

原子カインノベーションを巡る海外動向とJAEAの国際戦略

(2) 原子カインノベーションを巡るJAEAの国際戦略

令和4年3月18日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
舟木 健太郎

はじめに

1. 現行のJAEA「国際戦略」
2. 原子力を巡る動向
3. JAEAの第4期中長期計画
4. 新たなJAEA「国際戦略」の検討方針
5. 海外国研の動向
6. 国際戦略の検討にあたっての視点と論点

昭和三十年法律第百八十六号

原子力基本法

第一章 総則

(目的)

第一条 この法律は、原子力の研究、開発及び利用（以下「原子力利用」という。）を推進することによって、将来におけるエネルギー資源を確保し、学術の進歩と産業の振興とを図り、もって人類社会の福祉と国民生活の水準向上とに寄与することを目的とする。

(基本方針)

第二条 原子力利用は、平和の目的に限り、安全の確保を旨として、民主的な運営の下に、自主的にこれを行うものとし、その成果を公開し、進んで国際協力に資するものとする。

2 前項の安全の確保については、確立された国際的な基準を踏まえ、国民の生命、健康及び財産の保護、環境の保全並びに我が国の安全保障に資することを目的として行うものとする。

第三章 原子力の開発機関

(国立研究開発法人日本原子力研究開発機構)

第七条 原子力に関する基礎的研究及び応用の研究並びに核燃料サイクルを確立するための高速増殖炉及びこれに必要な核燃料物質の開発並びに核燃料物質の再処理等に関する技術の開発並びにこれらの成果の普及等は、第二条に規定する基本方針に基づき、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構において行うものとする。

1. 現行のJAEA「国際戦略」(全体像)

【基本方針】

国際協力の意義

- 海外研究機関等のリソースの活用による研究開発の効率的推進、成果の最大化（狭義の国際協力）
- 原子力利用に伴う共通課題に関する国際貢献を通じ、プレゼンスの増大や成果の我が国へのベネフィットが期待（国際貢献）
- 研究開発成果の国際展開による国際原子力コミュニティや我が国産業界への寄与（国際展開）



国際協力推進の基本方針

- 原子力安全の確保への貢献
- 核不拡散・核セキュリティの確保への貢献
- 研究開発成果の最大化
- 原子力人材育成支援（他国に対する支援、機構内の国際人材育成）
- 研究成果の海外への普及、国際展開

基本方針を踏まえ、以下を重点協力国、機関や重点協力分野とし、それぞれの特徴を踏まえた国際協力を展開

【重点協力国等】

原子力先進国

相手国の英知を最大限活用した、リソースの分担による互恵的な協力

原子力新興国

基礎基盤、原子力安全及び核不拡散・核セキュリティ等に係る支援の推進

原子力関連国際機関

原子力安全、核セキュリティ等に関する国際基準の策定、多国間の原子力研究開発活動等に参画

【重点協力分野】

福島廃止措置

原子力安全の確保

次世代炉の研究開発

バックエンド研究

他の国の原子力人材育成支援と機構の国際人材の育成

環境回復

核不拡散・核セキュリティの確保

原子力の基礎・基盤研究

機構施設の廃止措置・廃棄物管理

【国際協力推進方策】

国際協力の優先度の向上

国際協力に必要な資源の配分に高いプライオリティを付与

原子力機構の国際化

- 国際協力拠点の充実
- 国際シンポジウム、ワークショップの開催や優れた研究者の招聘
- 研究開発拠点における英語公用化の検討、英語での情報発信の強化

国際室の機能強化

- シンクタンクとしての国際室の機能強化
- 海外事務所主催のイベントの開催等、海外事務所の活用

外部資金の獲得

原子力国際協力関連の既存の公募事業の有効活用と新たな競争的資金の創設の働きかけ

【推進期間と見直し】

本国際戦略は、2017年3月に策定。推進期間は2021年度まで第3期中長期目標期間。ただし、情勢の変化等に応じて適宜見直し



1. 現行のJAEA「国際戦略」(国・地域、分野別)

【国・地域等ごとの国際協力の進め方】

欧州

- ・フランス：高速炉、核燃料サイクルを中心に幅広く協力
- ・英国：放射性廃棄物管理、廃止措置の協力等を推進
- ・フィンランド等：高レベル放射性廃棄物処分に関する研究開発協力を推進

ロシア・CIS

- ・ロシア：革新的な原子力技術の促進を目的とした協力を検討
- ・カザフスタン：高速炉の炉心溶融試験に関する協力を継続、高温ガス炉などの協力を検討
- ・ウクライナ：原発事故の情報交換を開始

北米

- ・米国：原子力分野における最も重要なパートナーであるとの認識の下、次世代炉等の研究開発、安全研究、核不拡散・核セキュリティ分野での協力を幅広く展開
- ・カナダ：高レベル放射性廃棄物処分に関する研究開発協力を推進

アジア・太平洋

- ・タイ、インドネシア等：原子力安全及び核不拡散・核セキュリティに関する人材育成支援を実施
- ・オーストラリア：中性子科学、照射技術等の協力を推進
- ・中国：核不拡散・核セキュリティに関する人材育成支援を推進
- ・インド：我が国の核不拡散政策等も踏まえ、今後の協力の可能性を模索

国際機関等

事務局への機構職員の派遣人数の増大に取り組む他、それぞれの機関の役割に応じ、以下の貢献を実施

- ・IAEA：諮問委員会等の常設委員会、専門家会合等に積極的に参画し、原子力安全や核セキュリティ等の基準策定等に貢献
- ・OECD/NEA：常設委員会や共同事業への参加を継続。NI2050等、新たなイニシアティブに積極的に参加
- ・CTBTO：放射性核種の監視施設の運用、試料分析を行うとともに、検証技術向上に貢献
- ・EURATOM：核物質の測定・検知、核鑑識に関する技術協力、核不拡散・核セキュリティ分野における人材育成に関する共同支援を実施
- ・ISTC：本枠組みを活用したCIS諸国へのプロジェクト支援を実施

【研究開発分野ごとの国際協力の進め方】

福島廃止措置

- ・廃炉措置を国内外の英知を結集して推進
- ・事故進展シナリオ等の成果を国際的に発信

環境回復

- ・未除染地帯の線量評価、放射能の環境動態等の科学的データの提供
- ・同様の課題に取り組む国との協力を推進

原子力規制行政支援のための安全研究と原子力の安全性向上研究

- ・安全研究を世界の英知を結集して推進する機能・体制を安全研究センターに整備
- ・原子力の安全性向上研究を国際的に推進する機能・体制を原子力基礎工学研究センターに整備

核不拡散・核セキュリティ

- ・IAEAや米国等と連携した人材育成支援、技術開発により国際的な核不拡散・核セキュリティ強化に貢献
- ・CTBTOの枠組みの下で放射性核種監視観測所等の暫定運用等を実施

次世代炉の研究開発

- ・高速炉に関しては、フランス、米国との二国間協力やGIF等多国間協力の枠組みを活用した共同研究やGIFにおける安全設計基準の国際標準化に向けた取組を実施
- ・高温ガス炉に関しては、技術実証に向けた活動や高温ガス炉の安全設計基準の国際標準化に向けた取組を実施

原子力の基礎・基盤研究

先端原子力科学研究、原子力基盤研究、中性子利用研究に関して、世界の優れた研究機関との人材交流、情報交換、互恵的な研究協力を展開

バックエンド研究

- ・ADSによる核変換技術に関して、米国、ベルギーなどとの協力を積極的に活用
- ・高レベル放射性廃棄物処分の研究開発に関しては欧州諸国やカナダ等、地下研究施設を有する国等との間で協力

機構施設の廃止措置・廃棄物管理

フランス、英国、米国といった先行国との協力、国際プロジェクトへの参加等により知見を取得

他の国の原子力人材育成支援と機構の国際人材の育成

- ・アジアを中心とした原子力新興国の原子力人材育成に貢献
- ・国際協力拠点における内外研究者の協働と交流の機会を活用して人材育成を実施
- ・国際原子力コミュニティのリーダーとなる人材を機構職員の中から育成

2. 原子力を巡る動向

- 安全確保を大前提とした再稼働、既設炉の長期運転
- 燃料サイクル、廃棄物・廃止措置対策、地層処分推進
- 技術・人材基盤の喪失への懸念を踏まえた取組み
- 将来の選択肢としてのSMR・新型炉（NEXIP）
- 医療用RI

□ 政府(政策)

➤ 「エネルギー基本計画」

➤ 「2050年のCN実現に伴うグリーン成長戦略」

⇒ **国際協力を通じ、民間活力を活かした軽水炉SMR、ガス炉（熱利用、水素製造）、高速炉、核融合炉等の開発・実証を推進**

➤ 国際的にも、COP26・気候危機への意識の高まり、エネルギー価格の高騰

⇒ **各国で、ネットゼロに向けた実用段階の選択肢として原子力の役割を再認識**

□ 事業者・サプライヤ

➤ 1F事故教訓を踏まえた十分な対策に加え、長期運転に向けて継続的な安全性向上、サプライヤを含む技術・人材の維持が各国共通の課題

➤ 廃棄物、廃止措置対策の推進（効率化と合理的規制への期待）

⇒ **海外の事業者、規制当局、研究機関等から、先行事例を学ぶ必要性の高まり**

□ 研究機関他

➤ 医療用RIなど放射線科学

□ その他

➤ 経済安全保障の考慮、東アジア地域・新興国等における原子力安全

3. JAEAの第4期中長期目標

□ 次期中長期目標策定の考え方：文部科学省等関係省庁からJAEAに対して提示された「目標」

- 原子力機構（JAEA）は、今期中長期目標期間（H27年度～R3年度）において、**国立研究開発法人**として、また、**我が国における原子力に関する唯一の総合的研究開発機関**として、原子力に関する基礎的研究・応用の研究から核燃料サイクルに関する研究開発、安全規制行政等に係る技術支援、東京電力福島第一原子力発電所の廃炉に関する研究開発まで、**幅広い分野で顕著な成果を創出**してきた。
- 次期中長期目標期間（R4年度～R10年度）では、今期に引き続き、「**原子力イノベーションの持続的創出**」と「**安全を最優先としたバックエンド対策の着実な推進**」とを高度に両立させつつ、エネルギー利用を越えた**様々な分野における原子力の多様な価値発現**を通じて、**新たな社会的課題**に向き合い、その**政策的要請・期待に応えていく**ことが求められている。

▶ 次期中長期目標案における研究開発関連の目標設定に当たっては、以下に列挙する原子力機構を取り巻く近年の環境変化・政策的背景・新たな課題等を踏まえ、これらを反映する形で新たに柱建てを見直し。

➤ 「2050年カーボンニュートラル実現」への貢献

➤ 東日本大震災発災から10年経過（新たな復興フェーズの到来）

➤ 研究開発のDXを含めデジタル社会への急速な転換

➤ COVID-19で大きく変容した社会全体の在り方・行動様式

➤ 大学等における原子力関係の人材育成基盤の脆弱化

➤ エネルギー政策上の原子力の位置付け：第6次エネルギー基本計画

➤ 新規制基準下におけるバックエンド・コスト（対象施設数・規模）の増大

➤ 経済安全保障上の原子力・放射線科学の位置付け

➤ 世界規模課題の解決等に向けた「総合知」の創出・活用への期待

➤ 高速炉・高温ガス炉・SMR等の新型炉開発をめぐる各国動向

3. JAEAの第4期中長期目標

□ 研究開発の重点分野（第4期中長期目標期間：2022～2028年度の7年間）

1. 安全性向上等の革新的技術開発によるカーボンニュートラルへの貢献

- (1) 一層の安全性・経済優位性を追求した原子力システムの研究
- (2) 高温ガス炉に係る研究開発（高温工学試験研究炉（HTTR）の活用、水素製造技術の開発）
- (3) 高速炉・核燃料サイクルに係る研究開発（高速増殖原型炉「もんじゅ」の経験活用、高速実験炉「常陽」の運転再開・活用に係る取組）

2. 原子力科学技術に係る多様な研究開発の推進によるイノベーションの創出

- (1) 原子力基礎基盤研究、先端原子力科学研究、中性子等利用研究及び原子力計算科学研究の推進
- (2) 特定先端大型研究施設の共用促進・高度化並びに供用施設の利用促進（J-PARC、JRR-3等の活用）
- (3) 産学官の共創によるイノベーション創出への取組の強化

3. 我が国全体の研究開発や人材育成に貢献するプラットフォーム機能の充実

- (1) 大学や産業界等との連携強化による人材育成（国内外で活躍する原子力イノベーション人材の育成、人材交流・国際研修機会の提供）
- (2) 核不拡散・核セキュリティ強化等及び国際連携の推進（各国の原子力機関等との戦略的かつ多様な国際連携、安全保障の観点重視した輸出管理）

4. 東京電力福島第一原子力発電所事故の対処に係る研究開発の推進

- (1) 廃止措置等に向けた研究開発（バックエンド等の他部門との連携・協働、成果や知見の相互展開・応用）
- (2) 環境回復に係る研究開発（広範囲を対象とした放射性物質の環境動態研究）
- (3) 研究開発基盤の構築・強化（東京電力への成果の橋渡し）

5. 高レベル放射性廃棄物の処理処分に関する技術開発の着実な実施

- (1) 高レベル放射性廃棄物の処理に関する研究開発（放射性廃棄物の減容化や有害度低減による長期リスクの低減）
- (2) 高レベル放射性廃棄物等の地層処分研究開発（実施主体が行う地層環境調査、処分システムの設計・安全評価、国による安全規制上の取組に貢献する技術基盤の整備・提供）

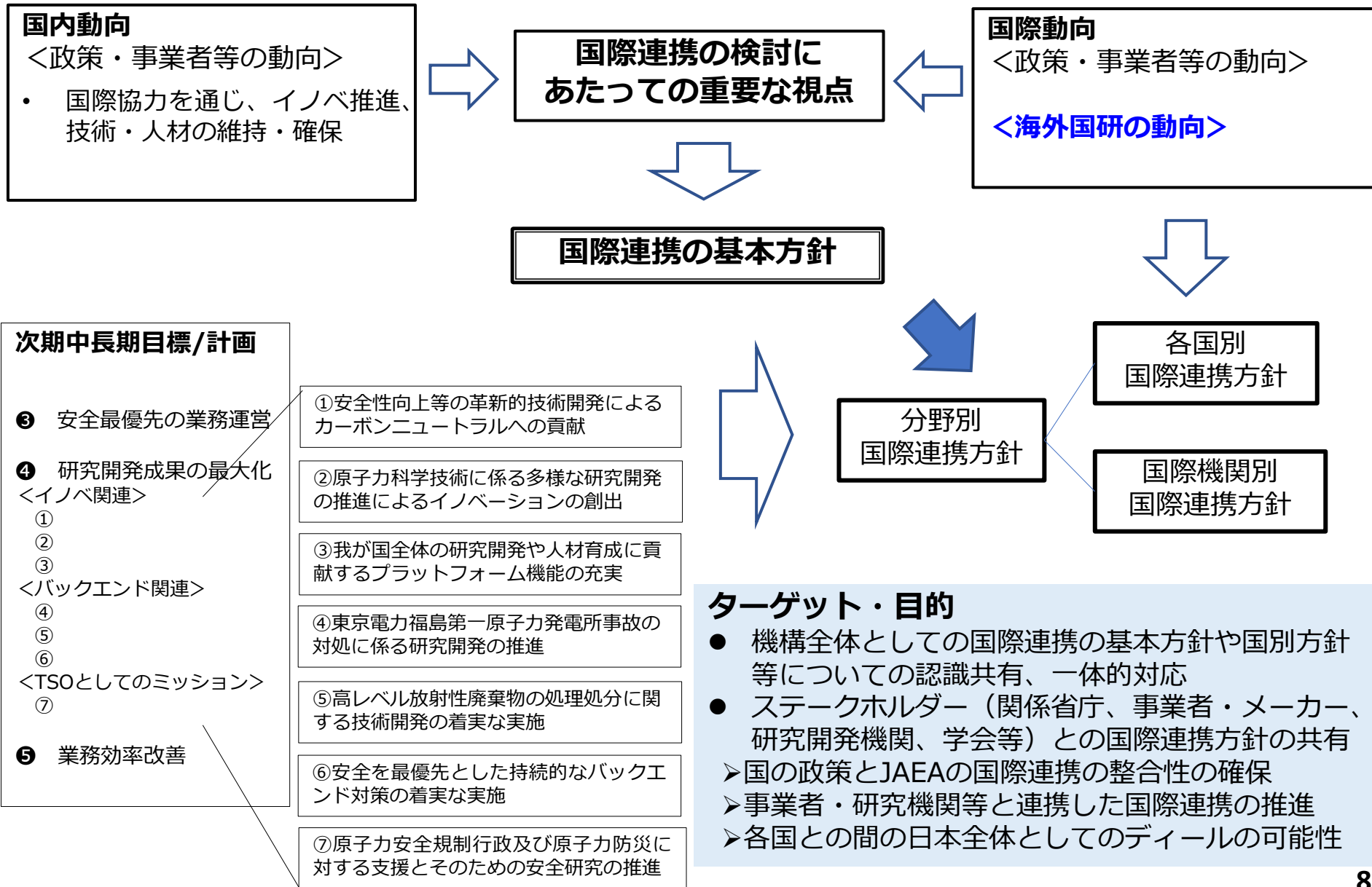
6. 安全を最優先とした持続的なバックエンド対策の着実な推進

- (1) 廃止措置・放射性廃棄物処理処分の計画的遂行と技術開発（研究施設等から発生する低レベル放射性廃棄物の埋設に向けた取組、クリアランス及び適切な区分・処理・廃棄体化の推進）
- (2) 敦賀地区の原子力施設の廃止措置実証のための活動
- (3) 東海再処理施設の廃止措置実証のための活動

7. 原子力安全規制行政及び原子力防災に対する支援と そのための安全研究の推進

- (1) 原子力安全規制行政に対する技術的支援とそのための安全研究
- (2) 原子力防災等に対する技術的支援

4. 新たなJAEA「国際戦略」の検討方針



□ 主要国における国研の役割

- 米国：DOE戦略ビジョン、DOE LWRS、GAIN、INL/NRIC
- 英国：NNL
- フランス：CEA、IRSN

□ 原子カイノベーションに関わる海外国研の取り組み(トピック別)

- 先進燃料、SMR・新型炉の開発・実証：
 - ✓ ATF：INL
 - ✓ SMR：IRSN、VTT
 - ✓ 製造技術：ORNL
- 統合エネルギーシステム：米国Tri-Lab、CNL、CEA、5か国サミット
- 廃止措置の合理化：CEA
- DX&AIの活用：CEA、OECD/NEA、IAEA
- 医療用RI製造：CNL、NNL、DOE、ORNL(官民パートナー)
- 宇宙関連：INL、ORNL

VISION

クリーンエネルギーと経済機会を実現する米国原子力セクターの繁栄

MISSION

米国のエネルギー、環境、経済におけるニーズを満たす原子力科学技術の進展

目標1: 既設炉の継続的運転

① 運転コストを低減させる技術の開発

- 国研の広範な**計算科学の専門性**を活かし、事業者のプラント設計、運転改善、安全性向上に資するデータと技術基盤を提供 (**INLヒューマンシステム・シミュレーション研究所等**)
- 国研と協力して、事業者パートナーとともに、**事故耐性燃料開発**を進め、2025年までに商業化

② 非電力分野の市場への拡大

- 2022年までに、**既設炉と接続する拡張性ある水素製造パイロットプラントの実証**を支援
 - **INL、ダイナミック・エネルギートランスポート&インテグレーション研究所 (DETAIL)**で**統合エネルギーシステム**に関する研究を実施

③ 長期運転のための科学的基盤の提供

- 国研は60年超の既設炉の安全性と性能を証明するために必要な**科学的基盤、データ、試験に寄与する理論、計算科学、実験の専門性**を有する

目標2: 新型炉の導入を実現

- ① 先進的原子力技術の導入におけるリスクと時間の低減
- ② 原子力エネルギーの市場を拡大する原子炉の開発
- ③ 資源利用を向上させる多様な設計を支援
(**GAIN、NRIC : 国研が研究インフラ・資源・技術の提供を通じて民間による新型炉導入を支援**)

目標3: 先進的な核燃料サイクルの開発

- ① 国内の核燃料サプライチェーンのギャップへの対応
- ② 新型炉開発に向けたギャップへの対応
- ③ 統合的廃棄物管理システム構築に係るオプション評価

目標4: 原子力技術における米国のリーダーシップ維持

- ① 原子力分野における米国の世界的な機会を促進
- ② 世界最高水準の研究開発能力の維持
 - **多目的試験炉 (VTR)**を開発し、高速中性子を用いる照射試験等を実施
(**INLが、国研、産業界、大学等による専門家チームを主導**)
- ③ 将来の原子力科学者の育成

目標5: 高いパフォーマンスの組織実現

- ① DOE原子力局の労働力の支援と投資
- ② プログラム、プロジェクト、R&D投資、契約の効果的管理



□ DOE軽水炉サステナビリティ・プログラム (LWR Sustainability Programme)

- 60年超運転を視野に、DOE、NRC、EPRIの議論を踏まえて2008年から実施：
EPRIの長期運転 (LTO) プログラムと連携
- 産業界、ベンダー、サプライヤ、規制当局、研究機関との様々な連携により科学的基盤、評価手法・ツールを開発 ⇒ 既に80年運転の許認可申請に必要な研究もスコープに

⇒ 国研は、研究インフラと資源を提供するとともに、民間では実施が困難なハイリスク・ハイリターンの技術開発、専門性の高い研究開発を担当

□ 原子力の技術革新を加速するゲートウェイ (GAIN) プログラム

- 既設炉の継続的な運転を確保しつつ、新型炉概念を実用化に導くために必要な技術、規制、資金面でのDOEによる支援を促進する取組み
- DOE傘下の国研が有する試験設備、モデリング・シミュレーション・ツール、情報・データ等の研究インフラへのアクセスを促進
- 公募プログラムにより選定された民間企業等を支援

□ アイダホ国立研究所 (INL) の国立原子炉イノベーションセンター (NRIC)

- 原子力革新能力法 (NEICA) によって認可
- NRICは、国研の研究インフラと資源を利用できるよう、試験・実証・性能評価のためのツール・方法論を提供 (マネジメント、技術支援)
- 民間企業、技術開発者は、これらの資源を商業用、研究開発・実証、導入に活用できる

⇒ 国研が研究インフラ・資源・技術を提供し、民間による新型炉導入に向けた取組みを積極的に支援

□ 先進核燃料サイクルプログラム (AFCP)

- Fueling Net Zero: Advanced Nuclear Fuel Cycle Roadmaps for a Clean Energy Future (先進的な燃料サイクルの研究・開発・実証に関するロードマップ) を発表
- 政府及び産業界における意思決定者に対し、今後のパスウェイを提示（2021年6月24日）

□ 高温ガス炉

- 英国における実証炉建設に関する関心表明を募集（2022年2月23日）

□ 水素製造

- Unlocking the UK's Nuclear Hydrogen Economy to Support Net Zero（2021年7月14日）
2021年5月に開催された「原子力水素ラウンドテーブル」の結論をレポートとして取りまとめ

□ 統合エネルギーシステム

- UK Energy System Modelling: Net Zero 2050（2021年6月17日）、ネットゼロシナリオの発表
- 英米加仏日によるGlobal National Laboratory Energy Summit（2022年1月26日）を主導

NNL自身の役割を再定義

- **Nuclear Science to Benefit our Society – Our Strategic Plan 2021**（2021/6/8）



- **Our Science and Technology Agenda: Unleashing Innovation and Meeting the UK's Climate Change Targets**（2021/7/5）

- Science and Technology Agendaに規定された4つの重点分野の内、3つ（クリーンエネルギー、健康・原子力医療、セキュリティ・不拡散）についてイノベーション実現のための産学パートナー9組織を選定（2022年1月17日）
- 先進原子力に伴う技術的課題の解決に挑む先進原子力スキル・イノベーション・キャンパス：パイロットプログラム」の下で公募による10組織を選定

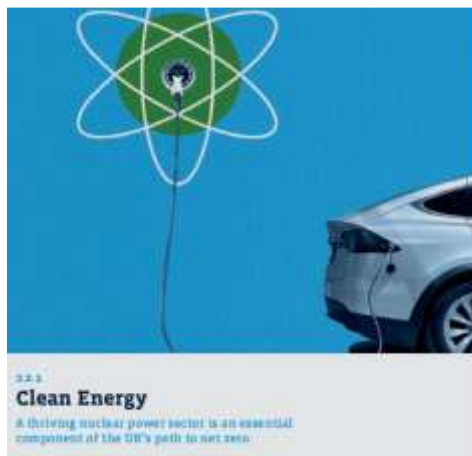
COP26の議長国である英国の国研として、ネットゼロ目標の達成を図る観点から、原子力イノベーションについて積極的に発信し、存在感を高めている

NNL Strategic Plan 2021 — Nuclear Science to Benefit our Society (2021/6/8)

クリーンエネルギー

環境回復

- UKSMRコンソーシアムの一部として、**SMRのUKコンセプトを開発**
- 2030年までに**AMR実証**への途を確立すべく技術・設備を提供
- 先進炉による高品質な熱を利用した新しい**グリーン水素製造方法**を模索



- NDA、セラフィールド社との協力により、**英国最大の分析研究所を創設**
(Replacement Analytical Services Project: £650M)
- サプライチェーン中小企業と協力し、**廃止措置のための遠隔ロボットシステム CellRailを開発**
- 欧州宇宙機関(ESA)の**RI発電システム (RPSS) を開発**

健康と核医療

セキュリティと核不拡散

- 既存の核物質から医療に用いる**RIを生産**するルートを開発
- RI製造のための**中性子加速器システムSTELLAR**導入の検討
- 医療専門家、産業界、学界の連携、国内供給の確立及び世界市場での競争の**支援**



- SMRを含む世界的な原子力技術利用への助言とベストプラクティスの提供
- 保障措置に関するIAEAへの支援、**先進核燃料サイクル分野**でのIAEAコラボレーティングセンターの活動
- 新しい核セキュリティ計画に係る能力と知識の共有

□ 組織再編(2020年)

DEN (La Direction des énergies nucléaire) からDES (La Direction des énergies) へ

□ ジュール・ホロビッツ照射炉プロジェクトの遅れ

現状の予定では、運用開始は2030年代初め頃

□ ナトリウム冷却高速炉の先進型の概念検討(2020-2024年プログラム)

https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/52/041/52041026.pdf

- **ATRIUM** (熱供給 (50MWth)、発電 (150MWe)) :
従来の設計思想から大きく転換したループ型。フィードバック最適化炉心、二次系廃止、圧力容器を通じた多様な崩壊熱除去システム。
- **ANAIS** (150MWe) : ASTRIDの設計に由来する熱交換器内蔵タンク型。出力が小さく設計簡素化が可能。コスト削減を主眼とした研究を推進
⇒Papyrusモデル化プラットフォーム、LECA (燃料研究ホットラボ@カダラッシュ)、
Atalante (燃料サイクル・ホットラボ@マルクール)、LECI (材料試験ホットラボ@サクレー)
照射施設として、ロシアBOR-60、BN600、カザフスタンIGRを活用した国際協力を計画

□ 仏露原子力協力

2021年12月1日、CEA、EDFとロスアトムとの間で、使用済MOX燃料のリサイクル性を実証する研究開発協力を行う共同宣言に署名。翌12月2日にはロスアトムとフラマトムとの間で燃料製造及び計装制御 (I&C) 技術の開発における新たな戦略的協力協定も締結。

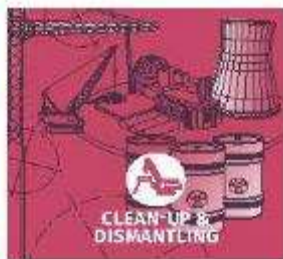
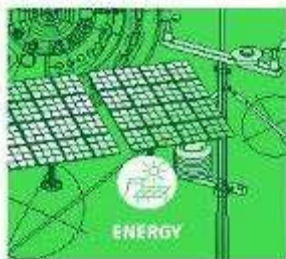
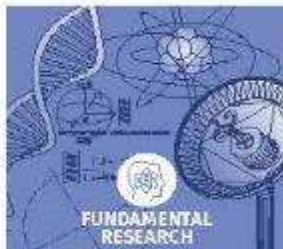
□ EU議長国(2022年1月～6月)としてのリーダーシップ

□ 6つのミッション

防衛

デジタルトランス
フォーメーション

基礎研究



エネルギー

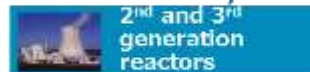
医療技術

クリーンアップと解体

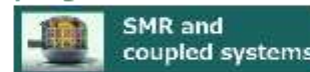
©CEA

□ エネルギー部門 (DES) のR&Dプログラム

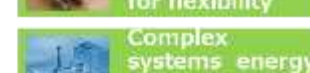
Current and future nuclear industry



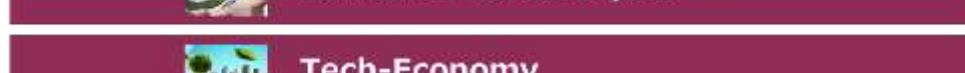
Common programmes



New energy technologies



Cross-cutting programmes



©CEA

□ 4つの部門

➤ Military Application Division(DAM)

➤ Energy Division(DES)

➤ Technological Research Division(DRT)

➤ Fundamental Research Division(DFR)



©CEA

IRSNにおける技術支援・研究の主要分野

- ・ 環境放射線モニタリングと原子力災害・緊急時の対応
- ・ 原子力施設の大規模事故防止
- ・ 工場・研究所、輸送、放射性廃棄物の安全対策
- ・ 人体の放射線防護
- ・ 原子炉の安全対策
- ・ 核セキュリティ

□ 技術支援機関 (TSO)

仏規制当局 (ASN) を支援する他、バイ協定、EU・OECD/NEA・ETSON・IAEAの枠組みの下、49カ国において活動。

□ 複数の専門機関やネットワークの創設を主導

- ・ ETSON (欧州のTSOネットワーク)、SHARE (電離放射線に関する社会科学、人文科学統合のプラットフォーム)、運転経験フィードバックの欧州ネットワーク
- ・ SNETP (Sustainable Nuclear Energy Technology Platform、第2・3世代炉のNUGENIA等を含む研究機関等の共通プラットフォーム)、MELDI (低線量の学際的欧州イニシアティブ) など
- ・ NERIS (European Platform on Preparedness for Nuclear and Radiological Emergency Response and Recovery) (24カ国参加)

□ 原子力災害緊急時対応・事前訓練

公的機関を支援し、技術的対応、健康・医療面の対応について規制当局に提言。

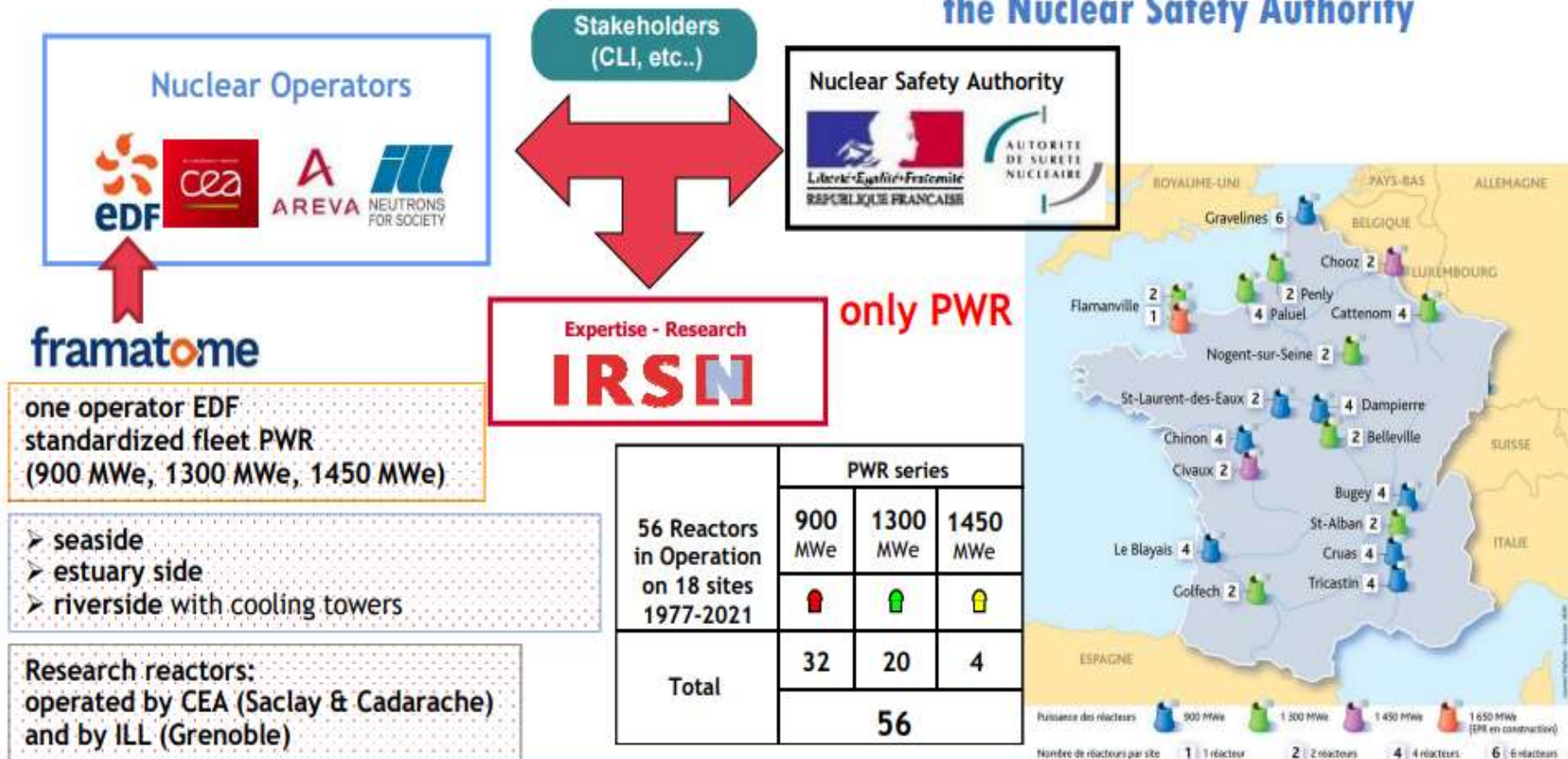
- EDFの原子力発電所における応力腐食割れ事象に関する技術支援
- ウクライナの原子力発電所の危機に関する状況報告 (2月以降継続)

□ 国内外の関係機関とのパートナーシップ構築による研究プログラムを開発

- ・ CABRI国際プログラム (研究炉CABRIを利用した反応度事故の研究。OECD/NEAの援助の下、12カ国の規制当局、事業者、研究機関が参加)、LOCAに関する研究プログラムなどを推進。

Few words about IRSN

Technical support organization for the Nuclear Safety Authority



□ DOE事故耐性燃料 (ATF) プログラム

- 産学官の協力により、事故耐性燃料の商業炉への装荷を計画
- 米国企業3社 (GNF、Framatome、Westinghouse) が協力、事故耐性燃料先行試験体を開発し、米欧の**商用原子炉に装荷する計画**
- **INL先進試験炉 (ATR) にて、商用軽水炉の冷却条件を模した照射試験**
 - ATRでは、燃料サンプルを急速に劣化させることができるほか、中性子による数十年分の燃料損傷と同等の損傷を数か月で生じさせることが可能
 - 試験で得られるデータは、米NRCが同燃料の規制審査を行う際に活用される
- **INL 過渡事象試験施設 (Transient REactor Test facility: TREAT) を活用**し、各ATF概念の安全運転が可能な限界点を検証。
 - 高強度(20GW)、短い持続時間(80ms)の中性子パルスによる過酷事象検査
 - 120 kW定常動作
 - 静的カプセル、ナトリウムループ、水ループの試験が可能
 - 中性子ラジオグラフィ施設

出典) INL Website <https://transient.inl.gov/SitePages/Home.aspx>

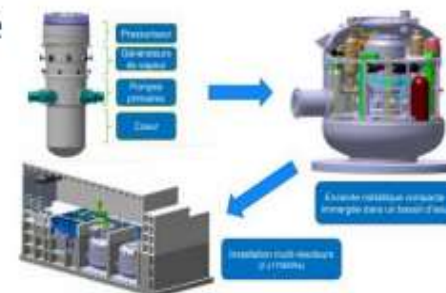
□ IRSNによるSMRの安全性に関する情報メモ（2021年10月7日公表）

- SMRは、固有かつ受動的な安全システムにより高い水準の安全性能を備え、複数モジュールを設置することで比較的大きな出力（600–800MWe）とする設計も可能
- 経済的収益性の観点から、SMR開発者は、設計の簡素化に加え、モジュール構造とシリーズ生産を可能とする標準化による建設期間の短縮を提案している。このため、SMR導入を図る各国で安全要件の調和が実現されるよう求めている。中には、SMR固有の安全性の特徴に安全要件を適応させるべきと考える者もいる。
- 一方、IRSNは、SMRのために安全レベルを下げる方向で安全要件を見直す必要は無いと考える。設計の簡素化と固有の安全性により、現行の要件を満たす高い安全性が確保されるべきである。
- SMRは低出力かつ小型であるため、様々な設計の選択が可能（約70もの設計）。既に米国での認証やカナダでの審査が進んでいるものもあるが、非軽水炉については、認可プロセスを開始するために期待される成熟度よりかなり低い状況にある。
- 中には安全性に有利となるものもある。しかし、多くの設計は革新的な技術的な解決策を必要とし、その実現可能性と有効性はまだ実証されていないことに注意が必要。設計の選択と仮定を詳細に検討することによってのみ、大型炉と比較した場合の最終的な安全性の向上を評価することが可能となる
- 新しい設計、特に受動的な安全システムを含む設計については、代表的なモデルで実験を行うことが安全性の実証に必要。技術やその成熟度によって異なるものの、多かれ少なかれ時間を要する

IRSNは、受動的安全システム（特に崩壊熱除去）適用の詳細分析が必要と主張

IRSN and Passive Systems and SMRs

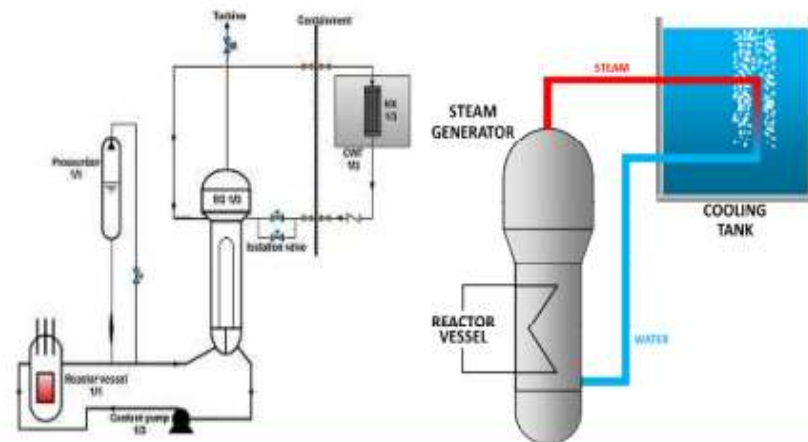
- Passive systems are implemented in operating reactors in Europe (Russia, Belarus) and in project (Finland)
 - What the benefits and drawbacks of such systems ?
- Need to require introduction of passive systems in future reactors constructed in France
 - In-depth analysis required (as active systems have proven high reliability)
- Development of NUWARD in France (SMR proposed by TA, Naval Group, CEA & EDF)
 - A kind of “follow-up” of Flexblue



IRSN has been more and more involved in the study of passive systems and SMRs

- OECD activity
- European H2020 projects (ELSMOR and PASTELS)
- IAEA regulator’s forum
- ATMEA and Flexblue Review

IRSN focus on Decay Heat Removal or “Safety Condenser”



人的要因を含む信頼性やパフォーマンス（想定外事象時含む）に係る安全解析が鍵

Safety Analyses

Reliability

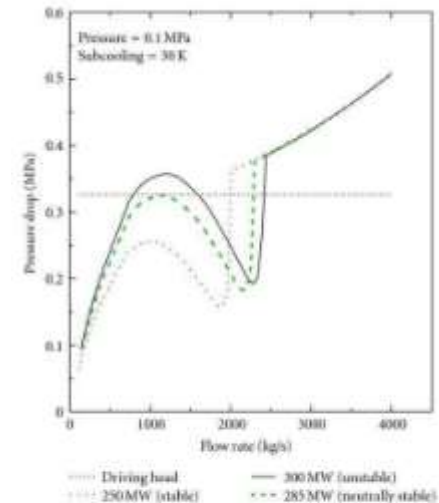
- Including Human Action

Performance

- Instabilities, Time lag
- Models
 - Pressure drops, HX
- Code qualification (coupled phenomena)
 - Instabilities
 - Parameter range
 - Low pressure, low power, low to very low velocities, ...
 - Validation
 - SET, ITS, Component tests, Coupled Effect tests and scaling issues
 - 3D affect
 -
- Uncertainties
- Unexpected impact of some parameters
 - Leakages, fouling, non-condensable gas, unforeseen phenomena

One example (Two-Phase Natural Circulation)

- System operating point (flow rate) is at the intersection of the
 - Driving head (i.e. temperatures thus HX performance)
 - “ pump “ performance curve : $\Delta p g H$
 - Heat transfer (tube immersed depends on several parameters)
 - Fluid flow system curve (i. e. Pressure loss vs flow rate)
 - Large uncertainties



IRSNは、受動安全システムを検証する設備を活用して多様な研究に取り組む計画

R&D at IRSN

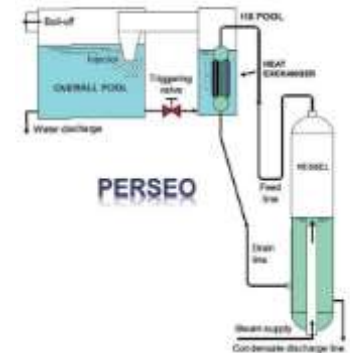
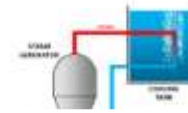
- Studies on "simple" experiments
 - HERO-2
 - PERSEO

- Numerical studies on SACO

- Studies on Reliability and Safety approaches for passive systems

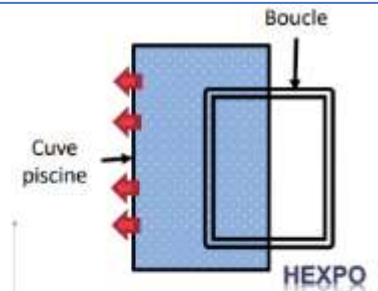
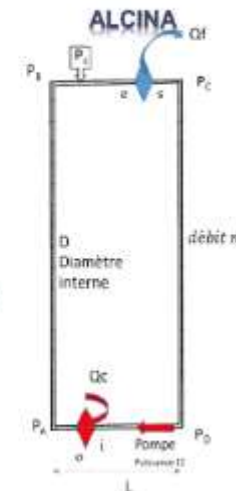
- Participation in WENRA, IAEA SMR, OECD, H2020 projects

- Projects on new experimental support
 - Both for passive systems and SMRs
 - Not related to specific components or systems
 - More "generic" oriented objectives
 - Model validation (and improvement)
 - Independent validation



R&D : Projects at IRSN

- ALCINA test Loop
 - Closed Natural/Forced Circulation Loop (single and two phase)
 - With multiple pressure drop measurements and void measurements (in two phase configuration)
 - Several pipe diameters
 - Controlled Heat Exchangers
- HEXPO test Loop
 - Tube(s) immersed in a pool
 - With clear window for velocity measurements in pool
- EIPI test loop
 - Containment in a pool Internally heated
 - Measure of pressures and temperatures



ELSMOR towards European licensing of SMRs

- Project aiming to investigate selected safety features of LW-SMRs
- Part of projects funded by EURATOM 2014-2018 Research and Training Programme
 - Safety focus of H2020 EURATOM Programme calls
- 3.5 year research project started on 9/2019



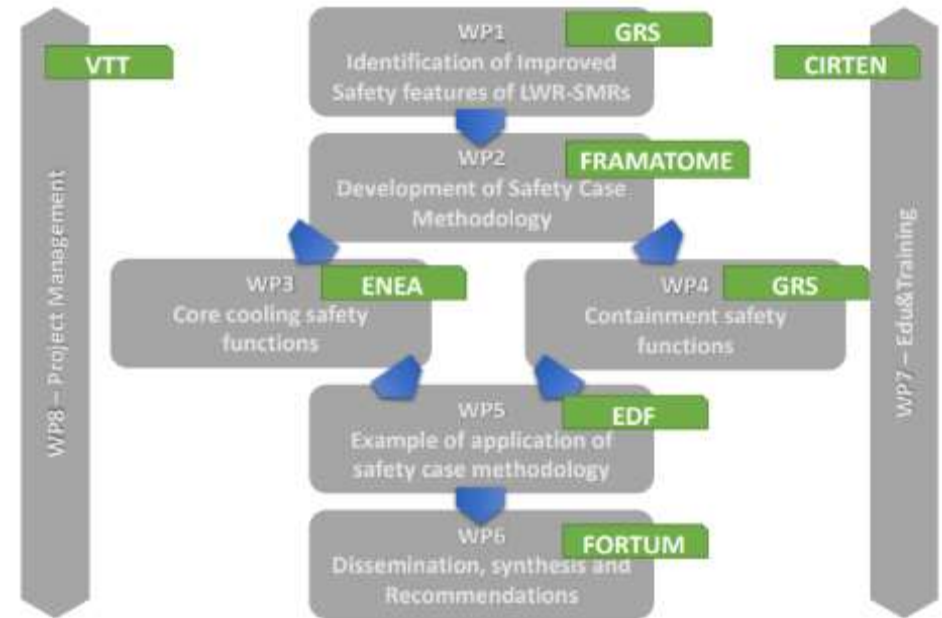
Project consortium

- 15 partners
- 8 countries represented
- Initial consortium building by Nugenia T.A. 6



Collaboration with European SMR developers

- Collaboration with French SMR developer consortium
 - 3 out of 4 partners in ELSMOR
- Earlier conceptual development version of Nuward (F-SMR) provides some reference cases for investigation
 - Passive core cooling
 - Submerged containment cooling
 - Similar features in various designs





原子力イノベーションに関わる海外国研の取り組み

先進燃料・SMR・新型炉の開発・実証 / 製造技術: ORNL*

* オークリッジ国立研究所

□ DOE Nuclear Energy Enabling Technologyプログラムにおける先進製造技術 (AMM)

Nuclear Energy Enabling Technology (NEET) 先進製造技術 (AMM) プログラムは、

- 新規原子力発電所のコスト縮減とスケジュール短縮
- プラント・機器製造の迅速化、経済性及び信頼性向上

を目的として2012年より開始。

原子力以外の産業分野で活用されている最新の取組みを評価し、原子力分野では、①溶接・継ぎ手、②付加製造、③モジュール工法、④コンクリート材料・鉄筋のイノベーション、⑤データ・コンフィギュレーション管理、⑥表面加工・被覆プロセスの6つの主要分野で事業を推進。

特に最近注目される製造プロセス・イノベーションの分野

- 工場・フィールド製造技術
 - 高速、高品質な溶接技術
- モジュール建設技術を支える組立・材料イノベーション
- 製造プロセスにおける進化
 - 粉末冶金 / 熱間等方圧加圧法 (HIP)
 - 付加製造 (3Dプリンティング)
 - 被覆・表面加工プロセス
- コンクリート検査、受入れ、建設に関する方法論の改善
- データ・コンフィギュレーション管理

Transformational Challenge Reactor (TCR) プログラム

- NEETプログラムの一つ
- 先進炉開発に際し、積層造型 (AM) など先進的な製造技術や、人口知能 (AI) など計算科学を適用し、低コスト、早期実装、迅速なイノベーション、新技術の早期適用を図ることが目標。
- **ORNLが主導**し、INL、ANL等の国研、産業界からのパートナーが貢献。

出典) ORNL WEBサイト

<https://www.ornl.gov/news/3d-printed-nuclear-reactor-promises-faster-more-economical-path-nuclear-energy>

出典) USDOE Office of Nuclear Energy, NEET-Advanced Methods for Manufacturing Awards Summary

<https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/08/f65/ne-amm-award-summaries072019.pdf>

- **INL、NREL（国立再生可能エネルギー研究所）、NETL（国立エネルギー技術研究所）の協働**による、再エネ、原子力、カーボン回収付き化石燃料を含む多様なエネルギー源を活用し、電力、熱、エネルギー貯蔵・輸送等のサービスを提供する新概念である**統合エネルギーシステム***の実現への取り組み
 - ✓ 協働すべき優先度の高いR&D分野を特定
 1. 熱貯蔵システム(TES), 輸送, 利用を通じたエネルギー・システムの効率向上
 2. 低温熱エネルギー利用を通じたエネルギー・システムの効率性向上
 3. 再エネ, 原子力, 化石燃料発電をサポートし、北中西部の水素市場を供給する最初のIES
 4. テキサス湾沿岸地域における低炭素エネルギーによる燃料・製品へのCO2利用
 5. 炭鉱地域におけるクリーンエネルギー源を用いたハイブリッド炭素転換
 - ✓ システム・モデリングと最適化方策検討（エネルギーインフラの理解と最適管理のためのツール開発）
 - ✓ システム実現に向けた先進材料や構成要素の設計・開発・導入に関する科学技術の課題

* Integrated energy system (IES), (Novel, Tightly coupled), Hybrid energy system (HES)

出展) INL, NREL Website

<https://inl.gov/article/tri-lab-initiative-leads-innovation-in-novel-hybrid-energy-systems/>

https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/Sort_44976.pdf?msclkiid=a8ec5c43a9ab11eca672e4dffc008e98

<https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/72926.pdf?msclkiid=459f6bc1a9a411eca5a0696c1517fa94>

Arent, D.J. et al., Multi-input, Multi-output Hybrid Energy Systems, Joule, Vol.5(1), 47-58, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.11.004>

□ 連邦政府による原子力科学技術ワークプランの下、CNLがハイブリッド・エネルギーシステム最適化モデルを開発する研究プロジェクトを推進

- ✓ 時間、季節、年単位での時間フレームにおける多様な需要と供給源の相互作用を分析し、異なるエネルギーシステム間のトレードオフや、異なる地域での高効率な低炭素エネルギーシステムへの移行に必要な事項を理解することを目的
- ✓ 本モデルを用いたケーススタディをNICE Futureの報告書に反映
 - 住宅用給湯の電化に関するケーススタディにて、新型炉の需要追従能力が向上し、再エネの導入普及を補完できる可能性を提示
 - 電力・熱の需要バランスに応じ、生じる蒸気（熱）の利用方法を変えることにより、高稼働率での原子炉の運転を維持する概念をモデル化

□ CNLが、原子力-再エネのハイブリッドシステムを含む、SMRをベースとした低炭素ハイブリッドエネルギーシステムの実証に向けたプラットフォーム、Clean Energy Demonstration, Innovation, and Research (CEDIR) Parkを提供

- 低炭素ソリューションを実行に移せることをステークホルダーに提示するプラットフォームを提供
- 原子力-再エネのハイブリッドエネルギーシステムの技術成熟度（TRL）を向上
- 複数の低炭素技術を併存させて運用することを実証

原子力イノベーションに関する海外国研の取り組み

統合エネルギーシステム：CEA

- CEAは、現在利用可能な低炭素エネルギー（即ち、原子力と再生可能エネルギーの両方）を同時にカバーする唯一のフランスの研究機関として、ネットワーク管理、エネルギー貯蔵、シミュレーション、資源と消費の制御などの横断的なトピックに取り組み中。

⇒ エネルギー問題に対する「統合アプローチ」を追求

- フランスの公的機関の要請とエネルギー移行に関わる主要な課題に可能な限り効果的に取り組むための議論を踏まえ、CEAにエネルギー部門（DES）を2020年に設立。
 - ・ 公的機関や業界による2050年CNに貢献する技術のロードマップ作成や多様なエネルギーシナリオ評価をサポート

□ 主要プログラム（4つの重点分野）

脱炭素化エネルギーの生産

- ・ 現在および将来の原子力エネルギーへの支援（第2・第3世代炉、燃料サイクル、第4世代炉、SMR、軍事用）
- ・ 統合システムの開発（SMRの非発電利用、原子力の熱利用・水素製造）
- ・ 太陽光発電の開発
- ・ 高温電解による水素製造

エネルギーシステムの技術運用

- ・ 有効性と効率の向上（グリッドの柔軟性ソリューション、エネルギー貯蔵方法、ネットワーク上のスマートな負荷管理、電力変換の可能性）

利用可能なリソースの管理

- ・ 材料・機器のライフサイクル全体を考慮
- ・ CO₂を有用なエネルギーに変換する方法を研究（循環炭素経済）

システム全体のパフォーマンス

- ・ 技術的および経済的アプローチを組み合わせ、多様なエネルギーシナリオを評価

Global National Laboratories Energy Summit 22 (2022年1月26日)

□ 趣旨

COP26以降も低炭素化に向けたモメンタムを維持する観点から、原子力、再エネその他の低炭素技術を含むエネルギー分野の国研が集結し、**エネルギー統合システム (Integrated Energy System: IES)***や原子力の非電力利用等に関する協力を議論。

* 原子力や再エネ等の低炭素エネルギー源の組み合わせにより、各技術のベネフィットや運転モードを活用し、信頼性が高く、持続可能性を有する、安価な低炭素エネルギーの供給に資することが可能

□ 参加機関 (4か国8機関)

英国：NNL、エナジー・システムズ・カタパルト

米国：INL、NREL

カナダ：CNL

フランス：CEA

日本：JAEA、エネ研 (IEEJ)

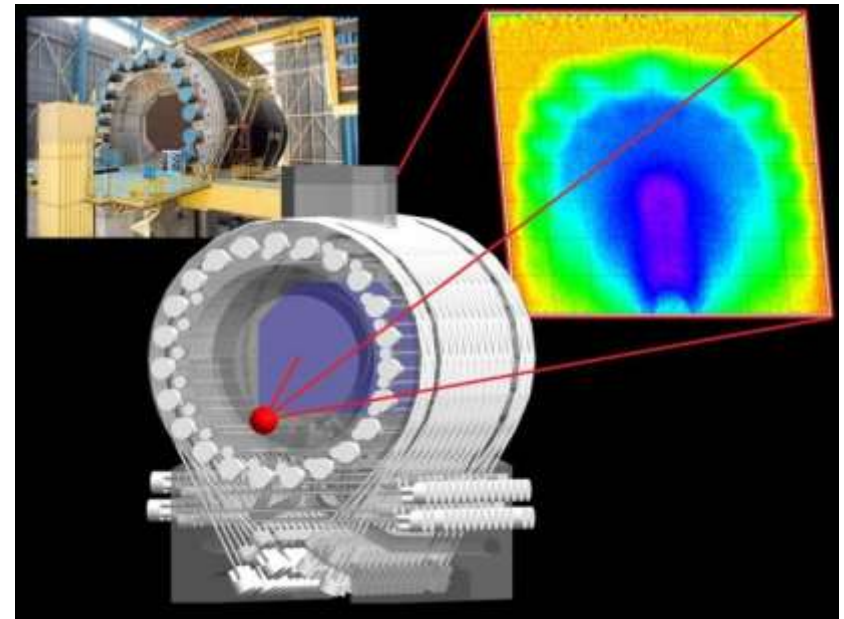
- 将来のIESがどのようなものになるか 理解を深めていくため、研究・イノベーションのベストプラクティスを共有していくことを声明として発表



- CEAは、廃止措置事業主体かつ研究機関として、多種多様な施設の廃止措置プロジェクトとR&Dを主導 ⇒ プロジェクト管理、手法、技術等の専門的知見がCEAに蓄積
- 作業環境の改善や一層優れた廃棄物性状把握のために、多くのイノベーションを導入・実証 ⇒ CEAの他部門や産業界からなる横断的・学際的チーム（遠隔ロボット、VR、除染プロセス、超高感度測定等）の協力。一部は国内外の事業者において活用可能。
- **研究開発**（2020年度の成果）
 - 多種多様な廃棄物に適用可能なツールを開発（16cm径のトレンチ孔から中レベル放射性廃棄物を取り出すテスト）
 - 再処理研究開発に伴って発生した有機廃液の固化



©CEA



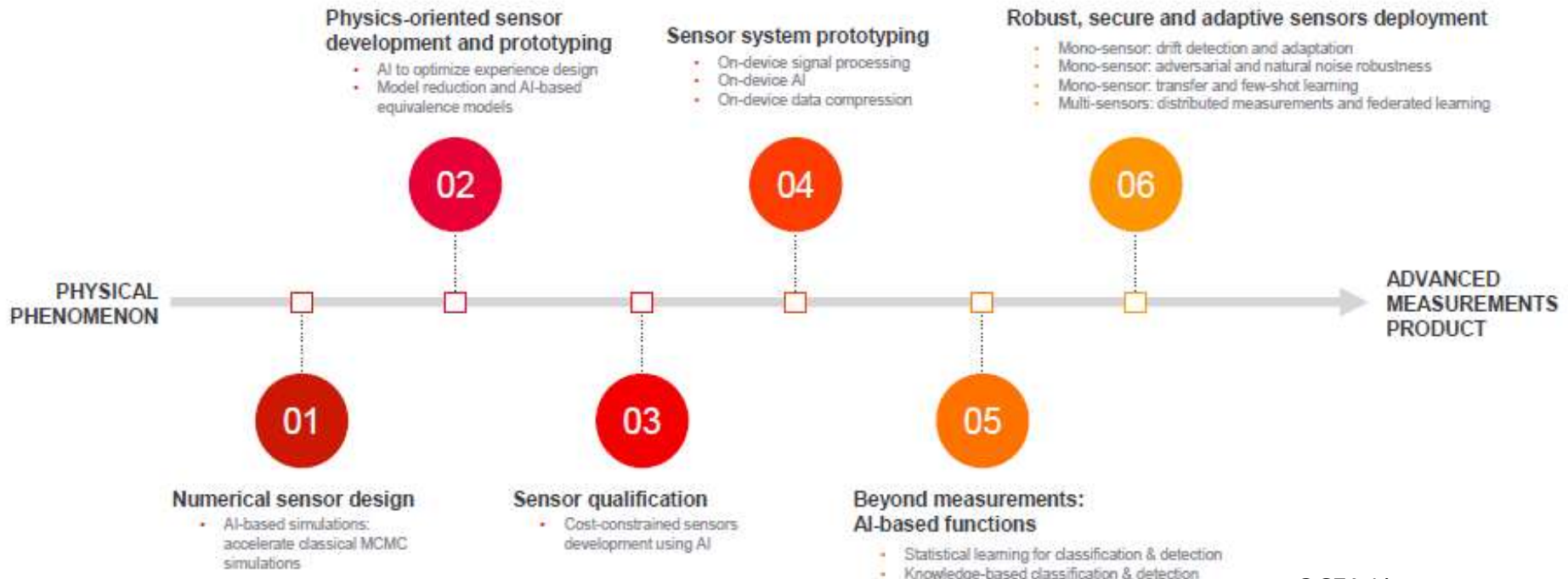
©CEA

- CEAと基礎研究部門(宇宙基礎法則研究所)との連携により、ミュオンを利用した2D画像技術を開発（G2炉）

原子力イノベーションに関する海外国研の取り組み DX & AIの活用：CEA

- CEAは、List（統合技術研究所）を中核として、スマート・デジタルシステムに特化し、産業界とのパートナーシップ活動を年間200以上実施（先進製造技術、組み込みシステム、データ・インテリジェンス、放射線治療分野等）
- 原子力分野に関するCEA/DES（エネルギー部門）との連携分野
 - 廃止措置のための先端的な原子力計測機器類の開発
 - 原子力計測機器のAIによる技術的ブレークスルー
 - シミュレーションとデジタルツイン技術
 - 対話型ロボット
 - 非破壊評価とモニタリング（シミュレーション、診断、知能増強）

ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR NEXT-GENERATION NUCLEAR MEASUREMENT SYSTEMS





原子力イノベーションに関する海外国研の取り組み DX & AIの活用： OECD/NEA、IAEA

OECD/NEA Digital transformation: Opportunities and challenges for the nuclear sector

- 第3世代炉の新規建設における短期間でのコスト低減のために実行可能な技術的アプローチとして、[先進技術を活用したコスト削減イニシアティブの一環としてDX](#)を検討。

< ワークショップ（2021年5月） >

- ✓ 原子力発電所のライフサイクルへのデジタル技術適用
- ✓ DXとともに変わりゆく原子力機関とサプライチェーン
- ✓ 原子力システムの将来におけるDX化
- ✓ DXと原子力規制当局

IAEA Technical Meeting on AI for Nuclear Technology and Applications（2021年10月）

- 原子力技術の応用を一層進歩させる可能性がある[AIの活用・方法論・ツール・インフラの実現について議論し、国際協力を促進するための国際的・分野横断的なフォーラム](#)を提供
- 全体会議： インフラの実現、先端的モデリング・シミュレーション手法
- WGセッション： 倫理、食料と農業、健康、核データ、核融合、原子核物理、原子力、原子力安全保障、放射線防護、放射性同位元素と放射線技術、保障措置の検証、水と環境

□ カナダ原子力研究所 (CNL)

- Co-60, Mo-99の製造において世界をリード
- Ac-225製造プログラム
 - カナダ粒子加速器センターTRIUMFの529MeVサイクロトロンを使用して製造し、CNLのチョークリバー研究所で処理

□ 英国国立研究所 (NNL) 【再掲】

- 既存の核物質から医療に用いるRIを生産するルートを開発
- RI製造のための中性子加速器システムSTELLAR導入の検討
- 医療専門家、産業界、学界の連携、国内供給の確立及び世界市場での競争 (2024年までに£230億の価値と推定)

□ DOEアイソトープ・プログラム

- 国立アイソトープ開発センター (NDIC) が以下の施設を使用し、利用期間とのインターフェースとして機能。
 - ORNL高中性子束同位体原子炉 (HFIR)
 - INL先進試験炉 (ATR)
 - SRNLトリチウム施設
 - LANL-RI製造施設
 - ANL低エネルギー加速器 (LEAF)

□ ORNLトリウムエクスプレス・プロジェクト

- ORNLによるオークリッジ環境管理局、Isotek社、Terra Power社等との官民パートナーシップ
 - ORNLで貯蔵されたU-233を含むレガシー廃棄物の処理処分過程で医療用トリウム同位体を抽出
 - 2021年エネルギー長官功労賞を受賞

- DOEは、NASA と協力しつつ、月と火星への宇宙探査を支援するための核分裂地表電力システムと核熱推進システムの技術を開発中。
 - INLを運営するBEAが産業パートナーを募集。核熱推進システムについては、民間企業3社による小型原子炉（HALEU燃料）概念を選定（2021年7月）。 [INLは原子炉設計のレビュー](#)を行う。
 - また、INLは、アイソトープの熱電効果による電力システムを開発中。火星探査車「キュリオシティ」などで利用されている。 [ATRを利用したPu-238製造技術を開発](#)。試験料準備室（SPL）で、ロボット制御による無窓作業で照射された構造材の試験をサポート。
 - [ORNLにて、宇宙探査のためのPu-238供給技術を開発](#)。 [照射炉HFIRでNp-237ターゲットを照射、放射化学工学開発センターで分離抽出](#)。

□ 海外の国研の動向

- 原子カイノベーションに関わる国研の取組み
 - ✓ 先進燃料、SMR・新型炉の開発・実証：ATF、SMR、製造技術
 - ✓ 統合エネルギーシステム（再エネ共存、熱利用・水素製造）
 - ✓ 廃止措置の合理化
 - ✓ DX&AIの活用
 - ✓ 医療用、宇宙用原子力

□ JAEAで重点化すべき今後の取組み

JAEAに期待されるニーズ（≡「第4期中長期計画：イノベ、バックエンド、TSO」）

× 国研としての役割（強み）

- 試験設備・施設などハードに加え、解析コード、評価手法・方法論などソフトも
- 軽水炉から新型炉まで、基盤研究からプラント安全やバックエンドまで俯瞰的に
- 海外諸国の国研や国際機関のネットワークへのアクセス

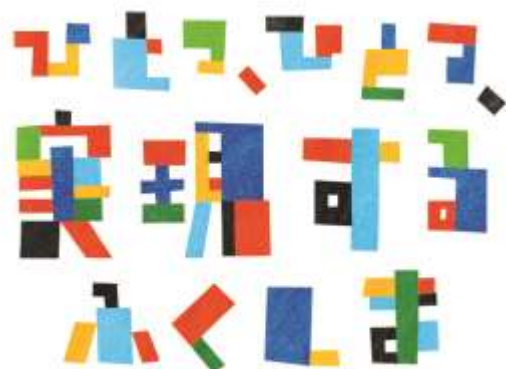
□ 国際連携へのニーズの高まり

- 国際的に共通課題が増え、国際共同プロジェクト・国際連携へのニーズが高まり
- 我が国の研究インフラ、知見、人材の維持に国際連携を利用していくとの視点も

□ 国際戦略の検討にあたっての主な論点

1. 研究開発成果の最大化に向けて、いかに国際連携を活用するか
国研&TSOとしての強みを最大限活かし、いかに優先付けしていくか
 - ✓ イノベーション促進
 - ✓ バックエンド対策推進
 - ✓ 安全性向上（開発側における新技術・新型炉の許認可性検討を含む）
2. 原子力安全の確保、核不拡散・核セキュリティの確保において、海外から学ぶとともに、我が国の経験をいかしつつ、いかに国際貢献を進めるか
3. 政府・事業者等とともに、国際連携の具体化をいかに進めるか
 - 分野別、国・地域別、国際機関別の連携方針
 - オールジャパンとしての連携
4. 研究拠点、組織・人材の国際化をいかに進めるか
5. 経済安全保障上の要請、東アジア地域における原子力安全にいかに対応するか

ご清聴ありがとうございました。



君の英知が、
ふくしまの未来を創る。

Decommissioning
Gamma rays
Alpha rays
Radiation
Uranium
 $\alpha = mc^2$
Radioactive material
State of the arts
Environmental Restoration

英知事業 MISSION HP