



水素社会への貢献を目指して

～固有の安全性を兼ね備えた高温ガス炉が拓く脱炭素社会～

令和5年11月15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長

坂場 成昭





- 水素社会における水素供給源の要件
- 脱炭素高温熱源「高温ガス炉」の特長と現状
- 高温ガス炉の社会実装に向けた課題と対応



1

国内の水素製造

- 海外水素利用には液化水素の大量輸送が必要
- 液化水素輸送は現状高コスト

162円/m³

(ローリー輸送+液化+積荷+海上輸送コスト)

資源エネルギー庁：2020年時点試算

2

大量・安定した水素製造

- 産業プロセスの経済的操業は長期連続運転が前提
- カーボンニュートラル実現には大量水素供給が必要

200万t/年 ▶ **2,000万t/年**
(現状) (2050年)

水素基本戦略

3

カーボンフリー水素製造

- 水素利用による産業プロセスのカーボンニュートラル化に向けた技術開発競争激化
- 海外におけるカーボンプライシングの本格導入

32,500円/tCO₂
(国際エネルギー機関の2050年
先進国炭素税試算結果)

日本総研 カーボン・プライシングの活用に向けた課題～炭素価格引き上げの国内環境整備と国際協調を～

高温ガス炉とはどのような原子炉か

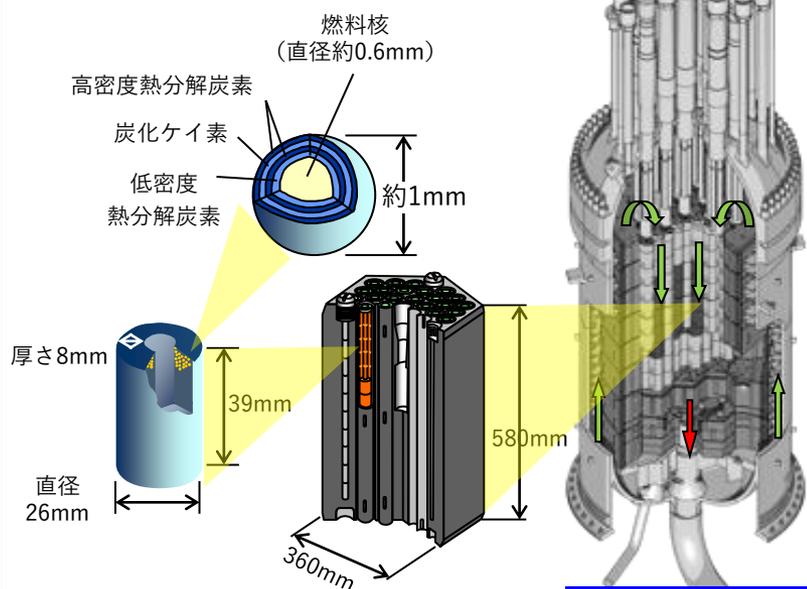


●優れた安全性

高温ガス炉は、その高い固有の安全性により、炉心溶融が起こらない設計が可能

被覆燃料粒子

1600°Cでも放射性物質を閉じ込める



黒鉛構造材

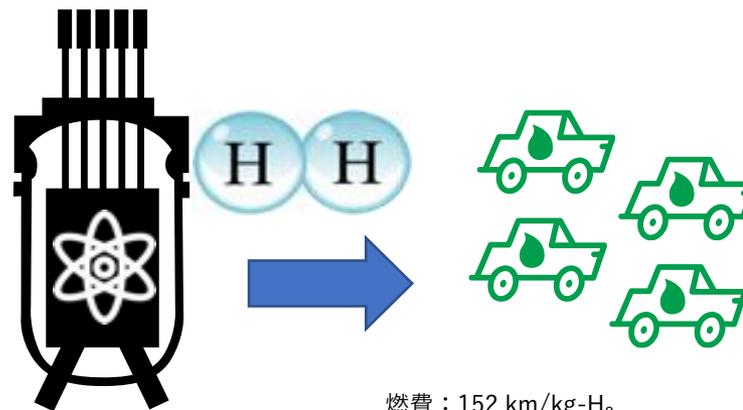
耐熱温度2500°C

ヘリウムガス

高温でも安定
(温度制限なし、
化学的に不活性)

●多様な熱利用

900°Cを超える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



高温ガス炉

燃費：152 km/kg-H₂
年間走行距離を10,000kmと仮定
年間の必要水素量：約730m³/台

高温ガス炉* (熱出力250MW) で、燃料電池車30万台/年分の水素製造が可能

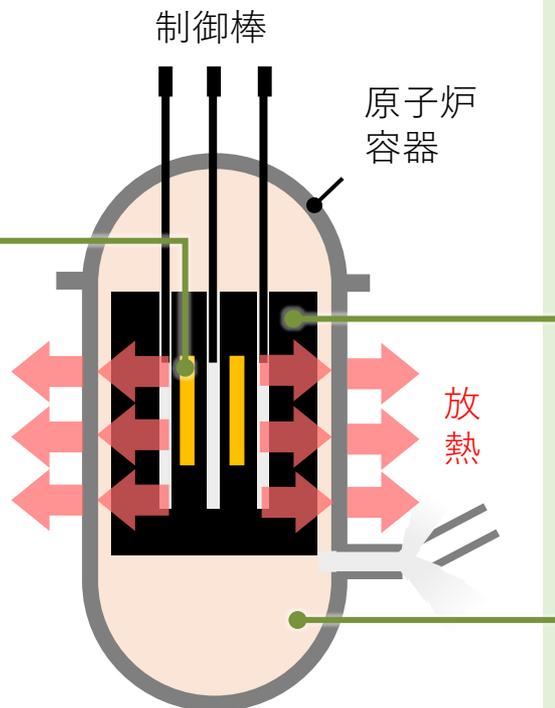
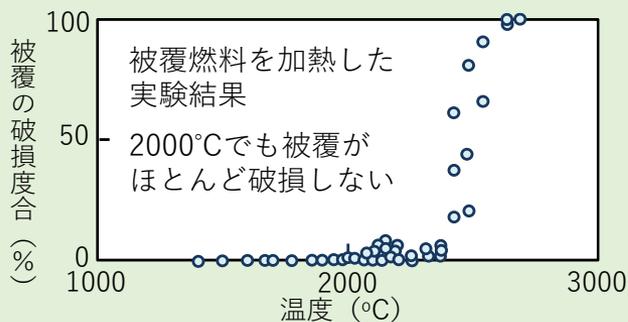
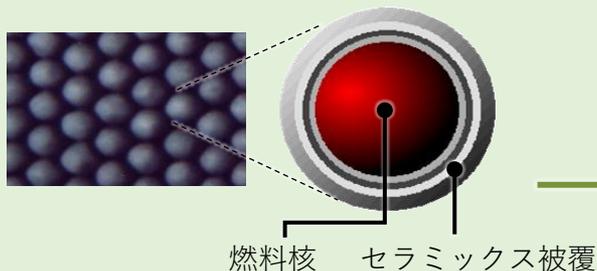
* 水分解による水素製造効率50%、稼働率80%を仮定

高温ガス炉の特長 –優れた安全性–



セラミックス被覆燃料

耐熱性が高く燃料溶融しない



黒鉛構造材

大熱容量・高熱伝導であるため
原子炉容器外側での放熱で
燃料が冷える



ヘリウム冷却材

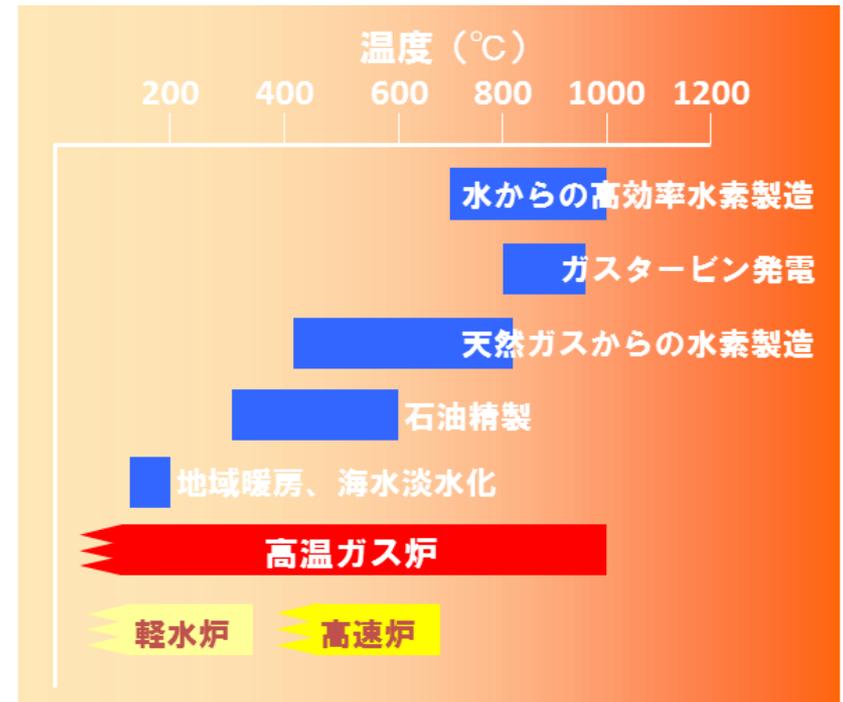
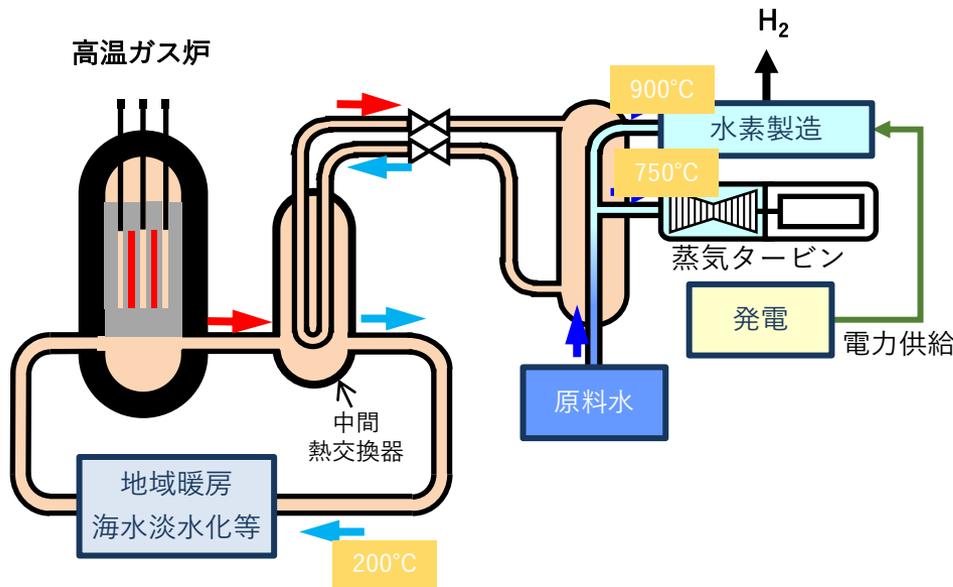
化学反応、蒸発しないため
水素・水蒸気爆発が発生しない

電源や冷却材が喪失しても自然に止まり、冷え、放射性物質が閉じ込められる

高温ガス炉の特長 – 多様な熱利用 –

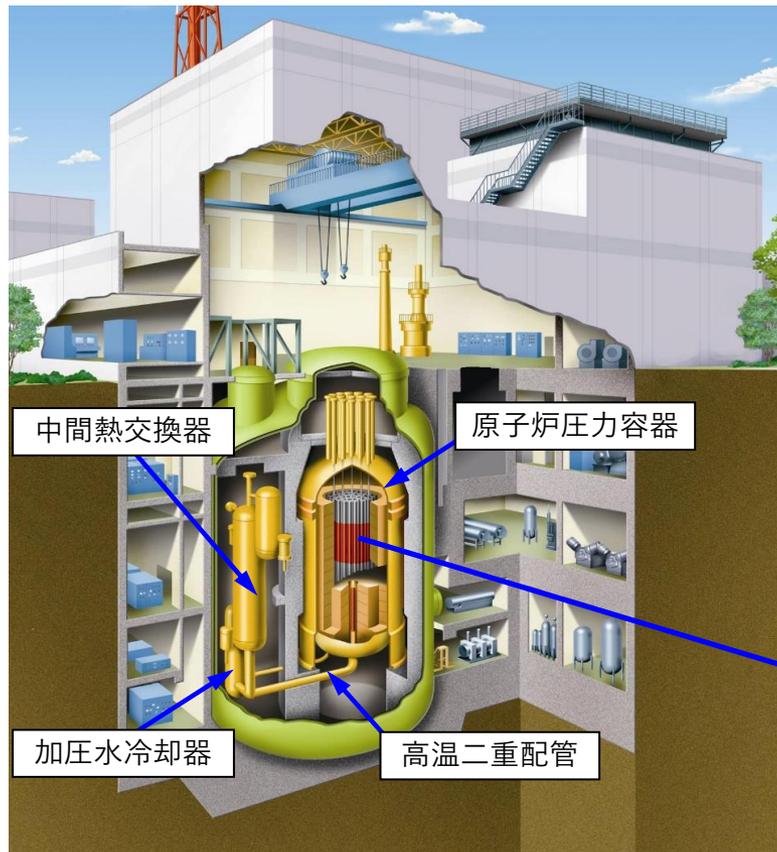


高温ガス炉は、発電以外の水素製造、高温熱供給、地域暖房、海水淡水化等の幅広い熱利用が可能



クリーンかつ多様なエネルギー供給により、発電以外の分野における炭酸ガス排出量を大幅に削減可能

HTTR (高温工学試験研究炉)



日本初の高温ガス炉

- 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°C
- 1次冷却材圧力 4MPa
- 炉心構造材 黒鉛

- 1998年11月 初臨界
- 2010年 3月 950°Cでの連続50日運転
- 2010年12月 安全性実証試験*
- 2021年 7月 新規制基準対応を経て運転再開
- 2022年 1月 安全性実証試験*

*OECD/NEA国際協カプロジェクト



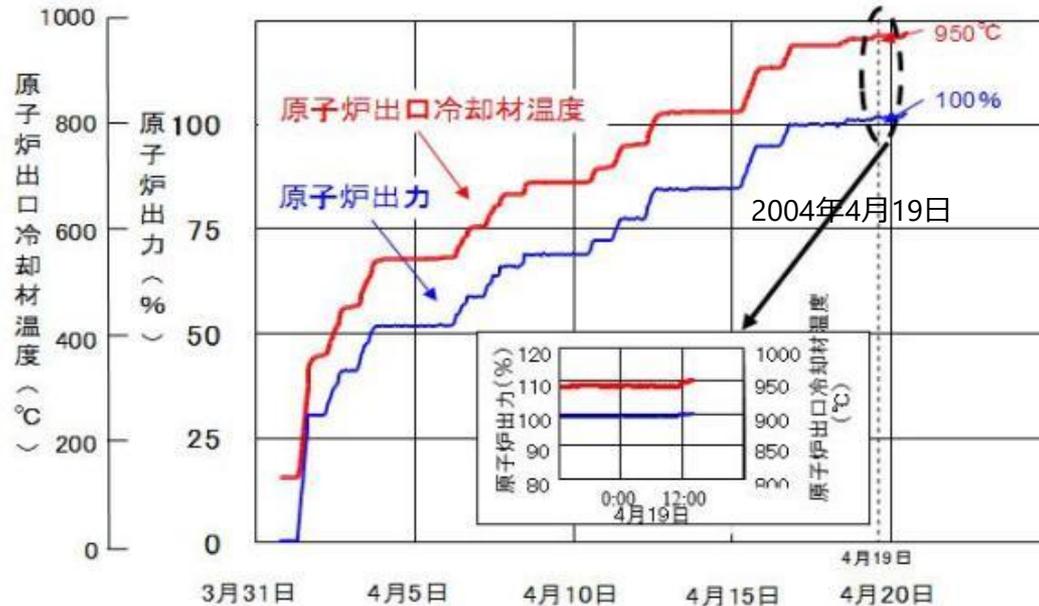
炉心の中心部



炉心の黒鉛ブロック

高温ガス炉HTTRは世界最高温度950°Cを達成

日本の高温ガス炉技術 - HTTRで高温熱供給を実証 -



800°Cを超える高温熱供給を実炉で実証

日本の高温ガス炉技術 – 日本が保有する技術 –

H₂

■ HTTR設計・建設・運転経験 (三菱重工、東芝/IHI、 日立製作所※1、富士電機、川崎重工業 等)

膨大な高温ガス炉技術データの蓄積

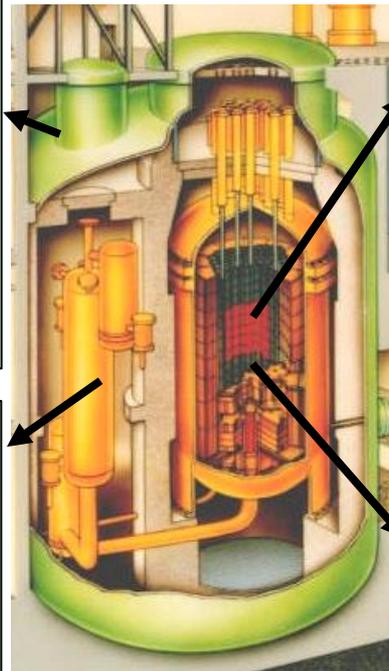
実用炉の最適設計可能

■ 高温金属材料ハステロイXR (三菱マテリアル※2と共同開発)



原子力用構造材として世界最高温度
(950°C) で使用
できる金属材料

950°Cの熱を
取り出し可能



■ 燃料 (原子燃料工業と共同開発)

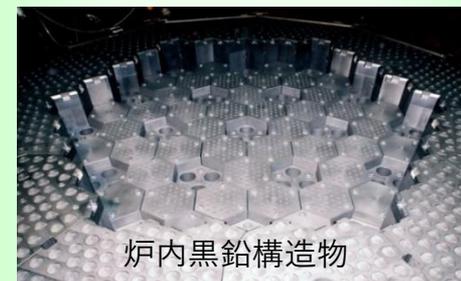


高い閉じ込め性能を有するセラミックを用いたウランの被覆

長期間 (軽水炉の約3倍の燃焼度)、
安定に被覆

■ 黒鉛材料IG-110 (東洋炭素と共同開発)

世界最高の高品位(等方性高密度)黒鉛



高強度・高熱伝導・耐照射性

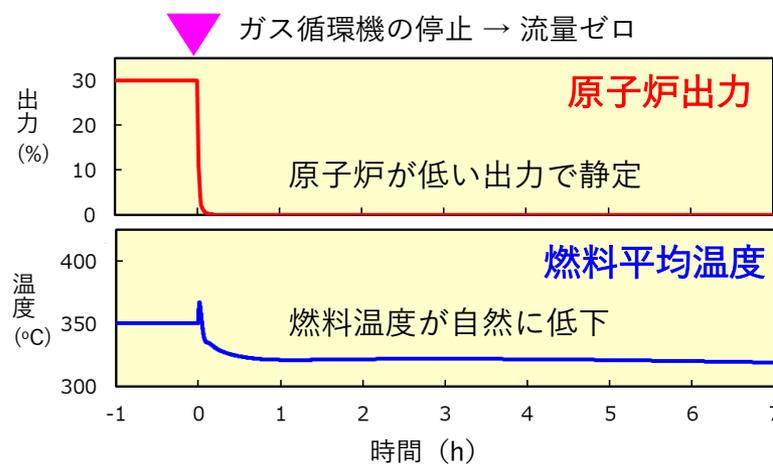
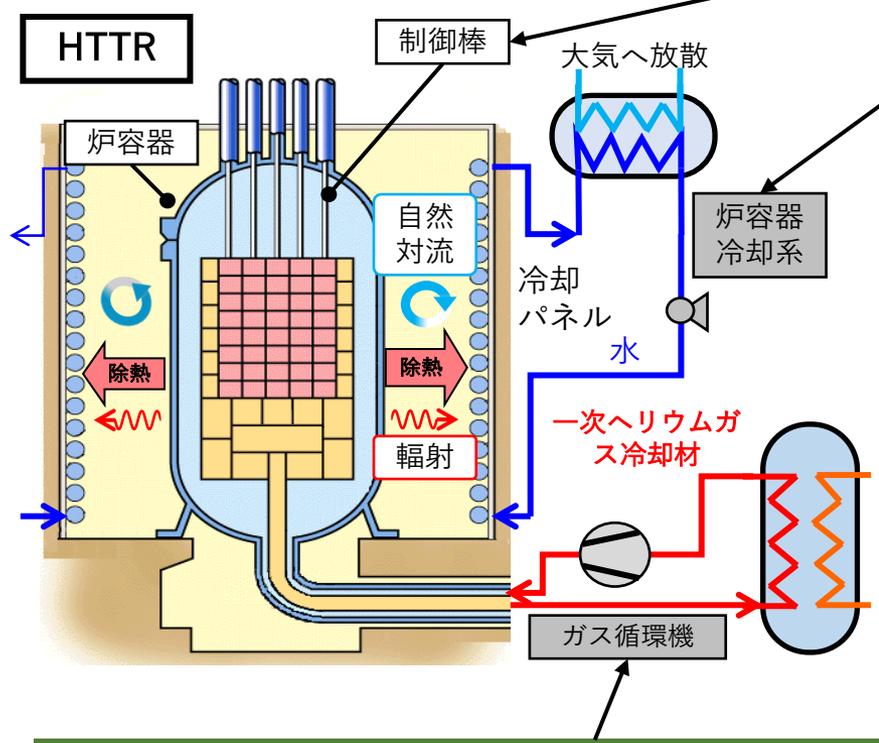
高温ガス炉は国産技術で建設可能

高温ガス炉の特長 – HTTRを用いた安全性実証試験 –



制御棒挿入せず（原子炉の停止操作なし）

冷却パネルの運転継続（輻射による除熱）



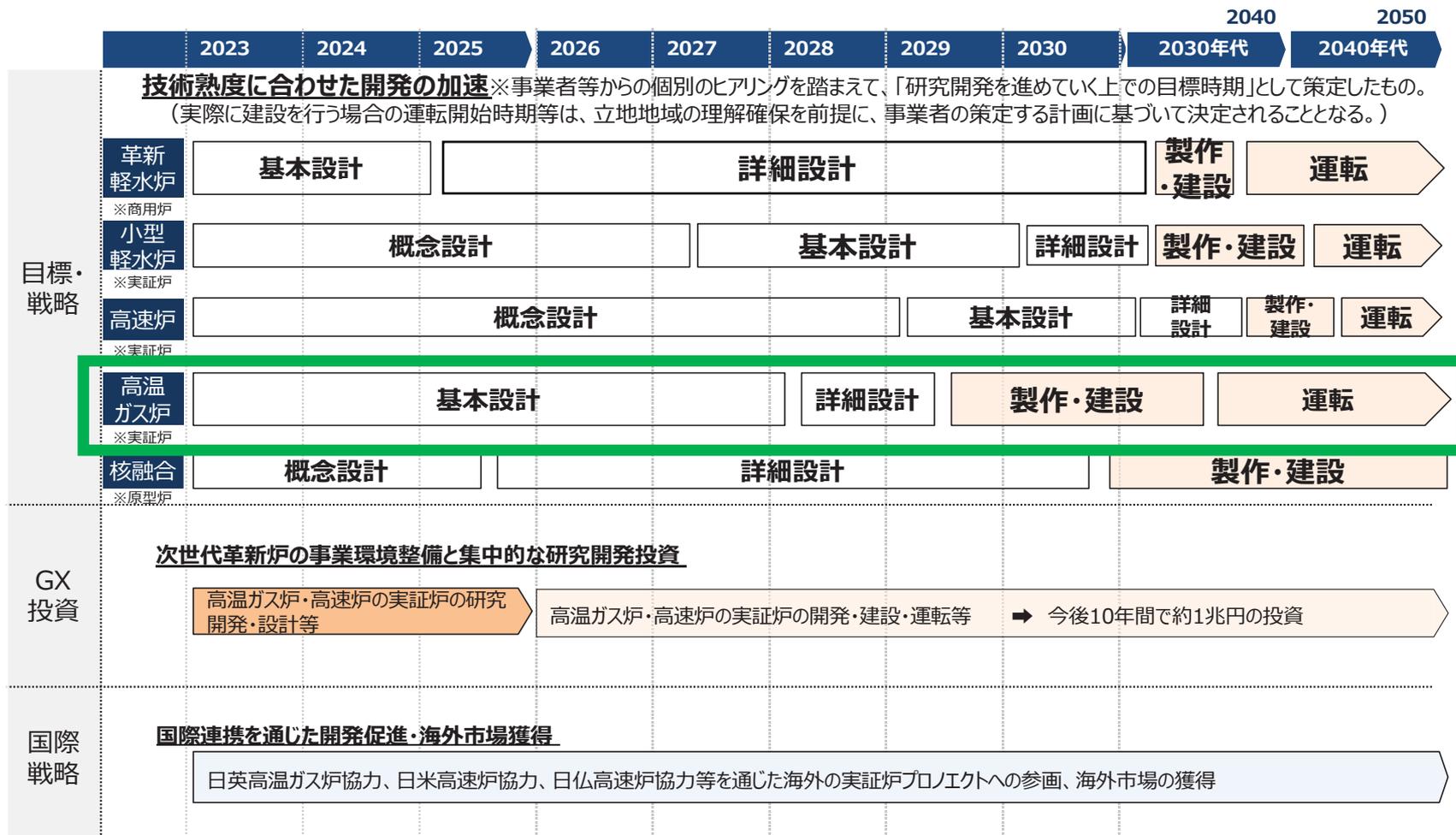
ガス循環機停止（炉心を冷却するヘリウムガスの流れを停止）

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

国内実証炉開発計画 – GX実現に向けた基本方針 –



2030年代後半の運転開始を目指して高温ガス炉の実証炉を開発



高温ガス炉実証炉開発事業

| | | | | |
|-------|-------|-------|-----------|---------|
| 予算措置済 | 令和5年度 | 48億円 | (令和5~7年度) | 431億円 |
| 概算要求 | 令和6年度 | 256億円 | (令和6~8年度) | 1,279億円 |



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、
英国実証炉プロジェクト活用

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

技術

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：カーボンフリー水素製造
技術確立

政策

国内
実証炉
開発

HTTR
-熱利用
試験

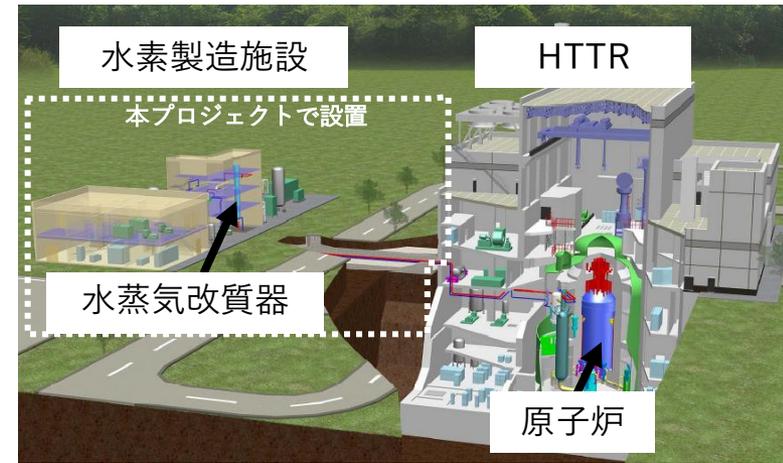
【内容】

- 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

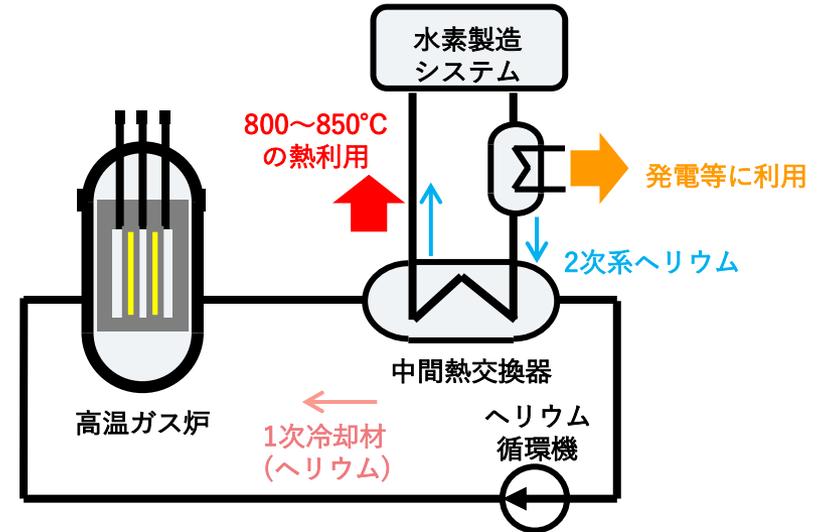
- ✓ 先ずは、商用技術が確立されている天然ガス水蒸気改質法による水素製造施設をHTTRに接続し、接続技術を確立
- ✓ 将来はカーボンフリー水素製造法による水素製造施設をHTTRに接続

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 | | |
| | [Green bar] | | | | [Blue bar] | | | [Red bar] | | |
| | [Blue bar] | | | | [Blue bar] | | | [Red bar] | | |

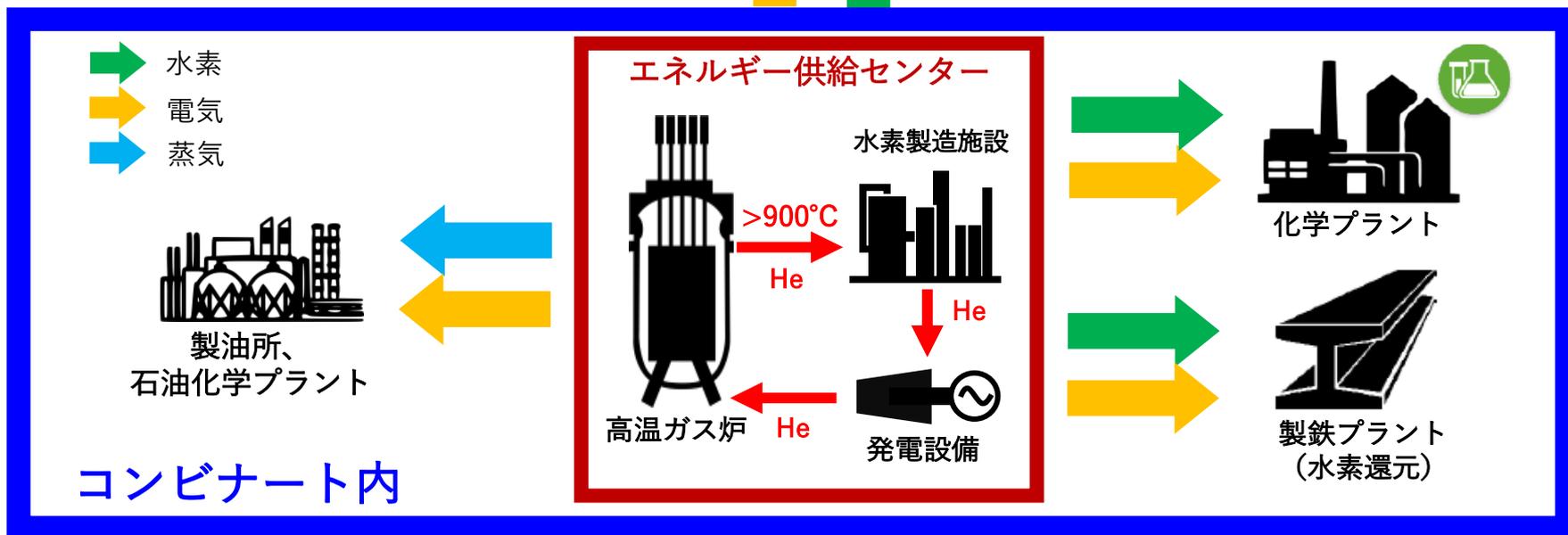
水素製造技術の選定

- 原子炉熱出力 150MW～250MW
- 高温ガス炉を熱源として800°Cを超える超高温を水素製造施設に供給
- 水素製造で使用しない熱は、発電を行い、製鉄所等で利用
- 水素製造施設には、カーボンフリー水素製造法を採用し、大量かつ安価な水素を供給
- カーボンフリー水素製造技術の技術成熟度を見極め、採用する水素製造技術を選定



| | メタン水蒸気改質法 | 高温水蒸気電解法 | メタン熱分解法 | IS法 |
|----|---|---|---|---|
| 概要 | | | | |
| | $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$ | $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 1/2\text{O}_2$ | $\text{CH}_4 \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{C(s)}$ | $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 1/2\text{O}_2$ |

高温ガス炉の社会実装モデル



新しい社会価値の提供

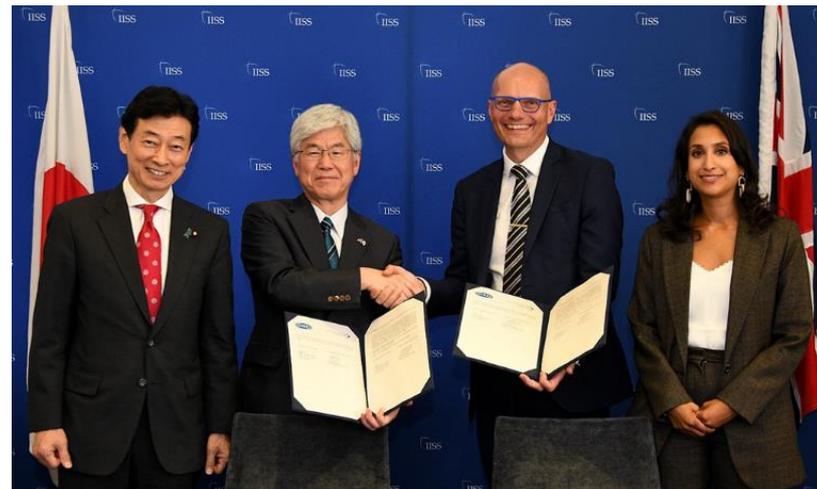
多排出産業の
カーボンニュートラル実現

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

日本の高温ガス炉技術に対する期待 – 英国 –



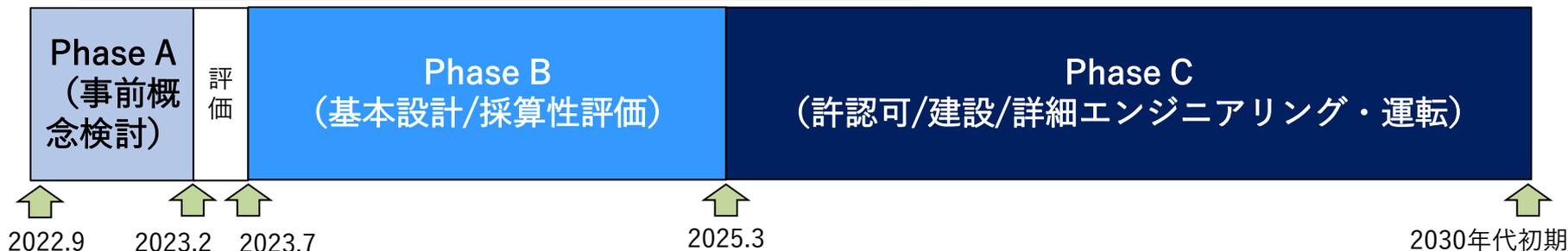
- 英国政府DESNZが、英国国立原子力研究所（NNL）と原子力機構のチームを、英国の高温ガス炉実証炉プログラムの基本設計を行う事業者として採択
- JAEAとNNLは、西村康稔経済産業大臣及びクレア・クティニーニョDESNZ大臣の立ち会いの下、包括的な高温ガス炉技術に係る協力覚書を締結
- JAEAはNNLと連携して、2050年までのカーボンニュートラルの達成に貢献するため、高温ガス炉技術に係る早期の社会実装を目指す



左から西村経済産業大臣、JAEA小口理事長、NNLハワースCEO、クティニーニョDESNZ大臣
(2023年9月、英国ロンドン)

英国高温ガス炉実証炉プログラム

- Phase A：事前概念検討 (2022.9～2023.2)
- Phase B：基本設計、採算性評価 (2023.7～2025.3)
- Phase C：許認可、建設、詳細エンジニアリング及び運転



英国高温ガス炉実証炉 建設候補地

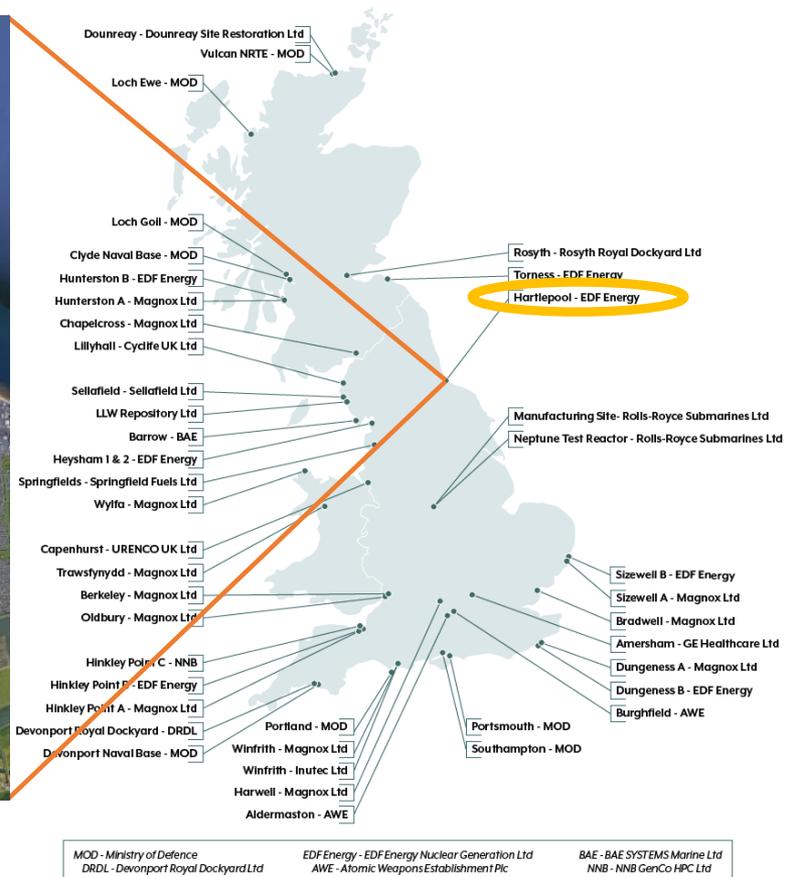


Office for Nuclear Regulation

Map of regulated sites/facilities



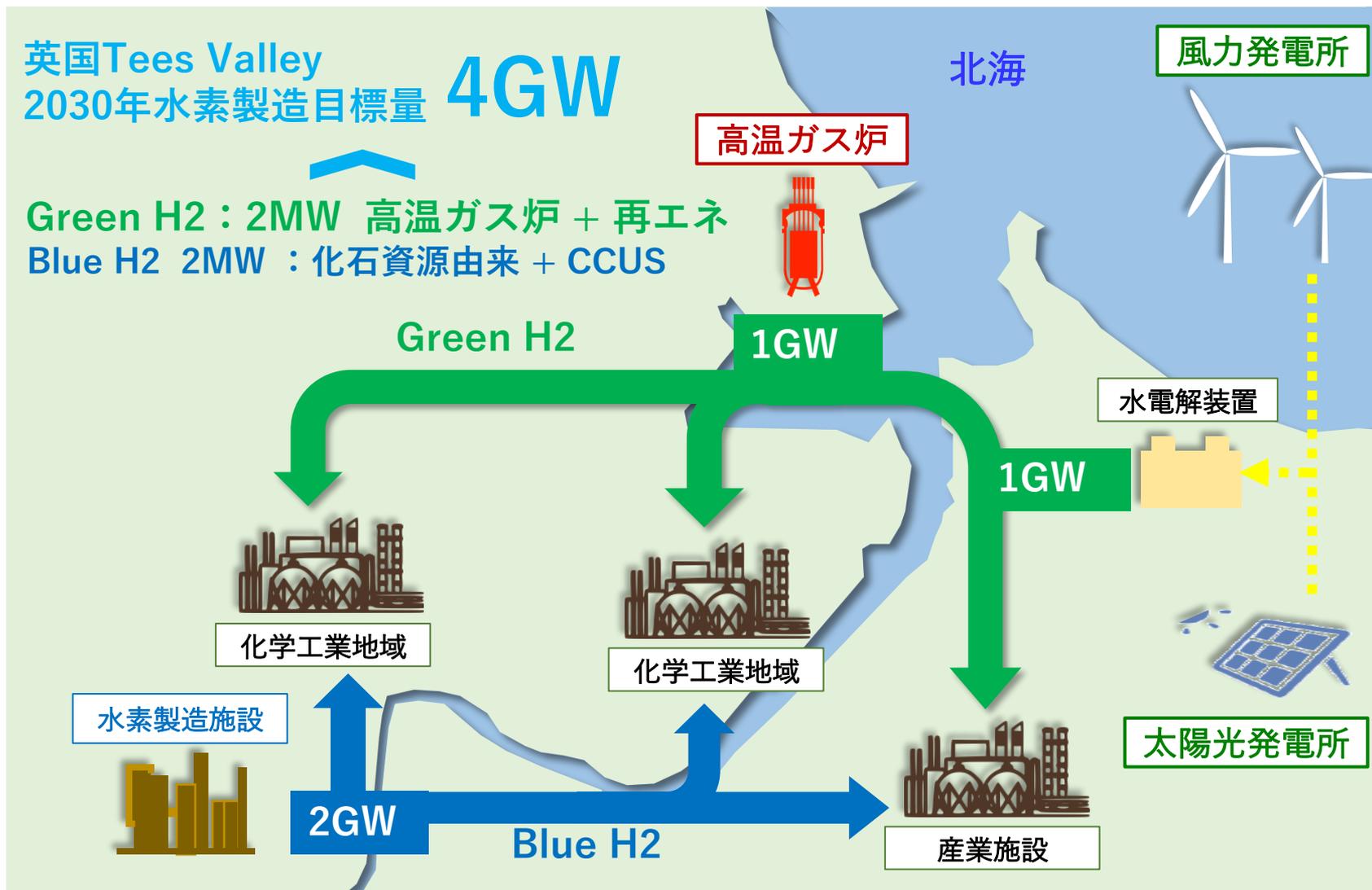
EDF-Energyパンフレットより



March 2022

www.onr.org.uk

高温ガス炉の社会実装モデル - 高温ガス炉×再エネ -



需要地近接立地を目指して

H₂



優れた安全性により
需要地に近接した立地を可能に

*1 EDF energy, <https://www.edfenergy.com/energywise/amr> (accessed on November 7, 2023)

*2 US NRCの場合

*3 X-energy, X-energy's Xe-100 Reactor Design Status, National Academy of Sciences, May 26, 2021.

世界の高温ガス炉開発



| | |
|--|--|
| <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, 2020年～)</p> <ul style="list-style-type: none">• ~2028年に稼動する革新炉原子炉 (750°C、電気出力80MW) の建設を支援 |
| <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年～)</p> <ul style="list-style-type: none">• 英国政府は新型モジュール炉として高温ガス炉を選定、2030年初頭までに実証 |
| <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">• 高温ガス炉研究炉 (750°C、原子炉熱出力30MW) の基本設計を開始 (2021年) |
| <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 (700°C) を用いた研究開発• 実証炉 (750°C、電気出力210MW) が運転中 (2021年12月送電開始、2022年全出力運転) |

- 世界各国で高温ガス炉の社会実装に向けた開発が加速
- 高効率水素製造を可能とする900°Cを超える熱供給は視野に入っていない



1

国内の水素製造

安全性に優れた高温ガス炉の
需要地近接立地

2

大量・安定した水素製造

高温ガス炉による
900°Cを超える高温熱供給

3

カーボンフリー水素製造

高温ガス炉
+ カーボンフリー水素製造施設

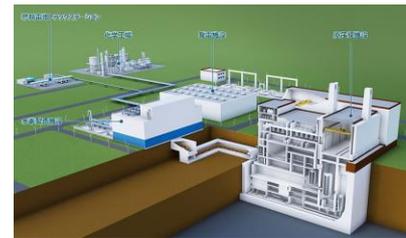
HTTR-熱利用試験

高温ガス炉と
水素製造施設の
接続技術確立



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