資料４

世界の革新炉 開発動向

2022年3月28日

(一般社団法人）海外電力調査会

2022Japan Electric Power Information Center, Inc. All Rights Reserved

目次

１．革新炉とは
２．世界の革新炉開発の概要
３．SMRの展望
４．まとめ

〇参考：　1.　革新炉導入検討国
　　2.　主要国の革新炉開発状況

2022Japan Electric Power Information Center, Inc. All Rights Reserved

1．革新炉とは

1-1　革新炉（定義）

1-2　SMRの特長

1-1　革新炉（定義）

- 革新炉とは、「安全性、廃棄物、エネルギー効率、核不拡散性等の観点から優れた技術を取り入れた先進的な原子炉」
- 小型モジュール炉（SMR）の定義は、国や機関により様々
- 本資料では「電気出力が概ね30万kW以下の革新炉」とする

革新炉の区分

革新炉＜定義＞	大型 ＞30万kW	小型 ＜30万kW
軽水炉	新型軽水炉	小型モジュール炉（SMR）
第4世代炉等		

SMRの定義

米国			英国		OECD/NEA		IAEA	
AR	SMR	・軽水炉 ・30万kWe未満	SMR	・第3世代炉 ・小型 ・モジュール	SMR	・1～30万kWe ・モジュール（連続生産） ・第3世代炉 ・第4世代炉	SMR	・30万kWeまで ・モジュール ・先進的 ・固有の安全性 ・全ての炉型 –第3世代炉 –第4世代炉
	・非軽水炉（全ての炉型）		AMR	・第4世代炉 ・モジュール 〈核融合炉〉				

AR:Advanced Reactor、AMR:Advanced Modular Reactor、IAEA:国際原子力機関

出所：JEPIC作成

1-2　SMRの特長

□ OECD/NEAによると、2035年までに約2,000万kWに達する可能性も

（1）SMRの特長

① 統合化された設計
② 固有の安全性
③ 炉心の放射性核種インベントリの削減
④ モジュール化によるファイナンス・リスクの低減、予見性向上
⑤ 系統への柔軟性付与
⑥ 需要や立地に対する多様な用途

（2）SMRへの期待

① エネルギーシステムの脱炭素化
- ●石炭火力のリプレース
- ●エネルギー分野への脱炭素化（熱供給、水素製造、産業利用）

② 変動型再エネ（VRE）の導入補完
- ●水素製造、熱貯蔵システムの併設による出力調整能力の拡大

③ 新しい分野や地域への活用促進
- ●需要の小さい国や地域への導入
- ●遠隔地、局地事業での利用（ディーゼルの代替）

2. 世界の革新炉開発の概要

2-1　世界の新型軽水炉建設状況
2-2　世界のその他革新炉開発の状況
2-3　代表的な革新炉
2-4　主要国のプロジェクト

2-1　世界の新型軽水炉建設状況

- ロシアは、世界一の新型軽水炉輸出国。最新型のVVER-TOIも開発
- 中国は、国産の華龍1号を2021年1月に運開。以降、続々と建設を計画
- 西側諸国では、フランスが新型のEPR2（~170万kW）を開発中。2050年までに、6基＋8基のEPR2を新設　（初号機：2028年着工、2035年運開）

世界の新型軽水炉建設状況（2022年1月現在）

供給国	メーカ	炉型名	炉型	出力	運転	開発基数	
				万kW		建設	計画
米国	WH	AP1000	PWR	110	4	2	0
フランス	フラマトム	EPR	PWR	160	2	4	4
		EPR2	PWR	～170	0	0	0
ロシア	ロスアトム	VVER1200	PWR	120	5	10	12
		VVER-TOI	PWR	126	0	2	9
韓国	KHNP	APR1400	PWR	140	3	7	0
中国	国家電投	CAP1400	PWR	140	0	2	0
	CGN CNNC	華龍1号	PWR	116	2	12	7

出所：原産協会「世界の原子力発電　開発の動向」2021および各種情報よりJEPIC作成

2-2 世界のその他革新炉開発の状況

- 大型の第4世代炉については、ロシア、中国等で高速炉、高温ガス炉の開発が進められている。
- 一方、SMRについては、国際原子力機関（IAEA）報告書によると、世界で70種類以上の開発が行われている。

世界の開発中SMR（炉設計の種類）

国名	軽水炉		第4世代炉（GenⅣ）			マイクロ炉	合計
	陸上 LWR	海上 LWRS	高温ガス HTGR	高速 FR	溶融塩 MSR	MiMR	
米国	5		2	4	4	3	18
英国	1				1	1	3
カナダ	1		1	1	1		4
ロシア	7	5	3	2			17
中国	4	1	2		1		8
日本	2		2	1	1	1	7
韓国	1			1			2
フランス	1						1
その他	3		4	3	2	1	13
合計	25	6	14	12	10	6	73

注：IAEAのリストに、米国Natriumを追加

出所：IAEA（2020）を基にJEPIC作成

2-3　代表的な革新炉

- 新型軽水炉を除き、ほとんどの革新炉はまだ開発中
- 燃料濃縮度は5%以上が多い

＊ニュースケールは2021年12月、名称を変更

国名	原子炉名	炉型	電気出力（万kW）	M性	燃料	設計者	開発段階
米国	VOYGR	LWR	7.7	○	＜5%	ニュースケール	○
	SMR-160	LWR	16			ホルテック	○
	BWRX-300	LWR	30			GE日立	○
	Xe-100	HTGR	8	○	HALEU	Xエナジー	○
	Hermes	MSR	3.5			ケイロス・パワー	○
	Natrium	FR	34.5			テラパワー、GE日立	○
	eVinci	MiMR	～0.5			ウェスチングハウス	△
	Aurora	MiMR	0.15			オクロ	○
	MMR	MiMR	0.5～1			USNC	○
英国	UK-SMR	LWR	47		＜5%	ロールス・ロイス	△
	SSR-W	MSR	30		Pu	モルテックス	×
	U-Battery	MiMR	0.4		HALEU	Urenco	△
カナダ	ARC-100	FR	10		HALEU	ARC	×
	IMSR	MSR	19	○	＜5%	テレストリアル・エネジー	○
ロシア	BN-800	FR	88.5		U&Pu	ロスアトム	●
	KLT-40S	LWRS	3.5	○	HALEU	ロスアトム	●
	RITM-200M	LWRS	5.3	○	HALEU	ロスアトム	△
中国	ACP100	LWR	12.5		＜5%	CNNC	◎
	ACPR50S	LWRS	6			CGN	◎
	HTR-PM	HTGR	21	○	HALEU	清華大	◎

出所：OECD/NEA等を基にJEPIC作成

凡例
●　運転中
◎　建設中
○　許認可段階
△　基本設計中
×　概念設計中
M性　モジュールとして
○　連結が可能
（電気出力は1Mあたり）
HALEU　濃縮度5～20%

LWR：軽水炉、MSR：溶融塩炉
HTGR：高温ガス炉
FR：高速炉、MiMR：マイクロ炉
LWRS：海上軽水炉

2-4　主要国のプロジェクト

- 米国、英国、カナダは、完成時期が20年代後半
- 一方、ロシア、中国は、2020年以前の運開もあり、西側先進国に先行

	推進者（代表）	原子炉名	サイト	建設スケジュール(2019～) 20	25	30
米国	UAMPS	VOYGR	アイダホ州INL	○	◎	●
	オクロ	Aurora	アイダホ州INL	○	＜◎	■＞ ＊2022.1.NRC申請却下
	テラパワー	Natrium	ワイオミング州	○	◎	●
	Xエナジー	Xe100	ワシントン州		◎	●
	ケイロス・パワー	Hermes	テネシー州		●	
英国	ロールスロイス	UK-SMR	未定	○	◎	●
	Urenco	U-Battery	未定			■
カナダ	OPG、BP	BWRX-300	オンタリオ州（1基）	○		●
	SKP		サスカチュワン州（～4基）			●
	NBP	ARC-100	ニューブランズウィック州			●
		SSR-W				■
	OPG	MMR	オンタリオ州	○		●
	BP	eVinci	未定			●
ロシア	ロスアトム	BN-800	ベロヤルスク	●（2016年）		
		KLT-40S	チュクチ自治管区	●		
		RITM-200M	チュクチ自治管区			●
		RITM-200N	サハ共和国		◎	●
中国	華能集団	HTR-PM	山東省威海市	●		
	CNNC	ACP100	海南省昌江	◎		●
	CGN	ACPR50S	（渤海沿岸）	■		

凡例
● 運開予定
■ 運開時期
◎ 着工予定
○ 安全審査開始

出所：各種情報より、JEPIC作成

3. SMRの展望

3-1　SMRの展望（全体）

3-2　規制関係

3-3　経済性

3-1　SMRの展望（全体）

- OECD/NEAは2021年4月、「Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities」を発刊。この中で、SMRの課題を指摘

（1）規制および法的枠組の整備
- SMRはこれまで経験のない技術であり、国際条約や安全規制における枠組みの整備が必要
- 例えば、移動可能な浮体式発電所や超小型のマイクロ炉の再定義、国境を超える環境評価、原子力損害賠償責任などにおける議論が必要

（2）世界的展開に向けた課題
- SMRの競争力は、連続生産効果に依存し、十分大きな世界的市場が不可欠

①経験が限られた新技術であり、その実現性が不確実
②実証プロジェクトに続く商業化には、さらなる最適化（経済的実証）が必要
③サプライチェーンの構築と濃縮度の高いウラン（HALEU)の定常的な供給
④規制当局による円滑な安全性の審査や承認。共通ライセンスや相互協定による承認等、世界的な規制体制の調和
⑤SMR利用への社会的受容性（PA）の獲得

3-2 規制関係

- 世界原子力協会（WNA）は2021年6月、「Design Maturity and Regulatory Expectations for SMRs」を発刊。9カ国の関係者が、規制上の課題を指摘

（1）主な規制上の（共通）課題
- ●技術の多様性の包含
- ●モジュール性に伴う評価・管理
- ●製造に係る認証、標準策定
- ●工場／サイトの検査手法
- ●受動的安全性の実証・解析
- ●固有の安全性の規制への反映

SMR規制上の課題（関係者の認識）

SMR	軽水炉	第4世代炉			マイクロ炉
		高温ｶﾞｽ	高速	溶融塩	
	LWR	HTGR	FR	MSR	MiMR
許認可経験	○	△	△	×	×
課題の大きさ	△	△	△	×	×

出所：WNA(2021）を参考にJEPIC作成

（2）課題解決の方向
- ●ベンダーと規制当局の意見交換
  - → ベンダーによる炉型毎の設計認証制度（米：DC、英：GDA）
  - → 柔軟な審査制度（米：事前審査、英国：GDA、加：VDR）
- ●国際的規制基準、規制手順の統一 → IAEAで検討（軽水炉は進捗）
- ●関係国規制機関の情報交換、相互協力
  - → 米NRCと加CNSCの「SMR技術審査協力覚書」（2019.8）
- ●多様な型に適応できる新しい規制技術の開拓
  - → 米NRCで新規則策定（技術包括、リスク情報活用、ﾊﾟﾌｫｰﾏﾝｽﾍﾞｰｽ）

3-3　経済性

- SMRは、大型炉に比べてコスト削減の可能性はあるものの、現時点ではまだ不透明。5割程度高くなるとの見方もある
- このためか、電力会社の関与は少なく、まだ設計開発者が中心。
- 先行するロシア、中国は電力会社が既に主体として関与。（国家的ニーズ主導で、経済性は今後）

（1）経済性の見通し
- 現在はベンダーの目標値のみ
- 目標値は最近の大型炉建設単価の低い目

（2）電力会社が協力するプロジェクト例

①米国：ユタ州公営共同電力事業体（UAMPS）
- VOYGRをアイダホ国立研究所内
- 2029年運開を目指す

②米国：TVA
- テネシー州クリンチリバーにSMR建設を検討中（BWRX-300が有力）

③カナダ：オンタリオ州営電力会社（OPG)
- GE日立製BWRX-300をダーリントン原子力発電所内
- 2028年運開を目指す

SMRの経済性（ベンダー目標）		建設単価（ドル/kW）
VOYGR		2,850
BWRX300		2,250
UK-SMR	FOAK	6,100
	継続機	4,900
最近の大型炉		2,400～8,600

出所：各種報道、OECD-NEA（2020)より JEPIC作成

4. まとめ

- 世界においては、新型軽水炉、SMRを含め、革新炉建設プロジェクトが進展。特に新型軽水炉の分野では、中国・ロシアの活動が顕著
- SMRは大型炉が抱える建設期間やファイナンス・リスク等の課題克服の他、安全性強化、用途の多様性、VRE導入の補完等を目指す
- 米国、英国、カナダは、原子力において世界をリードすることを目標に、国を挙げてSMRを積極的に開発。2020年代後半～30年代初頭にSMR初号機の運開を目指す
- ロシア、中国も、革新炉を着実に開発しており、既に稼働している革新炉もあり、西側諸国に先行
- 一方、SMRや第4世代炉の多くはまだ開発段階にあり、将来これらが世界的市場において競争力を持つためには、技術的成立性の実証、規制整備等の多くの課題がある
- 2020年代後半から各国で実証運転が開始され、SMRの成熟度が高まり、課題が逐次克服されていけば、SMRの世界市場は、OECD/NEAが想定する高成長シナリオ「2035年までに2,100万kW」（世界の原子力設備容量約3%相当）の実現も可能

参考資料

参考-1：革新炉導入検討国

参考-2：主要国の革新炉開発状況

参考-1　革新炉導入検討国

- 世界で革新炉導入に関心を示す国は、東欧を中心に多くある
- 輸出に向けて、米国、英国が世界をリードしている

導入国		原子炉名		FS覚書締結等の状況	導入計画
東欧	ポーランド	BWRX-300 MMR VOYGR		2019年　GE日立 2020年　エクセロン 2020年　USNC 2021年　ニュースケール	2030年までに
	エストニア	UK-SMR SSR-W IMSR	BWRX-300 MMR NuScale	2019～21年　各社と	2030年までに 建設開始 2035年まで運開
	ブルガリア	VOYGR		2021年　ニュースケール	ー
	チェコ	VOYGR BWRX-300	UK-SMR	2019年　各社と	ー
	ルーマニア	VOYGR		2021年　ニュースケール	2028年までに建設
	ウクライナ	SMR-160 VOYGR		2018年　Holtec 2021年　ニュースケール	26年までに 6基リプレース
中東	ヨルダン	HTR-PM Xe100 VOYGR	UK-SMR SMART	2017年　ロールス・ロイス 2019年　ニュースケール、 Xエナジー	25年までにHTR-PM 30年までにXe-100
	トルコ	UK-SMR		2020年　ロールス・ロイス	ー
	サウジアラビア	SMART HTR-PM		2015年～　韓国MSIT 2017年　CNEC	20年代に初号機建設
アジア	カザフスタン	VOYGR		2021年　ニュースケール	
	フィリピン	RITM-200M? SMART		2019年　ロスアトム 2020年　韓国KHNP	ー

MSIT:科学技術情報通信部、KHNP:韓国水力原子力　　出所：各種情報よりJEPIC作成

参考－２　主要国の革新炉開発状況

（１）　米国
（２）　英国
（３）　カナダ
（４）　ロシア
（５）　中国

（1） 米国： 原子力政策

- 米国の原子力発電所は2013年以降、12基が廃炉となり、2021年8月現在、運転中は93基まで減少
- 新設が進むのは、ボーグル3、4号機（AP-1000）の2022年～23年の運開予定のみ
- しかし、原子力発電の重要性は広く認知されており、また原子力は国家安全保障に関係するとして、世界の市場を現在席巻しつつある中国、ロシアに対し強い危機感を持つ。
- 原子力業界は多くの既設炉が運転開始から60年に達する2030年代に備え、2回目の運転延長（80年運転）とともに、世界の原子力市場におけるリーダーシップ奪還を目指し、先進型原子炉（AR）を積極的に開発
  ＊米国では、NRC定義のSMRと区別するためARを使用する
- バイデン大統領（民主党）は、カーボンニュートラル（CN）達成の観点から、原子力発電の重要性を理解しており、「既設LWRの継続活用」に加えて「AR研究開発への積極的な投資」を進める方針

（1） 米国： 法律の制定

- 連邦議会は2018年、NEICA法、NEIMA法によりAR開発をサポート
- NEICA法はエネルギー省（DOE）に、NEIMA法は原子力規制委員会（NRC）に対する要請事項が内容

NEICA：Nuclear Energy Innovation Capabilities Act of 2017
NEIMA：Nuclear Energy Innovation and Modernization Act

米国連邦議会のSMR開発促進に向けた法制定

法　律	内　容
NEICA法 （2018年9月）	●NRC事前審査・本審査の審査費用の分担プログラム策定 ●商業化のための研究開発施設（NRIC）の設置 ●研究開発のための技術資源のDOEとNRCの共有化促進 ●2025年末までに、照射試験用の多目的試験炉（VTR）の建設
NEIMA法 （2019年1月）	●2027年末までに、ARを対象とした規制プロセスの構築 ●事業者がNRCへ支払う年間費用の上限額の設定 ●事業者がNRCへ支払う審査費用の合理化 ●審査が予定より遅れた場合の、連邦議会への報告

出所：JEPIC作成

（1） 米国： DOEプログラム

- 2015年、革新的原子力技術支援（GAIN＊）を開始
- 2018年、AR開発に対する財政支援機会公募（FOA＊）を開始
- 2020年5月から、AR実証プログラム（ARDP＊）による資金援助を開始
- 2020年10月、「AR実証」カテゴリーで、NatriumとXe-100を選定

AR実証プログラム（ARDP）

カテゴリー	AR	設計者	DOE予定額 ＜単位：100万ドル＞	
AR実証（7年以内）	Xe-100	Xエナジー	7年	3,200（2020年：各80）
	Natrium	テラパワー		
将来のリスク低減（14年以内）	Hermes	Kairos Power	7年	303
	eVinci	ウエスチングハウス		7.4
	BANR	BWXT		85.3
	SMR-160	Holtec		116
	MCRE	Southern Company		90.4
AR コンセプト（2030年代半ば）	Advanced SMR	ARC	3.5年	27.5
	Fast Modular Reactor	General Atomics		24.8
	MIGHTR	MIT		3.9

＊：
GAIN：Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear
FOA：Funding Opportunity Announcement
ARDP：Advanced Reactor Demonstration Program

出所：DOE（2021）を基にJEPIC作成

（1） 米国： HALEU＊

- ARの多くは、燃料として濃縮度5.0～20%のHALEUの使用を想定
- 当面は研究炉等の使用済燃料から回収した高濃縮ウランの希釈により生産。しかし米国には現在、HALEUの商業生産施設はなく将来の需要に対応できない　⇒　この供給が大きな課題

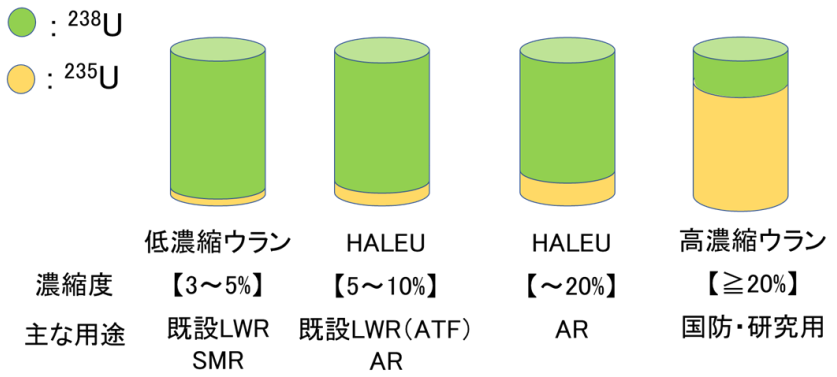
（1）Centrus EnergyのHALEU生産実証

- DOEは2019年11月、Centrus Energy とHALEU商業生産実証プログラムを契約。オハイオ州で米国遠心分離技術ACP（American Centrifuge Plant）を用いて、2022年の濃縮度約20%のHALEU生産の実証を目指す

（2）UrencoUSAのHALEU生産

- 米国で低濃縮ウランを商業生産するUrencoUSAは2020年5月、NRCから最高濃縮度の5.5%への引上げの承認を取得
- また、2021年4月にはNRCへ10%への引上げ申請の事前通知を実施

＊HALEU：High-Assay Low-Enriched Uranium



出所：JEPIC作成

（1） 米国： NRCの動き

（1）AR規則（10CFR53）の整備

- NRCは、現行連邦規則10CFR50、10CFR52に加えて、ARに特化した「10CFR53」の制定準備を進めている
- NEIMA法の制定期限2027年末より、2025年7月に前倒しの予定

（2）NRCのARの審査状況

- 2020年6月、オクロのAuroraの建設運転一括許認可（COL）申請を受理
  - ➢同申請は、米国のCOLとして11年ぶり、非軽水炉として初であったが、
  - ➢2022年1月、NRCは同申請を情報不十分として却下
- 2020年8月、NuScale に初の標準設計認証（SDA）を発給
- Xエナジー（Xe-100）とテラパワー（Natrium）は申請の事前審査中

時期	審査分類	タイプ	申請対象	審査状況	申請者
2019年12月	ESP	SMR	ｸﾘﾝﾁﾘﾊﾞｰｻｲﾄ	ESP発給	TVA
2020年6月	COL	非軽水炉	Aurora	COL審査開始	オクロ
2022年1月				COL審査却下	
2020年8月	DC	SMR	NuScale（5万kW）	SDA発給	ニュースケール
（2022年7月）				規則制定予定	
2018年9月	事前審査	非軽水炉	Xe-100	事前審査開始	Xエナジー
（2022年第4Q）		SMR	VOYGR（7.7万kW）	DC申請予定	ニュースケール
（2023年8月）		非軽水炉	Natrium	CP申請予定	テラパワー
（2026年3月）		非軽水炉		OL申請予定	

ESP：Early Site Permit、COL: Combined License、DC: Design Certification、
CP: Construction Permit、OL: Operating License、SDA：Standard Design Approval

出所：NRC（2021）を基にJEPIC作成

（1） 米国： VOYGR＊

＊2021年12月、ニュースケールSMRの正式名称となる

（1）VOYGR（軽水炉）

- ユタ州公営共同電力事業体（UAMPS＊）は、DOEアイダホ国立研究所（INL)の敷地内で2029年までの初号機運転を目指す
  ＊UAMPS：Utah Associated Municipal Power Systems
- 運転は北西部のワシントン州でコロンビア原子力発電所（NPP）を所有するEnergy Northwestが担当
- 2019年、ニュースケールと韓国の斗山重工業と事業協力協定を締結
- 斗山重工業は主要機器を供給し、関係企業とで1億ドル強を出資
- 2021年、日揮（0.4億ドル）、IHI（0.2億ドル）がニュースケールへ出資
- VOYGR 初号機の建設費用のうち10年総額13億5,500万ドルの支援をDOEが承認（連邦議会は未決）。これにより、発電原価（LCOE） 55ドル/MWhの見込み
- UAMPSは2021年6月、VOYGRの出力の7.7万kWへの増強を受け、建設モジュール数を当初の12基から6基に縮小
- ニュースケールは、2024年1月のCOL申請、2025年後半の取得を目指す

（1） 米国： Xe-100、Natrium、BWRX-300

（2）Xe-100（高温ガス炉）

- Xエナジーは Energy Northwestと提携し、同社コロンビアNPP近くに4つのモジュールを2028年頃までに運転開始予定
- 球状燃料（TRISO）の高い融点から理論上炉心溶融は起こらないとされる

（3）Natrium（Na冷却高速炉・溶融塩エネ貯蔵）

- ビル・ゲイツ氏が会長のテラパワーと高速炉技術を持つGE日立が協力
- さらに、日本の三菱重工、日本原子力研究開発機構が技術協力予定
- 2021年10月、ワイオミング州の石炭火力跡地を選定
- 建設許可を2023年に提出、2028年頃までに運転開始予定
- 溶融塩を貯めたエネ貯蔵システムで電気出力を約1.4倍まで上昇可能

（4）BWRX-300（軽水炉）

- GE日立が2028年頃の実用化を目指し開発中
- 2021年12月、カナダ（オンタリオ州）のプロジェクト（後述）への採用が決定
- NRC設計認証取得済みのESBWRが技術的ベース
- 一般的なSMRと比較して約60%の建設コスト低減（2,250ドル/kW）
- TVA、クリンチリバーでのSMR新設計画で、BWRX-300を優先検討

（2） 英国： 原子力政策

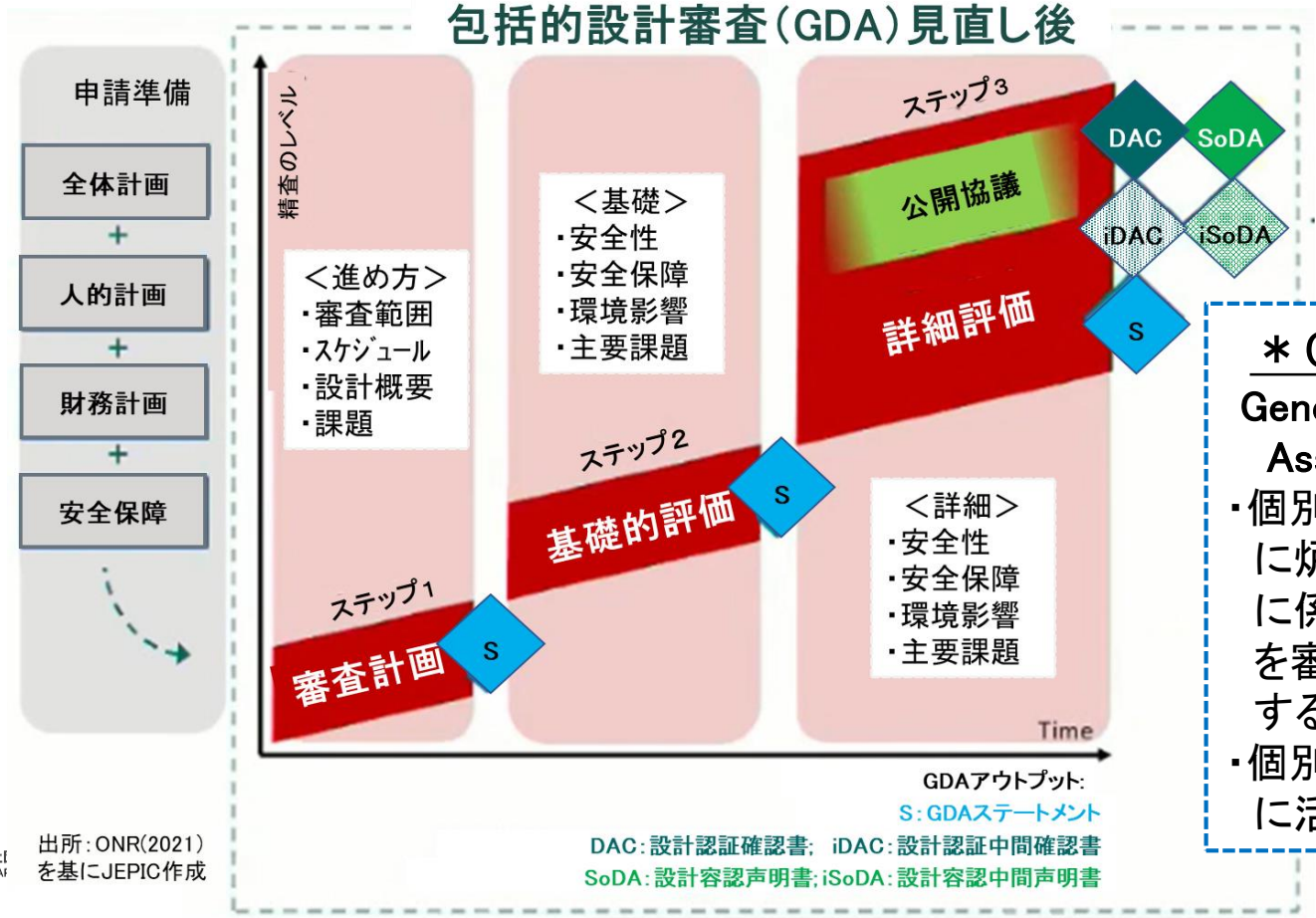
- 英国政府は2008年に原子力推進に転換し、現在、大型炉の新設、SMR、AMRの開発を進める
- 2013年以降、SMR、AMRを支援しており、革新的な原子力技術における世界的リーダーを目指す

年	英国における主な政策的な動き	
2013年	「The UK’ s Nuclear Future」	●SMR導入の可能性調査（FS）を開始
2015年	（秋季財政声明）	●革新的な原子力技術において世界のリーダーになる ●SMR・AMR開発に2.5億ポンド（5年間）を投資
2016年	○「SMR設計コンペ」を実施（～2017年12月）	
2018年	「原子力セクターディール」	●SMR・AMRの開発に0.56億ポンドを拠出
	○「AMR F&D 計画（ﾌｪｰｽﾞ1）」	●8件×30万ポンド （～2020年7月）
2019年	○ UK-SMR（ﾛｰﾙｽﾛｲｽ）に0.18億ポンド	
2020年	○「AMR F&D 計画（ﾌｪｰｽﾞ2）」	●ﾌｪｰｽﾞ1に基づき選定 ●3件×0.1億ポンド
	「ｸﾞﾘｰﾝ産業革命のための10項目」	●SMR・AMR開発に3.85億ポンドの基金 （SMR：2.15億ポンド、AMR：1.7億ポンド）
	「エネルギー白書」	
2021年	「AMR研究開発・実証プログラム」	●2030年代初頭までにAMR技術を実証 ●高温ガス炉を指向

F&D： Feasibility and Development　　出所：各種情報よりJEPIC作成

（2） 英国： 規制（GDA＊）の見直し

- 英国原子力規制局（ONR）、環境庁（EA）は包括的設計審査（GDA）を見直し、2021年5月、SMR、AMRの審査受入れを開始
- 従来のプロセスに、「ステップ2で終了」、「ステップ3ステートメントのみ」等の申請も選択可能となる
- 開発段階において規制との意見交換ができ、事業の予見性が高まる



＊GDAとは
Generic Design Assessment
・個別審査の前に炉型の設計に係る安全性を審査し認定する制度
・個別安全審査に活用

出所：ONR(2021)を基にJEPIC作成

（2） 英国： UK-SMR

＜開発の背景および体制＞

- ロールスロイスは、1950年代から英国で原子力潜水艦プログラムの原子炉の設計・製造を行っており、数十年にわたる経験を有する
- 2014年のSMRのFSに参加し、本格的にUK SMRを開発
- 2016年にUK SMRコンソーシアムを立ち上げ、Assystem、Atkins、Jacobs、NNL、Nuclear AMRC等が参画
- 2021年11月、開発会社“ロールスロイスSMR”を設立
- 2021年11月、GDA申請書類を提出、2022年審査開始の見込み
- 2025年6月のGDA認証取得、2031年の運転開始を目指す
- 英国内に2050年までに最大16基（うち10基は2035年まで）の導入予定（初号機を22 億ポンド/基との見積もり）

＜海外展開＞

- 国際的受注を目指し、多くの海外事業者とFSに関する覚書を締結

英国　UK-SMRの海外展開の状況

地域	対象国	日時	FS覚書の締結
北米	米国	2020年11月	米国エクセロンと、「英国内外でのSMR運転の可能性追求とUK SMR開発支援」
中東	ヨルダン	2017年11月	「SMR建設に向けたFS」
	トルコ	2020年3月	トルコ国営企業EUASと「SMR導入に向けたFS」
欧州	チェコ	2020年11月	チェコ電力CEZと「SMR導入に向けたFS」
	エストニア	2021年3月	エストニアのFermi Energiaと「SMR導入に向けたFS」

出所：各種情報よりJEPIC作成

（2） 英国： U-Battery

＜開発の背景および体制＞

- 英国原子燃料大手Urencoの子会社（U-Battery Ltd）が開発
- Urenco主導のU-Batteryコンソーシアムが支援
- 原子炉システムと安全性はJacobsとｷｬﾍﾞﾝﾃﾞｨｯｼｭ、燃料関係はBWXTとNNL、主要部品はロールスロイスなど、が協力
- 英国とカナダの2カ国を市場として選定し、両国での2020年代後半までの初号機の建設を目指す
- 英国では政府のAMR開発資金の援助、カナダでは、カナダ原子力研究所（CNL）チョークリバーサイトにおけるSMR実証プロジェクトに応募
- 日本とは2017年5月に、日本原子力研究開発機構（JAEA）と協力覚書を締結

<設計の特徴＞

- U-Batteryは高温ガス炉のマイクロ炉（電気出力0.4万kW）
- 一次冷却材にヘリウム、減速材に黒鉛ブロック、燃料はTRISO燃料を使用

（3） カナダ： 原子力政策

- カナダは稼働中19基（CANDU炉）のうち10基について、現在、運転延長（30～35年）に向けた大改修工事を2016年～2033年に順次実施中
- この連続改修により、原子力サプライチェーンは当面維持される見通しで、次の目標として、SMR開発が浮上
- 政府、州、事業者が一体となり現在、積極的にSMR開発を進めている

（1）SMRロードマップ（2018年11月）

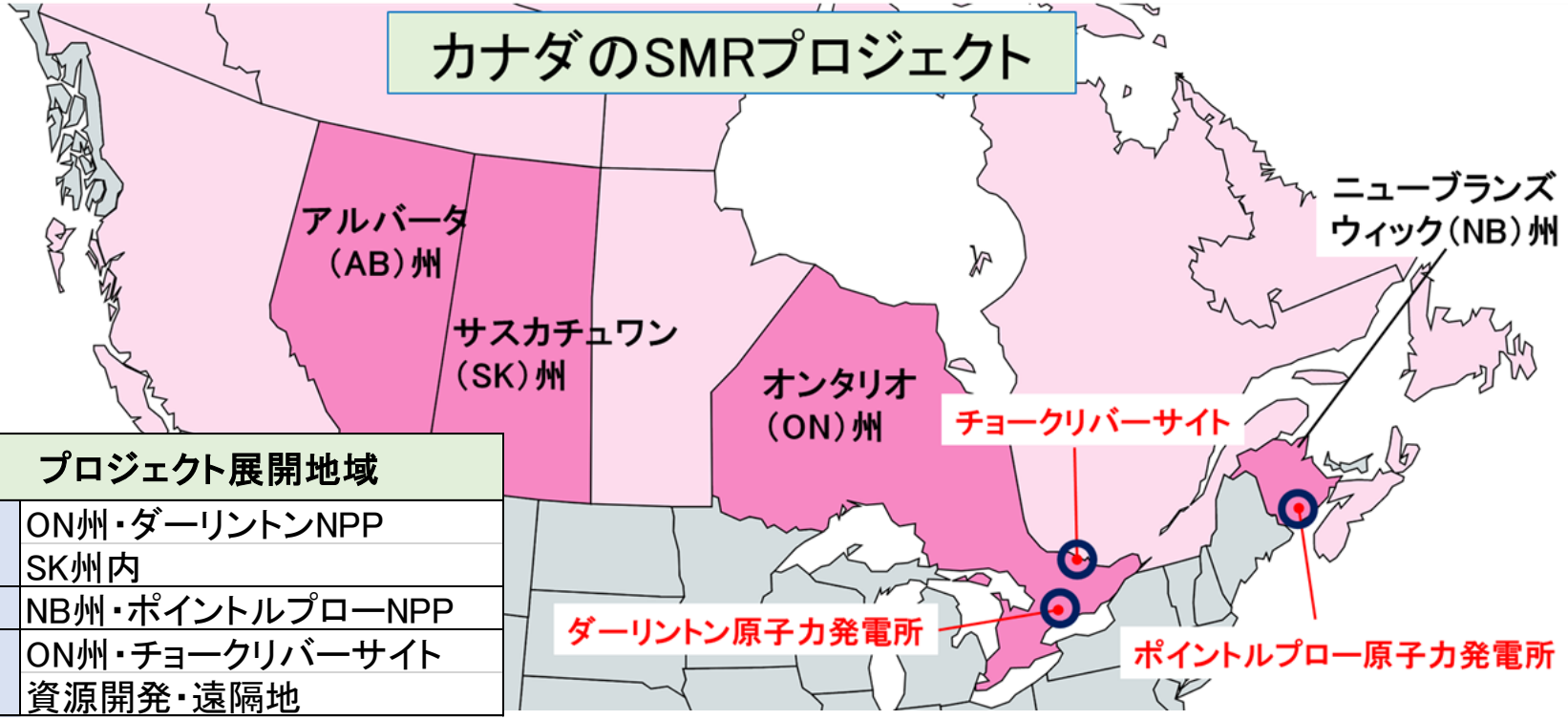
- SMRは、本来の特長に加え、カナダ特有の北部遠隔地や鉱山開発などに役立つと同時に、輸出産業の構築にもつながると評価

（2）3州によるSMR開発の推進

- オンタリオ（ON）州、ニューブランズウィック（NB）州およびサスカチュワン（SK）州の首相は、2019年12月、協力覚書に署名
- 州の要請により、オンタリオ・パワー・ジェネレーション（OPG）、ブルースパワー（BP）、ニューブランズウィック・パワー（NBP）、サスカパワー（SKP）の州営電力会社4社がSMRの実現可能性調査（FS）を実施
- 2021年4月、FS結果を公表。アルバータ（AB）州も協力覚書に参加

（3） カナダ： 州政府によるFS

- 2021年4月、3州政府の要請を受けたFS結果が公表される
  - ➢3つのプロジェクトいずれも、経済的・技術的に実現可能
    - ①系統接続地域におけるSMR展開 → 2021年12月、採用炉型が決定
    - ②第4世代炉の開発（使用済燃料の再利用）
    - ③系統未接続地域への電力供給
  - ➢ カナダがSMR開発における世界的リーダーになる



プロジェクト展開地域	
1	ON州・ダーリントンNPP SK州内
2	NB州・ポイントルプローNPP
3	ON州・チョークリバーサイト 資源開発・遠隔地

出所：JEPIC作成

（3） カナダ： 3つのプロジェクト

- OPGは2021年12月、ﾌﾟﾛｼﾞｪｸﾄ1としてGE日立製BWRX-300を選定
- 西側諸国の中で、最も早いSMRの商業化になると見られる

	プロジェクト1	プロジェクト2	プロジェクト3
目標	①ON州で初号機 ②SK州で同炉型MAX4基	（2種類の）第4世代炉	遠隔地への電力供給 （電力以外の活用）
関係州	①オンタリオ（ON）州 ②サスカチュワン（SK）州	ﾆｭｰﾌﾞﾗﾝｽﾞｳｨｯｸ（NB）州	オンタリオ（ON）州
関係電力	①OPG、BP、②SKP	NBP	①OPG、②BP
立地場所	①ダーリントンNPP ②SK州内	ポイントプローNPP	カナダ国立研究所 （CNL）
炉型	BWRX-300、IMSR、 Xe-100　から選定	①ARC-100、 ②SSR-W（WATSS併設）	①MMR ②eVinci
スケジュール	①2021年までに炉型選定 2028年までに運転 ②2032年までに1基、 その後3年ごと1基建設	①2030年までに運転 ②2030年代初頭までに 運転	①2026年までに運転 ②2026年までに運転

出所：OPG他（2021）を基にJEPIC作成

（3） カナダ： VDR＊制度

＊カナダ原子力安全委員会（CNSC）による事前設計レビュー制度
VDR：Pre-Licensing Vendor Design Review）

- ベンダーの要請により、CNSCが設計を事前評価し、結果をフィードバック
- 審査結果の予見性を高め、成果はライセンス申請に反映可能
- 3つの段階（Phase）
  - Phase 1：規制要件への適応性評価（12～18カ月）
  - Phase 2：ライセンス発給への基本的障害の有無評価（24カ月）
  - Phase 3：Phase 2評価結果(指摘事項)のフォローアップ
- 2021年6月現在、5カ国の10ベンダーが実施中（2件契約交渉中）

カナダ　VDRの状況（2021.6現在）

	ベンダー		原子炉名	審査状況	
				フェーズ	開始年
1	ﾃﾚｽﾄﾘｱﾙ	カナダ	IMSR	1＋2	2016
2	USNC	米国	MMR	1	2016
3	LeadCold	ｽｳｪｰﾃﾞﾝ	SEALER	（1）	2017
4	ARC	カナダ	ARC-100	1	2017
5	ﾓﾙﾃｯｸｽ	英国 カナダ	SSR-W	1	2017
6	ホルテック	米国	SMR-160	1	2018
7	ﾆｭｰｽｹｰﾙ	米国	NuScale	1/2	2020
8	Urenco	英国	U-Battery	（1）	未定
9	GE日立	米国 日本	BWRX-300	1/2	2020
10	Xエナジー	米国	Xe-100	1/2	2020
	ｳｪｽﾁﾝｸﾞﾊｳｽ	米国	eVinci	契約交渉中	
	スターコア	ｶﾅﾀﾞ、英国 米国	StarCore	契約交渉中	

出所：CNSC（2021）を基にJEPIC作成

（3） カナダ： SSR-W

Stable Salt Reactor - Wasteburner

＜開発の背景および体制）

- SSR-Wを開発するモルテックス・エナジーは、英国に本拠地を置く、2014年設立の新興企業（NB州にモルテックス・エナジー・カナダを置く）
- 同社は2017年11月、概念設計を終えたSSR-Wについて、カナダ原子力安全委員会（CNSC）に事前設計レビュー（VDR）を要請
- 2018年8月、NBPとポイントルプローNPP内に2030年初頭までにSSR-Wを建設することを合意。
- 2021年3月、ポイントルプローNPPでの建設計画に対してカナダ連邦政府から計5,050万加ドル（約44億円）の資金を獲得。
- 2019年以降、米国DOEの先進的研究機関ARPA-E（Advanced Research Projects Agency-Energy）から合計約700万ドルの資金を得て、アルゴンヌ国立研究所などと開発を行う

＜設計の特徴＞

- 燃料のプルトニウム溶融塩は燃料棒に封入し、フッ化物溶融塩により冷却する方式（燃料漏洩リスクの低減。運転中の燃料交換）
- 併設する「WATSS：WAste To Stable Salts」では、燃料としてプルトニウムを90%程度まで高める再処理を行う

（4） ロシア： 原子力政策

- ロシアは2007年設立の国営原子力企業ロスアトムを中心に、原子力を強力に推進
- 世界の2020年1月現在の原子炉建設＆計画基数において、ロシア（VVER）型が最も多く、30基を超える海外での建設・計画数を保持
  - ➢建設中19基（国内7基、国外12基）
  - ➢計画中35基（国内14基、国外21基）
  - ➢2017年の海外受注額は15兆円規模
- ロシアは、燃料サイクルを推進し、高速実証炉(BN-800）を2016年から運転中
- さらに、SMR開発においても、世界で唯一実用化

- ロシアでは、原子力砕氷船の原子炉をベースにSMRを開発
- 2020年5月、SMRを2基搭載した海上浮体式原子力発電所（FNPP：：Floating Nuclear Power Plant））が運転開始
- さらに、新型SMRを搭載したFNPPも導入を決定
- ロシアはFNPPを北極圏の北部海路全域で活用することを期待
- 海外への輸出にも積極的で、これに対しアフリカ北部、中東、東南アジアの国々が強い関心を示している

（4） ロシア： FNPP（初号機）

（1）アカデミック・ロモノソフ

- ロスアトムは2009年、サンクト・ペテルブルクにおいて、世界初のFNPPとなるアカデミック・ロモノソフの建設を開始
- 原子炉KLT-40Sは、原子力砕氷船の小型原子炉をベースに開発
- FNPP（燃料なし）は2018年4月に同地で完成
- その後、ムルマンスクに曳航され燃料装荷、2018年11月に初臨界
- 2019年8月、再び移動し、極東ペベクにおいて2020年5月、運転開始
- 3年毎に燃料交換（船体内の設備で保管）
- 12年に一度、総点検のため、ムルマンスクまでFNPPを曳航

FNPPアカデミック・ロモノソフの移動経路

出所：JEPIC作成

（4） ロシア： FNPP（新型）、陸上SMR

（2）新型FNPP（OFPU＊）　　＊OFPU：Optimized Floating Power Unit

- ロスアトムは2021年1月、FNPPの新型OFPUを発表
- 最新型海上SMRであるRITM-200Mを2基搭載
- 単純化、燃料交換・保守の長期化等により、初号機より経済性を向上
- ロスアトムは2021年9月、チュクチ自治管区で操業予定の鉱山プロジェクトへの電力供給の契約を締結。
- OFPU4隻を建設する予定で、搭載する原子炉は現在製造中
- 最初の2隻は2027年、3隻目は2028年、予備となる4隻目は2031年に起動の予定

（3）陸上SMR（RITM-200N）

- ロスアトムは2020年12月、シベリア東部サハ共和国と、ウスチ・ヤンスク地区にRITM-200Nを建設し、電力供給することで合意
- 2021年8月、連邦の規制当局から、建設許可を取得。
- 2024年に建設開始、2028年の運転開始を予定

ロシアFNPPの仕様

	アカデミック・ロモノソフ	OFPU
原子炉	KLT−40S	RITM−200M
原子炉基数	2基	2基
船体面積(m)	144×30	(110×30)
排水量(t)	21,500	16,680
設計寿命	40年	60年
燃料サイクル	2.5～3.0年	10年
定検頻度	12年	20年

出所：各種情報よりJEPIC作成

（5） 中国： 原子力政策

- 第13次5カ年計画（～2020年）：＊原子力関係
  - 2020年に運転中58GW（ほぼ達成）、建設中30GW以上（未達)
- 2021年１月現在、運転中48基、建設16基。原子力シェアは約5% (kWh)
  - 2020年の発電電力量、ﾌﾗﾝｽを抜いて世界第2位の原子力発電国に
  - 世界で現在、最も建設（16基）、計画中（29基）基数の多い国
  - 2019年10月、漳州1、2号の建設許可。（商業炉として3年ぶり）
- 2021年1月、国産型炉「華龍1号」初号機が運転開始
- 第14次5カ年計画（～2025年、2021年3月決定）＊原子力関係
  - 2025年末の運転中設備の目標は70GW
  - SMR、高温ガス炉、浮体式原子炉の実証
  - 再処理施設および中低レベル廃棄物処分場の建設

- 大型炉の建設と並行して、SMRの開発にも積極的
- 2021年7月、昌江NPPサイトにACP100「玲龍1号」を着工
- 2021年12月、高温ガス炉HTR-PMの送電を開始
- その他、浮体式原子力発電所（FNPP)も開発

（5） 中国： FNPP

（1）FNPP

- 2015年、第13次5カ年計画の一部として国家発展改革委員会（NDRC）が自国産のFNPP開発を承認

①中国核工業集団有限公司（CNNC）

- 2015年、FNPP設計基準等の構築のため、英国ロイドレジスターと協力
- 2016年、中国船舶集団有限公司（CSSC）と、戦略的協力協定を締結
- ACP100をベースに海上用ACP100Sを開発 （より小型のACP25Sも）

②中国広核集団公司（CGN）

- 2016年、CSSCと戦略的協力協定を締結。
- 2016年、東方電気に圧力容器を発注 （実質の着工）

③最近の状況

- 現在、中国のFNPPの開発状況、計画は不明
- 約5年前の情報によれば、海上ボハイ（渤海）油田の発電所代替（20隻規模）、南シナ海等の島々への支援等が想定され、2020年代初頭に完成の予定だった

中国FNPPの仕様

開発者	CNNC	CGN
原子炉型	ACP100S	ACPR50S
船体面積(m)	―	140×30
排水量（t）	40,000	22,000
設計寿命	60年	40年
燃料サイクル	2年	2.5年

出所：各種情報よりJEPIC作成

（5） 中国： HTR-PM、ACP100

（2）HTR-PM（高温ガス炉実証炉）

- 中国政府は2006年HTRプロジェクトを「科学技術重大プロジェクト」に指定
- 事業主体へ、中国華能集団、CNEC、精華大学が出資
- HTR-PM建設（ペブルベッド型高温ガス炉）
  - ➢2012年、山東省華能石島湾で着工
  - ➢2021年8月、燃料装荷開始
  - ➢2021年9月、初臨界達成
  - ➢2021年12月、初併入、送電開始

  HTR-PM600（商業規模）建設計画も
  - ➢熱出力25万kWのモジュール6基
- ヨルダンやサウジへの輸出も視野

（3）ACP100（玲龍1号）

- CNNCが、2010年頃から開発
- 2016年、IAEAの一般安全レビュー
- 2021年7月、海南省昌江サイトで着工
- 目的：発電、海水淡水化、熱供給等
- 工期65カ月、2026年頃の運転開始か

出所：JEPIC作成