

第4世代原子力システムの国際協力と 我が国の研究開発の状況

(3) 高温ガス炉の研究開発と HTTR運転再開への取り組み

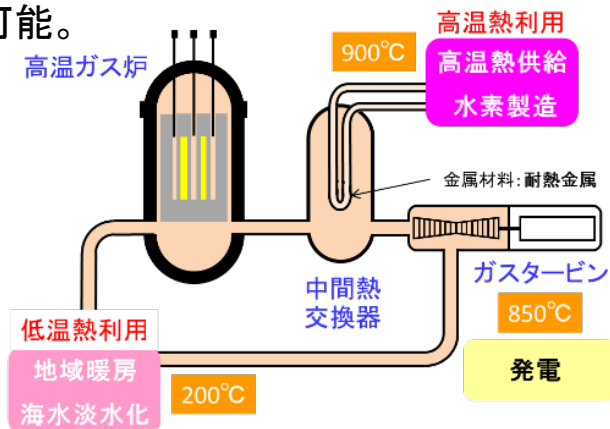
令和4年3月16日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
高速炉・新型炉研究開発部門 大洗研究所
高温ガス炉研究開発センター

高温ガス炉の概要

多様な熱利用

- 950℃の高温熱を供給可能で、水素製造、発電、海水淡水化等の幅広い熱利用が可能。



軽水炉との違い

項目	高温ガス炉	軽水炉
電気出力 (熱出力)	~30万kW(中小型) ~600MW	100万kW以上 (大型が主流) 3000MW以上
原子炉出口温度	850℃~950℃	約300℃
原子炉冷却材	ヘリウムガス	軽水
減速材	黒鉛	軽水
燃料型式	セラミック製 被覆燃料粒子	金属製被覆管 (ジルカロイ)
用途	熱利用(水素製造、高温蒸気、海水淡水化、地域暖房)、発電	発電

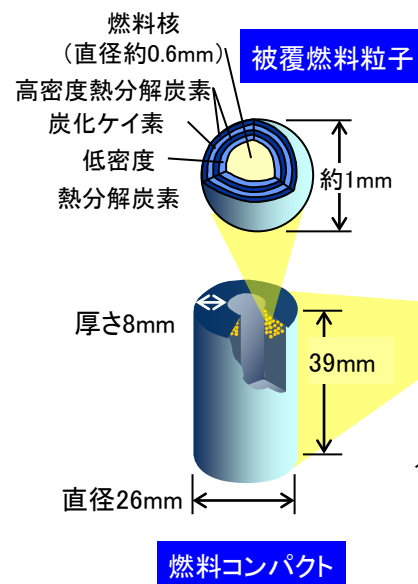
優れた安全性

- 高温ガス炉は電源や冷却材の喪失時に制御棒を挿入しなくても、安全な状態を維持することが可能

- ✓ 自然に原子炉は停止
- ✓ 間接的に原子炉を冷却
- ✓ 水素は発生しない

セラミックス被覆燃料

1600℃でも放射性物質を閉じ込める

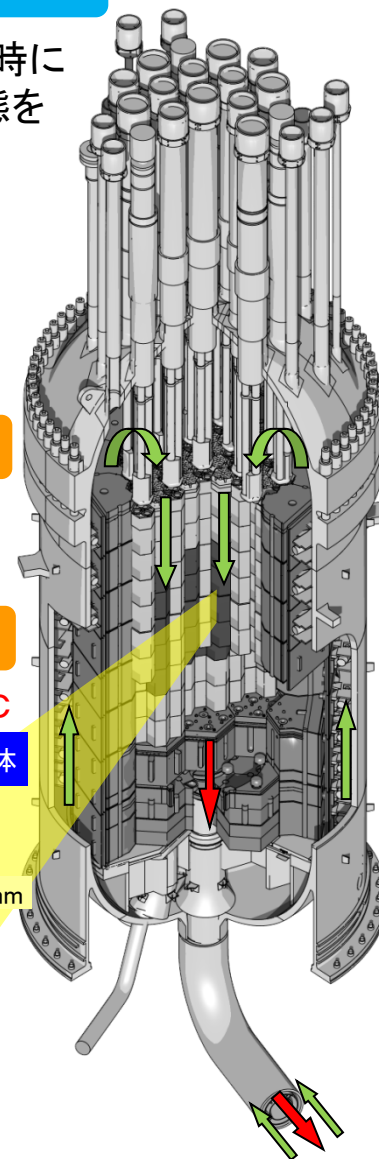
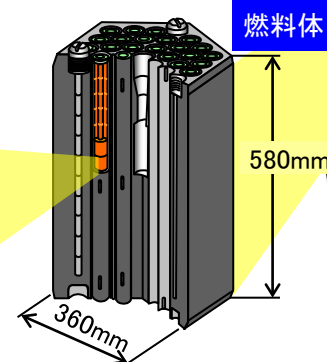


ヘリウム冷却材

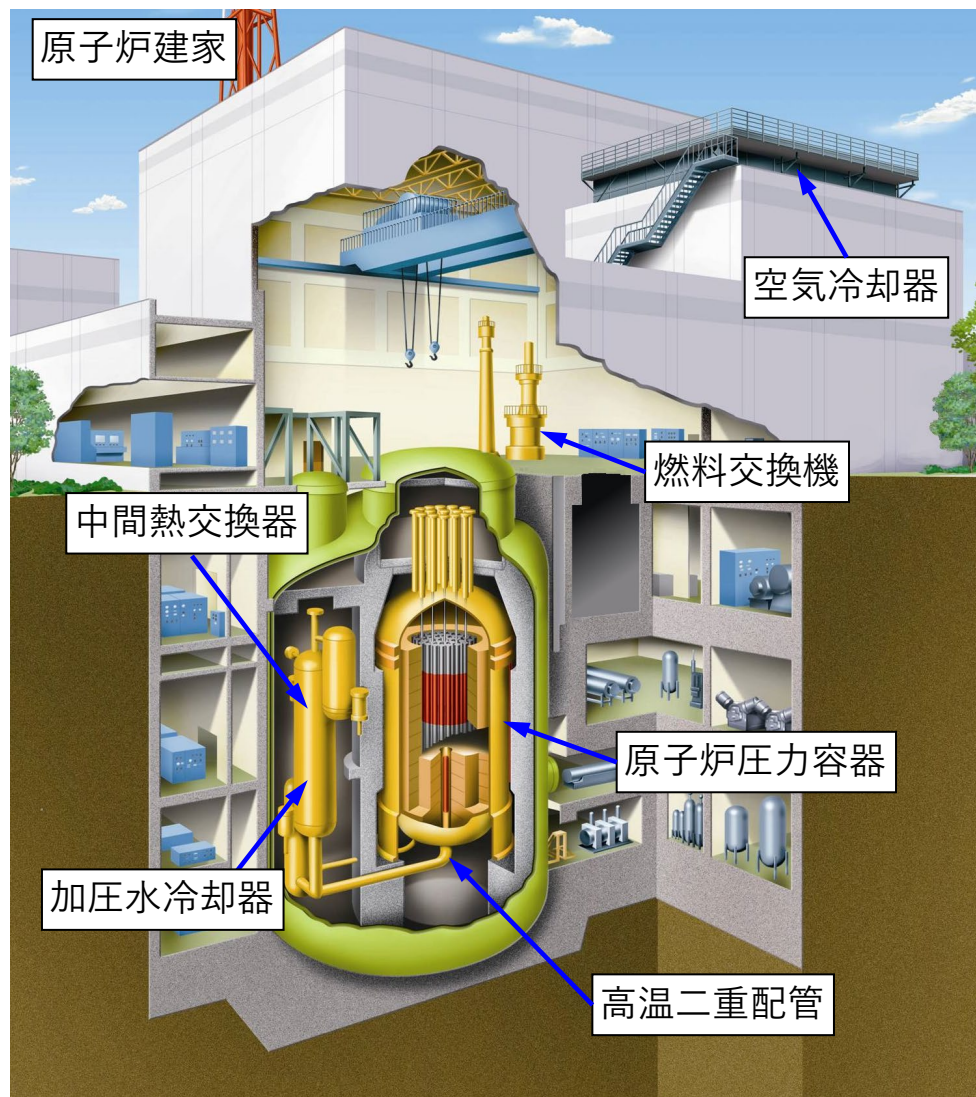
高温でも安定 (温度制限なし)

黒鉛構造材

耐熱温度2500℃



HTTR（高温工学試験研究炉）



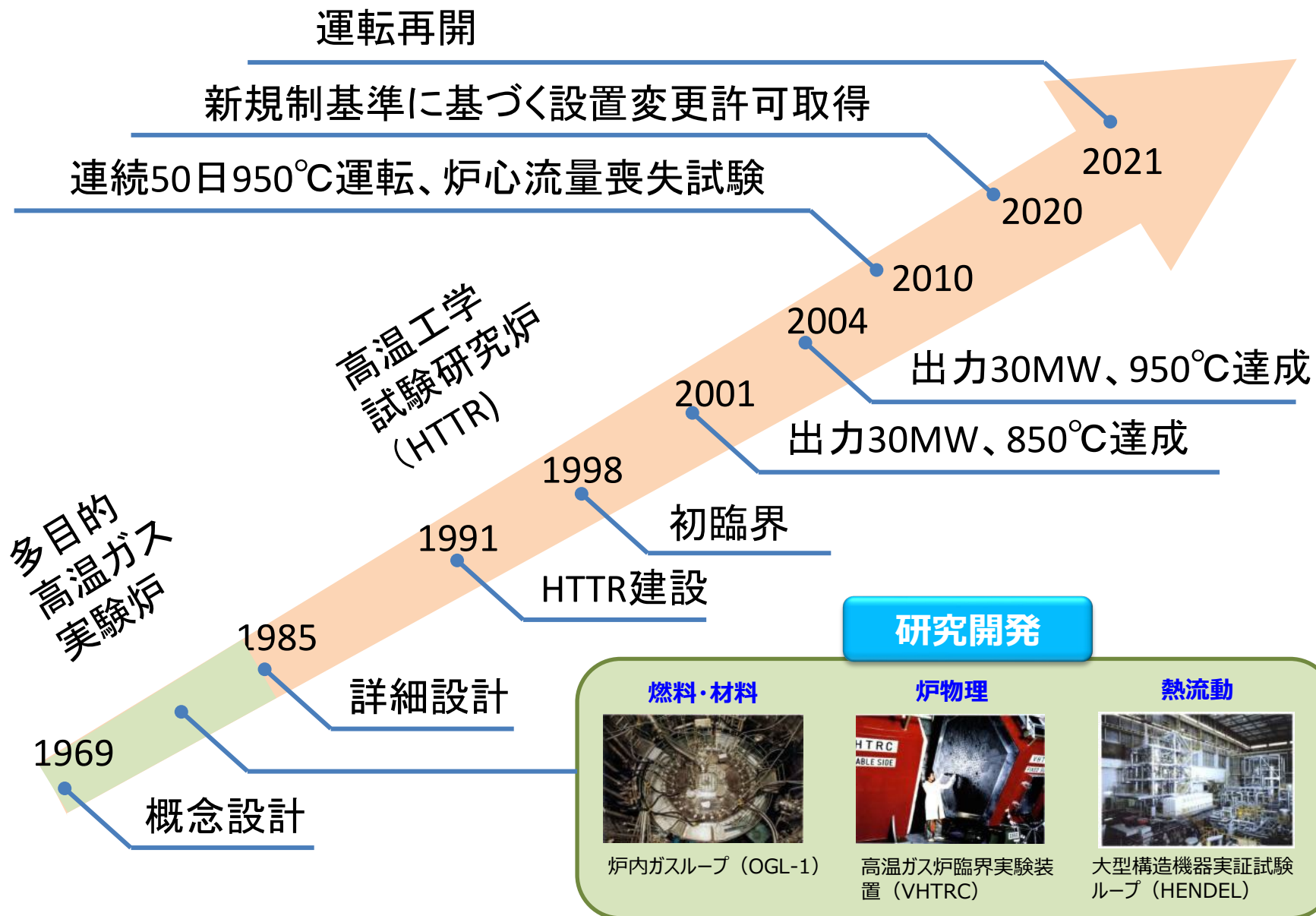
原子炉出力	30MW
原子炉出口温度	950℃（最高）
1次冷却材	ヘリウム
1次冷却材圧力	4.0MPa
出力密度	2.5W/cc
燃料濃縮度	6%（平均）



設置場所：大洗研究所（茨城県大洗町）

世界で唯一950℃の熱を取り出せる高温ガス炉

HTTR開発の歴史



(1) 高温ガス炉技術



- 定格出力30MW、原子炉出口温度950℃達成（2004年4月）
- 950℃、50日間高温連続運転（2010年3月）
- 安全性実証試験（炉心流量喪失試験）に成功（2010年12月）

- 新規規制基準適合性に係る設置変更許可の取得（2020年6月）
- HTTR運転再開（2021年7月）
- 高温ガス炉安全性向上のためのHTTR試験

(2) 熱利用技術（発電、水素製造）



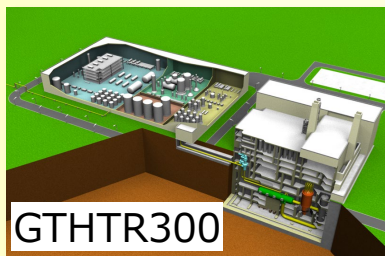
ヘリウム圧縮機



連続水素製造試験装置

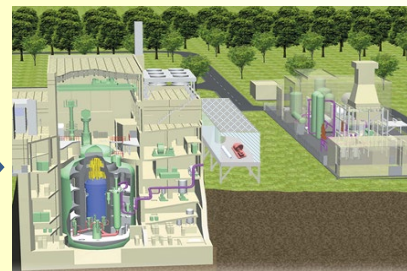
- 水素製造設備、ガスタービン発電に関する基盤技術を完成
- ISプロセスの運転制御技術の確証
- 連続水素製造試験30L/h、150時間の水素製造に成功（2019年1月）
- 連続水素製造試験92L/hを達成（2020年10月）

(3) 実用高温ガス炉設計



- 実用高温ガス炉システム設計
- 実用高温ガス炉の安全基準策定と国際標準化
- 再生可能エネルギーとのハイブリッドシステム設計
- 海外輸出用高温ガス炉の設計

(4) HTTR熱利用試験



- 高温ガス炉熱利用技術の総合実証



新規制基準対応概要（1 / 2）



項目	新たな安全規制（新規制基準）対応	対応等
①地震	- 設計基準地震動：973gal - 耐震評価により耐震健全性を確認	健全性確認の結果、耐震補強の必要なし
②津波	基準としている津波(海拔17.8m)が、施設へ到達しないことを確認	海拔約36m
③竜巻 (追加要求)	- 風速100m/sの竜巻を基準として設定 - 重要な設備機器を設計竜巻から防護	- 原子炉建屋等の外壁が竜巻に耐えることを確認 <u>大きな飛来物の撤去</u>
④外部火災 (追加要求)	- 外部火災を想定した、防火帯を設定 - 外部火災(熱) による原子炉施設への影響の有無を確認	<u>防火帯を設置</u>

項目	新たな安全規制（新規制基準）対応	対応等
⑤内部火災	- 火災の早期検知のために検知器を追設 - 火災に対するケーブルの防護	- 原子炉格納容器内部に火災感知器を追加設置 <u>ケーブルトレイの遮熱対策</u>
⑥外部電源喪失	外部電源喪失時に、原子炉停止後の状態を監視	持ち運び可能な計器や発電機等を整備
⑦多量の放射性物質等を放出する事故の拡大防止（追加要求）	- 設計基準事故を超える事故（BDBA）を選定し、対策に必要な機器等を整備 ➢ DBA+原子炉停止機能の全喪失 ➢ DBA+炉心冷却機能の全喪失 ➢ DBA+閉じ込め機能の全喪失 ➢ 使用済燃料貯蔵プールの冷却機能喪失（DBA：1次冷却系配管破断）	- 消防自動車を用いた注水 - 持ち運び可能な計器、発電機等を用いた継続監視

上記対応の他、

- 避難誘導用の構内一斉放送設備を新設
- モニタリングポストの通信多様化に係る工事を実施

HTTRを用いた安全性実証試験

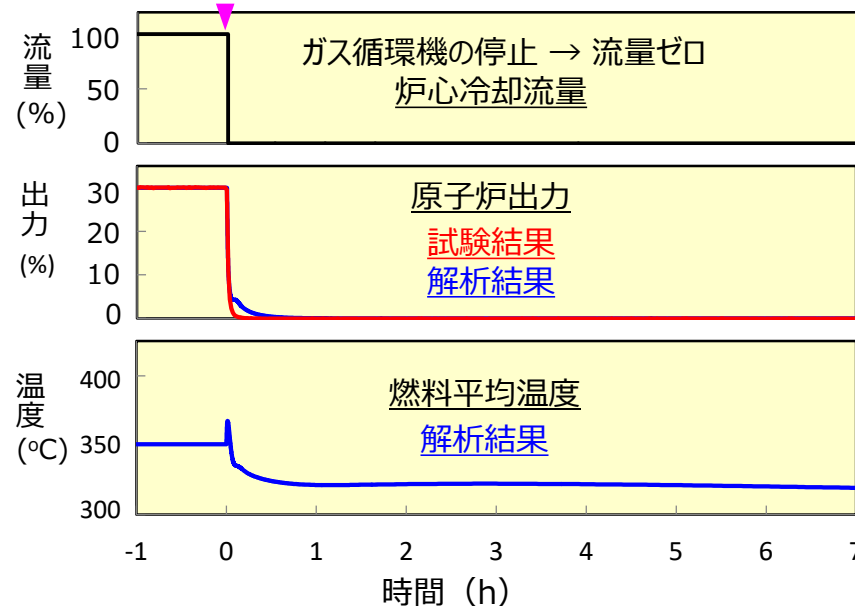
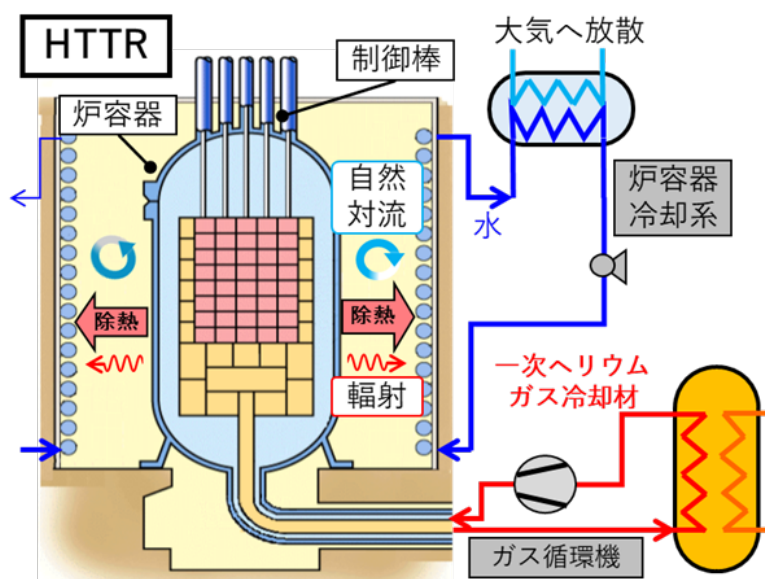
OECD/NEAの国際共同試験（LOFC試験）



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

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

高出力(100%) 炉心流量喪失試験(ガス循環機停止)

⇒ 調整中

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

2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略

(分野別実行計画 原子力産業 高温ガス炉)



4. 重要分野における「実行計画」 (4) 原子力産業 ③高温ガス炉

(略) 世界最高温度を記録した試験炉 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支援していく。並行して、IS 法やメタン熱分解法等を含む超高温熱を活用したカーボンフリー水素製造方法についても開発を支援する。(略) また、試験炉 HTTR の建設・運転・再稼働を通じて、規格基準策定の点でも海外に先行している 状況を踏まえ、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する。

- 世界最高温度を記録した試験炉 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

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
高温 ガス炉	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 ・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。	HTTRを活用した試験・実証等 ・HTTRを活用し、<u>安全性の国際実証</u>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。

④原子力産業の 成長戦略「工程表」

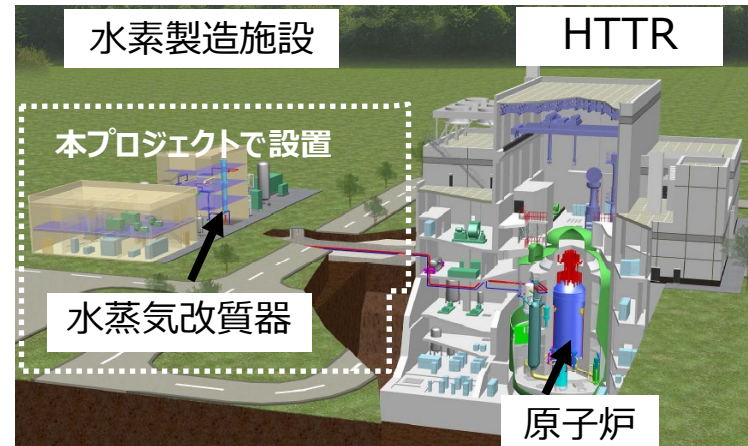
●導入フェーズ： 1. 開発フェーズ 2. 実証フェーズ 3. 導入拡大・コスト低減フェーズ 4. 自立商用フェーズ

●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

	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	～2030年	～2040年	～2050年
高温 ガス炉 水素コスト： 2050年に 12円/Nm ³ の可能性	HTTR 再稼働	HTTRを活用した「固有の 安全性」確認のための試験		カーボンフリー水素製造に必要な技術開発			カーボンフリー水素製造設備 と高温ガス炉の接続実証	販路拡大・量産体制化で コスト低減
		世界最高温の950℃を出力可能なHTTRを活用した国際連携の推進						
		高温熱を利用したカーボンフリー水素製造技術の確立（IS法、メタン熱分解法等）					実用化スケールに必要な実証	

HTTR-熱利用試験計画

- 高温ガス炉と水素製造施設の接続に係る安全設計を確立
 - ✓ 化学プラントを一般産業法規の下で製作し、原子炉への接続を可能とすることにより、原子力熱利用の利便性、用途拡大を図る
 - ✓ 2030年までに高温ガス炉（HTTR）と水素製造施設の接続技術を開発する
 - ✓ 並行して熱化学水素製造法（ISプロセス）等のカーボンフリー水素製造技術を検討する



HTTR-熱利用試験施設

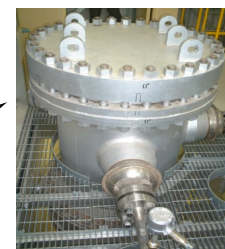
第4期中長期計画							第5期中長期計画	
2022 R4	2023 R5	2024 R6	2025 R7	2026 R8	2027 R9	2028 R10	2029 R11	2030 R12
設置許可申請書作成								
			許認可					
HTTR改造設計					改造			水素製造 試験
水素製造施設設計					製作・据付			

HTTRに接続する水蒸気改質水素製造システム



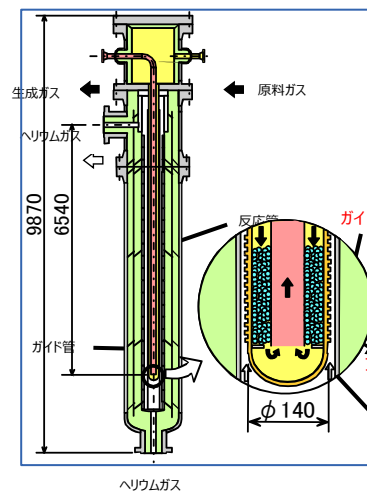
水蒸気改質水素製造法とは

- 天然ガス（メタン）と水蒸気を高温（約800℃）で反応させて水素（とCO₂）を製造するプロセス（ $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \Rightarrow 4\text{H}_2 + \text{CO}_2$ ）
- 現在の水素製造の主流（世界の全生産量の約78%）※1

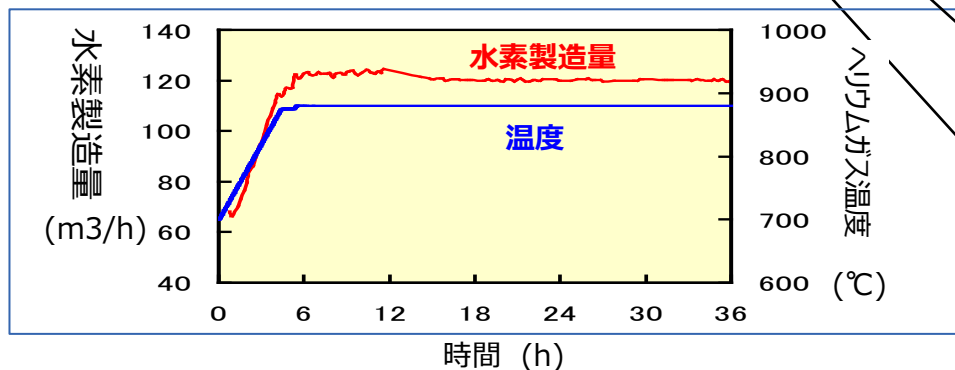


Heガス熱交換型
反応器(水蒸気改質器)

高さ9.9m
直径0.9m



ガイド管とフィンで高温Heガスから反応器への熱伝達を促進



蒸気発生器
長さ4.9m
直径1.2m



Heガス加熱器
高さ7.2m
直径1.0m

- 実規模 (HTTR用)Heガス熱交換型反応器を開発
- 高温ヘリウムガスを熱源とした水素製造を実証
- CCUSと組み合わせることでカーボンフリー水素製造に貢献可能

高温ガス炉水素製造システムの導入方策（JAEA案）



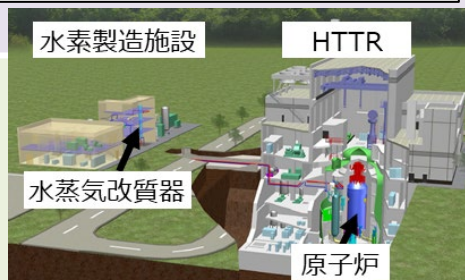
2020

～2030

～2040

～2050

HTTR-熱利用試験 (SR)



- 水素製造施設の一般産業法規での建設を可能とする高温ガス炉の**安全設計の確立**
- 高温ガス炉と水素製造施設の**接続に必要な技術**（機器、システム設計、安全評価）の確立

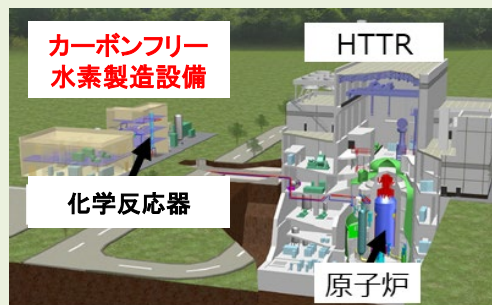
技術開発プラント



- 耐食機器の信頼性確認
- 工学的課題の抽出と対策技術の開発
- 組成制御技術の確立、安定性の確認
- プラント運転自動化技術の開発

国外実証炉（発電・熱利用） 国際連携の下で実施

カーボンフリー水素製造設備の接続 （実用化に必要な技術の実証）



HTTR-熱利用試験(100～1000m³/h)

技術開発プラントの成果を反映
実用プラントの構成要素を実装

- カーボンフリー水素製造の確証
- 高温ガス炉システムの総合性能確認

個別要素の技術移転

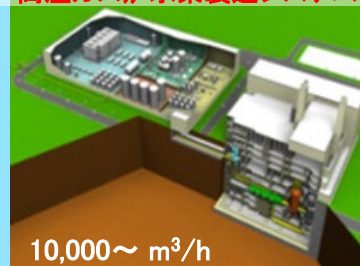
国内実証炉 （発電+水素製造）

国内実用炉 （商用1号炉）

高温熱を活用できる様々な熱源へ展開

サプライチェーンの構築
経済性向上
立地の多様化

高温ガス炉水素製造システム



太陽熱
水素製造システム
100～ m³/h

水素製造設備



産業排熱利用（鉱業等）
水素製造システム

1000～ m³/h

民間への
技術移転

民間企業

JAEA

規制側

● HTTR熱利用施設審査 (SR)

● HTTR熱利用施設審査
（カーボンフリー-H₂特有の部分のみ）

● 実証炉審査

● 商用炉審査

※ SR:天然ガスの水蒸気改質水素製造

原子力機構における高温ガス炉の国際協力



多国間協力

経済協力開発機構原子力機関 (OECD/NEA)



チェコ 仏 独 ハンガリー 韓 米

HTTR共同試験 LOFCプロジェクト (受託研究)

- ✓ 炉心流量喪失試験 (完了) (30%出力から1次ヘリウム循環機全3台停止)
(計画) (100%出力から1次ヘリウム循環機全3台停止)
- ✓ 炉心冷却喪失試験 (完了) (30%出力から全電源喪失を模擬)

国際原子力機関 (IAEA)

- ✓ ガス冷却炉技術WG (TWG-GCR) (17カ国参加)
- ✓ 小型モジュール炉技術WG (TWG-SMR) (21カ国参加)
- ✓ 協力研究計画 (CRP)
 - ・ 原子力水素製造技術の評価及び展開の見通し
 - ・ SMRのEPZ (緊急時避難区域) 検討
 - ・ SMRの経済性評価手法と適用

第4世代原子力システム国際フォーラム (GIF)



加 中 仏 韓 スイス 米 EU 豪 英

超高温ガス炉

- ✓ 水素製造プロジェクト
- ✓ 燃料・燃料サイクルプロジェクト
- ✓ 材料プロジェクト
- ✓ 計算手法検証・ベンチマークプロジェクト

欧州連合 (EU)

GEMINI+プロジェクト (2021年2月終了、次期計画検討中)

- ✓ 熱利用炉の設計、R&D



二国間協力

ポーランド

- ✓ 「日・ポーランド戦略的パートナーシップの実施のための行動計画 (2017-2020)」 (2017.5.18、日・ポーランド外相署名) の下、「高温ガス炉技術に関する協力のための覚書」を締結 (2017.5.18)。公開情報に基づく情報交換 (国立原子力研究センター NCBJ)
- ✓ 「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」 (2019.9.20) に基づく技術開発、人材育成 (国立原子力研究センター NCBJ)

英国

- ✓ 電力・熱供給高温ガス炉 (商用炉) U-Battery計画への協力 (原子燃料企業URENCO社、他)
- ✓ 英国国立原子力研究所 (NNL) の間で締結している包括的な技術協力取り決めに「高温ガス炉技術分野」を追加 (2020.10.16)
- ✓ 英国原子力規制局 (ONR) と高温ガス炉の安全性に関する情報交換のための取決めに締結 (2020.11.27)

米国 民生用原子力研究開発WG (CNWG)

- ✓ 先進的シミュレーションコードの開発・検証、HTTR熱利用試験計画の共同検討、ヘリウムガスタービン技術の開発、等 (米国エネルギー省 DOE、アイダホ国立研究所 INL)

中国

- ✓ 公開情報に基づく情報交換 (清華大学 INET)

韓国

- ✓ 公開情報に基づく情報交換 (KAERI)

カザフスタン

- ✓ カザフスタン高温ガス炉 (KHTR) の概念設計への協力 (国立原子力センター NNC)
- ✓ 耐酸化SiC燃料コンパクトの照射特性ISTCプロジェクト (核物理研究所 INP)
- ✓ 安全研究 (原子力技術安全センター NTSC)

インドネシア

- ✓ 高温ガス炉 (試験・実証炉、熱出力10MW) の技術協力、公開情報に基づく情報交換、人員交流、等 (BATAN)