



日本原子力学会 新型炉部会セッション

原子カイノベーションを支える最新の新型炉 開発の状況

(1) 最新の国内外の新型炉開発の状況

2021年9月10日

日本原子力研究開発機構
高速炉・新型炉研究開発部門
山野秀将、稲葉 良知

米国のSMR導入動向

国名	組織	計画名等	選択炉型及び出力(MWe)	現状及び計画	
米国	DOE	ARDP① 5-7年以内の新型炉実証 (2020年代後半運開)	高速炉: Natrium (TerraPower社)	345	2020年10月選定。ワイオミング州の旧石炭火力発電所跡地に建設予定。2023年8月に建設許可を、2026年3月に運転許可をNRCに申請予定。 2020年10月選定。Energy Northwest社のワシントン州コロンビア原子力発電所敷地内に建設予定。
			高温ガス炉(ペブル型): Xe-100 (X-energy社)	75	
		ARDP② 将来の実証に向けたリスク低減 (2030年代半ばの運開)	溶融塩炉: Hernes (Kairos Power社)		2020年12月選定。フッ化物塩冷却高温炉: KP-FHRの開発。
			ヒートパイプ冷却炉: eVinci超小型炉 (WH社)	15MWt	2020年12月選定。
			TRISO燃料・SiCマトリックス利用炉: BANR (BWXT AT社)	50MWt	2020年12月選定。
			PWR: SMR-160 (Holtec Government Services社)	160	2020年12月選定。
		ARDP③ 新型炉概念2020 (2030年代半ばの実用化を期待)	溶融塩炉: MCRE (Southern Company Services社)	1MWt	2020年12月選定。塩化物溶融塩高速炉: MCFRの開発。
			高速炉: 固有安全新型SMR (ARC社)	100	2020年12月選定。ARC-100に基づき検討。
			高速炉: モジュール型高速炉 (GA社)	50	2020年12月選定。
		国防総省	プロジェクトPele	高速炉: VTR (Bechtel National社、GEH社、TerraPower社)	
	ヒートパイプ冷却炉: eVinci超小型炉 (WH社)			15MWt	2020年3月選定。安全かつ先進的な可動式の超小型炉を設計。 2021年3月、3社からBWXT社とX-energy社を選定。
	不明: 超小型炉 (BWXT社)				
	NuScale Power社	INLサイトにおけるSMR建設・運転計画	PWR: NuScale Power Module	60	2020年9月、NRCは標準設計承認を発行。 経済性の悪化により、7都市が計画から脱退。2029年運開。 2021年4月に日揮HDが、5月にIHIが出資を表明。
	GEH社	BWR型SMR開発計画	BWR: BWRX-300	300	NRCによる先行安全審査実施中。
Oklo社	INLサイトにおけるAurora計画	超小型高速炉: Aurora	2	2020年、建設・運転一括認可申請をNRCが受理。 2020年代初頭から半ばに初号機着工。	
USNC	MMR計画	高温ガス炉(ブロック型): MMR	5-10	ARDP①②に申請も、採択されず。	
TVA	SMR建設計画	未定		2019年、NRCによる早期立地許可の承認。	
NRC	CNSCとの共同技術審査	溶融塩炉: IMSR (Terrestrial Energy社)	190	2019年から実施。	

	: 政府機関、国研		: 州政府
	: 開発ベンダー		: 規制機関

カナダ、英国及び仏国のSMR導入動向



国名	組織	計画名等	選択炉型及び出力(MWe)	現状及び計画		
カナダ	CNL	CNLサイトでのSMR 実証炉建設・運転計画 1. 認定前設計審査段階 2. 適正評価段階 3. 土地手配・契約交渉段階 4. プロジェクト実施段階	高温ガス炉(ブロック型): MMR (GFP社、OPG社、USNC)	5	第3段階評価中 2026年運開。 ※2021年4月に3州が発表したSMR開発のFS報告書で、2026年までにMMRをCNLチョークリバー・サイトで建設することを記載。	
			熔融塩炉: IMSR (Terrestrial Energy社)	190		第1段階評価完了
			高温ガス炉(ブロック型): StarCore (StarCore Nuclear社)	10		第1段階評価完了
			高温ガス炉(ブロック型): U-Battery (U-Batteryカナダ社)	4		第1段階評価完了
			他2炉(炉型・社名等非公開)			第1段階評価中
	オンタリオ州、 ニュー・ブランズ ウィック州、サス カチュワン州、 アルバータ州	SMR開発・建設計画	州営電力会社が、以下の炉型を選択。		<ul style="list-style-type: none"> 2019年、3州がSMRの開発・建設のため協力覚書を締結。 2021年4月、3州の電気事業者が共同で実施したSMR開発の実行可能性調査の結果を公表。 2021年4月、アルバータ州が正式に参加。 	
	OPG社	同社原発敷地内へのSMR導入計画	熔融塩炉: IMSR (Terrestrial Energy社) BWR: BWRX-300 (GEH社) 高温ガス炉(ペブル型): Xe-100 (X-energy社)	190 300 75	<ul style="list-style-type: none"> エンジニアリング作業を実施中。2028年運開。 次フェーズで、最大4基のSMRの最初の1基を2032年までにサスカチュワン州内で完成。 2021年末までに、採用技術と開発企業を選定 	
	NB Power社	同社原発敷地内へのSMR導入計画	熔融塩炉: SSR-W (Molten Energy社) 高速炉: ARC-100 (ARC Clean Energy Canada社)	300 100	<ul style="list-style-type: none"> 2020年、NB州でのSMR建設に向けた相互協力のためSMRベンダークラスターを設立。 ARC-100の実証炉を2030年までに完成。 SSR-Wと廃棄物リサイクル施設を、2030年代初頭までに稼働。 	
	CNSC	許認可申請前ベンダー設計審査 1. 規制基準全般の適合評価 2. 許認可上障害となる点の同定 3. フォローアップ	SMRでは、高温ガス炉4社、軽水炉3社、熔融塩炉2社、高速炉2社、ヒートパイプ炉1社の計12社が申請		高温ガス炉4社 (USNC、U-Battery Canada社、StarCore Nuclear社、X-energy社)、軽水炉3社 (NuScale Power社、GE-Hitachi Nuclear Energy社、SMR社; 審査終了)、熔融塩炉2社 (Terrestrial Energy社、Molten Energy社)、高速炉2社 (LeadCold Nuclear社、ARC Nuclearカナダ社; 審査終了)、ヒートパイプ炉1社 (Westinghouse Electric Company社)。下線は審査中の5社。	
			NRCとの共同技術審査	熔融塩炉: IMSR (Terrestrial Energy社)	190	2019年から実施。
MMRのサイト準備許可: LTPS			高温ガス炉(ブロック型): MMR (GFP社、OPG社、USNC)	5	2021年5月、LTPS申請が技術審査に移行。	
英国	BEIS	新型モジュール炉(AMR) 実行可能性・開発計画 1 . 実行可能性調査 2. 設計開発	核融合炉 (Tokamak Energy社)	100	フェーズ2 (2020年7月、フェーズ1に進んだ8社から左記3社を選定) ※2020年11月及び12月に政府から10ポイント計画及びエネルギー白書が公表され、AMR研究開発への1.7億ポンドの投資及び2030年代初頭のAMR実証炉導入が示された。	
			鉛冷却高速炉 (WH UK社)	450		
	Rolls-Royce社	PWR型SMR開発計画	PWR: UK-SMR		概念設計段階。2029年運開。	
仏国	CEA、EDF等	NUWARD計画	PWR: NUWARD (CEA、EDF、Naval Group、TechnicAtome社)	170 ×2	概念設計段階。2020年代後半運開。	

	: 政府機関、国研		: 州政府
	: 開発ベンダー		: 規制機関



米国の原子カイノベーション支援プログラム(ARDP)

出所:資源エネルギー庁、原子力小委員会資料5(令和3年4月14日)

- 米国エネルギー省は2020年から、革新炉の実証を目指した革新的原子炉実証プログラム(ARDP:Advanced Reactor Demonstration Program)を開始。
- 技術熟度・実用化時期に応じて3種類のプランで多様な炉型の実証・開発を支援。

革新炉実証(Advanced reactor demonstrations)

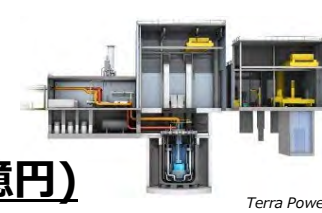
実用化時期

7年以内に稼働する2つの革新炉原子炉の建設を支援

支援額: 初期支援**\$80M(80億円)**

+ 50%のコストシェアのもと7年間・2炉型で**\$3.2B(3200億円)**

- ① TerraPower社: Natrium(金属燃料ナトリウム冷却高速炉)
- ② X-energy社: Xe-100(高温ガス炉)



ナトリウム冷却高速炉
Natrium



高温ガス炉
Xe-100

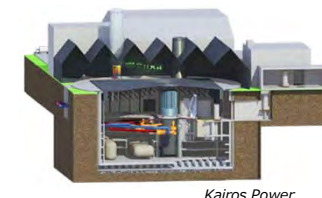
~2027年

将来的な実証に向けたリスク低減(Risk reduction for future demonstrations)

10~14年後に許認可・実用化される5炉型に対し、技術的、運用上、規制上の課題解決を支援

支援額(最大): **\$303M(303億円)**

- ① Kairos Power社: ヘルメス試験炉(熔融塩冷却高速炉)
- ② Westinghouse社: eVinci(マイクロ炉)
- ③ BWXT社: BANR(マイクロ炉)
- ④ Holtech社: SMR-160(小型軽水炉)
- ⑤ Southern Company Services社: MCRE(熔融塩炉)



熔融塩冷却高速炉
Kairos Power社



マイクロ炉
eVinci

2030~
2034年

革新的炉概念2020(Advanced reactor concepts 2020)

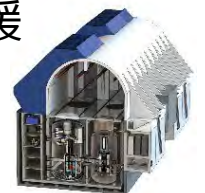
2030年代半ばに実用化する可能性のある3炉型に対し、革新的で多様な設計を支援

支援額(最大): **\$27.5M(27.5億円)**

- ① ARC社: ARC-100(ナトリウム冷却高速炉)
- ② General Atomics社: FMR(ヘリウム冷却高速炉)
- ③ MIT: MIGHTR(高温ガス炉)



高速炉ARC-100
ARC Clean Energy



ヘリウム冷却高速炉
General Atomics社 4

2035年~



米国ARDPの選択概念(炉型ごとの整理)

炉型	採択概念	出力	ARDPのプロジェクト			企業	
			Demo	リスク低減	ARC-20		
FR	Natrium	345MWe	実証炉			Terra Power	SFR(蓄熱システム導入)
	Inherently Safe Advanced SMR	100MWe概念を基に検討			概念設計	Advanced Reactor Concepts	SFR(免震システムの適用) Advanced Reactor Concepts社はARC-100(100MWe)を開発中
	FMR	50MWe			燃料、安全、運転性の検討	General Atomics	ガス冷却高速炉と推定される。
HTGR	Xe-100	80MWe x 4	実証炉			X-energy	高温ガス炉(TRISO/ペブル型)
	Horizontal Compact High Temperature Gas reactor	記述なし			概念検討	MIT	高温ガス炉
Micro reactor	BANR	50MWth		燃料開発、他		BWXT	UN燃料核/TRISO燃料/SiC Matrix
	eVinci	15MWt		機器開発、他		Westinghouse Electric	TRISO燃料 ヒートパイプ冷却方式
MSR	MCRE	1MWth以下		実験炉		Southern Company Services	Terra Powerの塩化物溶融塩高速炉(MCFR)開発の一環
	Hermes	記述なし		試験炉		Kairos Power	固体燃料(TRISO/ペブル型) フッ化物溶融塩冷却炉 KP-FHR:140MWeの縮小型 オークリッジのDOE/ETTPサイトへの建設を想定
LWR	Holtec-SMR160	160 MWe		設計、許認可活動、他		Holtec Government Services	軽水炉SMR Oyster Creekサイトでの建設を想定



カナダにおけるSMR開発・導入の枠組み

連邦政府

資金拠出(7,600万ドル/年、10年間)^(1,2)

原子力科学技術ワークプラン(FNST Work Plan)

カナダ原子力公社(AECL)、カナダ天然資源省(NRCan)等で策定(2015年9月)⁽¹⁾

研究資金
(能力と専門性の維持)

研究成果
(連邦政府の活動を支援)

SMRロードマップ⁽³⁾

- NRCanを中心とするSMRロードマップステアリングコミッティが、ロードマップを公表(2018年11月)

カナダ原子力研究所(CNL)によるSMR導入計画

- エネルギー分野等におけるアクションを示した10年間の長期戦略策定⁽⁴⁾(2017年4月)
 - ✓ SMR技術を優先課題とし、2026年までにSMRを実証
- CNLサイトでのSMR実証炉プロジェクトの提案募集及び評価(2018年4月～)
- カナダ原子力研究イニシアチブ(CNRI)設立(2019年7月)

カナダ原子力安全委員会(CNSC)によるSMR審査

- SMRに限らずベンダーに対する原子炉設計の事前審査(Pre-Licensing Vendor Design Review)を開始⁽⁵⁾(2012年5月)
- SMR許認可用ガイド作成中
- 米国NRCと協力

SMR行動計画⁽⁶⁾

- NRCanは、SMRロードマップに基づくSMR行動計画を公表(2020年12月)。SMRベンダー11社が参加。

カナダ州政府によるSMR導入計画

カナダでは、一般的な原子力政策の責任は連邦政府が負い、原子力発電への投資や建設の可否判断は各州政府が実施

¹ "Federal Nuclear Science and Technology Work Plan", AECL ホームページ . <https://www.aecl.ca/science-technology/federal-science-and-technology-work-plan/>

² "The Nuclear Sector at a Crossroads: Fostering Innovation and Energy Security for Canada and The World", 天然資源常任委員会, 2017年6月. https://www.cns-snc.ca/media/pdf_doc/position_papers/421_RNNR_Rpt05_GR-e.pdf

³ "A Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors", Canadian SMR Roadmap Steering Committee, 2018年11月. https://smrroadmap.ca/wp-content/uploads/2018/11/SMRroadmap_EN_nov6_Web-1.pdf

⁴ "2016-2026 10-YEAR INTEGRATED PLAN SUMMARY", CNL, 2017年4月. https://www.cnl.ca/wp-content/uploads/2020/08/Long_Term_Strategy_2017April18.pdf

⁵ "Pre-Licensing Vendor Design Review", CNSC ホームページ . <https://nuclearsafety.gc.ca/eng/reactors/power-plants/pre-licensing-vendor-design-review/index.cfm>



カナダ州政府が選定した炉型の比較

州 (主導組織)	① オンタリオ州、サスカチュワン州 (OPG社、BP社、サク・パワー社)			② NB州 (NBパワー社)		③ オンタリオ州 (CNL)
ベンダー	Terrestrial Energy社	GEH社	X-energy社	ARC Clean Energy社	Moltex Energy社	Global First Power社
炉型	溶融塩炉	BWR	“ダブルハット”型 高温ガス炉	高速炉	溶融塩炉 (高速炉)	ブロック型 高温ガス炉
炉名	IMSR	BWRX-300	Xe-100	ARC-100	SSR-W	MMR
冷却材	フッ化物燃料塩	軽水	ヘリウムガス	液体ナトリウム	溶融塩	ヘリウムガス
出力	440 MWt 195 MWe	870 MWt 290 MWe	200 MWt 82.5 MWe	286 MWt 100 MWe	750 MWt 300 MWe	15 MWt 5-10 MWe
炉心入口 出口温度	620℃ 700℃	270℃ 287℃	260℃ 750℃	355℃ 510℃	525℃ 590℃	300℃ 630℃
設置場所	ダーリントン原子力発電所、等			ポイント・ルプロー原子力発電所		チョーク・リバー
設置時期	2028年(オンタリオ州)、2032年(サスカチュワン州)			2030年	2030年代初頭	2026年
備考	3社から1社の炉型を選択、最大5基設置			2社2炉型を建設・設置		MMRを含む6社の炉型を評価中
対応するSMRロードマップ推奨事項	A-2 関心のある州・準州政府向け A-2-1 実証と展開 16 : SMR実証プロジェクト (炉型選定後に 17 が加わる見込み)			A-2 関心のある州・準州政府向け A-2-1 実証と展開 16 : SMR実証プロジェクト 17 : 商用SMR初号機のリスク共有		
SMR行動計画	上記①及び③のSMRプロジェクト開発を支援			NB州の先進SMR開発への支援と投資		

英国における革新炉開発に対する支援

出所:資源エネルギー庁、原子力小委員会資料5(令和3年4月14日)

- 2050年カーボンニュートラルに向けては脱炭素技術のサプライチェーンの競争。
- 米欧等では、民需断絶で既存軽水炉建設では遅延やコスト増。革新炉開発でも中口が台頭する中、原子力技術リーダーシップ再興のため、官民連携で原子力イノベーションの取組が加速中。

英国

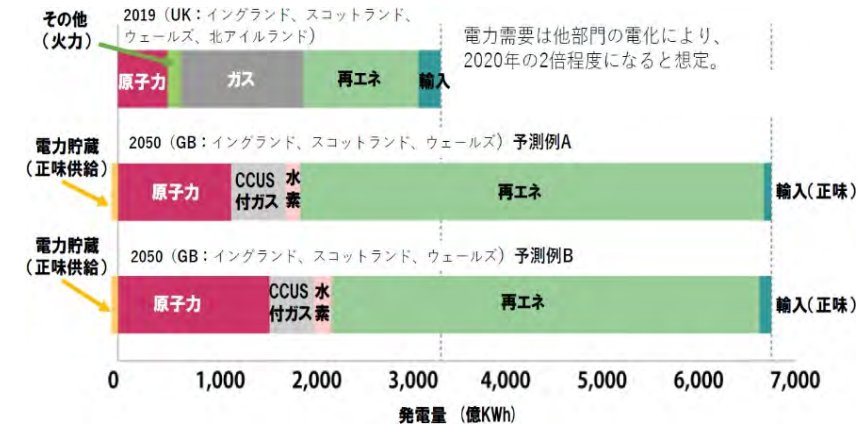
2020年11月 10 Point Plan

「英国は引き続き、原子力技術のリーダーであり続ける」ことを宣言。


- 2030年代初頭までに、小型モジュール炉(SMR)の開発と革新モジュール炉(AMR)実証炉の建設を目指して、約547億円の革新原子力ファンドを創設。

2020年12月 エネルギー白書

- 2050年までに電力倍増の見込みから、電力部門では洋上風力とともに原子力重視。
- ①大型炉、②SMR/AMR、③核融合を支援。



出典:英国エネルギー白書(2020年)を基に作成

	軽水炉SMR	革新炉(非軽水炉SMRを含む)
 英国	ロールスロイス SMR 運開目標: 2029年 政府支援: £18M (約25.2億円)	AMR: 非軽水炉SMRを対象とした開発支援(第一フェーズ2017年~、第二フェーズ2020年~) 第二フェーズ支援対象: ①WH社鉛冷却高速炉 ②U-Battery社高温ガス炉 ③Tokamak Energy社核融合炉 支援額:2年間で£40M (54億円) 革新原子力ファンド(2020年~) 支援額:国産SMRに£215M (325億円) 高温等が利用可能な革新炉に£170M(257億円)



各国の高速炉(主にSFR)開発状況

国名	組織	計画名等	選択炉型、冷却材及び出力(MWe)			現状及び計画
米国	DOE	ARDP① 5-7年以内の新型炉実証 (2020年代後半運開)	高速炉: Sodium (TerraPower社)	Na	345	2020年10月選定。蓄熱技術との組み合わせ。
		ARDP③ 新型炉概念2020 (2030年代半ばの実用化を期待)	高速炉: 固有安全新型SMR (ARC社)	Na	(100)	2020年12月選定。ARC-100に基づき検討。
		多目的試験炉(VTR)計画	高速炉: モジュール型高速炉 (GA社)	Heガス	50	2020年12月選定。Heガス冷却炉。
			高速炉: VTR (Bechtel National社、GEH社、TerraPower社)	Naほか	120	2020年9月、CD-1承認。2026年、運開。GEH社のPRISM設計に基づく。
英国	BEIS	新型モジュール炉(AMR) 実行可能性・開発計画 1. 実行可能性調査 2. 設計開発	高速炉: WH-LFR (WH UK社)	Pb	450	フェーズ2 (2020年7月、フェーズ1に進んだ8社から3社を選定) ※2020年11月及び12月に政府から10ポイント計画及びエネルギー白書が公表され、AMR研究開発への1.7億ポンドの投資及び2030年代初頭のAMR実証炉導入が示された。
加国	NB Power社	同社原発敷地内へのSMR導入計画	高速炉: ARC-100 (ARC Clean Energy社)	Na	100	2020年、NB州でのSMR建設に向けた相互協力のためSMRベンダークラスターを設立。2030年運開。
仏国	CEA	ASTRID計画	高速炉: ASTRID (CEA)	Na	600	2019年12月計画延期。安全性実証のための実証炉。
露国	ROSATOM		高速炉: BN-600 (ROSATOM)	Na	600	1980年4月、初臨界。1981年12月、営業運転。2020年4月、寿命延長(~2025年)。高い設備利用率。
			高速炉: BN-800 (ROSATOM)	Na	880	2014年6月、初臨界。2016年10月、営業運転。閉燃料C実証。
		2コンポーネントシステム(軽水炉・高速炉)計画(一部Proryvにて実施)	高速炉: BN-1200 (ROSATOM)	Na	1220	2025年頃、着工予定。2030年代、運開。第4世代SFR。
			高速炉: BREST-300 (ROSATOM)	Pb	300	2021年2月、建設許可。2026年末までの完成予定。閉燃料C実証。
			高速炉: SVBR-100 (ROSATOM)	Pb-Bi	100	小型モジュール炉(建設計画遅延)。Pb-Bi冷却。
	多目的高速中性子研究炉(MBIR)計画	高速炉: MBIR (ROSATOM)	Naほか	55	2015年9月、本格着工。2024年、運開。マルチ冷却材。	
中国	CIAE	863計画に基づく高度技術開発プログラム	高速炉: CEFR (CIAE)	Na	20	2010年7月、初臨界。2011年7月、発送電。UO ₂ 燃料。中国原子能科学研究院(CIAE)(国営企業)。
	CNNC	霞浦高速炉パイロットプロジェクト	高速炉: CFR600 (CNNC)	Na	600	2025年頃、運開。MOX燃料、金属燃料。中国核工業集团有限公司(CNNC)(国営企業)
			高速炉: CFR1000 (CNNC)	Na	1000	2030年代、運開。MOX燃料、金属燃料。中国核工業集团有限公司(CNNC)(国営企業)
印国	BHAVINI	インドの野心的な三段階の原子力発電開発計画	高速炉: PFBR (BHAVINI)	Na	500	2022年、運開(計画遅延)。インド独自で設計・建設。(Pu,U)O ₂
			高速炉: CFBR (BHAVINI)	Na	600	2020年代後半、運開。MOX燃料。

各国の高速炉(主にSFR)開発状況



	米国	英国	加国	仏国	露国	中国	印国	日本	
プロジェクト動向	ARDP① NATrIUM 345MWe	AMR Phase2 WH-LFR 450MWe	NBP社導 入計画 ARC-100 100MWe						NATrIUM協力 AtheNa, 常陽
	ARDP③ 固有安全新 型SMR							SFRのSMR開 発	
	ARDP③ FMR 50MWe			ASTRID 計画延期 600MWe		露中印では、「プロジェ クト」ベースではなく「R&D」 ベースでの開発		NEXIP MCR-200 200MWe	
照射炉 (実験炉)	VTR 2026運開 120MWe				MBIR 2024運開 55MWe	CEFR 運転中 20MWe		VTR協力 常陽 140MWt	
R&D動向				スケッチ活 動	BN-600 運転中 600MWe	CFR600 2025年頃 600MWe	PFBR 2022運開 500MWe	日仏協力	
	米英加では、「プロジェクト」ベース で開発推進。現在動いているR&D 活動は特になし。				BN-800 運転中 880MWe		CFBR 2020年代後半 600MWe		
					BN-1200 2030年代 1.22GWe	CFR1000 2030年代 1GWe		第4世代炉 JSFR 1.5GWe	
Etc.	Aurora 1.5MWe Pele(DOD) MARVEL 20kWe			Fast MSR	BREST-300 300MWe SVBR-100 100MWe (計画遅延)			PRISM 311MWe RBWR 1.36GWe	
注目点、提言	炉型選定に段階的なコンペ実施。プロジェクト 推進に政府支援あり。今後の展開に注目。			予算減の影響 大きい	自国での堅実な大型SFR開 発		トラブルによる 開発遅れ	多様な高速炉技 術	

凡例

- : 運転中
- : 運開間近
- : 計画延期
- : 調査対象

露中印では、「プロジェ
クト」ベースではなく「R&D」
ベースでの開発

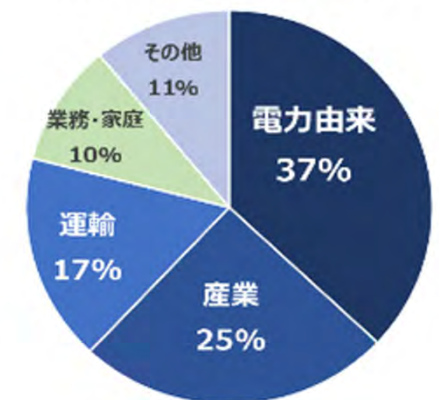
米英加では、「プロジェクト」ベース
で開発推進。現在動いているR&D
活動は特になし。

※ARDP①: [実証プロジェクト](#)、ARDP②: [リスク低減プロジェクト](#)、ARDP③: [新型炉概念プロジェクト\(ARC-20\)](#)

2050年カーボンニュートラルに伴う グリーン成長戦略(令和3年6月18日)

- ◆ 2020年10月、日本は、「2050年カーボンニュートラル」を宣言
- ◆ 「経済と環境の好循環」を作っていく産業政策＝「グリーン成長戦略」
- ◆ イノベーションを起こすといった民間企業の前向きな挑戦を、全力で応援＝政府の役割
- ◆ 電力部門
 - 脱炭素化は大前提
 - 再エネの最大限の導入及び**原子力の活用**、さらには水素・アンモニア、CCUSなどにより脱炭素化を進め、脱炭素化された電力により、電力部門以外の脱炭素化を進める。
 - 原子力・・・安全性向上、再稼働、**次世代炉**
 - 可能な限り依存度を低減しつつ、安全最優先での再稼働
 - 安全性等に優れた炉の追求
- ◆ 電力部門以外(産業・運輸・業務・家庭部門)
 - 「電化」が中心。熱需要には、「水素化」、「CO2回収」で対応。
- ◆ カーボンニュートラルは電化社会

【CO2の部門別排出割合】





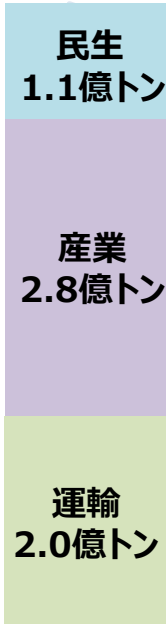
2050年カーボンニュートラルの実現

出所:2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(令和3年6月18日)

2019年

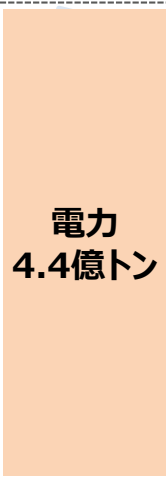
10.3億トン ※数値はエネルギー起源CO₂

非電力



- 規制的措置と支援的措置の組み合わせによる徹底した省エネの推進
- 水素社会実現に向けた取組の抜本強化

電力



- 再エネの主力電源への取組
- **原子力政策の再構築**
- 安定供給を大前提とした火力発電比率の引き下げ
- 水素・アンモニア発電の活用

2030年

(GHG全体で2013年比▲46%)

※更に50%の高みに向け挑戦を続ける



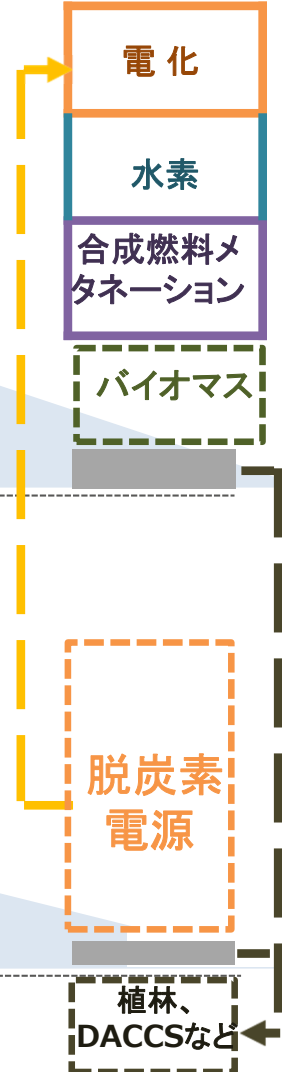
- 脱炭素化された電力による電化
- 水素、アンモニア、CCUS/カーボンリサイクルなど新たな選択肢の追求
- 最終的に脱炭素化が困難な領域は、植林、DACCSや BECCSなど炭素除去技術で対応



- 再エネの最大限導入
- **原子力の活用**
- 水素、アンモニア、CCUS/カーボンリサイクルなど新たな選択肢の追求

2050年

排出+吸収で実質0トン (▲100%)



炭素除去



原子力産業分野の実行計画

出所:2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(令和3年6月18日)

- ◆ 原子力は、実用段階にある脱炭素の選択肢。可能な限り依存度を低減しつつ、国内での着実な安全最優先の再稼働の進展とともに、海外(米・英・加等)で進む次世代革新炉開発に、高い製造能力を持つ日本企業も連携して参画し、多様な原子力技術のイノベーションを加速していく。

	現状と課題	今後の取組
高速炉	<p>資源循環性の向上が必要</p> <ul style="list-style-type: none"> 原子力の持続的な利用には、放射性廃棄物の減容化・有害度低減、中長期的には資源の有効利用に向けた技術開発を進めることが重要。 <p>世界各国で高速炉の開発が進展</p> <ul style="list-style-type: none"> ロシアは実証炉を運転開始済みで、中国も実証炉建設中。 北米でも政府支援を得て、ベンチャー企業等による高速炉開発が加速。 	<p>国際連携を活用し開発を着実に推進</p> <ul style="list-style-type: none"> 「戦略ロードマップ」に基づき、例えば今世紀半ば頃の適切なタイミングに、現実的なスケール的高速炉の運転開始を期待。それに向けて、2023年度末頃までは <u>多様な技術間競争を促進</u>。<u>日仏</u>、<u>日米協力</u>で効率的な開発を推進。 <p>原子力研究開発機構が保有するデータ・施設を最大限活用</p> <ul style="list-style-type: none"> <u>建設・運転・保守経験で培われたデータ</u>、<u>施設を最大限活用</u>。「<u>常陽</u>」の再稼働に向けた準備を速やかに進める。
小型炉 (SMR)	<p>各種要素技術の開発が必要</p> <ul style="list-style-type: none"> 海外での実証プロジェクトと連携した基本設計・開発。 日本企業独自で多様なニーズを見据えた小型炉を自主開発。 <p>革新的技術の安全性や経済性を検証</p> <ul style="list-style-type: none"> 安全性は、米・英・加で許認可取得に向けたプロセスが進行中。 経済性は、量産化で追求。 	<p>国際連携プロジェクトへの参画</p> <ul style="list-style-type: none"> 2020年代末の運転開始を目指す<u>海外の実証プロジェクトと連携した日本企業の取組</u>に対し、<u>安全性・経済性・サプライチェーン構築・規制対応を念頭に置きつつ支援</u>を行う。海外で先行する規制策定を踏まえ、技術開発・実証に参画 <u>日本企業がプロジェクトの主要プレーヤーとして参画し</u>、<u>脱炭素技術であるSMRの安全性の実証に貢献</u>。<u>主要サプライヤーの地位を獲得</u>。2020年代末の海外でのSMR初号機開発後、海外連携によりグローバル展開と量産体制を確立



原子力産業分野の実行計画

出所:2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(令和3年6月18日)

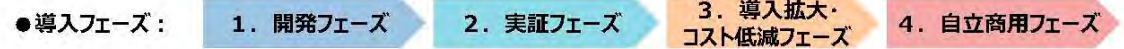
	現状と課題	今後の取組
高温 ガス炉	<p>開発・運転ノウハウの蓄積と実用化スケールへの拡張が必要</p> <ul style="list-style-type: none">・<u>高温工学試験研究炉 (HTTR) で950℃ (世界最高水準) ・ 50日 間の高温連続運転を達成(JAEA)。</u>安全性を実証。・日本企業が水素製造・発電コジェネプラント、蓄熱可能な発電用高温ガス炉などを開発中。・高温ガス炉と水素製造施設との接続技術の確立が必要。	<p>HTTRを活用した試験・実証等</p> <ul style="list-style-type: none">・<u>HTTRを活用し、安全性の国際実証に加え、2030年までに大量かつ安価なカーボンフリー水素製造に必要な技術開発を支援。</u>・安全性・経済性・サプライチェーン構築・規制対応を念頭に置いた開発支援を行いながら、技術開発・実証に参画。<u>海外の先行プロジェクトの状況を踏まえ、海外共同プロジェクトを組成していく。</u>・<u>日本の規格基準普及</u>に向けた<u>他国関連機関との協力を推進。</u>
核融合	<p>国内施設を通じた研究開発や核融合実験炉 (ITER) 建設に向けた製造・試験、各種要素技術の開発が必要</p> <ul style="list-style-type: none">・<u>プラズマ制御技術の高度化に向けた試験実施。</u>・<u>ITER本体の組立・据付開始、コイル等主要機器を日本から納入。</u>・安全で安定稼働できる核融合原型炉の設計。	<p>ITER計画等の着実な推進</p> <ul style="list-style-type: none">・ITER計画等の国際共同技術開発や将来的な原型炉建設計画に向けた取組を通じて<u>主要機器の実証と、出力の長時間維持技術を確立。</u>日本の核融合原型炉の建設計画に反映。2030年頃の実用化を目指す米・英のベンチャーと日本のベンチャー・メーカー等が連携を加速。・核融合炉の高温熱を活用したカーボンフリーな水素製造技術の開発を推進。



原子力産業分野の実行計画

出所:2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(令和3年6月18日)

④原子力産業の成長戦略「工程表」



●具体化すべき政策手法: ①目標、②法制度(規制改革等)、③標準、④税、⑤予算、⑥金融、⑦公共調達等

	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	～2030年	～2040年	～2050年
高速炉	○戦略ロードマップに基づく開発 ステップ1 ・民間によるイノベーションの活用による多様な技術間競争を促進 ・国際協力を活用した効率的な開発 ・日仏協力(安全性・経済性の向上)・日米協力(多目的試験炉等)		ステップ2 ・国、JAEA、ユーザーがメーカーの協力を得て技術を絞り込み(常陽等の施設を活用)			一定の技術が選択される場合	ステップ3 ・工程の具体化	例えば21世紀半ば頃の適切なタイミングに、現実的なスケールの高速炉の運転開始を期待
小型炉(SMR)	米国・カナダ等で2030年頃までに実用化 →日本企業が海外実証プロジェクトに参画			日本企業が主要サプライヤーの地位を獲得		販路拡大・量産体制化でコスト低減	アジア・東欧・アフリカ等にグローバル展開	
高温ガス炉 水素コスト: 2050年に12円/Nm ³ の可能性	HTTR再稼働	HTTRを活用した「固有の安全性」確認のための試験	カーボンフリー水素製造に必要な技術開発			カーボンフリー水素製造設備と高温ガス炉の接続実証	販路拡大・量産体制化でコスト低減	
	世界最高温の950℃を出力可能なHTTRを活用した国際連携の推進			高温熱を利用したカーボンフリー水素製造技術の確立(IS法、メタン熱分解法等)			実用化スケールに必要な実証	
核融合	国際協力の下、核融合実験炉(ITER)の建設・各種機器の製作				ITER運転開始 ・核融合反応に向けたプラズマ制御試験		ITER核融合運転開始 ・重水素-三重水素燃焼による燃焼制御・工学試験 ・核融合工学技術の実証	
	・JT-60SAを活用したITER補完実験、 ・原型炉概念設計・要素技術開発				原型炉へ向けた工学設計・実規模技術開発			実用化スケールに必要な実証
	人材育成、学術研究の推進							
	米国、英国等のベンチャーが2030年頃までに実用化目標 海外プロジェクトに日本のベンチャー等が研究開発・サプライヤーとして参画、機器納入							



2050年カーボンニュートラルに向けた原子力イノベーションへの要請

出所: 資源エネルギー庁、原子力小委員会資料5(令和3年4月14日)

一層の安全性向上を前提に、

- ✓ **安定供給** (大規模安定 + 革新的安全性・サプライチェーン + 技術自給)
- ✓ **資源循環性** (廃棄物問題解決への貢献 + 資源有効利用)
- ✓ **柔軟性** (負荷追従 + 水素・熱利用 + 立地の柔軟性)

安定供給

- 原子力は**安定供給に貢献する脱炭素電源**
- **革新的安全性向上**により、地域・国民の信頼獲得・安定供給へ
- **製造・調達等のプロセスイノベーション**を通じ、原子力サプライチェーンを維持・強化。技術自給にも貢献

資源循環性

- 原子力は脱炭素エネルギー源であるが、高レベル放射性廃棄物が発生
- 技術革新により原子力も循環型エネルギーへ
- **資源の有限性にも解決策を**

柔軟性

- 安価な再エネを最大限活用するために**負荷追従**
- 発電しない時には**水素製造、熱の形で利用・貯蔵** (実質的な負荷追従)
- 炉型革新により、EPZ縮小・立地の柔軟性

一層の安全性向上

- 東電福島第一原子力発電所事故を踏まえた一層の安全性向上技術開発と導入促進



原子カイノベーションの貢献の可能性

出所:資源エネルギー庁、原子力小委員会資料5(令和3年4月14日)

- 2050年CNに向けて、一層の安全性向上、安定供給、資源循環、柔軟性などの課題を克服すべく、官民の取組により、複線的R&D投資で死の谷（実用化のギャップ）を越えていくことが必要。

一層の安全性向上



✓安定供給

- 低廉安定
- 技術自給

✓資源循環性

- 廃棄物問題解決への貢献
- 資源有効利用

✓柔軟性

- 負荷追従
- 水素・熱利用



イノベーションの死の谷を克服する複線的R&D投資戦略

安定原子力(Stable Nuclear)

- 原子力を安全・安定的に活用していけるよう戦略的にサプライチェーンを維持・強化
- 一般産業品活用や3Dプリンタ技術といった調達・製造等のプロセスイノベーションを推進。

廃棄物低減原子力 (Circular Nuclear)

- 革新的サイクル技術で、高レベル放射性廃棄物の潜在的有害度が自然界並みになるのが10万年から300年に。
- 国際連携・異業種連携を活用。

柔軟性原子力 (Flexible Nuclear)

- 小型モジュール炉技術で負荷追従性向上。高温ガス炉や核融合炉の950℃以上の超高温を活用して水素・熱利用の可能性も。

革新的 安全性向上技術

- 事故時に水素発生のない燃料等
- 炉型革新

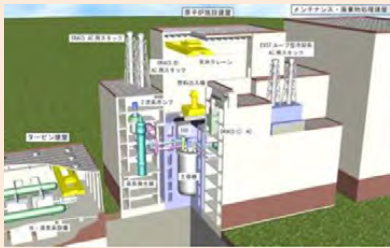
多様な高速炉・サイクル概念

出所: 資源エネルギー庁、原子力小委員会資料5(令和3年4月14日)

- 「戦略ロードマップ」に基づき、多様な技術間競争を促進中。
 - 「まず当面5年間程度は、これまで培った技術・人材を最大限活用し、民間によるイノベーションの活用による多様な技術間競争を促進する。」
- NEXIP補助事業のもと、令和元年度から**多様な炉型の研究開発**を支援。

小型ナトリウム冷却金属燃料高速炉(MCR-200)

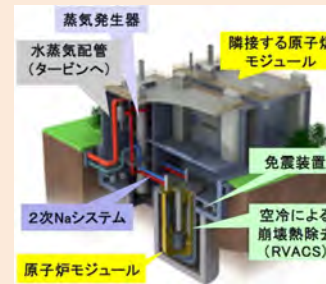
三菱重工業株式会社、三菱FBRシステムズ株式会社



- 二次系ループをモジュール型に増やして出力増が可能な小型ナトリウム冷却高速炉
- 金属燃料を粒子型とすることで、受動停止による安全性向上、ナノ粒子をナトリウム冷却材に混ぜることで、ナトリウムの化学的活性の抑制を目指す。
- 国産技術で高い技術成熟度。

小型ナトリウム冷却金属燃料高速炉(PRISM)

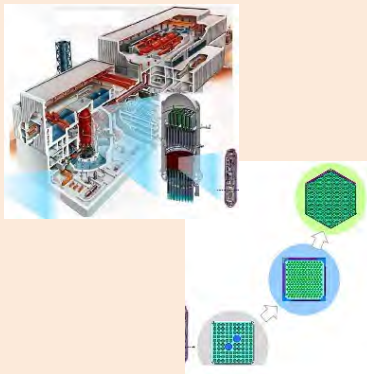
日立GEニュークリア・エナジー株式会社(日立GE)



- 日立GEのパートナー・米GE Hitachi社開発のナトリウム冷却・金属燃料小型モジュール高速炉。
- 金属燃料による固有安全性、静的機器による受動安全、モジュール工法による工期削減等が特徴。
- 設計概念は米国のVTR、Natrium炉にも採用。

軽水冷却高速炉

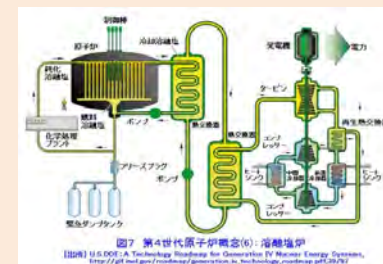
日立GEニュークリア・エナジー株式会社



- MOX燃料棒を稠密に配した四角格子燃料を既設BWR・ABWRに装荷し、BWRでプルトニウムを集中的に経済効率よく燃焼することを可能とする提案。
- 現行再処理・MOX燃料技術を活用可能。

溶融塩炉

- 沸点が高く低圧で作動可能な溶融塩の液体燃料を循環させ、発電等に用いる炉型。米、加、仏等で次世代の技術として開発。



超高温の活用で脚光を浴びる高温ガス炉

出所:資源エネルギー庁、原子力小委員会資料5(令和3年4月14日)

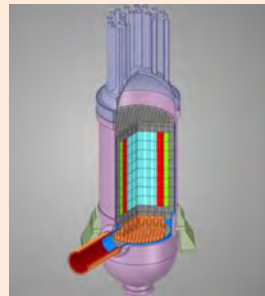
- NEXIPにおいて、水素製造、蓄熱のアイデアで柔軟性を有する高温ガス炉 2 炉型を支援。
- 日本発の核融合ベンチャー企業も登場。海外で進む実験炉プロジェクト市場へ参入中。

NEXIPで支援中の高温ガス炉提案

高温ガス炉コジェネプラント (水素製造・発電)

三菱重工業株式会社

- 高温ガス炉の900℃超の熱を活用し、発電と大量・安定の水素製造が可能なコジェネプラント。
- 水素の大量安定供給で製鉄等プラント等の脱炭素に貢献可能。
- HTTR設計・製作・建設、実用炉検討を通じた経験。



蓄熱型高温ガス炉

東芝エネルギーシステムズ株式会社、富士電機株式会社

- 熱出力600MWt/ユニットで、4ユニット合わせて電気出力約100万 kWを達成する高温ガス炉。
- 発電用を念頭とし、熔融塩蓄熱システム併設により負荷追従が可能。
- 高温水蒸気電解との接続による水素製造オプション
- HTTR建設主要企業としての経験。

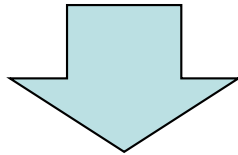




まとめ

◆ 報告内容

- 国外(米国、カナダ、英国、ロシア、中国)の開発動向
- 我が国の開発動向



- ◆ 現在、原子力を利用している国の多くがカーボンニュートラルを表明している中、原子力は脱炭素化の有力な技術選択肢として、**多くの国が原子力発電を活用していく方針を堅持している。**
- ◆ また、欧米との国際連携を通じて原子力発電所の新規導入国(東欧・アジア等)への展開も考えれば、**日本の原子力技術が世界の脱炭素化に貢献可能である。**
- ◆ 新型炉開発は若い世代を原子力研究・開発へと惹きつける魅力的な分野であるため、今後も、**民間の活力を活かした革新炉開発に国が支援していき、日本の原子力の人材・技術・産業基盤の維持・強化に繋げていくことが重要である。**