



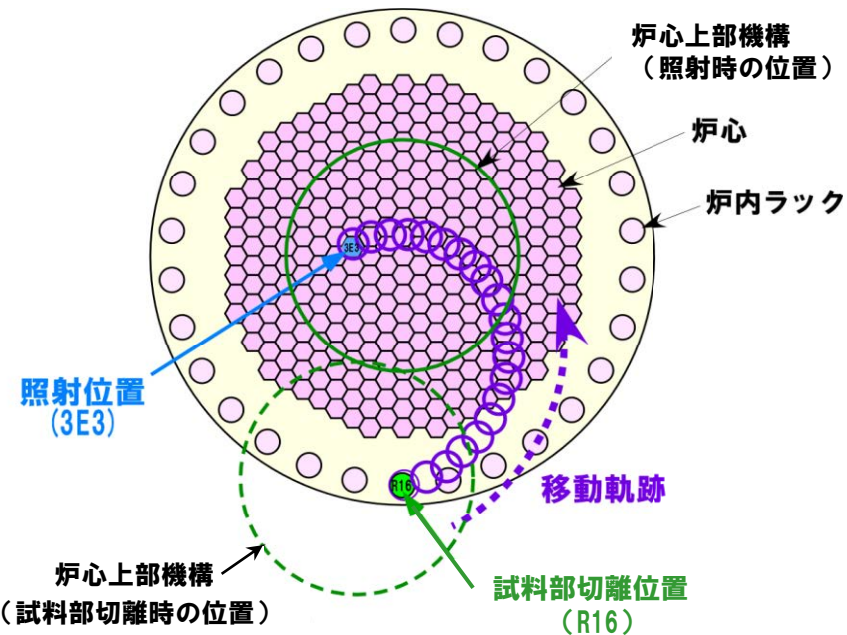
JY保-7-1

MARICO-2のルースパーツに関する 審査会合指摘への回答

2023年11月16日
日本原子力研究開発機構
大洗研究所 高速実験炉部

法令報告後のMARICO-2のルースパーツの 調査状況について

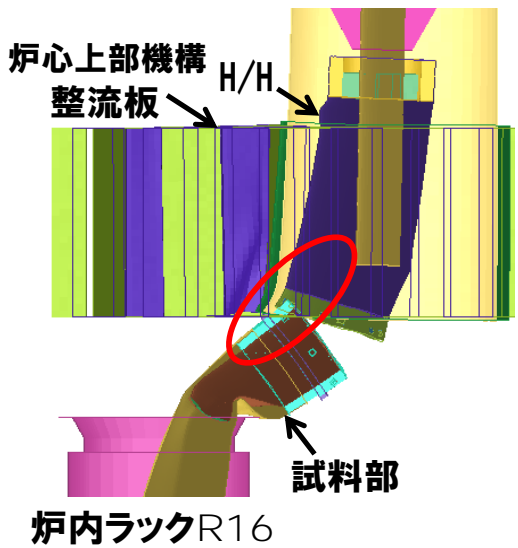
MARICO-2試料部の切り離し不能により発生したルースパーツ



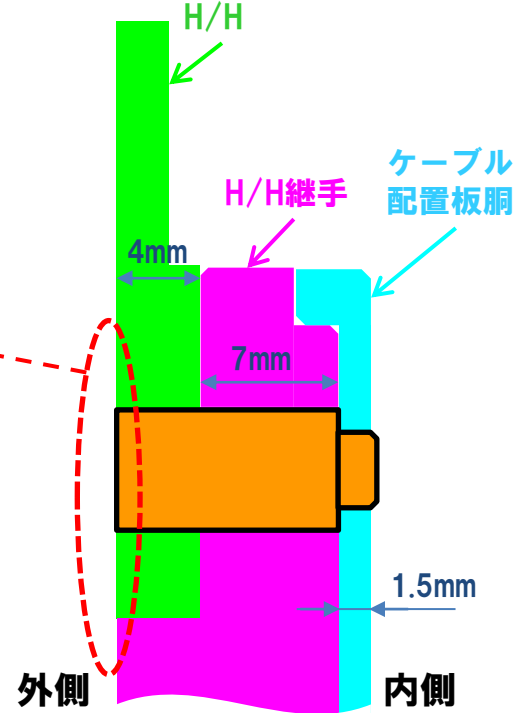
MARICO-2の移動軌跡

- MARICO-2試料部に6本の固定ピンで固定していたハンドリングヘッド (H/H) が分離 (H/Hは炉心上部機構内で保持機構に保持された状態)
- 炉内観察画像の解像度ではH/H側 (炉心上部機構側)、に固定ピンは確認できず、固定ピンの脱落*を想定

* MARICO-2試料部切離作業位置 (炉内ラックR16上部) から、固定ピン落下位置は炉内ラックR16上部近傍もしくはは炉心外周槽と推定



* 溶接施工試験の写真

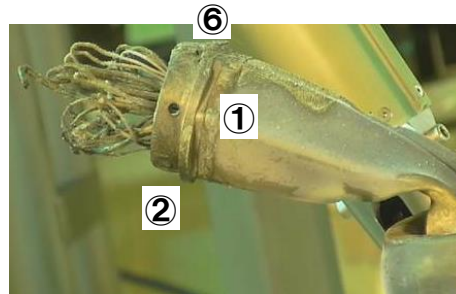
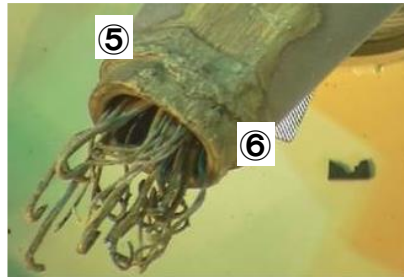
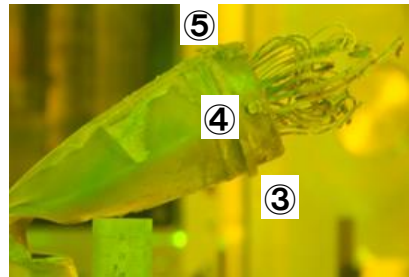


H/H 固定ピン

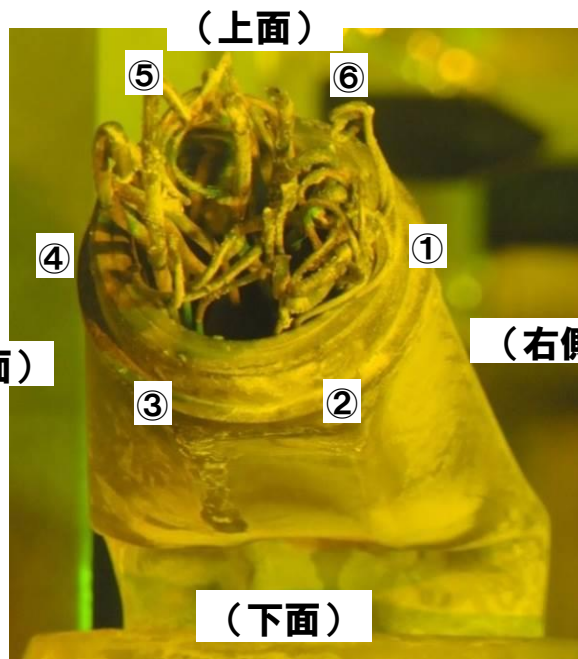
直径: 6 mm
 長さ: 13 mm
 個数: 6 本
 質量: 2.7g/本



回収したMARICO-2試料部頂部の詳細外観観察

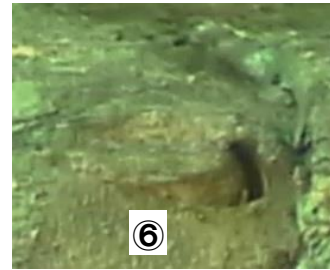


(左側面)



(上面)

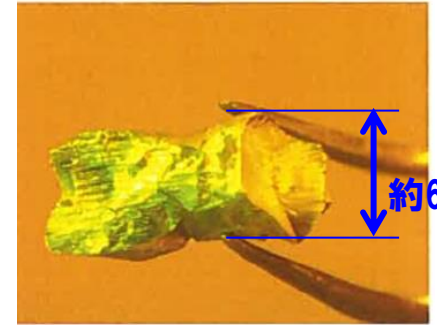
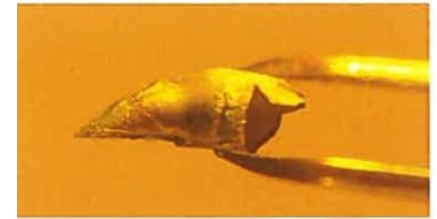
(右側面)



(下面)



完全に脱落



約6mm

長さ : 約 12mm
 幅 : 約 6mm
 線量率 : 約 20mSv/h
 質量 : 約 1.1g

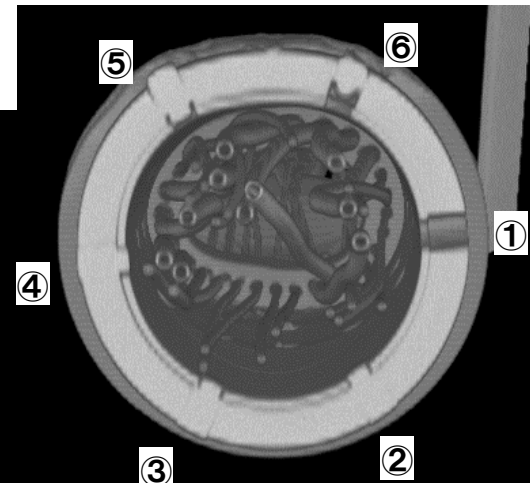
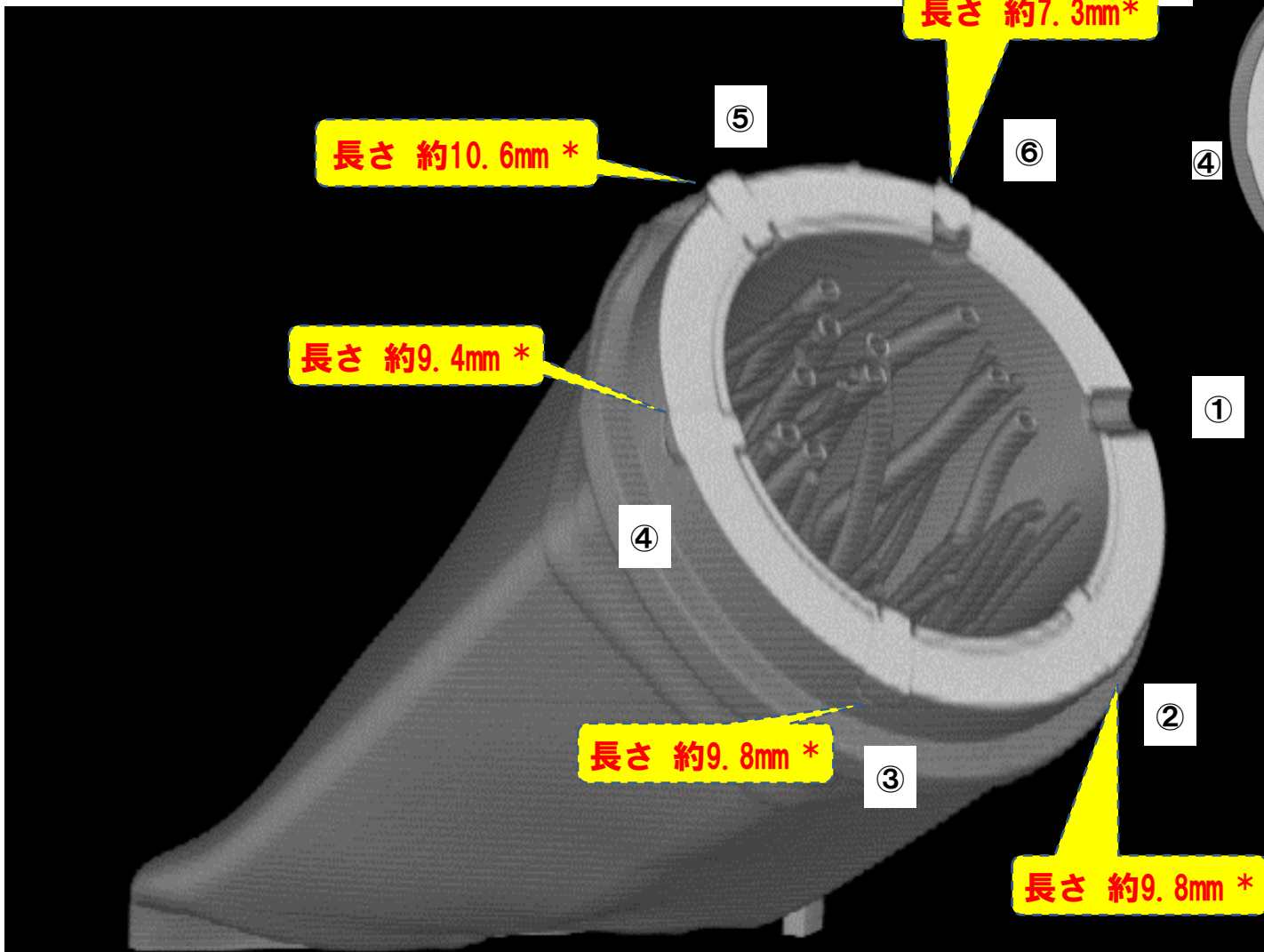
**MARICO-2試料部のPIEで
 約1.1gの金属小片を確認**

・元素分析の結果、固定ピンと同じSUS316系のステンレスであり、炉心上部機構の材料(SUS304)ではない。

・組成、形状及び試料部内から回収されたことから固定ピンの一部と判断。

2014年11月～2015年8月にかけて、照射燃料集合体試験施設において、調査を実施した。その結果、固定ピン①の脱落を確認。その他の5本の固定ピンはハンドリングヘッド継手に残留(一部欠損有)。

MARICO-2試料部頂部のX線CT検査

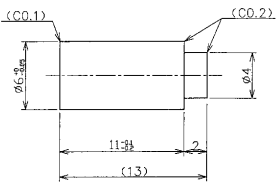


固定ピン①の脱落を確認。
その他の5本の固定ピンはハンドリングヘッド継手に残留(一部欠損有)。

*長さはCT画像のハンドリングヘッド継手の肉厚を基準として算出

X線CT画像に基づく固定ピン欠損量の評価

直径: 6 mm
長さ: 13 mm



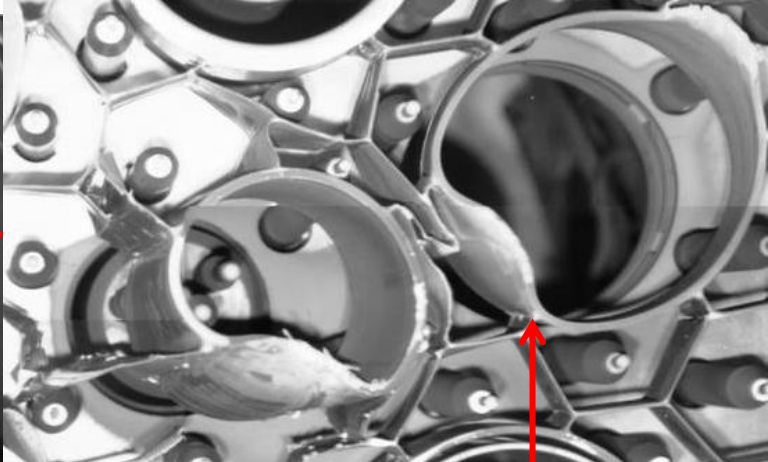
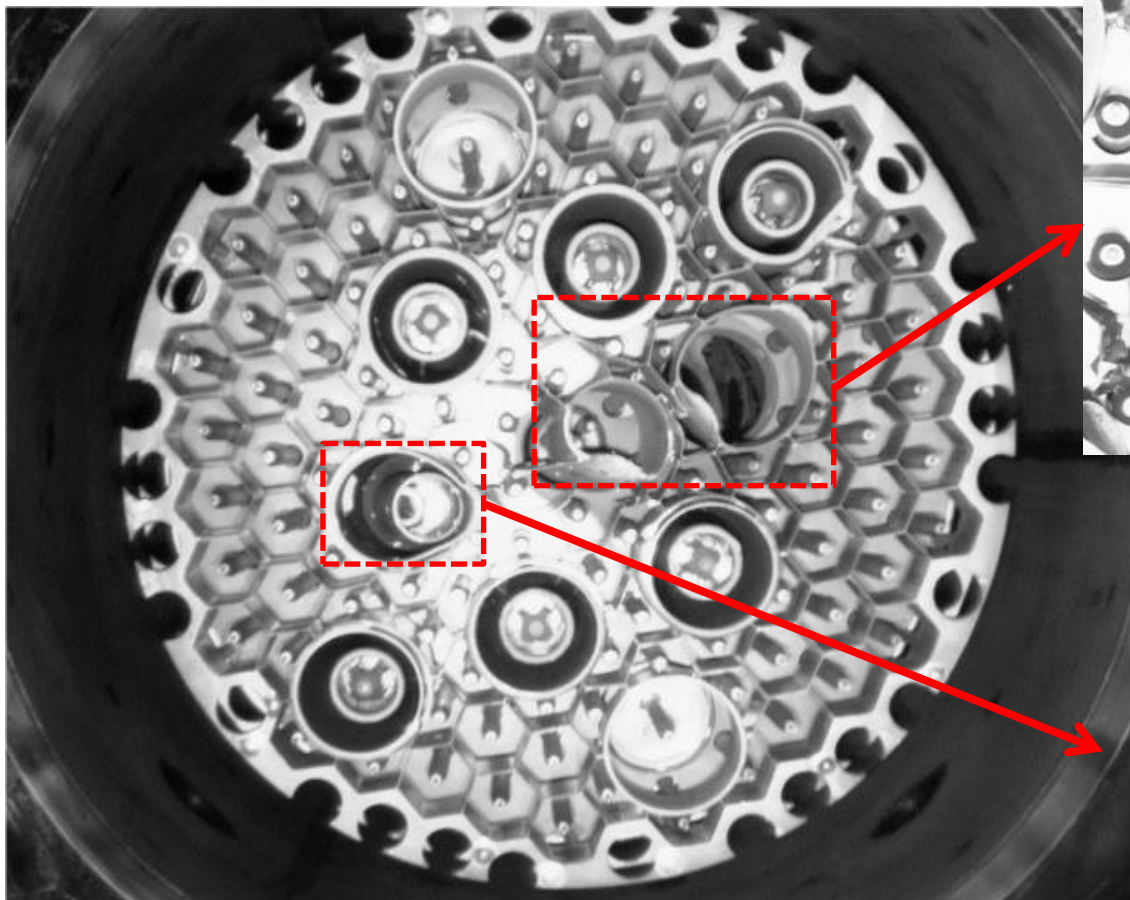
固定ピン構造

- 6本中1本は完全に脱落しているが、他5本は1/2以上がハンドリングヘッド継手部に残存。
- X線CT画像に基づく残存量及び回収された固定ピン小片の質量を考慮すると、試料部で確認された固定ピンは合計約**10.4g**、回収されていないルースパーツは約**5.7g**となる。

固定ピン番号	①	②	③	④	⑤	⑥	小片	計算合計
CT画像での残存長さ [mm]	0	9.8	9.8	9.4	10.6	7.3		
欠損部長さ (φ4mm部) [mm]	2	0	0	0	0	0		
欠損部長さ (φ6mm部) [mm]	11	3.2	3.2	3.6	2.4	5.7		
SUS316の密度 (室温) [g/cm ³]	7.97	7.97	7.97	7.97	7.97	7.97		
各固定ピン質量 [g]	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	—	16.1
各固定ピン回収量 [g]	0.00	1.96	1.96	1.87	2.14	1.39	1.1	10.4
各固定ピン欠損量 [g]	2.68	0.72	0.72	0.81	0.54	1.28	—	5.7 ※
固定ピンの欠損率 (%)	100.0	26.9	26.9	30.3	20.2	47.9	—	35.2 ※

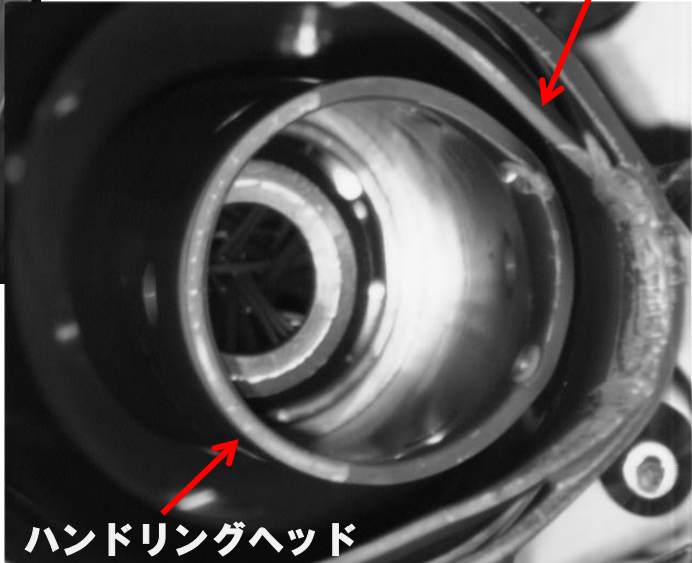
※各固定ピン欠損量と小片の質量を考慮した値

旧炉心上部機構回収時の下面観察結果



整流板（肉厚：約0.8mm）

上部案内管



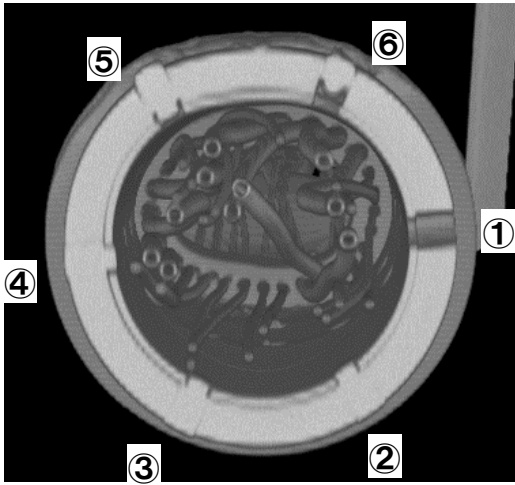
ハンドリングヘッド

旧炉心上部機構を回収のために引抜いた際に、耐放射線性カメラで観察。法令報告時の耐放射線性ファイバースコープによる観察に比べて画質が向上。

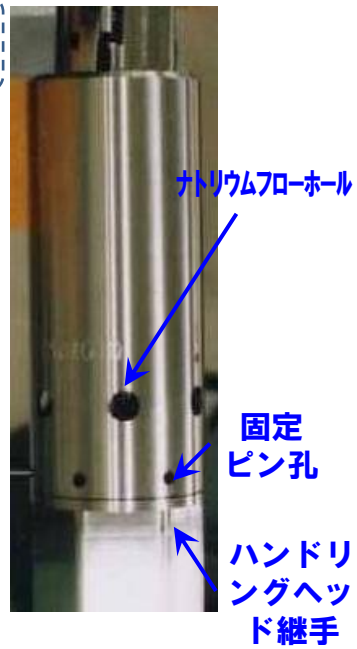
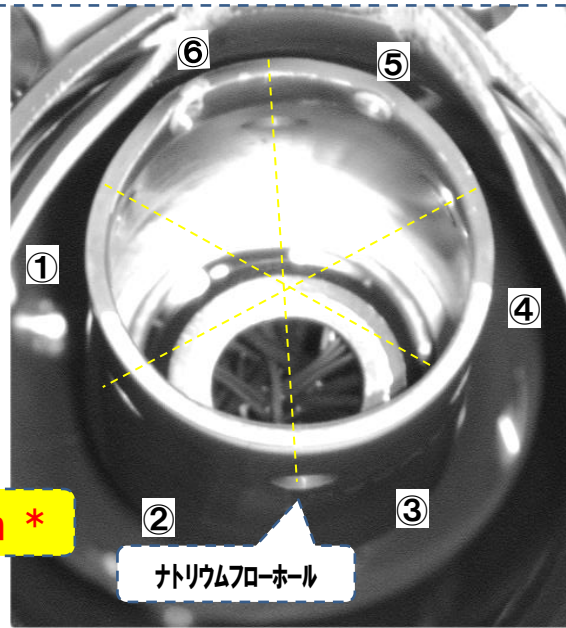
MARICO-2ハンドリングヘッドの観察結果



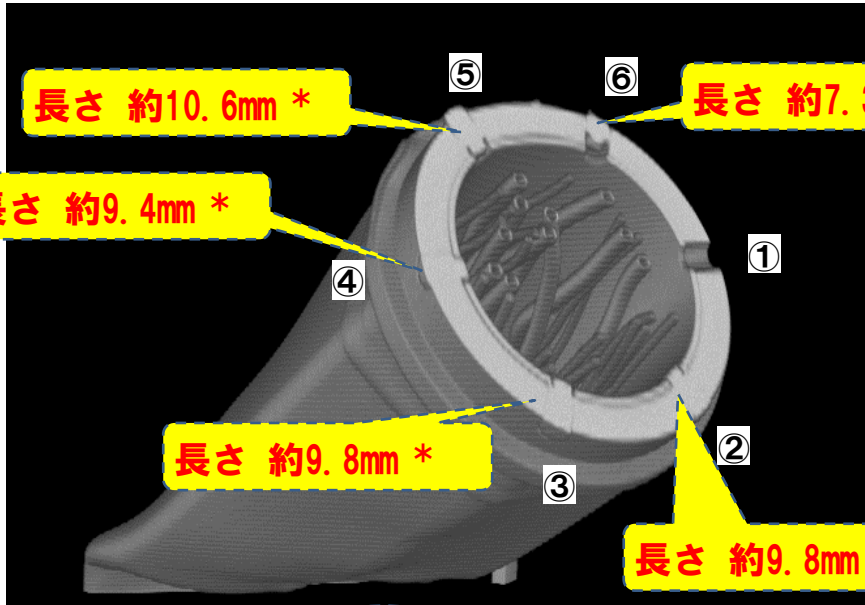
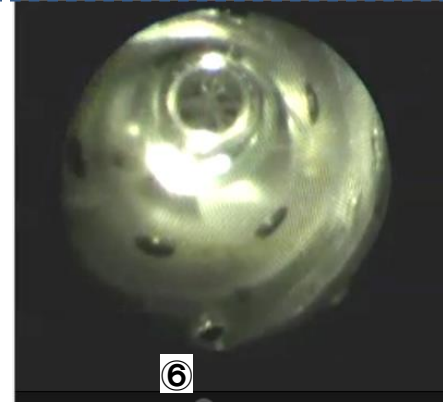
MARICO-2試料部のX線CT検査結果とハンドリングヘッド観察結果の突合せ



旧炉心上部機構引抜時に撮影したハンドリングヘッド（耐放射線性カメラによる撮影）



旧炉心上部機構下面観察時のハンドリングヘッド内部（耐放射線性ファイバースコープによる撮影）



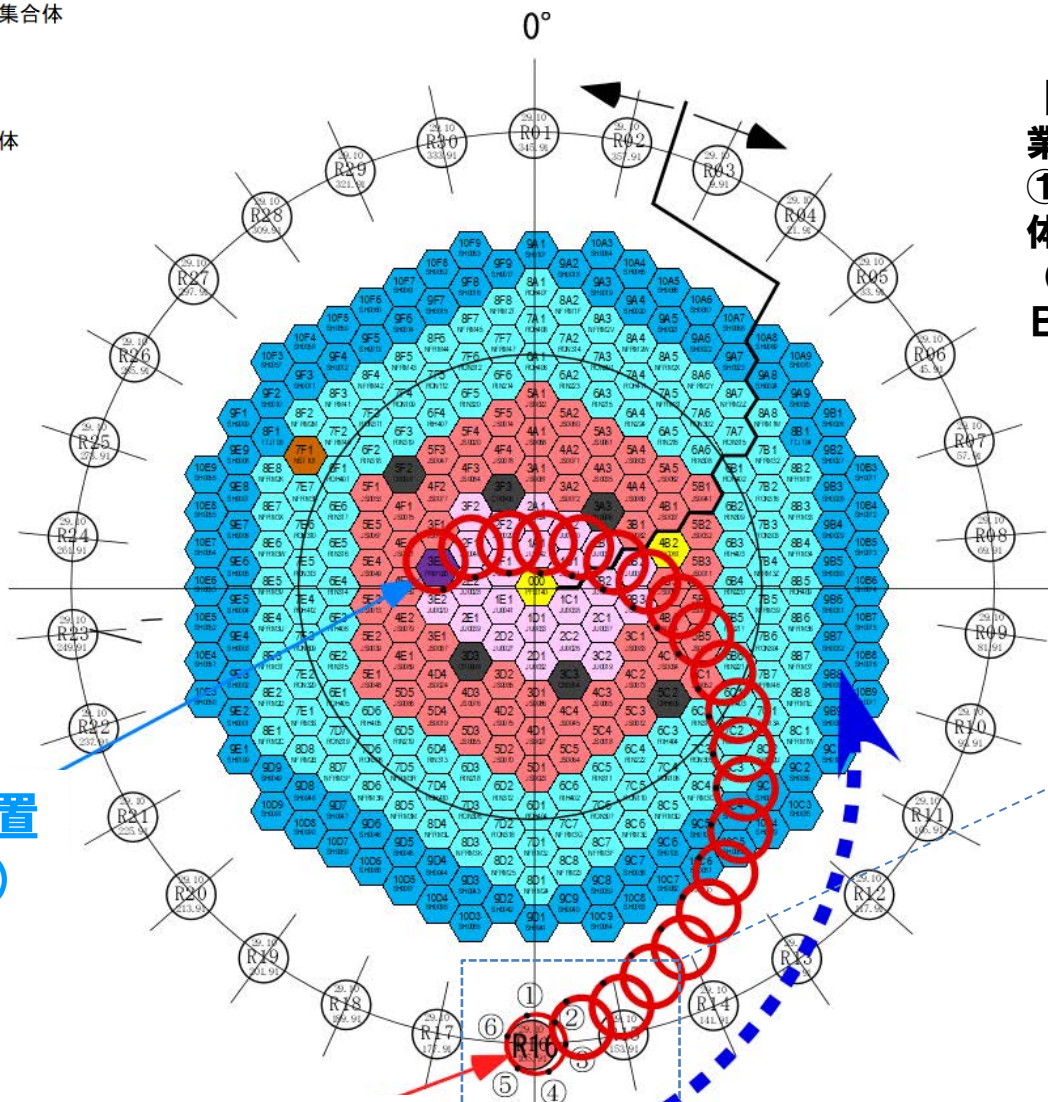
②③④⑤⑥は、ハンドリングヘッド継手に固定ピンが残留している

*長さはCT画像のハンドリングヘッド継手の肉厚を基準として算出

ハンドリングヘッド継手に固定ピンが残留

MARICO-2試料部切離作業後のハンドリングヘッド固定ピン①溶接部の移動軌跡

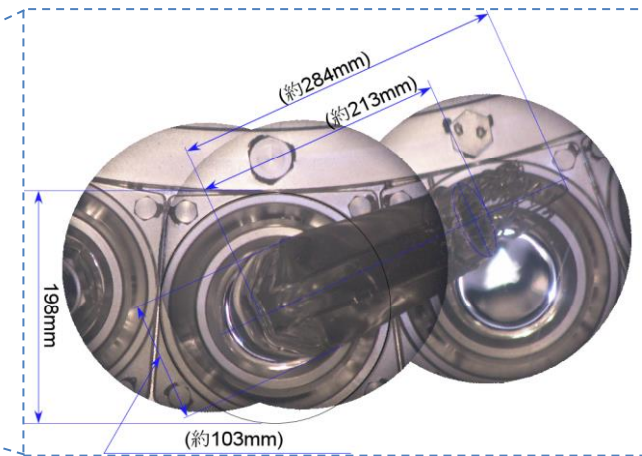
-  内側炉心燃料集合体
-  外側炉心燃料集合体
-  制御棒
-  照射燃料集合体
-  中性子源
-  反射体
-  遮へい集合体
-  材料照射装置



【●】R16でのMARICO-2試料部切離作業後、ハンドリングヘッド固定ピン①溶接部は遮へい集合体、外側反射体、内側反射体、炉心燃料集合体（外側）、炉心燃料集合体（内側）、B型照射燃料集合体の直上を通過

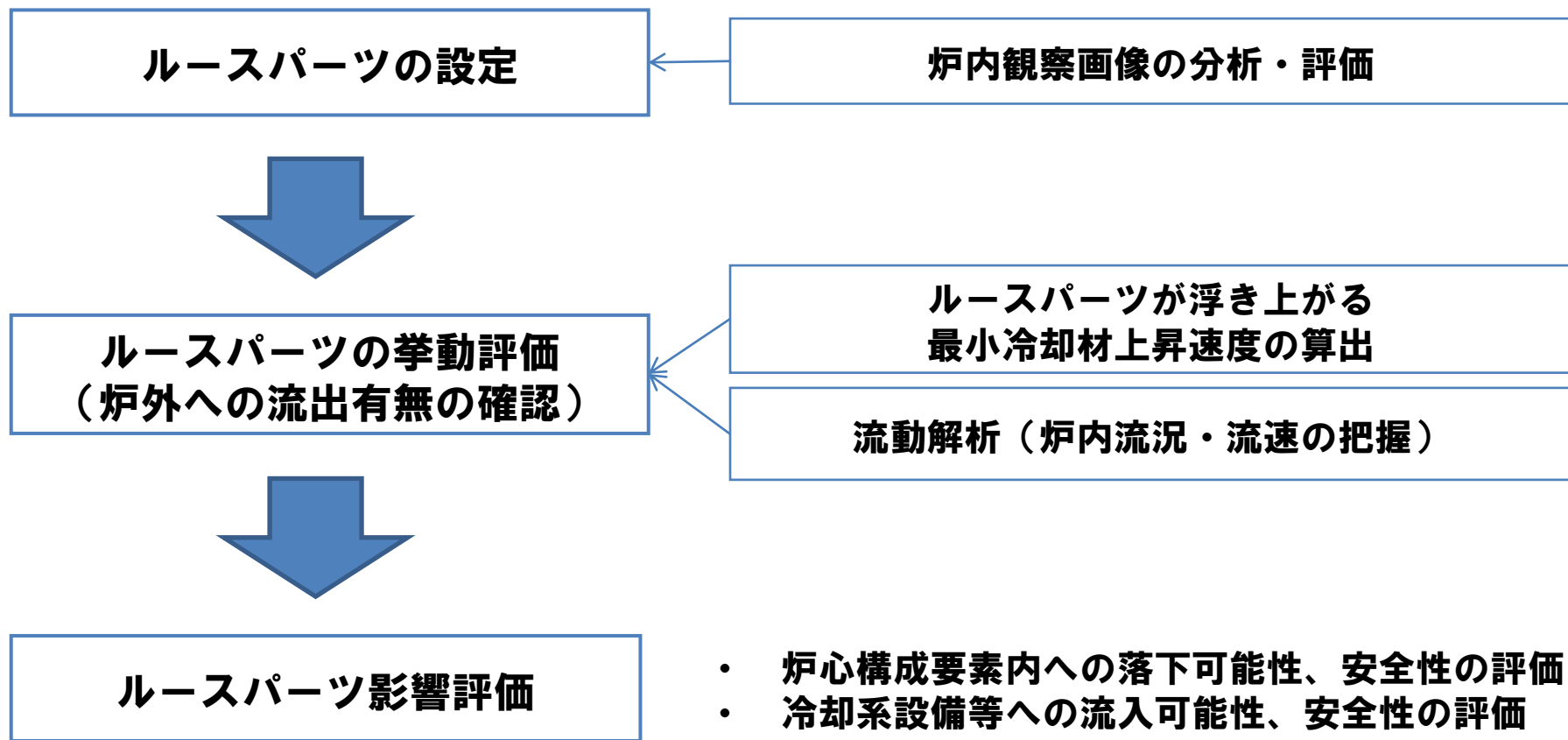
照射位置
(3E3)

試料部切離位置
(R16)



固定ピンの破損を考慮したルースパーツの 影響評価

ルースパーツの影響評価の流れ



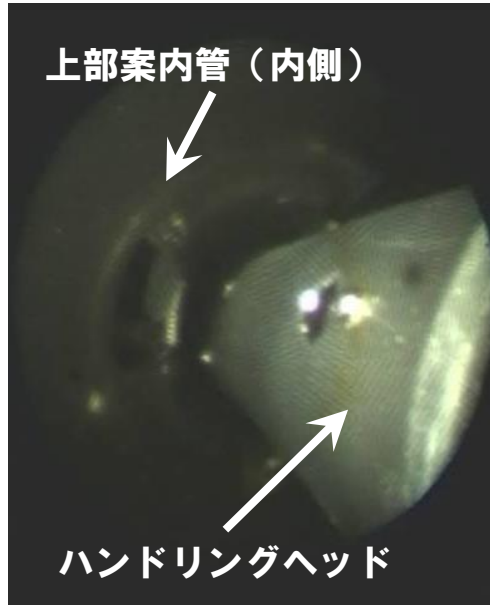
ルースパーツの設定

炉内観察結果（MARICO-2上部案内管・ハンドリングヘッド）

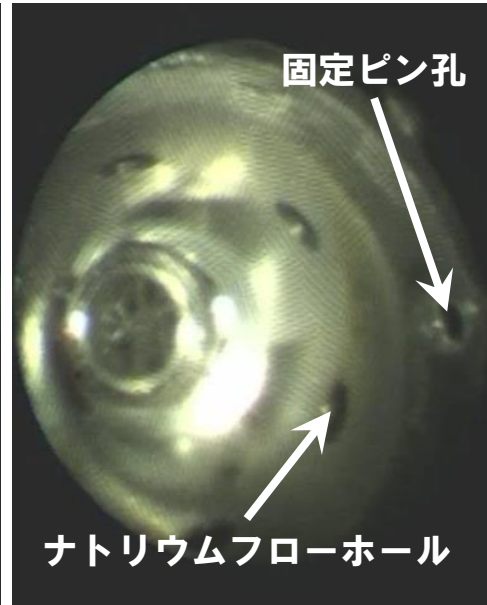
（組立時の写真）



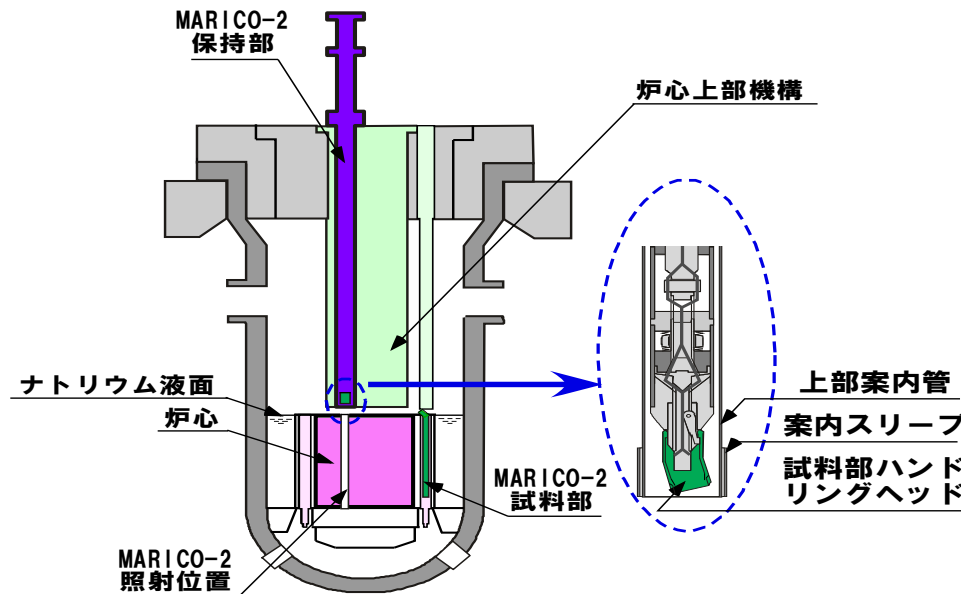
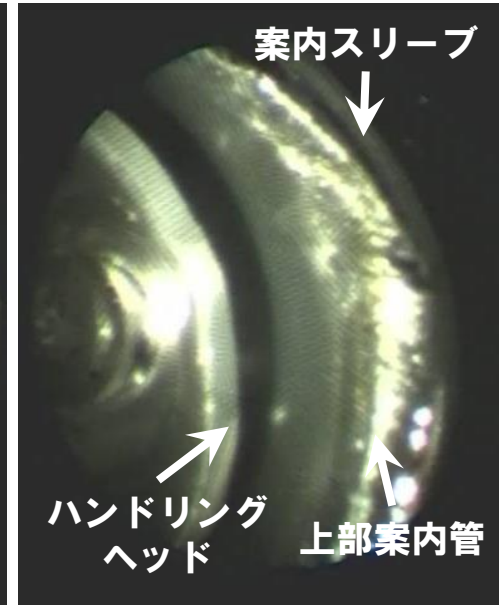
ハンドリングヘッド外側



ハンドリングヘッド内部



上部案内管下端変形部



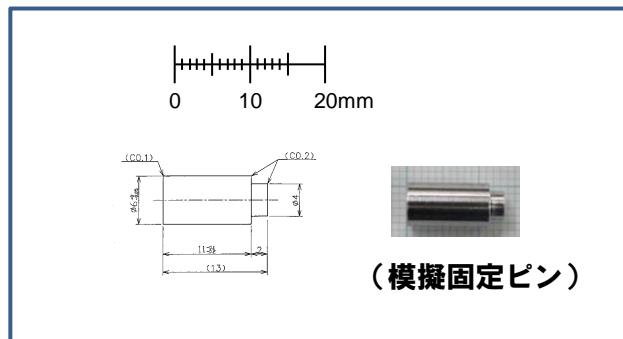
- 炉心上部機構内のMARICO-2保持部に、試料部ハンドリングヘッドが接続されていた。
- ハンドリングヘッドと試料部を接続していた固定ピン6本（概略寸法：直径6mm、長さ13mm）は、ハンドリングヘッド部分では確認できなかった。
- 固定ピン以外に、ルースパーツとして想定する必要がある部品等はなかった。

ルースパーツの設定

◆ 固定ピン及び破損した固定ピンをルースパーツと設定

<固定ピンの仕様>

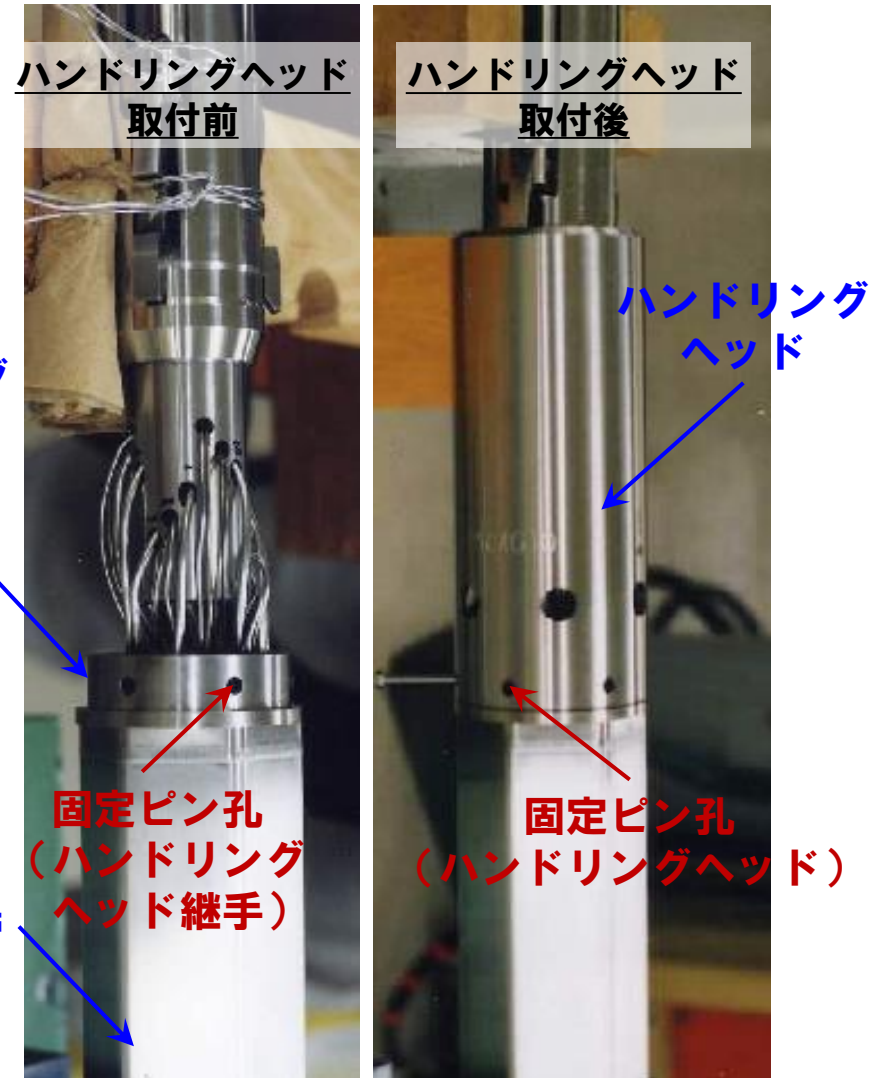
- 材料：SUS316
- 形状： $\phi 6\text{mm} \times 13\text{mm}$
(片側先端部2mmまで $\phi 4\text{mm}$)
- 数量：6本



ハンドリングヘッド外側より固定ピンを差し込み、ハンドリングヘッド外側 ($\phi 6\text{mm}$ 部分) で溶接

MARICO-2試料部の観察結果から、ルースパーツの長さは2.4mm~13mmと推定

組立時の写真 (MARICO-1)



異物の管理（建設時の1次主冷却系のフラッシング）

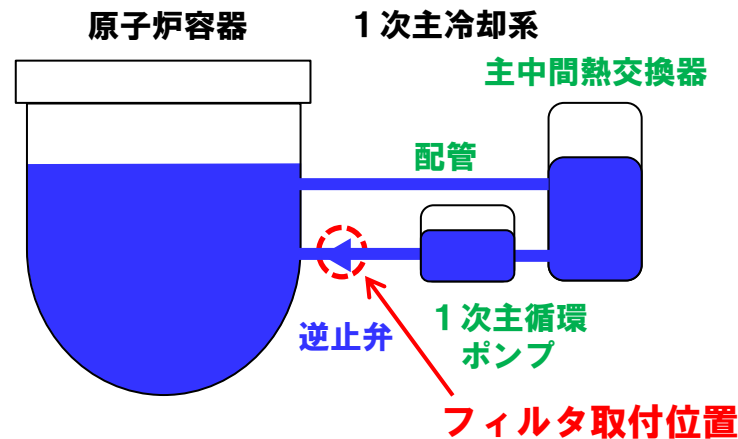
原子炉容器と1次主循環ポンプ間にある逆止弁位置にフィルタを取り付け、ナトリウム充填後に1次主循環ポンプを運転してナトリウムを循環させることにより、配管内に異物がある場合に捕獲する。

フラッシング運転後に、フィルタを取り出し、目視検査を実施した結果、異物は確認されなかった。

- フィルタ : 60メッシュ（濾過粒度：約300 μ m）
- 流量 : 630 m³/h ※
- 期間 : 50時間運転（1976年2月）

※ 右表に異物を鉄球とした場合に、流動可能な大きさ（ナトリウム流れにより浮き上がる最大径）を示す。

	配管径 (B)	流速 (m/s)	鉄球最大径 (mm)
主循環ポンプ～原子炉容器	12	2.4	28
主中間熱交換器～主循環ポンプ	18	1.2	6.0
原子炉容器～主中間熱交換器	20	1.0	3.7



1次主冷却系統フラッシング時のフィルタ取付位置の概念図

異物の管理（運転開始後の燃料集合体の交換等における管理）

◆ 燃料集合体等の交換作業

・ 燃料集合体等の構成確認

燃料集合体等の炉心構成要素は、原子炉容器内に装荷する前に、構成確認検査、X線撮影等を実施し、炉心構成要素内にルースパーツとなる可能性のある異物がないことを確認している。また、炉心構成要素の交換に伴い、原子炉容器内アルゴンガス雰囲気を開放することではなく、「常陽」の運転実績において、異物を混入させたことはない。

◆ 炉心上部機構交換・MARICO-2試料部回収作業

・ 炉心上部機構下面観察

炉心上部機構引抜時に炉心上部機構から脱落部品が発生していないことを確認するため、炉心上部機構をキャスク内に収納する際に、炉心上部機構下面を観察し、脱落部品がないことを確認している。

・ MARICO-2試料部回収作業監視

MARICO-2試料部回収作業監視と併せて、集合体頂部等を観察し、旧炉心上部機構引抜後に脱落部品が当該部がないことを確認している。

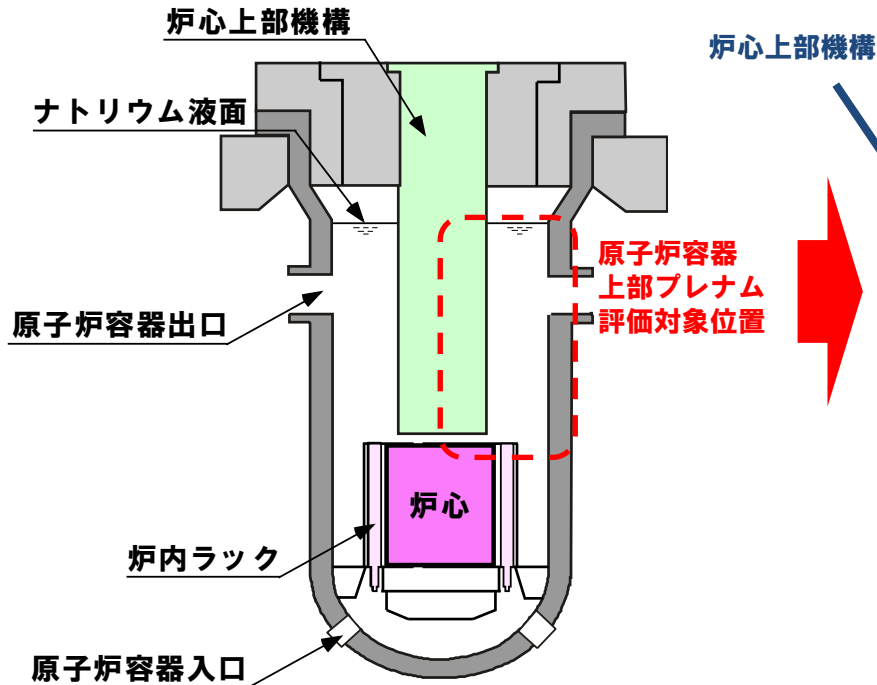
⇒ 燃料集合体等の交換及びバウンダリ開放作業においては、異物の混入を防止する管理としており、MARICO-2の固定ピン以外の異物は混入していない。

ルースパーツの拳動評価

原子炉容器上部プレナム部の流況 (2次元流動解析結果)

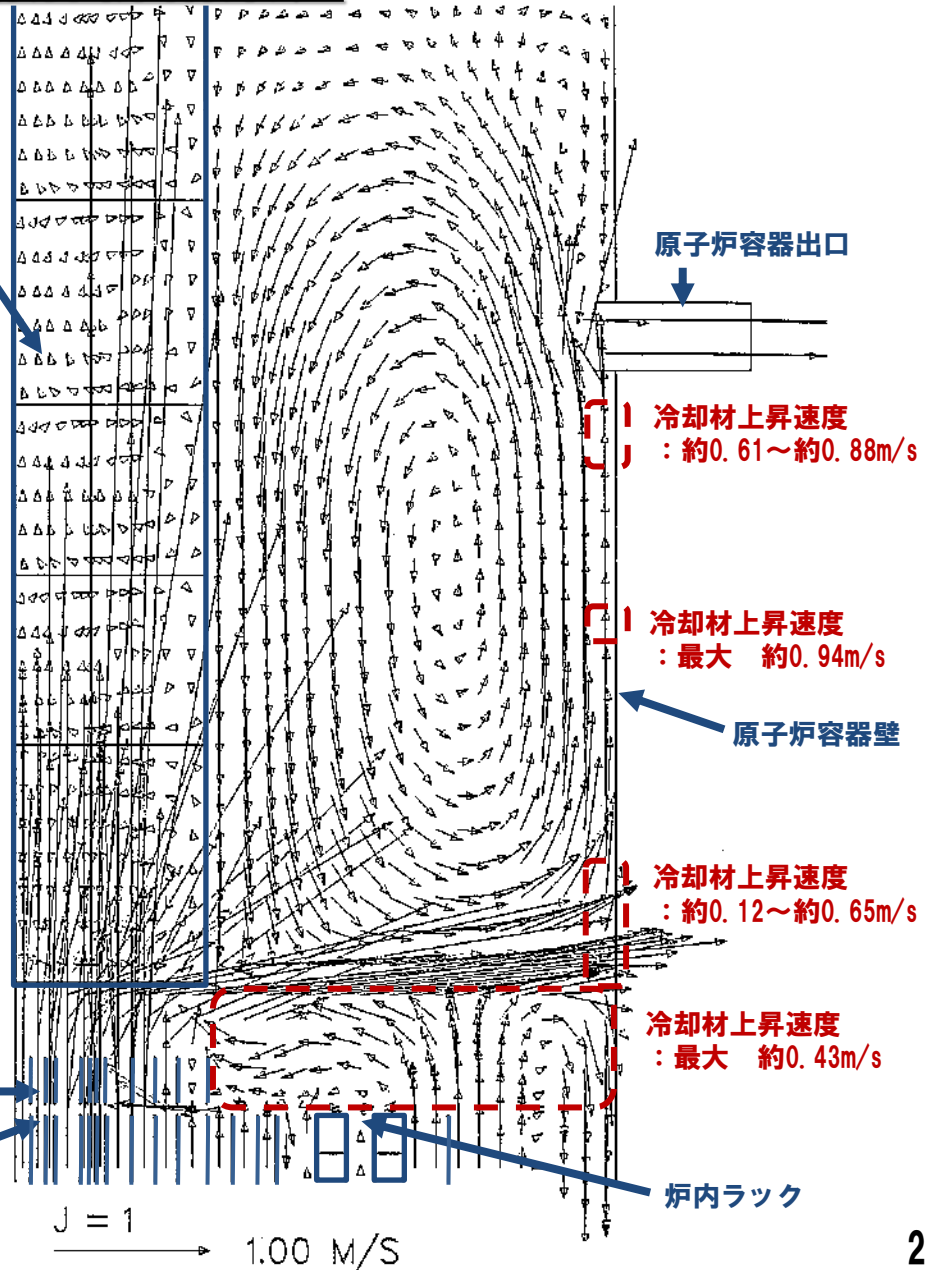
解析条件

- (1) 解析コード： AQUA
- (2) 解析モデル： 2次元R-Zモデル



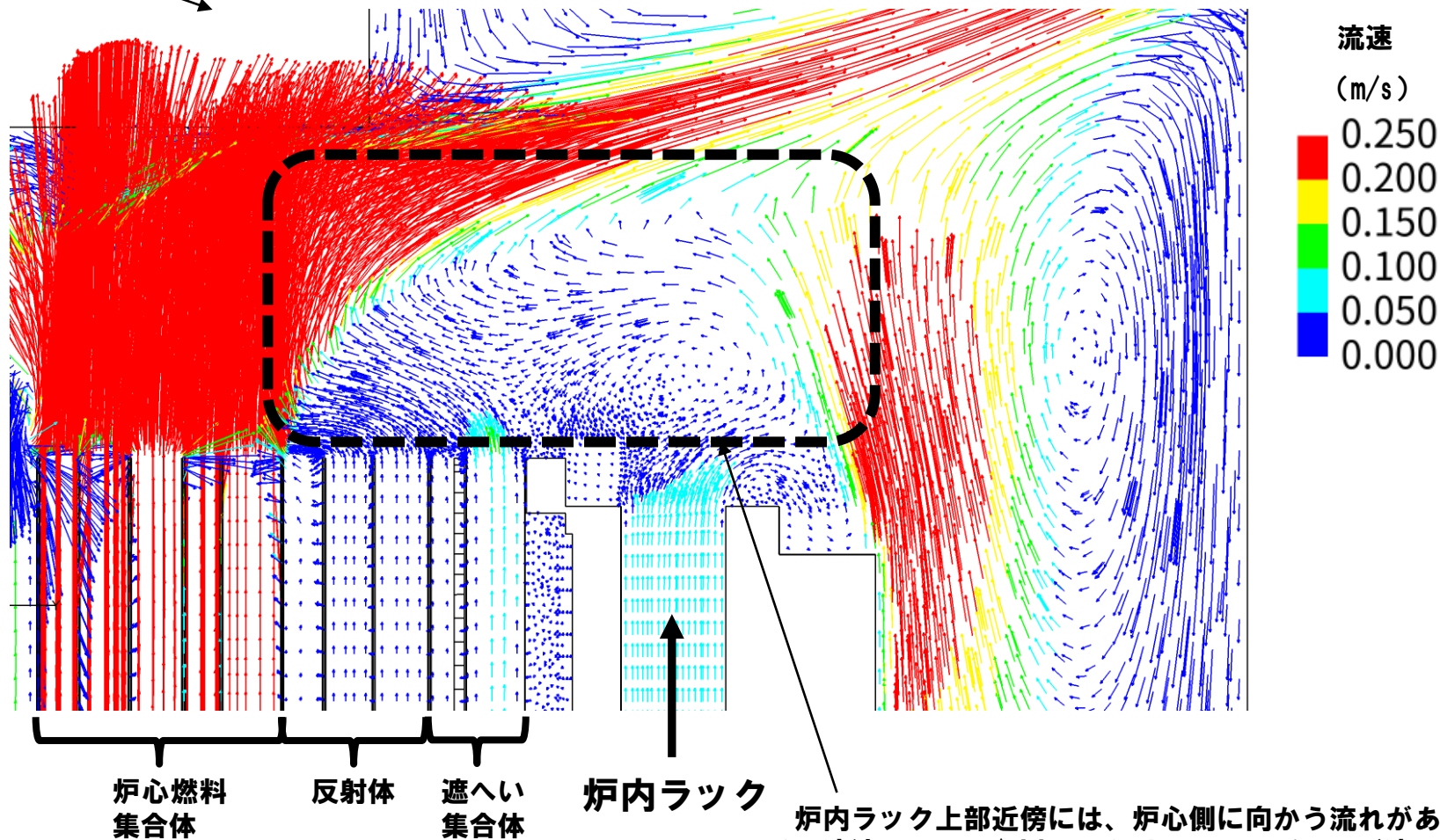
炉心燃料集合体から流出した冷却材は、炉心上部機構下面の下部熱遮へい板に衝突する。下部熱遮へい板は、角度を付けて設置しているため、冷却材は上向きの角度で原子炉容器壁に向かって流出する。原子炉容器壁に衝突した冷却材は、上昇流と下降流に分割されるが、原子炉容器出口配管に向かう上昇流の寄与が大きく、原子炉容器壁近傍の冷却材上昇速度は速くなる。

炉心上部機構
整流板
炉心構成
要素頂部



MARICO-2試料部切離作業時の炉内ラック近傍の流速分布

炉心上部機構

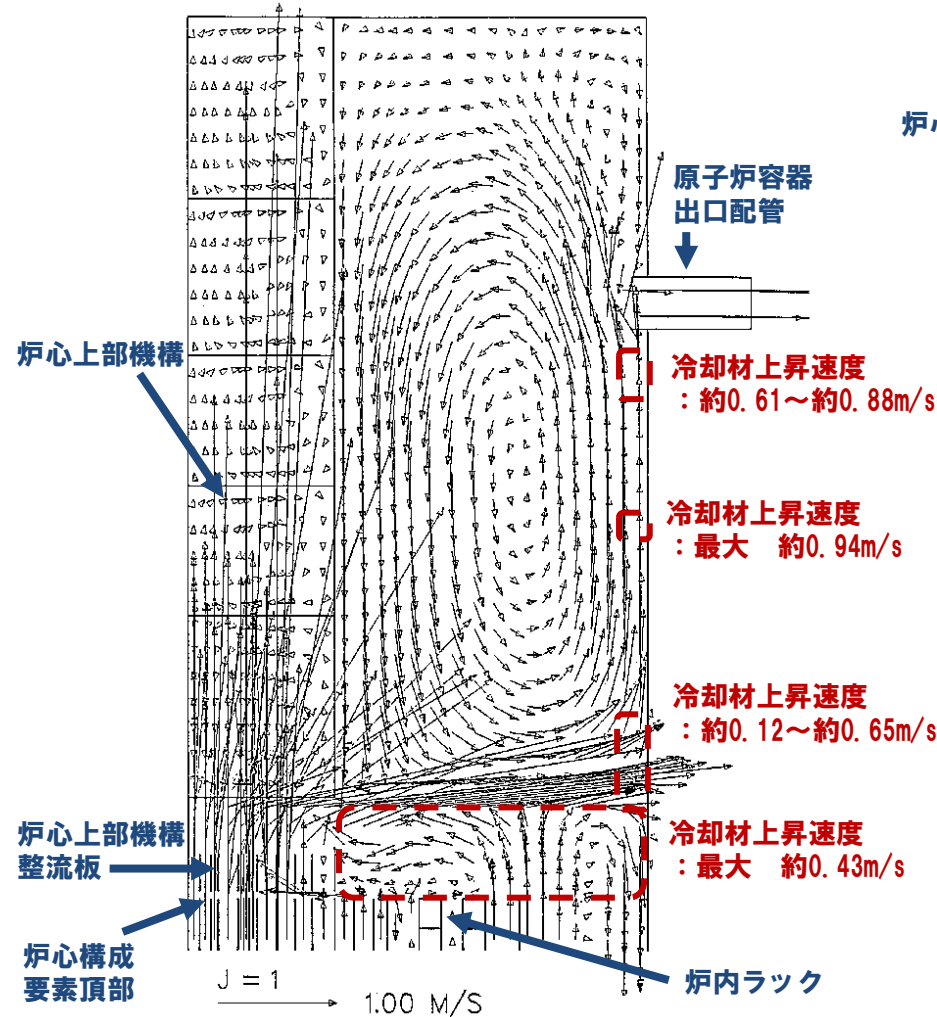


炉内ラック上部近傍には、炉心側に向かう流れがあるが、その流速は0.05m/s以下であり、ルースパーツが流れに沿って炉心燃料集合体内に落下することは考え難い。

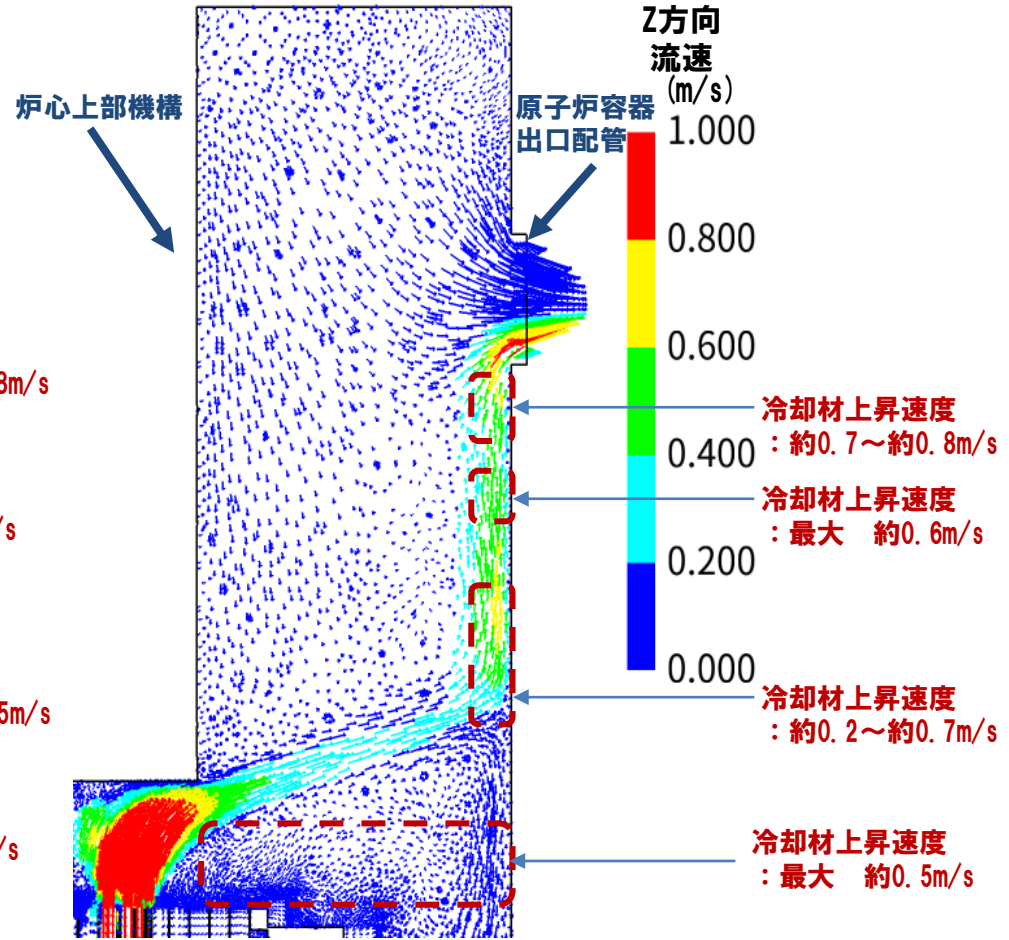
また、ルースパーツが炉心方向に飛散しても燃料集合体頂部にはナトリウムの流れあるため、燃料集合体内に落下することは考え難い。

炉内ラック上部近傍の流動解析結果

AQUAコード（2次元）の解析結果の検証（FLUENTコードの解析結果との比較）



AQUAコード（2次元）による原子炉容器内動解析結果



FLUENTコード（3次元）による原子炉容器内流動解析結果

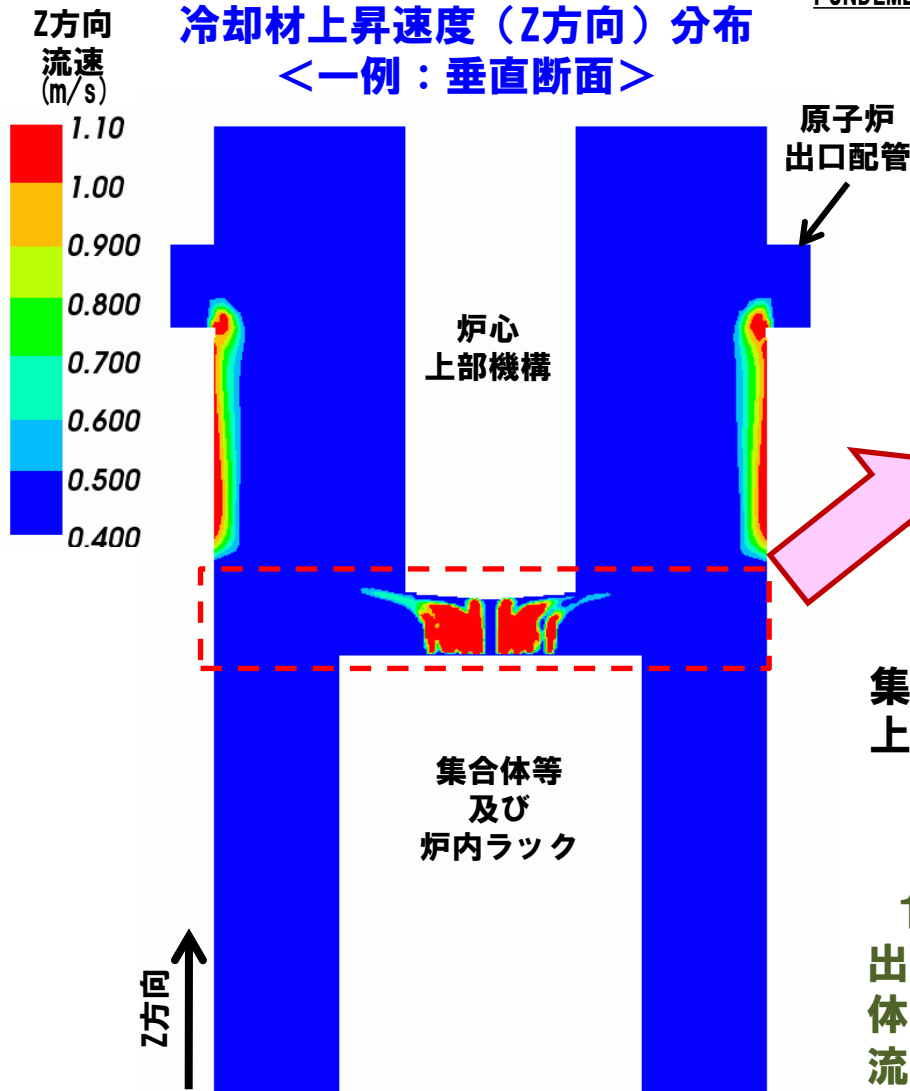
AQUAコード（2次元）とFLUENTコード（3次元）の解析結果を比較し、冷却材上昇速度の解析結果は概ね一致していることを確認した。また、原子炉容器上部プレナム部において、0.64m/sを超える上向きの流れは、原子炉容器出口まで連続しない結果は同じである。

燃料集合体内からの固定ピンの挙動予測

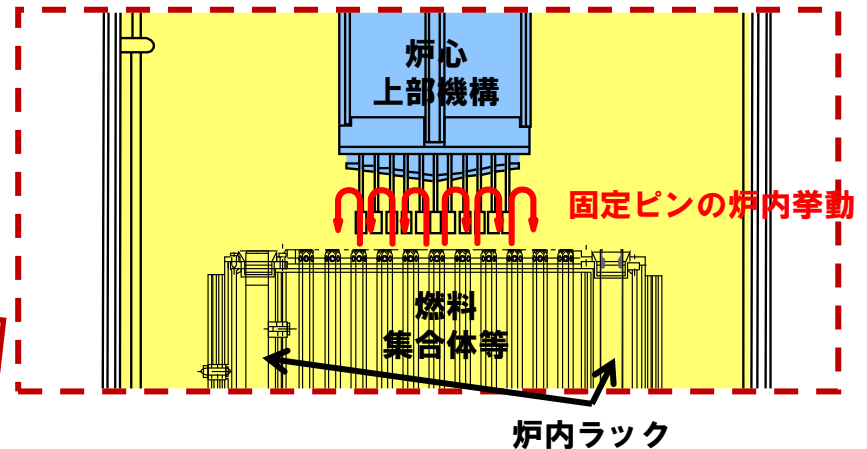
解析条件

- (1) 解析コード： AQUA※
- (2) 解析モデル： 3次元モデル

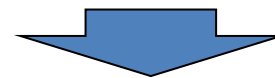
※AQUAによる原子炉容器上部プレナム部解析の検証に係る参考文献：
[1] 高速炉上部プレナム内温度成層化に関する解析手法の基本検証、日本機械学会論文集B編75巻751号、2009
[2] PRELIMINARY CALCULATION ON THERMAL STRATIFICATION PHENOMENA IN THE FUNDAMENTAL SODIUM EXPERIMENT "SuperCAVNA", N11P0087, NTHAS11



燃料集合体内に落下した固定ピンの1次冷却材流量上昇時の原子炉容器内挙動イメージ



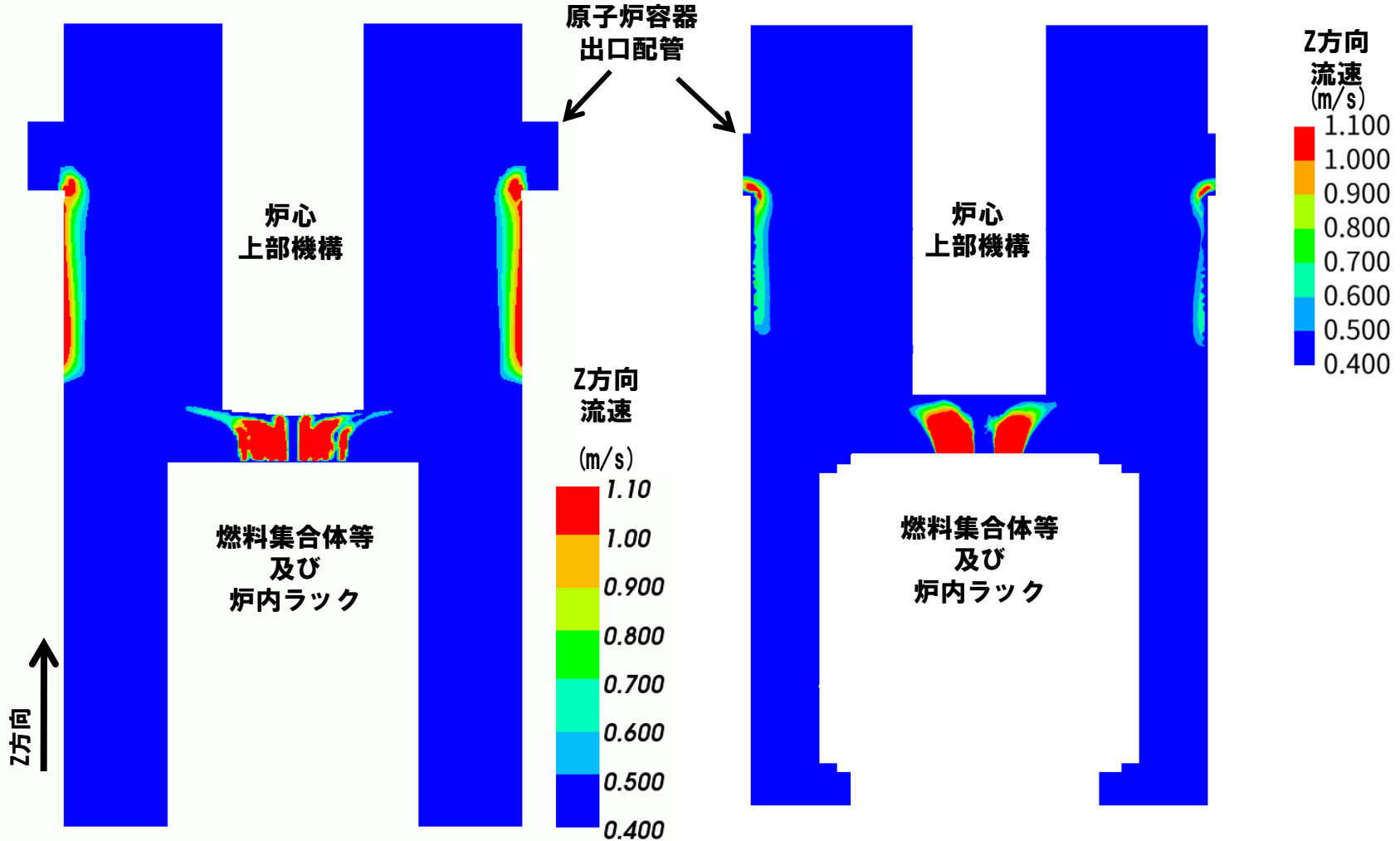
1次主循環ポンプの流量を増大させれば、燃料集合体内に落下していた固定ピンは流出し、炉心上部機構との隙間から炉心の外側に流出する。



1次冷却材流量の増大時に、燃料集合体内から流出した固定ピンは、冷却材上昇速度が小さい反射体・遮へい集合体領域や炉心外周槽に沈降し、定格流量到達後も浮き上がることはない。

AQUAコード（3次元）の解析結果の検証（FLUENTコードの解析結果との比較）

冷却材上昇速度（Z方向）分布＜一例：垂直断面＞



AQUAコード（3次元）による原子炉容器内流動解析結果

FLUENTコード（3次元）による原子炉容器内流動解析結果

AQUAコード（3次元）とFLUENTコード（3次元）の解析結果を比較し、冷却材上昇速度の解析結果は概ね一致していることを確認した。また、原子炉容器上部プレナム部において、0.64m/sを超える上向きの流れは、原子炉容器出口まで連続しない結果は同じである。

ルースパーツの挙動評価結果

固定ピンを浮き上がらせるために必要な最小冷却材上昇速度

: 約0.64m/s

原子炉容器上部プレナム部下部の冷却材上昇速度

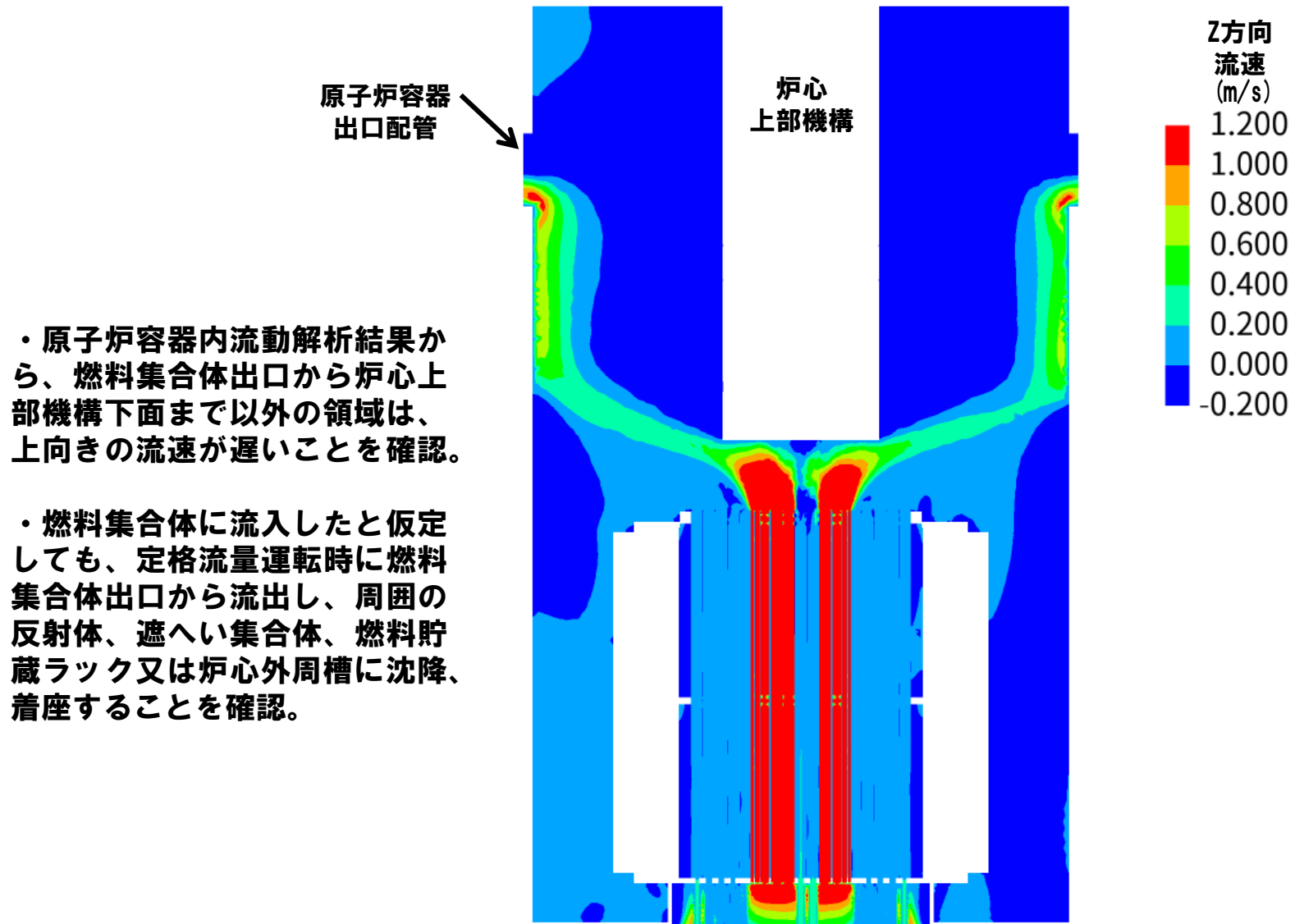
: 約0.43m/s (最大)



**固定ピンが原子炉容器プレナム部内を上昇し
原子炉容器出口配管より流出することはない**

原子炉容器内の流速分布（定格流量時）

冷却材上昇速度（Z方向）分布＜一例：垂直断面＞

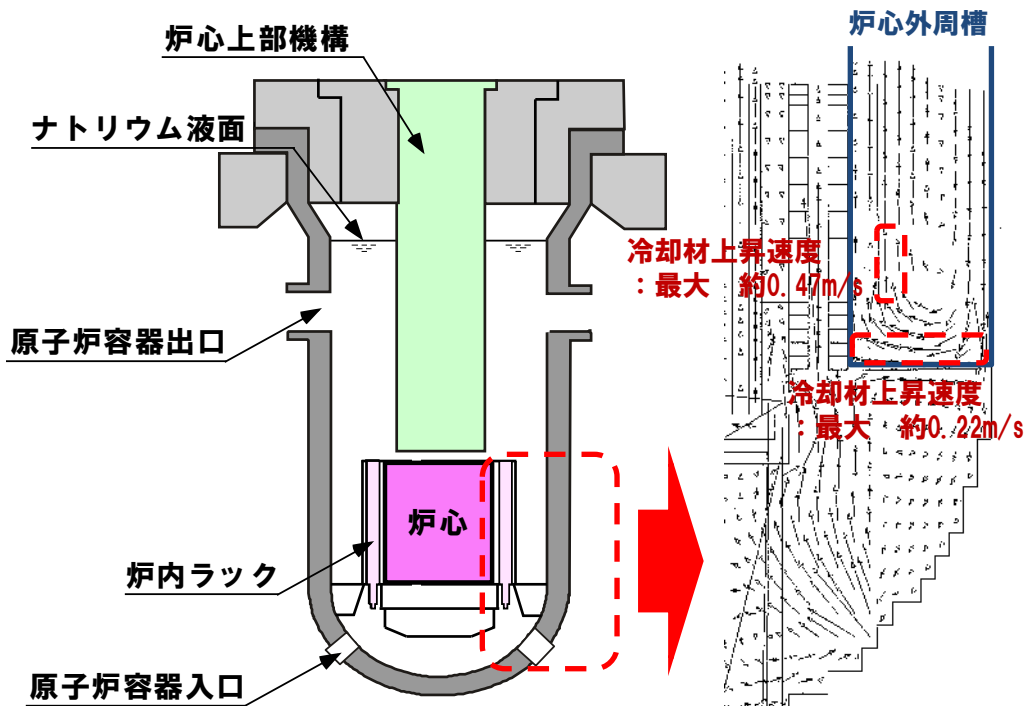


FLUENTコード（3次元）による原子炉容器内流動解析結果

ルースパーツの影響評価

ルースパーツの影響評価

- ◆ 固定ピンが原子炉容器出口配管より流出することはなく、**冷却系機器に問題が生じることはない。**
- ◆ 固定ピンの落下位置は、炉内ラックR16上部近傍もしくは炉心外周槽であると推定される。炉内ラックの移送ポットもしくは炉心外周槽に落下した場合、当該位置での冷却材上昇速度は小さい（最大約0.47m/s）ため、当該部位に落下した固定ピンが浮き上がることはなく、**炉心構成要素等に影響はない。**

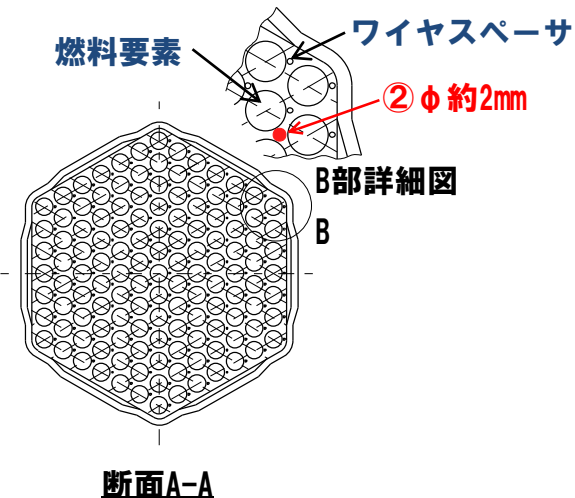
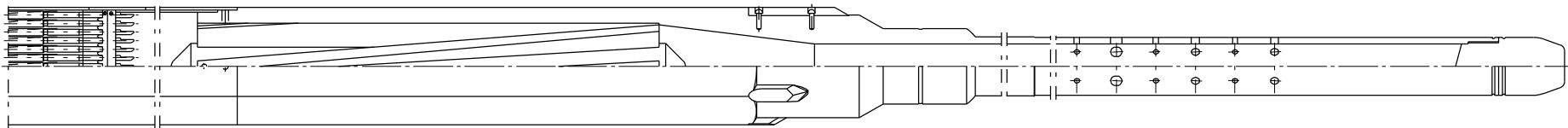
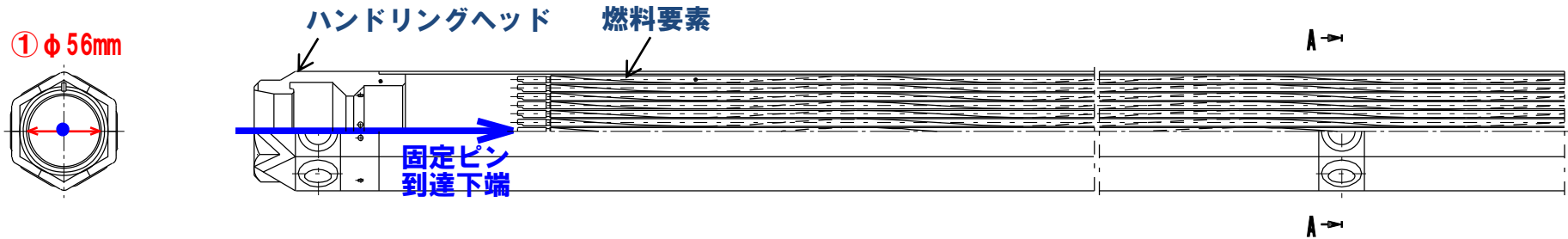


ただし、各炉心構成要素の上部から、固定ピンが落下したことを想定し、その影響を評価

- ・炉心燃料集合体
- ・制御棒
- ・制御棒下部案内管
- ・内側反射体
- ・遮へい集合体

炉心燃料集合体への固定ピン落下

→ 固定ピンの流入経路

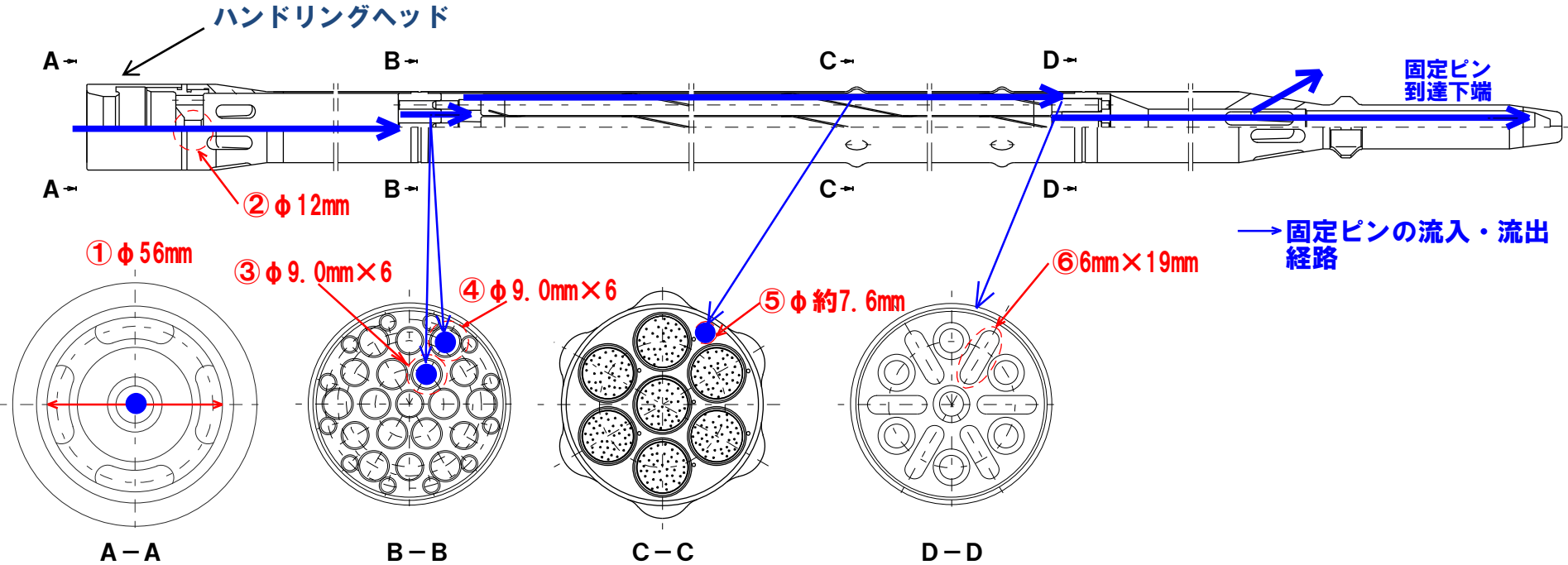


- ◆ ハンドリングヘッド開口部直径 : 56mm
- ◆ 燃料要素間ギャップ : 約2mm
(参考: ワイヤスペーサ直径 0.9mm)

固定ピンの影響評価

- ・ 上部より落下する可能性有
- ・ ただし、燃料要素バンドル間には落下せず、燃料要素バンドルの上部に留まるため、冷却材流量及び温度に与える影響は小さい。

制御棒への固定ピン落下

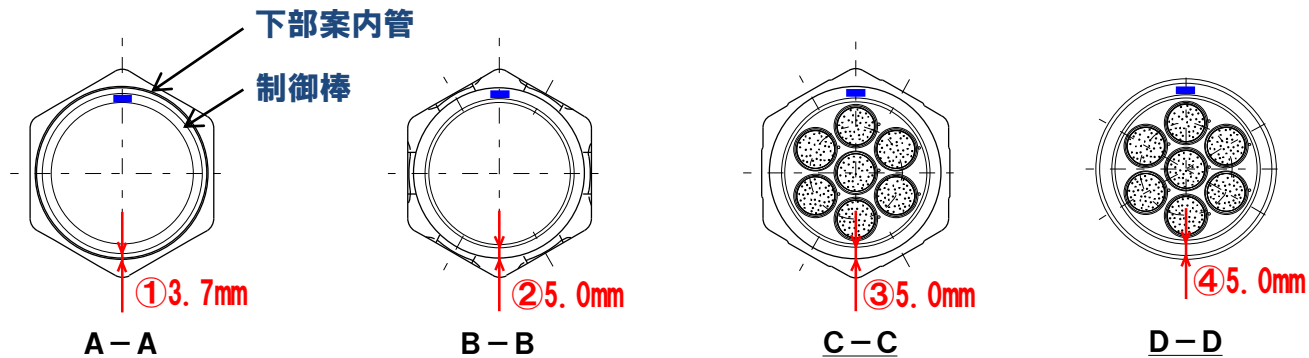
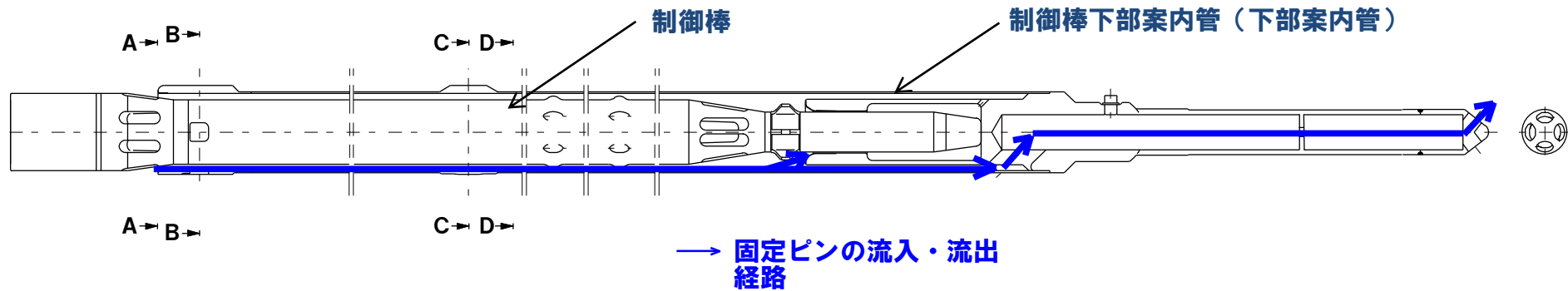


- ◆ ハンドリングヘッド開口部直径 : 56mm
- ◆ 下部グリッド板スリット幅 : 6mm

固定ピンの影響評価

- ・ 上部より落下する可能性あり
 - ・ 要素と保護管のギャップの一部を閉塞する可能性あり
 - 要素の単位面積あたりの発熱量は小さい
 - 流路面積が大きく、他の流路が確保される
 - ・ 要素と保護管のギャップ及び下部グリッド板を通過する可能性あり
 - ・ 制御棒下端に留まる可能性が高いが、制御棒外に流出する可能性あり
- 冷却材流量及び温度に与える影響は小さい
- 制御棒外に流出した場合、制御棒下部案内管のダッシュポットに着座、又はエントランスノズルを通過して低圧プレナムに着座することから、制御棒の挿入性を阻害しない。

制御棒下部案内管への固定ピン落下



◆ 制御棒と下部案内管のギャップ：3.7mm（着座時下部案内管上端）

固定ピンの影響評価

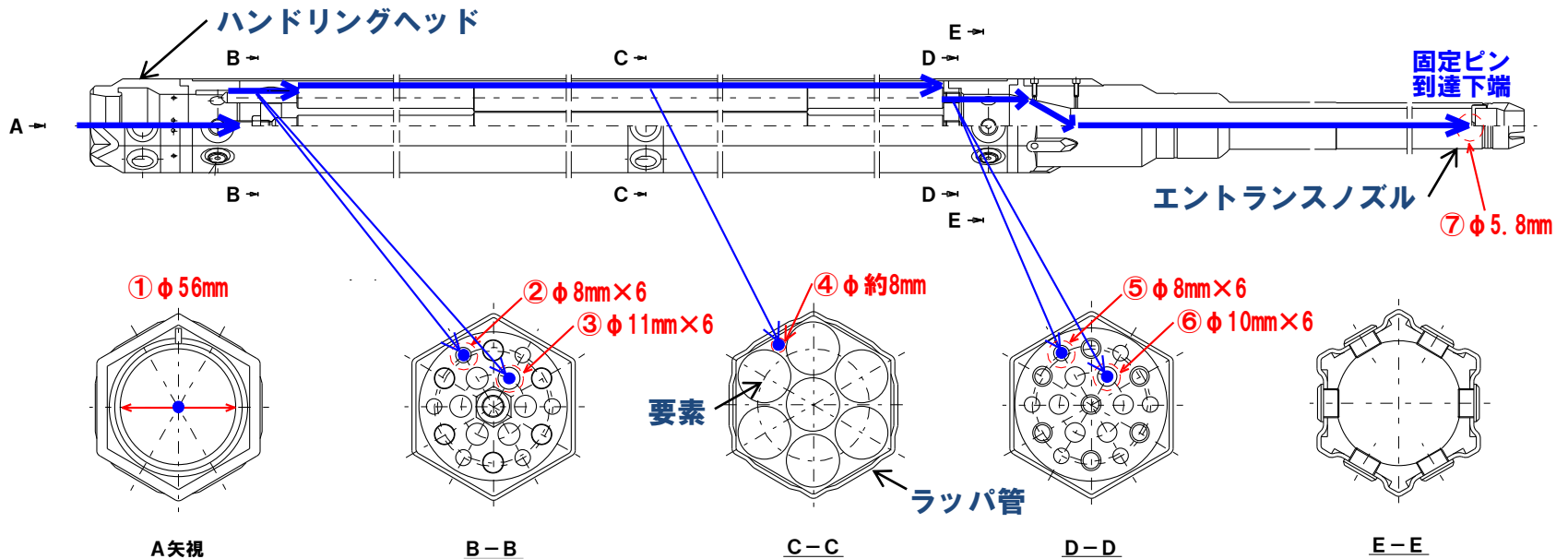
- 長さ3.7mm以下の固定ピンは下部案内管内へ落下する可能性があるが、制御棒と下部案内管の間隙を通過してダッシュポットに着座、又はエントランスノズルを通過して低圧プレナムに着座することから、制御棒の挿入性を阻害せず、必要な反応度制御能力も維持される（制御棒の着座位置が13mm上となっても、原子炉停止系に要求される0.8秒以内に90%核的挿入に影響はない）。
- 制御棒と下部案内管の間隙において、制御棒の挿入に異常を生じさせた場合は、起動前の点検において検知できる。

反射体・遮へい集合体への固定ピン落下

- ◆ ハンドリングヘッド開口部直径 : 56mm
- ◆ オリフィス直径 : 5.8mm (内側反射体)
3.9mm (外側反射体)
5.1mm (遮へい集合体)

<一例：内側反射体における固定ピン流入経路>

→ 固定ピンの流入経路



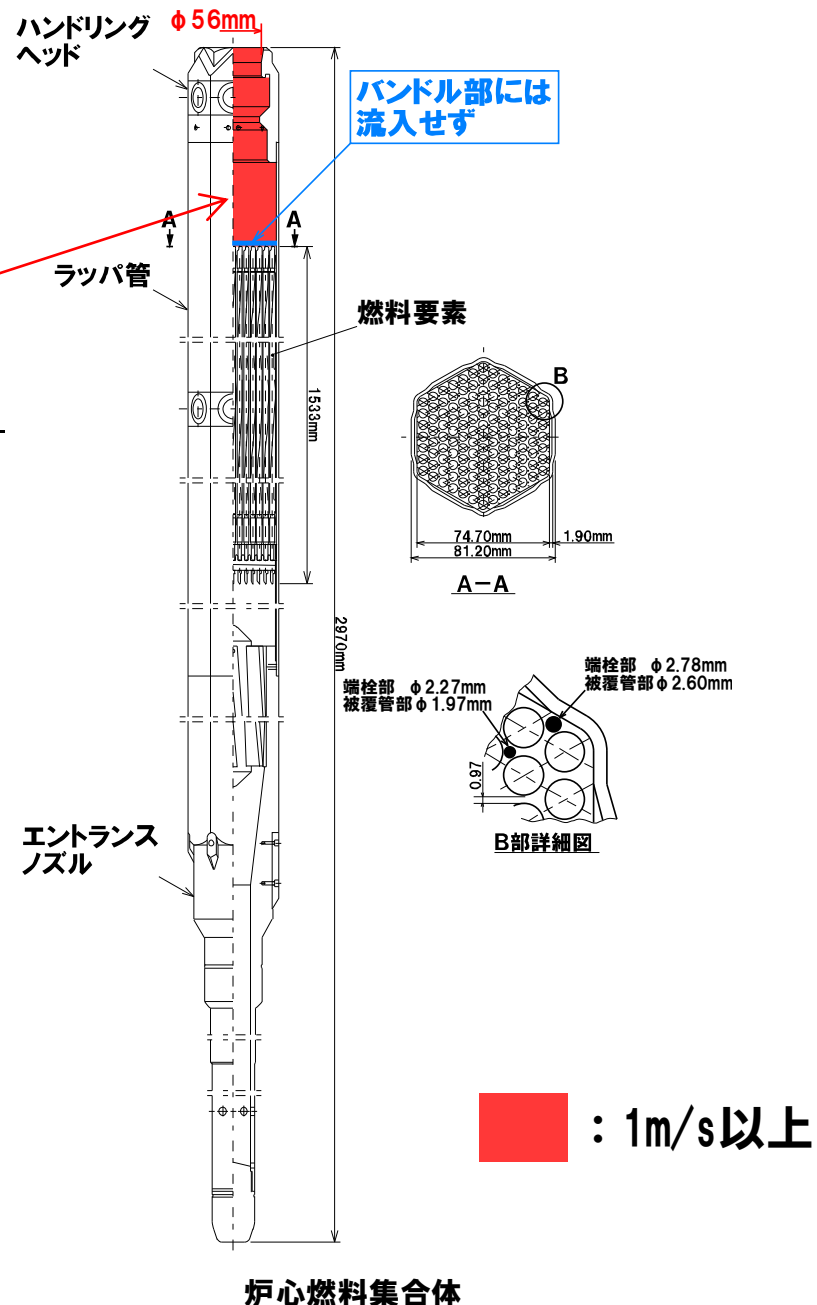
固定ピンの影響評価

- 上部より落下する可能性あり
- 要素とラッパ管のギャップの一部を閉塞する可能性あり (内側反射体、遮へい集合体)
 - 要素の単位面積あたりの発熱量は小さい
 - 冷却材流量及び温度に与える影響は小さい
- 要素とラッパ管のギャップ等を通り、エントランスノズル部に到達する可能性あり
- ただし、オリフィス部流速は8m/s以上であり、オリフィスを閉塞することはない

炉心燃料集合体内 流速分布

(運転中 (定格流量) : 約1.5m/s
停止中 (20%流量) : 約0.3m/s)

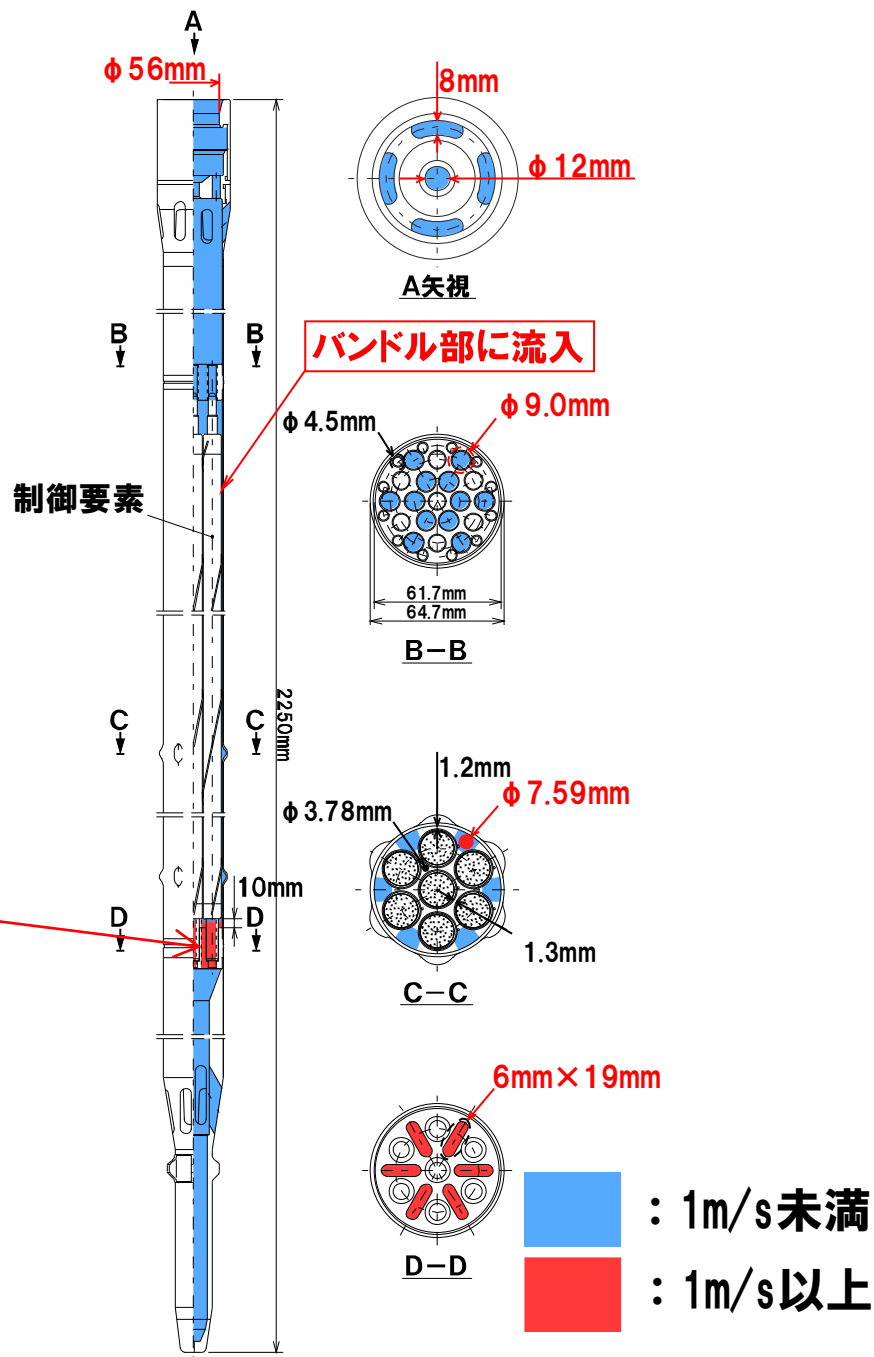
**固定ピン(13mm)、破断ピン(2mm)
とも寸法的には、バンドル頂部まで流
入する可能性があるが、原子炉の運
転中(定格流量時)には、流速により
流入しない。なお、原子炉の停止中(
20%流量以下時)には沈降する。**



制御棒内流速分布

(**運転中 (定格流量) : 約1.2m/s**
停止中 (20%流量) : 約0.2m/s)

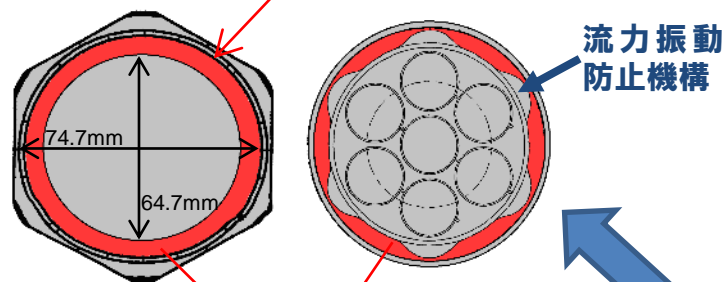
固定ピン(13mm)、破断ピン(2mm)
 とも寸法的には、下部グリッド板上部
 まで流入する可能性があるが、原子炉
 の運転中(定格流量時)には、流速に
 より、下部グリッド板より下には流入し
 ない。なお、原子炉の停止中(20%流
 量以下時)には流入する。



制御棒下部案内管内流速分布

(**運転中 (定格流量)**) : 約1.4m/s

(**停止中 (20%流量)**) : 約0.3m/s



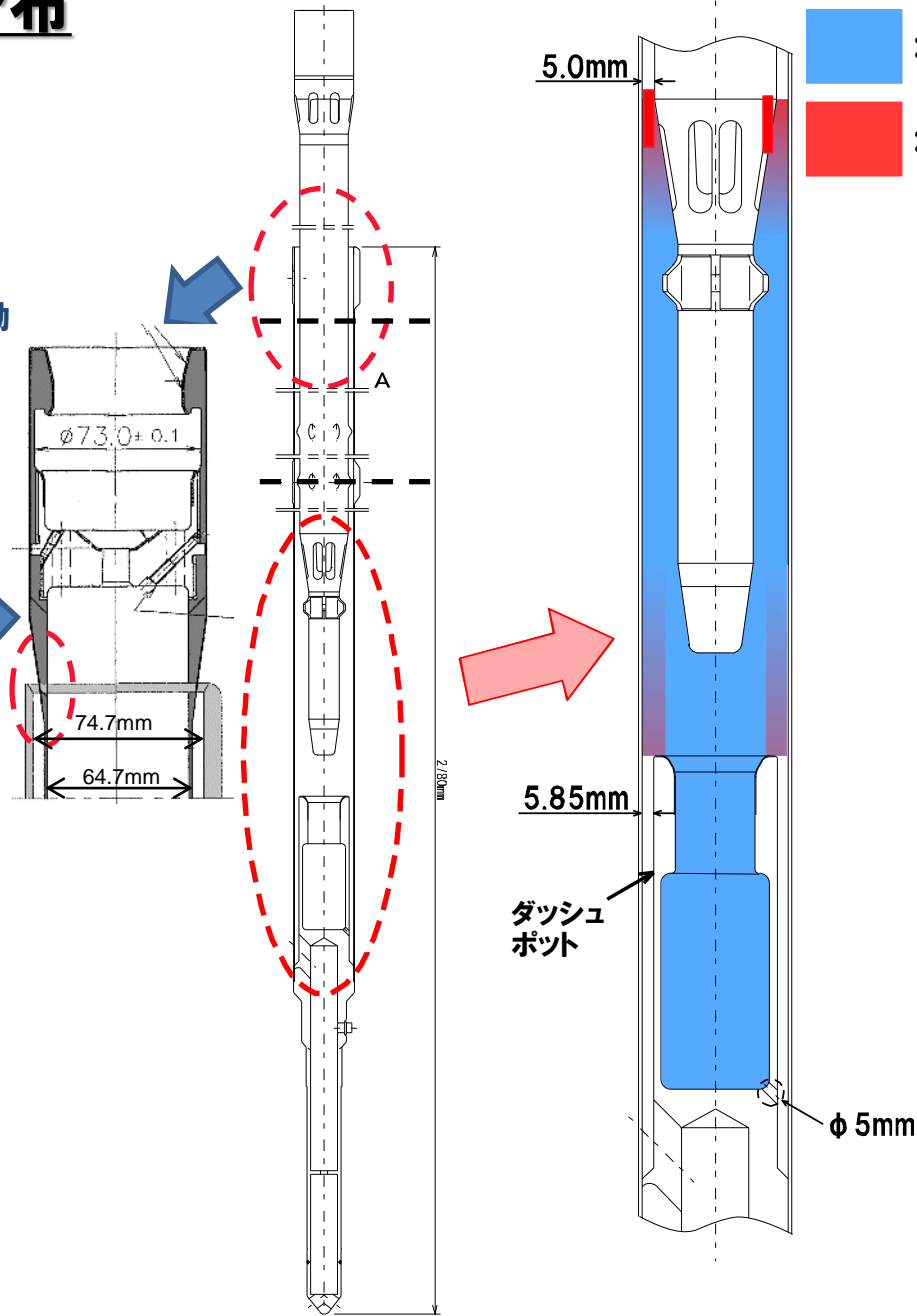
流力振動防止機構

制御棒と下部案内管の間隙 :

- 3.7mm (下部案内管上端部、着座時)
- 5.0mm (下部案内管上部、引抜時)
- 6.0mm (下部案内管上部、制御棒偏心時※1)

制御棒と制御棒下部案内管の間隙には、寸法的には、固定ピン(13mm)、破断ピン(2mm)とも流入する可能性があるが、原子炉の運転中(定格流量時)には、流速により流入しない。なお、原子炉の停止中(20%流量以下時)には流入する。

※1: 制御棒は上部で把持され、下方から冷却材が流入するため、原子炉の運転中に、流力振動により、制御棒下部案内管内で振動する。流力振動による原子炉出力の振動を防止するため、制御棒の下部に突起状の流力振動防止機構を設けており、これにより、制御棒の偏心は、1mm以下に抑制される。



■ : 1m/s未満
■ : 1m/s以上

固定ピンの振動による構造材の摩耗発生に係る検討

固定ピン：制御棒、内側反射体、遮へい集合体の要素バンドル部に留まる可能性有



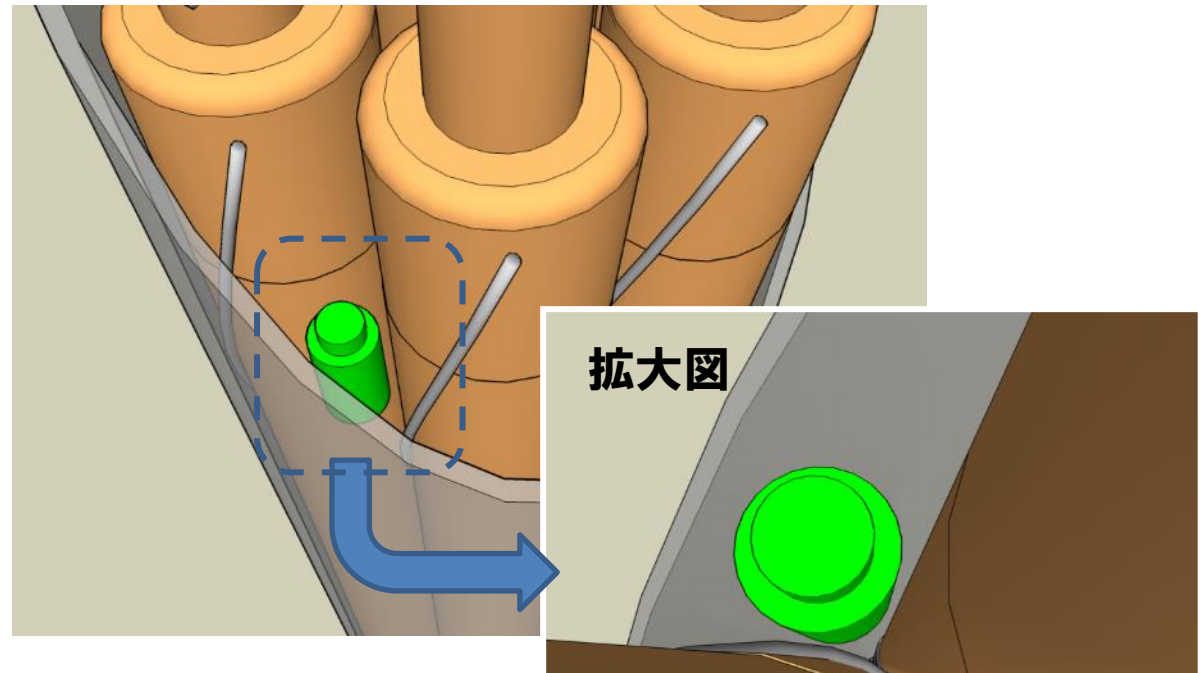
要素バンドル部のギャップ：7mm以上（表面は基本的に平滑）

固定ピンが振動した場合には、固定ピンは要素バンドル部のギャップを通過し、落下

固定ピンの振動により構造材の摩耗は発生しない

<一例：制御棒>

- ◆ 固定ピンはワイヤスペーサ部等に留まる可能性有
- ◆ ギャップが大きいため、固定ピンに振動等が生じた場合、固定ピンは落下
- ◆ 固定ピンの振動による構造材の摩耗は発生しない



**炉心燃料集合体等の製作公差等を考慮した場合の
炉心燃料集合体間ギャップへの落下について**

寸法公差等を考慮した燃料集合体間ギャップへの固定ピンの進入の評価

燃料集合体間最大ギャップ（以下「ギャップ」という。）の計算

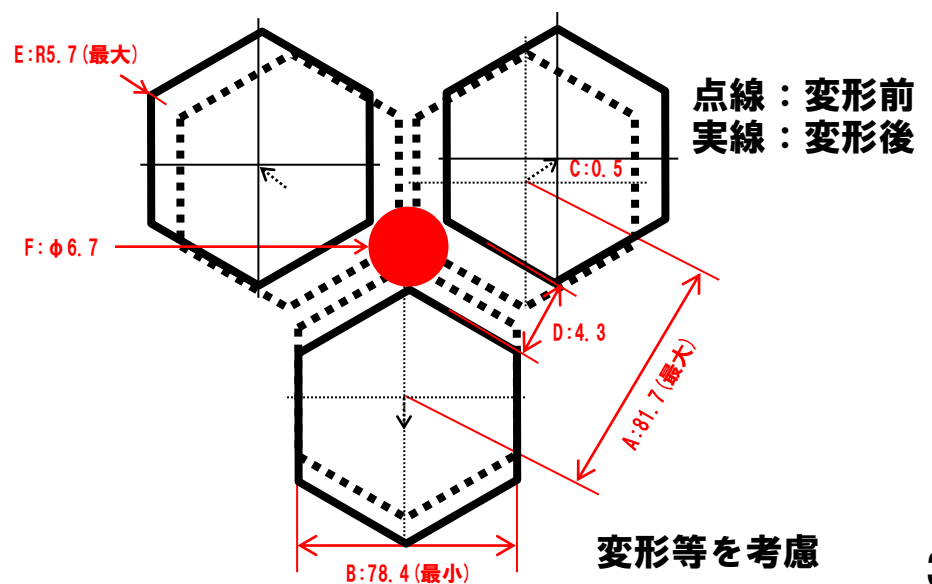
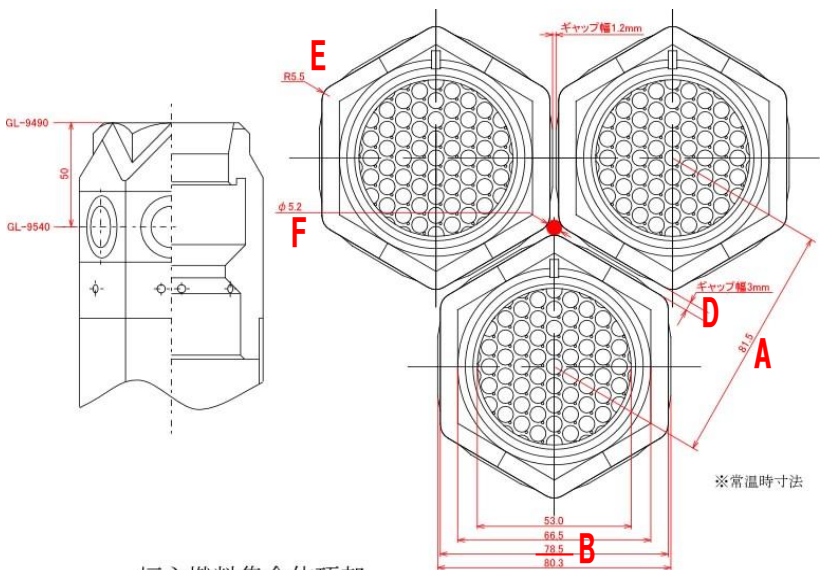
ノミナル寸法・変形無しを想定した場合、ギャップの最大径は、5.2mmとなるが、寸法公差・変形を考慮した場合、6.7mmとなる。ギャップ寸法が固定ピンの直径以上となることから、固定ピンが集合体頂部からギャップに落下する可能性がある。

ギャップに落下した場合の影響

ギャップの冷却材はほとんど流動しておらず、熱設計においても考慮していないことから、ギャップに落下しても燃料集合体の冷却機能に影響はない。また、燃料引き抜き後に、固定ピンが高圧プレナムに落下する可能性があるが、固定ピンが燃料集合体のオリフィスを閉塞させることはなく、また、燃料バンドル部にも進入しないことから、燃料集合体の冷却機能に影響はない。

燃料交換時には、固定ピンが干渉する可能性があるが、燃料集合体の引き抜き荷重の異常により検知できる。また、ホールダウン軸により周囲の燃料集合体を押さえて引き抜くため、燃料交換機能が不能になることはない。

集合体ピッチ		H/H		変形		ギャップ幅		六角頂部曲げ半径		ギャップの最大径
A		B		C		D		E		F
ノミナル	81.5	ノミナル	78.5	なし	0	3	ノミナル	5.5		5.2
全て最大	81.7	全て最小	78.4	3体全て外側に0.5mm	0.5	4.3	全て最大	5.7		6.7



国外のナトリウム冷却型高速炉との比較による 対策の妥当性の確認

国外のナトリウム冷却型高速炉との比較による対策の妥当性の確認（1/2）

1. 目的

「常陽」のルースパーツ対策と国外のナトリウム冷却型高速炉で発生したルースパーツへの対策を比較、検討し、「常陽」の対策が妥当であることを確認する。

2. 国外の高速炉における異物発生例の調査結果

国外の高速炉において、原子炉容器内に異物が混入又は発生した事例と、その後に運転を再開した事例を第1表に示す。情報が公開されている事例は、第1表のとおり、6件を認識している（非公開情報は1件認識している）。発生例のうち、固体の異物が炉内に混入又は発生した例は“Phenix”[1]、“Super-Phenix”[2][3]、“E. Fermi 1”[4]及び“Rapsodie”[5]の4件であった。

第1表 海外の高速炉における原子炉容器内への異物の混入例 [1] [2] [3] [4] [5] [6]

原子炉施設	原因及び異物の種類	運転再開時の対策
Phenix	原子炉容器上部蓋のボルトの脱落	ルースパーツ(ボルト)により安全性を損なわないことを確認
Super-Phenix	空気の混入	コールドトラップによるナトリウムの純化
Super-Phenix	燃料集合体内のゴム栓の混入	高温となった集合体の取り出し
E. Fermi 1	冷却材整流板の破損、燃料の溶融	冷却材整流板及び溶融した燃料の回収・撤去並びにバキューム装置による原子炉容器内の異物の吸引
Rapsodie	試験用集合体の冷却材オリフィスが、内部で外れた温度モニタにより閉塞されたため、2本の燃料要素が破損し、5g程度の燃料が冷却材中に放出	試験用集合体の取り出し
PFR	潤滑油の混入	高温となった集合体の取り出し、コールドトラップによるナトリウムの純化

国外のナトリウム冷却型高速炉との比較による対策の妥当性の確認 (2/2)

3. 運転再開時の対策の調査結果

第1表のPhenixの事例では、原子炉容器内で金属製のルースパーツ（ボルト）が発生しており、「常陽」のルースパーツと類似の事象であるため、Phenixの事例における運転再開時の対策を調査した。

Phenixでは、ルースパーツ（ボルト）が上部プレナムに移行すると仮定しても、原子炉施設の安全性を損なわないと評価し、運転を再開したことを確認した。

4. 評価

調査できた範囲で、海外の高速炉においても、①発生状況の把握、②ルースパーツの設定、③ルースパーツの探索・回収、④ルースパーツによる安全への影響の確認を実施した上で、運転を再開しており、ルースパーツ発生時の対策は、「常陽」と概ね共通であることを確認した。

5. 参考文献

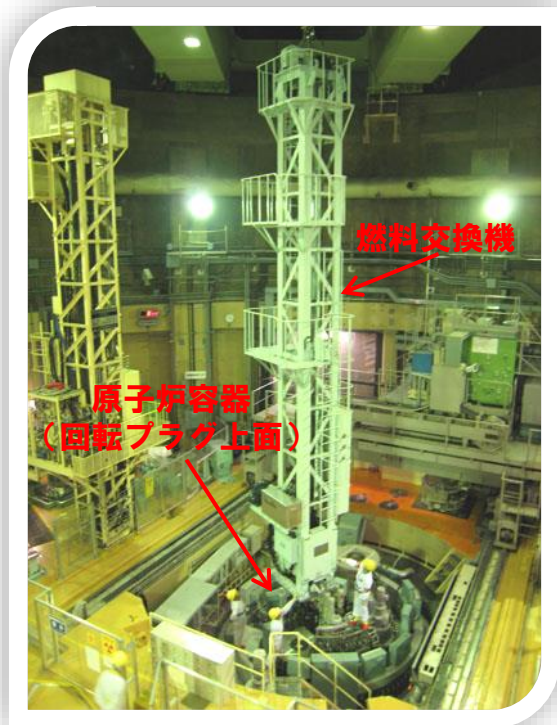
- [1]: Jean-Francois SAUVAGE. Phenix 30 years of history : the heart of a reactor. CEA/EDF
- [2]: Warinner, D. K.. LMFBR Operational and Experimental In-Core Local-Fault Experience, Primarily with Oxide Fuel Elements. Journal of Engineering for Power. 1983, Vol. 105, No. 3. doi:10.1115/1.3227468
- [3]: Bouchard J, Le Rigoleur C. The history of fast reactor safety in France. Proceeding of the International Fast Reactor Safety Meeting. Snowbird, Utah, USA, 1990 Aug 12-16, American Nuclear Society.
- [4]: Atomic Power Development Associates, Inc.. REPORT ON THE FUEL MELTING INCIDENT IN THE ENRICO FERMI ATOMIC POWER PLANT ON OCTOBER 5, 1966. 1968, doi:10.2172/4766757.
- [5]: 羽賀一男. 局所事故に関する研究の現状と展開. 動力炉・核燃料開発事業団, 1987, PNC TN2410 87-002
- [6]: M. Nishimura et al.. Updating of local blockage frequency in the reactor core of SFR and PRA on consequent severe accident in Monju. Journal of Nuclear Science and Technology. 2017, Vol. 54, No. 11. doi:10.1080/00223131.2017.1344576

ルースパーツ探索に係る現状の技術

ルースパーツ探索に関する経緯

期日	経緯
2007年5月14日	MK-III炉心第6' サイクルの運転終了
2007年5月28日	回転プラグを操作し、MARICO-2を炉内照射位置(3E3)から炉内ラック位置(R16)へ移動
2007年5月30日	R16でMARICO-2の試料部と保持部を切り離し
2007年6月1日	回転プラグを操作し、MARICO-2保持部をR16から3E3に移動 【本操作でMARICO-2 試料部を変形させた】
2007年6月11日	燃料交換機ホールドダウン軸に荷重異常が発生
2007年6月19日	燃料交換機ホールドダウン軸の下面に圧痕を確認 【原子炉容器内の調査が必要と判断】
2007年9月11日	崩壊熱減衰後にナトリウムをドレンし、ファイバースコープで観察した結果、画像が不明瞭であったが、R16上部に干渉物を確認
2007年10月10日～11日	新規に製作したファイバースコープで観察した結果、干渉物がMARICO-2試料部であること及び炉心上部機構の下端の中央付近に三角形の影を確認 【集合体頂部等の観察、炉心上部機構下面の観察が必要と判断】
2007年11月2日	回転プラグの燃料交換機能の一部阻害を確認 【MARICO-2試料部の撤去が必要と判断】
2007年11月～2008年3月	集合体頂部等の観察【ルースパーツがないことを確認】
2008年7月8日～29日	炉心上部機構下面の観察【下部の整流板等の変形が確認されたことから、炉心上部機構の交換が必要と判断】
2008年8月～2009年7月	観察結果に基づく影響評価及び原因究明等
2009年～2014年	炉心上部機構の交換及びMARICO-2試料部の撤去方法の検討、機器製作等
2014年5月8日～22日	旧炉心上部機構の引抜【炉心上部機構撤去孔から耐放射線性カメラで炉心上部機構下面及び炉内等を観察】
2014年9月16日～26日	MARICO-2試料部の撤去
2014年11月20日～21日	新炉心上部機構の装荷
2014年11月～2015年8月	照射燃料集合体試験施設において、MARICO-2試料部を調査 【一部固定ピンは、MARICO-2試料部のハンドリングヘッド継手に残留していること等を確認】
2017年2月～4月、 2018年3月、2022年3月	1次主冷却系の定格(100%)流量運転(主循環ポンプモータ点検に伴う運転、制御棒駆動機構調整に伴う運転、主循環ポンプ速度制御装置点検に伴う運転)時に異常がないことを確認

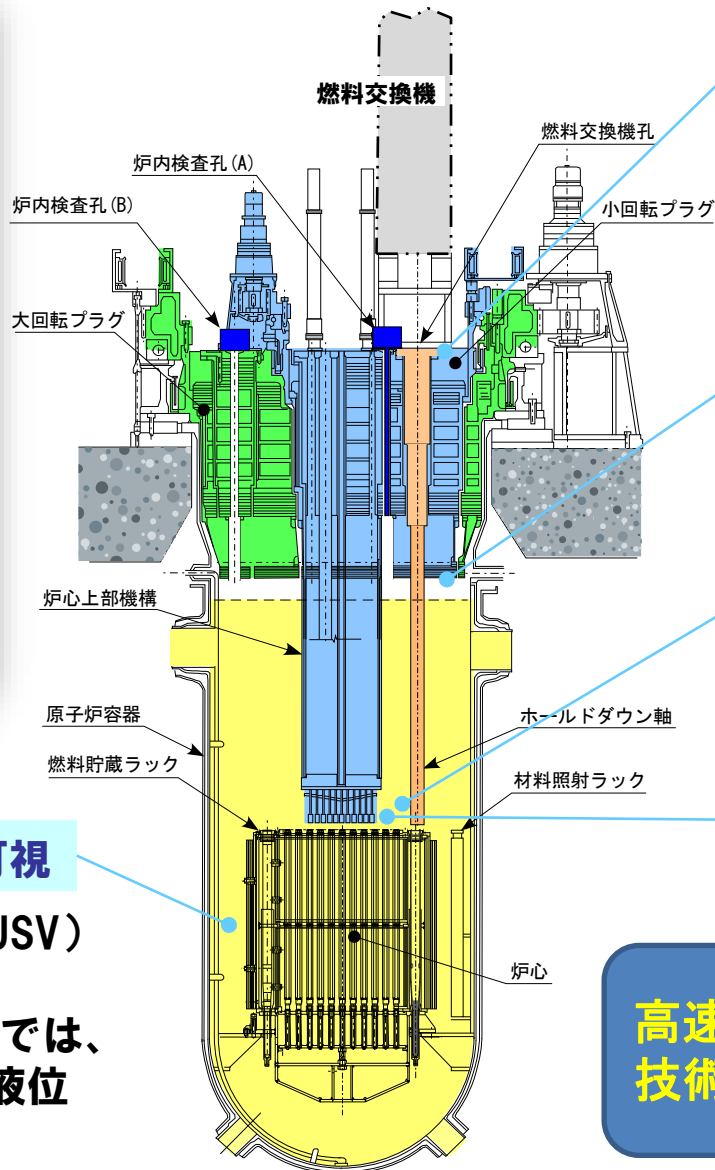
「常陽」原子炉容器内観察における装置、作業への要求事項



炉上部の様子（燃料交換作業時）

⑤冷却材（ナトリウム）中は不可視

- ・ナトリウム中可視化装置（USV）等の特殊な装置が必要
- ・または、小型の試験研究炉では、崩壊熱が減衰してから冷却材液位を下げる



「常陽」の原子炉容器

①厚い遮へい構造（アクセスルートの制約）

「常陽」の場合

- ・炉内検査孔（A）,（B）
- ・燃料交換機孔
- ・制御棒予備孔

②バウンダリの確保（アルゴンカバーガス）

- ・装置の気密性確保

③高放射線環境（～300Gy/h※）

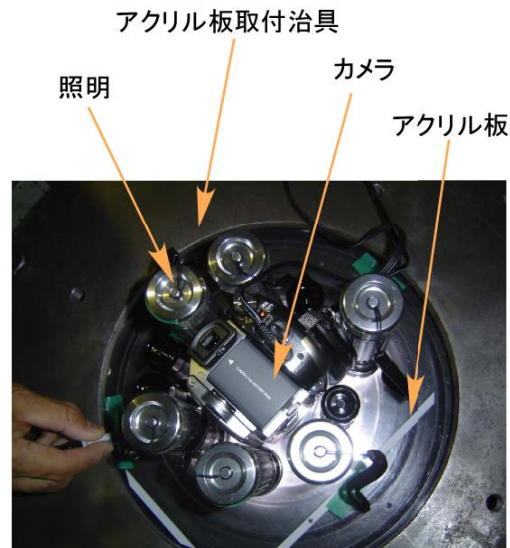
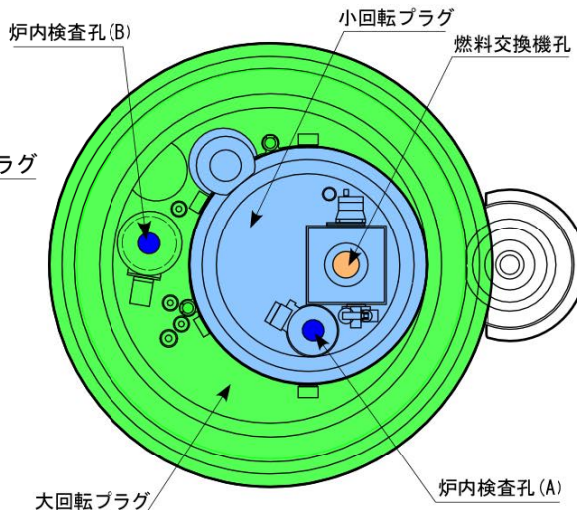
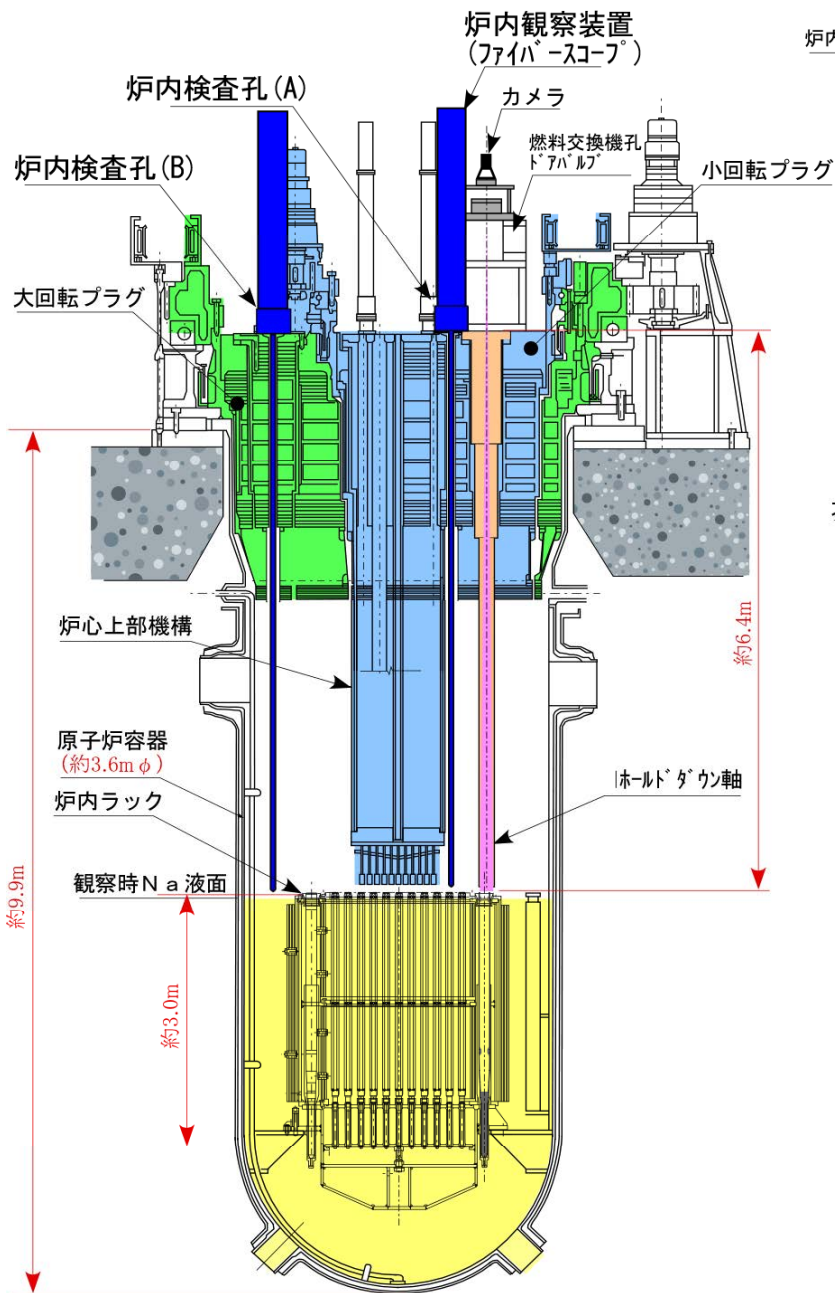
- ・装置の耐放射線性
- ・作業時の被ばく対策

④高温環境（～200℃）

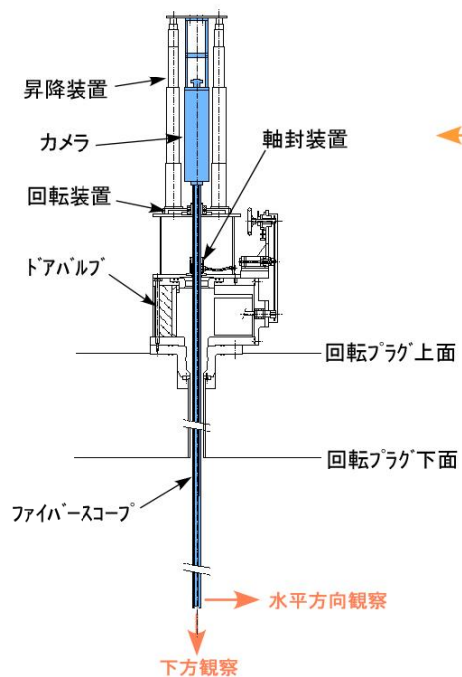
- ・装置、機器の耐熱性

高速炉に適した炉内観察技術を用いる必要がある。

「常陽」における原子炉容器内観察



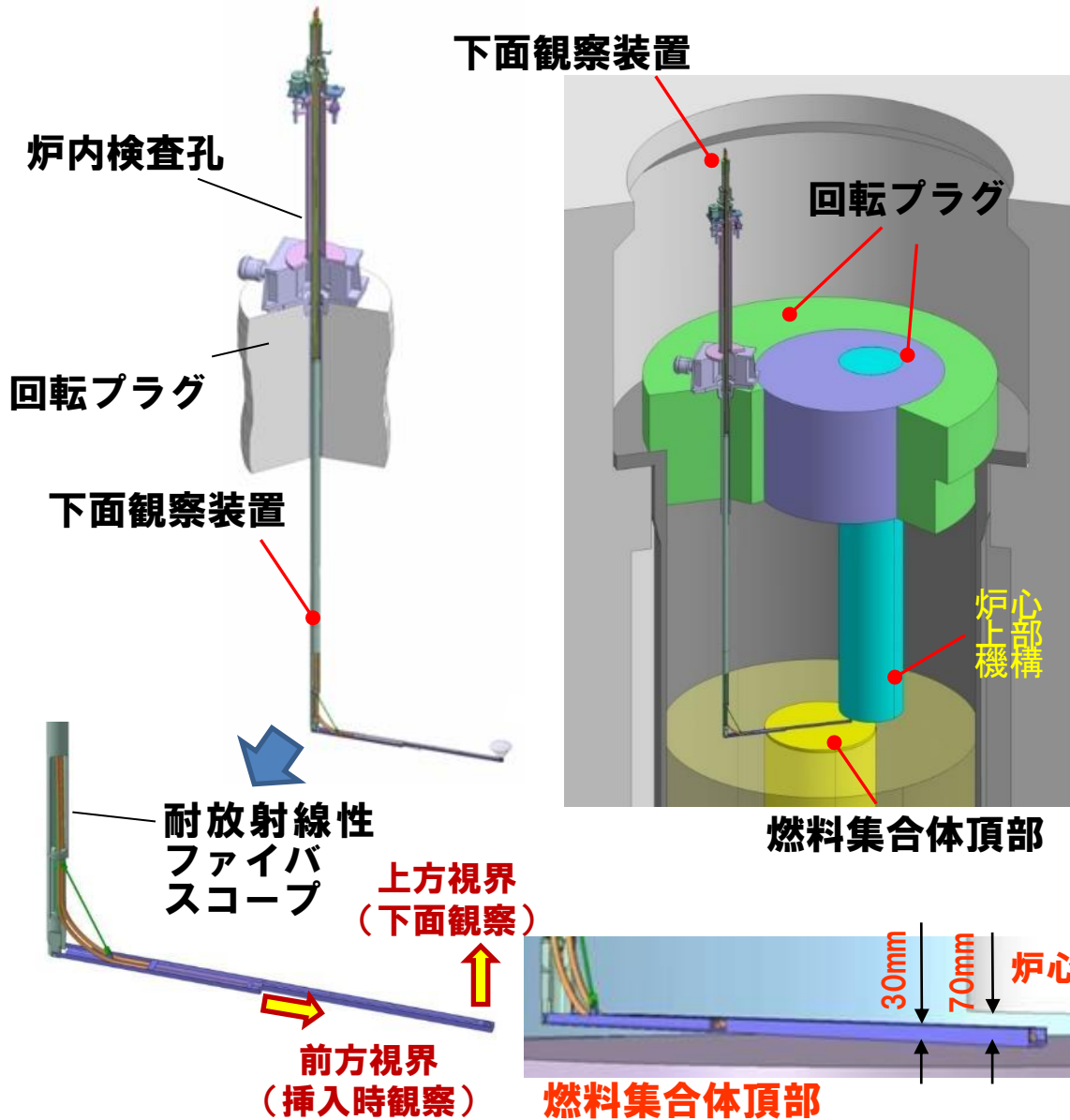
燃料交換機孔からの観察



炉内検査孔 (A) からの観察

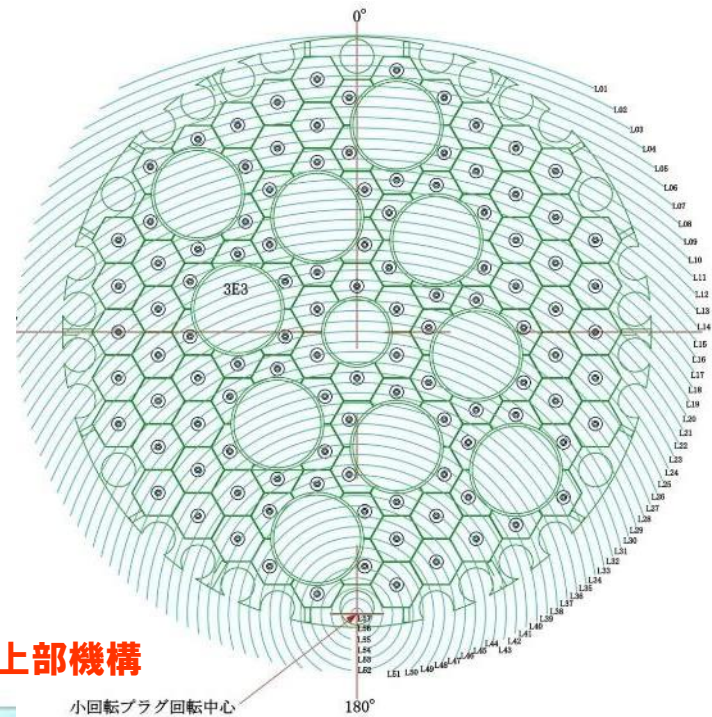
炉心上部機構の下面観察

炉心上部機構下面観察装置の概要



炉内で先端を90°に屈折させ、炉心上部機構下面に挿入。

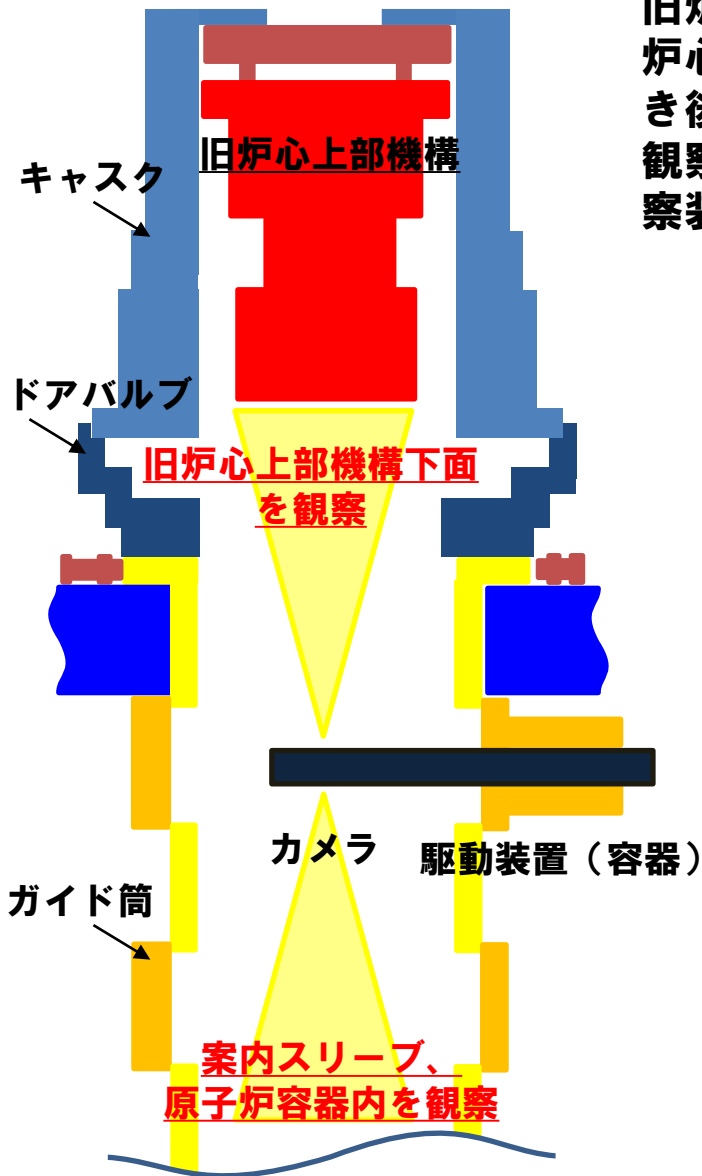
観察装置で位置を調節し、回転プラグを回転させて観察画像を取得する。



炉心上部機構下面の構造図と観察ライン

旧炉心上部機構引抜時の炉心上部機構下面・案内スリーブ等の観察

旧炉心上部機構下面・案内スリーブ等観察装置を開発し、炉心上部機構交換作業に適用し、旧炉心上部機構引き抜き後の状況を観察。
観察対象が高線量率の条件で必要な画質を得るため、観察装置として耐放射線性カメラを選定。

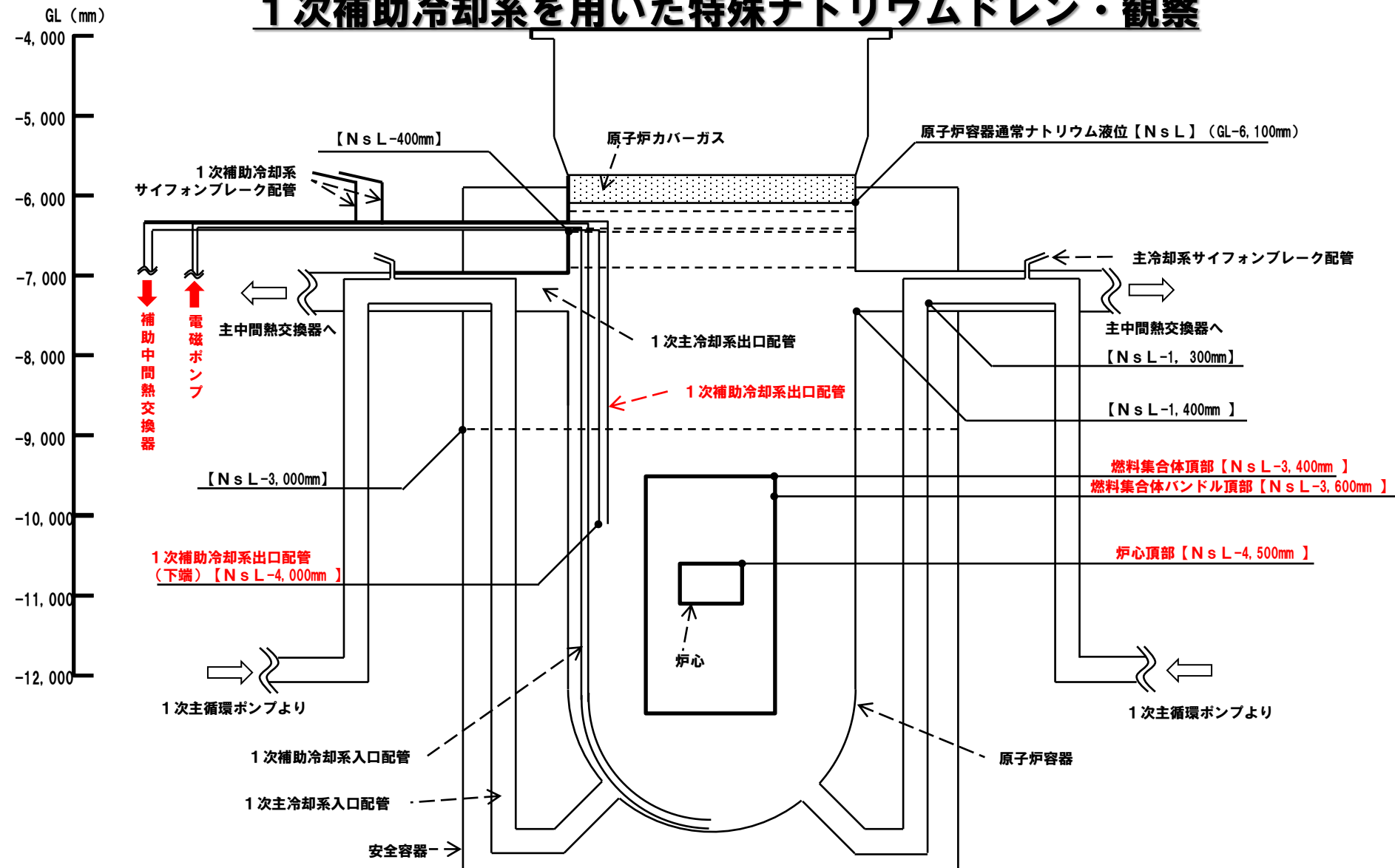


耐放射線性PTZカメラシステム

- ・ 許容線量 : 10^6 Gy
- ・ 許容線量率 : 3×10^3 Gy/h
- ・ 最高使用温度 : 55°C
- ・ 視野角 : 25.8°
- ・ 照明方式 : ハロゲンランプ

今後のルースパーツ探索に係る検討の整理

1次補助冷却系を用いた特殊ナトリウムドレン・観察

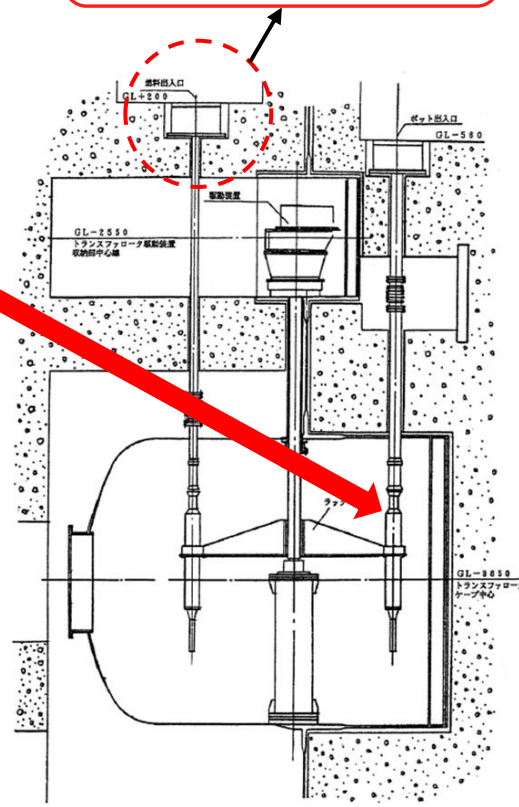
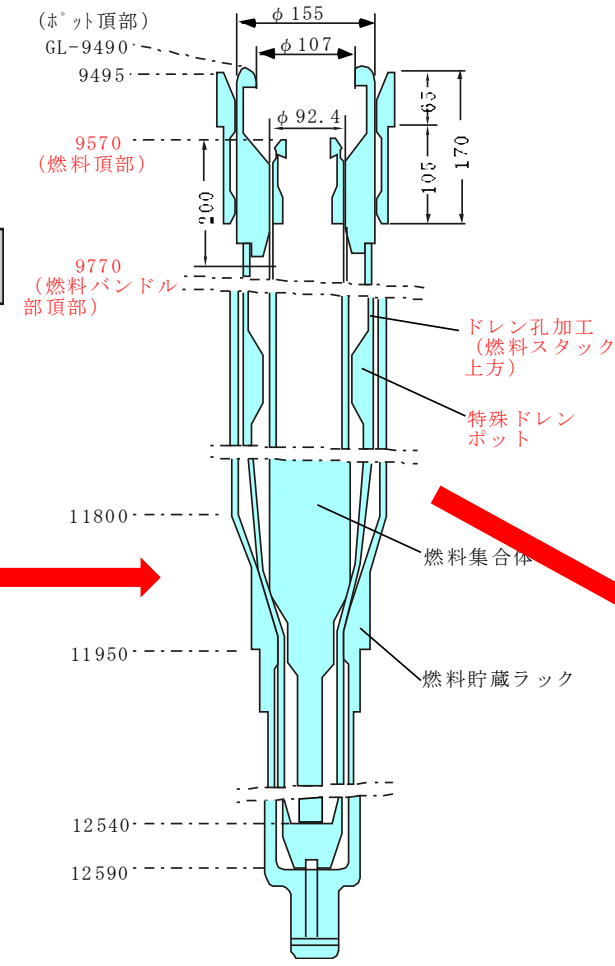
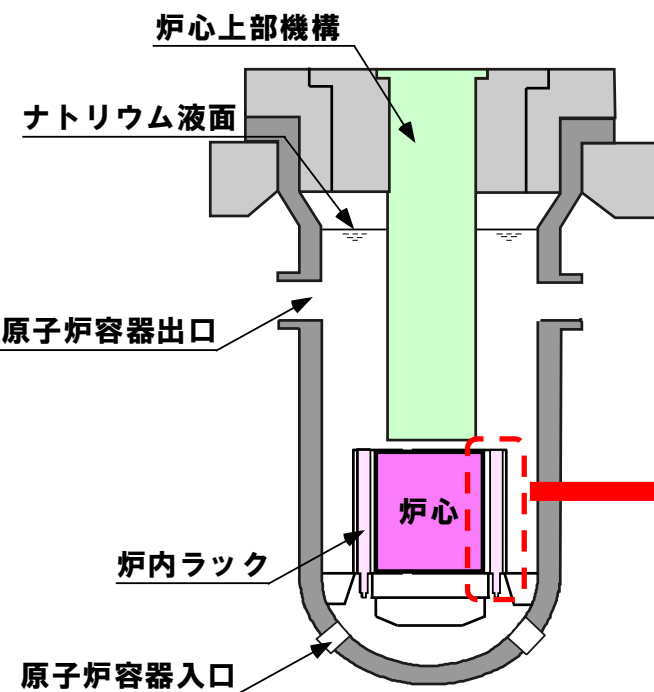


長期停止中で崩壊熱が減衰しているため、1次補助冷却系サイフォンブレイク機能を停止し、1次補助冷却系電磁ポンプを運転した状態で1次補助冷却系のドレン弁を開とすれば、燃料集合体頂部から約600mm下方に位置する1次補助冷却系出口配管部吸い込み部近傍まで原子炉容器内の液位を低下させることは、プラントの構造上は可能である。

他方、燃料集合体頂部から約600mm下方まで液位を下げる実績のないプラント操作及び原子炉容器内状態を維持して、原子炉容器内に観察装置を挿入する必要があるため、実施に向けては、安全を損なわないか慎重な検討が必要である。原子炉冷却材ハウダリを通常とは異なる方法で開放し、探索するため、新たなルースパーツ発生リスクもある。燃料集合体は、定格の原子炉冷却材流量を経験しているため、バンドル部上部にルースパーツが残存している可能性は極めて低く、探索可能性とリスクを踏まえると現実的な対応ではない。

特殊ドレンポットを用いたポット内燃料集合体頂部の観察

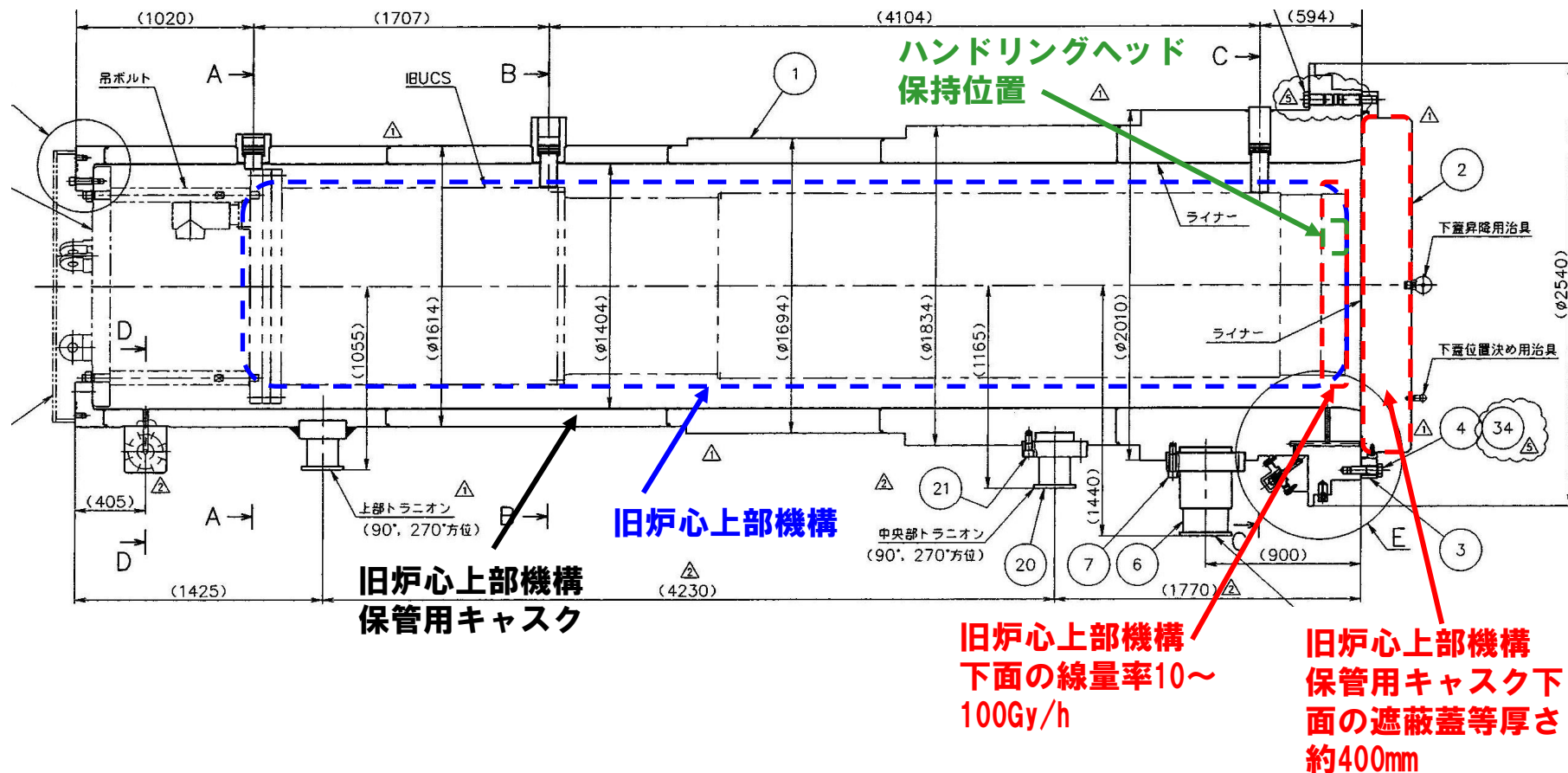
格納容器外側ドアバルブ



燃料交換機で燃料集合体を1体ずつ特殊ドレンポットに移動し、燃料出入機で特殊ドレンポット（燃料スタックと燃料バンドル部間の軸方向位置にドレン孔を穿孔し、燃料集合体の液位をドレン孔部まで下げる）をトランスフェロータに移送し、トランスフェロータの上部（ドアバルブ）から燃料集合体バンドル部上部を目視する。

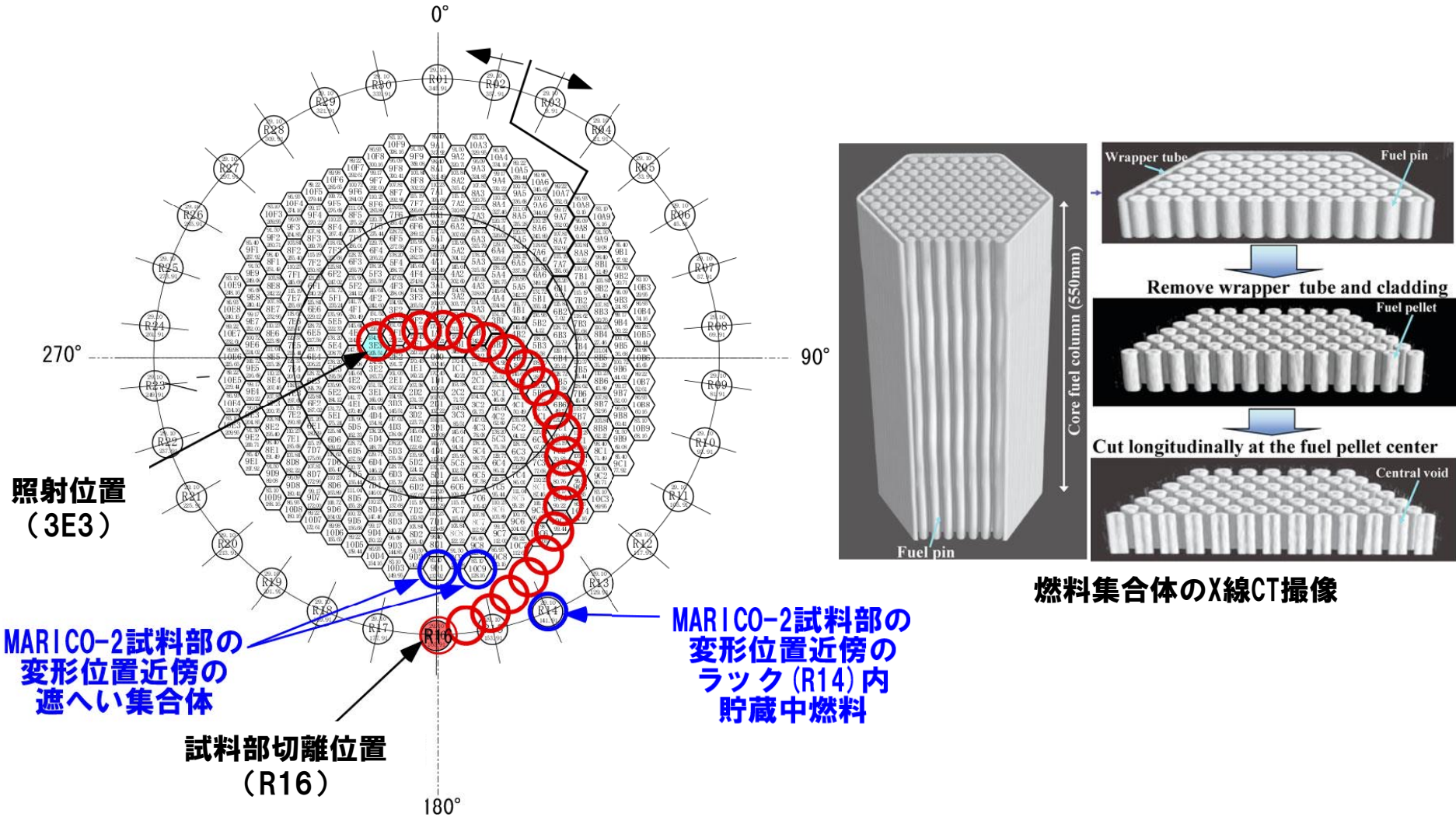
燃料集合体内の液位を下げることは可能であるが、実績のない操作及びポットの状態であるため、実施に向けては、安全を損なわないか慎重な検討が必要である。また、放射性廃棄物の発生量の増大、残留ナトリウム処理のリスクもある。他方、燃料集合体は、定格の原子炉冷却材流量を経験しているため、バンドル部上部にルースパーツが残存している可能性は極めて低く、探索可能性とリスクを踏まえると現実的な対応ではない。

保管中の旧炉心上部機構内ハンドリングヘッド部の固定ピン残存の確認



原子炉施設内（旧廃棄物処理建物）に保管中の旧炉心上部機構の下部に保持されているハンドリングヘッド部に固定ピンが残存していないか、旧炉心上部機構保管用キャスクに貫通孔を設け、カメラ等を挿入して、目視確認する。
 旧炉心上部機構下面の線量率は10～100Gy/hであり、作業時の被ばくのリスクが大きい。また、原子炉容器内からのルースパーツの回収にはつながらない。作業により生じるリスクと安全性向上効果を踏まえると現実的な対応ではない。

燃料集合体及び遮へい集合体の取出し、FMFにおけるCT撮像検査



燃料集合体のX線CT撮像

MARICO-2試料部が変形した炉内燃料貯蔵ラックR16及びR15近傍に装荷されていたR14ラック内貯蔵中燃料集合体及び遮へい集合体(2体)を原子炉容器から取り出し、隣接する照射燃料集合体試験施設で、集合体全域についてCT撮像を実施し、ルースパーツを探索する。

通常の燃料交換作業により原子炉容器から取り出すことが可能である。

今後のルースパーツの回収に係る検討

炉心部にルースパーツが残存する可能性の推移

- 回収されていないルースパーツは、固定ピン6本の欠損部等（約5.7g）である。
- 原子炉容器内でルースパーツが浮き上がり、流動・流出する可能性があるのは炉心燃料集合体のみである。
- 炉心燃料集合体のうち、ルースパーツの流入の可能性が高いR14貯蔵中の炉心燃料集合体は、直近の燃料交換時に原子炉容器から取り出し、再使用はしない。
- その他のMARICO-2試料部切離作業時に炉心装荷中であった炉心燃料集合体（約80体）についても、順次、新燃料と交換することにより、1サイクル運転当たり10体以上の炉心燃料集合体を原子炉容器から取り出し、ルースパーツが流動・流出する可能性を低減する。
- 上記の燃料交換時には、可能な限り、ハンドリングヘッド固定ピン①溶接部の移動軌跡に装荷された炉心燃料集合体を優先して交換する。