

高温ガス炉実証炉の開発状況

2025年12月11日

国立研究開発法人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

1. 高温ガス炉実証炉の開発状況
2. 高温ガス炉実証炉開発における課題

HTTR（高温工学試験研究炉）

HTTRの設置目的

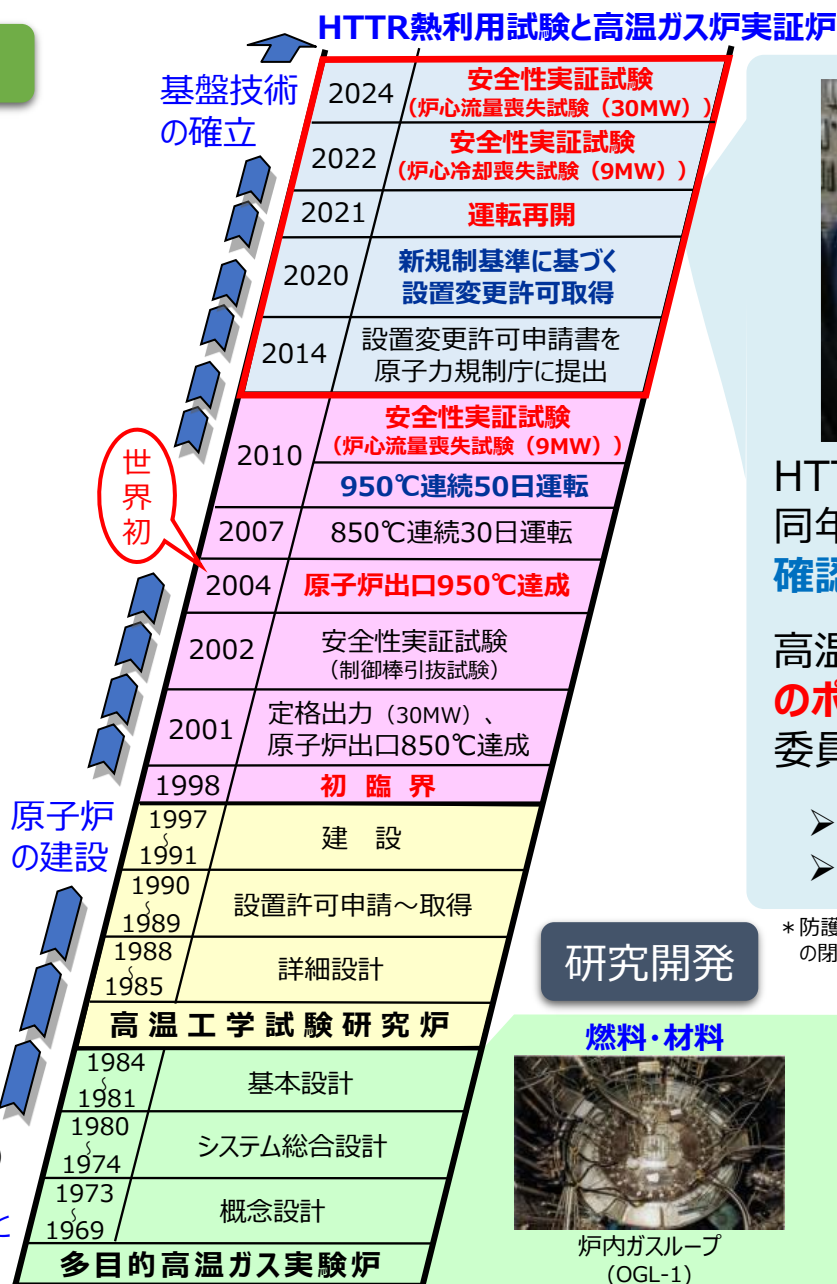
- 高温ガス炉原子炉技術の確立
- 熱利用技術の確立



HTTRの仕様

- 原子炉出力 30MW
- 冷却材 ヘリウムガス
- 原子炉入口／出口冷却材温度 395／850, 950℃
- 炉心構造材 黒鉛
- 燃料 二酸化ウラン
- ウラン濃縮度 3～10%（平均6%）

研究開発と
概念設計



基盤技術
の確立

世界
初

原子炉
の建設



HTTRは2021年7月に運転を再開し、同年9月に**新規制基準に係る適合性確認**の対応を完了

高温ガス炉は**シビアアクシデントフリー**のポテンシャルを有すると原子力規制委員会に認められた

- 炉心溶融が起こらない
- 事故時においても住民の退避不要*

* 防護設計の基準をはるかに超える自然現象やテロ行為による原子炉施設の閉じ込め機能を大きく破損させる事象は除く

研究開発

燃料・材料



炉内ガスループ
(OGL-1)

炉物理



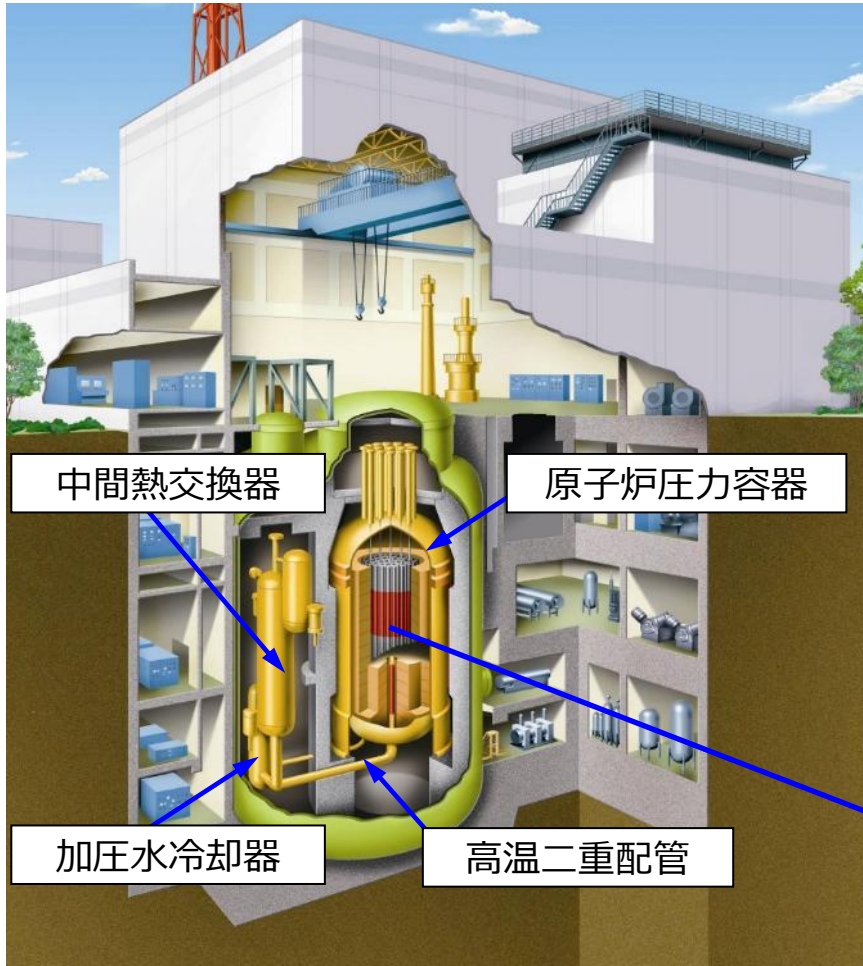
高温ガス炉臨界実験装置
(VHTRC)

熱流動



大型構造機器実証試験ループ
(HENDEL)

HTTR（高温工学試験研究炉）



我が国初の高温ガス炉

● 原子炉熱出力	3万kWt
● 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
● 炉心構造材	黒鉛

1998.11	: 初臨界
2010.3	: 950℃での連続50日運転
2010.12	: 安全性実証試験の実施*
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*
2024.3	: 安全性実証試験の実施*

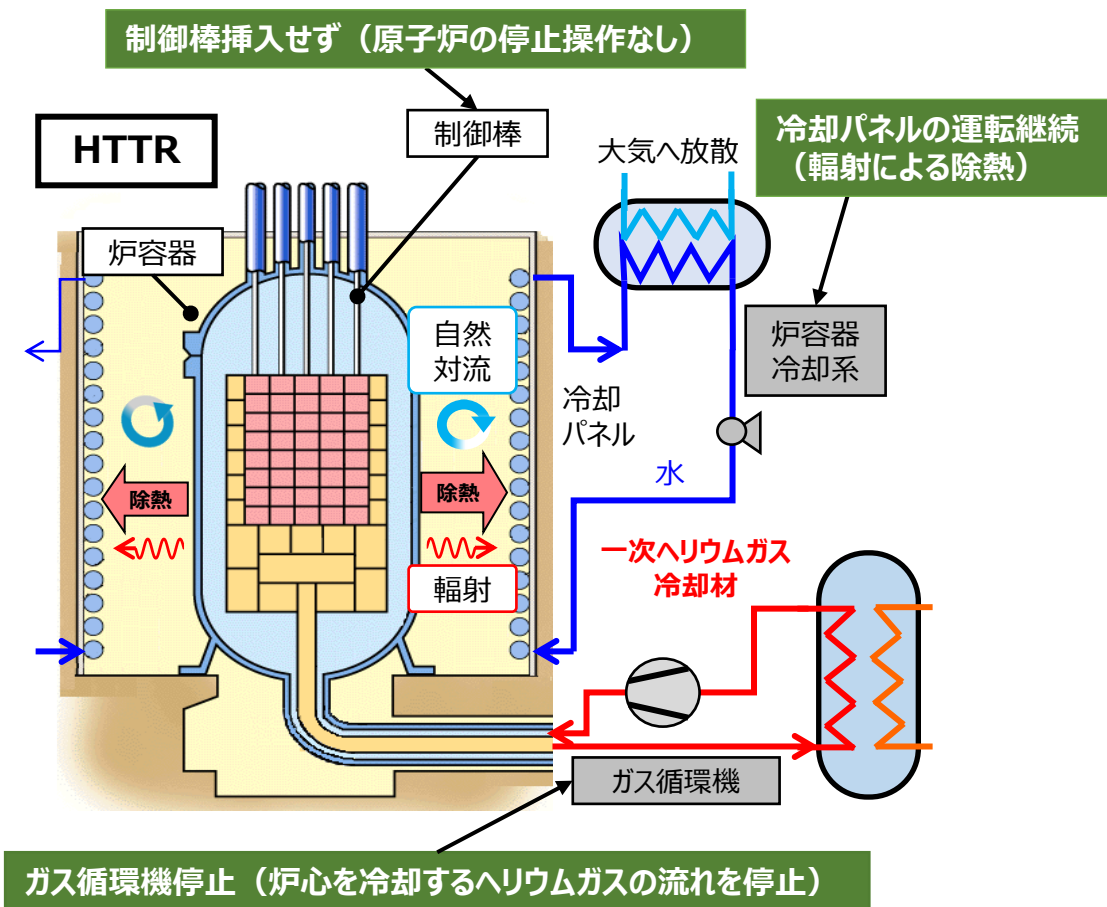
*OECD/NEA国際協力プロジェクト



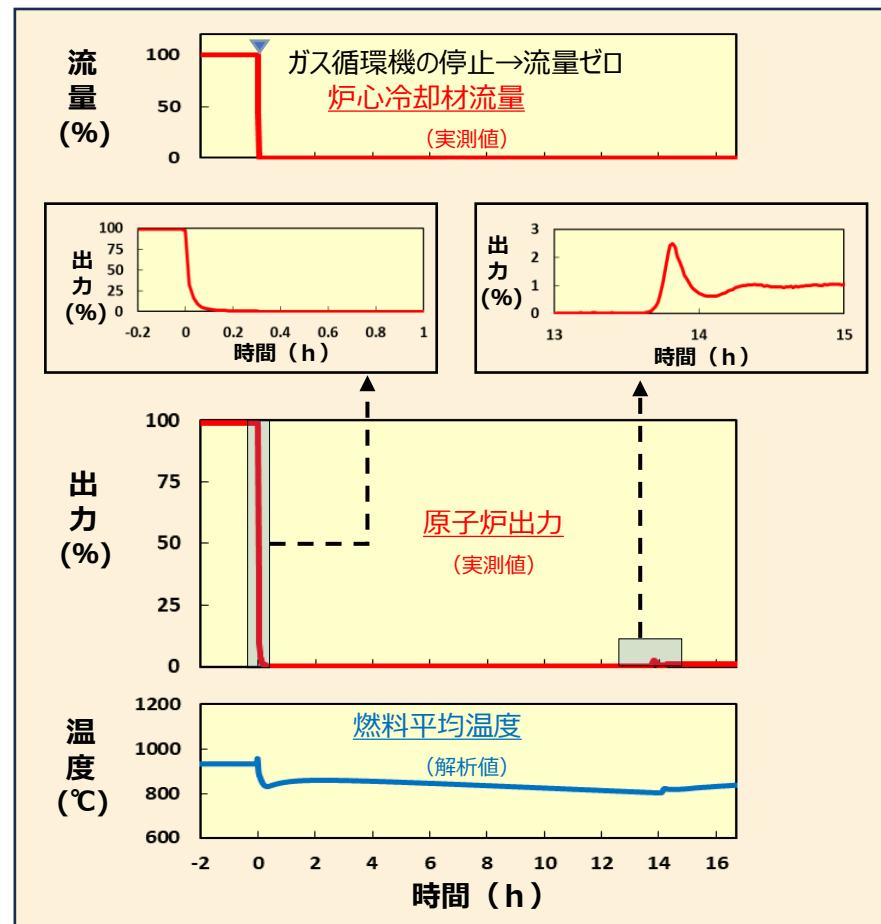
炉心の中心部



炉心の黒鉛ブロック



原子炉出力100%での試験結果 (2024.3)



事故発生時に制御棒挿入せずとも、冷却せずとも物理現象のみで、
原子炉が自然に静定・冷却されることを確証
(炉心溶融が起きない設計が成立する)

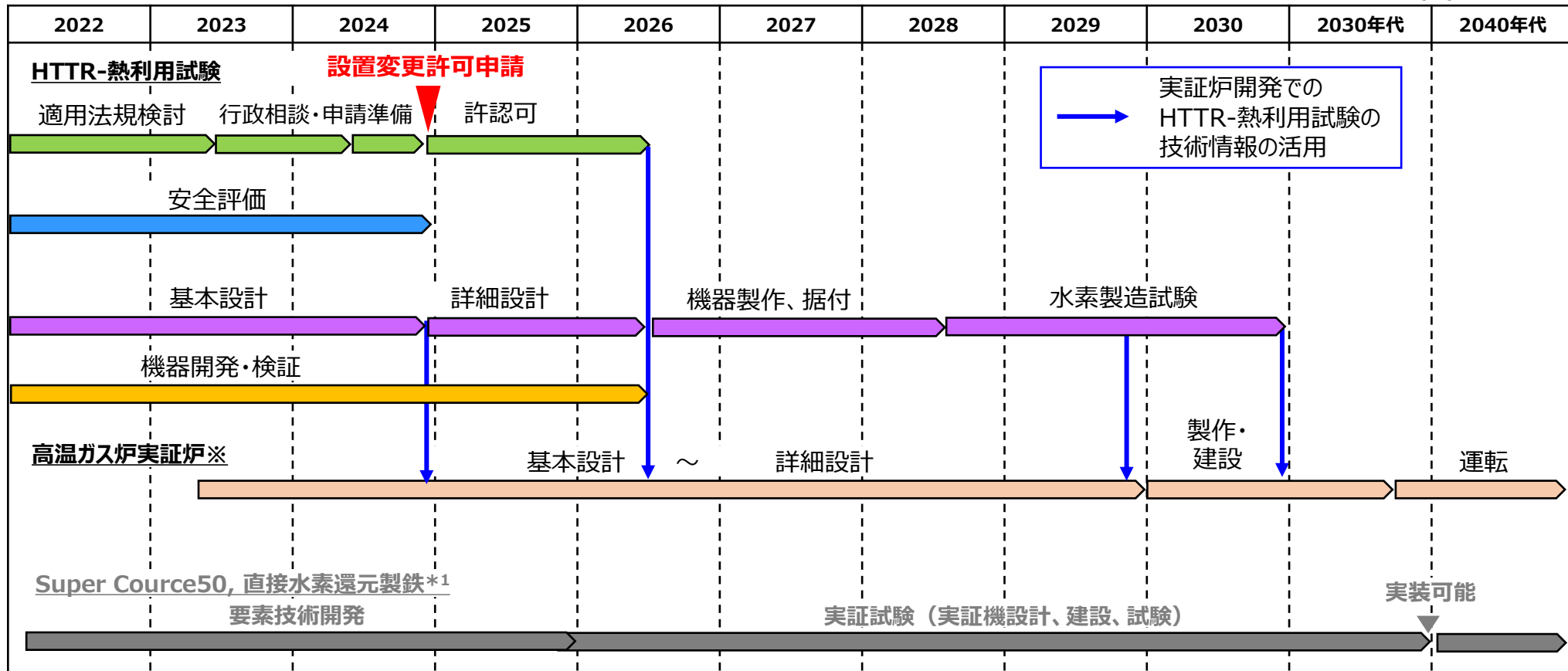
高温ガス炉の技術成熟度

- 高温ガス炉実証炉に必要な技術は、HTTR（熱出力30MWt）を通じて概ね実証済み（TRL6以上）
- 実証炉の設計・R&Dを通じて、HTTRからの大型化、設計寿命延長への対応や水素製造施設との接続に必要な追加設備の設計・検証、及び再処理技術・カーボンフリー水素製造技術の技術的成立性の検討を進めていく

主要な技術		技術成熟度（TRL）									TRL	定義
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
炉心燃料の技術	燃料・被覆管・集合体										9	運転段階
	設計・評価手法											
原子炉構造の技術 冷却システムの技術	冷却系統										8	試運転段階
	配管材料										7	
	高温機器支持構造										6	
	中間熱交換器										5	技術の実証段階
	高温隔離弁											
安全関連設備の技術	工学的安全設備										4	技術の開発段階
	外部ハザード対策										3	
運転保守の技術	補修・検査技術										2	実現可能性を示す 研究段階
	冷却材漏えい検知										1	
その他	再処理技術											基礎技術の研究段階
水素製造技術	水蒸気改質法											
	カーボンフリー製造法											

- 2030年代の高温ガス炉実証炉運転開始の実現に向けて、2030年までにHTTR－熱利用試験を完遂し、高温ガス炉と水素製造施設の安全な接続技術を確認する
- 脱炭素高温熱源である高温ガス炉を活用した大量、かつ、安定したカーボンフリー水素製造により、大量の水素需要が見込まれる製鉄（Super Course50や直接水素還元製鉄*）等の産業部門のカーボンニュートラル化の実現に貢献したい

2040 年度 2050



※ 事業計画により変更される可能性あり

*1 GREINS, 開発スケジュール, <https://www.greins.jp/research/research02/> (accessed on July 30, 2025)

技術

原子炉技術の確立

- 炉心：大型炉心の性能及び製作技術実証
- 設備：大型中間熱交換器やヘリウム循環機の性能及び製作技術実証、自然循環式炉容器冷却設備やコンファインメントの性能及び製作技術実証、サプライチェーンの再構築
- 燃料：高燃焼度用燃料の確立、再処理技術開発
- 安全基準：高温ガス炉の特長を考慮した規制基準策定
- 構造規格：HTTR用内規不足事項の規格策定、新規材料及び設計寿命長寿命化に向けたデータ取得

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（高温隔離弁等）の開発
- 水素製造：カーボンフリー水素製造技術のシステムレベルでの技術実証

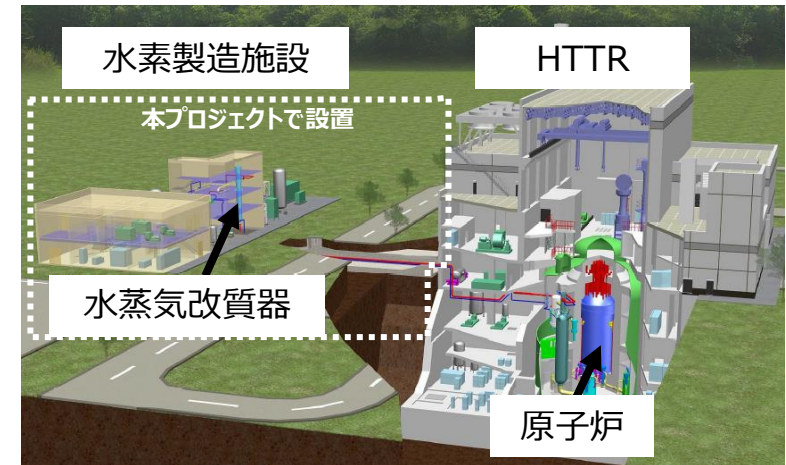
【内容】

- 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

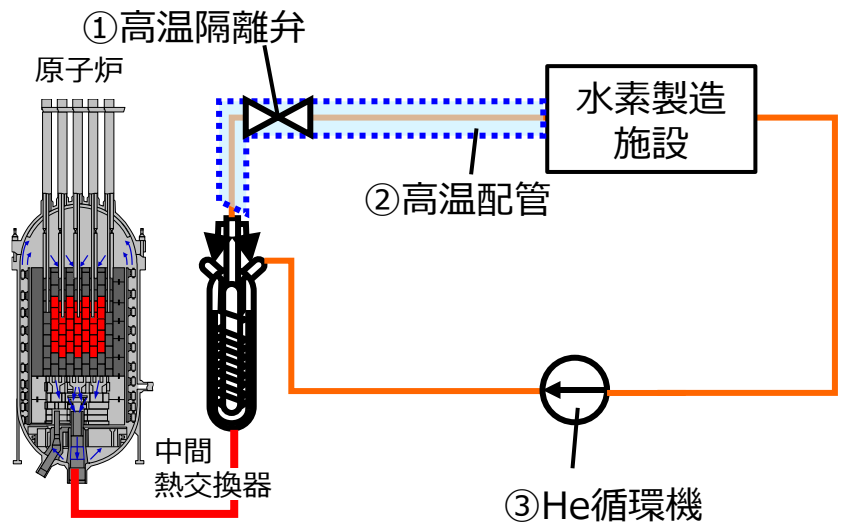


試験イメージ

- ✓ 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		設置変更許可申請 (2025.3.27)	補正 (2025.9.26)	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"> 起動停止及び定格運転を通じた原子炉と水素製造施設が協調した運転技術確立 プラント過渡試験データを用いた実証炉用プラント動特性解析コードの妥当性確認
② 安全設計 (含む 新規制基準対応)	原子力規制委員会からの許認可取得を通じた <ul style="list-style-type: none"> 適用法規の確定 水素製造施設との接続に係る原子炉施設の安全設計確立

HTTR-熱利用試験を通じて高温ガス炉と水素製造施設の接続技術を確立

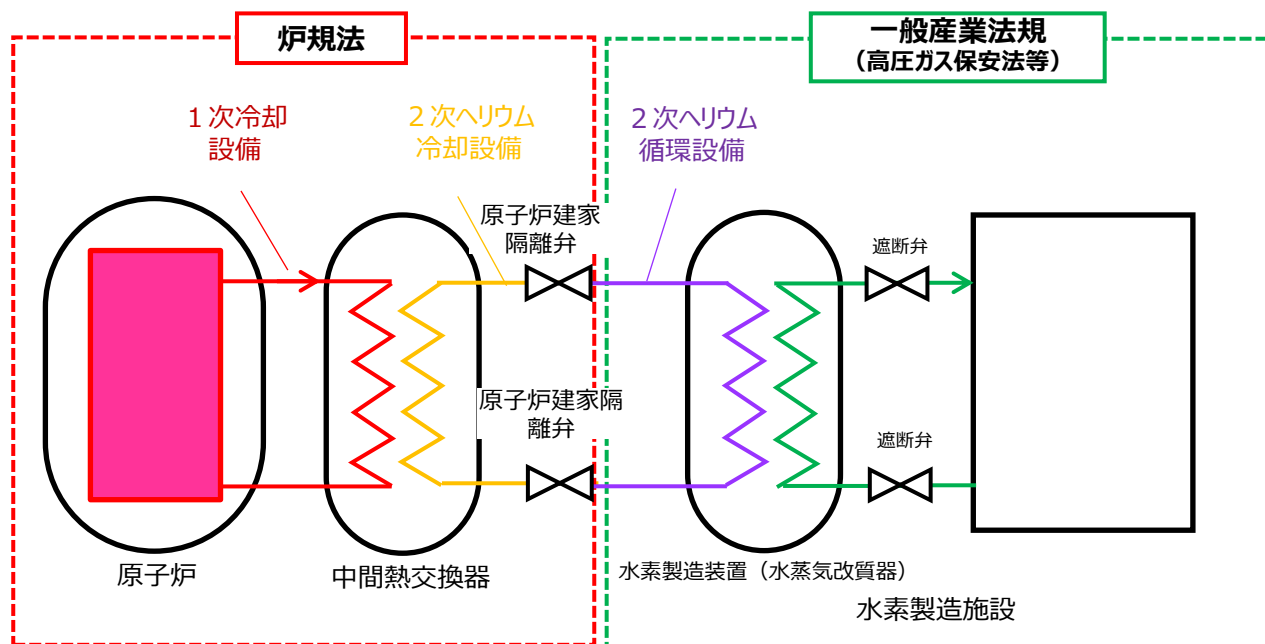
原子炉設置変更許可の審査会合にて、原子炉等規制法（炉規法）の適用範囲は原子炉建家隔離弁まで、水素製造施設は範囲外として審査を受ける方針で決着（2025.7.1）

（炉規法 原子炉を安全に停止しその状態を維持するために必要な設備（赤点線部））

- 炉規法を適用する
- 原子炉建家隔離弁は、原子炉施設と一般産業施設の分界点とし、一般産業施設に異常が発生した場合に閉止し、一般産業施設を原子炉施設から隔離する

（一般産業法規 原子炉の安全な停止やその状態の維持に必要な設備（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装置間に十分な隔離距離を確保する



適用法規分界点

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

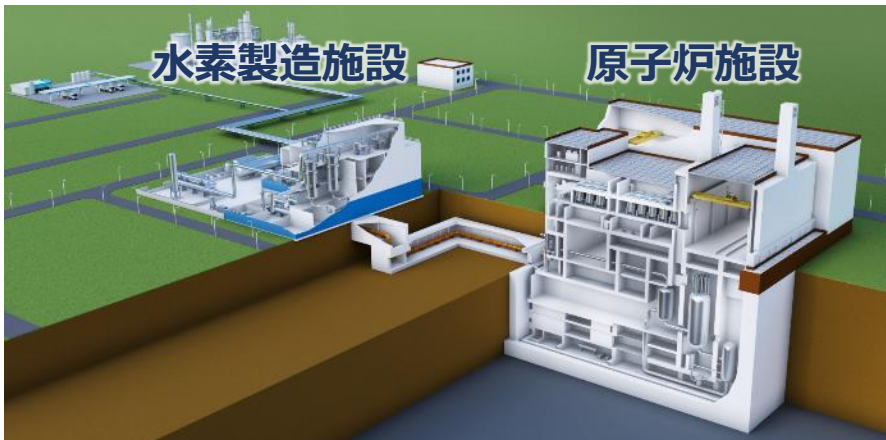
高圧ガス保安法適用範囲

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

高温ガス炉実証炉の開発状況（1/3）

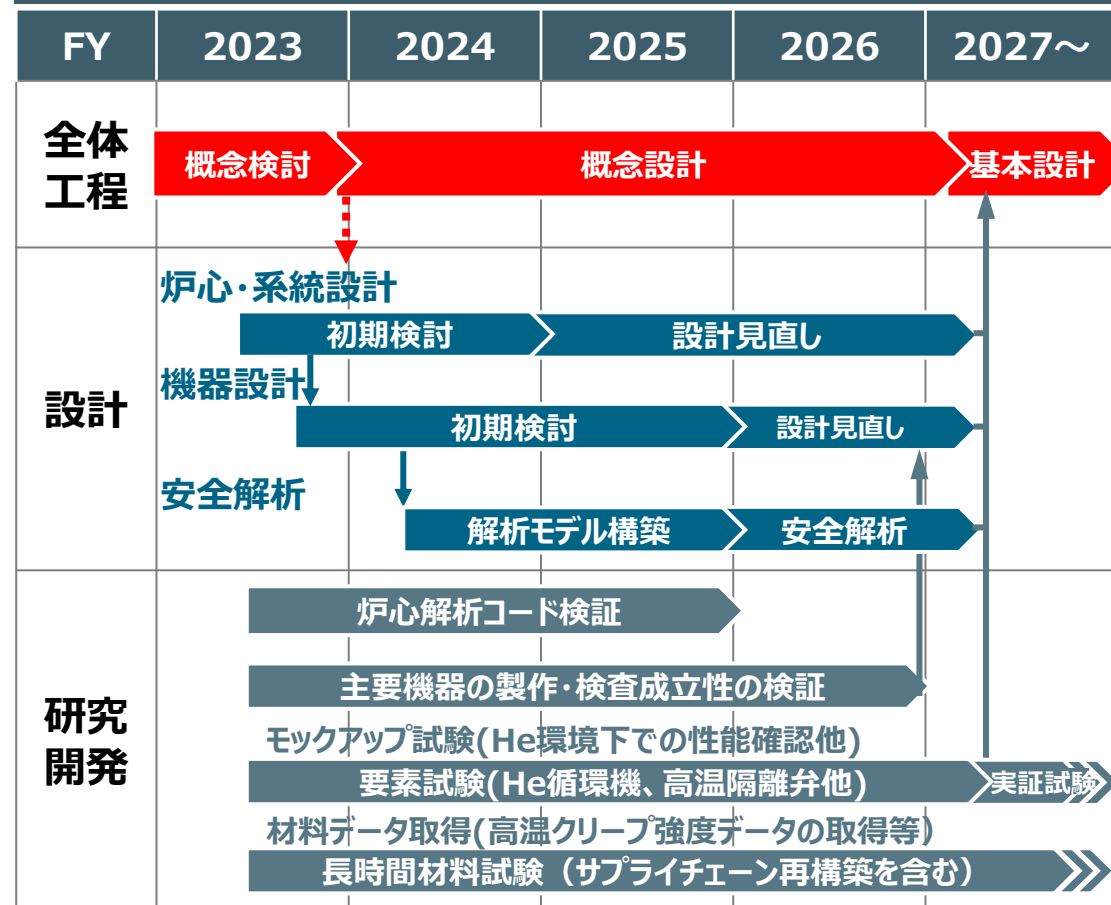
- 早期の実証炉実現を目標に、HTTRで得られた知見・実績をベースに、大型化、長時間運転に対応すべく設計・R&Dを推進中
- 実証炉の概念設計としての基本仕様をまとめ、炉心・系統・機器設計等を推進中

実証炉プラントの基本仕様



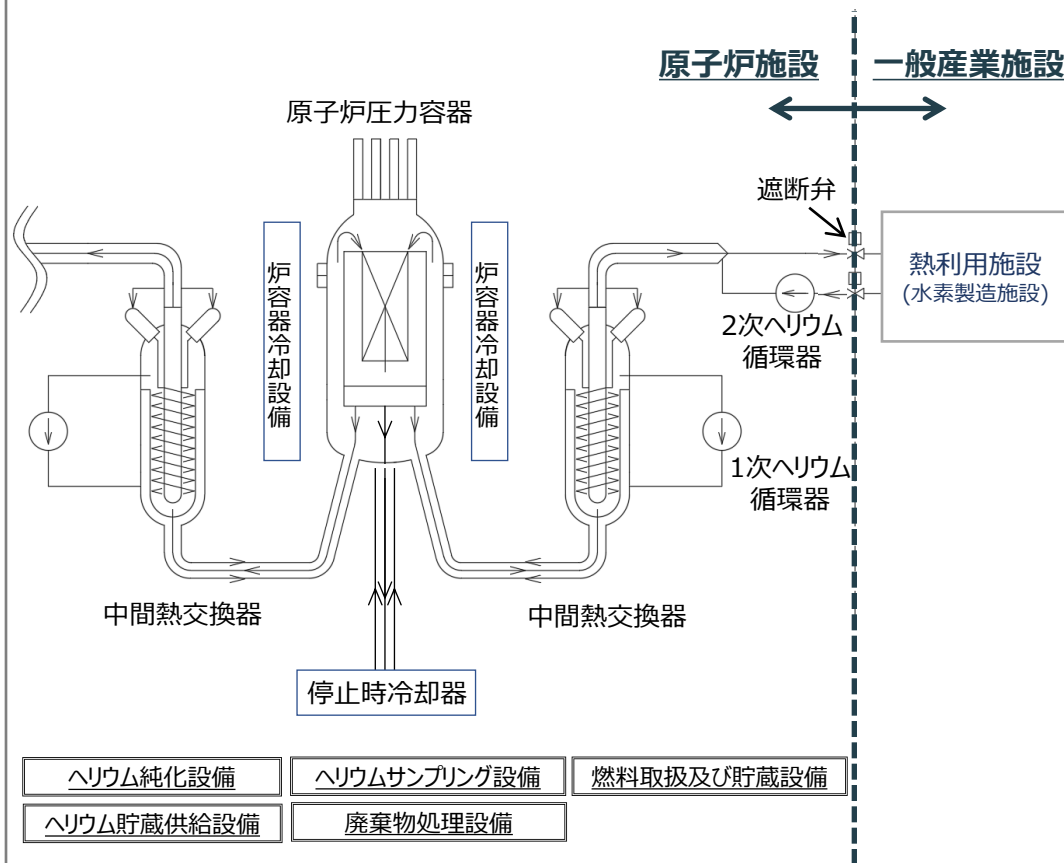
項目	仕様
出力	約200MWt
炉心	ピンインブロック型
原子炉出口温度	約900℃
水素製造方法	水蒸気改質法もしくは適用可能なカーボンフリー水素製造法

開発工程

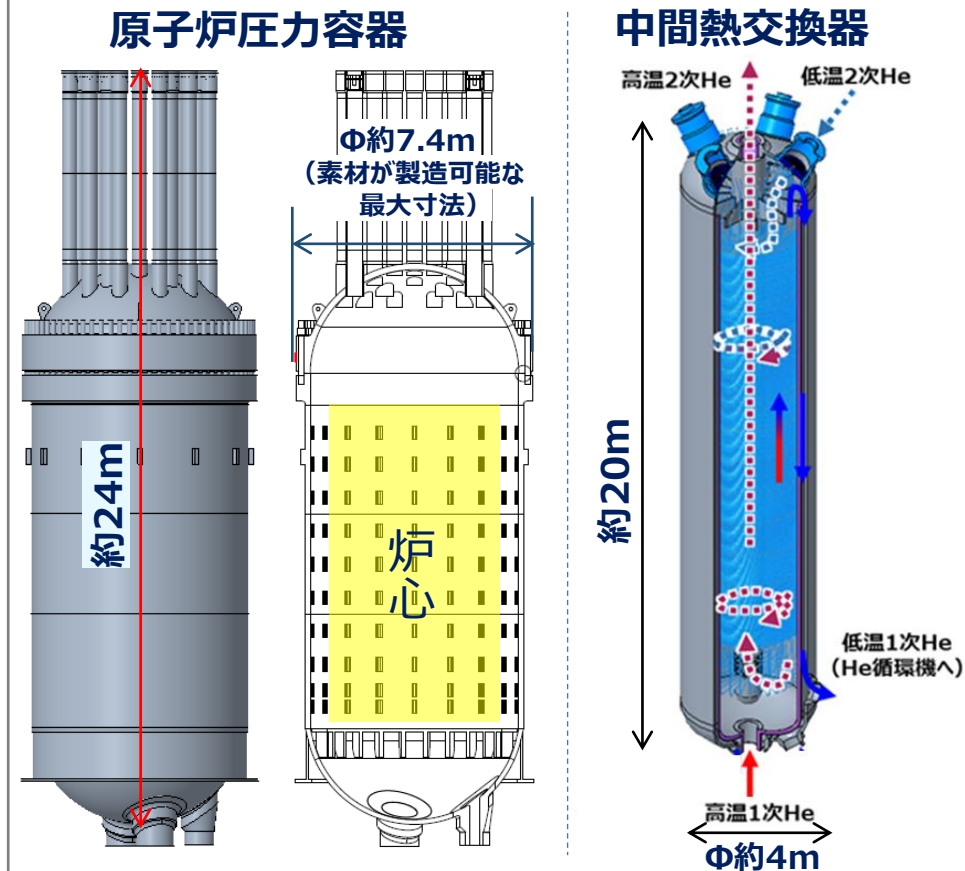


- 系統設計では、製作性の観点から中間熱交換器2基構成（2ループ化）を暫定して検討した結果を反映し、系統仕様、概略系統図等の整備を完了
- 原子炉压力容器、中間熱交換器等の主要機器について、HTTRからの出力アップ（30MW→200MW）を反映した機器概念を構築し、構造健全性、製作性、検査性、機器輸送性等の観点で成立性を検討中

全体系統図



主要機器の設計例



- HTTRからの大型化、設計寿命延長への対応や水素製造施設との接続に必要な追加設備、サプライチェーン再構築等の観点から約30項目のR&D項目を抽出
- 策定したR&D計画に従い、製作性検証や材料データ取得等を進めており、全般順調に進捗中

主なR&D項目例

大型化

- 実証炉炉心に対する核熱解析コード、燃料ブロック耐震コード等の適用性検証
- 大容量中間熱交換器の製作・検査の成立性検証
- 原子炉圧力容器スタンドパイプの製作方法及び検査方法の確立

設計寿命延長

- 低合金鋼の高温強度データ取得
- ハステロイXRの長時間クリープ試験、ヘリウム中クリープ試験
- 1次系ヘリウム中の腐食環境における材料健全性評価

追加設備

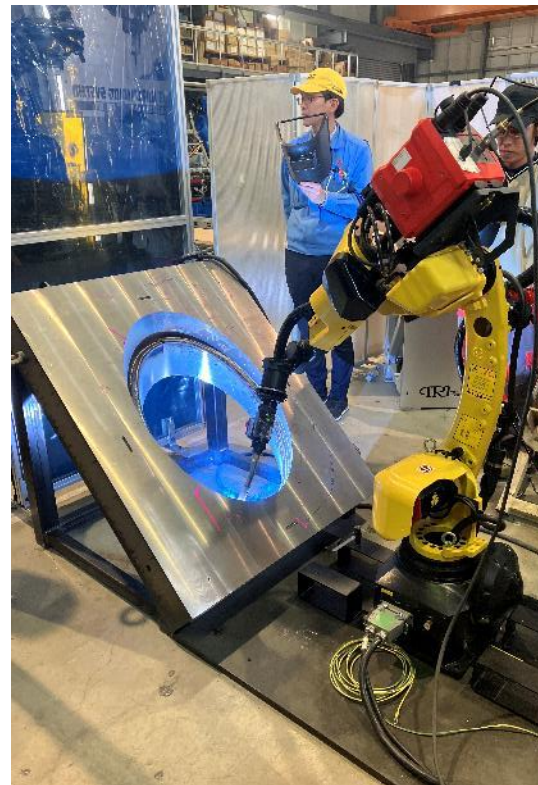
- 熱利用設備との接続に向けた高温隔離弁・高温断熱配管等の開発

サプライチェーン再構築

- 大容量ヘリウムガス循環機の開発
- ハステロイXR代替材の検討

R&D実施状況の例

スタンドパイプ製作性検証



低合金鋼高温強度データ取得



ハステロイXRクリープ試験



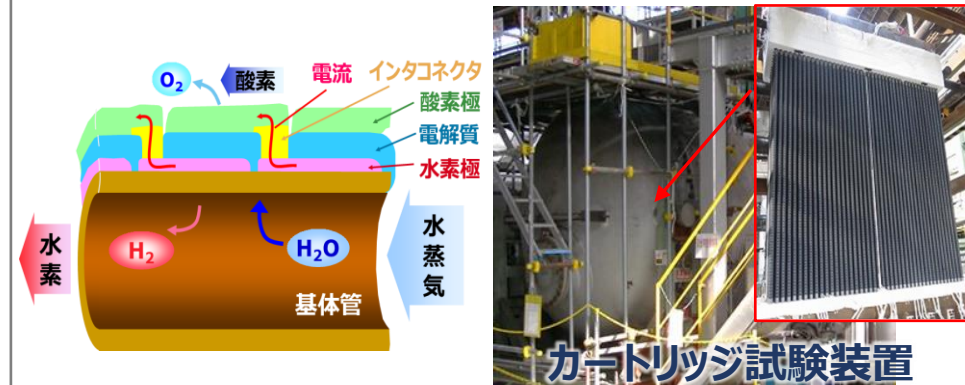
カーボンフリー水素製造技術フィージビリティースタディー 三菱重工

- 超高温熱を利用したカーボンフリー水素製造の候補技術として、高温水蒸気電解法（SOEC）とメタン熱分解を抽出し、高温熱供給を模擬した要素試験により水素製造が可能であることを確認
- 今後、高温ガス炉の熱を利用するための伝熱構造を検討すると共に、段階的に試験のスケールアップを進め、2028年頃から実施予定の小規模実証試験を通じて技術的成立性を確認していく

カーボンフリー水素製造技術 FS工程

FY	～2024	2025	2026	2027	2028～
SOEC	セルスタック試験				
		カートリッジ試験			
	伝熱構造検討		実証試験装置設計・製作		小規模実証試験
メタン熱分解		小型反応試験			
			連続式流動床試験		
	伝熱構造検討		連続式加圧流動床試験装置開発		小規模実証試験

SOECの概要及び試験装置



メタン熱分解の概要及び試験装置



IS法の特徴

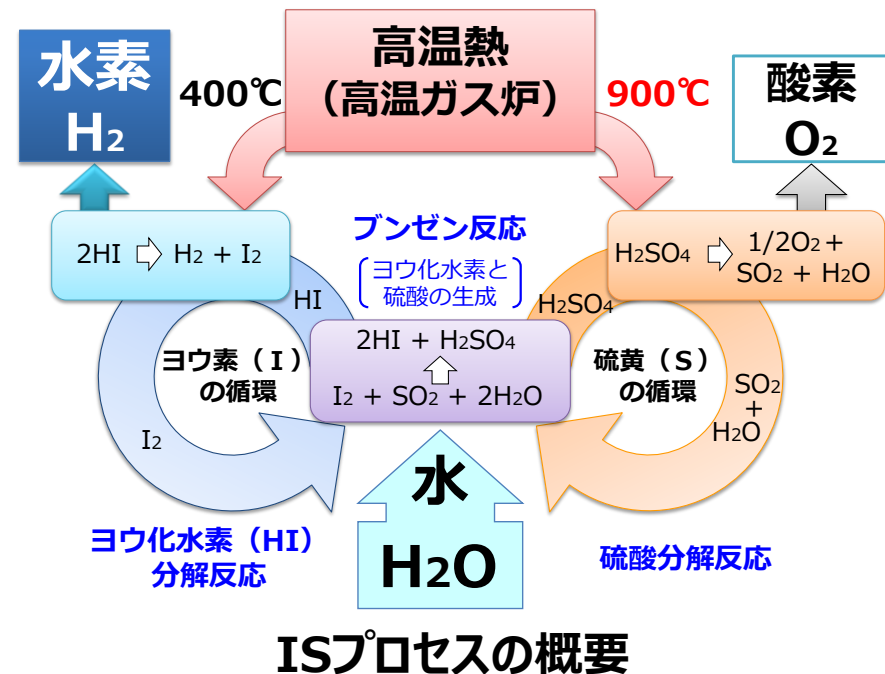
- ヨウ素 (I) と硫黄 (S) の化学反応を利用することで900℃以下の水を熱分解
(熱のみで水を分解するには4000℃必要)
- 水素製造に必要なヨウ素、硫黄はプロセス内で循環
- 高温ガス炉との組合せでカーボンフリー水素製造を実現可能

研究開発成果

- 工業材料製耐食機器を開発し、それらを統合した連続水素製造試験装置を製作
- 世界で初めて工業材料製装置による150時間の連続運転を達成

今後の研究開発項目

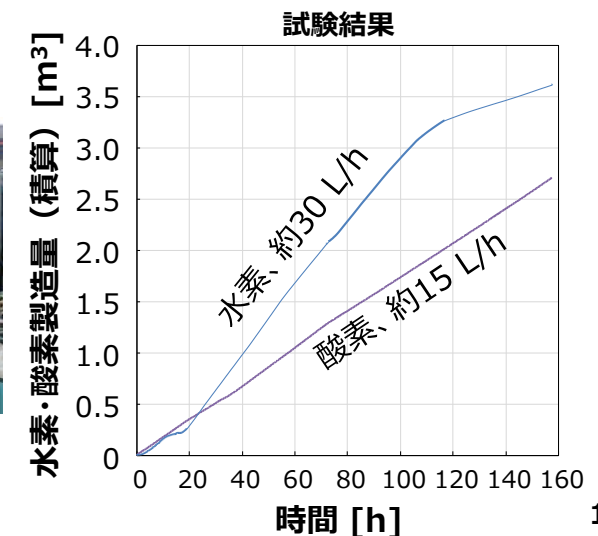
- 安定的な運転を目指した自動組成制御技術の開発
- 熱効率向上に向けた水素分離膜の開発



ISプロセスの概要



連続水素製造試験装置
(0.1 m³/h)

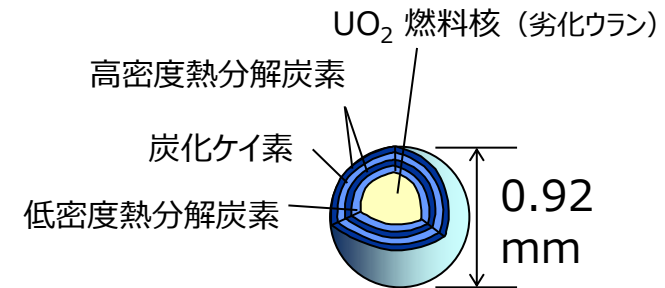


- HTTR燃料は2005年3月に納入した第2次燃料を最後としてそれ以後は製造されておらず、製造能力ならびにノウハウの維持が課題
- 技術維持の一環として、これまでに培った国内燃料製造技術のJAEAへの移管を合意
- 並行して英国との燃料製造技術開発プログラムの下、英国関係機関（下表参照）への被覆燃料粒子製造技術の供与を企図したトレーニングを完了した



NFIにおける燃料トレーニング風景

実施期間	UKNNL	スプリングフィールドズ
2025.1.27-2.7	4 名	1 名
2025.2.17-2.28	4 名	-



トレーニング対象の被覆燃料粒子

- 今後、安全機能の実証と経済性向上に向け以下を推進
 - 照射試験
 - ✓ 高燃焼度照射健全性確認
 - R&D
 - ✓ 高燃焼度化に伴うSiC層健全性予測精度の向上
 - ✓ 燃料の熱伝達性能の向上による炉心出力密度の向上

日本原子力学会 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」

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

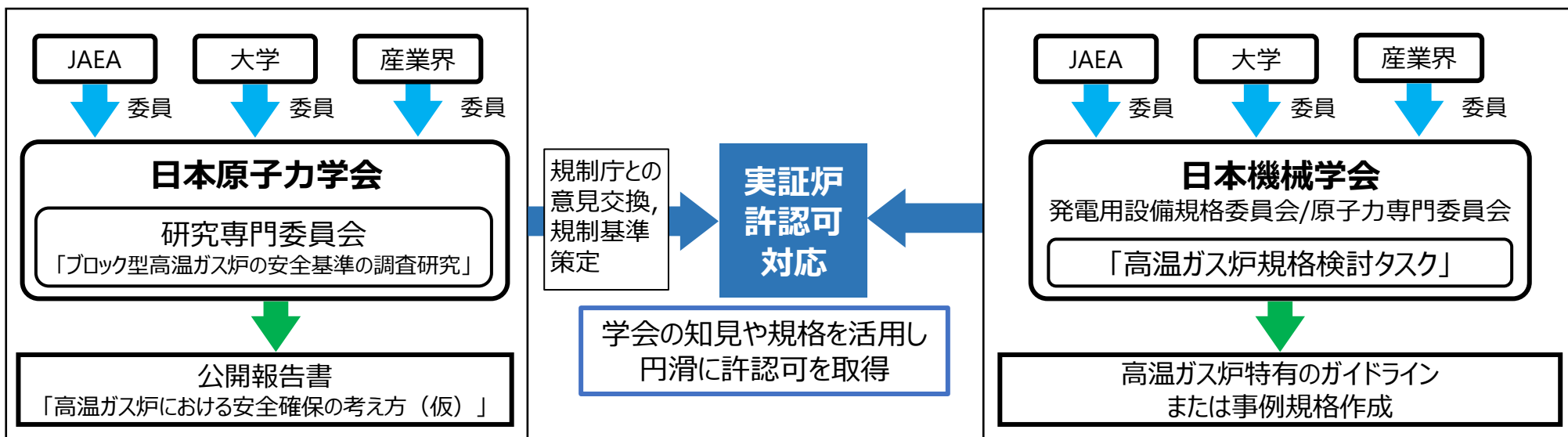
期待される成果

「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

日本機械学会 発電用設備規格委員会/原子力専門委員会 「高温ガス炉規格検討タスク」

- 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指針**が科学技術庁の内規として定められた

高温ガス炉の実用化に向けて、
機械学会での民間規格化（ガイドライン又は事例規格）を目指す



- 英国政府は、革新炉として高温ガス炉を選択し2030年代初頭に高温ガス炉実証炉の運転開始を目指す「高温ガス炉実証炉プログラム」及び「高温ガス炉燃料開発プログラム」を開始（2022.9）。NNLとJAEAのチームは基本設計（Phase B）及び燃料製造技術開発（Step 1）採択機関に選ばれた
- 国内実証炉の開発成果を活用し、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英国より得、国内高温ガス炉実証炉に活かす
- 日本（原子燃料工業（NFI）及びJAEA）の高温ガス炉燃料設計、製造技術を活用して英国と共同開発を実施、燃料製造技術の高度化を図る
- JAEAとNNLは以下を締結
 - ✓ 包括的な高温ガス炉技術に係る協力覚書（2023.9.6）
 - ✓ 英国高温ガス炉実証炉プログラム（Phase B）に係る実施覚書（2023.9.6）
 - ✓ 英国高温ガス炉燃料開発プログラム（Step 1）に係る実施覚書（2024.4.22）
 - ✓ ライセンス契約（実証炉設計 2024.2.20、燃料 2024.4.22）



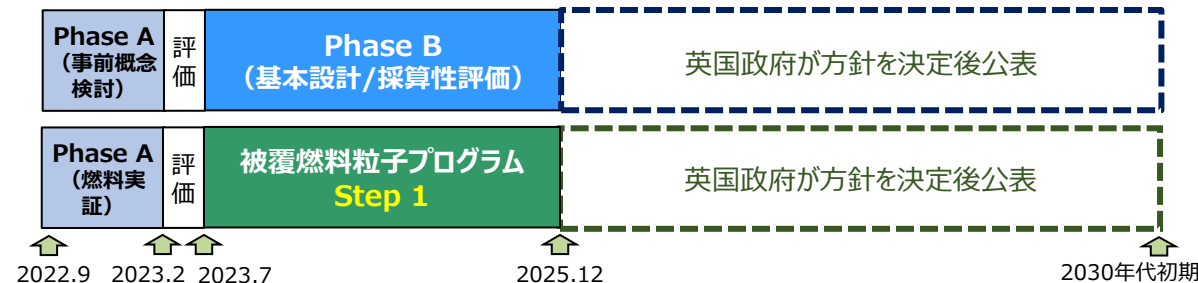
英国高温ガス炉実証炉 建設候補地

（イングランド北東部タム州ハートルプール。ティーズ川の河口の北岸に位置し、英国原子力規制室（ONR）の認可が得られたサイトのひとつ）
EDF-Energy パンフレットより



HTTR燃料製造設備

（エネ庁委託事業「高温ガス炉実証炉開発事業において燃料製造技術維持・向上に向けて燃料製造設備を整備」）



英国高温ガス炉プログラムスケジュール（上段：実証炉、下段：燃料）

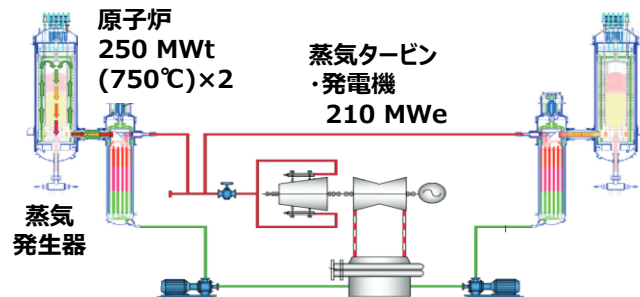
- 高温ガス炉の実証炉の建設と産業化を目的として、中国華能集团公司、中国核工業集团公司及び清華大学の3者がペブルベッド型モジュール式高温ガス炉（HTR-PM）の実証炉を共同で建設し、商業運転中
- 石油化学工場への高温蒸気供給を目的として、中国核工業集团公司がHTR-PM技術に基づく商用炉HTR-PM600S建設を計画（PWRと高温ガス炉を連結し高温蒸気を供給）

HTR-PM（実証炉）

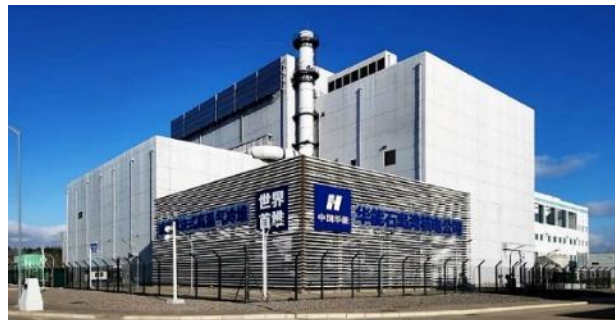
実績^{1),2)}

2021：初臨界（9月、11月）、送電網接続（12月）

2023：商業運転開始（12月）



HTR-PM系統構成



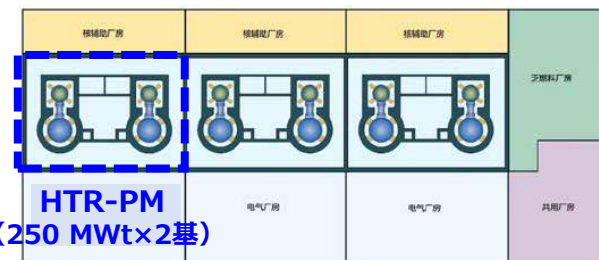
HTR-PM外観

HTR-PM600S（商用炉）

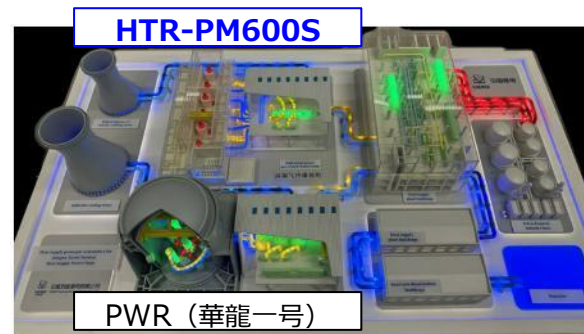
実績及び計画^{3),5)}

2024：中国国務院が建設を承認（12月）

2030：蒸気供給開始予定（10月）



HTR-PM600S配置（HTR-PM原子炉建家3ユニットの配置を最適化）



HTR-PM600S外観モデル⁴⁾

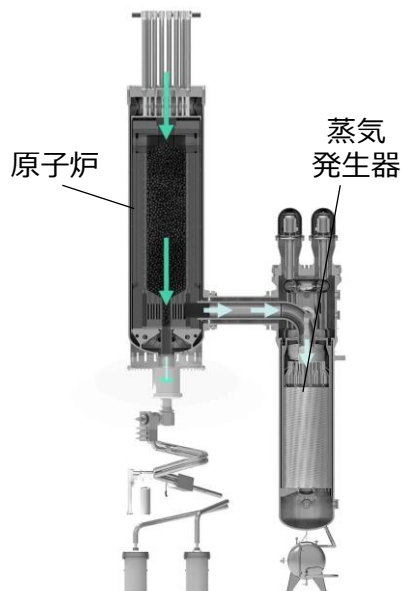
1) 華能山東石島湾核電公司サイト, 2016.11.7、2) Fu LI, "Approach of Operational Startup for HTR-PM in China", Virtual Side Event in IAEA 64th General Conference, 2020.9.24.

3) 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

4) IAEA, Nuclear Technology Review 2025.

5) C. Fangshui, HTR-2024 (2024)

- 米国大手化学メーカーDow社テキサス州シードリフト操業拠点の老朽電源及び蒸気製造設備の代替を目的として、Dow社子会社のLong Mott Energy社が、米国X-energy社の高温ガス炉Xe-100 4基の導入を計画¹⁾
- 米国電力会社Energy Northwest社が、同社が保有するコロンビア発電所近くにXe-100 12基の導入を計画²⁾
- 米国エネルギー省（DOE）が、の革新炉実証プログラム（ARDP）により、プロジェクト総額約25億ドル（3750億円、1ドル＝150円（以下同じ換算レート））の50%を支援¹⁾
- X-energy社が、Amazonの「Climate Pledge Fund」をはじめ、Segra Capital Management等から7億ドル（1050億円）のシリーズC-1資金を、Jane Street等から7億ドル（1050億円）のシリーズD資金を獲得¹⁾



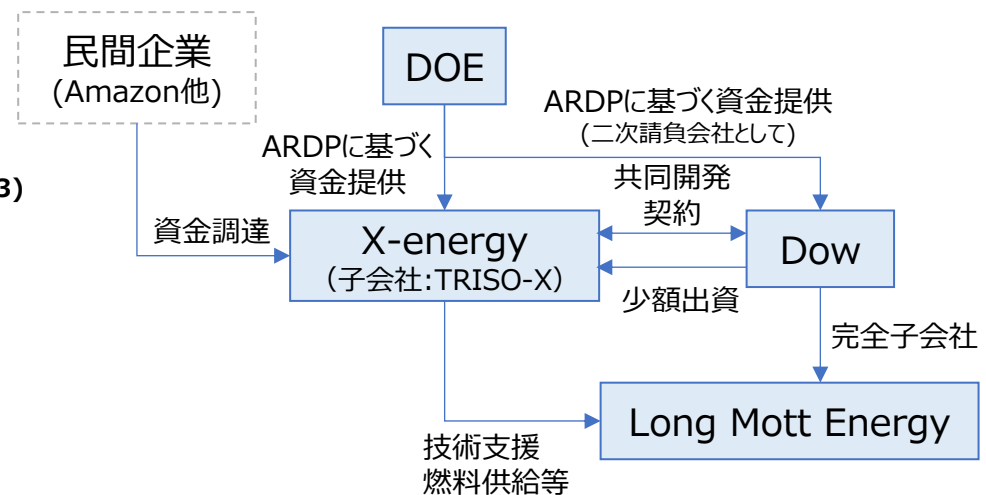
基本仕様

原子炉出力：200MWt
 電気出力：80MWe
 原子炉出口温度：750℃
 蒸気供給温度：565℃

実績及び計画（シードリフトプロジェクト）^{1),3)}

2025：建設許可申請（6月）
 2031：**運転開始**

Xe-100構成



シードリフトプロジェクト事業スキーム⁴⁾

1) X-energy, <https://x-energy.com/news-releases> (アクセス日 2025.11.12)
 2) ANS, <https://www.ans.org/news/article-7473/amazon-provides-update-on-its-washington-project-with-xenergy/> (アクセス日 2025.11.12)
 3) 米国NRCのweb情報を基にJAEA編集
 4) Dow, X-energy, DOE, NRC資料等よりJAEA作成

1. 高温ガス炉実証炉の開発状況
2. 高温ガス炉実証炉開発における課題

政策 ・技術

事業予見性確保

- 規制基準（許認可審査の予見性確保、性能に応じたスケーラブルな緊急時区域の設定）
- 燃料サプライチェーン構築

社会

立地の選定※・実施体制の確立

- 社会的受容性獲得・民間企業主導による事業モデル構築（原子力事業の特殊性、水素需要の不確実性）

※「2026年度国の施策及び予算に関する提案・要望（2025年6月茨城県）」（抜粋）

高温ガス炉の実証炉開発・建設の促進について

＜提案・要望先＞ 経済産業省、文部科学省

高温ガス炉の実証炉開発・建設は、H T T Rにおける研究開発の成果を活用しながら並行して進めていくものであることから、現在の研究開発体制・成果・立地を最大限活かすことができるとともに、臨海部などに大きな水素需要が見込まれる茨城県内に実証炉を設置すること。

また、2050年カーボンニュートラルの実現に資するためには、2030年代後半の実証炉運転開始目標を着実に達成する必要があることから、実施主体及び設置場所の早期選定に向けた議論を加速すること。

https://www.pref.ibaraki.jp/kikaku/seisaku/tyosei/yobo/2025jisshi/documents/250602_presentation.pdf（アクセス日 2025.11.25）

課題

- 現在、設計や研究開発は順調に着手・執行できている段階。社会実装に繋がる実証炉開発へと更に発展させるため、基本設計を更に本格化すべく必要なプラント基本仕様やサイト条件の確定に向け、早期の実施主体決定及び設置場所選定が必要
- 海外で先行するプロジェクトの事例も踏まえると、社会実装に繋がる実証事業の更なる発展には、技術以外の課題の特定と対応が必要
（例：規制見通し、原子力事業とその他事業の差異、水素社会の動向、等）
- 実証炉規模の原子炉の許認可対応や建設、運転及び保守管理に対応するには、現在、高温ガス炉プロジェクトに係る人員に加えて、JAEA内外から追加の人的リソース確保が必要

国内外の事例

- 米国Dow社テキサス州シードリフト操業拠点の高温ガス炉導入は、エンドユーザーのDow社が実施主体として子会社のLong Mott Energy社を設立^{*1}
- 米国NRCは、原子炉の性能に基づきスケーラブルな緊急時区域設定を可能とする連邦規則を公布^{*2}
- 米国X-energy社は、NRCに提出した被ばく評価トピカルレポートにおいて、Xe-100（4炉心）の緊急時区域を400 mと評価^{*3}
- 革新軽水炉に関し、原子力学会の「次期軽水炉の技術要件WG」（フェーズ1：2014.12～2017.3、フェーズ2：2018.6～2020.5）での検討^{*4}を経た上で、原子力規制委員会と事業者が規制基準に関する意見交換を開始（2024.12.9）^{*5}。1年程度の意見交換を想定^{*6}

^{*1} X-energy, <https://x-energy.com/news-releases> (アクセス日 2025.11.12)

^{*2} US NRC, <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part050/full-text.html>, (アクセス日 2025.11.25)

^{*3} X-energy, Technical Report, Preliminary Plume Exposure Pathway Emergency Planning Zone Analysis," Revision 3, March 19, 2025

^{*4} http://www.aesj.or.jp/~hatsuden/katsudou/04_jikiroWG/jikiroWG_index.html (アクセス日 2025.11.25)

^{*5} https://www.da.nra.go.jp/search?ftxt=1&fuse=1&gi=M003_189 (アクセス日 2025.11.25)

^{*6} https://www.aec.go.jp/kaigi/teirei/2025/siryo05/2_haifu.pdf (アクセス日 2025.11.25)