



小型モジュール炉に関する国際動向

電力中央研究所 社会経済研究所

主任研究員 堀尾健太

日本原子力学会 核燃料部会 夏季セミナー

2022年8月23日

 電力中央研究所

本日本話しすること

1. 小型モジュール炉とは

2. 世界全体

3. 主要国の動向

- ① 米国
- ② カナダ
- ③ 英国
- ④ フランス

参考資料

電力経済研究第68号「海外における原子力発電への期待と課題」 (2022.01)

<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/no68.html>

総説 欧米諸国における原子力発電の利活用の展望
 – 脱炭素化への貢献と課題の克服に向けた取り組み –

第1部 新增設に向けた投資の予見性と政策的支援

- 原子力発電所の新增設に対する国の支援策と競争政策との関係
 – 英国 Hinkley Point C 原子力発電所への支援策を巡る議論から –
- 英国における新設原子力発電所の資金調達手法「規制資産ベース (RAB) モデル」の導入をめぐる議論
- 英国の新設原子力発電所を対象とする廃棄物移転価格制度の概要
 – 政府と民間の責任分担のアプローチ –

第2部 既設炉の活用と固定費回収

- フランスの原子力発電への規制アクセス制度 ARENH の見直しと新たな制度的措置の概要案

第3部 イノベーションの推進

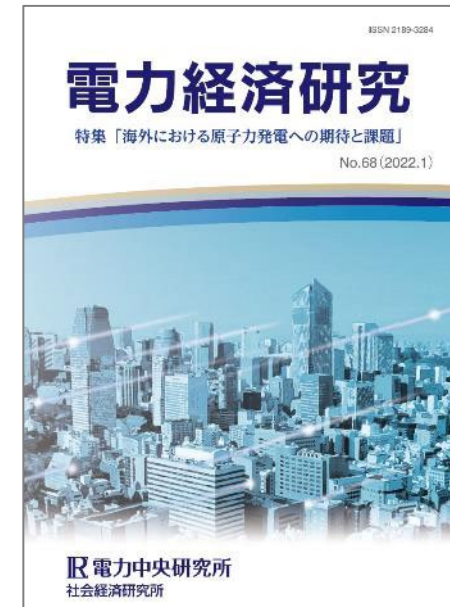
- **小型モジュール炉の開発と政策的支援の動向** ※米国・カナダ・英国

第4部 許認可に係る規制行政

- 米国原子力規制委員会の行政審判制度について – 原子力安全許認可審査パネル (ASLBP) の紹介 –

第5部 政策の変遷と国民意識

- 気候変動対策としての原子力発電に対する「条件付き消極受容」の日英国民意識の分析
- 英国の原子力政策の変遷とその背景要因 – 退潮から再興へ



1. 小型モジュール炉とは

小型モジュール炉の特徴

- 小型モジュール炉（SMR）は、小型化による規模の不経済を甘受しつつ、モジュラー化による習熟効果を期待
- 大型化（＝規模の経済）を追求してきた過去の原子炉開発の系譜とは一線を画す



(出典) 総合エネルギー調査会基本政策分科会 第8回会合資料、2013年10月

炉型の名称

軽水炉 (LWR)

- 沸騰水型原子炉 (BWR)
- 加圧水型原子炉 (PWR)

ナトリウム冷却高速炉 (SFR)

- 高速増殖炉 (FBR)

高温ガス炉 (HTGR)

黒鉛減速ガス冷却炉 (GCR)

重水炉 (HWR)

技術的な特性
(冷却材、減速材)

小型モジュラー炉

(SMR: Small Modular Reactor)

出力規模
製造方法

SMRへの注目が高まった背景

西側先進国における大型軽水炉建設の長期化、コスト超過

- ヴォーグル (米)
- フラマンビル (仏)
- オルキルオト (フィンランド)

プロジェクトリスクやファイナンスリスクの低減への期待

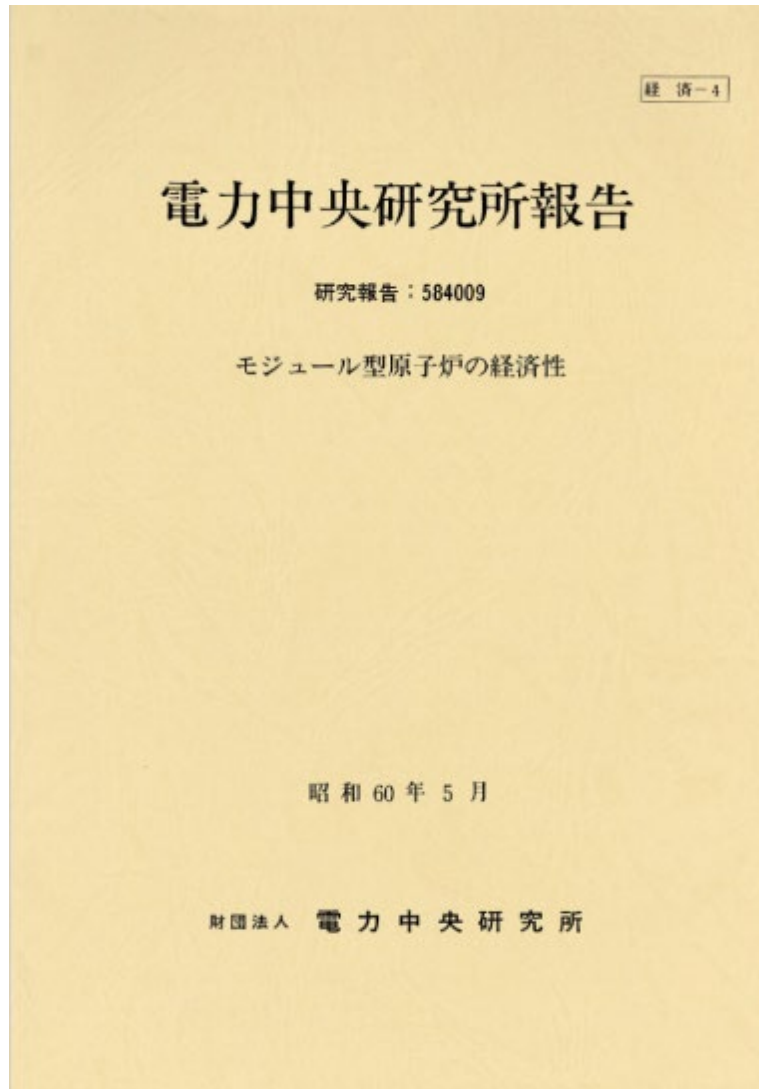
- 初期投資を抑制
- 工期を短縮
- 投資回収期間を短縮
- 金利負担を軽減

SMR (投資家に向けたメッセージ?)

その他のメリット

- 固有の安全性 (受動的安全性)、緊急時計画区域 (EPZ) の縮小
- 石炭火力の代替、再エネとの共存

(参考) モジュール型原子炉の経済性 (1985年)



著者は山地憲治氏

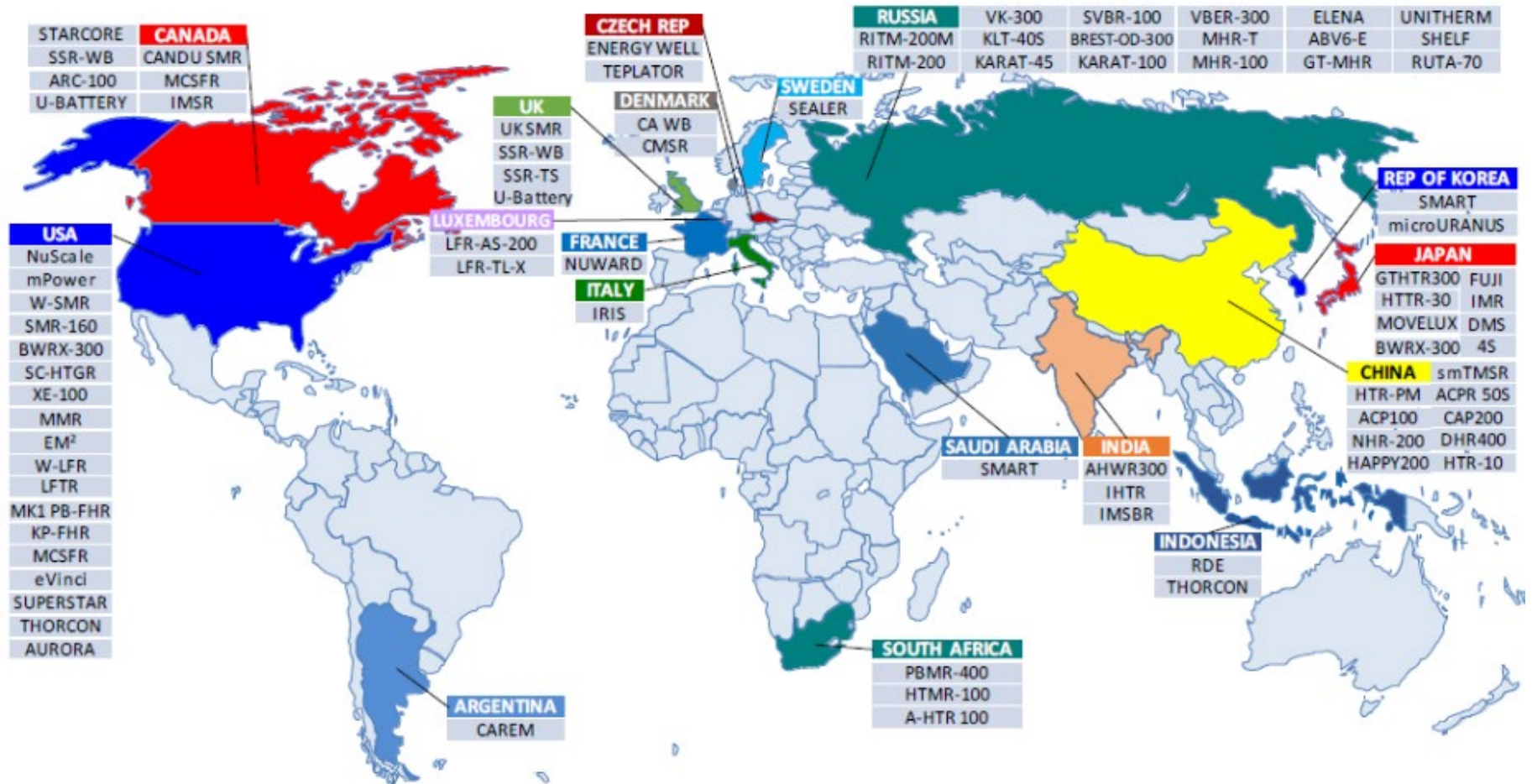
モジュラー炉のメリット/デメリットを整理した上で、以下の3点に着目して経済性を検討・考察

- ① **習熟効果** ←モジュラー
- ② **スケールデメリット** ←小型
- ③ **建設中利子** ←資金リスク

当時、米や西独では議論があった模様。ただし、現実的なニーズがあったようには見えない

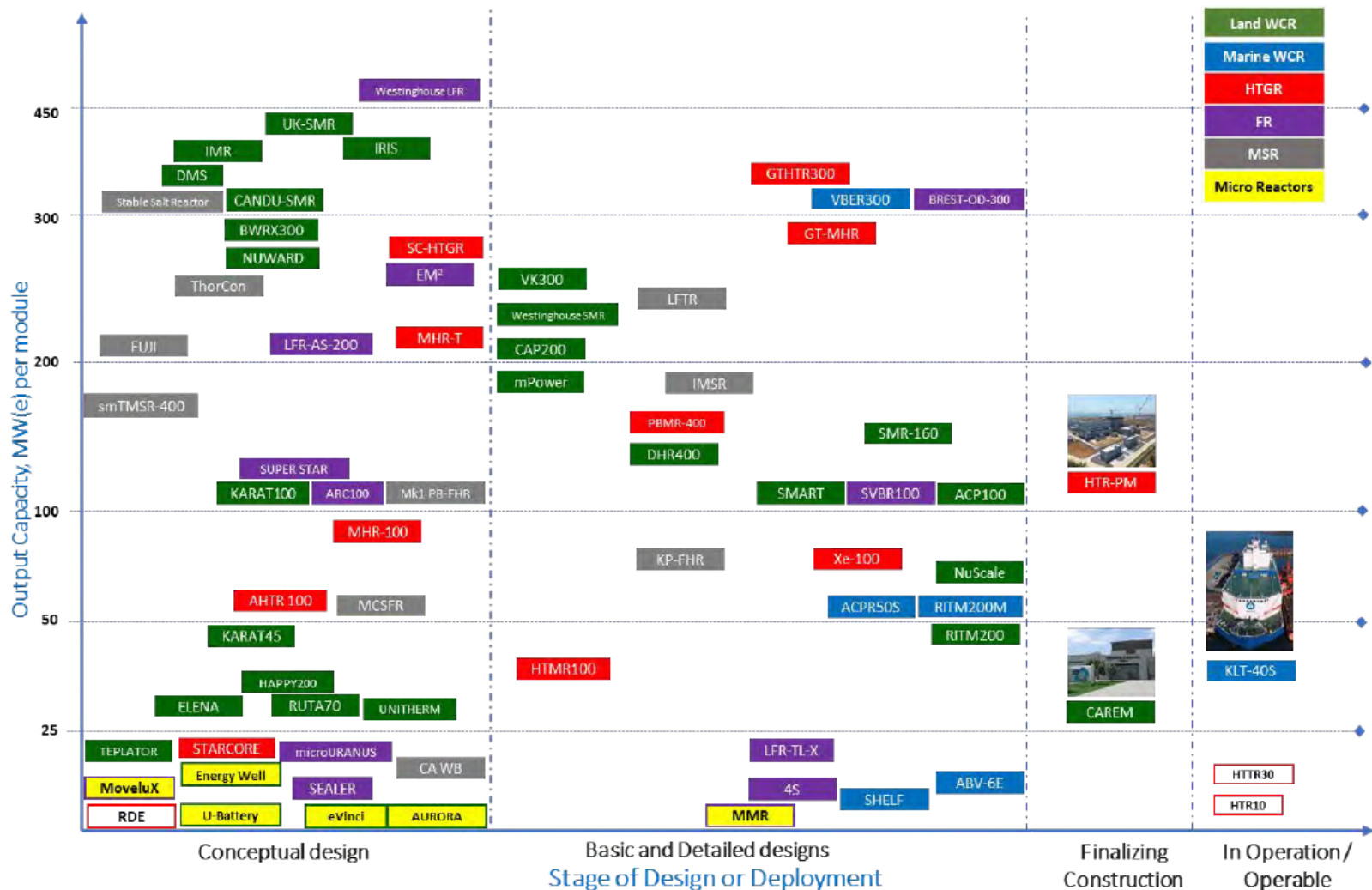
2. 世界全体

開発状況①



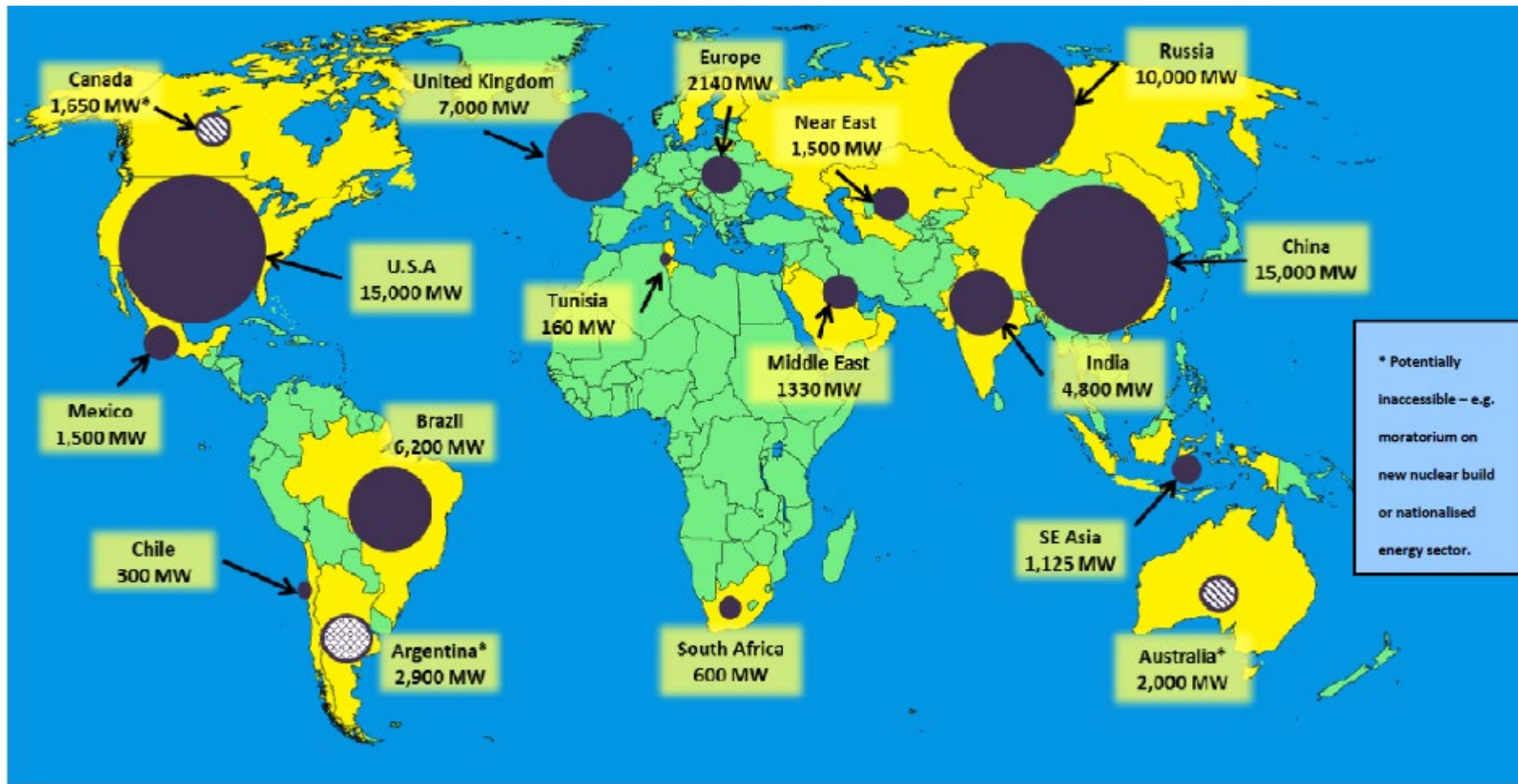
(出典) IAEA, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments 2020 Edition

開発状況②



(出典) IAEA, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments 2020 Edition

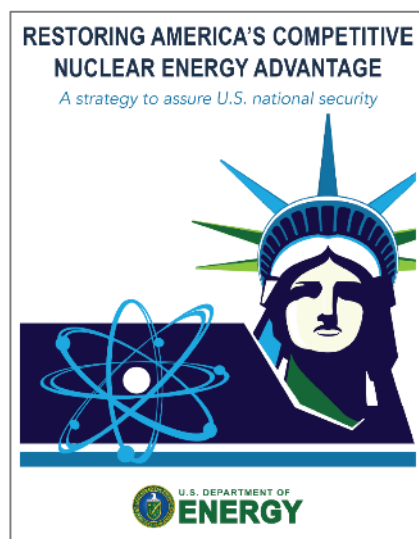
市場調査の例



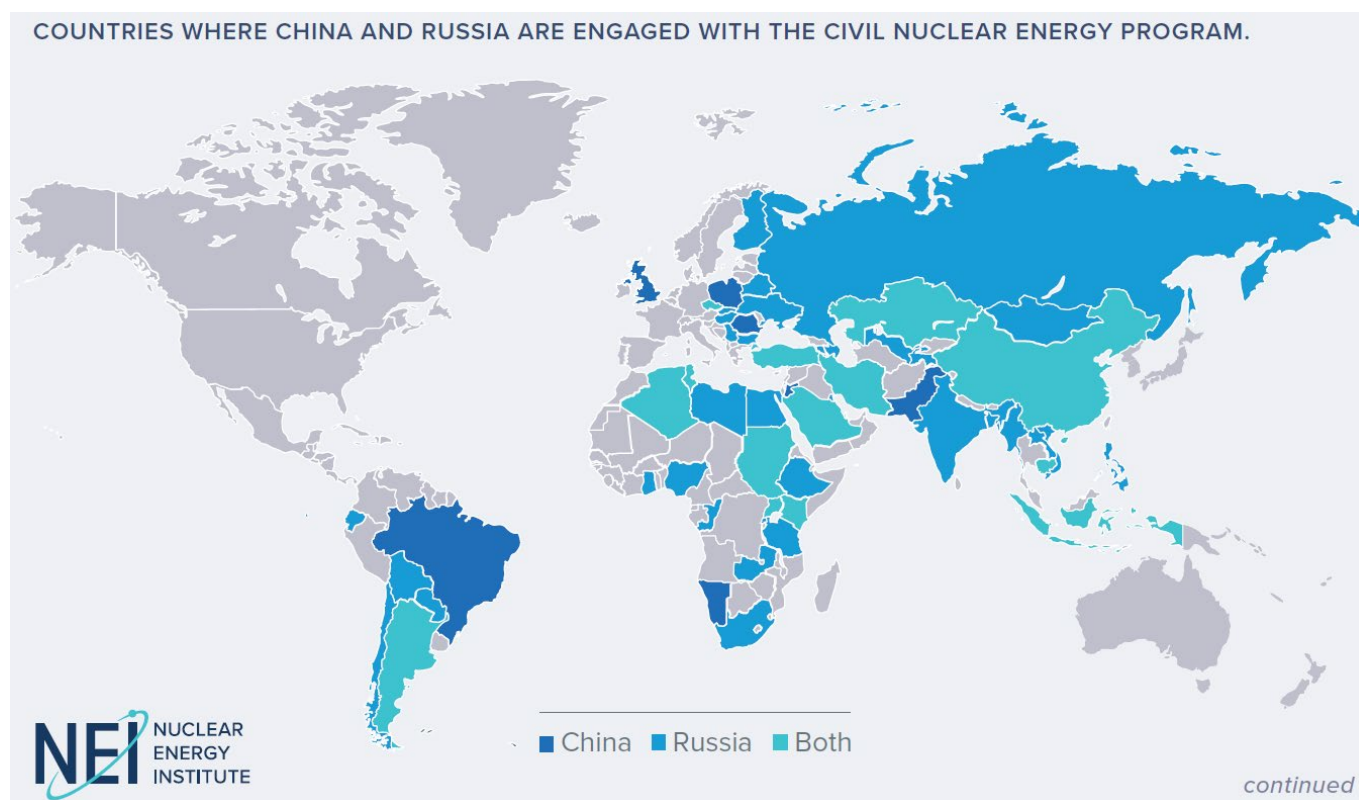
(出典) UK National Nuclear Laboratory, Small Modular Reactor Feasibility Study, December 2014

(参考) 戦略的競争と原子力

近年、米国と中国との戦略的競争が激化しているが、原子力についても、この文脈で語られる傾向（ただし、原子力の競争相手にはロシアも含まれる）



米DOE報告書
(2020年4月)



(出典) NEI, Russia and China Are Dominating Nuclear Energy Exports. Can the U.S. Catch Up?, 2021

3. 主要国の動向

米国①

原子力規制委員会（NRC）によるSMRの定義

The NRC refers to **light water reactor (LWR) designs** generating **300 MWe or less** as small modular reactors (SMRs)

許認可の状況

交付済

- NuScale（設計認証）
- TVA社クリンチリバーサイト（早期立地許可）

申請前

- ユタ州公営共同電力事業体（一括許認可）
- BWXT mPower / SMR-160 / BWRX-300（設計認証）

Design	Application Type	Applicant
NuScale DCA	Design Certification	NuScale Power, LLC
NuScale SDA-600	Standard Design Approval SDA-600	NuScale Power, LLC
NuScale US460	Standard Design Approval (SDA), Pre-Application	NuScale Power, LLC
US460 at Idaho National Laboratory Site	Pre-Application for a Combined License	Utah Associated Municipal Power Systems (UAMPS) / Carbon Free Power Project (CFPP) Licensing Lead: NuScale Power, LLC
BWXT mPower™	Pre-Application	BWXT mPower, Inc.
SMR-160	Pre-Application	SMR, LLC, a subsidiary of Holtec International
Clinch River Nuclear Site	Early Site Permit	Tennessee Valley Authority (TVA)
BWRX-300	Pre-Application	GE-Hitachi Nuclear Energy (GEH)

（出典）米NRCウェブサイト

米国②

連邦政府による支援の仕組み

- 許認可段階での支援は実施済み
- 建設や運転段階の支援には大型軽水炉の新設のために整備した制度が活用可能

許認可技術支援

Licensing Technical Support

- 許認可取得を目指すベンダー及び事業者に対して資金的な支援を行うもの（50対50の費用分担（cost sharing）方式）
- NuScaleやTVAに供与済み

債務保証

loan guarantee

- 2005年エネルギー政策法に基づくもので、原子力の枠は109億ドル
- これまで大型軽水炉（ヴォーグル原発など）に供与されてきた
- NuScaleは2017年9月にDOEへ申請

生産税控除

production tax credit

- 2005年エネルギー政策法に基づき、1kWhあたり1.8セントの税控除を8年間にわたって認めるもの
- 元々は2020年12月31日までに運開する発電所が対象
- 2018年度予算にて、2021年1月以降に運転を開始する発電所についても、600万kWを上限に適用することを認めた

- この他、連邦政府による長期契約（power purchase agreement）の可能性についてもDOEが委託調査を実施

米国③

バイデン政権と原子力

- 2020年の民主党綱領には、1972年以来、48年ぶりに原子力に対して前向きな文言が入った（脱炭素化やイノベーションの文脈）
 - 気候変動対策の観点から、原子力支持にシフト
 - SMRへの言及はないが、先進原子力（advanced nuclear）という言葉が含まれている
- 2021年11月15日に発効した**超党派インフラ投資法**（Infrastructure Investment and Jobs Act）は、2050年ネットゼロ達成に向けて、既設炉の早期廃炉の防止のための税控除（60億ドル）や**先進原子力開発への投資（25億ドル）**を含む
 - 予算権限は連邦議会にあるが、近年、連邦議会では原子力に関する複数の立法が超党派で成立
- 2022年8月7日に連邦議会上院が可決した**インフレ抑制法案（Inflation Reduction Act of 2022）**にも、**原子力に対する税控除（kWhあたり0.3セント、2024～2032年、総額300億ドル）**が含まれた

上野貴弘、米国「インフレ抑制法案」における気候変動関連投資、電力中央研究所 社会経済研究所ディスカッションペーパー-SERC22007、2022年8月10日

<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/discussion/22007.html>

(参考) 国防総省とマイクロ原子炉



U.S. Department of Defense

Release

IMMEDIATE RELEASE

DoD to Build Project Pele Mobile Microreactor and Perform Demonstration at Idaho National Laboratory

APRIL 13, 2022

[f](#) [t](#)

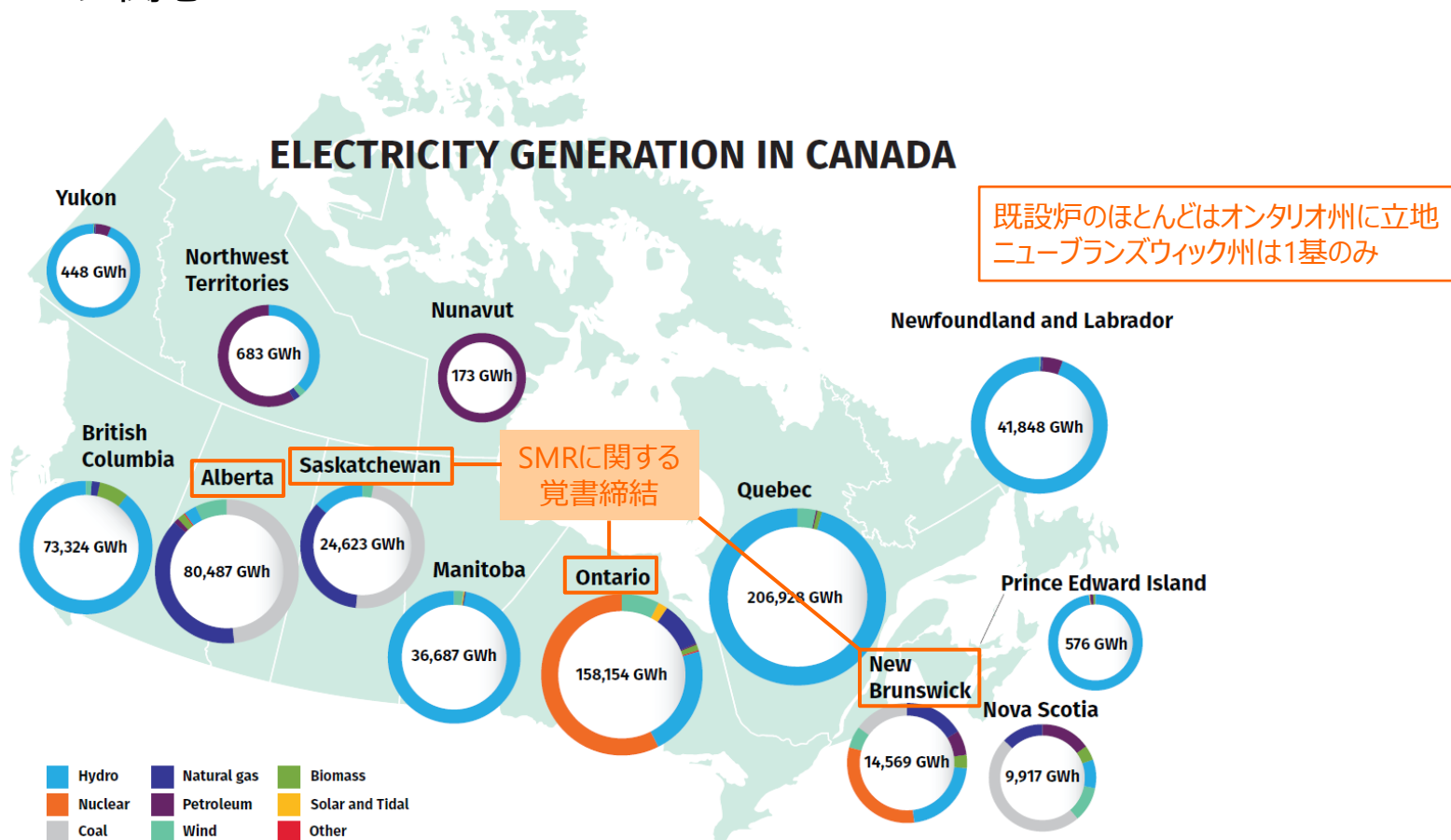
The Department of Defense's Strategic Capabilities Office (SCO) released a Record of Decision (ROD) for Project Pele, a program intended to design, build, and demonstrate a mobile microreactor.

SCO will construct an inherently safe by design nuclear microreactor capable of being transported by the DoD and able to deliver 1-5 MegaWatts of electrical power for a minimum of three years of full power operation.

2022年6月
BWXT社を
選定

カナダ①

- 連邦制であり、かつ憲法上の規程により、エネルギーミックスは州政府の権限
- 長年にわたりCANDU（重水炉）を開発・導入してきたが、新設の予定はなく、近年はSMRに関心



カナダ②

連邦政府の動向

カナダ原子力研究所（CNL）を中心に、民間によるSMRの開発・実証を支援（支援対象に選ばれた炉型は、高温ガス炉、溶融塩炉、マイクロ炉）

主な州の動向

- 既設炉の立地する2州に加えて、サスカチュワン州とアルバータ州もSMRに関心を有し、4州で覚書を締結。2022年3月に戦略計画を公表
 - ① **グリッドスケールのSMR（300MW）**：2028年にオンタリオ州ダーリントンに建設し、その後はサスカチュワン州でも建設（1基目は2034年に運転開始）
 - ② **次世代SMR（非軽水炉）**：ニューブランズウィック州ポイント・ルプローに2基（ARCは2029年、Moltexは2030年代前半の運転開始）
 - ③ **マイクロ炉**：遠隔地域や鉱山でのディーゼルの代替。2020年代半ばの実証炉の導入に向けて、OPGはUltra Safe Nuclear Corporation (USNC)、Bruce Powerはウェスティングハウスと協力
- オンタリオ州とサスカチュワン州の電力公社（OPG、SaskPower）は、上記①の炉型として、BWRX-300（GE日立）を選択

(参考) カナダの原子力規制の特徴

カナダ原子力安全委員会 (CNSC)

- 委員会（最大7名）とスタッフ（約800名）から構成
- 委員会は準司法的な行政審判所であり、スタッフからの独立性が高い
- 規範的（prescriptive）ではない、**technology neutral**な規制基準
- 日本と同様、事業者が許認可の申請を行う
 - 商用運転開始に必要な許認可は3つ（立地準備許可、建設許可、運転許可）

事前ベンダー設計レビュー (VDR: Pre licensing Vender Design Review)

- **CNSCスタッフと原子炉ベンダーが公的な技術対話を行うための仕組み**
- 評価サービスであり、設計認証のような規制判断ではない
- **3フェーズ**（概念設計、基本設計、詳細設計）あり、それぞれのフェーズが完了するごとに、レポート等を作成（一般には要約のみ公表）

規制基準の特徴やVDRという仕組みの存在が、新型炉開発に適した環境を提供

(参考) VDR申請中のSMRベンダー

10社が申請

軽水炉 : 3

非軽水炉 : 7

フェーズ2

Terrestrial (2018.12)

NuScale (2020.01)

GE-Hitachi (2020.01)

X Energy (2020.07)

Ultra Safe Nuclear Corporation (2021.06)

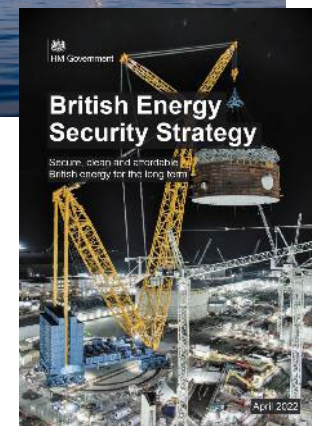
Vendor	Name of design and cooling type	Approximate electrical capacity (MW electrical)	Applied for	Review start date	Status
Terrestrial Energy Inc.	IMSR Integral Molten Salt Reactor	200	Phase 1	April 2016	Complete
			Phase 2	December 2018	Assessment in progress
Ultra Safe Nuclear Corporation	MMR-5 and MMR-10 High-temperature gas	5-10	Phase 1	December 2016	Complete
			Phase 2	June 2021	Assessment in progress
LeadCold Nuclear Inc.	SEALER Molten Lead	3	Phase 1	January 2017	On hold at vendor's request
ARC Nuclear Canada Inc.	ARC-100 Liquid Sodium	100	Phase 1	September 2017	Complete
			Phase 2	February 2022	Assessment in progress
Moltex Energy	Moltex Energy Stable Salt Reactor Molten Salt	300	Series Phase 1 and 2	December 2017	Phase 1 completed
SMR, LLC. (A Holtec International Company)	SMR-160 Pressurized Light Water	160	Phase 1	July 2018	Complete
NuScale Power, LLC	NuScale Integral pressurized water reactor	60	Phase 2*	January 2020	Assessment in progress
U-Battery Canada Ltd.	U-Battery High-temperature gas	4	Phase 1	Pending	Project start pending
GE-Hitachi Nuclear Energy	BWRX-300 boiling water reactor	300	Phase 2*	January 2020	Assessment in Progress
X Energy, LLC	Xe-100 High-temperature gas	80	Phase 2*	July 2020	Assessment in Progress

(出典) 加CNSCウェブサイト

英国①

英国の原子力政策とSMR

- 気候変動やエネルギーに関する主要な政策文書において、原子力を明確に位置づけ
 - The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution (2020)
 - Net Zero Strategy (2021)
 - British Energy Security Strategy (2022)
- SMRへの投資・支援
 - 軽水炉型SMR：ロールスロイスを中心としたコンソーシアム
 - 非軽水炉型SMR：複数の炉型のフェージビリティスタディを支援した後、2021年12月、高温ガス炉を選択することを決定
 - 先進原子炉基金（Advanced Nuclear Fund, 計38.5億ポンド）
軽水炉型SMRの開発に21.5億ポンド、非軽水炉型SMRの実証炉1基の建設（2030年代前半）に17億ポンド



英国②

British Energy Security Strategy (2022)

ロシア・ウクライナ戦争の勃発を踏まえて策定。原子力については、再度世界を主導（lead the world once again in a technology we pioneered）することを目標に掲げる

原子力に関する主な記述

- 2050年までに24GWを導入（現在の3倍、予想される発電電力量の1/4）
- 現在の議会の会期（～2024年）に1つ、次の会期（～2029）に2つの新設プロジェクトの投資判断を実施（後者はSMRを含む）
- さらに最大8基の新設を目指し、10年に1基ではなく、1年に1基の新設を実現
- 新設に対して総額20億ポンドの投資（サイズウェルCに1億ポンド、SMRに2.1億ポンド）
- 政府の投資判断よりも前の段階のプロジェクトへの投資のため、Future Nuclear Enabling Fundを創設（総額1.2億ポンド）
- 既存の8つのサイトをまとめた長期的な立地計画を策定

フランス

イノベーションへの投資

- EDFは軽水炉型SMR “NUWARD”を開発中（170MWe×2基）
- 2021年10月にフランス政府が公表した投資計画“France 2030”では、1つ目の目標にSMR開発への投資（2030年までに10億ユーロ）を掲げた

新設の再開

- マクロン大統領は、2021年11月9日、原子炉建設の再開を発表
 - 主な理由はエネルギー面での自立と2050年カーボンニュートラルの達成
- 次いで、2022年2月10日に「14基の新設」を表明、「原子カルネサンスの時が来た」と表現
 - 6基はEPR、残り8基の炉型は今後決定
 - 既設炉の運転延長の重要性にも言及
- 7月6日、ボルヌ首相は、EDFの国有化を表明

まとめ

- 小型モジュール炉は、小型化による規模の不経済を甘受しつつ、モジュール化による習熟効果を期待するもの
 - 注目が高まった背景にはプロジェクトリスクやファイナンスリスクの低減への期待
- SMRへのスタンスは国ごとに異なる
 - 米国：NuScaleを中心に、民間が軽水炉型SMRの開発を主導。債務保証など、大型軽水炉建設のために整備した仕組みを転用可能
 - カナダ：規制上の特徴等によって、非軽水炉型SMRのベンダーを惹きつけている。ただし、州ごとにニーズは異なり、オンタリオ州やサスカチュワン州は軽水炉型SMRを選択
 - 英国：外国製の大型軽水炉の新設と併行して、英国産SMRの確立を志向。軽水炉型SMRはロールスロイス中心、非軽水炉型SMRは高温ガス炉
 - フランス：大型軽水炉の新設と併行して、軽水炉型SMRを開発
- 2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、様々な革新的技術への公的な投資がなされる中、SMRも選択肢の1つとして位置づけ