

2.12 使用済燃料共用プール設備

2.12.1 基本設計

2.12.1.1 設置の目的

使用済燃料共用プール設備は、燃料の適切な貯蔵を目的として運用補助共用施設内に設け、燃料貯蔵設備と燃料取扱設備等で構成する。

燃料貯蔵設備は、使用済燃料共用プール（以下、「共用プール」という。）、共用プール冷却浄化系、共用プール補機冷却系、共用プール補給水系等で構成する。

共用プール冷却浄化系は、ポンプ、熱交換器、ろ過脱塩装置、補助機器等で構成する。

燃料取扱設備は、燃料取扱装置及び共用プールで取り扱う構内用輸送容器、使用済燃料乾式貯蔵容器（以下、「乾式貯蔵キャスク」という。）及び使用済燃料輸送貯蔵兼用容器（以下、「輸送貯蔵兼用キャスク」という。）で構成する。なお、これら容器については、「Ⅱ.2.11」、「Ⅱ.2.13」及び「Ⅱ.2.31」に記載する。

その他設備として天井クレーン、使用済燃料輸送容器除染設備等がある。

また、共用プールに、1～4号機原子炉建屋内の使用済燃料プールに貯蔵中の使用済燃料及び新燃料、5,6号機原子炉建屋内の使用済燃料プールに貯蔵中の使用済燃料及び新燃料を除く炉内燃料（合計5,936体）の受け入れを計画している。

その中には、震災前から使用済燃料プールに貯蔵されている変形燃料や破損燃料、震災時に破損した可能性のある燃料が含まれている。変形燃料の貯蔵にあたっては、変形の程度に対して、物理的に貯蔵できるとともに、臨界を防止することが必要である。また破損燃料の貯蔵にあたっては、破損形態に応じて、放射性物質の拡散を抑制するとともに、燃料の形状が維持されていない場合でも臨界を防止することが必要である。

このため、上記の燃料の貯蔵を目的とした使用済燃料貯蔵ラックを設置する。

なお、5,6号機原子炉建屋内の使用済燃料プールに貯蔵中の使用済燃料及び新燃料を除く炉内燃料の共用プールへの受け入れ計画を踏まえて、使用済燃料乾式キャスク仮保管設備（「Ⅱ.2.13」に記載）の増設を計画している。

2.12.1.2 要求される機能

原則、「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針」指針49から51に適合すること。

2.12.1.3 設計方針

(1) 未臨界性

共用プールは、容量いっぱい燃料集合体を収容した場合でも、通常時はもちろん、予想される外的条件が加わっても未臨界性を確保できる設計とする。

(2) 冷却及び浄化能力

共用プール冷却浄化系は、共用プール内に貯蔵する使用済燃料から発生する崩壊熱を除

去でき、かつ共用プール水の不純物を除去できる能力を持つ設計とする。

使用済燃料の崩壊熱は、共用プール冷却浄化系の熱交換器によって、共用プール補機冷却系へ伝えられ、同系の空気冷却器によって大気に伝えられる設計とする。

(3) 非常用補給能力

津波等により外部電源が喪失した場合にも、共用プール補給水系を用いて共用プール水の補給ができる設計とする。

(4) 貯蔵容量

炉心全装荷量（1～6号機炉心全装荷量の合計）の約200%貯蔵できる容量を超えない容量とする。

(5) 遮へい

共用プール及びキャスク・ピット内の壁面及び底部はコンクリート壁による遮へいを施すとともに、使用済燃料の上部には十分な水深を保つことにより、遮へい効果を有する設計とする。

燃料取扱装置は、構内用輸送容器、乾式貯蔵キャスクまたは輸送貯蔵兼用キャスクと共用プール間の使用済燃料の移送操作及び収容操作が、使用済燃料の遮へい及び熱除去を考慮して、水面下で行うことができる設計とする。

(6) 漏えい防止及び漏えい検知

共用プール水の漏えいを防止するため、共用プール及びキャスク・ピットには排水口を設けない設計としている。また、共用プールに接続された配管が破損しても、共用プール水が流出しない設計としている。

また、万一の共用プール・ライニングの想定される破損による漏えいを検知するため漏えい水検出計及び水位警報装置を設ける。

(7) 構造強度

燃料取扱装置及び貯蔵設備は、地震荷重等の適切な組合せを考慮しても強度上耐え得るように設計する。

また、共用プールのライニングは、万一の燃料集合体の落下時にも共用プールの機能を失うような損傷を生じない設計とする。

(8) 落下防止

使用済燃料貯蔵ラック上には、重量物を吊った天井クレーンは通過させないようにし、重量物の貯蔵燃料への落下を防止できる設計とする。

燃料取扱装置の燃料つかみ機は、二重のワイヤや種々のインター・ロックを設け、また天井クレーンの主要要素は種々の二重化を施すことにより移送中の燃料集合体等の落下を防止できる設計とする。

(9) 除染

構内用輸送容器等の除染ができるようにする。

(10) 被ばく低減

燃料取扱装置及び燃料貯蔵設備は、放射線業務従事者の被ばくを合理的に達成できる限り低くするため、運用補助共用施設の建屋内に設置し、換気空調設備を有する設計とする。

(11) 燃料取扱場所のモニタリング

燃料取扱場所は、崩壊熱の除去能力の喪失に至る状態及び過度の放射線レベルを検出できるとともに、これを適切に放射線業務従事者に伝える設計とする。

(12) 格納及び空気浄化

貯蔵設備は運用補助共用施設の建屋内に設置し、換気空調設備を有する設計とする。

(13) 試験可能性

燃料取扱装置及び燃料貯蔵設備のうち安全機能を有する構築物、系統及び機器は、定期的に試験及び検査ができる設計とする。

(14) 火災防護

共用プール施設は、火災により共用プール施設の安全性が損なわれないようにする。

2.12.1.4 供用期間中に確認する項目

- (1) 共用プール水温が 65℃以下であること。
- (2) 共用プールへ冷却水を補給できること。
- (3) 共用プールがオーバーフロー水位付近にあること。

2.12.1.5 主要な機器

運用補助共用施設平面図を図 2. 1 2 - 1 ~ 5 に、共用プール概要図を図 2. 1 2 - 6 に示す。

(1) 共用プール

- a. 共用プールは、鉄筋コンクリート造の設備で運用補助共用施設内にあり、1~6 号機原子炉建屋内の使用済燃料プールまたは炉内で 19 ヶ月以上冷却された使用済燃料（7×7 燃料※1、8×8 燃料、新型 8×8 燃料、新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料、高燃焼度 8×8 燃料及び 9×9 燃料）及び新燃料（9×9 燃料※2）を貯蔵し、貯蔵容量は炉心全装荷量（1~6 号機炉心全装荷量の合計）の約 200%である。なお、乾式貯蔵キャスク仕立て時に発生するチャンネルボックス等も共用プールに貯蔵する。

※1 共用プール内の使用済燃料貯蔵ラックにおける未臨界性の評価は、使用済燃料の中性子無限増倍率を新燃料およびいかなる燃焼度の燃料を貯蔵しても十分安全側の評価を得るように 1.30 を仮定している。7×7 燃料の炉心内装荷状態における燃料未照射状態から燃料寿命末期においてもっとも大きい中性子無限増倍率は 1.30 を下回るため、既存の評価に包含される。従って、7×7 燃料を燃料貯蔵ラックに貯蔵した場合でも臨界にはならない。なお、4 号機の使用済燃料貯蔵プールに存在する 7×7 燃料は、チャンネルボックス等の変形により使用済燃料貯蔵ラック（90 体）に貯蔵する事は適さないため、使用済燃料貯蔵ラック（49 体）に貯蔵する。

※2 使用済 9×9 燃料を共用プール内の燃料貯蔵ラックに貯蔵した場合の未臨界性は既存の設置許可において確認されている。使用済 9×9 燃料の未臨界評価においては、燃料未照射状態から燃料寿命末期において最も反応度が高い状態を包絡するような評価を行っていることから、新燃料を燃料貯蔵ラックに貯蔵した場合でも臨界にはならない。

- b. 使用済燃料貯蔵ラックは、ステンレス鋼を使用するとともに、適切な燃料間距離を保持することにより、容量いっぱい燃料を収容し、共用プール水温及びラック内燃料貯蔵位置等について想定される厳しい状態を仮定しても実効増倍率が 0.95 以下となる設計としている。また、使用済燃料貯蔵ラックの一部については、収納缶に入れた燃料を収納缶ごと貯蔵できる設計とする。収納缶は、変形、または破損燃料を収納缶内に収納して取扱うための吊上げ機能を持ち、また燃料の形状が維持されていない場合でも放射性物質の拡散を抑制する。
- c. 共用プール、キャスク・ピット壁の厚さ及び水深は遮へいを考慮して十分確保し、内面はステンレス鋼でライニングするとともに排水口を設けないことにより漏えいを防止している。また、万一の共用プール・ライニング及びキャスク・ピット・ライニングの想定される破損による漏えいを検知するため、漏えい水検出計及び水位警報装置を設ける。
- d. 燃料取扱場所においてガンマ線レベルを連続的に監視し、線量率が設定値を超えた場合には燃料取扱場所に警報を発するエリア放射線モニタを設ける。
- e. キャスク・ピットは、共用プールの横に別個に設け、万一のキャスクの落下事故の場合にも、共用プールの機能を喪失しない設計としている。また、万一の燃料集合体の落下時にも共用プールのライニングは機能を喪失しない設計としている。

(2) 共用プール冷却浄化系

共用プール冷却浄化系は、使用済燃料からの崩壊熱を共用プール補機冷却系により熱交換器で除去して共用プール水を冷却するとともに、ろ過脱塩装置で共用プール水をろ過脱塩して、共用プール及びキャスク・ピット水の純度及び透明度を維持する。

共用プール冷却浄化系は、1～6 号機原子炉建屋内の使用済燃料プールまたは炉内に 19 ヶ月以上冷却された使用済燃料及び炉内燃料を年間 900 体ずつ貯蔵容量いっぱいまで受入れた場合の使用済燃料から発生する崩壊熱の合計として定義する通常最大熱負荷を、この系の熱交換器で除去し、1 系列で共用プール水温がコンクリートの制限温度 65℃を超えない、また 2 系列で共用プール水温が現場作業環境を考慮した温度 52℃を超えない設計としている。

共用プールからスキマせきを越えてスキマ・サージ・タンクに流出する共用プール水は、ポンプで昇圧し、ろ過脱塩装置、熱交換器を通した後、共用プールのディフューザから吐出する設計としている。

共用プールに入る配管には逆止弁を設け、サイフォン効果により共用プール水が流出しない設計としている。

共用プール冷却浄化系は、スキマせきを越えてスキマ・サージ・タンクに流出する水をポンプで循環させるので、この系の破損時にも燃料プール水位はスキマせきより低下することはない。

なお、ろ過脱塩装置より発生する使用済イオン交換樹脂は、運用補助共用施設内の本設の沈降分離タンク（共用プールの設備寿命を40年として、発生する使用済イオン交換樹脂を収容できる容量として設計されている）で保管する。

また、本系統の電源は、外部電源喪失時に非常用所内電源からの受電が可能となっている。

(3) 共用プール補機冷却系

共用プール補機冷却系は、共用プールで発生する崩壊熱等を共用プール冷却浄化系の熱交換器等によって冷却除去するとともに、この系の空気冷却器によって大気へ伝える。

また、本系統の電源は、外部電源喪失時に非常用所内電源からの受電が可能となっている。

(4) 共用プール補給水系

共用プール補給水系は、通常時及び異常時に共用プール補給水貯蔵槽から共用プール補給水ポンプで昇圧し、共用プール水を補給する。

外部電源が喪失した場合にも、共用プール補給水系を用いて、共用プールへ水の補給ができる。また、長期停止した場合も消防車により共用プールへ水の補給が可能である。

なお、消防車については、ろ過水タンク等（ろ過水タンク：OP. 41,000，純水タンク：OP. 10,000）の真水を水源とする。

(5) 燃料取扱装置

燃料取扱装置は、共用プール及びキャスク・ピットの上に設けるレール上を水平に移動するブリッジと、その上を移動するトロリで構成する。

また、燃料つかみ機は、二重のワイヤや種々のインター・ロックを設ける。燃料取扱作業による放射線業務従事者の被ばくを低減するため、燃料取扱装置は、遠隔自動で運転できるようにしている。

(6) 天井クレーン

天井クレーンは、構内用輸送容器、乾式貯蔵キャスクまたは輸送貯蔵兼用キャスクの運搬等に使用する。

また、天井クレーンの主要要素は、種々の二重化（主巻装置のワイヤーロープ、ドラム等）を施しており、使用済燃料貯蔵ラック上には、重量物を通過させないように、天井クレーンにインター・ロックが設けられている。

(7) 使用済燃料輸送容器除染設備

使用済燃料輸送容器除染設備は、構内用輸送容器、乾式貯蔵キャスクまたは輸送貯蔵兼用キャスクの除染を行うため、共用プールに隣接して設けている。

(8) 燃料貯蔵区域換気空調系

燃料貯蔵区域換気空調系は、送・排風機、フィルタ等で構成する。共用プールの管理区域に供給された空気は、フィルタを通した後、排風機により排気口から大気に放出する。

(9) 使用済燃料輸送容器保管エリア

使用済燃料装填前あるいは装填後の構内用輸送容器、乾式貯蔵キャスク及び輸送貯蔵兼用キャスクを必要に応じて一時保管するため、運用補助共用施設内に使用済燃料輸送容器保管エリアを設けている。

(10) 電源

使用済燃料共用プール設備の電源は所内高圧母線から受電できる構成とする。また、外部電源喪失の場合でも、非常用所内電源からの供給が可能な構成とする。

なお、全交流電源喪失の場合でも電源車（「Ⅱ.2.7」に記載）により、使用済燃料共用プール注水機能を維持する機器に対して電源を供給できる構成とする。

2.12.1.6 自然災害対策等

(1) 津波

東北地方太平洋沖地震では、共用プール冷却浄化系、共用プール補機冷却系及び共用プール補給水系について、地下階に設置されていた電源設備以外のポンプ等の設備は床面より高い位置に設置されていたことにより被害は生じなかったが、同様に地下階に設置されていた電源盤等が浸水による被害を生じたため冷却機能を喪失した。

このため、余震により想定される津波対策としての仮設防潮堤の設置に加え、建屋の防水性向上対策等を行う。

現在は共用プール設備と同じく運用補助共用施設内に設置されている先行復旧予定の非常用ディーゼル発電機（4B）の復旧に合わせ、まずは地下階の防水性向上対策としてトレンチ開口部の閉塞を実施し、地下階の電源盤等の浸水による電源喪失リスクを低減させることで、冷却機能喪失リスクを低減している。また、建屋の浸水を抑えるために床・壁等の開口部の防水性向上対策を実施する。

(2) 火災

復旧した火災報知設備及び消火設備により、火災の早期検知、消火活動の円滑化を図る。

(3) 台風・竜巻

使用済燃料共用プール設備は、屋内に設置してあるため、台風・竜巻の影響を受けない。

(4) 環境条件

使用済燃料共用プール設備は基本的に東北地方太平洋沖地震において被災した設備を復旧する計画としている。復旧後は以下の保守管理を実施し、設備の維持を図る。

- ・燃料取扱装置、天井クレーンについては使用前の点検及び定期的な点検を実施する。
- ・共用プール冷却浄化系、共用プール補機冷却系、共用プール補給水系、建屋躯体等については、当面は、定期的な巡視点検において状態を監視し、異常の兆候が確認され

た場合に対応を行うこととしている。

2.12.1.7 構造強度及び耐震性

使用済燃料共用プール設備の構造強度及び耐震性は以下の工事計画認可申請書等により確認している。

工事計画認可申請書（6資庁第2935号 平成6年4月27日認可）

工事計画届出書（総文発官 5 第 1218 号 平成 6 年 4 月 13 日届出）

運用補助共用施設共用プール棟の耐震壁および使用済燃料共用プール躯体について、基準地震動 S_s による耐震安全性評価を実施し、問題のないことを確認している。

2.12.1.8 機器の故障への対応

(1) 共用プール冷却浄化系の機器の単一故障

a. 共用プール冷却浄化系又は共用プール補機冷却系ポンプ故障

共用プール冷却浄化系又は共用プール補機冷却系ポンプが故障した場合は、現場に移動し、待機ポンプの起動を行い、使用済燃料共用プールの循環冷却を再開する。

b. 電源喪失

共用プール冷却浄化系の電源が外部電源喪失や所内電源喪失により喪失した場合、電源の復旧に長時間を要しない場合は、電源の復旧により使用済燃料共用プールの循環冷却を再開する。

共用プール冷却浄化系ポンプ及び共用プール補給水ポンプの電源の復旧に長時間を要する場合は、予め免震重要棟付近（OP. 36, 900）に待機している電源車を用いて共用プール補給水系の電源を復旧し、使用済燃料共用プールへの注水を行うと共に、必要に応じて予め免震重要棟西側（OP. 36, 900）に待機している消防車の配備を行い、直接プールに注水を行うことにより、プール水位の異常な低下を防止する。

(2) 共用プール冷却浄化系の複数の系統・機器の同時機能喪失

地震、津波等により、万が一、共用プール冷却機能の複数の系統や機器の機能が同時に喪失した場合には、現場状況に応じて、予め免震重要棟西側（OP. 36, 900）に待機している消防車の配備を行い、プール水位の異常な低下を防止する。共用プール冷却機能が停止してから、燃料の露出を確実に防止でき且つ水遮へいが有効とされる使用済燃料の有効燃料頂部の上部 2m に至るまでは最短でも約 19 日であることから、使用済燃料プールの冷却を確保することは可能である。

(3) 冷却機能喪失事象に対する評価

共用プール冷却機能の喪失評価を添付資料—6 に示す。

(4) 燃料集合体の落下

燃料集合体の落下評価を添付資料—7に示す。

2.12.2 基本仕様

2.12.2.1 要求仕様

以下に要求仕様を示す。なお、福島第一原子力発電所 原子炉設置許可申請書に機器仕様を記載されているものは機器名称に※を記載する。

(1) 使用済燃料共用プール

容 量 6799 体

(使用済燃料共用プールについては、以下の工事計画認可申請書により確認している。

工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可))

(2) 使用済燃料貯蔵ラック

容 量 90 体

個 数 75

(使用済燃料貯蔵ラックについては、以下の工事計画認可申請書により確認している。

工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可))

(3) 使用済燃料貯蔵ラック

容 量 49 体

個 数 1

(4) 収納缶

個 数 48

(5) 共用プール冷却浄化系

a. ポンプ※

台 数 3 (うち 1 台は予備)

容 量 約 500m³/h/台

(ポンプについては、以下の工事計画認可申請書により確認している。

工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可))

b. 熱交換器※

基 数 2

交換熱量 約 3.3MW/基 (約 2.8×10⁶kcal/h/基)

(熱交換器については、以下の工事計画認可申請書により確認している。

工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可))

c. ろ過脱塩装置※

形 式 圧力プリコート形
 基 数 2
 容 量 約 200m³/h/基

(ろ過脱塩装置については、以下の工事計画認可申請書により確認している。

工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可))

表 2. 1 2 - 1 共用プール冷却浄化系 主要配管仕様

名 称	仕 様	
スキマ・サージ・タンクから共用プール冷却浄化系ポンプまで	外径/厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (kg/cm ²) 最高使用温度 (°C)	267.4/9.3 SUS304TP/STS42 静水頭/14.0 66
共用プール冷却浄化系ポンプから共用プール冷却浄化系熱交換器まで	外径/厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (kg/cm ²) 最高使用温度 (°C)	165.2/7.1 216.3/8.2 267.4/9.3 SUS304 TP/STS42 14.0 66
共用プール冷却浄化系熱交換器から使用済燃料共用プールへ	外径/厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (kg/cm ²) 最高使用温度 (°C)	267.4/9.3 SUS304 TP 14.0 66
ポンプ出口配管から共用プール冷却浄化系ろ過脱塩器まで	外径/厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (kg/cm ²) 最高使用温度 (°C)	165.2/7.1 SUS304TP/STS42/STPT38 14.0 66
共用プール冷却浄化系ろ過脱塩器からポンプ出口配管まで	外径/厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (kg/cm ²) 最高使用温度 (°C)	139.8/6.6 165.2/7.1 SUS304TP 14.0 66

(主要配管については、以下の工事計画認可申請書により確認している。

工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可))

(6) 共用プール補給水系

a. 共用プール補給水貯蔵槽※

基 数	1
容 量	約 430m ³
主要部材質	ステンレス鋼ライニング

b. ポンプ※

台 数	2
容 量	約 30m ³ /h/台

(7) 共用プール補機冷却系

a. ポンプ※

台 数	3 (うち 1 台は予備)
容 量	約 650m ³ /h/台

(ポンプについては、以下の工事計画認可申請書により確認している。

工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可))

b. 空気冷却器※

基 数	2
交換熱量	約 3.3MW/基 (約 2.9×10 ⁶ kcal/h/基)

(空気冷却器については、以下の工事計画認可申請書により確認している。

工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可))

表 2. 1 2 - 2 共用プール補機冷却系 主要配管仕様

名 称	仕 様	
共用プール補機冷却ポンプ から共用プール冷却浄化系 熱交換器まで	外径／厚さ (mm)	216.3／8.2 267.4／9.3 318.5／10.3
	材質	STS42
	最高使用圧力 (kg/cm ²)	12.0
	最高使用温度 (°C)	70
共用プール冷却浄化系熱交 換器から共用プール補機冷 却系空気冷却器まで	外径／厚さ (mm)	114.3／6.0 165.2／7.1 267.4／9.3 318.5／10.3
	材質	STS42
	最高使用圧力 (kg/cm ²)	12.0
	最高使用温度 (°C)	70
共用プール補機冷却系空気 冷却器から共用プール補機 冷却系ポンプまで	外径／厚さ (mm)	114.3／6.0 165.2／7.1 318.5／10.3
	材質	STS42
	最高使用圧力 (kg/cm ²)	12.0
	最高使用温度 (°C)	70

(主要配管については、以下の工事計画認可申請書により確認している。

工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可))

(8) 燃料取扱装置

型 式 燃料把握機付移床式

基 数 1

定格荷重 燃料把握機 460kg 補助ホイス ト 460kg

(燃料取扱装置については、以下の工事計画届出書により確認している。

工事計画届出書 (総文発官 5 第 1218 号 平成 6 年 4 月 13 日届出))

(9) 天井クレーン

a. 共用プールエリア天井クレーン

型 式	天井走行式
基 数	1
定格荷重	主巻 125t 補巻 5t

(共用プールエリア天井クレーンについては、以下の工事計画届出書により確認している。
工事計画届出書 (総文発官 5 第 1218 号 平成 6 年 4 月 13 日届出))

b. キャスク搬出入エリア天井クレーン

型 式	天井走行式
基 数	1
定格荷重	主巻 140t 補巻 5t

(キャスク搬出入エリア天井クレーンについては、以下の工事計画届出書により確認している。

工事計画届出書 (総文発官 5 第 1218 号 平成 6 年 4 月 13 日届出))

(10) 燃料貯蔵区域換気空調系

a. 共用プールエリア送風機

台 数	2 (うち 1 台は予備)
容 量	約 93,000m ³ /h/台
形 式	遠心式
静 圧	180mmAq

(共用プールエリア送風機については、以下の工事計画認可申請書により確認している。
工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可))

b. 共用プールエリア排風機

台 数	2 (うち 1 台は予備)
容 量	約 93,000m ³ /h/台
形 式	遠心式
静 圧	250mmAq

(共用プールエリア排風機については、以下の工事計画認可申請書により確認している。
工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可))

(11) 温度計

形 式 熱電対
計測範囲 0～100℃
個 数 1

(12) エリア放射線モニタ

検出器の種類	計測範囲	取付箇所
半導体式	10 ⁻⁴ ～1mSv/h	・ 3F 1チャンネル ・ 2F 1チャンネル ・ 1F 3チャンネル ・ B1F 1チャンネル (合計 6 チャンネル)
	1～10 ⁴ mSv/h	・ 3F 1チャンネル (合計 1 チャンネル)

(エリア放射線モニタについては、以下の工事計画届出書により確認している。

工事計画届出書 (総文発官 5 第 1218 号 平成 6 年 4 月 13 日届出))

(13) 使用済燃料輸送容器保管エリア

保管容量 (構内用輸送容器, 乾式貯蔵キャスク, 輸送貯蔵兼用キャスクの合計)
10 基

(14) 消防車

基 数 1※
規格放水圧力 0.7MPa 以上
放水性能 60m³/h 以上
高圧放水圧力 1.0MPa 以上
放水性能 36m³/h 以上
燃料タンク容量, 消費量 約 63 l (参考値), 約 37 l/h (参考値)
※使用済燃料プール設備と共用

(15) ろ過水タンク等

a. ろ過水タンク

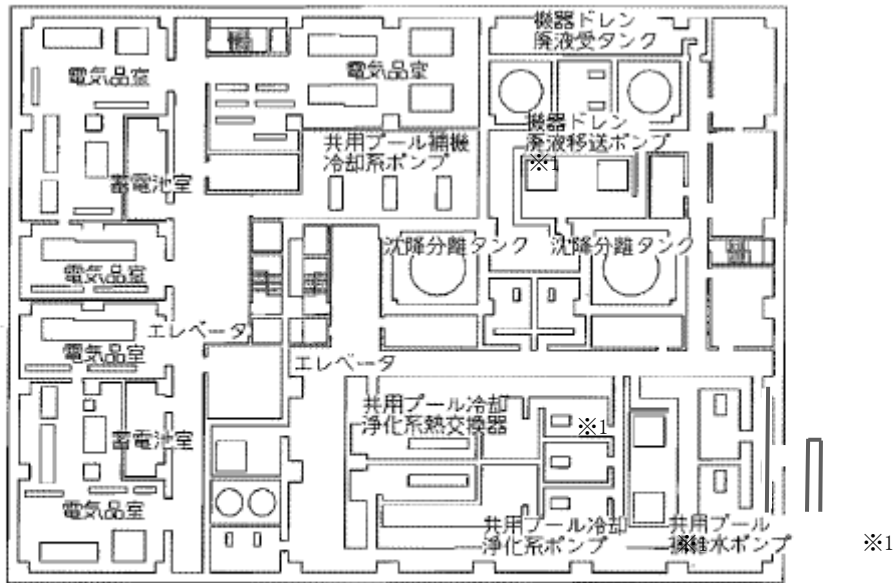
基 数	1
容 量	約 8,000m ³ /基

b. 純水タンク

基 数	2
容 量	約 2,000m ³ /基

2.12.3 添付資料

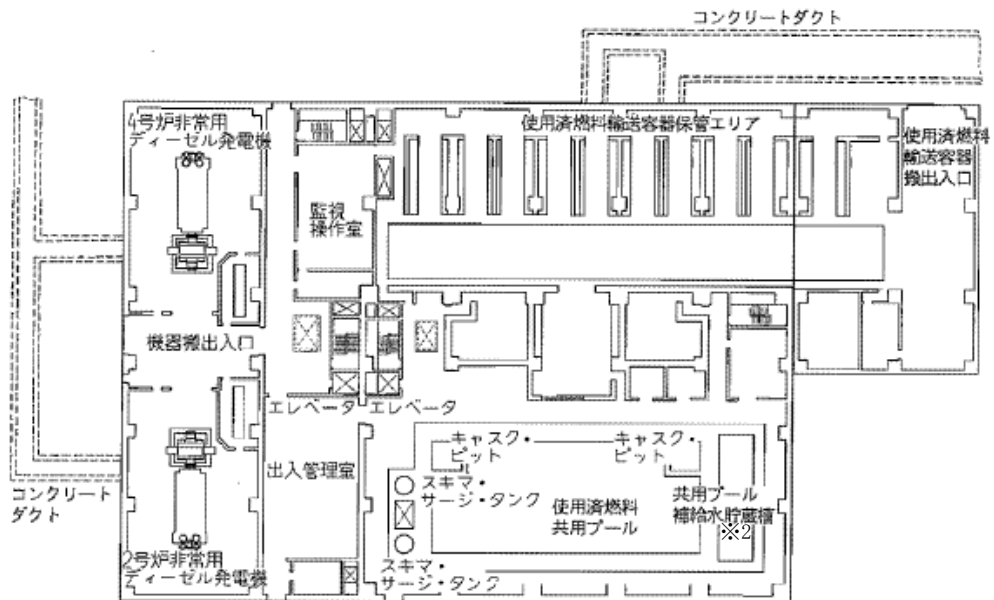
- 添付資料—1 系統概略図
- 添付資料—2 現在の設備状況
- 添付資料—3 有効燃料頂部+2m での線量率評価
- 添付資料—4 「共用プール冷却浄化系及び共用プール補機冷却系」1 系列運転時の共用プール水温度評価
- 添付資料—5 運用補助共用施設共用プール棟の耐震安全評価について
- 添付資料—6 共用プール冷却機能の喪失評価
- 添付資料—7 燃料集合体の落下評価
- 添付資料—8 使用済燃料共用プール設備の耐震安全性について
- 添付資料—9 使用済燃料貯蔵ラック（49 体）について
- 添付資料—10 使用済燃料共用プール設備に係る確認事項について



※1: 共用プール冷却浄化系ポンプ, 共用プール補機冷却系ポンプ, 共用プール補給水ポンプ, 共用プール冷却浄化系熱交換器は, 床面から高い位置に設置。

D.P. +2700mm

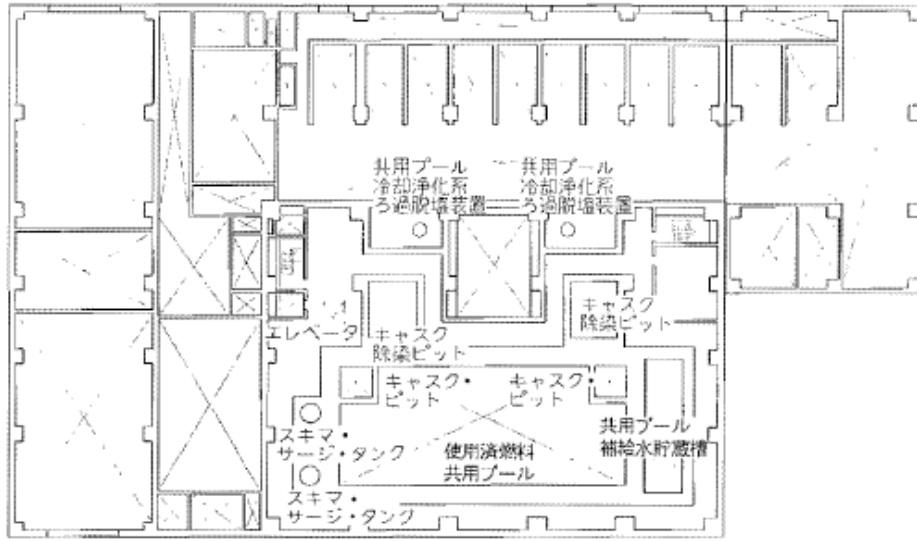
図2. 12-1 運用補助共用施設平面図 (その1)



※2: 共用プール補給水貯蔵槽は, 共用プール同様, 鉄筋コンクリート造の設備。

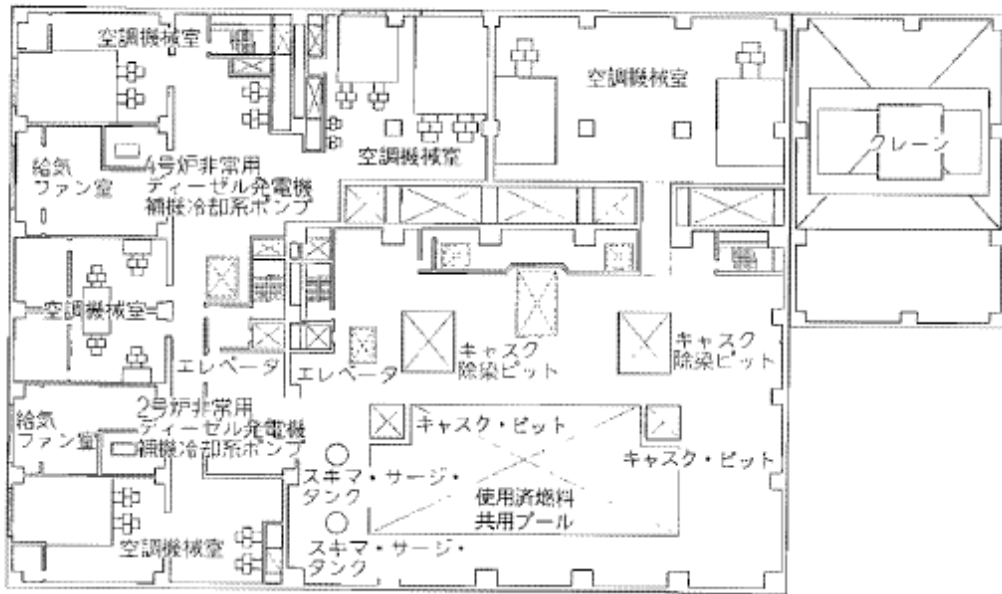
D.P. +10200mm

図2. 12-2 運用補助共用施設平面図 (その2)



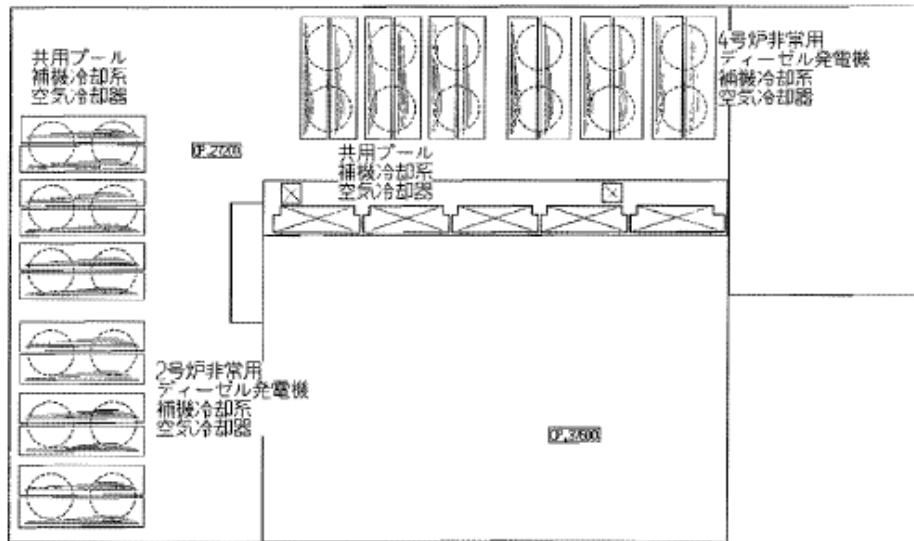
O.P. +15700mm

図2. 12-3 運用補助共用施設平面図 (その3)



O.P. +19200mm, O.P. +20200mm

図2. 12-4 運用補助共用施設平面図 (その4)



O.P. +27200mm, O.P. +37600mm

図2. 12-5 運用補助共用施設平面図 (その5)

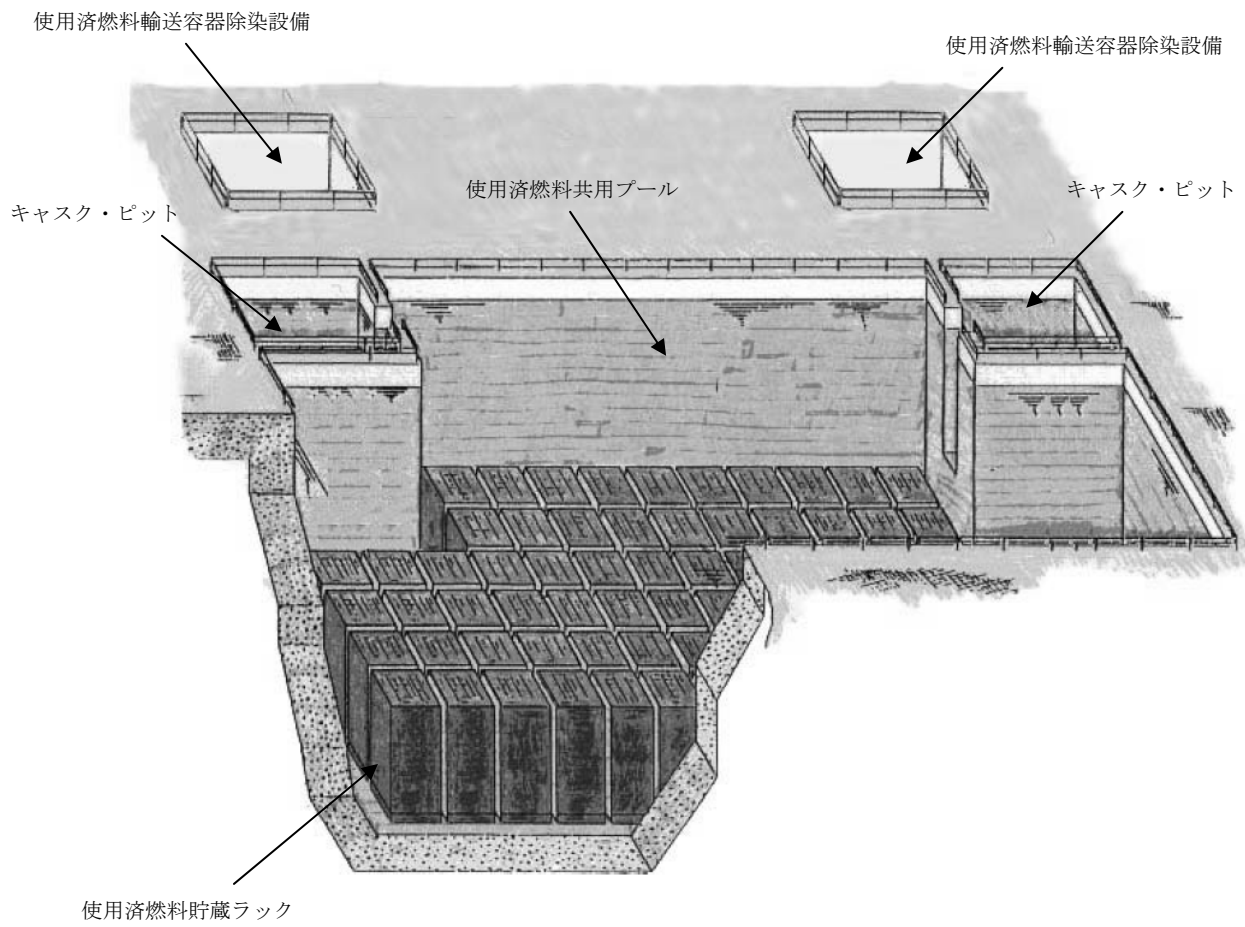


図 2. 1 2 - 6 共用プール概要図

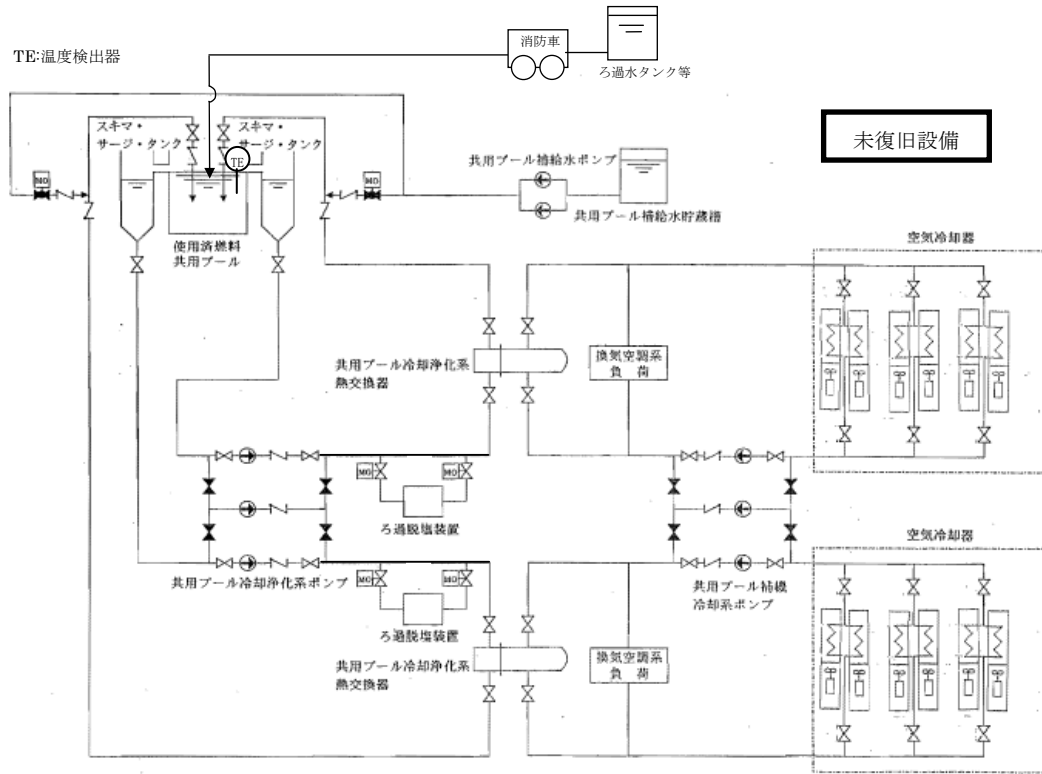


図1-1 共用プール冷却浄化系，共用プール補機冷却系
及び共用プール補給水系概略系統図（現状：平成26年4月）

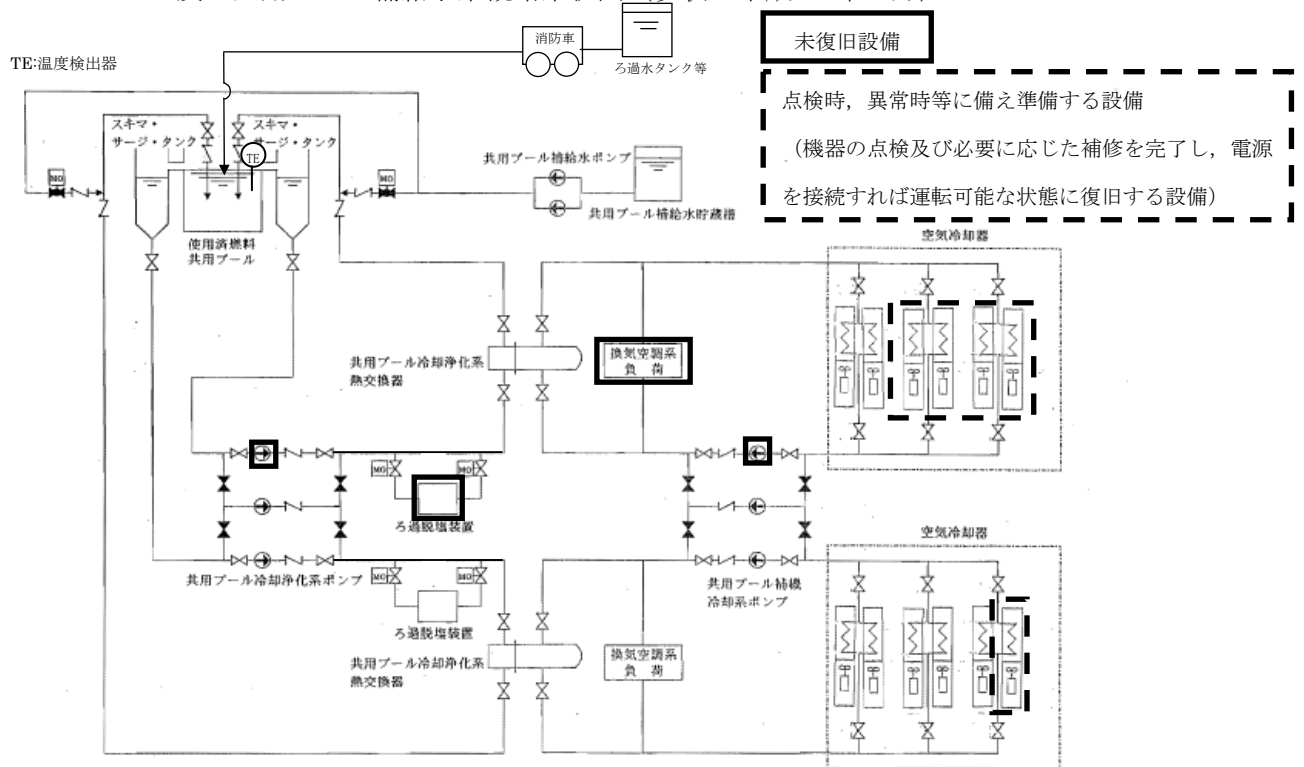


図1-2 共用プール冷却浄化系，共用プール補機冷却系
及び共用プール補給水系概略系統図（共用プールからの燃料取出開始時に必要な状況）

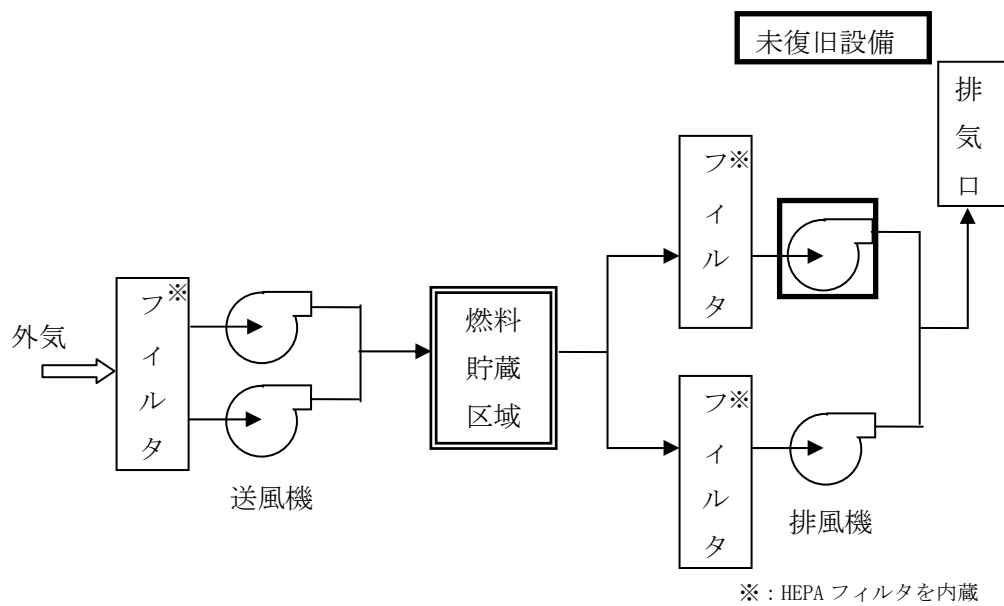


図 1 - 3 燃料貯蔵区域換気空調系概略系

現在の設備状況

東北地方太平洋沖地震に伴い発生した津波により、運用補助共用施設の非管理区域地下 1 階に設置された電源設備は 70～120cm 程度浸水し、運用補助共用施設は全ての電源が喪失した。電源喪失により共用プール冷却浄化系の機能は喪失したが、共用プール水位については、使用済燃料頂部より高い水位が十分確保されていた。なお、共用プール水温度は一時的に 73℃程度まで上昇したが、仮設電源の設置と共用プール冷却浄化系の一部復旧により水温は低下し、現在は概ね 15～35℃程度を維持している。

現在の設備状況を添付資料— 1 に、設備の点検・復旧の概略工程計画を表 1 に示す。

今後、設備信頼性、運用面の改善、津波、1～6 号機使用済燃料プール及び炉内の燃料受け入れの観点から、設備の復旧、改造または設置等を必要に応じて実施していく計画としている。

1.1 燃料貯蔵設備

1.1.1 共用プール

漏えい水検出計は平成 24 年 6 月、水位警報装置は平成 25 年 3 月に復旧している。スキマ・サージ・タンク水位計の指示は巡視点検で確認しており、ウェブカメラにより免震重要棟でも確認することができる。使用済燃料貯蔵ラックは、平成 25 年 1 月に代表ラック 2 個に対して外観点検を実施し、問題がないことを確認している。

1.1.2 共用プール冷却浄化系

3 台ある共用プール冷却浄化系ポンプのうち 1 台目を平成 23 年 3 月に復旧し、早期に 2 系統ある冷却浄化系のうち 1 系統での共用プール水の冷却を可能としており、平成 25 年 3 月には 2 台目、平成 25 年 7 月には 3 台目も復旧し、冷却に関して多重性を確保している。ろ過脱塩装置は、平成 24 年 4 月に 2 基のうち 1 基を復旧し、早期に 2 系統ある冷却浄化系のうち 1 系統での共用プール水の浄化を可能としており、平成 25 年 10 月には 2 基目を復旧し、浄化に関しても多重性を確保している。

添付資料— 4 に示すとおり、熱交換器 1 基で今後の 1～6 号機の燃料の受入れを考慮しても共用プール水温を 52℃以下に冷却することが可能であるが、残りの 1 系列についても点検時、異常時等に備えて熱交換器が使用できるように、平成 25 年 5 月に熱交換器を復旧している。

また、巡視点検において、共用プール水温度、ポンプの運転状態等を確認し、冷却状態を確認している。なお、共用プール水温度計の指示は、ウェブカメラにより免震重要棟でも確認することができる。

1.1.3 共用プール補機冷却系

3台ある共用プール補機冷却系ポンプのうち1台目を平成23年3月に復旧し、早期に2系統ある冷却浄化系のうち1系統での共用プール冷却浄化系の冷却を可能としており、平成25年3月には2台目、平成25年7月には3台目も復旧し、多重性を確保している。また、12台あるエアフィンクーラーは平成25年7月までに全数復旧している。

なお、空気冷却器は3ベイで1基（共用プール補機冷却系片系統に1基）を構成しており、1ベイあたり2台のエアフィンクーラーが配置されている。

添付資料一4に示すとおり、空気冷却器1基で今後の1～6号機の燃料の受入れを考慮しても共用プール水温を52℃以下に冷却することが可能であるが、残りの1系列の空気冷却器についても点検時、異常時等に備えて使用できるよう復旧している。なお、エアフィンクーラーについては、プール水温度を確認しながら運転台数の調整を行う。

また、巡視点検において、ポンプの運転状態等系を確認し、冷却状態を確認している。

1.1.4 共用プール補給水系

2台ある共用プール補給水ポンプのうち1台目を平成23年3月に復旧し、早期に共用プール補給水貯蔵槽からプールへ共用プール水を補給することを可能としており、平成25年3月には2台目も復旧し、多重性を確保している。

1.2 燃料取扱装置

平成24年9月に点検は終了しており、定期事業者検査相当の健全性確認を社内自主で実施し、機能上の問題がないことを確認している。

1.3 使用済燃料輸送容器

キャスク保管エリアで保管されていた使用済燃料輸送容器は、外観上異常はない。

また、震災時に使用済燃料輸送容器除染設備で点検していた使用済燃料輸送容器については、平成24年3月に点検を終了し問題ないことを確認している。

1.4 その他設備

1.4.1 天井クレーン

平成 24 年 2 月に点検は終了しており、定期事業者検査相当の健全性確認を社内自主で実施し、機能上の問題がないことを確認している。

1.4.2 使用済燃料輸送容器除染設備

外観上異常はない。

1.4.3 燃料貯蔵区域換気空調系

燃料貯蔵区域換気空調系については、2 台ある共用プールエリア送風機のうち 1 台を平成 23 年 3 月に、2 台目を平成 25 年 7 月に復旧している。また、2 台ある共用プールエリア排風機のうち 1 台を平成 23 年 3 月に運転可能としているが、現状停止している。

停止の間の燃料取扱作業時は、共用プールオペフロ階において、空気中の放射性物質をダストサンプラーで採取し、放射性物質濃度の測定を行う。

なお、2 台ある共用プールエリア送・排風機のうち、1 台は予備機であることから、当面は送・排風機については各 1 台で運用する。共用プールエリア排風機の 2 台目については平成 26 年 9 月末に復旧予定である。

1.4.4 エリア放射線モニタ

現在、点検復旧中である。

復旧までの間の燃料取扱作業時は、可搬式放射線モニタ等を用いて監視する。

表1 共用プール設備の点検・復旧工程（案）

	平成24年			平成25年			平成26年			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
機器点検・復旧	天井クレーン点検・復旧	[Bar chart showing work in early 2024]								
	燃料取扱装置点検・復旧	[Bar chart showing work from early 2024 to mid-2024]								
	使用済燃料輸送容器点検・保守	[Bar chart showing work in early 2024]								
	共用プール冷却浄化系、共用プール補機冷却系点検・復旧※1 (電源復旧しながら実施)	[Bar chart showing work from early 2024 to mid-2025]								
	共用プール補給水ポンプ（2台目）点検・復旧 (電源復旧しながら実施)	[Bar chart showing work from early 2024 to mid-2025]								
	監視系(漏えい水検出計, 水位警報装置, エリア放射線モニタ等)点検・復旧 (電源復旧しながら実施)	[Bar chart showing work from early 2024 to mid-2026]								
	換気空調系送風機側HEPAフィルタ設置 換気空調系点検・復旧 (共用プールエリア排風機2台目)	[Bar chart showing work from early 2024 to mid-2026]								
火災報知設備, 消火設備点検・復旧	[Bar chart showing work from early 2024 to mid-2025]									
電源設備	電源設備の復旧 ※2	[Bar chart showing work from early 2024 to mid-2025]								
津波対策	床・壁等の開口部の防水性向上	[Bar chart showing work from early 2024 to mid-2025]								

※1：1～4号機使用済燃料プールからの燃料受け入れ開始前までには、片系でエアフィンクーラー6台を復旧する。

※2：電源設備とは「II.2.7 添付資料2 図-1. 所内単線結線図」で示されている共用プールM/C等を示している。

有効燃料頂部+2m での線量率評価

共用プールの冷却浄化系及び補給水系の機能が喪失した場合、消防車を用いて共用プールの冷却を再開する必要がある。冷却再開にあたり、共用プール水位が有効燃料頂部+2m において共用プール 3 階フロアでの作業が可能な線量率であることの確認を行った。

1. 評価条件

評価条件は以下の通りである。

- (1) 使用済燃料の体数は 6,840 体とする。
- (2) 使用済燃料の燃焼度は保守的に全燃料 9×9 燃料の最高燃焼度 55GWd/t とする。
- (3) 冷却期間については、共用プールに移送される使用済燃料として冷却期間の最も短い 5 号機使用済燃料プール及び炉心燃料の使用済燃料を考慮する。具体的な冷却期間は、5 号機停止（平成 23/1/3）から平成 25/1/1（5 号機使用済燃料移送開始）とする。
- (4) ORIGEN2 により使用済燃料の線源強度を計算し、この線源強度を用い MCNP により線量率を計算する。
- (5) 共用プール中心及び共用プール縁について、フロア高さの線量率を評価する。

2. 評価結果

下表に線量率の評価結果を示す。共用プール水位を有効燃料頂部+2m 確保することで、共用プール 3 階フロアにおける線量率を低く抑えることができる。したがって、作業員が共用プール 3 階フロアで消防車等による注水作業を行うことは可能である。

場所	線量率 (mSv/h)
共用プール中心	1.3
共用プール縁	0.7

評価にあたっては使用済燃料の燃焼度及び冷却期間に十分な保守性を持たせていることから、線量率は更に小さくなると考える。

「共用プール冷却浄化系及び共用プール補機冷却系」1系列運転時の共用プール水温度評価

1～4号機の使用済燃料プール及び5号機、6号機炉心及び使用済燃料プールに貯蔵されている使用済燃料の受入れを考慮した崩壊熱の最大値『約2.6MW^{※1}』に対して、1系列運転（共用プール冷却浄化系熱交換器1基、共用プール冷却浄化系ポンプ1台、共用プール補機冷却系空気冷却器1基[エアフィンクーラー6台]、共用プール補機冷却系ポンプ1台）時に、共用プール水温度が52℃以下になることの確認を行った。

※1：「添付資料－6」を参照。

1. 評価条件

評価条件は以下の通りである。

- | | |
|-----------------------------|------------------------|
| (1) 崩壊熱 | ： 約 2.6MW |
| (2) 共用プール冷却浄化系管側（プール側）流量 | ： 500m ³ /h |
| 共用プール冷却浄化系胴側（補機冷却系側）流量 | ： 500m ³ /h |
| (3) 共用プール補機冷却系空気冷却器ファン側大気温度 | ： 29.1℃ |
| 共用プール補機冷却系空気冷却器管側出口水温度 | ： 38℃ |
| 共用プール補機冷却系管側流量 | ： 650m ³ /h |
| (4) 換気空調系負荷 | ： 約 1.3MW |

2. 評価結果

図1に評価結果を示す。共用プール水温度は51.4℃であり、1～4号機の使用済燃料プール、5号機、6号機使用済燃料プール及び炉心に貯蔵されている使用済燃料の受入れを考慮した崩壊熱に対して、1系列運転時に共用プール水温度を52℃以下とすることが可能である。

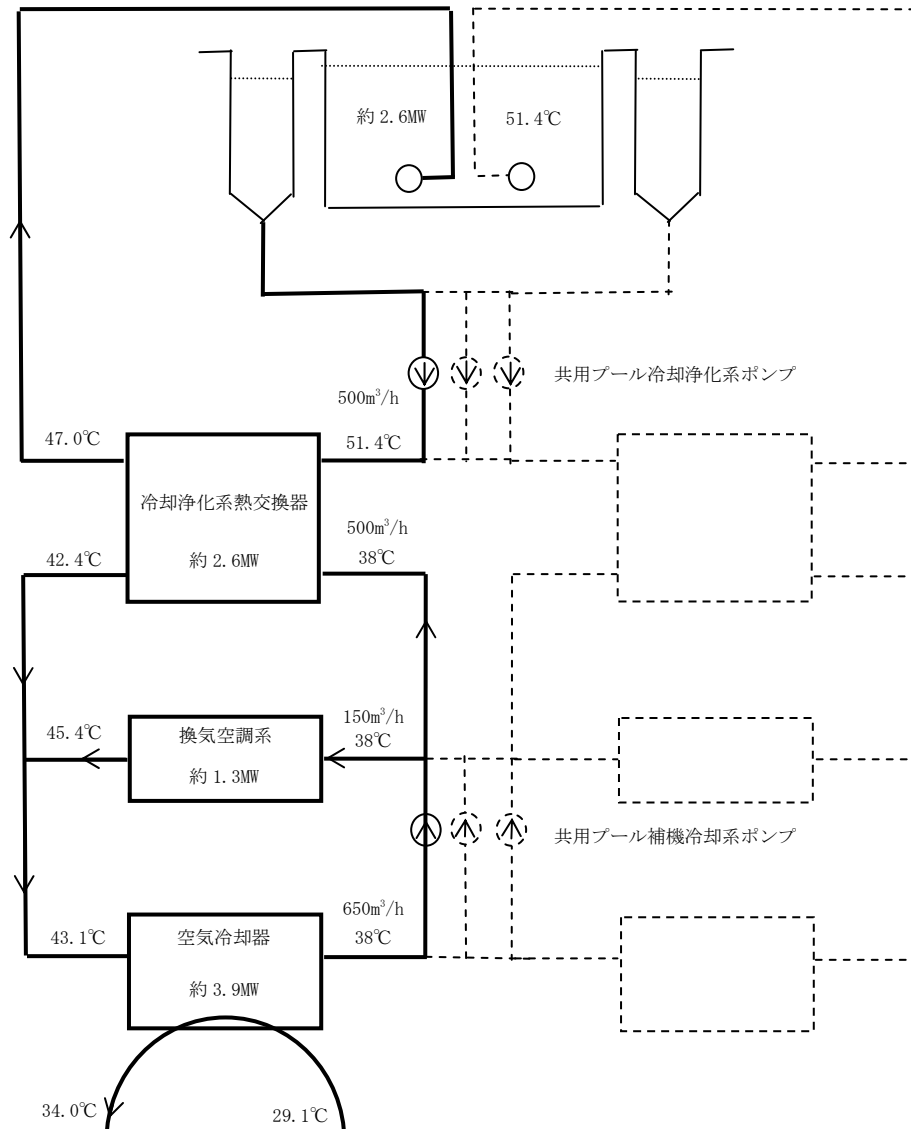


図1 1系列運転時熱バランス

運用補助共用施設共用プール棟の耐震安全性評価について

1. 耐震壁の耐震安全性評価

1.1 評価方針

運用補助共用施設共用プール棟（以下、PL/Bという）の耐震安全性評価は、基準地震動 S_s を用いた地震応答解析によることとし、建物・構築物や地盤の特性を適切に表現できるモデルを設定した上で行う。

1.2 地震応答解析

(1) PL/Bの概要

PL/Bは、地上3階、地下1階の鉄筋コンクリート造（一部鉄骨鉄筋コンクリート造及び鉄骨造）の建物である。概略平面図（基礎版レベル）及び概略断面図を、図1.1～図1.3に、物性値を表1.1に示す。

PL/Bは、基礎底面からの高さが37.6m、地上部が27.6m、地下部が10.0mであり、平面が72.5m(NS方向)×54.5m(EW方向)で、厚さ2.7mの鉄筋コンクリート造の基礎版を介して富岡層(O.P. 0.0m)上に支持されている。

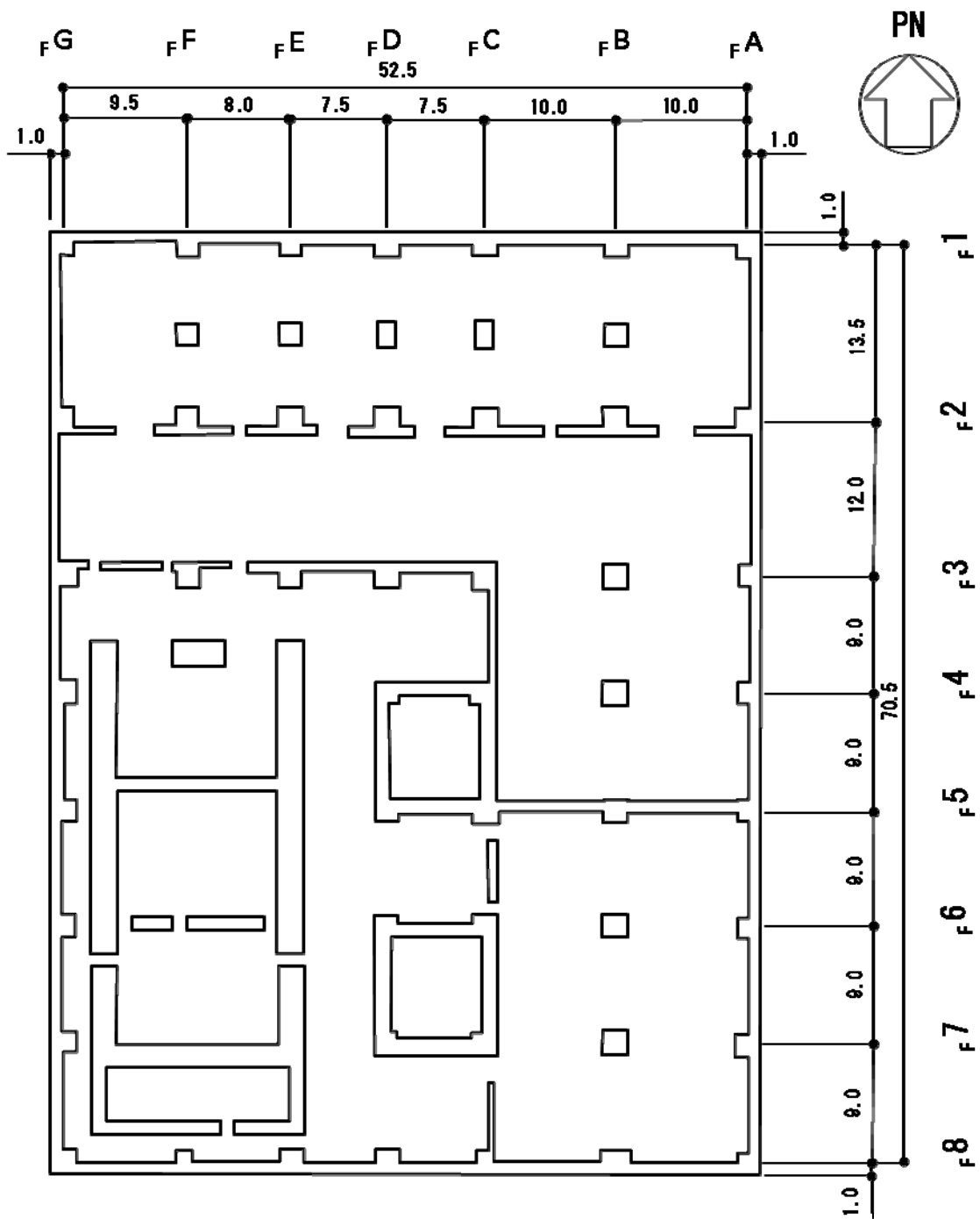


図1.1 PL/B 基礎版レベル平面図(O.P. 2.7m) (単位 : m)

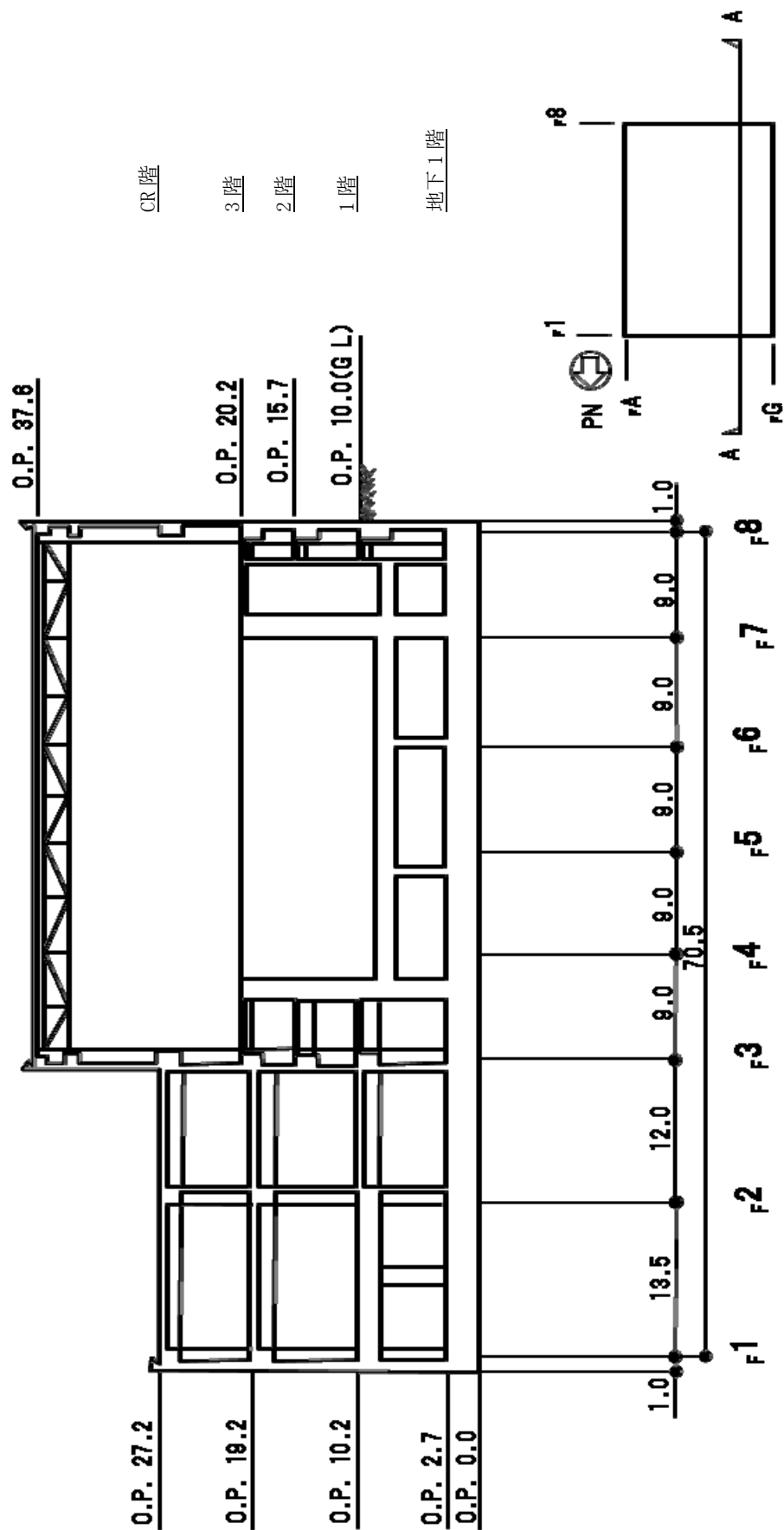


图1.2 PL/B NS方向断面图 (单位：m)

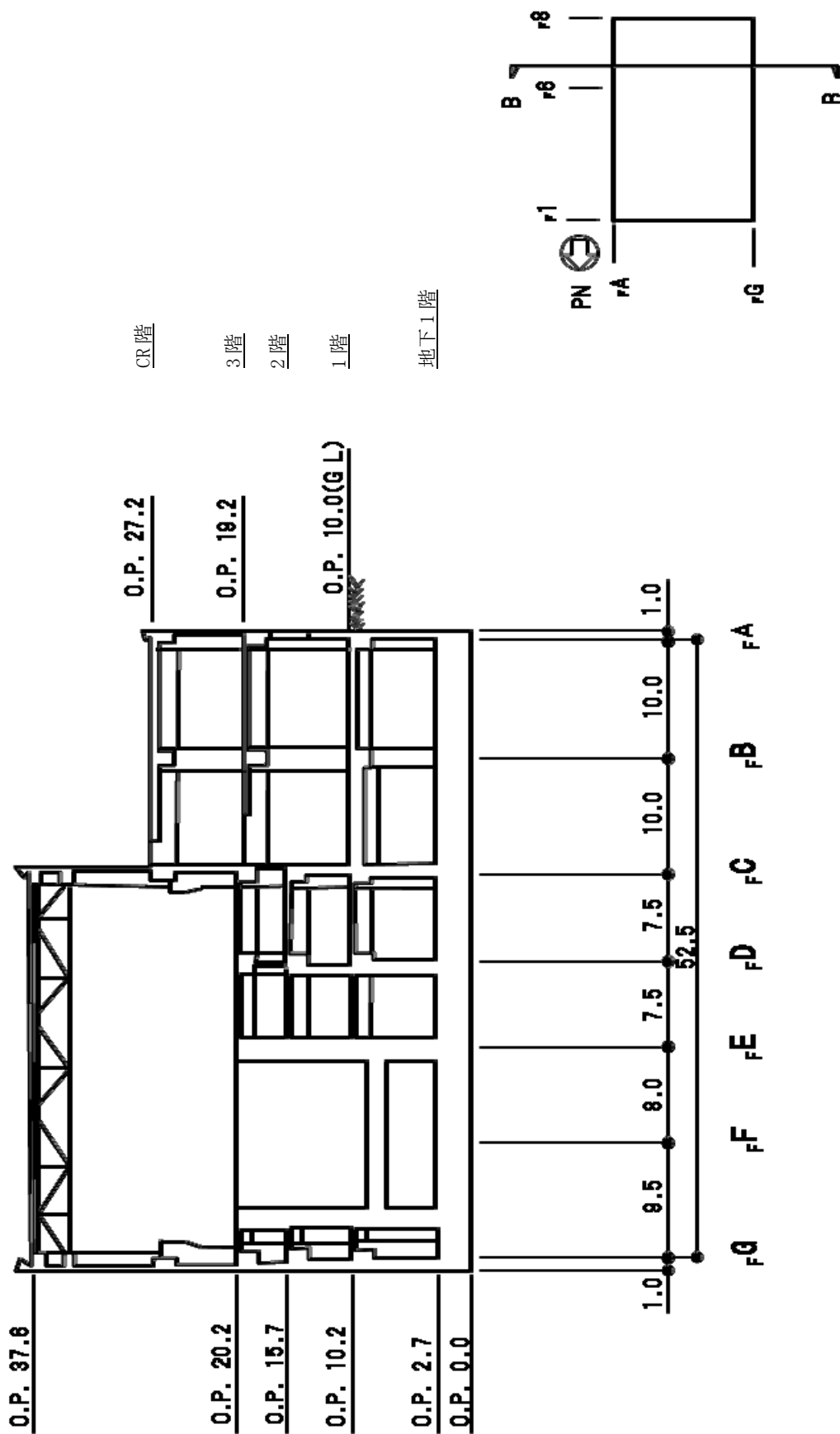


图1.3 PL/B EW方向断面图 (单位：m)

表 1.1 PL/B の物性値

	強度*1 F _c (N/mm ²)	ヤング係数*2 E (N/mm ²)	せん断弾性係数*2 G (N/mm ²)	ポアソン比 ν	単位体積重量*3 γ (kN/m ³)
コン クリ ート	40.0	2.81×10 ⁴	1.17×10 ⁴	0.2	24.5
鉄筋	SD345相当 (SD35)				

*1：強度は実状に近い強度（以下、「実強度」という。）を採用した。実強度の設定は、過去の圧縮強度試験データを収集し試験データのばらつきを考慮し圧縮強度平均値を小さめにまるめた値とした。

*2：実強度に基づく値を示す。

*3：鉄筋コンクリートの値を示す。

(2) 地震応答解析モデル

地震応答解析モデルは、地盤との相互作用を考慮した、曲げ及びせん断剛性を考慮した質点系モデルとする。解析モデルの諸元を図 1.4 及び図 1.5 に示す。

地盤は、地盤調査に基づき水平成層地盤とし、基礎底面地盤ばねについては、「原子力発電所耐震設計技術指針 追補版 JEAG 4601 - 1991」（以下、「JEAG 4601 - 1991」という。）により、成層補正を行ったのち、振動アドミタンス理論に基づいて、スウェイ及びロッキングばね定数を近似法により評価する。基礎底面地盤ばねには、基礎浮き上がりによる幾何学的非線形性を考慮する。図 1.6 に回転ばねの曲げモーメントと回転角の関係を示す。

また、埋め込み部分の建屋側面地盤ばねについては、建屋側面位置の地盤定数を用いて、水平及び回転ばねを「JEAG 4601 - 1991」により NOVAK ばねに基づいて近似法により評価する。

なお、表 1.2 に地盤調査に基づく地盤定数を示す。

復元力特性は、建屋の方向別に、層を単位とした水平断面形状より「JEAG 4601 - 1991」に基づいて設定する。

地震応答解析は、上記復元力特性を用いた弾塑性時刻歴応答解析とする。

入力地震動は、解放基盤表面レベルに想定する基準地震動 S_s を用いることとする。なお、埋め込みを考慮した解析モデルであるため、モデルに入力する地震動は、一次元波動論に基づき、解放基盤表面レベルに想定する基準地震動 S_s に対する地盤の応答として評価する。また、建屋基礎底面レベルにおけるせん断力（以下「切欠き力」という。）を入力地震動に付加することにより、地盤の切欠き効果を考慮する。図 1.7 に、地震応答解析モデルに入力する地震動の概念図を、図 1.8 に解放基盤表面位置（O.P. -196.0m）における基準地震動 S_{s-1} 、 S_{s-2} 及び S_{s-3} の加速度時刻歴波形（水平方向）を示す。

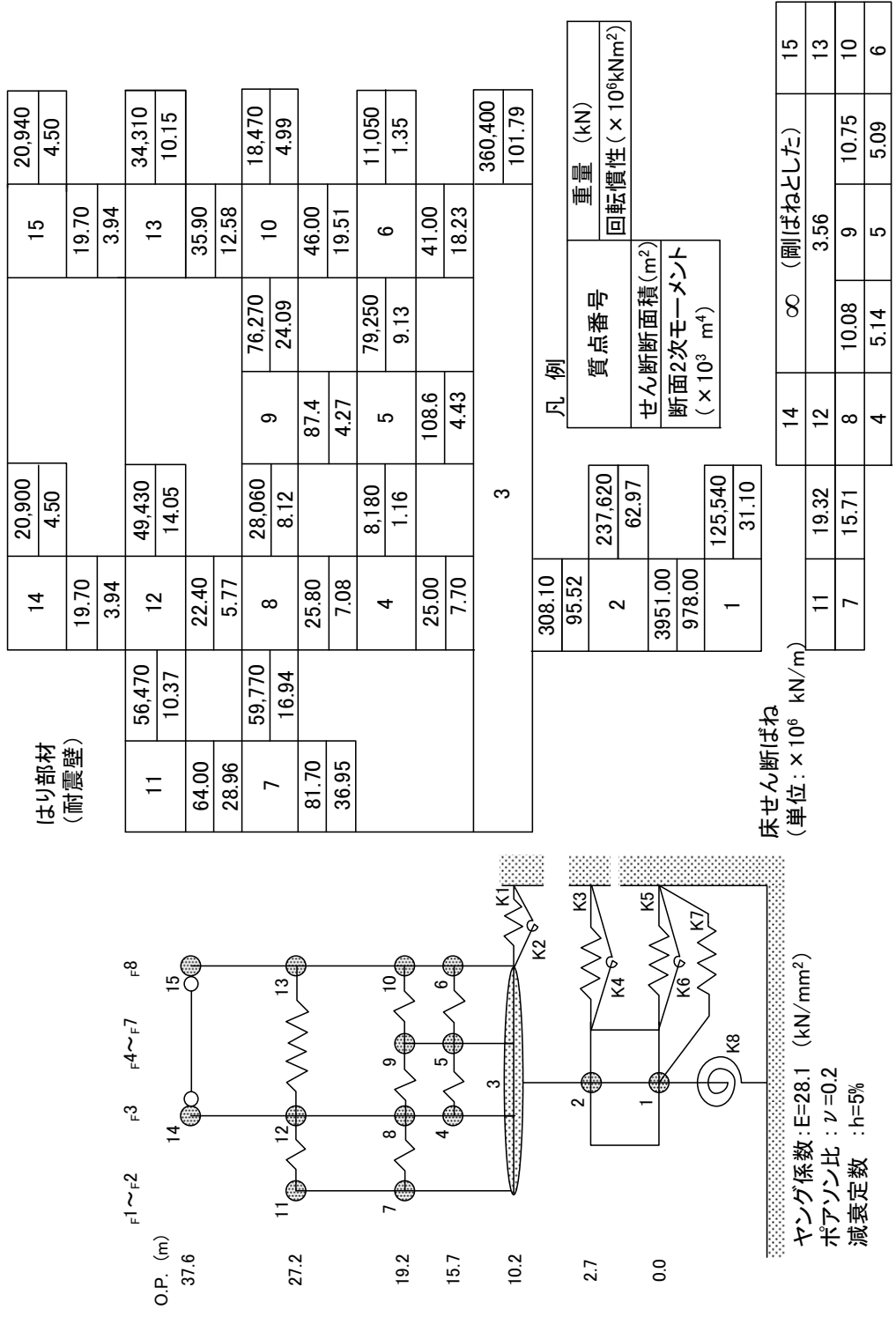


図1.5 PL/B 建屋の振動諸元 (EW方向)

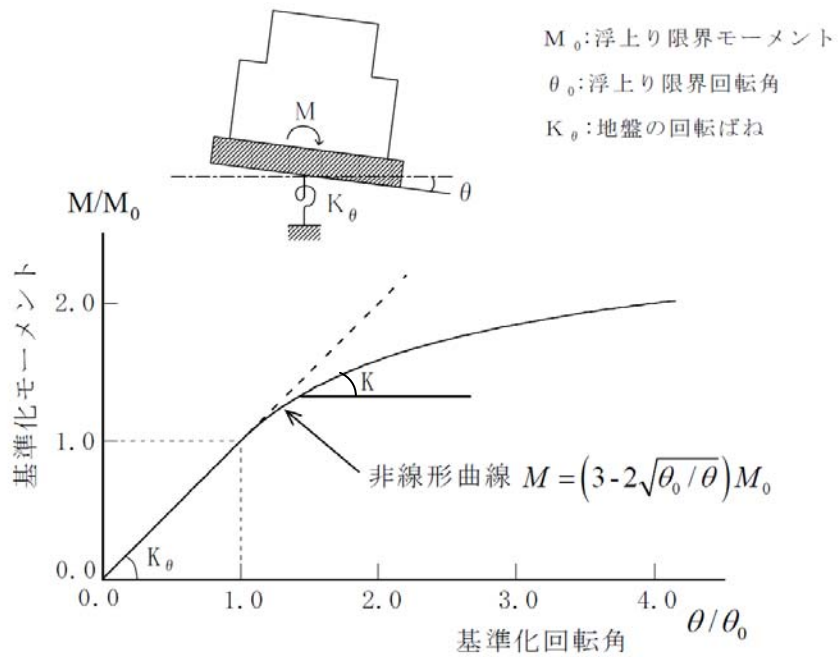


図 1.6 回転ばねの曲げモーメントと回転角の関係

表 1.2(1) PL/B 地盤定数 (Ss-1H)

標高 O. P. (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)
10.0										
2.7	砂岩	380	17.8	0.473	2.25	2.62	0.86	6.63	3	7.3
-10.0	泥岩	450	16.5	0.464	2.69	3.41	0.79	7.88	3	12.7
-80.0		500	17.1	0.455	3.44	4.36	0.79	10.01	3	70.0
-108.0		560	17.6	0.446	4.45	5.63	0.79	12.87	3	28.0
-196.0		600	17.8	0.442	5.16	6.53	0.79	14.88	3	88.0
		(解放基盤)	700	18.5	0.421	9.24	9.24	1.00	26.26	-

表 1.2(2) PL/B 地盤定数 (Ss-2H)

標高 O. P. (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)
10.0										
2.7	砂岩	380	17.8	0.473	2.25	2.62	0.86	6.63	3	7.3
-10.0	泥岩	450	16.5	0.464	2.76	3.41	0.81	8.08	3	12.7
-80.0		500	17.1	0.455	3.53	4.36	0.81	10.27	3	70.0
-108.0		560	17.6	0.446	4.56	5.63	0.81	13.19	3	28.0
-196.0		600	17.8	0.442	5.29	6.53	0.81	15.26	3	88.0
		(解放基盤)	700	18.5	0.421	9.24	9.24	1.00	26.26	-

表 1.2(3) PL/B 地盤定数 (Ss-3H)

標高 O.P. (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)
10.0										
2.7	砂岩	380	17.8	0.473	2.28	2.62	0.87	6.72	3	7.3
-10.0	泥岩	450	16.5	0.464	2.66	3.41	0.78	7.79	3	12.7
-80.0		500	17.1	0.455	3.40	4.36	0.78	9.89	3	70.0
-108.0		560	17.6	0.446	4.39	5.63	0.78	12.70	3	28.0
-196.0		600	17.8	0.442	5.09	6.53	0.78	14.68	3	88.0
		(解放基盤)	700	18.5	0.421	9.24	9.24	1.00	26.26	-

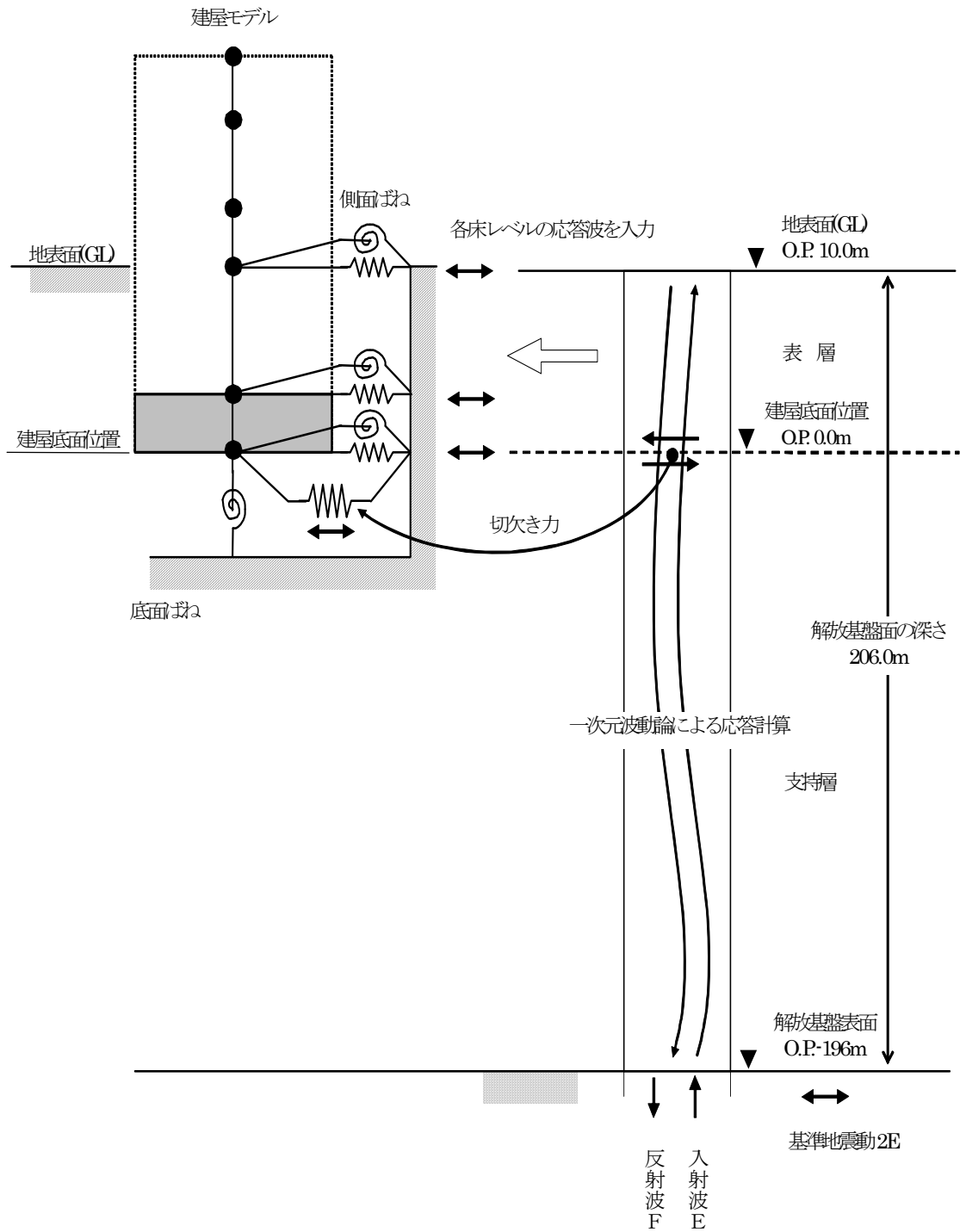
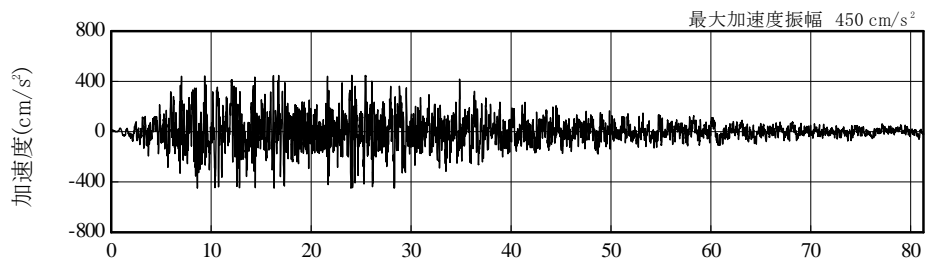
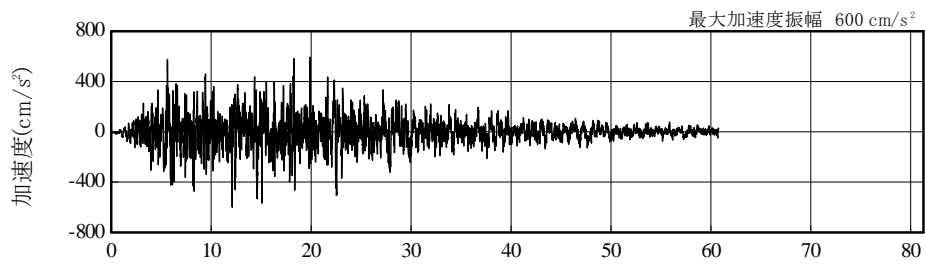


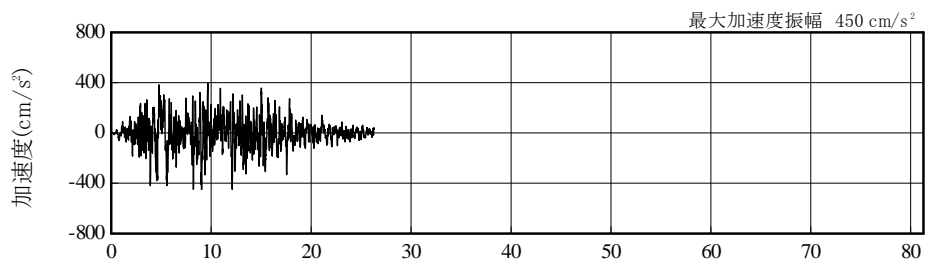
図1.7 PL/B 建屋—地盤連成系地震応答解析モデルの概要



時間(秒)
(Ss-1H)



時間(秒)
(Ss-2H)



時間(秒)
(Ss-3H)

図1.8 解放基盤表面位置における地震動の加速度時刻歴波形(水平方向)

(3) 地震応答解析結果

基準地震動Ssによる最大応答加速度を，図1.9及び図1.10に示す。

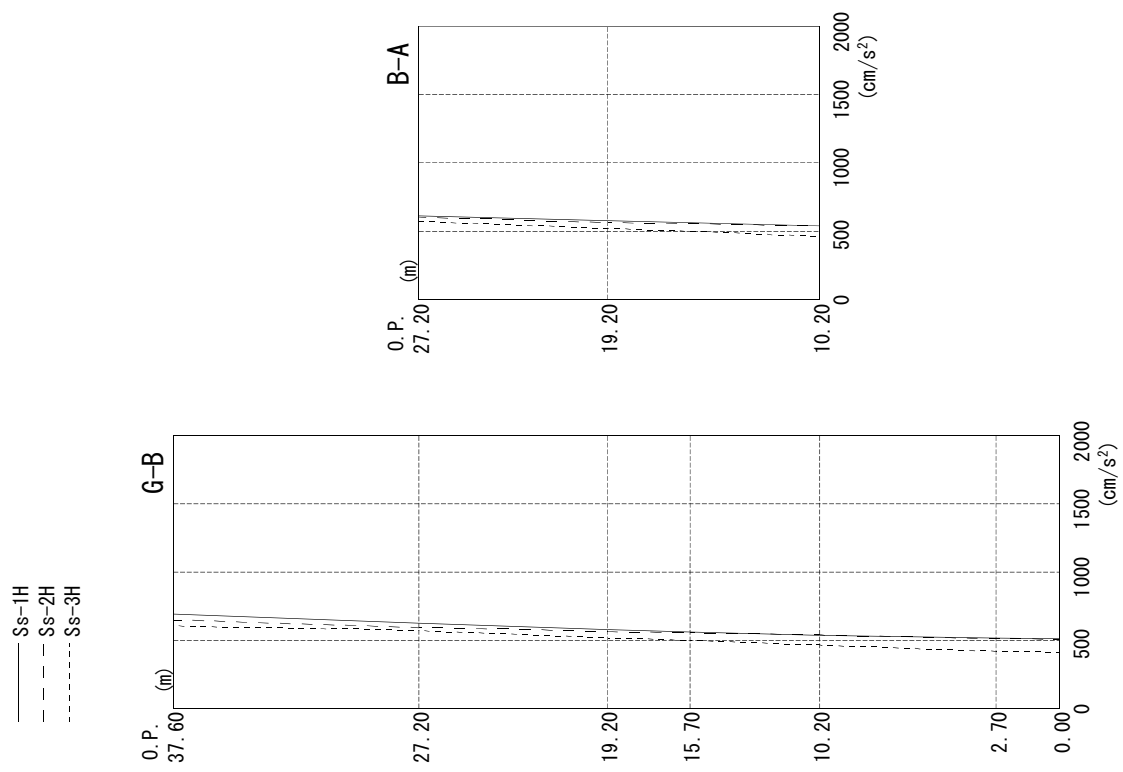


图1.9 PL/B 最大応答加速度 (NS方向)

—— Ss-1H
 - - - Ss-2H
 ····· Ss-3H

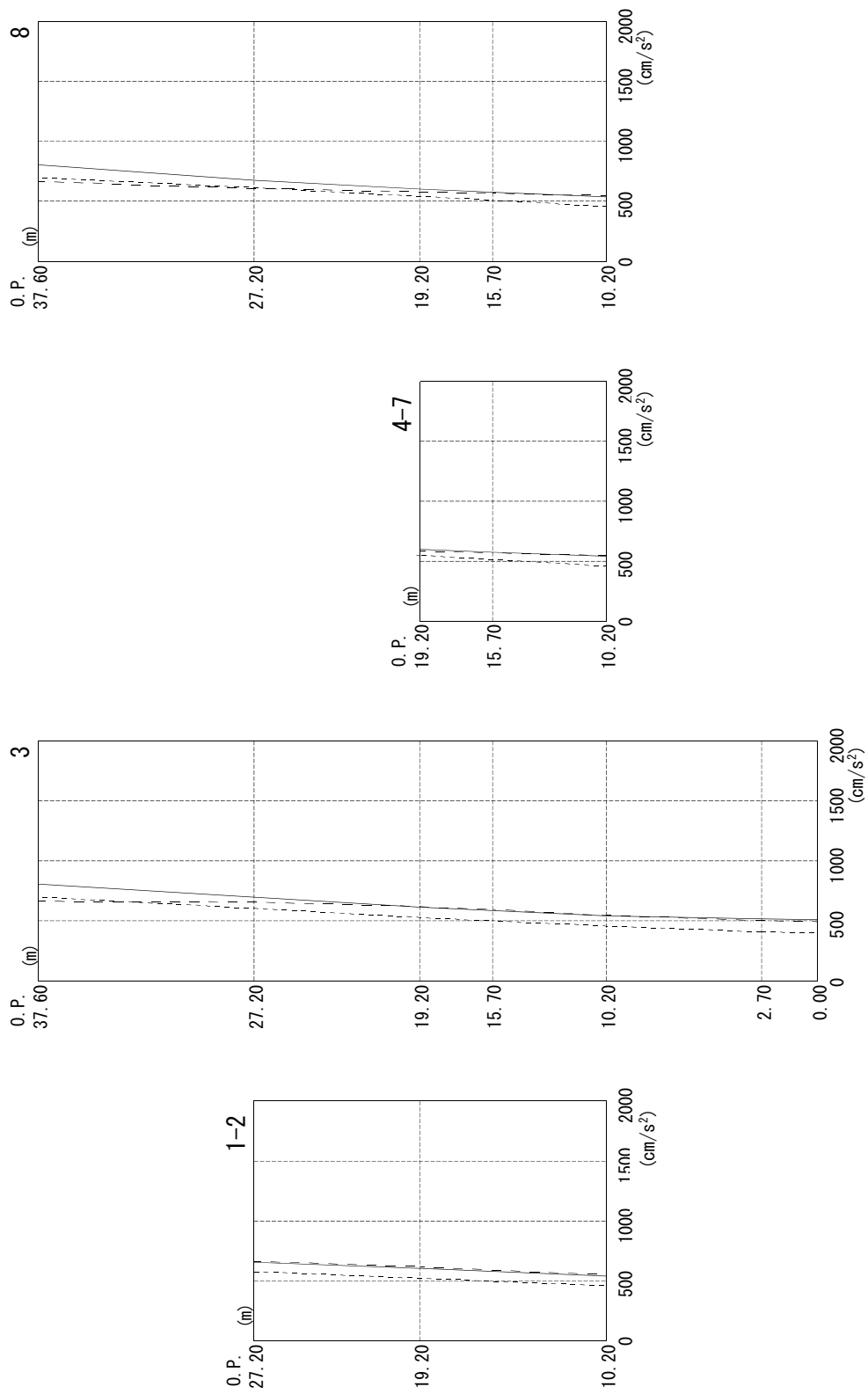


图1.10 PL/B 最大応答加速度(EW方向)

1.3 耐震壁の耐震安全性評価

表1.3及び表1.4に耐震壁のせん断ひずみ一覧を示す。また、図1.11及び図1.12に基準地震動 S_s に対する最大応答値を耐震壁のせん断スケルトン曲線上に示す。耐震壁のせん断ひずみは、最大で 0.14×10^{-3} であり、耐震壁の評価基準値 (2.0×10^{-3}) に対して十分余裕がある。

表 1.3 PL/B 耐震壁のせん断ひずみ一覧 (NS方向)

階	S_s-1	S_s-2	S_s-3	評価基準値
CR階	0.06	0.06	0.05	2.0 以下
3階	0.10	0.09	0.09	
2階	0.10	0.09	0.09	
1階	0.10	0.09	0.09	
地下1階	0.11	0.11	0.10	

表 1.4 PL/B 耐震壁のせん断ひずみ一覧 (EW方向)

階	S_s-1	S_s-2	S_s-3	評価基準値
CR階	0.10	0.09	0.09	2.0 以下
3階	0.12	0.11	0.10	
2階	0.12	0.12	0.11	
1階	0.14	0.14	0.12	
地下1階	0.12	0.13	0.11	

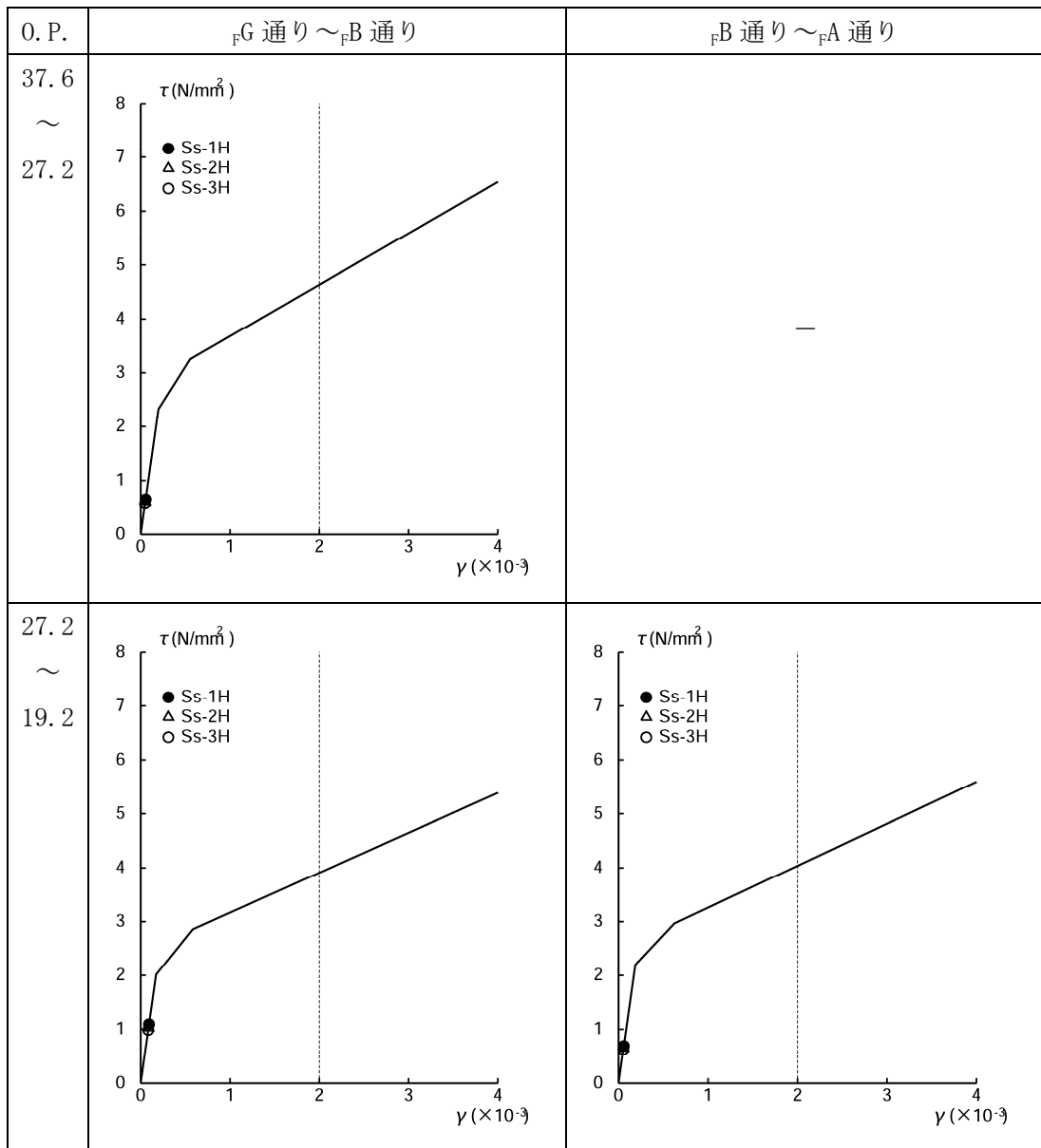


図 1.11(1) PL/B せん断スケルトン曲線上の最大応答値 NS 方向

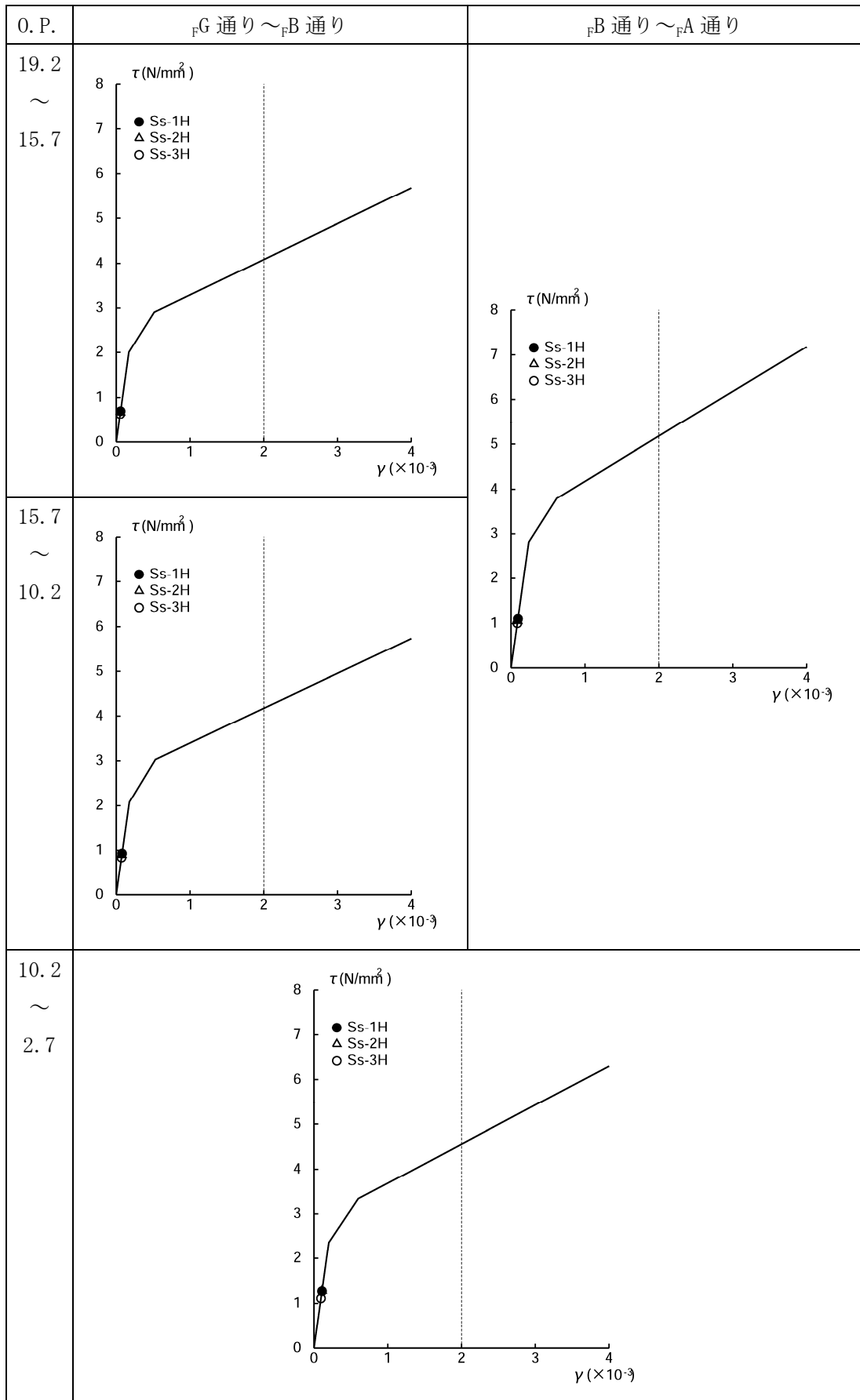


図 1.11(2) PL/B せん断スケルトン曲線上の最大応答値 NS 方向

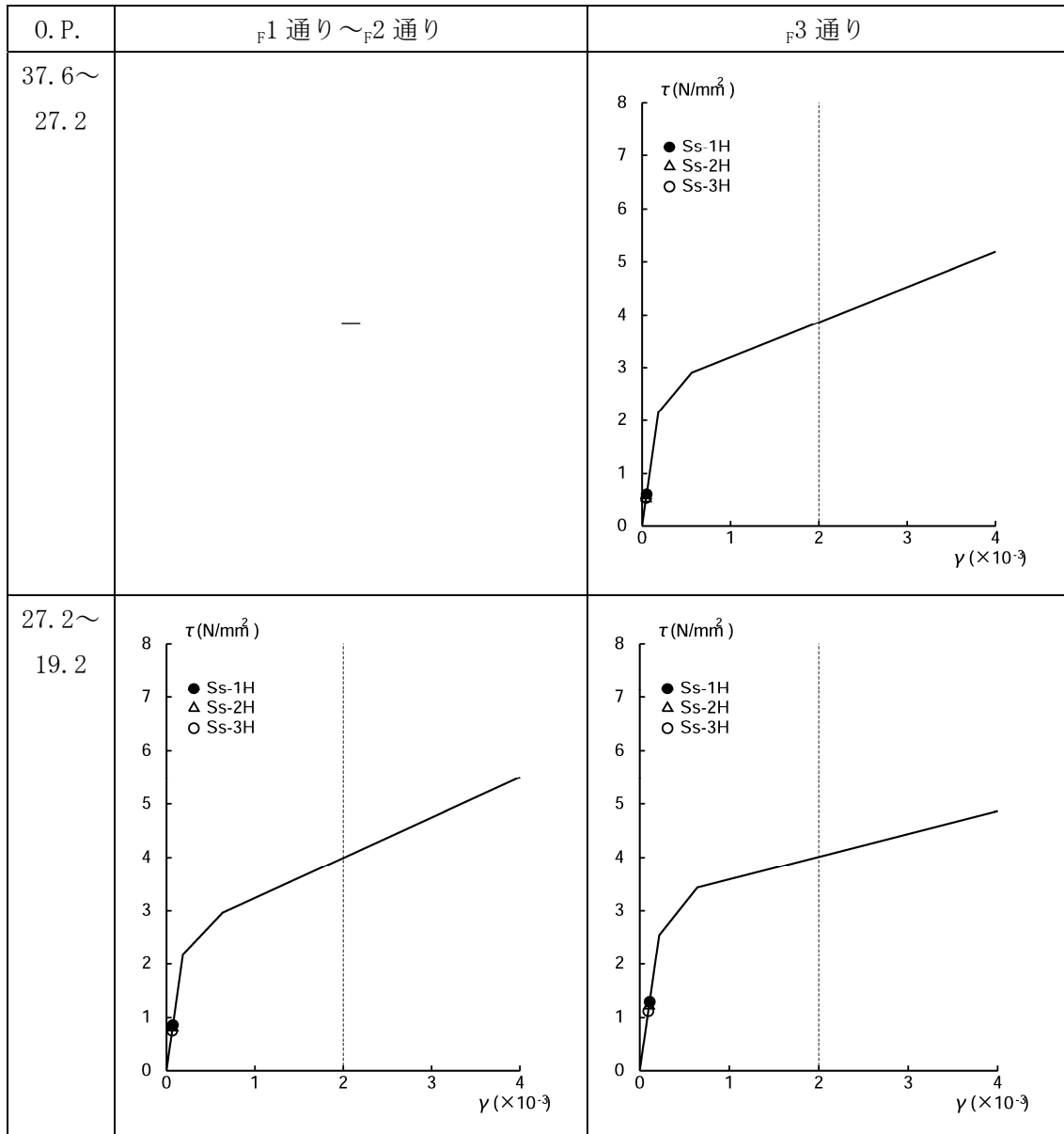


図 1.12(1) PL/B せん断スケルトン曲線上の最大応答値 EW 方向

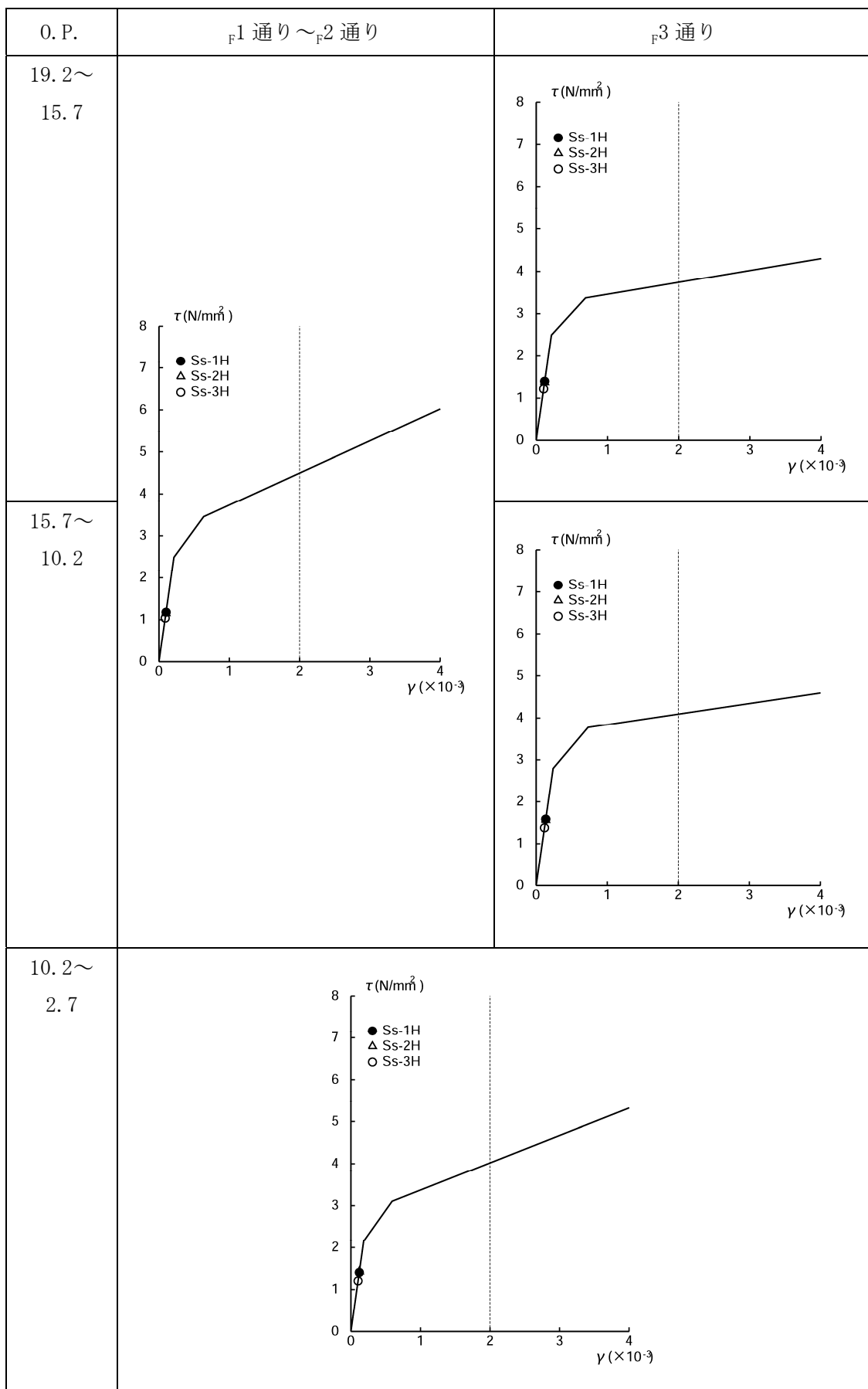


図 1.12(2) PL/B せん断スケルトン曲線上の最大応答値 EW 方向

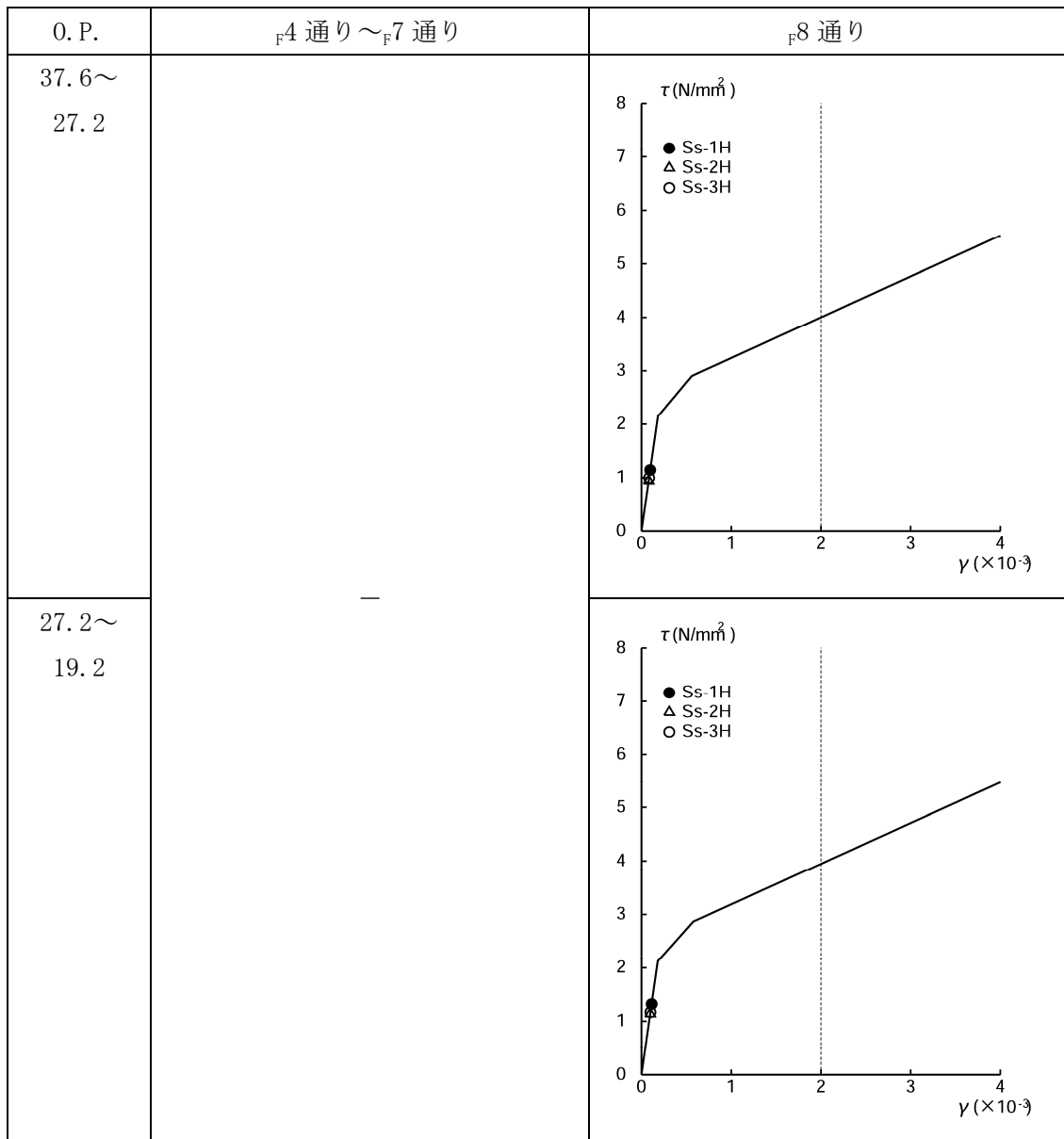


図 1.12 (3) PL/B せん断スケルトン曲線上の最大応答値 EW 方向

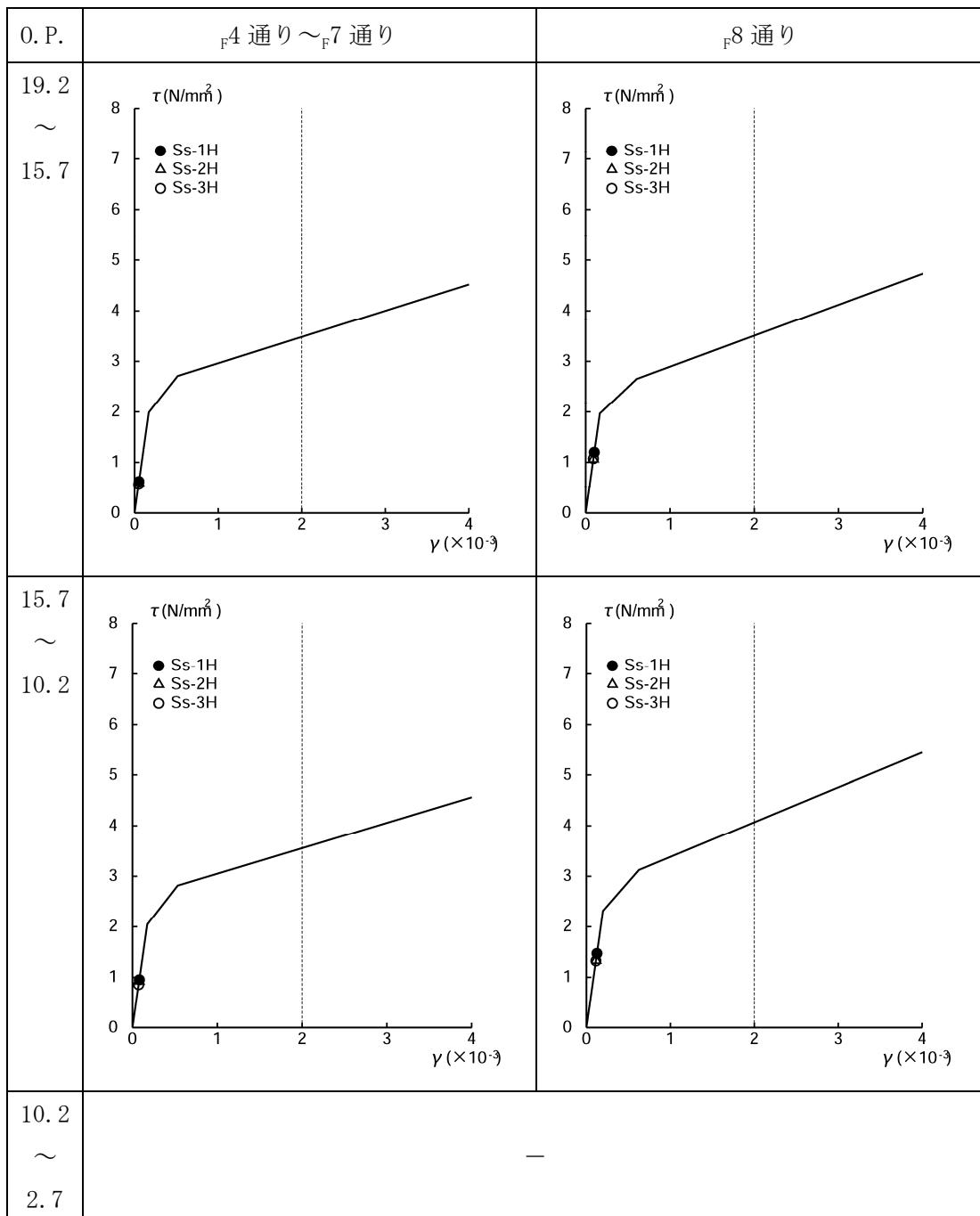


図1.12 (4) PL/B せん断スケルトン曲線上の最大応答値 EW方向

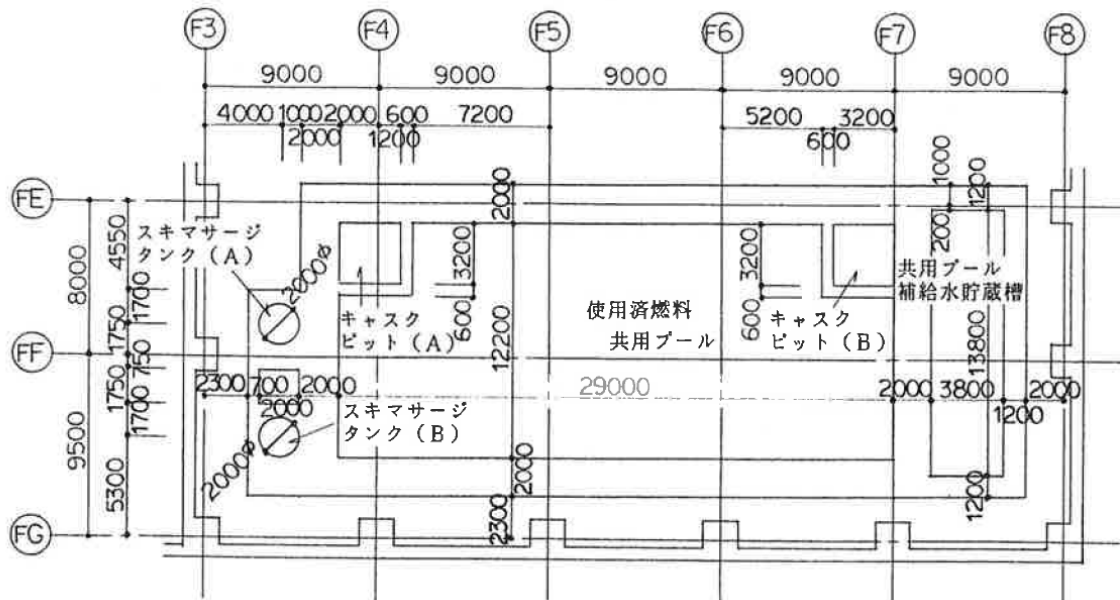
2. 使用済燃料共用プール躯体の耐震安全性評価

2.1 解析評価方針

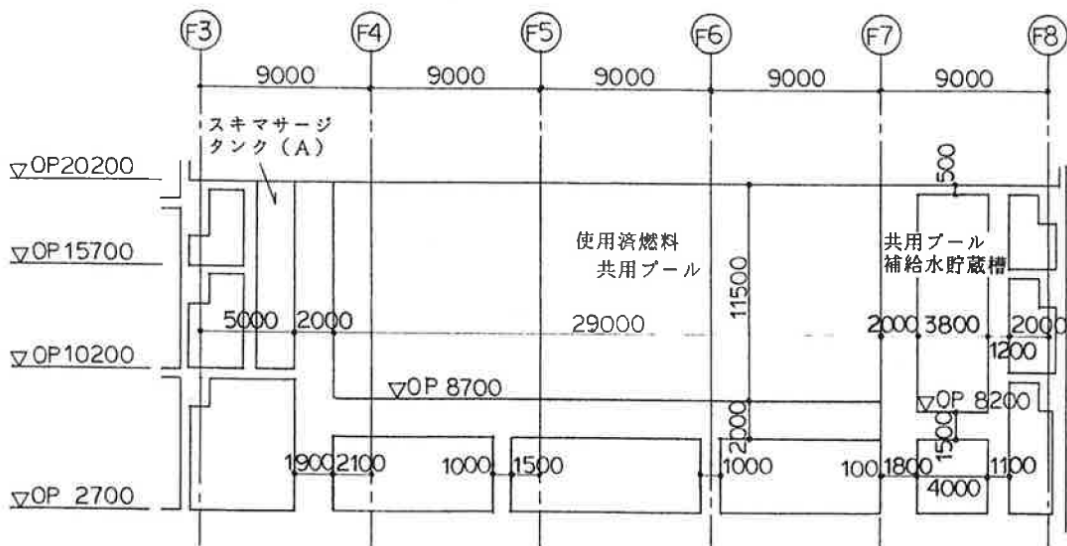
本検討では、使用済燃料共用プール躯体（以下、共用プール）の耐震安全性を3次元FEMモデルによって評価する。

共用プールの構造概要を図2.1に示す。

耐震安全性評価は、図2.2のフローに示すように以下の手順で行う。



(平面)



(断面)

(単位：mm)

図2.1 共用プール概要図

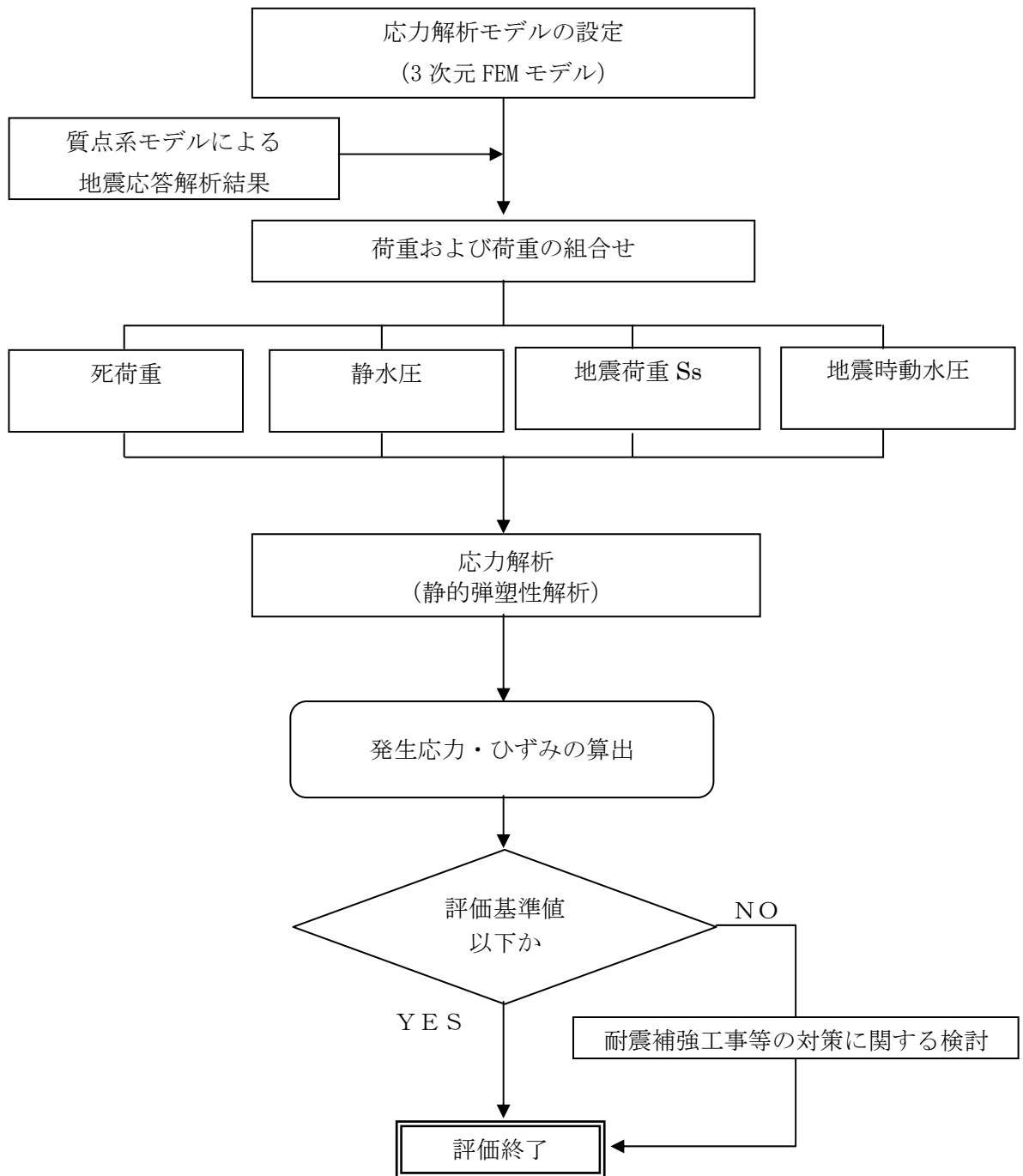


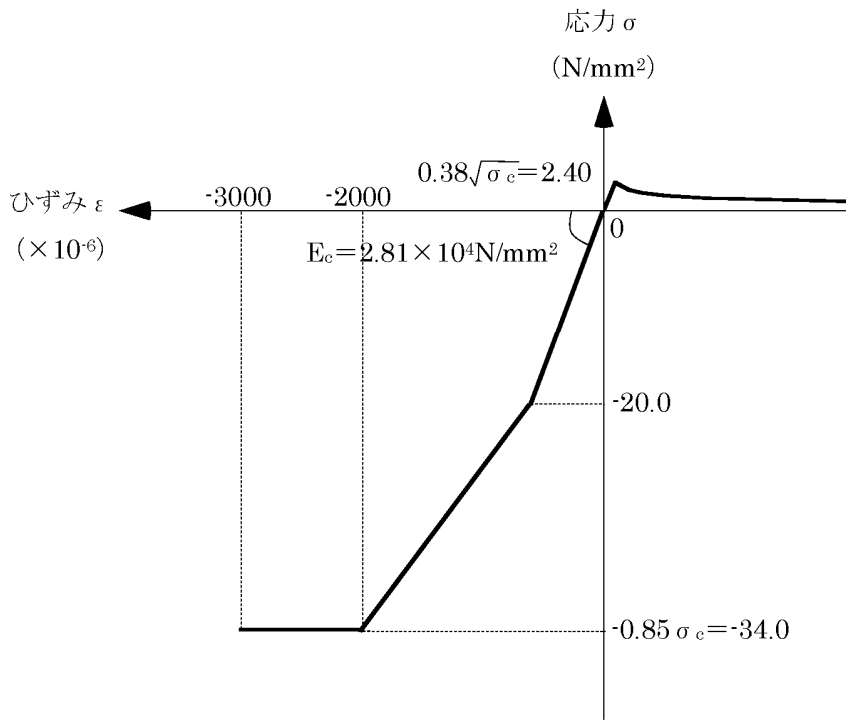
図 2.2 共用プールの耐震安全性評価フロー

2.2 応力解析モデルの設定

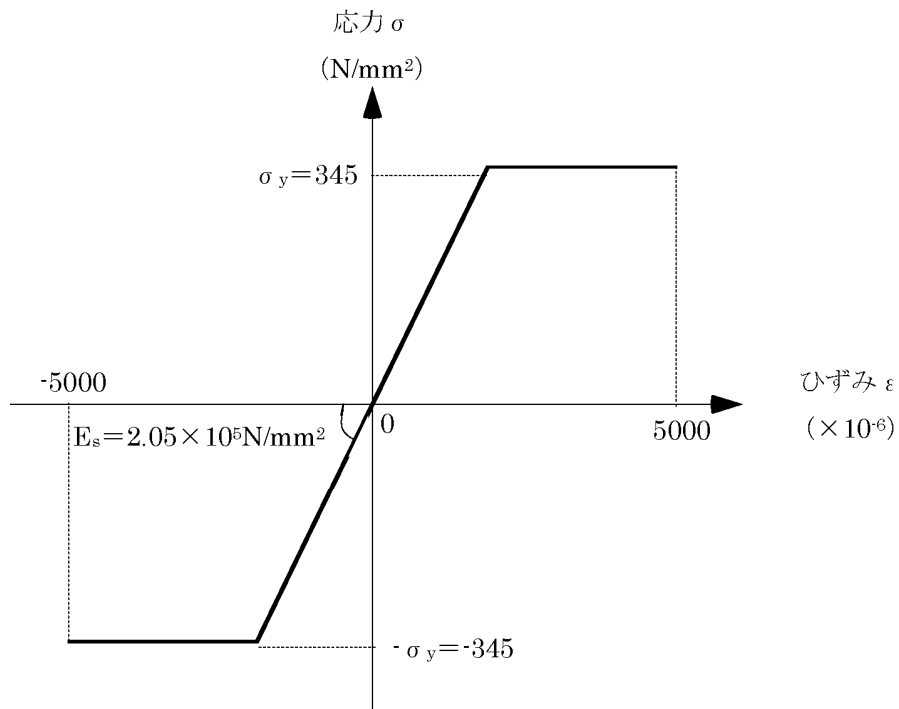
鉄筋コンクリート部材の塑性化を考慮した静的弾塑性解析を実施し、共用プール部に発生する応力およびひずみを算定する。解析モデルは、共用プール部分を切り出した3次元FEMモデルとする。

解析モデルに使用する板要素は、鉄筋層をモデル化した異方性材料による積層シェル要素を用いた。各要素には、板の軸力と曲げ応力を同時に考えるが、板の曲げには面外せん断変形の影響も考慮した。使用計算機コードは「ABAQUS」である。

図2.3に解析モデル概要図を、図2.4にコンクリートと鉄筋の構成則を、図2.5に解析モデルの境界条件を示す。



(a) コンクリートの応力-ひずみ関係 (コンクリート強度 $\sigma_c = 40 \text{N}/\text{mm}^2$)



(b) 鉄筋の応力-ひずみ関係 (鉄筋降伏点 $\sigma_y = 345 \text{N}/\text{mm}^2$)

図 2.4 コンクリートと鉄筋の構成則

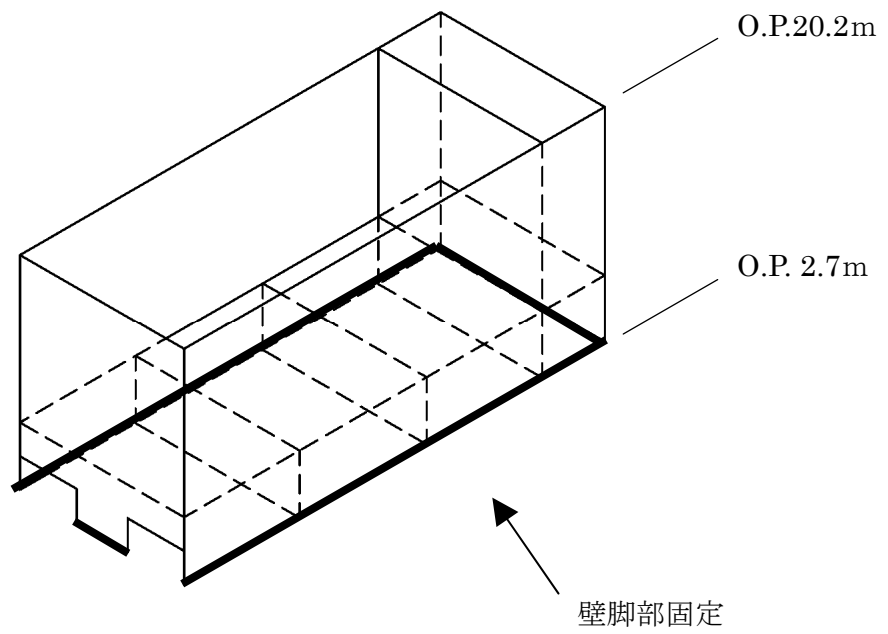


図 2.5 解析モデルの境界条件

2.3 荷重および荷重の組合せ

(1) 死荷重

解析モデルに付与する死荷重は、モデル化範囲の建屋躯体の自重に加え、機器・配管・その他の共用プールに直接取りつく大梁、小梁、床スラブ、間仕切壁の自重も考慮する。

(2) 静水圧

共用プールが満水状態にあると仮定した場合の静水圧を考慮する。

(3) 地震荷重

「1. 耐震壁の耐震安全性評価」の質点系モデルによる基準地震動 S_s に対する地震応答解析結果に基づき、水平方向および鉛直方向の地震荷重を設定する。

(4) 地震時動水圧

共用プールが満水状態にあると仮定した場合の動水圧を考慮する。

(5) 荷重の組合せ

表 2.1 に荷重の組合せを示す。なお、水平方向および鉛直方向の地震の組合せは、組合せ係数法（組合せ係数 0.4）により評価する。

表 2.1 荷重の組合せ

荷重時名称	荷重の組合せ
S_s 地震時	DL + H + K + KH

ここに、 DL：死荷重、 H：静水圧、 K：地震荷重（基準地震動 S_s ）、
KH：地震時動水圧

2.4 評価結果

配筋諸元等に基づき共用プールの構造検討を行い、耐震安全性を評価する。評価においては、応力解析より求まる発生応力およびひずみが、評価基準値を超えないことを確認する。評価基準値は、日本機械学会「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（2011）」等に基づき設定する。表 2.2 に評価対象毎に定められた評価基準値を示す。

評価基準値に対する発生ひずみ、発生応力の比（検定比）を図 2.6～図 2.11 に示す。また、各評価項目について検定比が最大になる要素について発生値、評価基準値、及び検定比を図中に示す。

いずれの箇所においても発生応力およびひずみは評価基準値を下回り（検定比が 1 以下）、共用プールは基準地震動 S_s に対する耐震安全性が確保されている。

図 2.6～図 2.11 に用いる記号の説明

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$: 各方向のひずみ（コンクリート：圧縮，鉄筋：圧縮及び引張）

ε_a : ひずみの評価基準値

※ひずみは全て引張側を正として表記

Q_x, Q_y : 各方向の面外せん断力

Q_a : 面外せん断力の評価基準値

表 2.2 評価対象毎に定められた評価基準値

評価対象	評価基準値
コンクリートのひずみ	-3000×10^{-6}
鉄筋のひずみ	$\pm 5000 \times 10^{-6}$
壁部および床部の面外せん断力	上述の規格に基づく許容面外せん断力

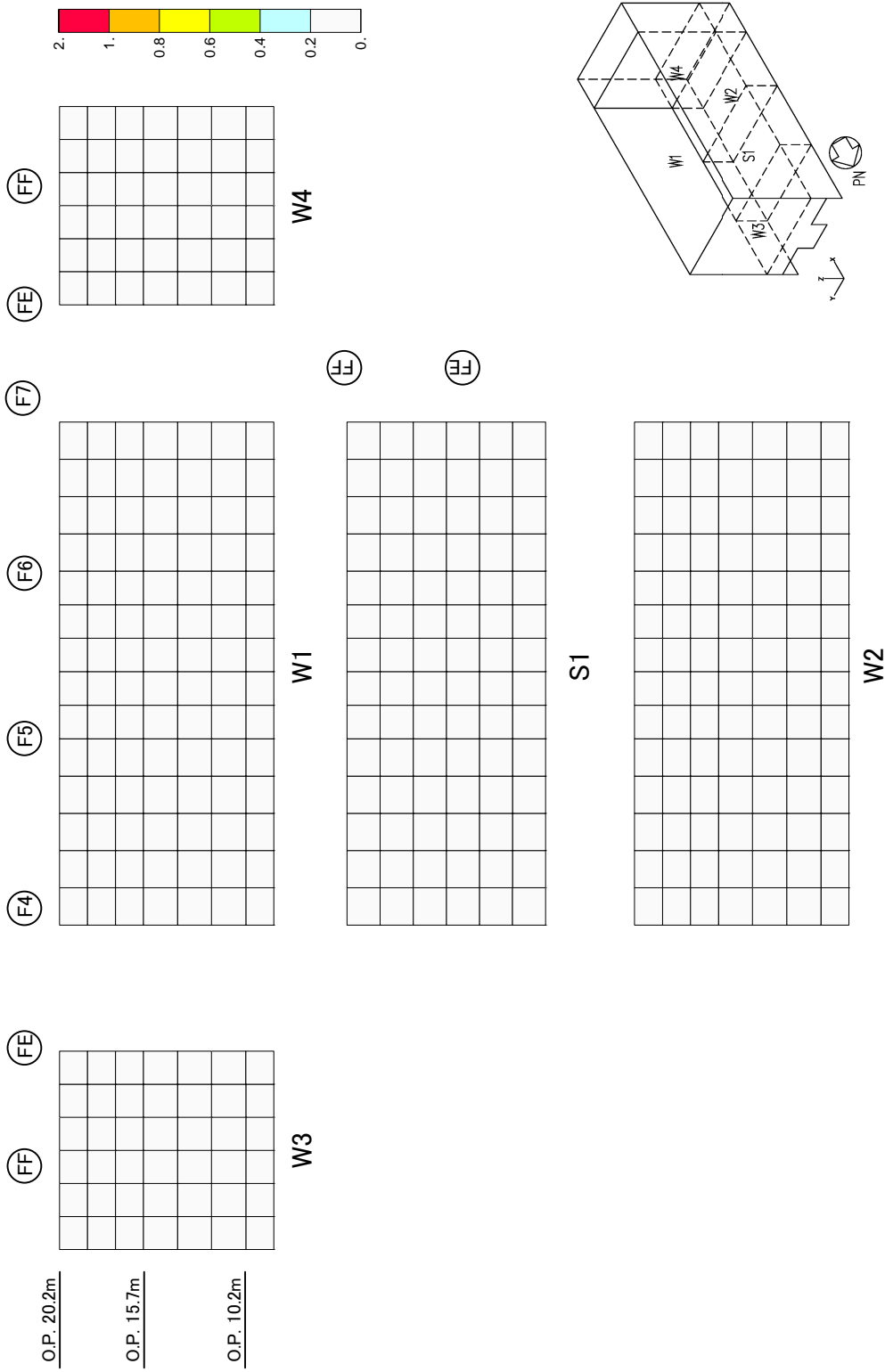


図 2.6 断面算定結果 コンクリートのひびくみ 検定比コンター図 ϵ_x / ϵ_a (壁：水平方向，床：南北方向)

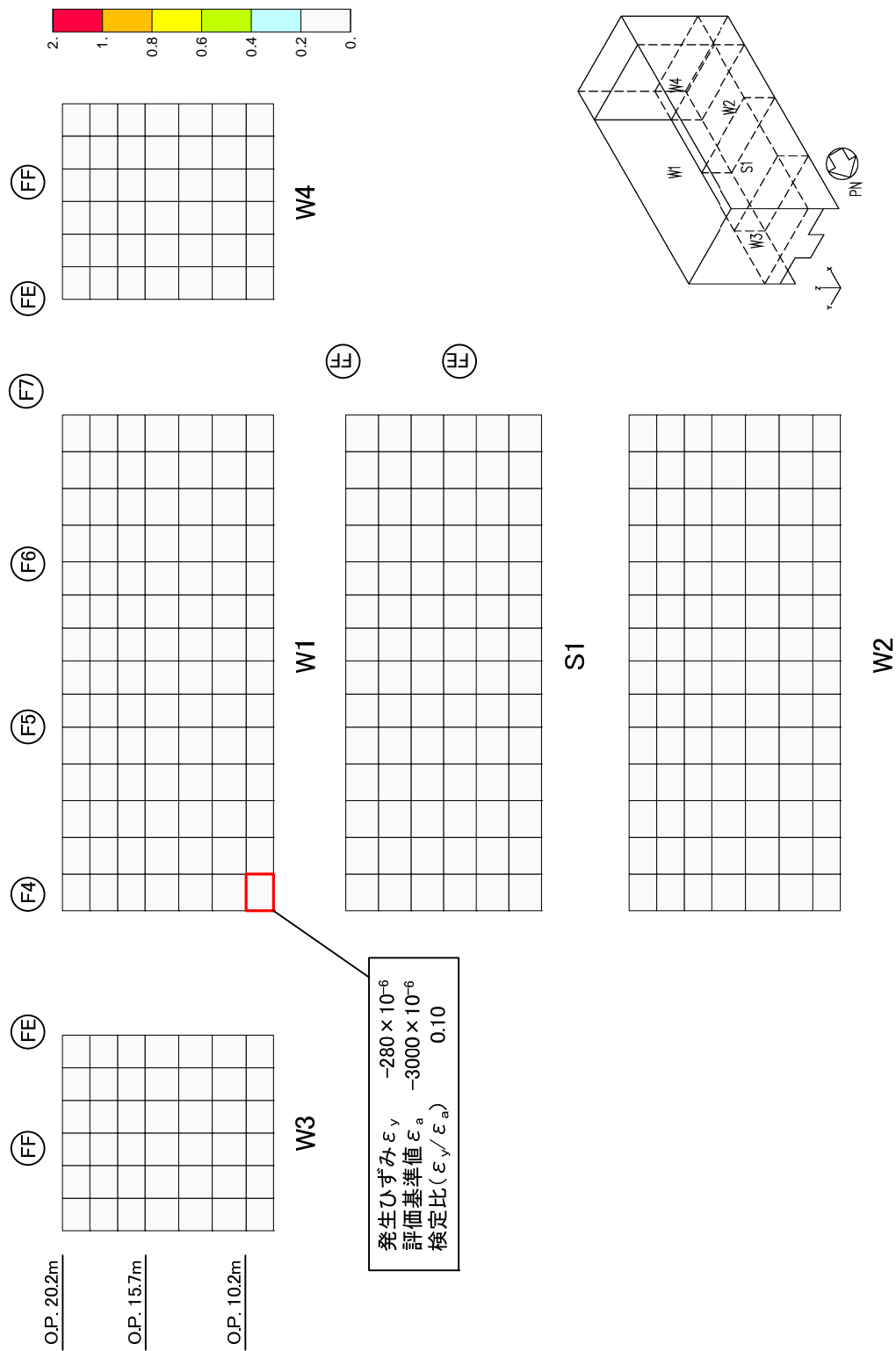


図 2.7 断面算定結果 コンクリートのひずみ 検定比コンタター図 $\varepsilon_y / \varepsilon_a$ (壁：鉛直方向，床：東西方向)

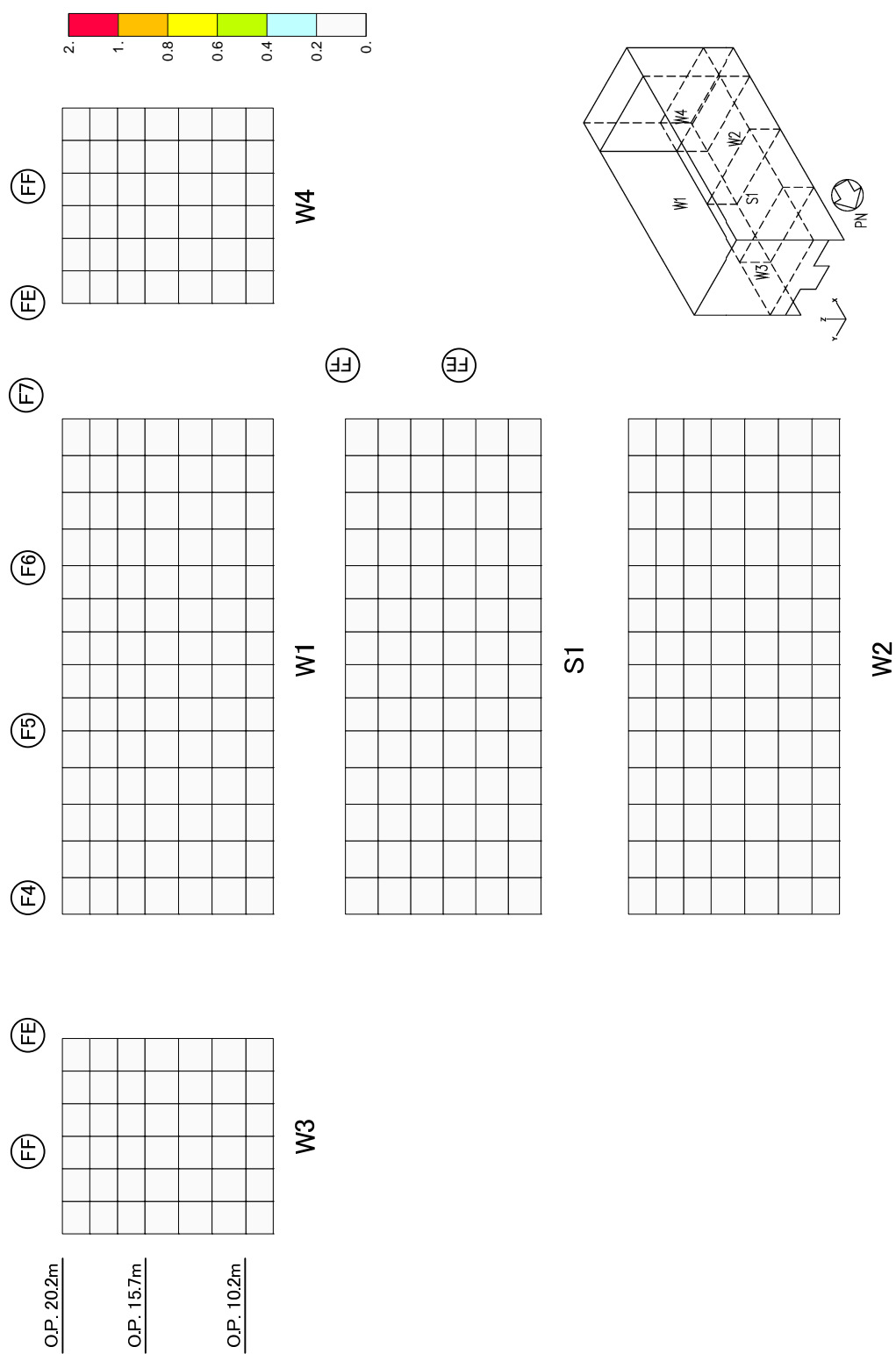


図 2.8 断面算定結果 鉄筋のひずみ 検定比コンター図 ϵ_x / ϵ_a (壁：水平方向, 床：南北方向)

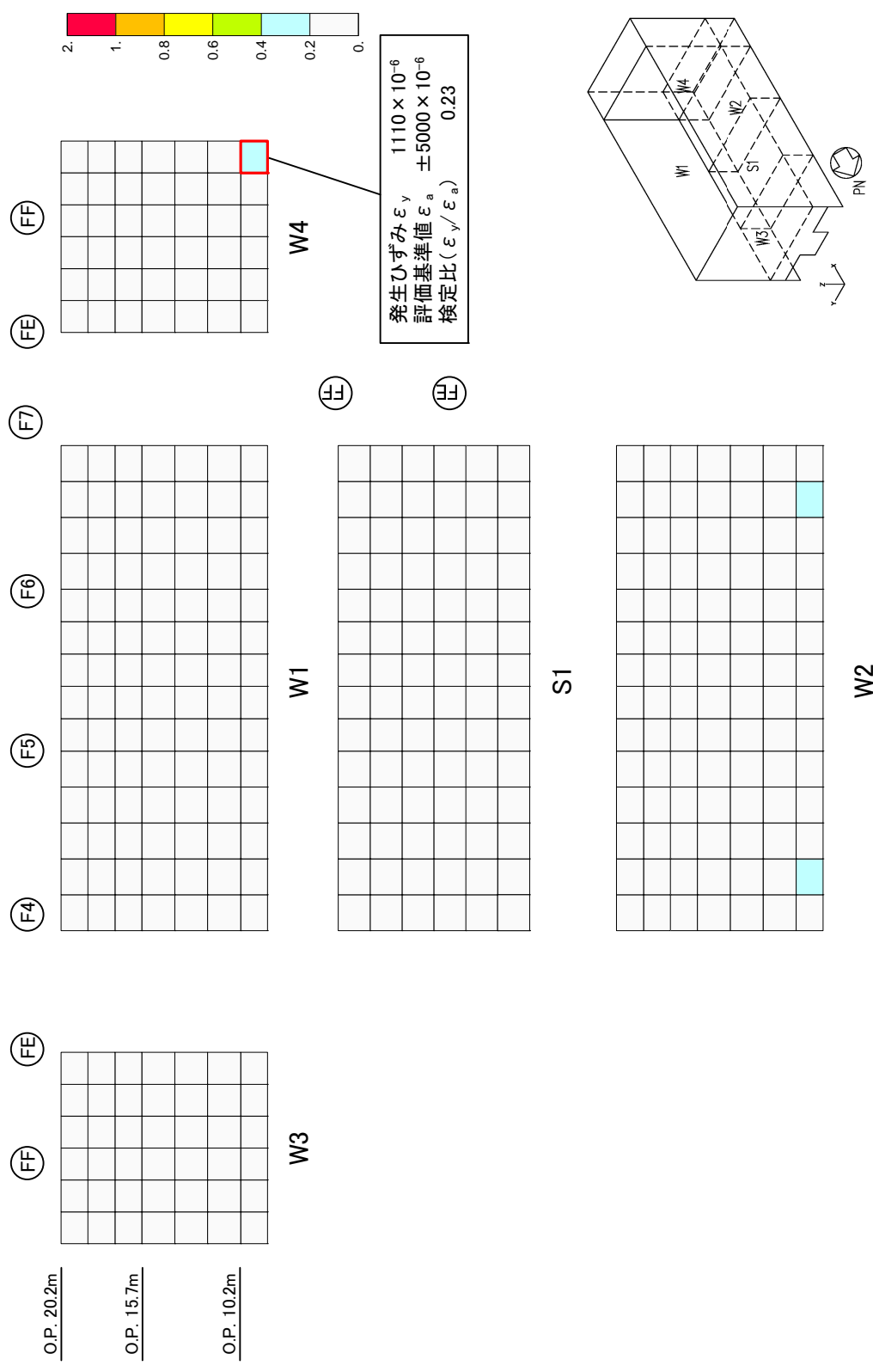


図 2.9 断面算定結果 鉄筋のひずみ 検定比コンタ一図 ϵ_y / ϵ_a (壁：鉛直方向，床東西方向)

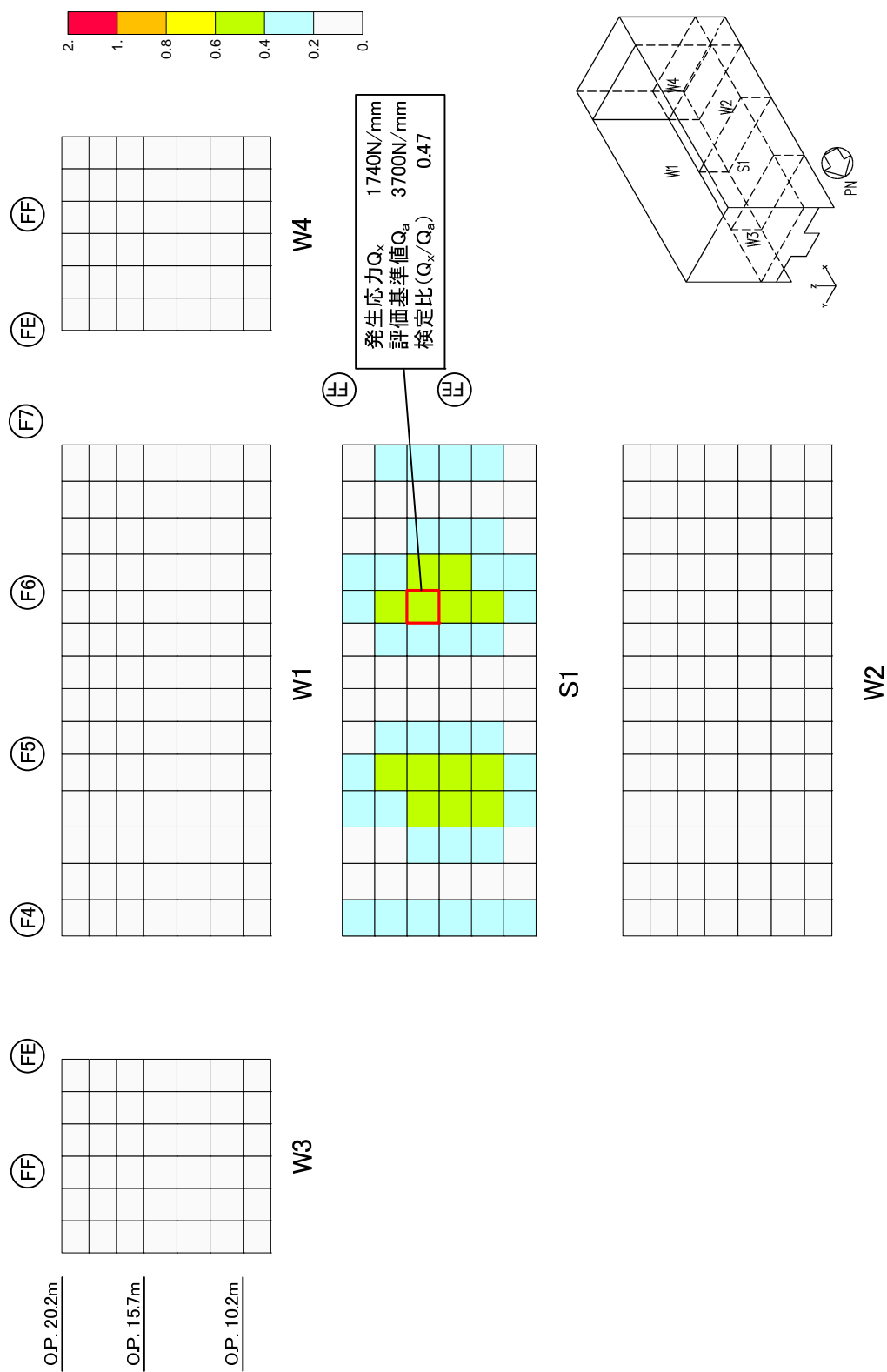


図 2.10 断面算定結果 面外せん断力 検定比コンター図 Q_x/Q_a (壁：水平方向, 床：南北方向)

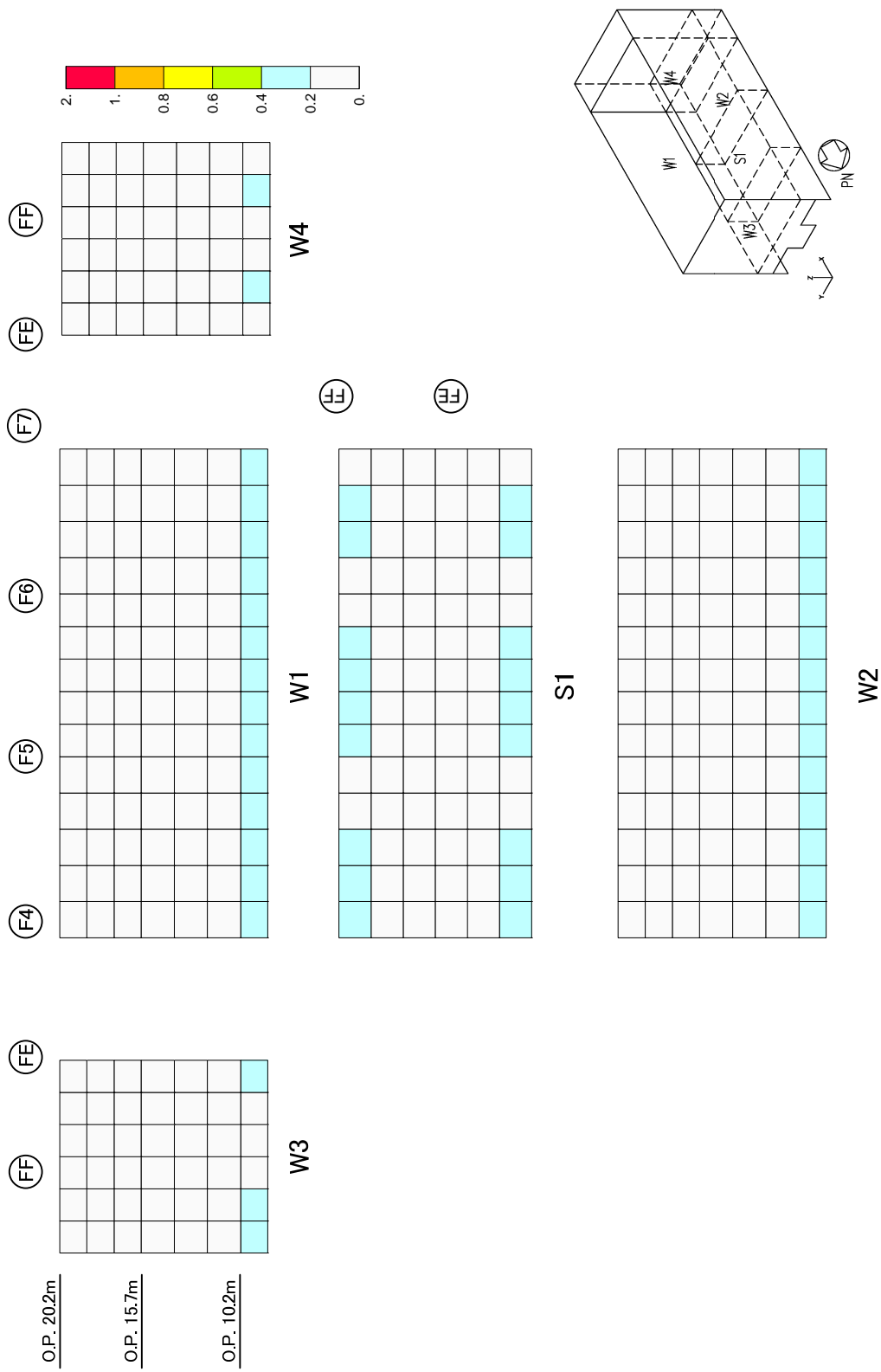


図 2.11 断面算定結果 面外せん断力 検定比コンター図 Q_y/Q_a (壁：鉛直方向，床：東西方向)

3. 別添

- 別添－1 福島第一原子力発電所 運用補助共用施設共用プール棟 耐震壁の耐震安全性
評価について（東京電力株式会社，平成25年2月21日，特定原子力施設
監視・評価検討会（第4回）資料3－2）

特定原子力施設監視・
評価検討会(第4回)
資料3-2
(第3回資料3-2を再配布)

福島第一原子力発電所 運用補助共用施設共用プール棟 耐震壁の耐震安全性評価について

平成25年2月21日
東京電力株式会社



無断複製・転載禁止 東京電力株式会社

1. 評価方針
 2. 地震応答解析
 3. 耐震壁の耐震安全性評価
 4. コメント回答
- ・ 参考資料



無断複製・転載禁止 東京電力株式会社

1

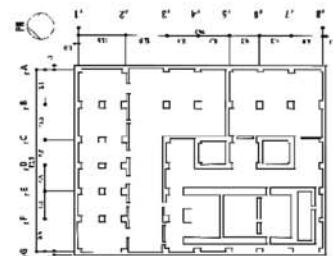
1. 評価方針

運用補助共用施設共用プール棟（以下、PL/Bという）は、Sクラス設備（使用済燃料共用プール、キャスクピット、使用済燃料貯蔵ラック）の間接支持構造物として機能保持させることとする。

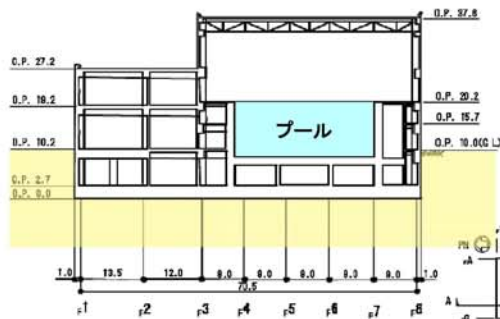
PL/Bの耐震壁は、機能保持限界における許容限界ひずみ 2×10^{-3} を評価基準値とする。

2. 地震応答解析 (1) PL/Bの概要

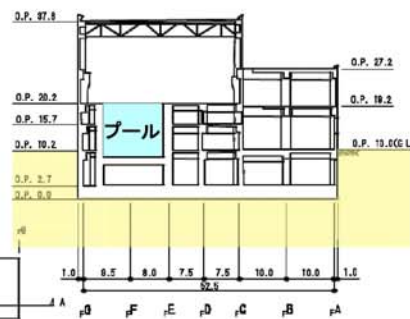
- 構造：鉄筋コンクリート造
（一部鉄骨鉄筋コンクリート造及び鉄骨造）
- 階数：地上3階，地下1階
- 基礎：厚さ2.7mのべた基礎で、泥岩盤上に設置
- 平面形状：72.5m（NS方向）×54.5m（EW方向）
- 高さ：基礎版底面から37.6m（地上高さ27.6m）



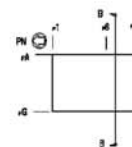
平面図



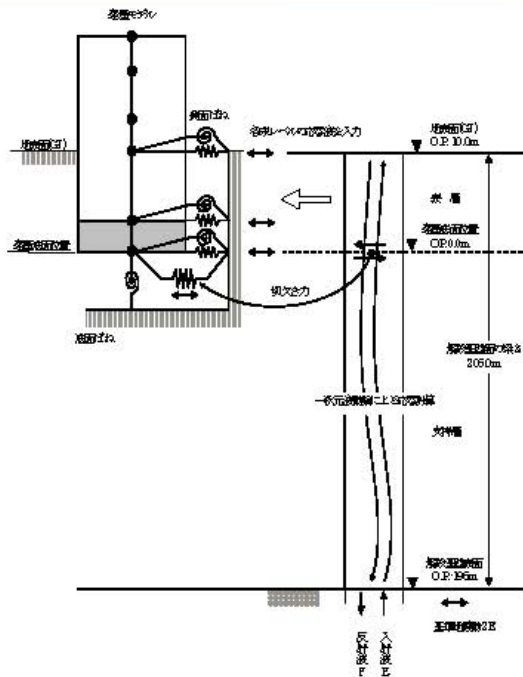
断面図 (NS方向)



断面図 (EW方向)

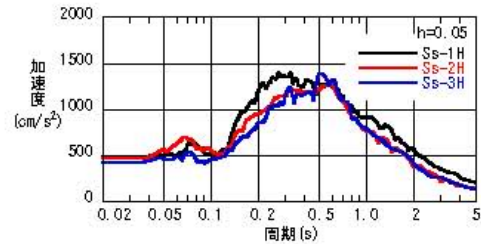


2. 地震応答解析 (2) 入力地震動の算定



PL/Bの水平方向の入力地震動については、解放基礎表面で定義される基準地震動 S_s を入力として、解放基礎表面から地表面までの速度構造を成層と仮定した地盤モデルを用いた一次元波動論による地震応答解析を行い、PL/B基礎底面位置及び側面ばね位置での地震動を入力地震動とした。

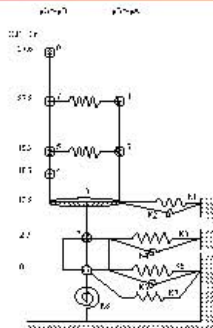
建屋基礎底面位置におけるせん断力（切欠き力）を入力地震動に付加することにより、地盤の切欠き効果を考慮した。



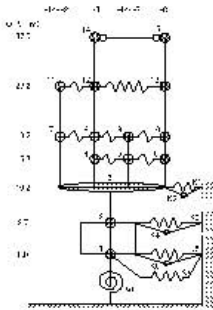
入力地震動の応答スペクトル（基礎底面E+F）

入力地震動の概念図（水平方向）

2. 地震応答解析 (3) 地震応答解析モデル



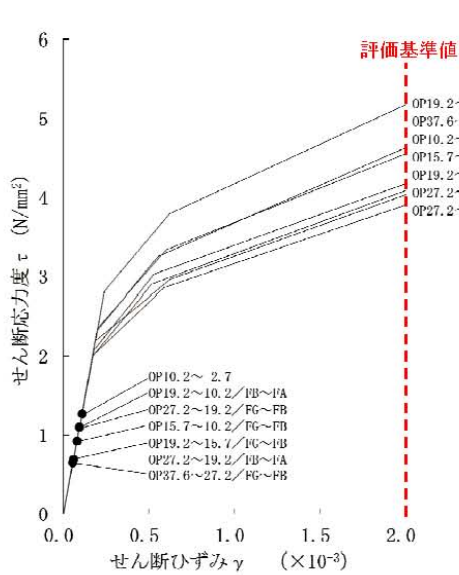
地震応答解析モデル（NS方向）



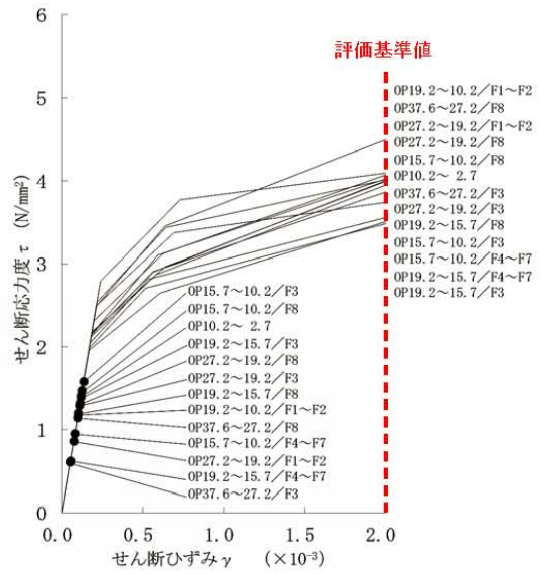
地震応答解析モデル（EW方向）

- 多質点系モデル
 - ・建屋と底面・側面地盤との相互作用を考慮
 - ・耐震壁のせん断剛性と曲げ剛性を考慮
- 地盤ばね
 - ・建屋底面地盤ばね（水平・回転）は、JEAG4601-1991による振動アドミタンス理論に基づく近似ばね
 - ・建屋側面地盤ばね（水平・回転）は、JEAG4601-1991によるNOVAKの手法に基づく近似ばね
- 建屋耐震壁のモデル化
 - ・せん断および曲げとも非線形性を考慮
- 材料特性
 - ・コンクリート実強度（40N/mm²）を採用
- 建屋の減衰
 - ・5%（コンクリート部）
- 固有周期（ S_s-1 ）
 - ・NS方向（1次：0.289s 2次：0.154s）
 - ・EW方向（1次：0.298s 2次：0.155s）

3.耐震壁の耐震安全性評価



せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-1 NS方向)



せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-1 EW方向)

耐震壁の最大応答せん断ひずみは、最大で 0.14×10^{-3} (Ss-1, EW方向, 1階)であり、評価基準値 (2.0×10^{-3}) を満たすことを確認した。

4. コメント回答

①地震応答解析モデル及び耐震安全性評価への、平成23年3月11日以降の地震、津波等による影響について



3階 (オペフロ) (撮影日: 平成24年12月9日)



2階 (撮影日: 平成24年12月9日)



1階 (撮影日: 平成24年12月9日)



地下1階 (撮影日: 平成24年12月9日)



目視点検 (実施期間: 平成23年12月5日~平成24年4月26日) の結果*、プール壁には、平成21年度調査後に発生したひび割れは見られず、一般壁で最大幅0.5mm、一般床で最大幅0.9mmのひび割れが新たに確認されたものの、躯体の健全性を損なうひび割れは見られなかった。

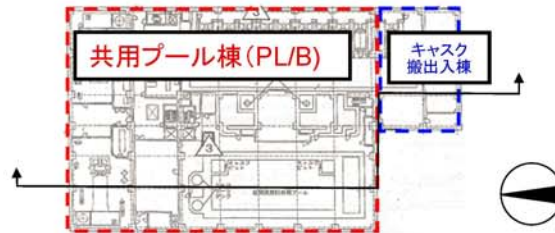
*:点検はマニュアルに基づき目視可能な範囲において、幅0.3mm以上のひび割れを記録し、1mm以上のひび割れを要補修としている。

4. コメント回答

②地震応答解析モデルへの地盤による埋め込み効果の適用性について



共用プール棟 (PL/B)・キャスク搬出入棟 NS方向断面図



共用プール棟 (PL/B)・キャスク搬出入棟 平面図

- ⇒ JEAC4601-2008では、地下部分の大部分（3面または面積で75%以上）が周辺地盤と接している場合には全面埋込みと同様な埋込み効果が期待できるものとしている。
 よって、上図に示すようにPL/Bにおいては地下部分の3面以上が周辺地盤と接しており、埋め込み効果が期待できるものとして、NOVAKの方法による側面ばねを考慮している。

4. コメント回答

③地震応答解析モデルへの基準地震動 S_s に対する建屋の接地率について

接地率

単位 (%)

	S_s-1	S_s-2	S_s-3
NS方向	100	100	100
EW方向	100	100	100

- ⇒ 基礎浮上り非線形性を考慮した地震応答解析の適用条件とされている「接地率65%以上」をいずれも満足する。

4. コメント回答

④コンクリートの実強度の適用性について

鉄筋コンクリートの物性値

コンクリート	強度*1 Fc (N/mm ²)	ヤング係数 E (N/mm ²)	せん断弾性係数 G (N/mm ²)	ポアソン比 ν	単位体積重量*2 γ (kN/m ³)
	40.0	2.81×10 ⁴	1.17×10 ⁴	0.2	24.5
鉄筋	SD345相当 (SD35)				

PL/Bの圧縮強度試験データ分析結果

設計基準強度		23.5 N/mm ²
平均圧縮強度*1 (調査年:平成 17年)	1階外壁	53.6 N/mm ² (3供試体の平均)
	1階内壁	46.9 N/mm ² (3供試体の平均)
解析採用値		40.0 N/mm²

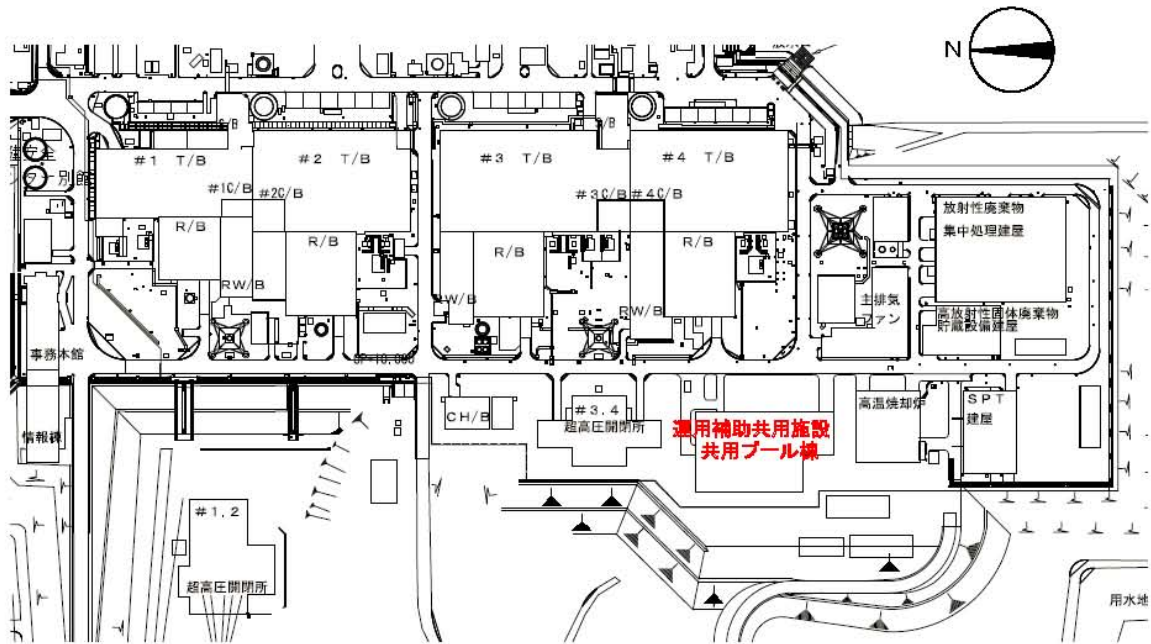
*1: RC造部の剛性を評価する際に用いるコンクリート強度は、PL/Bの圧縮強度試験の平均値を小さめに丸めた値を設定した。

*2: 鉄筋コンクリートの値を示す。

*1 福島第一原子力発電所第4号機 高経年化技術評価報告書
(平成19年10月、東京電力株式会社)

【参考資料】

PL/Bの配置



福島第一原子力発電所 配置図

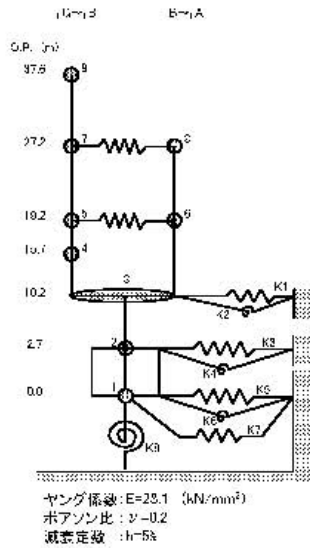
地盤定数

地盤モデル及び物性値については、PL/B付近の地盤の調査結果に基づき、せん断弾性係数及び減衰定数のひずみ依存性を考慮した等価線形解析により、基準地震動Ss-1、Ss-2及びSs-3のそれぞれについて個別に設定した。

地盤定数

標高 O.P. (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	初期せん断 弾性係数 G ₀ (×10 ⁶ kN/m ²)	剛性 低下率 G/G ₀			せん断 弾性係数 G (×10 ⁶ kN/m ²)			ヤング 係数 E (×10 ⁶ kN/m ²)			減衰 定数 h (%)			層厚 H (m)	
						Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-1	Ss-2	Ss-3		
10.0	砂岩	380	17.8	0.473	2.62	0.85	0.85	0.87	2.25	2.25	2.28	6.63	6.63	6.72	3	3	3	7.3	
2.7																			
-10.0	泥岩	450	16.5	0.464	3.41	0.79	0.81	0.78	2.69	2.75	2.56	7.88	8.08	7.79	3	3	3	12.7	
																			-80.0
																			-80.0
																			-108.0
-196.0	(解放基盤)	700	18.5	0.421	9.24	1.00	1.00	1.00	9.24	9.24	9.24	25.25	25.25	25.25	-	-	-	-	
																			-108.0

地震応答解析モデル



はり部材
(耐震壁)

9	41.840				
	11.06				
45.40					
18.09					
7	100.530	B	39.680		
	50.38		18.99		
81.90			42.10		
49.48			31.66		
5	137.540	6	45.030		
	70.36		21.61		
749.00			47.20		
68.20			36.68		
4	98.490				
	20.04				
247.70					
84.82					
3			380.400		
			152.05		
333.40					
157.87					
2	237.620				
	103.00				
3951.00					
1730.70					
1	23.540				
	55.02				

質点番号	質量 (kN)
せん断面積 (m ²)	回転慣性 (× 10 ⁶ kNm ²)
断面2次モーメント (× 10 ⁶ m ⁴)	

床せん断ばね (単位: × 10⁶ kN/m)

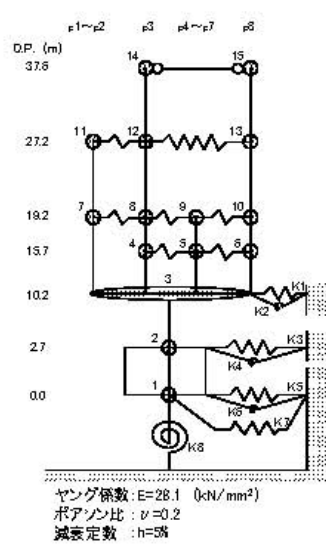
7	28.75	8
5	18.23	6



解析モデルの諸元 (NS方向)

無断複製・転載禁止 東京電力株式会社

地震応答解析モデル



はり部材
(耐震壁)

14	20.900					15	20.940
	4.50						4.50
19.70						19.70	
3.94						3.94	
11	56.470	12	49.430			13	34.310
	10.37		14.05				10.15
64.00		22.40				35.90	
28.96		5.77				12.58	
7	59.770	8	28.060	9	76.270	10	18.470
	16.94		8.12		24.09		4.99
81.70		25.80		87.4		46.00	
36.95		7.08		4.27		19.51	
4		8.180		5	79.250	6	11.050
		1.16			9.13		1.35
25.00				108.6		41.00	
7.70				4.43		18.23	
3						360.400	
						101.79	
308.10							
95.52							
2	237.620						
	62.97						
3951.00							
978.00							
1	125.540						
	31.10						

質点番号	質量 (kN)
せん断面積 (m ²)	回転慣性 (× 10 ⁶ kNm ²)
断面2次モーメント (× 10 ⁶ m ⁴)	

床せん断ばね
(単位: × 10⁶ kN/m)

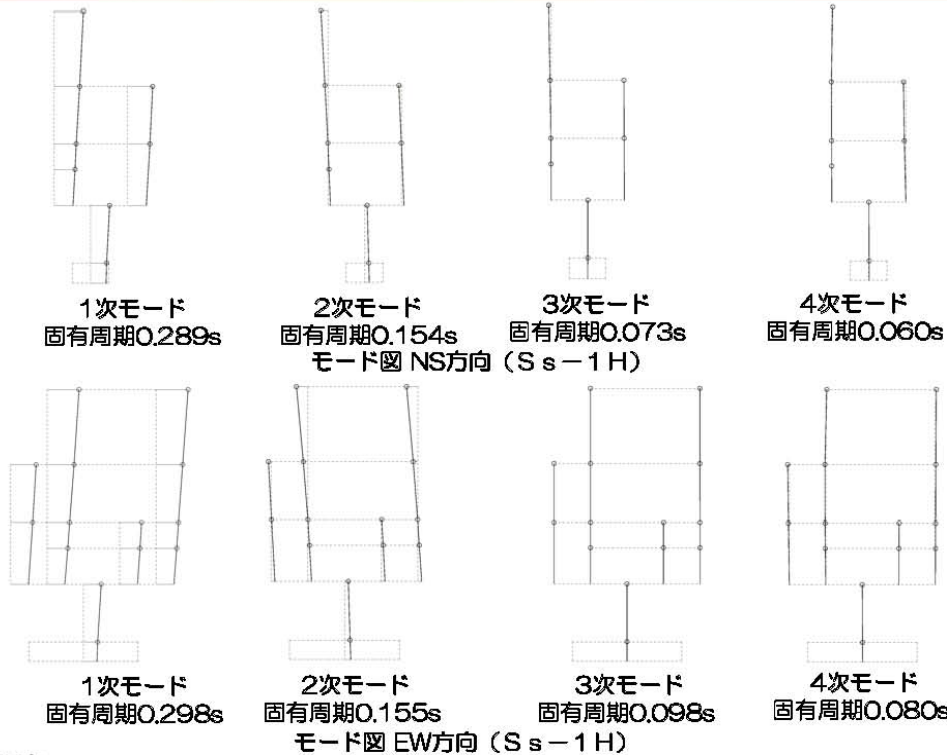
14	00 (剛ばねとした)	15				
11	19.32	12	3.56	13		
7	15.71	8	10.08	9	10.75	10
		4	5.14	5	5.09	6



解析モデルの諸元 (EW方向)

無断複製・転載禁止 東京電力株式会社

固有値解析結果



固有値解析結果

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）

(Ss-1H)

次数	固有周期 (sec)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.289	3.45	1.367	建屋-地盤連成系1次
2	0.154	6.50	-0.323	
3	0.073	13.64	-0.104	
4	0.060	16.74	-0.108	
5	0.050	19.81	0.047	

(Ss-2H)

次数	固有周期 (sec)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.286	3.49	1.371	建屋-地盤連成系1次
2	0.152	6.56	-0.327	
3	0.073	13.65	-0.105	
4	0.060	16.74	-0.111	
5	0.050	19.82	0.048	

(Ss-3H)

次数	固有周期 (sec)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.291	3.44	1.366	建屋-地盤連成系1次
2	0.155	6.47	-0.322	
3	0.073	13.63	-0.103	
4	0.060	16.74	-0.107	
5	0.050	19.81	0.047	

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）

(Ss-1H)

次数	固有周期 (sec)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.298	3.36	1.498	建屋-地盤連成系1次
2	0.155	6.44	-0.525	
3	0.098	10.16	-0.004	
4	0.080	12.44	-0.075	
5	0.076	13.13	-0.031	

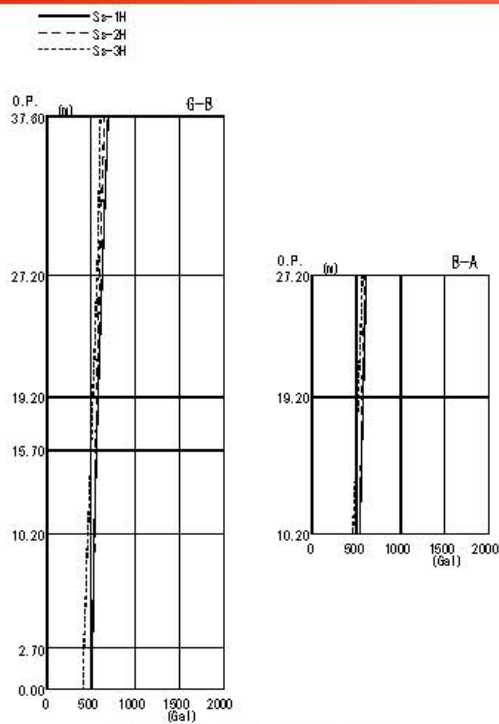
(Ss-2H)

次数	固有周期 (sec)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.295	3.39	1.503	建屋-地盤連成系1次
2	0.154	6.50	-0.532	
3	0.098	10.17	-0.003	
4	0.080	12.45	-0.078	
5	0.076	13.14	-0.031	

(Ss-3H)

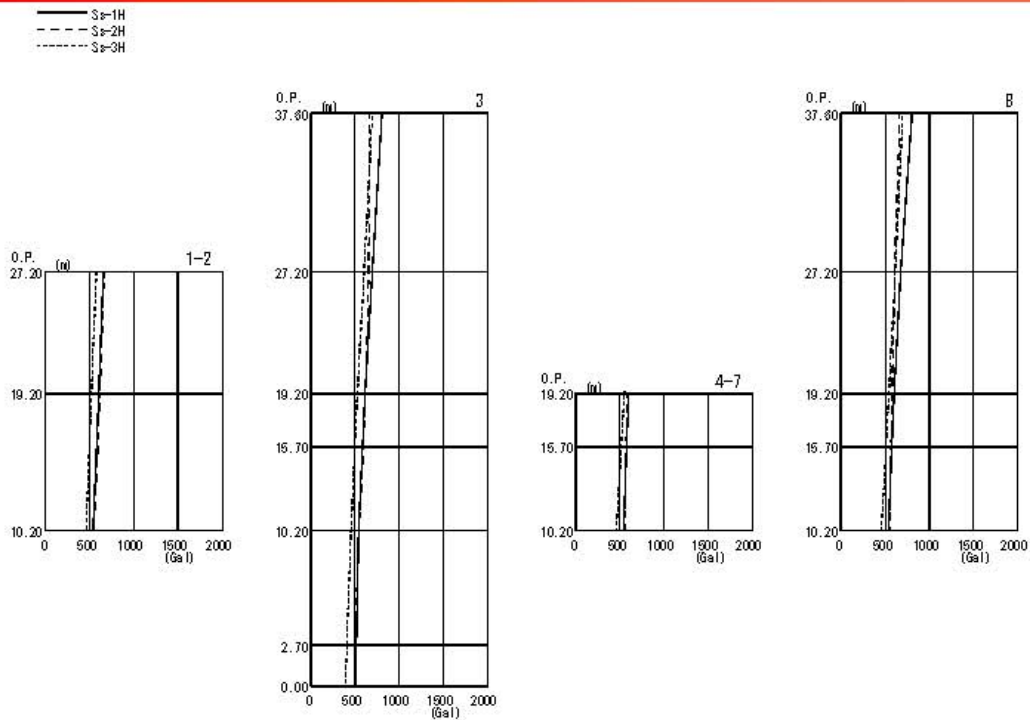
次数	固有周期 (sec)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.299	3.34	1.497	建屋-地盤連成系1次
2	0.156	6.42	-0.522	
3	0.098	10.16	-0.004	
4	0.080	12.43	-0.074	
5	0.076	13.13	-0.031	

地震応答解析結果



最大応答加速度 (NS方向)

地震応答解析結果



最大応答加速度 (EW方向)

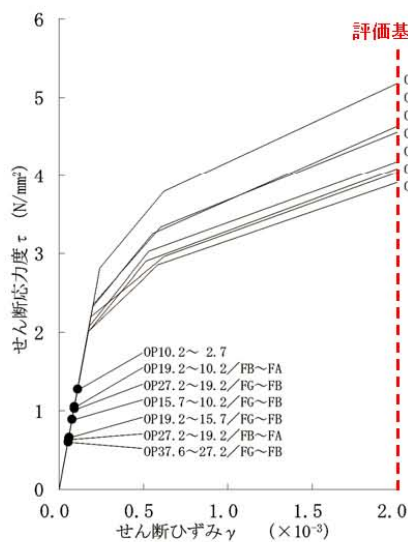
耐震壁の耐震安全性評価

耐震安全性の評価は、基準地震動 S_s による各層の鉄筋コンクリート耐震壁の最大応答せん断ひずみが評価基準値（ 2.0×10^{-3} ）を超えないことを確認する。
地震応答解析から得られる最大せん断応答ひずみを示す。

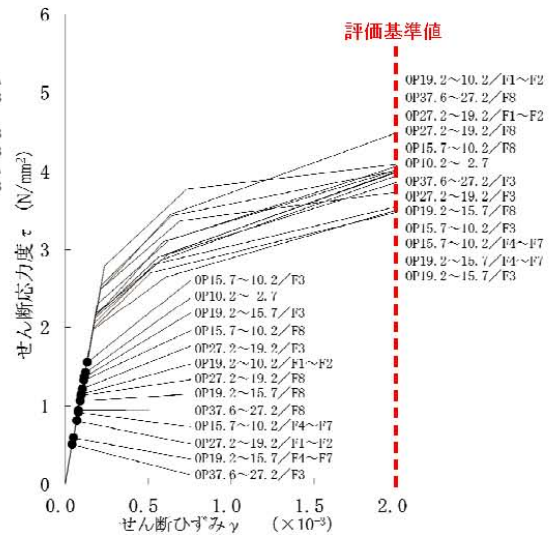
耐震壁の最大応答せん断ひずみ一覧

基準地震動 S_s	NS方向		EW方向	
	最大応答せん断ひずみ	部位	最大応答せん断ひずみ	部位
S_s-1	0.11×10^{-3}	地下1階	0.14×10^{-3}	1階
S_s-2	0.11×10^{-3}	地下1階	0.14×10^{-3}	1階
S_s-3	0.10×10^{-3}	地下1階	0.12×10^{-3}	1階

耐震壁の耐震安全性評価

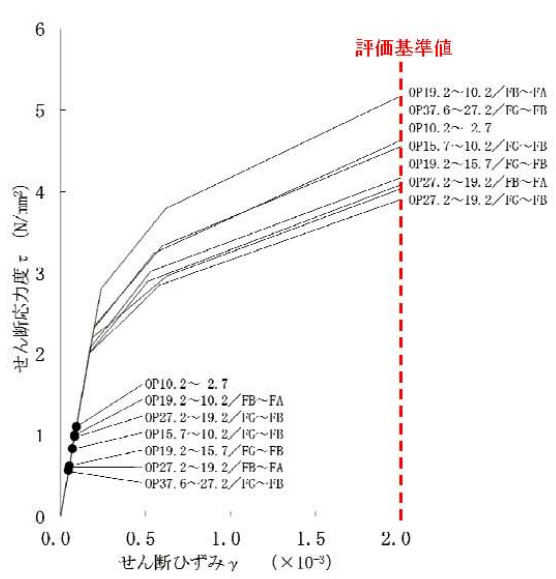


せん断スケルトン曲線上の最大応答値
(S_s-2 NS方向)

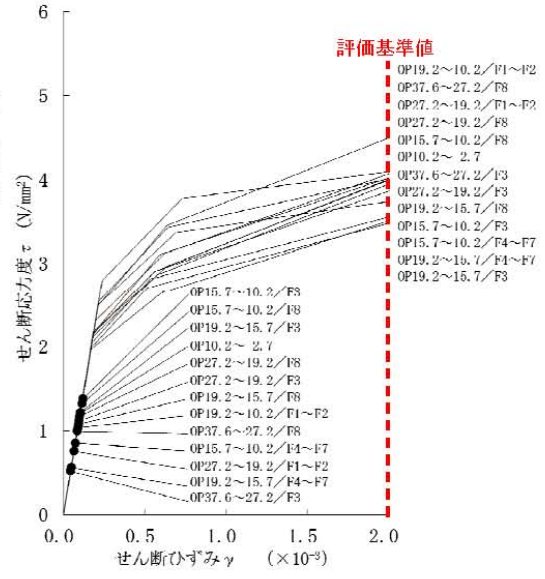


せん断スケルトン曲線上の最大応答値
(S_s-2 EW方向)

耐震壁の耐震安全性評価



せん断スケルトン曲線上の最大応答値
(Ss-3 NS方向)



せん断スケルトン曲線上の最大応答値
(Ss-3 EW方向)

共用プール冷却機能の喪失評価

1. 原因

共用プール冷却中に、ポンプの故障や地震・津波等の原因により共用プールの冷却機能が喪失し、共用プール水の温度が上昇すると共に共用プール水位が低下する。

2. 対策及び保護機能

- (1) 待機ポンプ（今後、待機ポンプを1台復旧する）を起動させる。
- (2) 冷却機能喪失後、共用プールの冷却機能の復旧に長時間を要する場合は、共用プール補給水系により共用プール水の補給を行い、プール水位の異常な低下を防止する。
- (3) 地震・津波等により電源喪失が発生し、共用プールの冷却機能が停止し、電源喪失の復旧に長時間を要する場合は、予め免震重要棟西側(OP. 36, 900)に待機している消防車の配備を行い、直接プールに注水を行うことにより、プール水位の異常な低下を防止する。

3. 評価条件及び評価結果

(1) 評価条件

- ・ 保守的に、使用済燃料から発生する崩壊熱は全て共用プール水の温度上昇及び共用プール水の蒸発に寄与するものとし、外部への放熱は考慮しないものとする。
- ・ 共用プール水の初期温度は52℃とする。
- ・ 共用プール初期水位はオーバーフロー水位付近(有効燃料頂部+約7.0m)とする。
- ・ 共用プールに貯蔵されている使用済燃料は、1～6号機の使用済燃料プール燃料及び5,6号機の炉心燃料の受け入れに必要な体数を取り出す予定であるが、ORIGEN2を用いた崩壊熱の評価に当たっては、保守的に共用プールからの燃料取出しによる崩壊熱の減少は考慮しない。
- ・ 平成25年1月に5,6号機使用済燃料プールの燃料取り出し、同年4月に5,6号機炉心燃料の取り出し、同年11月に4号機使用済燃料プールの燃料取り出し、平成27年1月に3号機使用済燃料プールの燃料取り出し、平成28年1月に1,2号使用済燃料プールの燃料取り出しが開始され、即時全ての燃料が共用プールに移送されると仮定して、使用済燃料から発生する崩壊熱を評価した。評価結果を表-1に示す。(実際の取り出し時期は確定していないため、取り出し時期が早まり、評価条件を超える場合は再評価を行う)

表-1 使用済燃料から発生する崩壊熱

評価時期	(1) 共用 プール既 存燃料の 崩壊熱 (MW)	(2) 1, 2 号機 SFP *燃料の 崩壊熱 (MW)	(3) 3 号 機 SFP* 燃料の 崩壊熱 (MW)	(3) 4 号 機 SFP* 燃料の 崩壊熱 (MW)	(4) 5, 6 号機 SFP *燃料の 崩壊熱 (MW)	(5) 5, 6 号機 炉 心燃料 の崩壊 熱 (MW)	共用プ ールで 考慮す る発熱 量 (MW)
平成 24 年 12 月	1.06	—	—	—	—	—	1.06
平成 25 年 1 月	1.06	—	—	—	0.80	—	1.86
平成 25 年 4 月	1.05	—	—	—	0.76	0.50	2.31
平成 25 年 11 月	1.03	—	—	0.51	0.69	0.40	2.62
平成 27 年 1 月	1.00	—	0.18	0.41	0.59	0.29	2.47
平成 28 年 1 月	0.98	0.25	0.16	0.36	0.54	0.24	2.53

(*SFP:使用済燃料プール)

(2) 評価結果

共用プール水位が有効燃料頂部+2m に至るまで：約 19 日

4. 判断基準への適合性の検討

本事象に対する判断基準は、「使用済燃料から発生する崩壊熱を確実に除去できること」である。

共用プールの冷却機能が喪失した後、共用プール水位が、水遮へいが有効とされる有効燃料頂部+2m に至るまでには、最短でも約 19 日の時間的余裕がある。なお、水遮へいの効果については「II.2.12 添付資料-3」に示すとおりである。このことから、他に緊急度の高い復旧作業がある場合は、そちらを優先して実施することになるが、共用プールの冷却機能の復旧作業を、事前準備が整い次第、速やかに実施することで、共用プール冷却を再開する。また、共用プールの冷却機能の復旧作業に長時間を要する場合にも、共用プール補給水系または消防車*により共用プール水位を保つことは十分可能である。

以上より、共用プールの冷却機能が喪失した場合でも、使用済燃料の冠水は確保され、使用済燃料から発生する崩壊熱が確実に除去されることから、判断基準は満足される。

※：消防車による注水開始までの所要時間（目安）は、作業開始から約 3 時間。

燃料集合体の落下評価

1. 原因

共用プール内における使用済燃料の取扱い中に、何らかの原因で燃料集合体が落下し、放射性物質が放出される。

2. 対策及び保護機能

燃料集合体の落下を防止するため、次のような設計及び運転管理上の対策を講じる。

- (1) 燃料取扱装置は、燃料集合体の総重量を十分上回る重量に耐えることのできる強度に設計している。
- (2) 燃料つかみ機のワイヤを二重化している。
- (3) 燃料つかみ機は、圧縮空気が喪失した場合、燃料集合体が外れないフェイル・セーフ設計としている。
- (4) 燃料つかみ機が燃料集合体を確実につかんでいない場合には、吊り上げが出来ないようなインター・ロックを設けている。
- (5) 運転要領を十分整備し、よく訓練された監督者の直接指揮下で燃料取り扱い作業を行う運転管理体制とする。

3. 評価条件及び評価結果

設置許可申請書において、「共用プールにおける燃料集合体落下事象」は、「炉心上への燃料集合体の落下事象」と比較して、敷地境界外の実効線量は小さく、周辺公衆に対し、著しい放射線被ばくのリスクを与えることはないと評価されている。

下表に、「炉心上への燃料集合体の落下事象」と「共用プールにおける燃料集合体落下事象」の評価条件と評価結果を示す。共用プールで取扱う使用済燃料は19ヶ月以上冷却された燃料であり、「炉心上への燃料集合体の落下事象」における冷却期間1日と比べて長いことからよう素及び希ガスは半減期に応じて減衰しており、また燃料集合体の落下高さの違いから破損燃料も少ない。したがって、大気中に放出される核分裂生成物の量は少なく、これによる敷地境界外の実効線量は、「炉心上への燃料集合体の落下事象」より小さい。

	原子炉建屋※	共用プール
燃料種類	9×9 燃料	9×9 燃料
落下場所	炉心	共用プール燃料ラック上
破損燃料体数	2.3 体	2 体
冷却期間	1 日	19 ヶ月
放出経路	スタック経由	地上放出
よう素 (I - 131 等価量) 大気放出量	$4.7 \times 10^{11} \text{Bq}$	$1.3 \times 10^7 \text{Bq}$
希ガス (γ線実効エネルギー 0.5MeV 換算値) 大気放出量	$3.2 \times 10^{14} \text{Bq}$	$4.2 \times 10^{11} \text{Bq}$
敷地境界での被ばく量	0.068mSv	0.068mSv 以下

※：2～5号機について記載。

4. 判断基準への適合性の検討

3. に示したとおり，周辺公衆に対し，著しい放射線被ばくのリスクを与えることはない。

使用済燃料共用プール設備の耐震安全性について

1. 概要

使用済燃料共用プール設備の耐震性については、建設時の工事計画認可申請時に確認しているが、当該工事計画認可申請は、発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針の改定（平成18年）以前におこなったものである。本項では、同指針に基づき策定された基準地震動 S_s に対して、使用済燃料共用プール設備の耐震性を検討した結果を示す。検討対象設備は耐震Sクラス設備である使用済燃料貯蔵ラック、耐震Sクラス設備に対する波及的影響を考慮すべき設備である燃料取扱装置、天井クレーンである。

2. 準拠基準等

本検討は、原則として下記に準拠して行う。

原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG 4601・補-1984）

原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG 4601-1987）

原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG 4601-1991 追補版）

原子力発電所耐震設計技術規程（JEAC 4601-2008）

発電用原子力設備規格 設計・建設規格（JSME S NC1-2005）

また、本検討に用いる設計時の図書は以下のとおり。

工事計画認可申請書（6資庁第2935号 平成6年4月27日認可）

工事計画届出書（総文発官5 第1218号 平成6年4月13日届出）

3. 使用済燃料貯蔵ラックに対する検討

使用済燃料共用プールに存在する3種類のラック各々に対して、設計時において評価に用いた S_2 地震動の震度と基準地震動 S_s の震度との応答比を算出し、設計時における S_2 地震動での応力評価値に乗じることにより、簡易評価を行う（応答倍率法）。応答倍率法の結果、評価が厳しい場合は詳細評価を実施する。

3.1 応答倍率法による検討

3.1.1 検討方法

表1に、各ラック1次モードの固有周期、 S_2 震度及び基準地震動 S_s の震度を示す。図1に、使用済燃料貯蔵ラックの評価床に対応するOP10.2mでの基準地震動 S_s の水平方向の床応答スペクトル図を示す。なお、設計時は使用済燃料貯蔵ラックは1%の減衰定数での床応答スペクトルを用いているが、ここでは過去に当社で実施した類似構造ラックの加振試験の結果を踏まえ、7%の減衰定数の床応答スペクトルを評価に用いた。また、鉛直方向はラック評価床OP10.2mでの基準地震動 S_s による最大加速度の1.2倍（1.2ZPA）を用いた。

表 1 より、応答比は最も震度の差異の大きい鉛直方向の比を採用することとし、基準地震動 S_s の鉛直震度 0.49 を設計時の鉛直震度 0.23 で除することにより、2.13 と設定した。

表 1 使用済燃料貯蔵ラックの固有周期及び震度

機器		固有周期 (秒)	設計時の震度 (G)	S_s 震度 (G)	応答比
使用済燃料貯蔵ラック	その 1	水平 : 0.097	水平 : 0.82	水平 : 0.68	水平 : 0.83
		鉛直 : -	鉛直 : 0.23	鉛直 : 0.49	鉛直 : 2.13
	その 2	水平 : 0.090	水平 : 0.73	水平 : 0.68	水平 : 0.94
鉛直 : -		鉛直 : 0.23	鉛直 : 0.49	鉛直 : 2.13	
その 3	水平 : 0.110	水平 : 1.23	水平 : 0.70	水平 : 0.57	
	鉛直 : -	鉛直 : 0.23	鉛直 : 0.49	鉛直 : 2.13	

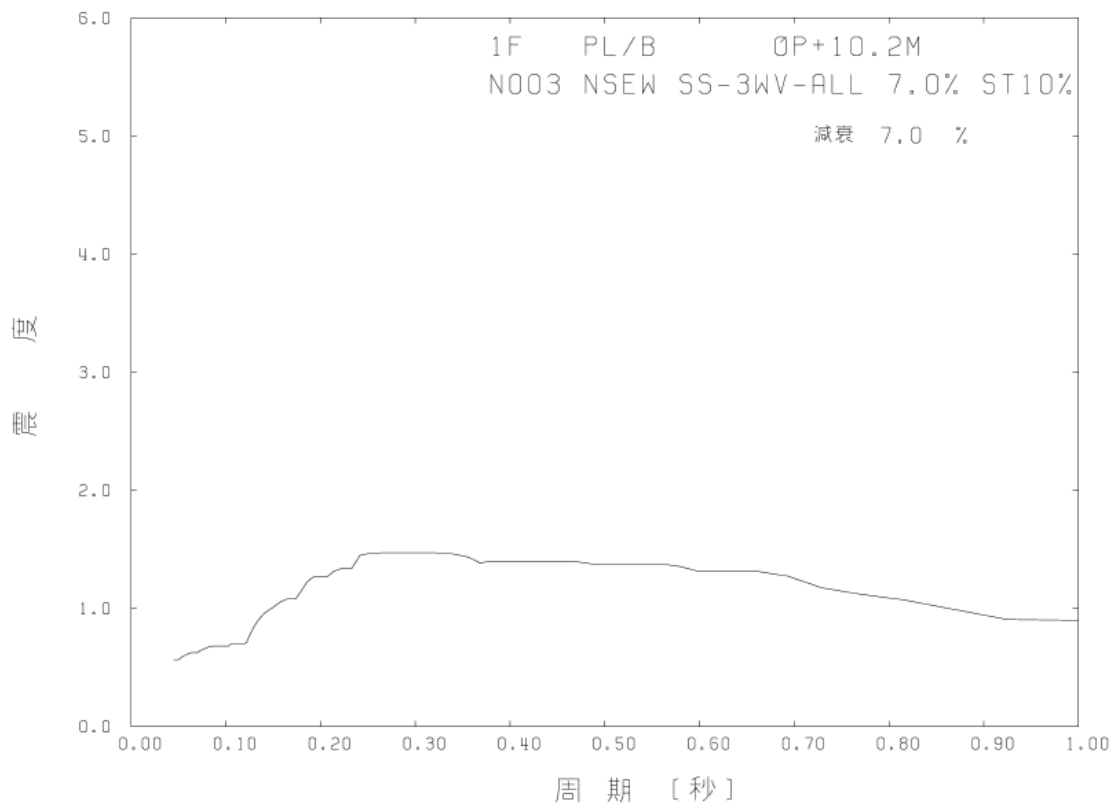


図 1 共用プールOP10.2mでの床応答スペクトル (水平方向)

3.1.2 検討結果

3.1.1で求めた応答比 (2.13) を設計時の応力評価値に乗じた結果を表 2 に示す。表 2 より、その 1 ラック及びその 2 ラックについては許容応力を満足する結果となった。なお、許容応力は設計・建設規格 (JSME S NC1-2005) に基づき設計時から見直しを行った。

表2 使用済燃料貯蔵ラックの応答倍率法による検討結果

(単位：MPa)

ラック	部位	応力の種類	設計時計算値	S _s 計算値	許容応力
その1	角管	組合わせ	39	84	246
	補強板	組合わせ	67	143	246
	ボルト	引張	97	207	488
		せん断	36	77	375
その2	角管	組合わせ	36	77	246
	補強板	組合わせ	58	124	246
	ボルト	引張	47	101	488
		せん断	21	45	375

3.2 解析モデルによる検討

3.2.1 検討方法

応答倍率法による検討の結果, その3ラックについては補強板の応力が許容応力を超過する結果となったため, その3ラックについて解析モデルを作成し, 耐震性の検討を行った。解析コードとしてNASTRANを用いた。図2にその3ラックの解析モデル, 表3に重量を示す。検討に用いる水平方向の床応答スペクトルは図1と同様であり, 鉛直方向はラック評価床OP10.2mでの基準地震動S_sによる最大加速度の1.2倍(1.2ZPA)を用いた。

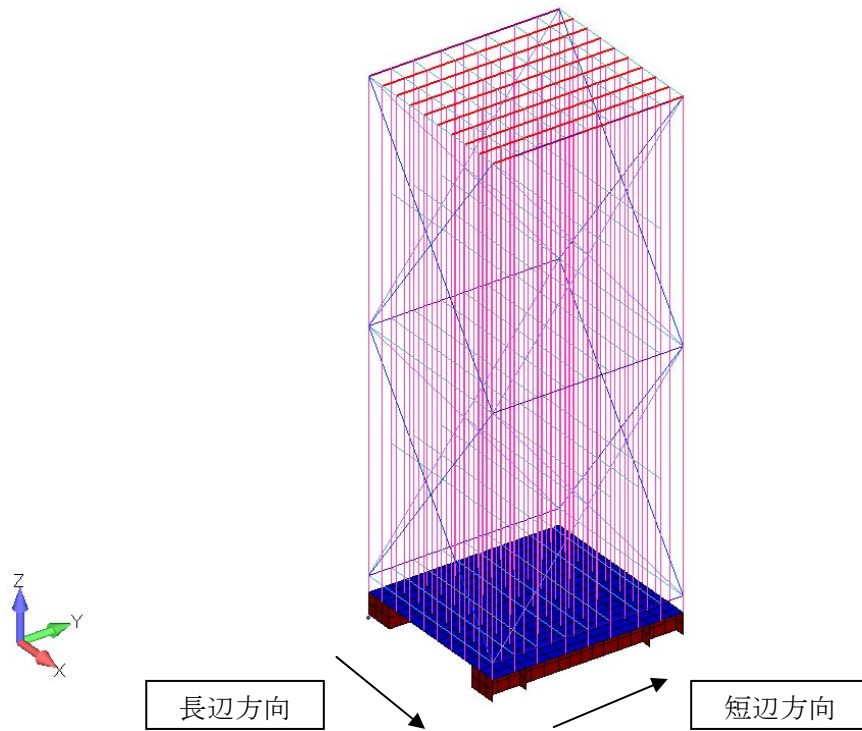


図2 使用済燃料貯蔵ラック（その3）の解析モデル

表3 使用済燃料貯蔵ラック（その3）の重量

(単位：ton)

使用済燃料貯蔵時のラック全重量 W^{*1}	使用済燃料の重量 W_F	ラックの重量 W_R	ラックに含まれる水の重量 W_W
47.84	28.44	14.0	5.4

※1 $W=W_F+W_R+W_W$

3.2.2 検討結果

表4に使用済燃料貯蔵ラック（その3）のスペクトル応答解析の検討結果を示す。発生応力は許容応力を満足する結果となった。

表4 使用済燃料貯蔵ラック（その3）スペクトル応答解析の検討結果

(単位：MPa)

部材	応力の種類	Ss 計算値	許容応力
角管	組合わせ	33	246
補強板	組合わせ	78	246
基礎ボルト	引張	12	488
	せん断	14	375

4. 燃料取扱装置に対する検討

4.1 検討方法

設計時において評価に用いた S_2 地震動の震度と基準地震動 S_s の震度との応答比を算出し、設計時における S_2 地震動での応力評価値に乗じることにより、簡易評価を行う（応答倍率法）。応答倍率法の結果、評価が厳しい場合は以下の式に示すように設計時の水平震度による組合わせ応力、設計時の鉛直震度による組合わせ応力それぞれに応答比を乗じることによって検討を行う。表 5 に、設計時の S_2 震度、基準地震動 S_s の震度及び応答比を示す。図 3 に、燃料取扱装置の評価床である 0P27.2m での基準地震動 S_s の水平方向の床応答スペクトル図を示す。また、図 4 に、鉛直方向の床応答スペクトルを示す。設計時において燃料取扱装置は複数の次数の固有周期および震度を用いて評価しているが、本検討では保守的に設計時の震度と基準地震動 S_s での震度の比がもっとも大きいものを応答比として用いた。表 5 より、応答倍率法に用いる応答比は水平・鉛直のうちより値の大きい鉛直の応答比である 7.79 を用いた。また、応答比を水平・鉛直それぞれ検討に用いる場合、水平：1.95、鉛直：7.79 を用いた。

$$\text{発生応力} : \sigma = \sqrt{(\beta_H \cdot \sigma_H)^2 + (\beta_V \cdot \sigma_V)^2} + \sigma_0$$

β_H : 水平方向の応答比

β_V : 鉛直方向の応答比

σ_H : 設計時の S_2 地震動における水平震度による組合わせ応力

σ_V : 設計時の S_2 地震動における鉛直震度による組合わせ応力

σ_0 : 設計時の S_2 地震動における地震以外の応力（自重）

表 5 燃料取扱装置の評価に用いる震度及び応答比

機器	設計時の震度 (G)	S_s 震度 (G)	応答比
燃料取扱装置	水平 : 0.76	水平 : 1.48	水平 : 1.95
	鉛直 : 0.23	鉛直 : 1.79	鉛直 : 7.79

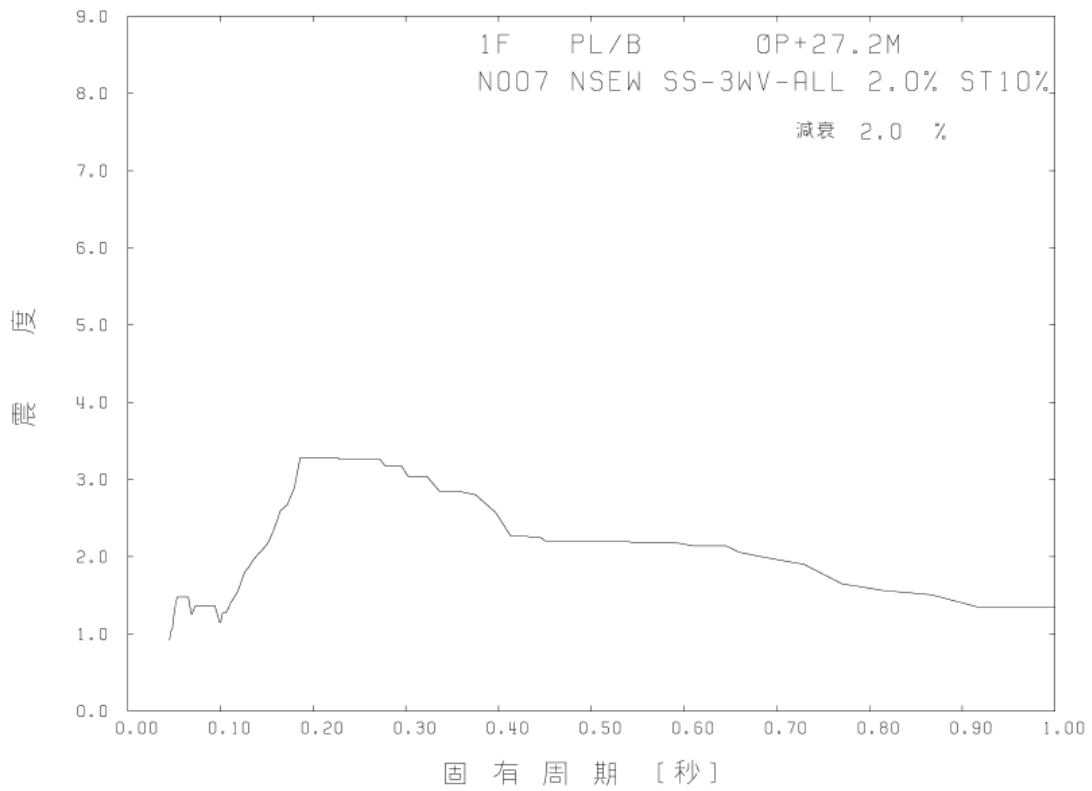


図3 共用プールOP27.2mでの床応答スペクトル（水平方向）

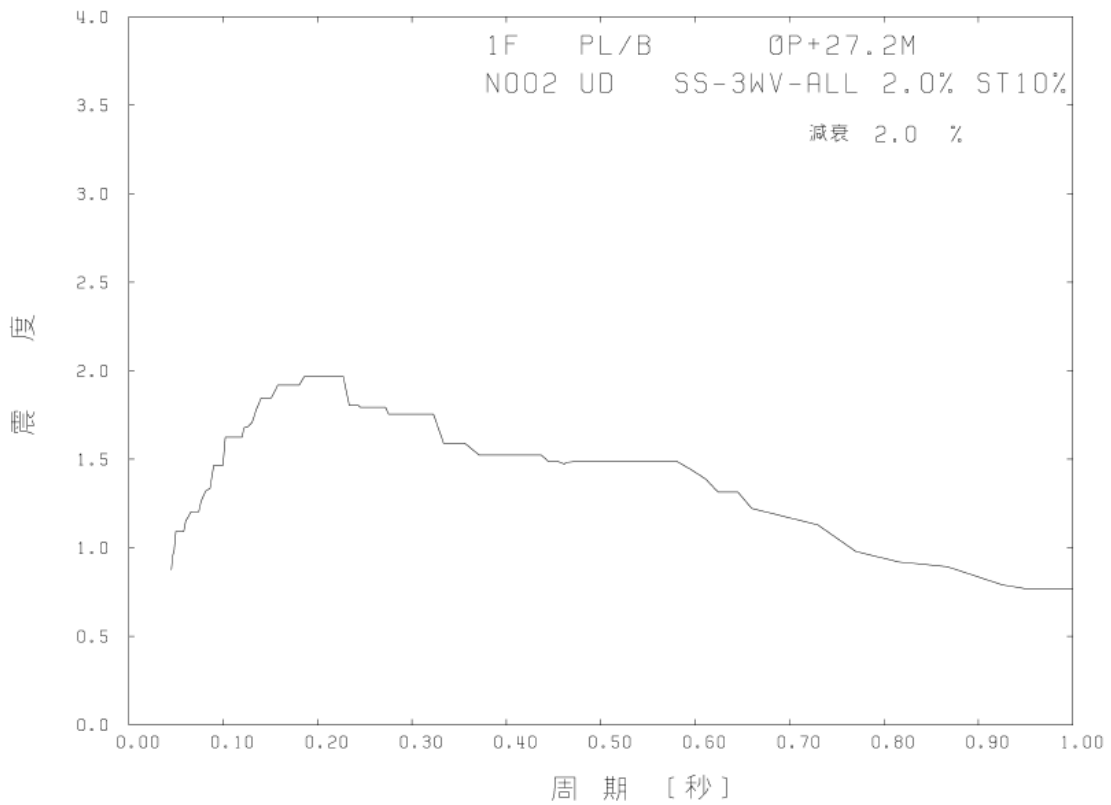


図4 共用プールOP27.2mでの床応答スペクトル（鉛直方向）

4.2 検討結果

応答比 (7.79) を用いた応答倍率法による検討, または設計時の水平震度による組合わせ応力, 鉛直震度による組合わせ応力それぞれに応答比 (水平 : 1.95, 鉛直 : 7.79) を乗じることで検討を行った結果を表 6 に示す。表 6 より, 基準地震動 S_s による計算値は許容応力を満足する結果となった。なお, 燃料取扱装置は図 5 に示すように脱線防止ラグを有しており, レールからの脱落を防止する構造になっている。

表 6 燃料取扱装置に対する検討結果

(単位 : MPa)

部位		応力の種類	評価方法※	設計時 計算値	S_s 計算値	許容応力
構造物フレーム		組合わせ	B	136	222	276
ブリッジ	脱線防止 ラグ	本体	組合わせ	4	32	253
		取付 ボルト	引張	7	55	350
			せん断	5	39	269
	ブリッジガ イドフレー ム	本体	組合わせ	24	187	253
		取付 ボルト	引張	5	39	350
			せん断	13	102	269
トロリ	脱線 防止ラグ	本体	組合わせ	3	24	253
		取付 ボルト	引張	1	8	350
			せん断	2	16	269
走行レール		組合わせ	A	26	203	548

※ A : 応答倍率法による評価 (応答比 : 7.79)

B : 設計時の水平・鉛直震度による組合わせ応力それぞれに応答比を乗じた評価 (水平 : 1.95, 鉛直 : 7.79)

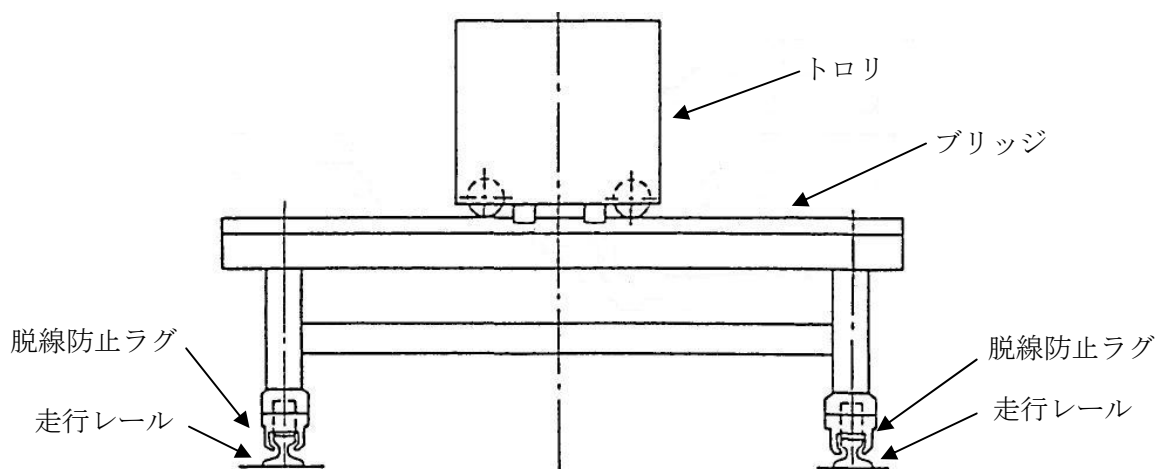


図 5 燃料取扱装置概念図

5. 天井クレーンに対する検討

5.1 検討方法

天井クレーンは基準地震動 S_s により S クラス設備への波及的影響を及ぼさないことが要求される。本検討では、基準地震動 S_s において天井クレーンがランウェイガーダから脱落し落下する事のないことを、時刻歴応答解析を用いることにより天井クレーンの浮き上がり量を評価することで確認する。また、あわせて天井クレーンに発生する応力を検討する。

天井クレーンは共用プールエリア及びキャスク搬出入エリアの2台が存在するため、本検討では両者について確認を行う。図6及び図7に、検討に用いる解析モデル、図8及び図9に入力値である基準地震動 S_s の時刻歴波形を示す。検討に用いる時刻歴波形は、各天井クレーンの鉛直方向固有周期における応答スペクトル値が最も大きい S_s-1 を用いた。検討には解析コードとして NASTRAN を用いた。

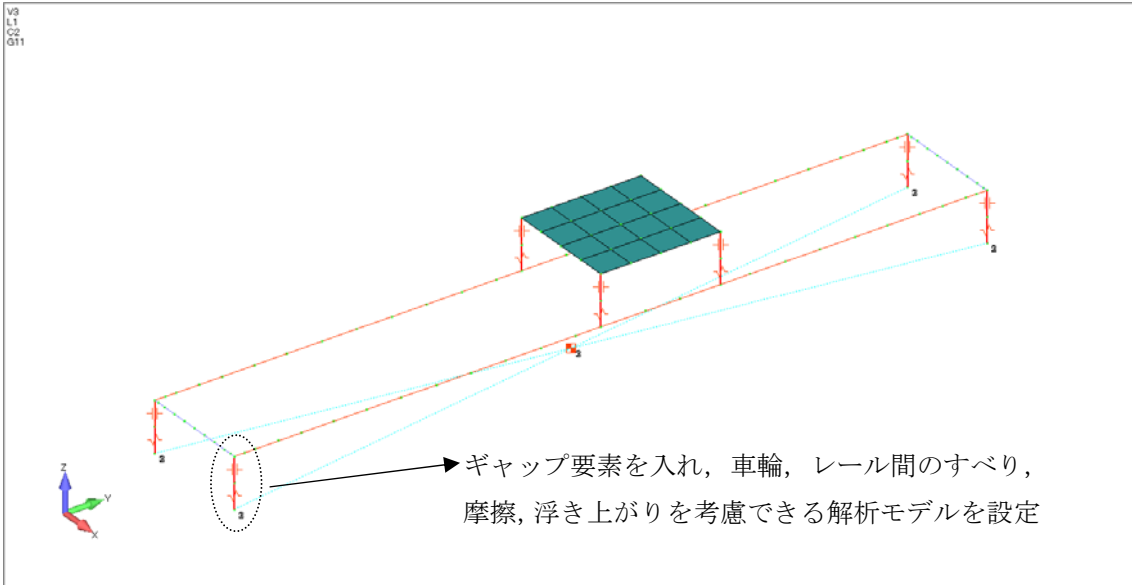


図6 共用プールエリア天井クレーンの解析モデル

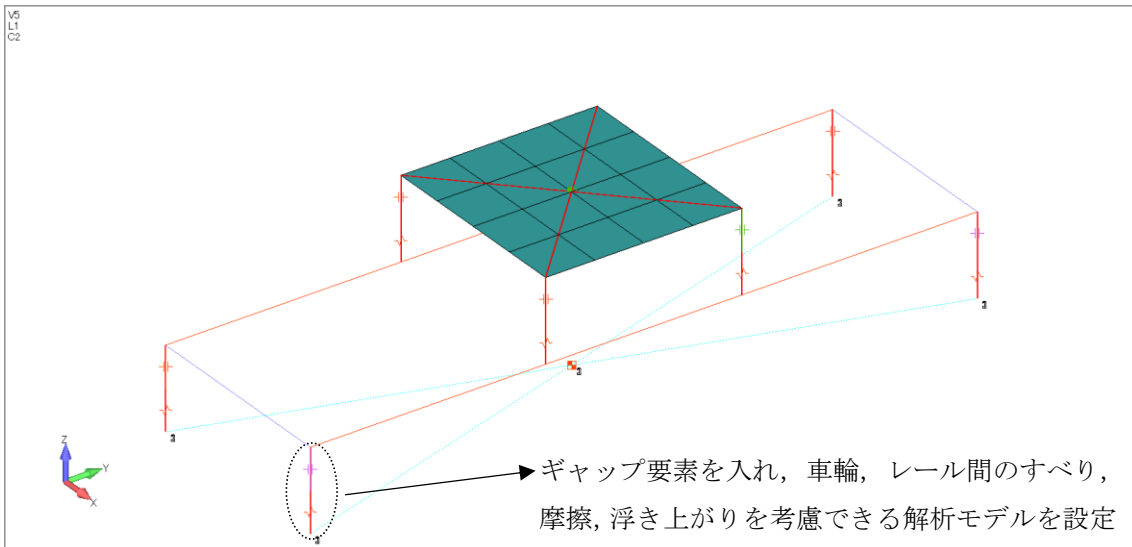
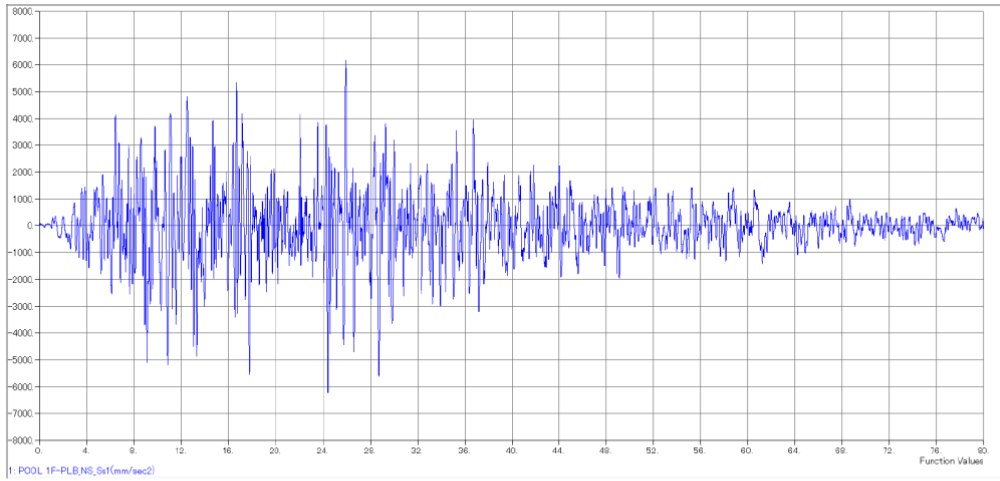
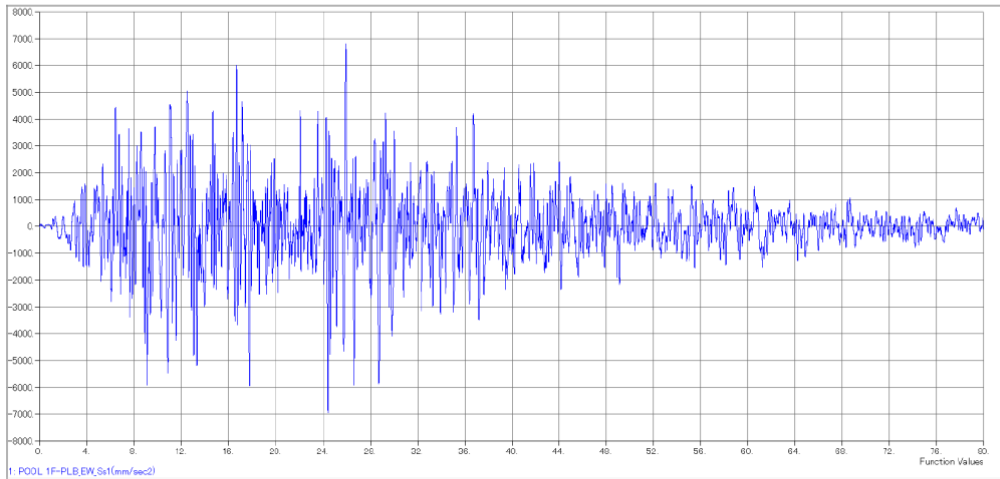


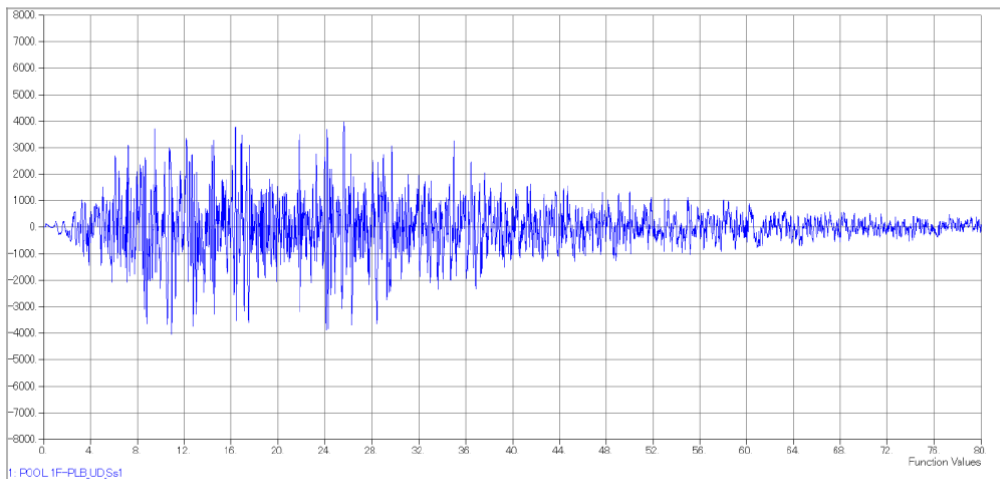
図7 キャスク搬出入エリア天井クレーンの解析モデル



(1)NS 加振 (1F-PLB_NS)

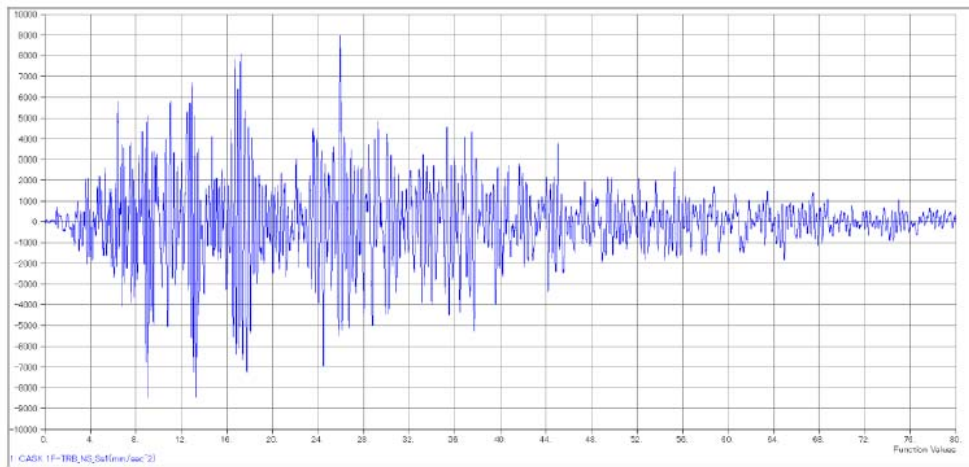


(1)EW 加振 (1F-PLB_EW)

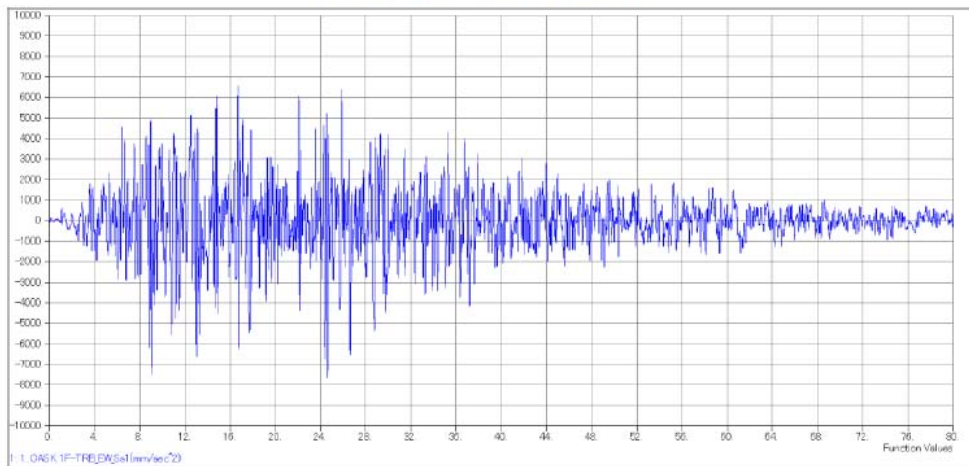


(1)UD 加振 (1F-PLB_UD)

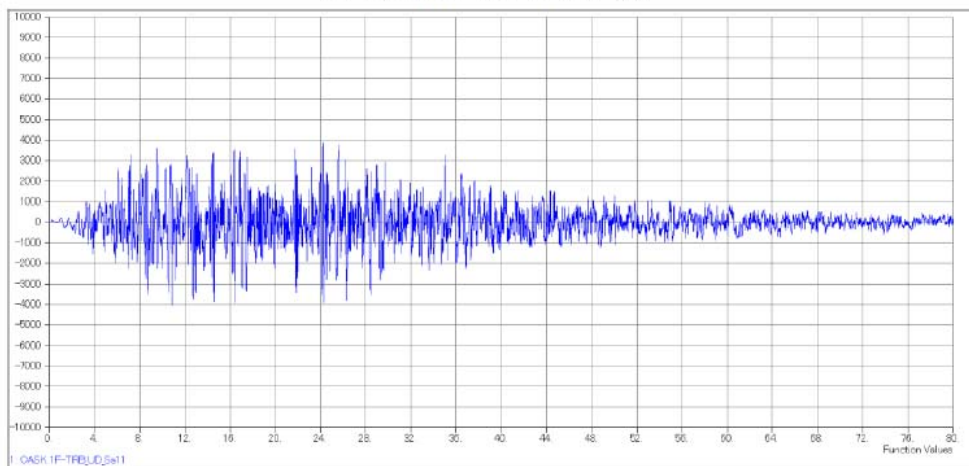
図8 基準地震動 S_s の時刻歴波形 (共用プールエリア天井クレーン)



(1)NS 加振 (1F-TRB_NS)



(1)EW 加振 (1F-TRB_EW)



(1)UD 加振 (1F-TRB_UD)

図9 基準地震動 S_s の時刻歴波形 (キャスク搬出入エリア天井クレーン)

5.2 検討結果

時刻歴応答解析により評価した各天井クレーンの浮き上がり量を表7に示す。また、各天井クレーンの応力を表8に示す。基準地震動 S_s による応力を試算した結果、評価値は許容応力に対して裕度を有している。また、浮き上がり量は各天井クレーンの脱線防止ラグとランウェイガーダのクリアランス以下であり、接触しないため(図10参照)、ランウェイガーダ及び脱線防止ラグが損傷することはない、天井クレーンは落下しないことが確認できた。

表7 各天井クレーンの浮き上がり量

(単位：mm)

種類	部位	浮き上がり量	脱線防止ラグとランウェイガーダとのクリアランス
共用プールエリア	ガーダ	8.1	65
キャスク搬出入エリア	ガーダ	8.2	65

表8 各天井クレーンの応力検討結果

(単位：MPa)

種類	部位	評価値	許容応力
共用プールエリア	ガーダ	185	392
キャスク搬出入エリア	ガーダ	99	336

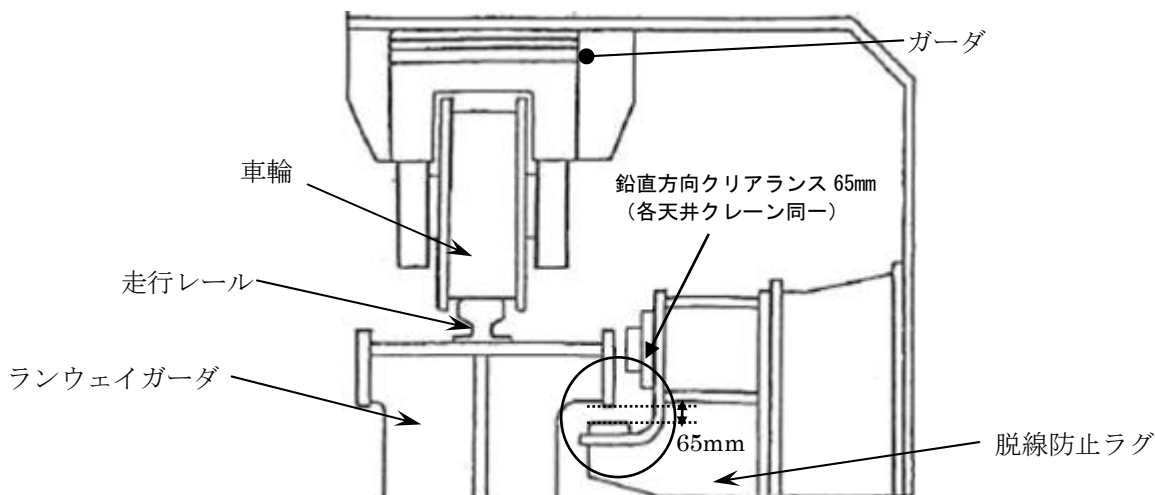


図10 天井クレーン脱線防止ラグ周り概念図

6. まとめ

使用済燃料貯蔵ラック、燃料取扱装置及び天井クレーンについて、基準地震動 S_s に対する耐震安全性評価を実施したところ、いずれも評価基準値に対して裕度を有していることを確認した。

以上

使用済燃料貯蔵ラック（49 体）について

1. 背景

共用プールに、1～4 号機原子炉建屋内の使用済燃料プールに貯蔵中の使用済燃料及び新燃料、5,6 号機原子炉建屋内の使用済燃料プールに貯蔵中の使用済燃料及び新燃料を除く炉内燃料（合計 5,936 体）の受け入れを計画している。その中には、震災前から使用済燃料プールに貯蔵されている変形燃料や破損燃料、震災時に破損した可能性のある燃料が含まれている。変形燃料の貯蔵にあたっては、変形の程度に対して、物理的に貯蔵できるとともに、臨界を防止することが必要である。また破損燃料の貯蔵にあたっては、破損形態に応じて、放射性物質の拡散を抑制するとともに、燃料の形状が維持されていない場合でも臨界を防止することが必要である。

このため、上記の燃料の貯蔵を目的とした使用済燃料貯蔵ラックを設置する。

2. 使用済燃料貯蔵ラック（49 体）および収納缶について

- 収納缶とは、変形、または破損燃料をその状態に応じて収納する缶であり、破損燃料を収納缶ごと使用済燃料貯蔵ラック（49 体）に貯蔵することが可能である。
- 使用済燃料貯蔵ラック（49 体）には収納缶に収納しない燃料集合体 1 体、および収納缶に収納された燃料集合体 48 体を貯蔵する。なお、収納缶に収納しない燃料集合体とは、4 号機において震災前の取扱中にチャンネルボックスおよびハンドルの変形が認められた使用済燃料（7×7 燃料）である。

3. 安全機能の維持の確認

使用済燃料貯蔵ラック（49 体）の安全機能は以下の別添—1～4 にて確認している。

- 別添—1 使用済燃料貯蔵ラック（49 体）の核燃料物質が臨界に達しないことを説明する書類
- 別添—2 使用済燃料貯蔵ラック（49 体）の耐震設計の基本方針
- 別添—3 使用済燃料貯蔵ラック（49 体）の耐震性についての計算書
- 別添—4 使用済燃料貯蔵ラック（49 体）設置後の使用済燃料共用プールの水深の遮へい能力に関する説明書
- 別添—5 使用済燃料貯蔵ラック（49 体）構造図
- 別添—6 収納缶についての説明書

使用済燃料貯蔵ラック(49体)の核燃料物質が臨界に達しないことを説明する書類

1.1 基本的考え方

使用済燃料共用プールの使用済燃料貯蔵ラック(49体)は、想定される厳しい状態において貯蔵する燃料が臨界に達することを防止する設計とする。また、使用済燃料貯蔵ラック(49体)は、臨界防止のため以下の配慮を行う。

- 貯蔵する燃料の中心間距離をラックの格子および格子内のスペーサで確保する。
- ラック構造材にはステンレス鋼を使用する。

1.2 設計基準

想定される厳しい状態において、実効増倍率(k_{eff})を0.95以下とすることを設計基準とする。

1.3 評価条件

以下の2通りの条件で評価を行うものとする。

- ①燃料棒の形状が維持されているが、取扱いを考慮して収納缶を用いる場合
- ②燃料棒の形状が維持されていないと仮定した場合

各評価条件を以下に示す。

- ①燃料棒の形状が維持されているが、取扱いを考慮して収納缶を用いる場合

臨界解析モデルを図-1に示す。実効増倍率を大きく見積るため、評価条件を下記の通りとした。

- 使用済燃料貯蔵ラック(49体)には収納缶に収納しない燃料集合体1体、および収納缶に収納された燃料集合体48体を貯蔵する。なお、収納缶に収納しない燃料集合体とは、4号機において震災前の取り扱い中にチャンネルボックスおよびハンドルの変形が認められた使用済燃料(7×7燃料)である。
- 収納缶に収納しない燃料集合体のU-235の濃縮度は未照射のまま減損しない値とし、7×7燃料の集合体平均値2.5wt%とする。また、中性子吸収断面積の大きいGdは無視する。
- 収納缶に収納しない燃料集合体のチャンネルボックスの変形による燃料棒間隔の変位の可能性を考慮し、実効増倍率が高くなるようラック格子内で燃料棒間隔を最適間隔に広げた評価とする。なお、当該格子には燃料集合体を保持する筒およびスベ

一サを設置する予定であるが、燃料棒間隔を最大限広げる場合が保守的であり、考慮しない。

- 収納缶に収納された燃料集合体の U-235 の濃縮度は未照射のまま減損しない値とし、 9×9 燃料の集合体平均値 3.9wt%とする。また、中性子吸収断面積の大きい Gd は無視する。
- 収納缶に収納された燃料集合体は変形を考慮して収納缶内で燃料棒が最適な状態に広がった配列とする。
- ラックおよび収納缶の板厚は、製造公差を考慮した最小値とする。
- ラックの貯蔵ピッチは、製造公差を考慮した最小値とする。
- ラック内の収納缶配置は、スペーサ間の範囲で偏心配置（ラック中心寄り）を考慮する。
- ラックが無限に並んだ状態として、高さ方向無限、かつラック周囲での境界条件を完全反射とする。
- チャンネルボックスを水に置き換える。

②燃料棒の形状が維持されていないと仮定した場合

臨界解析モデルを図-2に示す。実効増倍率を大きく見積るため、評価条件を下記の通りとした。

- 使用済燃料貯蔵ラック（49体）には収納缶に収納しない燃料集合体1体、および収納缶に収納された燃料集合体48体を貯蔵する。なお、収納缶に収納しない燃料集合体とは、4号機において震災前の取り扱い中にチャンネルボックスおよびハンドルの変形が認められた使用済燃料（ 7×7 燃料）である。
- 収納缶に収納しない燃料集合体の U-235 の濃縮度は未照射のまま減損しない値とし、 7×7 燃料の集合体平均値 2.5wt%とする。また、中性子吸収断面積の大きい Gd は無視する。
- 収納缶に収納しない燃料集合体のチャンネルボックスの変形による燃料棒間隔の変位の可能性を考慮し、実効増倍率が高くなるようラック格子内で燃料棒間隔を最適間隔に広げた評価とする。なお、当該格子には燃料集合体を保持する筒およびスペーサを設置する予定であるが、燃料棒間隔を最大限広げる場合が保守的であり、考慮しない。
- 収納缶に収納された燃料集合体は、燃料集合体の形状維持を前提としないため、以下の条件を設定する。
 - 燃料被覆管が破損しペレットが収納缶内に放出されたことを仮定し、収納缶内にペレットと水が非均質に混ざった状態とする。
 - 水/ウラン比、ペレット粒径が最適な状態とする。

・U-235 の濃縮度は未照射のまま減損しない値とし、9×9燃料のペレット最高濃縮度 4.9wt%とする。また、中性子吸収断面積の大きい Gd は無視する。

- ラックおよび収納缶の板厚は、製造公差を考慮した最小値とする。
- ラックの貯蔵ピッチは、製造公差を考慮した最小値とする。
- ラック内の収納缶配置は、スペーサ間の範囲で偏心配置（ラック中心寄り）を考慮する。
- ラックが無限に並んだ状態として、高さ方向無限、かつラック周囲での境界条件を完全反射とする。
- チャンネルボックスを水に置き換える。

1.4 評価方法

使用済燃料貯蔵ラック（49 体）の実効増倍率は、収納缶、ラックの形状を模擬した計算モデルを用い、計算には KENO-V.a コードを用いる。

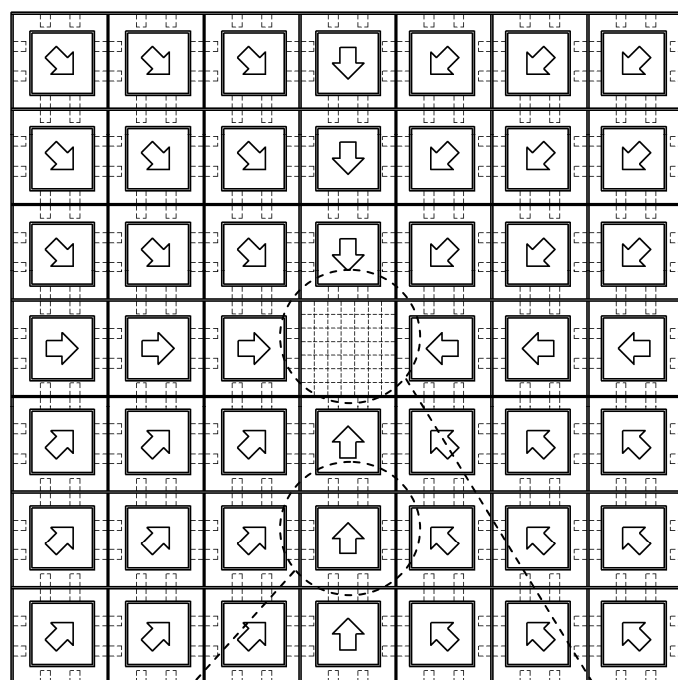
1.5 評価結果

使用済燃料貯蔵ラック（49 体）の実効増倍率は、表-1 に示す通り設計基準を満足している。

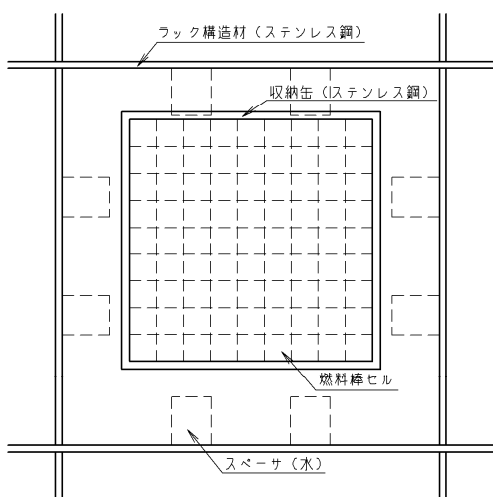
表-1 評価結果

収納缶内の燃料条件	実効増倍率 ^{*1}	設計基準
①燃料棒の形状が維持された燃料	0.84	0.95
②燃料棒の形状が維持されていない燃料	0.93	

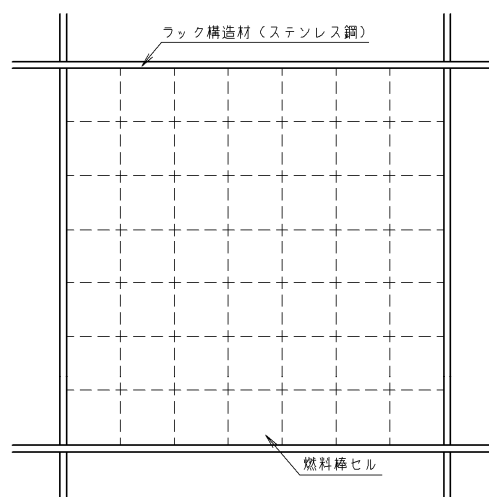
*1 モンテカルロ計算の統計誤差（3 σ ）を考慮した値



【ラック全体図】



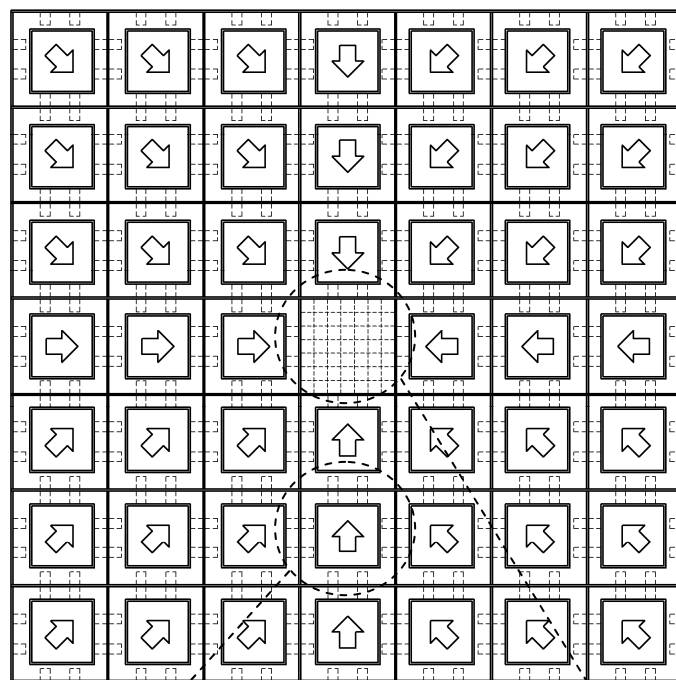
【収納缶に収納された燃料集合体の詳細】



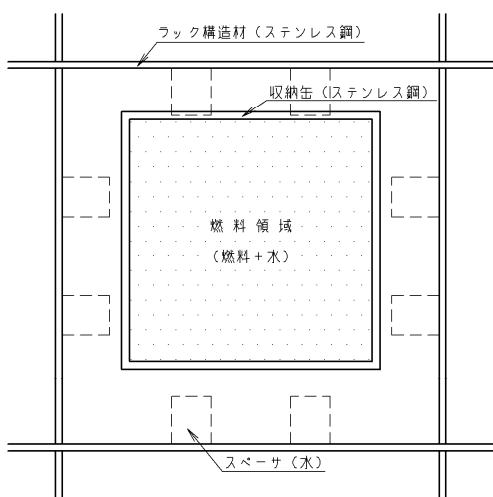
【収納缶に収納しない燃料集合体の詳細】

図-1 臨界解析モデル

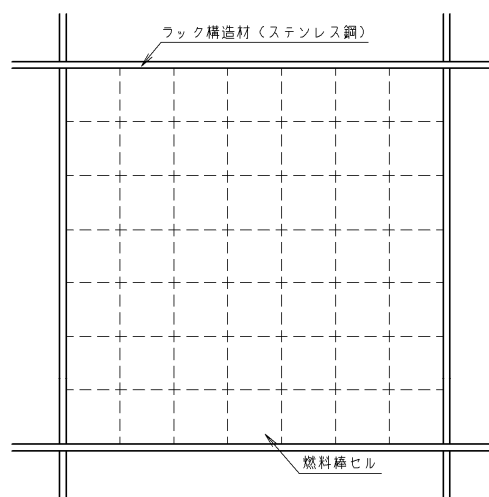
(燃料棒の形状が維持されているが、取扱いを考慮して収納缶を用いる場合)



【ラック全体図】



【収納缶に収納された燃料集合体の詳細】



【収納缶に収納しない燃料集合体の詳細】

図-2 臨界解析モデル
(燃料棒の形状が維持されていないと仮定した場合)

臨界解析に用いるコード (KENO-V.a) について

(1) 概要

KENO-V.a コードは、米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発されたモンテカルロ法に基づく公開の臨界解析コードであり、輸送容器の臨界解析などに利用されている。

(2) 機能

KENO-V.a コードは、臨界解析に際して以下の機能を有している。

- ① 実際に中性子が出会う物理現象を確率理論を用いて模擬するため、どのような物理的問題にも適用できる。なお、統計的な手法を用いるため、計算結果には統計誤差が付随する。
- ② 一次元～三次元の任意形状の体系を扱うことができる。

(3) 解析フロー

KENO-V.a コードの解析フローを図-3に示す。

(4) 使用実績

KENO-V.a コードは、国内外で輸送容器の臨界解析をはじめ、核燃料施設の臨界解析に使用されている。

(5) 検証

米国のバットル研究所 (パシフィック ノースウエスト研究所, PNL) で行われた臨界実験^{*1}の中から 16 種類の臨界体系をベンチマーク試験^{*2}として選び、検証を行った。

*1 S. R. Bierman and E. D. Clayton, “Criticality Experiments with Subcritical Clusters of 2.35 Wt% and 4.31 Wt% ²³⁵U Enriched UO₂ Rods in Water with Steel Reflecting Walls”, NUREG/CR-1784 (PNL-3602), U.S. Nuclear Regulatory Commission, April 1981.

*2 “International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments”, LEU-COMP-THERM-010, LEU-COMP-THERM-013, LEU-COMP-THERM-017, LEU-COMP-THERM-042, NEA/NSC/DOC(95)03, September 2009.

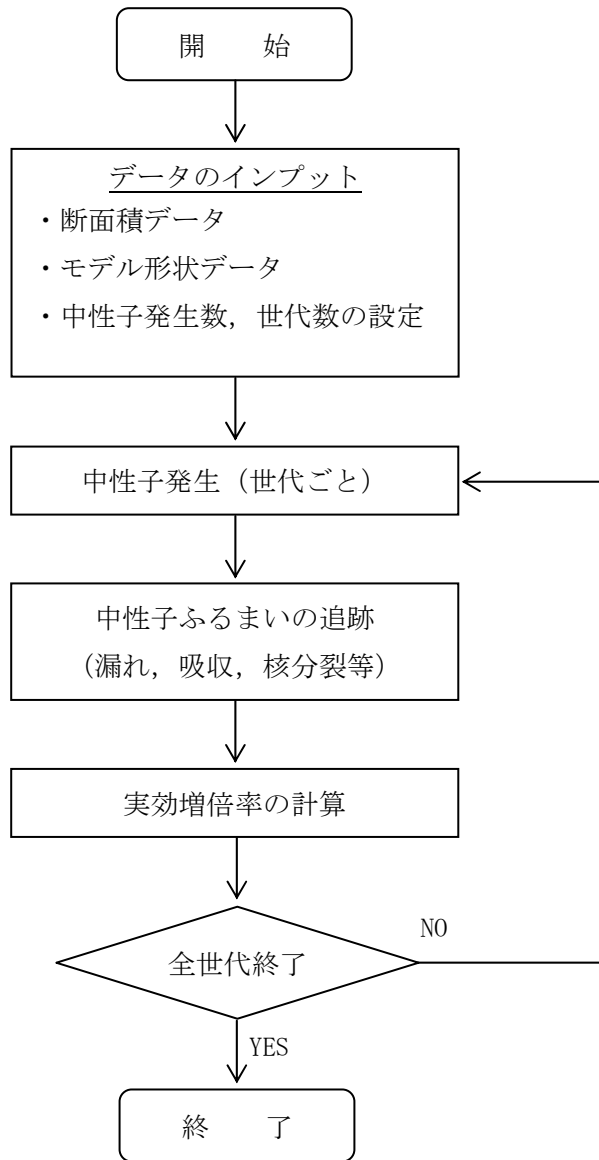


図-3 KENO-V.a コードの解析フロー図

使用済燃料貯蔵ラック（49 体）の耐震設計の基本方針

使用済燃料貯蔵ラック（49 体）の耐震設計は、次の基本方針に基づいて行う。

1. 設備の重要度による耐震クラス分類

耐震クラス	S
-------	---

2. 構造計画

主要区分	計画の概要		概要構造図	摘要
	基礎・支持構造物	主体構造		
(1) 使用済燃料貯蔵ラック (49体)	使用済燃料貯蔵ラック(49体)は、縦置型で共用ブーの床に置かれたコモンベース上に設置されラック取付ボルトで固定している。コモンベースは、共用ブール床に取り付けられてある基礎ボルトにより固定している。	ステンレス鋼製角形枠組構造		<ul style="list-style-type: none"> 使用済燃料貯蔵ラック (49体)

3. 設計用地震力

耐震クラス	設計用地震波	動的解析法	適用する地震動等		設計用地震力
			水平	鉛直	
S	基準地震動 S s	モーダル解析による 応答スペクトル法	S s	S s	水平地震力，鉛直地震力は動的解析により得られた地震力とする。

4. 荷重の組合せと許容限界

記号の説明

- D : 死荷重
- P_D : 地震と組合わすべきプラントの運転状態Ⅰ及びⅡ（運転状態Ⅲがある場合はこれを含む）における圧力荷重又は当該設備に設計上定められた最高使用圧力による荷重
- M_D : 地震と組合わすべきプラントの運転状態Ⅰ及びⅡ（運転状態Ⅲがある場合はこれを含む）における機械的荷重又は当該設備に設計上定められた機械的荷重
- S_s : 基準地震動 S_s により定まる地震力
- $f_t^{(注)}$: ボルト材以外の支持構造物に対しては設計・建設規格SSB-3121.1, ボルト材に対しては設計・建設規格SSB-3131により規定される供用状態A及びBでの許容引張応力
- $f_s^{(注)}$: ボルト材以外の支持構造物に対しては設計・建設規格SSB-3121.1, ボルト材に対しては設計・建設規格SSB-3131により規定される供用状態A及びBでの許容せん断応力
- $f_c^{(注)}$: ボルト材以外の支持構造物に対して設計・建設規格SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容圧縮応力
- $f_b^{(注)}$: ボルト材以外の支持構造物に対して設計・建設規格SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容曲げ応力
- $f_t^*, f_s^*, f_c^*, f_b^*$: 供用状態D s に対する許容応力算定に用いる応力であって、上記の f_t, f_s, f_c, f_b の値を算出する際、以下の読み替えを行って算出した値。その他の支持構造物の場合、下記（注）の S_y を $1.2S_y$ と読み替える。ただし、ステンレス鋼及び高ニッケル合金を除く。
- τ_b : 基礎ボルトに生じるせん断応力

（注）

クラス3支持構造物及びその他支持構造物に対する f_t, f_s, f_c, f_b の値の算出において、 F 値は次の値を用いる。

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

ただし、使用温度が40℃を超えるオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金にあつては、

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

ここで、

F : 許容応力算定用基準値、材料の許容応力を決定する場合の基準値

(1) 支持構造物

耐震クラス	荷重組合せ	共用状態	許容限界 (ボルト等以外)					許容限界 (ボルト等)			適用範囲
			一次応力					一次応力			
			引張	せん断	圧縮	曲げ	組合せ	引張	せん断	組合せ	
S	$D+P_D+M_D+Ss$	D s	$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$	$1.5f_c^*$	$1.5f_b^*$	$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$	$\text{Min}\{1.5f_t^*, (2.1f_t^* - 1.6\tau_b^*)\}$	<ul style="list-style-type: none"> • 使用済燃料貯蔵ラック (49 体) • ラック取付ボルト • 基礎ボルト • スペーサ • スペーサ下部支持部材 	

使用済燃料貯蔵ラック(49体)の耐震性についての計算書

1. 一般事項

本計算書は、使用済燃料貯蔵ラック(49体)(以下「ラック」という。)の耐震性についての計算方法と計算結果を示す。

1.1 計算条件

- (1) ラックは、使用済燃料共用プール(以下「共用プール」という。)の底部に基礎ボルトを介して据え付けられたコモンベース上にラック取付ボルトで固定されるものとする。
- (2) ラックの質量には、収納缶及びこれに収納されている使用済燃料の質量とラック自身の質量等を考慮する。
尚、49ヶ所の貯蔵セルのうち、中央のセル1ヶ所については、収納缶ではなく変形した使用済燃料を貯蔵するものとする。
- (3) 鉛直方向地震力と水平方向地震力は、同時に不利な方向に作用するものとする。
構造概要図を図1-1に示す。

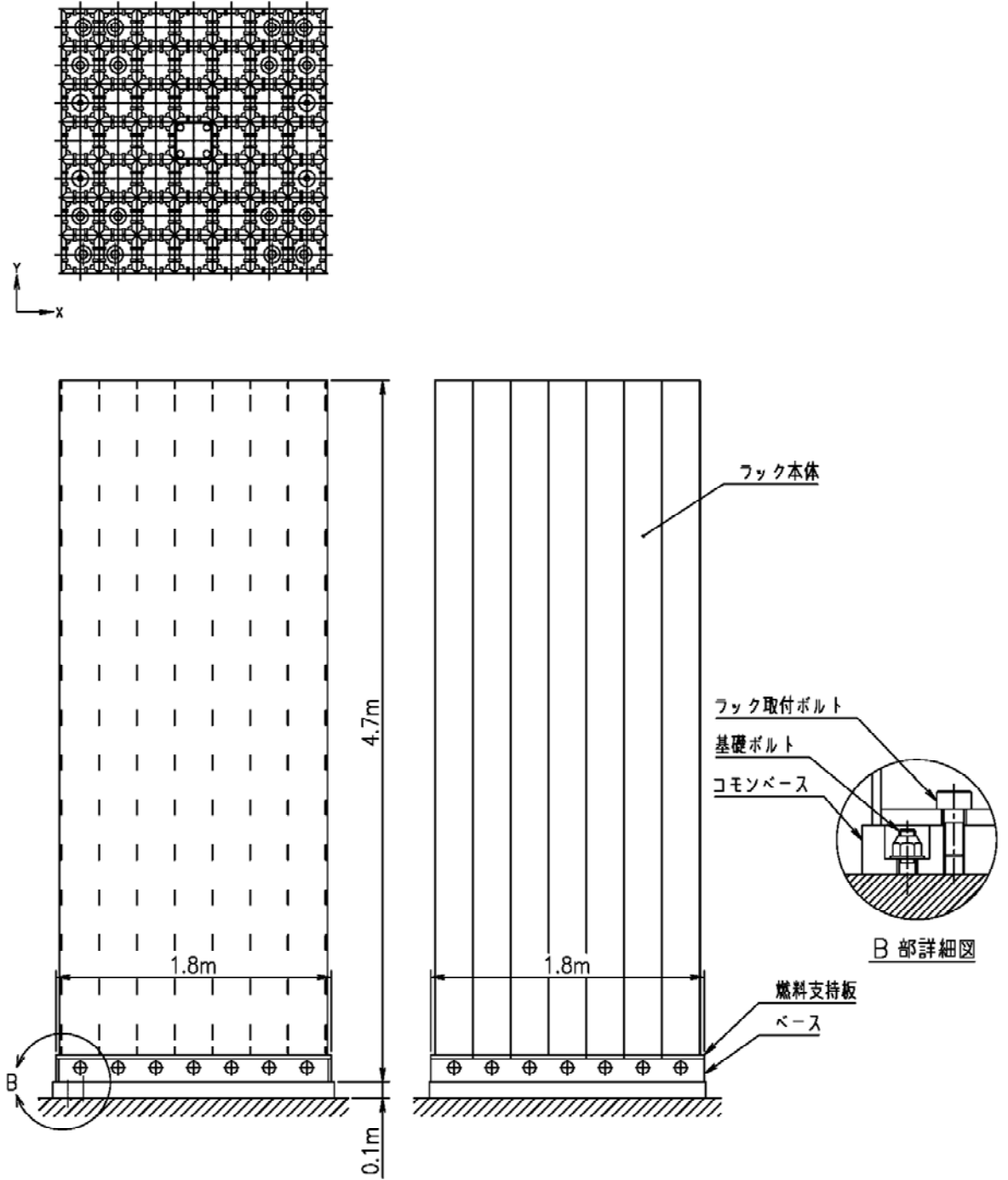


図 1 - 1 構造概要図 (使用済燃料貯蔵ラック (49 体))

1.2 記号の説明

記号	記号の説明	単位
A	スペーサ下部支持部材の断面積	mm ²
Ab	ラック取付ボルト又は基礎ボルトの軸断面積	mm ²
Af	圧縮フランジの断面積	mm ²
As	スペーサの面積	mm ²
CH	水平方向設計震度	—
Cv	鉛直方向設計震度	—
E	縦弾性係数	MPa
F*	設計・建設規格 SSB-3121.3 又は SSB-3133 に定める値	MPa
Fi	ベース又はコモンベース底部に作用するせん断力	N
fj	ベース又はコモンベース端から l_j の位置にあるラック取付ボルト又は基礎ボルトに作用する引張力（1本当り）	N
f _o	スペーサ下部支持部材の許容組合せ応力	MPa
f _{c b}	スペーサ下部支持部材の許容曲げ応力	MPa
f _c	スペーサの許容圧縮応力	MPa
f _s	部材の許容せん断応力	MPa
f _{sb}	せん断力のみを受けるラック取付ボルト又は基礎ボルトの許容せん断応力	MPa
f _{ss}	スペーサ下部支持部材の許容せん断応力	MPa
f _t	部材の許容引張応力	MPa
f _{to}	引張力のみを受けるラック取付ボルト又は基礎ボルトの許容引張応力	MPa
f _{ts}	引張力とせん断力を同時に受けるラック取付ボルト又は基礎ボルトの許容引張応力	MPa
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s ²
H	スペーサ下部支持部材の高さ	mm
L	支点間の距離	mm
L ₁	スペーサ下部支持部材とセル壁面との距離	mm
l _{ig}	ベース又はコモンベース端から重心までの距離	mm
l _j	ベース又はコモンベース端からラック取付ボルト又は基礎ボルトまでの距離	mm
M	曲げモーメント	N・mm
M _i	ベース又はコモンベース底部の転倒モーメント	N・mm
m	収納缶貯蔵時のラック全質量	kg

記号	記号の説明	単位
n	ラック取付ボルト又は基礎ボルトの全本数	—
n_j	ベース又はコモンベース端から l_j の位置にあるラック取付ボルト又は基礎ボルトの本数	—
P	スペーサおよびスペーサ下部支持部材への荷重	N
S_u	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表9に定める値	MPa
S_y	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に定める値	MPa
Z	スペーサ下部支持部材の断面係数	mm^3
Λ	スペーサの限界細長比	—
λ	スペーサの有効細長比	—
σ_0	スペーサ下部支持部材に生じる組合せ応力	MPa
σ_b	ラック取付ボルト又は基礎ボルトに生じる引張応力	MPa
σ_c	スペーサに生じる圧縮応力	MPa
σ_{cb}	スペーサ下部支持部材に生じる曲げ応力	MPa
σ_{fa}	部材に生じる組合せ応力	MPa
σ_x, σ_y	部材に生じる引張応力	MPa
τ_b	ラック取付ボルト又は基礎ボルトに生じるせん断応力	MPa
τ_s	スペーサ下部支持部材に作用するせん断応力	MPa
τ_{xy}	部材に生じるせん断応力	MPa

注記

- 1) 添字 i の意味は、以下のとおりとする。また、添字 j は 1 ～ 12 までの数字を示すものとする。

$i = X$: X方向

$i = Y$: Y方向

2. 計算方法

2.1 固有周期の計算方法

ラックはシェル要素を用いた有限要素モデルとする。

ラックの計算モデルを図 2-1 に示す。固有周期は、計算機コード「NASTRAN」を用いて求める。

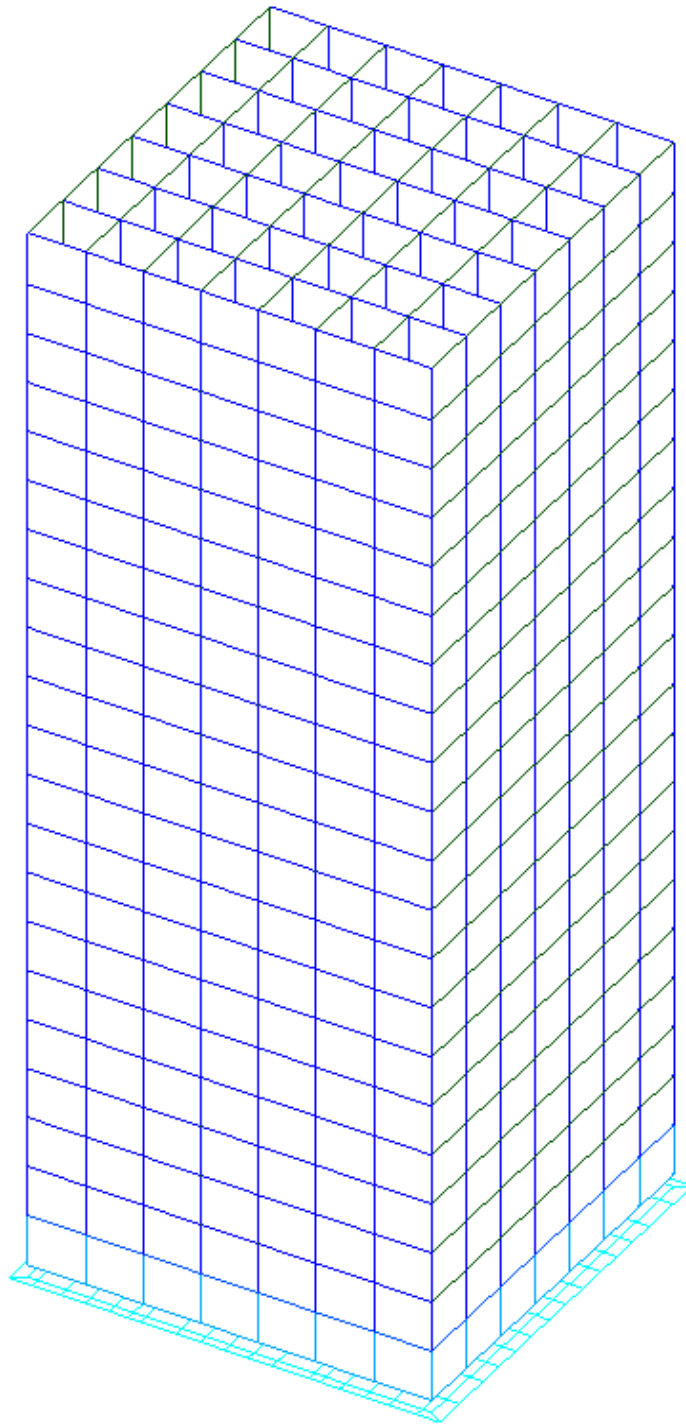


図 2 - 1 使用済燃料貯蔵ラック (49 体) 計算モデル

2.2 応力の計算方法

2.2.1 部材の応力

部材についての応力計算は、図2-1の計算モデルにて計算機コードを使用を行い、引張応力、せん断応力を求め、本項に示す計算方法に従って組合せ応力を計算する。

計算機コード内では、各部材の局所座標系及びせん断応力 τ_{xy} 、引張応力 σ_x 、 σ_y の作用する向きを、図2-2に示すように設定している。

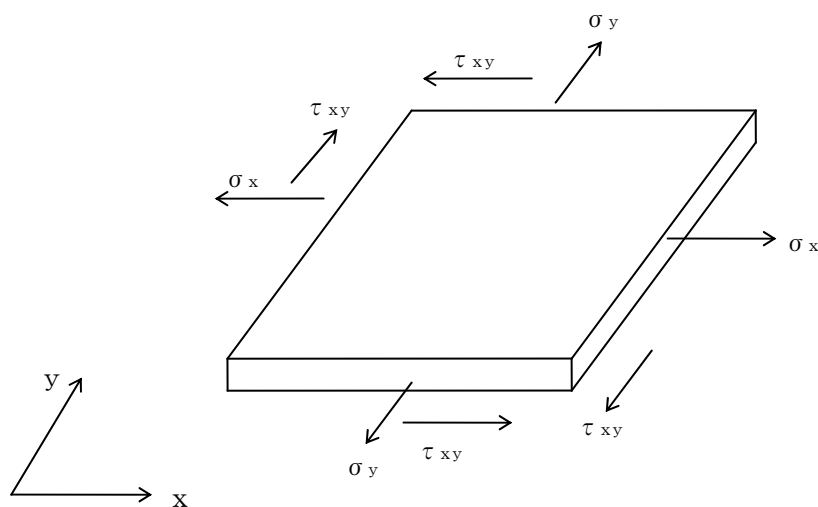


図2-2 部材の応力

各部材の組合せ応力 σ_{fa} は、上記で計算したせん断応力 τ_{xy} 、引張応力 σ_x 、 σ_y を用いて、次式より求める。

$$\sigma_{fa} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot \tau_{xy}^2}$$

2.2.2 ボルトの応力

図2-1の計算モデルにて荷重計算を計算機コードを使用して行い、求められた地震時にラックに作用する転倒モーメント M_x 及びベース底部に作用するせん断力 F_x が、ラックに図2-3のように負荷されるものとしてラック取付ボルトおよび基礎ボルトの応力を求める。

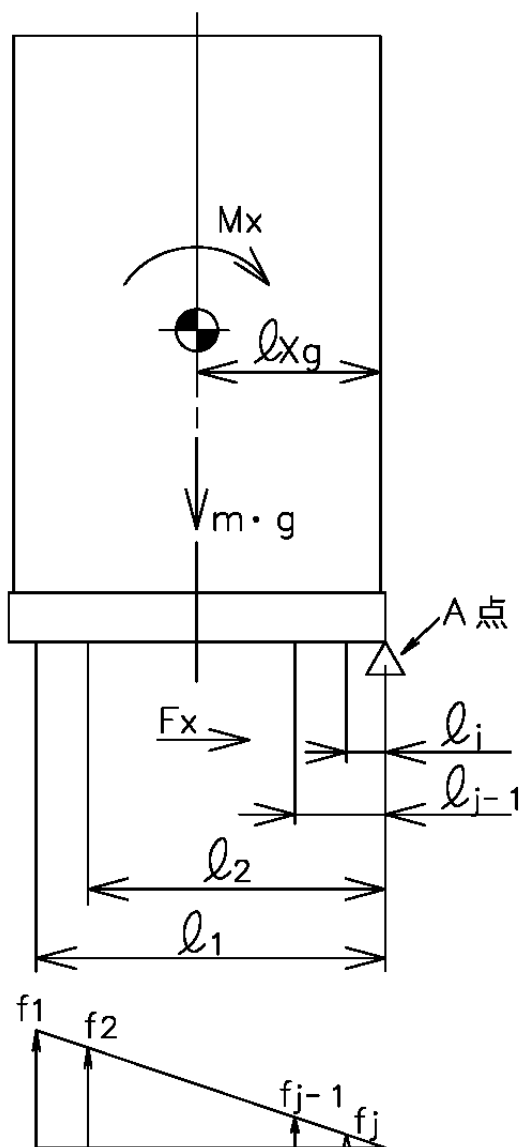


図2-3 ラック取付ボルトおよび基礎ボルトの応力

(1) 引張応力

A点まわりのモーメントの平衡によりラック取付ボルトおよび基礎ボルト1本当たりの引張力 f_j を求める。

$f_1 > f_2 > \dots > f_{j-1} > f_j$ の関係にあるので f_1 のみを求める。

$$f_1 = \frac{l_1(M_x - (1 - C_v) \cdot m \cdot g \cdot l_{xg})}{n_1 \cdot l_1^2 + n_2 \cdot l_2^2 + \dots + n_{j-1} \cdot l_{j-1}^2 + n_j \cdot l_j^2}$$

引張力 f_1 によりラック取付ボルトおよび基礎ボルトに生じる引張応力 σ_b は、次式により求める。

$$\sigma_b = \frac{f_1}{A_b}$$

ただし、 f_1 の値が負のときはラック取付ボルトおよび基礎ボルトに引張力が生じないので、引張応力の計算は行わない。

(2) せん断応力

ラック取付ボルトおよび基礎ボルトに対するせん断力はボルト全本数で受けるものとして計算する。

せん断力 F_x によりラック取付ボルトおよび基礎ボルトに生じるせん断応力 τ_b は、次式により求める。

$$\tau_b = \frac{F_x}{n \cdot A_b}$$

2.2.3 スペーサ及びスペーサ下部支持部材の応力

使用済燃料貯蔵ラック(49体)セル内の上下端に取付けるスペーサおよびスペーサ下部支持部材の条件は図2-4のa部もしくはa'部のどちらかに属すると考えられる。

a部とa'部の部位を比較すると、図2-4の矢印方向から荷重を受けたとき、a'部は隣り合うセルのスペーサおよびスペーサ下部支持部材も強度部材として寄与するが、a部は隣り合うセルが無いいため、a'部に比べ、強度上不利である。

したがって、代表してa部を評価する。

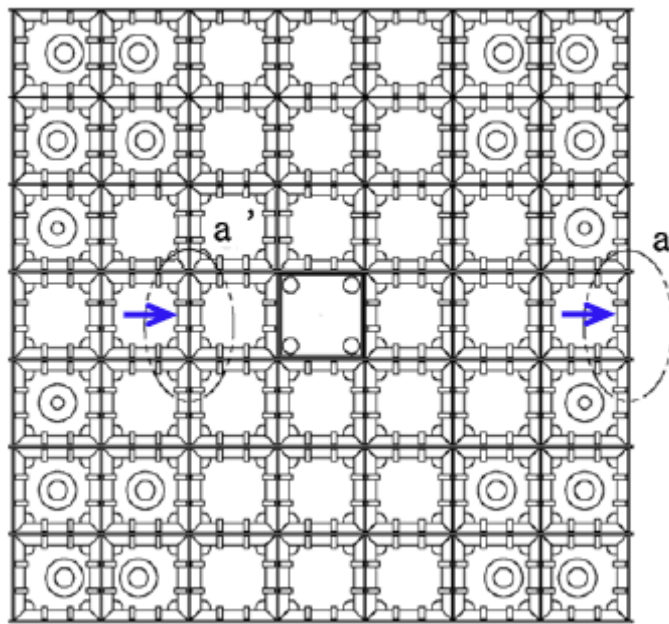


図2-4 使用済燃料貯蔵ラック(49体)上面図

(1) 作用荷重

収納缶に働く地震力が、セル1面の上下部スペーサ部に作用するものとする。

$$P = \frac{1}{4} \cdot C_H \cdot m \cdot g$$

(2) スペーサに生じる圧縮応力

$$\sigma_c = \frac{P}{A_s}$$

(3) スペーサ下部支持部材に生じる曲げ応力

$$M = P \cdot L_1$$

$$\sigma_{cb} = \frac{M}{Z}$$

(4) スペーサ下部支持部材に生じるせん断応力

$$\tau_s = \frac{P}{A}$$

(5) スペーサ下部支持部材に生じる組合せ応力

$$\sigma_0 = \sqrt{\sigma_{cb}^2 + 3 \cdot \tau_s^2}$$

3. 評価方法

3.1 固有周期の評価

2.1 項で求めた固有周期から「添付資料－9 別添－2 使用済燃料貯蔵ラック（49 体）の耐震設計の基本方針」に基づき、水平方向設計震度を求める。

3.2 応力の評価

3.2.1 部材の応力評価

2.2.1 項で求めた各部材の引張応力 σ_x 、 σ_y 及び組合せ応力 σ_{fa} が、許容引張応力 f_t 以下であること。

また、2.2.1 項で求めた各部材のせん断応力 τ_{xy} が、許容せん断応力 f_s 以下であること。

ただし、 f_t 及び f_s は下表による。

地震力の種類	基準地震動 S_s
許容引張応力 f_t	$\frac{F^*}{1.5} \cdot 1.5$
許容せん断応力 f_s	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

3.2.2 ラック取付ボルト及び基礎ボルトの応力評価

2.2.2 項で求めたラック取付ボルト及び基礎ボルトの引張応力 σ_b が、次式より求めた許容引張応力 f_{ts} 以下であること。

また、2.2.2 項で求めたラック取付ボルト及び基礎ボルトのせん断応力 τ_b が、せん断力のみを受けるボルトの許容せん断応力 f_{sb} 以下であること。

$$f_{ts} = 1.4 f_{to} - 1.6 \tau_b$$

かつ、

$$f_{ts} \leq f_{to}$$

ただし、 f_{to} 及び f_{sb} は下表による。

地震力の種類	基準地震動 S_s
許容引張応力 f_{to}	$\frac{F^*}{2} \cdot 1.5$
許容せん断応力 f_{sb}	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

3.2.3 スペーサおよびスペーサ下部支持部材の応力評価

2.2.3 項で求めたスペーサの圧縮応力が次式で求めた許容圧縮応力 f_c 以下であること。2.2.3 項で求めたスペーサ下部支持部材に生じる曲げ応力，せん断応力，組合せ応力がそれぞれ，次式で求めた許容曲げ応力 f_{cb} ，許容せん断応力 f_{ss} ，許容組合せ応力 f_o 以下であること。

地震力の種類	基準地震動 S_s
許容圧縮応力 f_c	$\left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F^*}{\nu} \times 1.5$
許容曲げ応力 f_{cb}	$\min \left\{ 1.5 \times \frac{0.433 \cdot E \cdot Af}{L \cdot H}, 1.5 \times \frac{F^*}{1.5} \right\}$
許容せん断応力 f_{ss}	$1.5 \times \frac{F^*}{1.5\sqrt{3}}$
許容組合せ応力 f_o	$1.5 \times \frac{F^*}{1.5}$

4. 評価条件

機器名称	耐震設計上の重要度分類	据付場所及び床面高さ (m)	次数	基準地震動 S_s		最高使用温度 (°C)	周囲環境温度 (°C)
				水平方向 ^{*5} 設計震度	鉛直方向設計震度		
使用済燃料貯蔵ラック (49 体)	S	運用補助共用施設 O.P. 8.7 ^{*1}	1 次	*2	$C_v = 0.49$	66	—
			2 次	*3			
			3 次	*4			

注記 *1：基準床レベルを示す。

*2：基準地震動 S_s に基づく動的解析より得られる応答値（1 次固有周期： $C_H = 0.84$ ）

*3：基準地震動 S_s に基づく動的解析より得られる応答値（2 次固有周期： $C_H = 0.89$ ）

*4：基準地震動 S_s に基づく動的解析より得られる応答値（3 次固有周期： $C_H = 0.89$ ）

*5：基準地震動 S_s により定まる動的震度（ $C_H = 0.67$ ）についても考慮する。

5. 評価結果

(1) 部材に生じる応力

(単位：MPa)

ラック	部 材	材 料	応 力	基準地震動 S_s	
				算出応力	許容応力
使用済燃料貯蔵 ラック (49 体)	ラック本体	SUS304	組合せ	$\sigma_{fa} = 29$	$f_t = 205$

許容応力以下である。

(2) ラック取付ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

ラック	部 材	材 料	応 力	基準地震動 S_s	
				算出応力	許容応力
使用済燃料貯蔵 ラック (49 体)	ラック 取付ボルト	SUS630 H1150	引張り	$\sigma_b = 33$	$f_{ts} = 455$

許容応力以下である。

(3) 基礎ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

ラック	部 材	材 料	応 力	基準地震動 S_s	
				算出応力	許容応力
使用済燃料貯蔵 ラック (49 体)	基礎ボルト	SUS630 H1150	引張り	$\sigma_b = 63$	$f_{ts} = 455$

許容応力以下である。

(4) スペーサおよびスペーサ下部支持部材に生じる応力

(単位：MPa)

ラック	部 材	材 料	応 力	基準地震動 S_s	
				算出応力	許容応力
使用済燃料貯蔵 ラック (49 体)	スペーサ	SUS304	圧縮	$\sigma_c = 2$	$f_c = 200$
	スペーサ 下部支持部材	SUS304	組合せ	$\sigma_o = 23$	$f_o = 205$

許容応力以下である。

参考資料

参考 計算機コード「NASTRAN」の概要

1. 一般事項

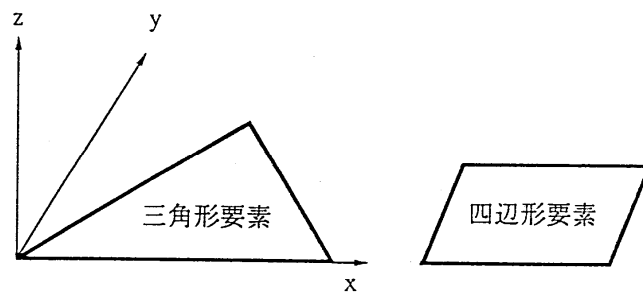
米国NASA (National Aeronautics and Space Administration)作成の有限要素法による構造解析用汎用計算機コード「NASTRAN」の概要である。

2. 本計算機コードの特徴

(1) 適用範囲が広く、以下の問題を解析できる。

- 静的構造問題
- 弾性安定問題
- 動的構造問題
- 熱伝導問題
- マトリックス問題一般

(2) 多くの要素が用意されており、種々のタイプの構造物の解析を行うことができる。



(3) 多自由度を有する大規模問題を効率よく解析することができる。

(4) 大規模問題を取り扱うために、入力データが簡単化されている。

(5) プロットINGの機能が準備されており、モデルの確認、解析結果の図形処理を簡単に行うことができる。

(6) 解析する座標系、拘束方法は、取り扱う問題にあったものを選ぶことができる。

3. 理論式

3.1有限要素法による評価

有限要素法による評価は、次の手順で行われる。

- (1) 要素内の変位を仮定し、節点変位を使って要素内任意点の変位を表現する。

$$\{u\} = [N]\{u_e\} \quad (3.1)$$

ここで、

- $\{u\}$: 要素内任意点の変位
 $[N]$: 形状関数マトリックス
 $\{u_e\}$: 節点変位

- (2) 上記の変位を微分して、要素内任意点のひずみを節点変位により表す。

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u_e\} \quad (3.2)$$

ここで、

- $\{\varepsilon\}$: 要素内任意点のひずみ
 $[B]$: ひずみマトリックス

- (3) 材料物性から求められる応力とひずみの関係式 ((3.3)式参照) より定められる弾性係数マトリックスを用いて、要素剛性マトリックスを (3.4) 式により計算する。

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (3.3)$$

$$[K] = \int [B]^T [D] [B] dvol \quad (3.4)$$

ここで、

- $\{\sigma\}$: 要素内任意点の応力
 $[D]$: 弾性係数マトリックス
 $[K]$: 要素剛性マトリックス

- (4) 全体の剛性マトリックスを要素剛性マトリックスの重ね合わせによって求め、力の釣合いより静的変位は(3.5)式、また動の変位は(3.6)式より求める。

$$\{f\} = [k]\{\gamma\} \quad (3.5)$$

$$\{f\} = [m]\{\ddot{\gamma}\} + [k]\{\gamma\} \quad (3.6)$$

ここで、

- $\{f\}$: 荷重ベクトル
 $\{\gamma\}$: 構造全体の変位

$$= \begin{Bmatrix} u_{e1} \\ u_{e2} \\ \vdots \\ u_{en} \end{Bmatrix}$$

$u_{e1}, u_{e2}, \dots, u_{en}$: 各節点の節点変位

[m] : 質量マトリックス

[k] : 剛性マトリックス

(5) 変位が求めれば, (3.2) 式, (3.3) 式より各要素の応力が求められる。

以上が有限要素法の評価手順であるが, この中で要素剛性マトリックスの算定及び動的解析における運動方程式の解法等の詳細について以下に述べる。

3.2 要素剛性マトリックスの算定

3.2.1 座標変換

解析で用いている要素は, 平面応力 (面内) 及び板の曲げ (面外) を考慮したシェル要素で, 各節点における変位成分は面内 2 方向 (u, v), 面外 1 方向 (w) 及び回転 2 方向 (α , β) の合計 5 つであり, 部材剛性は面内方向及び面外方向をそれぞれ独立に加算して求めるとともに, 算定に当たっては図 3-1 に示すような次の座標変換を行う。

$$\begin{aligned} x &= N_1 \cdot x_1 + N_2 \cdot x_2 + N_3 \cdot x_3 + N_4 \cdot x_4 \\ y &= N_1 \cdot y_1 + N_2 \cdot y_2 + N_3 \cdot y_3 + N_4 \cdot y_4 \end{aligned} \quad (3.7)$$

ここで,

$$N_1 = \frac{1}{4} \cdot (1 - \xi) \cdot (1 - \eta)$$

$$N_2 = \frac{1}{4} \cdot (1 + \xi) \cdot (1 - \eta)$$

$$N_3 = \frac{1}{4} \cdot (1 + \xi) \cdot (1 + \eta)$$

$$N_4 = \frac{1}{4} \cdot (1 - \xi) \cdot (1 + \eta)$$

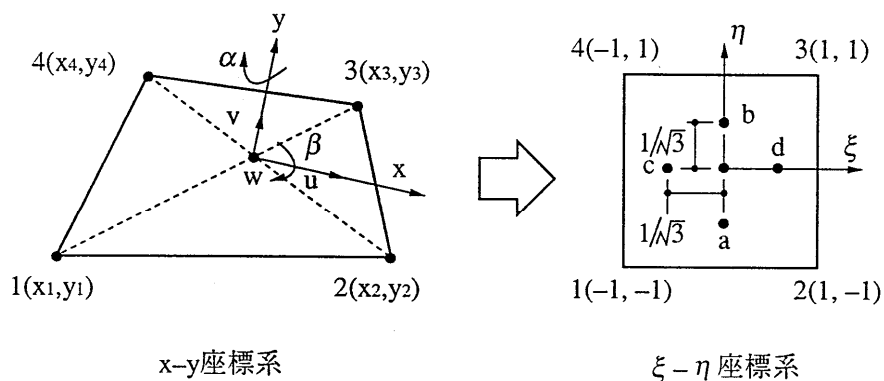


図 3 - 1 座標系

3.2.2 面内剛性の計算

要素内任意点の変位を、図 3-1 で示した (ξ, η) と節点変位を使って次のように仮定する。

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \mathbf{N}_1 \cdot \mathbf{u}_1 + \mathbf{N}_2 \cdot \mathbf{u}_2 + \mathbf{N}_3 \cdot \mathbf{u}_3 + \mathbf{N}_4 \cdot \mathbf{u}_4 \\ \mathbf{v} &= \mathbf{N}_1 \cdot \mathbf{v}_1 + \mathbf{N}_2 \cdot \mathbf{v}_2 + \mathbf{N}_3 \cdot \mathbf{v}_3 + \mathbf{N}_4 \cdot \mathbf{v}_4 \end{aligned} \quad (3.8)$$

すなわち、次のようになる。

$$\{\mathbf{u}^m\} = [\mathbf{N}^m] \{\mathbf{u}_e^m\} \quad (3.9)$$

(3.8)式を用いて要素内任意点のひずみを次のように求め、面内応力に対するひずみマトリックス $[\mathbf{B}^m]$ を求める。

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}^m\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} \\ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial y} \\ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x} \end{Bmatrix} = [\mathbf{B}^m] \{\mathbf{u}_e^m\} \quad (3.10)$$

一方、面内応力に対する応力とひずみの関係は次のように表される。

$$\{\boldsymbol{\sigma}^m\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [\mathbf{D}^m] \{\boldsymbol{\varepsilon}^m\} \quad (3.11)$$

ここで、

E : 縦弾性係数

ν : ポアソン比

したがって、面内応力に対する要素剛性マトリックス $[\mathbf{K}_m]$ は次のように計算される。

$$[\mathbf{K}_m] = \int [\mathbf{B}^m]^T [\mathbf{D}^m] [\mathbf{B}^m] \, d\text{vol} \quad (3.12)$$

3.2.3 面外剛性の計算

面外剛性は、面外曲げに対するものと面外せん断に対するものをそれぞれ別個に計算して求める。

(1) 面外曲げ剛性の計算

要素内任意点の面外方向変位 (w) と回転角 (α, β) を図 3-1 に示す ξ - η 座標系で次のように仮定する。

$$\begin{aligned} w &= w_{00} + w_{10} \cdot \xi + w_{01} \cdot \eta + w_{11} \cdot \xi \cdot \eta \\ \alpha &= \alpha_{00} + \alpha_{10} \cdot \xi + \alpha_{01} \cdot \eta + \alpha_{11} \cdot \xi \cdot \eta \\ \beta &= \beta_{00} + \beta_{10} \cdot \xi + \beta_{01} \cdot \eta + \beta_{11} \cdot \xi \cdot \eta \end{aligned} \quad (3.13)$$

ここで、

$$w_{00} \sim w_{11}, \alpha_{00} \sim \alpha_{11}, \beta_{00} \sim \beta_{11} : \text{未定係数}$$

四辺形の各節点の (ξ, η) を (3.13) 式に代入することによって、要素内任意点の面外方向変位及び回転角は、(ξ, η) と節点変位を使って表されることになる。面外曲げに対するひずみマトリックス $[B^b]$ を次のように求める。

$$\{\varepsilon^b\} = \begin{Bmatrix} x_x \\ x_y \\ x_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \alpha}{\partial x} \\ \frac{\partial \beta}{\partial y} \\ \frac{\partial \alpha}{\partial y} + \frac{\partial \beta}{\partial x} \end{Bmatrix} = [B^b] \{u_e^b\} \quad (3.14)$$

一方、面外曲げ応力に対する応力とひずみの関係は次のように表される。

$$\{\sigma^b\} = \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \begin{Bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} x_x \\ x_y \\ x_{xy} \end{Bmatrix} = [D^b] \{\varepsilon^b\} \quad (3.15)$$

ここで、

t : 板厚

したがって、面外曲げ応力に対する要素剛性マトリックス $[K_b]$ は次のように

計算される。

$$[K_b] = \int [B^b]^T [D^b] [B^b] \, dvol \quad (3.16)$$

(2) 面外せん断剛性の計算

x 方向のせん断ひずみを図 3-1 の a, b 点で, y 方向を c, d 点で代表させることとする。せん断ひずみを次のように定義し, これに(3.13)式を代入すると節点変位によりせん断ひずみが表され, ひずみマトリックス $[B^s]$ を求める。

$$\{\varepsilon^s\} = \begin{Bmatrix} y_x \\ y_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial w}{\partial x} - \alpha \\ \frac{\partial w}{\partial y} - \beta \end{Bmatrix} = [B^s] \{u_e^s\} \quad (3.17)$$

一方, 面外せん断応力に対する応力とひずみの関係は次のように表される。

$$\{\sigma^s\} = \frac{G}{1.2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_x \\ y_y \end{Bmatrix} = [D^s] \{\varepsilon^s\} \quad (3.18)$$

ここで,

G : せん断弾性係数

したがって, 面外せん断応力に対する要素剛性マトリックス $[K_s]$ は次のように計算される。

$$[K_s] = \int [B^s]^T [D^s] [B^s] \, dvol \quad (3.19)$$

3.3 動的解析

有限要素法による構造物の動的解析は(3.6)式の運動方程式を基本としている。

しかし、実際の構造物では常に減衰がある。有限要素系にも減衰力を導入する。減衰力が速度に比例する場合には粘性減衰といわれる。

この場合の運動方程式は減衰マトリックスを[c]とすれば、

$$[m]\{\ddot{\gamma}\} + [c]\{\dot{\gamma}\} + [k]\{\gamma\} = \{R(t)\} \quad (3.20)$$

となる。ただし、

$\{R(t)\}$: 時間に依存する外力

$\{\gamma\}$: 構造全体の変位

3.3.1 固有振動数解析

拘束のある構造物の自由振動を考える。減衰がない場合の運動方程式は、

$$[m]\{\ddot{\gamma}\} + [k]\{\gamma\} = \{0\} \quad (3.21)$$

自由振動は調和振動であるから $\{\gamma\}$ は、

$$\{\gamma\} = \{x\}e^{i\omega t} \quad (3.22)$$

$\{x\}$: 変位 $\{\gamma\}$ の振幅 (mode)

ω : 円振動数

(3.21)式に(3.22)式を代入すると、

$$(-\omega^2 [m] + [k])\{x\}e^{i\omega t} = \{0\} \quad (3.23)$$

又は、

$$([k] - \omega^2 [m]) \{x\} = \{0\} \quad (3.24)$$

$$[k] \{x\} = \omega^2 [m] \{x\} \quad (3.25)$$

となる。この式は固有値問題にほかならない。

NASTRANには固有値の解法として種々の方法が準備されている。

例えば、インバースパワー法(inverse power method)等がある。

インバースパワー法は大次元のマトリックスで小数の固有値を求める場合に有効である。

3.3.2 運動方程式の解法（モーダル解析）

モーダル解析(modal analysis)は複雑な構造物の全体の運動が非連成な1自由度の運動の重ね合わせであると考える点に基礎をおいている。この方法は大次元の連成微分方程式を直接解くよりもはるかに経済的であり、有効な方法として広く採用されている。

構造全体の変位 $\{\gamma\}$ を構造が有している固有モードの1次結合と仮定する。

$$\{\gamma\} = [\mathbf{X}]\{q\} \quad (3.26)$$

ただし、

$$[\mathbf{X}] = [x_1, x_2, \dots, x_n]$$

x_i : i 次のモード

$$\{q\} = [q_1, q_2, \dots, q_n]$$

q_i : i 次のモード x_i の重みを決定する係数

(3.20)式に(3.26)式を代入すると、

$$[\mathbf{m}][\mathbf{X}]\{\ddot{q}\} + [\mathbf{c}][\mathbf{X}]\{\dot{q}\} + [\mathbf{k}][\mathbf{X}]\{q\} = \{\mathbf{R}(t)\} \quad (3.27)$$

さらに、左から $[\mathbf{X}]^T$ を掛けると、

$$[\mathbf{X}]^T[\mathbf{m}][\mathbf{X}]\{\ddot{q}\} + [\mathbf{X}]^T[\mathbf{c}][\mathbf{X}]\{\dot{q}\} + [\mathbf{X}]^T[\mathbf{k}][\mathbf{X}]\{q\} = [\mathbf{X}]^T\{\mathbf{R}(t)\} \quad (3.28)$$

(3.25)式より、

$$[\mathbf{X}]^T[\mathbf{k}][\mathbf{X}] = [\omega^2][\mathbf{X}]^T[\mathbf{m}][\mathbf{X}] \quad (3.29)$$

と表される。ただし、

$$[\omega^2] = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & & 0 \\ & \omega_2^2 & \\ 0 & & \omega_n^2 \end{bmatrix}$$

また、

$$[\mathbf{X}]^T[\mathbf{c}][\mathbf{X}] = 2[\mathbf{h}][\omega][\mathbf{X}]^T[\mathbf{m}][\mathbf{X}] \quad (3.30)$$

となると仮定する。ただし、

$$[\mathbf{h}] = \begin{bmatrix} h_1 & & 0 \\ & h_2 & \\ 0 & & h_n \end{bmatrix}, \quad [\omega] = \begin{bmatrix} \omega_1 & & 0 \\ & \omega_2 & \\ 0 & & \omega_n \end{bmatrix}$$

h_i : i 次のモードに対する減衰比

(3.28)式に(3.29)式, (3.30)式を代入すると,

$$\begin{aligned} [X]^T [m][X]\{\ddot{q}\} + 2[h][\omega][X]^T [m][X]\{\dot{q}\} \\ + [\omega^2][X]^T [m][X]\{q\} = [X]^T \{R(t)\} \end{aligned} \quad (3.31)$$

となる。

ここで, モードの直交性により,

$$\begin{aligned} \{x_i\}^T [m] \{x_j\} &= 1.0 \quad (i=j) \\ \{x_i\}^T [m] \{x_j\} &= 0.0 \quad (i \neq j) \end{aligned} \quad (3.32)$$

(3.31)式は(3.32)式を適用することによって各々独立な n 個の運動方程式 (非連成) になる。

$$\ddot{q}_i + 2 \cdot h_i \cdot \omega_i \cdot \dot{q}_i + \omega_i^2 \cdot q_i = P_i(t) \quad (3.33)$$

ただし,

$$i = 1 \sim n$$

$$P_i(t) = \{x_i\}^T \{R(t)\}$$

(3.33)式を各々解けば, 各モード x_i の重みを決定する q_i が個々に求まり, さらにこれを(3.26)式に代入すれば構造全体の変位 $\{\gamma\}$ が求められる。

4. 解析フローチャート

本計算機コードの解析フローチャートを図4-1に示す。

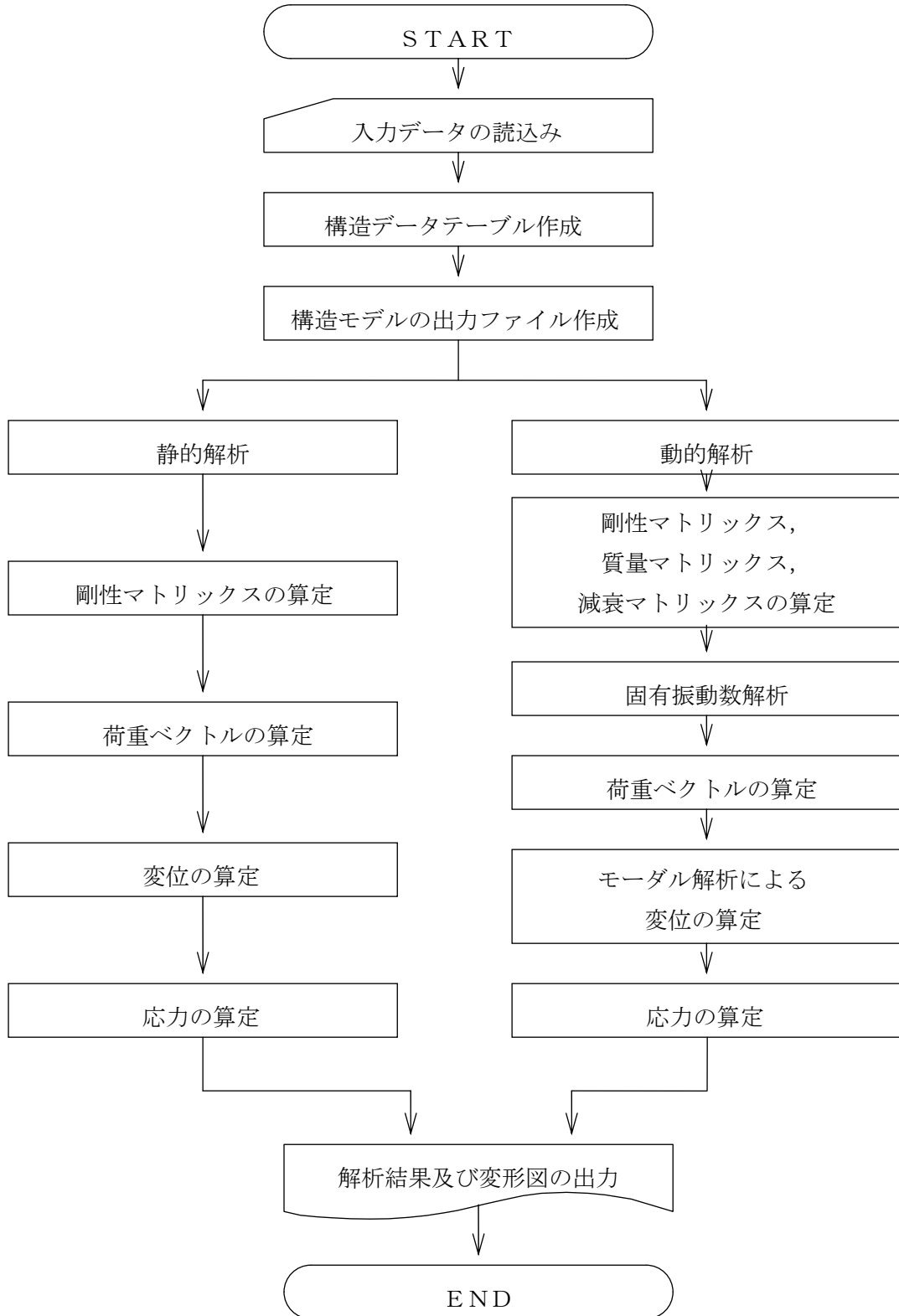


図4-1 解析フローチャート

使用済燃料貯蔵ラック(49体)設置後の使用済燃料共用プールの水深の遮へい能力に関する
説明書

1.1 概要

使用済燃料共用プールの使用済燃料貯蔵ラック(49体)の設置に伴い、設置後の使用済燃料共用プールの水深の遮へい能力について以下に示す。

放射線業務従事者等の立入る可能性のある区域の線量率については、表-1の設計基準が達成されるように遮へい設計を実施するものとする。遮へい設計の区分について表-1に示す。

表-1 基準線量率

区 分		設計基準線量率
非管理区域	A	0.006mSv/h 以下
管理区域	B	0.01mSv/h 以下
	C	0.06mSv/h 以下
	D	0.12mSv/h 以下
	E	0.5mSv/h 以下
	F	0.5mSv/h より大

ただし、立入りに対する制限は、線量率、作業時間、個人の線量等を考慮して定める。

1.2 使用済燃料共用プールの線源強度

使用済燃料共用プールの線源強度として、ラックに収納されている使用済燃料を線源として考える。使用済燃料の照射時間は 1×10^6 時間とし、原子炉停止後 1×10^4 時間経過したものが全てのラックに収納されているものとする。なお、原子炉運転中における燃料集合体1体あたりの出力は4.3MWとする。

使用済燃料の線源強度について、表-2に示す。

表-2 使用済燃料の線源強度

ガンマ線エネルギー (MeV)	線源強度 (MeV/(W・s))
1.0	1.2×10^9
2.0	3.6×10^6
3.0	6.4×10^6

※1 REACTOR HANDBOOK Vol. III Part B より

これより、各ガンマ線エネルギーの単位体積あたりの線源強度Sは次式により求められる。

$$S (s^{-1} \cdot mm^{-3}) = \frac{\text{線源強度 (MeV/(W \cdot s))} \times \text{燃料集合体 1 体あたりの出力 (W)}}{\text{各ガンマ線エネルギー (MeV)} \times \text{燃料集合体 1 体あたりの線源領域体積 (mm}^3\text{)}}$$

1.3 評価方法

前項の線源強度から、図-1 に示す評価点における線量率を計算機コード「QAD-CGGP2R」(概要を参考資料に示す。)を用いて計算する。

なお、遮へい計算に用いる前提条件は以下のとおりとする。

- 線源形状は、ラック配置面積、燃料有効長より算出した直方体モデルとする。なお、ラックによる遮へい効果は考慮しない。
- 線量率の評価点は、直方体モデルの中心位置延長上とする。計算モデルを図-2 に示す。

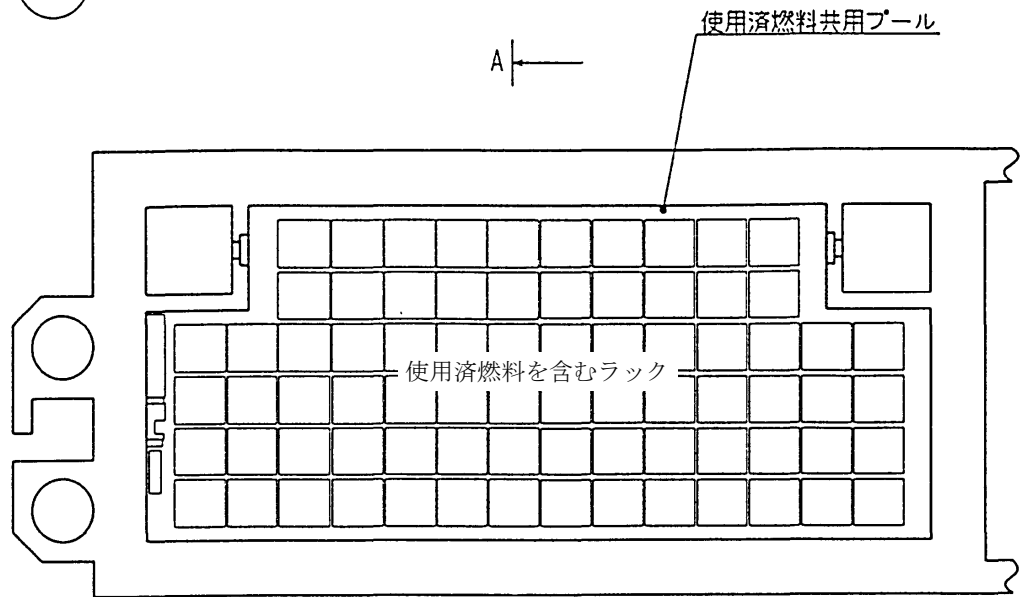
1.4 評価結果

計算結果について表-3 に示す。評価点における線量率は、当該区分に対する基準値を満足しており、水深の遮へい能力は十分確保される。

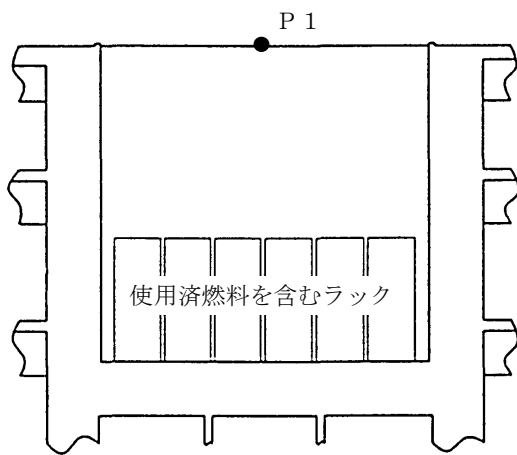
表-3 計算結果

評価点	区分	線量率 (mSv/h)
P1 (プール水面)	F	1.0×10^{-8}

P.N. 

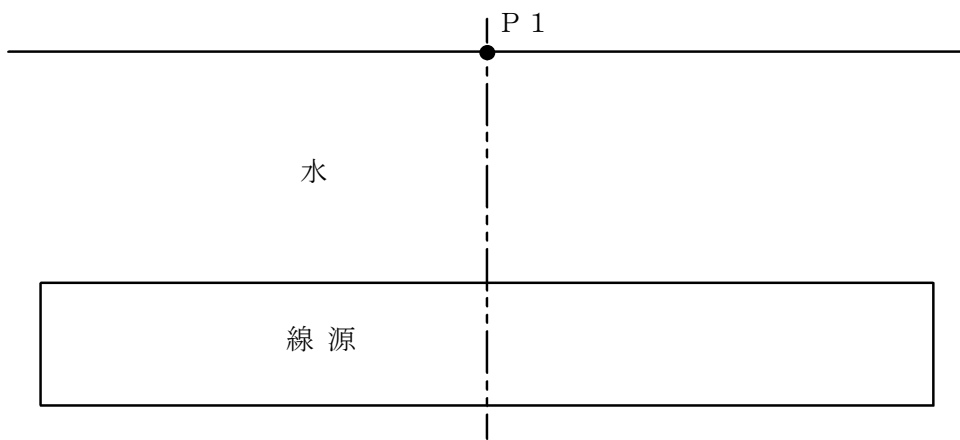
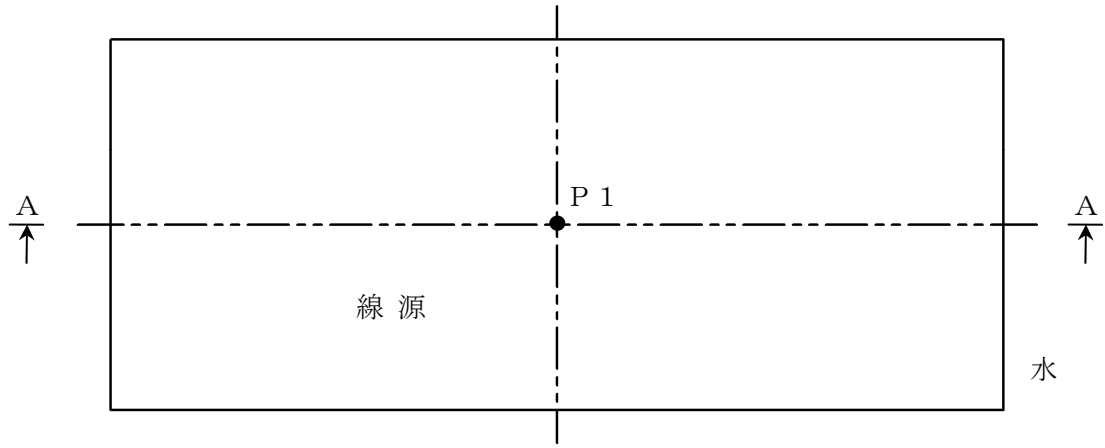


A-A




A-A断面

図-1 評価点



A-A断面

 計算に用いた線源

※1 評価においては、高さを使用済燃料の有効長とし、縦、横を使用済燃料貯蔵ラック設置エリアを包含する寸法とした直方体を線源として考慮する。

図-2 計算モデル (評価点P 1)

計算機コード「QAD-CGGP2R」の概要

(1) 概要

QAD-CGGP2Rコードは、米国ロスアラモス国立研究所で開発された、ガンマ線の物質透過を計算するための点減衰核積分コード「QAD」をベースとし、日本原子力研究所がICRP1990年勧告の国内関連法令・規則への取入れに合わせて、実効線量を計算できるように改良した汎用遮へい解析コードである。

(2) 機能

QAD-CGGP2Rコードは、遮へい解析に際して以下の機能を有する。

- 線源を直方体，円筒，球の形状に構成できる。
- 任意の遮へい体で構成される体系のガンマ線実効線量率を計算する。

(3) 使用実績

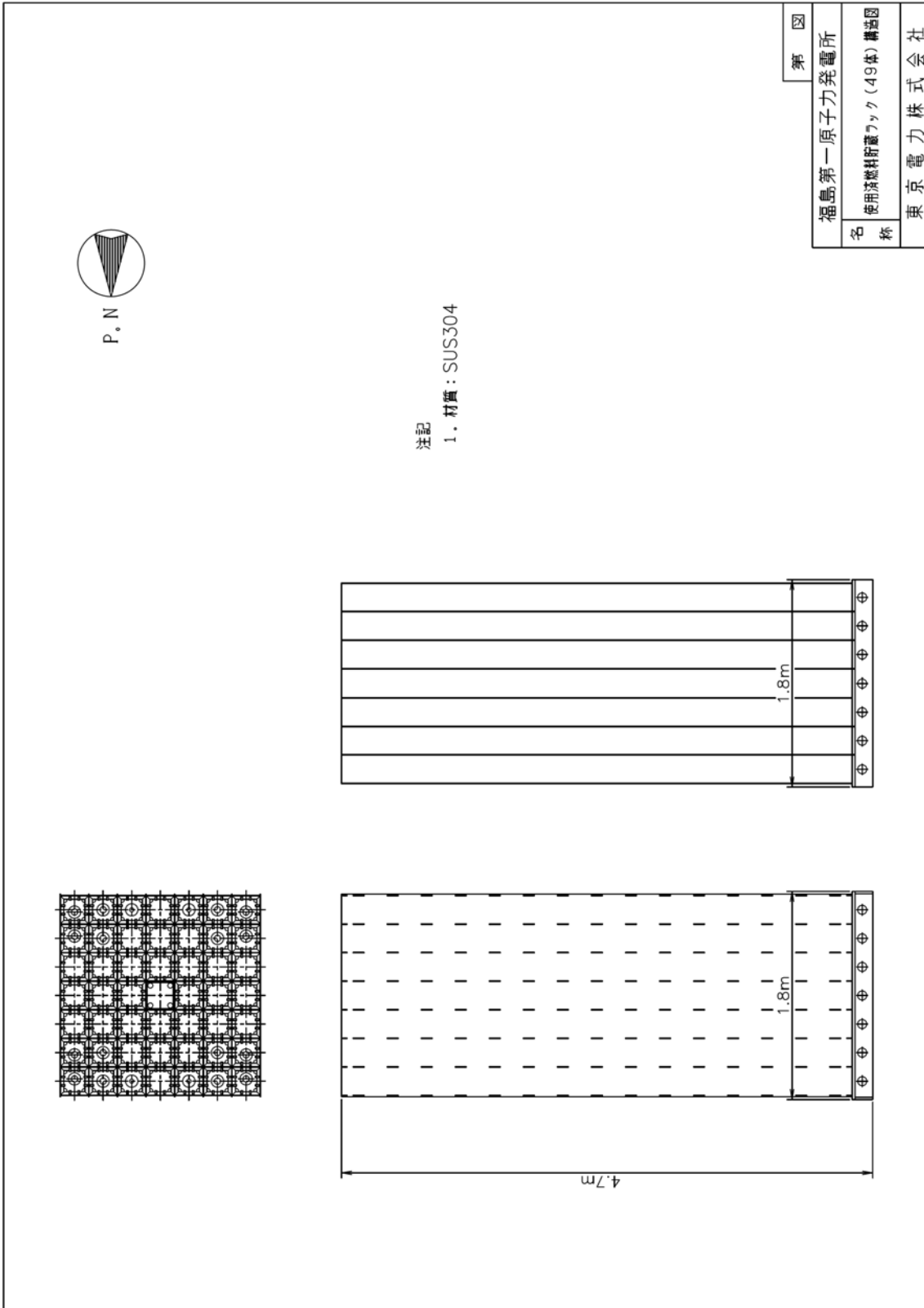
QAD-CGGP2Rコードは、使用済燃料貯蔵プールのガンマ線遮へい解析に豊富な実績を有する。

(4) 検証

大型実験／ベンチマーク試験による検証^{※1}が実施されていることを確認した。

※1 以下の文献を確認し、検証されたコードであることを確認した。

- ガンマ線遮蔽設計ハンドブック（1988年1月，（社）日本原子力学会）
- 放射線輸送計算コードを用いた「むつ」船用炉の遮蔽解析法と実験解析に基づく評価（日本原子力学会誌 1984 Vol.26 No.2）



収納缶についての説明書

1. 概要

使用済燃料貯蔵ラック（49 体）に貯蔵する変形燃料，および破損燃料は，燃料の取扱いを可能にするため，また破損燃料については放射性物質の拡散を抑制するとともに，燃料の形状が維持されていない場合でも臨界を防止するため，収納缶内に収納した状態で貯蔵する。

2. 収納缶の構造

収納缶はステンレス鋼製の角缶構造である。

3. 収納缶の機能

- (1) 収納缶は，燃料取扱装置を用いて収納缶内に収納した燃料の取扱いが可能になるよう，収納缶上部に燃料の上部タイププレートハンドル部と同等の形状を有する吊具を取り付け，吊具を燃料取扱装置の把握機で把持する。なお，吊具は落下防止措置を施した着脱式の機構とする。
- (2) 収納缶は，燃料棒の形状が維持されていない場合でも放射性物質の拡散を抑制する。

4. 収納缶の取扱い及び落下防止措置

- ・ 収納缶上部には吊具を取り付けるための接続部（窓）を設け，接続部に吊具を取り付ける。接続部は収納缶に4箇所設け，吊具を4箇所に取り付けることにより，吊上げ時の落下を防止する。
- ・ 吊具は燃料取扱装置の把握機で把持することから，以下の燃料取扱装置の落下防止機能により吊上げ時の落下を防止する。
 - ・ ホイストは電源断時に電磁ブレーキで保持する構造
 - ・ ホイストは二重のワイヤロープで保持する構造
 - ・ 把握機は空気喪失時にフックが開かない構造
 - ・ 把握機の機械的インターロック

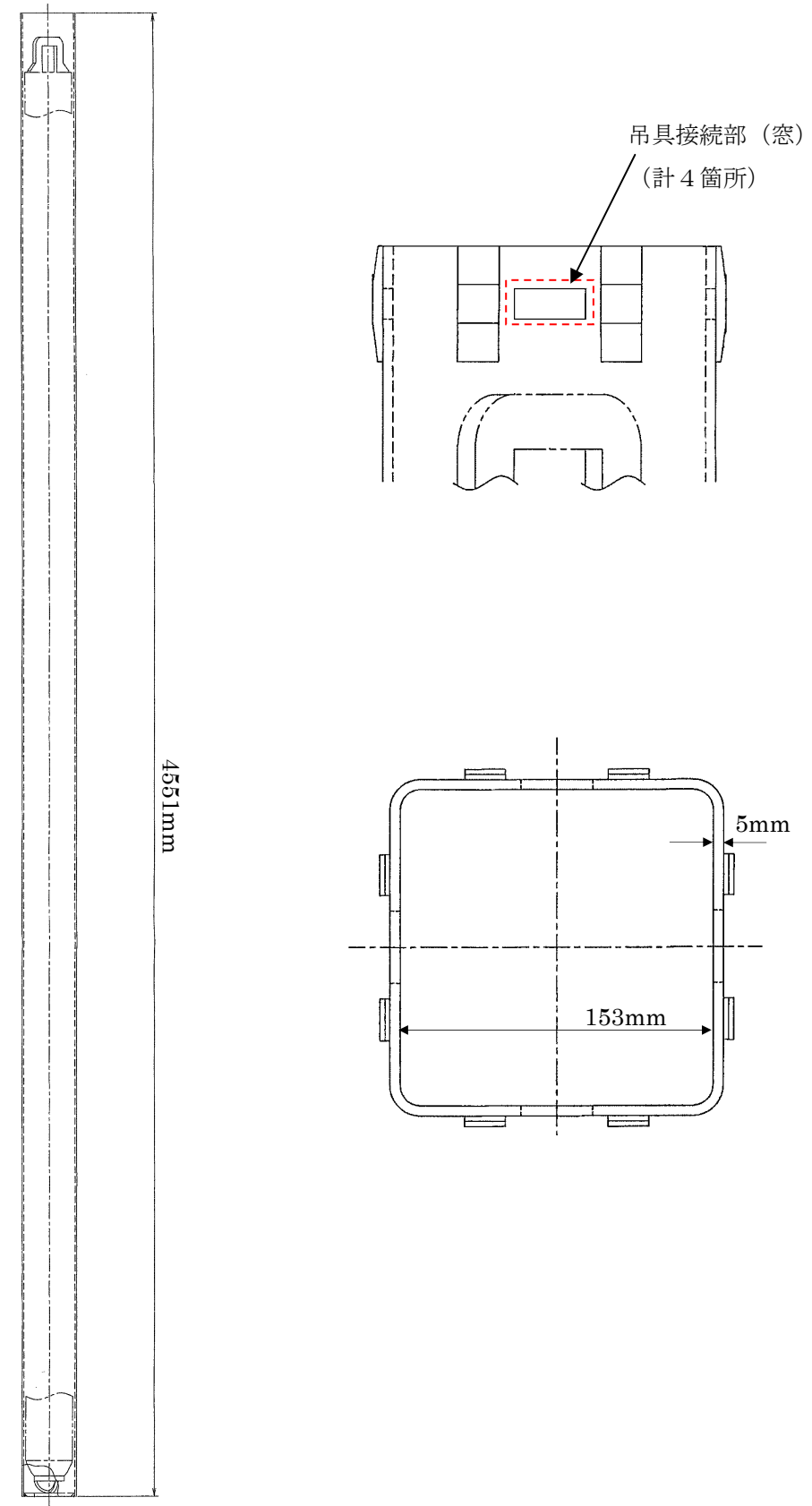


図-1 収納缶構造図

II-2-12-添 9-6-2

使用済燃料共用プール設備に係る確認事項について

使用済燃料共用プール設備に新たに設置する使用済燃料貯蔵ラック（49 体）の設置に係る主要な確認項目を表－1 に、収納缶に係る主要な確認項目を表－2 に示す。

尚、寸法許容範囲については製作誤差等を考慮の上、確認前に定める。

表－1 確認事項（使用済燃料貯蔵ラック（49 体））

確認項目		確認内容	判定基準
材料確認		実施計画に記載されている主な材料について確認する。	実施計画の通りであること。
構造 確認	寸法確認	実施計画に記載されている主要寸法を確認する。	寸法が許容範囲内であること。
	外観確認	各部の外観を確認する。	有意な欠陥がないこと。
	据付確認	機器の据付位置、据付状態について確認する。	実施計画の通りに施工・据付されていること。
機能 確認	使用済燃料貯蔵ラック容量確認	機器の容量、個数について確認する。	実施計画の通りであること。
	使用済燃料貯蔵ラック挿入確認	収納缶を用いて貯蔵する箇所の収納缶の挿入及び取出しが円滑に行え支障のないことを確認する。	収納缶の挿入及び取出しが円滑に行えること。

表－2 確認事項（収納缶）

確認項目		確認内容	判定基準
材料確認		実施計画に記載されている主な材料について確認する。	実施計画の通りであること。
構造 確認	寸法確認	実施計画に記載されている主要寸法を確認する。	寸法が許容範囲内であること。
	外観確認	各部の外観を確認する。	有意な欠陥がないこと。