

高温ガス炉に接続する水素製造設備の動特性解析コードの開発 Development of Dynamic Analysis Code for Hydrogen Production System Coupling with HTTR

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門
核熱応用工学ユニット コージェネレーション高温ガス炉設計評価グループ
佐藤 博之

日本原子力研究開発機構（原子力機構）は文部科学省から「核熱利用システム技術開発」を受託し、その中でHTTRと水蒸気改質法による水素製造設備との接続について検討を行った。HTTRに接続する水素製造設備は、原子炉2次冷却系の一部を構成し、起動停止時、通常運転時における水素製造設備で発生した負荷変動は、原子炉冷却材温度の変動を引き起こし、その結果原子炉の運転に影響を与える。本システムの安全評価においては、水素製造設備に起因する負荷変動によるシステムの過渡挙動を把握するための動特性解析コードが必要である。そこで、HTTRに接続する水素製造システムの起動停止、並びに運転中の異常な過渡変化時の動特性解析を行う解析コードN-HYPAC(Nuclear Hydrogen Production Analysis Code)を開発した。本コードは、水素製造システムの静定状態（通常運転時）及び動的状態（起動、停止及び異常時等の過渡変化時）における熱物質収支及び制御系の特性を解析することを目的としたもので、中間熱交換器（以下、「IHX」と呼ぶ）から下流の2次ヘリウムガス系、プロセスガス系をモデル化した。

本報は、動特性解析コードN-HYPACの概要および解析結果についてまとめたものである。

1. はじめに

高温ガス炉は、冷却材にヘリウムガス、主要構造材並びに減速材に黒鉛を用いることにより、1000℃近い原子炉出口冷却材温度を達成することができるため、発電のほか、水素製造、化学工業の熱源等、多用途にわたる利用が可能となる。特に水素は、近年の燃料電池自動車の実用化に向けての開発研究の高まりに見られるように、近い将来において需要の急増が予想される。しかし、自然界において単独で存在する水素はごく少量であり、ほとんどが水や化石燃料等の化合物の状態が存在していることから、水素製造には発電と同様にエネルギーを必要とする。したがって、将来予想される水素需要に対しては水素製造

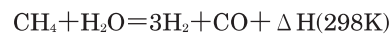
に必要な大量のエネルギーを環境への負荷をかけずに供給することが重要となる。高温ガス炉を水素製造の熱源とする水素製造システムは化石燃料を使わないことから、CO₂の排出が少ないため、将来の水素製造システムとして有望である。

日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」と呼ぶ）では、将来の水素利用社会への貢献を目指して高温ガス炉水素製造システムの研究開発を進めている¹⁾。高温ガス炉に係わる原子炉技術では、国内唯一の高温ガス炉である高温工学試験研究炉HTTR(High Temperature Engineering Test Reactor)を利用して2004年4月に世界で初めて原子炉出口冷却材温度950℃の核熱を炉外に取り出す

ことに成功している²⁾。また、水素製造技術においては、二酸化炭素を排出することなく核熱を用いて水から水素を製造する、熱化学法ISプロセスの研究開発を進め、毎時30リッター規模で一週間の連続水素製造を達成している³⁾。これらの研究開発の最終段階では、HTTRを用いた水素製造の実証試験を計画している。HTTRと水素製造設備の接続に当たって、水素製造設備の負荷変動に起因する熱外乱を緩和して原子炉の運転を維持する制御技術、ヘリウムガスおよび水素製造設備の過渡挙動を評価するための動特性解析コードの開発等が重要な課題である。そこで、高温ガス炉から供給されるヘリウムガス及び水素製造設備の過渡挙動を解析するための動特性解析コードN-HYPACの開発を行った。本解析コードでは、高温ガス炉に接続する水素製造システムの静的状態（定常運転時）及び動的状態（起動及び停止、異常時の過渡変化）における熱物質収支（ヘリウムガス、プロセスガス、構造物等の温度分布、ヘリウムガス及びヘリウムガスの質量、圧力分布等）及び制御系の特性を解析することができる。本報告書は、本解析コードの解析モデルおよび解析結果についてまとめたものである。

2. 高温ガス炉に接続する水素製造設備の概要

図1にHTTRと天然ガスの水蒸気改質法による水素製造設備とを接続したシステム（以下、「水素製造システム」と呼ぶ）の系統図を示す。水素製造システムは原子炉、中間熱交換器、水素製造設備から構成され、原子炉と中間熱交換器の間を1次ヘリウムガス、中間熱交換器と水素製造設備との間を2次ヘリウムガスが循環している。原子炉で950℃に加熱された1次ヘリウムガスは、中間熱交換器で2次ヘリウムガスと熱交換し（熱交換量10MW）、2次ヘリウムガスは水素製造設備の化学反応器等の熱源として供給される。水素製造設備は以下に示す水蒸気改質反応により、原料ガス（天然ガス）と水蒸気を反応させて水素を製造するための水蒸気改質器、水蒸気改質器に原料を供給するための原料ガス供給設備および水蒸気供給設備、起動および停止時に水蒸気改質器に窒素ガスを供給するための不活性ガス供給設備、水蒸気改質器で製造された生成ガス（水素、二酸化炭素、一酸化炭素など）を燃焼処分するための後処理設備で構成されている。



$$; \Delta H(298\text{K}) = 206\text{kJ/mol}$$

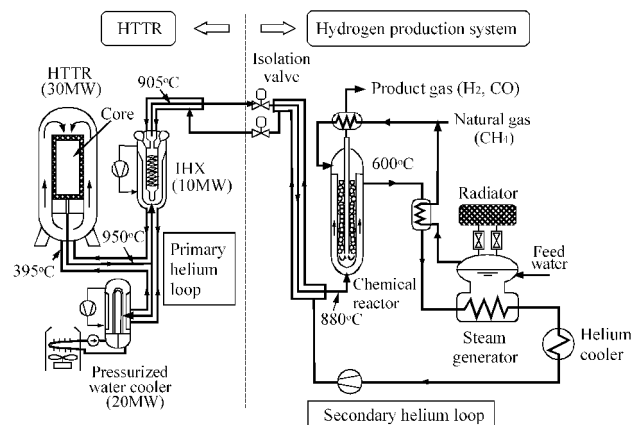


図1 高温ガス炉に接続する水素製造システムの系統概要図

水蒸気改質器には水蒸気改質反応を行わせるため、触媒を充填した反応管が設置されており、反応管の外側を2次ヘリウムガス（圧力：4.1MPa、水蒸気改質器入口温度：880℃）、内側をプロセスガス（メタンと水蒸気の混合ガス並びに反応後の生成ガスの総称、圧力：4.5MPa、水蒸気改質器入口温度：450℃）が流れて熱交換を行う。また、水素製造システムではHTTRのスクラムを防止する観点から、2次ヘリウムガスの温度変動を±10℃以内に制御することを目標としている。そこで、化学反応器の負荷変動による原子炉への戻りヘリウムガスの熱過渡変化を抑制するため、化学反応器の下流に蒸気発生器と放熱器を設置し、蒸気発生器の保有水の潜熱により2次ヘリウムガスの熱過渡を吸収する冷却システムを採用している。

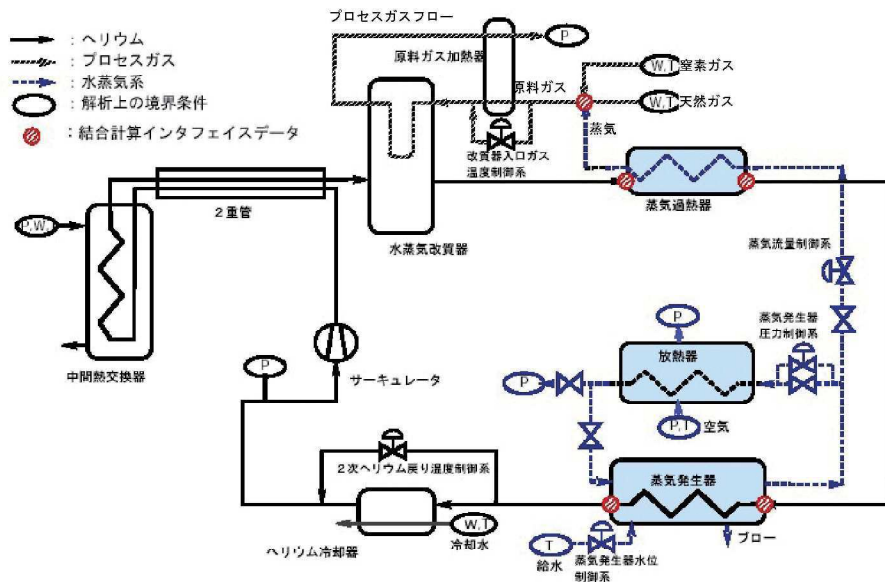
3. 動特性解析コードの概要

動特性解析コードN-HYPACは、水素製造システムの原子炉本体を除く、1次ヘリウム

ガス系、2次ヘリウムガス系および水素製造設備を構成する機器・配管の温度、圧力、流量および制御特性等の動特性挙動を解析することを目的として開発されたコードである。本コードの特徴は以下のとおりである。

- (1) 解析の対象となる機器は、化学反応器(水蒸気改質器)、熱交換器(中間熱交換器、蒸気過熱器、原料ガス過熱器、原料ガス加熱器、ヘリウム冷却器)、蒸気発生器、放熱器、2次ヘリウム循環機、配管、弁および制御系である。
- (2) 取り扱う流体は天然ガス、窒素ガス、生成ガス(水素、二酸化炭素、一酸化炭素)、水、水蒸気およびヘリウムガスである。
- (3) 本コードは化学反応器およびヘリウムガス・プロセスガスフローを取扱うNETFLOWモジュールと水蒸気フローを取扱うRELAP5モジュールの2モジュールから構成される。

N-HYPACの解析コードモデル概要図を図2に示す。



HTTR 水素製造システムのヘリウム系とプロセスガスフローは NETFLOW コード、水蒸気系は RELAP5 を適用し、結合計算により全体を連立して解く。

図2 高温ガス炉に接続する水素製造システムの解析コードモデル

3.1 解析モデルの概要

(1) NETFLOWモジュール

(a) 水蒸気改質器

水蒸気改質器では、質量保存式およびエネルギー保存式を基礎式として熱収支式と物質収支式を解くことにより、水蒸気改質器内の温度分布、濃度分布を算出した。水蒸気改質器はヘリウムガスとプロセスガスとの熱交換の他、プロセスガスの再生熱交換を行うバイオネット型であるため、伝熱モデルに関しては2次元とし、触媒層内のプロセスガス、内管内の生成ガス、ヘリウムガス相互の管壁を介したモデルとした。また、流れに関しては1次元として扱った。触媒層内の化学反応計算には定数型反応速度式を用い、反応速度定数は一般的なアレニウス型の式で記述した。以下に主要な反応である水蒸気改質反応およびシフト反応の反応速度式を示す。

$$r_1 = k_1 \cdot \left(P_{CH_4} \cdot P_{H_2O} - \frac{P_{CO} \cdot P_{H_2}^3}{K_{P,1}} \right)$$

(水蒸気改質反応式) (1)

$$r_2 = k_2 \cdot \left(P_{CO} \cdot P_{H_2O} - \frac{P_{CO_2} \cdot P_{H_2}}{K_{P,2}} \right)$$

(シフト反応式) (2)

$$k = k_0 \cdot \exp\left(\frac{-E}{R \cdot T}\right)$$

(3)

ここで、 r は触媒重量あたりの反応速度 (mol/s/kg-cat)、 k は反応速度定数 (mol/s/kg-cat/Pa²)、 P_i は*i*成分の分圧 (Pa)、 K_p は圧平衡定数 (Pa^{*}) (*:水蒸気改質反応では2、シフト反応では0)、 k_0 は頻度因子 (mol/s/kg-cat/Pa²)、 E は活性化エネルギー (J/mol)を表す。

(b) 原料ガス加熱器

原料ガス加熱器はプロセスガスと生成ガスの熱交換を行う機器であり、シェル&チューブ型の熱交換器である。解析モデルではプロセスガスおよび生成ガスの流路をそれぞれ、直管としてモデル化した。内側の円管流路であるプロセスガス流路の熱伝達係数の推算式にはDittus-Boelterの式 ($Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$)、外側の環状流路である生成ガス流路の熱伝達係数の推算式にはWiegantの式⁴⁾ ($Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} (D_2/D_1)^{0.45}$)を用いた。ここで、 D_1 は内管外径 (m)、 D_2 は外管内径 (m)を表す。

(c) 2次ヘリウム循環機

2次ヘリウム循環機はQ-H特性を使用した流量制御モデルとした。Q-H特性は特性図を基に、回転数比、流量比、ヘッド比を規格化して2次近似式とした。

(d) ヘリウムガス冷却器

ヘリウムガス冷却器はそれぞれの流路を直管としてモデル化し、熱計算は流路にそった1次元モデルで扱うこととした。

(e) 配管

配管は、流体の熱流動計算を1次元でモデル化し、基礎式には質量、運動量およびエネルギーの各保存式、気体の状態方程式を用いた。また、伝熱については1次元で取り扱った。

(2) RELAP5モジュール

図3に蒸気発生器、放熱器、蒸気過熱器の解析モデル概要図を示す。蒸気発生器、放熱器、蒸気過熱器の解析には沸騰・凝縮計算を行うことが可能であるRELAP5を使用した。基礎式は気液各相の連続の式、各相の運動量の式、各相のエネルギー式で構成される。また、熱構造材モデルによって、水力ボリュームの個体境界を通して移動する熱量を計算できる。流体とエネルギーは、1次元のモデルで近似され、流路、体積、流路断面積等で構

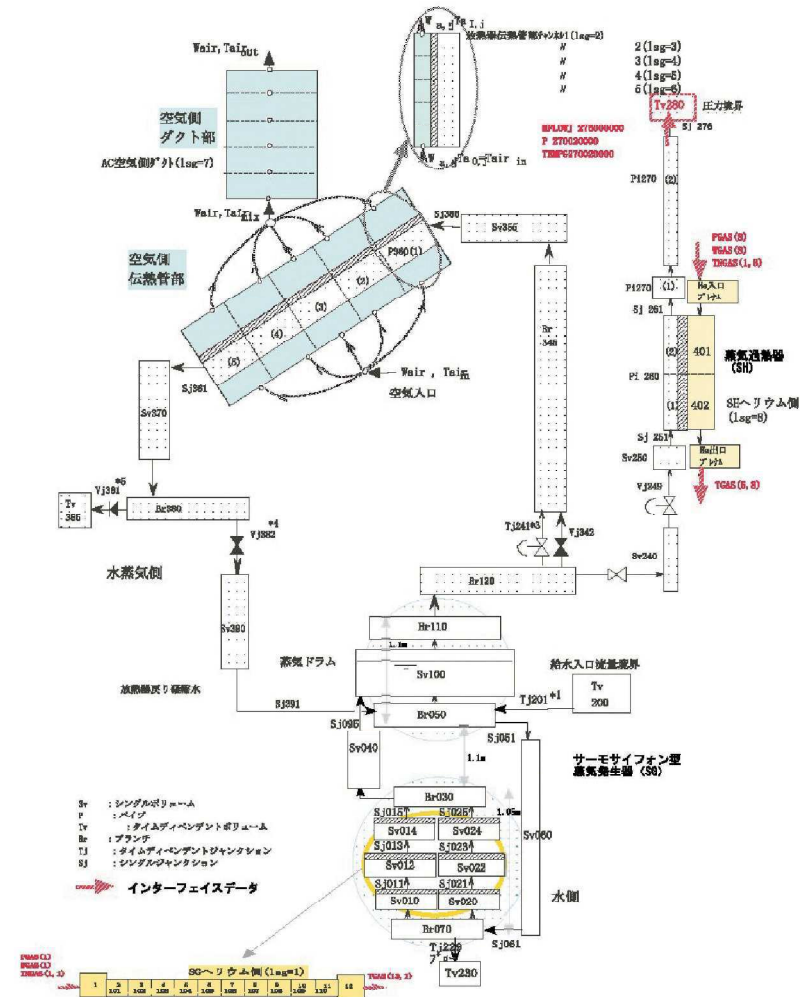


図3 蒸気発生器、放熱器および蒸気過熱器解析モデル概要図

成される物理的なシステムは、ジャンクションでつながれたコントロールボリュームのネットワークを構成する⁵⁾。また、蒸気発生器のヘリウムガス側および放熱器の空気側の伝熱流動計算については新規モジュール（蒸気発生器のヘリウムガス側および放熱器の空気側）をRELAP5に追加した。

(a) 蒸気発生器

蒸気発生器はサーモサイフォン型蒸気発生器である。本解析モデルでは大きく分けて上部プレナム部、伝熱管部、下降流領域、下部

プレナム部に分割した。上部プレナム部は気液分離と再循環流れの観点から気相領域、気液境界領域、液相領域に3分割した。また、蒸気発生器の液面が各解析セルの境界を通過すると数値計算上の圧力振動や流量振動を生じる恐れがあるため、気液境界領域の高さは液面が上下した場合でも液面が気液境界領域内に収まるような高さとした。蒸気発生器液相の水平方向の温度分布は比較的小さいと考えられるが、ヘリウムガスの温度分布を考慮し、伝熱管水側は高温部と低温部として水平

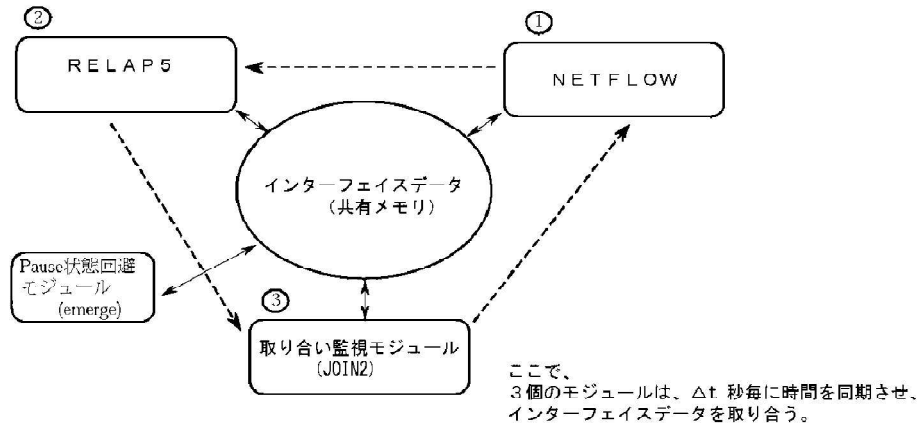


図4 結合化方法概念図

方向2分割とした。また、垂直方向には水の温度分布及び熱伝達率の分布を考慮し3分割とした。伝熱管ヘリウムガス側は27本の伝熱管内の流れを1チャンネルでモデル化した。ヘリウムガスの出入口温度差は非常に大きいため、温度分布を考慮し、1チャンネルをヘリウムガスの流れ方向に10分割した。伝熱管水側の熱伝達式はRELAP5で用意されている熱伝達パッケージを使用した。また、ヘリウムガス側の熱伝達式はDittus-Boelterの式を使用した。

(b) 放熱器

放熱器の伝熱管部の管内水と管外空気はクロスフロー流れになる。空気側の流路は入口と出口の温度差が大きいため、各チャンネルを空気の流れ方向(垂直方向)に5分割した。また、水側の流路については分割数を多くした場合、蒸気の凝縮が分割メッシュ境界上で生じ、数値解析上不安定な計算となることがあるため、数値解析的に安定した定常状態が得られる分割数をサーベイし、5分割とした。放熱器伝熱管水側の熱伝達式はRELAP5で用意されている熱伝達パッケージを使用し、伝熱管空気側(新規モジュール)の熱伝達式はJamesonの式⁶⁾ ($Nu = 0.092Re^{0.723}Pr^{0.333}$)を使用した。

(c) 蒸気過熱器

蒸気過熱器は縦置きヘリカルコイル型熱交換器であるが、簡易的に対向流形の熱交換器を採用し、それぞれ直管の流路を2分割し、熱構造材モデルによりモデル化した伝熱管を介して熱交換を行うモデルとした。蒸気過熱器水側の熱伝達式はRELAP5で用意されている熱伝達パッケージを使用し、ヘリウムガス側の熱伝達式はDittus-Boelterの式を使用した。

3.2 結合計算方法

本解析コードは、図4の結合化概念図に示すように、計算に必要なNETFLOWモジュールとRELAP5モジュール及び計算の監視に必要なJOIN2モジュール及びEMERGEモジュールの計4つのモジュールを4つの画面(window)で開いて順番に実行していくことで全体の結合計算を行う。結合に際してはインターフェイスデータを各モジュール間で適宜送受信しながら、同時に各モジュールを実行させる。

各モジュールのプロセス番号と各計算時刻、必要なインターフェイスデータ(温度、流量、圧力等の共有データ)は、共有メモリ経由で授受する。モジュールは共有データの

取り合い時刻を越えるまで計算を進め、次のモジュールにシグナルを送り待機する。シグナルを受けたモジュールは取り合い時刻を越えるまで計算を進め、また次のモジュールにシグナルを送り待機する。

質器トリップ時の計算を行った。なお、RELAP5モジュールは、“RELAP5/MOD2”と“RELAP5/MOD3”の両者を取り扱うことができるが、ここでは、MOD2を用いた結果を示す。

4. 解析結果

水素製造システム全体系をモデル化した解析体系において、定常時および非定常時の試解析を実施した。非定常時としては水蒸気改

4.1 解析条件

(1) 定常時

定常時の解析として、水素製造システムの定格運転時の設計値を用いて計算を行った。

表1 定常時解析条件

機器名	項目	値	備考
蒸気発生器	給水温度	190 °C	境界条件
蒸気過熱器	蒸気供給量	1.559 kg/s	制御値
中間熱交換器	1次側入口ヘリウムガス温度	950 °C	境界条件
	1次側入口ヘリウムガス流量	3.38 kg/s	境界条件
	1次側入口ヘリウムガス圧力	4.0 MPa	境界条件
	2次側出口ヘリウムガス圧力	4.05MPa	境界条件
原料ガス加熱器	入口天然ガス温度	0 °C	境界条件
	入口天然ガス流量	0.3889 kg/s	境界条件
	出口プロセスガス圧力	4.0 MPa	境界条件
ヘリウムガス冷却器	冷却水温度	32 °C	境界条件
	冷却水流量	100 t/h	境界条件
ヘリウムガス循環機	ヘリウムガス流量	2.519 kg/s	制御値

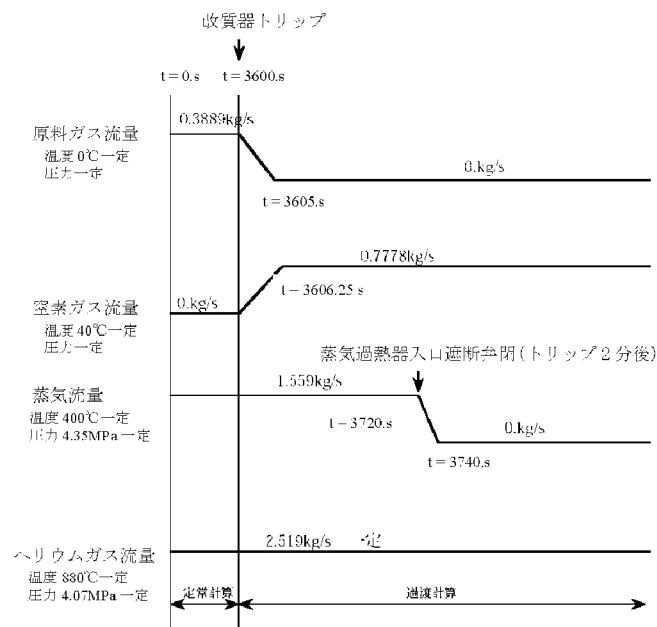


図5 水蒸気改質器トリップ解析シナリオ

表1に解析条件を示す。解析方法としては、各コード単独で計算を行い単独定常を導き、次にリスタート計算で“NETFLOW”と“RELAP5”の結合計算を3600秒まで行って結合定常を求めた。

(2) 非定常時(水蒸気改質器トリップ時)

非定常時の解析として、水蒸気改質器トリップ時の解析シナリオを用いて計算を行った。図5に解析シナリオを示す。水蒸気改質器トリップ状態では、蒸気発生器は通常運転モードから放熱器との組み合わせで2次ヘリウム温度を所定温度に冷却する受動的冷却運転モードに切り替わる運転を行う。受動的冷却運転モードとは、蒸気発生器により2次ヘリウムの温度変動を蒸気発生量の増減により吸収し、蒸気を放熱器で循環して冷却・凝縮させることにより受動的な安全性を保つ運転モードである。定常計算後の3600秒で水蒸気改質器トリップとし、蒸気発生器圧力が静定するまで計算を行った。

果、3600秒の計算時間で安定した解析結果を得ることができた。

(2) 非定常時(水蒸気改質器トリップ時)

水蒸気改質器トリップ時の2次ヘリウムガス系の温度の変化および水蒸気改質器での出入口温度の解析結果を図7に、蒸気発生器での圧力および温度の解析結果を図8に示す。解析結果から、蒸気発生器圧力は急上昇せずトリップ後2分のインターロックで放熱器による冷却モードに移行した。水蒸気改質器のヘリウム出口温度は、緩やかに上昇し、約4000秒後に850℃で静定した。また、水蒸気改質器トリップ直後に放熱器への大量の蒸気供給により一時的に蒸気圧力が低下したがトリップ6000秒後にはほぼ定常状態に移行することが確認できた。以上の結果から本解析コードにより水素製造システムの過渡現象を予測できることを確認した。

本解析結果から、全体系の計算モデルで、定常時および非定常時について安定して水素製造システムの特性を評価できることが確認できた。

4.2 解析結果

(1) 定常時

図6に定常時の解析結果を示す。解析の結

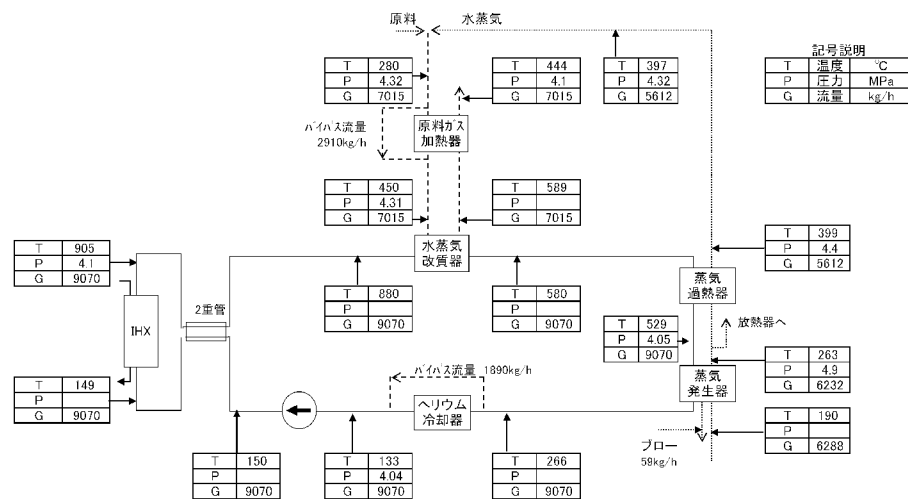


図6 定常計算結果

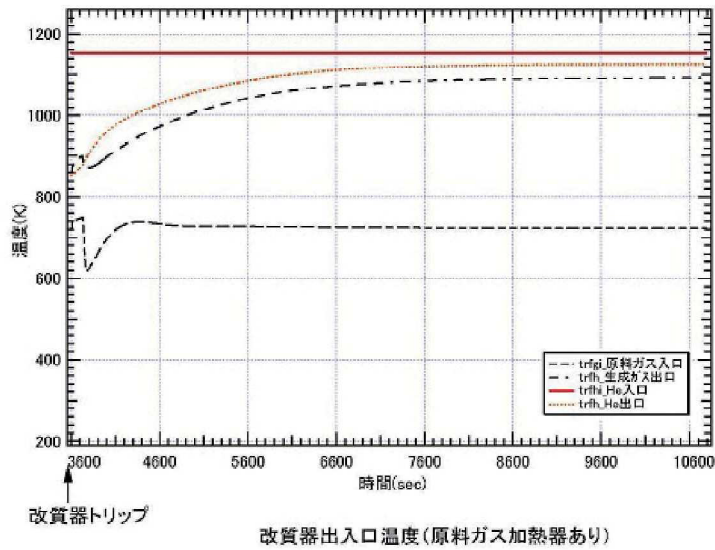
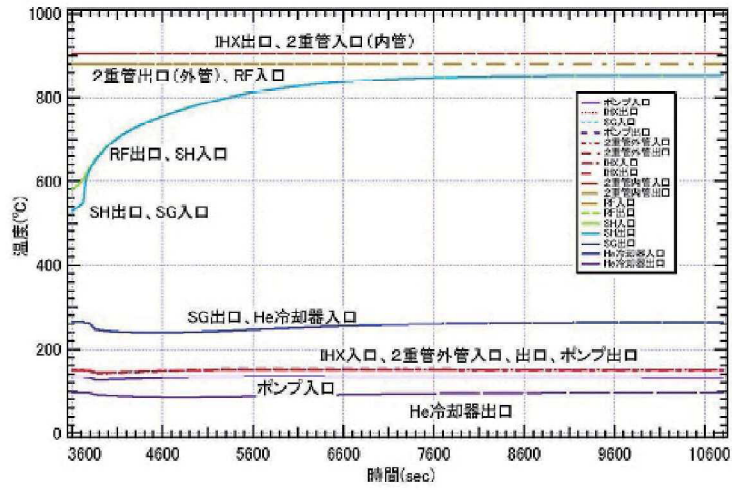


図7 水蒸気改質器トリップ時の試解析結果(1)

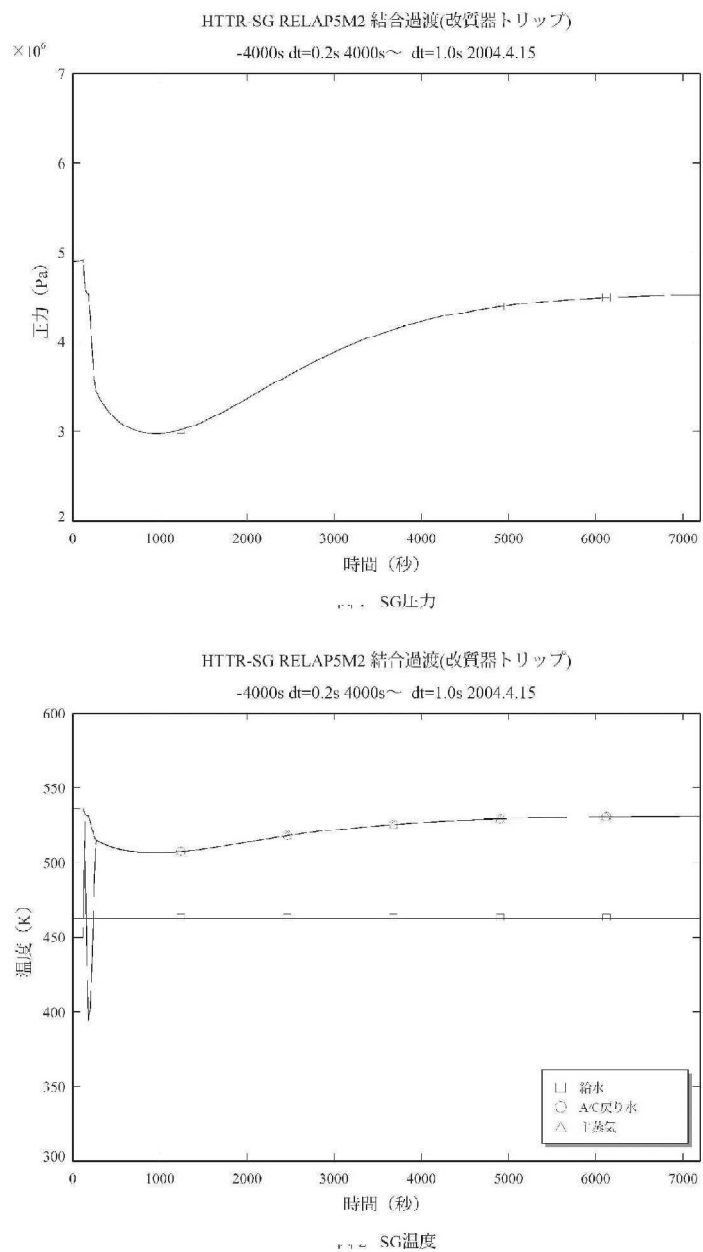


図8 水蒸気改質器トリップ時の試解析結果(2)

5. まとめ

以上において、HTTRに接続する水素製造システムの起動停止、並びに運転中の異常な過渡変化時の動特性解析を行うことを目的とした、高温ガス炉に接続する水素製造システムの動特性解析コードの開発について説明させて頂いた。その結果、本コードにより水素製造システムの機器相互の熱過渡影響を考慮し、蒸気発生器及び放熱器での蒸気の凝縮挙動が解析できることを確認した。原子力機構ではHTTRとISプロセスの接続を計画しており、この場合においてもプロセスガス系をISプロセスへ置き換えることで、原子炉への熱過渡の影響を評価することが可能である。

謝辞

本研究は電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの受託事業として、日本原子力研究開発機構(旧日本原子力研究所)が実施した平成9年度、14年度、15年度、16年度、17年度「核熱利用システム技術開発」の成果です。

本解析コードの開発に多大なるご協力を頂いた新型炉技術開発株式会社 岸田雅子氏、三菱重工業株式会社 森崎徳浩氏、株式会社日立製作所 前田幸政氏に感謝いたします。また、本研究の遂行に当たり、有益なご助言を頂いた日本原子力研究開発機構原子力基礎

工学研究部門核熱応用工学ユニット長 小川益郎氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 宮本喜晟,他, 水素エネルギー研究の現状と高温ガス炉 水素製造システムの将来展望, JAERI-Review 2001-006, (2001).
- 2) S.Fujikawa, et al., "Achievement of Reactor-Outlet Coolant Temperature of 950°C in HTTR", *J. Nucl. Sci. Technol.*, **41**, No.12, 1245-1254 (2004)
- 3) S.Kubo, et al., "A demonstration study on a closed-cycle hydrogen production by thermochemical water-splitting IS process", *Pro. 13th Int Conf. Nucl. Eng. (ICONE-13)*, Beijing, China, May 2005, ICONE -13- 50183 (2000).
- 4) J.H.Wiegand, "Discussion of paper by McMillen and Larson", *Trans. AIChE*, **41**, 147 (1945).
- 5) V.H.Ransom, et al., *RELAP5/MOD2 Code Manual*, Idaho National Engineering Laboratory, NUREG/CR-4312, EGG-2796 (1985).
- 6) S.L.Jameson, et al., "Tube spacing in finned-tube banks." *Trans. A.S.M.E.*, **67**, 633-642 (1945).