

原子力の活用に向けた安全性向上の取組

令和6年12月11日

資源エネルギー庁

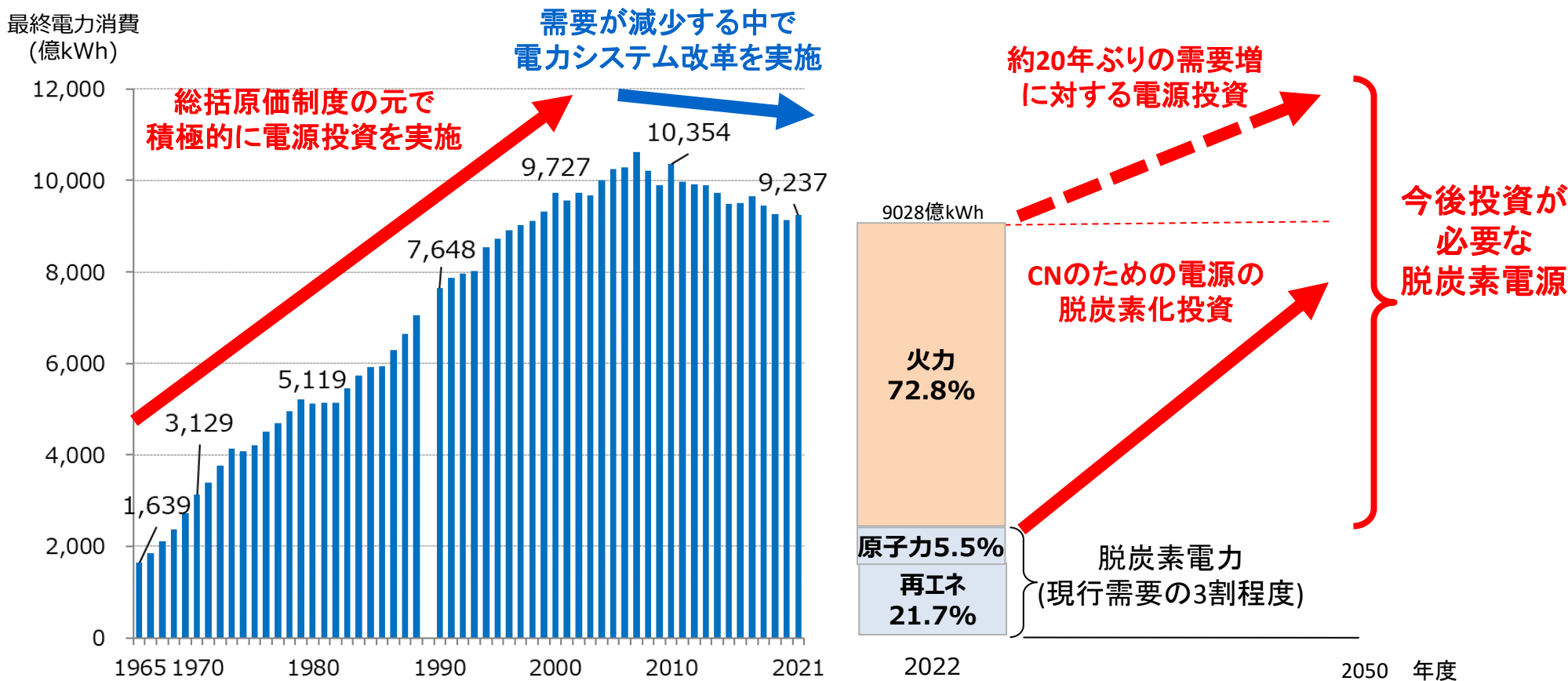
1. 次世代革新炉を巡る昨今の状況

2. 原子力の安全性向上及び 次世代革新炉の開発・建設に向けた取組

■ 半導体工場の新規立地、データセンター需要に伴い、国内の電力需要が約20年ぶりに増加していく見通し。2050CNに向けた脱炭素化とあいまって、大規模な電源投資が必要な時代に突入。これまでの電力システム改革時には必ずしも想定されていなかった状況変化が生じている。

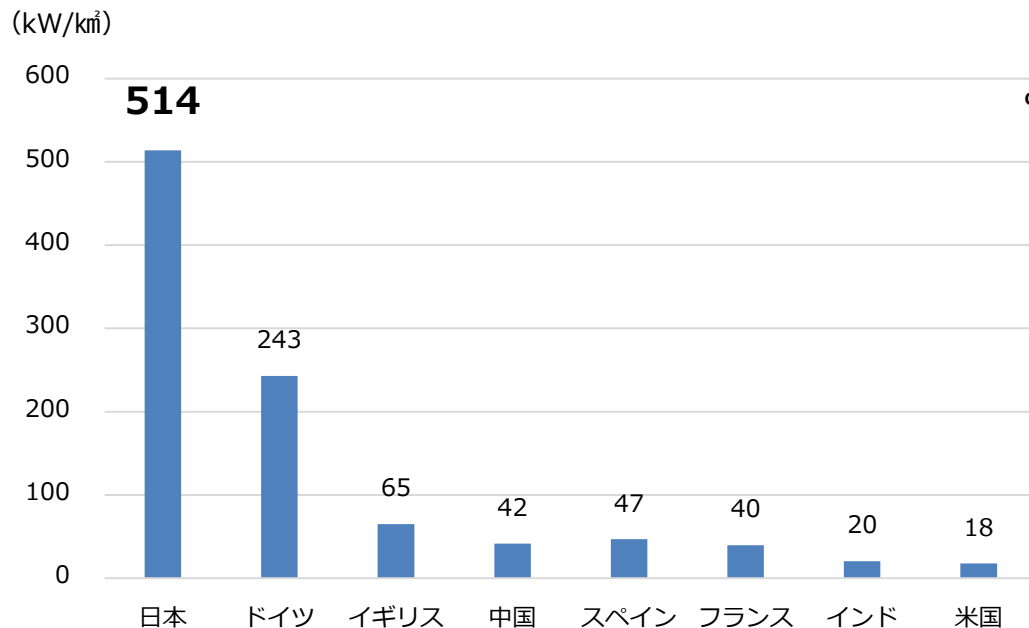
■ 脱炭素電源の供給力を抜本的に強化しなければ、脱炭素時代における電力の安定供給の見通しは不透明に。

※電力広域的運営推進機関は、2024年度から29年度にかけて電力需要が年率0.6%程度で増加する見通しを公表（2024年1月）。



- AI・データセンターによる計算能力拡大と、その計算能力を活用した産業活動のデジタル制御など、**DXの前提としても、脱炭素電力の供給拡大が不可欠。**
- 再エネは、2012年以降のFIT制度による投資拡大等により、**平地あたり導入量世界3位と増加。**地域との共生や、**関連技術の特定国への依存**といった顕在化する懸念にこたえつつ、**更なる導入加速を進めていく必要。**次世代型太陽電池（ペロブスカイト）や浮体式洋上風力の社会実装化など、**主力電源化への取組を進める。**
- 原子力は、脱炭素電源の量・価格両面から、**再稼働を着実に進めることが急務。**（原子力1基稼働により、約1000億円弱の燃料費削減効果（第2回GX実行会議試算））次世代革新炉への建替の具体化も必要。

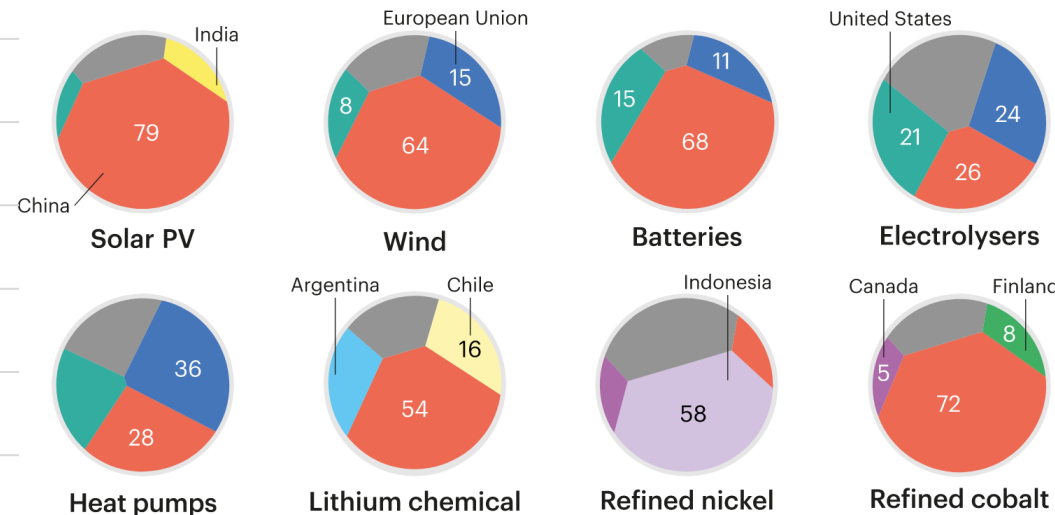
【平地面積あたりの太陽光設備容量】



（出所）外務省HP (<https://www.mofa.go.jp/mofaj/area/index.html>)、Global Forest Resources Assessment 2020 (<http://www.fao.org/3/ca9825en/CA9825EN.pdf>)
 IEA Renewables 2022、IEAデータベース、2021年度エネルギー需給実績(確報)、FIT認定量等より作成
 ※平地面積は、国土面積から、Global Forest Resources Assessment 2020の森林面積を差し引いて計算したもの。

【環境関連技術の国際サプライチェーンの見通し (IEA)】

Clean technology supply chain geography in 2030



（注）数字は2030年の国別製造能力のシェア（%）。計画段階のものを含む。
 （出所）IEA World Energy Outlook 2023

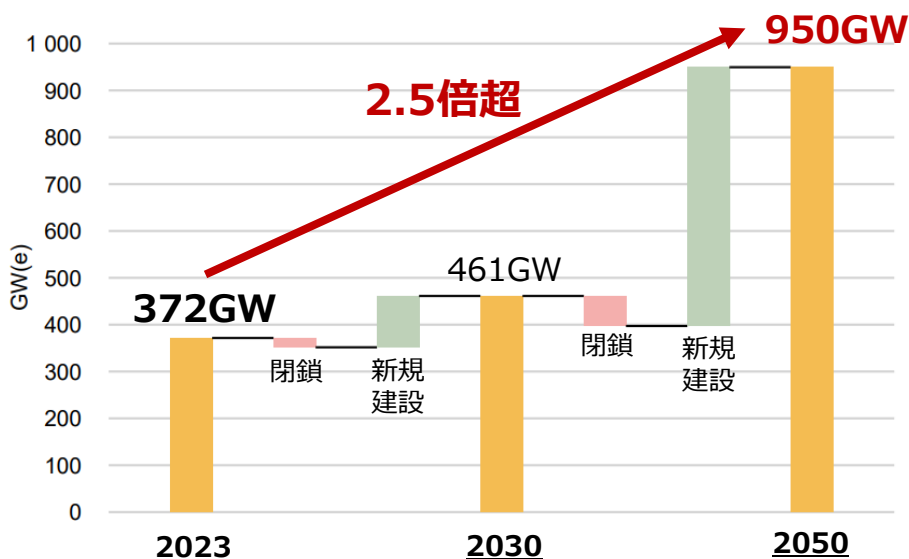
【参考】世界の原子力発電設備容量の見通し

2024.10.16 第41回
原子力小委員会 資料 1

- 2024年9月、IAEA（国際原子力機関）は、世界の原子力発電設備容量の見通しを公表。高予測シナリオでは、**2050年の世界の原子力発電設備容量が、2023年末比で2.5倍超**に達すると予測。特に、**中央・東アジアにおける伸びが顕著**となっている。
- また、**SMR（小型モジュール炉）**について、高予測シナリオでは、**2050年までの原子力発電設備容量増加分の24%**を占めると推定。

世界の原子力発電設備容量の見通し（高予測シナリオ※）

※各国の気候変動対応及び原子力拡大意向を考慮



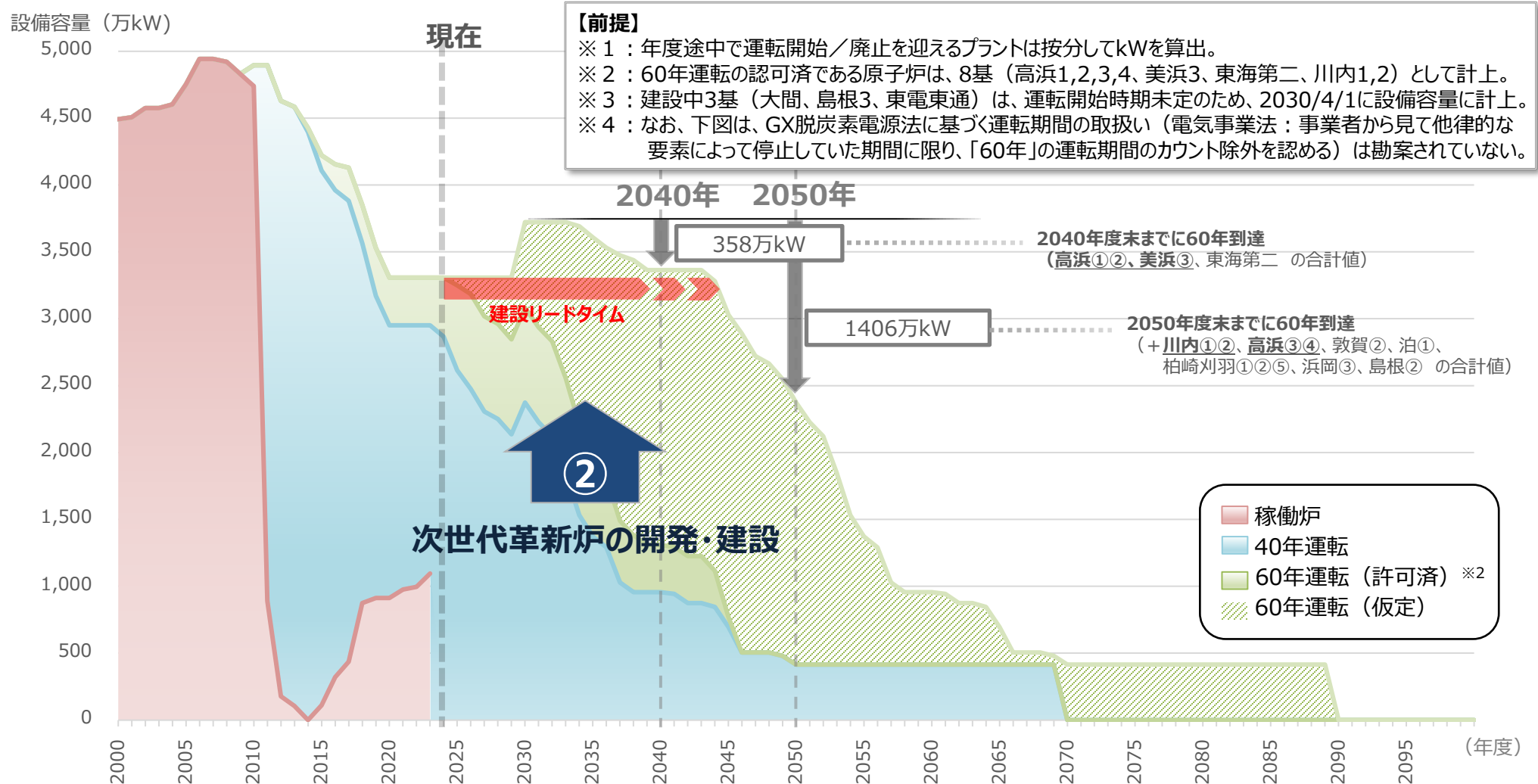
地域別の原子力発電設備容量の見通し

● 高予測シナリオでは、世界の全地域に原子力発電所が建設される想定

	2023	2030		2050		
		低予測	高予測	低予測	高予測	
世界	371.6	414	461	514	950	
北米	109.5	108	110	89	228	+100GW超
中南米・カリブ	5.1	5	5	8	20	
欧州（東欧除く）	93.8	86	88	69	135	
東欧	54.5	54	60	66	112	+50GW超
アフリカ	1.9	4	6	10	24	
西アジア	4.4	9	10	17	32	
南アジア	10.5	18	23	45	88	+50GW超
中央・東アジア	91.9	130	160	207	297	+200GW超
東南アジア	-	-	-	3	11	
オセアニア	-	-	-	-	2	

②次世代革新炉の開発・建設

- GX推進戦略（昨年7月閣議決定）では、「**原子力の安全性向上を目指し、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**」、「**地域の理解確保を大前提に、廃炉を決定した原発の敷地内での次世代革新炉への建て替え**」を対象として、具体化を進めていくとされている。



革新軽水炉

現行炉のメカニズム・出力規模をベースに安全性を高めた炉



◆ 三菱重工業 (SRZ-1200)

○特長

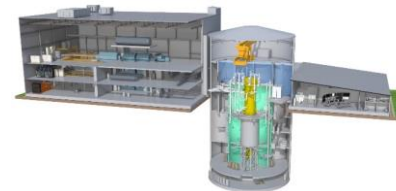
- ✓ 技術熟度が高く、規制プロセスを含め高い予見性あり
- ✓ 受動安全システムや外部事象対策（半地下化）により更なる安全性向上
- ✓ シビアアクシデント対策（コアキャッチャー、ガス捕集等）による発電所外の影響低減

○課題

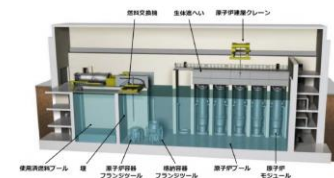
- ✓ 初期投資の負担
- ✓ 建設長期化の場合のファイナンスリスク

SMR（小型モジュール炉）

現行炉と比べて小型の軽水炉



◆ GE日立 (BWRX-300)



◆ NuScale (VOYGR)

○特長

- ✓ 炉心が小さく自然循環冷却
- ✓ 事故も小規模になる可能性
- ✓ 工期短縮・初期投資の抑制

○課題

- ✓ 小規模なため効率が低い（規模の経済性が小さい）
- ✓ 安全規制等の整備が必要

高速炉

冷却材にナトリウムを使用し、高速中性子を用いる炉



◆ 三菱重工業（実証炉）

○特長

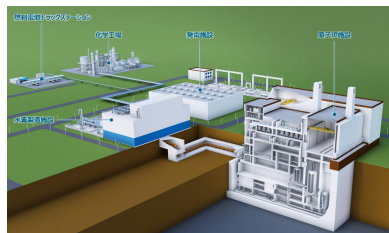
- ✓ 金属ナトリウムの自然対流による自然冷却・閉じ込め
- ✓ 放射性廃棄物の減容・有害度低減
- ✓ 資源の有効利用

○課題

- ✓ ナトリウムの安定制御等の技術的課題
- ✓ 免震技術・燃料製造技術等の技術的課題

高温ガス炉

冷却材にヘリウムガスを使用し、高温の熱を得る炉



◆ 三菱重工業（実証炉）

○特長

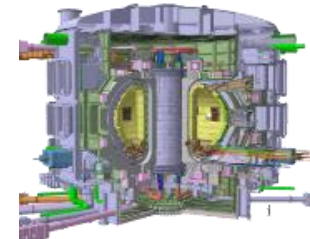
- ✓ 高温で安定なヘリウム冷却材（水素爆発なし）
- ✓ 高温耐性で炉心溶融なし
- ✓ 950℃の熱利用が可能（水素製造等に活用）

○課題

- ✓ エネルギー密度・経済性の向上
- ✓ 安定な被覆燃料の再処理等の技術的課題

核融合

核分裂反応ではなく、核融合反応から熱を得る炉



◆ ITER（実験炉）

○特長

- ✓ 連鎖反応が起こらず、万一の場合は反応がストップ
- ✓ 放射性廃棄物が非常に少ない

○課題

- ✓ プラズマの維持の困難性、主要機器の開発・設計（実用化には相応の時間が必要）
- ✓ エネルギー密度・経済性の向上

1. 次世代革新炉を巡る昨今の状況
2. 原子力の安全性向上及び
次世代革新炉の開発・建設に向けた取組

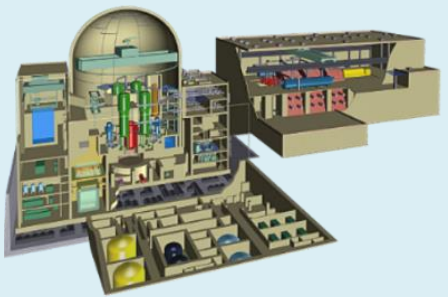
東京電力福島第一原子力発電所事故を教訓にした安全研究開発

● 2015年、資源エネルギー庁で「軽水炉安全技術・人材ロードマップ」を策定。規制基準以上の更なる安全性向上のため、**震災後13年**を経て**革新的安全性向上技術の実装・開発が進む**。

支援例

革新的軽水炉

- 自然災害やテロにも強い高い安全性、カーボンフリーかつ安定供給の実現性、高い経済性を有する革新的軽水炉のシステムとしての成立性を検証
- 耐震・安全性強化のための設計強化試験を実施



事故耐性燃料

- 事故時に水素発生を抑制するクロムコーティング被覆管等の開発
- 海外での照射試験の実施を計画



高経年化対策技術開発

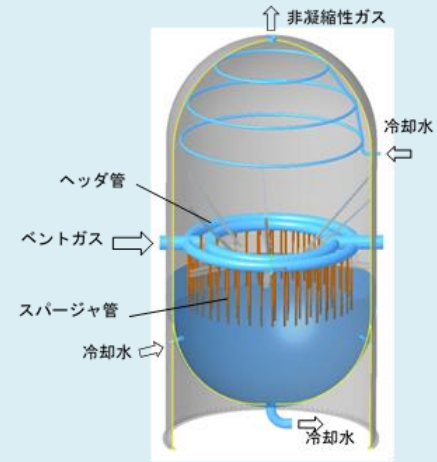
- 超小型試験片による材料評価手法の実証、PWRでの応力腐食割れの発生原因及び発生条件の明確化
- 既存発電所の安全な長期運転に貢献



超小型試験片 (10x10x4mm)

放射性ガス処理

- 事故時の放射性希ガス（クリプトン、キセノン等）を分離・貯蔵し、環境への放出を防ぐ
- ベントラインに設置、ベント時の放射性希ガスの放出を抑制



凝縮タンクの概念構造

革新軽水炉に関する民間事業者の取組

- 電力・メーカー等から成る原子力エネルギー協議会（ATENA）は、革新軽水炉の導入に向けて同会内に革新軽水炉WGを設置し、規制基準との関係性を含め課題検討・整理を進めている。
- 規制委員会との意見交換において、ATENAから、本年3月には革新軽水炉の規制基準に関する今後の意見交換の進め方イメージを、9月には規制の予見性が十分でないと考える事項を提示。規制委員会は、10月、実務レベルの技術的意見交換会を設置し議論を進めていく方針を了承。

原子力規制委員会-ATENA・CNO意見交換会※（2024年9月12日）

※第19回 主要原子力施設設置者（被規制者）の原子力部門の責任者との意見交換会

ATENA：規制の予見性が十分でないと考える事項（ATENA提示資料より抜粋）

- 【論点①】 常設設備を基本とした重大事故等対応
- 【論点②】 特重施設の在り方・重大事故等対処設備（4b;格納容器破損防止）と特重施設の機能統合
- 【論点③】 溶融炉心冷却対策への新技術導入（ドライ型コアキャッチャの導入）
- 【その他（現時点で直ちに開発に大きい影響を及ぼすものではないが、今後確認したい事項）】
 - ・新技術等の適用促進に向けて技術等を事前確認する制度の活用・拡大

原子力規制委員会（2024年10月9日）

原子力規制庁：建替原子炉の設計に関する事業者との実務レベルの技術的意見交換会の設置（資料1抜粋）

3. 意見交換会の設置（案）（委員会了承事項）

建替原子炉の設計について事業者と実務的に意見交換する場として、別添のとおり、「建替原子炉の設計に関する事業者との実務レベルの技術的意見交換会」（以下「意見交換会」という。）を設置することについて了承いただきたい。（後略）

4. 今後の進め方

SRZ-1200 の設計及び設計の思想、事業者側が規制の予見性が十分でないと考える事項に係る具体的内容、セキュリティ上の考慮等について、事業者と意見交換を行う。年内に意見交換会を開始し、原子力規制庁において規制上の論点等を整理し、事業者から聴取した内容とあわせて、1年程度を目処に原子力規制委員会に報告し、規制上の取扱いに係る原子力規制委員会の議論に供することとする。なお、意見交換の過程においても、必要があれば原子力規制委員会に進捗状況等を報告する。

「VOYGR」(米・NuScale社)の動向

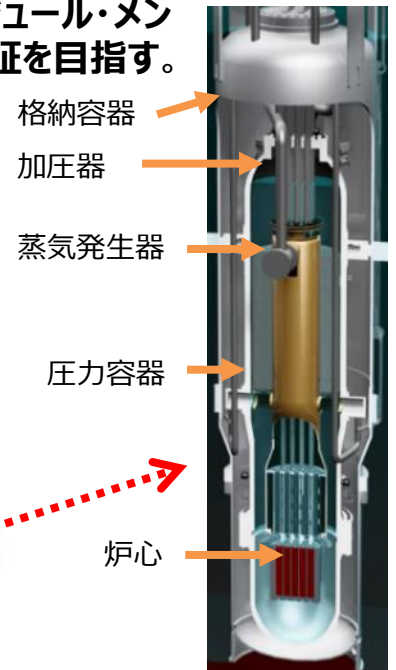
- 米NuScale社は米国エネルギー省の支援で開発を進め、初号機プロジェクト（CFPP）は中止となったが、オハイオ州とペンシルベニア州にて**2029年に米国内での運転開始を目指す**。
- 今年に入ってから動きとして、**ルーマニア**では、これまでの事業計画段階から、建設を見据えた**基本設計段階の契約締結**や**プロジェクトへの融資額の決定**など進捗があった。また、**ガーナ**において**新たな建設計画が立ち上がった**。

概要

- **米NuScale社が開発**するPWR型SMR。1モジュールの出力は7.7万kW。最大12モジュールを設置可能。
- 2023年11月、2029年運転開始を予定していた**Carbon Free Power Project(CFPP)の中止発表**。他方で、同年10月、米スタンダード・パワー社がオハイオ州とペンシルベニア州に立地する**データセンターへの電力源として採用発表**。
- 経産省予算にて、日揮・IHIが、**モジュール・メンテナンス機器等の課題についての実証を目指す**。

特徴

- 蒸気発生器と圧力容器の一体化により、**小型かつシンプルな設計で安全性を向上**。
- 蒸気自然循環により、**冷却ポンプ、外部電源なしで炉心を冷却可能**。



直近の動向

(ルーマニア)

- 2021年11月の米国・ルーマニア両政府間で発表された計画に基づき、**ルーマニアのRoPower社**（SMR建設プロジェクト会社）による**VOYGR建設プロジェクトが進行中**。直近での進捗は以下の通り。
 - 4月、IAEAのSEED（立地及び外部事象設計レビュー）のフォローアップ評価が実施され、**当該サイトがIAEAの安全基準に適合している**との結果が示された。
 - 7月、ルーマニアの国営原子力発電会社SNNとRoPower社は米EPC大手のFluorと**基本設計の第2段階の契約を締結**。
 - 10月、米国輸出入銀行の取締役会が本プロジェクトの準備段階に要する資金として**9800万ドルの融資の最終コミットメントを承認**。

(ガーナ)

- 8月、**ガーナの原子力発電公社（NPG）**は米国の**レグナム・テクノロジー・グループ**と**当該炉型（12モジュール）を建設**することで**合意**。NPGはレグナム社とともに、NuScaleを所有／運転する子会社を設立する計画。

「BWRX-300」(米・GE Hitachi社)の動向

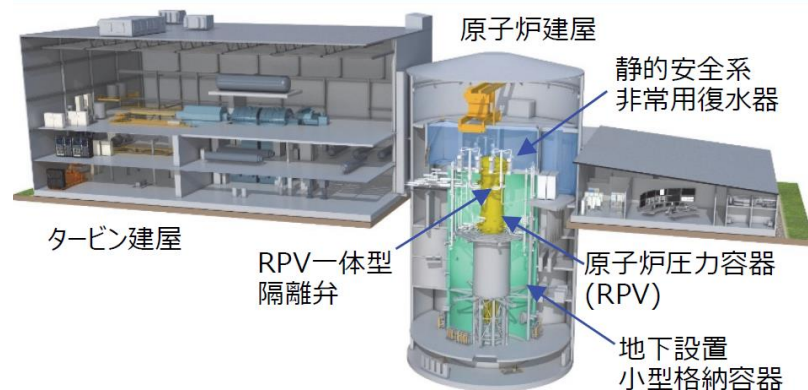
- 2021年より、カナダの電力会社OPG社による**最速2029年運転開始**を目指すプロジェクトが進められているところ。
- 今年に入ってから動きとして、**ポーランド**では建設に向けた**環境・立地調査を開始**。また、**カナダサスカチュワン州のサスクパワー社**は、**建設候補地として2箇所を選定**する進捗があった。また、**英国のSMR支援対象の1候補として選定**された。

概要

- **米GE Hitachi社と日立GE社が共同開発**する電気出力30万kW級のBWR型SMR。
- 2021年12月、カナダの電力会社OPG社が**オンタリオ州**にて**最速2029年運転開始**を目指すプロジェクトに、当該炉型を選定。
- 経産省予算にて、**日立GEの実温・実圧で試験できる設備を活用し、要素技術の実証**に向けて研究開発を実施中。

特徴

- 自然循環の利用によりポンプを排除、受動的冷却システムにより**電源・注水設備・運転員操作なしで7日間冷却可能**。
- 圧力容器に隔離弁を直付けすることで、**冷却材喪失事故の発生確率を削減**。



直近の動向

(ポーランド)

- 2023年12月、**ポーランド環境省はOSGE社の国内6地点における合計24基のBWRX-300建設計画に対しDIPを発給**。直近の進捗は以下の通り。
 - 2月、ポーランド環境保護総局は同社に対し、環境影響評価(EIA)の報告書作成に向けて記載すべき事項を提示。同社は**建設に向けて環境・立地調査を開始**。
 - 7月、同社はEU加盟10か国とノルウェーにある17企業の協力を得て、**BWRX-300の展開に向けた作業部会の設置**を欧州SMR産業アライアンスに申請。

(カナダ)

- 5月、**カナダ中西部サスカチュワン州の州営電力サスクパワー社は、建設候補地として、エステバン地域の2箇所を選定**。2025年初めに最終的なサイト選定を行う予定。

(イギリス)

- 9月、英国政府機関(GBN)は、**SMR支援対象選定コンペでGE日立を含む4社を選定**。今後、最終選考に入る。英政府は2029年にSMRへの最終投資決定を行い、**2030年代半ばには運転を開始**したい考え。

高速炉実証炉開発事業

- 2023年3月、炉概念の仕様と将来的にはその**製造・建設を担う事業者（中核企業）の公募**を実施、7月12日の**高速炉開発会議戦略ワーキンググループ**において、炉概念として三菱FBRシステムズ株式会社が提案する『ナトリウム冷却タンク型高速炉』を、**中核企業として三菱重工業株式会社を選定**して、**GX経済移行債を活用した実証炉開発事業を9月から開始**。
- 2024年7月、炉と燃料サイクルの研究開発全体を一定のレベルまで完遂するとともに、両者を統合して基本設計に繋げていく機能（**研究開発統合機能**）を担う組織として、**高速炉サイクルプロジェクト推進室をJAEAに設立**。当該プロジェクト推進室による開発作業マネジメントの下、設計・研究開発に取り組んでいる。

<高速炉実証炉開発の今後の作業計画>

2023 年夏：炉概念の仕様を選定 【23/7/12選定済】

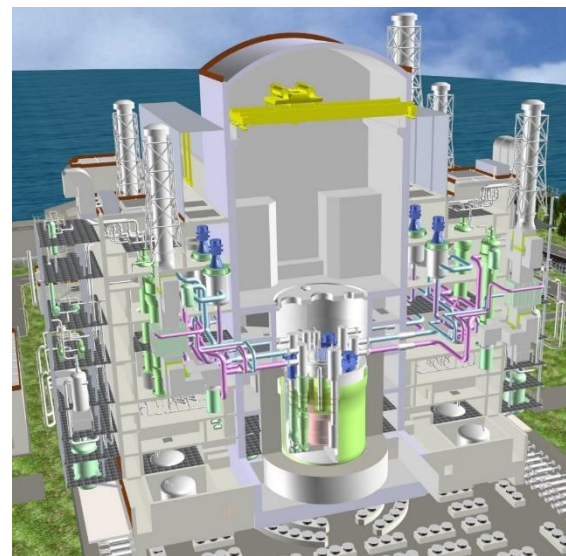
2024 年度～2028 年度：実証炉の概念設計・研究開発

2026年度頃：燃料技術の具体的な検討

2028 年度頃：実証炉の基本設計・許認可手続きへの移行判断

※戦略ロードマップ(令和4年12月23日 原子力関係閣僚会議)を基に作成

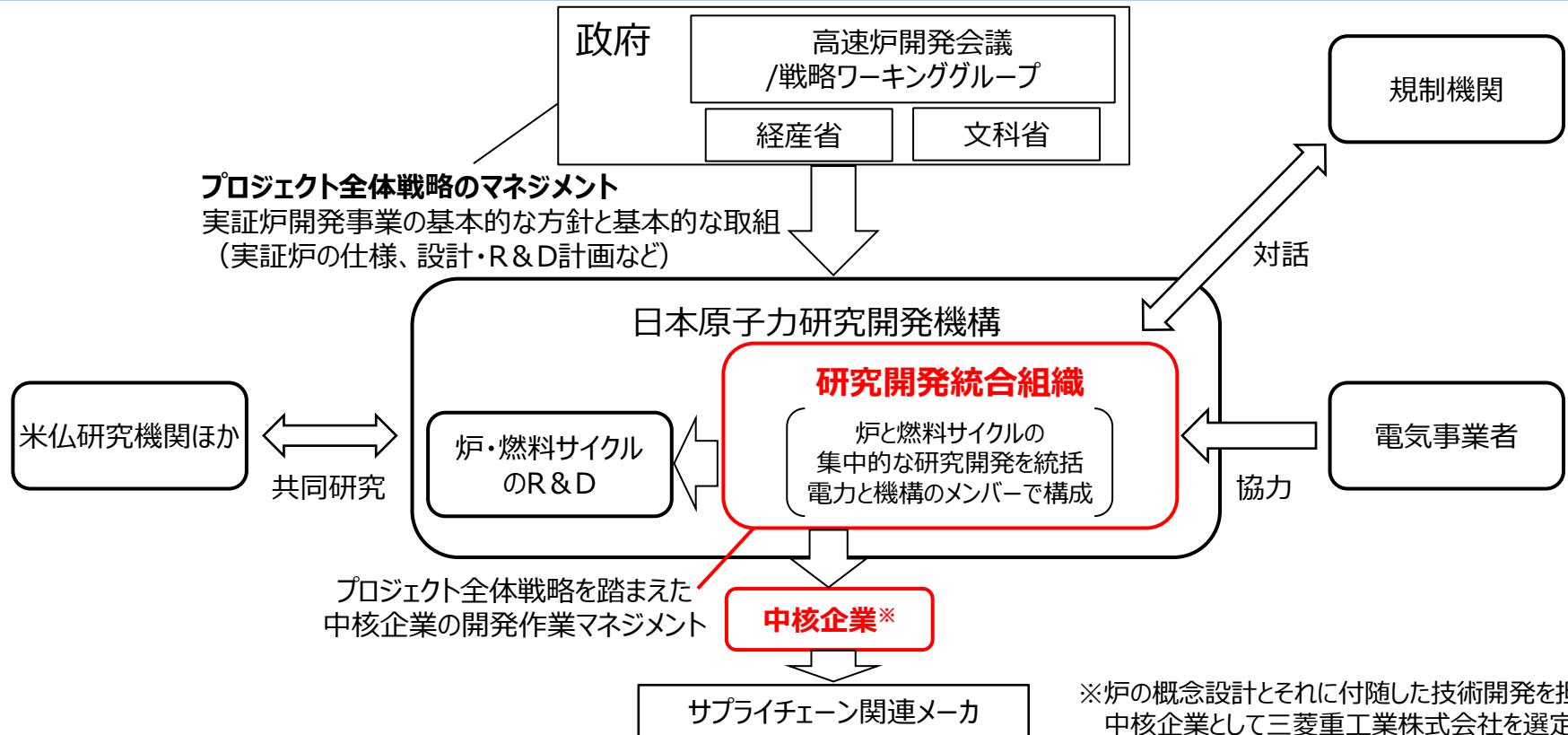
<ナトリウム冷却タンク型高速炉（イメージ）>



(出所) 三菱重工業株式会社PRESS INFORMATION (2023.07.12)
日本政府が開発を推進する高速炉実証炉の設計、開発を担う中核企業に選定
2040年代の運転開始に向け、ナトリウム冷却高速炉の概念設計などを推進

【参考】高速炉実証炉の概念設計段階における開発体制

- 「もんじゅ」は、主務会社を設けず、重工メーカーが横並びでプロジェクトを請け負う「護送船団方式」で、システム全体の設計を一貫性をもって実施する責任体制の明確化が課題であった。
- この教訓を踏まえ、システム全体の設計を明確な責任体制の下実施するため、中核企業1社にエンジニアリング機能を集中している。
- その上で、概念設計段階では、
 - プロジェクト全体戦略のマネジメント機能は引き続き**政府（高速炉開発会議／戦略WG）**が司令塔として担う。
 - 研究開発統合機能を担う研究開発統合組織を原子力機構に設置する。※2024年7月1日に設置済



高温ガス炉実証炉開発事業

- 2023年3月、基本設計を実施するとともに将来的にはその製造・建設を担う事業者（中核企業）の公募を実施、第三者の有識者で構成される技術評価委員会にて審査の結果、2023年7月25日、**中核企業として三菱重工業株式会社を選定して、GX経済移行債を活用した実証炉開発事業を8月から開始。**
- 2024年3月、**試験炉HTTRにて出力100%の状態から急遽停止する安全性実証試験を実施。**高温ガス炉の固有の安全性を立証した。
- HTTRへの水素製造施設の接続に向けて、**2024年度中に原子炉設置変更許可申請予定。**

<高温ガス炉（イメージ）>

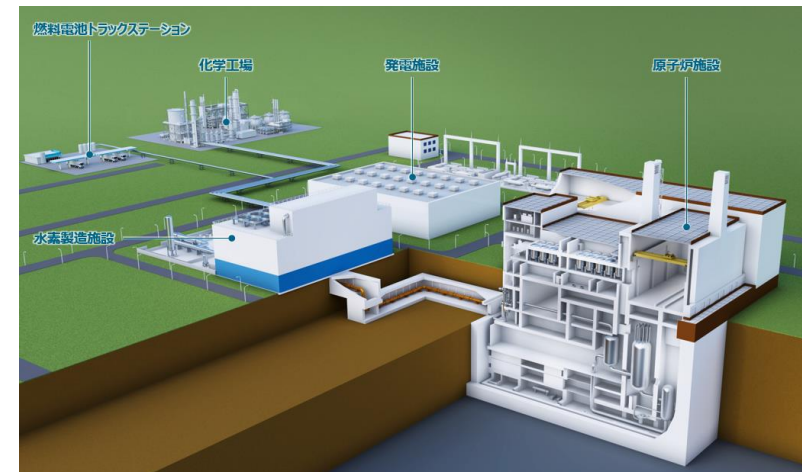
<高温ガス炉実証炉 今後の開発の作業計画>

事業開始～2030 年度：実証炉の基本設計・詳細設計

2030年度～2030年代後半：許認可の取得、建設、据付

2030年代後半：運転開始

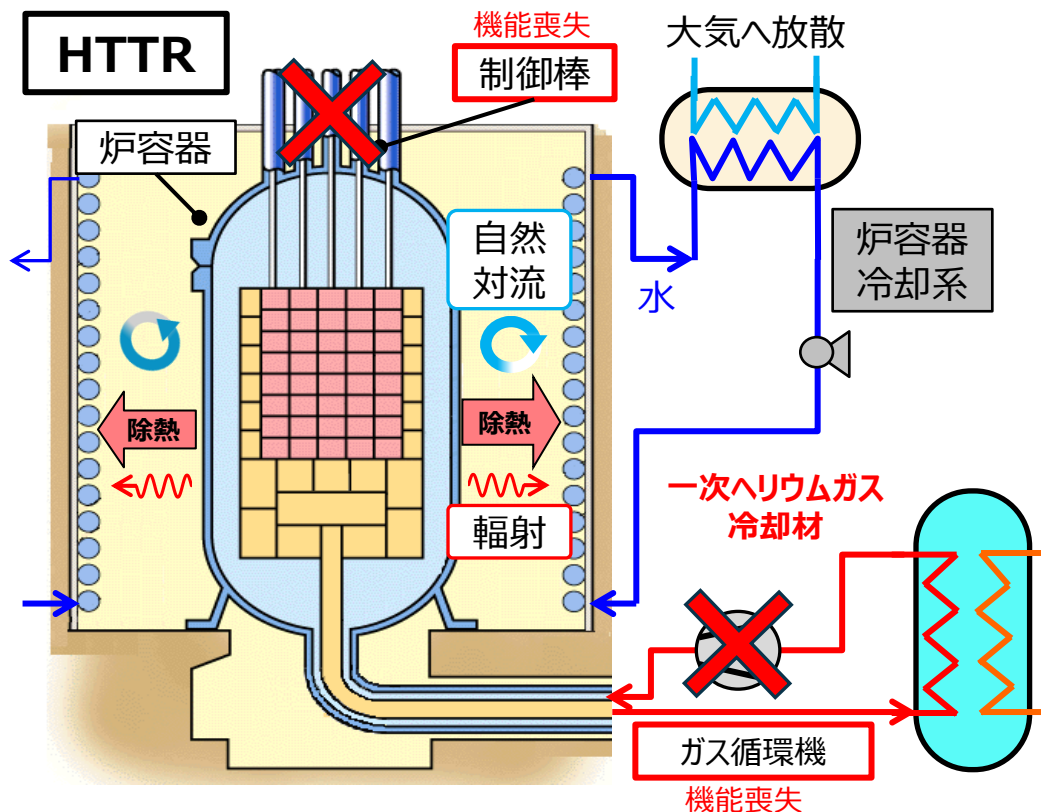
※革新炉開発の技術ロードマップ(令和4年11月2日 革新炉ワーキンググループ)を基に作成



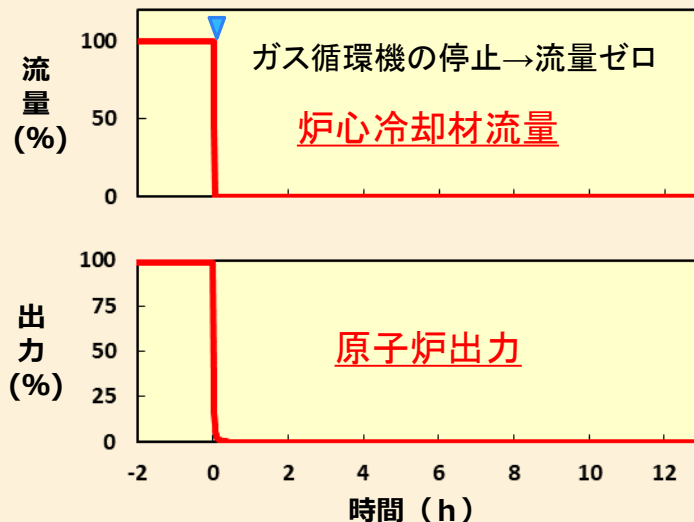
(出所) 三菱重工業株式会社PRESS INFORMATION (2023. 07. 25)
経済産業省が推進する高温ガス炉実証炉開発の中核企業に選定
2030年代の実証炉建設に向け、研究開発・設計を積極的に推進

【参考】HTTRにおける安全性実証試験

- 原子力機構における試験炉HTTRにおいて、本年3月27日に安全性実証試験を実施。
- 原子炉出力100%の状態から、制御棒挿入なし・冷却材循環機能喪失でも、物理現象のみで原子炉出力が自然に低下して静定することの実証に成功。



試験結果 (Run2)



原子炉出力100%において、制御棒挿入なし、強制冷却が喪失した状態で、物理現象のみで、原子炉出力が自然に低下し、静定することを実証

高温ガス炉の優れた固有の安全性により、需要地近接立地への理解を促進

核融合を巡る国内外の状況

- 核融合は、地球環境問題の解決に資する可能性を持つ“夢のエネルギー”として、世界7極によるITER計画を中心に据えつつ、前世紀から研究開発が進められてきた。
- 2010年代～2020年代初頭にかけて、米欧を中心に核融合による発電の実現を目指すスタートアップが勃興。数千億円単位で投資を集めるスタートアップも現れ、**民間部門による開発が活発化**。
- そうした中、2022年12月5日、**米ローレンスリバモア国立研究所（LLNL）**がレーザー型の核融合により史上初めて、出力エネルギーが入力エネルギーを上回る“**イグニッション（点火）**”を達成※。**ブレイクスルーの達成により、世界的に核融合への期待が高まった**。

※燃料への照射エネルギーに対するエネルギー増倍率 $Q > 1$ を達成したということ。レーザーを作り出すエネルギーを考慮すれば、商用のレーザー核融合炉では $Q = 100$ 程度が必要と言われている。

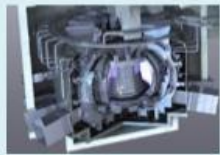
- 国内では、**2023年4月に初の国家戦略として、「フュージョンエネルギー・イノベーション戦略」を策定**。発電実証に向けたロードマップ・産官学の取組の更なる具体化に向け、**戦略改訂の議論が本年8月より内閣府の有識者会議において開始**されたところ。
- なお、**ITER計画**については、新型コロナウイルス感染症や、機器の不具合の修理等による日程への影響を受け、本年6月の理事会において**「ベースライン」見直しの必要性が提起**された。以下の通り、**主要なマイルストーンが後ろ倒しになる見通し**。
 - 完全な磁場生成：2033年→2036年
 - D-T核融合運転開始：2035年→2039年

多様な核融合の炉型

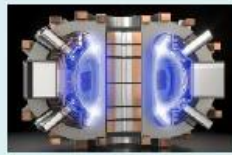
- 米国の核融合スタートアップ企業を中心に、2030年前後での核融合実用化を掲げ、多様な炉型の開発への挑戦が発表されているが、核融合反応の連続化や、投入したエネルギー量を超えるエネルギーの回収など解決すべき課題もある。

磁場閉じ込め型

トカマク型



(日) JA-DEMO



(米) Commonwealth Fusion Systems

2,800億円以上を調達
ビルゲイツ、Googleなど

球状トカマク型



(英) Tokamak Energy

350億円以上を調達



(中) ENN

260億円以上を調達

逆磁場配位型



(米) Helion Energy

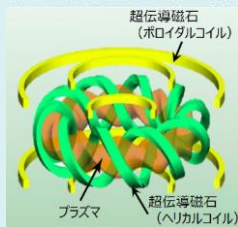
800億円以上を調達
サムアルトマンなど



(米) TAE Technologies

1,680億円以上を調達

ヘリカル型



(日) 核融合科学研究所 (NIFS)



(日) Helical Fusion

9億円以上を調達

ミラー型



(米) Lockheed Martin

飛行機や船等の動力源として開発中

慣性閉じ込め型

中心点火方式



(米) ローレンス・リバモア 国立研究所

レーザー型

高速点火方式



(日) 阪大レーザー研 (日) EX-Fusion

19億円以上を調達



(米) Blue laser fusion

2,500万ドルを調達

磁化標的核融合



(加) General Fusion

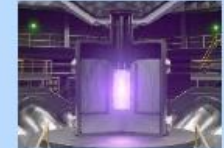
470億円以上を調達
ジェフ・ベソス

Zピンチ



(英) First Light Fusion

130億円以上を調達



(米) Zap energy

260億円以上を調達

その他

ミュオン触媒



(日) 中部大学

ミュオンの特徴
● 強い結合力→核融合
● 高い透過力→構造物イメージング等

凝縮系



(日) クリーンプラネット

20億円以上を調達

核融合の技術課題

- 核融合の実現には、核反応そのものに係るプラズマ物理だけでなく、電磁気学や材料工学、炉設計工学等、幅広い分野にまたがる技術課題の達成が必要。
- 経済産業省では、内閣府・文部科学省等の関係省庁や、本年3月に設立された(一社)フュージョンエネルギー産業協議会 (J-Fusion)とも連携しつつ、核融合と共通性のある分野の技術開発等への支援の検討を進めている。

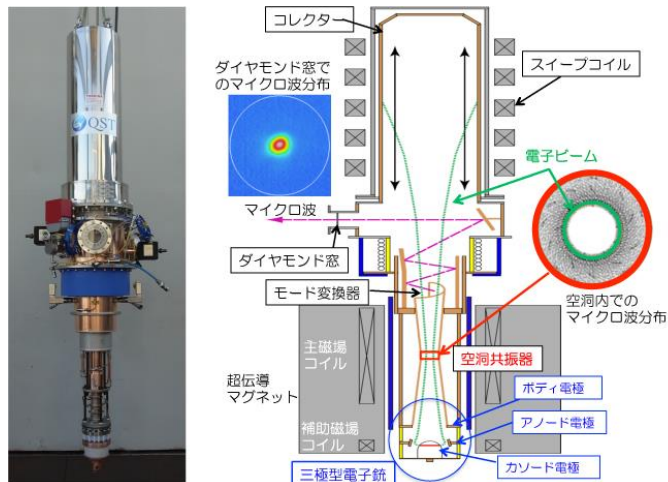
＜他分野と共通性のある核融合の技術課題例＞

◆ ジャイロトロンの開発

- ✓ **磁場型核融合**では、燃料プラズマを1億度程度まで加熱するため、**高出力電磁波を発信するジャイロトロン**が必要。

【他分野への応用例】

- ✓ ジャイロトロンは**地面の掘削等**に活用可能。
- ✓ NEDO事業で、高出力・連続運転ジャイロトロンの開発・深部地熱等への応用を支援。



◆ITERジャイロトロン (左) とジャイロトロン構成図 (右) ※1

(出所) ※1 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 ※2 大阪大学レーザー科学研究所

◆ 高出力レーザーの開発

- ✓ **レーザー型核融合**により定常的に発電を行うには、**1kW程度の高出力と10Hz程度の繰り返し動作を両立するレーザー**が必要。

【他分野への応用例】

- ✓ 高出力・高繰り返しレーザーは、**CFRP等、一般的な切削加工が適さない部素材の加工**に適している。
- ✓ NEDO事業で、自動車業界・航空機分野への応用を見据えた**ハイパワーレーザー開発**を支援。



◆レーザーⅫ号レーザー室※2