カーボンイーブン50に向けての取組　　2022年1月　インターネットより収集

最近　小型で安全性の高い原子炉「高温ガス炉」・「核融合炉」を発電や水素製造に組み合わせて、低炭素社会の実現を進める小型原子炉利用が広く注目されつつある。

そんな原子力利用の流れの紹介です。「原子力の安全制御と実用化」　遠い先の夢物語と思っていましたが・・・・・

◎高温ガス炉等コンパトで安全性が高い小型炉で900℃以上の高温流体を取り出すことが出来、この熱を利用して、CO_2フリーで発電　また効率の良い高温熱分解法や電気分解での水素取り出しができる。水素や電力の必要な場所近くで、大量に供給できるメリットを秘めている。

CO_2フリーの安定発電・高炉操業（原子力製鉄）等の実用化を一機に進める突破口の技術を秘めており、日本は実用に近いトップ技術を既に有しているという。

原子力タブー視から一機に実用へ　道を切り開けるか?　注目している

「原子力の安全制御と実用化」　遠い先の夢物語と思っていましたが・・・・・

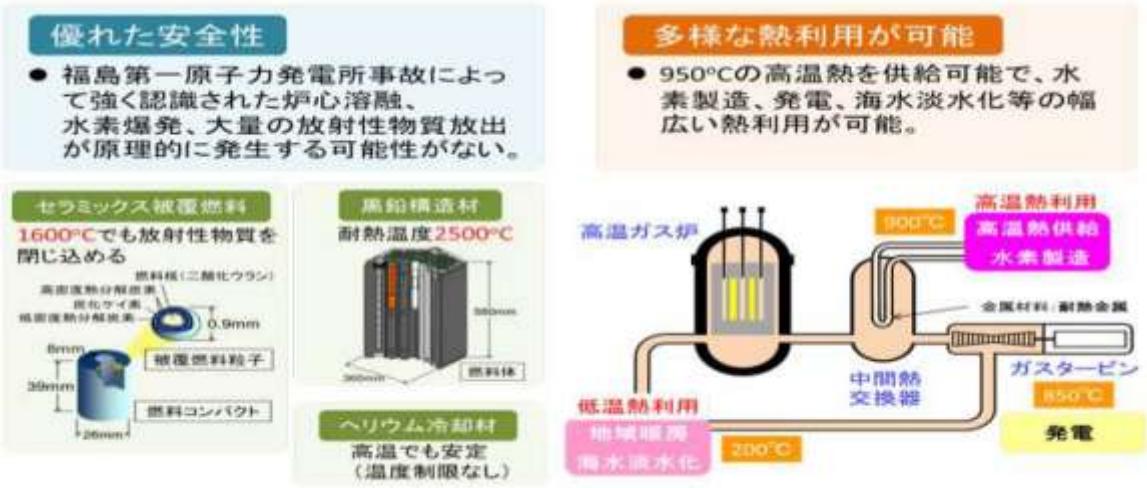
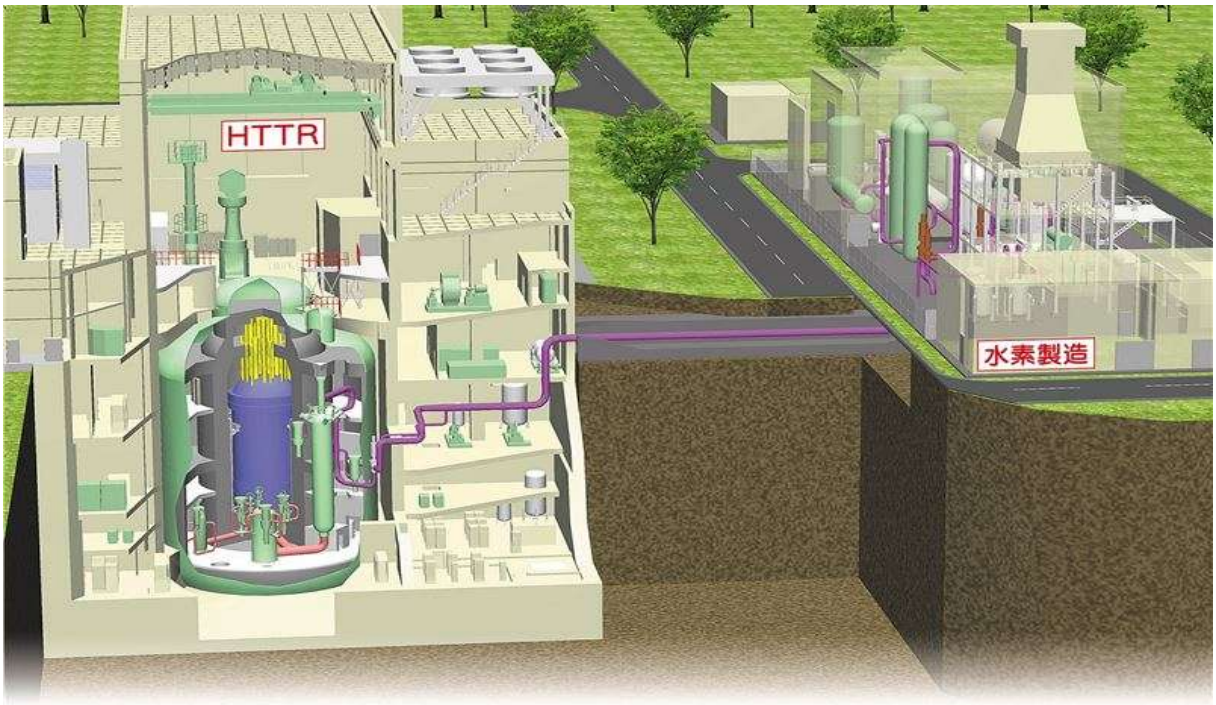


図１　高温ガス炉の特長

◎次世代原子炉「高温ガス炉」で未来は変わるか



ＨＴＴＲと水素製造装置のイメージ（原子力機構提供）

高い安全性、高効率で発電

化石燃料に代わる高温供給源として期待の次世代原子炉「高温ガス炉」。日本原子力研究開発機構は高温ガス炉の試験研究炉「高温工学試験研究炉（ＨＴＴＲ）」（茨城県大洗町）を利用し、技術を蓄積している。

高温ガスの利用で発電や水素製造、海水の淡水化などを可能とする。二酸化炭素（ＣＯ２）削減効果もあり、２０５０年までに温室効果ガス排出実質ゼロを目指す「カーボンニュートラル」実現への貢献が期待される。（冨井哲雄）

燃料溶け出さず

高温ガス炉の最大の特徴はその安全性だ。ＨＴＴＲは１６００度Ｃでも放射性物質を閉じ込められるセラミックス被覆燃料粒子をはじめ、耐熱性や伝熱性が高い減速材の黒鉛、冷却材のヘリウムガスを使う。

冷却機能を失っても燃料が溶け出さず、自然に冷える仕組みだ。

１１年の東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所の事故で、軽水炉のリスクが認識されるようになった。原子力機構大洗研究所高温ガス炉研究開発センター高温工学試験研究炉部の篠崎正幸部長は、「（高温ガス炉は）福島第一原発のような事故を起こすことはない」と断言する。

また、ＨＴＴＲは９５０度Ｃと高温の熱が利用できるため、多くの産業や生活分野で活用が期待される。例えば熱化学法を利用することで、９５０度Ｃのヘリウムガスで水を分解し水素を製造できる。「化石燃料を使わないため、ＣＯ２の排出量を減らせる」（篠崎部長）。１９年の運転では１時間当たり３０リットルの水素を１５０時間連続製造できた。「大量製造した水素を製鉄にも使える」（同）と期待する。

さらに熱効率の高さも大きなメリットだ。軽水炉で得られるガスの温度は３００度Ｃ程度でタービンによる発電の熱効率は３５％。一方、９５０度Ｃのヘリウムガスでタービンを駆動すれば熱効率は５０％まで向上できる。

耐震基準クリア

ＨＴＴＲ施設の外観（原子力機構提供）

ＨＴＴＲは０４年、９５０度Ｃの熱の取り出しに世界で初成功した。

その後、東日本大震災での運転停止を経て、従来基準の約３倍の地震動に耐えられる政府の新規制基準をクリア。

現在は２１年７月の運転再開を目指して準備中だ。

運転再開後、安全性の実証実験を２２年１月にも開始。

ＨＴＴＲにガスタービン発電施設と水素製造施設をつなぎ、

コージェネレーション（熱電併給）熱利用技術を３０年に実証する予定だ。
高温ガス炉は世界中で導入が検討されているが、稼働しているのは日本と中国のみ。
中国は高温ガス炉の実証炉を２１年中に稼働し、発電する見込みだ。

一方、日本政府は２０年１２月に策定したグリーン成長戦略の中で、
高温ガス炉を含む次世代原子炉の研究開発を重要な柱に位置付けた。
さらに原子力機構とポーランド国立原子力研究センターが研究協力し、ポーランドで高温ガス炉の研究炉の２５年以降運転開始を目指すなど、ＨＴＴＲで培った知見を海外で生かそうとしている。
脱炭素化に向けた動きが世界中で加速する中、日本で培った高温ガス炉の技術でどう貢献していくのか、政府の戦略が問われる。
日刊工業新聞 2021 年４月 26 日

◎. 未来を作る先端技術　**夢のエネルギー「核融合」、研究開発の現在地**　2021 年 10 月 05 日 テクノロジー
https://newswitch.jp/p/29065

核融合反応は太陽をはじめとする星々が生み出すエネルギーの源。水素など軽い原子種同士が融合して重い原子へと変わる際、膨大なエネルギーが生まれる。核融合反応の燃料となる重水素とリチウムは海水にもわずかながら含まれている。
このため、この反応を応用した核融合発電は、持続可能で二酸化炭素（ＣＯ２）も排出しない夢のエネルギーとして実用化が期待される。
（編集委員・田中弥生）

核融合科学研究所、世界最大級の大型ヘリカル装置（ＬＨＤ）

「２０２０年度にプラズマのイオンと電子の温度が共に１億度Ｃというマイルストーンを達成し、核融合研究は次のフェーズに入った」と、自然科学研究機構核融合科学研究所（岐阜県土岐市）の居田克巳教授は強調する。
核融合発電には、超高温のプラズマを長時間かつ安定して維持する必要がある。
同研究所はコイルをらせん状にひねってドーナツ型の磁場を作ることでプラズマを容器に閉じ込める世界最大級の「ヘリカル装置（ＬＨＤ）」を使い、高温のプラズマをつくる研究を進めている。
４月、居田教授らの研究グループは、「水素同位体混合プラズマの乱流」と「突発型不安定性」という二つの研究成果を発表した。
乱流はプラズマの中にできる渦。
これまで温度上昇を妨げる悪者のイメージだったが、将来の核融合発電で燃料として用いる重水素と三重水素を、軽水素と重水素で模擬する水素同位体混合プラズマの物理実験で、乱流がプラズマをかき混ぜて同位体を均一にするプラス効果があることを発見した。

300 台のコンピューターが並ぶ制御室（核融合科学研究所提供）

一方、突発型不安定性は地震や火山の噴火のようにいつ起こってもおかしくないが、いつ起こるか分からない性質のこと。正確に予知できなくても、起こりそうな幾つかの条件は分かっている。
居田教授らは磁場で閉じ込めたプラズマの一部が突然失われる突発現象の前兆となる変化を世界で初めて明らかにした。
では、核融合発電はいつ実現するのか。居田教授は「１億度C達成は一里塚。今は課題を見つけ、クリアにするための研究を進めている段階」と説明する。
核融合研究は同研究所の「ヘリカル方式」のほか、プラズマ中に電流を流す「トカマク方式」、レーザーを用いる「レーザー方式」があるが、それぞれ温度や持続時間など一長一短。「現段階ではどれも１００％優れているとはいえない」と居田教授。
核融合発電の最大の魅力は石油やウランのように、燃料が地域に偏在しないこと。ただ、海水からリチウムを取り出すには相当な費用がかかるため、実用化には国策としての推進が不可欠といえる。一方、核融合反応の応用は発電だけではない。反応の過程で生まれる中性子は、陽電子放射断層撮影（ＰＥＴ）に使われる短寿命の放射性物質など、医学分野で潜在ニーズが大きい。エックス線（Ｘ線）が通らないコンテナ検査にも応用できる。
プラズマの性質はまだ十分解明されていない。ただ世の中には物性物理が完全に理解されていなくても、実用化されているものはある。「プラズマをどこまで理解すれば制御できるかはまだはっきりしない。しかし解明が進めば、実用化に前進することは間違いない」（居田教授）。

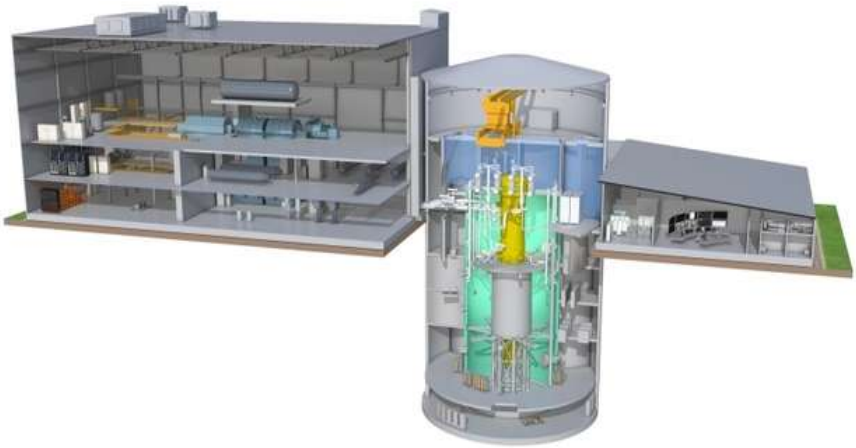
日刊工業新聞 2021 年８月９日

◎GE 日立がカナダで受注、「小型原子炉」が世界から注目を集めるワケ

12/7(火) 13:11 配信 53

GE 日立がカナダで受注、「小型原子炉」が世界から注目を集めるワケ（ニュースイッチ） - Yahoo!ニュース
https://news.yahoo.co.jp/articles/488d03e0dfaab5f48f065f12e2002198f672d5da

小型原子炉「BWRX―300」（イメージ）



日立製作所と米ゼネラル・エレクトリック（GE）の原子力合弁会社である米 GE 日立ニュークリア・エナジー（ノースカロライナ州）は、カナダ電力事業者のオンタリオ・パワー・ジェネレーション（OPG）から小型原子炉「BWRX―300」を受注する見通しとなった。
早ければ 2028 年に完成する。日本メーカーが関与して小型原子炉を受注するのは今回が初めてとなる。
今回、東部都市のトロントに近いダーリントン新原子力発電所計画の技術パートナーに選ばれた。
OPG などは 22 年に建設許可を申請し、最大で小型原子炉４基を建てる計画。

GE 日立は日立製作所の持分法適用会社。日本側の合弁会社である日立 GE ニュークリア・エナジー（茨城県日立市）からも北米へ人員を派遣し、技術開発や商談を支援してきたという。
小型原子炉は安全性が高く、低コストで建設・運用が可能だと言われる。
世界的なカーボンニュートラル（温室効果ガス排出量実質ゼロ）の潮流に合わせて BWRX―300 への関心は高まっている。GE 日立はカナダ以外に、米国やポーランド、エストニア、チェコでも現地企業と導入検討の契約を結んでいる。

脱炭素で注目「小型原子炉」　各国、研究開発後押し

カーボンニュートラル（温室効果ガス排出量実質ゼロ）の実現には向け、安全性が高く、低コストで建設可能な小型原子炉が注目されている。
米英やカナダなどは2030年前後の商用化に向け、政府予算を投入し、研究開発を支援している。
日本政府も10月に閣議決定したエネルギー基本計画で「脱炭素」電源として原子力の活用を掲げ、
革新技術の開発を後押し。
グリーン成長戦略で20年代末の海外での小型原子炉初号機の開発後、海外企業と連携しグローバル展開と量産体制を確立することを今後の目標としていた。
日本企業が関与した小型原子炉の受注は、日本の原発インフラの輸出に向けた第一歩となる。
日刊工業新聞

三菱重工技報 Vol.46 No.4 (2009) 原子力特集 技 術 論 文 46
https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/464/464046.pdf

低炭素社会実現に合致した高温ガス炉 –その開発状況と水素製造システムの特徴

Development of High Temperature Gas Reactor and Technologies Related to Hydrogen Production System to Meet Low-Carbon Society

清水 克　Katsusuke Shimizu　原子力事業本部原子力技術部主席技師 ＊
藤森 浩二　Koji Fujimori　原子力事業本部原子力技術部課長 ＊
皆月 功　Isao Minatsuki　原子力事業本部原子力技術部主席プロジェクト統括（工博）

高温ガス炉は，低炭素社会に合致する特長を有しており，将来，高効率発電用プラント及び核 熱利用へと期待が大きいと考えられる．当社の高温ガス炉における活動は，(独)日本原子力研究 開発機構・高温工学試験研究炉(HTTR：High Temperature Engineering Test Reactor）の R&D，建設に始まり，南アフリカで計画されたペブル型モジュール炉 （PBMR: Pebble Bed Modular Reactor）への参画，並びに原子力水素に向けた要素技術の開発とを継続してきた．現在は，高温ガス炉の実用化に向けた研究開発を展開中である．
本稿は，これらの成果を紹介す るものである．

1.はじめに

我が国における将来の高温ガス炉の開発方針は，2005 年に定められた原子力政策大綱(1)が 基本となっている．特に，高温ガス炉は“高い固有の安全性”，“高い熱効率”及び“高い経済性” という特長を有し，加えて，高温ガス炉で発生する高熱ガスは，一般産業における高温熱源として の適用範囲が広いことから，他の原子力発電と比べて，地球温暖化対策，CO２削減に，大きな貢 献が期待される．

これより，高効率発電用電源（系統電源，分散電源）及び原子力水素のような核 熱利用等に向けた研究開発が進められている． 本稿では，当社における高温ガス炉分野における研究開発への取組みを報告する．

2. 高温ガス炉の特徴

2.1 構造的な特徴

高温ガス炉の運転温度は，軽水炉に比べ，格段に高温である．それは原子炉の基本構成要 素となる“燃料”，“冷却材”及び“減速材”に特徴を有するためである．

“燃料”は，セラミックスで 被覆された直径が約１mm の被覆燃料粒子で，この被覆が核分裂によって生じる放射性物質を 閉じ込める役割を担う．

“冷却材”は化学的に不活性で伝熱特性の良いヘリウムガスで，

“減速 材”は中性子の吸収が少なく，耐熱性，熱伝導性の良い黒鉛材である．

この黒鉛材は，炉心支持 構造の機能を備え，事故時の急激な温度上昇も抑える役割を担う．

高温ガス炉と軽水炉との主な 仕様比較を表１に，高温ガス炉の原子炉構造(2)の例を図１に示す．

表1 高温ガス炉と軽水炉との主な仕様比較

	高温ガス炉	軽水炉
燃料 (濃縮度) (被覆材)	二酸化ウラン 数%～20% セラミックス，熱分解黒鉛の多層被覆	二酸化ウラン 2%～4% 金属(ジルカロイ)被覆
冷却材	ヘリウムガス	水
減速材	黒鉛	水
冷却材出口温度	750～950℃	290～330℃
熱効率	～45%	30～35%

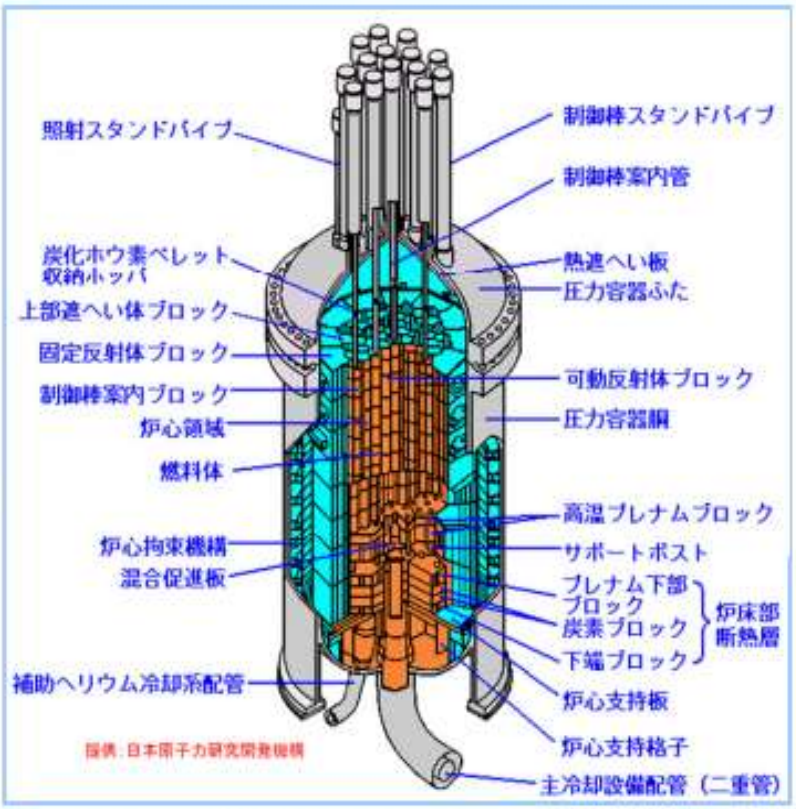


図1 高温ガス炉 HTTR(高温工学試験研究炉)の原子炉構造 (2)

2.2 機能的な特徴

高温ガス炉は，炉心構成，原子炉構造等の特性から，軽水炉等の他形式の原子炉に比べて， “高い固有の安全性”，“高い熱効率”及び“高い経済性”という特徴を有している．

(1) 高い固有の安全性

高温ガス炉では，大きな熱容量を有する減速材黒鉛が，事故時に熱溜めとなり，急激な温 度上昇が回避される．

加えて炉心が大きな負の反応温度係数を持つため，炉心温度が上昇しても，負の反応度フィードバックにより自然に

原子炉が停止する．また，燃料が高温に晒されて も燃料破損することなく，放射性物質を被覆燃料内に閉じ込めておくこができる．これらより，“冷える”，“止まる”，“閉じ込める”という機能を自然に有しており，高温ガス炉 は“高い固有の 安全性”を有する．

⑵ 高い熱効率

炉心が耐熱性材料から構成されており，高温の熱源を原子炉から取り出すことができる．原 子炉出口冷却材温度は，軽水炉の 300～350℃に比べ，高温ガス炉では 800～900℃となり， 直接サイクルガスタービンシステム発電プラントでは軽水炉の蒸気タービンによる熱効率が 35%程度に対して 45%以上の高い熱効率の実現が可能となる．

⑶ 高い経済性

高温ガス炉は小型化・モジュール化により，“固有の安全性”が向上し安全設備の簡素化 を図ることができ，標準設計及び標準生産による製造コスト・建設コストの低減を図ることができる．

また“高い熱効率”を有することより，発電機等を除く設備が削減されコスト低減が期待さ れる．これらの経済性効果から小型化によるスケールデメリット効果を勘案しても建設単価は 軽水炉に比べ，充分低減される可能性を有する．

2.3 核熱利用形態の特徴

高温ガス炉の供給可能温度範囲と一般産業における利用温度範囲を図２に示す⑶．

図に示すように高温ガス炉の供給可能温度領域は地域熱源，海水淡水化から鉄鋼，石油化学までの 産業に熱源として提供することが可能で，既存熱源と置き換えることで CO_2 排出量を抑制でき，加えて化石燃料を原料として製造されている水素を高温ガス炉の核熱を利用する技術が実用化されれば，高温ガス炉は低炭素社会に即した熱源と言える．

図2 高温ガス炉の供給可能温度範囲と一般産業における利用温度範囲[3]

3. 高温ガス炉開発の歴史と当社における実績

3.1 国内外における高温ガス炉開発の歴史

高温ガス炉の基本概念（“被覆粒子燃料”，“黒鉛減速材”，“ガス冷却”）を採用した原子炉の 歴史は古く，1942 年に臨界に達した CPI（米国）の黒鉛減速炉が最初となる．1956 年に被覆燃料 粒子が発明され，その後の基盤となる高温ガス炉の概念が確立された．

1960～1980 年代に，ドイツ，米国で，試験炉，原型炉が開発，設計，建設され，今日の高温ガ ス炉の基礎が築かれた．

ドイツの発電用実験炉 AVR（15MWe）及び発電用原型炉 THTR-300（300MWe），米国の発電用実験炉 Peach Bottom（40MWe，1966 年臨界，1974 停止）及び発電用 原型炉 Fort Saint Vrain(330MWe，1974 年臨界，1989 年停止)は，いずれもトラブルに遭遇し運転 終了となった．

1990 年以降，小型モジュール炉を基本概念とした高温ガス炉の設計研究が開始され，南アフ リカ，米国，ロシア，日本，中国では，2020 年頃にプラントの完成，運転開始を目指し発電用原 型・実証炉プロジェクトが進められてい

る．2000 年以降は，低炭素社会に合致した熱電併用型高 温ガス炉の実用化を目指した研究開発が活発化してきた．最近では，第4世代原子力システムの 検討を進めることを目的に，米国の提唱で GIF（Generation Ⅳ International Forum）が組織され， 超高温ガス炉がその概念の一つに選定された

これらの世界各国における高温ガス炉の開発 状況を表2に示す．

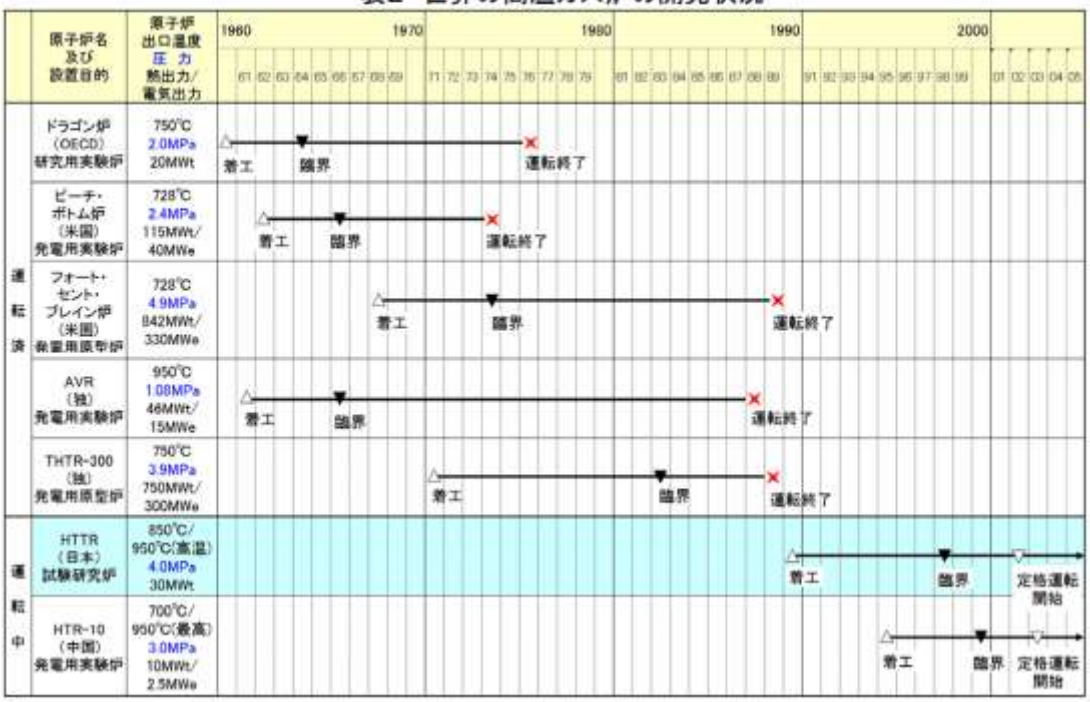
国内では，昭和 40 年代から，当時の日本原子力研究所（現，日本原子力研究開発機構，以 下，原子力機構と呼ぶ）が中心となり，高温ガス炉の調査研究が開始され，関連要素技術の開発 が 進められた ．

199 年に国内初の高温工学試験研究炉（ HTTR ： High Temperature Engineering Test Reactor）の建設が開始され，1998 年 11 月 10 日に初臨界を達成した．

その後， 2004 年 4 月 19 日に原子炉出口ヘリウム温度 950℃での全出力運転を達成し，安全性実証試験を行っている． また，水素製造技術開発に関しては，原子力機構は水を原料とした熱化学法(IS 法)水素製 造技術の開発に着手し，2003 年にはベンチテストにより毎時 35 リットル，20 時間連続で水素を 製造することに成功した > 次ステップとして水素製造プラントのパイロットプラントを計画し， 2004 年以降，設計を開始した．

HTTR の経験を生かし，発電用高温ガス炉として GTHTR-300 の概念設計研究(8)が実施され， 日本においても，高温ガス炉の広範な利用を視野に入れ，研究開発が行われている．

表2 世界の高温ガス炉の開発状況



3.2 当社における開発実績

当社は，国内初となる高温工学試験研究炉 HTTR を目的とした研究開発の初期から参画し， 旧日本原子力研究所（現(独)日本原子力研究開発機構）に建設された HENDEL（高温機器実証 試験ループ）のヘリウムガス循環機，高温配管，冷却器等の機器を製作，納入した．その後， HTTR の建設が開始され，幹事会社を務めるとともに，原子炉格納容器をはじめとし，一次加圧 水冷却器，高温配管等を製作，納入した． 海外の高温ガス炉での実績として，2002 年より南アフリカの PBMR（Pebble Bed Modular Reactor）プロジェクトに本格的に参画し，タービン発電機及び炉心槽の設計，製作を担当した．

2.3 節で述べたように，高温ガス炉の核熱利用は多用途に亘り，低炭素化社会に合致した熱源 となる．

現在，日本においては，現在，水素はメタンから製造されるために CO2 が排出されるが， 高温ガス炉を利用した水素製造システムは水の熱分解によるもので，CO2 の排出がない長所を有する．

ここでは，HTTR，PBMR 及び水素製造システムにおける当社の実績を示す．

(1) HTTR（高温工学試験研究炉）

(2) HTTR は高温ガス炉技術基盤の確立，高温ガス炉技術の高度化，高温工学に関する先端基礎研究を目的とし建設された試験研究炉であり，表3に，その主な仕様を示す．

表3 高温工学試験研究炉 HTTR の主な仕様[2] [9]

原子炉熱出力	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℃
1次系冷却材圧力	4MPa
炉心構造材	黒鉛
炉心有効高さ	2.9m
炉心等価直径	2.3m
出力密度	2.5MW/m^3
燃 料	二酸化ウラン
ウラン濃縮度	3～10%(平均 AV.6%)
燃料体形式	ピン・イン・ブロック型
原子炉圧力容器	2 1/4Cr-1Mo 鋼
出力密度	2.5MW/m^3
主冷却回路数	1ループ

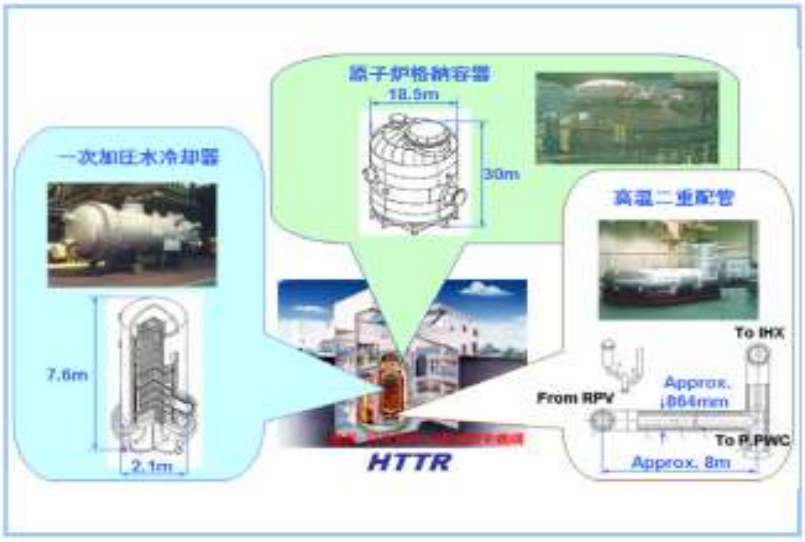


図3 当社が HTTR に納入した主要機器

図3 当社が HTTR に納入した主要機器 当社は幹事会社として，4社(富士電機ホールディングス(株)，(株)東芝，(株)日立製作所，三菱重工業(株))の取りまとめ，HTTR のプラントエンジニアリング，原子炉格納容器，主要冷却系 機器，高温配管の製作を実施した．

図3に，当社が納入した主要機器を示す．現在，HTTR は安全性実証試験のため運転中で あり，当社はその研究支援及び HTTR の点検・保守工事を継続して実施している．

(2) PBMR

PBMR は高温ガス炉の特長を生かした実用型小型モジュール炉であり，低コスト，斬新な概 念で世界的に注目された．高温ガス炉実用化への先導的なプロジェクトとなり，将来の事業拡 大が期待され，当社は，2001 年に受注したデモ機用の直接サイクルガスタービン発電機のフィ ジビリティスタディを契機に，2004 年より炉内構造物（炉心槽）の設計レビュー検討を受注し，引 続き冷却系のフィジビリティスタディを開始した．

PBMR の主な仕様は，電気出力 165MWe，ペブル型被覆粒子燃料，原子炉冷却材圧力 9MPa，原子炉冷却材出入口温度 900℃/500℃となっている．

(3) 核熱利用水素製造システム

高温ガス炉の核熱を利用した水素製造プロセスには，表4に示すように，メタンガス水蒸気 改質法，熱化学法（IS プロセス；I はヨウ素，S は硫黄の頭文字）及び固体酸化物水電解法があ り，原子力機構は，メタン水蒸気改質法及び熱化学法に関する研究開発を行ってきている．当 社は，原子力機構と高温用隔離弁の開発を行い，平行して IS プロセスで重要となる耐 熱・耐食性に優れたセラミックス製の硫酸分解器を独自に考案し，その設計，製作性の検証(14) を実施した．

ここで IS プロセスと言う熱化学法水素製造プロセスは，ヨウ素，二酸化硫黄及び水によるブンゼン反応を用いたもので，その反応によって生成されたヨウ化水素を熱分解し水素を発生させ， 硫酸を二酸化硫黄，酸素及び水に熱分解する．

このヨウ化水素と硫酸の熱分解に，高温ガス炉 からの核熱を利用する．

表4 高温ガス炉水素製造法の比較

	水蒸気改質法	熱化学分水解法(IS 法)	固体酸化物水電解法(SOSE 法)
特徴	・炭化水素原料(化石燃料)を，触媒(Ni系等)を用いて水蒸気と反応させ，二酸化炭素と水を発生	・熱エネルギーのみで水を分解 ・水以外の全ての反応物を繰り返し使用(閉サイクル)	・電解質溶液の代わりに安定化ジルコニア等の固体酸化物を用いた電気分解
反応式	① $CH_4+H_2O \rightarrow CO+3H_2$ (700～925℃) ② $CO+H_2O \rightarrow CO_2+H_2$ (350℃)	① $I_2+SO_2+2H_2O \rightarrow 2HI+H_2SO_4$ (100～200℃) ② $2HI \rightarrow H_2+I_2$ (300～500℃) ③ $H_2SO_4 \rightarrow SO_2+1/2O_2+H_2O$ (800℃～1000℃)	(陰極) $2H^++2e^- \rightarrow H_2$ (陽極) $H_2O \rightarrow 1/2O_2+2H^++2e^-$ 反応温度 900～1000℃
メリット	・実用化技術(商業段階)	・燃料費不要	・燃料費不要 ・燃料電池技術(逆反応)の活用が可能
デメリット	・CO_2排出	・耐熱・耐圧・耐食材料の開発等，技術開発のハードルが高い	・10kWe 級で約 300 本の燃料電池セル → 10MWe 級で約 30 万本の燃料電池セルが必要
課題	・CO_2固定化	・耐腐食性，機械強度に優れた材料(セラミクス)の開発，耐久性の実証 ・高効率化(5%(現状実験レベル)→45%以上への効率向上) ・3つの化学反応の運転制御技術	・大型セル製作技術の開発，耐久性の実証

4. 当社における実用化開発への取組み

4.1 概要

高温ガス炉の特長となる“高い固有の安全性”，“小型モジュール炉”，“使用済燃料の柔軟な 処理”は，“地球温暖化対策に貢献する原子力の革新的技術開発ロードマップで言及されている原子力に要請される重要な要件と言うべき，“安全確保”，“投資リスクの低減”，“平和利用の 担保”に合致させることがより容易な選択肢である．

したがって，小型高温ガス炉の研究開発は重 要となるため，当社では，高温ガス炉の小型モジュール化による発電用プラントの実用化及び熱 源利用（核熱利用）に向け，技術開発に取組んでいる．

4.2 小型炉プラント開発への取組み

小型高温ガス炉実用化の技術開発の中で，高効率，コンパクトな熱交換器の開発は代表的キ ー技術の一つである．当社は高温ガス炉の使用環境に適した新型のプレートフィン型熱交換器 の開発を文科省の委託で実施した．

また，小型炉のプラントイメージの構築のために，“安全性”，“経済性”，“社会的受容性”に考慮し，フィジビリティスタディも実施した．以下に，この２つについて概要を記す．

(1) プレートフィン熱交換器の開発)(文部科学省 委託)

以下の高温ガス炉の使用環境に耐え得る高効率，コンパクトな 熱交換器の開発を実施した．

非弾性解析による構造健全性評価のための材料データ整備をはじめとし，高温構造設計手法の整備，伝熱特性試験による除熱性能試験，耐熱合金からなるプレートフィン型熱交換器の 製作性試験（図４に試作モデルを示す）を実施した． その結果，コンパクトなプレートフィン型熱交換器の設計基準案を構築することができ，超細 密フィン構造を有する熱交換器により，熱交換密度 24MW/m3 以上，温度効率 95%を達成し た．また，1m×1m×0.2m の実機規模大の熱交換器を試作により，ステンレス鋼及び耐熱合金 ハステロイの良好なフィン加工性，ロウ付け性も確認することができた．以上より，プレートフィン 型熱交換器実機への見通しを得た．

(2) 小型高温ガス炉のプラント概念 既往技術の活用を図ったミニマム投資．

建設工程の縮減等の要件を加え，電気出力が5万 kW～10 万 kW程度のコンパクトな高温ガス炉プラントのフィジビリティスタディを実施した． その結果，原子炉炉心，蒸気発生器及びヘリウム循環機を一体化することで，設置空間が縮減されたコンパクトな炉のイメージを構築した（図5）．また，原子炉建屋に SC（鋼板コンクリー ト）造概念を取り入れたモジュール化工法を採用することで，建設工程の縮減を実施可能とした．

今後，さらにコンパクトな熱電併用型の小型炉の概念の構築を目指し，研究開発を進めていく予定である．

図4 プレートフィン型熱交換器の試作モデル

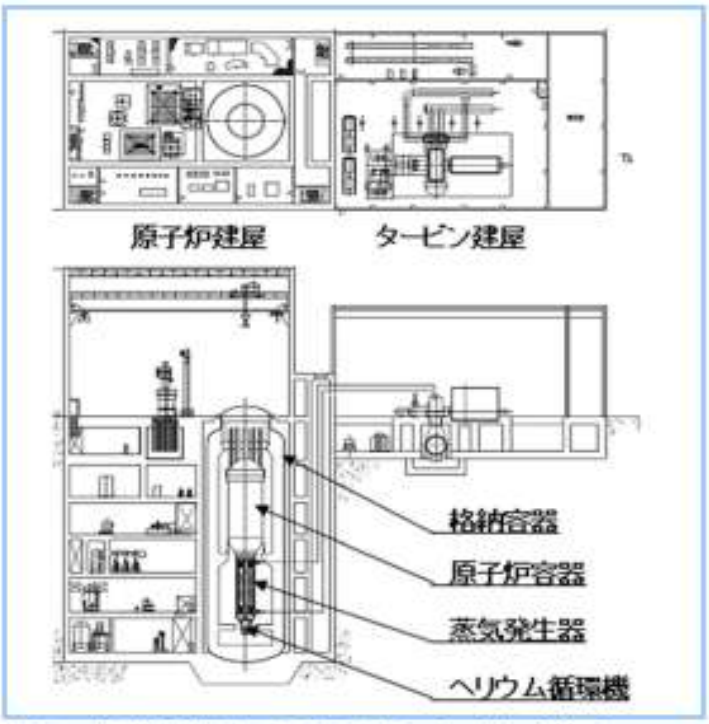


図5 小型高温ガス炉のプラントイメージ図

4.3 核熱利用水素製造システム開発への取組み

(1) 高温用隔離弁の開発

HTTR の核熱を利用した水素製造システムでは，システムの安全性確保のために高温仕様 の隔離弁が必要となる．原子力機構が中心となり，約 900℃の高温ヘリウムガスが流れる耐熱 性隔離弁の実用化に向けて，耐熱弁座の開発，高温構造設計及びスケールモデル試験によ る実証試験が行われた．当社は計画当初より参画し，モデルを試作し，原子力機構が性能試 験を行い，所定の性能を有することが確認された．高温用隔離弁の主な仕様を表５に，その基 本構造を図６に示す．

(2) セラミックス熱交換器の開発

熱化学法水素製造プラント（IS プラント）において，硫酸を SO3 ガス他に分解する硫酸分解器 と，SO3 ガスを SO2 ガスと酸素に分解する SO3 分解器がある．

前者の硫酸分解器は，高温で強 酸（硫酸）環境下に晒されるため，金属材料を使用することができない（硫酸温度は 391℃～ 527 度，ヘリウムガス温度は 688℃）．一方，SO3 分解器は，温度が比較的低く金属材料が使用 できる環境にある．したがって，IS プラントでは，硫酸分解器の成立性が重要課題となる． 硫酸分解器の基本形状は，プレート型熱交換器に比べ，熱伝達率を確保するために大型 化となることを許容し実現性の高い円筒型の熱交換器を採用した．硫酸分解器の構造材は， その使用環境（強酸，高温）からセラミックス材とし，熱特性が良く，耐食性に優れ，機械的強度 が高い SiC を選定した．熱交換の基本概念として硫酸を管内に流す管内流熱交換を選定し， そのセラミックス材熱交換パネルの試作試験を行うことで，多数配管を接続する製作精度及び 大型セラミックス機器の焼成等の製造プロセスを検証し，試作モデルの外観，寸法検査より有 害な欠陥がないことを確認し，所定の寸法で製作できたことを確認し，実機の製作性に見通しを得た（図７に，試作モデル外観を示す）．

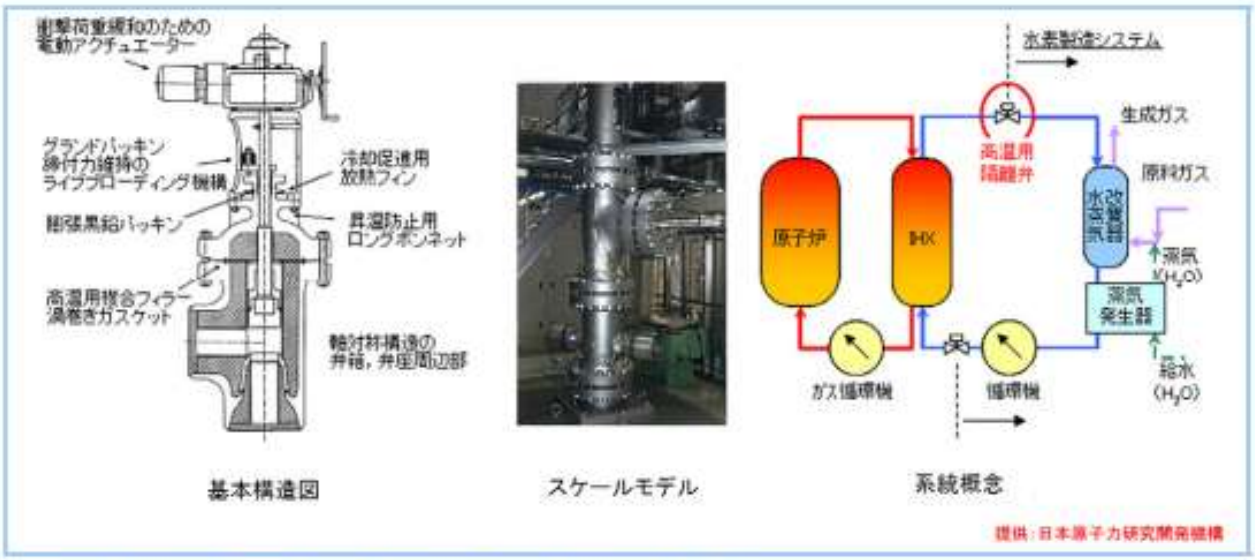


図6 高温用隔離弁の基本構造とスケールモデル[10] [12] [13]

表5 高温用隔離弁の主な設計仕様[12]

作動流体	ヘリウムガス
作動流体の温度	905℃
作動流体の圧力	4.0MPa
作動流体の流量	9070kg/h
弁の呼び径	22B
弁の内径	8B
弁の高さ	3m
材料	
弁箱	SCPH32
弁座シート盛金	ハステロイ X
断熱材	イソウール 1400

図7 IS 用硫酸分解器の試作モデル

5. まとめ

高温ガス炉は，今後の低炭素社会の要求に合致するものとして，その実用化が期待される．
当社としては，HTTR で育んだプラント技術，並びに水素製造プラントで開発した基盤技術を維持，伸長すべく，高温ガス炉の実用化を図るべく研究開発を推進していく．

参考文献

⑴ 原子力委員会，原子力大綱，（2005）
⑵ 日本原子力研究所高温工学試験研究炉開発部，高温工学試験炉の現状，（1999），p14
⑶ 日本原子力研究開発機構，高温工学試験研究炉（HTTR）を用いた研究開発にける最近の進捗と今後の課題、第 10 回原子力委員会定例会議，（2007）
⑷ 日本原子力産業会議，原子力ポケットブック 2003 年版，（2003）
⑸ Kubo S. et al., A pilot test plant of the thermochemical water-splitting iodine-sulfur process, Nucl. Eng. Des., 233, (2004), p.355～362
⑹ Onuki K. et al., STUDY ON THERMOCHEMICAL IODINE-SULFUR CYCLE AT JAERI, ICONE 12-49364, (2004)
⑺ Terada A. et al., DEVELOPMENT PROGRAM OF HYDROGEN PRODUCTION BY THERMO-CHEMICAL WATER SPLITTING IS PROCESS, ICONE 13-50183, (2005)
⑻ 國富一彦他，高温ガス炉ガスタービン発電システム（GTHTR300）の設計研究，日本原子力学会和文論文誌，Vol.1 No.4，(2002) ⑼ 塩沢周策，革新炉としての高温ガス炉の特長 開発現状及び展望，季報エネルギー総合工学，Vol.24 No.1，（2001），p.40～53
⑽（独）日本原子力研究開発機構ＨＰより
⑾ 原子力百科事典，南アフリカ PBMR の進展状況， ATOMICA, 03-03-07-04，（2006）
⑿ 西原哲夫他，HTTR 水素製造システムの高温隔離弁の概念設計及び弁座盛金材料の選定(受託研究)，JAERI-Tech，99-078，(1999)
⒀ 西原哲夫他、HTTR に接続する水素製造システムの系統及び機器設計，JAERI-Tech，2002-101，(2003)
⒁ Minatsuki I. et al., A Development of Ceramics Cylinder Type Sulfuric Acid Decomposer for Thermo-Chemical Iodine-Sulfur Process Pilot Plant, J. Power and Energy Systems, Vol.1 No.1 (2007)
⒂ 原子力委員会，地球温暖化対策に貢献する原子力の革新的技術開発ロードマップ，（2008）
⒃ Kawashima F. et al., HIGH-TEMPERATURE STRENGTH AND INELASTIC BEHAVIOR OF PLATE-FIN STRUCTURES FOR HTGR, SMiRT 18, (2005)
⒄ Tokunaga K. et al., Technology Development of High Efficiency and High Capacity Gas/Gas Heat Exchanger which is Necessary to Practical Application of Gas-cooled Reactor, GLOBAL 2005, (2005)
⒅ 溝上頼賢他，ガス冷却炉の実用化に必須の高性能大容量ガス/ガス熱交換器の技術開発，日本原子力学会 2006 年秋の大会、（2006）
⒆ 三好保行他、ガス冷却炉の実用化に必須の高性能大容量ガス/ガス熱交換器の技術開発⑵，日本原子力学会 2007 年秋の大会、（2007）
⒇ Minatsuki I. et al., A COMPARISON OF DESIGN CHARACTERISTICS BETWEEN PLATE-TYPE AND CYLINDER-TYPE CONFIGURATIONS OF CERAMIC HEAT EXCHANGER FOR HYDROGEN PRODUCTAION, 3rd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, (2006)

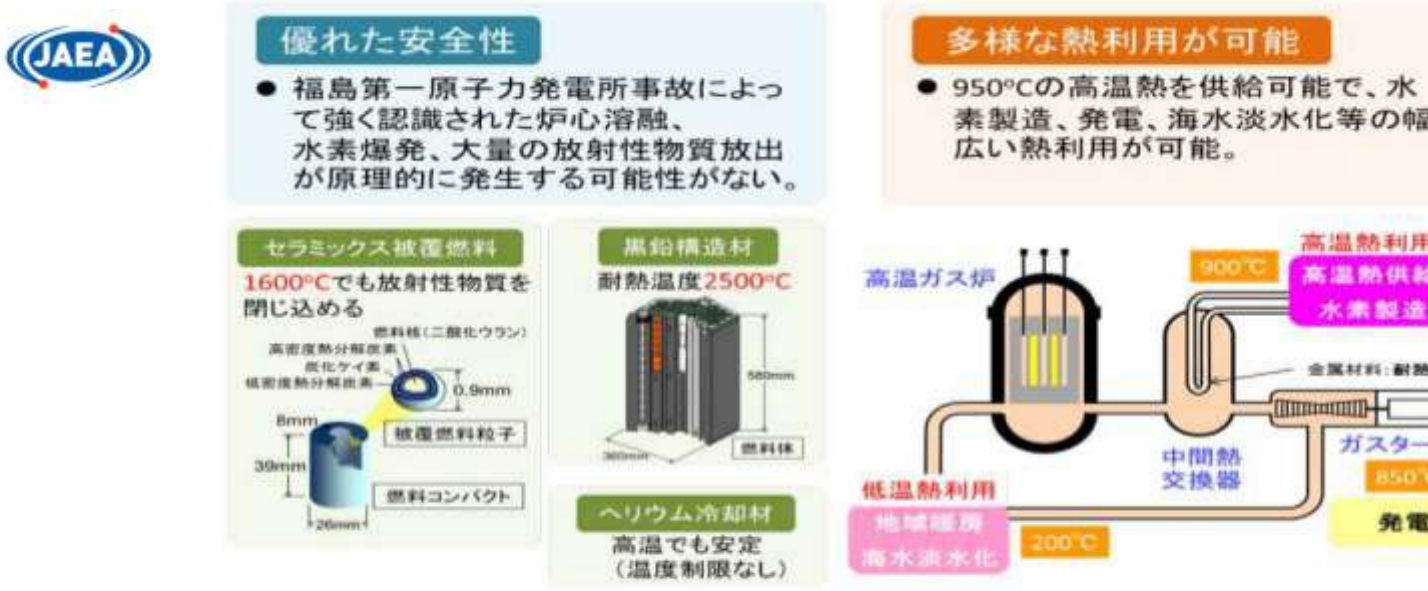


図１　高温ガス炉の特長

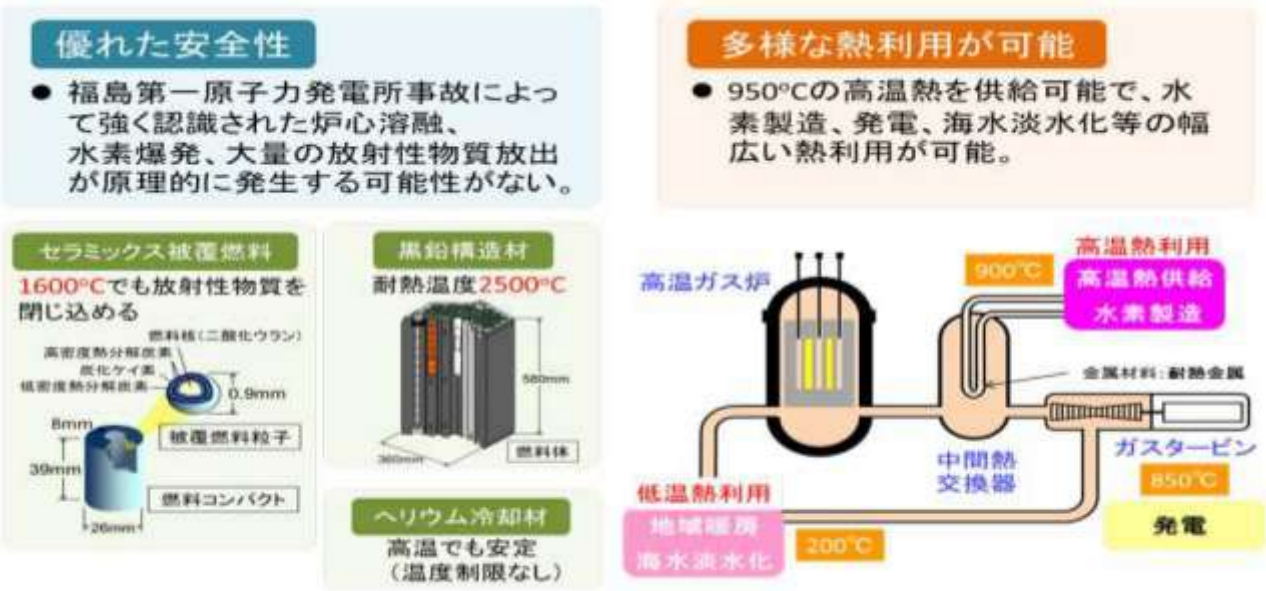


図１　高温ガス炉の特長

平成 31 年 1 月 25 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―

https://www.jaea.go.jp/02/press2018/p19012502/

【発表のポイント】

水素製造のための熱化学法 IS プロセスの研究開発は国際的な競争になっている。我が国では、2016 年 2 月に実用工業材料製の水素製造試験装置による水素製造の試運転に成功した。しかし、機器の腐食や閉塞が見られたことから、これらへの対策が新たな課題となっていた。

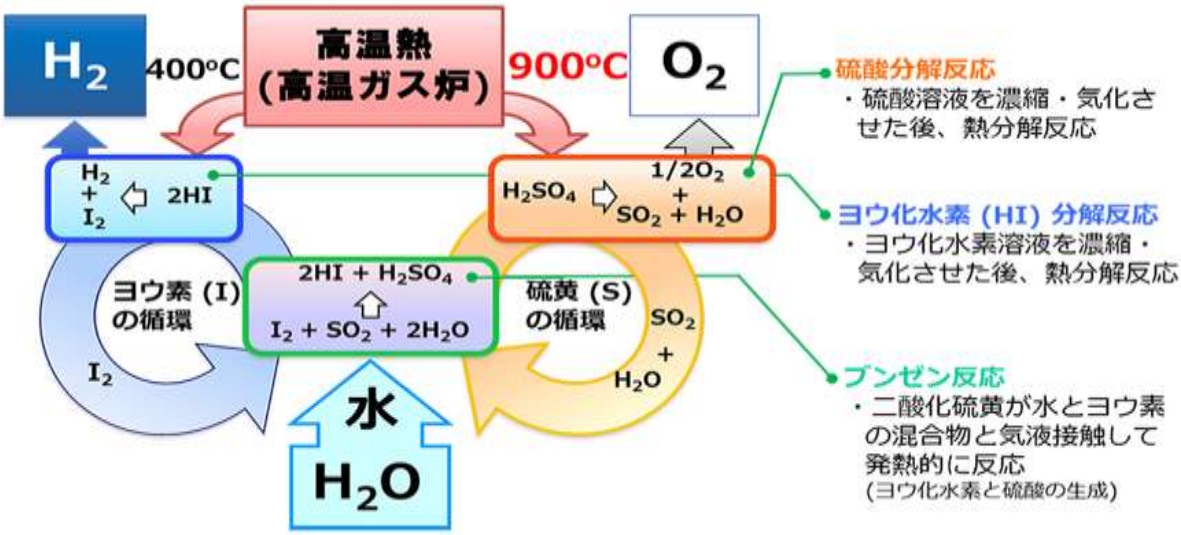
今回の試験では、装置の改良を行い、長時間運転の目安となる 150 時間の連続水素製造に成功した。本試験の成功により工業材料製機器の実用化に見通しをつけ、高温ガス炉へ接続する実用 IS プロセスの完成に向けて大きく前進した。IS プロセスにより水素を安定的に、かつ合理的な価格で供給することで、「水素社会」の構築に大きく貢献することが期待できる。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（理事長　児玉敏雄、以下「原子力機構」という。）では、大洗研究所におい

て、高温ガス炉[1]の熱を利用する熱化学法 IS プロセスによる水からの水素製造技術の研究開発を実施しています。本プロセスは、950℃の高温の熱を供給できる高温ガス炉と組み合わせることで、温暖化の原因となる二酸化炭素を排出することなく、大量の水素を高効率・低コストで製造するシステムを構築することが期待されます。

熱化学法 IS プロセスは、ヨウ素（I）と硫黄（S）を用いた３つの化学反応を組み合わせて水を分解して水素を製造する化学プロセスで、３反応工程（硫酸分解工程、ブンゼン反応工程、ヨウ化水素（HI）分解工程）で構成されます。

IS プロセスでは腐食性のある流体を用いるため、実用化を見据え、３反応工程毎の環境に耐え得る工業材料（金属、セラミックス等）を用いて反応器を開発しました。また、これらの反応器を３反応工程へそれぞれ組み込んだ世界最先端の水素製造試験装置を製作しました。2016 年２月に、この装置を用いて、３反応工程を連結した水素製造の試運転（約 10L/時、８時間）に成功し、実用化に向けた研究開発が大きく前進しました。



IS プロセスの原理

一方で、この試運転及びその後の運転により、ヨウ素の析出による機器の閉塞やヨウ化水素や硫酸などによる腐食が新たな課題として浮き彫りになったことから、これらの課題への対策を、１年半余りかけて徹底的に行いました。

このたび、装置の一連の改良が終了し、３反応工程を連結した水素製造試験を行ったところ、水素発生量 30L/時で 150 時間の安定した連続運転を実現しました。

本水素製造試験装置は 50 時間が１サイクルであり、150 時間（３サイクル分）の長期運転に成功したことで、IS プロセスの実用化に向けて大きく前進したことになります。

この結果は世界で開発が進められている熱化学法 IS プロセスでは初めてのものであり、改めて日本がこの分野のトップランナーであることが示されました。また、工業材料製機器の実用化に見通しをつけたことで、高温ガス炉へ接続する実用 IS プロセスの完成に向けて大きく前進しました。

今後は、運転データをさらに取得して、運転制御性に着目し IS プロセスの自動運転制御など、大量の水素を二酸化炭素の発生なしに安定的に製造できるシステムの実用化に必要な研究開発を進めていきます。さらには、HTTR（高温工学試験研究炉）[2]からの熱を用いて、世界で初めて原子力による水素製造を実証することを目標としています。

【研究開発の背景】

原子力機構では、高温ガス炉の熱を利用する熱化学法 IS プロセスによる水素製造技術の基盤技術の確立を目的とした研究開発を実施しています。

950℃の高温の熱を供給できる高温ガス炉は、高効率発電に加え、水素製造、化学・石油プラントでの熱利用、低温排熱を利用した海水淡水化、地域暖房など、多様かつ高効率の熱利用が期待されています。エネルギー基本計画（2018 年７月閣議決定）においても、「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原子力技術の研究開発を、海外市場の動向を見据えつつ国際協力の下で推進する。」とされています。

水素は次世代エネルギーキャリアとして期待されていますが、現在の一般的な水素製造法である化石燃料を用いた水蒸気改質法では、温暖化ガスである二酸化炭素を排出するという問題があります。また、再生可能エネルギーを用いた水

の電気分解で水素を製造する場合、二酸化炭素は排出されませんが、一般的にコストや安定供給の面での課題が指摘されています。他方、熱化学法 IS プロセスは、これらに変わる新たな水素製造法として注目されています。
このプロセスは、高温の熱を用いて化学反応のサイクルを駆動して水を分解する「熱化学水素製造法」であり、ヨウ素（I）と硫黄（S）を用いることから IS プロセスと呼ばれます。
本プロセスでは、原料水をヨウ素や硫黄の化合物と反応させ、生成するヨウ化水素（HI）及び硫酸（H_2SO_4）に熱を加えて分解し、水素と酸素を製造します。ヨウ素と硫黄はプロセス内で循環するため、環境中に廃棄物を出しません。また、高温ガス炉と組み合わせることで、温暖化の原因となる二酸化炭素を排出することなく、大量の水素を製造することができると期待されます。

熱化学法 IS プロセスによる水素製造試験装置　（3 反応工程で構成）

【得られた成果】

原子力機構では、2004 年に、ガラス製機器の実験室レベルの水素製造試験装置による 1 週間の連続水素製造に世界で初めて成功しました。熱化学法 IS プロセスは、作動流体として極めて腐食性が強い硫酸やヨウ素を、室温から 900℃と広い温度範囲、気液と多様な相状態で取り扱うため、実用化には、ガラス製機器の次段階として、実用工業材料により耐食・耐熱性を持たせた反応器[3)]での試験が必須です。
これらの反応器をそれぞれ、硫酸分解工程、ブンゼン反応工程、HI 分解工程の 3 反応工程へ組み込み、プロセス全系に工業材料（金属、セラミックス等）を用いて反応器、配管に耐熱・耐食性を持たせた世界最先端の水素製造試験装置[4)]を 2013 年度に製作しました。それ以降、プロセスを構成する 3 つの反応工程（硫酸分解工程、ブンゼン反応工程、HI 分解工程）毎の工程別試験を進め、各反応器による分解反応機能（HI 分解反応による水素生成など）やガス化機能（HI ガスの蒸留分離など）等の確認後、2016 年 2 月 16 日～17 日に、3 つの反応工程を連結した水素製造試験装置の試運転（約 10L/時、8 時間）に成功しました。また、プロセス流体として装置内を流動させるヨウ素やヨウ化水素に起因する熱交換器への固体析出防止などが、より安定的な水素製造運転を行う上で重要であることを明らかにしました。
技術検討によって示された課題に対して、品質管理を向上させたガラスライニング（鞘管）の採用による腐食対策や数値解析によるヨウ素が析出しない運転制御範囲の明確化や加熱方法の見直しによる固体析出対策など、1 年半余りをかけて十数項目に亘る改良を一つ一つ進めていき、2019 年 1 月 18 日～25 日に、水素発生量約 30L/時で連続 150 時間の運転を達成し、世界で初めて実用工業材料によって構成した IS プロセス装置による安定かつ長期間の水素製造に成功しました。

【今後の予定】

今後、より長期間かつ安定的に 3 反応工程の連結状態を維持した水素製造を目指し、運転データをさらに取得して、長期的な組成変動を制御するためのデータベースを構築するとともに、IS プロセスの自動制御システムの構築、自動制御運転の確証など、実用化に向けた技術、信頼性の確証をさらに進める計画です。

原子力機構では、HTTR に熱利用施設（水素製造施設とガスタービン発電施設）を接続し、高温ガス炉熱利用システムの総合性能を検証すること、水素製造施設の接続時の安全基準策定、安全基準に適合する設計対策を確立することを最終的な目標としています。

950℃の高温の熱を供給できる高温ガス炉は、熱化学法 IS プロセスを利用した水の熱分解による大量の水素製造を可能とし、将来的に水素を安定的に合理的な価格で供給することで、我が国における「水素社会」の構築に大きく貢献することが期待されます。

【参考資料】

1）高温ガス炉

高温ガス炉は、①冷却材に化学的に不活性なヘリウムガスを用いているため、冷却材が燃料や構造材と化学反応を起こさないこと、②燃料被覆材にセラミックスを用いているため、燃料が 1600℃までの高温に耐え、核分裂生成物（FP）の保持能力に優れていること、③出力密度が低く（軽水炉に比べ１桁程度低い）、炉心構造物に高熱伝導・大熱容量の黒鉛を用いているため、万一の事故に際しても炉心温度の変化が緩やかで、かつ、自然放熱による冷却が可能であることから、燃料の健全性が損なわれる温度に至らないこと等の安全性に優れた原子炉です。また、950℃の高温熱を原子炉から取り出せることから、発電効率に優れるとともに、水素製造等の発電以外での利用等、原子力の利用分野の拡大に役立つ原子炉です。

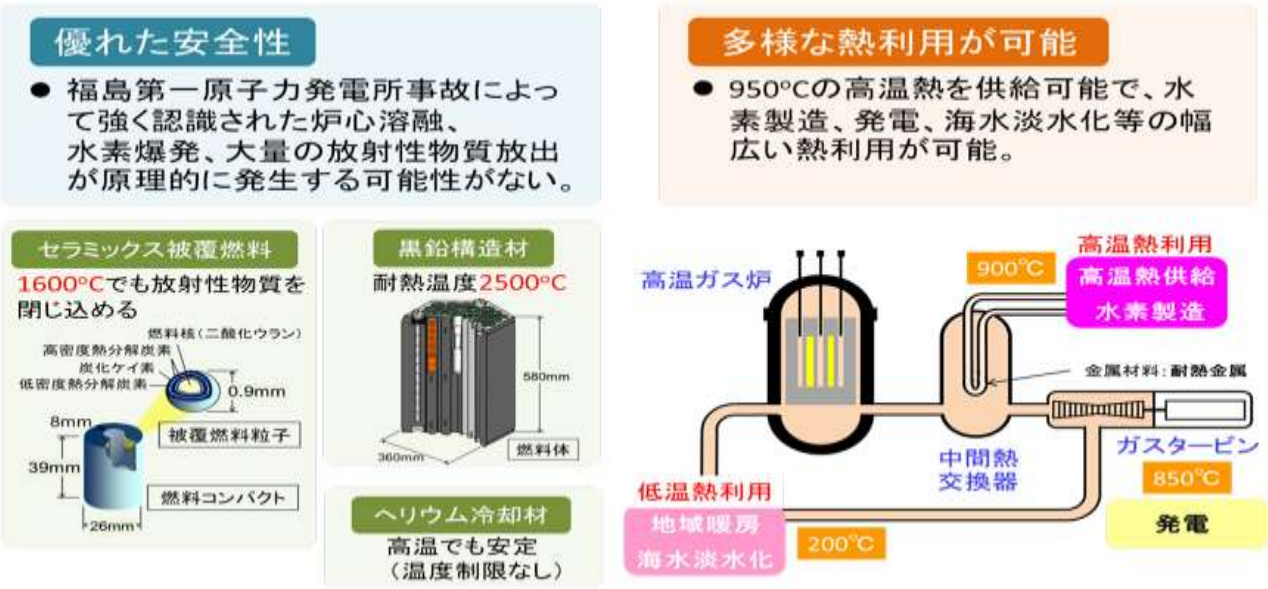


図１　高温ガス炉の特長

2）HTTR（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）で、熱出力 30MW、原子炉出口冷却材最高温度は 950℃です。1998 年 11 月 10 日に初臨界、2001 年 12 月７日に熱出力 30MW 及び原子炉出口冷却材温度 850℃、2004 年４月 19 日に原子炉出口冷却材温度 950℃、2010 年３月 13 日に 950℃、50 日間高温連続運転を達成しました。

HTTR は、現在、試験研究炉の新規制基準への適合性確認の審査を受けており、安全確保を最優先として、早期の運転再開を目指しています。

図２　HTTR（高温工学試験研究炉）

3）耐食耐熱性を有する工業材料製反応器

①硫酸分解工程

金属材料の適用が困難な最も高温（～900℃）の硫酸分解器（酸素を生成）には炭化ケイ素（SiC）セラミックスを主材料とし、SiC 製の管を耐食グラスライニング配管上に固定した簡素な構造ながら、本反応器内で硫酸の蒸発から分解反応までを複合一体化しました。高温域のシール部を持たず、腐食性流体の漏えいの可能性を低減し、また、SiC 内管を通して高温の硫酸分解ガスから低温硫酸へ熱回収する機能を持たせています。

②ブンゼン反応工程

低温域（～100℃）のブンゼン反応器（硫酸と HI を生成）には、ノズル数が多いなどの複雑形状に適用可能で施工性および配管割付が容易などの組み立て性に優れたフッ素樹脂ライニング材を用いました。本反応器に複数ある機能要件（混合、生成、除熱、分離）を、循環ポンプにて反応溶液を外部循環させ、管型反応器（静的混合器により気液の混合を促進）、冷却器、貯槽と、各機能をそれぞれ独立した機器に受け持たせることによって、確実な反応分離操作ができるようにしました。

③ヨウ化水素（HI）分解工程

高温（～400℃）のヨウ化水素（HI）分解器（水素を生成）には、耐熱・耐食合金のニッケル基合金を用い、原料ガスと触媒を均一に接触させ、偏流による反応率低下を低減し、確実な反応操作を狙いとするラジアルフロー・固定層型を適用しました。HI 濃縮器（水素生成のための HI を濃縮して供給）は、陽イオン交換膜を電極で挟み込んだセル構造で、陽極と陰極で生じるヨウ素の酸化還元反応を用いて HI の濃縮を行います。電極材料には、導電性かつ耐食性を有する不浸透黒鉛を用い、処理量の向上を狙いとし、これら膜及び電極を複数積層したスタックを開発しました。

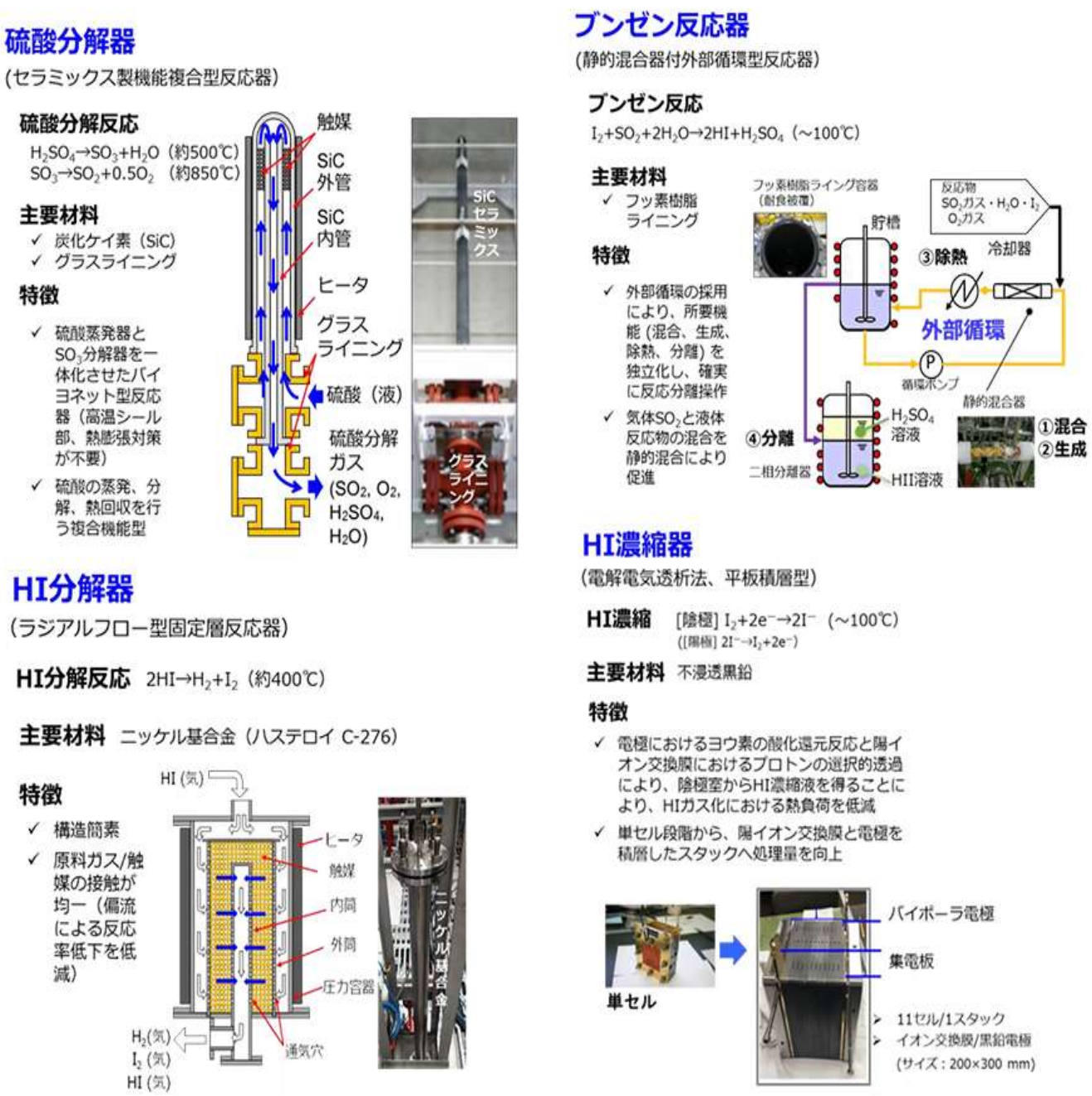


図３　工業材料製反応器の概要

4）工業材料製水素製造試験装置

本水素製造試験装置は、IS プロセスを構成する３反応（硫酸分解工程、ブンゼン反応工程、HI 分解工程）を統合しています。３ 反応工程毎の環境に耐え得る工業材料（金属、セラミックス等）を用いて反応器を開発し、装置の全系に、耐食性、耐熱性を有する工業材料が用いられています。主要材質は、接液部がフッ素樹脂ライニング材、グラスライニング材、SiC セラミックス、不浸透黒鉛、接ガス部がニッケル基合金（ハステロイ C276）、ステンレス（SUS316）です。機器は安全に配慮し全面をパネルで覆った鉄骨製架台に配置し、反応機器への加熱には電気ヒータを用いて、高温ガス炉からのヘリウムガス加熱を模擬しています。

本水素製造試験装置による研究開発は、工業材料製の耐食・耐熱性を有する反応器の開発、 反応器を３反応工程へそれぞれ組み込んだ工業材料製水素製造試験装置の製作、反応工程別試験および３反応工程を連結した水素製造試験装置の試運転まで進捗しています。今後、３反応工程を連結した状態を維持したより安定的な水素製造を目指して当該装置の改良を行い、本格的な試験（運転制御性、長時間運転安定性、機器の耐食性を確証する試験を実施）を行っていきます。

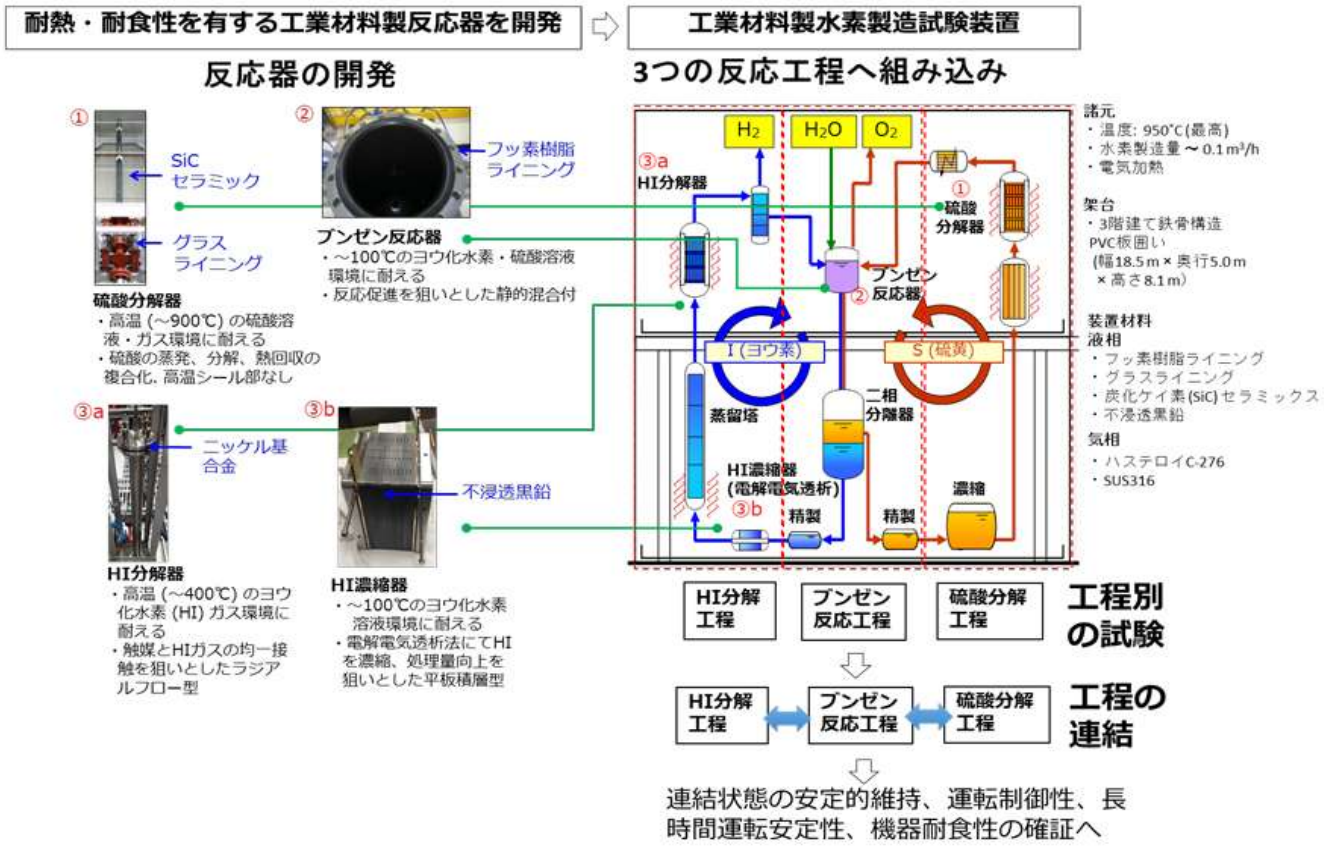


図４　工業材料製水素製造試験装置の概要

原発が水素も量産　10 年ぶりに再稼働した実証炉が秘める力

https://business.nikkei.com/atcl/gen/19/00289/122300022/

日本の官民が原子力発電とグリーン水素の製造を同時にやってのけるハイブリッドプラントの開発に臨んでいる。原子炉から熱を取り出し、主原料の水を化学反応させて水素を生む。

高温ガス炉（HTGR）と呼ばれる次世代炉の１つだ。

水素は製鉄所や化学産業の脱炭素への貢献が期待される。

一体どんなプラントなのか。肝心の安全性はどうなのか。

2021 年、10 年ぶりに再稼働した HTGR の試験研究炉（HTTR）の開発現場からリポートする。

記者が向かった先は穏やかな海岸線が続く茨城県中部の町、大洗町。その海沿いに日本原子力研究開発機構（JAEA）の大洗研究所がある。

「この地下に高温ガス炉が埋設されています」。高温ガス炉研究開発センターの篠崎正幸部長が案内してくれたのは、所内の一角にあるHTTR の建屋だ。１階にはオペレーション室しかない。

原子炉は地下 30m にわたって建造されている。

原子炉出口冷却材温度が 700℃～950℃の黒鉛減速ヘリウム冷却型炉を高温ガス炉（HTGR）という。

また、HTGR のうち、原子炉出口冷却材温度が 950℃以上となる HTGR を超高温ガス炉（VHTR）とも呼ぶこともある。

わが国では日本原子力研究所（現日本原子力研究開発機構）開発機構の高温工学試験研究炉（HTTR）が 2004 年 4 月には原子炉出口冷却材温度 950℃での全出力運転に成功している。

HTGR システムは、炉心構成、（炉心）出力密度、原子炉圧力容器および一次系主要機器に特徴がある。炉心は耐熱性に優れる被覆燃料粒子と黒鉛材料で構成され、ヘリウムガスで冷却され、低出力密度炉心と相まって高度の固有安全性を達成できる。燃料としてウランの他トリウムも実用化されており、平均燃焼度 10 万 MWd/t 以上が得られる。

また、原子炉から得られる高温のヘリウムガス用いた高効率発電のみならず、水素製造等の核熱利用を可能にする唯一の炉型である。