

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去でき、かつ共用プール水の不純物を除去できる能力を持つ設計とする。

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

(3) 非常用補給能力

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

(4) 貯蔵容量

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

(5) 遮へい

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

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

(6) 漏えい防止及び漏えい検知

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

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

(7) 構造強度

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

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

(8) 落下防止

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

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

(9) 除染

構内用輸送容器等の除染ができるようにする。

(10) 被ばく低減

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

(11) 燃料取扱場所のモニタリング

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

(12) 格納及び空気浄化

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

(13) 試験可能性

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

(14) 火災防護

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

2.12.1.4 供用期間中に確認する項目

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

2.12.1.5 主要な機器

運用補助共用施設平面図を図 2. 1 2 - 1 ～ 5 に、共用プール概要図を図 2. 1 2 - 6, 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℃を超えない、また 2 系列で共用プール水温が現場作業環境を考慮した温度 52℃を超えない設計としている。

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

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

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

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

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

(3) 共用プール補機冷却系

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

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

(4) 共用プール補給水系

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

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

なお、消防車については、ろ過水タンク等（ろ過水タンク：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、屋内に設置しているため、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. 1 2 - 1 共用プール冷却浄化系 主要配管仕様

名 称	仕 様	
スキマ・サージ・タンクから共用プール冷却浄化系ポンプまで	外径／厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (kg/cm ²) 最高使用温度 (℃)	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 (℃)	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 (℃)	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 (℃)	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 (℃)	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℃
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	・ 3F 1 チャンネル ・ 2F 1 チャンネル ・ 1F 3 チャンネル ・ B1F 1 チャンネル (合計 6 チャンネル)
	1～10 ⁴ mSv/h	・ 3F 1 チャンネル (合計 1 チャンネル)

(エリア放射線モニタについては、以下の工事計画届出書により確認している。

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

(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	・ 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	60m ³ /h 以上
高圧放水圧力	1.0MPa 以上
放水性能	36m ³ /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 8,000m ³ /基

b. 純水タンク

基 数	2
容 量	約 2,000m ³ /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 100m ³ /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 10m³/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 50m³/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 35m³/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 4m³/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 10m³/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. 1 2 - 3 共用プール建屋廃液移送系 主要配管仕様

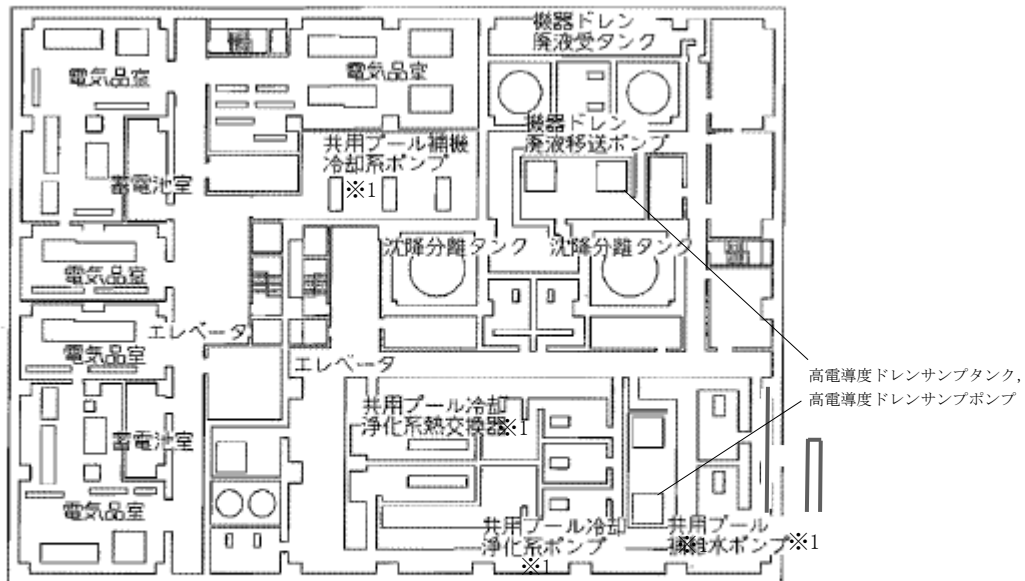
名 称	仕 様	
運用補助共用施設デカント ポンプから運用補助共用施 設機器ドレン廃液受タンク 集合管まで（＊）	外径／厚さ（mm） 材質 最高使用圧力（kg/cm ² ） 最高使用温度（℃）	34.0／3.4 60.5／3.9 60.5／5.5 SUS304TP／STPT38 10.0 66
運用補助共用施設機器ドレ ン廃液受タンク集合管（＊）	外径／厚さ（mm） 材質 最高使用圧力（kg/cm ² ） 最高使用温度（℃）	114.3／6.0 STPT38／SUS304TP 10.0 66
運用補助共用施設建屋デカ ントポンプ出口配管分岐点 から運用補助共用施設高電 導度ドレンサンプポンプ （B）、（D）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（℃）	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（℃）	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（℃）	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（℃）	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―1 0 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―1 1 共用プール建屋廃液移送系について

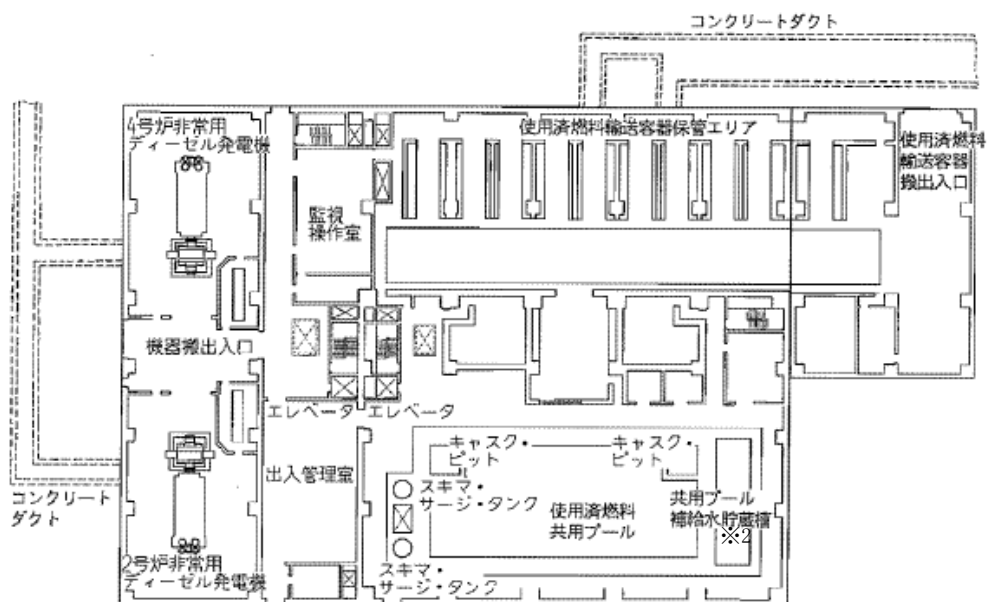


2.12 では、G.L. ±0m= T.P. 8.5m(※)とする。
 (※) 震災後の地盤沈下量(-709mm)と O.P.
 から T.P. への換算値(-727mm)を用いて、下
 式に基づき換算している。
 <換算式> T.P.=旧 O.P. -1,436mm

※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

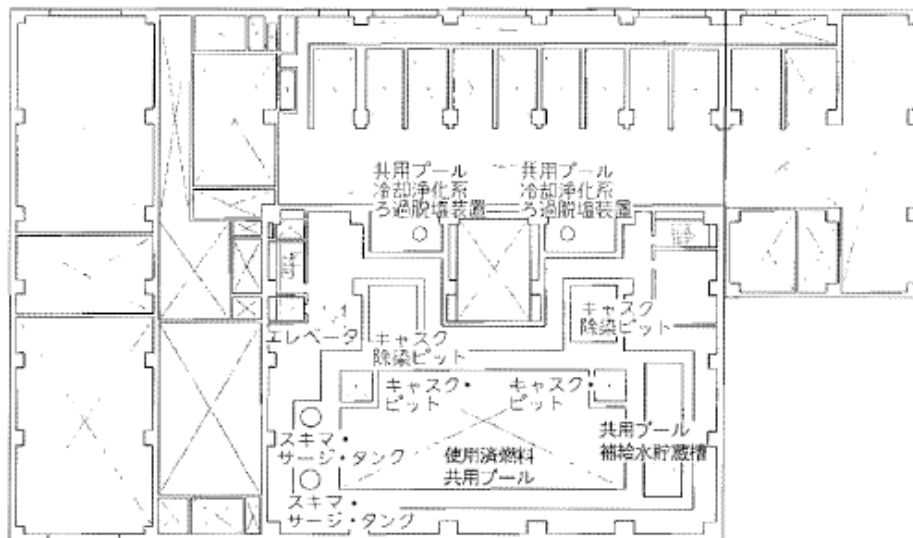
図 2. 1 2 - 1 運用補助共用施設平面図 (その 1)



G.L. +0.2m

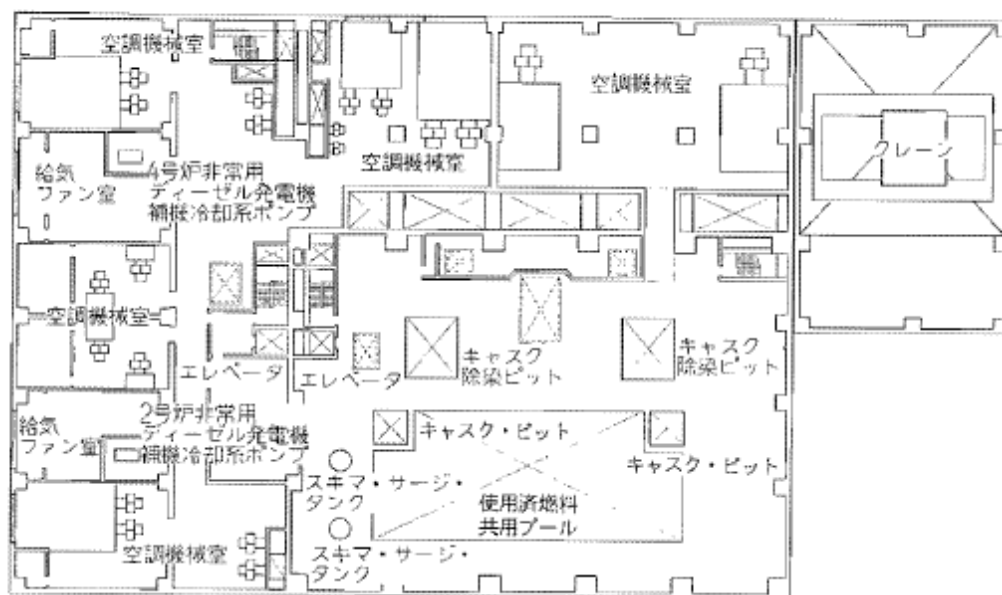
※2: 共用プール補給水貯蔵槽は、共用プール同様、
 鉄筋コンクリート造の設備。

図 2. 1 2 - 2 運用補助共用施設平面図 (その 2)



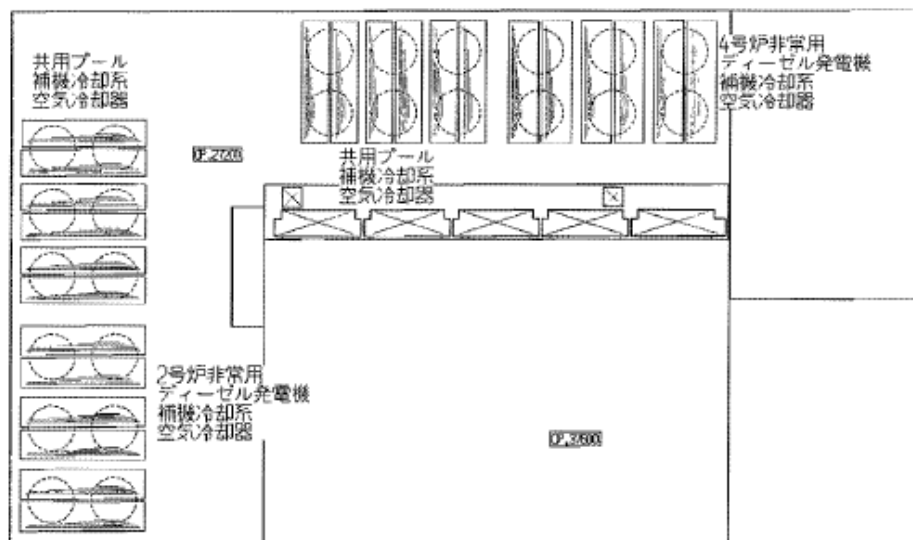
G. L. +5.7m

図2. 12-3 運用補助共用施設平面図 (その3)



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

図2. 12-4 運用補助共用施設平面図 (その4)



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

図 2. 1 2 - 5 運用補助共用施設平面図 (その 5)

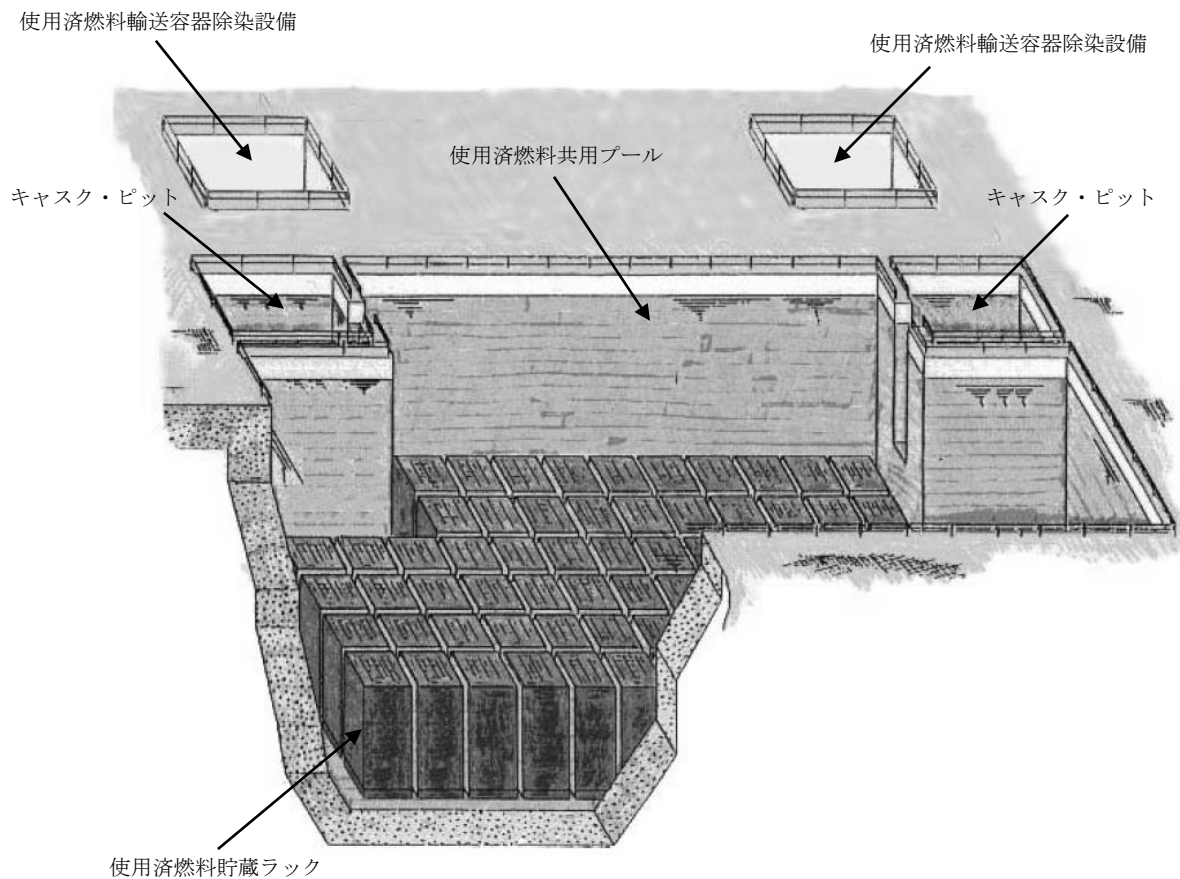


図 2. 1 2 - 6 共用プール概要図

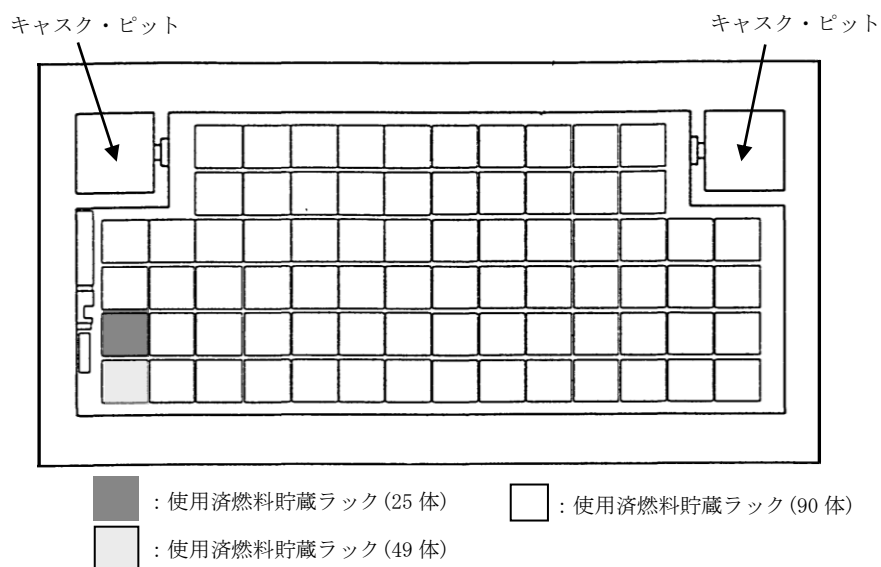


図 2. 1 2 - 7 共用プール概要図 (平面)

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パーサで確保する。
- 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℃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°C 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。

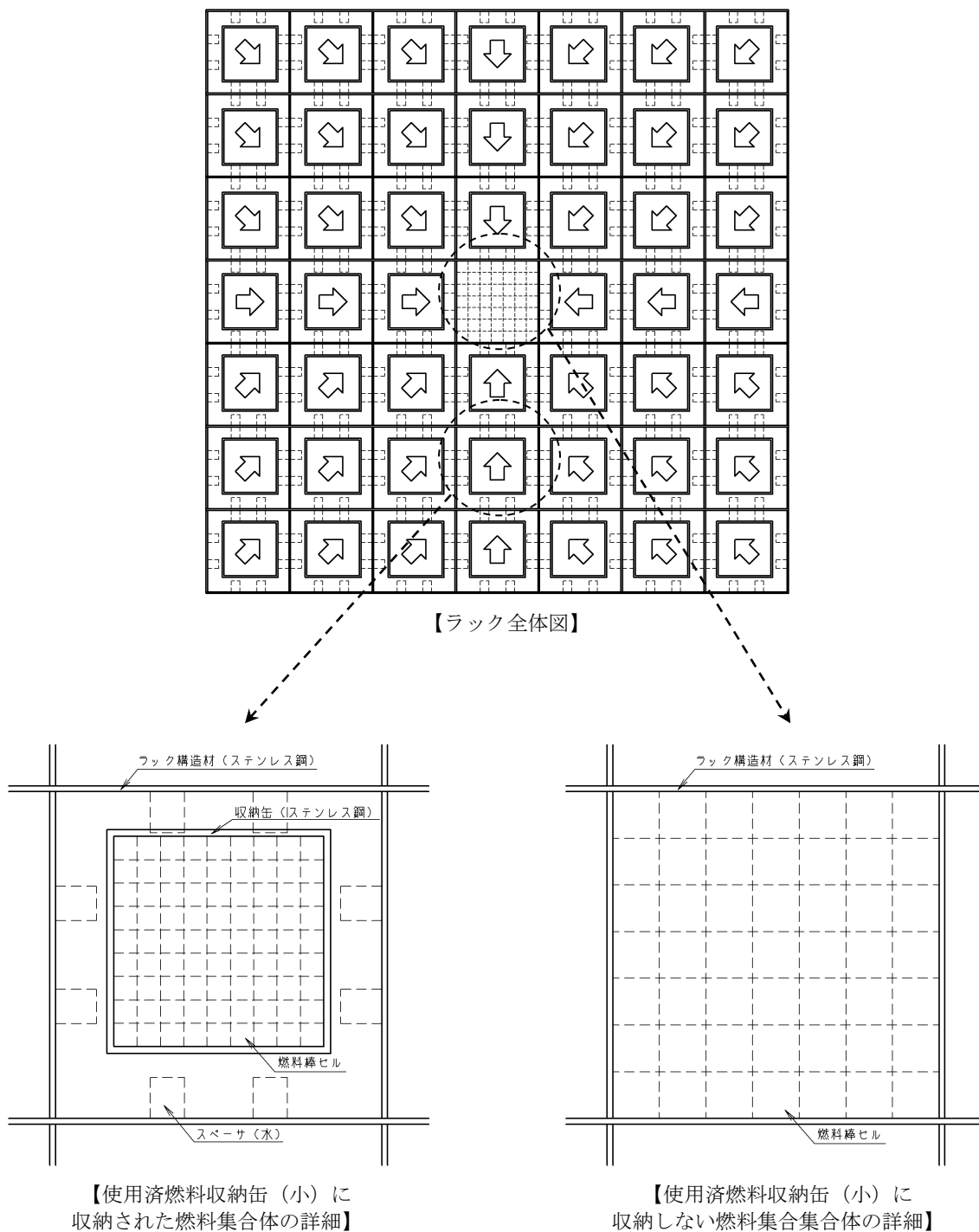
1.5 評価結果

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。

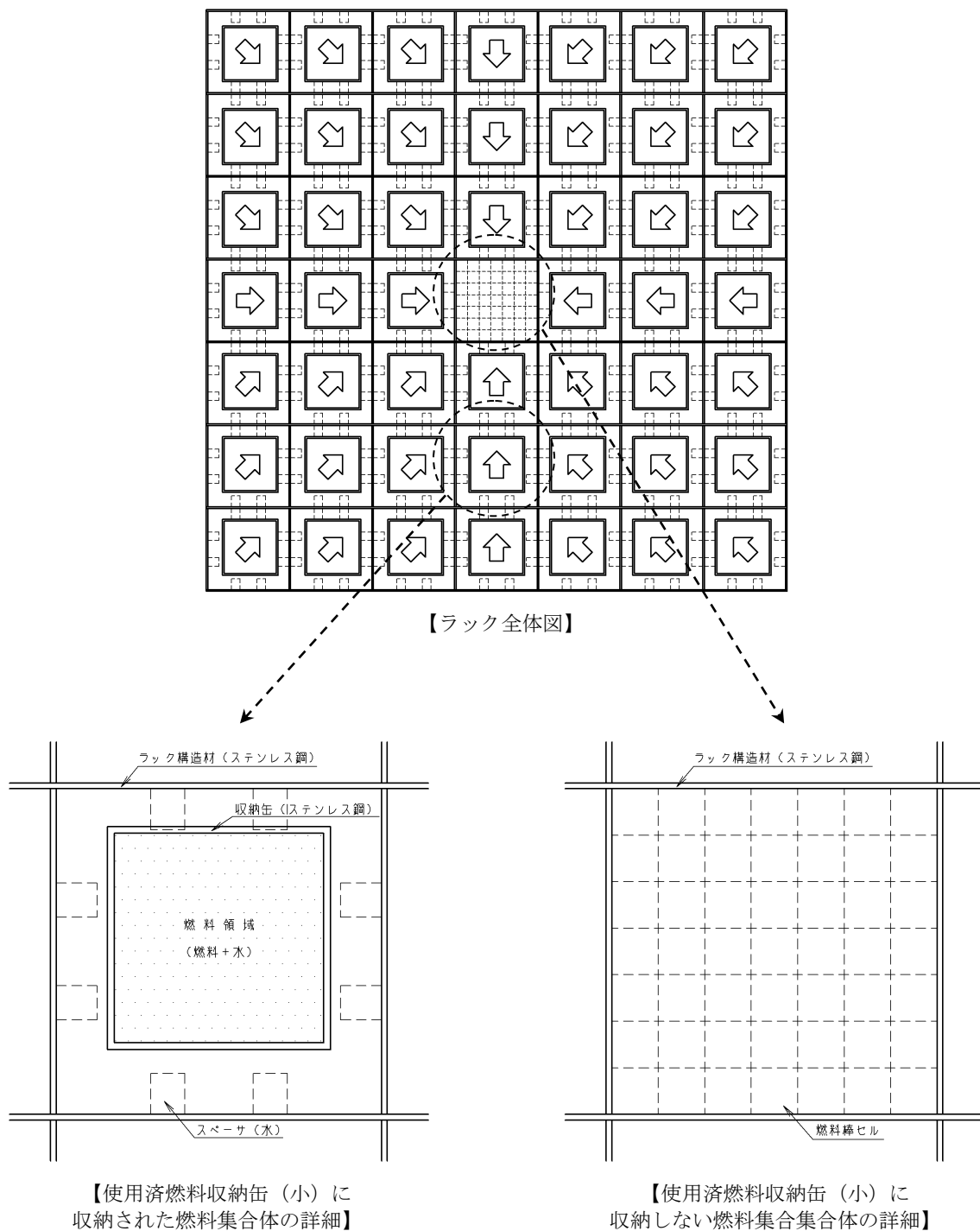
表－1 評価結果

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



図ー 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)



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 実際には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

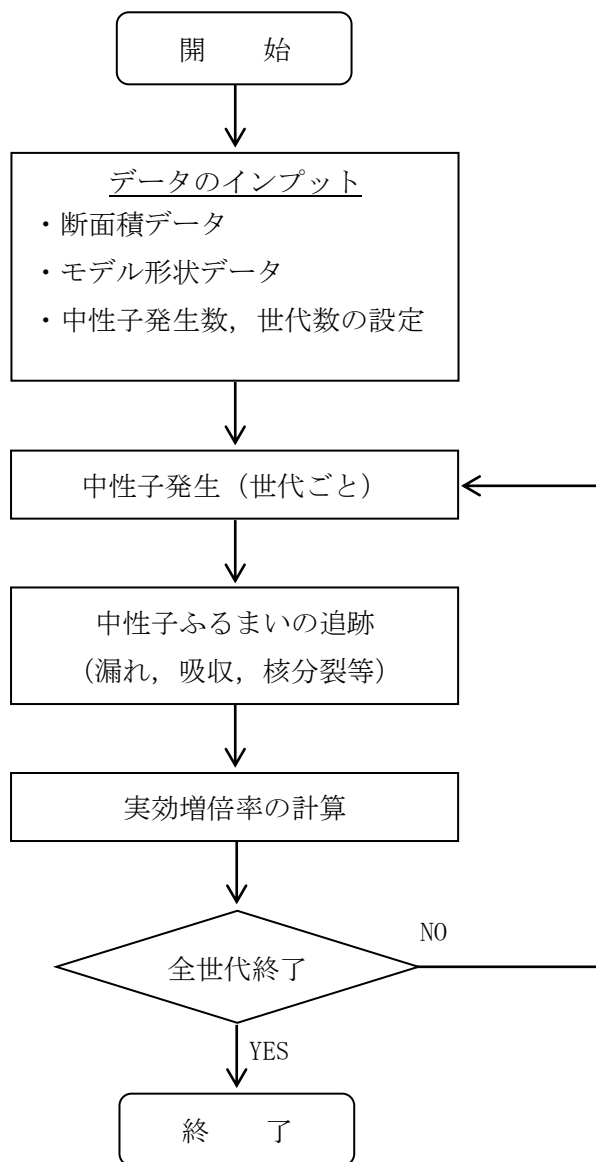
KENO-V.a コードは，国内外で輸送容器の臨界解析をはじめ，使用済燃料貯蔵ラックや核燃料施設の臨界解析に使用されている。

（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
- $f_t^{(注)}$: 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Ds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	$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$	$1.5f_c^*$	$1.5f_b^*$	$1.5f_t^*$	$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$	$\text{Min}\{1.5f_t^*, (2.1f_t^* - 1.6\tau_b)\}$	・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)

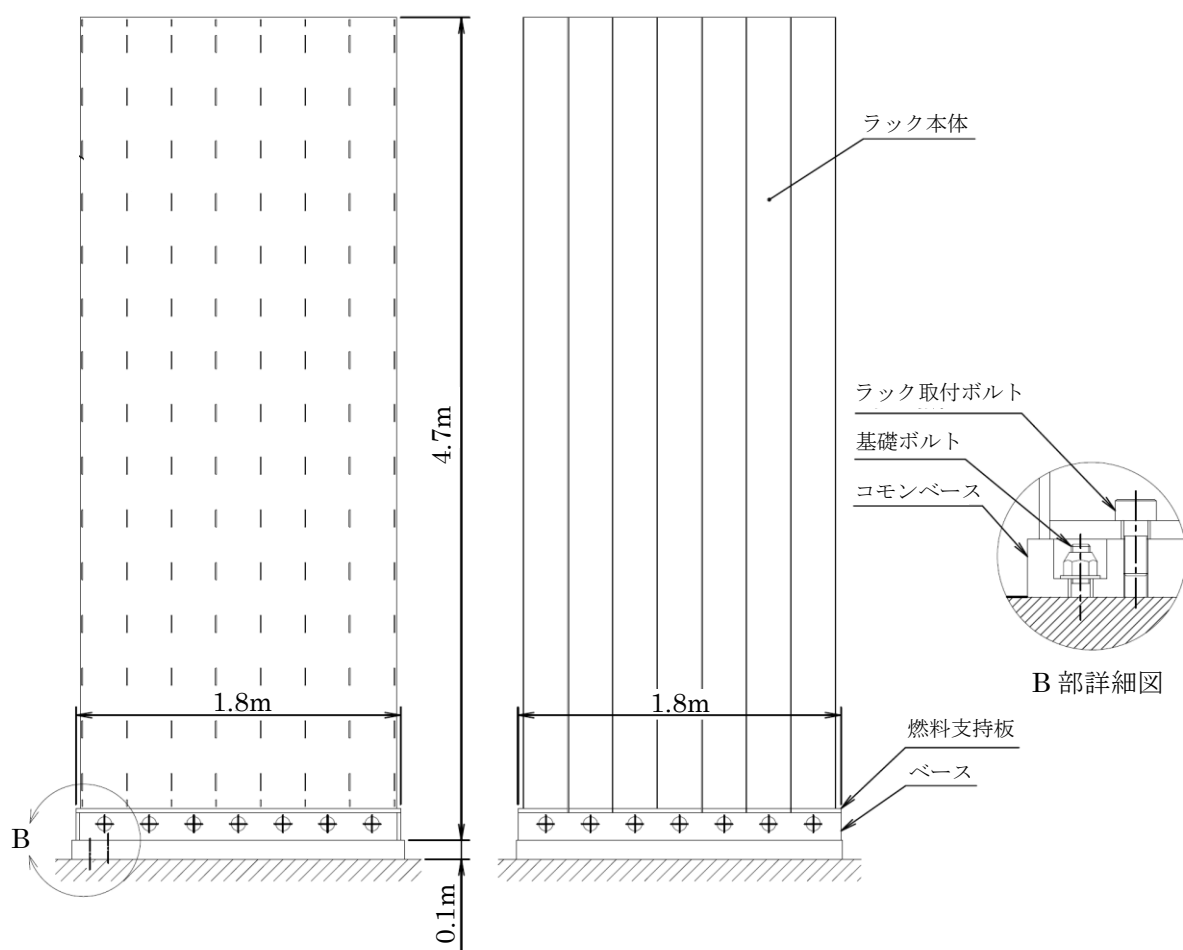
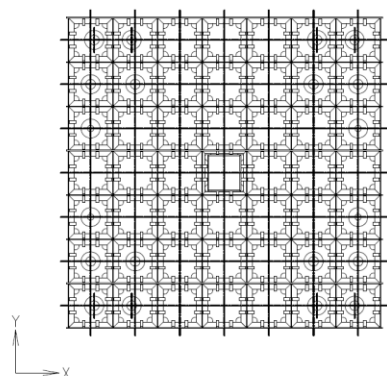


図 1 - 1 構造概要図 (使用済燃料貯蔵ラック (49 体))

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 _{ss}	スペーサ下部支持部材の許容せん断応力	MPa
f _t	部材の許容引張応力	MPa
f _{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。

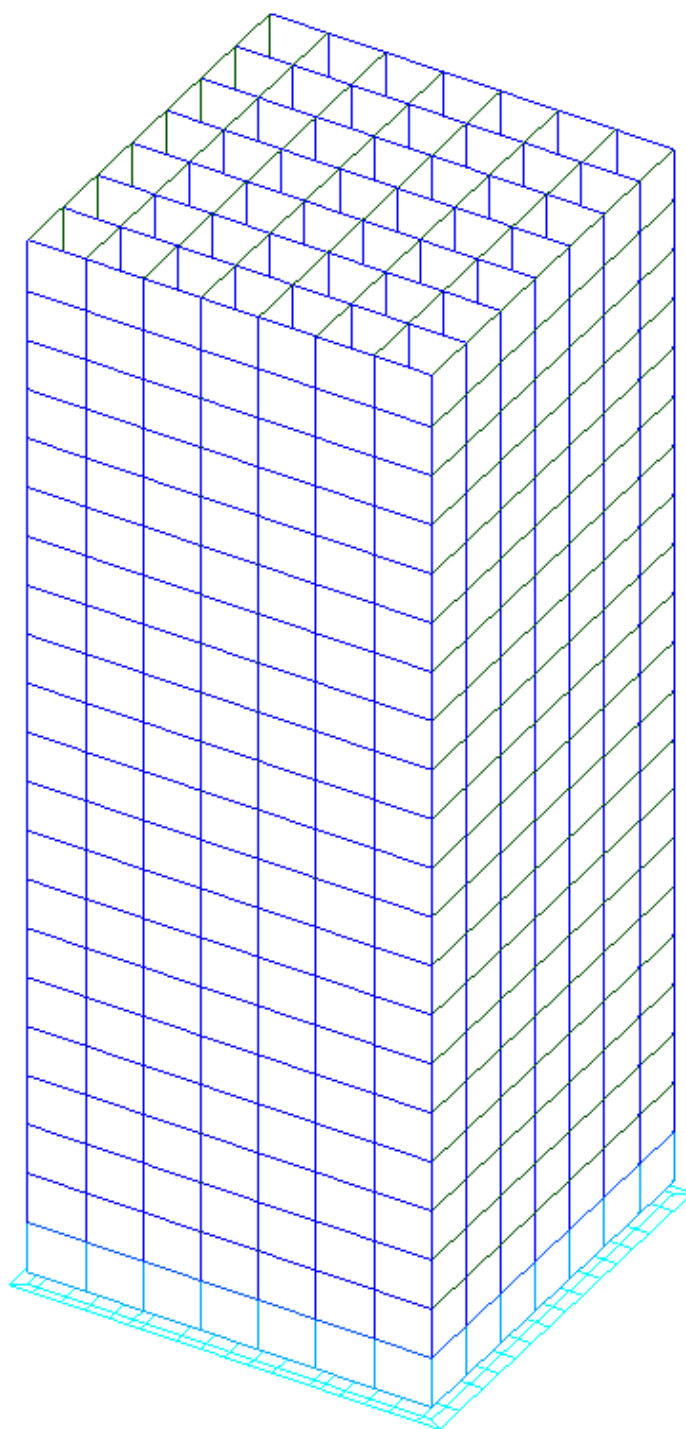


図 2－1　使用済燃料貯蔵ラック（49 体）計算モデル

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。

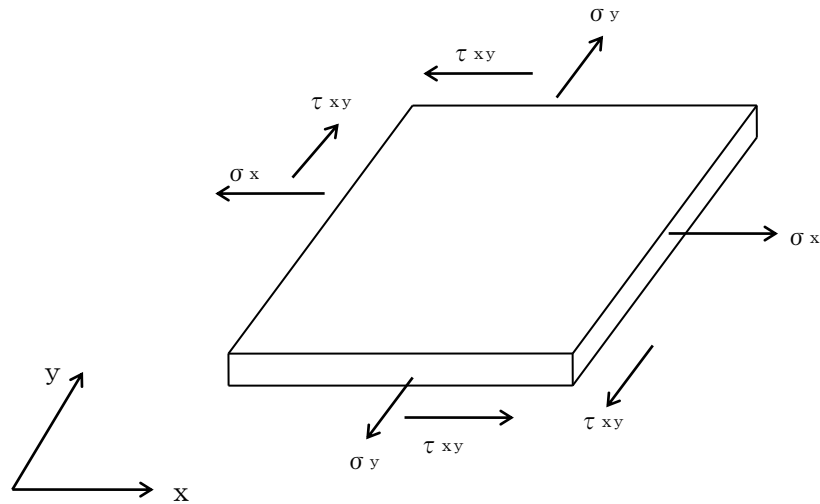


図 2-2 部材の応力

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を行い、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。

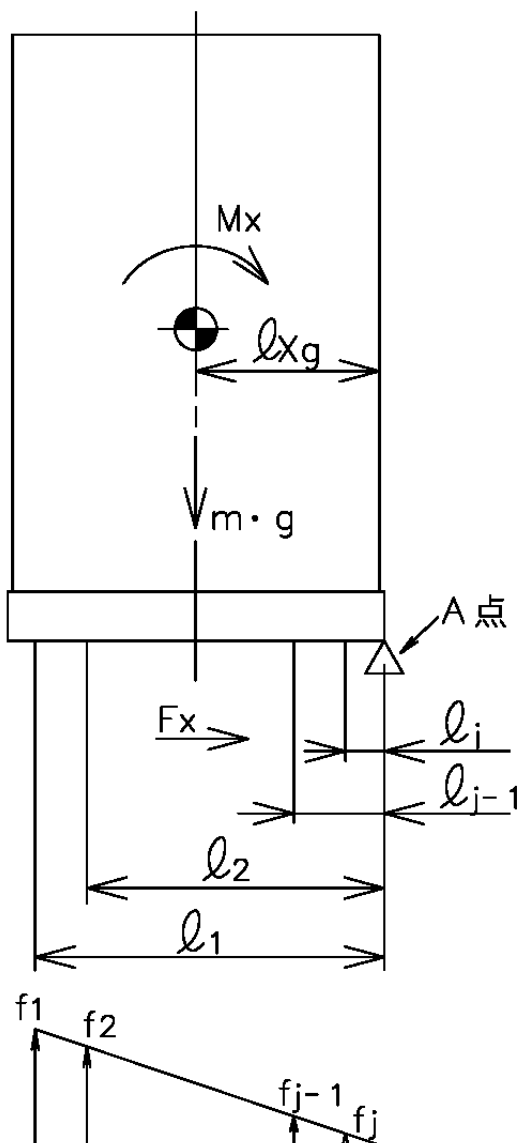


図 2-3 ラック取付ボルトおよび基礎ボルトの応力

(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。

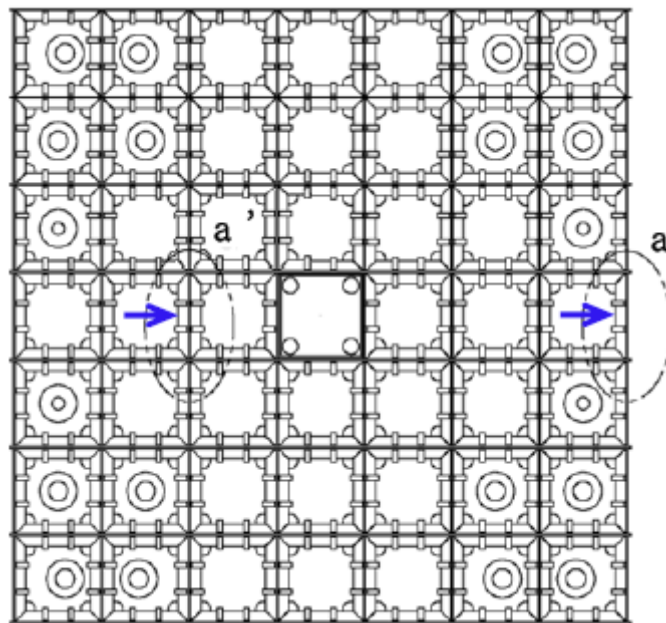


図2-4 使用済燃料貯蔵ラック(49 体)上面図

(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}	$\min \left\{ 1.5 \times \frac{0.433 \cdot E \cdot A f}{L \cdot H}, 1.5 \times \frac{F^*}{1.5} \right\}$
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 (℃)	周囲環境温度 (℃)
				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. $\pm 0\text{m} = \text{T. P. } 8.5\text{m}$ (※)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〉 $\text{T. P.} = \text{旧 O. P.} - 1,436\text{mm}$

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

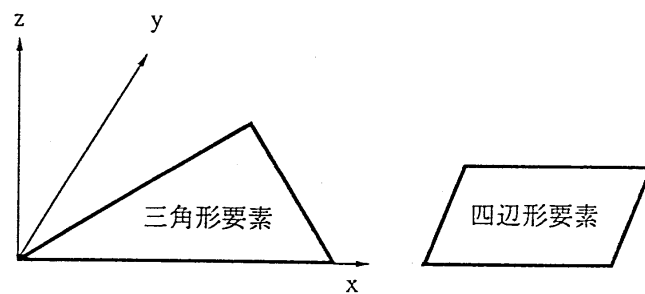
米国NASA (National Aeronautics and Space Administration)作成の有限要素法による構造解析用汎用計算機コード「NASTRAN」の概要である。

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) プロットイ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。

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

ここで、

$\{\epsilon\}$: 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。

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

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

ここで、

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

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

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

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

ここで、

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

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

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

[m] : 質量マトリックス

[k] : 剛性マトリックス

(5) 変位が求まれば, (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。

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

ここで,

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

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

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

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

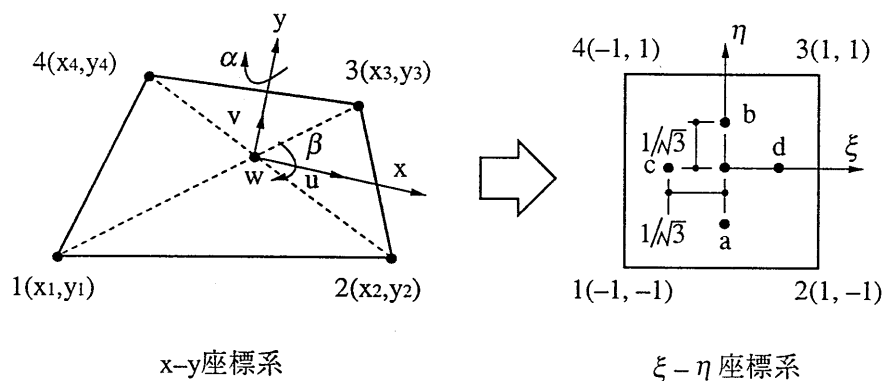


図 3-1 座標系

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 $\xi-\eta$ 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,

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

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。

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

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。

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

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。

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

ただし、

$$[X] = [x_1, x_2, \dots, x_n]$$

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、

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

さらに、左から $[X]^T$ を掛けると、

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

(3.25)式より、

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

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、

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

となると仮定する。ただし、

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

h_i : i 次のモードに対する減衰比

(3. 28)式に(3. 29)式, (3. 30)式を代入すると,

$$\begin{aligned} & [X]^T[m][X]\{\ddot{q}\} + 2[h][\omega][X]^T[m][X]\{\dot{q}\} \\ & + [\omega^2][X]^T[m][X]\{q\} = [X]^T\{R(t)\} \end{aligned} \quad (3. 31)$$

となる。

ここで, モードの直交性により,

$$\begin{aligned} \{x_i\}^T[m]\{x_j\} &= 1.0 \quad (i = j) \\ \{x_i\}^T[m]\{x_j\} &= 0.0 \quad (i \neq j) \end{aligned} \quad (3. 32)$$

(3. 31)式は(3. 32)式を適用することによって各々独立な n 個の運動方程式 (非連成) になる。

$$\ddot{q}_i + 2 \cdot h_i \cdot \omega_i \cdot \dot{q}_i + \omega_i^2 \cdot q_i = P_i(t) \quad (3. 33)$$

ただし,

$$i = 1 \sim n$$

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

(3. 33)式を各々解けば, 各モード x_i の重みを決定する q_i が個々に求まり, さらにこれを(3. 26)式に代入すれば構造全体の変位 $\{\gamma\}$ が求められる。

4. 解析フローチャート

本計算機コードの解析フローチャートを図4-1に示す。

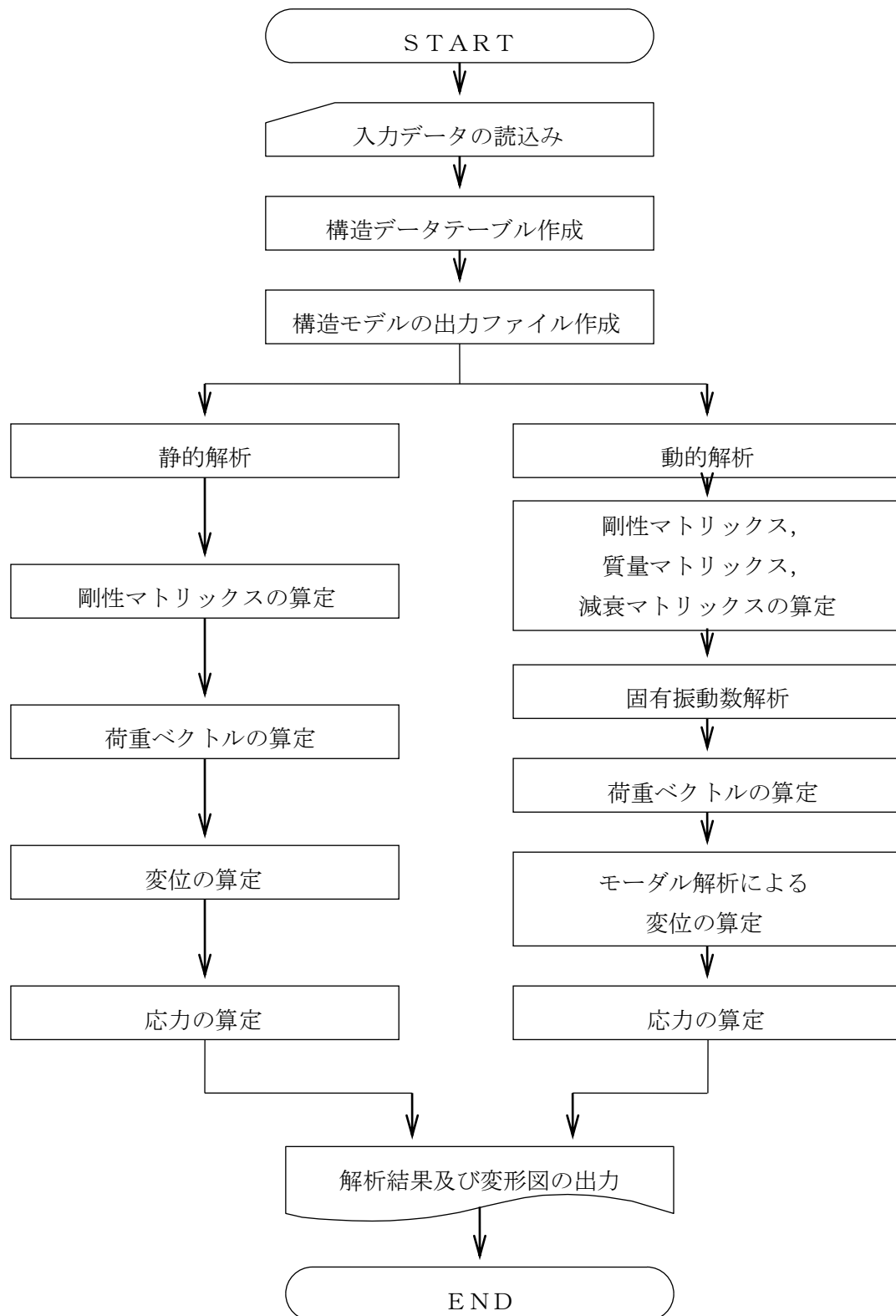


図4-1 解析フローチャート

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

1.1 概要

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

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

表－1 基準線量率

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

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

1.2 使用済燃料共用プールの線源強度

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

使用済燃料の線源強度について、表－2 に示す。

表－2 使用済燃料の線源強度

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

※ 1 REACTOR HANDBOOK Vol. III Part B より

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

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

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。

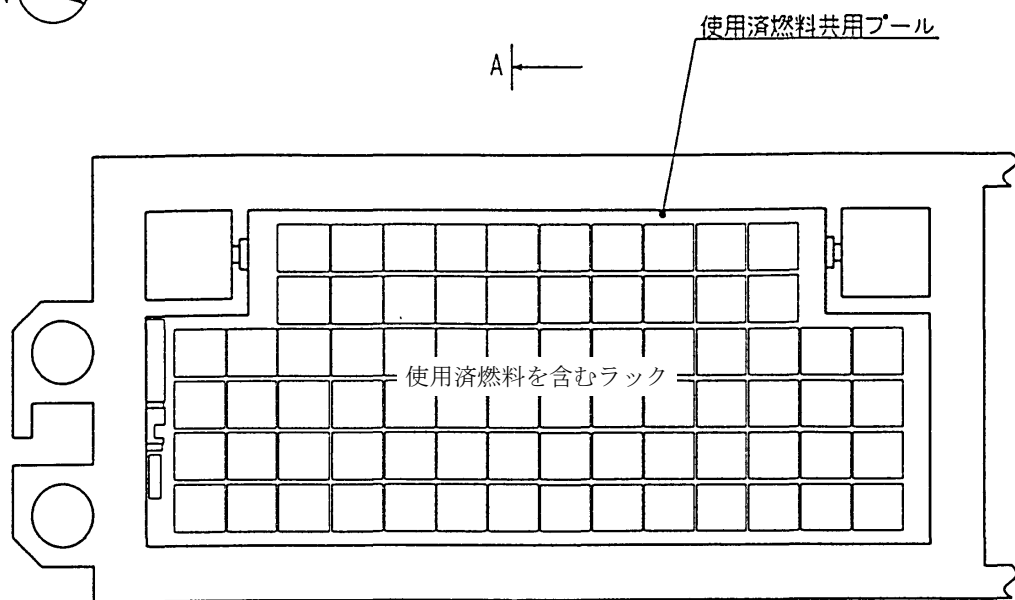
1.4 評価結果

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。

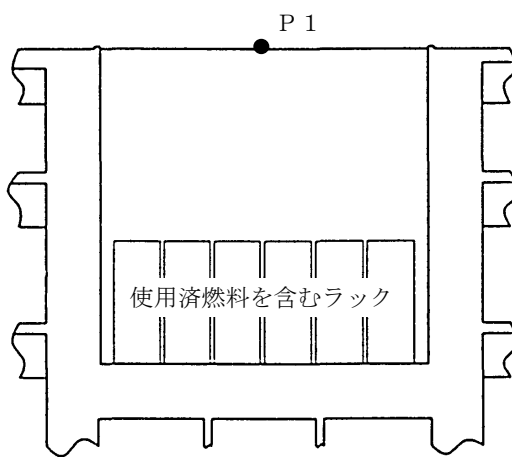
表－3 計算結果

評 価 点	区 分	線 量 率 (mSv/h)
P 1 (プール水面)	F	1.0×10^{-8}

P.N

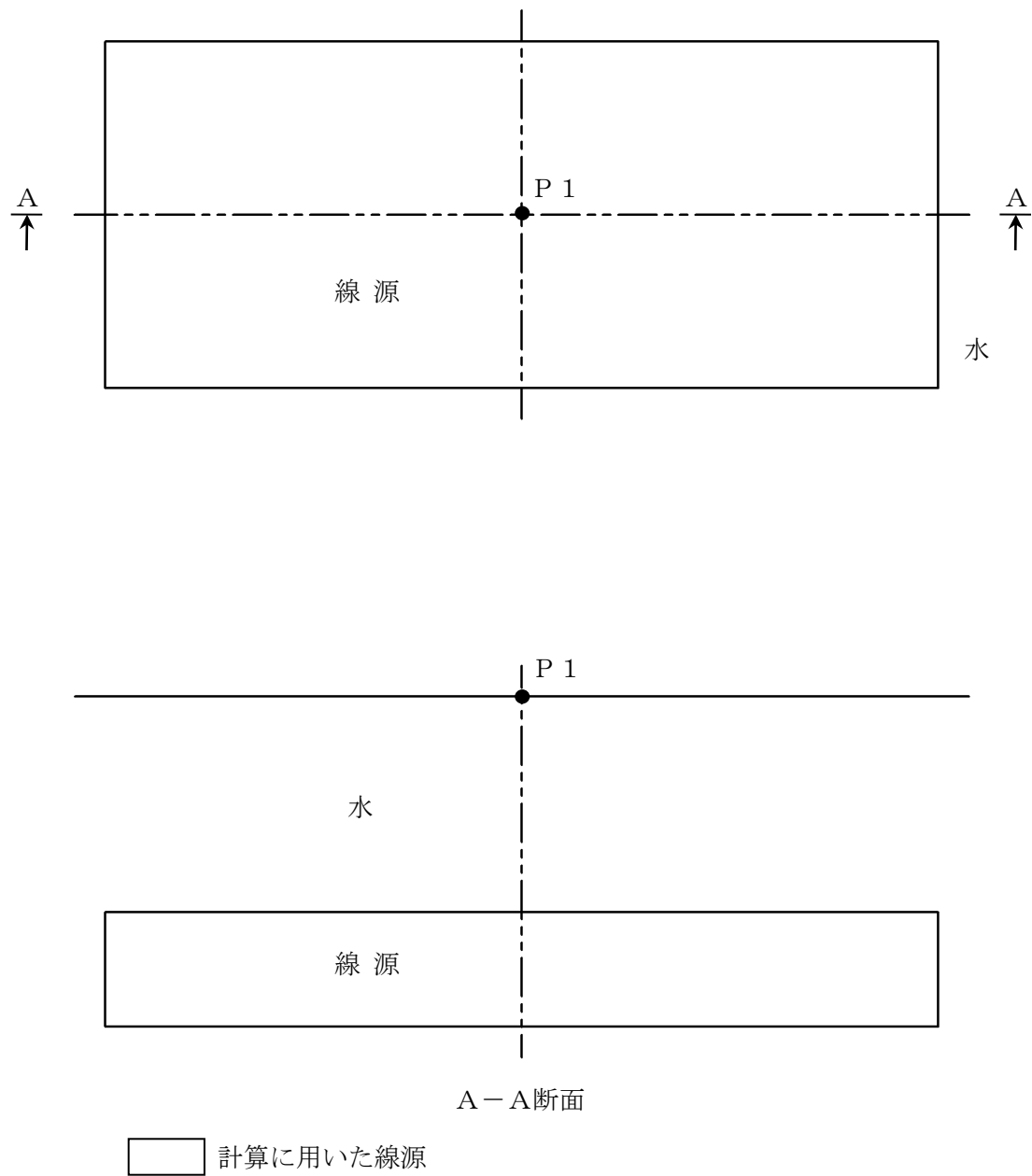


A



A-A断面

図－1 評価点



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

図－2 計算モデル（評価点P 1）

計算機コード「QAD-CGGP2R」の概要

(1) 概要

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

(2) 機能

QAD-CGGP2Rコードは、遮へい解析に際して以下の機能を有する。

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

(3) 使用実績

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

(4) 検証

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

※1 以下の文献を確認し、検証されたコードであることを確認した。

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

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

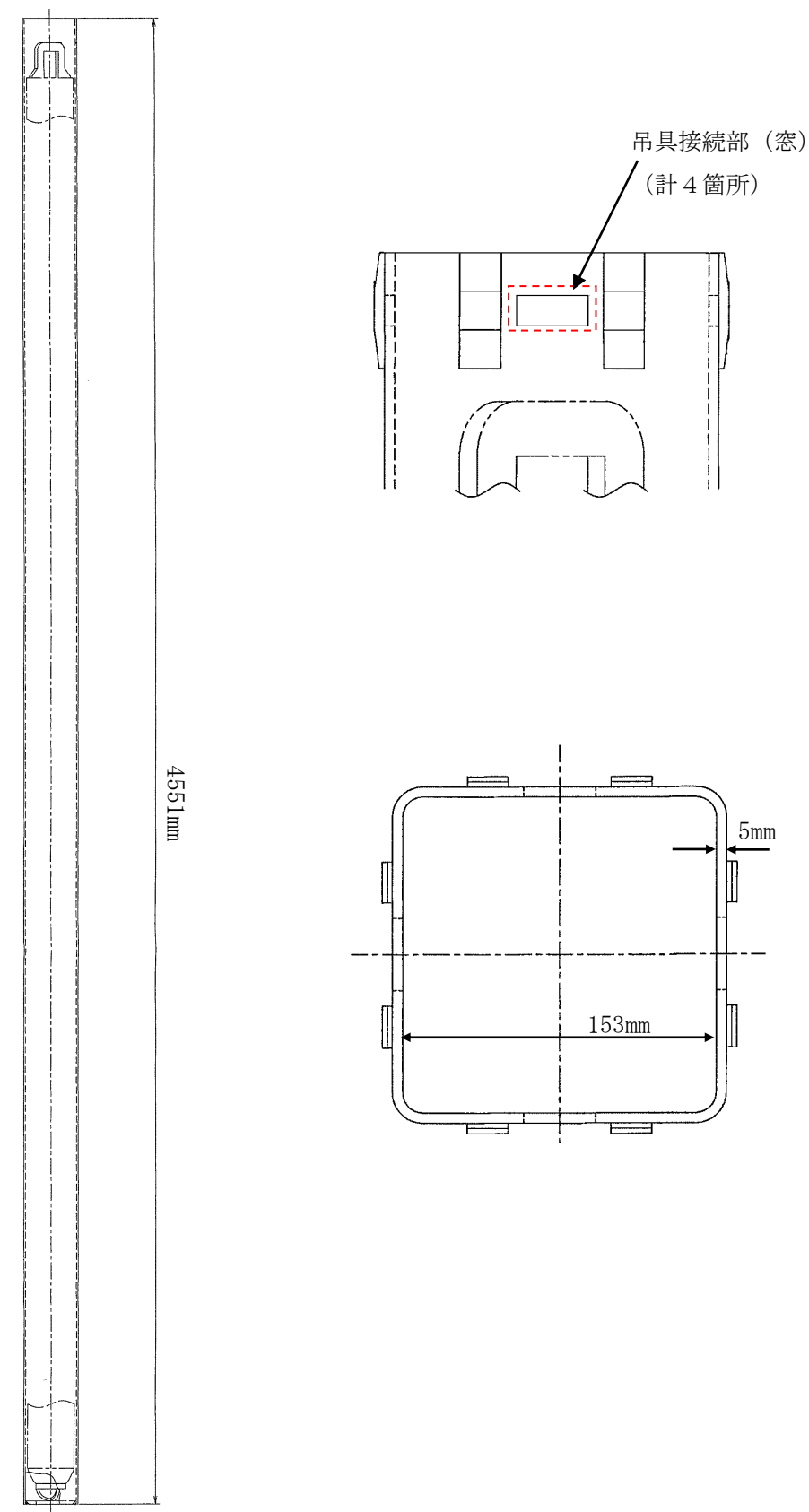
使用済燃料収納缶（小）はステンレス鋼製の角缶構造である。

3. 使用済燃料収納缶（小）の機能

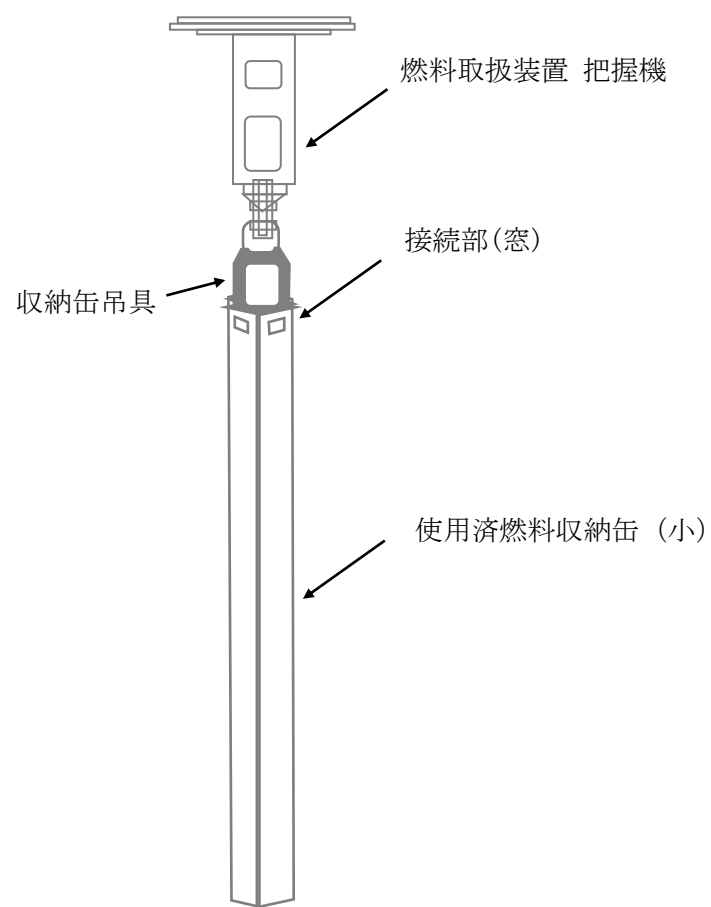
- (1) 使用済燃料収納缶（小）は，燃料取扱装置を用いて使用済燃料収納缶（小）内に収納した燃料の取扱いが可能になるよう，使用済燃料収納缶（小）上部に燃料の上部タイププレートハンドル部と同等の形状を有する吊具を取り付け，吊具を燃料取扱装置の把握機で把持する。なお，吊具は落下防止措置を施した着脱式の機構とする。
- (2) 使用済燃料収納缶（小）は，燃料棒の形状が維持されていない場合でも放射性物質の拡散を抑制する。

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



図－2 使用済燃料収納缶（小）取り扱い概念図

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パーサで確保する。
- 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、スパ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。

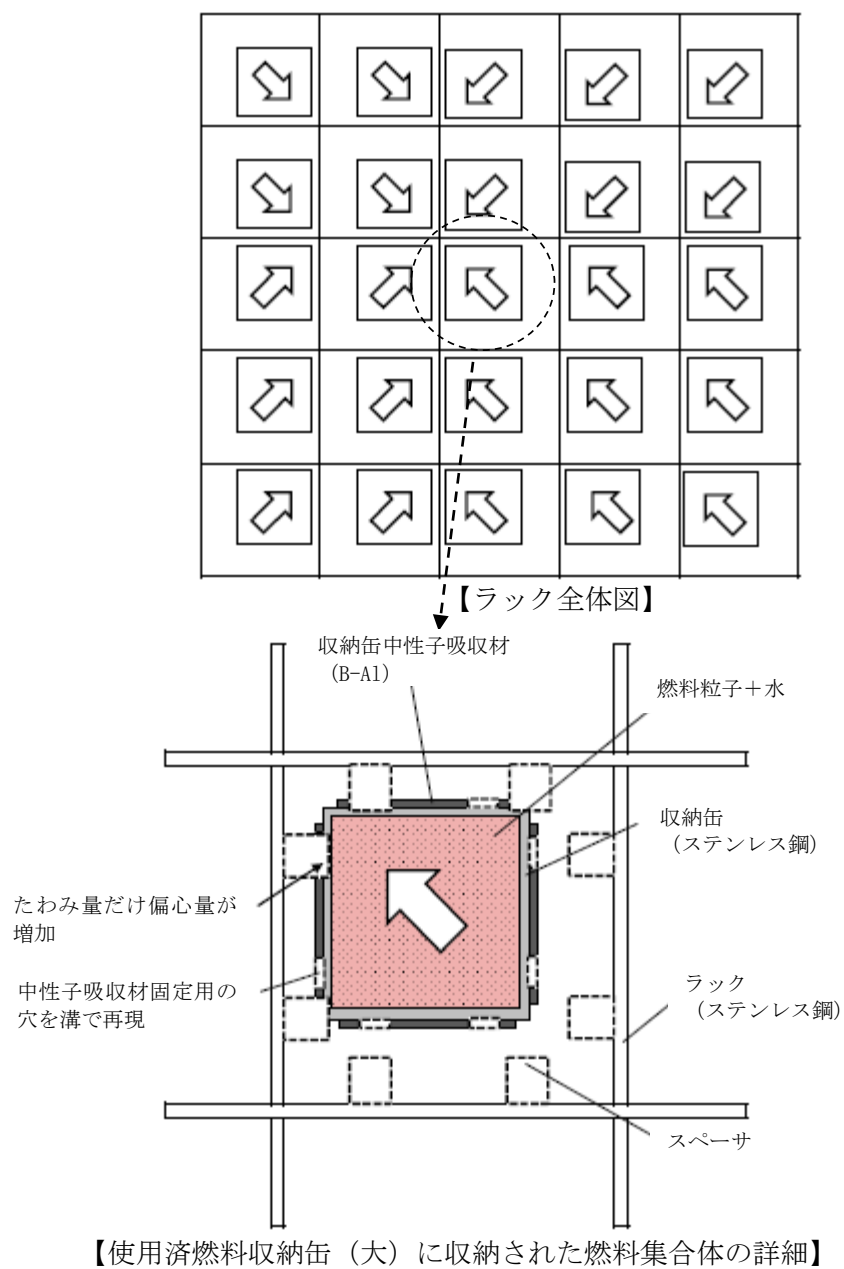
1.5 評価結果

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（3 σ ）を考慮した値



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

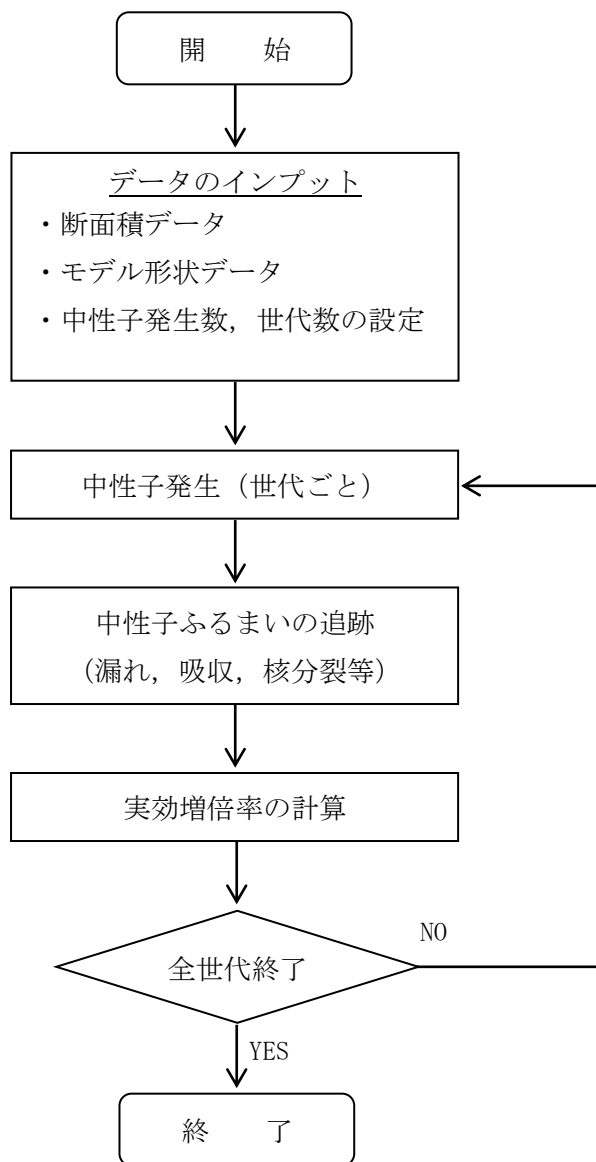
KENO-V.a コードは、国内外で輸送容器の臨界解析をはじめ、使用済燃料貯蔵ラックや核燃料施設の臨界解析に使用されている。

（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Ds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	$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$	$1.5f_c^*$	$1.5f_b^*$	$1.5f_t^*$	$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$	$\text{Min}\{1.5f_t^* , (2.1f_t^* -1.6 \tau_b)\}$	・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)

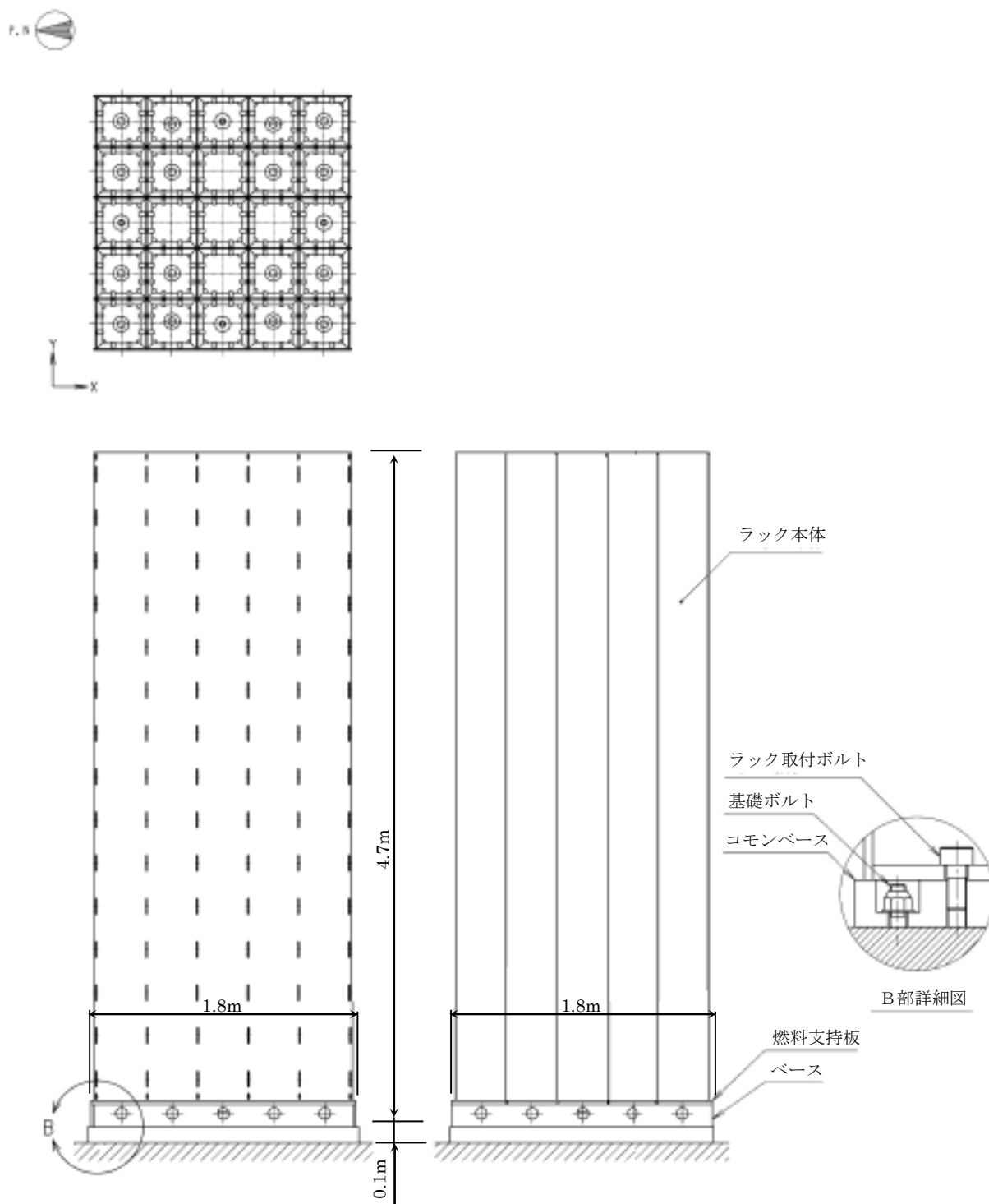


図 1 - 1 構造概要図 (使用済燃料貯蔵ラック (25 体))

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
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 本当たり）	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 _{ss}	スペーサ下部支持部材の許容せん断応力	MPa
f _t	部材の許容引張応力	MPa
f _{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。

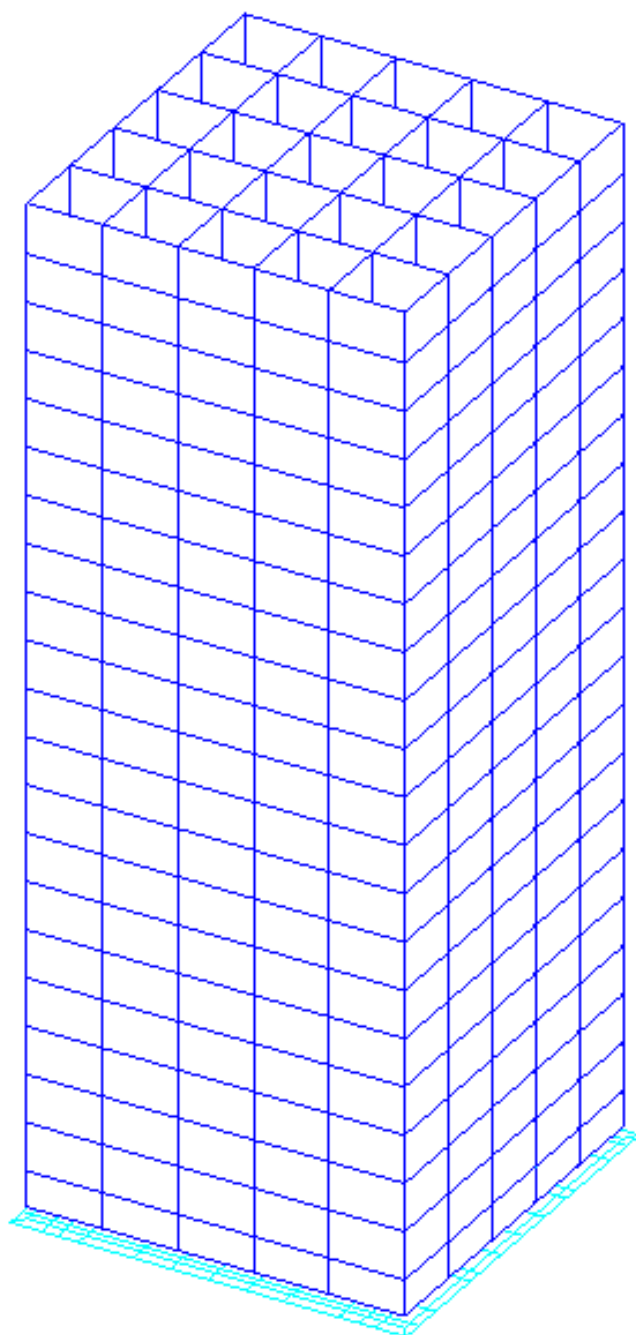


図 2 - 1 使用済燃料貯蔵ラック (25 体) 計算モデル

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。

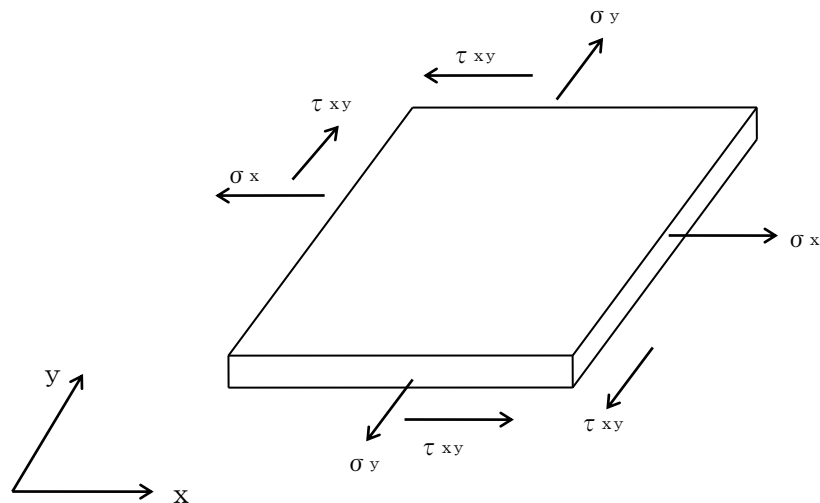


図 2-2 部材の応力

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を行い、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。

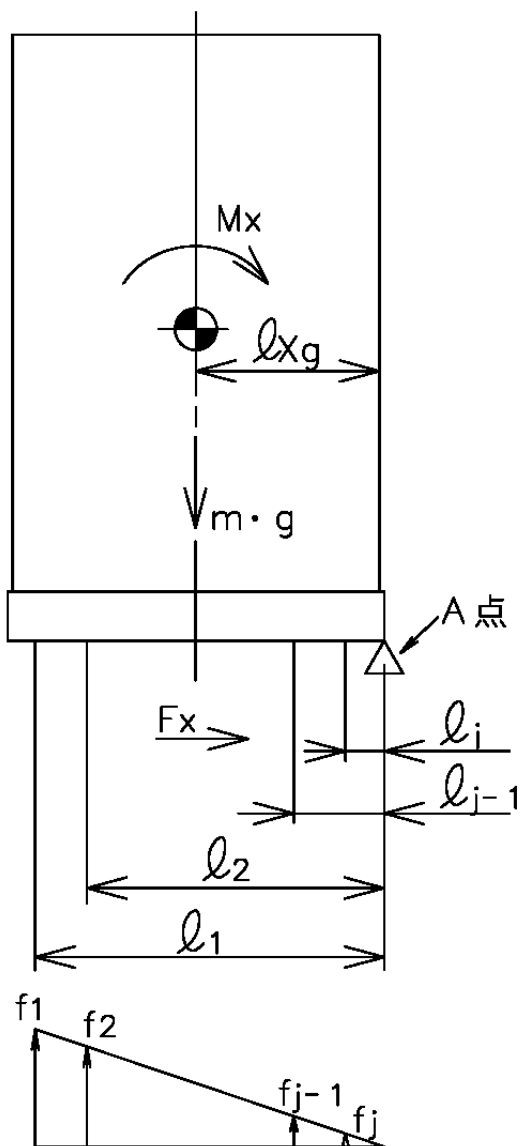


図 2-3 ラック取付ボルトおよび基礎ボルトの応力

(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。

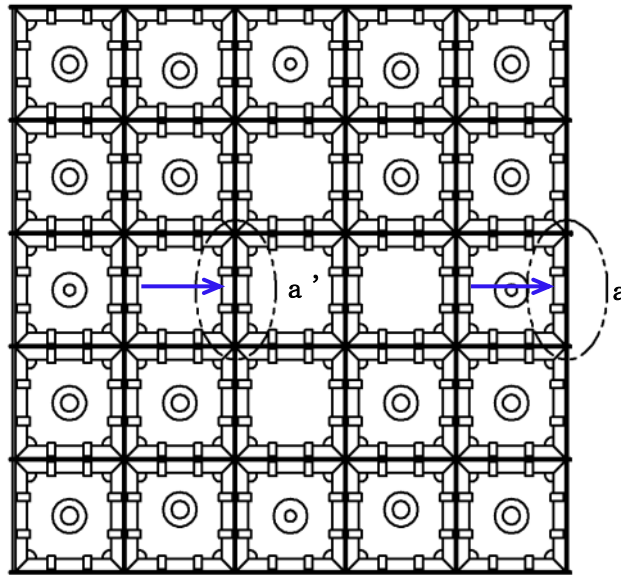


図2-4 使用済燃料貯蔵ラック(25 体) 上面図

(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}	$\min \left\{ 1.5 \times \frac{0.433 \cdot E \cdot A f}{L \cdot H}, 1.5 \times \frac{F^*}{1.5} \right\}$
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 (℃)	周囲環境温度 (℃)
				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. $\pm 0\text{m} = \text{T. P. } 8.5\text{m}(\text{※})$ 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〉 $\text{T. P.} = \text{旧 O. P.} - 1,436\text{mm}$

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	$\sigma_0 = 29$	$f_0 = 205$

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

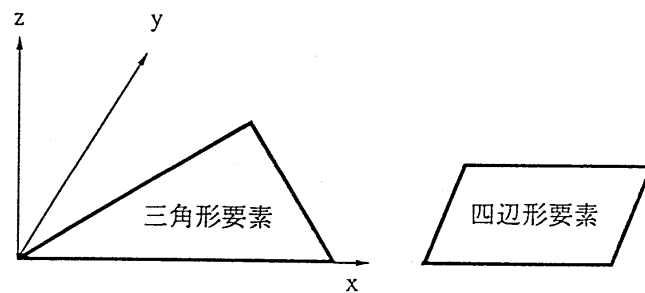
米国NASA (National Aeronautics and Space Administration)作成の有限要素法による構造解析用汎用計算機コード「NASTRAN」の概要である。

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

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

3. 理論式

3.1有限要素法による評価

有限要素法による評価は、次の手順で行われる。

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

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

ここで、

$\{u\}$: 要素内任意点の変位

$[N]$: 形状関数マトリックス

$\{u_e\}$: 節点変位

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

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

ここで、

$\{\epsilon\}$: 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。

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

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

ここで、

$\{\sigma\}$: 要素内任意点の応力

$[D]$: 弾性係数マトリックス

$[K]$: 要素剛性マトリックス

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

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

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

ここで、

$\{f\}$: 荷重ベクトル

$\{\gamma\}$: 構造全体の変位

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

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

[m] : 質量マトリックス

[k] : 剛性マトリックス

(5) 変位が求まれば, (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。

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

ここで,

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

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

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

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

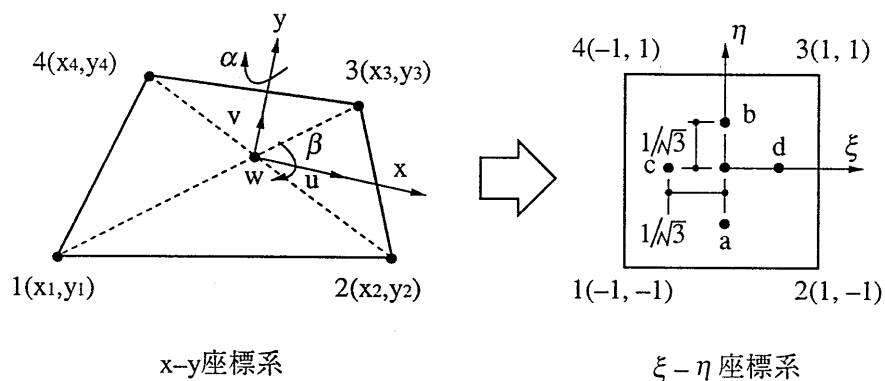


図 3-1 座標系

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 $\xi-\eta$ 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,

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

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。

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

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。

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

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。

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

ただし、

$$[X] = [x_1, x_2, \dots, x_n]$$

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、

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

さらに、左から $[X]^T$ を掛けると、

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

(3.25)式より、

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

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、

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

となると仮定する。ただし、

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

h_i : i 次のモードに対する減衰比

(3. 28)式に(3. 29)式, (3. 30)式を代入すると,

$$\begin{aligned} & [X]^T[m][X]\{\ddot{q}\} + 2[h][\omega][X]^T[m][X]\{\dot{q}\} \\ & + [\omega^2][X]^T[m][X]\{q\} = [X]^T\{R(t)\} \end{aligned} \quad (3. 31)$$

となる。

ここで, モードの直交性により,

$$\begin{aligned} \{x_i\}^T[m]\{x_j\} &= 1.0 \quad (i = j) \\ \{x_i\}^T[m]\{x_j\} &= 0.0 \quad (i \neq j) \end{aligned} \quad (3. 32)$$

(3. 31)式は(3. 32)式を適用することによって各々独立な n 個の運動方程式 (非連成) になる。

$$\ddot{q}_i + 2 \cdot h_i \cdot \omega_i \cdot \dot{q}_i + \omega_i^2 \cdot q_i = P_i(t) \quad (3. 33)$$

ただし,

$$i = 1 \sim n$$

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

(3. 33)式を各々解けば, 各モード x_i の重みを決定する q_i が個々に求まり, さらにこれを(3. 26)式に代入すれば構造全体の変位 $\{\gamma\}$ が求められる。

4. 解析フローチャート

本計算機コードの解析フローチャートを図4-1に示す。

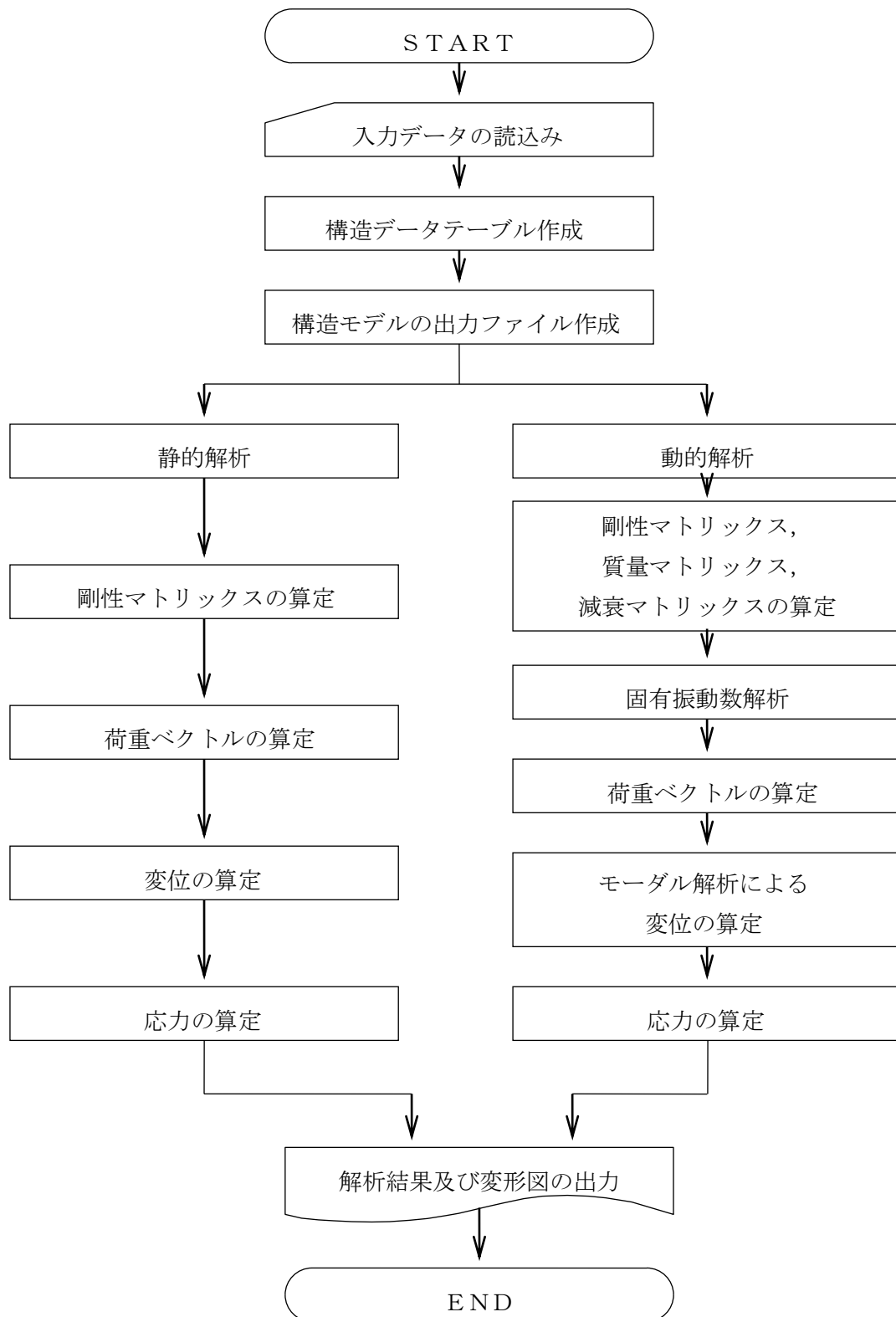


図4-1 解析フローチャート

使用済燃料収納缶（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。

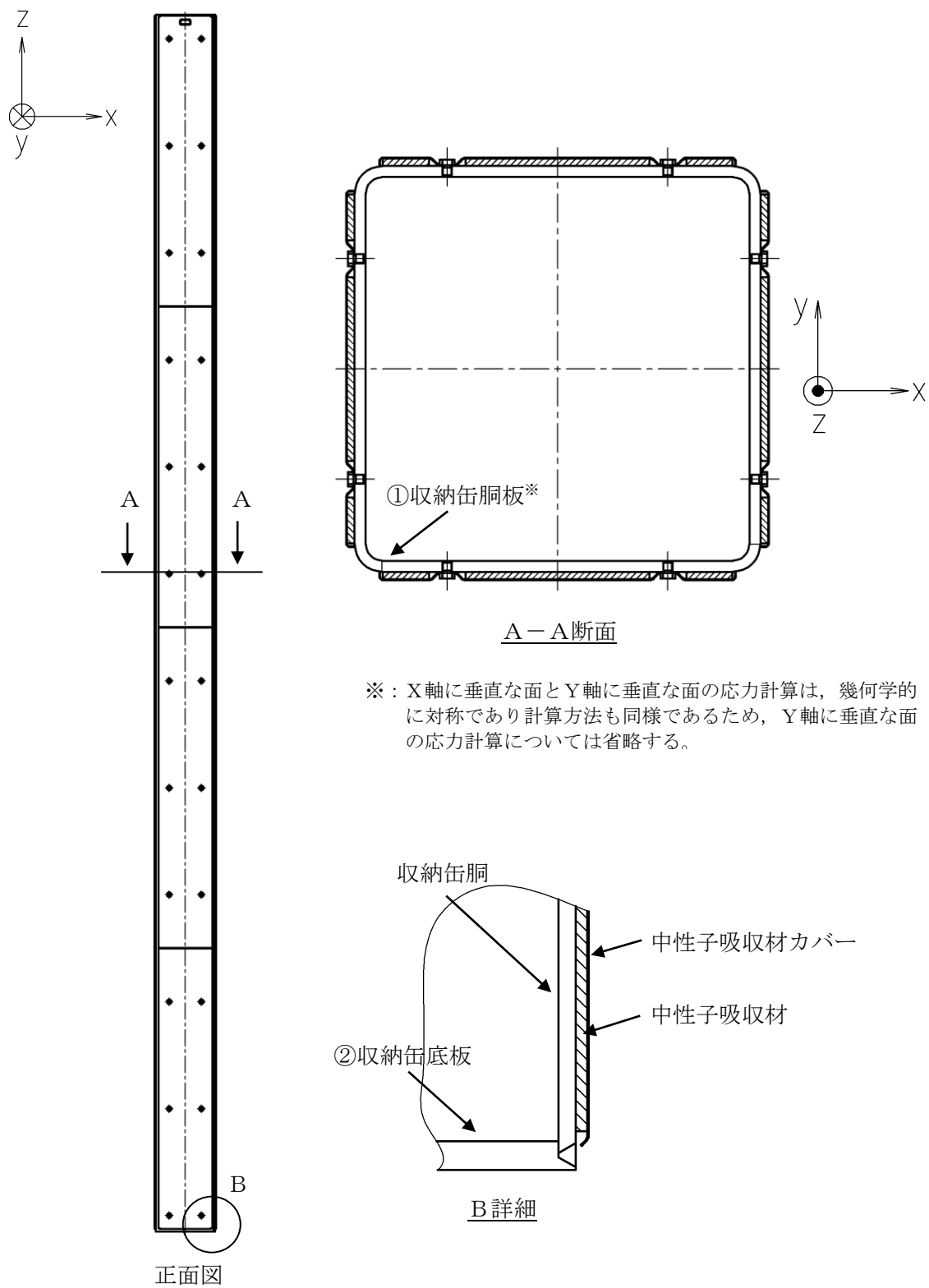
4. 荷重条件

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（ $=0.89\text{ g}$ ）

G_y : 図－1 に示す Y 方向の加速度（ $=0.89\text{ g}$ ）

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



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。

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

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。

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

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程」(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)

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

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

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

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

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

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	基準地震動 S s			
		応 力			
①収納缶胴板	SUS304TP	一次一般膜応力 P _m		算出応力	許容応力
		一次一般膜＋一次曲げ応力 P _m + P _b		1	319
		平均支圧応力 σ _b		11	478
		圧縮応力		1	376
		σ _c		1	205
②収納缶底板	SUS304	長手方向		0	79
		長手方向以外		1	319
		一次一般膜応力 P _m		1	478
		一次一般膜＋一次曲げ応力 P _m + P _b		1	376
		平均支圧応力 σ _b			

すべて許容応力以下である。

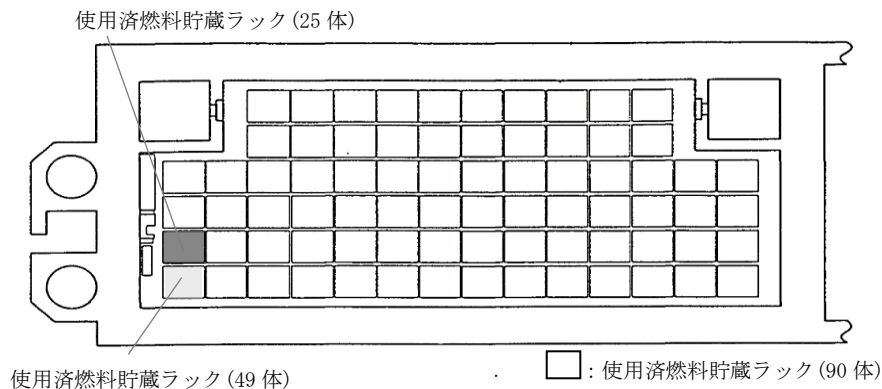
使用済燃料貯蔵ラック (25 体) 設置後の使用済燃料共用プールの水深の遮へい能力に関する説明書

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の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

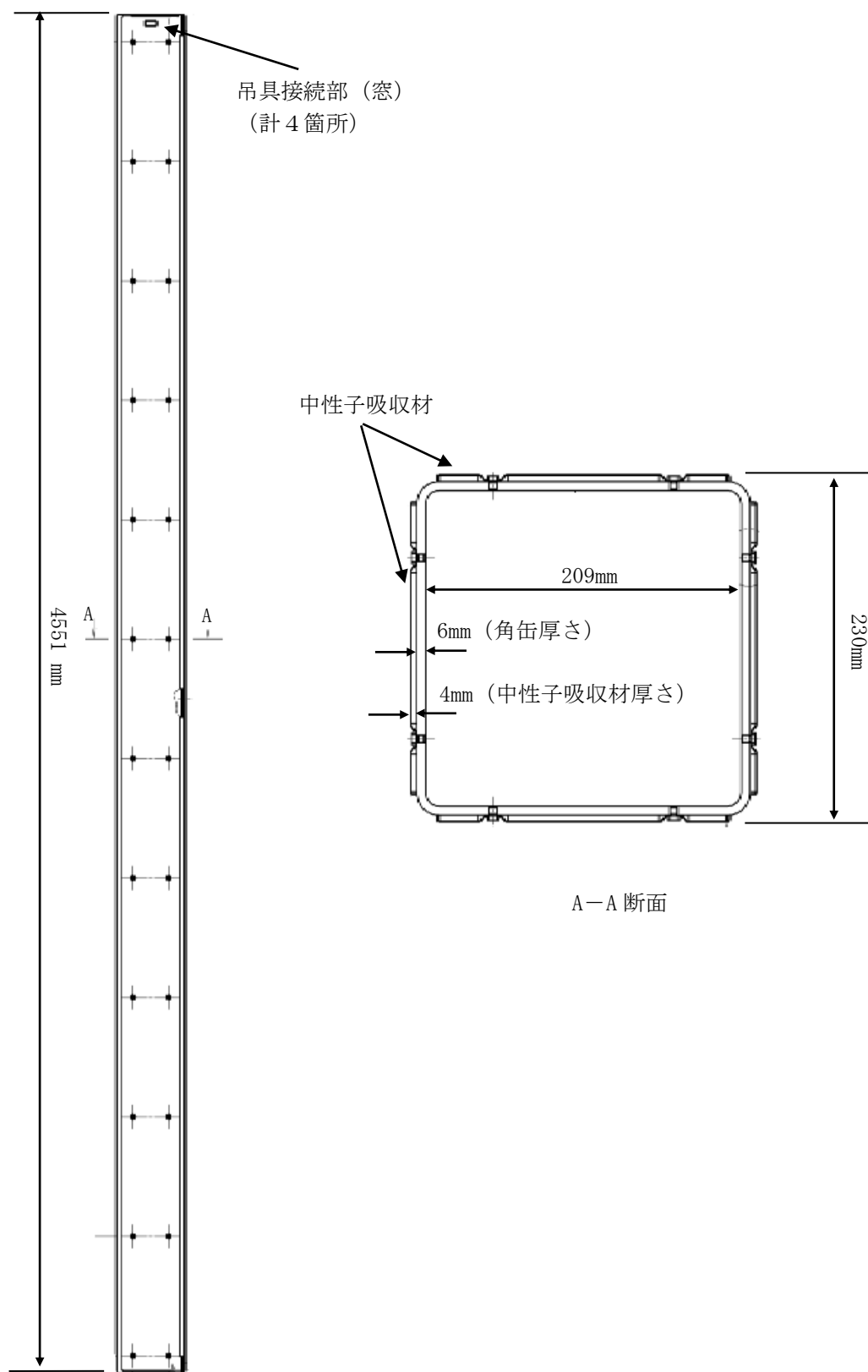
- (1) 使用済燃料収納缶（大）は，天井クレーンを用いて使用済燃料収納缶（大）内に収納した燃料の取扱いが可能になるよう，使用済燃料収納缶（大）上部に燃料の上部タイププレートハンドル部と同等の形状を有する吊具を取り付け，ワイヤロープ等により吊具と天井クレーンの主巻フックを取り付ける。なお，吊具は落下防止措置を施した着脱式の機構とする。
- (2) 使用済燃料収納缶（大）は，燃料棒の形状が維持されていない場合でも放射性物質の拡散を抑制する。

4. 使用済燃料収納缶（大）の取扱い及び落下防止措置

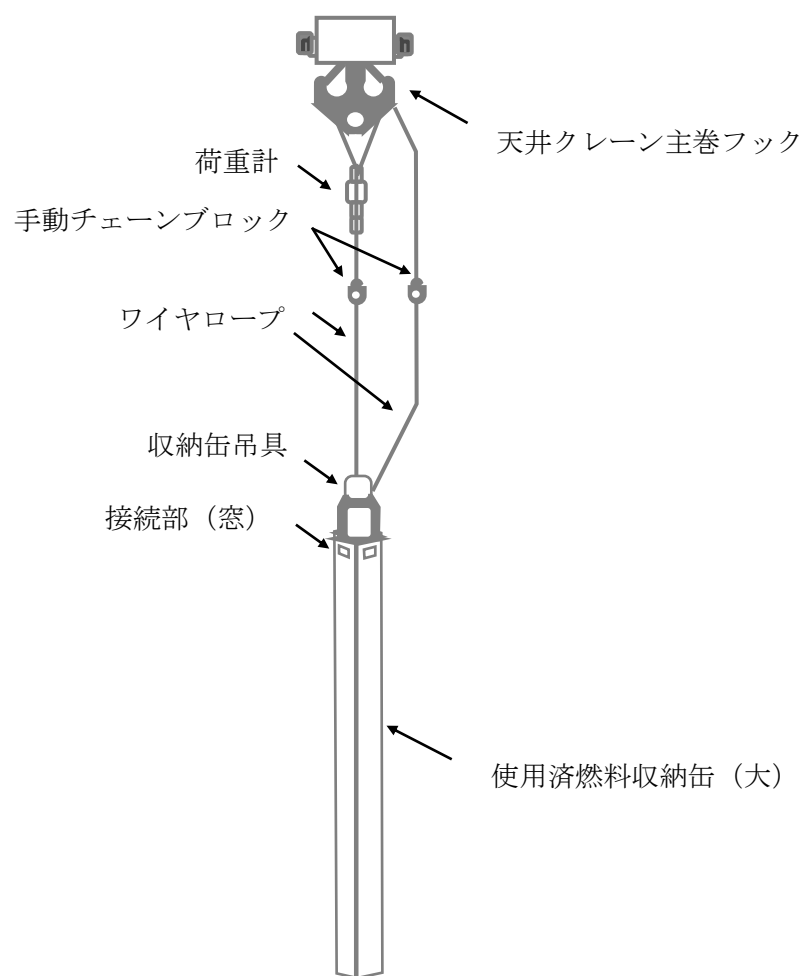
使用済燃料収納缶（大）上部には吊具を取り付けるための接続部（窓）を設け，接続部に吊具を取り付ける。接続部は使用済燃料収納缶（大）に 4 箇所設け，吊具を 4 箇所に取り付けることにより，吊上げ時の落下を防止する。

吊具は天井クレーン主巻フックを用いて取扱うことから，以下の天井クレーンの落下防止機能及び落下防止措置により吊上げ時の落下を防止する。

- ・天井クレーン主巻フックは電源断時に電磁ブレーキで保持する構造
- ・主巻フックは二重のワイヤロープで保持する構造
- ・主巻フックは外れ止めを有する構造
- ・主巻フックと吊具を取り付けるワイヤロープ等を二重化する
- ・取り付け作業後に取り付け状態を確認する



図－1 使用済燃料収納缶（大）構造図



図ー２ 使用済燃料収納缶（大）取り扱い概念図