



日本原子力学会 新型炉部会

新型炉の国際協力の現状と今後の研究開発課題 (イノベーションの創出)

(1) 高速炉の国際協力の現状

2019年3月20日

大島 宏之

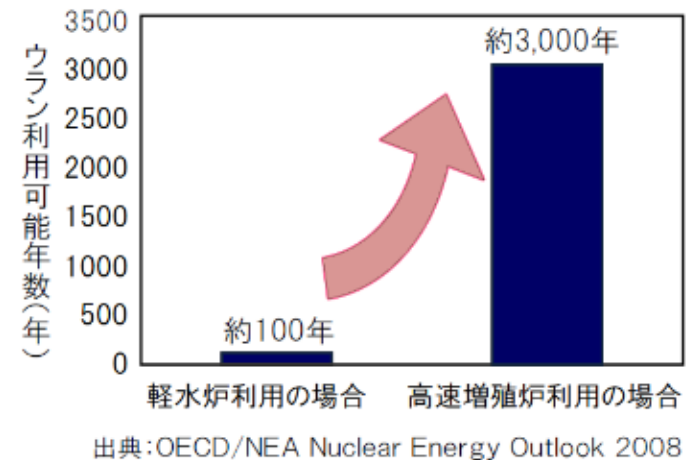
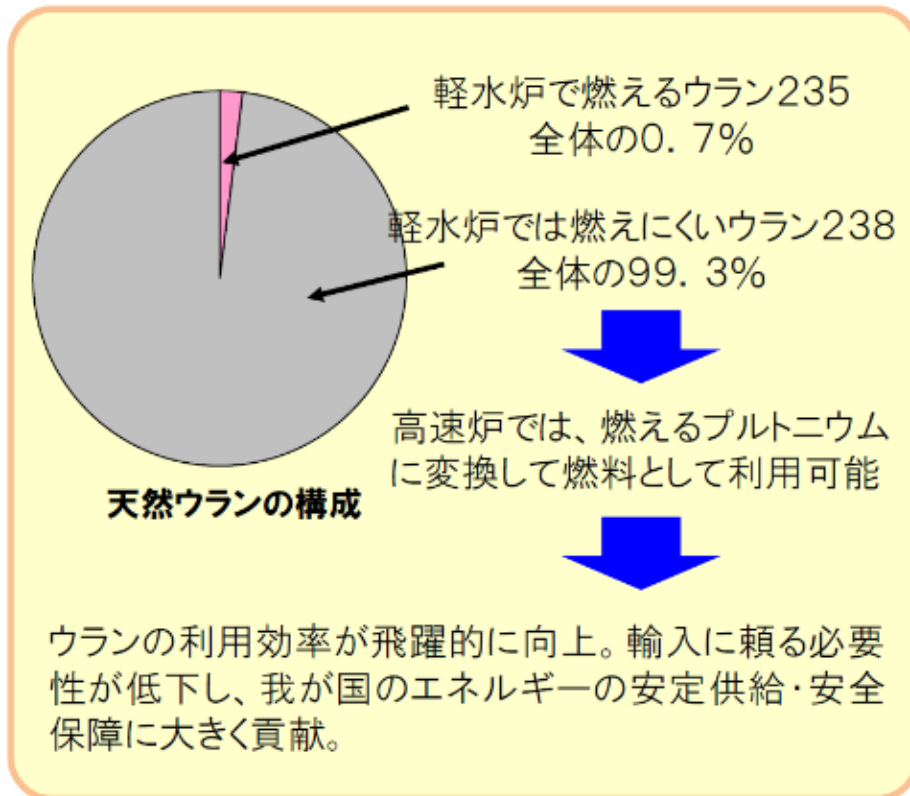
(日本原子力研究開発機構)



高速炉サイクル導入の意義(1)

＜ウラン資源の有効利用・エネルギーセキュリティの確保＞

- ◆ プルトニウムの利用により、ウラン資源を海外に頼らず **エネルギーの自立が可能**
⇒ **高速増殖炉 (FBR) 導入で3000年以上の利用**が可能
- ◆ ウラン資源埋蔵量は約**100年**程度だが、**高速炉サイクルの開発には長期間を有すること**、**各国の原子力発電の導入量に依存すること**から、**着実な研究開発が必要**

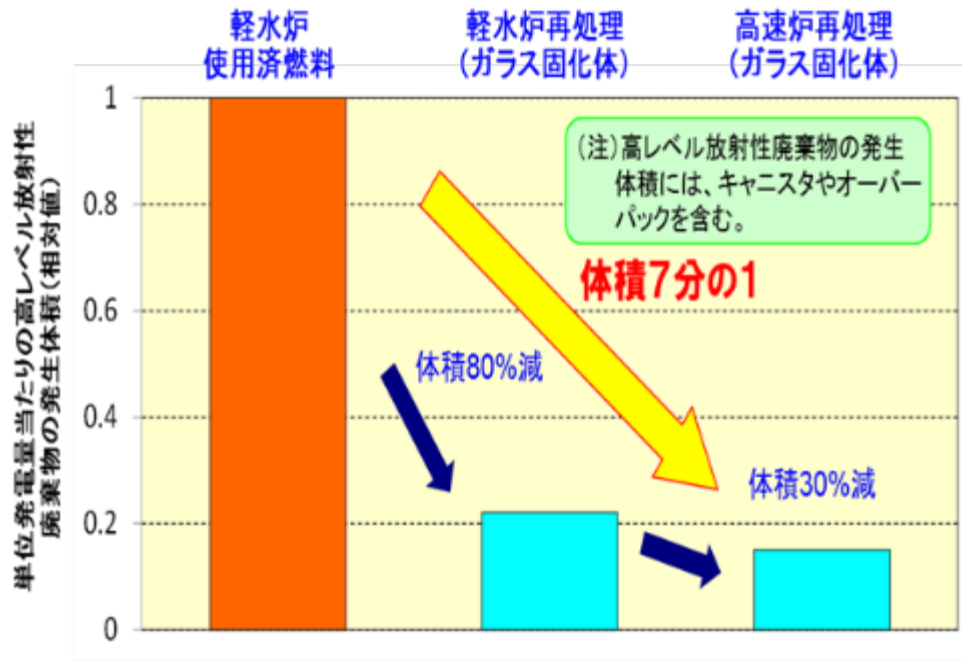




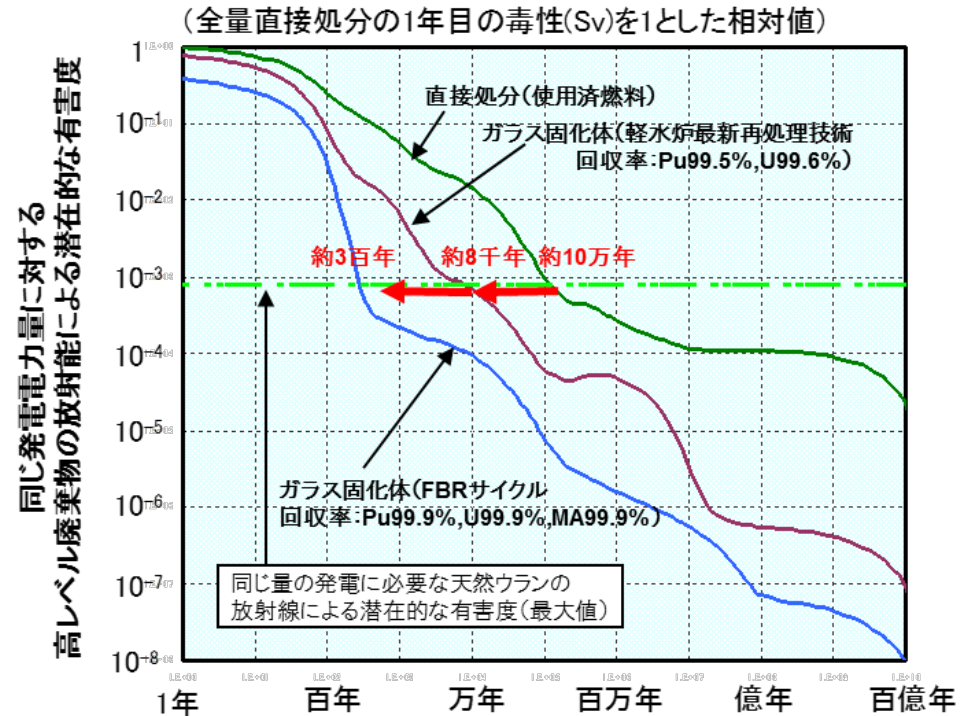
高速炉サイクル導入の意義(2)

<環境に優しい>

- ◆ 再処理しガラス固化体にする事で、**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、**その低減効果はさらに大きくなる**



廃棄物発生量の低減



潜在的有害度の継続期間の短縮




主要な高速炉開発国の状況

ロシア

- 原型炉(BN-600:60万kWe)運転中
⇒豊富な運転経験(1980年運転開始)
- 商用炉から増殖の計画

原型炉運転中 → 2014年6月 実証炉 (BN-800:88万kWe) 初臨界 → 2015年12月 初送電 → 2030年頃 商用炉 (BN-1200:122万kWe) 導入予定



BN-800外観

中国


- 原型炉はスキップし、実証炉 (CFR600:60万kWe)を建設中
- 実証炉から増殖の計画

2010年7月 実験炉 (CEFR:2万kWe) 初臨界 → 2011年7月 初送電 → 2023年 実証炉 (CFR600:60万kWe) 建設完了予定 → 2030年代 商用炉 導入予定

インド

- 発電機能を有する実験炉(FBTR:1.3万kWe(1985年~))を運転中
- 原型炉から増殖の計画

実験炉運転中 → 2019年 原型炉 (PFBR:50万kWe) 初臨界予定 → 2025年頃 実証炉・商用炉 (CFBR:60万kWe) 導入予定



PFBR外観

フランス

- 原型炉(フェニックス:25万kWe(1973年~2010年))及び実証炉(スーパーフェニックス:124万kWe(1985年~1998年))の運転経験があり、増殖性は確認済
- 現在は、放射性廃棄物等管理計画法(2006年)に基づき放射性廃棄物対策を主眼に高速炉を開発

→ 2060年以降 実証炉 → 21世紀後半 商用炉 (数基)

アメリカ

- 実験炉(EBR-II:2万kWe等)の運転経験がある。核不拡散政策により高速炉の商業化を中断
- 高速炉サイクルの基礎・基盤に関する広範な研究開発を国立研等で実施中
- 2015年に「原子力の技術革新を加速するゲートウェイ(GAIN)」を設立して、民間の先進炉開発を支援中。
- 議会の支援の下、多目的試験炉を産官学で開発中。

2025年末まで 多目的試験炉 VTR(300MWt) 運転開始予定

韓国

- 1997年から高速炉の設計研究等を実施
- 乾式処理で電解還元までの試験はできるが、Puを分離する電解精製等を実施するためには、米韓原子力協定の改定が必要
- 2017年の文政権の脱原発政策により、今後の動向は不透明

→ 2028年 原型炉 (PGSFR:15万kWe) 建設完了予定



国際協力の活用

日仏

- ASTRID協力による炉設計技術
- プラントシミュレーション技術と試験検証

日米

- ナトリウム冷却試験炉開発への参画
- 金属燃料・乾式再処理の共同開発

日カザフスタン

- 苛酷事故の共同炉内試験

機構を中心とした国際協力の方針

- 2国間協力（日仏、日米）では、**ナトリウム冷却高速炉の枢要技術を国際分担**することにより**開発の効率化、技術の国際標準化**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基準の原案作成
- 6炉型原子力システム概念の研究協力

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)

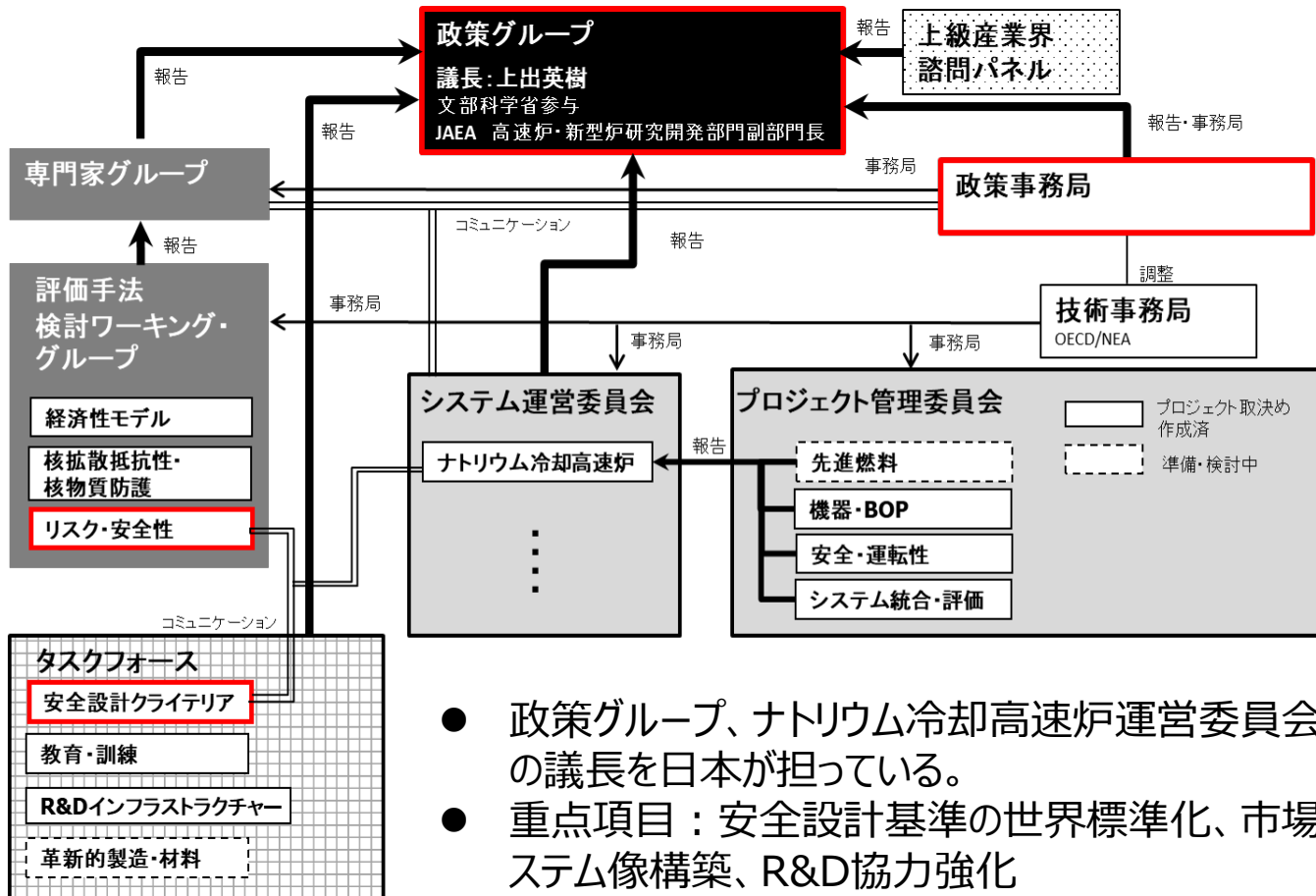
- 関連の規格基準類の国際標準化



多国間協力-GIFにおける高速炉協力

目的： GIFは、第4世代原子炉（Gen-IV炉）概念の開発のために設置された国際組織で、参加国（13か国と1機関）で必要な研究開発を分担、実施

開発目標： 21世紀に適用する革新的原子炉概念のための開発目標に、以下の4つを設定



- ① 持続可能性
(燃料の効率的利用、廃棄物の最小化と管理)
- ② 安全性と信頼性
(敷地外の緊急時対応不要等)
- ③ 経済性
- ④ 核拡散抵抗性と核物質防護

↓

6炉型の原子力システム概念の研究協力を実施中

- 政策グループ、ナトリウム冷却高速炉運営委員会、リスク・安全性WG、SDC-TFの議長を日本が担っている。
- 重点項目：安全設計基準の世界標準化、市場投入に向けた次世代原子力システム像構築、R&D協力強化

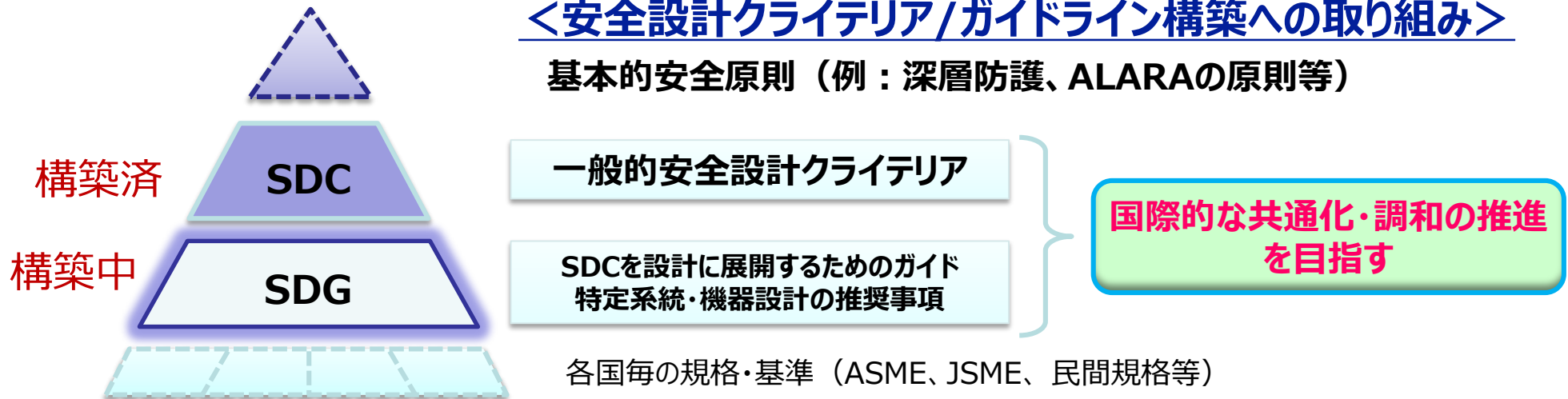


GIFにおける協力例 (安全設計基準 : SDC/SDG)

開発目標		設計仕様の例
安全・信頼性	安全・高信頼な運転	・通常運転時における高い安全性・信頼性
	炉心損傷の防止	・事故頻度の最小化、事故時でも炉心損傷を発生させない設計
	施設外の緊急時対応が不要	・放射性物質放出の可能性・量を最小化するようにシビアアクシデントの制御、緩和が出来る安全系

<安全設計クライテリア/ガイドライン構築への取り組み>

基本的安全原則 (例 : 深層防護、ALARAの原則等)



SDC : 安全設計クライテリア、SDG : 安全設計ガイドライン

日本の主導により国際協働で安全設計基準の原案作成

SDC=福島第1の経験を踏まえ更に安全性を高めた安全設計のクライテリア

ナトリウム炉を対象としたSDCは、https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_93020/safety-design-criteria にて公開されている。



多国間協力-OECD/NEAを通じた協力

■ NI2050 (Nuclear Innovation 2050)

● 協力概要

2050年を見通し、脱炭素社会を含む持続性のある原子力エネルギー利用に向けて、国際協力で開発を進める重要テーマを抽出し、計画の青写真を作成。高速炉燃料サイクルは主要な議題の1つ。

● 参加国：NEA加盟国

● 協力の進め方・ねらい

日本の試験インフラ活用を含む開発テーマの抽出を完了。プロジェクト化の議論へ。

■ WPFC*1)/AFCS*2)

● 協力概要

燃料サイクル諸量に関する評価手法の開発・標準化。各国の諸量解析コードのベンチマーク解析及び環境負荷低減と資源有効利用を目指したPu・MA利用シナリオの構築を実施

● 参加国：日、仏、米、ベルギー、フィンランド、ハンガリー、伊、スペイン

● 協力の進め方・ねらい

世界的に高速炉導入の意義を確認する場及び各国のシナリオ評価の動向把握の場として利用

*1) Working Party on Scientific Issues of the Fuel Cycle

*2) Advanced Fuel Cycle Scenarios



多国間協力-IAEAを通じた協力

■ TWG*1)-FR (18か国2機関)

- 協力概要：

- 各種CRP*2)に貢献 (これまでに、もんじゅ/EBR-II/NAPRO等、CEFR/FFTF 2018年開始など)

- 各種の情報交換

- 今後の進め方：

- 知識データベース、ナトリウム試験施設ブックレット作成を継続

■ TWG-NFCO*3) (18か国2機関)

- 協力概要：

- 各国の核燃料サイクルに係る情報を共有

■ INPRO*4) (40か国1機関)

- 協力概要：

- 日本は2006年に加入し、評価手法開発・改良、サイクル諸量評価、人員派遣等にこれまで貢献

*1) Technical Working Group

*3) Nuclear Fuel Cycle Options and Spent Fuel Management

*2) Coordinated Research Project

*4) International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel



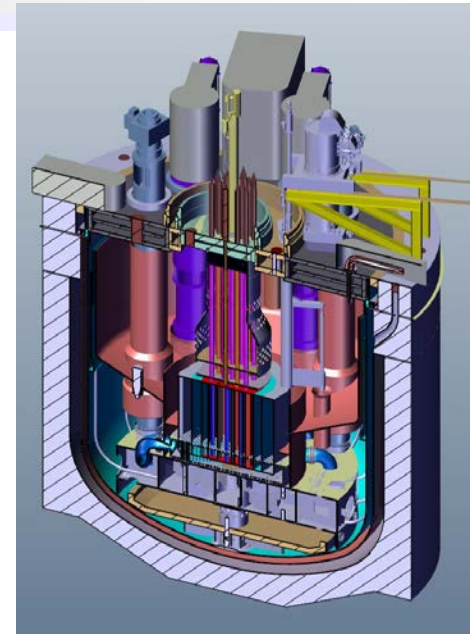
二国間協力-フランスとの協力(1)

■ 仏国技術実証炉ASTRIDの概要

- 2008年:ナトリウム冷却高速炉(SFR)をレファレンス炉に選定
- 2012年:プロトタイプ炉(ASTRID:技術実証炉)の技術仕様を決定
- 2013~2015年:概念設計、2016~2019年:基本設計

■ 協力の概要

- ASTRID開発プロジェクトへの参加は**日仏首脳同士の合意事項**。2014年5月に政府間の取決めを締結
- **JAEAが日本代表・MFBR/MHIが参加して推進**。2014年8月に、仏CEA・AREVA (現Framatome) と実施機関間取決めを締結して協力を開始



ASTRID概念

主な協力項目

設計分野

設計

- 強制循環方式崩壊熱除去系
- キュリー点電磁石方式自己作動型炉停止機構
- 免震技術
- 炉上部機構
- 原子炉容器室上蓋 (ポーラテーブル)
- コアキャッチャー
- 原子炉容器内熱流動挙動
- 炉容器等の構造健全性、等

炉心燃料分野

- 燃料照射試験検討
- 燃料ピン照射挙動評価コード検証
- 長寿命制御要素開発
- 高燃焼度被覆管材料開発、等

シビアアクシデント分野

- シナリオ検討
- 評価手法開発
- レベル2PSA
- SA試験計画の共同検討、等

炉技術分野

- 材料のクリープ挙動
- 計装・機器開発
- 熱流動評価手法開発
- 実証試験計画、等

R&D



二国間協力-フランスとの協力(2)

主な協力成果

■ 設計分野

- 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設計としてとりまとめた。

■ 燃料分野

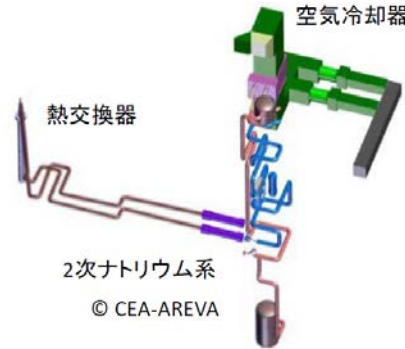
- 常陽の炉心設計や仏側要求事項等に適合した照射条件の検討、試験用燃料要素と照射試験用リグの概念設計結果を提示した。

■ シビアアクシデント分野

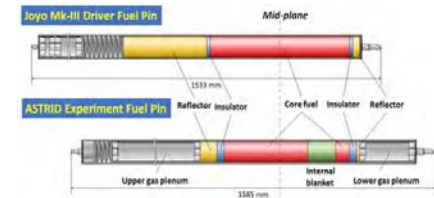
- 日仏の試験計画に関する情報交換、燃料排出ダクト周りの局所解析による影響緩和機構の評価、炉心構成物質である B_4C とスチールの共晶溶融挙動評価及び物性評価、大規模圧力発生事象（燃料冷却材相互作用）に関する日仏各評価の情報交換、デブリ冷却性評価（コアキャッチャ設計の成立性評価に提供）等を実施する等、シビアアクシデント分野の評価に係る知見を獲得した。

■ 炉技術分野

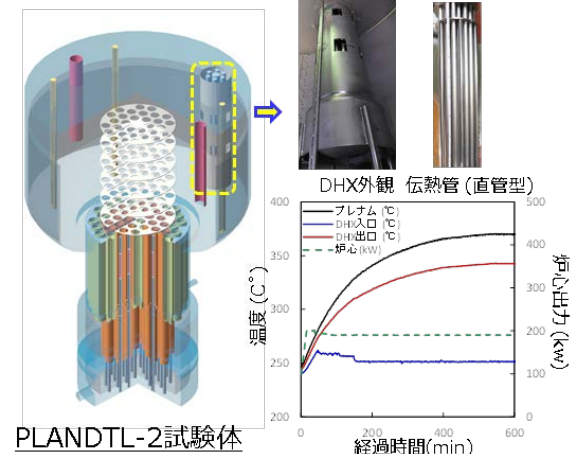
- 日仏共同で策定した試験計画に基づき PLANDTL-2において熱流動試験を実施することにより、原子炉容器内熱流動の高精度予測を可能とするために有用な試験データを仏国と共有した。



強制循環型崩壊熱除去系



ASTRID燃料ピン照射試験燃料の構造概念図
(上段：常陽ドライバ燃料 / 下段：ASTRID試験燃料)

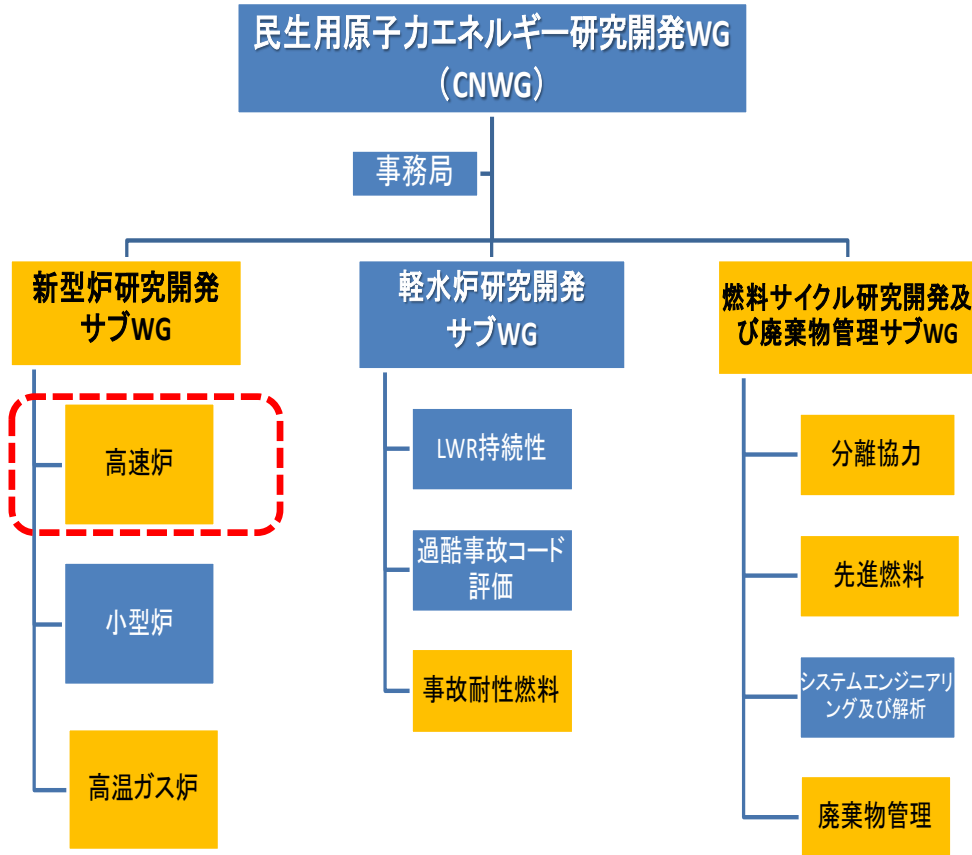


予備試験結果：DHX除熱性能確認



二国間協力-米国との協力-体制と協力項目

● 民生用原子力エネルギー研究開発WG(CNWG)



- 先進材料の開発と規格化に向けての技術整備
 - ✓ 60年設計のための設計許容値の検討、クリープ疲労相互作用および設計寿命に関する検討等
- 新型炉のモデル化とシミュレーション技術整備
 - ✓ 高速炉プラント総合シミュレーション技術の開発、マルチフィジックスシミュレーション手法の開発
- 金属燃料炉心の開発に向けての技術整備
 - ✓ 金属燃料炉心核設計、金属燃料炉心の安全性評価等
- 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

■ 現状、機構が大きく関与している分野



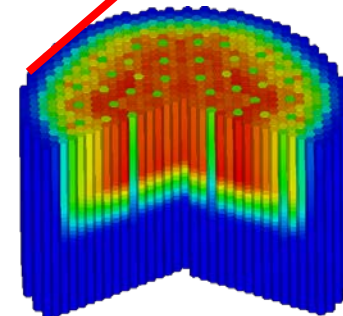
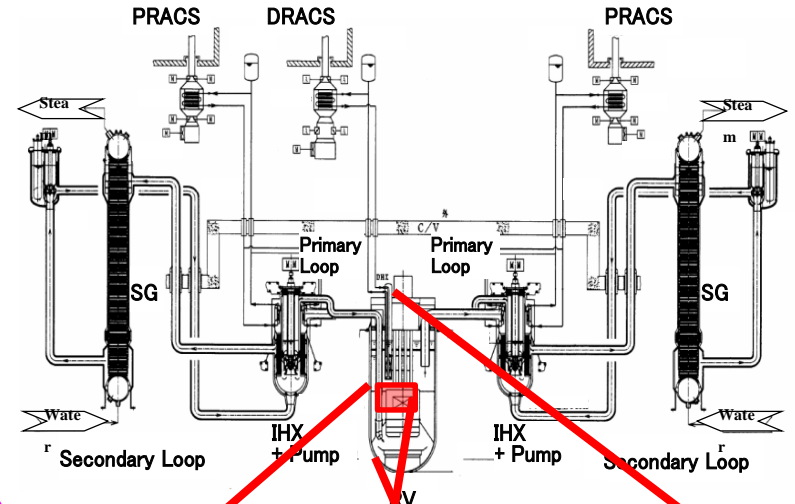
二国間協力-米国との協力を研究開発例

□ 新型炉のモデル化とシミュレーション技術整備

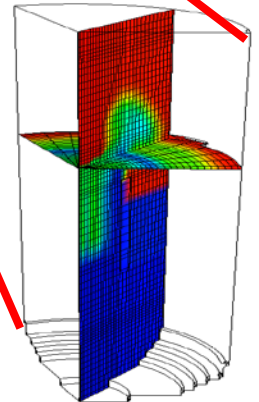
- 高速炉プラント総合シミュレーション技術の開発
 - 1次元から3次元までの手法を組み合わせたマルチレベルプラントシミュレーターの整備を実施
 - 炉心・燃料集合体モデル化に関する知見共有、及びベンチマーク解析を実施

- マルチフィジックスシミュレーション手法の開発
 - ナトリウム燃焼やナトリウム-水反応現象などナトリウム冷却高速炉特有の複雑現象に対するシミュレーション手法整備（実験データベース構築含む）を実施
 - 仮想的炉心損傷事故解析のための物理及び数値モデル知見共有、妥当性確認用の実験データ情報交換を実施

高速炉プラントモデル(1次元動特性コード)



炉心モデル
(1次元動特性コード)



炉容器モデル
※解析結果はイメージ (3次元解析コード)

<マルチレベルプラントシミュレーター(イメージ)>



二国間協力-カザフスタンとの協力

■ 目的、ねらい

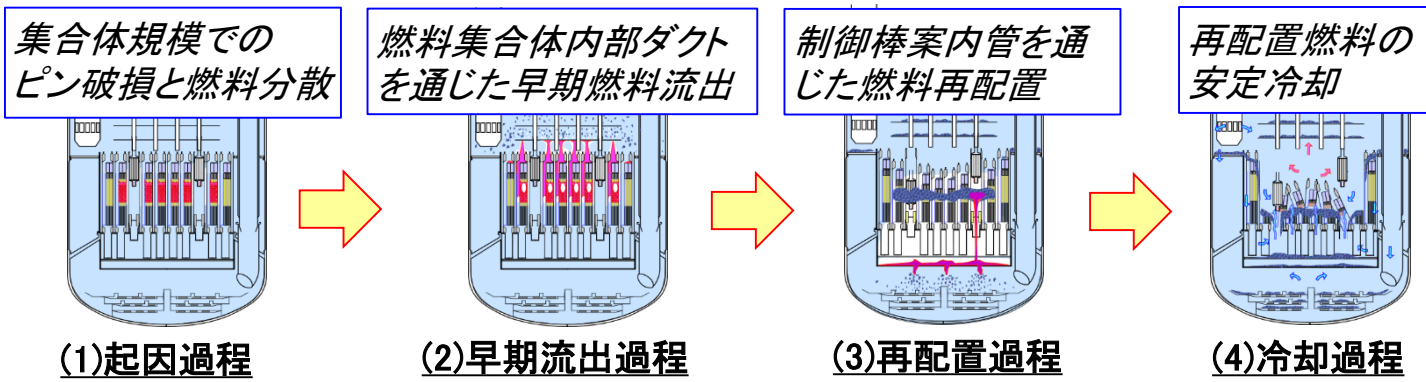
- シビアアクシデント時の損傷炉心物質の原子炉容器内で格納を目指し、試験を通じて損傷炉心の挙動（燃料溶融～再配置～冷却）を把握

■ 実施概要

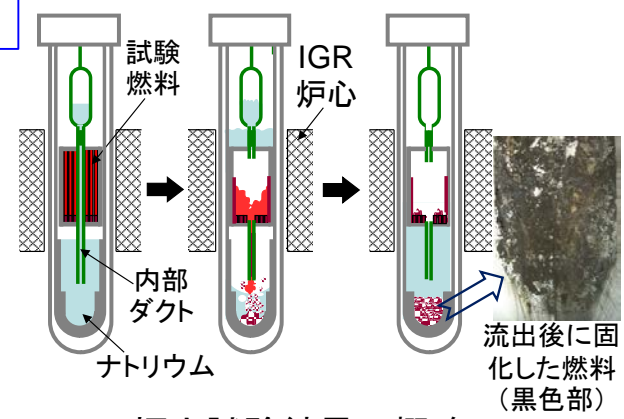
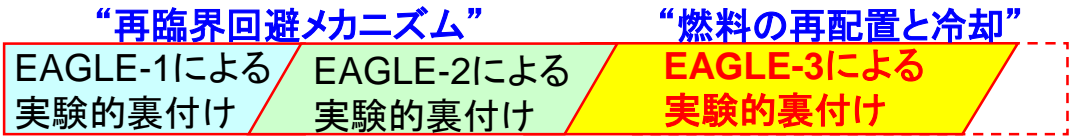
- カザフスタン共和国国立原子力センターの試験研究用照射炉IGR（Impulse Graphite Reactor）等の試験施設を活用したEAGLE（Experimental Acquisition of Generalized Logic to Eliminate recriticalities）試験研究を展開
- EAGLE-1、-2を通じて溶融燃料流出による再臨界回避メカニズムの確認、EAGLE-3による燃料再配置過程や再配置燃料の冷却性を確認

■ 成果

- 核加熱条件下で燃料ピン束が溶融、流出、静定するまでの一連の挙動に関するデータを取得
 - 安全解析コードSIMMERの検証に反映、実機解析を通じて溶融燃料の流出による反応度の効果的な低下を確認



過去の日仏協力
(CABRI試験等)



炉内試験結果の概略*

*エネルギーレビュー誌Vol.36 No. 11



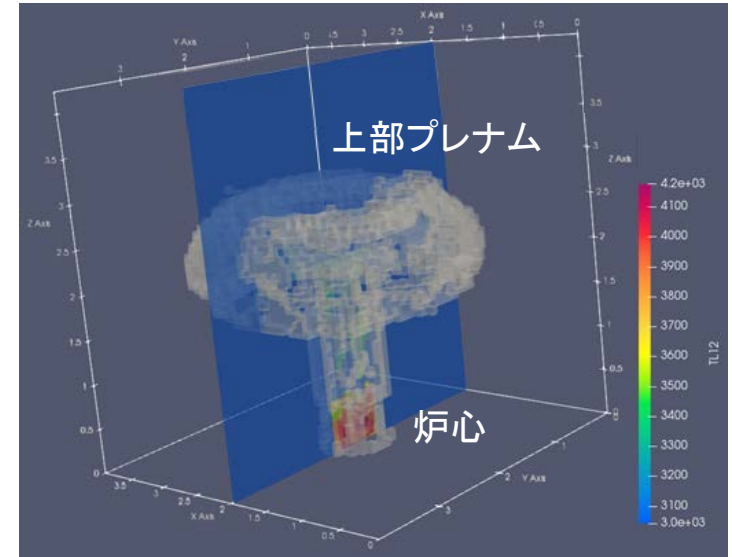
日独仏SIMMER開発協力

■ 協力の概要

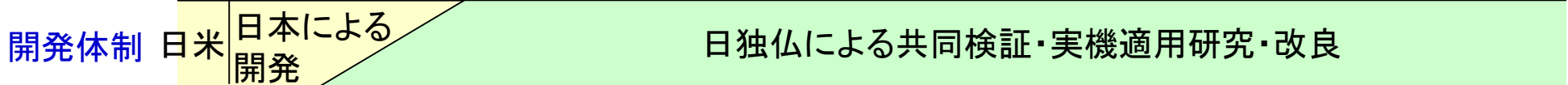
- 高速炉のシビアアクシデント時の炉心挙動を高精度にシミュレーションすることを目的とした多次元核熱流動（多成分多相流）解析コードの開発
- JAEAが主体となって開発を推進。1990年代から欧州研究機関と共同で改良および系統的な実験的検証を進めてきた。

■ 主な協力成果

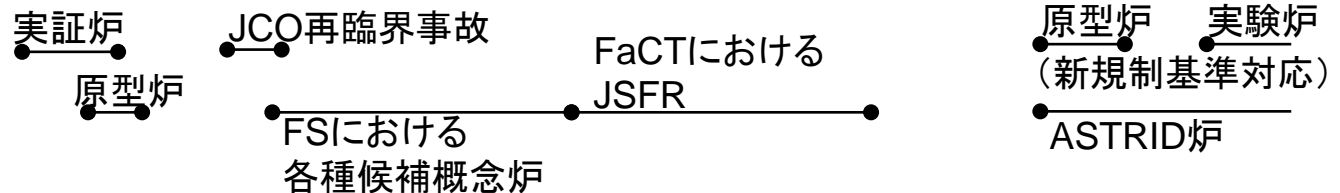
- 欧州各機関で蓄積された安全試験データを有効活用し、評価手法へ反映。
- 各機関における多様な高速炉の安全解析への適用研究を通じて、SIMMERを高速炉の安全評価における国際的な標準的手法として整備。



SIMMERによる炉心崩壊事故解析例



安全解析への適用実績





まとめ

- JAEAを中心としたナトリウム冷却高速炉の研究開発に関する国際協力の現状を紹介
- 国際協力は、評価手法や規格基準類の整備・国際標準化、インフラの共同利用や試験データの相互補完による研究開発自体の合理化・効率化、そして人材育成の観点から有効。将来の市場性を確保していく上でも重要
- 他電源との競争の激化など原子力を取り巻く社会環境は大きく変化し、世界的にもリソースの共有を促進する動きが活発化。長期間を要し多額の研究開発資金が必要となる高速炉開発では、国際協力を活用し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
- これまで行ってきた日仏及び日米協力の二国間協力やGIF等の多国間協力をさらに戦略的に活用することで、効果的かつ効率的に高速炉サイクルの実用化に向けた研究開発を展開していくことが肝要