



日本原子力学会 2023年秋の大会 @名古屋大学  
海外情報連絡会セッション H会場 2023年9月6日

## 海外情報連絡会セッション (1H\_PL01)

原子力機構における次世代革新炉の研究開発と国際連携

# (1) 高速炉の研究開発と国際連携

2023年 9月 6日

大野 修司

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構  
高速炉・新型炉研究開発部門

## 1. はじめに

- 1. 1 高速炉の意義、特徴
- 1. 2 高速炉開発の経緯、方向性

## 2. 原子力機構（JAEA）における高速炉研究開発と国際連携

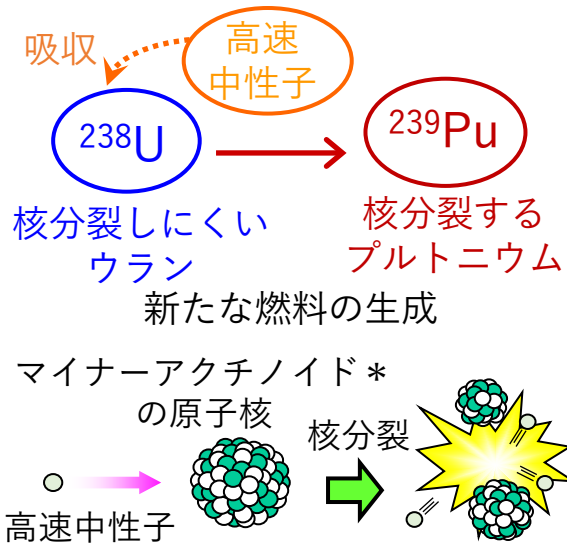
- 2. 1 研究開発の概要
- 2. 2 研究開発の具体例
  - (1) 日仏協力の活用
  - (2) 日米協力の活用
  - (3) 多国間協力の活用

## 3. まとめ

# 高速炉の特徴

- 高速中性子（エネルギーの高い中性子）を利用
- 冷却材に液体金属（ナトリウム）を使用
- 液体ナトリウムの自然循環による熱の除去が可能（自然に冷える）

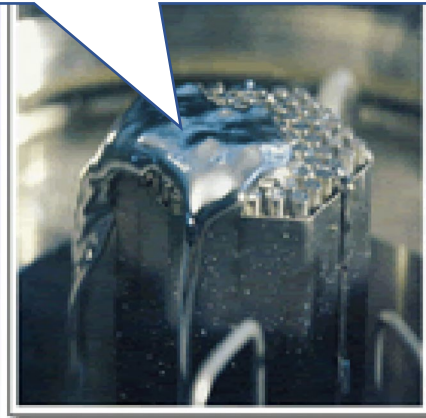
## 高速中性子の利用



- 高速中性子は、軽水炉での核分裂に利用する中性子よりエネルギーが高く様々な用途での利用が可能

## 液体ナトリウムの使用

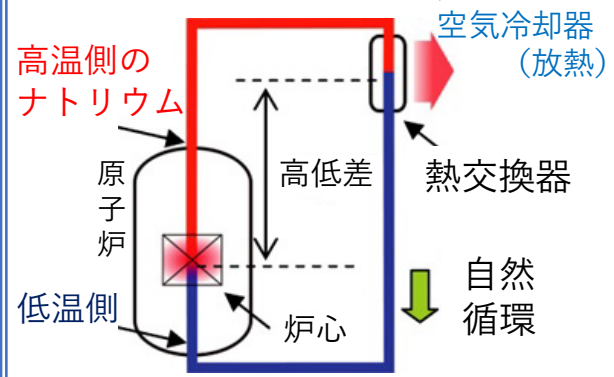
燃料集合体（模型）の中を流れる液体ナトリウム



- 中性子を減速しないため、高いエネルギーの中性子が利用可能
- 沸点が水より高く、高温・低圧での運転が可能（効率的に熱を取り出せる）

## 自然循環による安全性

冷却器を高所に置き、ナトリウムの温度差によって発生する密度の差だけで循環



- ナトリウムは自然循環（温度差による対流）が発生しやすいため、電源が失われても原子炉の自然冷却が可能

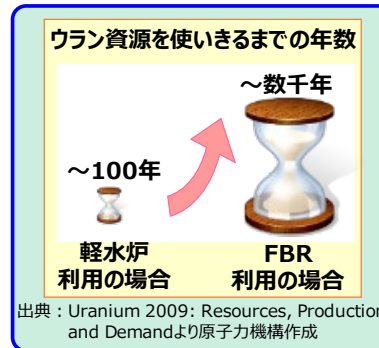
\*マイナーアクチノイド：長期間にわたって高い放射能をもち、放射性廃棄物の有害度を高める原因となる元素（代表的な元素：アメリシウム（Am）、ネプツニウム（Np））

# 高速炉サイクルの意義

- 軽水炉に比べ数十倍以上のウラン資源の有効利用が可能

- 燃料のリサイクル（ウラン資源輸入不要）と技術自給（国産）により、海外情勢に左右されない安定エネルギーを確保

⇒ 有限資源の有効利用・持続性の確保  
エネルギーセキュリティの強化



- 運転時にCO<sub>2</sub>を排出しない

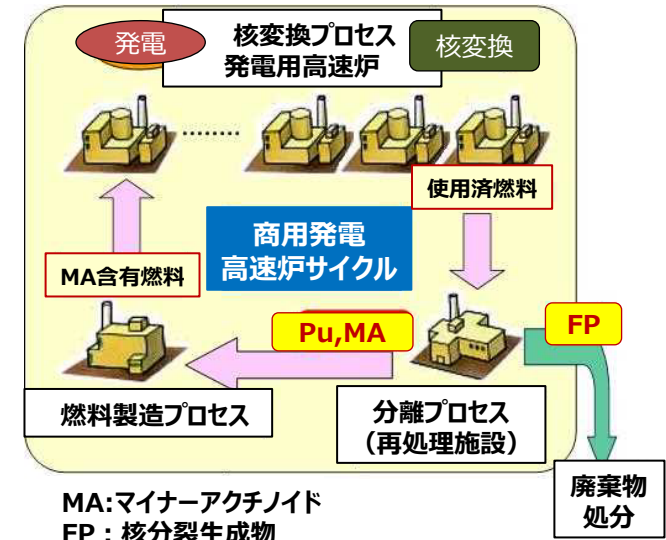
- マイナーアクチノイド（MA）を核燃料としてリサイクルすることにより、放射性廃棄物の量を減らし、放射能が減衰するまでの期間を大幅に短縮（10万年⇒300年）することが可能

- エネルギー事情に応じ、プルトニウムの生成／燃焼が可能  
⇒ 環境への負荷を低減

- ベースロード電源としての利用に加え、蓄熱技術との組み合わせにより電気出力を調整可能し、太陽光や風力等、出力変動再エネを補完  
⇒ CO<sub>2</sub>排出せずに変動再エネと共存

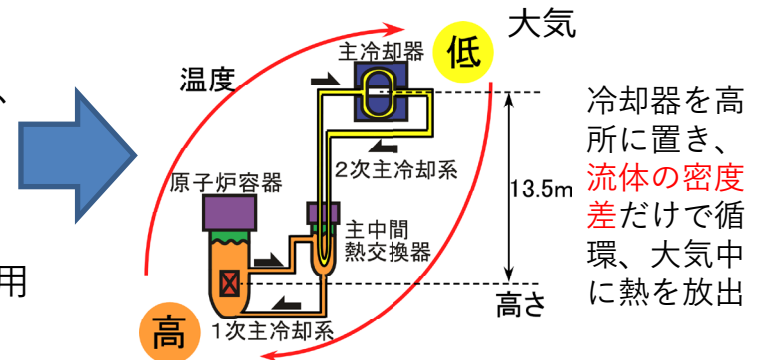
- 高い自然循環能力を有し、空気との熱交換が可能なることから、電源が喪失しても長期に安定した崩壊熱除去が可能（高速実験炉「常陽」で実証済み）  
⇒ 高い安全性

- 高速中性子を用いた医療用RIの製造によりがん治療などに活用  
⇒ 国民福祉向上への貢献



発電用高速炉利用型核変換システム

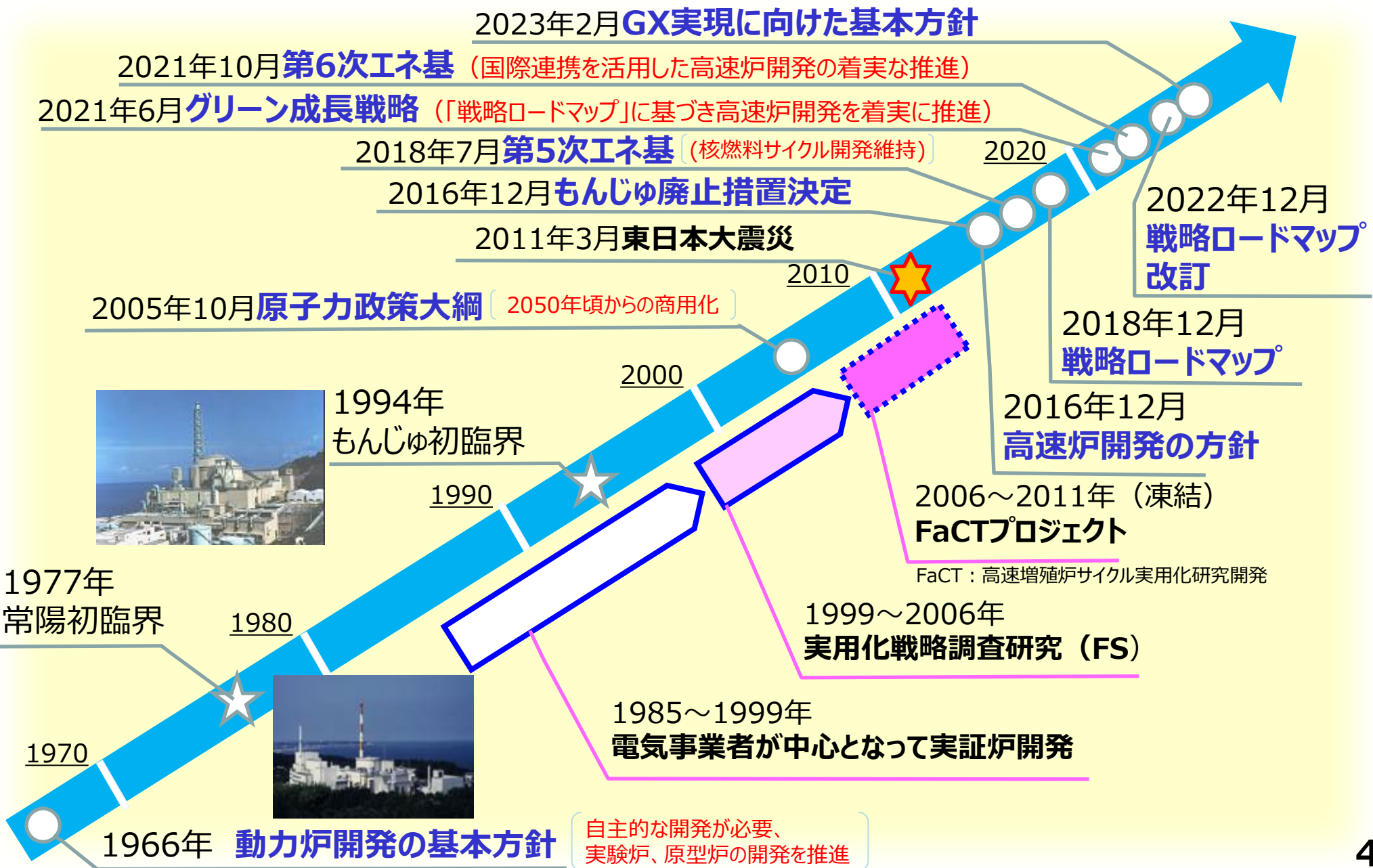
(文部科学省原子力研究開発・基盤・人材作業部会第10回資料より引用)



電源を必要としない自然循環による炉心冷却（高速実験炉「常陽」で実証済み）

グリーン成長戦略で求められるイノベーションの実現

# 我が国における高速炉サイクル開発の経緯



# 高速炉開発の流れとその選択肢

2019年 今後10年程度の開発作業

21世紀半ば頃

21世紀後半

戦略ロードマップ※

ブレークスルー

現実的なスケール的高速炉の  
運転開始

本格的利用

技術イノベーション

社会のニーズ

選択肢

民間、大学



原子力機構

- 炉心安全
- ✓ 炉心溶融排除
- ✓ 受動的炉停止
- ✓ 容器内事故収束
- 燃料サイクル
- ✓ Puの柔軟な利用
- 経済性・環境
- ✓ 開発コスト削減
- ✓ AIの活用
- ✓ 建設等コスト削減
- ✓ 変動再エネとの協調
- 保全
- ✓ 信頼性設計
- ✓ IoTの活用

様々な  
選択肢に  
対応

大型基幹電源

Pu専焼炉

SMRなど

Uの有効活用による長期安定なベースロード電源  
(エネルギーセキュリティ)  
MAの燃焼、閉じ込め

LWRサイクル長期利用  
Puバランスの確保  
廃棄物減容 (TRU)

SMARTグリッド  
再生可能エネルギーとの連携  
(電源網の信頼性アップ)

※ 2018年12月原子力関係閣僚会議決定



- **「GX 経済移行債」による支援策として、高速炉・高温ガス炉の実証炉開発に関する予算を、今年度から3カ年でそれぞれ460億円、431億円措置し、研究開発を加速していく。高速炉・高温ガス炉ともに本年3月から実証炉開発事業の公募を実施。**
- **高速炉実証炉開発事業**については、炉概念の仕様と将来的にはその製造・建設を担う事業者（中核企業）の公募（本年3月14日～4月21日）に対して3件の提案があり、**高速炉技術評価委員会において選定審査が行われた。**
- 審査結果を受け、**今月12日の高速炉開発会議戦略ワーキンググループは、炉概念として三菱FBRシステムズ株式会社が提案する『ナトリウム冷却タンク型高速炉』を、中核企業として三菱重工業株式会社を選定した。**

## ＜高速炉実証炉 今後の開発の作業計画＞

- 2023 年夏：炉概念の仕様を選定 【選定済】
- 2024 年度～2028 年度：実証炉の概念設計・研究開発
- 2026 年頃：燃料技術の具体的な検討
- 2028 年頃：実証炉の基本設計・許認可手続きへの移行判断

※戦略ロードマップ(令和4年12月23日 原子力関係閣僚会議)を基に作成

## ＜ナトリウム冷却タンク型高速炉（イメージ）＞



(出典) 三菱重工業株式会社PRESS INFORMATION (2023.07.12)  
日本政府が開発を推進する高速炉実証炉の設計、開発を担う中核企業に選定  
2040年代の運転開始に向け、ナトリウム冷却高速炉の概念設計などを推進

# JAEAにおける高速炉研究開発の概要

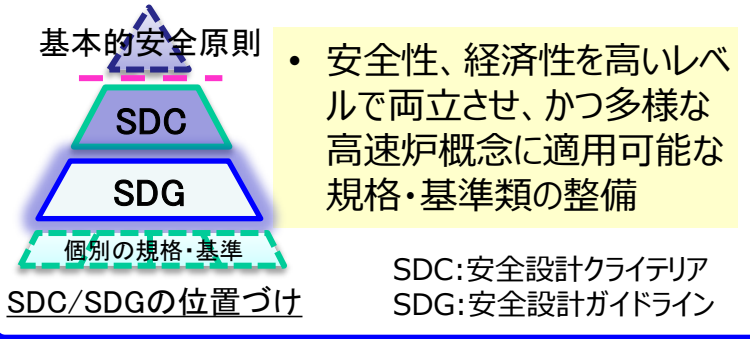
- 戦略ロードマップにおいて、原子力機構の役割として、原子力分野の研究開発・人材育成、民間が取り組む技術開発に対応できる研究開発基盤（試験施設、解析評価手法、安全基準等）の維持・整備が求められており、これを受けて**統合評価手法の開発**、**規格基準の整備**、**安全性向上技術の開発**に注力する。
- 2022年末の戦略ロードマップ改定により、高速炉開発計画がより具体化されたことを踏まえて、研究開発基盤を必要な時期に最大限利用し、**日仏・日米等の国際協力も活用しつつ、効果的に最有望と評価されたナトリウム冷却高速炉の研究開発**を推進する。

## 統合評価手法の開発



- 「常陽」、「もんじゅ」、それ以降の設計検討等の知見を整備するとともに知識ベース化
- 多様な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）を開発
- AI技術の活用による最適化

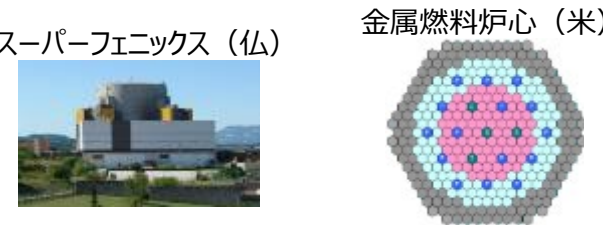
## 規格基準の整備



## 安全性向上技術の開発

- 受動的炉停止、炉心溶融防止、再臨界防止機能など炉心安全技術の整備
- 自然循環除熱などを含むプラント機器の安全性能の実証

## 国際協力



- フェニックス、スーパーフェニックス等のナトリウム冷却炉の運転経験が豊富な仏との協力
- 金属燃料、関連する解析コード等の開発が先行する米国との連携

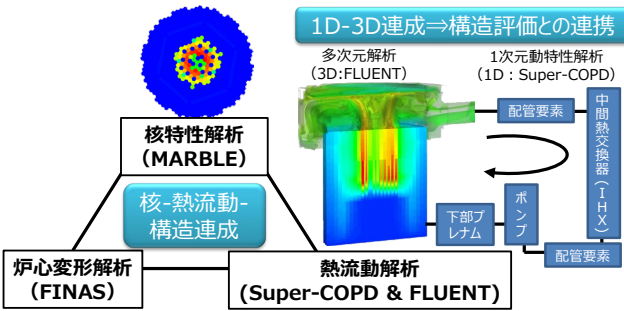
↓

- 実用化に向けた基盤技術の効果的な研究開発の推進

**2040年代半ばとされる実証炉の運転開始に貢献**



## ○安全性+経済性：核・熱・構造の課題解決

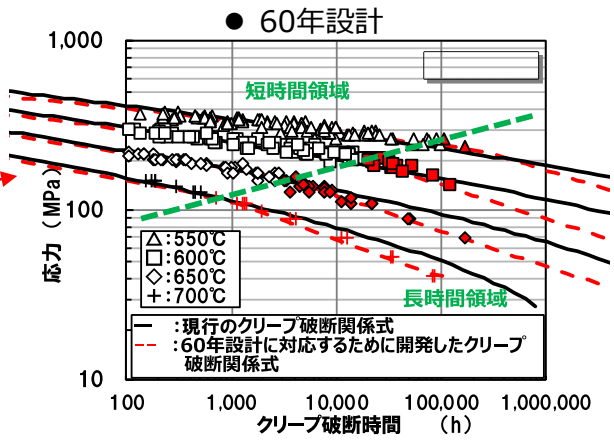
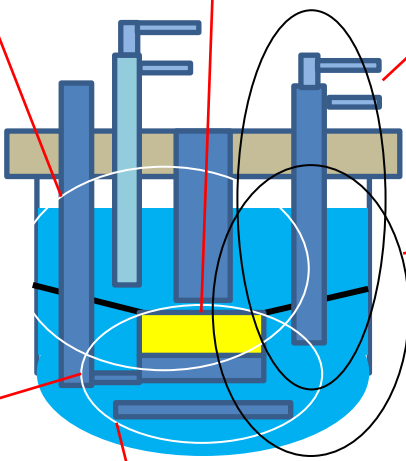


常陽  
炉心材料の許認可・照射データ



冷却系機器開発試験施設 (AtheNa)

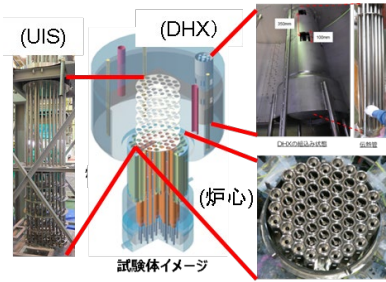
## ○構造・材料の規格・基準、維持規格



## 設計・建設知見の反映 高品質の実験検証



もんじゅ知識ベースポータルサイト

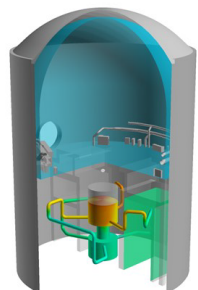


ナトリウム試験

## ○シビアアクシデント評価技術

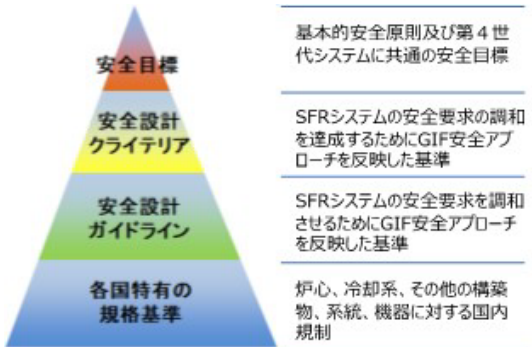
統合安全性評価シミュレーション  
基盤システムの整備

- 解析モデル拡張(炉心損傷、熱流動)
- 他炉型への適用拡張
- 融体熱物性整備による評価精度向上



プラント全体シミュレーションの例

## ○安全設計基準



## ○原子力のさらなる技術革新

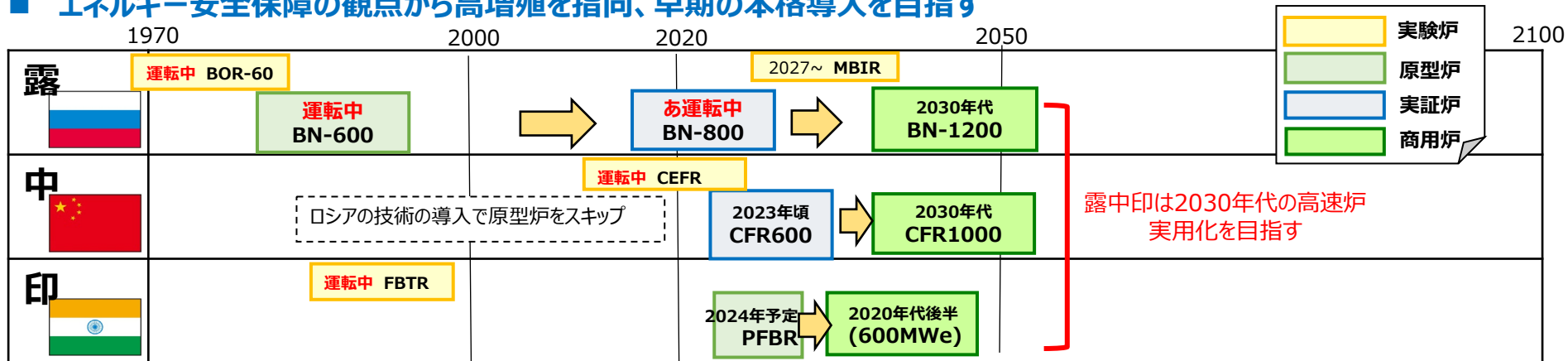
- 脱炭素に向けた原子力の蓄熱・熱利用技術
- 浮体免震技術による立地自由度向上
- 3D-Printingによる高い自由度をもつ燃料製造  
複雑な燃料製造プロセスの一元化  
自動化、形状管理、傾斜材料...

本基盤システムの社会実装

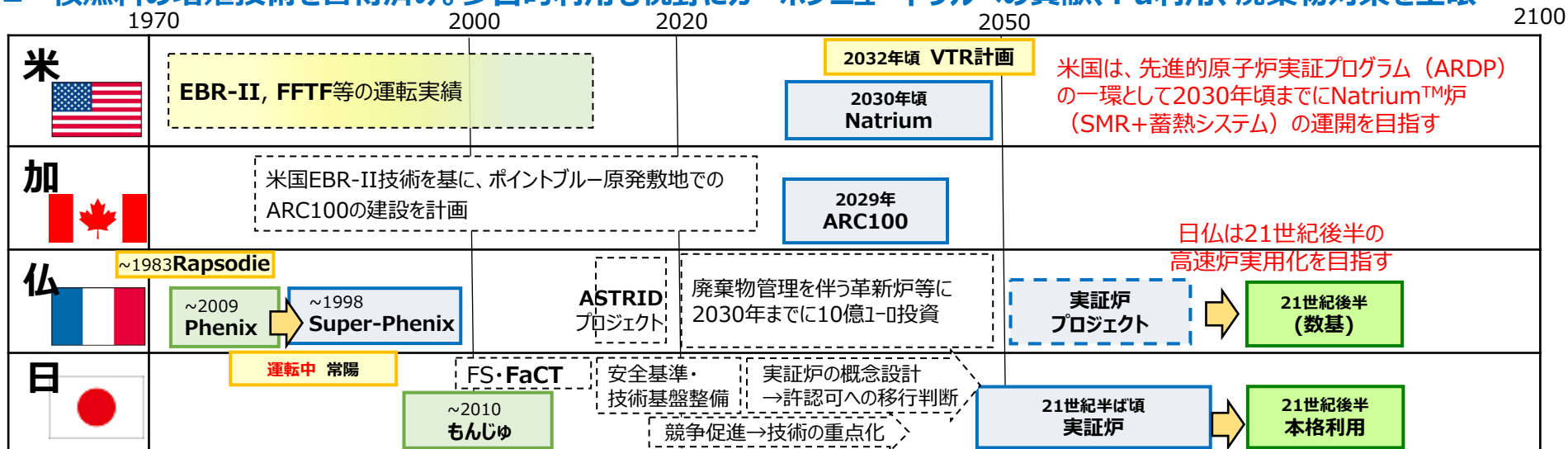
# 世界の高速炉開発状況

- ロシアでは2015年に実証炉が稼働、中国では2023年に実証炉が初臨界を予定、両国とも2030年代に商用炉運開を目指す
- 米（テラパワー社など）・加（ARC社など）は2030年頃の高速炉（SMR）の運転開始を目指して官民連携して挑戦
- 仏国は21世紀後半の高速炉の実用化を目指す

## ■ エネルギー安全保障の観点から高増殖を指向、早期の本格導入を目指す



## ■ 核燃料の増殖技術を習得済み。多目的利用も視野にカーボンニュートラルへの貢献、Pu利用、廃棄物対策を主眼

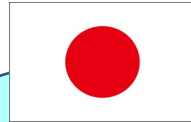


# 高速炉開発における国際連携

国際協力の戦略的推進：日米仏の戦略的協力により、高速炉開発をリード  
多国的な研究アプローチを主導、国際標準化の推進

## 日仏

- 高速炉R&D協力（11分野）
- プラント特性のデジタル化技術と試験検証データの共有



## 日米

- Sodium™開発プロジェクトに協力
- 構造材料、モデリング&シミュレーション、金属燃料・乾式再処理技術等の共同開発



### 機構を中心とした国際協力の方針

- 日仏、日米を中心に2国間協力で、ナトリウム冷却高速炉の枢要技術開発を国際協働し、国内技術（設計手法、安全技術、解析評価）及びプラント概念の国際共有・標準化を目指す
- GIF、IAEA等の多国間協力により規格基準類や安全要求・設計手法等の国際標準化を目指す

## 第四世代原子力システム 国際フォーラム GIF

- 国際協働で安全設計要件の作成
- 第4世代国際標準炉、設計手法、DB

## IAEA/NEA

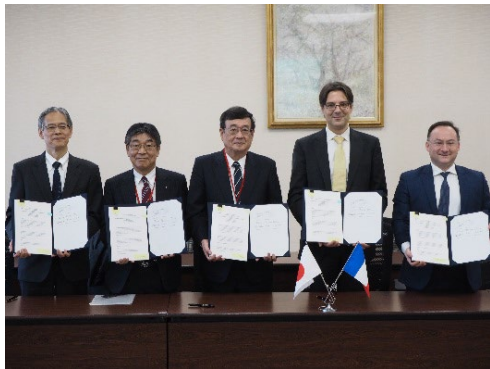
- 安全設計基準の国際標準化
- 規制側とのコミュニケーション促進

## ASME - JSME (学協会活動)

- 構造、維持等、規格基準類の国際標準化

## 【 協力の概要 】

- **2014年8月から**進めた「仏国次世代炉計画（ASTRID）及びナトリウム高速炉の協力に関する実施取決め」は、日本原子力研究開発機構（JAEA）、仏原子力・代替エネルギー庁（CEA）、アレバNP（現フラマトム）、三菱重工業（MHI）及び三菱FBRシステムズ（MFBR）との間で**ASTRIDの設計及び関連するR&D協力を進め、所定の成果を挙げて2019年末に完了。**
- この設計協力／R&D協力を通じて、我が国の立地条件におけるタンク型炉の設計概念を検討し、耐震性を含めたその設計の成立性を確認。
- 日仏相互の高速炉基盤技術の向上に寄与することに鑑み、引き続き、研究開発を効率的に進めることを目的として、シミュレーションや実験を主体とした協力を継続することに合意。2019年12月3日、JAEA、CEA、フラマトム、MHI、MFBRの五者は、**ナトリウム冷却高速炉開発計画の協力に関する実施取決めを締結し、2020年1月より研究開発協力を開始。**



実施取決め締結（2019.12.3）

### R&D協力課題（2020～2024年）

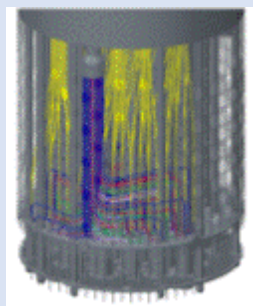
- RD1 シビアアクシデント
- RD2 化学リスク
- RD3 構造材料
- RD4 炉心材料
- RD5 燃料技術
- RD6 検査・計装
- RD7 数値シミュレーションツール
- RD8 プラント機器開発
- RD9 試験施設
- RD10 安全
- RD11 新型構造



# 日仏協力成果を反映したタンク型炉検討

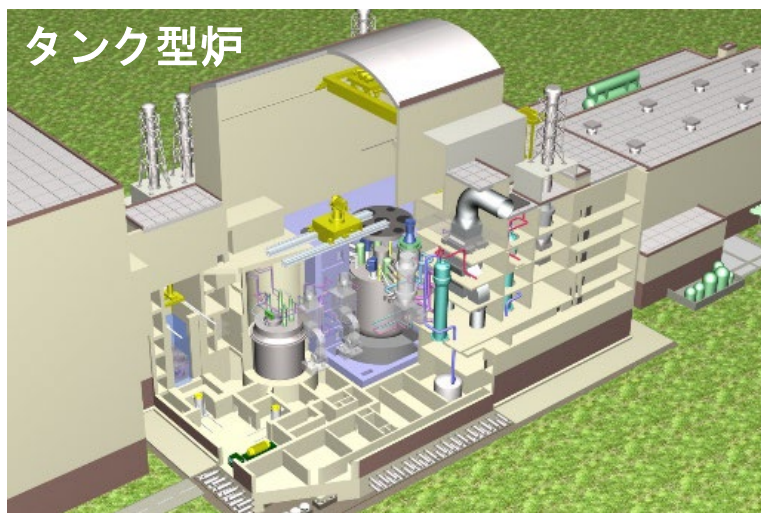
## 設計協力

仏の既存炉の経験を反映した設計データを入力し改良作業を実施することで仏設計を国内設計に反映する使用権を入手した。



(例) 炉内構造等

日仏協力（設計協力／R&D協力）で得た知見を用いて、タンク型ナトリウム冷却高速炉について耐震性、安全性、経済性等が成立する見通しを得た。



タンク型炉



仏の既存炉の経験に加え、ASTRID設計データを入力



フェニックス



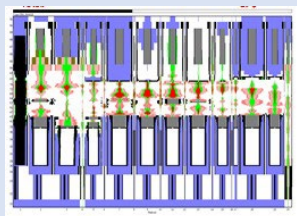
スーパーフェニックス



仏と共同で開発した評価手法や、協力で取得した試験データを、国内向け高速炉の開発に利用

## R&D協力

燃料分野、シビアアクシデント分野、原子炉技術分野で協力、日仏間で技術を融合（データシェア、設備共同利用、評価手法共同開発）することで、効率的な開発を行った。



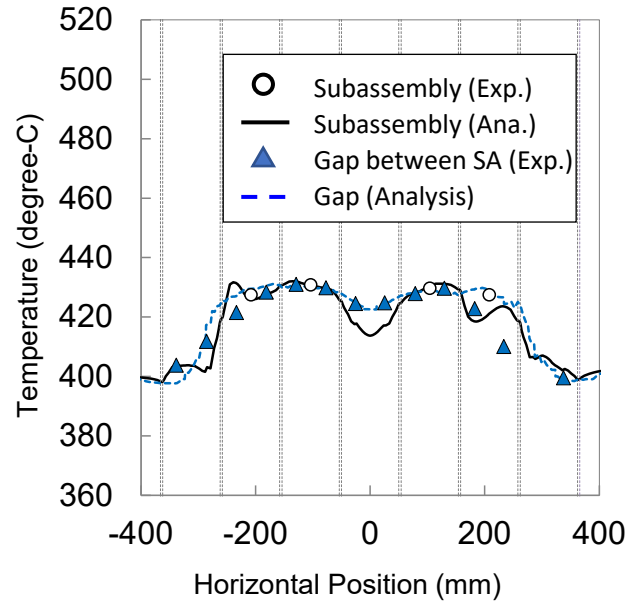
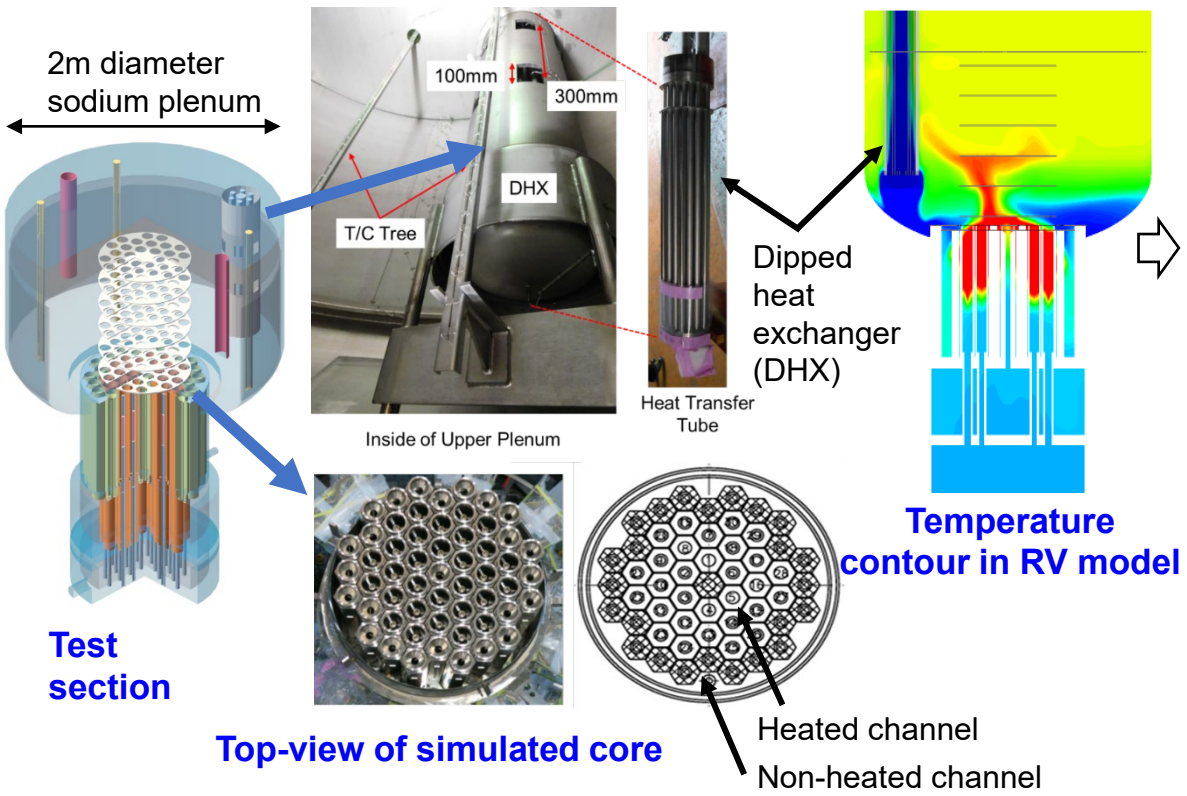
(例) シビアアクシデント評価手法の開発 (SIMMERコード) を共同で実施し、炉心を各領域ごとに並行して解析するモデルを導入。より複雑な炉心事象推移の評価が可能となった。



(例) 日本の試験施設において仏の予算で試験を実施。解析コード検証に利用できるデータを拡充した。



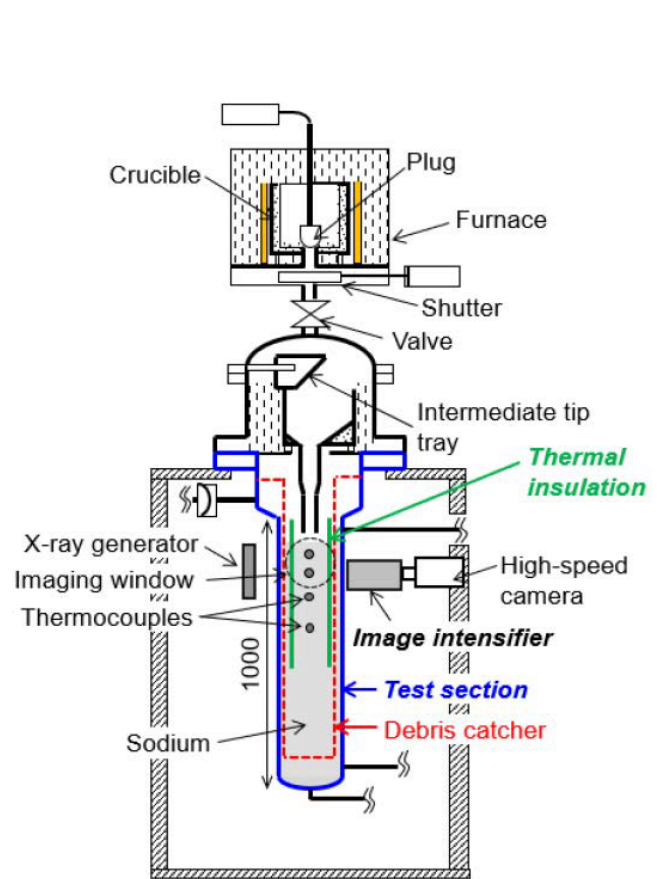
原子炉の設計／安全性評価において重要となる崩壊熱除去システムについて、試験研究と解析評価システム開発を実施



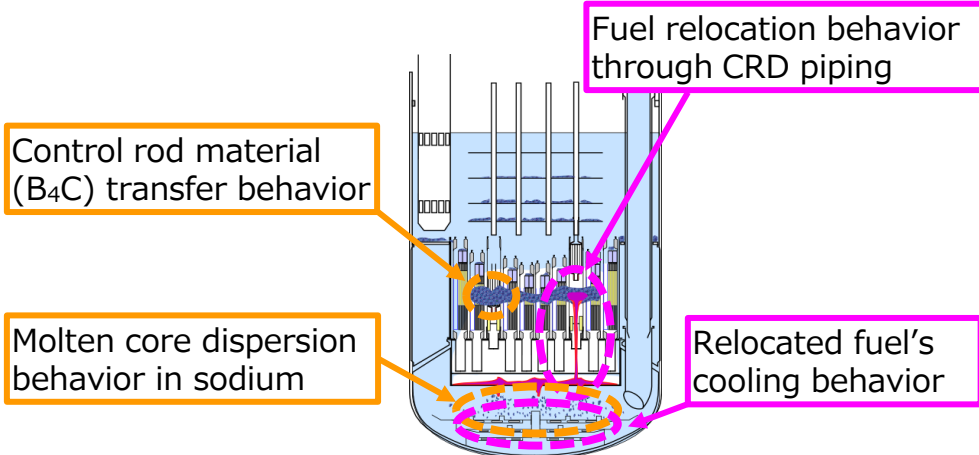
**Comparison of temperature distributions at core outlet level between Experiment and Analysis**

崩壊熱除去時ナトリウム熱流動に関するPLANDTL-2試験と数値シミュレーション

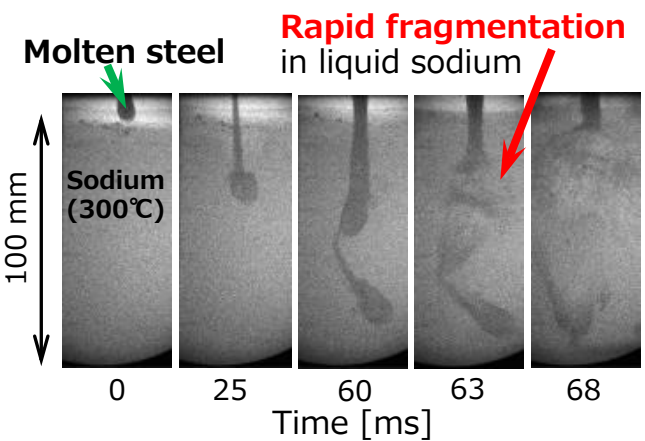
複雑現象の試験データ取得／分析や評価手法開発を共同実施



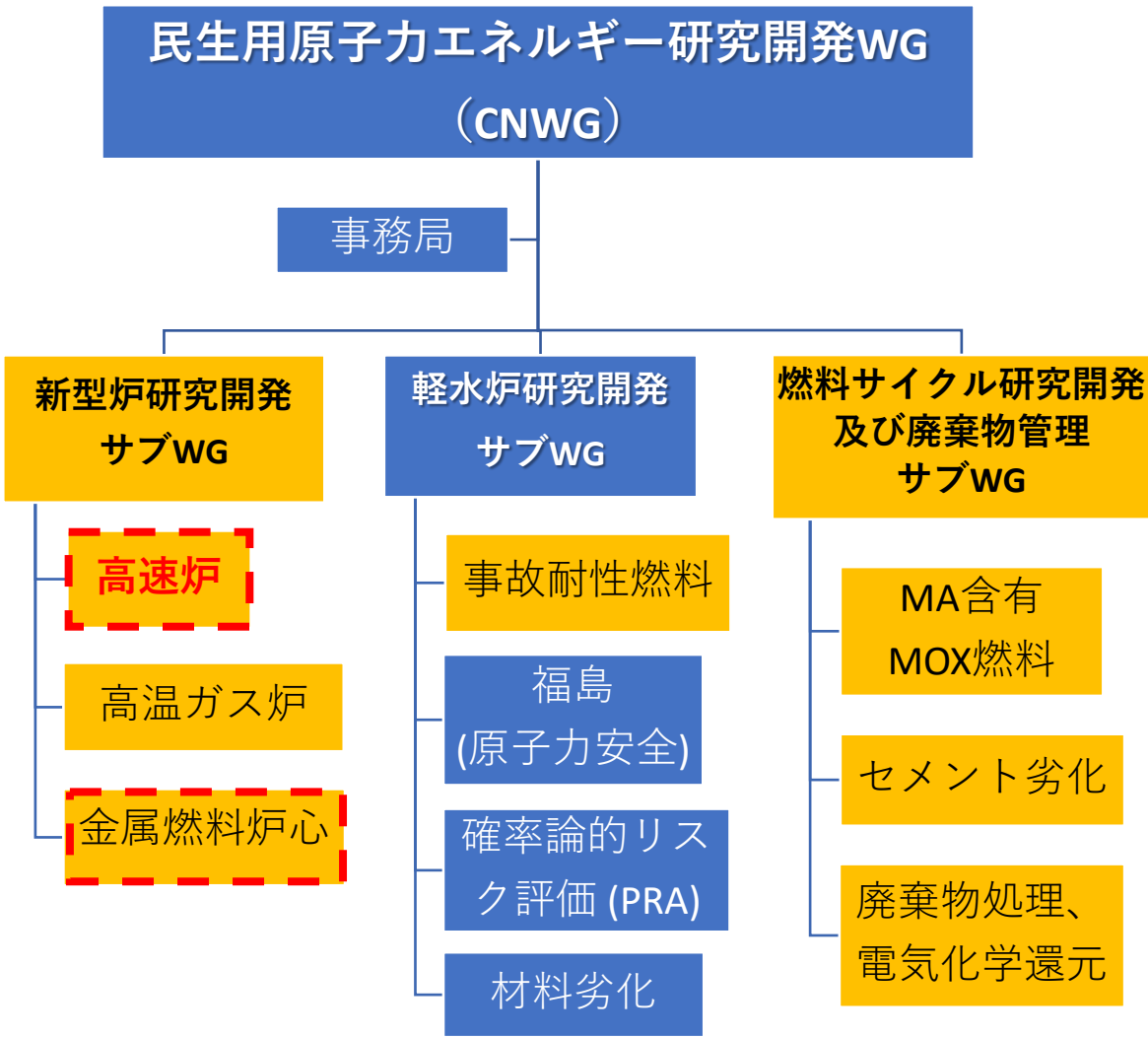
MELT facility in JAEA



Important phenomena in CDA progression & termination



X-ray used visualization test of fragmentation behavior



■ 現状、JAEAが関与している協力

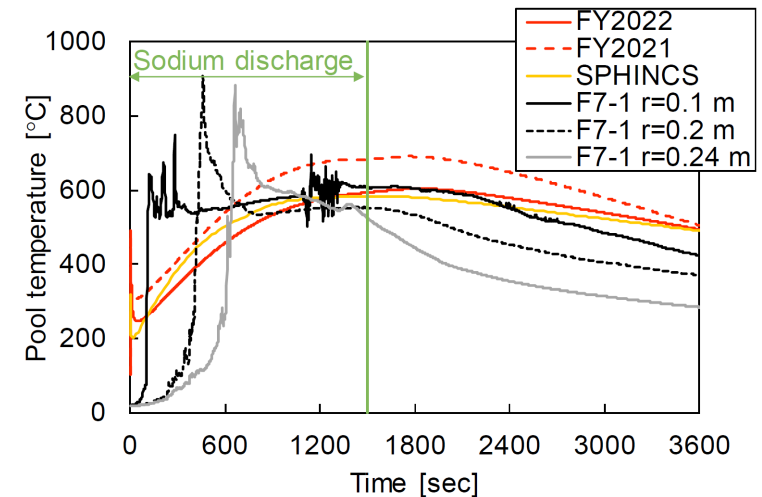
## 高速炉分野の協力項目

- 先進材料の開発と規格化に向けての技術整備
  - ✓サーベランス試験片に温度変化を駆動力として繰返し負荷を与える試験体の開発及びこれを利用した材料サーベランスプログラムの開発
- 新型炉のモデル化とシミュレーション
  - ✓事故時挙動に対するマルチフィジックスシミュレーション手法の開発 (情報交換、ベンチマーク解析等)
- 高速炉燃料炉心に関する協力
  - ✓炉心燃焼解析、照射燃料の放射線輸送計算
- 金属燃料高速炉の安全性解析
  - ✓炉心湾曲反応度評価、金属燃料高速炉のための炉心損傷解析、機構論的ソースターム評価

## ◆ マルチフィジックスシミュレーション手法の開発

### ● ナトリウム燃焼や核分裂生成物移行挙動等に関する評価手法妥当性確認

- 日米両コード(MELCOR, SPHINCS)を用いたナトリウム燃焼試験解析を実施、MELCORコードにおけるモデルの改良効果を確認。
- 核分裂生成物移行挙動モデルの整備を視野に入れた議論を開始。



プール燃焼試験の解析結果例

### ● 酸化物燃料損傷挙動に関する評価手法改良、妥当性確認

- CABRI試験を対象に、SAS4Aコードの日米両派生版での比較を実施中。
- 同コードにおける定常照射挙動モデル及び燃料破損後物質移動挙動モデルの妥当性確認を実施中。

- ◆ 高速炉使用済燃料の核種生成量や放射線量に着目した実験解析を日米共同で行い、解析手法のV&V/UQに資する
- ◆ 実施期間：2021～2026年

## ● 炉心燃焼解析

- 「常陽」およびEBR-IIの炉心ベンチマーク解析に必要な情報の交換
- 最新計算コードおよびライブラリを用いた炉心核設計手法の日米ベンチマーク解析

## ● 照射燃料の放射線輸送計算

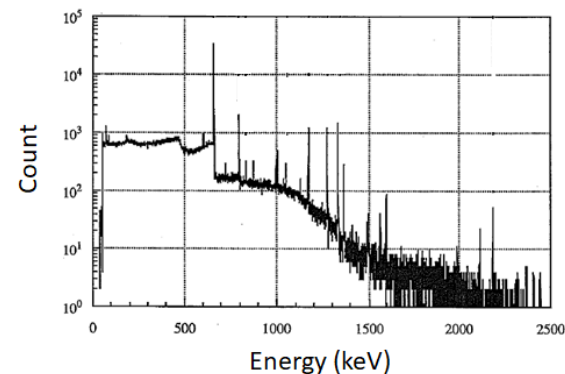
- 「常陽」およびEBR-IIにおける照射燃料の試験データの整理・検証およびベンチマーク解析に必要な情報の交換
- 最新計算コードおよびライブラリを用いた照射燃料からの放射線の輸送計算手法の日米ベンチマーク解析



高速実験炉「常陽」



米国 EBR-II炉



照射燃料からのγ線測定の例

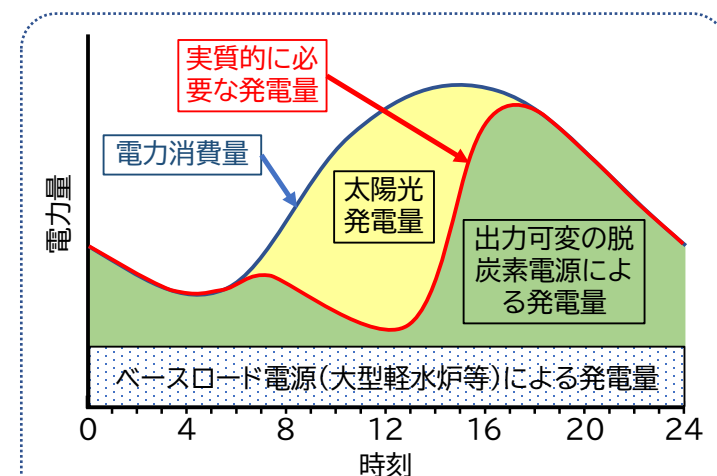
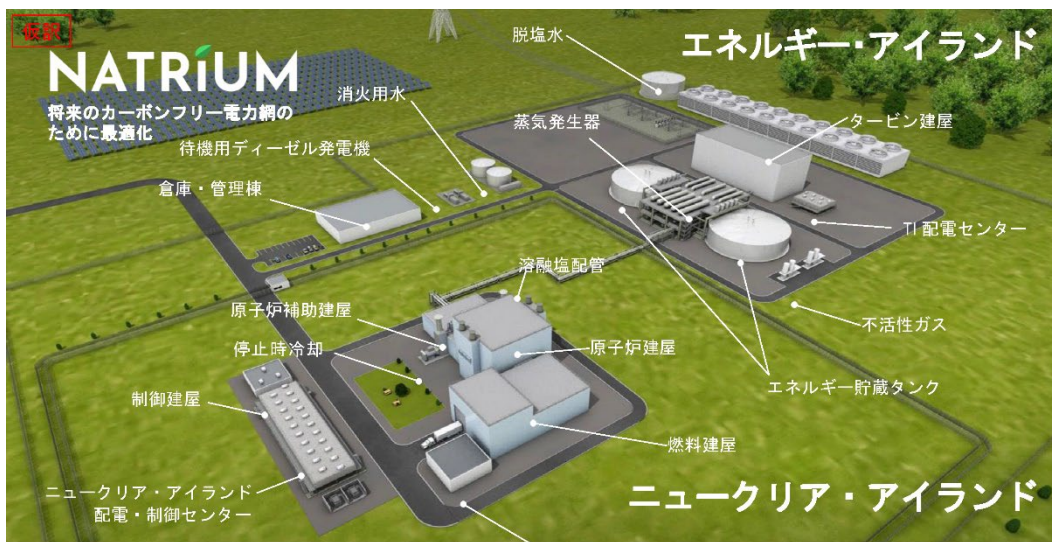


- 2022年1月、テラパワー社が開発する「Natrium」炉\*の研究開発にJAEA、三菱重工業、三菱FBRシステムズ社が技術協力することに関する覚書を締結
- 日米間の連携推進とナトリウム冷却高速炉技術の開発・実証を促進するための活動を目指し、現在、協力内容の具体化に向けて日米間で協議中

\* 政府による50%資金援助、米西部ワイオミング州に立地予定、2030年頃の運転開始を目指す（電気出力34.5万kW）  
蓄熱システムを組み合わせ、電力需要に応じてフレキシブルな発電運転が可能（再エネとの親和性あり）

## 協力対象分野

- 炉心及び燃料
- 制御棒と遮蔽体を含む炉心構成要素
- 原子炉容器と内部構造物
- ポンプや熱交換器を含む主冷却系
- 崩壊熱除去系
- 燃料取扱設備を含む燃料取扱系
- 破損燃料の検出と位置検知を含む計装系



1日での実質的に必要な発電量の変動モード図

電力消費量及び太陽光発電量に応じて、原子力等の脱炭素電源により総発電量を調整する必要

SUBJECT TO DOE COOPERATIVE AGREEMENT N-ON-E D00E09054  
Copyright © 2022 TerraPower, LLC. All Rights Reserved.  
\*テラパワー社とGE-日立の技術

## Natrium™ プラント

出典：経産省 第2回 革新炉ワーキンググループ（2022年5月19日）

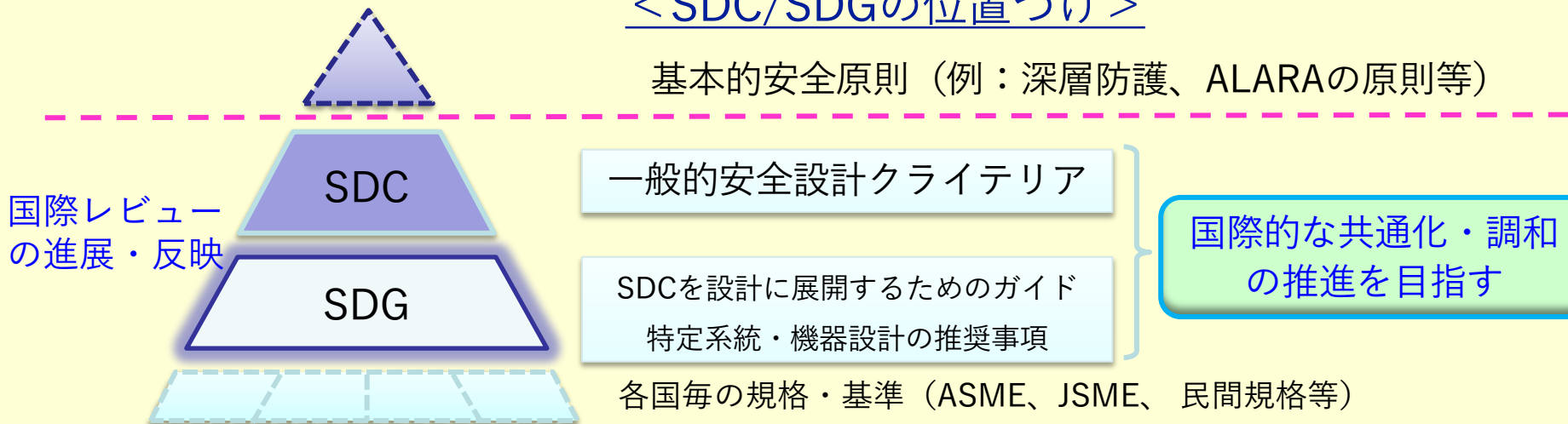


- 世界の高速炉の安全性向上に向け、我が国主導で安全設計要件を構築
- 高速炉開発国が安全規制や安全設計へ反映の意向を示し事実上の世界標準へ

◆主たる成果：

- SDCレポート (2017年改訂版公開)、安全アプローチSDGレポート (2020年改訂版公開)
- ロシア等の規制関連機関から反映の意向、中国・インドでも安全設計に反映の意向
- IAEAやOECD/NEA等で規制機関による国際的なレビューを反映した系統別SDG構築中

## <SDC/SDGの位置づけ>



SDC: Safety Design Criteria  
SDG: Safety Design Guideline

- ◆ **高速炉実証炉の開発が具体化する中でJAEAにて進めている国際協力を活用した研究開発について、概要と一端を紹介した。今後、これらの成果をもとに実証炉の運転開始に貢献していく。**
  - **安全性向上技術の開発**
  - **規格基準類の整備に係る研究開発**
  - **設計・安全性に関する解析評価手法の開発**

本報告は経済産業省からの受託事業である「高速炉の国際協力等に関する技術開発」及び「高速炉に係る共通基盤のための技術開発」の成果を含む。