

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)

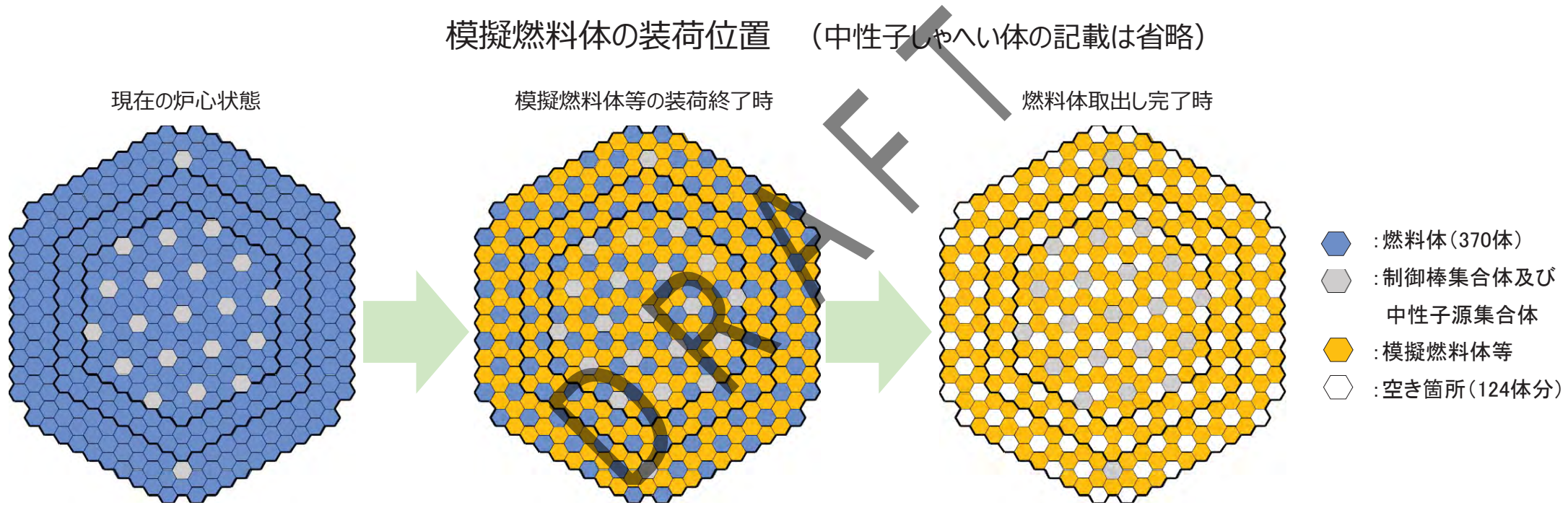
案

2020年 月 日

日本原子力研究開発機構 (JAEA)

# 1. 部分装荷とは

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し、模擬燃料体取扱中の不具合発生の可能性を低減（模擬燃料体取扱プロセスを簡略化による）。これにより燃料取出作業を円滑に進める。最終段階の燃料体取出時に部分装荷方式を採用予定。



## 部分装荷を実施するための課題

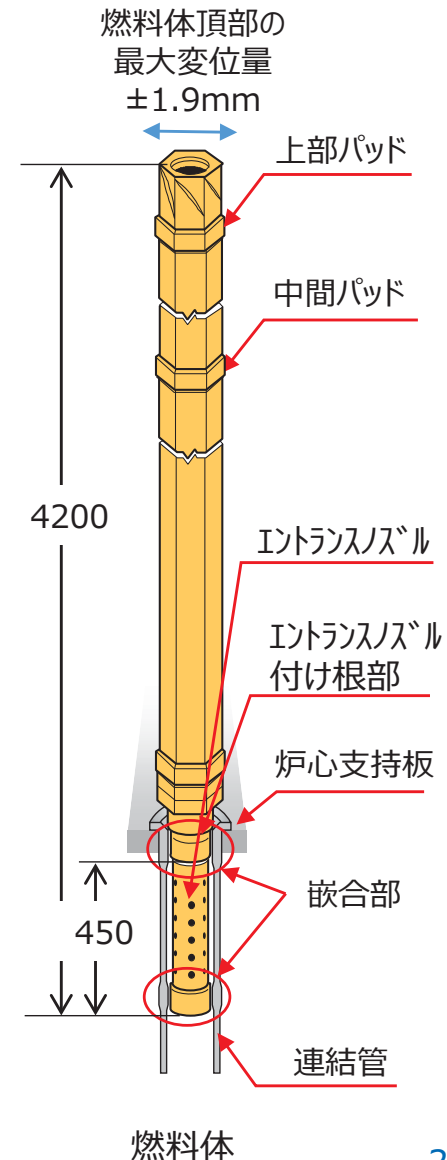
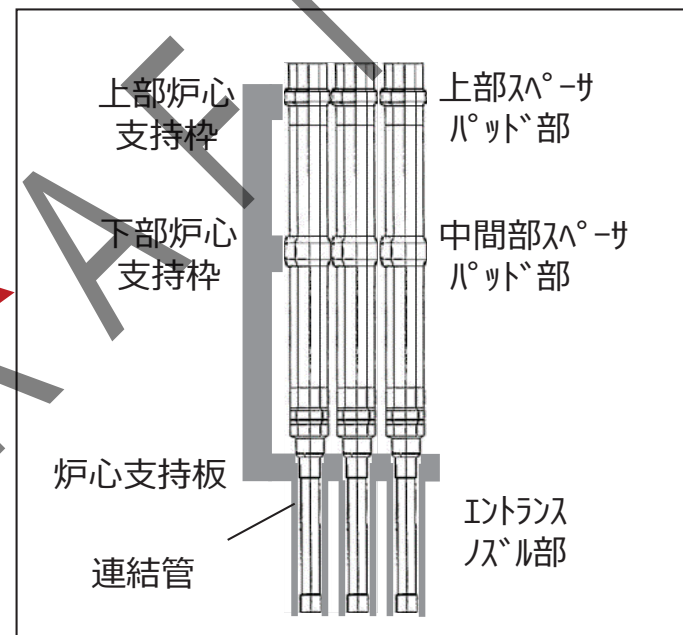
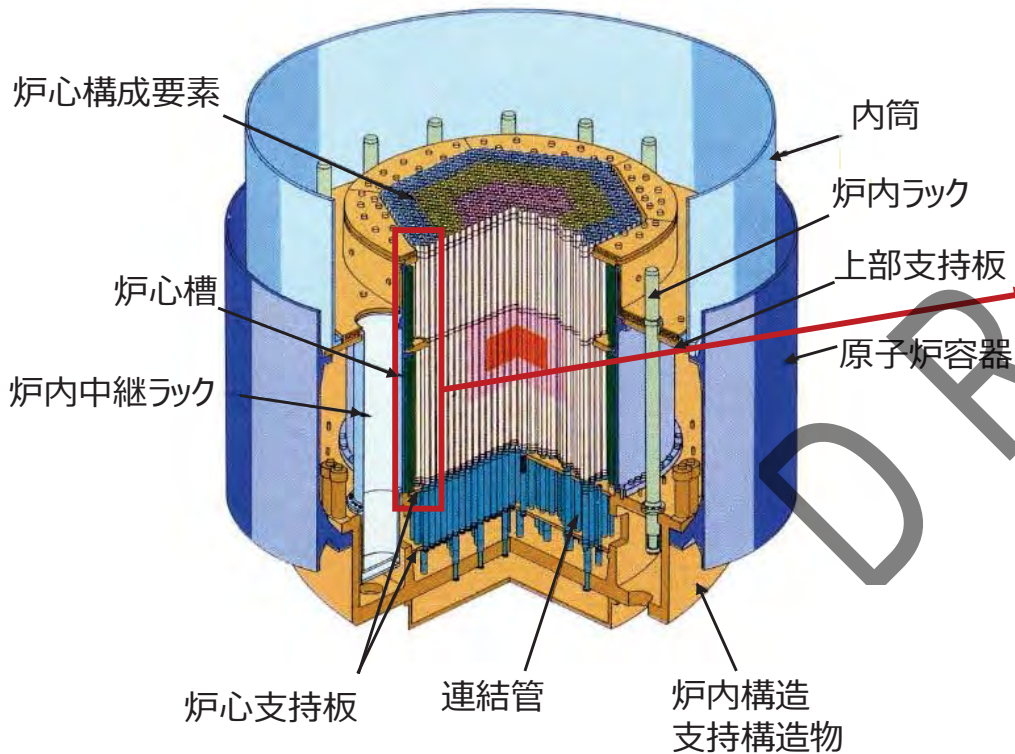
部分装荷では、隣接する燃料体の数が6体から3体まで減り、燃料体を支える面が6面から3面に減る。もんじゅの当初設計では考慮していない炉心体系となることから、原子炉施設の安全性の確保（止める、冷やす、閉じ込める）をはじめ、燃料体の取出し作業に影響を与えないことを確認しておく必要がある。

## 2. もんじゅの炉心構造の特徴

### 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。炉心は隣接する燃料体の六角面が互いに支え合い、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、燃料体を支える面が6面から3面に減り炉心体系を維持する。地震の際は、1体の燃料体を支える隣接燃料体の数が減ることから、耐震性の確認が重要。



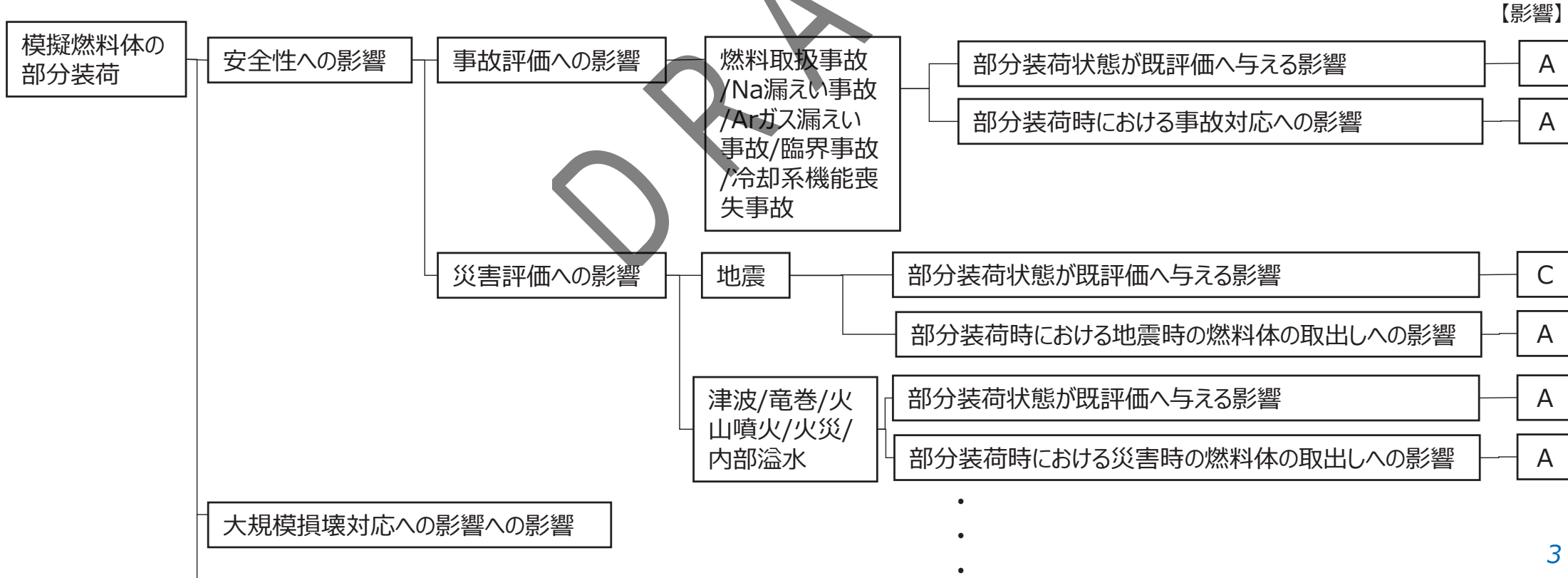
部分装荷では、燃料体を支える隣接燃料体の面が6面から3面に減るが、燃料体の最大傾きは、嵌合部の隙間によって制限されていることから、燃料体の最大傾きは変わらない。燃料体頂部の最大変位置量は±1.9mmであり、燃料交換装置による燃料体取扱いは可能。

### 3. 部分装荷による影響の把握

○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」を念頭に、以下の視点から影響要因を網羅的に抽出し、体系的に整理（詳細は【参考8】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





## 4. 部分装荷が与える影響の整理

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

制御棒は挿入状態。燃料体数が減り、制御棒を引抜いても臨界になることはなく、部分装荷は止める機能に影響を与えない。

### 2. 冷やす機能への影響

廃止措置開始時点で冷却機能を喪失しても、燃料被覆管の中心温度は制限温度の675℃を超えないことを確認済み。しかし、部分装荷状態によって炉内の冷却材の流れが変わることから、冷却機能への影響を確認する。

### 3. 閉じ込める機能への影響

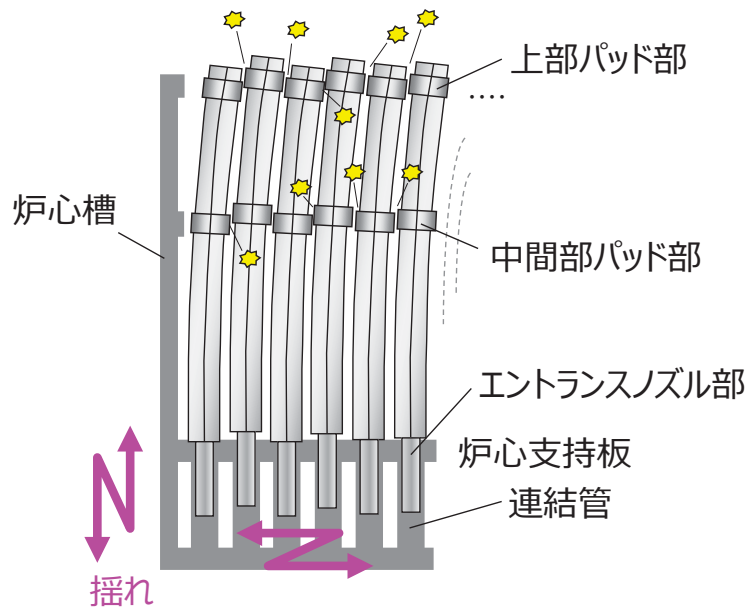
燃料体を支える周囲の燃料体数が、6体から3体に減り、地震時の炉心燃料の挙動が変わることから、燃料体の地震時の安全性を確認する。

### 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、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。
- 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える。未装荷部分の流れが増えることによる燃料取出し機能への影響を確認する。
- 隣接燃料体が減ることで、部分装荷により燃料体頂部の位置が変位する可能性がある。この場合の燃料取出し機能への影響を確認する。
- 模擬燃料体が未装荷となることで、燃料取扱設備の操作手順が変更となる。この影響について確認する。

## 5. 部分装荷における耐震性の確認

- ①地震時の燃料体の挙動(地震時の振動、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)で定量的に評価。
- ②地震時の燃料体の挙動を解析した結果、燃料体に発生する荷重/応力も小さく、燃料体は構造健全性を維持。跳び上がり量も小さく、他設備とも干渉せず、燃料体の取扱い機能へ影響を与えない。
- ③また、炉心支持板への燃料体着床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することなく健全。



地震時の炉心の挙動 (模式図)

地震時の燃料体挙動の解析結果

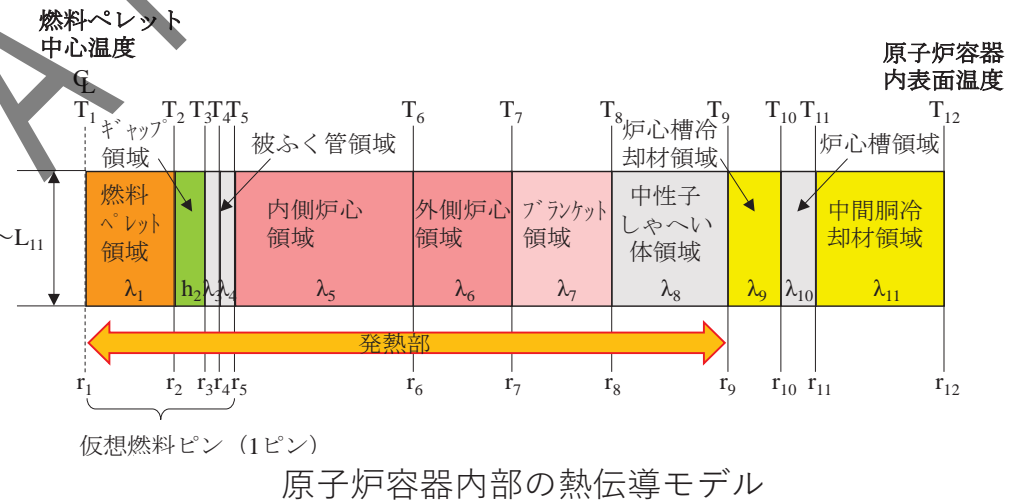
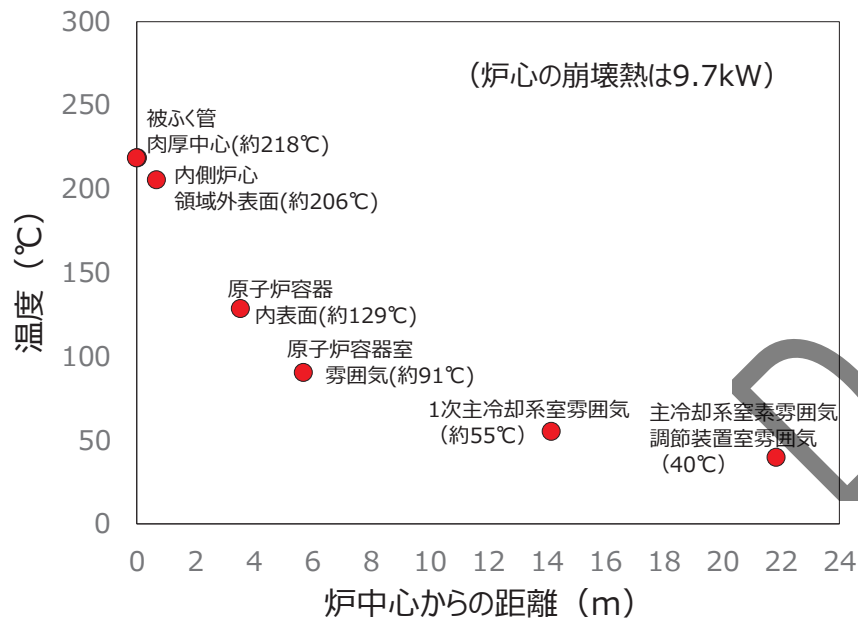
評価項目	発生値※1	評価基準値
上部パッド衝突荷重[kN]	112.8	564
	114.6	
中間パッド衝突荷重[kN]	5.3	28
	5.5	
エントランスノズル付け根部曲げ 応力[MPa]	141.1	440
	173.2	
跳び上がり量 [ mm ]	<20	40※2
	< 2	

※1：初回の廃止措置計画書で用いた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、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：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)シートNo.13参照

## 6. 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ふく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 炉心に装荷されている燃料体数が減ると、炉心部の流動抵抗が減り、主冷却系の循環流量は増加する。一方、循環ポンプのポニーモータは定回転数運転のため、モータ負荷はほとんど増加せずポンプの運転は継続可能。冷却材の循環は維持される。
- ③ 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

## 7. 部分装荷における燃料取出し機能への影響確認

### (1) 地震時の影響

燃料体の最大跳び上がり量は20mm程度であり、燃料交換装置の下端面と干渉することはない。燃料体の跳び上がりは、燃料取出し機能に影響を与えない（シートNo.13参照）。

### (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、その部分の流量は増加する（図1参照）。未装荷部の流量増加が燃料交換装置へ与える影響は全装荷時と変わらない。

### (3) 燃料体頂部変位の影響

部分装荷時における燃料体の傾きはエントランスノズル嵌合部によって制限されており、燃料体頂部変位は±1.9mm。これに炉心燃料のアドレス位置のずれ7.4mmを考慮しても、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最大は11.2mmとなり、設計許容値の20mm以内（図2参照）。

### (4) 操作性への影響

操作手順の変更、操作プログラムの変更があるが、経験している操作であり、操作ミスは発生しにくい。プログラム変更の誤り発生防止は実動作試験等にて対応可能。

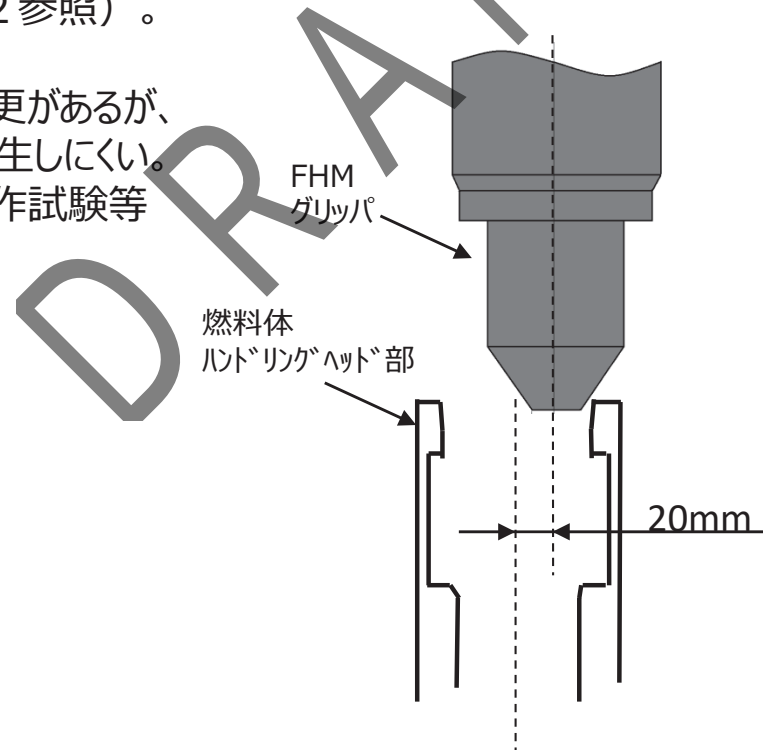


図2 FHMグリッパと燃料体ヘッド部の位置関係

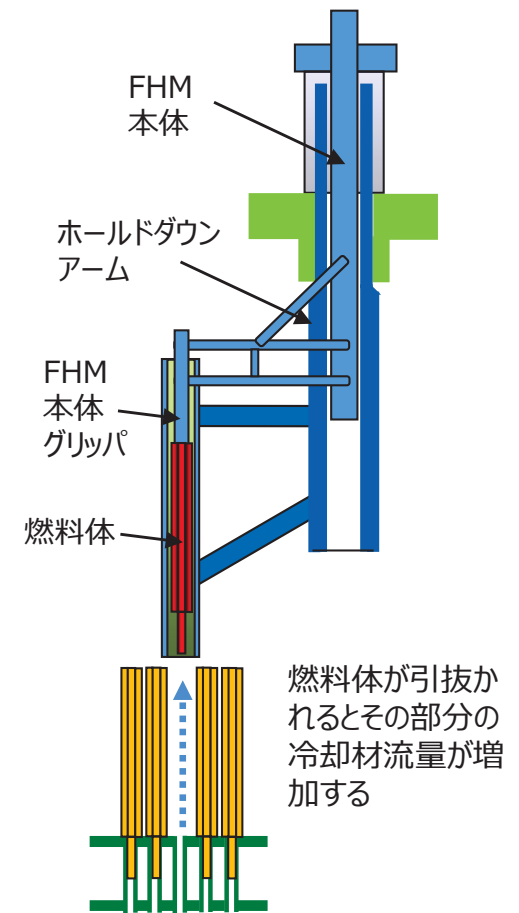


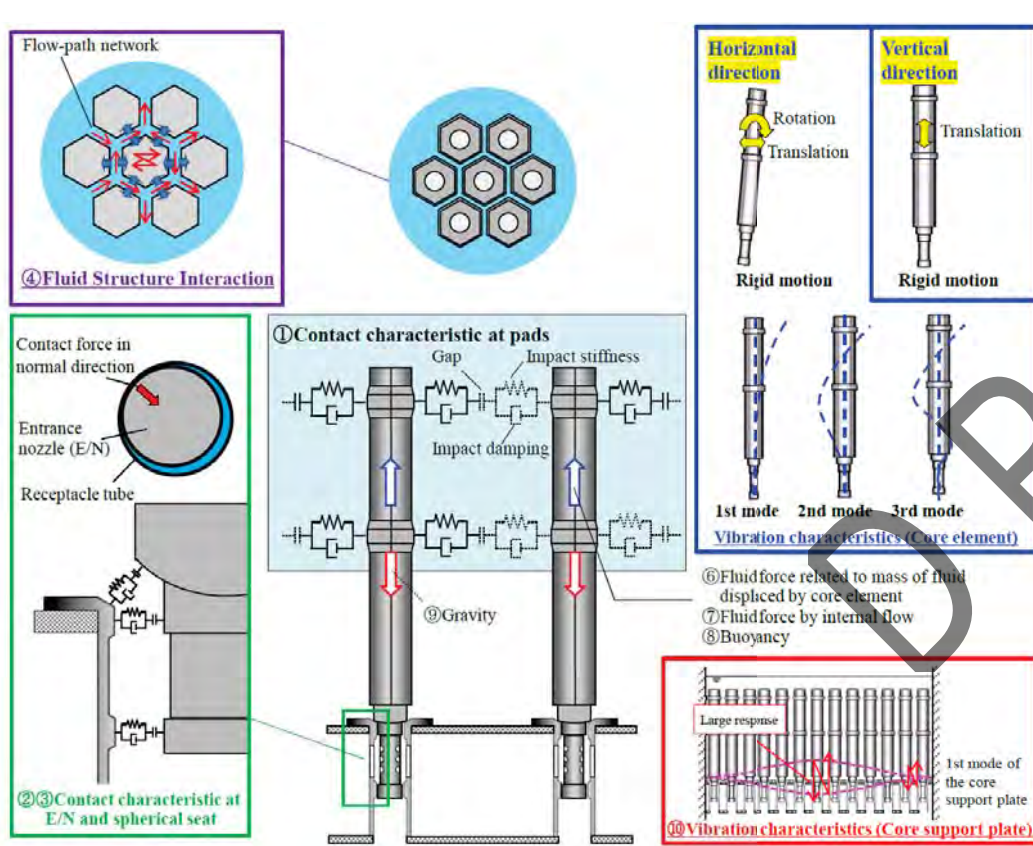
図1 燃料体取出し状況



## 8. 耐震評価に用いた3次元炉心群振動解析コードの概要

高速炉の炉心、炉心構成要素、炉心支持構造物等の設計では、地震時における炉心の群振動挙動を把握する必要があることから、群体系における衝突・摩擦、及び流体-構造連成を考慮した3次元炉心群振動解析コード(REVIAN-3D)が開発されている。

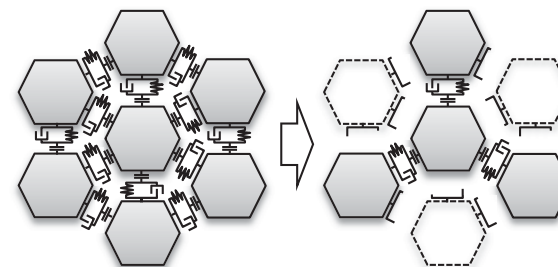
部分装荷状態の挙動を、もんじゅの耐震バックチェックで用いた列体系のモデルで評価することが難しいため、当該手法を採用し、部分装荷状態を模擬して評価を実施。



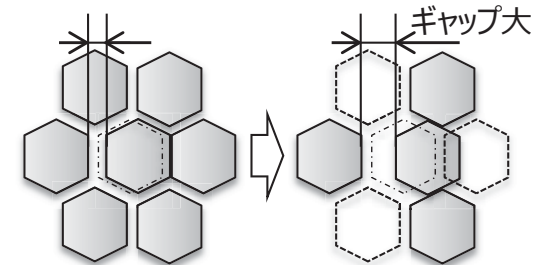
3次元炉心群振動解析モデル

【部分装荷状態を考慮したモデル】

- ① 模擬体非装荷箇所のモデル化  
 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。

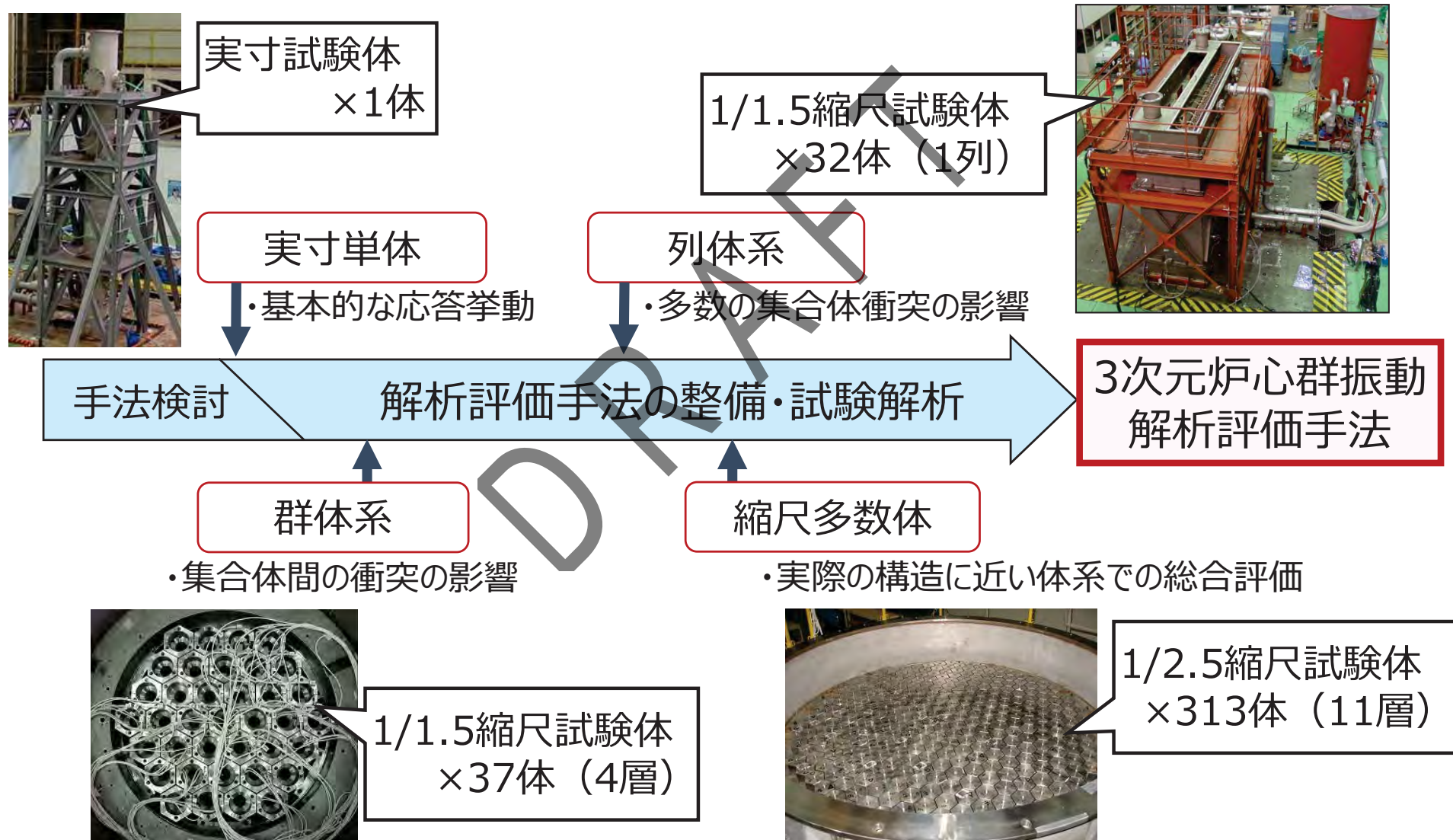


模擬体非装荷箇所のモデル化



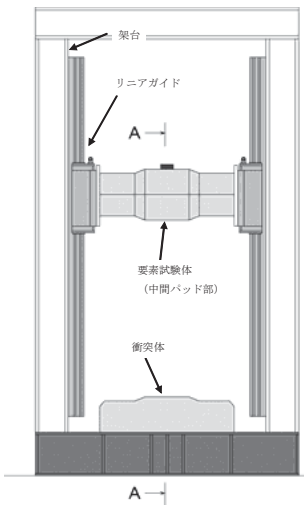
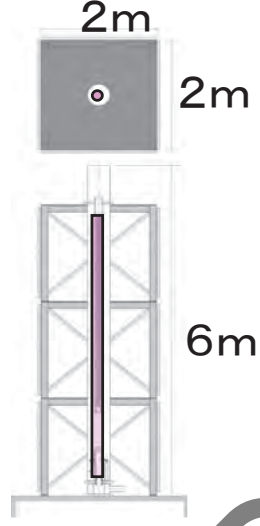
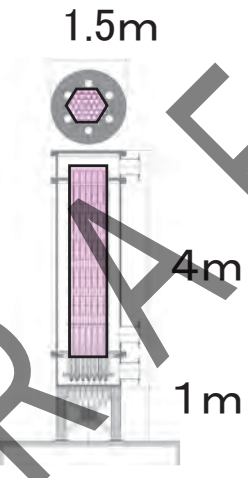
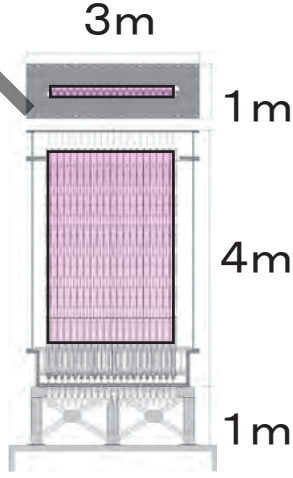
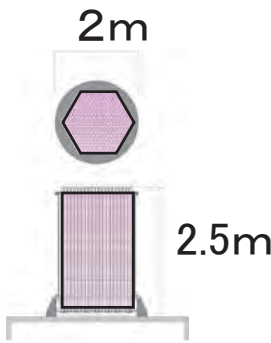
燃料体間ギャップの考慮

単純な実験体系から、実際に近い体系へと試験規模を拡大し、段階的に解析コードの妥当性を確認



# 10. 解析評価手法の妥当性確認 (2/4)

試験の概要と段階的に試験を進めた経緯を整理

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</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 上部パッド (ハンドリングヘッド)</li> <li>• 中間パッド</li> <li>• エントランスノズル</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 気中、水中、流水中</li> <li>• 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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 気中、水中、流水中</li> <li>• 炉心構成要素の変位が拘束されるため列体系試験が必要</li> <li>• さらに縮尺比を大きくした (試験装置の模擬性を犠牲にした) 多数体試験で構成用の変位挙動を確認する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 気中、水中、流水中</li> <li>• 実機状況に近い変位を実現できるので、主に衝突に係るデータを取得</li> <li>• 要素間のギャップの影響データを取得</li> <li>• 炉心構成要素の周辺の流体の状況が異なるため、特別な解析モデルとする</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 気中、水中</li> <li>• 水平変位、跳び上がり量を計測</li> <li>• 衝突部の隙間1mm以下を忠実に縮小することは困難。また、衝突力は計測しない⇒上部パッドのみ設ける</li> <li>• 流量配分機構を設けない (流水中のデータは取得しない)</li> </ul>



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

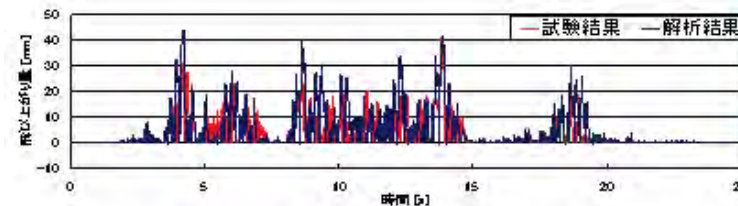
- ①耐震バックチェックにおける燃料体の跳び上がり量  
41mm (最大加速度35m/s<sup>2</sup>)  
(Ss-Dの最大加速度31m/s<sup>2</sup>)
- ②廃止措置段階においては炉心流量が約1/10に低下  
⇒燃料体に作用する上向きの流体力が低下し、見かけの重力加速度が0.5Gから0.9Gに増加  
跳び上がり量は概ね半減
- ③上記①、②を踏まえると、燃料体の最大跳び上がり量は20mm程度。
- ④解析による燃料体の最大跳び上がり量は17mm。加振条件等の違いを考慮すれば、跳び上がりは低めになる方向であり、妥当な値。

## 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

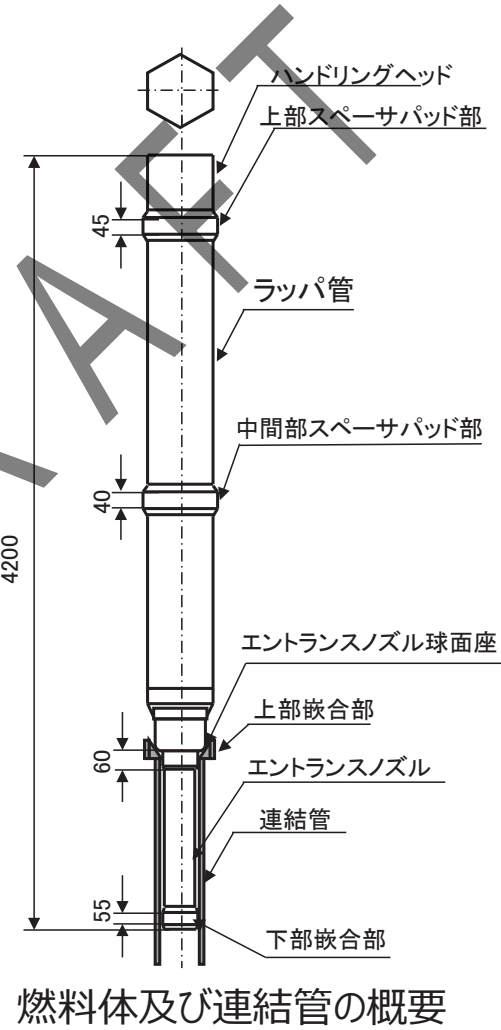
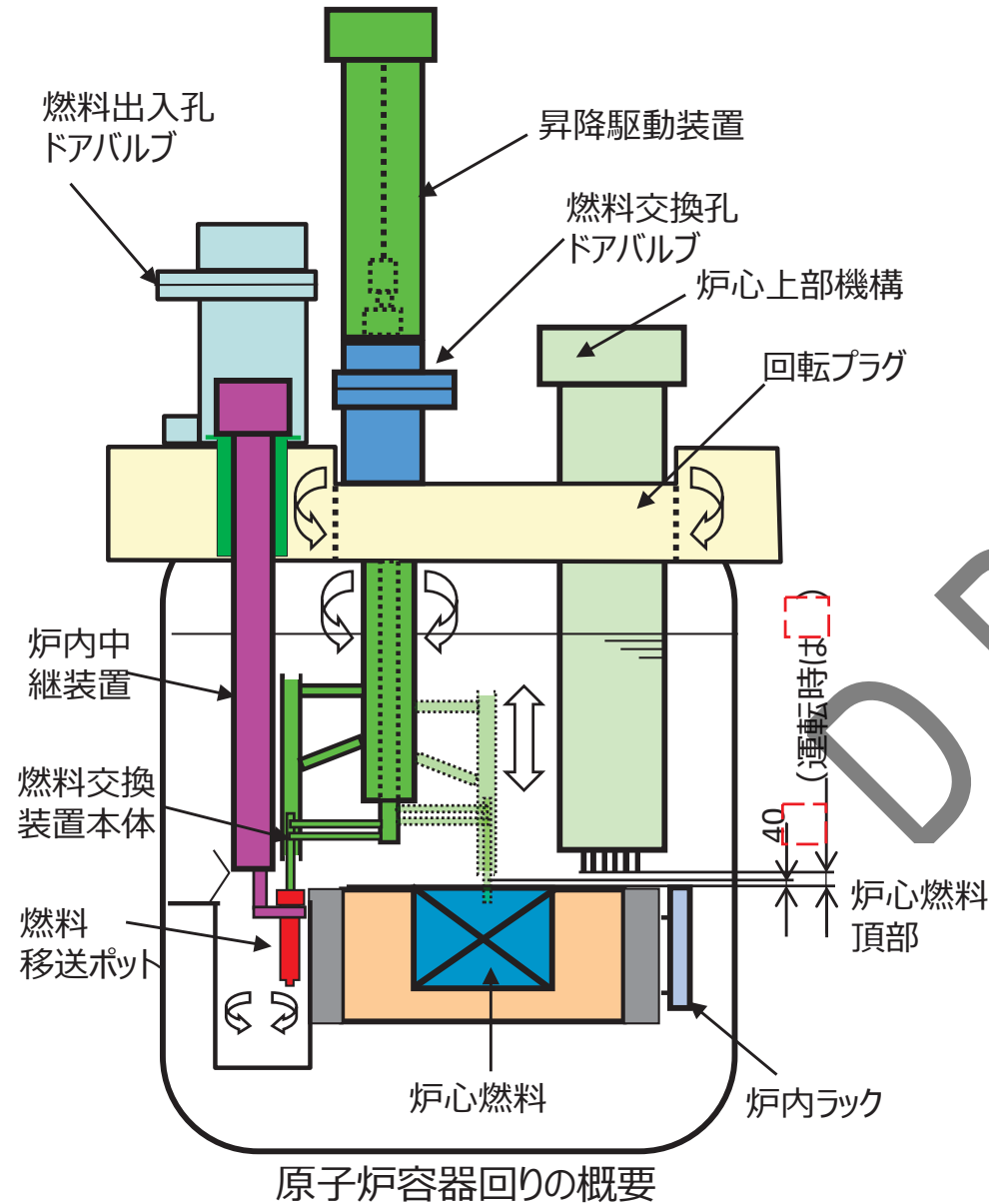
炉心構成要素飛び上り解析結果は、単体加振試験結果と精度良く一致しており、解析コードは妥当である

出典：耐震バックチェック説明資料（原安委WG2第47-8号）



- 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
  - ② 流体による衝突荷重の低減効果、流動による跳び上がり量の増加効果
  - ③ 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
  - ④ 多数体系における共振振動数の低減効果、流路網の流体による振動低減効果を模擬できており、現象を概ね再現できている
  
- 解析コードの信頼性向上にむけた課題  
評価項目（跳び上がり量、衝突荷重など）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」
  - Z軸回りの回転の影響
  - 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
  
- 燃料体の群振動挙動は、燃料体同士及び燃料体と炉心支持板との衝突現象を扱っており、評価値が大きくバラつくことが特徴。評価結果を超える場合も想定し、対応方策の見通しを持っておくことがリスク対応として肝要。

# 13. 想定を超えて跳び上がり量が増加した場合の影響

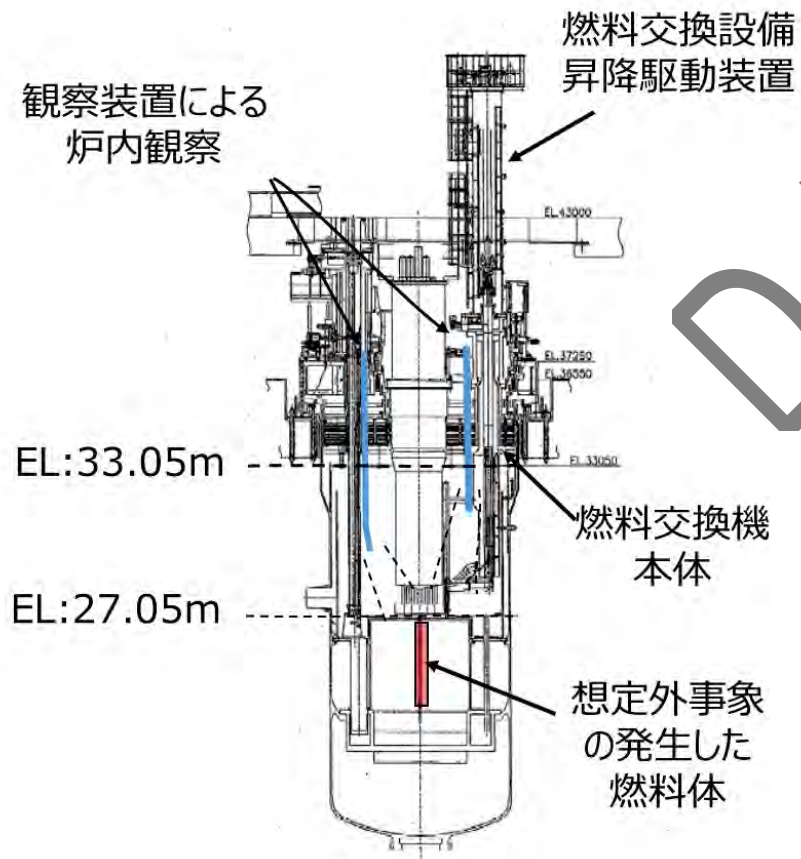


跳び上がり量	影響
40mm 超	燃料体の取出し中：ホールダウンアームのグリッパ案内筒下端面に燃料体頂部が衝突
45mm 超	燃料体の上部パッド部同士の外れが発生
mm 超	燃料体の取出し期間外：燃料体頂部が、炉心上部機構下端面に衝突
mm 超	燃料体エントランスノズルと連結管の嵌合部の外れが発生
mm 超	燃料体の取出し時：燃料体頂部が、炉心上部機構下端面に衝突

# 14. 燃料体取出しができない事態への対応

- ① 3次元炉心群振動解析コードREVIAN-3Dによる地震時の燃料体の挙動解析値の持つ不確かさを考慮し、万一燃料体の取出しができない事態も想定し、その対応方策を検討。
- ② 燃料体の崩壊熱は200W程度と低く、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、常陽におけるNa中からの機器回収知見(IVTM(炉内中継装置)、MARICO-2(材料試験片を照射する実験装置))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

## 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

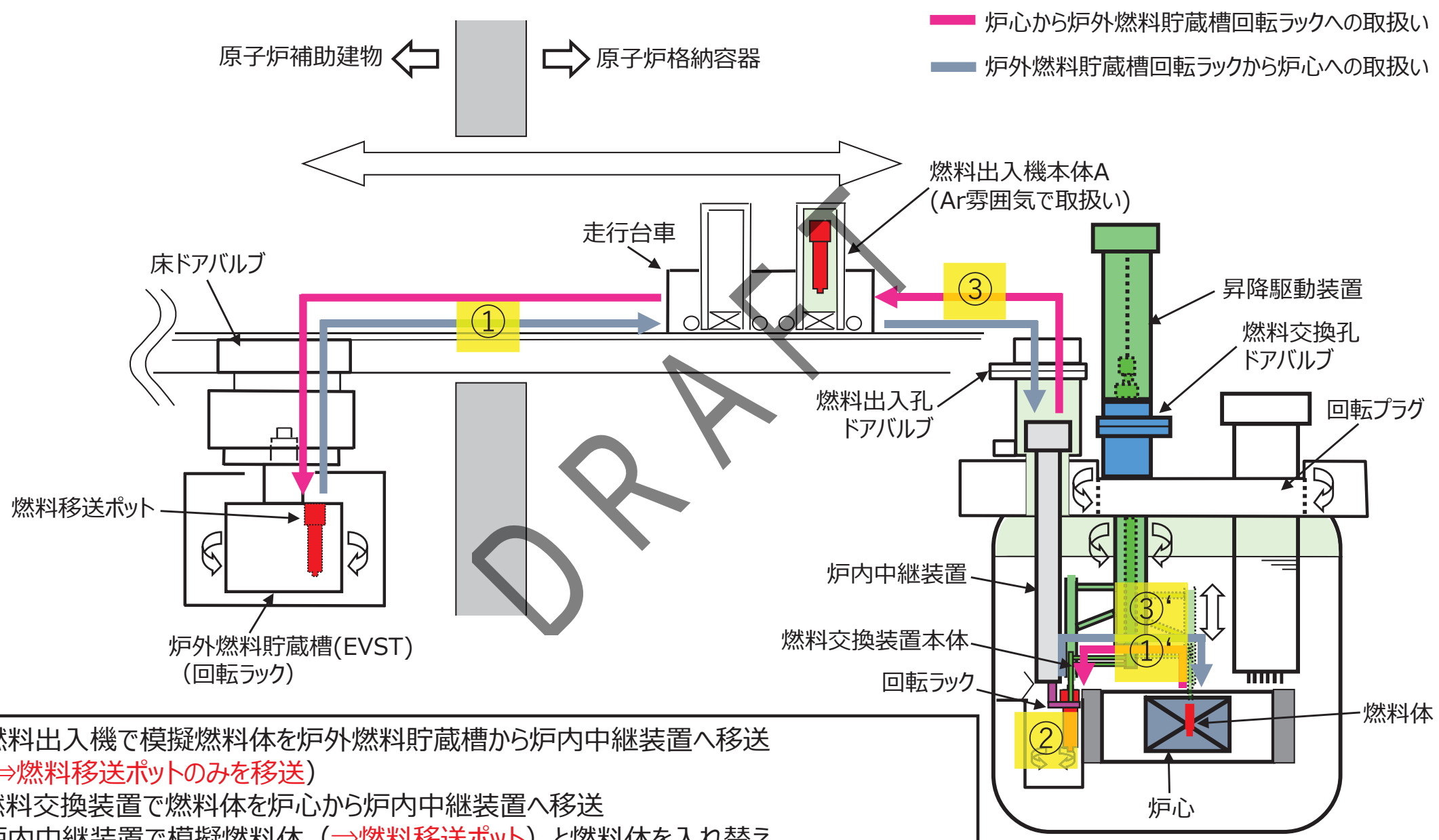
モックアップ試験・訓練を経て、実機に適用し燃料体を回収

- ①もんじゅの炉心は、燃料体が炉心支持板の連結管に差し込まれて自立させ、炉心は隣接する燃料体の六角面が互いに支え合い、炉心体系を維持する設計。
- ②部分装荷は、隣接燃料体の数が6体から3体まで減り、燃料体を支える面が6面から3面に減る、当初設計では考慮していない構造。
- ③当初設計で考慮していない炉心構造であることから、部分装荷による原子炉施設の安全性の確保（止める、冷やす、閉じ込める）を始めとして、燃料体の取出し作業に影響を与えないことを確認。
- ④特に、地震時の燃料体挙動は、解析コードにて概ね現象を把握でき、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部分装荷状態となる期間は約1カ月と短く、この期間に大きな地震が発生する可能性は小さい。万一想定を超え、燃料体取出しができない事態を想定しても、燃料体の回収見通しがあるものと判断。
- ⑥上記①～⑤より総合的な評価として、部分装荷は原子炉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可能性を低減し、燃料体の取出し作業を円滑に進めることができる。



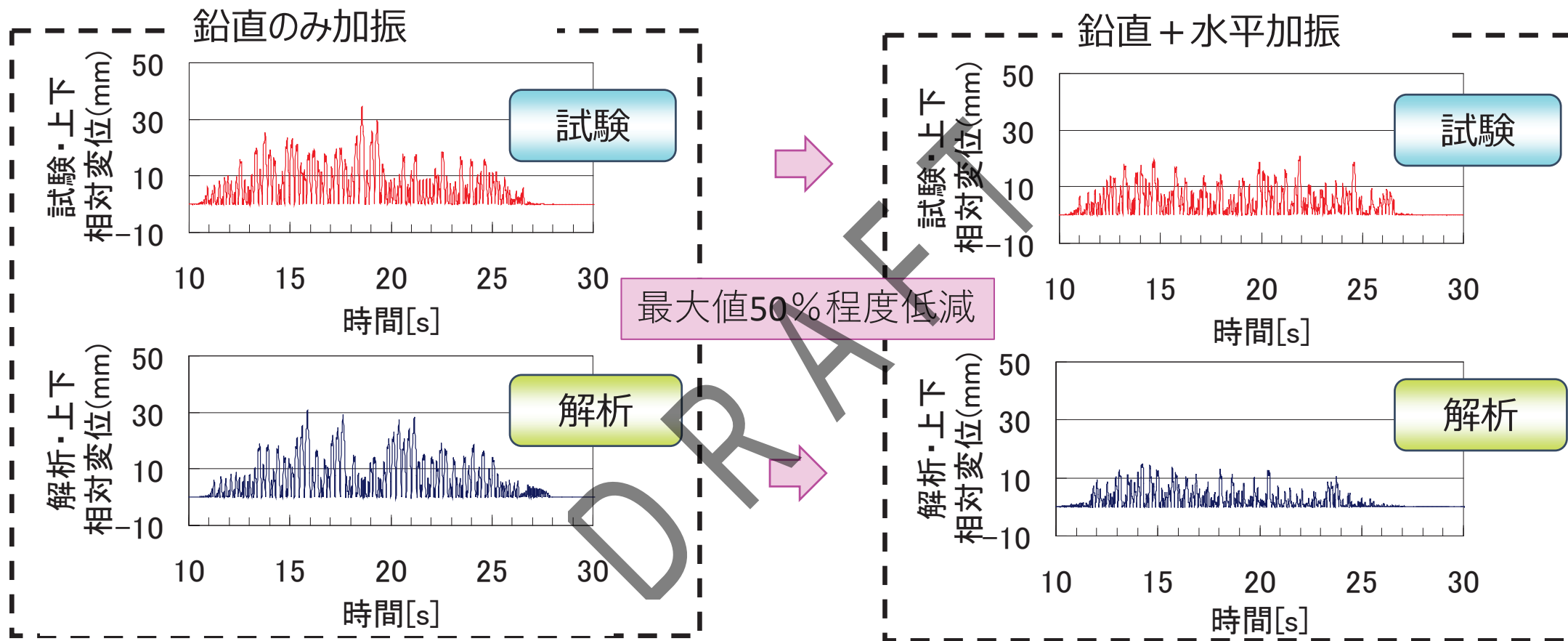
以下、参考資料

DRAFT



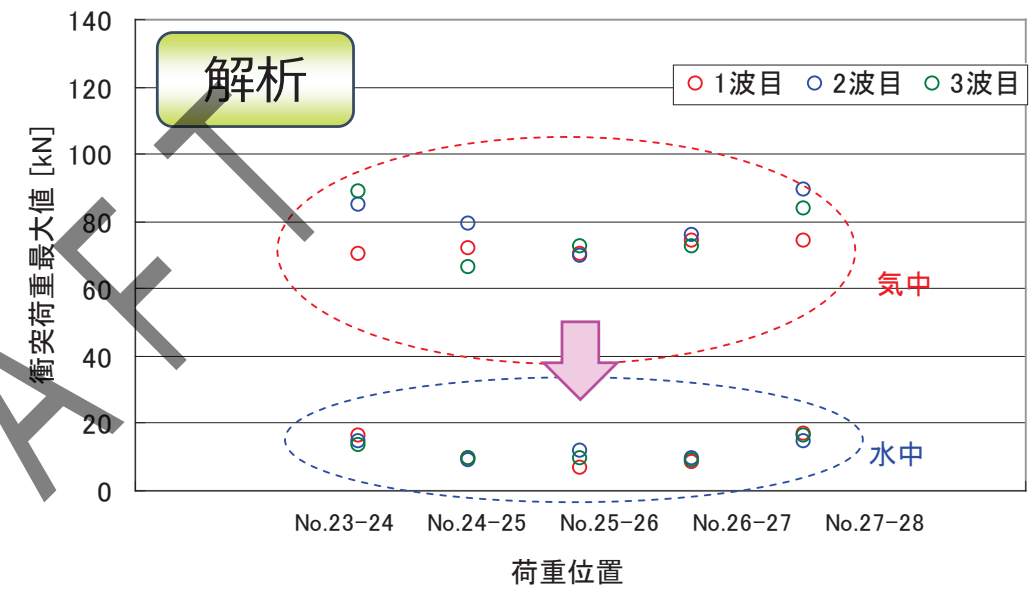
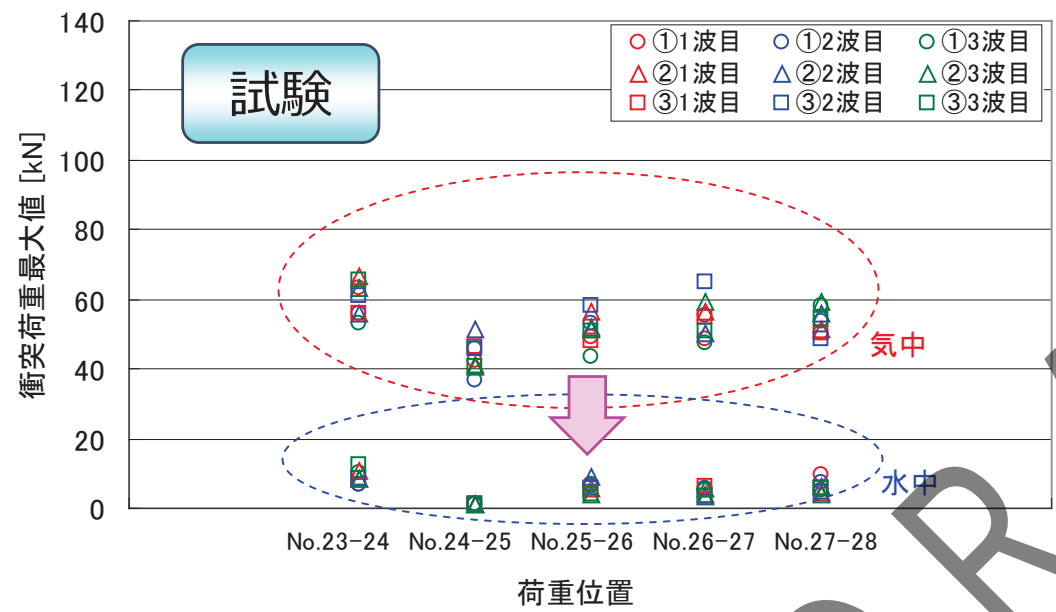
- ① 燃料出入機で模擬燃料体を炉外燃料貯蔵槽から炉内中継装置へ移送 (⇒燃料移送ポットのみを移送)
- ①' 燃料交換装置で燃料体を炉心から炉内中継装置へ移送
- ② 炉内中継装置で模擬燃料体 (⇒燃料移送ポット) と燃料体を入れ替え
- ③ 燃料出入機で燃料体を炉内中継装置から炉外燃料貯蔵槽へ移送
- ③' 燃料交換装置で模擬燃料体を炉内中継装置から炉心へ装荷 (⇒当該プロセスは不要)

## 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

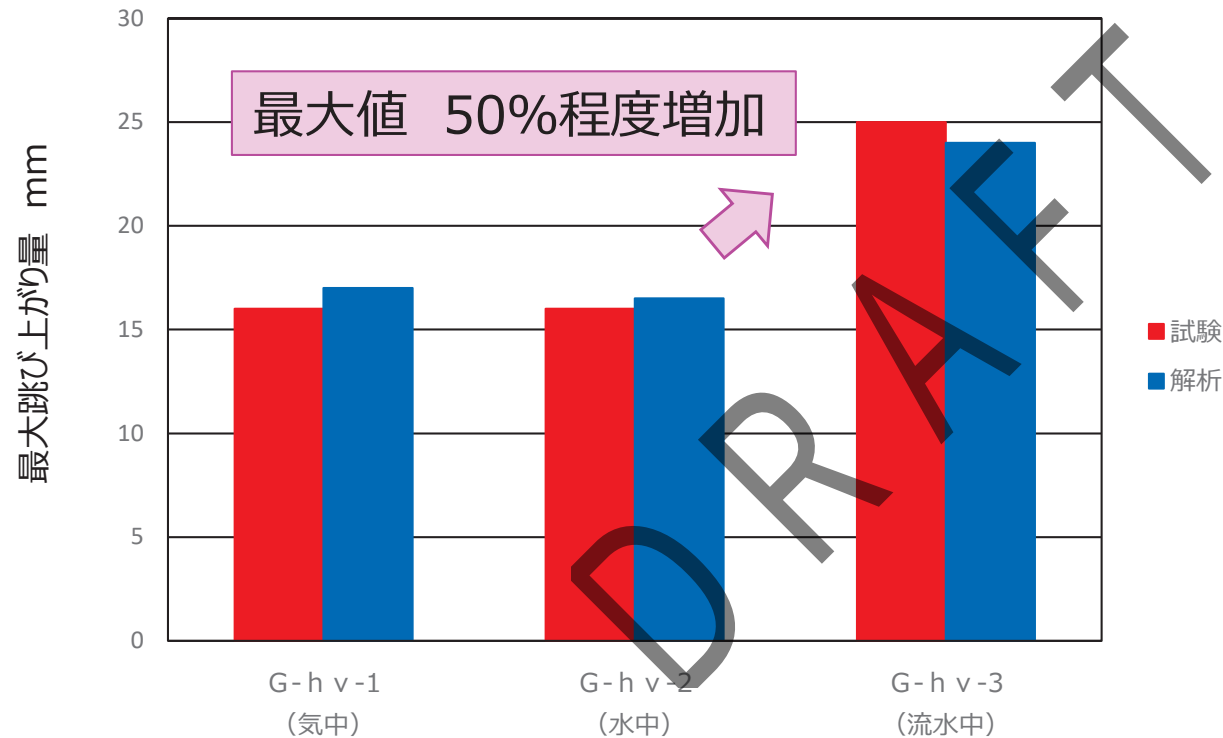
最大値分布 85%程度低減

- 流路網流体力により、空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

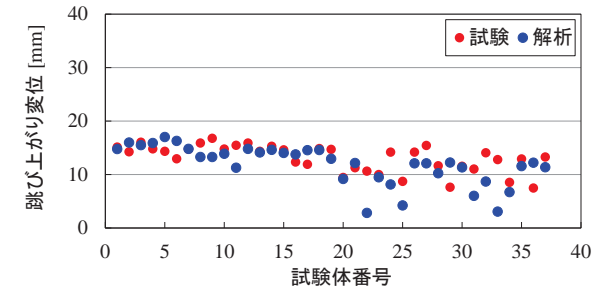


## 内部流水による跳び上がり量の増加効果（37体群体系 正弦波加振試験）

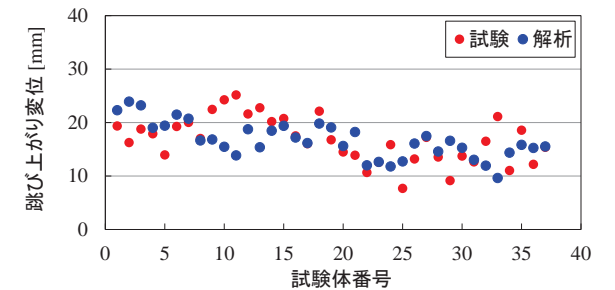
水平 + 鉛直加振



水中試験での最大跳び上がり量の分布

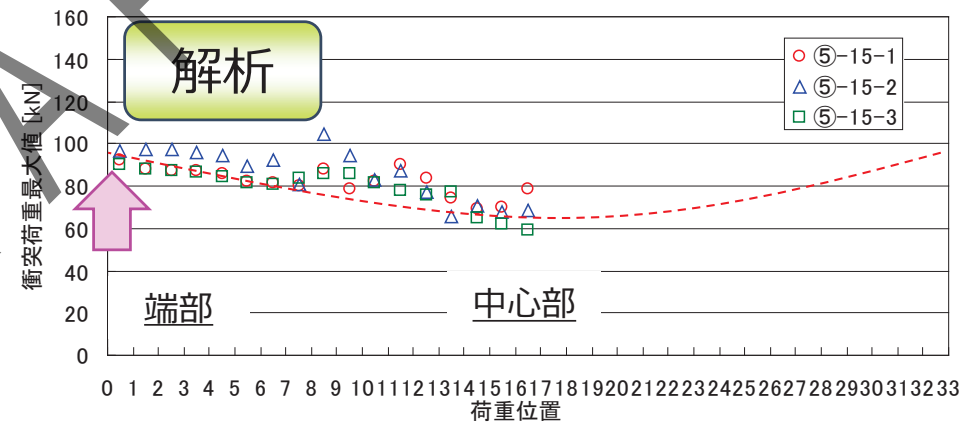
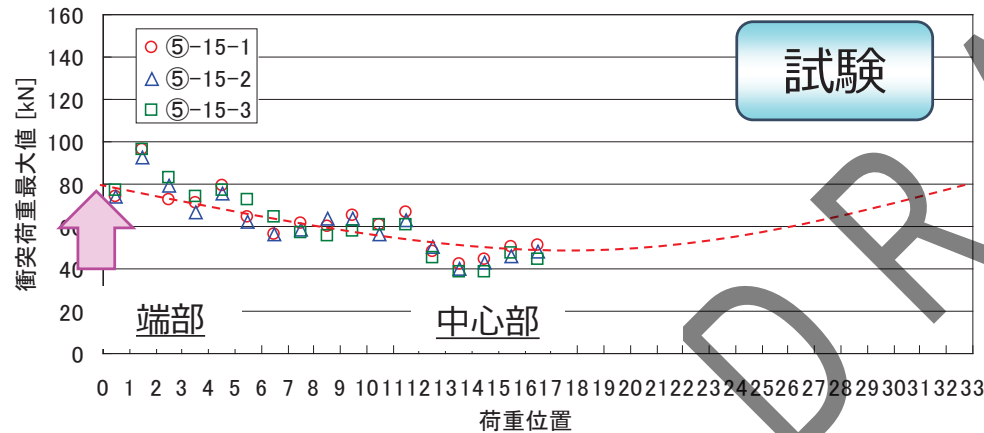
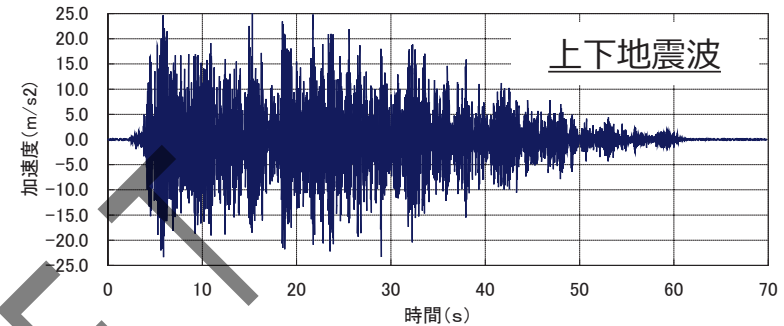
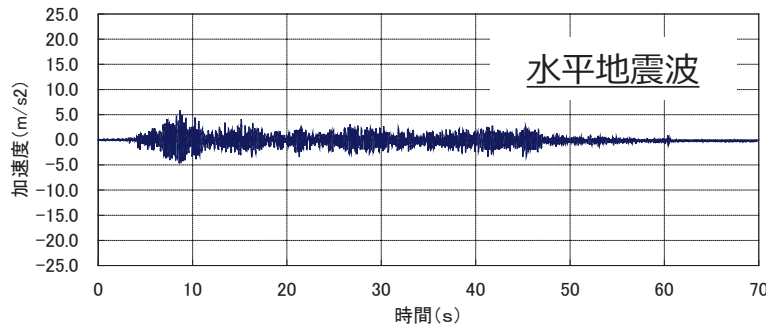


流水中試験での最大跳び上がり量の分布



- 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

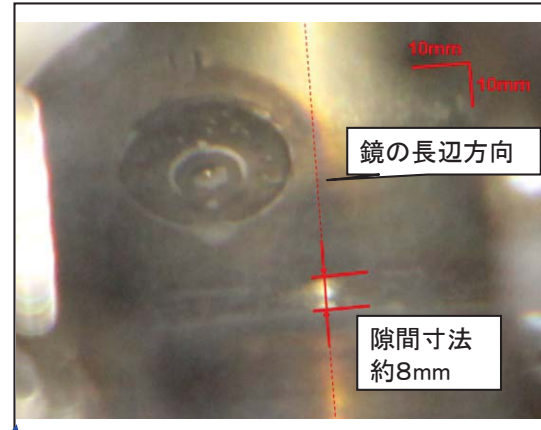
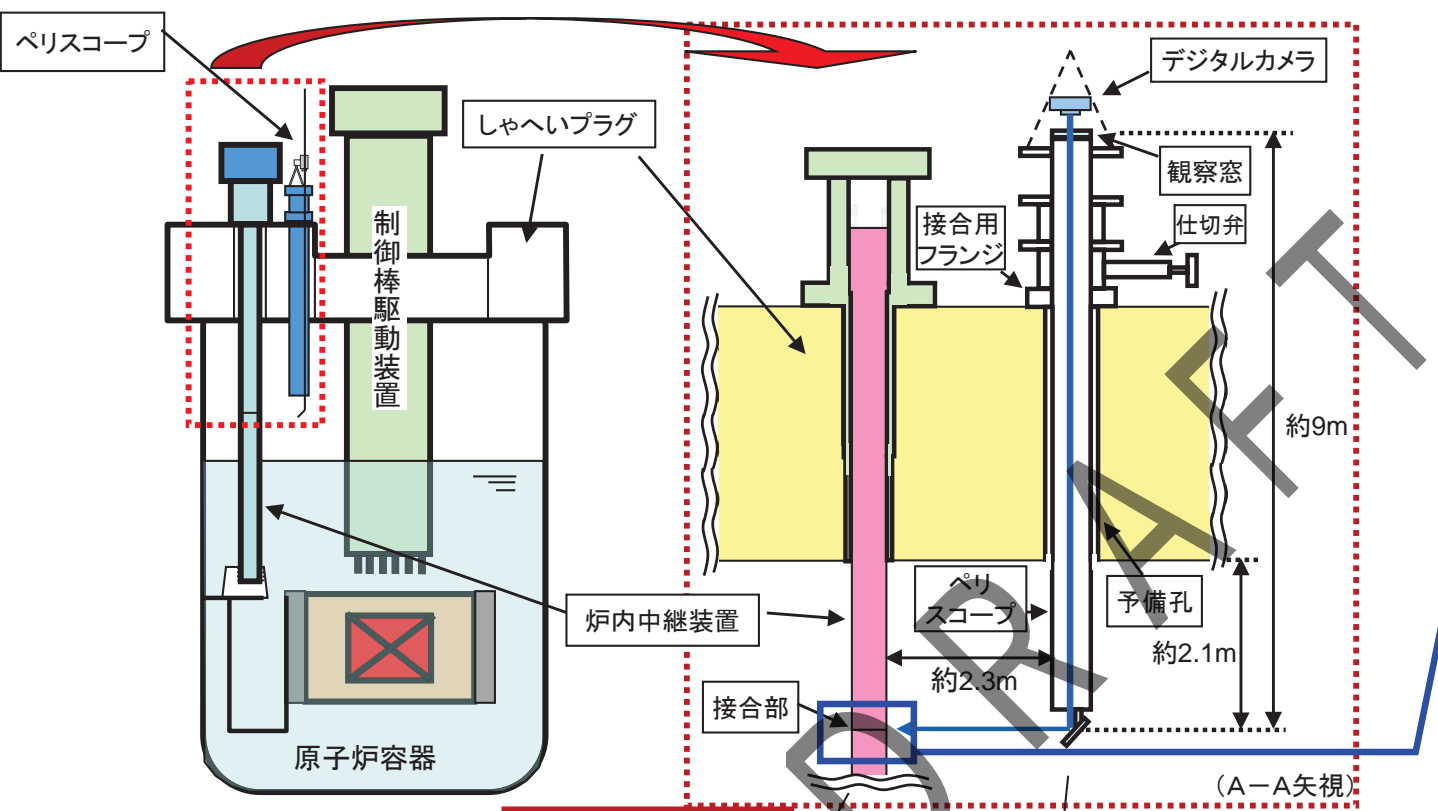
## 最外周付近で水平方向の衝突荷重が増大する列配置の効果（32体列体系 模擬地震波加振試験）



最大値の分布 端部は中央に比べ40%程度増加

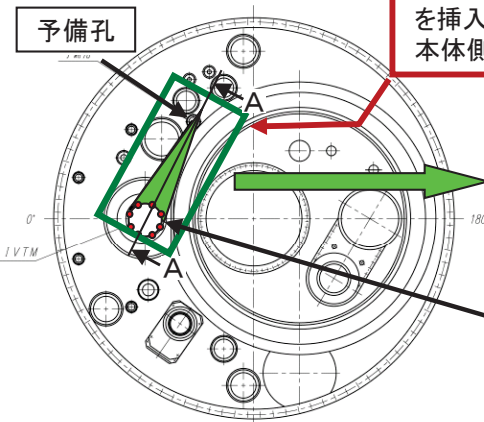
- 端部においては、中心部に比べ衝突荷重の最大値は40%程度増加。解析でも同様に40%程度増加しており、概ね再現したと判断（最大値による確認）
- 本試験の場合、衝突荷重を15%程度大きめに評価

## 炉内中継装置の案内管接続部の外面観察例



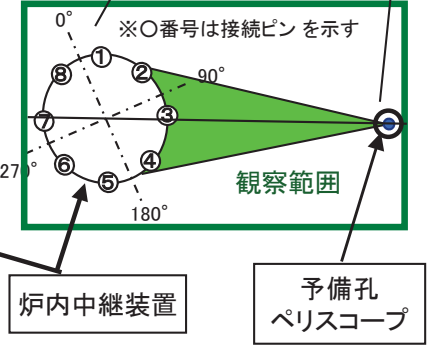
案内管接続部外側からの観察結果 (鏡を介し撮影)

(原子炉容器断面図)



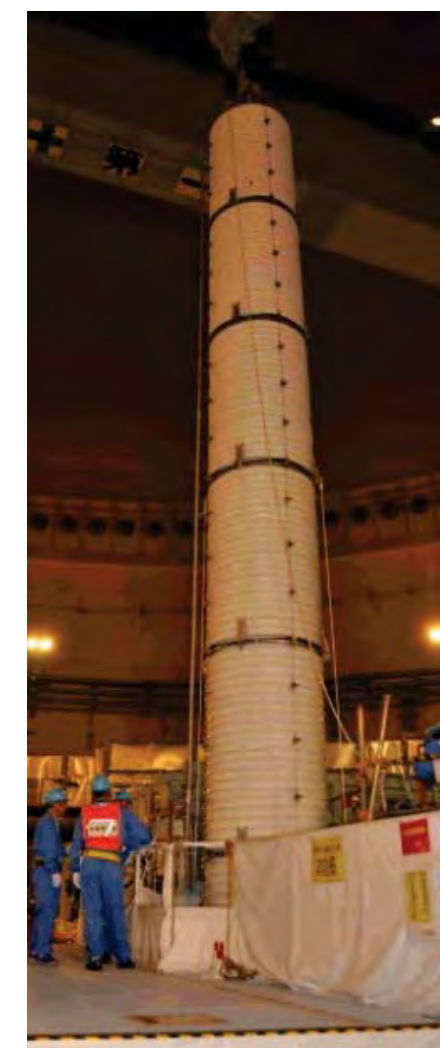
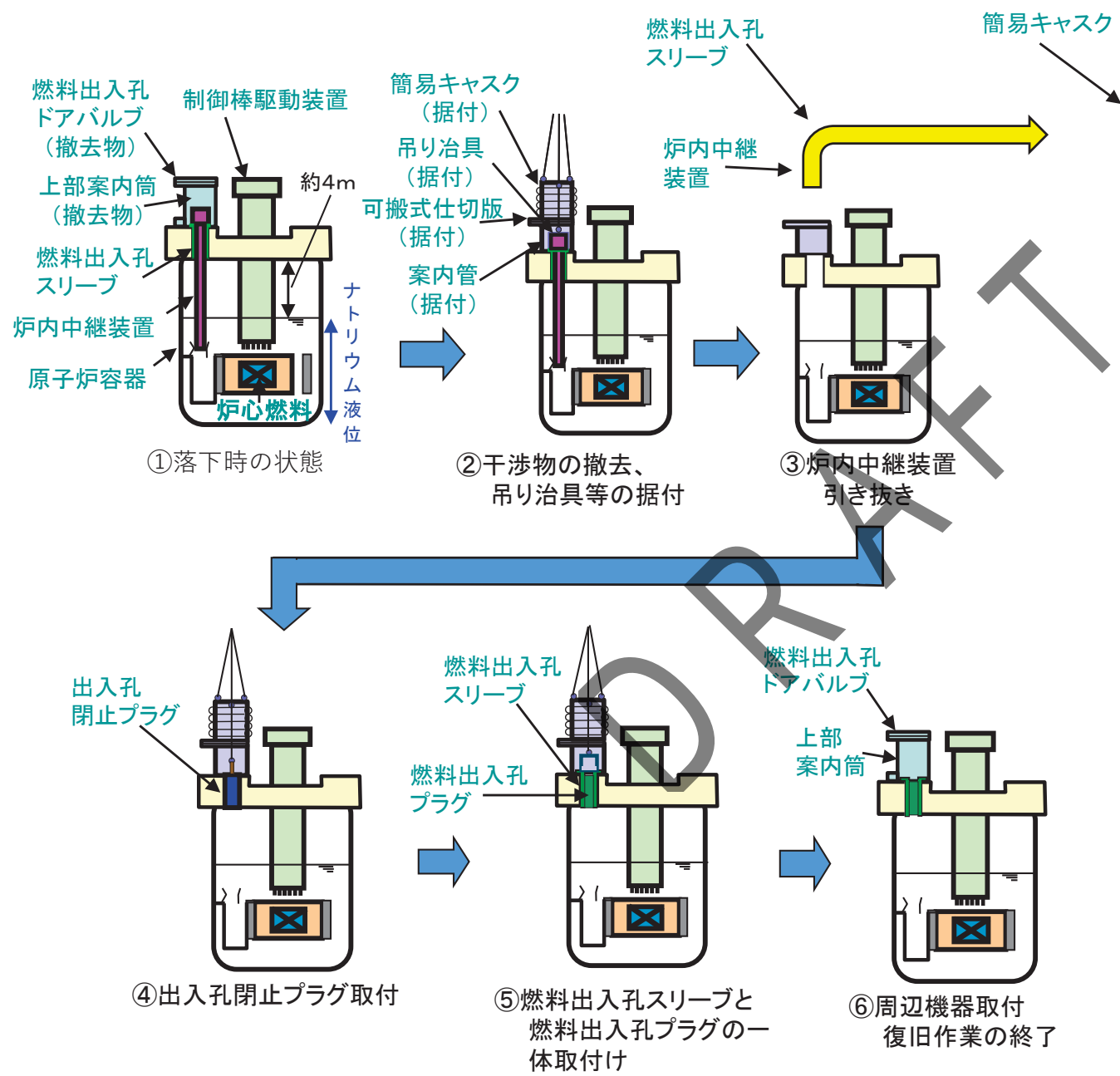
(炉上部平面図)

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

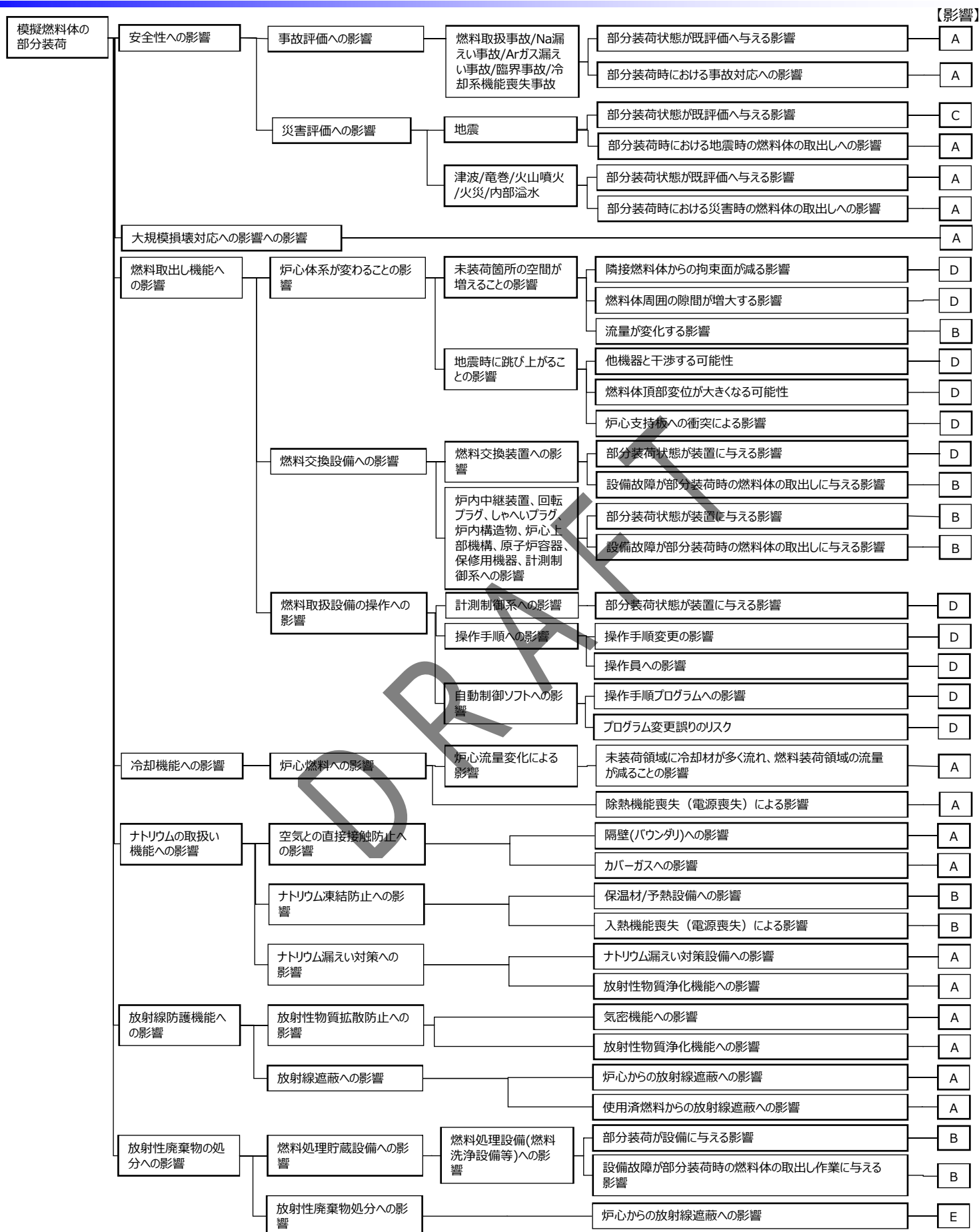
炉上部の固定プラグに設置された予備孔を利用し、内面観察と同様にペリスコープを原子炉容器内に挿入  
 観察は、ナトリウム液面から約1.57m、約160℃の1次系アルゴンガス中の原子炉容器内環境下において、観察部位（上部・下部案内管の隙間、接続ピン）を対象として、アクリル板を設置した観察窓から、鉛直方向で約9m、水平方向の約2.3mの焦点距離で写真を撮影



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



# 【参考8】 部分装荷による影響評価一覧



【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