

平成29年7月20日

CITY  
UNIV.

# 都市大原子カシンポジウム「日本の高速炉開発のゆくえ」 高速炉の事故はどのように進むのか？

東京都市大学 大学院 共同原子力専攻  
工学部 原子力安全工学科  
鈴木 徹



# 本日の講演内容

## □軽水炉と高速炉の安全上の違い

- 軽水炉(LWR)と高速炉(FBR)の基本的な仕組み
- 高速炉の安全性に関する一般的な特徴と格納機能の確保

## □高速炉における事故の進展

- シーケンスの選定
- IVR(炉容器内保持)の検討
- 各過程の概要と評価アプローチ

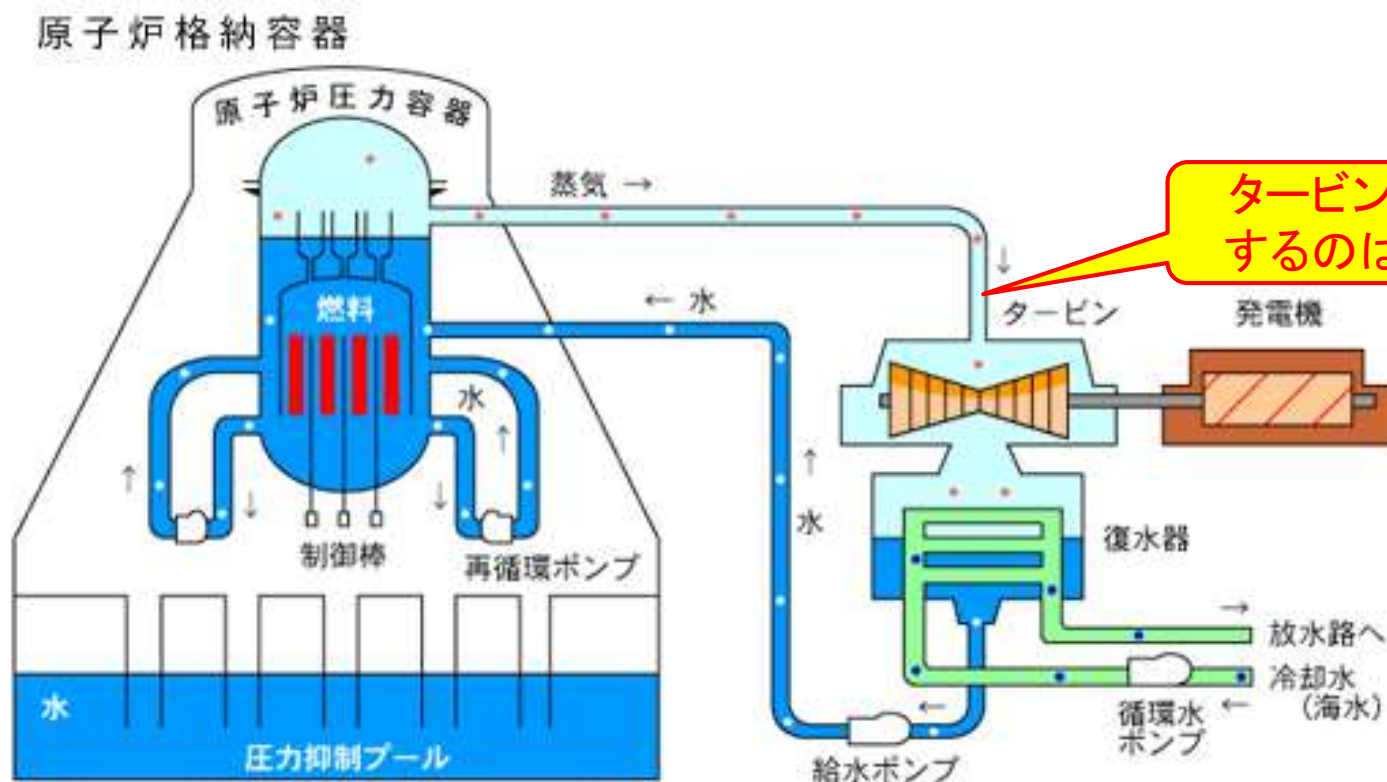
## □将来の高速炉における安全性向上策

- IVRをさらに確実にするには・・・

## □まとめ

# 軽水炉と高速炉の安全上の違い

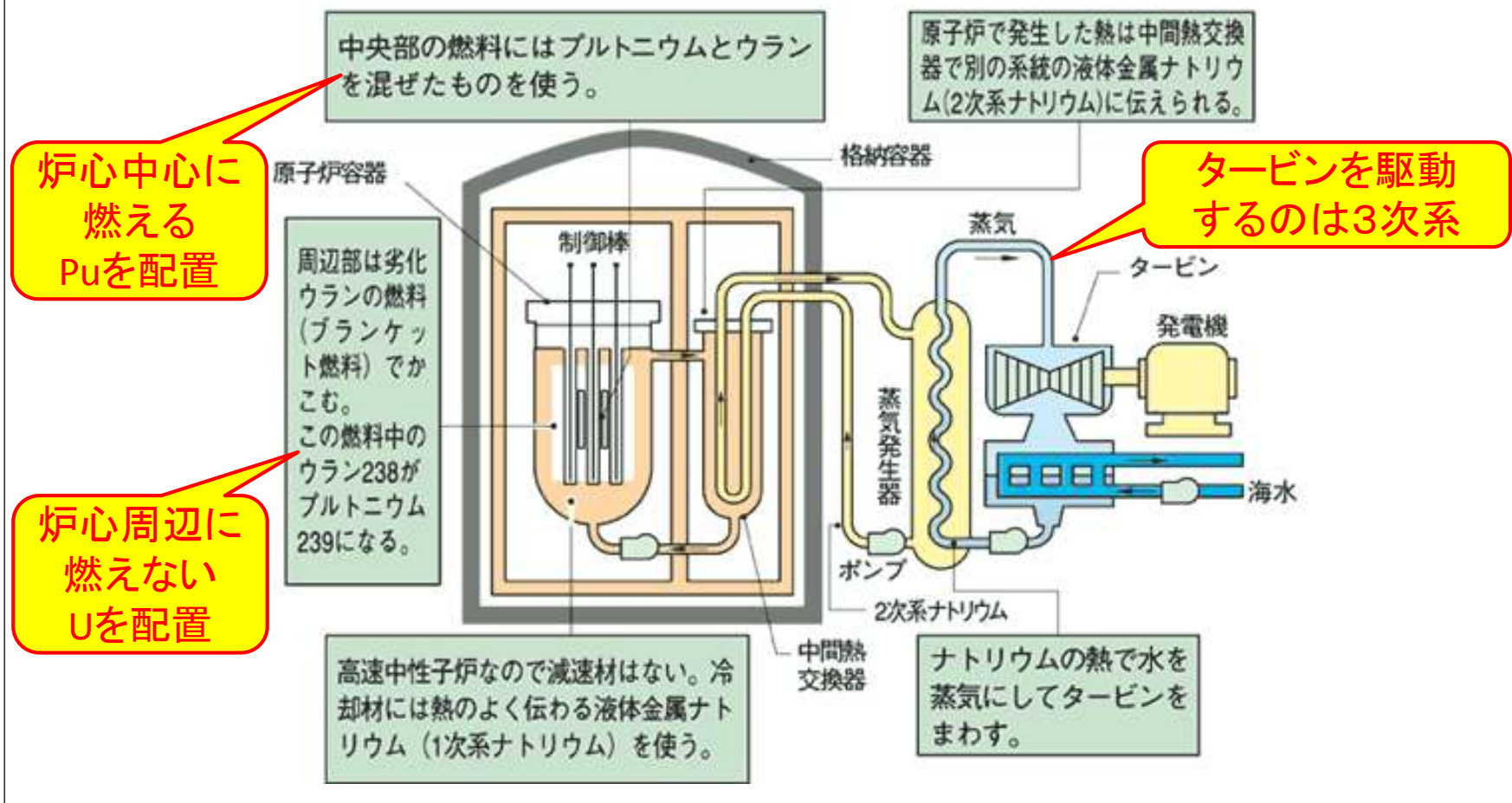
## ● 軽水炉(LWR)の基本的な仕組み



沸騰水型軽水炉(BWR)の概念

# 軽水炉と高速炉の安全上の違い

## ● 高速炉(FBR)の基本的な仕組み



# 軽水炉と高速炉の安全上の違い

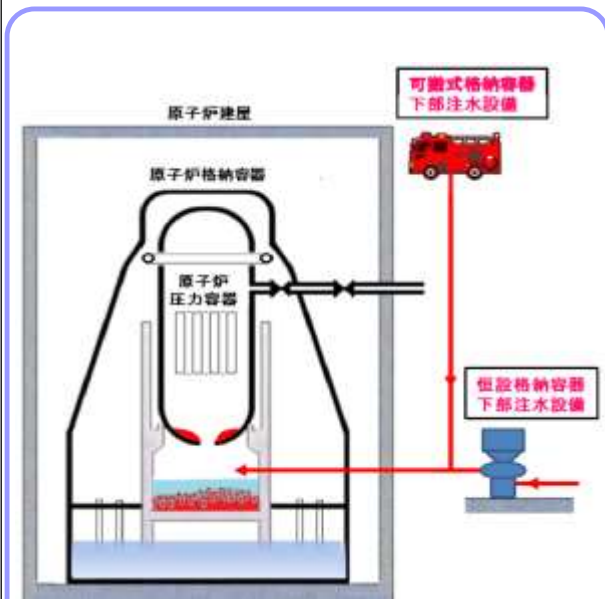
- 高速炉の安全性に関する一般的な特徴
  - ✓ 炉心が最大反応度形状となるように設計されていない
  - ✓ 炉心冷却が本来的に容易
    - 熱伝導性に優れた液体ナトリウムを使用
    - 自然循環能力が高い(炉心冷却に電源が不要)
    - 最終ヒートシンクが大気(海水冷却に依存しない)
  - ✓ 軽水炉と比較して原子炉の圧力が有意に低い
    - 軽水炉で想定される冷却材喪失事象(LOCA)に至ることはない
- 高速炉の重大事故における格納機能の確保
  - ✓ 高速炉では重大事故を炉容器に閉じ込めること(IVR: In-Vessel Retention)が有効かつ合理的[1]
    - 軽水炉の注水対策強化のような冷却性向上方策は不要
    - 国内外の専門家から妥当な考えであると評価されている

# 軽水炉と高速炉の安全上の違い

## ● 重大事故(炉心損傷事故)の格納機能確保に関する比較

### 軽水炉

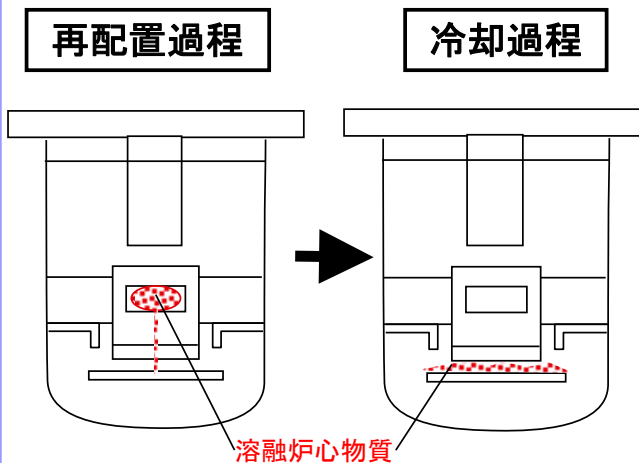
### ナトリウム冷却高速炉



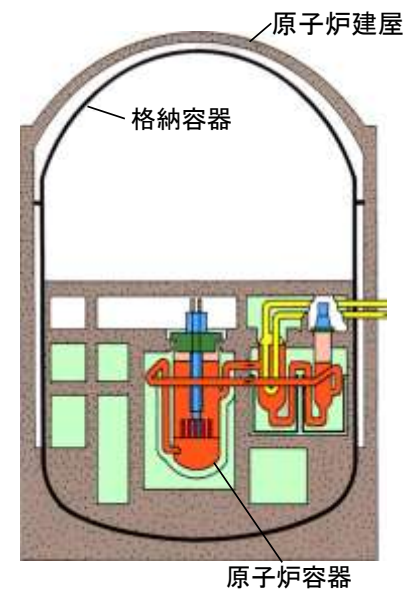
(原子力規制委員会資料を加工して作成)

- \* 熔融炉心物質の炉容器内保持が期待できない。
- \* 格納容器内に落下した熔融炉心物質は注水により冷却。
- \* ジルカロイ-水反応で水素が発生。

### 著しい炉心損傷後の対策



- \* 熔融炉心物質は炉容器内のNa冷却材により炉容器内で冷却保持が可能(炉容器の熔融貫通の可能性は極めて小さい)。
- \* Na冷却材の液体領域が極めて広く、軽水炉における冷却水のように短時間で蒸発喪失せず、外部からの補給を必要としない。



- \* 大型格納容器により温度・圧力の上昇は小さく、気体の放射性物質は十分格納される。
- \* 炉心が損傷しても水素が発生することはない。



# 高速炉における事故の進展

## ● 確率論的評価(L1PRA)による重要事故シーケンスの選定

事象分類	事故シーケンスグループ	SA対策2を適用した場合のCV機能確保に関する検討
ATWS型 (炉停止機能喪失型) 事象	<b>ULOF</b> (炉心流量喪失時 炉停止機能喪失)	<p>損傷炉心の炉容器内保持対策群 (固有の耐性など)</p> <p>↓</p> <p><b>IVRの成立性を検討</b> (炉心が損傷しても閉じ込められる)</p>
	<b>UTOP</b> (反応度挿入時 炉停止機能喪失)	<p>炉心の著しい損傷防止対策群 (独立したトリップ遮断器の追加など)</p> <p>↓</p> <p>炉停止機能の多重化による炉心損傷の回避 (炉心が損傷せずに閉じ込められる)</p>
	<b>ULOHS</b> (除熱源喪失時 炉停止機能喪失)	
LOHRS型 (除熱機能喪失型) 事象	<b>LORL</b> (液位喪失型 除熱機能喪失)	<p>炉心の著しい損傷防止対策群 (メンテナンス冷却系の起動など)</p> <p>↓</p> <p>崩壊熱除去方策の多様化による炉心損傷の回避 (炉心が損傷せずに閉じ込められる)</p>
	<b>PLOHS(SBOを含む)</b> (除熱源喪失型 除熱機能喪失)	

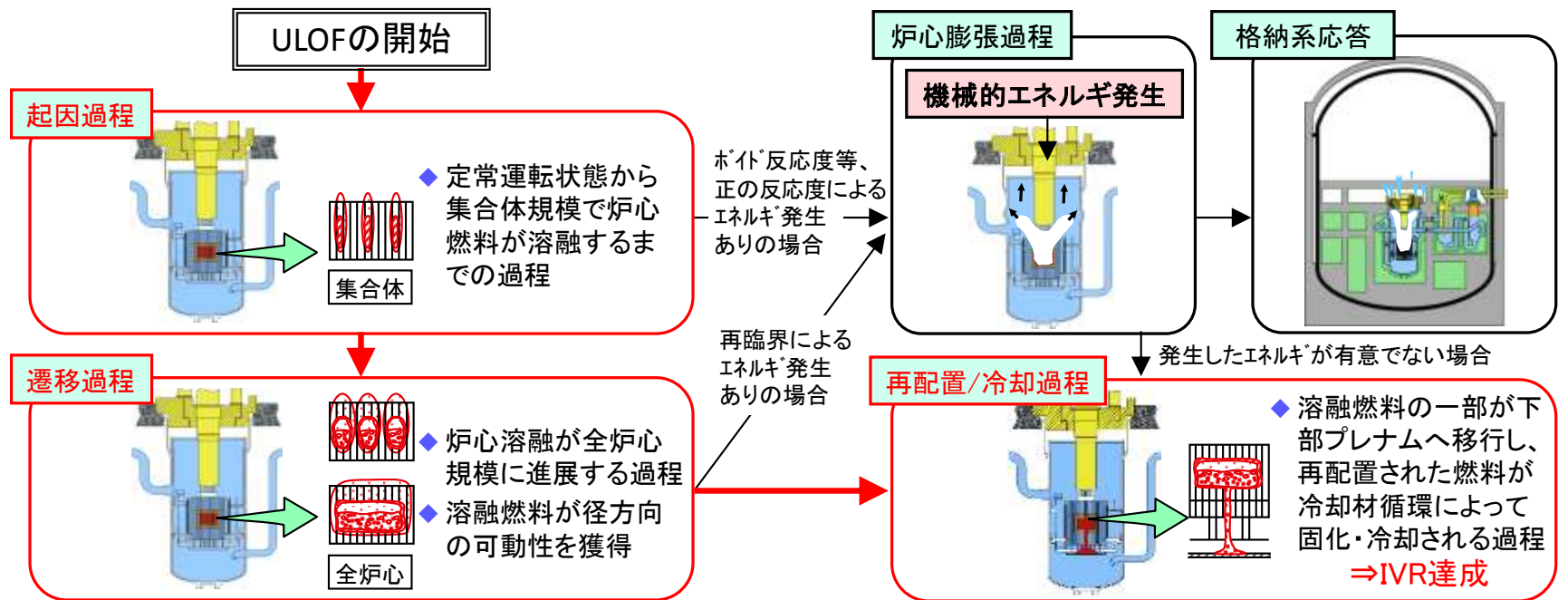
**ULOF**…時間余裕が小さく、炉心損傷頻度とバウンダリへの影響の観点から代表性が高い

# 高速炉における事故の進展

## ● ULOFにおけるIVR(炉容器内保持)の検討[2, 3]

### ➤ IVR成立のポイント

- ① 炉心損傷時に機械的エネルギーが発生しても炉容器内に格納できるか?
- ② 最終的に再配置された損傷炉心物質が冷却保持できるか?



原型炉におけるULOF時の事象推移の概要

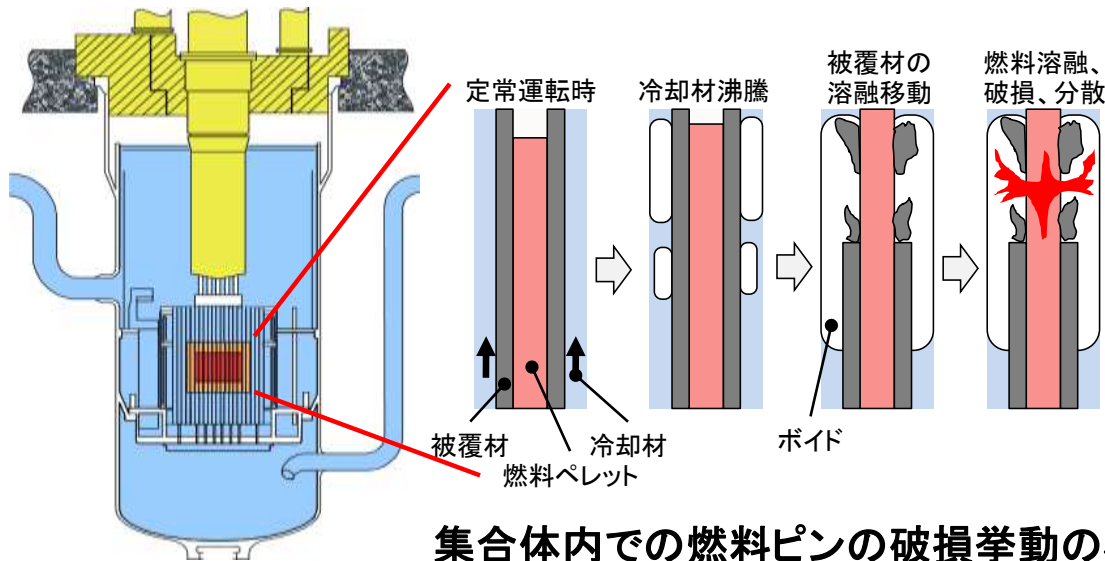


# 高速炉における事故の進展

## ● 起因過程

- 定常運転状態から集合体規模で炉心燃料が溶融するまでの過程
- 冷却材のボイド化による反応度挿入で再臨界に至る可能性

## ● 評価手法



### ◆ 正の反応度要因

- 冷却材のボイド化
- 被覆材の溶融流出、等

### ◆ 負の反応度要因

- 破損燃料の分散、等



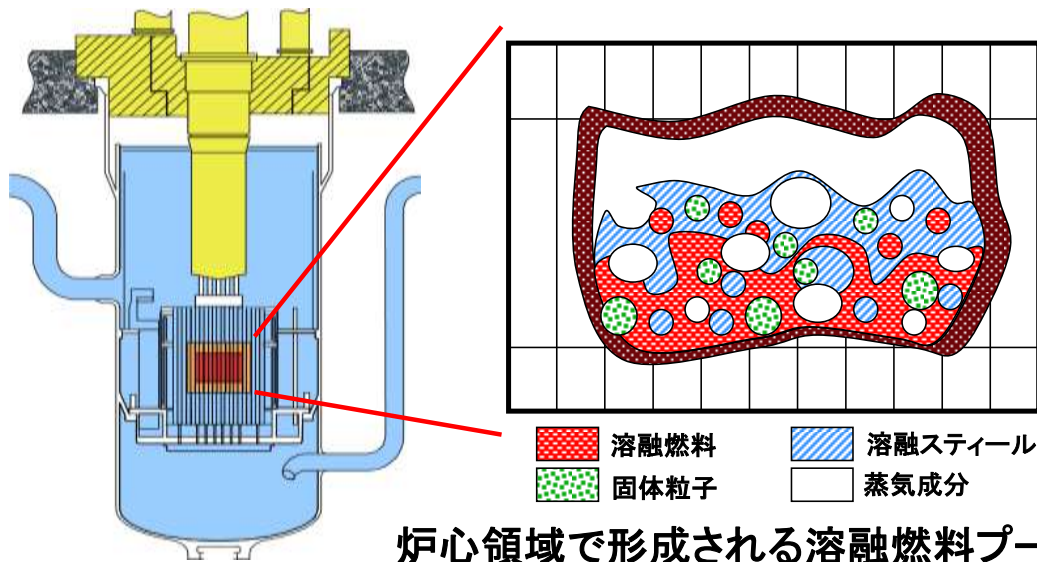
複雑な現象を解析コード  
**SAS4A**等で評価  
(CABRI試験等で検証)

# 高速炉における事故の進展

## ● 遷移過程

- 炉心溶融が全炉心規模に進展する過程
- 燃料の移動・凝集による反応度挿入で再臨界に至る可能性

## ● 評価手法



炉心領域で形成される溶融燃料プールの概念

### ◆ 正の反応度要因

- 全炉心規模での溶融燃料の凝集、等

### ◆ 負の反応度要因

- 制御棒案内管(CRGT)からの燃料流出、等



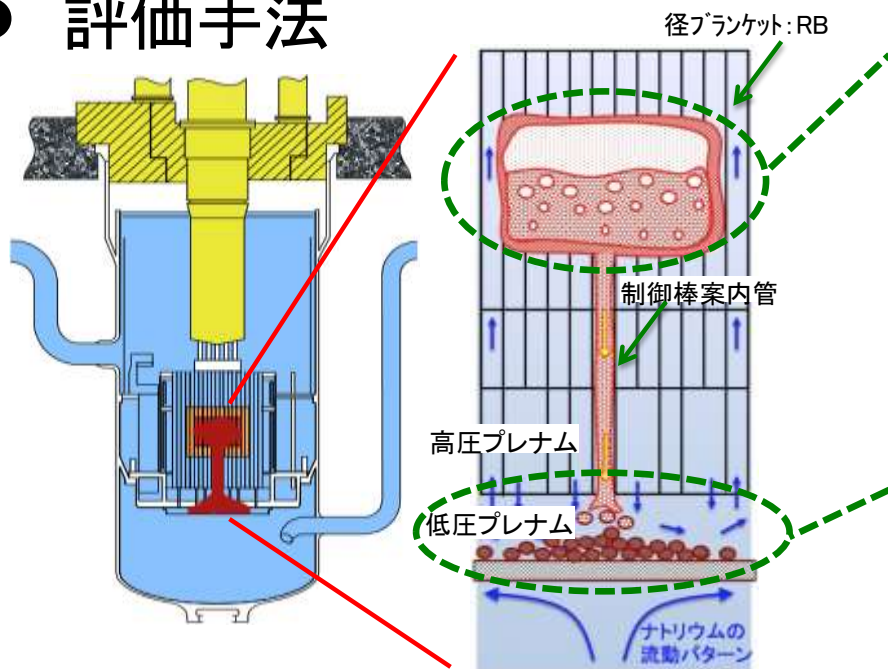
複雑な現象を解析コード  
**SIMMER**等で評価  
 (EAGLE試験等で検証)

# 高速炉における事故の進展

## ● 再配置/冷却過程

- 溶融燃料の一部が下部プレナムへ移行し、再配置された燃料が冷却材の循環によって固化・冷却される過程
- 核的終息後の崩壊熱によって炉容器構造が破損する可能性

## ● 評価手法



### ◆ 炉心残留燃料の冷却性

- 炉心周辺の状態を考慮した炉心残留燃料のエンタルピー
- 炉心周辺への伝熱と構造健全性



SIMMERコード、構造健全性データ

### ◆ 下方流出燃料の冷却性

- 冷却材の循環状態を考慮した下方流出燃料のエンタルピー
- 支持構造の構造健全性



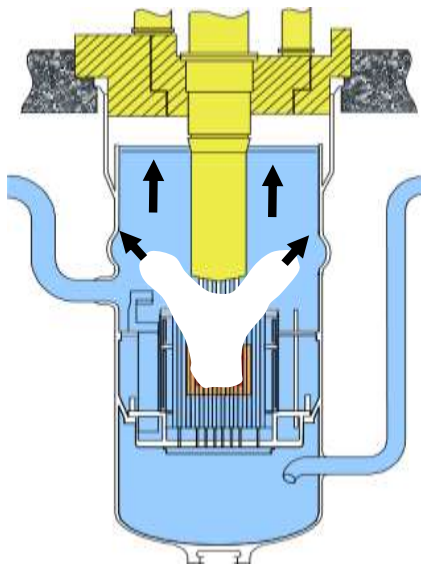
S-COPDコード、クリープ破断データ

# 高速炉における事故の進展

## ● 炉心膨張過程

- 起因過程／遷移過程で再臨界が生じた場合に、炉心物質が蒸発し、その熱エネルギーが機械的エネルギーに変換される過程
- 発生した機械的エネルギーにより炉容器構造が破損する可能性

## ● 評価手法



### ◆ 再臨界で発生する熱エネルギーと機械エネルギー

- 再臨界に伴う総発熱量
- 熔融燃料と冷却材の接触によるFCI蒸気泡の発生
- Naスラッグの運動エネルギーとカバーガスの圧縮エネルギー



SIMMERコード等

### ◆ 損失を考慮した機械エネルギーと炉容器の構造応答

- エネルギー損失を考慮したP-Vカーブ
- 炉容器構造の耐衝撃の評価



AUTODYNコード等

# 将来の高速炉における安全性向上策

## ● IVRの成立をさらに確実にするには…

①炉心損傷で機械的エネルギーが発生しても炉容器内に格納できるか？

➤ いかにして炉容器の機械的破損につながる厳しい再臨界を回避するか？

◆ 適切な設計方策による再臨界の排除



FAIDUSの導入（再臨界の回避）

②最終的に再配置された損傷炉心物質が冷却保持できるか？

➤ いかにして炉容器の熱的破損につながる安定冷却失敗を回避するか？

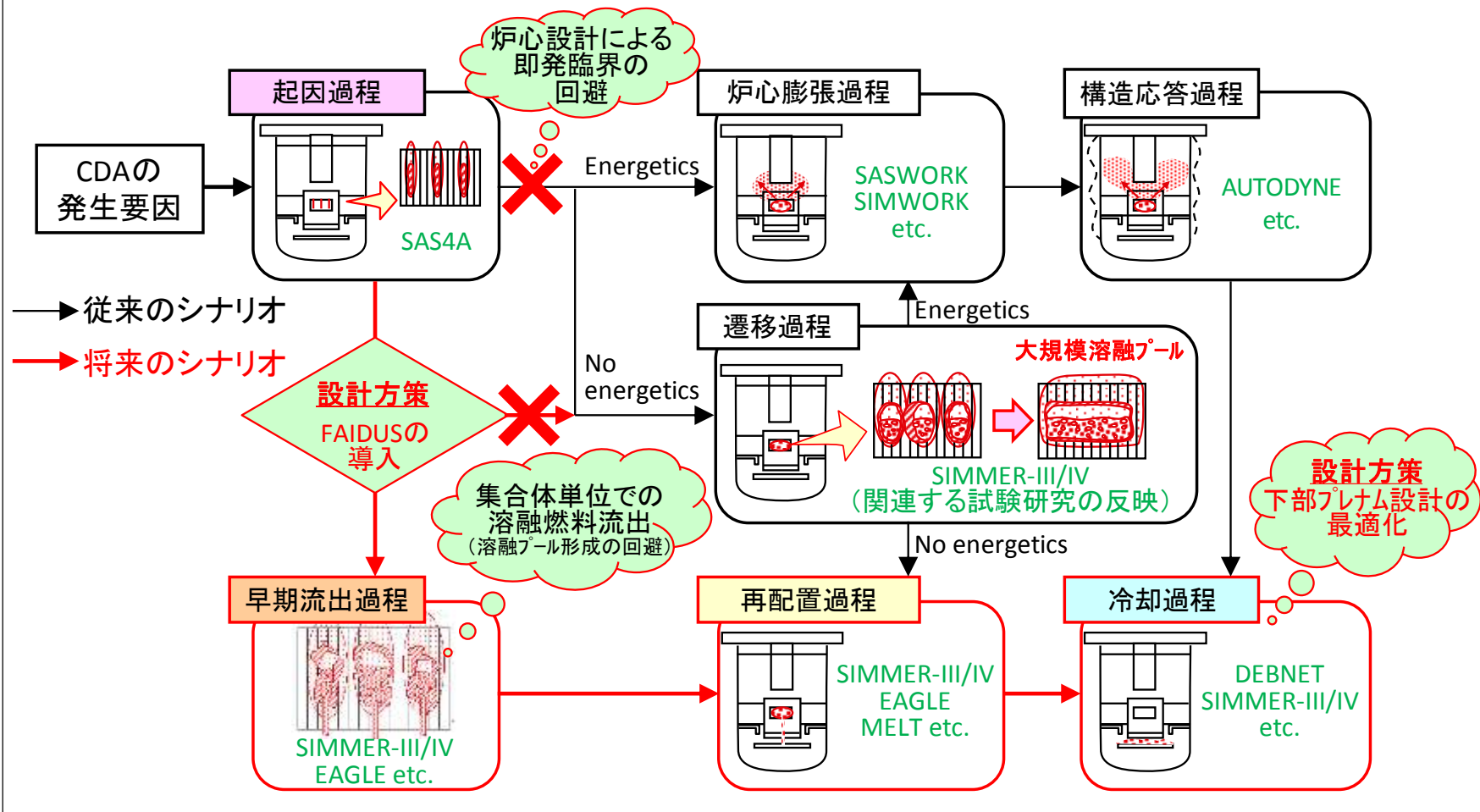
◆ 適切な設計方策による安定冷却の確保



下部プレナム設計の最適化（微粒化の達成）

# 将来の高速炉における安全性向上策

## ● 将来の高速炉における炉心損傷事故のシナリオ [4]

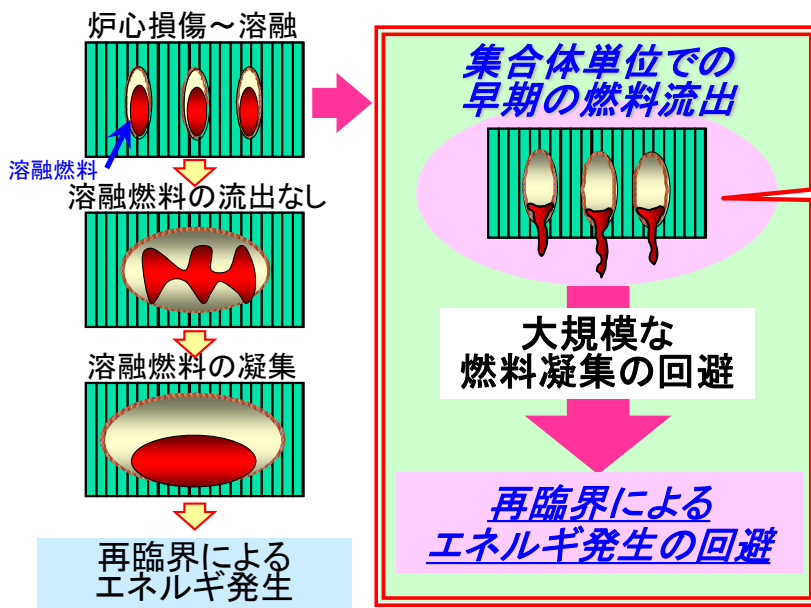




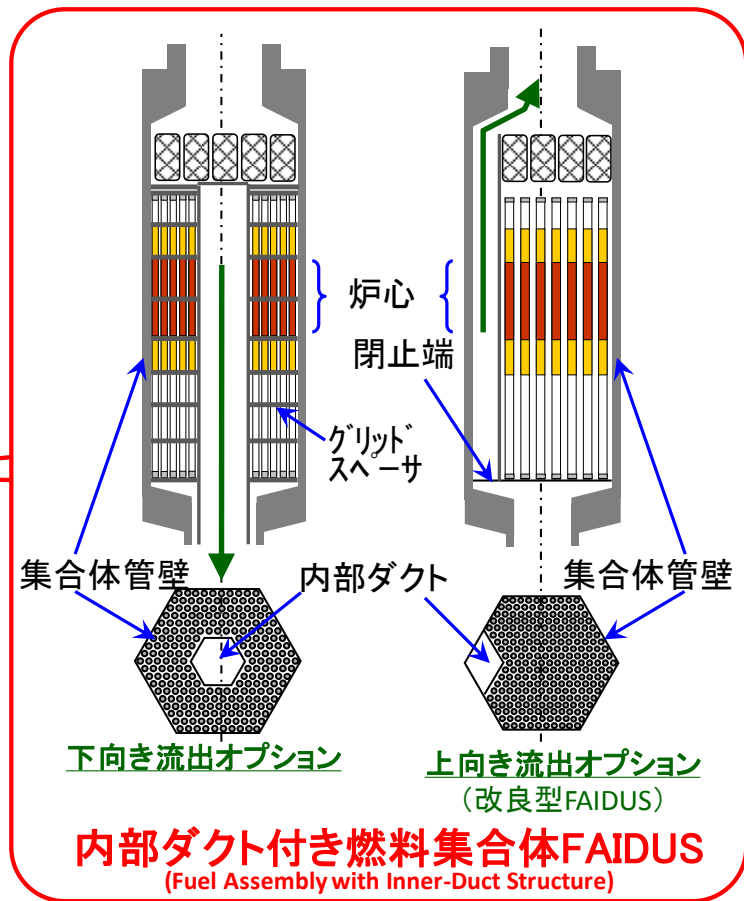
# 将来の高速炉における安全性向上策

## ● FAIDUSの導入（再臨界の回避）

- 全炉心プール形成前の早期の燃料流出
- 実証性を示すためのEAGLE試験



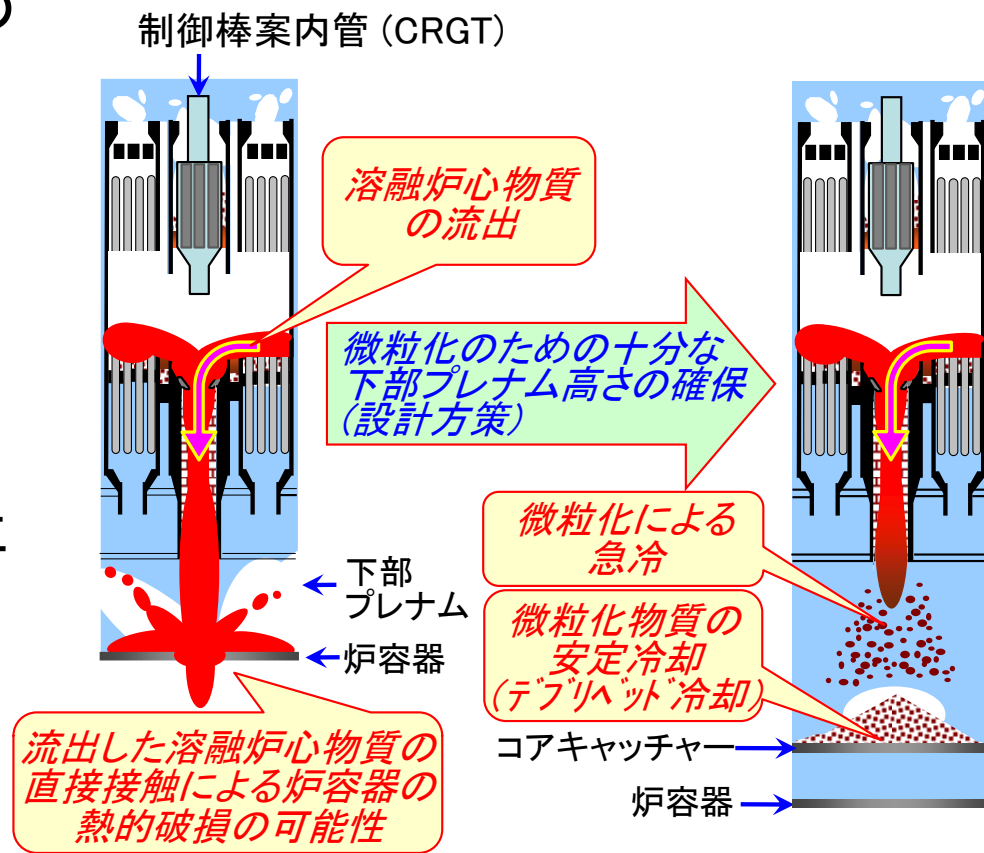
再臨界回避の概念



# 将来の高速炉における安全性向上策

## ● 下部プレナム設計の最適化（微粒化の達成）

- FAIDUSによる上向きの流出（核発熱条件）と制御棒案内管（CRGT）を通じた下向きの流出（崩壊熱条件）
- 熔融炉心物質の直接接触による炉容器の熱的な破損を微粒化による急冷で回避
- 高速炉条件での微粒化の挙動を明らかにするためのMELT試験



- 軽水炉と高速炉の安全上の違い(格納機能確保の考え方の違い)を整理
- 高速炉における炉心損傷事故の進展を概説
  - 事故事象の選定
  - 炉心損傷を「閉じ込める」ためのポイントを整理
  - 損傷状態の程度に応じた過程の分類と評価手法の概要
- 将来の高速炉における安全性向上策を紹介
  - より確実な、再臨界の回避
  - より確実な、損傷燃料の冷却失敗の回避

# 参考文献 & 参考図書

## [1] JAEA, 2016

- “International Review on Safety Requirements for the Prototype Fast Reactor Monju,” *JAEA Evaluation*, 2015-013.

## [2] Suzuki, et al., 2015

- “A Preliminary Evaluation of Unprotected Loss-of-Flow Accident for a Prototype Fast-Breeder Reactor,” *Nucl. Eng. Technol.*, Vol. 47, No.3, pp. 240-252.

## [3] 鈴木 他, 2017

- “高速炉の炉停止失敗事象における炉容器内終息 (IVR) に関する検討, (1) ATWS におけるIVR 評価の概要,” *日本機械学会論文集*, Vol. 83, No. 848.

## [4] Suzuki, et al., 2014

- “A Scenario of Core Disruptive Accident for Japan Sodium-Cooled Fast Reactor to Achieve In-Vessel Retention,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, Vol. 51, No. 4, pp. 493-513.

## [5] Waltar, et al. (訳: 高木 他), 2016

- “高速スペクトル原子炉,” 株式会社ERC出版..
- 原語版 \$400 ⇒ 邦訳版 ¥5,000



# 補足資料

## □ FAIDUSによる早期燃料流出挙動ついて解明すべき現象

### ● 内部ダクトと集合体管壁の破損

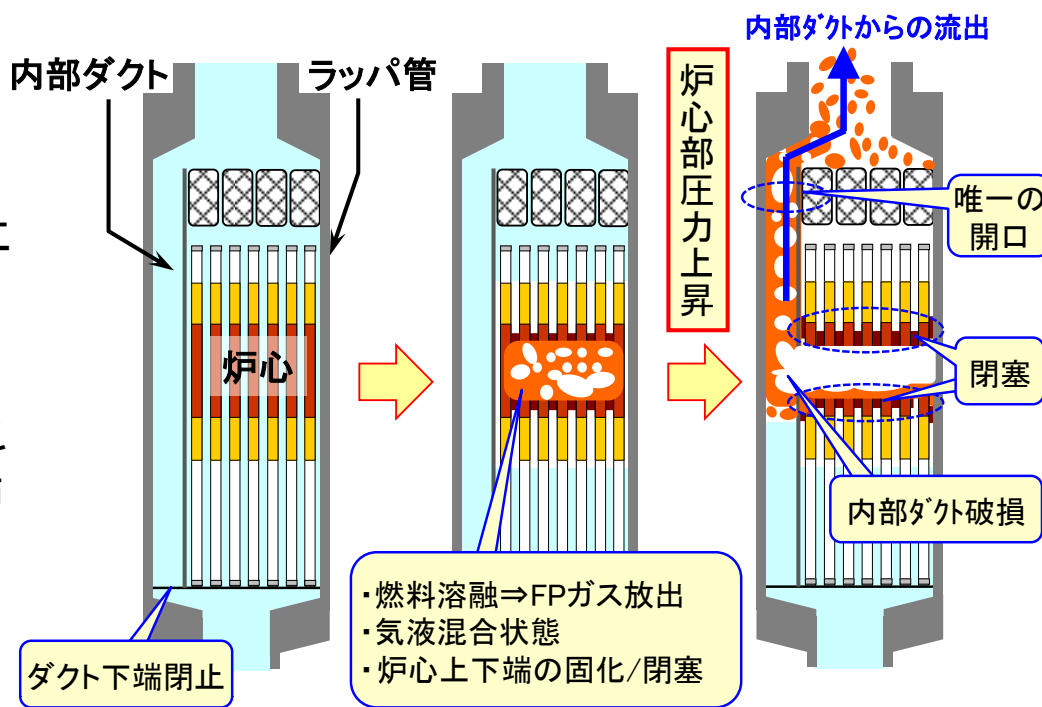
- 溶融炉心物質からスチール構造壁への熱伝達
- 内部ダクト内のナトリウムによる冷却効果

### ● 上向き流出の推進力

- 集合体内の圧力上昇(燃料溶融に伴うFPガス放出と炉心上下端の閉塞形成)
- 内部ダクト内での溶融燃料と気体成分のスリップ



これらの現象をEAGLE試験で調査解明



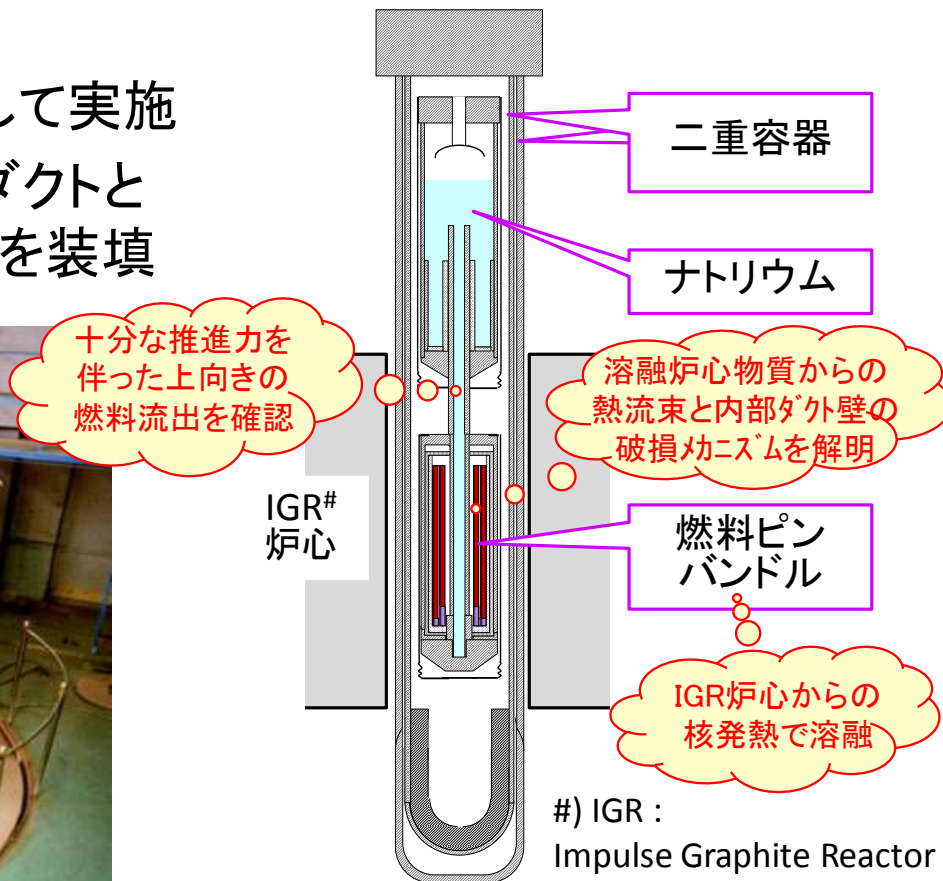
内部ダクトからの早期流出の概念

## □ EAGLE試験研究

- カザフスタンとの共同研究として実施
- IGR炉心の中心部にNa充填ダクトとUO<sub>2</sub>燃料ピンからなる試験部を装填



EAGLE炉内試験施設の概観



上向き流出試験のテストセクション

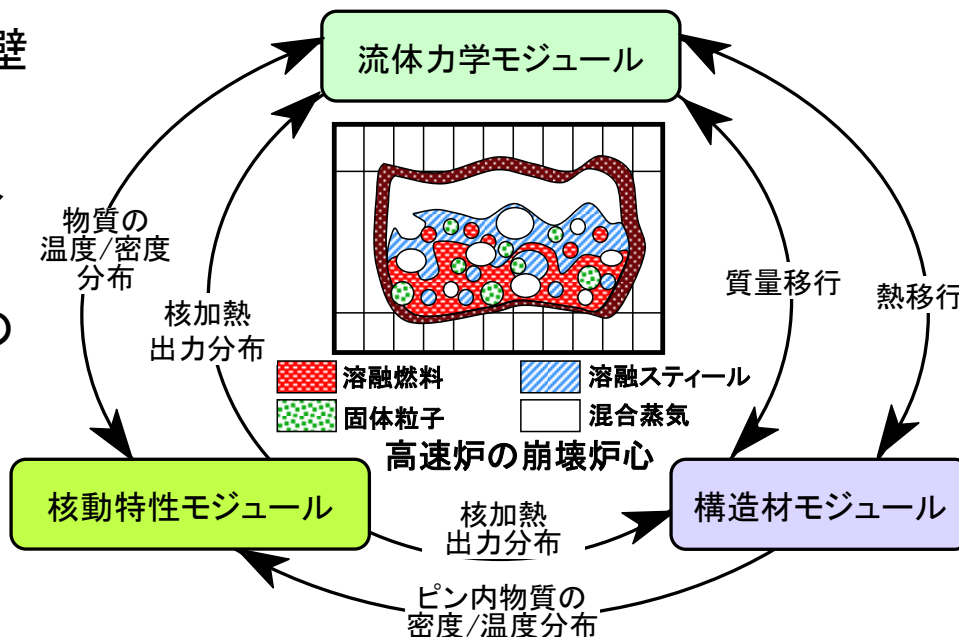


# 補足資料

## □ SIMMERコードを用いた燃料流出挙動の解析評価

- 多くの試験研究をベースとしたコード検証を実施[2]
- EAGLE試験から得られた知見の反映[4]

- 溶融炉心物質からスチール構造壁への熱流束
- ナトリウムが充填されたダクトへの溶融炉心物質の流出挙動
- 燃料-冷却材相互作用(FCI)の影響
- 流出経路内における閉塞形成の可能性



SIMMERコードの構成

# 補足資料

## □ SIMMERコードを用いた燃料流出挙動の解析評価

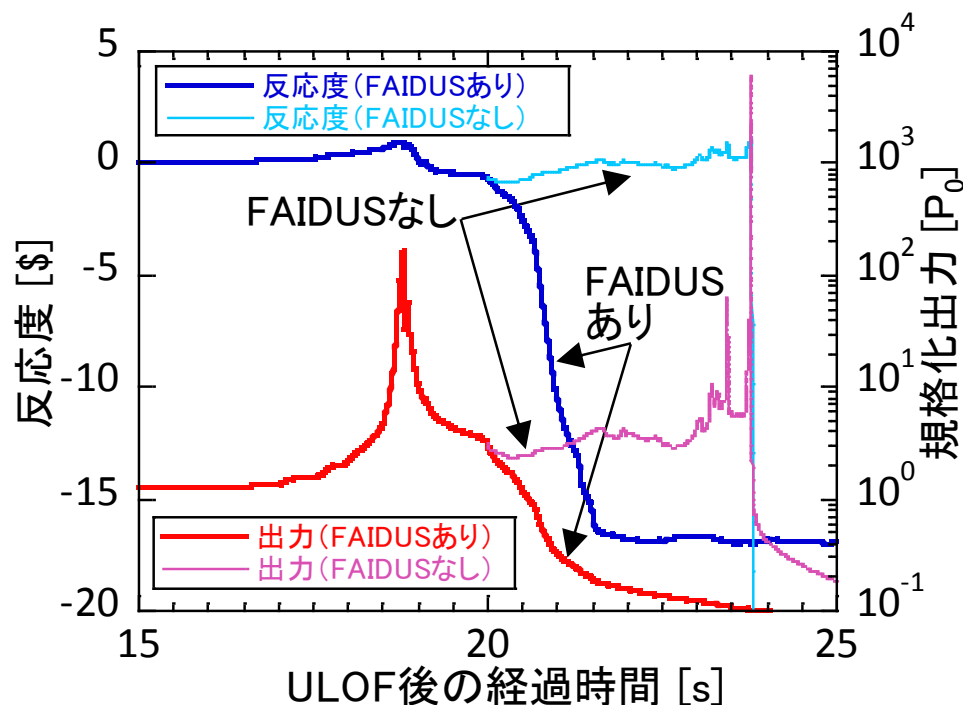
### ● FAIDUSの有効性に関する検討[4]

#### FAIDUSなしの場合)

- 溶融炉心プールにおける燃料の凝集により、再臨界と有意な出力ピークが発生

#### FAIDUSありの場合)

- 溶融炉心プールが形成される前に溶融燃料が流出することにより、再臨界と有意な出力ピークが回避



SIMMERコードで評価した反応度と出力の変化

# 補足資料

## □ 下部プレナムでの微粒化挙動について整理すべき現象

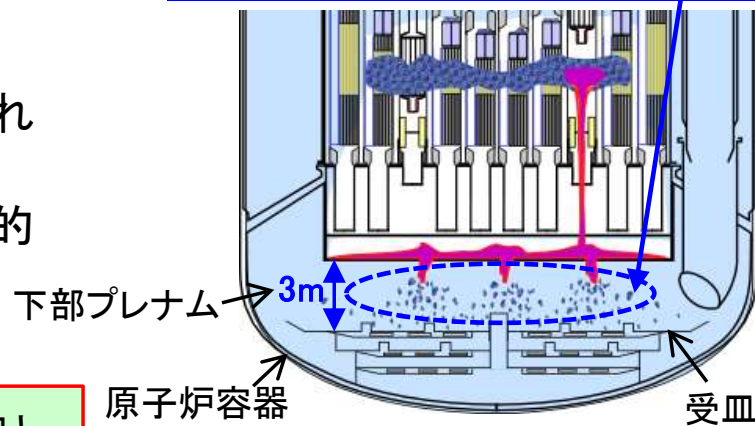
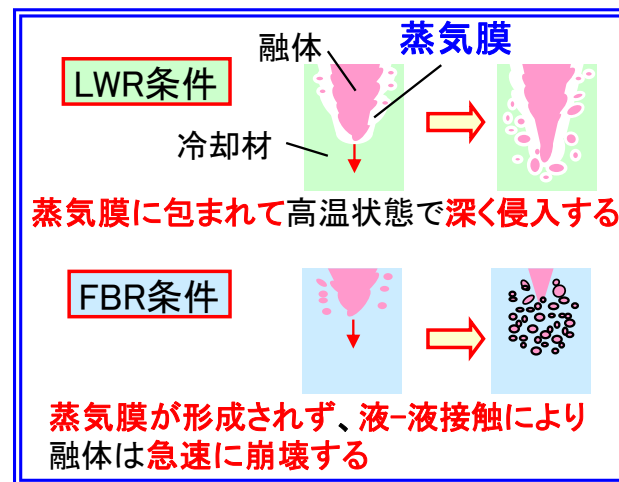
### ● 軽水炉(LWR)条件

- 融体表面での安定した蒸気膜の形成
- 蒸気膜により冷却材との熱的相互作用が抑制
- 融体の侵入距離が深い

### ● 高速炉(FBR)条件

- 融体表面で安定した蒸気膜が形成されない
- 冷却材との液体-液体接触により熱的相互作用が顕著
- 融体の急激な崩壊

微粒化挙動は、炉心から流出した溶融物質の冷却と炉容器の熱的破損の回避に大きく影響する



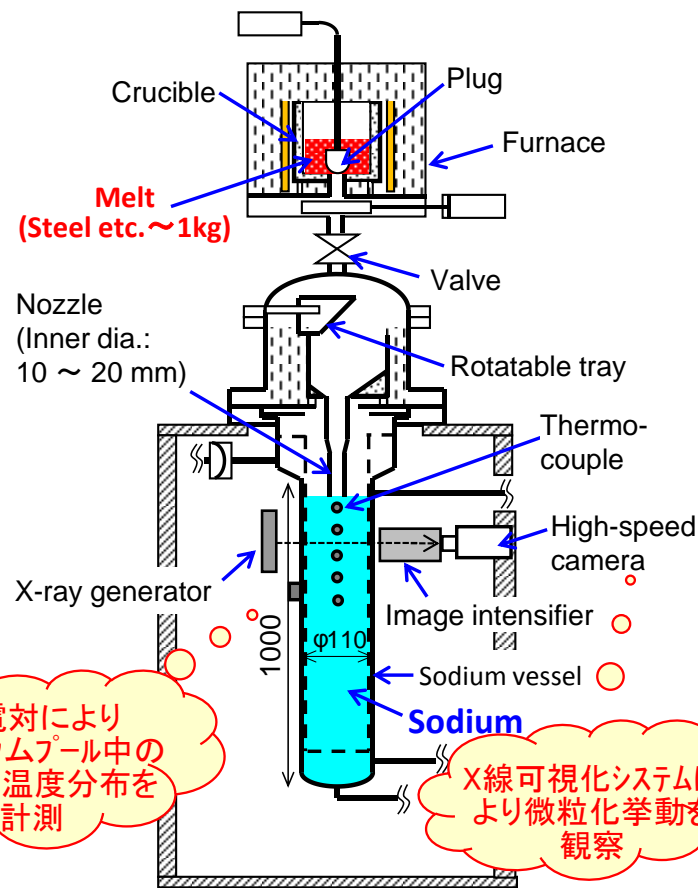
軽水炉と高速炉の微粒化挙動の比較

## □ MELT試験研究

- JAEA/大洗にて実施
- 坩堝で加熱溶融したアルミナをナトリウムのプール中に放出
- 高速炉の典型的な温度条件で実施



MELT試験施設の概観



微粒化試験部の概観

## □ 既存試験およびMELT試験に基づく微粒化距離の評価

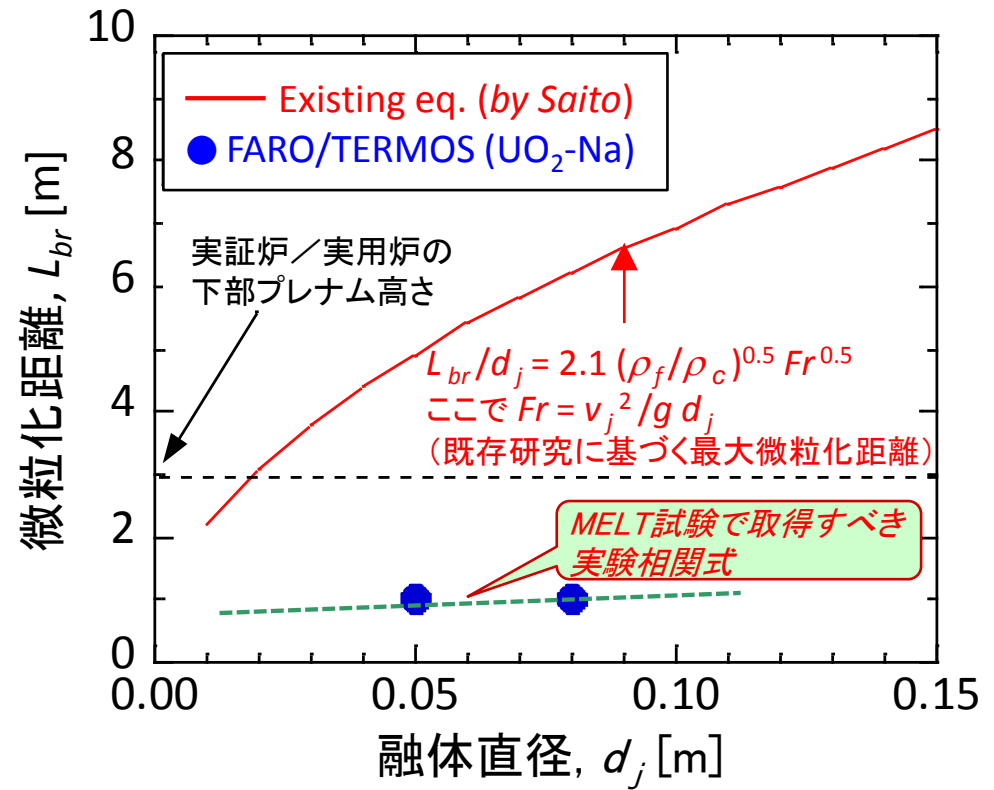
### ● 微粒化距離の比較

#### 既存の相関式)

- 液-液接触による熱的な相互作用を考慮していない
- FARO/TERMOS試験と比べ微粒化距離を過大評価

#### MELTで取得する相関式)

- 液-液接触による熱的な相互作用を考慮
- 微粒化距離は実証炉/実用炉の下部プレナム高さより短くなることを期待できる



流出した溶融炉心物質の微粒化距離の比較