技術報告

402. HTTR 水素製造システムの系統構成および制御性

西原 哲夫^{1,*}, 清水 明¹, 稲垣 嘉之¹, 谷平 正典²*Flow Scheme and Controllability of the HTTR Hydrogen Production System*

Tetsuo NISHIHARA, Akira SHIMIZU, Yoshiyuki INAGAKI and Masanori TANIHIRA

Fuel cell seems to be one of resolutions for global warming so that large amount of feed hydrogen to fuel cell will be necessary. To meet the hydrogen demand, new hydrogen production system without CO₂ emission will be required.

The High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR) can produce high temperature helium gas that is around 950°C. Hydrogen production using HTGR is now being studied all over the world. The Japan Atomic Energy Research Reactor (JAERI) is planning the demonstration test of hydrogen production using the High Temperature Engineering test Reactor (HTTR). A design study on the steam reforming hydrogen production plant to be connected to the HTTR has been performed.

In this report, interface technology between HTGR and hydrogen production plant is mainly discussed. In addition, safety requirements for hydrogen production plant are described. Flow scheme of the HTTR hydrogen production system is established to achieve stable controllability. Plant simulation analysis shows good performance of start up sequence. Component design of steam reformer and isolation valve for hot helium pipe that are special components in the HTTR hydrogen production system is presented. Heat and mass balance of hydrogen production plant is settled based on parametric survey of hydrogen production rate.

KEYWORDS: HTTR, hydrogen production system, steam reforming, flow scheme, heat and mass balance, reformer, isolation valve, plant simulation analysis

I. はじめに

エネルギー資源の石油依存度の低減, 並びに CO₂ 排出量の抑制の観点から, 新しいエネルギーキャリアとして水素に大きな注目が集まっている。水素を燃料とする燃料電池は, 従来の内燃機関に比べて効率がよく, CO₂ を排出しないことから, 自動車の動力源や分散型電源としての利用が大いに期待されている。

政府の目標に従って, 自動車用500万台, 定置用1,000万kWの燃料電池を導入すると¹⁾, 約390億 m³/yrの水素が必要となる²⁾。わが国の潜在的な水素供給能力は約90億 m³/yrであるため²⁾, 大幅に水素が不足する。したがって, 燃料電池の大量導入には, 燃料となる水素を大量かつ安定に生産・供給する設備が不可欠である。

水素は様々な方法から製造可能である。日本原子力研究所(原研)では, 高温ガス炉から供給される高温のヘリウムガスを熱源として水素を製造するシステムの研究開発を進めている。原研には日本初の高温ガス炉である高温工学試験研究炉(HTTR)があり, 現在, 運転を通して高温ガス炉の開発に必要な各種データを取得している³⁾。そして, 将来的にはヨウ素と硫黄を循環物質とし, 熱化学的に水を

分解するIS(Iodine-Sulfur)プロセスを接続して, 水素製造を実証することを考えている。しかし, ISプロセスは開発段階の技術であり⁴⁾, 現時点でHTTRへ接続することはできない。そこで, 汎用的な水素製造プロセスである天然ガスの水蒸気改質プロセスをHTTRに接続し, ISプロセスに適用可能な運転制御技術や安全技術を開発することを計画している⁵⁾。

本報は水蒸気改質プロセスを接続したHTTR水素製造システムの設計検討の結果を示したものである。まず, HTTR水素製造システムの開発課題を示す。次に, システムの主要系統構成, 並びに本システム特有の機器である水蒸気改質器および高温隔離弁の構造を示す。そして, 定格運転時のヒート・マスバランスを設定し, 起動運転時のプラント動特性解析を基に運転制御特性について検討する。なお, 本研究は文部科学省からの受託研究「核熱利用システム技術開発」により実施されたものである。

II. HTTR 水素製造システムの技術課題

HTTR水素製造システムは, 原子炉に水素製造設備を接続する世界初の原子炉システムである。そして, 安全性および信頼性を確保するため, 以下の技術を解決する必要があると考える。

- (1) 原子炉と水素製造設備の動特性の違いを考慮した運転制御技術
- (2) 原子炉施設の安全機能を確保するための安全技術

¹ 日本原子力研究所(Japan At. Energy Res. Inst.)

² 三菱重工業㈱(Mitsubishi Heavy Industry, Ltd.)

(2003年 3月5日 受理; 2003年 7月23日 査読通過)

* 著者連絡先: Tel. 029-264-8601, Fax. 029-264-8710

E-mail: nishihara@spa.oarai.jaeri.go.jp

1. 運転制御技術

高温ガス炉水素製造システムの実用化のためには、経済性の観点から接続する水素製造設備は一般設備とすべきである。しかし、そのことによりシステム全体の信頼性が低下することは避けたい。そこで、水素製造設備で発生する熱過渡変化が原子炉の運転に影響を及ぼさないことが必要と考える。

著者らは、水素製造の原料として必要な水蒸気を生成する蒸気発生器(SG)を水素製造のための反応器の下流に設置し、反応器で生じる熱過渡変化をSGで緩和することを考えた⁶⁾。第VII章で、HTTR水素製造システムのプラント動特性解析を行い、SGが熱過渡変化の緩和に有効であることを示す。また、HTTR水素製造システムのモックアップ試験装置を用いて本機能の実証試験を行っている⁷⁾。

2. 安全技術

HTTR水素製造システムの安全性を確保するため、すでにHTTRで考慮されている安全対策に加えて、以下の安全対策が必要と考える⁸⁾。

- (1) 2次ヘリウム配管からの放射性物質の放出防止
- (2) 火災爆発事故の影響軽減

(1) 2次ヘリウム配管からの放射性物質の放出防止

水素製造設備は、第IV章に示すように、2次ヘリウム配管を介して中間熱交換器と接続される。そして、2次ヘリウム配管は原子炉格納容器および原子炉建家を貫通して屋外まで引き出される。

原子炉施設では、事故時の放射性物質の格納容器外への放出を防止するため、格納容器を貫通する配管には隔離弁を設置している。しかし、水素製造設備に供給される2次ヘリウムガスは約900℃であり、このような条件で使用できる弁はない。そこで、第V章に示すように、原研では高温ヘリウムガス用の隔離弁の開発を進めている⁹⁾。

また、HTTRの炉心では運転中にトリチウムが生成されている。大部分はヘリウム純化設備で回収されるが、一部が高温で運転している熱交換器の伝熱管を透過して水素中に混入する¹⁰⁾。この水素を燃料電池の燃料等に利用する場合には、トリチウム濃度を十分低減する必要がある。

現在、原子炉施設のクリアランスレベルを参考に水素中トリチウム濃度限度を設定し、この許容値を満足するために必要なヘリウム純化設備の容量を定めた¹⁰⁾。

(2) 火災爆発事故の影響軽減

HTTR水素製造システムでは、原子炉建家の近傍で大量の可燃性物質を取り扱うため、大規模な火災爆発事故を想定した安全設計を行う必要がある。しかし、国内の原子炉施設に適用されている安全基準では、このような事象を想定していない。そこで、新たに大規模な火災爆発事故に対する安全設計方針を定める必要がある。

現在、高圧ガス保安法や外国の原子炉施設で適用されて

いる安全基準を参考に、深層防護の考えに基づく安全設計方針の試案を作成した⁸⁾。また、安全評価では大きな被害を与える爆発に着目し、可燃性物質の漏えい、大気拡散による可燃性ガスの移動、爆発により発生する爆風圧の強度、爆風圧の減衰などを適切に考慮して、機器・構造物に及ぼす影響を評価することを基本方針に定め、評価手法の開発を進めている⁸⁾。

III. HTTR 水素製造システムの概要

HTTRは熱出力30MWの高温ガス炉で、主要スペックはTable 1に示すとおりである。HTTRの主冷却設備は、Fig. 1に示すように、1次加圧水冷却器(PPWC)と中間熱交換器(IHX)が並列に設置されている。PPWCは、単独で運転する時の除熱量は30MWであるが、除熱量10MWのIHXと同時に運転する時は除熱量を20MWに減じる。水素製造設備はIHXを介した2次ヘリウム系に接続することとしており、現在設置されている2次加圧水冷却器は撤去される。このほかのHTTR原子炉施設に関する特徴については、参考文献を参照されたい¹¹⁾。

HTTR水素製造システムは、早期に水素製造設備を接

Table 1 Major specification of the HTTR

Thermal power	30 MW
Coolant	Helium gas
Outlet coolant temperature	
Rated operation	850℃
High temperature test operation	950℃
Inlet coolant temperature	395℃
Primary coolant pressure	4 MPa
Fuel	Low-enriched UO ₂
Fuel element type	Prismatic block
Moderator	Graphite
Plant lifetime	20 years

Fig. 1 HTTR flow scheme

Fig. 2 Equilibrium constant in steam reforming process

続し運転を開始できること、並びに本システムで開発する運転制御技術や安全技術が汎用的であることが望ましい。そこで、成熟した水素製造技術で設計情報が容易に入手でき、IS プロセスとシステム構成が類似で運転制御方法に汎用性がある⁶⁾、天然ガスの水蒸気改質プロセスを HTTR に接続することとした。

水蒸気改質プロセスは天然ガスと水蒸気を原料として、以下の反応により水素を製造する。

ここで、(1)式は水蒸気改質反応、(2)式はシフト反応である。水蒸気改質反応は吸熱反応で、メタンの場合、反応熱は 206 kJ/mol である。一方、シフト反応は発熱反応で、反応熱は 41 kJ/mol である。

これらの化学反応の平衡定数は Fig. 2 のような温度依

存性を示す。水蒸気改質反応は 620°C 以上で (1) 式の平衡定数が 1 を超え、メタンから水素への反応が促進される。そのため、水蒸気改質プロセスでは反応温度をできる限り高温にすることが望ましい。

IV. 系 統 構 成

HTTR 水素製造システムの主系統構成を Fig. 3 に示す。水蒸気改質プロセスでは改質反応のほかに、原料ガス(水蒸気と天然ガスの混合ガス)の予熱、水蒸気の生成に熱を必要とする。そこで、原子炉側から供給される 2 次ヘリウムガスに加えて、改質反応で高温となっている改質ガス(改質反応によって生成されるガス)の熱も有効に利用できるように系統構成を定めた。

2 次ヘリウムガスは、高温の熱を必要とする水蒸気改質器(SR)および蒸気過熱器(SH)、並びに SR で発生する熱過渡変化を緩和する蒸気発生器(SG)に熱を供給する。

SG を出た 2 次ヘリウムガスの熱を必要とする設備はないが、中間熱交換器(IHX) 2 次ヘリウム出口温度を設置許可で認められている上限温度 905°C にする場合、IHX の設計仕様から 2 次ヘリウム入口温度を 150°C としなければ 10 MW の除熱を行えない。そこで、SG 下流にヘリウム冷却器を設置し、2 次ヘリウムガスの冷却を行う。そして、2 次ヘリウムガスはヘリウム循環機を通して IHX に戻る。

一方、改質ガスの熱は SR に供給する原料ガスと SG に供給する給水の予熱に利用する。改質ガスは水素のほか、未反応のメタンおよび水蒸気、反応副生物の CO および CO₂ が含まれている。一般産業プラントでは、CO を水素に変換するシフト反応器や水素の純度を高める精製設備が設置される。しかし、本システムでは、高純度水素を製造・供給する計画はないため、セパレータで気液分離を行ったのち、ガス成分はフレアスタックで燃焼処理し、凝縮

Fig. 3 Flow scheme of HTTR hydrogen production system

水は回収して給水として再利用する。

本システムでは、SRの除熱量変化時に発生する2次ヘリウムガスの温度変化をSGで緩和し、IHX入口2次ヘリウム温度を所定の値に制御することが技術課題となっている。例えば、SRの除熱量低下に伴い、SG入口2次ヘリウム温度が上昇すると、蒸気発生量が増加する。このとき、SGの水位を一定に保つためには給水量を増加しなければならない。そこで、本システムでは余剰蒸気を放熱器で凝縮し、SGへ再循環することにより、大容量の給水設備を不用とする設計を採用した。なお、放熱器は定格時の蒸気圧力制御にも利用することとしている。

V. 主要機器の構造検討

水蒸気改質プロセスは一般産業界で広く利用されているプロセスであり、大部分の機器は既存技術に基づいて設計することができる。そこで本章では、HTTR水素製造システム特有の機器である水蒸気改質器および高温隔離弁の構造上の特徴を示す。

1. 水蒸気改質器 (SR)

一般産業プラントでは、化石燃料の燃焼ガスを熱源とし、その燃焼ガスは大気に放出できることから、大規模プラントではファーネス型の改質炉¹²⁾を採用している。一方、HTTR水素製造システムでは、熱源のヘリウムガスが高圧であり、高圧を保持したままIHXに戻す必要があるため、圧力を保持できる熱交換器型の改質器が必要となる。そこで、熱交換器の特徴を生かして効率的に原料ガスを加熱し、水素を製造できるようにSRの構造検討を行い、Fig. 4に示す基本構造を定めた。

SRでは、原料ガスを約800℃まで昇温して、改質反応

Fig. 4 Steam reformer

により水素を製造する。そして、SRを出た改質ガスにより原料ガスおよび給水の予熱を行うが、必要な熱量を考慮すると800℃でSRを出す必要はない。そこで、SR内部で改質ガスと原料ガスの熱交換ができるバイオネット型¹³⁾の反応管を採用する。また、本反応管は低温部のみを管板で固定するので、高温運転時の反応管の熱膨張を拘束せず、熱応力を低減することができる。

SRの伝熱形態は強制対流熱伝達であるので、反応管の外周にガイド管を取り付け、ヘリウムガスの流速を高めて伝熱を促進し、反応管長さを短縮する。

改質器を流れるヘリウムガスは高温であることから、容器内側に断熱材を設置して容器の温度上昇を抑制する。

SR内のガスの流れは以下の通りである。ヘリウムガスは容器下部から供給され、反応管とガイド管の間隙を上向きに流れて容器上部から出る。原料ガスは容器上部から供給され、反応管と内管の間隙を下向きに流れる。そして、反応管先端部で反転して内管を上向きに流れ、容器上部のヘッダーでまとめられて容器外部に出る。

2. 高温隔離弁

格納容器を貫通する2次ヘリウム配管は、高温のヘリウムガスを水素製造設備に供給する高温配管と、熱を利用した後のヘリウムガスをIHXに戻す低温配管がある。このうち、高温配管に設置する隔離弁(高温隔離弁)は約900℃のヘリウムガスが流れるため、既存の弁を使用できない。そこで、高温隔離弁の開発を行うこととし、Fig. 5に示す構造概念を定めた⁹⁾。

まず、弁箱の内側には断熱材を設置して弁箱の温度上昇を抑制する。弁体は高温のヘリウムガスと常時接しているため、弁体および弁棒は高温となる。その結果、弁棒の熱伝導によりグラント部の温度も上昇するおそれがある。そこで、グラント部には耐熱性に優れた黒鉛膨張パッキンを使用するとともに、パッキンの締付力を維持するためにラ

Fig. 5 Isolation valve for hot helium pipe

イブローディング機構¹⁴⁾を設置する。

一般に、弁座および弁体の表面には高硬度の金属を盛金して、弁締切時にシール面の変形を防止しているが、高温隔離弁のシール面は高温であることから既存の盛金材料が適用できない。そこで、汎用的な盛金材料であるステライト No. 6 に Cr_3C_2 を 30 wt% 添加し、高温特性を向上させた材料を開発し¹⁵⁾、高温隔離弁で使用することにした。

現在、盛金材料の高温特性を確認する材料試験を終了し、高温隔離弁のモックアップ試験に着手した。

VI. ヒート・マスバランス

HTTR 水素製造システムの定格運転時のヒート・マスバランスを設定するに当たり、Table 2 に示す境界条件を設定した。

ヘリウム温度に関しては以下のとおりである。

IHX 出口 2 次ヘリウム温度は 905°C であるが、配管からの放熱により若干温度が低下して 880°C で SR に入る。その後、SR、SH、SG の順で熱を利用し、150°C で IHX に戻る。

SG 出口ヘリウム温度は SG の保有水温度、すなわち、蒸気圧力に依存する。ところで、SR に供給する原料ガス圧力は、SR 反応管が破損した時に 2 次ヘリウム圧力より低下しないように、2 次ヘリウム圧力より高圧の 4.3 MPa に設定する。さらに、SG 出口蒸気圧力は原料ガス圧力より高圧の 4.9 MPa に設定する。このとき、SG の保有水温度は 264°C となるので、SG 出口ヘリウム温度は 275°C に設定する。なお、ヘリウム冷却器出口ヘリウム温度はヘリウム循環器からの入熱を考慮し、かつ、IHX 入口で 150°C となるように 132°C まで冷却する。

原料ガス、改質ガス等の条件は以下のとおりである。

SG で生成した蒸気は SH で 400°C まで過熱し、常温の天然ガスと混合して原料ガス予熱器に供給する。そして、原料ガス予熱器で 450°C まで昇温した後に SR に供給し、800°C まで昇温する。給水予熱器では、常温の水を 190°C まで予熱し、SG に供給する。原料ガスおよび給水の予熱に必要な熱量を考慮して SR 出口改質ガス温度を 580°C に設定する。なお、水蒸気ブロー量および機器の熱損失とし

て水蒸気流量および熱交換量の 5% を考慮した。

Table 2 を境界条件とし、SR 出口ヘリウム温度、並びに原料ガス中の水蒸気と天然ガス中の炭素量の比 (S/C) をパラメータとして水蒸気流量、天然ガス流量および水素製造量を計算した。その結果を Fig. 6 に示す。

SR 出口ヘリウム温度を低くすると改質反応で利用できる熱量が増加するので、水素製造量が増える。反面、SH および SG で使用できる熱量は減少するので、SR に供給可能な水蒸気流量は点線のように減少する。また、S/C を大きくすると少ない天然ガス流量で多くの水素を製造できるが、必要な水蒸気流量は増加する。今回のサーベイ範囲では、SR に供給可能な水蒸気流量 (点線) より上に水蒸気流量がプロットされている S/C=4.0 および 3.5 の一部に必要な水蒸気流量が不足し、マスバランスが成立しない。

一方、S/C=3.0 の場合、天然ガス流量は多くなり、運転コストの増大につながる。そこで、HTTR 水素製造システムでは少ない天然ガス流量で多くの水素を製造できる S/C=3.5 を採用する。

Fig. 6 から SR 出口ヘリウム温度 585°C の場合、水蒸気流量がわずかに不足した。そこで、原料ガス流量および水

Fig. 6 Analytical survey on hydrogen production rate

Table 2 Boundary condition for mass balance analysis

Helium gas temperature SR inlet	880°C
Helium gas temperature SG outlet	275°C
Process gas temperature at SR	
Feed gas temperature	450°C
Reaction temperature	800°C
Reformed gas temperature	580°C
Steam temperature SH outlet	400°C
Steam temperature SG outlet	264°C
SG feed water temperature	190°C
Steam blow rate	5% of steam flow rate
Heat loss at each equipment	5%

Fig. 7 Heat and mass balance of hydrogen production plant at steady state condition

Table 3 Gas compositions in steam reformer

	Inlet	Outlet
Flow rate (Nm ³ /h)	8,683	11,236
Composition (mol%)		
CH ₄	17.78	6.35
C ₂ H ₆	1.17	—
C ₃ H ₈	0.58	—
C ₄ H ₁₀	0.26	—
C ₅ H ₁₂	0.008	—
H ₂ O	80.21	44.50
H ₂	—	37.79
CO	—	5.23
CO ₂	—	6.13

蒸気流量を若干減量してマスバランスを再設定し、天然ガス流量 1,718 Nm³/h (1,400 kg/h)、水蒸気流量 6,965 Nm³/h (5,612 kg/h) とした。このとき、SR 出口における水素流量は 4,246 Nm³/h (382 kg/h)、CO 流量は 587 Nm³/h (734 kg/h) であり、SR 出入口ガス組成は Table 3 のとおりである。この条件で設定した水素製造設備の定格時のヒート・マスバランスを Fig. 7 に示す。

なお、シフト反応により CO から水素を製造すれば、本システムの水素製造能力は約 4,830 Nm³/h となる。

VII. 起動時のプラント動特性

HTTR 水素製造システムの計画起動曲線を Fig. 8 に示す。

改質反応は、Fig. 2 に示すように、温度上昇に伴い指数関数的に反応が進行するため、反応に必要な熱も急速に増加する。一方、HTTR では、出力30%から定格状態まで IHX 入口 1 次ヘリウム温度は約 15°C/h で上昇し、これに

Fig. 8 Start-up sequence of HTTR hydrogen production system

比例して 2 次ヘリウム温度も上昇する。IHX 入口 2 次ヘリウム温度は定格時に 150°C になるように約 2°C/h で上昇するが、これが起動曲線からずれると IHX 出口 1 次ヘリウム温度が変化して、原子炉の運転に影響を与えることとなる。

水蒸気改質プロセス側では、起動前は窒素ガスを充填しており、原料ガスの供給が開始されるまで窒素ガスを循環して SR での除熱を行う。2 次ヘリウム温度の上昇に伴い、

Fig. 9 Plant simulation analysis at start-up condition

45時間後に SG の蒸気圧力が定格に達する。そして、SR 入口 2 次ヘリウム温度が約 700°C になる 55 時間後から SR への蒸気供給を開始する。そして、その 15 分後に天然ガスの供給を開始する。蒸気は 5 時間、天然ガスは 15 時間かけて定格量まで増加させるとともに、窒素ガス循環量も 5 時間かけてゼロにする。

この手順に従って起動運転したときに IHX 入口 2 次ヘリウム温度が大きく変化しないことを確認するため、熱流体解析コード ASURA¹⁶⁾を用いてプラント動特性解析を実施した。HTTR の出力 30% 以降の IHX 出口 2 次ヘリウム温度、原料ガス流量および窒素ガス流量を入力条件として、各部のヘリウム温度および SG 出口蒸気圧力の変化を求めた結果を Fig. 9 に示す。

水蒸気および天然ガスの供給開始により、SR で改質反応が起こり、SR 出口ヘリウム温度が大幅に低下したが、SG 出口ヘリウム温度はほとんど変化しない。そして、ヘリウム冷却器の温度制御機能により IHX 入口 2 次ヘリウム温度は計画曲線に従って上昇する。

一方、蒸気圧力は SR への蒸気流量が定格となる 60 時間近傍で SG の蒸気生成量が僅かに不足し、一時的に低下した。このため、SG 出口ヘリウム温度が僅かに変化した。しかし、圧力は徐々に回復し、68 時間後には定格に復帰した。なお、62 時間の時点で発生している圧力変動は圧力制御弁の切替えに伴い発生したものである。

これらの結果から、SR 出口ヘリウム温度や SG 蒸気圧力が変化しても SG 出口ヘリウム温度の変化は緩和され、ヘリウム冷却器の温度制御機能とあいまって IHX 入口 2

次ヘリウム温度は所定の値に制御できることが確認できた。したがって、起動運転時に発生する熱過渡変化は SG により緩和され原子炉の運転に影響を与えない。

VIII. まとめ

高温ガス炉は熱源から CO₂ を排出せずに高温のヘリウムガスを供給できることから、水素製造に適した原子炉といえる。日本原子力研究所では、高温ガス炉と水素製造設備の接続技術の確立を目的として高温工学試験研究炉 (HTTR) 水素製造システムの研究開発を進めている。

本報では、まず HTTR 水素製造システムの開発課題として、運転制御技術および安全技術の確立があることを示した。そして、安定な制御性を確保し、核熱を有効利用する水素製造設備の系統構成を定め、本システム特有の機器である水蒸気改質器および高温隔離弁の構造概念を示した。

原料ガス流量についてパラメータサーベイを行い、ヒート・マスバランスを設定し、水素 4,246 Nm³/h を製造する能力があることを示した。

最後に、起動時の計画運転曲線を示し、この方法に従って運転した時のプラント動特性解析を実施した。その結果、蒸気発生器 (SG) による熱過渡変化の緩和機能が有効に作用し、中間熱交換器 (IHX) 入口 2 次ヘリウム温度は計画起動曲線に従って制御でき、原子炉の運転に影響を与えないことが確認できた。

現在、HTTR 水素製造システムの早期実現に向けて、安全設計方針の策定や安全解析を進めている。

— 参考文献 —

- 1) 燃料電池実用化戦略研究会報告, 燃料電池実用化戦略研究会, (2001).
- 2) 水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET) 第 II 期研究開発タスク 1 システム評価に関する調査・研究, NEDO-WE-NET-0001, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, (2001).
- 3) 藤川正剛, 大久保 実, 中沢利雄, 他, “HTTR (高温工学試験研究炉) の出力上昇試験,” 原子力と文論文誌, 1[4], 361 (2002).
- 4) K. Onuki, H. Nakajima, S. Kubo, *et al.*, “Thermochemical hydrogen production by iodine sulfur cycle,” *Proc. 14th World Hydrogen Energy Conf.*, Montreal, Canada, June 9-13 2002, (2002).
- 5) 西原哲夫, 清水 明, 谷平正典, 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, 日本原子力研究所, (2003).
- 6) 羽田一彦, 柴田大受, 西原哲夫, 他, “高温ガス炉水素製造システムの汎用性を有する安定な制御設計概念,” 原子力誌, 38[10], 834 (1996).
- 7) H. Ohashi, Y. Inaba, T. Nishihara, *et al.*, “Performance test results of mock-up test facility of HTTR hydrogen production system,” *Proc. ICONE 11*, Tokyo, Japan, Apr. 20-23, 2003, ICON-36059 (2003).
- 8) 西原哲夫, 羽田一彦, 塩沢周策, 高温ガス炉水素製造システムの安全設計の考え方の提案 (火災爆発事故対策を中心に),

- JAERI-Tech 97-022, 日本原子力研究所, (1997).
- 9) 西原哲夫, 岩月 仁, 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, JAERI-Tech 99-078, 日本原子力研究所, (1999).
 - 10) 西原哲夫, 羽田一彦, “高温ガス炉水素製造システムの製品水素へのトリチウム移行量評価,” 原子力誌, **41**[5], 571 (1999).
 - 11) 高温工学試験研究の現状, 日本原子力研究所, (1998).
 - 12) 五十嵐 哲, “水蒸気改質による水素製造プロセス,” 化学工学, **58**[11], 861 (1994).
 - 13) 尾花英朗, 熱交換器設計ハンドブック, 工学図書, 66 (1994).
 - 14) 実用新案第2514208号, グランドパッキン用押圧装置, 特許庁, (1996).
 - 15) 柳 明裕, 西原哲夫, 谷平正典, 他, “HTTR 水素製造システム高圧隔離弁用盛金材料の開発,” 原子力学会「2003春の年会」要旨集, J49, (2003).
 - 16) 藤本 望, 中川繁昭, 露崎典平, 他, 高温工学試験研究炉用制御動特性解析コード ASURA の検証解析, JAERI-M 89-195, 日本原子力研究所, (1989).
-