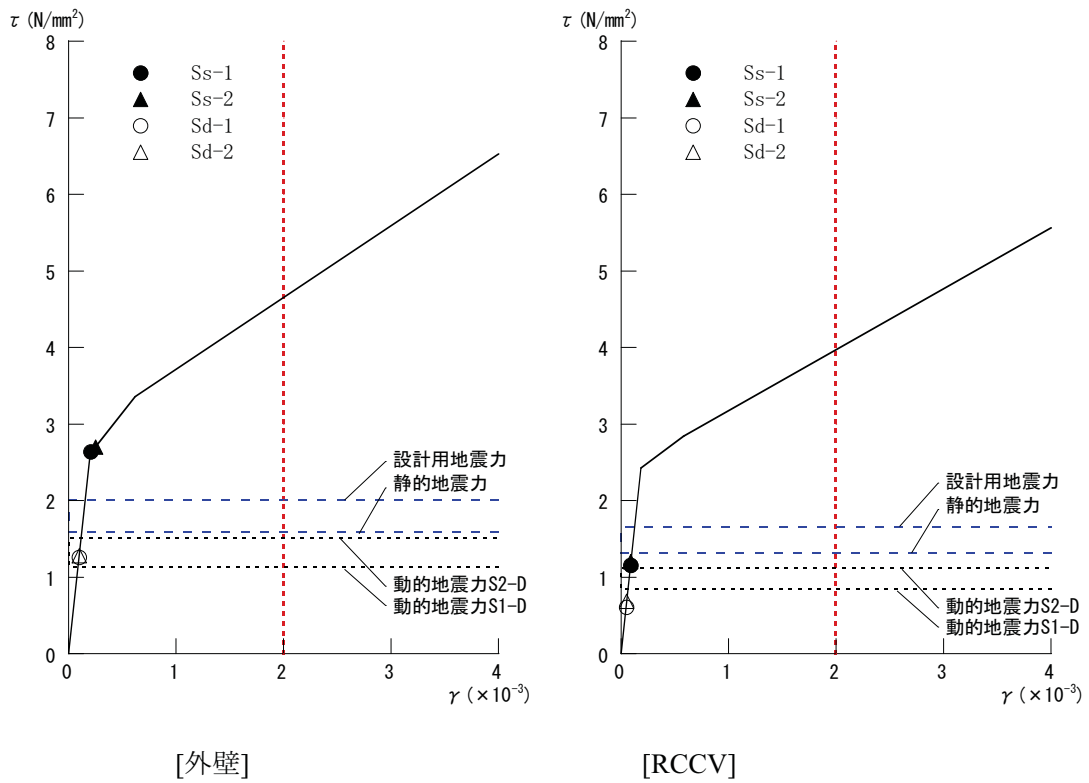
第 9.3.1-10 図(b) せん断スケルトン曲線上の最大応答値(EW 方向,4F)



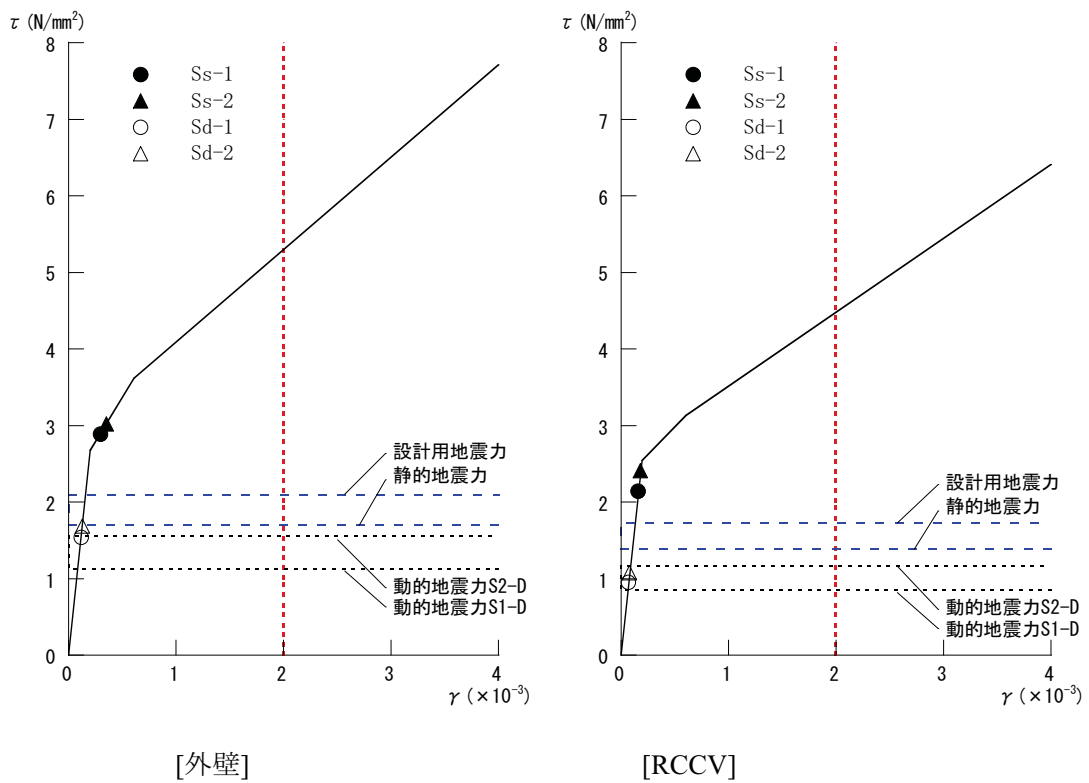
第 9.3.1-10 図(c) せん断スケルトン曲線上の最大応答値(EW 方向,3F)



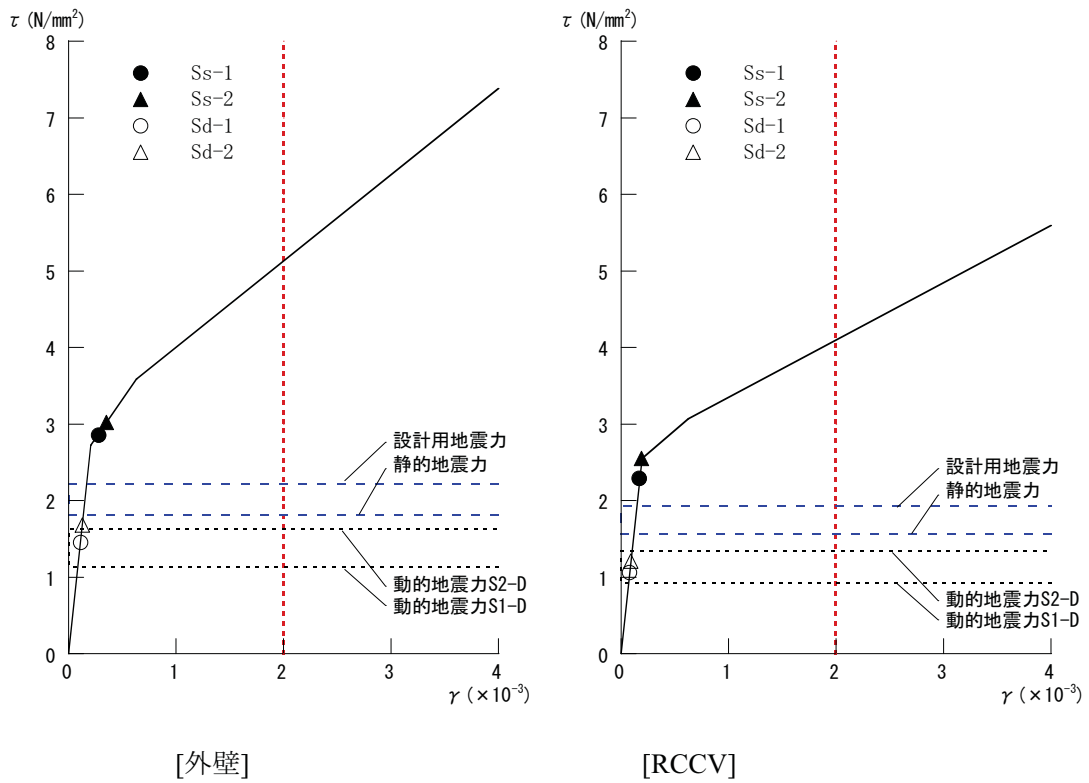
第 9.3.1-10 図(d) せん断スケルトン曲線上の最大応答値(EW 方向,2F)



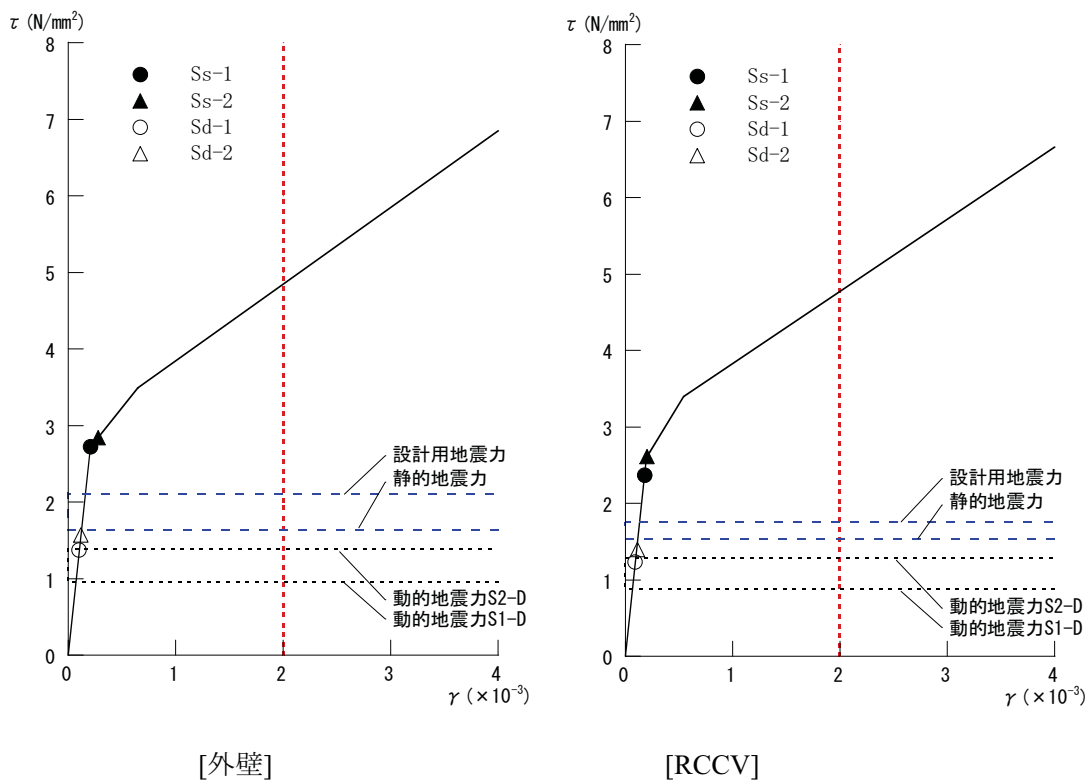
第 9.3.1-10 図(e) せん断スケルトン曲線上の最大応答値(EW 方向,1F)



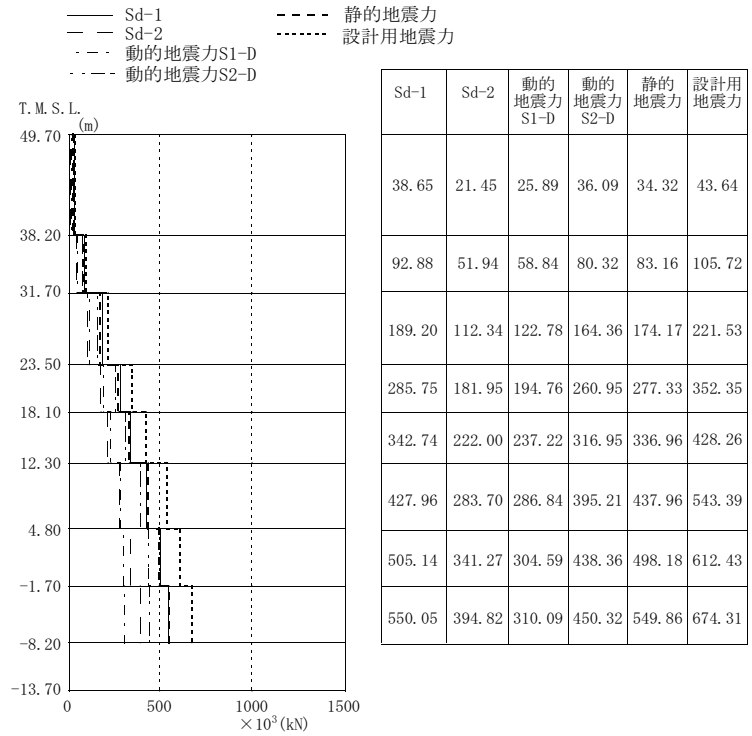
第 9.3.1-10 図(f) せん断スケルトン曲線上の最大応答値(EW 方向,B1F)



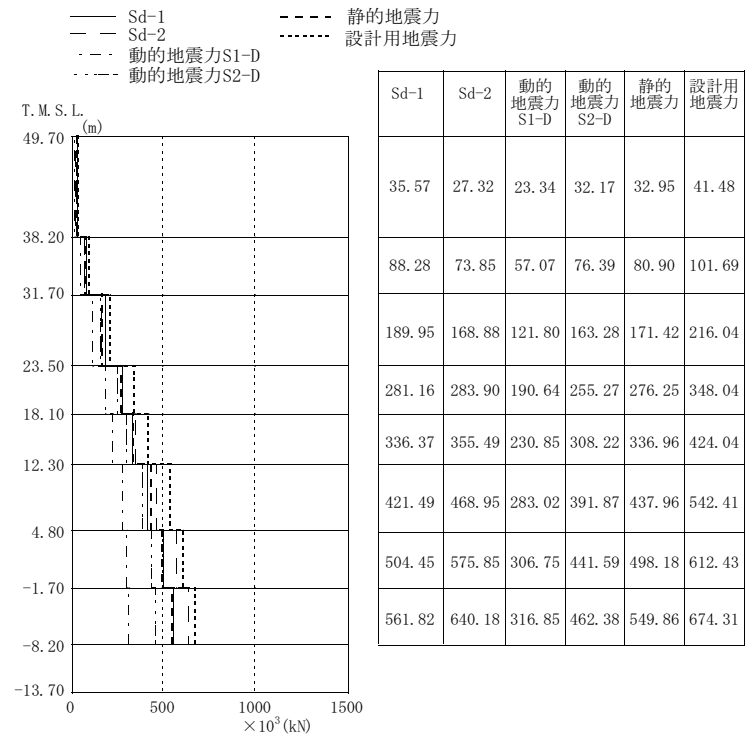
第 9.3.1-10 図(g) せん断スケルトン曲線上の最大応答値(EW 方向,B2F)



第 9.3.1-10 図(h) せん断スケルトン曲線上の最大応答値(EW 方向,B3F)



第 9.3.1-11 図 最大応答せん断力比較 (NS 方向)



第 9.3.1-12 図 最大応答せん断力比較 (EW 方向)

9.4. 機器・配管系の弾性設計用地震動 S_d による評価

9.2 で設定された弾性設計用地震動 S_d と、9.3 で検討された弾性設計用地震動 S_d による原子炉建屋地震応答解析結果を用いて、弾性設計用地震動 S_d に対する機器・配管系の応答に関する検討を行った。

9.4.1. 弾性設計用地震動 S_d による耐震評価条件について

9.2 で設定した弾性設計用地震動 S_d が、機器・配管系に対してどの程度の影響を及ぼすかを把握するために、建設時における静的震度、基準地震動 S_1 および基準地震動 S_2 による耐震性評価条件と、弾性設計用地震動 S_d による耐震性評価条件の比較を行った。

耐震性評価条件には、主に次の3つの条件がある。

地震応答荷重：大型機器地震応答解析により得られる、地震動に対する大型機器（例えば原子炉本体）の地震応答荷重（モーメント，せん断力，軸力等）。原子炉本体や原子炉格納容器，炉内構造物などの大型機器の耐震性評価に用いる。

評価用震度：大型機器地震応答解析や原子炉建屋地震応答解析結果から得られる地震応答加速度に基づき設定されるもの。主に剛な構造の設備の耐震性評価に用いられる。

床応答スペクトル：大型機器地震応答解析や原子炉建屋地震応答解析結果から得られる地震応答加速度に基づき設定されるもの。主に柔な構造の設備の耐震性評価に用いられる。

本検討では、上記の耐震評価用条件を比較することで、弾性設計用地震動 S_d に対する原子炉建屋に設置されている機器の耐震性への影響について、網羅的に把握する。

(1) 大型機器の水平方向応答荷重の比較

代表的な大型機器について下記の地震動等による応答荷重を第 9.4.1-1 表に示す。第 9.4.1-1 表に示す通り、 S_s の 0.5 倍で設定した S_d による応答荷重は、設計時の S_1^* 又は S_2 荷重とほぼ同等の大きさの荷重を与えるものとなっている。

- ・ 基準地震動 S_1 又は静的震度による荷重の最大値（以下、 S_1^* という）
- ・ 基準地震動 S_2 （以下、 S_2 という）
- ・ 弾性設計用地震動 S_d （以下、 S_d という）
- ・ 基準地震動 S_s （以下、 S_s という）

第 9.4.1-1 表 大型機器の地震応答荷重

水平方向評価用地震荷重		S_1^*	S_2	S_d	S_s
原子炉圧力容器スカート	モーメント (kN・m)	50,112	44,130	52,800	98,800
	せん断力 (kN)	9,248	7,188	10,100	19,200
遮へい壁	モーメント (kN・m)	27,262	27,753	36,000	67,800
	せん断力 (kN)	5,580	5,502	7,160	13,500
原子炉本体基礎	モーメント (kN・m)	583,496	518,772	463,000	1,070,000
	せん断力 (kN)	30,106	26,380	25,600	57,300

<p><参考>S クラス施設に対する静的地震力 建物・構築物：3.0C_1により算定 機器・配管系：3.6C_1により算定</p>

(2) 水平方向評価用震度の比較

建屋床に設置されている設備に適用する評価用震度について(1)と同様のケースで比較したものを第 9.4.1-2 表に示す。S_s の 0.5 倍で設定した S_d による評価用震度は、設計時の S₁* 又は S₂ とほぼ同等の大きさとなっている。

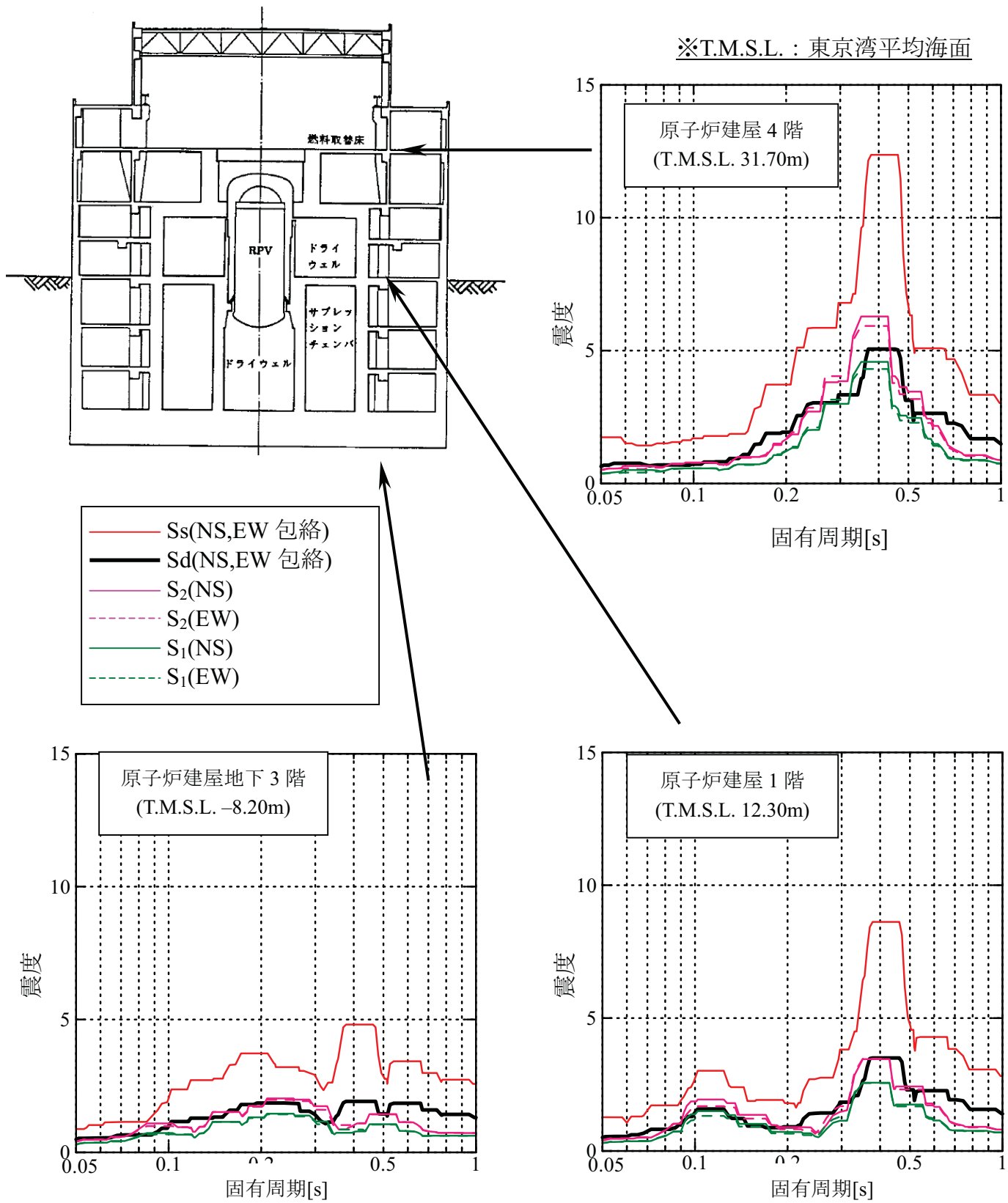
第 9.4.1-2 表 原子炉建屋設置機器の評価用震度

標高 T.M.S.L. (m)	震 度			
	S ₁ *	S ₂	S _d	S _s
49.7	0.91	0.97	1.18	2.10
38.2	0.78	0.67	0.81	1.56
31.7	0.69	0.58	0.65	1.31
23.5	0.62	0.51	0.59	1.16
18.1	0.58	0.47	0.55	1.11
12.3	0.44	0.42	0.54	1.07
4.8	0.36	0.34	0.50	0.97
-1.7	0.29	0.33	0.45	1.00
-8.2	0.25	0.33	0.38	0.91

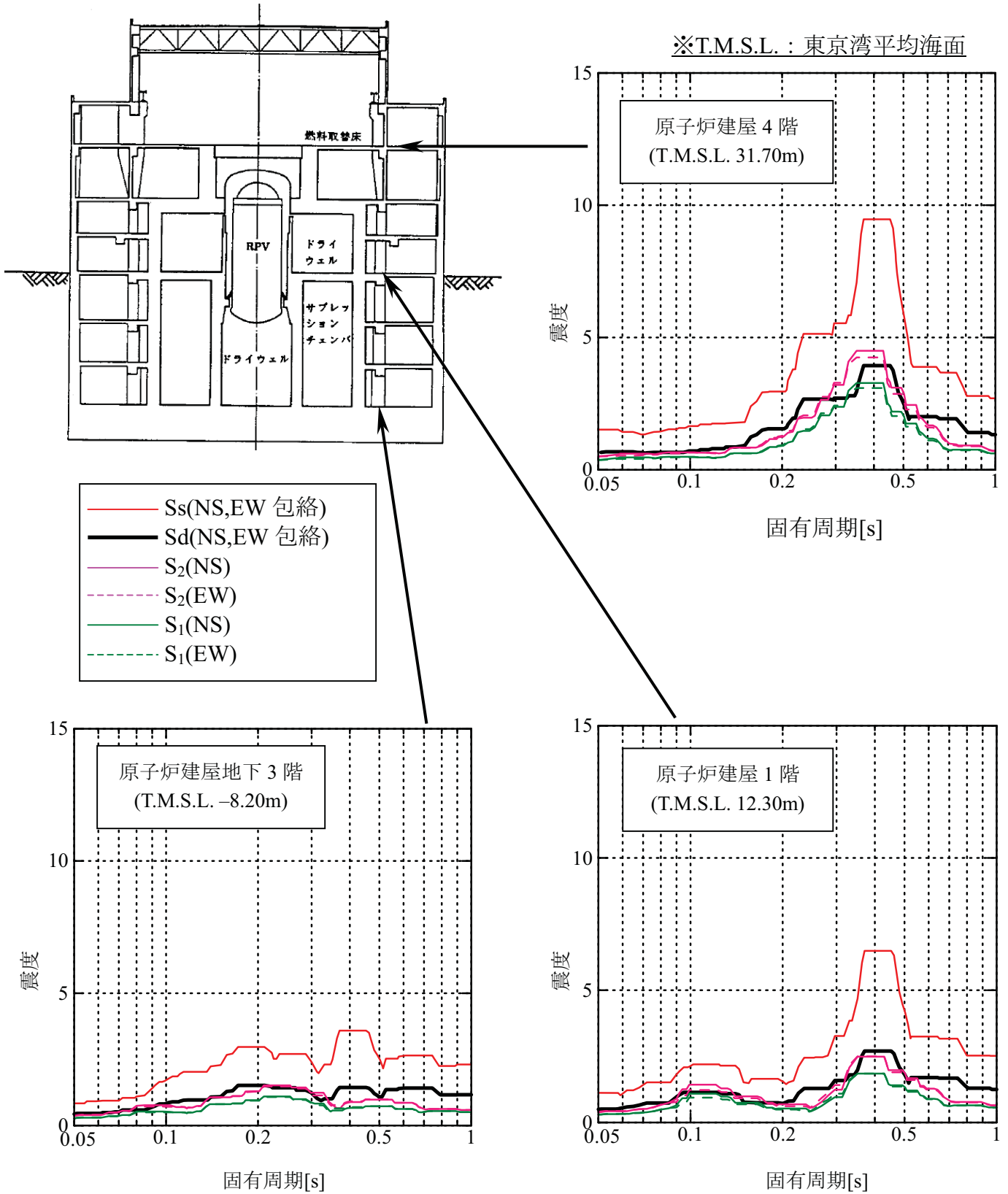
(3) 床応答スペクトル（水平方向）の比較

原子炉建屋の代表床における機器・配管系評価用の床応答スペクトルを(1)と同様のケースで比較したものを次頁の第 9.4.1-1 図および第 9.4.1-2 図に示す。なお、比較に用いた床応答スペクトルは、溶接構造物に適用する減衰定数 1%（第 9.4.1-1 図）と配管系に適用する減衰定数 2%（第 9.4.1-2 図）とした。

S_s の 0.5 倍で設定した S_d による評価用床応答スペクトルは、設計時の S₁ 又は S₂ とほぼ同等の大きさとなっている。



第 9.4.1-1 図 原子炉建屋水平方向床応答スペクトル (減衰 1%, 水平)



第 9.4.1-2 図 原子炉建屋水平方向床応答スペクトル (減衰 2%, 水平)

9.4.2. 弾性設計用地震動 S_d に対する重要な機器・配管系の耐震性評価結果

7号機の原子炉施設のうち、主要でかつ重要な設備について、弾性設計用地震動 S_d に対する耐震性の評価を行った。評価対象設備は、原子炉を「止める」「冷やす」「閉じ込める」という観点から、代表的な設備を選定した。耐震性の評価に当たっては、構造強度評価を行うこととした。また、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」では、弾性設計用地震動 S_d に対して施設が概ね弾性状態にあることとしていることから、本検討における評価基準値はⅢAS相当の値とした。

第 9.4.2-1 表に示したとおり、今回の評価対象機器は、弾性設計用地震動 S_d に対して、発生値がⅢAS 相当の許容基準値を下回ることを確認した。なお、今回の評価対象機器は、地震応答荷重を用いて強度評価を行う設備、評価用震度を用いて強度評価を行う設備、床応答スペクトルを用いて強度評価を行う設備のそれぞれの設備について、弾性設計用地震動 S_d に対する耐震性の確保が確認できていることを付け加えておく。

第 9.4.2-1 表 弾性設計用地震動 S_d による主要設備の耐震性評価結果*

機能	評価対象設備	評価部位	応力分類	発生値 (S_d)	評価基準値 (IIIAS)	評価条件 (※)	評価方法 (注)
止める	炉心支持構造物	シュラウドサポート	一次一般膜	50	246	荷重	B
冷やす	残留熱除去ポンプ	基礎ボルト	せん断	10	350	震度	A2
	残留熱除去系配管	配管	一次	135	274	FRS	B
閉じ込める	原子炉圧力容器	基礎ボルト	引張	140	499	荷重	B
	主蒸気系配管	配管	一次	158	281	FRS	B
	原子炉格納容器	サプレッションチェンバ出入口	せん断	14	137	震度	B

※評価条件における「荷重」は、大型機器地震応答解析結果から得られる荷重に基づき評価したものを示す。
 ※評価条件における「震度」は、原子炉建屋や大型機器の地震応答解析結果から得られる震度に基づき評価したものを示す。

※評価条件における「FRS」は、原子炉建屋や大型機器の地震応答解析結果から得られる床応答スペクトルに基づき評価したものを示す。

注：評価方法については、第7章の第7.5.1-1表における評価方法の凡例と同様である。

A1：応答倍率法において、基準地震動 S_s による地震力と既往評価の地震力との応答比を用いた評価法

A2：応答倍率法において、基準地震動 S_s による床応答スペクトル等と、既往評価で用いた床応答スペクトル等から水平加速度と鉛直加速度の比をそれぞれ求め、大きい方の値を用いた評価方法

B：詳細評価（スペクトルモーダル解析法等による評価）

*弾性設計用地震動 S_d によるものと静的地震力によるものの包絡条件で本評価を行った。

9.5. まとめ

本検討で定めた弾性設計用地震動 S_d は、原子炉建屋および機器・配管系に対して概ね従前の基準地震動 S_1 と同等の耐震評価条件を与えることを確認した。また、主要な設備に対して弾性設計用地震動 S_d に対する耐震性評価を行ったところ、すべての評価対象設備の発生値が評価基準値を下回ることを確認した。

なお、主要な設備には、地震応答荷重、評価用震度および床応答スペクトルを用いる評価が網羅されていたが、そのいずれにおいても、評価基準値を下回る評価結果が得られた。

10. 地震随件事象に対する考慮（周辺斜面の安定性）

【目 次】

10.1. 評価方針	10-1
10.2. 7号機周辺の状況	10-1
10.3. 参考文献	10-1

10. 地震随件事象の考慮（周辺斜面の安定性）

10.1. 評価方針

耐震安全上重要な機器・配管系を内包する建物・構築物（以下「対象施設」という）の周辺斜面が施設の安全機能に重大な影響を与えるおそれがないことについて、以下により評価する。

対象施設と周辺斜面の離間距離に基づき、地震時における安定性評価の対象とすべき斜面の有無を確認する。安定性評価の対象とすべき斜面は、「原子力発電耐震設計技術指針 JEAG4601-1987」⁽¹⁾ に従い、斜面法尻と対象施設の離間距離が約 50m 以内あるいは斜面高さの約 1.4 倍以内の斜面とする。安定性評価の対象とすべき斜面がある場合は、基準地震動 S_s による地震力に対して、当該斜面が施設の安全機能に重大な影響を与えるおそれがないことを確認する。

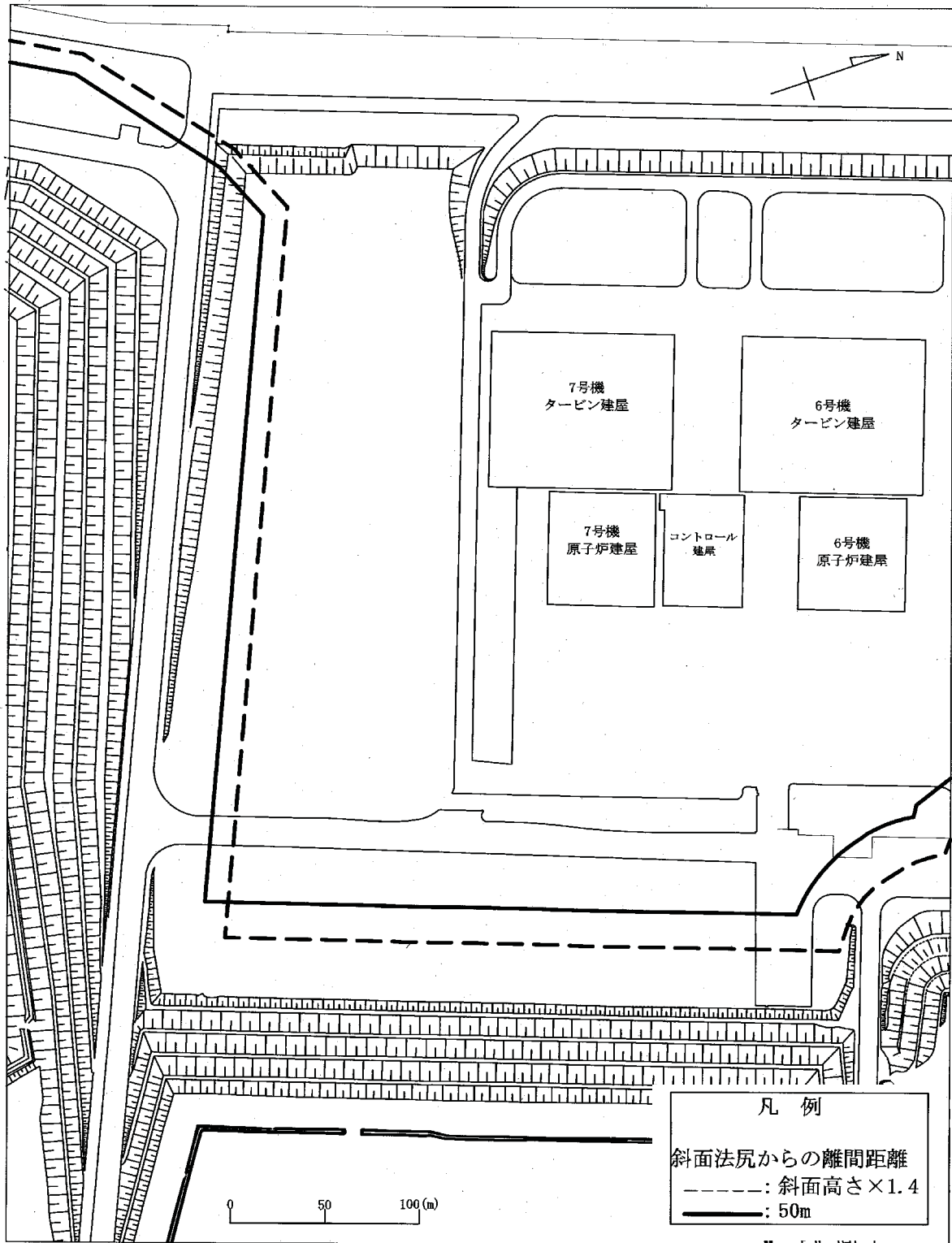
10.2. 7号機周辺の状況

第 10.2-1 図に 7 号機敷地周辺平面図を示す。同図に斜面法尻から 50m の範囲および斜面高さの 1.4 倍の範囲を示す。

第 10.2-1 図より 7 号機の施設の周辺には安定性評価の対象とすべき斜面が無いことを確認した。

10.3. 参考文献

- (1) 「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987」 社団法人 日本電気協会 電気技術基準調査委員会, 89p, 170p, 184p, 1987



第 10.2-1 図 7 号機敷地周辺平面図

1 1 . 地震随件事象に対する考慮
(津波に対する安全性)

【目 次】

11.1. 評価方針	11-1
11.2. 評価方法	11-1
11.3. 津波の想定及び数値シミュレーション	11-1
11.3.1 既往津波の検討	11-2
11.3.2 海域活断層に想定される地震に伴う津波の検討	11-5
11.3.3 日本海東縁部に想定される地震に伴う津波の検討	11-6
11.4. 津波に対する安全性の評価	11-7
11.4.1 津波水位の評価	11-8
11.4.2 津波に対する安全性の評価	11-8
11.5. 二次的な影響に対する評価	11-10
11.5.1 砂移動に対する評価	11-10
11.5.2 漂流物に対する評価	11-11
11.6. 評価結果	11-12
11.7. 参考文献	11-12

【参考資料】

- 参考資料 11.1 日本海東縁部の地震活動領域のうち，新潟～山形沖の領域を詳細パラメータスタディの対象とするものの妥当性について
- 参考資料 11.2 日本海東縁部の地震活動域における基準断層モデルの設定について
- 参考資料 11.3 浮遊砂濃度の上限値 5%による砂移動解析

11. 地震随件事象に対する考慮（津波に対する安全性）

11.1. 評価方針

施設の共用期間中に極めてまれではあるが発生する可能性がある津波を想定し、想定津波による水位変化の原子炉施設への影響を評価して、原子炉施設の安全性に問題とならないことを確認する。

また、津波による二次的な影響についても評価して、原子炉施設の安全性に問題とならないことを確認する。

11.2. 評価方法

既往の津波の発生状況等を考慮して津波を想定し、既往津波の痕跡高の再現性の検討を踏まえて想定津波の断層モデルを設定する。設定した想定津波の断層モデルに係る不確かさを考慮した数値シミュレーションにより評価用の津波水位を求め、津波水位に対する原子炉施設への影響を評価する。評価に当たっては、取水設備の水理特性による水位変動への影響も考慮するが、本報告書においては、取水設備の水理特性による水位変動への影響は7号機についてのみ検討を行う。

また、津波に伴う砂移動等の水位変動以外の事象に対しても評価する。

ここでの評価フローを第11.2-1図に示す。

11.3. 津波の想定及び数値シミュレーション

津波の想定に当たっては、敷地周辺の既往津波の被害状況、日本海東縁部における津波の発生状況、及び海域の活断層を考慮する。数値シミュレーションに当たっては、土木学会(2002)⁽¹⁾を参考に、既往津波の数値シミュレーションを踏まえて想定した設定津波の断層モデルに係る不確かさを合理的な範囲で考慮したパラメータスタ

ディを実施する。

11.3.1 既往津波の検討

11.3.1.1. 文献調査

文献調査^{(2)~(17)}を基に敷地周辺の既往津波の被害状況について、以下のとおり検討した。

日本海沿岸に影響を及ぼしたと考えられる津波規模 m が2以上の津波を第11.3.1-1表に示す。同表より、敷地周辺に影響を及ぼしたと考えられる津波としては、1833年(山形県沖)津波、1964年新潟地震津波、1983年日本海中部地震津波、及び1993年北海道南西沖地震津波の4つが挙げられる。これら津波の波源域を図11.3.1-1図に示す。また新潟県本州沿岸における既往津波高を第11.3.1-2表に、既往津波高の比較を第11.3.1-2図に示す。

1833年(山形県沖)津波では、出雲崎で2~3m(第11.3.1-2表には中間値の2.5mと記載)を記録している。1964年新潟地震津波では、出雲崎で約1.3m、柏崎で約1.5m、直江津で約1.1m(直江津と直江津港の観測値の平均値)を記録している。1983年日本海中部地震津波では、寺泊で約0.5m、出雲崎で約0.6m、敷地前面で約0.6mを記録している。また、1993年北海道南西沖地震津波では、寺泊で約1.7m、米山海岸で約1.9m、敷地前面で約0.9mを記録している。

このように柏崎周辺の沿岸で観測されている津波は最大でも3m程度である。なお、2007年新潟県中越沖地震津波では、敷地前面(専用港湾外海象計)で最大上昇量0.27m、最大下降量0.44mであった。

11.3.1.2. 既往津波の数値シミュレーション

既往津波の数値シミュレーションについては、痕跡高の再現性を検討し、数値シミュレーションに用いたモデルおよび計算手法の妥当性を確認した。

(1) 津波の数値シミュレーションの手法

数値シミュレーションにおける主な計算条件を第 11.3.1-3 表に示す。

地形のモデル化に当たっては、日本水路協会や米国地球物理センター等による最新の地形図^{(18)~(21)}と、平成 20 年 4 月に実施した深淺測量による敷地周辺及び専用港湾内の詳細な地形図を用いた。数値シミュレーションに用いた計算領域とその水深、および計算格子分割を第 11.3.1-3 図に示す。計算格子については、水深と津波の周期から推定される津波の波長をもとに、長谷川・首藤ほか(1987)⁽²²⁾の方法を参考にして設定した。第 11.3.1-4 図に長谷川・首藤ほか(1987)⁽²²⁾の方法と、敷地周辺における必要計算格子サイズと設定計算格子サイズを比較した図を示す。

(2) 再現性の評価方法

数値シミュレーションによる津波の再現性の評価は、敷地周辺および沿岸における痕跡高と数値シミュレーションにより計算された津波高を比較した。

再現性の評価の指標としては、相田(1977)⁽²³⁾による痕跡高と数値シミュレーションにより計算された津波高との比から求める幾何平均 K およびバラツキを表す指標 κ を用いた。

以下に、幾何平均 K およびバラツキを表す指標 κ の算定式を表す。

$$\log K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log K_i$$

$$\log \kappa = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\log K_i)^2 - (\log K)^2 \right\}^{1/2}$$

$$K_i = \frac{R_i}{H_i}$$

ここに、 R_i は i 番目の地点の観測値（痕跡高）であり、 H_i は数値シミュレーションにより計算された津波高である。

なお、幾何平均 K およびバラツキを表す指標 κ については、土木学会（2002）⁽¹⁾ により「 $0.95 < K < 1.05$ ， $\kappa < 1.45$ 」が再現性の目安とされている。

(3) 再現性の検討

数値シミュレーションにより津波の再現性について、以下のとおり検討した。

a. 1964 年新潟地震津波

第 11.3.1-5 図に示す東京電力オリジナルの断層モデルを波源として設定し、津波の再現計算を実施した。

相田ほか(1964)⁽¹¹⁾、土木学会(1964)⁽¹²⁾に示される津波痕跡高と数値シミュレーション結果による計算津波高との比較を第 11.3.1-6 図に示す。秋田県から新潟県に至る日本海沿岸域において、 $K = 1.008$ ， $\kappa = 1.364$ との結果が得られ、各指標が再現性の目安とされる基準を満足していることを確認した。この結果より、1964 年新潟地震に対する数値シミュレーションについては良好な再現性を確認できたといえる。

b. 1983年日本海中部地震津波

第 11.3.1-7 図に示す相田(1984)⁽²⁴⁾の Model-10 を波源として設定し、津波の再現計算を実施した。

首藤ほか(1984)⁽¹³⁾、気象庁(1984)⁽¹⁴⁾、土木学会(1986)⁽¹⁵⁾に示される津波痕跡高と数値シミュレーション結果による計算津波高との比較を第 11.3.1-8 図に示す。青森県から石川県に至る日本海沿岸域において、 $K=1.049$ 、 $\kappa=1.422$ の結果が得られ、各指標が再現性の目安とされる基準を満足していることを確認した。この結果より、1983年日本海中部地震に対する数値シミュレーションについては良好な再現性を確認できたといえる。

11.3.2 海域活断層に想定される地震に伴う津波の検討

海域活断層に想定される地震に伴う津波に対しては、2007年7月16日の新潟県中越沖地震発生後に実施した敷地前面海域において海上音波探査や海底地形調査の結果などから敷地前面海域において再評価した海域活断層をもとに検討を行った。再評価した海域活断層分布図を第 11.3.2-1 図に示す。

これらの海域活断層を基に地震動評価において考慮すべき断層モデルを対象として数値シミュレーションを行った。断層モデルの諸元は第 11.3.2-1 表に示す。

各海域活断層による取水口前面における最大水位上昇量と最大水位下降量は第 11.3.2-2 表に示すとおりである。取水口前面における最大水位上昇量は、1～4号機では佐渡島棚東縁断層による地震に伴う津波の+1.57m～+1.44m、5～7号機では、F-D断層+高田沖断層による地震に伴う津波の+1.42m～+1.35m である。また、取水口前面における最大水位下降量は全号機とも長岡平野西縁断層帯（傾斜角 $\delta = 35^\circ$ ）による地震に伴う津波の-3.48m～-3.21m

である。

敷地前面における最大水位上昇量分布図，最大水位下降量分布図，及び水位の時系列変化を第 11.3.2-2 図～11.3.2-4 図に示す。

11.3.3 日本海東縁部に想定される地震に伴う津波の検討

土木学会（2002）⁽¹⁾を参考に，日本海東縁部で想定される地震規模に応じた波源の基準断層モデルを設定し，この断層モデルの諸条件を，位置を含め合理的と考えられる範囲内で変化させた数値シミュレーションを多数実施するパラメータスタディを行った。ただし，地震調査研究推進本部（2003）⁽²⁵⁾に示される日本海東縁部の地震活動域のうち，土木学会（2002）⁽¹⁾に示される範囲を超える部分についてもパラメータスタディの対象範囲とした。

なお，概略パラメータスタディと詳細パラメータスタディには，第 11.3.3-1 図に示す概略検討用の計算格子モデル（最小計算格子間隔＝40m）を用いて数値シミュレーションを行うものとし，パラメータスタディにより抽出した最大水位上昇量，及び最大水位下降量を示す断層モデルに対してのみ第 11.3.1-3 図に示す計算格子モデル（最小計算格子間隔＝10m）により数値シミュレーションを実施して津波水位を評価する。

11.3.3.1. 基準断層モデルの設定

敷地周辺では，日本海東縁部の地震活動領域で発生した地震のうち，同領域の北方で発生した 1983 年日本海中部地震や 1993 年北海道南西沖地震による津波水位が比較的小さいことを考慮して，第 11.3.3-2 図に示す日本海東縁部の地震活動領域のうち，敷地により近い新潟～山形沖の領域を断層設定範囲とした。基準断層モデルは，1993 年北海道南西沖地震の津波を再現するモデルのモー

メントマグニチュード $M_w7.84$ を下回らないように、 $M_w=7.85$ に設定した。

11.3.3.2. 概略パラメータスタディ

基準断層モデルを用いて、第 11.3.3-3 図に示すように、位置、走向、傾斜角、及び傾斜方向を組み合わせた多数の数値シミュレーションを実施した。

11.3.3.3. 詳細パラメータスタディ

概略パラメータスタディのうち、取水口前面において最大水位上昇量及び最大水位下降量を示すケースについて、第 11.3.3-4 図に示すように波源位置を補間的に移動させた場合の数値シミュレーションを実施するとともに、さらに、このうちの最大水位上昇量及び最大水位下降量を示すケースに対して、断層上縁深さ及び傾斜角を変化させた場合の数値シミュレーションを実施した。

これらの結果より、敷地に最も大きな影響を及ぼす津波は、第 11.3.3-5 図に示すとおり比較的沿岸に近い断層によるものであり、取水口前面における最大水位上昇量は、1号機で最高値を示し、その値は+2.76mである。取水口前面における最大水位下降量は、1号機で最低値を示し、その値は-3.05mである。

取水口前面における最大水位上昇量及び最大水位下降量を第 11.3.3-1 表に、また、敷地前面における最大水位上昇量分布、最大水位下降量分布、及び取水口前面における水位時系列を第 11.3.3-6 図～第 11.3.3-8 図に示す。

11.4. 津波に対する安全性の評価

評価用の津波水位による水位上昇及び水位低下に対しては、原子

炉施設の安全性に問題とならないことを確認する。確認にあたっては、取水施設の水利特性による水位変動の影響も考慮する。

なお、基準面は東京湾平均海面（T.M.S.L.）を用いた。

11.4.1 津波水位の評価

数値シミュレーションによる津波高の検討結果から、取水口前面における最高水位を与える津波は、日本海東縁部の津波で、最大水位上昇量は1号機で+2.76mであり、評価用の最高水位は、朔望平均満潮位（T.M.S.L.+0.48m）を考慮するとT.M.S.L.+3.3m程度である。全号機の取水口前面の最高水位を第11.4.1-1表に示す。

また、取水口における最低水位を与える津波は、長岡平野西縁断層帯（ $\delta=35^\circ$ ）による津波で、最大水位下降量は1号機で-3.48mであり、評価用の最低水位は、朔望平均干潮位（T.M.S.L.-0.02m）を考慮すると、T.M.S.L.-3.5m程度である。全号機の取水口前面の最低水位を第11.4.1-1表に示す。

11.4.2 津波に対する安全性の評価

評価用の津波水位に対する原子炉施設の安全性について、数値シミュレーションの結果を考慮して、以下のとおり検討した。

11.4.2.1 津波による水位上昇に対する安全性

原子炉建屋等の重要施設の設置レベルは、第11.4.1-1表に示すとおり、1～4号機がT.M.S.L.+5.0m、5～7号機がT.M.S.L.+12.0mであることから、原子炉施設が津波による被害を受けるおそれはない。

11.4.2.2. 津波による水位低下に対する安全性

第 11.4.1-1 表に示すとおり，原子炉補機冷却海水ポンプの吸い込み可能レベル^{*)}は評価用の最低水位より十分深いことから，津波により，水位が低下した場合でも原子炉補機冷却系の海水を取水することは可能である。

^{*)} 吸込み可能レベル：これ以上水位が低下すると水面に渦が形成されて空気を吸い込む可能性がある水位のこと

11.4.2.3. 取水施設の水利特性による水位変動への影響（7号機）

想定津波による7号機の取水施設の水利特性による水位変動について，数値シミュレーションにより以下のとおり検討した。

(1) 数値シミュレーションの手法

数値シミュレーションは，取水口からスクリーン室，取水路，取水路分岐，補機系取水路を経て補機冷却海水ポンプ室に至る取水路系について検討した。数値シミュレーションの計算条件を第 11.4.2-1 表に，7号機の取水施設の概要図を第 11.4.2-1 図に示す。

(2) 対象津波

7号機取水口前面において最低水位を示す長岡平野西縁断層帯（ $\delta = 35^\circ$ ）による津波を対象とした。

(3) 検討結果

想定津波を対象とした7号機取水施設の水利特性による水位変動について，数値シミュレーションを実施した結果，補機冷却海水ポンプ室における津波による最低水位は，原子炉補機冷却海水ポンプの吸い込み可能レベルより上方であることから，必要な取水は十分確保できる。

取水設備の水利特性による水位変動の検討結果を第 11.4.2-2

図に示す。

11.5. 二次的な影響に対する評価

津波の水位変動以外の事象に対する評価として、津波に伴う砂移動および漂流物の影響について確認する。

11.5.1 砂移動に対する評価

想定津波により砂が移動した場合の影響について数値シミュレーションにより検討し、原子炉補機冷却系の取水に支障が生じることはなく、原子炉施設の安全性に問題とならないことを確認した。

11.5.1.1. 数値シミュレーションの手法

数値シミュレーションは、藤井ほか(1998)⁽²⁶⁾ および高橋ほか(1999)⁽²⁷⁾ の手法に基づき、津波の挙動とそれに伴う砂移動を同時に計算し、その結果より変化した地形を用いて次のステップの流れと水位を計算した。

数値のシミュレーションのフローを第 11.5.1-1 図に、砂移動の数値シミュレーションの手法および条件を第 11.5.1-1 表に示す。

11.5.1.2. 対象津波

取水口前面において最高水位を示す日本海東縁部の津波と、最低水位を示す長岡平野西縁断層帯($\delta = 35^\circ$)による津波を対象とした。

11.5.1.3. 評価結果

想定津波を対象とした砂移動の数値シミュレーションを実施した結果、取水口前面における砂の堆積はいずれの手法においても最大で約 30cm であり、砂移動により原子炉補機冷却系の取水に支

障が生じることはない。

砂移動に伴う地形変化量の分布を第 11.5.1-2 図に示す。

11.5.2 漂流物に対する評価

津波による漂流物として、船舶、流木およびゴミの影響について検討し、原子炉補機冷却系の取水に支障が生じることはなく、原子炉施設の安全性に問題とならないことを確認した。

11.5.2.1. 船舶に対する評価

専用港湾に入港する船舶のうち、大型船舶は使用済燃料輸送船等であり、喫水は 5m 程度、長さは 100m 程度である。津波による最高水位が T. M. S. L. +3.3m 程度であることを考慮すると、原子炉建屋等の重要施設の設置レベル（1～4号機：T. M. S. L. +5.0m, 5～7号機：T. M. S. L. +12.0m）に打ち上げられる可能性はない。また、1～4号機側と5～7号機側にはそれぞれ 200m 以上のカーテンウォール（天端レベル：T. M. S. L. +3.0m）があり、船舶の長さを考慮すると完全に閉塞する可能性はないことから、原子炉冷却系の取水に支障が生じることはない。

11.5.2.2. 流木に対する評価

敷地周辺には貯木場はなく、津波発生時に木材の流出、散乱のおそれがないことから、流木により原子炉補機冷却系の取水の支障が生じることはない。

11.5.2.3. ゴミに対する評価

取水口にはスクリーン等を設置し、ゴミの流入を防止する構造となっていることから、津波発生時にゴミにより原子炉補機冷却

系の取水に支障が生じることはない。

11.6. 評価結果

以上により，津波に対して，柏崎刈羽原子力発電所の原子炉施設の安全性に問題とならないことを確認した。

11.7. 参考文献

- (1) 「原子力発電所の津波評価技術」
土木学会原子力土木委員会津波評価部会，2002
- (2) 「最新版 日本被害地震総覧 [416] -2001」
宇佐美龍夫，東京大学出版会，2003
- (3) 「津波の事典[第2版]」
宇津徳治・嶋悦三・吉井敏尅・山科健一郎編，朝倉書店，
pp. 569-642，2001
- (4) 「日本海の歴史津波」
羽鳥徳太郎，月刊海洋科学，Vol. 16, No9, pp. 538-545. 1984
- (5) 「理科年表 平成20年」
国立天文台編，丸善，2007
- (6) 「日本被害津波総覧 [第2版]」
渡辺偉夫，東京大学出版会，1998
- (7) 「日本被害津波総覧」
渡辺偉夫，東京大学出版会，1985
- (8) 「日本海沿岸における歴史津波の挙動とその波源域」
羽鳥徳太郎・片山通子，東京大学地震研究所彙報，
Vol. 52, pp. 49-70, 1977
- (9) 「続古地震一実像と虚像」
萩原尊禮・大長昭雄・相田勇，東京大学出版会，

pp. 165-214, 1989

- (10) 「天保 4 年 (1833) 山形沖地震とその津波の規模」
羽鳥徳太郎, 地震第 2 輯, 第 43 卷, pp. 227-232, 1990
- (11) 「1964 年 6 月 16 日新潟地震にともなう津波の調査」
相田勇・梶浦欣二郎・羽鳥徳太郎・桃井高夫,
東京大学地震研究所彙報, 第 42 冊第 4 号, pp741-780, 1964
- (12) 「昭和 39 年新潟地震震害調査報告」
土木学会新潟震災調査委員会, 1966
- (13) 「1983 年日本海中部地震津波の痕跡高」
首藤伸夫・卯花政孝,
東北大学工学部津波防災実験所研究報告, 第 1 号, 1984
- (14) 「昭和 58 年 (1983 年) 日本海中部地震調査報告－災害時自然現象報告書－」
気象庁, 気象庁技術報告第 106 号, 1984
- (15) 「1983 年日本海中部地震震害調査報告書」
土木学会日本海中部地震震害調査委員会編,
土木学会, pp. 903, 1986
- (16) 「4. 津波, 1993 年北海道南西沖地震震害調査報告」
首藤伸夫・明田定満・都司嘉宣・松富英夫,
土木学会, pp. 76-106, 1997
- (17) 「北海道南西沖地震に伴う津波－小樽から礼文島まで－」
後藤章夫・高橋浩晃・宇津木 充・小野 忍・西田泰典・
大島弘光・笠原 稔・竹中博士・斉田智治,
月刊海洋, 号外 No. 7, pp. 153-158, 1994
- (18) 「日本近海 30 秒グリッド水深データ (JTOP030) , M1307,
M1407, M1408, M1508」
(財)日本水路協会, 2003

- (19) 「2-Minute Gridded Global Relief Data (ETOPO2v2)」
World Data Center for Geophysics & Marine Geology, 2006
- (20) 「海底地形デジタルデータ (M7000 シリーズ), M7006 (津軽海峡東部), M7009 (北海道西部), M7010 (秋田沖), M7011 (佐渡), M7012 (若狭湾)」
(財)日本水路協会, 2004
- (21) 「数値地図 50m メッシュ (標高)」
国土地理院, 2002
- (22) 「津波の数値実験における格子間隔と時間積分間隔に関する研究」
長谷川賢一・鈴木孝夫・稲垣和男・首藤伸夫,
土木学会論文集, No. 381/II-7, pp. 111-120, 1987
- (23) 「三陸沖の古い津波のシミュレーション」
相田勇, 東京大学地震研究所彙報, Vol. 52, pp71-101, 1977
- (24) 「1983年日本海中部地震の波源数値モデル」
相田勇, 東京大学地震研究所彙報, Vol. 59, pp93-104, 1984
- (25) 「日本海東縁部の地震活動の長期評価」
地震調査研究推進本部 地震調査委員会, 2003
- (26) 「津波による海底地形変化に関する研究」
藤井直樹・大森政則・高尾 誠・金山 進・大谷英夫,
海岸工学論文集第 45 巻, pp. 376-380, 1998
- (27) 「掃流砂層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発」
高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦・浅井大輔,
海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 606-610, 1999

- (28) 「Leap-frog 法を用いた津波の数値計算法」
後藤智明・小川由信，
東北大学工学部土木工学科資料， 1982
- (29) 「GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法」
小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫，
海岸工学論文集， 第 45 卷， pp. 356-360， 1998
- (30) 「低溢流堰堤の流量係数」
本間仁， 土木学会誌， 第 26 卷， 第 6 号， pp. 635-645，
第 9 号， pp. 849-862， 1940
- (31) 「The displacement field of inclined faults」
Mansinha, L. and D. E. Smylie，
Bulletin of the Seismological Society of America，
Vol. 61, No. 5, pp. 1433-1440, 1971
- (32) 「火力・原子力発電所土木構造物の設計－補強改正版－」
電力土木技術協会， 1995
- (33) 「発電水力演習」
千秋信一， 学献社， 1967
- (34) 「水理公式集 [平成 11 年版]」
土木学会， 1999
- (35) 「歴史津波－危険度の地域性」
羽鳥徳太郎， 地震工学振興会ニュース， No. 135, pp. 5-9, 1994

第 11.3.1-1 表 日本海沿岸に影響を及ぼした津波の一覧

発生年月日 元号	震央位置 (緯度・経度)	地震規模 M	津波規模 m	地震・津波の概要
701.5.12 大宝 1	若狭湾	—	—, — [2]	丹波 地震うこと 3 日。若狭湾内の丹海郷が海に没したという「冠島伝説」があるが疑わしい。
850.11.27 嘉祥 3	山形県沿岸 39.0° N 139.7° E	≒ 7.0	2, — [2]	出羽 地裂け、山崩れ、国府の城柵は傾倒し、山裂け圧死者多数。最上川の岸崩る。海水は国府から 6 里(3km)のところまで迫った。
863.7.10 貞観 5	新潟県沖	—	—, — [2?]	越中・越後 山崩れ谷埋まり、水湧き、民家破壊し、圧死者多数。直江津付近にあった数個の小島、この地震のために壊滅したという。
887.8.2 仁和 3	新潟県南部沖	—	—, — [2]	越後で津波を伴い、溺死者数千という。京都有感。越後に関する史料の信憑性不十分。
1092.9.13 寛治 6	新潟県沖	—	—, — [2?]	越後 柏崎～岩船間の沿岸、海府浦・親不知大津波におそわる。「地震」とある古記あるも、地震の状況を記した古記録未発見。疑わしい。
1341.10.31 興国 2	青森県西部沖	—	—, — [3?]	青森県西方沖 『東日流(つがる)外三郡誌』によれば、朝地震とともに三丈余(9m)の津波が津軽半島の十三湊を襲い 26,000 人が溺死したとある。最近発見された古文書であるが、疑問視する人もいる。
1614.11.26 慶長 19	新潟県南部沖	—	2, — [2]	従来、越後高田沖の地震とされていたもの。大地震の割に史料が少なく、震源については検討すべきことが多い。京都で家屋・社寺などが倒壊し、死 2, 傷 370 という。京都付近の地震とする説がある。
1741.8.28 寛保 1	北海道南西沖 41.6° N 139.4° E	6.9	3, — [3.5]	渡島西岸・津軽・佐渡 渡島大島この月の下旬より活動、13 日に噴火した。19 日早朝に津波、北海道で死 1467, 流出家屋 729, 船 1521 破壊。津軽で田畑の損も多く、流失潰家約 100, 死 20 余。佐渡・能登・若狭にも津波。
1792.6.13 寛政 4	北海道西方沖 43 ³ / ₄ ° N 140.0° E	≒ 7.1	2, — [1]	後志 小樽から積丹岬辺で有感、津波あり。忍路で港頭の岸壁崩れ、海岸に引き揚げていた夷船漂流。出漁中の夷人 5 人溺死。美国でも溺死若干。
1833.12.7 天保 4	山形県沖 38.9° N 139.25° E	7 ¹ / ₂ ± 1/4	2, — [2.5]	羽前・羽後・越後・佐渡 地震被害は山形庄内地方で最も多い。湯野浜～鼠ヶ関間で最も激しい津波、局地的に 7～8m に達した。波源から遠い輪島中心部に津波遡上。
1940.8.2 昭和 15	北海道西方沖 44.15° N 139.28° E	7.5	2, 2 [2]	神威岬沖 震害ほとんどなく、津波による被害が大きかった。波高は、羽幌・天塩 2m, 利尻 3m, 金沢・宮津 1m。天塩河口で溺死 10。
1964.6.16 昭和 39	新潟県沖 38° 22' N 139° 12.9' E	7.5	2, 2 [2]	新潟県沖 [新潟地震]新潟・秋田・山形の各県を中心に被害があり、死 26, 家屋全壊 1960, 半壊 6640, 浸水 15298, その他船舶・道路の被害も多かった。津波が日本海沿岸一帯を襲い、波高は新潟県沿岸で 4m 以上に達した。粟島が約 1m 隆起した。
1983.5.26 昭和 58	秋田・青森県沖 40° 21.4' N 139° 4.6' E	7.7	2.5, 3 [3]	秋田県沖 [昭和 58 年日本海中部地震]被害は秋田県で最も多く、青森・北海道がこれに次ぐ。日本全体で死 104(うち津波によるもの 100)。傷 163(同 104), 建物全壊 934, 半壊 2115, 流失 52, 一部破損 3258。船沈没 255, 流失 451, 破損 1187。津波は早い所では津波警報発令以前に沿岸に達した。石川・京都・島根など遠方の府県にも津波による被害が発生した。
1993.7.12 平成 5	北海道南西沖 42° 46.8' N 139° 11.0' E	7.8	—, 3 [3]	北海道南西沖 [平成 5 年北海道南西沖地震]地震に加えて津波による被害が大きく、死 202, 不明 28, 傷 323。特に地震後間もなく津波に襲われた奥尻島の被害は甚大で、島南端の青苗地区は火災もあって壊滅状態、夜 10 時すぎの闇のなかで多くの人命、家屋等が失われた。津波の高さは青苗の市街地で 10m を越えたところがある。

注 1) 震央位置(緯度、経度)及び地震規模 M は、以下より参照している

1884 以前の地震：宇佐美(2003)⁽²⁾

1885～1922 年の地震：宇津ほか編(2001)⁽³⁾

1923 年以降の地震：気象庁の発表による

注 2) 地震規模 m は、宇佐美(2003)⁽²⁾ によるが、下線付き数字は羽鳥による値(宇佐美(2003)⁽²⁾ より)であり、[]内の値は羽鳥(1984)⁽⁴⁾ による値を参照している

注 3) 地震・津波の概要は、宇佐美(2003)⁽²⁾、理科年表(2007)⁽⁵⁾、渡辺(1998)⁽⁶⁾、及び渡辺(1985)⁽⁷⁾ を参照している

第 11.3.1-2 表(1) 新潟県本州沿岸における既往津波の痕跡高一覧
(単位：m)

市町	地名	1833 年 (山形県沖)	1964 年 新潟	1983 年 日本海中部	1993 年 北海道南西沖
村上市	岩崎海岸		3.95		
	間ノ内		4.55		
	勝木		4.15		
	寝屋		3.95	0.64	1.55
	寒川		2.65		2.10
	脇川		2.45		2.48
	今川		2.24		2.30
	笹川		3.25	0.77	2.59
	桑川		3.85	1.00	
	馬下			0.91	
	早川		2.85		
	吉浦海岸				1.73
	柏尾		2.95	0.91	2.02
	野潟			1.79	
	岩ヶ崎海岸				1.98
	三面川海岸				1.54
	瀬波		4.20	1.16	
	岩船	4.50	3.20	1.43	1.35
	塩谷		4.15		
荒川河口	4.50				
胎内市	桃崎浜			1.29	
	胎内川				1.44
	村松浜		1.80	1.19	
新発田市	藤塚浜				1.44
北蒲原郡	次第浜			1.52	
聖籠町	綱代海岸				1.44
	新潟東港			1.26	
新潟市	太郎代				1.43
	島見浜			1.22	
	新井郷川			1.62	
	岩崎海岸		3.95		
引用文献	羽鳥(1977) ⁽⁸⁾ 萩原ほか(1989) ⁽⁹⁾ 羽鳥(1990) ⁽¹⁰⁾	相田ほか(1964) ⁽¹¹⁾ 土木学会(1964) ⁽¹²⁾	首藤ほか(1984) ⁽¹³⁾ 気象庁(1984) ⁽¹⁴⁾ 土木学会(1986) ⁽¹⁵⁾	首藤ほか(1993) ⁽¹⁶⁾ 後藤ほか(1994) ⁽¹⁷⁾ 渡辺(1998) ⁽⁷⁾	

第 11.3.1-2 表 (2) 新潟県本州沿岸における既往津波の痕跡高一覧
(単位：m)

市町	地名	1833 年 (山形県沖)	1964 年 新潟	1983 年 日本海中部	1993 年 北海道南西沖
新潟市	松浜			1.82	
	阿賀野川			1.22	
	新潟	5.00	2.47	0.69	
	関屋			0.96	
	小針海岸				0.90
	新川			1.58	0.80
	越前浜				0.97
	角田浜	5.00			0.70
	間瀬		1.25		0.66
長岡市	寺泊		1.4	0.45	1.70
三島郡	井鼻				1.13
出雲崎町	出雲崎	2.50	1.25	0.64	
柏崎市	柏崎		1.45		
	米山海岸				1.89
上越市	直江津		1.14		
	谷浜海水浴場				1.36
糸魚川市	浜徳合				1.31
	能生川				2.16
	梶屋敷海岸				2.06
	姫川港				1.56
	田海川				2.05
	親不知ヒアパーク				2.10
引用文献		羽鳥(1977) ⁽⁸⁾ 萩原ほか(1989) ⁽⁹⁾ 羽鳥(1990) ⁽¹⁰⁾	相田ほか(1964) ⁽¹¹⁾ 土木学会(1964) ⁽¹²⁾	首藤ほか(1984) ⁽¹³⁾ 気象庁(1984) ⁽¹⁴⁾ 土木学会(1986) ⁽¹⁵⁾	首藤ほか(1993) ⁽¹⁶⁾ 後藤ほか(1994) ⁽¹⁷⁾ 渡辺(1998) ⁽⁷⁾

第 11.3.1-3 表 計算条件一覧

項目	計算条件
計算時間間隔	C.F.L 条件を満たすように以下のとおりに設定 格子間隔 1,440m～240m の領域：0.5 秒 格子間隔 80m～10m の領域：0.25 秒
基礎方程式及び 数値計算スキーム	非線形長波理論（浅水理論）に基づく後藤・小川(1982) ⁽²⁸⁾ の方法
沖側境界条件	後藤・小川(1982) ⁽²⁸⁾ の自由透過の条件
陸側境界条件	<ul style="list-style-type: none"> 敷地周辺：（計算格子間隔 80m～10m）の領域は小谷ら(1998)⁽²⁹⁾ の陸上遡上境界条件 それ以外は完全反射条件
越流境界条件	越流を本間公式(1940) ⁽³⁰⁾ や相田公式(1977) ⁽²³⁾ で考慮
初期条件	Mansinha and Smylie(1971) ⁽³¹⁾ の方法により海底面の鉛直変位分布を求めて初期水位として与えている
海底摩擦係数	マンニングの粗度係数（ $n=0.03\text{m}^{-1/3}\text{s}$ ）
水平渦動粘性係数	考慮していない
再現時間	港内での重複波の影響も考慮し、断層変位後 4 時間の計算を実施

基礎方程式：非線形長波（浅水理論）の連続式及び運動方程式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - K_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) + \gamma_b^2 \frac{M \sqrt{M^2 + N^2}}{D^2} = 0$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - K_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) + \gamma_b^2 \frac{N \sqrt{M^2 + N^2}}{D^2} = 0$$

ここに、 t ：時間 x, y ：平面座標、
 η ：静水面から鉛直上方にとった水位変動量
 M ： x 方向の線流量 N ： y 方向の線流量、 h ：静水深
 D ：全水深（ $D = h + \eta$ ） g ：重力加速度
 K_h ：水平渦動粘性係数（ $= 0$ ）
 γ_b^2 ：摩擦係数（ $= gn^2 / D^{1/3}$ 、 $n=0.03$ ：マンニングの粗度係数）

第 11.3.2-1 表 海域活断層の断層モデル諸元

断層名	断層長さ L(km)	断層幅 W(km)	すべり量 D(m)	断層上縁深さ d(km)	走向 θ (°)	傾斜角 δ (°)	すべり角 λ (°)
佐渡島棚東縁断層	37	18.31	2.52	0.0	209	55	90
F-B 断層	36	24.00	1.72	0.0	39	35	90
佐渡島南方断層	29	19.33	1.70	0.0	0	45	62
F-D 断層 + 高田沖 ^{*1)}	55	26.15	2.62	0.0	55	35	96
長岡平野西縁断層帯 ^{*2)} ($\delta = 35^\circ$)	91	26.15	4.34	0.0	187	35	72
長岡平野西縁断層帯 ^{*2)} ($\delta = 50^\circ$)	91	19.58	5.80	0.0	187	50	72

*1) F-D 断層と高田沖断層について安全評価上，同時活動を考慮したもの

*2) 角田・弥彦断層，気比ノ宮断層，および片貝断層の3つの断層について，安全評価上，同時活動を考慮したもの

第 11.3.2-2 表 海域活断層による津波水位（取水口前面）

（太字：各号機の最大水位上昇量，最大水位下降量）

（単位：m）

プラント	佐渡島棚東縁断層		F-B 断層		佐渡島南方断層	
	最大水位 上昇量	最大水位 下降量	最大水位 上昇量	最大水位 下降量	最大水位 上昇量	最大水位 下降量
1号機	+1.57	-1.39	+1.33	-2.35	+1.17	-1.05
2号機	+1.47	-1.34	+1.24	-2.26	+1.07	-1.03
3号機	+1.44	-1.31	+1.18	-2.15	+0.99	-0.97
4号機	+1.45	-1.28	+1.15	-2.09	+0.94	-0.98
5号機	+1.11	-1.15	+1.08	-2.10	+0.82	-0.88
6号機	+1.06	-1.15	+1.05	-2.10	+0.79	-0.88
7号機	+1.07	-1.09	+1.01	-2.05	+0.74	-0.84

プラント	F-D断層・高田沖断層連動		長岡平野西縁断層帯 ($\delta = 35^\circ$)		長岡平野西縁断層帯 ($\delta = 50^\circ$)	
	最大水位 上昇量	最大水位 下降量	最大水位 上昇量	最大水位 下降量	最大水位 上昇量	最大水位 下降量
1号機	+1.41	-1.69	+0.60	-3.48	+1.28	-3.32
2号機	+1.36	-1.63	+0.57	-3.45	+1.25	-3.23
3号機	+1.32	-1.51	+0.55	-3.42	+1.19	-3.15
4号機	+1.29	-1.44	+0.53	-3.39	+1.15	-3.11
5号機	+1.42	-1.11	+0.47	-3.31	+1.04	-3.07
6号機	+1.39	-1.12	+0.47	-3.27	+1.04	-3.05
7号機	+1.35	-1.10	+0.45	-3.21	+1.03	-3.01

第 11.3.3-1 表 日本海東縁部の想定津波による水位（取水口前面）
（単位：m）

プラント	最大水位上昇量	最大水位下降量
1号機	+2.76	-3.05
2号機	+2.73	-2.95
3号機	+2.70	-2.85
4号機	+2.68	-2.81
5号機	+2.57	-2.60
6号機	+2.54	-2.60
7号機	+2.46	-2.54

第 11.4.1-1 表 想定津波による水位の評価結果（取水口前面）
 （単位：T.M.S.L. (m)*）

プラント	最高水位	原子炉建屋等の 重要施設設置レベル	最低水位	原子炉補機冷却海水ポンプ 吸い込み可能レベル
1号機	+3.3	+5.0	-3.5	-4.22
2号機	+3.3		-3.5	-4.59
3号機	+3.2		-3.5	-4.59
4号機	+3.2		-3.5	-4.93
5号機	+3.1	+12.0	-3.4	-4.43
6号機	+3.1		-3.3	-5.24
7号機	+3.0		-3.3	-4.92

*）東京湾平均海面（T.M.S.L.）

第 11.4.2-1 表 水位変動の数値シミュレーションの計算条件

項目	計算条件
計算領域	取水口～スクリーン室～取水路～取水ピット～ 取水路分岐～補機取水路～補機冷却ポンプ室
計算時間間隔	0.005sec
基礎方程式	非定常管路及び開水路流れの連続式及び運動方程式
取水量	<ul style="list-style-type: none"> ・ 循環水ポンプ(CWP)：停止 ・ 原子炉補機冷却海水ポンプ(RSW)：1,800(m³/h/台)×6 台 ・ タービン補機冷却海水ポンプ(TSW)：2,800(m³/h/台)×3 台
摩擦損失係数	マンニングの粗度係数 (n=0.02m ^{-1/3} s)
貝の付着代	貝代 10cm を考慮
局所損失係数	電力土木技術(1995) ⁽³²⁾ ，千秋(1967) ⁽³³⁾ ，及び土木学会(1999) ⁽³⁴⁾ による
初期水位	下降側：L.W.L (=T.M.S.L.-0.02m)
計算時間	断層変位後 4 時間
地盤変動量	考慮する

開水路の連続式及び運動方程式

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad , \quad \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gA \left(\frac{n^2 |v|v}{R^{4/3}} + \frac{1}{\Delta x} f \frac{|v|v}{2g} \right) = 0$$

管路の連続式及び運動方程式

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad , \quad \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gA \left(\frac{n^2 |v|v}{R^{4/3}} + \frac{1}{\Delta x} f \frac{|v|v}{2g} \right) = 0$$

ここに、
 t ：時間， Q ：流量， v ：流速， x ：管底に沿った座標
 A ：流水断面積
 H ：圧力水頭＋位置水頭(管路の場合)，位置水頭(開水路の場合)
 z ：管底高， g ：重力加速度， n ：マンニングの粗度係数
 R ：径深， Δx ：管路の流れ方向の長さ， f ：局所損失係数

水槽および立坑部

$$A_p \frac{dH_p}{dt} = Q_s$$

ここに、
 A_p ：水槽の平面積（水位の関数となる）， H_p ：水槽水位
 Q_s ：水槽へ流入する流量の総和， t ：時間

第 11.5.1-1 表 砂移動の数値シミュレーションの手法及び条件

	藤井ほか(1998) ⁽²⁶⁾ の手法	高橋ほか(1999) ⁽²⁷⁾ の手法
地盤高の連続式	$\frac{\partial Z}{\partial t} + \alpha \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \frac{E-S}{\sigma(1-\lambda)} = 0$	$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{E-S}{\sigma} \right) = 0$
浮遊砂濃度連続式	$\frac{\partial C}{\partial t} + \left(\frac{\partial UC}{\partial x} \right) - \frac{E-S}{D} = 0$	$\frac{\partial(C_s D)}{\partial t} + \frac{\partial(MC_s)}{\partial x} - \frac{E-S}{\sigma} = 0$
流砂量式	$Q = \alpha 80 \tau_*^{1.5} \sqrt{sgd^3}$	高橋ほか(1999) ⁽²⁷⁾ の実験式 $Q = 21 \tau_*^{1.5} \sqrt{sgd^3}$
巻き上げ量の算定式	$E = \frac{(1-\alpha)Qw^2\sigma(1-\lambda)}{Uk_z \left[1 - \exp\left\{ \frac{-wD}{k_z} \right\} \right]}$	$E = 0.012 \tau_*^{2.0} \sqrt{sgd} \cdot \sigma$
沈降量の算定式	$S = wC_b$	$S = wC_s \cdot \sigma$
摩擦速度の計算式	log-wake 則を鉛直方向に積分した式より算出	マニング則より算出 $u_* = \sqrt{gn^2 U U / D^{1/3}}$

Z : 水深変化量 (m)

t : 時間 (s)

x : 平面座標 (m)

Q : 単位幅, 単位時間当たりの掃流砂量 (m³/s/m)

τ_* : シールズ数

σ : 砂の密度 (=2.69g/cm³, 東京電力の調査結果より)

s : $\sigma / \rho - 1$

d : 砂の粒径 (=0.27mm (中央粒径), 東京電力の調査結果より)

g : 重力加速度 (m/s²)

ρ : 海水の密度 (g/cm³)

U : 流速 (m/s)

D : 全水深 (m)

M : $U \times D$ (m²/s) λ : 空隙率 (=0.4, 高橋ほか(1999)⁽²⁷⁾ 他より)

n : Manning の粗度係数 (=0.03m^{-1/3}s, 土木学会(2002)⁽¹⁾ より)

α : 局所的な外力のみに移動を支配される成分が全流砂量に占める比率 (=0.1, 藤井ほか(1998)⁽²⁶⁾ より)

w : 土粒子の沈降速度 (Rubey 式より算出) (m/s)

Z_0 : 粗度高さ (=k_s/30) (m)

k_z : 鉛直拡散係数 (=0.2 $\kappa u_* h$, 藤井ほか(1998)⁽²⁶⁾ より) (m²/s)

k_s : 相当粗度 (= (7.66ng^{1/2})⁶) (m)

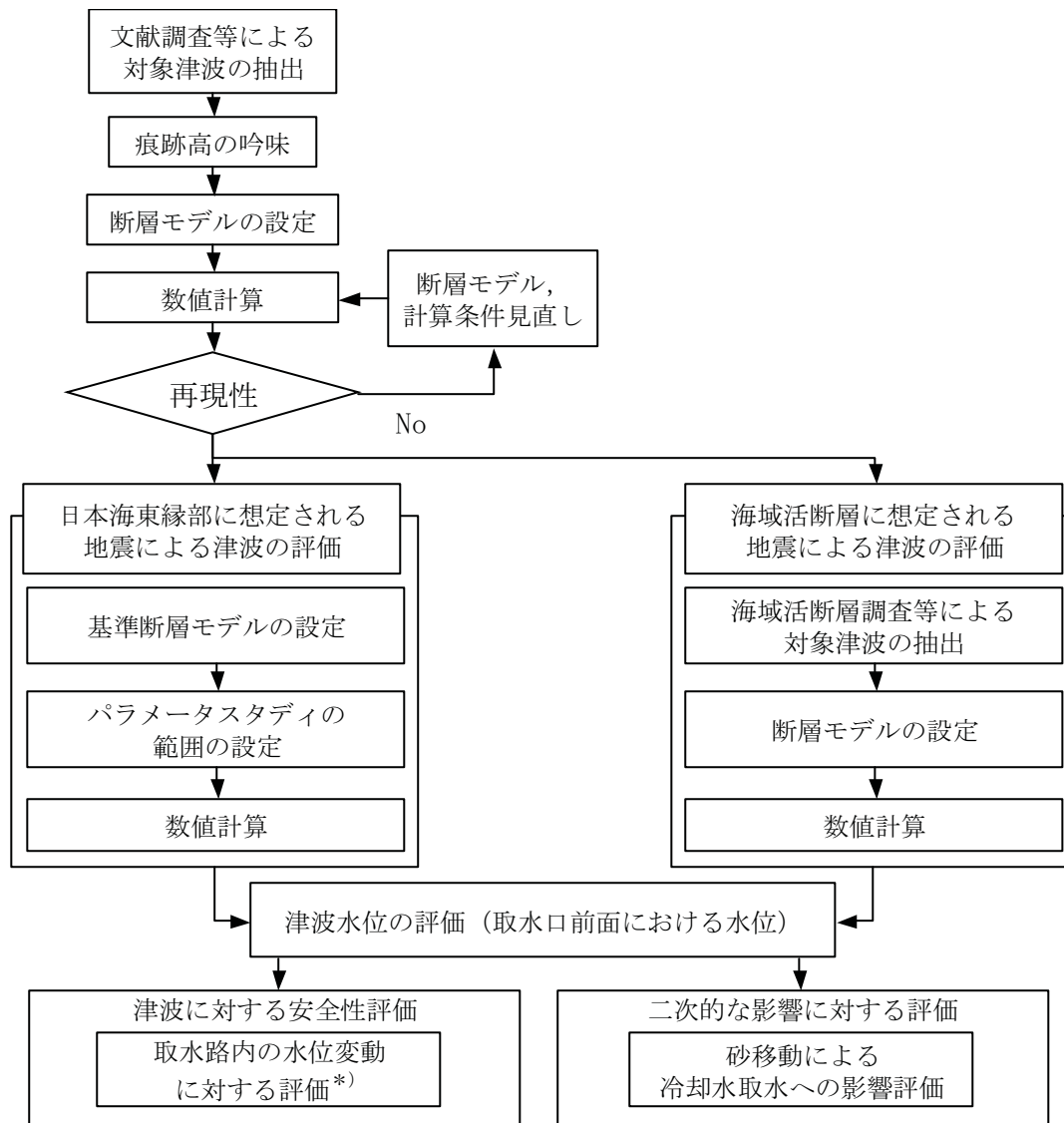
κ : カルマン定数 (=0.4, 藤井ほか(1998)⁽²⁶⁾ より)

h : 水深 (m)

C, C_b : 浮遊砂濃度, 底面浮遊砂濃度 (浮遊砂濃度連続式より算出, 浮遊砂体積濃度 1%相当を上限とする) (kg/m³)

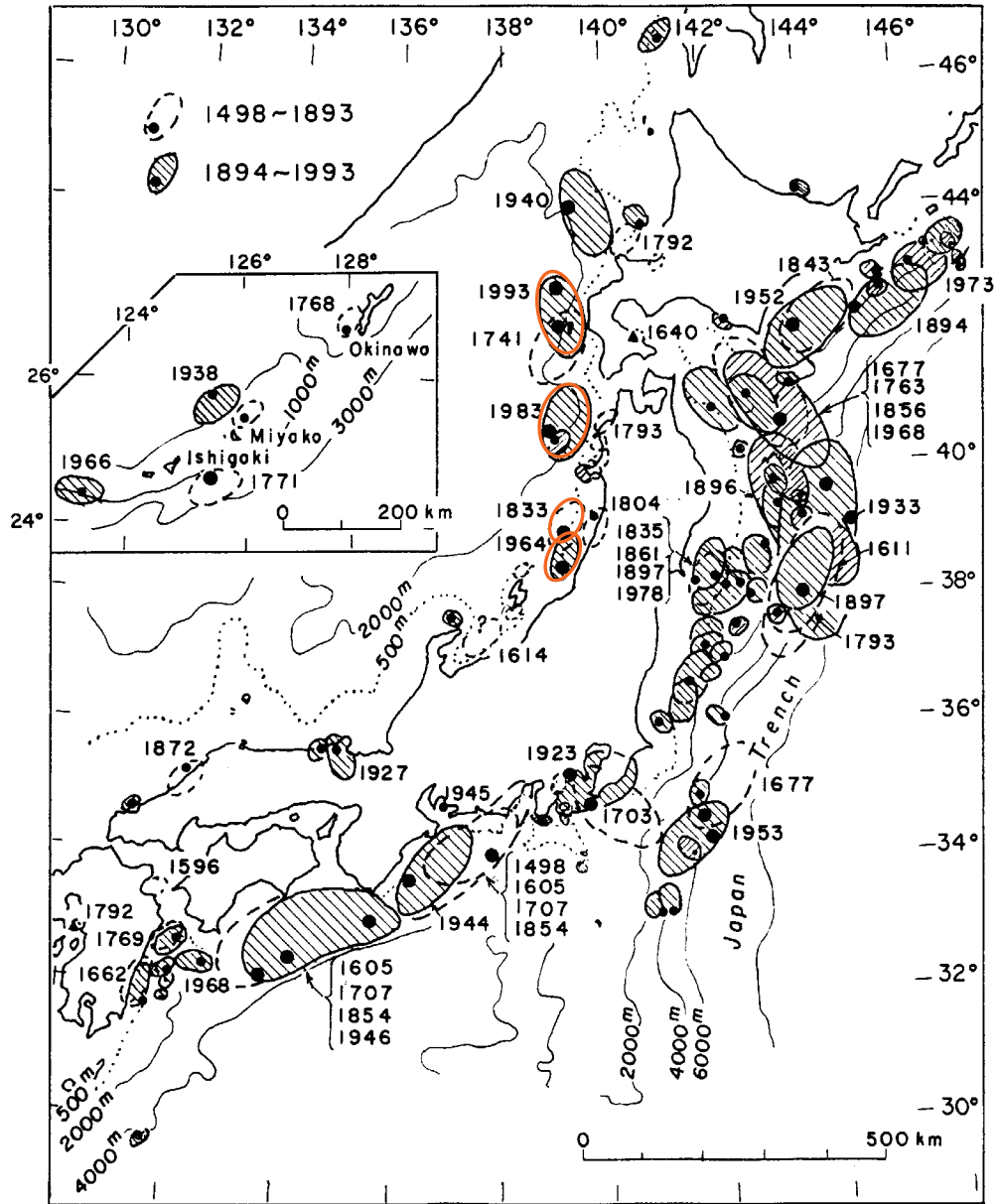
C_s : 浮遊砂体積濃度 (浮遊砂濃度連続式より算出, 1%相当を上限とする)

log-wake 則 : 対数則 $u_*/U = \kappa / \{ \ln(h/Z_0) - 1 \}$ に wake 関数 (藤井ほか(1998)⁽²⁶⁾ より) を付加した式



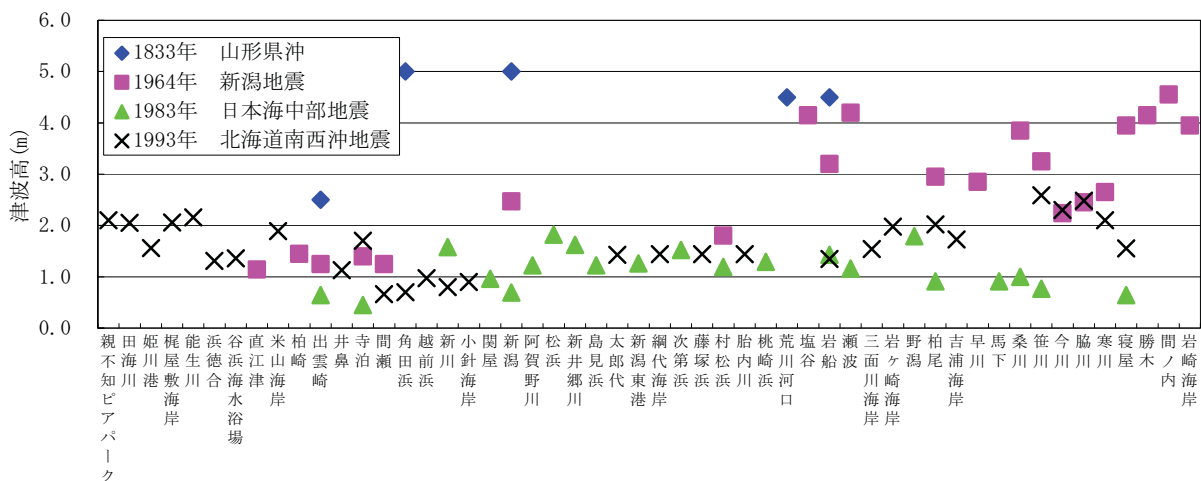
*)本報告書では7号機のみを評価

第 11.2-1 図 評価フロー

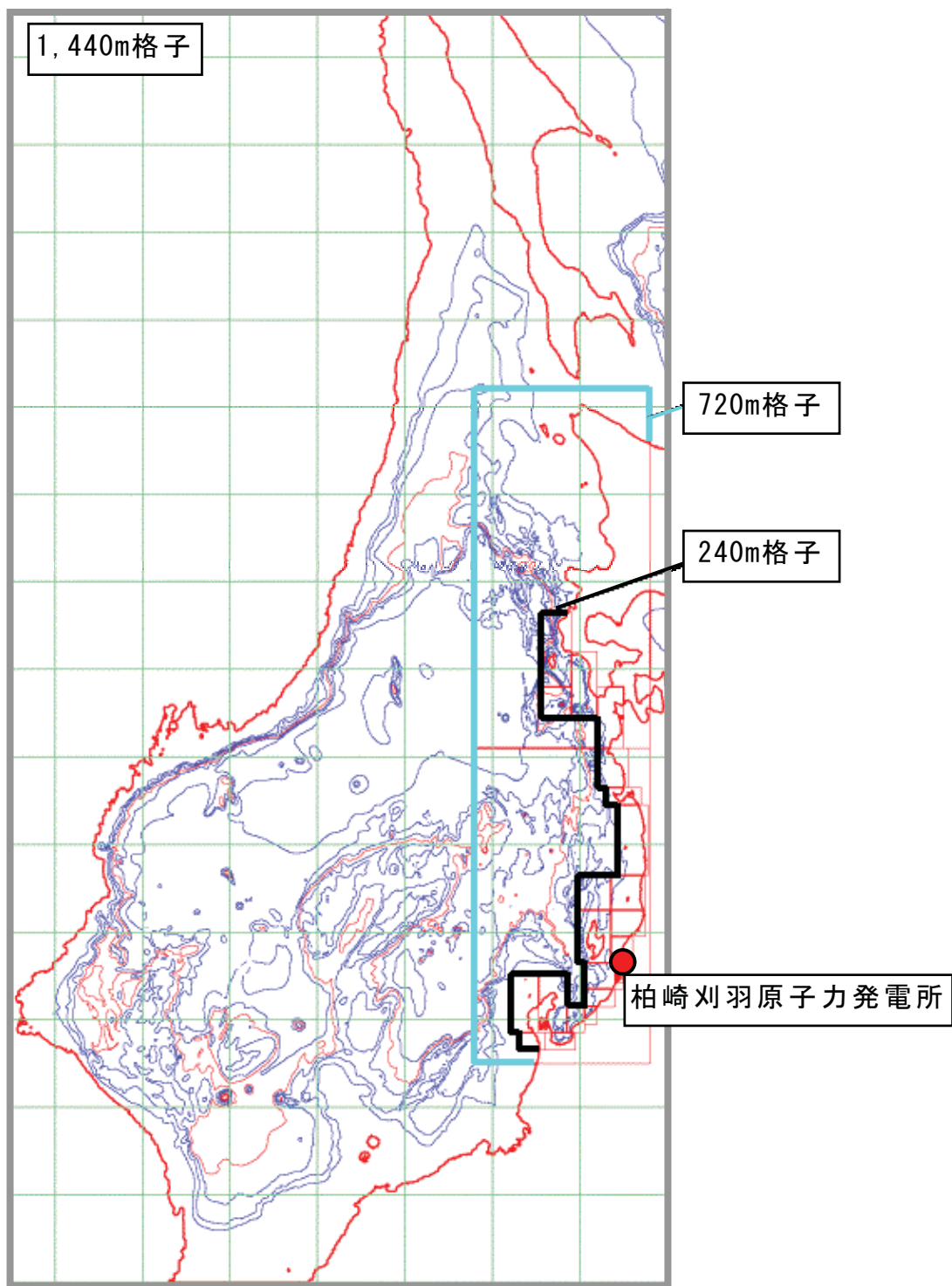


(羽鳥(1994) ⁽³⁵⁾)

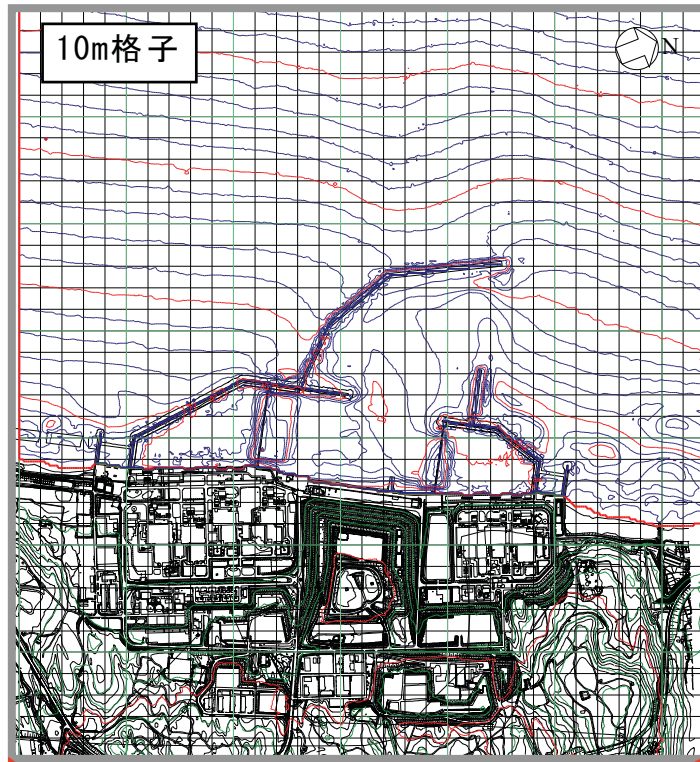
第 11.3.1-1 図 日本海で発生した地震と津波波源域



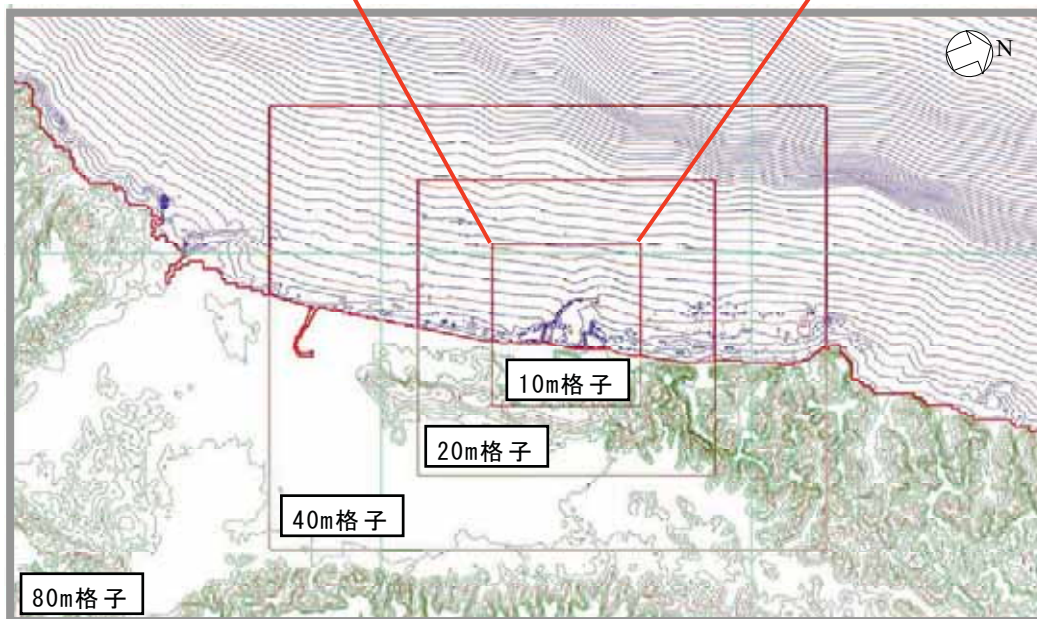
第 11. 3. 1-2 図 新潟県本州沿岸における既往津波高の比較



第 11.3.1-3 図(1) 計算格子分割と水深 (全域)
 (水深コンター間隔 : 500m)



発電所近傍（水深コンター間隔：1m）



発電所周辺（水深コンター間隔：2m）

第 11.3.1-3 図(2) 計算格子分割と水深（発電所周辺及び近傍）

長谷川・首藤ほか(1987)⁽²²⁾ 提案の方法

計算格子間隔は津波の空間波形の1波長Lの1/20以下に設定すればよい

$$\Delta x \leq \frac{L}{20}$$

ここに、 Δx : 計算格子間隔

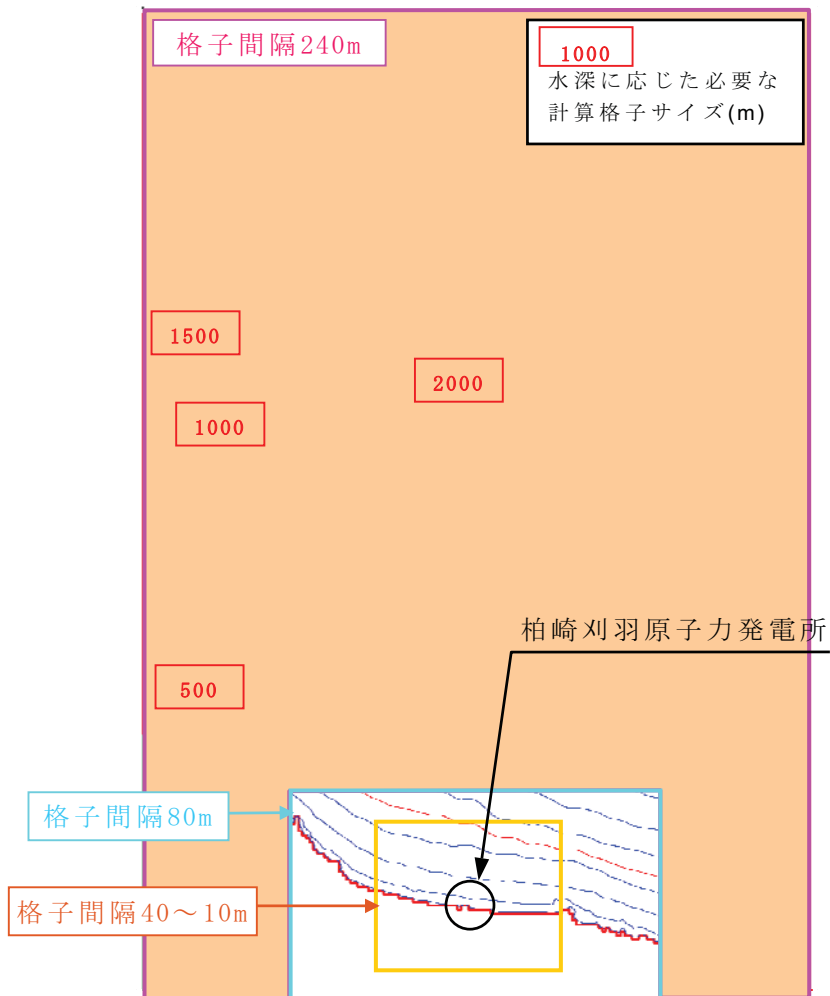
L : 1波長

$$L = \sqrt{gh} \times T$$

g : 重力加速度

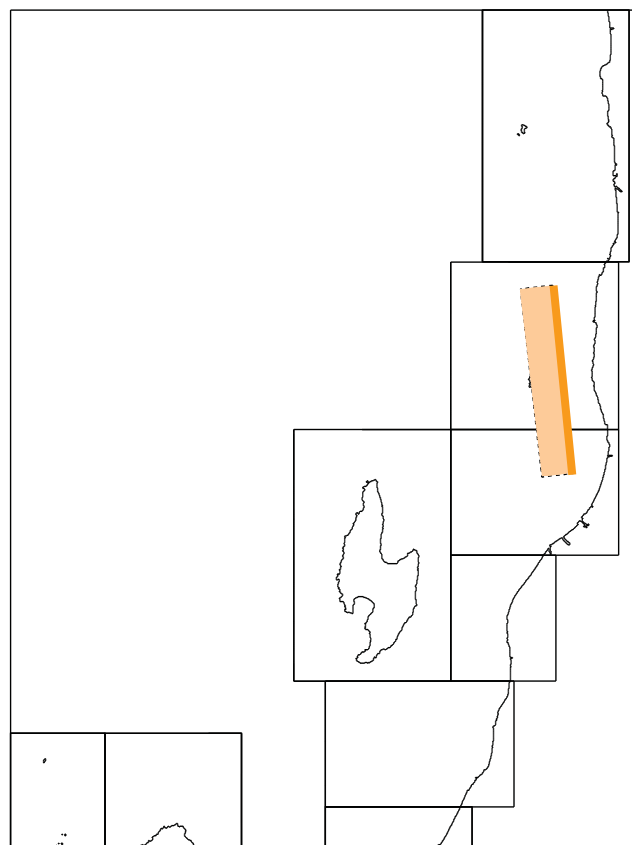
h : 水深

T : 周期



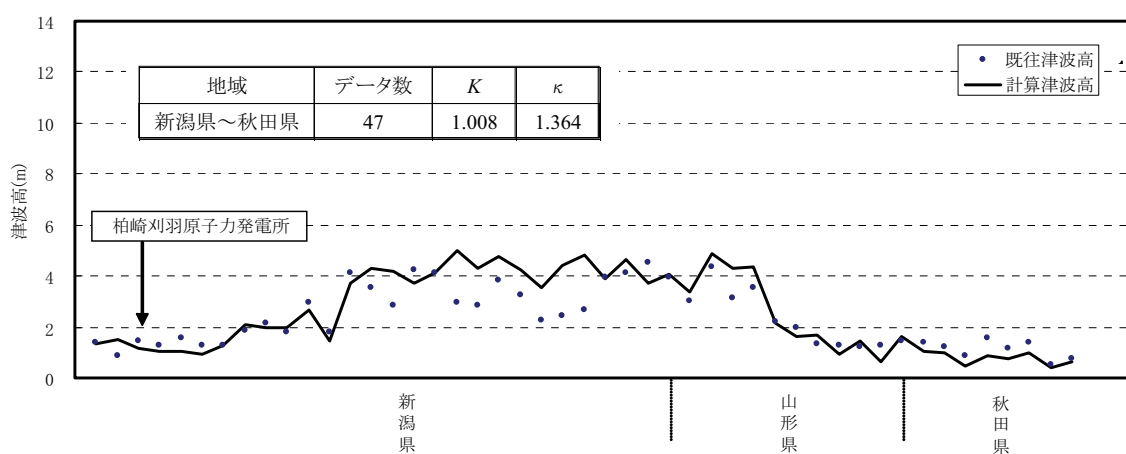
第 11.3.1-4 図 必要計算格子サイズのコンター*
(コンター間隔 : 100m)

*) 波の周期は 7sec とした



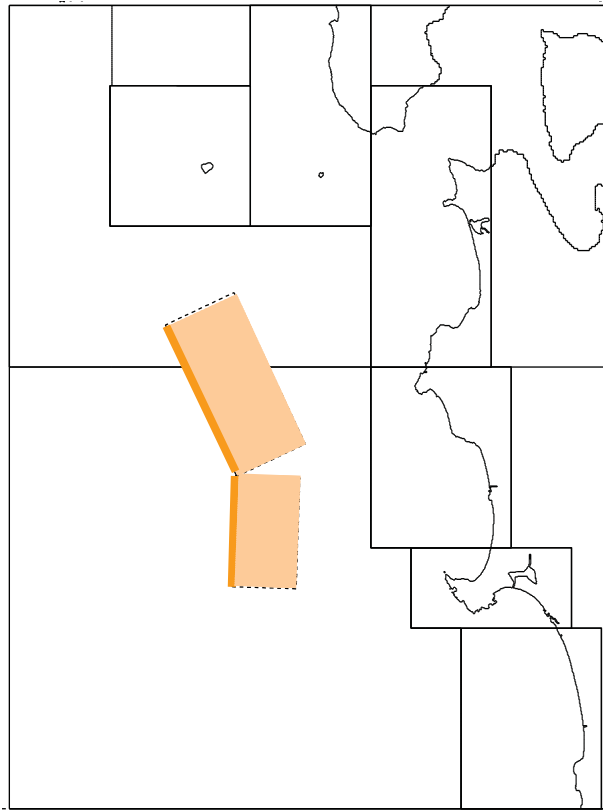
	Mw	断層長さ L (km)	断層幅 W (km)	すべり量 D (m)	断層上縁深さ d (km)	走向 θ (°)	傾斜角 δ (°)	すべり角 λ (°)
モデル諸元	7.43	65	20	3.85	0.0	194	56	90

第 11.3.1-5 図 1964 年新潟地震津波の断層モデル



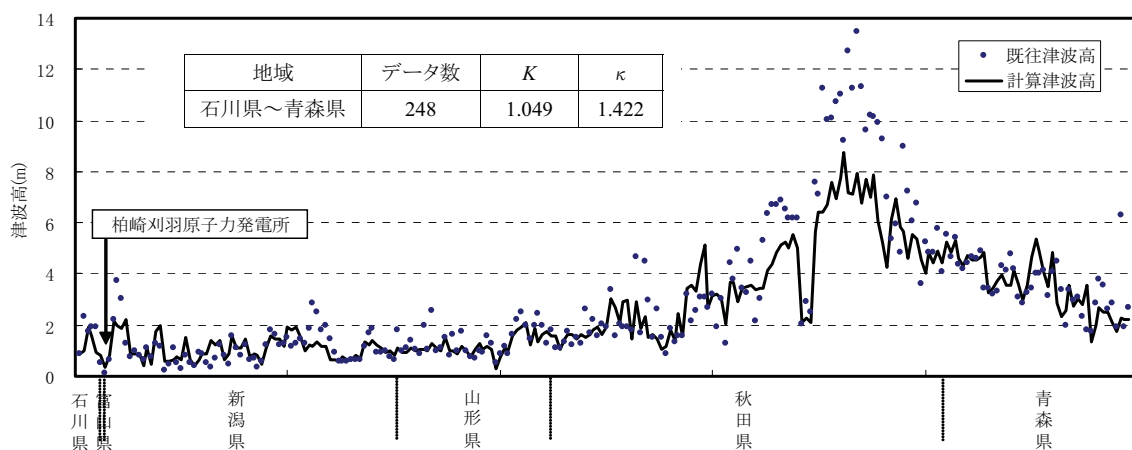
既往痕跡高は、相田ほか(1964)⁽¹¹⁾、土木学会(1966)⁽¹²⁾による

第 11.3.1-6 図 既往津波高と計算津波高との比較
(1964 年新潟地震津波)



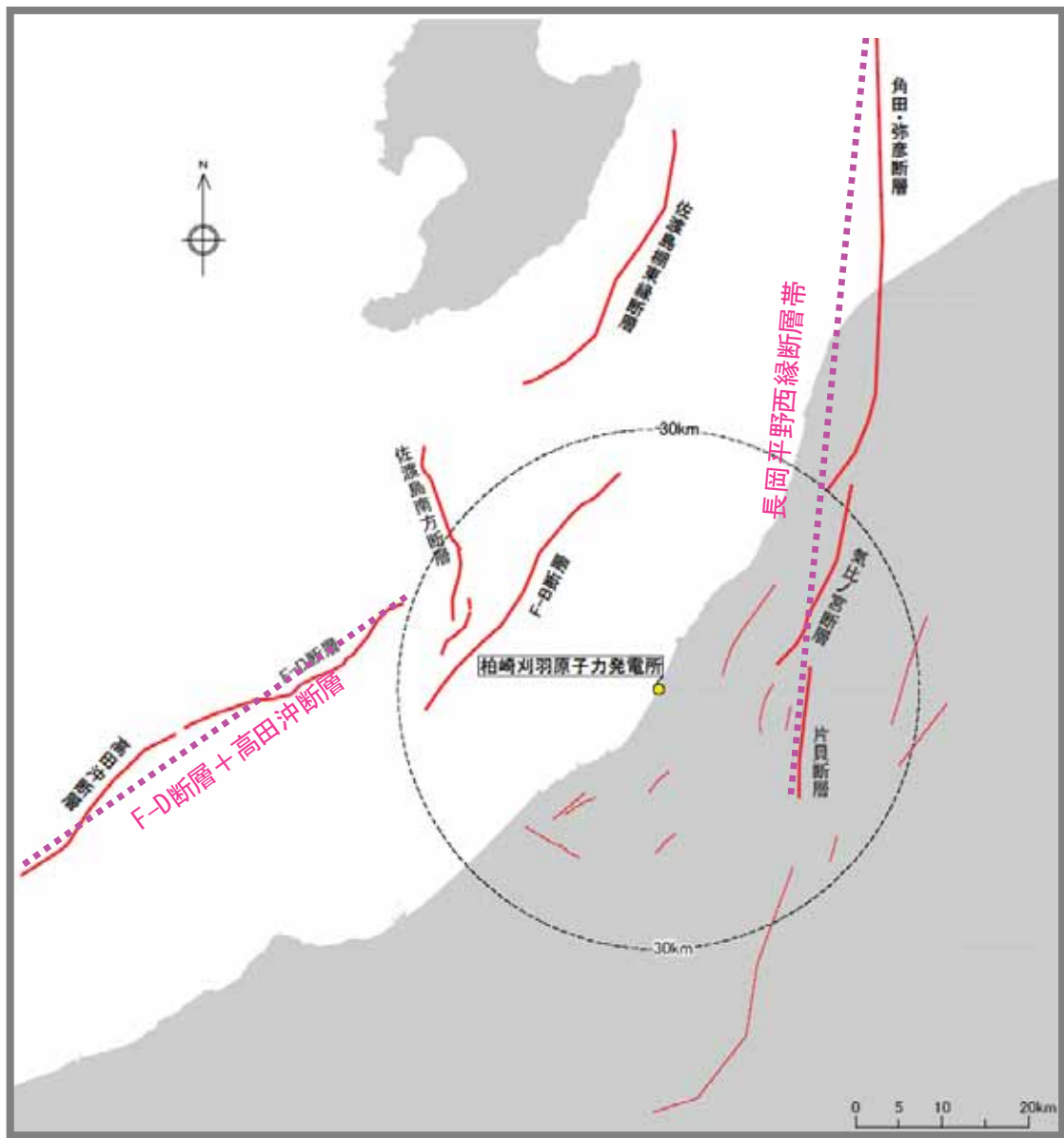
	Mw	断層長さ L (km)	断層幅 W (km)	すべり量 D (m)	断層上縁深さ d (km)	走向 θ (°)	傾斜角 δ (°)	すべり角 λ (°)
モデル諸元	7.74	40	30	7.60	2.0	22	40	90
		60	30	3.05	3.0	355	25	80

第 11.3.1-7 図 1983 年日本海中部地震津波の断層モデル

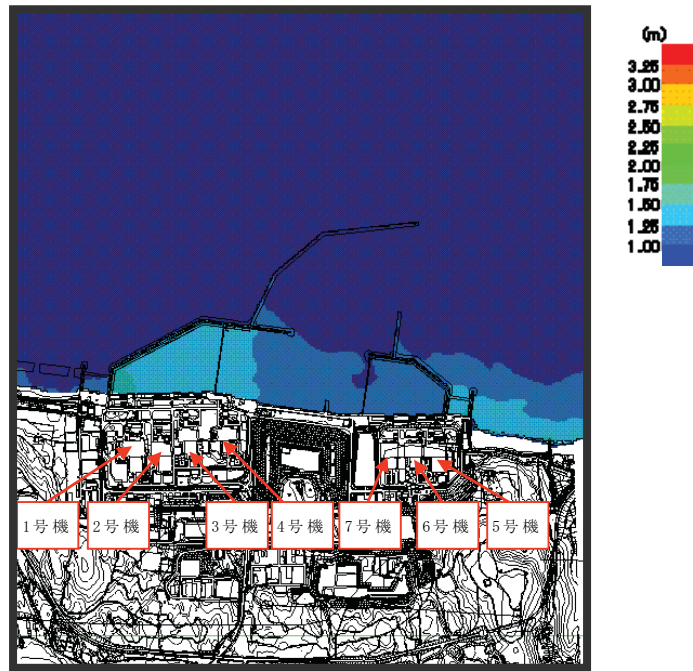


既往痕跡高は、首藤ほか(1984)⁽¹³⁾、気象庁(1984)⁽¹⁴⁾、土木学会(1986)⁽¹⁵⁾による

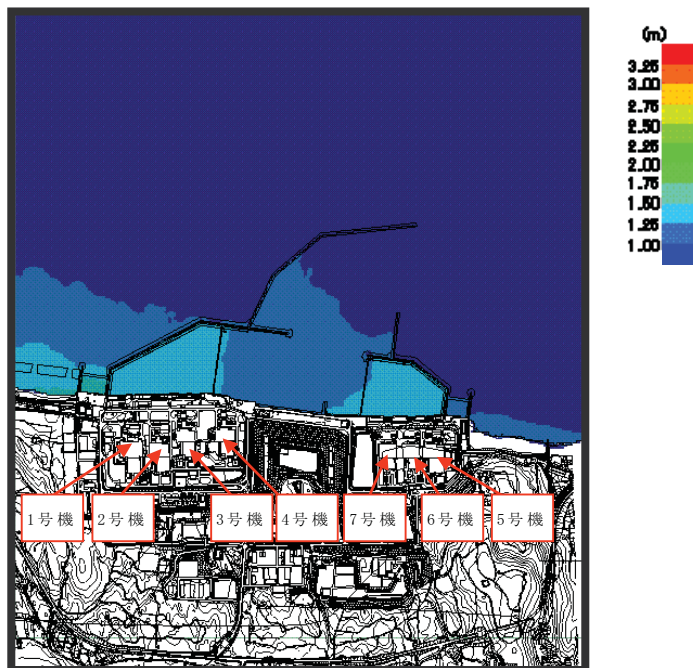
第 11.3.1-8 図 既往津波高と計算津波高との比較
(1983 年日本海中部地震津波)



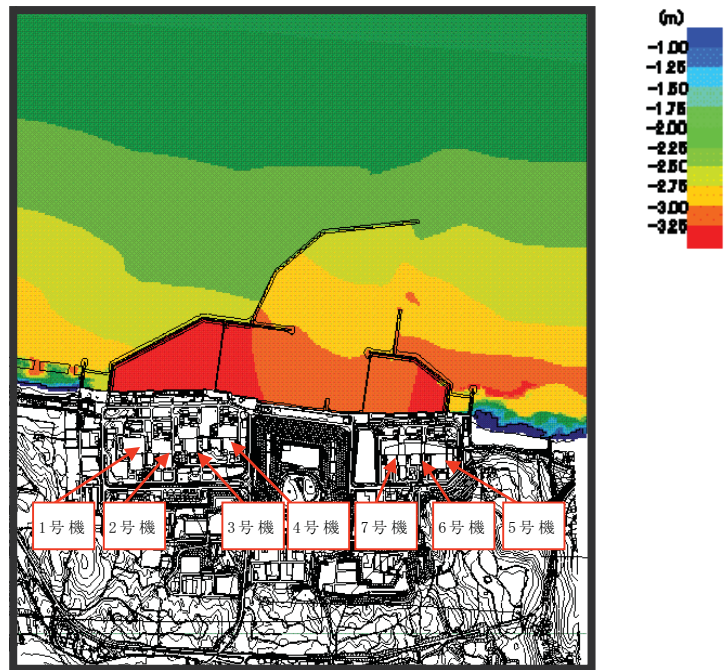
第 11.3.2-1 図 敷地前面の海域活断層分布図



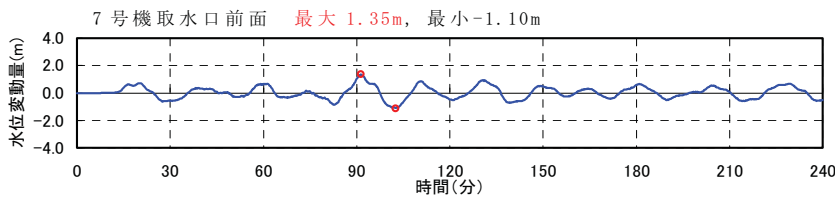
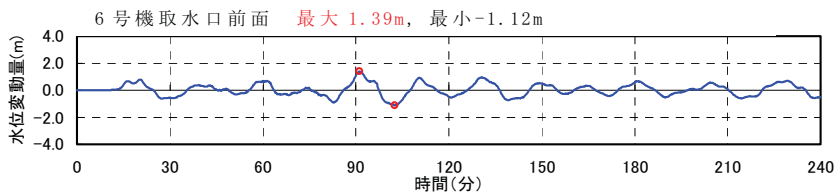
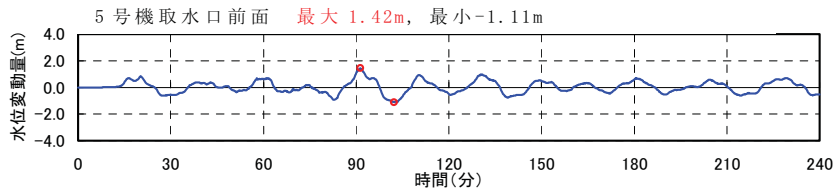
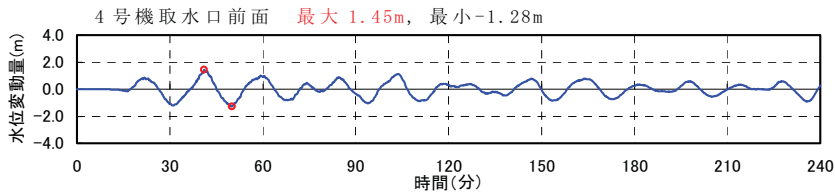
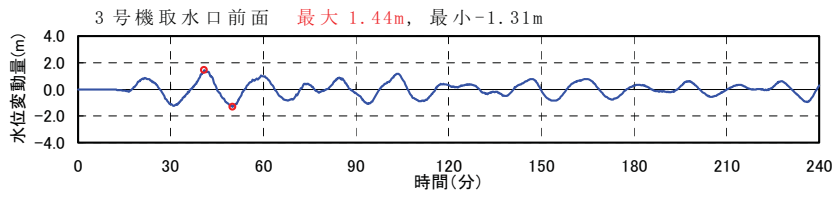
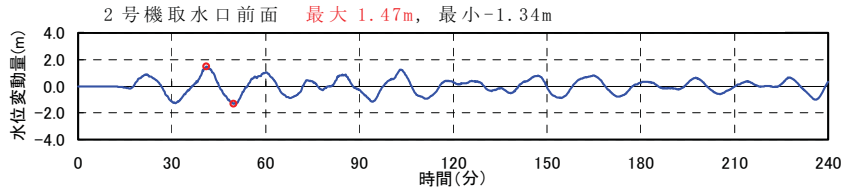
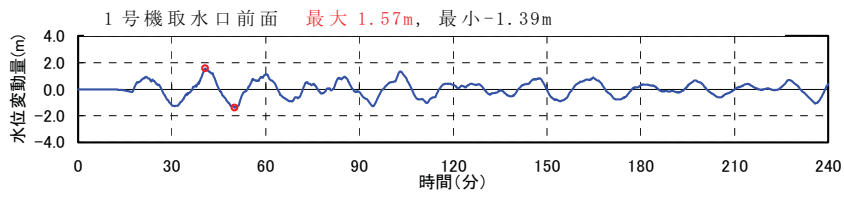
第 11.3.2-2 図(1) 海域活断層による津波の最大水位上昇量分布図
 (1～4号機：佐渡島棚東縁断層)



第 11.3.2-2 図(2) 海域活断層による津波の最大水位上昇量分布図
 (5～7号機：F-D断層＋高田沖断層)

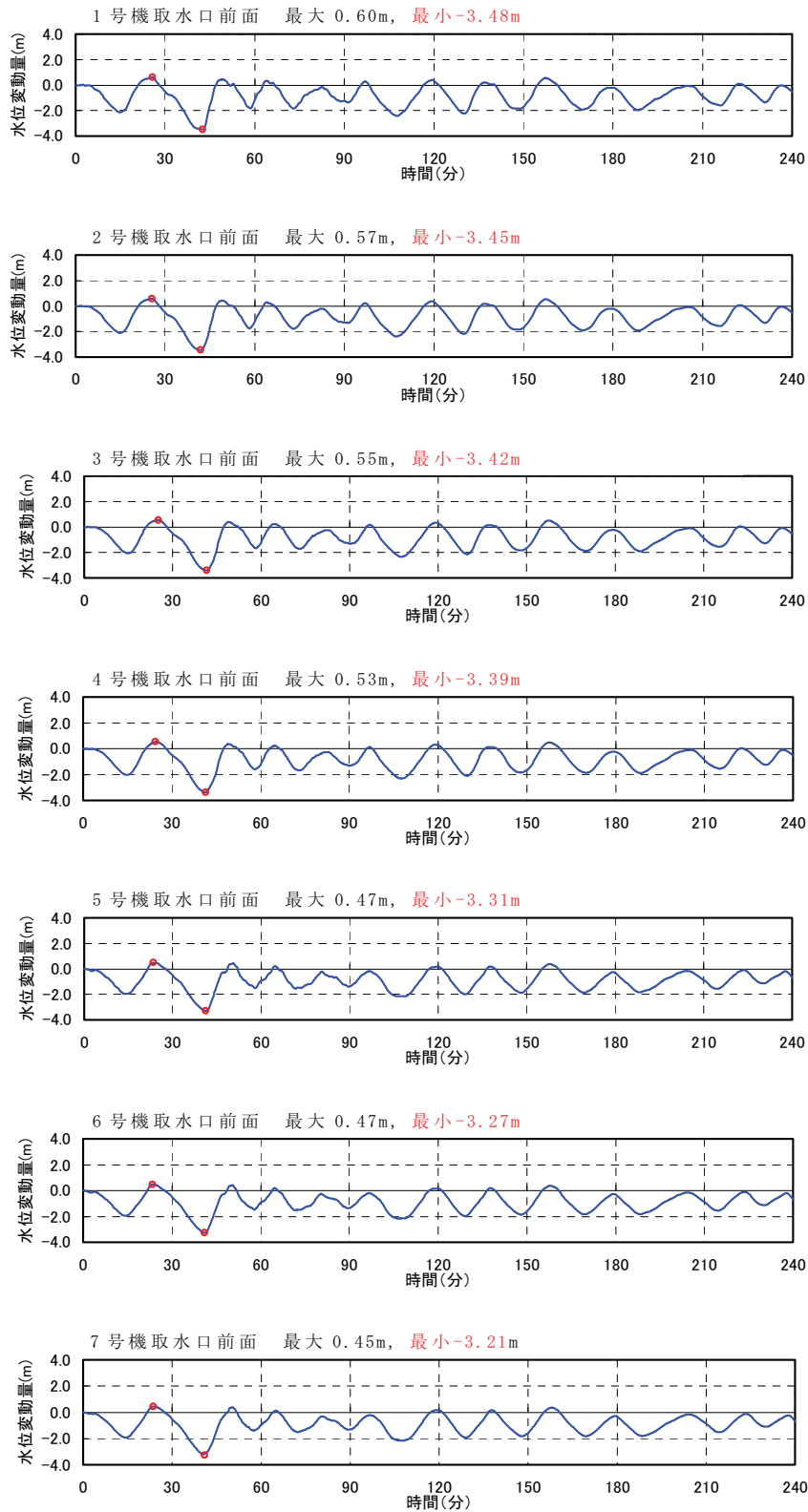


第 11.3.2-3 図 海域活断層による津波の最大水位下降量分布図
 (長岡平野西縁断層帯 ($\delta = 35^\circ$))

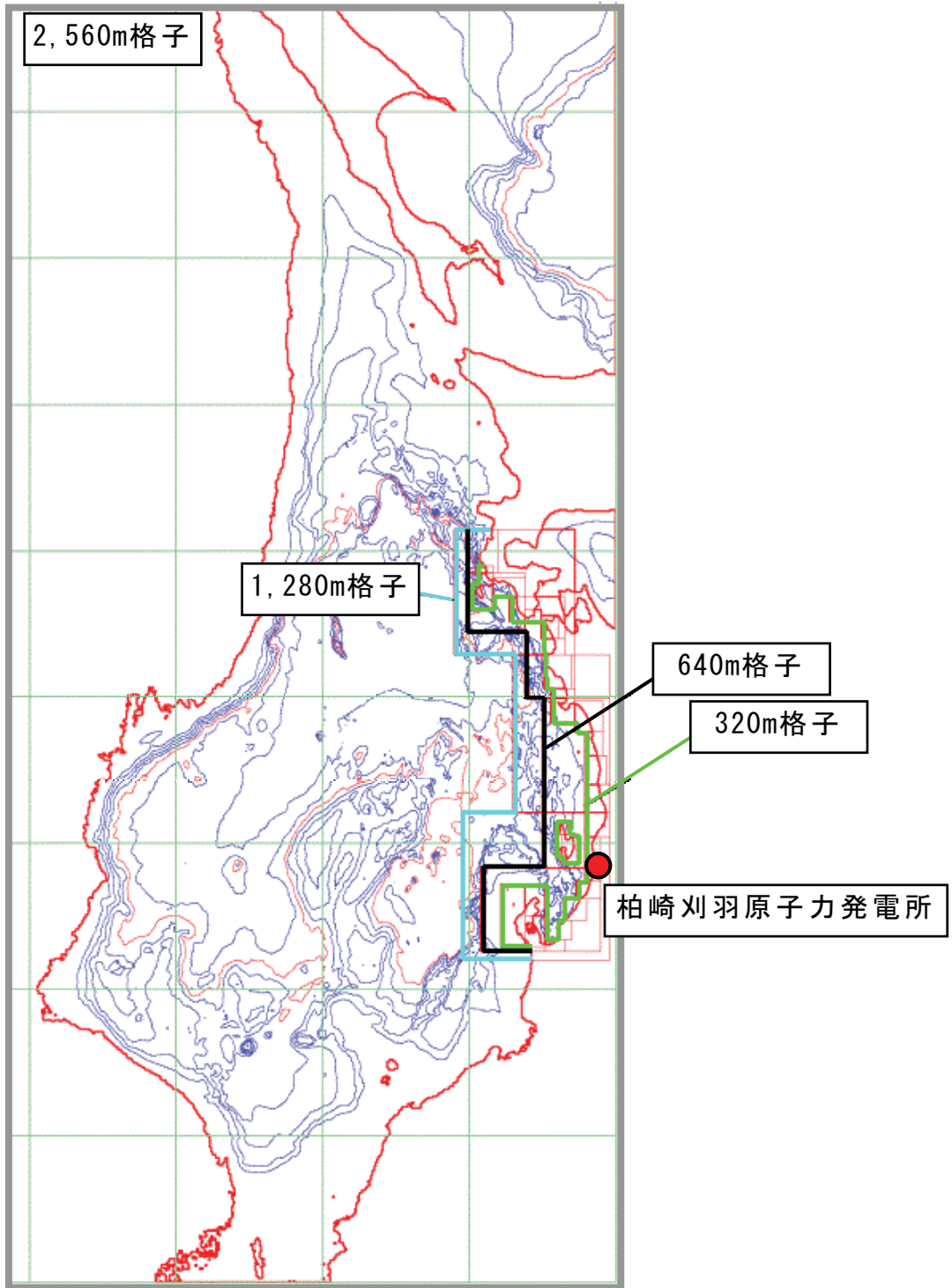


第 11.3.2-4 図(1) 海域活断層による津波の取水口前面における
水位時刻歴 (最大水位上昇量ケース)

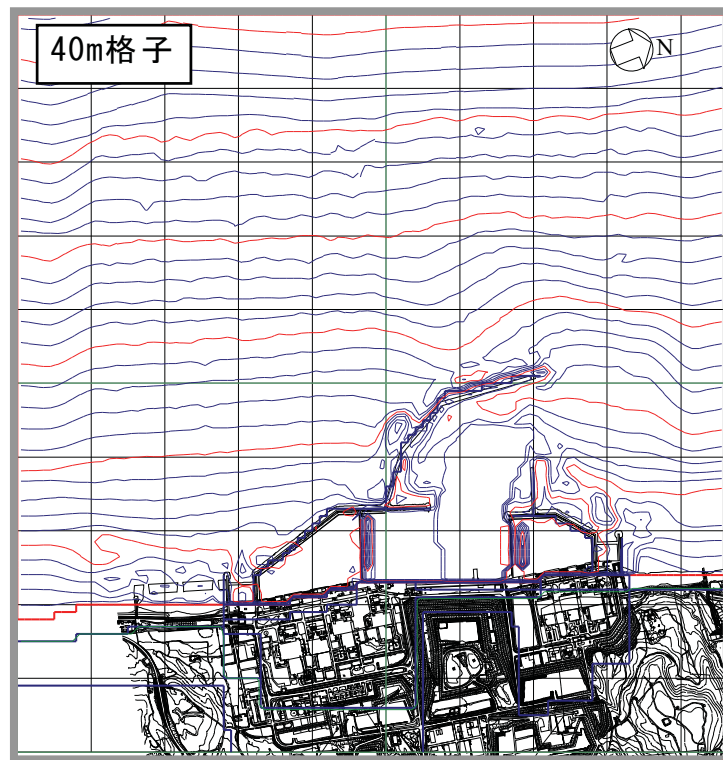
(1～4号機:佐渡島棚東縁断層, 5～7号機:F-D断層+高田沖断層)



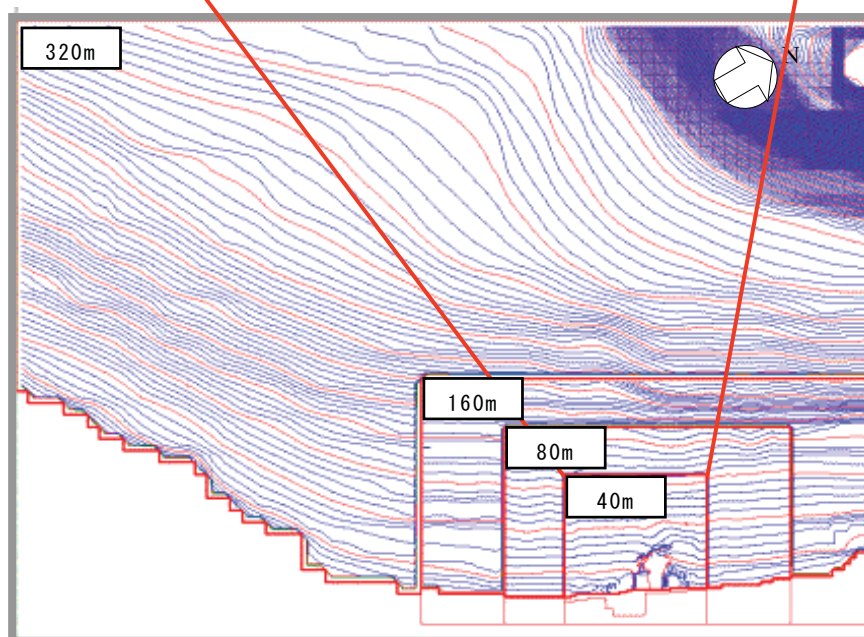
第 11.3.2-4 図(2) 海域活断層による津波の取水口前面における
 水位時刻歴 (最大水位下降量ケース)
 (長岡平野西縁断層帯 ($\delta = 35^\circ$))



第 11.3.3-1 図(1) 概略検討用モデルの計算格子分割と水深（全域）
（水深コンター間隔：500m）

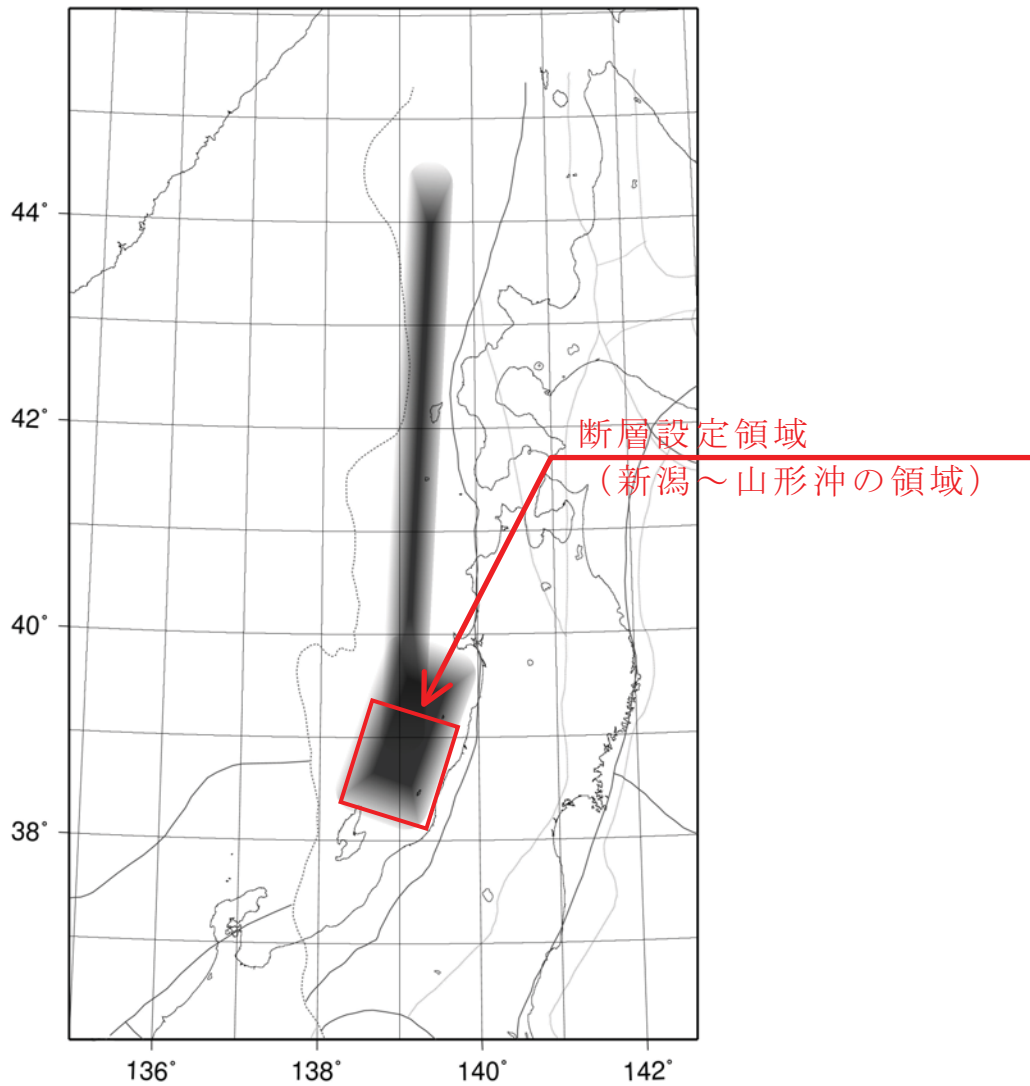


発電所近傍 (水深コンター間隔 : 1m)



発電所周辺 (水深コンター間隔 : 2m)

第 11.3.3-1 図 (2) 概略検討用モデルの計算格子分割と水深
(発電所周辺及び近傍)



日本海東縁部の地震活動域（土木学会(2002) (1)）

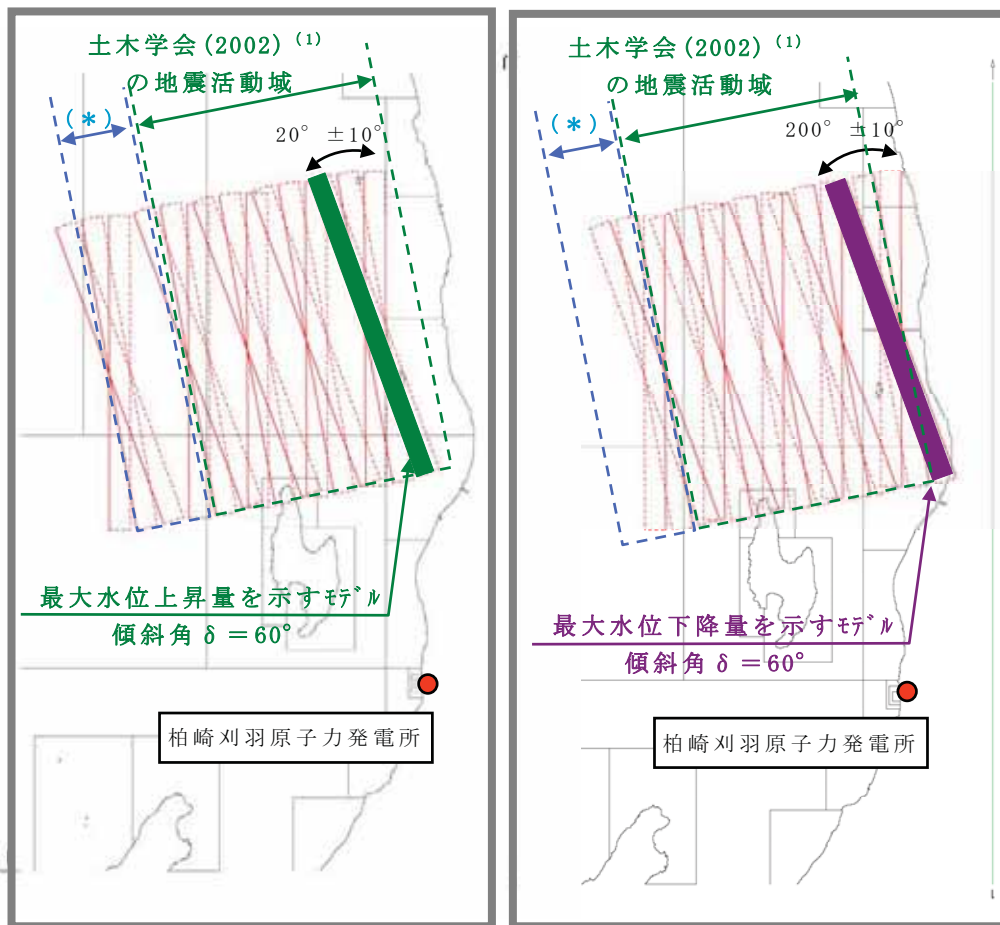
基準断層モデルの諸元

断層名	Mw	断層長さ L(km)	断層幅 W(km)	すべり量 D(m)	断層上縁深さ d(km)	走向 θ (°)	傾斜角 δ (°)	すべり角 λ (°)
高角モデル	7.85	131.1	17.3	9.44	0.0	20・200	60	90
低角モデル	7.85	131.1	30.0	5.45	0.0	20・200	60	90

第 11.3.3-2 図 日本海東縁部の地震活動域と基準断層モデル

概略パラメータスタディの検討内容

諸元	パラメータの設定範囲	ケース数
位置	新潟～山形沖の活動域に東西方向約25km 間隔を基本に設定	5
走向 θ	基準, 基準 $\pm 10^\circ$	3
傾斜角 δ	高角 (60°), 低角 (30°)	2
傾斜方向	東傾斜, 西傾斜	2
組合せ計		60



東傾斜モデルのパラメータスタディ

西傾斜モデルのパラメータスタディ

(*) 地震調査研究推進本部 (2003) ⁽²⁵⁾ による日本海東縁部の長期評価に示される地震活動域で, 土木学会 (2002) ⁽¹⁾ に示される範囲を超える部分

第 11.3.3-3 図 日本海東縁部に想定される津波の概略パラメータスタディ

詳細パラメータスタディの検討内容

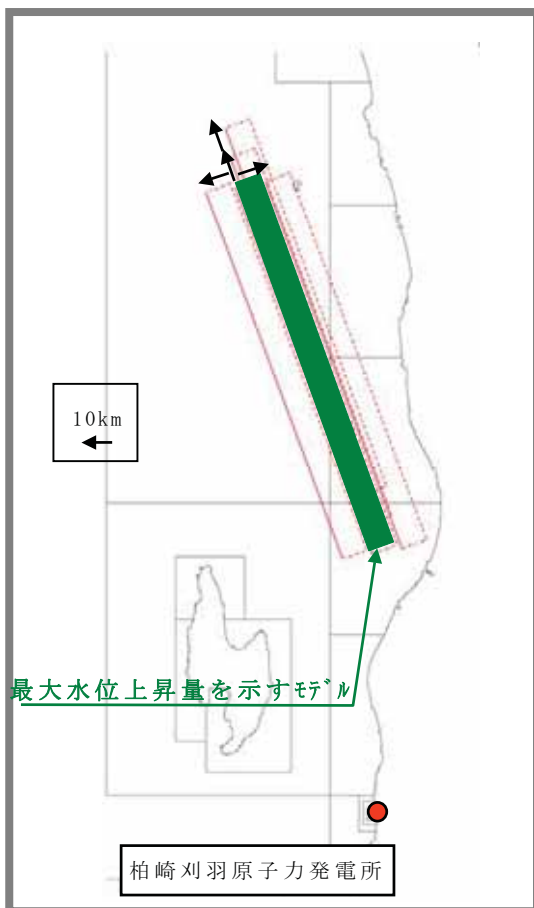
諸元	パラメータの設定範囲	ケース数
位置	最大水位上昇量（下降量）モデルを基準に 10km 単位で移動	5

↓

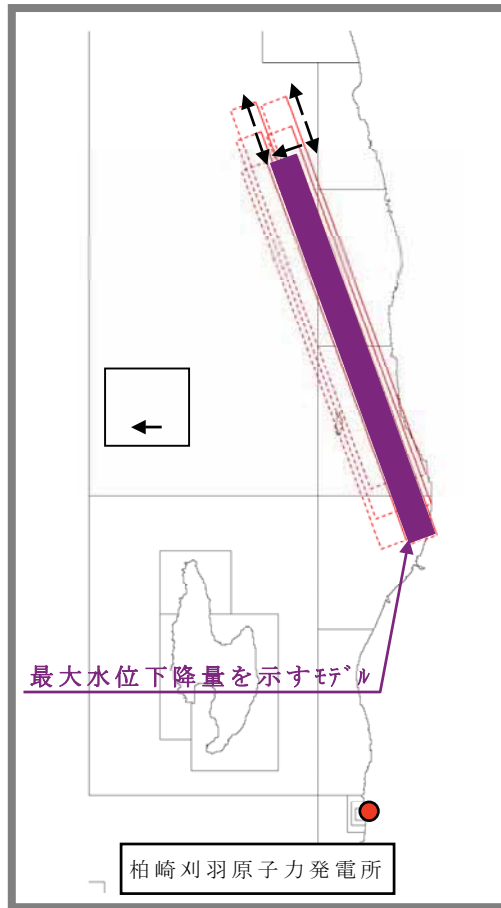
最大水位上昇量（下降量）を示す各モデルに対して
以下のパラメータスタディ

↓

断層 上縁深さ d	0, 2.5km, 5.0km	3
傾斜角 δ	60° , 52.5° , 45°	3
組合せ計		14

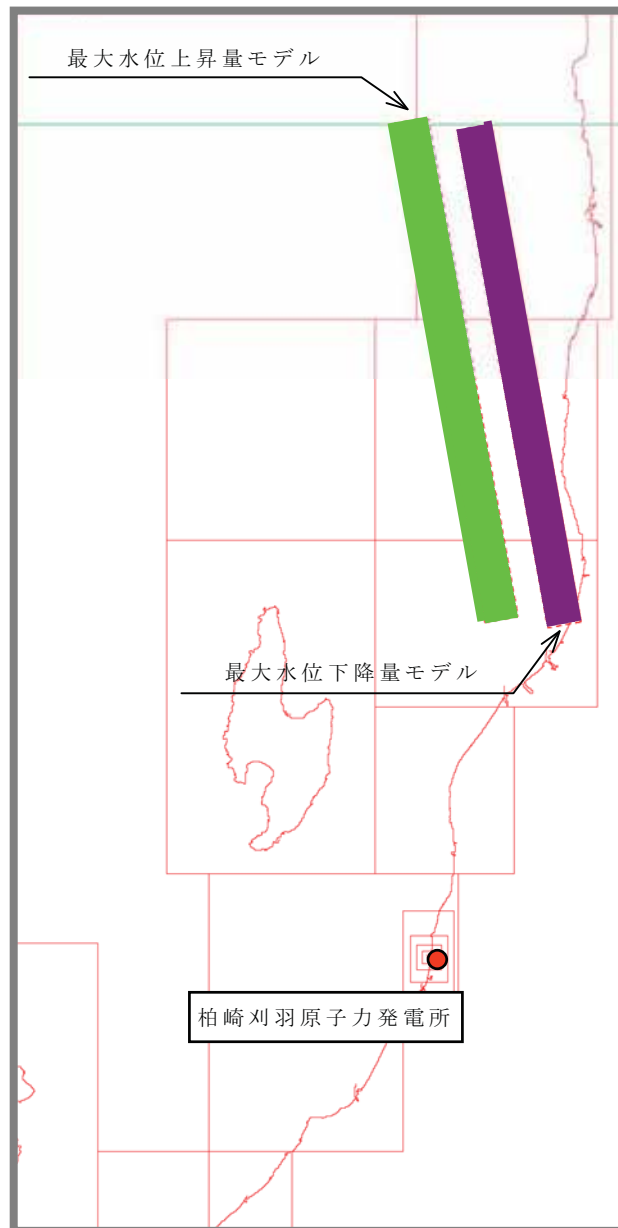


最大水位上昇量モデルのパラメータスタディ

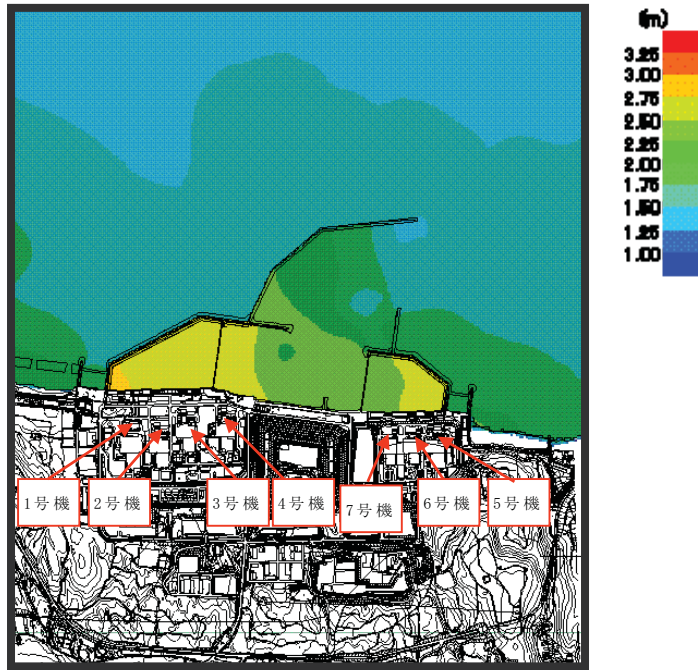


最大水位下降量モデルのパラメータスタディ

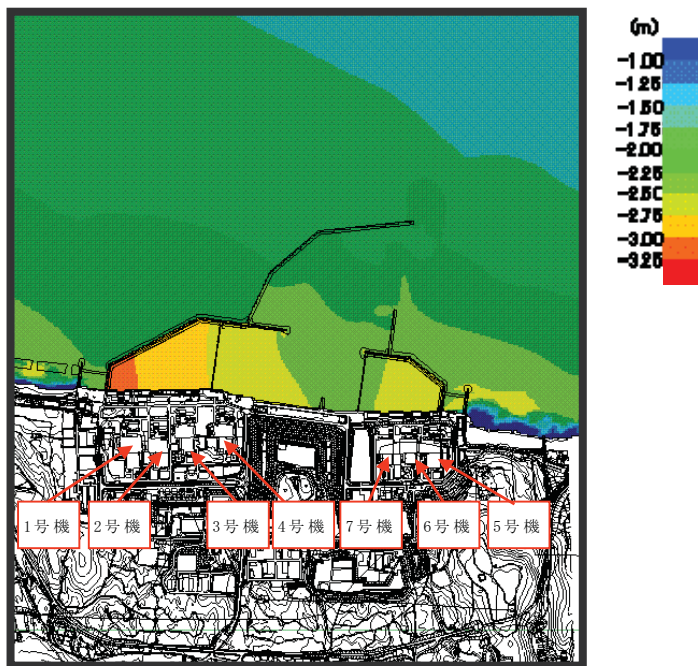
第 11.3.3-4 図 日本海東縁部に想定される津波の詳細パラメータスタディ



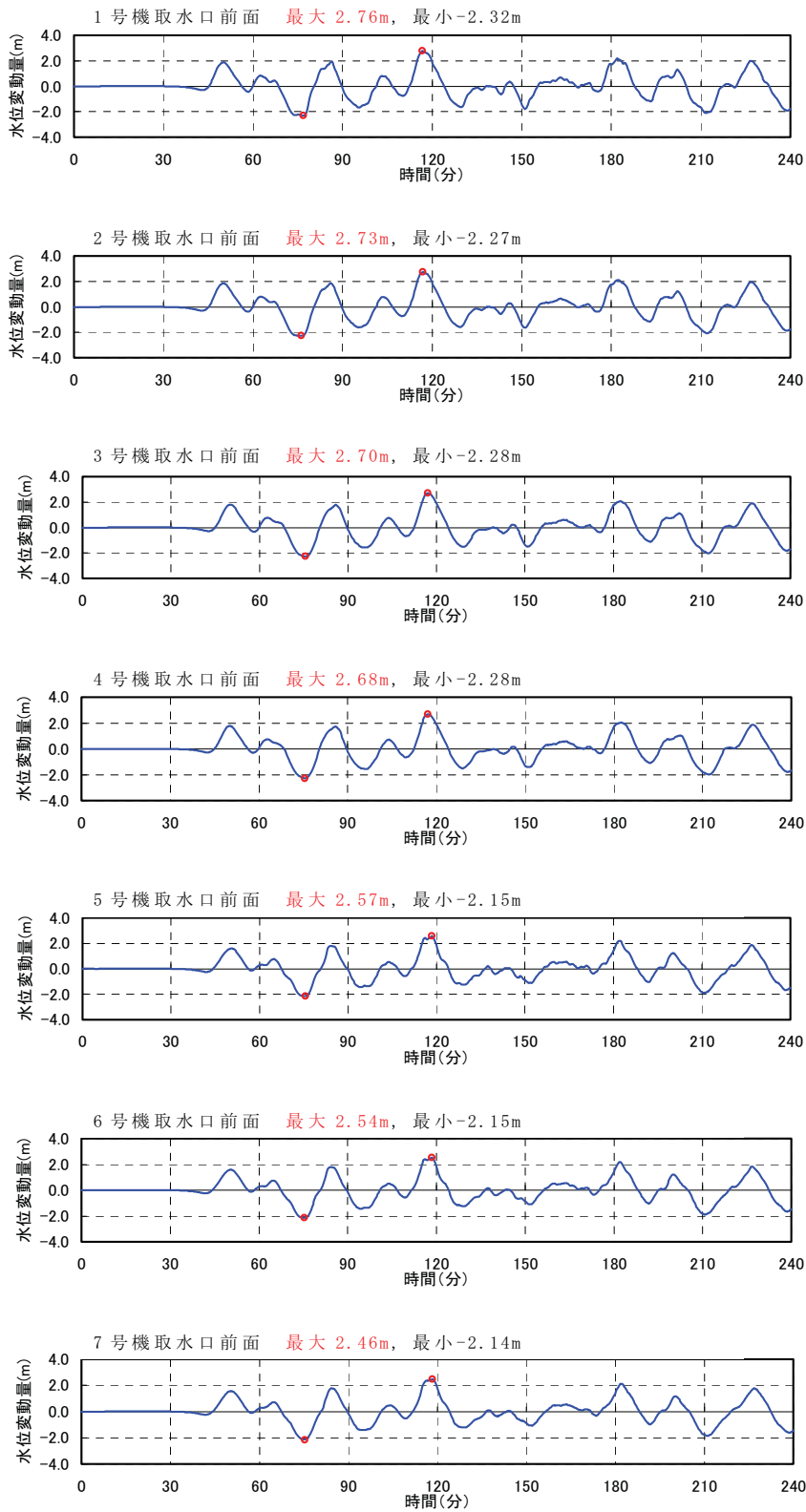
第 11. 3. 3-5 図 日本海東縁部に想定される津波の最大水位上昇量・下降量モデル



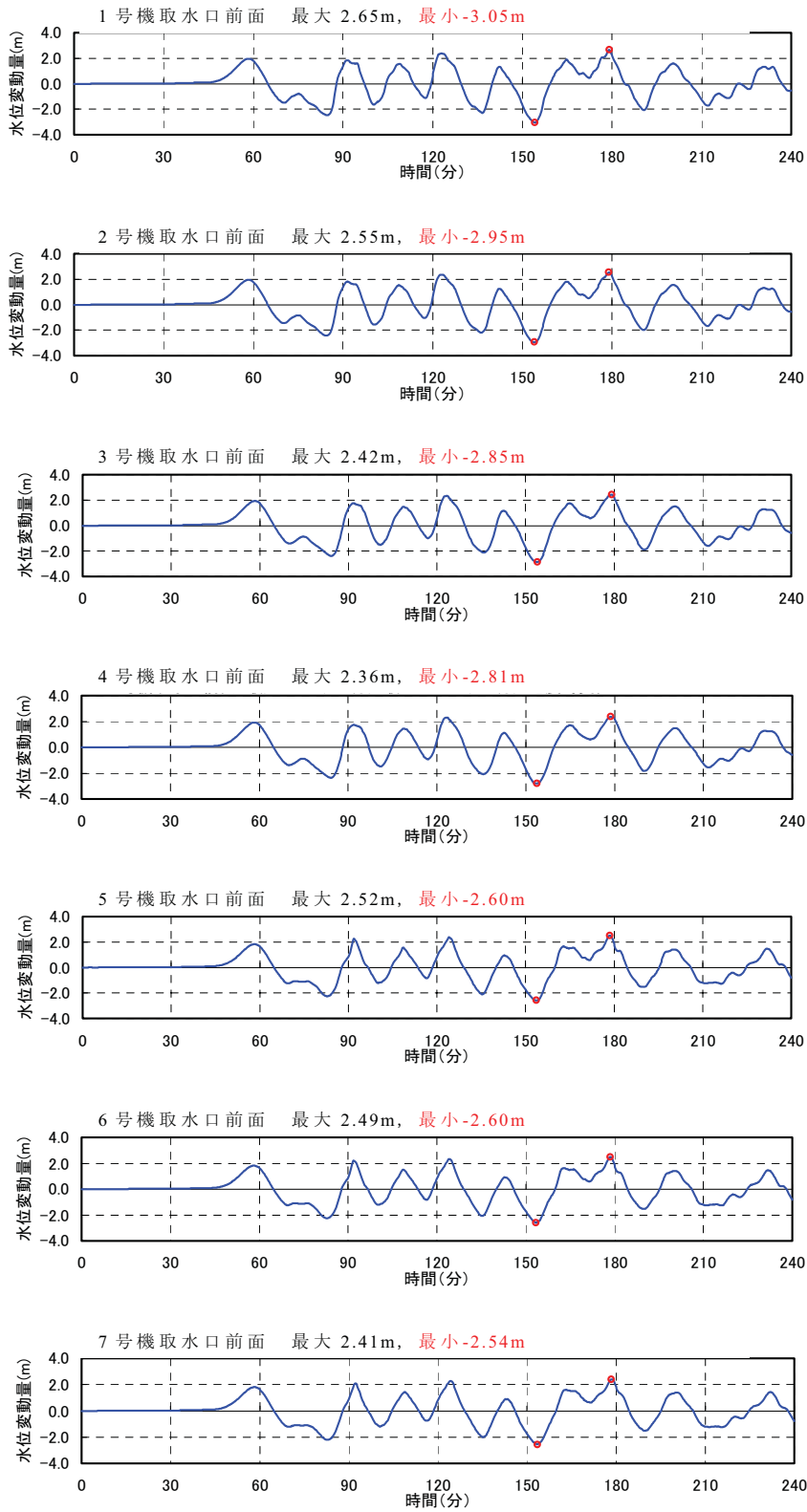
第 11. 3. 3-6 図 日本海東縁部の想定津波による
最大水位上昇量分布図



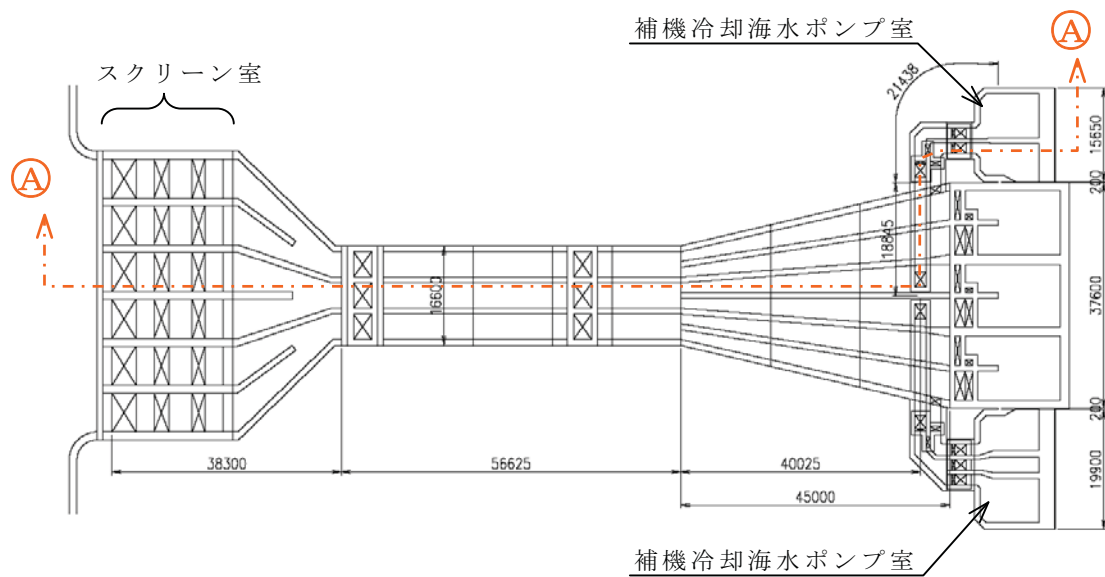
第 11. 3. 3-7 図 日本海東縁部の想定津波による
最大水位下降量分布図



第 11.3.3-8 図(1) 日本海東縁部の想定津波による取水口前面の
水位時刻歴（最大水位上昇量ケース）

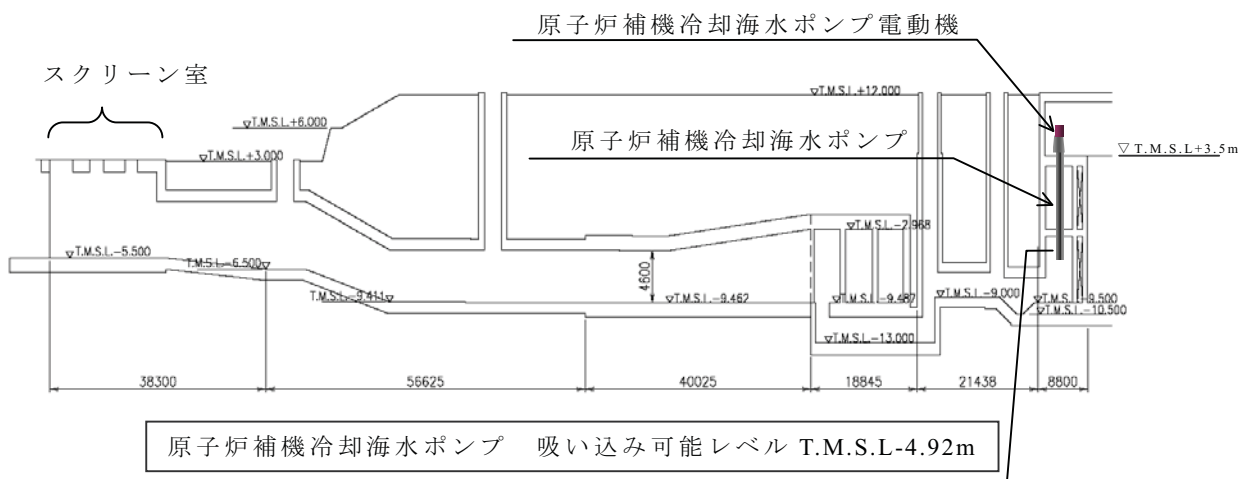


第 11.3.3-8 図(2) 日本海東縁部の想定津波による取水口前面の
水位時刻歴 (最大水位下降量ケース)



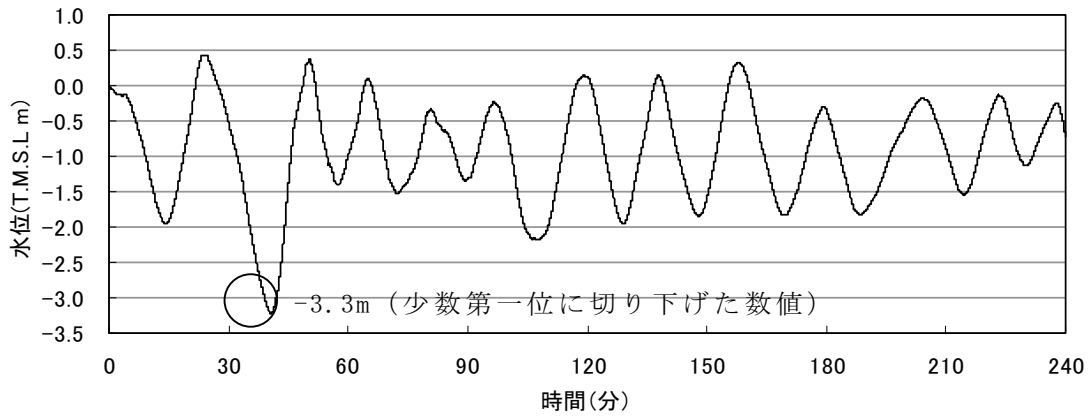
取水施設平面図

A - A 断面

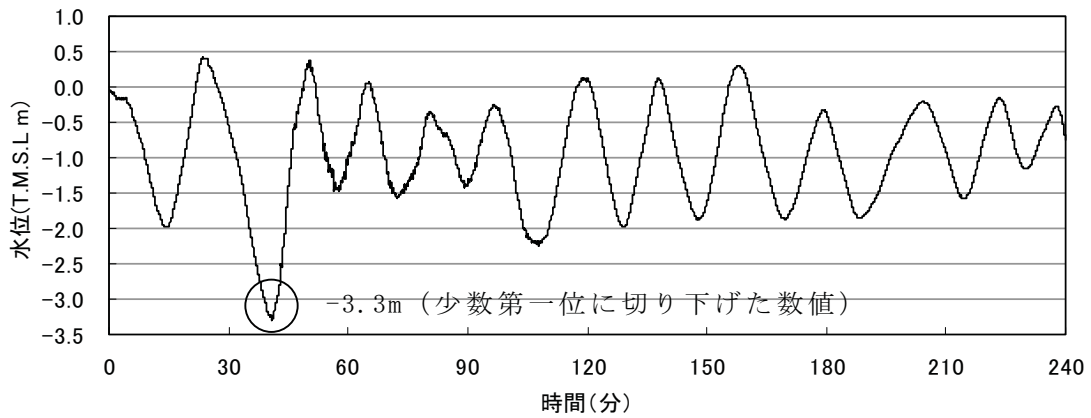


補機冷却海水取水施設断面図

第 11.4.2-1 図 7号機取水施設概要図



取水口前面の津波水位変動



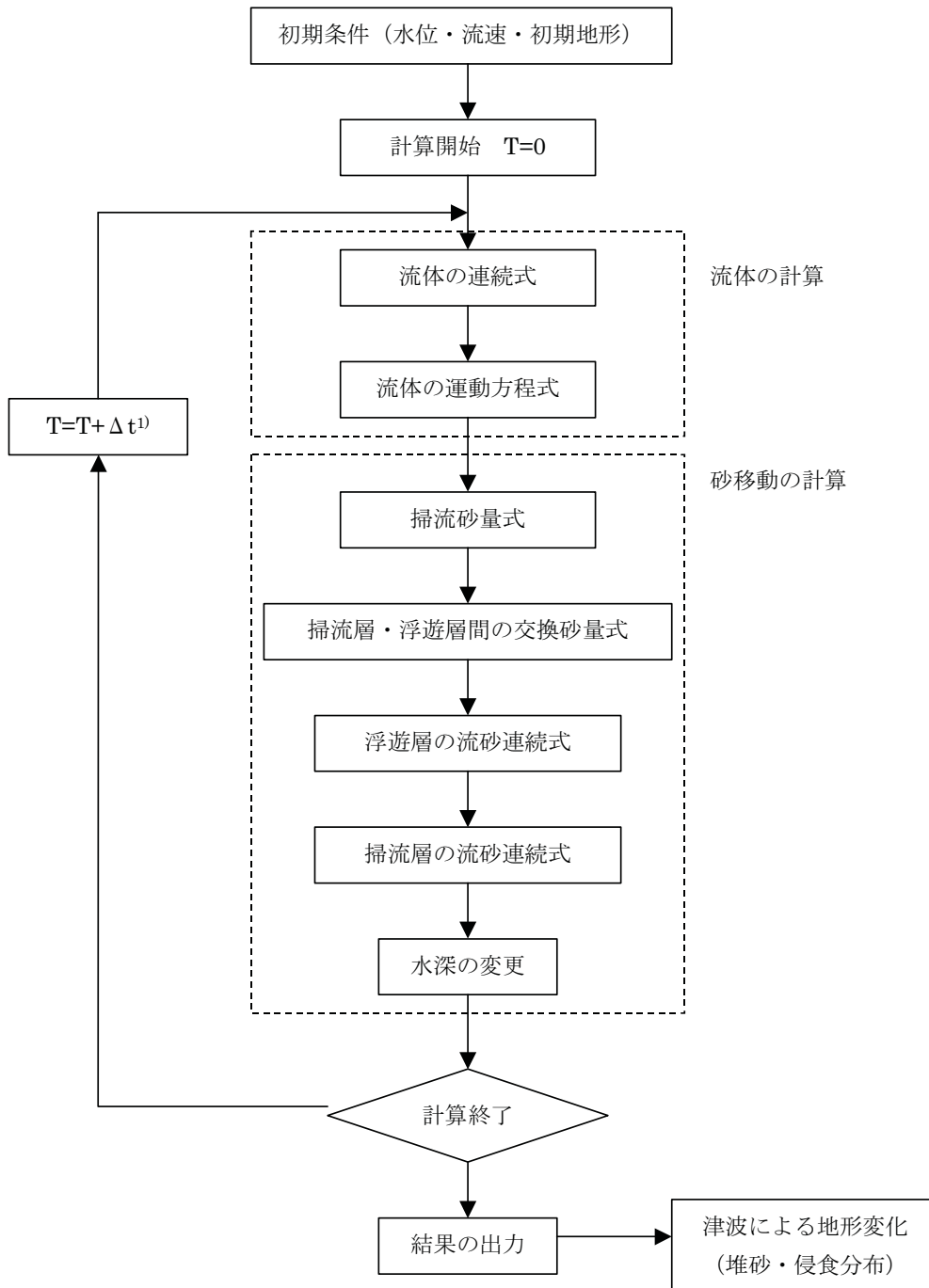
補機冷却海水ポンプ室の津波水位変動

(単位：T. M. S. L. (m))

プラント	最低水位	原子炉補機冷却海水ポンプ 吸い込み可能レベル*)
7号機	-3.3	-4.92

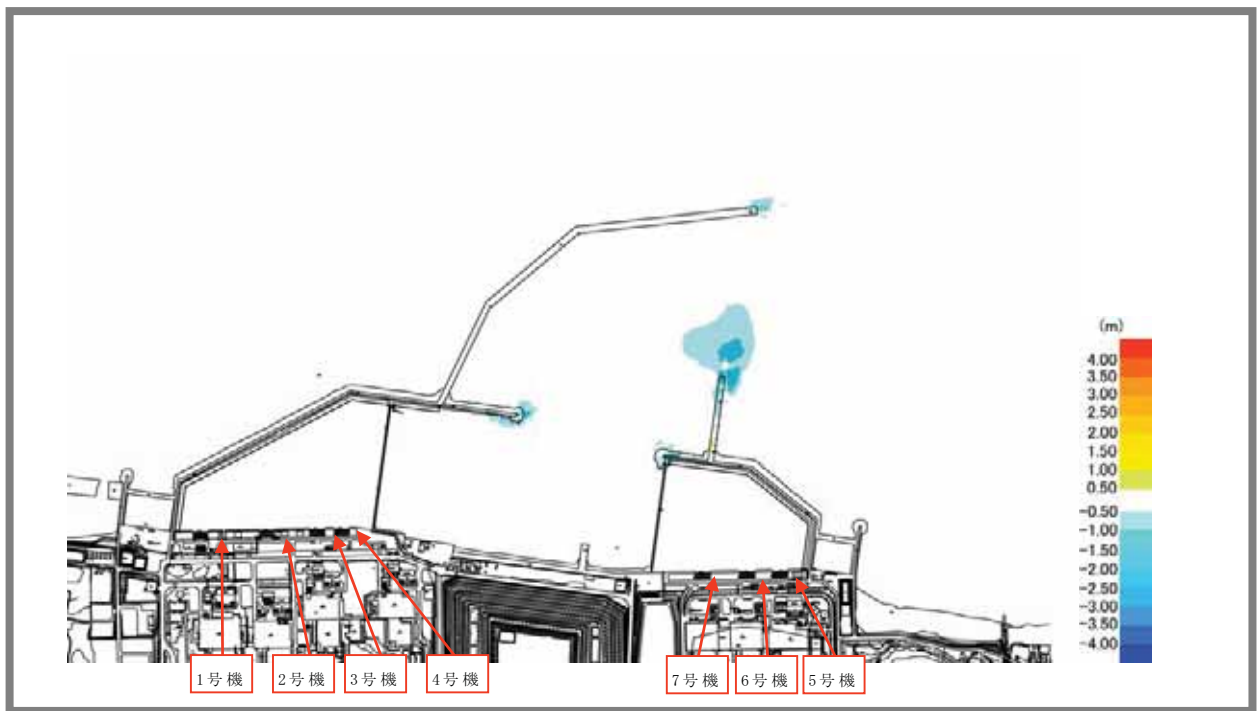
*) 地盤の隆起を考慮

第 11.4.2-2 図 取水施設の水利特性による検討結果

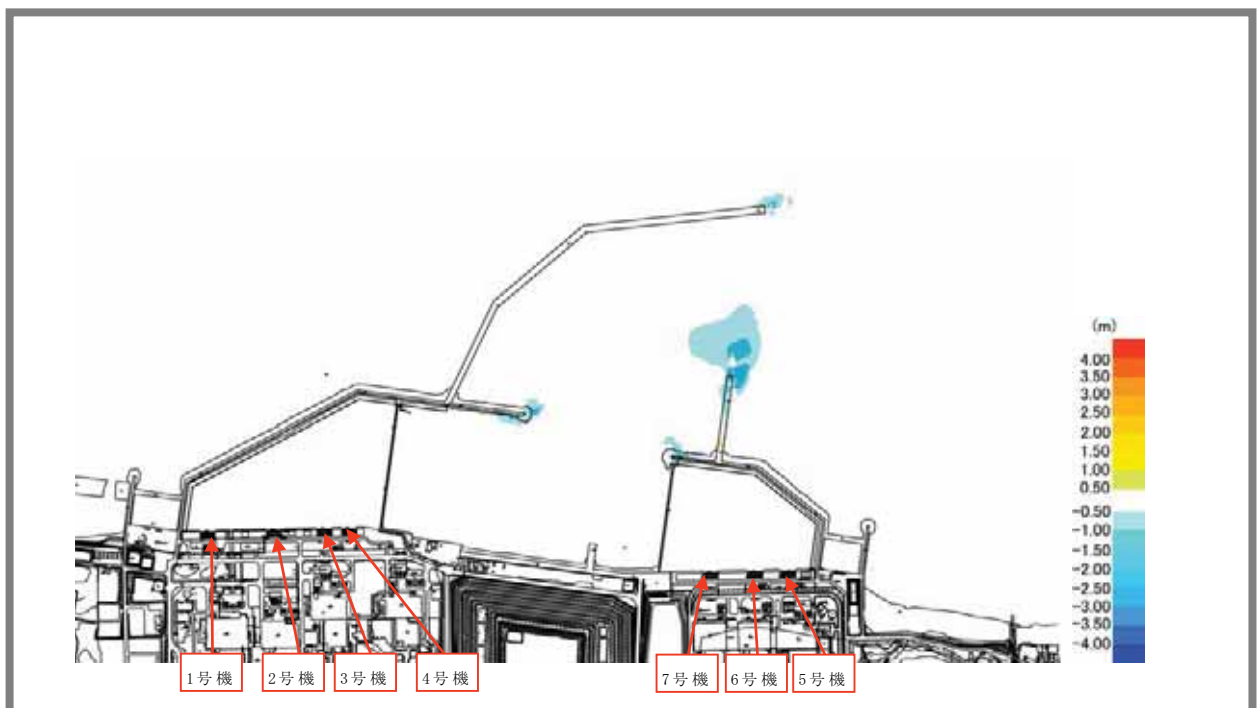


1) 計算時間間隔 $\Delta t=0.25\sim 0.5$ 秒にて計算を実施している。

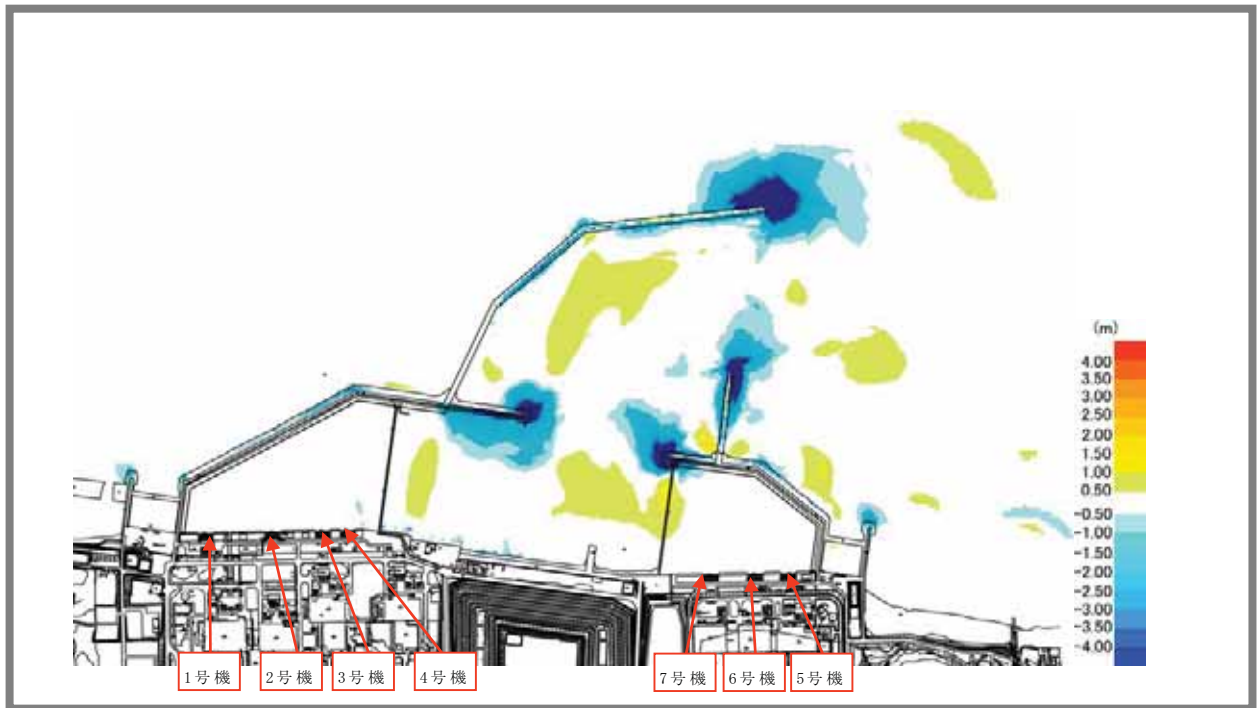
第 11.5.1-1 図 砂移動の数値シミュレーションのフロー



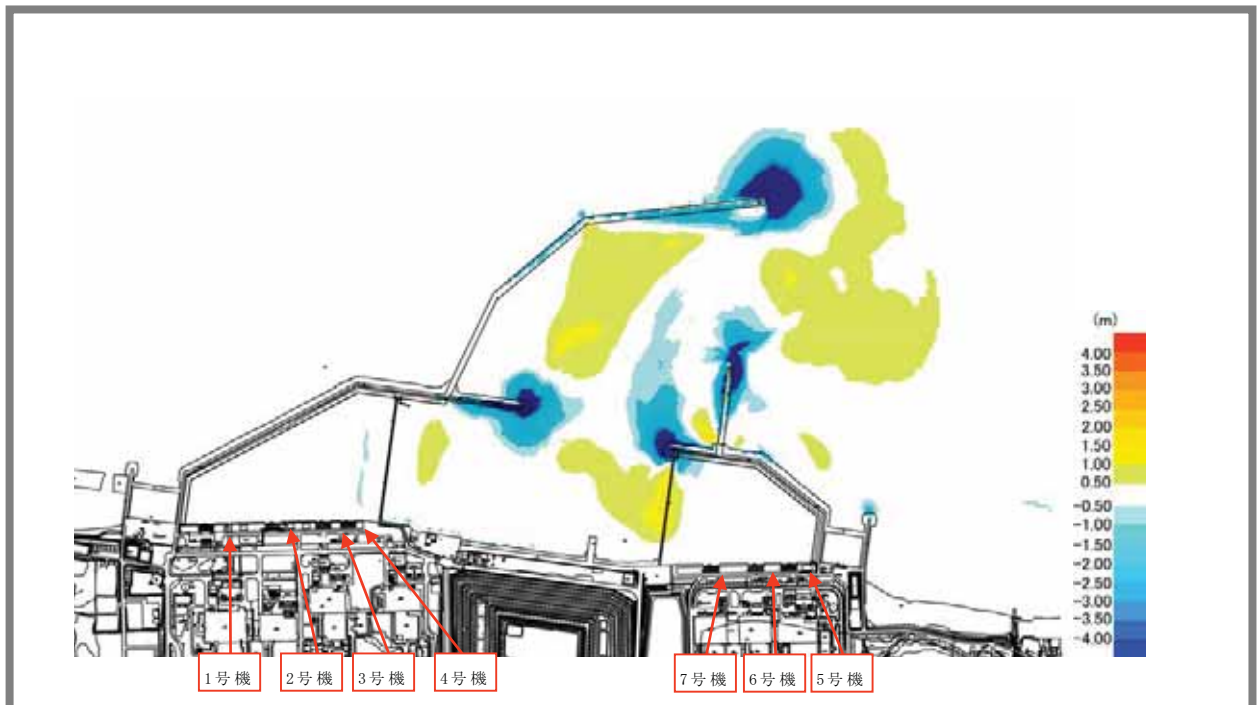
第 11.5.1-2 図(1) 砂移動に伴う地形変化量－最高水位ケース
 (藤井ほか(1998)⁽²⁶⁾, 地震発生後 4 時間)



第 11.5.1-2 図(2) 砂移動に伴う地形変化量－最低水位ケース
 (藤井ほか(1998)⁽²⁶⁾, 地震発生後 4 時間)



第 11.5.1-2 図(3) 砂移動に伴う地形変化量—最高水位ケース
(高橋ほか(1999)⁽²⁷⁾, 地震発生後 4 時間)



第 11.5.1-2 図(4) 砂移動に伴う地形変化量—最低水位ケース
(高橋ほか(1999)⁽²⁷⁾, 地震発生後 4 時間)

参考資料 11.1 日本海東縁部の地震活動領域のうち、新潟～山形沖の領域を詳細パラメータスタディの対象とすることの妥当性について

本報告書では、日本海東縁部に想定される津波の検討においては、日本海東縁部の地震活動領域の北方で発生した既往地震津波による水位が比較的小さいことを考慮して、敷地により近い新潟～山形沖の領域のみを対象として詳細パラメータスタディを実施しているが、新潟～山形沖の領域のみを対象とすることの妥当性について以下のとおり検討した。

(1) 検討の方針

土木学会(2002)⁽¹⁾に示される日本海東縁部の地震活動領域全域において、日本海東縁部で想定される地震規模に応じた波源の基準断層モデルを設定して、位置を変えた概略パラメータスタディを実施し、地震活動領域内における津波水位の傾向を分析することとした。パラメータスタディにおいて設定した断層の位置を参図-11.1.1に示す。ただし、地震調査研究推進本部(2003)⁽²⁾に示される日本海東縁部の地震活動領域のうち、土木学会(2002)⁽¹⁾に示される範囲を超える部分についてもパラメータスタディの対象範囲とした。

(2) 基準断層モデル

基準断層モデルには、日本海東縁部の地震活動領域のうち、敷地により近い新潟～山形沖の領域において実施した詳細パラメータスタディ(11.3.3参照)において最大水位上昇量、及び最大水位下降量を示す高角度モデル(傾斜角 60°)を用いた。参表-11.1.1に

基準断層モデルの諸元を示す。

(3) 数値シミュレーション結果

a. 最大水位上昇量

数値シミュレーション結果より得られた各断層による最大水位上昇量を参図-11.1.2のグラフに示す。なお，グラフは耐震安全性評価対象の7号機と1～6号機に区別している。いずれのグラフも横軸に波源位置を示しており，右に向かって敷地から遠くなることを表している。

同グラフによれば，大局的には敷地により近い領域の「新潟～山形沖」にある波源（①'～④'）で水位が最も大きくなり，波源が敷地から遠くなるほど水位が小さくなっていることがわかる。ただし，1号機及び2号機のみ，「新潟～山形沖」の領域にある波源（①'～④'）に比べて「山形～秋田沖」の領域にある波源（①～④）による水位が若干大きくなるものの，他号機は全て「新潟～山形沖」の領域の方が大きい。

b. 最大水位下降量

数値シミュレーション結果より得られた各断層による最大水位下降量を参図-11.1.3のグラフに示す。

最大水位上昇量と同様に，敷地により近い領域の「新潟～山形沖」にある波源（①'～④'）で最大値を示しており，波源が敷地から遠くなるほど下降量が小さくなっていることがわかる。

(4) まとめ

概略パラメータスタディの結果から，最大水位上昇量においては1号機及び2号機のみ，「新潟～山形沖」の領域より若干大きい波源

があるものの、その量は小さいこと、また今回耐震安全性評価の対象としている7号機を含むそれ以外の号機は全て「新潟～山形沖」による影響が最も大きいことが確認された。したがって、「新潟～山形沖」の領域を詳細パラメータスタディの対象とすることは妥当と考えられる。

(5) 参考文献

(1) 「原子力発電所の津波評価技術」

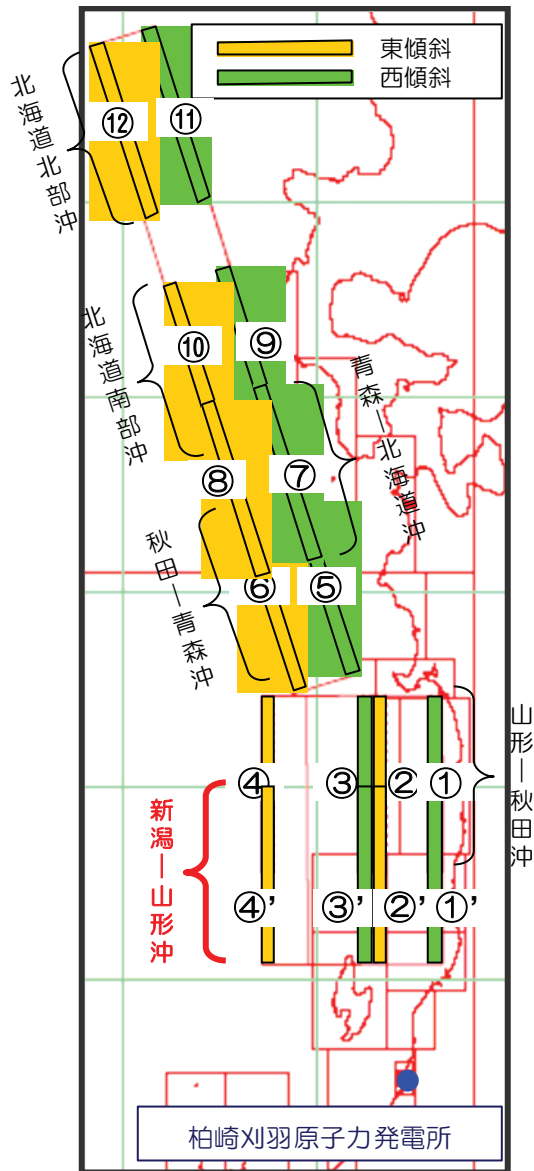
土木学会原子力土木委員会津波評価部会，321p，2002

(2) 「日本海東縁部の地震活動の長期評価」

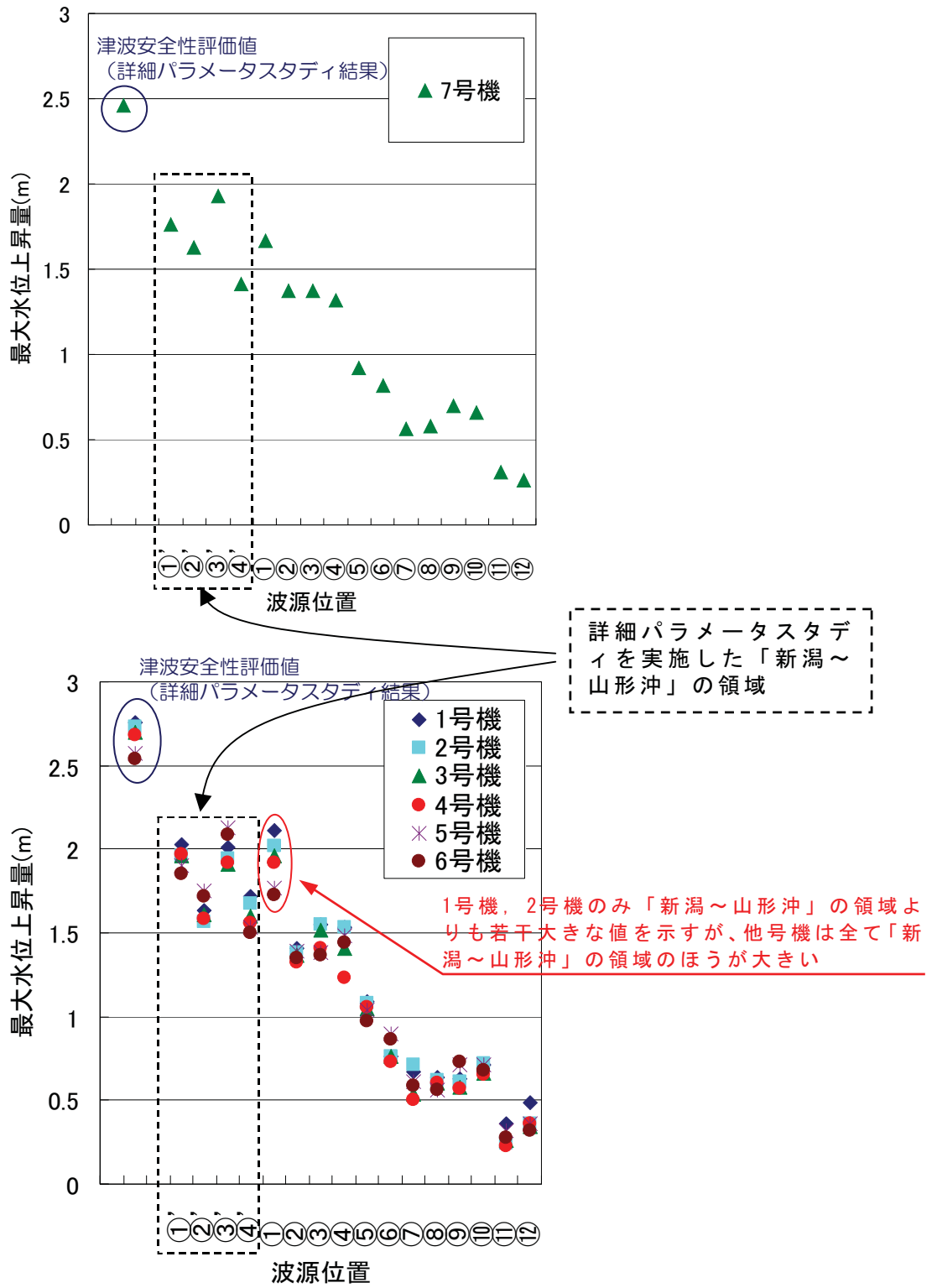
地震調査研究推進本部 地震調査委員会，2003

参表-11.1.1 基準断層モデルの諸元

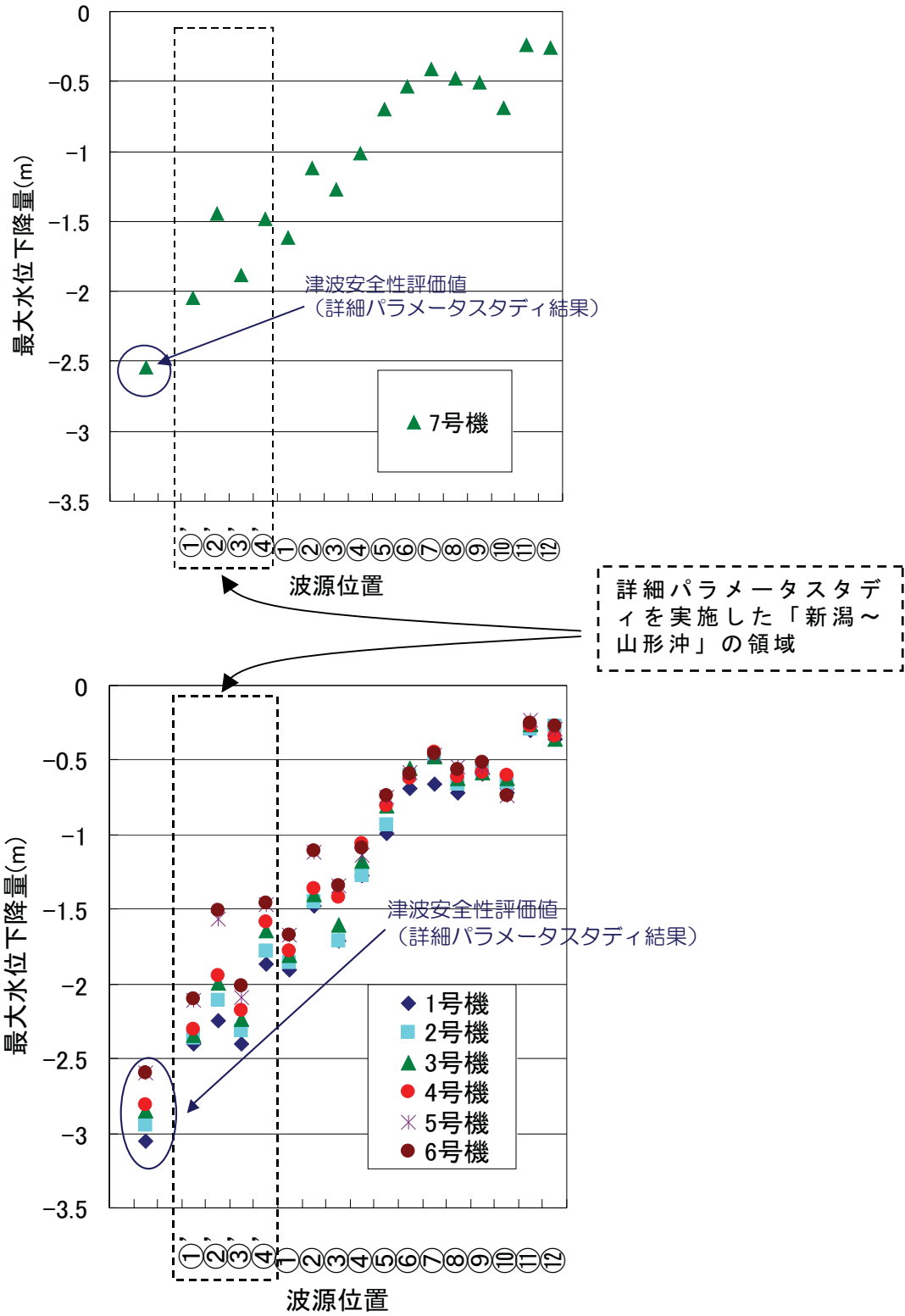
断層名	Mw	断層長さ L (km)	断層幅 W (km)	すべり量 D (m)	断層上縁深さ d (km)	走向 θ (°)	傾斜角 δ (°)	すべり角 λ (°)
高角モデル	7.85	131.1	17.3	9.44	0.0	20・200	60	90



参図-11.1.1 日本海東縁部の地震活動領域における概略パラメータスタディ



参図-11.1.2 概略パラメータスタディ結果
(最大水位上昇量)



参図-11.1.3 概略パラメータスタディ結果
(最大水位下降量)

参考資料 11.2 日本海東縁部の地震活動域における基準断層モデル について

日本海東縁部に想定される地震に伴う津波の波源設定については、土木学会(2002)⁽¹⁾に従い、痕跡高が多く存在する津波を再現できるモデルのうち、既往最大のモーメントマグニチュード(M_w)を示す1993年北海道南西沖地震の $M_w = 7.84$ を下回らないように、 $M_w = 7.85$ となる基準断層モデルを用いている。また、基準断層モデルの断層パラメータの設定にあたっては、同じく土木学会(2002)⁽¹⁾に従い、武村(1998)⁽²⁾のスケーリング則を適用した。日本海東縁部において既往津波の痕跡高を説明できる断層モデル一覧を参表-11.2.1に、その断層モデルの位置図を参図-11.2.1に示す。

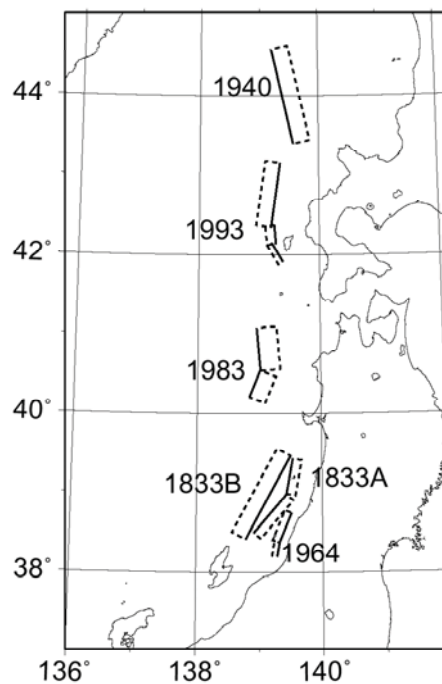
参考文献

- (1) 「原子力発電所の津波評価技術」
土木学会原子力土木委員会津波評価部会， 2002
- (2) 「日本列島における地殻内地震のスケーリング則－地震断層の影響および地震被害との関連－」
武村雅之，地震第2輯，第51巻，pp.211-228，1998

参表-11.2.1 既往津波の痕跡高を説明できる断層モデル
(日本海東縁部)

対象津波	モデル M_w	面積 (km^2)	L (km)	W (km)	D (m)	d (km)	θ ($^\circ$)	δ ($^\circ$)	λ ($^\circ$)	データ 数	K	κ	備考
1833年天保山形沖(A)	7.82	1250	50	25	6.4	0	10	60	90	27	1.04	1.42	本体系化原案 (相田(1989)を修正;陸岸近く)
		1750	70	25	6.4	0	40	60	120				
1833年天保山形沖(B)	7.76	3960	132	30	4.0	0	208	45	90	27	1.17	1.28	本体系化原案(沖合)
1940年積丹沖	7.70	4050	135	30	3.2	0	347	40	90	20	1.02	1.42	本体系化原案 (Satake(1986)を修正)
1964年新潟	7.35	900	45	20	3.3	1	202	60	90	検潮	-	-	Noguera and Ku.Abe(1992)
		300	20	15	3.0	1	189	60	90				
同上	7.51	813	32.5	25	5.3	0	200	60	52	検潮	-	-	加藤・安藤(1995)
		813	32.5	25	2.9	0	200	60	90				
1983年日本海中部	7.74	1200	40	30	7.6	2	22	40	90	218	1.12	1.46	相田(1984) Model-10
		1800	60	30	3.05	3	355	25	80				
1993年北海道南西沖	7.84	2250	90	25	5.71	10	188	35	80	249	0.96	1.51	高橋武之ら(1995) DCRC-26モデル
		650	26	25	4.00	5	175	60	105				
		458	30.5	15	12	5	150	60	105				

(土木学会(2002)⁽¹⁾より)



参図-11.2.1 日本海東縁部の既往断層モデル位置
(土木学会(2002)⁽¹⁾より)

参考資料 11.3 浮遊砂濃度の上限値 5%による砂移動解析

本報告書では、藤井ほか(1998)⁽¹⁾ および高橋ほか(1999)⁽²⁾ の手法に基づき、浮遊砂濃度の上限値 1%の条件で、津波に伴う砂移動による影響検討を実施している。

ここでは、念のため浮遊砂濃度の上限値 5%の条件で、侵食・堆積量のより大きいケースとして高橋ほか(1999)⁽²⁾ の手法を用いて砂移動による影響検討を行った。検討対象は、最高水位を示す日本海東縁部の津波と、最低水位を示す長岡平野西縁断層帯 ($\delta = 35^\circ$) による想定津波とした。参図-11.3.1 には計算時間 4 時間後の、砂移動による地形変化量を、参図-11.3.2 には取水口前面における津波水位と海底面の変動時刻歴を示す。最低水位ケースにおいては、3号機の取水口前面で最大堆積量約 120cm を示すものの、いずれのケース、いずれの号機においても取水口前面では常に水深が 2m 程度確保されており、取水への影響はないと考えられる。

なお、浮遊砂濃度の上限値 5%は、例えば芦田・道上(1970)⁽³⁾ の水理実験などによる河床付近の実測値の最大値に相当するが、高橋ほか(1999)⁽²⁾ の手法における浮遊砂濃度の上限値は全水深の平均値として与えられることから、上限値 5%の設定は過大な評価であると考えられる。

参考文献

(1) 「津波による海底地形変化に関する研究」

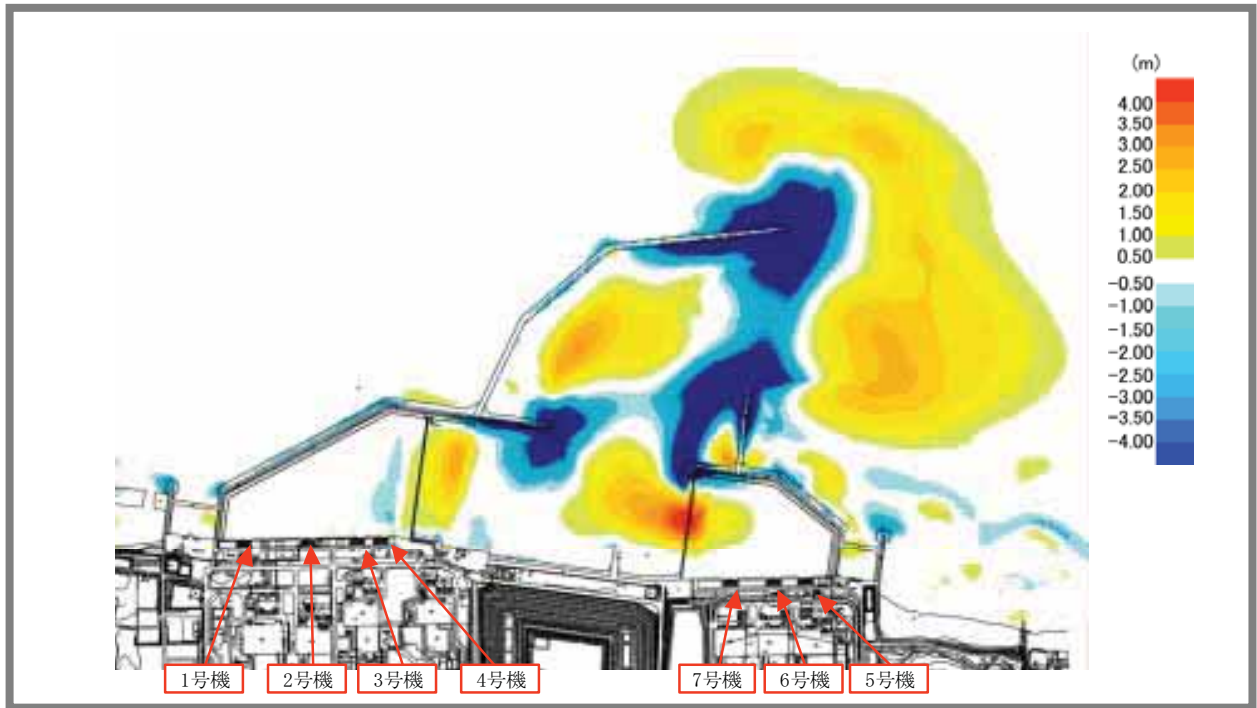
藤井直樹・大森政則・高尾 誠・金山 進・大谷英夫，
海岸工学論文集第 45 巻，pp. 376－380，1998

(2) 「掃流砂層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発」

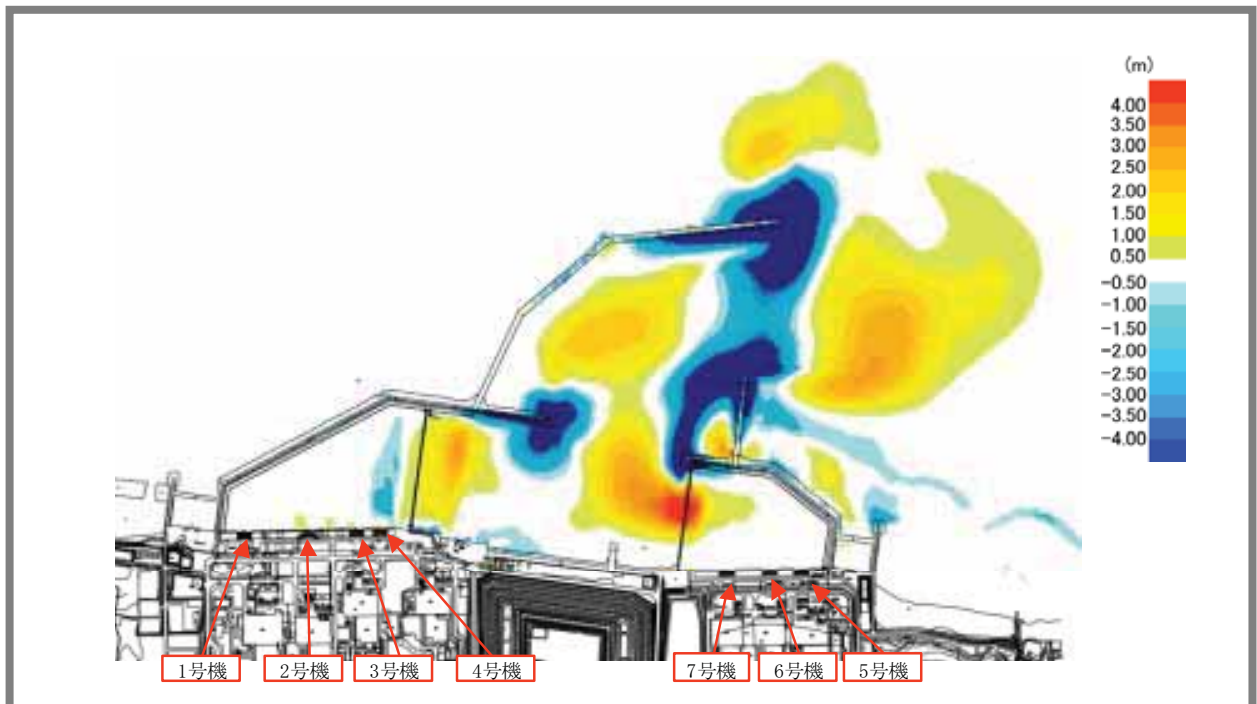
高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦・浅井大輔，
海岸工学論文集，第 46 卷，pp. 606－610，1999

(3) 「浮遊砂に関する研究(1)－河床付近の濃度－」

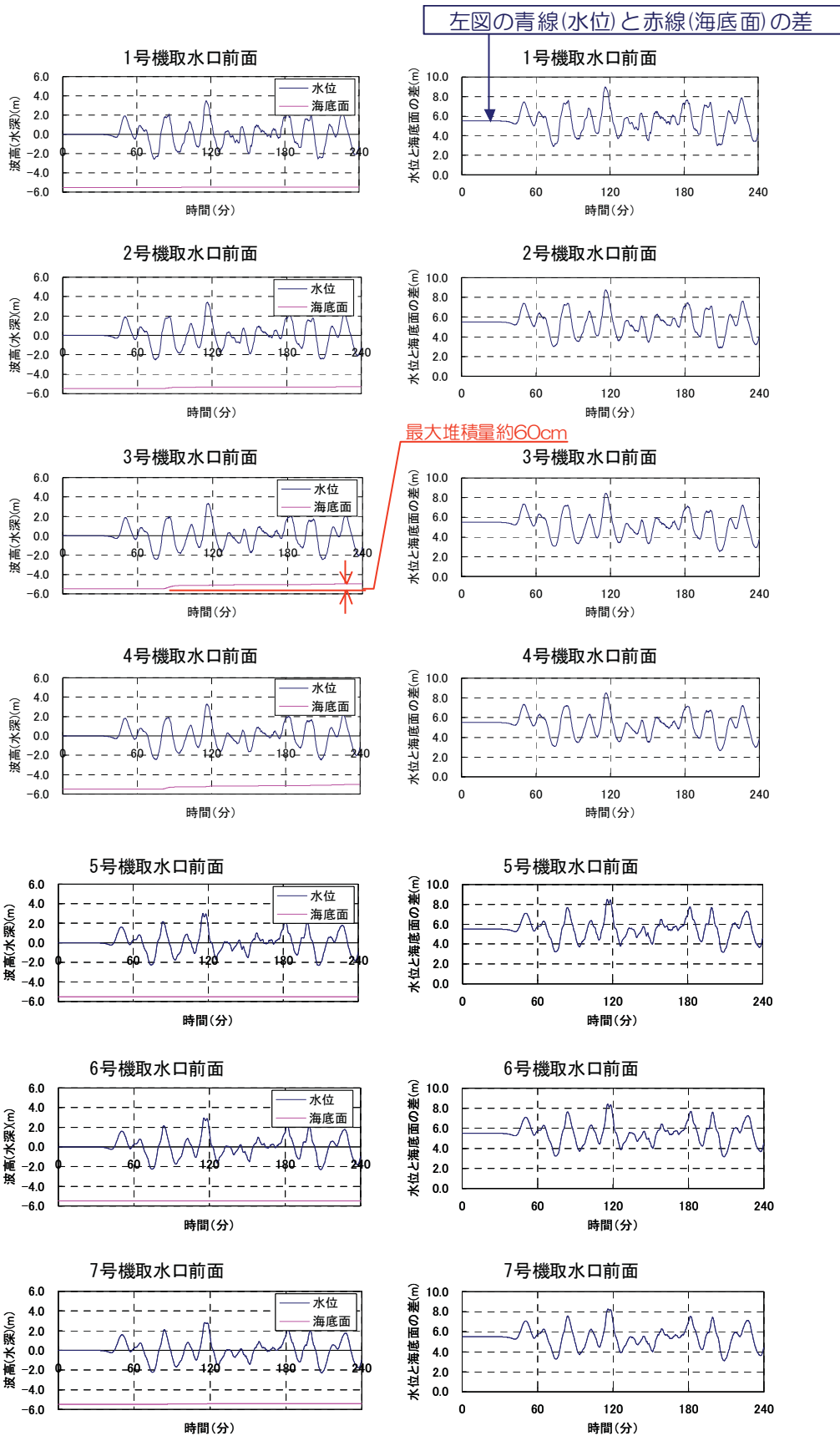
芦田和男・道上正規，
京大防災研究所年報第 16 号 B，pp. 1－10，1970



参図-11.3.1(1) 砂移動に伴う地形変化量－最高水位ケース－
 (高橋ほか(1999)⁽²⁾のモデル, 地震発生後4時間, 浮遊砂濃度上限値=5%)



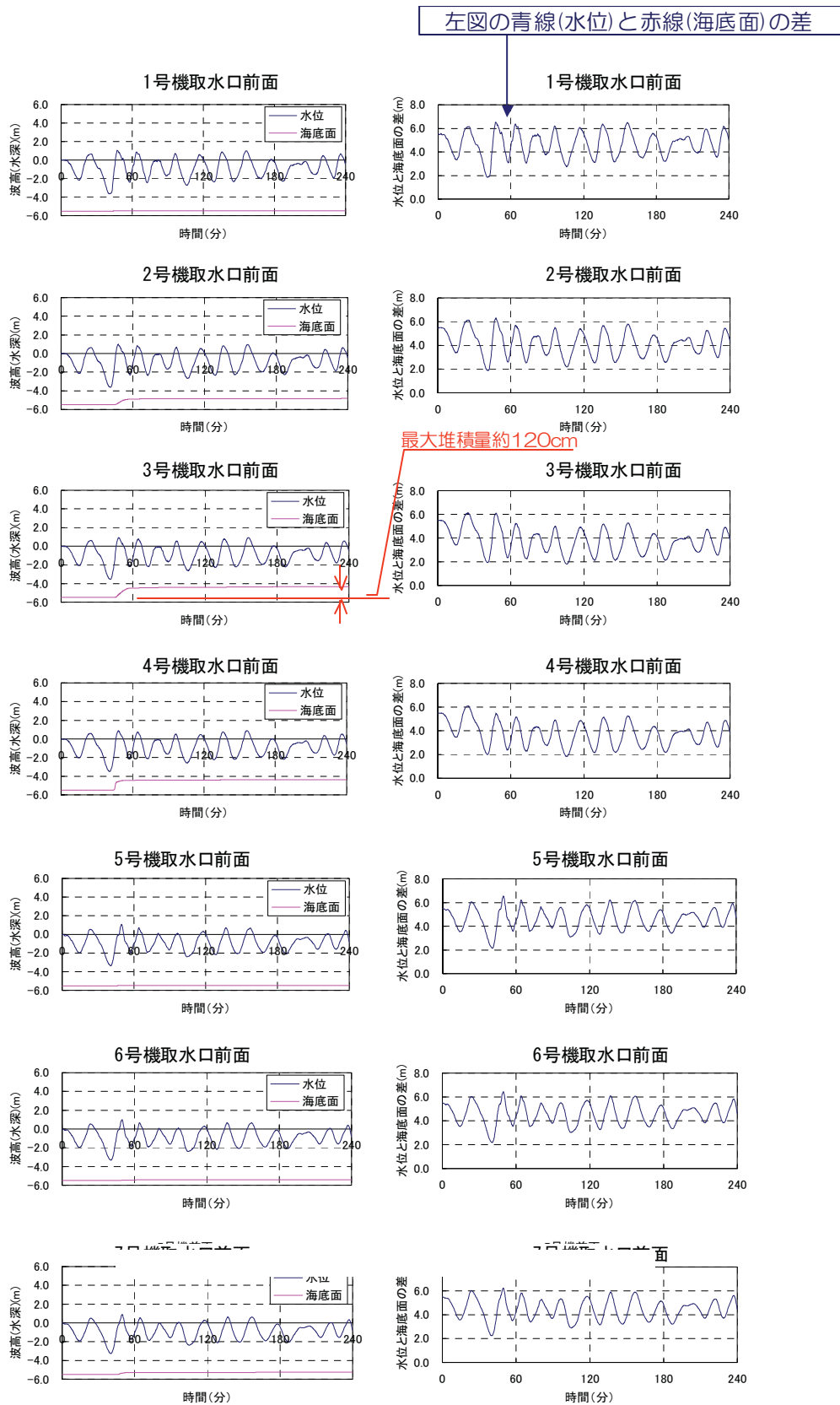
参図-11.3.1(2) 砂移動に伴う地形変化量－最低水位ケース－
 (高橋ほか(1999)⁽²⁾のモデル, 地震発生後4時間, 浮遊砂濃度上限値=5%)



参図-11.3.2 取水口前面における津波水位と海底面の変動時刻歴

— 最高水位ケース —

(高橋ほか(1999)⁽²⁾のモデル, 浮遊砂濃度上限値=5%)



参図-11.3.2 取水口前面における津波水位と海底面の変動時刻歴

—最低水位ケース—

(高橋ほか(1999)⁽²⁾のモデル, 浮遊砂濃度上限値=5%)

1 2 . 地震随件事象に対する考慮

(活断層の変位に伴う建屋基礎地盤の変形評価)

【目 次】

12.1.検討目的	12-1
12.2.評価方針	12-1
12.3.評価方法	12-2
12.3.1. くいちがいの弾性論に基づく解析値と実測値の比較	12-2
12.3.2. 局所的な地盤変動量のばらつきの評価	12-2
12.3.3. 地震に伴う地盤変動量と建屋傾斜の検討方法	12-3
12.3.4. 検討対象モデル	12-3
12.4.評価結果	12-3
12.5.参考文献	12-4

12. 地震随件事象の考慮（活断層の変位に伴う建屋基礎地盤の変形評価）

12.1. 検討目的

新潟県中越沖地震では地震に伴う地盤変動が生じ、柏崎刈羽原子力発電所敷地内においても最大 10cm 程度の隆起が認められた。

この地盤変動に伴い、機器・配管系の健全性に影響を与えるものではなかったものの、原子炉建屋等重要施設に最大 1/4,000 程度の傾きが生じた。

そこで、今後さらなる地震が生じた場合の地盤変動による建屋傾斜を評価し、施設の安全機能が損なわれることがないことを確認する。

なお、新潟県中越沖地震で生じた地盤変動および原子炉建屋等重要施設の傾斜については、「柏崎刈羽原子力発電所敷地及び敷地周辺の地質・地質構造に係わる報告書，東京電力株式会社，平成 20 年 10 月 22 日」に詳述している。

12.2. 評価方針

耐震設計上考慮する活断層について、くいちがいの弾性論⁽¹⁾に基づく解析によって地盤の変形を算定する。その際、新潟県中越沖地震で原子炉建屋等重要施設の水準変動が測量されていることから、ここで得られた結果をくいちがいの弾性論の解析結果に反映する。

最終的に原子炉建屋の傾斜量を評価し、設備の健全性との関係を検討する。

12.3. 評価方法

12.3.1. くいちがいの弾性論に基づく解析値と実測値の比較

中越沖地震で生じた建屋位置の地盤変動について、新潟県中越沖地震国土地理院モデル⁽²⁾に基づいた解析値と水準測量による実測値を比較した。解析結果および建屋の測点位置を第 12.3.1-1 図に、また、解析値と実測値の関係を第 12.3.1-2 図に示す。

解析値と実測値の関係は概ね 45° 線を中心にばらついており、全体的な傾斜の傾向は整合している。

一方、実測値は解析値に比べ 60mm 程度、全体的に大きい傾向がある。これは、当該モデルが広域の地殻変動データ（GPS、干渉 SAR、水準測量）をもとにした逆解析により断層面上のすべり分布を推定したものであり、敷地の地盤変動の再現を目的としたものではないこと、モデルのスケールに比べて敷地のスケールが小さいこと等の影響が考えられる（第 12.3.1-3 図）。建屋の傾斜は建屋端部の鉛直変動量の差分で評価されることから、この影響は特に問題にならないと考えられる。

12.3.2. 局所的な地盤変動量のばらつきの評価

局所的な地盤変動量のばらつきを評価するため、解析値と実測値の平均的な変動量の差（第 12.3.1-2 図における回帰直線の y 切片）を考慮して、これをあらかじめ実測値から差し引き、この値と解析値の差分（以下「回帰直線からの差」という。）を整理した結果を第 12.3.2-1 図に示す。回帰直線からの差は概ね正規分布となり、標準偏差は 8.8mm 程度である。

12.3.3. 地震に伴う地盤変動量と建屋傾斜の検討方法

地震に伴う地盤変動量および建屋傾斜は次の方法で検討することとする。

- ① 各震源断層のモデルに応じたくいちがいの弾性論に基づく解析により建屋四隅の鉛直変動量を計算
- ② 中越沖地震のデータに基づいた地盤変動のばらつき（標準偏差 σ : 8.8mm）を考慮し、各々の辺の最大傾斜を計算
- ③ 現状の建屋の傾斜（実測値）を各々の辺に加算

12.3.4. 検討対象モデル

本検討を行うにあたっては、基準地震動策定の際に用いた断層モデルを対象とし、地質調査結果及び地盤変動を評価する点を踏まえて、上端深さ及びすべり量を設定したモデルを用いる。なお、新潟県中越沖地震を対象とした国土地理院モデルを拡張（断層長さ比例：36/27倍）したものについても検討した。検討条件を第 12.3.4-1 表に示す。

また、断層がすべて破壊しない場合の方が敷地の傾斜が大きくなることも考えられることから、断層の長さまたは幅を変化させた場合の影響についても検討した。

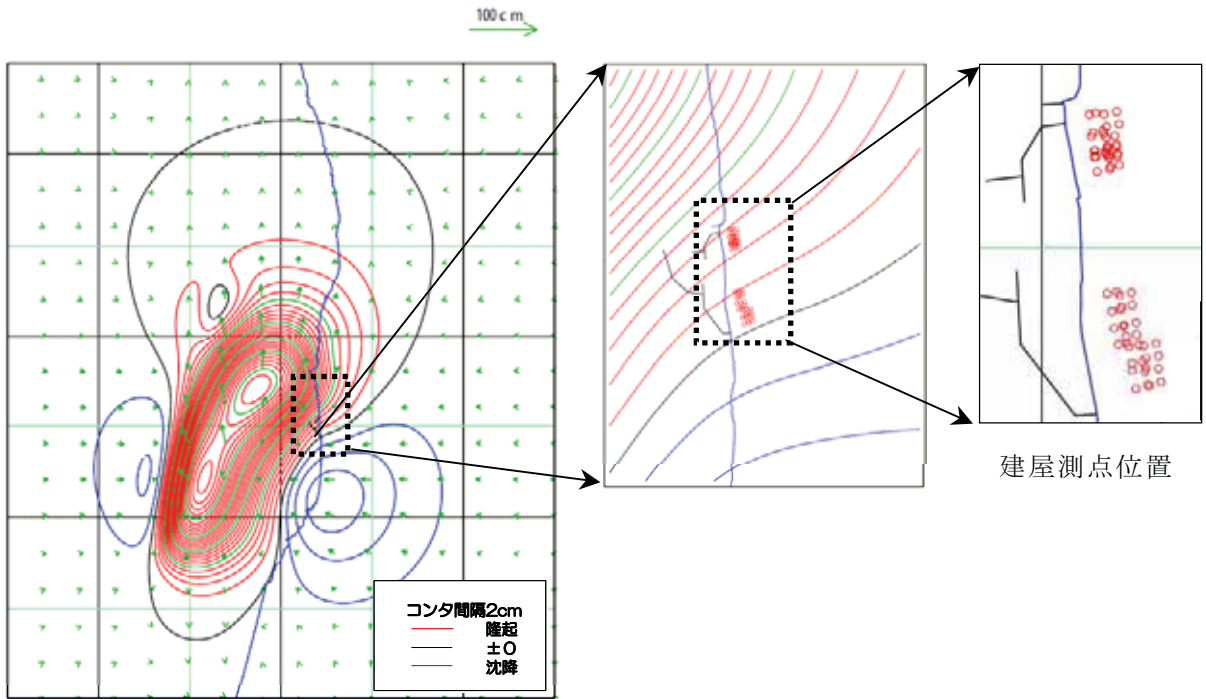
12.4. 評価結果

くいちがいの弾性論による解析結果を第 12.4-1 図に、断層の長さまたは幅を変化させた場合の影響を第 12.4-2 図に示す。また、中越沖地震のデータに基づいた地盤変動のばらつきを考慮した建屋傾斜を第 12.4-1 表に示す。

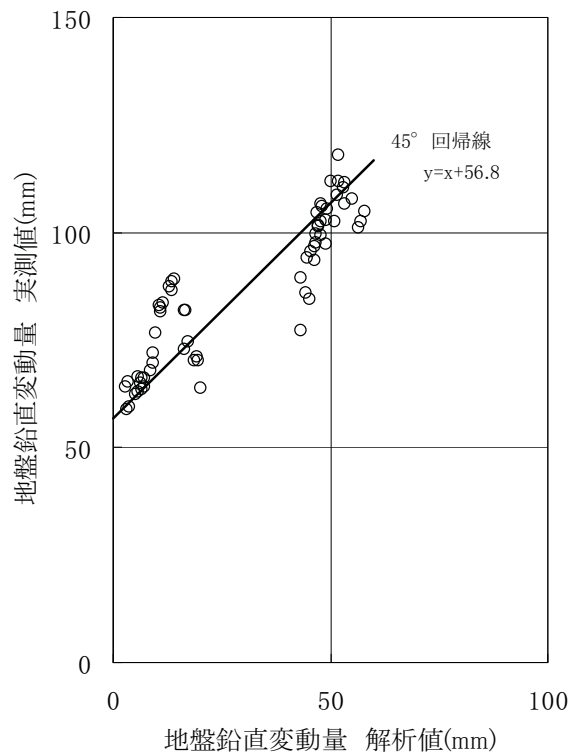
建屋の傾斜は最大でも 1/1,400 程度と 1/1,000 以下であり建屋および機器・配管系の機能を損なうものではない（第 12.4-3 図，第 12.4-4 図）。

12.5. 参考文献

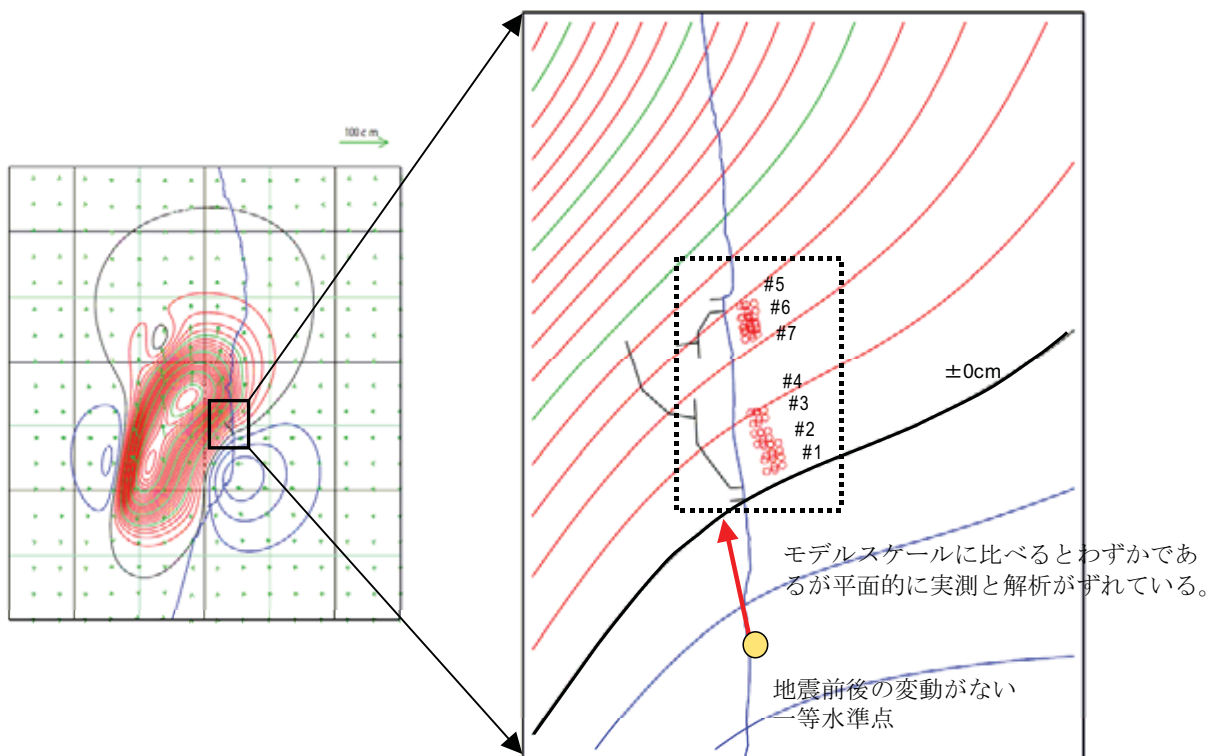
- (1) Rongjiang Wang, Francisco Lorenzo Martin, Frank Roth(2003) :
Computation of deformation induced by earthquakes in a multi-layered elastic crust—FORTRAN programs, Computers & Geosciences 29
- (2) 国土地理院(2008) : 「平成 19 年(2007 年)新潟県中越沖地震」の震源断層モデルを更新（主に断層面に関する評価）
<http://cais.gsi.go.jp/Research/topics/topic080111/index.html>



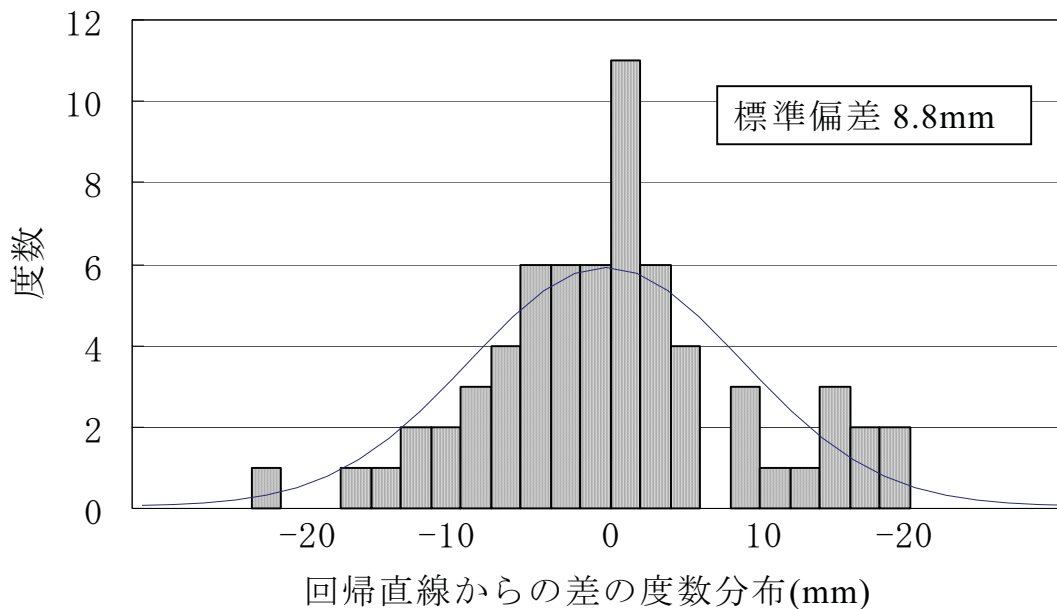
第 12.3.1-1 図 くいちがいの弾性論 (新潟県中越沖地震国土地理院モデル) に基づく解析結果と水準測量による建屋測点位置



第 12.3.1-2 図 くいちがいの弾性論による解析値と水準測量による実測値の関係



第 12.3.1-3 図 くいちがいの弾性論による解析値と水準測量による実測値の平面的なずれ

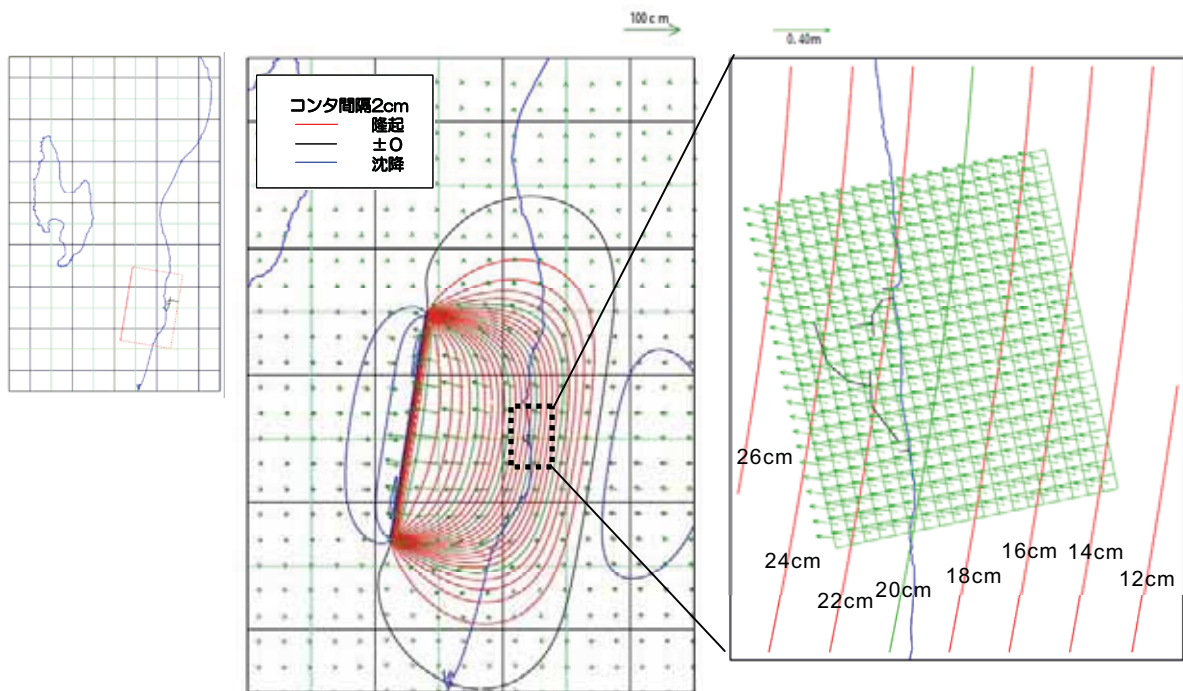


第 12.3.2-1 図 回帰直線からの差の度数分布

第 12.3.4-1 表 くいちがいの弾性論に基づく解析の検討条件

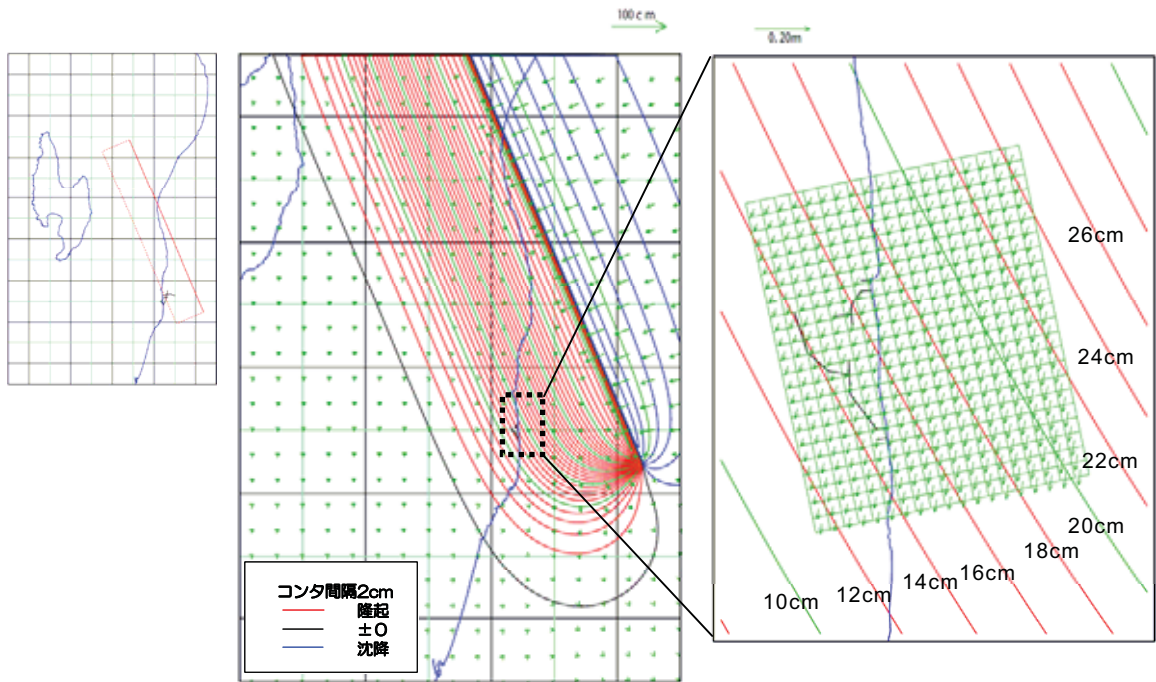
断層モデル	断層長さ (km)	傾斜角 (°)	上端深さ (km)	すべり量 (m)	地盤変動評価 のための補正	
					強震動モデル 地震モーメント (N・m)	すべり量 (m)
F-B 断層モデル	36	35	0.1	1m	1.7×10^{19}	0.51
長岡平野西縁断層帯 モデル (傾斜 50°)	91	50	0.1	1m	1.0×10^{20}	1.6
長岡平野西縁断層帯 モデル (傾斜 35°)	91	35	0.1	1m	1.8×10^{20}	2.2
新潟県中越沖地震 国土地理院拡張 モデル	国土地理院 モデルの 1.33 倍	国土地理 院モデル と同様	国土地理 院モデル と同様	国土地理 院モデル の 1.33 倍	—	—

注) 建屋傾斜算定に用いる地盤変動量の評価においては、強震動モデルの地震モーメント(M_0)と同じになるよう算定したすべり量を用いた結果を使用



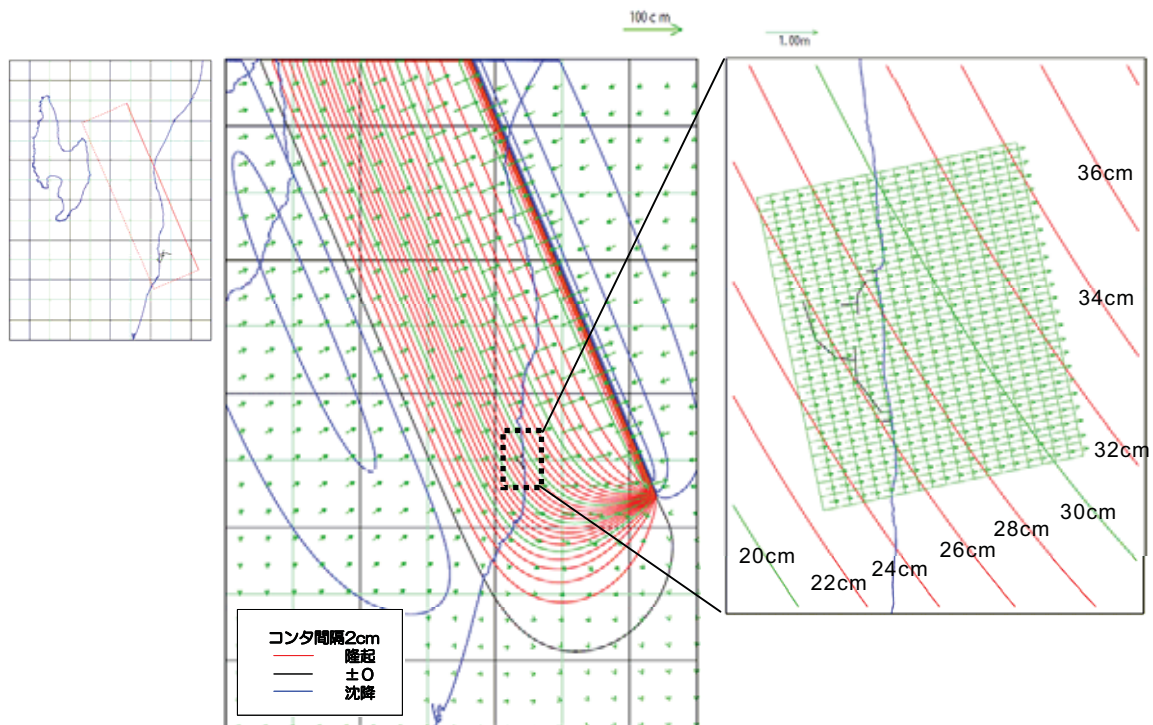
注) 建屋傾斜算定に用いる地盤変動量の評価においては、強震動モデルの地震モーメント(M_0)と同じになるようすべり量を 0.51 倍している。

第 12.4-1 図(1) くいちがいの弾性論による敷地周辺の地殻変動量 (F-B 断層モデル)



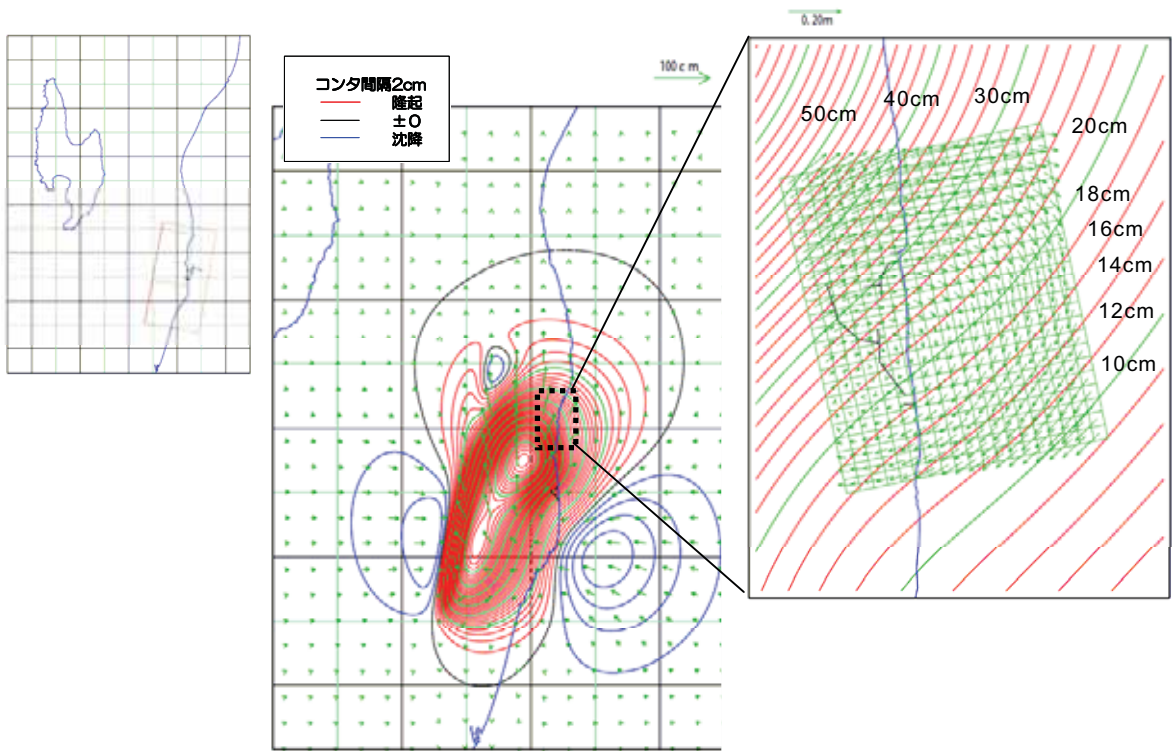
注)建屋傾斜算定に用いる地盤変動量の評価においては、強震動モデルの地震モーメント(M_0)と同じになるようすべり量を 1.6 倍している。

第 12.4-1 図(2) くいちがいの弾性論による敷地周辺の地殻変動量
(長岡平野西縁断層帯モデル：傾斜 50 度)

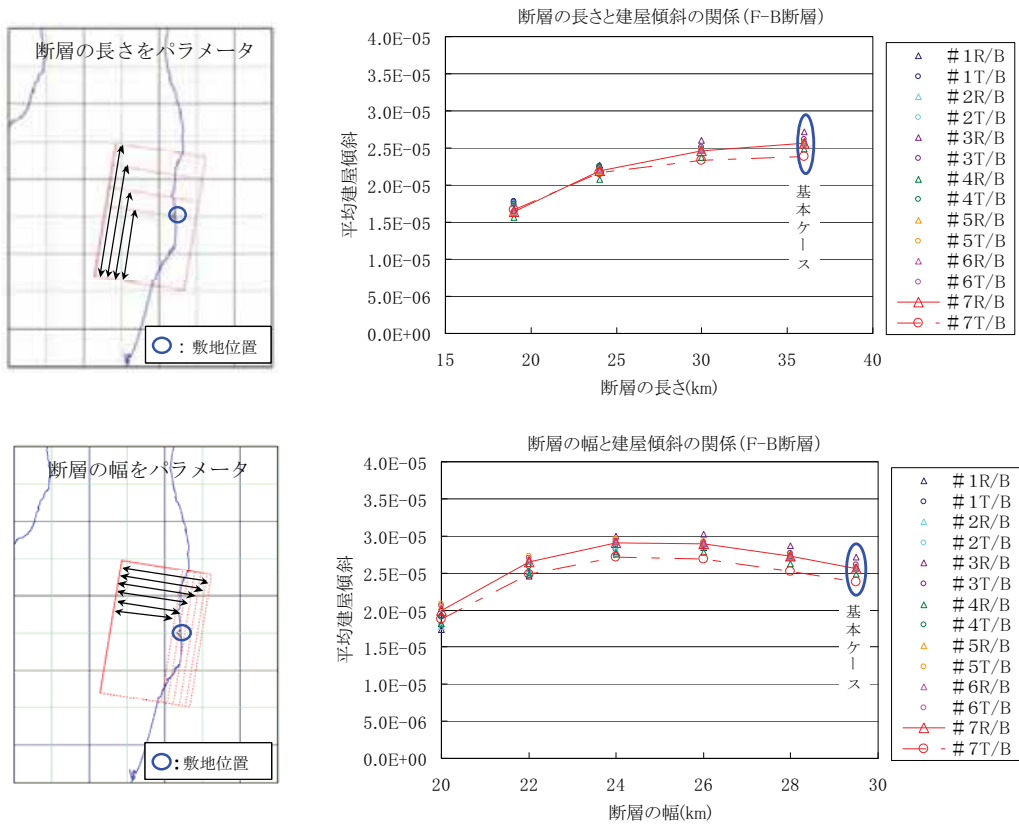


注)建屋傾斜算定に用いる地盤変動量の評価においては、強震動モデルの地震モーメント(M_0)と同じになるようすべり量を 2.2 倍している。

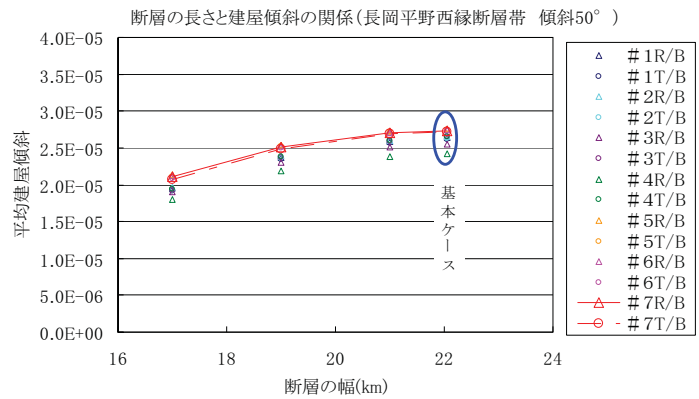
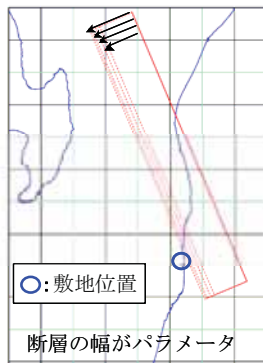
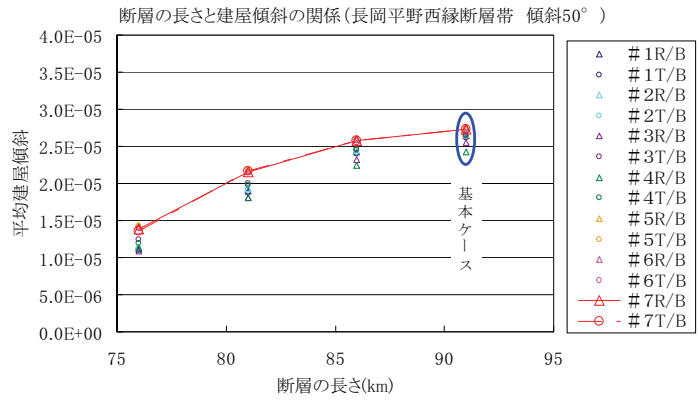
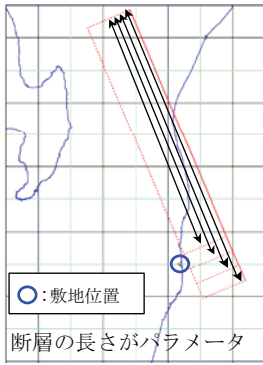
第 12.4-1 図(3) くいちがいの弾性論による敷地周辺の地殻変動量
(長岡平野西縁断層帯モデル：傾斜 35 度)



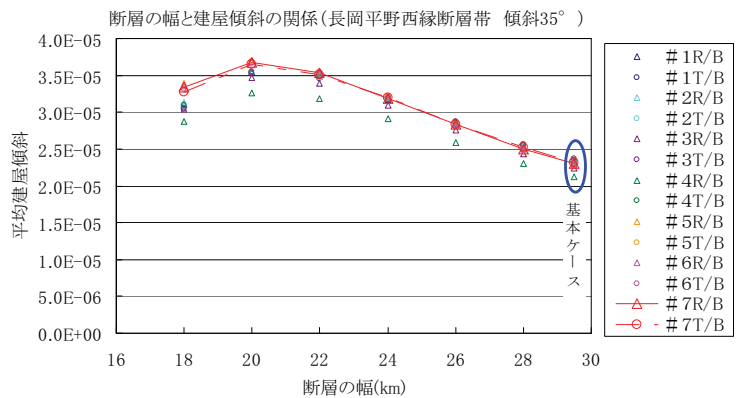
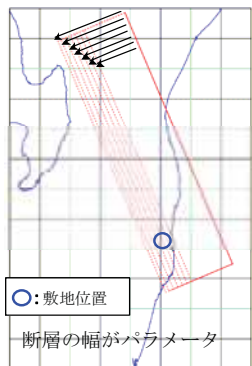
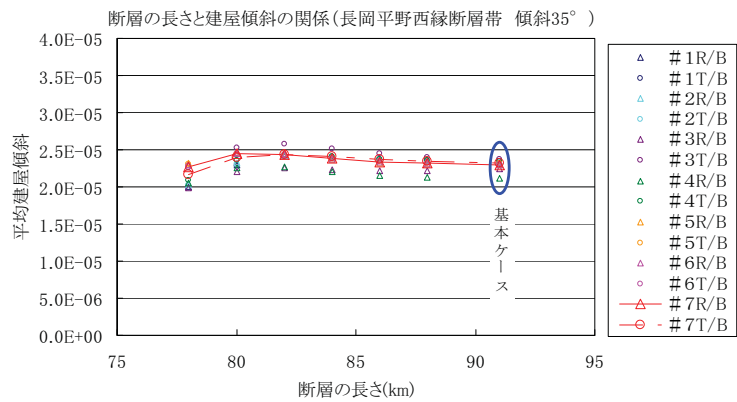
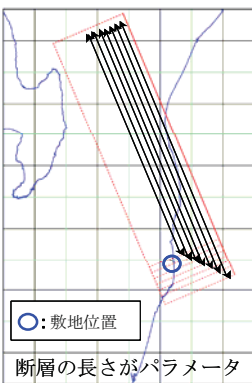
第 12.4-1 図(4) くいちがいの弾性論による敷地周辺の地殻変動量 (新潟県中越沖地震国土地理院拡張モデル)



第 12.4-2 図(1) 断層長さまたは幅の敷地内傾斜への影響 (F-B 断層)



第 12.4-2 図(2) 断層長さまたは幅の敷地内傾斜への影響
(長岡平野西縁断層帯 傾斜 50°)



第 12.4-2 図(3) 断層長さまたは幅の敷地内傾斜への影響
(長岡平野西縁断層帯 傾斜 35°)

第 12.4-1 表 建屋傾斜検討結果

F-B 断層モデル

評価位置	#7R/B	#7T/B	C/B
1~2	1/2400	1/5200	1/1500
2~3	1/2100	1/3700	1/2600
3~4	1/2700	1/3900	1/1600
4~1	1/2300	1/2900	1/2400
1~3	1/3700	1/6100	1/2200
2~4	1/2600	1/4300	1/3100

F-B 断層モデル (断層幅 24km)

評価位置	#7R/B	#7T/B	C/B
1~2	1/2400	1/5100	1/1500
2~3	1/2100	1/3700	1/2600
3~4	1/2700	1/3800	1/1600
4~1	1/2300	1/2900	1/2400
1~3	1/3700	1/6100	1/2200
2~4	1/2600	1/4200	1/3100

長岡平野西縁断層帯モデル(傾斜 50°)

評価位置	#7R/B	#7T/B	C/B
1~2	1/2400	1/4900	1/1500
2~3	1/2000	1/3300	1/2400
3~4	1/2700	1/3700	1/1600
4~1	1/2200	1/2600	1/2300
1~3	1/3300	1/5100	1/2000
2~4	1/2600	1/4100	1/3000

長岡平野西縁断層帯モデル(傾斜 35°)

評価位置	#7R/B	#7T/B	C/B
1~2	1/2400	1/4800	1/1500
2~3	1/2000	1/3300	1/2400
3~4	1/2600	1/3700	1/1600
4~1	1/2200	1/2600	1/2300
1~3	1/3300	1/4900	1/2000
2~4	1/2600	1/4100	1/2900

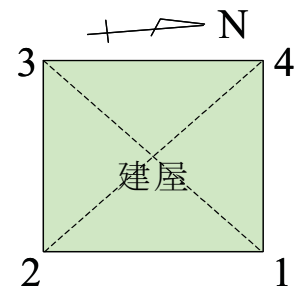
長岡平野西縁断層帯モデル(傾斜 35°)

(断層幅 20 km)

評価位置	#7R/B	#7T/B	C/B
1~2	1/2400	1/4800	1/1500
2~3	1/1900	1/3000	1/2200
3~4	1/2600	1/3600	1/1600
4~1	1/2000	1/2400	1/2100
1~3	1/3000	1/4500	1/1900
2~4	1/2400	1/3800	1/2700

新潟県中越沖地震国土地理院拡張モデル

評価位置	#7R/B	#7T/B	C/B
1~2	1/2100	1/3900	1/1400
2~3	1/2000	1/3400	1/2400
3~4	1/2400	1/3200	1/1500
4~1	1/2200	1/2700	1/2300
1~3	1/3600	1/5500	1/2200
2~4	1/2300	1/3400	1/2600



評価位置

注) 建屋傾斜の算定の際は強振動モデルの地震モーメント (M_0) と同じになるようにすべり量を調整

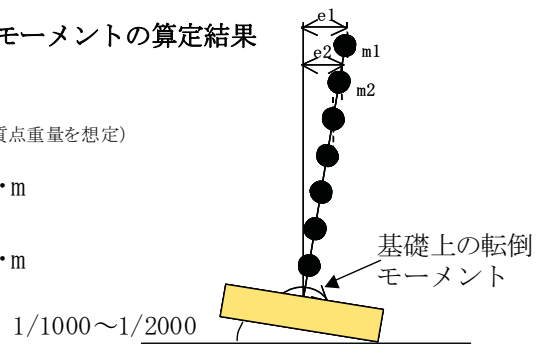
1. 傾斜によって生じる基礎上 (T. M. S. L. -8.2m) の転倒モーメントの算定結果

基礎上の転倒モーメント = $\sum m_i \times e_i$

(m_i は、中越沖地震時の建屋質点重量を想定)

①基礎傾斜1/1,000の場合 : $3.54 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m}$

②基礎傾斜1/2,000の場合 : $1.77 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m}$

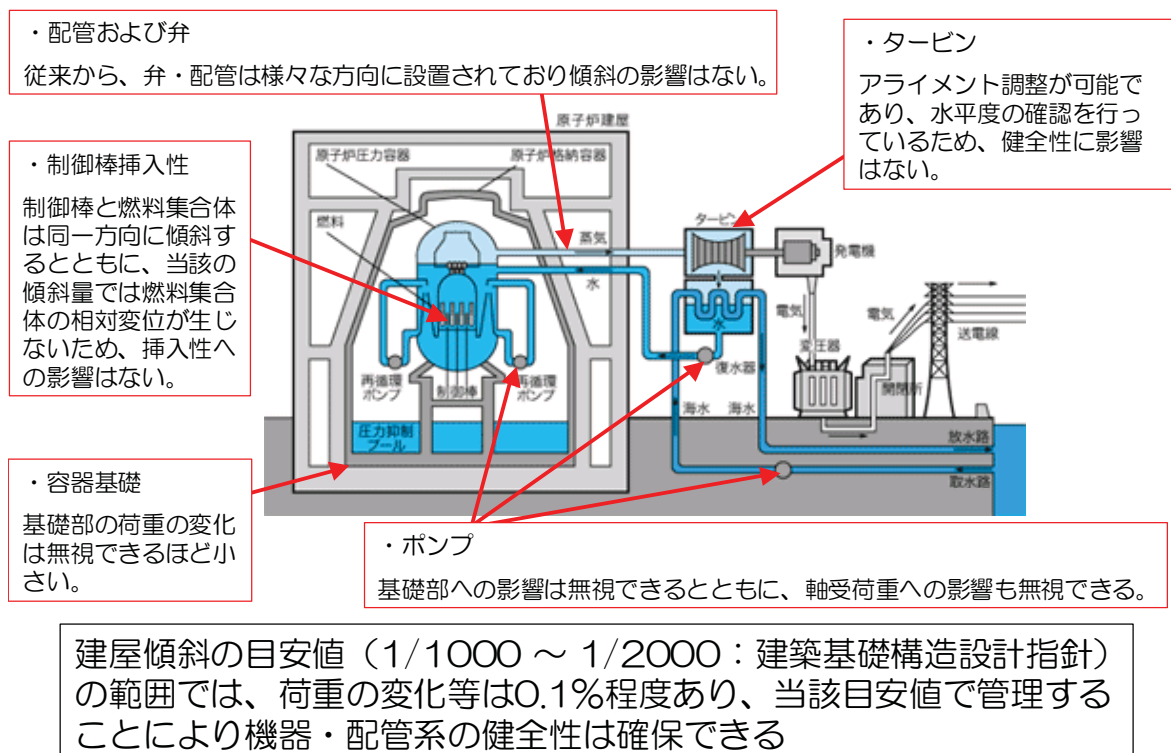


2. 設計時に想定した基礎上 (T. M. S. L. -8.2m) における曲げモーメント (EW方向) *

(* 工認図書記載の数値を S I 単位系に変換)

- ・静的地震力 (3Ci) : $1.47 \times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}$
→ (基礎傾斜1/1,000の場合の割合は約0.24%)
- ・設計用地震力 : $1.82 \times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}$
→ (基礎傾斜1/1,000の場合の割合は約0.20%)

第 12.4-3 図 7号機原子炉建屋の傾斜による建屋影響検討



(運営管理・設備健全性評価ワーキンググループ設備健全性評価 SWG (第6回) 資料, H20.3.7)

第 12.4-4 図 建屋傾斜による機器への影響について

13. まとめ

13. まとめ

各種調査・評価結果を踏まえ、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」および「震源を特定せず策定する地震動」を考慮して、基準地震動 S_s を策定した。

この基準地震動 S_s を用いて評価した結果、これまでに評価が完了した柏崎刈羽原子力発電所 7 号機の耐震 S クラス施設の耐震安全性が確保されていること、および原子炉建屋基礎地盤が十分な支持性能を持つことを確認した。

また、地震随伴事象についても、原子炉施設の安全性に問題としないことを確認した。

以 上