

JAERI-Tech
2005-032



JP0550289



HTTR水素製造システム実規模単一反応管試験装置
平成13年度試験運転報告
(受託研究)

2005年 6月

林 光二・稻垣 嘉之・加藤 道雄・藤崎 勝夫・会田 秀樹・武田 哲明
西原 哲夫・稻葉 良知・大橋 弘史・片西 昌司・高田 昌二・清水 明
森崎 徳浩・榎 明裕・前田 幸政・佐藤 博之

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

HTTR 水素製造システム実規模单一反応管試験装置

平成 13 年度試験運転報告

(受託研究)

日本原子力研究所大洗研究所核熱利用研究部

林 光二・稻垣 嘉之・加藤 道雄・藤崎 勝夫・会田 秀樹・武田 哲明
西原 哲夫・稻葉 良知・大橋 弘史・片西 昌司・高田 昌二・清水 明
森崎 徳浩・榎 明裕*・前田 幸政・佐藤 博之

(2005 年 3 月 18 日受理)

本書は、HTTR 水素製造実規模单一反応管試験装置の平成 13 年度試験運転報告である。平成 13 年度は平成 14 年 3 月 1 日から 3 月 13 日の 2 週間に第 1 回試験運転を実施し、水蒸気改質器の熱流動に関する試験、ならびに試験装置の運転訓練を行った。水蒸気改質器の熱流動に関する試験は、ヘリウムガスとプロセスガス間の伝熱特性を評価するものである。本報告では、試験の概要、結果、並びに運転記録についてまとめている。

本報告書は、文部科学省からの受託研究「核熱利用システム技術開発」の成果である。

大洗研究所：〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀 3607

*※業務協力員

Annual Report on Experimental Operation of Mock-up Model Test Facility with a
Full-scale Reaction Tube for HTTR Hydrogen Production System
in 2001 Fiscal Year
(Contract Research)

Koji HAYASHI, Yoshiyuki INAGAKI, Michio KATO, Katsuo FUJISAKI,
Hideki AITA, Tetsuaki TAKEDA, Tetsuo NISHIHARA, Yoshitomo INABA,
Hirofumi OHASHI, Shoji KATANISHI, Shoji TAKADA, Akira SHIMIZU,
Norihiro MORISAKI, Akihiro SAKAKI*, Yukimasa MAEDA and Hiroyuki SATO

Department of Advanced Nuclear Heat Technology
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received March 18, 2005)

This is an annual report on the experimental operation of the mock-up test facility with a full-scale reaction tube for the HTTR hydrogen production system in 2001 fiscal year. The first experimental operation was performed during two weeks from March 1, 2002 to March 13, 2002 to test on the thermal hydraulic performance of the steam reformer and also to train the operators. The thermal hydraulic performance test of the steam reformer was performed to evaluate the heat transfer characteristics between helium gas and process gas in the steam reformer.

This report is summarized with an overview of the test, the results and its operation records.

Keywords: Nuclear Heat Utilization, HTTR, Hydrogen Production System, Steam Reforming, Mock-up Test Facility, First Experimental Test Operation

Present study is entrusted from Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology.

*Cooperative Staff

目 次

1. 緒 言	1
2. 試験装置の概要	4
3. 第1回試験運転の概要	12
3. 1 第1回試験運転の試験項目と運転操作	12
3. 2 試験と運転の工程	12
4. 水蒸気改質器特性試験－熱流動特性試験結果	16
4. 1 目的	16
4. 2 試験	16
4. 3 結果および考察	17
5. 運転記録	31
5. 1 運転履歴	31
5. 2 ヘリウムガス循環設備の純度管理履歴	31
5. 3 水蒸気供給系の水質管理履歴	32
5. 4 ガス・水・電気の消費統計	33
5. 5 運転体制並びに運転訓練	34
6. 結 言	44
謝 辞	44
参考文献	45
使用記号	46

Contents

1. Introduction	1
2. Overview of the Mock-up Test Facility of HTTR Hydrogen Production System	4
3. Outline of the First Experimental Test Operation	12
3.1 Test Item and Operations of the First Experimental Test Operation.....	12
3.2 Schedule of Experimental Test and Operation	12
4. Results of Steam Reformer Performance Test – Thermal-hydraulic Performance Test	16
4.1 Objective	16
4.2 Test	16
4.3 Test Results and Considerations	17
5. Operation Records	31
5.1 Historical Record of the Experimental Operation	31
5.2 Historical Record of Helium Purity Control	31
5.3 Historical Record of Water Quality Control	32
5.4 Statistics on Consumptions of Gas, Water and Electricity	33
5.5 Organization of Operational Stuffs and Operational Training	34
6. Concluding Remarks	44
Acknowledgements	44
References	45
Nomenclature	46

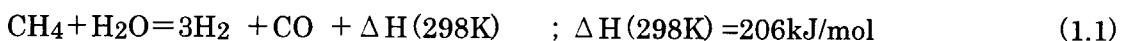
1. 緒 言

日本原子力研究所（以下、「原研」と呼ぶ）では、将来の水素利用社会への貢献を目指して、我が国初の高温ガス炉、高温工学試験研究炉（HTTR：High Temperature Engineering Test Reactor）を用いて、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⁾。

水素は、近年の燃料電池自動車への期待の高まりに見られるように、新しいエネルギー源として注目を集め、近い将来において需要の急増が予想される。ところが、水素は自然界ではそのほとんどが水や化石燃料等の化合物の形態で存在するため、水素単体で取り出すためにはそれらに何らかのエネルギーを与える必要がある。工業界における水素製造は、主として化石燃料の燃焼熱を利用した炭化水素と水の化学反応による水蒸気改質法が主流である。したがって、今後水素需要が増加すると、化石燃料の消費による CO₂ の排出増加に繋がることから、いかに環境への負荷をかけずに大量の水素を確保するかが重要な課題となっている。

原研は燃焼ガスの代わりに高温ガス炉から供給される高温のヘリウムガスを利用して水素を製造する HTTR 水素製造システムの研究開発を進めている。高温ガス炉は、冷却材にヘリウムガス、炉内の主要構造材並びに減速材に黒鉛を用いることにより、原子炉出口で冷却材温度 950°C 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。高温ガス炉による水素製造は、熱源として化石燃料を使わないので、CO₂ の排出が少ない水素製造システムとして有望である。

高温ガス炉へ水素製造システムを接続するためには、a)大量の可燃性ガスの火災爆発に対して原子炉を防護するための安全指針、b)原子炉と水素製造システムを安定に運転するための制御技術、c)原子炉から製品水素へ透過するトリチウムの移行の評価及び移行低減対策、d)異常時に原子炉と水素製造システムを隔離するための高温隔離弁、等の技術開発が必要である。これらの技術の確立を目的として、メタンの水蒸気改質法による HTTR 水素製造システム「以下、HTTR 水素製造システム」が検討された^(2,3)。メタンの水蒸気改質は次式で示される。



HTTR 水素製造システムの系統構成を Fig. 1.1 に示す。

原子炉で 950°C に加熱された 1 次ヘリウムガスは、中間熱交換器で 2 次ヘリウムガスへ熱交換されて（熱交換量 10MW）、水蒸気改質器、蒸気発生器等に熱源として供給される。水蒸気改質器には改質反応を行わせるため、触媒を充填した触媒管が設置されており、触媒管の外側をヘリウムガス（圧力：4.1MPa、水蒸気改質器入口温度：880°C）、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°C）が流れ熱交換を行う。

この系統構成を基に、原子炉と水素製造システムを安定に運転するための制御技術の開発、動特性解析コードの検証、等を目的として、炉外試験を計画し^(4,5,6)、電気ヒータで原子炉を模擬した水素製造試験装置である「実規模単一反応管試験装置」（以下、「試験装置」と呼ぶ）を製作した。平成 14 年 2 月に実施した試験装置の機能試験において、アラスカ産の LNG(液化天然ガス：メタンの成分割合が 99%以上) を原料に 120Nm³/h の水素製造を行い、計画通りの性能を有する

ことを確認した⁽⁷⁾。

その後、平成 14 年 3 月に原研による試験装置の初回運転訓練を兼ねて、第 1 回試験運転を実施し、水蒸気改質器の熱流動特性試験を行った。本報告はこの第 1 回試験運転に関するもので、試験装置の概要、水蒸気改質器熱流動特性試験の概要と結果、並びに運転記録についてまとめたものである。

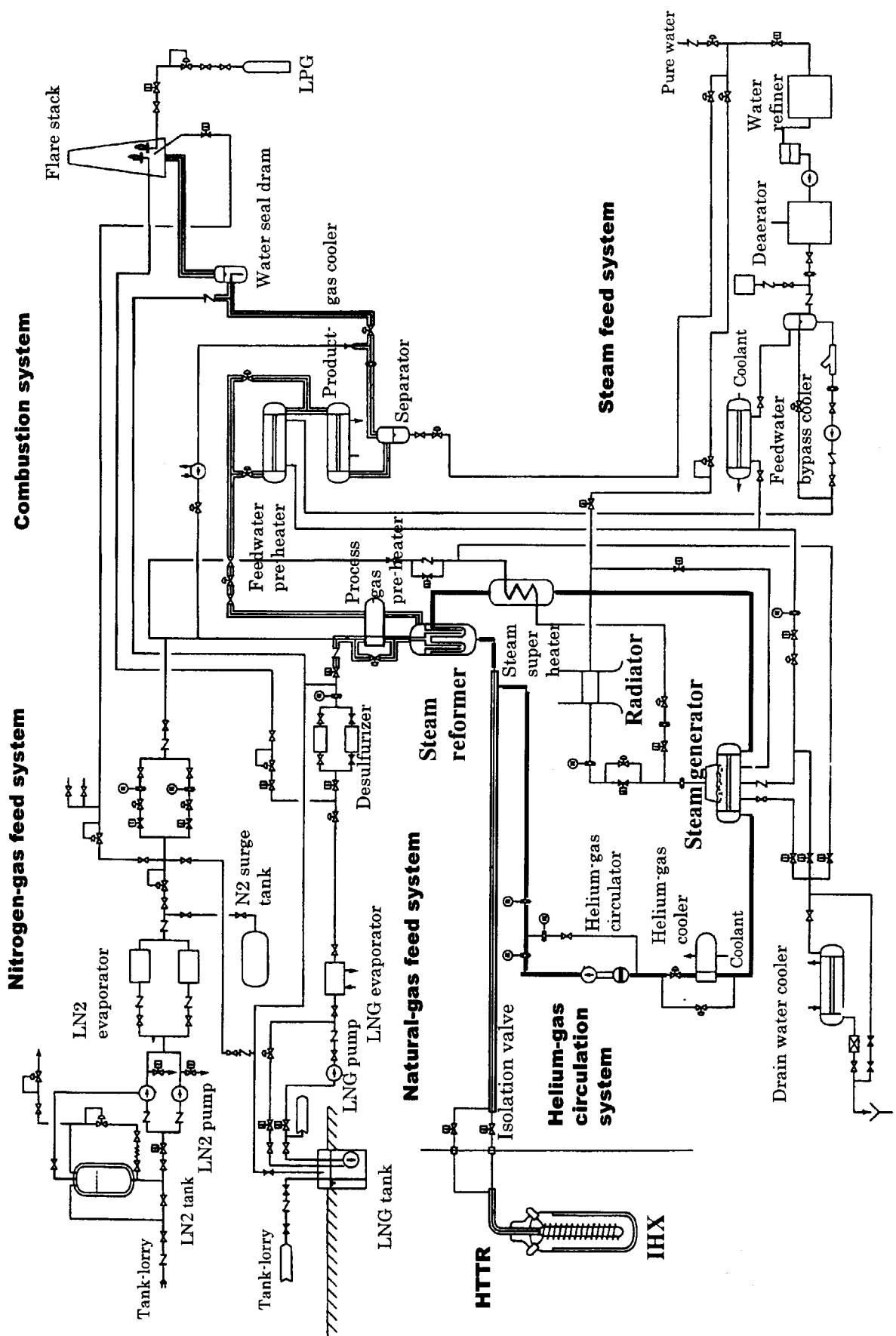


Fig.1.1 Schematic flow diagram of HTTR hydrogen production system

2. 試験装置の概要

試験装置は、HTTR 水素製造システムのうち、中間熱交換器から下流の水素製造システムの構成を模擬したものである。Table 2.1 に試験装置と HTTR 水素製造システムの主要諸元の比較を示す。

主要機器のうち水蒸気改質器は、反応管内外の熱伝達特性、圧力損失特性、改質反応特性を HTTR 水素製造システムと同じ条件となるよう HTTR 水素製造システムと同じ反応管を 1 本使用し、反応管の動作環境も同じ温度、圧力となるよう仕様を定めている。HTTR 水素製造システムの水蒸気改質器は反応管 30 本の設計であるため、反応管 1 本の本試験装置は HTTR 水素製造システムの 1/30 モデルに相当する。

また、試験装置は、原子炉への外乱抑制、反応管差圧制御等の運転制御技術の確立、水素製造システムの動特性・過渡挙動の把握、等に関する各種試験が実施できるよう、ヘリウムガス循環ループの構成やプロセスガスの各設備等の構成も HTTR 水素製造システムを模擬した設計としている。Table 2.2 に試験装置の定格運転条件を、また Fig. 2.1 に試験装置の系統構成を示す。

試験装置は、原料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、熱源となるヘリウムガスを水蒸気改質器に供給するヘリウムガス供給設備、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及び水蒸気供給設備、起動及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水素等の生成ガスを燃焼処分するための後処理設備の他、冷却水設備、計測制御設備、電気設備等で構成している。Fig. 2.2 に試験装置の全体外観と主要機器、設備の外観を示す。

(1) 水蒸気改質器

水蒸気改質器は、高温ヘリウムと熱交換を行う化学反応器であり、内部にバイヨネット型反応管を 1 本収納し、その外周部にはヘリウムを流して反応管に熱を伝える。反応管内部の触媒層には原料ガス(メタンと水蒸気の混合ガス)を供給し、水蒸気改質反応により水素を製造する。

(2) ヘリウムガス供給設備

ヘリウムガス供給設備は、加熱ヘリウムガスを水蒸気改質器に供給する設備であり、ヘリウム循環機を出たヘリウムガスは、原子炉中間熱交換器の役目を果たすヘリウムガス加熱器、水蒸気改質器、蒸気過熱器、水蒸気発生器、水予熱器、ヘリウム冷却器を一巡するように循環ループを形成している。その他、ヘリウム供給設備の圧力調整を行うヘリウムガス圧力調整設備、ヘリウムガス中の不純物を除去するヘリウムガス精製設備からなる。

(3) 原料ガス供給設備

原料ガス供給設備は、水蒸気改質器に原料となるガスを供給する設備であり、メタンガスを液化天然ガス (LNG) の状態で貯蔵する LNG タンク、それを送り出す LNG ポンプ、LNG を気化するための LNG 蒸発器、ガス化した天然ガスを一時貯蔵する原料ガスサージタンク、さらにメタンと水蒸気を混合した後加熱する原料ガス加熱器、並びに原料ガス過熱器等から

成る。

(4)水蒸気供給設備

水蒸気供給設備は、水蒸気改質反応に必要な水蒸気を原料ガス供給設備を経て水蒸気改質器に供給する設備で、純水を貯蔵するための給水受入タンク、ヘリウムと熱交換を行う水予熱器、蒸気発生器並びに蒸気過熱器等からなる。

(5)後処理設備

後処理設備は、水蒸気改質器で生成した水素、一酸化炭素等の生成ガス、並びに未反応のメタンガス等を燃焼処分する設備であり、生成ガス冷却器、セパレータ、水封ドラム、フレアスタック等からなる。

(6)不活性ガス供給設備

不活性ガス供給設備は、メタンや水素等の可燃性ガスが通じる系統をバージするための窒素ガスを供給する設備である。本試験装置の原料ガス・生成ガス・ラインはワンスルー型を採用しているため、水素製造時を除く起動から停止までの期間中は常に窒素ガスを流し続ける設計としている。また、水蒸気供給設備にも、原料ガス中への空気混入を防止するため、窒素ガスを供給している。設備は、液体窒素(LN_2)を貯蔵する LN_2 タンク、 LN_2 ポンプ、気化させる LN_2 蒸発器、気化後の窒素ガスを一時貯蔵する窒素ガスサージタンクからなる。

Table 2.1 Design specifications of HTTR hydrogen production system and the mock-up test facility

Terms	HTTR hydrogen production system	Mock-up test facility
Inlet pressure of steam reformer Process-gas / Helium-gas		4.5 / 4.1 MPa
Inlet temperature of steam reformer Process-gas / Helium-gas		450 / 880 °C
Outlet temperature of steam reformer Process-gas / Helium-gas	580 / 585 °C	600 / 650 °C
Natural-gas feed flow-rate	1400 kg/h	43.2 kg/h
Helium-gas circulation flow-rate	9070 kg/h	327.6 kg/h
Steam-carbon ratio	3.5	
Hydrogen production rate	4240 Nm ³ /h	110 Nm ³ /h
Heat source	Nuclear reactor (10 MW)	Electric heater (0.42 MW)

Table 2.2 Nominal conditions of the mock-up test facility

Subsystem and items	Nominal conditions (available)
Steam reformer	
Helium-gas side	
• Inlet pressure of steam reformer	4.1 MPa
• Inlet temperature of steam reformer	880°C
• Outlet temperature of steam reformer	650°C
Process-gas side	
• Inlet pressure of steam reformer	4.4 MPa
• Inlet temperature of steam reformer	450°C
• Outlet temperature of steam reformer	600°C
• Hydrogen production rate	110Nm ³ /h
• Steam-carbon ratio	3.5
Pressure difference control between helium-gas and process-gas	0.04 MPa
Helium circulation system	
• Inlet temperature of circulation pump	150°C
• circulation flow rate	91 g/s (0~120 g/s)
Natural-gas feed system	
• Feed pressure of natural-gas feed sysytem	4.95 MPa
• feed flow rate	12 g/s (0~16 g/s)
Steam feed system	
• Pressure of steam generator	4.6 MPa
• feed flow rate	47 g/s (0~58 g/s)
Nitrogen-gas feed system	
• Feed pressure of natural-gas feed sysytem	4.95 MPa
• feed flow rate during start-up period	15 g/s (0~30 g/s)
• feed flow rate during waiting period	30 g/s (0~30 g/s)

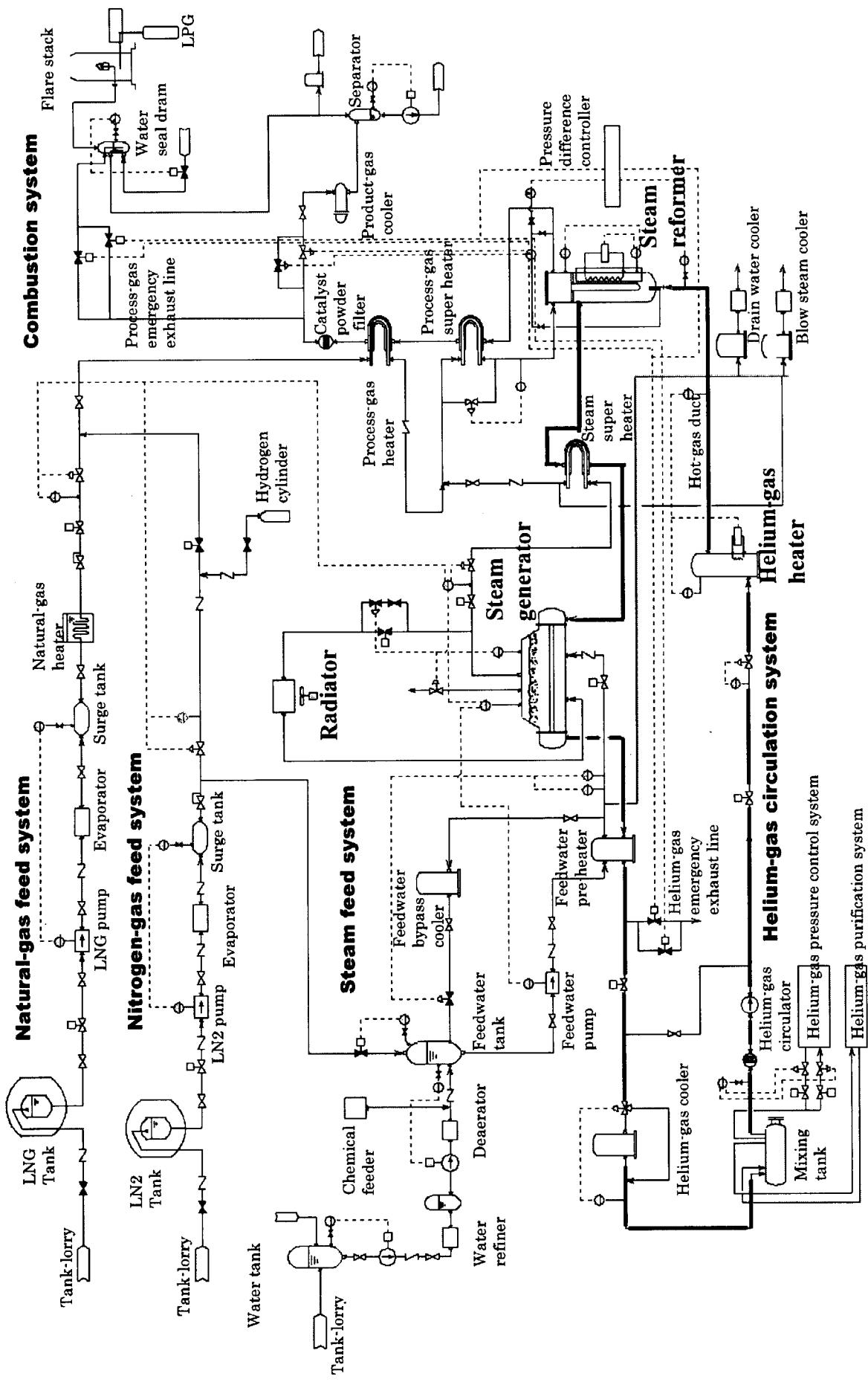


Fig. 2.1 Schematic flow diagram of the mock-up test facility

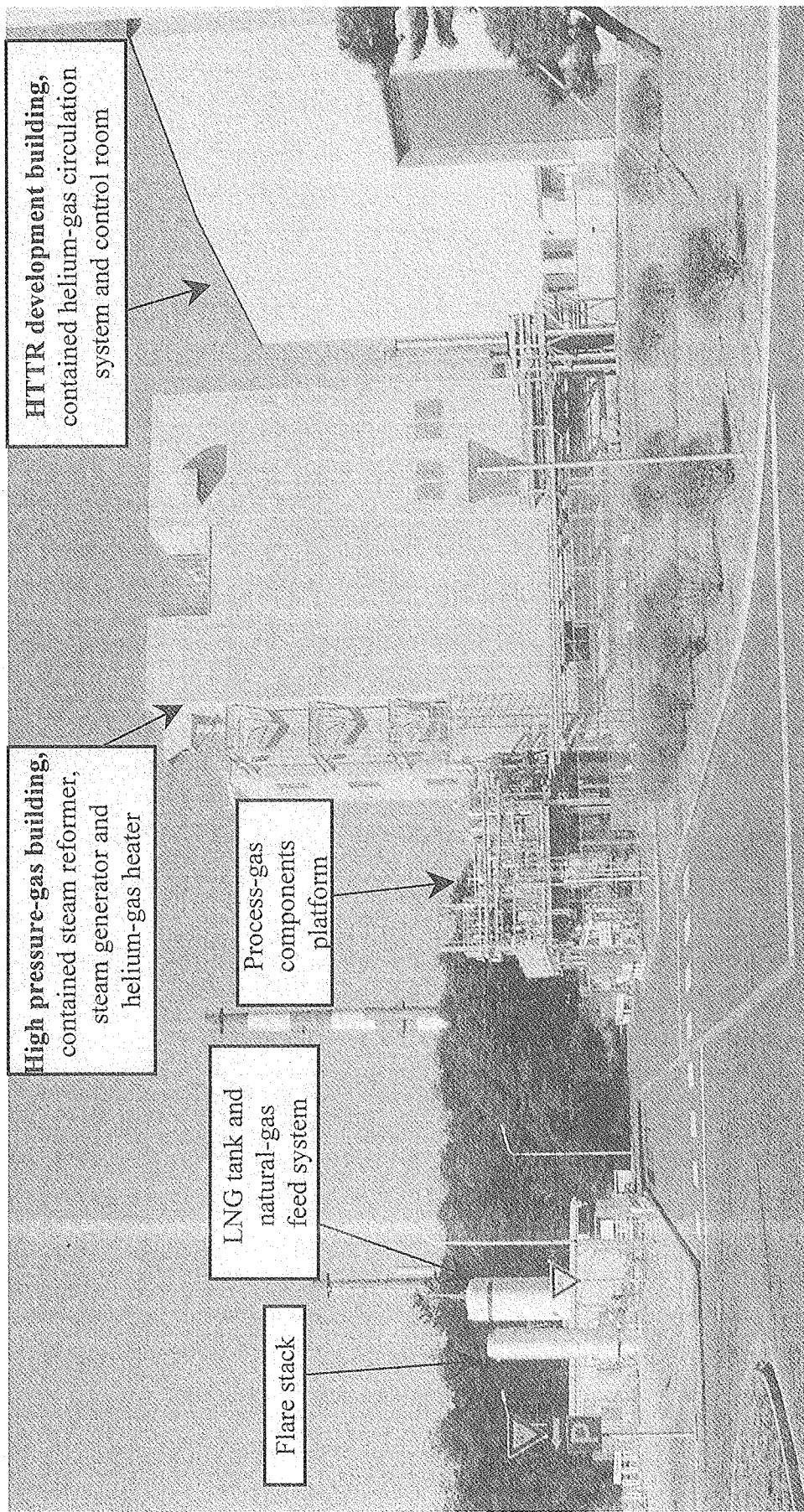


Fig.2.2(a) Overview of the mock-up test facility

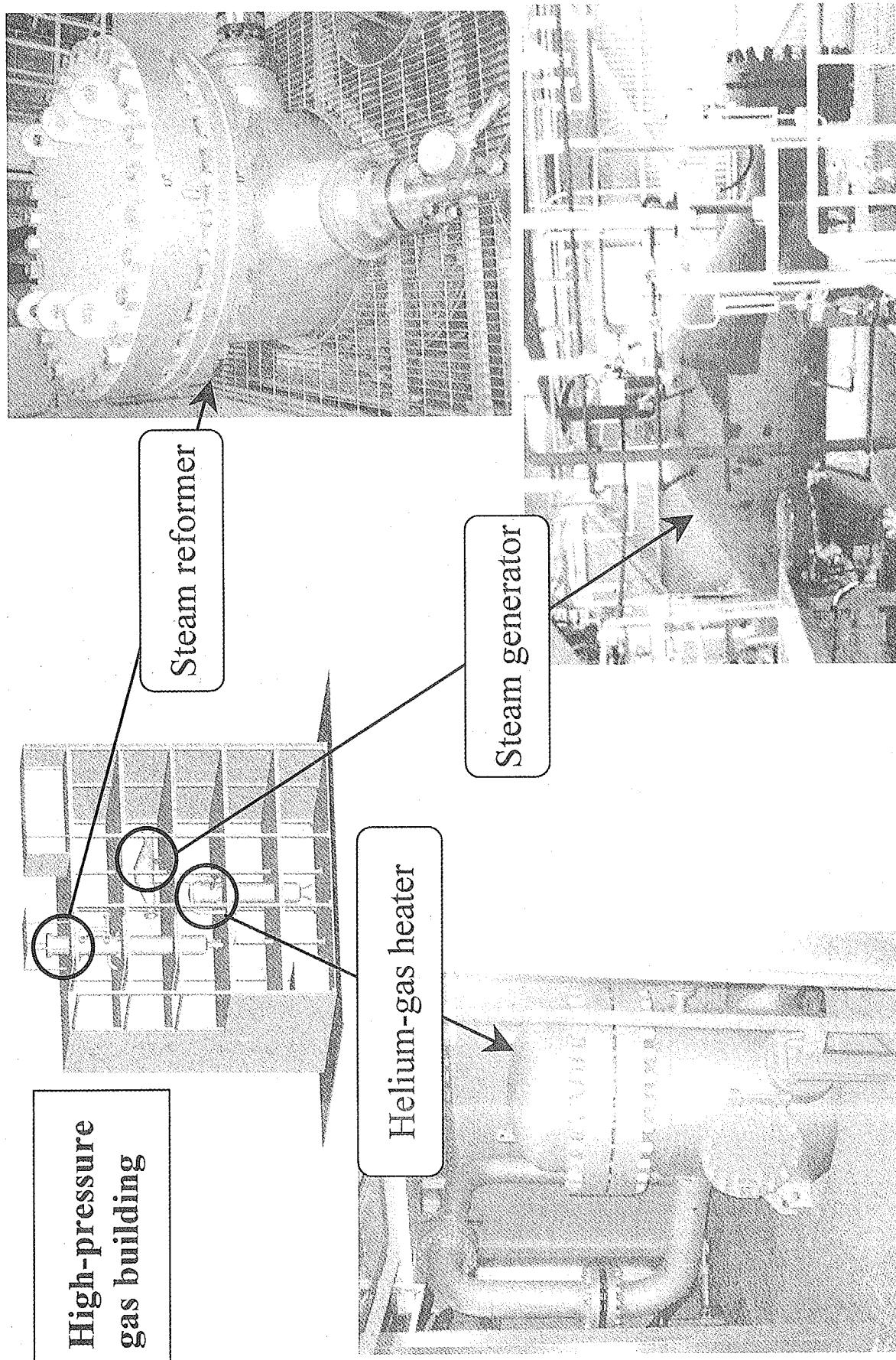


Fig.2.2(b) Main components of the mock-up test facility

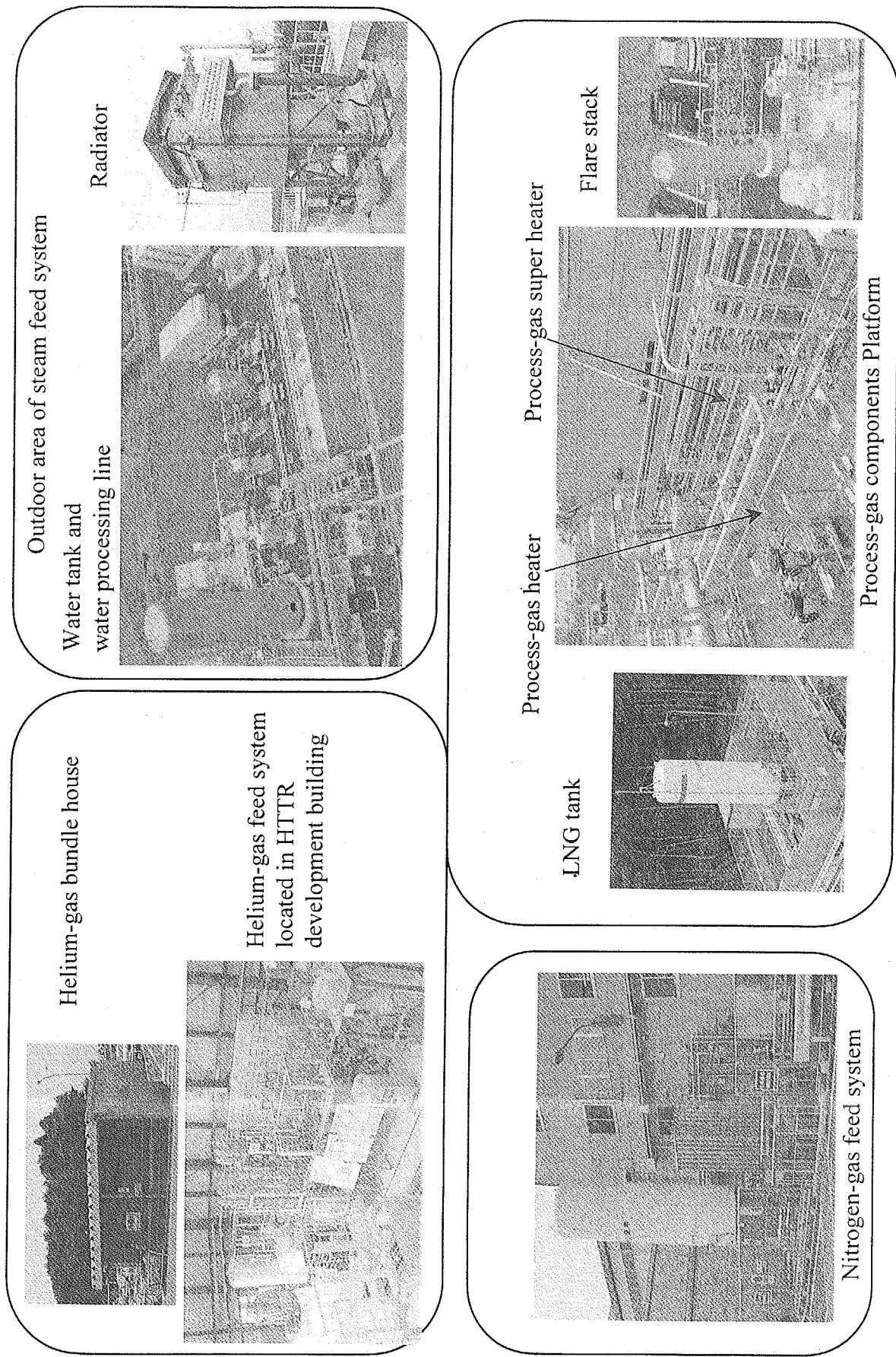


Fig.2.2(c) Other components of the mock-up test facility

3. 第1回試験運転の概要

本試験装置は平成13年9月に製作を完了し、平成13年10月から平成14年2月にかけて機能試験を実施し、設計仕様を満足する性能を有することを確認した。その後、メーカーからの引渡しを受けて、第1回試験運転を平成14年3月1日から13日間実施した。

3.1 第1回試験運転の試験項目と運転操作

本試験装置を用いた炉外技術開発試験は平成13年度から平成16年度までの4年間にTable3.1に示す試験を実施する計画を作成した。平成13年度末に実施する第1回試験運転では、水蒸気改質器の熱流動特性試験、並びに運転訓練を実施した。

水蒸気改質器の熱流動特性試験は、水蒸気改質器の伝熱流動特性を調べるもので、試験の詳細は4章に述べる。この試験に必要な運転操作は次の通りである。

- (1) 水蒸気改質器ヘリウムガス流量は、40、60、80、100 g/sと順次増加させる。
- (2) 水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度は、ヘリウムガス流量が40g/sの時に200°C、300°C、600°Cと順次上昇させ、ヘリウムガス流量増加時には600°C一定とする。また、水蒸気改質器入口ヘリウムガス圧力は混合タンク圧力を3.1MPa一定制御したときの値とする。
- (3) 水蒸気改質器のプロセスガス側には窒素ガスを流量30g/s一定で流す。水蒸気改質器出口プロセスガス圧力は反応管内外差圧制御によりヘリウムガス圧力より0.04MPa高い値に維持される。

今回は可燃性ガスを取り扱わないので、原料ガス設備並びに後処理設備の運転操作は基本的に不要であるが、水蒸気供給設備は除熱のために通常通りの運転操作が必要である。水蒸気設備ではヘリウムガス温度の上昇に伴い常温クリーンアップから温水クリーンアップへの切替操作と待機運転、さらに温水クリーンアップから蒸気クリーンアップへの切替操作と待機運転が必要となる。

3.2 試験と運転の工程

試験運転工程の実績をFig.3.1に示す。今回の試験運転期間は平成14年3月1日から3月13日までの13日間である。通常の運転では、起動前準備に2週間、停止後処理に1週間程の時間を要するが、今回は第1回試験運転の直前に機能試験の運転を実施していたため、起動前準備に関しては、冷却水設備については、水張り、水薬液処理、冷却水循環クリーンアップ等が完了している状態であった。また水蒸気供給設備については、機能試験で水素製造を経て降温後は常温クリーンアップを継続している状態であった。したがって、第1回試験運転期間の初日に直ちにヘリウム循環設備の昇圧と昇温が行える状況にあった。

平成14年3月1日に改質器入口ヘリウムガス圧力3.1MPaまで昇圧した後、ヘリウムガス循

環機の起動とヘリウムガス加熱器を作動させて、運転状態に入った。同日、ヘリウムガス循環機流量 305 g/s として改質器入口ヘリウムガス流量を 40g/s 一定にするとともに、改質器入口ヘリウムガス温度 200℃までの昇温を完了した。その後、3月 4 日に改質器入口ヘリウムガス温度を 300℃まで昇温、さらに 3月 6 日に 600℃まで昇温した。次に、3月 8 日にヘリウムガス循環機流量 340 g/s として改質器入口ヘリウムガス流量を 60g/s に増加、3月 10 日にさらに 80g/s に、3月 11 日にヘリウムガス循環機流量 370 g/s として改質器入口ヘリウムガス流量を 100g/s に増加した。3月 12 日に試験を終了して降温降圧を開始し、3月 13 日にヘリウムガス加熱器を停止して運転を終了した。

Table 3.1 Items of the mock-up test for the HTTR hydrogen production system

Test Items	Objectives
Start-up and shut-down test	To establish the operational procedure for the start-up and shut-down operations of the hydrogen production system, synchronized with HTTR operation.
Plant performance test (a) Process change test	To confirm system controllability against thermal and pressure disturbances caused by change of chemical reaction, and so on, and to check a validity of the numerical dynamics code for the hydrogen production system using the measurement data.
(b) Continuous operation test	To demonstrate stability of the hydrogen production system for a long-time range.
Steam reformer performance test (a) Thermal hydraulic performance test	To evaluate heat-transfer characteristics of the steam reformer between helium gas and process gas.
(b) Reaction performance test	To investigate reaction performance of the steam reformer operated under the various conditions like temperature, pressure, mole ratio of steam to methane (S/C), and flow-rate.
Chemical reaction shut-down test	To establish the shut-down procedure of the HTTR hydrogen production system for an accident in the hydrogen production system.

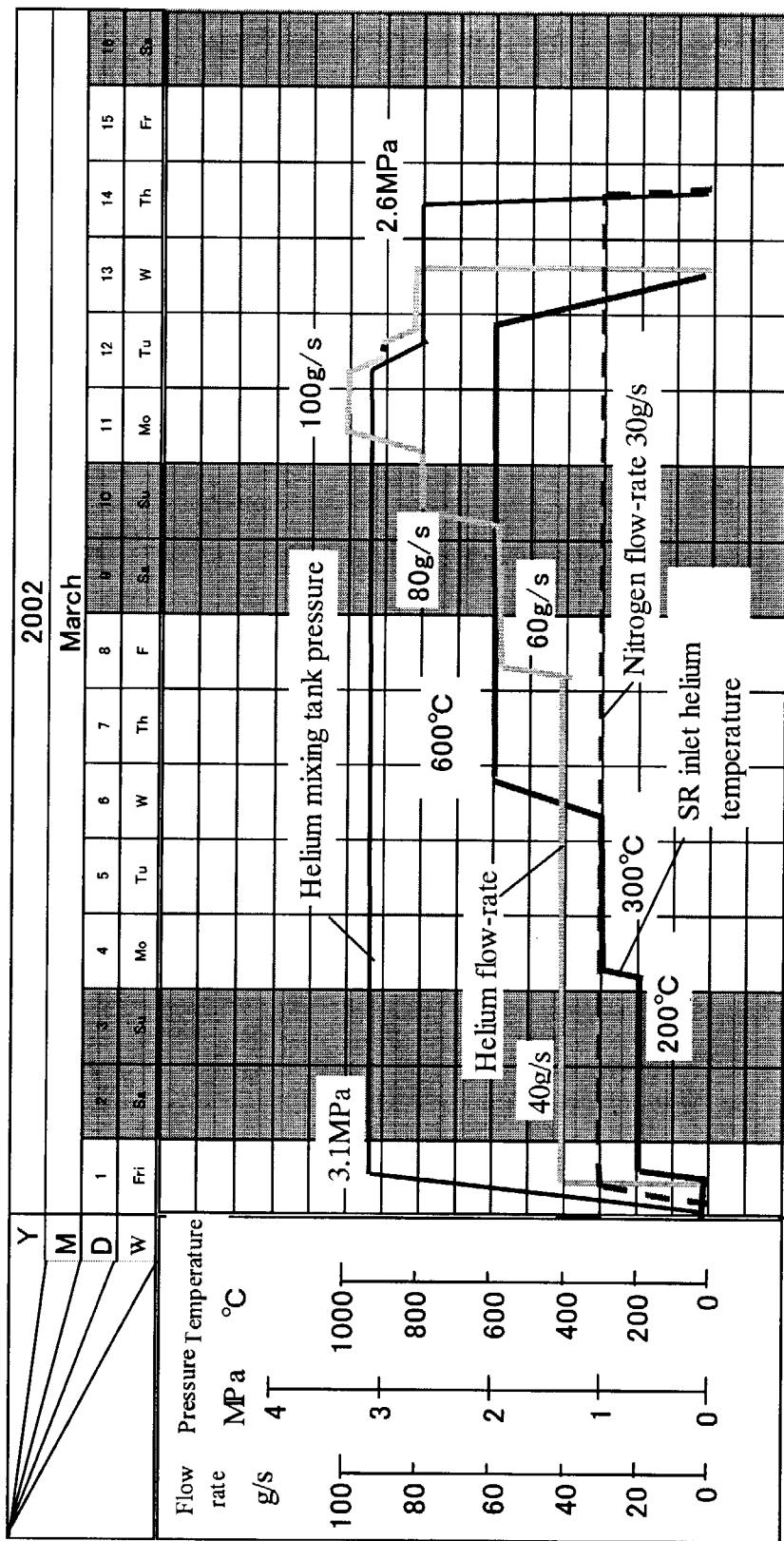


Fig. 3.1 Time record of the first experimental test operation

4. 水蒸気改質器特性試験－熱流動特性試験結果

4. 1 目的

従来の化石燃料水素製造システムは、燃焼ガス（約 1200°C）からの放射伝熱を利用し、反応管の熱流束は 70,000~87,000W/m² に達する。一方、水蒸気改質法による HTTR 水素製造システムでは、ヘリウムガスの対流伝熱を利用するが、原子炉から水蒸気改質器に至るまでに熱損失により 950°C から 880°C へ低下し、ヘリウムガスと反応管の温度差は平均で約 60°C と小さい。したがって、反応管外を流れるヘリウムガスの伝熱促進は、水蒸気改質器をコンパクトに設計するために重要な課題であり、化石燃料水素製造システムと同等の熱流束を得るために、ヘリウムガスの熱伝達率を 1170~1450W/m²K まで向上させる必要がある⁽⁶⁾。この改善策として、試験装置の水蒸気改質器には、ヘリウムガス流速増加を目的として、反応管外側に円筒状のガイド管を設置し流路断面積を小さくするとともに、伝熱面積の増加を目的として、反応管外表面に円盤状の直交フィンを設置している。本試験では、水蒸気改質器の伝熱特性を明らかとするため、水蒸気改質器の伝熱特性データを取得し、HTTR 水素製造システム動特性解析コード N-HYPAC の妥当性を検証する。

4. 2 試験

4. 2. 1 試験方法

本試験でプロセスガス（原料ガス及び水蒸気）を流した場合には、触媒層内で水蒸気改質反応及びシフト反応に伴う吸熱及び発熱が生じて、伝熱特性を精度良く測定することが困難となる。そこで、伝熱の現象を簡明化するために、プロセスガス系に窒素ガスを流し、伝熱特性の評価を行った。

4. 2. 2 試験条件

試験条件を Table 4.1 に示す。ヘリウムガスの Re 数を変化させる目的でヘリウムガス流量を 40g/s から 100g/s まで変化させた。なお、水蒸気改質器入口窒素ガス温度は、成り行き、すなわち原料ガス加熱器及び原料ガス過熱器において水蒸気改質器を流出した窒素ガスとの熱交換により定まった温度とした。水蒸気改質器内において、構造物熱容量の影響を受け、熱平衡に達するのに最も時間を要するのは、水蒸気改質器管板温度であった。このため、各条件下で水蒸気改質器管板温度が熱平衡に達したことを確認した後、温度、流量及び圧力の計測を行った。

4. 2. 3 計測項目

定常状態において、下記の計測値を記録した。

温度：水蒸気改質器入口及び出口ヘリウムガス温度、

水蒸気改質器入口及び出口窒素ガス温度、

水蒸気改質器内ヘリウムガス温度、触媒層内窒素ガス温度、内管内窒素ガス温度

反応管外壁温度

流量：ヘリウムガス流量、窒素ガス流量

圧力：水蒸気改質器入口及び出口ヘリウムガス圧力、

水蒸気改質器入口及び出口窒素ガス圧力

また、参考として、以下の温度を測定した。

ガイド管外壁温度、補償ヒータ取付管外壁温度、管板温度、補償ヒータ表面温度、
水蒸気改質器表面温度

4. 3 結果および考察

4. 3. 1 熱収支

各試験条件で熱平衡に達した後の温度、圧力及び流量の計測結果を Fig.4.1~4.6 に示す。なお、計測結果は、計測開始時刻から終了時刻までにおける平均値である。また、以下の手順に従い、ガス流れに沿った各温度測定点間における交換熱量を算出した。各試験における交換熱量の算出結果を Fig.4.1~4.6 に示す。なお、Fig.中の矢印に示す方向への熱移動を正の値として示す。ここで、触媒層内窒素ガスの流れに沿った 2 つの温度測定点間を上部から第 1 区間、第 2 区間、第 3 区間及び第 4 区間と呼ぶ。全ての条件において、熱交換は第 1 区間を中心に行われており、第 2 ~ 第 4 区間での熱交換量は小さいことが分かる。これは、窒素ガスの比熱及び流量がヘリウムガスと比較して小さいため、窒素ガスが触媒層に流入した入口部付近で熱源であるヘリウムガスにほぼ近い温度まで昇温されてしまうためである。

①内管内窒素ガスの交換熱量 Q_P

$$Q_P = -G_{N2} \cdot \int_{T_{P,in}}^{T_{P,out}} C_{P,N2} dT \quad (4.1)$$

ここで、

G_{N2} : 窒素ガスの重量流量 (kg/s)

$C_{P,N2}$: 窒素ガスの定圧比熱 (J/kg/K)

$T_{P,in}$: 内管内窒素ガスの区間入口における温度 (K)

$T_{P,out}$: 内管内窒素ガスの区間出口における温度 (K)

②触媒層内窒素ガスの交換熱量 Q_C

$$Q_C = G_{N2} \cdot \int_{T_{C,in}}^{T_{C,out}} C_{P,N2} dT \quad (4.2)$$

ここで、

$T_{C,in}$: 触媒層内窒素ガスの区間入口における温度 (K)

$T_{C,out}$: 触媒層内窒素ガスの区間出口における温度 (K)

③ヘリウムガスから反応管への交換熱量 $Q_{He,i}$

$$Q_{He,i} = Q_C - Q_P \quad (4.3)$$

④ヘリウムガスからガイド管への交換熱量 $Q_{He,o}$

$$Q_{He,T} = G_{He} \cdot \int_{T_{He,in}}^{T_{He,out}} C_{P,He} dT \quad (4.4)$$

$$Q_{He,o} = Q_{He,T} - Q_{He,i} \quad (4.5)$$

ここで、

G_{He} : ヘリウムガスの重量流量 (kg/s)

$C_{P,He}$: ヘリウムガスの定圧比熱 (J/kg/K)

$T_{He,in}$: 内管内窒素ガスの区間入口における温度 (K)

$T_{He,out}$: 内管内窒素ガスの区間出口における温度 (K)

4. 3. 2 解析結果との比較

HTTR 水素製造システム動特性解析コード N-HYPAC における水蒸気改質器の伝熱特性に関する部分の検証を目的として、同コードにより各試験条件下における水蒸気改質器内の温度分布を算出し、試験結果との比較を行った。ここで、温度に関する境界条件は、ヘリウムガス入口温度として反応管下部の位置に設置されている TE5R におけるヘリウムガス温度、及び窒素ガス入口温度として反応管下部から 6.37m の位置に設置されている TE6R における窒素ガス温度を用いた。また、解析コードにおける熱伝達係数の算出には、以下に示す式を使用した。

①ヘリウムガス-反応管間の熱伝達係数 α_{He}

Knudsen の式⁽⁷⁾

$$\frac{\alpha_{He} \cdot D_{He}}{\lambda_{He}} = 0.039 \cdot Re^{0.87} \cdot Pr^{0.4} \cdot \left(\frac{S_p}{D_{He}} \right)^{0.4} \cdot \left(\frac{H_f}{D_{He}} \right)^{-0.19} \quad (4.6)$$

ここで、

Re : レイノルズ数

Pr : プラントル数

D_{He} : ヘリウムガス流路代表径 (=0.009m)

λ_{He} : ヘリウムガスの熱伝導率 (W/m/K)

S_p : フィン間隔 (=0.002m)

H_f : フィン高さ (=0.002m)

②触媒層内窒素ガス-反応管間及び触媒層内窒素ガス-内管間の熱伝達係数 α_c

Yagi-Kunii の式⁽⁹⁾

$$\frac{\alpha_c \cdot d_P}{\lambda_g} = \left(\frac{d_P}{D_t} \right) \cdot \left(\frac{\lambda_e}{\lambda_g} \right) \cdot \left\{ a^2 + \frac{\phi(b)}{y} \right\} \quad (4.7)$$

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_g} = \frac{\lambda_e^\circ}{\lambda_g} + \psi \beta \cdot Pr \cdot Re_P \quad (4.8)$$

$$\frac{\lambda_e^\circ}{\lambda_g} = \varepsilon \cdot \left(1 + \frac{\alpha_{rv} \cdot d_P}{\lambda_g} \right) + \frac{1 - \varepsilon}{\frac{1}{\phi} + \frac{\alpha_{rs} \cdot d_P}{\lambda_g} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\lambda_g}{\lambda_s}} \quad (4.9)$$

$$\alpha_{rv} = \frac{0.1952}{1 + \frac{\varepsilon}{2 \cdot (1 - \varepsilon)} \cdot \frac{(1 - p)}{p}} \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^3 \quad (4.10)$$

$$\alpha_{rs} = 0.1952 \frac{p}{(2 - p)} \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^3 \quad (4.11)$$

$$y = \frac{4 \left(\frac{d_P}{D_t} \right) \cdot \left(\frac{L_p}{D_t} \right) \cdot \left(\frac{\lambda_e}{\lambda_g} \right)}{Pr \cdot Re_P} \quad (4.12)$$

$$b = \frac{1}{2} \left(\frac{D_t}{d_P} \right) \cdot \left(\frac{\alpha_w \cdot d_P}{\lambda_g} \right) / \left(\frac{\lambda_e}{\lambda_g} \right) \quad (4.13)$$

$$\frac{\alpha_w \cdot d_P}{\lambda_g} = \frac{\alpha_w^\circ \cdot d_P}{\lambda_g} + 1 / \left(\frac{1}{\frac{\alpha_w^* \cdot d_P}{\lambda_g}} + \frac{1}{\psi_w \cdot Pr \cdot Re_P} \right) \quad (4.14)$$

$$\frac{\alpha_w^\circ \cdot d_P}{\lambda_g} = 1 / \left(\frac{1}{\lambda_w^\circ / \lambda_g} - \frac{0.5}{\lambda_e^\circ / \lambda_g} \right) \quad (4.15)$$

$$\frac{\lambda_w^\circ}{\lambda_g} = \varepsilon_w \cdot \left(2 + \frac{\alpha_{rv} \cdot d_P}{\lambda_g} \right) + \frac{1 - \varepsilon_w}{\frac{1}{\phi} + \frac{\alpha_{rs} \cdot d_P}{\lambda_g} + \frac{3 \cdot \lambda_s}{\lambda_g}} \quad (4.16)$$

$$\frac{\alpha_w^* \cdot d_P}{\lambda_g} = 4.0 \cdot Pr^{1/3} \cdot Re_P^{1/2} \quad (4.17)$$

ここで、

d_P : 粒子粒径 (=0.00476m)

D_t : 充填層径 (=0.0645m)

λ_g : 流体熱伝導率 (W/m/K)

λ_e : 流れと直角方向 (半径方向) の充填層有効熱伝導率 (W/m/K)

$a : b$ の関数

λ_e° : 流体静止時における充填層有効熱伝導率 (W/m/K)

ψ : (充填層横方向流体質量速度) / (流れ方向の流体質量速度)

β : (粒子中心距離平均値) / (粒子粒径)

$\psi \beta = 0.13$

Pr : プラントル数

Re_P : 粒子レイノルズ数 ($= d_P \cdot u_0 / \nu$)

u_0 : 充填層断面積当たり見かけ流速 (m/s)

ν : 流体の動粘性係数 (m²/s)

ε : 空隙率 (=0.354)

α_{rv} 、 α_{rs} : ふく射熱伝達率 (W/m²/K)

ϕ : (粒子接触点近傍の流体膜有効厚さ) / (粒径)

λ_s : 固体熱伝導率 (=1.05W/m/K)

p : 粒子表面のふく射率 (=0.55)

T : 温度 (K)

L_p : 充填層長さ (m)

α_w : 管内壁表面における見かけの熱伝達率 (W/m²/K)

α_w^* : 流体静止時における α_w の値 (W/m²/K)

α_w^* : 管内壁表面境界層による真の熱伝達率 (W/m²/K)

ψ_w : 壁近傍における (充填層横方向流体質量速度) / (流れ方向の流体質量速度) の値

λ_w : 管壁近傍における流体静止時の熱伝導率 (W/m/K)

ε_w : 壁近傍の空隙率

③内管内窒素ガス - 内管間の熱伝達係数 α_{inn}

Kays の式⁽¹⁰⁾

$$\frac{\alpha_{inn} \cdot D_{inn}}{\lambda_g} = 0.022 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.5} \quad (4.18)$$

ここで、

D_{inn} : 内管内流路代表径 (=0.0527m)

Fig.4.7～Fig.4.12 に水蒸気改質器内の温度分布に関する解析結果（実線）及び試験結果（▲：ヘリウムガス、■：触媒層内窒素ガス、●：内管内窒素ガス）を示す。各試験条件の解析結果は試験結果と同様の温度分布を示しており、比較的良く一致した。これより、解析コード N-HYPAC における水蒸気改質器の伝熱特性に関する部分の妥当性が確かめられた。

Table 4.1 Experimental conditions

Run No.	Steam reformer inlet temperature [°C]	Flow rate [g/s]		Steam reformer inlet pressure [MPa]	
		Helium	Nitrogen	Helium	Nitrogen
N1	200	40		3.17	3.19
N2	300	40		3.17	3.19
N3		40		3.17	3.19
N4		60		3.20	3.22
N5		80		3.23	3.25
N6		100		3.27	3.29

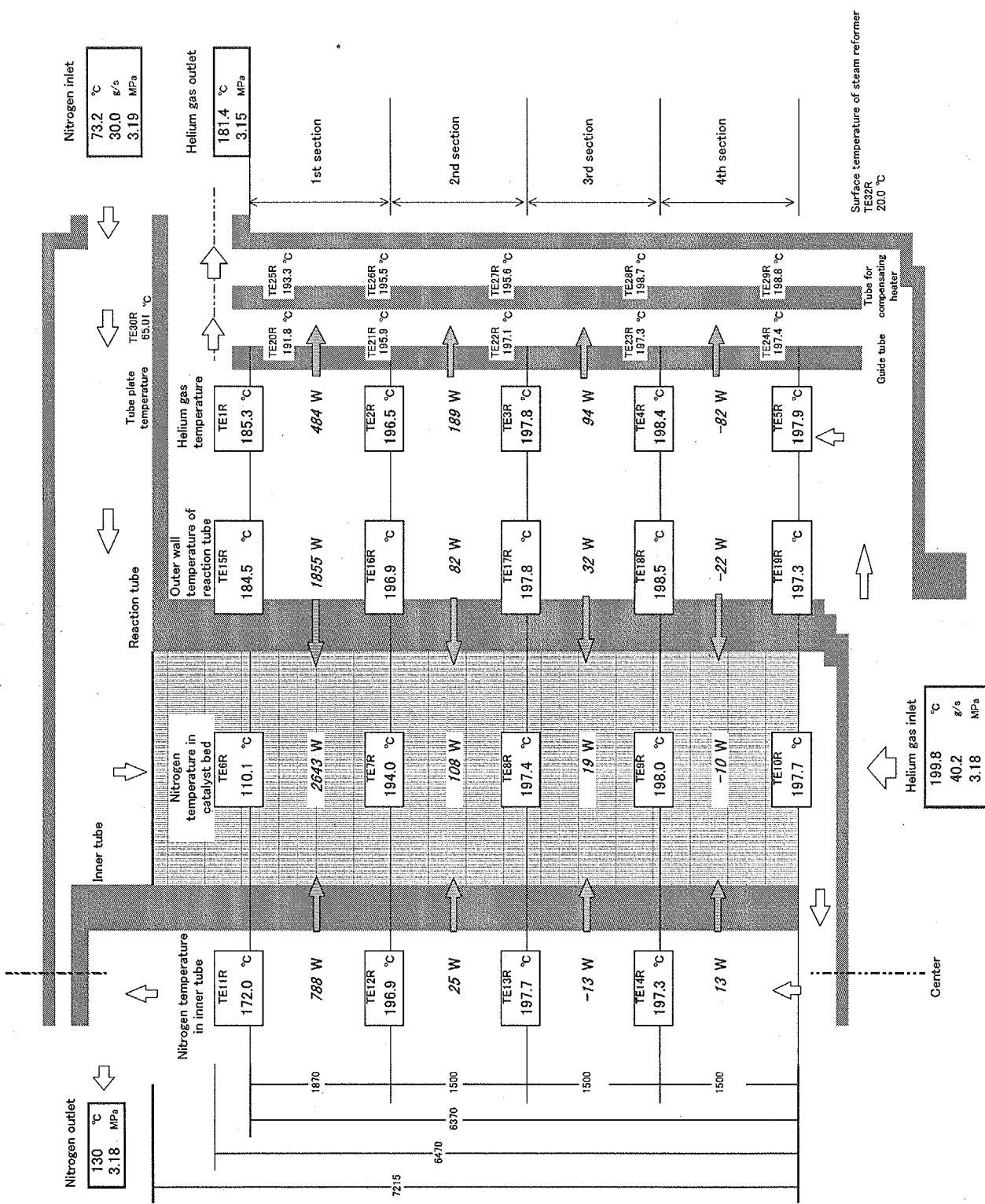


Fig.4.1 Heat balance of Run No. N1.

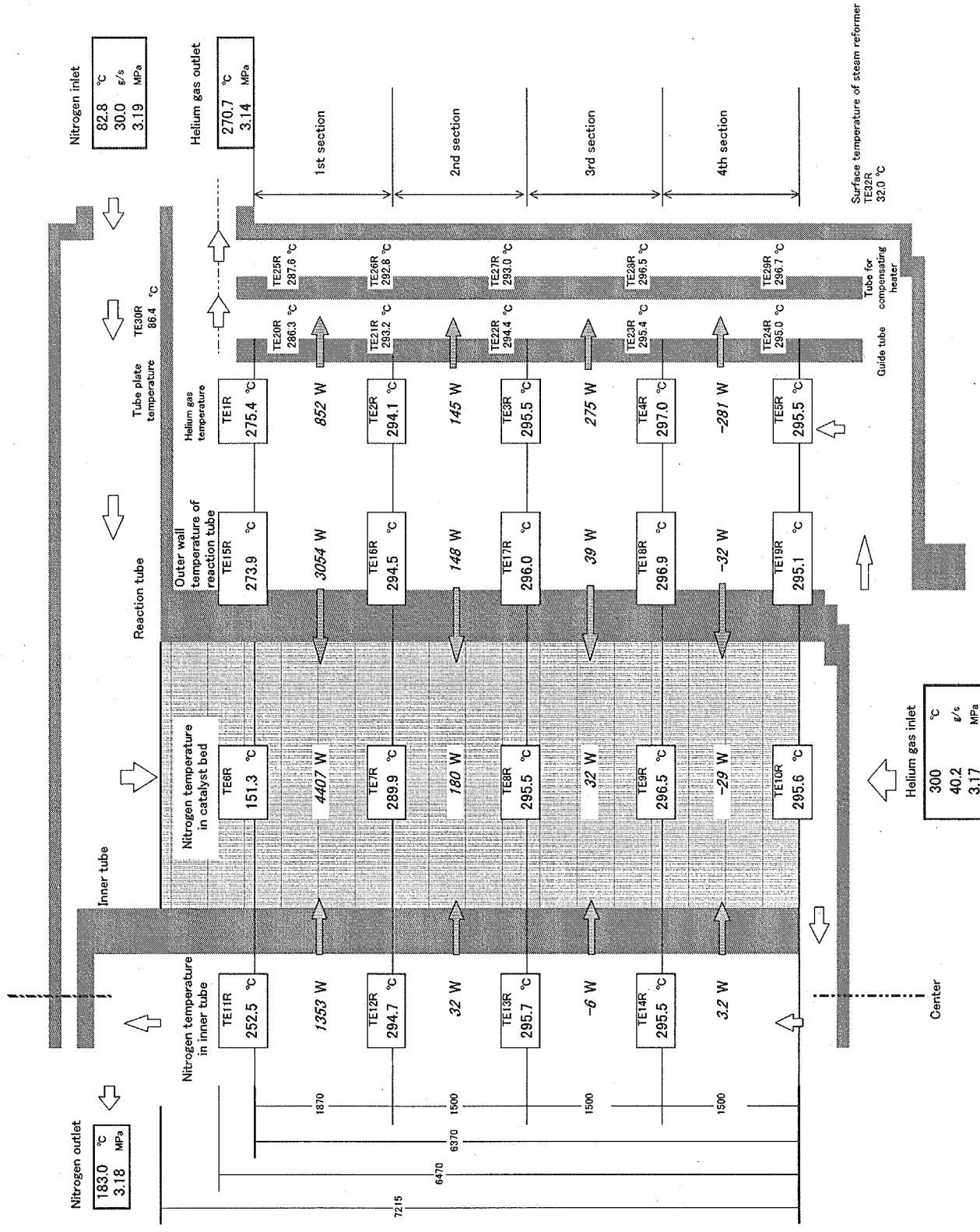


Fig.4.2 Heat balance of Run No. N2.

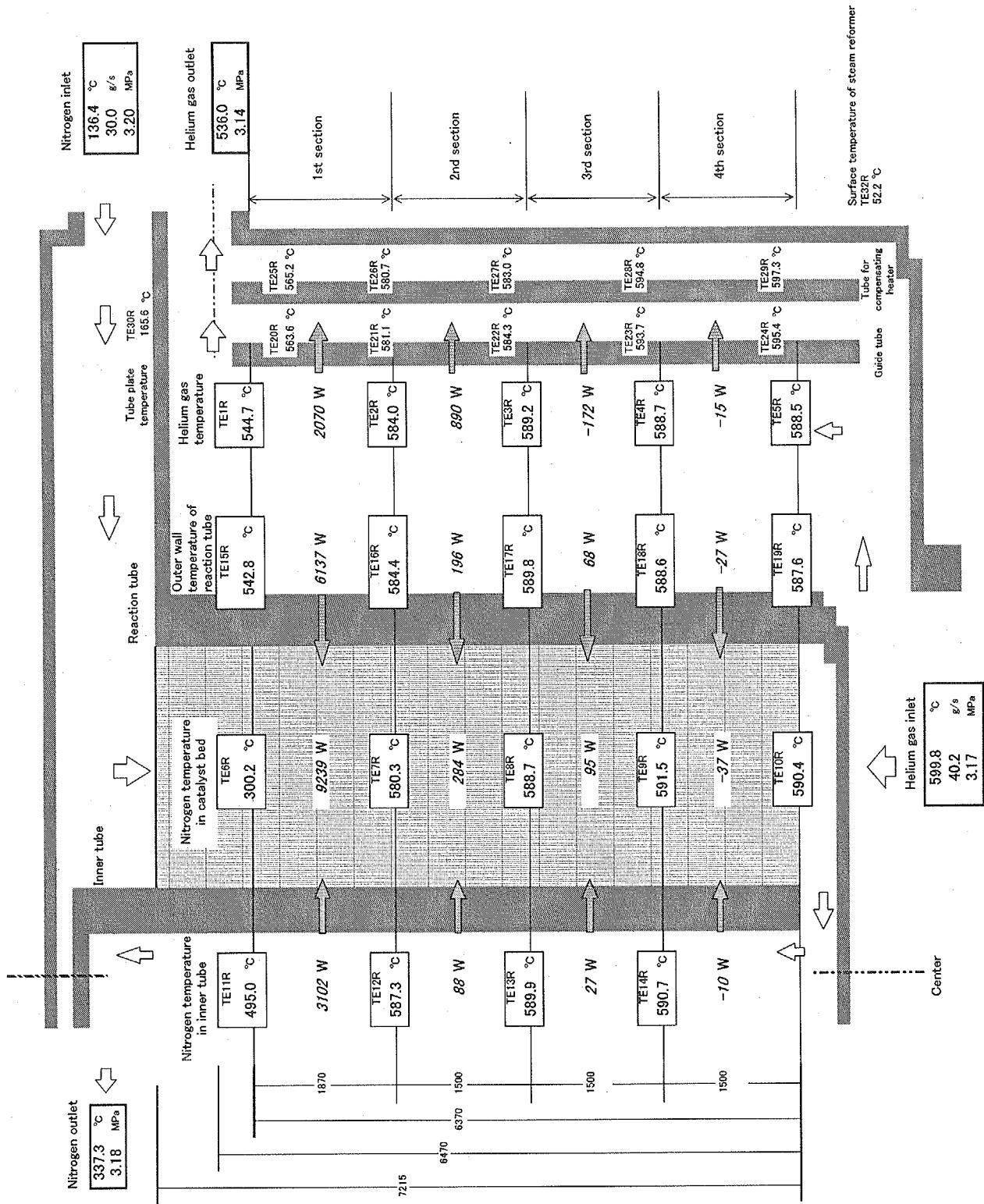


Fig.4.3 Heat balance of Run No. N3.

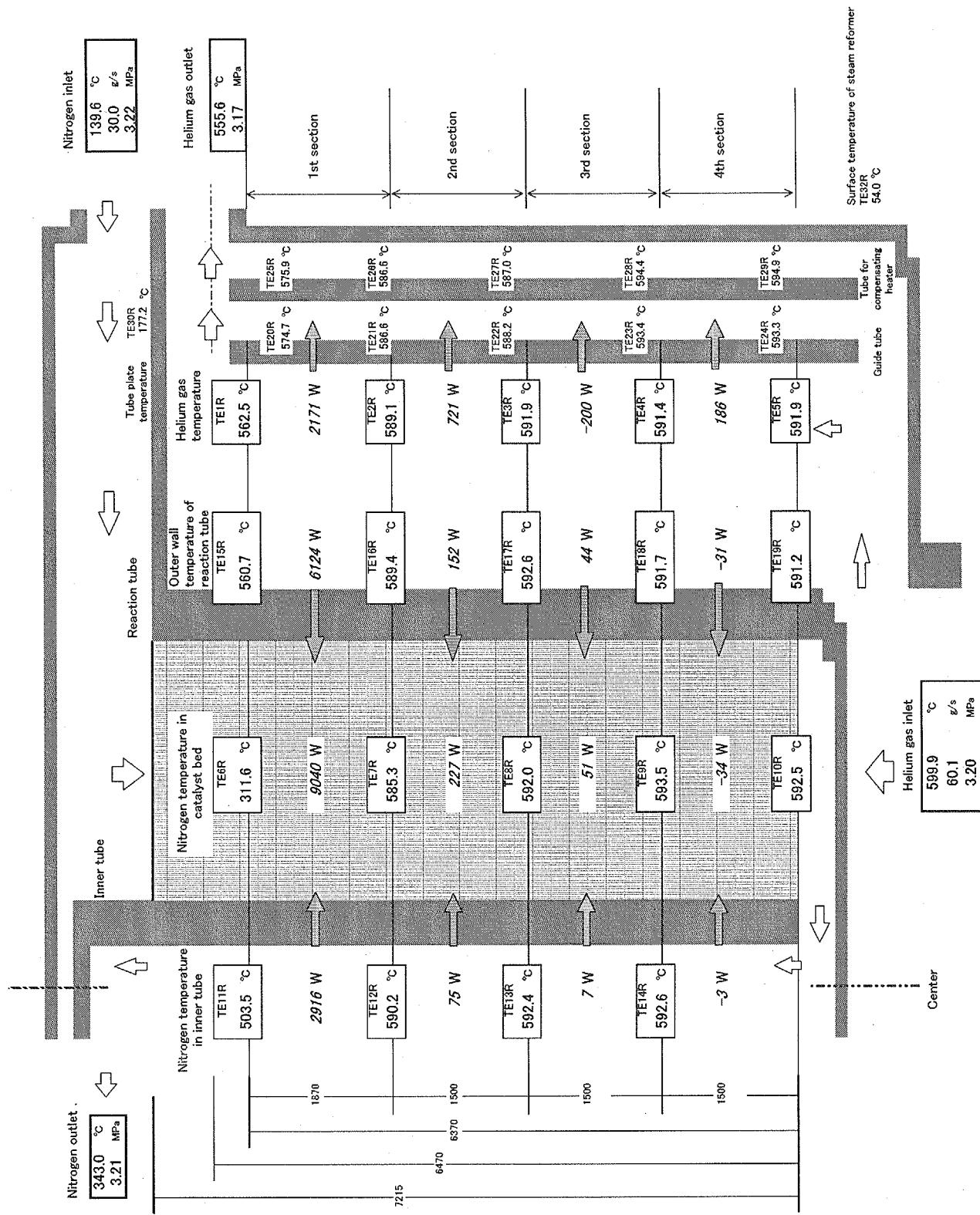


Fig. 4.4 Heat balance of Run No. N4.

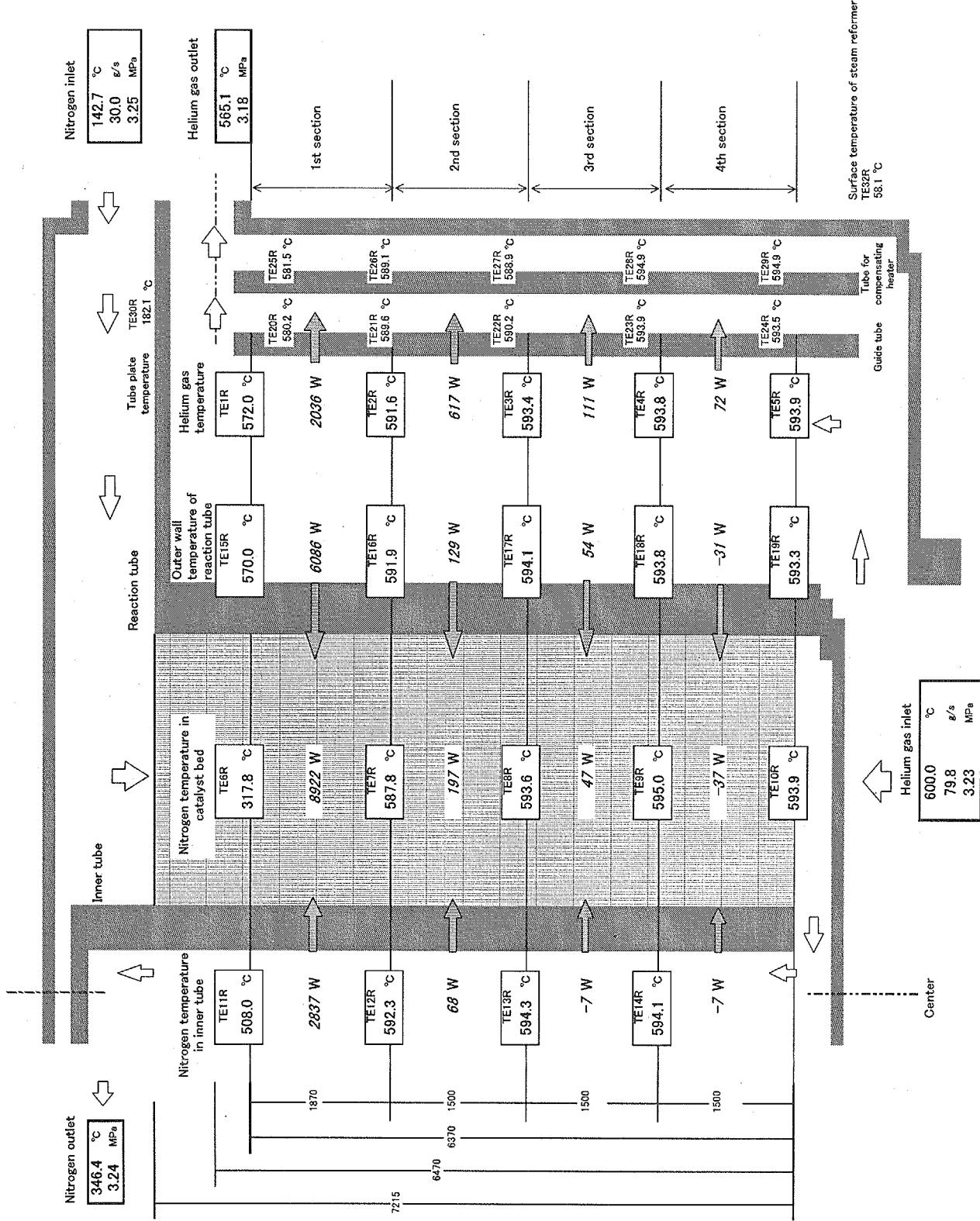


Fig.4.5 Heat balance of Run No. N5.

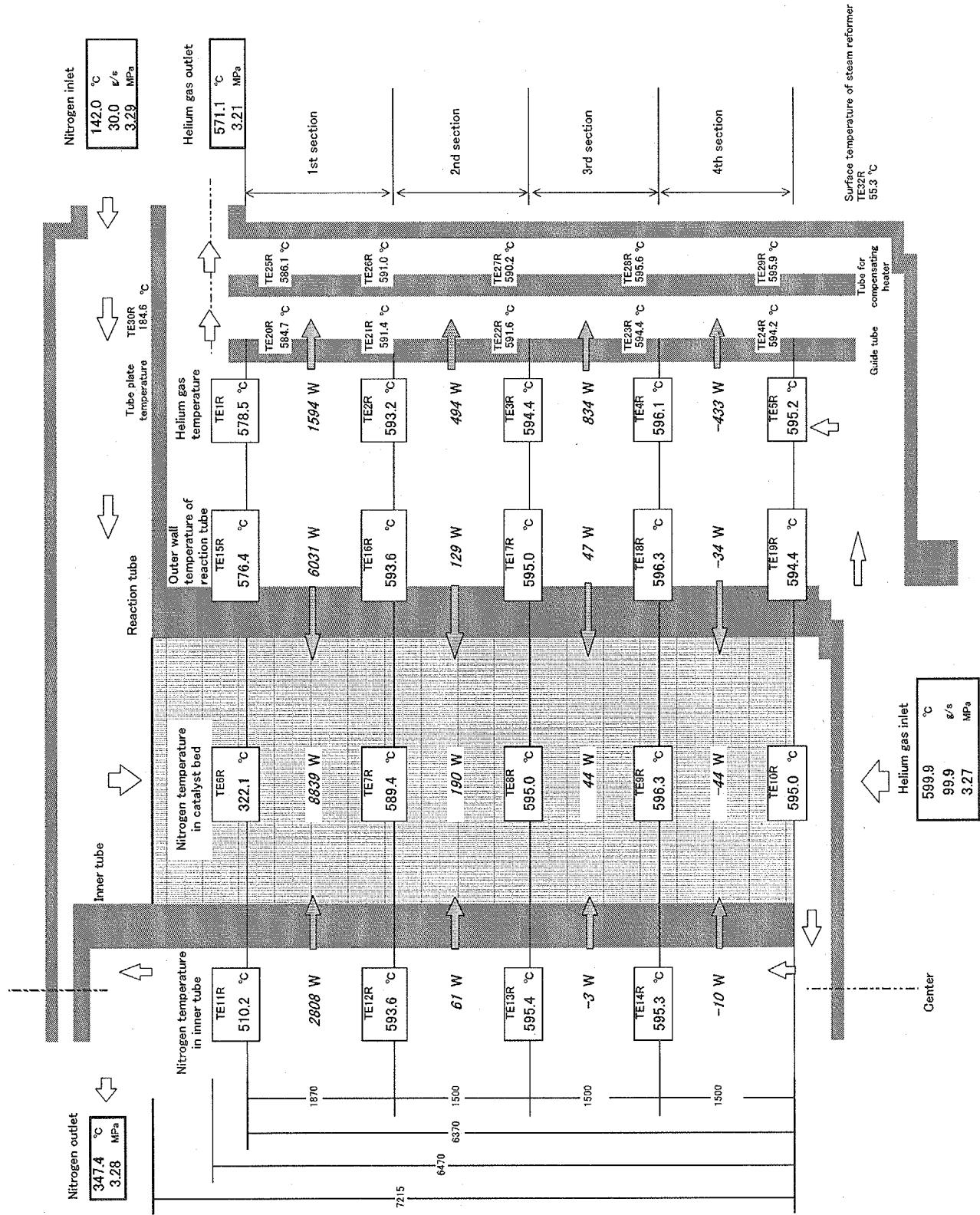


Fig.4.6 Heat balance of Run No. N6.

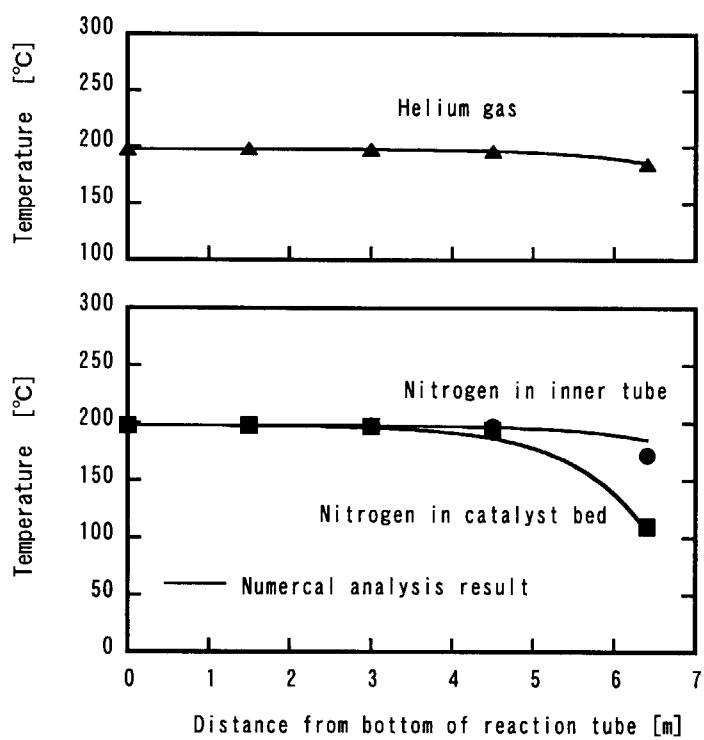


Fig.4.7 Comparison between experimental and numerical analysis results of temperature of Run No. N1.

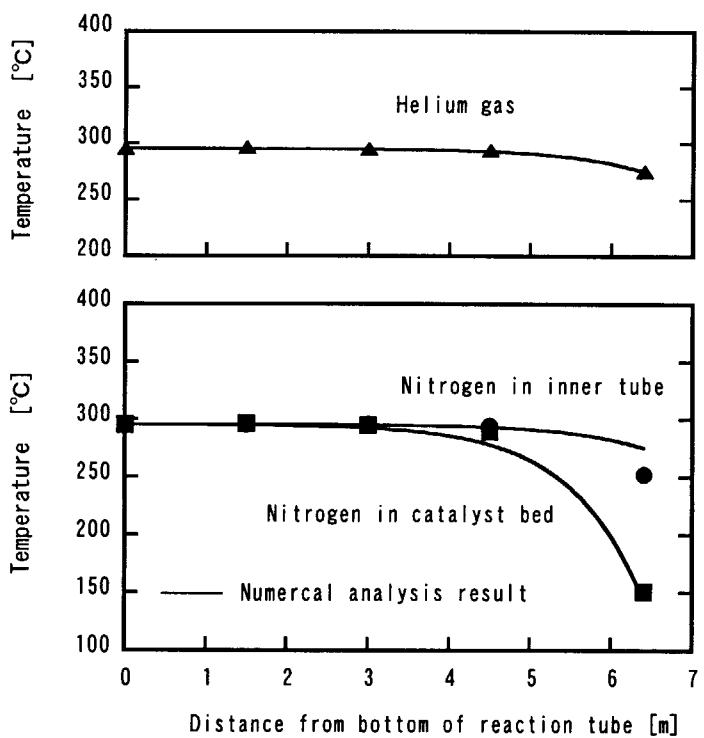


Fig.4.8 Comparison between experimental and numerical analysis results of temperature of Run No. N2.

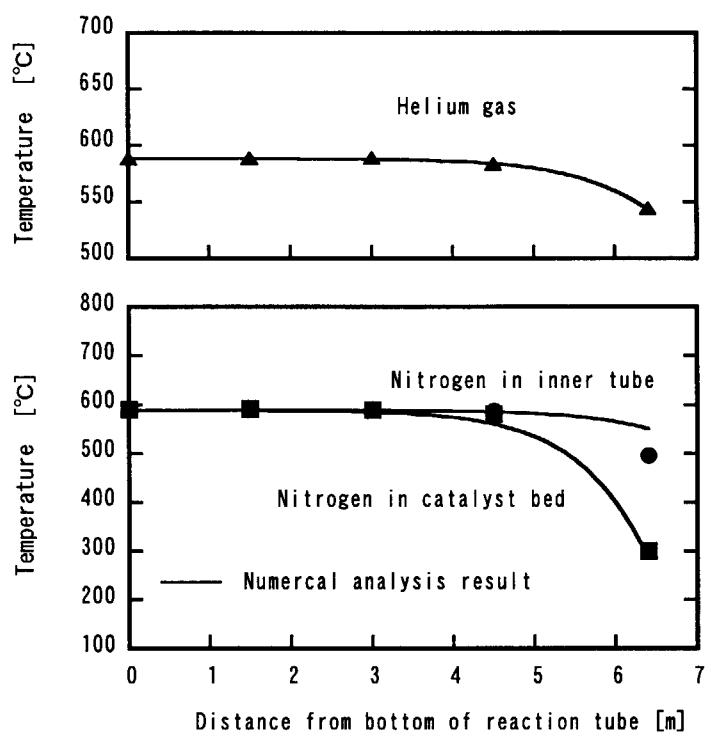


Fig.4.9 Comparison between experimental and numerical analysis results of temperature of Run No. N3.

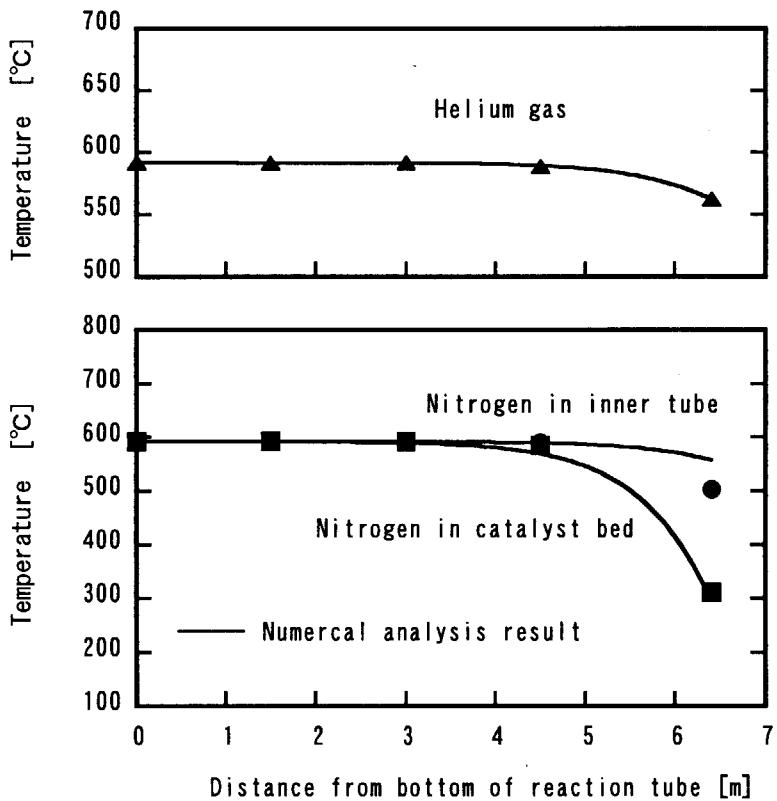


Fig.4.10 Comparison between experimental and numerical analysis results of temperature of Run No. N4.

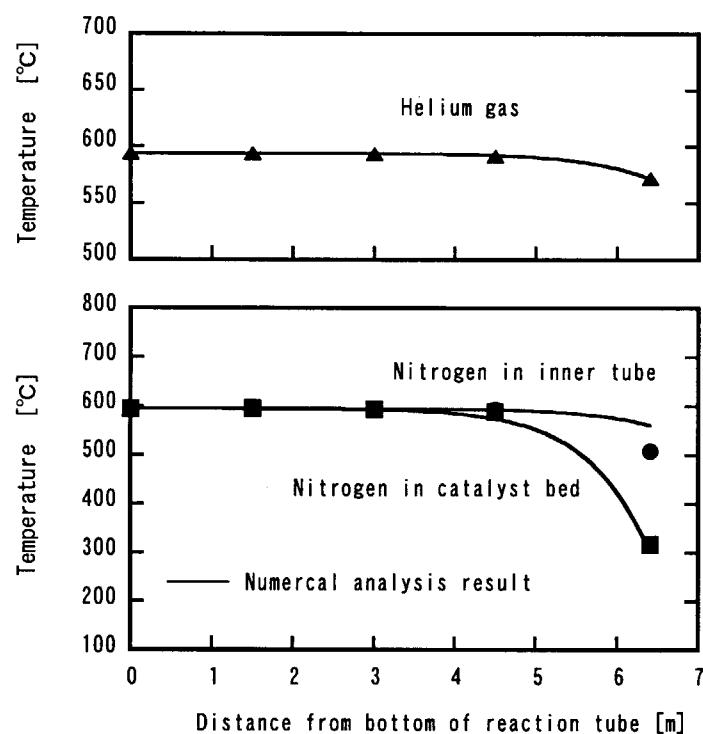


Fig.4.11 Comparison between experimental and numerical analysis results of temperature of Run No. N5.

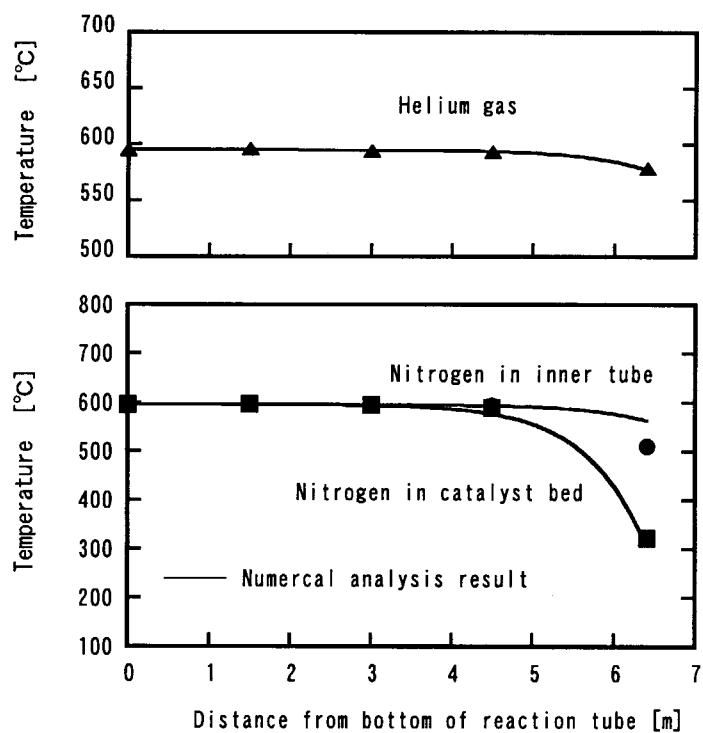


Fig.4.12 Comparison between experimental and numerical analysis results of temperature of Run No. N6.

5. 運転記録

5. 1 運転履歴

第1回試験運転は平成14年3月1日から3月13日までの13日間実施した。試験装置各設備プロセス量の代表的な温度、流量、圧力、差圧のトレンド・グラフをFig.5.1に示す。

(1) 起動操作

3月1日にヘリウムガス供給設備を3.1MPaまで昇圧し、その途中2.6MPaでヘリウムガス循環機を起動した。さらにヘリウムガス加熱器を起動して運転を開始した。ヘリウムガス循環機流量325g/s、水蒸気改質器ヘリウムガス流量40g/sとし、水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度200℃まで昇温した。水蒸気供給設備は常温クリーンアップから温水クリーンアップ状態に移行した。

(2) 試験運転

ヘリウムガス流量40g/s一定の条件で、水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度が200℃に到達してから試験運転に入った。この状態を2日間保持してTable4.1に示す熱流動特性試験N1のデータを測定した。3月4日にヘリウムガス循環機流量325g/sから305g/sに変更、水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度を200℃から300℃に昇温し、この状態を2日保持し熱流動特性試験N2のデータを測定した。3月6日に水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度を300℃から600℃に昇温し2日間状態を保持して熱流動特性試験N3のデータを測定した。次に、3月8日にヘリウムガス循環機流量325g/sから340g/sに、また水蒸気改質器ヘリウムガス流量40g/sから60g/sに変更し、2日間状態を保持して熱流動特性試験N4のデータを測定した。3月10日には、水蒸気改質器ヘリウムガス流量60g/sから80g/sに変更して1日間状態を保持して熱流動特性試験N5のデータを測定した。最後に、3月11日には、ヘリウムガス循環機流量340g/sから370g/sに、水蒸気改質器ヘリウムガス流量80g/sから100g/sに変更して1日間状態を保持して熱流動特性試験N6のデータを測定した。

(3) 停止操作

3月12日に試験を終了し停止操作に入った。まず、ヘリウムガス循環機流量370g/sから350g/sに、水蒸気改質器ヘリウムガス流量100g/sから91g/sに変更した後、ヘリウムガス圧力を3.1MPaから2.6MPaまで降圧開始した。途中、ヘリウムガス循環機の回転数高の領域を横切るため、ヘリウムガス循環機流量をさらに350g/sから310g/sに減少させ、また水蒸気改質器ヘリウムガス流量を82g/sまで減少させた。その後、水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度を常温まで降温する操作を開始し、3月13日にヘリウムガス加熱器を停止して、第1回試験運転を終了した。運転終了後の3月14日にヘリウムガスを回収した。

5. 2 ヘリウムガス循環設備の純度管理履歴

ヘリウムガス循環設備のヘリウムガスは、試験装置の昇温後ヘリウム精製設備を稼動させヘリウムガス中の不純物除去を行うことにより、水分濃度が常に所定の値以下となるよう管理する。水分は水分計によって連続的に監視し、試験装置が昇温中に水分濃度が15ppmを超える場合には10ppm以下に下がるまで昇温を中断し減少を待つことにしている。またヘリウムガス中の水

素、窒素、一酸化炭素、二酸化炭素、メタンを計測設備のガスクロマトグラフィー分析により約12分毎に監視し、水分濃度の結果と合わせて濃度上昇の原因が昇温にともなう一時的なものか、ヘリウム精製設備の不純物除去能力の低下によるものか、あるいはヘリウムガス設備に他の設備のガスの漏えいが生じて起きたものかを判定するのに用いている。

第1回試験運転における水分計の監視結果をFig.5.2に示す。試験運転直前の2月始めまで機能試験運転を行っていたこともあり、ヘリウムガスの不純物濃度は低く、試験装置昇温後の水分濃度上昇は無かった。また、ガスクロマトグラフィー分析による水素、窒素、一酸化炭素、二酸化炭素、メタンはいずれも検出されなかった。

5. 3 水蒸気供給系の水質管理履歴

試験装置の水蒸気供給設備は、運転前の起動準備から水素製造準備完了となるまでの期間にクリーンアップ運転を実施する。クリーンアップ運転は給水や蒸気の通水・通気とドレンにより給水・蒸気が接する機器・配管の内面の汚れや錆びを系外に排出するとともに、化学的に安定な酸化膜を形成させ機器・配管の腐食を防止し、水質の向上と維持を図るものである。試験装置ではヘリウム加熱器の昇温に同期させて、給水ポンプから給水バイパス冷却器の循環ラインならびに蒸気発生器の(1)常温、(2)温水、(3)蒸気の3段階のクリーンアップ運転を実施し、その間随時サンプル水の分析を行い水質の管理を行う。

水質管理の分析項目とその標準値は、ボイラ水（ボイラ内部で濃縮された水でドラム内の水を指す）ならびに給水（給水ポンプによってボイラ入口に供給される復水と補給水の混合水）についてJIS B 8223-1999に定められているが、実ボイラへの適用にあたっては運転方法とか稼動実績などボイラ固有の条件を考慮して標準値にのっとって個々に管理目標値を設定し遵守するほうが効果的と言われている⁽¹¹⁾。しかしながら、その標準値は長期にわたる定常運転時の値であるから、本試験装置の運転期間1~2ヶ月の期間内にボイラを起動することを考慮すると、本試験装置では運転期間内に全ての分析項目についてJIS B 8223-1999の標準値を満足することは困難と考えられた。そこで、本試験装置では、管理目標値としてJIS B 8223-1999の標準値を用い、仮にこれが満たされないとしてもボイラ及び第一種圧力容器の開放検査において不純物の堆積や孔食の有無を確認することにより、ボイラ及び第一種圧力容器の健全性を確保するものとした。

本試験装置における水質分析項目、サンプル点とJIS B 8223-1999に基づく管理目標値をTable5.1に示す。なお、油脂分については本試験装置では純水を原水として用いること、銅については水蒸気供給設備に銅を使用していないことから、これらを検査対象外とした。また、原水から給水に至る各処理装置の処理水の水質については、JIS B 8223-1999の対象外であるが、給水とボイラ水の管理目標値が達成できるように各処理装置の能力を考慮して、Table5.1に示す管理目標値を定めた。ボイラから出た蒸気の水質にも標準値は無いが、蒸気過熱器出口ドレン水については参考のためサンプルしている。

この管理目標値に基づき、本試験装置の水質管理は以下のように行う。Fig.2.1の系統構成に示すように、タンクローリーで運搬された純水ならびに水素製造時にセパレータに溜まる凝縮水は一旦給水受入タンクに貯蔵する。その後、水精製器により電気伝導率を低減し、脱器装置により溶存酸素を制御し、薬液注入装置によりアンモニアを注入することでpHを制御し、これを補給水

として給水タンクに送り込む。給水タンクの水は給水ポンプにより送り出し、水予熱器を経て蒸気発生器に至る。また蒸気発生器入口を迂回した一部の給水は給水バイパス冷却器を経て再び給水タンクに戻る。給水の硬度、鉄分等の管理は、給水バイパス冷却器出口でのドレン操作によって行い、またボイラ水の塩化物イオン、シリカの管理は蒸気発生器内の溜水のドレン操作によって行う。

第1回試験運転は、水素製造を行わないため、ヘリウムガス温度に関する試験運転をしながらクリーンアップを進め、蒸気供給準備完了後はその水質を維持する運転(待機運転)とした。水分析はクリーンアップ運転の状況に応じて1日1回実施した。水蒸気供給設備は2月中旬に終了した機能試験以来、常温クリーンアップ状態にあり、3月1日の第1回試験運転の運転開始日に200°Cまで昇温して温水クリーンアップ運転に入った。その後、3月6日に水蒸気改質器入口ヘリウム温度を300°Cから600°Cに昇温し、蒸気クリーンアップ状態に移行した。

第1回試験運転の水分析の結果をFig.5.3に示す。(a)のpHは、脱器装置出口、給水タンク(出口)とともに管理目標値(8.0~9.2)を維持した。蒸気発生器(ドラム水)については当初管理目標値を満足していたが、蒸気クリーンアップが始まると減少し、僅かに管理目標値を下回った7.8~7.9まで低下した。蒸気過熱器は参考データである。(b)電気伝導度は脱器装置出口、蒸気発生器ドラム水ともに運転期間を通じて管理目標値内にあった。蒸気発生器ドラム水は蒸気クリーンアップ運転に入ると増加傾向を示していた。蒸気過熱器は参考データである。(c)給水タンクの溶存酸素は温水クリーンアップとともに増加し最大約1300μg/lまで増加したが、蒸気クリーンアップに入ると管理目標値以内にまで下がった。(d)給水タンクの鉄分は、運転当初(長期の常温クリーンアップ後)から管理目標値30μg/lの5倍程度大きかったが、溶存酸素と同様に、温水クリーンアップが始まるとさらに増加し500μg/lに達し、その後時間とともに下がる傾向を示した。しかし、運転期間を通じて管理目標値以下にはならなかった。蒸気発生器ドラム水の鉄分は参考値であるが、温水クリーンアップ、蒸気クリーンアップとともに高い値を維持し、変わること無かった。(e)塩化物イオンは運転期間を通じて管理目標値を満足していた。なお、図には無いが、全硬度、シリカは運転期間を通じて管理目標値を満足していた。

以上から、今運転では電気伝導率、塩化物、全硬度、シリカは問題なく管理目標値を達成できた。pHについては昇温後の蒸気発生器ドラム水で管理目標値より低めな点を除き、管理目標値を達成できた。また、溶存酸素については蒸気クリーンアップにより管理目標値を達成できた。

5. 4 ガス・水・電気の消費統計

本試験装置の第1回試験運転におけるガス・水・電気の消費実績は下記の通りである。

(1) 可燃性ガス

今運転では、水蒸気改質器に窒素のみを流す試験を行ったため、可燃性ガス(LNG、LPG、水素)は使用されなかった。

(2) ヘリウムガス

ヘリウムガスについては、ヘリウム精製設備の再生運転やガス分析ライン(ガスクロ、水分計)の運転により系外に僅かづつ排出している。

ヘリウムガスの消費量は、本試験装置においてはヘリウムガス循環設備のヘリウムガス貯蔵タ

ンクであるヘリウム・カードルの圧力降下から推計できる。ヘリウム・カードルは、運転開始前の状態で低圧側 13.4MPa、高圧側 13.9MPa(8.6°C)、運転終了後には、低圧側 12.7MPa、高圧側 14.2MPa(18.4°C)であった。圧力降下から計算された消費量は約 90N m³である。

(3) 窒素ガス

窒素ガスは、水蒸気改質器を含む原料・後処理ラインのバージ用ガス、ヘリウムガス精製設備の再生運転用、ならびに水蒸気供給設備に使用する。水蒸気改質器反応管はヘリウムガスと生成ガスとの差圧設計としているため、ヘリウムガス側を加圧している間は生成ガス側も常に加圧する必要があり、水素を製造しない期間中は窒素ガスを常に通気しフレアスタックから放出する運転を行うので、バージ用ガスとしての窒素ガスは大きな消費量となる。

今試験運転での LN2 ローリーによる充填実績を Fig. 5.4 に示す。充填は 2 日に一度の割合で実施され、ピーク時の LN2 充填量は約 2500 Nm³/day 程度、その時の全系統消費量は約 36 g/s であり、原料・後処理系のバージ用ガスに 30g/s、その他の系統で 6g/s という内訳であった。

(4) 純水

水蒸気供給設備は蒸気発生の原料として純水を使用するが、純水は水蒸気製造前であっても設備のクリーンアップのために使用され汚れた水は設備外に排出される、また蒸気製造時には蒸気ラインのクリーンアップにともなう設備外への排出、水素製造前の待機運転においてはいつでも水蒸気を供給できるよう供給ラインの暖機を兼ねて定格の 60%の水蒸気(28g/s)を蒸気過熱器を通じて設備外に放出するアイドル運転を行う。したがって、本試験装置が水素を製造しない試験運転を行っても、純水は相当量を継続的に消費する。純水の今試験運転でのローリーによる補給実績を Fig. 5.5 に示す。補給は 2 日に一度の割合で実施され、補給量はピーク時に約 4.5t/day、ピーク時の全系統消費量は 52g/s、蒸気過熱器を通じての排出に 28g/s、蒸気発生器の圧力調整ならびに各部位の定期的なドレンに 24g/s という内訳であった。

(5) 電気

また、本試験装置の動力源は商用電力であり、起動から昇温していくことにより電力の使用量も増大する。今運転の使用実績を Fig. 5.6 に示す。水蒸気改質器ヘリウムガス温度 600°C、ヘリウムガス流量 100g/s、圧力 3.1MPa 時にピークを迎え、約 650KVA(約 12MWh)であった。

5. 5 運転体制並びに運転訓練

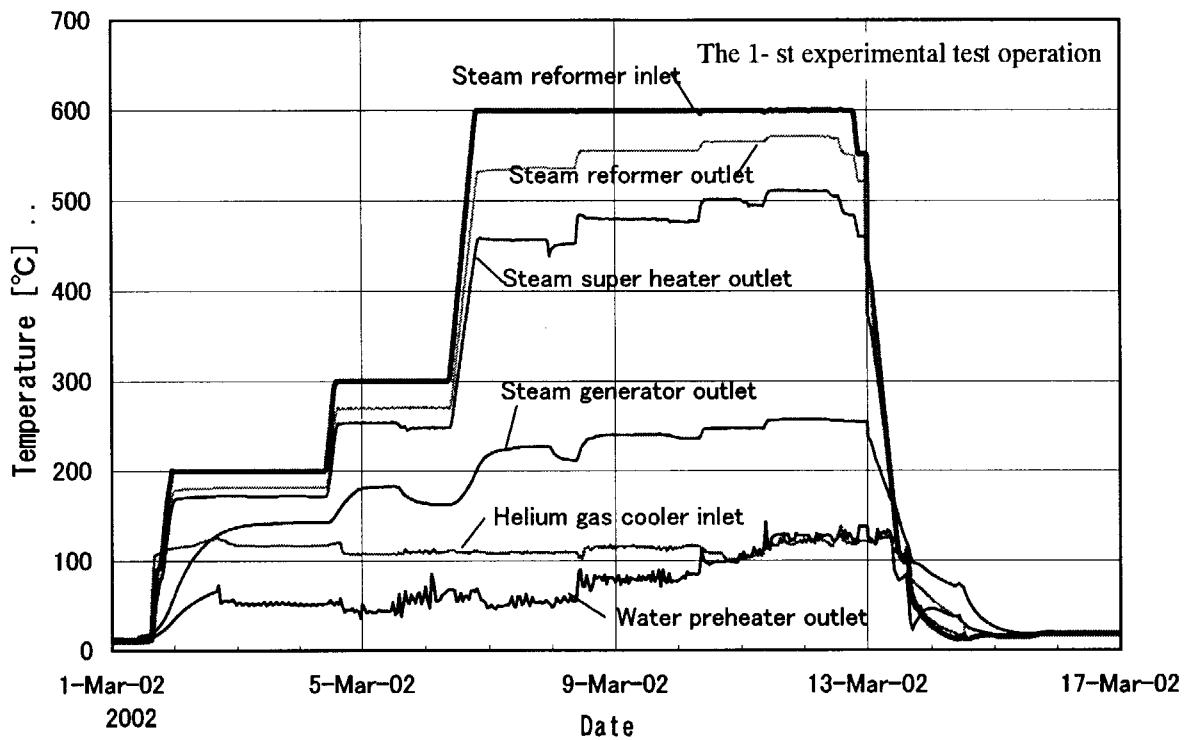
本試験装置の運転は、1班 3 名の直員が、5班 3交代で制御室ならびに現場での操作・点検に従事し、また日勤者が必要に応じてガス・水等の補給、水質分析等の作業を補助するという体制で行われる。第1回試験運転は運転員にとって約 5 ヶ月間の教育訓練受講後行われる初の運転であり、水蒸気改質器の特性測定という試験項目を実施することの他に、運転員の訓練を目的の 1 つとして、現場での運転操作や点検を通じて各設備の構成と配置、操作箇所、運転マニュアルを習熟するとともに十分な経験を積んでいくという実地訓練として実施された。

運転員は、計画された試験運転工程に従って起動操作に入り、ヘリウム供給設備と不活性設備による系統の昇圧、昇温、水蒸気供給設備の常温クリーンアップ状態から温水クリーンアップ状態への切替、水質管理、蒸気クリーンアップ状態への切替という操作ステップを順次遂行し、試験条件の運転に入った。試験運転では試験条件での運転を実施し、その後、停止操作に入った。

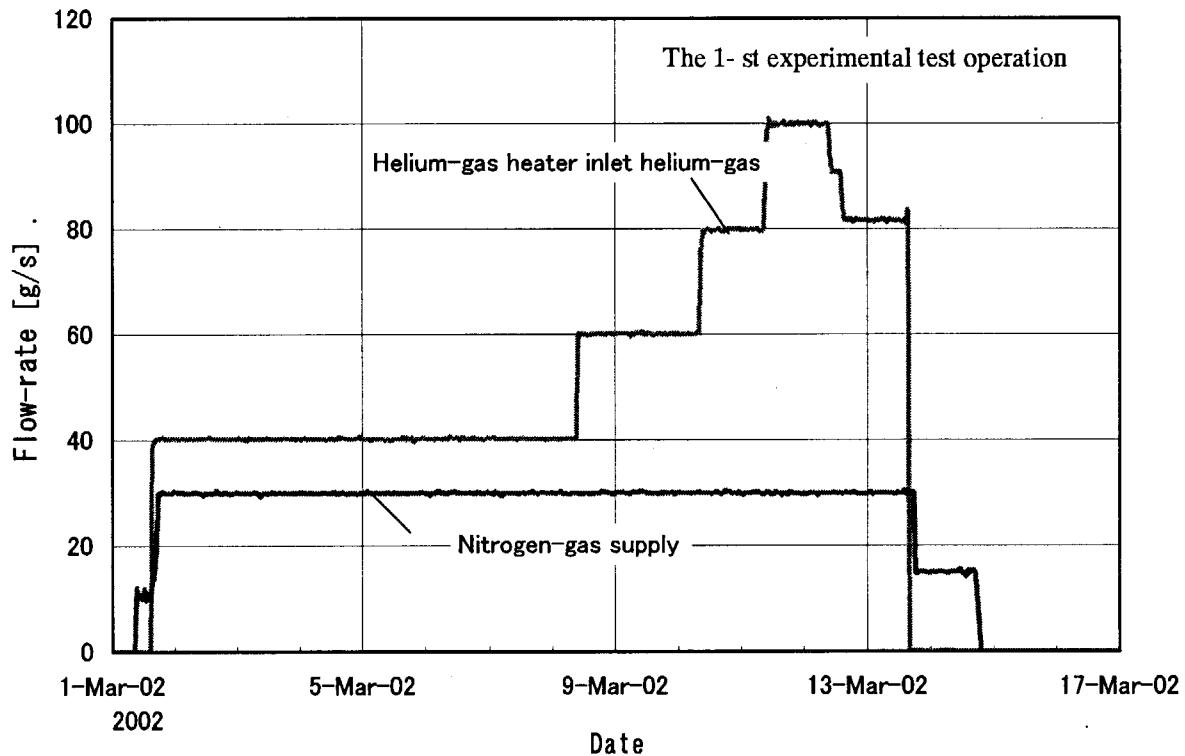
降温、降圧、ヘリウム回収を遂行し、停止操作を完了した。また、運転期間中、制御室の機器運転制御盤の監視と操作、現場制御盤や各設備の弁等の手動操作、高圧ガス、ボイラー、電気設備等の定時点検、純水や液体窒素の補給作業、さらに水蒸気供給設備の水質検査作業（サンプルと分析）を実施した。

Table 5.1 Criteria of water examination

	Sample point	pH at25°C	Electric conductivit $\mu\text{s}/\text{cm}$	Total hardness mg/l	DO2 mg/l	T-Fe $\mu\text{g}/\text{l}$	Cl- mg/l	SiO2 $\mu\text{g}/\text{l}$
Original water	Tank-torry water		(≤ 10)	(No Detection)	—	—	—	—
	Water tank		(≤ 10)	—	—	—	—	—
	Water refiner (outlet)		($6.0 \sim 7.5$)	—	—	—	—	—
Processed water	Deaerator inlet tank (outlet)		(≤ 0.2)	—	—	—	—	—
	Deaerator (outlet)			($0.02 \sim 0.2$)	—	—	—	—
	Feedwater tank (outlet)				—	—	—	—
	Feedwater preheater (inlet)				—	—	—	—
Feed water	Feedwater preheater (outlet)		8.0~9.3	≤ 0.2 No Detection	0.02~0.2 ≤ 30	—	—	—
	Feedwater bypass cooler (outlet)					—	—	—
	Boiler water			≥ 3.0	—	—	≤ 0.05	≤ 300
	Steam	Steam super heater (outlet steam)	—	—	—	—	—	—



(a) Helium gas temperature



(b) Gas flow- rates

Fig.5.1 Operational records of the first experimental operation

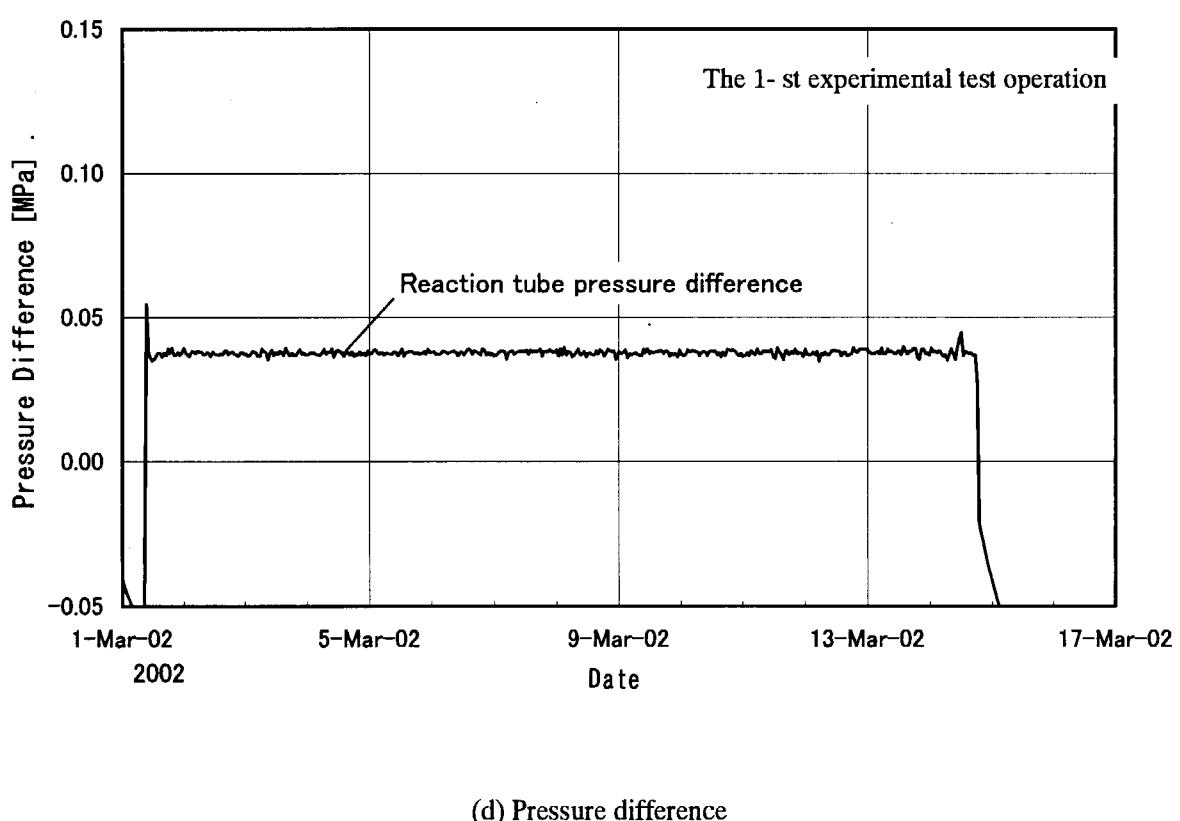
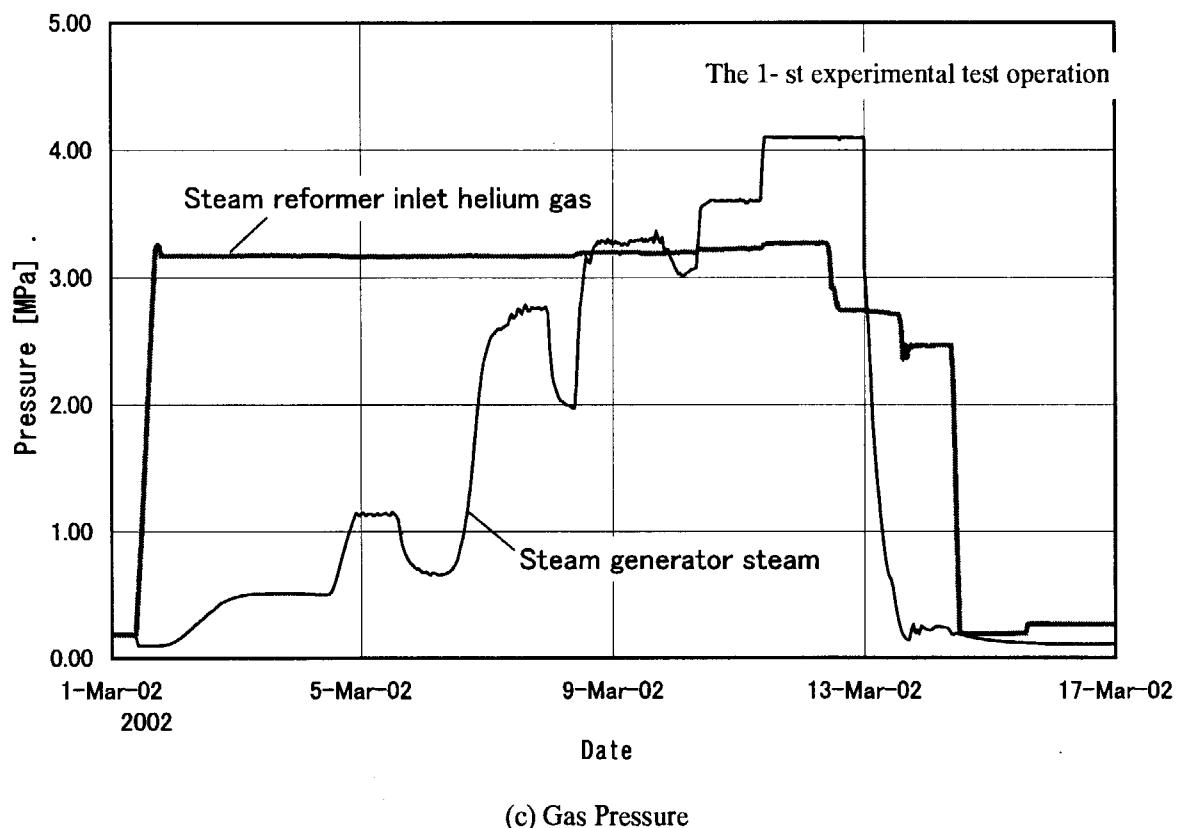


Fig.5.1 Operational records of the first experimental operation (Continued)

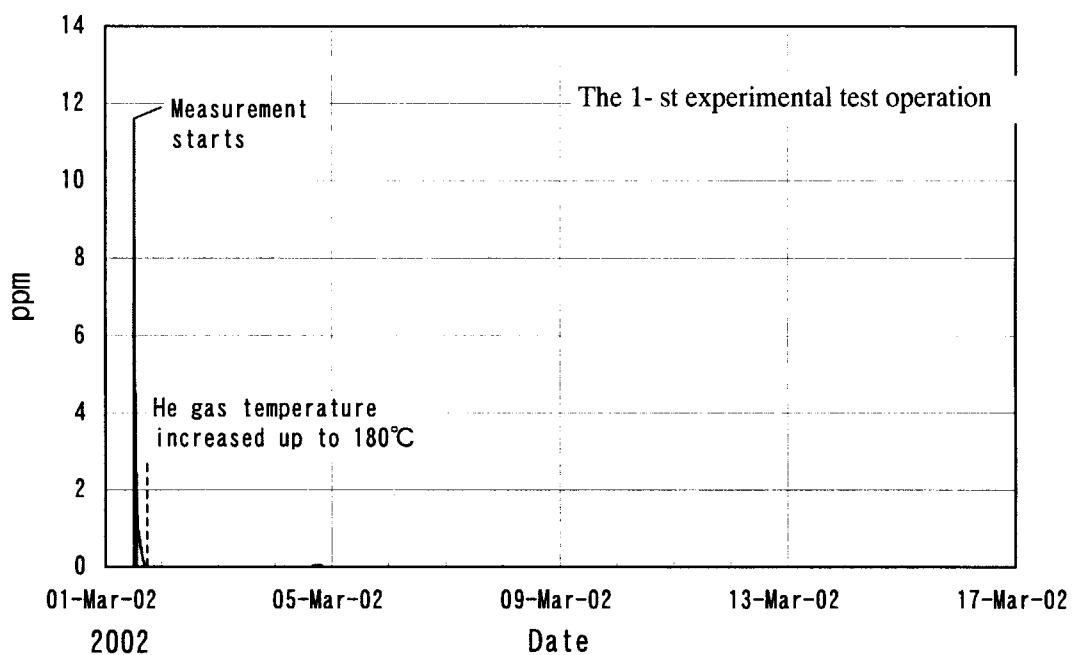


Fig. 5.2 Historical record of concentration of H₂O including in helium gas

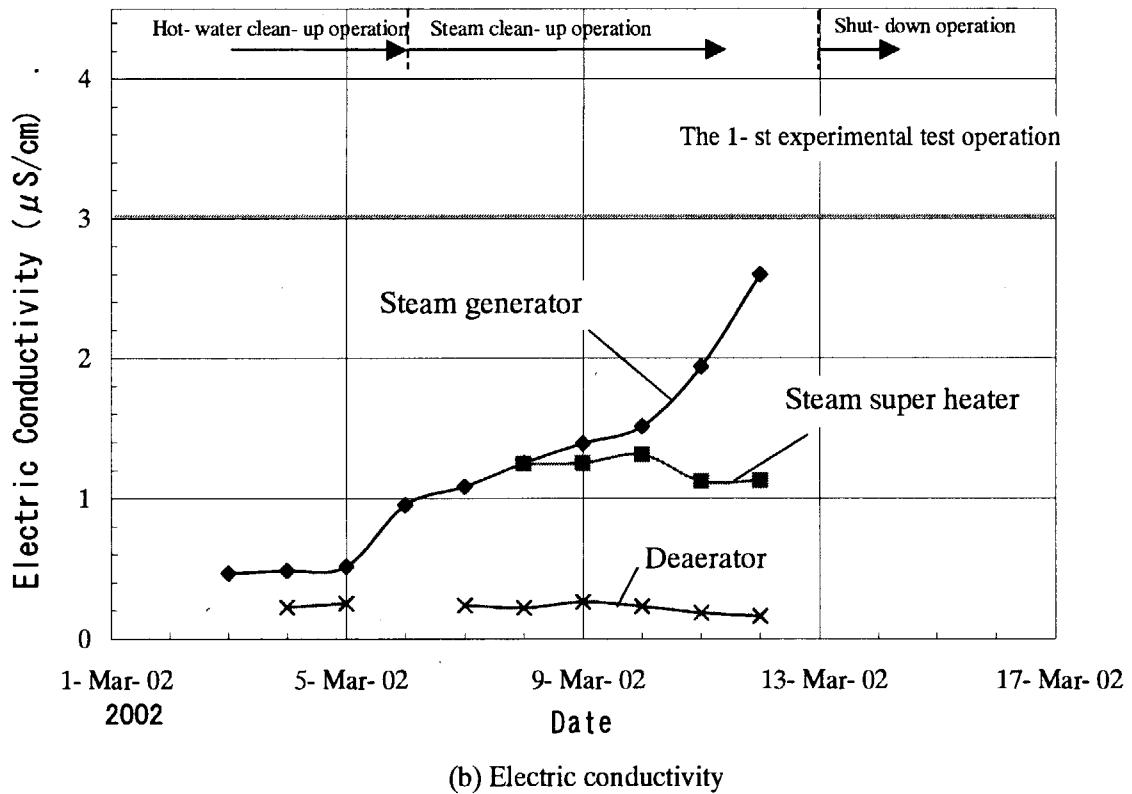
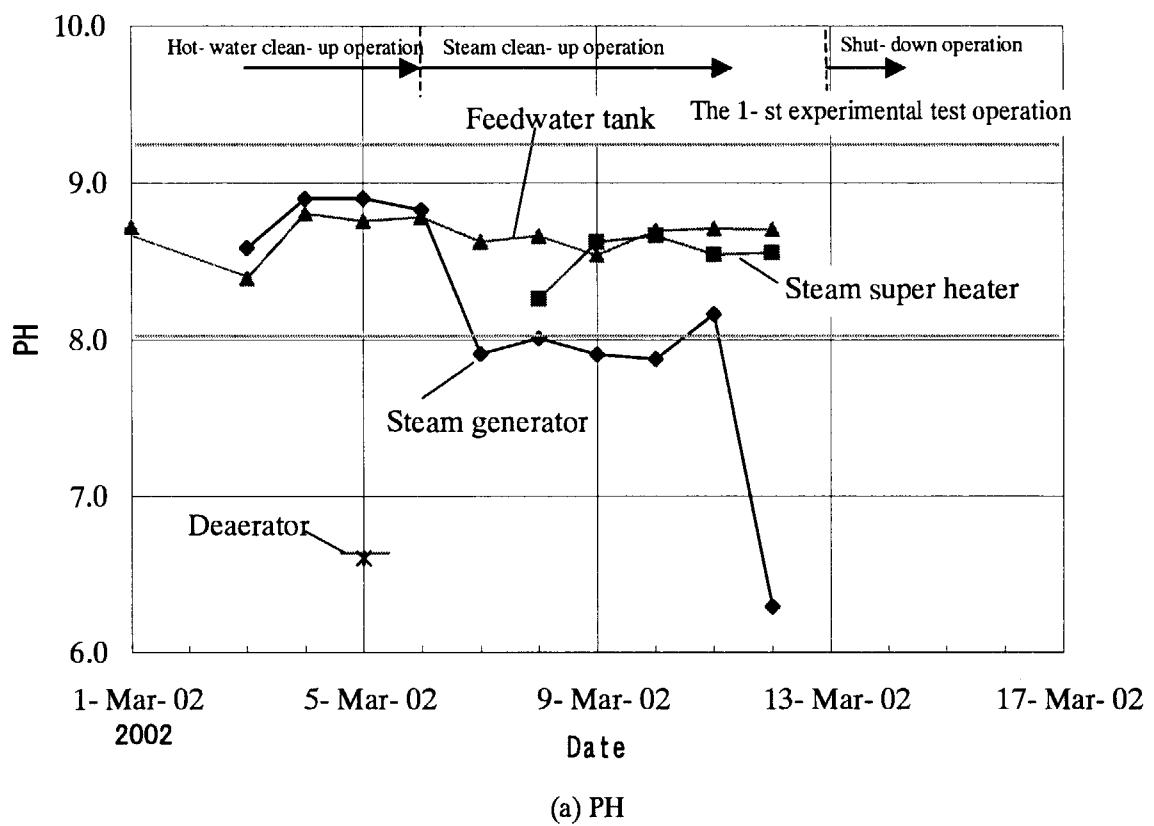
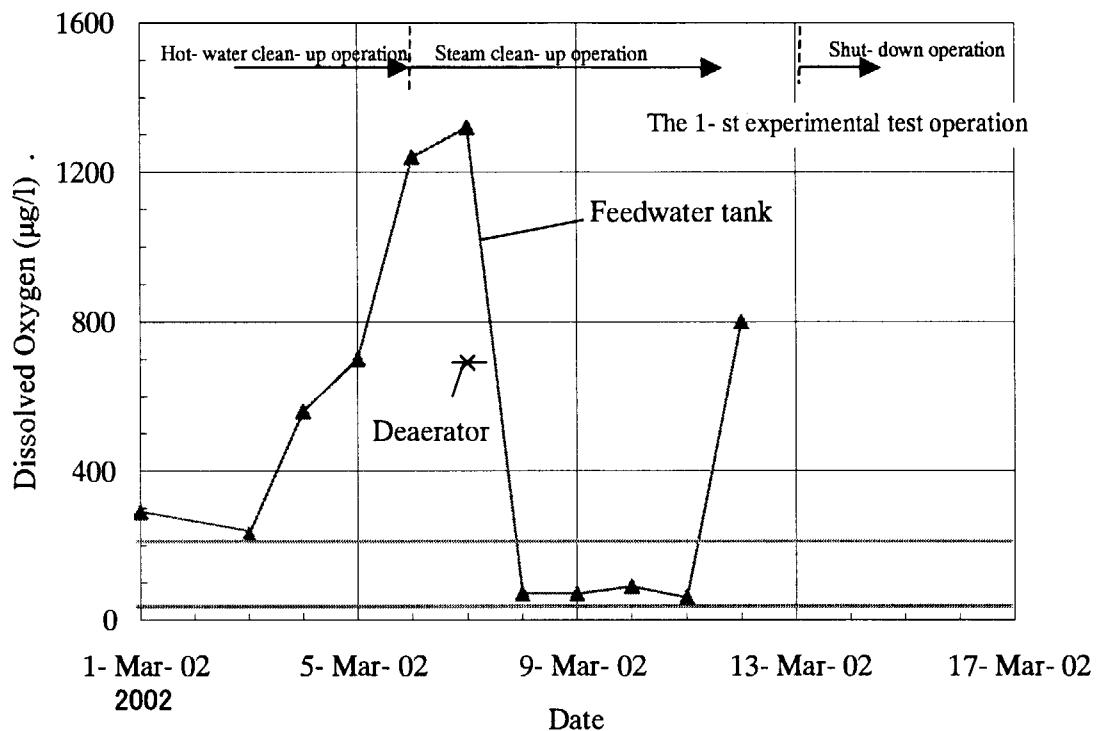
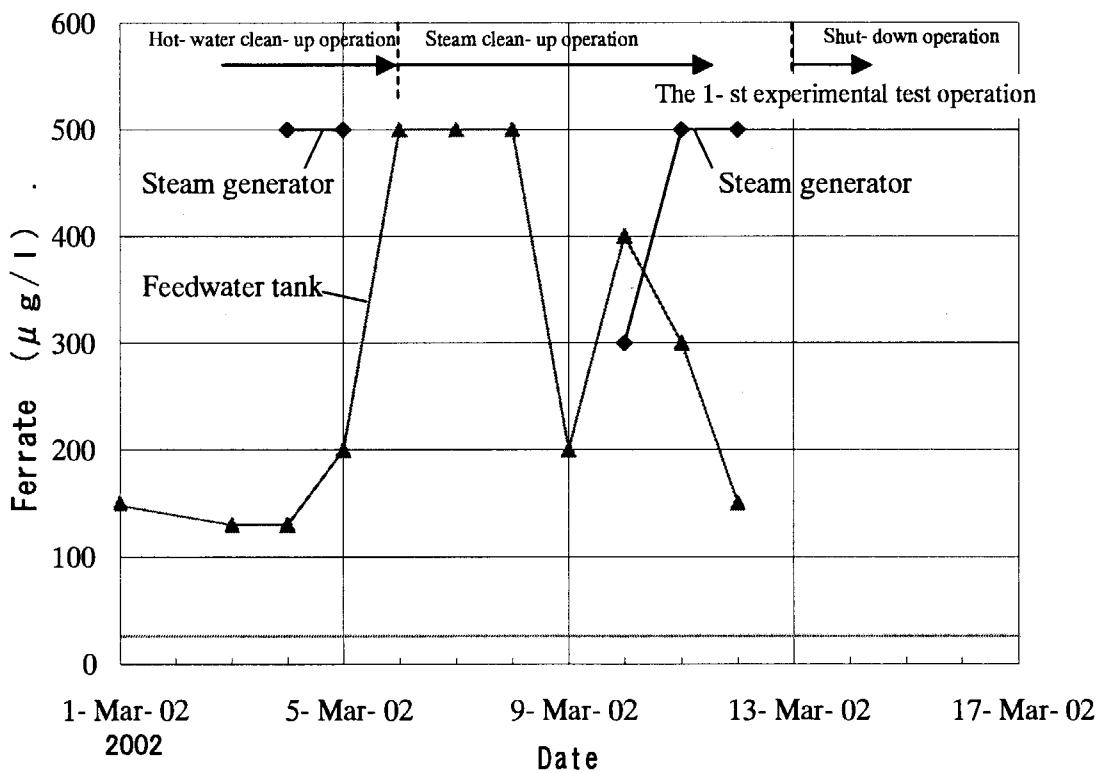


Fig.5.3 Historical records of water quality control of steam supply system

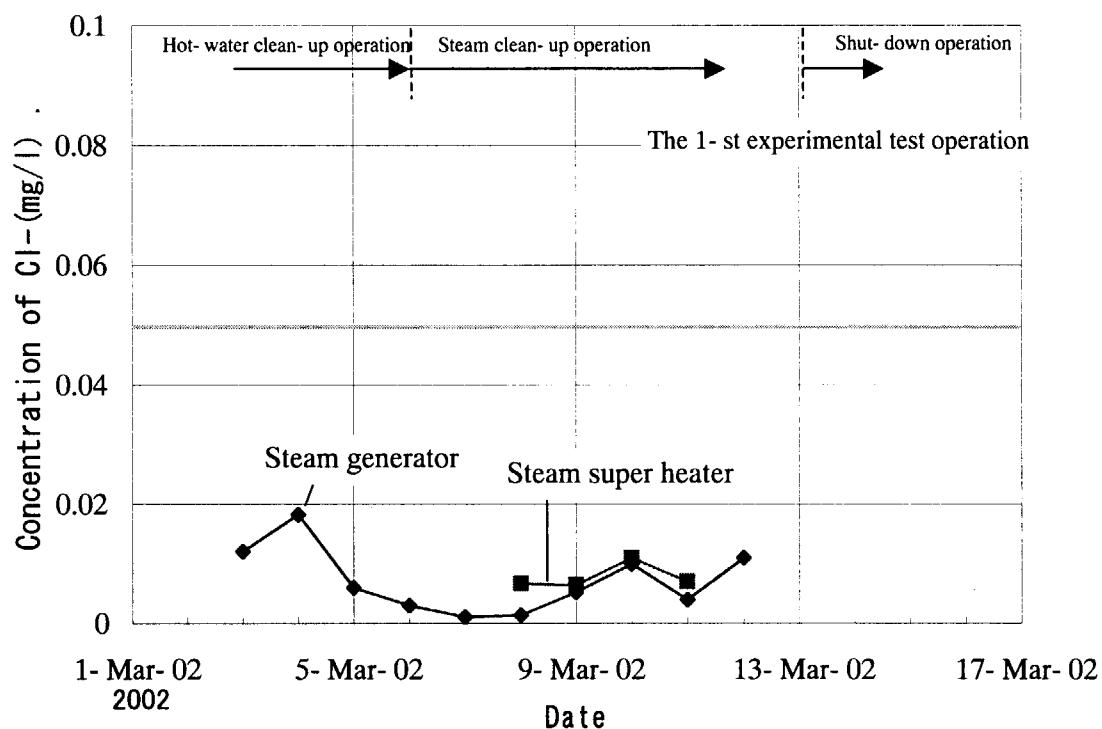


(c) Dissolved oxygen



(d) Ferrate

Fig.5.3 Historical records of water quality control of steam supply system (Continued)



(e) Chroride

Fig.5.3 Historical records of water quality control of steam supply system (Continued)

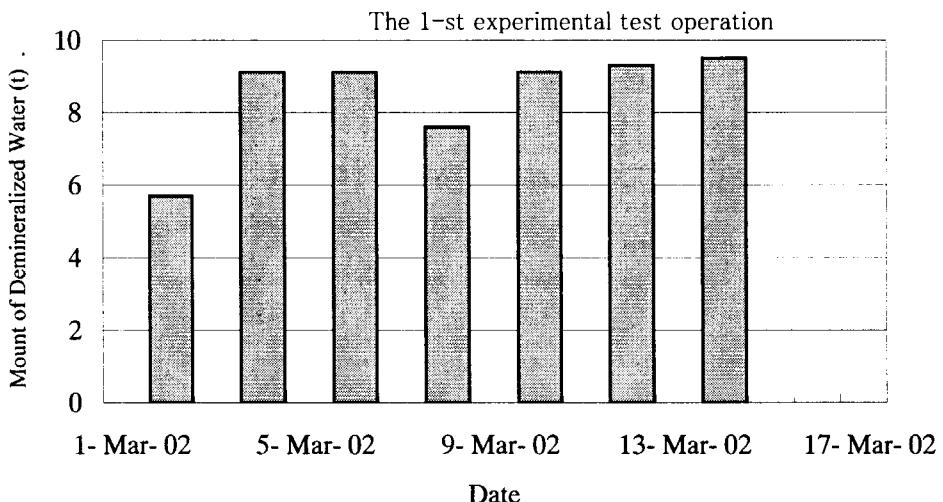


Fig. 5.4 Mount of demineralized water supply

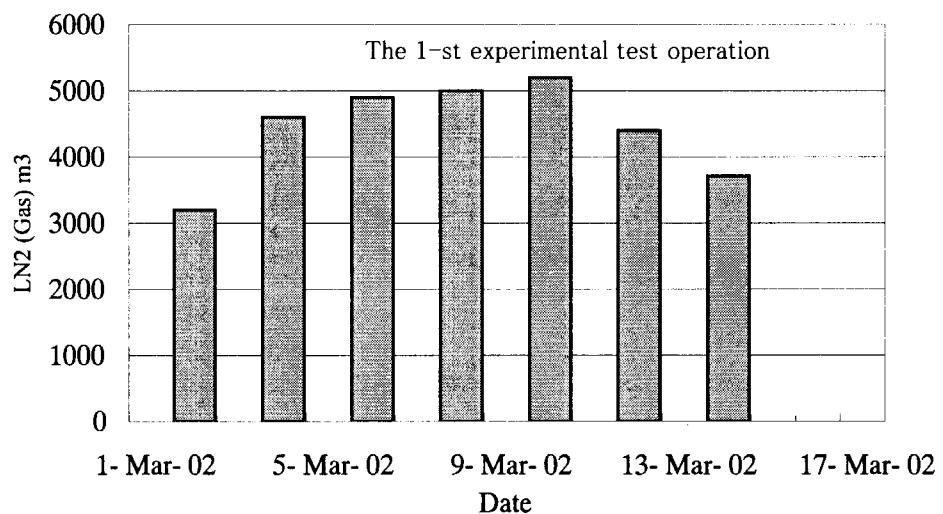


Fig. 5.5 Mount of liquefied nitrogen gas supply

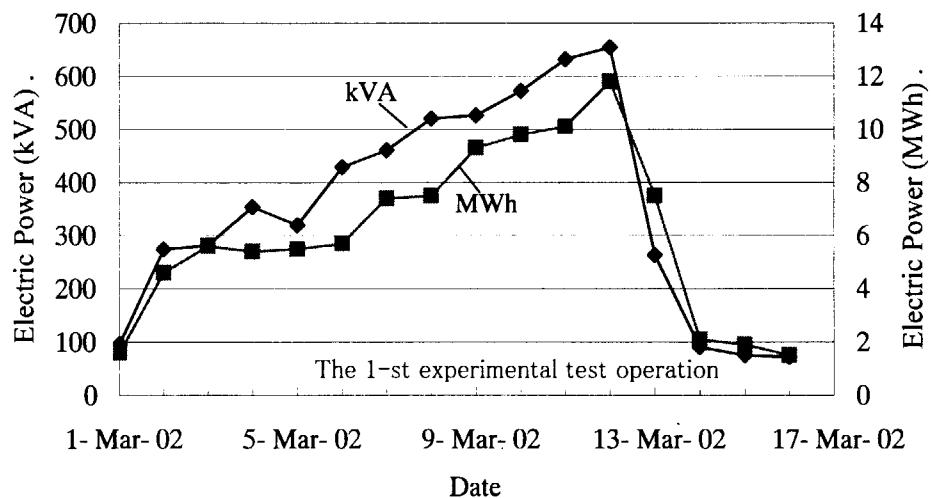


Fig. 5.6 Mount of electricity supply

6. 結 言

HTTR 水素製造実規模単一管試験装置の第 1 回試験運転を平成 13 年 3 月 1 日から 3 月 13 日までの 13 日間実施し、水蒸気改質器特性試験（熱流動特性試験）ならびに運転員の実地訓練を行った。

水蒸気改質器特性試験（熱流動特性試験）は、水蒸気改質器の伝熱特性測定試験である。試験は、水素製造時にプロセスガス側で生じる吸熱や発熱による伝熱特性の複雑化を避けるため、プロセスガス側に通気するガスは窒素ガスのみとし、窒素ガス流量とヘリウムガス圧力を一定として、水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度とヘリウムガス流量をパラメータとした 6 つのケースについて実施し、計画通り終了した。試験後、得られた伝熱特性データを用いて動特性解析コードの妥当性検証を行った。その結果、水蒸気改質器内の温度分布は比較的良く一致し、動特性解析コードの妥当性が確かめられた。

また本試験運転は、運転員が現場での運転操作や点検を通じて各設備の構成と配置、操作箇所、運転マニュアルを習熟するとともに十分な経験を積んでいくという実地訓練として実施された。運転工程は各ステップ毎に着実に遂行され、計画通り完了し、運転員の運転操作技術向上に役立つことができた。

最後に、今後の参考に供する目的で、今試験運転における試験装置のガス・水・電力の消費統計、水蒸気供給設備の水質管理実績の記録をまとめた。

謝 辞

第 1 回試験運転の実施に当たり、当時、核熱利用研究部の重本雅光氏(現、原子力エンジニアリング株式会社)、当時、高温機器開発試験室の岩月仁氏(現、石川島播磨重工業株式会社)、並びに原子力エンジニアリング(株) 塙博美、米川日出男、照沼孝志、滑川勝徳、柴田一之の各氏に多大なるご協力をいただいた。ここに深く謝意を表します。

また、本報告書の作成に当たり貴重なご助言をいただいた核熱利用研究部の椎名保顕氏に深く謝意を表します。

参考文献

- (1) 宮本, 小川, 秋野, 椎名, 稲垣, 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) Hada, K., Nishihara, T., Shibata, T., Shiozawa, S., "Design of a Steam Reforming System to be Connected to the HTTR," JAERI-CONF, 96-010, 229 (1996).
- (3) 西原, 清水, 谷平, 内田, “HTTR に接続する水素製造システムの系統及び機器設計(受託研究),” JAERI-Tech 2002-101 (2003).
- (4) 稲垣, 武田, 西原, 羽田, 林, "HTTR 水素製造システムの炉外実証試験計画," 原子力誌, 41, 250 (1999).
- (5) Inagaki, Y., Nishihara, T., Takeda, T., Hada, K., Hayashi, K., "Out-of-Pile Demonstration Test of Hydrogen Production System Coupling with HTTR," Proc. 7th Int. Conf. on Nucl. Eng., ICONE-7101 (1999).
- (6) 稲垣, 大内, 藤崎, 加藤, 宇野, 林, 会田, "HTTR 水素製造システムの炉外技術開発試験 水蒸気改質器の構造と製作上の技術的課題," JAERI-Tech 99-074 (1999).
- (7) 稲垣, 林, 加藤, 藤崎, 会田, 武田, 西原, 稲葉, 大橋, 片西, 高田, 清水, 森崎, 櫛, 前田, 佐藤, 重本, 岩月, 真野, "HTTR 水素製造システム 実規模単一反応管試験装置の機能試験結果報告(受託研究)," JAERI-Tech 03-034 (2003).
- (8) 尾花英朗 : ”熱交換器設計ハンドブック (第 2 版) ,” 674 (1994).
- (9) 日本機械学会編 : ”伝熱工学資料 (改訂第 3 版) ,” 丸善, 227 (1975).
- (10) 日本機械学会編 : ”伝熱工学資料 (改訂第 4 版) ,” 丸善, 56 (1986).
- (11) 日本機械学会編 : ”機械工学便覧 (新版) ,” 日本機械学会 B6-34 (1987).

使用記号

A	: 伝熱面積 [m ²]
C_p	: 定圧比熱 [J/(kg · K)]
D	: 流路相当直径 [m]
G	: 質量流量 [kg/s]
H_f	: フィン高さ [m]
l	: 管肉厚 [m]
Nu	: ヌッセルト数 [-]
Pr	: プラントル数 [-]
Q	: 交換熱量 [J/]
Re	: レイノルズ数 [-]
S_p	: フィン間隔 [m]
T	: 温度 [K]
α	: 热伝達率 [W/(m ² · K)]
α_o	: 充填層の総括熱伝達率 [W/(m ² · K)]
λ	: 热伝導率 [W/(m · K)]

下付文字

N_2	: 窒素ガス
He	: ヘリウムガス
C	: 触媒層内
P	: 内管内
in	: 入口
out	: 出口
av	: 平均
W_1	: 反応管
W_2	: 内管
I	: 管内壁
O	: 管外壁

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリイ	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s(N·s/m²) = 10 P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St(ストークス)(cm²/s)

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	= 4.184 J(熱化学)
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855 J(15 °C)
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ³	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	= 4.1868 J(国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS(仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499 W
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1	

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹		1	100
	3.7 × 10 ¹⁰	1	0.01	1	

照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
	1	3876		1	100
	2.58 × 10 ⁻⁴	1		0.01	1

(86年12月26日現在)

HTTR水素製造システム実規模単一反応管試験装置 平成13年度試験運転報告（受託研究）

R100

高純度水素供給
資源の効率化再生紙を採用しました。日本