

R A H P ニュースレター

No.24

(会員専用)

世界の高温ガス炉開発 ～ 現状と将来計画 ～

2025 年 3 月

高温ガス炉プラント研究会

HP: <https://www.iae.or.jp/htgr/>

[連絡先] 高温ガス炉プラント研究会事務局
株式会社桜門イノベーションリサーチ
e-mail: omonrahp@jcom.zaq.ne.jp

はじめに

本ニュースレターは、日本の産業界（原子炉メーカー、建設会社、電力会社、研究機関等）と学識経験者で構成する「高温ガス炉プラント研究会（RAHP）」が、「高温ガス炉（High Temperature Gas-cooled Reactor = HTGR）」プラント開発に関し、開発戦略検討ならびに国内外（産、官、学、一般）向けの理解促進活動の一環として定期的に世界の高温ガス炉開発の背景・狙い・最新状況・将来計画等を調査し、その概要を紹介するものである。

第2章は本研究会の第19回定期講演会(2025.1.20 於:東京大学山上会館大会議室)において、本研究会の都筑和泰テクニカルアドバイザー/西村洋亮調査担当が行った講演資料である。

目 次

青字部分が前回よりの追加・変更のある部分（第2章は全て）

第1章 日本における高温ガス炉開発の現状

- 1. 日本のエネルギー需給状況・・・・・・・・・・1～7
 - 1.1 エネルギー需給に関する諸問題
 - 1.2 エネルギー基本計画～推移と現行計画
- 2. 脱炭素化の動き・・・・・・・・・・8～14
 - 2.1 2050年カーボンニュートラル
 - 2.2 グリーン成長戦略
 - 2.3 高温ガス炉の位置付け
 - 2.4 原子力政策の転換
 - 2.5 米国「パリ協定」離脱通告
- 3. 日本の高温ガス炉開発状況・・・・・・・・・・15～21
 - 3.1 HTGRの再稼働と安全性実証試験
 - 3.2 高温ガス炉における国際連携
 - 3.3 日本の高温ガス炉実証炉開発事業

添付1 高温ガス炉における国際連携・・・・・・・・・・表紙～P.17

添付2 我が国の高温ガス炉実証炉開発計画
原子力機構の取組・・・・・・・・・・表紙～P.15

第2章 高温ガス炉に関する国内外動向調査報告・・・・・・・・表紙～P.26

第1章 日本における高温ガス炉開発の現状

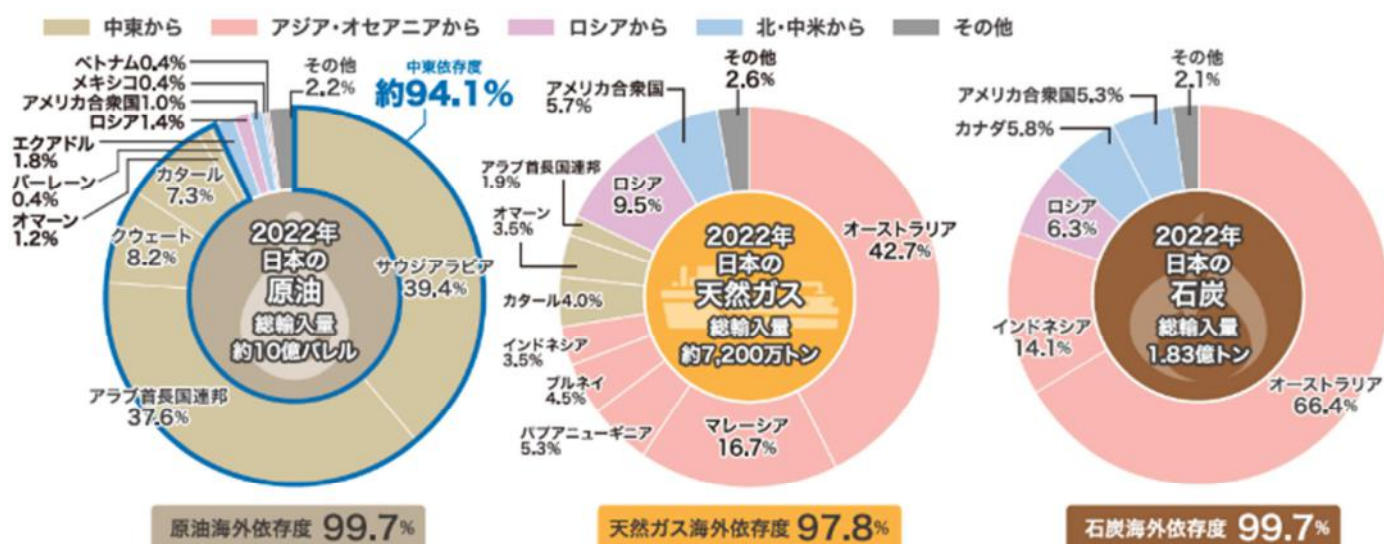
1. 日本のエネルギー需給状況

1.1 エネルギー需給に関する諸問題

(1) 外部依存一極集中

日本は天然資源に乏しく、化石燃料のほとんどを輸入に依存し、**特定国への集中度も高い**。特に原油は政情不安定な中東への依存度が高い。

- ・原油 . . . **中東依存度 99%以上**
- ・天然ガス . . . **オーストラリア・マレーシア 2国で約 60%**
- ・石炭 . . . **オーストラリア・インドネシア 2国で約 80%**



図表 1-1 日本の化石燃料輸入先（2022 年）

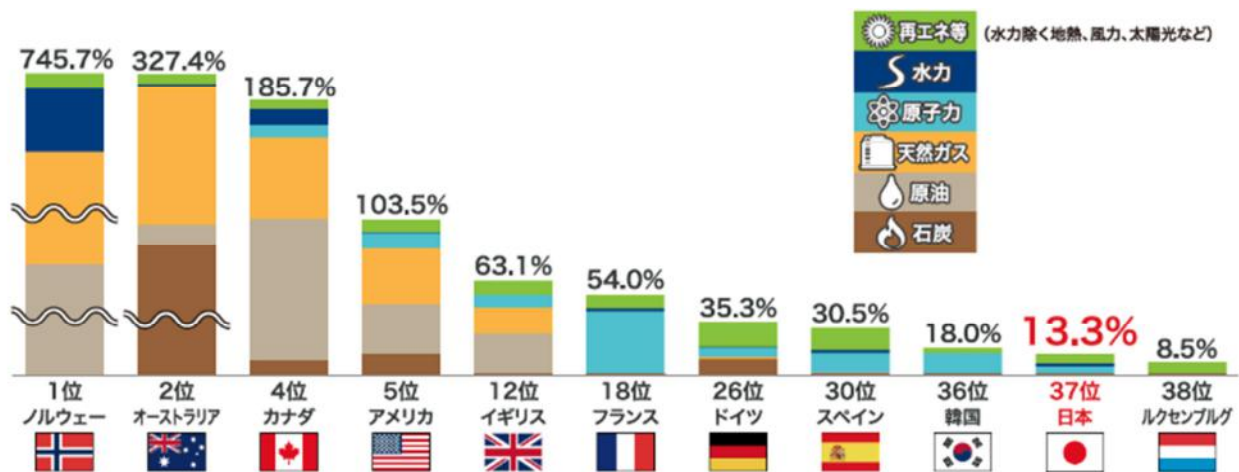
出典：資源エネルギー庁、2024. 4. 26、「2023-日本が抱えているエネルギー問題（前編）」

https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/energyissue2023_1.html?ui_medium=lpene

(2) 低いエネルギー自給率

日本の一次エネルギー自給率は、2021 年において 13.3%（注）で、OECD（経済協力開発機構）38 か国中 37 位と低い水準となっている（図表 1-2）。2010 年度は 20.2%であったが、東日本大震災後に原子力発電所の稼働が停止したことなどで自給率は大幅に下がった。近年は原子力発電所の再稼働や再生可能エネルギー（以下、再エネ）の導入拡大などにより、少しずつ上昇傾向にあるが、まだまだ震災前の水準には届いていない。

（注）2023 年度速報値では 15.2%となっている（資源エネルギー庁、後述）。



図表 1-2 主要国の一次エネルギー自給率比較 (2021 年)

出典：資源エネルギー庁、前掲

(3) 火力発電への過度な依存

日本のエネルギー消費は石油への依存度が高く、1970 年代の石油ショックで日本社会は大きな影響を受けた。その頃から原子力発電の割合を増やし、化石燃料依存度を減らそうとし、原子力発電は一時期電力供給の 30% 程度にまでになったが、福島第一原発事故の影響で一時期全原発が運転停止の状態となった。電力会社は休止中の火力発電所再開等の対応を行い、化石燃料による火力発電の割合が一時期 90% 近くにまで高まった(図表 1-3)。

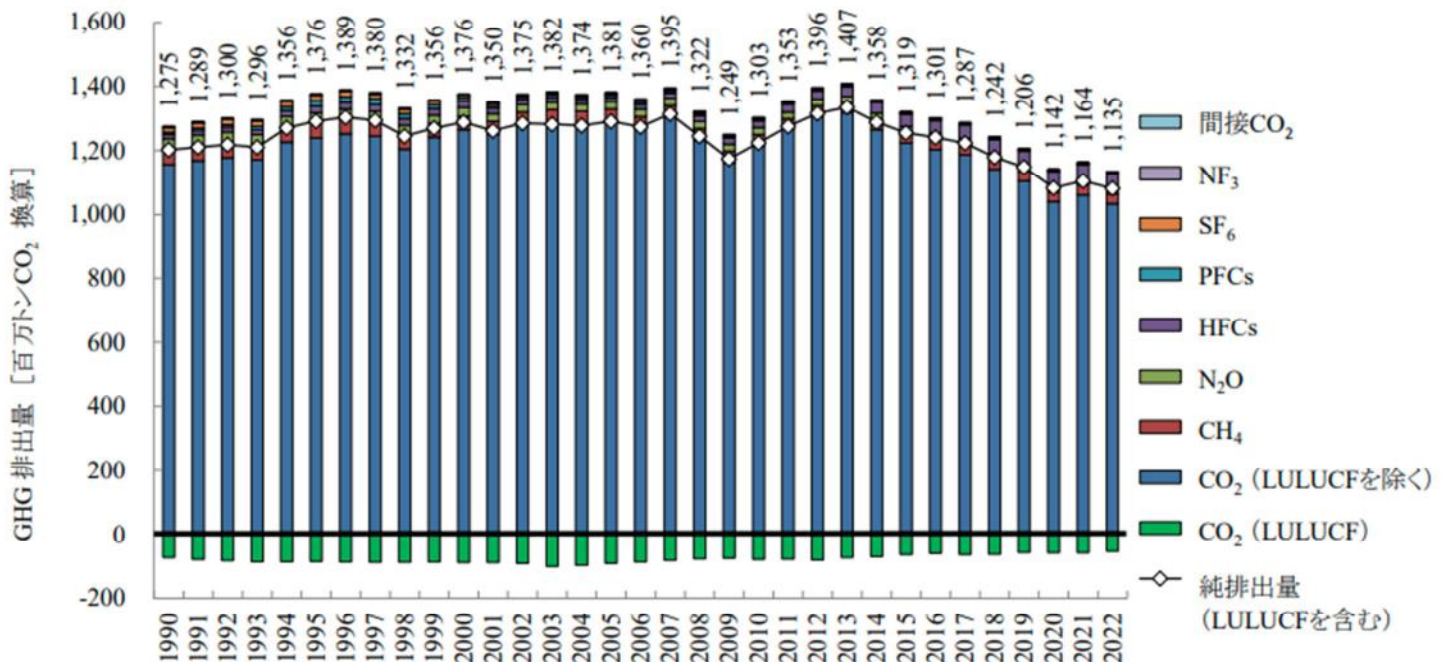


図表 1-3 震災による火力発電依存度の急増 (2010 年と 2012 年の比較)

出典：資源エネルギー庁 (赤字加筆)

(4) 温室効果ガスの排出

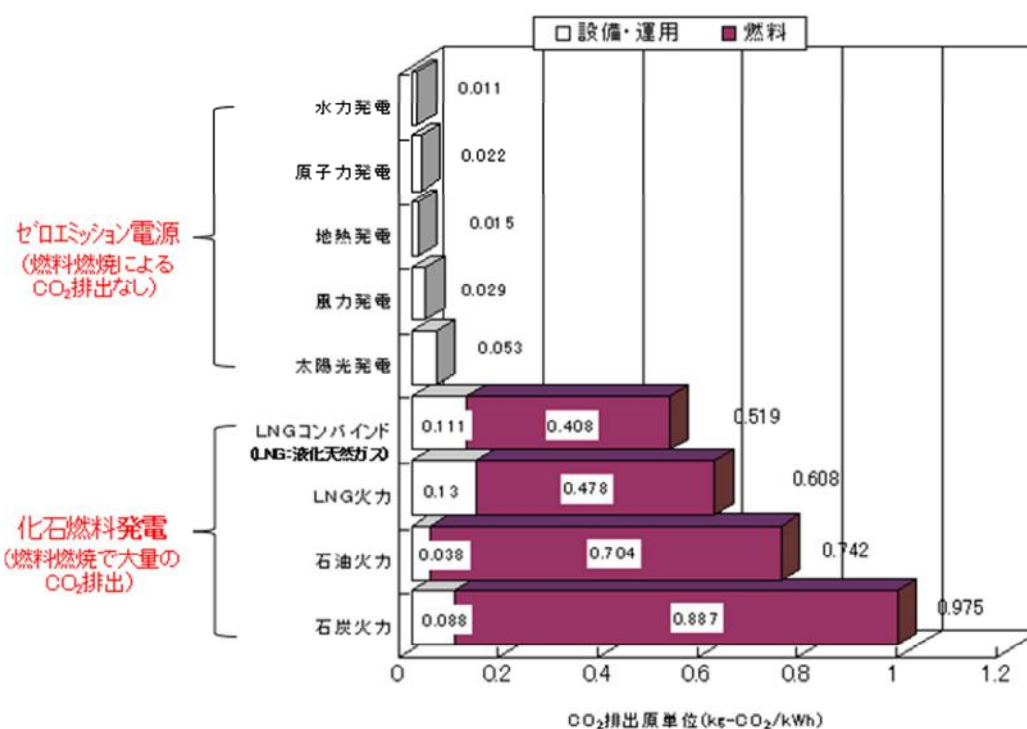
2022年度の日本の温室効果ガス排出量は、11.35億トン（CO₂換算、以下同）で、2013年度の排出量14.07億トンに比べ約19%（2.72億トン）減少した（図表1-4）。これはエネルギー消費量の減少（省エネ等）や、電力の低炭素化（再エネの拡大等）による電力由来のCO₂排出量の減少が主要因とされている。



図表1-4 日本の温室効果ガス排出量及び吸収量の推移

出典：国立環境研究所、<https://www.env.go.jp/content/000226851.pdf>

今後「2050年カーボンニュートラル」（後述）に向けてさらに大幅な排出量削減を図るべく、電源構成をゼロエミッション電源（再エネによる発電と原子力発電等）に移行していく必要がある（図表1-5）。



図表 1-5 発電システム別 CO₂ 排出量
出典：財団法人電力中央研究所（赤字加筆）

1.2 エネルギー基本計画～推移と現行計画

(1) 震災前の計画（2010 年 6 月）

2002 年 6 月に「エネルギー政策基本法」が成立し、「エネルギー基本計画」が策定された。その後、改訂により現在は第 6 次計画となっている。

東日本大震災前の 2010 年 6 月計画では、ゼロエミッション電源を 34%から 2030 年までに約 70%にまで倍増させ、そのための取り組みとして原子力発電推進を掲げ、2030 年までに少なくとも 14 基の原子力発電所を新增設するとともに、稼働率を 90%に上げるにより、全電力中の割合を 50%に高めることとしていた(図表 1-6)。

2030年に向けた目標	現状(2009年)	2030年目標
自主エネルギー比率を倍増 (自主開発権益・原子力含む)	38%	70%
ゼロエミッション電源比率を倍増	34%	70%
目標実現のための取組	現状(2009年)	2030年目標
原発推進	—	14基新增設
同 稼働率向上	65%	90%
同 全電力中の割合	25%	50%
再エネ導入拡大 再エネ割合	数%	20%

図表 1-6 エネルギー基本計画（2010 年 6 月）の概要
出典：資源エネルギー庁資料から作成

(2) 第6次エネルギー基本計画（2021年10月）

前記計画は2011年3月11日の東日本大震災とそれに伴う福島第一原発事故により大幅に見直され、2015年、2018年計画では、2030年における原子力の目標割合は20～22%とされた。

さらに「2050年カーボンニュートラル」（後述）宣言後の2021年10月22日に正式決定された第6次エネルギー基本計画でも、再エネを2019年実績18%から36～38%に倍増する一方、原子力は20～22%に据え置かれている。この計画により、2030年にゼロエミッション電源割合を2019年実績の24%から約59%に、温室効果ガス削減割合を14%（2013年比）から46～50%にするとしている（図表1-7）。

電源構成	現状 (2019年実績)	2030年目標	
		2015・2018年計画	今回の計画案
再生可能エネルギー	18%	22～24%	36～38%
水素・アンモニア	0%	0%	1%
原子力	6%	20～22%	20～22%
ゼロエミッション 電源割合	24%	約44%	約59%
化石燃料電源割合 (LNG、石炭、石油等)	76%	56%	41%
温室効果ガス削減割合 (2013年比)	▲14%	▲25%	▲46～50%

図表 1-7 第6次エネルギー基本計画（2021年10月）の概要

出典：資源エネルギー庁資料から作成

(3) 第7次エネルギー基本計画（現行）

出典：経済産業省

「第7次エネルギー基本計画が閣議決定されました」, 2025. 2. 18

<https://www.meti.go.jp/press/2024/02/20250218001/20250218001.html>

「第7次エネルギー基本計画の概要」、2025年2月

<https://www.meti.go.jp/press/2024/02/20250218001/20250218001-2.pdf>

政府は2024年12月17日、第7次基本計画の原案を提示し、パブリックコメント等を経て2025年2月18日、閣議決定した。第6次計画以降の下記状況変化を勘案し、2023年（速報値）の日本の電源構成に対する2024年度（見通し）を示している。

- ・ロシアによるウクライナ侵略や中東情勢の緊迫化などの経済安全保障上の要請が高まる。
- ・DXやGXの進展に伴う電力需要増加が見込まれる。
- ・各国がカーボンニュートラルに向けた野心的な目標を維持しつつも、多様かつ現実的なアプローチを拡大。
- ・エネルギー安定供給や脱炭素化に向けたエネルギー構造転換を、経済成長につなげるための産業政策が強化されている。

再生可能エネルギーを2023年度（速報値）「22.9%」から2040年度（見通し）「4～5割程度」に、原子力を「8.5%」から「2割程度」とし、温室効果ガス削減割合（2013年度比）を「22.9%」から「73%」とするとしている（図表1-8、1-9）。

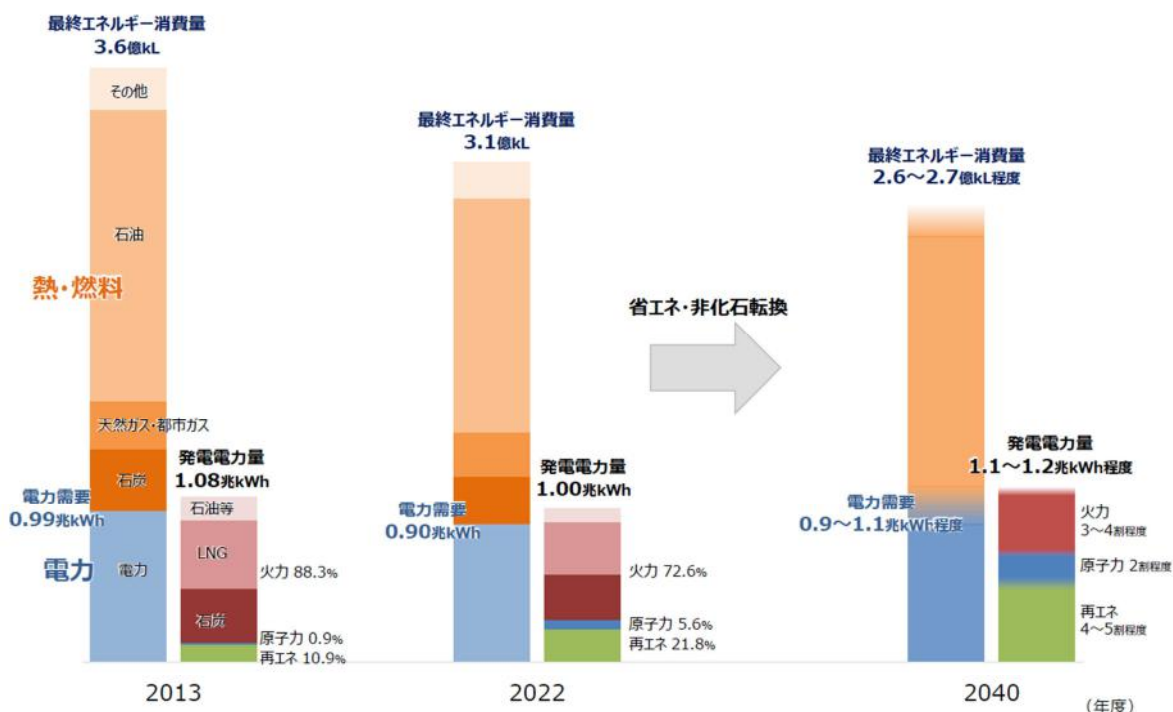
- 2040年度エネルギー需給の見通しは、諸外国における分析手法も参考としながら、**様々な不確実性が存在することを念頭に、複数のシナリオを用いた一定の幅として提示。**

	2023年度 （速報値）	2040年度 （見通し）
エネルギー自給率	15.2%	3～4割程度
発電電力量	9854億kWh	1.1～1.2兆kWh程度
電源構成	22.9%	4～5割程度
再エネ		
太陽光	9.8%	23～29%程度
風力	1.1%	4～8%程度
水力	7.6%	8～10%程度
地熱	0.3%	1～2%程度
バイオマス	4.1%	5～6%程度
原子力	8.5%	2割程度
火力	68.6%	3～4割程度
最終エネルギー消費量	3.0億kL	2.6～2.7億kL程度
温室効果ガス削減割合 （2013年度比）	22.9% ※2022年度実績	73%

（参考）新たなエネルギー需給見通しでは、2040年度73%削減実現に至る場合に加え、実現に至らないシナリオ（61%削減）も参考値として提示。73%削減に至る場合の2040年度における天然ガスの一次エネルギー供給量は5300～6100万トン程度だが、61%削減シナリオでは7400万トン程度の見通し。

図表 1-8 2040 年度におけるエネルギー需給の見通し

出典：経済産業省、前掲



図表 1-9 エネルギー需給の見通し（イメージ）

出典：経済産業省、前掲

原子力の2040年見通しは「2割程度」と第6次の「20～22%」とほぼ同レベルとなっているが、下記のとおり原子力発電所の持続的活用に加え、次世代革新炉（高温ガス炉を含む）の研究開発に関する方針が記述されている（経済産業省、前掲）。

6. 脱炭素電源の拡大と系統整備（続き）

<原子力>

- 原子力は、優れた**安定供給性、技術自給率**を有し、**他電源と遜色ないコスト水準**で変動も少なく、また、**一定出力で安定的に発電可能**等の特長を有する。こうした特性は**データセンターや半導体工場等の新たな需要ニーズにも合致**することも踏まえ、国民からの信頼確保に努め、安全性の確保を大前提に、必要な規模を持続的に活用していく。
- **立地地域との共生に向けた政策や国民各層とのコミュニケーションの深化・充実、核燃料サイクル・廃炉・最終処分**といった**バックエンドプロセスの加速化**を進める。
- 再稼働については、安全性の確保を大前提に、**産業界の連携、国が前面に立った理解活動、原子力防災対策等、再稼働の加速に向け官民を挙げて取り組む**。
- 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・設置**については、地域の産業や雇用の維持・発展に寄与し、地域の理解が得られるものに限り、**廃炉を決定した原子力発電所を有する事業者の原子力発電所のサイト内での次世代革新炉への建て替え**を対象として、六ヶ所再処理工場の竣工等の**バックエンド問題の進展も踏まえつつ具体化を進めていく**。その他の開発などは、各地域における再稼働状況や理解確保等の進展等、今後の状況を踏まえて検討していく。
- **次世代革新炉（革新軽水炉・小型軽水炉・高速炉・高温ガス炉・フュージョンエネルギー）の研究開発等**を進めるとともに、**サプライチェーン・人材の維持・強化**に取り組む。

2. 脱炭素化の動き

2.1 2050 年カーボンニュートラル

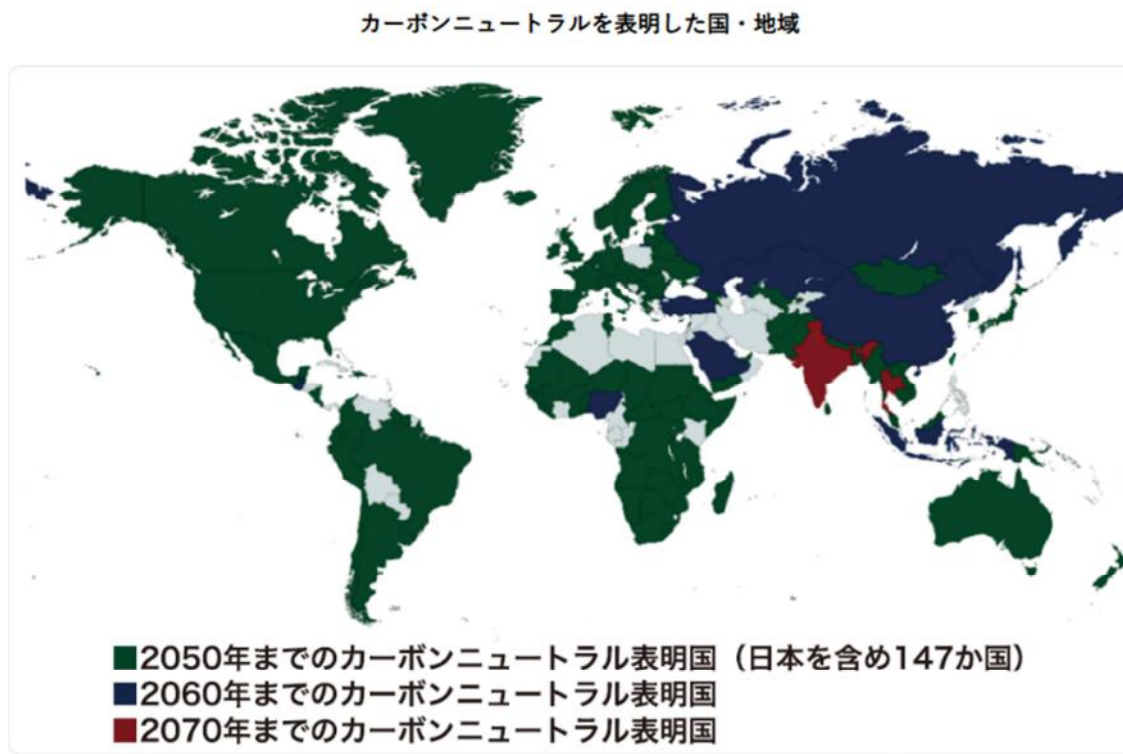
(1) 世界に向けて宣言

2020 年 10 月 26 日、菅義偉首相（当時）は就任後初の所信表明演説において「2050 年までに温室効果ガスの排出を実質ゼロ（備考参照）にする」と宣言した（「2050 年カーボンニュートラル」）。また 11 月に行われた G20 リヤド・サミット（TV 会議形式）でも表明して国際公約した。コロナ禍からの復興を目指す世界的潮流「グリーンリカバリー」の流れに沿ったもので、温暖化対策を成長の制約でなくチャンスと位置付けている。

（備考）排出分から吸収分（森林吸収、バイオマス活用、CCS 等）を差し引くこと

政府は引き続き 2050 年カーボンニュートラルの実行計画の一環として、12 月 5 日、コロナ対策や脱炭素などに向けた研究・開発を支援する 2 兆円の「グリーンイノベーション基金」創設を表明、同年 12 月 25 日、2050 年カーボンニュートラルに向けた行動計画として「グリーン成長戦略」（次項参照）を公表した。さらに 2021 年 4 月には「パリ協定」での温室効果ガス削減目標を従来の 26% から 46% に引き上げた。

なおカーボンニュートラルを表明した国・地域は 147 か国・地域以上、世界全体の CO₂ 排出量に占める割合は 40%（2020 年実績）を占め、2060 年及び 2070 年を含めると 90% となる（図表 2-1）。

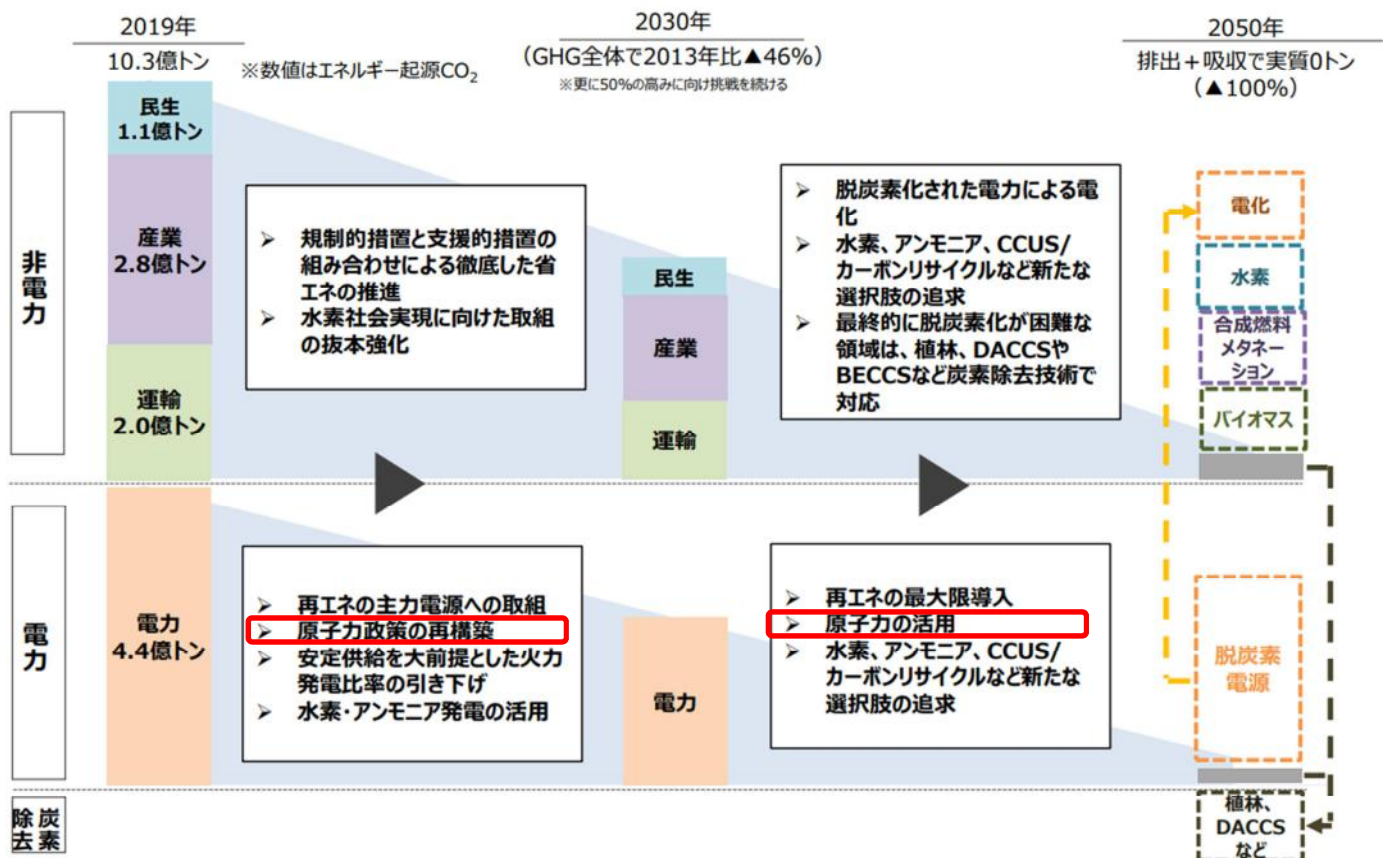


図表 2-1 カーボンニュートラルを表明した国・地域

出典：資源エネルギー庁、前掲

(2) 2050 年カーボンニュートラル実現のイメージ

カーボン排出を電力部門と非電力部門に分け、2019 年の排出量 10.3 億トンを 2030 年までに温室効果ガス全体で 2013 年比▲46%、2050 年に排出+吸収で実質 0 トンとしている。電力部門は電源構成を脱炭素電源とし、一部発生する CO₂ 排出を森林吸収や DACCS（Direct Air Capture with Carbon Storage：大気中に存在する CO₂ を直接回収して貯留する技術）などで打ち消すこととしている。



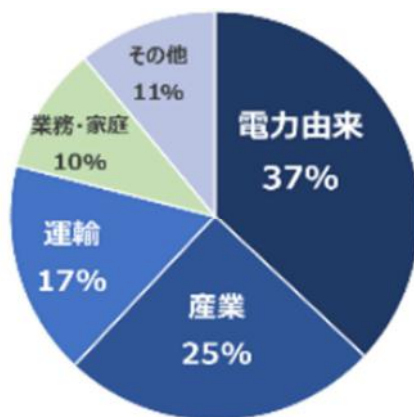
図表 2-2 2050 年カーボンニュートラル実現のイメージ

出典：経済産業省、2020. 6. 18、「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」(赤枠追記)

2.2 グリーン成長戦略

(1) 電力部門の脱炭素化

「グリーン成長戦略」は電力部門の脱炭素化を大前提としている。「現在の技術水準を前提とすれば全ての電力需要を 100%単一種類の電源で賄うことは一般的に困難で、再エネ、水素発電、火力+CO₂吸収、原子力を含めてあらゆる選択肢を追求する」としている。

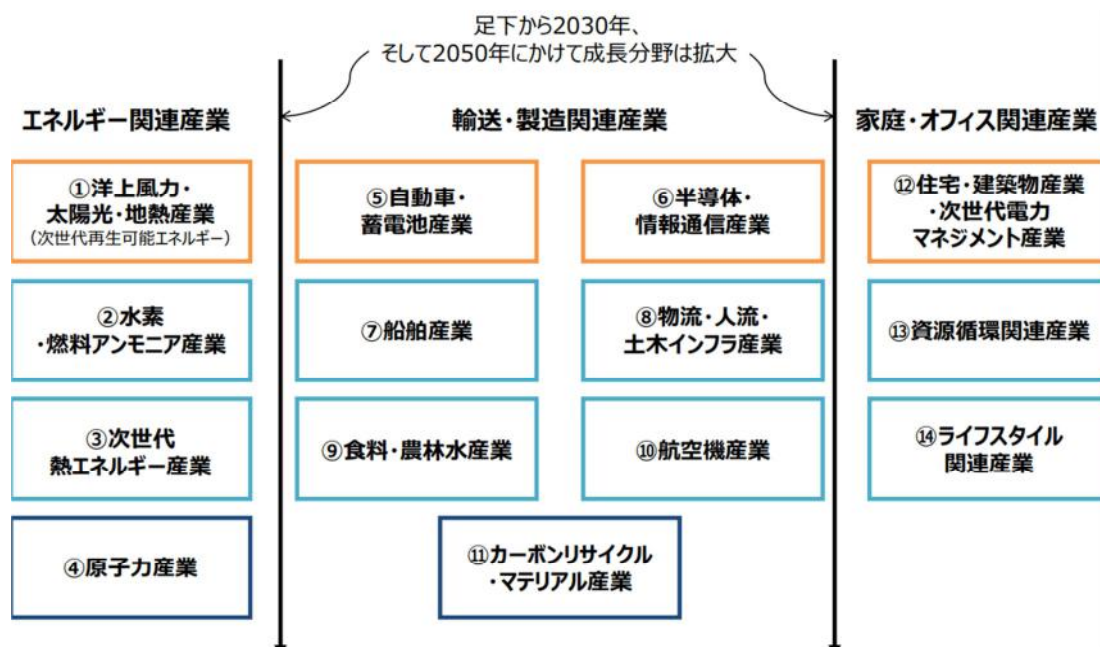


図表 2-3 CO₂の部門別排出割合

出典：経済産業省、前掲

(2) 成長を期待される 14 分野

図表 2-4 に示す 14 分野が「成長を期待される分野」とされ、④として原子力産業が掲げられている。



図表 2-4 「グリーン成長戦略」において成長が期待される 14 分野

出典：経済産業省、前掲

2.3 高温ガス炉の位置付け（前掲 経済産業省、グリーン成長戦略（概要）より抜粋）

前項で述べた「原子力産業」についての実行計画及び工程表を図表 2-5、2-6 に示す。
高温ガス炉については、

「2030 年までに高温ガス炉における水素製造に係る要素技術を確立する」

とし、その方策として

「JAEA が保有する高温工学試験研究炉（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推進。」

としている。

2.4 原子力政策の転換

出典：首相官邸ホームページ及び各種報道をもとに作成

2022 年 8 月 24 日、岸田文雄首相は首相官邸で開いた「GX トランスフォーメーション 実行会議」にて原子力発電の本格活用に向けた新たな方針を示した。

- ・原子力発電所の新增設を検討
- ・最長 60 年の運転期限の延長を検討
- ・東京電力柏崎刈羽原子力発電所など 7 基の再稼働を目指す

2011 年の福島第一原子力発電所の事故以来、歴代政府は原子力発電を「重要なベースロード電源」と位置付けるとしつつ、「原子力への依存度の低減」、「原子力発電所の建替や新增設は想定してしない」との方針を掲げてきたが、この方針を大きく転換するものである。この背景として首相は、以下のとおり述べている。

- ・エネルギー安定供給の再構築は GX 実現の大前提である。
- ・ロシアによるウクライナ侵攻で世界のエネルギー事情が一変し、グローバルなエネルギー需給構造に大きな地殻変動が起こっている。
- ・再エネや原子力は GX を進める上で不可欠な脱炭素エネルギーである。
- ・今後の危機ケースも念頭に、足元の危機克服と GX 推進を両立させなければならない。

首相は原子力発電所の運転期間延長と並んで次世代型原発の開発・建設について検討を加速するよう指示している。これを受けた原子力産業の実行計画（図表 2-5）、同 工程表（図表 2-6）を示す。

④原子力産業

- ◆ 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、現実的なスケールの高速炉の運転開始を期待。それに向けて、2023年度末頃までは多様な技術間競争を促進。<u>日仏、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"> 建設・運転・保守経験で培われたデータ、施設を最大限活用。「常陽」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海外の実証プロジェクトと連携した日本企業の取組に対し、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。 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、脱炭素技術であるSMRの安全性の実証に貢献。<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。
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"> 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)。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"> 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。 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>に向けた他国関連機関との協力を推進。
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"> プラズマ制御技術の高度化に向けた試験実施。 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。 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主要機器の実証と、出力の長時間維持技術を確立。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。

図表 2-5 「グリーン成長戦略」における原子力産業に関する実行計画 出典：経済産業省、前掲（青枠追記）

④原子力産業の 成長戦略「工程表」

●導入フェーズ：

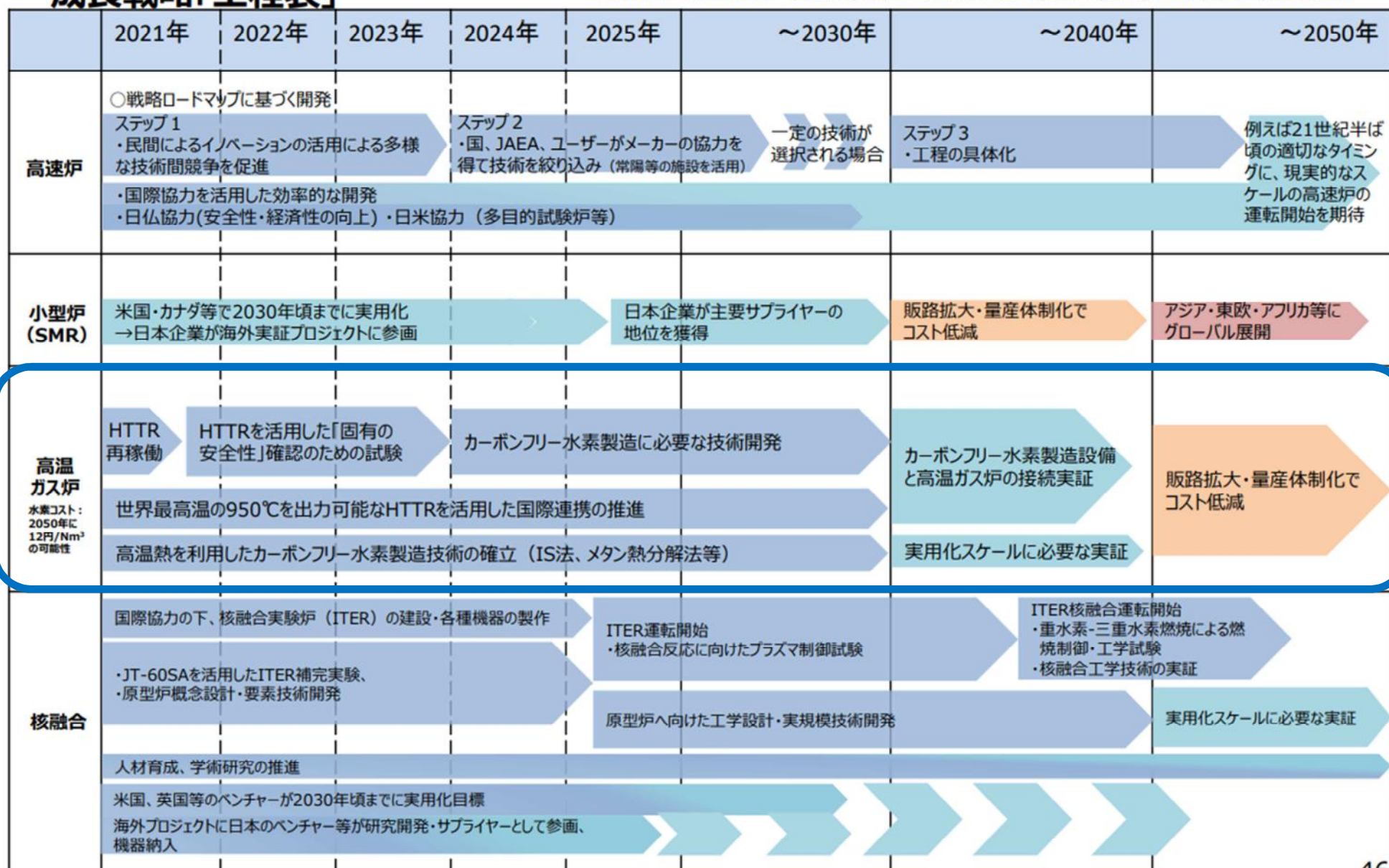
1. 開発フェーズ

2. 実証フェーズ

3. 導入拡大・
コスト低減フェーズ

4. 自立商用フェーズ

●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



図表 2-6 「グリーン成長戦略」における原子力産業に関する工程表 出典：経済産業省、前掲（青梓追記）

2.5 米国「パリ協定」離脱通告

出典:各種報道資料より作成

トランプ米新政権は、2025 年 1 月 27 日、地球温暖化対策の国際的枠組み「パリ協定」からの離脱を国連に通告した。規定に基づき正式な離脱日は 2026 年 1 月 27 日となる。また大統領令により途上国への資金拠出も中止・撤回するように命じた。

パリ協定は世界最大の排出国である中国、第 2 位の米国を含めて地球上のほぼ全ての国・地域が参加する国際的枠組み。トランプ大統領は第 1 次政権時も離脱を通告しているが、当時の規定で正式離脱はバイデン政権への移行 3 か月前となり、バイデン前大統領が就任即日パリ協定へ復帰したため、実質的な影響はなかったとされる。今回は任期が 3 年残り、世界の気候変動対策の流れにどのように影響を与えるかが注目される。

3. 日本の高温ガス炉開発状況

3.1 HTTR の再稼働と安全性実証試験

出典：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下「JAEA」）、「高温ガス炉と水素・熱利用研究」 <https://www.jaea.go.jp/04/o-arai/nhc/jp/faq/>

(1) 高温ガス炉とは

高温ガス炉は、セラミックス（炭素や炭化ケイ素）で被覆した粒子状燃料用い、冷却材として不活性なヘリウムガスを、減速材として黒鉛を使用することにより、超高温の熱エネルギーを取り出すことができる原子炉である。

高温ガス炉は次のような固有の安全特性を備えている。

- ・燃料の耐熱温度が高い。500 時間を超える長時間で約 1,600℃、短時間であれば 2,000℃を超えても核分裂生成物（FP）の保持機能が損なわれることはない。
- ・炉心構造物（黒鉛）の耐熱温度が高く、炉心溶融の恐れがない。
- ・黒鉛ブロックで構成される炉心は熱容量が大きく、異常時、事故時の温度挙動が緩慢である。
- ・冷却材ヘリウムの漏洩等により冷却機能喪失が生じた場合にも、熱容量の大きい黒鉛減速材が熱溜めとなるため、燃料温度の急激な上昇がない。
- ・炉心は全運転範囲において大きな負の反応速度係数を持ち、炉心温度が上昇した場合、反応度温度フィードバックにより自然炉停止特性、出力自己制御性が得られる。

また電力供給に加えて熱供給の利用が期待され、さらに水素製造に結び付くことから、「グリーン成長戦略」において有力な次世代炉の一つとして期待されている。

(2) HTTR の概要

HTTR（高温工学試験研究炉）は、日本初かつ唯一の高温ガス炉で、1998 年 11 月 10 日に初臨界を達成し、その後 2004 年 4 月 19 日に定格熱出力 30MW において原子炉出口冷却材温度 950℃を世界で初めて達成し、さらに 2010 年 1 月～3 月、50 日間の高温連続運転を完遂した。これらにより次世代超高温ガス炉の設計や運転保守のためのデータを取得・蓄積している。

(3) HTTR の仕様

原子炉出力：30MW

1 次冷却材：ヘリウムガス

原子炉入口／出口冷却材温度：395／850, 950℃

1 次冷却材圧力：4MPa

炉心構造物：黒鉛

炉心有効高さ／等価直径：2.9m／2.3m

出力密度：2.5MW/m³

燃料：二酸化ウラン・被覆粒子／黒鉛分散型

燃料体形式：ピン・イン・ブロック型

原子炉圧力容器：2・1/4Cr-1Mo 鋼

HTTR（高温工学試験研究炉）概要

別紙2



原子炉出力	30 MW
原子炉出口温度	950℃（最高）
1次冷却材	ヘリウム
1次冷却材圧力	4.0 MPa
出力密度	2.5 W/cc
燃料濃縮度	6%（平均）



設置場所：大洗研究所（茨城県大洗町）

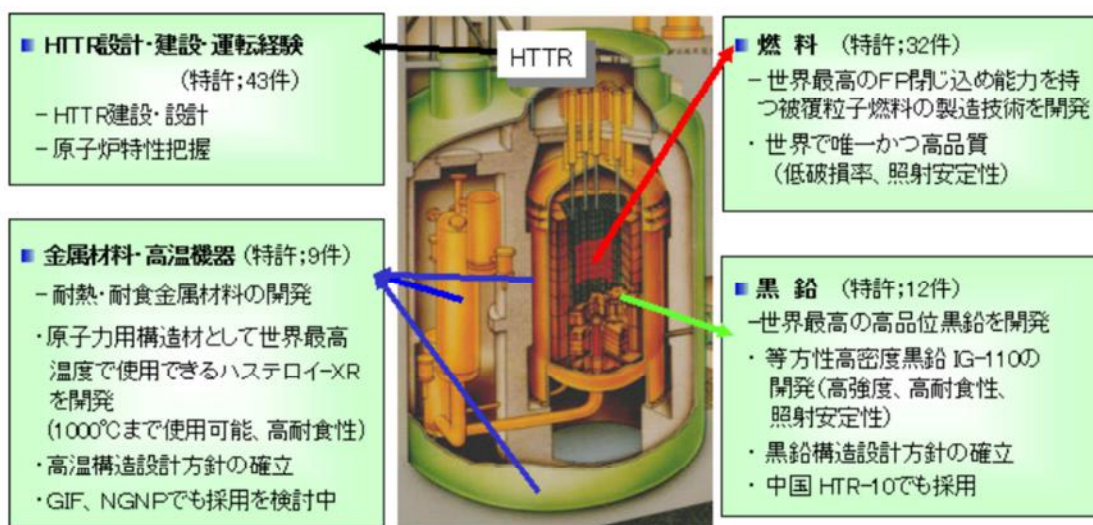
図表 3-1 HTTR の構造

出典：日本原子力研究開発機構、前掲

(4) HTTR に関する技術開発

高温ガス炉に関する主要基盤技術は国内のメーカーと共同して開発した。

- ・燃料：世界最高の核分裂生成物 (FP) 閉じ込め性能を有する被覆粒子燃料製造技術を開発した。このような高品質の被覆燃料粒子を工場規模で生産できるのは日本だけ。
- ・黒鉛：等方性で不純物の少ない品質のよい黒鉛 IG-110 を開発し、黒鉛構造設計方針を確立した。HTTR の他に中国の高温ガス炉 HTR-10 でも使用されている。
- ・金属材料：熱交換器の伝熱管や冷却配管の高温部で 1,000℃まで使用可能なハステロイ-XR を開発し、高温構造設計方針を確立した。



(特許;公開数)

図表 3-2 HTTR による技術開発及び特許数

出典：日本原子力研究開発機構、前掲

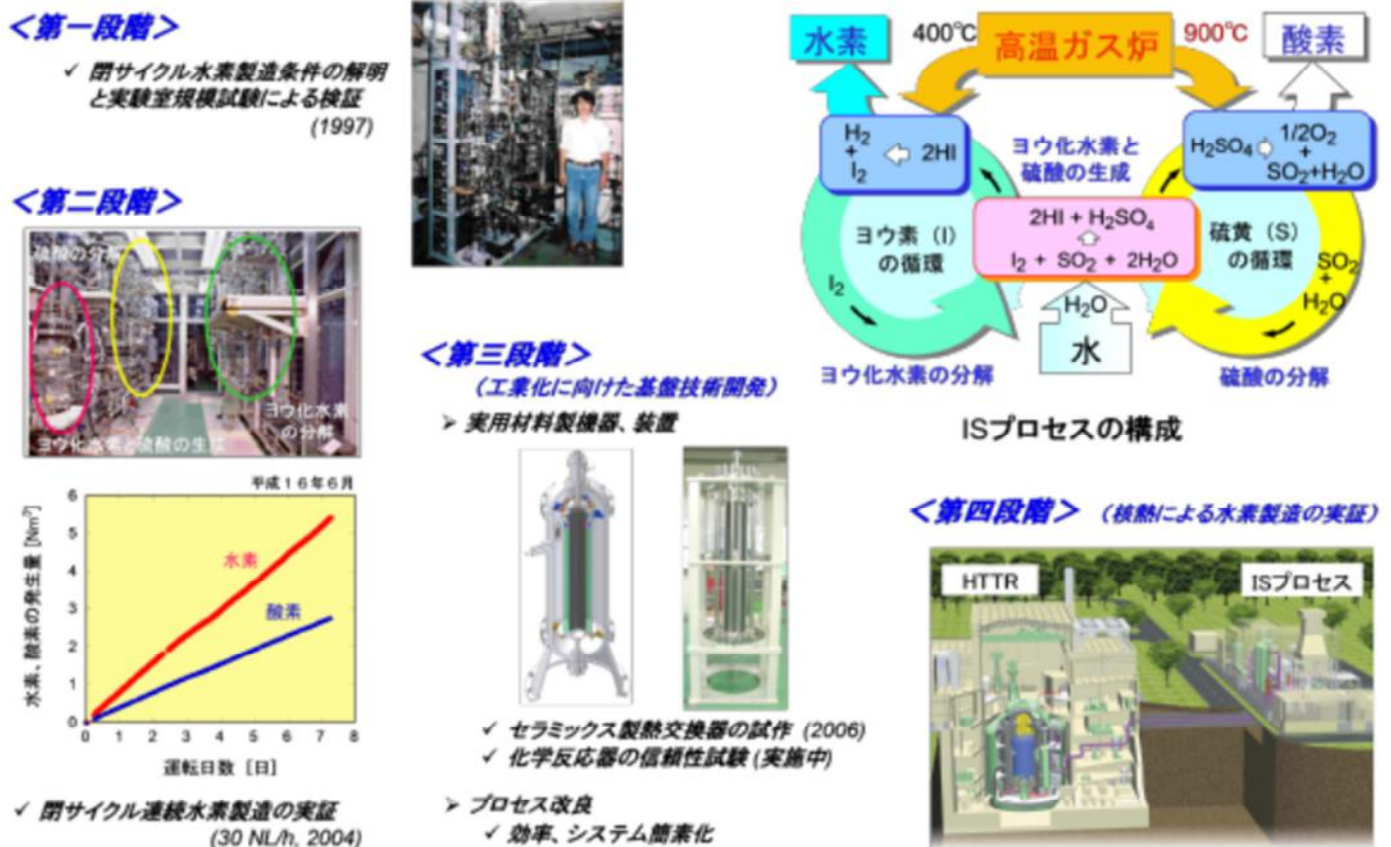
(5) IS プロセスによる水素製造技術開発

出典：日本原子力研究開発機構-ATOMICA

https://atomica.jaea.go.jp/dic/detail/dic_detail_1726.html

IS プロセスとは熱化学分解法の一つ。複数の化学反応を組み合わせることによって、直接熱分解に必要な温度よりも低温（800～1,000℃）の熱のみで、水を水素と酸素に分解する化学プロセスである。プロセスの循環物質にヨウ素（iodine）と硫黄（sulfur）化合物を使用するので IS プロセスという。熱化学分解法による水素製造の特徴は、原料に水のみを使用し、化石燃料使用のように炭素ガスを排出しないことである。日本原子力開発機構において高温ガス炉からの核熱エネルギーを利用して、IS プロセスによる水素製造研究が行われている。

日本原子力研究開発機構では、2004 年 6 月、工学基礎試験装置（ガラス製、電気ヒータの熱を利用）を用い、世界で初めて水素発生量毎時 30 リットル規模で約 1 週間の連続水素製造を達成した。さらに第三段階として、工業化に向けた基盤技術開発を実施し、第 4 段階の核熱による水素製造の実証を行うこととしている。



図表 3-3 日本原子力研究開発機構における IS プロセスの研究開発

出典：日本原子力研究開発機構、前掲

(6) HTTR の運転休止と再稼働

HTTR は 2011 年 2 月に定期検査のため運転を停止し、2014 年に原子炉設置変更許可を原子力規制委員会に申請した。2020 年 6 月に許可取得、保安規定について 2021 年 4 月

に認可取得、設工認可を4段階に分けて認可取得、使用前事業者検査を同年7月2日に完了させ、7月30日に運転を再開し、同日臨界に達した。2011年1月以来約11年半ぶりの運転開始となる。

2021年9月22日、定期事業者検査合格、2014年11月26日に行った新規制基準対応に係る原子炉設置変更許可の申請以降、約7年間に及ぶ新規制基準対応を完了、HTTRを用いた高温ガス炉の研究開発を本格的に再開した。

再開後、2024年（令和6年）にはOECD/NEA（経済協力開発機構／原子力機関）の7か国（日本、米、仏、独、韓、チェコ、ハンガリー）国際共同試験である安全性実証試験を実施した（後述）。

(7) 「グリーン成長戦略」に伴う試験計画

前出図表2-5において、高温ガス炉の実行計画として下記のとおり定められており、日本原子力研究開発機構はこれに沿った試験計画を策定、実施していくこととしている。

- ・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。
- ・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。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。
- ・日本の規格基準普及に向けた他国関連機関との協力を推進。

(8) 安全性実証試験に成功

2024年（令和6年）3月28日付 JAEA 発表資料より転載

<https://www.jaea.go.jp/02/press2023/p24032801/>

HTTR（高温工学試験研究炉）における安全性実証試験に成功 —高温ガス炉固有の安全性を確認—

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（理事長 小口正範）は、大洗研究所に設置されているHTTR（高温工学試験研究炉）を用いて、高温ガス炉（ブロック型※1）として世界で初めて、事故時においても炉心溶融がおきないことを実証する安全性実証試験「炉心流量喪失試験※2」に成功しました。試験は令和6年3月27日（水）から28日（木）10時にかけて実施し、原子炉出力100%の運転中に原子炉を冷却できない状況を引き起こしても、自然に原子炉出力が低下し、安定な状態を維持することを確認しました。

この試験により原理的に炉心溶融が起きない高温ガス炉固有の安全性※3を証明し、高温ガス炉の社会実装に向けた大きな一歩を踏み出しました。

原子力機構では、本プロジェクトを通じて高温ガス炉の固有の安全性を示し、安全上の特徴を反映した安全基準の国際標準化を進めるとともに、我が国の高温ガス炉技術の国際競争力強化に貢献していきます。

引き続き、安全確保を最優先に、HTTRの運転を慎重に進めてまいる所存です。

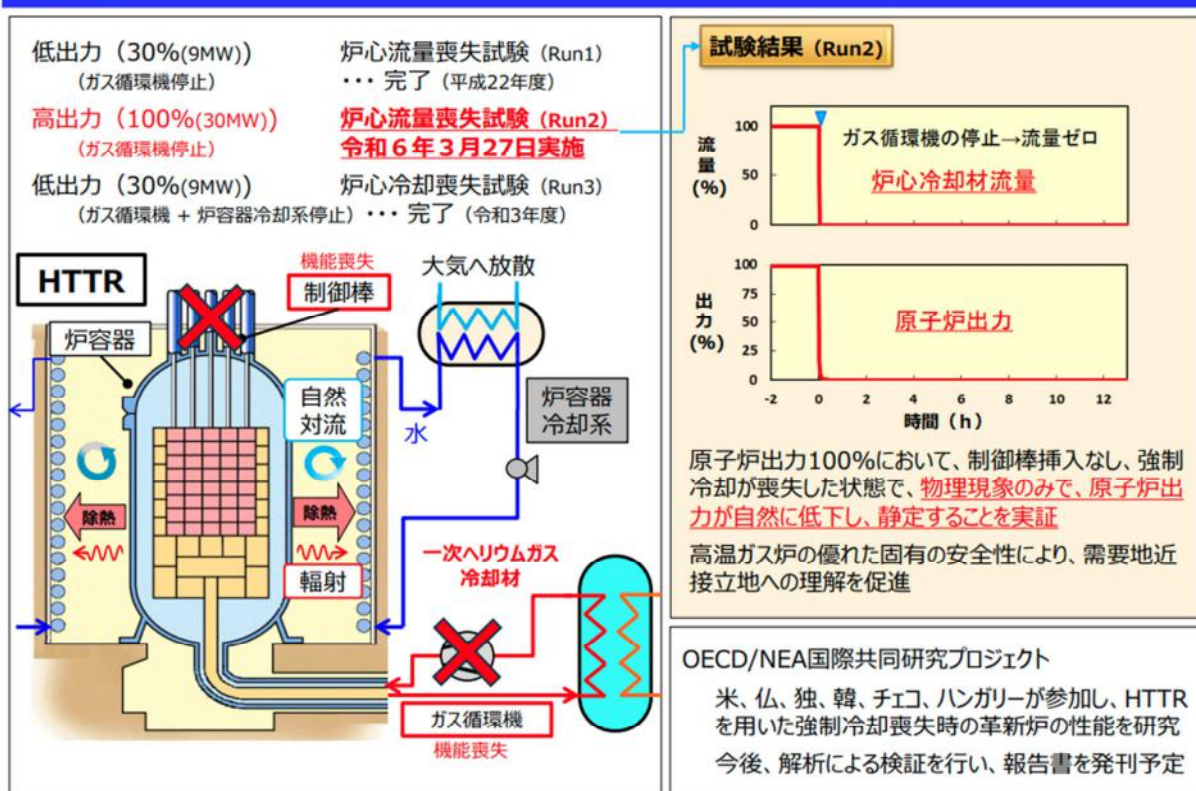
※1 高温ガス炉にはブロック型とペブルベッド型があり、HTTRはブロック型である。

- ※2 定格出力 100% (30MW) において、ヘリウム循環機を停止して強制冷却機能を喪失させ、かつ、制御棒による原子炉の停止ができない状態においても、物理現象のみで原子炉の出力が低下し、安定な状態を維持することを確認するための試験。OECD/NEA（経済協力開発機構/原子力機関）の国際共同研究プロジェクトとして実施。（別紙 1、別紙 2 参照）
- ※3 高温ガス炉は、炉心には高温に耐える黒鉛を使用。炉心の熱容量（熱を貯めこむ能力）が大きく、万一の事故に際しても炉心温度の変化が緩やかで、燃料破損（炉心溶融）に至らないという高い固有の安全性を有している。



安全性実証試験の結果

別紙1



3.2 高温ガス炉における国際連携

(1) ポーランドへの技術協力

出典：JAEA2022/11/22 付プレス発表

<https://www.jaea.go.jp/02/press2022/p22112201/>

ポーランド政府は、脱炭素化に向けた石炭火力の代替として高温ガス炉を化学産業用の熱源として利用することを想定し、2020年代後半に高温ガス炉研究炉（熱出力 30MW）及び 2030 年代に商用高温ガス炉（熱出力 165MW）の導入を計画している。

2017年5月18日、日本政府とポーランド政府は、「2017年から2020年までの日本国政府とポーランド共和国政府との間の戦略的パートナーシップの実施のための行動計画」に署名した(備考参照)。この下で「高温ガス炉技術に関する協力のための覚書」を締結し、JAEAはポーランド国立原子力研究センター(以下「NCBJ」と、公開情報に基づく情報交換を実施、また2019年9月20日「高温ガス炉技術分野における研究開発協力のための実施取決め」を締結し、技術開発・人材育成を実施している。

(備考)2021年5月6日、「2021年から2025年までの日本国政府とポーランド共和国政府との間の戦略的パートナーシップの実施のための行動計画」として更新

2021年5月、ポーランド政府は高温ガス炉の研究開発を次の段階に進めることとし、NCBJは高温ガス炉研究炉の基本設計を開始した。NCBJはJAEAに協力を要請し、2022年11月22日、両機関間における既存の研究開発協力取決め(上記2019年9月20日付)の協力分野に、研究炉の基本設計を追加するなどの事項を加えた改定を両機関が署名した。今後もJAEAはNCBJへ協力し、ポーランド高温ガス炉研究炉の基本設計を通して高温工学試験研究炉(HTTR)の建設及び運転を通じて培った我が国の高温ガス炉技術のさらなる高度化、国際標準化を図る。

(2) 英国プロジェクトへの参画

出典：JAEA2022/9/5付、及び、2023/9/7付プレス発表

① 概要

英国政府は脱炭素化に向けた原子力利用の最有力候補として高温ガス炉に着目しており、「新型モジュール炉(AMR)研究開発・実証プログラム(以下「AMR RD&Dプログラム」)を進め、2030年代初頭までに高温ガス炉の実証につなげる予定。2050年までに二酸化炭素の排出量を実質ゼロにすることが法制化されており、二酸化炭素を排出しない原子力(大型軽水炉、小型軽水炉(SMR)、AMR)の導入／開発を重点化している。

2020年12月には、英国ビジネス・エネルギー・産業戦略省(以下、BEIS)が「グリーン産業革命のための10項目計画」に基づく「エネルギー白書」を発表し、SMR及びAMR導入の支援策を打ち出した。JAEAは英国国立原子力研究所(以下、NNL)と協力し、AMR RD&Dプログラムへの参画を通してHTTRの建設及び運転を通じて培った我が国の高温ガス炉技術の高度化と英国での実証を進め、国際標準化を図り、国際競争力の強化を目指す。

② 進捗状況

2022年9月から高温ガス炉実証炉プログラムを開始した。このプログラムは、フェーズA(事前概念検討、2023年2月終了)、フェーズB(基本設計、2025年終了予定)、フェーズC(許認可、建設、2030年代初期運転開始予定)と進められる。

(a) Phase A

2022年4月、BEISは、AMR RD&DプログラムPhase A(プレ概念設計)を実施する事業者の公募を開始し、JAEAは高温ガス炉技術分野において協力関係にある英国国立原子力研究所(以下、NNL)からの要請を受け、NNLチームの一員として(NNLチームは、NNL、JAEA及び英国企業(ロット1：Jacobs、ロット2：Urenco)の3社で構成)AMR

RD&D プログラムへ応募した。BEIS は、2022 年 9 月 2 日付で NNL チームがフェーズ A（予備調査）を行う実施事業者として採択されたことを公表した。

(b) Phase B

英国エネルギー安全保障・ネットゼロ省（DESNZ）は、2023 年 7 月 18 日付（現地時間）で NNL と JAEA のチームをフェーズ B の事業者として採択したことを発表した。同時に、フェーズ B に係る採択を踏まえ、「高温ガス炉技術に関する覚書」と「英国高温ガス炉実証プログラムの基本設計に係る実施覚書」を締結したことを公表した。

詳細は添付 1 参照：高温ガス炉プラント研究会第 19 回定期講演会（2025. 1. 20）における講演資料（講演者の許諾取得済、会員専用）。

添付 1 「高温ガス炉における国際連携」 2025. 1. 20

日本原子力研究開発機構 高温ガス炉プロジェクト推進室 坂場成昭

3. 3 日本の高温ガス炉実証炉開発事業

(1) 中核企業の選定

出典：資源エネルギー庁、2023/7/25 付

https://www.enecho.meti.go.jp/appli/public_offer_result/2023/data/0725_02.pdf

経済産業省は、2023 年度から開始する委託事業「高温ガス炉実証炉開発事業」において、中核企業（基本設計を実施するとともに将来的には製造・建設を担う事業者）を一般から募集した。

経済産業省資源エネルギー庁電力・ガス事業部原子力政策課は技術評価委員会を設置して選定審査を行い、中核企業として三菱重工業株式会社を選定した。三菱重工業は、今後、高温ガス炉実証炉の開発を推進し、資源エネルギー庁が 2030 年代の運転開始を目指す実証炉の建設に向け、研究開発および設計、建設まで一括して取りまとめる。

(2) 事業の概要

詳細は添付 2 参照：高温ガス炉プラント研究会第 19 回定期講演会（2025. 1. 20）における講演資料（講演者の許諾取得済、会員専用）。

添付 2 「我が国の高温ガス炉実証炉開発計画 原子力機構の取組」

日本原子力研究開発機構 高温ガス炉プロジェクト推進室 佐藤博之

中核企業である三菱重工業資料は下記リンク参照。

「水素製造に向けた高温ガス炉の開発」三菱重工技法 Vol. 61 No4（2024）
原子力特集

<https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/614/614090.pdf>

高温ガス炉における国際連携

2025.1.20

日本原子力研究開発機構
高温ガス炉プロジェクト推進室
坂場成昭

世界の高温ガス炉開発状況

<p>英国</p> 	<p>エネルギー安全保障・ネットゼロ省（DESNZ）による開発支援 （新型モジュール炉研究開発・実証プログラム、2022～）</p> <ul style="list-style-type: none"> • DESNZは、新型モジュール炉として高温ガス炉を選定し、2030年代初頭までに高温ガス炉を実証する計画 • 英国国立原子力研究所（NNL）原子力機構（JAEA）が参加するチームが、英国の高温ガス炉実証炉プログラムの基本設計を行う事業者として採択（2023.7） • NNLが、燃料開発プログラムの製造技術開発等を行う事業者として採択される（2023.7）。JAEAと連携し、英国における燃料製造技術を開発 • NNLとJAEAは、包括的な高温ガス炉技術に係る協力覚書及び英国高温ガス炉実証炉プログラムの基本設計に係る実施覚書を締結（2023.9）、燃料開発に係る実施覚書を締結（2024.4）
<p>米国</p> 	<p>エネルギー省（DOE）による開発支援 （新型炉実証プログラム（ARDP）、2020～）</p> <ul style="list-style-type: none"> • ～2028年に稼動する革新原子炉の建設を支援中 • DOEはARDPの助成金受給者のひとつにX-energy社（高温ガス炉）を選定 • X-energy社は、2030年までの運転開始を目指し、テキサス州のダウ社※の製造拠点に高温ガス炉（Xe-100：750℃、電気出力80MWe）を4基建設することを発表（2023.5） ※世界的な化学製品メーカー
<p>ポーランド</p> 	<p>ポーランド政府による高温ガス炉計画</p> <ul style="list-style-type: none"> • 国立原子力研究センター（NCBJ）は教育科学省から高温ガス炉研究炉の設計のための予算を獲得 • 高温ガス炉研究炉（HTGR-POLA：750℃、原子炉熱出力30MWt）の基本設計を開始（2021） • JAEAは、研究開発協力に基づき、ポーランドの高温ガス炉研究炉の基本設計を受託
<p>中国</p> 	<p>エネルギー技術創新“十三五”計画（能源技術創新“十三五”規画）</p> <ul style="list-style-type: none"> • 研究炉（HTR-10：700℃、熱出力10MWt）を用いた研究開発 • 実証炉（HTR-PM：750℃、電気出力210MWe）が運転中（2021.12 送電開始、2022.12 全出力運転開始、2023.12 商用運転開始） • 商用炉（HTR-PM600、HTR-PM600S：750℃）開発中
<p>日本</p> 	<p>経済産業省による高温ガス炉実証炉開発事業開始（2023）</p> <ul style="list-style-type: none"> • 超高温を利用した水素大量製造技術実証 • 高温ガス炉実証炉（～900℃）の設計・建設、要素技術の開発及び燃料製造などのサプライチェーン検討 • 技術評価委員会にて、三菱重工を中核企業として選定（2023.7）

中国：ペブルベッド型高温ガス冷却実証炉（HTR-PM）

概要

- 開発目的：実証炉の建設と産業化¹⁾
- 設置場所：山東省威海市石島湾
- 開発目標：熱出力250 MWt×2、冷却材出口温度750℃²⁾
- 開発経緯：「国家中長期科学技術発展規画綱要」（2006年国務院 公表）において、「国家重大特別プロジェクト」の1つに選定³⁾
- 「エネルギー技術創新“十三五”計画」（2016.12国家能源局 公表）の重点項目として、商業規模600 MW規模プラント（HTR-PM600）の普及を2016-2025に実現することを目標¹⁾
- 開発状況：商業運転中
原子力用黒鉛製造工場を建設開始（年産10万トン）（2012.4）⁴⁾
「方大炭素高温ガス炉原子力黒鉛総合研究センター」を設立（2013.2）⁵⁾
燃料製造ラインでペブル型燃料20万個製造（2017.7）⁶⁾

主要な組織²⁾

華能山東石島湾核電有限公司（国有企業）、
中核能源科技有限公司（合併会社）、清華大学

計画スケジュール^{7) 11)}

2017：炉内黒鉛構造物組立
2020：主冷却系圧力試験終了
2021：初臨界（9月、11月）、送電網接続（12月）
2023：商業運転開始（12月）

資金源

中国華能集团公司（国有企業）47.5%、
中国核工業建設集团公司（国有企業）32.5%及び
清華大学（政府機関）20%出資⁸⁾

- 総投資額は、約1,400億円¹⁰⁾

10) 2020.3.4 大衆日報（中国共産党山東省委員会の機関紙）

外国との連携状況

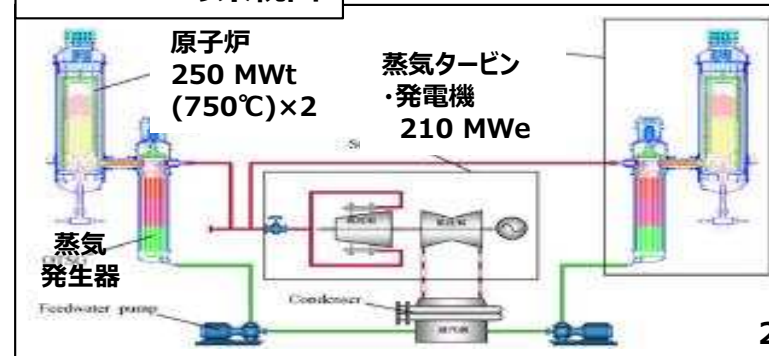
東洋炭素（株）（民間企業、日本）が黒鉛納入契約締結（2008）⁹⁾

1) 能源技術創新“十三五”規画、国家能源局、2016.12、2) Z. Zhang et al., Nuclear Engineering and Design, 239, 7, 1212-1219, 2009、3) 中国科学技術部、国家科技重大專項サイト(<http://www.nmp.gov.cn/zxjs/>)、4) 中国アルミニウムネットワークサイト、2012.4.16. (http://www.alu.cn/aluNews/NewsDisplay_788819.html)、5) 中国網サイト、2013.2.1. (<http://finance.china.com.cn/stock/20130201/1269241.shtml>)、6) 中国核能行業協会サイト、2017.7.18、7) 華能山東石島湾核電有限公司サイト、2016.11.7、8) 科学技術振興機構 中国総合研究交流センター、平成26年度版 中国の科学技術の現状と動向、2014、9) 住友商事(株)ニュースリリース、2008 (<http://www.sumitomocorp.co.jp/news/detail/id=26341>)、11) Fu LI, “Approach of Operational Startup for HTR-PM in China”, Virtual Side Event in IAEA 64th General Conference, 2020.9.24.



HTR-PM外観

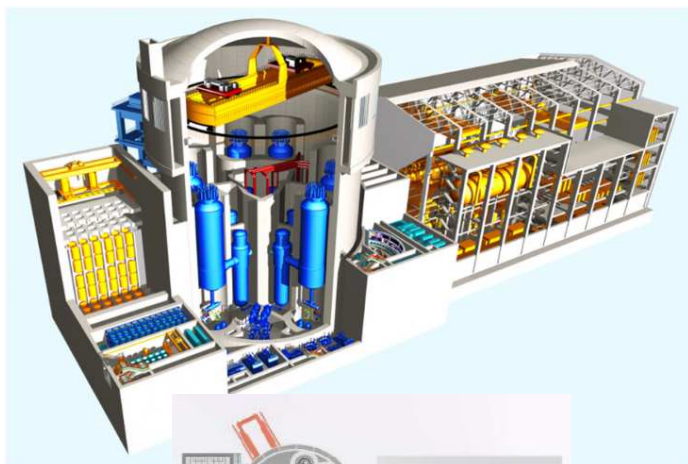
HTR-PMの系統図



HTR-PM600商用炉計画

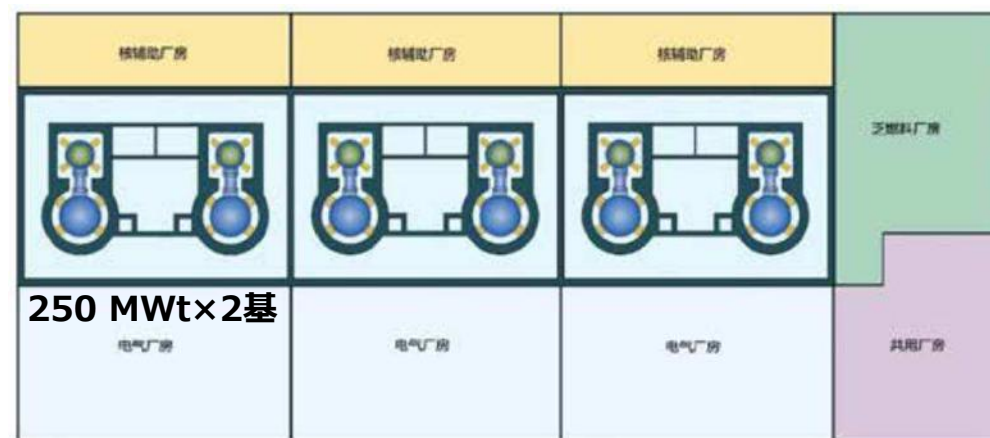
- 高温ガス炉プラント概念の構築 (6×250MWt)
- HTR-PMの250MWt技術に基づくモジュラー化
- コジェネレーション (高温蒸気生成、発電：HTR-PM600S)
- 固有安全性確認
- PWRとの経済的競合性確認 (目標：7 UScents/kWh)
- 政府出資30%、民間出資70% (R&Dは政府が100%出資)
- 中国国務院、HTR-PM600Sの建設 (江蘇省 徐圩原子力発電所) を承認 (2024.8)¹⁾

中国が独自開発した第3世代の加圧水型炉 (HPR1000) と第4世代の高温ガス炉 (HTR-PM600S) を連結した世界初の原子力発電所



蒸気タービン
250MWt×6基 : 680MWe

HTR-PM600

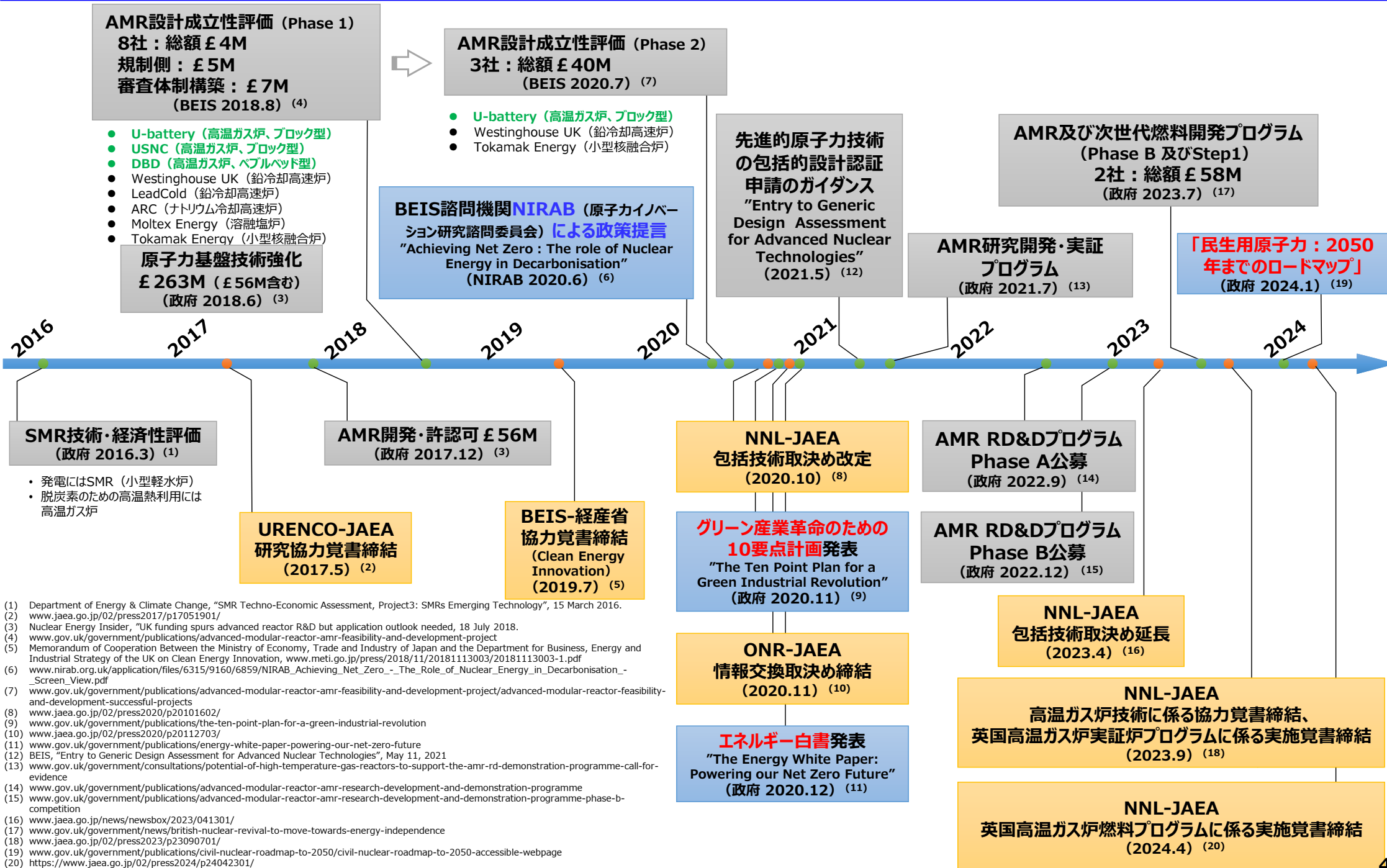


HTR-PM600S

(3つのHTR-PM原子炉建家のプラント構成と配置を最適化)

1) 原子力産業新聞、中国 大型炉11基の新設を承認、2024年8月28日。 URL : <https://www.jaif.or.jp/journal/oversea/24550.html>

英国におけるAMR・SMR開発・導入動向



(1) Department of Energy & Climate Change, "SMR Techno-Economic Assessment, Project3: SMRs Emerging Technology", 15 March 2016.
 (2) www.jaea.go.jp/02/press2017/p17051901/
 (3) Nuclear Energy Insider, "UK funding spurs advanced reactor R&D but application outlook needed, 18 July 2018.
 (4) www.gov.uk/government/publications/advanced-modular-reactor-amr-feasibility-and-development-project
 (5) Memorandum of Cooperation Between the Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan and the Department for Business, Energy and Industrial Strategy of the UK on Clean Energy Innovation, www.meti.go.jp/press/2018/11/20181113003/20181113003-1.pdf
 (6) www.nirab.org.uk/application/files/6315/9160/6859/NIRAB_Achieving_Net_Zero_-_The_Role_of_Nuclear_Energy_in_Decarbonisation_-_Screen_View.pdf
 (7) www.gov.uk/government/publications/advanced-modular-reactor-amr-feasibility-and-development-project/advanced-modular-reactor-feasibility-and-development-successful-projects
 (8) www.jaea.go.jp/02/press2020/p20101602/
 (9) www.gov.uk/government/publications/the-ten-point-plan-for-a-green-industrial-revolution
 (10) www.jaea.go.jp/02/press2020/p20112703/
 (11) www.gov.uk/government/publications/energy-white-paper-powering-our-net-zero-future
 (12) BEIS, "Entry to Generic Design Assessment for Advanced Nuclear Technologies", May 11, 2021
 (13) www.gov.uk/government/consultations/potential-of-high-temperature-gas-reactors-to-support-the-amr-rd-demonstration-programme-call-for-evidence
 (14) www.gov.uk/government/publications/advanced-modular-reactor-amr-research-development-and-demonstration-programme
 (15) www.gov.uk/government/publications/advanced-modular-reactor-amr-research-development-and-demonstration-programme-phase-b-competition
 (16) www.jaea.go.jp/news/newsbox/2023/041301/
 (17) www.gov.uk/government/news/british-nuclear-revival-to-move-towards-energy-independence
 (18) www.jaea.go.jp/02/press2023/p23090701/
 (19) www.gov.uk/government/publications/civil-nuclear-roadmap-to-2050/civil-nuclear-roadmap-to-2050-accessible-webpage
 (20) https://www.jaea.go.jp/02/press2024/p24042301/

英国高温ガス炉実証炉プログラム（実証炉）

英国政府は、産業界の脱炭素に向け、高温ガス炉の熱及び水素を活用するため、高温ガス炉開発を決定
(2021.12)

実証炉プログラム開始 (2022.9)

NNL-JAEAコンソーシアム：Ph-A採択 (2022.9.2)、完了 (2023.2.10)、

Ph-B採択 (2023.7.18)、実施覚書締結 (NNL-JAEA) (2023.9.6)

ライセンス契約締結 (NNL-JAEA) (2024.1.2)

Ph-A 採択機関：NNL (-JAEA-Jacobs)、EDFエナジー、U-battery、USNC

Ph-B 採択機関：NNL (-JAEA)、USNC

プロジェクト予算 (マッチングファンド)

日本から、国内実証炉基本設計情報を英国に提供 (GX予算)。設計情報の使用範囲を規定するライセンス契約をNNLと締結。英国は、日本から提供された設計情報を自国の規制に基づき更新

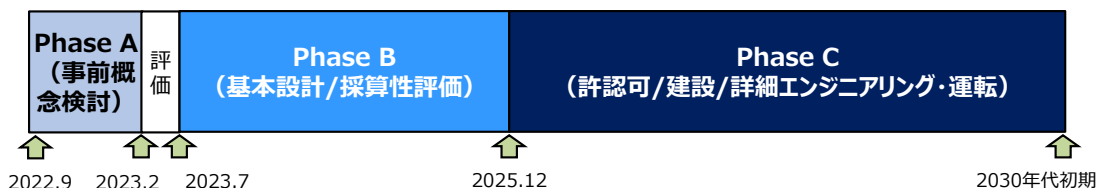
規制対応 (ONR, EA)

規制側のヒアリングが Ph-B期間に求められる

ヒアリング開始 (JAEAはオブザーバー出席) (2023.11.8～、14回開催)

スケジュール

今年の春以降に、Ph-Cの予算を含む今後2～3年の予算を決定



Ph-B実施内容

実証炉基本設計、Ph-C計画立案 (スケジュール及びコスト)、人材育成及びサプライチェーン構築

立地候補地

ハートルプールAGRの隣が立地候補地 (EDFエナジーがPh-Aで評価)

周辺エリア (ティーズサイド) は、化学工業、製鉄等の産業集積エリアであり、2030年の水素需要量4GW (英国全体の水素製造目標値の40%) のうち、1GWを高温ガス炉由来の水素に期待 (再エネ 1 GW、化石資源由来 (+ CCUS) 2GW)



- X-energy社：2030年代初頭までに12基の高温ガス炉 (Xe-100, 80MWe) 運転開始目標
- WH社とコミュニティ・ニュークリア・パワー (CNP) 社：2030年代初頭までに4基の軽水炉SMR (AP-300, 300MWe) 運転開始目標

英国高温ガス炉実証炉プログラム（燃料）

英国政府は、高温ガス炉燃料製造技術を英国内に確立するため、高温ガス炉燃料開発プログラムを開始

NNLとJAEAチーム：Ph-A採択（2022.9.2）完了（2023.2.10）、
STEP1採択（2023.7.18）実施覚書締結（NNL-JAEA）（2024.4.22）
ライセンス契約締結（NNL-JAEA）（2024.4.22）

Ph-A 採択機関： NNL（-JAEA）、Springfields Fuels Limited（SFL）
Step1 実施機関： NNL（-JAEA）

Step1実施内容

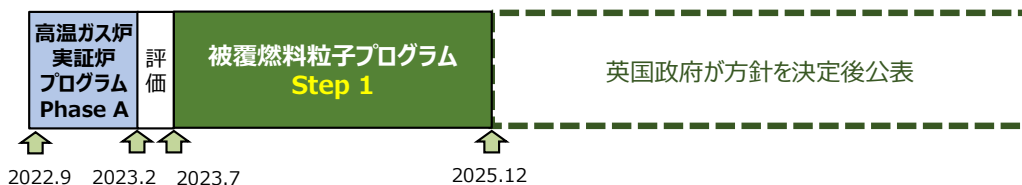
燃料製造技術開発、Step2計画立案（スケジュール及びコスト）、
人材育成（NFIによるトレーニング）、サプライチェーン構築

規制対応（ONR、EA）

規制側のヒアリングが Step1期間に求められる
ヒアリング開始（JAEAはオブザーバー出席）（2024.2.20～、3回開催）

スケジュール

今年の春以降に、Ph-Cの予算を含む今後2～3年の予算を決定



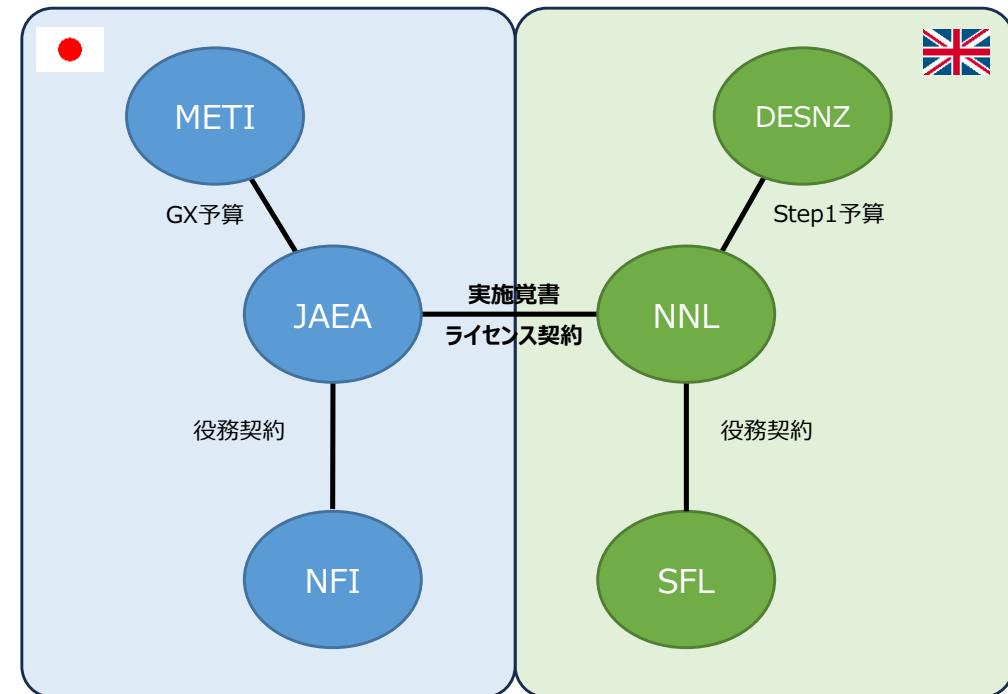
英国高温ガス炉燃料プログラム（Ph-Aは実証炉プログラムの一部として実施。Step1が終了する2025年3月以降は、実証炉への供給を目的とした燃料製造工場の建設が予想されるが、詳細は英国政府が方針を決定後公表予定）

プロジェクト体制（マッチングファンド）

日本（原子燃料工業（NFI）及びJAEA）の高温ガス炉燃料設計、製造技術を英国側へ提供

英国は、日本から提供された技術に基づき、英国内に高温ガス炉燃料製造施設を整備し、高温ガス炉燃料技術を確立する

日本側が提供する技術に対して、英国は、Step2以降のライセンスフィーの支払い及び日本の実証炉への燃料優先供給（必要時期に必要量を所定の濃縮度で）を行うこと、並びに技術の使用範囲をライセンス契約に規定する



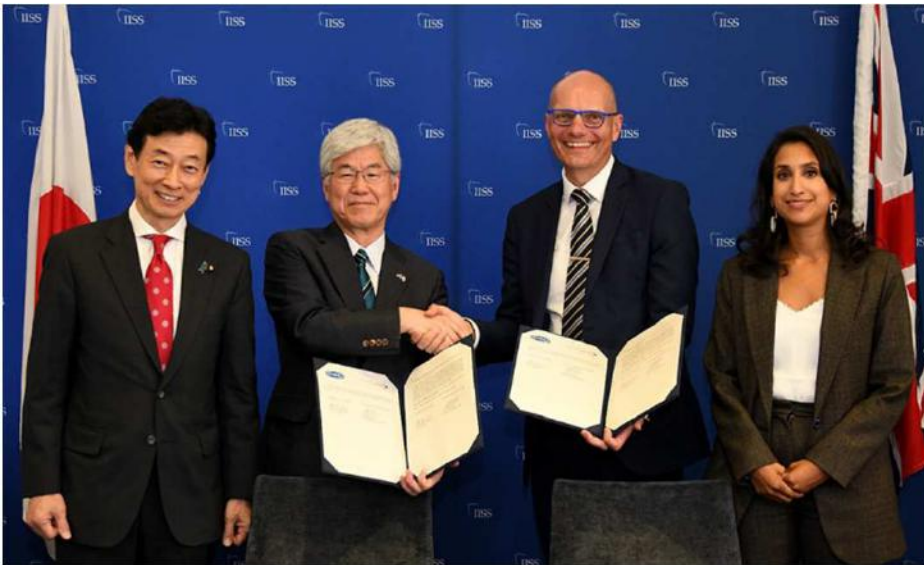
Step1実施体制図（案）（日本側はHTTRの燃料製造実績のある原子燃料工業（NFI）、英国側は英国内に燃料製造工場を有するSpringfields Fuels Limitedが、それぞれJAEA及びNNLの請負先として参画）

高温ガス炉技術に係る協力覚書締結

英国高温ガス炉実証炉プログラムに係る実施覚書締結

英国高温ガス炉燃料プログラムに係る実施覚書締結

- JAEAとNNLは、西村康稔経済産業大臣及びクレア・クティーニョDESNZ大臣の立ち会いの下、包括的な高温ガス炉技術に係る協力覚書を締結 (2023.9.6)
- 英国高温ガス炉実証炉プログラム（フェーズB）に係る採択を踏まえ、基本設計に係る実施覚書を締結 (2023.9.6)
- 英国高温ガス炉燃料プログラム（ステップ1）に係る採択を踏まえ、基本設計に係る実施覚書を締結 (2024.4.22)
- 高温ガス炉の熱を用いた炭酸ガス削減技術や経済性の見通しを得て、国内高温ガス炉実証炉計画に活かす
- 高温ガス炉用被覆燃料製造技術を英国で確立し、国内実証炉用の燃料調達オプションとする



高温ガス炉技術に係る実施覚書及び英国高温ガス炉実証炉プログラムに係る覚書
左から西村経済産業大臣、JAEA小口理事長、NNLハワースCEO、クティーニョDESNZ大臣
(2023.9、ロンドン)



英国高温ガス炉燃料プログラムに係る実施覚書
左からNNLハワースCEO、JAEA小口理事長
(2024.4、東京)

● 英国高温ガス炉実証炉プログラム

- 日本の高温ガス炉技術の国際展開を図り、英国で実証する
- 高温ガス炉実証炉建設の候補地を既に決定し、建設が日本よりも先行する英国において、高温ガス炉の社会実装を実現する
- 英国で実証・社会実装した高温ガス炉技術を我が国に還元する

● 英国高温ガス炉燃料プログラム

- 日本の高温ガス炉燃料製造技術の国際展開を図り、英国で実証する
- 将来の国内高温ガス炉実証炉用燃料の調達先として、英国を一つのオプションとする

日時 2024.11.6～7 0800 – 1700
場所 マリオットデルタホテル プレストン（Marriott Delta Hotel, Preston）
出席者 英国：DESNZ、NIRO、EA、NNL、EDF-Energy、原子力プラントメーカー、原子力燃料製造メーカー、水素ユーザー、大学他
日本：在英日本国大使館、経済産業省、JAEA、原子力プラントメーカー、原子力燃料製造メーカー、水素ユーザー、ゼネコン、水素及び燃料関連商社他

【概要】

- 日本及び英国の政府関係者、産業界、学術界の専門家約100名が参加、英国高温ガス炉実証炉プログラムの事業者であるNNL及びJAEAは計画が着実に進捗していることを紹介し、産業界からは自社の開発成果を紹介
- 早期の実証炉運転開始に向けて、既に実証された技術を有する日本との連携が重要、Ph-C予算化の英国政府判断において、エンドユーザーに関する更なる情報提供や規制側からの信頼確保が重要であることを日英ともに強く認識し、DESNZも理解を深めた。これにより来年春における英国高温ガス炉予算獲得に向けた強いメッセージを発信できたとNNLが評価





DESNZによるNNLの戦略的レビュー

【概要】

- DESNZは、NNLの英国原子力分野における役割を再評価し、国家にとって重要なプログラムの推進、政府への支援、そして国家への貢献を強化するために、NNLがどのように発展すべきかを特定するための戦略的レビューを行い、その結果を2024.12.18に公表した。また、これに伴い、NNLの名称とロゴが変更となった。

【戦略的レビューの概要】

- NNLの大胆な変革ビジョンが提示され、その使命、役割、ブランドを再定義。
- 英国国立原子力研究所（United Kingdom National Nuclear Laboratory : UKNNL）は、政府主導による民生用原子力研究所であり、その使命は、政府へ原子力による成果をもたらす提供すること及び英国の原子力部門の成長を支援すること。
- レビューの提言は今後10年にわたる変革プログラムの第一歩であり、これによりUKNNLはその役割を体現し、その使命を果たし、英国の原子力部門の再生を支えることができるようになる。
- DESNZはUKNNLと緊密に連携し、政府の国家政策や優先事項に沿うよう努めるとともに、組織との戦略的関係の強化を支援し、原子力部門全体にわたる改善された成果の実現に向けた機会を提供する。

新	旧
United Kingdom National Nuclear Laboratory (UKNNL)	National Nuclear Laboratory (NNL)
	

ティーズサイド (Teesside) 概要

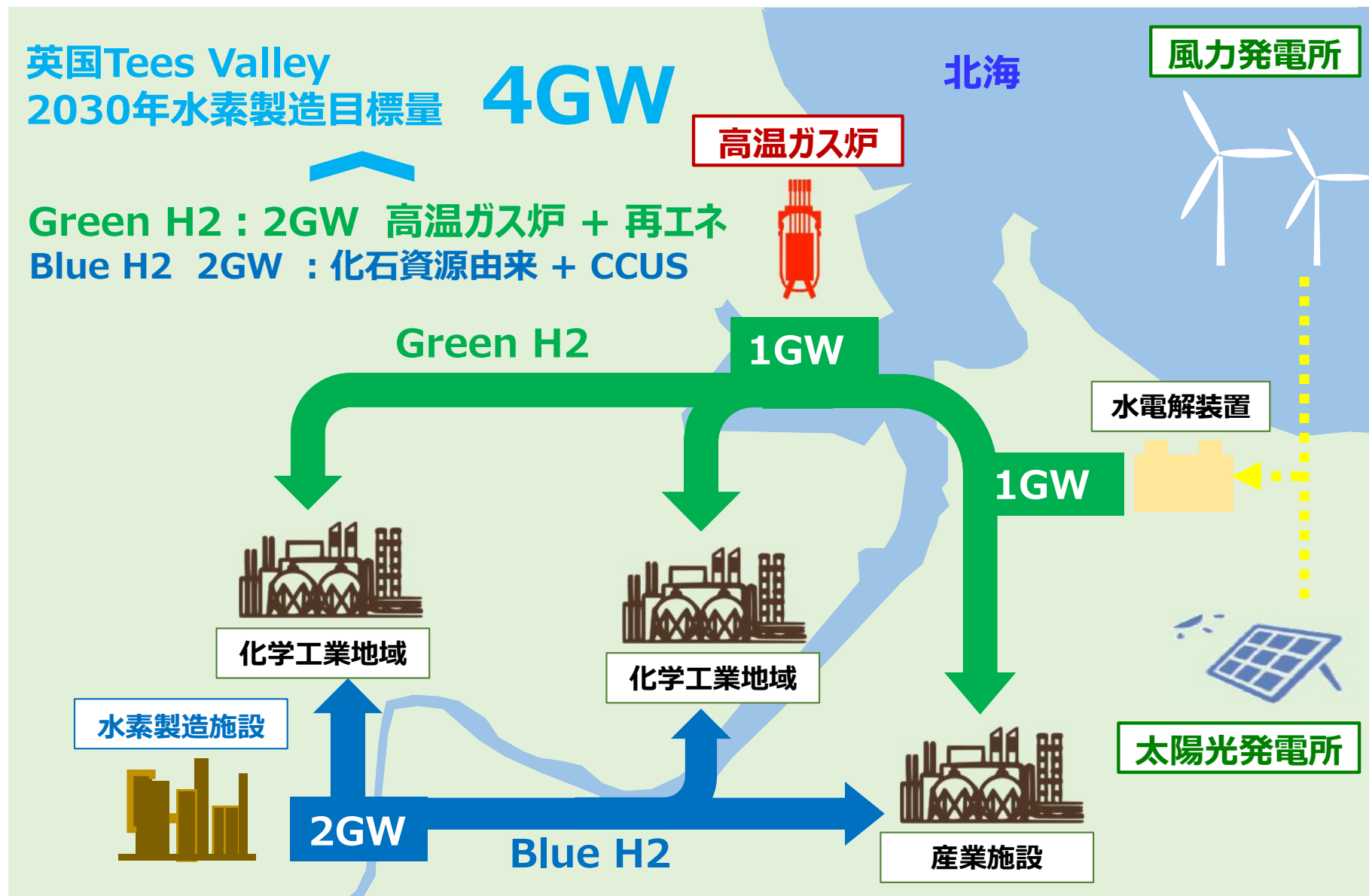
- ティーズサイドは、化学工業、製鉄等の産業集積エリアであり、2030年の水素需要量4GW（英国全体の水素製造目標値の40%）のうち、1GWを高温ガス炉由来の水素に期待（再エネ1GW、化石資源由来（+CCUS）2GW）
- ティーズサイドの産業用地であるWilton internationalは、多国籍の企業が入居するビジネス及び研究センターであり、イングランド北東部プロセス産業クラスター（NEPIC）が使用する産業用地で電気、水等を整備（税制優遇措置あり）
- 用地内に、肥料メーカー、石油化学メーカー、プラスチックメーカー、ガス事業者の他、研究所が入っており、用地内の電力は、用地内のバイオマス発電により供給、外部から隔離
- EDF-Energyは、ティーズサイドハートルプール地区高温ガス炉実証炉用の土地として、既にONRのライセンスを取得した土地を敷地内に確保。この他企業や地元のサポート、さらに人材が揃っていることから、ハートルプールが高温ガス炉実証炉の建設地として有力としている。
- X-energy社は、ハートルプールに2030年代初頭までに12基の高温ガス炉（Xe-100、80MWe）の運転開始を目標
- ウェスティングハウス社とコミュニティ・ニュークリア・パワー社は、2030年代初頭までに4基の軽水炉SMR（AP-300、300MWe）の運転開始を目標



Wilton international



<https://www.wiltoninternational.com/>



* 1GW = 282,000Nm³/h

ポーランドにおける高温ガス炉開発（1/2）

- 2016.7** ポーランドエネルギー省が高温ガス炉の導入に向けた諮問委員会（HTR委員会）を設置
- 2017.2** ポーランド政府が「責任のある開発のための戦略」を公表
➤ エネルギーだけではなく産業界への熱供給も可能な高温ガス炉の開発を開始
- 2017.9** HTR委員会の報告書をエネルギー省が受理
- 2018.1** エネルギー省が、HTR委員会の報告書を公開
化学プラントへ供給する化石由来の蒸気を高温ガス炉に置き換える計画
➤ 天然ガス輸入依存から脱却、石炭火力によるCO₂排出量削減、低コストで産業への熱供給等を目指し、高温ガス炉を導入
➤ 165MWtの商用炉初号機建設を目指し、そのマイルストーンとして国立原子力研究センター（NCBJ）に10MWtの研究炉を建設
- 2018.11** エネルギー省が2040年までのエネルギー政策（PEP2040）案を公表（2021年2月内閣承認）
➤ 高温ガス炉を産業利用として導入する。
- 2019.2** エネルギー省が、高温ガス炉研究開発プロジェクトとしてGOSPOSTRATEG-HTRプロジェクト（3年間で総額約6.4億円）を開始
- 2021.5** ポーランド政府予算（3年間総額約18億円）で、NCBJが高温ガス炉研究炉の基本設計を開始
⇒ **日本に協力を要請**
- 2021.11** ポーランド政府がポーランド水素戦略を閣議決定
➤ 2040年までに期待される技術の1つとして、CO₂フリーの高温ガス炉による水素製造が掲載

- 2021.6から、NCBJが技術実証炉を兼ねた研究炉（30MWt規模）の設計を開始

- スケジュール

- Phase I 研究炉の基本設計、安全予備解析書の作成等
(2021.6.1～2024.6.1、約18億円)
- Phase II（未定） 研究炉の詳細設計、許認可、建設、試運転
(2024-2030)
- Phase III（未定） 商用炉検討（2023～）、FOAK建設（2030～）

- Phase I の内容

- 高温ガス炉の許認可に必要な材料のデータ取得
- 研究炉の基本設計
- 安全予備解析書に必要な解析ツールの検証
- 安全予備解析書の作成



研究炉の基本設計に関して日本に協力を要請

高温ガス炉技術分野における研究開発協力の実施取決め

経緯

- 2019.9.20 ポーランド国立原子力研究センター（NCBJ）において、実施取決めに署名
- 2022.11.22 JAEAにおいて、改定した実施取決めに署名

取決めの内容

- **基本設計**（改定実施取決めにより追加）
- 高温ガス炉の高度化に関するシミュレーションのための材料及び被覆粒子燃料に関わる研究開発
- 原子炉への化学プラント接続のための安全解析
- 設計研究による高温ガス炉の高度化に関するシミュレーション
- 高温ガス炉の人材育成



● 基本設計に関する有償契約を締結

契約（その1）	約1.2億円	2022.11.22 – 2023.2.28	検収完了
契約（その2）	約3.8億円	2023.03.29 – 2024.3.31	検収完了



JAEAとNCBJが研究協力実施取決めに署名（2022.11）
奥から、NCBJ クレック所長、小口理事長

基本設計に関する有償契約

- 日本側が原子炉施設の基本設計を行った
(ポーランド側は、別途、熱利用施設を設計)
- 技術ワークショップ (日本民間企業※¹も出席) を開催し、
基本設計の成果報告と技術的な協議を行った

第1回	2023.2	日本
第2回	2023.6	日本
第3回	2023.8	ポーランド
第4回	2023.11	ポーランド
第5回	2024.2	日本※ ²
第6回	2024.3	ポーランド※ ³

1 : 東芝ESS、MHI、富士電機、大林組

2 : 原燃工、東洋炭素視察

3 : ORLEN社 (ポーランド最大の石油化学会社。高温ガス炉の導入に興味あり) 視察

- 2024.3末に契約の検収を完了した

現状及び今後

- NCBJは、JAEAが提出した設計を基に基本設計報告書を完成させ、ポーランド政府へ提出 (2024.12)
- 2025年以降の予算は未定。NCBJがポーランド政府と協議中
- 今後の連携は、ポーランド側予算と日本企業の参画方針次第



ポーランド高温ガス炉研究炉 (日本側設計)



第1回WS (2023.2日本)



第2回WS (2023.6日本)



第3回WS (2023.8ポーランド)



第4回WS (2023.11ポーランド)



第5回WS (2024.2日本)



第6回WS (2024.3ポーランド)

まとめ

- 高温ガス炉は、核熱を用いて高温熱の供給が可能であり、これを用いて脱炭素化が困難とされる製鉄分野、化学工業分野等へ水素、高温蒸気等を供給することで二酸化炭素排出ネットゼロに向けた貢献が為し得ると世界各国で開発が加速
- 日本政府は、GX実現に向けた基本方針の中で、「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」として、2030年代後半運転開始とする高温ガス炉実証炉の開発目標・戦略を公表
- 英国政府は、温室効果ガス排出ネットゼロ達成に向け、電力分野では軽水炉、非電力分野では革新炉として高温ガス炉を選択し、2030年代初期運転開始とする高温ガス炉実証炉及び高温ガス炉燃料プログラムを開始。2023.7.18に英国政府が、JAEAと連携するNNLをPhase B（原子炉）及びStep1（燃料）プログラムに採択したことを公表
- JAEAとNNLは、包括的な高温ガス炉技術に係る協力覚書を締結。同時に、英国高温ガス炉実証炉プログラム（フェーズB）に係る採択を踏まえ、基本設計に係る実施覚書を締結
- JAEAはNNLと政府機関の下で連携して英国高温ガス炉実証炉計画に参加し、日本の高温ガス炉技術の国外展開を図る
- これにより、製鉄分野等へ水素、高温蒸気を供給する高温ガス炉を英国で社会実装し、その経済的合理性等を含めた脱炭素化技術を我が国の高温ガス炉実証炉計画に活かす

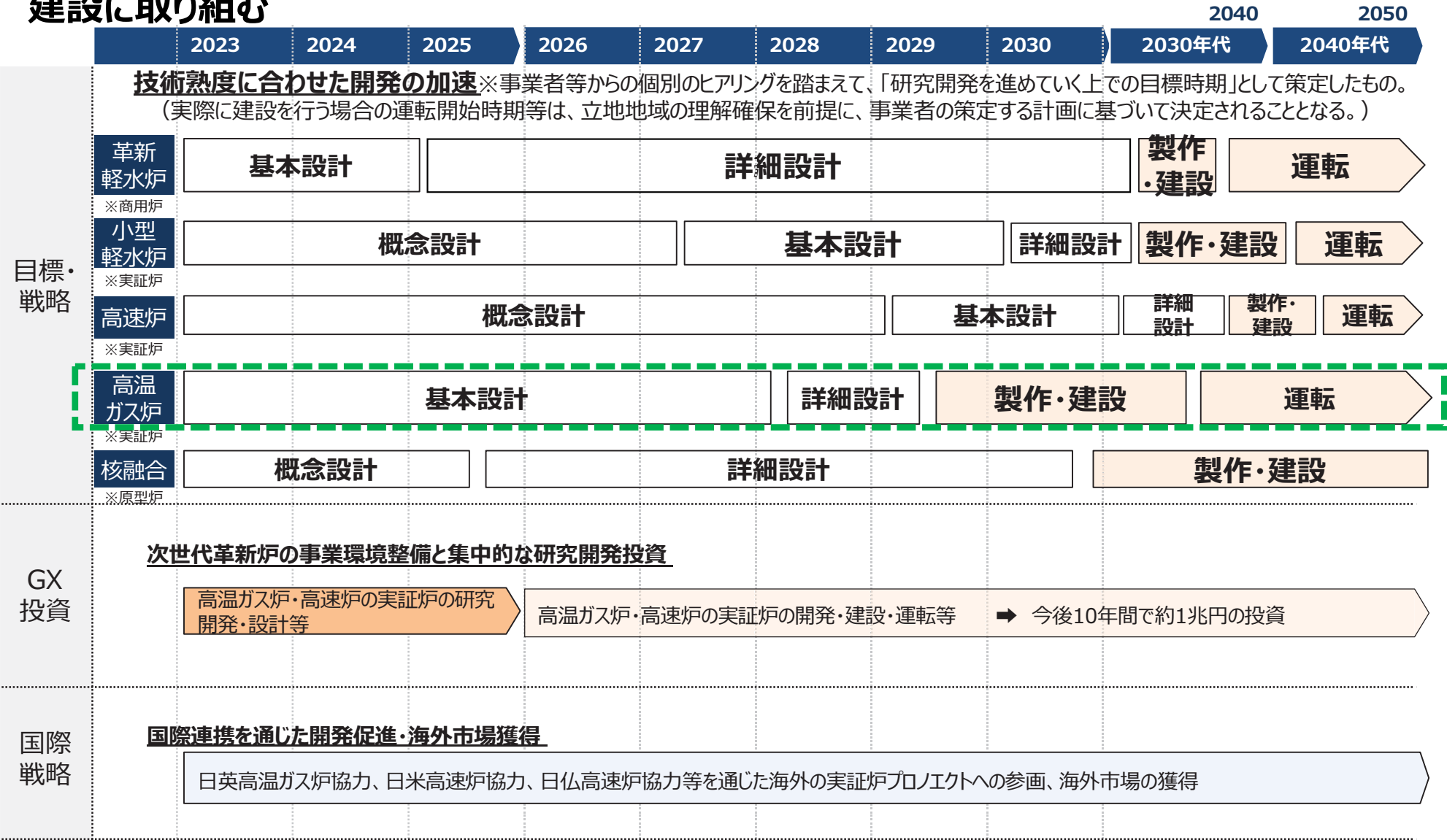
我が国の高温ガス炉実証炉開発計画

原子力機構の取組

2025.1.20

日本原子力研究開発機構
高温ガス炉プロジェクト推進室
佐藤博之

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



高温ガス炉実証炉開発事業 予算措置額 1,279億円 (令和5～8年度までの国庫債務負担行為含む)
 追加要求額 673億円 (令和7年度予算案 (令和7年度から令和9年度までの国庫債務負担行為を含む))

政策

事業予見性担保

- 規制（許認可取得に要する期間）

社会

立地の選定、実施体制の確立

- 社会的受容性獲得・事業モデル構築
：ステークホルダーとの対話、
先行する英国実証炉PJ活用

技術

原子炉技術の確立

- 炉心：大型環状炉心確立
- 設備：大型化・高度化
- 燃料：再処理技術確立
- 規格基準：安全基準/構造規格策定

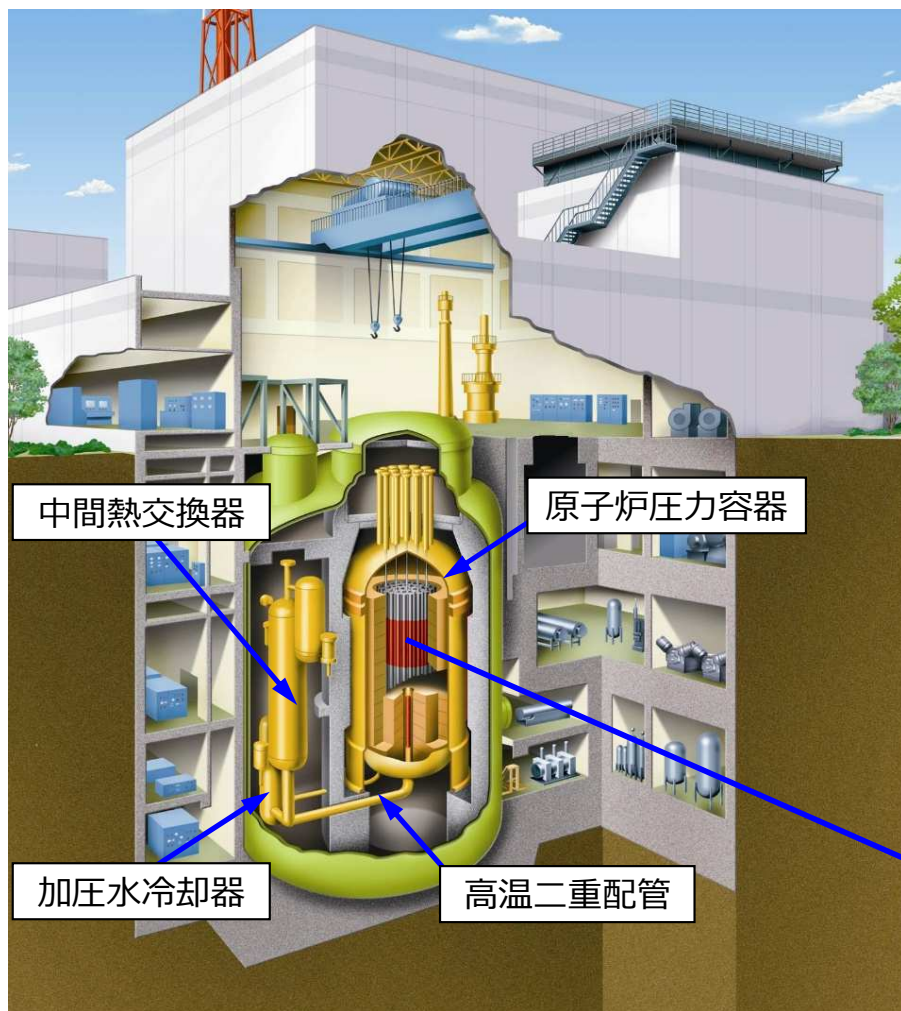
熱利用技術の確立

- 接続：水素製造施設の適用法規決定、
接続設備機器の確立
- 水素製造：CF水素製造技術確立

国内
実証炉
開発

HTTR
-熱利用
試験

HTTR（高温工学試験研究炉）



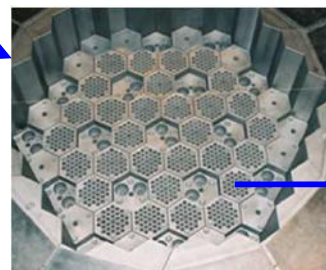
設置場所：日本原子力研究開発機構 大洗原子力工学研究所
(茨城県大洗町)

我が国初の高温ガス炉

- 原子炉熱出力 30 MWt
- 冷却材 ヘリウムガス
- 原子炉入口／出口冷却材温度 .. 395/850,950℃
- 1次冷却材圧力 4 MPa
- 炉心構造材 黒鉛

- 1998.11 : 初臨界
- 2004.4 : 原子炉出口950℃達成
- 2010.3 : 950℃での連続50日運転
- 2010.12 : 安全性実証試験の実施*
(出力30%からの炉心流量喪失試験)
- 2021.7 : 新規規制基準対応を経て運転再開
- 2022.1 : 安全性実証試験の実施*
(出力30%からの炉心冷却喪失試験)
- 2024.3 : 安全性実証試験の実施*
(出力100%からの炉心流量喪失試験)

*OECD/NEA国際協カプロジェクト



炉心の中心部



炉心の黒鉛ブロック

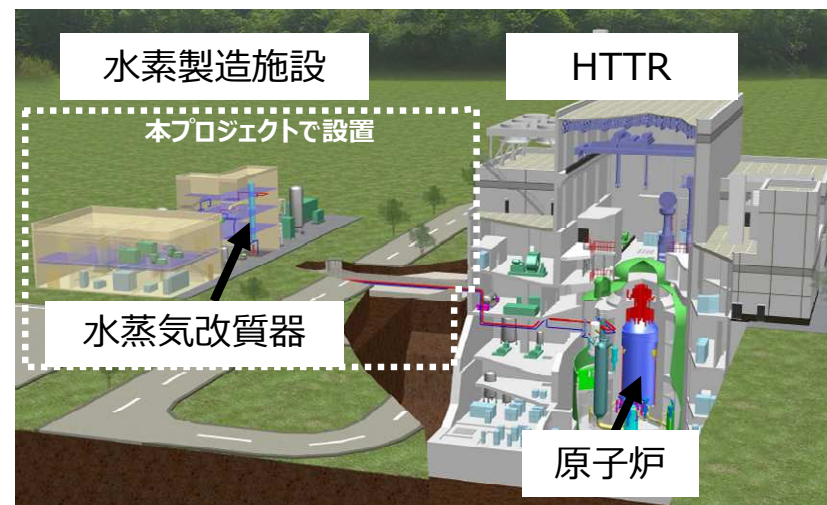
【内容】

- 高温熱源として、世界最高温度（950℃）を記録したHTTRを活用
- 高温ガス炉と水素製造施設の接続に係る安全設計、安全評価技術を確立
- 必要な機器、システム設計技術を確立



【期待される成果】

高温ガス炉と水素製造施設を高い安全性で接続する技術の確立

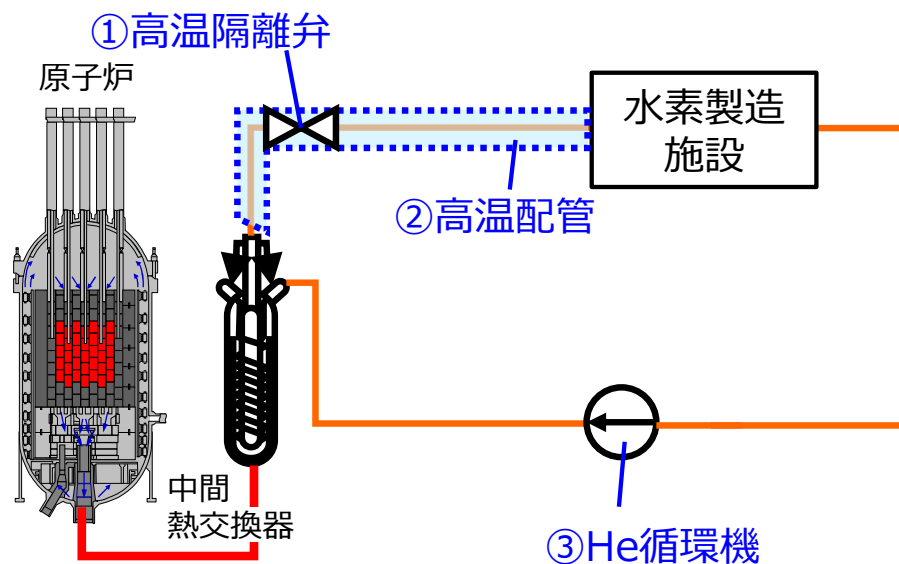


試験イメージ

- ✓ 先ずは、商用技術が確立されている天然ガス水蒸気改質法による水素製造施設をHTTRに接続し、接続技術を確立
- ✓ 将来はカーボンフリー水素製造法による水素製造施設をHTTRに接続

試験スケジュール（案）

	R4 2022	R5 2023	R6 2024	R7 2025	R8 2026	R9 2027	R10 2028	R11 2029	R12 2030		
HTTR- 熱利用 試験	安全設計・安全評価		申請 ▼	許認可							
	HTTR改造設計/水素製造 (天然ガス水蒸気改質法) 施設設計				HTTR改造工事/水素製造施設の 製作・据付			水素製造試験			



開発が必要な機器	主要な課題
① 高温隔離弁	融着による弁体/弁座損傷対策、製作性及びシール性能確証
② 高温配管	新規断熱材採用に伴う断熱性能等の特性把握、製作性確証
③ He循環機	磁気軸受等を用いた循環機性能確証

開発が必要なシステムとしての技術パッケージ	主要な課題
① プラント全体設計	<ul style="list-style-type: none"> ● 原子炉と水素製造施設が協調した起動停止が未確立 ● 計測制御施設の設計に必要なプラント動特性解析コードの妥当性が未確認
② 安全設計 (含む 新規制基準対応)	<ul style="list-style-type: none"> ● 水素製造施設の適用法規が未確定 ● 原子炉異常が水素製造施設に異常を発生させない設計が未確立 ● 水素製造施設異常が原子炉施設に異常を発生させない設計が未確立

- HTTR-熱利用試験を通じて高温ガス炉と熱利用系の接続に係る共通基盤技術整備が必要
- 確証した接続技術はどの熱利用系が採用された場合でも適用可能
(HTTR-熱利用試験では、メタン水蒸気改質法による水素製造施設を採用)

(設置許可申請)

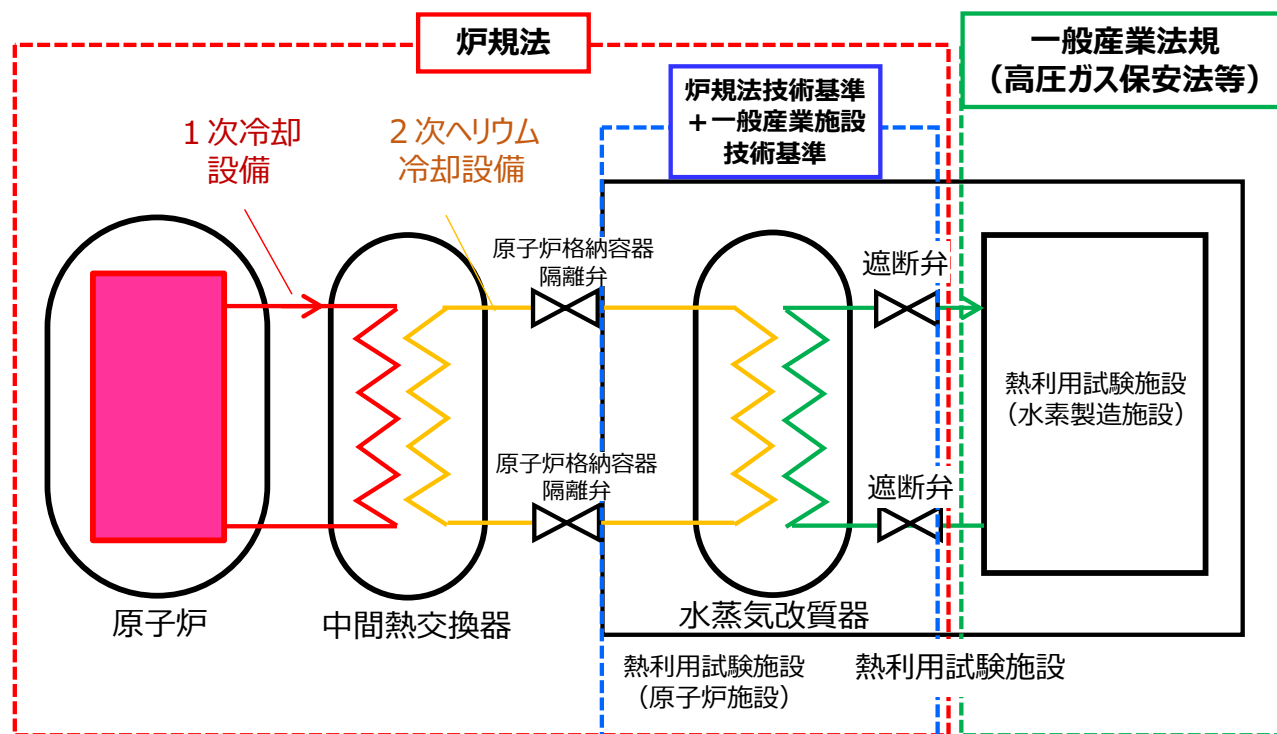
水素製造施設は、以下の法規を適用するとして、①原子炉施設に直接影響を及ぼす設備（青点線部）と②直接影響を及ぼさない設備（緑点線部）に分けて申請することが、原子力規制庁の行政相談により認められた（2024.6）

(適用法規 ①原子炉施設に直接影響を及ぼす設備（青点線部）)

- 炉規法の基準（原子力規制委員会規則、内規及び構造等の技術基準）または一般産業施設の基準の規定のうち、一方の基準のみで定められる場合は、当該基準の規定を適用する
- 炉規法または一般産業施設の基準において規定が重複する場合は、原則として炉規法の基準を適用する（必要に応じて、差分を加える）

(適用法規 ②原子炉施設に直接影響を及ぼさない設備（緑点線部）)

- 一般産業法規を適用する
- 漏えい可能性がある可燃性ガスに起因する火災・爆発等への対処は、一般産業法規を満足するとともに、原子炉施設に対しては「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」に従い、原子炉施設と水素製造施設間に十分な離隔距離を確保することが求められる

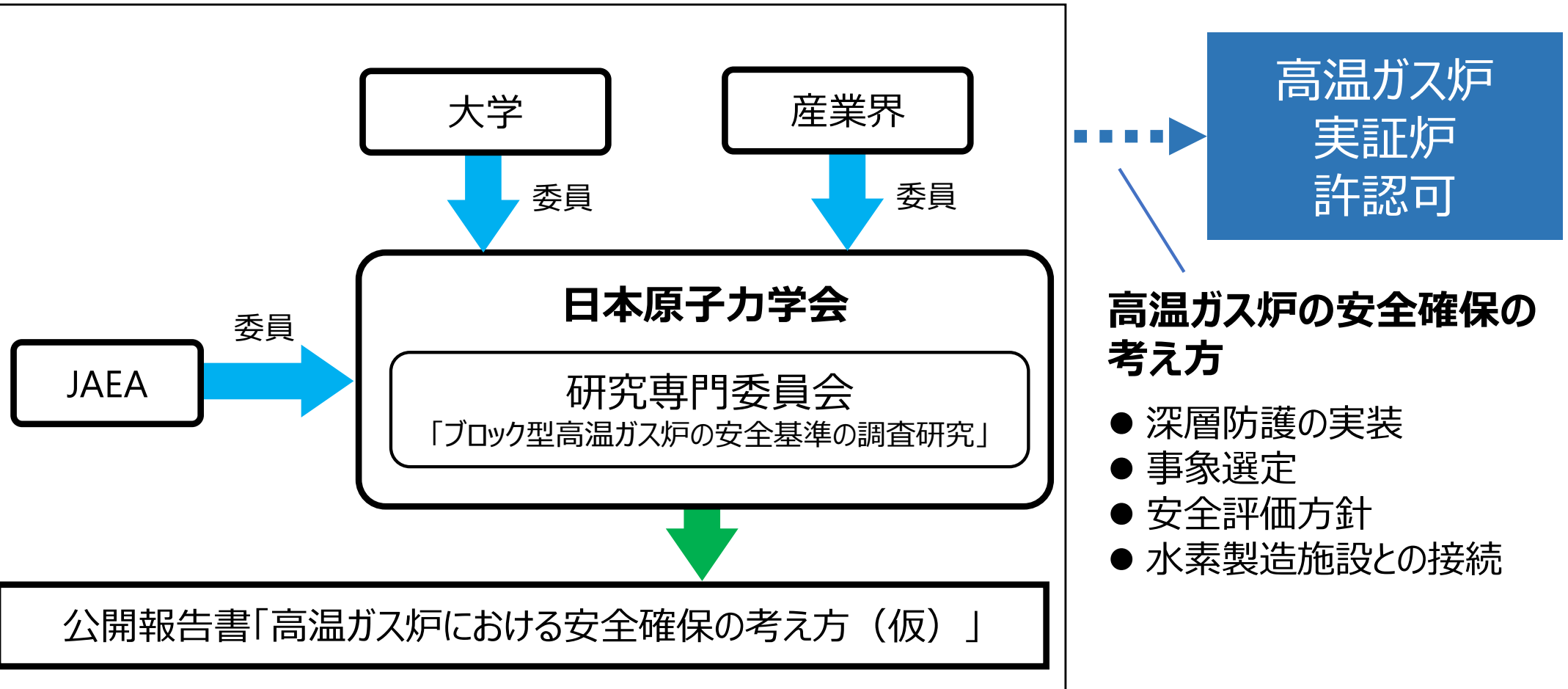


炉規法適用範囲

原子力規制委員会が原子力安全の観点から規制業務を行う範囲

高圧ガス保安法適用範囲

都道府県が高圧ガス安全の観点から規制業務を行う範囲



目的

高温ガス炉が生来的に有する特長及び性能の立証

論点

- ① 著しい炉心損傷の実質排除は可能か
(燃料の破損モード及び破損限界、高温ガス炉の事故シナリオ)
- ② 著しい炉心損傷の実質排除の可否に応じた深層防護の実装は適切か
- ③ 深層防護に則ったLBE選定とConsequence評価は適切か
- ④ 原子炉固有の安全性による未臨界移行が停止系の一系統に相当し得るか
- ⑤ 熱利用システム擾乱のバウンディングと原子炉安全への影響の定量化は適切か
- ⑥ 高温ガス炉安全確保の考え方の前提条件は適切か

期待される成果

「高温ガス炉安全確保の考え方」を構築し、専門家の合意形成を図る

設置期間

令和5年4月から2年間（1年間の延長予定）

関連部会

原子力安全部会

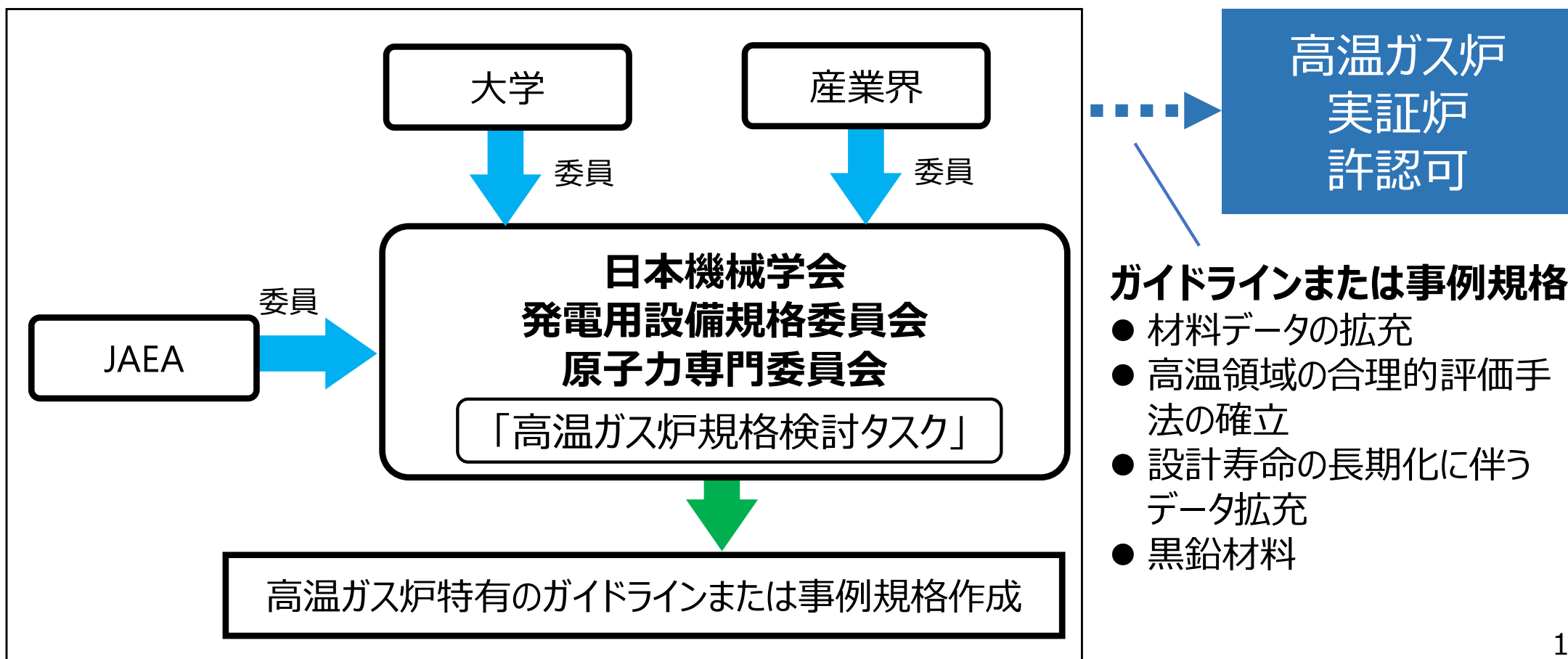
- HTTR建設にあたり、科学技術庁（当時）が、試験研究の用に供する原子炉等の設計及び工事の方法の技術基準に関する規則（昭和62年3月25日 総理府令第11号）第7条の規定に係る細則として、同規則第2条第2項第5号に規定する試験研究用原子炉の内、**黒鉛減速ヘリウムガス冷却型原子炉施設に関する構造等の技術基準**を策定した
- その添付資料として、**高温機器及び黒鉛構造に関する以下の指針**が科学技術庁の内規として定められた
 - 高温ガス炉第1種機器の高温構造設計指針
 - ✓ 高温ガス炉高温構造設計指針の材料強度基準等
 - 高温ガス炉炉心支持黒鉛構造物構造設計指針
 - 高温ガス炉炉心黒鉛構造物構造設計指針
- 上記技術基準及び構造設計指針は、平成15年に改定され、文科省から原子力規制庁に内規として引き継がれている



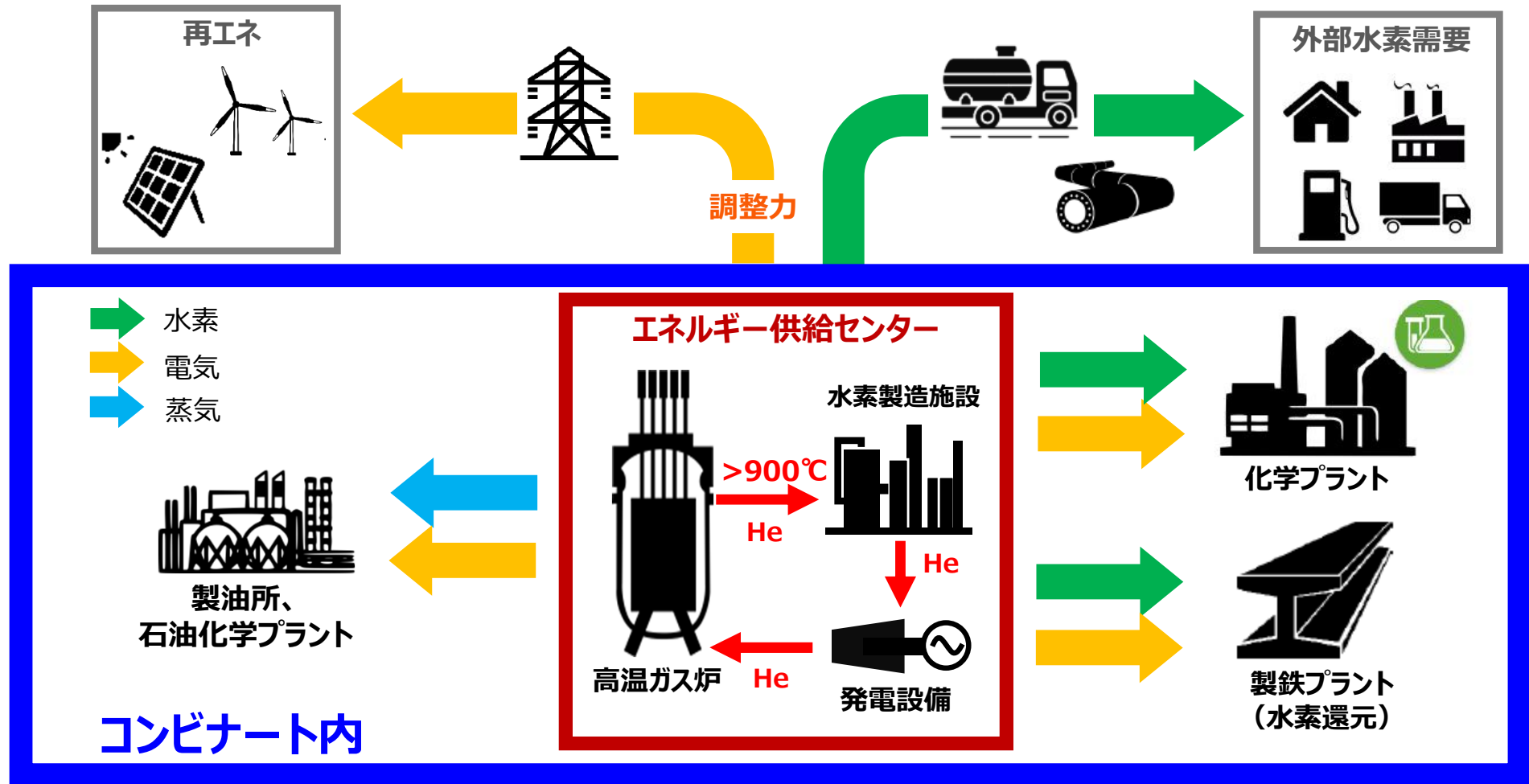
- 高温ガス炉の実用化に向けて、**機械学会での民間規格化**を目指す。

機械学会「高温ガス炉規格検討タスク」

- 機械学会 発電用設備規格委員会 原子力専門委員会に時限的な組織である「高温ガス炉規格検討タスク」を設置
- 以下方針にて高温ガス炉に関する規格案の作成と審議を集中的に行う
 - 高温ガス炉実証炉に向け、HTTRの旧科技庁内規を活用し、不足する内容のみを規格化（ガイドラインまたは事例規格の作成）する
 - 高温ガス炉実用炉に向け、HTTRの旧科技庁内規と実証炉向けガイドライン又は事例規格を一本化する形で規格化する



高温ガス炉の社会実装モデル



新しい社会価値の提供

多排出産業の
カーボンニュートラル実現

カーボンニュートラル社会システムの
レジリエンス強化

製鉄分野の
カーボンニュートラル実現に
必要な3つの外部条件

- ・カーボンフリー水素
- ・カーボンフリー電力
- ・CCUS



高温ガス炉

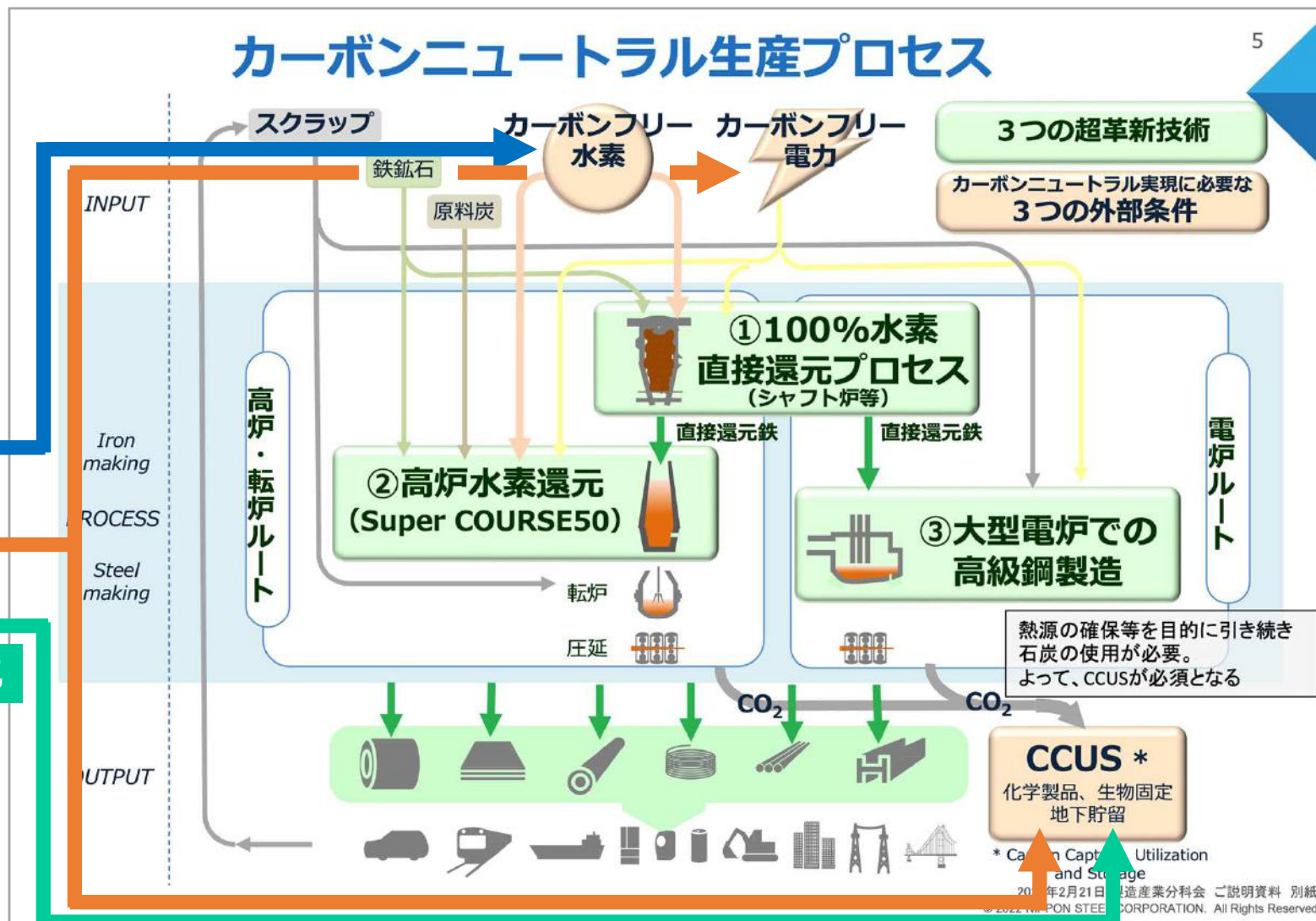
- ・カーボンフリー水素
- ・カーボンフリー電力
- ・高温熱・蒸気

水素

電気

熱・蒸気

カーボンニュートラル生産プロセス



大量・安定した多様なエネルギー供給（水素・電気・熱・蒸気）により
製鉄分野の脱炭素化に貢献

石油化学・化学分野のカーボンニュートラル実現に向けた取組

①熱源転換

→ ナフサ分解炉への高温熱・蒸気供給、水素への変換

②原料転換

→ MTOへの水素供給

③原料循環



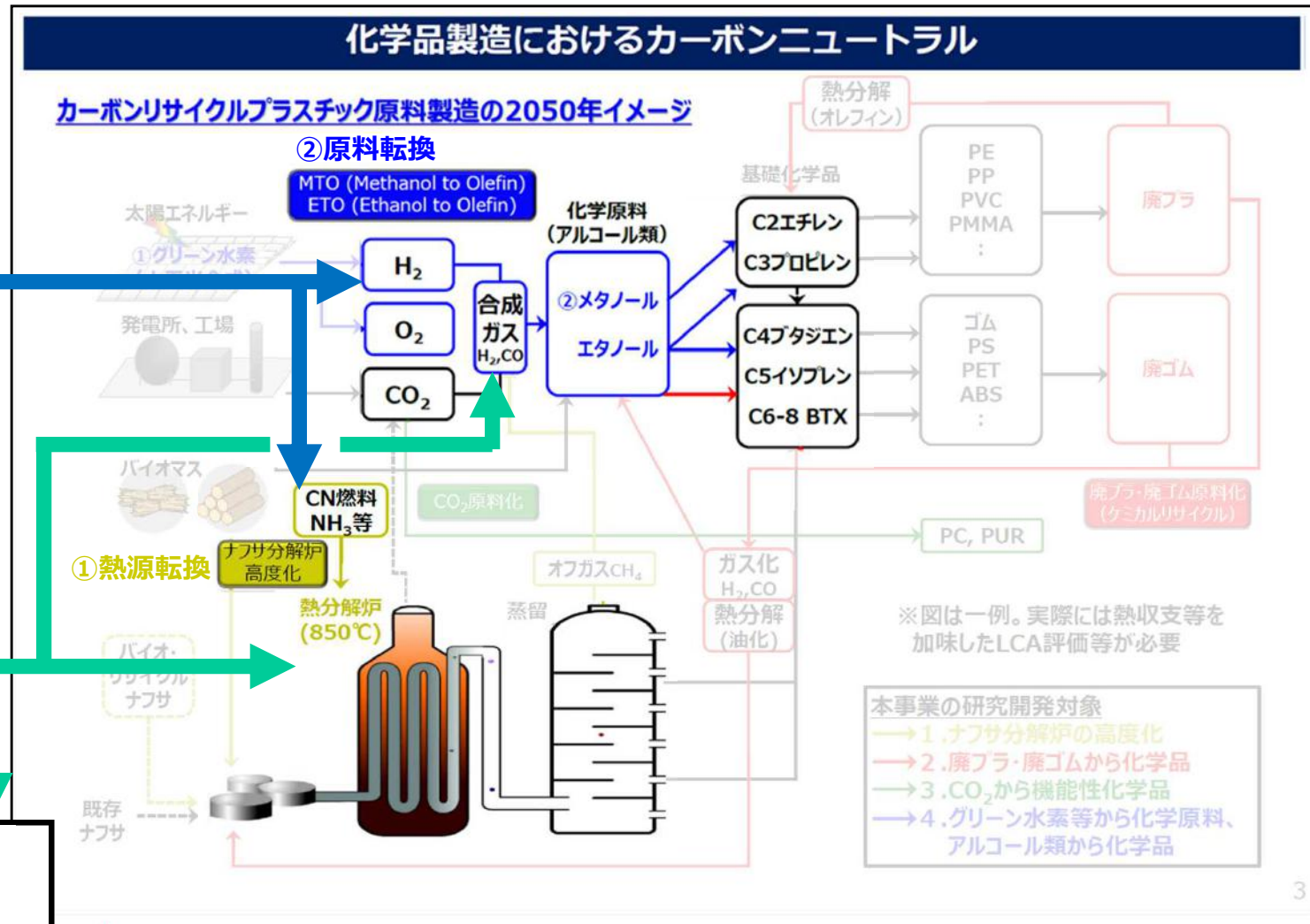
高温ガス炉

- ・カーボンフリー水素
- ・カーボンフリー電力
- ・高温熱・蒸気

自家発・ボイラ代替

石油化学・化学コンビナートの蒸気・電気需要

大量・安定した多様なエネルギー供給（水素・電気・熱・蒸気）により
石油化学・化学分野の脱炭素化に貢献



イベント・展示会への出展

一定の規模及び関係業界への影響があると考えられるイベントに参加し、広報展示を実施。計1800人以上が当室の出展ブースに来訪。

- ・H2 & FC EXPO (2024.2.28~3.1、東京ビッグサイト)
- ・WHEC2024 (2024.6.23~6.27、メキシコ・カンクン)
- ・GLOBAL2024 (2024.10.6~10.10、イイノホール)
- ・H₂ POWER WORLD OSAKA (2024.11.20~11.22、インテックス大阪)

英国高温ガス炉燃料開発プログラムに係る調印式

(2024.4.22、東京)

調印式後の会見に朝日新聞ほか5社が参加。報道状況は以下のとおり
読売新聞「新型炉燃料製造へ 日英覚書」(朝刊27面)

日経新聞「高温ガス炉の燃料技術、英国立研と覚書」(web)

ほか国内3社、海外1社 (WNN : world nuclear news、web)

英国高温ガス炉実証炉プログラム成果報告・展示会

(2024.11.6・7、英国・プレストン)

NNLが主催し、日本及び英国の政府関係者、産業界、学术界の専門家約100名が参加。本プログラムの事業者であるJAEA及びNNLから、計画が着実に進捗していることを紹介。

SNS (X) による情報発信 (2023.2~2024.11)

機構アカウントのXから約170件発信：高温ガス炉技術 (65件)、国際連携・会議報告・視察 (29件)、広報活動 (20件)、水素技術 (16件)、熱利用技術 (15件)、HTTR (14件) 等



H2 & FC EXPOへの出展

世界最大規模の水素の展示会であり、水素の製造、貯蔵、輸送、利用に関する企業が多数出展 (出展企業数：約200社、来場者数：約70,000人)。



東京事務所にてJAEA (小口理事長)
NNL (ハワースCEO) による調印式開催



英国高温ガス炉実証炉プログラム成果報告・展示会
ハイレベルの政府関係者 (在英日本国大使館川上公使、DESNZから複数のDirectorクラス) の他、日英産業界からも多数の参加を得た。



Xによる情報発信

テレ東BIZ YouTubeチャンネルに高温ガス炉
プロジェクト推進室メンバーがスタジオ出演

- 日本政府は、GX実現に向けた基本方針 参考資料の中で、「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」として、**2030年代後半運転開始とする高温ガス炉実証炉の開発目標・戦略が公表された**
- 高温ガス炉は、核熱を用いて高温熱の供給が可能であり、これを用いて**脱炭素化が困難とされる製鉄分野、化学工業分野等へ水素、高温蒸気等を供給することで2050年温室効果ガス排出ネットゼロに貢献する**
- JAEAは、**HTTR-熱利用試験、高温ガス炉国内実証炉**、英国等との国際連携を推進し、**高温ガス炉の早期社会実装を目指す**

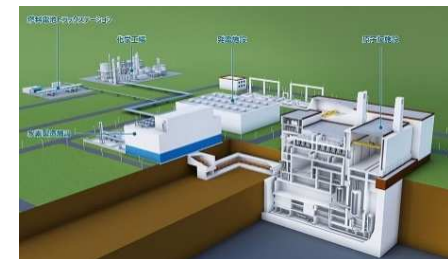
HTTR-熱利用試験

高温ガス炉と
水素製造施設の
接続技術確立



国内実証炉開発

技術的成立性と
経済的な実現性
の実証



三菱重工 www.mhi.com/jp/news/230725.html

第2章

高温ガス炉に関する国内 外動向調査報告

西村洋亮、都筑和泰

調査対象

国内外の学会、研究会等に関する情報収集

- 原子力学会春の年会（2024年3月26～28日近畿大学東大阪キャンパス）
- ICONE31（2024年8月21～26日 チェコ プラハ）
- 原子力学会秋の大会（2024年9月11～13日（東北大学川内北キャンパス）

関係機関からの情報発信やニュース等の公開情報の収集と整理

番号		情報源	具体的な調査対象 HP
国内	B1-1	JAEA	JAEA の HP・プレス発表
	B1-2	日本の政府関連	文科省、外務省、経産省、大学等
	B1-3	国内の民間関連	原子力学会誌、電事連、JAIF 等 注) 海外の HP 等で記載されている紹介記事の場合、 海外の HP 記事と一緒に記載。
	B1-4	国内の報道機関	新聞(電子版)等
国外	B2-1	国際機関	IAEA、OECD/NEA 等
	B2-2	海外の政府関連	NRC、DOE、BATAN、NCJP
	B2-3	海外の民間関連	WNA(世界原子力協会)と WNN 等
	B2-4	海外の報道機関	Newspaper、etc.

世界の概況

- 現在稼働中の高温ガス炉プラントは中国のHTR-PM、HTR-10、及び日本のHTTRである。このうち商用規模なのはHTTR-PMのみである。HTR-PMは熱出力250MWのモジュールを2基有し、電気出力200MWである。日本のHTTRの約16倍の熱出力に相当する
- 国際展開を積極的に実施し、ニュースに取り上げられているのはX-Energy社のXe-100、Ultra Safe Nuclear社のMMR、日本の高温ガス炉（英、ポーランド、日本）程度である。
- IAEAのARIS（Advanced Reactor Information System）では、上記以外にも開発中の炉をいくつか紹介している
 - 南アフリカ共和国ではPBMRの検討を進めていたが、2012年にはHTMR100プロジェクト、2020年にはAMRプロジェクトを開始。
 - ロシアは2020年より、主に熱供給を想定したMHR100、水素製造を想定したMHR-Tの検討を開始しているが、まだ概念検討段階のようである。
 - フランスでは、2020年に設立されたJIMMY社が主に産業熱供給を想定して10MWtクラスの高圧高温ガス炉の開発を行っている。
 - アメリカでは2018年に設立されたHolosGen社が10MWeクラスのモジュールの開発についてARISにアップしている。

X-Energy社 Xe-100

- 燃料調達：完全子会社であるTRISO-Xが、2022年10月よりテネシー州オークリッジに先進核燃料施設を建設中2024年10月には4080万ドル（約60億円）の敷地開発にGeiger Brothers, Inc. を選定
- 立地；2024年4月英国政府から334万ポンドの助成金（X-Energyも同額）。後述する通り、ハートルプールに12基の炉を建設し、2030年代初頭までに完成させる計画で、英国で最大40基の炉を建設することを目指している
- 資金：2020年10月にDOEの「先進的原子炉実証プログラム（ARDP）」における初回補助金の交付対象の一つとして選定され、「Xe-100」の実証炉建設に向けた7年間の補助金として総額12億ドル交付することとした。その後もDOEなどから各種支援を受けている。2024年10月、アマゾンが5億ドル投資。

中国HTR-PM

- 前記の通り、250MWtのモジュール2基を有している。
- 2012年ファーストコンクリート。2021年初臨界。2023年12月商用運転開始
- 2024年4月には地域暖房プロジェクトを始動した
- 出資者は、中国華能集团公司、中国核工業建設集团公司、精華大学が出資、合計約12000億円
- なお、既に建設を開始している、商用炉HTR-PM600は同じ規模(250MWt)のモジュールを6基で構成される予定。

出典<https://www.jaea.go.jp/04/sefard/faq/files/material050202.pdf>

- 2024年半ばに比較的大きなトラブルがあり、下記技術者連盟主催の視察も延期となっていた。
- トラブルは概ね収束し、3月16日より視察を受入可能とのことである。

http://www.jef-site.or.jp/image/c_HTGR.pdf

国内外の学会、研究会 等に関する情報収集

1. 日本原子力学会 (AESJ) における主な高温ガス炉関係口頭発表

調査対象: 2024年3月春の年会 (近畿大学) & 9月秋の年会 (東北大学)

会議名	研究機関名	炉型	主な分野
AESJ (春・秋計 34件)	JAEA: 10 九州: 5 東大: 4 MHI: 4 北海道: 2 大阪: 2 東芝ESS: 1 サイエンスト キョー: 1 山梨: 1 名古屋: 1 東京都市大: 1 東北: 1	HTGR: 26 HTTR: 8	核計算コード: 7 再エネ調和型: 4 スリーブレス燃料 コンパクト: 3 専門委員会報告: 3 トリチウム製造: 3

① 名古屋大・JAEA・東大による専門委員会の報告では、高温ガス炉実証炉への適用を念頭に、HTTRの建設や運転・試験、新規性基準適合性審査で得た経験と過去の安全基準案検討結果を活用し、原子炉安全確保のための技術要件や安全評価方針の検討が発表された。

② MHI・JAEAによる再エネ調和型新型炉のシリーズ発表では、安全評価にかかるコード開発、IoT利用、実験施設の建設に関する報告がなされた。特に水素製造や蓄熱を狙いとした新型発電事業に関する異常時の安全性評価ツールの開発が喫緊の課題である。

総合講演・報告「ブロック型高温ガス炉の安全基準の調査研究」研究専門委員会
「ブロック型高温ガス炉の安全基準の調査研究」研究専門委員会 2023 年度成果報告

(1) 検討の背景と目的

＊山本 章夫¹

¹名古屋大学

- ◆研究専門委員会「ブロック型高温ガス炉の安全基準の調査研究」の設立背景や目的、高温ガス炉の設計及び安全上の特徴、そして2023年度の成果として技術的論点と高温ガス炉の安全確保の考え方に関する検討状況が報告
- ◆本研究専門委員会は、高温ガス炉実証炉への適用を念頭に、高温ガス炉の特長や性能に基づく安全基準の考え方を構築することを目的とし、2023年度から2年間の計画で活動している。HTTRの建設や運転・試験、新規制基準適合性審査で得た経験と過去の安全基準案検討結果を活用し、原子炉安全確保のための技術要件や安全評価方針を検討

6つの技術的論点

- ①著しい炉心損傷の実質排除の可能性
- ②深層防護の実装の適切性
- ③LBEの選定と評価の適切性
- ④未臨界移行が停止系の一系統に相当し得るか
- ⑤熱利用システム擾乱の影響の定量化
- ⑥安全確保の考え方や機能要求の前提条件の適切性

(2) 高温ガス炉の設計及び安全上の特徴

＊佐藤 博之¹、坂場 成昭¹

¹原子力機構

高温ガス炉における安全確保の設計および安全上の特徴

セラミックス被覆粒子燃料

(TRISO) 被覆粒子燃料は、燃料核を多層のセラミックスで被覆し、高い耐熱性を持つ。1800℃までの加熱試験で破損が認められず、2000℃でも著しい破損はない。

これにより **1600℃を超える範囲でも核分裂生成物を閉じ込め可能**。

黒鉛減速材

黒鉛は耐熱性が高く、2500℃でも使用可能。減速能が低く、炉心出力密度は軽水炉の約1/10となるが、**大きな熱容量**を持つ。さらに黒鉛は高い熱伝導率を有する。

ヘリウム冷却材

気体のまま使用され、**化学的に不活性**であるため燃料や構造材との反応がなく、中性子を減速や吸収する効果もほとんどない。

安全上の特徴

基本構成要素の特性を活かし、事故が発生しても以下の安全上の特徴を持つことが確認

自然炉停止特性：反応度温度フィードバックにより、自然に炉が停止し出力を自己制御

緩慢な温度上昇：炉心の温度上昇は緩やかで、黒鉛構造物の熱伝導や原子炉圧力容器の周囲の自然対流による崩壊熱除去により、燃料温度は1600℃以下に維持

炉心の溶融がない：セラミックス材料で構成された炉心は溶融せず、溶融燃料による脅威がない。

HTTRを用いた高温ガス炉の安全性実証

原子力機構は, HTTR (高温工学試験研究炉) を用いて高温ガス炉の安全性を実証. 異常事象を模擬した試験を実施し, 安全性を確認

制御棒引き抜き試験, 1次冷却材流量部分喪失試験, 炉心流量喪失試験, 炉心冷却喪失試験などを実施.

- 2010年12月の試験では, 出力30%からの炉心流量喪失試験で物理現象のみで自然に静定・冷却されることを確認.
- 2022年1月の試験では, 全交流電源喪失を仮定し, 炉心冷却設備全停止の状態で自然に静定・冷却されることを確認.
- 2024年3月の試験では, 定格出力100%において、ヘリウム循環機を停止して強制冷却機能を喪失させ、かつ、制御棒による原子炉の停止ができない状態においても、物理現象のみで原子炉の出力が低下し、安定な状態を維持することを確認.

(3) 技術的論点と検討の進め方

＊更田 豊志¹

¹東京大学

技術的論点および検討の進め方

第1回委員会において、高温ガス炉の安全基準を既存の軽水炉の設置許可基準の書き換えに矮小化せず、実証可能な根拠を基に議論する重要性が指摘された。これを受け、安全確保の考え方や安全機能への要求に関連する技術的論点を抽出・明確化するために、委員からの意見を集約した。この意見集約には、過去の「高温ガス炉の安全設計方針」や「ブリズマティック型高温ガス炉の安全設計プロセス」、およびIAEAの高温ガス炉に関する安全基準案の検討結果を参考資料とした。集約の結果、75件の技術的論点候補が提出された。

高温ガス炉の設計および安全上の特徴を踏まえ、安全対策の適正化に向けて、軽水炉から安全確保の考え方を変更するという観点で、以下の6つの技術的論点に整理

著しい炉心損傷の実質排除の可能性

- 。 最悪のシナリオを考慮し、炉心損傷の実質的な排除が可能かどうかの検討。

深層防護の実装の適切性

- 。 炉心損傷の実質排除の可否に応じた深層防護の実装が適切かどうかの検討。

LBEの選定と評価の適切性

- 。 深層防護に基づいた炉心冷却手段（LBE）の選定とその評価の適切性の検討。

未臨界移行が停止系の一系統に相当し得るか

- 。 原子炉の固有の安全性による未臨界移行が停止系の一系統に相当するかどうかの検討。

熱利用システム擾乱の影響の定量化

- 。 熱利用システムの擾乱が原子炉安全に与える影響の定量化の検討。

安全確保の考え方や機能要求の前提条件の適切性

- 。 高温ガス炉の安全確保の考え方や機能要求の前提条件が適切であるかの検討。

研究専門委員会「ブロック型高温ガス炉の安全基準の調査研究」の技術的論点や検討の進め方を報告した. 今後は, 高温ガス炉が有する特長と性能に基づいた安全基準の考え方を構築することを目的とし, 深層防護の実装, 事象選定方針, 安全評価方針など, 高温ガス炉の安全確保の考え方の検討を進めていく予定.

再エネ調和型新型炉システムの安全性評価技術の開発

(1) 全体概要

*相澤 康介¹, 今井 良行¹, 上地 優¹, 赤坂 尚昭¹, ヤン ジングロン¹, 佐久間 渉², 谷平 正典²,
岡本 圭太³, 森本 泰臣³

¹JAEA, ²MHI, ³日揮グローバル

再エネ調和型新型炉システムの安全評価技術の開発計画と現状について報告する。開発の背景には、水素製造や蓄熱を行う新型発電システムの事業化があり、異常状態を模擬し安全性を評価する試験装置や解析ツール、需給バランス最適化のためのIoT開発が必要である。高温ガス炉やナトリウム冷却炉を対象に、事故模擬試験装置は各設備の安全運転技術を確認し、解析コードのデータ取得を行う。解析ツールは発電・蓄熱・水素製造設備の異常挙動を模擬し、IoT装置は複数システムの発電量等を最適化し安全性を評価する。開発状況として、試験装置の設計を完了し、解析ツールで適切な過渡解析が可能であることを確認。IoT装置は最適化計算を実施し、出力指示が出せることが確認された。今後は試験装置の詳細設計と試験計画を進める。

再エネ調和型新型炉システムの安全性評価技術の開発

(2) 再エネ調和型新型炉事故模擬試験装置の設計

＊上地 優¹, 相澤 康介¹, ヤン ジングロン¹, 蔵本 亮一², 溝上 頼賢², 谷平 正典³
1JAEA, 2MHI パワーエンジニアリング, 3MHI

再生可能エネルギー調和型新型炉システムの安全評価技術の中で、特に事故模擬試験装置の設計に関する報告である。これらのシステムは、水素製造や蓄熱が可能な発電技術を含み、その事業化には異常状態を模擬し安全性を評価する試験装置と解析ツールの開発が不可欠である。加えて、再エネ電源の変動に対応した発電量や蓄熱量の最適化を行い、需給バランスと経済性を確保するための高速通信装置（IoT）の開発も求められている。試験装置は高温ガス炉とナトリウム冷却炉を想定し、ヘリウムガスループによる1次系および2次系、熔融塩を使用する蓄熱設備を含む。1次系には、加熱器、ガスタービン、発電機、中間熱交換器が含まれ、2次系には水素製造や蓄熱用の熱交換器が設置されている。さらに、ナトリウム系の熱交換器を持つ3次系も装備され、異常模擬が可能な発電モードとコジェネモードを運転モードとして設定している。設計結果として、各プラント構成要素について熱物質収支計算を行い、加熱器出力は5MW規模、出口温度は発電モードで約750℃、コジェネモードで約850℃と設定された。蓄熱設備には硝酸塩系熔融塩を用いた顕熱蓄熱方式を採用し、伝熱面積増大による大型化が懸念されたが、スタティックミキサー内蔵型の熱交換器設計によりコンパクト化が図られた。これに基づいてプラント全体の配置設計も完了した。結論として、試験装置設計の成果を報告し、今後は試験計画の詳細検討や安全性評価のための装置のコンパクト化、コスト削減のための更なる検討を進めていく予定である。

1G03 再エネ調和型新型炉システムの安全性評価技術の開発

(3) 再エネ調和型新型炉用安全解析ツールの開発事故模擬試験装置の設計

＊佐久間 渉¹, 谷平 正典¹, 相澤 康介², 今井 良行², 幕内 悦予², ヤン ジングロン²
1MHI, 2JAEA

再エネ調和型新型炉システムの安全評価技術の一環として、安全解析ツールの開発状況を報告する。本システムは水素製造や蓄熱など多様な発電用システムを備えており、異常時の挙動を模擬し安全性を評価する試験装置や解析ツールの開発が重要である。さらに、再生可能エネルギー供給に応じて発電量や蓄熱量を最適化するため、高速通信装置（IoT）との連携も必要とされる。今回報告する安全解析ツールは、RELAP5コードを基盤として構築され、事故模擬試験装置に対応するモデルを備える。安全解析ツールは、ヘリウムガスを冷却材とする1次系と、発電や熱利用を模擬する2次系を含むシステム全体の過渡挙動を評価することが可能である。1次系には、原子炉模擬ヒータ、発電機、中間熱交換器があり、2次系は水素製造や蓄熱設備を想定している。この解析ツールは異常発生時の挙動を評価するだけでなく、再エネ電源からの電力供給状況に合わせて運転最適化を行う高速通信装置と連携し、発電と熱利用を同時に行うコジェネモードと発電モードの間で運転条件を過渡的に変更することもできる。模擬試験装置の過渡解析では、発電機負荷喪失や中間熱交換器除熱喪失などのシナリオに対してツールを用いて解析を行った。発電機負荷喪失時、タービンが過回転するもバイパス流量制御系により適切に制御され、また、ヒータ出力制御系の作動により原子炉模擬ヒータの出口温度が維持された。これにより、開発した安全解析ツールが異常発生時のプラント挙動を正確に評価できることが確認された。結論として、再エネ調和型新型炉用の安全解析ツールの開発が進展し、試験装置における異常時の評価が可能であることを報告した。今後、試験装置の詳細設計を反映したさらに精密な解析モデルを作成し、安全性評価の精度を高めていく予定である。

再エネ調和型新型炉システムの安全性評価技術の開発

(4) 高速通信装置の開発

＊岡本 圭太¹, 角谷 亮介², 森本 泰臣¹, 赤坂 尚昭³, 幕内 悦予³, ヤン ジングロン³
1 日揮グローバル, 2 日本エヌ・ユー・エス, 3 JAEA

再エネ調和型新型炉システムの開発において、高速通信装置（IoT）のシステム概要、電力需給調整の最適化評価結果、及び技術課題について報告する。再エネ調和型新型炉システムは、再生可能エネルギーの発電量や電力需要の変動に応じて、発電量と蓄熱量を安全かつ経済的に最適化し、適切なプラント操作を行う必要がある。このため、新型炉と再エネプラント間で高速通信を行い、電力需給調整を行うIoT装置を開発中である。このIoT装置は、RELAP5コードに基づいて構築された新型炉システムの安全解析ツールと連携する形で開発され、Pythonを使用して最適化計算プログラムを構築した。最適化には、経済性の追求に加え、負荷追従運転や事故時の系統安定性を優先するケースも含めた複数の運転モードを考慮している。代表的なシナリオとして、1週間分の電力需要予測データを用いて最適化解析を実施し、機能評価を行った。

その結果、構築したプログラムが想定した最適化と出力配分指示を適切に実行できることが確認された。例えば、負荷追従運転時には需要電力量や再エネ発電量の変動に合わせて原子力発電と蓄熱設備を組み合わせ、安定した運転計画が提示された。これにより、システムが経済的かつ安全に対応可能なことが実証された。

今後の課題として、新型炉システム安全解析ツールとの接続により、安全運転への影響をより詳細に評価することが必要である。また、本研究では負荷追従運転、経済性、事故時の模擬に焦点を当てたが、環境負荷を考慮した運転モード（CO₂排出量削減運転）を新たに導入する可能性も検討中である。これらの改良により、さらに持続可能で効率的な運転を目指す。

2. 原子力工学国際会議 (ICONE) における主な高温ガス炉関係口頭発表

調査対象: 2024年8月ICONE31 (チェコ, プラハ)

会議名	国名等	炉型	分野	概要
ICONE31 (12件)	中国: 10 日本: 2	HTR-PM: 10 HTTR: 1 HTGR: 1	制御: 2 材料: 2 ベンチマーク: 1 核計算: 1 ペブルフロー: 1 動的特性: 1 運転: 1 燃料: 1 熱伝導: 1	・大部分が中国精華大学からの報告であり, 特に近年話題であるAIを活用した運転戦略の成果報告が特筆すべきポイントである. 総じて中国からは10件(熱流動, 機械学習, 腐食化学等), そして日本からは1件(ベンチマーク核計算)の発表がなされた

- Tsinghua Univ. (中国)からインコネル617の酸化挙動と引っ張り特性に関する研究が報告された。インコネル617は不純なヘリウム中よりも空気中で著しく酸化し、引張強度が低下する。酸化を抑えるためには、ヘリウム中の酸素、水、COの制御が重要であると議論された (ICONE31-130256参照)。
- JAEAから、MVP-3とJENDL-5を用いてHTGRの核種生成・燃焼と崩壊熱評価 方法の検証を進めていると報告された (ICONE31-131748参照)。
- INNET(中国)からHTR-PM600の制御システムをMATLABでシミュレーションする研究成果が報告され、タービン孤立時でも安定した負荷追従運転が可能であることが報告された (ICONE31-131854参照)。
- Tsinghua Univ.から高温ガス冷却ペブルベッド炉の燃料ペブルモデリング法を比較する報告がなされ、RPTモデル (Reactivity-equivalent Physical Transformation) が計算コストを削減しつつ非均質性効果を最適に捉えることが示された (ICONE31-131880参照)。

関係機関からの情報発信やニュース等の公開情報の収集と整理

X-energy 社関連

Funds awarded to assist Xe-100 development in the UK

04 April 2024 WNN

<https://world-nuclear-news.org/Articles/Funds-awarded-to-assist-Xe-100-deployment-in-the-U>

X-Energy社, UK Holdings社とCavendish社は, Xe-100小型モジュール炉の設計評価とサプライチェーン開発のために, 英国の将来の原子力促進基金から資金を申請し, 成功した. 英国政府は334万ポンドを提供し, X-Energy社も同額を拠出して合計668万ポンドのプログラムとなる. このプロジェクトは, ハートルプールに12基の炉を建設し, 2030年代初頭までに完成させる計画で, 英国で最大40基の炉を建設することを目指している. このプロジェクトは多くの雇用を創出し, クリーンで信頼性のある電力を提供することを目的としている.

Study to assess benefits of Hartlepool SMR plant

23 May 2024 WNN

<https://world-nuclear-news.org/Articles/Study-to-assess-benefits-of-Hartlepool-SMR-plant>

ティーズサイド大学とX-energy社およびCavendish社は, ハートルプールの原子力発電所プロジェクトの社会経済的影響を評価するために協力関係を築いた. 評価は, 地域社会や経済に与える影響を分析し, 雇用創出や脱炭素化への貢献を見積もることを目的としている. このプロジェクトは, 英国政府とX-energy社の共同資金による668万ポンドのプログラムの一部であり, 2030年代初頭までにハートルプールに12基の炉を建設する計画である. ティーズサイド大学の専門知識と地域社会との連携を活用し, 地域への利益を最大化し, 影響を軽減するための最善の方針を策定する.

Amazon、X-energyへの投資を発表、SMRプロジェクト計画を公開

2024年10月16日 WNN

<https://www.world-nuclear-news.org/articles/amazon-invests-in-x-energy-unveils-smr-project-plans>

Amazonは、X-energyに出資し、2039年までにアメリカ国内で最大5GWの小型モジュール炉（SMR）を展開することを目指していると発表した。

Amazonの気候変動対策基金「Climate Change Pledge Fund」が、X-energyに対する5億ドルの資金調達でメインの投資家として機能した。この資金調達には、シタデルの創業者兼CEOのケン・グリフィン、Ares Management Corporation、プライベート・エクイティ会社NGP、およびミシガン大学も参加している。この資金は、原子炉設計とライセンスの完成、そしてテネシー州オークリッジにおけるTRISO-X燃料製造施設の最初のフェーズの完成を目指している。

JAEA-NNL関連

UK' s NNL and Japan' s JAEA strengthen HTGR fuel collaboration

24 April 2024 WNN

<https://world-nuclear-news.org/Articles/UK-s-NNL-and-Japan-s-JAEA-sign-HTGR-fuel-agreement>

被覆粒子燃料（CPF）は、国立原子力研究所（NNL）のプレストン実験室で生産されているが、日本の経験を学ぶため、JAEAとNNLが協力覚書に署名した。この協力は、HTGR実証炉の燃料製造技術の開発と知的財産権の取り決めに焦点を当てている。英国政府はHTGR研究に6000万ポンドを拠出し、NNLとJAEAは3100万ポンドを受け取った。この協力により、英国はネットゼロ達成に向けて進展し、日本と英国は難脱炭素化産業向けの技術開発を目指す。