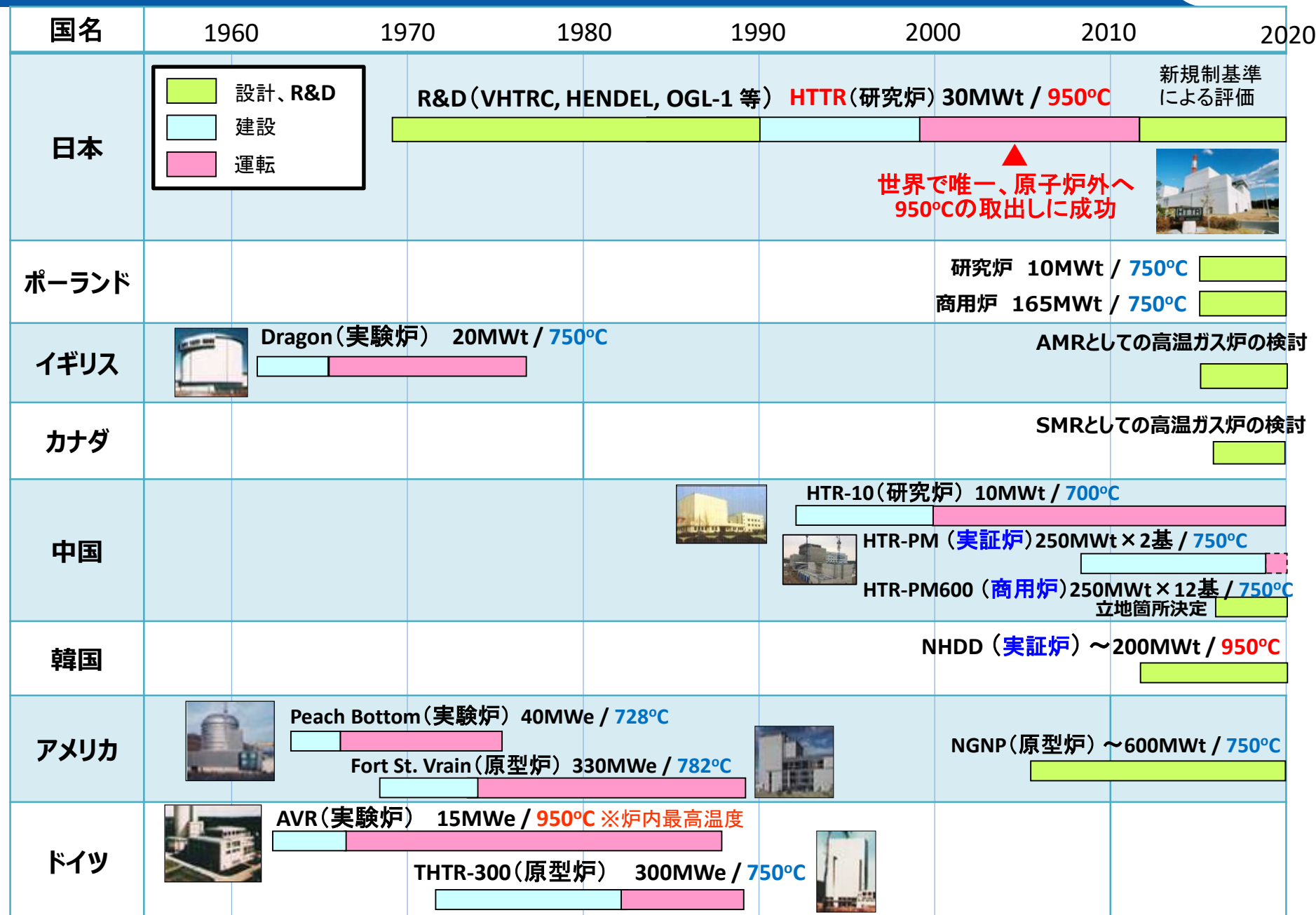


高温ガス炉技術開発の概要

令和2年4月14日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

高温ガス炉開発の歴史と計画



◎エネルギー基本計画(第5次)(平成30年7月3日 閣議決定)

第2章 2030年に向けた基本的な方針と政策対応 第3節 技術開発の推進

2. 取り組むべき技術課題

(略) 安全性・信頼性・効率性の一層の向上に加えて、再生可能エネルギーとの共存、水素製造や熱利用といった多様な社会的要請の高まりも見据えた原子力関連技術のイノベーションを促進するという観点が重要である。(略) また、**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技術開発を、海外市場の動向を見据えつつ国際協力の下で推進する。**

◎未来投資戦略2018(平成30年6月15日 閣議決定)

第2 具体的施策 [2]経済活動の「糧」が変わる 1. エネルギー・環境

(3)新たに講ずべき具体的施策 i)エネルギー転換・脱炭素化に向けたイノベーションの推進

原子力については、安全最優先の再稼働を進める。防災対策の充実化や自主的安全性向上の取組を通じて社会的信頼の回復に努めつつ、人材・技術・産業基盤の強化に着手し、安全性等に優れた炉の追求、バックエンド問題の解決に向けた技術開発を進める。また、高速実験炉や**高温ガス炉等の試験研究炉を活用するなど、将来に向けた研究開発を推進する。**

◎水素・燃料電池戦略ロードマップ(平成31年3月12日、水素・燃料電池戦略協議会/経産省)

第2章 水素基本戦略の実行に向けた各論

2-3. 技術開発の推進・国民理解 (1)革新的技術開発 <アクションプラン>【製造】

化石エネルギー資源や太陽光等の既に水素製造に活用されているエネルギー資源だけでなく、高温地熱や海洋エネルギー、宇宙太陽光、**高温ガス炉など、水素製造に活用し得る革新的な技術の活用も含めて、あらゆる可能性を検討していく。**

◎パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略(令和元年6月11日 閣議決定)

第3章: 重点的に取り組む横断的施策 第1節: イノベーションの推進 I. 技術のイノベーション

2. 施策の方向性 (4)個別分野における実用化に向けた課題の見える化

③水素 ○水素に関連する技術の例 ・製造技術「太陽熱・産業排熱等を用いた熱化学水素製造(ISプロセス)」

⑤原子力 ○原子力に関連する技術の例「高温ガス炉」

◎革新的環境イノベーション戦略(令和2年1月21日、統合イノベーション戦略推進会議決定)

1. エネルギー転換

3. 低コストな水素サプライチェーンの構築

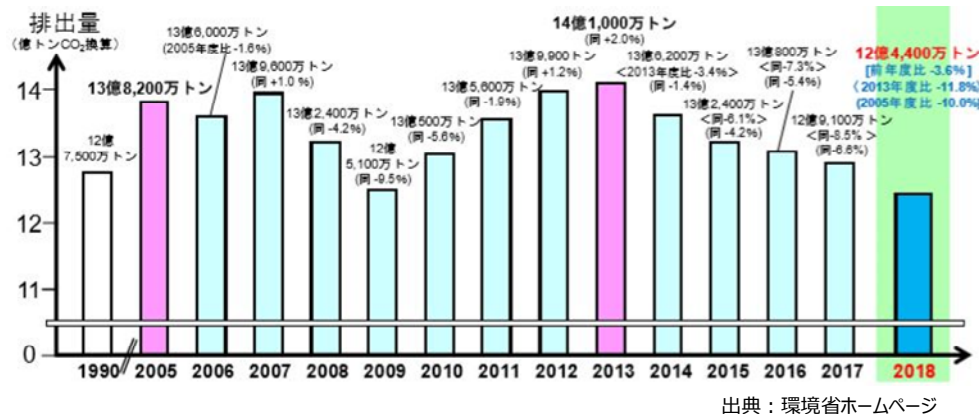
⑦製造: CO2フリー水素製造コスト1/10の実現 <再エネ利用水素製造> 「ISプロセスによる水素製造」

4. 革新的原子力技術/核融合の実現 ⑩安全性等に優れた原子力技術の追求 「高温ガス炉」

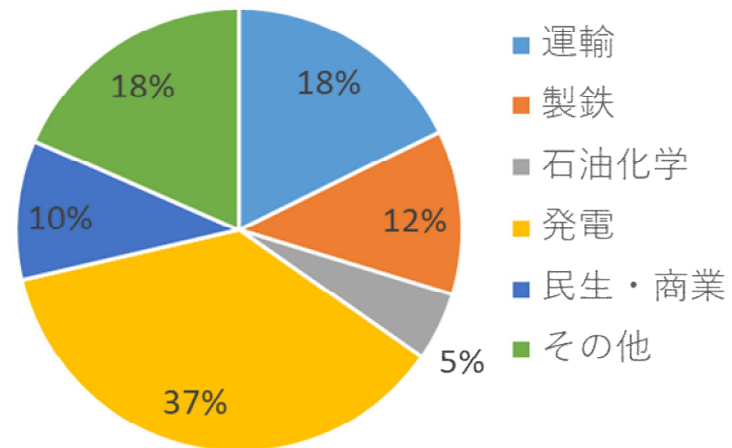
地球温暖化対策計画（平成28年5月13日閣議決定）

- ・ 中期目標：2030年度に26%削減する（2013年度比）
- ・ 長期目標：2050年までに80%の削減を目指す（2013年度比）

我が国の温室効果ガス排出量（2018年度速報値）



我が国のCO₂ガス排出量内訳(2018年)



2018年度の我が国の温室効果ガスの総排出量は、12億4,400万トン(2013年比11.8%削減、前年比は3.6%)

目標達成には、

- ・ 2030 年までに、さらに14%の削減が必要
- ・ 2050 年までに、68%の削減が必要

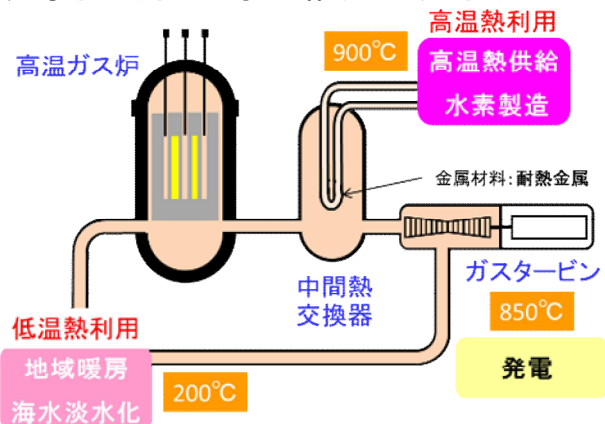
発電、運輸、製鉄からの温室効果ガス排出量削減が重要

- ・ 水素還元製鉄の導入(国内13か所で12%)→高温ガス炉水素製造
- ・ 燃料電池自動車の導入→高温ガス炉水素製造
- ・ 化石燃料を用いたプラントの代替→高温ガス炉ガスタービン発電

温室効果ガス削減の長期目標達成には、再生可能エネルギーの利用拡大に加え、
発電のみならず発電以外の分野への原子力エネルギー利用が重要

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。

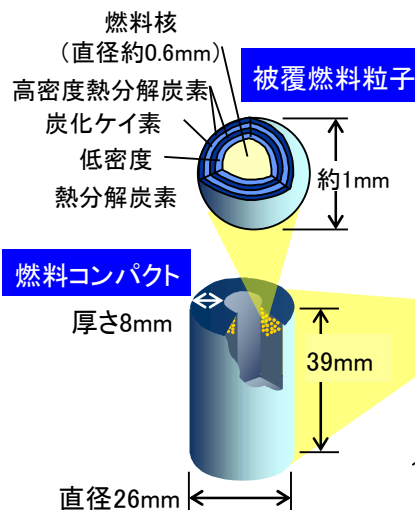


優れた安全性

- 軽水炉のリスク(炉心溶融、水素爆発、大量の放射性物質放出)が福島第一原子力発電所(1F)事故によって強く認識された。
- 原理的には高温ガス炉は1F事故と同様の事故を起こす可能性がない。

セラミックス被覆燃料

1600℃でも放射性物質を閉じ込める

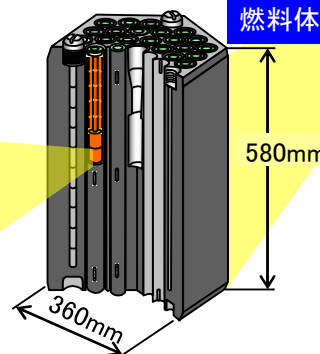


ヘリウム冷却材

高温でも安定(温度制限なし)

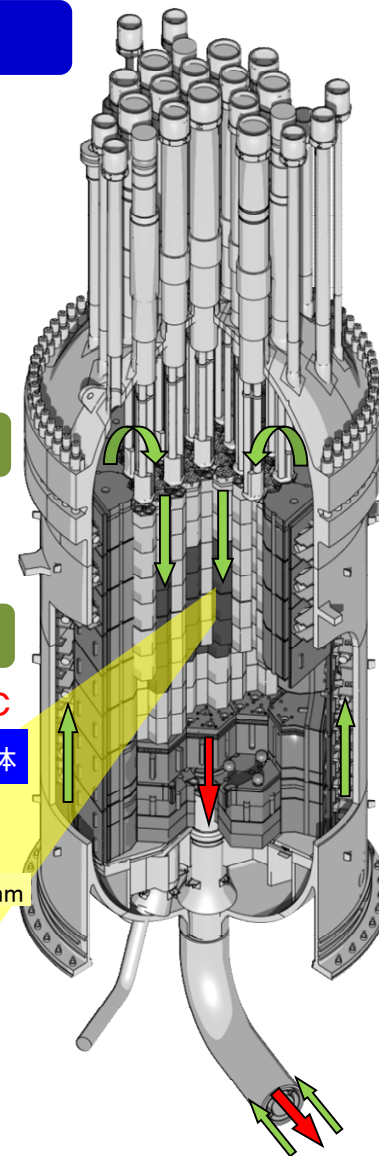
黒鉛構造材

耐熱温度2500℃



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



HTTR（高温工学試験研究炉）



世界で唯一950℃の熱を取り出せる高温ガス炉

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）
初臨界、950℃達成	1998年、2004年
安全性実証試験 連続50日950℃運転	2010年

2014年から新規制基準適合審査中



設置場所：大洗研究所（茨城県大洗町）

HTTRの概要と開発の歴史

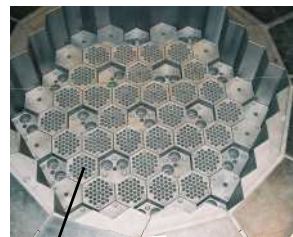


高温工学試験研究炉



我が国初の黒鉛減速ヘリウムガス冷却型原子炉(高温ガス炉)
熱出力30MW/出口温度950℃

設置場所 茨城県大洗町
日本原子力研究開発機構
大洗研究所



炉心の中心部



炉心の黒鉛ブロック

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

実用システムの原型提示

安全性実証試験

OECD/NEAプロジェクト



2014 設置変更許可申請書を原子力規制庁に提出

2010 安全性実証試験
(炉心流量喪失試験等)

連続50日運転950℃

2007 連続30日運転850℃

2004 原子炉出口950℃達成

2002 安全性実証試験
(制御棒引抜試験)

2001 定格出力(30MW)、
原子炉出口850℃達成

1998 初臨界

1997 建設

1991 建設

1990 設置許可申請～取得

1989 詳細設計

1988 詳細設計

1985 詳細設計

高温工学試験研究炉

1984 基本設計

1981 基本設計

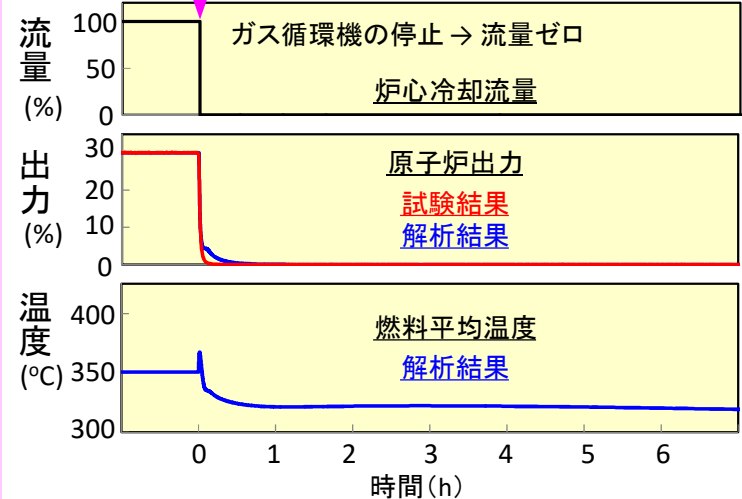
1980 システム総合設計

1974 システム総合設計

1973 概念設計

1969 概念設計

多目的高温ガス実験炉



制御棒挿入なし、冷却流量ゼロにおいて、
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認

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)

核となる技術は世界一の国産技術

■ HTTR設計・建設・運転経験

(三菱重工、東芝/IHI、日立、富士電機、川崎重工等)

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

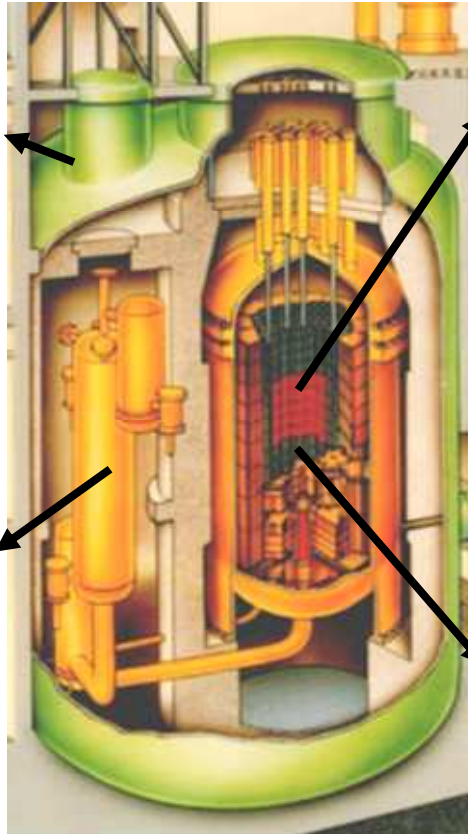
(三菱マテリアと共同開発)



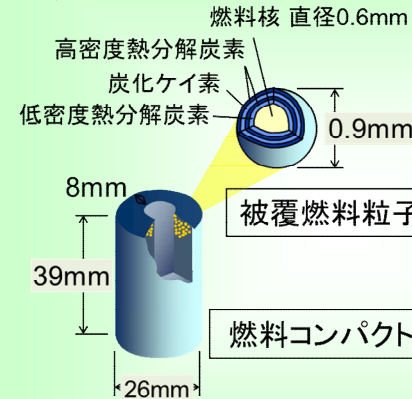
中間熱交換器

原子力用構造材として世界最高温度
(950℃)で使用する金属材料

950℃の熱を
取り出し可能



■ 燃料 (原子燃料工業と共同開発)



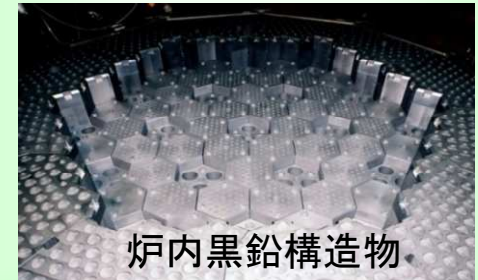
高い閉じ込め
性能を有する
セラミックを
用いたウラン
の被覆

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



炉内黒鉛構造物

高強度・高熱伝導・耐照射性

高温ガス炉は、
国産技術のみで建設可能

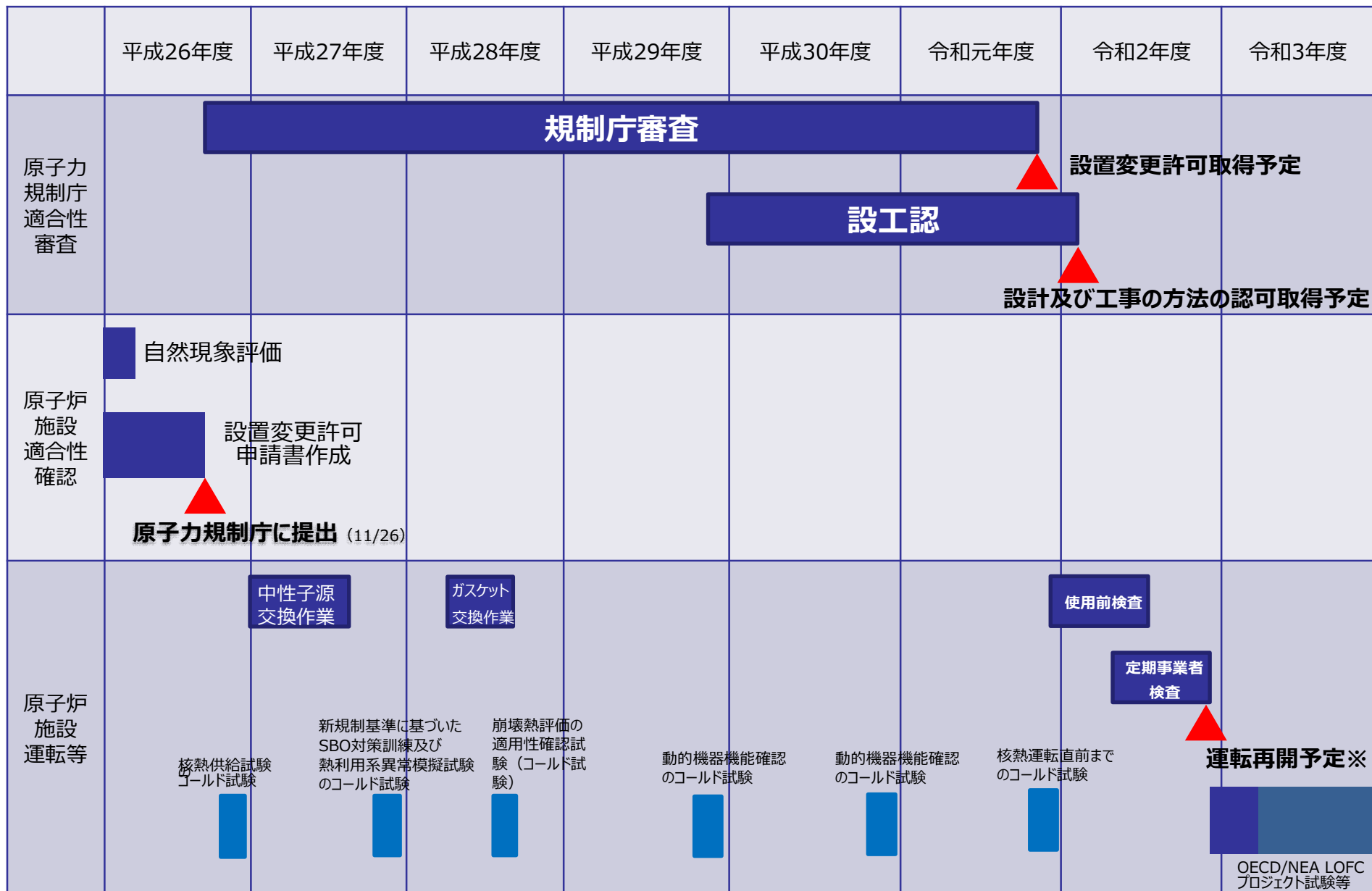
新規制基準審査概要



項目		主な内容	審査結果	追加措置
地震による損傷の防止	設計基準地震動	350gal(S ₂)から973gal(Ss)に変更	構築物、系統及び機器の耐震クラスの見直しは適当	不要
	耐震重要度分類の見直し	「研究炉の耐震重要度の考え方」に基づき、いくつかの構築物、系統及び機器を旧AsクラスからBクラスに変更(リスクの程度の考慮) ➤ 残留熱除去設備：AsクラスをBクラスに変更 ➤ 非常用発電機等：AsクラスをBクラスに変更		
津波による損傷の防止		評価のための津波高さ：海水面から17.8m	原子炉施設の設置位置が海水面から36.5mの高さにあるため、津波はHTTR原子炉施設に到達しない	不要
外部からの衝撃による損傷の防止（自然現象等）		● 設計竜巻の最大風速：100 m/s ● 火山灰の層厚：50 cm ● 外部火災対策が必要	● 防護対象となる全ての構築物、系統及び機器が原子炉建家内に設置されており、防護される ● 原子炉建家周辺に防火帯の拡幅・設置が必要	・防火帯設置 ・各種可搬型発電機の設置
火災による損傷防止		原子炉建家内の可燃物を対象にした評価を実施	● 原子炉建家内の可燃物量を制限 ● 火災に対するケーブルの防護等が必要 ● 火災の早期感知のため原子炉格納容器内の火災検知器の追設が必要	・ケーブルの追加防護措置 ・火災感知器の追加
外部電源を喪失した場合の対策設備等		非常用電源が喪失した場合の評価を実施	電源が喪失された状態でも炉心からの崩壊熱除去が可能	・事故後監視及び後備停止系作動のための可搬型発電機の設置等
多量の放射性物質を放出する事故の拡大の防止(BDBA)		BDBAの想定 ➤ DBA + 原子炉停止機能喪失 ➤ DBA + 強制冷却機能喪失 ➤ DBA + 閉じ込め機能喪失	● 全てのBDBA事象において燃料破損は発生しないため公衆被ばく影響は小さい	・事故後監視及び後備停止系作動のための可搬型発電機の設置等

平成25年12月に施行された新規制基準をもとに、平成26年11月26日に新規制基準適合性確認のための設置変更許可申請
上記の対策の他、構内一斉放送設備の新設、モニタリングポストの通信多様化の工事を実施する。

運転再開スケジュール (R1.11.25公表)



運転再開後の予定

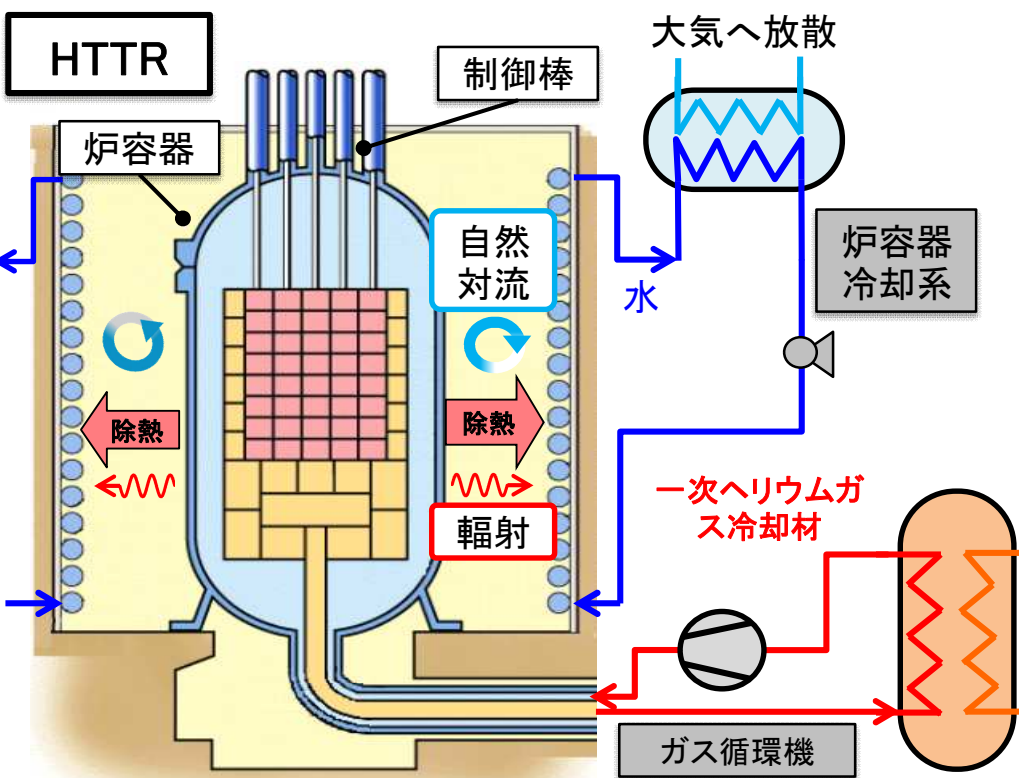
OECD/NEA LOFC安全性実証試験の内容

- ☒ 低出力 (30%(9MW)) (ガス循環機停止) **炉心流量喪失試験 (Run1)** ... 完了 (平成22年度)
- ☐ 高出力 (100%(30MW)) (ガス循環機停止) **炉心流量喪失試験 (Run2)**
- ☐ 低出力 (30%(9MW)) (ガス循環機 + 炉容器冷却系停止) **炉心冷却喪失試験 (Run3)**

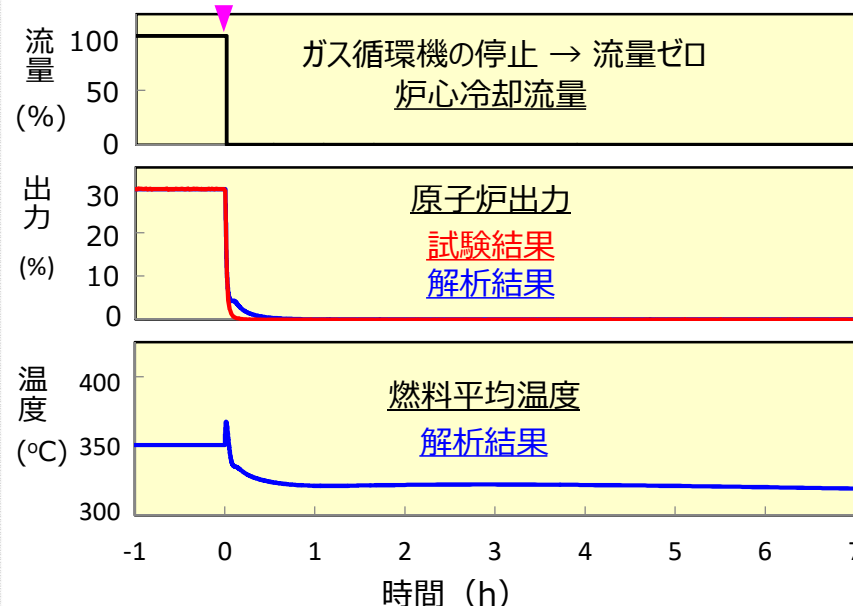
炉心流量喪失試験 (Run1) の試験条件

- 初期出力30% (9MW)
- 炉心冷却流量の停止
- 炉容器冷却系の運転継続
- 停止操作 (制御棒挿入) なし

試験結果 (Run1)

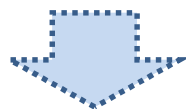


制御棒挿入せずとも、冷却せずとも
物理現象のみで、原子炉が
自然に静定・冷却されることを確認



HTTR使用済燃料

(現在まだ発生していない。1998年以降40年間：1.8トン(2炉心))



HTTRの使用済燃料貯蔵設備において貯蔵（2炉心分整備済）



使用済燃料の処分

(複数の選択肢を検討できるよう申請書に記載)

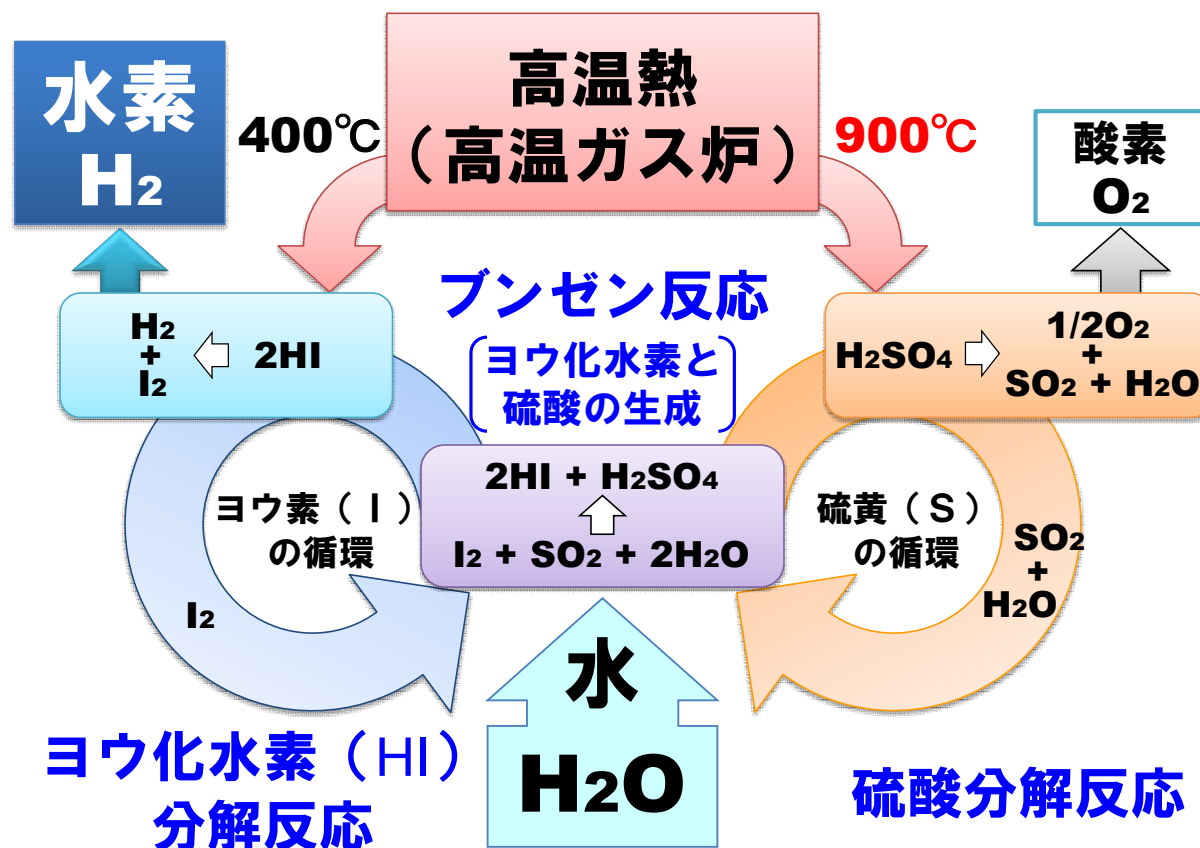
- ・海外再処理
- ・海外による引き取り

今回の設置変更許可申請書での記載ぶりを変更した理由：

○現段階では再処理の方針が決まっていないため、考えられる処分の選択肢（再処理の委託又は引き取りの依頼）を列記。

今後、使用済燃料の扱いについて具体的な対応を進める場合には、
予め原子力委員会殿にご相談に伺う。

- 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℃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



連続水素製造試験装置による水素製造に成功



試験概要 2019年1月18日～25日に、水素発生量最大約30L/時で**連続150時間の運転を達成**



水素製造試験の状況

成果

- **世界で初めて、実用工業材料によって構成した連続水素製造試験装置による安定かつ長時間の水素製造に成功し、世界のトップランナーであることを示した**

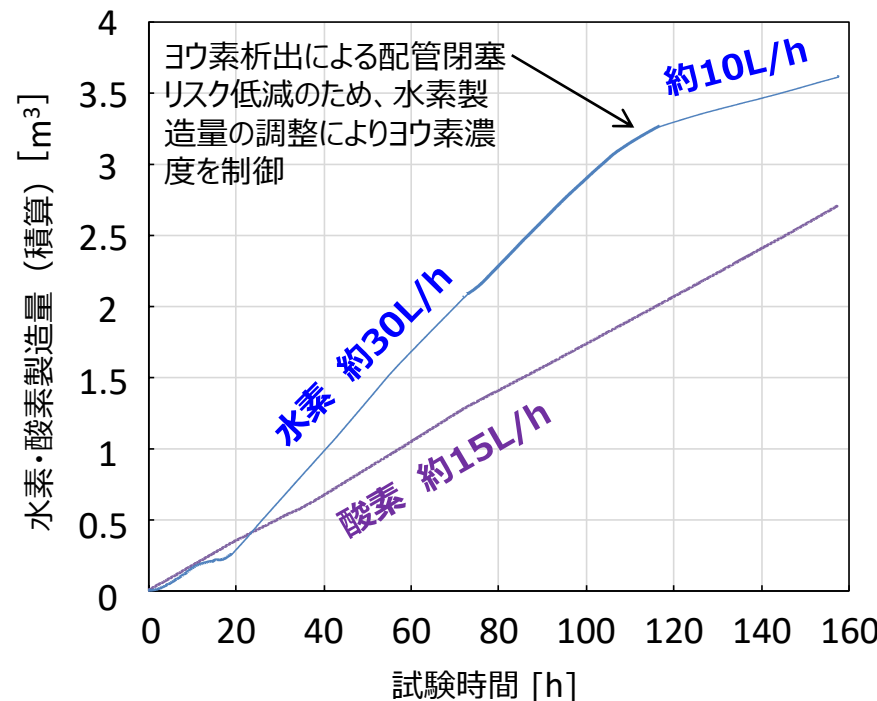
長時間（150時間）の意義：

- 連続水素製造試験装置の滞留時間は約50時間
- 50時間経過によって安定運転に目処。100時間経過で確認
- 150時間で安定運転維持を再確認

プレス発表「高温ガス炉による水素製造が実用化へ大きく前進—実用工業材料で製作した水素製造試験装置を用いた熱化学法ISプロセスによる150時間の連続水素製造に成功—」（H31.1）：日経産業新聞など多数のメディアに掲載

- **実用工業材料製機器の実用化に見通し**

- 機器の腐食による漏えいや、ヨウ素等の析出による閉塞の問題を解決



連続水素製造試験結果（H31.1）

今後の計画

- ✓ 運転後の点検による腐食データ取得
- ✓ 自動組成制御に向けた運転データ取得、データベース構築及び組成制御法確立
- ✓ 高温ガス炉との接続に向けた運転手順の確立

(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)

- 高性能燃料要素開発
- 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及び機器信頼性の確証
- ガスタービン翼材の開発

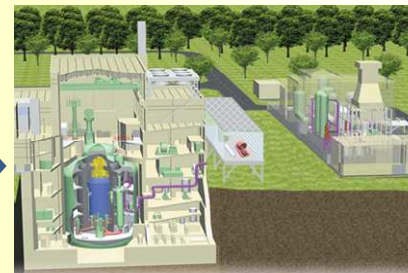
(3) 実用高温ガス炉設計



- 実用高温ガス炉システムの設計研究
- プルトニウム燃焼高温ガス炉の炉心設計
- 実用高温ガス炉の安全基準の策定と国際標準化

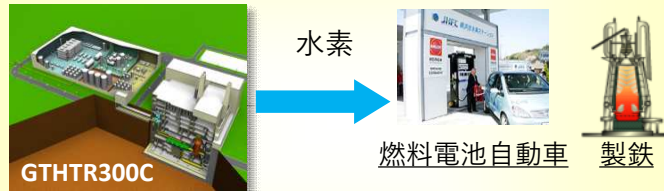
- 海外輸出用高温ガス炉の設計

(4) HTTR-GT/H₂ 試験



- 高温ガス炉熱利用技術の総合実証

水素製造システム



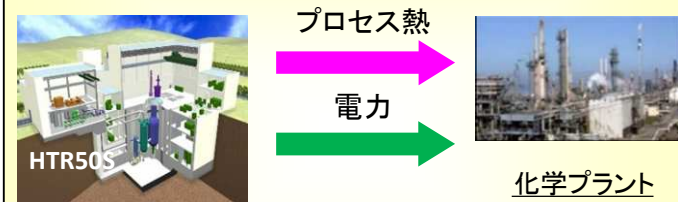
- 熱化学法（ISプロセス）又はメタンの水蒸気改質法による水素製造

再生可能エネルギーとのハイブリッドシステム



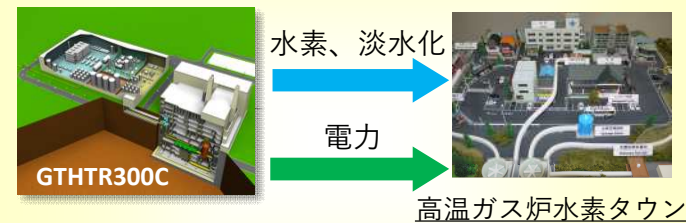
- 再生可能エネルギーの変動を発電量調整又は水素製造により吸収
- 再生可能エネルギーに変動に応じて、高発電効率を維持したまま発電量を調整

工業利用として高温の熱供給又熱電供給



- 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

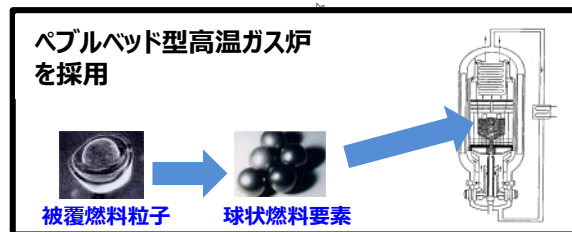
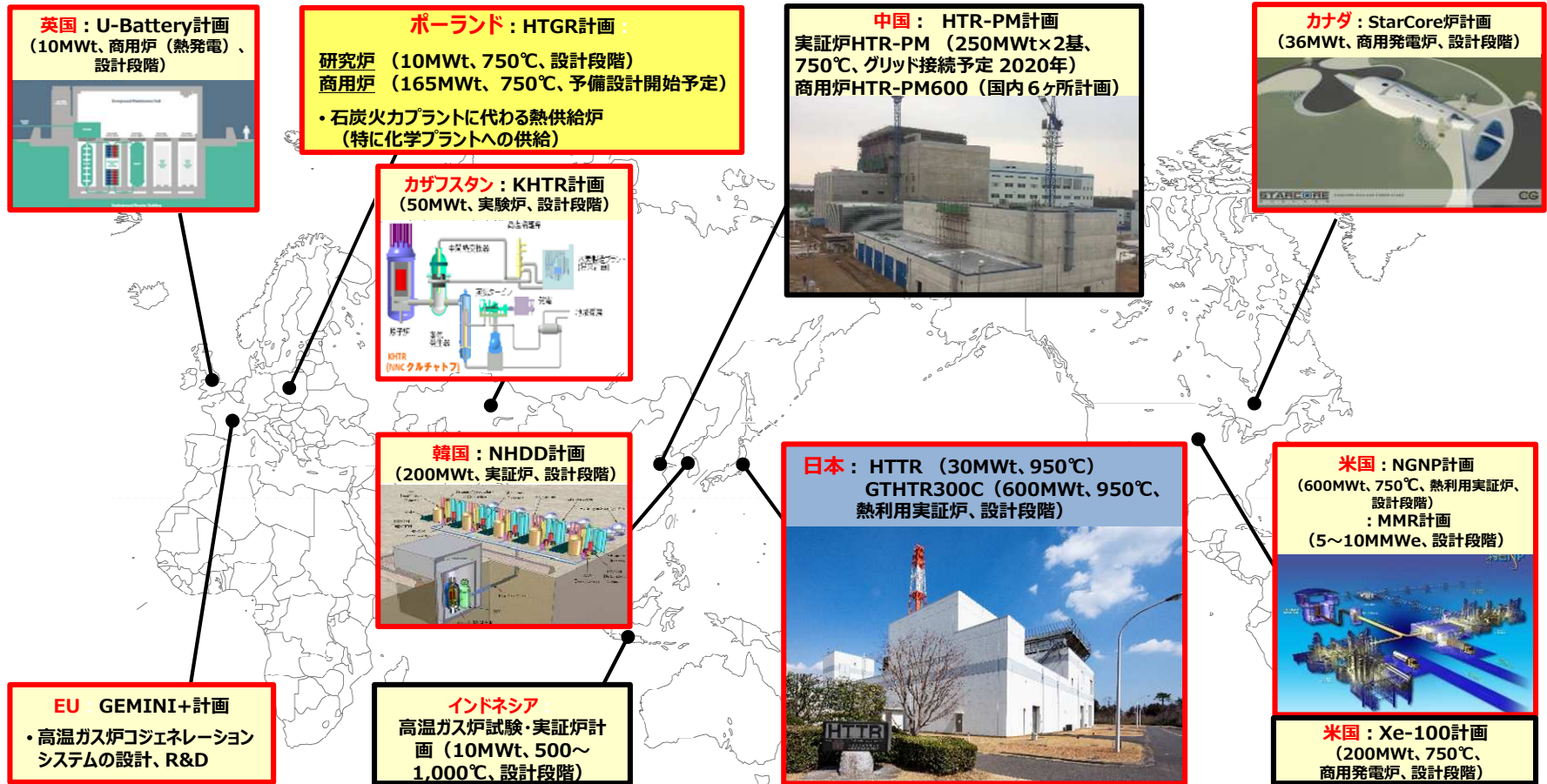
コジェネシステム（水素、発電、淡水化等）



- 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

高温で高効率（ガスタービン発電50%）、高熱利用率（最大80%弱）であるため経済性に優れ、高い安全性を有するために需要地近接立地が可能

世界の高温ガス炉開発状況



概要

ポーランド国立原子力研究センター（NCBJ）において、「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」を令和元年9月20日に署名

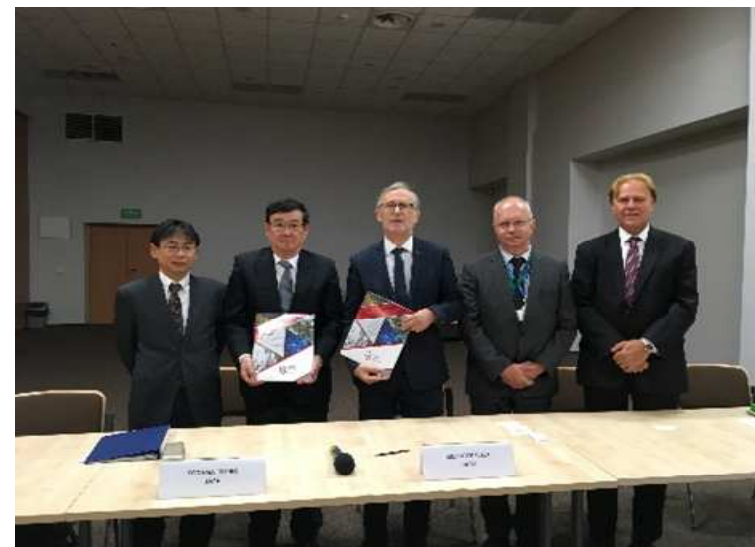
取決め内容

以下の分野においてデータ共有等による研究開発協力を進める

- 高温ガス炉の高度化に関するシミュレーションのための材料及び被覆粒子燃料に関わる研究開発
- 原子炉への化学プラント接続のための安全解析
- 設計研究による高温ガス炉の高度化に関するシミュレーション
- 高温ガス炉の人材育成

今後の計画

- ポーランドの高温ガス炉開発における主要なパートナーとして、日本の高温ガス炉技術のさらなる高度化、国際標準化を図る
- ポーランドと協力して高温ガス炉技術を海外展開することにより、我が国の高温ガス炉技術の採用と高温ガス炉技術の国際競争力の強化



JAEAとNCBJが、研究協力実施取決めに署名（2019年9月）