

スタートアップは原子力発電の新規導入ペースを変えるか

Valérie Vandenberghe (ヴァレリー・ヴァンデンベルグ) 博士、エネルギー部門国際
関係担当

つるが国際シンポジウム 2023年11月2日

今日のフランスにおける原子力

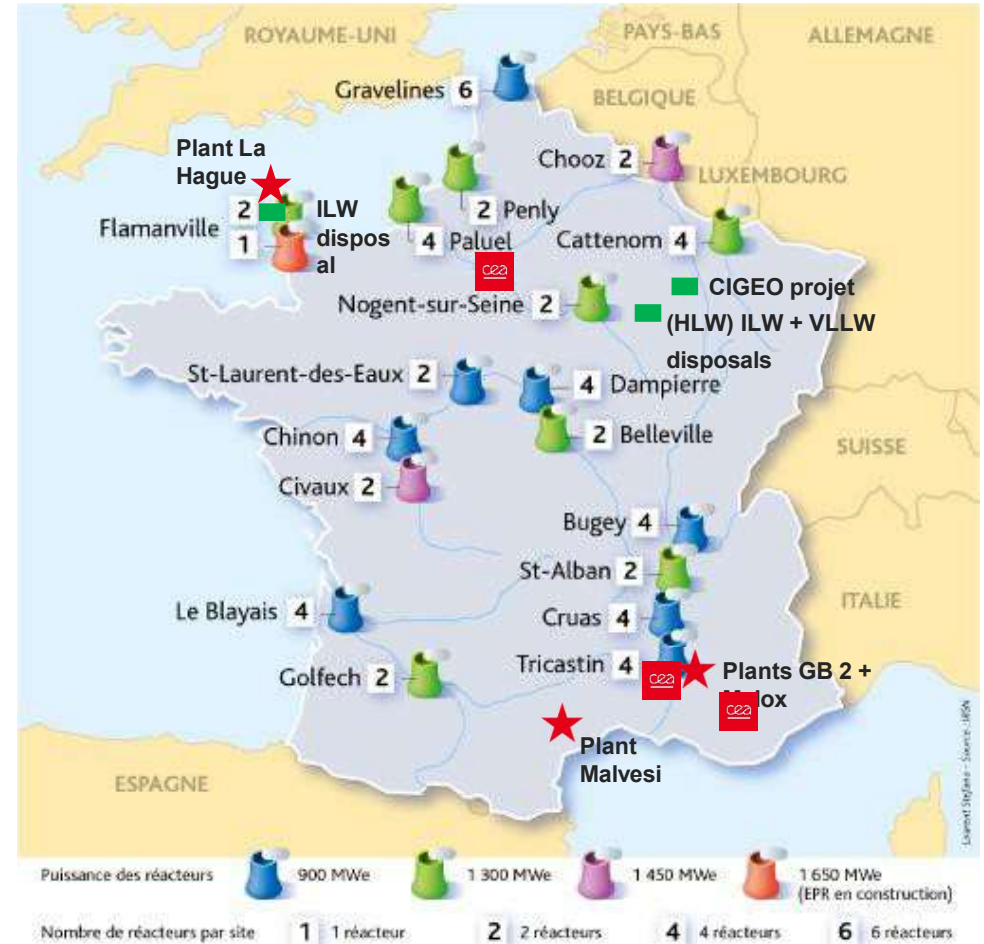
原子力発電所

- 加圧水型原子炉 (18サイト): 56基
- 設備容量: 61GW
- 2021年の発電量: 361TWh (69%)
- 2020年の平均運転年数: 35年
- フランスの技術により世界中で運転中の原子炉: 120基
- 経験豊かなフィードバック: 50年以上

+ 6基 (3x2) の新規PWR計画

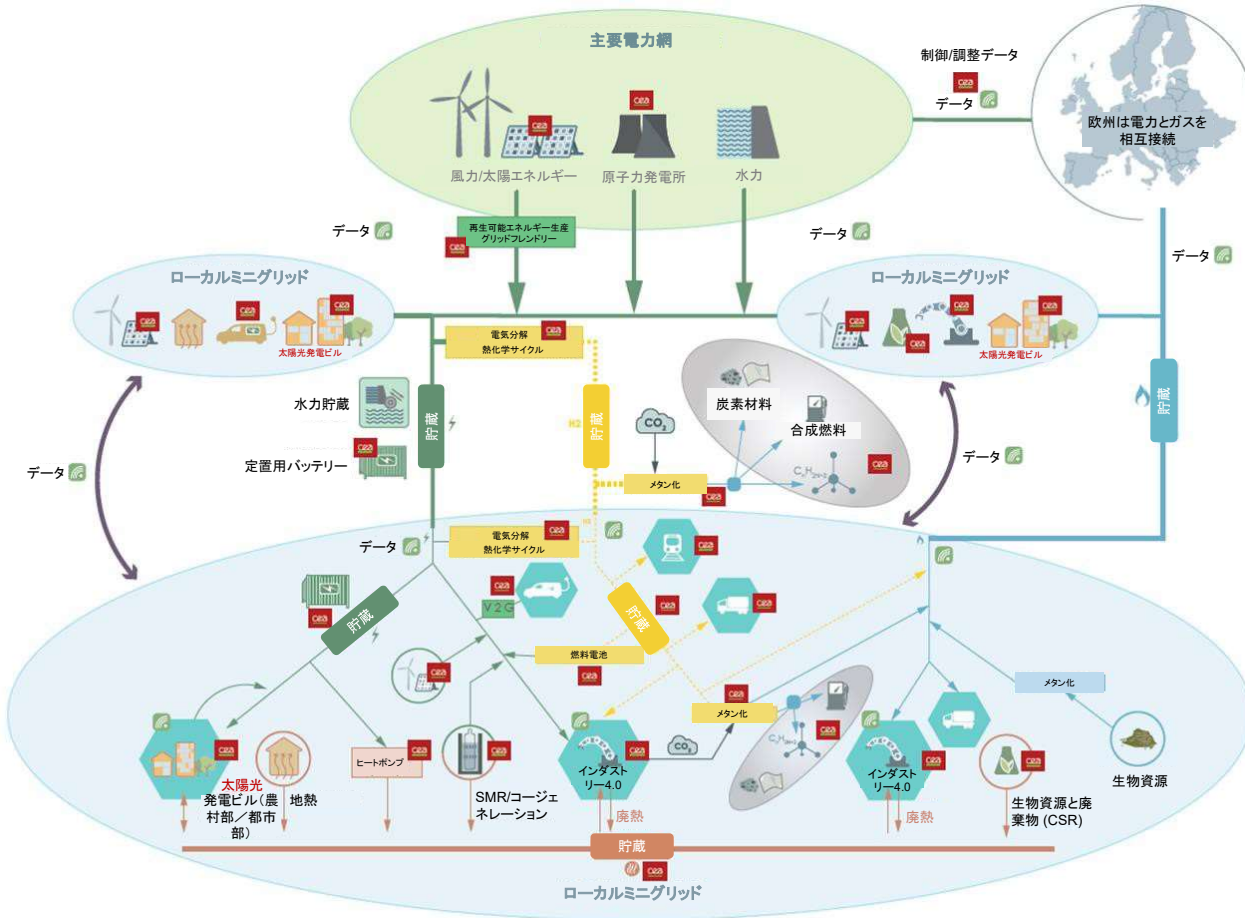
燃料サイクル、廃棄物、研究開発のための設備

- 燃料サイクル施設 (転換、濃縮、燃料製造、燃料再処理、廃棄物管理・貯蔵)
- 廃棄物処理センター (VLLW、ILW) およびCIGEOプロジェクト (HLW)
- 研究炉 (JHR建設中) およびホットラボ



2050年までにネットゼロを目指すCEAのビジョン

原子力は再生可能エネルギーとともに、解決策の一部



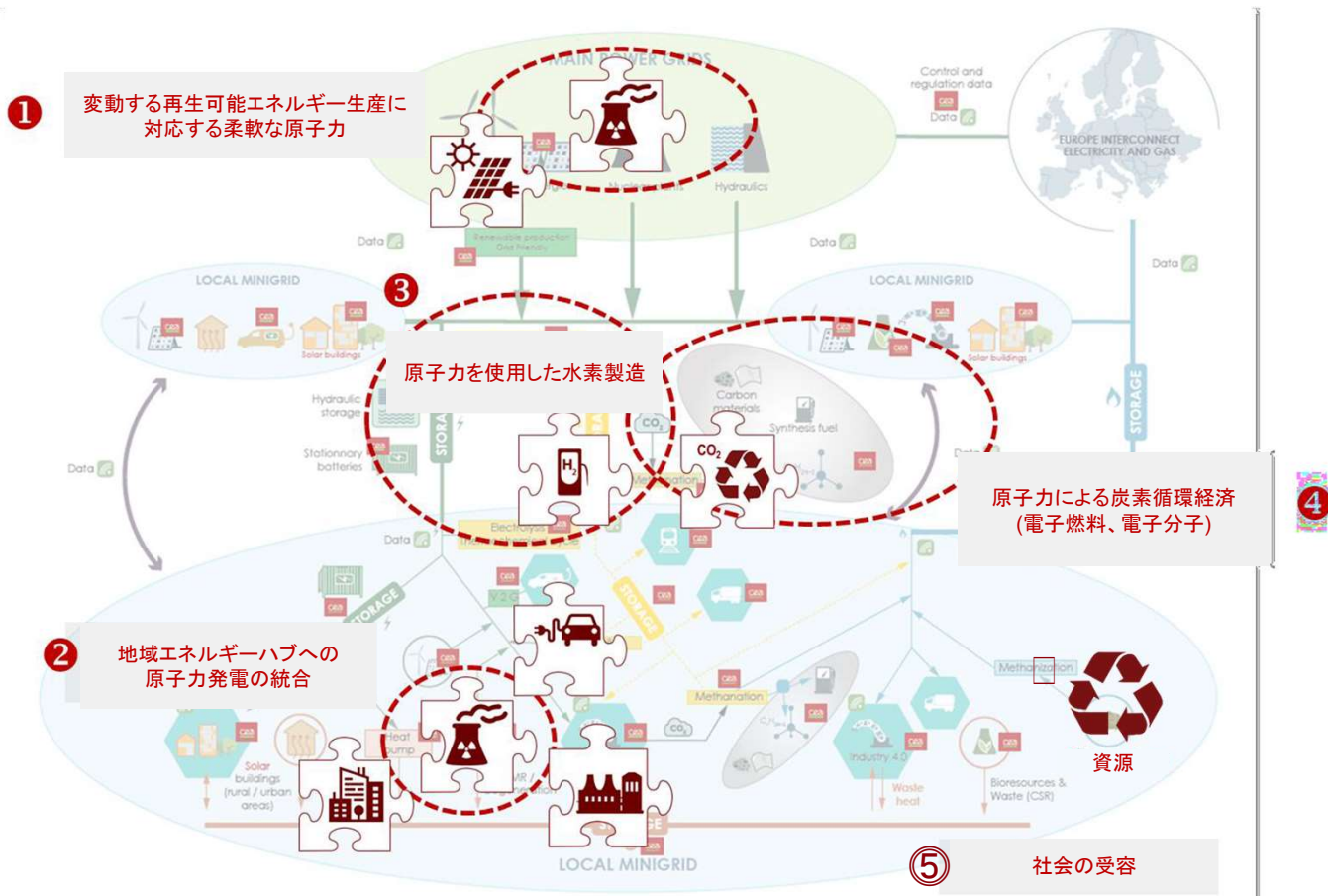
- マルチエネルギーベクター: (電気、熱、ガス/水素)
- 再生可能エネルギーと原子力の融合
- マルチスケール&マルチエージェント
- イノベーション
- スマートグリッド デジタルとデマンドサイドマネジメント
- 規制と新しいビジネスモデル
- 循環型経済(資源とCO2)
- 社会との結びつき





2050年までにネットゼロを目指すCEAのビジョン

原子力は再生可能エネルギーとともに、解決策の一部

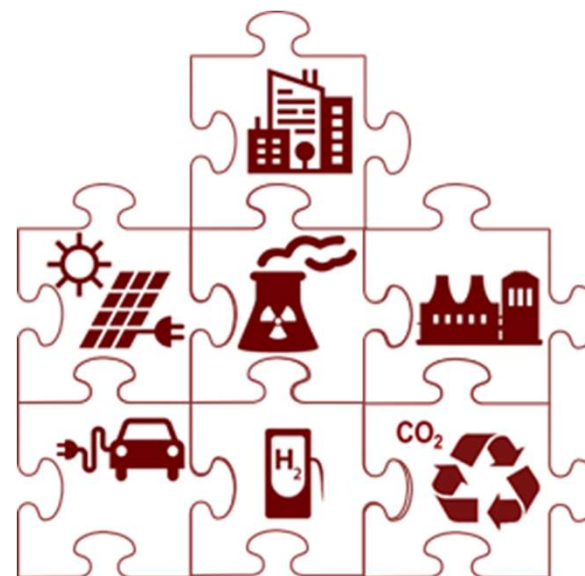


原子力と再生可能エネルギーの融合

- (1) 柔軟性のある原子力
- (2) 地域のエネルギーハブにおける小型原子力 (SMRまたはAMR)
- (3) 水素製造
- (4) 電子燃料や電子炭素分子製造のための原子力精製所
- (5) 社会の受容:新しい原子力、廃棄物管理、浄化と解体
- (6) 循環型経済-資源管理
- (7) 気候変動への適応
- (8) 産業への展開

原子力の新たな使用例

- グリッド統合とローカルグリッドバランシング
- 地域のエネルギーハブや遠隔地への供給
- 石炭火力発電所の代替
- 地域暖房と産業用プロセス熱
- 水素工場と電子燃料精製
- 脱塩



技術的ニッチに特化したスタートアップの機会？

CEAにおける原子力研究開発活動のロードマップ



スタートアップの可能性
がある領域？

明日への備え
(新しい原子力と新しい利用法)

未来への探求
(原子力の再発明)

将来のニーズの
予測と対応

業界のサポートと歴史的活動の管理

原子力発電所稼働中のプラントと 核燃料サイクルプラント

- 性能
- 寿命と安全性
- 操縦性と柔軟性
- デジタルツイン



廃止措置と解体

- 廃棄物の回収と調整、解体サイト
- 方法と技術 (遅延、コスト、廃棄物の抑制、安全性の向上)

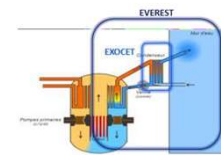


燃料とLT稼働

- 性能を向上させた燃料 (ATF-フレックス燃料)
- 原子力発電所の長期稼働
- 改修・改装

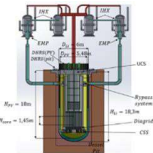
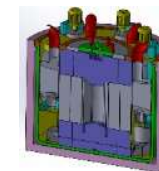
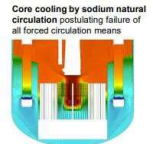
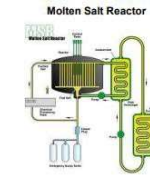
SMR/AMRと燃料サイクル

- 電力用SMR (軽水炉)
- 地域エネルギーシステム (電気、熱、水素など) の脱炭素化のためのハイブリッドSMR
- 新しいサイクルプロセスと施設



第四世代原子炉/AMRと先進燃料サイクル

- 先進炉 (SFR、Na-AMR、MSR、MMR)
- 原子力精製
- Advanced fuel cycle



スタートアップの可能性が
ある領域？



フランスのエネルギー政策の新たな方向性

- エネルギーの節減: 2050年に消費量を40%削減
- 脱炭素エネルギーの創出
 - 再生可能エネルギーの大規模開発
 - 原子力産業の再開: 2050年までに25GWの新規容量を目標。
 - 安全条件付きで稼働延長 (LTO)
 - <<フランス新原子力>>プログラム (EPR2を3基建設し、その他8基を研究)
 - 小型原子炉 (SMR/AMR) に10億ユーロの公的支援を行う原子カイノベーション
 - このセクターの組織化のための規制・財務条件の確立
- フランスのエネルギー・気候戦略 (SFEC) および関連する戦略計画ファイル (SNBC、PPE、PNACC)
 - EAは、SNBCとPPEの技術作業部会、およびSFECに関する提案書起草のためのハイレベル作業部会に貢献
 - エネルギー・気候プログラム法プロジェクト検討中
- 原子力政策会議 (CPN)
 - 民間原子力ガバナンスの強化
 - PR2プログラムと60年以降の稼働
 - 原子カイノベーションプログラム
 - 将来のサイクルに向けた戦略的分析
 - CEAの役割: 資源と施設計画を強化し、研究を調整すること
 - ジュール・ホロヴィッツ炉の建設完了に向けた投資の継続

ASTRIDからMRREP、そして新しい第4世代コンセプトへ

2019年、フランスは、SFRの活発な研究開発プログラムを維持しながら、大規模SFRの産業展開に要する予想期間を考慮し、ASTRID実証プラントの建設を見送ることを決定。

- 以前のPPEで確認されたように、燃料サイクルの閉鎖は依然としてフランスの原子力政策の強力な要素である
- 現在進行中のモノリサイクリングと長期的なクローズド燃料サイクルとのギャップを埋めるため、CEAとフランスの産業界パートナーは、PWRにおけるマルチサイクリングを研究しており、マルチサイクリングにおける段階的な産業戦略を可能にしている
- CEAは、AMRだけでなく、大規模原子力発電所用のSFRにも取り組んでおり、MSRのような他の第4世代コンセプトも再検討している

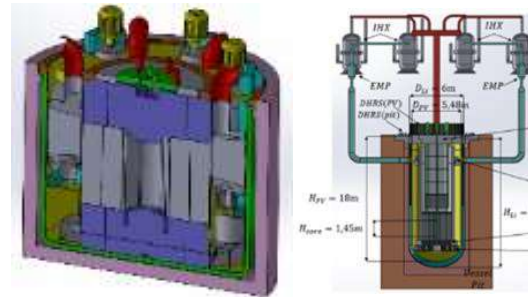
MR-REP



- 燃料サイクル閉鎖に向けた産業界の中間ステップ
- 核サイクル管理に関する実現可能性と関心を評価するための研究



ISAC Project



- アクチノイド核変換用溶融塩炉
- 重要な科学的・技術的課題に取り組む研究開発
- 研究機関と産業界の協力





France 2030 (2021年10月)

2030年までに10の目標を達成するための300億ユーロ計画



スタートアップに
重点!

- 1 : SMR/AMR、および廃棄物管理を改善した革新的な原子力発電所
CFPを通じてNUWARDプロジェクトに50億ユーロ程度、スタートアップに5億ユーロ以上、
合計10億ユーロを拠出する
- 2 : 電気分解による水素製造の促進 (10ギガファクトリー)
- 3 : カーボンニュートラルな産業を目指す (2030年までにGGEを35%削減)
これら3つの目標を達成するために80億ユーロを投資
- 4 : 200万台の電気自動車 (またはハイブリッド車) を製造
- 5 : 初の低炭素飛行機を製造
これらの将来の輸送目標を達成するために40億ユーロを投資
- 6 : 持続可能な農業へ投資
- 7 : 健康へ投資 (投薬、診断ツールなど)
- 8 : 文化
- 9 : 宇宙技術
- 10 : 深海

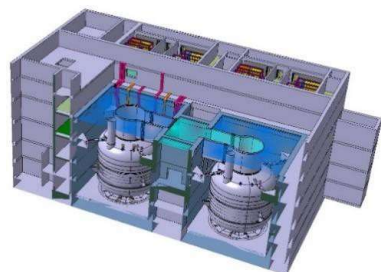
新型原子炉の研究開発

1原子炉分野のイノベーションを支援するため、今後10年間で10億ユーロの公的資金を投入する



原子力セクターに特化した「France 2030」の最初の目標は、フランスにおける革新的な原子炉の開発を実現することであり、なかでも放射性物質の管理を改善することである。

■ SMR (NUWARD)



nuward

原子炉2基、合計340 Mwe



革新的な原子炉 (核分裂または核融合)

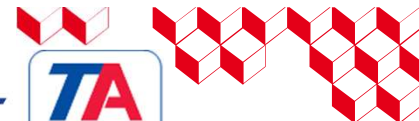
- プロジェクトは競争的プロセスを通じて実施
- 初回募集期間は2022年3月2日から2023年6月28日まで
- 新興民間企業が対象 □フランスのエネルギー分野における新規参入企業
- 長期的な官民パートナーシップを目指し、新興企業と市場優位企業を結びつける
- フランス公共投資銀行(BPI)が運営し、各州政府および選考委員会の後援を受ける

NUWARD: SMRプロジェクト

フランスおよびEUの産業プレイヤーと協力



framatomeme TRACTEBEL



事業目標

- 最高の安全基準を備えた輸出向け設計 (300~400MWeの範囲)
- 大型ユニットに比べ、設置の自由度が高い
- 多目的設計 (H2、地域暖房、海水淡水化、熱電併給、CO2回収)
- 基本設計: 2023年開始->2026予定。2030年までに商業利用を開始する
2030目標: フランスにおける基準プラントの「建設第1号」

最適化設計

- 各170 MWeの統合型原子炉2基による公称出力340 MWe
- ボロンフリー設計の統合型原子炉圧力容器
- 受動的安全システム
- 堅牢な設計: プール水没鋼製格納容器構造、半埋設型核島
- モジュール設計と建設

産業パートナー

- フランス原子力産業の主要企業
- トラクテベル社とともにヨーロッパのパートナーに拡大
- ANSALDO社との契約



The NUWARD™ Nuclear Island: 2 Units and 1 common pool

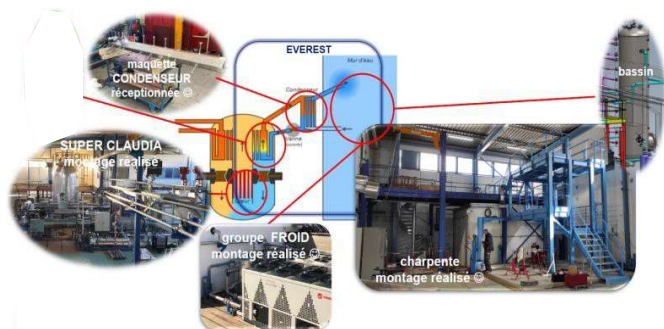


NUWARD

340 MWeの多目的SMR

NUWARDへのCEAの研究開発貢献

- NUWARD (蒸気発生器) の革新的なコンポーネントの設計に貢献
- 炉心設計のための中性子工学研究
- 熱流動システムコードに関する専門知識の提供
- 革新的なシステムのための熱流動過渡研究と検証ロードマップ
- コンポーネントのパフォーマンスとコード検証をサポートする実験ループ



国際的パートナーに開かれたプロジェクト

- 欧州のサプライチェーン企業との協力
- 国際NUWARD諮問委員会
 - 産業界
 - 研究開発および学術関係者



「共同早期審査」:3つの原子力安全当局 (フランス、フィンランド、チェコ共和国) が共通の安全評価を行うための共同イニシアチブ





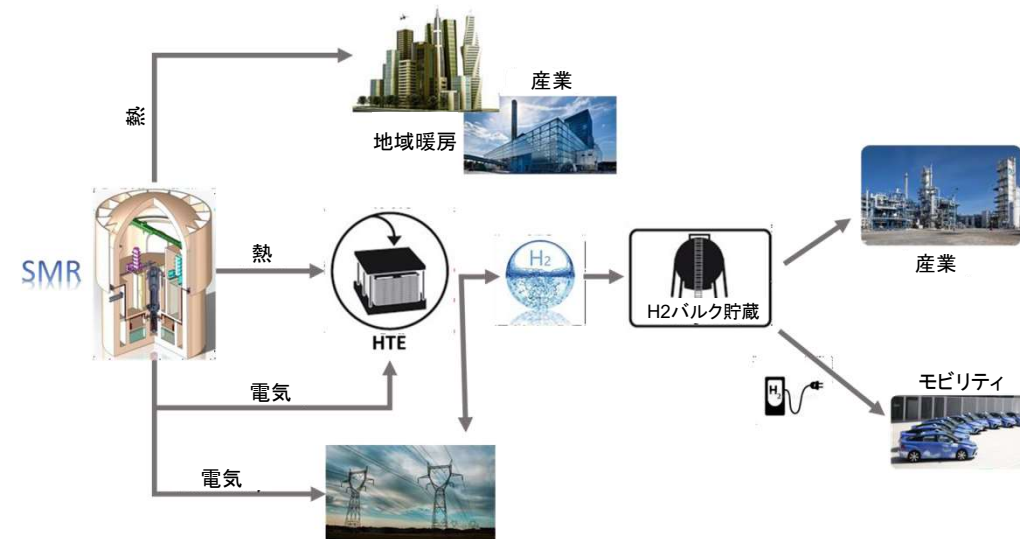
NUWARDの先にあるSMR研究開発プログラム

発電だけではないハイブリッド原子力システム

- 革新的脱炭素原子力エネルギーシステム構想
- 市場調査アプローチ
- コージェネレーションを含むマルチベクターシステム

SMRの電力以外の用途を評価する:

- 市場調査とユースケースの定義
- 熱生産のための結合システムに関する研究
- H₂製造のためのカップリングシステムに関する研究
- 電子燃料: 化学プロセスを脱炭素化するためのSMRとDACおよびクリーンH₂のカップリング



<<事業募集>>の主な特徴

2022年、2024年、2026年の3回連続募集



製造、供給、販売の努力は、最終的には国家主導の別の計画によって支えられることになる。



CEAは重要な貢献者:

- プログラムの全過程において、認可された新興企業の開発を技術的に支援する
- 低TRL項目と技術検証のための実験プラットフォームと施設を開発する
- CEA内でのスタートアップ・プロジェクトの出現を促進する (内部アイデア創出・開発プログラム)。



数多くのスタートアップ企業(核分裂と核融合)がフェーズ1と2を争う

競合の可能性:

- **核分裂技術**: NAAREA、Jimmy、ニュークレオ
- **核融合技術**: Renaissance Fusion、Marvel Fusion...



第四世代原子炉の全技術が集結する予定溶融塩炉、ナトリウム冷却高速炉、鉛高速炉、高温マイクロリアクターなど

第1フェーズの受賞者は間もなく確定。ニュークレオとNAAREAにはすでに資金が提供されている(ニュークレオは第2フェーズで1,500万ユーロ、NAAREAは第1フェーズで1,000万ユーロ)



その他10社以上が現在も検討中

要望があれば、関連プロジェクトにはCEAが同行する。

...CEAの研究室から現在生まれているコンセプトは5つ以上
(すでに設立された、または設立中のスタートアップ企業)

エクサナ: SFRコンセプト (2 x 400 MWth)



ステラリア: MSRコンセプト (250 MWth)



Blue Caspule: ナトリウム冷却HTRコンセプト (150 MWth)



Otrera: SFRコンセプト

Archeos: 熱生産に特化したSMRコンセプト



France 2030: 革新的な原子炉コンセプトにとって絶好の機会であり、原子力産業が手を差し伸べ、原子炉問題に取り組む新しい方法をテストする絶好の機会である...

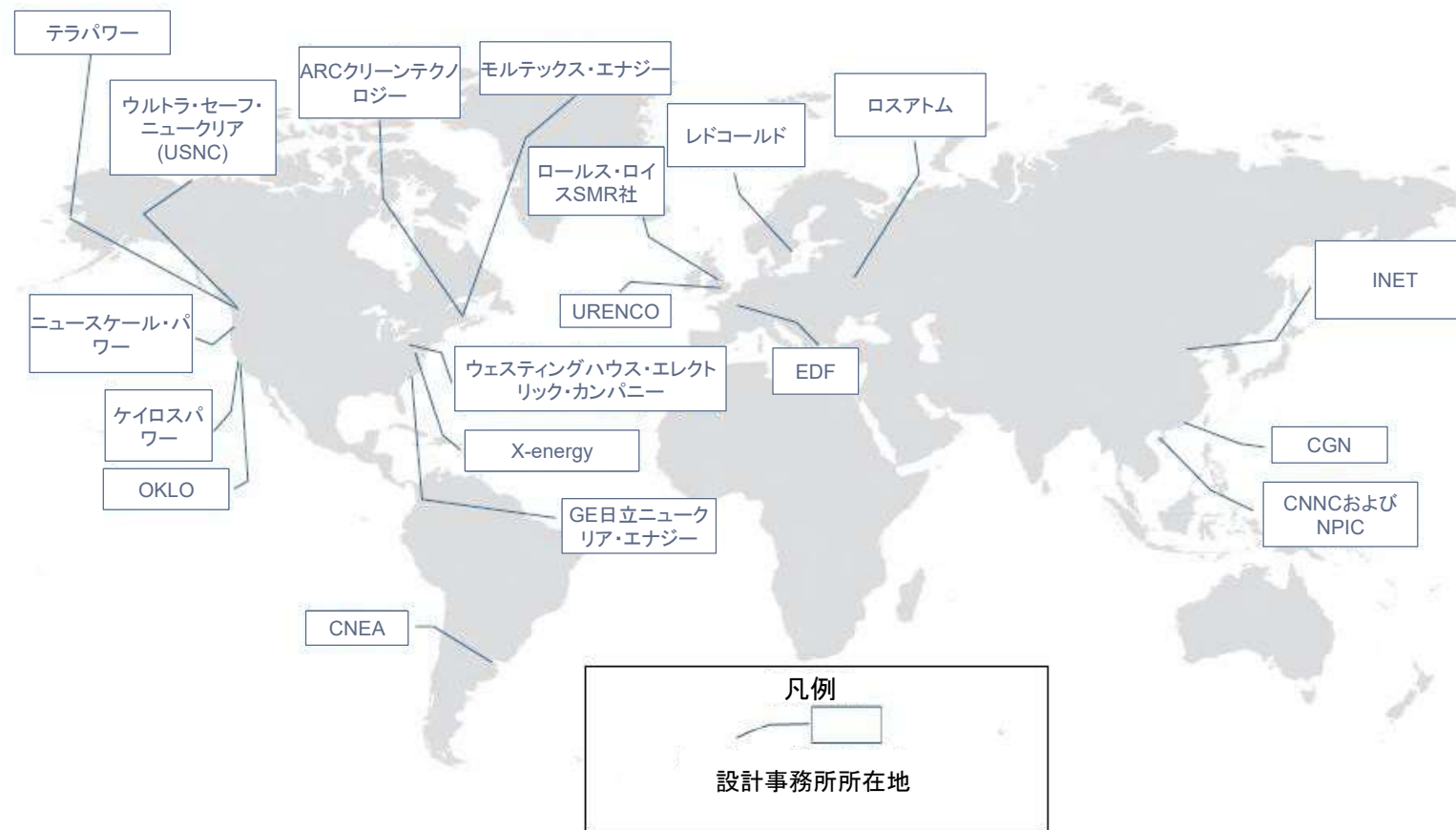
..燃料サイクルと許認可の問題を考慮する必要がある！



NEAダッシュボードvol.1 (2023年4月号)より

20

図5. 一部のSMRの設計事務所所在地

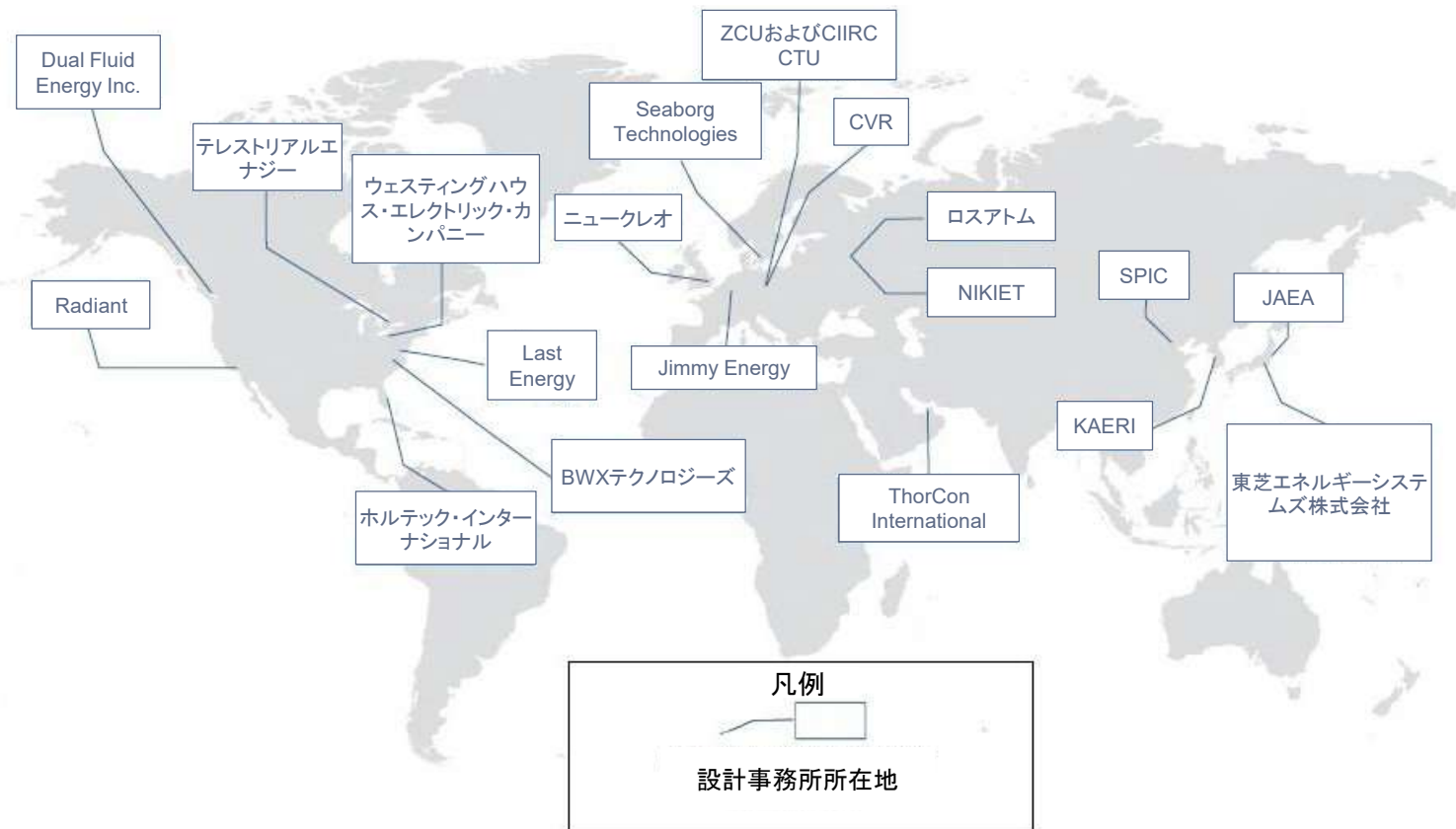




NEAダッシュボード vol.2 (2023年7月号) より

「市場からのシグナルは、電力および非電力産業用途の両方において、化石燃料に代わるSMRの可能性に対する認識が高まるにつれ、この傾向がさらに加速することを示唆している。」

+21





結論:

原子力エネルギーは、大型原子力発電所だけでなく、おそらくSMRや AMRも含めて、将来のフランスのエネルギーミックスの一部となるだろう

SMRとAMRのプロジェクトは世界中に数多くあるが、実際にFOAKを建設したのはそのうちの数件にすぎない

- 依然として、時間通りに、予算通りに、経済的に実行可能であることを実証しなければならない

SMRとAMDのプロジェクトは、既存の原子力企業 (たとえば、フランスのNEWARD社) や新興企業によるものである

- フランスはその両方を信頼し、NUWARDの事業展開とFrance 2030プログラムによる新興企業への支援を行っている

スタートアップ企業は、多くの場合、原子力分野では新規参入者であり、新規原子力発電のペースを速めることができる。しかし以下の制約がある。

安全当局とのやり取りが必要であり、原子力の特殊性を考慮する必要がある
プロジェクトの原子炉部分だけでなく、燃料サイクルにも取り組む必要がある
サプライチェーンと市場を確保する必要がある
コンセプトの経済性を確保する必要がある

原子力コミュニティに挑戦すること、それ自体が価値あることである。