

安全性に優れる 高温ガス炉と カーボンニュートラルに 向けた熱利用技術

日本原子力研究開発機構
高温ガス炉研究開発センター
水素・熱利用研究開発部

久保真治

ヘリウム冷却材

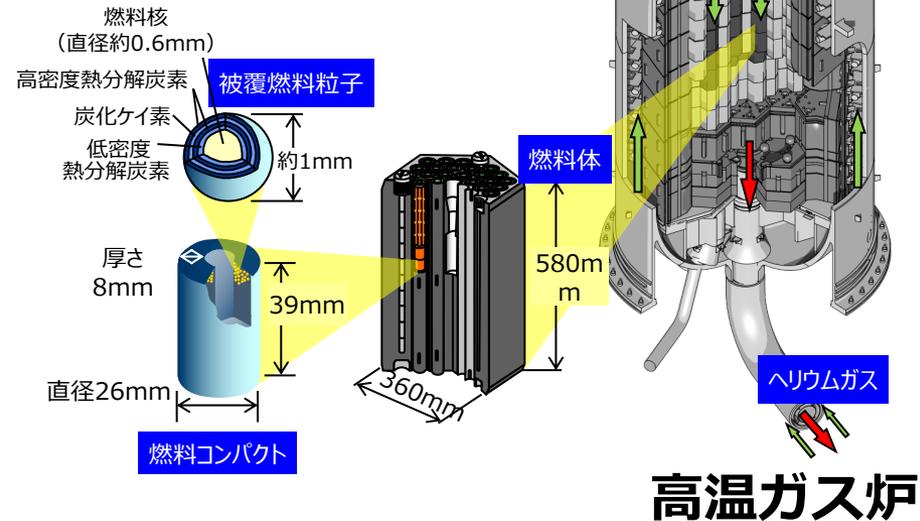
高温でも安定（温度制限なし）

黒鉛構造材

耐熱温度2500℃

セラミックス被覆燃料

1600℃でも放射性物質を
閉じ込める



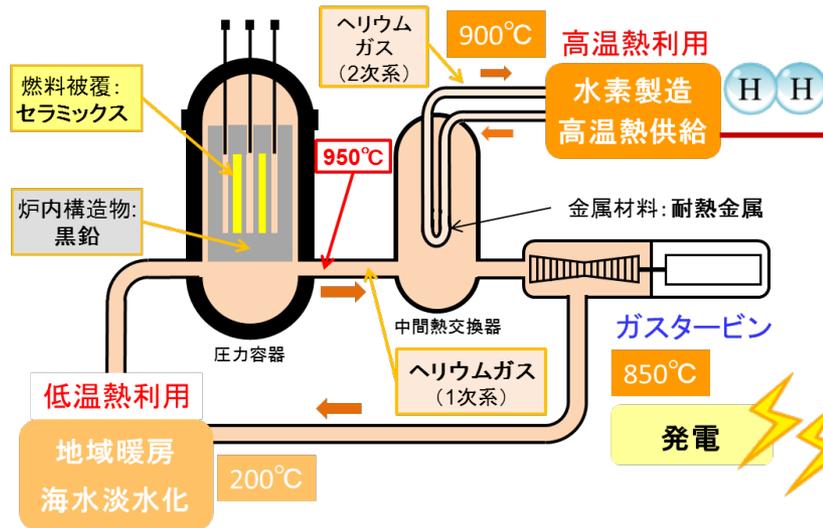
高温ガス炉これによる熱利用 (水素製造・発電など) の導入の意義

我が国の政策 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 (令和2年12月25日策定)

高温ガス炉は、安全性に優れるカーボンフリー熱源として記載され、ISプロセスは、高温ガス炉を用いた大量かつ安価なカーボンフリー水素製造技術として技術開発を支援すると記載

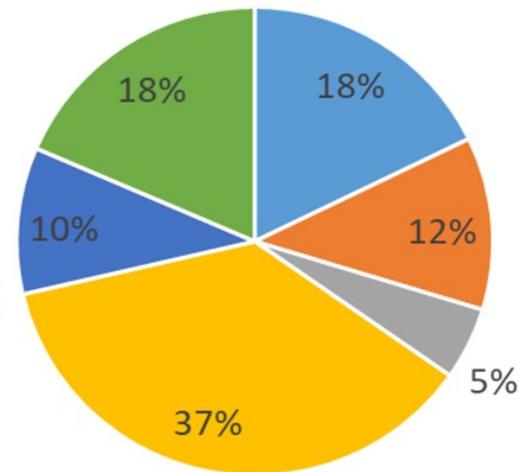
高温ガス炉とは？
=ヘリウムガスで950℃の熱を取り出す原子炉

多様な産業利用を行う意義
=原子力エネルギーによって熱需要に応える



熱需要

- 運輸
- 製鉄
- 石油化学
- 発電
- 民生・商業
- その他



我が国のCO2ガス排出量内訳(2019年)

高温ガス炉-コジェネ (電気と水素) システム

高い経済性

- 80%近い熱利用率
(水素製造と発電とのコジェネレーションなどによる効率的なエネルギー利用)
- 約50%の発電効率

優れた安全性

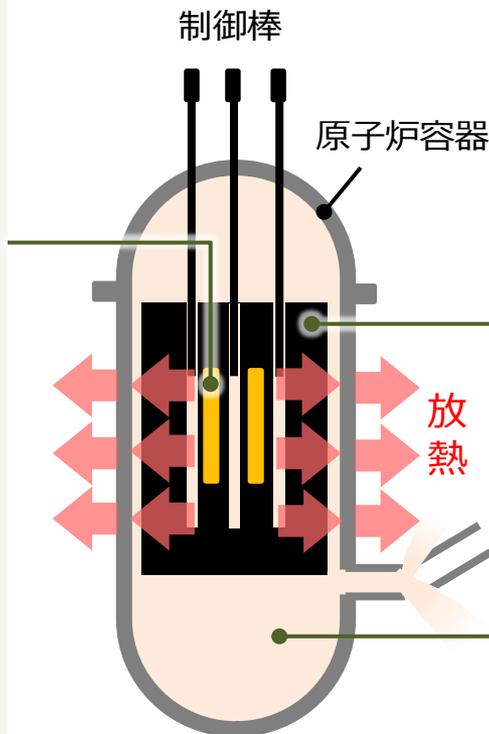
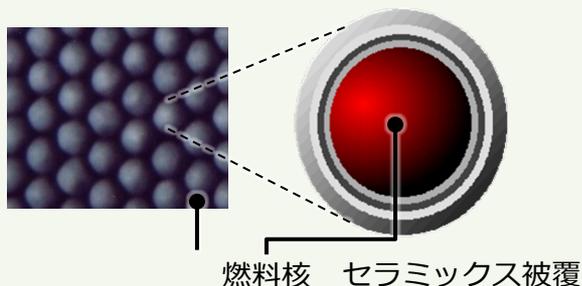
- 固有の安全性により炉心溶融が起こらない

- 熱需要の排出量は全体の約60%強を占めており、CO₂の大幅な削減には熱需要における排出量を削減が有効
- 熱利用産業分野の一次エネルギーは全量が化石資源に依存しているため、CO₂の排出要因となっている
- 発電だけで排出量は全体の約40%弱をも占めている

高温ガス炉の優れた安全性 炉心溶融しない原子炉

セラミックス被覆燃料

耐熱性が高く燃料溶融しない



黒鉛減速材

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
- 高温ガス炉は、原理的には、東電福島第一原子力発電所事故と同様な事故を引き起こす恐れがない

JAEAにおける直近の成果 (高温ガス炉及び水素製造技術開発)

(1) 高温ガス炉技術



HTTR

- 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)
- 新規制基準適合性に係る設置変更許可の取得 (2020年6月)
- 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 30 l/h、150時間の水素製造に成功 (2019年1月)
- 連続水素製造試験 92 l/hを達成 (2020年10月)

(3) 実用高温ガス炉設計



GTHTTR300

- 実用高温ガス炉システム設計
 - ✓ ポーランドが進める高温ガス炉計画への協力 (HTTRの知見に基づくFS (基本設計等) など)
- 実用高温ガス炉の安全基準策定と国際標準化
 - ✓ 英国が進める高温ガス炉など新型モジュール炉計画と国研を通じて連携強化 (HTTRの技術・安全の情報交換など)
- 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-熱利用試験計画



- 高温ガス炉熱利用技術の総合確証へ

HTTRの新規制基準適合と運転再開

- HTTRの極めて高い固有の安全性（BDBAにおいても炉心溶融が発生しないこと）により、耐震重要度や安全機能の重要度の再分類が**原子力規制委員会に認められ**、大規模な追加工事の必要がなかった
- 新規制基準に適合した設置変更許可を取得した
- 令和3年7月30日に、**HTTRは運転再開した**

世界で唯一950℃の熱を取り出せる高温ガス炉



原子炉出力：30 MW
冷却材圧力：4 MPa

HTTR (原子力機構 大洗)

JAEAが建設した高温ガス炉を開発するための試験研究炉

- 1998年 初臨界
- 2004年 原子炉出口**950℃達成**
- 2010年 安全性実証試験
連続50日950℃運転
- 2020年 新規制基準適合性に係る
原子炉設置変更許可の取得
- 2021年 **運転再開**

HTTRの新規制基準対応 (主な項目)

項目	従来の内容	取得した許可における新規制基準想定内容等	機構の措置
BDBA (多量の放射性物質を放出する事故)	<ul style="list-style-type: none"> 新規制基準による追加要求 	(BDBAの想定)→ どの想定も炉心溶融は発生しない ・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 ・使用済燃料プール等の冷却機能喪失	<ul style="list-style-type: none"> 対策工事不要 可搬型発電機6基設置 (電源喪失時の後備炉停止用や監視の継続用等) 消防車の活用 (プールへの注水用)
地震	<ul style="list-style-type: none"> 耐震重要度分類は実用炉を参考に分類 最大の地震動：350gal 	<ul style="list-style-type: none"> 耐震重要度分類を試験研究用等原子炉施設に係る耐震重要度分類の考え方を参考に重要度を再分類 設計基準地震動：973 gal[*] 設計基準事故 	<ul style="list-style-type: none"> 補強工事不要

高温ガス炉の多様な産業利用

再生可能エネルギーとのハイブリッドシステム



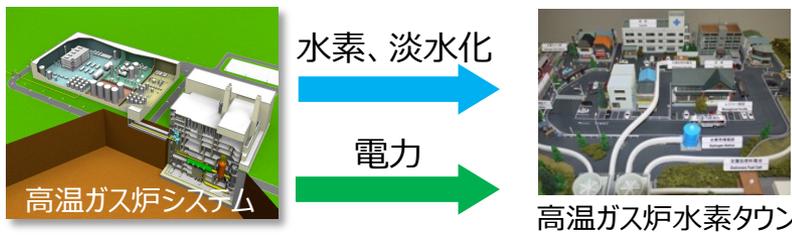
- 再生可能エネルギーの**変動を発電量調整又は水素製造により吸収**
- 再生可能エネルギーに変動に応じて、高発電効率を維持したまま発電量を調整

水素製造システム



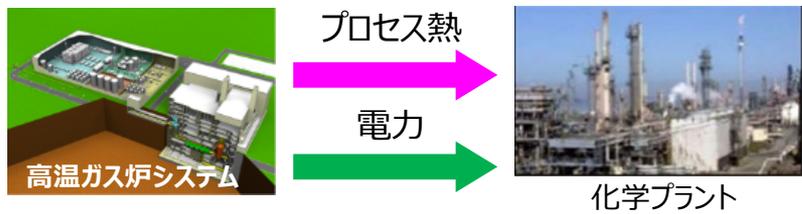
- 熱化学法（IS法）又はメタンの水蒸気改質法による水素製造

コジェネシステム（水素、発電、淡水化等）



- 水素製造、発電、海水淡水化のコジェネレーションシステム
- **熱利用率が80%弱**

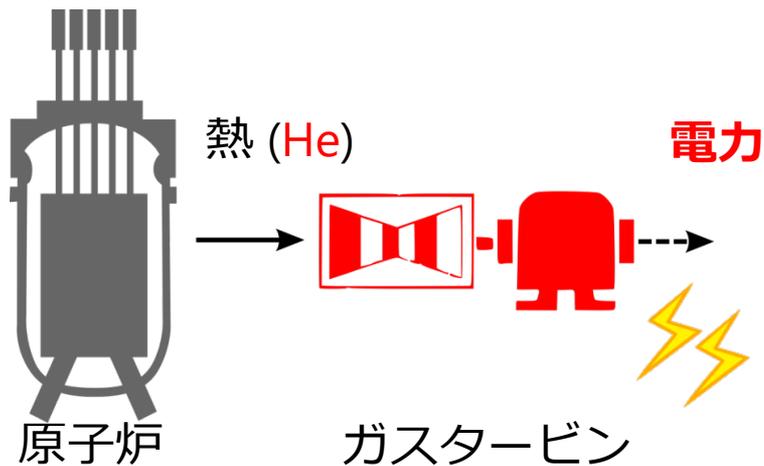
工業利用として高温の熱供給、熱電供給



- **蒸気によるプロセス熱供給**（化学プラント、石油精製プラント、等）
- 蒸気タービン発電による電力供給

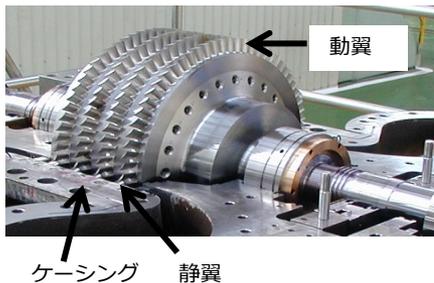
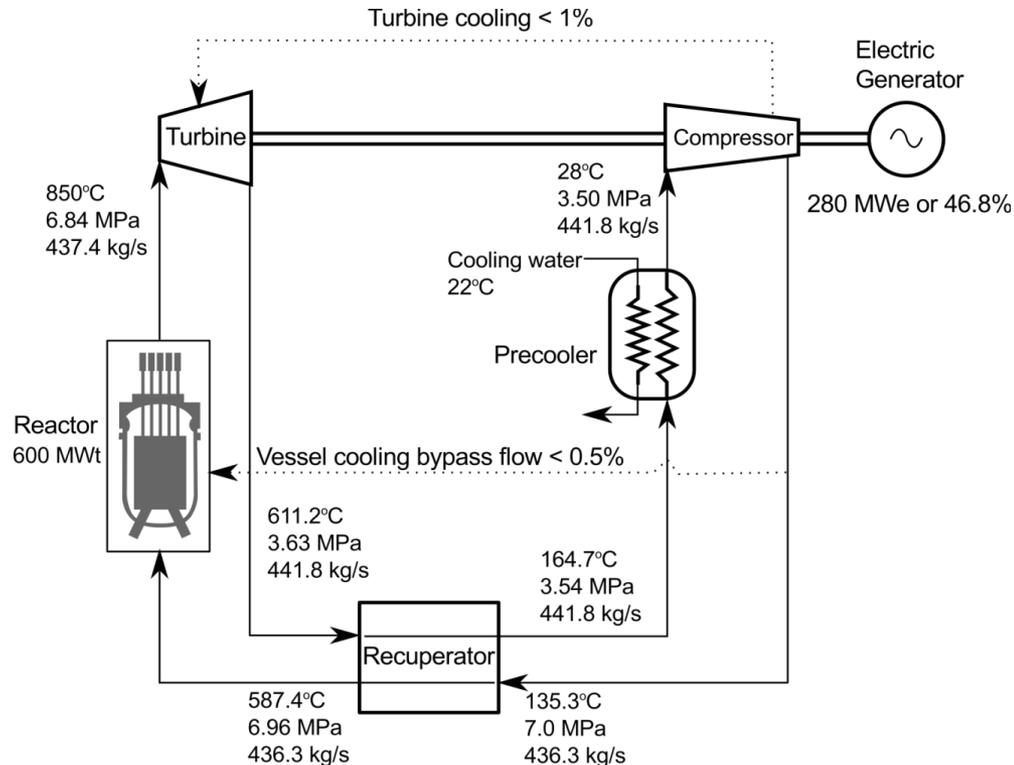
高い安全性を有するために**需要地近接立地**による産業利用が可能

ヘリウムガスタービン発電技術の開発

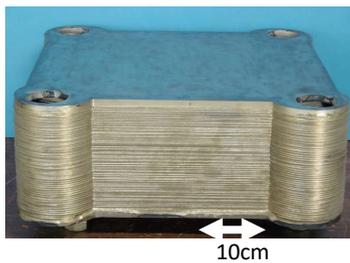


- ✓ 高い熱効率 (46.8%)が期待
- ✓ シンプルな機器構成(水が不要、二次系不要)
- ✓ 再生式密閉ブレイトンサイクル

ループ構成と主要プロセス条件¹⁾ (例)



1/3スケール試験装置
(圧縮機部分)

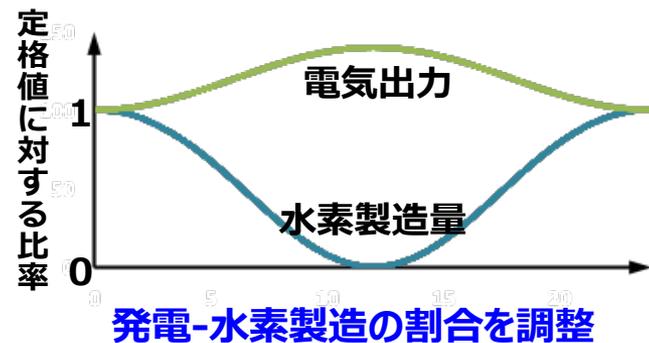
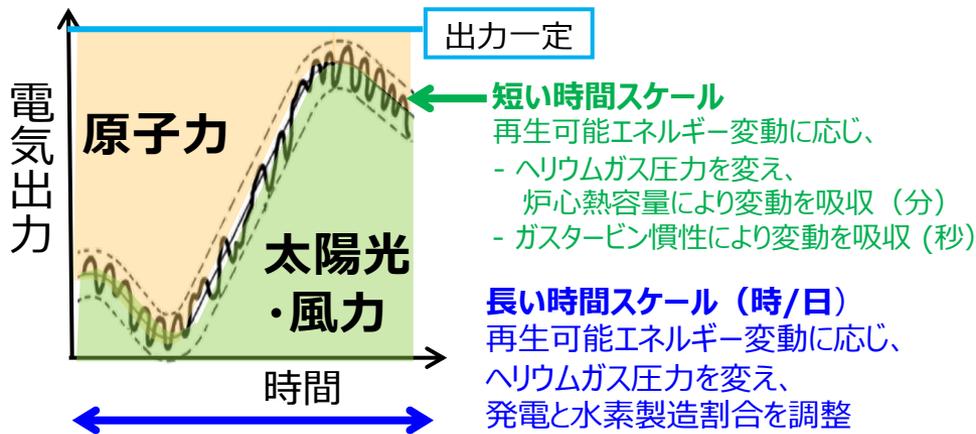
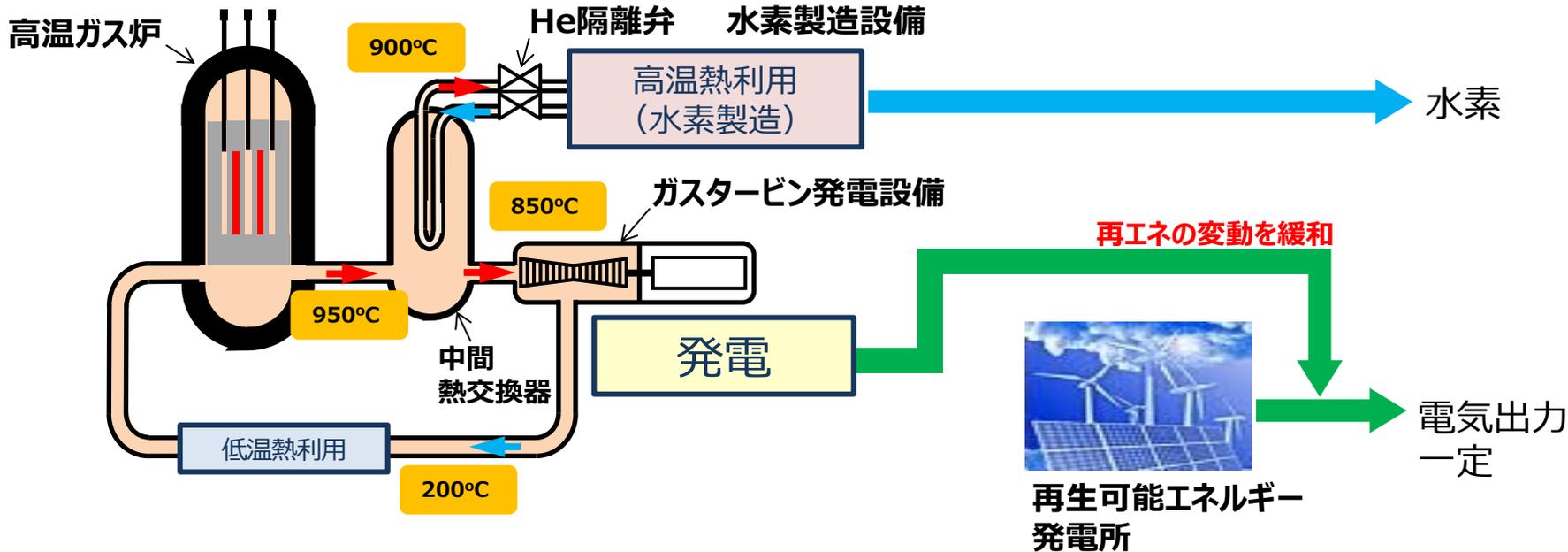


再生熱交換器
熱交換部のモデル試験体²⁾

主要な要素技術は確立

¹⁾ X. Yan et al., *Nuclear Engineering and Design*, 222 (2003) 247-262.
²⁾ 三菱重工業 (株) にて開発

再生可能エネルギーとのハイブリッドシステム

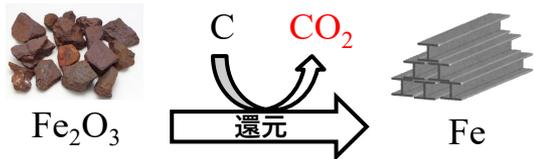


高発電効率 (950°Cシステム50%、850°Cシステム45%) を維持したまま、再生可能エネルギーの負荷変動を吸収可能

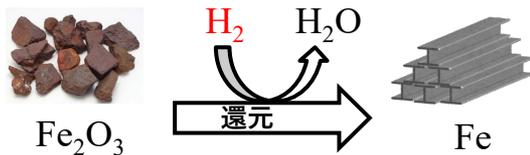
高温ガス炉-水素製造システムと水素還元製鉄

水素還元製鉄によりCO2排出量の削減が可能

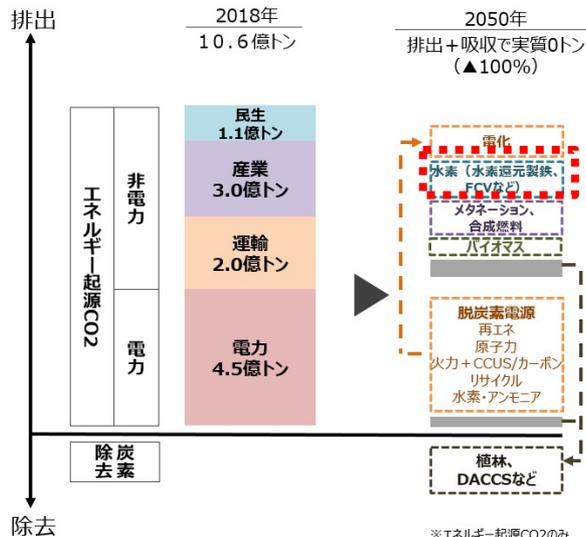
1トンの鉄製造で約2トンのCO₂が発生



水素還元製鉄



「カーボンニュートラル」を実現するための方向性*4

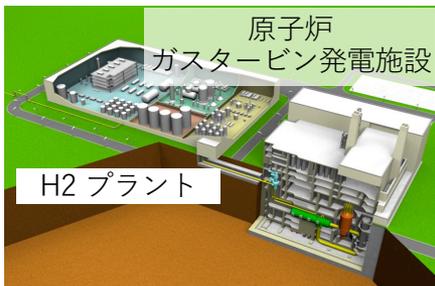


- 電力部門の脱炭素化
- 非電力部門については、水素還元製鉄などCO₂を排出しないエネルギーへの転換

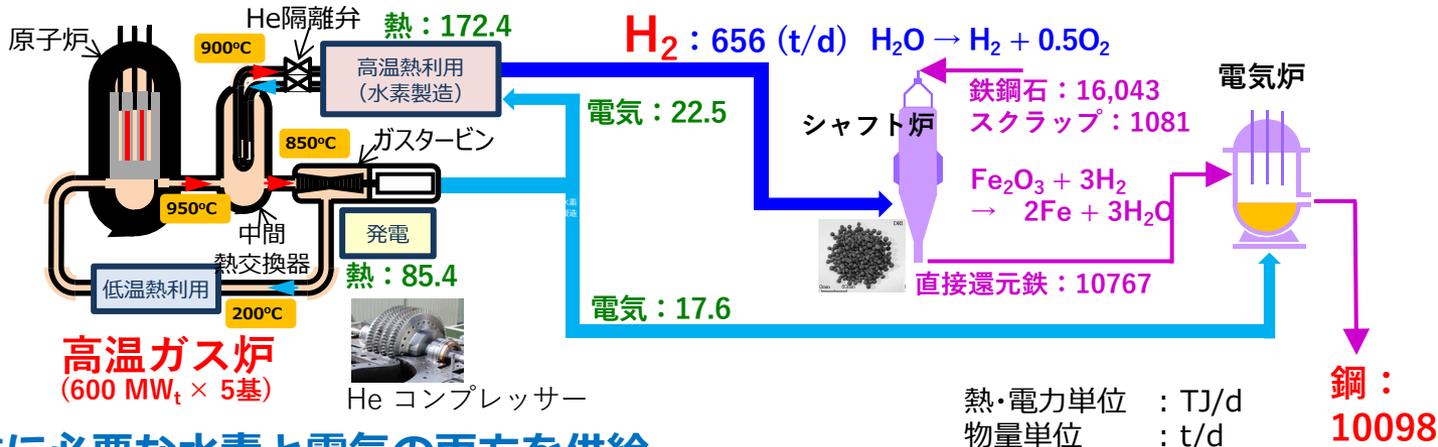
電化・水素化等で脱炭素化できない領域はCCUS/カーボンリサイクル 水素・アンモニア等の最大限活用

高温ガス炉-水素還元製鉄 (シャフト炉利用の場合)

製鋼量*2 1万トン/日基準 (標準的な製鉄所の規模) における熱物質収支*3



- コジェネレーション (H₂ と電気)
- 高効率発電 ($\eta = ca. 45\%$ *)



コジェネシステムで製鉄に必要な水素と電気の両方を供給

*1 : X. Yan et al./Nuclear Engineering and Design 222 (2003) 247-262.

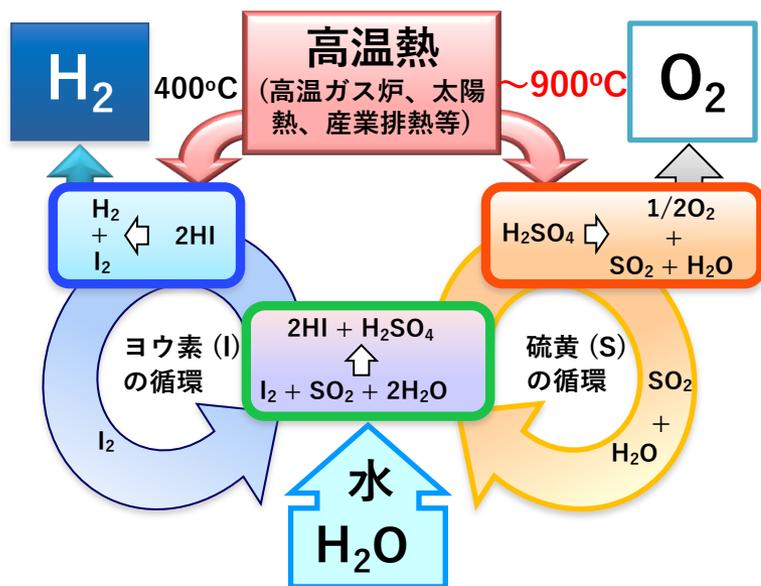
*2 : Domestic steel production: c.a. 290,000 t/d (2016).

*3 : Kasahara and Ogawa, Production of Green Energy and Its Utilization in Ironmaking and Steelmaking Processes, Iron and Steel Institute of Japan, 123-143, 2012.

*4 : 資源エネルギー庁, https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyoo/carbon_neutral_02.html

JAEAが進めるカーボンフリー水素製造法 (熱化学法ISプロセス)

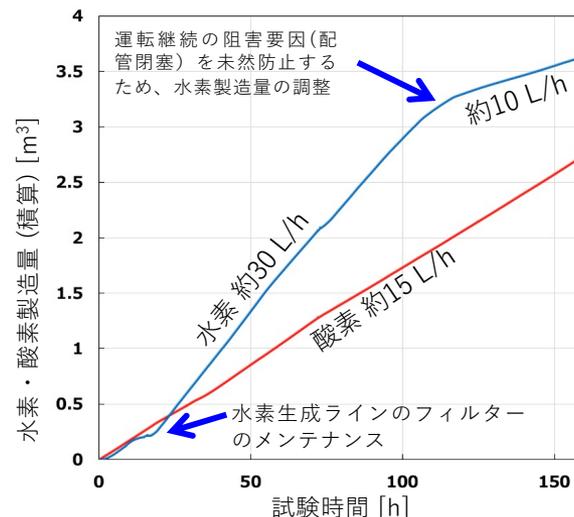
- 水の熱分解：4000℃以上の高温熱が必要
- IS プロセス：ヨウ素 (I) と硫黄 (S) を利用して約900℃^{※1}の熱で水を熱分解
 ヨウ素と硫黄はプロセス内で循環 ⇒ 有害物質の排出なし
 高温ガス炉との組み合わせ ⇒ 炭酸ガスの排出なし



- 温度
 - 工業用材料の使用 (900℃以下)
 - 高温ガス炉に適合
- 効率
 - 高温吸熱反応と低温発熱反応で高い理論熱効率 73%^{※2}
- 化学プラントのような形態の大規模オフサイト製造に適しているため大量の水素製造が可能

実用化に向けた技術課題

- ① 高温、強腐食性環境 → **耐食・耐熱機器の開発**
- ② 安定した水素製造 → **プロセス制御法の開発**
- ③ 水素製造効率向上 → **効率向上技術の開発 (膜技術等)**



30 l / h、
150時間
の水素製
造に成功
(2019
年1月)

ISプロセス水素製造試験による水素製造

※1：900℃程度の排熱（熱源）があれば、ISプロセスの適用が可能

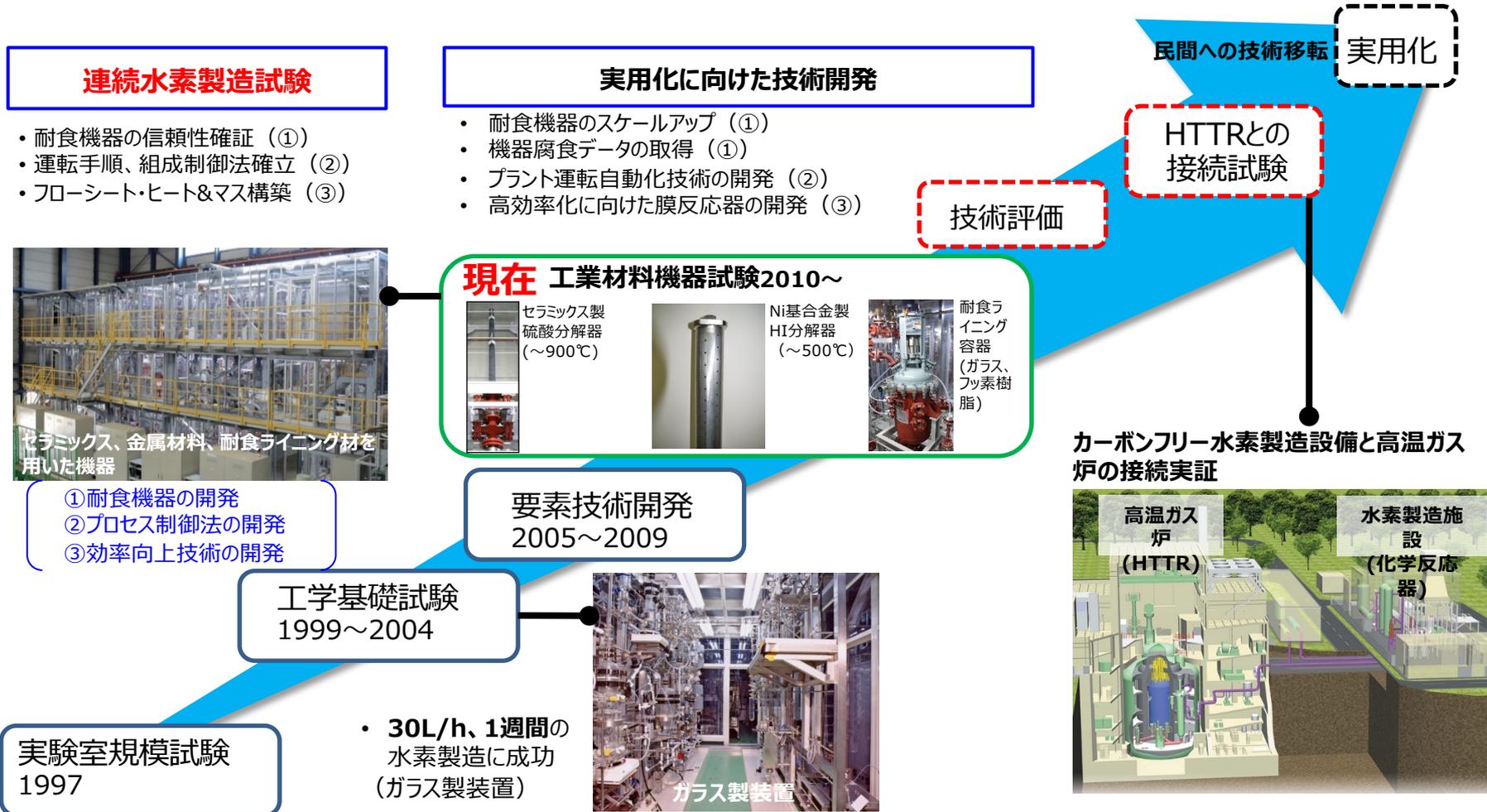
※2：実用システムの熱効率は、熱回収等の限界から最大で60%程度

熱化学法ISプロセスの開発の進め方

・現在、ガラス製機器の次段階として工業材料*を用いた機器試験の段階

・今後、実用化に向け、耐食機器信頼性向上・プラント制御技術開発、機器スケールアップ技術、プラント保全技術、高効率化技術に取り組む予定

*セラミックス、金属材料や、鋼製の容器・配管の内面をガラス等でライニングしたライニング容器・配管等



グリーン成長戦略（原子力産業）とJAEAの取り組み

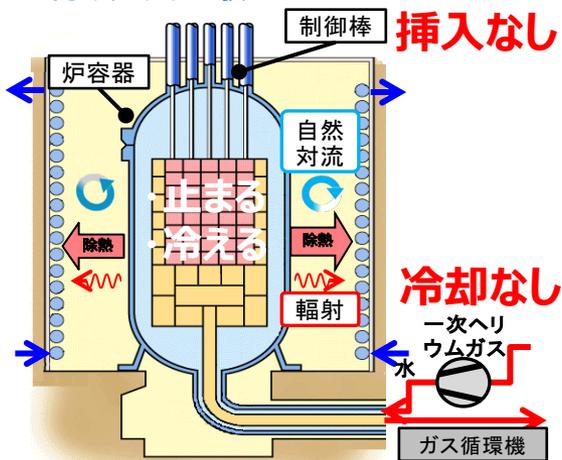
鉄鋼等の産業部門のCO₂排出量は国内総排出量の約25%を占めることから、水素還元製鉄等が進められており、大規模かつ経済的な水素供給が必要※

原子力産業の成長戦略「工程表」※



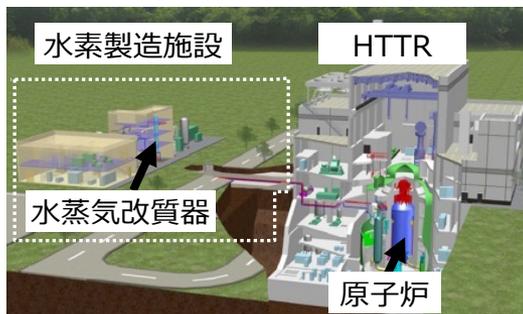
JAEAにおける取り組み

(1) HTTRを活用した「固有の安全性」確認のための試験



- 物理現象のみで、原子炉が自然に静定・冷却されることの確認へ
- 熱負荷変動試験

(2)カーボンフリー水素製造に必要な技術開発



HTTR-熱利用試験のイメージ

大量かつ安価なカーボンフリー水素製造に必要な技術の開発に向け、脱炭素高温熱源（高温ガス炉）を活用し、熱源と水素製造施設の高い安全性を実現する接続技術を確立する。

(3)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法水素製造試験装置
(工業材料製(耐食ライニング等))

今後、実用化に向け、自動制御システム、耐食機器信頼性の向上、高効率化膜反応器技術を確立する。

※「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略（経済産業省、令和2年12月25日策定）」

以上