



SFR安全標準炉に求められる技術開発の状況

(1) 安全性向上技術の概要

令和2年9月18日

日本原子力学会 新型炉部会

小竹 庄司



目次

1. SFR安全標準炉

- (1)「高速炉開発の方針」、「第5次エネルギー基本計画」「戦略ロードマップ」
- (2) 新型炉部会「高速炉戦略ロードマップ検討会」で提言
- (3)今後の開発の方向性と進め方

2. 開発目標

- (1)原子力エネルギーの持続的利用
- (2)安全性の向上
- (3)経済性の向上
- (4)機動性の確保

3. 技術戦略の視点

- (1)エネルギー安全保障に対する地政学的認識
- (2)ステークホルダーとの合意形成
- (3)蓄積された技術レベルの維持・発展
- (4)建設間隔の経済性への影響
- (5)イノベーションおよび人材の確保
- (6)国際協力による効率的な開発と市場性の確保

4. SFR安全標準炉に求められる安全性向上技術

- | | |
|----------------|---------------|
| 0. 事象分類と安全設計方針 | 1. 自己作動型炉停止機構 |
| 2. 自然循環冷却 | 3. 再臨界回避技術 |
| 4. ナノ粒子分散ナトリウム | 5. 3次元免震装置 |



「高速炉開発の方針」

(2016年12月21日 原子力関係閣僚会議決定)

(我が国の方針)

「エネルギー基本計画」に基づき、**高速炉開発の推進を含めた核燃料サイクルの推進**が基本的方針

(新たに掲げる目標)

- ① **世界最高レベルの技術基盤の維持・発展を図る**
- ② **高い安全性と経済性を同時に達成する高速炉を開発し、将来的な実用化を図る**
- ③ **もって国際標準化に向けたリーダーシップを最大限に発揮する**

(開発の4原則)

【原則 1】国内に蓄積した技術・知見。人材の徹底活用 (**国内資産の活用**)

【原則 2】国際ネットワークを利用した最先端知見の吸収 (**世界最先端の知見の吸収**)

【原則 3】費用対効果の高い、コスト効率的な開発の推進 (**コスト効率性の追求**)

【原則 4】国、メーカー、電力、研究機関が密に連携し責任関係を一元化した体制 (**責任体制の確立**)

(「ロードマップ」の策定による開発工程の具体化)

- ✓ 国内技術によって高速炉発電プラントを設計、建設、運転できる能力を实在プラントシステムとして立証し、主要な設備・機器等に関するコア技術の基盤を既に獲得。この結果、**実証炉の設計段階に向けた開発作業に改めて着手することは十分に可能**
- ✓ 「開発の4原則」に則った開発方針を具体化するため、**2018年を目途に今後10年程度の開発作業を特定する「戦略ロードマップ」を策定**

(今後の国際的な関連技術の展開の不確実性への柔軟な対処)

- ✓ これまでの高速炉開発の経緯も踏まえ、引き続き、**MOX燃料によるナトリウム炉を念頭に高速炉開発を継続していく。その他の技術を巡る国際動向**についても情報収集を継続的に進め、今後の情勢に応じて対応できるよう戦略的な柔軟性を持って対処していく



「第5次エネルギー基本計画」

(2018年7月3日 閣議決定)

(基本方針)

- ✓ 我が国は、資源の有効利用、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減等の観点から、使用済燃料を再処理し、回収されるプルトニウム等を有効利用する核燃料サイクルを推進

(2030年に向けた政策対応)

核燃料サイクル政策の推進の記述概要

- ✓ 使用済MOX燃料の処理・処分の方策について、発生状況と保管状況、再処理技術の動向、関係自治体の意向を踏まえながら、引き続き研究開発に取り組みつつ検討を進める、また、「高速炉開発の方針」に基づき策定されるロードマップの下、米国や仏国と国際協力を進めつつ、高速炉の研究開発に取り組む
- ✓ 核燃料サイクルに関する諸課題は中長期的な対応が必要であり、技術動向、エネルギー需給、国際情勢等の様々な不確実性に対応する必要がある、対応の柔軟性を持たせることが重要

技術開発の推進の記述概要

- ✓ 安全性・信頼性・効率性の一層の向上に加えて、再生可能エネルギーとの共存、水素製造や熱利用といった多様な社会的要請の高まりも見据えた原子力関連技術のイノベーションを促進するという観点が重要
- ✓ 小型モジュール炉(SMR)や熔融塩炉を含む革新的な原子炉開発を進める米国や欧州の取組も踏まえつつ、国は長期的な開発ビジョンを掲げ、民間は創意工夫や知恵を活かしながら、多様な技術間競争と国内外の市場による選択を行うなど、戦略的柔軟性を確保して進める

(2050年に向けたエネルギー転換・脱炭素化への挑戦)

原子力の課題解決方針の記述概要

- ✓ 人材・技術・商業基盤の強化に直ちに着手し、安全性・経済性・機動性に優れた炉の追求、バックエンド問題の解決に向けた技術開発を進めていく



「戦略ロードマップ」

(2018年12月21日 原子力関係閣僚会議決定)

(高速炉開発の意義)

従来、①資源の有効利用、②高レベル放射性廃棄物の減容化、③潜在的有害度（放射能レベル）の低減の3点を意義としてきたが、プライオリティが変化。中長期的には資源の有効利用と我が国のエネルギーの自立に大きく寄与する可能性がある

- ✓ 廃棄物に関する課題は継続的なものであり、高レベル放射性廃棄物の減容化・潜在的有害度低減に対する寄与の観点も重要
- ✓ 米国や英国等では、プルトニウムマネジメントを主目的とした炉の開発も実施されるなど高速炉の意義が多様化されていることにも留意
- ✓ 高速炉に付随するバックエンドへの対応、立地対策や規制対応が必要

(高速炉の導入時期)

- ✓ 高速炉の本格的利用が期待されるタイミングは21世紀後半のいずれかのタイミングとなる可能性
- ✓ 例えば21世紀半ば頃の適切なタイミングにおいて、技術成熟度、ファイナンス、運転経験等の観点から現実的なスケールの高速炉が運転開始されることが期待される

(今後の開発の作業計画)

- ✓ 当面5年間程度は、これまで培った技術・人材を最大限活用し、民間によるイノベーションの活用による多様な技術間競争を促進
- ✓ 2024年以降に採用する可能性のある技術の絞り込みを、各炉型等の技術的な成熟度、経済性や社会環境への適応性、有効性を、国、原子力機構、電力、メーカーの協力を得て実施
- ✓ 関係者の理解が共通化されたタイミングで、現実的なスケールの高速炉の運転開始に向けた工程を検討



「高速炉戦略ロードマップ検討会」

新型炉部会（2017/8～2019/12）

◆ 背景

- 世界は二酸化炭素排出量の大幅削減を目指したエネルギー改革を進めている。それを踏まえ、我が国は「2030年度に13年度比26%減」を国際約定とするとともに、**長期的には「2050年に80%減」を目標**としている[1]
- エネルギー安定供給と二酸化炭素排出量大幅削減を実現していくには、太陽光や風力を中心とした**変動性再生可能エネルギーと原子力エネルギーとの組み合わせが現実的かつ有望**であるとの意見が国内外で示されている[2]

◆ 「高速炉戦略ロードマップ検討会」

- **今後の原子力研究開発の在り方に大きな影響を及ぼす高速炉開発の方向性とその進め方について、原子力学会の行動指針である「研究開発成果の活用、地球環境の保全、人類社会の持続的発展への寄与」の観点から提言する**

➡ **2018年3月に提言し、2018年戦略ロードマップへ反映**

安全技術の世界展開と高速炉の実用化を見通すための経済性実証を行う



安全標準炉

[1]日本の約束草案 2015.07.17 地球温暖化対策推進本部決定

[2] 例えば、総合エネルギー調査会 基本政策分科会、The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World, An Inter-disciplinary MIT Study, 2018、GIF Symposium 2018.Oct., OECD/NEA

[3]原子力関係閣僚会議、「高速炉開発の方針」（2016年12月決定）



高速炉サイクル開発の方向性と進め方



* Safety Standard Demonstration Reactor 規制庁により見直される最新の高速炉に関する法規類 (SDC/SDGも考慮) に合致



2. 開発目標

(1)原子力エネルギーの持続的利用

資源の有効利用（資源量の飛躍的拡大）

ウラン資源の1%程度を利用する軽水炉サイクル（プルサーマル）から、天然ウランの99.3%を占める**ウラン238からプルトニウム239へ核変換**し、ウラン資源の利用率を飛躍的に向上させるとともに、軽水炉では燃焼（核分裂）させることができない**超長寿命核種（マイナーアクチノイド：MA）の燃焼を同時に達成**

ウラン資源の利用率は約1%から約90%以上まで飛躍的に向上

放射性廃棄物の削減と潜在的有害度の低減

- ◆再処理しガラス固化体にすることで、**高レベル放射性廃棄物の発生量を低減**
- ◆**高速炉サイクルへ移行**すると、高い熱効率とマイナーアクチノイド除去によるガラス固化体生成時の発熱制限の緩和などにより、**その低減効果をさらに拡大**
- ◆MAを回収して高速炉サイクルに閉じ込めることで、高レベル放射性廃棄物の**潜在的有害度**が、天然ウランと同等レベルになるまで、**直接処分の10万年オーダから300年オーダまで短縮**できる可能性



(2) 安全性の向上

- 東京電力福島第一原子力発電所事故の教訓として、より**過酷な自然災害への対策及びシビアアクシデント(SA)対策を徹底**
- 同事故を経験した我が国は、**世界の高速炉安全に貢献する責務**
- 第4世代炉国際フォーラム (GIF) では、高速炉開発国の政府間協力として、SFRに対する**国際的な安全設計要件である**
安全設計クライテリア (SDC)
安全設計ガイドライン (SDG)
を我が国が主導して構築

東電福島第1事故の教訓反映

安全目標
基本的安全アプローチ

第4世代炉共通の安全原則

例: 緊急時退避の必要性を回避
例: DiD第4レベル対応・受動的特性活用

第4世代SFRの安全設計クライテリア (SDC)

高温構造 受動安全 他

安全原則を要件化

第4世代SFRの安全設計ガイドライン (SDG)

炉心反応度関連対策
崩壊熱除去関連対策

安全設計クライテリアを解説

炉心系 燃料など	冷却材系 Na水反応対策	格納系 Na火災対策
-------------	-----------------	---------------

各国の規格・基準類



(3) 経済性向上

- 高速炉の実用化段階では、**他の基幹電源と競合できる発電コストを達成することが求められる**
- 高燃焼度燃料及び被覆管材料の開発と長期運転サイクルを可能とする炉心設計、システム設計の簡素化、主要機器のコンパクト化、ナトリウムループ数等の削減等、革新的技術開発により**経済性の向上が不可欠**
- **高速炉サイクルによって達成できる**①燃料増殖、②放射性廃棄物減容と潜在的有害度の低減、③エネルギー資源の備蓄効果、④将来のエネルギー源に対する安全保障、**の4項目に対する経済価値（社会的便益コスト）を評価する研究を進めることも重要**



(4)機動性の確保

- 変動性再生可能エネルギーと共存できる能力 -

- 2050年の脱炭素社会の実現に向けて、**原子力発電と変動性再生可能エネルギー（VRE）が共存できることが必要**
- 現時点では、天候依存で電力需要に応えられないVREには、バックアップ電源が必要であり、化石燃料による火力発電が用いられている
- 将来の脱炭素時代に向けては、大容量バッテリーに期待がかかるものの、大規模に導入されるVREの調整電源とするには経済的に大きな課題
- このため、将来の脱炭素社会の実現に向けては、**原子力発電が安全性と信頼性を損なうことなく、短時間の負荷追従運転によって調整力を確保できることはもとより、原子炉出力を定格にしたままで他のエネルギーへの変換（蓄熱あるいは水素等）して貯蔵できる技術開発を行い、機動性を確保していくことが重要**



4. 技術戦略の視点

(1) 日本的高速炉開発の状況

- エネルギー資源に乏しい我が国は、軽水炉の導入と並行して1960年代から一貫して高速炉サイクル開発を国策として進め、1977年に実験炉「常陽」、1994年に原型炉「もんじゅ」を建設
- 高速炉の実用化は、**1999年からオールジャパン体制で、多様な冷却材、燃料形態、炉型を対象に「高速炉サイクルの実用化戦略調査研究」を実施**。2005年に「ナトリウム冷却MOX燃料高速炉と同燃料サイクル施設」を有望な主概念として選定し、2025年の実証炉建設、2050年頃の実用化に向け「高速増殖炉サイクル実用化研究開発（FaCT）プロジェクト」を展開
- 「もんじゅ」は、設計・建設・試運転の段階までの技術や知見は蓄積されたが、**定格出力運転を達成できず、運転・保守経験等が殆ど得られず廃止措置に至る**。一方 1F事故後FaCTは中断されたが、高速炉の安全性向上に関する設計検討、GIFでの安全設計クライテリア及び同ガイドラインの策定、ASTRID協力が進められた
- これらの経験から、我が国的高速炉技術は、**実証炉の設計段階に向けた開発作業に改めて着手することは十分に可能な技術レベル**に到達（「高速炉開発の方針」）
- 「第5次エネルギー基本計画」では、「高速炉開発の方針」に基づき策定されるロードマップの下、国際協力を進めつつ高速炉の開発を進める
- 「戦略ロードマップ」では、「例えば**21世紀半ば頃の適切なタイミング**において、技術成熟度、ファイナンス、運転経験等の観点から**現実的なスケールの高速炉が運転開始されることが期待**されると記載しつつも、当面は多様な技術間競争を促進し、2024年以降に採用する可能性のある技術の絞り込みを実施し、**関係者の理解が共通化されたタイミングで、現実的なスケールの高速炉の運転開始に向けた工程を検討**する



(2) エネルギー安全保障に対する地政学的認識

- 我が国はエネルギー資源に乏しく、化石燃料資源のみならず**天然ウラン資源も海外に依存**している
- VREである風力・太陽光発電ともに、諸外国に比べて稼働率を年間通じて高くできる気象条件の良い場所も少ない
- 国内で電力系統は閉じていることから、**EU諸国のように電力の輸出入で調整することもできない**
- 一方、高速炉サイクルは技術によって長期に亘り安定したエネルギーを獲得できることから、**我が国では原子力開発当初から高速炉サイクルの実用化を目標**としてきた
- **高速炉サイクルは、技術が生み出す国産エネルギーであり、技術自給率の向上、ひいてはエネルギー自給率の向上に貢献**でき、ウラン資源の価格高騰等によって軽水炉利用が困難になる可能性に備えることができる



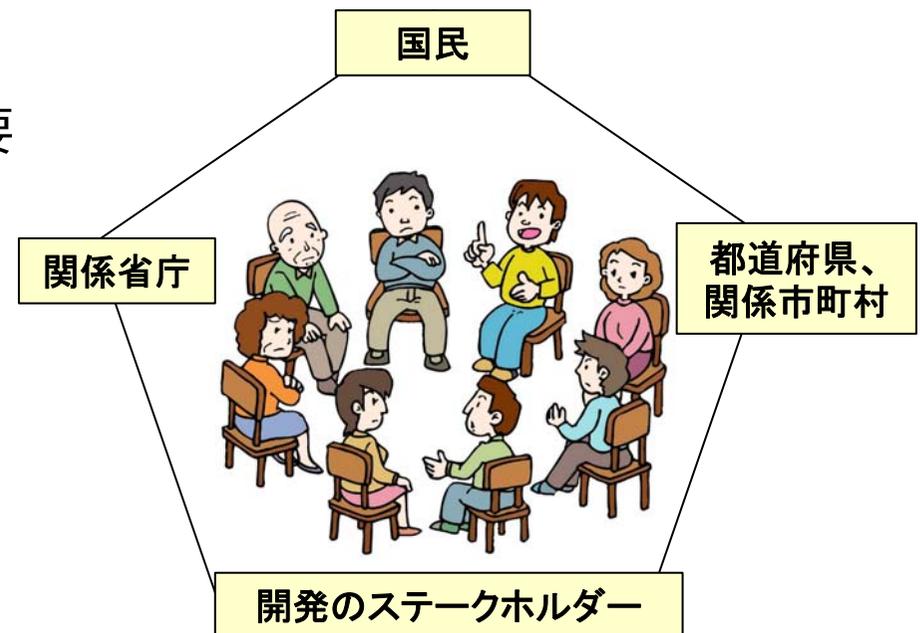
(3) ステークホルダーとの合意形成

■ 高速炉開発の方針(※)

今後の我が国の高速炉開発は、世界最高レベルの技術基盤の維持・発展を図りつつ、高い安全性と経済性を同時に達成する高速炉を開発し、将来的な実用化を図り、もって**国際標準化に向けたリーダーシップを最大限に発揮すること**を目標 (※原子力関係閣僚会議,「高速炉開発の方針」(2016年12月決定))

- 開発のステークホルダーをはじめ、規制機関を含む政府の関係省庁、都道府県、関係市町村、国民の各層において本決定が十分に浸透し、**理解を得た状態で開発を推進**することが重要

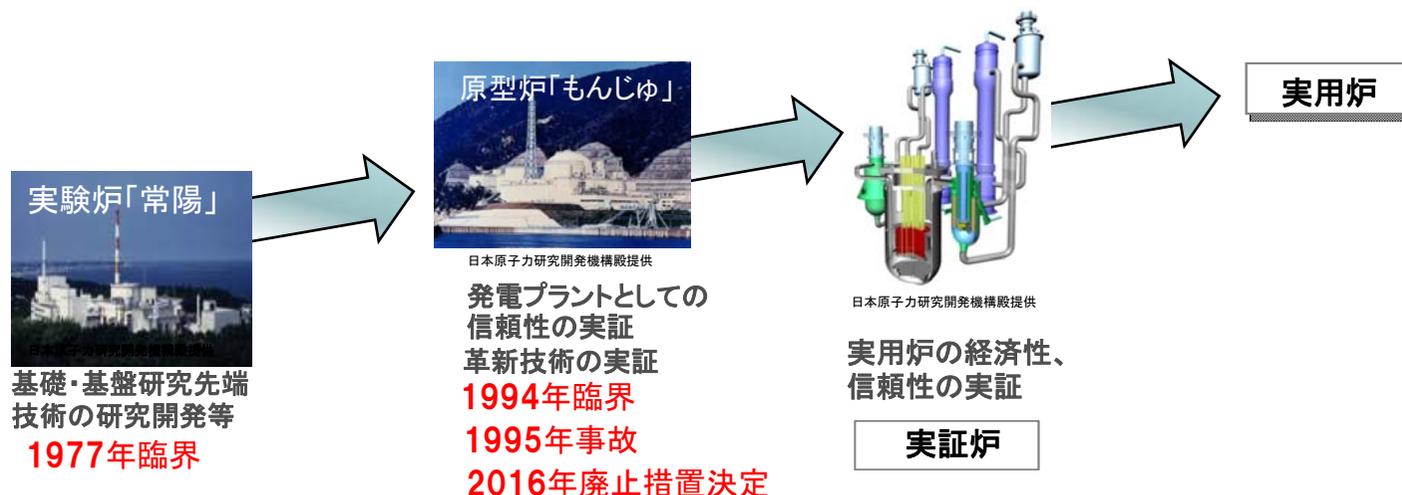
- 特に、高速炉開発は、向こう50年から100年程度の長期的な取り組みが必要となることから、**エネルギー安全保障上の重要性、確保すべき安全性の目標、得られる便益及びコスト等の視点を長期間にわたって共有**できるよう、社会的な合意形成に取り組むとともに、その維持に努めることが重要





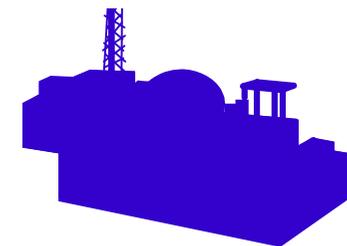
(4) 蓄積された技術レベルの維持・発展

- 我が国に蓄積されてきた高速炉技術は、SFR(MOX)に関するものが殆どである。これまで、実験炉「常陽」及び原型炉「もんじゅ」の設計・建設・運転、それ以降に実施した設計研究と要素技術開発により、**次の実証炉の設計、建設ができるレベルの技術が官民に蓄積されてきた**
- 特に事業者やメーカーが保有する技術の維持は、設計研究や要素技術開発を進めていくだけでは困難であり、**実際的高速炉プラントを設計・建設・運転して初めて実用化に向けた技術の発展が期待でき、人材の確保に繋がる**
- 「もんじゅ」の建設完了から四半世紀経過した現在では、「もんじゅ」の機器製造や建設、試運転に携わった技術者の多くが退職年齢に到達しつつある。**我が国の技術資産を無駄にせず、若手・中堅の技術者へ伝承し、今後の実用化に繋げていく方策を明確にすることが急務**





(5) 建設間隔の経済性への影響



- 米国は、1979年のTMI事故以降、新規軽水炉の設計・建設プロジェクトが途絶。2012年に認可・建設が開始された新規軽水炉は、**主に建設プロジェクト上の問題**（サプライチェーンや現地での設計変更の対応不備の問題も含む）**で建設工期が大幅に遅延しコストが高騰**した。また、フランスの新規軽水炉でも、安全規制による設計変更、原子炉材料の品質保証の問題等により、**建設工期の遅延と建設コストの高騰**が発生
- これらの経験から、原子力発電の経済性は、設計物量に基づいたコストのみならず**安全規制の予見性、主要機器の品質保証、建設プロジェクトの熟練度等が大きく影響**することが指摘された
- 一方、上述したようにロシア・中国は、多くの新規軽水炉の建設を進めており、欧米で発生した工期の大幅遅延や建設コストの高騰は見当たらない。これらの事実は**設計・建設の経験知があるうちに、次期炉の開発に着手することが、技術継承のみならずプラントの経済性を確保する上で有効**であることを示唆



<http://www.jhpson.jp/service/technology.html>



http://tohoku-tec.co.jp/yume_kobo/



<http://www.hitachi.co.jp/recruit/newgraduate/field-navi/power/nuclear/>



<http://www.hitachi-hgnc.co.jp/index.html>



(6)イノベーションおよび人材の確保

- 国際的には萌芽的なものを含めて、様々な冷却材、燃料形態の**革新的な高速炉概念**の研究開発が行われている。これらの**動向について、常にアンテナを高くし、SFRの技術革新へ適用できる可能性**に常に注意を払っていく
- 我が国はSFRの基幹技術の実用化に向けた技術開発とともに、革新炉技術の多様性確保の両者を達成できる研究開発環境を整備し、**自由な発想ができる大学等が中心**となって幅広く多様な概念検討や基礎研究に取り組み、**革新技術の創出と人材の育成**を進めていくことが期待される

(7) 国際協力による効率的な開発と市場性の確保

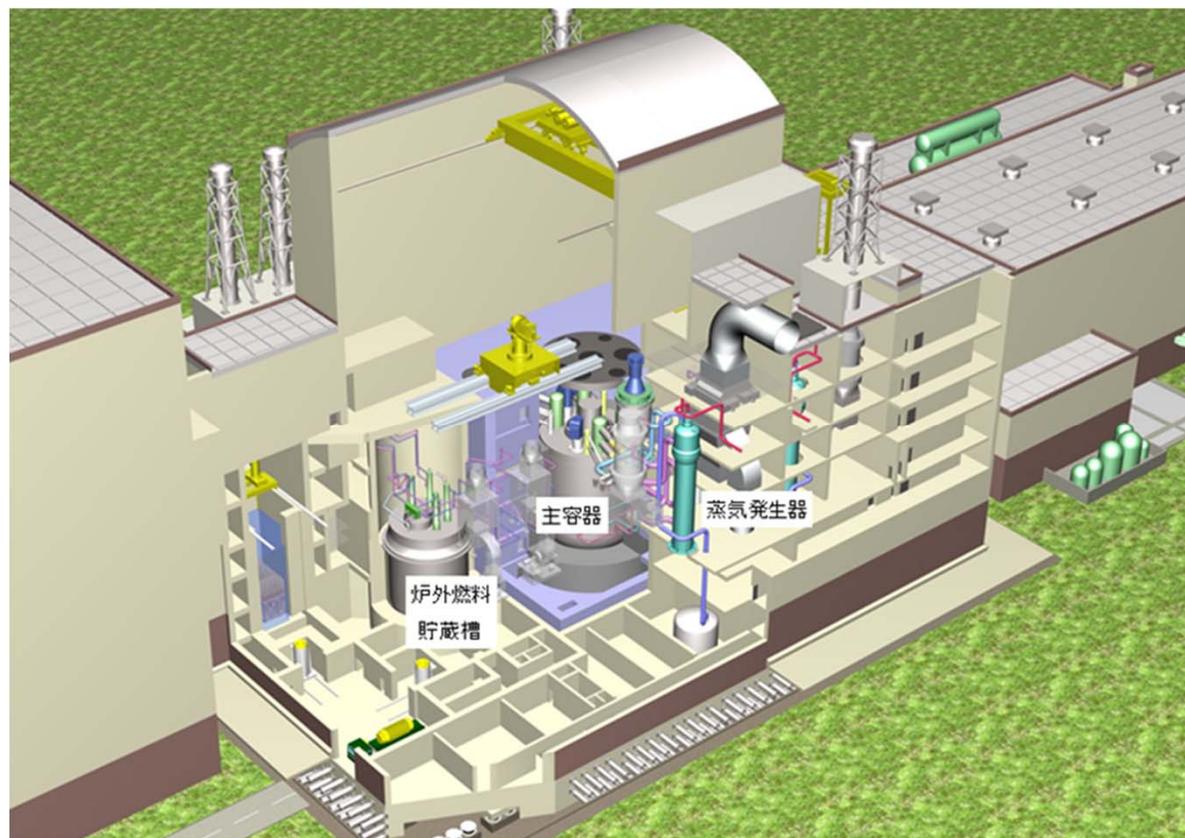
- 長期間を要し、**多額の研究開発資金が必要となるSFR開発では、国際協力を活用して効率的な研究開発を実施**するとともに、海外の運転経験や技術知見の取り込みを積極的に進め、開発リスクの低減を行うことが合理的
- **SFRの安全基準類の世界標準化を目指し**、これに基づく安全設計概念を世界に先駆けて実機で具現化する。そして、その内容や効果を国際的なネットワークを通じて情報発信していくことは、**将来の市場性を確保していく上でも重要**
- 日仏及び日米協力を留まらず、SFR開発を加速している**ロシア、中国、インドとの情報交換等により、安全技術の標準化を先導**し、高速炉の安全性向上に貢献していくことが望ましい



4. SFR安全標準炉に求められる安全性向上技術

■ 1F事故の教訓、SDC/SDGに基づいた安全設計概念の国際標準化

高速炉の安全設計基準類の整備は、1F事故の教訓反映も含め我が国が世界で主導的な役割を担ってきた。**早期にこの安全技術を実証し、国際標準として世界に貢献し、市場の優位性を確保**すべき





0. 事象分類と安全設計方針



(1) 異常・故障の発生防止

(2) 異常の拡大防止及び
故障検知
(3) 事故の制御

(4) シビアアクシデントの管理 (事故
進展の防止、シビアアクシデントの
影響緩和を含む)

	DBE (設計基準事象)	BDBE 防止 (設計基準外事象)	BDBE 緩和 (設計基準外事象)
設計信頼度の目標	10 ⁻² /d 10 ⁻⁴ /d 10 ⁻⁶ /d	10 ⁻¹ ~ 10 ⁻² /d	10 ⁻¹ ~ 10 ⁻² /d
原子炉停止	主炉停止系 ↔ 後備炉停止系	SASS (自己作動型炉停止機構)	再臨界回避炉心 FAIDUSの採用 + 炉容器内デブリ 長期安定冷却
崩壊熱除去	・ガードベッセルと外管による液位確保 ・多重性・多様性があり、自然循環除熱能力を有する崩壊熱除去系 ↔	アクシデントマネジメント	IVR (炉容器内終息)
格納	耐圧・気密性格納容器		

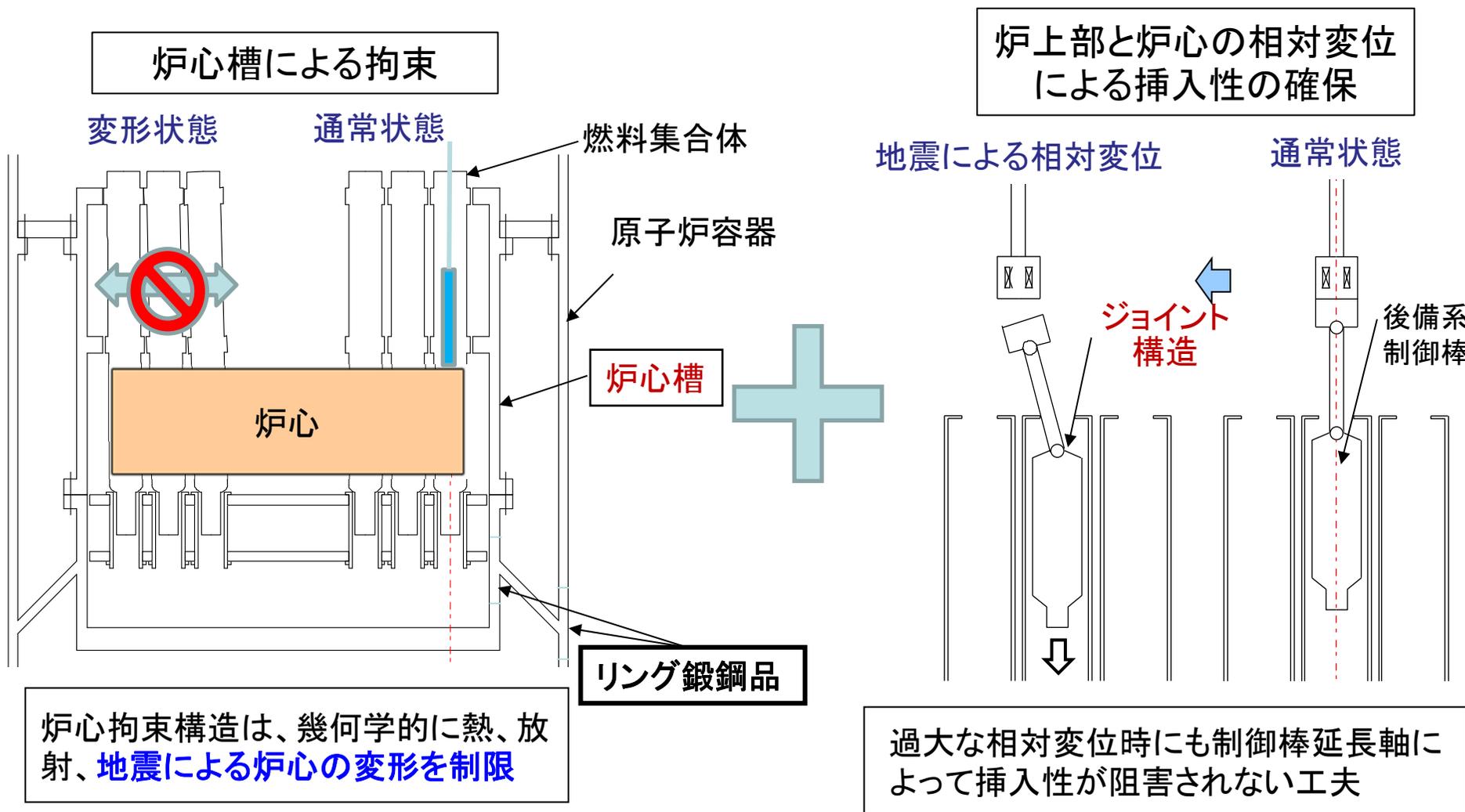
(B)DBE: (Beyond) Design Basis Event
SASS: Self-Actuated Shutdown System
IVR: In-Vessel Retention

ナトリウムの化学的活性に対する方策→ナノ粒子分散Naの採用

- ◆ ナトリウム漏えい→ ガードベッセルと外管による漏えい防止
- ◆ 蒸気発生器伝熱管からの水漏えい→ Na-水反応の検出、早期事象終息

1. 自己作動型炉停止機構：SASS

原子炉停止系の設計



燃料集合体長さは約4m、炉心高さは1m、制御棒は炉心上部で待機

1. 自己作動型炉停止機構：SASS

SASSの特徴

- 過度変化時のスクラム不作動事象 (ATWS)条件化でも炉心損傷に至らせない受動的な炉停止機構
- 制御棒挿入までの反応が早い (1秒以内)
- ナトリウムループを用いた過渡試験で有効性を確認
- 保持力を測定することで供用期間中に定期試験が実施可能
- 「常陽」の通常運転時に誤落下しないことを確認



重力を利用したシンプルな機構によって、ATWS時における不確定さを大幅に削減

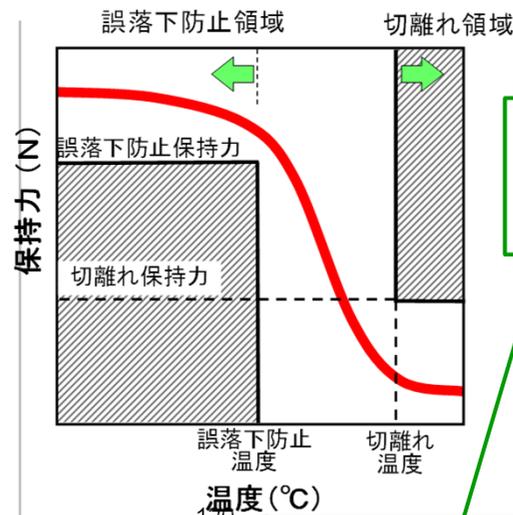
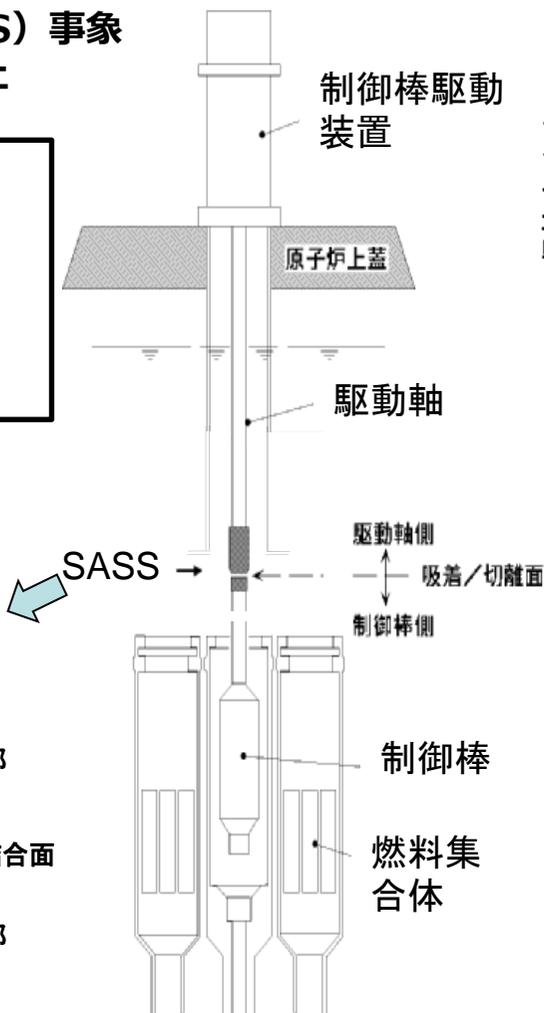
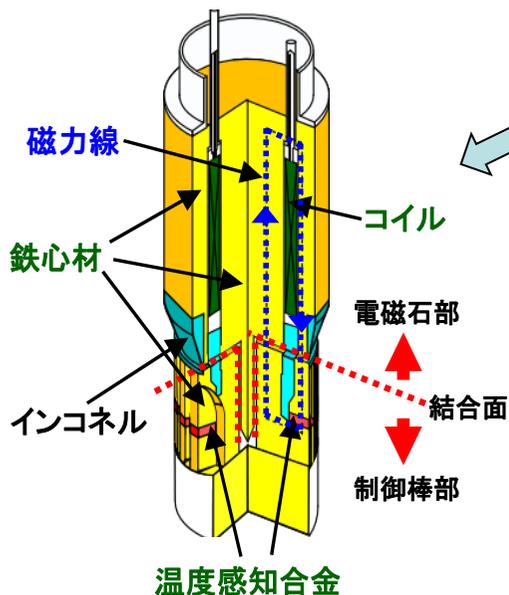


1. 自己作動型炉停止機構：SASS

SASSの仕組みと有効性評価

炉停止失敗（ATWS）事象
時に炉心損傷を防止

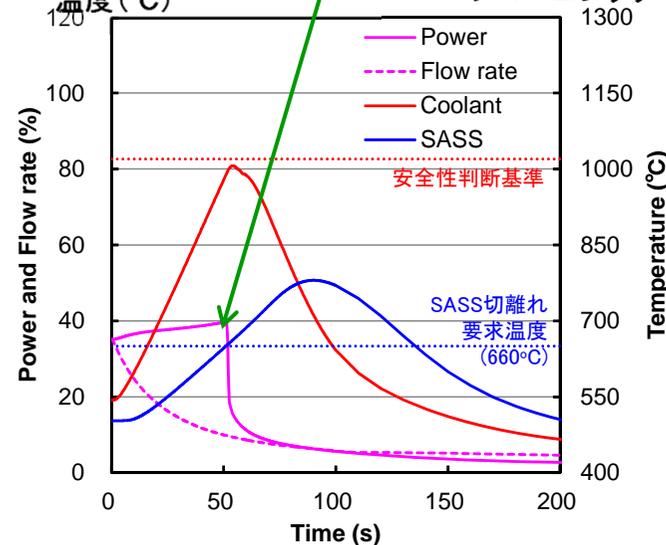
炉心冷却材温度の上昇を利用して、制御棒が切り離され、自重挿入によって炉心損傷を防止する



SASS切離し要求温度で
制御棒の自重挿入開始
→急速な炉停止を達成

判断基準を満足し、
成立性の見通し有り

30%出力LOF型ATWS
フローコレクター改善

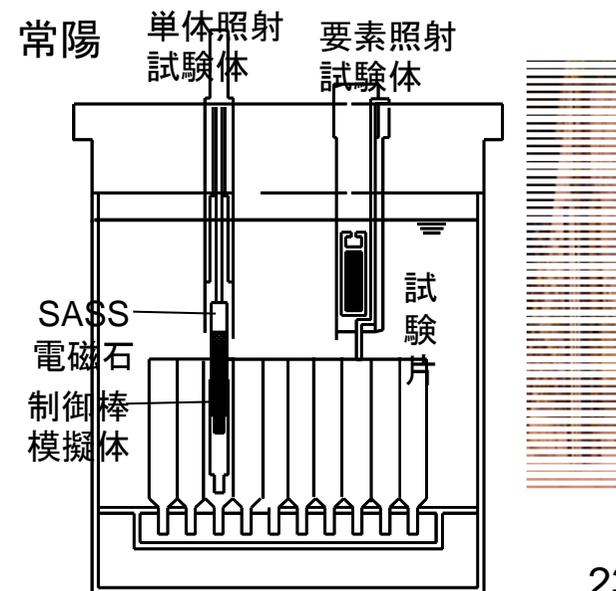
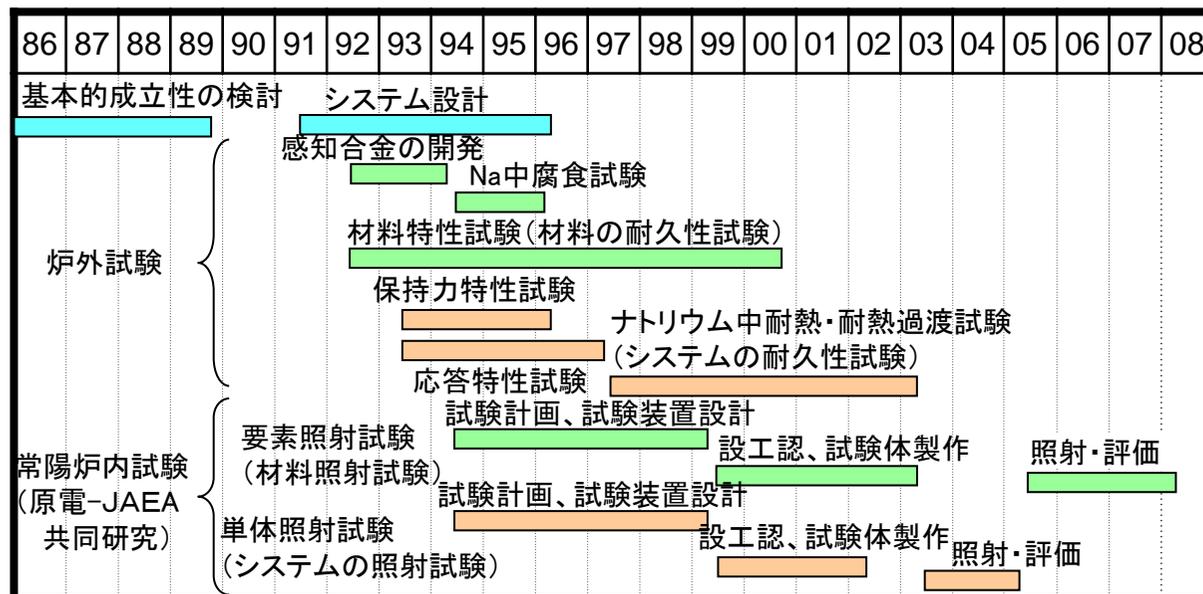


1. 自己作動型炉停止機構：SASS

SASSの研究開発経緯

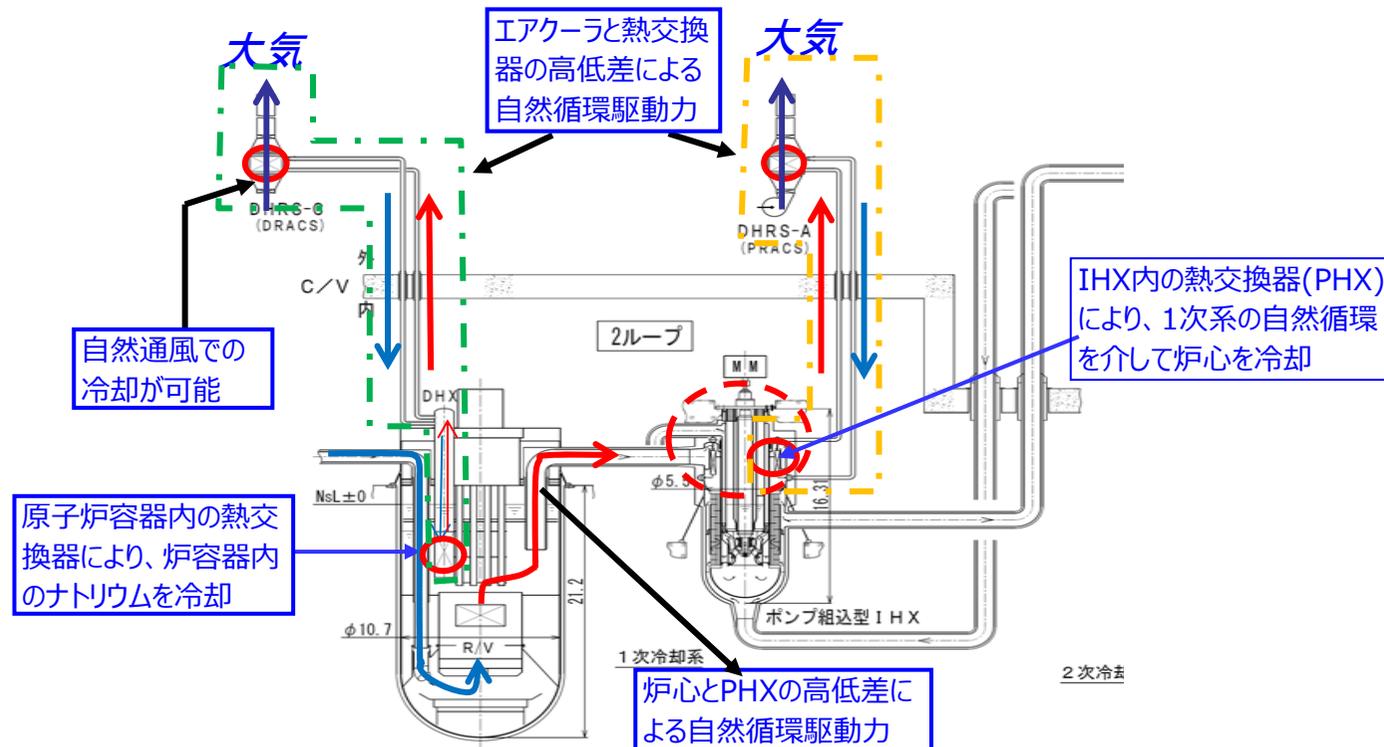
20年を越える研究開発によって、感知合金や鉄芯、コイル等の構成材料の熱時効試験、照射試験等、フルスケールでの過渡応答試験を実施した上で、ATWS解析によって有効性を確認。実験炉「常陽」環境での保持力特性試験（誤落下防止試験）も完了。

- 「常陽」にSASS試験体を設置し、同環境では誤落下しないことを確認するとともに、制御棒の切り離しを保持電流で確認できること、切り離し後の接合等の操作可能であること等の試験検査性を確認
- 今後の実機の設計が決まった段階で、寸法調整、感知合金温度の確認及び、SASSの過渡応答特性に関する信頼性を向上させるために、制御棒に隣接する燃料集合体からのナトリウム流れを感知合金部に誘導するフローコレクタの設計を行い、その実証試験の必要性について判断することが必要



2. 自然循環冷却

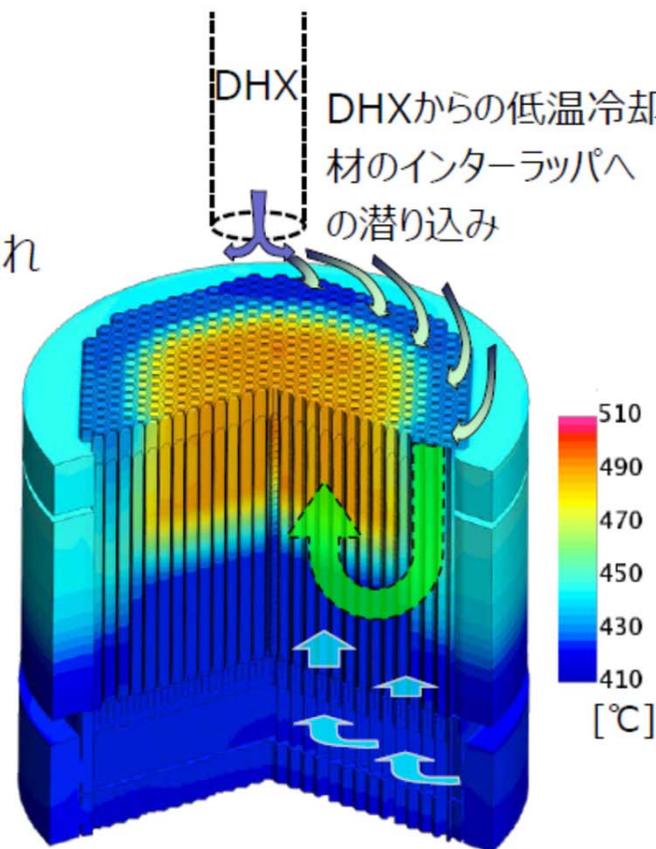
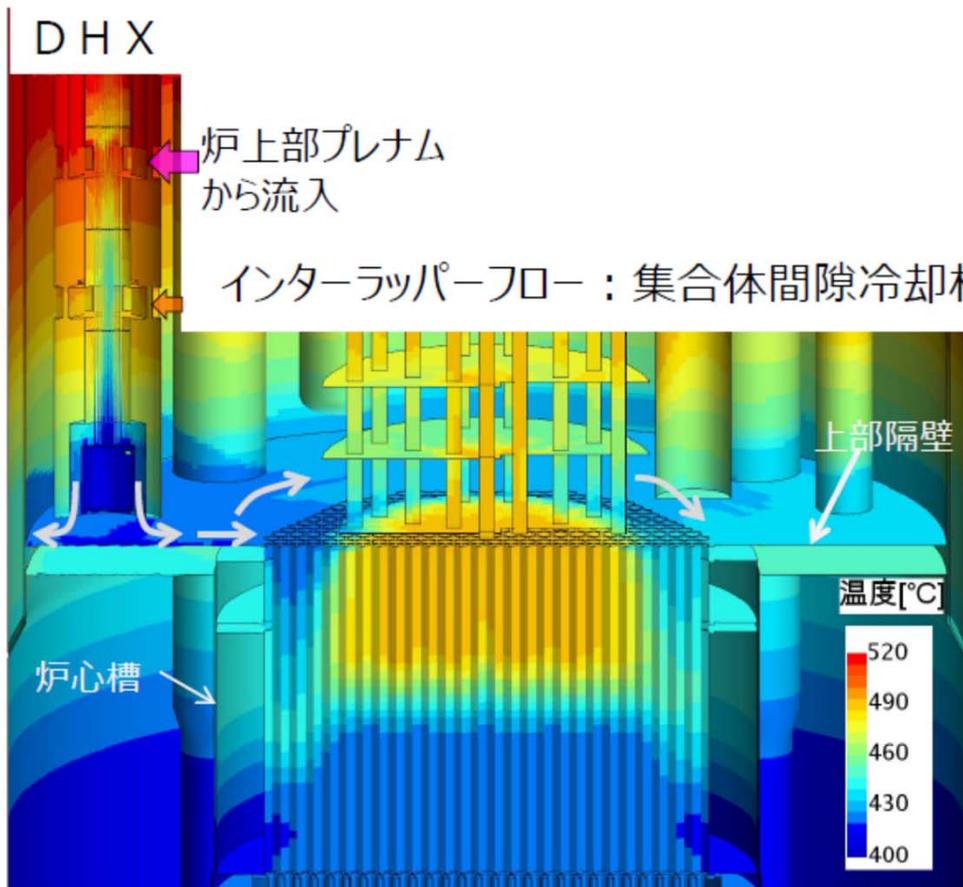
- 沸点が高く、低圧系であるため、バウンダリ破損時にも減圧沸騰が生じない
配管破断を想定しても炉心冷却材の喪失がなく、冷却材注入が不要
→バウンダリ破損に対してガードベッセル等の静的機器による冷却材確保が可能
(高圧系の軽水炉に必要となる高圧・低圧注入設備が不要)
- 高温で熱伝導性に優れた冷却材ナトリウムは、大気を最終ヒートシンクとできる
→自然循環によって、炉心崩壊熱を長期間安定に除去することが容易
(循環に必要なポンプ、電源、貯水タンク等が不要)





2. 自然循環冷却

浸漬型DRACSの過渡解析例； インターラッパフローによる自然循環熱除去能力

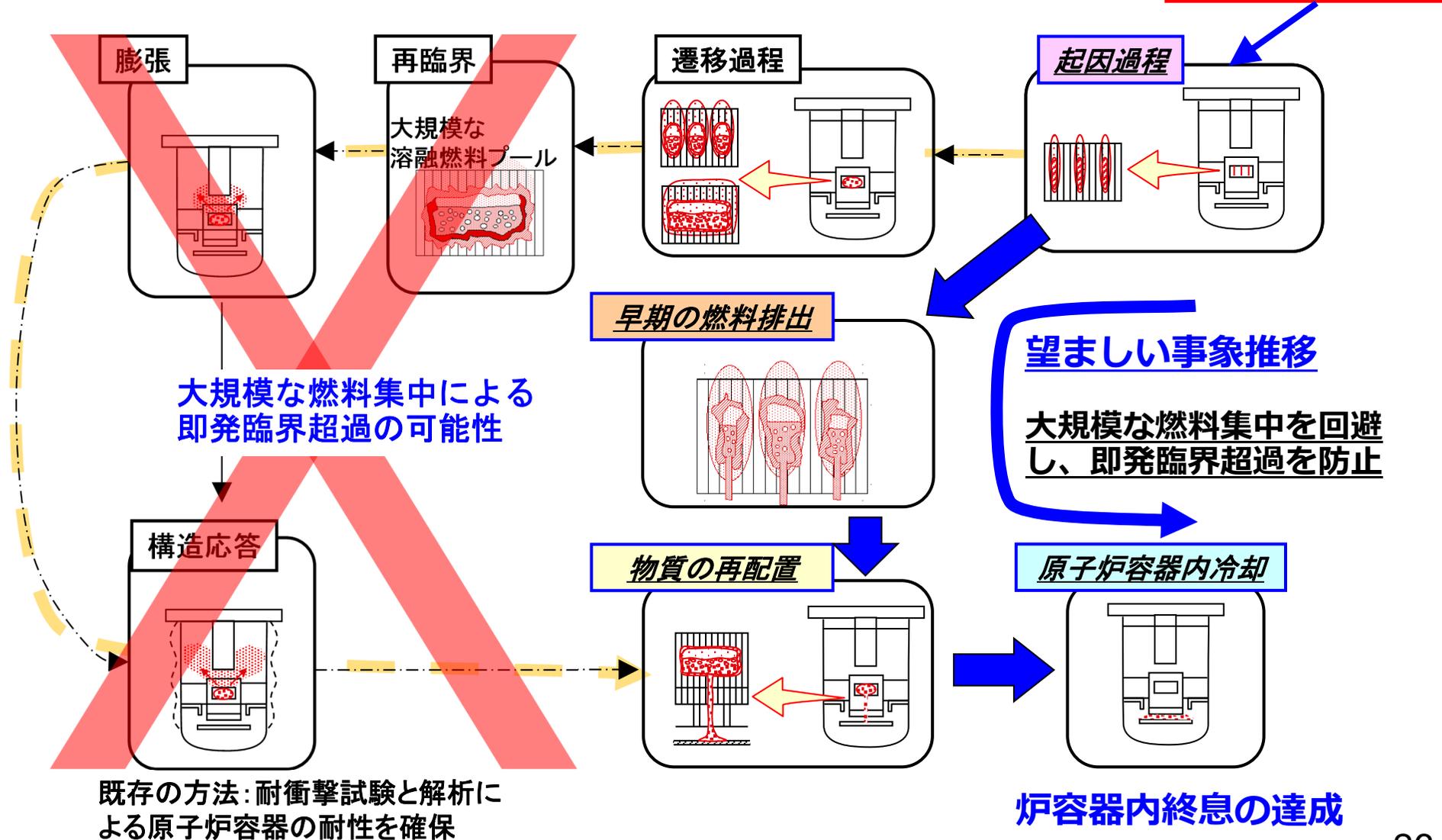


- インターラッパフロー除熱量：約8.8 MW[t] (4800秒時点)
- 炉心発熱の約36%がインターラッパフロー除熱

- ← 集合体内流れ
- ← インターラッパフロー

3. 再臨界回避技術

事象進展の過程で即発臨界超過に至らない設計対策 **ATWS/CDA**



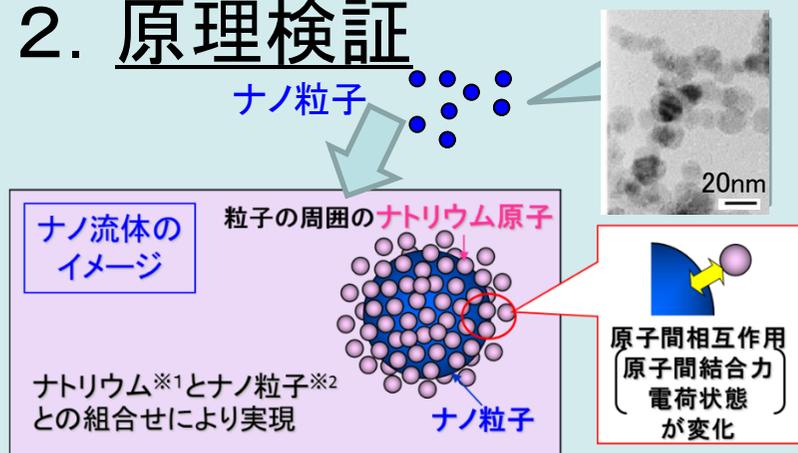
1. 基本概念

- (1) ナトリウム中に金属ナノ粒子を分散させることによって生じる原子間相互作用により反応抑制を実現※¹ (特許5364948,特願2010-41414, 2010-44382)
- (2) ナノ粒子を微細化することにより、低分散量でも膨大な比表面積となるので、ナトリウムが有する優れた伝熱流動性を損なわない※²

【成果】※¹: The preparation and physical properties of liquid sodium containing titanium nanoparticles, JNR, vol.14, (2012).

※²: Study on Chemical Reactivity Control of Sodium by Suspended Nanoparticles II, JNST, vol.47, (2010).

2. 原理検証



※¹: 電子を離し易い性質

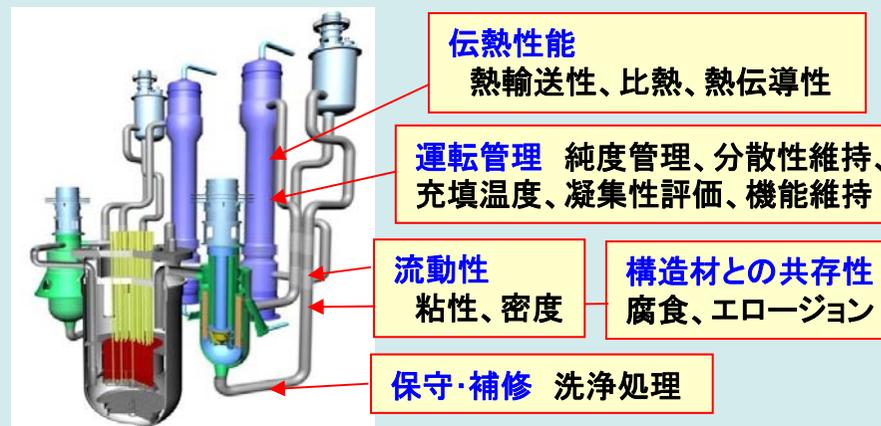
※²: 高い電気陰性度(電子を引付けようとする性質)の金属

- 理論推定(計算)⇒ 実験検証(物性)⇒ 反応抑制(速度/熱量)
- 構造解析(XAFS)、状態観察(Na中TEM)、相変化(融解/固化)...

...他を実施し、原理を検証済み

【成果】Study on Chemical Reactivity Control of Sodium by Suspended Nanoparticles I, JNST, vol.47, (2010).

3. 基本的適用性検証



ナノ粒冷却材としての伝熱流動性の維持を確認

【成果】 Study on Chemical Reactivity Control of Sodium by Suspended Nanoparticles II, JNST, vol.47, (2010).

10nm級のナノ粒子(Ti)、僅か1 vol.%濃度で、反応抑制と伝熱流動性の両立を確認

5. 3次元免震装置

■ **大型高速炉への適用または原子炉容器等の肉厚低減を目的として、積層ゴムに、皿ばね・上下減衰装置を組み合わせた3次元免震装置を開発中**
従来までに開発された要素技術の組合せにより構成

