



新型炉部会セッション:「福島第一原子力発電所事故の技術的知見と第4世代炉の安全性」:  
報告3

# シビアアクシデント対策を取り入れた 第4世代SFRの安全設計アプローチ - JSFR Approach -

日本原子力発電(株)  
小竹 庄司



# 目 次

1. 序 論
2. 安全確保の基本的な考え方
3. JSFRの安全設計アプローチ
  - － 止める
  - － 冷やす
  - － 閉じ込める
4. 結 論



## 序 論

- **第4世代炉の開発目標**;安全確保を前提とし、資源の有効利用と環境負荷低減の両立と、核拡散抵抗性を備えた基幹電源の開発を目指す。
- **基幹電源**として、スケールメリットを追求し、軽水炉並の大型炉を対象。
- SFRは各国で運転実績が有り、運転安全、事故対応に関する知見が蓄積されてきている。**シビアアクシデント関連を含む炉心安全**やナトリウム安全に関する多くの研究開発がなされてきており、これらを基盤として第4世代炉の安全設計概念の構築が可能。



## 序 論

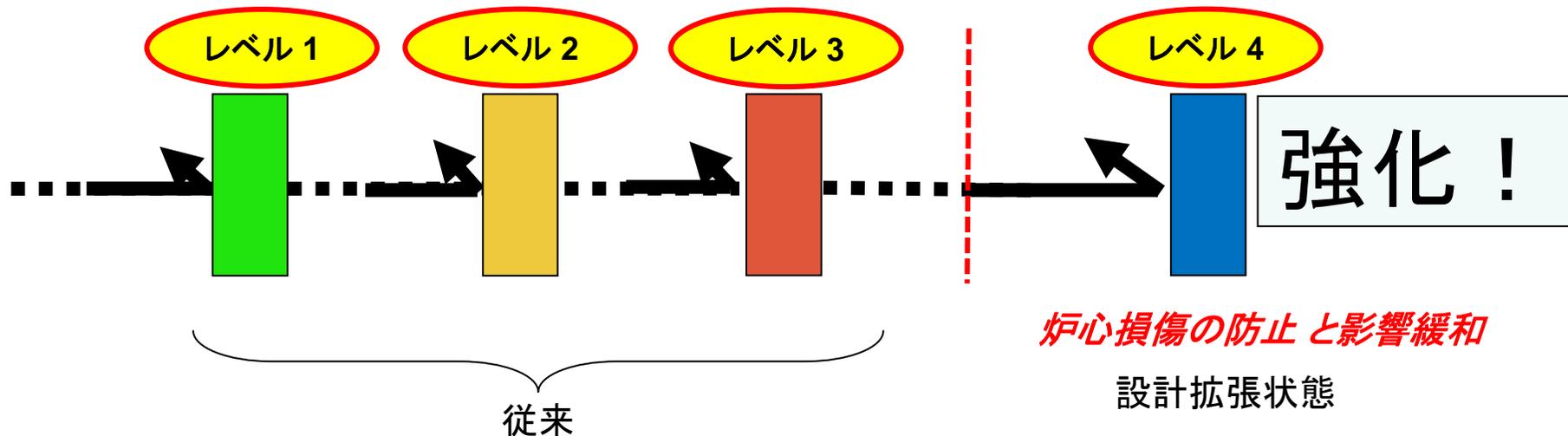
- 「もんじゅ」を含むSFRでは従来よりシビアアクシデントに相当する**炉心損傷事故**を考慮した安全設計・評価が行われてきているが、**東電福島事故**の教訓を踏まえて、炉心損傷防止及び影響緩和対策を強化していくことが重要。
- 「もんじゅ」で発電炉としての**運転実績**を積み、東電福島事故の教訓も踏まえて、事故管理方策を含む**シビアアクシデント対策**を具体化することは、第4世代炉の開発にとって不可欠。
- このような経験と実績に基づいて将来の**SFRが満足すべき実効性のある安全設計クライテリア**を構築し、各国で共有していくことが重要。



# 安全確保の基本的な考え方

- 「**深層防護の考え方**」: 「異常発生防止」「異常の拡大防止」「事故の影響緩和」に加えて、シビアアクシデントを含む「**炉心損傷の防止と影響緩和**」が必要であり、第4世代炉ではここを強化して、実質的に「**サイト外緊急時活動の不要化**」を目指す。このために、設計拡張状態: DECに対する炉心損傷防止と炉心損傷時の影響緩和の徹底を図る。

## 深層防護





# 安全確保の基本的な考え方

- 東電福島事故では、地震と津波によって全ての電源が失われた結果炉心崩壊熱の除去ができなくなり炉心損傷に至った。
- 特に、安全機能を確保するために必要な電源や冷却系統が**津波等の外部事象による共通要因によって機能喪失しない対策**が必要。
- このために、安全設備の**多様性の強化が重要**であり、能動的な安全設備の多様性強化に加え、安全機能発揮のために必要な機器を簡素化できる**受動的な機能の導入による安全性向上が重要**。
- SAに対する設計対策を予め組み込み、設備設計の合理化を図れる**「Built-in」対策が重要**。このためには、安全設計上の特徴を有効に活用して、**受動的に「止まる」「冷える」**ようにする。これらの対策により、SA状態でも運転員の負担を軽減した安全確保が可能。
- **ナトリウムの化学反応**についても、深層防護の考え方を適用し、これまでの経験を踏まえて炉心安全性へ波及しない頑健性を確保することが重要。



# JSFRの安全設計アプローチ

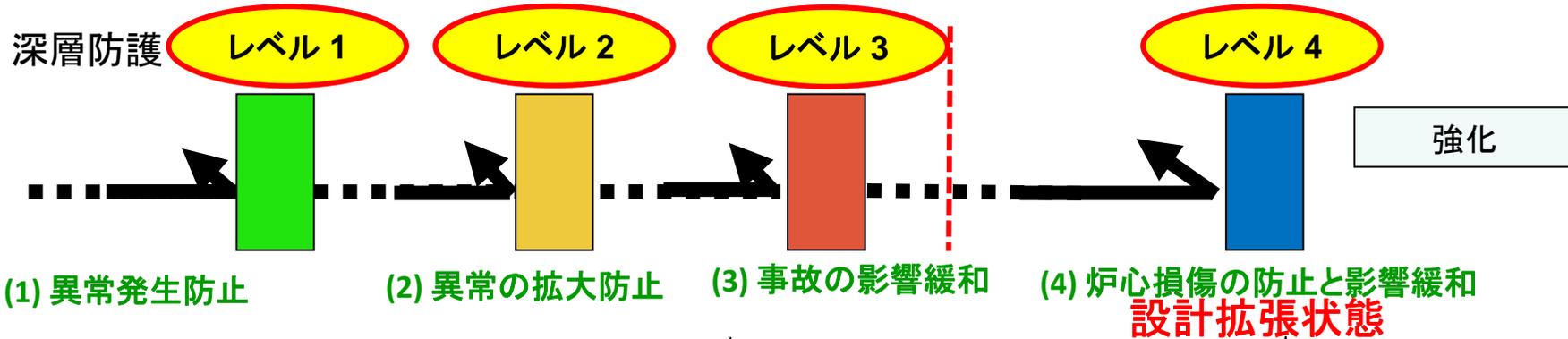
**包括的な安全設計アプローチ = 能動的な工学的安全施設  
+ SAを終息させるための自然現象 (受動的機能) + アクシ  
デントマネジメント**

- 「もんじゅ」等の経験を踏まえて、能動的な安全機能の「多重性または多様性及び独立性」により信頼性を確保し、「異常を早期に検知し、軽微な段階で事象終息できる設計対策」を基盤とする。
- これに、受動的な炉停止と崩壊熱除去機能を組み込んで炉心損傷防止能力を強化する。
- 更に、炉心損傷を想定しても自然現象に基づいて事象終息し格納機能が確保できるようにする。
- 自然循環による崩壊熱除去と炉心損傷の影響を格納することについては、「もんじゅ」に採用されている技術を基盤とする。これに加え、「もんじゅ」等で検討される事故管理方策も適切に取り入れる。



# JSFRの安全設計アプローチ

包括的な安全設計アプローチ = 能動的な工学的安全施設 + SAを終息させるための自然現象 (固有の又は受動的な機能) + アクシデントマネジメント



<ul style="list-style-type: none"> <li>◆適切な安全裕度</li> <li>◆信頼性の確認</li> <li>◆予防保全 (検査, オンラインモニタリング等)</li> </ul> <p>参考文献 H.Yamano et al., "Safety Design and Evaluation in a Large-Scale Japan Sodium-Cooled Fast Reactor" Science and Technology of Nuclear Installations, volume 2012.</p>		異常状態/設計基準事故	炉心損傷の防止	影響緩和
	止める	能動的炉停止系	受動的な炉停止機能	格納機能
冷やす	自然循環型崩壊熱除去系 (多重性・多様性有)	事故後安定冷却保持	再臨界回避	
	アクシデントマネジメント	固有のメカニズム		



# SFRの安全設計の特徴

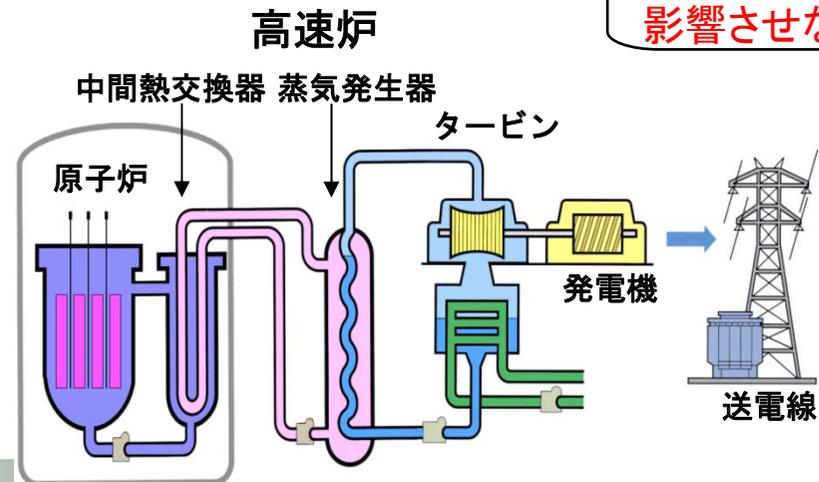
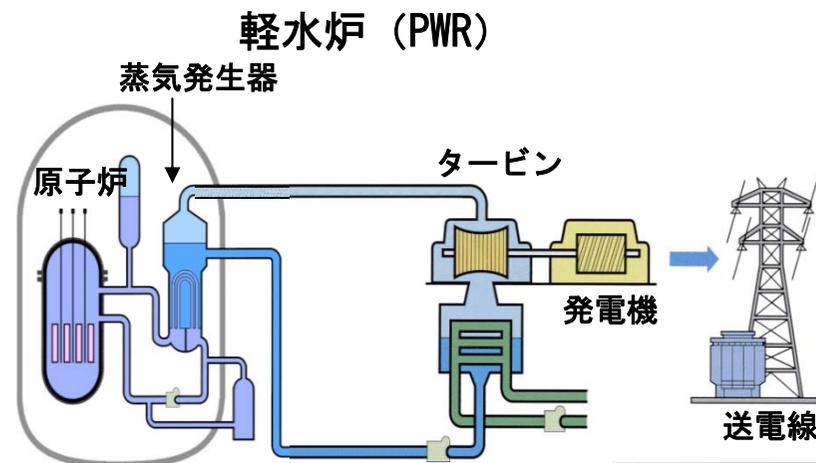
深層防護の設計⇒「止める」「冷やす」「閉じ込める」(軽水炉と同様)

項目	軽水炉	高速炉
炉心	反応度最大構成	最大でない
冷却材	系統圧力	高い
	化学的活性度	低い

## 高速炉の安全確保の考え方

- 炉心損傷事故の発生を防止すること **止める**
- 仮に炉心損傷事故を想定しても放射性物質を格納すること **閉じ込める**
- 配管破損を想定しても、静的機器により液位を確保すること。Naの特長を活かした自然循環除熱。 **冷やす**
- 漏えいナトリウムの燃焼対策、蒸気発生器伝熱管破損時のナトリウム-水反応対策が必要

**炉心安全に影響させない**





# JSFRの安全設計アプローチ

PRACS: Primary Reactor Auxiliary Cooling System  
DRACS: Direct Reactor Auxiliary Cooling System

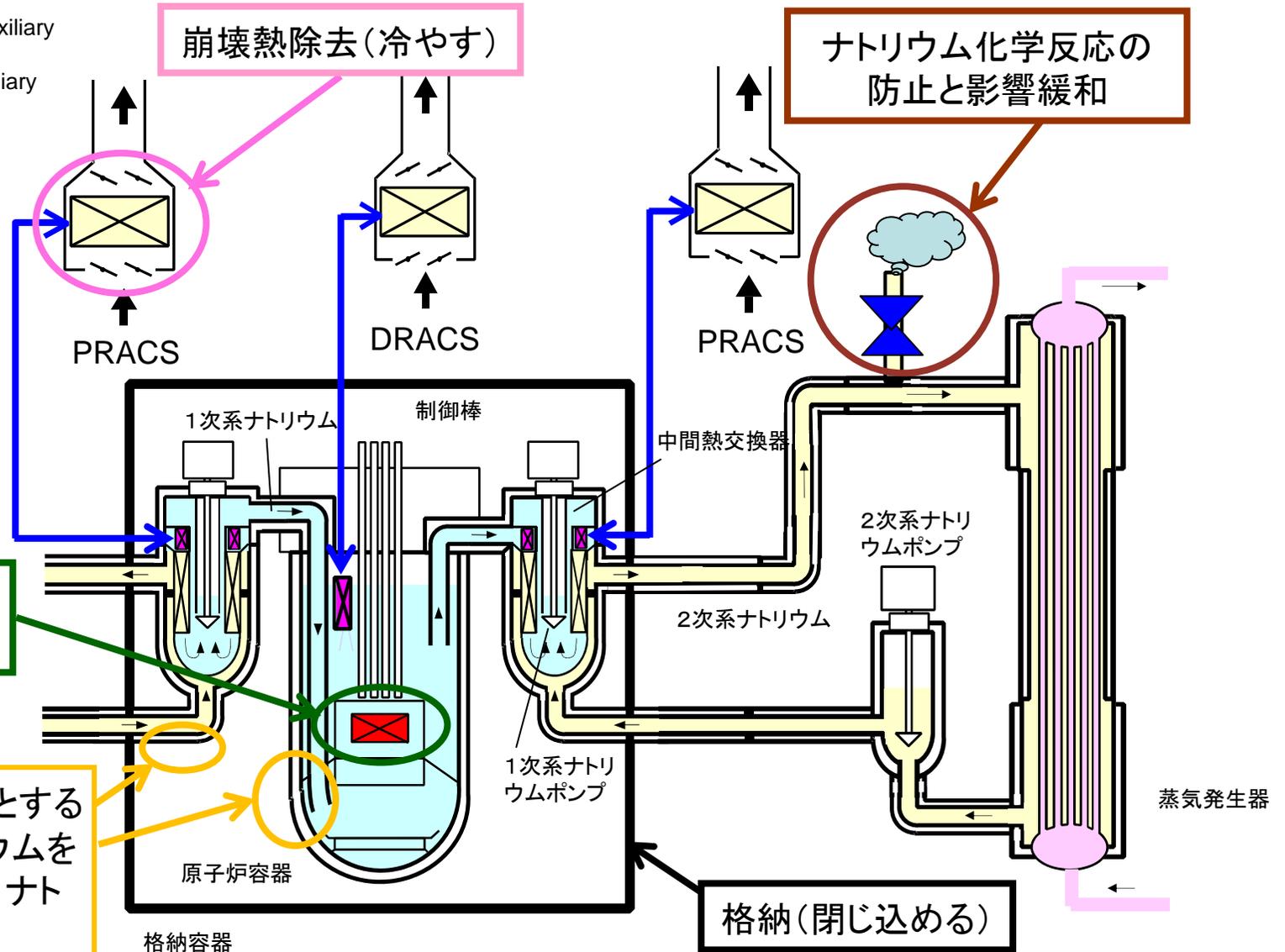
崩壊熱除去(冷やす)

ナトリウム化学反応の防止と影響緩和

参考文献:  
日本原子力学会, “高速炉熱流動・安全評価に関する調査報告書”, 平成23年1月.

原子炉停止(止める)

2重バウンダリ構造とすることで漏えいナトリウムを保持→ECCS不要、ナトリウム燃焼を抑制





# 止める

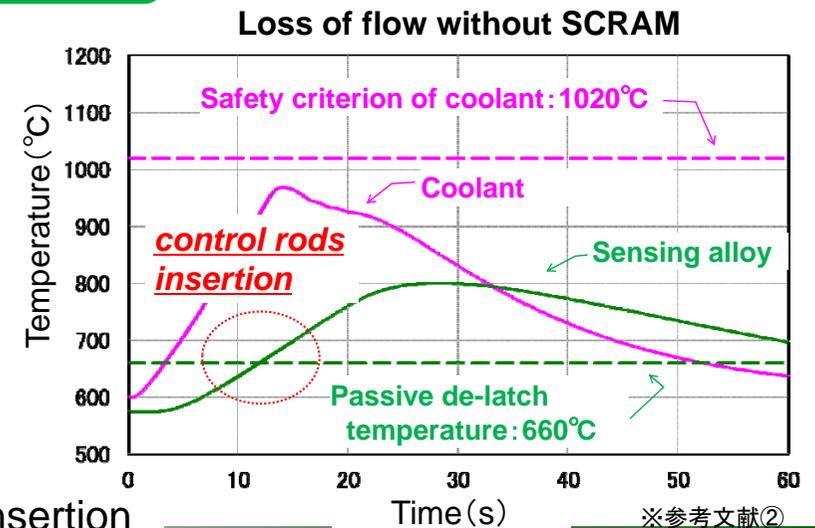
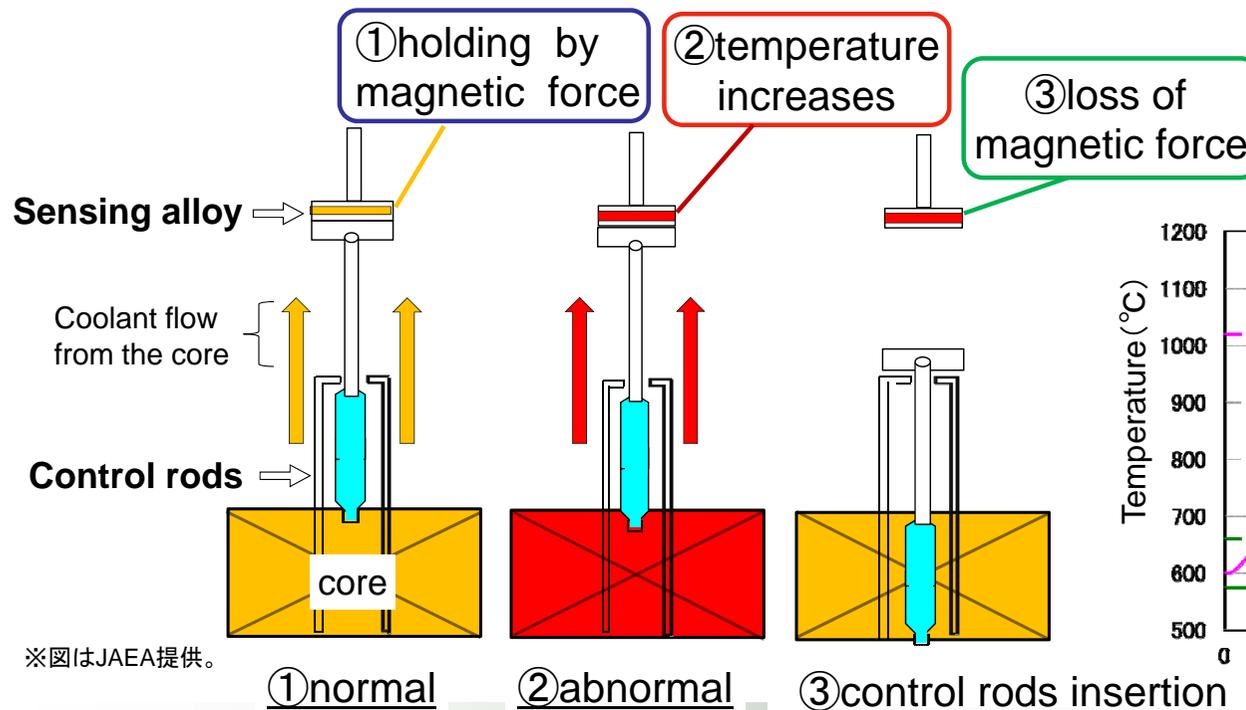
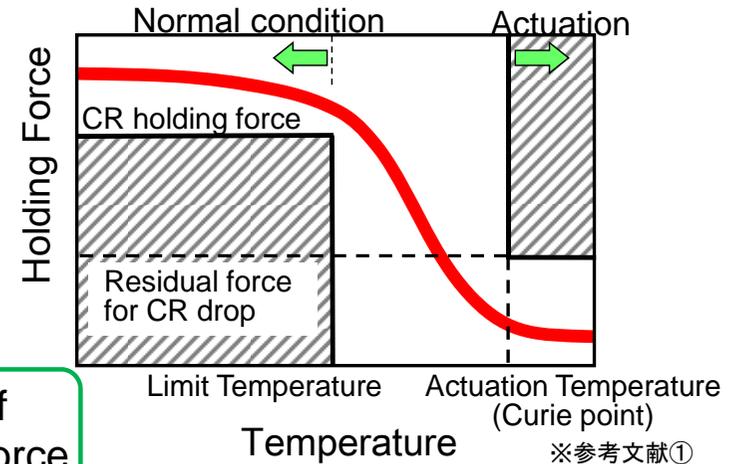
## 2つの独立した能動的炉停止系 [主炉停止系と後備停止系]

+ 受動的炉停止機能(キュリー一点電磁石方式を  
採用した受動的制御棒挿入機構)

参考文献:

①日本原子力学会, “高速炉熱流動・安全評価に関する調査報告書”, 平成23年1月.

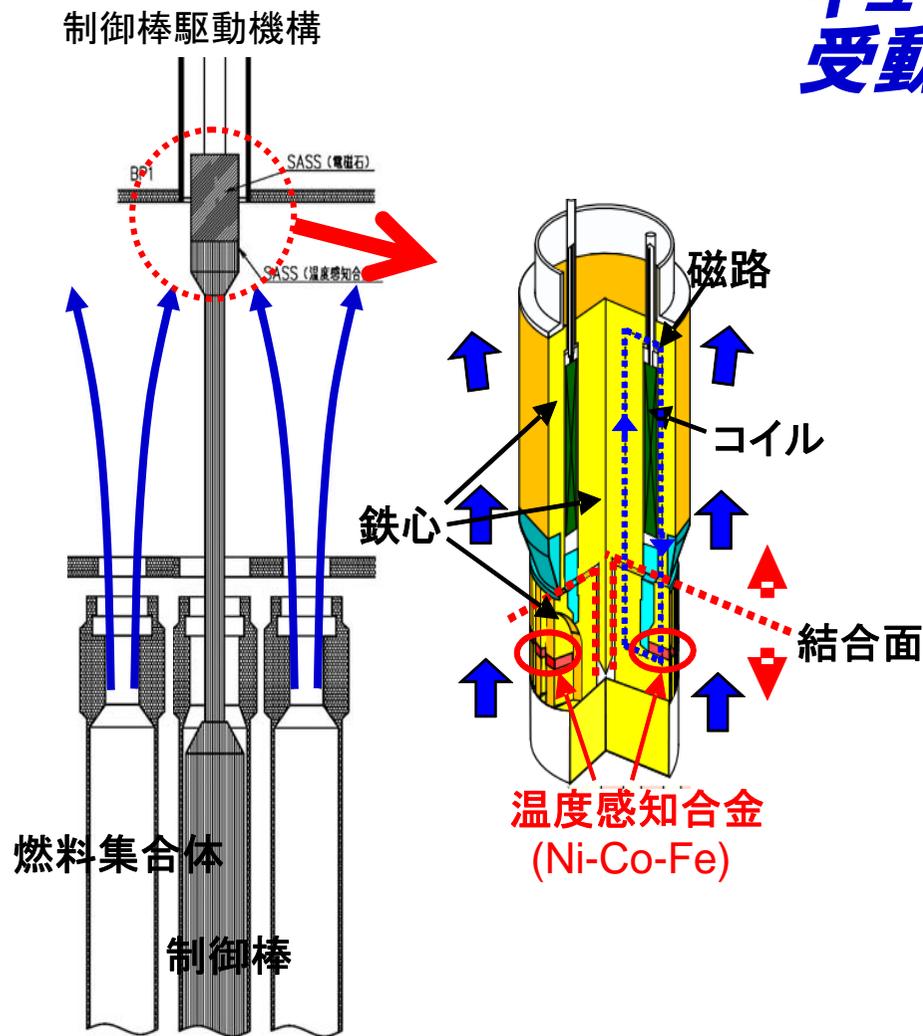
②H.Yamano et al., “Safety Design and Evaluation in a Large-Scale Japan Sodium-Cooled Fast Reactor” Science and Technology of Nuclear Installations, volume 2012.





# 自己作動型炉停止機構 (SASS)

## キュリー点電磁石方式を採用した 受動的制御棒挿入機構

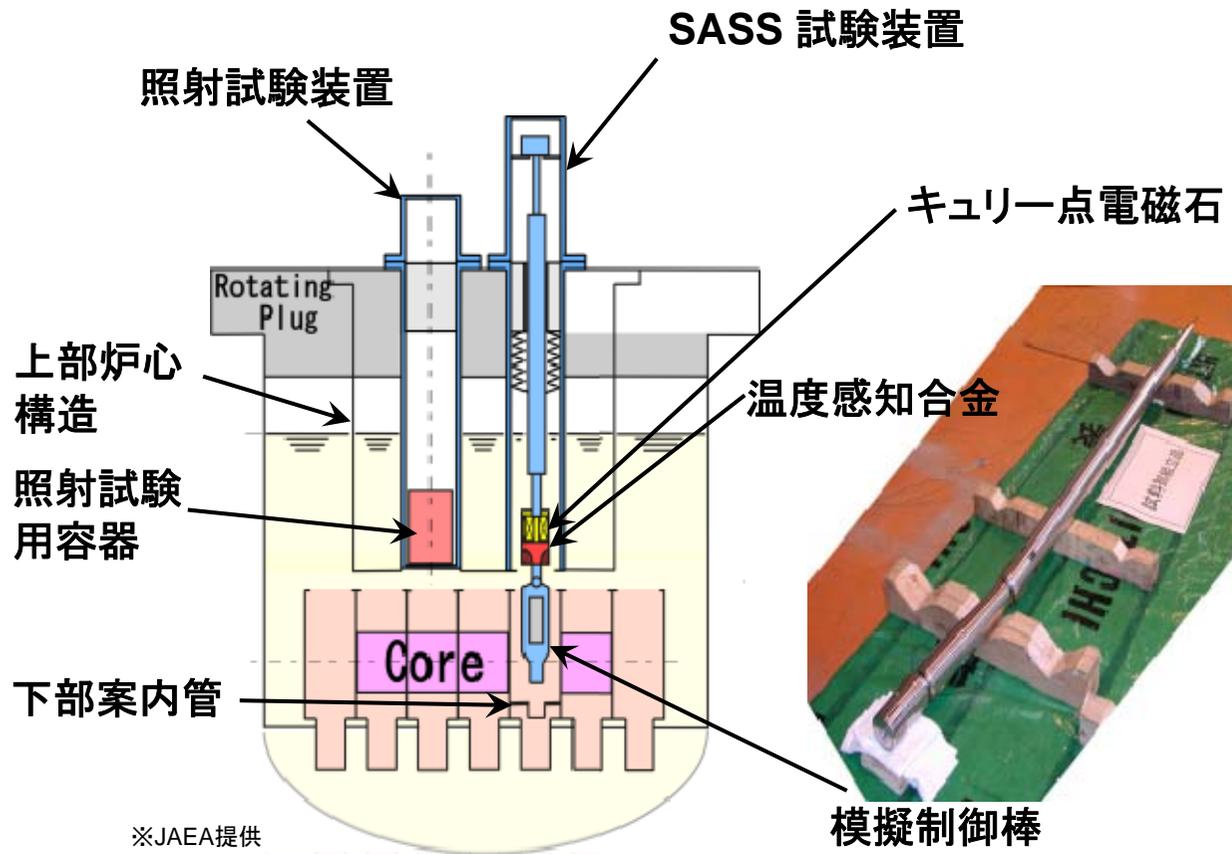


- ✓ 全てのタイプのATWS (ULOF, UTOP及びULOHS) に対して有効
- ✓ 重力を利用し、1次元的に制御棒を落下挿入させる単純な機構であり不確さが小さい
- ✓ 投入される負の反応度は炉停止するために十分であり、かつ、不可逆性を有する
- ✓ 耐震設計要求に対応した拘束炉心構造とすることで、制御棒吸収体取付け部の可動構造とすることで、制御棒案内管との3点接触によるロッドジャミングの可能性を大きく低減
- ✓ 切離し部位は、能動的と受動的の両方で操作・確認できるため、運転期間中に機能確認が容易にできる

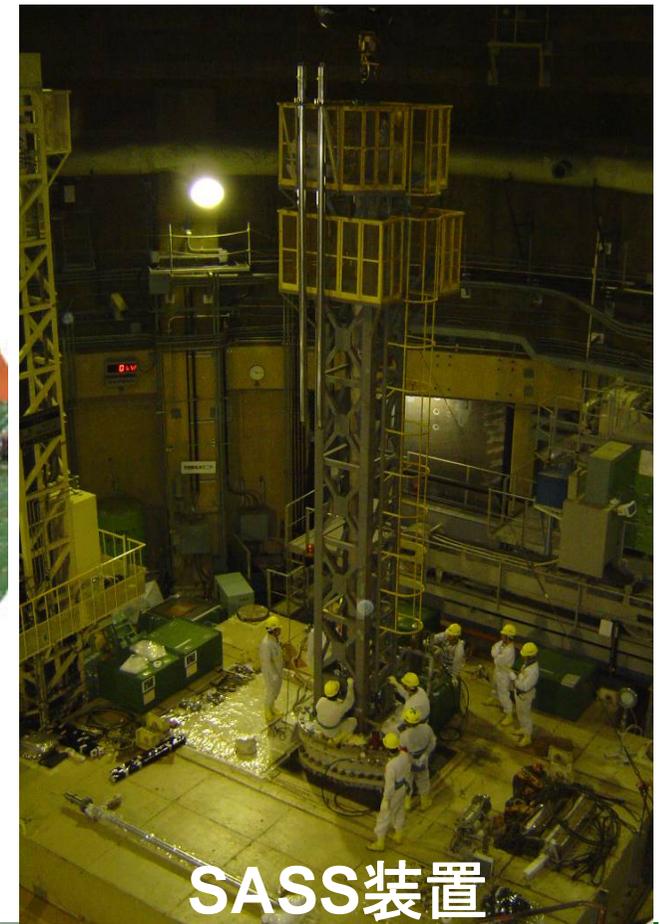
# 「常陽」におけるSASS試験

キュリー一点電磁石を用いたSASSにより、模擬制御棒を安定して保持できることを実証

→ SASSの過渡温度応答、切り離し特性試験等は、気中及びナトリウム中にて実施済み



※JAEA提供



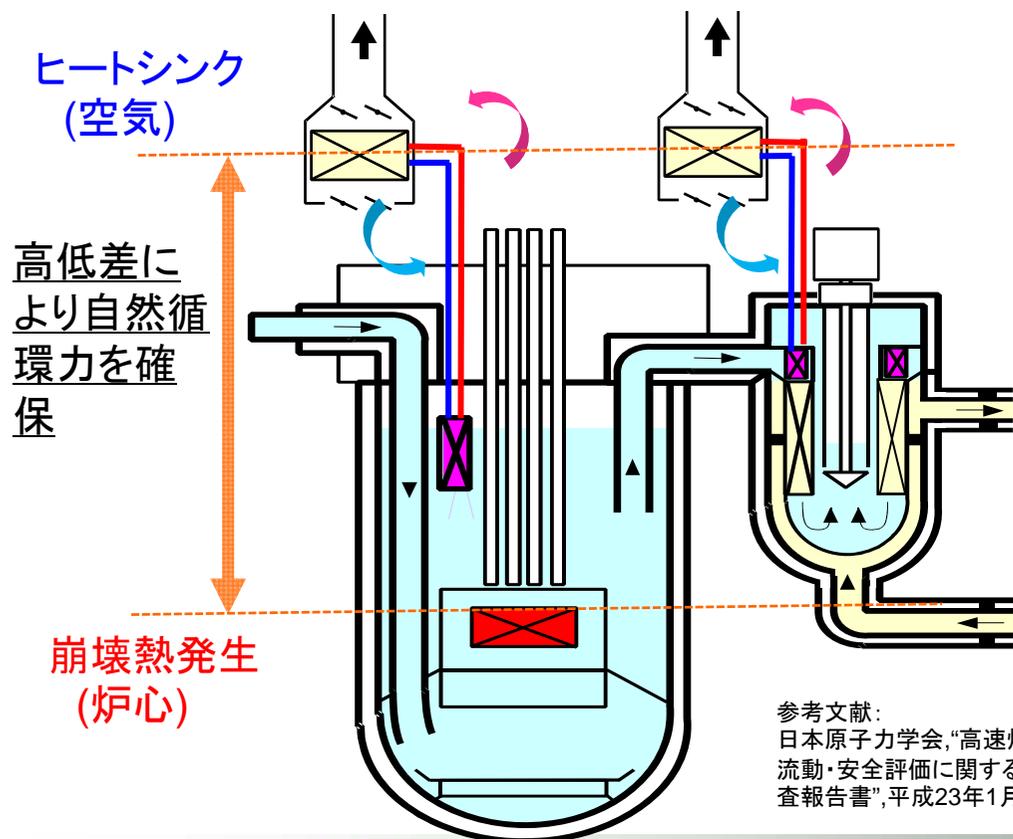
SASS装置

※JAEA提供

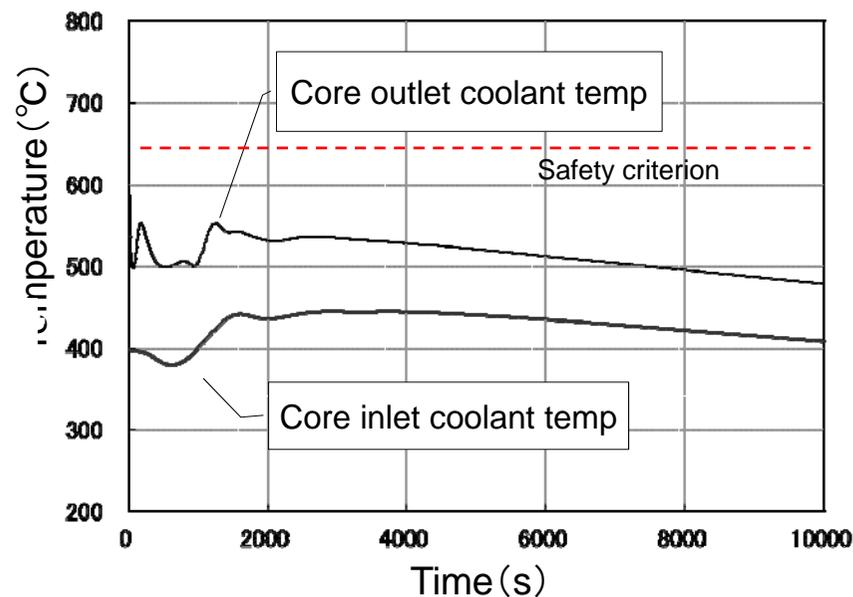


# 冷やす

- SFRでは、炉心出入口温度差を大きくとることができ、ナトリウムの高い熱伝導度とあいまって、伝熱中心の高低差を確保した設計とすることで、大気放熱する恒久的な自然循環型の崩壊熱除去系とすることができる。
- **自然循環**冷却システムの基本的性能は「常陽」等によって実証されている。
- 「もんじゅ」にて**自然循環**を確認することが、SFR商業化への重要なステップとなる。



参考文献：  
日本原子力学会，“高速炉熱流動・安全評価に関する調査報告書”，平成23年1月。



※参考文献  
H.Yamano et al., "Safety Design and Evaluation in a Large-Scale Japan Sodium-Cooled Fast Reactor" Science and Technology of Nuclear Installations, volume 2012.



# 冷やす

自然循環能力を有した崩壊熱除去系により、崩壊熱除去機能が長期間に亘って機能喪失する可能性は著しく小さくできる

## システムの特徴

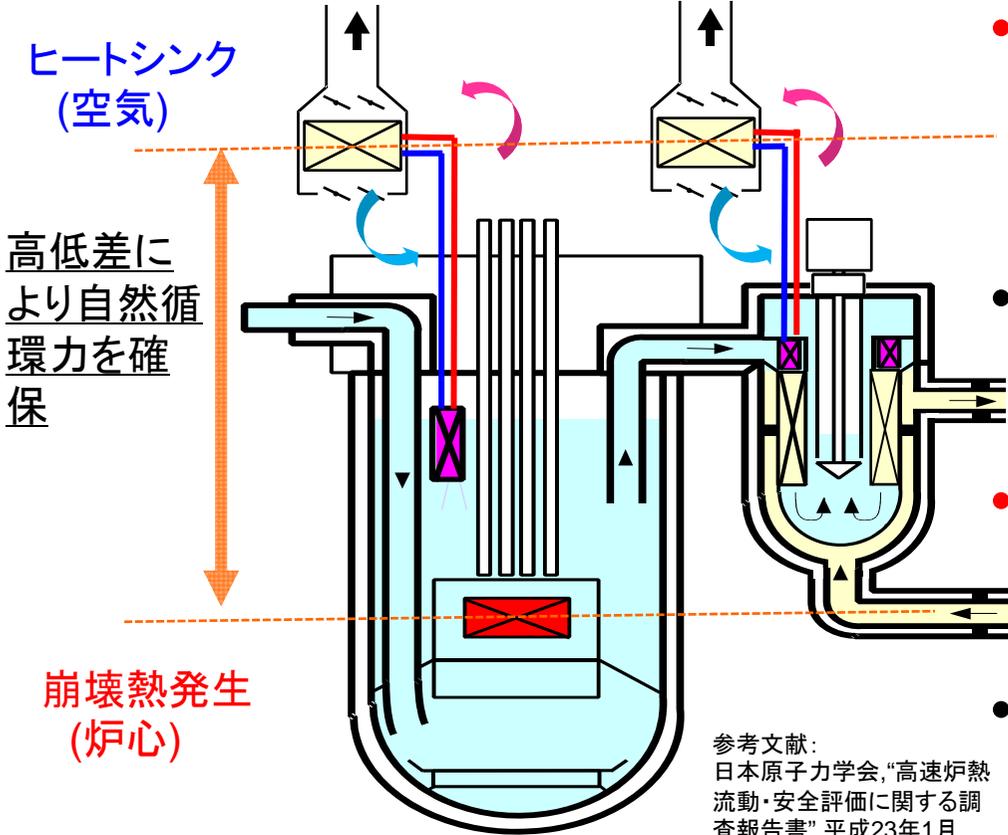
• 低圧系であるためG/V等によって冷却材液位の確保が容易(冷却材注入が不要)

• 最終ヒートシンクは空気であり、原子炉冷却系に直接浸漬させた熱交換器からの自然循環によって安定除熱が可能

• 操作が必要となる空気冷却器のダンパーは、多重化や手動操作によって機能喪失を防止可能

• 通常除熱源の水-蒸気系～海水冷却系も利用可能であり、ここでのAM操作による冷却機能確保も可能

• 外部飛来物に対しては、建屋による防護と分散配置によって機能喪失を防止可能

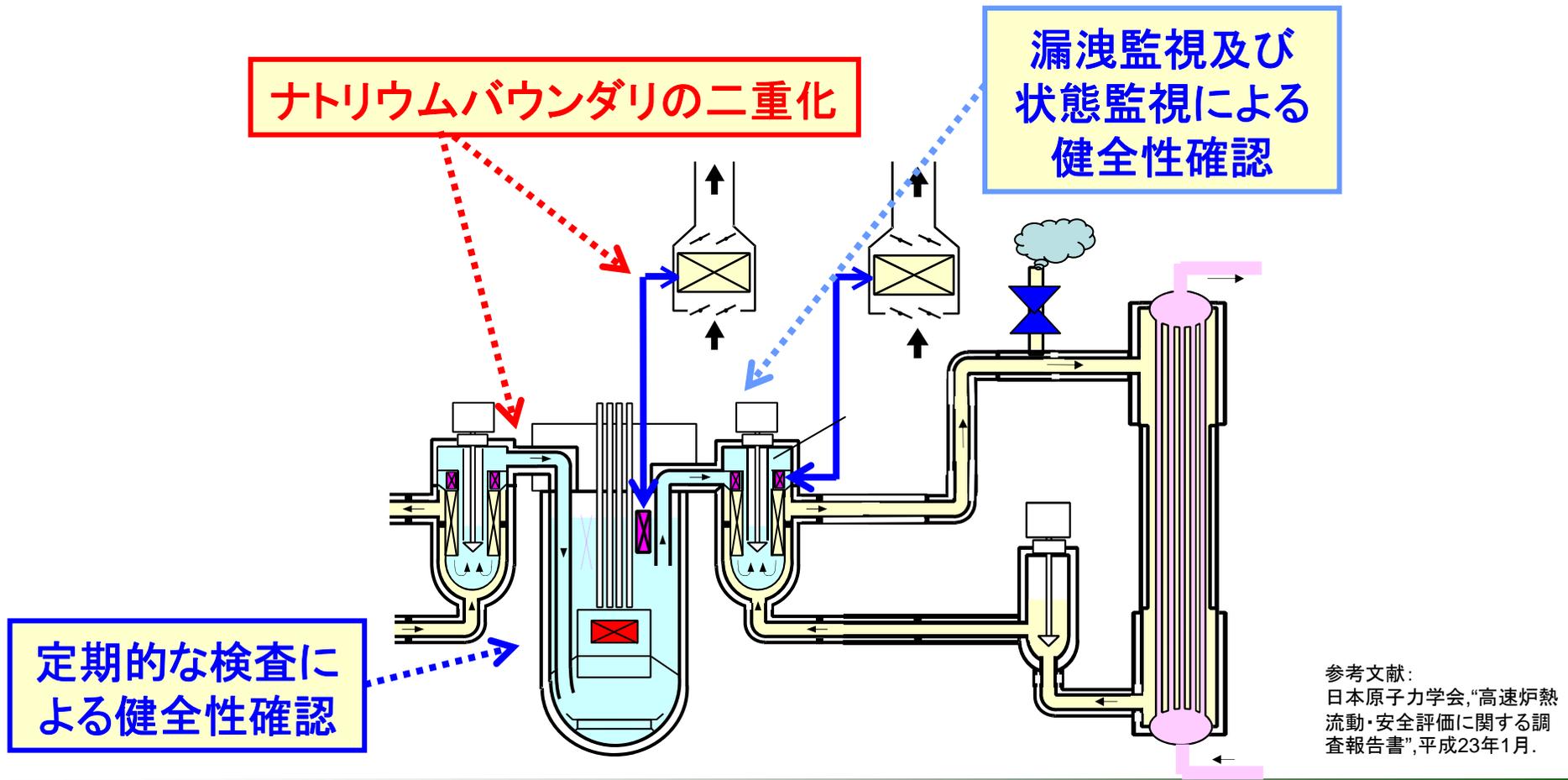


参考文献: 日本原子力学会, “高速炉熱流動・安全評価に関する調査報告書”, 平成23年1月.



# 冷やす

崩壊熱除去機能を確認するには、原子炉冷却材及び空気冷却系（二次冷却系）の液位確保が必須





# 閉じ込める

- 格納機能に対する主なチャレンジ要因は、仮想的な炉心崩壊事故(CDA)時の即発臨界によって生じる、機械的エネルギー放出により原子炉容器が損傷する可能性や原子炉容器上部プラグ部などから噴出される冷却材ナトリウムの燃焼影響である。
- 主なチャレンジ要因を排除するには、以下の2つが必要。

## ①機械的エネルギー放出の回避

炉心のナトリウムボイド反応度等を制限して炉心損傷初期の即発臨界に到達させない炉心設計とともに、炉心燃料が溶融破損した場合に分散する特性を利用して早期に炉心外へ流出させる設計対策を講じる

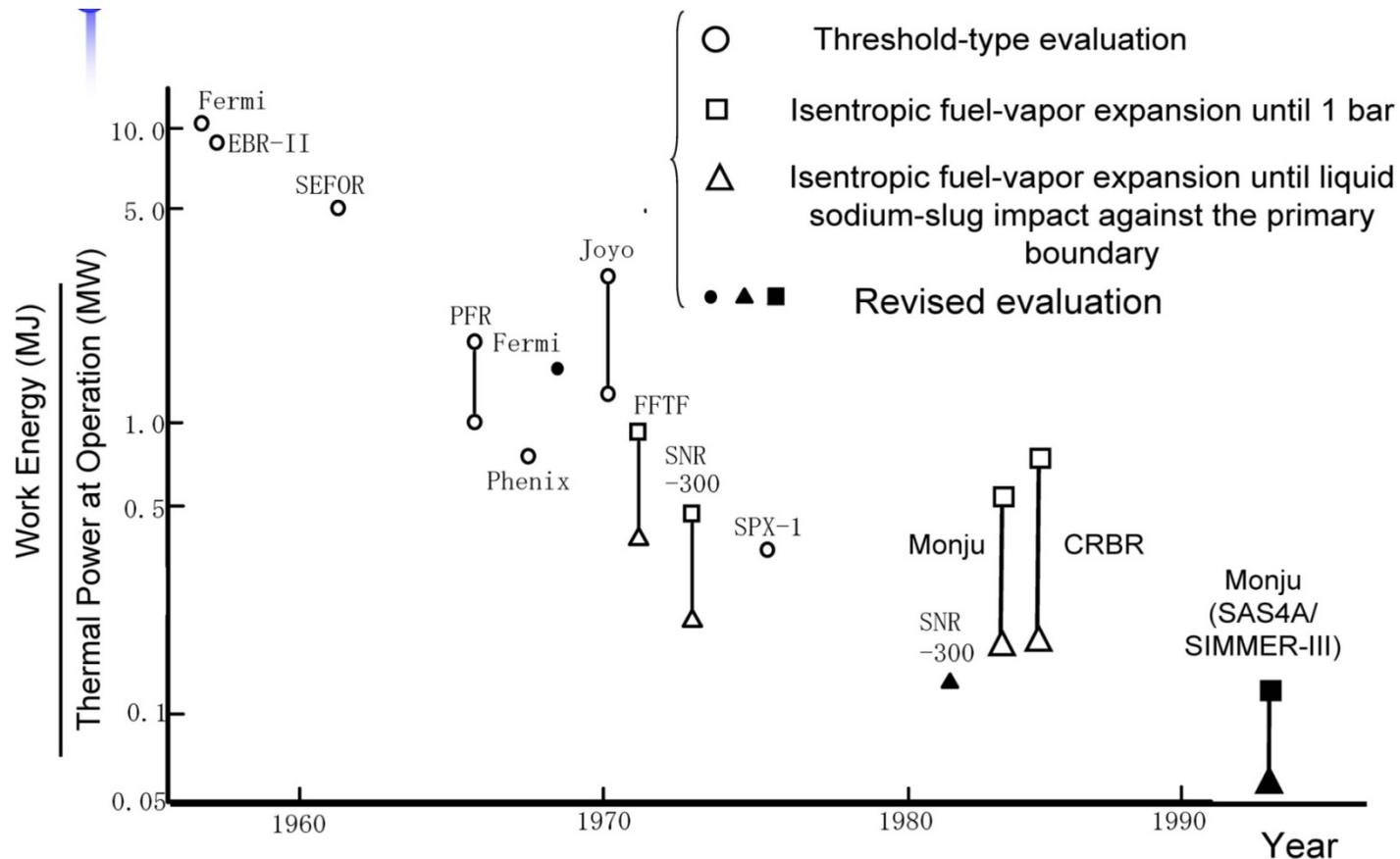
## ②損傷炉心を原子炉容器内に安定保持

炉心冷却材液位の確保と損傷炉心と分散したデブリの長期安定冷却を達成できる炉心下部構造と自然循環冷却機能を確保する



# CDA の放出エネルギー評価の変遷

- 炉心損傷に関する研究成果により、機構論的な物理モデルや解析コードが整備され、炉心損傷初期に想定される機械エネルギーは低減。
- 大型炉心でも、ボイド反応度等を制限する炉心設計によって即発臨界を超過する可能性は排除できる。



※JAEA提供



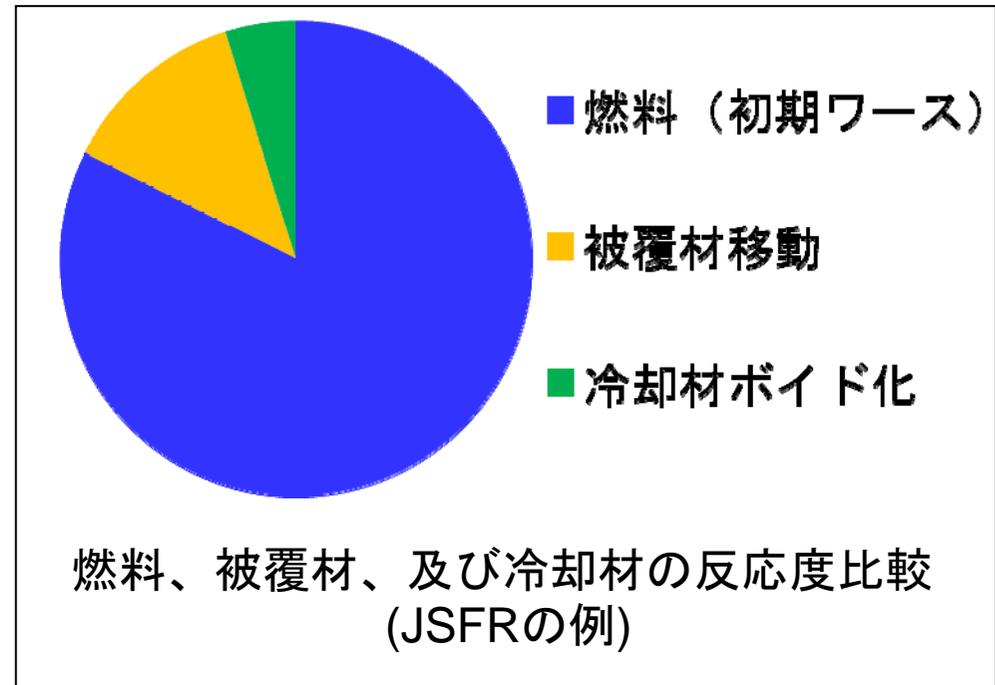
# 反応度価値

※JAEA提供

- 反応度価値大きさは次の通り

**燃料** > **被覆材** > **冷却材**

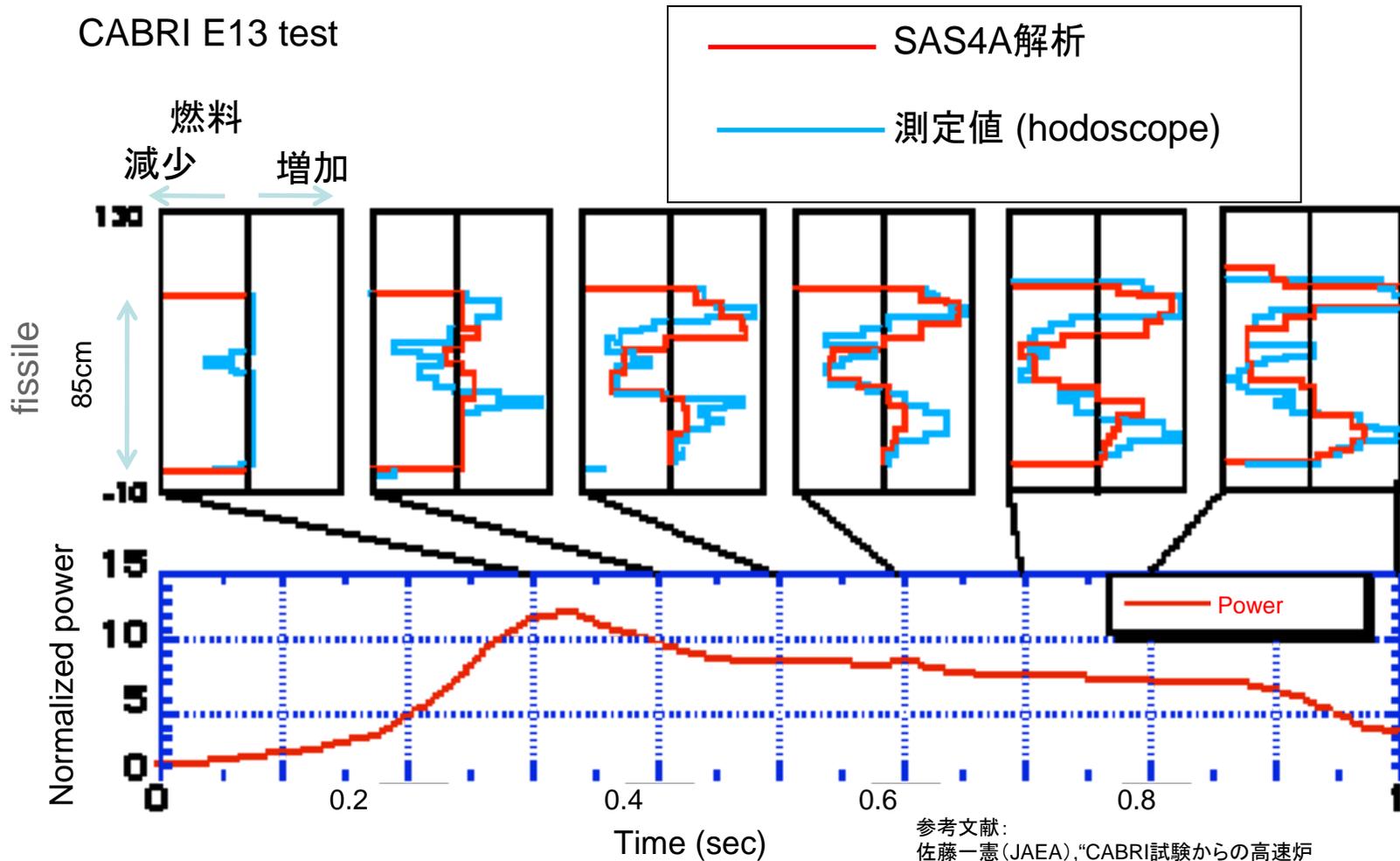
- 冷却材沸騰開始時には、ナトリウムボイド反応度が支配的。
- その後、溶融燃料と被覆材の挙動に伴う反応度が支配的となる。
- **溶融燃料の分散挙動により、大きな負の反応度がフィードバックさせる。**
- 正のナトリウムボイド反応度は負の燃料反応度によって打ち消される。



→ボイド反応度が正であっても適切に抑制することで、有意なエネルギー放出は回避可能

- 燃料破損の過程における、大きな負の反応度フィードバックを伴う軸方向の溶融燃料分散は**自然現象**に基づくものである。
- CABRIやTREAT等での炉内試験により観測・検証されている。

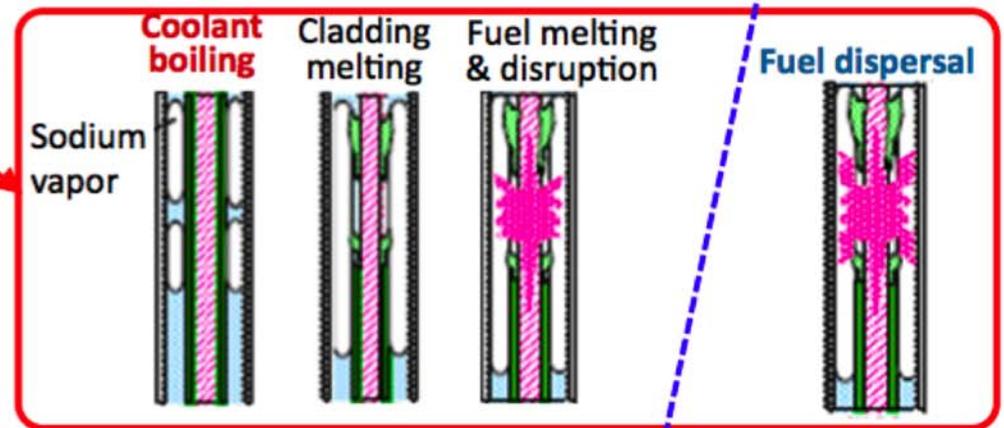
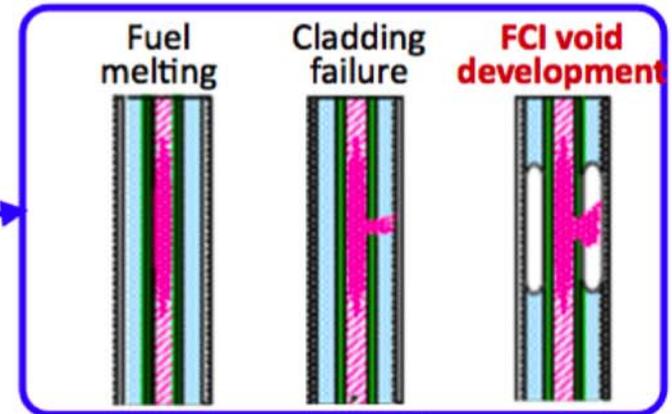
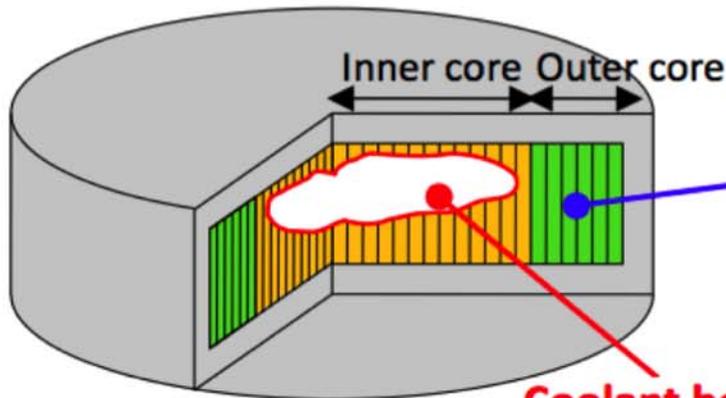
CABRIによる溶融燃料分散についてのSAS4A解析の例



参考文献:  
佐藤一憲 (JAEA), "CABRI試験からの高速炉  
安全研究に係る主要な知見", 日本原子力学会  
誌, Vol.48, No.10(2006)

- 即発臨界に至るか否かは負/正反応度成分の競合に依存する。
- これを防止するためには、**ナトリウムボイド反応度の制限**のように、適切な炉心設計パラメータを取り込む必要がある。

### 初期段階での反応度成分の競合



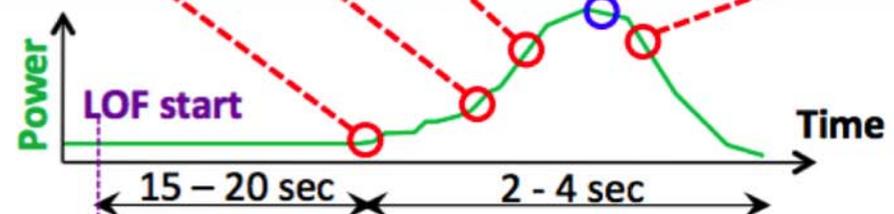
#### Element of positive reactivity feedback

- > Void reactivity with coolant boiling & FCI (Fuel Coolant Interaction)

#### Elements of negative reactivity feedback

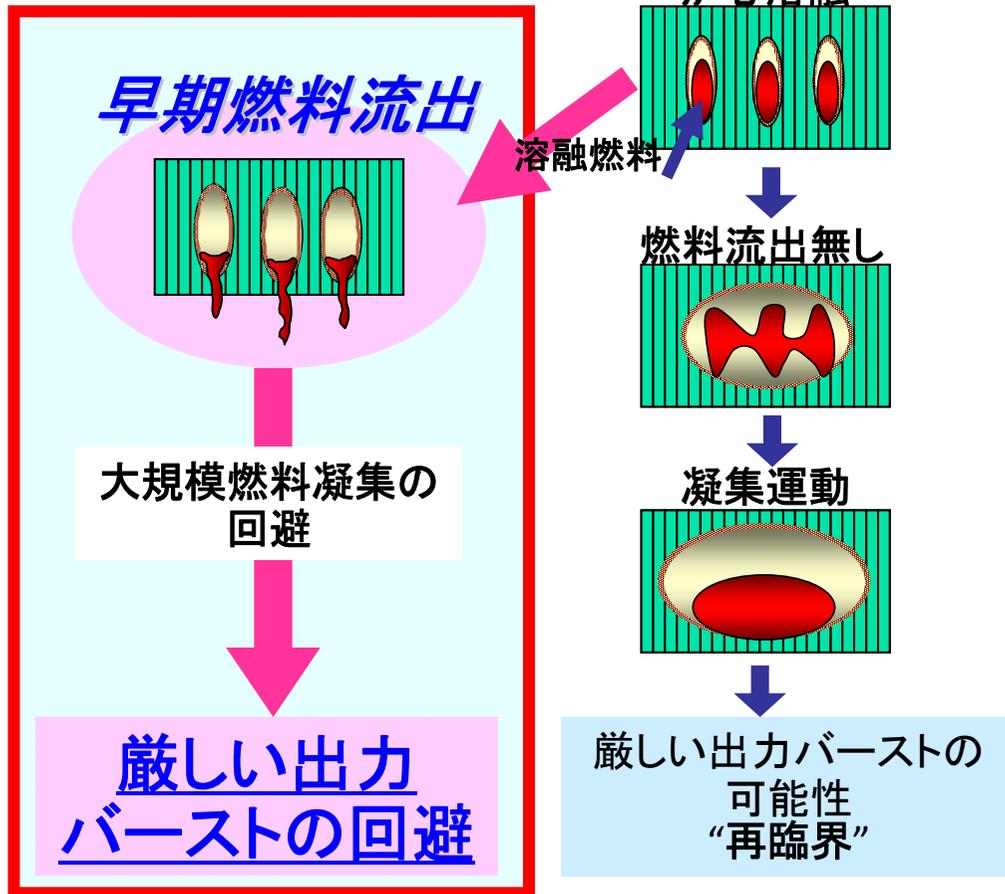
- > Fuel Doppler effect
- > Fuel axial expansion
- > Fuel dispersal

参考文献  
I.Sato et al., "Elimination of severe recriticality events in the Core Disruptive Accident of JSFR aiming at In-Vessel Retention of the core materials"FR09.



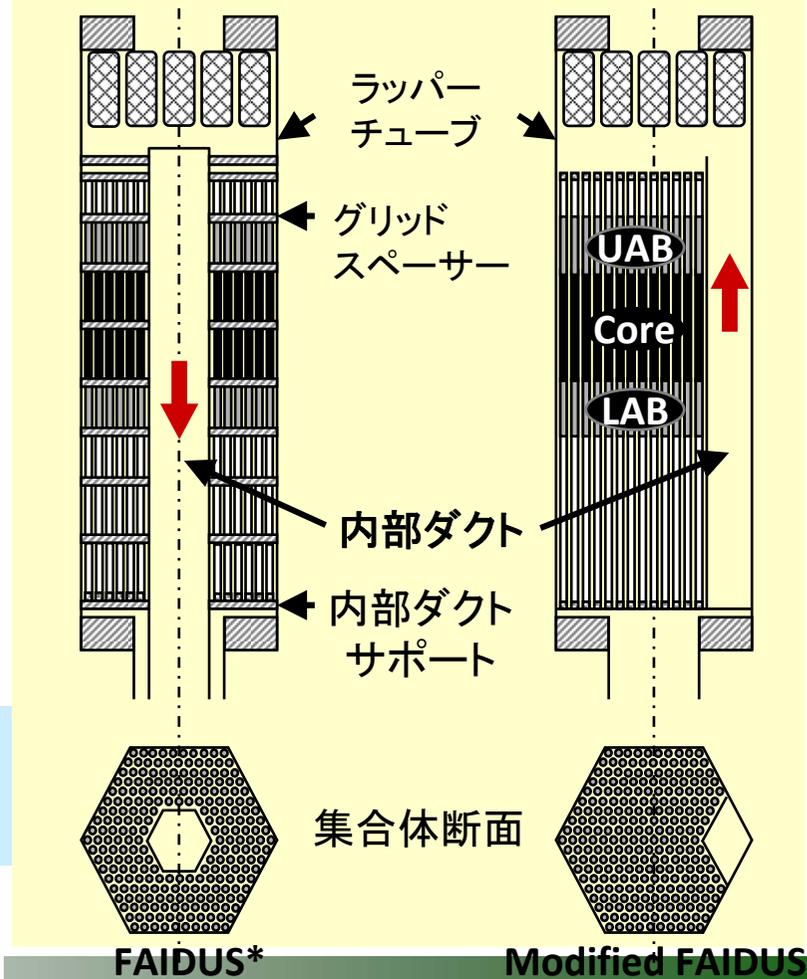
- エネジェティックスの潜在的要因は、初期の出力過渡後の大規模溶融燃料凝集であり、それを防ぐためには**早期燃料流出**が必要となる。
- この目的のため、**内部ダクト付燃料集合体 (FAIDUS)** を導入。

## 現在の取組み



## FAIDUS の概念

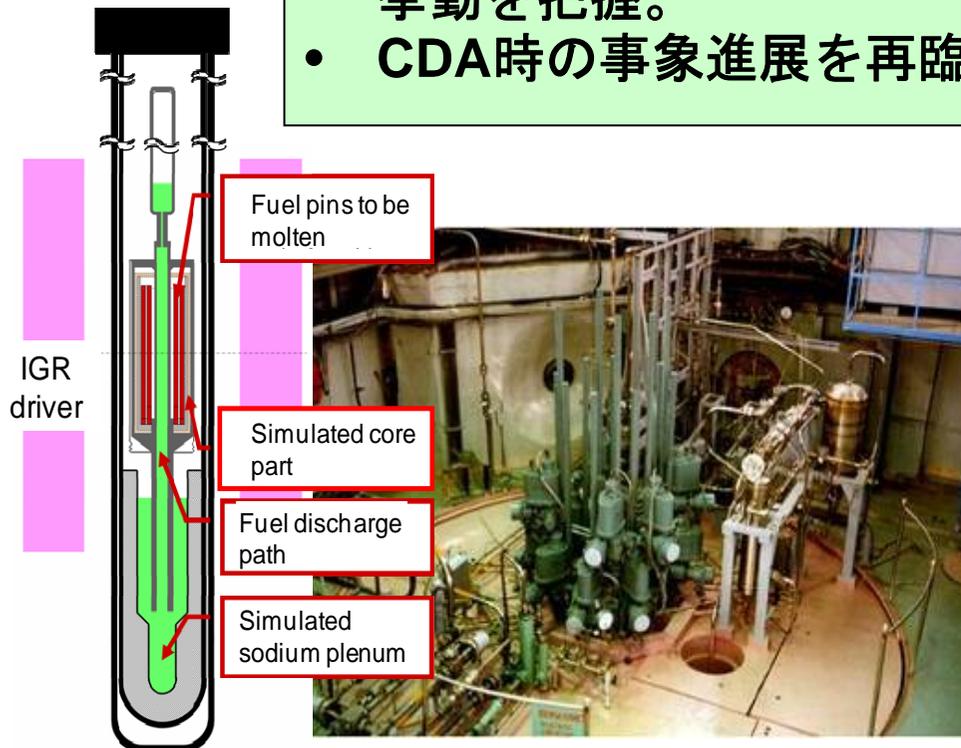
[Fuel Assembly with Inner Duct Structure]



参考文献：  
日本原子力学会，“高速炉熱流動・安全評価に関する調査報告書”，  
平成23年1月。



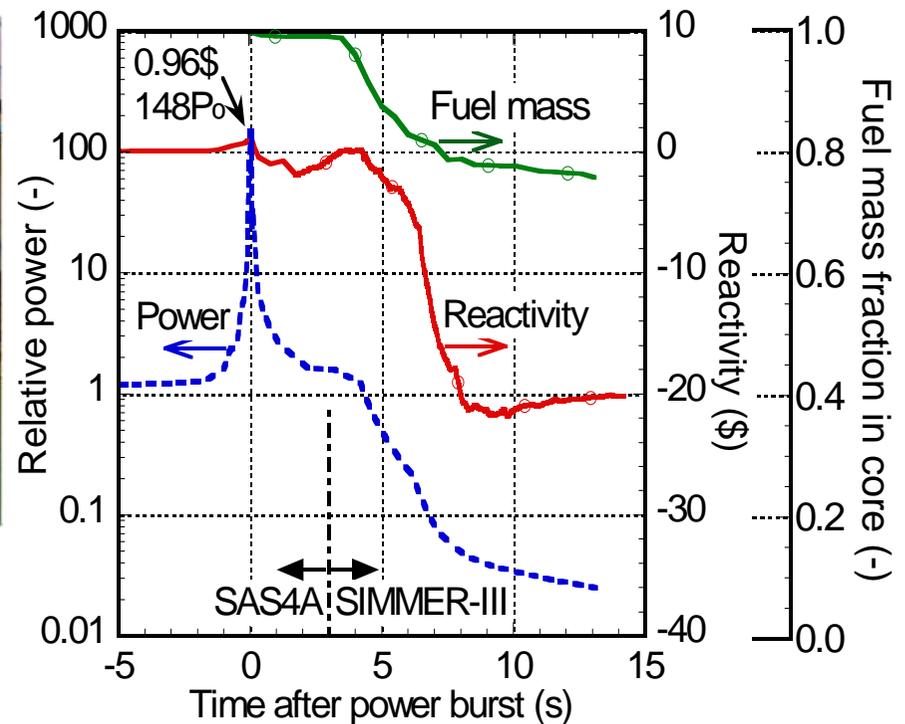
- カザフスタンの安全研究炉IGRにて、**FAIDUS**の溶融燃料流出挙動を把握。
- CDA時の事象進展を再臨界に至ることなく終息する。



カザフスタンの安全研究炉IGR

**EAGLE Project :**

SAにおいて燃料流出を強化するための実験・研究



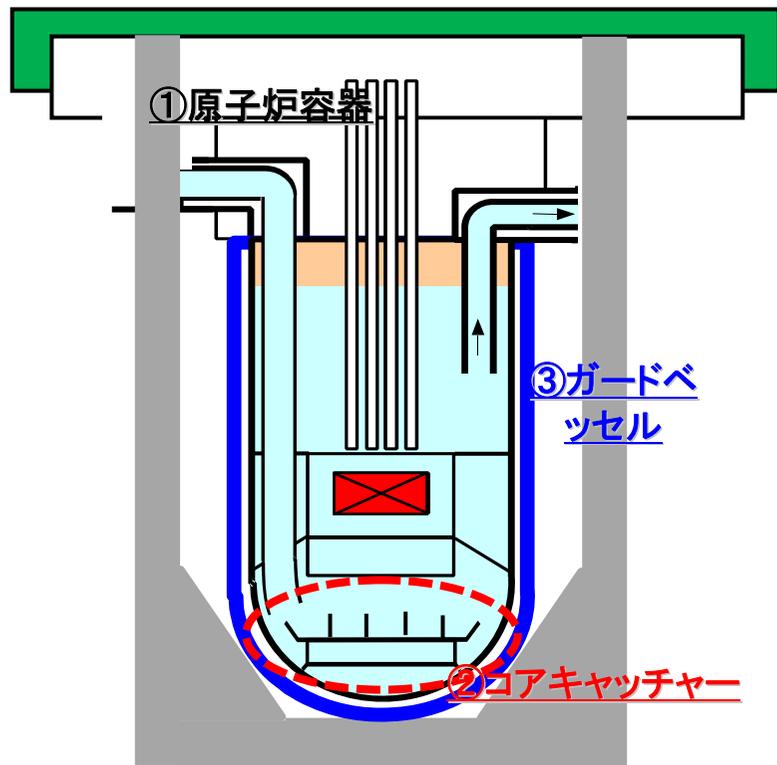
**JSFRにおけるULOF解析**

参考文献：  
日本原子力学会，“高速炉熱流動・安全評価に関する調査報告書”，平成23年1月。

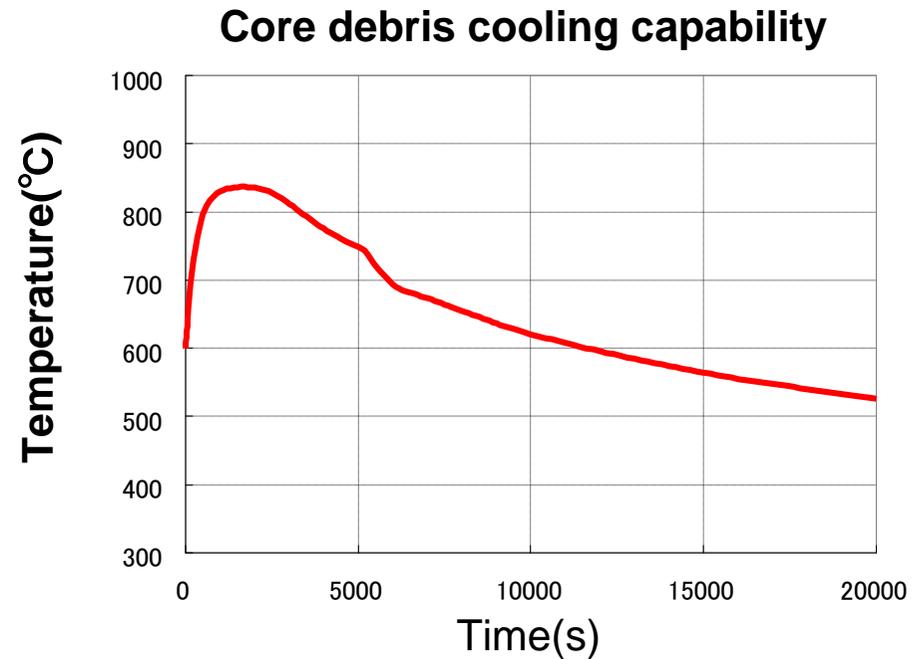


# 溶融炉心の冷却

- 炉容器内のコアキャッチャーにてデブリを保持・冷却
- デブリの冷却はナトリウムの自然循環で行われる。



④格納容器





## 結 論

- 第4世代SFRの安全性を実現していくためには、これまでのSFRの開発経験を活かすとともに、炉心損傷防止と影響緩和の両面において、自然現象に基づいて事象影響が緩和・終息に向かう特性を活用し、受動的な安全性で想定すべきSAに対応できる設計方策を取り入れるべき。
- 東電福島事故の教訓とSFRの特徴を踏まえ、設計基準を超える過酷なプラント状態を考慮しても自然に「止まる」「冷える」「閉じ込める」、さらに炉心損傷を想定しても格納できるようにしていくことが重要。
- このような設計を実現するためには、SFRのSAに関する研究開発を幅広く深堀できるよう、国際協力を活用していくことが重要。
- 「もんじゅ」は我が国のSFR技術の重要な成果の1つであり、第4世代炉のアプローチを先取りした炉心損傷の格納性までを考慮して具現化されたプラント。今後の運転によって得られる実績と保守経験とともに、東電福島事故の教訓を反映して構築されるAM策は、第4世代炉の安全及びプラント設計にとって極めて重要。