

枠内は機密情報のため公開できません

「もんじゅ」廃止措置計画の変更内容 (模擬燃料体の部分装荷)

2020年2月17日

日本原子力研究開発機構 (JAEA)

模擬燃料体の部分装荷に関する安全性の確認について(概要)

部分装荷による影響を網羅的に抽出し評価すべき事項を整理

止める：影響なし(制御棒は挿入済/燃料体数少なく臨界に至らず)
 冷やす：影響なし(燃料体の発熱熱は小：最大200W/体、全体で9.7kW
 冷却機能を喪失しても燃料被覆管は破損しない)
 閉じ込める：地震時の炉心体系維持、燃料体の健全性の確認が必要
 燃料体取出し機能：地震時の燃料体の跳び上がり、燃料体が減ることによる
 炉心流量の変化、隣接燃料体が減ることによる燃料体頂部
 部の変位等の影響に関し確認が必要 等

確認事項の評価結果

閉じ込め機能への影響
 耐震性の評価：部分的に燃料体が装荷されない状態の地震時の燃料体の挙動を解析コードにて評価
 燃料体の構造健全性は確保され、炉心体系を維持。被覆管の座屈による破損も無く、燃料体は閉じ込め機能を維持

燃料体取出し機能への影響
 地震時の影響：地震時の燃料体の跳び上がり量は20mm程度。燃料体のパッド部外れも、燃料交換装置との干渉もなく、影響なし
 炉心流量増加：流量増加量は燃料交換装置や循環ポンプの運転に影響ない程度
 燃料体頂部の変位：燃料体の最大傾きはエントランスノズル部の嵌合部の隙間によって制限。隣接燃料体がなくなっても嵌合部の制約は変わらず、燃料交換装置による取扱いは可能

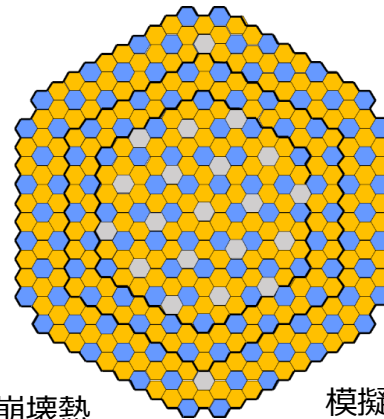
解析コードの適用性

解析コード：REVIAN-3D(高速炉の地震時の炉心群振動挙動を3次元で解析評価する目的で開発)を用いて評価を実施
 開発経緯：次期高速炉を想定し、実寸単体、37体群体系(1/1.5縮尺)、32体列体系(1/1.5縮尺)、313体群体系(1/2.5縮尺)と段階的に規模を拡大して試験を実施。試験と解析とを比較しコードの妥当性を確認
 適用性：水平加振による跳び上がり量低減、流体力による衝突荷重低減、内部流水による跳び上がり量増加等の挙動を概ね再現。衝突現象を含みバラツキが大きい現象であるが、跳び上がり最大量の評価精度は30%程度であり、精度を考慮しても評価基準値を満足。もんじゅの実寸単体試験(運転中)の最大跳び上がり値41mm。停止時は燃料体に作用する上向き流体力が低下し、最大跳び上がり値は20mm程度に半減すると推定され、解析結果は妥当と判断
 開発課題：評価目的に応じて適切な保守性を見込める条件設定を決めるため、影響因子をパラメータとした感度解析等の検討が必要

燃料体取出しができない事態への対応

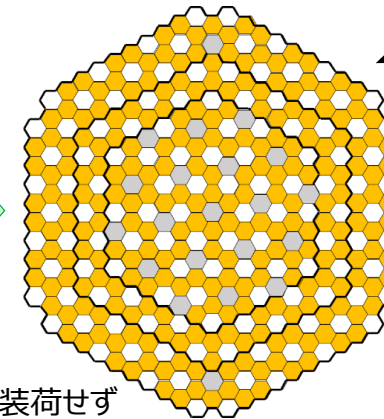
燃料体の取出しができない事態の発生も想定し、その対応策を検討。燃料交換装置動作不能時の復旧方法、過去のNa中からの機器回収知見等を活用すれば燃料体の回収見通しがあることを確認

模擬燃料体の装荷終了時



崩壊熱
9.7 kW

燃料体取出し完了時



模擬燃料体を装荷せず
燃料体を取り出し。
燃料体同士の相互支持
面が減少(6面→3面)

当初設計で想定していない炉心体系

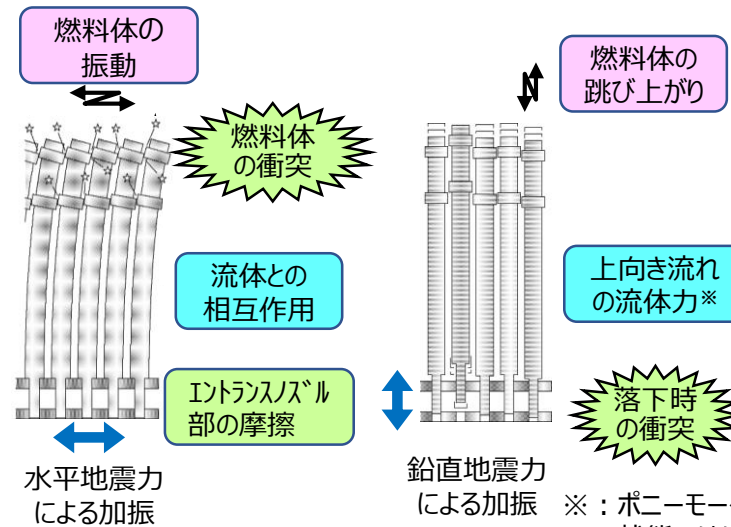
- : 燃料体
- : 制御棒集合体及び中性子源集合体
- : 模擬燃料体(246体)
- : 空き箇所(124体)

(中性子しゃへい体の記載は省略)

地震時の燃料体挙動の解析結果

評価項目	発生値※1	評価基準値
上部パッド衝突荷重 [kN]	112.8 114.6	564
中間パッド衝突荷重 [kN]	5.3 5.5	28
エントランスノズル付け根部曲げ応力 [MPa]	141.1 173.2	440
跳び上がり量 [mm]	<20 <2	40※2

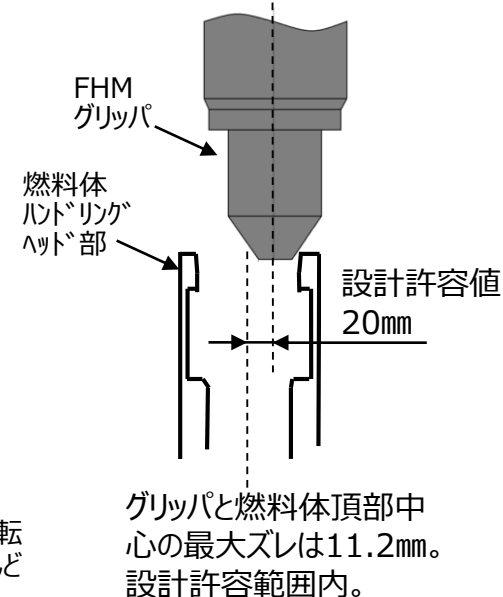
- ※1：2種類の地震動で評価(上段：耐震BCで用いた基準地震動、下段：近隣の軽水炉の基準地震動を参考に策定した地震動)
 ※2：燃料体頂部から燃料交換装置(FHM)のグリッパ案内筒下端面までの距離(干渉回避)。更に45mmでパッド部外れ発生



地震時の燃料体の挙動

※：ポニーモータ運転状態ではほとんど無視できる

燃料体頂部の変位



総合評価

部分装荷となる期間は2か月と短い。部分装荷は原子炉施設の安全性に影響を与えることなく、模擬燃料体取扱い中の不具合発生の可能性を低減。燃料とナトリウムが共存するリスクの早期低減に寄与するものと評価

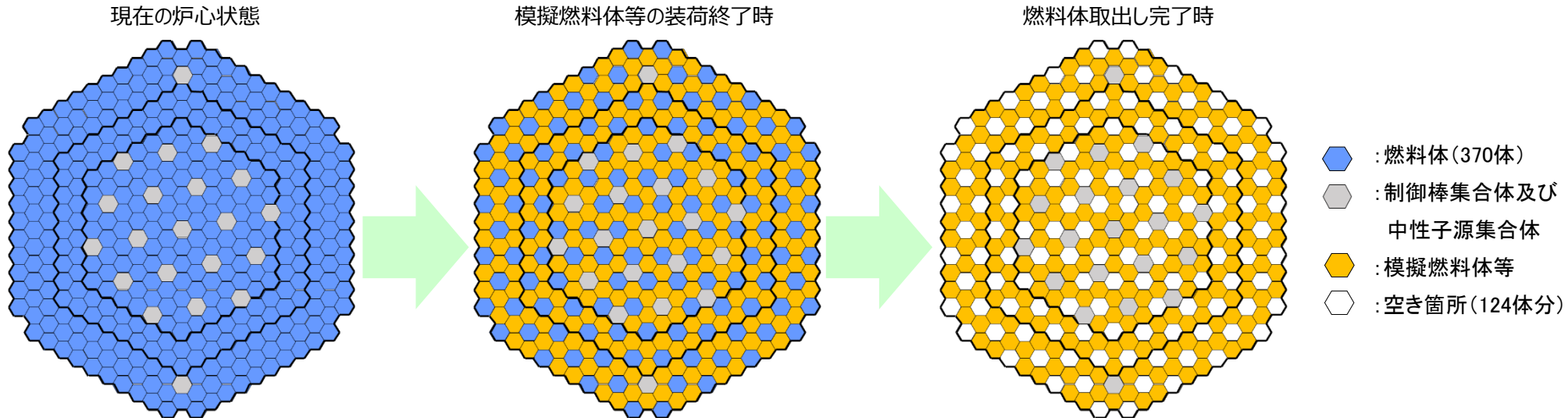
昨年7月22日に廃止措置計画の変更認可申請を行った後、4回のもんじゅ廃止措置安全監視チーム会合（第23回～第26回）及び審査の過程において受けた指摘を踏まえ、模擬燃料体を部分装荷とした場合の影響評価結果を再整理して説明

目次		概要	頁
1	部分装荷の概要と課題の整理	<ul style="list-style-type: none"> 部分装荷は、当初設計と異なり部分的に模擬燃料体を装荷しない 炉心構造の特徴を考え、安全性、燃料体の取出しに影響を与えないことの確認が必要 	3～ 5
2	部分装荷による影響と安全性の確認	<ul style="list-style-type: none"> 「止める、冷やす」の機能については廃止措置段階では影響がなく、「閉じ込める」の機能については地震時の燃料体の健全性を確認 燃料体の取出し機能への影響については、地震時を含めて設備や操作性等の複数の視点から評価し、影響がないことを確認 	6～ 9
3	炉心の振動解析に用いた解析コードの適用性	<ul style="list-style-type: none"> 炉心構造の特徴を踏まえ、地震時の炉心燃料体の複雑な挙動を評価するため、高速炉の炉心の地震挙動を解析するコードREVIAN-3Dを適用 解析コードについては、適用性を確認し、解析コードが地震時の現象を概ね再現できることを確認 	10～ 13
4	燃料体取出しができない事態への対応	<ul style="list-style-type: none"> 想定を超えた事態が発生し、通常の手順による燃料体の取出しができないとなった場合は、原子炉容器の液面を下げて炉内の状況を確認 燃料交換装置の故障時対応、過去のもんじゅや常陽におけるNa中からの機器回収の知見を活用し、状況に応じて対応することによって燃料体の回収が可能と判断 	14
5	まとめ	<ul style="list-style-type: none"> 部分装荷は、原子炉施設の安全性に影響を与えることなく、模擬燃料体取扱いに伴う不具合の発生可能性を低減するとともに、燃料とナトリウムの共存によるリスクの早期低減に寄与 	15
6	コメント一覧、参考資料	<ul style="list-style-type: none"> もんじゅ安全監視チーム会合、面談におけるコメント一覧、燃料体の取出しの概要、解析コードの概要、解析コードの妥当性、ナトリウム中からの機器回収の実績、影響評価一覧等の補足説明資料を添付 	16～ 34

1.1 模擬燃料体の部分装荷とは

- 最終段階の燃料体の取出し期間（2か月）において、炉心から燃料体を取り出した後に装荷する模擬燃料体を全数装荷せず、部分的な装荷状態とする
- 模擬燃料体取扱いに伴うプロセスを簡略化し、不具合の発生可能性を低減、また、放射性廃棄物の発生を低減することにより、燃料体取出し作業やその後の廃止措置全体を円滑に推進

模擬燃料体の装荷位置（中性子しゃへい体の記載は省略）



部分装荷を実施するための課題

部分装荷においては、隣接する燃料体の数が6体から3体に減少し、燃料体を支える面が6面から3面に減少することから、もんじゅの当初設計において考慮していない炉心体系となるため、原子炉施設の安全性を確保する機能「止める、冷やす、閉じ込める」について、また、燃料体の取出しへの影響について、確認が必要

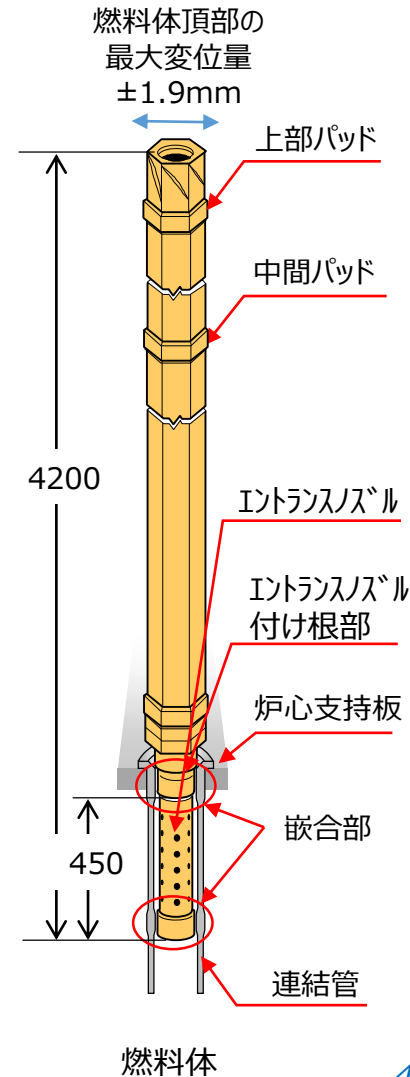
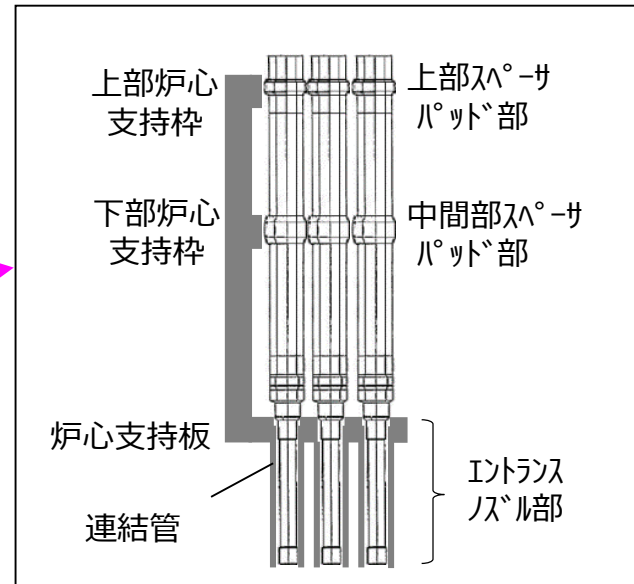
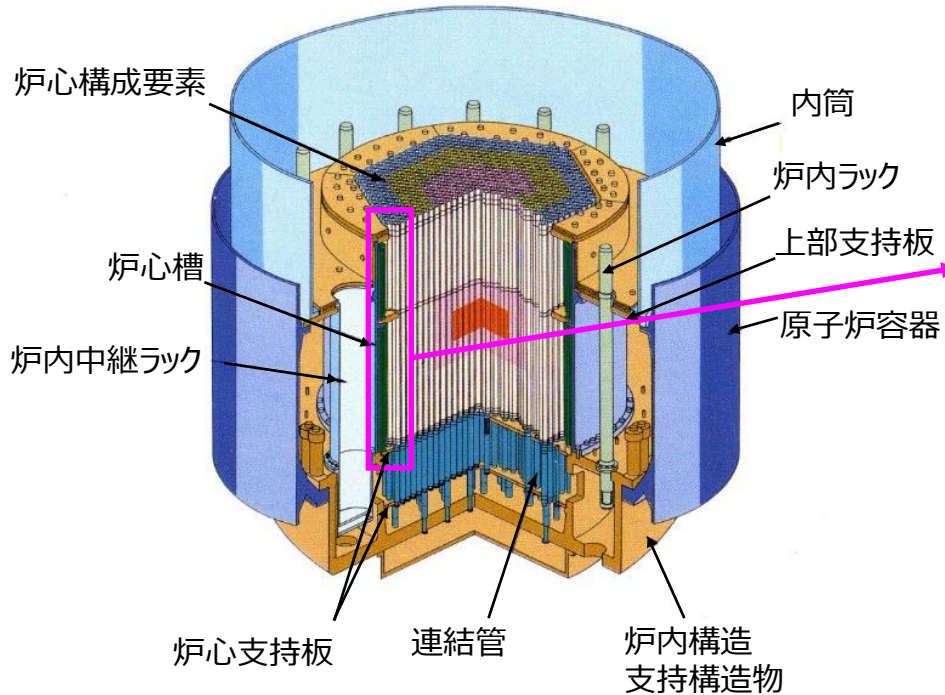
1. 部分装荷の概要と課題の整理

1.2 もんじゅの炉心構造の特徴

もんじゅの燃料体は、炉心支持板の連結管に差し込まれて自立しており、地震時には隣接する燃料体の六角面が互いに支え合って炉心体系を維持する設計

部分装荷では、この当初設計とは異なり、燃料体が支え合う面が6面から3面に減少した状態で炉心体系を維持*

地震の際には、1体の燃料体を支える隣接燃料体の数が減ることから、耐震性の確認が必要



* 部分装荷において、燃料体を支える隣接燃料体の面が6面から3面に減少するが、燃料体頂部の傾きの最大値は、嵌合部の隙間によって制限されていることから、部分装荷をしない場合と変わらず、±1.9mm(右図参照)

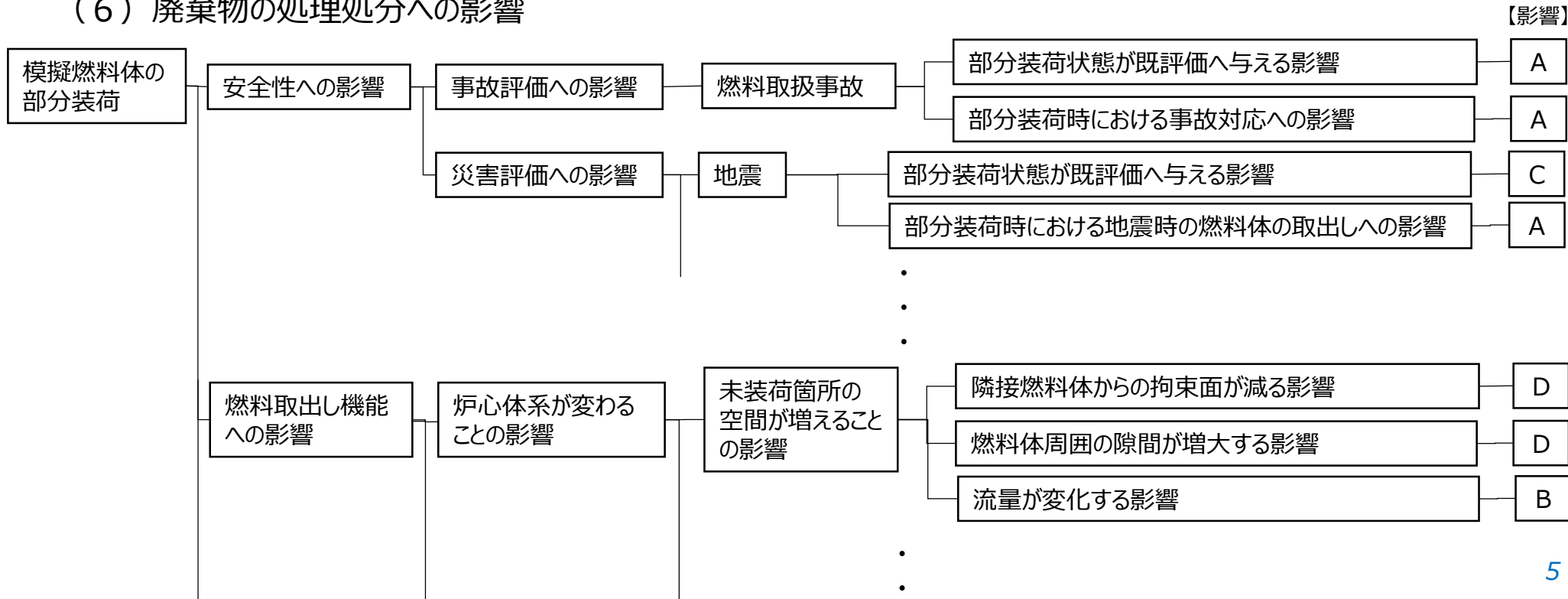
1. 部分装荷の概要と課題の整理

1.3 部分装荷による影響の把握 (コメント回答No.1)

部分装荷による影響を把握するため、原子炉施設の安全確保の大前提である「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」の機能を念頭に、以下の視点から影響要因を網羅的に抽出して体系的に整理し(【参考15】参照)、必要となる評価を実施

- (1) 安全性への影響 (事故・災害、大規模損壊への対応)
- (2) 燃料取出し機能への影響
- (3) 冷却機能への影響
- (4) ナトリウム取扱い機能への影響
- (5) 放射線防護機能への影響
- (6) 廃棄物の処理処分への影響

【凡例】
 A: 原子炉施設の安全性の観点から影響ない
 B: 燃料体の取出しの観点から影響ない
 C: 原子炉施設の安全性の観点で確認が必要
 D: 燃料体の取出しの観点で確認が必要
 E: 廃棄物が低減される



2.1 部分装荷が与える影響の整理 (コメント回答No.1)

模擬燃料体が部分的に装荷されない影響を通常的全装荷状態と比較して整理すると、その概要は以下の通り

1. 「止める」機能への影響

- ・ 制御棒が挿入状態にあり、燃料体数が減少して制御棒を引き抜いても臨界に至ることはないことから、部分装荷が「止める」機能に影響を与えない

2. 「冷やす」機能への影響

- ・ 廃止措置開始時点において、冷却機能を喪失しても燃料被覆管の中心温度が制限温度の675℃を超えないことから、被覆管が損傷しないことを確認
- ・ 部分装荷を実施する時点では、炉心に残る燃料体の数が約1/3に減少しており、被覆管の温度が下がる方向になるため、冷却機能を喪失しても燃料の健全性を維持(【参考2】参照)

3. 「閉じ込める」機能への影響

- ・ 部分装荷により、燃料体が互いに支え合う隣接する燃料体の数が6体から3体に減少するため、地震時の炉心燃料の挙動が変わることから、燃料体の地震時の安全性を確認する⇒2.2

4. 燃料取扱い機能への影響

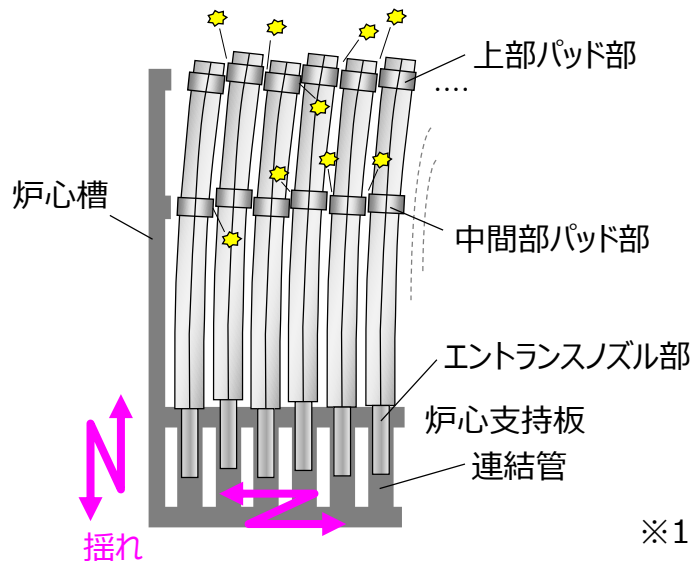
- ・ 地震時に燃料体が跳び上がることから、部分装荷における跳び上がり量を評価し、燃料体同士の鉛直方向のズレ(パッド部の外れ)や燃料交換装置等との干渉の有無を確認する ⇒2.4 (1)
- ・ 部分装荷により、模擬燃料体を装荷しない部分の冷却材流量が増加することによる燃料体の取出し機能への影響を確認する ⇒2.4 (2)
- ・ 部分装荷により、隣接する燃料体が減少するため、燃料体頂部の位置が変位する可能性があることから、この場合の燃料体の取出し機能への影響を確認する⇒2.4 (3)
- ・ 部分装荷により、模擬燃料体を取り扱うが操作が不要となるため、燃料取扱設備の操作手順が変更となることから、この影響について確認する ⇒2.4 (4)

2.2 部分装荷における耐震性の確認

地震時の燃料体の挙動(地震時による振動、燃料体同士の衝突、跳び上がり)は、高速炉用に開発された3次元で炉心の振動を解析するコード(REVIAN-3D、【参考4】参照)を用いて定量的に評価

- 燃料体に発生する荷重/応力が小さいことから燃料体の構造健全性が維持される
- 跳び上がり量が小さいことから他設備と干渉しないため、燃料体の取出し機能に影響しない
(最大跳び上がり量の評価精度は±20～30%であり、精度を考慮しても評価基準値を下回る)
- 地震時に燃料体が炉心支持板に着床する時の衝突荷重を想定しても、ラッパ管及び燃料被覆管は、座屈しない

地震時の燃料体挙動の解析結果



地震時の炉心の挙動 (模式図)

評価項目	発生値※1	評価基準値
上部パッド衝突荷重[kN]	112.8 ----- 114.6	564※2
中間パッド衝突荷重[kN]	5.3 ----- 5.5	28※2
エントランスノズル付け根部曲げ 応力[MPa]	141.1 ----- 173.2	440※2※3
跳び上がり量 [mm]	<20 ----- < 2	40※4

※1：初回の廃止措置計画認可申請で用いた2種類の地震動で解析した結果（上段：耐震BCで用いた基準地震動Ss-D、下段：近隣の軽水炉の基準地震動を参考に策定した地震動）を記載

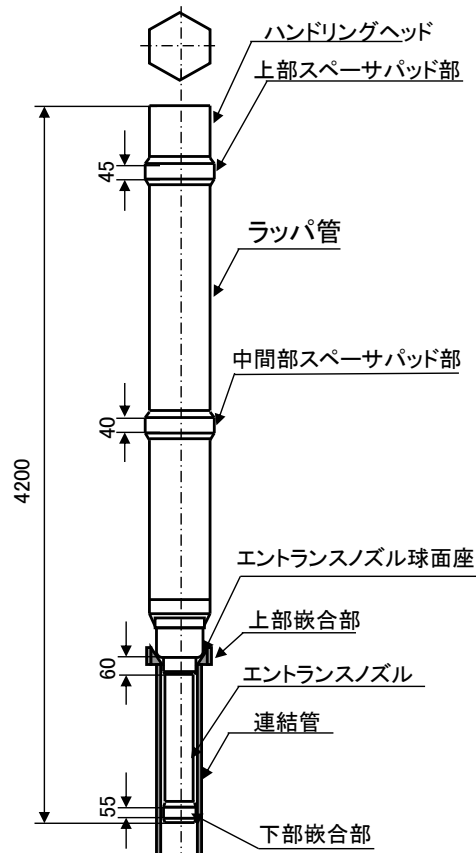
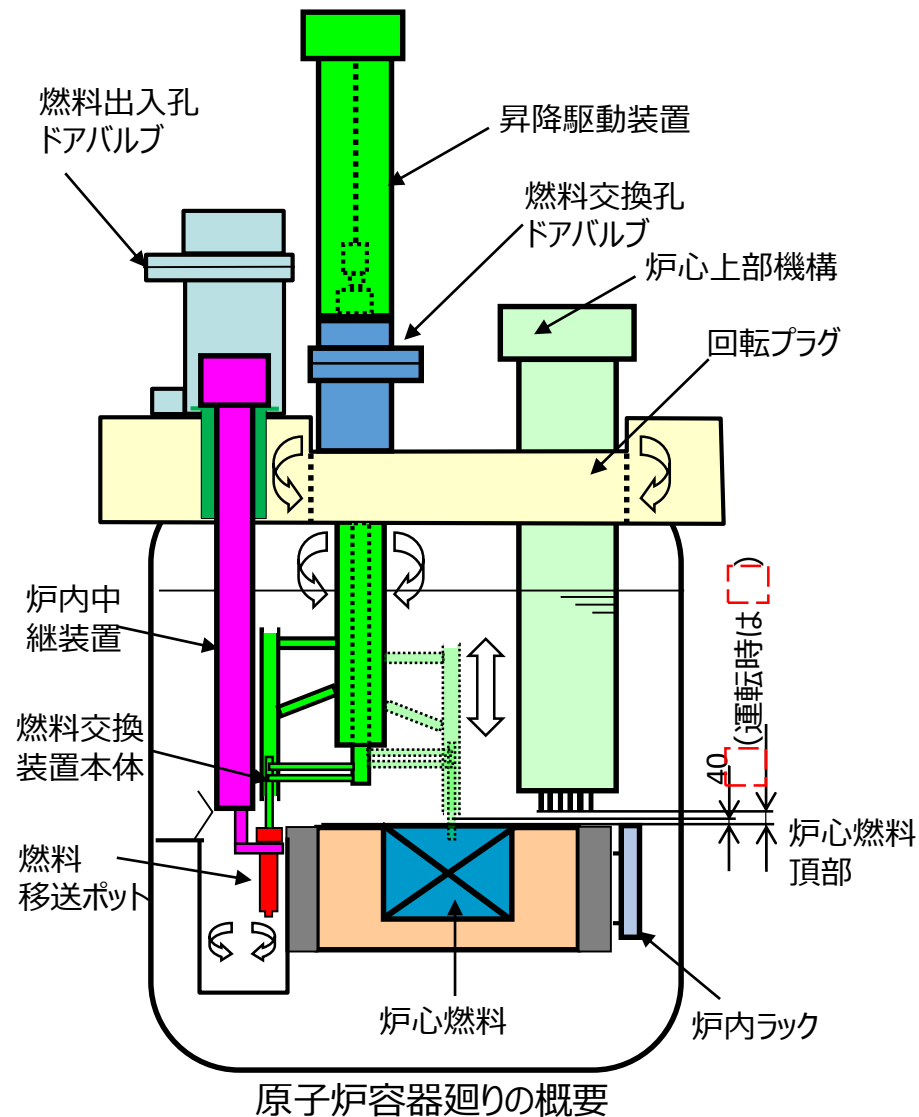
※2：評価基準値は、当初設計及び日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格の考え方（供用状態D）における応力評価を基に設定

※3：供用状態Aの場合、223[MPa]

※4：燃料体頂部から燃料交換装置のグリッパ案内筒下端面までの距離(干渉回避)については次頁参照 7

2. 部分装荷による影響と安全性の確認

2.3 燃料体が跳び上がった場合の影響 (コメント回答No.19、20)



跳び上がり量	影響
40mm 超	燃料体の取出し中：ホールダウンアームのグリップ案内筒下端面に燃料体頂部が衝突
45mm 超	燃料体の上部パッド部同士の外れが発生
[] mm 超	燃料体の取出し期間外：燃料体頂部が、炉心上部機構下端面に衝突
[] mm 超	燃料体エントランスノズルと連結管の嵌合部の外れが発生
[] mm 超	燃料体の取出し時：燃料体頂部が、炉心上部機構下端面に衝突

燃料体の跳び上がり量が40mm未満であれば、燃料交換装置との干渉はない

2.4 部分装荷における燃料取出し機能への影響確認 (コメント回答No.1)

(1) 地震時の影響

- 燃料体の最大跳び上がり量が20mm程度であるため、燃料交換装置の下端面と干渉しないことから、燃料体の跳び上がりが燃料体の取出し機能に影響を与えない(前頁参照)

(2) 流量変化の影響

- 全装荷状態においても、燃料体を引き上げれば、その部分の流量が増加(図1参照)
- 部分装荷において模擬燃料体を装荷しない部分の流量が増加しても燃料交換装置へ与える影響は、全装荷時の燃料交換と変わらない
- また、炉心に装荷されている燃料体数が減少すると、炉心部の流動抵抗が減少し、主冷却系の循環流量が増加する。一方、循環ポンプのポニーモータは定回転数運転のため、モータ負荷がほとんど増加しないことからポンプの運転継続が可能であり、冷却材の循環を維持

(3) 燃料体頂部変位の影響

- 部分装荷における燃料体頂部の変位は、エントランスノズル嵌合部によって制限されており、最大で±1.9mm
- これに炉心燃料のアドレス位置のずれ7.4mmを考慮すると、燃料交換装置(FHM)グリッパ中心と燃料体ハンドリングヘッド中心の芯ずれは、最大で11.2mmとなり、設計許容値の20mm以内に留まる(図2参照)

(4) 操作性への影響

- 操作手順の変更やこれに伴う操作プログラムの変更が必要
- ⇒経験している操作の一部を省略するものであることから操作ミスが発生する可能性は低い
- ⇒操作プログラムの変更における誤り発生防止については実動作試験等によって対応可能

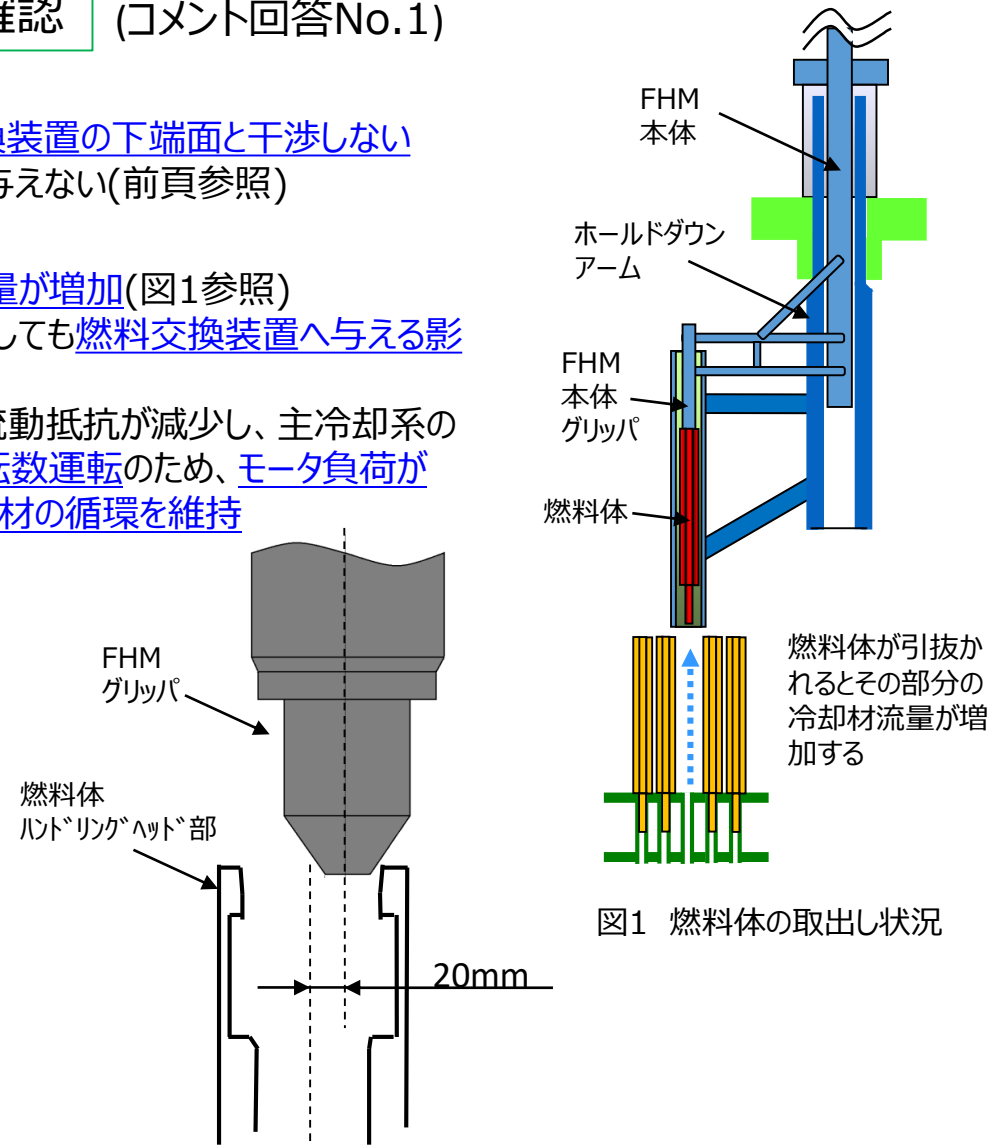


図1 燃料体の取出し状況

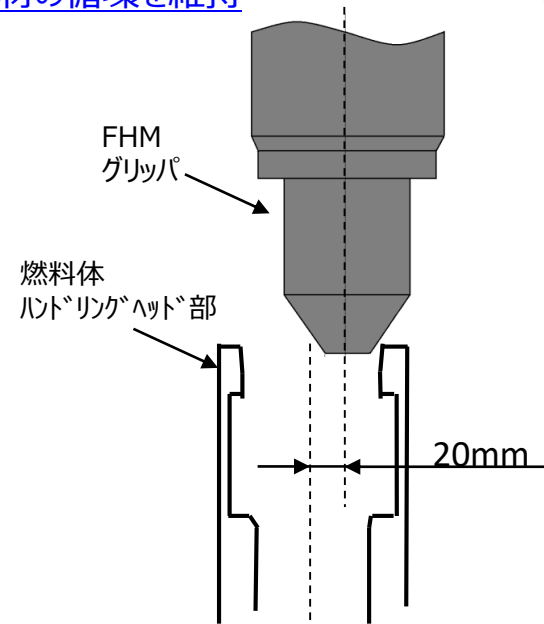
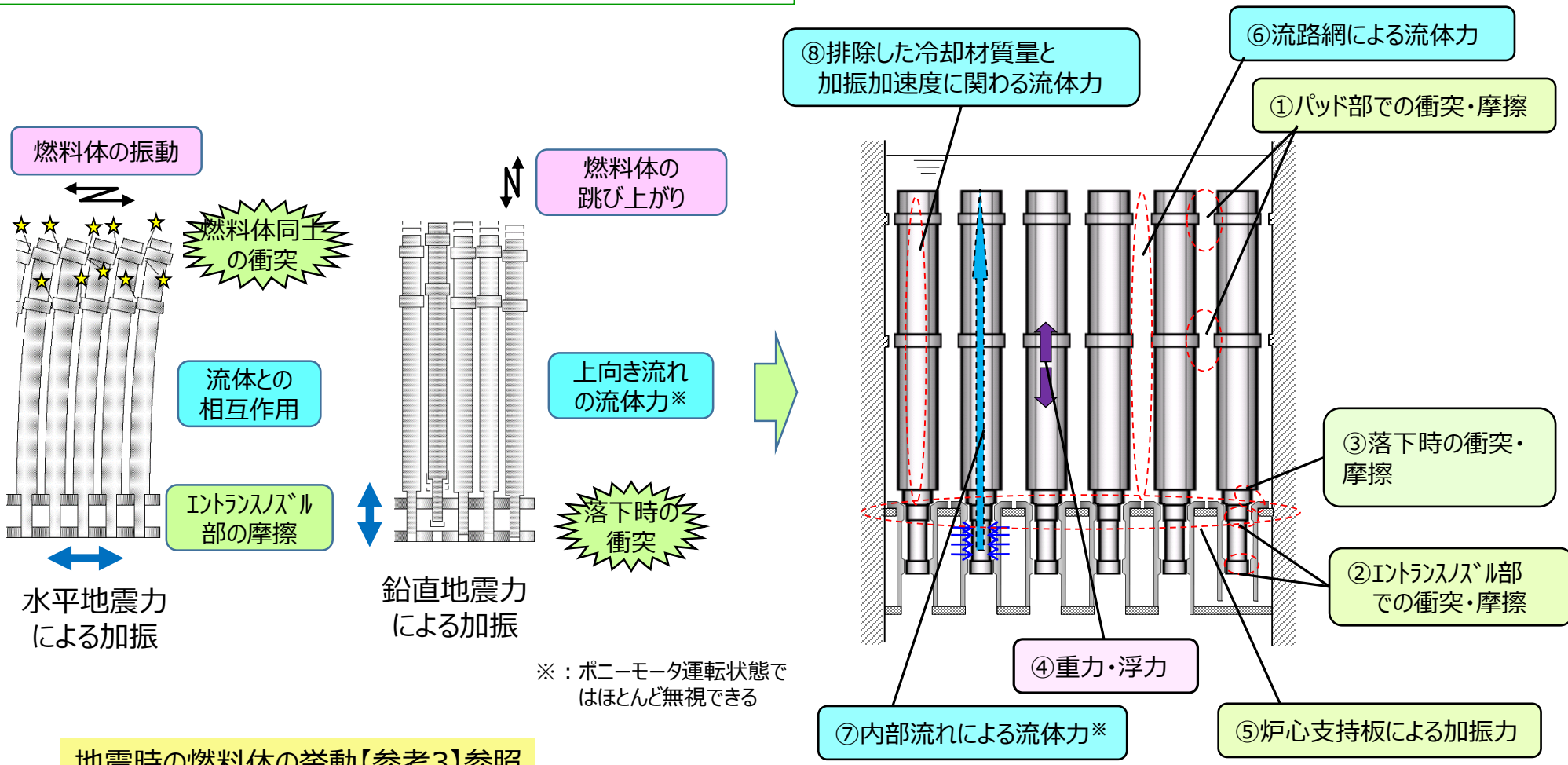


図2 FHMグリッパと燃料体ヘッド部の位置関係

3. 炉心の振動解析に用いた解析コードの適用性

3.1 地震時の燃料の挙動と解析で考慮する荷重等

(コメント回答No.3)



地震時の燃料体の挙動【参考3】参照

解析では上図に示す荷重や力を考慮して評価

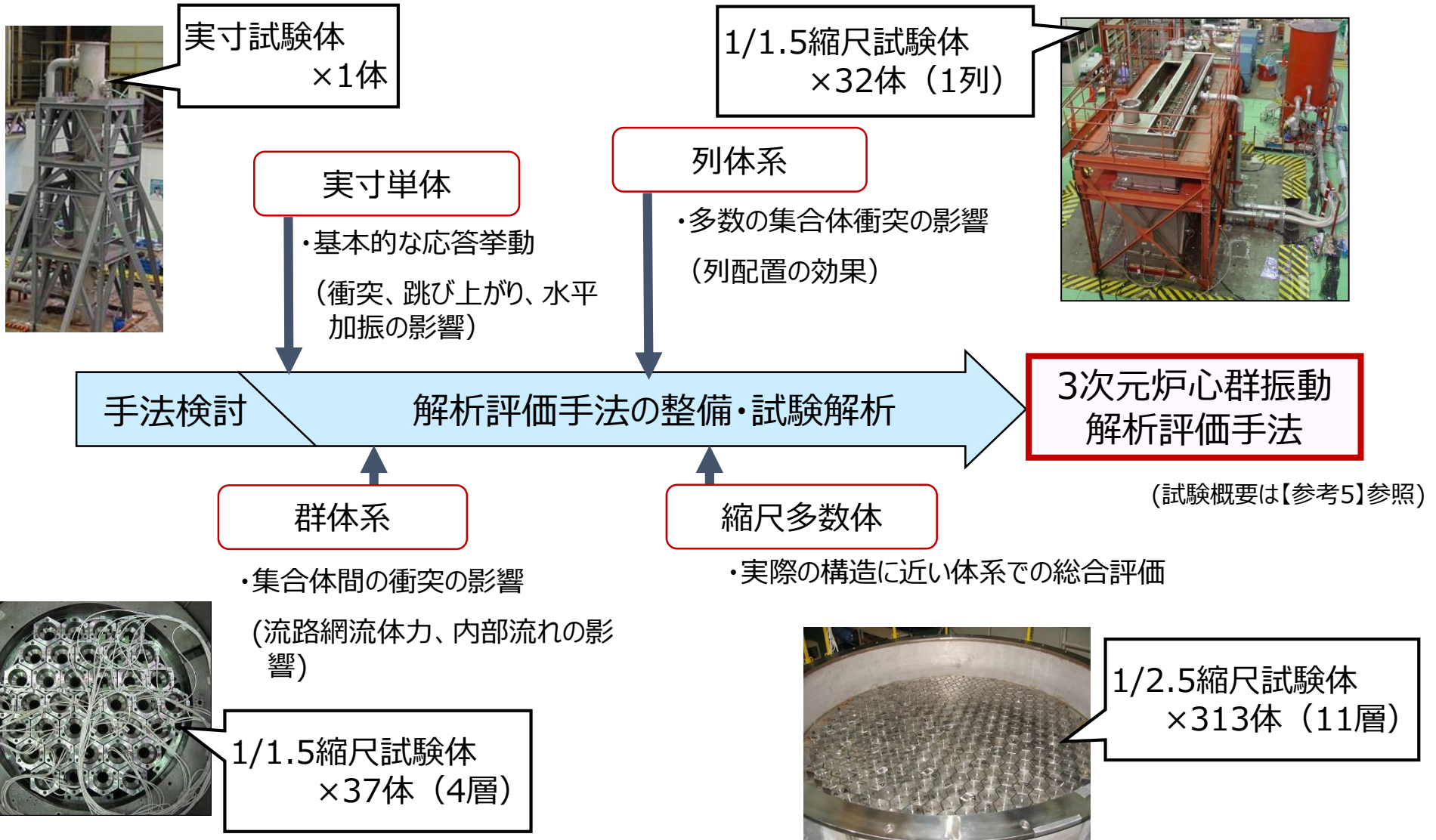
- 3次元炉心群振動解析コード (【参考4】参照) を用いて部分装荷状態を模擬した条件における評価を実施
- 解析コードの適用性(妥当性)を確認しておくことが重要

3. 炉心の振動解析に用いた解析コードの適用性

3.2 段階を踏んだ解析コードの開発

(コメント回答No.2、16)

実験体系を単純な体系から実際に近い体系へと段階的に拡充し、それぞれの段階で解析コードの妥当性を確認



- 試験結果と解析結果との比較 (コメント回答No.2、10、16、17、18、22)
試験結果と解析結果を比較すると、解析コードは、群振動挙動の特徴である
 - ①水平加振による跳び上がり量の低減効果(【参考6】参照)
 - ②流路網流体力による衝突荷重の低減効果 (【参考7】参照)
 - ③内部流れにより跳び上がり量が増加する効果(【参考8】参照)
 - ④最外周付近で水平方向の衝突荷重が増大する列配置の効果(【参考9】参照)

を模擬できており、現象を概ね再現*

*精度は、跳び上がり量：±20～30%、衝突：0～60%

- 多数体系へ解析コードを適用した場合の保守性
解析による跳び上がり評価に関し、試験結果に比べ燃料体数が増加するほど保守側の評価結果を与えること(【参考11】参照)については、定性的には燃料体の中心軸(鉛直軸)廻りの回転を考慮していないことが要因と推定されるが、定量的には感度解析等による確認が必要
- 解析コードの信頼性向上にむけた課題 (コメント回答No.22)
評価項目(跳び上がり量、衝突荷重等)に応じて適切な保守性を確保できるパラメータもしくは係数の設定方法について、感度解析等による検討が必要

「主な影響因子」

- 燃料体中心軸(鉛直軸)廻りの回転の影響
- 実機雰囲気条件の相違(水/Na、熱膨張)の影響
- 材料物性値に対するパラメーターの影響
- 加振波による影響

等

3.3 試験結果を用いて跳び上がり量評価結果の妥当性を傍証

(コメント回答No.25)

耐震バックチェックで実施したもんじゅの燃料体単体加振試験結果を用いて燃料体の最大跳び上がり量を推定し、評価結果の妥当性を傍証

- ①もんじゅ燃料単体加振試験(運転時の炉心流量を模擬)における燃料体の跳び上がり量は、最大加速度 35m/s^2 (Ss-Dの最大加速度 31m/s^2 と同等)において41mm
- ②廃止措置段階においては、炉心流量が約1/10に低下しているため、燃料体に作用する上向きの流体力が低下し、見かけの重力加速度が0.5Gから0.9Gに増加することから、跳び上がり量は、20mm程度に半減すると推定※1
- ③今回の解析コードによる評価については、燃料体の最大跳び上がり量が最大20mm未満であり、加振条件等の違い※2を考慮すれば、跳び上がり量が低めになる方向であることから、今回の解析コードによる評価の結果は、妥当と判断

※1:衝突による跳び上がり高さは周囲からの干渉の影響等を除けば簡易的に以下の式で計算できる

$$h = \frac{v^2}{2g'}$$

h:跳び上がり高さ
v:衝突直後の速度
g':見かけの重力加速度

炉心流量の低下に伴い、見かけの重力加速度が0.5Gから0.9Gまで増加することから概ね半減 ($0.5/0.9 = 0.55$ 倍) する。

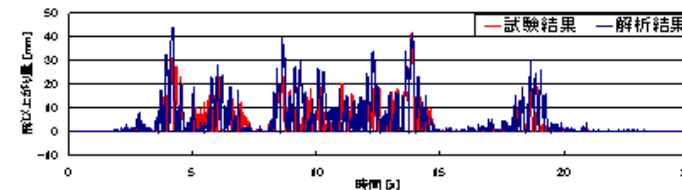
※2:単体より群体のほうが水平変位が大きく、エントランスノズル部の摩擦による跳び上がり量がより抑制される方向

4(4). ⑥ 炉心構成要素飛び上り解析コードの検証

集合体の単体加振試験結果を用い解析コードを検証
解析は水の物性値を使用

検証結果

	最大値	二乗和平方根
試験結果	41.0 mm	5.9 mm
解析結果	43.9 mm	8.6 mm



試験装置全景

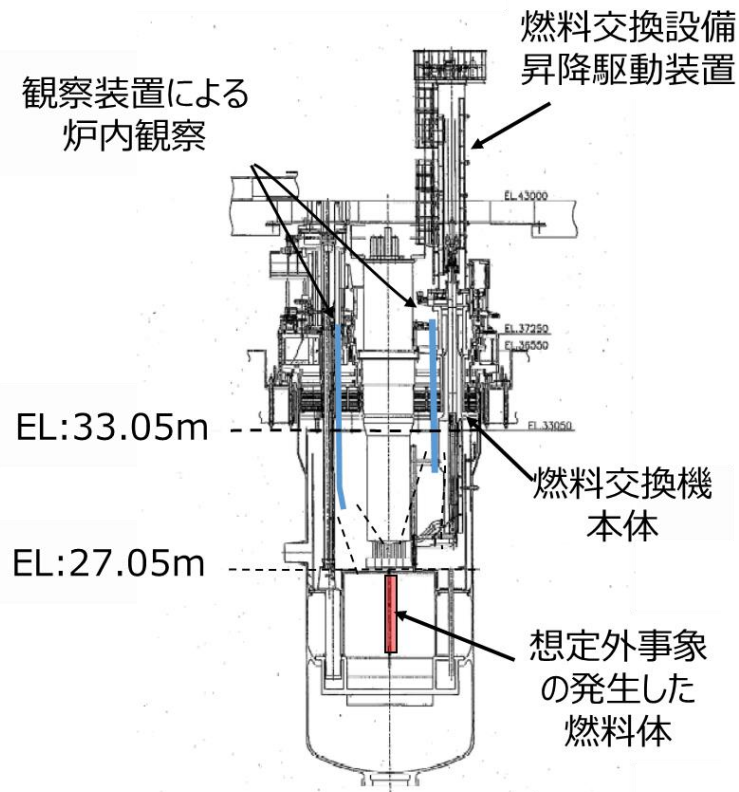
炉心構成要素飛び上り解析結果は、単体加振試験結果と精度良く一致しており、解析コードは妥当である

出典：耐震バックチェック説明資料（原安委WG2第47-8号）

- ① 燃料体の取出しができない事態の発生も想定し、その対応方策を検討
- ② 部分装荷開始時点において炉心全体の崩壊熱が9.7kWと低く、原子炉容器内の液面を下げ、炉内の状況を確認することが可能
- ③ 燃料交換装置動作不能時の補修・復旧方法、もんじゅや常陽におけるNa中からの機器(炉内中継装置、MARICO-2 (材料試験片を照射する実験装置))回収の知見等を活用すれば、燃料体を回収することができるものと判断

詳細は【参考12～14】参照

炉内の観察



回収までの流れ

検査孔や予備孔を開放、観察装置を挿入

燃料体の発熱が小さいことから、炉容器内の液面を下げ、内部状況を観察把握

観察結果を元に、回収に最適な装置を設計・製作

モックアップ試験・訓練を経て、実機に適用し燃料体を回収

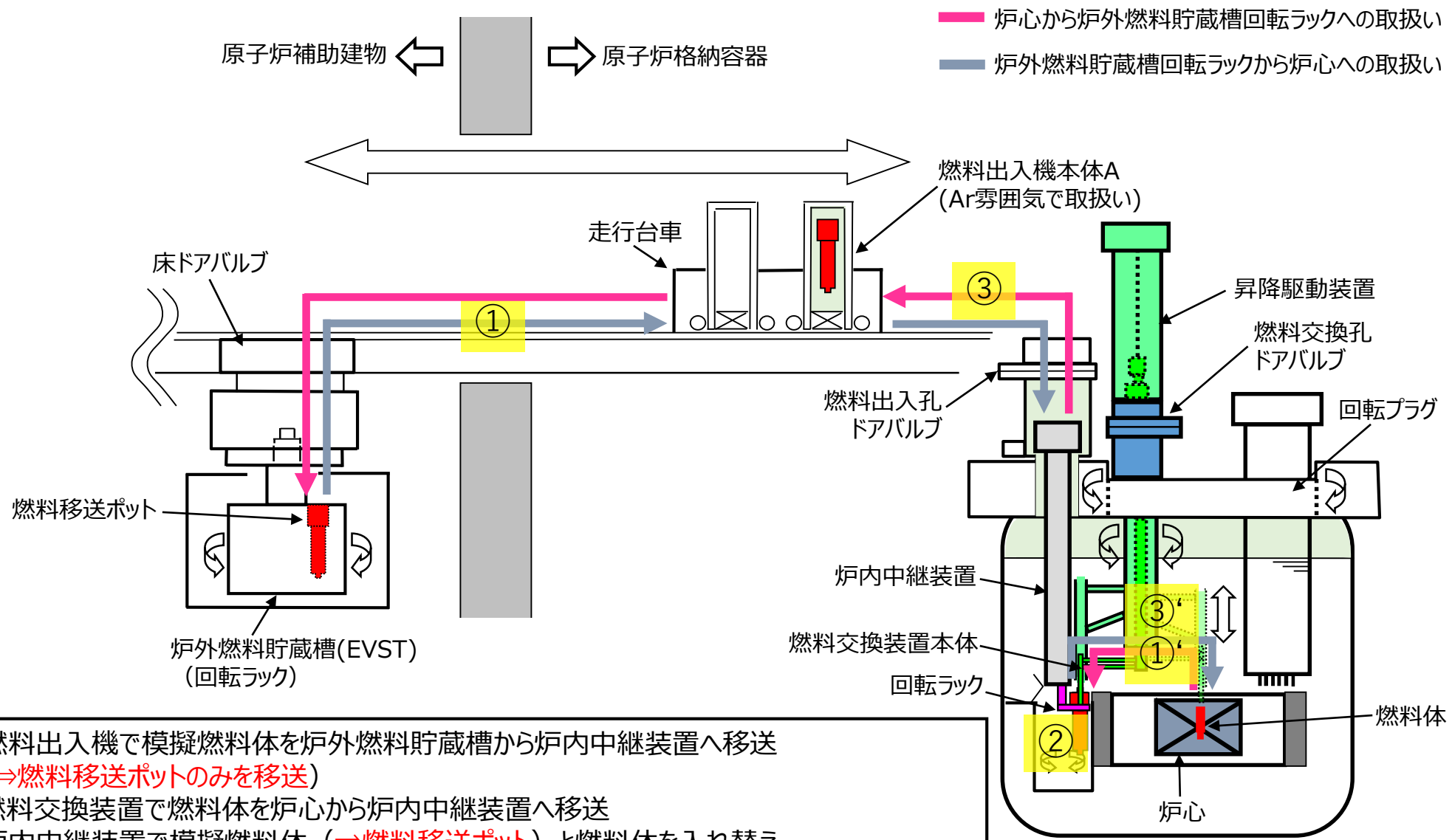
- ①もんじゅの燃料体は、炉心支持板の連結管に差し込まれて自立しており、地震時には隣接する燃料体の六角面が互いに支え合って炉心体系を維持する設計
- ②部分装荷においては、隣接する燃料体の数が6体から3体に減少し、燃料体が支え合う面が6面から3面に減少するため、炉心体系が変化
- ③当初設計においては考慮していない炉心体系となることから、部分装荷による原子炉施設の安全性を確保する機能（「止める、冷やす、閉じ込める」）、また、燃料体の取出し機能（燃料体の頂部変位、冷却材流量変化、地震時の跳び上がり等）に影響を与えないことを確認
- ④複雑な地震時の燃料体挙動については、解析コードによって概ね現象を再現でき、その解析結果から燃料体の健全性、燃料体の取出しに影響を与えないと評価
- ⑤想定を超えて燃料体の取出しができない事態が発生しても、燃料体を回収できる見通しがあることを確認
- ⑥部分装荷となる期間は2か月と短い。上記①～⑤より、総合的な評価として、部分装荷は、原子炉施設の安全性に影響を与えることなく、模擬燃料体の取扱いに伴う不具合の発生可能性を低減するものであり、燃料とナトリウムが共存するリスクの早期低減に寄与
- ⑦今後、本日の説明内容を踏まえて廃止措置計画変更認可申請の補正を申請

もんじゅ安全監視チーム会合、面談におけるコメント一覧

No.	コメント内容
第25回もんじゅ安全監視チーム会合時のコメント	
1	部分装荷における影響の洗い出しについては、燃料取出し作業に限定せず、広範囲に行って、検討項目に抜けが無いようにすること。
2	評価手法の妥当性は、実験と解析の比較に基づいている。『解析により実験を再現できた』と判断した場合の根拠や考え方を説明すること。
3	炉心構成要素単体及び群振動としての振動モードは、衝突あるいは跳び上がりの有無、フル装荷から部分装荷とすることにより変化すると思われる。これらをどこまで正確に模擬しているのか説明すること。
4	実験ではX方向単独加振のみであり、衝撃力の計測もX方向しか測定されていない。X、Y同時加振の場合は挙動が複雑になると思われるが、本評価手法は十分確認できるのか、説明すること。
5	上下変位応答の検証にあたり、実寸大試験体系と37体群体系で水中と気中の跳び上がり量の傾向が逆転していることの理由を説明すること。
6	32体列体系、127体群体系、313体群体系でも跳び上がり挙動に係る実験を行っているのであれば、その実験の条件、結果、考察などを説明すること。
7	各実験装置の試験体は次期高速炉（JSFR）における燃料要素を模擬しているため、この手法をもんじゅ体系に適用するにあたり、炉心構成要素の種類、振動特性や物性等に関する相違をどのように考慮したのか説明すること。また、評価手法に組み込まれている物性値は試験体に基づく実測値が含まれるが、もんじゅへの適用にあたり同じ項目の測定データを取得したのか、説明すること。
8	群振動の入力条件となる炉心支持板の地震時時刻歴応答について、その評価手法やモデルと合わせて、その時刻歴データについても具体的に示すこと。 また、これに対する実験体系の入力条件に関する妥当性を説明すること。
9	もんじゅ部分装荷状態に関する評価に関し、313体群体系で部分装荷を模擬した実験を実施しているのか。実施しているのであればその内容を説明すること。
10	跳び上がり量を判断基準と比較する際に、考慮すべき誤差や不確かさの項目、値を説明すること。

No.	コメント内容
11	炉心支持板から燃料体/模擬体への上下方向の地震動は全て同位相で入力しているが、これは実機とは異なる状態である。この影響について保守側となっているかどうかを説明すること。
12	フル装荷/千鳥装荷で、炉心支持板の上に乗っている集合体の数が変わることで炉心支持板にかかる荷重重量が変わり、炉心支持板の地震時応答性が異なってくる。この観点でどちらが保守側か説明すること。
13	千鳥では、炉心の流量配分が変わってくる。集合体/模擬体への上向き流体力が変わる。この影響について説明すること。
14	部分装荷時の地震時構造健全性評価において、耐震バックチェック時に策定した地震動を用いた評価と軽水炉参考波を用いた評価について、飛び上がり量の評価結果に1桁の差がある。この理由と妥当性を説明すること。
15	REVIAN-3DのV&Vのうち、Verificationに関するものについて、当該解析コードと検証モデルのコードとしての整合性等を整理して説明すること。
面談時の追加コメント	
16	解析で試験を概ね再現ができたとしているが、その考え方を説明すること。
17	燃料体の跳び上がり評価ではどのような保守性を考慮しているのか説明すること。
18	極値統計を分かり易く説明すること。
19	想定を超えた燃料体の跳び上がりが発生した場合の影響を説明すること。
20	パッド外れが起きた場合について、試験結果を含め説明すること。
21	炉心支持板の変位はどの程度となるのか説明すること。
22	本解析手法の限界（適用できる範囲）について説明すること。また、本解析手法を汎用的に使用する際の課題は何か説明すること。
23	刺激係数の値からは炉心重量が小さい様に推察される。炉心支持板の応答解析が適切か確認すること。
24	燃料体跳び上がり評価における不確かさ（加振波含む）はどのように評価しているか説明すること。
25	燃料体の跳び上がり量評価について、解析結果が概ね妥当であることを試験結果から分かり易く説明するとどうなるか示すこと

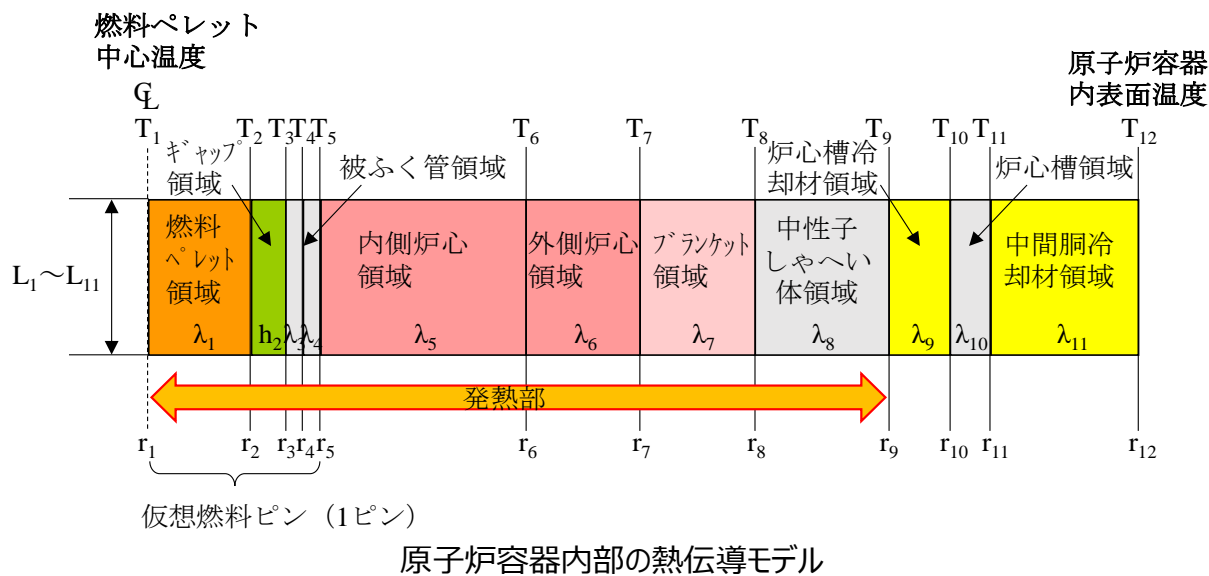
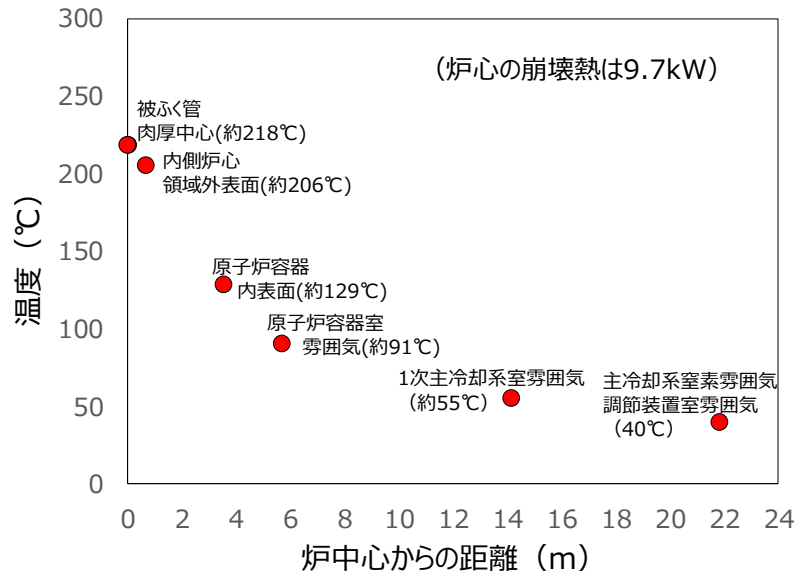
以下、参考資料



- ① 燃料出入機で模擬燃料体を炉外燃料貯蔵槽から炉内中継装置へ移送 (⇒燃料移送ポットのみを移送)
- ①' 燃料交換装置で燃料体を炉心から炉内中継装置へ移送
- ② 炉内中継装置で模擬燃料体 (⇒燃料移送ポット) と燃料体を入れ替え
- ③ 燃料出入機で燃料体を炉内中継装置から炉外燃料貯蔵槽へ移送
- ③' 燃料交換装置で模擬燃料体を炉内中継装置から炉心へ装荷 (⇒当該プロセスは不要)

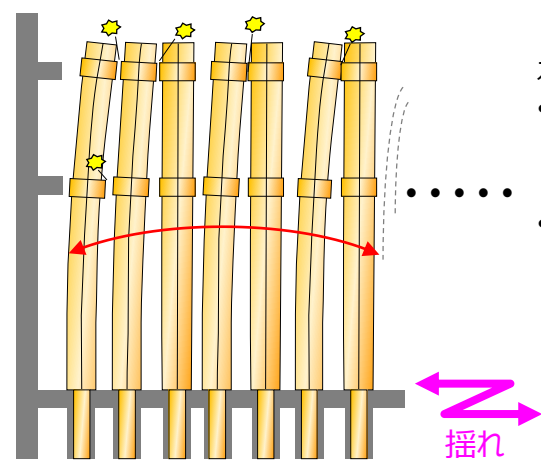
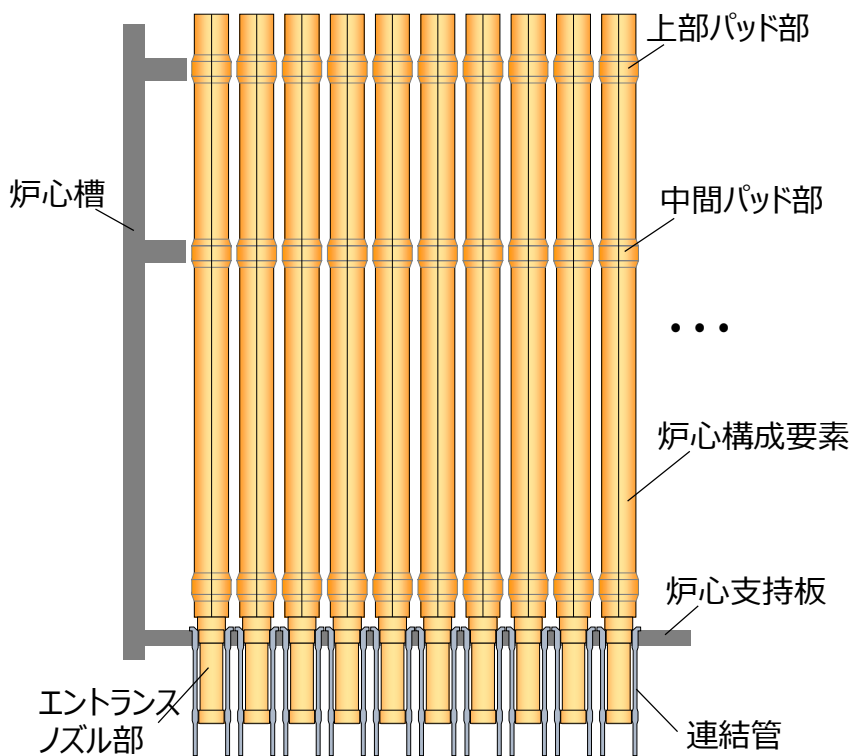
【参考2】 部分装荷における冷却機能への影響確認

- ① 部分装荷開始時点の炉心燃料の崩壊熱は9.7kW。炉内の熱移送を周方向への熱伝導のみと保守的な仮定を置き、冷却機能喪失時の燃料被覆管肉厚中心最高温度を評価すると約218℃。燃料取出し期間中のナトリウム温度200℃と比較して、ごくわずかな温度上昇にとどまる
- ② 部分装荷状態では、模擬燃料体未装荷箇所に冷却材が多く流れ、燃料体に流れるナトリウム量が少なくなる。この流量を概算し、燃料体装荷部を流れる冷却材の温度上昇を評価すると温度上昇は1℃未満



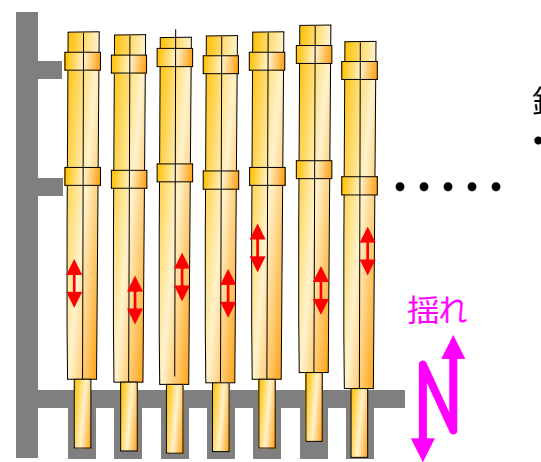
冷却機能喪失時の燃料体の温度評価

- 一般に高速炉の炉心を構成する炉心構成要素（燃料体、遮へい体等）は、六角形の外筒に覆われて、六角形配列により稠密に配置される。高速炉炉心は高温で運転されることから、炉心構成要素の長手方向の熱膨張を拘束しないために、炉心支持板に設置された連結管に差し込まれ自立し、隣接する炉心構成要素とはわずかな隙間（ギャップ）を設けて配置される
- 地震時には、これらの炉心構成要素が隣接する要素と衝突等によりお互いがお互いの挙動に影響し合うため、一連の「群」として振動挙動を評価する必要がある



水平方向の挙動模式図

- 水平方向の挙動
- 炉心支持板（連結管）に差し込まれ自立していることから、単体では倒立振り子のような動きをする
 - 隣接する要素とわずかな隙間（ギャップ）によって配置されていることから、水平方向の揺れが大きいと、隣接する要素と衝突する

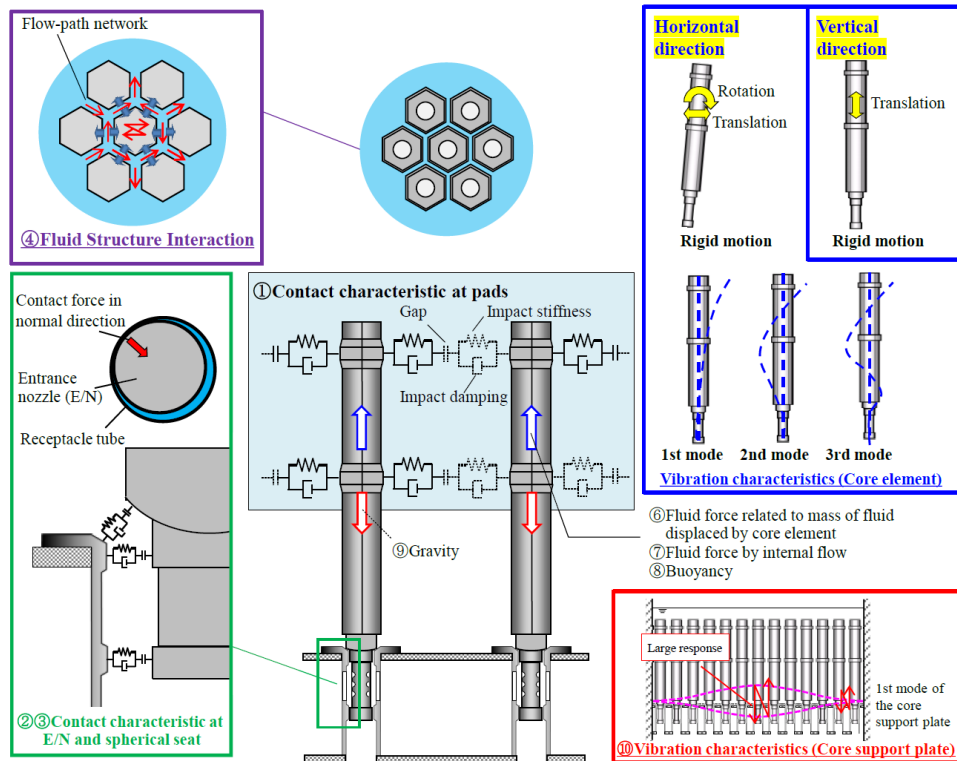


鉛直方向の挙動模式図

- 鉛直方向の挙動
- 炉心支持板（連結管）に差し込まれるが固定していないことから、鉛直方向の揺れが大きい場合には、跳び上がることがある

3次元炉心群振動解析

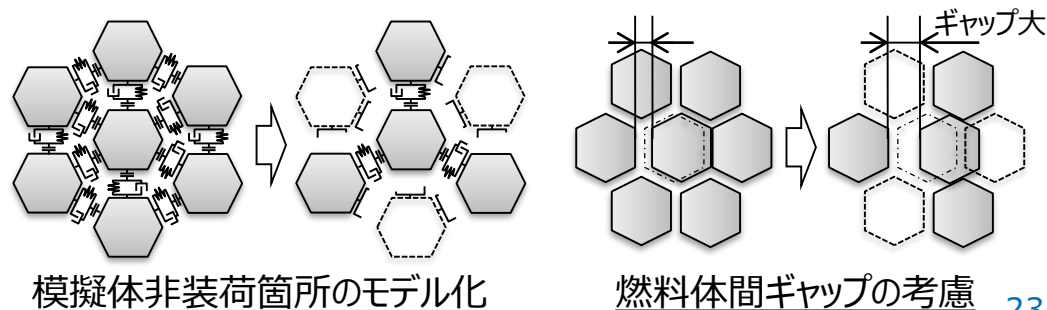
- 地震時における高速炉の炉心、炉心構成要素、炉心支持構造物等の炉心群振動挙動(前頁参照)の把握を目的とし、群体系における衝突・摩擦、及び流体-構造連成を考慮した耐震解析手法
- 以下の通り、部分装荷状態を模擬して評価を実施



3次元炉心群振動解析モデル

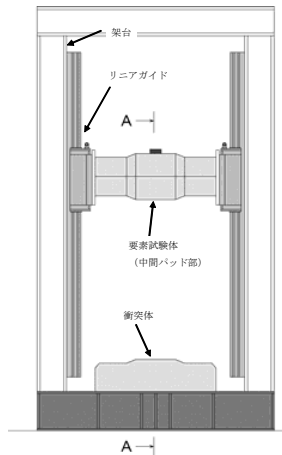
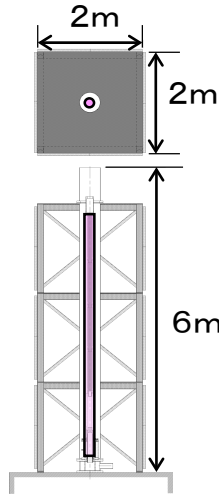
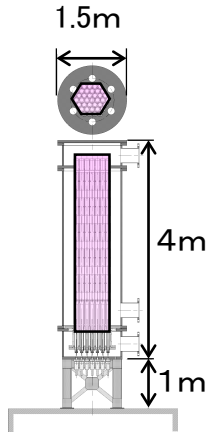
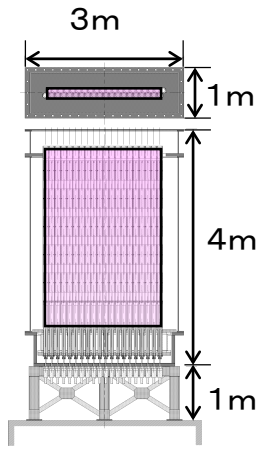
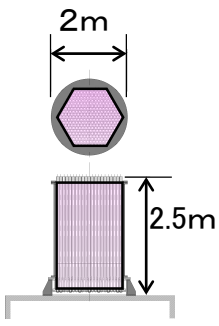
【部分装荷状態を考慮したモデル】

- ① 模擬体非装荷箇所モデル化
 水平変位挙動が最も大きくなる、非装荷箇所が最多（燃料体取出し完了時）状態の炉心を評価対象
 ⇒装荷しない箇所のモデルを除去
- ② 水平方向の流体抵抗の考慮
 ⇒模擬体非装荷箇所の空間の流体効果を考慮
- ③ 廃止措置段階の状態の考慮
 ⇒・炉心及び構造の温度条件は200℃とする
 ・燃料体内の上向き流体力は考慮しない

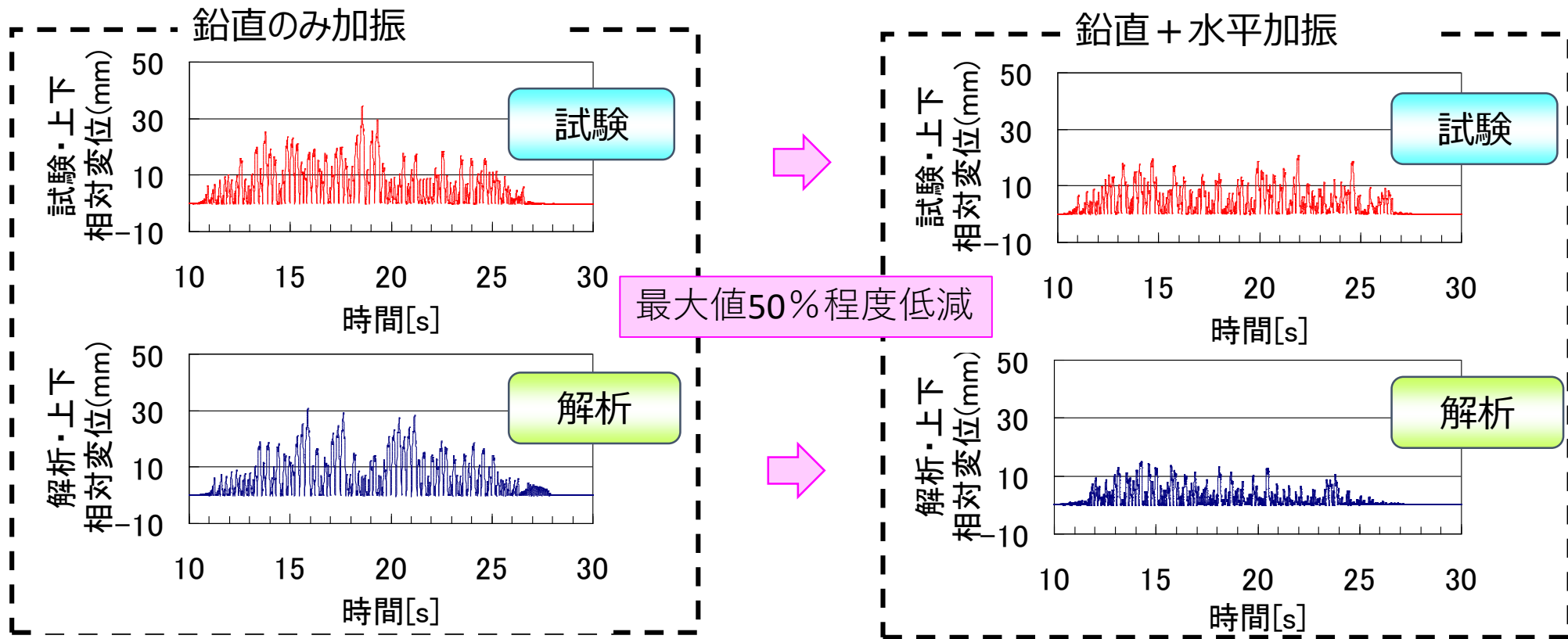


模擬体非装荷箇所のモデル化

燃料体間ギャップの考慮

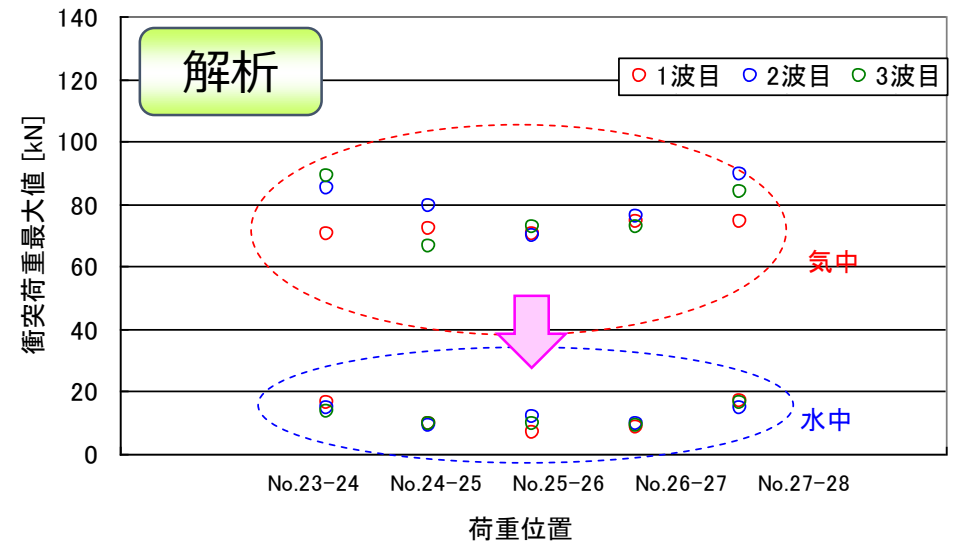
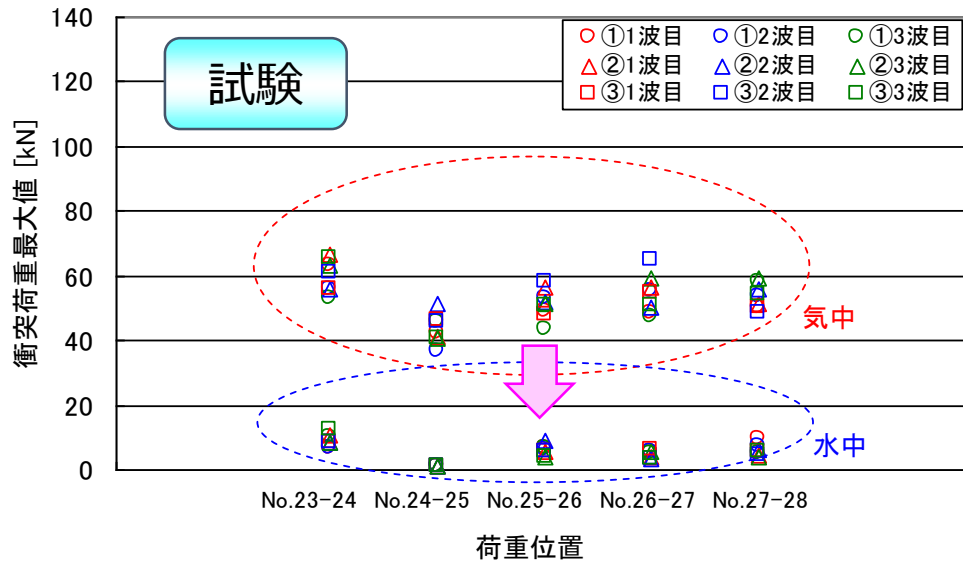
要素試験 各試験体の 衝突部位モデル	実寸単体試験 縮尺 1/1 1 体	群体系試験 縮尺 1/1.5 最大 37 体	列体系試験 縮尺 1/1.5 最大 32 体	多数体系試験 縮尺 1/2.5 最大 313 体
				
<p>各縮尺試験体について、以下の衝突部位のパラメータを取得</p> <ul style="list-style-type: none"> 上部パッド (ハンドリングヘッド) 中間パッド エントランスノズル 	<ul style="list-style-type: none"> 気中、水中、流水中にて実施 衝突解析モデルの妥当性について、水平加振による跳び上がり量の低減効果を概ね再現できることを確認 (参考6) 試験容器と衝突⇒炉心構成要素同士の衝突データを取得できるように群体系試験が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 気中、水中、流水中にて実施 流路網流体力モデルの妥当性について水中における水平方向の衝突荷重の低減効果及び内部流水により跳び上がり量が増加する効果を概ね再現できることを確認 (参考7,8) 大きな水平変位時のデータを取得するため、列体系試験が必要 縮尺比を大きくし (試験装置の模擬性を犠牲にした) 多数体試験で炉心構成要素の変位挙動の確認が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 気中、水中、流水中にて実施 炉心構成要素の周辺の流体の状況が異なるため、特別な流体力解析モデルを採用 実機状況に近い大きな水平変位時において、最外周付近で衝突荷重が増大する列配置の効果を概ね再現できることを確認 (参考9) 	<ul style="list-style-type: none"> 気中、水中にて実施 衝突部の1mm以下の隙間を忠実に縮小することは困難 上部パッドのみ設置するが、衝突荷重は計測しない 流量配分機構は未設置 (流水中のデータは取得しない) 水平変位、跳び上がり量を計測し、群振動挙動 (衝突の影響、流体の影響) を概ね再現できることを確認 (参考10)

水平加振による跳び上がり量の低減効果（単体 正弦波加振試験）



- 水平加振の重畳により、跳び上がり量最大値は50%程度低減。解析でも同様に50%程度低減しており、水平加振の効果を解析でも概ね再現できたと判断（時刻歴による確認）
- 本試験の場合、最大跳び上がり量は、20%程度小さく評価

流路網流体力による衝突荷重の低減効果（37体群体系 正弦波加振試験）



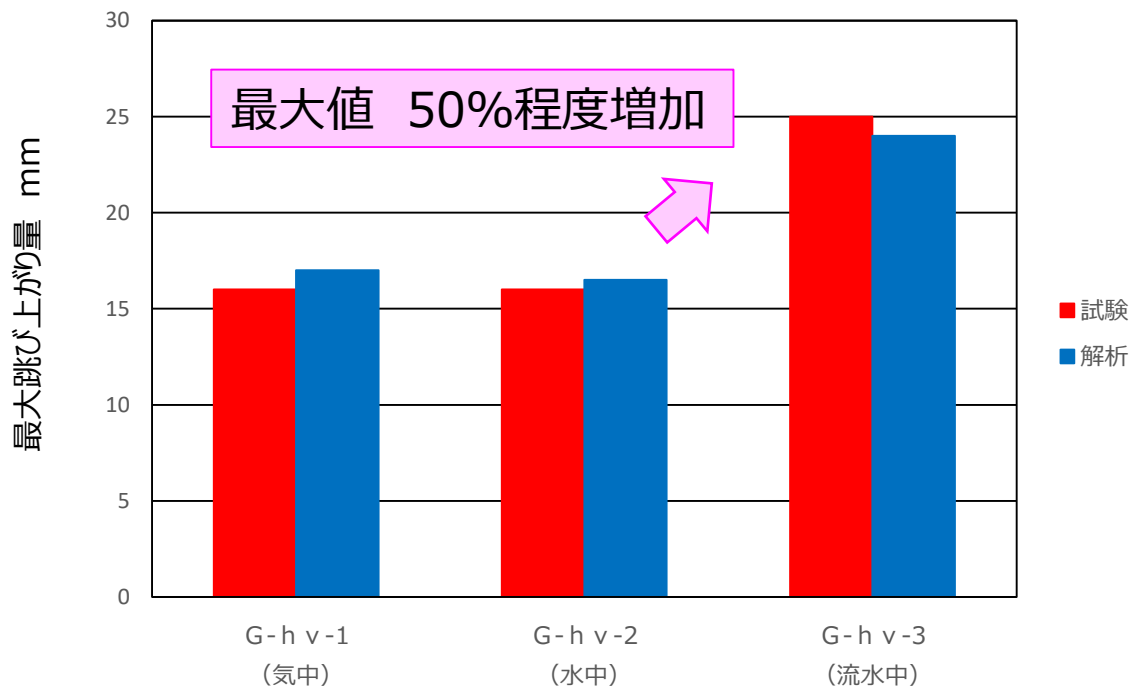
最大値分布 85%程度低減

最大値分布 85%程度低減

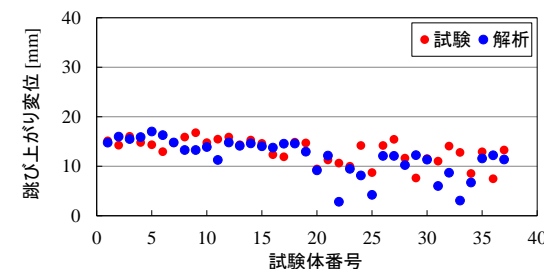
- 流路網流体力により、気中に比べ水中での衝突荷重の最大値は85%程度低減。解析でも同様に85%程度低減しており、流路網流体力の効果を解析で概ね再現できたと判断（最大値分布による確認）
- 本試験の場合、衝突荷重を30%程度大きめ（保守側）に評価

内部流れによる跳び上がり量の増加効果（37体群体系 正弦波加振試験）

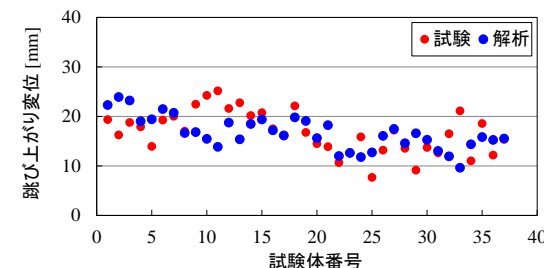
水平 + 鉛直加振



水中試験での最大跳び上がり量の分布

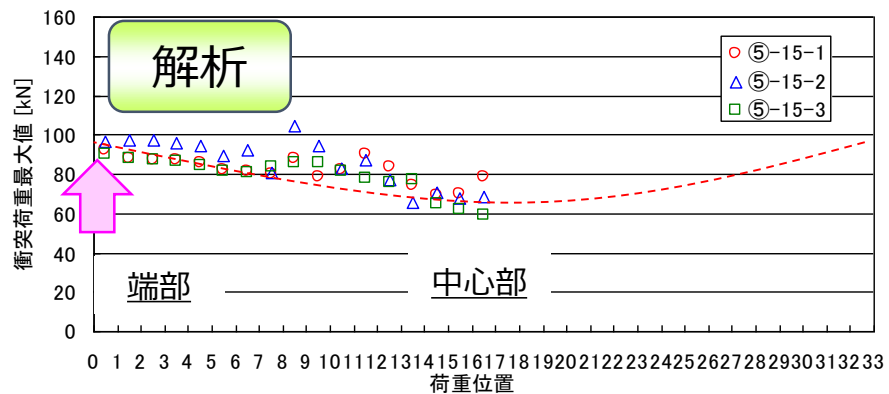
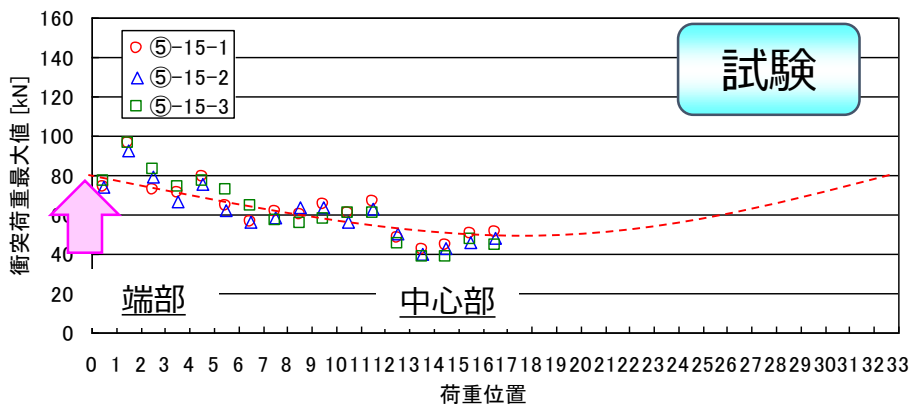
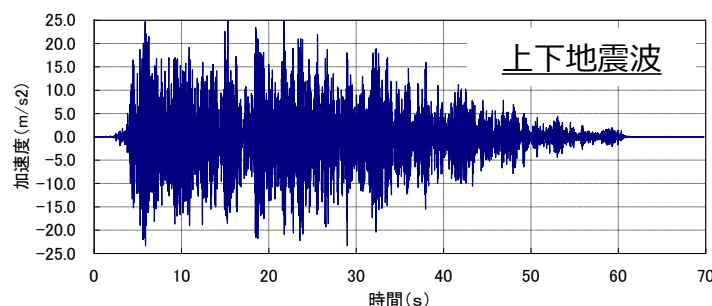
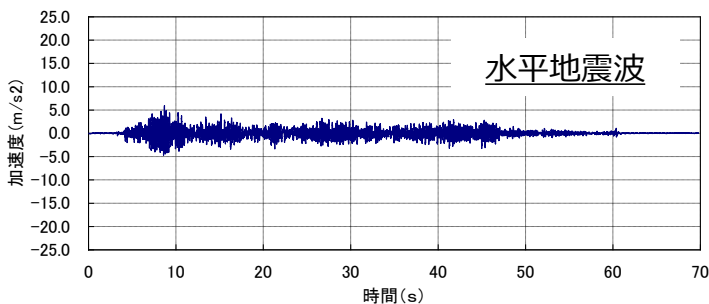


流水中試験での最大跳び上がり量の分布



- 内部流水による流体力により、水中に比べ流水中での跳び上がり量の最大値は50%程度増加。解析でも同様に50%程度増加しており、概ね再現できたと判断（最大値による確認）
- 本試験の場合、最大跳び上がり量を±10%程度の範囲で評価

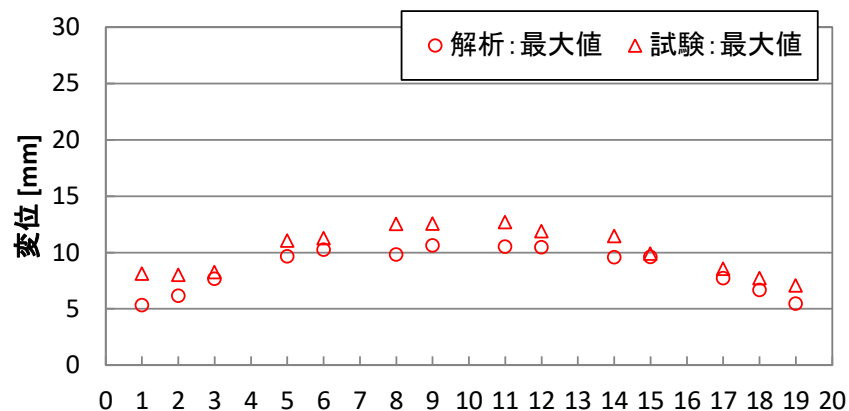
最外周付近で水平方向の衝突荷重が増大する列配置の効果（32体列体系 模擬地震波加振試験）



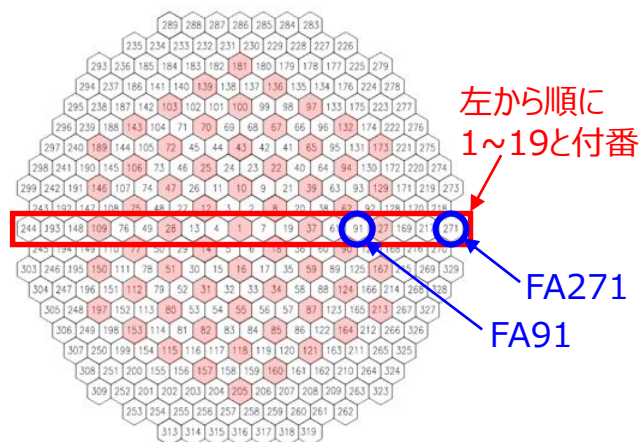
最大値の分布 端部は中央に比べ40%程度増加

- 端部においては、中心部に比べ衝突荷重の最大値は40%程度増加。解析でも同様に40%程度増加しており、概ね再現できたと判断（最大値による確認）
- 本試験の場合、衝突荷重を15%程度大きめに評価

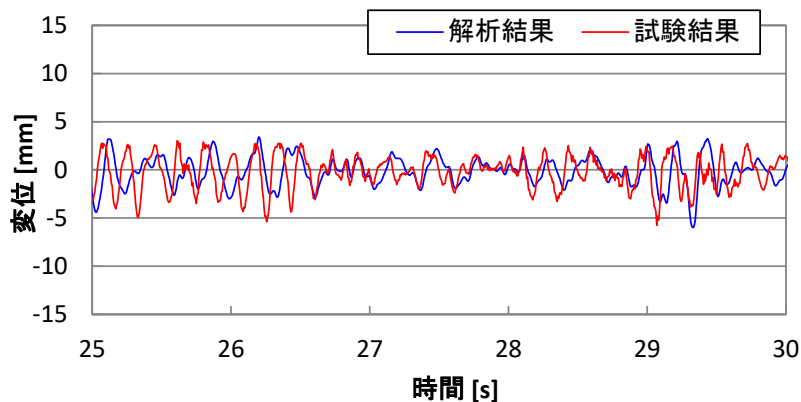
313体多数体系試験：水平方向変位量評価



X方向水平変位 両振幅最大値
水平変位の比較結果（水中・模擬地震波加振）

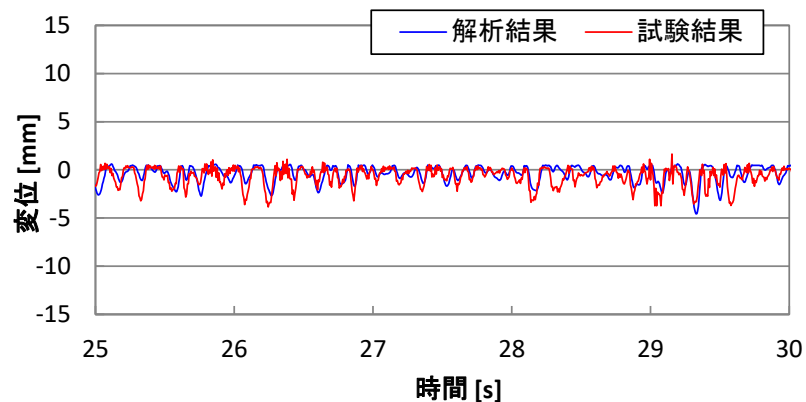


部分装荷状態（ハッチ部試験体無）



時刻歴応答比較（FA91）

水平変位の比較結果（水中・模擬地震波加振）



時刻歴応答比較（FA271）

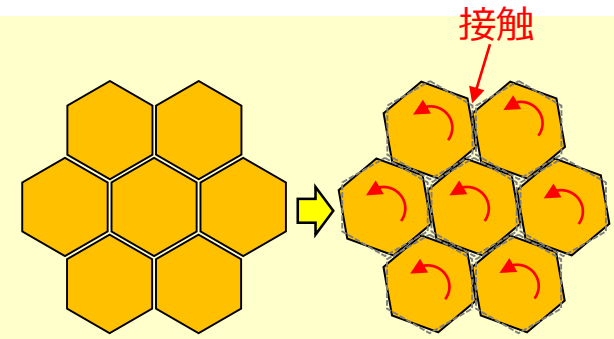
時刻歴応答波形および両振幅最大値は試験と解析において概ね一致

313体多数体系試験：跳び上がり量評価

跳び上がり量：
 ・ 水平 + 上下方向加振時 : 小
 ・ 上下方向のみ加振時 : 大

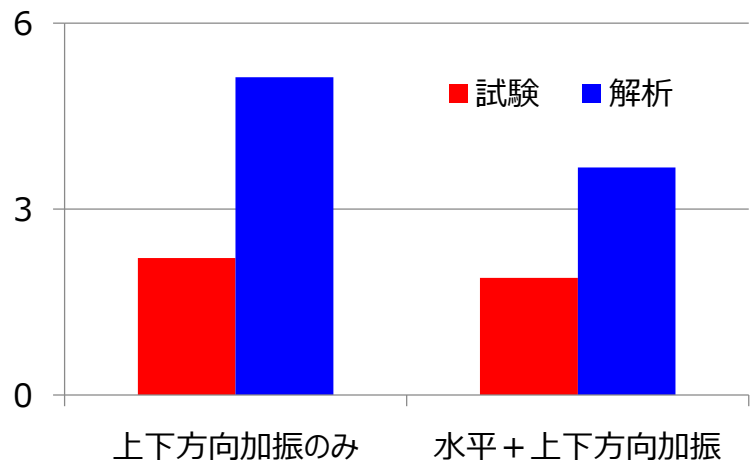
多数体系試験とその解析結果を比較すると、解析値は跳び上がり量を保守的に評価。

・ 313体多数体系では水平方向加振により、試験体の中心軸(鉛直軸)廻りの回転により隣接する試験体と接触しその摩擦力が作用し、跳び上がり量を抑制する効果が現れていると推測。解析においては、鉛直軸廻りの回転を考慮していないため、隣接試験体との接触による摩擦力の作用は考慮されず、試験と解析で差が出た要因と考察。

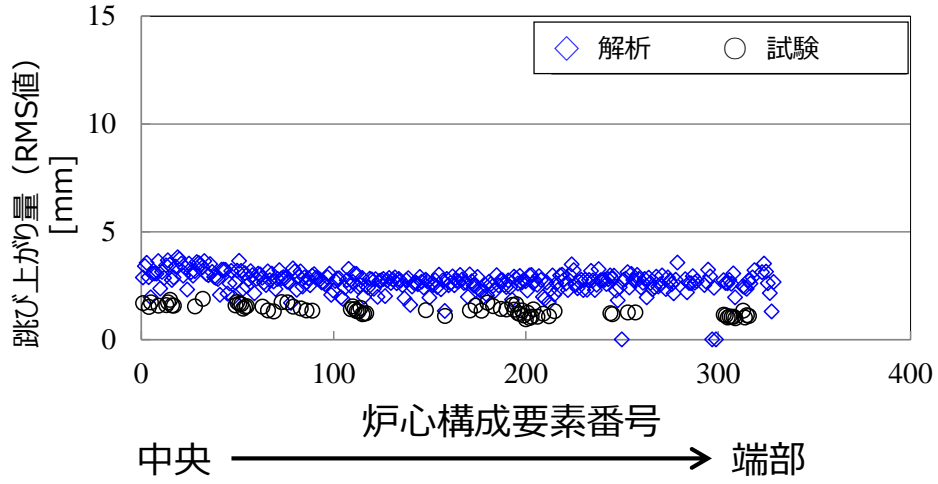


試験体の鉛直軸廻りの回転
 → 接触による摩擦力発生
 → 跳び上がり量抑制効果

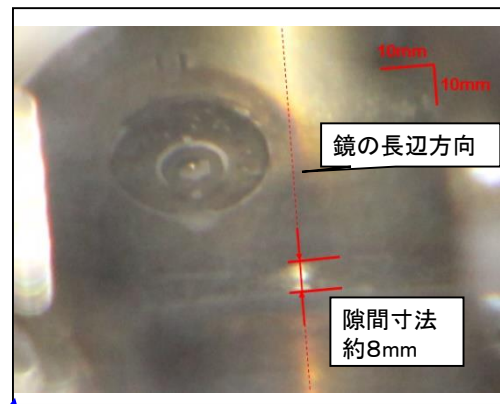
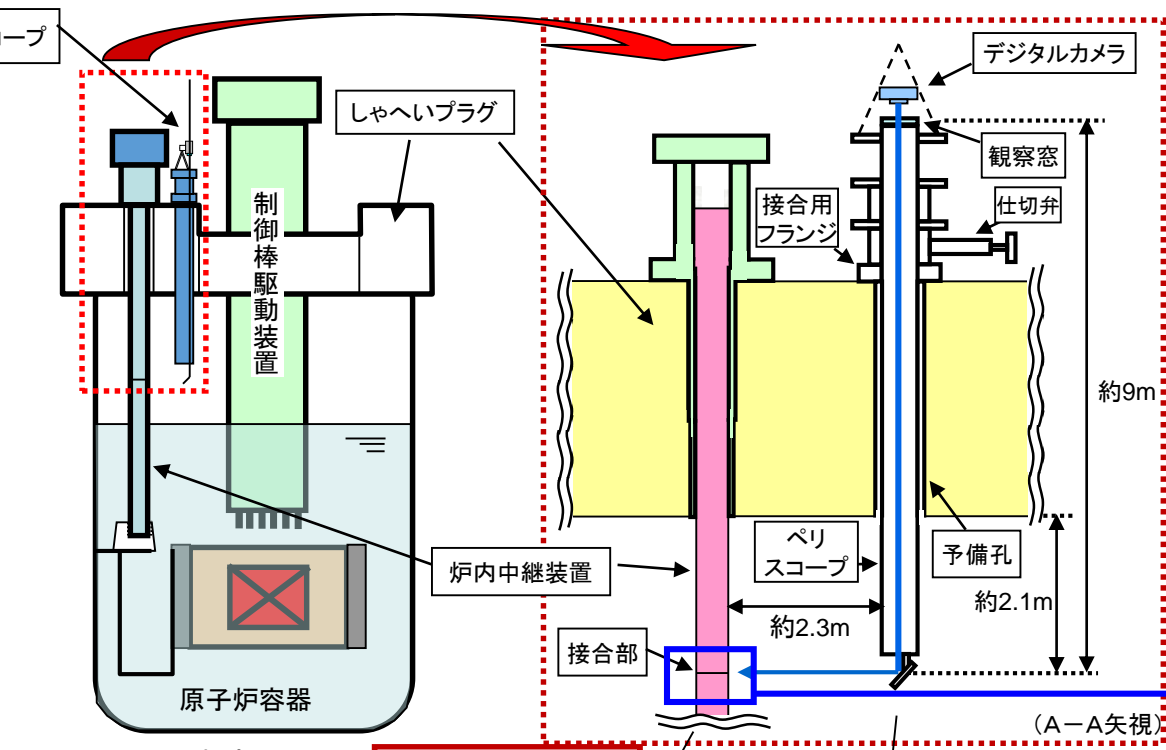
跳び上がり量 [mm]



結果比較 (313体多数体系：模擬地震波加振)

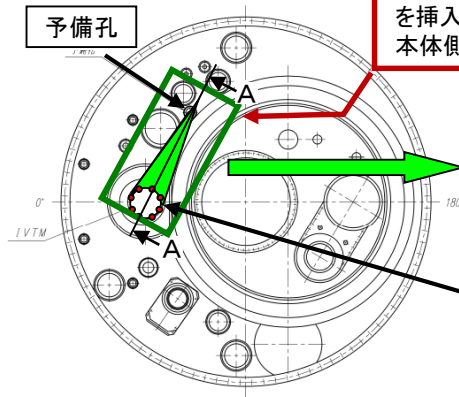


炉内中継装置の案内管接続部の外面観察例



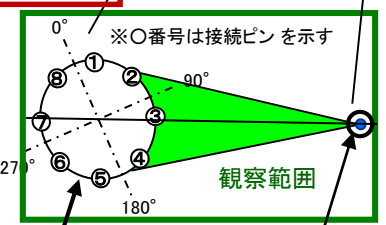
案内管接続部外側からの観察結果 (鏡を介し撮影)

(原子炉容器断面図)



(炉上部平面図)

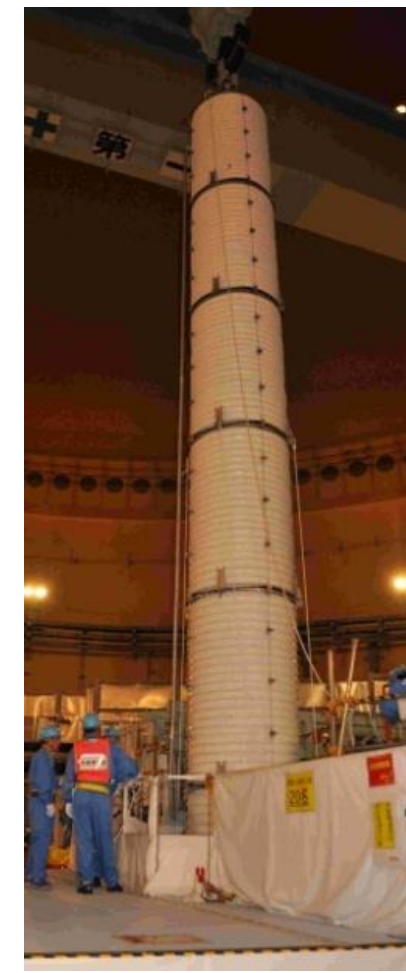
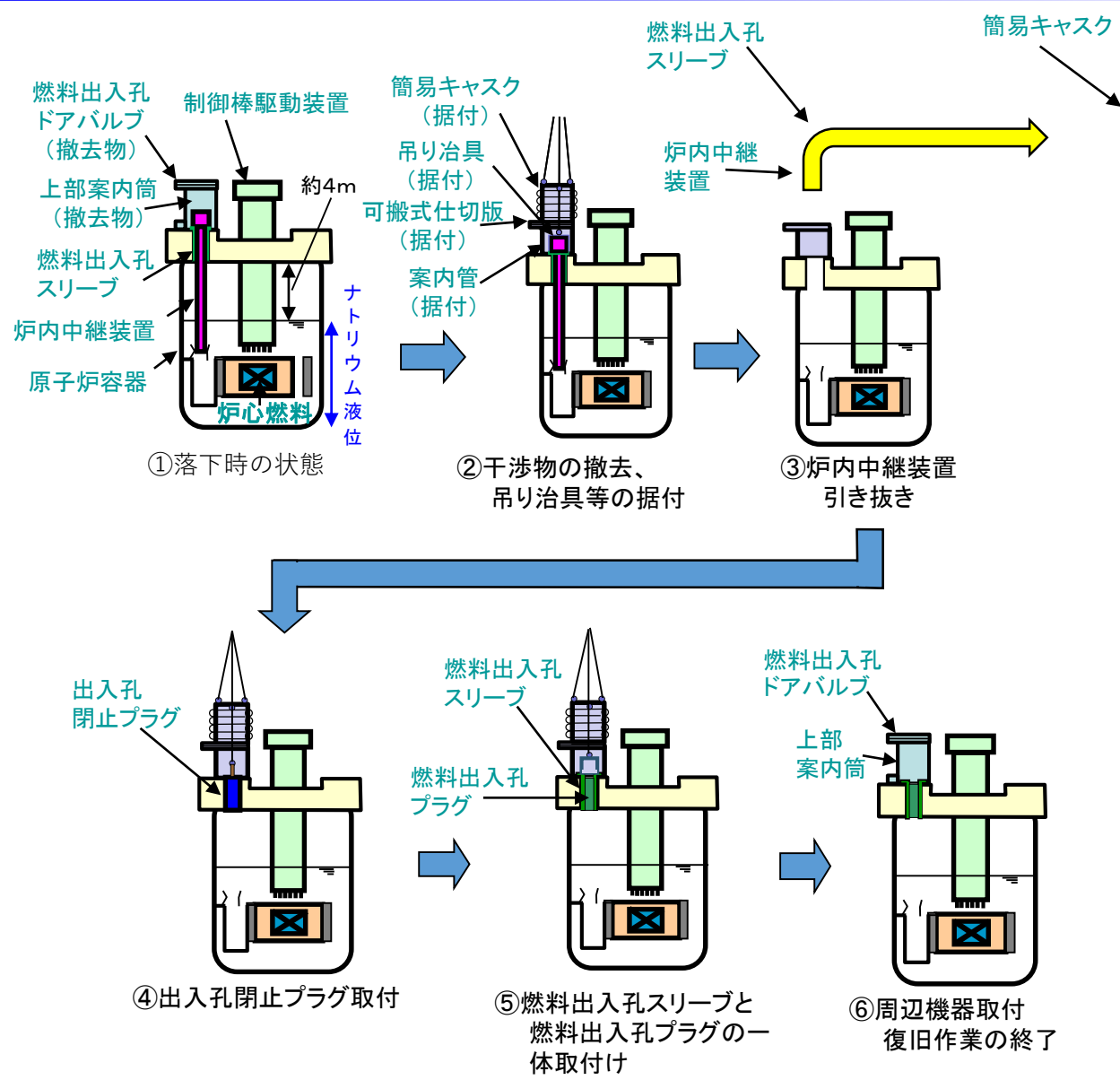
予備孔にペリスコープを挿入し、鏡部をIVTM本体側に向け観察



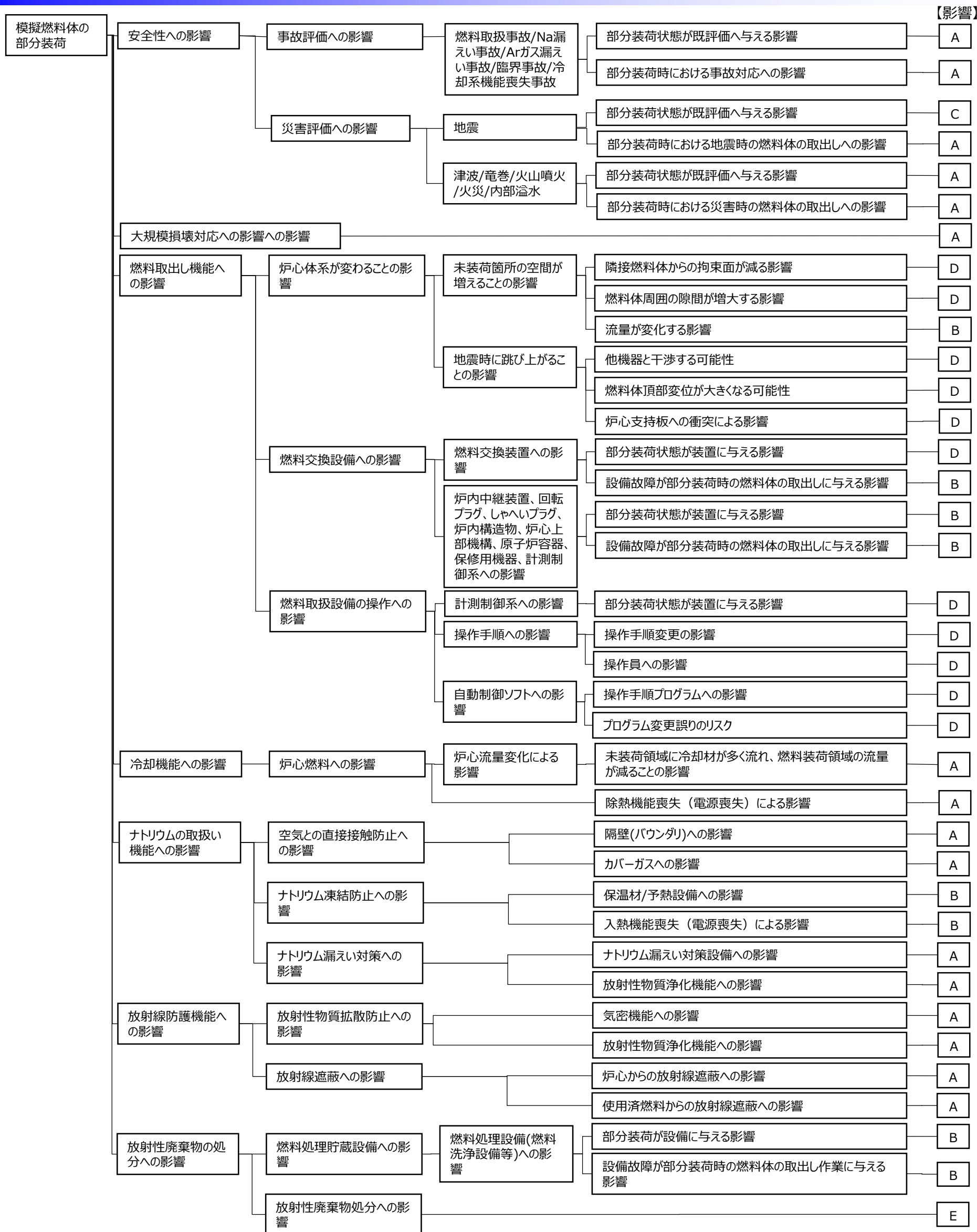
炉内中継装置

予備孔ペリスコープ

炉上部の固定プラグに設置された予備孔を利用し、内面観察と同様にペリスコープを原子炉容器内に挿入
 観察は、ナトリウム液面から約1.57m、約160℃の1次系アルゴンガス中の原子炉容器内環境下において、観察部位（上部・下部案内管の隙間、接続ピン）を対象として、アクリル板を設置した観察窓から、鉛直方向で約9m、水平方向の約2.3mの焦点距離で写真を撮影



簡易キャスクによる燃料出入孔スリーブ、炉内中継装置を一体で引抜き



【凡例】
 A:原子炉施設の安全性の観点から影響ない
 B:燃料体の取出しの観点から影響ない
 C:原子炉施設の安全性の観点で確認が必要
 D:燃料体の取出しの観点で確認が必要
 E:廃棄物が低減される