



[2M_PL01]

日本原子力学会 新型炉部会セッション

次世代革新炉(高速炉と高温ガス炉)開発の 最前線

(1) 国内外の高速炉開発の最前線

2024年3月27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、豊岡 淳一

■ 新規建設に向けて(大型炉)

- 世界の建設・計画中原子炉の基数において、ロシア、中国は西側を大きくリード(建設、計画とも3/4を占める)
- 海外への輸出状況では、ロシアが圧倒的に世界一(輸出・建設中基数18基のうち、ロシアは13基に関与)

世界の大型第3世代炉建設状況(2022年末現在)

供給国	炉型名	運転	開発基数		導入国(赤字は輸出)		
			建設	計画	運転中	建設中	計画中
米国	AP1000	4	2	5	中4	米2	ウク2、ポー3
フランス	EPR	2	4	2	中2	英2、フィ1、仏1	英2
	EPR2	0	0	6			仏6
韓国	APR1400	5	5	2	韓3、U2	韓3、U2	韓2
ロシア	VVER1200	5	13	8	ロ4、ベラ1	ハン2、ベラ1、トル4、中4、エジ2	ロ2、ハン2、ウズ2、エジ2
	VVER-TOI	0	2	7		ロ2	ロ7
中国	CAP1000	0	2	14		中2	中14
	CAP1400	0	2	0		中2	
	華龍1号	4	11	17	中2、パキ2	中11	中15、パキ1、アル1

出所: 原産協会(2022)および各種情報よりJEPIC作成

出典) 黒田雄二(海外電力調査会)、「エネルギー危機による世界の原子力情勢の変化」、海外情報連絡会・企画セッション、2023年3月14日

<http://www.aesj.or.jp/kaigai/documents/Lecture/Lecture-44-4-OHP.pdf>

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。2022年12月、2028年から2年以上の運転開始延期を発表。
			高温ガス炉(ペブル型): Xe-100 (X-energy社)	75	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。2023年5月、米国化学大手Dow社の拠点、テキサス州シードリフトに建設予定を発表。
		ARDP② 将来の実証に向けたリスク低減 (2030年代半ばの運開)	熔融塩炉: Hermes (Kairos Power社)		2020年12月選定。フッ化物塩冷却高温炉: KP-FHRの開発。テネシー州東部テネシー技術パークに建設予定。NRCは2023年6月、Hermesの建設許可に関し、安全面の評価審査を完了、同年12月、許可発給
			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)	熔融塩炉: MCRE (Southern Company Services社)	1Mwt	2020年12月選定。塩化物熔融塩高速炉: 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。
		多目的試験炉(VTR)計画	高温ガス炉: 水平コンパクト高温ガス炉 (MIT)		2020年12月選定。
	高速炉: VTR (Bechtel National社、GEH社、TerraPower社)			GEH社のPRISM設計に基づく。 2020年9月、CD-1承認。2022年7月、EIS最終版のROD発行。	
	国防総省	プロジェクトPele	高温ガス炉: 超小型炉 (BWXT社)		安全かつ先進的な可動式の超小型炉を設計。2022年6月、最終的にBWXT社の高温ガス炉設計を選定。同年12月、BWXT社がTRISO燃料の製造を開始。2025年末までに稼働予定。
	NuScale Power社、CFPP社	INLサイトにおけるSMR建設・運転計画	PWR: NuScale Power Module	77	NRCは、2023年1月、50MWe版NPMIにDCを発給、同年8月、77MWe版のSDA審査を開始。CFPP社が同年7月、LWAをNRCに申請。NuScale社には日本企業(日揮HD社、IHI社)が出資。 2023年11月、NPM初号機の導入を中断。
	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が受理し、2022年1月に申請を却下(再申請予定)。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	2022年8月、TRISO燃料粒子とFCM燃料のパイロット製造施設をテネシー州にオープン。	
WH社	AP300計画	PWR: AP300	300	2023年5月、AP1000のSMR版として発表。今後10年以内に初号機を完成、稼働が目標。	
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	熔融塩炉: IMSR (Terrestrial Energy社)	190	2019年からIMSRの共同審査を実施し、2022年6月に完了。2022	
		BWR: BWRX-300 (GEH社)	300	年9月から、BWRX-300の審査で協力中。	

カナダの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
			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。 2022年3月、4州のSMRの戦略的開発・建設計画を策定。
	OPG社	同社原発敷地内へのSMR導入計画	BWR: BWRX-300 (GEH社)	300	<ul style="list-style-type: none"> 初号機を2028年までにOPG社ダーリントン発電所で、次段階で最大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12月、BWRX-300を選定。2022年10月、CNSCに建設許可を申請。ダーリントン発電所に3基を追加導入する計画。
	NB Power社	同社原発敷地内へのSMR導入計画	熔融塩炉: SSR-W (Moltex Energy社)	300	<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2029年までに運開。 SSR-Wと廃棄物リサイクル施設を、2030年代初頭までに稼働
			高速炉: ARC-100 (ARC Clean Energy社)	100	
	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3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11社が申請		高温ガス炉3社 (USNC、U-Battery Canada社、X-energy社)、軽水炉2社 (GE-Hitachi Nuclear Energy社:完了、SMR社:完了)、熔融塩炉2社 (Terrestrial Energy社:完了、Moltex Energy社)、高速炉1社 (ARC Nuclearカナダ社)、ヒートパイプ炉1社 (Westinghouse Electric Company社)。下線は現在審査中の5社。
米国NRCとの共同技術審査		熔融塩炉: IMSR (Terrestrial Energy社) BWR: BWRX-300 (GEH社)	190 300	2019年からIMSRの共同審査を実施し、2022年6月に完了。 2022年9月から、BWRX-300の審査で協力中。	
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。	
波国PAAとの共同活動		BWR: BWRX-300 (GEH社)	300	2023年2月、BWRX-300の共同技術審査を目指し協力覚書を締結。	

英国及び伊国等の革新炉(SMR)開発・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
英国	DESNZ (旧BEIS)	AMR RD&Dプログラム フェーズA: FEED関係予備調査 フェーズB: 詳細設計FEED調査 フェーズC: 許認可、建設	高温ガス炉	<ul style="list-style-type: none"> 2021年12月、2030年代初頭の実証を目指すAMRとして、高温ガス炉を選択。 2022年2月、実証までのスケジュール概要を発表。同年9月、JAEAとチームを組むNNLを含むフェーズA実施機関を公表 2023年7月、JAEAとチームを組むNNLを含むフェーズB実施機関を公表。
		SMR開発・建設計画 ⇒SMRの支援対象選定コンペ(GBN主催)	PWR: NUWARD 170 PWR: UK-SMR 470 PWR: VOYGR-SMR 77 BWR: BWRX-300 300 PWR: SMR-160,300 160,300 PWR: AP300 300	2030年代初頭運開 <ul style="list-style-type: none"> 2021年5月、SMRを含む先進原子力技術のGDAプロセス開始 2021年12月、Rolls-Royce SMR社が政府資金獲得、GDA申請 2022年4月、2030年までに最大8基の(SMR含む)建設を承認、Rolls-Royce SMR社のGDA開始 2022年5月、未来原子力実現基金(FNEF)を設立 2023年4月、Rolls-Royce SMR社のGDAのステップ1完了、ステップ2進行中 2023年7月、大英原子力(Great British Nuclear: GBN)を設立、SMR支援対象選定コンペ開始 2023年10月、最終候補6社(EDF社、Rolls-Royce SMR社、NuScale Power社、GEH社、Holtec Britain社、Westinghouse社)を発表 2023年12月、Holtec Britain社が政府資金獲得、SMR-300がGDA開始 2024年1月、GEH社が政府資金獲得、GDA開始 2024年2月、Westinghouse社がGDA申請
伊・仏・英	伊電力 ENEA等 仏CEA等 英NNL等	Newcleo	LFR-AS-30(及び200)鉛冷却高速炉 MOX利用	実証炉 30 実用炉 200 CEOはStefano BUONO氏、CERNで核変換関連の研究を実施 ADS研究者が参加して立ち上げ

: 政府機関、国研	: 州政府
: 開発ベンダー	: 規制機関

仏国の革新炉(SMR)開発・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
仏国	CEA、EDF等	NUWARD計画	PWR: NUWARD (CEA、EDF、Naval Group、TechnicAtome社)	170×2 基本設計段階。2030年までにプロトタイプを建設。 2023.7.19 EDFが安全オプション文書(DOS)を仏原子力安全局(ASN)に提出し、予備的許認可手続きに着手
	Naarea	XAMR (eXtrasmall Advanced Modular Reactor)	熔融塩炉MSR	40 概念設計段階 超臨界CO2ガスタービン。1,000万ユーロの助成金獲得
	伊電力 ENEA等 仏CEA等 英NNL等	Newcleo	鉛冷却高速炉LFR—TL-30(及び200) MOX燃料	実証炉 30 2026年にプロトタイプ of イタリアでの建設、2030年に実証炉のフランスでの建設、2032年に実用炉の英国での建設を目指す 200 1,500万ユーロの助成金獲得
	CEA等	Otrera Nuclear Energy (ONE)	ナトリウム冷却高速炉SMR MOX利用(10年間の燃料交換なし)	110+ 熱出力 180MW 概念設計段階 CEOのFrederic VARAINE氏はCEA出身、元ASTRID計画のプロジェクトマネージャー。長期運転約10年。熱電気併用炉。
	CEA等	HEXANA	ナトリウム冷却高速炉SMR MOX利用	熱出力 400MW ×2 概念設計段階 CTOのPaul GAUTHE氏はCEA出身、元ASTRID計画の炉心設計研究者。2基の原子炉を連結した熱電気併用炉。
	CEA等	BLUE CAPSULE	ナトリウム冷却高温炉 TRISO粒子燃料	熱出力 150MW 概念設計段階 ナトリウム冷却材(700°C以上)とTRISO粒子燃料を組み合わせた高温炉を開発
	JIMMY ENERGY社	GTA (Générateur Thermique Atomique)	高温スペクトルマイクロリアクター	熱出力 15MW 概念設計段階 600°Cの脱炭素産業用熱を生産する、革新的な第4世代マイクロリアクター(熱中性子炉)の開発を目指す
伊・仏・英	伊電力 ENEA等 仏CEA等 英NNL等	Newcleo	LFR—AS-30(及び200)鉛冷却高速炉 MOX利用	実証炉 30 2026年にプロトタイプ of イタリアでの建設、2030年に実証炉のフランスでの建設、2032年に実用炉の英国での建設を目指す 200 1,500万ユーロの助成金獲得

: 政府機関、国研	: 州政府
: 開発ベンダー	: 規制機関

露国及び中国の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
露国	ROSATOM社	浮揚式原子力発電所	PWR: KLT-40S	35 × 2	完成(2019年12月から送電を開始)。
		鉛冷却高速実証炉 建設計画	鉛冷却高速炉: BREST-OD-300	300	建設開始(2021年6月)。
		陸上設置式SMR	PWR: RITM-200N	55	建設許可(2021年8月)。
中国	CNNC	HTR-PM(実証炉)計画	高温ガス炉(ペブル型): HTR-PM	210	2モジュールで1つの蒸気タービン。臨界(1号炉: 2021年9月、2号炉2021年11月)、送電網へ接続(1号炉: 2021年12月)、初期全出力運転(2022年12月)、 商業運転開始(2023年12月) 。
		HTR-PM600(商用炉)計画	高温ガス炉(ペブル型): HTR-PM600	650	基本設計終了。6モジュールで1つの蒸気タービン。
		PWR型SMR実証炉計画	PWR: 玲龍一号	125	建設開始(2021年7月)。

■	: 政府機関、国研	■	: 州政府
■	: 開発ベンダー	■	: 規制機関

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。 2022年12月発表: 2030年頃、運開(計画遅延)。 HALEU燃料製造が、2028年の運開に間に合わないため。
		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。
			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。
		多目的試験炉(VTR)計画	高速炉: VTR (Bechtel National社、GEH社、TerraPower社)	Na他	120	2020年9月、CD-1承認。2032年の運開は遅延見込。GEH社のPRISM設計に基づく。
英国	BEIS (現DESNZ)	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)。 2022年、終了。
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 クラスタを設立。2029年頃、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。 2022年からStartup企業を支援

※ARDP①: 実証プロジェクト
5-7年以内の新型炉実証
(2020年代後半運開)

ARDP②: リスク低減プロジェクト
将来の実証に向けたリスク低減
(2030年代半ばの運開)

- 多様な新型炉概念を対象に、技術的なリスク課題への対応を支援

ARDP③: 新型炉概念プロジェクト(ARC-20)
、新型炉概念2020
(2030年代半ばの実用化を期待)

- 2035年前後での実証の可能性のある新型炉を対象に、安全性、経済性、運転性の技術開発を支援

凡例	
	: 政府機関、国研
	: 州政府

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
露国	ROSATOM社		高速炉:BN-600(ROSATOM社)	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社)	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社)	Na	1220	2027年、着工予定。2030年代、運開。第4世代SFR。
			高速炉:BREST-300(ROSATOM社)	Pb	300	2021年6月、着工。2028年頃、運開。閉燃料C実証。
			高速炉:SVBR-100(ROSATOM社)	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社)	Na 他	55	2015年9月、本格着工。2027年頃、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。UO2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年頃までに2ユニットが運開。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社	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社)	Na	500	2024年、運開(計画遅延)。インド独自で設計・建設。(Pu,U)O2。2024年3月、燃料装荷開始。
			高速炉:CFBR(BHAVINI社)	Na	600	当初は2020年代後半運開予定、現状は不明。MOX燃料。

凡例
 :政府機関、国研
 :州政府

テラパワー社Natriumベンダーとの契約締結

テラパワー社は2023年8月1日、Natrium炉実証プロジェクトにコンポーネント等を供給するサプライヤー4社の選定を発表

- ① Western Service Corporation (WSC) :
 - Natriumエンジニアリング・シミュレータのソフトウェア・プラットフォームとエンジニアリング
- ② James Fisher Technologies :
 - テラパワー社のエベレット研究所に導入される射出鋳造炉システムを設計・製作し、射出鋳造プロセスの基本機能を実証
- ③ BWXT Canada :
 - 中間熱交換器
- ④ Curtiss-Wright Flow Control Service :
 - 原子炉保護系

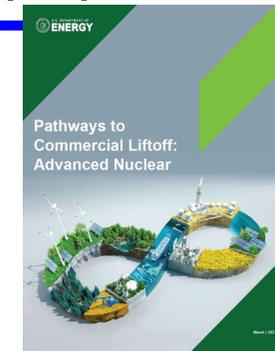
- Natrium炉実証プロジェクトは、ワイオミング州ケメラーにある廃止される石炭火力発電所の近くでの開発が予定されている。
- Natrium技術は、溶融塩ベースのエネルギー貯蔵システムを備えた345MWeのナトリウム冷却高速炉。この蓄電技術は、必要なときにシステムの出力を5時間半以上にわたって500MWeまで増強できる。

- 2023年7月、テラパワー社とセントラス・エナジー社は、テラパワー社の世界初のNatrium炉とエネルギー貯蔵システムを供給するため、HALEUの商業規模の米国生産能力を確立することを目的とした協力関係を大幅に拡大する覚書に調印した。
- テラパワー社とセントラス社は、セントラス社のオハイオ州パイクトン施設における国内濃縮技術の商業化を促進するためのサービス契約を2021年に締結して以来、協力している。

■ Natrium提案依頼書の今後の計画

- テラパワー社は、Natrium炉実証プロジェクトでの調達可能性リストを公開し、実証プラントの実現に協力可能な関連機関からの問合せを募集中。当該リストの詳細は、変更、修正、または中止される可能性がある。各RFP（**Request for Proposal**）が正式に発表された際には、追加情報が掲載

米国DOEの報告書「Pathways to Commercial Liftoff」(2023/3/21)



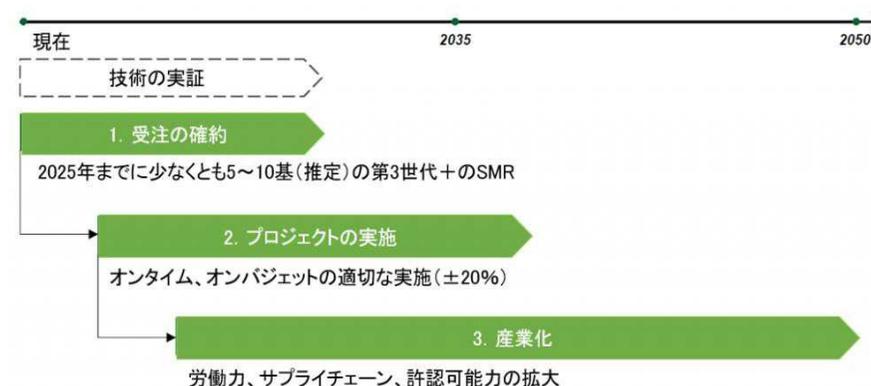
- クリーンエネルギー技術が本格的な展開に達する方法と時期について、民間企業やその他の業界パートナーに貴重な情報を提供するものとされており、最初のレポートの対象として、①グリーン水素、②先進的原子炉、③長期エネルギー貯蔵が取り上げられた(分冊)。
- これら以外の技術を分析の対象とするレポートも今後、数か月の内に順次、発刊される。

■ エグゼクティブサマリー(先進的原子炉) :

- 米国国内の原子力発電設備容量は、先進原子力技術の展開により、**2023年の1億kW(100GW)から2050年までに3億kW(300GW)まで拡大する必要**がある。
- 先進原子力には、実証済の技術から革新的な技術までが含まれる。
- 先進原子力は、脱炭素システムのために差別化された価値提案を提供する。
- 大規模な展開を可能にするには、先進原子力の後続機(N号機、Nth-of-a-kind)のオーバーナイト資本コスト(建設コスト)はkWあたり3,600ドル程度にする必要があるかもしれない。
- しかし、今日の原子力産業は、潜在的な顧客と展開に必要な原子力産業基盤への投資との間で商業的な行き詰まり状態にあり、脱炭素化の目標を危険に晒している。
- **大規模展開を2030年代半ばまで待つと、脱炭素化目標が達成できず、サプライチェーンに大きく負荷がかかる状態になる可能性がある**。

- 原子力産業基盤を早急に拡大することで、より近い時期に脱炭素化を実現し、資本効率を高めることができる。2030年までに先進原子力の展開を開始し、2040年までに年間の展開率を1,300万kW(13GW)に拡大すれば、2050年までに2億kW(200GW)を達成することができる。産業基盤の拡大が5年遅れた場合、同じ2億kWを達成するためには、2,000万kW(20GW)以上の年間展開率が必要となり、必要資本が50%も増加する可能性がある。

2050年の脱炭素化目標達成のための先進原子力産業のスケールアップへの道筋



EPRI&NEI「先進的原子炉ロードマップ」(2023/5/16)

世界がクリーン・エネルギー社会に向けて移行するなか、市場の需要に合わせて大規模な（例えば、2050年までに60~400GWe）先進的原子炉の建設を円滑に進めるための重要戦略と支援アクション、実行可能な道筋を示した「Advanced Reactor Roadmap（先進的原子炉ロードマップ）」を共同発表

□ ロードマップの情報源

- ロードマップは、先進炉開発企業、サプライヤー、電力会社、原子力発電事業協会、NGO、国立研究所 など、複数のステークホルダーからの意見をもとに作成された

□ アプローチに関する3つの留意点

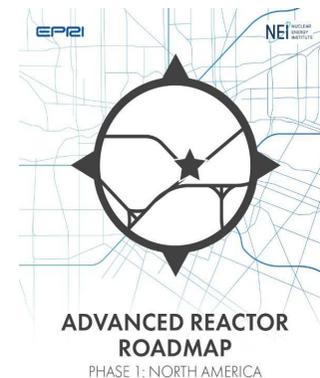
- ① 建設上の課題が少ない等、市場のニーズに即した炉型を商業化する
- ② 市場や顧客の多様なニーズに合わせて、複数の先進的原子炉の製品リストを確立する
- ③ 脱炭素化に向けた節目の目標に合せて、これらの確実な商業化やコスト面での有効性を保証する

□ 成功の条件（基準）

- ロードマップはまた、先進的原子炉を大規模に建設していく上で、産業界が**政策や規制、社会的受容性**の各側面で必要となる**7つの条件**を説明。
 - 初号機の建設プロジェクトを成功裏に進めるための連邦政府や州政府などが講じた財政支援や優遇 税制等の措置
 - 後続の建設計画が速やかに続くために、産業界がリスク軽減のための枠組みの開発を継続
 - 規制当局は、革新技術を用いた複数の先進的原子炉の規制審査を、円滑に進めねばならない

□ 先進的原子炉を市場に出すために、産業界で必要とされる46の具体的アクション：

- 「許認可手続き」や「環境影響と立地」、「サプライチェーン」、「建設と運転」、「プロジェクト管理」、「労働力開発」などの項目別に、細かな戦略的優先事項を提示。
- 戦略的優先事項の例：
 - 濃縮ウランの安定供給を確保するため政府と協議すること
 - これらの炉型がタイムリーかつ効率的に審査・承認されるよう規制当局に働きかけること
 - 初号機建設プロジェクトの実施準備を確実に進めること



フランス2030「革新的原子炉」プロジェクトの公募

- 2022年3月9日、投資計画「フランス2030」の枠組みにおける革新的原子炉プロジェクト公募開始の発表があった。
- この中で、SMR、AMR、廃棄物の最小化に向けたシステムへの投資が発表され、現在、SMR、AMR等に係る入札募集(2023年6月締切)がなされた。
- 政府は、核分裂および核融合の分野における革新的な原子炉の新しいコンセプトを支援するため、5億ユーロのプロジェクト募集を開始した。
- これらの新しい原子炉コンセプトは、電気、熱、水素の複合的生産の開始、核燃料サイクルをクローズすることの促進、放射性廃棄物の量や放射能の低減による管理の改善、生産エネルギーの競争力向上、原子力安全やセキュリティなど、フランスの原子力産業の研究開発に画期的な革新をもたらすことが可能になる。
- CFP (プロジェクト公募) プログラムは、(i)構想、(ii)概念の実証、(iii)プロトタイプの3段階からなる。今回の公募はそのうち(i)構想にかかるものであり、1プロジェクトあたり最大1000万ユーロ (約14億円) 近くを約2年間支援する。

企業	炉型	出力	備考	採択
①Naarea	MSR	40MWe		
②Newcleo	LFR	30MWe or 200MWe		
③Hexana	SFR	400MWt/150MWe×2	2基の原子炉を連結した熱電気併用炉。CEA支援	
④Otrera Nuclear Energy	SFR	110MWe+180MWt(2基)	長期運転10年、熱電気併用炉。CEA支援。	
⑤Blue Capsule	SFR	150MWt	Na冷却でTRISO粒子燃料を使用。CEA支援。	
⑥Calogena	モジュール式	30MWt	熱供給	
⑦Renaissance Fusion	核融合炉	1GWe	モジュール式でコンパクト。CEA支援。	
⑧Jimmy	高温ガス炉	15MWt	産業用熱を生産する第4世代マイクロリアクター。	
⑨Next Engineering	LFR	-		
⑩USNC	高温ガス炉	15~30MWt		MMR
⑪Transmutex	ADS	-		

フランス2030「革新的原子炉」プロジェクトの公募

① Naarea (溶融塩炉)

- 「XAMR (eXtrasmall Advanced Modular Reactor)」プロジェクト
- 40MWeのMSR、超臨界CO₂ガスタービン
- 40フィートコンテナに収まるサイズ、通常手段で輸送可能
- 2020年設立、於・パリ

② Newcleo (鉛冷却高速炉)

- 「Newcleo-LFR-TL-30」プロジェクト
- 2026年に非原子力電気加熱式プロトタイプ of イタリアでの建設、2030年に30MWeのLFR (TL-30) 試験・実証炉のフランスでの建設、2032年に200MWeのLFR (TL-200) 商業炉の英国での建設を目指す
- プルトニウムと劣化ウランからなるMOX燃料
- 2021年9月設立、於・英国、イタリア、フランス (本プロジェクトには、フランス (リヨン) の Newcleo SAが応募)

③ Hexana (ナトリウム冷却高速炉)

- CEAからのスピノフ、EDFとフラマトムがサポート
- 熱貯蔵装置を組み合わせた2基のSFR (各400MWth)
- プルトニウムと劣化ウランからなるMOX燃料
- 2022年3月設立

④ Otrera (ナトリウム冷却高速炉)

- ASTRIDプロジェクトの経験を生かしたSFR(300MWth)
- コージェネレーションシステム (110MWe、180MWth) で発電と熱供給
- 地下設置型
- ラアグ再処理工場からのPuをMELOXで燃料に加工
- 建設期間3年、2032年の運転を目指す
- 2023年5月24日にCEAからのスピノフを発表

⑤ Neext Engineering (鉛冷却高速炉)

- LFR、スパイラル式熱交換器
- エネルギー多消費型産業向けプラント (ターンキー方式、生産するエネルギーの個別設計、プレハブ&モジュール化)
- SPARTAプロジェクトで応募。
 - 産業界の脱炭素化に貢献する原子力発電：
 - ターンキー・アプローチ
 - カスタマイズされたエネルギー生産
 - 迅速な設置のためのプレハブ化とモジュール化
 - 安定したエネルギーコストと供給力
- 2022年設立、於・ベルフォール

原子力に関する日本の政策

グリーン成長戦略（原子力に関連する記載） 2021.6

- 原子力は大量かつ安定的にカーボンフリーの電力を供給可能、**技術自給率**も高い
 - 更なるイノベーションにより、**安全性・信頼性・効率性**の一層の向上、**放射性廃棄物の有害度低減・減容化**、**資源の有効利用による資源循環性**の向上を達成
 - 再生可能エネルギーとの共存、水素製造や熱利用といった多様な社会的要請に応えることも可能
- ⇒ 高速炉、高温ガス炉、小型炉(SMR) に関する2050年までの成長戦略工程の提示
- ⇒ 「常陽」においては、世界的にも希少な医療用放射性同位体を、大量製造することが可能
「常陽」の再稼働を進めていくことで、先進的ながん治療等への貢献期待

第6次エネルギー基本計画（原子力・革新炉に関連する記載） 2021.10

2050年カーボンニュートラル実現に向けて：

- 電力部門は、再エネや**原子力**などの**実用段階にある脱炭素電源**を活用
- 原子力は、**安全性の確保を大前提**に、必要な規模を持続的に活用

2030年に向けて（原子力）：

- 国際連携を活用した**高速炉開発**の着実な推進、**小型モジュール炉**技術の国際連携による実証、**高温ガス炉**における**水素製造**に係る要素技術確立等を推進

GX（グリーントランスフォーメーション）実行会議（原子力・革新炉に関連する記載） 2023.2

「GX実現に向けた基本方針 ～今後10年を見据えたロードマップ～」

- 原子力はエネルギー**安全保障に寄与し脱炭素効果の高い電源**、**最大限活用**
- 2030年度電源比率20～22%の確実な達成に向け、**安全最優先**で再稼働を進める
- **次世代革新炉の開発・建設は、廃止を決定した炉の建て替えを対象に具体化を進める**

GX脱炭素電源法の整備（2023年5月31日成立、6月7日公布）

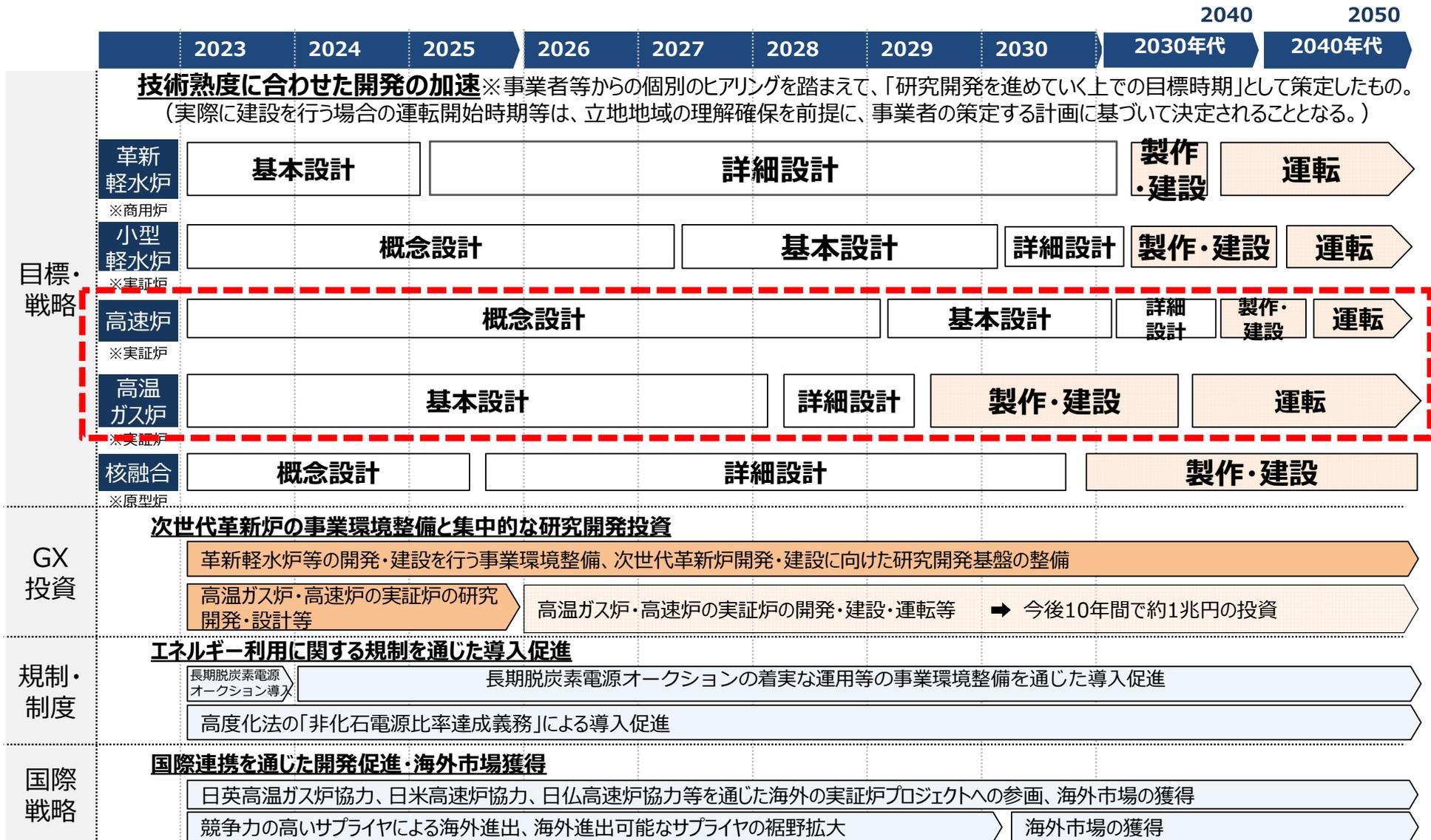
脱炭素社会の実現に向けた電気供給体制の確立を図るための電気事業法等の一部を改正

次世代革新炉に関するGX実現に向けた基本方針

GX実現に向けた基本方針
 <令和5年2月10日 閣議決定>
 参考資料から引用追記

【今後の道行き】 事例 16 : 次世代革新炉

- 安全性の確保を大前提として、新たな安全メカニズムを組み込んだ次世代革新炉の開発・建設に取り組む。



革新炉に関する最近の国内動向

原子力小委員会 革新炉ワーキンググループ(経済産業省)

- 原子力の新たな社会的価値を再定義し、我が国の炉型開発に係る道筋を示す議論を実施
 - 革新炉開発の技術ロードマップ(骨子案)を中間取りまとめ(2022年7月末)

高速炉開発会議 戦略ワーキンググループ(経済産業省)

- 戦略ロードマップ(2018年12月策定)に基づき、2024年以降の高速炉開発の在り方を検討
- 外部有識者の技術評価を踏まえ、戦略ロードマップの改訂に向けて議論

改訂案のポイント

- 技術の成熟度等の観点から、ナトリウム冷却高速炉が今後開発を進める概念として最も有望
- 2023年夏:炉概念の仕様選定、2024~2028年:実証炉の概念設計・必要な研究開発、…
- 国や JAEA 等、各プレイヤーの役割・開発体制の明確化

次世代革新炉の開発に必要な研究開発基盤の整備に関する検討会(文部科学省)

- GX(グリーントランスフォーメーション)実行会議(2022年8月)での岸田総理の指示を踏まえ、次世代革新炉の開発・建設に向けて、今後10年以内に行うべき基盤整備を議論

原子力委員会(内閣府)

- 原子力利用に関する基本的考え方(2017年7月策定)の見直しに向け、事業者から意見聴取
 - 原子力の持続的活用に関する基本方針の確立が必要等の意見

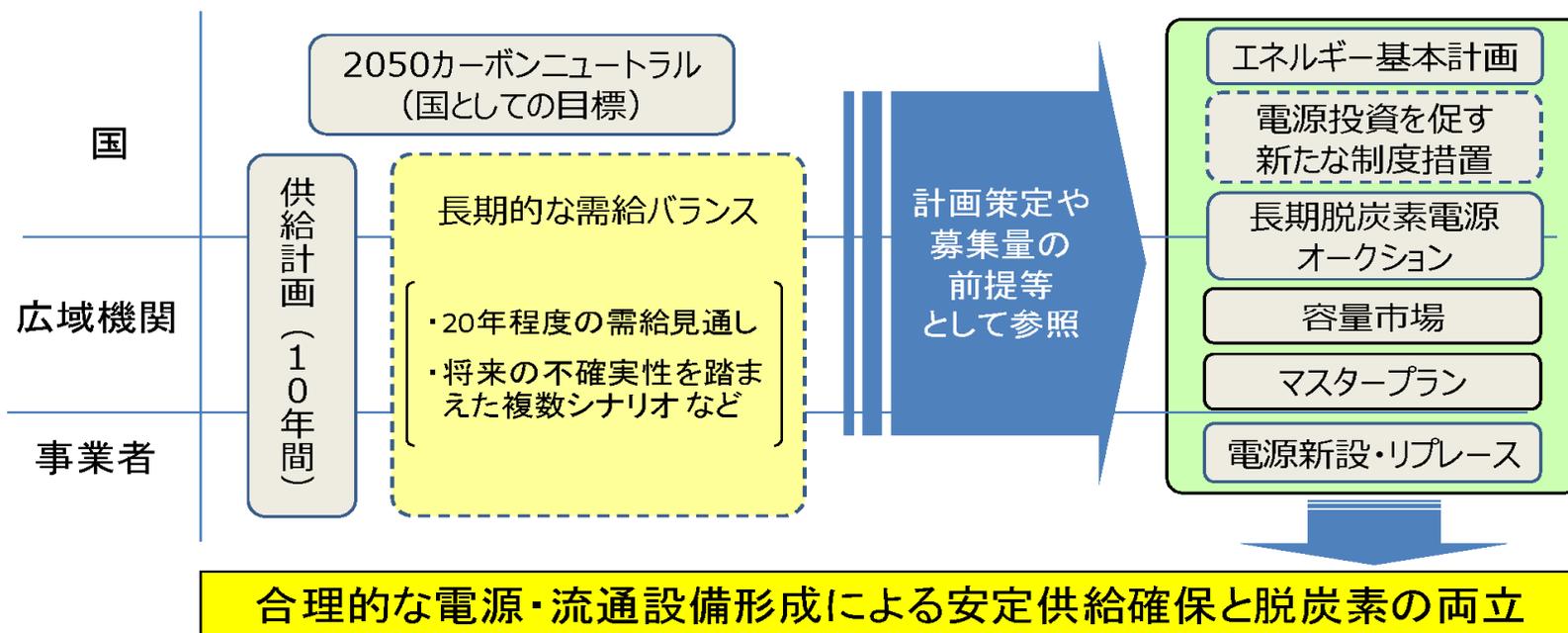
電事連会長 定例会見（2023/11/17）

将来の電力需要を展望すると、GXの進展に向けて電化率はしっかりと上昇させなければなりませんし、また、一層のデジタル化への対応として、電力を大量に消費するデータセンターの建設増や、AI、EVの拡大などにより、将来の電力需要は大きく伸びていくものと考えております

長期の電力需給想定的重要性

3

- ✓ 長期で多額の投資が必要となる電気事業において、安定供給を維持していくために、電源・ネットワーク設備の維持・建設が適切に行われる必要がある。
 - 電源やネットワーク設備の建設には長期のリードタイムが必要であることから、供給計画期間（10年間）を超える長期的な需給バランスに基づき、供給力を確保していくことが必要。
 - 供給力確保のためには、容量市場、長期脱炭素電源オークションなども含め、投資回収の予見性を高め、資金が適切に循環するような制度の構築・運用が必要。



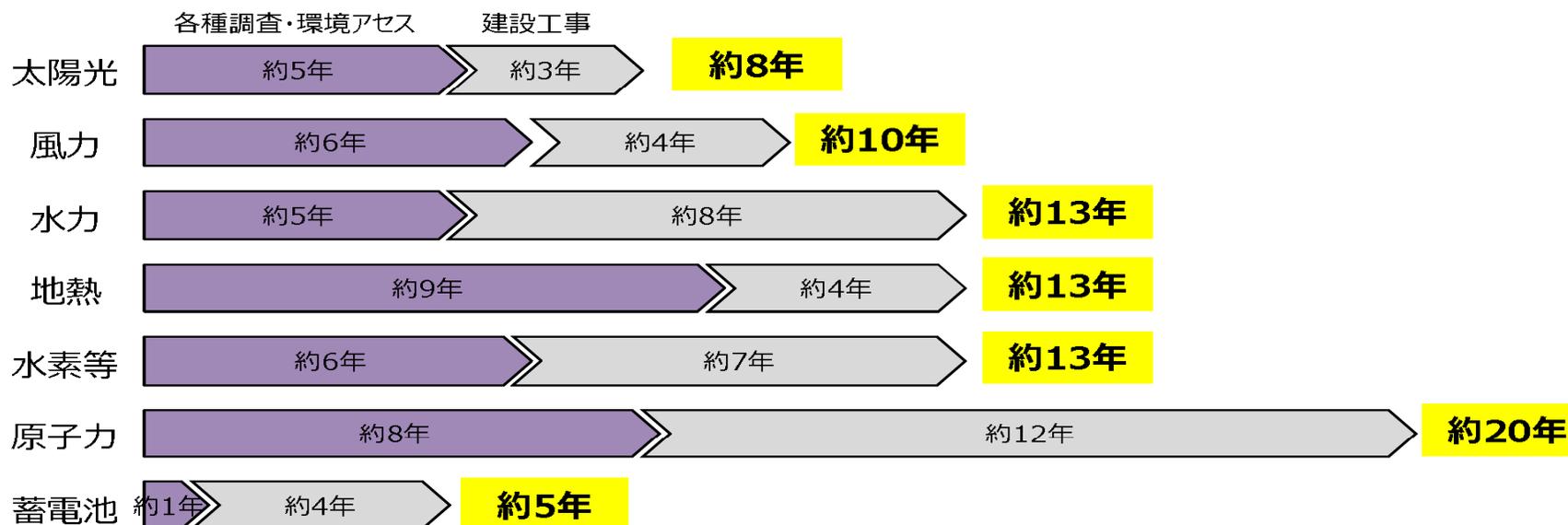
電事連会長 定例会見（2023/11/17）

電力需要が伸びていく中で、安定供給に必要な供給力や調整力を確保しつつ、カーボンニュートラルを達成していくために、時間軸を考慮した上で、既設電源の脱炭素化や新規電源の建設を、計画的に進めていくことが重要です。

電源開発のリードタイム

6

- ✓ 電源開発には、各種調査・環境アセス、建設工事のリードタイムを考慮することが必要



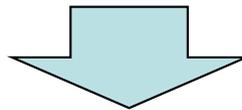
(出典：2022年6月22日 第67回制度検討作業部会資料を基に作成)

電事連会長 定例会見（2023/11/17）

電事連会長 定例会見要旨（2023年11月17日）から、

COP28にむけて

- 供給面で、再生可能エネルギーの導入促進と原子力の最大限の活用により、非化石電源比率を高めることが重要。
- 特に原子力については、既設炉の長期活用方策やリプレース・新增設など、**原子力発電の持続的な活用に必要なあらゆる選択肢を確保しておくことが重要**。
- 火力発電についても、非効率火力をフェードアウトさせながら、安定供給に必要な電源を維持するとともに、水素・アンモニアやCCUS等の新技術開発に、必要なリソースを投入。
- 一方、火力発電の脱炭素化は、短期的には電力コストの上昇にも繋がるものであるため、新たな脱炭素燃料等の実証・実用化段階においては、GX 経済移行債の活用等による支援措置にも期待。日本の火力発電は極めて効率性に優れており、こうした日本の誇る技術を、アジアをはじめとした海外で活用することは、地球規模での実効的なCO2削減につながることから発電所運営のノウハウもつ事業者として、グローバルな視点での貢献も目指す。
- こうした供給面での取り組みとともに、需要面においても、エネルギーを効率的に利用していく観点から、大気熱を活用できるヒートポンプの普及促進など、様々な分野での電化の推進も重要。
- 電気事業者としては、引き続き、2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、需給両面での取り組みを進める。

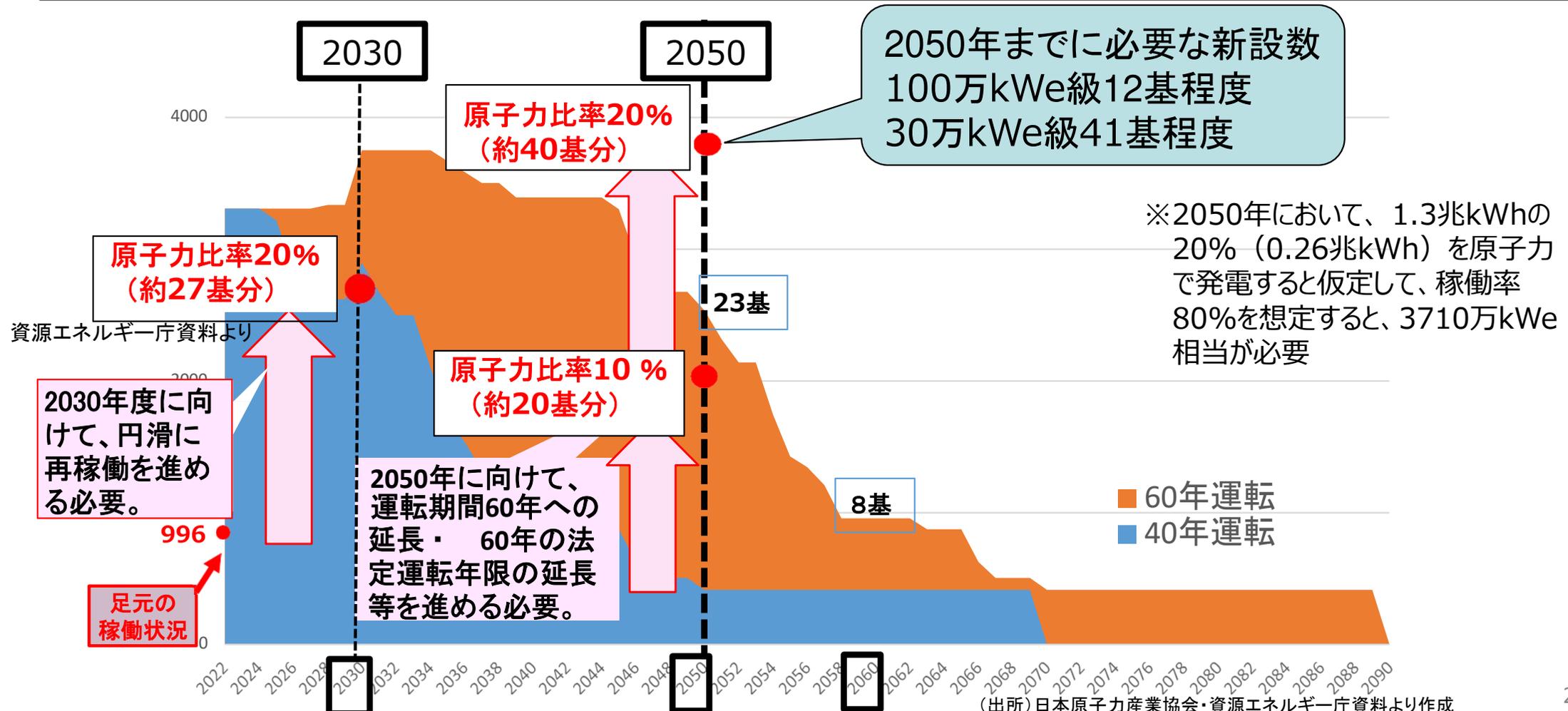


国連気候変動枠組条約第28回締約国会議（COP28）（2023/12）

22カ国が2050年までに世界の原子力発電能力を3倍にするという目標に署名

原子力発電の設備容量の見通し

- 電力需要は約1兆kWhから約1.3~1.6兆kWhになると予測
- 2050年に原子力発電割合が1.3兆kWhの20% (0.26兆kWh)と仮定して、その2/3 (0.17兆kWh)が100万kWe級の大型軽水炉とすると稼働率80%想定で25基が必要であり、60年運転延長を仮定した既設炉23基に相当する。一方、その1/3 (0.09兆kWh)が次世代革新炉とすると、30万kWeのSMRでは稼働率80%想定で41基が必要になる(100万kWe級では12基)。
- ここでの試算には不確定要素が含まれているが、各種調査・環境アセスメントや建設工事のリードタイムは20年程度かかることを考えると、**早期に原子力発電所の建設に向けた対応を開始する必要がある。**



次世代革新炉を国内で事業化するためには許認可性は重要な鍵

日本原子力学会 新型炉部会

「次世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計評価方針検討会」

設置期間： 2023年10月～2026年12月

成果物：次世代ナトリウム冷却高速炉の安全基準類に対する考え方

安全設計

研究開発炉用設置許可基準規則および解釈(平成25年原子力規制委員会)

「もんじゅ」「ふげん」を対象としており、**実証炉向け規則が必要**

重要度分類

「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」(平成2年原子力安全委員会)

実証炉向け重要度分類が必要

安全評価

「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」(平成2年原子力安全委員会)

「高速増殖炉の安全性の評価の考え方」(昭和55年原子力安全委員会)

「実用発電用原子炉に係る炉心損傷防止対策及び格納容器破損防止対策の有効性評価に関する審査ガイド」(平成25年原子力規制委員会)

高速炉の審査指針(審査ガイド)が必要

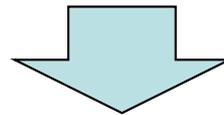
安全性判断基準

実証炉審査のための基準が必要

まとめ

◆報告内容

- 米仏を中心に、国外の最新の高速炉開発の動向を概説
- 我が国における「GX実現に向けた基本方針」に則った高速炉開発の動向と原子力発電能力強化の必要性
- 高速炉の安全基準類検討着手



- 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
- 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
- 欧米との国際連携を通じて原子力発電所の新規導入国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
- 新型炉開発は魅力的な分野
- 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