



# 高速増殖炉の安全性評価技術に関する研究 —開発研究の成果の活用—

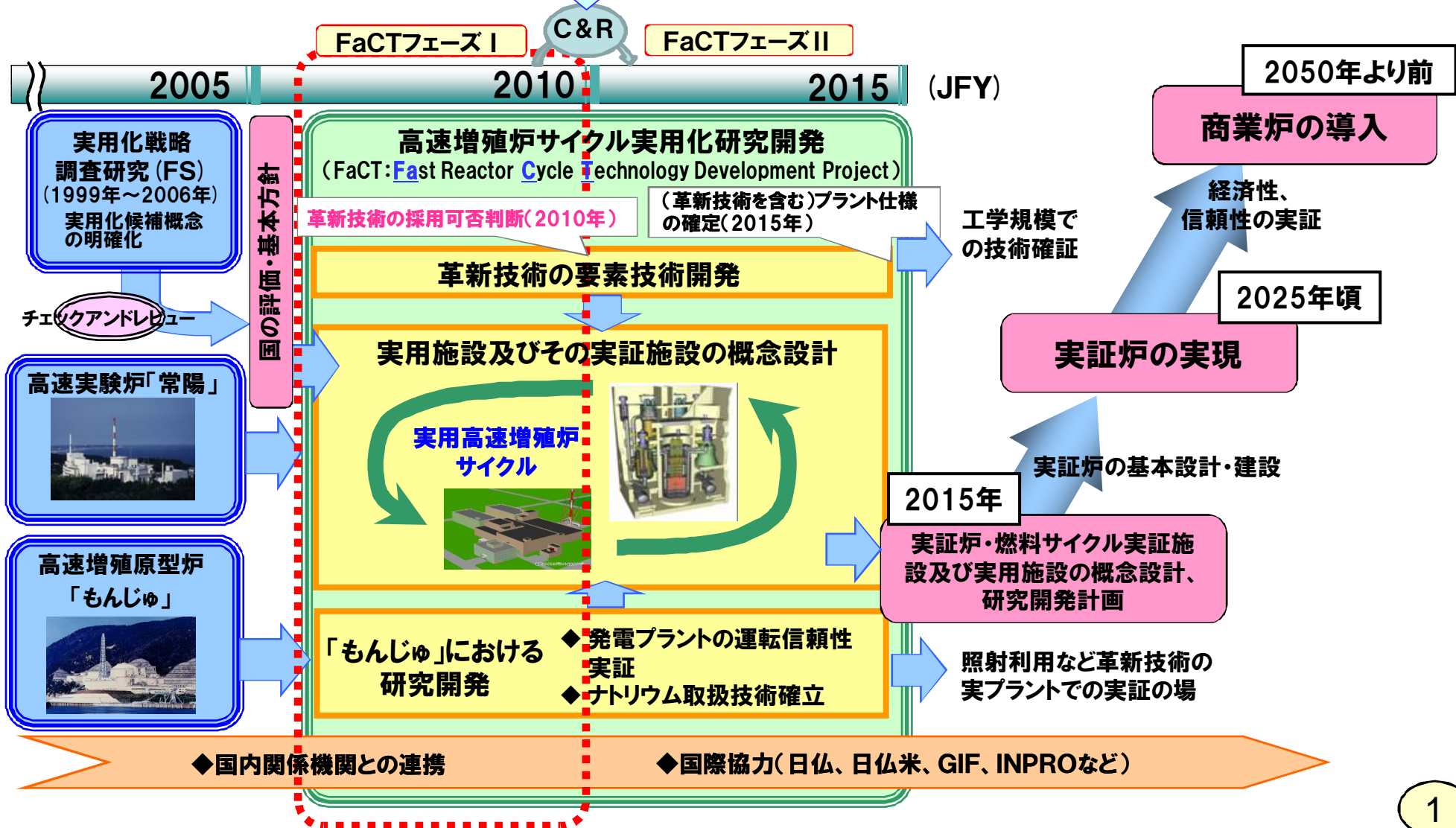
平成22年12月24日

第8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

# FBRサイクルの研究開発計画

＜国の評価＞ ⇒ 研究開発方針の具体化  
 ◆ 革新技術採否判断、性能目標達成度評価を通じたシステム全体の妥当性  
 ◆ フェーズII(2011～2015年度)の研究開発計画の妥当性



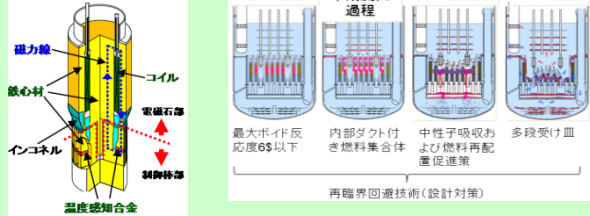
# FBRサイクルの実用化に向けた革新技術の開発

## ①高燃焼度炉心・燃料

2010年度末、2013年度末の2段階でODS鋼に対する代替被覆材開発の要否を含めて再評価し、被覆管材料を選定

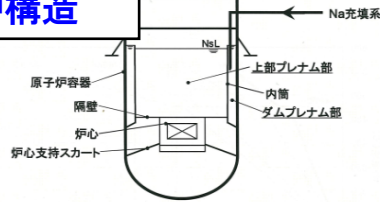
## ②安全性向上技術

(受動的炉停止系(SASS)、再臨界回避技術)

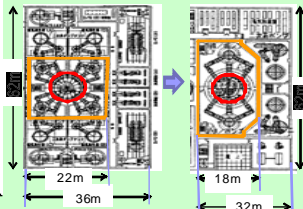


## ③コンパクト化原子炉構造

ホットベッセル及び切込付UISによる原子炉容器のコンパクト化



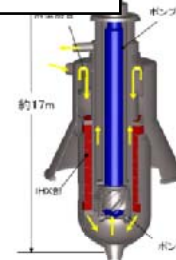
## ④9Cr鋼製大口径配管を用いた2ループシステム



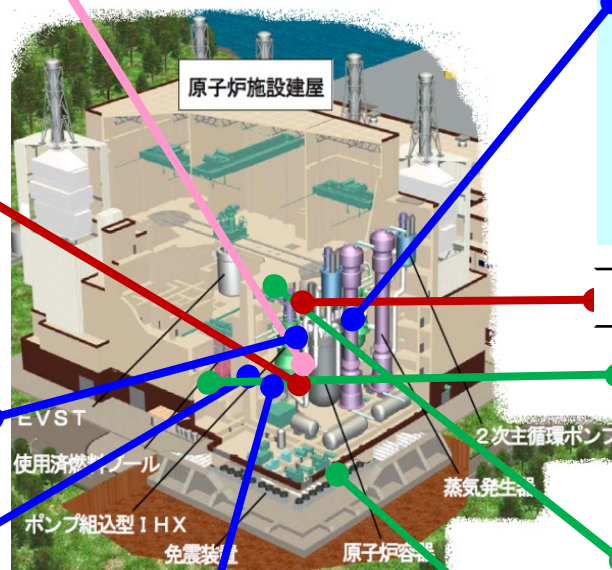
4ループから2ループとすることによる建屋容積の減少

## ⑤ポンプ組込型中間熱交換器

ポンプと中間熱交換器を合体して格納容器をコンパクト化

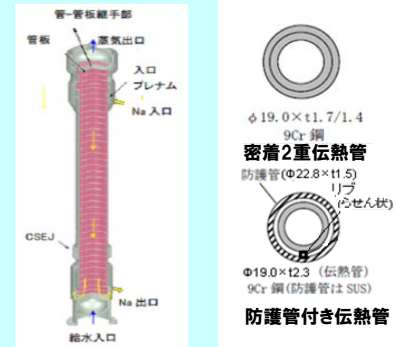


## 炉システムに係る革新技術の採否判断



## ⑥直管2重伝熱管蒸気発生器

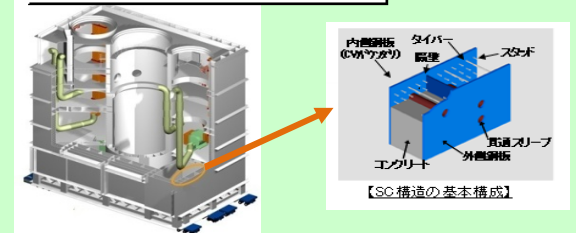
防護管付き伝熱管を採用



## ⑦自然循環除熱式崩壊熱除去システム

## ⑧簡素化燃料取扱いシステム

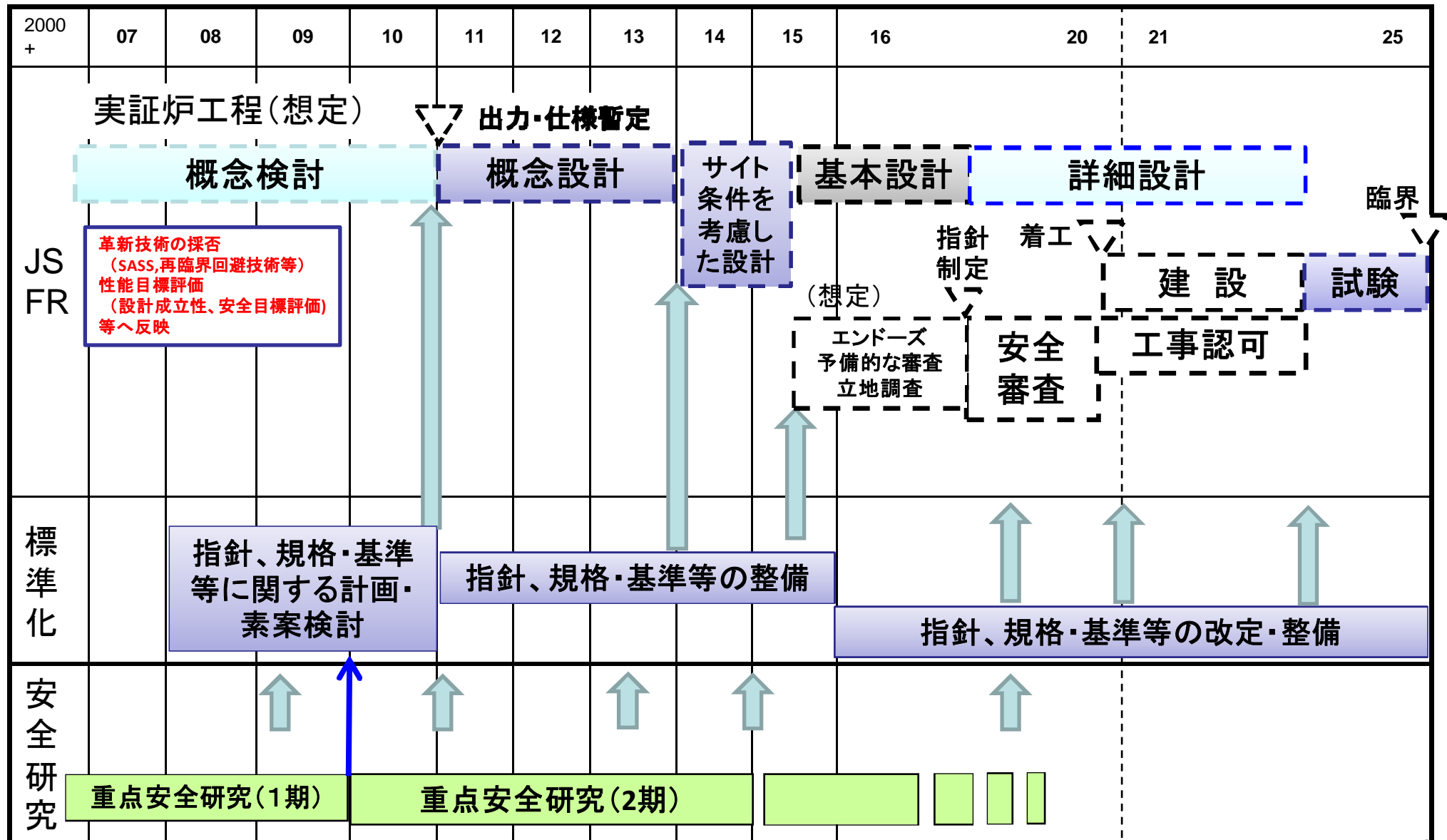
## ⑨SC造格納容器



## ⑩高速炉用免震システム



# 高速増殖炉開発ロードマップのイメージと 重点安全研究の関係





# 前回安全研究審議会からの外部委員による検討の経緯

## 技術内容に関する審議

安全研究専門委員会(平成21年度第2回)  
H22年1月8日

- ・第1期 重点安全研究成果レビュー
  - イ. ナトリウムの化学反応に関する安全評価技術の整備
  - ハ. 炉心損傷時の事象推移評価技術の整備
- ・第2期重点安全研究に関する計画(平成22年度～平成26年度)検討

EAGLE WG H22.2.9

CDAシナリオWG H22.2.17

安全研究専門委員会(平成21年度第3回)  
H22年3月1日

- ・CDAシナリオ成立性に関する検討報告審議
- ・EAGLEワーキンググループ報告
- ・第2期重点安全研究に関する計画(平成22年度～平成26年度)審議

H21年度

CDAシナリオWG H22. 4.28

H22年度

CDAシナリオWG H22. 9.10

安全研究専門委員会(平成22年度第1回)  
H22年12月9日

- 「第2期重点安全研究に関する研究の計画と状況報告」
- ・Na-水反応現象に関する研究計画と進捗状況
- ・炉心損傷時の炉心物質再配置挙動評価手法の開発計画と進捗
- ・PSA 技術の高度化に関する研究計画と進捗状況

EAGLE WG H23.1.17

CDAシナリオWG H23.1.28

安全研究専門委員会(平成22年度第2回) TBD

## 審議状況に関する報告

安全研究審議会(第7回)  
H22年1月27日

- ・高速増殖炉の安全性評価技術に関する研究  
- 次期中期計画に向けて -

安全研究審議会(第8回)  
H22年12月24日

- ・高速増殖炉の安全性評価技術に関する研究  
- 第1期重点安全研究成果と第2期への方針 -

報告

報告

# 第1期重点安全研究計画及びJAEA中期計画

## 【第1期重点安全研究計画(H17～H21)の内容】

高速増殖炉の安全研究については、平成7年12月に発生した高速増殖原型炉「もんじゅ」でのナトリウム漏えい事故を踏まえ、高速増殖炉に特有のナトリウムの取扱いに係わる安全研究及び高速増殖炉の安全設計・評価に必要な取組みを実施することが必要である。

### ○ 高速増殖炉の安全評価技術

原子力安全委員会及び規制行政庁においては、高速増殖炉の安全確保の考え方や安全基準の基本的事項をより一層高度化していくために必要な判断資料の整備等が必要である。

研究内容としては、ナトリウム漏えい燃焼及びナトリウム－水反応に関する知見や試験研究等で検証された評価手法の整備・高度化、高速増殖炉用燃料の安全評価技術に関する研究、シビアアクシデントの評価技術に関する研究等が重要である。

得られる成果は、高速増殖炉の安全確保のための基本的考え方、安全基準の高度化等に活用できる。

## 【第1期JAEA安全研究の内容(～H21まで)】

### <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>

- (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

● 平成17～21年度の主な成果

★ 課題

➡ 第2期の取り組み方針

## (1) ナトリウムの化学反応に関する安全評価技術の整備

- ナトリウム微量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について、引張試験、金相試験等の評価結果をまとめる。

● 平成17～21年度の主な成果

★ 課題

➡ 第2期の取り組み方針

## (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、実用炉での再臨界を回避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。また、除熱性に関する評価結果から原子炉容器内で終息する見通しを得た。
- 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17～21年度の主な成果

★ 課題

➡ 第2期の取り組み方針

## (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受動的安全機能及び地震条件に関する水平免震建屋・機器の故障確率評価手法の開発及び標準化準備

★ 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) プラント異常時の安全評価技術の整備 (第2期より新規)

◆ 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。

★ 40%定格条件及び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。

★ 安全設計評価手法の妥当性確認

➡ プラント異常時の安全裕度を評価し、判断基準に対して十分に余裕があることを確認し、裕度の定量化等を行い、今後の評価手法の高度化へ反映する。

FBR安全研究専門委員会(H22.1及びH22.3)での審議結果に基づき改訂

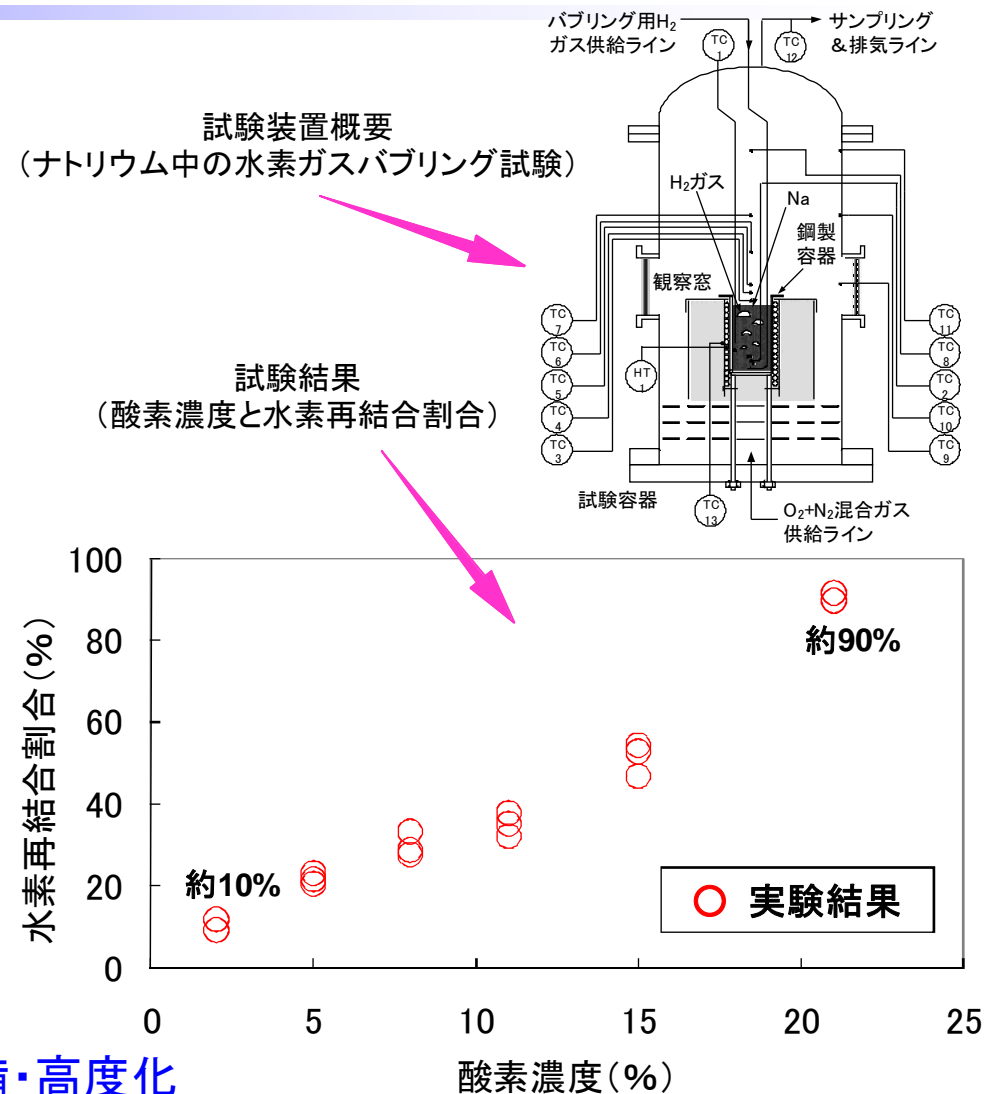
## 【第1期の主な成果】

- ✓ 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(★)と第2期の取り組み方針(➡)】

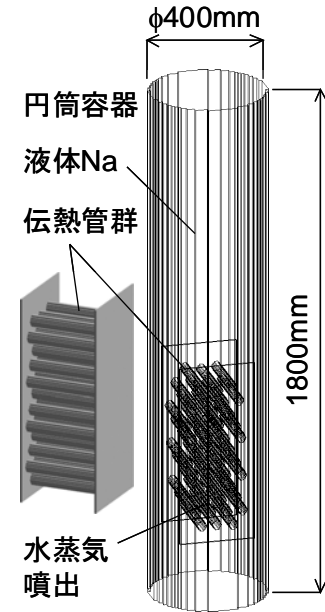
### ★ ナトリウム漏えい燃焼に関する評価手法の整備・高度化

- ➡ 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

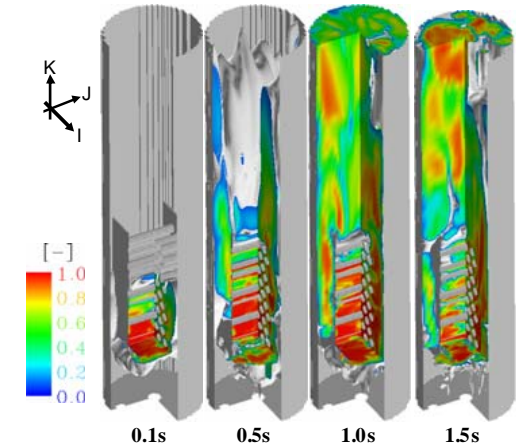


## 【第1期の主な成果】

- ✓ 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。

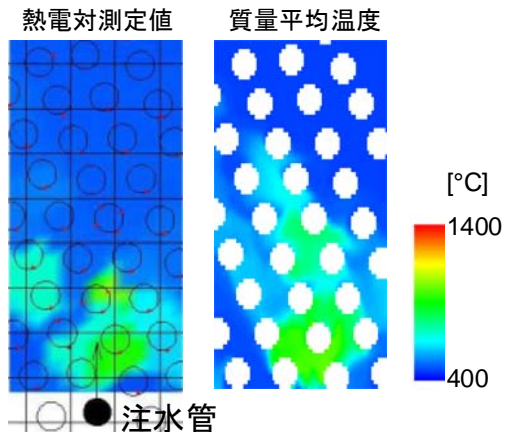


SERAPHIM解析体系



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(★)と第2期の取り組み方針(➡)】

### ★ 現象解明試験の実施

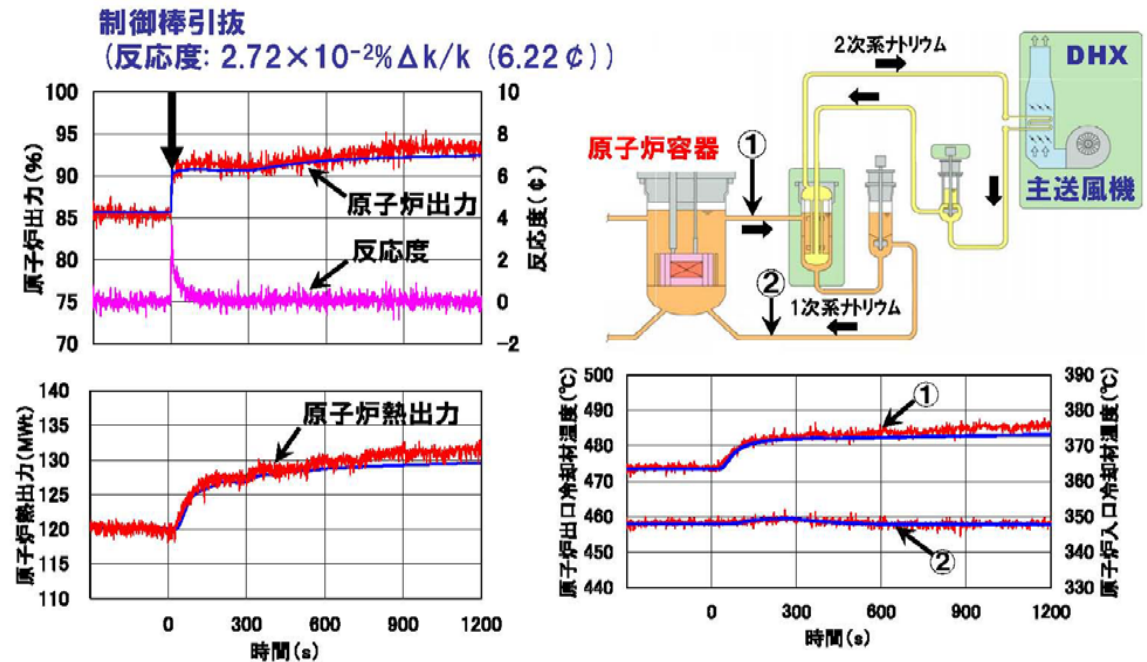
- ➡ 反応ジェットで生じる化学反応現象やセルフ/ターゲットウェスティング、高温ラプチャ現象の解明を進める

### ★ 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

## 【第1期の主な成果】

- ✓ 「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(★)と第2期の取り組み方針(➡)】

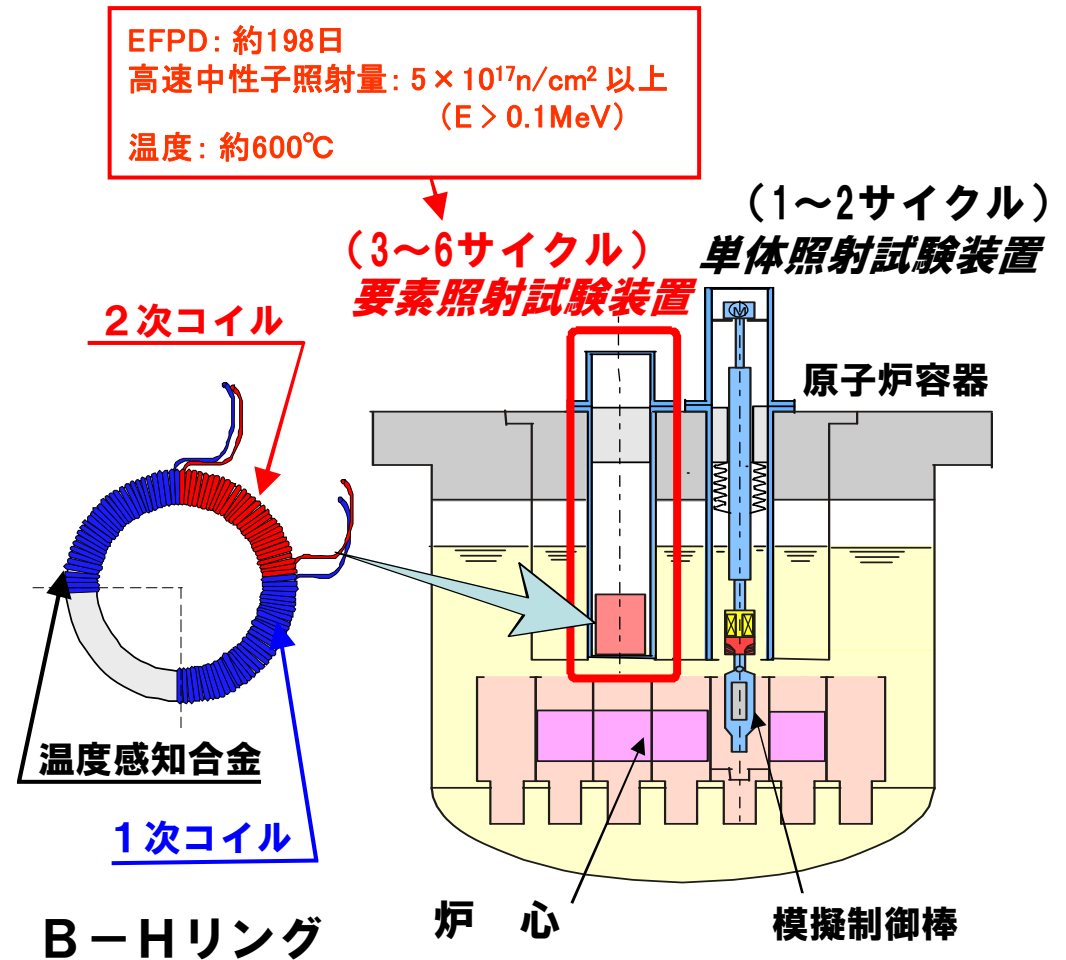
### ★出力運転時のフィードバック反応度の発生メカニズムの検討

- ➡ 蓄積したフィードバック反応度の測定データ及び新たなデータ取得により出力運転時のフィードバック反応度の発生メカニズムについて検討を進めるとともに、再起動後にフィードバック反応度特性試験を実施して解析手法を整備し、その検証を行う。

## (2) ATWS時の炉心損傷防止及び影響緩和特性の実証(2/2)

### 【第1期の主な成果】

- ✓ 「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。



SASS主要構成材料の照射試験

### 【課題(★)と第2期の取り組み方針(➡)】

#### ★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について、引張試験、金相試験等の評価結果をまとめる。

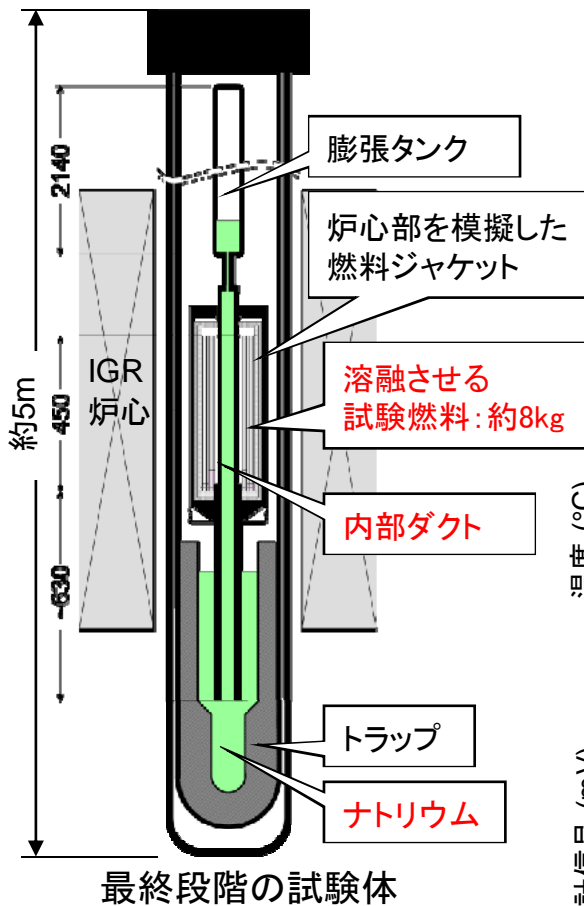
### (3) 炉心損傷時の事象推移評価技術の整備(1/2)

#### 【第1期の主な成果】

- ✓ 再臨界の回避
- ➔ IGR (Impulse Graphite Reactor) 内で約8kgのUO<sub>2</sub>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、再臨界を回避できる見通しを得た。また、除熱性に関する評価結果から原子炉容器内で終息する見通しを得た。

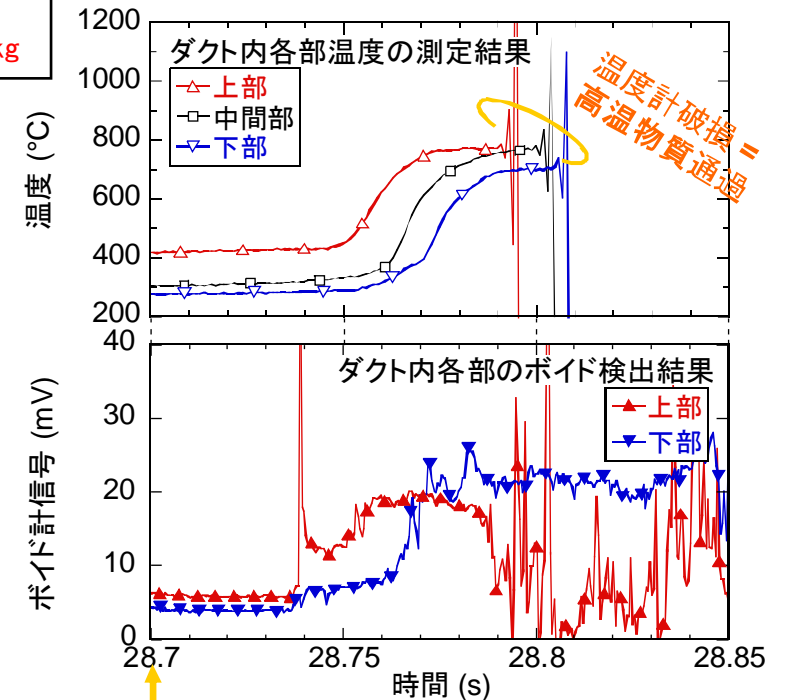
#### 【課題(★)と第2期の取り組み方針(➔)】

- ★ 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



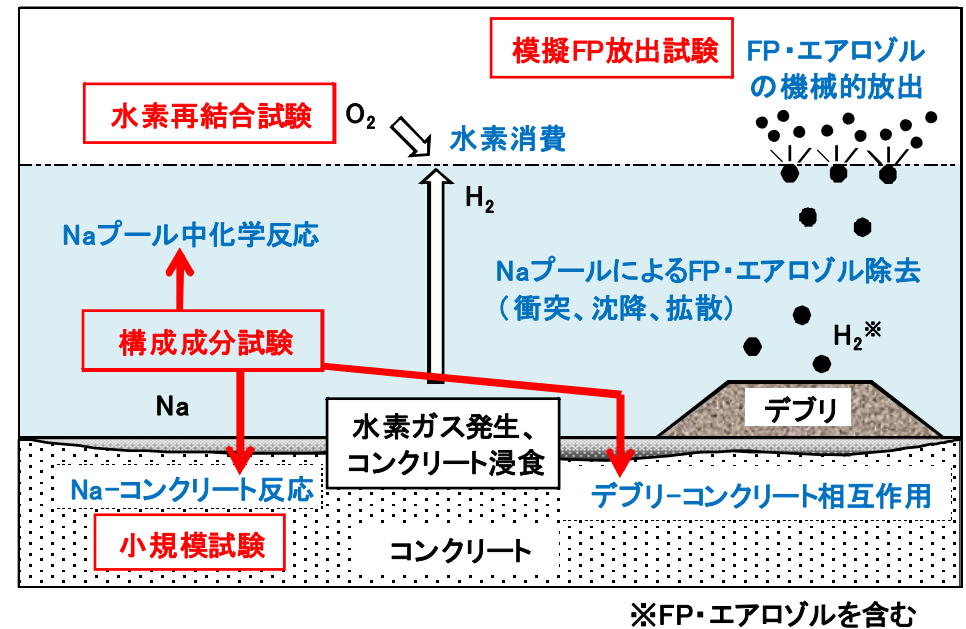
溶融燃料がダクトに侵入

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)

#### 【第1期の主な成果】

- ✓ 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関連計算モデルを改良
  - ✓ 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整備(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

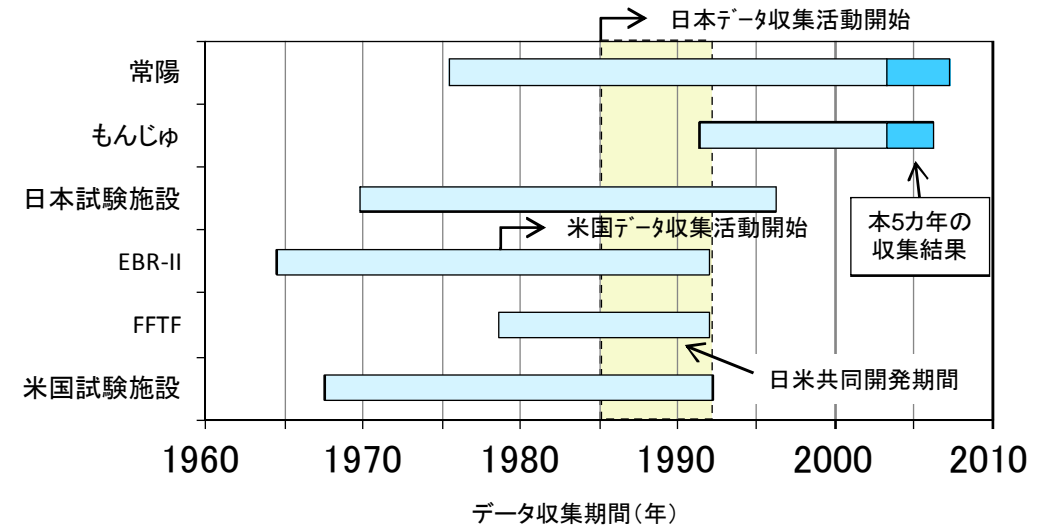
#### 【課題(★)と第2期の取り組み方針(⇒)】

- ★ 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

### 【第1期の主な成果】

- ✓ 「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(★)と第2期の取り組み方針(⇒)】

#### ★ 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受動的な安全機能及び地震条件に関する水平免震建屋・機器の故障確率評価手法の開発及び標準化準備

#### ★ 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

FBR安全研究専門  
委員会H22.3)での  
審議結果に基づき  
改訂



## (5)プラント異常時の安全評価技術の整備 (新規)

### 【これまでの関連する研究成果】

- ✓ 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。

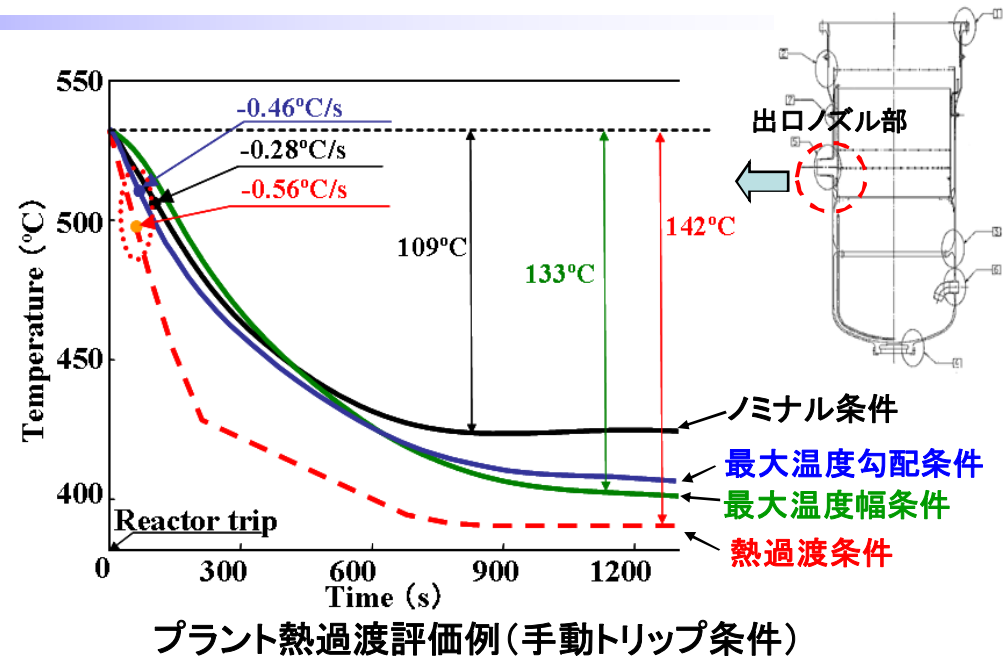
### 【課題(★)と第2期の取り組み方針(⇒)】

#### ★40%定格条件及び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。

#### ★安全設計評価手法の妥当性確認

- ⇒ プラント異常時の安全裕度を評価し、判断基準に対して十分に余裕があることを確認し、裕度の定量化等を行い、今後の評価手法の高度化へ反映する。



## 第2期重点安全研究計画及びJAEA中期計画

### 【第2期重点安全研究計画(H22～H26)】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。

### 【第2期JAEA安全研究(H22～H26)の内容】

＜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) 実機データを用いた過渡変化時のプラント挙動評価技術の整備
- (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) プラント異常時の安全評価技術の整備(新規)

FBR安全研究専門  
委員会(H22.1及び  
H22.3)での審議結  
果に基づき改訂

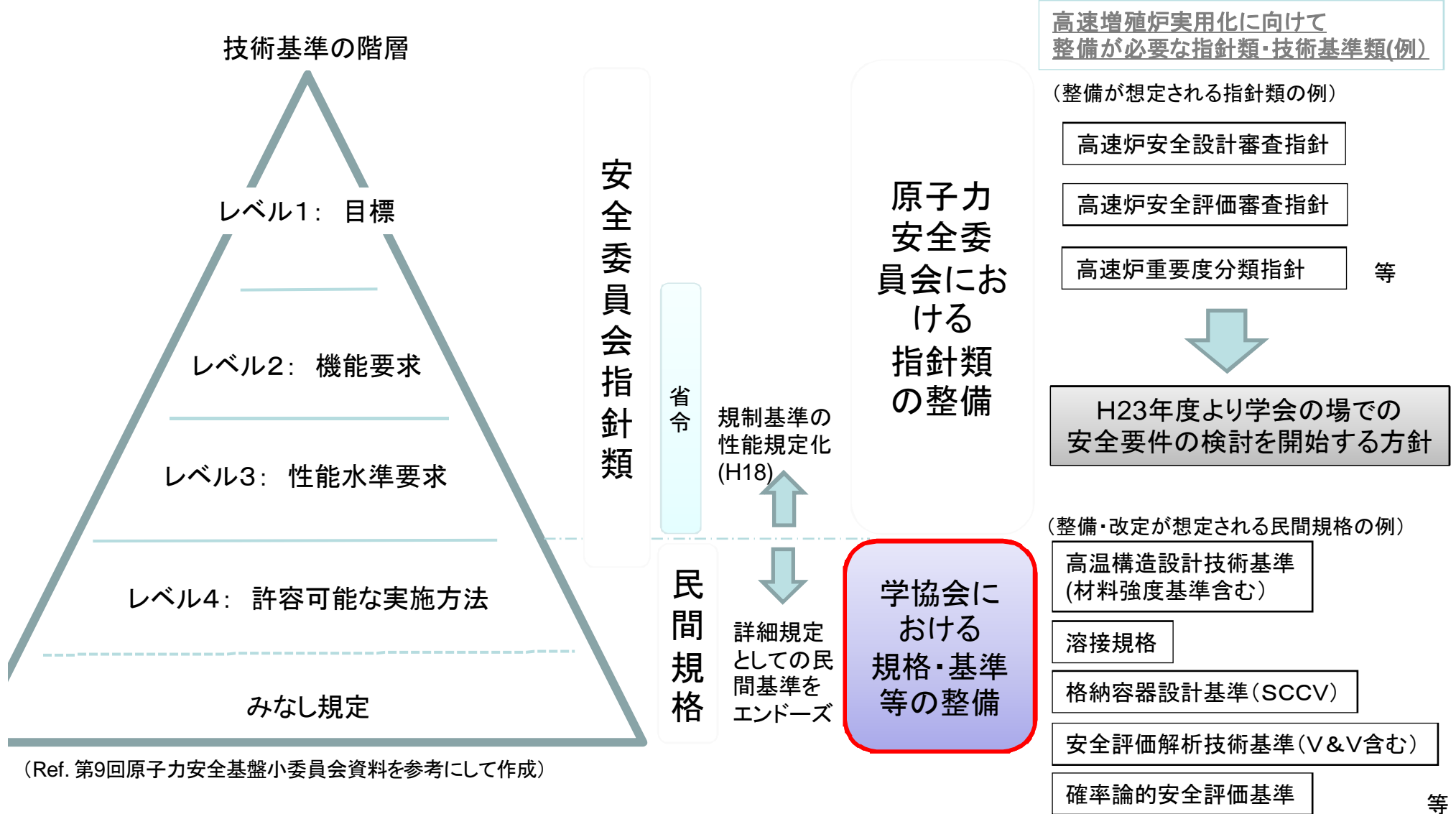


以下補足説明用：

# 高速増殖炉の指針類及び技術基準の体系化

## 指針、技術基準と民間規格の構築イメージ

機構が想定



(Ref. 第9回原子力安全基盤小委員会資料を参考にして作成)

等

# 高速増殖炉の指針類及び技術基準の体系化 指針、技術基準と民間規格の構築体制イメージ



## 第2期重点安全研究計画のJAEA中期計画

### 【第2期重点安全研究(H22～H26)の内容】(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) 実機データを用いた過渡変化時のプラント挙動評価技術の整備
- (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) プラント異常時の安全評価技術の整備(新規)



上記の重点安全研究内容について、以下のJAEA中期計画の実施項目として反映する

- ・ナトリウム冷却高速増殖炉の革新技術の採否判断に必要な技術開発(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)

決定された  
中期計画の  
表現

### 【JAEA第2期中期計画(H22～H27)】(要約)

#### 2)高速増殖炉サイクル実用化研究開発

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、**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、技術の採否を判断する。また、将来のプラントが備えるべき**性能目標達成度を評価**する。
- ② 平成23年度以降は、以下の研究開発を進める。
  - ・**炉システム**については、革新的な技術について、機器・構造の製作性評価、構成要素の機能確認を進めるとともに、**システムとしての工学規模での設計成立性(ここに安全性を含む)を確認**することを目指す。これらの成果を概念設計に反映し、関係五者で「実証炉のサイズを含む仕様及び商業炉に至るまでに必要な炉の基数」を平成27年(2015年)頃に決定するために必要な技術情報をまとめる。
- ③ 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。