

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、共用プール建屋廃液移送系等がある。

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及び炉内に貯蔵中の使用済燃料（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。

※ 5,6号機原子炉建屋内に貯蔵中の新燃料は含まない

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 2.12-1～5 に、共用プール概要図を図 2.12-6, 7 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 1～4 号機原子炉建屋内の使用済燃料プール内の新燃料（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最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、使用済燃料収納缶に入れた燃料を使用済燃料収納缶ごと貯蔵できる設計とする。使用済燃料収納缶は、変形、または破損燃料を使用済燃料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°C 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°C 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：T.P. 約 39m、純水タンク：T.P. 約 8m）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。

(11) 共用プール建屋廃液移送系

共用プール建屋廃液移送系はポンプ、タンク、配管等で構成され、運用補助共用施設内で発生する廃液を雑固体廃棄物減容処理建屋（以下、高温焼却炉建屋）へ移送する。

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、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。

まずは地下階の防水性向上対策としてトレンチ開口部を閉塞し、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行っている。

屋外に設置している共用プール建屋廃液移送系の一部配管は仮設防潮堤内に設置する。また、仮設防潮堤の高さを上回る津波の襲来に備え、大津波警報が出た際は廃液移送設備を停止することにより、設備損傷による影響が最小限になるよう対策を図る。

(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（共用プール建屋廃液移送系を除く）は、屋内に設置してあるため、台風・竜巻の影響を受けない。共用プール建屋廃液移送系は配管の一部を屋外に設置しているため、台風・竜巻時は移送設備の停止等を行い、設備損傷による影響が最小限になるよう対策を図る。

(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、共用プール建屋廃液移送系、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。ただし、共用プール建屋廃液移送系の一部配管を除く（添付資料-11参照）。

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（T.P. 約 35m）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（T.P. 約 35m）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（T.P. 約 35m）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 6734 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 74

(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) 使用済燃料貯蔵ラック

容 量 25 体

個 数 1

(5) 使用済燃料収納缶 (小)

個 数 48

(6) 使用済燃料収納缶 (大)

個 数 25

(7) 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 2.8×10^6 kcal/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. 12-1 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))

(8) 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 430m³
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 30m³/h/台

(9) 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 650m³/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 2.9×10⁶kcal/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))

(10) 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))

(11) 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))

(12) 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 93,000m³/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))

(13) 温度計

形式	熱電対
計測範囲	0~100°C
個数	1

(14) 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	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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))

(15) プロセス放射線モニタ

a. 運用補助共用施設排気放射線モニタ (以下「排気放射線モニタ」という)

検出器の種類	計測範囲	取付箇所
シンチレーション	10 ⁻¹ ~10 ⁶ s ⁻¹	<ul style="list-style-type: none"> ・ 3F 2チャンネル

(排気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))

b. 共用プール補機冷却系放射線モニタ（以下「補機冷却系放射線モニタ」という）

検出器の種類	計測範囲	取付箇所
シンチレーション	$10^{-1} \sim 10^6 \text{ s}^{-1}$	・B1F 2チャンネル

（補機冷却系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））

(16) 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

(17) 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 63ℓ（参考値），約 37ℓ/h（参考値）
※使用済燃料プール設備と共用

(18) ろ過水タンク等

a. ろ過水タンク

基 数 1
容 量 約 8,000m³/基

b. 純水タンク

基 数 2
容 量 約 2,000m³/基

(19) 共用プール建屋廃液移送系

a. 運用補助共用施設沈降分離タンク※

基 数 2
容 量 約 100m³/基

（運用補助共用施設沈降分離タンクについては、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））

b. 運用補助共用施設デカントポンプ

台数	2 (うち1台は予備)
容量	約 10m ³ /h/台

(運用補助共用施設デカントポンプについては、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)

c. 運用補助共用施設機器ドレン廃液受タンク※

基数	2
容量	約 50m ³ /基

(運用補助共用施設機器ドレン廃液受タンクについては、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)

d. 運用補助共用施設機器ドレン廃液移送ポンプ

台数	2 (うち1台は予備)
容量	約 35m ³ /h/台

(運用補助共用施設機器ドレン廃液移送ポンプについては、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)

e. 運用補助共用施設高電導度ドレンサンプタンク

基数	2
容量	約 4m ³ /基

(運用補助共用施設高電導度ドレンサンプタンクについては、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)

f. 運用補助共用施設高電導度ドレンサンプポンプ

台数	4 (うち2台は予備)
容量	約 10m ³ /h/台

(運用補助共用施設高電導度ドレンサンプポンプについては、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)

表 2. 1 2 - 3 共用プール建屋廃液移送系 主要配管仕様

名 称	仕 様	
運用補助共用施設高電導度 ドレンサンプポンプ(A), (C) から運用補助共用施設高電 導度ドレンサンプポンプ出 口配管合流部下流まで (*)	外径/厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (kg/cm ²) 最高使用温度 (°C)	60.5/3.9 76.3/5.2 89.1/5.5 SUS316LTP 10.0 66
運用補助共用施設高電導度 ドレンサンプポンプ(B), (D) から運用補助共用施設高電 導度ドレンサンプポンプ (A), (C)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)	60.5/3.9 76.3/5.2 SUS304TP/SUS316LTP 10.0 66
運用補助共用施設高電導度 ドレンサンプポンプ出口配 管合流部下流から高温焼却 炉建屋地下滞留水貯留エリ アまで (鋼管)	外径/厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (MPa) 最高使用温度 (°C)	89.1/5.5 SUS304TP 0.98 66
(ポリエチレン管)	呼び径 材質 最高使用圧力 (MPa) 最高使用温度 (°C)	80A 相当 ポリエチレン 0.98 40
(耐圧ホース)	呼び径 材質 最高使用圧力 (MPa) 最高使用温度 (°C)	80A 相当 ポリ塩化ビニル 0.98 40
運用補助共用施設沈降分離 タンクから運用補助共用施 設デカントポンプまで (*)	外径/厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (kg/cm ²) 最高使用温度 (°C)	60.5/3.9 SUS304TP 静水頭/10.0 66

(*の記載が有る配管は、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. 12-3 共用プール建屋廃液移送系 主要配管仕様

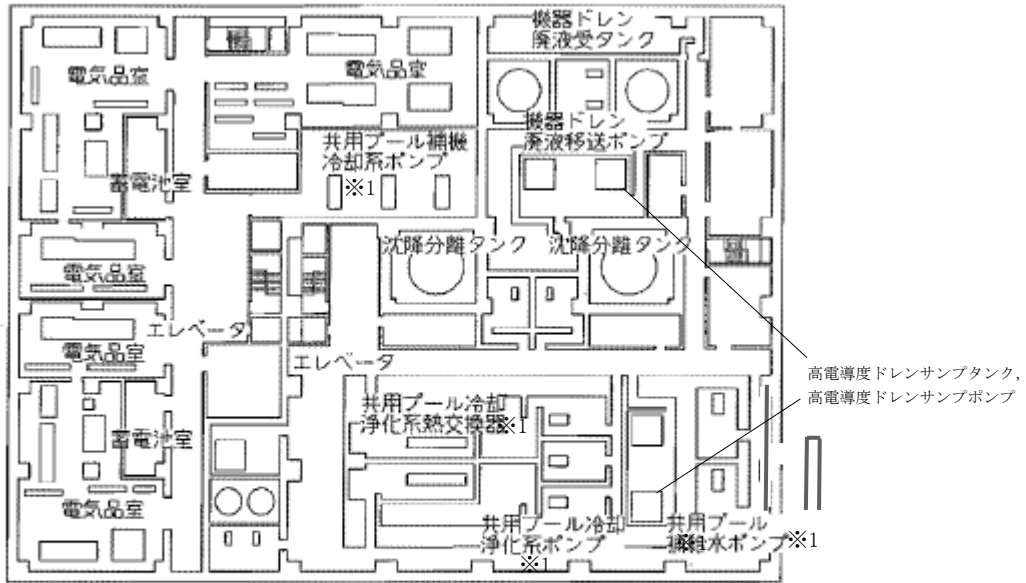
名 称	仕 様	
運用補助共用施設デカントポンプから運用補助共用施設機器ドレン廃液受タンク集合管まで (*)	外径/厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (kg/cm ²) 最高使用温度 (°C)	34.0/3.4 60.5/3.9 60.5/5.5 SUS304TP/STPT38 10.0 66
運用補助共用施設機器ドレン廃液受タンク集合管 (*)	外径/厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (kg/cm ²) 最高使用温度 (°C)	114.3/6.0 STPT38/SUS304TP 10.0 66
運用補助共用施設建屋デカントポンプ出口配管分岐点から運用補助共用施設高電導度ドレンサンプポンプ(B), (D)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)	60.5/3.9 SUS304TP 10.0 66
運用補助共用施設機器ドレン廃液受タンクから運用補助共用施設機器ドレン廃液移送ポンプまで (*)	外径/厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (kg/cm ²) 最高使用温度 (°C)	114.3/6.0 SUS304TP/STPT38 静水頭/10.0 66
運用補助共用施設機器ドレン廃液移送ポンプから運用補助共用施設機器ドレン廃液移送ポンプ出口配管分岐点まで (*)	外径/厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (kg/cm ²) 最高使用温度 (°C)	60.5/5.5 89.1/5.5 76.3/5.2 STPT38 10.0 66
運用補助共用施設機器ドレン廃液移送ポンプ出口配管分岐点から運用補助共用施設高電導度ドレンサンプポンプ(B), (D)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)	76.3/5.2 STPT38/SUS304TP 10.0 66

(*の記載が有る配管は、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)

2.12.3 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について
 - 添付資料—9—1 使用済燃料貯蔵ラック（49 体）について
 - 添付資料—9—2 使用済燃料貯蔵ラック（25 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
- 添付資料—11 共用プール建屋廃液移送系について

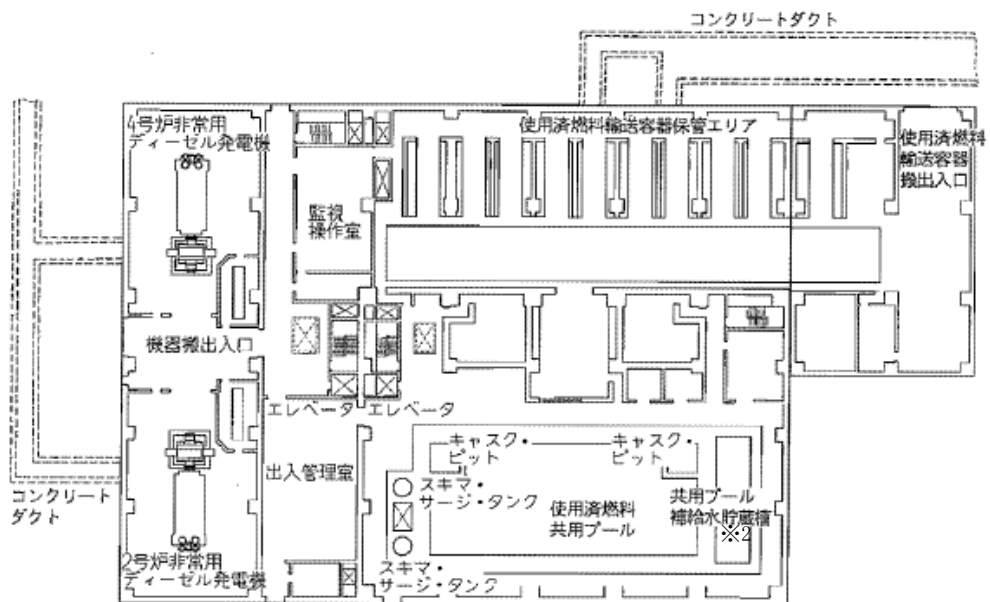


2.12では、G.L. ±0m= T.P. 8.5m^(※)とする。
 (※) 震災後の地盤沈下量(-709mm)と O.P.
 から T.P. への換算値(-727mm)を用いて、下
 式に基づき換算している。
 <換算式> T.P.=旧 O.P.-1,436mm

※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。

G.L. -7.3m

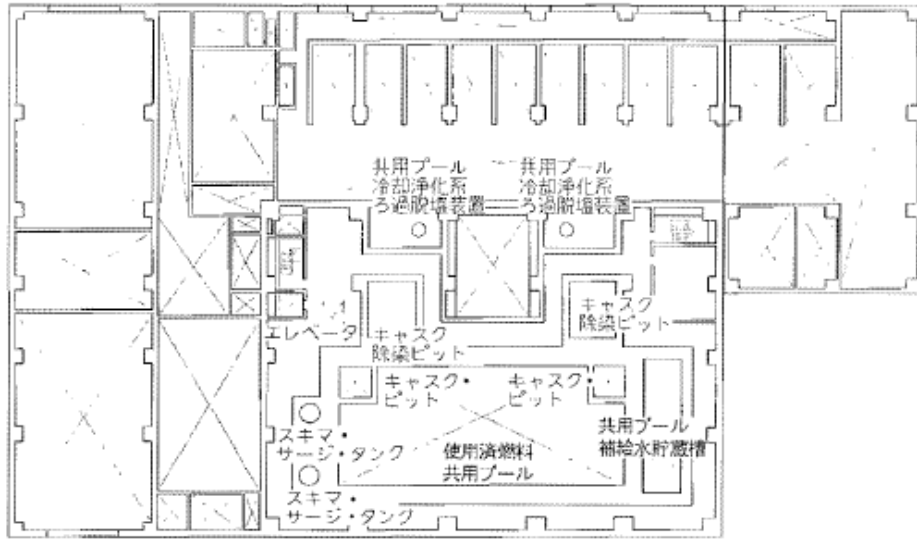
図2. 12-1 運用補助共用施設平面図 (その1)



G.L. +0.2m

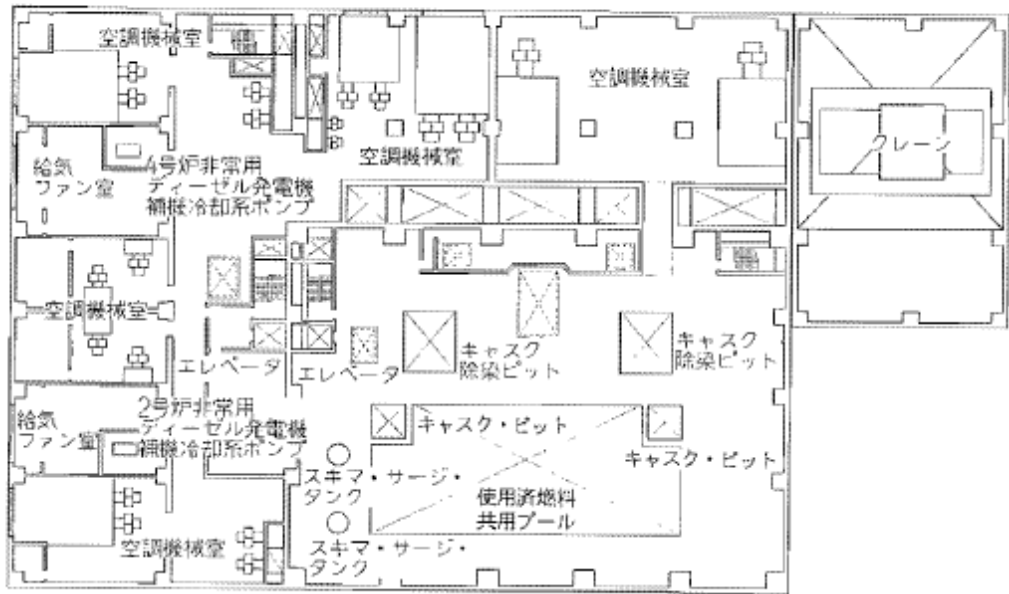
※2: 共用プール補給水貯蔵槽は、共用プール同様、鉄筋コンクリート造の設備。

図2. 12-2 運用補助共用施設平面図 (その2)



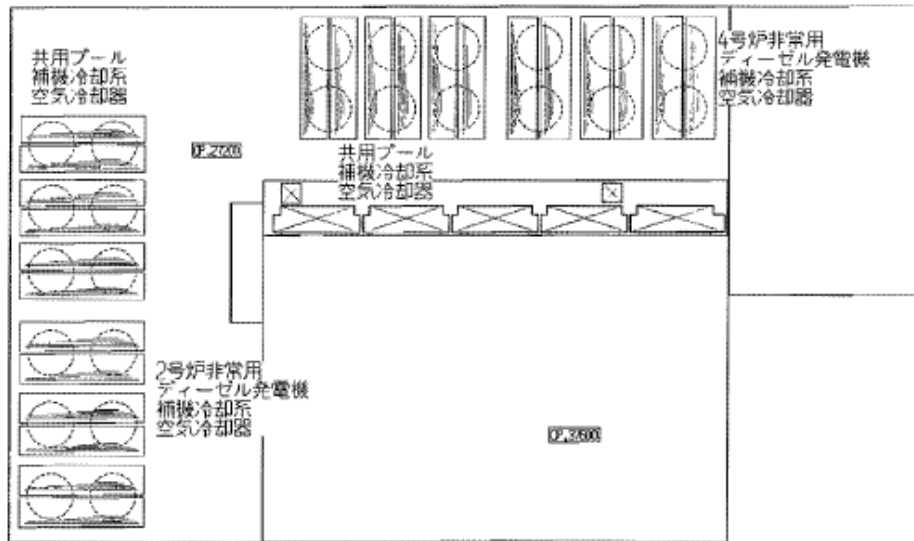
G. L. +5.7m

図 2. 1 2 - 3 運用補助共用施設平面図 (その 3)



G. L. +9.2m, G. L. +10.2m

図 2. 1 2 - 4 運用補助共用施設平面図 (その 4)



G. L. +17.2m, G. L. +27.6m

図2. 12-5 運用補助共用施設平面図 (その5)

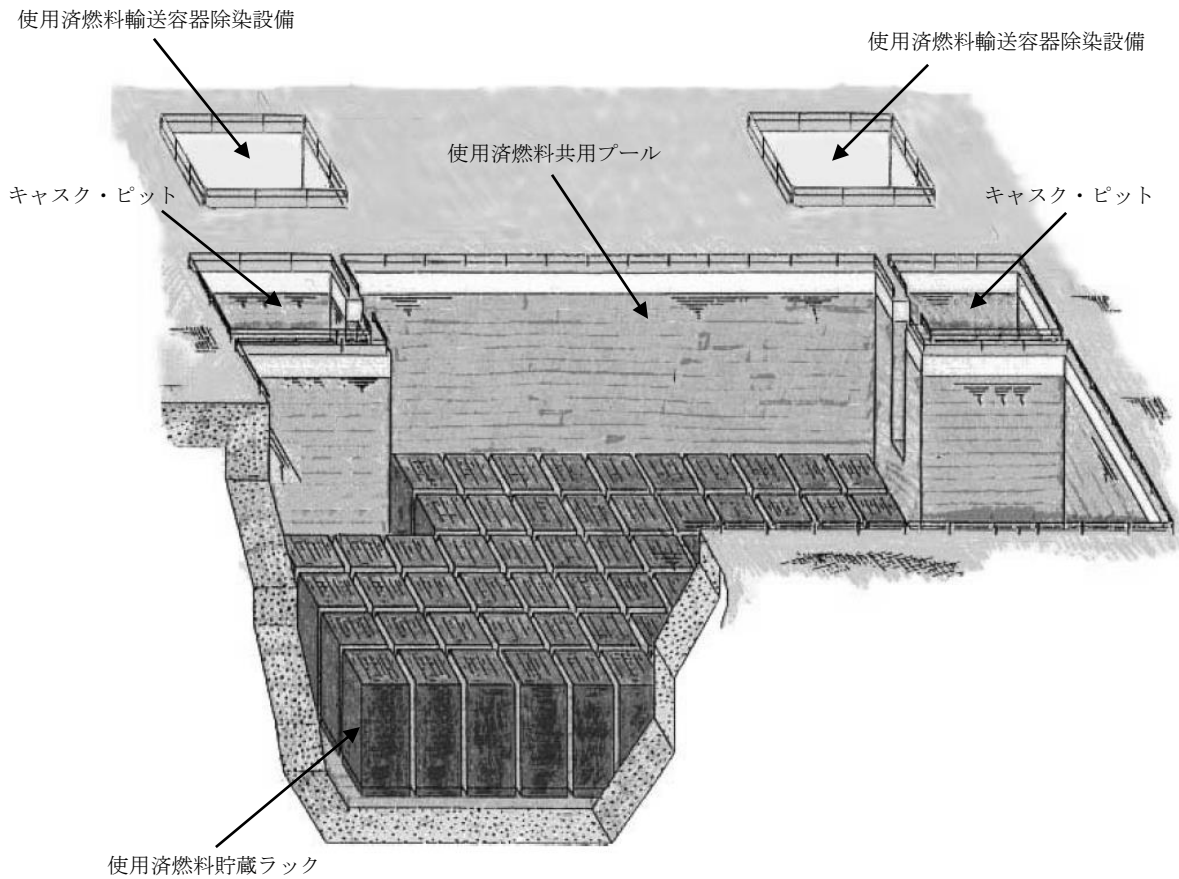


図 2. 1 2 - 6 共用プール概要図

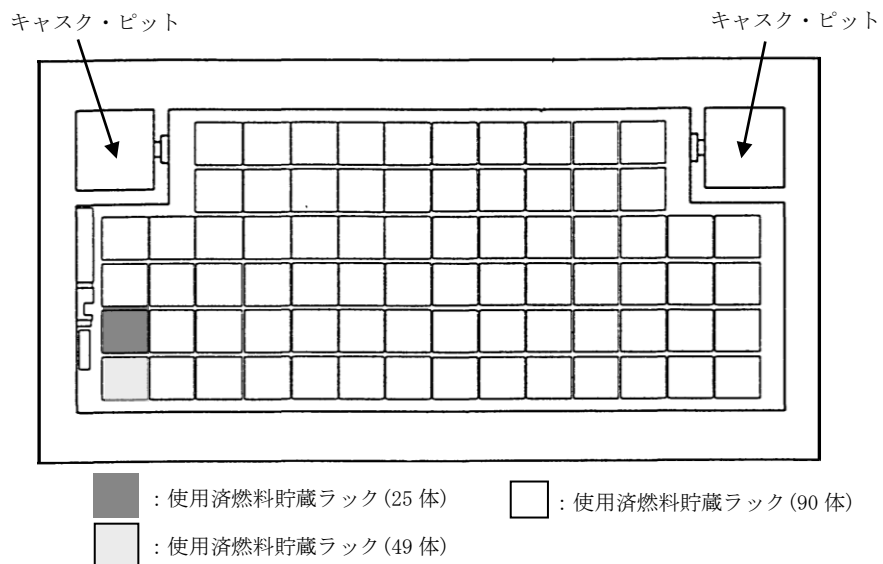


図 2. 1 2 - 7 共用プール概要図 (平面)

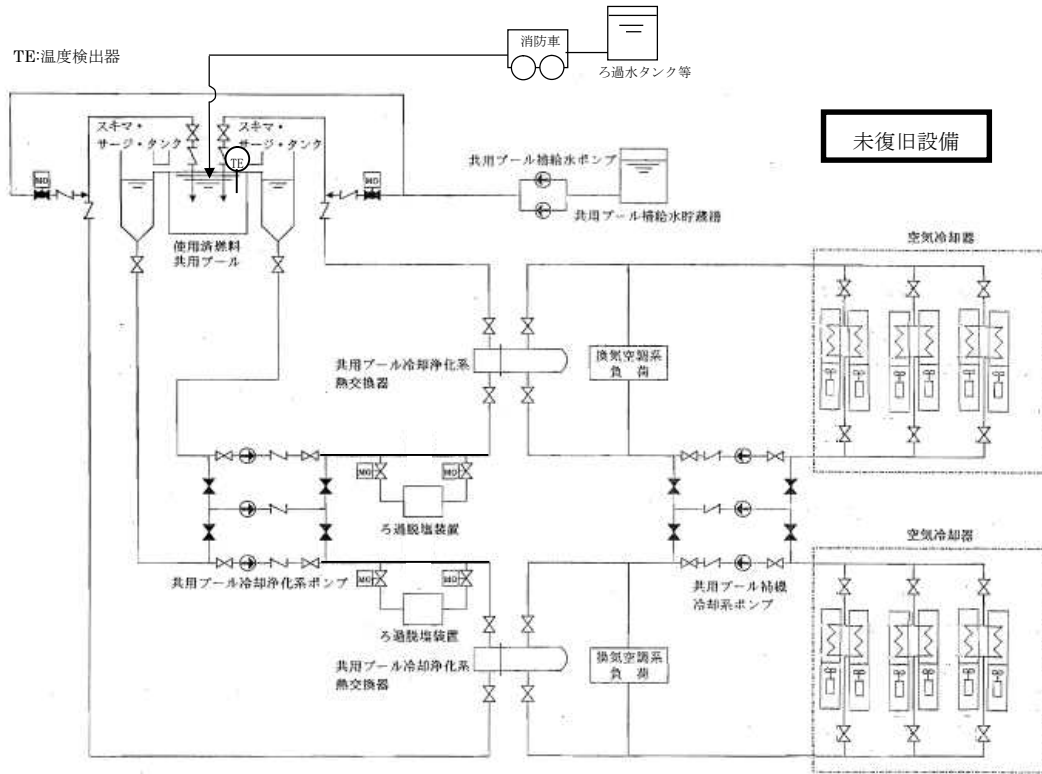


図1-1 共用プール冷却浄化系，共用プール補機冷却系
及び共用プール補給水系概略系統図（現状：平成26年7月）

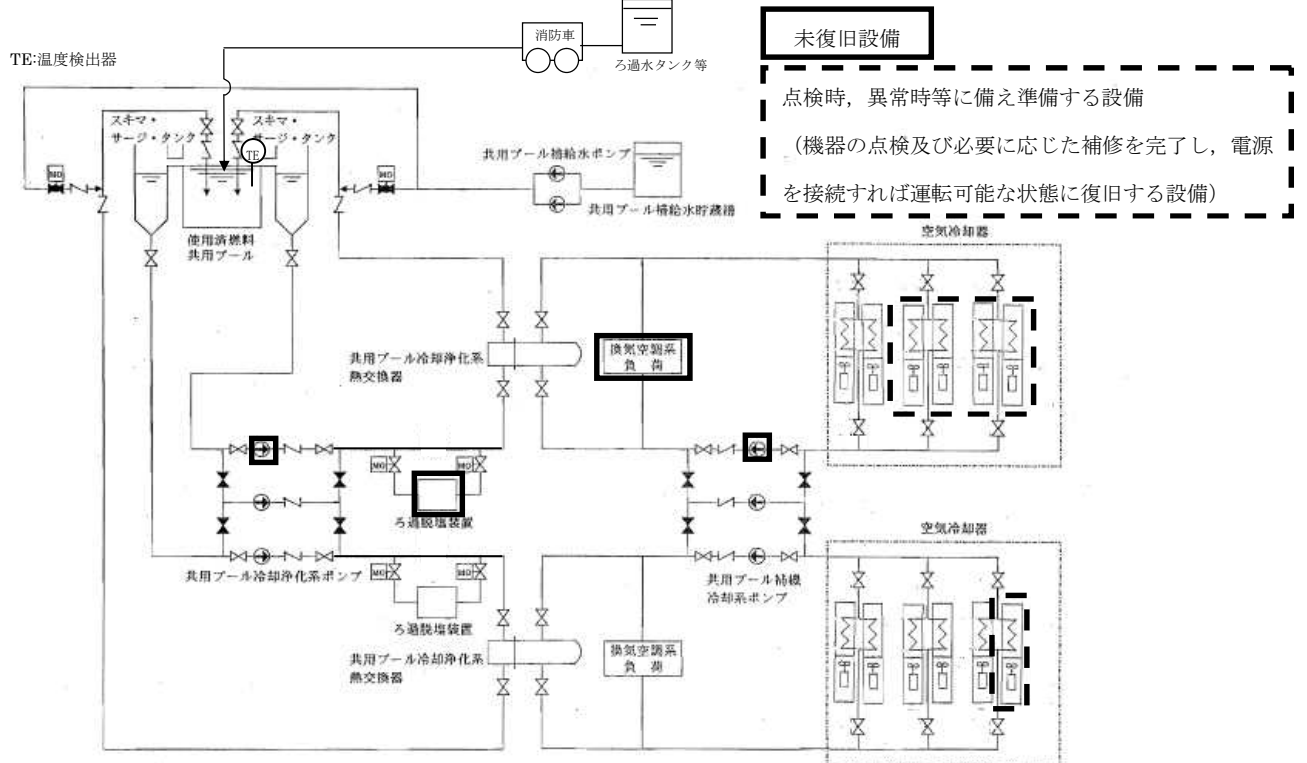


図1-2 共用プール冷却浄化系，共用プール補機冷却系
及び共用プール補給水系概略系統図（共用プールからの燃料取出開始時に必要な状況）

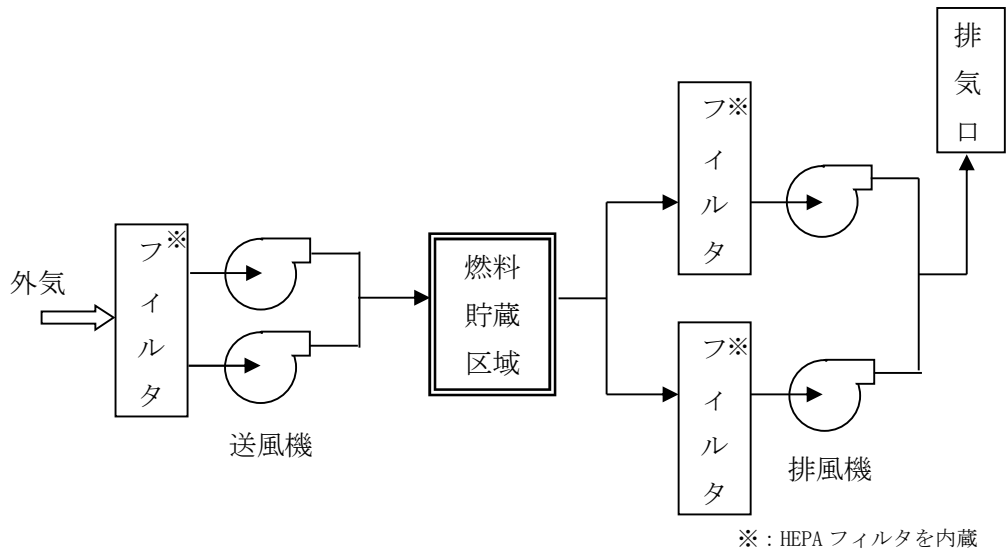


図 1 - 3 燃料貯蔵区域換気空調系概略系統図

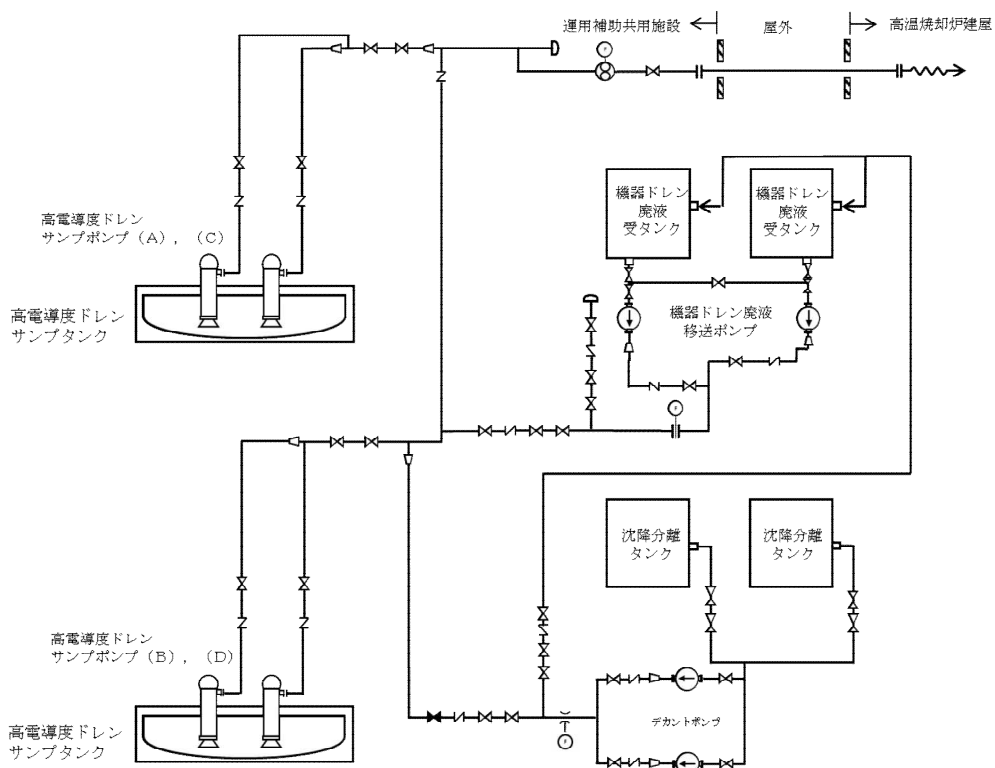


図 1 - 4 共用プール建屋廃液移送系概略系統図

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、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、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号機の燃料の受け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、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、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，2 台目を平成 25 年 7 月に運転可能としている。その後，排気放射線モニタの復旧に伴い，運用補助共用施設からの気体の放出管理が可能となっている。

共用プールエリア送・排風機は各々 2 台あるが，通常運転時は，1 台運転となり，残りの 1 台が予備機となる。

1.4.4 エリア放射線モニタ

現在，平成 26 年 12 月に全てのエリア放射線モニタが復旧し，監視状態となっている。エリア放射線モニタで監視できない場合は，可搬式放射線モニタ等を用いて監視する。

1.4.5 プロセス放射線モニタ

平成 26 年 12 月にプロセス放射線モニタが，2 系統全て復旧している。

表1 共用プール設備の点検・復旧工程

	平成24年				平成25年				平成26年				平成27年			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
機器点検・復旧	天井クレーン点検・復旧	[Bar]														
	燃料取扱装置点検・復旧	[Bar]														
	使用済燃料輸送容器点検・保守	[Bar]														
	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	[Bar]														
	(電源復旧しながら実施)	[Bar]														
	共用プール補給水ポンプ(2台目)点検・復旧	[Bar]														
	(電源復旧しながら実施)	[Bar]														
	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	[Bar]														
	(電源復旧しながら実施)	[Bar]														
	換気空調系送風機側HEPAフィルタ設置	[Bar]														
換気空調系点検・復旧(共用プールエリア送・排風機2台目)	[Bar]															
火災報知設備, 消火設備点検・復旧	[Bar]															
電源設備	電源設備の復旧 ※2	[Bar]														
		[Bar]														
津波対策	床・壁等の開口部の防水性向上	[Bar]														
		[Bar]														

※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。

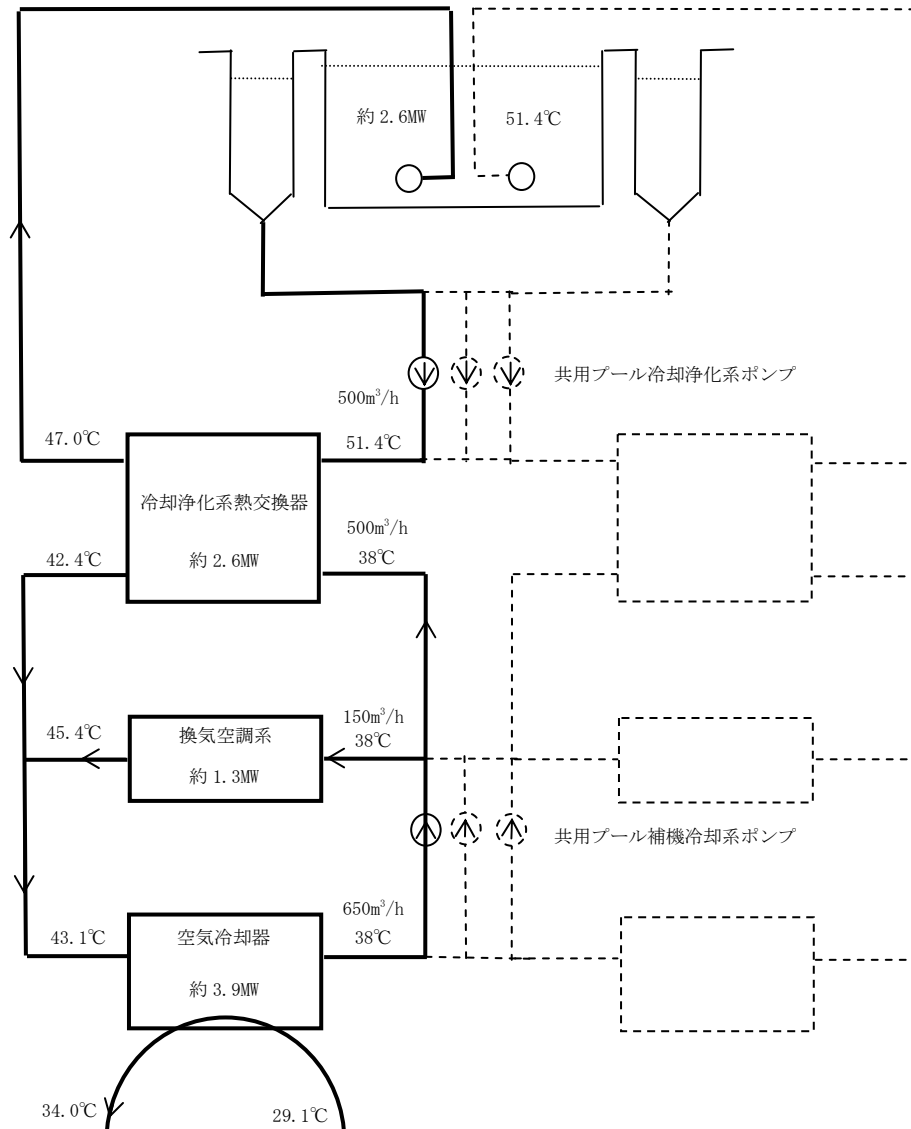


図1 1系列運転時熱バランス

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(G.L. -10.0m)上に支持されている。

添付資料-5では、 $GL \pm 0m = T.P. 8.5m^{(*)}$ とする。

(*) 震災後の地盤沈下量 (-709mm) と O.P. から T.P. への読替値 (-727mm) を用いて、下式に基づき換算している。

〈換算式〉 $T.P. = \text{旧 O.P.} - 1,436\text{mm}$

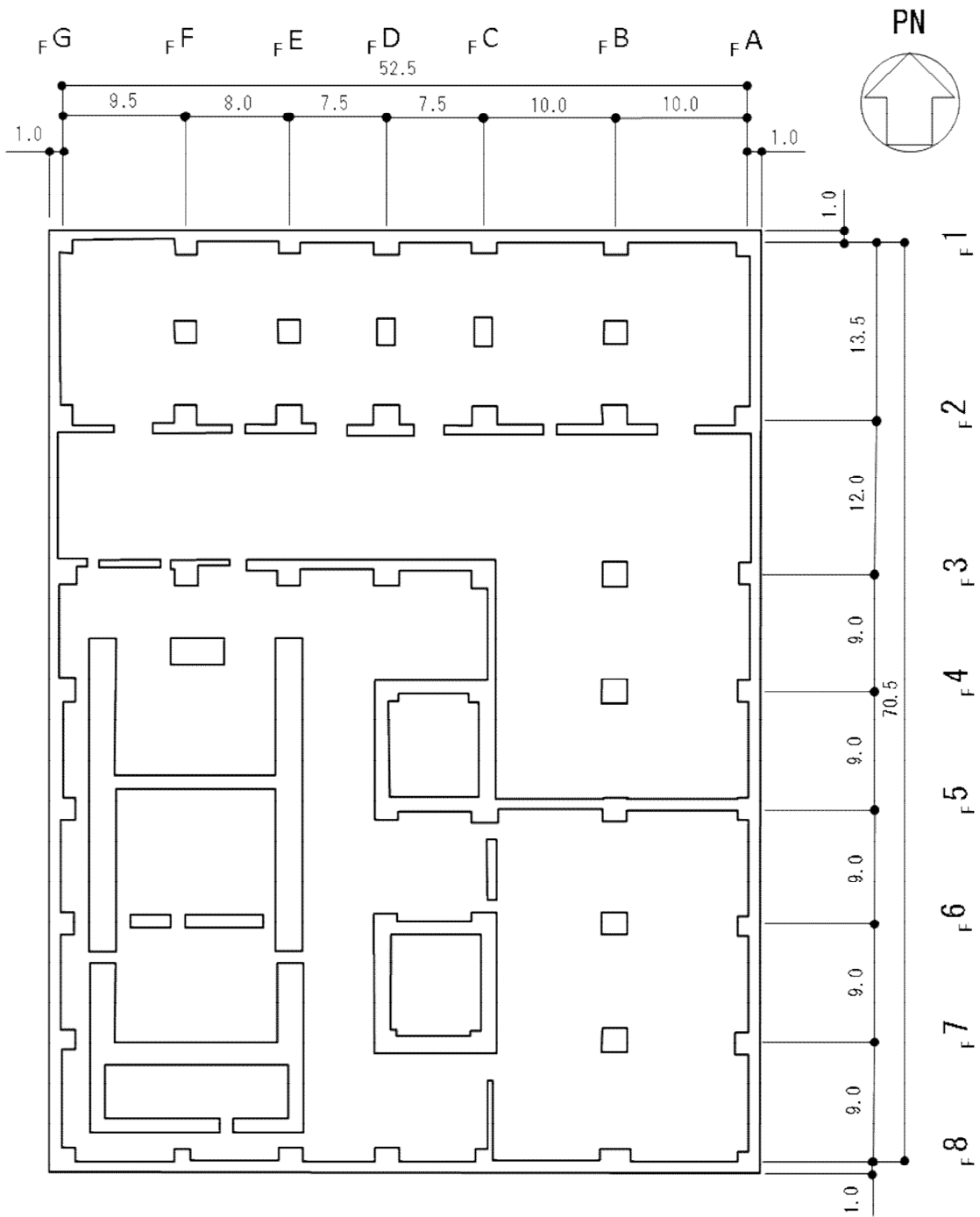


図1.1 PL/B 基礎版レベル平面図(G. L. -7.3m) (単位 : m)

II-2-12-添5-3

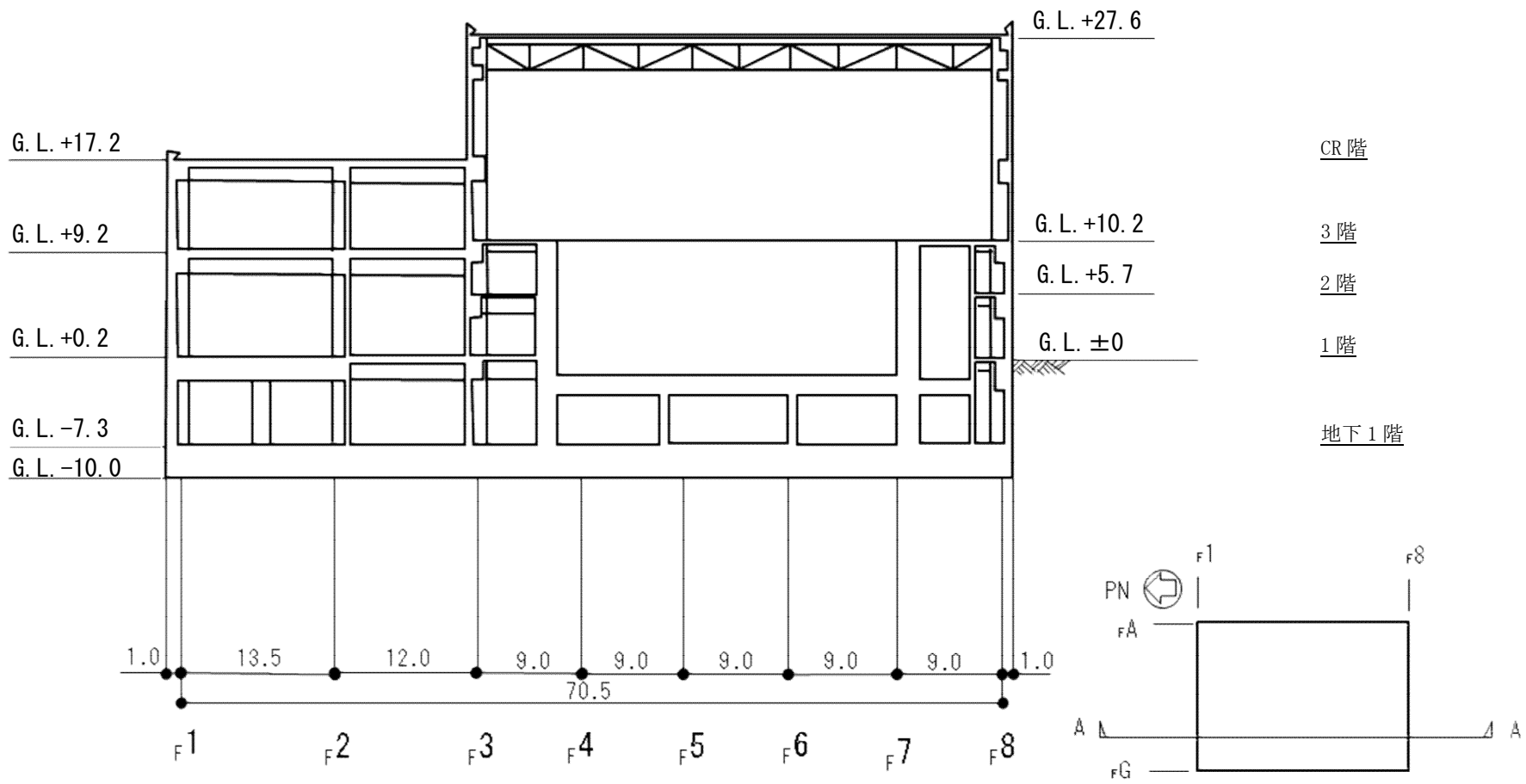


图1.2 PL/B NS方向断面图 (单位：m)

II-2-12-添5-4

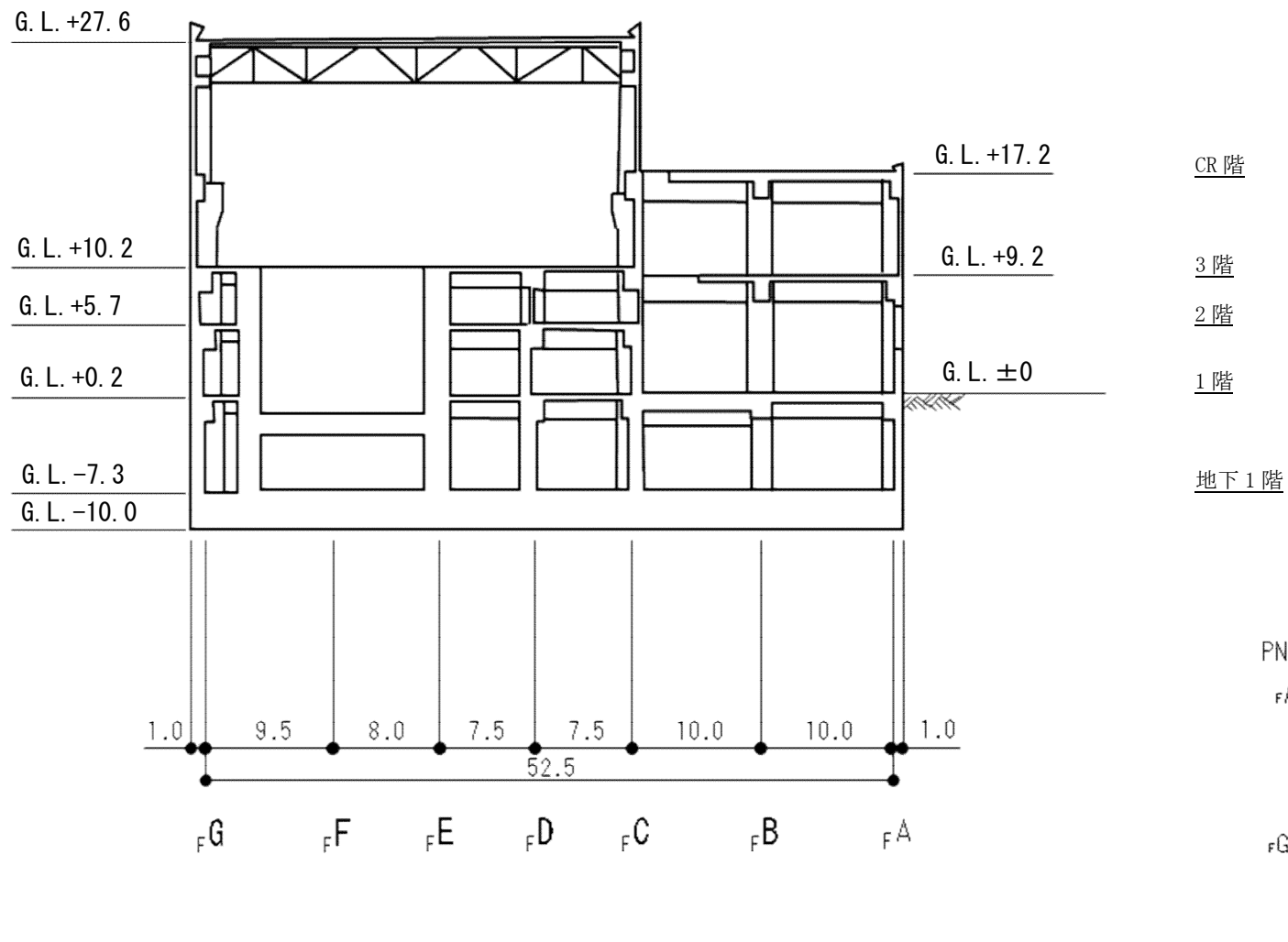


图1.3 PL/B EW方向断面图 (单位：m)

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、振動アドミッ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。

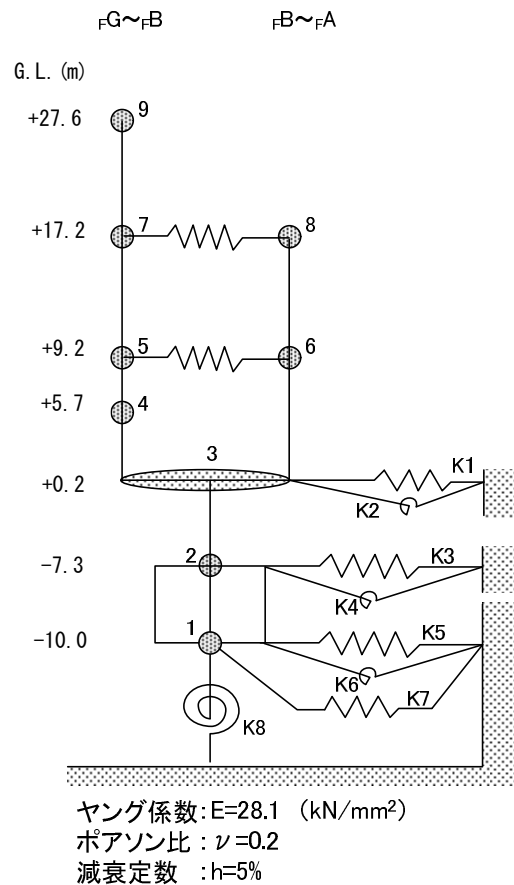
また、埋め込み部分の建屋側面地盤ばねについては、建屋側面位置の地盤定数を用いて、水平及び回転ばねを「JEAG 4601 - 1991」により NOVAK ばねに基づいて近似法により評価する。

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。



はり部材
(耐震壁)

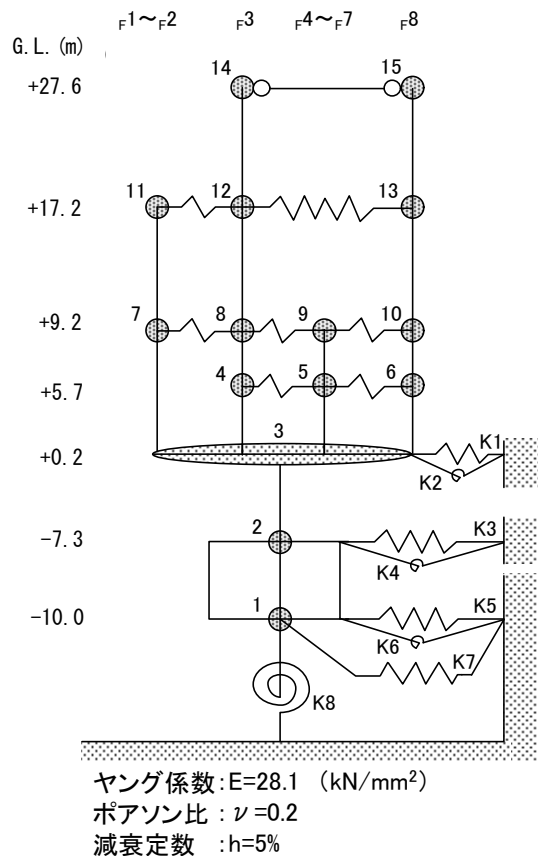
9	41,840		
	11.06		
45.40			
18.09			
7	100,530	8	39,680
	50.38		18.59
81.90		42.10	
48.48		31.68	
5	137,540	6	45,030
	70.36		21.61
249.00		47.20	
68.20		36.68	
4	98,480		
	20.04		
247.70			
84.82			
3			360,400
			152.05
333.40			
157.87			
2	237,620		
	105.00		
3951.00			
1730.70			
1	125,540		
	55.02		

凡例	
質点番号	重量 (kN)
	回転慣性 ($\times 10^6$ kNm ²)
せん断面積 (m ²)	
断面2次モーメント ($\times 10^3$ m ⁴)	

床せん断ばね (単位: $\times 10^6$ kN/m)

7	28.75	8
5	18.23	6

図1.4 PL/B 建屋の振動諸元(NS方向)



はり部材 (耐震壁)

11	56,470	12	49,430	13	34,310
	10.37		14.05		10.15
	64.00		22.40		35.90
7	59,770	8	28,060	9	76,270
	16.94		8.12		24.09
81.70	36.95	25.80	87.4	46.00	19.51
4	25.00	7.70	8,180	5	79,250
			1.16		9.13
360,400	101.79	108.6	4.43	41.00	18.23

床せん断ばね (単位: $\times 10^6$ kN/m)

2	308.10
	95.52
3951.00	978.00
125,540	31.10

凡例

質点番号	重量 (kN)
	回転慣性 ($\times 10^6$ kNm ²)
せん断断面積 (m ²)	
断面2次モーメント ($\times 10^3$ m ⁴)	

14	∞ (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		

図1.5 PL/B 建屋の振動諸元(EW方向)

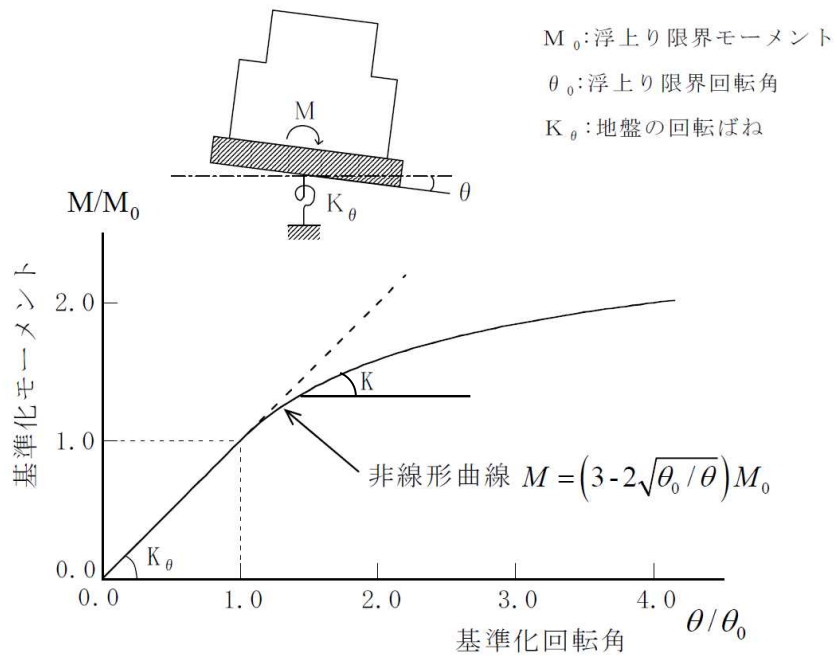


図 1.6 回転ばねの曲げモーメントと回転角の関係

表 1.2(1) PL/B 地盤定数 (Ss-1H)

G. 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)
±0.0										
-7.3	砂岩	380	17.8	0.473	2.25	2.62	0.86	6.63	3	7.3
-20.0	泥岩	450	16.5	0.464	2.69	3.41	0.79	7.88	3	12.7
-90.0		500	17.1	0.455	3.44	4.36	0.79	10.01	3	70.0
-118.0		560	17.6	0.446	4.45	5.63	0.79	12.87	3	28.0
-118.0		600	17.8	0.442	5.16	6.53	0.79	14.88	3	88.0
-206.0		(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)

G. 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)
±0.0										
-7.3	砂岩	380	17.8	0.473	2.25	2.62	0.86	6.63	3	7.3
-20.0	泥岩	450	16.5	0.464	2.76	3.41	0.81	8.08	3	12.7
-90.0		500	17.1	0.455	3.53	4.36	0.81	10.27	3	70.0
-118.0		560	17.6	0.446	4.56	5.63	0.81	13.19	3	28.0
-118.0		600	17.8	0.442	5.29	6.53	0.81	15.26	3	88.0
-206.0		(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)

G. 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)
±0.0										
-7.3	砂岩	380	17.8	0.473	2.28	2.62	0.87	6.72	3	7.3
-20.0	泥岩	450	16.5	0.464	2.66	3.41	0.78	7.79	3	12.7
-90.0		500	17.1	0.455	3.40	4.36	0.78	9.89	3	70.0
-118.0		560	17.6	0.446	4.39	5.63	0.78	12.70	3	28.0
-118.0		600	17.8	0.442	5.09	6.53	0.78	14.68	3	88.0
-206.0		(解放基盤)	700	18.5	0.421	9.24	9.24	1.00	26.26	-

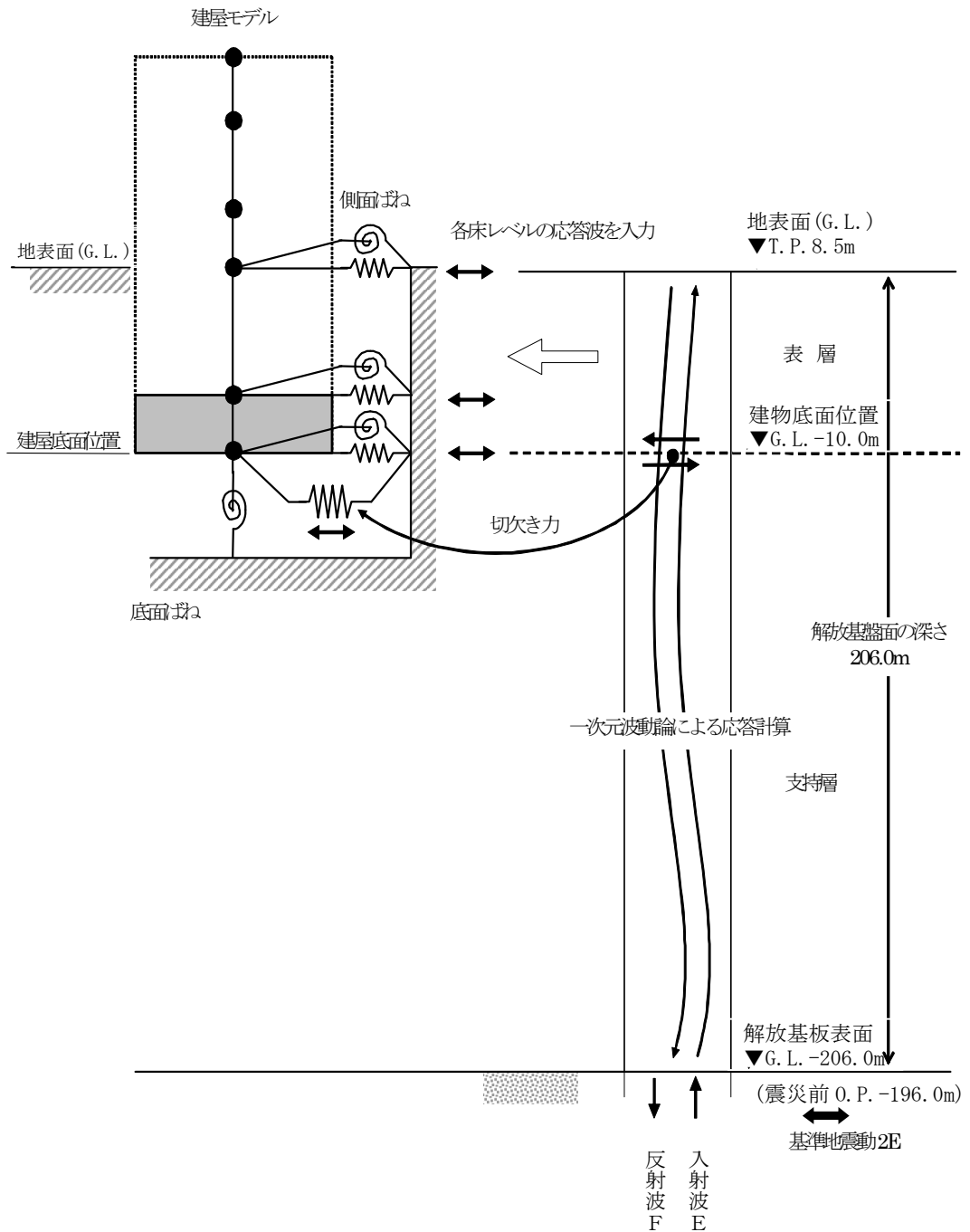
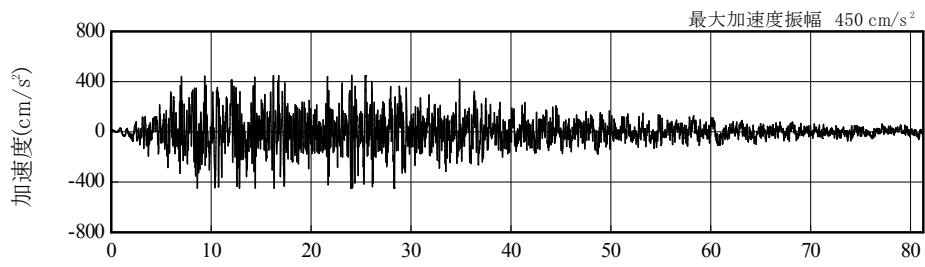


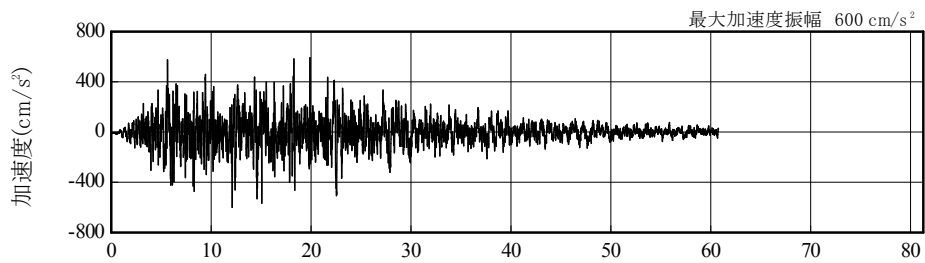
図1.7 PL/B 建屋—地盤連成系地震応答解析モデルの概要

本資料に記載の標高は、震災後の地盤沈下量 (-709mm) と O.P. から T.P. への読替値 (-727mm) を用いて、下式に基づき換算している。

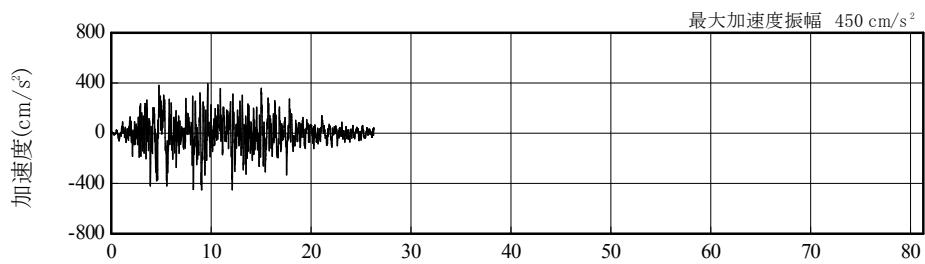
〈換算式〉 $T.P. = \text{旧 O.P.} - 1,436\text{mm}$



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 S_s による最大応答加速度を、図1.9及び図1.10に示す。

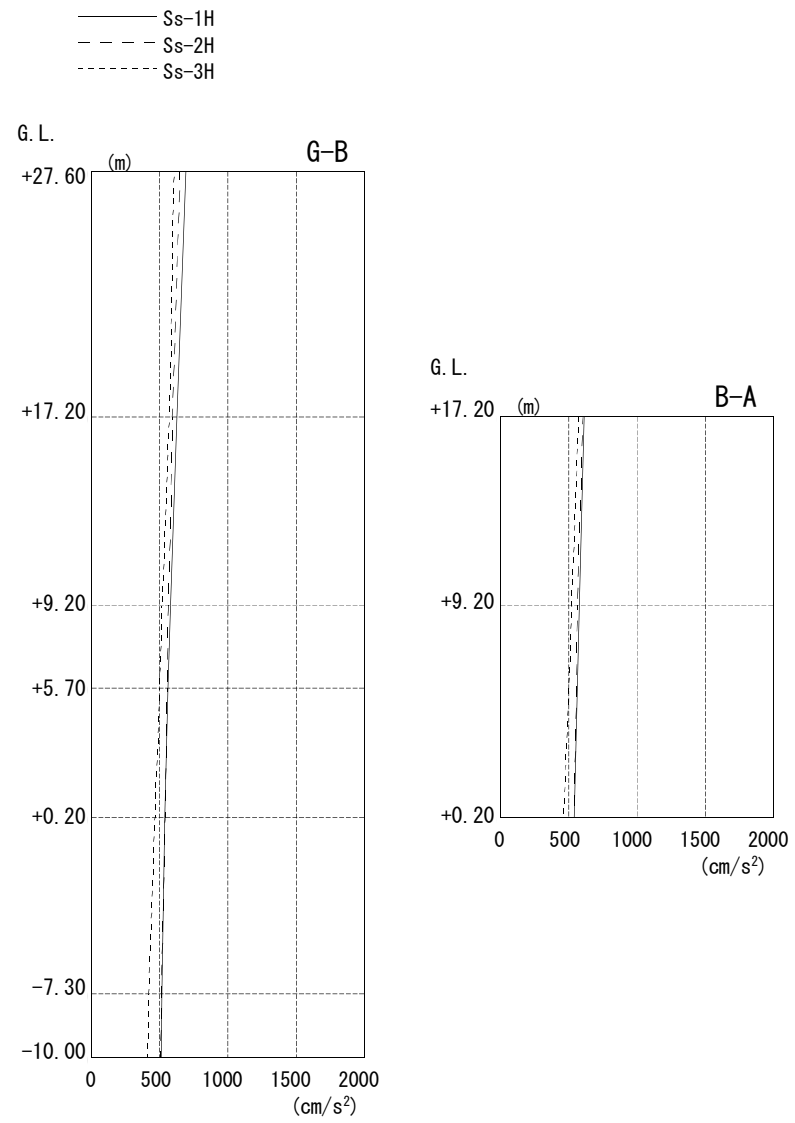


图1.9 PL/B 最大応答加速度(NS方向)

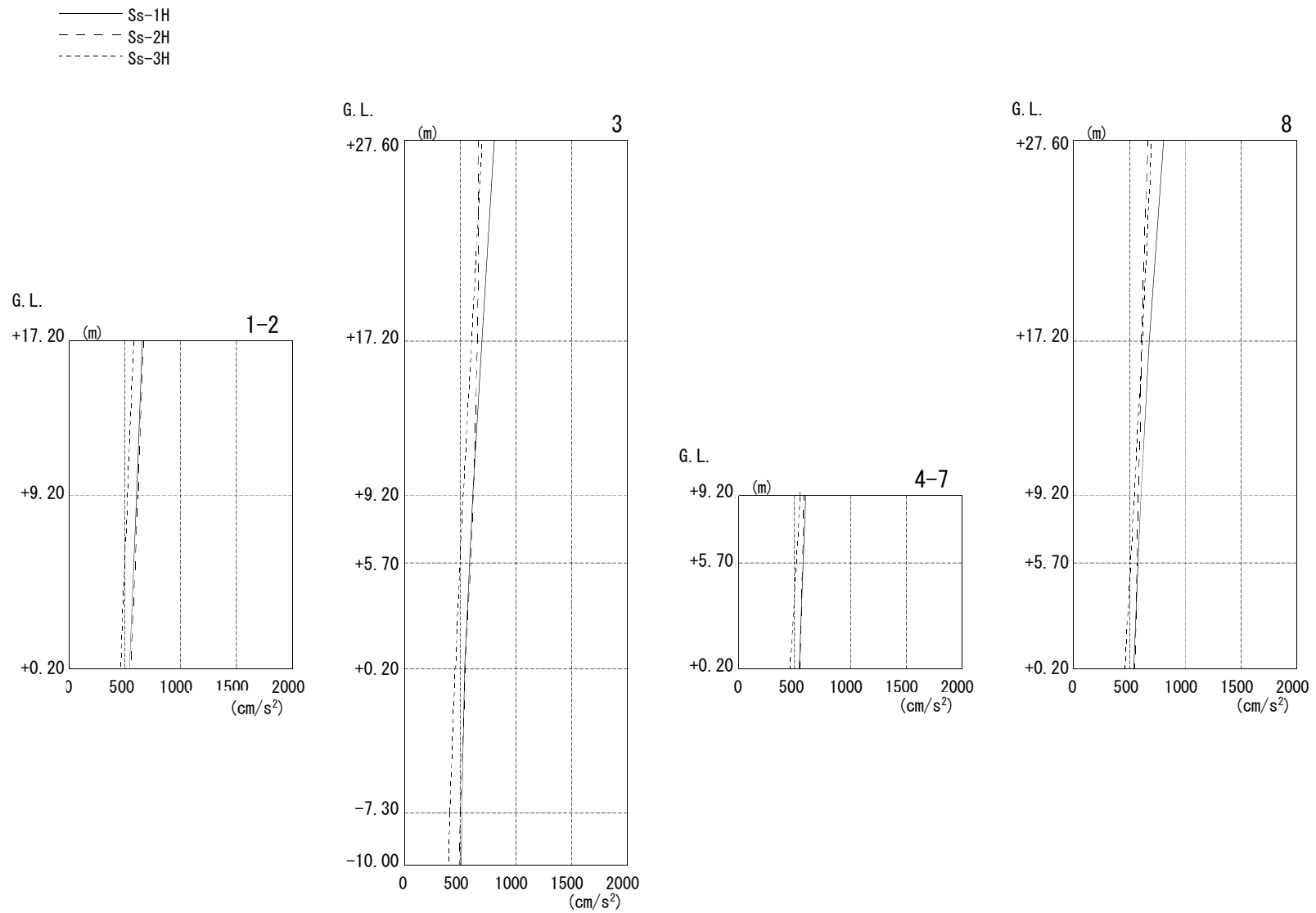


图1.10 PL/B 最大応答加速度(EW方向)

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	$(\times 10^{-3})$			評価基準値
	S_s-1	S_s-2	S_s-3	
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	$(\times 10^{-3})$			評価基準値
	S_s-1	S_s-2	S_s-3	
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	

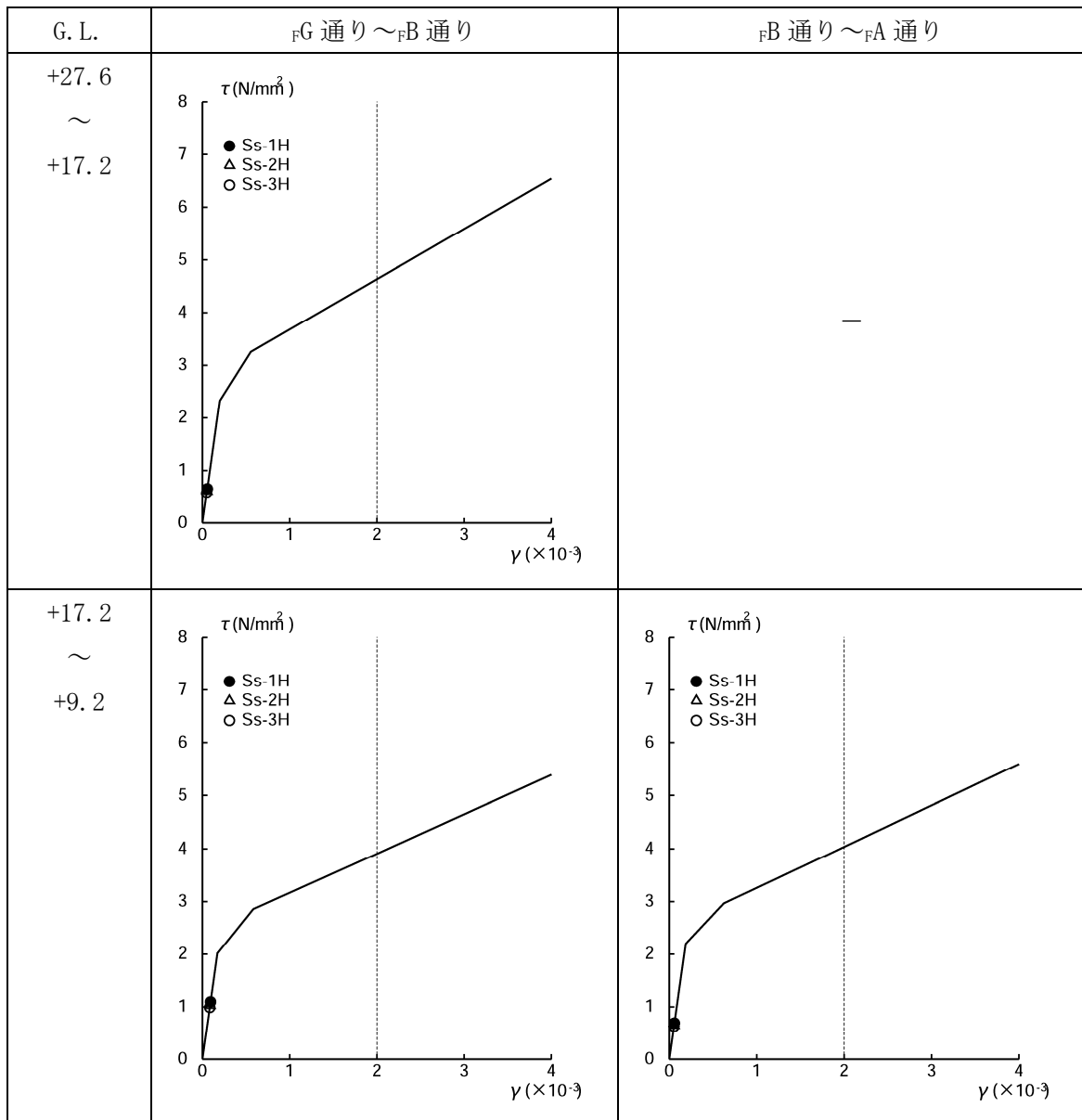


図 1.11(1) PL/B せん断スケルトン曲線上の最大応答値 NS 方向

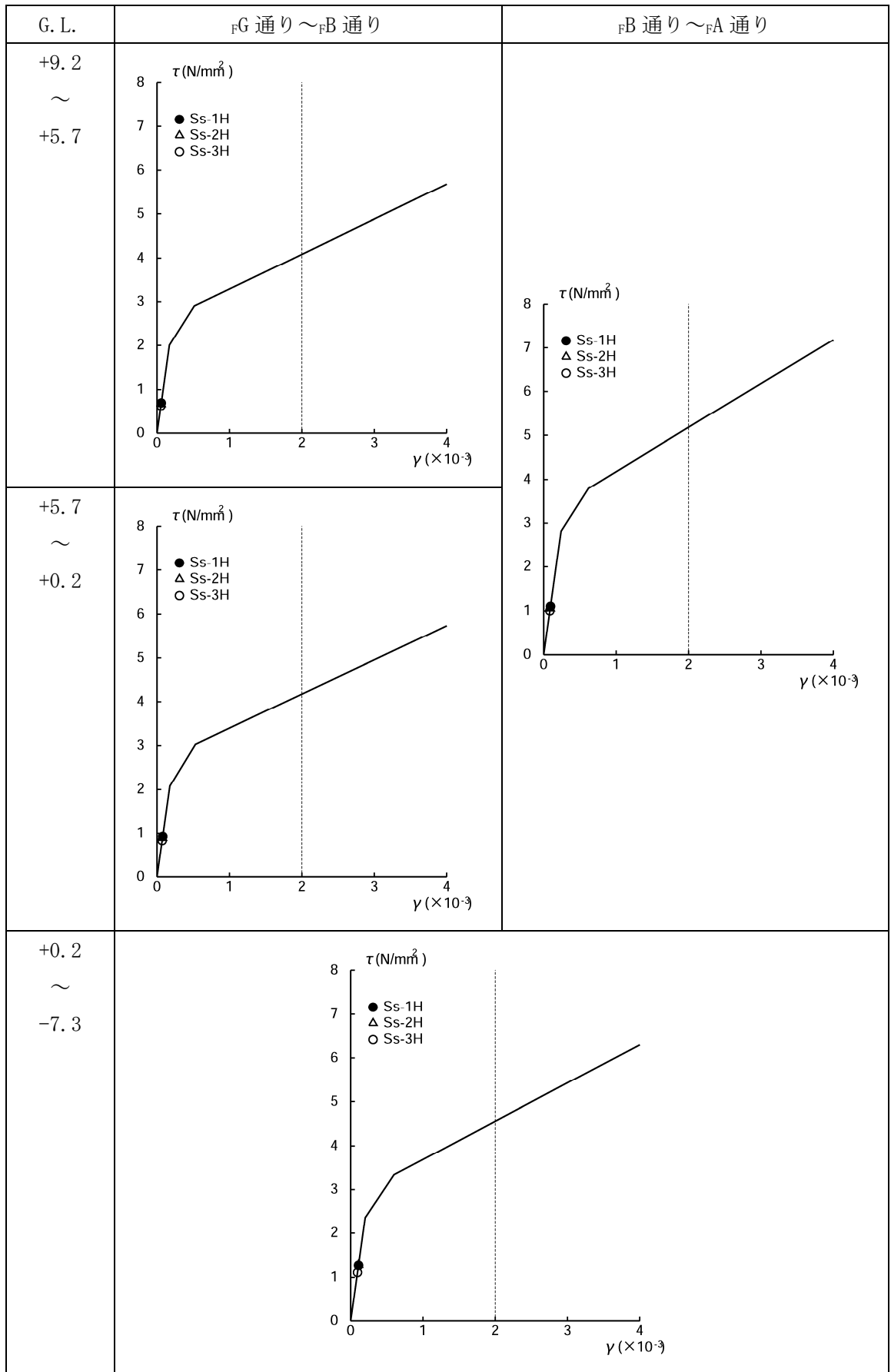


図 1.11(2) PL/B せん断スケルトン曲線上の最大応答値 NS 方向

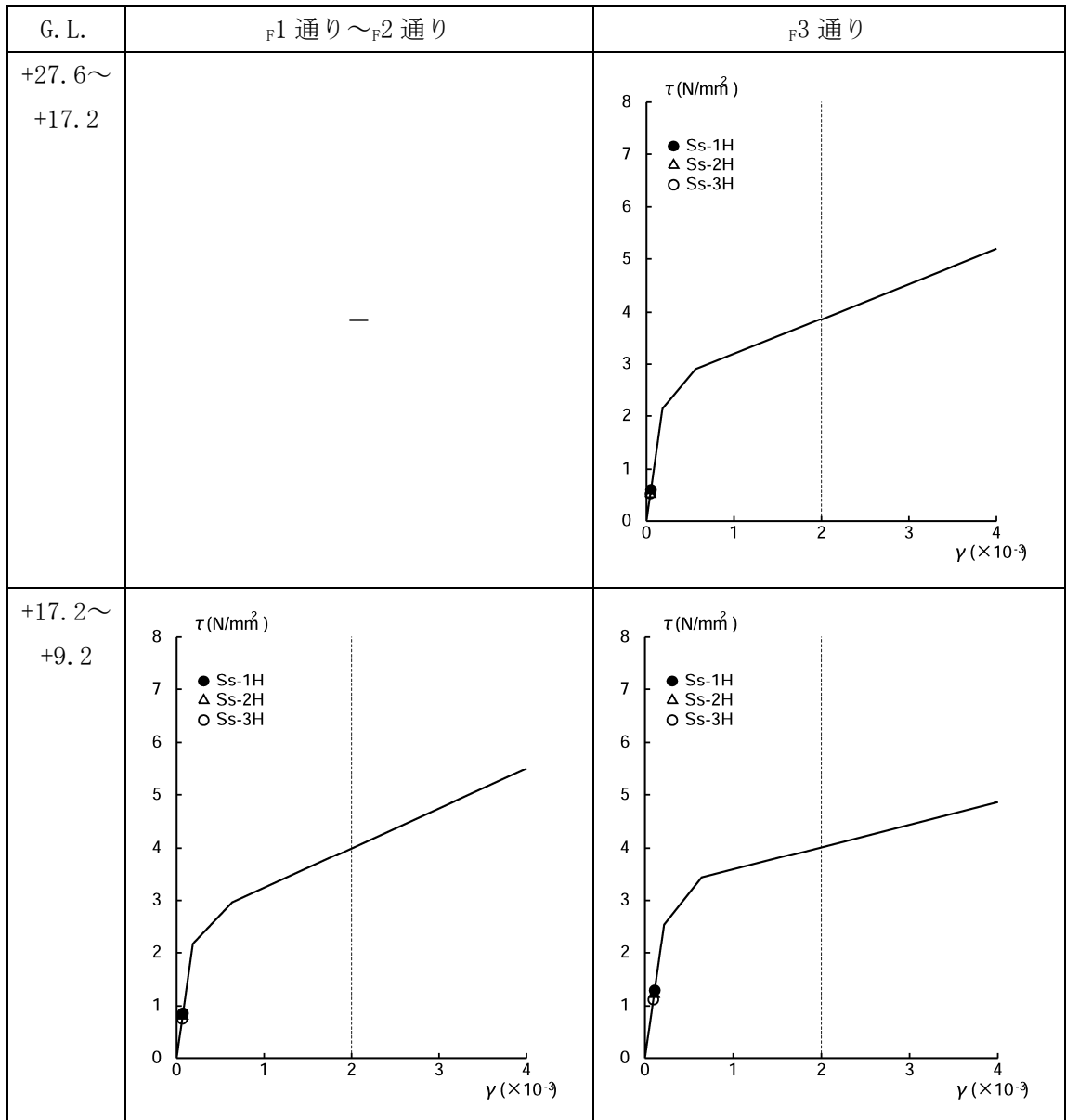


図 1.12(1) PL/B せん断スケルトン曲線上の最大応答値 EW 方向

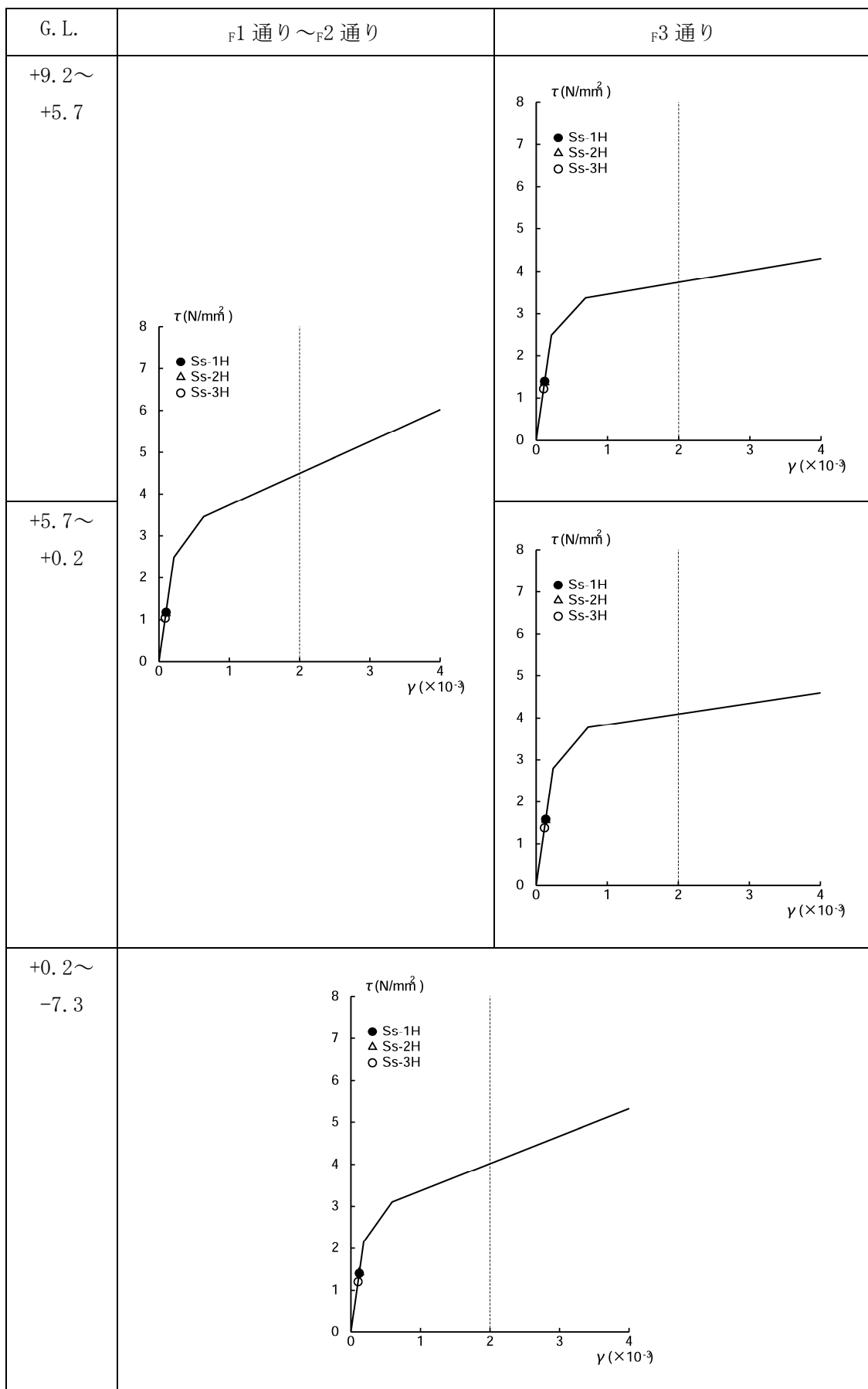


図 1.12 (2) PL/B せん断スケルトン曲線上の最大応答値 EW 方向

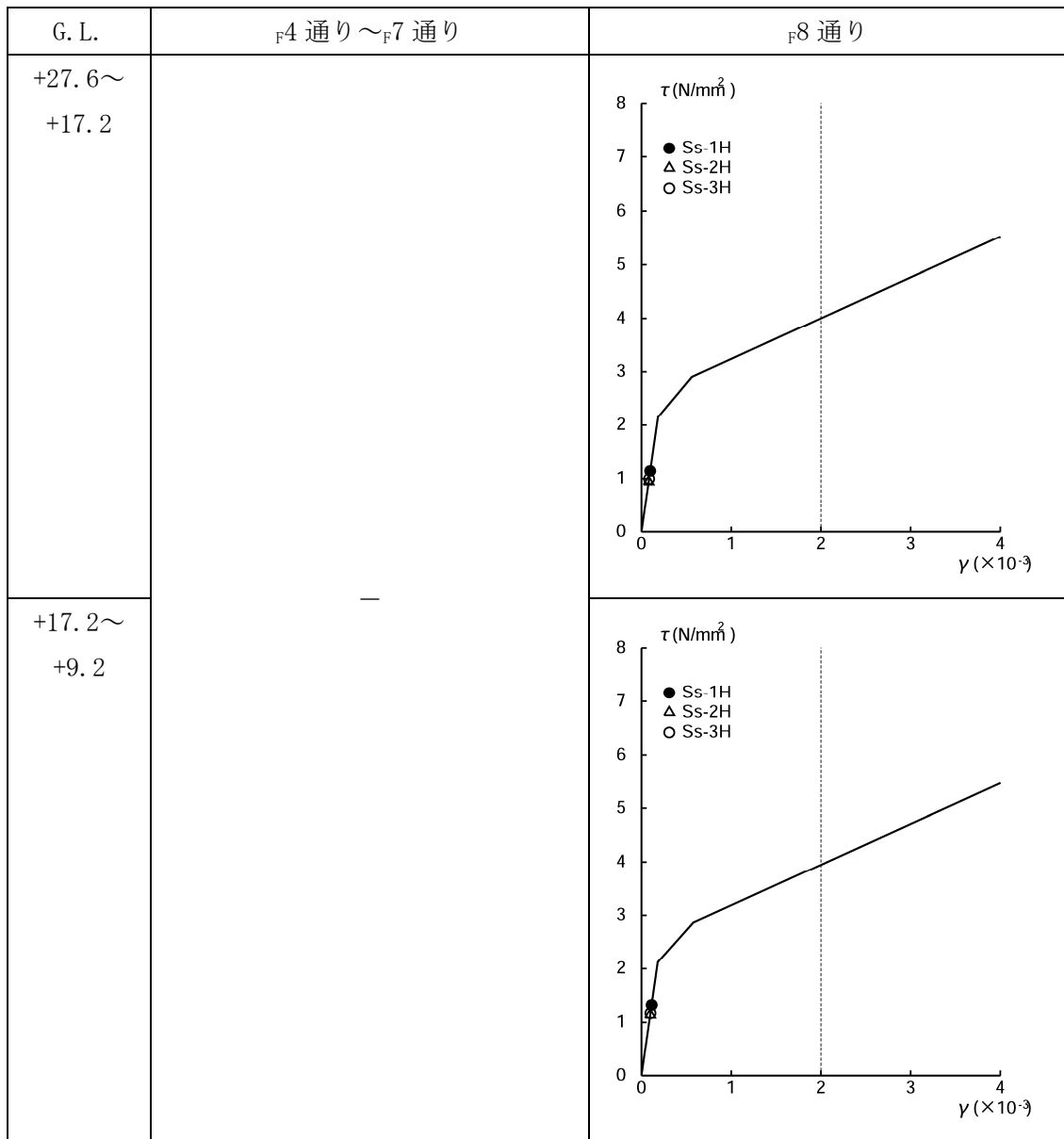


図 1.12 (3) PL/B せん断スケルトン曲線上の最大応答値 EW 方向

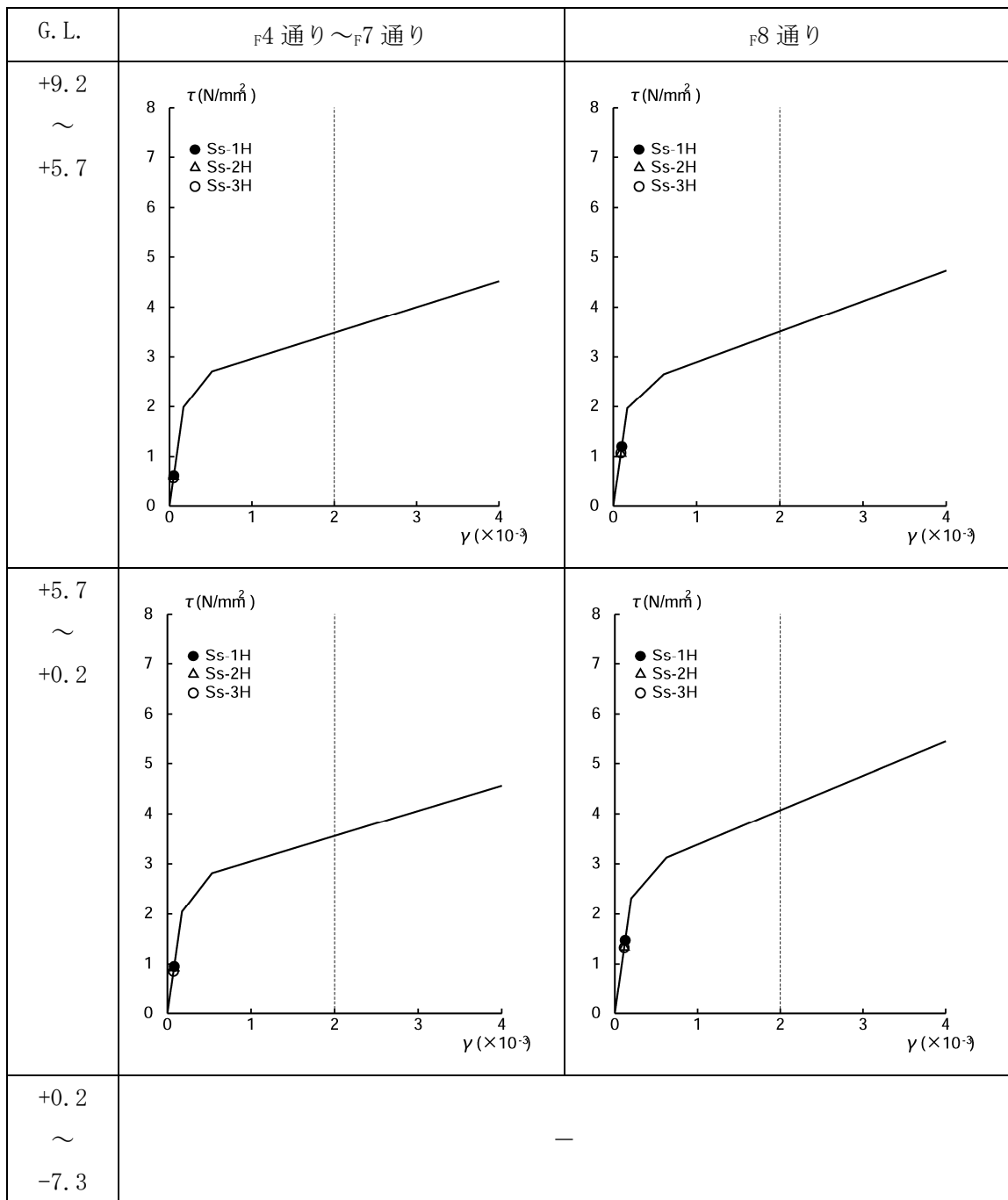


図1.12 (4) PL/B せん断スケルトン曲線上の最大応答値 EW方向

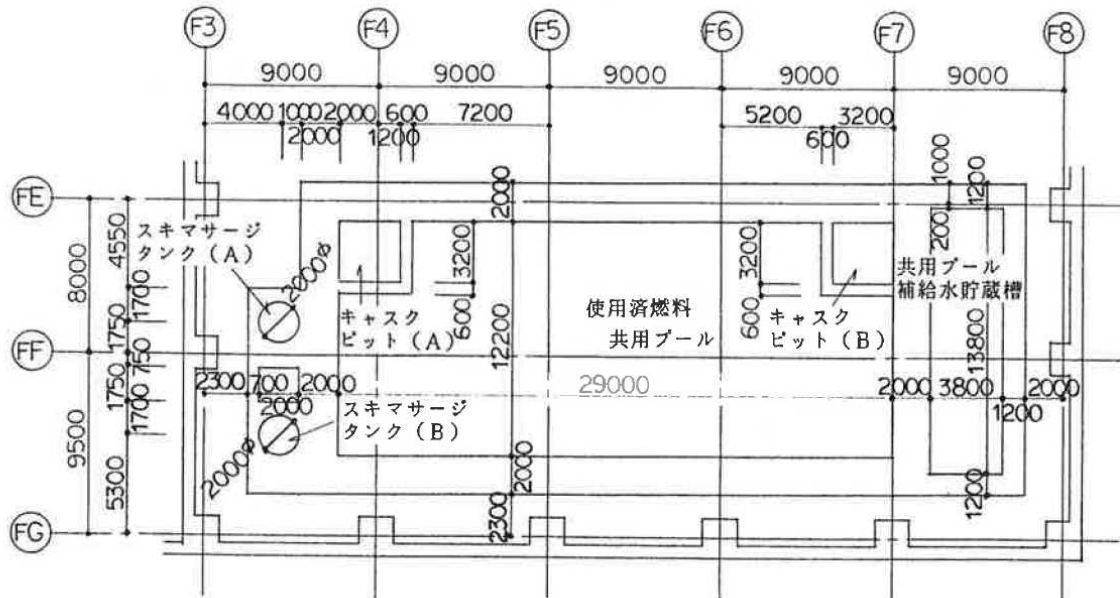
2. 使用済燃料共用プール躯体の耐震安全性評価

2.1 解析評価方針

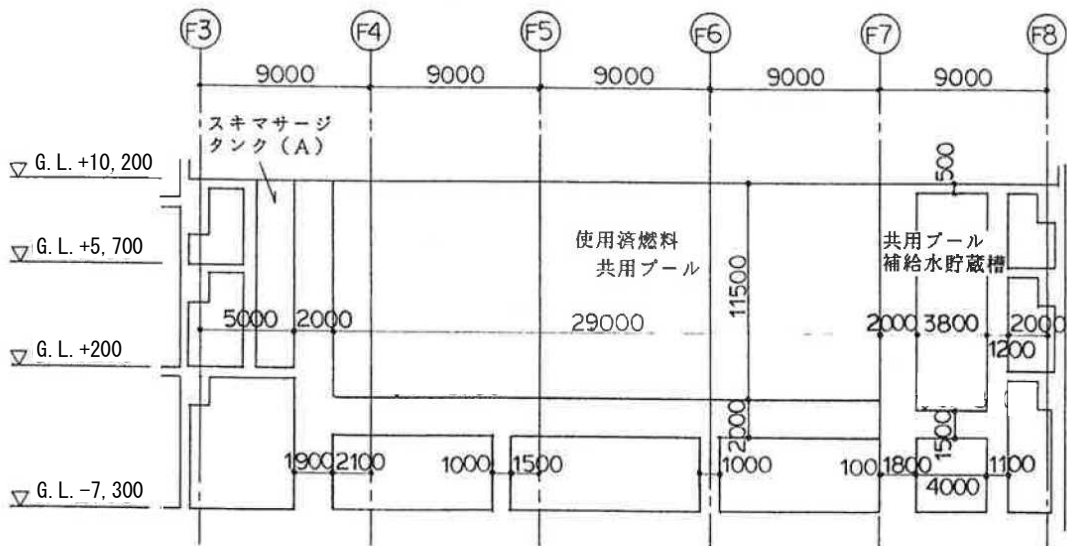
本検討では、使用済燃料共用プール躯体（以下、共用プール）の耐震安全性を3次元FEMモデルによって評価する。

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

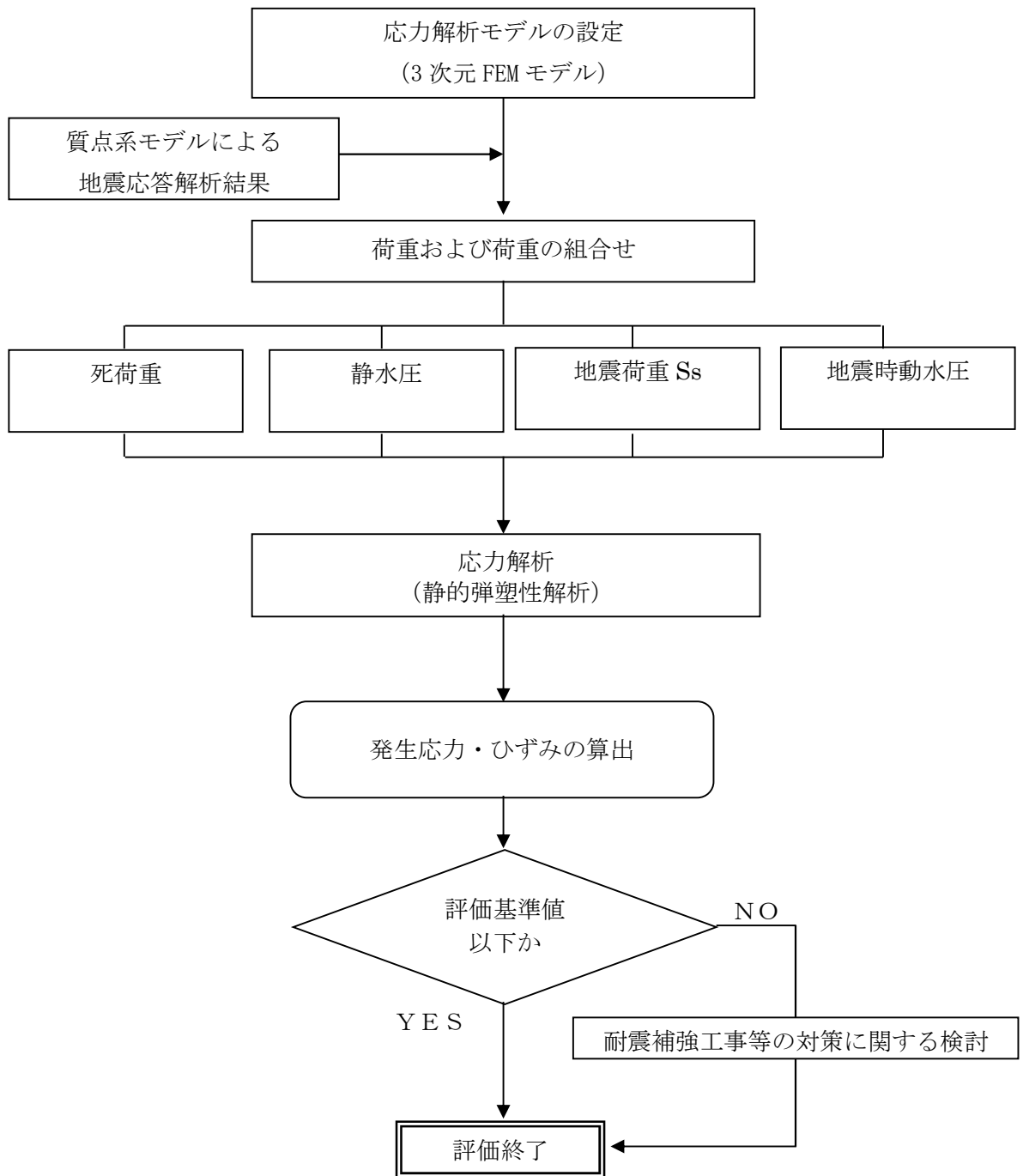


図 2.2 共用プールの耐震安全性評価フロー

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。

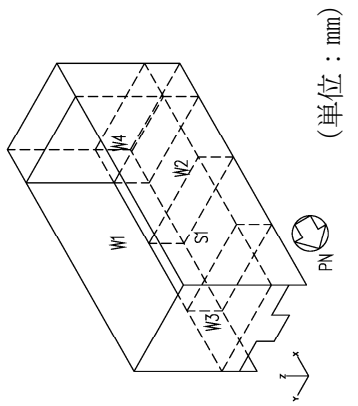
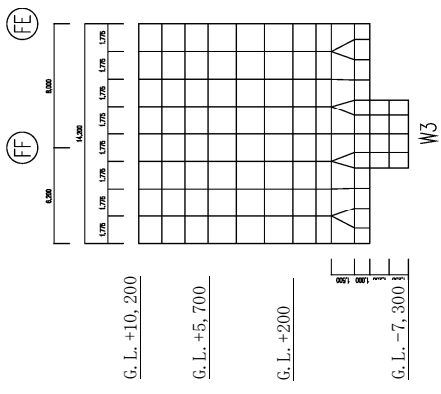
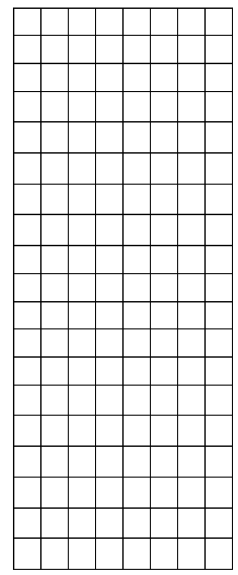
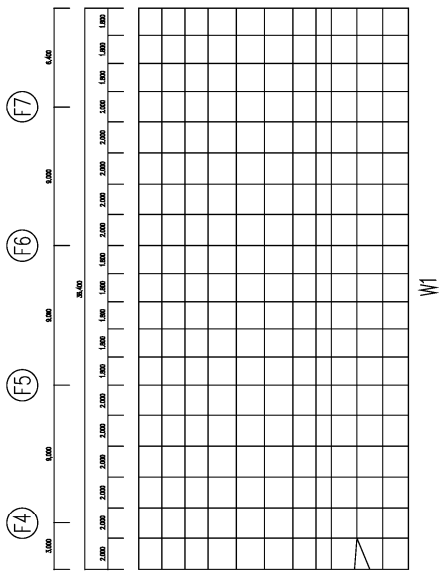
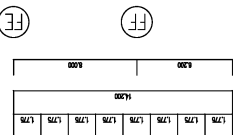
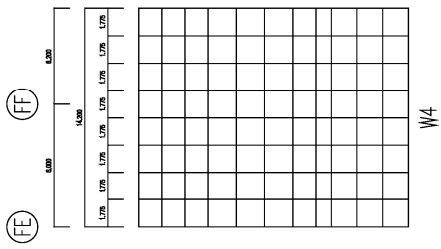
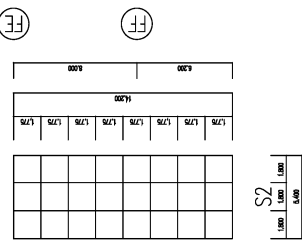
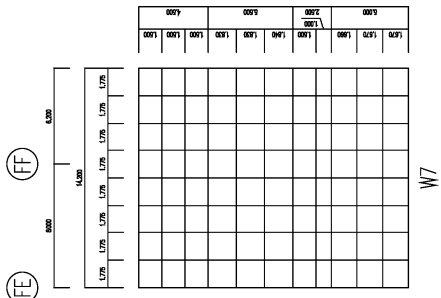
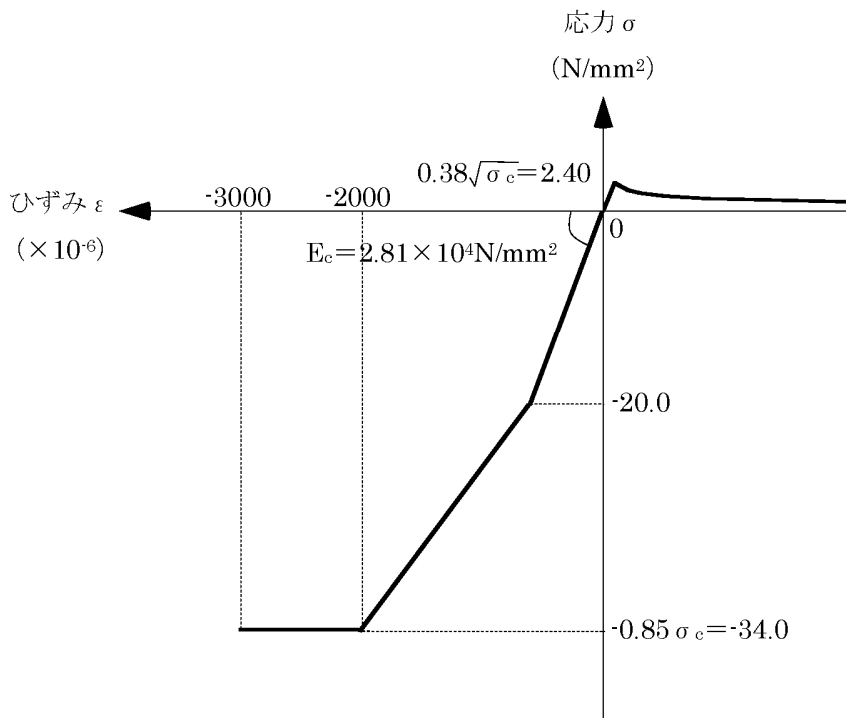


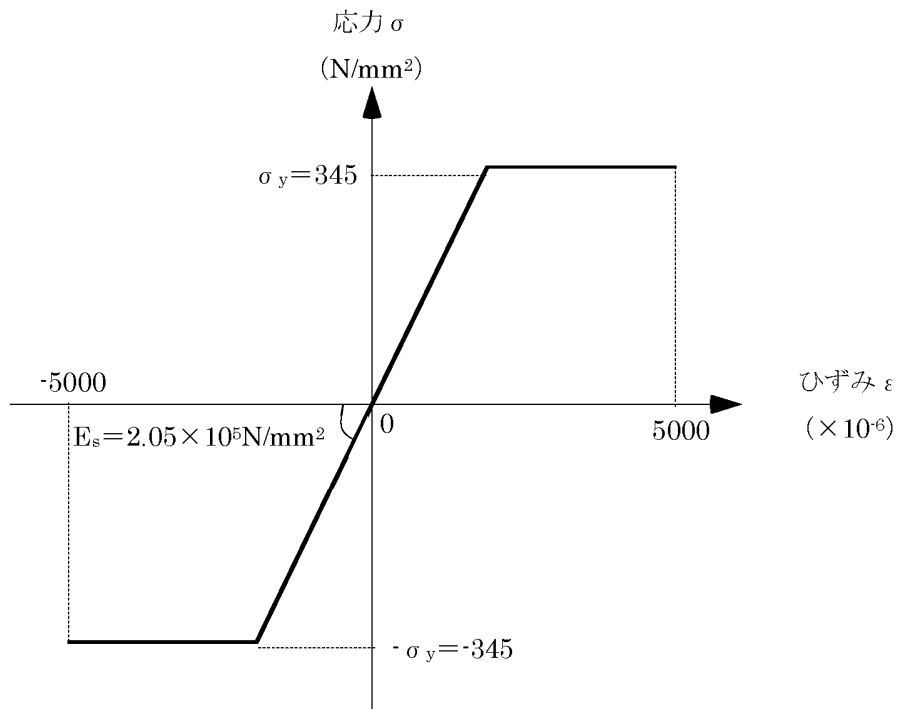
図 2.3 解析モデル概要図

G. L. +10, 200
 G. L. +5, 700
 G. L. +200
 G. L. -7, 300

G. L. +10, 200
 G. L. +5, 700
 G. L. +200
 G. L. -7, 300



(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

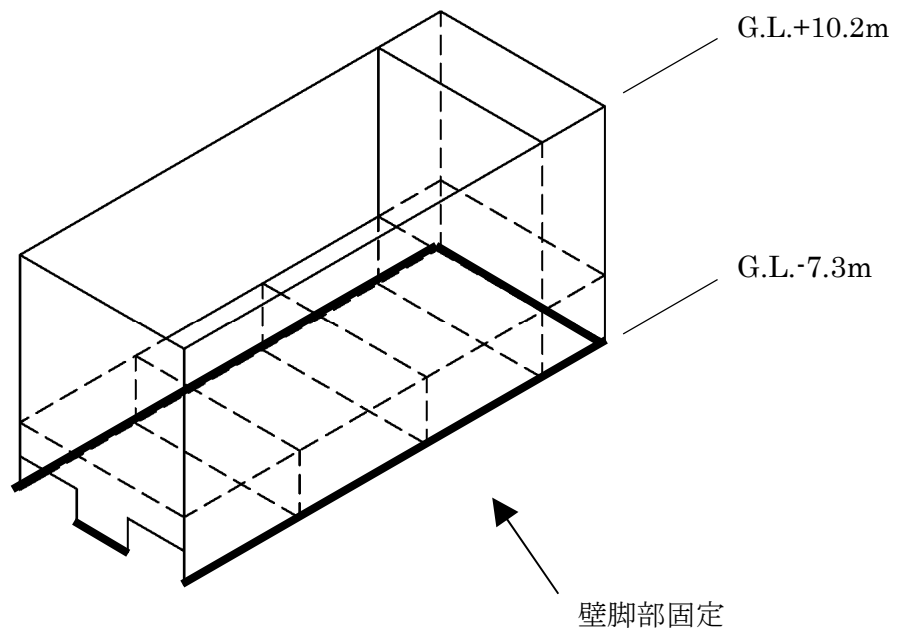


図 2.5 解析モデルの境界条件

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

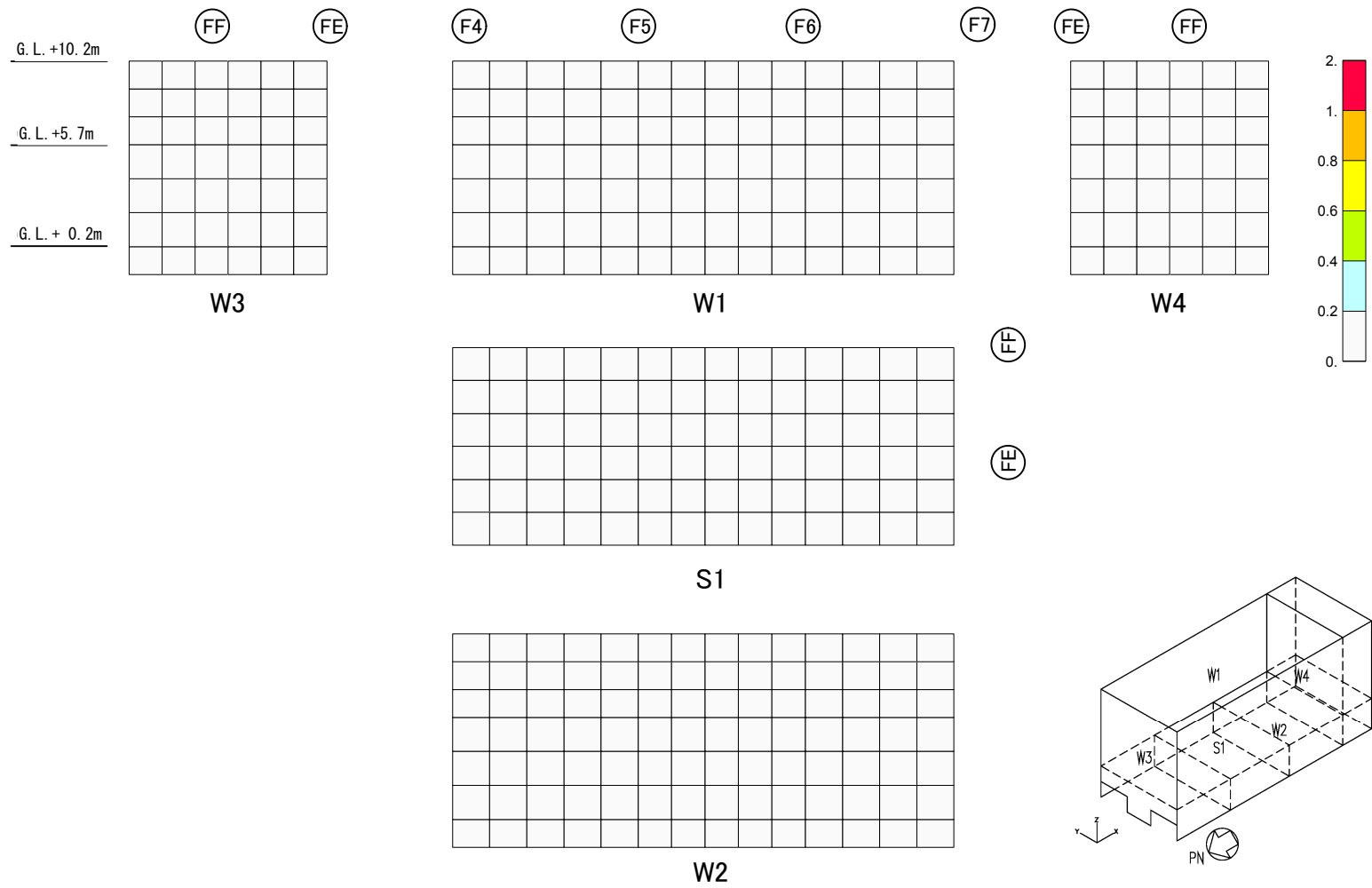


図 2.6 断面算定結果 コンクリートのひずみ 検定比コンター図 ϵ_x / ϵ_a (壁：水平方向，床：南北方向)

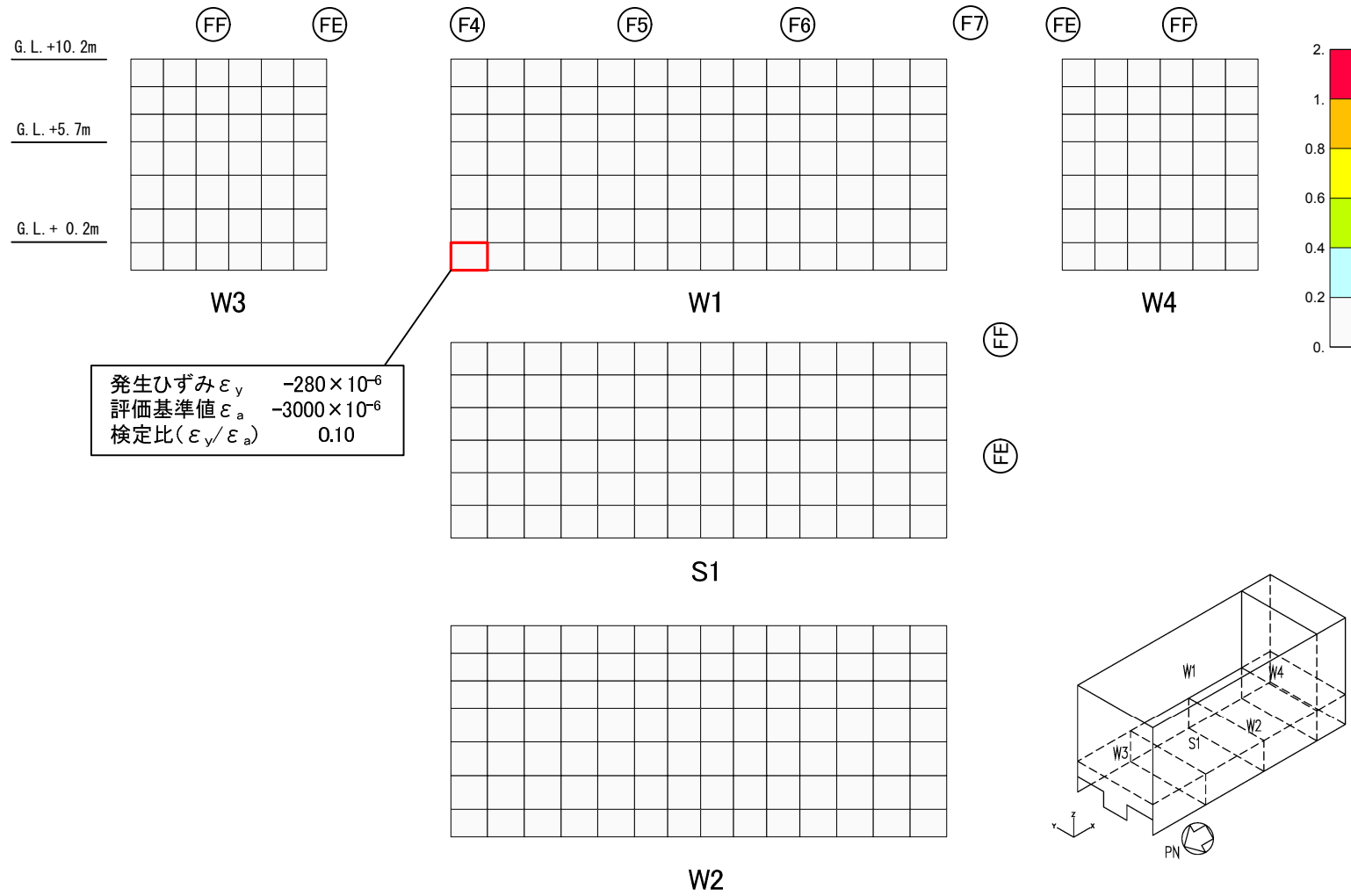


図 2.7 断面算定結果 コンクリートのひずみ 検定比コンター図 $\varepsilon_y / \varepsilon_a$ (壁：鉛直方向，床：東西方向)

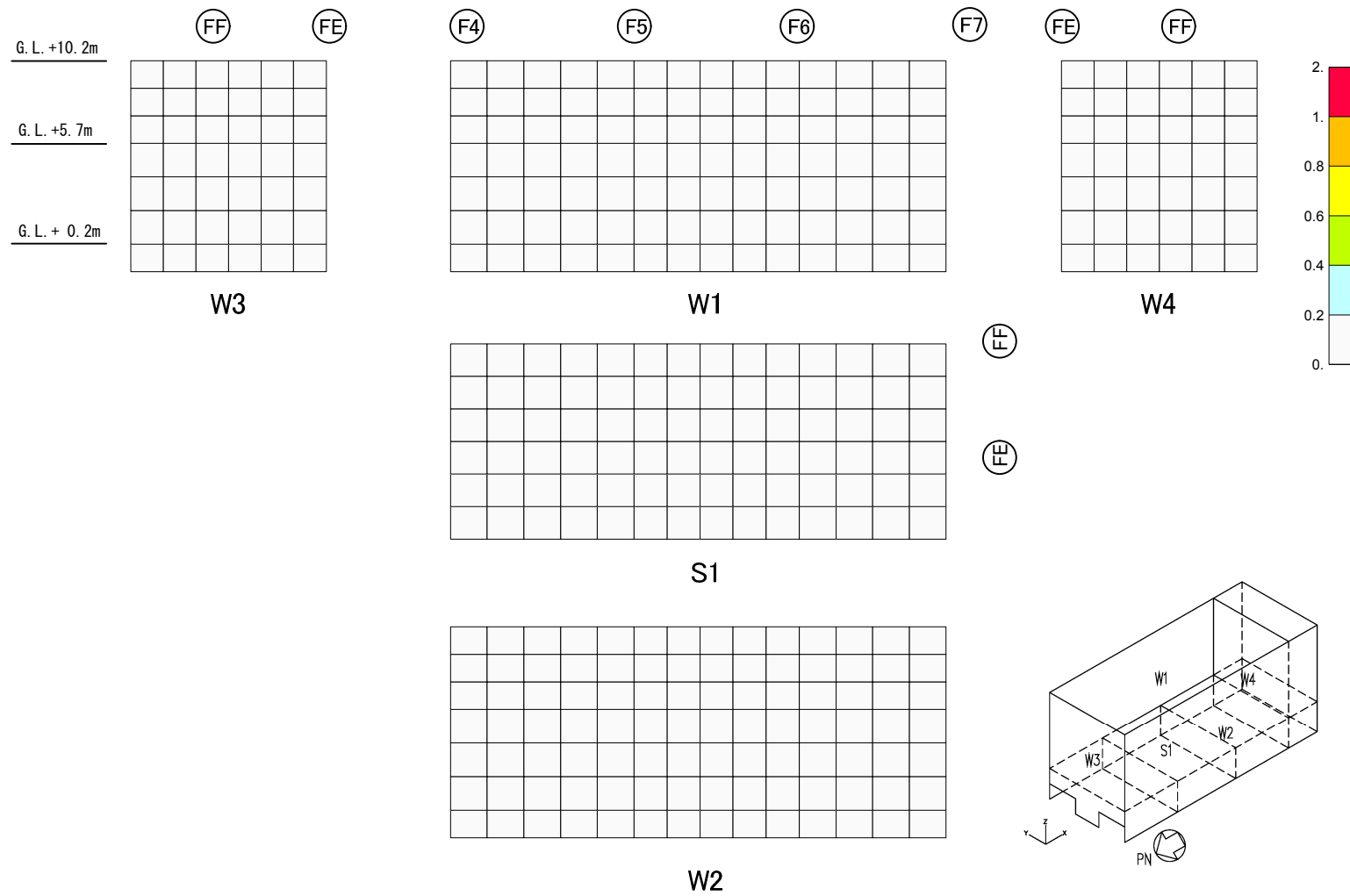


図 2.8 断面算定結果 鉄筋のひずみ 検定比コンター図 ϵ_x / ϵ_a (壁：水平方向，床：南北方向)

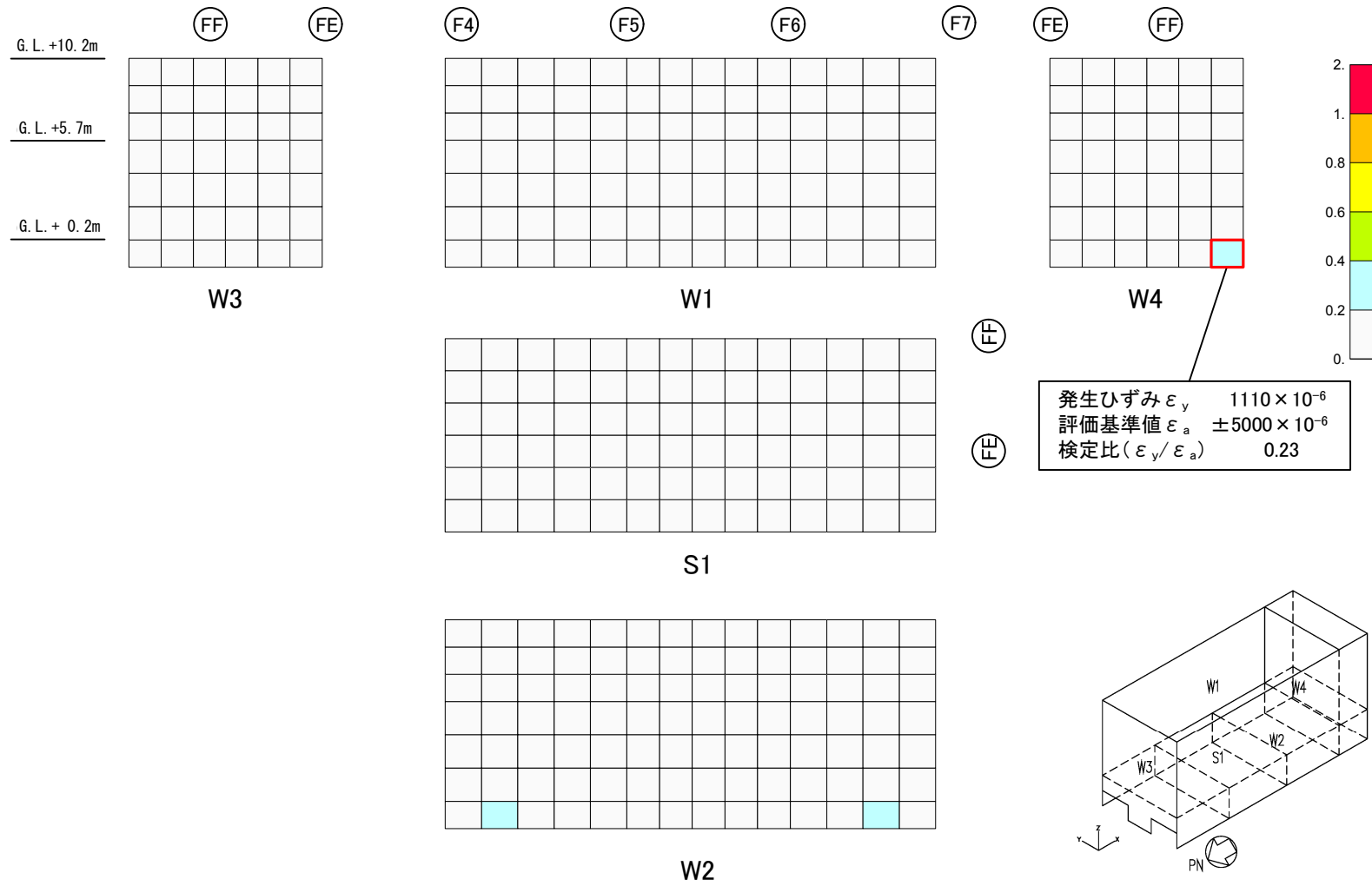


図 2.9 断面算定結果 鉄筋のひずみ 検定比コンター図 $\varepsilon_y / \varepsilon_a$ (壁：鉛直方向，床：東西方向)

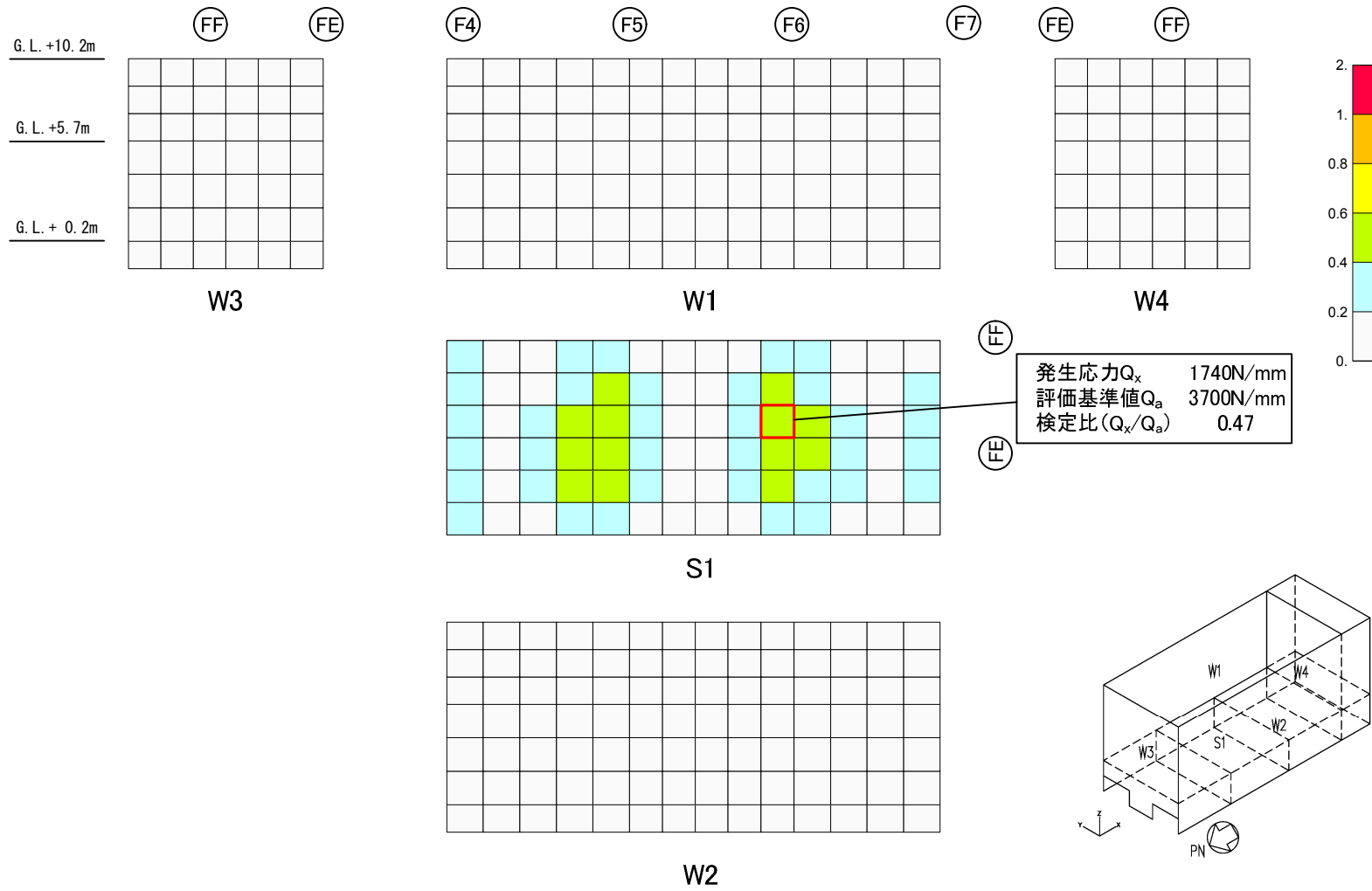


図 2.10 断面算定結果 面外せん断力 検定比コンター図 Q_x/Q_a (壁：水平方向，床：南北方向)

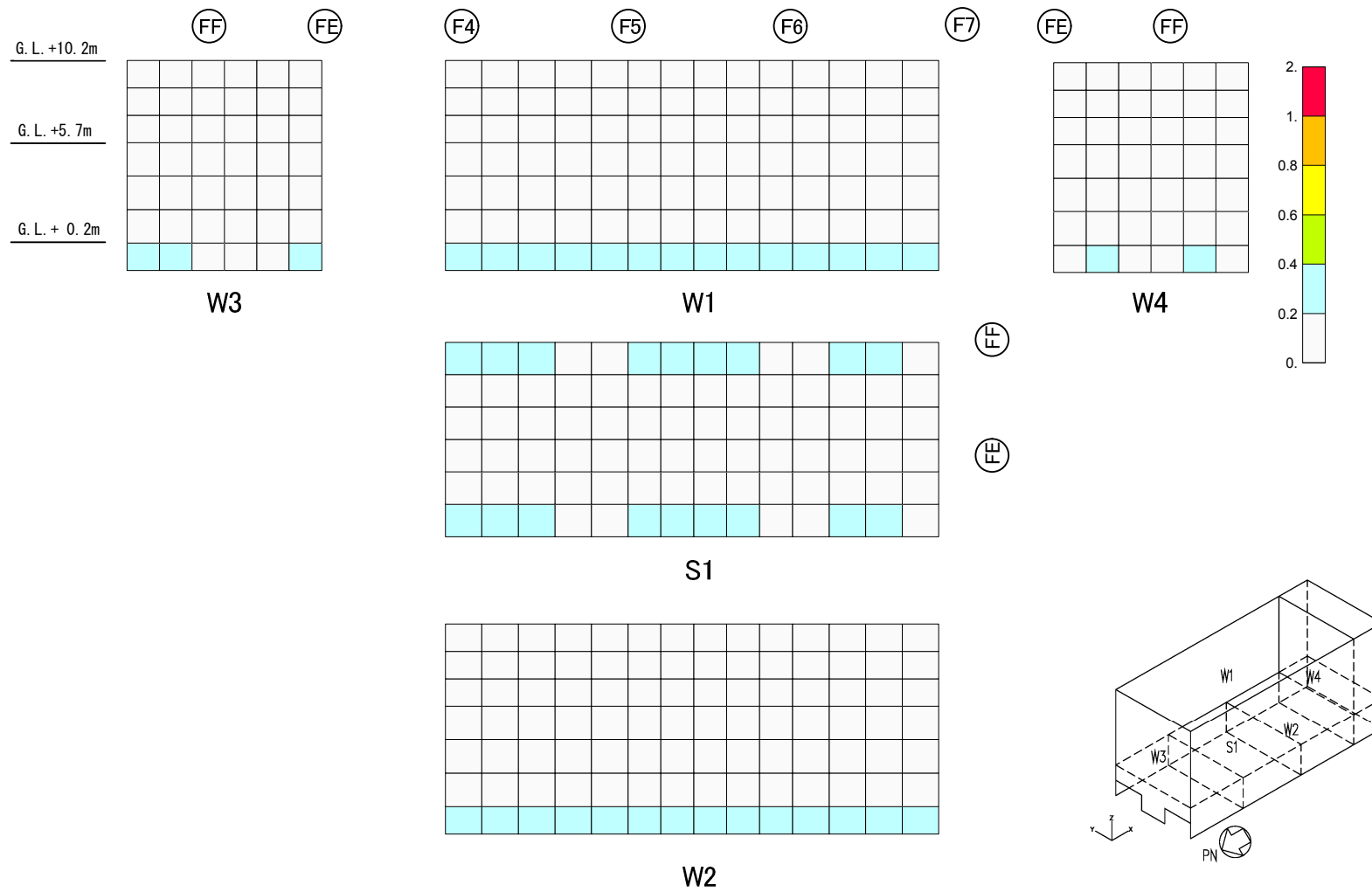


図 2.11 断面算定結果 面外せん断力 検定比コンター図 Q_y/Q_a (壁：鉛直方向，床：東西方向)

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

※O.P. 表記は震災前の「旧 O.P. 表記」を指す。
 T.P. 表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量 (-709mm) と O.P. から
 T.P. への読替値 (-727mm) を用いて、下式に基づくこととする。
 〈換算式〉 T.P. = 旧 O.P. - 1,436mm

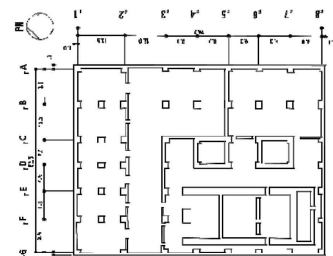
1. 評価方針

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。

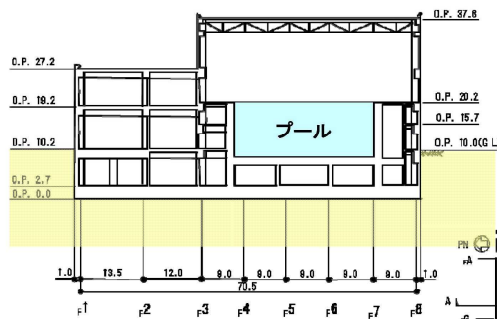
PL/Bの耐震壁は、機能保持限界における許容限
 界ひずみ 2×10^{-3} を評価基準値とする。

2. 地震応答解析 (1) PL/Bの概要

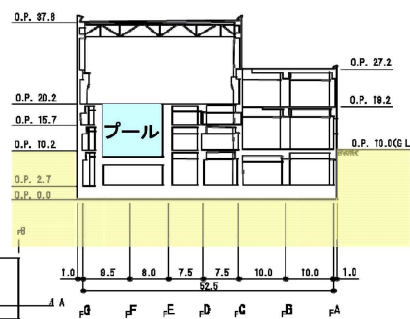
- 構造：鉄筋コンクリート造
 （一部鉄骨鉄筋コンクリート造及び鉄骨造）
- 階数：地上3階，地下1階
- 基礎：厚さ2.7mのべた基礎で、泥岩盤上に設置
- 平面形状：72.5m（NS方向）×54.5m（EW方向）
- 高さ：基礎版底面から37.6m（地上高さ27.6m）



平面図



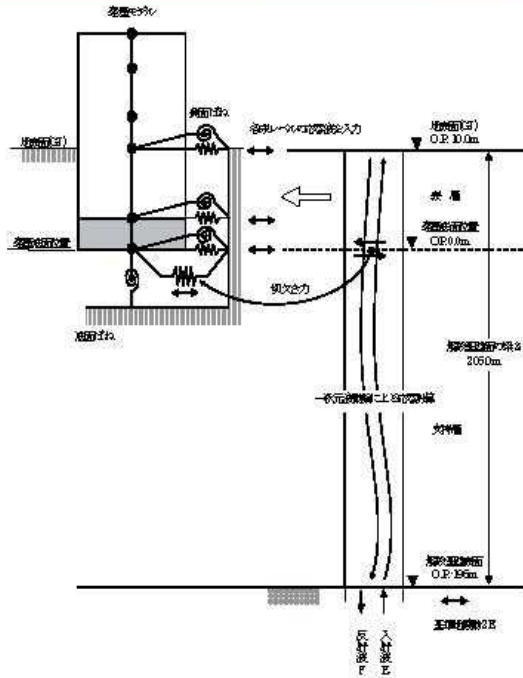
断面図 (NS方向)



断面図 (EW方向)

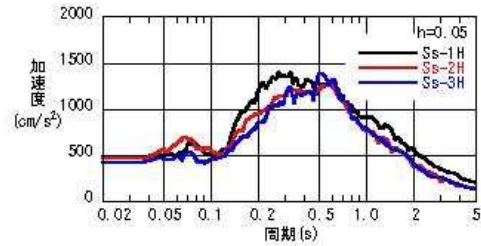
※O.P. 表記は震災前の「旧 O.P. 表記」を指す。
 T.P. 表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量 (-709mm) と O.P. から T.P. への読替値 (-727mm) を用いて、下式に基づくこととする。
 (換算式) T.P. = 旧 O.P. - 1,436mm

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、解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s を入力として、解放基盤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。

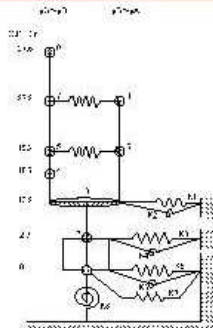
建屋基礎底面位置におけるせん断力(切欠き力)を入力地震動に付加することにより、地盤の切欠き効果を考慮した。



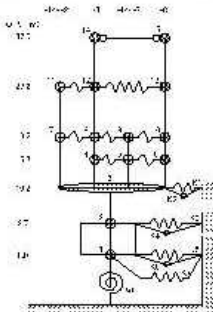
入力地震動の応答スペクトル (基礎底面E+F)

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)

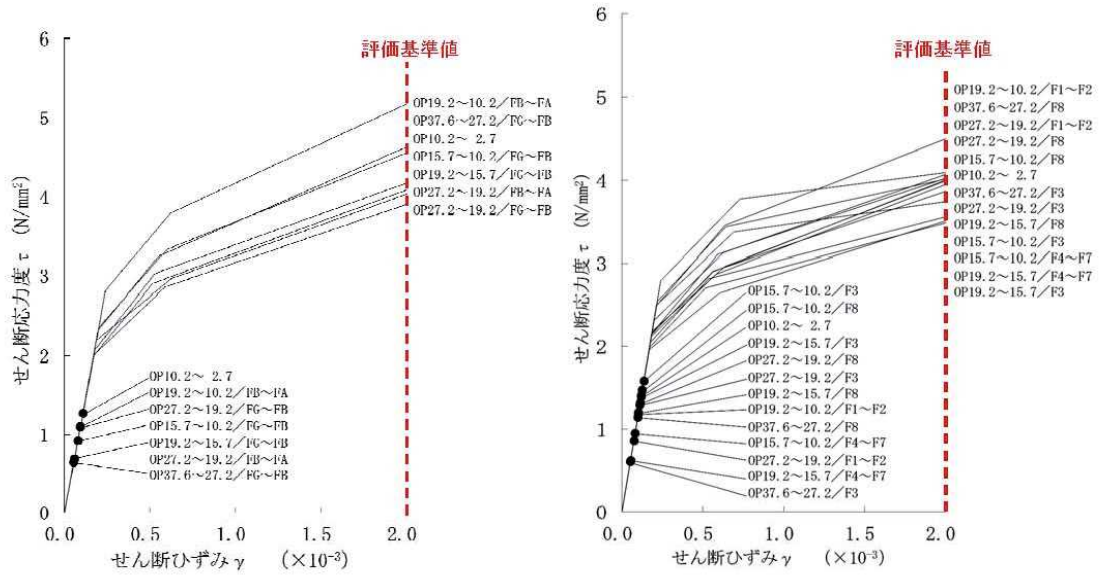


地震応答解析モデル (EW方向)

- 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 (Ss-1)
 - ・NS方向 (1次: 0.289s 2次: 0.154s)
 - ・EW方向 (1次: 0.298s 2次: 0.155s)

※O.P. 表記は震災前の「旧 O.P. 表記」を指す。
 T.P. 表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量 (-709mm) と O.P. から T.P. への読替値 (-727mm) を用いて、下式に基づくこととする。
 (換算式) T.P. = 旧 O.P.-1,436mm

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)

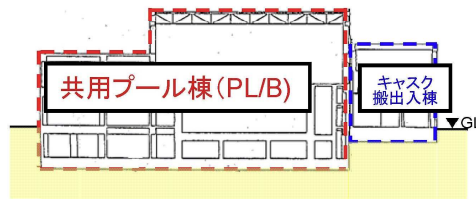


目視点検 (実施期間: 平成23年12月5日~平成24年4月26日) の結果*、プール壁には、平成21年度調査後に発生したひび割れは見られず、一般壁で最大幅0.5mm、一般床で最大幅0.9mmのひび割れが新たに確認されたものの、躯体の健全性を損なうひび割れは見られなかった。

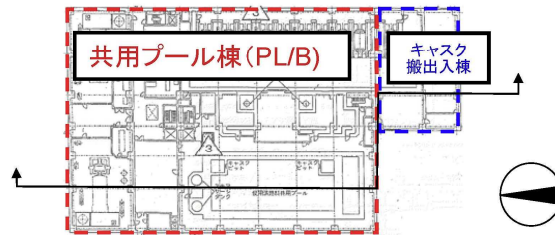
*: 点検はマニュアルに基づき目視可能な範囲において、幅0.3mm以上のひび割れを記録し、1mm以上のひび割れを要補修としている。

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。

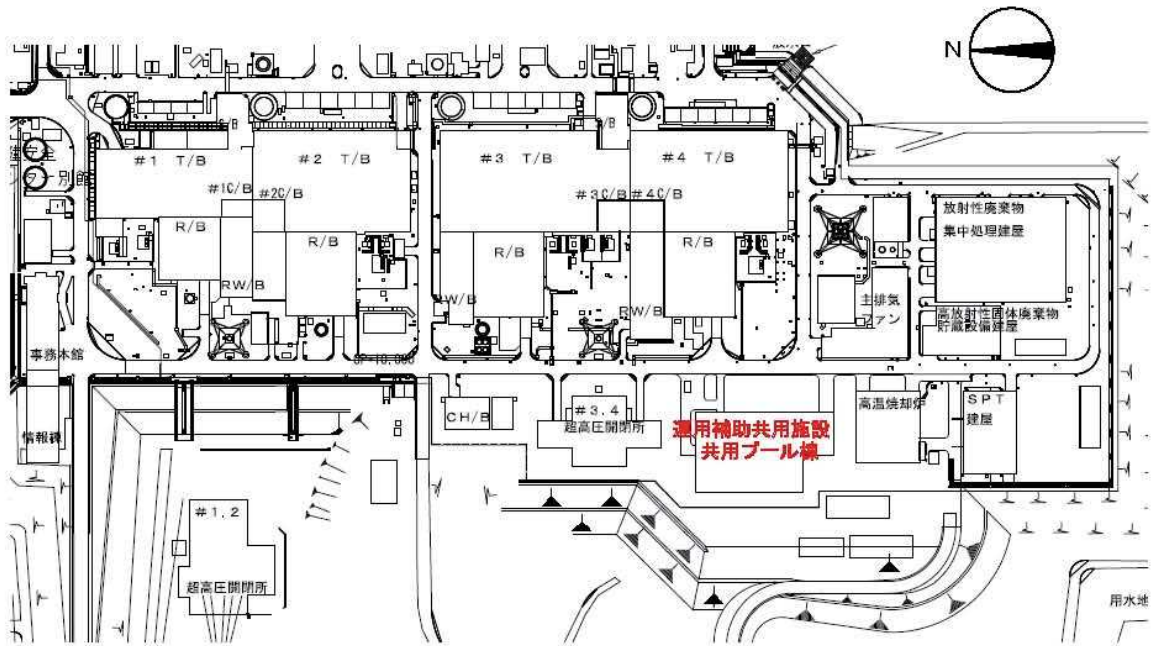
*2: 鉄筋コンクリートの値を示す。

*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】

※O.P. 表記は震災前の「旧 O.P. 表記」を指す。
 T.P. 表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量 (-709mm) と O.P. から T.P. への読替値 (-727mm) を用いて、下式に基づくこととする。
 (換算式) T.P. = 旧 O.P.-1,436mm

PL/Bの配置



福島第一原子力発電所 配置図

地盤定数

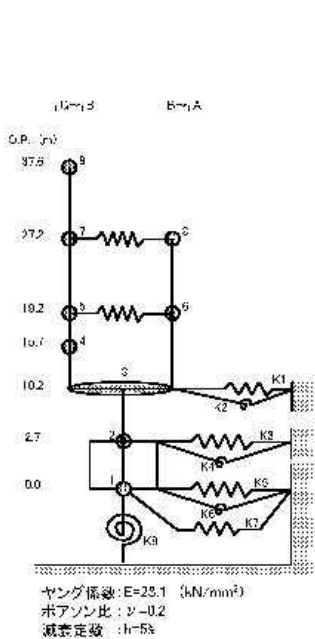
地盤モデル及び物性値については、PL/B付近の地盤の調査結果に基づき、せん断弾性係数及び減衰定数のひずみ依存性を考慮した等価線形解析により、基準地震動Ss-1、Ss-2及びSs-3のそれぞれについて個別に設定した。

地盤定数

標高 O.P. (m)	地質	せん断波 速度 Ys (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	2.76	2.66	7.88	8.08	7.79	3	3	3	12.7		
-80.0		500	17.1	0.455	4.36				3.44	3.53	3.40	10.01	10.27	9.89					70.0	
-108.0		550	17.6	0.446	5.63				4.45	4.56	4.39	12.87	13.19	12.70						28.0
-196.0		500	17.8	0.442	5.63				5.15	5.29	5.09	14.88	15.25	14.68						
-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	26.26	26.26	26.26	-	-	-	-		

※O.P. 表記は震災前の「旧O.P. 表記」を指す。
 T.P. 表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量 (-709mm) と O.P. から
 T.P. への読替値 (-727mm) を用いて、下式に基づくこととする。
 (換算式) T.P. = 旧 O.P.-1,436mm

地震応答解析モデル

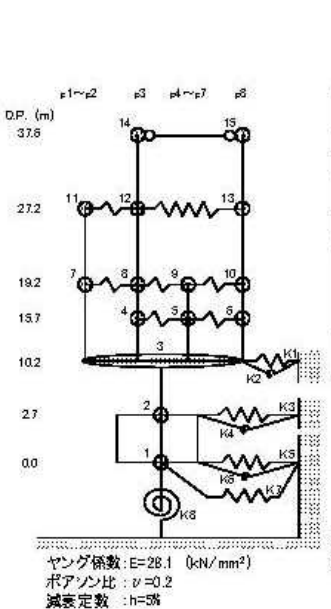


部材番号	質量 (kN)	回転慣性 (×10 ⁶ kNm ²)
9	41,840	1,108
45.40		
19.09		
7	100,530	39,690
	50.38	18.69
81.90		42.10
49.48		31.68
5	137,540	45,030
	70.96	21.61
749.00		47.20
68.20		36.88
4	98,490	
	20.04	
247.70		
84.82		
3	380,400	152.05
333.40		
157.87		
2	237,620	
	103.00	
3951.00		
1730.70		
1	23,540	
	55.02	

部材番号	質量 (kN)	回転慣性 (×10 ⁶ kNm ²)
7	28.75	8
5	18.23	6

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

地震応答解析モデル

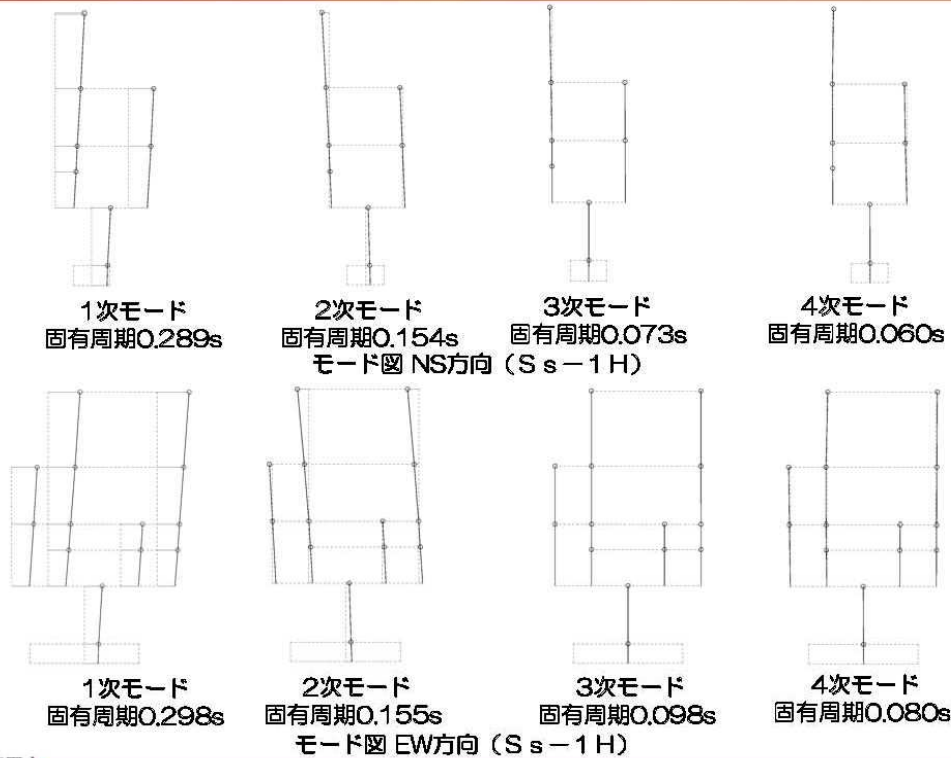


部材番号	質量 (kN)	回転慣性 (×10 ⁶ kNm ²)
14	20,900	4,50
15	20,940	4,50
19.70		19.70
3.94		3.94
11	56,470	34,310
	10.37	10.15
64.00		35.90
28.96		12.58
7	59,770	18,470
	16.94	4.99
81.70		46.00
36.95		19.51
8	28,060	
	8.12	
9	76,270	
	24.09	
10	18,470	
	4.99	
4	25.80	87.4
	7.08	4.27
5	81.80	79,250
	1.16	9.13
6	11,050	
	25.00	41.00
7	7.70	1.823
3	380,400	101.79
308.10		
95.52		
2	237,620	
	62.97	
3951.00		
978.00		
1	125,540	
	31.10	

部材番号	質量 (kN)	回転慣性 (×10 ⁶ kNm ²)
14	00 (剛ばねとした)	15
11	19.32	13
7	15.71	8
		9
		5
		10.75
		10
		5
		5.09
		6

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

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)

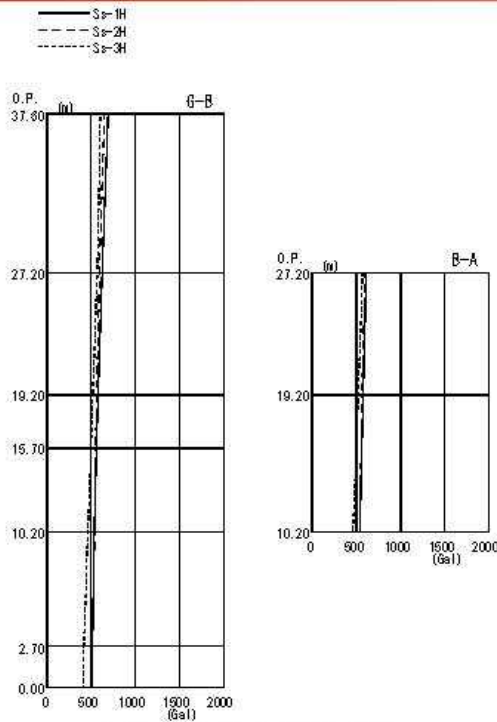
次数	固有周期 (sec)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.295	3.39	1.503	建屋-地盤連成系 1次
2	0.154	6.50	-0.532	
3	0.098	10.17	-0.003	
4	0.080	12.45	-0.078	
5	0.076	13.14	-0.031	

(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	

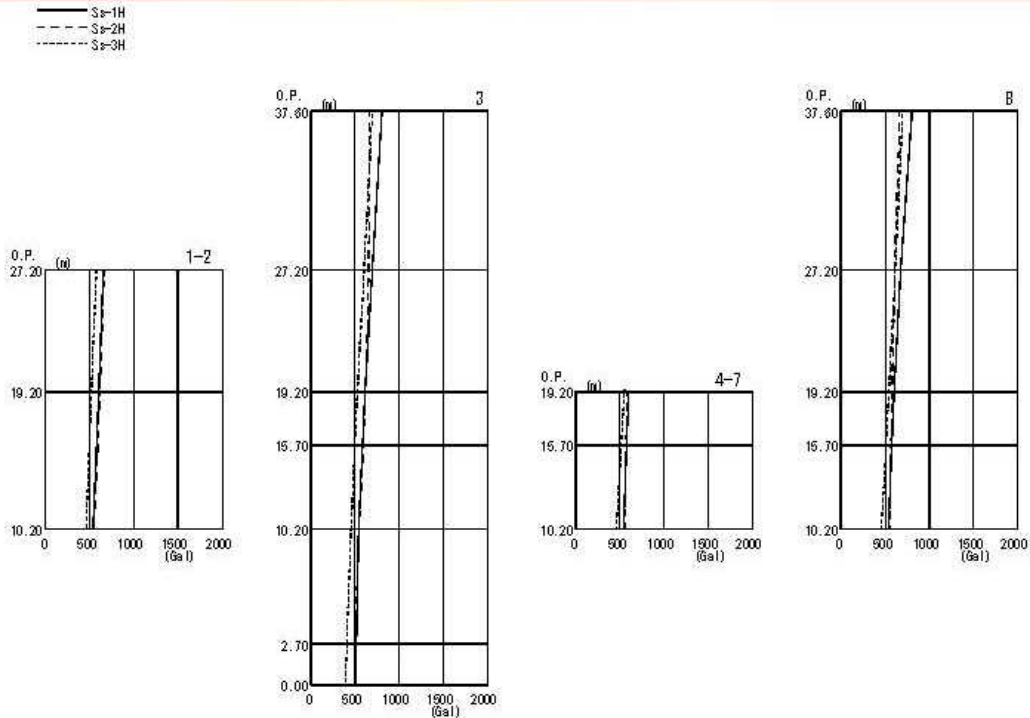
※O.P. 表記は震災前の「旧 O.P. 表記」を指す。
 T.P. 表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量 (-709mm) と O.P. から
 T.P. への読替値 (-727mm) を用いて、下式に基づくこととする。
 (換算式) T.P. = 旧 O.P.-1,436mm

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)

※O.P. 表記は震災前の「旧 O.P. 表記」を指す。
 T.P. 表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量 (-709mm) と O.P. から
 T.P. への読替値 (-727mm) を用いて、下式に基づくこととする。
 (換算式) T.P. = 旧 O.P.-1,436mm

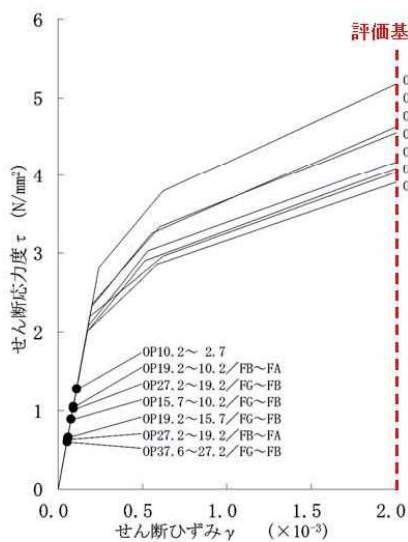
耐震壁の耐震安全性評価

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。

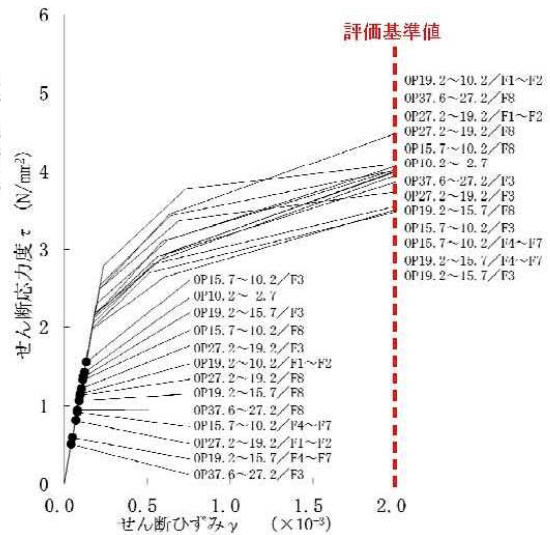
耐震壁の最大応答せん断ひずみ一覧

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



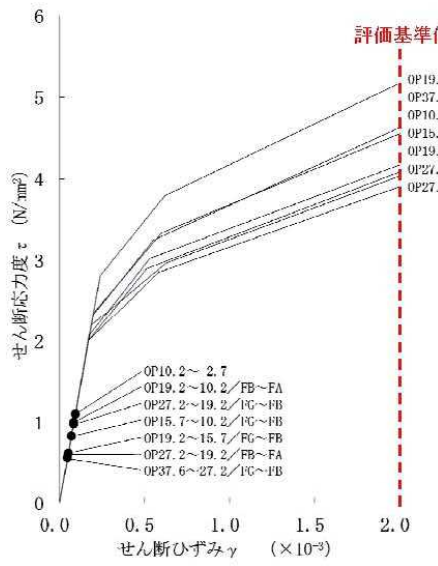
せん断スケルトン曲線上の最大応答値
(S_s-2 NS方向)



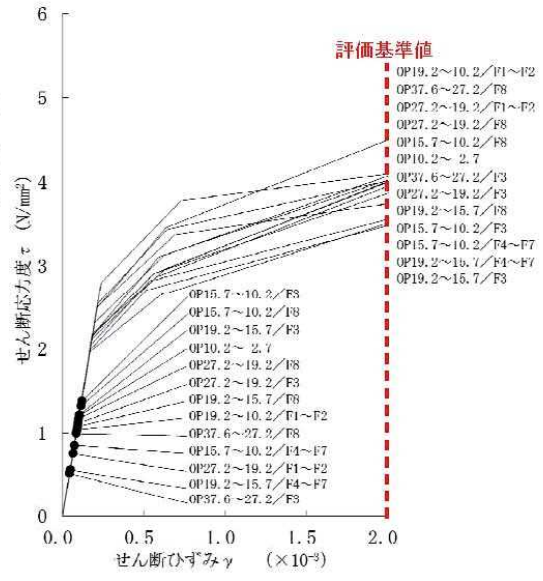
せん断スケルトン曲線上の最大応答値
(S_s-2 EW方向)

※O.P. 表記は震災前の「旧 O.P. 表記」を指す。
 T.P. 表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量 (-709mm) と O.P. から
 T.P. への読替値 (-727mm) を用いて、下式に基づくこととする。
 (換算式) T.P. = 旧 O.P. - 1,436mm

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(T.P.約35m)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「 .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G.L.+0.2m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G.L.+0.2m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。

添付資料 - 8では、G.L. ±0m=T.P.8.5m()とする。

() 震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.からT.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算している。

$$\text{換算式 } T.P. = \text{旧O.P.} - 1,436\text{mm}$$

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

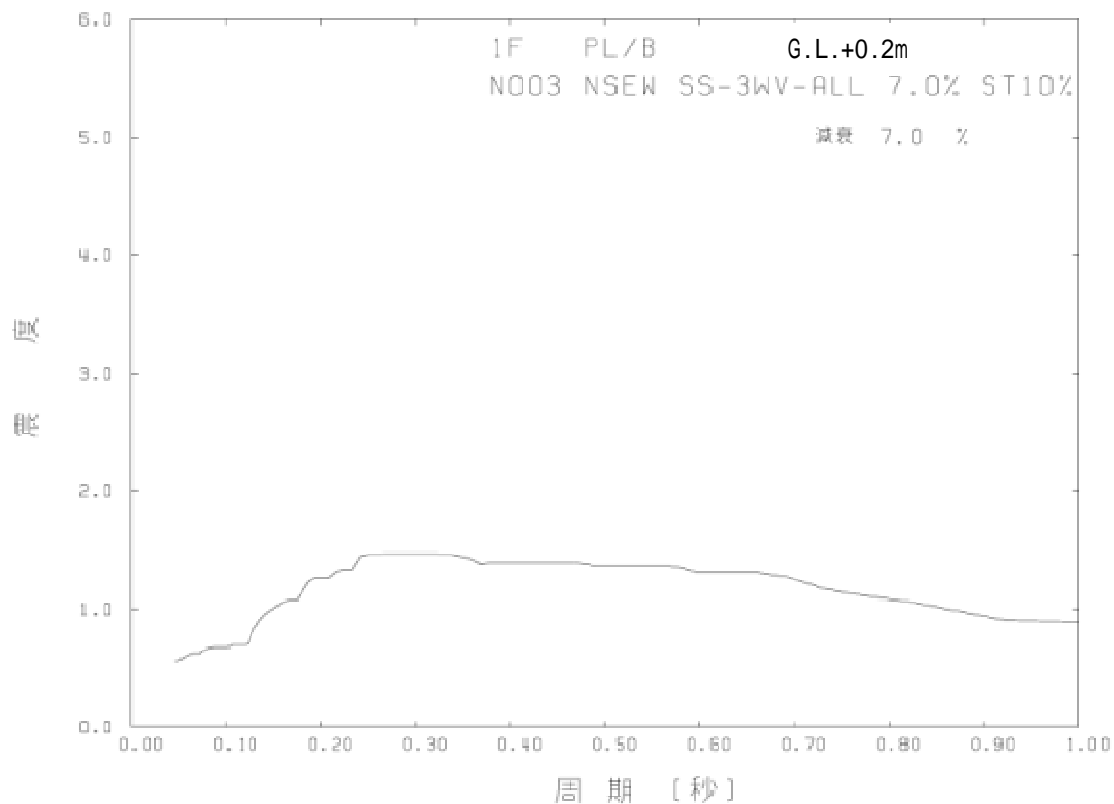


図1 共用プールG.L.+0.2mでの床応答スペクトル(水平方向)

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	Ss 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G.L.+0.2mでの基準地震動Ssによる最大加速度の1.2倍(1.2ZPA)を用いた。

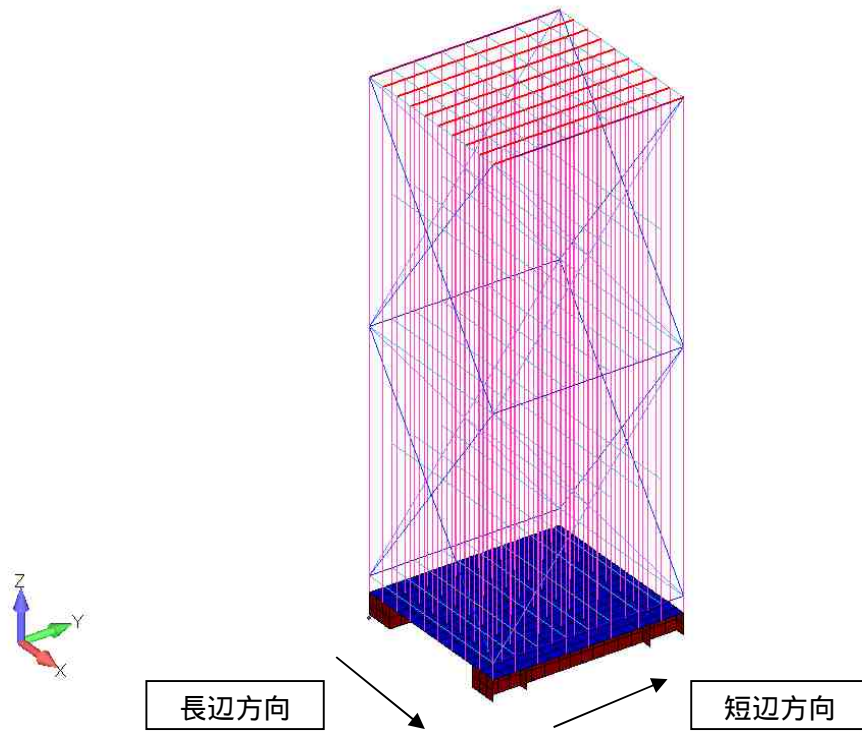


図2 使用済燃料貯蔵ラック（その3）の解析モデル

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S₂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S₂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S₂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G.L.+17,2m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。

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

H：水平方向の応答比

V：鉛直方向の応答比

H：設計時のS₂地震動における水平震度による組合わせ応力

V：設計時のS₂地震動における鉛直震度による組合わせ応力

o：設計時のS₂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

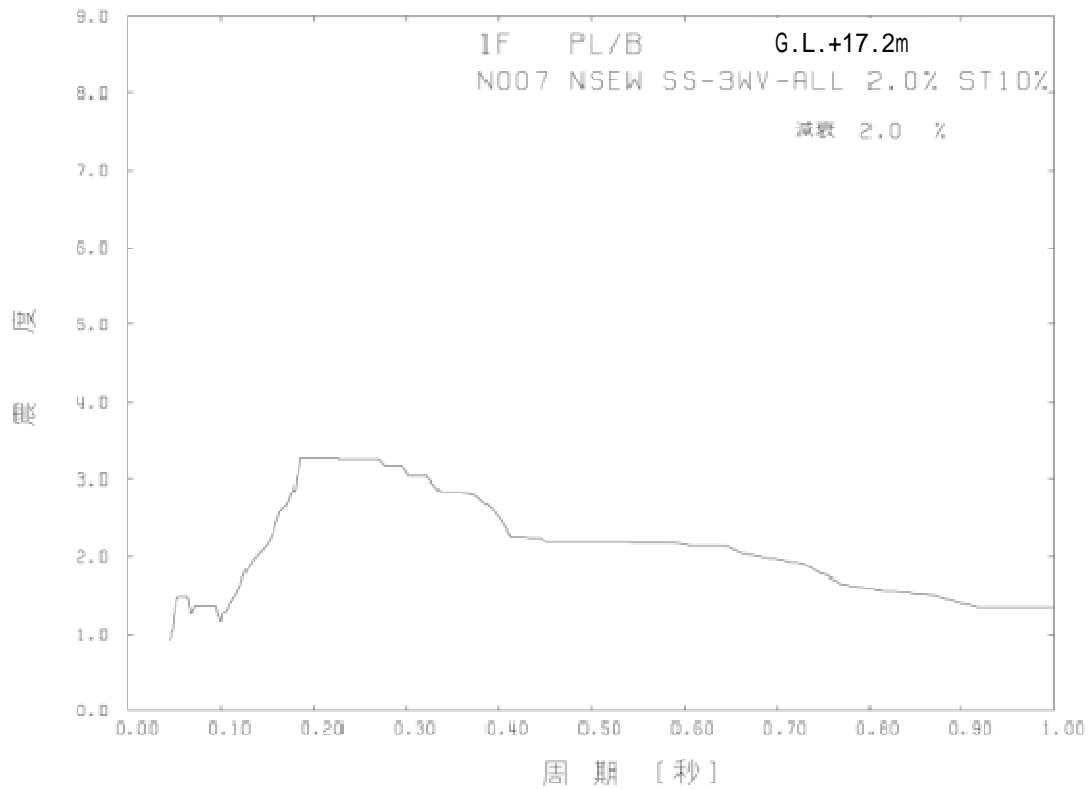


図3 共用プールG.L.+17.2mでの床応答スペクトル（水平方向）

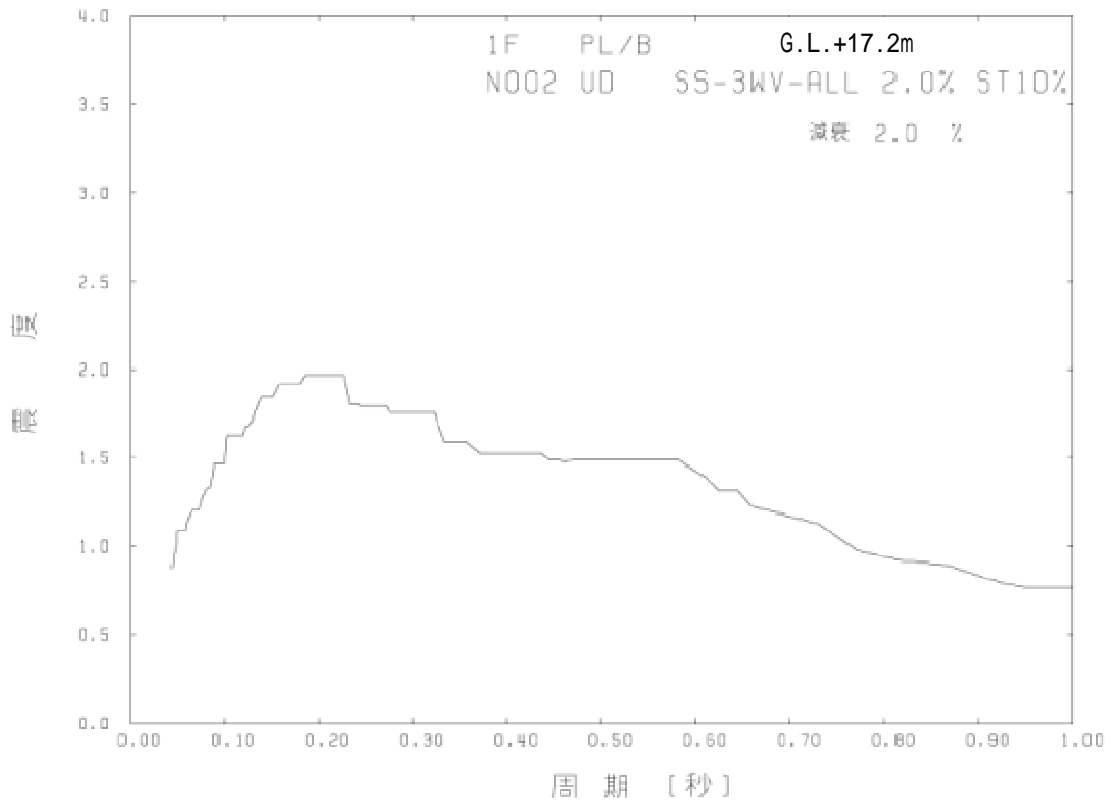


図4 共用プールG.L.+17.2mでの床応答スペクトル（鉛直方向）

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	A	4	32	253
		取付 ボルト	引張	A	7	55	350
			せん断	A	5	39	269
	ブリッジガ イドフレー ム	本体	組合わせ	A	24	187	253
		取付 ボルト	引張	A	5	39	350
			せん断	A	13	102	269
トロリ	脱線 防止ラグ	本体	組合わせ	A	3	24	253
		取付 ボルト	引張	A	1	8	350
			せん断	A	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)

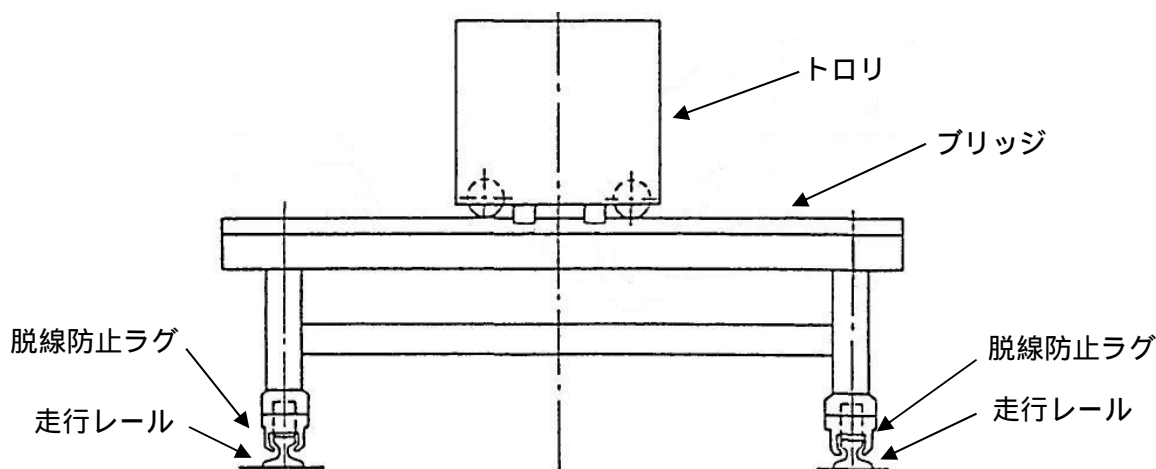


図5 燃料取扱装置概念図

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ド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。

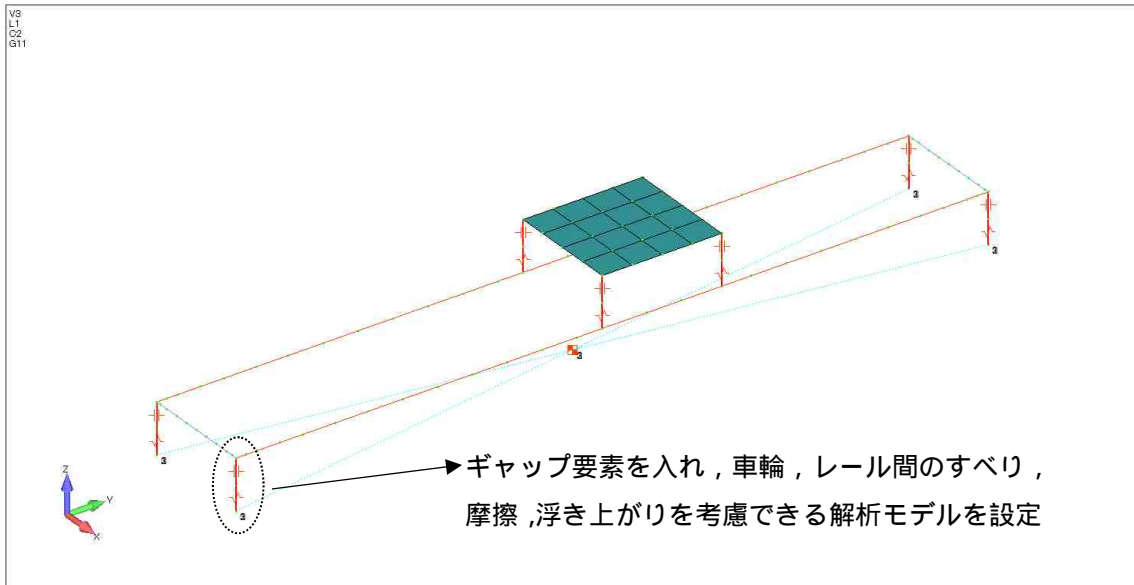


図6 共用プールエリア天井クレーンの解析モデル

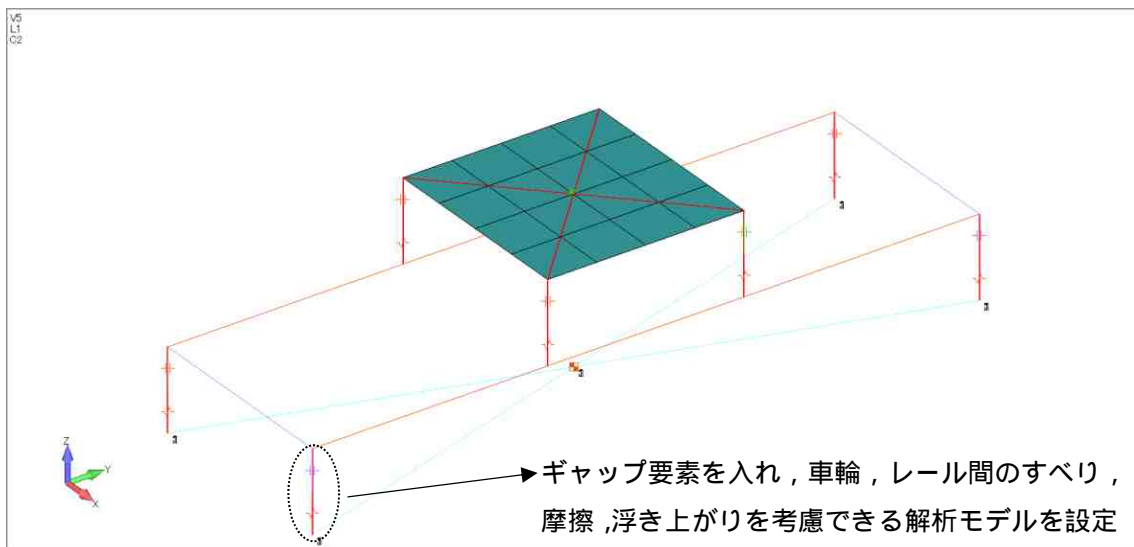
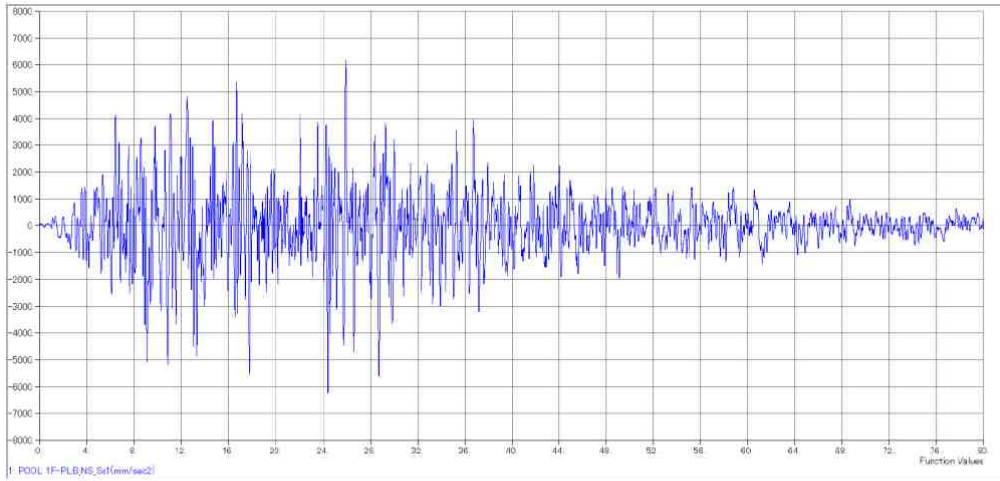
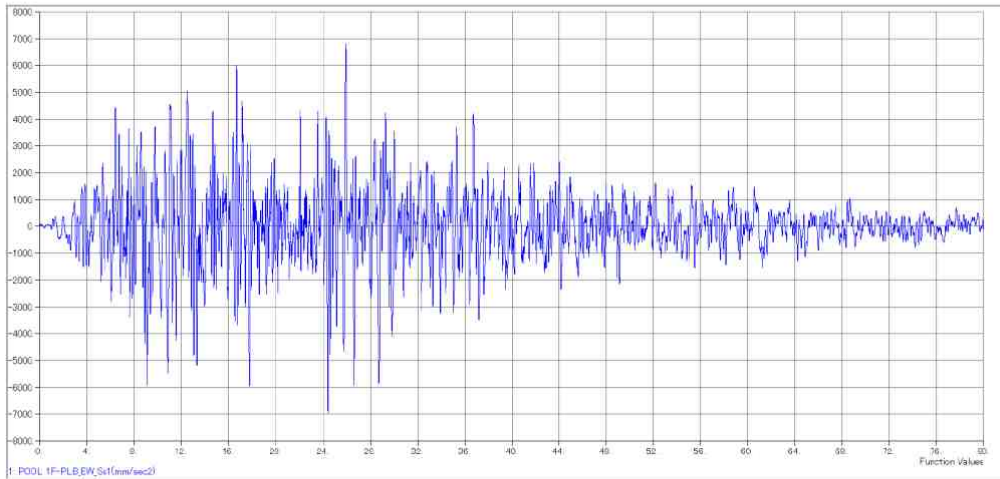


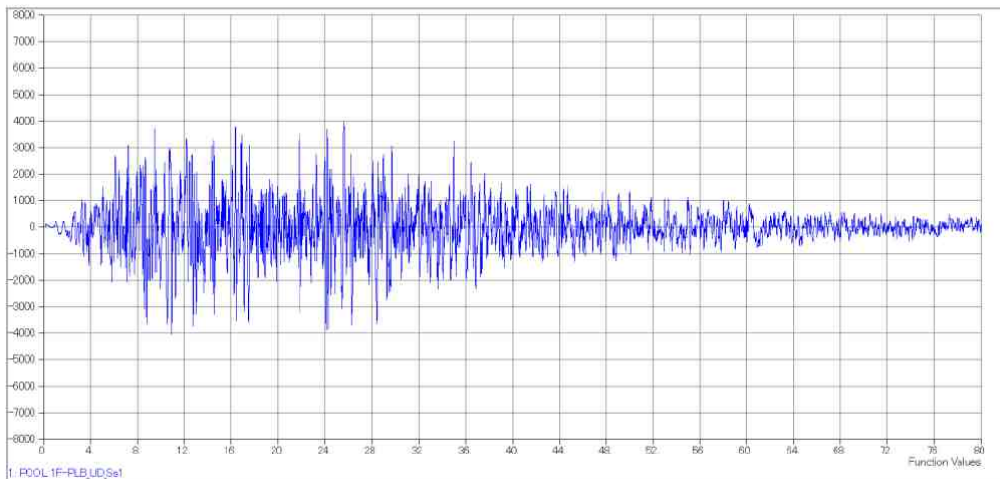
図7 キャスク搬出入エリア天井クレーンの解析モデル



(1)NS 加振 (1F-PLB_NS)

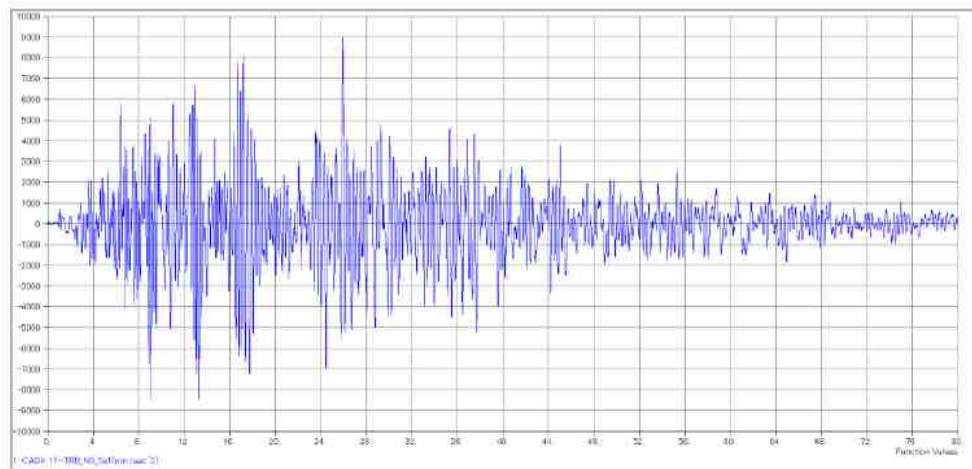


(1)EW 加振 (1F-PLB_EW)

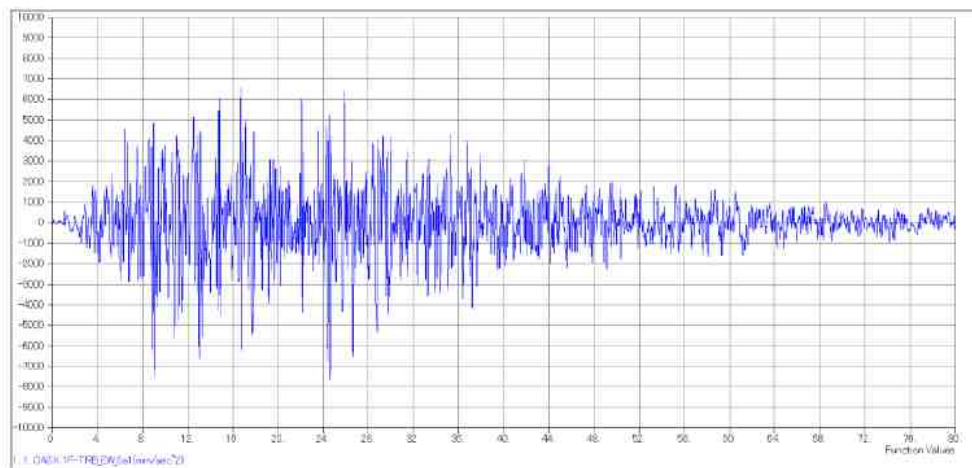


(1)UD 加振 (1F-PLB_UD)

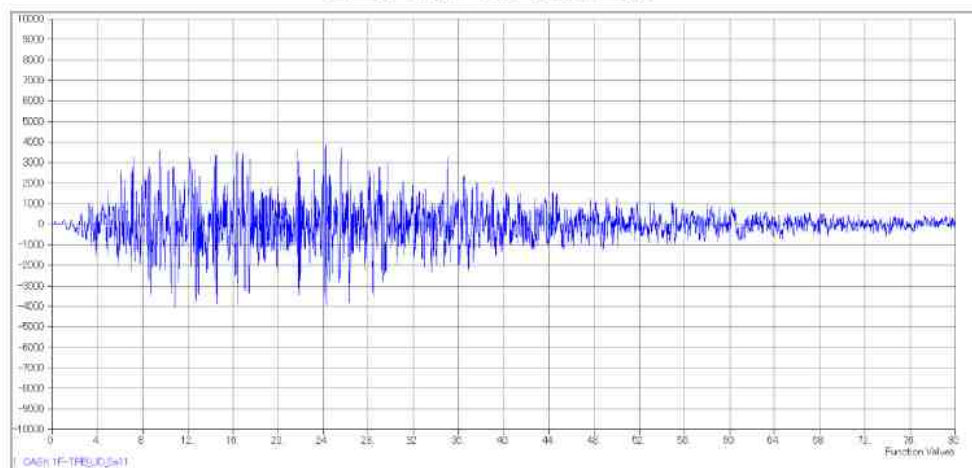
図 8 基準地震動 S s の時刻歴波形 (共用プールエリア天井クレーン)



(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く、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

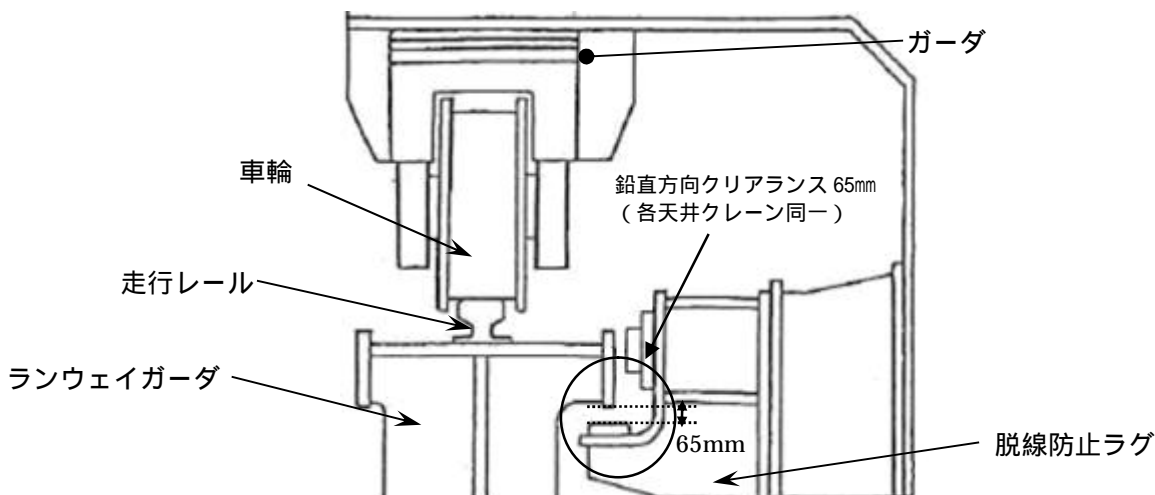


図10 天井クレーン脱線防止ラグ周り概念図

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及び炉内に貯蔵中の使用済燃料(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、使用済燃料収納缶に収納することにより放射性物質の拡散を抑制するとともに、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）および使用済燃料収納缶（小）について

- 使用済燃料収納缶（小）とは、燃料ハンドル部の変形が小さい燃料、または使用済燃料プールに貯蔵されている破損燃料（破損の疑いがある燃料を含む）を収納する缶であり、使用済燃料収納缶（小）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。なお、健全燃料についても使用済燃料収納缶（小）に収納し、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）には使用済燃料収納缶（小）に収納しない燃料集合体 1 体、および使用済燃料収納缶（小）に収納された燃料集合体 48 体を貯蔵する。なお、使用済燃料収納缶（小）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 使用済燃料収納缶（小）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、取扱いを考慮して使用済燃料収納缶 (小) 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、取扱いを考慮して使用済燃料収納缶 (小) 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) には使用済燃料収納缶 (小) に収納しない燃料集合体 1 体、および使用済燃料収納缶 (小) に収納された燃料集合体 48 体を貯蔵する。なお、使用済燃料収納缶 (小) 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。
- 使用済燃料収納缶 (小) 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。

- 使用済燃料収納缶（小）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。
- 使用済燃料収納缶（小）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。
- 使用済燃料収納缶（小）に収納された燃料集合体は変形を考慮して使用済燃料収納缶（小）内で燃料棒が最適な状態に広がった配列とする。
- ラックおよび使用済燃料収納缶（小）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。
- ラック内の使用済燃料収納缶（小）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。
- 水温は 100°C とする。

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）には使用済燃料収納缶（小）に収納しない燃料集合体 1 体、および使用済燃料収納缶（小）に収納された燃料集合体 48 体を貯蔵する。なお、使用済燃料収納缶（小）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。
- 使用済燃料収納缶（小）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。
- 使用済燃料収納缶（小）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。

- 使用済燃料収納缶（小）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使用済燃料収納缶（小）内に放出されたことを仮定し、使用済燃料収納缶（小）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，燃料粒子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。
- ラックおよび使用済燃料収納缶（小）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。
- ラック内の使用済燃料収納缶（小）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。
- 水温は 100℃とする。

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，使用済燃料収納缶（小），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。

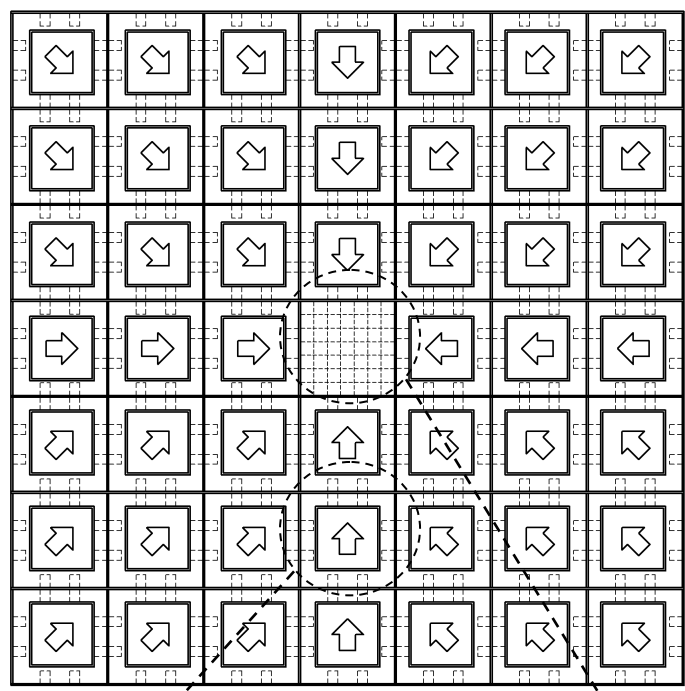
1.5 評価結果

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。

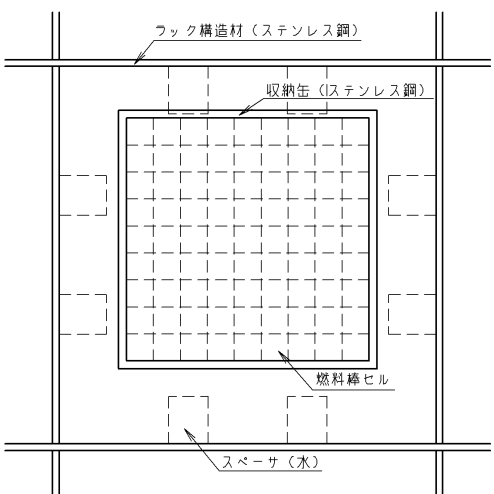
表-1 評価結果

使用済燃料収納缶（小）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	

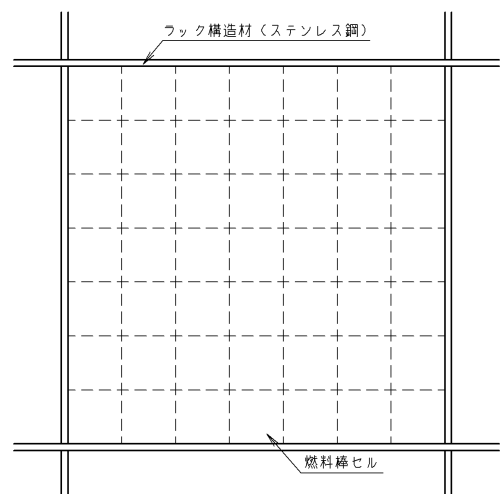
※1 モンテカルロ計算の統計誤差（3σ）を考慮した値



【ラック全体図】

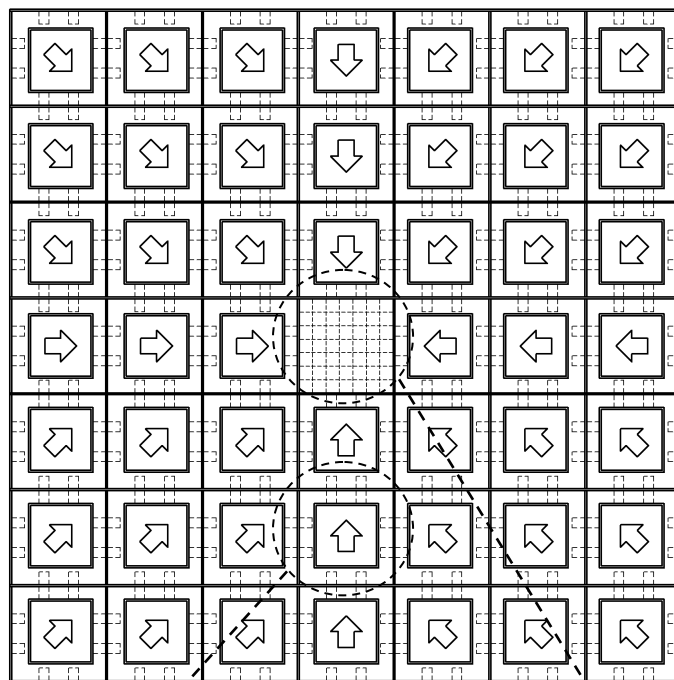


【使用済燃料収納缶 (小) に
収納された燃料集合体の詳細】

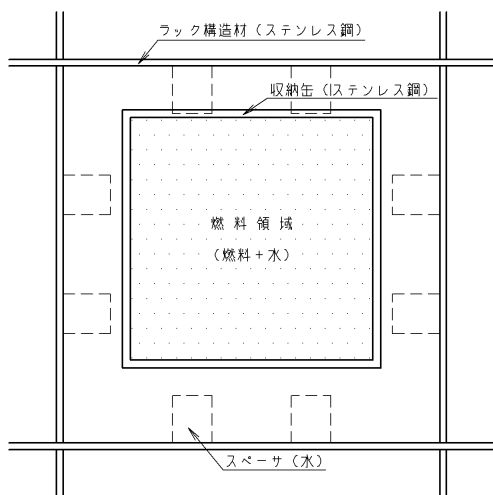


【使用済燃料収納缶 (小) に
収納しない燃料集合体の詳細】

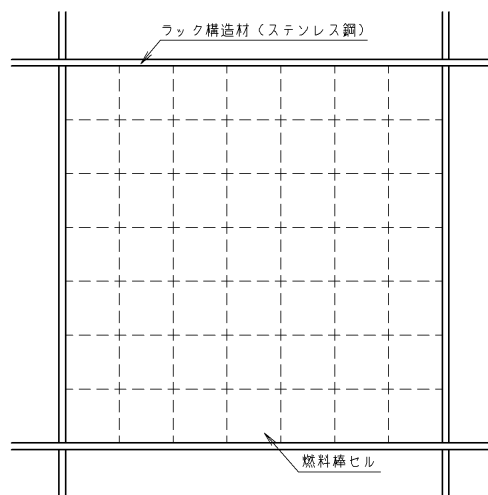
図-1 臨界解析モデル
(燃料棒の形状が維持されているが、取扱いを考慮して
使用済燃料収納缶 (小) を用いる場合)



【ラック全体図】



【使用済燃料収納缶（小）に
収納された燃料集合体の詳細】



【使用済燃料収納缶（小）に
収納しない燃料集合体の詳細】

図ー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、使用済燃料貯蔵ラックや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.

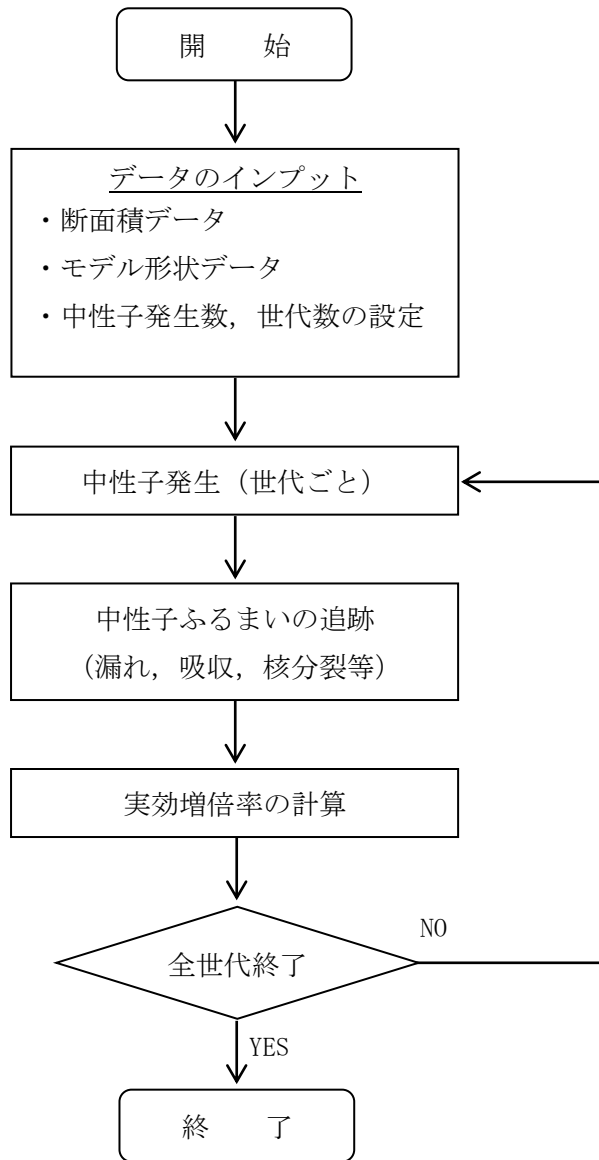


図-3 KENO-V.a コードの解析フロー図

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		概略構造図	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、縦置型で共用プール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、共用プ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		・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
- $f_t^{(註)}$: 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
- $f_s^{(註)}$: 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
- $f_c^{(註)}$: 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
- $f_b^{(註)}$: 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	供用状態	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	$D+P_D+M_D+S_S$	D s	$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$	$1.5f_c^*$	$1.5f_b^*$	$1.5f_t^*$	$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$	$\text{Min}\{1.5f_t^*, (2.1f_t^* - 1.6\tau_b)\}$	<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、使用済燃料収納缶(小)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のほか、使用済燃料収納缶(小)とラックに含まれる水の質量及びラック外形の排除水質量*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、使用済燃料収納缶(小)ではなく変形した使用済燃料を貯蔵するものとする。
- (3) 水平方向地震動と鉛直方向地震動を解析モデルへ別々に入力して地震荷重、応力を求め、それらを適切に組み合わせて評価を行う。
構造概要図を図1-1に示す。

注記*：排除水質量とは、水中の機器の容積により排除される機器の周囲の流体の質量である。

1.2 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 NC1-2005/2007)
- ・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))
- ・日本産業規格(JIS)

P. N

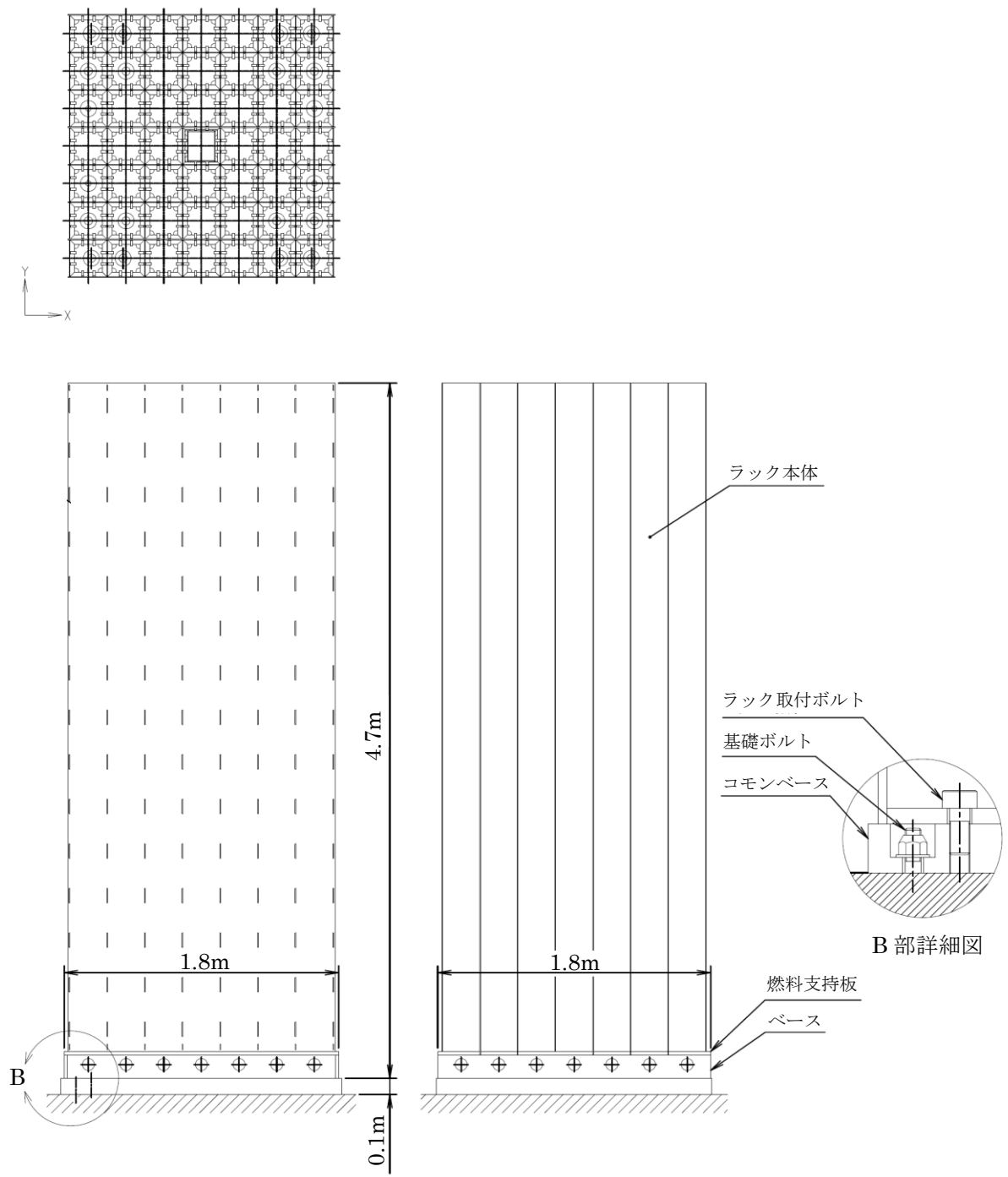


図1-1 構造概要図 (使用済燃料貯蔵ラック (49体))

1.3 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 _{s b}	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 _{s s}	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 _{t o}	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 _{t s}	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	使用済燃料収納缶（小）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。

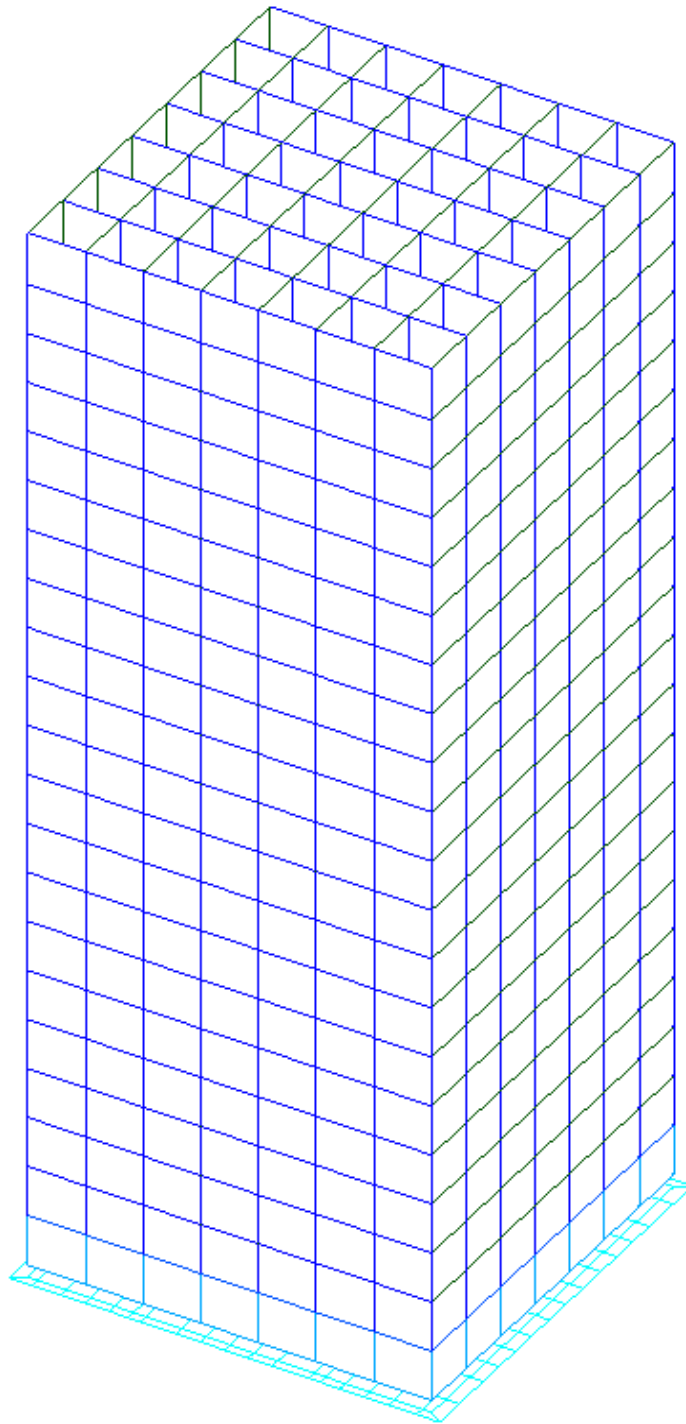


図 2-1 使用済燃料貯蔵ラック (49 体) 計算モデル

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。

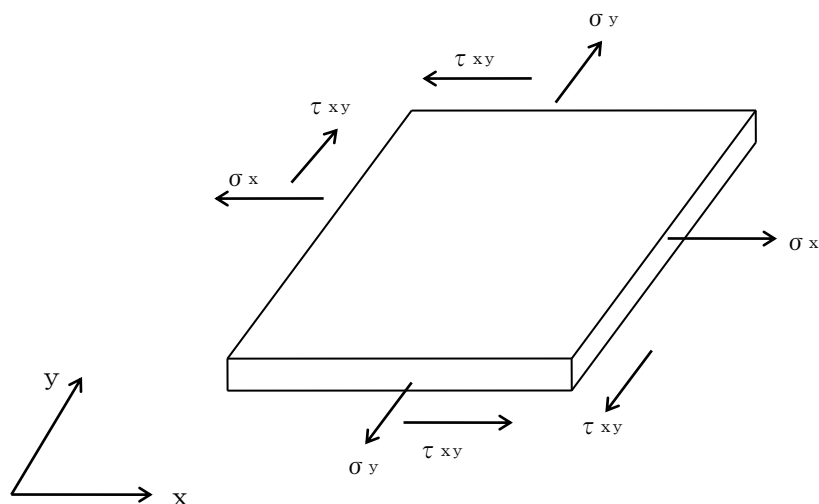


図2-2 部材の応力

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。

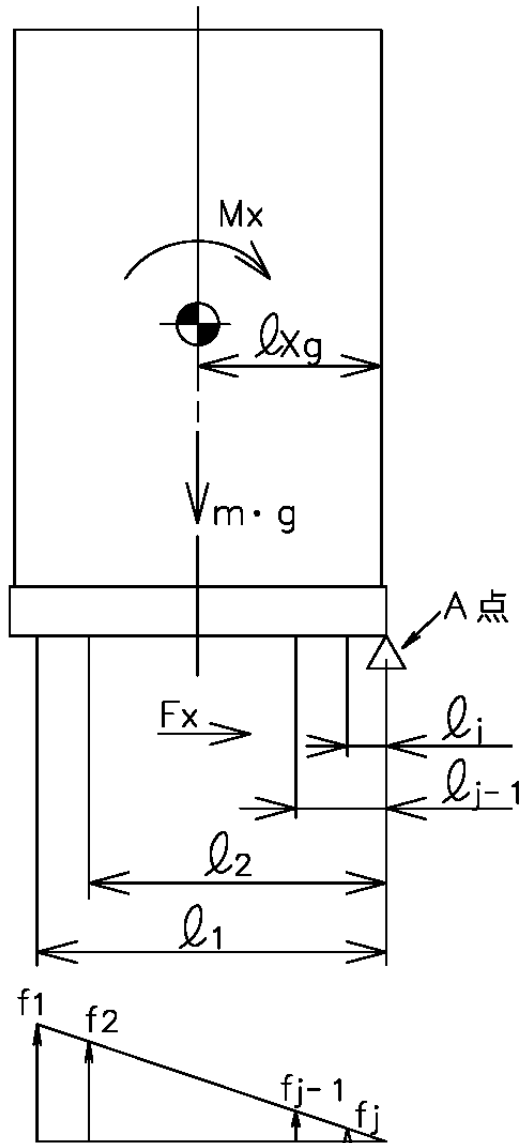


図2-3 ラック取付ボルトおよび基礎ボルトの応力

(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。

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

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。

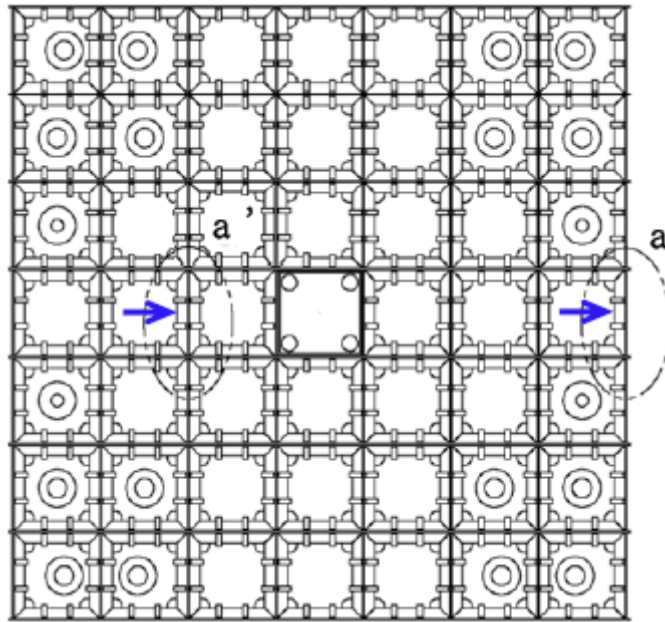


図2-4 使用済燃料貯蔵ラック(49体)上面図

(1) 作用荷重

使用済燃料収納缶(小)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－9－1 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 G. L. -1.3 *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。

添付資料-9 では、G. L. $\pm 0m = T. P. 8.5m$ (※) とする。

(※) 震災後の地盤沈下量 (-709mm) と O. P. から T. P. への読替値 (-727mm) を用いて、下式に基づき換算している。

〈換算式〉 $T. P. = \text{旧 } O. P. - 1,436\text{mm}$

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	$\sigma_0 = 23$	$f_0 = 205$

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

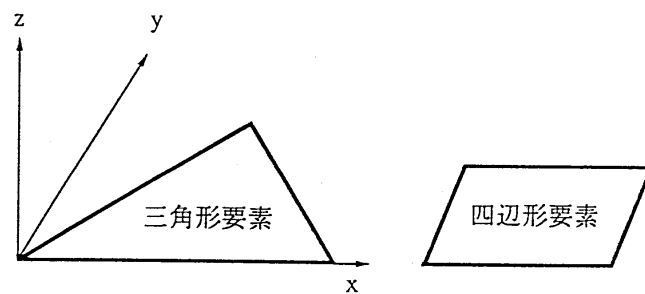
米国NASA (National Aeronautics and Space Administration)作成の有限要素法による構造解析用汎用計算機コード「NASTRAN」の概要である。

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) プロットング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、また動的変位は(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,

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

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

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

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

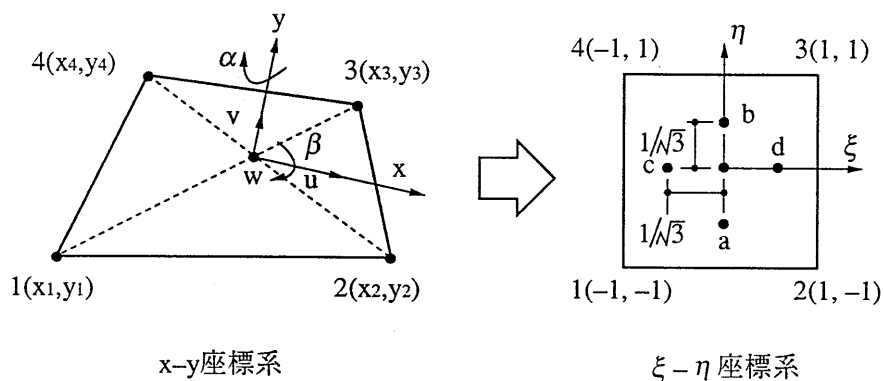


図 3 - 1 座標系

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。

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

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。

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

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,

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

となる。

ここで, モードの直交性により,

$$\begin{aligned} \{\mathbf{x}_i\}^T[\mathbf{m}]\{\mathbf{x}_j\} &= 1.0 \quad (i=j) \\ \{\mathbf{x}_i\}^T[\mathbf{m}]\{\mathbf{x}_j\} &= 0.0 \quad (i \neq j) \end{aligned} \quad (3.32)$$

(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,

$$i = 1 \sim n$$

$$P_i(t) = \{\mathbf{x}_i\}^T \{\mathbf{R}(t)\}$$

(3.33)式を各々解けば, 各モード \mathbf{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 $\{\boldsymbol{\gamma}\}$ 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。

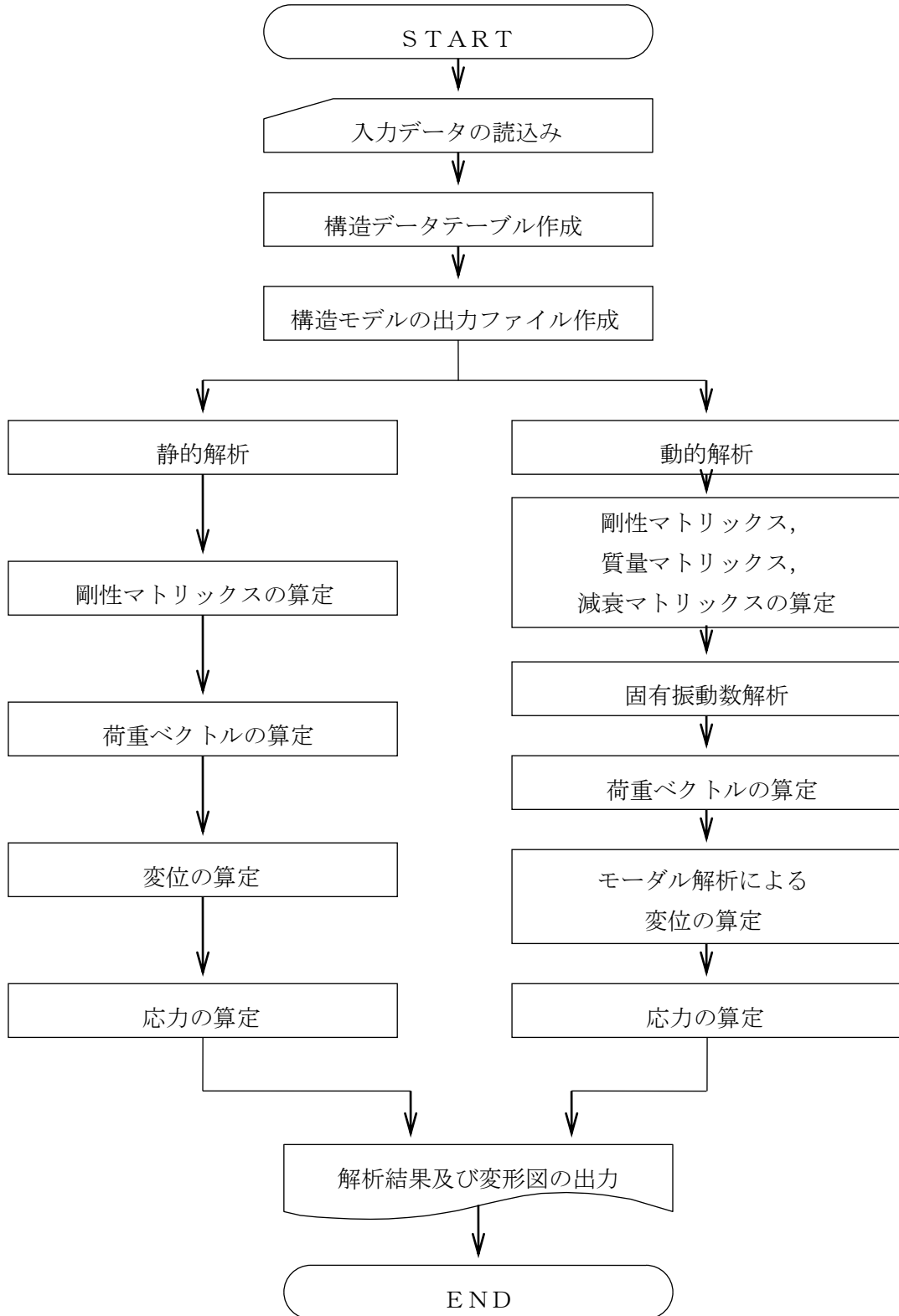


図4-1 解析フローチャート

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。

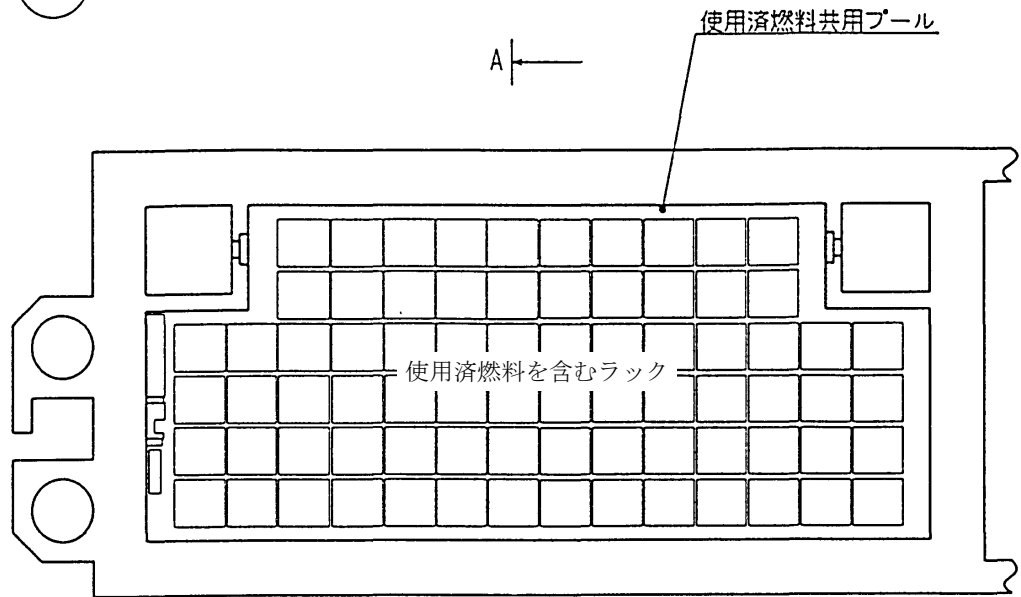
1.4 評価結果

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。

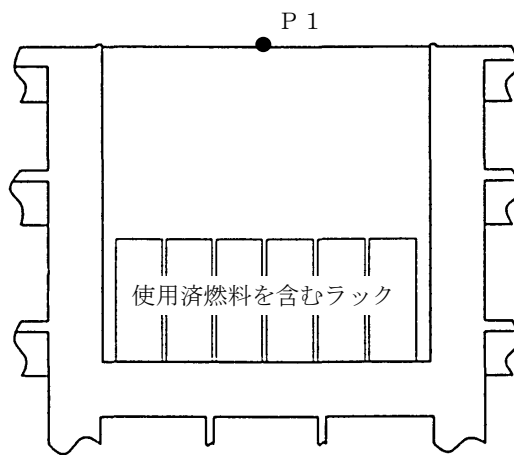
表-3 計算結果

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

P.N. 

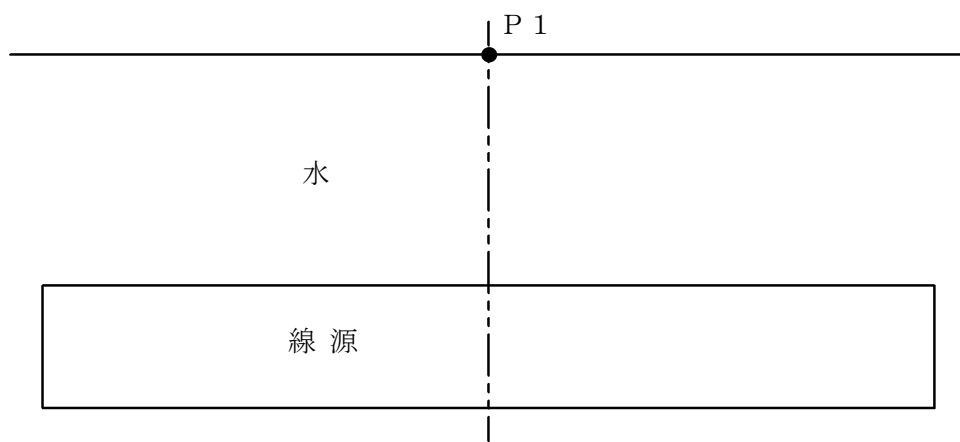
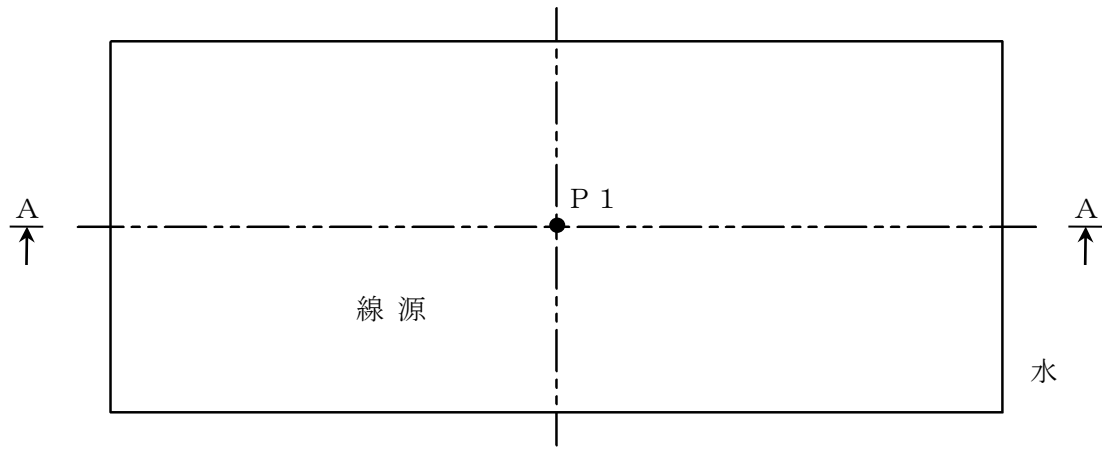


A




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P1)

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）

使用済燃料収納缶（小）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，使用済燃料収納缶（小）内に収納した状態で貯蔵する。

2. 使用済燃料収納缶（小）の構造

使用済燃料収納缶（小）はステンレス鋼製の角缶構造である。

3. 使用済燃料収納缶（小）の機能

(1) 使用済燃料収納缶（小）は，燃料取扱装置を用いて使用済燃料収納缶（小）内に収納した燃料の取扱いが可能になるよう，使用済燃料収納缶（小）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) 使用済燃料収納缶（小）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. 使用済燃料収納缶（小）の取扱い及び落下防止措置

・使用済燃料収納缶（小）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。接続部は使用済燃料収納缶（小）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

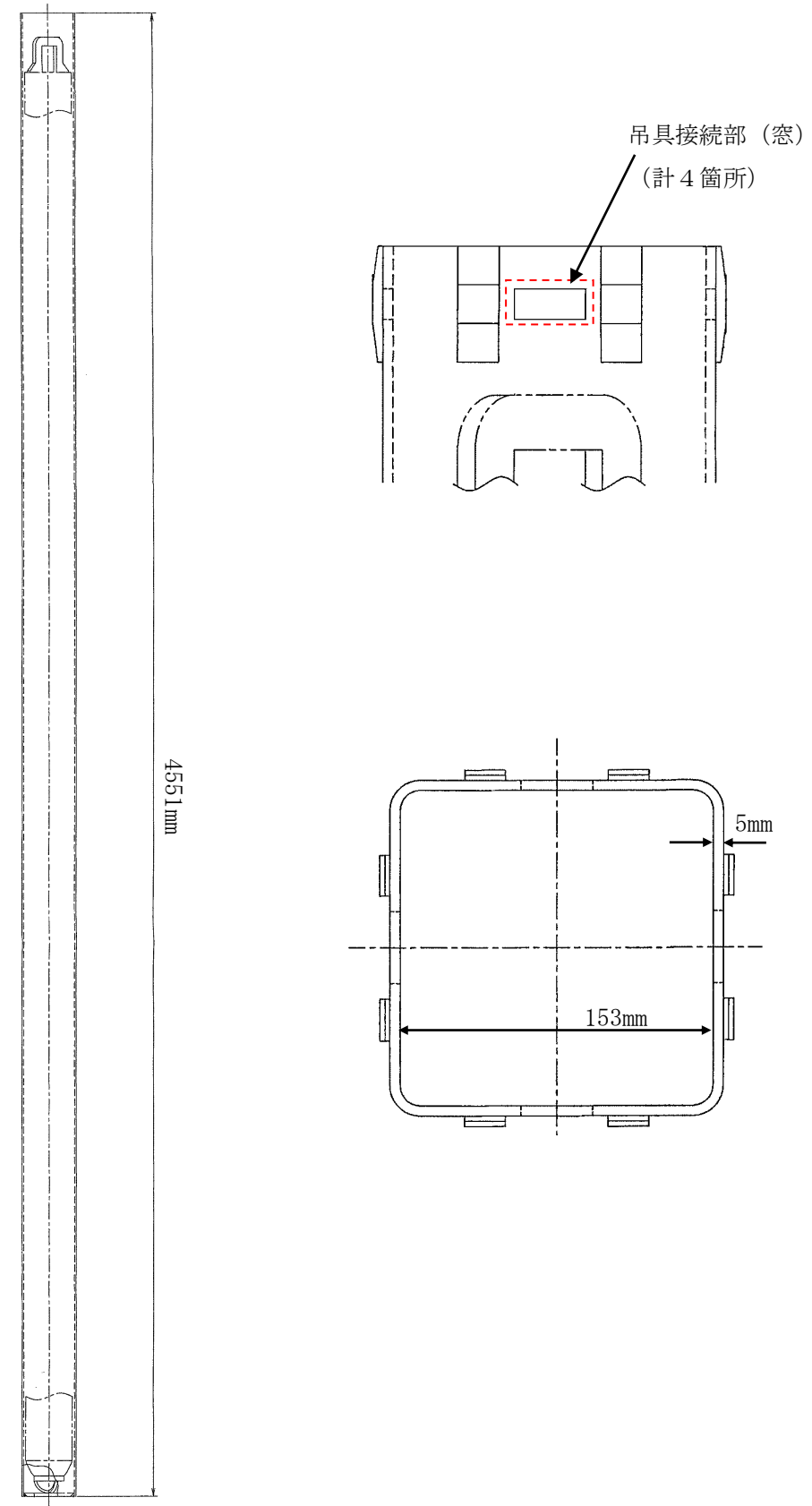


図-1 使用済燃料収納缶 (小) 構造図

使用済燃料貯蔵ラック（25 体）について

1. 背景

共用プールに、1～3 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（合計 4,403 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、使用済燃料収納缶に収納することにより放射性物質の拡散を抑制するとともに、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（25 体）および使用済燃料収納缶（大）について

- 使用済燃料収納缶（大）とは、使用済燃料収納缶（小）に入らない変形、または破損燃料を収納する缶であり、使用済燃料収納缶（大）ごと使用済燃料貯蔵ラック（25 体）に貯蔵することが可能である。なお、健全燃料についても使用済燃料収納缶（大）に収納し、使用済燃料貯蔵ラック（25 体）に貯蔵することが可能である。
- 使用済燃料収納缶（大）は、燃料ハンドル部が幾何形状的に最も変形した場合でも収納することが可能な内寸としている。
- 使用済燃料貯蔵ラック（25 体）には使用済燃料収納缶（大）に収納された燃料集合体 25 体を貯蔵する。

3. 安全機能の維持の確認

使用済燃料貯蔵ラック（25 体）の安全機能は以下の別添—1～3，5にて確認し、使用済燃料収納缶（大）の安全機能は以下の別添—4にて確認している。

- 別添—1 使用済燃料貯蔵ラック（25 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（25 体）の耐震設計の基本方針
- 別添—3 使用済燃料貯蔵ラック（25 体）の耐震性についての計算書
- 別添—4 使用済燃料収納缶（大）の耐震性についての計算書
- 別添—5 使用済燃料貯蔵ラック（25 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—6 使用済燃料収納缶（大）についての説明書

使用済燃料貯蔵ラック (25 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 (25 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 (25 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

燃料棒の形状が維持されていないと仮定した条件で評価を行うものとする。

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 (25 体) には使用済燃料収納缶 (大) に収納された燃料集合体 25 体を貯蔵する。
- 使用済燃料収納缶 (大) 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使用済燃料収納缶 (大) 内に放出されたことを仮定し、使用済燃料収納缶 (大) 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、燃料粒子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。
- 使用済燃料収納缶 (大) の板厚は、製造公差を考慮した最大値とする。
- ラックの貯蔵ピッチ及び内のりは、製造公差を考慮した最小値とする。なお、ラックの板厚は、貯蔵ピッチと内のりによって決まるため、公称値とする。
- ラック内の使用済燃料収納缶 (大) 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は水に置き換え，中性子吸収材を使用済燃料収納缶（大）に固定するボルト穴は溝として水に置き換える。
- 水温は 4℃とする。

1.4 評価方法

使用済燃料貯蔵ラック（25 体）の実効増倍率は，使用済燃料収納缶（大），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。

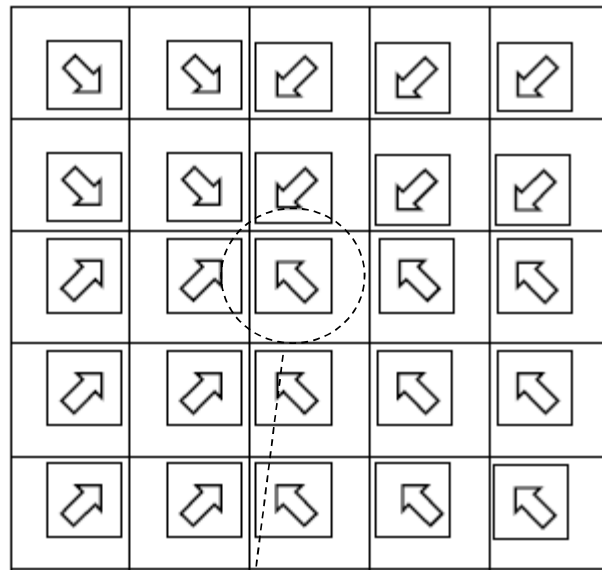
1.5 評価結果

使用済燃料貯蔵ラック（25 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。

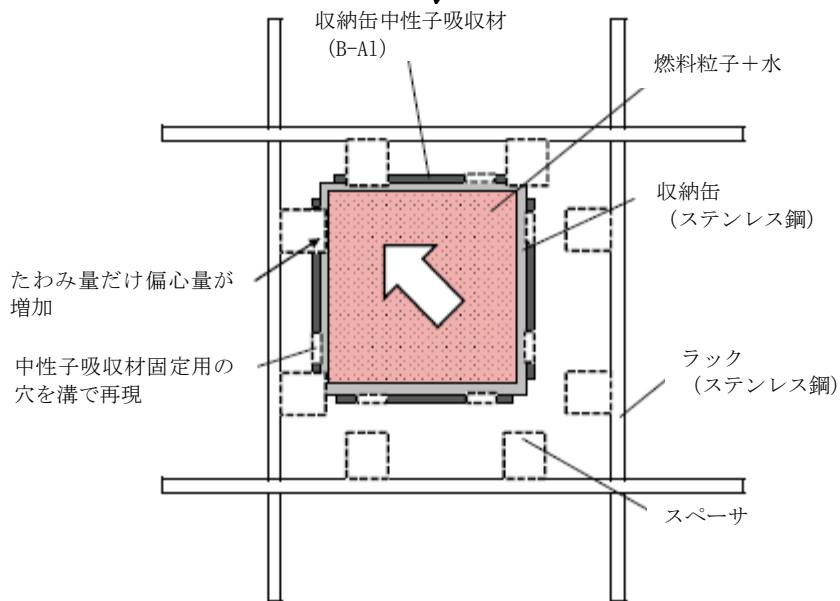
表-1 評価結果

使用済燃料収納缶（大）内の燃料条件	実効増倍率 ^{※1}	設計基準
燃料棒の形状が維持されていない燃料	0.91	0.95

※1 モンテカルロ計算の統計誤差（3σ）を考慮した値



【ラック全体図】



【使用済燃料収納缶（大）に収納された燃料集合体の詳細】

図-1 臨界解析モデル
(燃料棒の形状が維持されていないと仮定)

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-2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、使用済燃料貯蔵ラックや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.

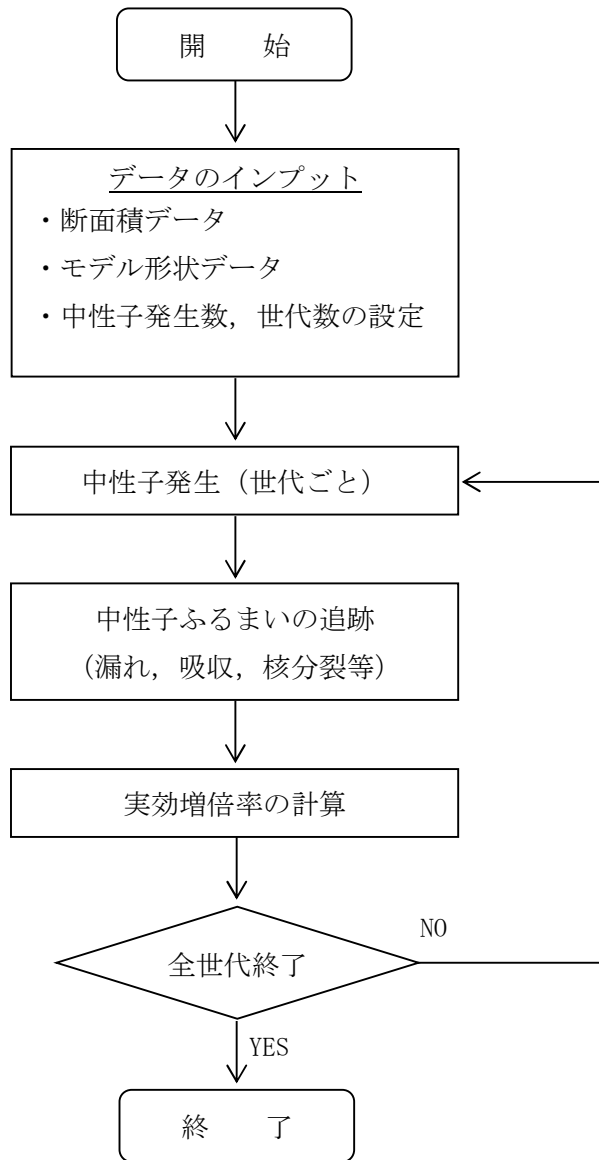


図-2 KENO-V.a コードの解析フロー図

使用済燃料貯蔵ラック（25 体）の耐震設計の基本方針

使用済燃料貯蔵ラック（25 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		概略構造図	摘要
	基礎・支持構造物	主体構造		
(1) 使用済燃料貯蔵ラック (25体)	使用済燃料貯蔵ラック(25体)は、縦置型で共用プール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、共用プ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		・使用済燃料貯蔵ラック(25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	供用状態	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	$D+P_D+M_D+S_S$	D s	$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$	$1.5f_c^*$	$1.5f_b^*$	$1.5f_t^*$	$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$	$\text{Min}\{1.5f_t^*, (2.1f_t^* - 1.6\tau_b)\}$	<ul style="list-style-type: none"> ・使用済燃料貯蔵ラック (25 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(25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(25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、使用済燃料収納缶(大)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のほか、使用済燃料収納缶(大)とラックに含まれる水の質量及びラック外形の排除水質量*を考慮する。
- (3) 水平方向地震動と鉛直方向地震動を解析モデルへ別々に入力して地震荷重、応力を求め、それらを適切に組み合わせて評価を行う。
構造概要図を図1-1に示す。

注記*：排除水質量とは、水中の機器の容積により排除される機器の周囲の流体の質量である。

1.2 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 NC1-2005/2007)
- ・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))
- ・日本産業規格(JIS)

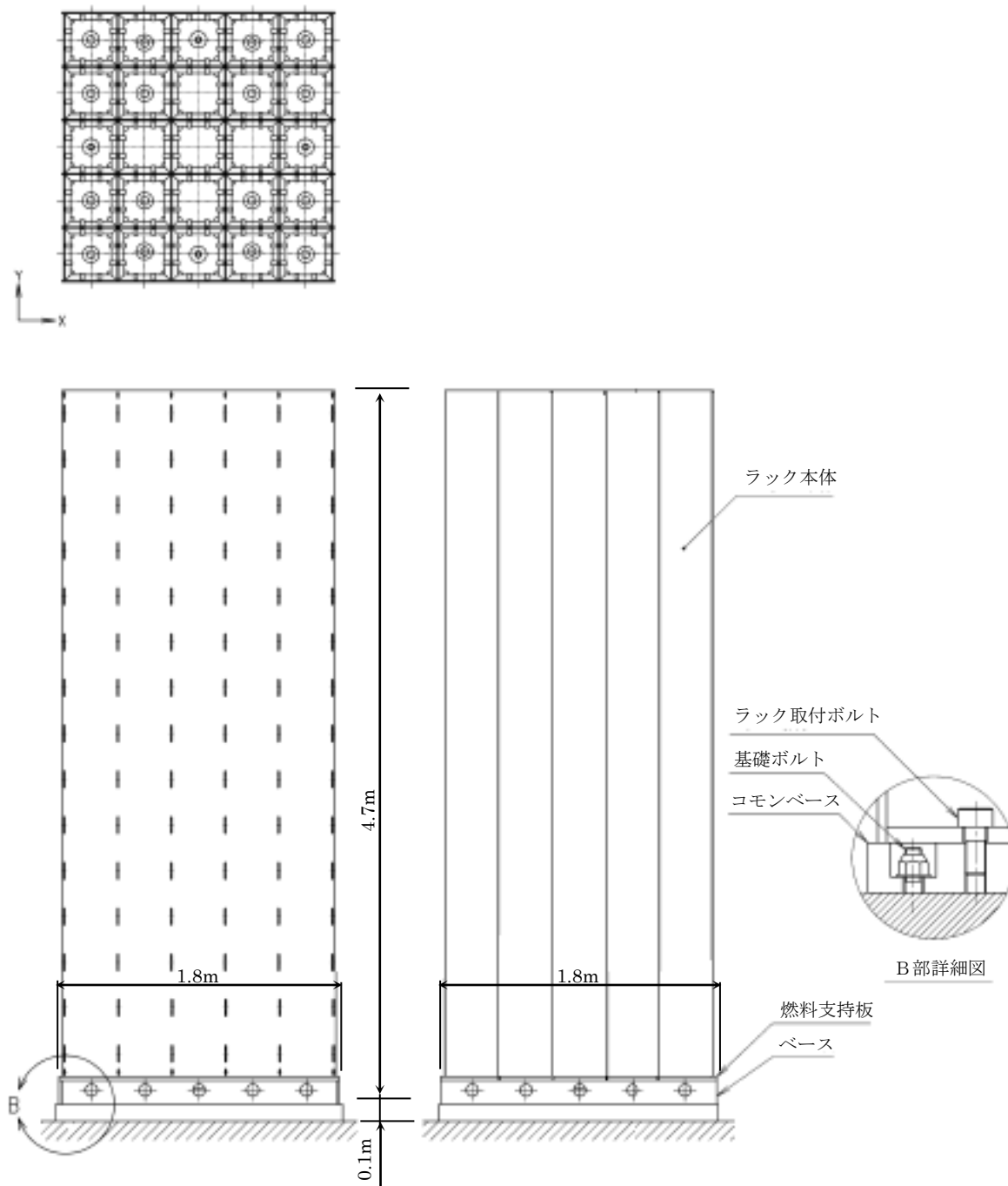


図1-1 構造概要図 (使用済燃料貯蔵ラック (25体))

1.3 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 _{s b}	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 _{s s}	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 _{t o}	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 _{t s}	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	使用済燃料収納缶（大）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 ～ 10 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。

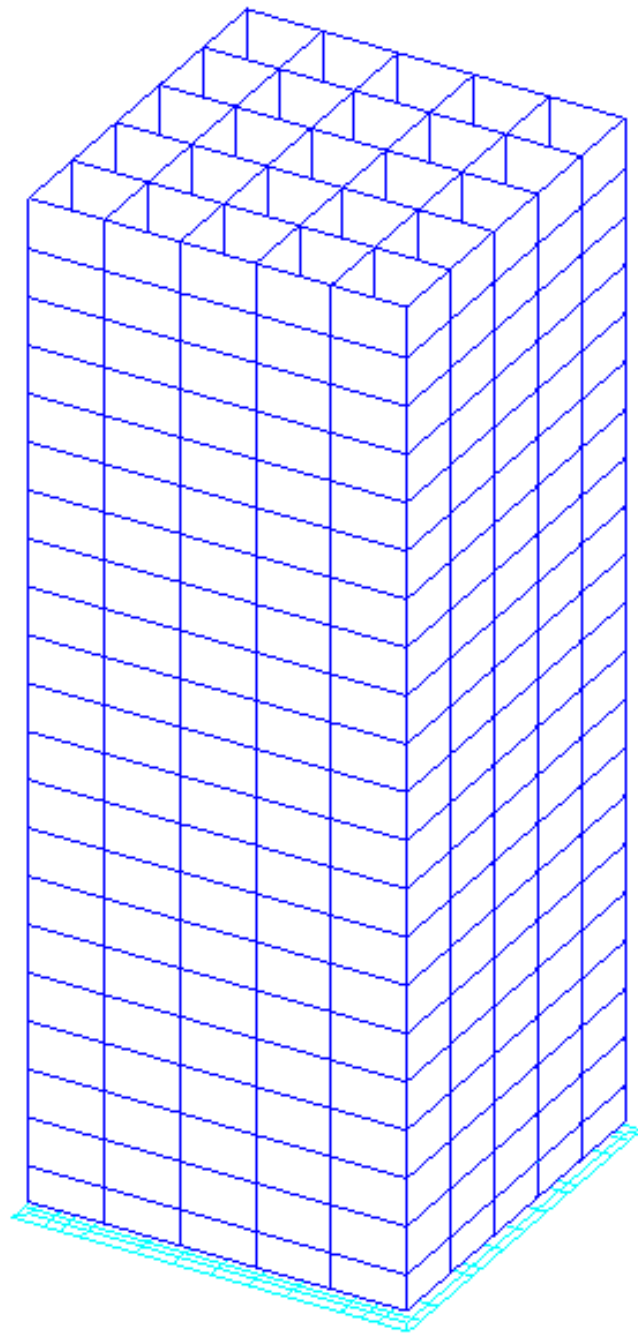


図 2-1 使用済燃料貯蔵ラック (25 体) 計算モデル

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。

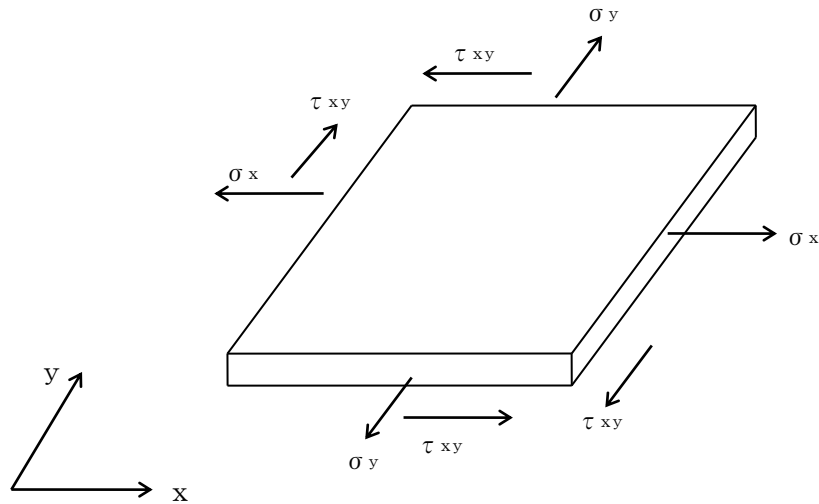


図2-2 部材の応力

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。

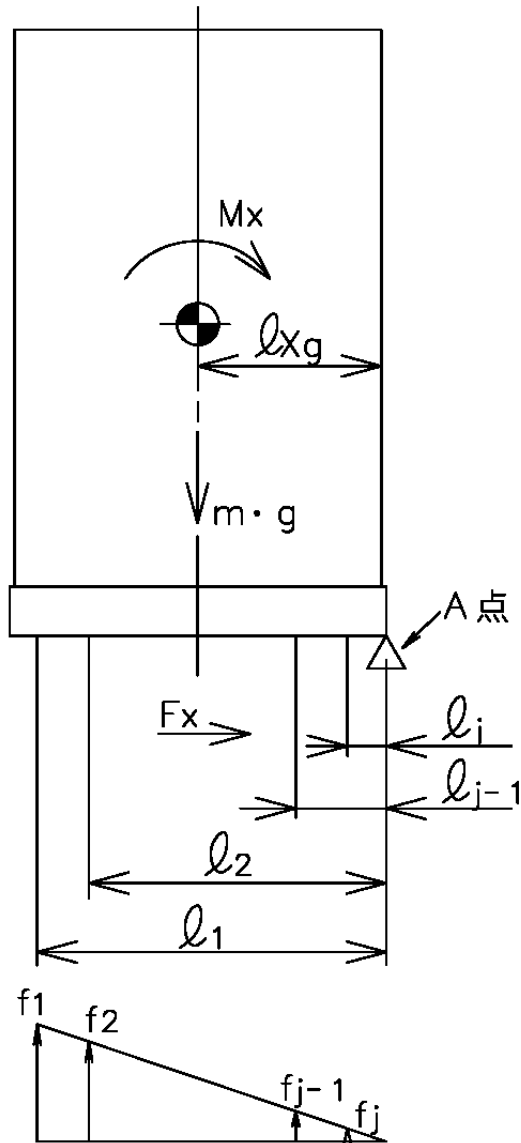


図2-3 ラック取付ボルトおよび基礎ボルトの応力

(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。

$$f_1 = \frac{l_1(M_X - (1 - C_V) \cdot m \cdot g \cdot l_{Xg})}{n_1 \cdot l_1^2 + n_2 \cdot l_2^2 + \Lambda + n_{j-1} \cdot l_{j-1}^2 + n_j \cdot l_j^2}$$

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 (25 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。

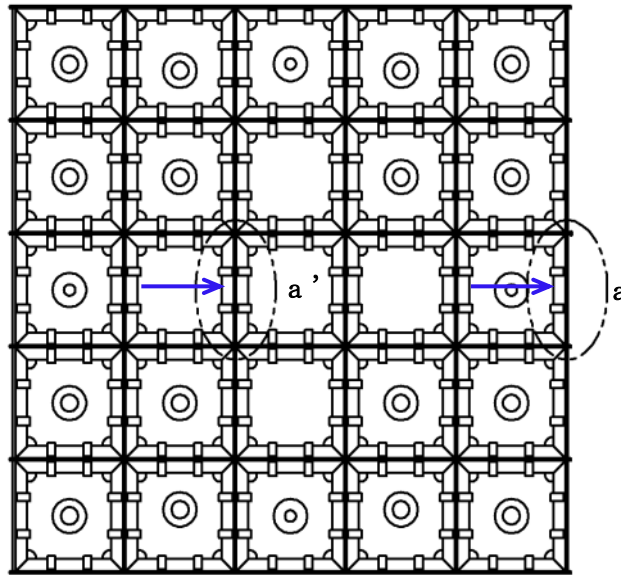


図 2-4 使用済燃料貯蔵ラック (25 体) 上面図

(1) 作用荷重

使用済燃料収納缶 (大) 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－9－2 別添－2 使用済燃料貯蔵ラック(25 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 (25 体)	S	運用補助共用施設 G. L. -1.3 *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： $C_H = 0.89$ ）

*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： $C_H = 0.70$ ）

*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： $C_H = 0.70$ ）

*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。

添付資料-9 では、G. L. $\pm 0m = T. P. 8.5m$ (※) とする。

(※) 震災後の地盤沈下量 (-709mm) と O. P. から T. P. への読替値 (-727mm) を用いて、下式に基づき換算している。

〈換算式〉 $T. P. = \text{旧 } O. P. - 1,436\text{mm}$

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 (25 体)	ラック本体	SUS304	組合せ	$\sigma_{fa} = 14$	$f_t = 205$

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 (25 体)	ラック取付ボルト	SUS630 H1150	引張り	$\sigma_b = 21$	$f_{ts} = 455$

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 (25 体)	基礎ボルト	SUS630 H1150	引張り	$\sigma_b = 36$	$f_{ts} = 455$

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 (25 体)	スペーサ	SUS304	圧縮	$\sigma_c = 1$	$f_c = 202$
	スペーサ下部支持部材	SUS304	組合せ	$\sigma_o = 29$	$f_o = 205$

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

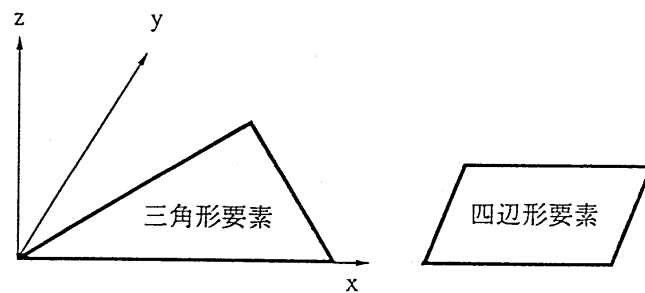
米国NASA (National Aeronautics and Space Administration)作成の有限要素法による構造解析用汎用計算機コード「NASTRAN」の概要である。

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。

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

ここで、

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

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = [\mathbf{B}]\{\mathbf{u}_e\} \quad (3.2)$$

ここで、

- $\{\boldsymbol{\varepsilon}\}$: 要素内任意点のひずみ
 $[\mathbf{B}]$: 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。

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

$$[\mathbf{K}] = \int [\mathbf{B}]^T [\mathbf{D}] [\mathbf{B}] d\text{vol} \quad (3.4)$$

ここで、

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

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

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

ここで、

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

$$= \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_{e1} \\ \mathbf{u}_{e2} \\ \vdots \\ \mathbf{u}_{en} \end{Bmatrix}$$

$\mathbf{u}_{e1}, \mathbf{u}_{e2}, \dots, \mathbf{u}_{en}$: 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,

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

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

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

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

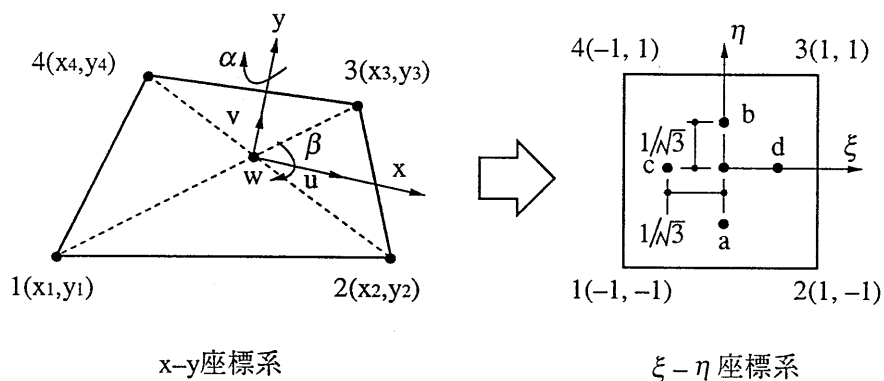


図 3 - 1 座標系

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。

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

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。

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

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,

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

となる。

ここで, モードの直交性により,

$$\begin{aligned} \{\mathbf{x}_i\}^T[\mathbf{m}]\{\mathbf{x}_j\} &= 1.0 \quad (i=j) \\ \{\mathbf{x}_i\}^T[\mathbf{m}]\{\mathbf{x}_j\} &= 0.0 \quad (i \neq j) \end{aligned} \quad (3.32)$$

(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,

$$i = 1 \sim n$$

$$P_i(t) = \{\mathbf{x}_i\}^T \{\mathbf{R}(t)\}$$

(3.33)式を各々解けば, 各モード \mathbf{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 $\{\boldsymbol{\gamma}\}$ 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。

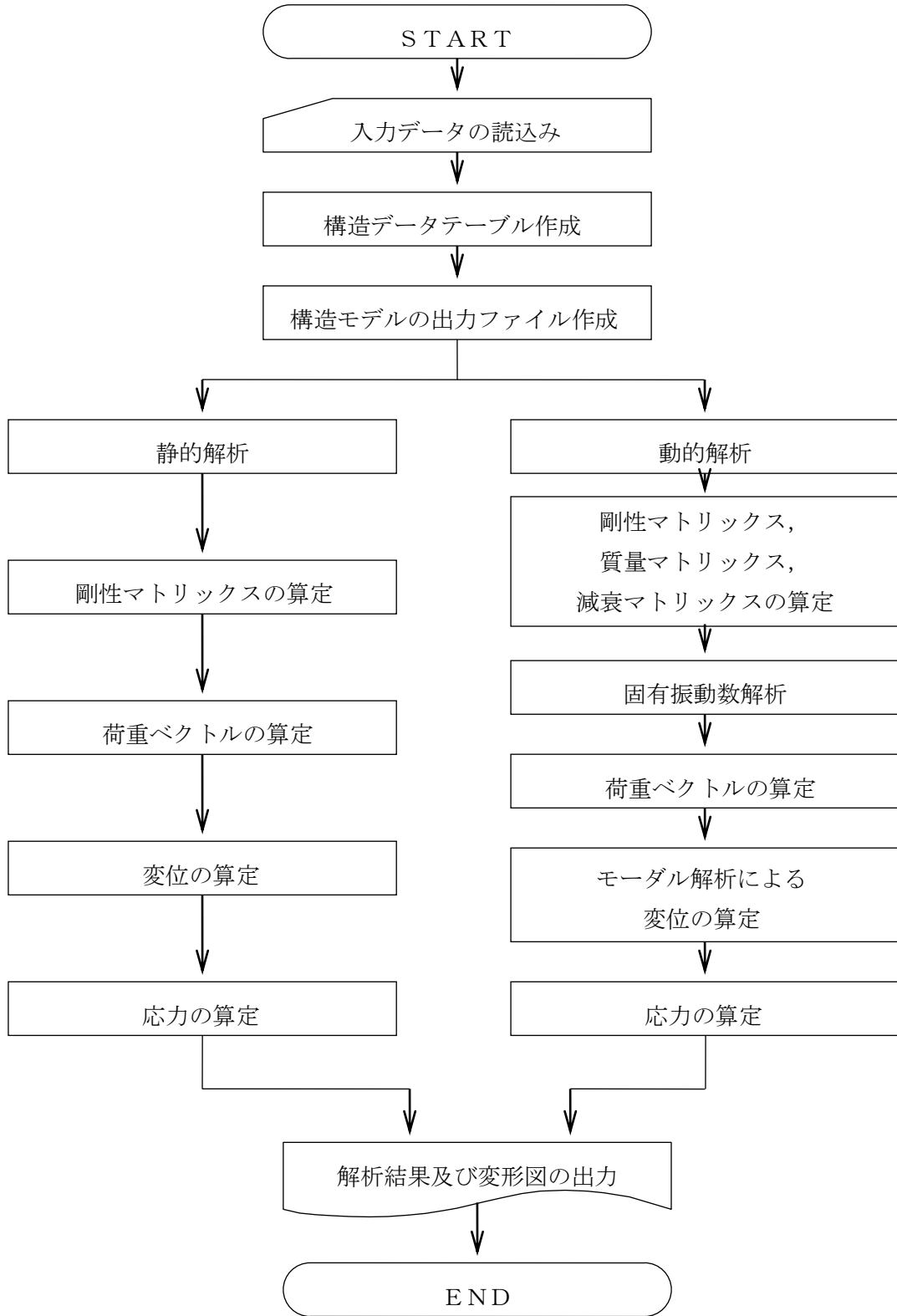


図4-1 解析フローチャート

使用済燃料収納缶（大）の耐震性についての計算書

1. 評価の基本方針

使用済燃料収納缶（大）に対して基準地震動 S_s を考慮しても強度上耐え得ることを以下の考え方にに基づき評価する。

使用済燃料収納缶（大）および使用済燃料収納缶（大）内の燃料はラック内に貯蔵された状態で水平方向には構造的に拘束されておらず、ラックセル内・使用済燃料収納缶（大）内は水で満たされているため、ラックと使用済燃料収納缶（大）・燃料は、流体を介して相互作用により振動する（連成振動）。使用済燃料収納缶（大）は四方をラックセルに、燃料は四方を使用済燃料収納缶（大）に狭い隙間で囲まれているため流体連成力（流体連成効果）が大きく、ラック内の使用済燃料収納缶や燃料はラックと一体で振動すると考えられる。

以上より、使用済燃料収納缶（大）・燃料はラックと同一の加速度が作用するものとして耐震性を評価する。

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 NC1-2005/2007）
- ・日本産業規格（JIS）

3. 評価部位

使用済燃料収納缶（大）の耐震評価は、構造部材である収納缶胴及び底板について実施する。評価箇所については、図-1に示す。

4. 荷重条件

使用済燃料収納缶（内部水を含む）及び燃料に、以下に示す自重及び地震による加速度が付加されることによる荷重が発生する。

G_x : 図-1に示すX方向の加速度（=0.89 g）

G_y : 図-1に示すY方向の加速度（=0.89 g）

G_z : 図-1に示すZ方向の加速度（=(1+0.49) g =1.49 g）

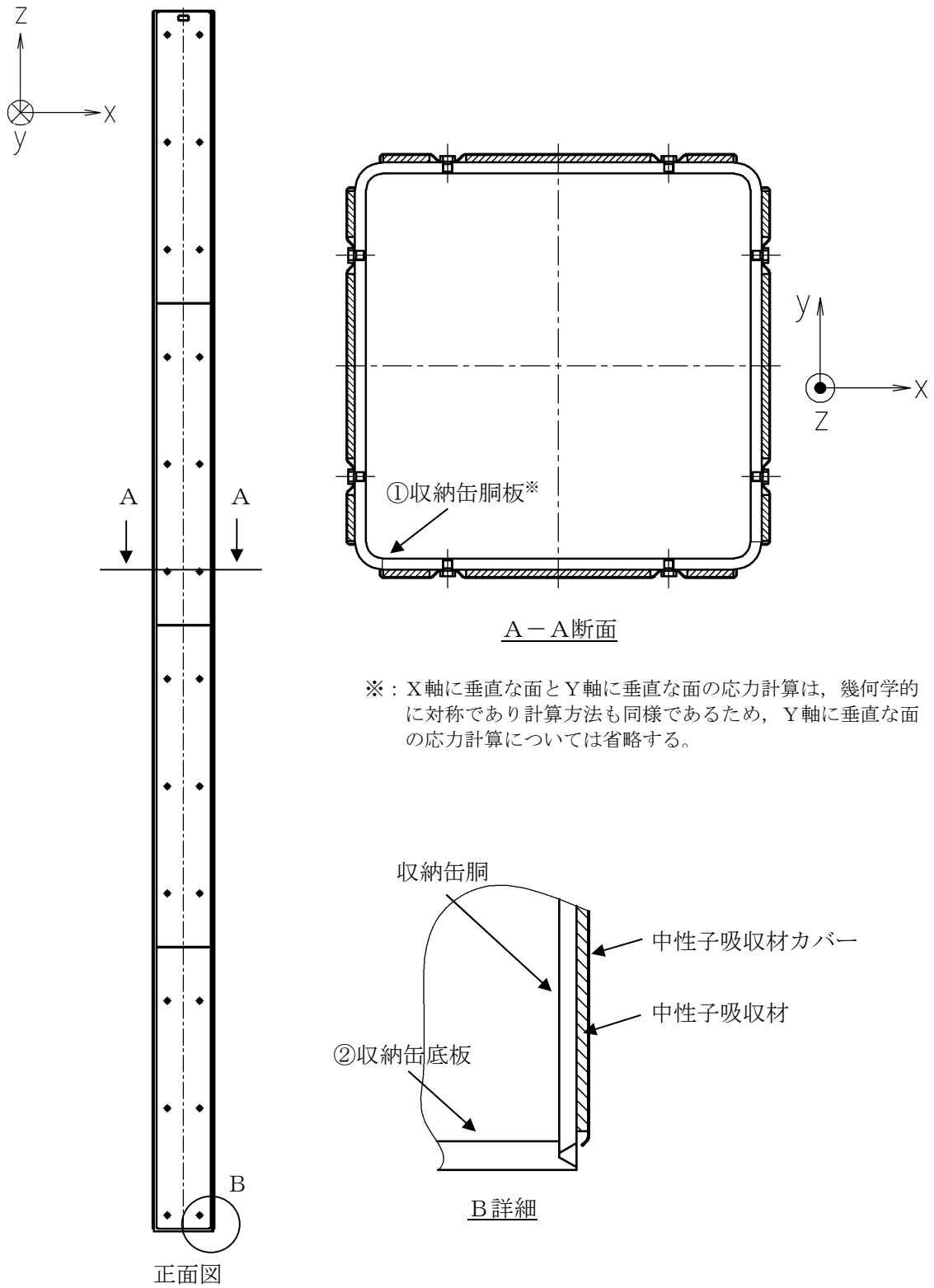


図-1 使用済燃料収納缶（大）の応力評価箇所

5. 応力の計算方法

5. 1 収納缶胴

(1) X方向の荷重による応力

評価点①には、X方向荷重によりX方向の垂直応力（圧縮応力） σ_{x1x} が発生し、次式により求める。

$$\sigma_{x1x} = \frac{m_{\text{can}} \cdot G_x}{A_{x1}}$$

ここで、

m_{can} : 使用済燃料収納缶（大）1体の質量

G_x : X方向の加速度

A_{x1} : 評価点①のX方向荷重支持面積

(2) Y方向の荷重による応力

①垂直応力（平均支圧応力）

評価点①には、Y方向荷重によりY方向の垂直応力（平均支圧応力） σ_{y1y} が発生し、次式により求める。

$$\sigma_{y1y} = \frac{(m_{\text{can}} + m_{\text{fuel}} + m_w) \cdot G_y}{A_{y1}}$$

ここで、

m_{fuel} : 使用済燃料1体の質量

m_w : 使用済燃料収納缶（大）1体に含まれる内部水の質量

G_y : Y方向の加速度

A_{y1} : 評価点①のY方向荷重支持面積（使用済燃料収納缶（大）とスペーサの接触面積）

②垂直応力（曲げ応力）

評価点①には、Y方向荷重によりZ方向の垂直応力（曲げ応力） σ_{z1y} が発生し、次式により求める。

$$\sigma_{z1y} = \frac{M_{z1y}}{Z_{z1x}}$$

$$M_{z1y} = \frac{F_{y1} \times L}{8}$$

ここで、

M_{z1y} : 評価点①に作用する曲げモーメント

Z_{z1x} : 評価点①のX軸まわりの断面係数

L : ラックの収納缶支持ピッチ（上下のスペーサ間の距離）

(3) Z方向の荷重による応力

評価点①には、Z方向の荷重によりZ方向の垂直応力（圧縮応力） σ_{z1z} が発生し、次式により求める。

$$\sigma_{z1z} = \frac{m_{\text{can}} \cdot G_z}{A_{z1}}$$

ここで、

G_z : Z方向の加速度

A_{z1} : 評価点①のZ方向荷重支持面積

(4) 平均せん断応力

評価点①には、平均せん断応力は発生しない。

5. 2 収納缶底板

(1) X方向の荷重による応力

評価点②に発生するX方向荷重による応力は、収納缶底板の自重によるもののみであり、無視できる。

(2) Y方向の荷重による応力

評価点②に発生するY方向荷重による応力は、収納缶底板の自重によるもののみであり、無視できる。

(3) Z方向の荷重による応力

評価点②には、Z方向荷重によりZ方向垂直応力（平均支圧応力） σ_{z2z} が発生し、次式により求める。

$$\sigma_{z2z} = \frac{(m_{\text{can}} + m_{\text{fuel}} + m_w) \cdot G_z}{A_{z2}}$$

ここで、

A_{z2} : 評価点②のZ方向荷重支持面積

(4) 平均せん断応力

評価点②には、平均せん断応力は発生しない。

(5) 圧縮応力

評価点②には、圧縮応力は発生しない。

6. 許容応力

使用済燃料収納缶（大）の耐震評価における許容応力は、「日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格」（JSME S NC1-2005/2007）（以下、設計・建設規格という。）の炉心支持構造物の設計に関する規定及び「日本電気協会 原子力発電所耐震設計技術規格」（JEAC4601-2008）の炉心支持構造物の許容応力に関する規定を準用する。なお、許容応力を算出する際の温度は、共用プールの最高使用温度である 66℃とする。

許容応力の算出に用いる設計応力強さ（ S_m ）、設計降伏点（ S_y ）及び設計引張強さ（ S_u ）等は、設計・建設規格の付録材料図表の値を使用する。

6. 1 一次応力の許容応力

供用状態D sにおいて生じる応力解析による一次応力強さの許容応力は次の通りである。

(1) 一次一般膜応力強さ（ P_m ）

$$P_m \leq \min \left[2.4S_m, \frac{2}{3}S_u \right]$$

(2) 一次一般膜応力＋一次曲げ応力強さ（ $P_m + P_b$ ）

$$P_m + P_b \leq 1.5 \min \left[2.4S_m, \frac{2}{3}S_u \right]$$

6. 2 特別な応力の許容応力

(1) 供用状態D sにおける平均せん断応力（ τ ）

純せん断荷重を受ける部分において生じる平均せん断応力の許容応力は次の通りである。

$$\tau \leq 2 \times 0.6S_m$$

(2) 供用状態D sにおける平均支圧応力（ σ_b ）

支圧荷重を受ける部分の平均支圧応力の許容応力は次の通りである。（安全側に、支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合以外の許容応力とする。）

$$\sigma_b \leq 2S_y$$

(3) 供用状態D sにおける圧縮応力 (σ_c)

①圧縮材の有効細長比 (λ) が限界細長比 (Λ) 以下の場合の圧縮応力 (σ_c)

$$\sigma_c \leq 1.5f_c^* = 1.5 \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F^*}{v}$$

$$F^* = \min[1.35S_y, 0.7S_u, 1.2S_y(RT)]$$

$$\lambda = \frac{l_k}{i}$$

$$\Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6F^*}}$$

$$v = 1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$$

ここで,

l_k : 座屈長さ

i : 座屈軸についての断面二次半径

E : 縦弾性係数

②圧縮材の有効細長比 (λ) が限界細長比 (Λ) を超える場合の圧縮応力 (σ_c)

$$\sigma_c \leq 1.5f_c^* = 1.5 \times 0.277 \times F^* \left(\frac{\Lambda}{\lambda} \right)^2$$

7. 評価結果

使用済燃料収納缶（大）に生じる応力

(単位：MPa)

部 位	材 料	応 力	基準地震動 S_s		
			算出応力	許容応力	
①収納缶胴板	SUS304TP	一次一般膜応力 P_m	1	319	
		一次一般膜＋一次曲げ応力 $P_m + P_b$	11	478	
		平均支圧応力 σ_b	1	376	
		圧縮応力 σ_c	長手方向	1	205
			長手方向以外	0	79
②収納缶底板	SUS304	一次一般膜応力 P_m	1	319	
		一次一般膜＋一次曲げ応力 $P_m + P_b$	1	478	
		平均支圧応力 σ_b	1	376	

すべて許容応力以下である。

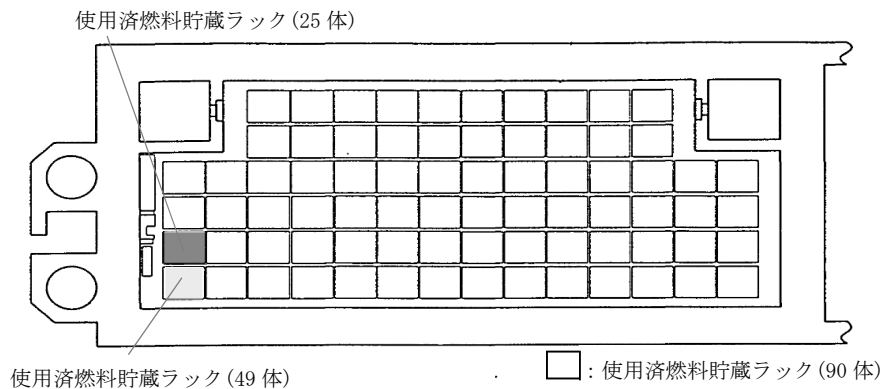
使用済燃料貯蔵ラック(25体)設置後の使用済燃料共用プール水深の遮へい能力に関する
説明書

使用済燃料貯蔵ラック(90体)に替えて使用済燃料貯蔵ラック(49体)と同じ高さの使用済燃料貯蔵ラック(25体)を設置し、設置により使用済燃料共用プールの貯蔵容量は減少することから、既存の使用済燃料貯蔵ラック(49体)の評価に包絡されることを確認した。

使用済燃料貯蔵ラック(49体)は、使用済燃料貯蔵ラック(90体)と比べてラックの高さが高く、貯蔵体数が減っている。49体ラックの線量率評価については、ラックの高さにあわせて水深の条件を変更しているが、線源強度については保守的に90体ラックと同じ条件(実際の貯蔵体数よりも多い)で評価している。

使用済燃料貯蔵ラック(25体)は、使用済燃料貯蔵ラック(49体)と比べてラックの高さは同じで、貯蔵体数が減っている。そのため、25体ラックの線量率評価については、ラックの高さは49体ラックと同じ条件、線源強度についても49体ラックと同じ条件に設定することで保守的な評価となる。

従って、ラックに収納されている使用済燃料を線源とするプール水面の線量率は「添付資料—9—1 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水深の遮へい能力に関する説明書」の評価に包絡されるため、水深の遮へい能力は十分確保される。



図—1 使用済燃料貯蔵ラック配置図

使用済燃料収納缶（大）についての説明書

1. 概要

使用済燃料貯蔵ラック（25 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，使用済燃料収納缶（大）に収納した状態で貯蔵する。

2. 使用済燃料収納缶（大）の構造

使用済燃料収納缶（大）はステンレス鋼製の角缶構造である。また，未臨界確保のため側面に中性子吸収材を配置している。なお，中性子吸収材は，輸送容器や使用済燃料貯蔵ラック向けのボロン添加アルミニウム合金を使用している。

3. 使用済燃料収納缶（大）の機能

- (1) 使用済燃料収納缶（大）は，天井クレーンを用いて使用済燃料収納缶（大）内に収納した燃料の取扱いが可能になるよう，使用済燃料収納缶（大）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，ワイヤロープ等により吊具と天井クレーンの主巻フックを取り付ける。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) 使用済燃料収納缶（大）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. 使用済燃料収納缶（大）の取扱い及び落下防止措置

使用済燃料収納缶（大）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。接続部は使用済燃料収納缶（大）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。

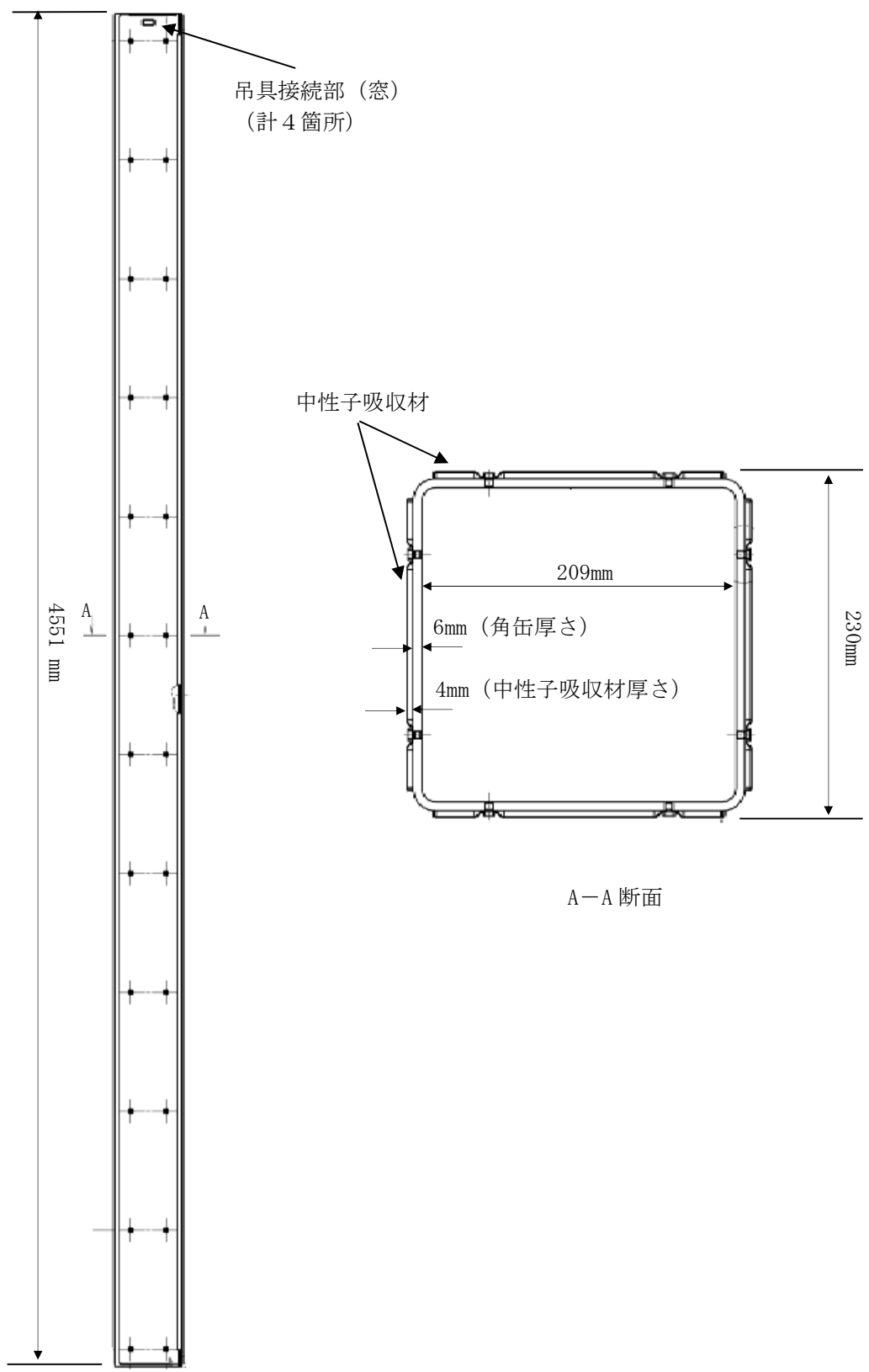


図-1 使用済燃料収納缶 (大) 構造図

II-2-12-添 9-2-47

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体及び25体）の設置に係る主要な確認項目を表－１に、使用済燃料収納缶（小及び大）に係る主要な確認項目を表－２に示す。

なお、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体及び25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	使用済燃料 貯蔵ラック (49体) 使用済燃料収納缶（小）を用いて貯蔵する箇所の使用済燃料収納缶（小）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。 挿入ゲージを用いて変形燃料を貯蔵する箇所の挿入ゲージ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。	使用済燃料収納缶（小）の挿入及び取出しが円滑に行えること。 挿入ゲージの挿入及び取出しが円滑に行えること。
	使用済燃料 貯蔵ラック (25体)	試験用収納缶を用いて貯蔵する箇所の試験用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。	試験用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（使用済燃料収納缶（小及び大））

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。

共用プール建屋廃液移送系について

従来、運用補助共用施設内で発生する廃液はプロセス主建屋へ移送していたが、プロセス主建屋地下階へ1～4号機のタービン建屋等の滞留水を受入れるため、建屋貫通部の止水措置が必要となったことから、2012年3月より高温焼却炉建屋へ移送先を切り替えている。

以下、運用補助共用施設内で発生する廃液を高温焼却炉建屋へ移送する共用プール建屋廃液移送系（以下、廃液移送系）に関する、2.12.1の記載事項以外の追加的な安全確保策、準拠規格、構造強度※、耐震性※、確認事項について記載する。（※は工事計画に記載が無い主要配管に限る）

なお、廃液をプロセス主建屋へ移送する系統は、以下の通り工事計画の認可申請・届出を実施している。

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）

1. 漏えい防止対策

(1) 漏えい発生防止

廃液移送系は、腐食による漏えいを防止するため、耐食性を有する鋼材、ステンレス鋼管、ポリエチレン管、耐圧ホースもしくは十分な肉厚を有する炭素鋼管を基本とする。廃液移送中は免震重要棟集中監視室にて高温焼却炉建屋水位を監視し、溢水による放射性物質の漏えい発生を防止する。

廃液移送系は、異常のないことを巡視点検等により容易に確認できる設備とし、漏えいを停止するための適切な処置ができるようにする。

鋼管もしくはポリエチレン管の継手部は、可能な限り溶接構造もしくは融着構造とする。耐圧ホースは継手部の無いものを使用する。

なお、ポリエチレン管と耐圧ホースの継手部は、フランジ構造にすることで外れることがないようにし、締付トルク管理およびフランジ面間の隙間管理を行うことで漏えい発生を防止する。

また、仮設ラインでの移送を行う際には、耐圧ホースを使用する。継手部はフランジ構造にすることで外れることがないようにし、締付トルク管理およびフランジ面間の隙間管理を行うことで漏えい発生を防止する。

(2) 漏えい検知・漏えい拡大防止

廃液移送系は、一部の配管を除いて建屋内に設置されており、仮に配管から漏えいが発生しても拡大防止堰及び施設外漏えい防止堰により、建屋外へ漏えいが拡大することはない。屋外の配管はすべて融着構造とし、フランジ構造となる継手部を設けず、さらに、金属トレイの中に敷設する。

また、巡視点検等で漏えいがないことを確認する。移送配管は、サポートにより地表面から離すことにより、漏えい検知を容易にする。道路横断部は巡視点検時に端部の金属トレイを開放することにより、漏えい検知が可能である。

なお、仮設ラインでの移送を行う際には、耐圧ホースを使用し、継手部に水受けをもうけることにより、漏えい水を受けられるようにした上で、巡視点検等で漏えいがないことを確認する。

2. 放射線遮へい

移送配管の表面線量率は 0.05mSv/h と評価しており、移送配管付近に線量表示を行い、作業員が不用意に近づくことを防止する。なお、放射線遮へいの必要が生じた場合には、状況に応じて適切な放射線遮へいを行う。

3. 検査可能性に対する設計上の考慮

廃液移送系は、高温焼却炉建屋に廃液を移送できることを確認するための検査が可能な設計とする。

4. 健全性に対する考慮

廃液移送系は、機器の重要度に応じた有効な保全が可能な設計とする。

5. 供用期間中に確認する項目

廃液移送系は、高温焼却炉建屋に廃液を移送できること。

6. 凍結

屋外に敷設する配管は、保温材を設置することにより凍結を防止する。

7. 紫外線

屋外に敷設するポリエチレン管は、耐紫外線性を有する保温材で覆う等の処置を講ずることで、紫外線による劣化を防止する。

8. 火災

廃液移送系は、火災発生防止及び火災影響軽減のため、実用上可能な限り不燃性又は難燃性材料を使用するとともに設備周辺から可能な限り可燃物を排除する。また、初期消火の対応ができるよう、設備近傍に消火器を設置する。

9. 耐放射性

耐圧ホースの構造部材であるポリ塩化ビニルの放射線照射による影響は、 $10^5 \sim 10^6 \text{Gy}$ の集積線量において、破断時の伸びの減少等が確認されている。過去の測定において、2号機タービン建屋の滞留水表面上の線量当量率が 1Sv/h であったことから、耐圧ホースの照射線量率を 1Gy/h と仮定すると、集積線量が 10^5Gy に到達する時間は 10^5 時間（11.4年）と評価される。そのため、耐圧ホースは数年程度の使用では放射線照射の影響により大きく劣化することはないと考えられる。

ポリエチレンは、集積線量が $2 \times 10^5 \text{Gy}$ に達すると、引張強度は低下しないが、破断時の伸びが減少する傾向を示す。ポリエチレン管の照射線量率を 1Gy/h と仮定すると、 $2 \times 10^5 \text{Gy}$ に到達する時間は 2×10^5 時間（22.8年）と評価される。そのため、ポリエチレン管は数年程度の使用では放射線照射の影響を受けることはないと考えられる。

10. 準拠規格・基準類

廃液移送系の配管で使用する主要材料については、以下の規格・基準類に準拠する。

- ・ 発電用原子力設備規格 設計・建設規格（JSME S NC1-2005/2007）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術規程（JEAC-4601(2008)）
- ・ 日本工業規格（JIS規格）
- ・ 国際標準化機構規格（ISO規格）
- ・ 日本水道協会規格（JWWA規格）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601）

11. 構造強度評価

11.1 構造強度評価の基本方針

廃液移送系を構成する機器は、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則（平成 25 年 6 月 28 日原子力規制委員会規則第 6 号）」において、廃棄物処理設備に相当するクラス 3 機器に準ずるものと位置付けられる。

廃液移送系については、「JSME S NC-1 発電用原子力設備規格 設計・建設規格（JSME 規格）」（以下、「JSME 規格」という。）、日本工業規格（JIS 規格）等の国内外の民間規格に適合した工業用品の採用、またはこれらと同等の技術的妥当性を有する規格での設計・製作・検査を行う。

また、JSME 規格で規定される材料の日本工業規格（JIS 規格）年度指定は、技術的妥当性の範囲において材料調達性の観点から考慮しない場合もある。

さらに、JSME 規格に記載のない非金属材料（耐圧ホース、ポリエチレン管等）については、現場の作業環境等から採用を継続する必要があるが、これらの機器等については、日本工業規格（JIS 規格）や日本水道協会規格（JWWA 規格）、製品の試験データ等を用いて設計を行う。

11.2 配管（鋼管）の強度評価

強度評価箇所を図-1に示す。設計・建設規格に準拠し、厚さ評価を行った。評価の結果、最高使用圧力に対して十分な厚さを有することを確認した。（表-1 参照）

内面に圧力を受ける配管について、以下の計算式により計算した値及び設計・建設規格表 PPD-3411-1 に定める値のいずれか大きい方の値以上であること。

<評価方法>

内面に圧力を受ける配管について、以下の計算式により計算した値及び設計・建設規格表 PPD-3411-1 に定める値のいずれか大きい方の値以上であること。

$$t = \frac{P \cdot D_o}{2 \cdot S \cdot \eta + 0.8 \cdot P}$$

t : 管の計算上必要な厚さ[mm]

P : 最高使用圧力[MPa]

D_o : 管の外径[mm]

S : 最高使用温度における材料の許容引張応力[MPa]

η : 長手継手の効率

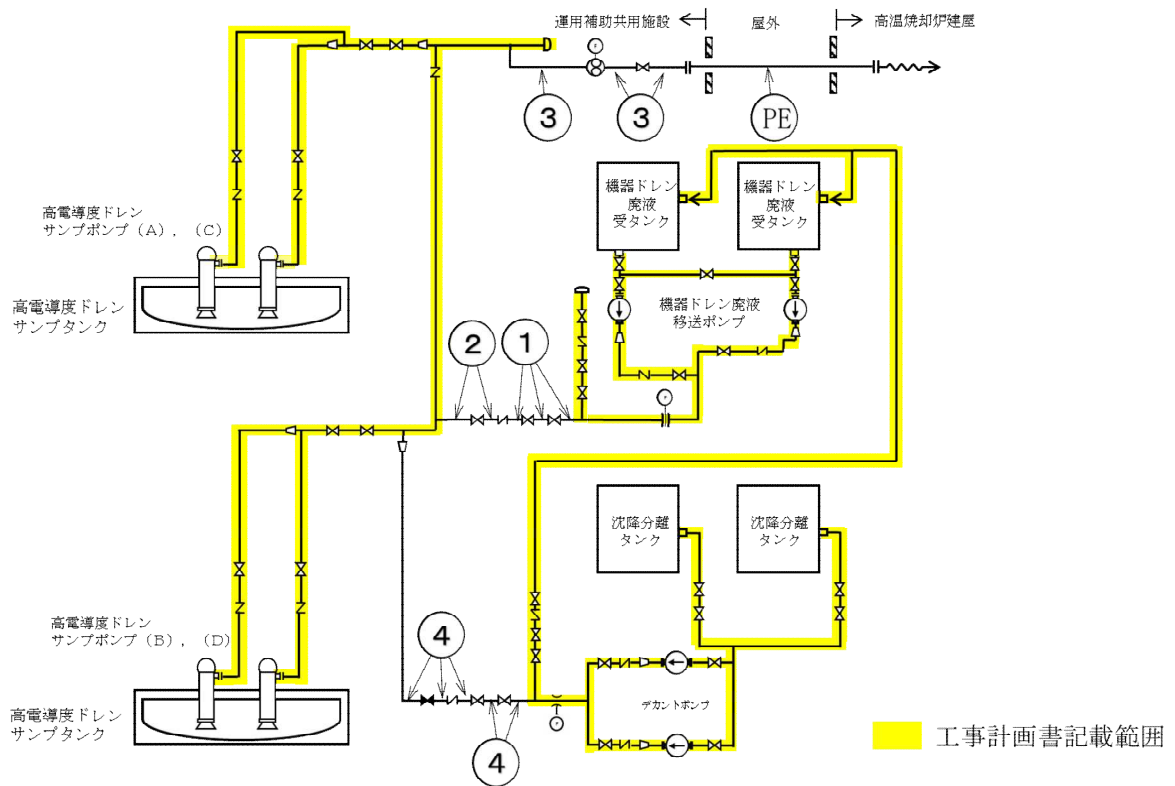


図-1 配管概略図

表-1 配管（鋼管）の厚さ評価結果

評価機器	口径	Sch.	材質	最高使用 圧力 (kg/cm ²)	最高使用 温度 (°C)	必要厚さ (mm)	設計厚さ (mm)
配管①	65A	40	STPT38	10.0	66	2.70	4.55
配管②	65A	40	SUS304TP	10.0	66	0.30	4.55
配管③	80A	40	SUS304TP	0.98MPa	66	0.35	4.81
配管④	50A	40	SUS304TP	10.0	66	0.24	3.40

11.3 配管（ポリエチレン管）の強度評価

配管（ポリエチレン管）は鋼材ではなく、一般産業品であるため、設計・建設規格の要求に適合するものではない。しかしながら、配管（ポリエチレン管）は、一般に耐食性、電気特性（耐電気腐食）、耐薬品性を有しており、鋼管と同等の信頼性を有している。また、以下により高い信頼性を確保する。

- ・日本水道協会規格及び ISO 規格に適合したポリエチレン管を採用する。
- ・継手は、可能な限り融着構造とする。

11.4 配管（耐圧ホース）の強度評価

設計・建設規格上のクラス 3 機器に対する規定を満足する材料ではないが、系統の温度、圧力を考慮して仕様を選定した上で、漏えい試験を行い、運転状態に異常がないことを確認する。従って、耐圧ホースは、必要な構造強度を有していると評価した。

12. 耐震性評価

12.1 耐震性評価の基本方針

廃液移送系を構成する機器のうち放射性物質を内包するものは、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の B クラス相当の設備と位置付けられ、耐震性を評価するにあたっては、「JEAC4601 原子力発電所耐震設計技術規程」（以下、「耐震設計技術規程」という。）等を準用する。ただし、評価手法、評価基準について実態に合わせたものを採用する場合もある。耐圧ホース、ポリエチレン管は、材料の可撓性により耐震性を確保する。

12.2 配管（鋼管）の耐震性評価

配管支持の位置を決定するにあたっては、定ピッチスパン法により適正な支持間隔を確保する。定められた間隔で支持することにより、配管系の固有周期を設定し、地震応力が過大とならないようにする。また、集中質量部、曲り部、分岐部に発生する応力及び固有周期は、直管部における値を上回らないものとする。

a. 評価条件

評価条件としては、配管軸直 2 方向拘束サポートにて支持される 3 点支持はりモデル（図-2 参照）とする。

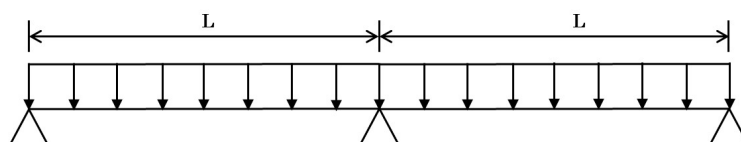


図-2 等分布荷重 3点支持はりモデル

次に、当該設備における配管（鋼管）について、各種条件を表-2 に示す。

表-2 配管（鋼管）の基準支持間隔

配管分類	主配管（鋼管）			
配管クラス	クラス3相当			
耐震クラス	クラスB相当			
最高使用圧力 (kg/cm ²)	10.0	10.0	0.98MPa	10.0
最高使用温度 (°C)	66			
配管材質	STPT38	SUS304TP		
配管口径	65A	65A	80A	50A
Sch	40	40	40	40
設計震度※1	0.36			
配管支持間隔※2 (m)	2.8	2.8	3.0	2.5

※1 設計震度は、建物・建築物の振動性、地盤の種類等を考慮して求められる値とする。

※2 評価は保守的に 4.0m とする。

b. 評価方法

水平方向震度による配管応力を評価する。

自重による応力 S_w は、下記の式で示される。

$$S_w = \frac{M}{Z} = \frac{w \cdot L^2}{8Z} \quad (\text{b. 1})$$

- S_w : 自重による応力 [MPa]
- L : 支持間隔 [mm]
- M : 曲げモーメント [N・mm]
- Z : 断面係数 [mm³]
- w : 等分布荷重 [N/mm]

地震による応力 S_s は、自重による応力 S_w の震度倍で下記の式で示される。

$$S_s = C_H \cdot S_w \quad (\text{b. 2})$$

- S_s : 地震による応力 [MPa]
- C_H : 水平震度

また、評価基準として JEAC4601-2008 に記載の供用応力状態 C_s におけるクラス 3 配管の一次応力制限を用いると、地震評価としては下記の式で示される。

$$S = S_p + S_w + S_s = S_p + S_w + C_H \cdot S_w \leq 1.0S_y \quad (\text{b. 3})$$

- S : 内圧, 自重, 地震による発生応力 [MPa]
- S_p : 内圧による応力 [MPa]
- S_y : 設計降伏点 [MPa]

c. 評価結果

3 点支持はりモデルで各応力計算をした結果を表-3 に示す。

表-3 より、いずれの場合においても許容値に対して十分な裕度があることが確認できた。

表-3 応力評価結果

評価機器	口径	Sch	材質	最高使用圧力 (kg/cm ²)	内圧, 自重, 地震による発生応力 (MPa)	供用状態 C_s における 一次応力許容値 (MPa)
配管①	65A	40	STPT38	10.0	26	199
配管②	65A	40	SUS304TP	10.0	26	188
配管③	80A	40	SUS304TP	0.98MPa	25	188
配管④	50A	40	SUS304TP	10.0	32	188

12.3 配管（ポリエチレン管）の耐震性評価

配管（ポリエチレン管）は、可撓性を有しており、地震変位による有意な応力は発生しないと考える。

12.4 配管（耐圧ホース）の耐震性評価

配管（耐圧ホース）は、可撓性を有しており、地震変位による有意な応力は発生しないと考える。

13. その他考慮事項

瓦礫類発生量

配管取替を実施することから、約 2m³の瓦礫類が発生する見込みである。瓦礫類の表面線量率は 1mSv/h 以下であり、表面線量率に応じて定められた瓦礫類の一時保管エリア（E1, P2, W, X）もしくは固体廃棄物貯蔵庫第 9 棟地上 1 階へ搬入する。

14. 確認事項

廃液移送系の確認事項を表-4～7に示す。

表-4 確認事項（鋼管の溶接検査）

確認事項	確認項目	確認内容	判定
溶接検査	材料検査	材料が溶接規格等に適合するものであり、溶接施工法の母材の区分に適合することを確認する。	使用する材料が、溶接規格等に適合するものであり、溶接施工法の母材の区分に適合するものであること。
	開先検査	開先形状等が溶接規格等に適合するものであることを確認する。	開先形状等が溶接規格等に適合するものであること。
	溶接作業検査	あらかじめ確認された溶接施工法又は実績のある溶接施工法又は管理されたプロセスを有する溶接施工法であることを確認する。あらかじめ確認された溶接士により溶接が行われていることを確認する。	あらかじめ確認された溶接施工法および溶接士により溶接施工をしていること。
	非破壊検査	溶接部について非破壊検査を行い、その試験方法及び結果が溶接規格等に適合するものであることを確認する。	溶接部について非破壊検査を行い、その試験方法及び結果が溶接規格等に適合するものであること。
	耐圧・漏えい検査	溶接規格により定められた検査圧力で一定時間保持した後、検査圧力に耐えていること及び耐圧部分から漏えいがないことを確認する。	溶接規格により定められた検査圧力で一定時間保持した後、検査圧力に耐えていること及び耐圧部分から漏えいがないこと。
	外観検査	耐圧・漏えい検査後外観上、傷・へこみ・変形等の異常がないことを確認する。	外観上、傷・へこみ・変形等の異常がないこと。

表-5 確認事項（主要配管（ポリエチレン管））

確認事項	確認項目	確認内容	判定
構造強度 ・耐震性	材料確認	実施計画に記載した主な材料について記録を確認する。	実施計画のとおりであること。
	寸法確認	実施計画に記載した外径について記録を確認する。	実施計画のとおりであること。
	外観確認 ※1	各部の外観を確認する。	有意な欠陥がないこと。
	据付確認	配管の据付状態について確認する。	実施計画のとおり施工・据付されていること。
	耐圧・漏えい確認	最高使用圧力以上の水圧で、一定時間保持した後、検査圧力に耐えていること及び耐圧部から漏えいがないことを確認する。※1	検査圧力に耐えていること及び耐圧部から漏えいがないこと。
機能	通水確認	通水されていることを確認する。	通水されていること。

※1 現地では実施可能な範囲とし、必要に応じて記録を確認する。

表-6 確認事項（主要配管（耐圧ホース））

確認事項	確認項目	確認内容	判定
構造強度 ・耐震性	材料確認	実施計画に記載した主な材料について記録を確認する。	実施計画のとおりであること。
	寸法確認	実施計画に記載した外径について記録を確認する。	実施計画のとおりであること。
	外観確認 ※1	各部の外観を確認する。	有意な欠陥がないこと。
	据付確認	配管の据付状態について確認する。	実施計画のとおり施工・据付されていること。
	耐圧・漏えい確認	運転圧力による漏えい有無を確認する。※1	耐圧部から漏えいがないこと。
機能	通水確認	通水されていることを確認する。	通水されていること。

※1 現地では実施可能な範囲とし、必要に応じて記録を確認する。

表-7 確認事項（主要配管（鋼管））

確認事項	確認項目	確認内容	判定
構造強度 ・耐震性	材料確認	実施計画に記載した主な材料について記録を確認する。	実施計画のとおりであること。
	寸法確認	実施計画に記載した主要寸法について記録を確認する。	実施計画のとおりであること。
	外観確認 ※1	各部の外観を確認する。	有意な欠陥がないこと。
	据付確認	配管の据付状態について確認する。	実施計画のとおり施工・据付されていること。
	耐圧・漏えい確認	最高使用圧力の1.5倍の水圧で、一定時間保持した後、検査圧力に耐えていること及び耐圧部から漏えいがないことを確認する。※1	検査圧力に耐えていること及び耐圧部から漏えいがないこと。
機能	通水確認	通水されていることを確認する。	通水されていること。

※1 現地では実施可能な範囲とし、必要に応じて記録を確認する。

以上

福島第一原子力発電所
特定原子力施設に係る実施計画

別冊集

本資料は、「福島第一原子力発電所特定原子力施設に係る実施計画」の内容を補足するものです。

本資料は、東京電力ホールディングス株式会社またはその他の企業の秘密情報が含まれている可能性があります。当社の許可なく本資料の内容を本来の目的以外に使用すること、ならびに第三者に開示、公開する行為を禁止します。

東京電力ホールディングス株式会社

目次

- 別冊 1 原子炉圧力容器・格納容器注水設備に係る補足説明
 - I 原子炉圧力容器・格納容器注水設備の構造強度及び耐震性について

- 別冊 2 原子炉格納容器内窒素封入設備に係る補足説明
 - I 原子炉格納容器内窒素封入設備の構造強度及び耐震性について

- 別冊 3 使用済燃料プール設備に係る補足説明
 - I 使用済燃料プール設備の構造強度及び耐震性について

- 別冊 4 原子炉圧力容器・格納容器ホウ酸水注入設備に係る補足説明
 - I 原子炉圧力容器・格納容器ホウ酸水注入設備の構造強度及び耐震性について

- 別冊 5 汚染水処理設備等に係る補足説明
 - I 汚染水処理設備等の構造強度及び耐震性について
 - II 2.5 汚染水処理設備等の寸法許容範囲について

- 別冊 6 原子炉格納容器ガス管理設備に係る補足説明
 - I 原子炉格納容器ガス管理設備の構造強度及び耐震性について

- 別冊 7 使用済燃料プールからの燃料取り出し設備に係る補足説明
 - I 燃料取り出し用カバー換気設備の構造強度及び耐震性について
 - II 燃料の健全性確認及び取り扱いに関する補足書
 - III 3号機 構内用輸送容器に関する要目表
 - IV 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（4号機）（添付資料2-1-3）に関する補足書
 - V 構内用輸送容器（NFT-12B型）の確認項目に係わる寸法及び材料

- 別冊 8 使用済燃料乾式キャスク仮保管設備に係る補足説明
 - I 乾式キャスク仮保管設備の構造強度及び耐震性について
 - II 乾式キャスク仮保管設備に関する要目表

別冊 9 放射性液体廃棄物処理施設及び関連施設に係る補足説明

- I 放射性液体廃棄物処理施設及び関連施設の構造強度及び耐震性について

別冊 10 福島第一原子力発電所 原子力事業者防災業務計画

別冊 12 サブドレン他水処理施設に係る補足説明

- I サブドレン他水処理施設の耐震性に係る補足説明
- II サブドレン集水設備の強度に係る補足説明
- III サブドレン他浄化設備の強度に係る補足説明
- IV サブドレン他移送設備の強度に係る補足説明
- V 地下水ドレン集水設備の強度に係る補足説明

別冊 13 放射性固体廃棄物等の管理施設及び関連施設（雑固体廃棄物焼却設備）に係る補足説明

- I 雑固体廃棄物焼却設備の耐震性に係る補足説明
- II 雑固体廃棄物焼却設備の強度に係る補足説明
- III 雑固体廃棄物焼却設備の公称値の許容範囲について

別冊 14 雨水処理設備等に係わる補足説明

- I 雨水処理設備等の構造強度・耐震性に係る補足説明
- II 雨水処理設備等の寸法許容範囲について
- III 雨水処理設備等の耐圧検査条件について

別冊 15 使用済燃料共用プール設備に係る補足説明

- I 使用済燃料貯蔵ラックおよび使用済燃料収納缶に係る要目表
- II 使用済燃料貯蔵ラック（49 体）の耐震性について
- III 使用済燃料貯蔵ラック（25 体）の核燃料物質が臨界に達しないことを説明する書類に係る補足説明
- IV 使用済燃料貯蔵ラック（25 体）の耐震性について

別冊 16 建屋内 RO 循環設備に係る補足説明

- I 建屋内 RO 循環設備の構造強度評価に係る補足説明
- II 建屋内 RO 循環設備の耐震性評価に係る補足説明

別冊 17 5・6号機 燃料取扱系及び燃料貯蔵設備に係る補足説明

- I 燃料の取扱い・耐震性について

別冊 18 RO 濃縮水処理設備に係る補足説明

- I RO 濃縮水処理設備の構造強度及び耐震性について

別冊 19 大型機器除染設備に係る補足説明

- I 大型機器除染設備の強度に係る補足説明
- II 大型機器除染設備の公称値の許容範囲について

別冊 20 電気系統設備に係る補足説明

- I 所内共通 M/C5A/B の耐震性評価結果
- II 所内共通 M/C6A/B の耐震性評価結果
- III 所内共通 M/C7A/B の耐震性評価結果

別冊 21 放射性物質分析・研究施設 第1棟に係る補足説明

- I 放射性物質分析・研究施設 第1棟の構造強度について
- II 放射性物質分析・研究施設 第1棟の耐震性について
- III 第1棟の設備の公称値の許容範囲について

別冊 22 油処理装置に係る補足説明

- I 油処理装置の耐震性に関する補足説明
- II 油処理装置の強度に係る補足説明
- III 油処理装置の公称値の許容範囲について

別冊 23 増設雑固体廃棄物焼却設備に係る補足説明

- I 増設雑固体廃棄物焼却設備の耐震性に係る補足説明
- II 増設雑固体廃棄物焼却設備の強度に係る補足説明
- III 増設雑固体廃棄物焼却設備の公称値の許容範囲について

別冊 24 5・6号機 放射性液体廃棄物処理系に係る補足説明

- I 5・6号機 放射性液体廃棄物処理系のうち、仮設設備（滞留水貯留設備）の構造強度及び耐震性について

別冊 1 5 使用済燃料共用プール設備に係る補足説明

I. 使用済燃料貯蔵ラックおよび使用済燃料収納缶に係る要目表

表-1 使用済燃料貯蔵ラック (49 体)

名 称		使用済燃料貯蔵ラック	
種 類	—	たて置ラック式	
容 量	体	49	
主 要 寸 法	高 さ	mm	(4680)
	中 心 間 距 離	mm	()
	内 の り	mm	() *1
			() *2
	ス ペ ー サ 間 距 離	mm	() *1
厚 さ	mm	()	
材 質	—	SUS304	
個 数	—	1	

注：主要寸法の（ ）内は公称値を示す。

*1：使用済燃料収納缶（小）を貯蔵するスペース

*2：変形燃料を貯蔵するスペース

表-2 使用済燃料貯蔵ラック (49 体) の許容寸法

主要寸法	公称値	公差	公差の考え方
高さ(mm)	4680	()	製造メーカー社内技術標準*1における「普通公差の通則」に基づいて設定。
中心間距離(mm)	()	()	ラックの製造性*2を考慮して設定。
内のり(mm)	()	()	ラックの製造性*2を考慮して設定。
	()	()	ラックの製造性*2を考慮して設定。
	()	()	ラックの製造性*2を考慮して設定。
スペーサ間距離(mm)	()	()	ラックの製造性*2を考慮して設定。
厚さ(mm)	()	()	材料メーカーの製造能力を考慮した上で設定。

*1：製造メーカー社内技術標準について

JIS B 0405「普通公差—第1部：個々に公差の指示がない長さ寸法及び角度寸法に対する公差」に基づき、公差を設定している。

*2：ラックの製造性について

ラックの製造過程における SUS304 の切断精度、ラックの組立精度、溶接変形（溶接入

熱による縮み、歪みによる変形)等に起因するもの。

表-3 使用済燃料貯蔵ラック (25 体)

名	称	使用済燃料貯蔵ラック							
種	類	たて置ラック式							
容	量	25							
主 要 寸 法	高	さ	mm	(4680)					
	中	心	間	距	離	mm	()		
	内	の	り	mm	()				
	ス	ペ	ー	サ	間	距	離	mm	()
	厚	さ	mm	()					
材	質	—	SUS304						
個	数	—	1						

注：主要寸法の () 内は公称値を示す。

表-4 使用済燃料貯蔵ラック (25 体) の許容寸法

主要寸法	公称値	公差	公差の考え方
高さ (mm)	4680	■	製造メーカー社内技術標準 ^{*1} における「普通公差の通則」に基づいて設定。
中心間距離 (mm)	■	■	ラックの製造性 ^{*2} を考慮して設定。
内のり (mm)	■	■	ラックの製造性 ^{*2} を考慮して設定。
スペーサ間距離 (mm)	■	■	ラックの製造性 ^{*2} を考慮して設定。
厚さ (mm)	■	■	材料メーカーの製造能力を考慮した上で設定。

*1：製造メーカー社内技術標準について

JIS B 0405「普通公差—第1部：個々に公差の指示がない長さ寸法及び角度寸法に対する公差」に基づき、公差を設定している。

*2：ラックの製造性について

ラックの製造過程における SUS304 の切断精度、ラックの組立精度、溶接変形（溶接入熱による縮み、歪みによる変形）等に起因するもの。

表-5 使用済燃料収納缶 (小)

名称			使用済燃料収納缶 (小)
容量	量	体	1
主要寸法	全長	mm	(4551)
	内寸	mm	(153)
	厚さ	mm	(5)
材質	質	-	SUS304

注：主要寸法の () 内は公称値を示す。

表-6 使用済燃料収納缶 (小) の許容寸法

主要寸法	公称値	公差	公差の考え方
全長 (mm)	4551	■	製造性を考慮して設定
内寸 (mm)	153	■	製造性を考慮して設定
厚さ (mm)	5	■	製造性を考慮して設定

表-7 使用済燃料収納缶 (大)

名称			使用済燃料収納缶 (大)
容量	量	体	1
主要寸法	角缶	全長	mm (4551)
		内寸	mm (209)
		厚さ	mm (6)
	中性子吸収材	全長	mm (4530)
		板幅	mm (190)
		厚さ	mm (4)
材質	角缶	-	SUS304
	中性子吸収材	-	B-A1 なお, ^{10}B の面密度は ■ g/cm ² 以上

注：主要寸法の () 内は公称値を示す。

表-8 使用済燃料収納缶（大）の許容寸法

主要寸法		公称値	公差	公差の考え方
角缶	全長(mm)	4551	■	製造能力及び製造実績を考慮して設定
	内寸(mm)	209	■	製造能力及び製造実績を考慮して設定
	厚さ(mm)	6	■	製造能力及び製造実績を考慮して設定
中性子吸収材	全長(mm)	4530	■	製造能力及び製造実績を考慮して設定
	板幅(mm)	190	■	製造能力及び製造実績を考慮して設定
	厚さ(mm)	4	■	製造能力及び製造実績を考慮して設定

II. 使用済燃料貯蔵ラック（49 体）の耐震性について

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、使用済燃料収納缶（小）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のほか、使用済燃料収納缶（小）とラックに含まれる水の質量及びラック外形の排除水質量*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、使用済燃料収納缶（小）ではなく変形した使用済燃料を貯蔵するものとする。
- (3) 水平方向地震動と鉛直方向地震動を解析モデルへ別々に入力して地震荷重、応力を求め、それらを適切に組み合わせて評価を行う。
構造概要図を図 1-1 に示す。

注記*：排除水質量とは、水中の機器の容積により排除される機器の周囲の流体の質量である。

1.2 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 NC1-2005/2007）
- ・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））
- ・日本産業規格（JIS）

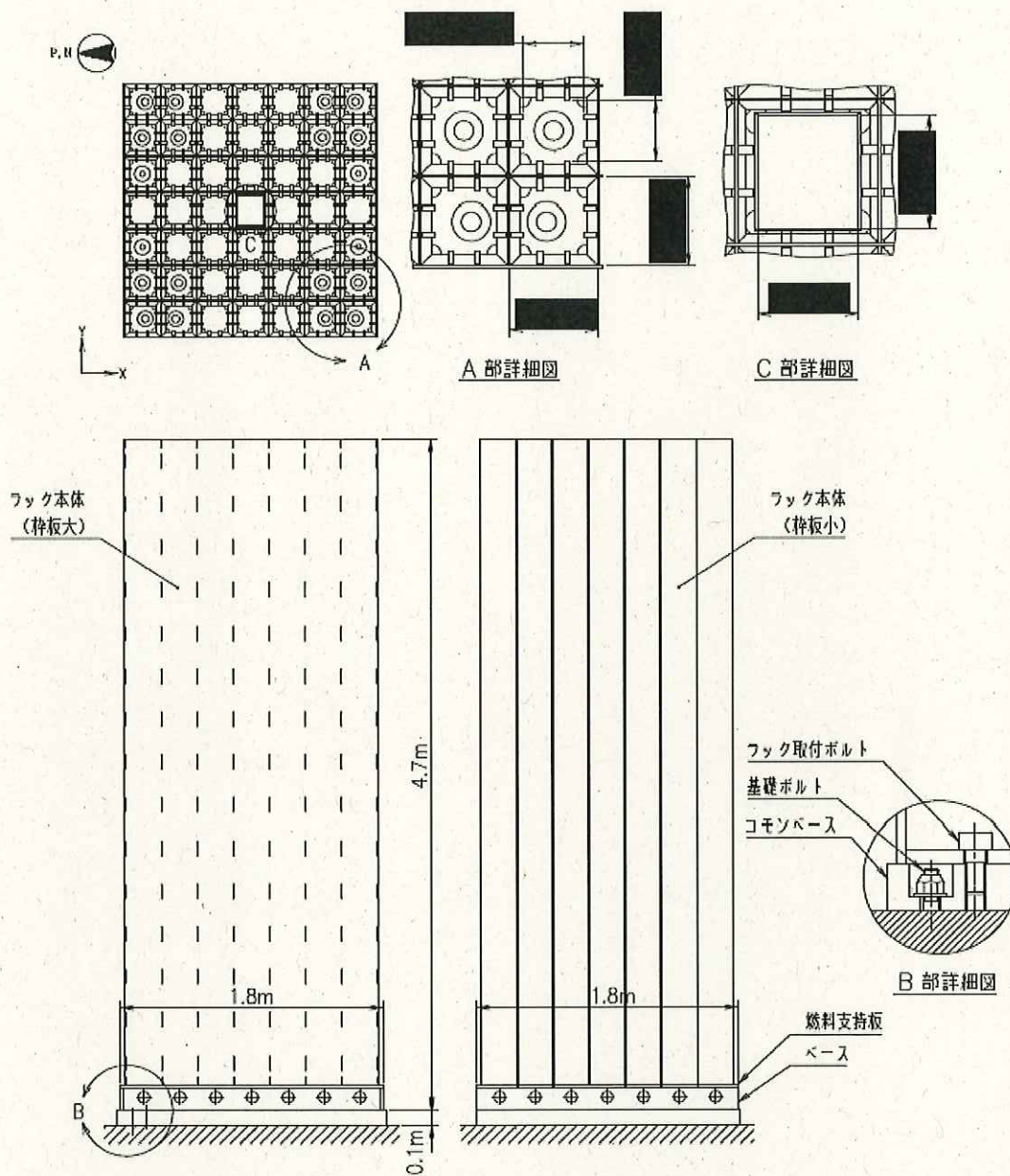


図 1-1 構造概要図 (使用済燃料貯蔵ラック (49 体))

1.3 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
A _b	ラック取付ボルト又は基礎ボルトの軸断面積	mm ²
A _f	圧縮フランジの断面積	mm ²
A _s	スペーサの面積	mm ²
C _H	水平方向設計震度	—
C _V	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
F _i	ベース又はコモンベース底部に作用するせん断力	N
f _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 _{s b}	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 _{s s}	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 _{t o}	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 _{t s}	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
H'	スペーサの高さ	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
$l_{i g}$	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	使用済燃料収納缶（小）貯蔵時のラック全質量	kg

記号	記号の説明	単位
mF	使用済燃料収納缶（小）に収納した燃料及び 1F-4 変形燃料の質量	kg
mR	ラックの質量	kg
mW	ラックに含まれる水の質量	kg
mFC	使用済燃料収納缶（小）の質量	kg
mCB	コモンベースの質量	kg
n	ラック取付ボルト又は基礎ボルトの全本数	—
n _i	ベース又はコモンベース端から l_i 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) 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_{cb} 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°C 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っては、

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

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

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。

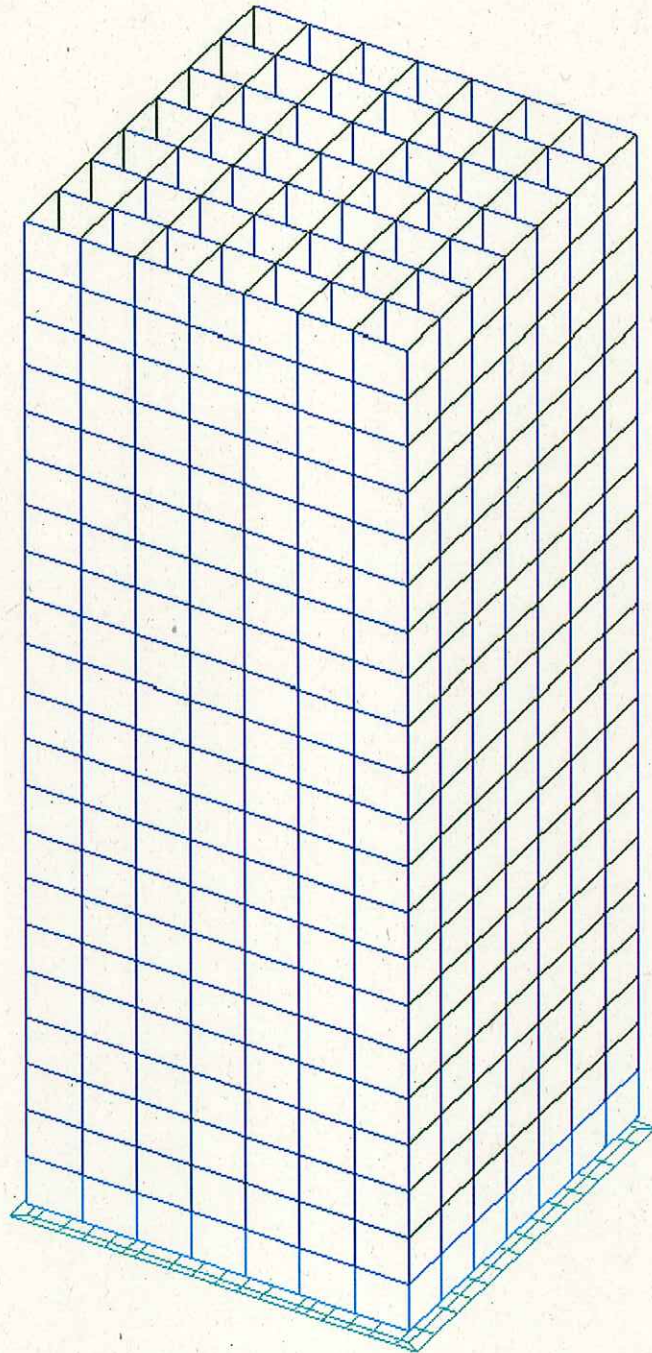


図 2-1 使用済燃料貯蔵ラック (49 体) 計算モデル

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し、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。

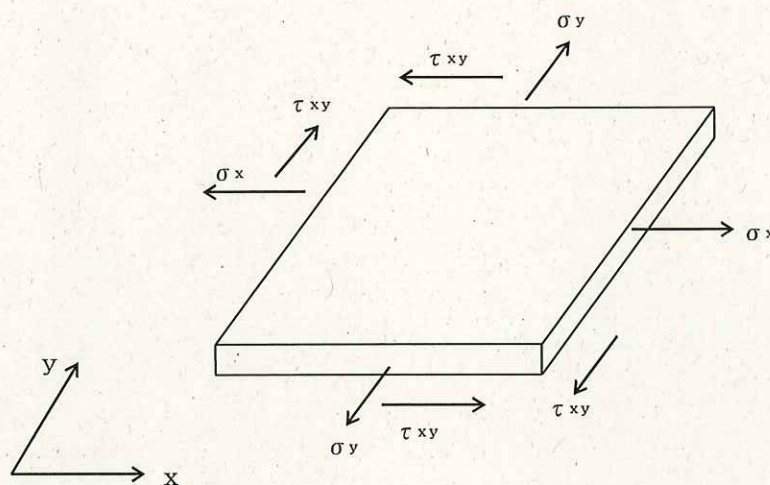


図2-2 部材の応力

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 ラック取付ボルトの応力

X方向地震時を例にとり、以下に計算方法を説明する。

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の応力を求める。

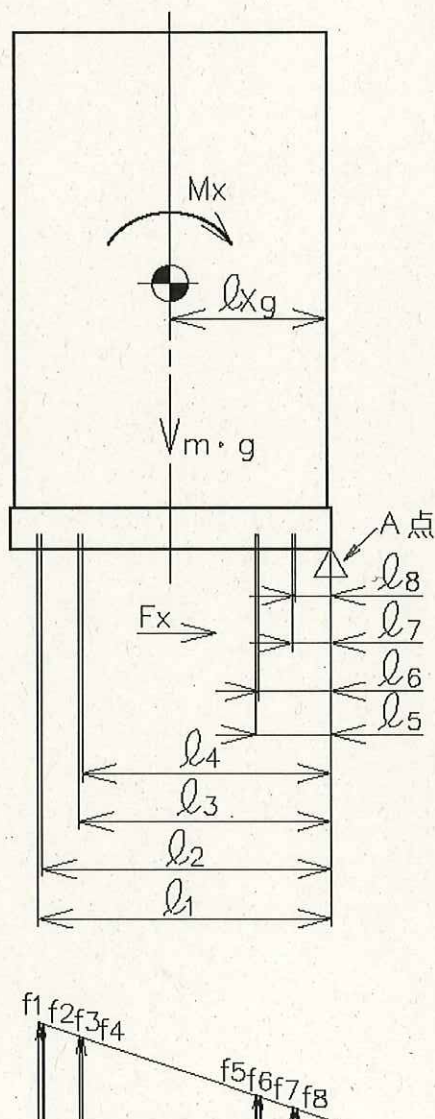


図2-3 ラック取付ボルトの応力

(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1本当りの引張力 f_i を求める。

$f_1 > f_2 > f_3 > f_4 > f_5 > f_6 > f_7 > f_8$ の関係にあるので f_1 のみを求める。

$$f_1 = \frac{l_1(M_x - (1 - C_V) \cdot m \cdot g \cdot l_{Xg})}{n_1 \cdot l_1^2 + n_2 \cdot l_2^2 + n_3 \cdot l_3^2 + n_4 \cdot l_4^2 + n_5 \cdot l_5^2 + n_6 \cdot l_6^2 + n_7 \cdot l_7^2 + n_8 \cdot l_8^2}$$

引張力 f_1 によりラック取付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

ラック取付ボルトに対するせん断力はラック取付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 基礎ボルトの応力

X方向地震時を例にとり、以下に計算方法を説明する。

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 及びコモンベース底部に作用するせん断力 F_x が、ラックに図2-4のように負荷されるものとして基礎ボルトの応力を求める。

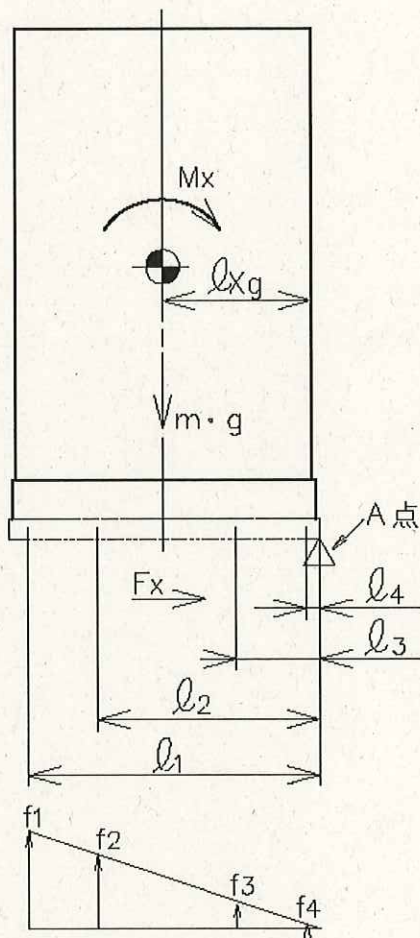


図2-4 基礎ボルトの応力

(1) 引張応力

A点まわりのモーメントの平衡により基礎ボルト1本当りの引張力 f_i を求める。

$f_1 > f_2 > f_3 > f_4$ の関係にあるので f_1 のみを求める。

$$f_1 = \frac{l_1(M_x - (1 - C_V) \cdot m \cdot g \cdot l_{xg})}{n_1 \cdot l_1^2 + n_2 \cdot l_2^2 + n_3 \cdot l_3^2 + n_4 \cdot l_4^2}$$

引張力 f_1 により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

基礎ボルトに対するせん断力は基礎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。

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

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-9-1 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 項及び 2.2.3 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 項及び 2.2.3 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}	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

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 G. L. -1.3 ^{*1}	1次	*2	C _v = 0.49	66	-	
			2次					*3
			3次					

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。

別冊15では、G. L. ±0m=T. P. 8.5m(※)とする。

(※) 震災後の地盤沈下量 (-709mm) と O. P. から T. P. への読替値 (-727mm) を用いて、下式に基づき換算している。

(換算式) T. P. = 旧 O. P. -1, 436mm

5. 機器要目

5.1 固有周期の算出及び部材の応力評価に用いる要目

項目 部材	材 料	t (mm)	E* ¹ (MPa)	G* ¹ (MPa)	S _y * ¹ (MPa)	S _y * ² (MPa)	S _u * ¹ (MPa)	F* (MPa)
ラック本体 (枠板大)	SUS304	■	192000	73800	188.66	205	479.89	205
ラック本体 (枠板小)	SUS304	■	192000	73800	188.66	205	479.89	205
燃料支持板	SUS304	■	192000	73800	188.66	205	479.89	205

注記 *1：最高使用温度（66℃）で算出

*2：室温で算出

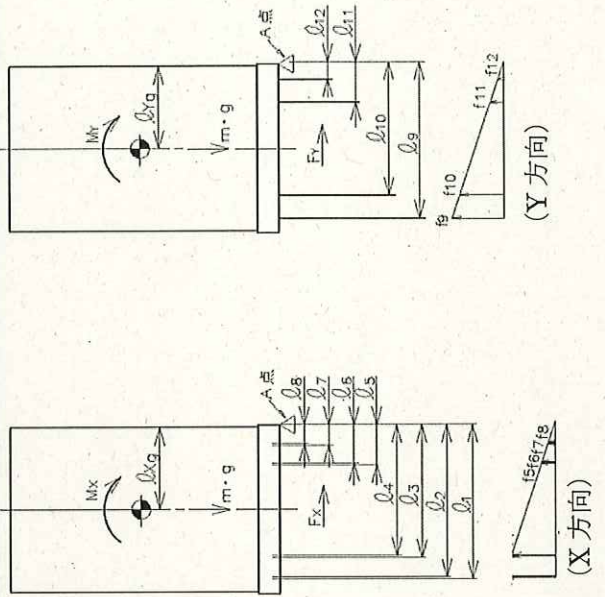
5.2 ラック取付ボルトの応力評価に用いる要目

機器名称	m (kg)	m _F (kg)	m _R (kg)	m _W (kg)	m _{FC} (kg)
使用済燃料貯蔵 ラック (49 体)	■	■	■	■	■

l ₁ (mm)	l ₂ (mm)	l ₃ (mm)	l ₄ (mm)	l ₅ (mm)	l ₆ (mm)	l ₇ (mm)	l ₈ (mm)	l ₉ (mm)	l ₁₀ (mm)	l ₁₁ (mm)	l ₁₂ (mm)	l _{Xg} (mm)	l _{Yg} (mm)
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

A ^b (mm ²)	n	n ¹	n ²	n ³	n ⁴	n ⁵	n ⁶	n ⁷	n ⁸	n ⁹	n ¹⁰	n ¹¹	n ¹²
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

ラック取付 ボルト材料	F _x (N)	F _y (N)	M _x (N・mm)	M _y (N・mm)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	F* (MPa)
SUS630H1150	2.002 × 10 ⁵	1.978 × 10 ⁵	8.134 × 10 ⁸	7.841 × 10 ⁸	■	■	■



注記 *1: 最高使用温度 (66°C) で算出

5.3 基礎ボルトの応力評価に用いる要目

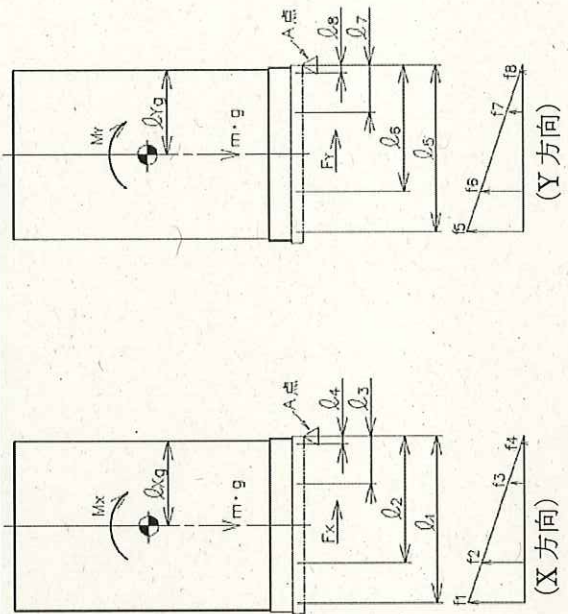
機器名称	m	m _F	m _R	m _W	m _{PC}	m _{CB}
コモンベース						

l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇	l ₈	l _{Xg}	l _{Yg}

A ^b	n	n ₁	n ₂	n ₃	n ₄	n ₅	n ₆	n ₇	n ₈
	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)

基礎ボルト 材料	F _x	F _y	M _x	M _y	S _y	S _u	F*
SUS630H1150	2.002 × 10 ⁵	1.978 × 10 ⁵	8.134 × 10 ⁸	7.841 × 10 ⁸			

注記 *1: 最高使用温度 (66°C) で算出



6. 計算結果

6.1 部材に生じる応力

(単位：MPa)

ラ ッ ク	部 材	地震の方向	応 力	基準地震動 Ss
使用済燃料貯蔵 ラック (49 体)	ラック本体 (枠板大)	X方向	引張り	$\sigma_x = 27$
			引張り	$\sigma_y = 4$
			せん断	$\tau_{xy} = 5$
			組合せ	$\sigma_{fa} = 27$
		Y方向	引張り	$\sigma_x = 28$
			引張り	$\sigma_y = 4$
			せん断	$\tau_{xy} = 4$
			組合せ	$\sigma_{fa} = 28$
	ラック本体 (枠板小)	X方向	引張り	$\sigma_x = 5$
			引張り	$\sigma_y = 29$
			せん断	$\tau_{xy} = 6$
			組合せ	$\sigma_{fa} = 29$
Y方向		引張り	$\sigma_x = 4$	
		引張り	$\sigma_y = 24$	
		せん断	$\tau_{xy} = 5$	
		組合せ	$\sigma_{fa} = 24$	

6.2 ラック取付ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

ラ ッ ク	地震の方向	応 力	基準地震動 Ss
使用済燃料貯蔵 ラック (49 体)	X方向	引張り	$\sigma_b = 33$
		せん断	$\tau_b = 8$
	Y方向	引張り	$\sigma_b = 32$
		せん断	$\tau_b = 8$

6.3 基礎ボルトに生じる応力

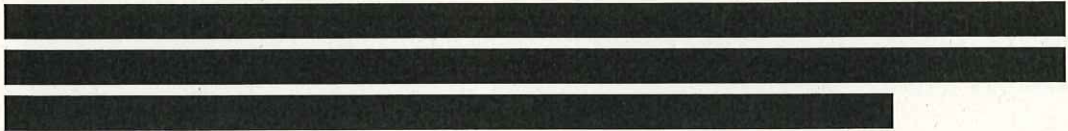
(単位：MPa)

ラ ッ ク	地震の方向	応 力	基準地震動 Ss
使用済燃料貯蔵 ラック (49 体)	X方向	引張り	$\sigma_b = 63$
		せん断	$\tau_b = 17$
	Y方向	引張り	$\sigma_b = 59$
		せん断	$\tau_b = 17$

6.4 許容応力

(1) ラック部材 (SUS304→オーステナイト系ステンレス鋼)

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



S _y : 付録材料図表Part5表8	-30°C~40°C	75°C
	205 (MPa)	183 (MPa)
S _u : 付録材料図表Part5表9	-30°C~40°C	75°C
	520 (MPa)	466 (MPa)

温度66°Cで線形補間すると

$$S_y(66^\circ\text{C}) = 205 - \frac{(205-183)}{75-40} \times (66-40) = 188.66 \text{ (MPa)}$$

$$S_u(66^\circ\text{C}) = 520 - \frac{(520-466)}{75-40} \times (66-40) = 479.89 \text{ (MPa)}$$

したがって、 $F^* = S_y(RT) = 205 \text{ (MPa)}$

(許容引張応力)

$$f_t = \frac{F^*}{1.5} = 205 \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て})$$

(許容せん断応力)

$$f_s = \frac{F^*}{1.5\sqrt{3}} = 118 \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て})$$

(許容組合せ応力)

$$f_t \geq \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x\sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$$

ここで、 σ_x 、 σ_y : 互いに直交する垂直応力

τ_{xy} : σ_x 、 σ_y の作用する面内のせん断応力

(2) ボルト類 (SUS630H1150→オーステナイト系ステンレス鋼ではない)

$$F^* = \text{Min}[1.2S_y, 0.7S_u]$$

S_y : 付録材料図表Part5表8 -30°C~40°C 75°C
 ■ (MPa) ■ (MPa)

S_u : 付録材料図表Part5表9 -30°C~40°C 75°C
 ■ (MPa) ■ (MPa)

温度66°Cで線形補間すると

$$S_y(66^\circ\text{C}) = \text{■} - \frac{(\text{■})}{75-40} \times (66-40) = \text{■} \text{ (MPa)}$$

$$S_u(66^\circ\text{C}) = \text{■} - \frac{(\text{■})}{75-40} \times (66-40) = \text{■} \text{ (MPa)}$$

したがって、 $F^* = \text{■} \text{ (MPa)}$

(許容引張応力)

$$f_{t0} = \frac{F^*}{2} \cdot 1.5 = \text{■} \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て})$$

(許容せん断応力)

$$f_{sb} = \frac{F^*}{1.5\sqrt{3}} \cdot 1.5 = \text{■} \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て})$$

(許容組合せ応力)

$$f_{ts} = 1.4f_{t0} - 1.6\tau_b$$

かつ

$$f_{ts} \leq f_{t0}$$

7. 結論

7.1 固有周期

ラック	次数	固有周期T (s)
使用済燃料貯蔵 ラック (49 体)	1 次	■
	2 次	■
	3 次	■

7.2 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 (桝板大)	SUS304	引張り	$\sigma_x = 28$	$f_t = 205$
			引張り	$\sigma_y = 4$	$f_t = 205$
			せん断	$\tau_{xy} = 4$	$f_s = 118$
			組合せ	$\sigma_{fa} = 28$	$f_t = 205$
	ラック本体 (桝板小)	SUS304	引張り	$\sigma_x = 5$	$f_t = 205$
			引張り	$\sigma_y = 29$	$f_t = 205$
			せん断	$\tau_{xy} = 6$	$f_s = 118$
			組合せ	$\sigma_{fa} = 29$	$f_t = 205$

すべて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	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)	SUS630	引張り	$\sigma_b = 33$	$f_{ts} = 455$
	H1150	せん断	$\tau_b = 8$	$f_{sb} = 350$

すべて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	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)	SUS630	引張り	$\sigma_b = 63$	$f_{ts} = 455$
	H1150	せん断	$\tau_b = 17$	$f_{sb} = 350$

すべて許容応力以下である。

8. スペーサおよ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 8-1 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 と a' の部位を比較すると、図 8-1 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場合、a' に比べ、強度上不利である。

したがって、代表して a 部を評価し、強度を満足することを確認する。

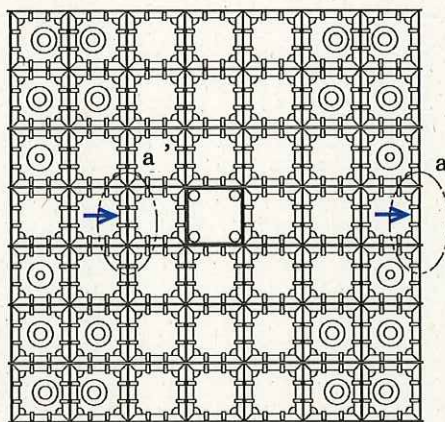


図 8-1 使用済燃料貯蔵ラック（49 体）上面図

8.1 作用荷重

使用済燃料収納缶（小）に働く地震力が、セルの1面の上下部スペーサ部に作用するものとする。

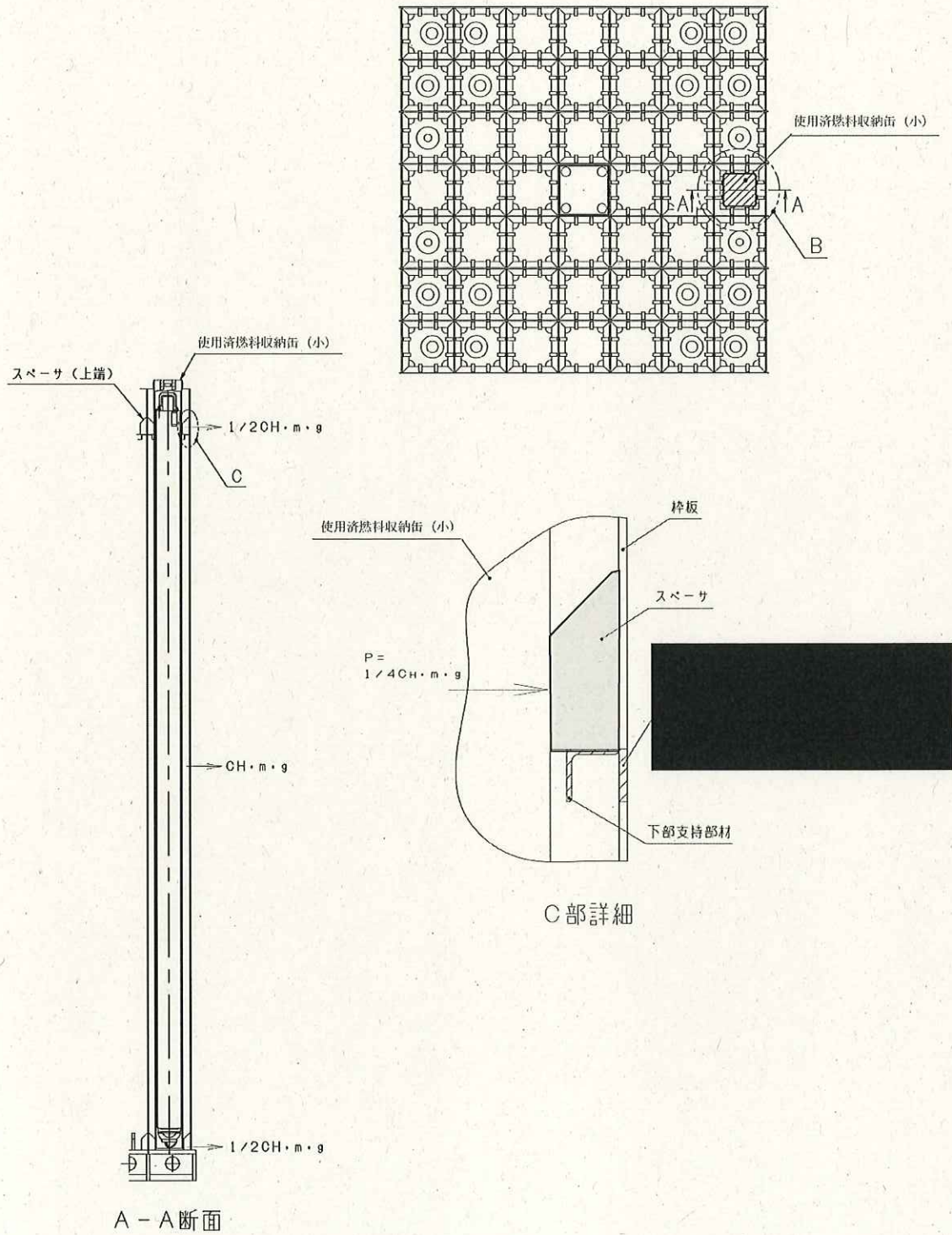
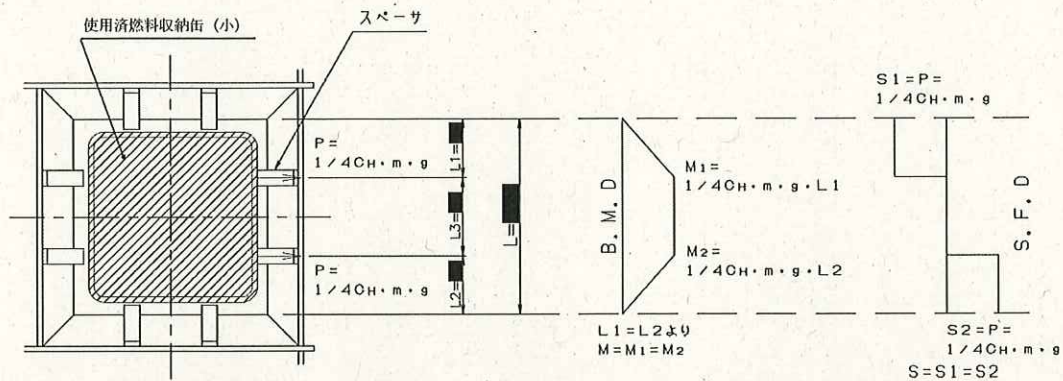


図8-2 スペーサおよびスペーサ下部支持部材の作用荷重 (1/2)



B部詳細

図8-3 スペーサおよびスペーサ下部支持部材の作用荷重 (2/2)

作用荷重 : $P = \frac{1}{4} C_H \cdot m \cdot g$
 $= \frac{1}{4} \times 0.89 \times \blacksquare \times 9.80665$
 $= \blacksquare \text{ (N)}$

適用震度 : $C_H = 0.89 (-)$

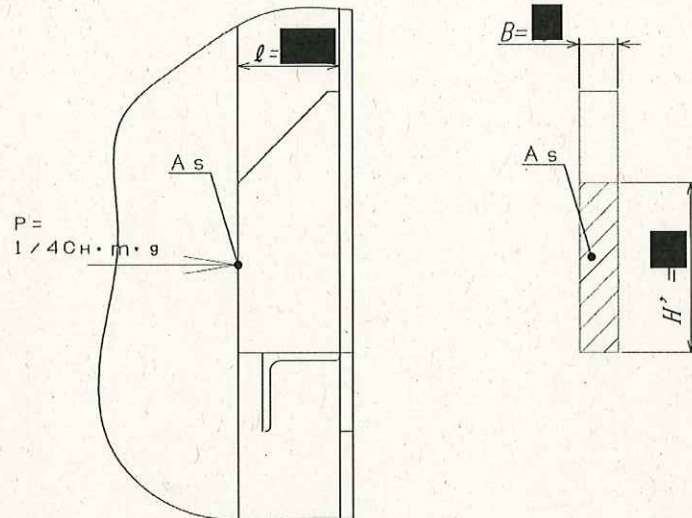
質量 : $m_s = \blacksquare \text{ (kg)}$
 m_s : 燃料, 使用済燃料収納缶 (小) 及び使用済燃料収納缶 (小) 内包水の合計質量

重力加速度 : $g = 9.80665 \text{ (m/s}^2\text{)}$

長さ : $L = \blacksquare \text{ (mm)}$
長さ : $L_1 = \blacksquare \text{ (mm)}$
長さ : $L_2 = \blacksquare \text{ (mm)}$

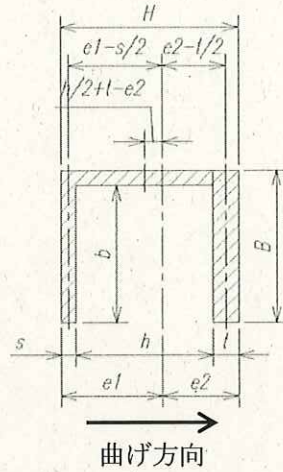
8.2 断面特性

8.2.1 スペーサの断面特性



断面形状	項目	記号	値	単位	数式
長方形断面	幅	B	■	mm	
	高さ	H'	■	mm	
	断面積	As	■	mm ²	$= H' \times B$
	断面二次モーメント(弱軸)	I	■	mm ³	$= \frac{H' \times B^3}{12}$
	断面二次半径	i	■	mm	$= \sqrt{\frac{I}{As}}$
	長さ	ℓ	■	mm	
	座屈長さ	ℓk	■	mm	$= 2.1\ell$
	有効細長比	λ	19.169	-	$= \ell k / i$

8.2.2 スペーサ下部支持部材の断面特性



断面形状	項目	記号	値	単位	数式
コの字断面 (非対称断面)	幅	B	■	mm	
		b	■	mm	
	高さ (はりのせい)	H	■	mm	
	高さ	h	■	mm	
	厚さ	s	■	mm	
		t	■	mm	
	重心の距離	e1	■	mm	$= \frac{b \cdot s^2 + (B-b) \cdot H^2 + b \cdot t \cdot (2H-t)}{2(b \cdot s + (B-b) \cdot H + b \cdot t)}$
		e2	■	mm	$= H - e1$
	断面二次モーメント	I	■	mm ⁴	$= \frac{B \cdot t^3}{12} + B \cdot t \left(e2 - \frac{t}{2} \right)^2 + \frac{B \cdot s^3}{12} + B \cdot s \left(e1 - \frac{s}{2} \right)^2 + \frac{(B-b)h^3}{12} + (B-b) \cdot h \cdot \left(\frac{h}{2} + t - e2 \right)^2$
	断面係数	Z1	■	mm ³	$= I/e1$
		Z2	■	mm ³	$= I/e2$
	断面積	A	■	mm ²	$= B \cdot H - b \cdot h$
	断面二次半径	i	■	mm	$= \sqrt{I/A}$
	支点間距離	L	■	mm	
	圧縮フランジの断面積	Af	■	mm ²	$= B \cdot s$
板幅比	B/s	■	-		
$24/\sqrt{\frac{F}{100}} = 16.76 \geq B/s$ なので板幅比を満足する。					

8.3 許容応力

SUS304 (オーステナイト系ステンレス鋼)

基準強度 : $F^* = 205$ (MPa)

縦弾性係数 : $E = 1.92 \times 10^5$ (MPa)

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	$1.5 \times \frac{F^*}{1.5}$

8.3.1 スペーサの許容応力

設計・建設規格 (JSME S NC1-2005/2007) SSB-3121.3, SSB-3121.1 に従い、許容応力を算出する。

(1) 許容圧縮応力

SSB-3121.1(3)より

有効細長比 $\lambda = 19.169$

$$\text{限界細長比 } \Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6 F^*}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \times 1.92 \times 10^5}{0.6 \times 205}} = 124.12$$

$$\nu = 1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 = 1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{19.169}{124.12} \right)^2 = 1.516$$

$\lambda < \Lambda$ より

$$f_c = \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F^*}{\nu} \times 1.5$$

$$= \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{19.169}{124.12} \right)^2 \right\} \frac{205}{1.516} \times 1.5$$

= 200 (MPa) (整数位, 小数点以下第一位切り捨て)

8.3.2 スペーサ下部支持部材の許容応力

設計・建設規格(JSME S NC1-2005/2007) SSB-3121.3, SSB-3121.1に従い、許容応力を算出する。

(1) 許容曲げ応力

設計・建設規格 SSB-3121.1(4) c より荷重面内に対称軸を有しないため

$$\begin{aligned} f_{eb} &= \min \left\{ 1.5 \times \frac{0.433 \cdot E \cdot A_f}{L \cdot H}, 1.5 \times \frac{F^*}{1.5} \right\} \\ &= \min \left\{ 1.5 \times \frac{0.433 \times 1.92 \times 10^5 \times \blacksquare}{\blacksquare}, 1.5 \times \frac{205}{1.5} \right\} \\ &= \min\{1714, 205\} = 205 \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て}) \end{aligned}$$

(2) 許容せん断応力

$$\begin{aligned} f_{ss} &= 1.5 \times \frac{F^*}{1.5\sqrt{3}} \\ &= 1.5 \times \frac{205}{1.5\sqrt{3}} = 118 \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て}) \end{aligned}$$

(3) 許容組合せ応力

$$\begin{aligned} f_0 &= 1.5 \times \frac{F^*}{1.5} \\ &= 1.5 \times \frac{205}{1.5} = 205 \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て}) \end{aligned}$$

9. スペーサおよびスペーサ下部支持部材の強度評価

9.1. スペーサの強度評価

前項の作用荷重：Pによりスペーサは圧縮荷重を受ける。以下に、その圧縮の強度評価を行う。

(1) 圧縮応力

$$A_s = \text{[redacted]} \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$P = \text{[redacted]} \text{ (N)}$$

$$\sigma_c = \frac{P}{A_s} = \frac{\text{[redacted]}}{\text{[redacted]}} = 2 \text{ (MPa)}$$

9.2. スペーサの支持部材の強度評価

前項の作用荷重：Pによりスペーサ下部支持部材は曲げとせん断荷重を受ける。以下に、その曲げとせん断の強度評価を行う。

(1) 曲げ応力

$$\text{曲げモーメント } M = P \times L_1$$

$$= \text{[redacted]}$$

$$= \text{[redacted]} \text{ (Nmm)}$$

$$\text{断面係数 } Z = \text{[redacted]} \text{ (mm}^3\text{)}$$

$$\sigma_{cb} = \frac{M}{Z} = \frac{\text{[redacted]}}{\text{[redacted]}} = 21 \text{ (MPa)}$$

(2) せん断応力

$$\text{断面積 } A = \text{[redacted]} \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$\tau_s = \frac{P}{A} = \frac{\text{[redacted]}}{\text{[redacted]}} = 4 \text{ (MPa)}$$

(3) 組合せ応力

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= \sqrt{\sigma_b^2 + 3 \times \tau^2} \\ &= \sqrt{21^2 + 3 \times 4^2} = 23 \text{ (MPa)} \end{aligned}$$

10. スペーサおよびスペーサ下部支持部材の強度評価まとめ

10.1. スペーサの強度評価まとめ

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	$\sigma_c = 2$	$f_c = 200$

すべて許容応力以下である。

10.2. スペーサ下部支持部材の強度評価まとめ

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 下部支持部材	SUS304	曲げ	$\sigma_{cb} = 21$	$f_{cb} = 205$
			せん断	$\tau_s = 4$	$f_{ss} = 118$
			組合せ	$\sigma_0 = 23$	$f_0 = 205$

すべて許容応力以下である。

III. 使用済燃料貯蔵ラック (25 体) の核燃料物質が臨界に達しないことを説明する書類に係る補足説明

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 (25 体) (以下「ラック」という。) 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、ラックは、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。

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。

3. 評価条件

臨界解析モデルを図-1, 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。

3.1 燃料条件

ラックは変形燃料を収納対象としているが、変形燃料が取扱い中に破損する又は、破損していることが明らかになる可能性がある。想定される厳しい状態においても臨界にならないことを確認するため、保守的に燃料棒の形状が維持されていない状態を想定する。評価に用いる燃料条件を表-1 に示す。

- ・ ラックには使用済燃料収納缶 (大) (以下「収納缶」という。) に収納された燃料集合体 25 体を貯蔵する。
- ・ 収納缶に収納された燃料集合体は、燃料棒の形状が維持されていないとして、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、収納缶内に燃料粒子と水が非均質に混ざった状態とする。
 - ・ 水/ウラン比、燃料粒子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、福島第一原子力発電所 (1F) にある燃料で、ペレット最高濃縮度が最も高い 9×9 燃料の 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。

表-1 臨界防止機能評価で用いる燃料条件

項目	評価条件	備考
燃料の状態	燃料被覆管の破損を想定	
燃料の形態	燃料粒子+水	燃料粒子と水による非均質燃料粒子セル体系
ウラン同位体組成	U-235 : 4.9 wt% U-238 : 95.1 wt%	1Fにある燃料でペレット最高濃縮度が最も高い
核分裂生成物	核分裂生成物、及びアクチニドは考慮しない	
燃料粒子	粒子径による影響を考慮	

3.2 ラック条件

ラックの製造公差としては、板厚、貯蔵ピッチ、内のり、スペーサ間距離があり、これらのパラメータについて保守的に設定する。ラックの主要寸法を表-2に示す。

- ラックの貯蔵ピッチ及び内のりは、製造公差を考慮した最小値とする。(燃料間隔が近くなり実効増倍率が大きくなるため、保守的な条件となる。)なお、ラックの板厚は、貯蔵ピッチと内のりによって決まるため、公称値とする。
- 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。(燃料間隔が近くなり実効増倍率が大きくなるため、保守的な条件となる。)(図-1)

表-2 ラックの主要寸法

項目	機器仕様		解析使用値
	公称値	製造公差	
板厚(mm)	■	■	■
貯蔵ピッチ(mm)	■	■	■
内のり(mm)	■	■	■
スペーサ間距離(mm)	■	■	■
ラック間ギャップ(mm)	■	■	■

3.3 収納缶条件

収納缶の製造公差としては、板厚、内寸、中性子吸収材板厚、中性子吸収材板幅等があり、これらのパラメータについて保守的に設定する。収納缶の主要寸法を表-3に示す。

- 収納缶の板厚は、製造公差を考慮した最大値とする。(板厚を厚くすると、板の外側にある中性子吸収材が燃料領域の中心から遠ざかるため実効増倍率は大きくなるので保守的な条件となる。)

- 内寸は、製造公差を考慮した最大値とする。(2次元モデルなので燃料物質が増加し、実効増倍率が大きくなるため保守的な条件となる。)
- 中性子吸収材板厚及び板幅は、製造公差を考慮した最小値とする。(中性子吸収反応を起こすボロン添加量 (^{10}B の量) は少ないほうが保守的な条件となる。)
- 地震などによる収納缶のたわみを考慮し、偏心量に加える。たわみ量は製造公差を考慮した最大値とする。(燃料間隔が近くなるため実効増倍率は大きくなるので保守的な条件となる。)

表-3 収納缶の主要寸法

項目	機器仕様		解析使用値
	公称値	製造公差	
板厚(mm)	6.0		
内寸(mm)	209		
中性子吸収材板厚(mm)	4		
中性子吸収材板幅(mm)	190		
ボロン添加量 (g/cm ²) (^{10}B 面密度) ※			
たわみ量(mm)			

※：ボロンに含まれる ^{10}B の存在比は天然ボロンとする。

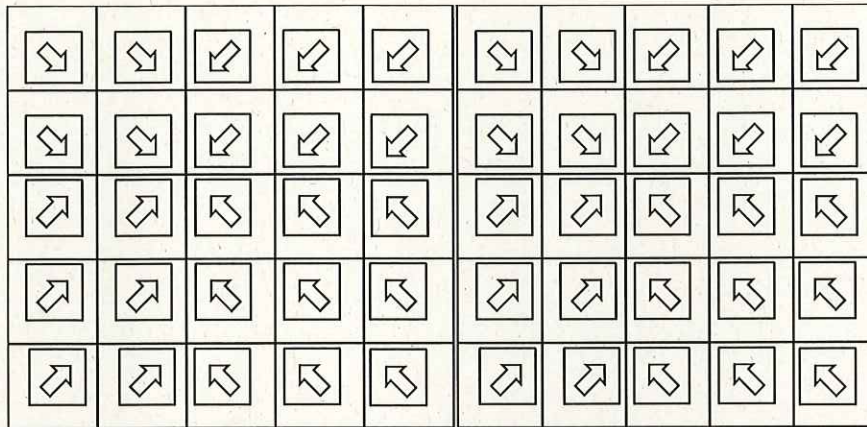
3.4 その他の条件

- プール水温は、実効増倍率が最も高くなる状態で臨界を防止できることを確認するため、水密度が最大の4℃とする。
- 収納缶のラック内偏心配置を考慮し、実効増倍率が高くなるようラック中心部に向けて偏心させる。
- 3号機の燃料はガレキの付着が想定されるが、ガレキの主成分であるコンクリートより水の方が減速効果が大きく、ガレキを考慮すると実効増倍率が小さくなるのでガレキの付着は考慮しない。

3.5 計算モデル

計算モデルは、ラック・収納缶の幾何学形状を模擬した2次元体系とする。概念図を図-1、2に示す。なお、収納缶には中性子吸収材を固定するボルト穴があるが、2次元モデルを作成するにあたっては、溝で再現している。

- チャンネルボックスおよび溝で再現した中性子吸収材固定用ボルト穴は水に置き換える。
- 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。



ラック間ギャップ:

図-1 ラックセル内偏心配置概念



※燃料粒子径と水対燃料体積比
(ピッチ) をパラメータとする。

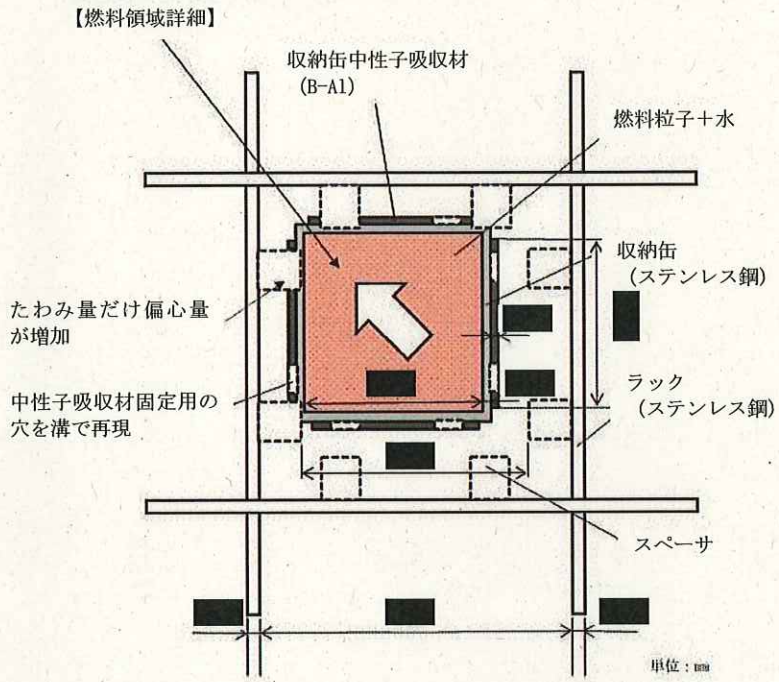


図-2 収納缶のラックセル内偏心配置

4. 評価方法

ラックの実効増倍率は、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。

5. 評価結果

ラックの水対燃料体積比に対する中性子実効増倍率の変化を、燃料粒子径毎に図-3 に示す。ここで、燃料粒子径は mm とした。また、それぞれの燃料粒子径において実効増倍率が最大となる評価結果を表-4 と図-4 に示す。

ラックの実効増倍率は、表-5 に示す通り設計基準を満足している。

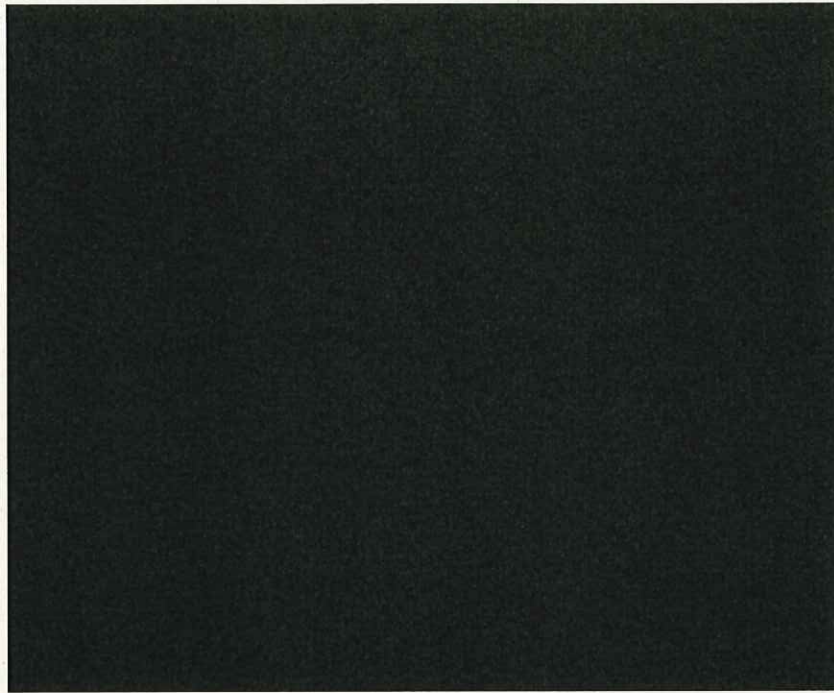


図-3 (1) 水対燃料体積比に対する実効増倍率の変化 (燃料粒子径 \blacksquare mm)

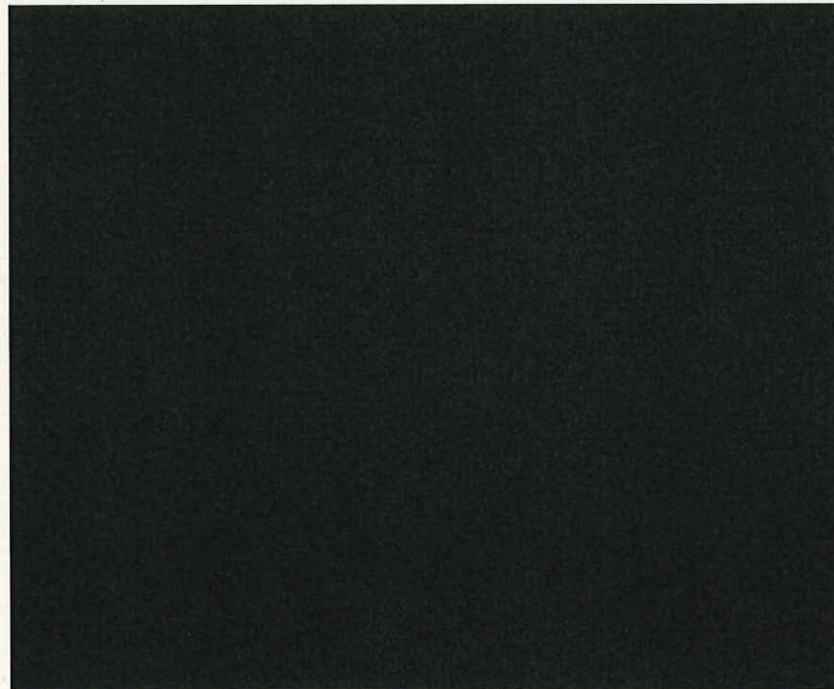


図-3 (2) 水対燃料体積比に対する実効増倍率の変化 (燃料粒子径 \blacksquare mm)

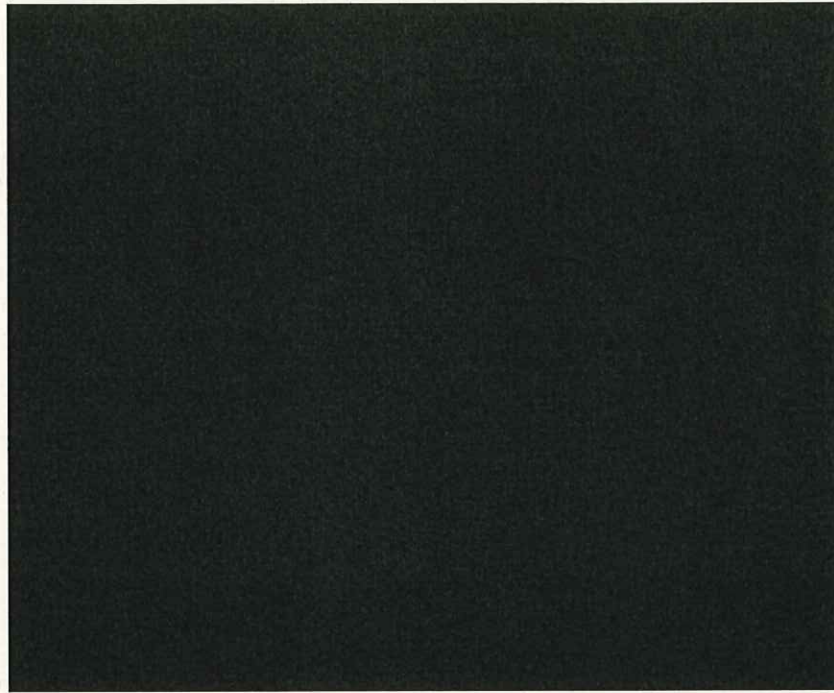


図-3 (3) 水対燃料体積比に対する実効増倍率の変化 (燃料粒子径 \blacksquare mm)

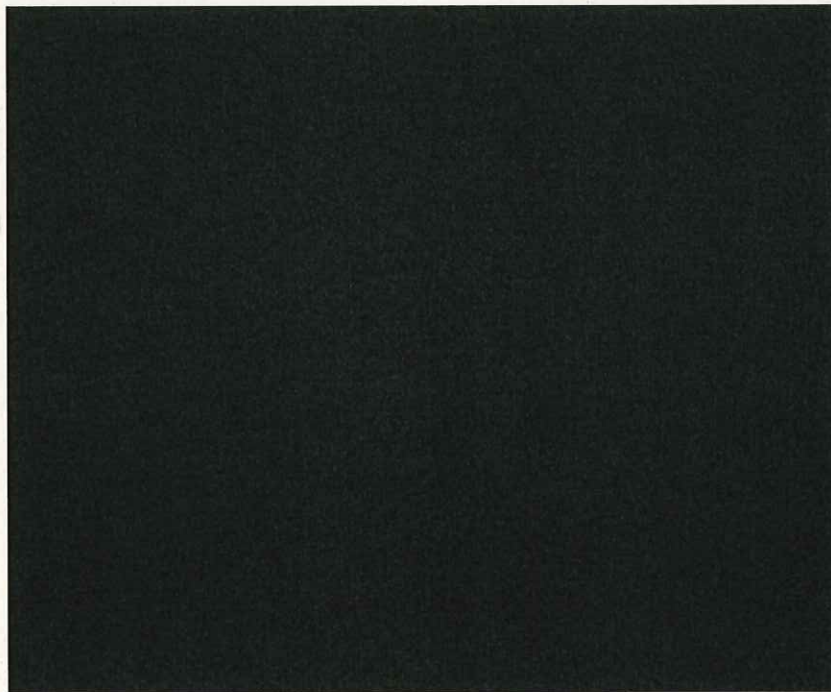


図-3 (4) 水対燃料体積比に対する実効増倍率の変化 (燃料粒子径 \blacksquare mm)

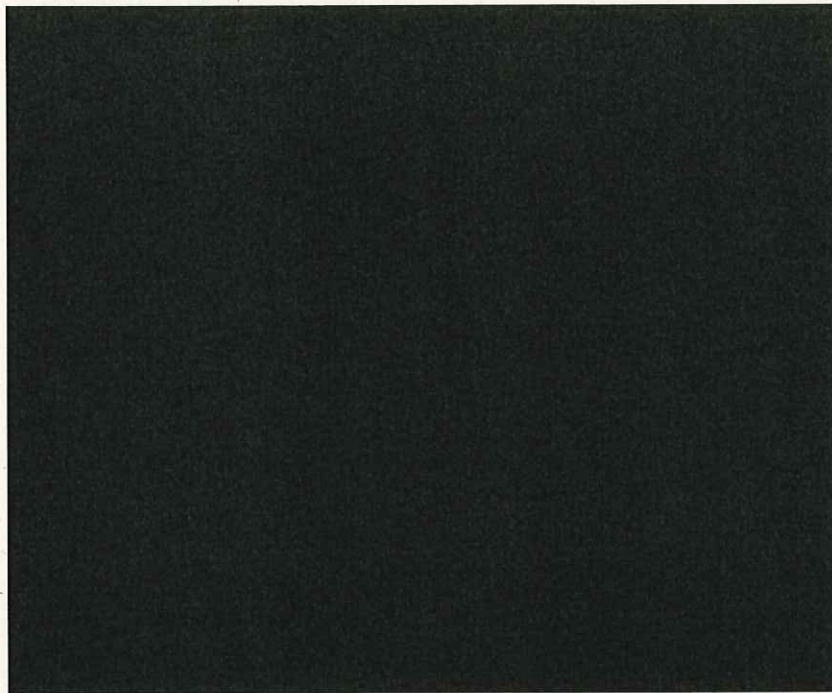


図-3 (5) 水対燃料体積比に対する実効増倍率の変化 (燃料粒子径 \blacksquare mm)

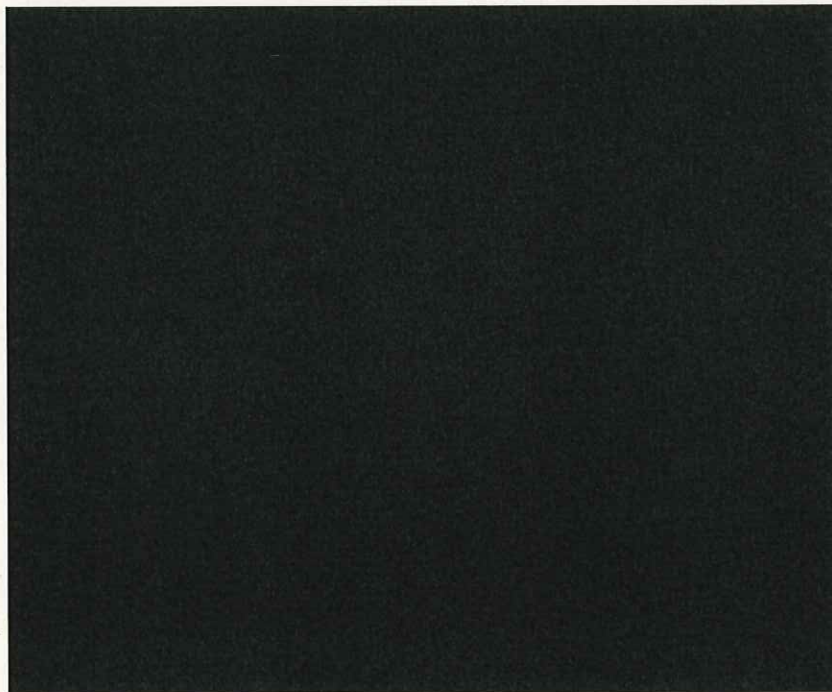


図-4 ラックの実効増倍率の変化

表-4 ラックの実効増倍率

燃料粒子径 (mm)	水対燃料体積比	実効増倍率	
		k_{eff}	$k_{eff} + 3\sigma$ ※1, 2

※1 モンテカルロ計算の統計誤差 (3σ) を考慮した値

※2 本評価は最も厳しい燃料偏心配置によるもの

表-5 評価結果

収納缶内の燃料条件	実効増倍率※1	設計基準
燃料棒の形状が維持されていない燃料	0.91	0.95

※1 モンテカルロ計算の統計誤差 (3σ) を考慮した値

IV. 使用済燃料貯蔵ラック（25体）の耐震性について

1. 一般事項

1.1 構造計画

1.2 評価方針

1.3 準拠基準等

1.4 記号の説明

1.5 計算精度と数値の丸め方

2. 評価部位

3. 地震応答解析及び構造強度評価

3.1 地震応答解析及び構造強度評価方法

3.2 荷重の組合せ及び許容限界

3.3 解析モデル及び諸元

3.4 固有周期

3.5 設計用地震力

3.6 応力の計算方法

3.7 計算条件

3.8 応力の評価

4. 評価結果

1. 一般事項

本計算書は、使用済燃料貯蔵ラック（25 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 構造計画

ラックの構造計画を表 1-1 に示す。

表 1-1 構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造物	主体構造	
<p>ラックは、縦置型で共用プール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、共用プール床に取り付けられている基礎ボルトにより固定している。</p>	<p>ステンレス鋼製角形枠組構造</p>	

1.2 評価方針

ラックの応力評価は、「3.2 荷重の組合せ及び許容限界」にて設定した荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界に基づき、「1.1 構造計画」にて示すラックの部位を踏まえ「2. 評価部位」にて設定する箇所において、「3.3 解析モデル及び諸元」及び「3.4 固有周期」で算出した固有周期に基づく設計用地震力による応力等が許容限界内に収まることを、「3. 地震応答解析及び構造強度評価」にて示す方法にて確認することで実施する。確認結果を「4. 評価結果」に示す。

ラックの耐震評価フローを図1-1に示す。

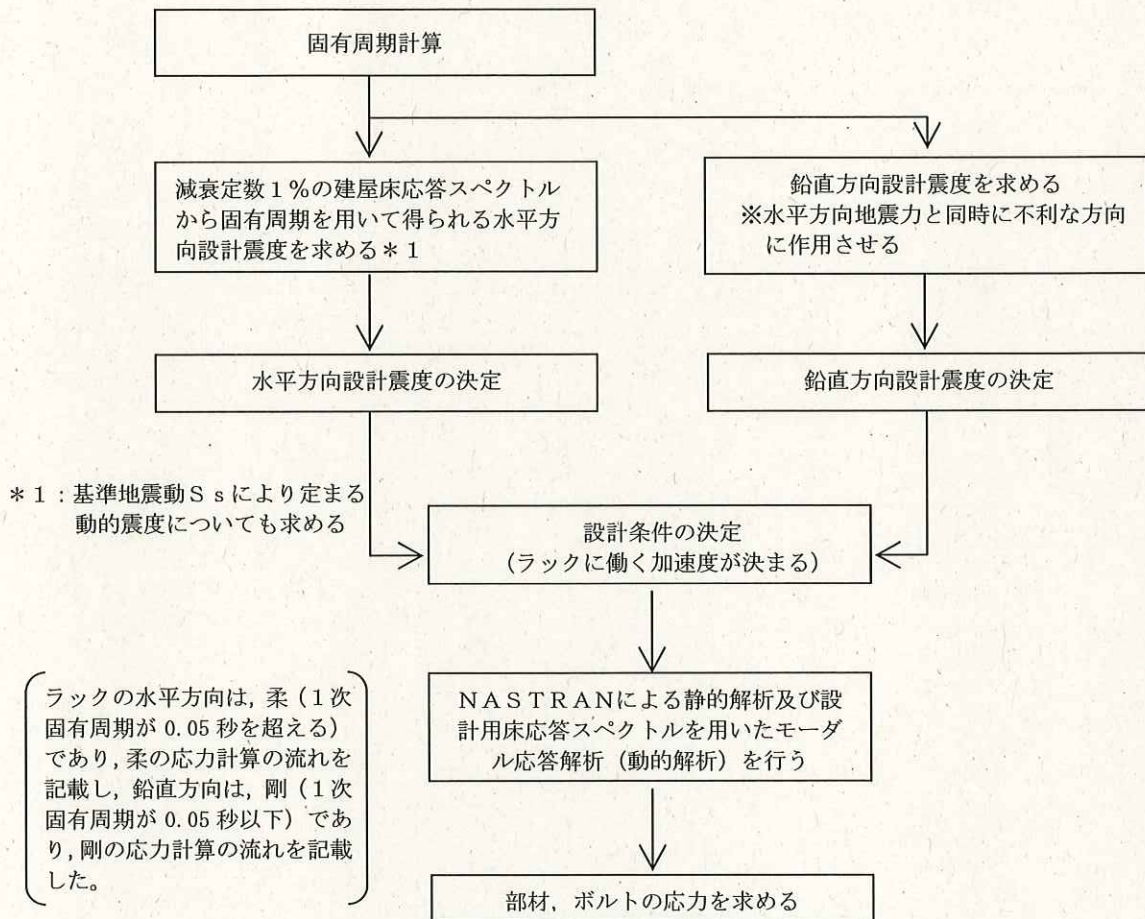


図1-1 ラックの耐震評価フロー

1.3 準拠基準等

本評価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 NC1-2005/2007)
- ・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))
- ・日本産業規格 (JIS)

1.4 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
A _b	ラック取付ボルト又は基礎ボルトの軸断面積	mm ²
A _f	圧縮フランジの断面積	mm ²
A _s	スペーサの面積	mm ²
C _H	水平方向設計震度	—
C _v	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
F _i	ベース又はコモンベース底部に作用するせん断力	N
f _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 _{s b}	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 _{s s}	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 _{t o}	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 _{t s}	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
H'	スペーサの高さ	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
$l_{i g}$	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	使用済燃料収納缶 (大) 貯蔵時のラック全質量	kg

記号	記号の説明	単位
mF	使用済燃料収納缶（大）に収納した燃料	kg
mR	ラックの質量	kg
mW	ラックに含まれる水の質量	kg
mFC	使用済燃料収納缶（大）の質量	kg
mCB	コモンベースの質量	kg
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 1～10 までの数字を示すものとする。

i = X : X 方向

i = Y : Y 方向

- 2) クラス 3 支持構造物及びその他支持構造物に対する f_b , f_s , f_c , f_{cb} 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°C 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

1.5 計算精度と数値の丸め方

表示する数値の丸め方は表1-2に示すとおりとする。

表1-2 表示する数値の丸め方

数値の種類	単位	処理桁	処理方法	表示桁
固有周期	s	小数点以下第4位	四捨五入	小数点以下第3位
設計震度	—	小数点以下第3位	切上げ	小数点以下第2位
力	N	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁目
モーメント	N・mm	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁目
算出応力	MPa	小数点以下第1位	切上げ	整数位
許容応力*1	MPa	小数点以下第1位	切捨て	整数位

注記 *1：設計・建設規格 付録材料図表に記載された温度の間における設計引張強さ及び設計降伏点は、比例法により補間した値の小数点以下第1位を切り捨て、整数位までの値とする

2. 評価部位

ラックの耐震評価は、耐震評価上厳しくなるラック本体、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について実施する。ラックの耐震評価部位については、図3-1、図3-10、図3-11に示す。

3. 地震応答解析及び構造強度評価

3.1 地震応答解析及び構造強度評価方法

- (1) 地震応答解析には、シェル要素を用いた有限要素モデルによるモーダル解析を用いる。
- (2) 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。
- (3) ラックの質量には、使用済燃料収納缶（大）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のほか、使用済燃料収納缶（大）とラックに含まれる水の質量及びラック外形の排除水質量^{*}を考慮する。
- (4) 水平方向地震動と鉛直方向地震動を解析モデルへ別々に入力して地震荷重、応力を求め、それらを適切に組み合わせて評価を行う。
- (5) 構造概要図を図3-1に示す。また、使用済燃料貯蔵ラックに係る要目表を表3-1、表3-2に示す。

注記*：排除水質量とは、水中の機器の容積により排除される機器の周囲の流体の質量である。

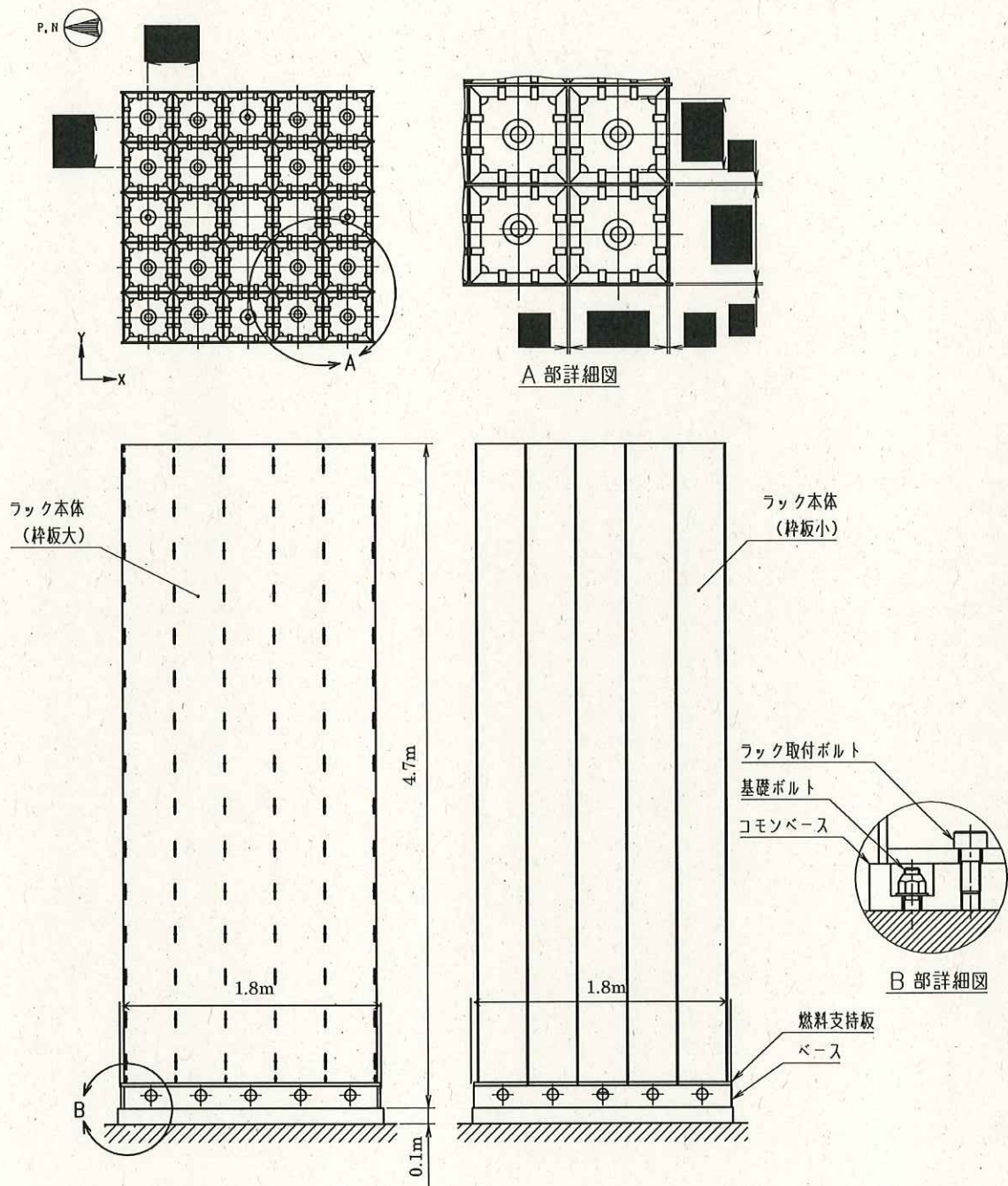


図 3-1 構造概要図 (使用済燃料貯蔵ラック (25 体))

表3-1 使用済燃料貯蔵ラック (25体) に係る要目表

名	称	使用済燃料貯蔵ラック							
種	類	たて置ラック式							
容	量	25							
主 要 寸 法	高	さ	mm	(4680)					
	中	心	間	距	離	mm	()		
	内	の	り	mm	()				
	ス	ペ	ー	サ	間	距	離	mm	()
	厚	さ	mm	()					
材	質	—	SUS304						
個	数	—	1						

注：主要寸法の () 内は公称値を示す。

表3-2 使用済燃料貯蔵ラック (25体) の主要寸法

主要寸法	解析使用値
高さ(mm)	4680
中心間距離(mm)	()
内のり(mm)	()
スペーサ間距離(mm)	()
厚さ(mm)	()

3.2 荷重の組合せ及び許容限界

3.2.1 荷重の組み合わせ許容限界

ラックの荷重の組み合わせ許容限界を表 3-3 に示す。

3.2.2 使用材料の許容応力評価条件

ラックの許容応力評価条件を表 3-4 に示す。

表 3-3 許容限界

耐震クラス	荷重組合せ	供用状態	一次応力					適用範囲
			引張	せん断	圧縮	曲げ	組合せ	
S	$D + P_D + M_D + S_S$	D s	$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$	$1.5f_c^*$	$1.5f_b^*$	$1.5f_t^*$	<ul style="list-style-type: none"> ・ラック本体 ・スペーサ ・スペーサ下部支持部材
			$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$	—	—	$\text{Min}\{1.5f_t^*, (2.1f_c^* - 1.6\tau_b)\}$	

記号の説明

- D : 死荷重
- P_b : 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_b : 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°C 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

表 3-4 使用材料の許容応力評価条件*3

項目 部材	材 料	S _y *1 (MPa)	S _y *2 (MPa)	S _u *1 (MPa)	F * (MPa)
ラック本体 (枠板大)	SUS304	188.66	205	479.89	205
ラック本体 (枠板小)	SUS304	188.66	205	479.89	205
燃料支持板	SUS304	188.66	205	479.89	205

注記 *1：最高使用温度 (66℃) で算出

*2：室温で算出

*3：ラック取付ボルト，基礎ボルト，スパーサ及びスペース下部支持部材については，3.7.2項～3.7.5項に示す

3.3 解析モデル及び諸元

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3-2に示す。また、機器の諸元を表3-5に示す。

ラックは、共用プール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。

使用済燃料収納缶（大）及びこれに収納されている使用済燃料の質量と使用済燃料収納缶（大）に含まれる水の質量はセル内の上下スペーサで支持されるためラックセルの上下端に与える。また、ラックセル内に含まれる水の質量、ラック外形の排除水質量は、ラック全高にわたって等分布に与える。

また、計算に用いる設計条件、固有周期の算出及び部材、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の応力評価に用いる要目を「3. 地震応答解析及び構造強度評価」に示す。

解析コードは、「NASTRAN」を使用する。

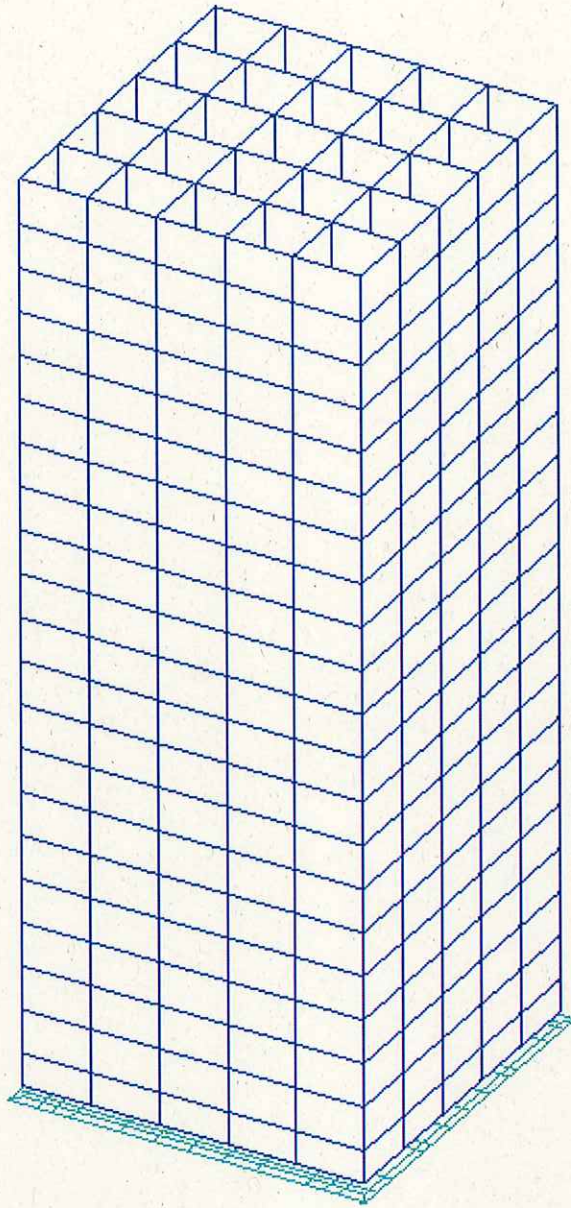


図3-2 使用済燃料貯蔵ラック (25体) 計算モデル

表 3-5 機器諸元

項目	記号	単位	入力値
材質	—	—	SUS304 (ラック本体, スペーサ 及びスペーサ下部支持部材), SUS630H1150(ラック取付ボルト 及び基礎ボルト)
質量	m	kg	■
温度条件 (最高使用温度)	T	°C	66
縦弾性係数	E*1	MPa	192000 (ラック本体, スペーサ 及びスペーサ下部支持部材)
ポアソン比	ν	—	0.3

注記 *1: 最高使用温度 (66°C) で算出

3.4 固有周期

固有周期は、計算機コード「NASTRAN」を用いて求める。

固有値解析の結果を表3-6に、振動モード図を図3-3～図3-5に示す。鉛直方向は、4次モード以降で卓越し、固有周期は0.05秒以下であり、剛であることを確認した。

表3-6 固有値解析結果

ラック種類	次数	固有周期 (s)	刺激係数		
			X方向	Y方向	Z方向
使用済燃料貯蔵 ラック (25 体)	1	██████	██████	██████	██████
	2	██████	██████	██████	██████
	3	██████	██████	██████	██████

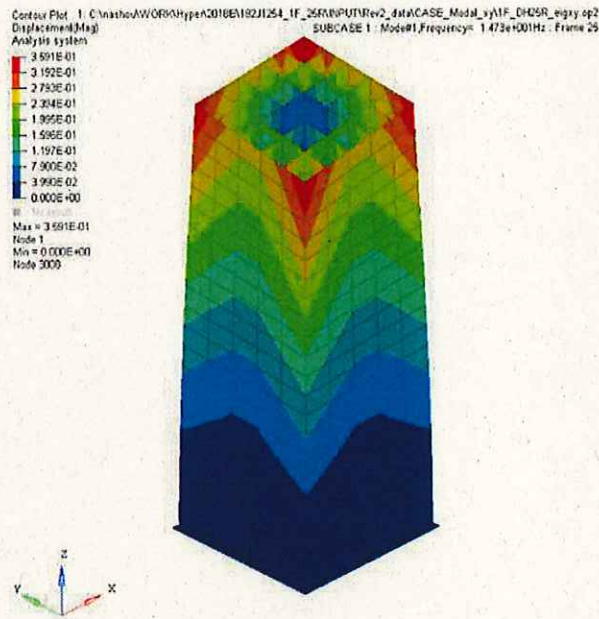


図3-3 振動モード (1次モード)

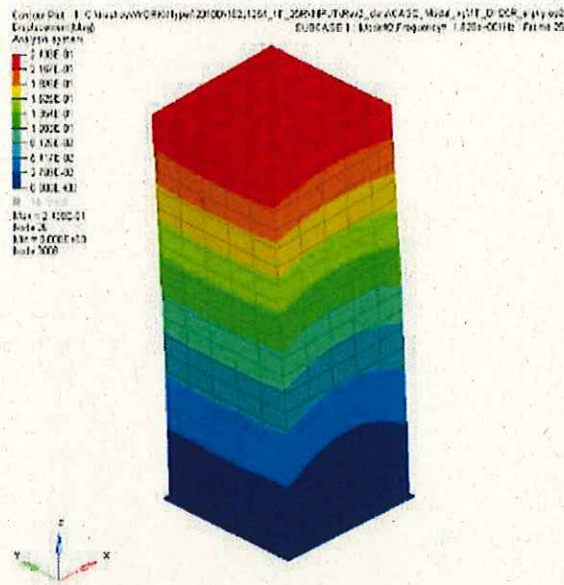


図 3-4 振動モード (2次モード)

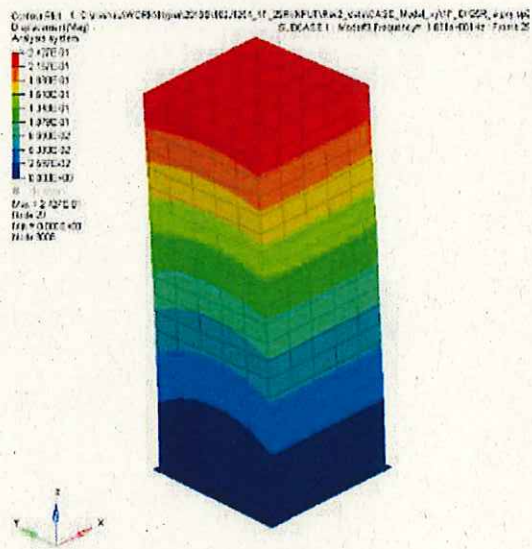


図 3-5 振動モード (3次モード)

3.5 設計用地震力

評価に用いる設計用地震力を表 3-7 に示す。

表 3-7 設計用地震力

据付場所及び 床面高さ (m)	次数	固有周期 (s)	基準地震動 S_s *7		減衰定数 (%)	
			水平方向*5 設計震度	鉛直方向*6 設計震度	水平方向	鉛直方向
運用補助共用施設 G. L. -1.3*1	1次	■	*2	C _v =0.49	1.0	-
	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=0.89)

*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=0.70)

*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=0.70)

*5: 基準地震動 S_s により得られる 1.2ZPA (C_H=0.67) についても考慮する。

*6: 基準地震動 S_s により得られる 1.2ZPA (C_V=0.49)

*7: S_s -1~3 の 3 波を包絡する地震動

3.6 応力の計算方法

3.6.1 部材の応力

部材についての応力計算は、図3-2の計算モデルにて計算機コードを使用して行い、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3-6に示すように設定している。

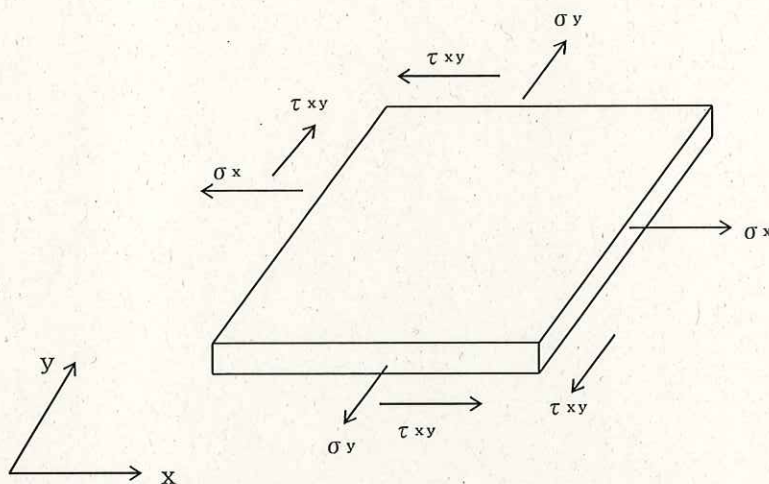


図3-6 部材の応力

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。

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

3.6.2 ラック取付ボルトの応力

X方向地震時を例にとり、以下に計算方法を説明する。なお、Y方向も同様の計算方法により応力を求める。

図3-2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3-7のように負荷されるものとしてラック取付ボルトの応力を求める。

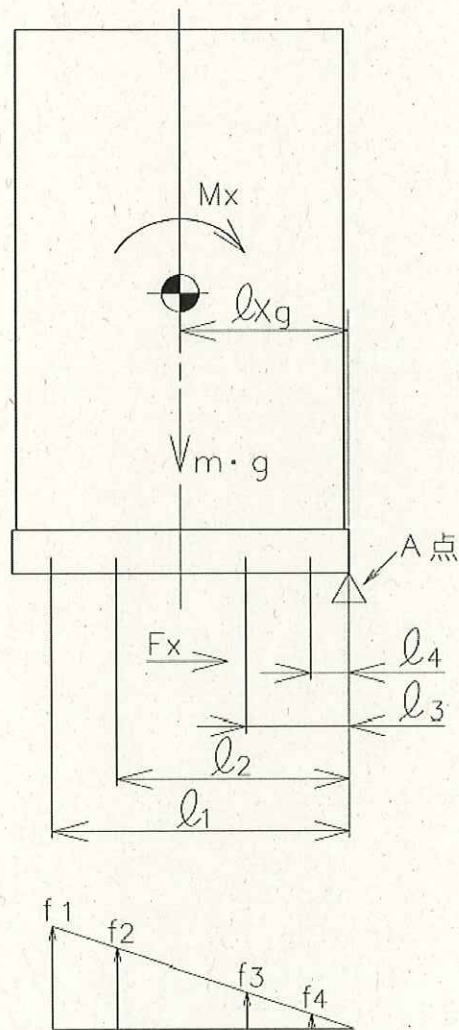


図3-7 ラック取付ボルトの応力

(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1本当りの引張力 f_j を求める。

$f_1 > f_2 > f_3 > f_4$ の関係にあるので f_1 のみを求める。

$$f_1 = \frac{l_1(M_X - (1 - C_V) \cdot m \cdot g \cdot l_{Xg})}{n_1 \cdot l_1^2 + n_2 \cdot l_2^2 + n_3 \cdot l_3^2 + n_4 \cdot l_4^2}$$

引張力 f_1 によりラック取付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

ラック取付ボルトに対するせん断力はラック取付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。

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

3.6.3 基礎ボルトの応力

X方向地震時を例にとり、以下に計算方法を説明する。なお、Y方向も同様の計算方法により応力を求める。

図3-2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 及びコモンベース底部に作用するせん断力 F_x が、ラックに図3-8のように負荷されるものとして基礎ボルトの応力を求める。

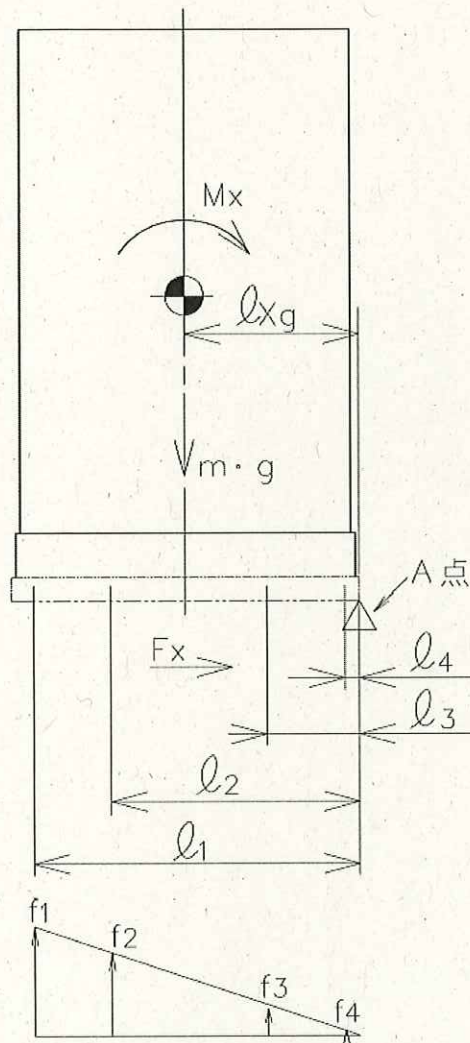


図3-8 基礎ボルトの応力

(1) 引張応力

A点まわりのモーメントの平衡により基礎ボルト1本当りの引張力 f_1 を求める。

$f_1 > f_2 > f_3 > f_4$ の関係にあるので f_1 のみを求める。

$$f_1 = \frac{l_1(M_x - (1 - C_V) \cdot m \cdot g \cdot l_{xg})}{n_1 \cdot l_1^2 + n_2 \cdot l_2^2 + n_3 \cdot l_3^2 + n_4 \cdot l_4^2}$$

引張力 f_1 により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

基礎ボルトに対するせん断力は基礎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。

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

3.6.4 スペーサおよびスペーサ下部支持部材の応力

使用済燃料貯蔵ラック（25 体）セル内の上下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3-9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とa'の部位を比較すると、図3-9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'に比べ、強度上不利である。

したがって、代表してa部を評価し、強度を満足することを確認する。

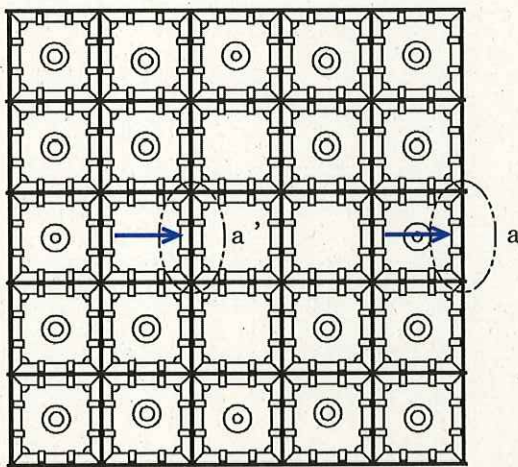


図3-9 使用済燃料貯蔵ラック（25 体）上面図

(1) 作用荷重

図3-10, 図3-11に示すとおり使用済燃料収納缶(大)に働く地震力が、セルの1面の上下部スペーサ部に作用するものとする。

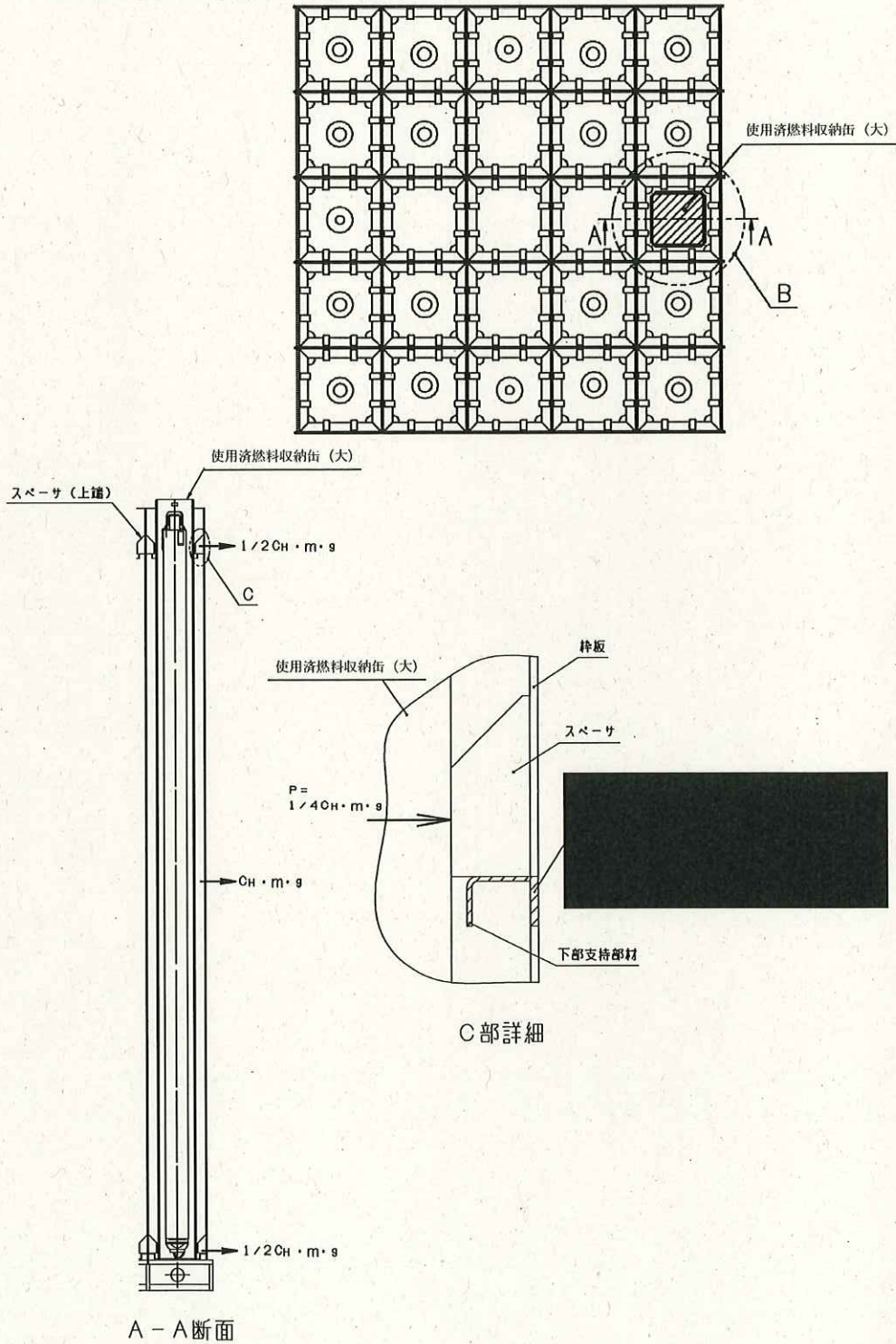
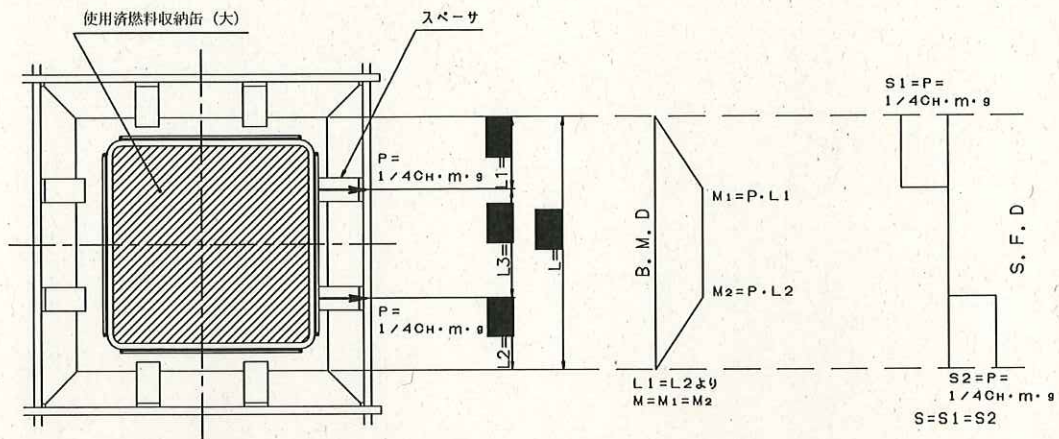


図3-10 スペーサおよびスペーサ下部支持部材の作用荷重 (1/2)



B部詳細

図3-11 スペーサおよびスペーサ下部支持部材の作用荷重 (2/2)

作用荷重：

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{1}{4} \cdot C_H \cdot m \cdot g \\
 &= 1/4 \times 0.89 \times \blacksquare \times 9.80665 \\
 &= \blacksquare \text{ (N)}
 \end{aligned}$$

適用震度： $C_H = 0.89$ (-)

質量： $m_s = \blacksquare$ (kg)

m_s ：燃料 (1F にある燃料で最大の質量)，使用済燃料収納缶 (大) 及び使用済燃料収納缶 (大) 内包水の合計質量

重力加速度： $g = 9.80665$ (m/s²)

長さ： $L = \blacksquare$ (mm)

長さ： $L_1 = \blacksquare$ (mm)

長さ： $L_2 = \blacksquare$ (mm)

(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

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

3.7 計算条件
3.7.1 設計条件

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^{*7}		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 ^{*6} 設計震度		
使用済燃料貯蔵ラック (25体)	S	運用補助共用施設 G. L. -1.3 ^{*1}	1次	*2	*3	66	-
			2次				
			3次				

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: $C_H=0.89$)

*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: $C_H=0.70$)

*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: $C_H=0.70$)

*5: 基準地震動 S_s により得られる 1.2ZPA ($C_H=0.67$) についても考慮する。

*6: 基準地震動 S_s により得られる 1.2ZPA ($C_v=0.49$)

*7: $S_s-1\sim 3$ の3波を包絡する地震動。

3.7.2 ラック取付ボルトの応力評価に用いる要目

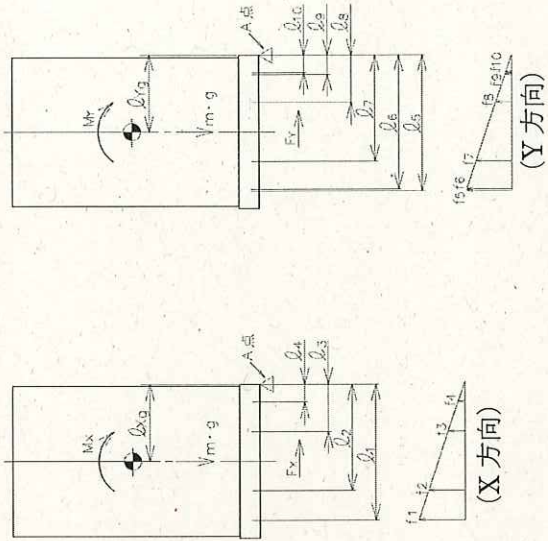
機器名称	m (kg)	m ^F (kg)	m ^R (kg)	m ^W (kg)	m ^{FC} (kg)
使用済燃料貯蔵 ラック (25 体)	■	■	■	■	■

φ ₁ (mm)	φ ₂ (mm)	φ ₃ (mm)	φ ₄ (mm)	φ ₅ (mm)	φ ₆ (mm)	φ ₇ (mm)	φ ₈ (mm)	φ ₉ (mm)	φ ₁₀ (mm)	φ _{X5} (mm)	φ _{Y5} (mm)
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

A ^b (mm ²)	n	n ¹	n ²	n ³	n ⁴	n ⁵	n ⁶	n ⁸	n ⁷	n ⁹	n ¹⁰
■	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

ラック取付 ボルト材料	F _x (N)	F _y (N)	M _x (N・mm)	M _y (N・mm)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	F [*] (MPa)
SUS630H1150	1.368 × 10 ⁵	1.380 × 10 ⁵	5.291 × 10 ⁸	5.333 × 10 ⁸	■	■	■

注記 *1 : 最高使用温度 (66°C) で算出



3.7.3 基礎ボルトの応力評価に用いる要目

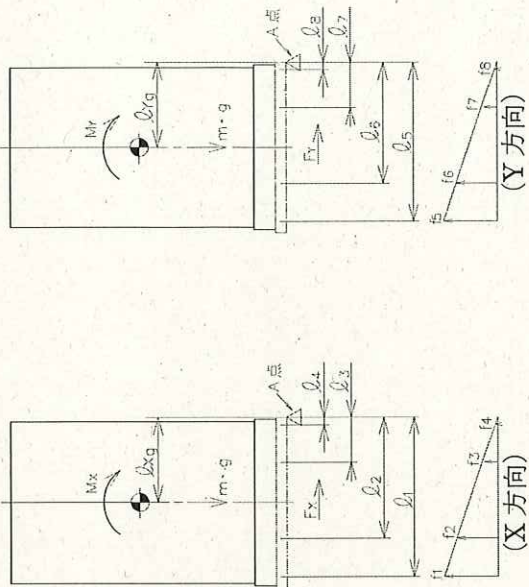
機器名称	m (kg)	m ^F (kg)	m ^R (kg)	m ^W (kg)	m ^{FC} (kg)	m ^{CB} (kg)
コモンベース	■	■	■	■	■	■

φ ₁ (mm)	φ ₂ (mm)	φ ₃ (mm)	φ ₄ (mm)	φ ₅ (mm)	φ ₆ (mm)	φ ₇ (mm)	φ ₈ (mm)	φ _{X5} (mm)	φ _{Y5} (mm)
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

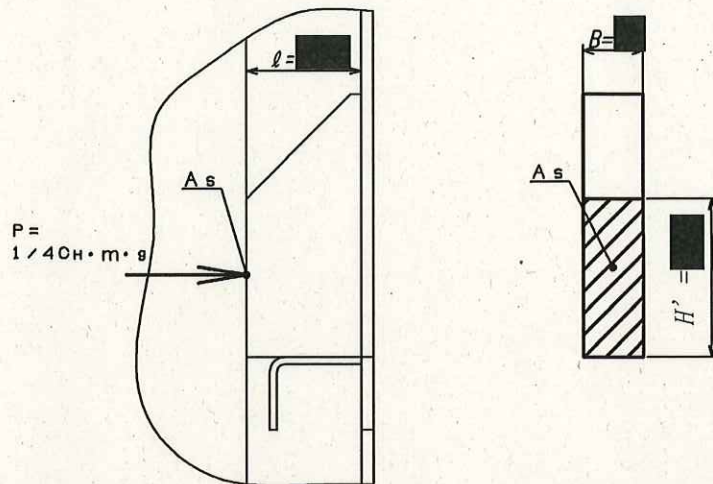
A ^b (mm ²)	n (-)	n ¹ (-)	n ² (-)	n ³ (-)	n ⁴ (-)	n ⁵ (-)	n ⁶ (-)	n ⁷ (-)	n ⁸ (-)
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

基礎ボルト 材料	F _x (N)	F _y (N)	M _x (N・mm)	M _y (N・mm)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	F [*] (MPa)
SUS630HI150	1.368 × 10 ⁵	1.380 × 10 ⁵	5.291 × 10 ⁸	5.333 × 10 ⁸	■	■	■

注記 *1: 最高使用温度 (66°C) で算出

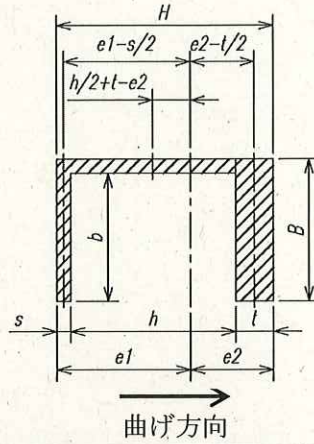


3.7.4 スペーサの断面特性



断面形状	項目	記号	値	単位	数式
長方形断面	幅	B	■	mm	
	高さ	H'	■	mm	
	断面積	As	■	mm ²	= H' × B
	断面二次モーメント(弱軸)	I	■	mm ⁴	= $\frac{H' \times B^3}{12}$
	断面二次半径	i	■	mm	= $\sqrt{I/As}$
	長さ	ℓ	■	mm	
	座屈長さ	ℓk	■	mm	= 2.1ℓ
	有効細長比	λ	13.828	-	= $\frac{\ell k}{i}$

3.7.5 スペーサ下部支持部材の断面特性



断面形状	項目	記号	値	単位	数式
コの字断面 (非対称断面)	幅	B	■	mm	
		b	■	mm	
	高さ (はりのせい)	H	■	mm	
	高さ	h	■	mm	
	厚さ	s	■	mm	
		t	■	mm	
	重心の距離	e1	■	mm	$= \frac{b \cdot s^2 + (B-b) \cdot H^2 + b \cdot t \cdot (2H-t)}{2(b \cdot s + (B-b) \cdot H + b \cdot t)}$
		e2	■	mm	$= H - e1$
	断面二次 モーメント	I	■	mm ⁴	$= \frac{B \cdot t^3}{12} + B \cdot t \cdot (e2 - t/2)^2$ $+ \frac{B \cdot s^3}{12} + B \cdot s \cdot (e1 - s/2)^2$ $+ \frac{(B-b)h^3}{12} + (B-b) \cdot h \cdot (h/2 + t - e2)^2$
	断面係数	Z1	■	mm ³	$= I/e1$
		Z2	■	mm ³	$= I/e2$
	断面積	A	■	mm ²	$= B \cdot H - b \cdot h$
	断面二次半径	i	■	mm	$= \sqrt{I/A}$
	支点間距離	L	■	mm	
	圧縮フランジの 断面積	Af	■	mm ²	$= B \cdot s$
板幅比	B/s	■	-		
$24 / \sqrt{F^*/100} = 16.76 \geq B/s$ なので板幅比を満足する。					

3.8 応力の評価

3.8.1 部材の応力評価

3.6.1 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, 3.6.1 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	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

3.8.2 ラック取付ボルト及び基礎ボルトの応力評価

3.6.2 項で求めたラック取付ボルト及び3.6.3 項で求めた基礎ボルトの引張応力 σ_b が, 次式より求めた引張力とせん断力を同時に受けるボルトの許容引張応力 f_{ts} 以下であること。

また, 3.6.2 項で求めたラック取付ボルト及び3.6.3 項で求めた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}	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

3.8.3 スペーサ及びスペーサ下部支持部材の応力評価

SUS304 (オーステナイト系ステンレス鋼)

基準強度 : $F^* = 205$ (MPa)

縦弾性係数 : $E = 1.92 \times 10^5$ (MPa)

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	$1.5 \times \frac{F^*}{1.5}$

3.8.4 許容応力

3.8.4.1 ラック部材 (SUS304→オーステナイト系ステンレス鋼)

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



S _y : 付録材料図表Part5表8	-30°C~40°C	75°C
	205 (MPa)	183 (MPa)
S _u : 付録材料図表Part5表9	-30°C~40°C	75°C
	520 (MPa)	466 (MPa)

温度66°Cで線形補間すると

$$S_y(66^\circ\text{C}) = 205 - \frac{(205-183)}{75-40} \times (66-40) = 188.66 \text{ (MPa)}$$

$$S_u(66^\circ\text{C}) = 520 - \frac{(520-466)}{75-40} \times (66-40) = 479.89 \text{ (MPa)}$$

したがって、 $F^* = S_y(RT) = 205 \text{ (MPa)}$

(許容引張応力)

$$f_t = \frac{F^*}{1.5} = 205 \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て})$$

(許容せん断応力)

$$f_s = \frac{F^*}{1.5\sqrt{3}} = 118 \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て})$$

(許容組合せ応力)

$$f_t \geq \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x\sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$$

ここで、 σ_x 、 σ_y : 互いに直交する垂直応力

τ_{xy} : σ_x 、 σ_y の作用する面内のせん断応力

3.8.4.2 ボルト類 (SUS630H1150→オーステナイト系ステンレス鋼ではない)

$$F^* = \text{Min}[1.2S_y, 0.7S_u]$$

S _y : 付録材料図表Part5表8	-30°C~40°C	75°C
	■ (MPa)	■ (MPa)
S _u : 付録材料図表Part5表9	-30°C~40°C	75°C
	■ (MPa)	■ (MPa)

温度66°Cで線形補間すると

$$S_y(66^\circ\text{C}) = \frac{\text{■} - \text{■}}{75-40} \times (66-40) = \text{■} \text{ (MPa)}$$

$$S_u(66^\circ\text{C}) = \frac{\text{■} - \text{■}}{75-40} \times (66-40) = \text{■} \text{ (MPa)}$$

したがって、 $F^* = \text{■}$ (MPa)

(許容引張応力)

$$f_{to} = \frac{F^*}{2} \cdot 1.5 = \text{■} \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て})$$

(許容せん断応力)

$$f_{sb} = \frac{F^*}{1.5\sqrt{3}} \cdot 1.5 = \text{■} \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て})$$

(許容組合せ応力)

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

かつ

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

3.8.4.3 スペーサ

設計・建設規格(JSME S NC1-2005/2007) SSB-3121.3, SSB-3121.1に従い、許容応力を算出する。

(1) 許容圧縮応力

SSB-3121.1(3)より

有効細長比 $\lambda = 13.828$

$$\text{限界細長比 } \Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6 F^*}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \times 1.92 \times 10^5}{0.6 \times 205}} = 124.12$$

$$\nu = 1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 = 1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{13.828}{124.12} \right)^2 = 1.508$$

$\lambda < \Lambda$ より

$$\begin{aligned} f_c &= \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F^*}{\nu} \times 1.5 \\ &= \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{13.828}{124.12} \right)^2 \right\} \frac{205}{1.508} \times 1.5 \\ &= 202 \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て}) \end{aligned}$$

3.8.4.4 スペーサ下部支持部材

設計・建設規格(JSME S NC1-2005/2007) SSB-3121.3, SSB-3121.1に従い、許容応力を算出する。

(1) 許容曲げ応力

設計・建設規格 SSB-3121.1(4) cより荷重面内に対称軸を有しないため

$$\begin{aligned} f_b &= \min \left\{ 1.5 \times \frac{0.433 \cdot E \cdot Af}{L \cdot H}, 1.5 \times \frac{F^*}{1.5} \right\} \\ &= \min \left\{ 1.5 \times \frac{0.433 \times 1.92 \times 10^5 \times \blacksquare}{\blacksquare}, 1.5 \times \frac{205}{1.5} \right\} \\ &= \min \{ 910, 205 \} = 205 \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て}) \end{aligned}$$

(2) 許容せん断応力

$$\begin{aligned} f_{ss} &= 1.5 \times \frac{F^*}{1.5\sqrt{3}} \\ &= 1.5 \times \frac{205}{1.5\sqrt{3}} = 118 \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て}) \end{aligned}$$

(3) 許容組合せ応力

$$\begin{aligned} f_0 &= 1.5 \times \frac{F}{1.5} \\ &= 1.5 \times \frac{205}{1.5} = 205 \text{ (MPa)} \quad (\text{整数位, 小数点以下第一位切り捨て}) \end{aligned}$$

4. 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 (25 体)	ラック本体 (枠板大)	SUS304	引張り	$\sigma_x = 14$	$f_t = 205$
			引張り	$\sigma_y = 2$	$f_t = 205$
			せん断	$\tau_{xy} = 2$	$f_s = 118$
			組合せ	$\sigma_{fa} = 13$	$f_t = 205$
	ラック本体 (枠板小)	SUS304	引張り	$\sigma_x = 14$	$f_t = 205$
			引張り	$\sigma_y = 2$	$f_t = 205$
			せん断	$\tau_{xy} = 3$	$f_s = 118$
			組合せ	$\sigma_{fa} = 14$	$f_t = 205$

すべて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	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 (25 体)	SUS630	引張り	$\sigma_b = 21$	$f_{ts} = 455$
	H1150	せん断	$\tau_b = 6$	$f_{sb} = 350$

すべて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	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 (25 体)	SUS630	引張り	$\sigma_b = 36$	$f_{ts} = 455$
	H1150	せん断	$\tau_b = 12$	$f_{sb} = 350$

すべて許容応力以下である。

(4) スペーサに生じる応力

(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 (25 体)	スペーサ	SUS304	圧縮	$\sigma_c = 1$	$f_c = 202$

すべて許容応力以下である。

(5) 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 (25 体)	スペーサ 下部支持部材	SUS304	曲げ	$\sigma_{cb} = 28$	$f_{cb} = 205$
			せん断	$\tau_s = 4$	$f_{ss} = 118$
			組合せ	$\sigma_0 = 29$	$f_0 = 205$

すべて許容応力以下である。