



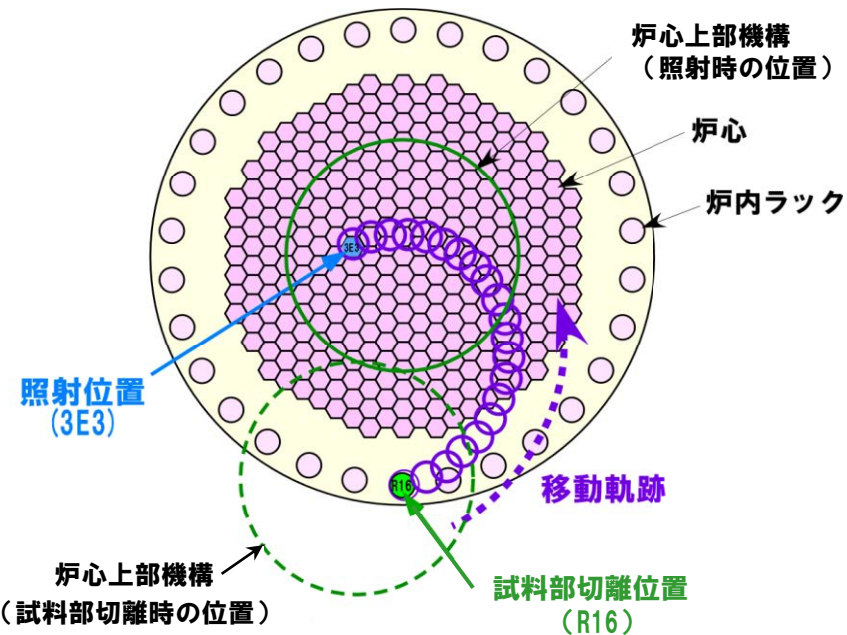
JY保-5-2

# 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2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

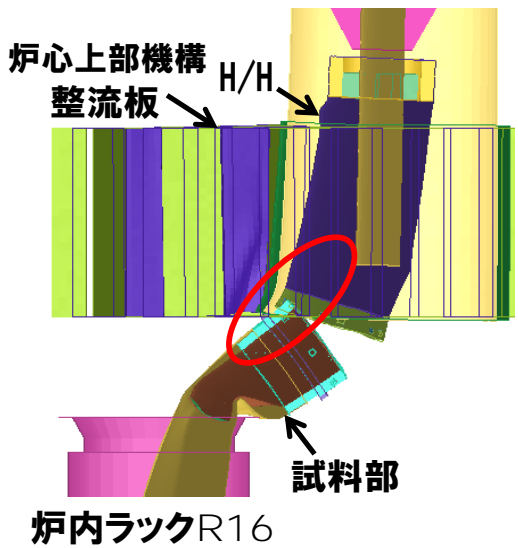
# MARICO-2試料部の切り離し不能により発生したルースパーツ



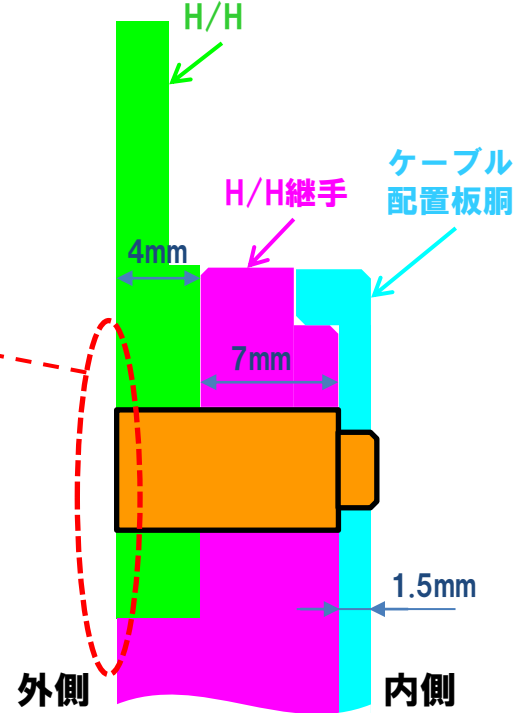
MARICO-2の移動軌跡

- 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

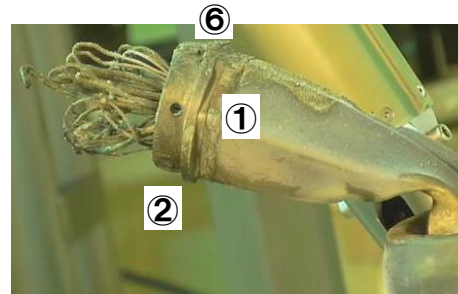
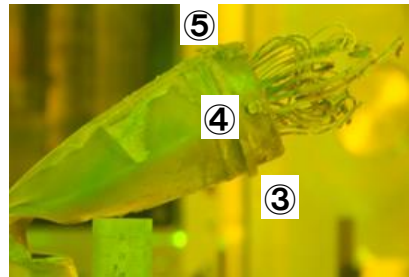


## H/H 固定ピン

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)



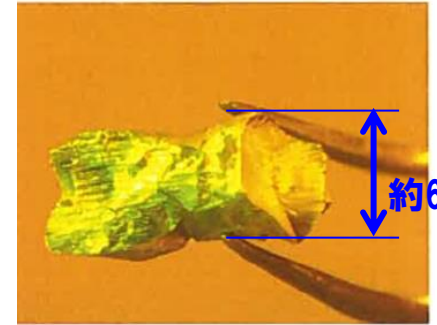
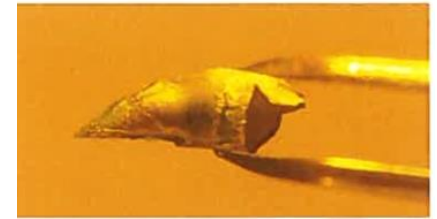
↑ ③



(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

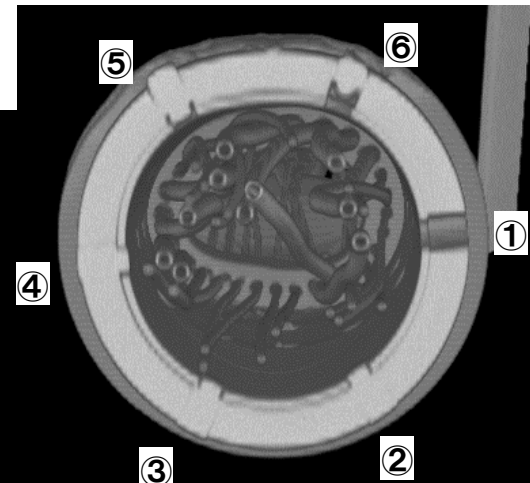
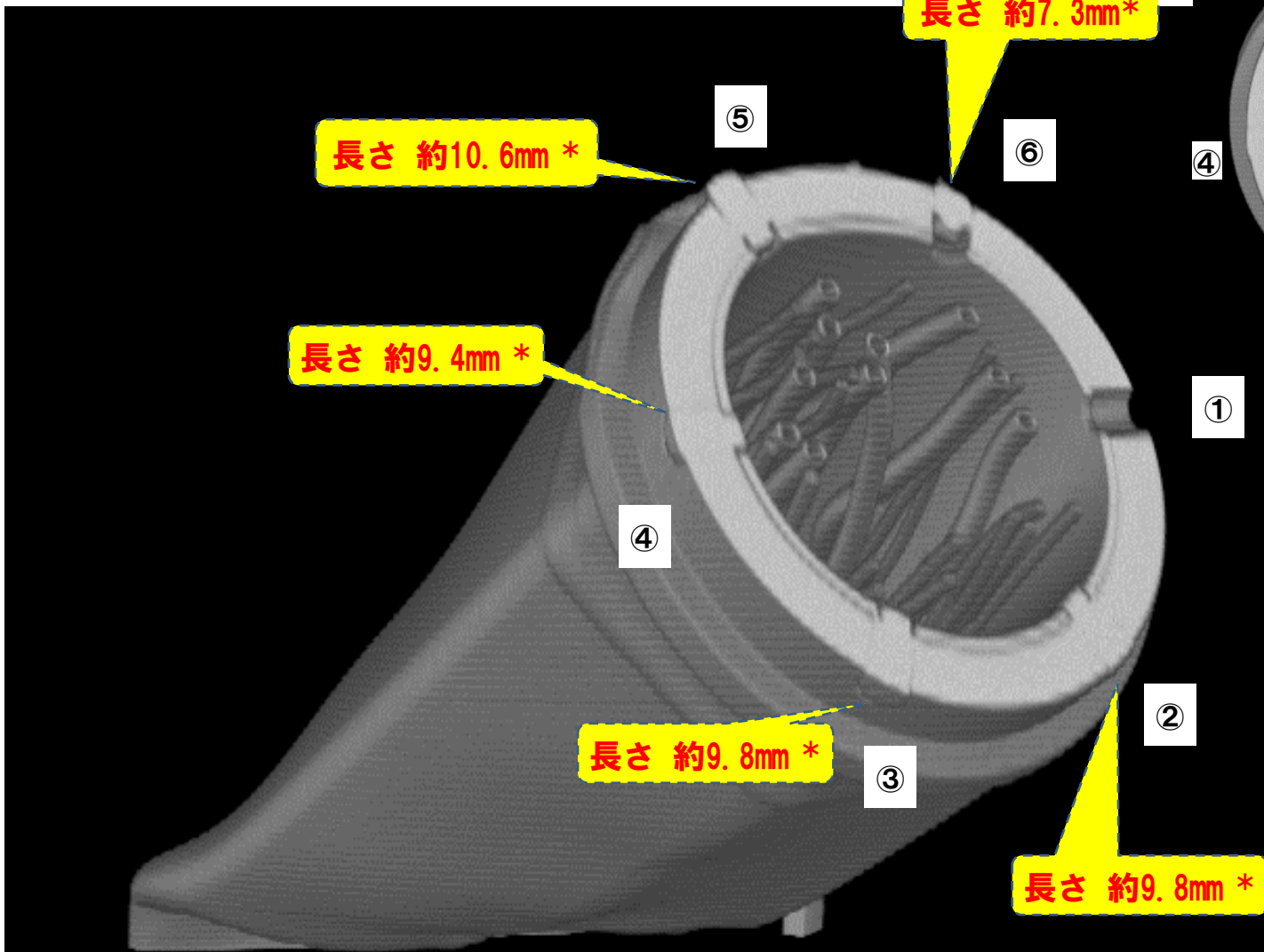
- 元素分析の結果、固定ピンと同じSUS316系のステンレスであり、炉心上部機構の材料(SUS304)ではない。

- 組成、形状及び試料部内から回収されたことからMARICO-2固定ピンの一部と判断。

**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

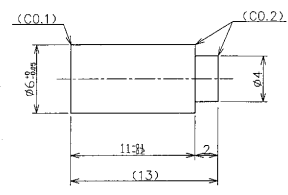


固定ピン①の脱落を確認。  
その他の5本の固定ピンはハンドリングヘッド継手に残留(一部欠損有)。

\*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

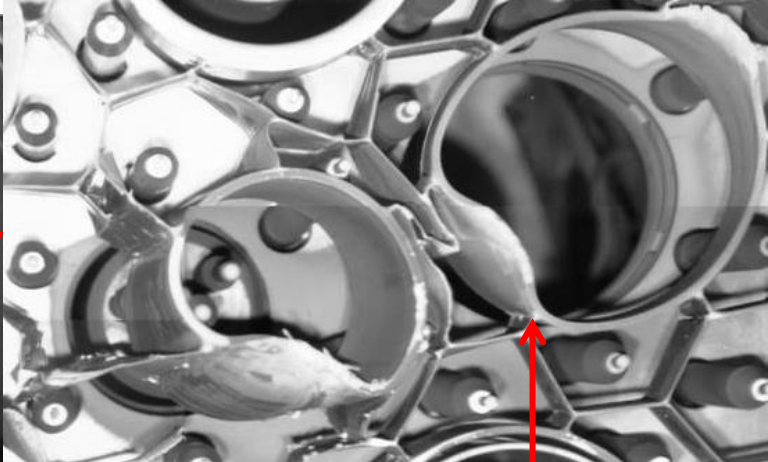
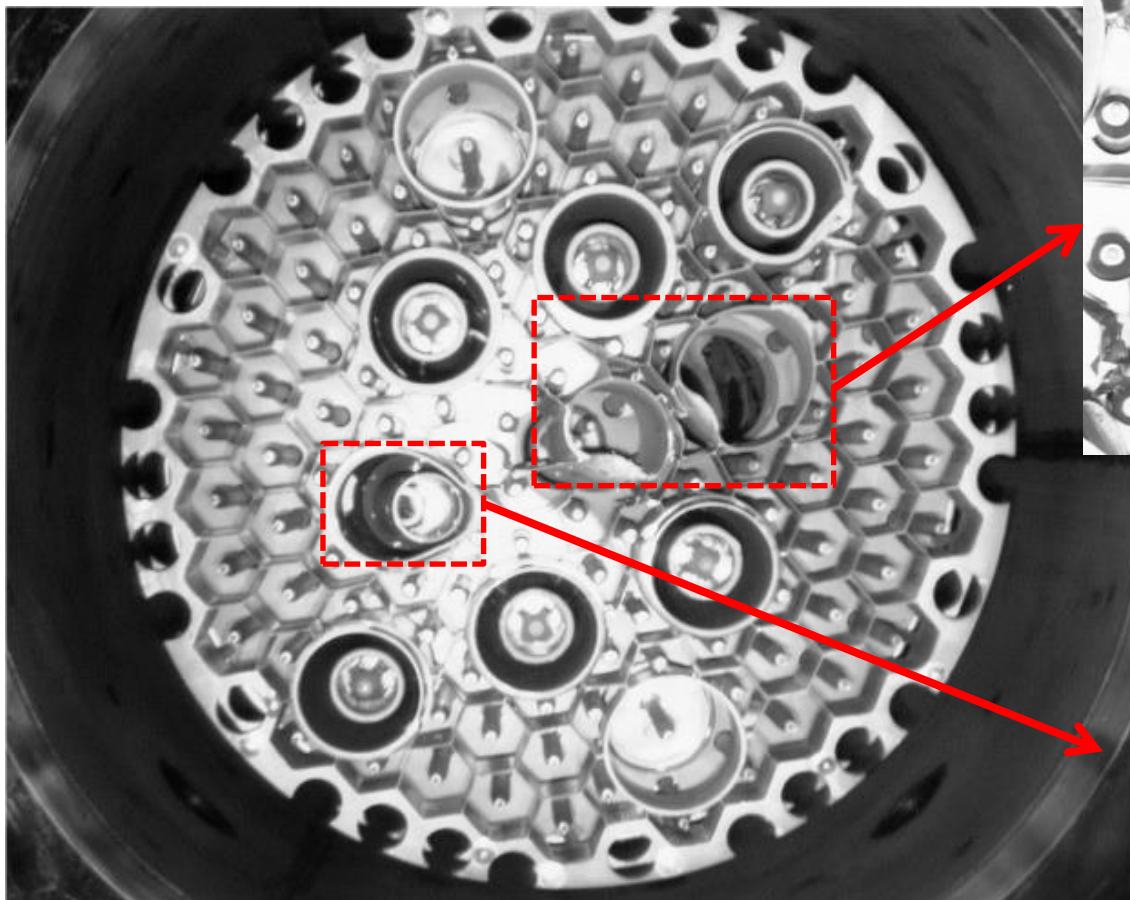


固定ピン構造

- 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サーパーツは約**5.7g**となる。

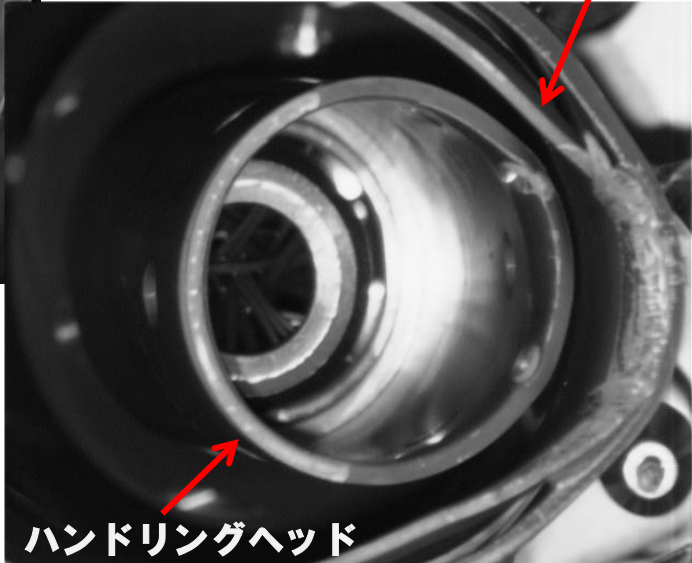
固定ピン番号	①	②	③	④	⑤	⑥	計算合計 (小片1.1g考慮)
CT画像での残存長さ[mm]	0	9.8	9.8	9.4	10.6	7.3	
欠損部長さ (φ4mm部) [mm]	2	0	0	0	0	0	
欠損部長さ (φ6mm部) [mm]	11	3.2	3.2	3.6	2.4	5.7	
SUS316の密度 (室温)	7.97	7.97	7.97	7.97	7.97	7.97	
各固定ピン質量[g]	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	16.1
各固定ピン回収量[g]	0.00	1.96	1.96	1.87	2.14	1.39	10.4
各固定ピン欠損量[g]	2.68	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

# 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

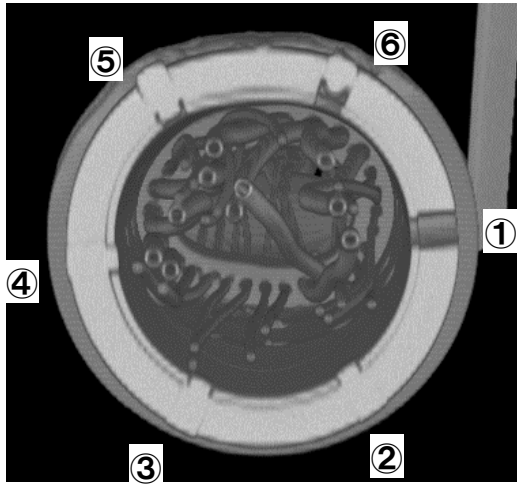
旧炉心上部機構を回収のために引抜いた際に、耐放射線カメラで観察。法令報告時のファイバースコープによる観察に比べて画質が向上。

# MARICO-2ハンドリングヘッドの観察結果

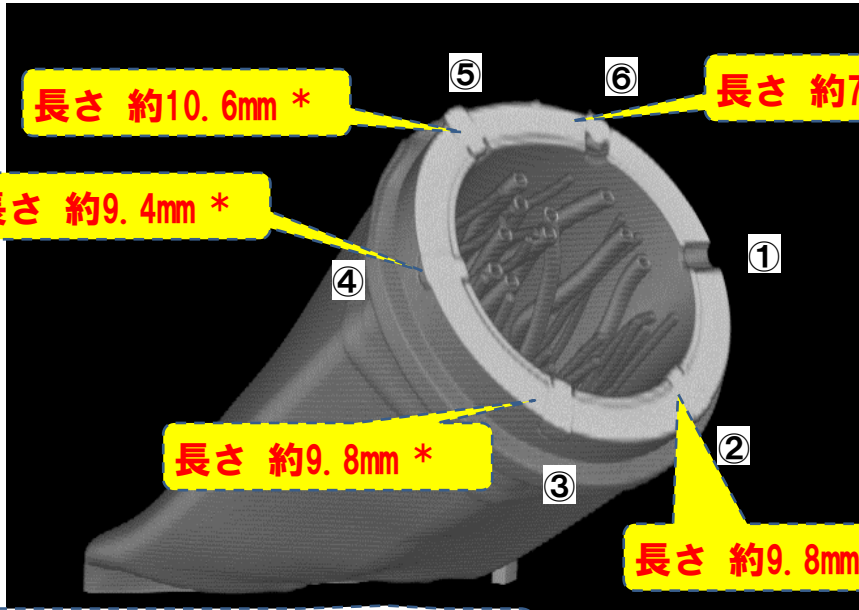
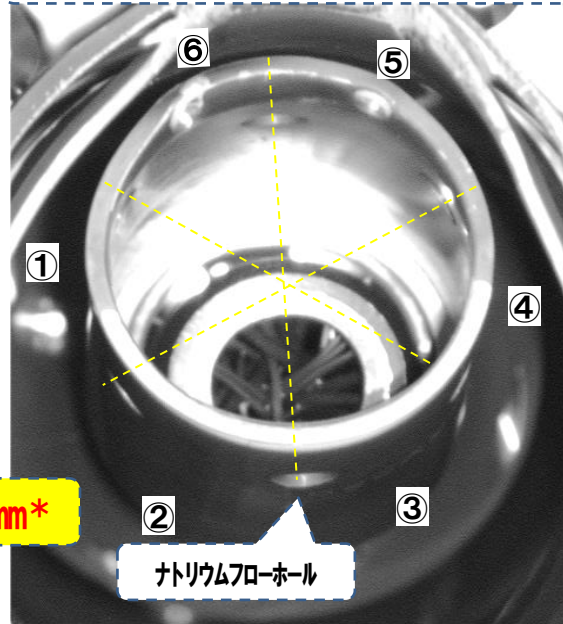




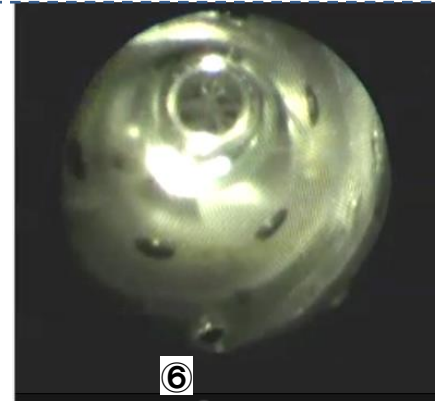
# MARICO-2試料部のX線CT検査結果とハンドリングヘッド観察結果の突合せ



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（ファイバースコープによる撮影）



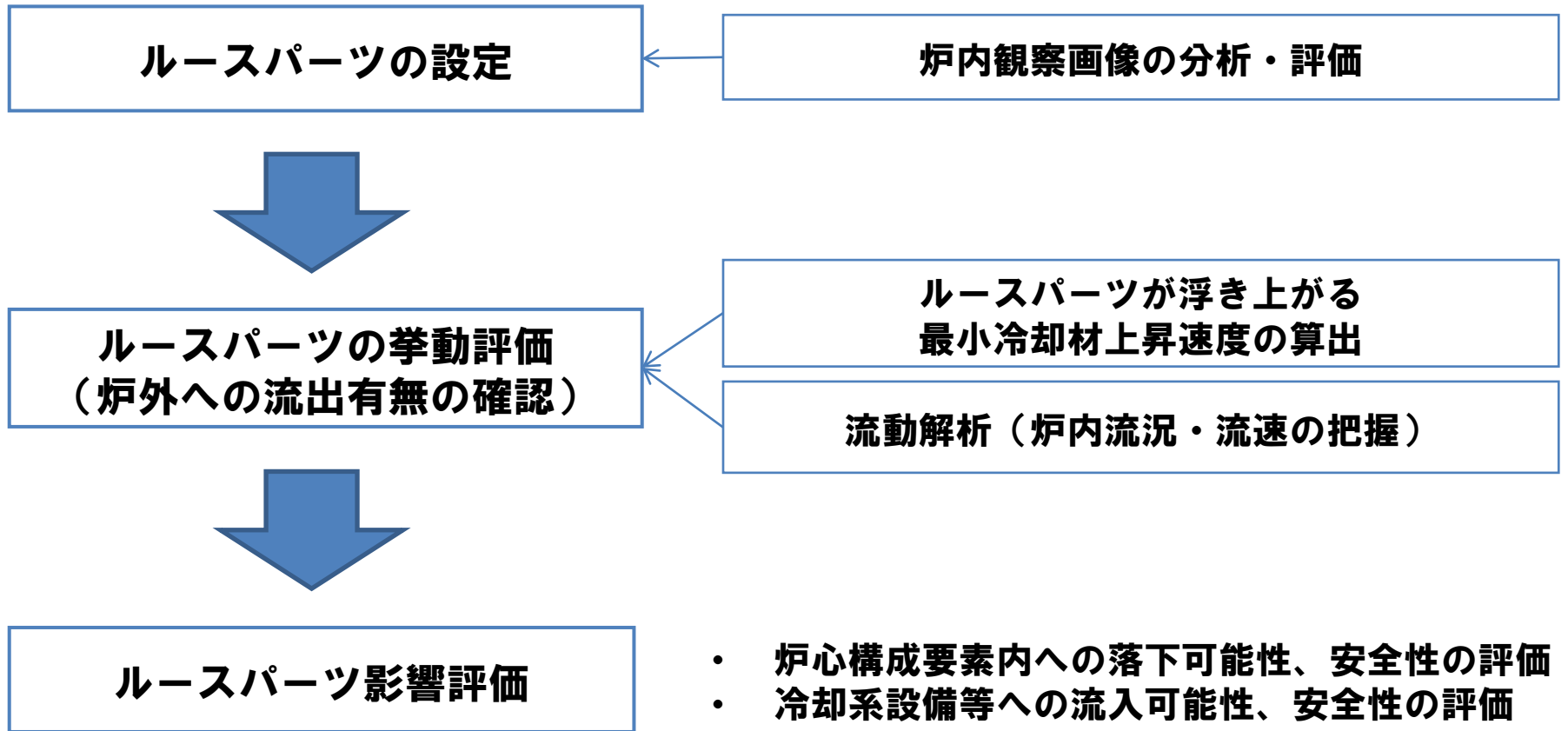
②③④⑤⑥は、ハンドリングヘッド継手に固定ピンが残留している

\*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**

# 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



- 炉心構成要素内への落下可能性、安全性の評価
- 冷却系設備等への流入可能性、安全性の評価

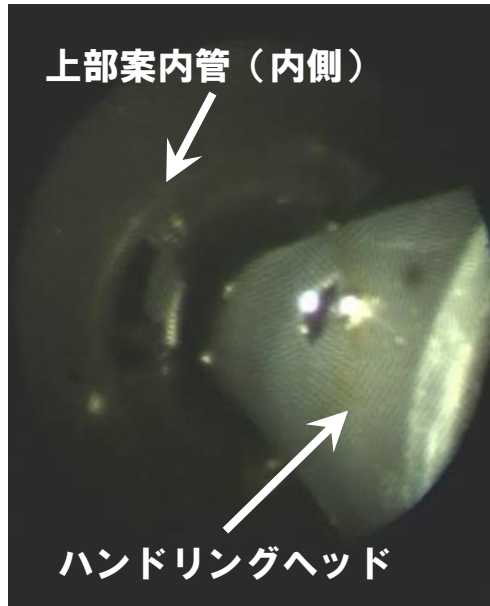
# ルースパーツの設定

# 炉内観察結果（MARICO-2上部案内管・ハンドリングヘッド）

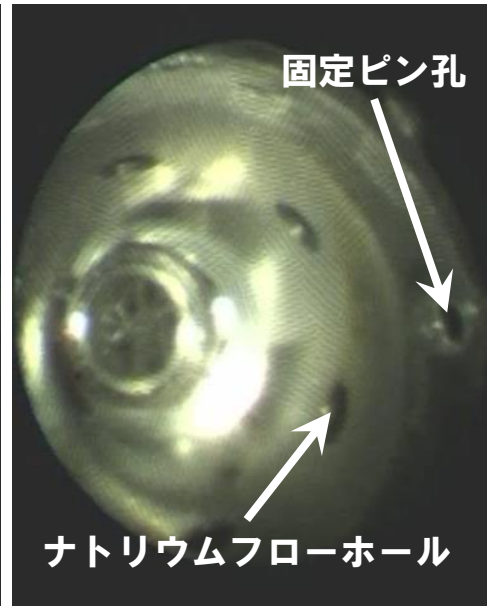
（組立時の写真）



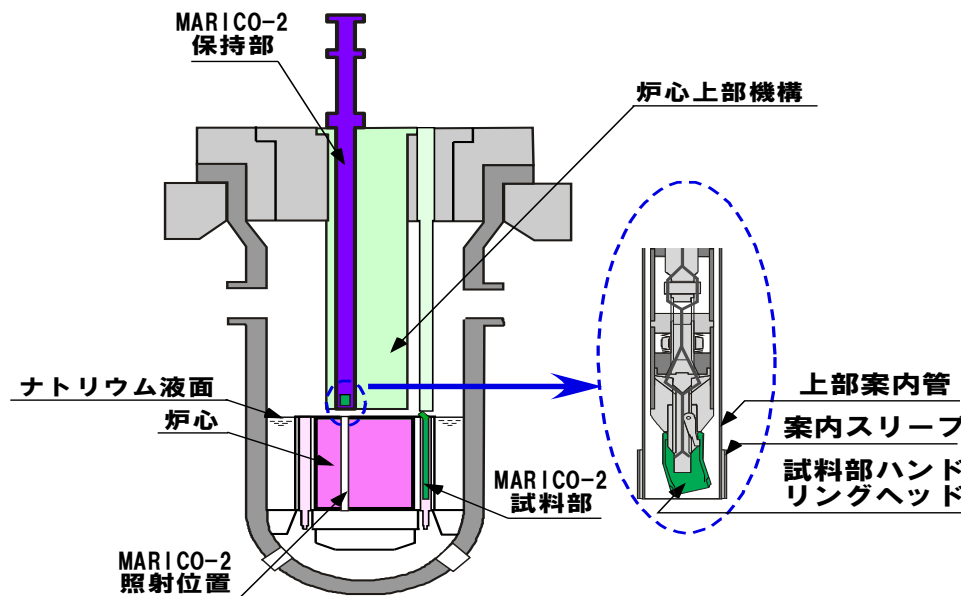
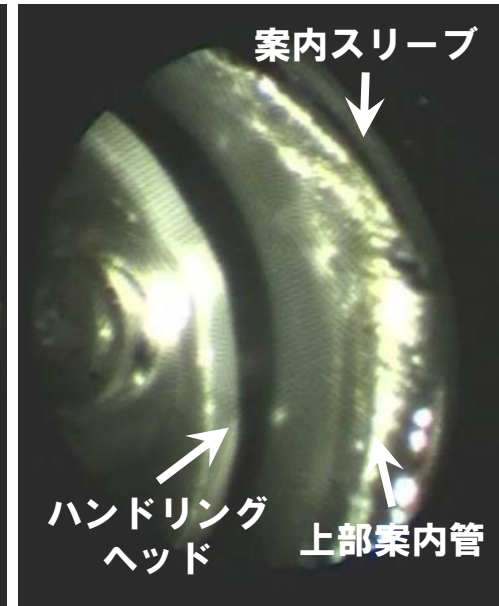
ハンドリングヘッド外側



ハンドリングヘッド内部



上部案内管下端変形部



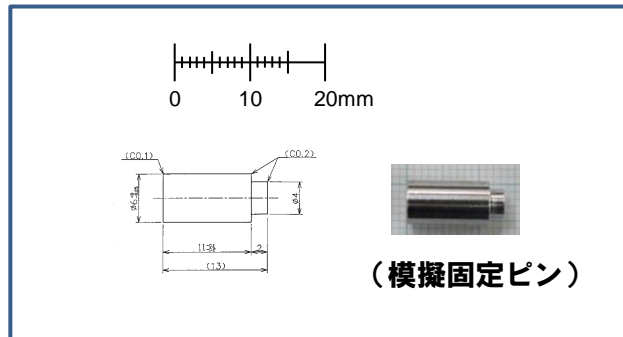
- 炉心上部機構内のMARICO-2保持部に、試料部ハンドリングヘッドが接続されていた。
- ハンドリングヘッドと試料部を接続していた固定ピン6本（概略寸法：直径6mm、長さ13mm）は、ハンドリングヘッド部分では確認できなかった。
- 固定ピン以外に、ルースパーツとして想定する必要がある部品等はなかった。

# 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>

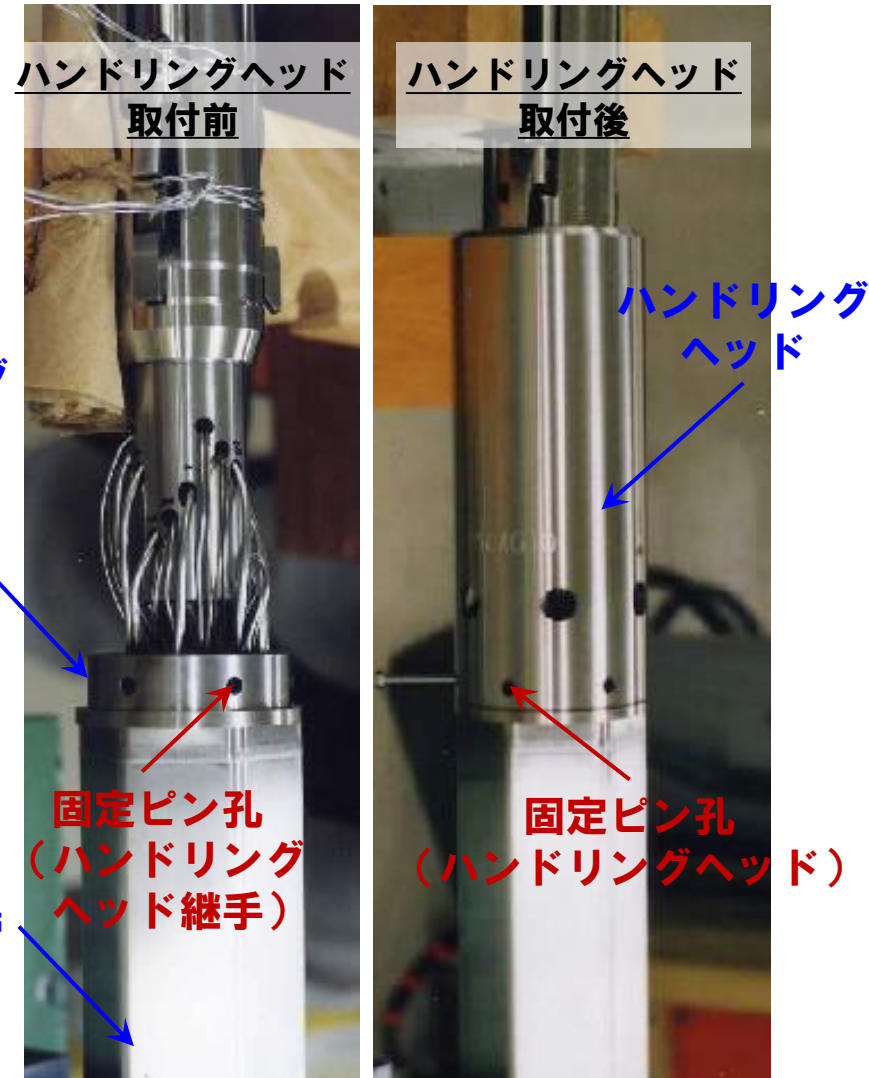
- 材料：SUS316
- 形状： $\phi 6\text{mm} \times 13\text{mm}$   
(片側先端部2mmまで $\phi 4\text{mm}$ )
- 数量：6本



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)



# ルースパーツの拳動評価

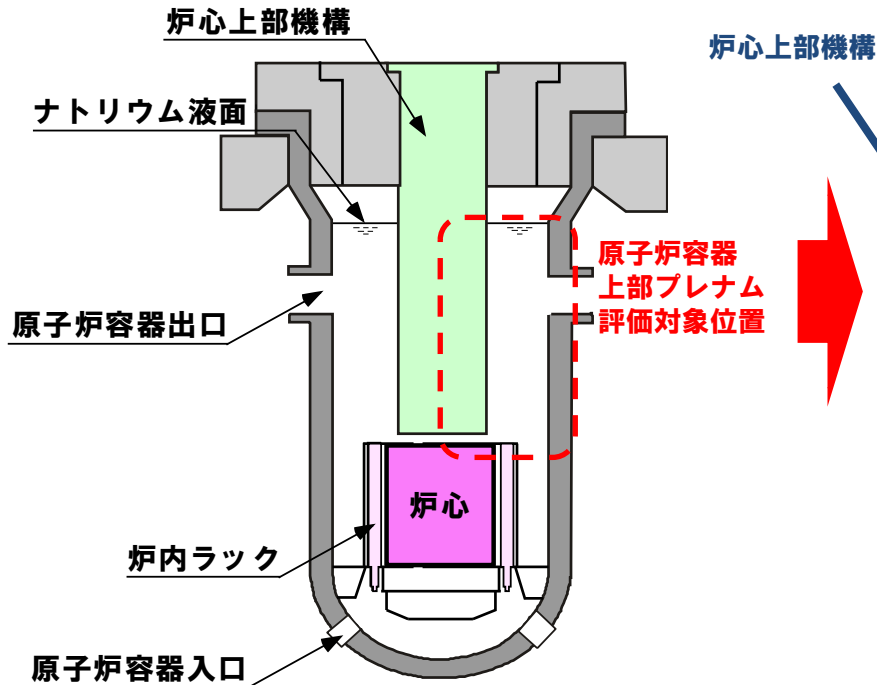




# 原子炉容器上部プレナム部の流況 (2次元流動解析結果)

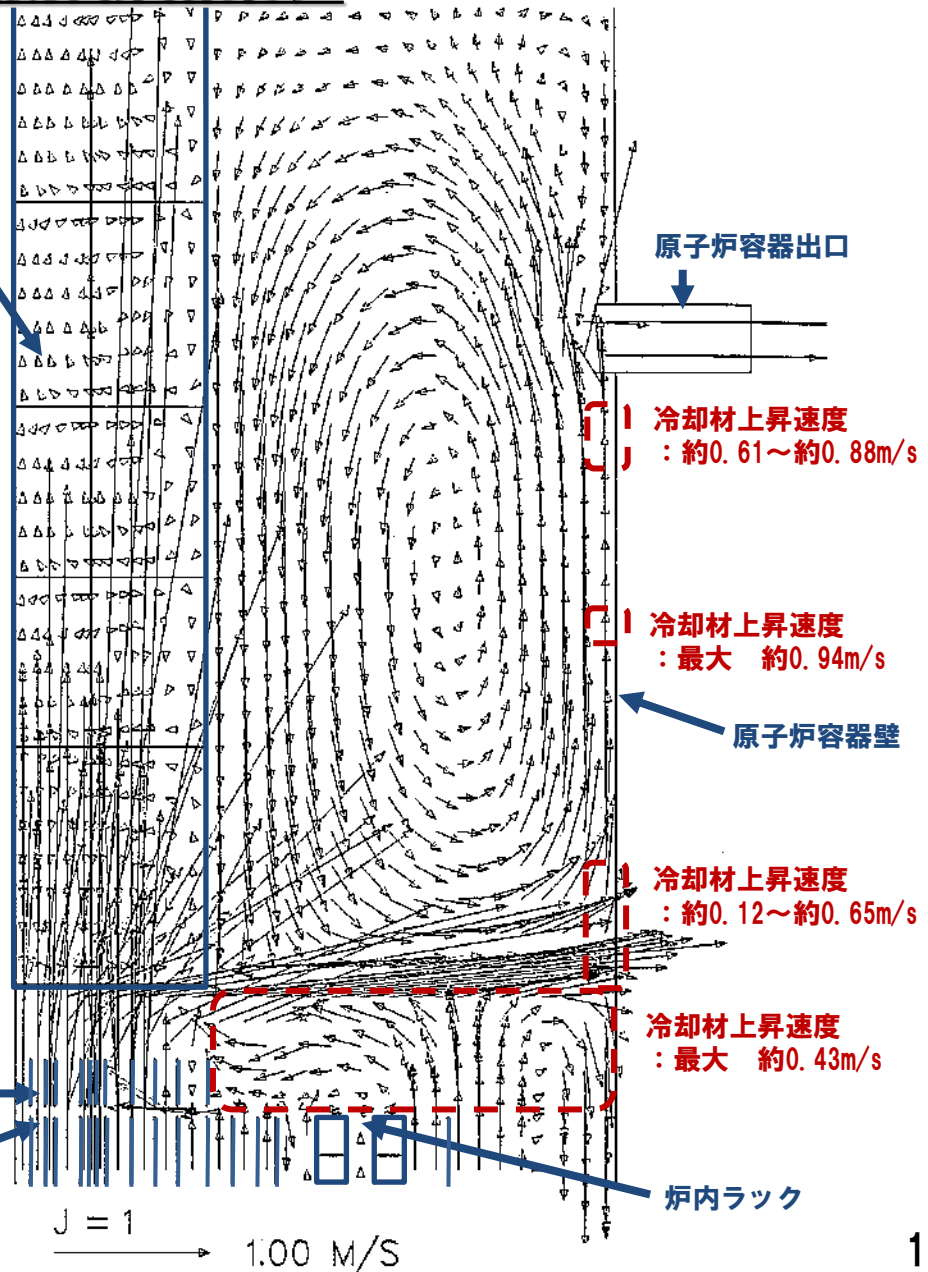
## 解析条件

- (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



# 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**

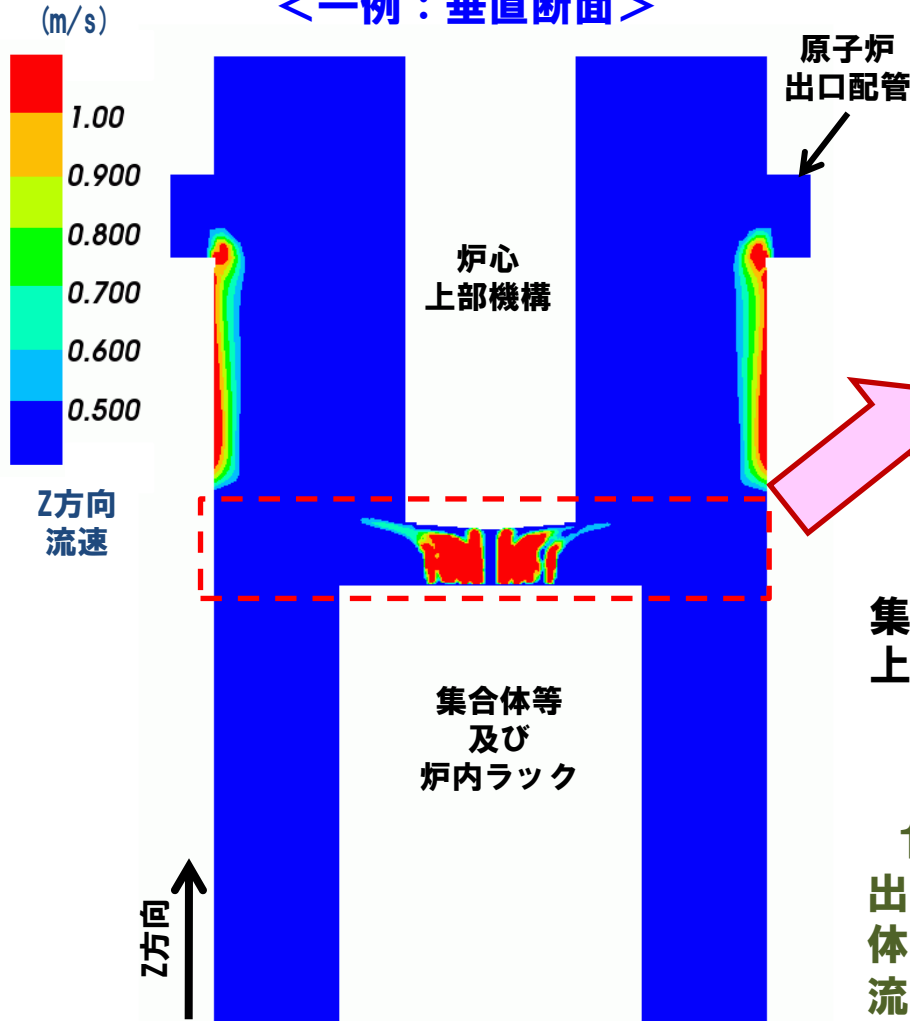
# 燃料集合体内からの固定ピンの挙動予測

## 解析条件

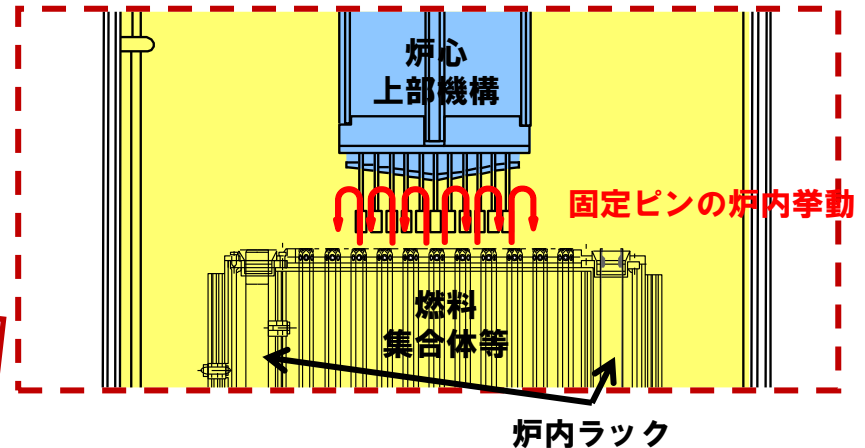
- (1) 解析コード： AQUA※
- (2) 解析モデル： 3次元モデル

※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

## 冷却材上昇速度（Z方向）分布 ＜一例：垂直断面＞



## 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。

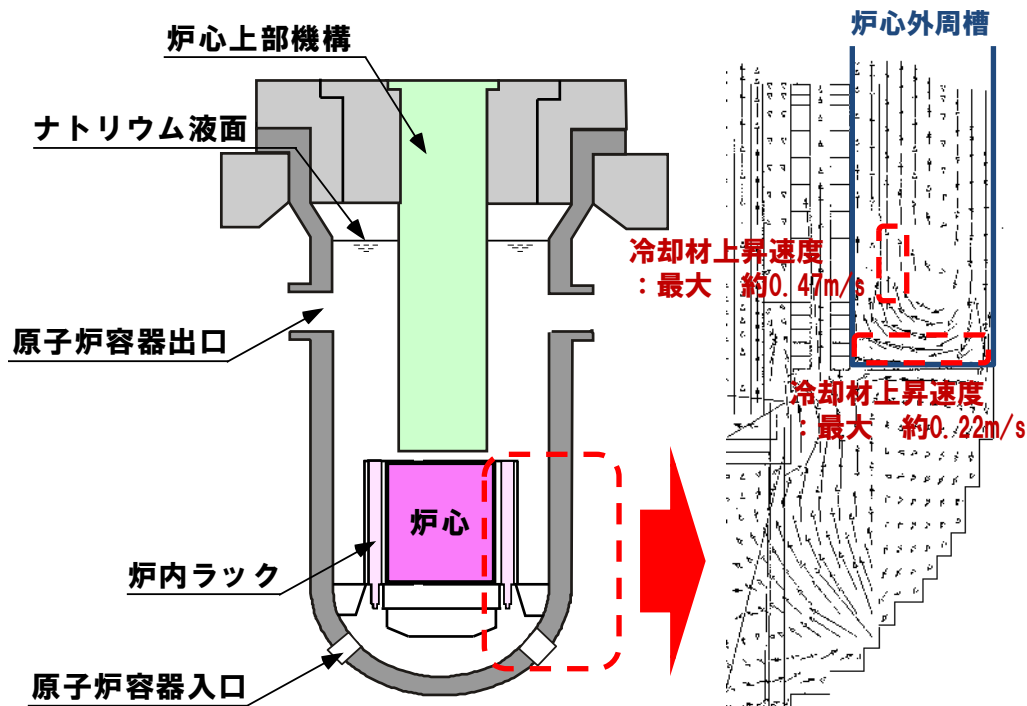


1次冷却材流量の増大時に、燃料集合体内から流出した固定ピンは、冷却材上昇速度が小さい反射体・遮へい集合体領域や炉心外周槽に沈降し、定格流量到達後も浮き上がることはない。

# 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。**

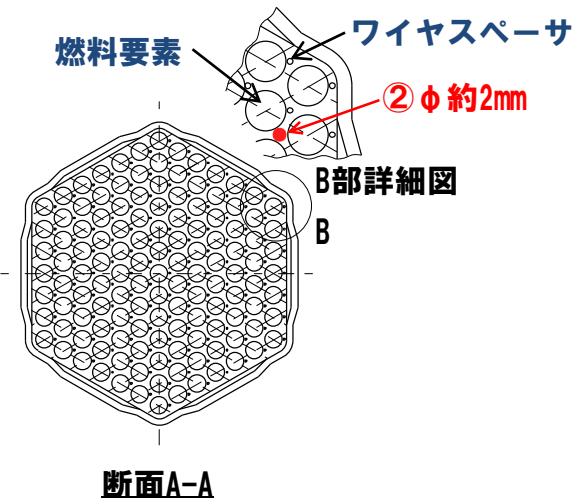
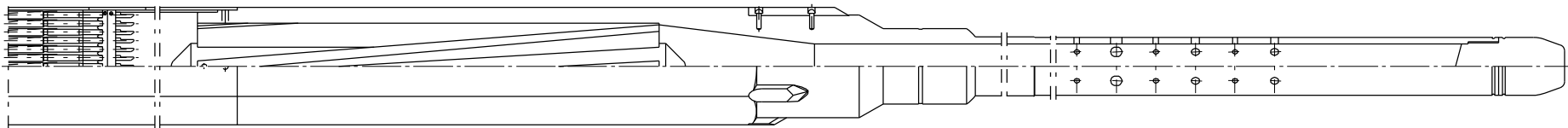
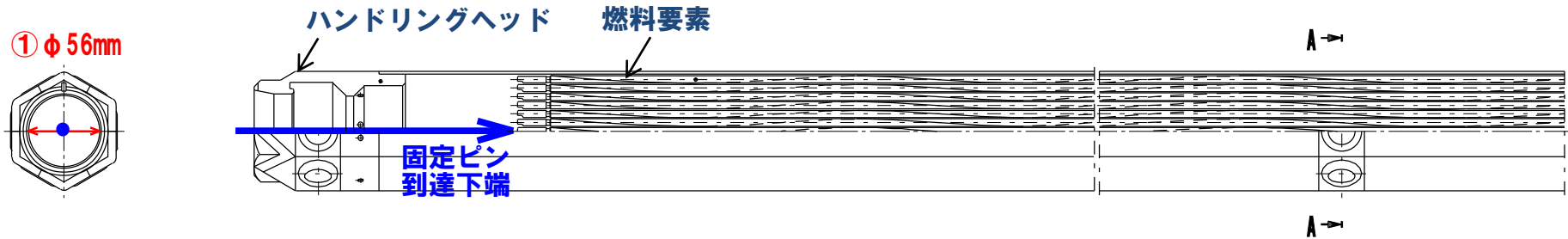


ただし、各炉心構成要素の上部から、固定ピンが落下したことを想定し、その影響を評価

- ・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

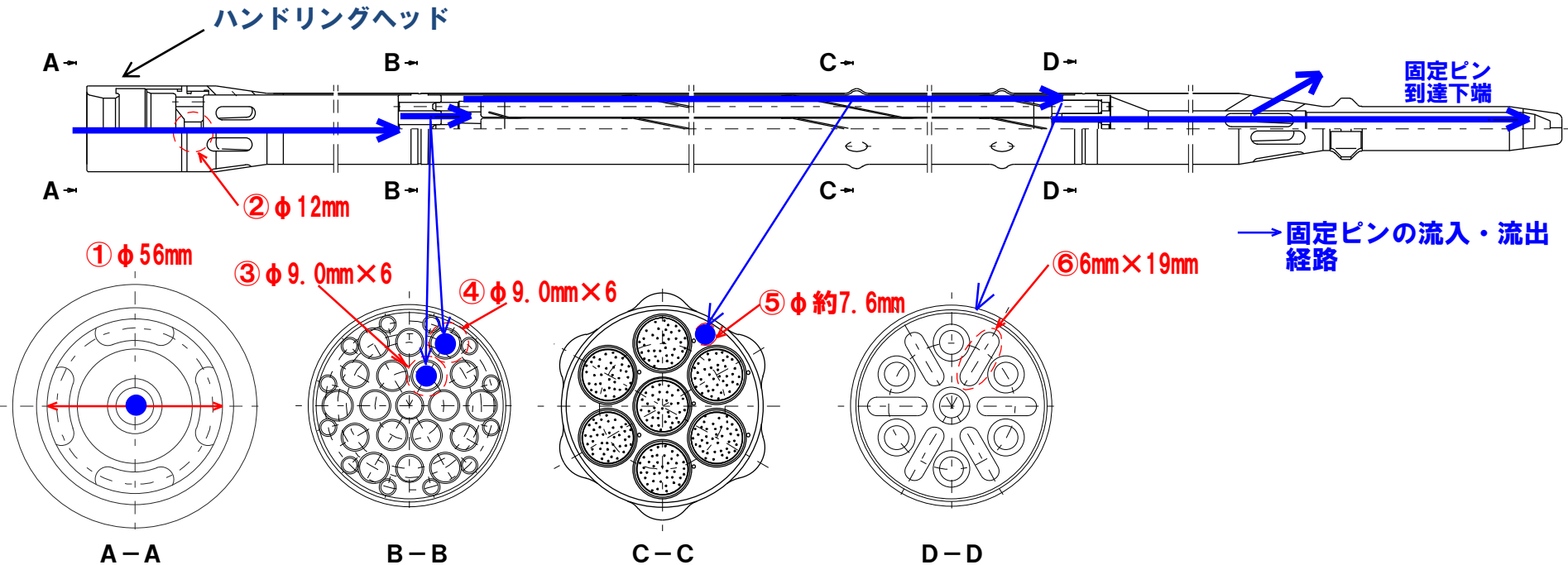


- ◆ ハンドリングヘッド開口部直径 : 56mm
- ◆ 燃料要素間ギャップ : 約2mm  
(参考: ワイヤスペーサ直径 0.9mm)

## 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

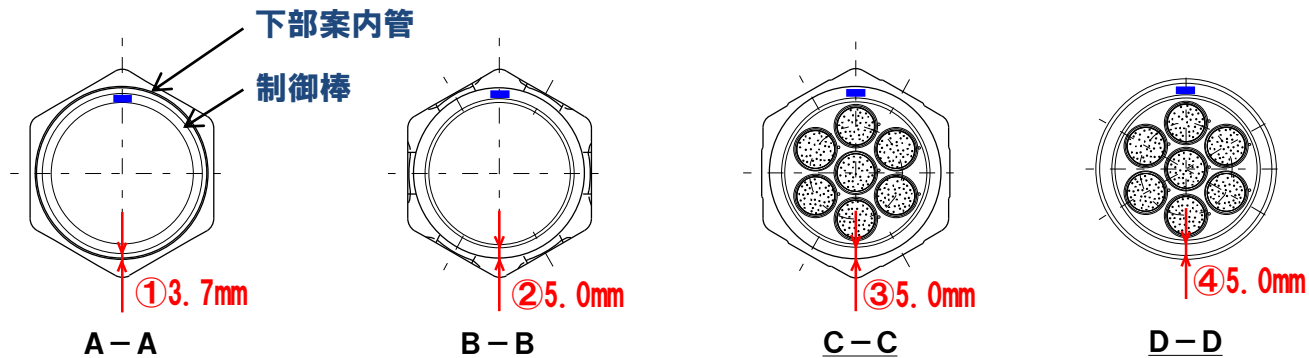
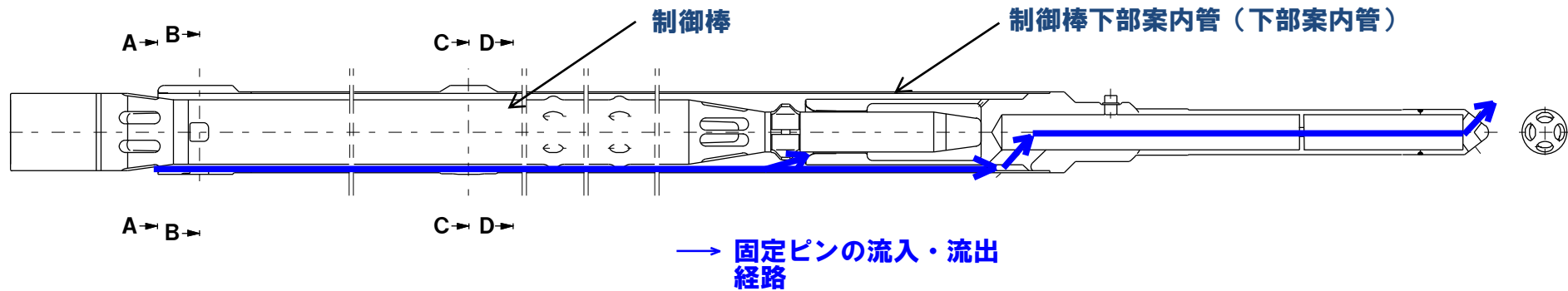


- ◆ ハンドリングヘッド開口部直径 : 56mm
- ◆ 下部グリッド板スリット幅 : 6mm

## 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。

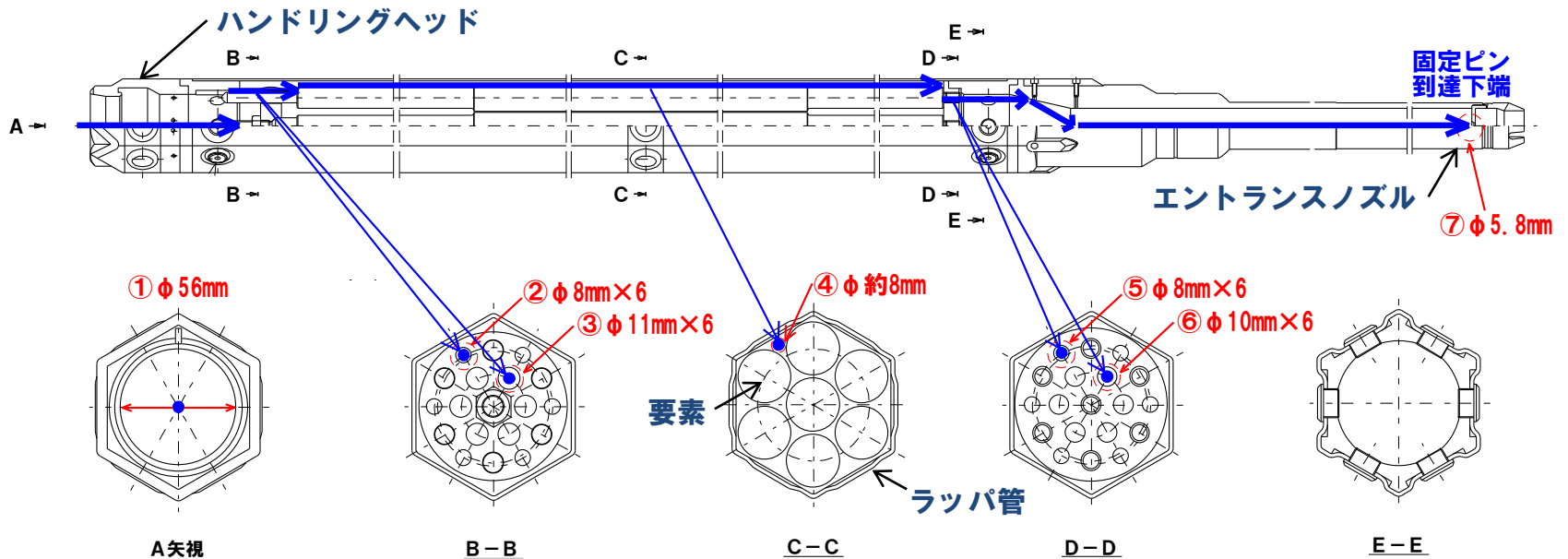


# 反射体・遮へい集合体への固定ピン落下

- ◆ 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



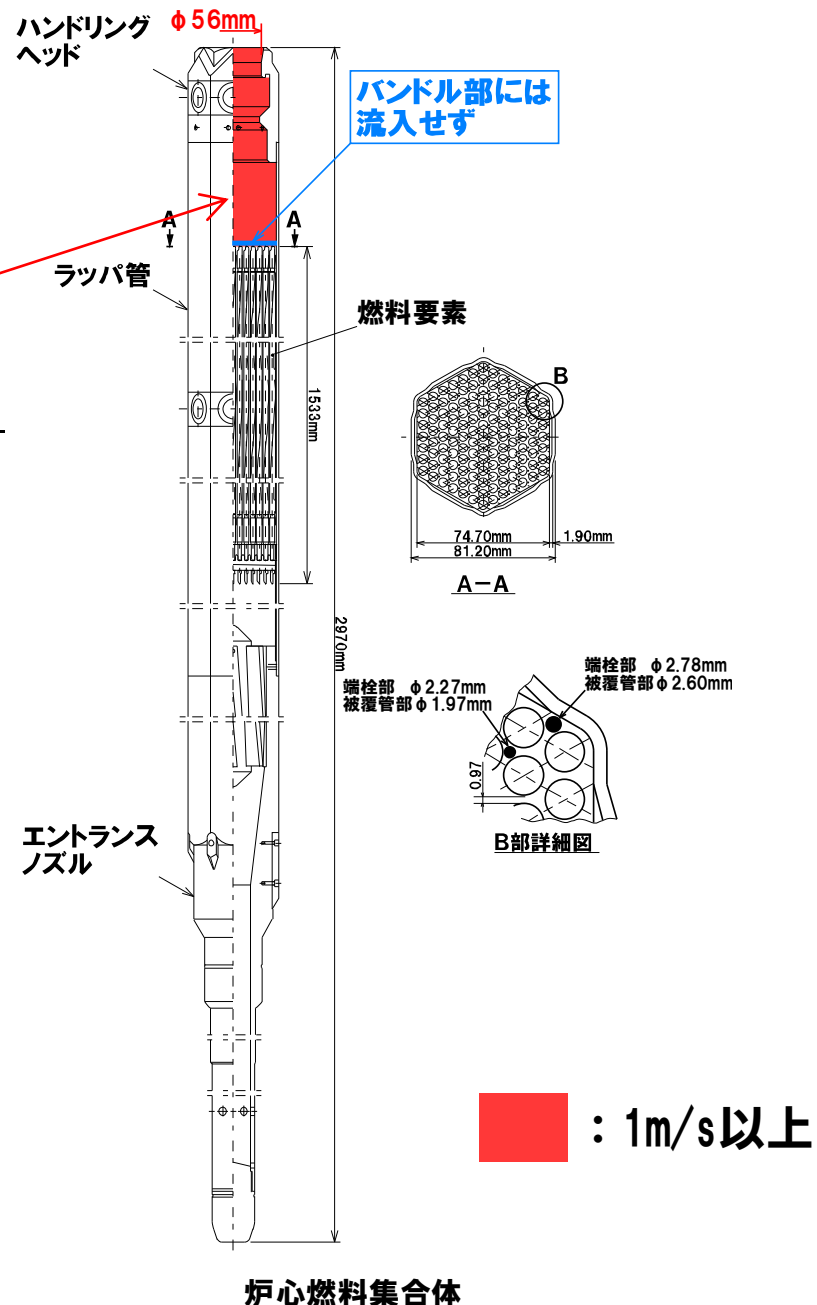
## 固定ピンの影響評価

- 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
  - 流路面積が大きく、他の流路が確保される
- 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

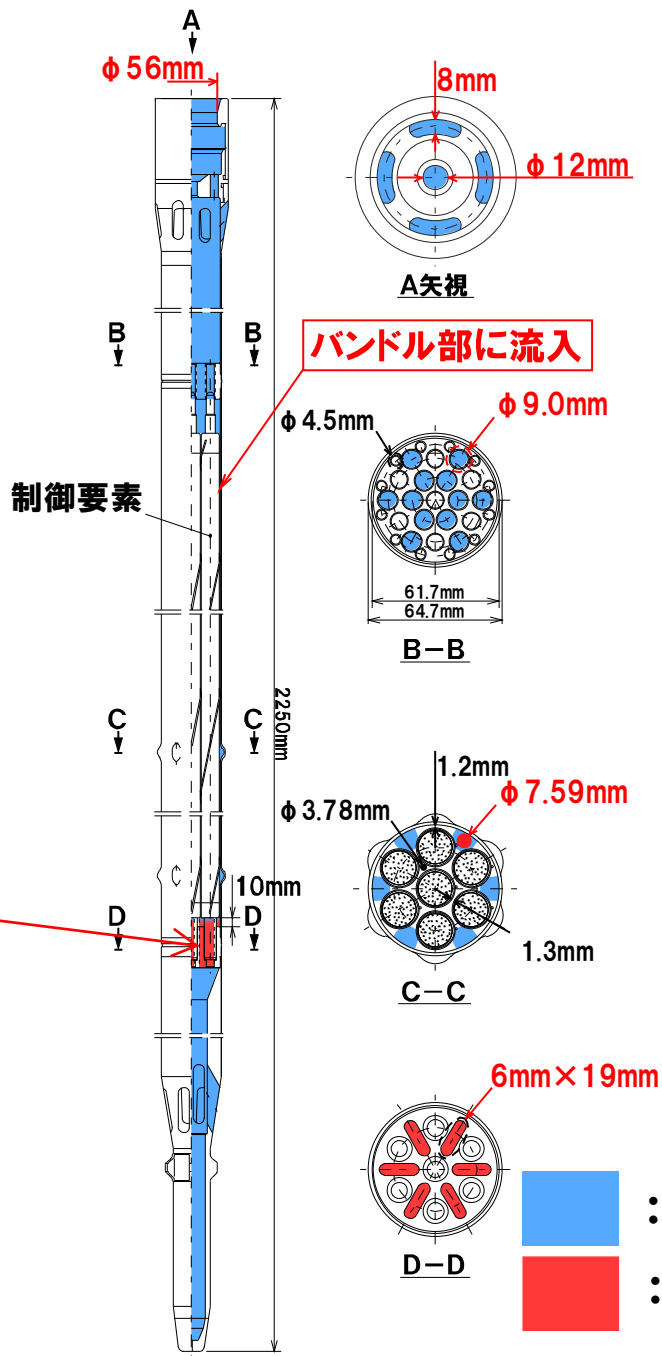
(運転中(定格流量)) : 約1.5m/s  
(停止中(20%流量)) : 約0.3m/s)

**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。**



炉心燃料集合体

# 制御棒内流速分布

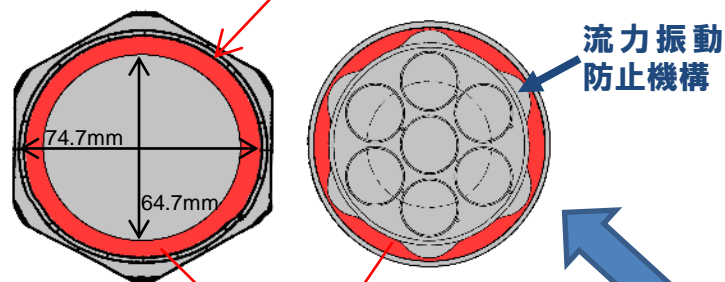


(運転中 (定格流量) : 約 $1.2\text{m/s}$ )  
(停止中 (20%流量) : 約 $0.2\text{m/s}$ )

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



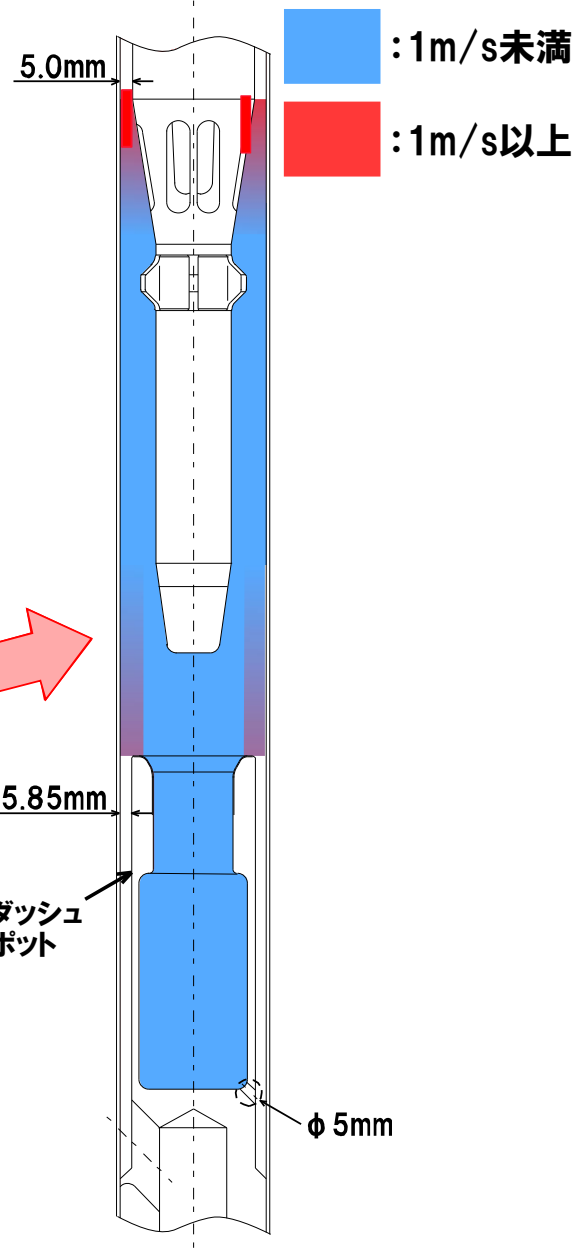
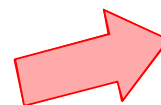
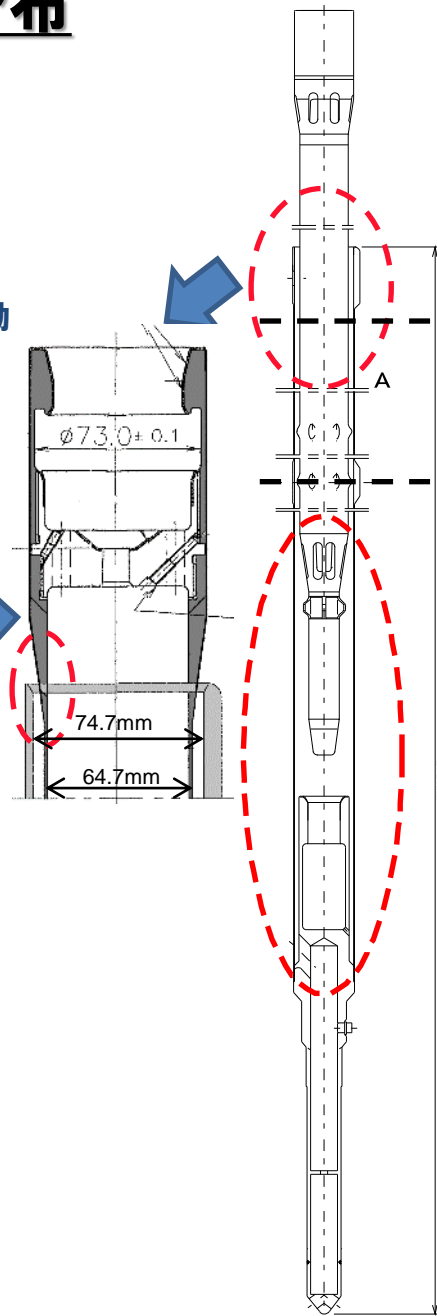
流力振動防止機構

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**



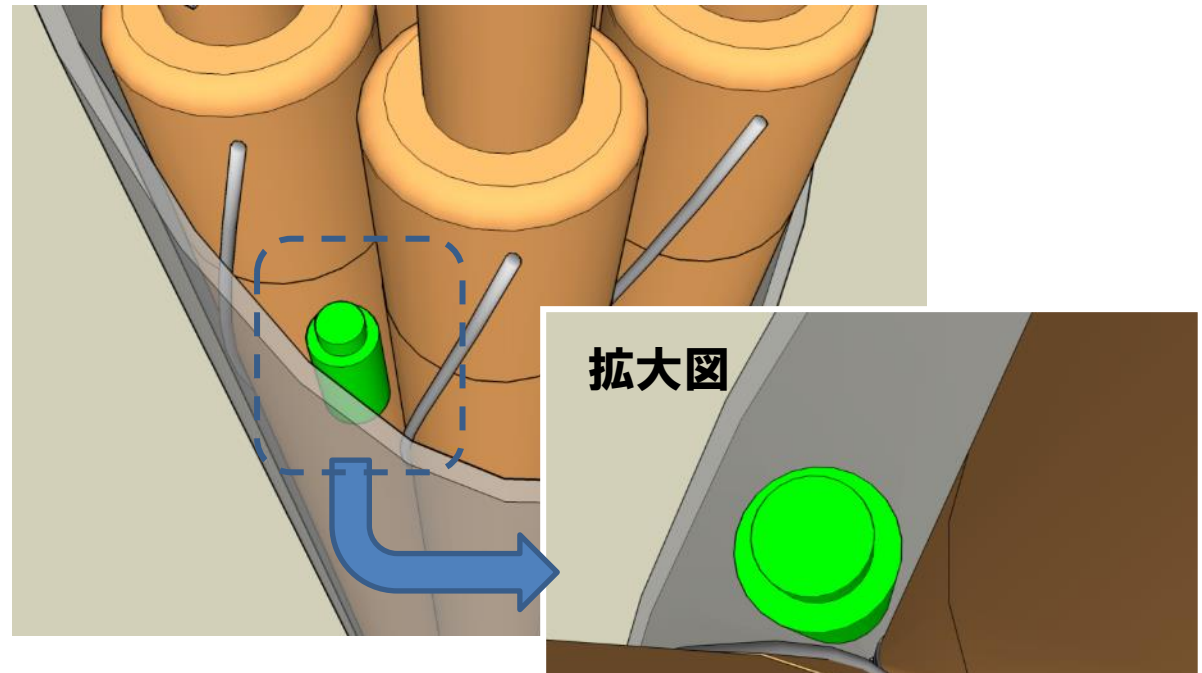
**要素バンドル部のギャップ：7mm以上（表面は基本的に平滑）**

**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>

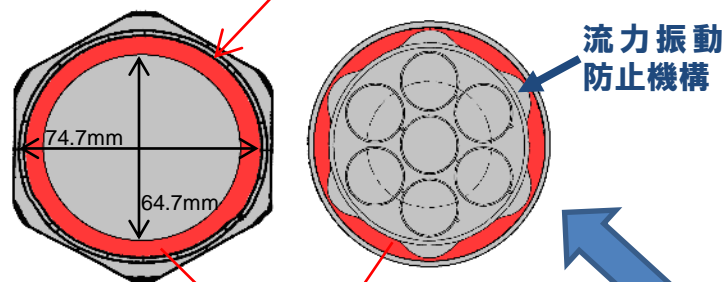
- ◆ 固定ピンはワイヤスペーサ部等に留まる可能性有
- ◆ ギャップが大きいため、固定ピンに振動等が生じた場合、固定ピンは落下
- ◆ 固定ピンの振動による構造材の摩耗は発生しない



# 原子炉運転中の制御棒の偏心を考慮した 場合の挙動について

# 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)

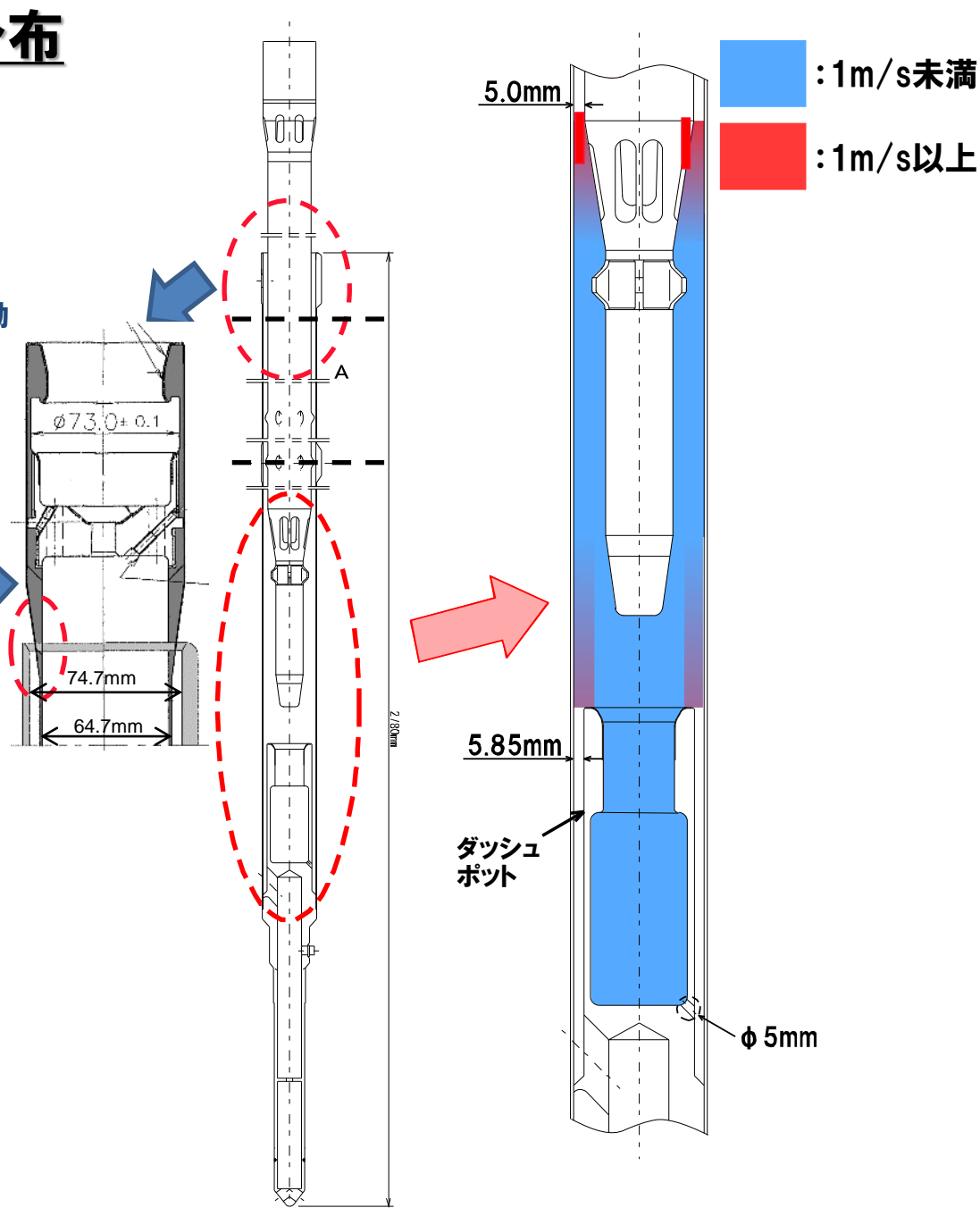


## 制御棒と下部案内管の間隙:

- 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。



**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

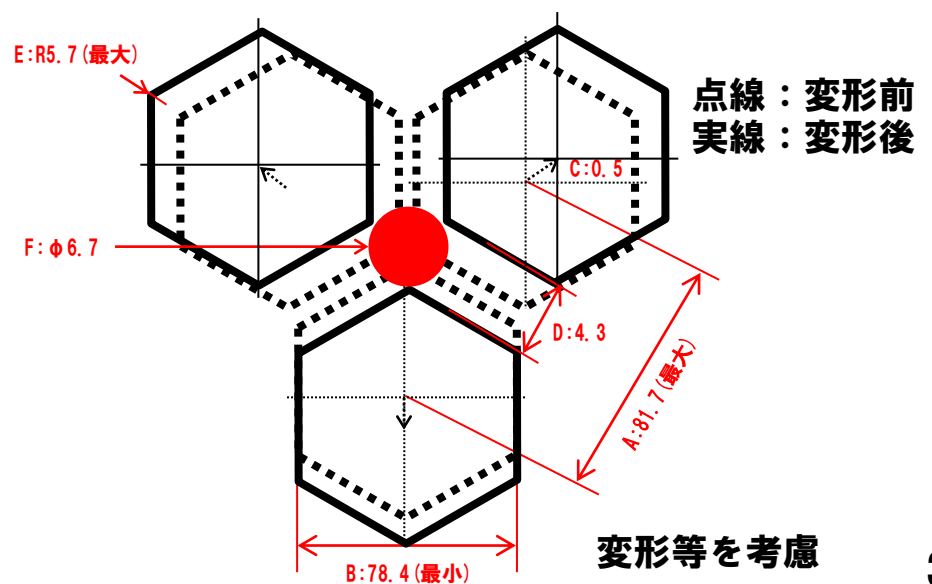
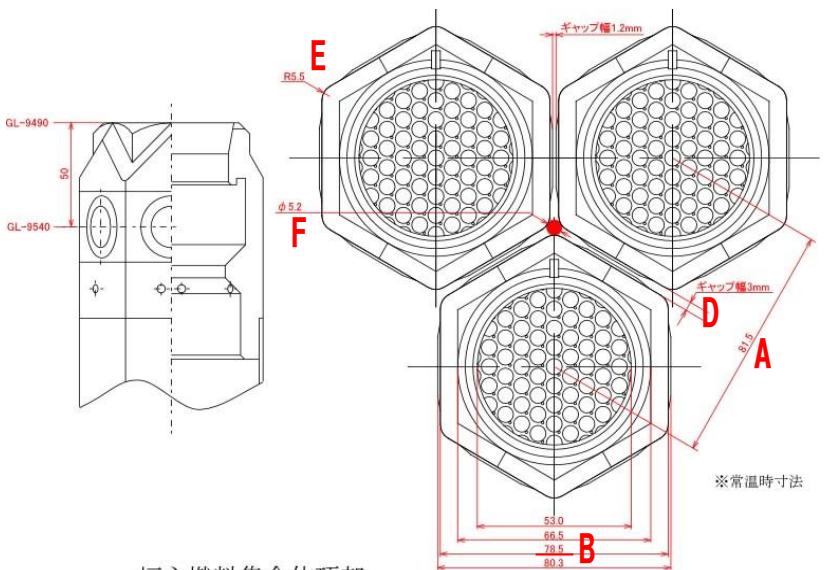
ノミナル寸法・変形無しを想定した場合、ギャップの最大径は、5.2mmとなるが、寸法公差・変形を考慮した場合、6.7mmとなる。ギャップ寸法が固定ピンの直径以上となることから、固定ピンが集合体頂部からギャップに落下する可能性がある。

## 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



炉心燃料集合体頂部

変形等を考慮

# **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