資料８－５

５．(2) 高速炉の実証技術の確立に向けた研究開発と研究開発の成果の最大化を目指した国際的な戦略立案

平成30年12月27日

日本原子力研究開発機構
高速炉・新型炉研究開発部門

高速炉開発について

- 資源が乏しく、国土の狭い日本では、エネルギー安全保障及び放射性廃棄物の減容化・有害度低減の観点から、高速炉サイクル技術開発は大変重要

- これらの課題解決に向けて、「もんじゅ」、「常陽」の原子力施設、東海、大洗の試験施設において、研究開発等を着実に推進してきた。

3.11 東日本大震災 福島第一原子力発電所事故

「もんじゅ研究計画」（平成25年9月）

- 高速増殖炉の成果の取りまとめ
- 廃棄物の減容及び有害度の低減
- 高速増殖炉／高速炉の安全性強化

「第4次エネルギー基本計画」（平成26年4月）

- 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、長期的かつ計画的に講ずべき施策として**核燃料サイクル政策の推進**を基本方針とする。

高速炉研究開発の第３期中長期計画（平成27年～平成33年）

・「もんじゅ」における研究開発　・高速炉サイクル技術の研究開発　・放射性廃棄物の減容化/有害度低減の研究開発

高速炉開発の方針
「もんじゅ」の取扱いに関する政府方針
（平成28年12月21日原子力関係閣僚会議決定）

「第5次エネルギー基本計画」（平成30年7月）

- 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**核燃料サイクルの推進**を基本的方針としている。

＜新たに掲げる目標＞
・更なる安全性の向上
・開発段階を含めた経済効率性の追求
・国際協力を通じた最先端の知見の獲得

「戦略ロードマップ」（平成30年12月21日）

第３期中長期計画【H27年度～H33年度】

5. 高速炉の研究開発

(2)高速炉の実証技術の確立に向けた研究開発と研究開発成果の最大化を目指した国際的な戦略立案

1) 高速炉の実証技術の確立に向けた研究開発

燃料・材料の照射場としての「常陽」等を活用しながら、実証段階にある仏国ASTRID炉等の国際プロジェクトへの参画を通じ、高速炉の研究開発を行う。

枢要課題であるシビアアクシデントの防止と影響緩和について、冷却系機器開発試験施設（AtheNa）等の既存施設の整備を進め、目標期間半ばから試験を実施し、シビアアクシデント時の除熱システムの確立や炉心損傷時の挙動分析に必要なデータを取得する。また、その試験データに基づく安全評価手法を構築する。

高速炉用の構造・材料データの取得及び評価手法の開発を推進するとともに、機構論に基づく高速炉プラントシミュレーションシステムの開発、それに必要な試験技術と試験データベースの構築等の安全性強化を支える基盤技術の開発を進める。

2) 研究開発成果の最大化を目指した国際的な戦略立案と政策立案等への貢献

高速炉研究開発の国際動向を踏まえるため、世界各国における高速炉研究開発に関する政策動向や研究開発の進捗状況等について、適時調査を行い、実態を把握する。また、実証プロセスへの円滑な移行や効果的・効率的な資源配分を実現できるよう、機構内部の人材等の資源の活用とともに、機構も含めた我が国全体として高速炉技術・人材を維持・発展する取組を進める。

3) 高速炉安全設計基準の国際標準化の主導

高速炉の安全設計基準の国際標準化を我が国主導で目指す観点から、高速炉の安全設計基準案の策定方針を平成27年度早期に構築し、政府等関係者と方針を合意しながら、第4世代原子力システムに関する国際フォーラムや日仏ASTRID協力等を活用して、高速炉の安全設計基準の国際標準化を主導する。

次頁以降の資料の構成

- 個別の研究開発テーマごとに、以下の5項目の構成にて記載

【目的・目標（ねらい）】
中長期目標期間（平成３３年度まで）の目的・目標

【実施内容・スケジュール】
上記の目的・目標を達成するための実施内容とスケジュール

【平成２７～２９年度の実施内容と成果、実績、達成度】

【平成３０年度の成果見通し】

【効果・効用】

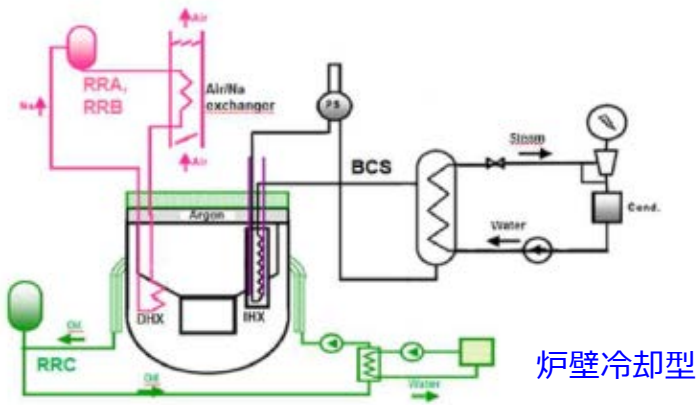
1) ASTRID開発における設計協力（1/2）

【目的・目標（ねらい）】
我が国における高速炉開発とASTRIDで仕様共通化可能な系統・機器で、我が国の技術でASTRIDの系統・機器を開発することにより実証技術を確立するとともに、国際標準化に繋げる。日仏共同評価等によりタンク型炉の設計技術を吸収し、我が国における高速炉の技術開発に役立てる。

【実施内容・スケジュール】

- 強制循環型崩壊熱除去系、受動的炉停止機構、免震システム、炉上部機構、ポーラーテーブル、コアキャッチャー、プラント過渡解析、原子炉容器構造健全性、CFV炉心の炉心特性の炉心遮へいの9項目について、基本設計を固めるための設計詳細化作業を実施
- 日仏設計共通化のための日仏設計要求と主要設備に関する仕様共通化に関する検討を実施

原子炉容器内熱交換器設置型
- 強制循環型 ⇨ 日本が分担、設計
- 自然循環型



炉壁冷却型

	2015	2016		2019	～2021
設計協力	概念設計	基本設計			調整期間*
			日仏設計共通化検討		

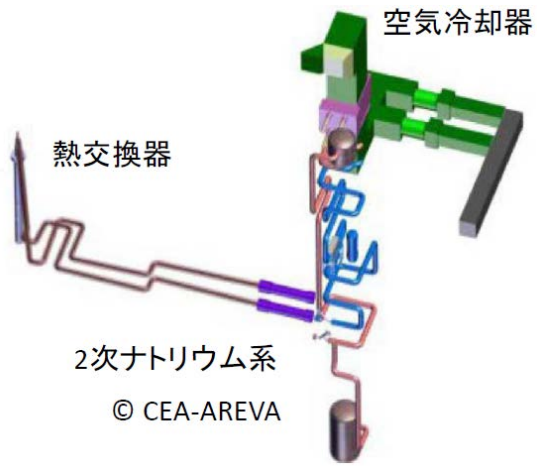
＊：基本設計以降の協力実施の判断については今後仏側と協議

設計協力における日本の分担例（ASTRIDの崩壊熱除去システム）

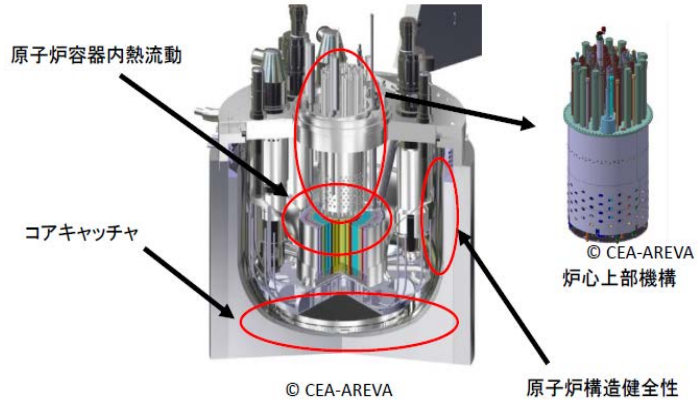
1) ASTRID開発における設計協力（2/2）

【平成２７～２９年度の実施内容と成果、実績、達成度】

- 崩壊熱除去系について、補助系や配置を含めてタンク型炉に適合した信頼性の高い強制循環方式の設計概念を構築し、ASTRID設計に採用された。
- 温度感知合金を用いた受動的炉停止機構について、我が国の技術をタンク型炉に適用し、通常運転時は制御棒を安定保持し、異常時に所定温度で動作する構造を具体化し設計概念を構築し、ASTRID設計に採用された。
- タンク型炉に適合した免震システムの設計概念を構築した。
- 機器のアクセス孔を有しメンテナンスも考慮した大型スチール構造物であるポーラテーブルについて、日本の大型機器の製作技術の適用により設計概念を構築した。
- コアキャッチャー上のデブリの冷却性と臨界性、炉心上部機構の製作性、炉内の熱流動やガス巻き込み、地震時のスロッシング、炉心耐震、炉容器支持部の健全性等の評価を通して、タンク型炉に適合する設計概念を構築した。
- 我が国の高速炉技術開発に資することを目的とした日仏の設計共通化については、基本設計要求についてほぼ合意し、炉心燃料や原子炉構造の設計共通化のための論点と検討計画の明確化を図った。
- 以上の設計協力の取組みを通して、新たなタンク型炉の設計知見を獲得し、我が国にも適用可能な設計オプションを拡充できた。



強制循環型崩壊熱除去系



原子炉構造

【平成３０年度の成果見通し】

- ASTRID計画の変更にともない、ASTRID（600MWe）の設計検討は平成29年度で終了。一方、日仏仕様共通化については、設計検討計画に合意して、実施機関間取決めの最終年（平成31年）までのワークプランを策定する見通し。

【効果・効用】

設計成果が採用される等、国際的な評価を得た。また、我が国の高速炉開発に反映可能な設計成果とタンク型炉の設計技術に関する知見が得られた。

1) ASTRID開発におけるR&D協力（燃料分野）（1/2）

【目的・達成目標（ねらい）】

我が国の高速炉の実証技術の開発に資するため、「仏国次世代炉計画及びナトリウム高速炉の協力に関する実施取決め」（平成26年8月締結）に従い、日仏ASTRID協力を通じて、燃料・材料分野の高速炉技術についての日仏共同研究開発を進める。

【実施内容・スケジュール】

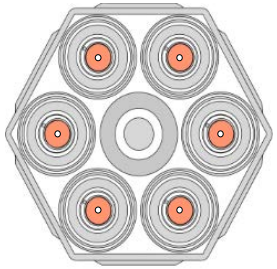
- F2 ： 「もんじゅ」におけるASTRID燃料確証照射試験の可能性検討
- F3 ： 「常陽」におけるASTRID燃料ピン照射試験の可能性検討
- F4 ： 燃料設計解析コードのベンチマーク
- M1 ： 電子ビーム溶接によるフェライト鋼製ラッパ管の異材溶接開発
- M2 ： 長寿命制御要素の開発
- M3 ： 高燃焼度燃料用ODS被覆管の開発
- M4 ： 「常陽」におけるMgO反射ピン照射実験の可能性検討

	H27	H28	H29	H30	H31~H33
F2	照射条件検討、燃料要素と集合体の概念設計			▼もんじゅ廃炉により終了	
F3	照射条件検討、試験用燃料要素とリグの概念設計、照射試験の準備				▼技術評価、継続判断
F4	燃料設計解析コードのベンチマーク			▼日仏双方でベンチーマークの対象となるデータが準備できるまで中断	
M1	情報交換	EB溶接試験、溶接継ぎ手の熱時効特性評価			▼適用見通し評価、継続判断
M2	照射条件検討、試験用制御要素とリグの概念設計、B_4C共同調達検討、次期研究計画に関する協議				▼技術評価、継続判断
M3	情報交換	日仏材の横断的なR&D（機械特性試験等）、次期研究計画に関する協議			▼継続判断
M4			照射条件検討、試験用反射体要素とリグの概念設計		▼技術評価、継続判断

1) ASTRID開発におけるR&D協力（燃料分野）(2/2)

【平成27~29年度の実施内容と成果、実績、達成度】

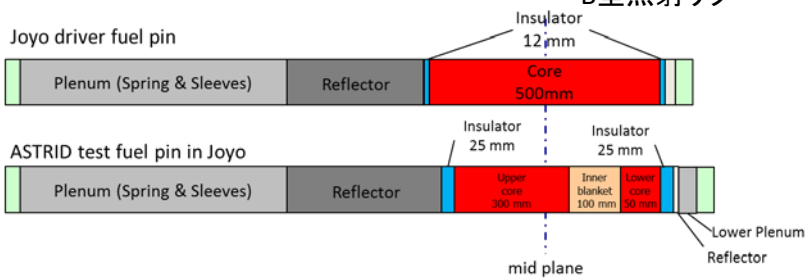
- F2 ： 照射条件の検討、燃料要素と燃料集合体の概念設計を実施し、照射健全性に関する見込を得た。
- F3 ： 照射条件の検討、試験用燃料要素とリグの概念設計を実施し、照射実施に向けての検討継続判断を得た。
- F4 ： 日仏双方の燃料設計解析コードによるベンチマークを実施し、仏コード適用物性・モデル等の詳細情報、Phenix照射試験データを取得した。
- M1 ： JAEAのEB溶接技術をEM10/316SSに適用し、優れた機械的特性を示すデータを取得
- M2 ： 100ＭWth出力に対応した照射条件の検討、試験用制御要素とリグの概念設計実施
- M3 ： 日仏ODS鋼の基本特性を共同評価し、両国材の基本性能を把握
- M4 ： 照射条件の検討を実施



B型照射リグ

【平成30年度の成果見通し】

- F2 ： 平成29年度末で終了
- F3 ： 常陽の炉心設計や仏側要求事項等に適合した照射条件の検討、試験用燃料要素とリグの概念設計結果を提示
  また、燃料構造設計基準の検討等の試験準備を進める。
- F4 ： 平成29年度末から中断中
- M1 ： 溶接部の高温長時間環境での健全性実証データの取得
- M2 ： B_4Cの共同調達の可能性に関する検討結果を提示
  日仏共同で実施する次期研究計画の立案
- M3 ： 日仏材の交換試験を継続実施。日仏ODS鋼仕様統一化を視野に入れた次期研究計画の検討
- M4 ： 仏側の要求事項を満たす照射条件を継続検討。試験用反射体要素及びリグの概念設計結果を提示



「常陽」におけるASTRID燃料ピン照射試験の可能性検討

【効果・効用】

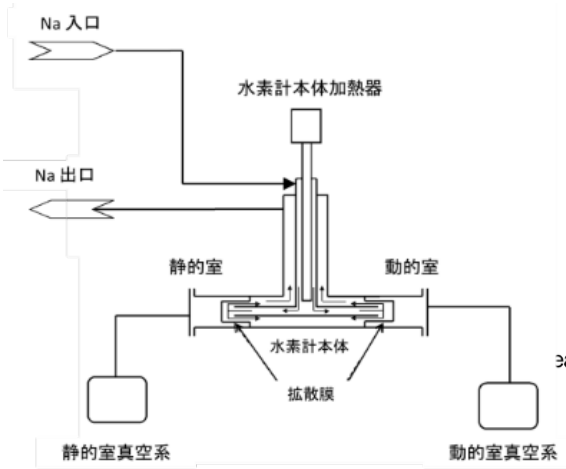
情報交換、共同試験等を通じて高速炉用燃料・材料開発分野において相互に有益な知見が得られ、高速炉の実証技術の確立や我が国の高速炉技術の国際競争力の向上に貢献する。また、常陽利用計画を策定した。

1) ASTRID開発におけるR&D協力（炉技術分野）（1/2）

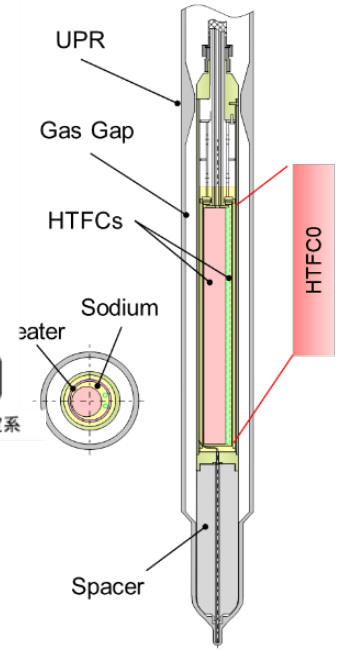
【目的・目標（ねらい）】
　我が国における高速炉開発とASTRIDの共通技術について日仏共同でR&Dを進めることにより、安全設計の根拠となるデータ取得や評価手法の開発など安全性向上技術を中心とした高速炉の技術開発を合理的に進める。

【実施内容・スケジュール】

- 構造材料分野（316LN鋼クリープ試験・オーステナイト鋼低照射試験情報交換）
- 熱流動分野（シミュレーション技術検証データ取得等）
- 計装技術分野（炉内中性子計装・水素計・遠隔操作技術）
- ナトリウム技術分野（Na洗浄技術・Na-水反応、AtheNaを用いた試験計画）



水素計試験装置系統図（イメージ）



常陽での中性子計測機器のための照射リグ（概念図）

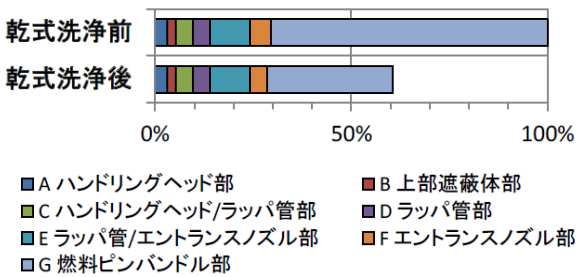
	2015	2018~	2019 ~2021
R&D協力	計画立案・過去の試験データの交換	試験を含む研究開発の実施	データ拡充・実証試験等＊

＊：基本設計以降の協力実施の判断については今後仏側と協議

1) ASTRID開発におけるR&D協力（炉技術分野）（2/2）

【平成２７～２９年度の実施内容と成果、実績、達成度】

- 構造材料技術については、長時間にわたる高温クリープ疲労強度データの拡充のための日仏双方の試験実施、低照射材料の強度試験データの交換によるデータベース拡充により、基盤データを強化した。
- 計装技術については、炉内中性子検出器を「常陽」で照射するために必要となる照射試験用リグに関する検討、水素計試験装置及びその検出部の現象論に基づく検討を実施。
- 燃料集合体のナトリウム洗浄技術に関して、燃料集合体へのナトリウム付着量についての基礎試験、模擬燃料集合体を用いた試験を実施し、部位依存のナトリウム付着の現象把握と洗浄性能に関するデータを取得した。
- 熱流動技術については、Na伝熱流動試験施設（PLANDTL-2）を用いた崩壊熱除去時の自然循環試験について、インターラッパーフロー現象の重要性に着目した日仏共同の試験計画を策定した。



ナトリウム残留量評価結果の一例

【平成３０年度の成果見通し】

- 当該分野のR&D協力を継続的に実施して基本設計フェーズ（～2019年）完了時期において成果の取りまとめを図れるよう協力を進めるとともに、日仏共同で策定した試験計画に基づきPLANDTL-2において熱流動試験を実施することにより仏と試験データを共有。

【効果・効用】

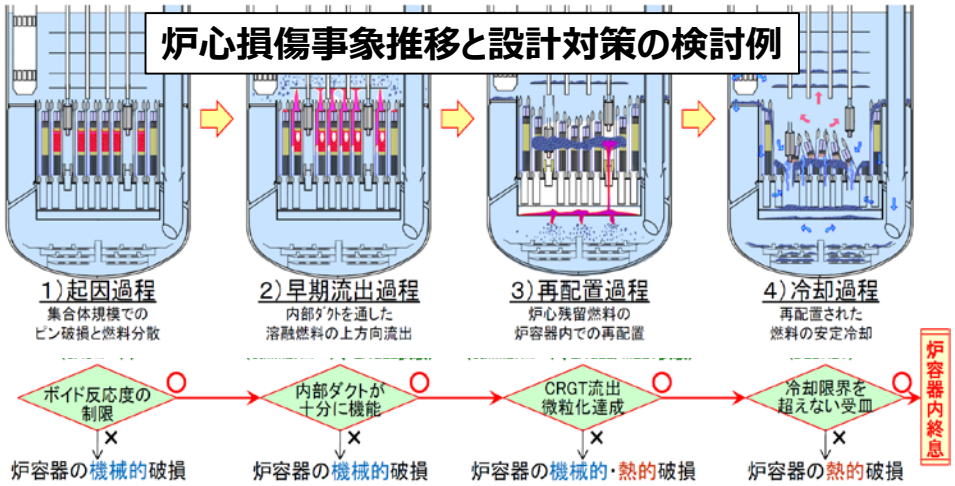
日仏で分担してR&Dを進めていくことで、我が国の高速炉開発により有益なデータを蓄積することができた。また、「常陽」の利用計画の一つを検討した。

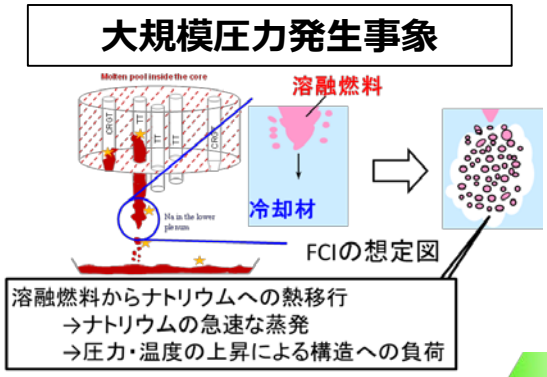
1）ASTRID開発におけるR&D協力（ｼﾋﾞｱｱｸｼﾃﾞﾝﾄ分野）（1/2）

【目的・目標（ねらい）】
我が国における高速炉開発とASTRIDの共通技術として開発負荷の大きなシビアアクシデントを対象に、我が国が先行開発してきた成果に基づいて、考慮すべき事象推移および設計対策のアプローチと評価技術の共通化を推進し、我が国の技術の浸透を図るとともに、シビアアクシデント分野で共同開発が可能な領域を拡大する。

【実施内容・スケジュール】

【実施内容】：全8項目
- 炉心損傷事象推移の検討、試験計画検討
- 大規模圧力発生事象評価（解析）
- 大規模圧力発生事象評価（試験）
- 影響緩和機構の評価
- デブリ冷却性の評価
- 炉心構成物質の混合挙動（共晶等）評価
- 解析コード開発協力
- 溶融燃料移動挙動に関するデータ交換





*FCI（燃料冷却材相互作用）と呼ばれる圧力発生現象

	H29	H30	H31	～H33
事象推移検討 解析手法開発 試験研究	解析評価を含めた検討→R&D計画整備 ロードマップ策定、解析コード共同開発→コード完成 計画、進捗に係る情報交換・データ交換・共同評価等			調整期間における協力＊

＊：H32年以降の協力実施の判断については今後仏側と協議

1) ASTRID開発におけるR&D協力（ｼﾋﾞｱｱｸｼﾃﾞﾝﾄ分野）(2/2)

【平成２７～２９年度の実施内容と成果、実績、達成度】

- ナトリウムボイド反応度低減型炉心の特徴を踏まえた炉心損傷事象推移の概要をイベントツリーを用いて把握するとともに、今後詳細化すべき評価項目を具体化し、一部予備的にソースターム挙動解析を行い、ナトリウム中へのヨウ素の移行速度に対するヨウ素気泡径の影響の感度を把握した。
- SIMMER-Vコードのバージョンアップ（並列化等による計算高速化）を行い、日仏でコード開発及びテスト計算を実施し、詳細燃料ピンモデルを組み込むためのベースとなるコードバージョンを完成させた。
- 日仏の試験計画に関する情報交換、燃料排出ダクト周りの局所解析による影響緩和機構の評価、炉心構成物質であるB_4Cとスティールの共晶溶融挙動評価及び物性評価、大規模圧力発生事象（燃料冷却材相互作用）に関する日仏各評価の情報交換、デブリ冷却性評価（コアキャッチャ設計の成立性評価に提供）等を実施する等、シビアアクシデント分野の評価に係る知見を獲得した。

【平成３０年度の成果見通し】

- 今後実施すべきR&D計画を日仏共同で構築できる見通し。
- SIMMER-Vコードのバージョンアップ（炉心損傷事故の初期から一貫して解析可能な詳細燃料ピンモデルの開発）のロードマップが日仏間で合意できた。日仏でコード開発及びテスト計算を実施し、計画通りバージョンアップが出来る見通し。
- ASTRID対象の大規模圧力発生事象の共同評価条件設定完了の見込み。
- 溶融燃料プールが形成されたときのスロッシング挙動を評価する全炉心解析を実施し、その特徴を把握できる見込み。
- B_4Cとスティールの共晶溶融液滴を浮遊させて液体物性を計画通り計測できる見込み。

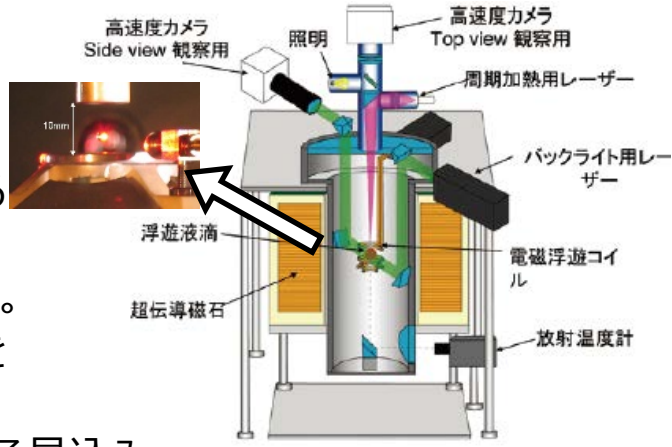


図1 超高温融物性計測システム

【効果・効用】

- 日仏でシナリオや設計対策をできるだけ共通化することで、実証試験や評価手法の開発負荷を分担可能。

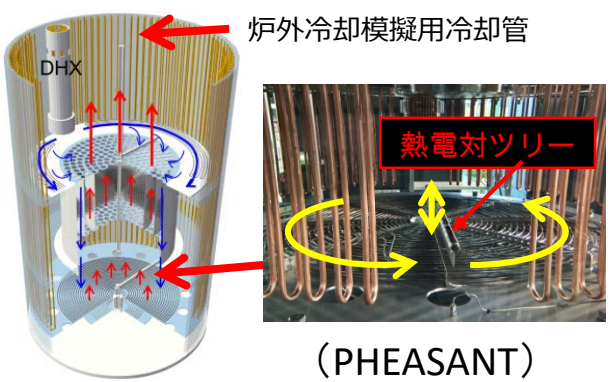
1）PHEASANT / PLANDTL-2による試験(1/3)

【目的・目標（ねらい）】
シビアアクシデントの防止と影響緩和について、水流動試験（PHEASANT）及びナトリウム試験（PLANDTL-2）を実施し、シビアアクシデント（SA）時を含む多様な崩壊熱除去システム（DRACS）の冷却特性評価及び設備仕様の設計検討に必要な根拠データを取得とともに、SA時の熱流動現象解析評価手法の整備とその妥当性確認に必要な試験データベースを構築する。

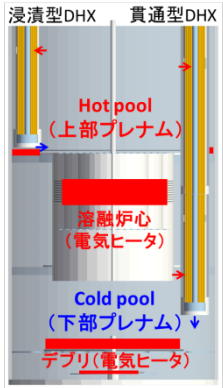
【実施内容・スケジュール】

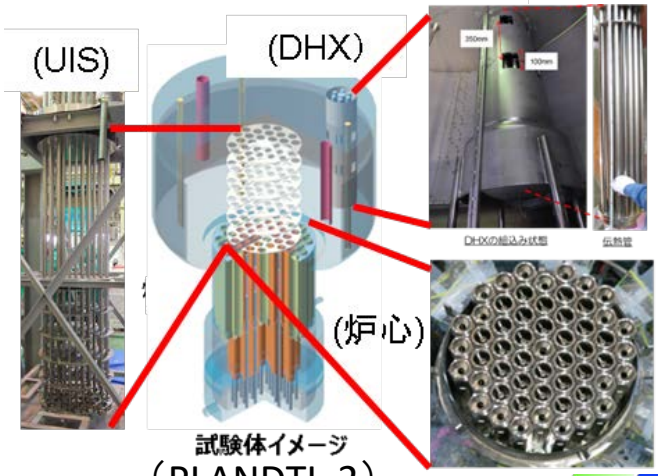
- PHEASANTは、多様なDRACS運用時の炉内/炉外冷却システムの相互作用に係る影響を含めた冷却特性確認を目的とした試験を実施する。まず、浸漬型炉内冷却器（DHX）稼働時の水試験を継続し、プレナム領域の速度場計測を実施するとともに試験解析により解析評価手法を整備する。さらに、炉外冷却システム稼働時の試験を実施し、複雑な炉内熱流動挙動を把握する。
- PLANDTL-2は、浸漬型DHXを有する体系で炉上部プレナム部と炉心部との熱的な相互作用を炉心規模で把握するとともに、熱流動解析評価手法の開発整備に必要な試験データベースを構築するため、仏CEAと共同試験を実施する（H31年まで）。さらに、試験解析を通じ、熱流動解析評価手法の開発整備を実施する。

	H27		～H33
・PHEASANT試験（水試験）	予備試験	個別効果（単一機器）試験、データ分析、データベース化	総合効果（複数機器によるシステム最適化）試験、分析、データベース化
・PLANDTL試験（ナトリウム試験）	設計・製作・据付	試験データ取得（共同試験）・評価・データベース構築	



（PHEASANT）





（PLANDTL-2）

１）PHEASANT / PLANDTL-2による試験(2/3)

【平成２７～２９年度の実施内容と成果、実績、達成度】

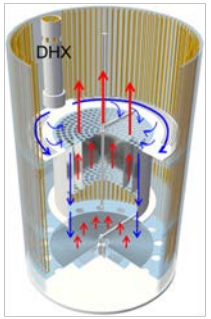
- PHEASANTによる水流動試験

（平成27年度）予備的な試験及び解析を実施し、平成28年度からの本格運用時の試験計画を具体化。

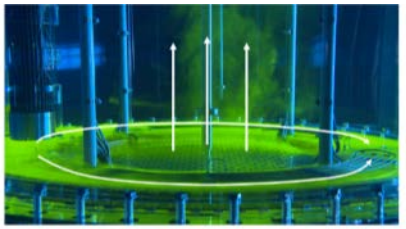
（平成28年度）可視化試験を実施し、炉心損傷時における浸漬型炉内冷却器（DHX）からの複雑な低温流体の流れを把握。

（平成29年度）レーザー光を用いた測定により、浸漬型DHX稼働時の速度分布を計測し、炉心冷却時の流動状況を定量的に解明。

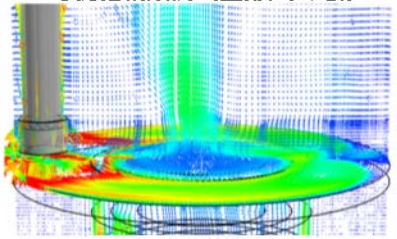
（平成27年度～）熱流動解析コードによる冷却特性評価に必要な解析モデルを構築。試験結果との比較により解析モデルの有効性を確認。



（PHEASANT）



可視化結果例（上部プレナム）

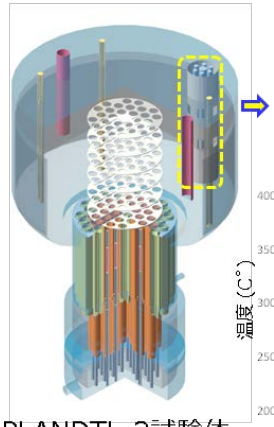


3次元解析結果例

- PLANDTL-2によるナトリウム試験

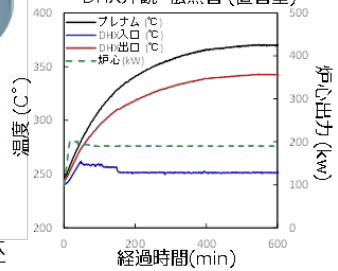
（平成27年度～平成28年度）試験体の設置を完了（平成26年度に着工）、予備解析を実施して今後の試験計画を検討。

（平成29年度）予備試験により、炉心規模での熱流動特性評価や冷却性能評価に必要な条件での試験データが取得できることを確認。ASTRID協力の枠組みで、DRACS運用時の熱流動解析評価手法の開発整備に必要な試験データベース構築のため、仏CEAと共同試験（資金分担を含む）の実施に合意。



PLANDTL-2試験体

DHX外観　伝熱管（直管型）



予備試験結果：DHX除熱性能確認

- 成果の外部発信

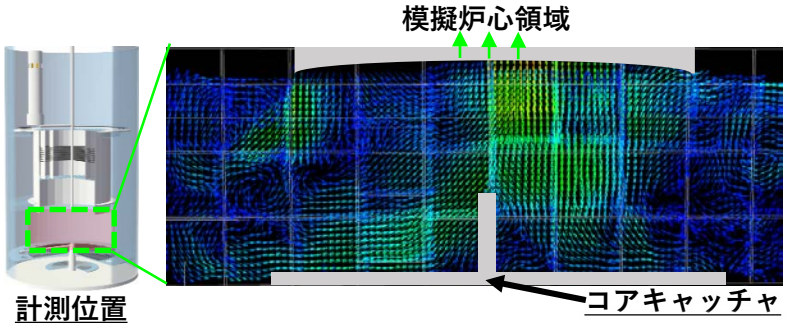
PLANDTL及びPHEASANTで得られた成果について、国内会議（原子力学会4件）にて成果発表を行った。また、PHEASANTの試験結果と熱流動解析結果を併せて国際会議論文（ICAPP2017）にまとめ成果の外部発信を着実に実施した。

1）PHEASANT / PLANDTL-2による試験(3/3)

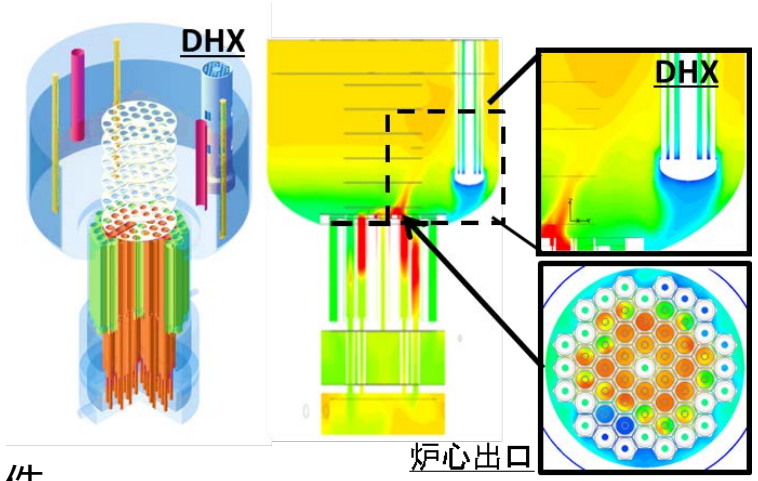
【平成３０年度の成果見通し】

- PHEASANTによる水流動試験
  - 浸漬型DHX稼働時の速度場を計測し、DHX-炉心間の冷却材循環を含む、上部プレナム部の流動場を定量的に把握。
  - 炉外冷却システム稼働時を対象とした試験により、炉外冷却システム稼働時のプレナム内流況を概略的に把握。
  - 試験データとの比較により、解析結果の妥当性を確認。
- PLANDTL-2によるナトリウム試験
  - 仏CEAとの共同試験実施について、2ヵ年分の試験計画を含む共同試験の実施取り決めを平成30年5月に締結。
  - 本年度予定の全試験ケースを終了し、定常試験データの分析により炉心規模での浸漬型DHX稼働時の除熱特性解明。
  - 試験データを参照して、浸漬型DHXのモデルを適正化し、炉内熱流動場の予測精度向上に見通し。
- 成果の外部発信

（実績）原学会秋：1件、茨城講演会:1件、北関東支部講演会：1件
（予定）原学会春：1件、ICONE2019（投稿）：１件



PHEASANT試験：コアキャッチャ上部の速度分布計測



3次元CFDコードによるPLANDTL-2予備解析
（浸漬型DHX稼働時の温度分布）

【効果・効用】

PHEASANT、PLANDTL-2等、我が国の施設を用いた試験実施で新たな知見を得ることにより、国内外で研究開発の効率化はもとより、評価技術の国際標準化、試験技術及び知識基盤の維持・高度化を促進し、今後の高速炉開発を担う人材を育成する。

1) AtheNa施設を活用した試験（1/2）

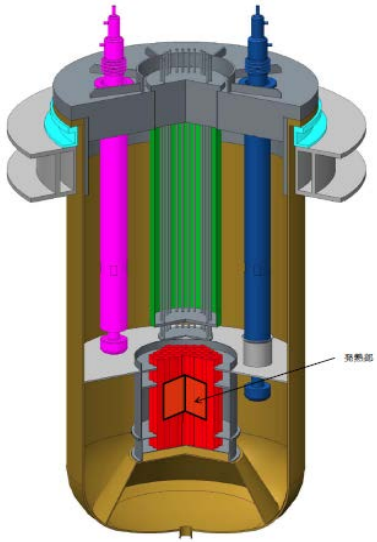
【目的・目標（ねらい）】
ナトリウム試験施設（AtheNa）を活用し、シビアアクシデント（SA）時を含む多様な崩壊熱除去システム（DRACS）運用時の冷却特性評価や高速炉のシステム構成検討に必要なナトリウム機器仕様の根拠となる試験データを取得する。試験計画検討は、仏国とのASTRID協力等の国際協力の枠組みの活用を検討する。

【実施内容・スケジュール】

- DRACSに関する試験計画（DRACS試験）
  DRACSの設計検討に必要となる根拠データの取得に向け、試験装置の仕様や装置概念に関する検討を進める。
- ASTRID機器試験計画
  AtheNaでのナトリウム機器試験について、ASTRID協力での仏側が要望する試験項目を考慮し、試験実施可能性の検討を進める。

	2015 ～2021	
DRACS試験	DRACS試験計画・設備検討	
ASTRID機器試験	試験可能性検討	試験計画

＊：基本設計以降の協力実施の判断については今後仏側と協議



試験装置の炉容器内イメージ

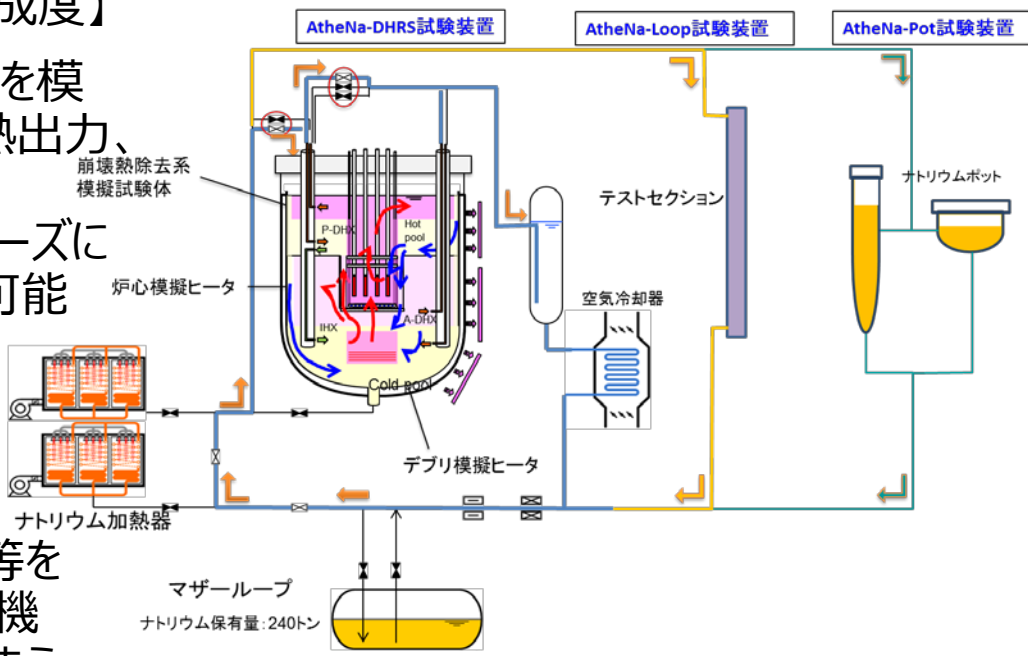
1) AtheNa施設を活用した試験（2/2）

【平成２７～２９年度の実施内容と成果、実績、達成度】

- DRACSに関する検討では、着目すべき実機現象を模擬するための試験装置のスケールや試験条件（熱出力、流量等）を熱流動の相似則に基づき設定した。
- ナトリウム機器試験検討では、仏国からの試験ニーズに関して、仕様（流量・温度等）の観点から実現可能性の整理等を進めた。

【平成３０年度の成果見通し】

- DRACS試験検討に関しては、試験条件の設定等を踏まえて装置概念を取りまとめる。なお、ナトリウム機器試験項目については、ASTRID計画変更を踏まえて試験項目の再整理ならびに重要試験項目の選定に関する検討に着手したところである。（AtheNa施設での試験実施は本中長期計画期間以降となる見込み）



AtheNaでの試験イメージ

【効果・効用】

AtheNaは大型のナトリウム機器を試験が可能な世界でも稀有の設備であり、高速炉の安全性強化に資する研究開発を国際協力を通して国内施設を活かして効率的に進めることにより、我が国の大型ナトリウム試験技術の基盤をさらに高められる。

1) 炉心損傷時の挙動分析に関する試験データの取得(1/2)

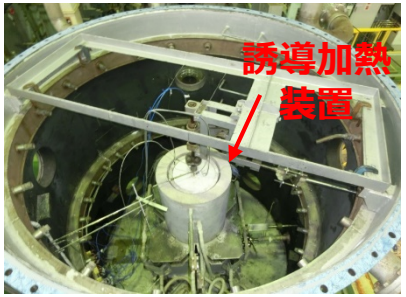
【目的・目標（ねらい）】
シビアアクシデントの影響を緩和するためには、損傷炉心物質を原子炉容器内で格納する必要がある。そのためには、損傷炉心の挙動を把握できる試験を実施して安全評価手法へ反映する必要がある。そこで、MELT施設およびEAGLE計画を活用して、炉心損傷事故の評価手法の構築と解析コードシステムの整備に資する試験データを取得する。

【実施内容・スケジュール】

炉心損傷事故の炉容器内終息性を評価する上で重要な現象（制御棒案内管を通じた燃料再配置、再配置された損傷炉心物質の冷却性、等）を対象とし、我が国のMELT施設およびカザフスタン共和国国立原子力センター（カザフNNC)の試験研究用照射炉IGR等の試験施設を活用して枢要現象の把握および評価手法の構築に資する炉外・炉内試験を準備実施してデータを取得する。

IGR試験設備（EAGLE計画にて利用）

MELT試験施設の全景



試験装置の上方より

	H27 ～H33
MELT試験 EAGLE試験	国内外の試験を通じての現象理解および安全評価手法構築に資する試験データ取得の推進

1) 炉心損傷時の挙動分析に関する試験データの取得(2/2)

【平成２７～２９年度の実施内容と成果、実績、達成度】

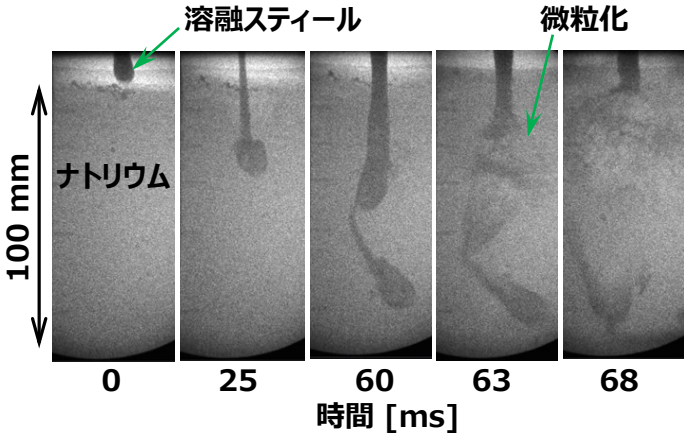
- カザフNNCとの共同試験研究プログラムEAGLE-3を進め、制御棒案内管を通じた燃料再配置に関する炉外試験を実施して試験データベースを構築した。さらに、後続の炉内試験条件を定めて実施準備を進めた。
- MELT施設において試験研究を進め、 再配置燃料の冷却性に関するデータベースを構築し現象の理解を深めた。さらに、溶融スティールのナトリウム中分散挙動の可視化データを世界で初めて取得する等、ナトリウム中へ流出した溶融炉心物質の挙動解明に資する優れた成果を得た。

EAGLE-3炉外試験での制御棒案内管を通じた燃料模擬物質（アルミナ）の再配置

【平成３０年度の成果見通し】

- EAGLE-3を進め、制御棒案内管を通じた燃料再配置に関する炉内試験を実施して試験データベースを拡充する。さらに、再配置燃料の冷却性に関する炉外試験を実施しての試験的知見を取得し、 MELT施設での試験を通じて得られた知見のナトリウム条件への拡張性を検討する。
- MELT施設での試験研究を進め、溶融スティールのナトリウム中分散挙動に関わる試験データベースを拡充する。

ナトリウム中に落下した溶融スティールは急速に微粒化



MELT施設におけるX線を用いた微粒化挙動の可視化試験

【効果・効用】

炉心損傷事故の原子炉容器内終息に向けた挙動評価に必要な試験的知見を取得した。本知見は今後、安全評価手法の精度向上に貢献するとともに、効果的なシビアアクシデントの影響緩和方策の策定に貢献する。

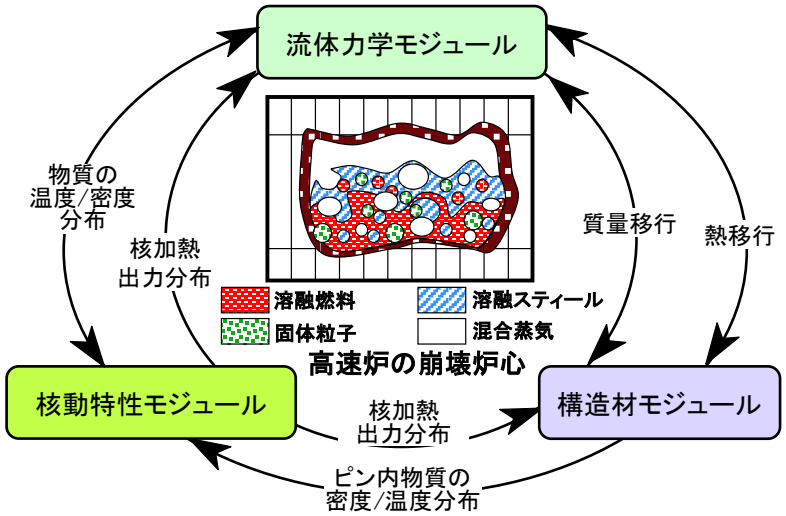
1) 安全評価手法の構築(1/2)

【目的・目標（ねらい）】
シビアアクシデントの影響を緩和するためには、損傷炉心物質を原子炉容器内で格納する（IVRを達成する）必要がある。そのためには、炉心損傷の起因となる事象の発生から損傷炉心物質の再配置・冷却までを評価できる安全評価手法の構築が必要である。そこで、試験的知見を反映させて、機構論に基づく炉心損傷事故の評価手法の構築と解析コードシステムの整備を行う。

【実施内容・スケジュール】

- 炉心損傷事故を評価する上で重要な物理モデルに対して炉内／炉外の試験研究等で得られた知見に基づく検証を行い、機構論的モデルを構築する。
- 構築された機構論的モデルにより、起因事象の発生から損傷炉心物質の再配置・冷却までを評価できる解析コードシステムを整備する。
- 整備された評価手法を用いて実機評価を行い、起因事象の発生から損傷炉心物質の再配置・冷却までを解析評価できることを確認する。

	H27 ～H33
解析コードの整備	国内外の試験データによるモデルの検証、 コードシステムの整備



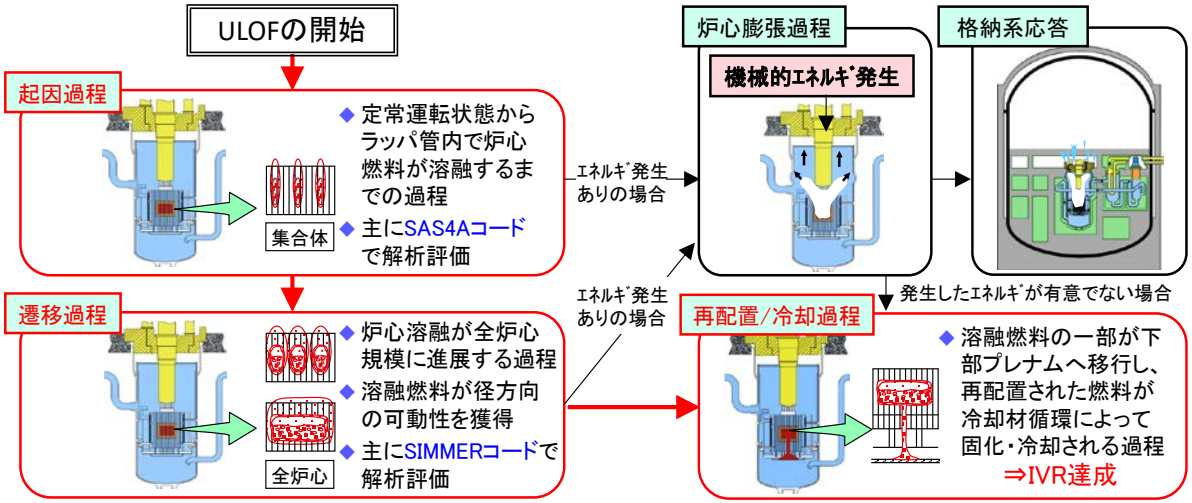
炉心損傷事故の解析コードの構造

1) 安全評価手法の構築(2/2)

【平成２７～２９年度の実施内容と成果、実績、達成度】

炉心損傷事故評価で重要な物理モデルをPIRTによって摘出した上で試験データベースとの対応付けを行い、解析コードの検証評価を進めた。

また、「もんじゅ」の実機評価を通じて、炉心損傷の起因となる事象の発生から損傷炉心物質の再配置・冷却までを評価できることを確認した。



【平成３０年度の成果見通し】

解析コードの検証評価を更に進めるとともに、「もんじゅ」以外にも、「常陽」等特徴の異なる複数の高速炉の実機評価を通じて、炉心損傷の起因となる事象の発生から損傷炉心物質の再配置・冷却までを評価できる見通しを得た。

評価上の重要現象の摘出と物理モデルの構築

⇩

試験研究に基づく物理モデルの検証

⇩

実機評価への適用性確認

【効果・効用】

炉心損傷事故の終息に向けた挙動評価に必要な試験的知見を取得して安全評価手法の整備に反映し、シビアアクシデントの影響緩和に貢献する。

１）ナトリウム技術の高度化（Na工学研究施設等を活用した研究開発）（1/2）

【目的・目標（ねらい）】
「もんじゅ」及びその周辺地域における高速増殖炉の研究開発拠点の形成に向け、ナトリウム工学研究施設等を活用して、高速炉の基盤技術であるナトリウム取扱技術等の研究開発に大学や研究機関等と連携して取り組み、高速炉技術・人材の維持・発展を図る。

【実施内容・スケジュール】

・原子力関係閣僚会議(H28.12)において、「もんじゅ」を含む周辺地域を高速炉研究開発の中核的拠点の１つに位置付けるとの国の方針が示された。その実現に向け、ナトリウム工学研究施設等を試験研究の場として活用し、高速炉の実用化に向けたナトリウム取扱技術の高度化や「もんじゅ」廃止措置に役立つ技術開発等に取り組む。

主な研究テーマ：①ナトリウム機器の遠隔保守技術、②プラントモニタリング／ナトリウム計測技術、③ナトリウム管理技術（廃炉段階を含む）、④高速炉の安全性向上に関する試験研究、⑤ナトリウムの基礎・応用研究

・大学や教育研究機関との共同研究や実習生の受け入れ、企業との共同開発等、外部との連携協力／人材育成に積極的に取り組む。

	H27	H28	H29	H30	H31	H32	H33
・施設整備	Na工学施設試運転						
・研究開発		ナトリウム取扱技術等の研究開発					

ナトリウム工学研究施設全景

保全技術開発ループ

グローブボックス

多目的Naセル

１）ナトリウム技術の高度化（Na工学研究施設等を活用した研究開発）（2/2）

【平成２７～２９年度の実施内容と成果、実績、達成度】

◆**大学等との研究協力、人材育成**：

・水素誘導拡散燃焼試験（平成28年度～継続）
高速炉のシビアアクシデント時に発生し、緩慢な水素消費現象として期待される水素誘導拡散燃焼の詳細な現象把握のために試験を、福井大学との研究協力※により実施中。

※原子力システム研究開発事業「ナトリウム冷却高速炉における格納容器破損防止対策の有効性評価技術の開発」（H25～28年度　福井大学）

・学生実習生の受け入れ（平成28-29年度：年１件）

◆**地元企業等との共同開発**：

・Na中ルースパーツ回収技術の開発（平成28-29年度）
高速炉特有の高温・放射線環境下での遠隔保守技術開発の一環として、不透明なNa中でルースパーツ（脱落部品等）を回収する装置を地元企業と共同で開発した。

◆**連携強化に向けた取り組み**：

・学会、国際会議、教授会等の場で、本施設の試験設備と研究テーマを紹介する等、大学・研究機関等との連携協力に向けて働きかけを継続した。（平成27～29年度）

【平成３０年度の成果見通し】

◆大学・研究機関等との連携協力として、新たに「もんじゅ」の廃止措置やナトリウムの基礎・応用研究に関するテーマを含め、共同研究７件を実施中。

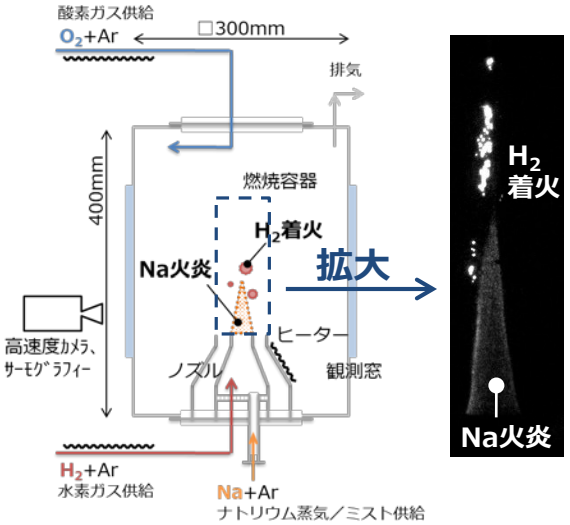
◆地元企業の技術力を活かした試験治具、装置等の試作を3社と実施中。

◆学生実習生の受け入れ（４件実施済み）。

【効果・効用】

◆高速炉の基盤技術であるナトリウム取扱技術・人材の維持、発展

◆もんじゅ廃止措置の着実な推進や福井県エネルギー研究開発拠点化計画への貢献



水素誘導拡散燃焼試験

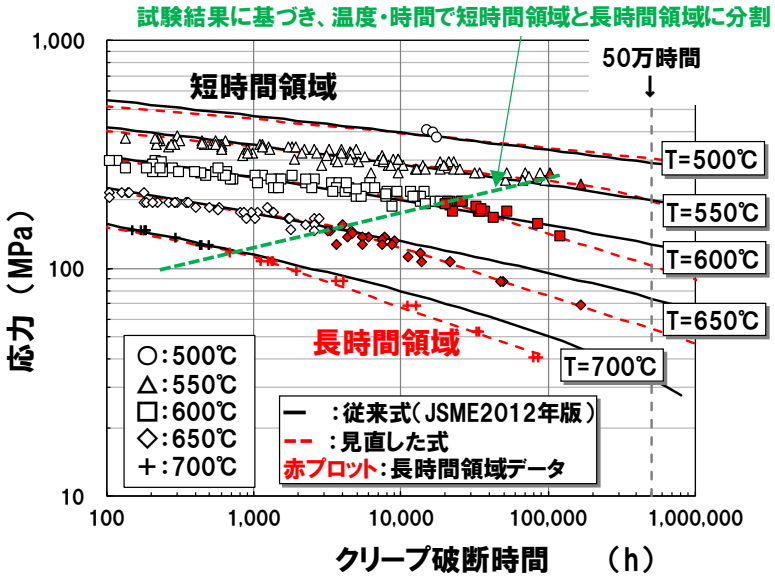
Na中ルースパーツ回収試験

１）構造・材料データの取得・評価手法の開発(1/2)

【目的・目標（ねらい）】
高速炉の実証技術の確立に向けた研究開発の一環として、高速炉構造材料に対する高温長時間材料試験や構造物試験等を実施し、材料強度基準の長寿命設計（50万時間）への拡張、ならびに高速炉構造設計基準の合理化及び高度化を行う。また、シビアアクシデント時におけるバウンダリ機能維持評価を可能とするため、超高温域における材料特性の定式化に取り組む。

【実施内容・スケジュール】

- 米国・仏国等と共通のニーズのある材料に対する高温長時間試験を継続し、50万時間までの外挿性の検証に資する。
- 構造物試験を実施し、破損様式や限界荷重を把握する。
- 事故時を想定した超高温での材料試験を実施し、それらの試験結果に基づいて、構造解析で利用可能な材料特性式を提示する。



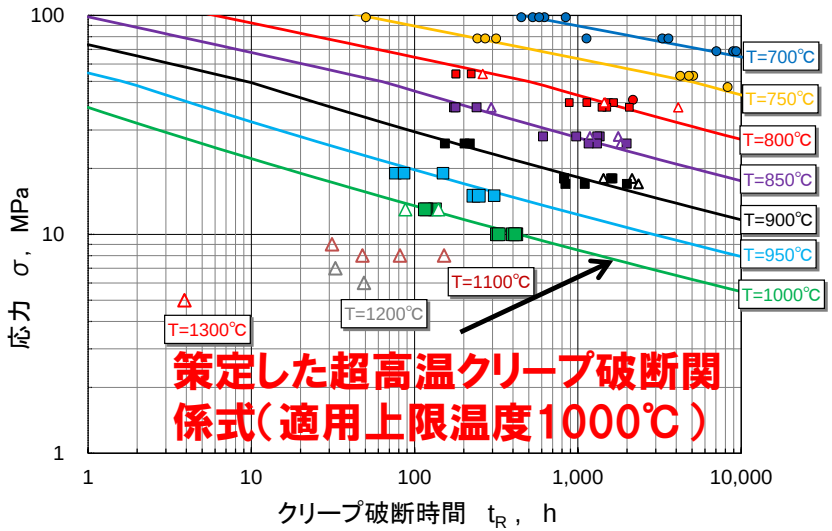
改訂した316FR鋼クリープ破断式と試験データ

	H27 ～H33
超高温／長時間材料試験	規格基準への反映 ▼ 規格基準への反映 ▼ 超高温／長時間材料試験
構造強度評価法整備	構造強度評価法整備

１）構造・材料データの取得・評価手法の開発(2/2)

【平成２７～２９年度の実施内容と成果、実績、達成度】

- 長時間域の高温強度データの取得及び解析的検討により、材料強度基準の50万時間までの外挿が可能となり、長寿命プラントの構造設計の信頼性を向上させた。
- 高速炉の特徴である薄肉構造の健全性評価に対し、薄肉容器の座屈試験を実施。大口径化と水平免震技術の適用に重要なせん断座屈と軸圧縮座屈の相互作用が顕著となる負荷条件における座屈評価法の適用性見通しを得た。また、配管限界耐力試験結果から、大きな地震荷重下でも、破損様式は疲労破損であることを示した。
- 超高温域の材料特性のデータ取得及び定式化をしたことでシビアアクシデント時の構造健全性評価にかかる信頼性を向上させた。これらにより、「もんじゅ」の原子炉容器内事象収束（IVR）成立性見通し確保や「常陽」新規制基準対応におけるシビアアクシデント評価にも知見が活用されている。



超高温クリープ試験データ

【平成３０年度の成果見通し】

- 316FR鋼の高温長時間クリープ試験データを拡充し、それらに基づいて同鋼の日本機械学会においてクリープ破断式の50万時間への拡張にかかる改訂提案を行った。今後、日本機械学会の審議を経て規格化される見通し。
- 薄肉容器に対する座屈試験及び解析による試験・検証データの蓄積を踏まえ、薄肉容器や高降伏応力材料の容器で発生する軸圧縮、曲げ、せん断の弾性座屈現象にも対応した評価式を提案する等、着実に業務を進めた。

【効果・効用】

- 構造・材料に係るデータ蓄積や評価手法高度化により、次期炉に要求される、高温、高効率化、長寿命プラントの設計・評価が可能となる。

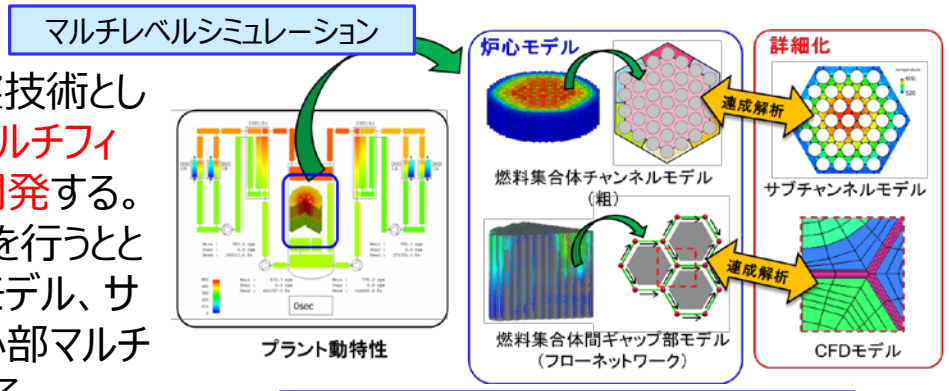
１）機構論に基づく高速炉プラントシミュレーションシステム開発(1/3)

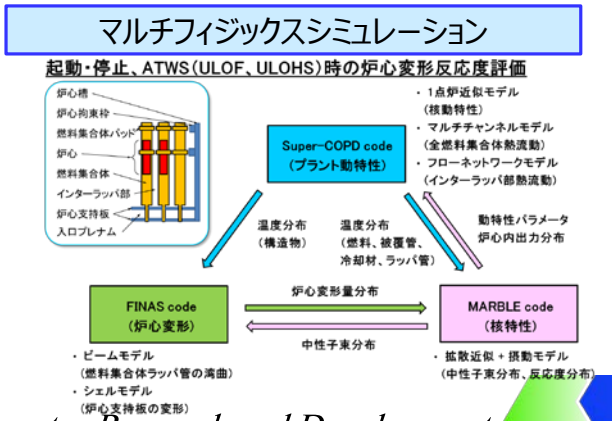
【目的・目標（ねらい）】

高速炉の実証技術の確立に向け、既存／将来の高速炉プラントの安全性・信頼性向上、安全裕度適正化、設計最適化、革新技術開発を支える安全基盤技術として、様々な事象評価に適用可能なマルチフィジックス／マルチレベルプラント・シミュレーションシステムを開発するとともに、個々の解析モジュール（要素解析コード）の系統的な検証・妥当性確認（V&V）によりシステムの信頼性・適用性を確保する。また、V&Vに必要な高品位な試験データの取得を可能とする試験実施技術・計測技術を整備し、これまでに蓄積した知見に加えて国際協力も活用し試験データベースを構築する。

【実施内容・スケジュール】

- 高速炉の設計最適化・革新技術開発を支える安全基盤技術として、プラント全系から機器要素内の局所現象までを扱うマルチフィジックス／マルチレベルプラント・シミュレーションシステムを開発する。
- 本システムの基盤である解析コード間の連成機能の整備を行うとともに、炉心部熱流動のマルチレベルシミュレーション（1Dモデル、サブチャンネルモデル、CFDモデル）の妥当性評価及び炉心部マルチフィジックスシミュレーション（核-熱-構造連成）を整備する。
- 国際協力を活用して解析モジュールの検証及び妥当性確認（V&V）を行うとともに、試験データベースの整備を実施する。





	H27		～H33
・シミュレーションシステム開発	設計検討	システム統合機能整備	システム統合化・V&V
・モジュール整備	個々の解析モジュール（要素解析コード）のV&V		
・データベース構築	試験データ取得・分析・データベース構築		

１）機構論に基づく高速炉ﾌﾟﾗﾝﾄｼﾐｭﾚｰｼｮﾝｼｽﾃﾑ開発(2/3)

【平成２７～２９年度の実施内容と成果、実績、達成度】

- マルチフィジックス／マルチレベルプラント・シミュレーションシステムの開発

（平成27年度）統合プラットフォームの試作を完了、１次元動特性解析コードと３次元熱流動解析コードとを連成させた解析手法への適用に着手、従来の個別評価に比べて精度向上が期待出来ることを確認した。

（平成28年度）炉心部を対象に詳細解析コード（燃料集合体サブチャンネル解析、集合体間ギャップCFD解析、核計算等）と１次元動特性解析コードとの連成方法の確立に向けて検討（コード改良含む）した。

（平成29年度）構築した連成解析手法を基礎的な体系に適用して、その妥当性について確認した。

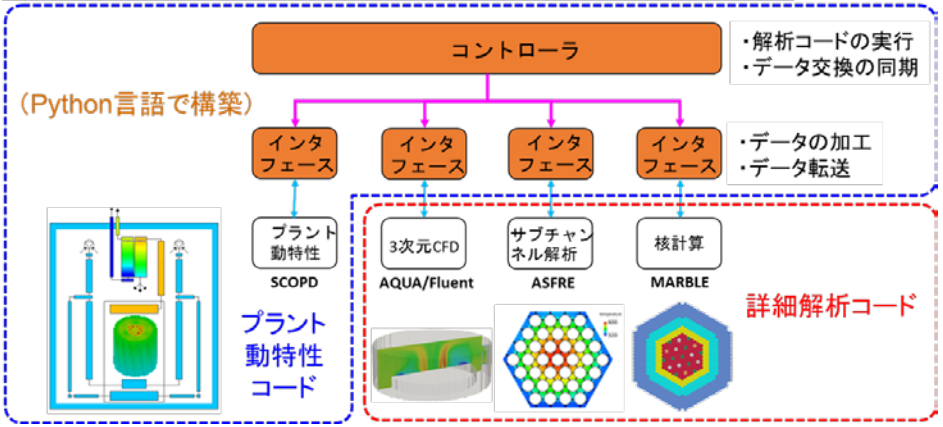
- データベース構築

国際協力の枠組を通じ、ベンチマーク解析等の実施により各種解析モジュールの検証及び妥当性確認（V&V）を進めるとともに、プラント過渡・Na燃焼（日米CNWG協力）、Na－水反応（ASTRID協力）、温度成層化（日米仏MOU協力）に関する試験データを拡充した。

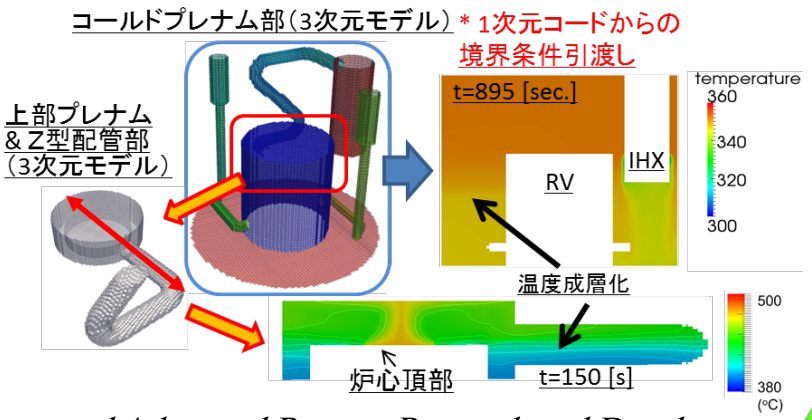
- 成果の外部発信

国内会議（原子力学会）、国際会議（FR17）、共同報告書（JAEA、ANL、SNL）等において着実に実施した。

統合プラットフォームの構築
～核、熱流動、構造等の複数分野の解析コードの連成ツール～



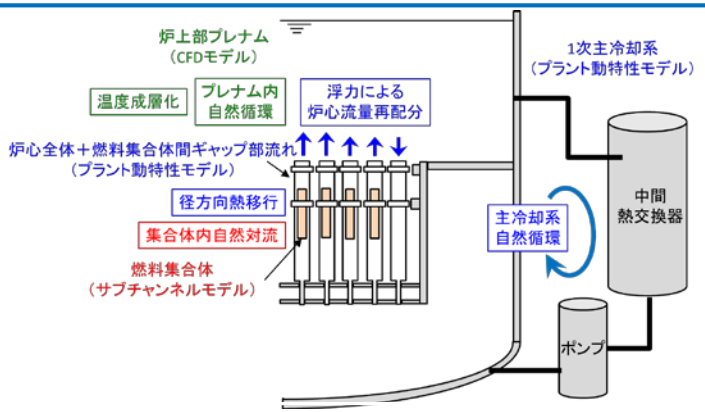
実機（EBR-II）試験解析例
～1次元-3次元カップリング手法の適用～



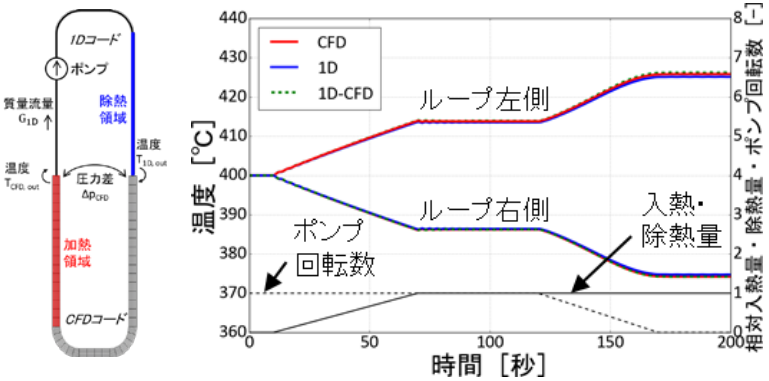
１）機構論に基づく高速炉プラントシミュレーションシステム開発(3/3)

【平成３０年度の成果見通し】

- シミュレーションシステム開発について、高速炉プラントの炉心を対象とした熱流動のマルチレベルシミュレーションシステム（プラント動特性解析、燃料集合体サブチャンネル解析、CFD解析の組み合わせ）を構築し、連成手法の妥当性を確認。
- 炉心部の核-熱-構造分野のマルチフィジックスシミュレーションシステムの構築に着手し、連成手法の妥当性について基礎的なレベルまでを確認。
- 日米CNWG協力（プラント過渡・Na燃焼）、ASTRID協力（Na－水反応）等の国際協力の枠組を通じ、それぞれのベンチマーク解析の実施により各種解析モジュールのV&Vを継続するとともに、必要な試験データベースを拡充。
- 知見拡充および人材育成の一貫として日米CNWG協力の枠で研究員をサンディア国立研究所に派遣（1年間）。
- 外部発信について、国内会議（原子力学会）、国際会議（NUTHOS、NTHAS）にて成果発信を着実に実施。



マルチレベルシミュレーション
～自然循環時の熱流動解析コードの組合せ～



連成手法の妥当性確認の例（注）
～プラント動特性コードとCFDの連成～

【効果・効用】

国際協力の枠組を活用して試験データベースの拡充及び知見・ノウハウの導入を行うなど、研究開発成果の効率的な最大化につながる成果を得ることができる。また、研究開発コストの削減や、効率化・合理化に寄与するプラントシミュレーションシステムの開発により、技術知見／ノウハウを集約し、人材育成・技術伝承の手段としても活用することができる。

（注）エネルギー対策特別会計に基づく文部科学省からの受託事業として原子力機構が実施した平成29年度「革新的ナトリウム冷却高速炉におけるマルチレベル・マルチシナリオプラントシミュレーションシステム技術の研究開発」の成果の一部です。

１）「もんじゅ」成果の取りまとめ(1/2)

【目的・目標（ねらい）】
「もんじゅ」の設計、建設、試運転、性能試験、運転および保守管理を通じて得られた様々な知見・データを将来の高速炉開発に活用できるように集約・整理し、知識ベース化する。

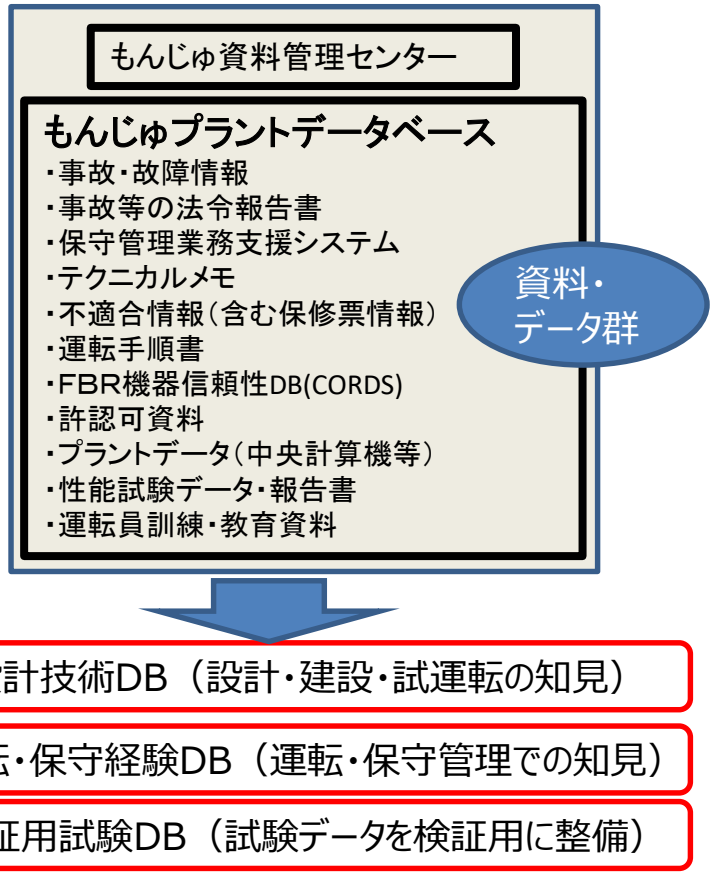
【実施内容・スケジュール】

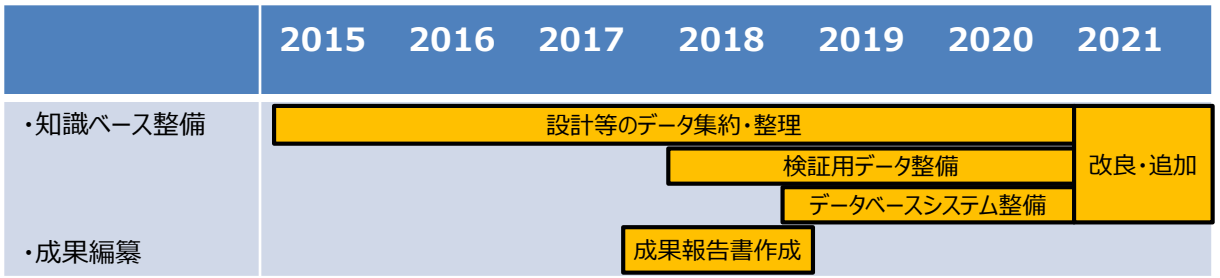
「もんじゅ」知識ベースの整備

○「もんじゅ」がこれまでに取得してきた成果（設計、建設、試運転の各段階での成果、運転および保守経験に基づく成果）を集約・整理する。
○「もんじゅ」性能試験について、設計解析ツール検証用のベンチマークデータを整備する。
○集約・整理した情報を利用するためのデータベースシステムを整備する。

「もんじゅ」成果の編纂

○機構OBの協力の下、「もんじゅ」開発実績、技術成果情報を集約するとともに、アピール点をまとめた公開報告書を作成する。





１）「もんじゅ」成果の取りまとめ(2/2)

【平成２７～２９年度の実施内容と成果、実績、達成度】

「もんじゅ」知識ベースの整備

○「もんじゅ」で蓄積してきた設計、製作・建設及び試運転から得られた技術情報等（設計根拠書、設計図書、試験報告書等）を高速炉の技術評価項目（342項目）毎に抽出し、分類整理した。

○重要な118項目については、開発経緯、考え方、根拠等の解説書を作成した。

○運転管理データ、トラブル情報・経験、手順書の整備・改善、保修経験等についても同様に集約・整理した。

「もんじゅ」開発実績・技術成果の編纂

○編纂委員会（機構OBを中心とした約40名）を平成29年9月に組織し、20の分科会ごとに技術成果情報を集約（進捗約7割）

【平成３０年度の成果見通し】

「もんじゅ」知識ベースの整備

○分類整理した結果（技術情報リスト）の電子データを収集

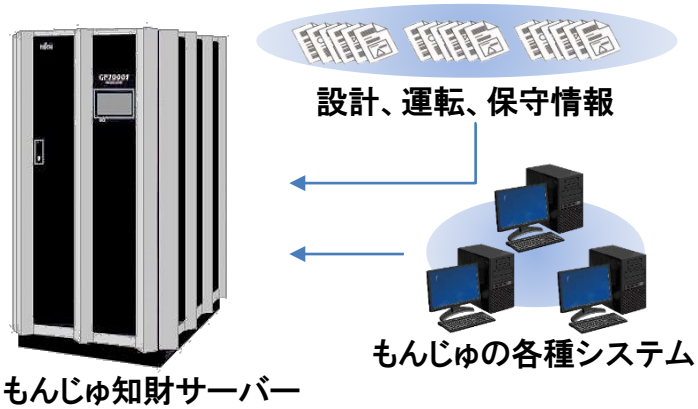
○保守点検情報を収集、データベース化（次年度も継続）

○性能試験データ（炉心特性4件）をベンチマークデータ用に評価・整理

○集約・整理した情報の利用システム（ハードウェア、ソフトウェア）を整備

「もんじゅ」開発実績・技術成果の編纂

○技術成果情報を集約、公開報告書を作成



（技術情報リストや技術成果情報等をベースに多数の電子情報を関連付けて管理し、容易に検索、閲覧、ダウンロードできる。）

【効果・効用】

「もんじゅ」の知財を集約・整理したデータベースにより、次期炉設計を効率的に進めることができる。

「もんじゅ」の開発実績、成果を簡潔にまとめた報告書を公開することにより、社会に「もんじゅ」の成果をアピールする。

1）高速実験炉「常陽」(1/2)

【目的・目標（ねらい）＊1】
「常陽」の新規制基準適合性に関する設置変更許可を取得し、本中長期計画中に、予定された耐震補強・内部火災対策等の工事を確実に実施し、運転再開に向けた施設定期検査・使用前検査の受検準備を進める。
廃棄物減容・有害度低減及びASTRID開発協力に関する照射試験を実施するとともに、高速中性子照射場として、国内外の照射ニーズに対応するべく、許認可を含めた必要な体制等を整備する。

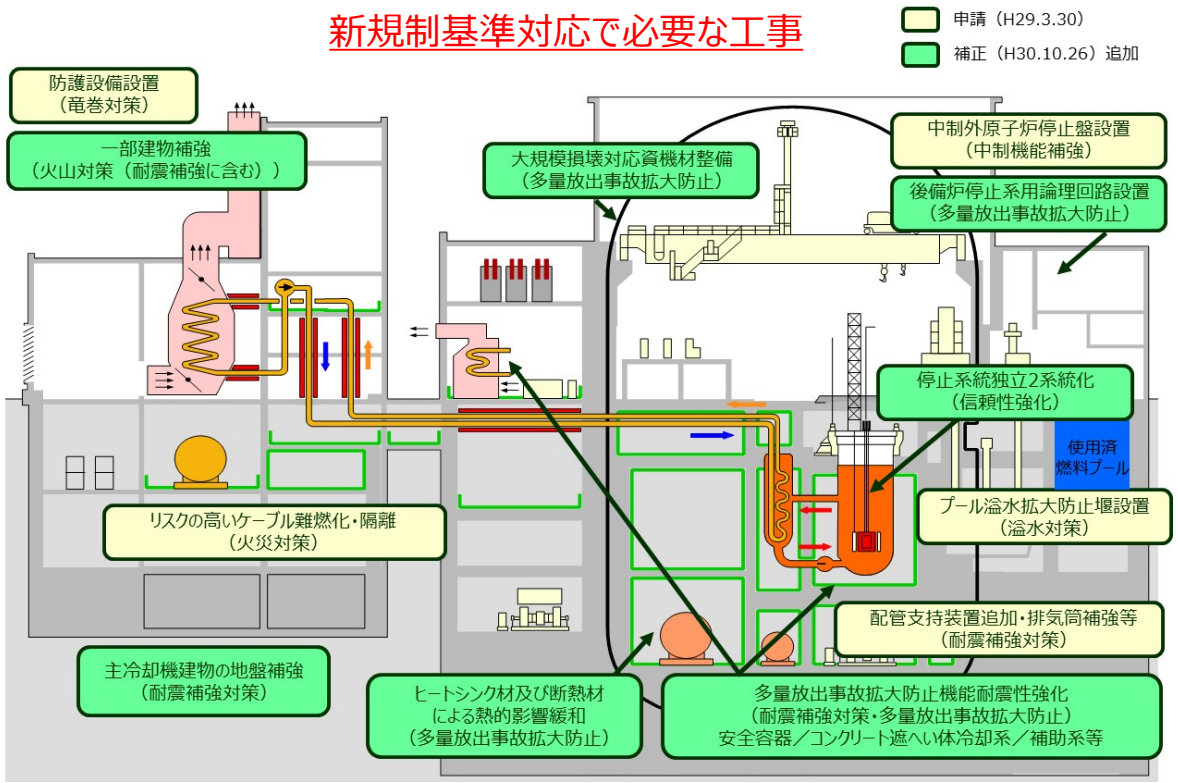
【実施内容・スケジュール】

- 設置変更許可申請、適合性審査
- 対策工事の実施
- 廃棄物減容・有害度低減やASTRID開発協力に関する照射試験計画の検討・体制整備
- 照射リグに係る許認可取得・製作着手
- 第15回施設定期検査・高経年化対策の実施

	H27	～H33
設置変更許可申請	申請準備	適合性審査、対策工事等＊1
照射試験準備	照射試験計画検討、設工認、集合体製作等	

＊1：適合性審査に係る申請書補正の内容を踏まえ、運転再開及び照射試験実施は、次期中長期計画中を予定。早期運転再開を目標に努力。

新規制基準対応で必要な工事



１）高速実験炉「常陽」(2/2)

【平成２７～２９年度の実施内容と成果、実績、達成度】

- 平成27年6月に燃料交換機能復旧作業を完了し、新規制基準対応フェーズに移行。設置変更許可申請（平成29年3月30日）を実施。
- ASTRID開発協力（燃料、制御材、炉内NIS）に関する照射試験の検討を実施し、試験計画を調整・具体化。また、熱出力100MW運転での照射条件評価等を実施。
- 第15回施設定期検査・高経年化対策の実施。

【平成３０年度の成果見通し】

- 設置変更許可申請の一部補正（平成30年10月26日）を実施。新規制基準適合性審査継続中。主炉停止系と後備炉停止系の整備により原子炉停止系統の信頼性を強化。
- ASTRID開発協力に関する照射条件評価等を継続中。
- 第15回施設定期検査は、平成30年度分について合格。高経年化対策（使用済燃料貯蔵施設の冷却塔の更新等）の実施を継続。

原子炉停止中において機能を維持しなければならない設備について、所要の施設定期検査を受検すると共に、これに伴う点検・整備を実施。

長期保全計画に基づき、防災監視盤の更新や廃液トレンチの放射性廃液配管の更新（左写真）等を実施。

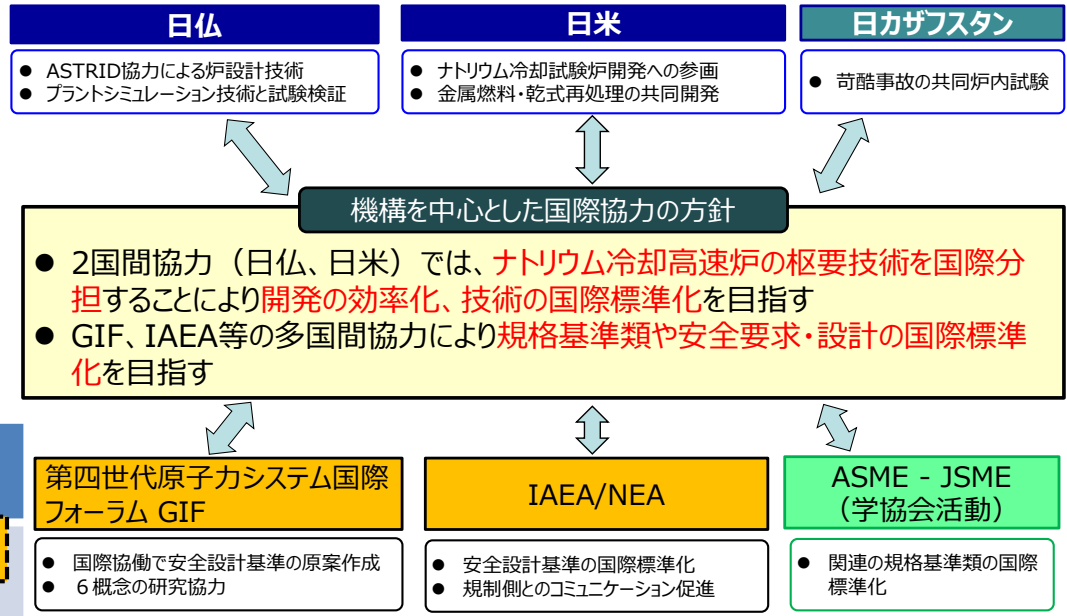
【効果・効用】

- 新規制基準への適合性確認や試験協力調整を継続することにより、ASTRID開発協力や、高速中性子照射場として国内外の照射ニーズに対応するための準備を着実に進めた。

２）研究開発の成果の最大化を目指した国際的な戦略立案と政策立案等への貢献(1/3)

【目的・目標（ねらい）】
国内外の高速炉研究開発状況を踏まえ、産業界と密接に連携の上、研究開発成果の最大化を目指した二国間及び多国間協力の国際戦略を立案し、政府の政策立案等に貢献する。また、機構を含め我が国全体の高速炉技術・人材の維持・発展のため、国際協力への参画を通じた人材育成を行う。

【実施内容・スケジュール】
国内研究資源が限定され、求められる次世代高速炉の姿が変化する中、枢要技術の研究開発のため、国際協力を積極的・効果的に活用し他国に先んじリードするための戦略を立案する。また実際に国際協力を進める際の課題と解決方策を電力やメーカーと連携して検討する。これらを政府等関係者と協議し国の政策立案等に資する。立案及び検討に必要となる各国の高速炉サイクル研究開発状況や政策動向等について調査・分析を行い取りまとめる。更に、二国間・多国間協力への参画を通じた人材育成を進める。



	2015 ～2021
・国際協力戦略の立案と政策等への貢献 ・人材育成	各国の開発状況や政策動向の調査を踏まえた国際協力戦略立案と政策への貢献 ・日仏-日米協力の最大効率化 ・日露協力における協力の具体化と推進 ・高速炉導入意義の定量化(サイクルシナリオ・諸量) ・GIF議長団活動及び OECD/NEA技術事務局派遣

２）研究開発の成果の最大化を目指した国際的な戦略立案と政策立案等への貢献(2/3)

【平成２７～２９年度の実施内容と成果、実績、達成度】

【平成27年度の成果・実績】

●日仏ASTRID協力及び日米CNWG協力における、設計とR&Dの各国分担による効率的な研究開発の枠組みを構築。GIFにおいて安全設計ガイドラインの国際標準化を主導。OECD/ NEAのNI2050に積極的に参加し、新たな国際協力へ取組みを提案した。

【平成28年度の成果・実績】

●日仏ASTRID協力及び日米CNWG協力をそれぞれ推進。GIFにおいて安全設計クライテリアの国際レビュー（規制側を含む）の反映と国際標準化を主導。二国間及び多国間協力で目指すべき国際戦略を検討。大学や研究機関等と連携して共同研究及び人材育成を推進した。

【平成29年度の成果・実績・達成度】

- 諸外国の核燃料サイクルへの取組、核燃料サイクル技術の研究開発の動向や核不拡散・保障措置への取組等に関する最新の知見について総括的な調査を行い、核燃料サイクル政策の企画・立案に資することを目的として報告書にまとめ、高速炉開発会議・戦略ワーキンググループ等で活用された。
- 高速炉開発会議戦略ワーキンググループ・統括チームでの戦略ロードマップ検討に資するため、部門内にアドホックチームを設置、高速炉の研究開発方針を構築、総括チームへの提言に向けた準備を推進。原子力学会新型炉部会にてロードマップ検討委員会に参画した。
- ASTRID開発協力に係る「常陽」を活用した照射試験の検討を進め、CEAとの情報交換・協議を継続
- OECD/NEAのNI2050では、AtheNaなどを活用した研究計画を最終的な研究提案に載せた。
- ロシアとMA核変換に関する新たな協力の枠組みを構築した。
- 若手や中堅の職員を中心に二国間や多国間協力に参加、国外知識の吸収の機会と国際感覚の醸成を図った。

２）研究開発の成果の最大化を目指した国際的な戦略立案と政策立案等への貢献(3/3)

【平成３０年度の成果見通し】

- 日米CNWGに関連し、新たに高速炉金属燃料に関するNE-08及びNE-09プロジェクトにおいて、取決文章の準備と関係省庁との調整を主導し、取決め締結に寄与した。米国VTR計画への日本の協力に関する政府間MOUの締結に関し、取決文章の準備と関係省庁との調整を主導し、協力内容を具体化。
- 日仏ASTRID協力において、仏国の今後のプロジェクトにかかる検討状況に対応しつつ，設計及び研究開発を計画的に推進。タンク型炉の知見を深めた。JAEA-EdF協力では協力の継続を図り延長取決めを締結。IRSN-JAEA間の協力について，協力事項の再設定を含めた機構内体制を取り纏め。
- 日露協力として新たに、MA核変換にかかる情報交換についての実施取決めを締結。更に知的財産権(IP) に関する実施取決めを３月末までに締結予定。
- 国際協力を戦略的に活用する高速炉開発戦略の検討WGを立ち上げ、日仏・日米協力を中心とした二国間協力及び多国間協力の戦略的な活用に関するポジションペーパーを作成し、これを基に高速炉サイクル諸量評価と併せて、高速炉開発会議で定める戦略ロードマップの具体化を図った。
- 日英仏米４カ国での米国をモデルにしたPu管理シナリオ評価やOECD/NEAのEG-AFCSでの高速炉導入に関する世界シナリオ評価などを実施して報告。
- 二国間協力及び多国間協力を利用して海外機関に要員を派遣し、個人のスキルアップ及び海外機関への機構の貢献を目指した。

【効果・効用】

- 二国間及び多国間の協力を着実に推進し，様々な知見を蓄積すると共に、国際協力を戦略的に活用した日本の高速炉サイクル開発計画案を提案し、高速炉の導入シナリオ及び諸量評価と併せ、平成30年12月21日に決定された戦略ロードマップを見据え研究開発への展開を明確にすることに大きく貢献。

２）研究開発の成果の最大化を目指した国際的な戦略立案と政策立案等への貢献　-高速炉技術に関する教育訓練（研修）- (1/2)

【目的・目標（ねらい）】
機構内部の人材等の資源の活用とともに、機構も含めた我が国全体として高速炉技術・人材を維持・発展させる。

【実施内容・スケジュール】

（1）ナトリウム取扱技術研修
　高速炉の研究開発やもんじゅの廃止措置に携わる技術者等を対象として、ナトリウムの性質や取扱い技術の習得を目的とした教育研修を実施する。

（2）保守技術研修
　高速炉に特有な機器や汎用的な機器等を対象として、機器・設備等の基礎的な保守技術の習得を目的とした教育研修を実施する。

ナトリウム取扱技術研修
- ナトリウム消火訓練コース
- ナトリウム基礎実験専門コース
- ナトリウム取扱技能認定コース
- ナトリウム配管漏えい対応訓練コース
- ナトリウムループ運転技術コース

保守技術研修
- 電源盤取扱コース
- 計測制御コース
- 水系機器運転・保守コース
- メカニカルシール分解点検作業コース
- 燃料取扱及び貯蔵設備コース
- もんじゅ系統設備学習コース

	H27	H28	H29	H30	H31	H32	H33
(1)ﾅﾄﾘｳﾑ取扱技術研修	研 修 の 実 施						
(2)保守技術研修	研 修 の 実 施						

２）研究開発の成果の最大化を目指した国際的な戦略立案と政策立案等への貢献　-高速炉技術に関する教育訓練（研修）- (2/2)

【平成２７～２９年度の実施内容と成果、実績、達成度】

611名の受講者に対して計77回のナトリウム取扱技術研修を実施し、また201名の受講者に対して計28回の保守技術研修を実施した。さらに、大学等の学生や規制庁、韓国原子力研究所の技術者等の外部関係者130名の受講者に対する研修を計24回実施してきた。

ナトリウム消火訓練コース

【平成３０年度の成果見通し】

（1）ナトリウム取扱技術研修

ナトリウムの性質や取扱い技術の習得を目的とした研修コースとして、「ナトリウム消火訓練コース」、「ナトリウム基礎実験専門コース」、「ナトリウム取扱技能認定コース」、「ナトリウム配管漏えい対応訓練コース」を実施

また、ナトリウムループを使用したナトリウム充填・ドレン操作方法やナトリウム純化運転方法、プラギング計での純度測定方法等の運転訓練を行う「ナトリウムループ運転技術コース」を実施

さらに、大学等の学生や規制庁技術者に対するナトリウム研修を実施

（2）保守技術研修

機器・設備等の基礎的な保守技術の習得を目的とした研修コースとして、「電源盤取扱コース」、「計測制御コース」、「水系機器運転・保守コース」を実施。

また、「もんじゅ」特有の機器について学ぶ研修コースとして、「もんじゅ系統設備学習コース」、「メカニカルシール分解点検作業コース」、「燃料取扱及び貯蔵設備コース」を実施

さらに、大学等の学生を対象とした保守研修を実施

水系機器運転・保守コース

【効果・効用】

ナトリウム取扱技術及び保守技術に関する職員等の技術力の向上

高速炉技術に関する国内外の人材育成貢献

福井工大の夏期実習での保守研修

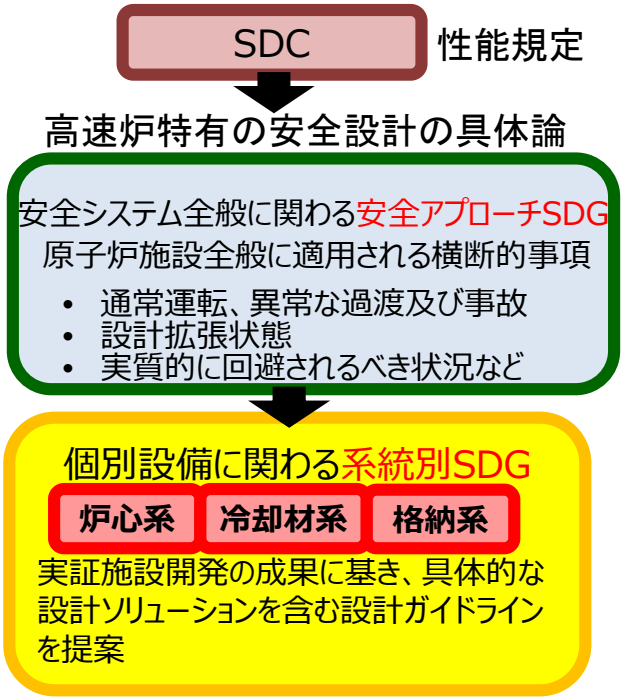
韓国KAERI技術者へのNa研修

3）安全設計要件の国際合意に向けた取組み(1/2)

【目的・目標（ねらい）】
建設計画が進む世界のナトリウム冷却高速炉の安全確保に資するため、国際標準を目指す安全設計要件を構築し、国際合意に向けた取組を推進する。本課題は、これまでの国内学会での活動やそれに基づくGIFにおける合意（安全設計クライテリア（SDC））等の成果を基盤として、高速炉特有の安全アプローチを新たに構築し、IAEA等への展開、さらにより詳細な個別設備の設計ガイドライン(SDG)）の構築に取り組むものである。

【実施内容・スケジュール】

1) SDCの国際標準化に向け、各国規制機関のフィードバックを得て国際機関のレビューに供する。
2) 高速炉ではBWR/PWR等の世界共通のシステムは無く、高速炉特有の安全システム全般に関する設計体系(安全アプローチSDG)を構築する必要があった。昨年度までに日本が原案を提案し、GIFで検討してきた安全アプローチを取りまとめ、国際的な浸透を推進する。
3) 系統別SDGの原案を日本がGIFに提案し、各国案を踏まえて系統別SDGの合意案を策定する。



	H27	H30	～H33
GIFにおけるガイドラインの検討 SDC/SDGの国際合意に向けた取組	安全アプローチ／系統別SDGの整備	ASTRID等の技術を取り入れた設計概念への適合性評価	
	国内外の諸活動を通じての国際標準化の推進		

３）安全設計要件の国際合意に向けた取組み(2/2)

【平成２７～２９年度の実施内容と成果、実績、達成度】

- OECD/NEAに設置された新型炉安全検討グループ（GSAR）とIAEAのそれぞれにおいて、具体論として日本が原案を提示した世界で初となる安全アプローチSDG（設計体系）について議論を進め、「IAEA-GIF高速炉の安全性に関わる技術会合」において国際機関・各国規制機関及び高速炉開発機関合同で最終的なレビューが総括され、GIFより発行された。インド/中国/ロシア/韓国等も本アプローチの活用を表明する等、安全設計要件の国際標準化に見通しを得るなど、特に優れた成果を創出した。
- 経産省事業の成果を活用し、具体的な我が国実証技術に基づき個別設備に係る系統別安全設計ガイドライン（系統別SDG)案を作成し、国内専門委員会での検討ベースとした国内議論集約を経た設計推奨項目を提示するとともに、GIFに対して案を提示し議論集約を主導して合意形成を進めることで、ドラフトを完成させた。
- ASTRIDの技術を取り入れた国内プラント概念を検討するにあたり、SDC/SDGを考慮する必要性から、ASTRIDを含む海外高速炉概念に対するSDC/SDGへの適合性検討を進め、まとめた。GIFではSFRの成果をベースにガス炉、MSRなど他の炉システムにもSDCの議論が展開されている。

【平成３０年度の成果見通し】

- GSARは新型炉安全検討ワーキンググループ（WGSAR）としてOECD/NEAの中で本格的に活動を開始した。WGSARとIAEAのそれぞれにおいて、GIFにおけるSDC検討会議体の議長国として活動を主導する日本が高速炉の安全設計要件及び補足情報を提示し、技術的議論を先導し、各国規制機関における高速炉安全性の理解促進を図っており、安全設計要件の国際標準化に一歩近づいた。
- 系統別SDGについてはドラフトがGIF専門家によりレビューされ、承認を得た。今後、IAEA（2019年3月末IAEA高速炉安全性会合等）を始め各国関係機関によるレビューが行われる見込み。

【効果・効用】

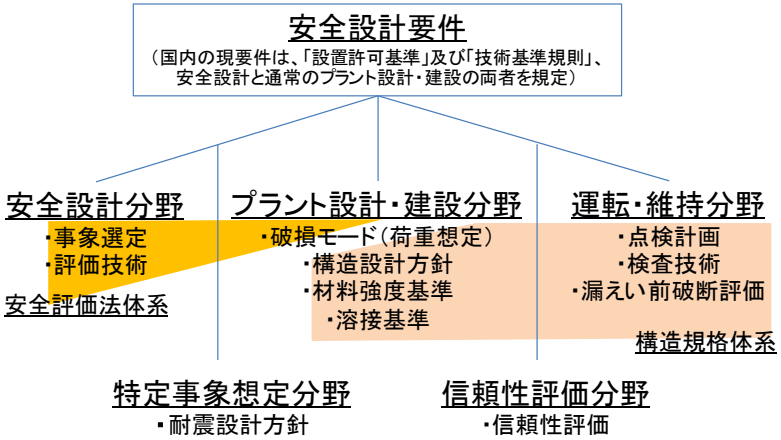
次世代ナトリウム冷却高速炉の国際的な安全基準策定に貢献。ナトリウム炉以外のシステムへも波及開始。

3）学協会規格基準整備(1/2)

【目的・目標（ねらい）】
安全設計要件の具現化のために必要な評価基準の整備、学協会規格基準整備への貢献を行う。具体的には、高速炉用のPRA手法整備（外部ハザード等）とPRA標準整備を行うとともに、高速炉用設計・建設規格等の改訂および構造規格体系の構築活動を行う。

【実施内容・スケジュール】

- 高速炉用外部ハザードPRA手法をMEXT公募研究を活用して開発する。
- 日本原子力学会（AESJ）のPRA標準化活動を行う。
- 日本機械学会（JSME）において、高速炉用設計・建設規格の改訂および維持規格・信頼性評価ガイドライン・破断前漏えい評価ガイドラインの新規策定のための活動を行う。
- 米国機械学会（ASME）において、JSMEで策定中の維持規格に整合する内容の事例規格策定に向けた活動を行う。



	H27 ～H33
構造規格体系の整備（学協会規格体系）	構造規格体系構築（日本機械学会） 構造規格体系高度化（設計、建設、運転、維持）（日本機械学会）
安全評価法体系の整備	評価基準の整備（確率論的安全評価、熱流動評価基準等）（日本原子力学会）

3）学協会規格基準整備(2/2)

【平成２７～２９年度の実施内容と成果、実績、達成度】

- MEXT公募研究の成果に基づき、重畳事象等を対象とした高速炉用外部ハザードPRA手法を取り纏め、地震・津波以外の外部ハザード（例：森林火災）のハザード評価及び外部ハザードの重畳について、国際会議で論文発表を行った。また、AESJのPRA標準策定（レベル1PRA、PRAﾊﾟﾗﾒｰﾀ、PRA品質確保等）において、各種委員会の委員・副主査として標準の改定を主導するとともに、米国ANS高速炉基準策定に寄与した。
- JSME高温規格分科会での議論を主導し、「高速炉機器の信頼性評価ガイドライン案」、「高速炉維持規格案」及び「ナトリウム冷却型高速炉破断前漏えい評価ガイドライン案」を取り纏めた。「高速炉機器の信頼性評価ガイドライン」については、JSMEでの審議を経て、発刊が決定した。
- ASMEのタスクグループで液体金属炉の維持規格の事例規格案を開発し提案した。ASMEでの審議を経て、事例規格の発刊（ASME-Code Case N-875）に至った。供用中試験検査の内容を合理的に定める本事例規格の基本部分については、高速炉だけでなく他の炉システムへの波及が期待される等、特に優れた成果を得た。

【平成３０年度の成果見通し】

- 安全設計ガイドラインの構築に関連したプレス発表（日刊工業新聞、電気新聞）を行った。第4世代炉共通の安全評価手法に関連し、国際会議で論文発表を行った。日本原子力学会のPRA品質確保標準委員会の副主査として品質確保標準改定を主導するとともに、共通用語標準の構築を進めた。
- 「高速炉維持規格案」及び「ナトリウム冷却型高速炉破断前漏えい評価ガイドライン案」について、分科会での議論を主導し、発刊に向けた技術的審議の最終段階である上部委員会での書面投票意見への対応を進めた。

【効果・効用】

規格基準体系の骨格を国内外の規格策定団体に提示し、軽水炉等と同等の学会規格の形での発刊に向けて前進させ、我が国の高速炉規格の国際標準化活動を進めた。高速炉安全基準を国際機関に提示し、標準化を進めた。

４年間のまとめ（暫定）

高速炉の実証技術の確立に向けた研究開発

- 高速実験炉「常陽」の新規制基準への適合性確認準備を着実に進め、高速中性子照射場としての国内外ニーズに対応していくとともに、仏国ASTRID炉等の国際プロジェクトへの参画を通じ、タンク型炉に適合する設計概念を確立・設計技術を取得し、メーカを含む高速炉開発技術の維持・発展を図るとともに、設計オプションの拡充につながる成果が得られた。
- PLANDTL-2等の既存施設の整備を進め、仏国との共同試験を開始し（資金分担含む）、炉内流動の予測精度向上を図るとともに、MELT施設においては炉心損傷事故時における溶融物資室の挙動データ解明に資するデータを取得する等、シビアアクシデント時における安全評価手法の構築を進めた。
- 構造・材料データの取得及び評価手法の開発、プラントシミュレーションシステムの開発等、安全性強化を支える基盤技術の開発を進めた。これらの成果は開発コストの削減や効率化・合理化に資するものである。

研究開発成果の最大化を目指した国際的な戦略立案と政策立案等への貢献

- 日本で必要な高速炉技術の開発を効率的に進めるための日仏ASTRID協力及びCNWG協力等の二国間協力及び規格・基準類の国際標準化や試験施設の国際的な共用を図るためのGIFやOECD/NEAのNI2050等の多国間協力に積極的に参画するとともに、大学や研究機関等と連携して共同研究及び人材育成を推進してきた。
- 関係機関との連携・協力を通じ、平成28年12月21日の原子力関係閣僚会議での決定を踏まえ、今後の高速炉開発方針の策定に大きく貢献した。

高速炉安全設計基準の国際標準化の主導

- わが国主導により世界で初となる安全アプローチSDGについて議論を進め、国際標準化に見通しを得る等の優れた成果の創出を果たし、今後世界で開発される高速炉が高い安全性を確保していくことに貢献した。
- 米国ASMEに液体金属炉の維持規格の事例規格案を提案し事例規格の発刊につなげ、ナトリウム炉以外のシステムへの波及も期待できるなど、優れた成果を創出した。

【自己評価　**A**】

上記のとおり本評価項目について、中長期計画に従い着実に取組み、仏ASTRID炉への技術の採用、SDGの策定とその国際標準化の進展、安全性評価係るデータ拡充、規格基準類の整備等、顕著な成果を創出した。

今後の高速炉研究開発の進め方（1/3）

「戦略ロードマップ」の策定を受け、今後の高速炉の研究開発では、

- 「多様な高速炉概念の性能評価、開発への技術提供」は原子力機構の重要な役割
- 安全性向上を前提に高い性能・経済性を追求する設計が必要であり、個々の要求間の相互作用全体で整合性のある成立解を求めるなど、設計評価手法の変革と高度化が必要
- 開発リスク・開発コストの低減が求められ、設計の大幅な合理化、開発過程の合理化が求められる

評価手法の整備：

- 多様な冷却材・システムの評価に対応するため、物理現象に基づく評価手法（マルチフィジックス評価）が必要
- 様々なリスク（再臨界、地震…）の大小に応じ、メリハリのついた安全対策により効果を最大化。
- 機器・系統を超えた設計最適化により、必要十分なマージンを持つ設計成立解を求める手法が必要
- 物理現象を計算空間で精緻に評価し、モックアップによる総合検証試験を含む試験を削減し、開発過程の合理化が必要

①統合評価手法の整備

安全性向上技術の研究：

- 安全性向上技術の開発は国研の使命
- 多様な高速炉概念に適用可能な技術として研究開発
- 再臨界事故防止、炉心溶融事故防止など炉心燃料設計を含む炉心安全の向上
- 冷却材の化学反応等の高速炉特有事故の抑止
- 必要な試験研究と検証(評価、規格基準)

③安全技術の研究

②規格基準類の整備・国際標準化、規制当局への技術提供

今後の高速炉研究開発の進め方（2/3）

■ 統合評価手法の整備

「統合評価手法」

各種試験による知見

照射場「常陽」

ホットラボ

液体金属試験施設

解析ツール開発知見
- 設計ツール
- 安全評価ツール、等

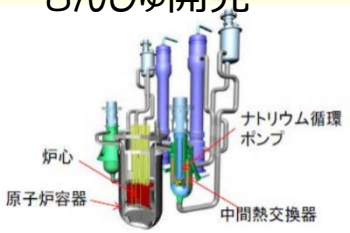
AIによる設計最適化システム
- 知識ベースと有機的に連携する評価により最適設計を探索
- リスクを考慮した最適設計の探索

仮想空間上のプラントシステム
- マルチフィジックス評価による実験式に依存しない設計
- 機器・系統を超えたモデル化による設計最適化
- 解析による試験の代替

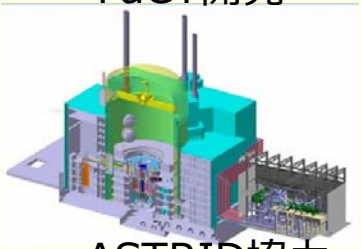
知識ベース
- 先行炉、FaCT、国際協力での知見を設計に活用可能な知識化
- AI・解析システムとの連携により知見を補完・拡張し設計可能窓を拡大し実験式に依存しない設計実現

炉開発からの知見

もんじゅ開発



FaCT開発



ASTRID協力

今後の高速炉研究開発の進め方（3/3）

RM開始　1年後　3年後　5年後(評価)　10年後

多様な高速炉の概念検討　（Phase I）　SFR-SMR･･･

概念検討（Phase II）

- 知識ベースを活用した概念検討工程の合理化
- 安全性向上技術候補
- 主要指標（安全性、経済性等）に関する性能評価
- 炉概念に応じた安全技術
- 主要指標に関する性能向上策
- 炉概念の安全性・性能評価結果
- 総合最適化
- 開発目標に照らした課題
- 選定概念からの開発ニーズ

技術基盤整備

①統合評価手法：ライフサイクルリスクインフォームドデザイン手法の開発

- ●主要知見の知識ベース化
- ● 基本スキームの提示
- ● 主要な個別評価手法等
- ● 重点分野別最適化システム
- ● マルチフィジックス評価手法

②規格基準類：統合評価手法の活用を実現する規格基準類の整備活動

統合評価手法の活用に必要な規格基準体系の高度化像の提示

③安全技術：多様な高速炉概念の安全性を飛躍的に向上させる技術の検討

- 候補技術
- 炉概念と連携した技術検討
- 炉概念と連携した技術改良

リソースの補強

- ● 個別システムを統合した全体最適化システムの開発
- ● 選定概念の開発ニーズに基づく技術の高度化と検証
- ● 国際標準化の推進
- ● 炉の安全技術の設計根拠データ等の提供

規制当局への技術提供

試験研究：常陽等照射試験関連施設、燃料サイクル研究施設、AtheNa等液体金属試験施設…

開発技術の国際標準化　⇔　連携による開発の合理化、加速

国際協力（GIF、IAEA、OECD-NEA、ASME-JSME、日仏、日米等）

参考）　平成３０年度の計画項目（1/2）

1) 高速炉の実証技術の確立に向けた研究開発

① 日仏ASTRID協力を通じて、基本設計段階の設計及び高速炉技術についての日仏共同研究開発を進める。

② シビアアクシデントの防止と影響緩和に関して、熱流動試験を継続し、事故時熱流動挙動や冷却性能に関するデータを取得する。冷却系機器開発試験施設（AtheNa）等を活用したナトリウム試験の立案を日仏ASTRID協力等、国際協力の枠組みを利用して継続する。カザフスタン共和国国立原子力センターとのEAGLE-3試験等を進め、これまでに得られた知見に基づく安全評価手法整備を推進する。

③ 国際協力を活用しつつ、高速炉用の構造・材料に関する高温、長時間データの取得試験等を継続し、機構論に基づく高速炉プラントシミュレーションシステムの開発を進める。

④「常陽」については、第15回定期検査を継続するとともに、プラントの安全確保を最優先として保全計画に基づく保全活動を実施する。また、新規制基準への適合性確認対応を進める。

⑤ GIFや日仏ASTRID協力において技術的な国際交渉や既設炉の技術分析・調査等を行い、これらの活動を通して、国際会議の議長を担うなど会議を主導できる人材の育成を進める。

参考）　平成３０年度の計画項目（2/2）

2) 研究開発の成果の最大化を目指した国際的な戦略立案と政策立案等への貢献

① 各国の高速炉の研究開発状況や政策動向等について継続的に調査を行い、これを踏まえて、国際協力戦略の検討を進める。

② 平成28年12月に原子力関係閣僚会議で決定された「高速炉開発の方針」に基づき、今後10年程度の開発作業を特定する「戦略ロードマップ」の策定に貢献する。

③ 我が国の高速炉技術・人材の維持・発展を図るため、大学や研究機関等と連携して取り組む高速炉の技術基盤を支える研究開発を通じて人材育成を進める。

3) 高速炉安全設計基準の国際標準化の主導

① GIFにおいて、我が国の主導により安全アプローチガイドラインへの関連機関のレビューへの対応とともに、系統別ガイドラインの具体化と合意案の策定を進める。

② 国内外で必要な関連基準等の整備活動を行う。