



Ⅱ. 「もんじゅ」以外で実施する安全性強化の研究開発

- ① 炉心損傷時の再臨界の防止と事象の炉容器内終息を図るための研究
- ② 損傷炉心燃料等を安定に冷却できる手段の多様化を行う研究

- 福島第一原子力発電所での事故を受けて、高速炉のSAに対する安全性を強化する。
 - 炉心損傷時の再臨界の防止と事故の炉容器内終息
- 炉心損傷時の挙動分析のための試験(EAGLE試験等)の実施とSA評価技術の確立

【目的】炉心損傷時の挙動分析のための試験(EAGLE試験等)により、再臨界防止策等の有効性を確認するとともに、炉心損傷時の燃料挙動評価手法を確立する。

【方法】日、仏、カザフスタンの国際協力により、カザフスタン国立原子力センター(NNC)のIGR試験炉と炉外試験装置、及び大洗研究開発センターのMELT試験装置において、炉内及び炉外での燃料溶融試験を実施するとともに、SA評価コードの検証を行う。

【反映先】炉心損傷時の燃料挙動を把握し、事故の炉容器内終息の実験的裏付けの取得及びSA評価コードの検証へ反映する。

EAGLE試験



カザフスタンIGR試験炉

Ⅱ. 「もんじゅ」以外で実施する安全性強化の研究開発①炉心損傷評価研究 カザフスタンNNCのIGRと炉外試験装置、大洗のMELT装置を活用



IGR (Impulse Graphite Reactor)

照射による核分裂反応を利用し、大型試験体(約60本のピン束試験体)の使用とパルス出力(最小半値幅120ms)・準定常出力(数分～数10分)の組み合わせによる**集合体規模の燃料溶融が可能**な世界唯一の試験用原子炉。



EAGLE炉外試験装置

誘導加熱により約3000℃の融体を約3リットル生成。試験体を耐圧性の高い鋼製格納容器内に組み入れ、**高温高圧条件下の厳しい試験**を実施できる装置。



MELT試験装置

誘導加熱等を用いて約2300℃の融体を約20リットル生成。遮蔽構造を有する地下試験施設に試験体を設置し、高強度の連続エックス線と高速度・高解像度カメラを組み合わせ**ナトリウム中の微粒化／堆積挙動を高速度で可視化する施設**。

■ EAGLE-1,-2 計画の成果

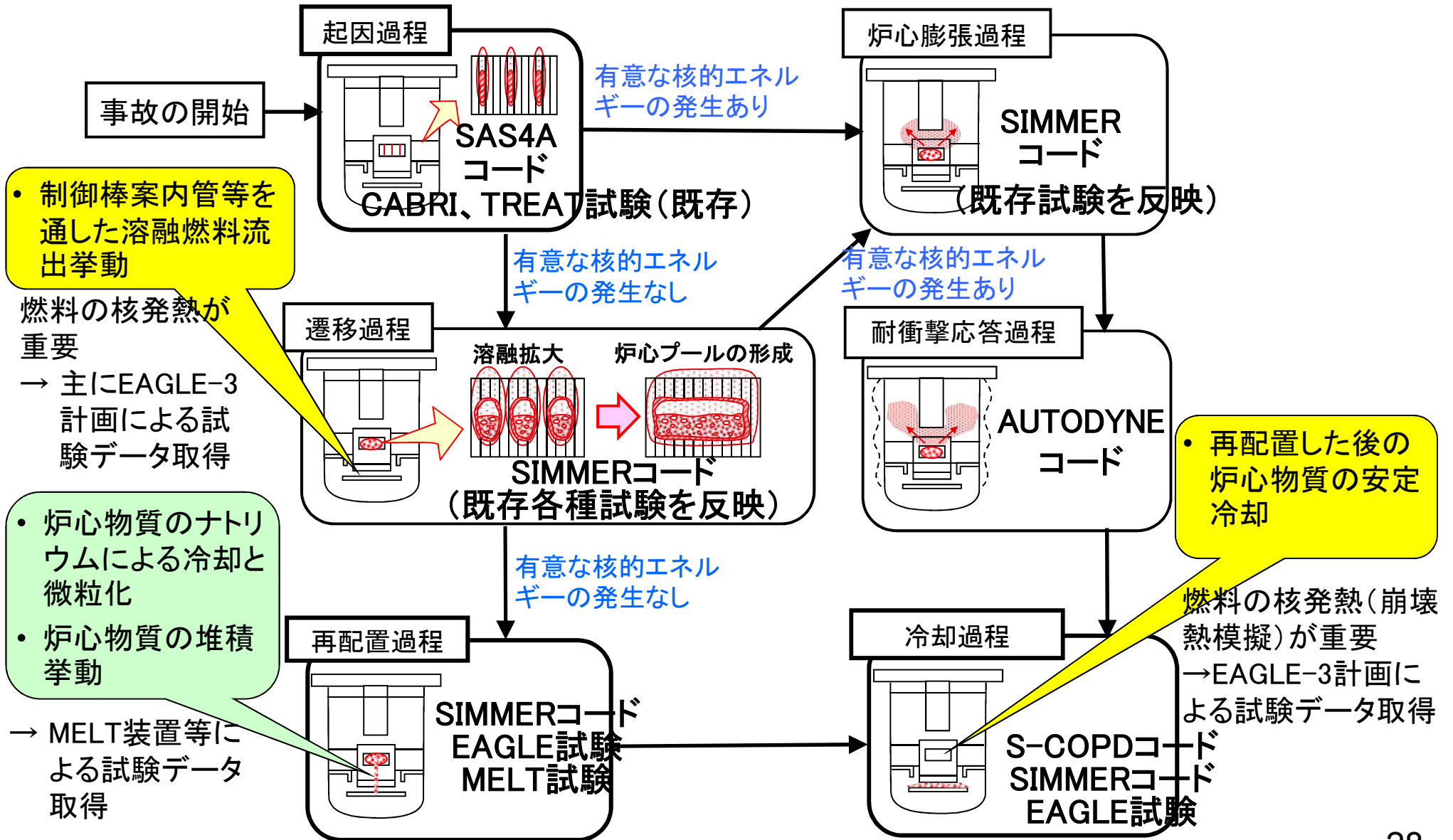
- 高速炉の炉心溶融事故を模擬した実験を実施し、溶融燃料の流出に係わる基本メカニズムを把握するとともに燃料流出を促進する設計により、再臨界による過大なエネルギー発生は防止し得るとの見通しを得た。



■ 今後の研究

- 制御棒案内管などの既存の構造を通した燃料流出の確認
- 流出後の炉心物質の安定冷却保持によるシビアアクシデントの炉容器内終息の実験的な裏付けの取得
- 日・仏・カザフスタンの国際協力によるEAGLE-3試験、大洗MELT装置等を用いた試験を実施。
- 試験成果を解析コードの検証、評価手法の開発に反映。

Ⅱ. 「もんじゅ」以外で実施する安全性強化の研究開発①炉心損傷評価研究 炉心損傷事故の事象推移における試験研究課題と評価手法整備





Ⅱ. 「もんじゅ」以外で実施する安全性強化の研究開発①炉心損傷評価研究 炉心安全性評価手法の開発と整備

【目的】

- SAの安全評価に用いる標準的手法としてSAS4A、SIMMERコードを整備する。

【内容】

■ SAS4Aコードの開発と整備

- 既実施のCABRI炉内試験、TREAT炉内試験等の試験データを用いて体系的な検証を日米仏の共同研究として実施する。

■ SIMMERコードの開発と整備

- EAGLE試験、MELT試験等から得られる試験データを反映して検証解析を実施。日仏の共同研究として実施する。
- 3次元空間依存核動特性モデルの並列化、詳細燃料ピンモデルの開発を、日独仏の共同研究として進め、コードの適用範囲を拡大する。

■ 実機適用による安全解析コードシステム整備

- SAS4Aコード、及びSIMMERコード等を用いた高速炉の炉心損傷事故解析を実施し、体系的なSA評価技術として整備する。

【期待される成果】

- 既実施のCABRI、TREAT試験、新規に実施するEAGLE、MELT等の試験データを反映して国際協力のもとに検証された標準的安全解析手法
- 各解析コードの接続ツール、核データ作成ツール等の補助的ツールを含めた体系的なSAの評価技術

背景と目的

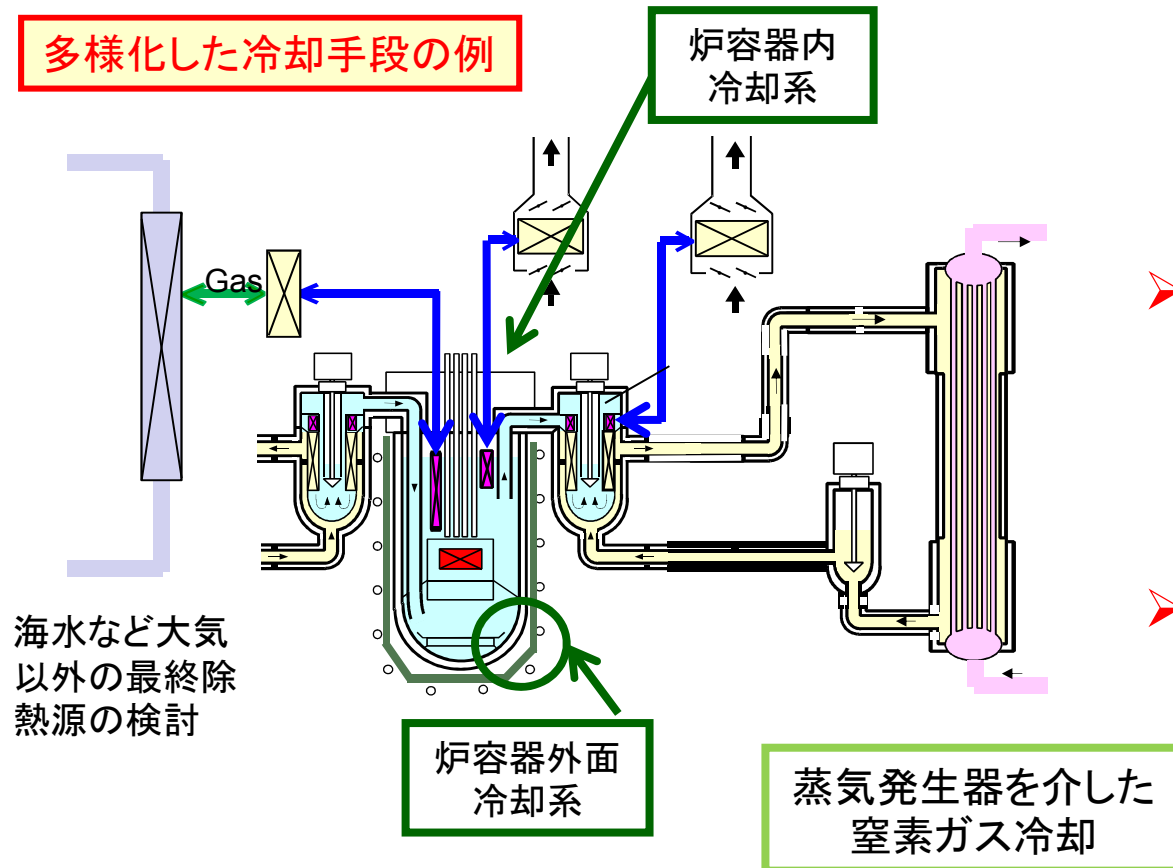
- 福島第一原子力発電所での事故を受けて、高速炉のSAに対する安全性を強化する。
 - SA条件下での使用を前提とした設備対応
 - 長時間の電源喪失時を含むSA時の崩壊熱除去手段の多様化



- 多様性を備えた炉心冷却手段の開発
 - 多様な炉心除熱にかかる評価手法の開発
- プラント全体の安全性向上にかかる技術・評価手法の開発
- 安全評価技術の体系化と安全設計指針への反映

崩壊熱: 制御棒の挿入による核分裂反応停止後にも、停止前出力の%オーダで発生する残留熱(核分裂後の原子が徐々に安定化する際に発生し、時間とともに低下)

❖ 事故時の炉心の崩壊熱をより確実に除去するために、**除熱手段の多様化**（方法が異なり、他と独立した複数の手段を用意）を図る。

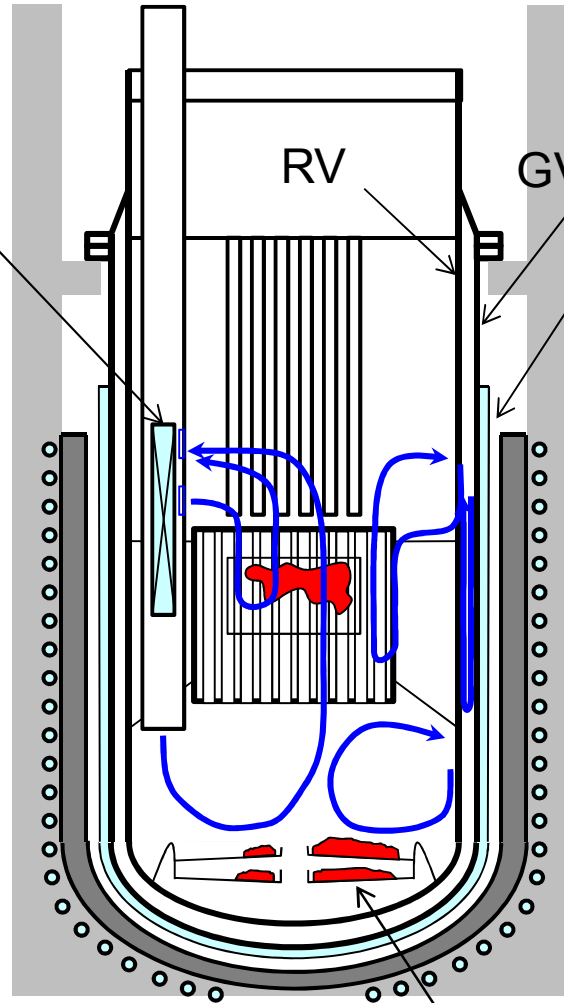


- 炉容器(RV)外面を介した冷却
 - ✓ 冷却系が上部デッキを貫通しない系統配置の多様性
 - ✓ RVの外側に熱交換機器を配置できる
- 炉容器内に挿入した熱交換器による冷却(炉容器内冷却)
 - ✓ 低液位状態への対応
 - ✓ 下部プレナム貫通型など新しい型式の検討
- 蒸気発生器(SG)による冷却
 - ✓ 水の代わりに窒素ガスの強制循環冷却

❖ 炉容器内の熱交換器による冷却 (DRACS)

検討例

- 液位の低下に対応できる構造形状。
- 上下プレナムを熱交換器が貫通した方式
- 燃料集合体間のギャップ領域の自然対流による除熱を積極的に活用する(インターラッパーフロー)
- 熱交換を炉容器の外に置き、炉容器の上下プレナムと配管でつなぐ方式



コアキャッチャー

❖ 炉容器外面を介した冷却

検討例

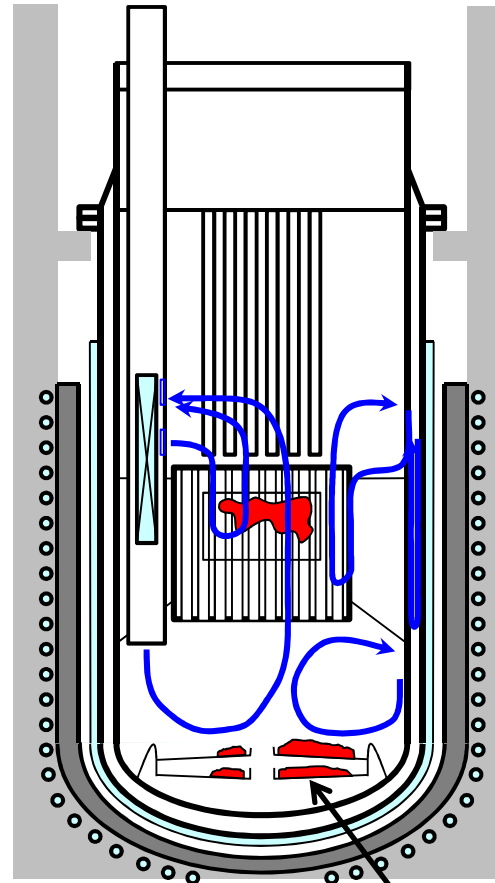
- 炉容器 (RV) とその外側にあるガードベッセル (GV) のギャップ部の熱伝達促進
- GVの外側を除熱
- GVの外側にあるコンクリート冷却系の活用
- コアキャッチャーを直接冷却する流路を形成可能
- DRACS系統との併用

❖ 炉容器内冷却

- 燃料ピン、ラッパー管、炉心槽、事故時の燃料損傷など、複雑な形状をした炉心内部の冷却性 (Naの高い熱伝導率)
- 低液位時の除熱特性
- 炉内冷却器の除熱方式 (貫通型 など) による効果

❖ 炉容器外面冷却

- 炉容器 (RV) - ガードベッセル (GV) 間の伝熱と促進方策の開発
- GV外面からの冷却の炉心除熱効果 (Na体系での検証)
- コアキャッチャー内に落下した燃料の冷却 (冷却流路の形成)



コアキャッチャー

❖ 評価手法

- 複雑形状に対応できる3次元解析手法
- 損傷炉心のモデル化
- 温度差と浮力に基づく自然対流の評価

❖ SA関連安全研究

- 燃料集合体内熱流動
- プレナム内熱流動
- SG安全性
 - ✓ ナトリウム-水反応
- 炉外事象
 - ✓ ナトリウム燃焼
 - ✓ ソースターム評価
- SA条件下での計測

❖ SA対策冷却系試験

● 炉容器内冷却

□ 炉容器全体水試験

- DRACS+RV外面冷却
- 損傷炉心冷却の現象把握

□ 既存ループ利用Na試験

- 極低流量時の炉心冷却
- 炉内冷却器構造の効果

● 炉容器外面冷却

□ RV-GV熱伝達基礎水試験

□ AtheNa-RV試験(Na)

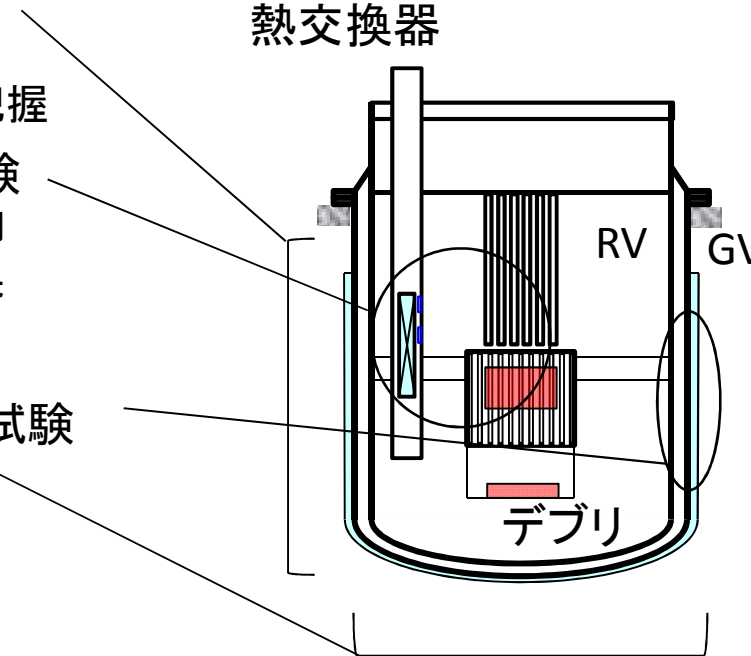
外面冷却のみを模擬

● 評価手法の開発

- ✓ 複雑形状3D解析
- ✓ 炉容器内自然対流
- ✓ 設計用データベース

◇ 国際協力による推進: GIF

炉容器内
熱交換器



❖ SA関連安全研究

● 炉容器熱流動評価手法

- ✓ 燃料集合体
- ✓ プレナム

● 炉外事象評価

- ✓ ナトリウム漏洩火災
- ✓ ソースターム評価

● SG安全

- ✓ ナトリウム-水反応
- ✓ 流動安定性
- ✓ SG除熱

● SA対策計測技術

- ✓ 自然循環流量計測
- ✓ 遠隔温度、液位計測
- ✓ 水素濃度計測

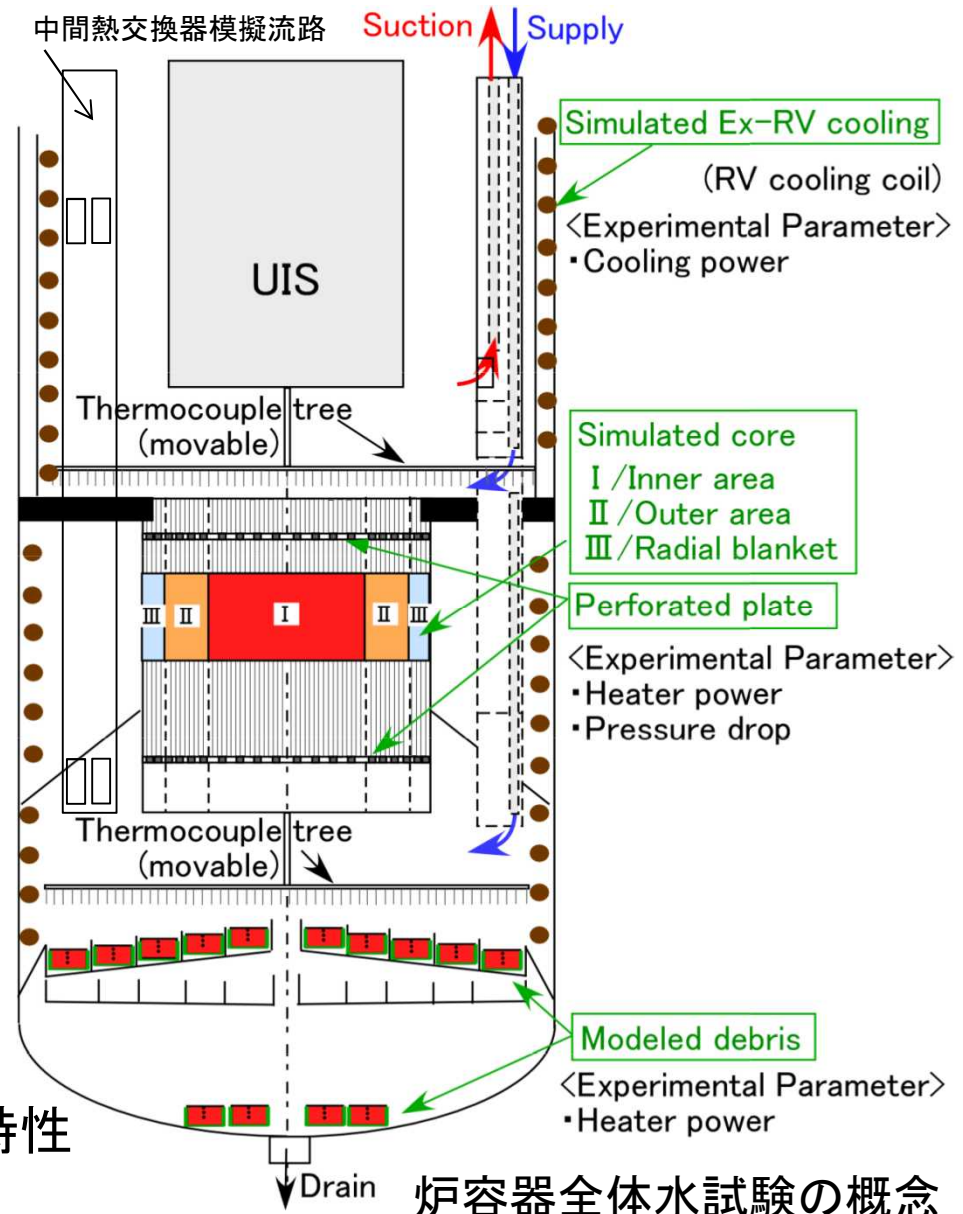
◇ 国際協力: 日米仏3カ国

● 炉容器内冷却

- 炉容器全体水試験
 - ✓ DRACSとRV外面冷却の相互影響
 - ✓ 損傷炉心冷却の基礎特性
- PLANDTL試験 (Na)
 - ✓ 既存ループの利用
 - ✓ 極低流量時の炉心冷却
- PLANDTL-2試験 (Na)
 - ✓ 既設ループの改造
 - ✓ 炉心規模での冷却冷却
 - ✓ 冷却器流路形状の効果



❖ 炉内冷却器による損傷炉心の除熱特性を明らかにし、安全強化策に反映



● 炉容器外面冷却

－ RV-GV熱伝達基礎水試験

✓RV-GV間の自然対流による
除熱現象の解明

✓除熱促進方策の検討

－ AtheNa-RV試験

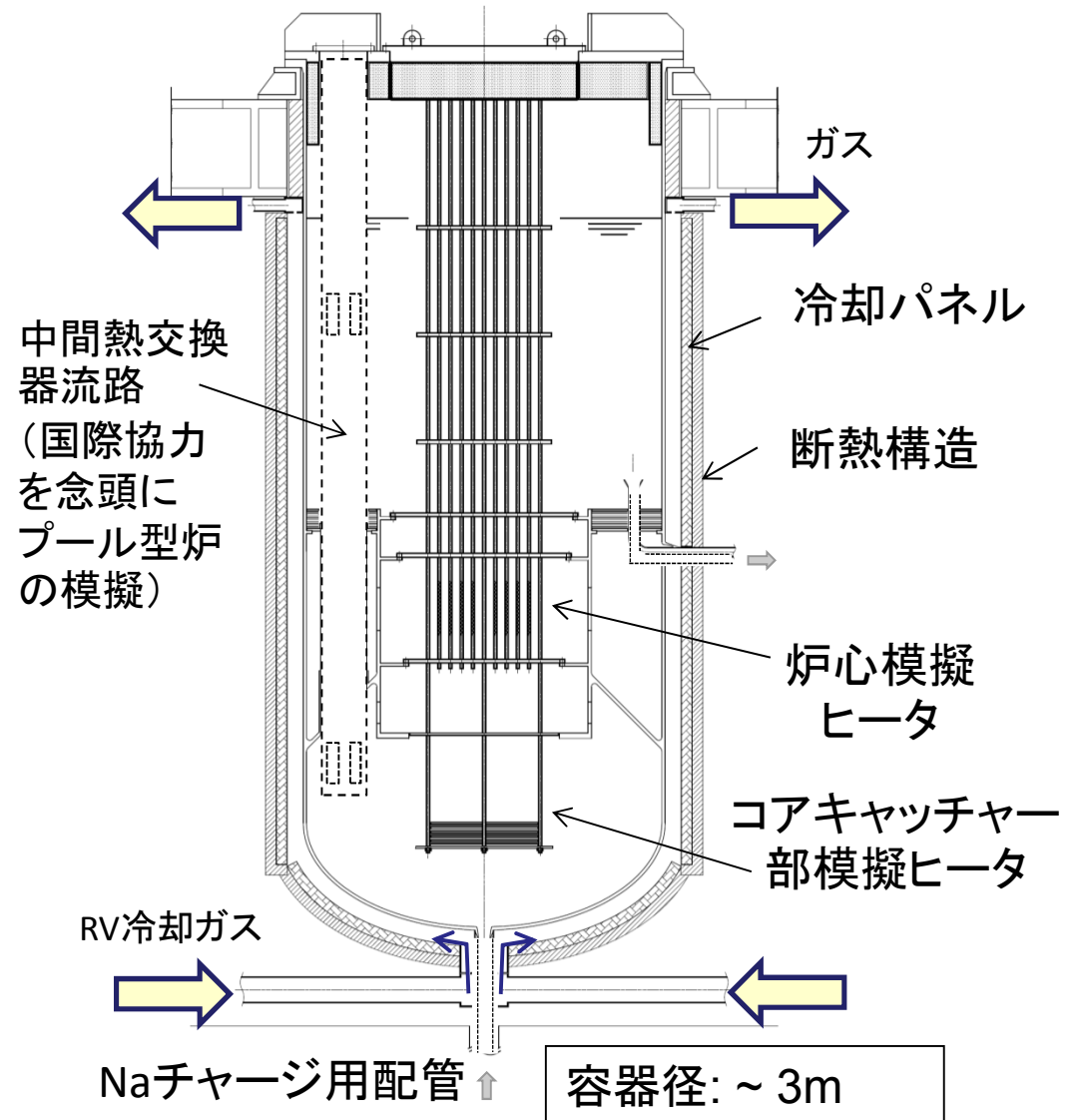
✓2重の壁を通したRV壁での
伝熱特性評価

✓RV壁からの冷却による炉
内自然対流除熱の評価

✓コアキャッチャー内デブリ
の除熱



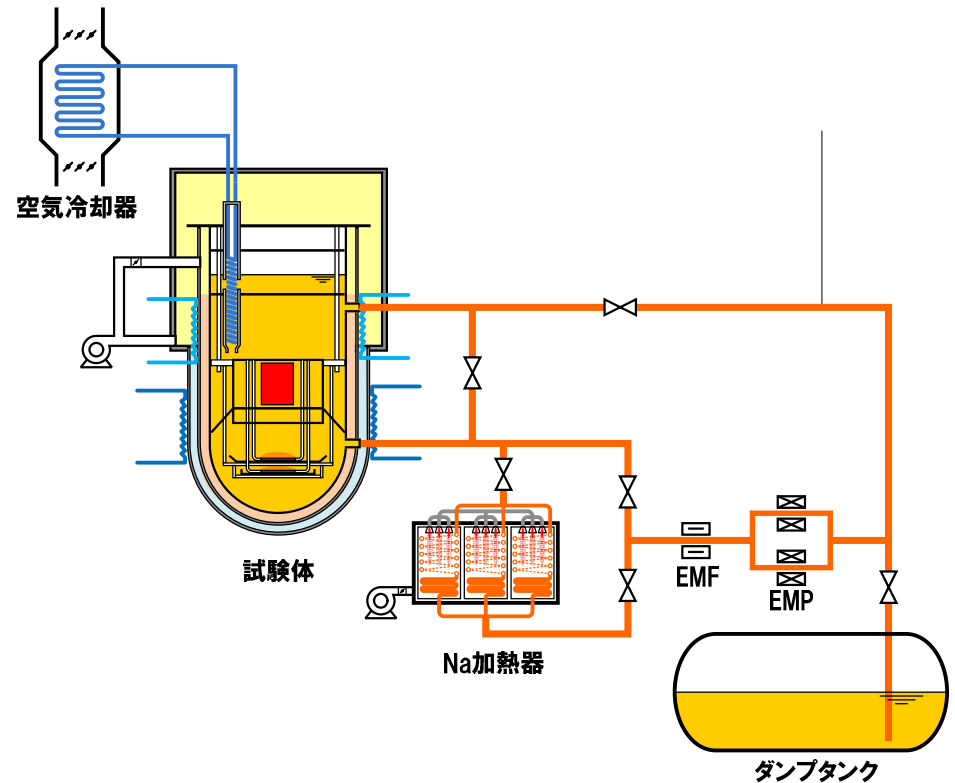
❖ RV外面冷却による損傷炉心の除熱特性を明らかにし、安全強化策に反映



AtheNa-RV試験体の概念形状

炉システムの**安全強化策**の検討
に合わせて、今後計画

- Phase-1試験の成果を反映した除熱システムの性能確認、実証
 - 炉内冷却と炉容器外面冷却を組み合わせた体系
 - 空気冷却器の自然通風除熱特性
- 炉心燃料再配置過程での**制御棒案内管**の破損過程評価
 - 案内管内ナトリウムの沸騰除熱
- **SG除熱特性**(RVの過渡試験にも対応可能なOption)
 - SGによる崩壊熱除去特性の評価
 - SGの運転安定性評価



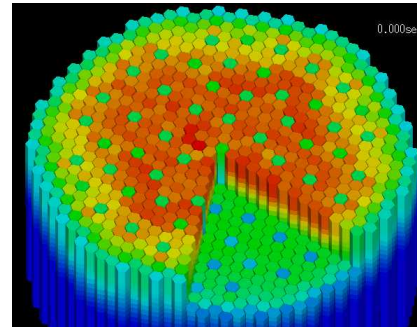
❖ SA対策の炉心及び損傷炉心冷却性能を実証

【目的】SA対策にかかる熱流動評価手法の開発

【内容】:

1) 自然循環評価手法の開発

- 1次元コードによる全体解析と炉心部最高温度評価
- 3次元コードとの組合せ



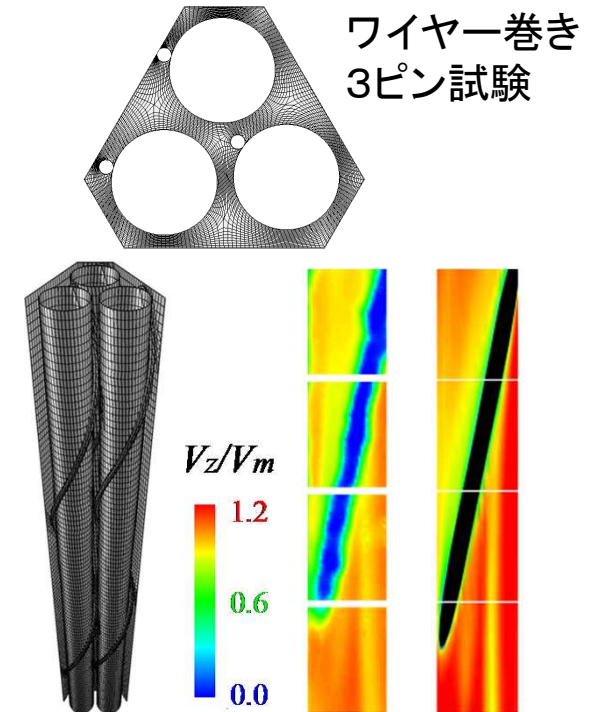
炉心全チャンネルモデル

2) 燃料集合体内熱流動評価手法の開発

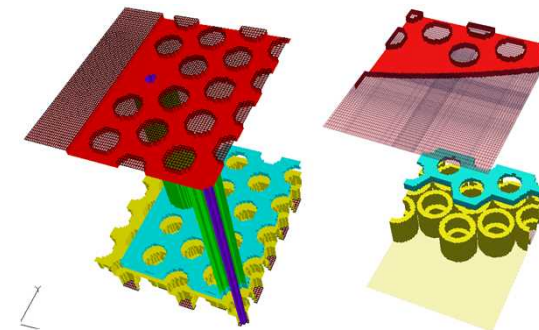
- 詳細解析手法による変形、損傷影響評価

3) プレナム内熱流動評価手法の開発

- 複雑形状プレナム、炉心のモデル化
- 自然対流除熱流路の形成
- 炉容器外面冷却での伝熱特性
- 熱荷重を受ける構造物の健全性
- 気液界面を含む2相熱流動



集合体内流速分布の実験検証



SG安全性の評価

– ナトリウム–水反応現象

➤ 機構論的評価手法の開発

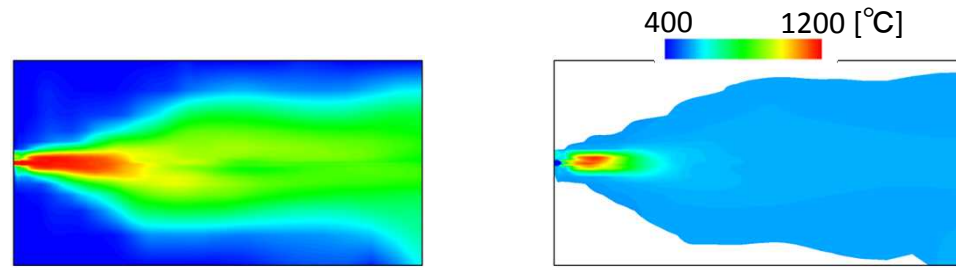
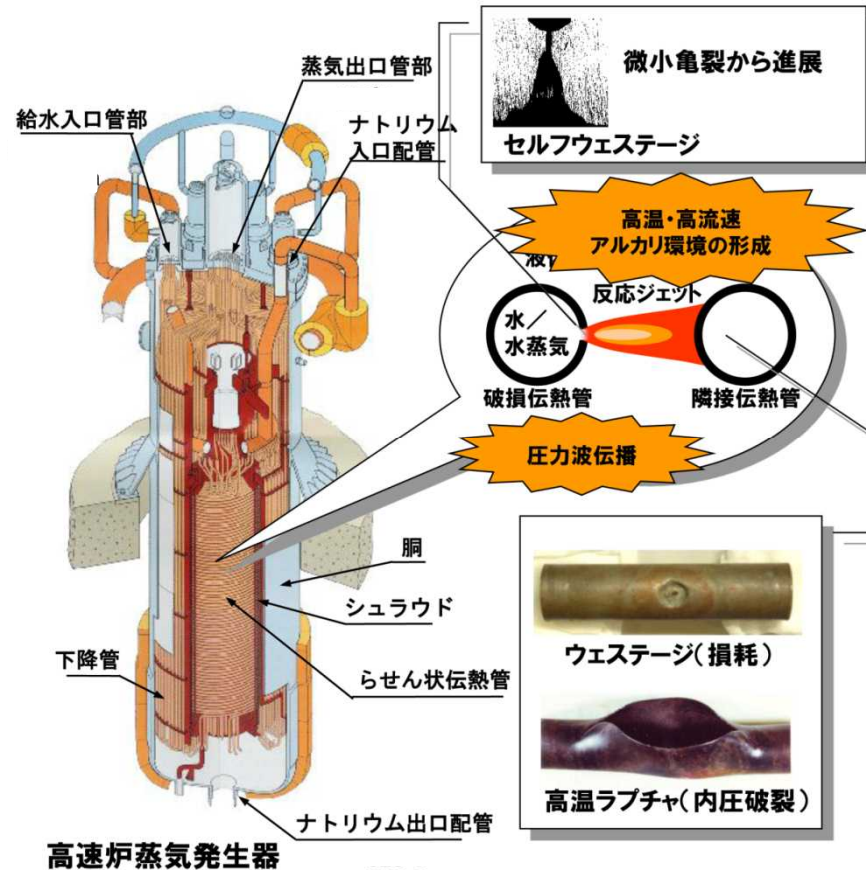
✓ 熱流動、化学反応、構造材料のマルチフィジックス問題

➤ 解析評価手法の検証及び妥当性確認

- ✓ 伝熱管破損伝播
- ✓ 圧力波伝播 の評価
- ✓ 検証範囲の拡大
- ✓ データの拡充

– 水側流動安定性

– SG内多次元熱流動特性



ナトリウム中への蒸気噴出解析(反応ガス、温度) 39

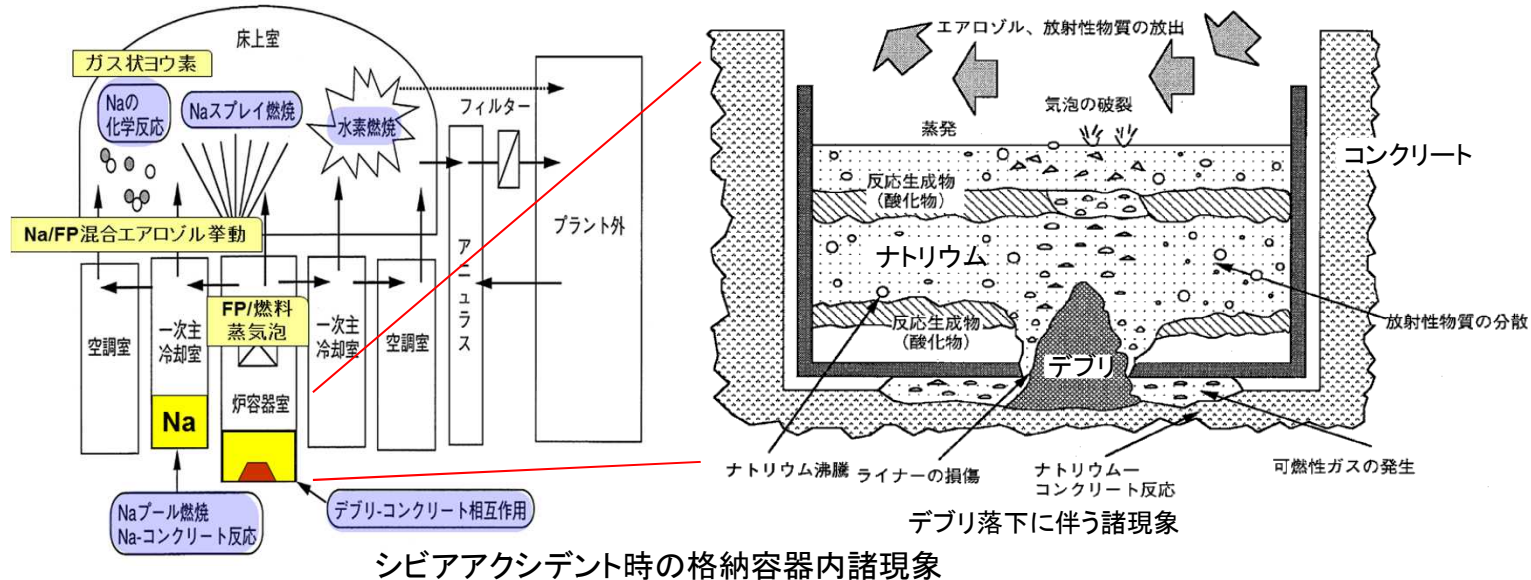
【目的】原子炉容器外へ炉心溶融物が至る想定事象について、レベル2PSAや安全評価に用いる標準ツールとしてCONTAIN/LMRコードを整備する。

【内容】

- 格納容器内諸現象を扱う解析モデルの機能確認、改良・検証
- 要素試験による現象解明、検証用データ取得
(燃料からの放射性物質放出挙動、Na-コンクリート反応、Na中のセシウム移行挙動に着目)

【期待される成果】

- CONTAIN/LMRコードをレベル2PSAや安全評価に用いる標準ツールとして整備
- 同コードの検証性を裏付ける試験データの蓄積
- 被ばく/ソースターム評価用データの蓄積



- ❖ 炉心冷却機能の状態監視技術の開発
 - 液位計測
 - ✓ 超音波、Naからのガンマー線の利用など
 - 温度計測、流速計測
 - ✓ ガイド棒と組み合わせた超音波の利用など
- ❖ 格納容器内の状態監視技術の開発
 - 水素濃度計測
 - ✓ 音速の水素と空気の違いの利用など

SA対策冷却系試験ならびに評価手法開発

❖ 米国、仏国との協議

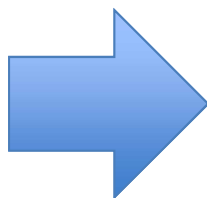
- 2012年1月、6月：計画概要を提示し、以下を確認
 - ◇ 高速炉のSAの防止と緩和に重要な研究
 - ◇ 特に、大型のナトリウム試験は貴重なデータを提供できる
 - ◇ 実験、評価手法検証を含めた協力

❖ IAEAシビアアクシデント国際ワークショップ（2012年6月、敦賀）

- 研究の計画概要を紹介、冷却手段の具体化などに高い関心

❖ GIF（第4世代原子炉システムに関する国際フォーラム）への提案

- 2012年11月のSFR-SSC（高速炉分野）で計画を紹介
 - ◇ 韓国、ロシア、中国からも高い関心が寄せられ、協力に関する具体的な提案と協議を GIFのフレームワークで行うことを合意。



韓国、ロシア、中国などの高い関心を受けて、先行して協議している米仏と合わせて、**GIFの枠組みで研究協力の具体化**を計る。

参 考

もんじゅ研究計画作業部会(第5回) 配付資料

資料1 「もんじゅ」等の研究計画について(中間的な論点のとりまとめ案)
添付資料3

高速増殖炉の安全性強化を目指した研究開発

添付資料3

東電福島第一原子力発電所事故の経験を踏まえた高速増殖炉の安全技術体系を構築するため、「もんじゅ」でシビアアクシデント(SA)対策に関する実践的な研究開発を実施するとともに、SAを模擬した試験やシミュレーションコードを含むSA評価技術の開発を実施することを検討。

東電福島事故を踏まえ実施する安全性強化のための研究開発

