

RAHP ニュースレター

No. 21

世界の高温ガス炉開発 ～ 現状と将来計画 ～

2022 年 3 月

高温ガス炉プラント研究会

HP : <http://www.iae.or.jp/htgr/index.html>

[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
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（電力、原子力メーカー等）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。

2021年度よりニュースレターの形態を変更し、下記目次に示す2章構成とした。第2章は本研究会の第16回定期講演会（2022.1.17 オンライン）において、本研究会の伊与久達夫テクニカルアドバイザーが行った講演資料である。

目 次

第1章	日本における高温ガス炉開発の現状	1
1.	日本のエネルギー需給状況	1
2.	脱炭素化の動き	5
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	
3.	日本の高温ガス炉開発状況	10
3.1	HTRの再稼働	
3.2	ポーランド案件への取組	
4.	高温ガス炉プラント研究会の活動	15
第2章	国内外の高温ガス炉開発動向	18
1.	高温ガス炉の炉型について	20
2.	世界における高温ガス炉の開発状況	21
3.	政策的側面からの情報調査・調査結果	22
4.	技術的側面からの情報調査・調査結果	24
5.	中国、カナダ及び米国の動向	26
5.1	中国：HTR-PM	
5.2	カナダ：SMR計画	
5.3	米国：燃料開発	
6.	おわりに	33

第 1 章 日本における高温ガス炉開発の現状

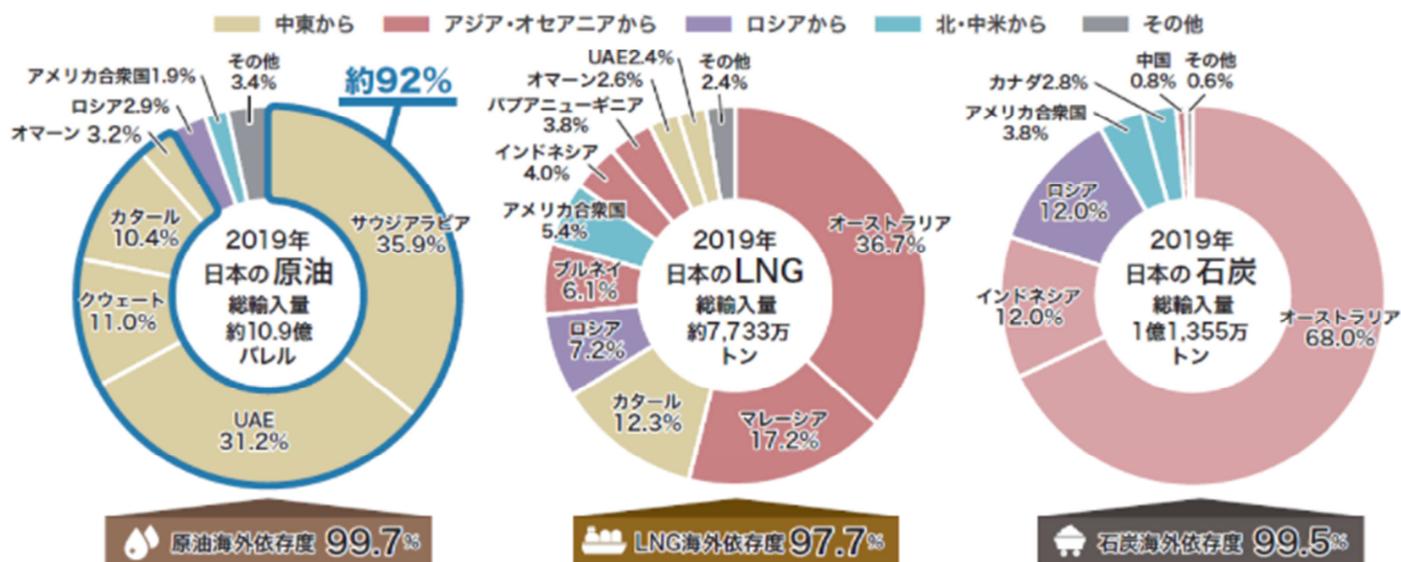
1. 日本のエネルギー需給状況

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 92%
- ・ 天然ガス . . . オーストラリア・マレーシア 2 国で 54%
- ・ 石炭 . . . オーストラリア 1 国で 68%



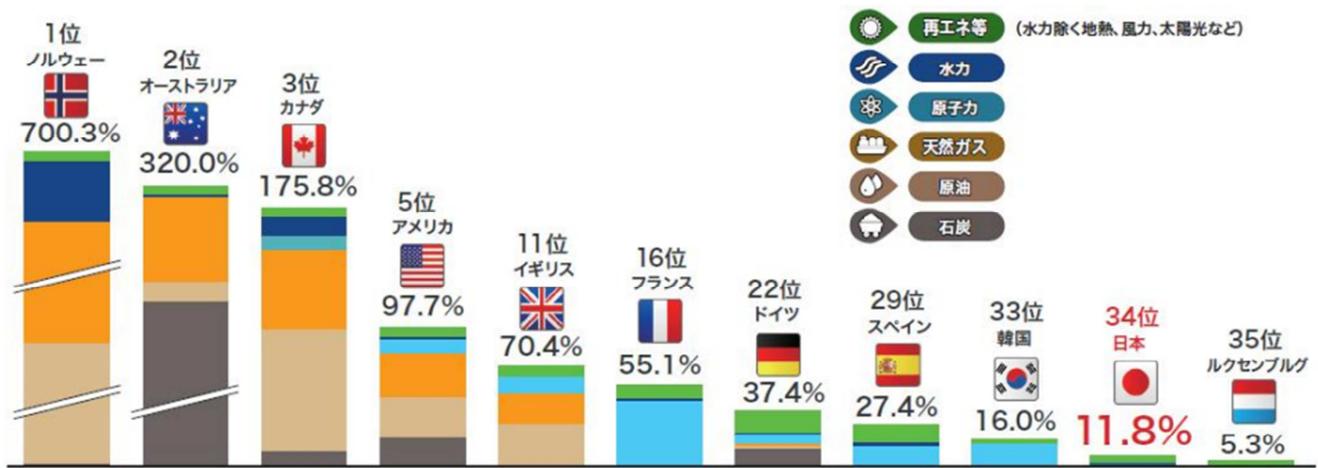
(出典) 財務省「日本貿易統計」(海外依存度は総合エネルギー統計より)

図表 1-1 日本の化石燃料輸入先 (2019 年)

出典：資源エネルギー庁、2020. 11. 18、「日本が抱えているエネルギー問題 (前編)」

(2) 低いエネルギー自給率

日本のエネルギー自給率は、2018 年において OECD35 か国中 34 位と低水準である。2018 年の日本の自給率は 11. 8%で、2010 年の 20. 3%に比べ低下している。



(出典) IEA「World Energy Balances 2019」の2018年推計値、日本のみ資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」の2018年度確報値。※表内の順位はOECD35カ国中の順位

図表 1-2 主要国の一次エネルギー自給率比較 (2018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 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

2019年度の日本の温室効果ガス排出量は、12億1,200万トン(CO₂換算、以下同)で、2013年度の排出量14億800万トンに比べ14%(1億9,700万トン)減少した。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(再生可能エネルギー(以下、再エネ)の拡大等)による電力由来のCO₂排出量の減少が主な要因である(データ:環境省、2019.4.12、報道発表資料)。

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)に移行していく必要がある。

1.2 エネルギー基本計画

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%に上げることにより、全電力中の割合を50%に高めることとしていた。

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 1-4 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

この計画は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ることとなり、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現在(2019年)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。

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 1-5 第6次エネルギー基本計画の概要
出典：資源エネルギー庁資料から作成

2. 脱炭素化の動き

2.1 2050年カーボンニュートラル

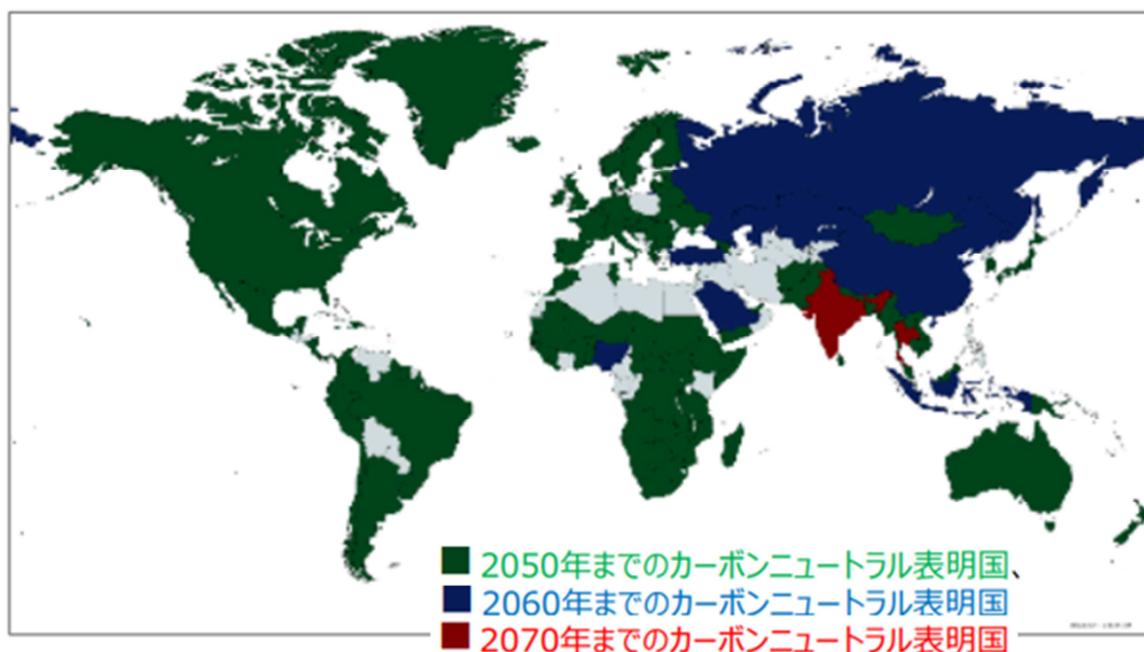
(1) 世界に向けて宣言

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、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2021年11月（COP26終了時点）で150か国・地域以上、世界全体のCO₂排出量に占める割合は88.2%である。



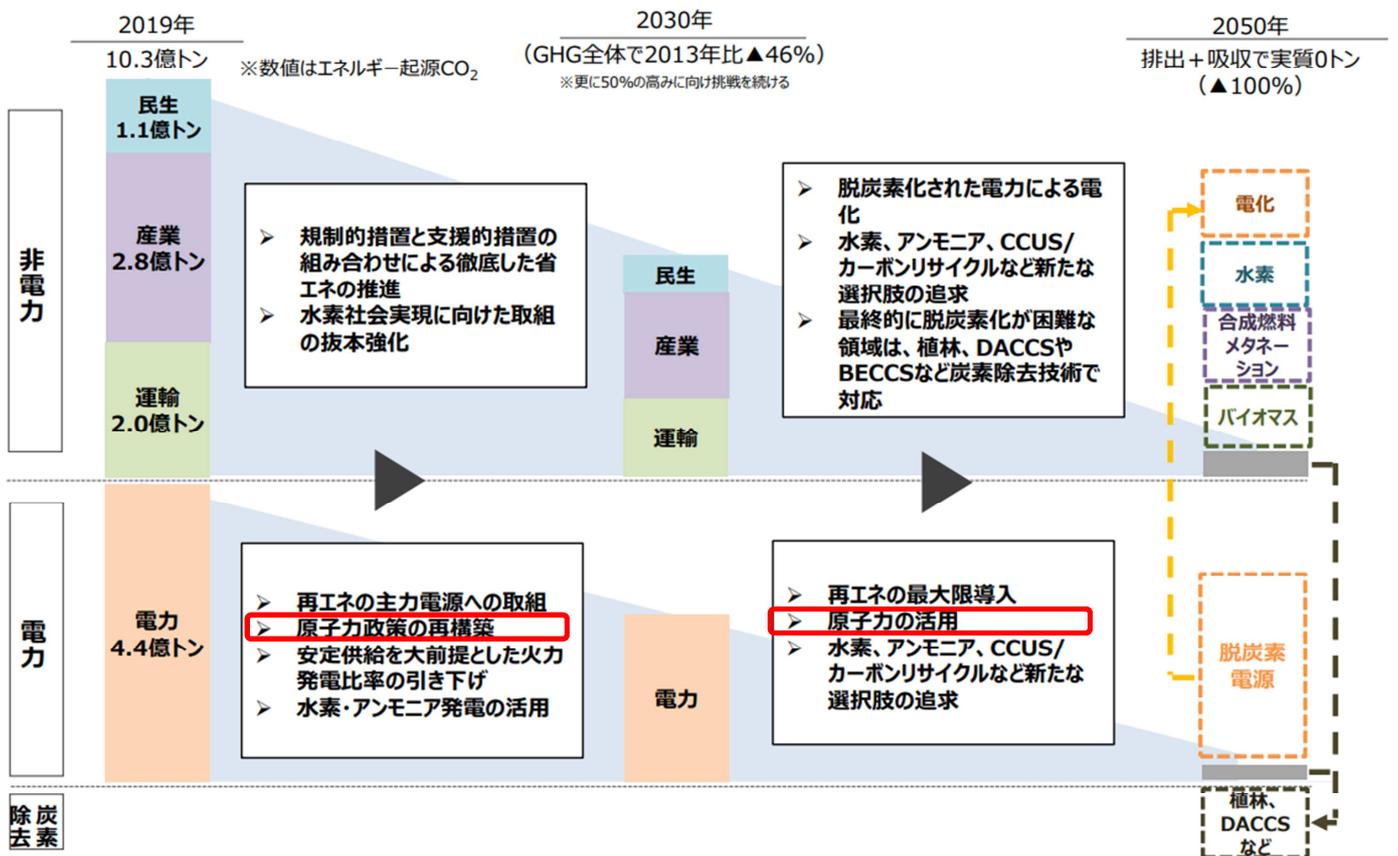
図表 2-1 カーボンニュートラルを表明した国・地域（2021年11月時点）

出典：経済産業省、2021年11月

(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10.3億トンをもとに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。



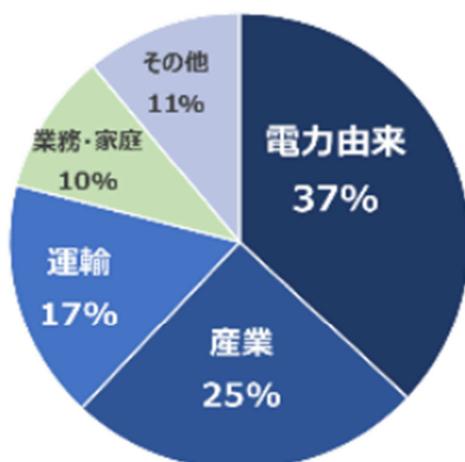
図表 2-2 2050年カーボンニュートラル実現のイメージ

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

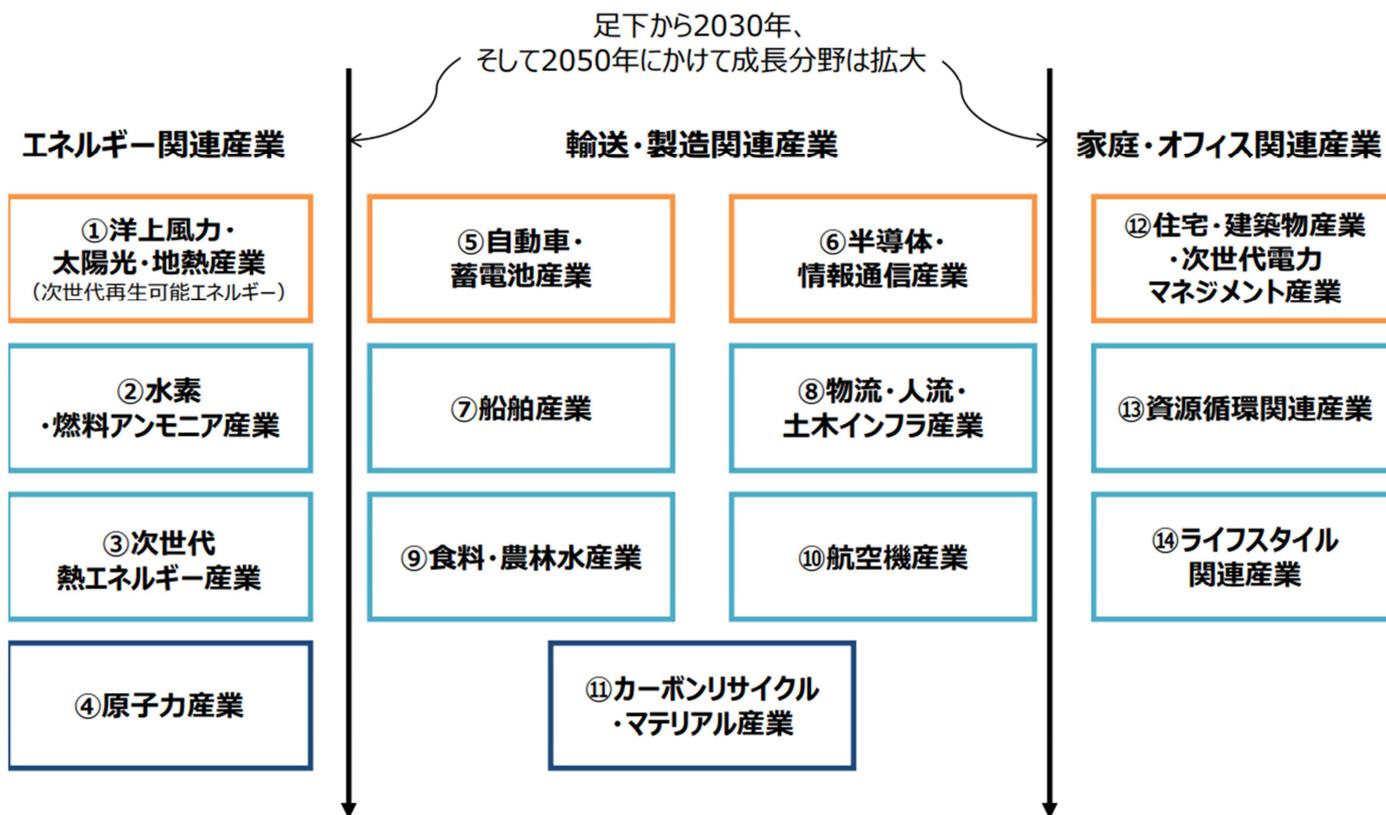
「グリーン成長戦略」は電力部門の脱炭素化を大前提としている。「現在の技術水準を前提とすれば全ての電力需要を100%単一種類の電源で賄うことは一般的に困難で、再エネ、水素発電、火力+CO₂吸収、原子力を含めてあらゆる選択肢を追求する」としている。



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

下図表に示す 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（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。

④原子力産業

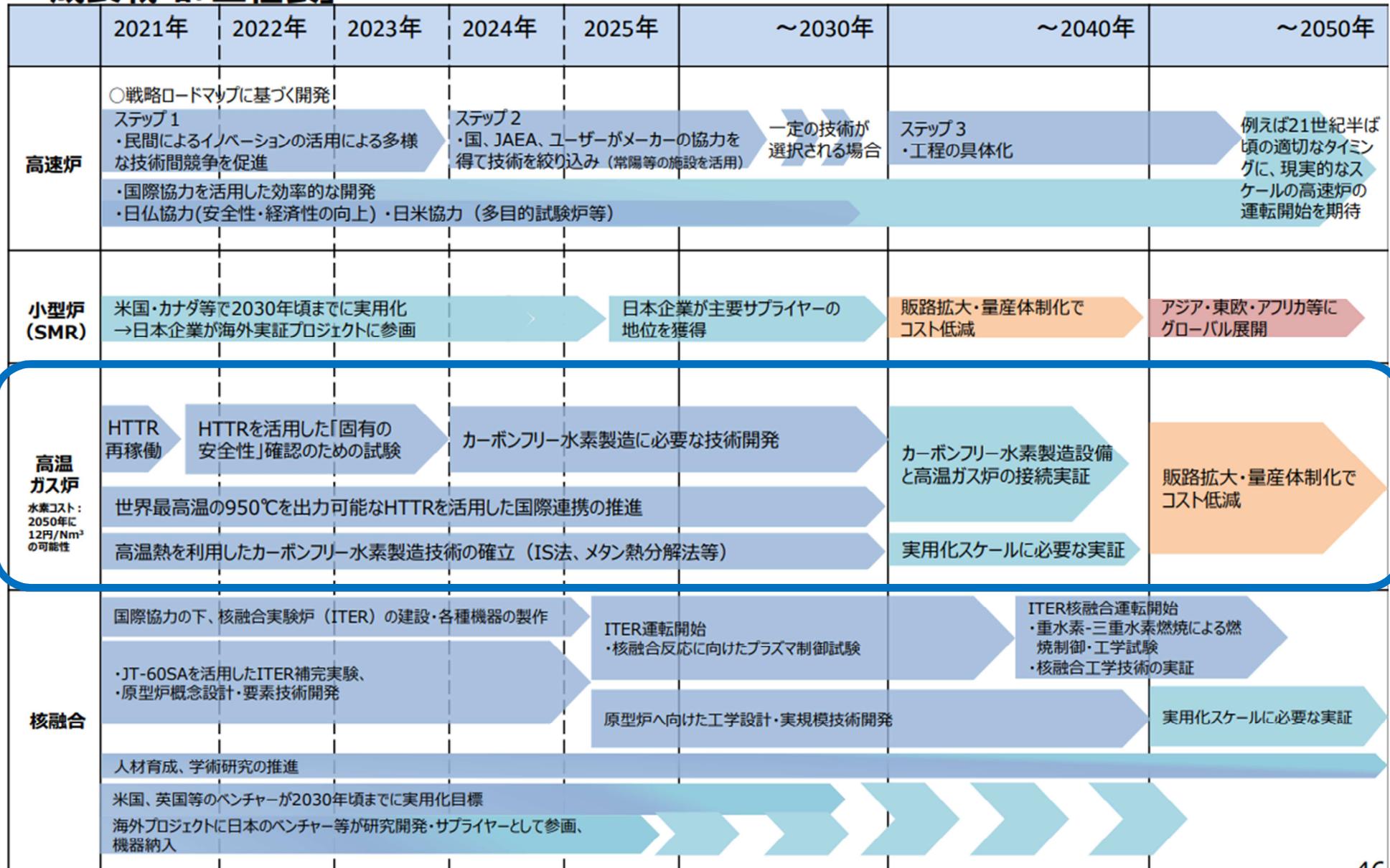
- ◆ 原子力は、実用段階にある脱炭素の選択肢。可能な限り依存度を低減しつつ、国内での着実な安全最優先の再稼働の進展とともに、海外（米・英・加等）で進む次世代革新炉開発に、高い製造能力を持つ日本企業も連携して参画し、多様な原子力技術のイノベーションを加速していく。

	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。日仏、日米協力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。主要サプライヤーの地位を獲得。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。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。
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。

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

●具体化するべき政策手法： 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（青椀追記）

3. 日本の高温ガス炉開発状況

3.1 HTTR の再稼働

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

(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°C、短時間であれば 2,000°C 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°C 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°C

1 次冷却材圧力：4MPa

炉心構造物：黒鉛

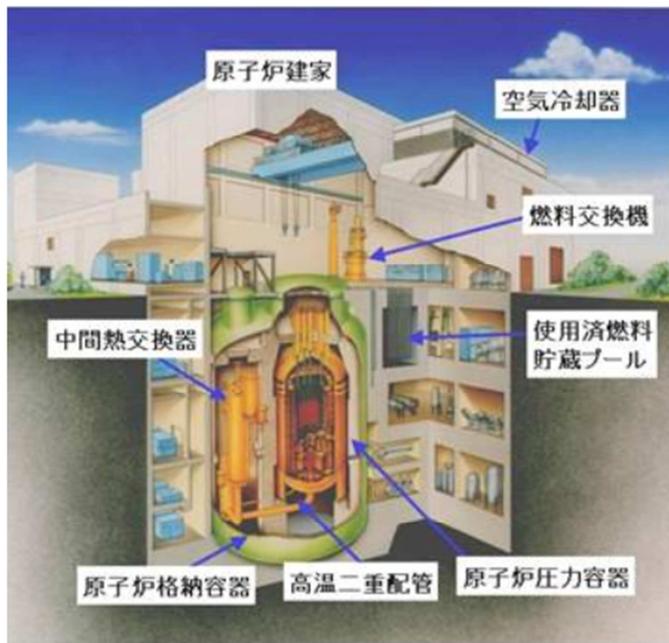
炉心有効高さ／等価直径：2.9m／2.3m

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



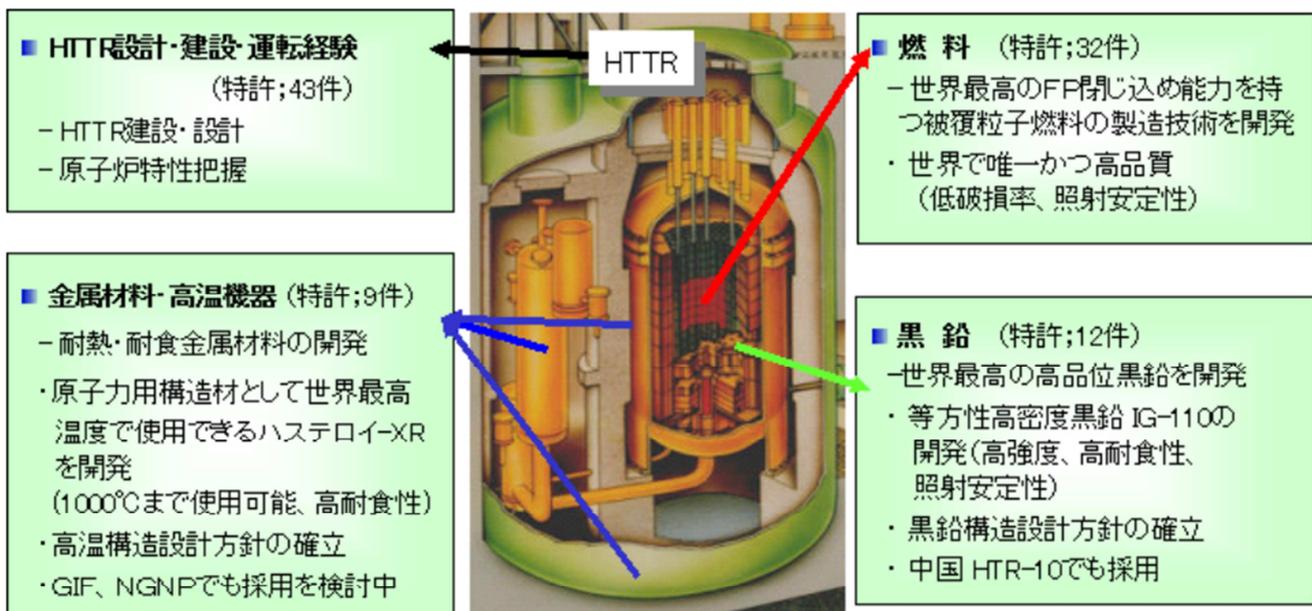
図表 3-1 HTTR の構造

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である。
- ・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°C まで使用可能な Hastelloy-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

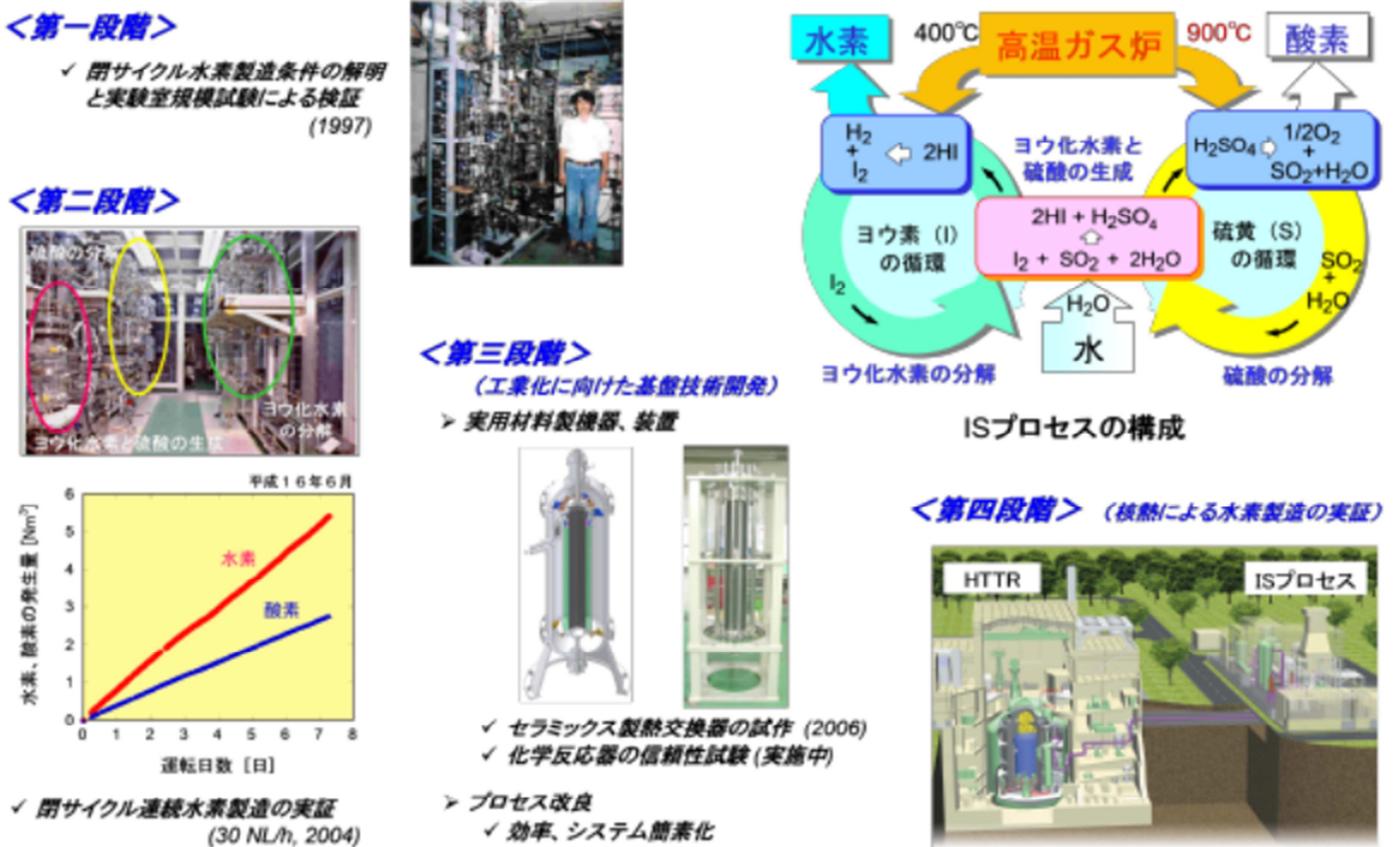
(5) IS プロセスによる水素製造技術開発

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 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。

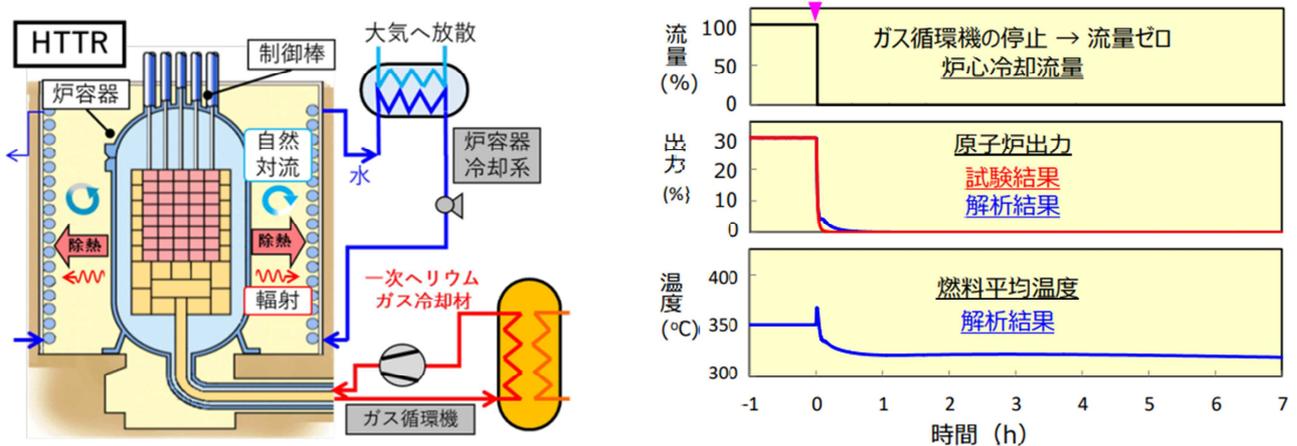
2021年9月22日、定期事業者検査合格、2014年11月26日に行った新規制基準対応に係る原子炉設置変更許可の申請以降、約7年間に及ぶ新規制基準対応を完了、HTTRを用いた高温ガス炉の研究開発を本格的に再開している。

今後はOECD/NEA（経済協力開発機構／原子力機関）の国際共同試験であるLOFC（炉心強制冷却喪失）試験を実施する予定である。

(7)LOFC 試験

本試験は7か国（日本、米、仏、独、韓、チェコ、ハンガリー）の国際共同試験として下記試験を行う。

- ①原子炉運転中に全交流動力電源を喪失し、かつ、制御棒が挿入できない事象を想定した試験
 - ・ 原子炉運転中に原子炉の冷却に使用する循環機等を停止
 - ・ 原子炉を緊急停止させずに制御棒を運転状態の位置に保持
- ②高温ガス炉の固有の優れた安全性により、原子炉の出力が低下し、自然冷却等によって原子炉が安全な状態に維持され、燃料破損等に至らないことを確認



低出力(30%)	炉心流量喪失試験(ガス循環機停止)	⇒ 2010.12実施
高出力(100%)	炉心流量喪失試験(ガス循環機停止)	⇒ 2022.3 予定
低出力(30%)	炉心冷却喪失試験(ガス循環機+炉容器冷却系停止)	⇒ 2022.1 予定

図表 3-4 LOFC 試験の内容と工程

出典：日本原子力研究開発機構、西原、2022.1.17、
高温ガス炉プラント研究会第16回定期講演会講演資料

(8)「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。

3.2 ポーランド案件への取組

日本政府とポーランド政府は、2017年5月18日、「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、公開情報に基づく情報交換(国立原子力研究センター NCBJ)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」に基づく技術開発、人材育成(国立原子力研究センター NCBJ)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」として更新経済協力において、日本国経済産業省及び文部科学省並びにポーランド共和国気候・環境省、開発・労働・技術省及び教育・科学省の支援の下、日本原子力開発機構(JAEA)とポーランド国家原子力研究センター(NCBJ)との間における高温ガス冷却炉分野の研究開発に向けた協力を奨励することが明記された。現在、研究協力実施取決めを締結し、具体的な協力を開始しつつある。

4. 高温ガス炉プラント研究会の活動

「高温ガス炉プラント研究会」は民間企業を中心とした自主的活動として高温ガス炉に関する調査研究等を行っている組織である。1985年の設立以来、36年にわたって高温ガス炉の実現に向けた調査研究・情報発信等の活動を継続している。

(1) 設立経緯等

・ 設立 1985年4月

・ 構成 会長 安 成弘（1985年～2007年）

岡 芳明（2008年～2009年）

関本 博（2010年）

岡本孝司（2011年～現在）

会員 学識経験者、テクニカルアドバイザー、
原子力関連メーカー、建設会社

オブザーバー 学識経験者、日本原子力研究開発機構、電力中央研究所、電力会社、メーカー

事務局 一般財団法人エネルギー総合工学研究所（1995～2015年）
株式会社桜門イノベーションリサーチ（2016年～）

(2) 背景・活動目的・目標・基本方針

① 背景と活動目的

21世紀において70億人を超えた人類は、水・資源・エネルギー確保、地球環境の保全、社会経済の発展という3つの課題を同時解決し、持続可能な発展を達成しなければならない。そして、原子力の利用は、これらに対し大きく貢献すべきであり、また期待されている。かかる観点から、原子力エネルギーを有効に活用するには、安全性の確保を第一にし、発電のみならず発生する熱も有効に活用していく必要がある。

2014年4月に閣議決定された「エネルギー基本計画」において、「利用方法次第では高いエネルギー効率、低い環境負荷、非常時対応等の効果が期待される水素は、将来の二次エネルギーの中心的役割を担うことが期待される」と水素社会の実現に向けた取組を加速することが盛り込まれ、加えて「水素製造を含めた多様な産業利用が見込まれ、固有の安全性を有する高温ガス炉など、安全性の高度化に貢献する原子力技術の研究開発を国際協力の下で推進する」とし、高温ガス炉が日本の将来のエネルギーを考えるうえで重要なシステムとして位置付けられた。

これを受けて2014年9月、文部科学省が中間とりまとめを行い、高温ガス炉の研究開発を進めることが明記され、産学官によるアライアンスの構築が進められ、2015年4月、高温ガス炉の実用化戦略を策定することを目的とする産学官の協議会がスタートした。電気を作るだけでなく、熱エネルギー利用の可能性を期待して様々な業界のメンバーが協議会に参加した。

2015年6月に閣議決定された成長戦略「『日本再興戦略』改訂2015」において、「高温ガス炉など安全性の高度化に資する技術開発の国際協力を進める」ことが、新たに講ずべき具体的施策の一つに挙げられている。

2020年10月、日本は「2050年カーボンニュートラル」を宣言し、それに伴う「グリーン成長戦略」において電力部門の脱炭素化を目指し、水素産業の創出や安全性に優れた次世代炉の開発が取り上げられている。実行計画において高温ガス炉の今後の取組として、「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」と記述されている。

以上を踏まえ、本研究会では高温ガス炉プラントの実用化に関する技術調査・研究・評価（安全性、経済性、市場性、開発戦略などを含む）と情報発信を行う。

②活動目標

- ・高温ガス炉（発電ならびに水素製造等の熱利用）の実用化検討評価への国、民間団体の理解・支援獲得
- ・我が国主体の高温ガス炉実証炉の早期（2030年頃）実現

③活動基本方針

- ・国内外の技術調査や現状把握等を通じて実用化開発シナリオの検討
- ・実用化プラントの技術的・経済的フェージビリティ検討、及び総合評価の実施、あわせて国、民間団体への働きかけの実施

(3)活動内容

①有識者による講演

高温ガス炉プラントの実用化（実現性）を戦略的かつ多面的に検討するための、有益かつタイムリーなテーマ・講演者を選定して、講演を実施し、加えて意見交換を実施する。講演者は、高温ガス炉の位置付けや活用面から何らかの斬新な情報が提供できる有識者とする。講演後の講演者との討論も重視する。

②調査・研究・評価

(a)国内外動向調査

高温ガス炉に関し、国内外の最新動向を調査し、(b)及び(c)に反映させる。

(b)高温ガス炉戦略の検討

高温ガス炉の実用化を念頭に置いて課題を考慮し、開発展開等を検討する。

(c)内外への情報発信

- ・ニュースレターの作成・HPへの掲載
- ・定期講演会の実施
- ・ホームページによる情報発信

(4) 定期講演会開催実績

本研究会では国内外の有識者による講演及び本研究会の活動報告を内容とし、一般公開の講演会を原則として毎年1回実施している。

第1回	2002年12月11日	九州大学
第2回	2004年12月1日	東京工業大学
第3回	2005年11月18日	中部電力
第4回	2006年11月17日	茨城県立図書館
第5回	2007年11月16日	東北大学
第6回	2012年1月31日	京都大学
第7回	2013年1月22日	早稲田大学
第8回	2013年12月10日	東京海洋大学
第9回	2015年1月6日	東京大学
第10回	2016年3月7日	東京大学
第11回	2017年1月30日	東京大学
第12回	2018年1月25日	東京大学
第13回	2019年2月7日	東京大学
第14回	2020年1月22日	東京大学
第15回	2021年1月18日	オンライン開催
第16回	2022年1月17日	オンライン開催

第2章

高温ガス炉に関する国内外動向調査報告

本資料は高温ガス炉プラント研究会第16回定期講演会(2022年1月17日)における伊与久テクニカルアドバイザーの講演資料である。

第6次エネルギー基本計画(令和3年10月22日に閣議決定)

2030年までに、民間の創意工夫や知恵を活かしながら、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進めるとともに、(核融合開発)

- 海外の高温ガス炉開発の動向調査は、ここ数年、主に中国、米国及びカナダの推進側と規制側の両側面から調査。今年は、**特に米国の燃料開発に焦点**

本講演の目次

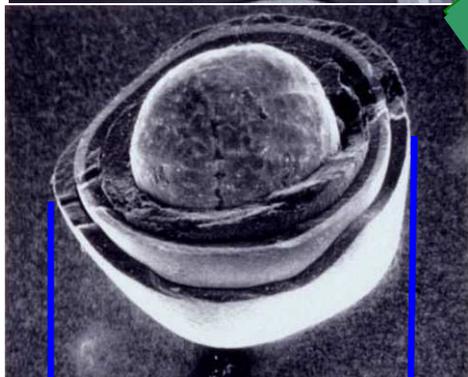
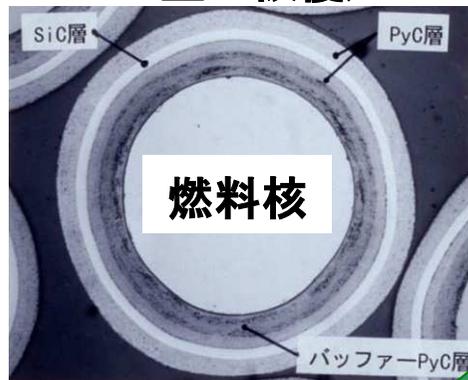
1. 高温ガス炉の炉型について
 2. 世界における高温ガス炉の開発状況
 3. 政策的側面からの情報調査・調査結果
 4. 技術的側面からの情報調査・調査結果
 5. 中国、カナダ及び米国の動向
 - 5.1 中国:HTR-PM
 - 5.2 カナダ:SMR計画
 - 5.3 米国:燃料開発
 6. おわりに
- 付録

1. 高温ガス炉の炉型について

「ブロック型炉心」と「ペブルベッド型炉心」の違い

被覆燃料粒子

(燃料核をセラミックスで多重に被覆)



約1mm

燃料コンパクト



黒鉛ブロック



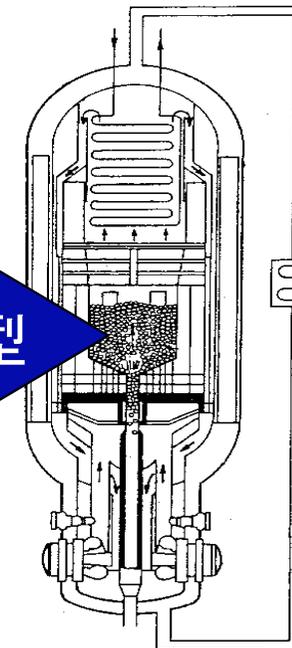
ブロック型

減速材、炉心構造物に黒鉛材料を使用

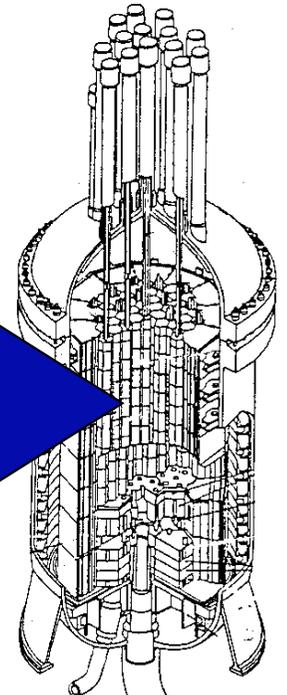
ペブルベッド型



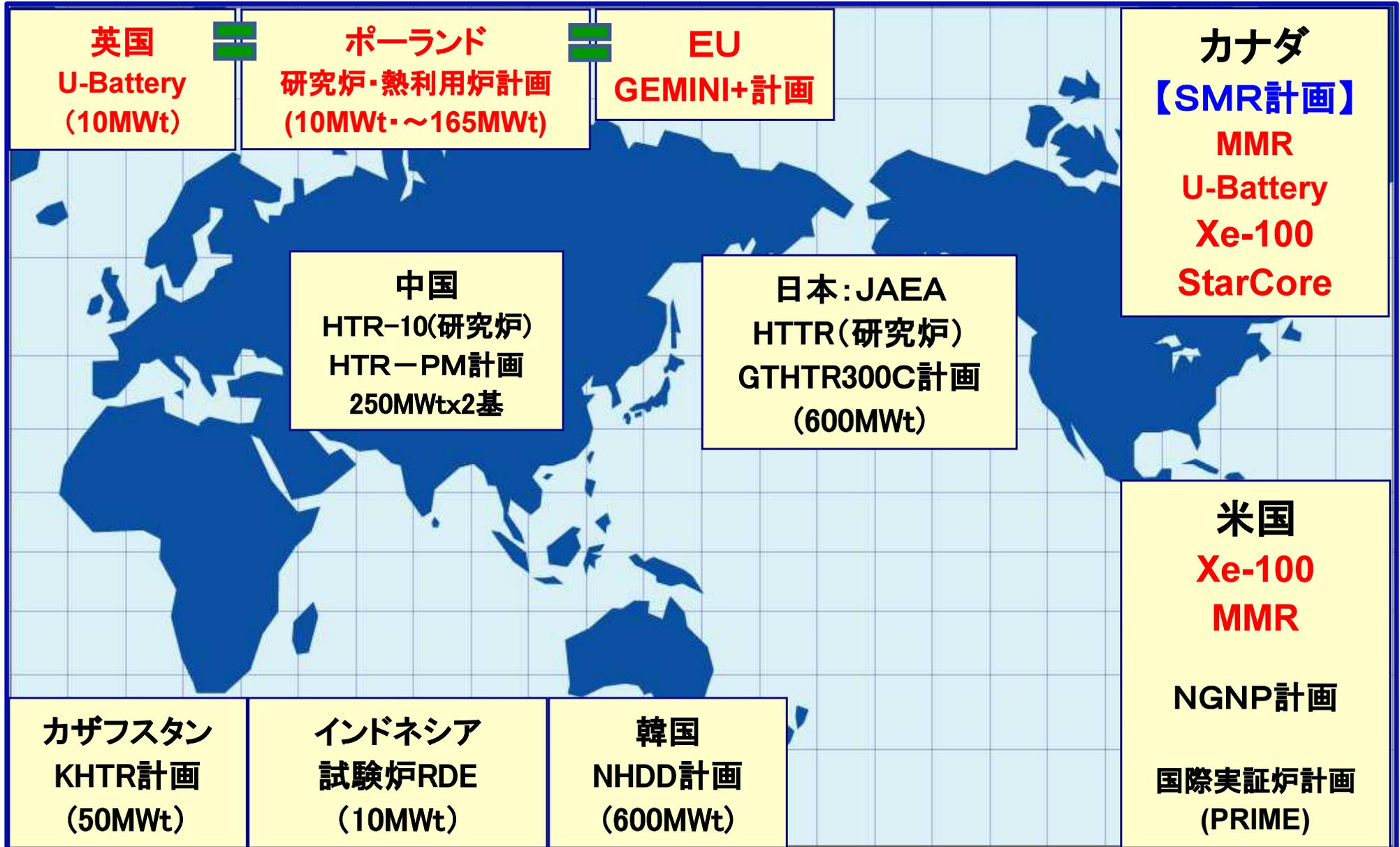
球状燃料(直径60mm)



冷却材にヘリウムガスを使用



2. 世界における高温ガス炉の開発状況



ブロック型炉心	日本(HTR等)、英国(U-Battery)、米国(MMR, PRIME) ...
ペブルベッド型炉心	中国(HTR-10、HTR-PM)、米国(Xe-100)、インドネシア(RDE)

3. 政策的側面からの情報調査・調査結果(1/2)

調査方針: 国内外を対象とし、政府、研究機関、民間等の公開情報を調査する

国内

- 2021年 6月: グリーン成長戦略での高温ガス炉開発の工程表をMETIが公表
- 2021年 7月: HTTRが7月30日に運転を再開、及びMEXTとMETIの大臣談話
【9月19日にフルパワー到達、9月22日に定期事業者検査が終了】
- 2021年 8月: 原子力学会誌「特集 SMR等革新炉の安全と安全規制について」
- 2021年 9月: 2022年度概算要求で、高温ガス炉利用や福島の水産復興で新規計上

国外

- ポーランド(原子力全般)
 - ・2021年 5月: 文部科学省とNCBJ、HTGR設計作業の次のラウンドへの協定に署名
 - ・2021年 6月: Synthos(化学製品)とPKN Orlen(石油)、SMRで協力することに合意
 - ・2021年 7月: 米国貿易開発庁、ポーランドの原子力導入計画を支援
 - ・2021年 9月: Synthos(化学製品)、ZE PAK社(エネルギー)と合併でSMR建設に投資
- 英国(U-Battery等)
 - ・2021年 5月: BEIS、包括的設計認証審査GDAの対象をAMRにも広げると表明
 - ・2021年 5月: Penultimate Power、JAEAと協力してHTGRのライセンス取得を目指す
 - ・2021年 7月: BEIS、AMR実証計画では2030年代初頭までに1億7,000万ポンドの予算で、HTGRの実証炉を同計画の初号機として完成させる案を公表
 - ・2021年 8月: 英政府、2030年までに5GWの低炭素水素生産には原子力は重要と言及
 - ・2021年 9月: U-Batteryとキャベンディッシュ原子力、AMRのモックアップを発表
- 中国(HTR-PM)
 - ・2021年 1月: HTR-PM、高温高压(約250°C・7MPa)状態での機能試験を開始
 - ・2021年 8月: HTR-PM、非核熱蒸気を用いた蒸気タービンの試験完了、燃料装荷開始
 - ・2021年 9月: HTR-PM・1基目、9月12日午前9時35分に初臨界を達成
 - ・2021年11月: HTR-PM・2基目、11月11日に大気圧で初臨界を達成
 - ・2021年12月: HTR-PMをグリッドに接続

主な出典: WNN (<https://www.world-nuclear-news.org/>)、JAIF (<https://www.jaif.or.jp/journal/news/>)

3. (2/2)

米国 及び カナダ

- カナダ(MMR、Xe-100)
 - 2021年 4月:カナダ原子力研究所、MMR用燃料ペレット(FCM燃料)の製造に成功
 - 2021年 4月:カナダ3州の要請を受け、SMR開発の実現可能性に関する研究を完了
 - 2021年 5月:MMRがCNSCのライセンスプロセスの技術的レビュー段階に移行
 - 2021年 5月:X-energyとKinectrics、Xe-100の設計と展開のための協力協定に署名
 - 2021年 6月:カナダの研究所、原子力水素のFS(実現可能性調査)を開始
- カナダと米国
 - 2021年 5月:X-energy、カナダの子会社の社長にKatherine Moshonas Coleを任命
 - 2021年 8月:米国NRCとカナダCNSCの規制当局、最初のライセンス協力を完了
 - 2021年 9月:カナダのカメコ、XエネルギーのXe-100展開のサポートに参加
- 米国(Xe-100、HALEU燃料)
 - 2021年 5月:セントラス、原子力燃料販売で力強い成長
 - 2021年 5月:DOE-ARPA-E局、先進炉から発生する廃棄物量を削減するための基金設立
 - 2021年 6月:世界原子力協会、SMR等の規制の迅速化や世界的調和を提言
 - 2021年 6月:NRC、セントラスのHALEU燃料生産を可能にするライセンス改正を承認
 - 2021年 6月:NRG所有の高中性子束炉(HFR)で、MMR用FCM燃料を照射する計画
 - 2021年 6月:イリノイ大学、NRCに対しキャンパス内にMMRを建設する意向を通知
 - 2021年 8月:X-energy、Xe-100の制御棒系の開発に、Curtiss-Wrightを選定
 - 2021年 8月:X-energy、燃料部門を拡張してTRISO-Xと呼ばれる100%子会社を設立
 - 2021年 8月:サンディア研究所、事故計算コードMELCORを先進炉(HTGR含む)用に開発
 - 2021年 9月:韓国DOOSAN、X-energyとエンジニアリングサービス契約を締結
 - 2021年 9月:アメリカ原子力学会、議会にHALEUの国内供給確保の必要性を訴える
 - 2021年 9月:米国防総省、移動式マイクロリアクターに関する環境影響声明の草案公表
 - 2021年11月:X-energy、Centrus社の支援を受けてTRISO燃料製造工場の予備設計を完了
 - 2021年11月:米国で原子力への支援も盛り込んだインフラ投資雇用法が成立
 - 2021年11月:オーロラ(超小型高速炉)開発のOkloとCentrusがHALEUサプライでチームを組む

主な出典: WNN (<https://www.world-nuclear-news.org/>)、JAIF (<https://www.jaif.or.jp/journal/news/>)

4. 技術的側面からの情報調査・調査結果 (1/2)

調査方針: 国内外会議を対象とし、高温ガス炉の特徴を考慮して調査・整理(付録1参照)

HTR2021 6月2-4日@インドネシア・リモート	国名等	炉型	分野	特記
	<p>合計81件</p> <p>中国:25 インドネシア:24 米国:12 南アフリカ:5 ポーランド:4 日本:3 英国:2</p> <p>発表が1件の国・国際機関【EC、フランス、ドイツ、チェコ、ロシア、カナダ】</p>	<p>RDE: 8</p> <p>HTR-10: 4</p> <p>HTR-PM: 3</p> <p>HTTR: 3</p> <p>PBMR: 2</p>	<p>分野1(燃料): 19</p> <p>分野2(黒鉛): 1</p> <p>分野3(金属): 9</p> <p>分野4(核): 16</p> <p>分野5(熱安全): 11</p> <p>分野6(その他): 18</p> <p>分野7(熱利用): 7</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・12か国・1国際機関が発表。中国とインドネシアで半数以上 ・キーノート発表で、JAEA、BATAN、INET、BEIS(英)、NCBJ、USNC、X-energyの機関から発表 ・燃料・核分野からの発表が多い。燃料は製造技術等、核計算は解析能力や精度向上関連 ・中国はHTR-PM,HTR-10関連は計7件で、それ以外は幅広い分野からの発表 ・インドネシアはRDE関連が8件、燃料製造や核解析等が多い ・米国はAGR燃料開発関連が5件 ・ポーランド絡みはGEMINI+3件と、燃料製造時の品質保証 ・日本からはHTTR関連

4. (2/2)

会議名	国名等	炉型	分野	特記
ICONE28 【8月リモート】 (23件)	中国: 16 日本: 5 米国: 2	HTR-10:1 MIGHT-R:1	分野1(燃料): 6 分野2(黒鉛): 1 分野3(金属): 4 分野4(核): 1 分野5(熱流動): 3 分野6(その他): 6 分野7(熱利用): 2	<ul style="list-style-type: none"> ・殆どの発表は中国。米国はペブルの燃焼計算と横置きHTGRの伝熱計算を発表 ・燃料分野: 日本からは高度化研究が、中国からは基盤技術の発表 ・金属分野: 耐熱合金の腐食実験等
原子力学会 春の年会 【3月リモート】 (14件)	JAEA: 8 大学: 5 メーカー: 1	—	分野1(燃料): 2 分野4(核): 3 分野6(その他): 6 分野7(熱利用): 3	<ul style="list-style-type: none"> ・企画セッション: 新型炉部会の安全基準に関する諸外国の動向 ・燃料: 高燃焼燃料の破損率評価 ・核分野: HTTR関連の解析3件 ・熱利用系: HTTRを用いた利用技術と制御方法
原子力学会 秋の大会 【9月リモート】 (13件)	JAEA: 3 大学: 4 メーカー: 6	—	分野1(燃料): 1 分野4(核): 1 分野5(熱流動): 2 分野6(その他): 9	<ul style="list-style-type: none"> ・企画セッション: GiFの活動状況、燃料の照射試験の状況、熱流動設計の特徴と課題、東芝の蓄熱型モジュールHTGRと三菱のコジェネHTGR ・三菱「炉心溶融しないHTGRコジェネプラント開発」シリーズ発表4件

5. 中国、カナダ及び米国の動向

5.1 中国:HTR-PM

- ◆ 2008年4月～2009年9月 ・設計審査(PSAR)
- ◆ 2012年12月 ・コンクリート打設開始
- ◆ 2015年 6月 ・原子炉建家完成
- ◆ 2016年 3月 ・原子炉容器(RPV)据付(1基分)
- ◆ 2016年 9月 ・RPV据付(1基分)
- ◆ 2017年 6月 ・セラミック炉内構造物据付
- ◆ 2017年 7月 ・燃料の大量製造開始(30万個/年)
- ◆ 2017年12月 ・RPVの上鏡据付(1基分)
- ◆ 2018年 3月 ・試験運転が許可される
- ◆ 2018年 9月 ・SGの空気での圧力検査を実施し合格
- ◆ 2019年 7月 ・2基目にSGを設置
- ◆ 2020年 3月 ・2基目の機器類の接続完了
- ◆ 2020年 10月 ・1基目の低温試験終了、2基目開始
- ◆ 2021年 1月 ・高温・高圧(約250°C・7MPa)試験開始
- ◆ 2021年 8月 ・蒸気タービンの試験完了、燃料装荷(1号機)
- ◆ 2021年 9月 ・1基目:初臨界達成(9月12日午前9:35)
- ◆ 2021年11月 ・2基目:初臨界達成(11月11日)
- ◆ 2021年12月 ・グリッドに接続

主な出典: WNN (<https://www.world-nuclear-news.org/>)、JAIF (<https://www.jaif.or.jp/journal/news/>)

5.2 カナダ: SMR計画

<p>SMR ロードマップ*1 (2018年11月公開)</p>	<p>国内に大きな潜在的SMR市場があるとし、ディーゼル発電等と競合できることを目指す</p> <ul style="list-style-type: none"> (1) 遠隔地や鉱山の79か所(>1MWe) (2) 重質油採取箇所の96か所(平均出力:210MWe) (3) 重工業への高温蒸気供給箇所(25~50MWe)の85か所 (4) 既設石炭火力29基のリプレイス(平均出力:343MWe)
<p>開発支援 イニシアチブ CNRI</p>	<p>CNRIは、カナダ政府・産業界がSMR開発ロードマップ*1に基づきCNLの知見や設備を産業界が活用し、カナダをSMR研究のハブとすることを目指すもので、共同資金負担でCNLが開発を支援。2019年11月、CNLはSMR開発支援イニシアチブの候補企業4社を選定*2</p> <ul style="list-style-type: none"> (1) Moltex Canada社: CANDUの使用済燃料をピン型溶融塩炉の燃料に転換 (2) Kairos Power社: 高温のフッ化塩で冷却(KP-FHR) (3) Ultra Safe Nuclear Corporation(USNC): 高温ガス炉(MMR) (4) Terrestrial Energy社: 一体型溶融塩炉(IMSR)
<p>CNRIの成果</p>	<p>2021年4月、CNLでMMR用燃料ペレット(FCM燃料)の製造に成功*3</p>
<p>*1) https://smrroadmap.ca/wp-content/uploads/2018/11/SMRroadmap_EN_nov6_Web-1.pdf *2) https://www.jaif.or.jp/191120-a *3) https://www.world-nuclear-news.org/Articles/TRISO-fuel-made-in-Canada-for-first-time</p>	

カナダ国内(州政府)のSMR開発支援

- (1) 2019年12月:カナダ3州(オンタリオ州、ニューブランズウィック州及びサスカチュワン州)の首相がSMR開発で協力覚書(MoU)に署名。後にアルバータ州が署名に加わる
- (2) 2021年 4月:カナダ3州の要請を受け、SMR開発の実現可能性に関する研究を完了。この結果、SMR開発が国内のエネルギーニーズを支援し、温室効果ガスの排出を抑制し、カナダをこの新興技術の世界的リーダーとして位置付けると結論

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Canadian-provinces-complete-SMR-study>

5.3 米国：燃料開発 (1) 調査目的

高温ガス炉開発で、燃料開発が最も重要；

- ① HALEU(濃縮度5～20%)燃料の商業規模での製造能力
- ② 被覆粒子燃料と燃料コンパクト(又は燃料球)の商業規模での製造能力

①HALEU燃料開発の背景

POWER magazine : 「New Boosts for Commercial Production of HALEU Advanced Nuclear Reactor Fuel」(Nov. 7, 2019, Sonal Patel)で、米国に於けるHALEU燃料、被覆粒子燃料等の開発が加速している状況を紹介

- ✓ 先進炉用燃料にHALEU燃料が必要(今後、需要が急増することが想定)
- ✓ HALEU燃料製造能力を確立することは、米国のリーダーシップにとって重要【NEI】
- ✓ ロシアにはHALEU燃料を生産する能力があり、この製造能力を確保することは米国のエネルギー安全保障にとって非常に重要【DOE副長官のダン・ブルイエット】

<https://www.powermag.com/new-boosts-for-commercial-production-of-haleu-advanced-nuclear-reactor-fuel/>

最近の①及び②に関する情報を調査・整理することで、米国における高温ガス炉の開発状況を把握することを目的

5.3 (2) 政策的側面調査(2018～2021年度)

西暦	BWXT	X-energy	HALEU燃料製造
2018		3月 : Centrusと燃料製造工場建設に向けた支援サービス契約を締結	
		8月 : TRISO燃料製造施設への公開会合 11月 : Centrus社の支援を受けてTRISO燃料製造工場の予備設計を開始	
2019		3月 : DOEが燃料製造工場建設に融資保証の適用申請を提出するよう要請 5月 : NFIがXe-100用燃料製造に協力	
	10月 : TRISO燃料製造設備(カテゴリー1の許可取得済)を稼働 12月 : 燃料製造が順調に進展(10月ニュースの継続)	11月 : 燃料製造に向けGNFとチーム契約調印	10月 : HALEU燃料の商業利用実施に向けた法案が下院通過 11月 : Centrus社がHALEU燃料製造実証でDOEと3年契約を締結
2020	3月 : 超小型炉(TCR)用TRISO燃料の製造契約をBWXTが獲得 4月 : TRISO燃料の製造再開後、順調に進展(計画より先行)	5月 : X-energy製造のTRISO燃料の性能確認でMITが協力 6月 : X-energyとNFIが協力してHTGR用燃料を供給	
	7月 : 燃料製造ラインの拡張・更新費をINLから獲得 11月 : TRISO燃料製造ライン再稼働プロジェクトを完了し燃料を生産 11月 : 3Dプリンターによる耐熱金属(燃料も)製造技術を開発		7月 : 「NELA」米上院可決。先進炉の実証やHALEU燃料の供給促進
2021		11月 : Centrus社の支援を受けてTRISO燃料製造工場の予備設計を完了	1月 : 「戦略ビジョン」(DOE) HALEU製造を2022年までに実証 6月 : CentrusがHALEU製造許可取得 12月 : HALEUサプライチェーン構築(DOE)

主な出典: WNN (<https://www.world-nuclear-news.org/>)、JAIF (<https://www.jaif.or.jp/journal/news/>)

5.3 (3) NGNPプロジェクトでの燃料開発

- DOE は、「2005 年エネルギー政策法(EPA-2005)」並びにそこに明記の官民連携の原則に基づき、「次世代原子力プラント(NGNP)」の開発・実証プログラムを推進
 - 途中、需要動向や技術的成熟度等の判断から、その主目的を「水素製造 & 発電」から「熱利用 & 発電」に、また冷却材出口温度条件も「950°C以上」から「当面750～800°C程度」に変更
 - 「フェーズ 1(2005～2010 年; プラント概念設計、技術絞込み)」はほぼ終了
 - プログラム完遂までの費用、官民連携見通し等を考慮して、当初予定の「フェーズ 2(2011～2021年; プラント詳細設計、建設、実証)」には入らず、内容を縮小し、**被覆粒子燃料**や高品質黒鉛材の製造や照射特性評価研究をアイダホ国立研究所(INL)等が実施することとした
- https://www.iaea.or.jp/htgr/pdf/05_newsletter/05_1/05_1_rahp_No20_202103_ja.pdf

- **改良型ガス原子炉(AGR)燃料開発プログラムによりTRISO燃料製造技術を開発**
- **AGR燃料開発プログラム**は高性能被覆粒子燃料を設計、製造及び試験することを目的とし、本プログラムは燃料製造、INLの試験炉(ATR)を用いた照射、照射後試験(PIE)等を実施
- 試験用の**燃料製造プロセスは、INL、オークリッジ国立研究所(ORNL)及びBWXTの共同活動**で、米国でパイロット規模のTRISO燃料製造能力を再確立することを目標
- **原子炉の予想される運転及び事故条件下での燃料の性能を決定するために、照射、安全性試験、PIE等を実施。**試料はその研究目的に応じて7バッチ(AGR-1～AGR-7)から成る

HTR2018-054 Status Report on HTR Research, Development, and Deployment in the USA, Hans Gougar, INL, USA

- HTR2018、HTR2021及びICAPP2019の国際会議で、AGR燃料開発の状況や成果を発表

5.3 (4) 調査結果の整理 (1/2)

特別な核物質: カテゴリー I は戦略的に高、カテゴリー II は戦略的に中、カテゴリー III は戦略的に低。
 カテゴリー毎に許可が必要。HALEU燃料を使用したTRISO燃料製造はカテゴリー II の許可が必要

	BWXT	X-energy	USNC
用途	<ul style="list-style-type: none"> - TCR(ORNL): 2020年3月契約 - 米国防総省: 2021年3月選定 (Project Pele: モバイル炉) - NASA 	<ul style="list-style-type: none"> - Xe-100 - 米国防総省: 2021年3月選定 (Project Pele: モバイル炉) - NASA 	<ul style="list-style-type: none"> - MMR - CANDU - 溶融塩炉
TRISO 燃料 製造	<ul style="list-style-type: none"> - バージニア州リンチバーグ*1 	<ul style="list-style-type: none"> - テネシー州オークリッジ*1 	<ul style="list-style-type: none"> - カナダ・チョークリバー & 米国・ソルトレイクシティ
	<ul style="list-style-type: none"> - NGNPで被覆粒子燃料と燃料コンパクトの製造経験 - 燃料製造設備の更新・拡張 (INLから資金獲得) - 3Dプリンタでの燃料材料製造技術(ORNLと共同研究) 	<ul style="list-style-type: none"> - TRISO-X燃料製造施設の設計等(Centrus, GNF, 日本NFI) - 実験室規模での被覆粒子燃料と燃料球の製造経験 	<ul style="list-style-type: none"> - FCM燃料: TRISO粒子をSiCマトリックスで包み込む - カナダで初めてMMR用燃料を製造(CNL: 2021年4月)
主な 協力 (燃料)	<ul style="list-style-type: none"> - INL&ORNL(燃料製造) 	<ul style="list-style-type: none"> - Centrus(燃料製造設備設計等) - GNF(燃料製造設備設計等) - NFI(HTTR用燃料製造設備移転) - MIT(製造した燃料の照射) 	<ul style="list-style-type: none"> - CNL(CNRI: SMR支援の一環) - NRG(HFRでFCM燃料の照射)

* 1) BWXTの燃料製造設備はカテゴリー I の許可取得済、カテゴリー II の許可取得は容易。

X-energyはライセンス取得に向けて活動中

注) 主な出典: WNN (<https://www.world-nuclear-news.org/>)、JAIF (<https://www.jaif.or.jp/journal/news/>)

5.3 (4) (2/2)

<p>① HALEU燃料 の製造能力</p>	<p>➤ 2019年11月のDOEとCentrusの3年契約で、2022年までにHALEU燃料の商業規模の製造能力を実証 https://www.jaif.or.jp/191107-a</p>
<p>② 被覆粒子燃料 燃料コンパクト (燃料球) の製造能力</p>	<p>➤ X-energyは、Centrus、GNF及び日本のNFIと協力関係を築く。Xe-100用燃料製造設備の予備設計が完了 https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Preliminary-design-of-TRISO-X-fuel-plant-completed</p> <p>➤ BWXTは、AGR燃料開発プログラムでは被覆粒子燃料と燃料コンパクトを製造した実績を有し、休止後、その設備を更新して被覆粒子燃料製造を開始*1。ORNLの超小型炉TCR用燃料製造*2や、今後の米国防総省*3やNASAが計画しているマイクロ炉用等の燃料製造に備える</p> <p>*1) https://www.world-nuclear-news.org/Articles/BWXT-completes-TRISO-fuel-line-restart *2) https://www.world-nuclear-news.org/Articles/BWXT-to-produce-TRISO-fuel-for-3D-printed-reactor *3) https://www.world-nuclear-news.org/Articles/BWXT-and-X-Energy-selected-to-develop-Project-Pele</p> <p>➤ USNCは、MMR用燃料製造に向けてCNLとも協力し、カナダで初めて被覆粒子燃料と燃料コンパクト(FCM燃料)の製造に成功 https://www.world-nuclear-news.org/Articles/TRISO-fuel-made-in-Canada-for-first-time</p>

6. おわりに

◆ 海外のHTGR開発

- 中国：政策的・政治的には強引だが、高温ガス炉技術の面で不透明(難あり)。
初臨界を達成したHTR-PMは、今後、出力上昇させ電力網に給電
- 米国：推進側と規制側ともSMRやnon-LWRの先進炉に積極的。各社の燃料製造技術開発、及びDOEから資金獲得したXe-100計画が進展
- カナダ：推進側と規制側ともSMR計画に積極的。MMRが先陣を切る
- 英国：AMR実証計画でHTGRを有望視(BEISは2030年代初頭までに1億7,000万ポンドの予算で、HTGRの実証炉を初号機として完成させる案を公表)

<https://www.jaif.or.jp/journal/oversea/9328.html>

◆ 世界的潮流：温暖化対策、SDGsを目指す ⇒ 原子力の貢献（付録2参照）

- コロナ禍で海外での活動が大変な時期ではあるが、日本は最優先でポーランドとの国際協力を強固にして高温ガス炉開発を推進、及び国内の「原子カイノベーションの追求」、「カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」に期待
- 我が国の高温ガス炉開発は、世界的潮流である国連の持続可能な開発目標(SDGs)の達成に貢献できることも国内外にアピールして、積極的な国際展開を期待

付録1 技術的側面からの情報整理の仕方

論文等の発表内容の分類

項目	内容
国名	発表者の国/原子炉が設置される国
炉型	<ul style="list-style-type: none"> ・ブロック型(B型)、ペブル型(P型)、判別不明(BP型) ・対象炉: 具体名(HTRR, GTHTR300, HTR-PM等), 一般炉 (HTGR, VHTR等)
分野*	<p>分野1: 燃料(燃料性能、製造・輸送、FP挙動、被ばく、高レベル廃棄物等)</p> <p>分野2: 黒鉛(材料特性、黒鉛構造物、炉心耐震、脱ガス、ダスト等)</p> <p>分野3: 金属(材料特性、高温機器(中間熱交換器、ガス循環機)等)</p> <p>分野4: 核(核特性、核計算、核データライブラリー等)</p> <p>分野5: 熱流動・安全(通常時や異常時の炉心プラント挙動、防災、核セキュリティ等)</p> <p>分野6: その他原子炉関連(炉全体、計測・制御、照射試験、運転保守実績等)</p> <p>分野7: 熱利用系(ガスタービン発電、水素製造、熱供給配管等)</p>
特記	<p>課題、研究内容のポイント、シリーズ発表、論文等の特徴となる項目 (プルトニウム燃焼炉、確率論的リスク評価(PRA)等)</p>

*)分野は、高温ガス炉の特徴を考慮して分類

付録2 SDGsへの原子力の貢献

「持続可能な開発目標(SDGs)達成への原子力の貢献」—世界の原子力産業界団体が報告書を公表

JAIF : https://www.jaif.or.jp/sdgs_20211029

WNN : <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Report-highlights-nuclear-s-contribution-to-SDGs>

SDGs(開発目標)	開発目標達成への原子力の貢献
1. 貧困をなくそう	原子力発電は貧困を減らし経済成長を促すのに役立つ
2. 飢餓をゼロに	原子力技術は害虫を減少させより良い品質の作物を開発する
3. すべての人に健康と福祉を	核医学は毎年数千万人の人々を助けている
4. 質の高い教育をみんなに	原子力関連企業は従業員の教育・訓練に投資している
5. ジェンダー平等を実現しよう	原子力産業界はすべてのレベルにおいて女性の登用改善に取り組んでいる
6. 安全な水とトイレを世界中に	原子力による淡水化は温室効果ガスの排出なしにきれいな水を提供する
7. エネルギーをみんなに。そしてクリーンに	原子力発電はクリーンで信頼性の高い手頃な価格のエネルギーを大量に供給する
8. 働きがいも経済成長も	原子力産業は高給で高度に熟練した雇用と地域社会を支える投資を提供する
9. 産業と技術革新の基盤を作ろう	原子力は持続可能な産業化に必要な電気と熱を供給することができる。【高温の原子炉はプロセス熱のために用いられている化石燃料の代替手段、水素製造の新たな手段】
10. 人や国の不平等をなくそう	原子力は不安定な電力価格の影響を過度に受ける低所得世帯を保護する
11. 住み続けられるまちづくりを	原子力は都市と人間の居住地を包括的、安全、強靱、持続可能なものにする
12. つくる責任、つかう責任	原子炉は世界のエネルギー需要を満たすために必要な電力を責任を持って生産する
13. 気候変動に具体的な対策を	原子力は気候変動との闘いに多大な貢献を果たす
14. 海の豊かさを守ろう	原子力により海洋酸性化をもたらす二酸化炭素排出を回避できる
15. 陸の豊かさも守ろう	原子力発電所は小さな面積の土地から大量の電力を供給している
16. 平和と公正をすべての人に	核不拡散条約は原子力技術の平和的利用に関する協力を促進する
17. パートナーシップで目標を達成しよう	原子力関係組織は持続可能な開発目標の達成を支援するためステークホルダーと協力する