

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 克祐*¹
Katsusuke Shimizu

藤森 浩二*²
Koji Fujimori

皆月 功*³
Isao Minatsuki

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。

*1 原子力事業本部原子力技術部主席技師

*2 原子力事業本部原子力技術部課長

*3 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)

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	二酸化ウラン	二酸化ウラン
(濃縮度)	数%~20%	2%~4%
(被覆材)	セラミックス, 熱分解黒鉛の 多層被覆	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%

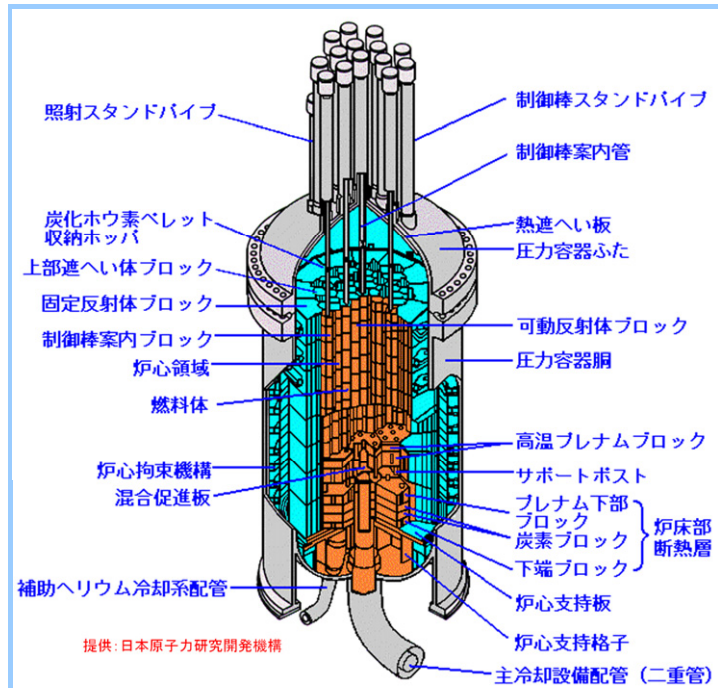


図1 高温ガス炉 HTTR(高温工学試験研究炉)の原子炉構造⁽²⁾

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とができる。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。

(2) 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。

(3) 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⁽³⁾。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CO₂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。

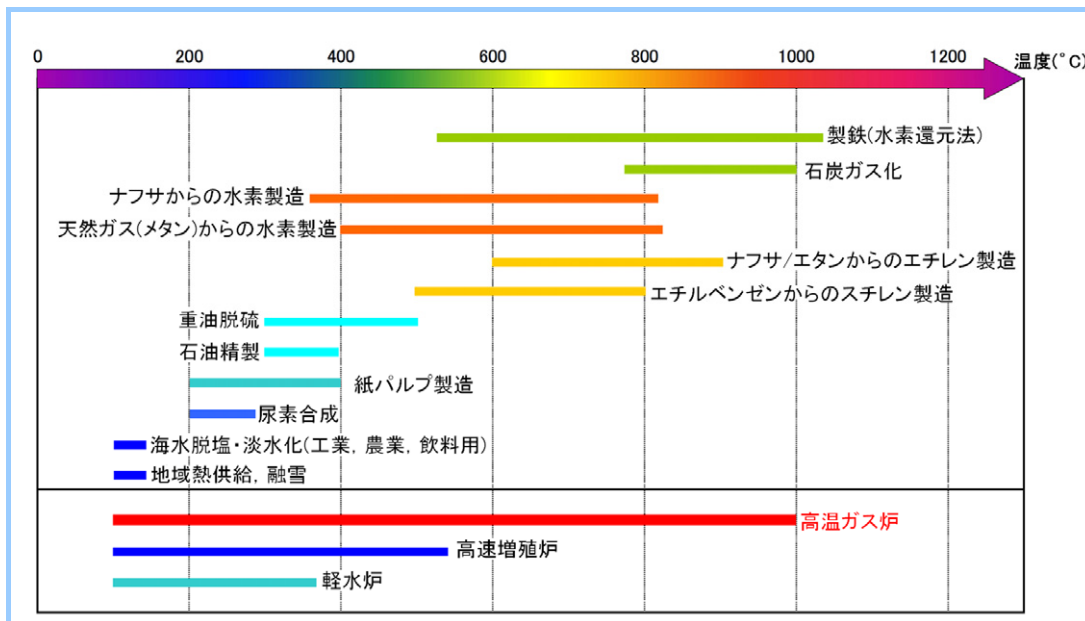


図2 高温ガス炉の供給可能温度範囲と一般産業における利用温度範囲⁽³⁾

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⁽⁴⁾。これらの世界各国における高温ガス炉の開発状況⁽⁴⁾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。1991年に, 国内初の高温工学試験研究炉(HTR: 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°C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⁽⁵⁾⁽⁶⁾。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⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

HTRの経験を生かし, 発電用高温ガス炉としてGTHTTR-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

原子炉名 及び 設置目的	原子炉 出口温度 圧力 熱出力/ 電気出力	1960		1970					1980					1990					2000																					
		61	62	63	64	65	66	67	68	69	71	72	73	74	75	76	77	78	79	81	82	83	84	85	86	87	88	89	91	92	93	94	95	96	97	98	99	01	02	03
ドラゴン炉 (OECD) 研究用実験炉	750°C 2.0MPa 20MWt	△		▼					●					●					●					●																
ピーチ・ ボトム炉 (米国) 発電用実験炉	728°C 2.4MPa 115MWt/ 40MWe	△		▼					●					●					●					●																
フォート・ セント・ ブレイン炉 (米国) 発電用原型炉	728°C 4.9MPa 842MWt/ 330MWe	△		▼					●					●					●					●																
AVR (独) 発電用実験炉	950°C 1.08MPa 46MWt/ 15MWe	△		▼					●					●					●					●																
THTR-300 (独) 発電用原型炉	750°C 3.9MPa 750MWt/ 300MWe	△		▼					●					●					●					●																
HTTR (日本) 試験研究炉	850°C/ 950°C(高温) 4.0MPa 30MWt	△		▼					●					●					●					●																
HTR-10 (中国) 発電用実験炉	700°C/ 950°C(最高) 3.0MPa 10MWt/ 2.5MWe	△		▼					●					●					●					●																

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⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾

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°C
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

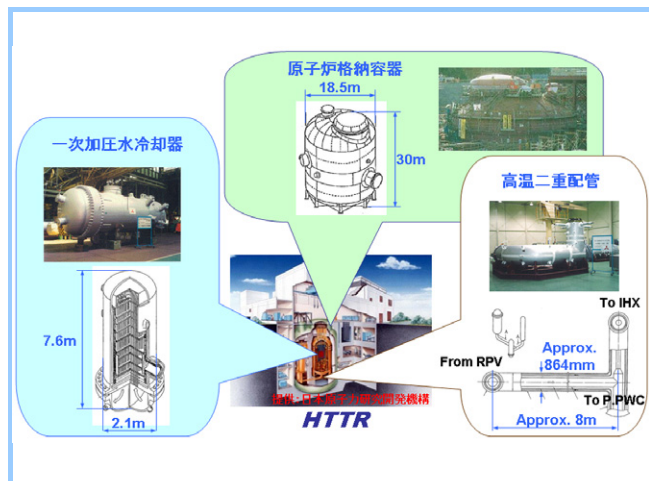


図3 当社が HTTR に納入した主要機器

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⁽¹¹⁾

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, 引き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^{(10) (12) (13)}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レ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(セラミックス)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”⁽¹⁵⁾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，技術開発に取り組んでいる。

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⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾(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 $24\text{MW}/\text{m}^3$ 以上，温度効率 95%を達成した。また， $1\text{m}\times 1\text{m}\times 0.2\text{m}$ 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

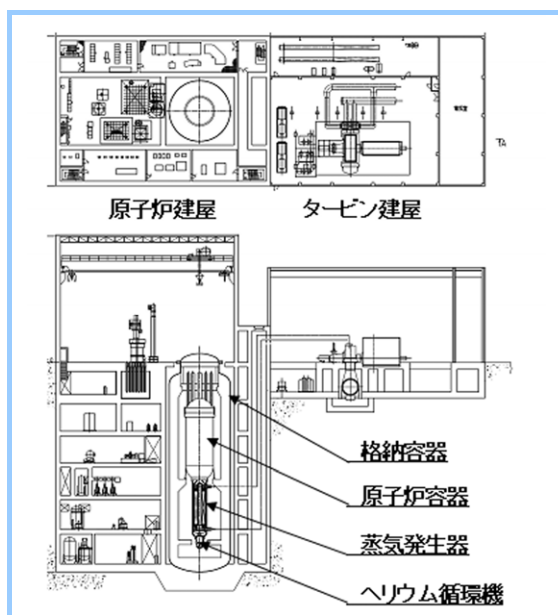


図5 小型高温ガス炉のプラントイメージ図

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^{(10) (12) (13)}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^{(14) (20)}

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、温度が比較的低温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)。

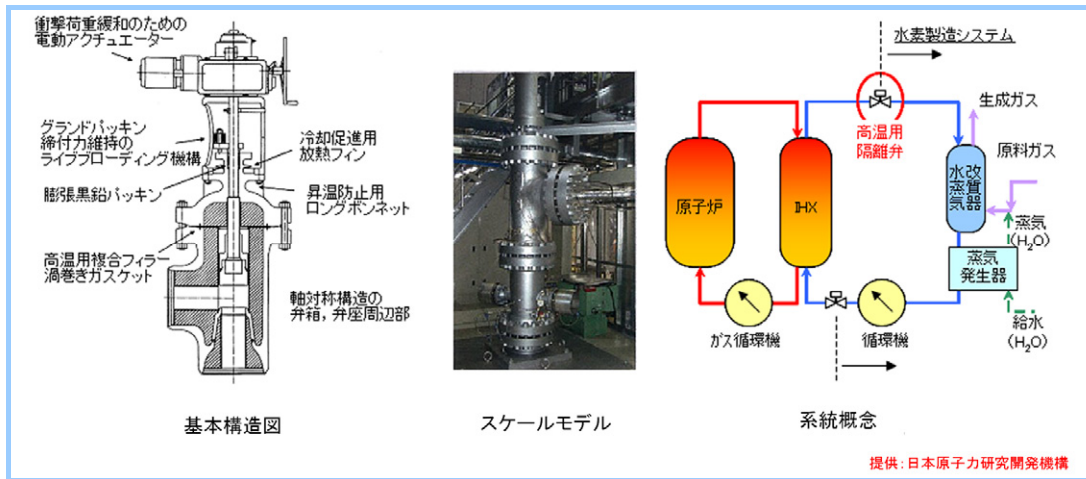


図6 高温用隔離弁の基本構造とスケールモデル^{(10) (12) (13)}

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	インソール 1400

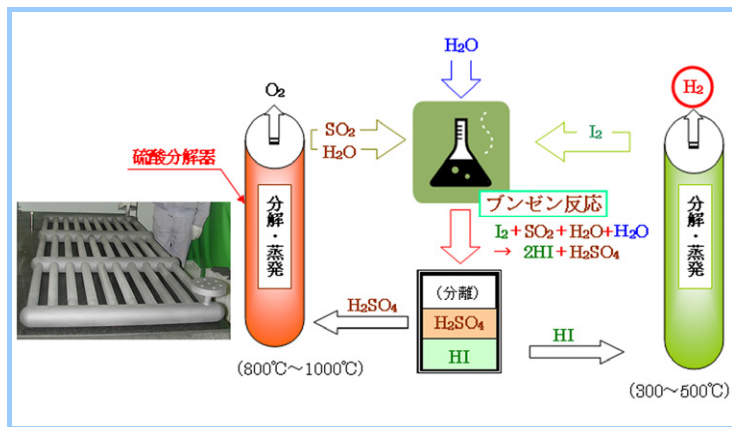


図7 IS用硫酸分解器の試作モデル

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

- (1) 原子力委員会, 原子力大綱, (2005)
- (2) 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
- (3) 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お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)
- (4) 日本原子力産業会議, 原子力ポケットブック 2003 年版, (2003)
- (5) Kubo S. et al., A pilot test plant of the thermochemical water-splitting iodine-sulfur process, Nucl. Eng. Des., 233, (2004), p.355~362
- (6) Onuki K. et al., STUDY ON THERMOCHEMICAL IODINE-SULFUR CYCLE AT JAERI, ICONE 12-49364, (2004)
- (7) Terada A. et al., DEVELOPMENT PROGRAM OF HYDROGEN PRODUCTION BY THERMO-CHEMICAL WATER SPLITTING IS PROCESS, ICONE 13-50183, (2005)
- (8) 國富一彦他, 高温ガス炉ガスタービン発電システム (GTHTTR300) の設計研究, 日本原子力学会和文論文誌, Vol.1 No.4, (2002)
- (9) 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
- (10) (独) 日本原子力研究開発機構HPより
- (11) 原子力百科事典, 南アフリカ PBMR の進展状況, ATOMICA, 03-03-07-04, (2006)
- (12) 西原哲夫他, HTTR 水素製造システムの高圧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)
- (13) 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)
- (14) 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)
- (15) 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)
- (16) Kawashima F. et al., HIGH-TEMPERATURE STRENGTH AND INELASTIC BEHAVIOR OF PLATE-FIN STRUCTURES FOR HTGR, SMiRT 18, (2005)
- (17) 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)
- (18) 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)
- (19) 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(2), 日本原子力学会 2007 年秋の大会, (2007)
- (20) Minatsuki I. et al., A COMPARISON OF DESIGN CHARACTERISTICS BETWEEN PLATE-TYPE AND CYLINDER-TYPE CONFIGURATIONS OF CERAMIC HEAT EXCHANGER FOR HYDROGEN PRODUCTION, 3rd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, (2006)