



高速増殖炉の安全性評価技術に関する研究 一次期中期計画に向けて一

平成22年1月27日

第7回安全研究審議会

日本原子力研究開発機構

次世代原子力システム研究開発部門

現行重点安全研究計画及び中期計画

【現行中期計画】

1) 高速増殖炉サイクル技術の確立に向けた研究開発

- ①平成17年度までには、平成13年度から実施してきている原子炉(ナトリウム冷却炉、鉛ビスマス冷却炉、...)に関する研究成果をもとにして、研究開発の重点化の考え方及びこれを踏まえた課題をとりまとめる。
- ②平成18年度(2006年度)以降は、上記①の取りまとめを踏まえるとともに、これに対する国の評価・方針に基づき、主として開発を進めていくべき概念を中心に技術開発を実施しつつ、その成果に基づき設計研究を進める。

ナトリウム冷却型高速増殖炉: JSFR

安全評価技術の開発が必須

【現行重点安全研究計画】

<研究目的>

高速増殖炉の安全評価技術に関する研究を実施し、高速増殖炉の安全規制の基本的考え方や安全基準類の基本的事項を検討する際に必要な判断資料の整備に資する。

<研究課題>

- イ. ナトリウムの化学反応に関する安全評価技術の整備
 - ロ. ATWS時の炉心損傷防止及び影響緩和特性の実証
 - ハ. 炉心損傷時の事象推移評価技術の整備
- 二. PSA技術の高度化

次期重点安全研究計画及び中期計画(案)

【重点安全研究計画(第2期)】H21.8 安全委員会決定 (要約)

高速増殖炉に関して、安全規制の基本的考え方や安全基準類の基本的事項を検討する際に必要な判断資料の整備等が必要。

- ナトリウム漏えい燃焼及びナトリウム－水反応評価手法の整備・高度化
- 「常陽」、AGF、MMF、FMF等の原子炉及び照射試験施設を利用した実験データの蓄積
- 大規模な炉心損傷(シビアアクシデント)の発生を防止し、また、その発生を想定した場合の影響を適切に評価できる技術(PSA技術を含む)

当安全研究について、(独)日本原子力研究開発機構は「常陽」の運転及び「もんじゅ」の建設、各種の試験研究施設を使用した研究開発を行ってきており、引き続き、研究の実施が求められる。

【次期重点安全研究計画(案)】

＜目的＞高速増殖炉の安全評価技術に関する研究を実施し、高速増殖炉の安全規制の基本的考え方及び安全基準類の基本的事項を検討する際に必要な判断資料の整備に資する。

- (1)ナトリウムの化学反応に関する安全評価技術の整備
- (2)ATWS時の炉心損傷防止及び影響緩和特性の実証
- (3)炉心損傷時の事象推移評価技術の整備
- (4)PSA技術の高度化
- (5)プラント熱過渡に係わる評価技術の整備(新規)

次期重点安全研究計画の中期計画への反映

【次期重点安全研究計画(案)】(前出)

＜目的＞高速増殖炉の安全評価技術に関する研究を実施し、高速増殖炉の安全規制の基本的考え方及び安全基準類の基本的事項を検討する際に必要な判断資料の整備に資する。

- (1) ナトリウムの化学反応に関する安全評価技術の整備
- (2) ATWS時の炉心損傷防止及び影響緩和特性の実証
- (3) 炉心損傷時の事象推移評価技術の整備
- (4) PSA技術の高度化
- (5) プラント熱過渡に係わる評価技術の整備(新規)



上記の重点安全研究を実施し、以下の中期計画の実施項目へ反映する

- ・ナトリウム冷却高速増殖炉の実証炉の実現に向けて必須な技術開発(H22)
- ・炉のシステムとしての工学規模での設計成立性(安全性)の評価(H23～H26)

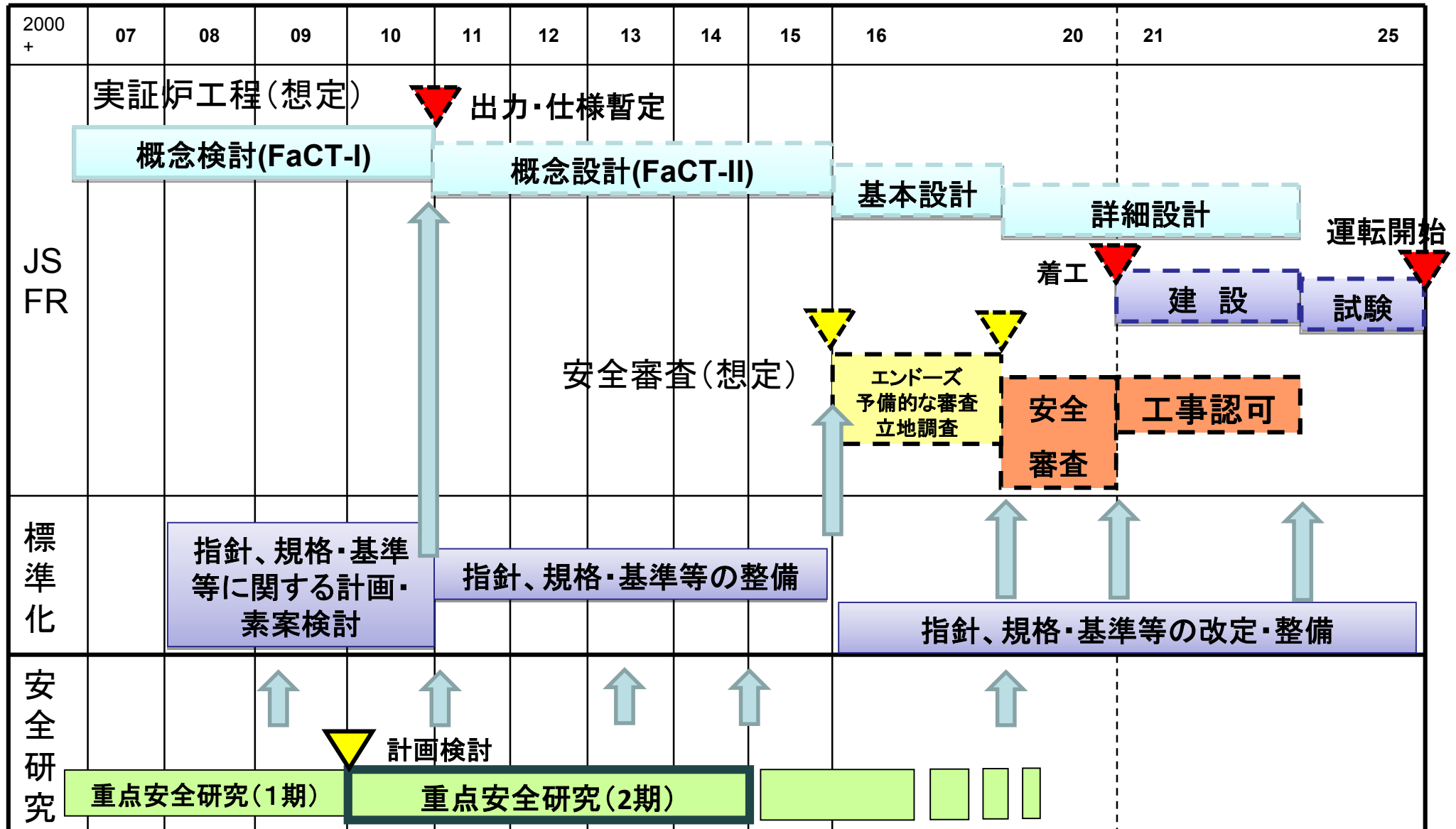
【次期中期計画(現状案)】

2)高速増殖炉サイクル実用化研究開発

～機構は、～高速増殖炉サイクルの実用化計画を平成27年に提示することを目標として以下の研究開発を実施する。

- ① 平成22年度までは、主として開発を進めていくべき概念(ナトリウム冷却高速増殖炉、先進湿式法再処理及び簡素化ペレット法燃料製造)に係る革新的な技術の採否判断に必要な要素技術開発を進める。その際には**2025年度の実証炉の実現に向けて必須の要素技術開発**に重点化を図る。
- ③ 平成23年度以降は、～ 以下の研究開発を進める。
 - ・炉技術の研究開発については、革新的な技術について、主要部位の部分構造試作による機器・構造の製作性評価、材料試験等の要素技術開発による構成要素の機能確認を進めるとともに、機器開発試験やシステム試験によって**システムとしての工学規模での設計成立性を確認する**ことを目指す。～
- ④ 高速増殖炉サイクル技術の～**研究開発を大学や研究機関等との連携を強化して継続的に実施**する。

高速増殖炉開発ロードマップのイメージと 安全研究計画の関係



成果と課題、取り組み (1/3)

● 平成17～20年度の主な成果

★ 課題

➔ 取り組み

(1) ナトリウムの化学反応に関する安全評価技術の整備

- ナトリウム微少漏えいの早期検出やナトリウム燃焼反応に関する実験的知見を整備。
- ナトリウム－水反応に関して、反応ジェットの伝熱流動現象や管内伝熱特性を把握するためのデータを取得するとともに、反応場近傍の混相流現象を評価する機構論的解析コードを検証。
- ★ ナトリウム漏えい燃焼及びナトリウム－水反応に関する検証された評価手法の整備・高度化
- ➔ ナトリウム燃焼解析コードの検証例の蓄積・適用性向上
- ➔ ナトリウム－水反応で生じる各種重要現象の解明を進め、解析評価コード体系を整備

(2) ATWS時の炉心損傷防止及び影響緩和特性の実証

- 「常陽」においてATWSの予備試験(UTOP予備試験)を実施し、解析コード「Mimir-N2」を検証。
また、自己作動型炉停止機構(SASS)の主要構成材料の照射試験及び照射後試験を実施
- ★ フィードバック反応度メカニズムの検討及びATWS模擬試験の実施
- ➔ 蓄積したフィードバック反応度の測定データより出力運転時のフィードバック反応度のメカニズムについて検討を進めるとともに、「常陽」再起動後にATWS模擬試験を実施
- ★ SASS主要構成材料の照射後試験
- ➔ SASS主要構成材料の照射後試験の評価結果をまとめる。

● 平成17～20年度の主な成果

★ 課題

➡ 取り組み

(3) 炉心損傷時の事象推移評価技術の整備

- 溶融炉心物質の炉心周辺への早期流出挙動を実験的に確認し、実用炉での厳しい再臨界が排除できる見通しを示すとともに、既存試験と併せて安全評価手法の改良・検証・標準化へ反映した
- ナトリウム・デブリ・コンクリートの共存反応挙動に関して、要素試験及び解析コードの改良・整備を実施
- ★ 流出挙動の実証的データ取得
 - ➡ 上方流出体系での炉内・炉外試験データを取得する
- ★ 炉心物質の熱的負荷に対する炉容器内終息性の確認
 - ➡ 設計を最適化しつつ、実験研究によりその有効性を確認する
- ★ 炉心損傷の影響を合理的に評価する手法の整備
 - ➡ 加熱燃料からのFP放出試験の実施。格納系応答解析コードの検証・整備

● 平成17～20年度の主な成果

★ 課題

➡ 取り組み

(4) PSA技術の高度化

- 「もんじゅ」のアクシデントマネジメント有効性評価へのPSA適用を通じて手法を整備
- ★ 本手法の実証炉・実用炉等への適用性検討
- ➡ 実証炉・実用炉の概念設計に対するPSA手法の適用性検討及び評価条件の設定
- ★ 機器信頼性データの拡充・整備
- ➡ 「常陽」、「もんじゅ」の機器について運転・故障データを継続・収集

(5) プラント熱過渡に係わる評価技術の整備(新規)

◆ これまでの関連研究成果

前回の「もんじゅ」総合機能試験結果及び性能試験(40%定格条件)結果をプラント動特性解析コードSuper-COPDにより評価した。また本コードを用いてプラント手動トリップ時の熱過渡解析及び事故解析を実施し、設計データ及び安全評価データが十分に保守側であることを確認した。

★ 出力上昇試験結果によるSuper-COPDコードの検証

➡ 今回の性能試験結果によりコード検証を実施する。

★ 設計余裕及び安全余裕の最適化手法の開発

➡ 熱過渡事象に与える影響パラメータの取りうる範囲や組合せの中で設計裕度及び安全裕度が最適となる熱過渡条件を求める手法を開発する。

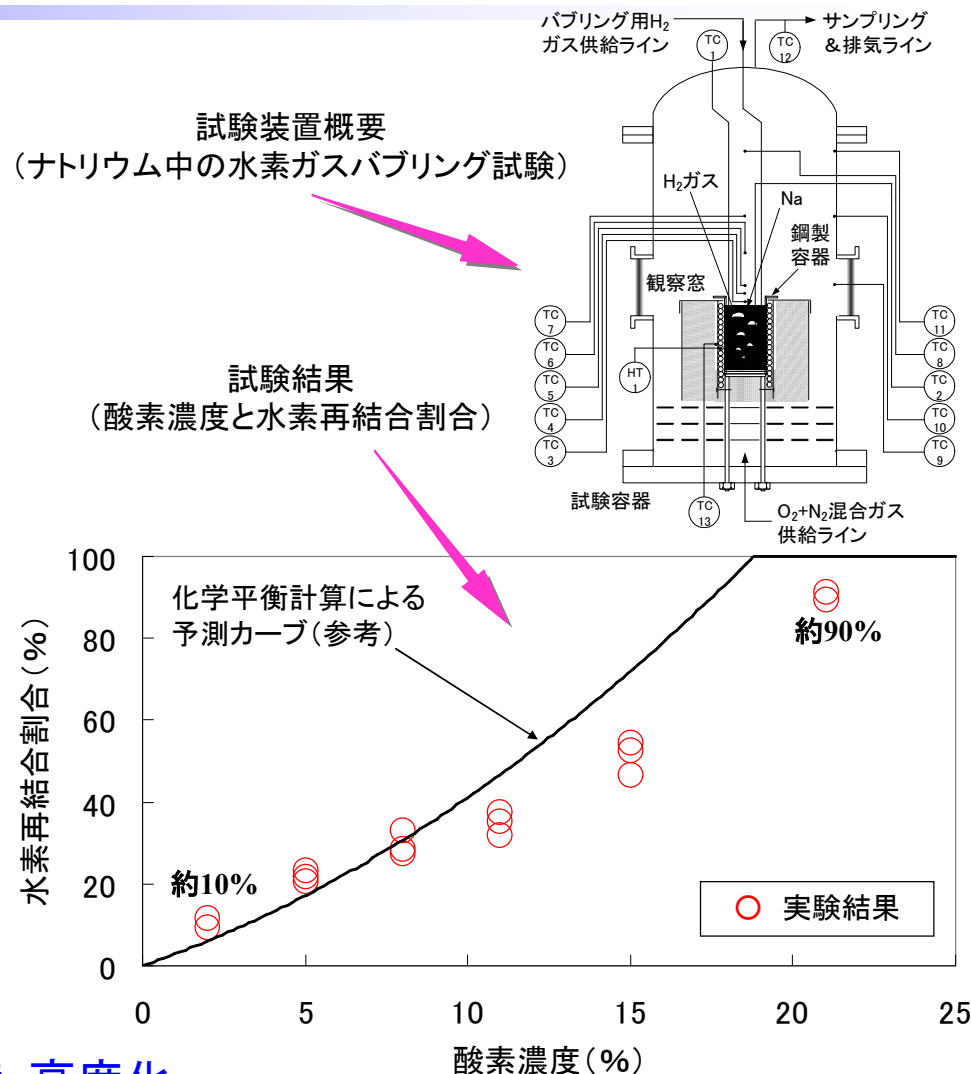
【主な成果】

- ✓ ナトリウム微小漏えいの早期検出に関する試験検討を行い、ナトリウムを選択的に検知する新手法を対象として信頼性確認に必要な実験的知見を整備
- ✓ ナトリウム燃焼反応を調べる各種試験の実施及び成果の資料化
⇒ナトリウム燃焼の理解促進を図る知見蓄積
- ✓ コンクリートと反応が競合する場合のナトリウム燃焼挙動に関する実験を行い、ナトリウム・コンクリート反応で発生する水素の挙動を明らかにするデータを取得

【課題と取り組み、今後の方針】

★ ナトリウム漏えい燃焼に関する評価手法の整備・高度化

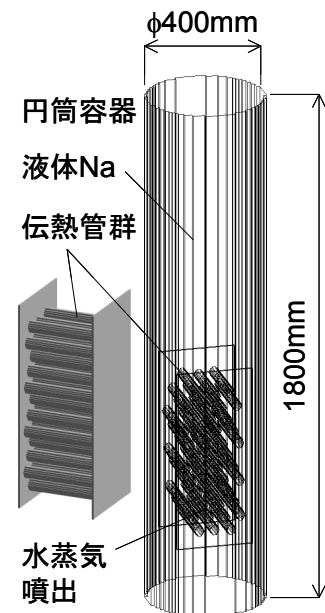
- ➡ 試験研究で蓄積されてきた知見を活用して、ナトリウム燃焼解析コードを系統的に検証し、適用性向上を図る



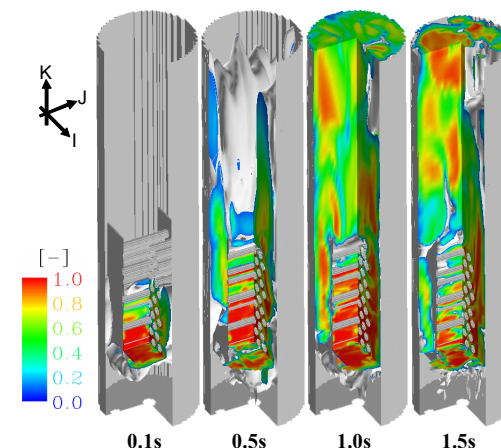
(1) ナトリウムの化学反応に関する安全評価技術の整備(2/2)

【主な成果】

- ✓ ナトリウム-水反応時の反応ジェットの流れ現象を把握するための試験データを取得した。
- ✓ 急速加熱時の水側熱伝達率測定試験を行い、水平管内伝熱特性を明らかにした。
- ✓ 機構論的数値解析コードSERAPHIMによる試験解析を行い、ナトリウム-水反応時の熱流動特性(温度やボイド率分布)を概ね評価できることを確認した。

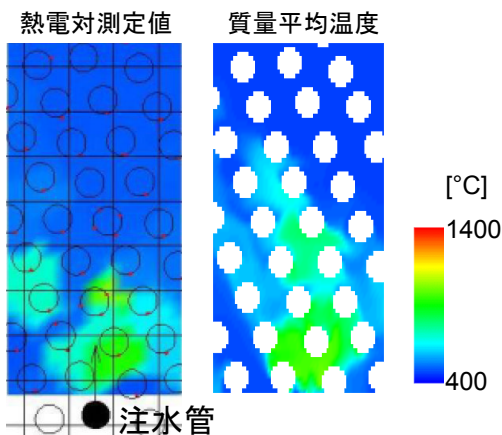


SERAPHIM解析体系



解析結果(ボイド率分布)

噴出水蒸気温度352°C、水蒸気圧力17MPa
初期Na温度470°C、Na圧力0.2MPa



試験結果 解析結果

結果比較(温度分布)

【課題と取り組み、今後の方針】

★ 現象解明試験の実施

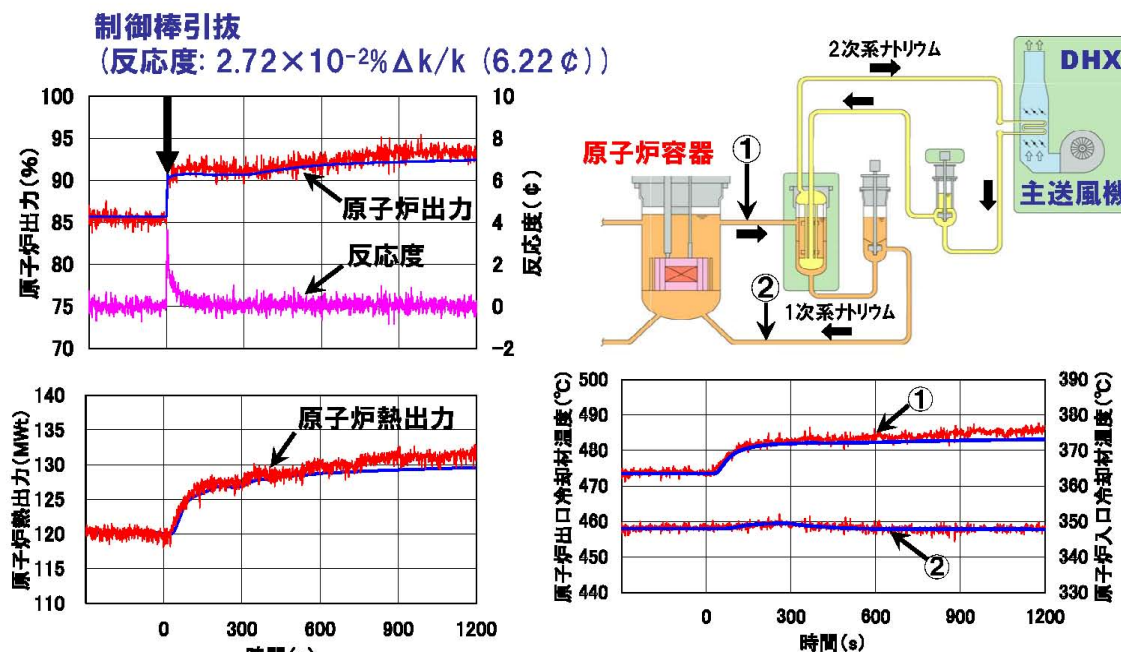
- ➡ 反応ジェットで生じる化学反応現象やセルフ/ターゲットウェスティング、高温ラプチャ現象の解明を進める

★ 解析評価手法の整備・高度化

- ➡ 現象解明結果に基づく機構論的な解析評価手法の高度化。事象終息まで評価する簡易解析手法を構築

【主な成果】

- ✓ 「常陽」を用いたATWS模擬試験の実施に向けた第1ステップとして、MK-Ⅲ炉心の第3サイクル運転において「UTOP予備試験」を実施し、解析コード「Mimir-N2」を検証した。試験の結果、計算値と測定値は概ね一致しており（右図参照）、Mimir-N2がプラント挙動解析ツールとして適用できることを確認した。
- ✓ 「常陽」MK-Ⅲ炉心の第3～6サイクル運転において、等温温度係数及び出力係数測定を行い、フィードバック反応度に関する測定データを取得した。



グラフの青線: 解析コードMimir-N2による計算値

UTOP予備試験結果とMimir-N2による計算結果の比較

【課題と取り組み、今後の方針】

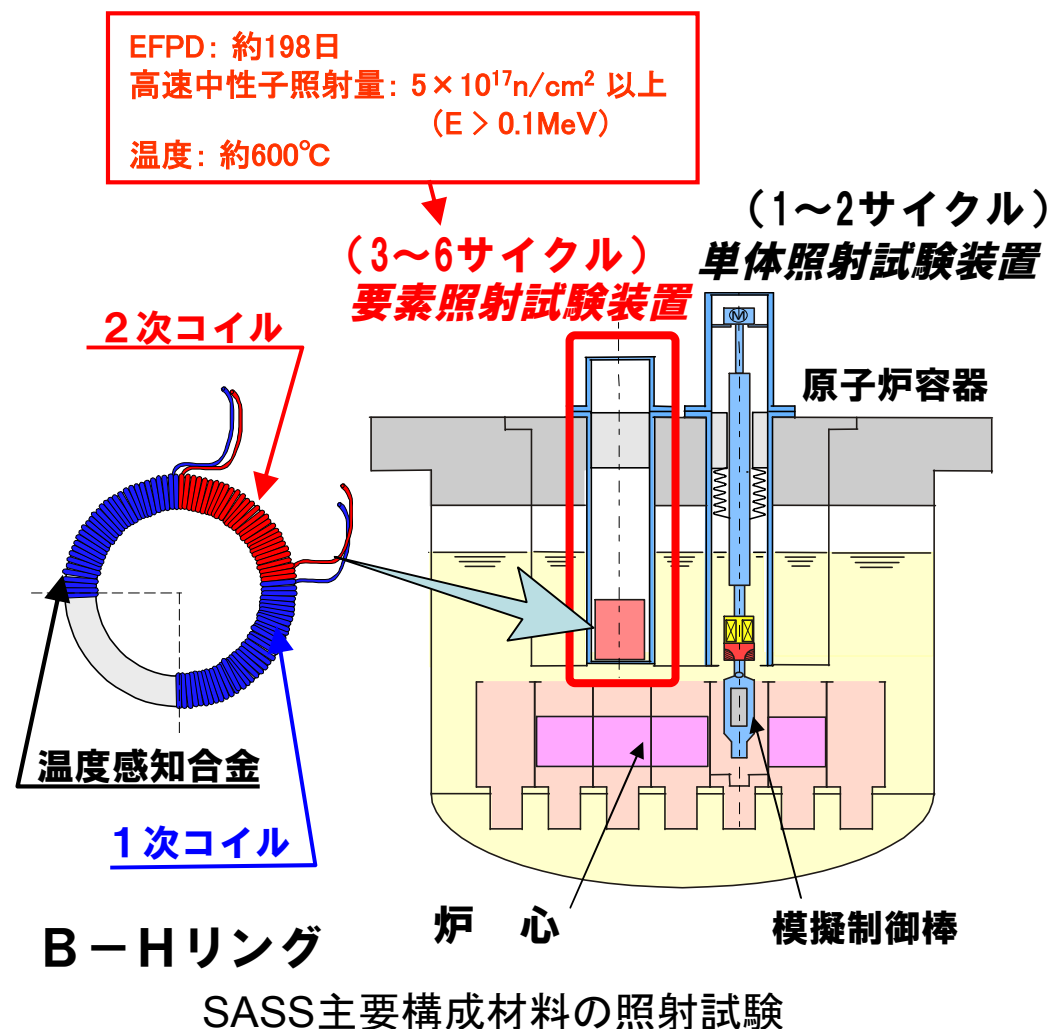
★フィードバック反応度メカニズムの検討及びATWS模擬試験の実施

- ➡ 蓄積したフィードバック反応度の測定データより出力運転時のフィードバック反応度のメカニズムについて検討を進めるとともに、「常陽」再起動後にATWS模擬試験を実施

(2) ATWS時の炉心損傷防止及び影響緩和特性の実証(2/2)

【主な成果】

- ✓ 「常陽」MK-Ⅲ炉心の第3～6サイクル運転において、自己作動型炉停止機構（SASS）の主要構成材料の照射試験を実施した（右図参照）。
- ✓ SASSの要素照射試験装置には、温度感知合金にコイルを巻いたB-Hリングを装填し、オンラインで実機使用環境での磁気特性の変化を測定した。その結果、温度感知合金の照射への影響は僅かであることが確認できた。



【課題と取り組み、今後の方針】

★SASS主要構成材料の照射後試験

- ➡ SASS主要構成材料の照射後試験の評価結果をまとめる。

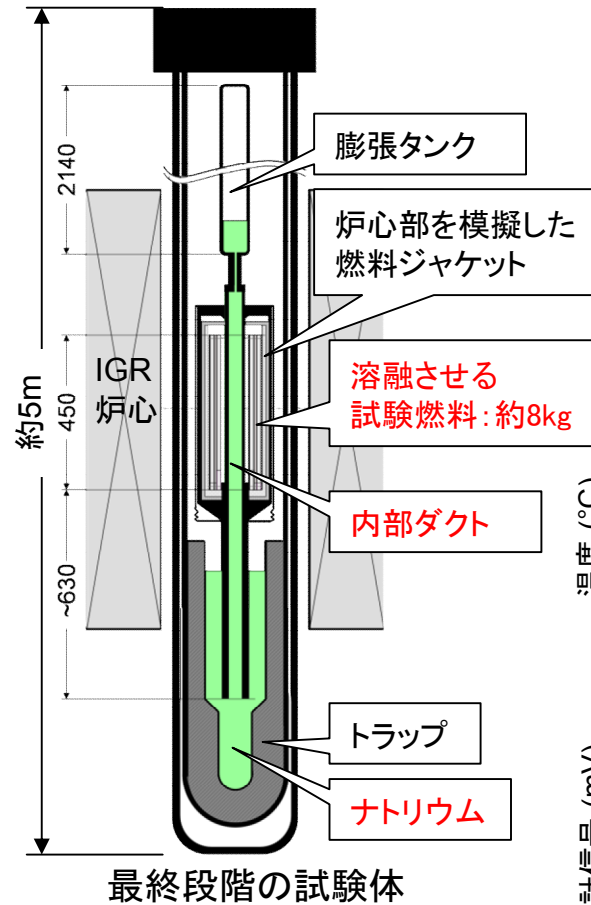
(3) 炉心損傷時の事象推移評価技術の整備(1/2)

【主な成果】

- ✓ 厳しい再臨界の排除
- IGR (Impulse Graphite Reactor)内で約8kgの UO_2 燃料を溶融させ、下部トラップへの流出挙動を観測した。これにより実用炉設計で採用している「内部ダクト型燃料集合体」により、厳しい再臨界を排除できる見通しを得た。

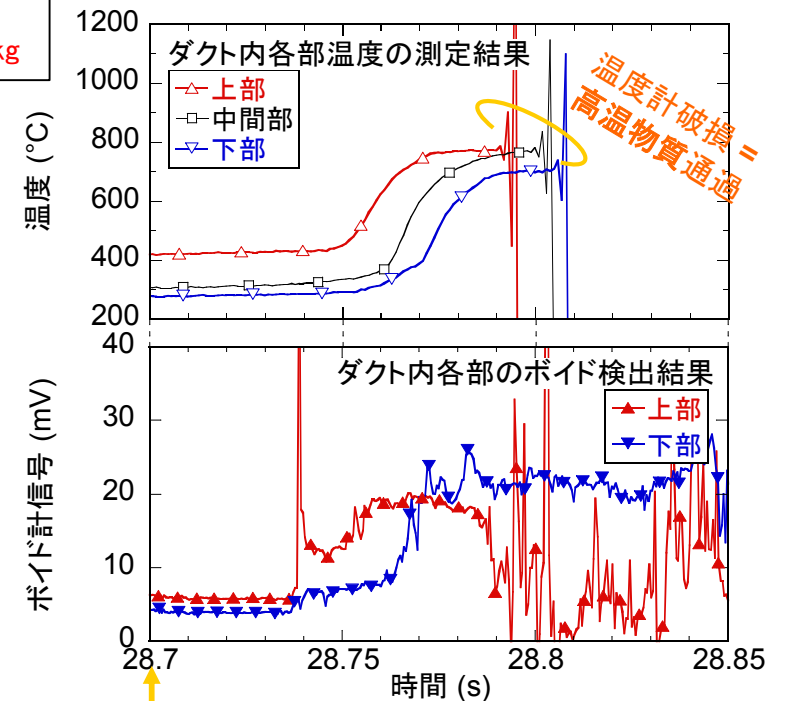
【課題と取り組み、今後の方針】

- ★流出挙動の実証的データ取得
- 上方流出体系での炉内・炉外試験データを取得する。
- ★炉心物質の熱的負荷に対する炉容器内終息性の確認
- 設計を最適化しつつ、実験研究によりその有効性を確認する。



カザフスタン共和国の研究専用炉IGR等を用いた試験計画を実施

IGRへの試験体装荷風景



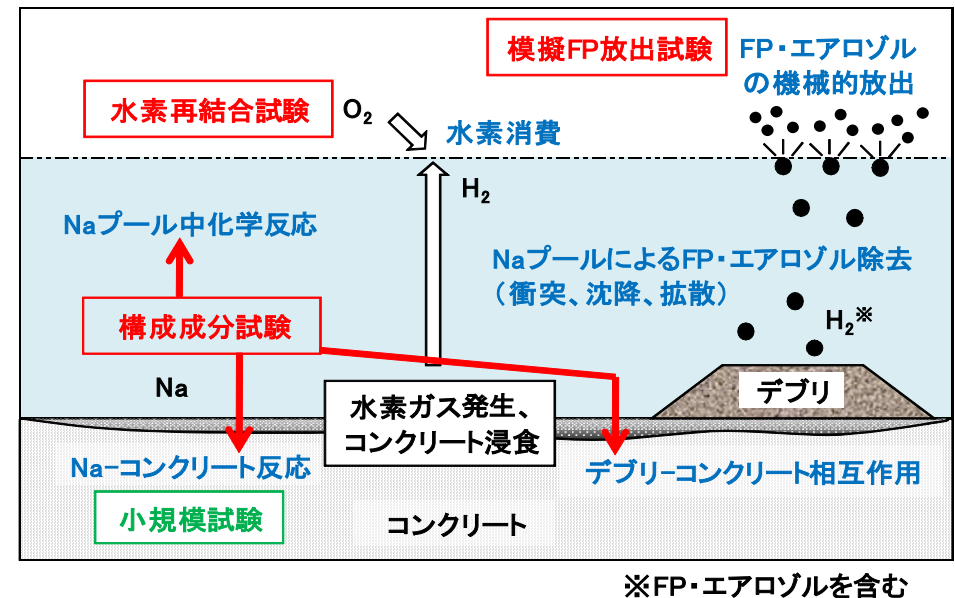
溶融燃料がダクトに侵入

内部ダクトを通じた燃料流出の観測例

(3) 炉心損傷時の事象推移評価技術の整備(2/2)

【主な成果】

- ✓ ナトリウム・デブリ・コンクリートの共存反応挙動に関して、以下の要素試験により基礎データを取得
 - ✓ 主要物質間の化学反応性を調べる試験(構成成分試験)
 - ✓ 発熱源の存在がナトリウム・コンクリート反応へ与える影響を調べる試験(小規模試験)
- ✓ 格納系応答解析コードCONTAIN/LMRのデブリ・コンクリート相互作用計算モデルを改良
 - ✓ デブリがナトリウムに覆われる場合の事象推移解析機能を付加(ナトリウム化学反応、FP・エアロゾル挙動に関するモデル改良)



改良後の解析モデルで扱う
ナトリウム・デブリ・コンクリート相互作用関連現象

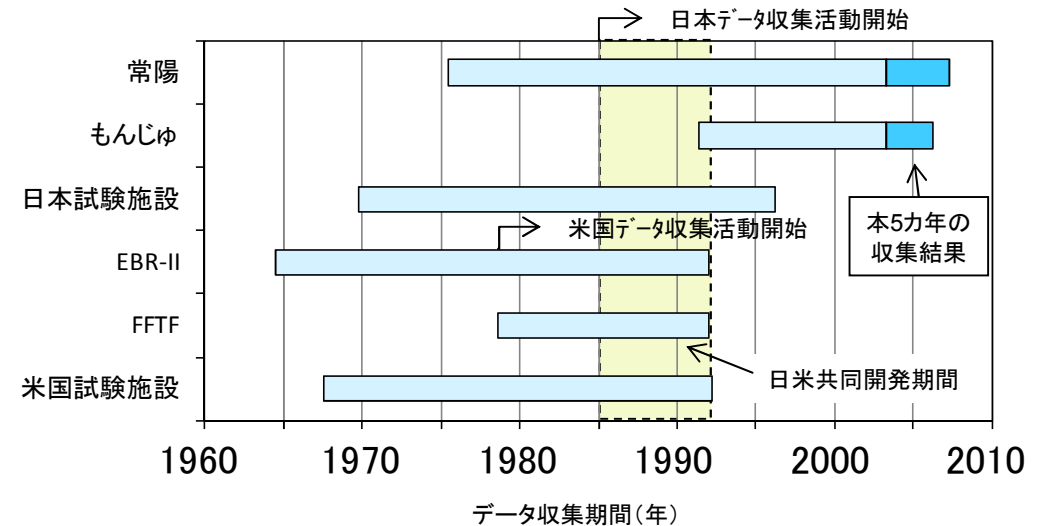
【課題と取り組み、今後の方針】

- ★ 炉心損傷の影響を合理的に評価する手法の整備
- ➡ 加熱燃料からのFP放出試験の実施(照射後試験施設の試験設備を使用)
- ➡ 格納系応答解析コードCONTAIN/LMRの系統的な検証・整備

(4) PSA技術の高度化

【主な成果】

- ✓ 「常陽」及び「もんじゅ」の運転・故障データを継続的に収集し、JAEAが整備している高速炉用機器信頼性データベースCORDSの保有データを拡充した。
- ✓ CORDSデータを基に「もんじゅ」等の高速炉PSAにおける機器故障率を推定した。
- ✓ 「もんじゅ」のアクシデントマネジメントの有効性を定量的に示せるPSA手法を整備した。



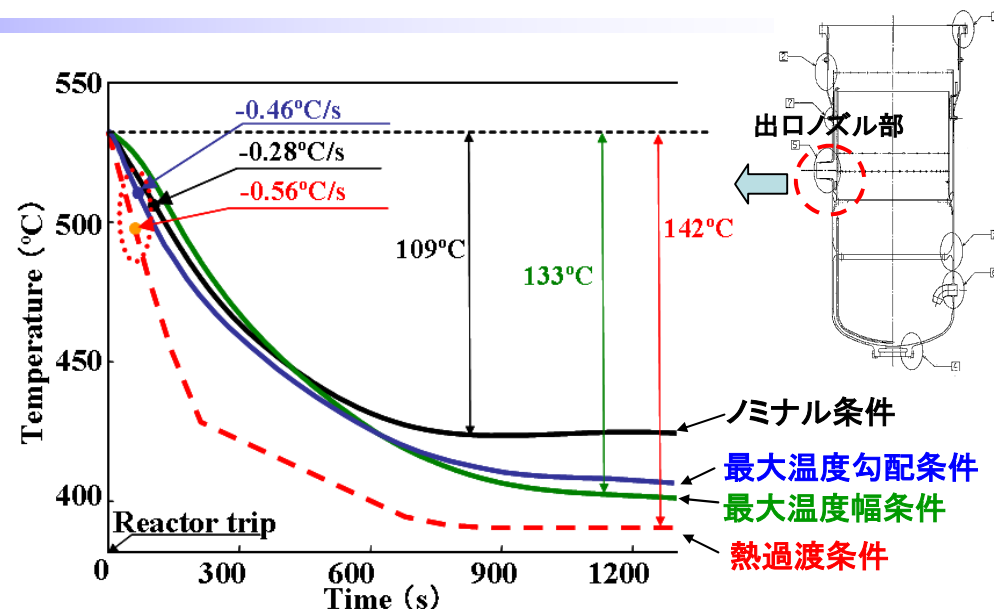
【課題と取り組み、今後の方針】

- ★ 実証炉・実用炉等へのPSA手法適用性検討
 - ➡ 実証炉・実用炉の概念設計に対するPSA手法の適用性検討及び評価条件の設定
- ★ 機器信頼性データの拡充・整備
 - ➡ 「常陽」、「もんじゅ」の機器について運転・故障データを継続・収集

(5) プラント熱過渡に係わる評価技術の整備

【これまでの安全関連研究成果】

- ✓ 前回の「もんじゅ」総合機能試験結果及び性能試験(40%定格条件)をプラント動特性解析コードSuper-COPDより評価した。
- ✓ プラント手動トリップ時の熱過渡解析及び事故解析を実施し、設計データ及び安全評価データが十分に保守側であることを確認した。



プラント熱過渡評価例(手動トリップ条件)

【課題と取り組み、今後の方針】

★出力上昇試験結果によるSuper-COPDコードの検証

- ➡ 今回の性能試験結果によりコード検証を実施する。

★設計余裕及び安全余裕の最適化手法の開発

- ➡ 熱過渡事象に与える影響パラメータの取りうる範囲や組合せの中で設計裕度及び安全裕度が最適となる熱過渡条件を求める手法を開発する。