

令和4年度  
原子力規制庁技術基盤グループ-原子力機構安全研究・防災支援部門  
合同研究成果報告会

# FP移行挙動に着目した高速炉炉心損傷挙動 解析コードASTERIA-SFRによる FAUST試験解析

令和4年11月22日

原子力規制庁  
長官官房技術基盤グループ  
システム安全研究部門  
園田 大貴

本研究の一部は令和元年度原子力施設等防災対策等委託費(高速炉シビアアクシデント時の炉容器内FP移行挙動に関する検討)事業の成果である。



# 目次

---

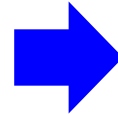
- 安全研究の背景
- 目的
- 解析モデルの開発
- 試験解析
- まとめ



# 安全研究の背景 –ULOF事象の概要–

## ➤ 高速炉の特徴

- ◆ 燃料: 高富化度のMOX燃料
- ◆ 冷却材: 液体金属ナトリウム
- ◆ 減速材: なし



炉心が最大反応度体系でないため、冷却材沸騰及び燃料凝集による正の反応度投入により再臨界になり得る。

## ➤ 原子炉出力と冷却材流量の不均衡を想定したULOF事象が安全研究の重要事項

## ➤ ULOF: Unprotected Loss-Of-Flow

- ◆ 炉心流量減少+トリップ失敗の重畳事象
- ◆ 事象進展が早い。
  - ✓ 発生～再臨界: 数分以内
  - ✓ 再臨界～原子炉損傷: 数秒以内
- ◆ 複雑な事象進展をたどる。
  - ✓ 熔融燃料による再臨界
  - ✓ FCI※による直径数mの気泡形成

※Fuel-Coolant Interaction: 燃料-冷却材熱的相互作用

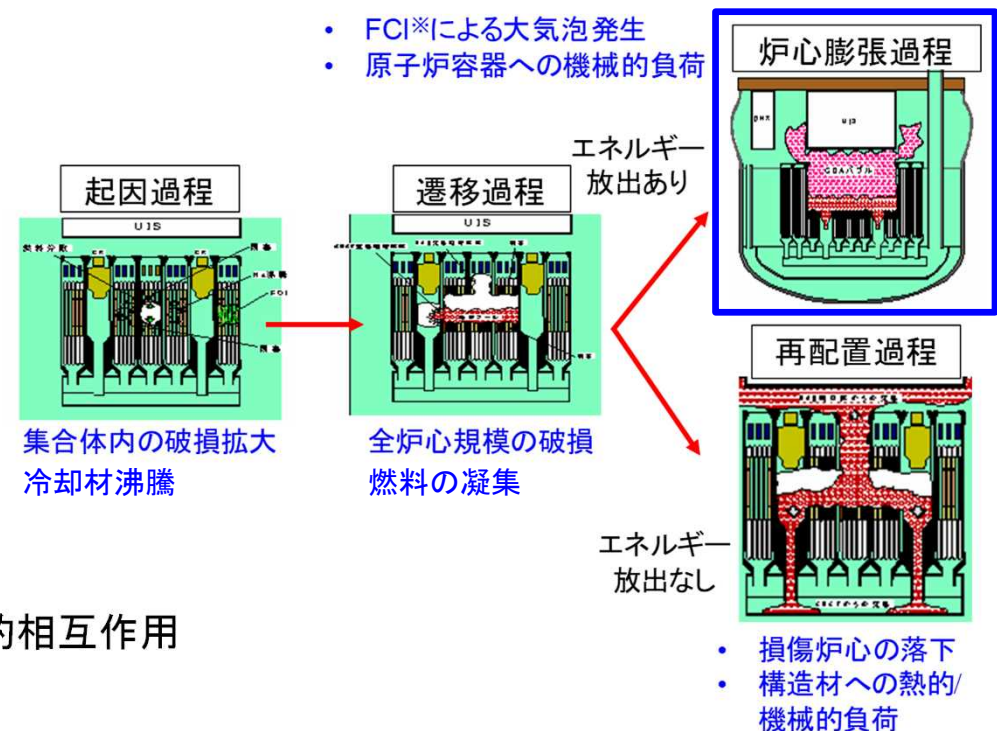


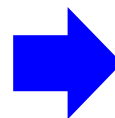
図1 ULOF事象の事故シナリオ



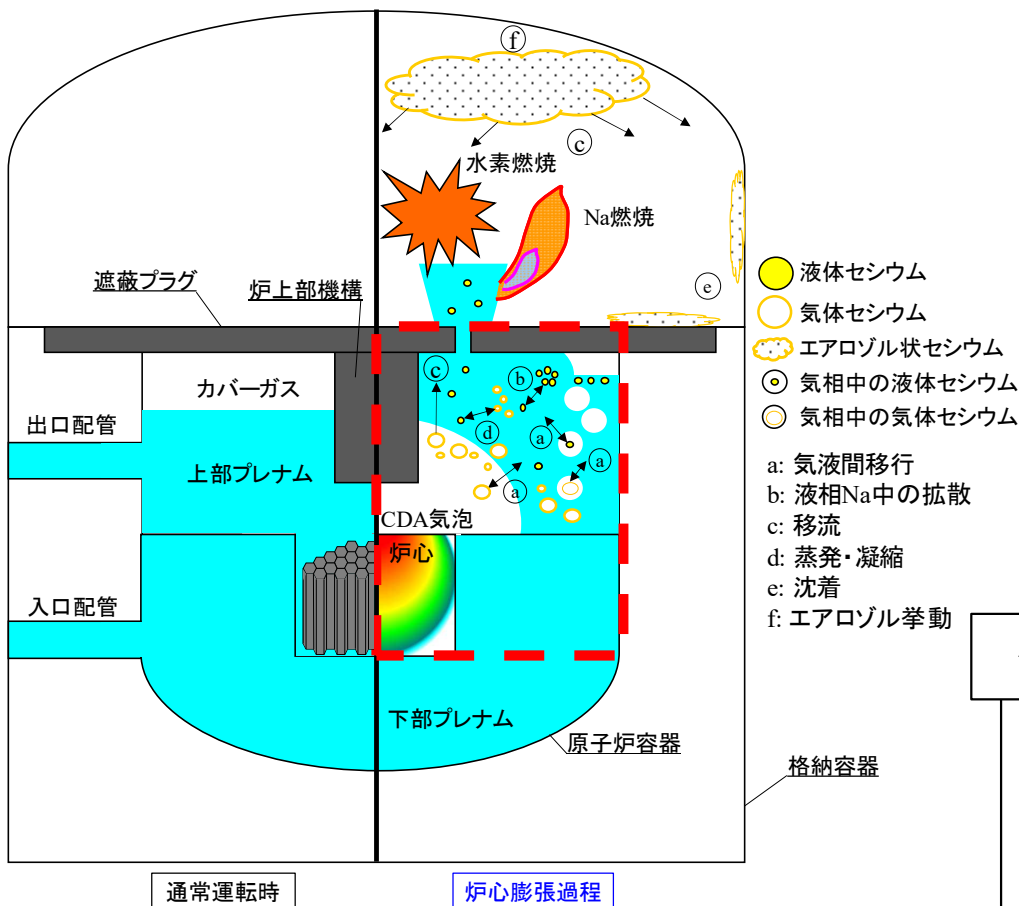
# 安全研究の背景 -ULOF事象のソースターム研究-

## ➤ 高速炉の特徴

- ◆ ナトリウムの沸点が高い(880°C)
- ◆ ナトリウムとFPの化学反応



- ・全炉心での燃料溶融時に炉内液体ナトリウムが存在<sup>1,2,3</sup>)
- ・ナトリウムによるFPの保持効果



## 炉心膨張過程のFP放出過程

1. 再臨界の発生
2. 全炉心規模の燃料溶融 ⇒ FP放出
3. FCIによるCDA気泡※発生
4. 加速されたNaにより遮蔽プラグにリークパス形成
5. 格納容器へのFP移行

※CDA: Core Disruptive Accidentの略  
燃料・構造材・ナトリウムの蒸気、FPガスから構成される大気泡

## 想定されるFP移行現象

- ・ 気液間移行
- ・ 液相Na中の拡散
- ・ 蒸発・凝縮
- ・ 移流



熱流動計算への導入を検討

図2 ULOF事象において想定するFP移行メカニズム



# 目 的

## 本研究の背景

- 炉内事象では、複雑な熱流動過程を経てFPは移行する。
  - ⇒ 従来、ソースターム評価では保守的な放出割合を設定することで評価されてきた。
- FP移行メカニズムを把握できる詳細解析手法は開発されていない。
- 原子力規制庁では、従来から炉心損傷事故時の炉心挙動の模擬を目的とした機構論的解析コードASTERIA-SFRを整備している。
  - ⇒ FPに関するモデルを開発・整備することにより、炉内のFP移行挙動を適切に評価可能となる。

## 本研究の目的

- ULOF事象におけるFP移行挙動に関するモデルを開発・整備し、FP移行に対するASTERIA-SFRの適用性を確認
- 試験解析を実施し、FP移行に寄与する現象を把握

## 最終的な目標

取得した知見を高速炉の安全規制※に活用

※新規制基準への適合性審査など



# 解析モデルの開発

高速炉炉心損傷挙動解析コード**ASTERIA-SFR**

- 炉心損傷事故時における核・熱・燃料挙動を一貫して解析するコードとして整備

熱流動計算部**CONCORD**

- 多相・多成分・多速度場
- 状態方程式(EOS)モデル



任意の物質の詳細な熱流動計算が可能

CONCORDにFP移行挙動の計算機能を追加



- モデル化するFPとして、代表的な元素であるセシウムを選定



# 解析モデルと移行現象の関係

- 効果を把握するため、想定する移行現象ごとに解析モデルを開発
- 蒸発/凝縮に着目 → セシウム成分モデル
- 気液間移行、濃度拡散に着目 → セシウム濃度モデル

表1 解析モデルと移行現象の対応

現象	セシウム成分モデル	セシウム濃度モデル
蒸発・凝縮	○	△
気液間移行	×	○
液相ナトリウム中の濃度拡散	×	○
移流	○	△

○:考慮 ×:未考慮 △:簡易的にモデル化



# セシウム成分モデル

---

目的: 蒸発/凝縮、移流に基づく移行挙動の把握

- EOSモデルを用いてセシウムをモデル化  
固体～臨界点までの温度範囲を実験データを基にフィッティングした多項式
- 九州大学への委託事業により  
セシウムのEOS・熱物性パラメータを導出<sup>4,5)</sup>  
気体比熱、液体密度 液体比熱、粘性係数、表面張力、熱伝導率 etc.
- 炉心→CDA気泡→上部プレナムへの移行、蒸発凝縮を多成分・多相熱流動計算モデルによって解析可能





# セシウム濃度モデル

## 目的: 濃度拡散、気液間移行、移流に基づく移行挙動の把握

- 気液間移行

気泡-液相Na間、気相連続相-液相Na連続相間に、境界面積、濃度勾配、気液分配係数に基づく移行を考慮

- 濃度拡散

濃度勾配に基づく液相Na中の拡散を考慮

- 熱流動計算

独立した成分として扱わず、簡易的に熱流動計算をモデル化  
多相熱流動モデルによる液体Na、気体成分の計算結果を参照

- 液体セシウムの速度、温度 ⇒ 液体Naの値を使用
- 気体セシウムの速度、温度 ⇒ 気体成分の値を使用
- 相変化 ⇒ セル内のモル濃度比からセシウムの分圧を算出  
分圧に応じた飽和温度を用いて相変化を判定

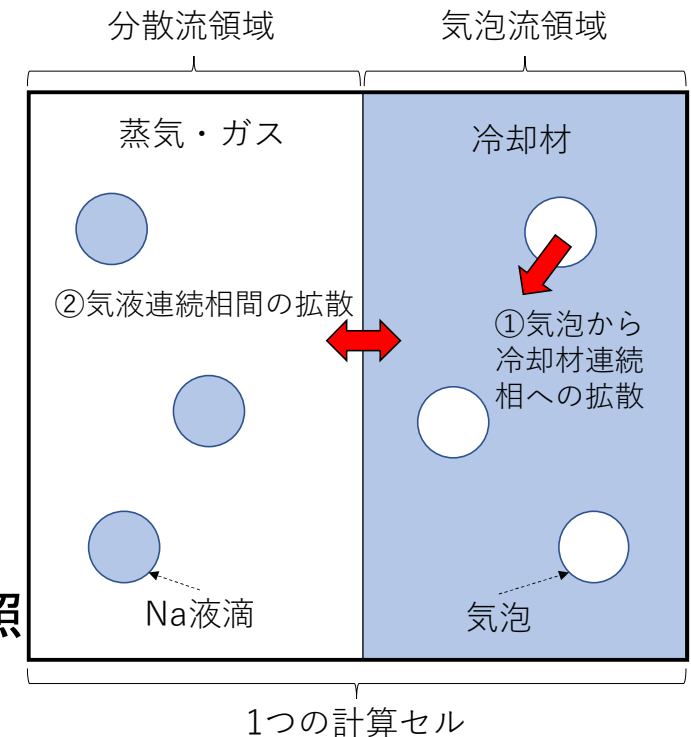


図3 気液間移行パス



# 試験解析： 対象試験FAUST II-B<sup>6)</sup>

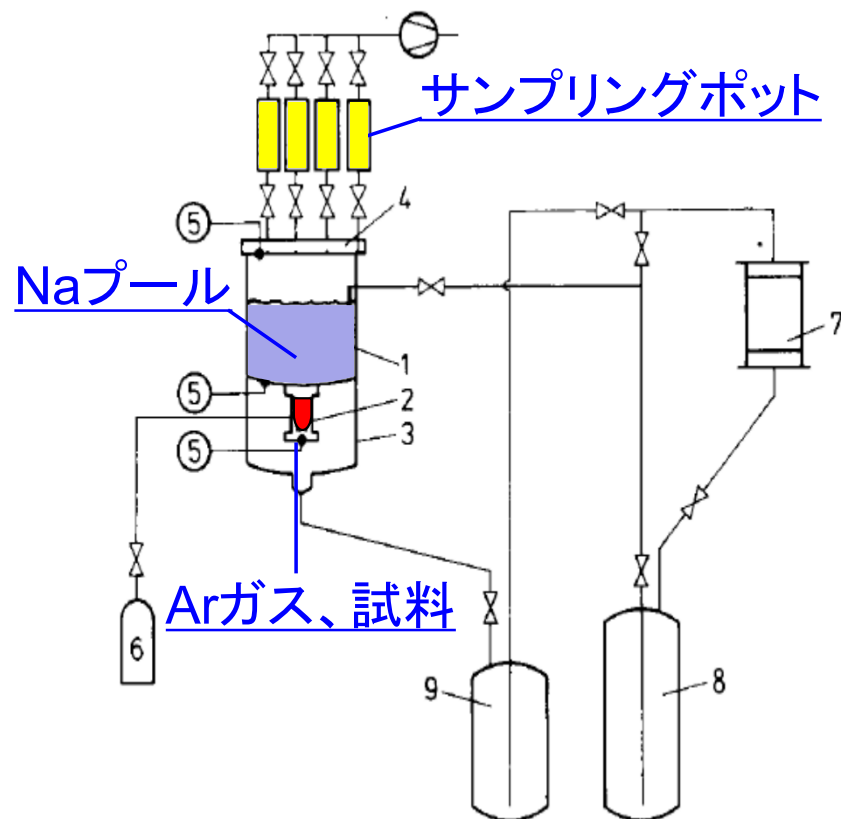
- 独カールスルーエ原子力研究所(現カールスルーエ工科大学)が1986-1989年に事故時のエアロゾル輸送挙動を模擬する目的で実施した実験
- 高温高压の蒸気泡によって、FPが炉心からカバーガスに移行する状況を想定

## 試験条件

- 試験容器形状: 円筒
- 試験容器高さ: 1.1m
- 試験容器直径: 0.6m
- Naプール液位: 0.4m
- Na、カバーガス温度: 490°C
- 試料、Arガス温度: 490°C
- 試料: Cs(4.5g)
- Arガス注入圧力: 3.1MPa

## 試験方法

- Naプールの底部からArガスと試料を注入
- サンプリングポットへの移行量を測定
- 試料の移行割合をRetention Factor(RF)で整理



目的に応じて4点の移行量を測定

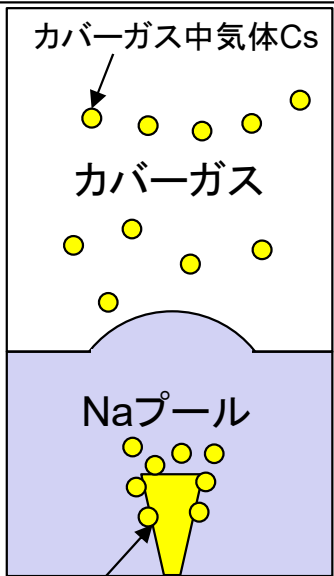
- 注入前 ⇒ バックグラウンド
- 注入後1秒時点 ⇒ CDA気泡発生時のFP放出
- 注入後4分時点 ⇒ コア・キャッチャーに堆積した燃料からのFP放出
- 注入後10分時点 ⇒ 格納容器に流出した燃料からのFP放出



# 解析方法

- 座標系: 2次元、R-Z円筒体系
- 初期Na、カバーガス温度: 490°C
- 試料、Arガス温度: 490°C
- サンプルングポットは考慮しない。
- パラメータ: 拡散係数、気液分配係数
- Cs初期条件: ソース領域に4.5gのCsを配置
- 外乱条件: Naプールと圧力源の間に仮想壁を設定  
→ t=0.5sで仮想壁を削除

## RFC※の評価方法



注入されたCs

試験開始1秒時点での移行割合  
RFC※を解析結果と比較

$$RFC = \frac{\text{注入されたCs量}}{\text{カバーガス中の気体Cs量}}$$

※サンプルングポットの体積をカバーガス体積に補正した移行割合

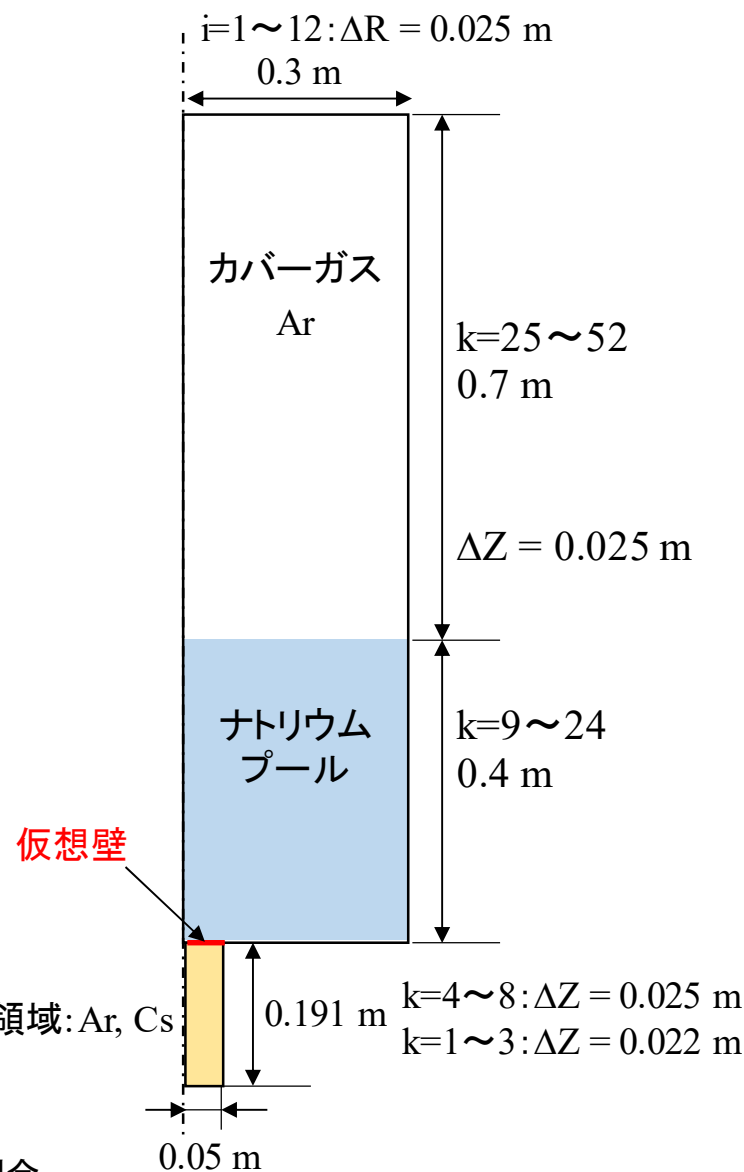


図5 解析体系



# RFCの比較

表2 RFCの比較

No.	モデル	拡散係数	気液分配係数	RFC(解析)	RFC(試験)	C/E※1
1	Cs濃度 モデル	ノミナル	ノミナル	$1.48 \times 10^4$	$7.4 \times 10^3$	2.0
2		ノミナル×0.5	//	$1.48 \times 10^4$		2.0
3		ノミナル	ノミナル×2.0	$7.39 \times 10^3$		1.0
4	Cs成分 モデル	N/A	N/A	$2.72 \times 10^1$		0.0037

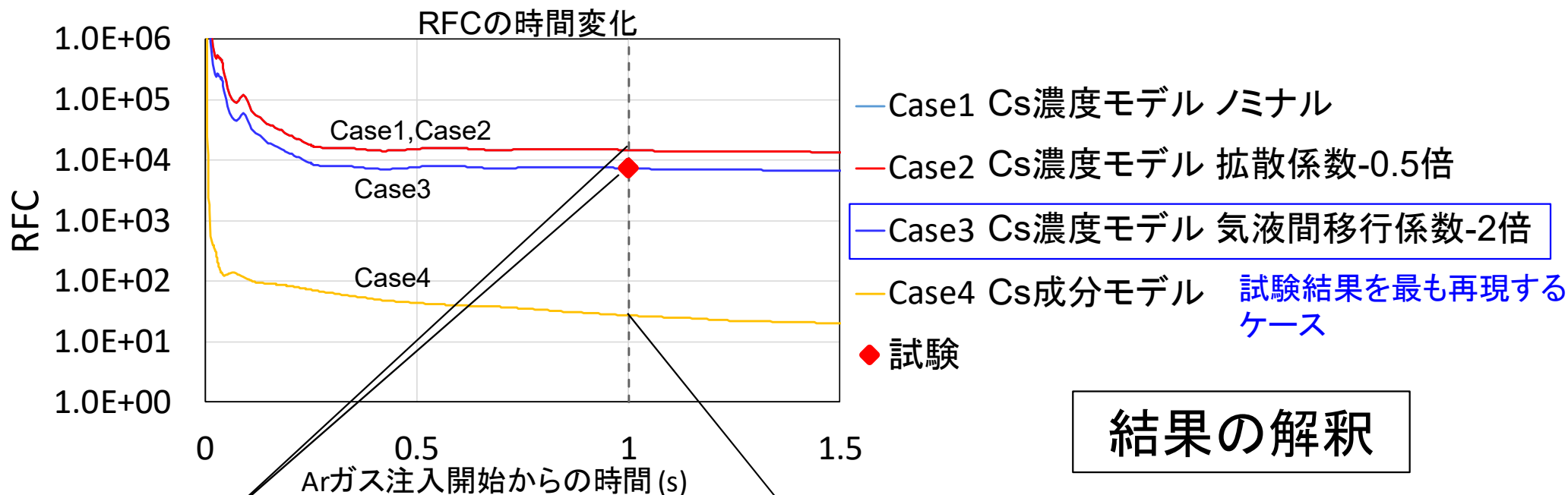
※1: C/E=解析値/試験値

## 結果の解釈

- Cs濃度モデルは、試験のRFCを概ね再現
- Case1, 3のRFCは線形に変化 ⇒ 連続相間の気液移行の効果が大きい。
- Case1, 2のRFCに差は小さい。 ⇒ 濃度拡散の効果は小さい。
- Case4のRFCは小さい。 ⇒ カバーガスへの移行量を過大評価  
(数値解法上の課題である可能性)



# 解析モデル間のCs移行メカニズムの違い



## 結果の解釈

### ●Cs濃度モデルの場合

Case1~3: RFCは計算直後から減少し、約0.25秒から一定。  
Csは、Naとカバーガスの混合時に、気液間移行により液体Naを介して気相に移行。

### ●Cs成分モデルの場合

Case4: RFCは計算直後から減少し、その後も緩やかに減少傾向。  
大部分のCsが蒸発により気相に直接移行。

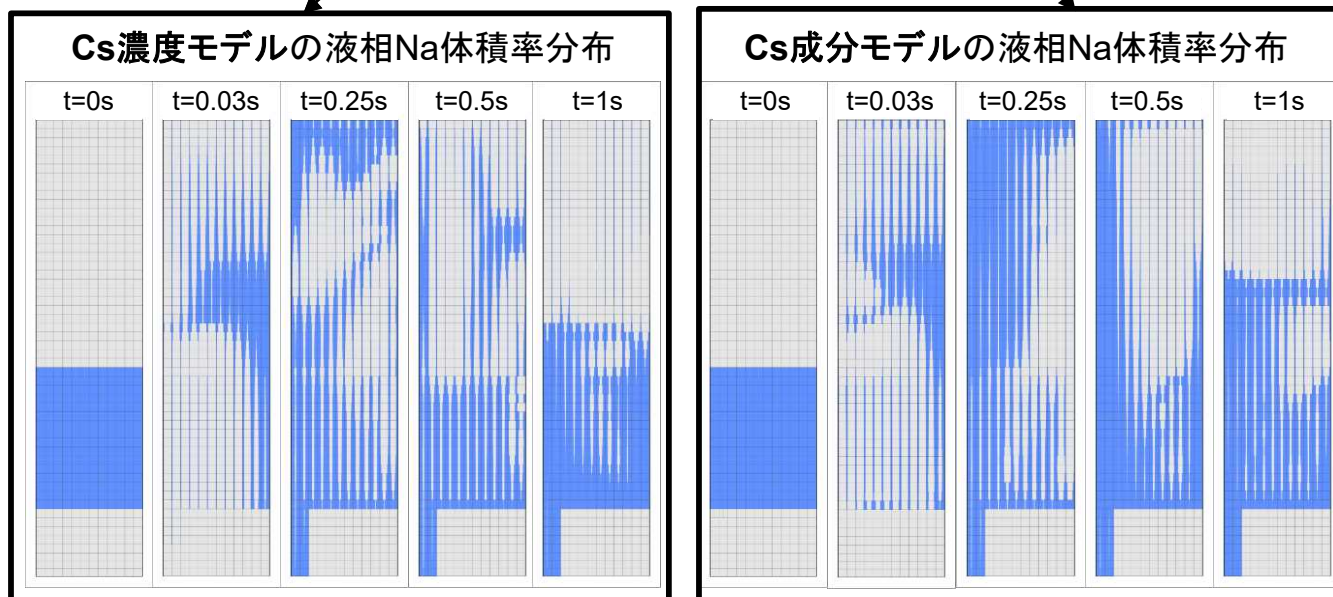


図6 RFCと液相Na体積率分布の時間変化



# まとめ

---

- 機構論的解析コードASTERIA-SFRにセシウム移行に関する解析モデルを導入した。
- ASTERIA-SFRを用いてFAUST II-B試験解析を実施した結果は、試験結果を概ね再現することから、FP移行解析に対する同コードの適用性を確認した。
- FP移行メカニズムに関して、以下の知見が得られた。
  - ◆ 気液間移行の感度が大きい一方、濃度拡散の感度は小さい。
  - ◆ 蒸発/凝縮のみを考慮する場合、気相への移行量を過大評価する。
  - ◆ 本検討では、気液間移行を考慮することで試験結果(RFC)を良く再現した。
- 今後の予定
  - ◆ 液相Na-カバーガス間のCsの平衡分配係数を測定した試験を対象に、気液間移行モデルと蒸発モデルに着目した妥当性確認解析を実施する。



## 【参考文献】

---

- 1) P. R. Patel, et al., “In-vessel source term calculation using chemical equilibrium approach for a medium sized sodium cooled fast reactor”, Nuclear Engineering and Design, 362 (2020), 110583.
- 2) R.P.C. Schram, et al., “SOURCE TERM CALCULATIONS OF THE ALMR”, ECN, (1995), ECN-R-95-021.
- 3) D. Grabaskas, et al., Regulatory Technology Development Plan Sodium Fast Reactor Mechanistic Source Term – Trial Calculation, Argonne National Laboratory, ANL-ARP-49 Vol.1, 2016.
- 4) N.B. Vargaftik et al., “Cesium,” in Chapter 2, Handbook of Physical Properties of Liquids and Gases, 3rd. edition, Begell House, 281-308, New York, USA (1996)
- 5) “令和元年度原子力施設等防災対策等委託費(高速炉シビアアクシデント時の炉容器内FP移行挙動に関する検討)事業”, 九州大学, 2020.[公開予定]
- 6) J. Mingos, W. Schütz, “SNR Quelltermexperimente mit Berstscheibenentladungen unter Natrium“, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK 5082, 1993.
- 7) J. Mingos, et al., “Retention factors for fission products from sodium tests to simulate a severe LMFBR accident”, Nuclear Engineering and Design 137 (1992) 133-138.



---

ご静聴ありがとうございました。