



JAEA-Technology

2006-012



JP0650352

HTTR水素製造システム実規模单一反応管試験装置

平成15年度試験運転報告(受託研究)

Annual Report on Experimental Operations and Maintenances of Mock-up
Model Test Facility with a Full-scale Reaction Tube for
HTTR Hydrogen Production System in 2003 Fisical Year (Contract Research)

林 光二 森崎 徳浩 大橋 弘史 加藤 道雄
会田 秀樹 武田 哲明 西原 哲夫 稲葉 良知
高田 昌二 稲垣 嘉之

Koji HAYASHI, Norihiro MORISAKI, Hirofumi OHASHI, Michio KATO
Hideki AITA, Tetsuaki TAKEDA, Tetsuo NISHIHARA, Yoshitomo INABA
Shoji TAKADA and Yoshiyuki INAGAKI

原子力基礎工学研究部門
ガス炉ISプロセス接続技術開発グループ

HTGR-IS Coupling Technology Group
Nuclear Science and Engineering Directorate

March 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology
Kobayashi

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に刊行している研究開発報告書です。
本レポートの全部または一部を複写・複製・転載する場合は下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

This report was issued subject to the copyright of Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about the copyright and reproduction should be addressed to :

Intellectual Resources Section,
Intellectual Resources Department
2-4, Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, JAPAN
Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

©日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency, 2006

HTTR 水素製造システム実規模单一反応管試験装置
平成 15 年度試験運転報告
(受託研究)

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

林 光二⁺・森崎 徳浩※・大橋 弘史・加藤 道雄・会田 秀樹
武田 哲明・西原 哲夫・稻葉 良知・高田 昌二・稻垣 嘉之

(2006 年 1 月 26 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 15 年度試験運転報告である。平成 15 年 5 月から第 4 回試験運転を、また平成 15 年 10 月から第 5 回試験運転を実施し、(a)起動停止試験、(b)プロセス変動試験、(c)水素連続製造試験、(d)化学反応停止試験を行った。その結果、水素製造システムの長期安定性の確認、化学反応停止時における蒸気発生器と放熱器による冷却システムの挙動把握等の成果が得られた。また、平成 15 年 7 月末から定期点検を実施し、ボイラ設備ならびに高圧ガス設備の整備作業と保安検査を終了した。

本報告では、これらの試験の概要、結果、保守・点検、並びに運転記録についてまとめた。

本報告書は、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 17 年度「核熱利用システム技術開発」の成果です。

原子力科学研究所（駐在）：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

+ 大洗研究開発センター材料試験炉部

※三菱重工業(株)から出向中

Annual Report on Experimental Operations and Maintenances of Mock-up Model
Test Facility with a Full-scale Reaction Tube for HTTR Hydrogen Production
System in 2003 Fiscal Year
(Contract Research)

Koji HAYASHI⁺, Norihiro MORISAKI^{*}, Hiroyumi OHASHI, Michio KATO,
Hideki AITA, Tetsuaki TAKEDA, Tetsuo NISHIHARA,
Yoshitomo INABA, Shoji TAKADA and Yoshiyuki INAGAKI

Nuclear Applied Heat Technology Division
Nuclear Science and Engineering Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 26, 2006)

This is a report on the experimental operations and maintenances of the mock-up test facility with a full-scale reaction tube for the HTTR hydrogen production system in 2003 fiscal year. The fourth and fifth experimental test operations were performed, from May to July and from October to December in 2003, for the following tests; (a) start-up and shutdown operation test, (b) process change test, (c) continuous hydrogen-production test and (d) chemical reaction shutdown test. From the results, a long time-range stability of the hydrogen production system was confirmed, a behavior of the helium-gas cooling system, consists of steam generator and radiator, during chemical reaction shutdown, was understood, and so on. Periodic inspections on boiler equipment and high-pressure gas production facilities were performed from end of July 2003.

This report is summarized on outlines and results of the tests, outlines and results of the periodic inspections, and operation records of the mock-up test facility.

Keywords; Nuclear Heat Utilization, HTTR, Hydrogen Production System, Steam Reforming, Mock-up Test Facility, Fourth Experimental Test Operation, and Fifth Experimental Test Operation.

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

+ Department of JMTR, Oarai Research and Development Center

*On loan from MITSUBISHI HAVEY INDUSTRIES, LTD.

目 次

1. 緒 言	1
2. 試験装置の概要	4
3. 工事と保守の概要	12
3. 1 定期自主検査と官庁検査	12
3. 1. 1 ボイラ並びに第一種圧力容器の性能検査	12
3. 1. 2 高圧ガス製造設備の保安検査	19
3. 2 その他の工事	33
3. 2. 1 後処理設備凝縮水戻りラインの改修	33
3. 2. 2 水蒸気改質器触媒交換	33
3. 2. 3 可燃性ガス漏えい検知器の増設	35
4. 試験運転の概要	37
4. 1 試験と運転の工程	37
4. 2 起動停止試験	41
4. 2. 1 水素製造開始停止条件選定	41
4. 2. 2 ヘリウムガス冷却器の温度制御特性	44
4. 3 プロセス変動試験	52
4. 4 水素連続製造試験	56
4. 5 化学反応停止試験	58
4. 6 水蒸気改質器上部ガス検知器指示値上昇の原因調査	67
5. 運転記録	71
5. 1 第4回試験運転	71
5. 1. 1 運転履歴	71
5. 1. 2 ヘリウムガス循環設備の純度管理履歴	71
5. 1. 3 水蒸気供給系の水質管理履歴	72
5. 1. 4 ガス・水・電気の消費統計	73
5. 2 第5回試験運転	85
5. 2. 1 運転履歴	85
5. 2. 2 ヘリウムガス循環設備の純度管理履歴	85
5. 2. 3 水蒸気供給系の水質管理履歴	85
5. 2. 4 ガス・水・電気の消費統計	86
6. 結 言	97
謝 辞	97
参考文献	98

Contents

1. Introduction	1
2. Overview of the Mock-up Test Facility	4
3. Outline of Improvement and Maintenance of the Facility	12
3.1 Periodic Independent Inspection and Official Inspection	12
3.1.1 Performance Inspection of Boiler and First Seed Pressure Vessel	12
3.1.2 Periodic Inspection of High Pressure Gas Manufacturing Facilities	19
3.2 Other Maintenance Works	33
3.2.1 Modification of Return-water Line in the Production-Gas Post-processing System	33
3.2.2 Replacement of Steam Reforming Catalyst	33
3.2.3 Installing of Additional Leak-gas Monitoring System	35
4. Outline of Experimental Operation	37
4.1 Schedule of Experimental Test and Operations	37
4.2 Start-up and Shut-down Test	41
4.2.1 Choosing of Start-up and Shut-down Conditions for Hydrogen Production	41
4.2.2 Characteristics of Temperature Control at Helium-gas Cooler Outlet	44
4.3 Process Change Test	52
4.4 Continuous Hydrogen Production Test	56
4.5 Chemical Reaction Shut-down Test	58
4.6 Causal Investigation on Abnormal Increase of Gas Monitoring Level at the Top of Steam Reformer	67
5. Operation Records	71
5.1 The Fourth Experimental Test Operation	71
5.1.1 Historical Record of the Experimental Test Operation	71
5.1.2 Historical Record of Helium Gas Purity Control	71
5.1.3 Historical Record of Water Quality Control	72
5.1.4 Statistics on Consumptions of Gas, Water and Electricity	73
5.2 The Fifth Experimental Test Operation	85
5.2.1 Historical Record of the Experimental Test Operation	85
5.2.2 Historical Record of Helium Gas Purity Control	85
5.2.3 Historical Record of Water Quality Control	85
5.2.4 Statistics on Consumptions of Gas, Water and Electricity	86
6. Concluding Remarks	97
Acknowledgements	97
References	98

1. 緒 言

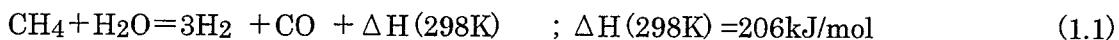
日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」と記す）では、将来の水素利用社会への貢献を目指して、我が国初の高温ガス炉、高温工学試験研究炉（HTTR: High Temperature Engineering Test Reactor）を用いて、高温ガス炉水素製造システムの研究開発を進めている⁽¹⁾。

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。この方法による水素製造は、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。

原子力機構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。

高温ガス炉に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、HTTR とメタンの水蒸気改質法による水素製造システム「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 と接続する水蒸気改質法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 次ヘリウムガスと熱交換し（熱交換量 10MW）、中間熱交換器を出た 2 次ヘリウムガスが水蒸気改質器、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の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）が流れて熱交換を行う。

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討等を目的として、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「実規模单一反応管試験装置」（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月に原子力機構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に関する試験を行っている⁽⁸⁾。さらに、平成14年度には、流量計他の改修工事を実施するとともに、第2回と第3回試験運転において、起動停止に関する試験、プロセス変動特性に関する試験、水蒸気改質器の反応特性に関する試験、並びに水蒸気改質器の化学反応停止時に対応する放熱器を用いた冷却システムに関する試験を実施している⁽⁹⁾。

本書は、その後の平成15年度に実施した第4回と第5回試験運転における各試験とその結果、並びに試験装置の保守管理としてのボイラ及び第一種圧力容器性能検査、高圧ガス製造施設の保安検査等に関して報告するものである。

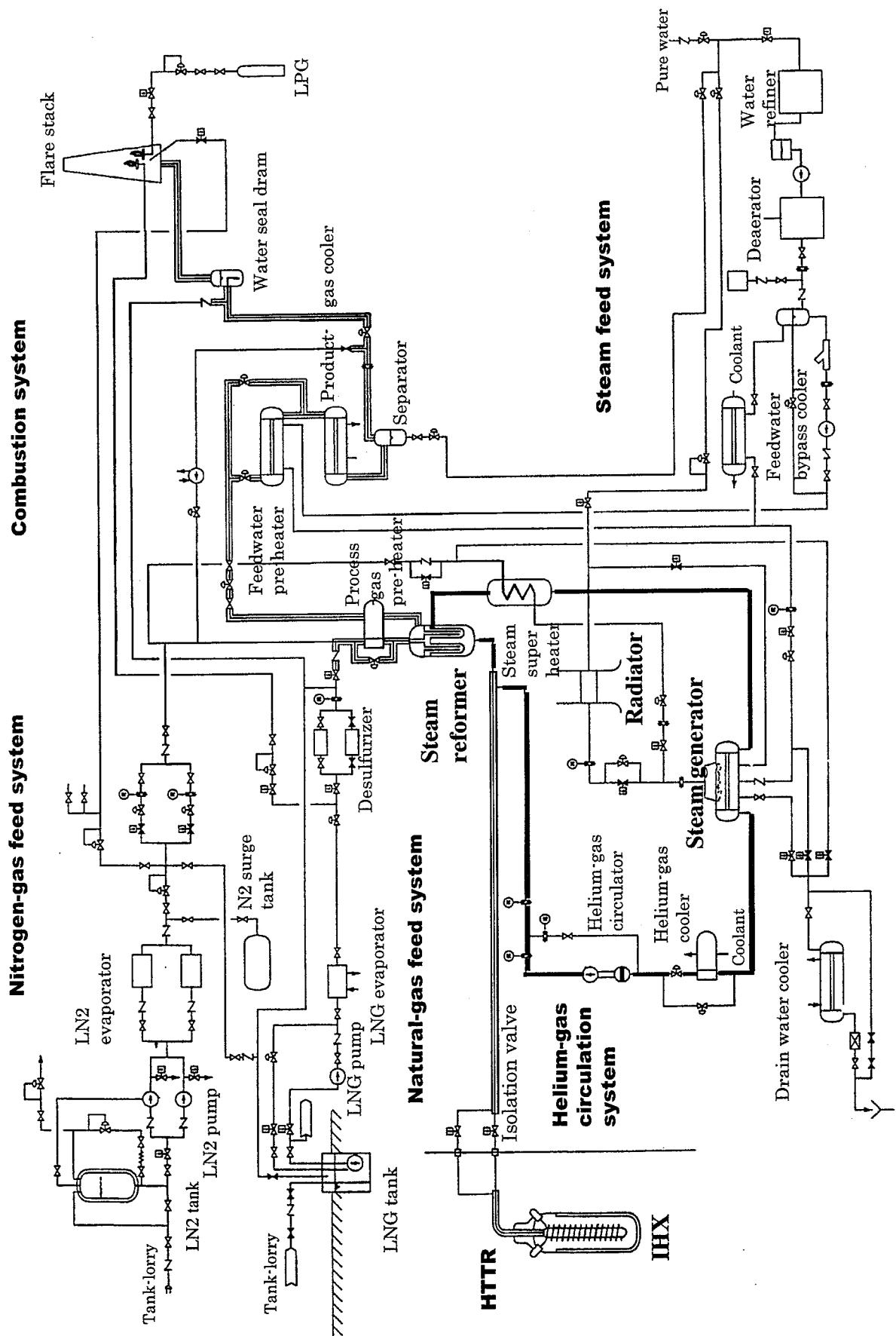


Fig.1.1 Schematic flow diagram of HTTR hydrogen production system

2. 試験装置の概要

試験装置は、HTTR に接続する水蒸気改質法水素製造システム(以下、HTTR 水素製造システム)のうち、HTTR 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、メタンと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となるガス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となるガス(メタンと蒸気の混合ガス)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、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メタン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、ヘリウムガス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モード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(LN₂)を貯蔵する LN₂ タンク、LN₂ ポンプ、気化させる LN₂ 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 system	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 nitrogen-gas feed system	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)

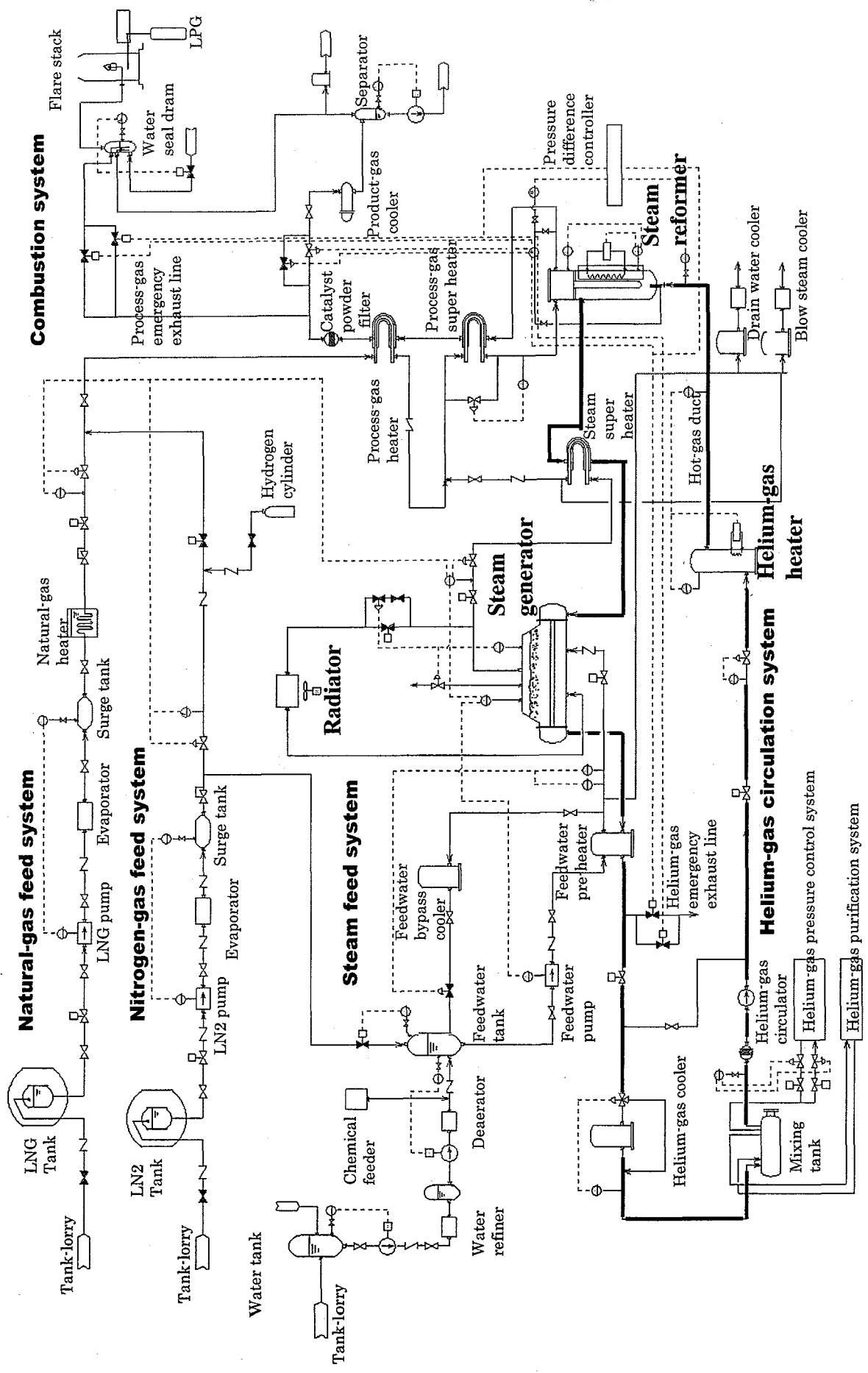


Fig. 2.1 Schematic flow diagram of the mock-up test facility

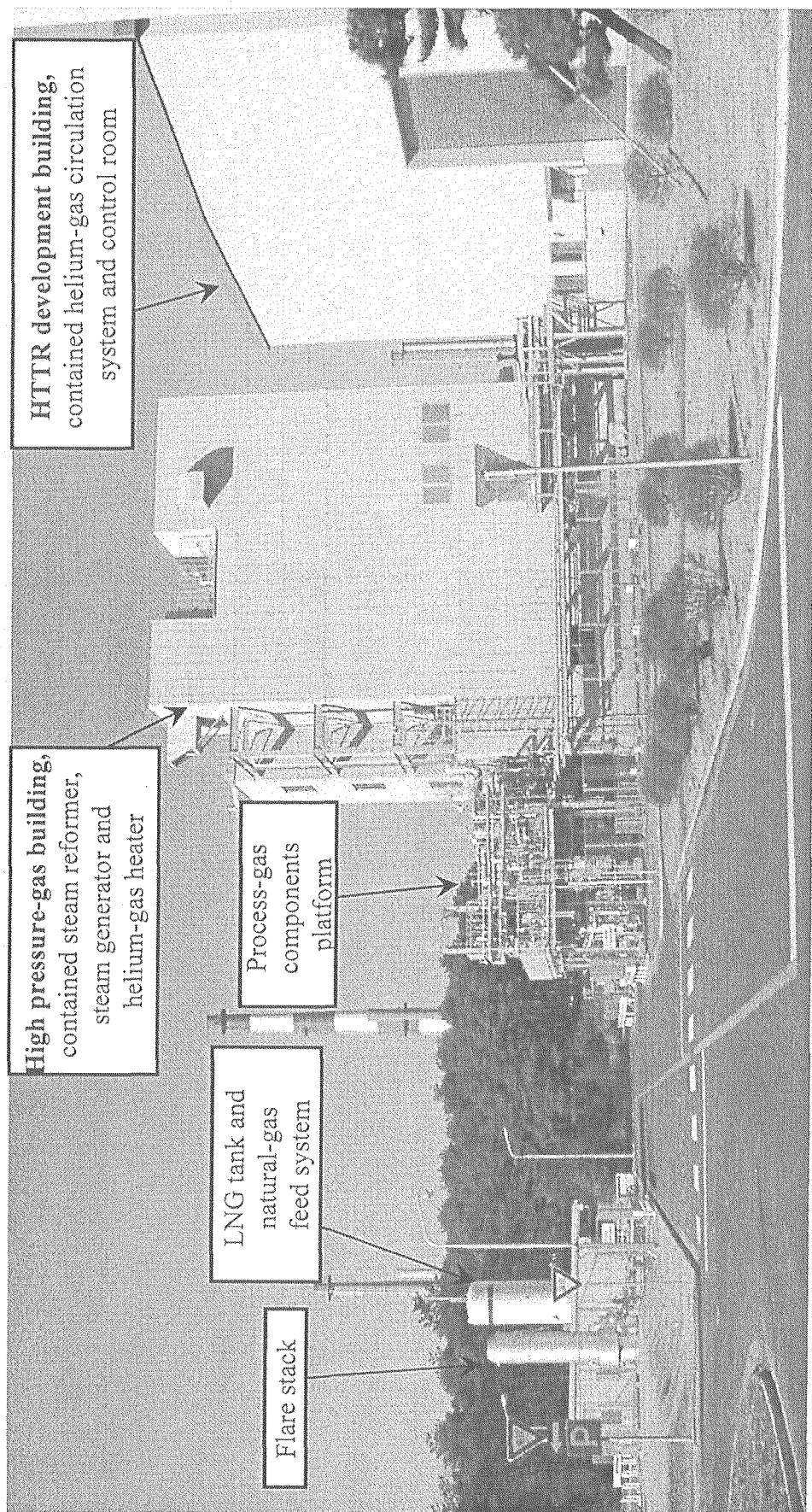


Fig.2.2(a) Overview of the mock-up test facility

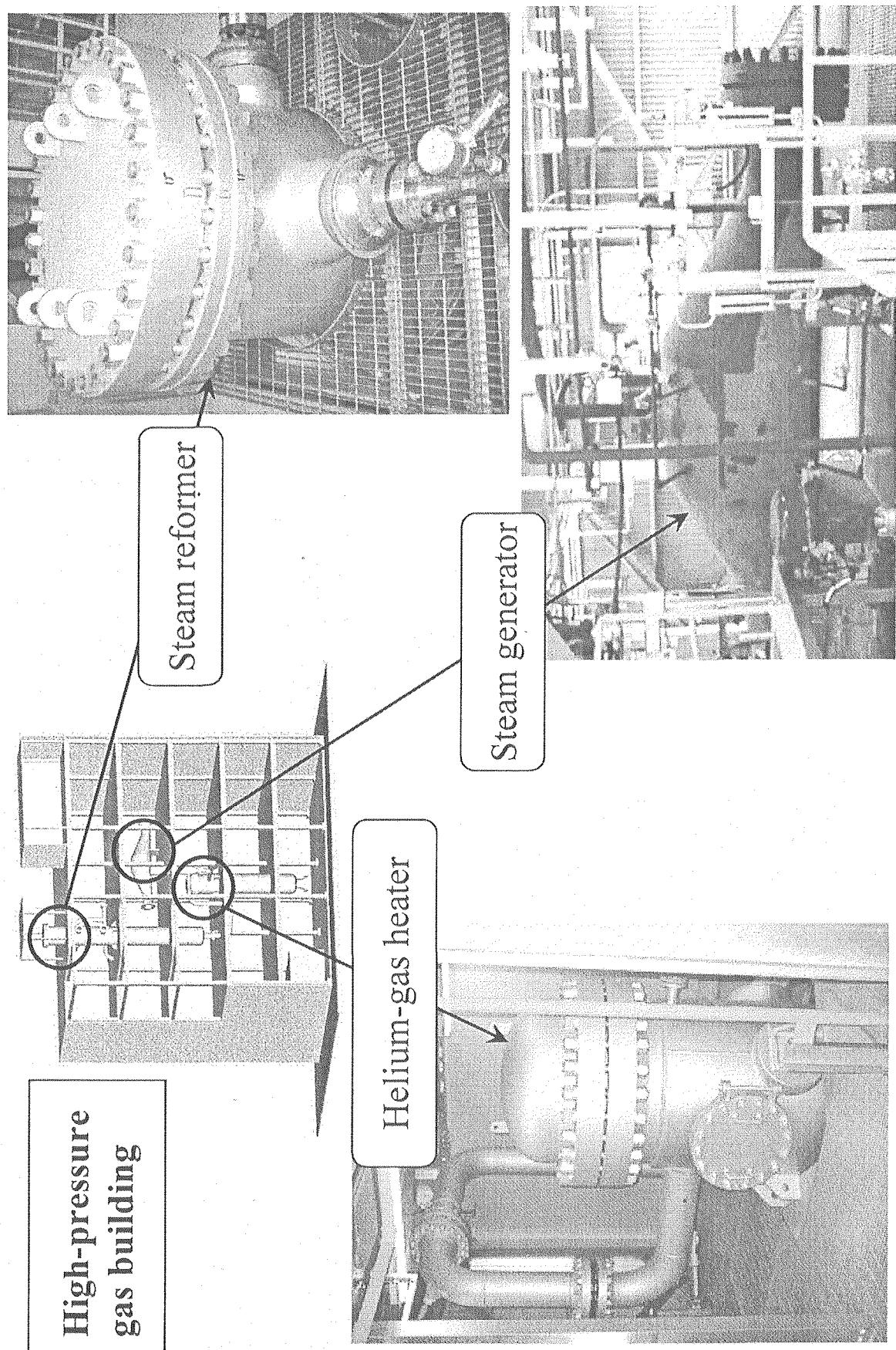


Fig.2.2(b) Main components of the mock-up test facility

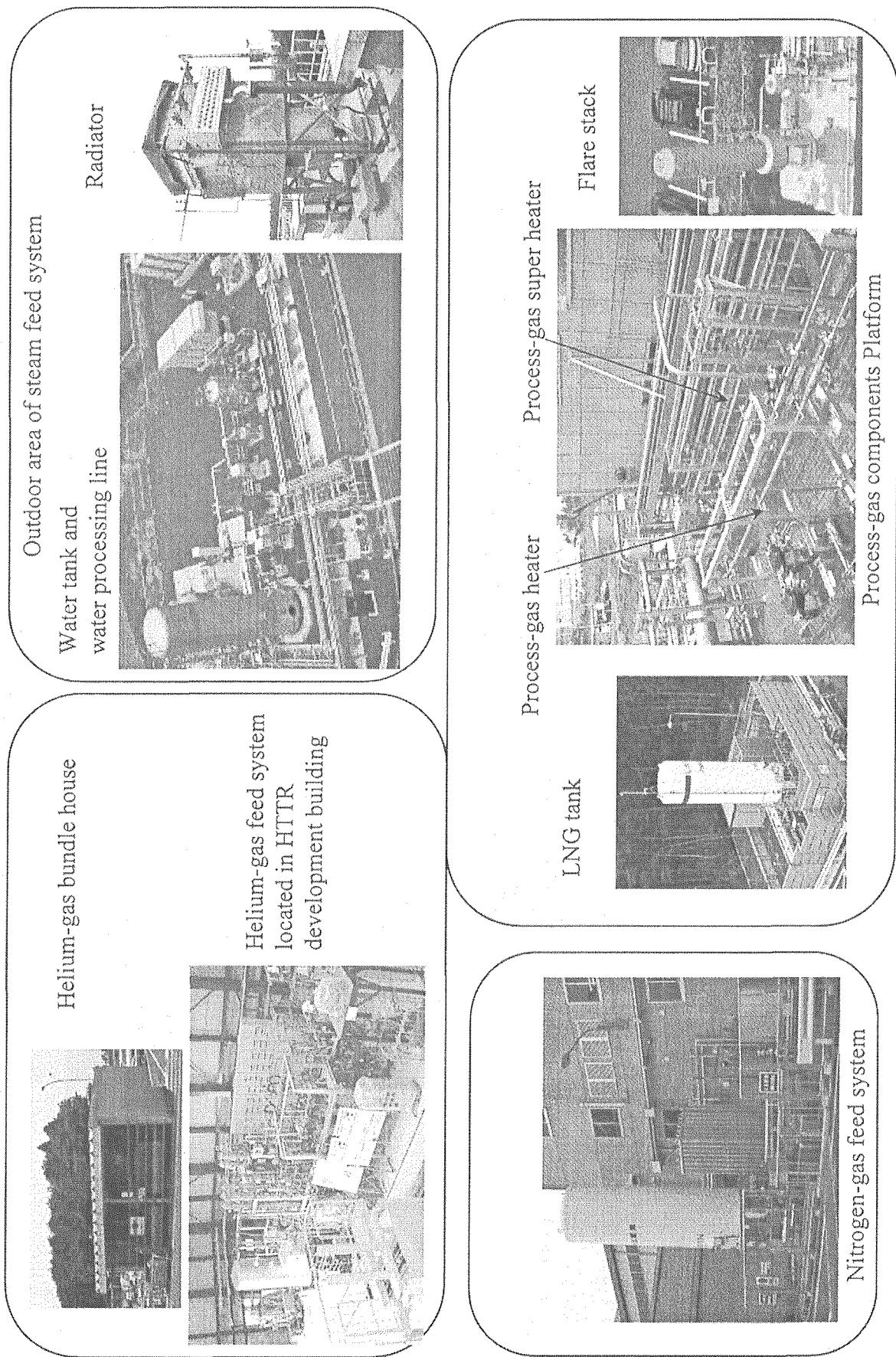


Fig.2.2(c) Other components of the mock-up test facility

3. 工事と保守の概要

本試験装置は、平成 15 年 8 月に定期点検に入り、ボイラ及び第一種圧力容器の性能検査については平成 15 年 8 月に、また高圧ガス製造設備の保安検査については平成 15 年 9 月にそれぞれ官庁検査に合格し終了した。また平成 15 年 7 月末に触媒交換を実施し、平成 15 年 9 月末には可燃性ガス漏えい検知設備の増設工事を実施した。

なお、第 5 回試験運転終了後の平成 15 年 12 月 11 日、点検のため窒素ガスによる気密試験を実施したところ、後処理設備の触媒粉塵用フィルタのノズルフランジ部に損傷があることが分かった。損傷の原因調査を実施するため、平成 16 年 1 月に高圧ガス製造設備の変更申請を行い、許可後に接続配管を切断し触媒粉塵用フィルタの損傷部位の材料検査、環境検査等を実施した。その結果、当該部位に凝縮水が溜まり、塩化物イオン等による応力腐食割れが生じたことが判明した。このため、平成 16 年度に補修を行った⁽¹⁰⁾。

なお、本書では圧力の単位 MPa に絶対圧を使用しているが、ボイラ並びに第一種圧力容器の性能検査、ならびに高圧ガス製造施設の保安検査に関する圧力の単位は法律上ゲージ圧を用いることになっているので、本章に限り圧力の単位 MPa はゲージ圧を意味するものとする。

3. 1 定期自主検査と官庁検査

平成 15 年 8 月から 9 月にかけて試験装置の定期自主検査作業を実施した。

3. 1. 1 ボイラ並びに第一種圧力容器の性能検査

労働安全衛生法ボイラ及び圧力容器保安規則に基づき試験装置に設置されているボイラ及び第一種圧力容器の点検整備作業を平成 15 年 8 月に実施し、平成 15 年 8 月 20 日に労働基準監督署（ボイラ保安協会代行）の検査官立ち会いのもとに性能検査を実施した。

検査対象となる設備は、水蒸気供給設備の蒸気発生器(X11S) 1 基がボイラに、放熱器(X14S) 1 基、給水バイパス冷却器(X13S) 1 基が第一種圧力容器に該当し、またこれらに付属する安全弁 2 台、圧力計 3 台である。その詳細を記した検査対象機器一覧を Table 3.1.1-1 に、ボイラ及び第一種圧力容器主要設備仕様一覧を Table 3.1.1-2 に示す。

対象設備の性能検査は、原則として各機器を開放した状態で、機器内部及び内部構造物に対し錆等の発生による構造材の腐食の有無及び変形の有無、熱源であるヘリウムガス室内及び伝熱管内部の異常及び堆積物・付着物等の有無、ボルト・ナット類の変形・損傷の有無等を検査するものである。ただし、給水バイパス冷却器は構造上二重管式冷却器となっており、また出入口配管も溶接構造のため開放検査が困難であるので、前年度と同様に、事前に労働基準監督署と協議し全溶接部の染色液体浸透探傷試験(P T)を行うことで了解された。蒸気発生器と放熱器についても主要な部位について P T を行うこととした。安全弁の性能検査は分解した状態でシート面の状態及び汚損の有無、圧力計については標準検査器との比較校正試験結果等を検査するものである。

以上について、労働基準監督署の検査官立会いによる検査を行い、全て異常のないことを確認した。点検項目の詳細と点検結果を Table 3.1.1-3 に示す。性能検査終了後、機器開放部及び安全

弁の調整・据付けを行い、水圧試験を 5.41 MPa（常用圧力の 1.1 倍）で実施し、機器及び本体の異常及び機器開放部等に漏えいの無いことを確認した。

Table 3.1.1-1 List of boiler and the first category pressure vessels to be inspected

系統名	機器名	分類	検査証No.	有効期限	検査年月日	点検内容
水蒸気供給設備	蒸気発生器	ボイラ	第3655号	平成16年9月10日	平成15年8月22日	開放点検
	放熱器	第一種圧力容器	第4498号	平成16年9月10日	平成15年8月22日	開放点検
	給水ババース冷却器	第一種圧力容器	第4499号	平成16年9月10日	平成15年8月22日	開放点検
系統名	機器名	Tag. No.	機器No.／口径	接続機器	点検内容	
水蒸気供給設備	安全弁 (法的対象 *の2台)	PV-25S*	99FY042 25A×50A	蒸気発生器	分解点検／ 設定圧力調整	
		PV-171S*	99FY058 40A×50A	給水ババース冷却器	分解点検／ 設定圧力調整	
		PV-172S	99FY059 25A×50A	ドレン水冷却器	分解点検／ 設定圧力調整	
		PV-22S	99FY055 25A×50A	給水タンク	分解点検／ 設定圧力調整	
		PV-24S	99FY056 25A×50A	水予熱器	分解点検／ 設定圧力調整	
系統名	機器名	Tag. No. 器番	最大/ 最小目盛	接続機器	点検内容	
水蒸気供給設備	圧力計	PI17S 9504287	10 0.2 MPa	蒸気発生器	基準圧力計との 比較検査	
		PI52S 8076067	10 0.2 MPa	放熱器	基準圧力計との 比較検査	
		PI55S 8076064	10 0.2 MPa	給水ババース冷却器	基準圧力計との 比較検査	

Table 3.1.1-2 Specification of the boiler and the first category pressure vessels

機器名称	蒸気発生器	放熱器	給水ババス 冷却器
検査証番号	第3655号	第4498号	第4499号
型式	蒸気ボイラ 排熱ボイラ煙管	チューブ型 (角形管寄せ)	ジャケット付き (二重管式)
伝熱面積 又は内容積	伝熱面積 7.54 m^2	内容積 0.067 m^3	内容積 外管 $0.018 \frac{3}{4} \text{ m}^3$ 内管 $0.007 \frac{3}{4} \text{ m}^3$
最大蒸発量 又は交換熱量	0.54 ton/hr	260 KW	67 KW
設計温度 胴側 管側	300°C 350°C	300°C	300°C
最高使用圧力 胴側 管側	4.90 MPa 4.42 MPa	4.91 MPa	外管 0.69 MPa 内管 4.91 MPa
材質 胴側 管側	SGV480 SGV480	SB410-SR STB340-SC	外管 APT410, SB410 内管 STS410
胴側最大内径 長さ 板厚	1150 mm 36, 38 mm	1000 mm 50, 25 mm	52.7 mm 3.9, 4.0 mm
管側 内径or外径 肉厚	514.4 mm (内径) 22 mm	25.4 mm (外径) 2.6 mm	25 mm (内径) 4.5 mm
製造者	大江工業(株)	大江工業(株)	大江工業(株)

Table 3.1.1-3 (a) Inspection results of boiler and the first category pressure vessels(1/3)

対象機器	点検項目	点 檢 内 容	結 果	備 考
蒸気発生器 (X11S)	外観検査	1) 清掃前検査 伝熱管内面のボアスコープによる観察・記録。 He入出口室の目視検査及び記録。 水室内面及び伝熱管外面の付着物、堆積物の状況及び腐食等の有無についての検査・記録。	良	
		2) 清掃後検査 伝熱管内面のボアスコープによる観察・記録。 He入出口室・水室内面・伝熱管外面等の部位について亀裂、腐食、歪み、汚れ及び有害な欠陥が無いこと。	良	
		3) その他の検査 保温・塗装などの異常の有無。 接続配管の錆、損傷の有無。 ボルト類の錆、緩み、損傷の有無 パッキン、シート面の傷及び漏洩の有無。 止め弁、安全弁等の漏洩の有無。 圧力計の損傷等異常の有無。	無	
	浸透探傷 検査(PT)	ヘリウム入出口側胴部の周方向溶接部2箇所及び水室マンホール管台の溶接部について染色浸透探傷試験を行う。有害な欠陥の有無。	無	
	安全弁 (PV-25S)	分解清掃後、弁座弁体摺り合わせ、ディスク弁座・弁棒についてPTを行い、腐食、割れ変形、傷等が無いこと。 組み立て後の吹出し圧力の設定は設計圧力の90%を越え、かつ100%未満であること。 また、拭止まり圧力は設計圧力の80%以上であること。	無	
	圧力計 (PI-17S)	圧力基準器との比較校正試験を行い、性能異常等の有無。	無	
	水圧試験	開放部復旧後、常用圧力の1.1倍の圧力である5.41MPaにて試験を行い、水室側開放部及び付属機器取付部等の漏洩の有無。 本体及び配管等の異常の有無。 He側については高圧ガス保安検査事前検査時に同時に加圧して確認し、その結果、漏洩の有無。	無	
	官庁立会 検査	水圧試験を除く上記項目について検査官による記録検査及び現場検査。	合格	

Table 3.1.1-3 (b) Inspection results of boiler and the first category pressure vessels(2/3)

対象機器	点検項目	点 檢 内 容	結 果	備 考
放熱器 (X14S)	外観検査	1) 清掃前検査 伝熱管内面及び入出口ヘッダー部をボアスコープで観察し、付着物、堆積物の状況及び腐食等の有無についての検査・記録。	良	
		2) 清掃後検査 伝熱管内部及び入出口ヘッダー部に亀裂、腐食歪み、汚れ等及び有害な欠陥が無いことをボアスコープにより検査する。	良	
		3) その他の検査 保温・塗装などの異常の有無。 接続配管の錆、損傷の有無。 ボルト類の錆、緩み、損傷の有無 パッキン、シート面の傷及び漏洩の有無。 止め弁、安全弁等の漏洩の有無。 圧力計の損傷等異常の有無。	無	
	浸透探傷 検査(PT)	入出口ヘッダー外面の主要な溶接部である水平溶接継手(上下2本)についてPTを行い、有害な欠陥の有無確認。	無	
	圧力計 (PI-52S)	圧力基準器との比較校正試験を行い、性能異常等の有無。	無	
	水圧試験	開放部復旧後、常用圧力の1.1倍の圧力である5.41MPaにて試験を行い、ヘッダー等開放部及び付属機器取付部等の漏洩の有無。 本体及び配管等の異常の有無。	無	
	官庁立会 検査	水圧試験を除く上記項目について検査官による記録検査及び現場検査。	合格	

Table 3.1.1-3 (c) Inspection results of boiler and the first category pressure vessels(3/3)

対象機器	点検項目	点 檢 内 容	結 果	備 考
給水バイパス 冷却器 (X13S)	外観検査	前部及び後部の曲管部の亀裂、腐食、歪み汚れ等について目視にて有害な欠陥がないことを検査する。	良	
		※ その他の検査 保溫・塗装などの異常の有無。 接続配管の錆、損傷の有無。 ボルト類の錆、緩み、損傷の有無 パッキン、シート面の傷及び漏洩の有無。 止め弁、安全弁等の漏洩の有無。 圧力計の損傷等異常の有無。	無	
	浸透探傷 検査(PT)	本設備は継手部及び本体が全て溶接構造で開放が困難なため、代替としてPT検査が義務付けられている。曲管部近傍の内管(外径Φ34)及び外管(外径Φ60.5)の溶接部(周方向)41箇所について実施し、有害な欠陥の有無確認する。	無	
	安全弁 (PV-171S)	分解清掃後、弁座弁体摺り合わせ、ディスク弁座・弁棒についてPTを行い、腐食、割れ変形、傷等がないこと。 組み立て後の吹出し圧力の設定は設計圧力の90%を越え、かつ100%未満であること。 また、拭止まり圧力は設計圧力の80%以上であること。	無	
	圧力計 (PI-55S)	圧力基準器との比較校正試験を行い、性能異常等の有無。	無	
	水圧試験	常用圧力の1.1倍の圧力である5.41MPaにて試験を行い、付属機器取付部等の漏洩の有無。本体及び配管等の変形等異常の有無。	無	
	官庁立会 検査	水圧試験を除く上記項目について検査官による記録検査及び現場検査。	合格	

3. 1. 2 高圧ガス製造設備の保安検査

高圧ガス保安法に基づき、試験装置に設置されている高圧ガス製造設備の点検整備作業（定期自主検査、保安検査の事前検査）を平成15年7月から9月にかけて実施し、平成15年9月11日に茨城県庁の検査官立会いのもと保安検査を受検し合格した。

高圧ガス製造設備に該当する部位は、ヘリウムガス循環設備、不活性ガス供給設備、水蒸気供給設備、原料ガス供給設備、後処理設備、防消火設備であり、点検整備作業は約2ヶ月の工程で実施した。

（1）事前検査ならびに定期自主検査

平成15年7月下旬より、保安検査の対象となる全設備について、定期自主検査を兼ねて保安検査のための事前検査を実施した。保安検査のための事前検査は、高圧ガス保安法に定める技術上の基準（製造施設の位置、構造及び施設にかかる技術上の基準）に適合するように維持され、かつ、安全の確保が十分に施されていることの確認を目的とした検査である。また、定期自主検査は、高圧ガス製造施設の自主保安意識の向上と事業所自ら保安の確保が維持されているか否かを検査、確認することを目的とした検査である。定期自主検査の検査項目は保安検査の検査項目と基本的に同じであるが、耐圧検査に係る項目だけは免除されている。

（2）点検項目と対象設備

保安検査のための事前検査は、定期自主検査を兼ねて、一般高圧ガス保安規則第82条（別表第3）に掲げる方法に準拠して、技術上の基準の全項目について点検を実施した。Table 3.1.2-1に検査項目一覧とその対象設備を示す。同規則の「耐圧試験」については別表第3の11項に記載された代替方法、いわゆる開放検査により、32基を対象に行い、機器内外の目視及び溶接線（周縫手及び長手縫手）についての非破壊検査（浸透探傷試験、磁粉探傷試験）を実施した。構造上、非破壊検査が不可能な部位（溶接構造、二重管構造等）については事前に監督官庁と協議し了解を得た検査方法等で実施した。Table 3.1.2-2に高圧ガス製造設備開放検査機器一覧表を示す。なお温度計及び圧力計の比較検査については、製造細目告示第14条「保安検査の期間の延長(2年)」に基づき、今回の検査対象外とした。

（3）事前検査とその結果

開放検査の方法、使用測定機器、ならびに検査結果をTable 3.1.2-3に示す。対象設備のうち、LN₂ポンプについては、LN₂ポンプ用ケージングの浸透探傷検査（PT検査）において、内槽のTig溶接面に約15mm程度の欠陥が認められた。欠陥部分については、溶接部ビート形状による疑似模様と思われた為、溶接部ビートをペーパーやすりで研磨修正後、再試験（PT検査）を行い有害な欠陥がないことを確認した。また水蒸気改質器の磁粉探傷試験において下段フランジ溶接部に線状磁粉模様（長さ3mm）と上段ノズルの溶接部に円形状指示模様（3箇所）認められた。欠陥部分については、グラインダー処理による除去を行い再試験、有害な欠陥の無いことを確認した。他の対象設備については、全ての検査項目において亀裂・腐食・歪み等の有害な欠陥がないことを確認した。

次に、肉厚測定試験の方法、検査結果を Table 3.1.2-4 に示す。開放検査対象機器ならびに配管類においては、法定肉厚以上を有し、かつ前回の測定値と著しく違わないことを確認した。

気密試験の方法ならびに検査結果について Table 3.1.2-5 に示す。気密試験は不活性ガスを用いて常用の圧力以上で行った結果、手動グローブ弁のグランド部及びシート部からの漏えいが 10箇所あったが、グランドパッキンの交換及び本体シート面の摺り合わせ等の措置後、再試験を実施し全系統の洩れの無いことを確認した。

以上、本試験装置の全ての高圧ガス製造設備は、高圧ガス保安法に定める技術上の基準に適合するよう維持され、また安全の確保が十分施されていることを確認した。

(4) 保安検査とその結果

保安検査では、平成 15 年 9 月 11 日に書類検査と立会検査（気密試験、肉厚測定、緊急遮断装置作動試験、散水装置作動試験、ガス漏洩検知警報設備機能試験、安全弁作動試験）が行われ、合格し、「保安検査合格証」の交付を受けた。

Table 3.1.2-1 Inspection Items

検査項目	対象設備(数)	備考
1 開放検査 ・目視検査 ・非破壊検査	容器32基について実施 ヘリウムガス冷却器、ヘリウムガス循環機、圧縮機 圧縮機用3段クーラー、圧縮機用アフタークーラー 圧縮機用ダストフィルター、酸化銅ベッド×2基 モレキュラーシープベッド×2基 サージボリューム×4基、コールドチャコールベッド×2基 フィルター×6基、ガス循環機、LN2ポンプ LN2ポンプ用ケーシング、LN2ポンプ用SC LNGポンプ、LNGポンプ用SC、原料ガス加熱器 原料ガス過熱器、水蒸気改質器、水予熱器	Table 3.1.2-2
2 肉厚測定	・容器 532箇所について実施 ・配管 151箇所について実施	Table 3.1.2-3
3 気密試験	全系統の対象設備について実施	Table 3.1.2-4
4 不同沈下測定	貯槽 4基について実施 ・LNGタンク、原料ガスサージタンク ・液化窒素ガス貯槽、窒素ガスサージタンク	
5 温度計検査	熱電対温度計 36台、測温抵抗体温度計 5台 バイメタル式温度計 1台について外観検査を実施。	
6 圧力計検査	ブルドン管式圧力計 29台、圧力・差圧伝送器 20台について外観検査を実施。	
7 安全弁検査	安全弁 49台について実施。 ラプチャーディスク 8台について実施	
8 遮断弁機能試験	3台について実施 ・原料ガス供給系遮断弁:2台 ・不活性ガス供給系遮断弁:1台	
9 可燃性ガス検知器検査	13台について実施	
10 液化ガス貯槽検査	2基の貯槽について実施 ・液化窒素ガス貯槽、液化天然ガス貯槽	
11 接地抵抗測定	5箇所の測定点について実施。	

尚、主な試験検査の方法及び判定基準の詳細について、Table 3.1.2-2～3.1.2-4 に示す。

Table 3.1.2-2(a) Specification list of the high pressure gas components to be overhauled (1)

種 別	系統 名	機器名称 及び フロー番号	メーカー名 型 式	内容積 (m3)		貯藏能力 (トン)	ガス名 材質 (JIS)	設計圧力 (MPa)	常用圧力 (MPa)	設計溫度 (°C)	常用溫度 (°C)	肉 厚 (mm)		備 考	
				寸 法 (mm)	寸 法 (mm)							腐れ代	計 算	仕 様	
		酸化銅ベッド (SB551)	東海工業 壁型円筒	0.02	—	ヘリウム	SUS304	4.42	4.42	350	300	0	4.7	7.1	特定設備検査品 移設品
		酸化銅ベッド (SB552)	東海工業 壁型円筒	0.02	—	ヘリウム	SUS304	4.42	4.42	350	300	0	4.7	7.1	特定設備検査品 移設品
		モレキュラー シープベッド (MB551)	東海工業 壁型円筒	0.04	—	ヘリウム	SUS304	4.42	4.42	350	300	0	0.46	8.2	特定設備検査品 移設品
		モレキュラー シープベッド (MB552)	東海工業 壁型円筒	0.04	—	ヘリウム	SUS304	4.42	4.42	350	300	0	0.46	8.2	特定設備検査品 移設品
		サービボリウム (ST551)	東海工業 壁型円筒	0.065	—	ヘリウム	SUS304	4.42	4.42	50	35	0	3.6	8.2	特定設備検査品 移設品
		サービボリウム (ST551)	東海工業 壁型円筒	0.065	—	ヘリウム	SUS304	4.42	4.42	50	35	0	3.6	8.2	特定設備検査品 移設品
		サービボリウム (ST552)	東海工業 壁型円筒	0.065	—	ヘリウム	SUS304	4.42	4.42	50	35	0	3.6	8.2	特定設備検査品 移設品
		ヘリウムガス	東海工業 壁型円筒	0.065	—	ヘリウム	SUS304	4.42	4.42	50	35	0	3.6	8.2	特定設備検査品 移設品
		コールド チャコールベッド (CB551)	日本酸素 壁型円筒	0.02	—	ヘリウム	SUS304TP-S	4.42	4.42	50	35	0	3.6	8.2	特定設備検査品 移設品
		コールド チャコールベッド (CB552)	日本酸素 壁型円筒	0.02	—	ヘリウム	SUS304TP-S	4.42	4.42	-196~200	-196	0	5.36	8.2	完成検査品
		フィルター (F551)	フジ工業 FS-2	0.00086	—	ヘリウム	SUS304TP	4.42	4.42	350	300	0	2.24	5.2	特定設備検査品 移設品
		フィルター (F552)	フジ工業 FS-2	0.00086	—	ヘリウム	SUS304TP	4.42	4.42	350	300	0	2.24	5.2	特定設備検査品 移設品
		フィルター (F553)	フジ工業 FS-2	0.00086	—	ヘリウム	SUS304TP	4.42	4.42	350	10	0	2.24	5.2	特定設備検査品 移設品

Table 3.1.2-(b) Specification list of the high pressure gas components to be overhauled (2)

種別	系部名	機器名称及び フロー番号	メーカー名 型式	伝熱面積 (m ²)		ガス名 又は 熱媒体	材質 (JIS)	設計圧力 (MPa)	常用の 圧力 (MPa)	設計温度 (°C)	常用の 温度 (°C)	肉厚 (mm)	備 考	
				0.00086	處理能力 (Nm ³ /日)									
ヘリウムガス	ヘリウムガス (F554)	フジ工業	FS-2	0.00086	76.3 φ × 390H	ヘリウム	SUS304TP	4.42	4.42	350	35	0	2.24	5.2 特定設備検査品 移設品 保安協会製造設備試験品
ヘリウムガス	ヘリウムガス (F555)	フジ工業	FS-2	0.00086	76.3 φ × 390H	ヘリウム	SUS304TP	4.42	4.42	350	10	0	2.24	5.2 特定設備検査品 移設品 保安協会製造設備試験品
ヘリウムガス	ヘリウムガス (F556)	フジ工業	FS-2	0.00086	76.3 φ × 390H	ヘリウム	SUS304TP	4.42	4.42	350	10	0	2.24	5.2 特定設備検査品 移設品 保安協会製造設備試験品
ヘリウムガス (C3H)	長菱ハイテック(株)	—	胸: He	STPA22S	4.42	4.42	400	159	0	2.5	6	—	—	
熱交換器類	コトブキテクレックス (X7G)	二重管式	平板: He	SCMV2	4.42	4.42	400	159	0	14.1	22	—	—	
原料ガス 加熱器 (X8G)	コトブキテクレックス	外	N ₂ , H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O	SUS316TP	4.91	4.91	560	560	0	0.78	3.7 特定設備検査品	—	—	
原料ガス 過熱器 (X8G)	コトブキテクレックス	内	N ₂ , H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O	NCF800HTP	4.91	4.91	560	560	0	1.75	5.1	—	—	
原料ガス	バブコック日立(株)	外	N ₂ , H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O	NCF800HTP	4.91	4.91	700	700	0	2.04	4.5 特定設備検査品	—	—	
水蒸気改質器 (R1R)	バブコック日立(株)	5.01	加熱流体側胴: He H ₂ , CO ₂ , H ₂ O, CH ₄	SCMV4-1	4.42	4.42	400	920*	1	18.3	23 特定設備検査品 耐震設計適用品 大臣特認品	—	—	
水蒸気	水路管付 パイオネッジ型	4371	触媒管: H ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O, CH ₄ 鏡: He	NCF800HTF	4.91	4.91	400	740*	1	20.4	23 特定設備検査品 耐震設計適用品 大臣特認品	—	—	
回転機器	日揮工事	5.22	シリカ: ヘリウム	STPT370-S	4.42	4.42	350	281	3.0	1.43	5.5	—	—	
水蒸気	2重管型	—	シリカ/カルボン酸: He チューブ: 水 チューブ/アルネット: 水	SFVC2A STB340-SC STPT370-S	4.42	4.42	350	281	3.0	1.09	5.5 特定設備検査品	—	—	
ヘリウムガス	ガス循環機 (B551)	三國重工業 レシプロ	He	FCD50	4.42	4.42	100	50	4倍耐圧試験圧力: 19.62MPa 原動機出力: 75kW	—	—	—	—	
ヘリウムガス (B1H)	トーハイ川崎重工 コトブキテクレックス	193.536	He	SUSF321 SUSF316L	4.42	4.42	400	164	0	34.1	80 保安協会製造設備試験品 移設品	—	—	
ヘリウムガス	ヘリウムガス (B1H)	外	N ₂ , H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O	SUS316TP	4.91	4.91	560	560	0	0.78	3.7 保安協会製造設備試験品 移設品	—	—	

Table 3.1.2-2(c) Specification list of the high pressure gas components to be overhauled (3)

種別	系統名	機器名及びフロー番号	メーカー名 型式	処理能力/ 内容積 伝熱面積	ガス名 又は 熱媒体	材質 (JIS)	設計圧力 (MPa)	常用の 圧力 (MPa)	設計 温度 (°C)	常用の 温度 (°C)	肉厚 (mm)			備考
											腐れ代	計算	仕様	
回転機類	ヘリウムガス	圧縮機 (B3U)	加圧テック X型4段圧縮空冷	2544	ヘリウム	FCD450	19.7	14.7	250	230	1	9.25	18.3	認定検査試験品 原動機出力:45kW
		3段クリーラー ^{（C13U）}	加圧テック 空冷フイン付	11.8	ヘリウム	(チュー-ブ) SUS304TPS	10.7	5.5	200	190	0	1.04	2.3	
	アフターケーラー ^{（C14U）}	加圧テック 空冷フイン付	—	—	ヘリウム	(チュー-ブ) SUS304TPS	—	—	—	—	—	—	—	特定設備検査品
		ダストフィルタ ^{（F4U）}	加圧テック 垂直円筒	11.8 0.0006 寸法 φ132×268	ヘリウム	鏡、胴板共 SUS304	19.7	14.7	200	190	0	1.84	3.2	特定設備検査品
		LNGポンプ ^{（P2G）}	Cvi Incorporated 往復動式	5744	液化天然ガス	SUS304L相当	0.932+0.1013	0.491	吸入: 吐出:24.6	-196~40	-164	0	6.0	13.13
複合機器	原料ガス	SC	Cvi Incorporated 内筒型	0.00031	天然ガス	SUS304相当	24.6	19.7	-196~40	-164	0	2.5	9.7	保安協会製造設備試験品 原動機出力:5.5kW 防爆性能:d2G4
		LN2ポンプ ^{（P2N）}	Cvi Incorporated 往復動式	5752	處理能力 (Nm ³ /日)	ASME SA479 Type304L	24.0	19.6	-196~+40	-196	0	5.87	13.13	
	不活性ガス	LN2ポンプ ^{（ケーシング）}	Cvi Incorporated —	—	LN2	ASME SA479 Type304L	1.05 (+0.1013)	0.69	-196~+40	-196	0	0.89	2.77	保安協会製造設備試験品 原動機出力:5.5kW
		SC	Cvi サージチャンバー 内圧容器	内容量 0.31 リットル	ASME SA312 Type304	24.0	19.6	-196~+40	-196	0	2.51	9.70		
		SC	Incorporated サージチャンバー 内圧容器	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

Table 3.1.2-3(a) Results of overhaul inspection (Non-destructive inspection)

1. 検査方法

検査項目	検査方法	判定基準
目視検査	目視により亀裂、腐食、変形、汚れ等の有害な欠陥の有無を確認する。	亀裂、腐食、変形、汚れ等の有害な欠陥が無いこと。
磁粉探傷試験 (M T)	極間式探傷装置を用いて、容器等内外面の溶接部について割れ等の欠陥がないことを、紫外線探傷灯を用いて確認する。	磁化された溶接部を紫外線探傷灯で検査し、欠陥表示模様が確認されないこと。
浸透探傷試験 (P T)	溶剤除去性染色浸透法により、溶接部の表面欠陥(割れ、ピンホール等)のないことを確認する。	現像処理を行った後、可視発色のこと。

2. 使用測定機器

(1) 磁粉探傷試験 (M T)

磁化装置：交流極間型磁粉探傷装置：マークテック（栄進化学株製）

起磁力：A C 2 0 0 0 A T、観察装置：紫外線探傷灯

磁 粉：湿式蛍光磁粉、分散方式：水+界面活性剤 標準試験片：A2-30/100(直線形)

(2) 浸透探傷検査 (P T)

探傷剤：I K S チェック(浸透液、洗浄液、現像剤)

浸透時間：10分 現像時間：20分

3. 検査結果

検査年月日		平成 15 年 8 月 19 日～9 月 4 日				
機 器 名		検査方法	検査個所	欠陥の有無	欠陥の処理	結果
1	ヘリウムガス冷却器 (C 3 H)	目視検査	外面の外観検査	無		合格
		P T	外面の溶接線			
2	ヘリウムガス循環機 (B 1 H)	目視検査	外面及び内面の外観検査	無		合格
		P T	外面の溶接線			
3	圧縮機(B 3 U)	目視検査	外面及び内面の外観検査	無		合格
		P T	外面の溶接線			
4	圧縮機用 3段クーラー (C 1 3 U)	目視検査	外面の外観検査	無		合格
		P T	外面の溶接線			
5	圧縮機用アフタークーラー (C 1 4 U)	目視検査	外面の外観検査	無		合格
		P T	外面の溶接線			
6	圧縮機用ダストフィルター (F 4 U)	目視検査	外面及び内面の外観検査	無		合格
		P T	外面の受圧部			
7	酸化銅ベッド (S B 5 5 1、S B 5 5 2)	目視検査	外面の外観検査	無		合格
		P T	外面の溶接線			
8	モレキュラーシーブベッド (M B 5 5 1、M B 5 5 2)	目視検査	外面の外観検査	無		合格
		P T	外面の溶接線			
9	サージボリウム (S T 5 5 1、S T 5 5 2)	目視検査	外面の外観検査	無		合格
		P T	外面の溶接線			
10	コールドチャコールベッド (C B 5 5 1、C B 5 5)	目視検査	外面の外観検査	無		合格
		P T	外面フランジ部の溶接線			

Table 3.1.2-3(b) Results of overhaul inspection (Non-destructive inspection) (Continued)

機 器 名		検査方法	検査箇所	欠陥の有無	欠陥の処理	結果
11	フィルター (F 5 5 1～F 5 5 6)	目視検査	外面及び内面の外観検査	無		合格
		P T	外面の溶接線			
12	ガス循環器(B 5 5 1)	目視検査	外面及び内面の外観検査	無		合格
		P T	外面の溶接線			
13	L N 2 ポンプ(P 2 N)	目視検査	外面及び内面の外観検査	無		合格
		P T	外面の溶接線			
14	L N 2 ポンプ用ケーシング	目視検査	外面及び内面の外観検査	有	内面研磨処理	合格
		P T	外面の溶接線			
15	L N 2 ポンプ用S C	目視検査	外面の外観検査	無		合格
		P T	外面の溶接線			
16	L N G ポンプ(P 2 G)	目視検査	外面及び内面の外観検査	無		合格
		P T	外面の溶接線			
17	L N G ポンプ用S C	目視検査	外面の外観検査	無		合格
		P T	外面の溶接線			
18	原料ガス加熱器(X 7 G)	目視検査	外面の外観検査	無		合格
		P T	外面の溶接線			
19	原料ガス過熱器(X 8 G)	目視検査	外面の外観検査	無		合格
		P T	外面の溶接線			
20	水蒸気改質器(R 1 R)	目視検査	外面の外観検査	有	グラインダ処理	合格
		MT, PT	外面の溶接線			
21	水予熱器(X 1 0 S)	目視検査	外面及び内面の外観検査	無		合格
		P T	外面の溶接線			

Table 3.1.2-4(a) Results of thickness inspection on high pressure gas component

1. 試験方法

試験方法	判定基準
パルスエコー方式の超音波厚さ計を使用し、測定しようとする被検材に最も近い厚みの対比試験片D型により零点調整し、接触媒体質にグリセリン又はこれと同等品を塗布し、あらかじめ定めておいた測定点を2回測定法により測定する。	法定肉厚以上を有し、かつ、前回の測定値と著しく違わないこと。(測定点新設の場合、法定肉厚以上を有すること)

2. 検査結果

検査年月日	平成15年8月19日～9月4日	測定器		測定方式	接触媒質	測定精度	
		36DM、22HR GM-8	2回 測定法				
検査設備名 (開放機器)		測定個所数	測定最小肉厚(mm)	必要最小肉厚(mm)	前回測定肉厚(mm)	結果	
1 ヘリウムガス冷却器 (C3H)	胴側管②	4	5.4	2.44	新設	合格	
	胴側管③	4	6.2	3.14	新設	合格	
	胴側管④	4	5.5	2.44	新設	合格	
	胴側管⑤	4	5.4	2.44	新設	合格	
	胴側管⑥	4	5.2	1.90	新設	合格	
	胴側管⑦	4	5.4	2.44	新設	合格	
	胴側管⑧	4	5.5	2.44	新設	合格	
	胴側管⑨	4	5.9	3.14	新設	合格	
	胴側管⑩	4	5.6	2.44	新設	合格	
	エンドプレート	4	21.5	13.5	新設	合格	
2 ヘリウムガス循環機 (B1H)	Heガス出入口ノズル	8	5.1	1.90	新設	合格	
	上部平板部	4	80.5	34.1	新設	合格	
	上部胴部	2	65.4	8.4	新設	合格	
3 圧縮機(B3U)	3段シリンダー部	4	24.2	7.70+1.0	新設	合格	
	4段シリンダー部	4	25.6	9.25+1.0	新設	合格	
	ダストフィルタ-胴部	4	9.9	6.28	新設	合格	
	複合配管(L318～L320)	12	1.9	0.85	新設	合格	
	複合配管(L321)	4	4.5	2.47	新設	合格	
	複合配管(L323, L326)	8	2.0	0.97	新設	合格	
	複合配管(L324, L325)	8	1.0	0.46	新設	合格	
	複合配管(L327, L329)	8	1.0	0.46	新設	合格	
	複合配管(L328, L330)	8	0.9	0.46	新設	合格	
	複合配管(L331, L332)	8	2.0	0.97	新設	合格	
	複合配管(L333)	4	4.2	3.05	新設	合格	
	複合配管(L334, L335)	8	2.0	0.97	新設	合格	
	複合配管(L338)	4	1.0	0.26	新設	合格	
4	3段クーラー(C13U)	3段クーラー伝熱管	8	2.0	1.04	新設	合格
5	アフタークーラー(C14U)	アフタークーラー伝熱管	8	3.0	1.84	新設	合格

Table 3.1.2-4(b) Results of thickness inspection on high pressure gas component (Continued)

検査設備名 (開放機器)			測定個所数	測定最小肉厚(mm)	必要最小肉厚(mm)	前回測定肉厚(mm)	結果
6	酸化銅ベッド (SB551)	胴部	4	6.6	4.70	新設	合格
		上部鏡部	4	7.0	4.56	新設	合格
		下部鏡部	4	6.8	4.56	新設	合格
7	酸化銅ベッド (SB552)	胴部	4	6.7	4.70	新設	合格
		上部鏡部	4	6.9	4.56	新設	合格
		下部鏡部	4	6.8	4.56	新設	合格
8	モレキュラーシーブベッド (MB551)	上部胴部	4	7.8	6.22	新設	合格
		下部胴部	4	7.9	6.22	新設	合格
		上部鏡部	4	8.0	6.03	新設	合格
		下部鏡部	4	8.0	6.03	新設	合格
9	モレキュラーシーブベッド (MB552)	上部胴部	4	8.0	6.22	新設	合格
		下部胴部	4	7.8	6.22	新設	合格
		上部鏡部	4	8.0	6.03	新設	合格
		下部鏡部	4	7.9	6.03	新設	合格
10	サービボリウム (ST551)	胴部	8	7.9	3.6	新設	合格
		上部鏡部	8	7.6	3.56	新設	合格
		下部鏡部	8	7.7	3.56	新設	合格
11	サービボリウム (ST552)	胴部	8	7.7	3.6	新設	合格
		上部鏡部	8	7.9	3.56	新設	合格
		下部鏡部	8	8.2	3.56	新設	合格
12	コールドチャコルベッド(CB551)	Heガス入口ノズル	4	1.60	0.71	新設	合格
		Heガス出口ノズル	4	1.60	0.71	新設	合格
13	コールドチャコルベッド(CB552)	Heガス入口ノズル	4	1.60	0.71	新設	合格
		Heガス出口ノズル	4	1.60	0.71	新設	合格
14	フィルター (F551)	胴部	4	5.1	2.24	新設	合格
		鏡部	4	4.9	1.99	新設	合格
15	フィルター (F552)	胴部	4	5.0	2.24	新設	合格
		鏡部	4	5.0	1.99	新設	合格
16	フィルター (F553)	胴部	4	5.0	2.24	新設	合格
		鏡部	4	4.7	1.99	新設	合格
17	フィルター (F554)	胴部	4	5.0	2.24	新設	合格
		鏡部	4	4.7	1.99	新設	合格
18	フィルター (F555)	胴部	4	5.0	2.24	新設	合格
		鏡部	4	4.9	1.99	新設	合格
19	フィルター (F556)	胴部	4	5.0	2.24	新設	合格
		鏡部	4	4.8	1.99	新設	合格
20	ガス循環機(B551)	本体胴部	2	73.5	4倍耐圧	新設	合格
21	原料ガス加熱器 (X7G)	シェル側胴部①、③	8	4.9	1.75	新設	合格
		シェル側胴部②	4	9.1	4.75	新設	合格
		シェル側胴部④、⑤	8	4.9	2.74	新設	合格
		チューブ側胴部	8	3.6	0.78	新設	合格

Table 3.1.2-4(c) Results of thickness inspection on high pressure gas component (Continued)

検査設備名 (開放機器)		測定個所数	測定最小肉厚(mm)	必要最小肉厚(mm)	前回測定肉厚(mm)	結果
22	原料ガス過熱器 (X8G)	シェル側胴部①、③	8	5.1	3.63	新設 合格
		シェル側胴部②	4	9.4	6.13	新設 合格
		シェル側胴部④、⑥	8	5.1	3.63	新設 合格
		シェル側胴部⑤	4	8.9	6.13	新設 合格
		チューブ側胴部	12	4.2	2.04	新設 合格
23	LN2 ポンプ(P2N)	内胴部	4	2.7	0.89	新設 合格
		内胴鏡部	4	3.2	0.94	新設 合格
		LN2、GN2 ノズル	8	2.5	0.18	新設 合格
		エクステンションスプール	4	5.8	0.42	新設 合格
		シリンドーヘッド①	4	13.5	5.87	新設 合格
		シリンドーヘッド②	3	13.9	7.05	新設 合格
		シリンドーヘッド③	4	6.0	4.50	新設 合格
		SC	4	9.5	2.51	新設 合格
		配管部①	4	1.6	0.93	新設 合格
		配管部②	4	1.2	0.63	新設 合格
		配管部③	4	1.0	0.07	新設 合格
24	LNG ポンプ(P2G)	内胴部	4	3.0	0.86	新設 合格
		内胴鏡部	4	2.8	0.80	新設 合格
		LN2、GN2 ノズル	8	2.5	0.16	新設 合格
		エクステンションスプール	4	5.8	0.44	新設 合格
		シリンドーヘッド①	1	13.3	6.00	新設 合格
		シリンドーヘッド②	3	14.1	7.21	新設 合格
		シリンドーヘッド③	4	5.8	4.60	新設 合格
		SC	4	9.6	2.50	新設 合格
		配管部①	4	1.6	0.94	新設 合格
		配管部②	4	1.2	0.64	新設 合格
		配管部③	4	1.0	0.06	新設 合格
25	水蒸気改質器 (R1R)	上部フランジ部	4	25.4	20.4+1.0	新設 合格
		胴部	12	25.5	18.3+1.0	新設 合格
		下部鏡部	4	27.3	17.8+1.0	新設 合格
26	水予熱器(X10)	胴部	16	5.0	1.43+3.0	新設 合格
		シェル側ノズル部	12	5.0	1.43+3.0	新設 合格
		チューブカバー・ヘッド部	8	12.0	3.419+3.0	新設 合格

Table 3.1.2-4(d) Results of thickness inspection on high pressure gas component (Continued)

検査年月日	平成15年9月1日～9月2日	測定器	測定方式	接触媒質	測定精度
		22HR、36DL	2回測定法	ソニコート	±0.1mm
	検査設備名 (配管類)	測定個所数	測定最小肉厚(mm)	必要最小肉厚(mm)	前回測定肉厚(mm)
1	B1H 出口配管(L1H)	4	5.4	1.90	5.4
2	H2H 出口配管(L9H)	4	14.7	5.7	14.9
3	改質器出口配管(L12H)	4	14.9	5.7	15.1
4	蒸気過熱器出口配管(L13H)	4	14.7	5.7	14.7
5	蒸気発生器出口配管(L14H)	4	5.3	1.90	5.3
6	水予熱器出口配管(L15H)	4	3.6	1.29	3.7
7	混合タンク出口配管(L24H)	4	5.4	1.90	5.3
8	B3U 出口配管(L12U)	4	4.2	3.05	4.6
9	高圧ヘリウムカードル(L34U)	4	4.3	3.05	4.4
10	低圧ヘリウムカードル(L32U)	4	4.2	3.05	4.3
11	原料ガス加温器出口配管(L7G)	4	3.6	2.18	3.6
12	X3G 原料ガス出口配管(L20G)	4	3.5	1.92	3.5
13	CV15G 出口配管(L18G)	4	2.7	0.54	新設
14	AV14G 出口配管(L10G)	4	4.4	0.10	新設
15	原料ガス加熱器入口配管(L9G)	4	2.7	0.54	2.7
16	LNG 蒸発器入口配管(L3G)	4	3.6	1.92	3.6
17	原料ガス過熱器出口配管(L11G)	3	3.4	0.70	3.3
18	水蒸気供給系取合点(L52G)	4	5.0	0.82	4.9
19	温度調節用バイパスライン分岐点(L15G)	4	3.8	0.88	3.7
20	原料ガス過熱器出口配管(L16G)	4	4.1	2.04	4.3
21	原料ガス過熱器出口配管(L17G)(17-2)	4	4.8	1.74	4.8
22	原料ガス過熱器出口配管(L17G)(17-13)	4	4.2	1.74	4.5
23	LNG タンク・ポンプ廻り(L64G)	4	2.4	0.17	2.4
24	原料ガス過熱器出口配管(L2C)	4	4.5	1.76	4.5

Table 3.1.2-4(e) Results of thickness inspection on high pressure gas component (Continued)

検査設備名 (配管類)		測定 個所数	測定最小 肉厚 (mm)	必要最小 肉厚 (mm)	前回測 定肉厚 (mm)	結果
25	原料ガス過熱器出口配管(L3C)	4	4.6	1.66	4.5	合格
26	生成ガス放出ライン(L32C)	4	4.5	1.16	4.3	合格
27	触媒粉塵用フィルター入口(L3C)	4	4.6	1.66	4.5	合格
28	CV3C 出口配管(L4C)	4	5.6	3.47	5.5	合格
29	水蒸気改質器生成ガス出口(L1C)	3	4.8	3.85	4.8	合格
30	蒸気過熱器入口(L15S)	4	3.3	2.45	3.3	合格
31	蒸気過熱器出口(L16S)	4	4.3	2.95	4.3	合格
32	CV251S 入口(L231S)	4	4.3	2.95	4.3	合格
33	LN2 ポンプ出口(L57N)	4	3.7	2.15	3.7	合格
34	LN2 蒸発器出口(L61N)	4	4.4	2.69	4.4	合格
35	LN2 サージタンクライン(L64N)	4	2.8	1.72	2.8	合格
36	CV63N 出口配管(L76N)	4	2.0	0.49	2.1	合格
37	水素ライン一次側配管(L87N)	4	2.0	0.26	1.9	合格
38	水素ライン二次側配管(L88N)	4	2.0	1.00	1.9	合格

Table 3.1.2-5 Results of hermeticity test

1. 試験方法

試験方法	判定基準
不活性ガスを用いて常用の圧力以上の圧力に昇圧し、その圧力で 10 分以上保持する。漏洩の確認は、検定済みの圧力計及び発泡液(腐食防止剤混入のもの)を用いて、すべての機器、配管及び弁類の継手部(溶接継手部は除く)、貫通部、取付部(フランジ、弁のグランド、ねじ込み部、電極貫通部、熱電対取付部等)について漏洩の有無を検査する。	各部に漏洩がないこと。

2. 検査結果

検査年月日	平成 15 年 9 月 4 日～9 月 6 日	検査媒体	窒素ガス	検査方法	発泡試験
対象設備	常用圧力(MPa)	検査圧力(MPa)	保持時間	結果	備考
ヘリウムガス循環設備	4.42	4.50	30 分	合格	
	4.2	4.50	30 分	合格	
	5.5 ^(※)	4.50 ^(※)	30 分	合格	
ヘリウムガス圧調設備	4.42	4.50	30 分	合格	
	14.7	14.7	30 分	合格	
	14.8	15.2	30 分	合格	
ヘリウムガス精製設備	0.589	0.590	30 分	合格	
	0.932	1.04	30 分	合格	
	4.42	4.50	30 分	合格	
水蒸気供給設備	4.91	4.95	30 分	合格	
不活性ガス供給設備	0.69	0.69	30 分	合格	
	1.8	1.85	30 分	合格	
	3.5	3.6	30 分	合格	
	5.89	5.90	30 分	合格	
	14.7	15.0	30 分	合格	
	19.6	20.3	30 分	合格	
後処理設備	4.91	4.95	30 分	合格	
原料ガス供給設備	0.8	0.82	30 分	合格	
	0.491	0.50	30 分	合格	
	4.91	4.95	30 分	合格	
	5.89	5.89	30 分	合格	
	19.7	20.3	30 分	合格	
水蒸気改質器	4.91	4.95	30 分	合格	

※印:圧縮機(B3U)の気密試験は、開放検査後の試運転において運転圧力(4.50MPa)にて実施した。

3. 2 その他の工事

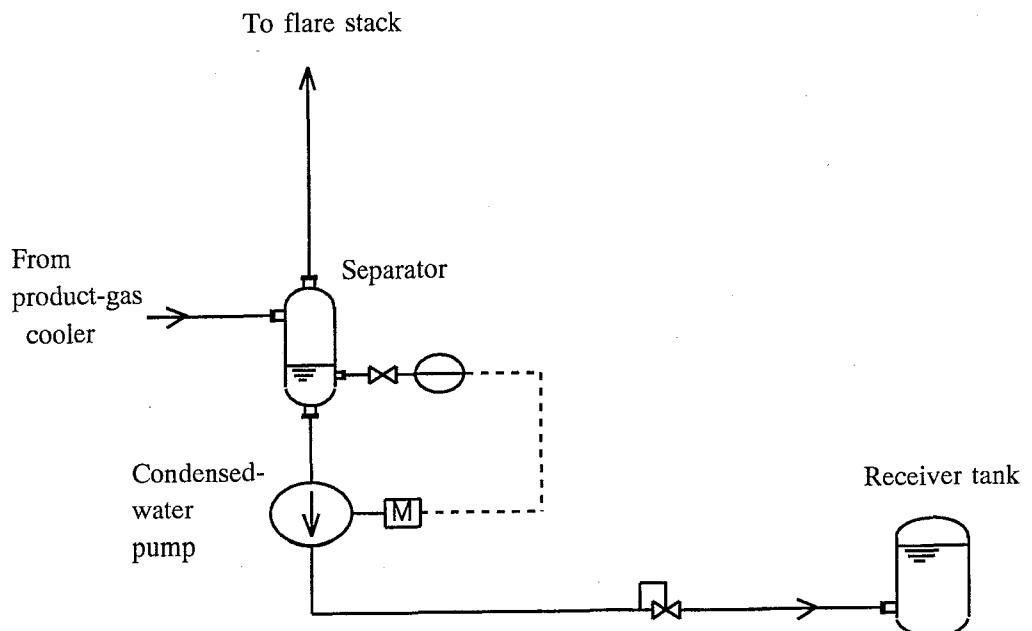
3. 2. 1 後処理設備凝縮水戻りラインの改修

平成 15 年 5 月に、後処理設備のセパレータ凝縮水戻りラインの改修工事を実施した。

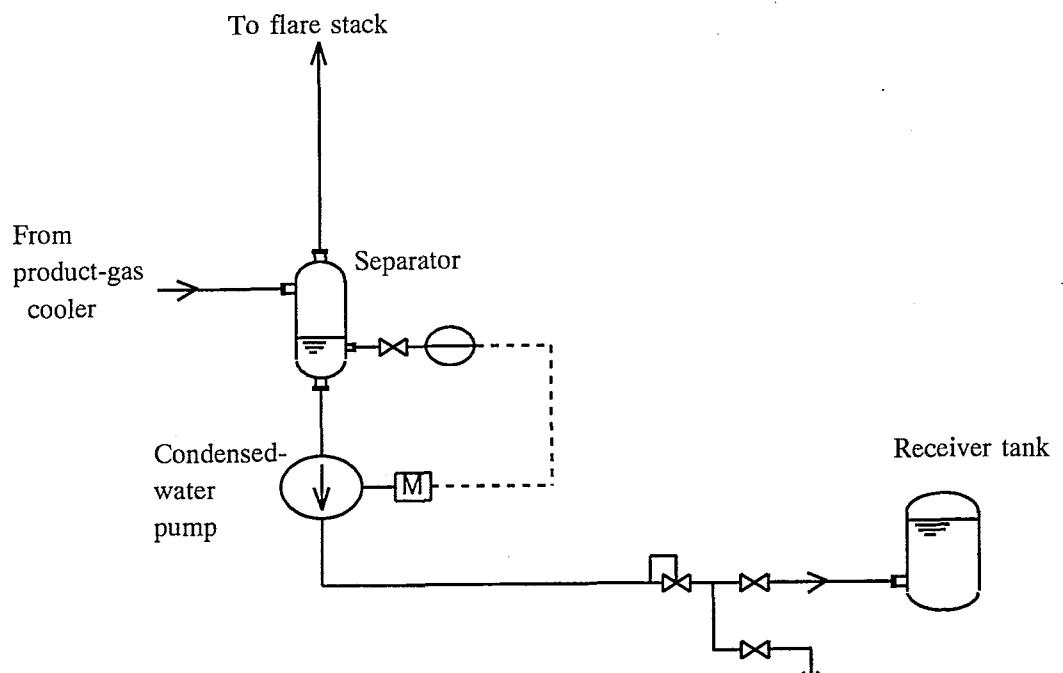
後処理設備のセパレータは、生成ガスを気水分離し、未反応の蒸気を凝縮水として貯留した後、水蒸気供給設備の純水受け入れタンクに戻し、再利用するための機器である。平成 14 年の第 3 回試験運転において、水蒸気供給設備の脱気装置内水純化用フィルタが想定寿命よりかなり早い時期に目詰まりが起きるようになり頻繁に交換作業を実施した。PH 調整が難しくなるとともに、蒸気発生器（ボイラ水）の電気伝導度は規定値内に入っていたが数値は 2 倍に悪化した。この原因は純水受入タンク水（補給水）の水質劣化によるものと考えられたが、その原因がタンクローリーからの補給水の水質変化か、水素製造中にセパレータに生ずる凝縮水（復水）を純水受入タンクに戻すことによる水質劣化かは判定できなかった。そこで、セパレータからの戻り水の水質悪化の場合にも対応できるようにするために、Fig.3.2.1 の系統図に示すように配管構成を改修し、弁操作によりセパレータ凝縮水の再利用を止めて溜まった凝縮水はドレンできるように改善した。

3. 2. 2 水蒸気改質器触媒交換

平成 15 年 7 月 22 日から 30 日にかけて、試験研究を目的とした水蒸気改質器の触媒交換作業を実施した。新規に充填した触媒は、これまで使用していた触媒と同様のニッケル触媒であるが、形状及びニッケルの担体構造が異なっており、一般工業界において広く使用され始めている新触媒である。また、実機での触媒交換作業に先立ち、水蒸気改質器の反応管と同寸の透明な樹脂製のモックアップ反応管を作り、それを用いて真空吸引機と吸引チューブによる触媒抜き取り並びに充填チューブを用いた触媒充填の模擬作業を実施し、内部に触媒の残留なく触媒を抜き出せること、及び触媒充填時に触媒の破損がなく、かつ不均一な充填に起因する過大な空隙部がないことを確認した。水蒸気改質器からの触媒抜き取り作業においては、CCD カメラにより全ての触媒が抜き出せたことを確認し、また触媒の充填作業においては、所定高さ 6000mm まで充填した際の充填触媒重量が模擬作業から算出した所定量であることを確認した。さらに、抜き出した触媒に対して、比表面積、密度、活性成分担持量、成分比、破碎強度、細孔容積、炭素分析及び硫黄分析を実施した。この結果、使用前の触媒に対する分析結果と比較して、大きな変化は見られず、性能及び強度上問題のないことが確認できた。



(a) Before improvement



(b) After improvement

Fig.3.2.1 Flow-diagram of the condensed-water return-line of combustion system

3. 2. 3 可燃性ガス漏えい検知器の増設

可燃性ガスを取り扱う設備のうち、保温材、保冷材で覆われた機器についての漏えい監視を連続的に行えるよう、平成 15 年 9 月に保温材・保冷材内用可燃性ガス漏えい検知器を設置し、第 5 回試験運転から使用を開始した。

本試験装置の可燃性ガスを取り扱う設備は、可燃性ガスの漏えいが生じても滞留することが無いように、原則として屋外に設置され、水蒸気改質器だけは防火壁に覆われた建屋室内に設置されているが強制排気設備を有している。また、可燃性ガスを取り扱う各設備の開放空間には平成 13 年度の建設時に合計 13 個の定置式ガス検知器を設置し、運転中は 24 時間連続監視を行うとともに、機器・配管継ぎ手部等については、運転員の定時現場点検においてポータブルガス検知器による可燃性ガスの漏えいチェックを実施している。これらの監視体制はいずれも法規上の要求を十分に満足しているが、安全対策をさらに強化する観点から再検討を行ったところ、保温材、保冷材で覆われた機器について内部の継ぎ手部等で漏えいが生じた場合には既設検知器や定時点検で実施する外表面の点検で発見されるまでに時間遅れがあることから、保温材・保冷材内用に専用の可燃性ガス検知器を設置することとし、平成 15 年度に増設工事を実施した。

保温材・保冷材内用には、開放空間に設置したのと同じ形式の定置式ガス検知器を用いているが、検出対象のガスが高温・多湿になる場合があることを考慮して、検出対象部位に検出配管を挿入して吸引ポンプで吸引し、配管による冷却と除湿を行った後センサ部に流すよう構成している。検出対象は (a) 原料後処理架台の触媒粉塵用フィルタの保温材頂部、原料ガス過熱器保温材上部、原料ガス加熱器保温材上部、の合計 3箇所、(b)水蒸気改質器室の水蒸気改質器保温材頂部、入口配管保温材、出口配管保温材、(c)LNG タンク下部の LNG 配管保冷材の上部と下部、の合計 8箇所である。Fig.3.2.2 に増設した検知器の配置を示す。

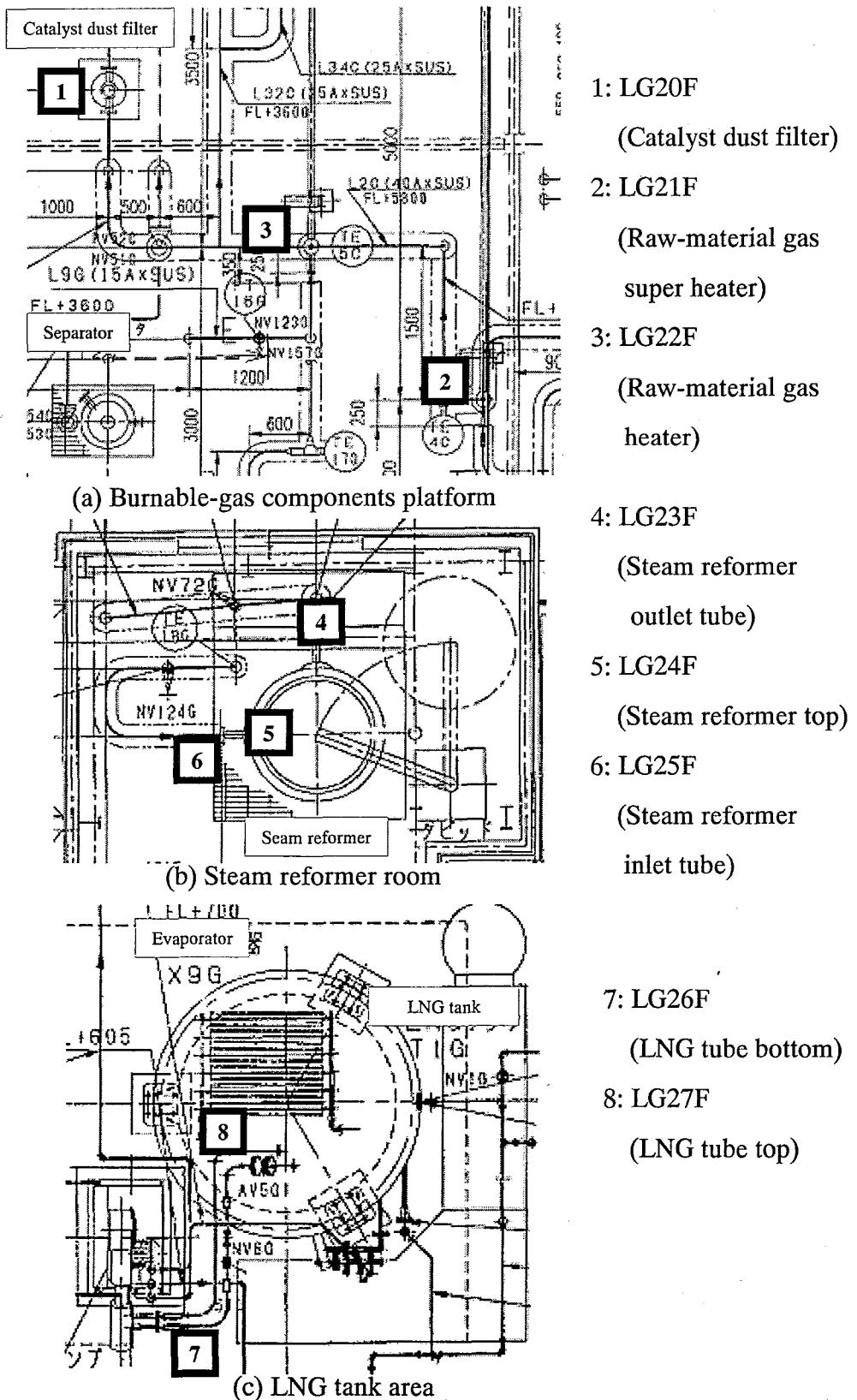


Fig.3.2.2 Location of additional burnable-gas detectors

4. 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⁽⁷⁾。その後、平成 14 年 3 月 1 日から 3 月 16 日にかけて第 1 回試験運転を実施し、水蒸気改質器特性試験のうち熱流動試験並びに運転訓練を行っている⁽⁸⁾。平成 14 年度には一部系統の改修工事を経て、第 2 回、第 3 回試験運転を実施し、起動停止試験、プラント特性試験、水蒸気改質器特性試験並びに化学反応停止試験を計画通りに達成した⁽⁹⁾。

平成 15 年度は、5 月 22 日から 7 月 6 日にかけて第 4 回試験運転を、また平成 15 年 10 月 28 日から 12 月 10 日の期間に第 5 回試験運転を実施した。試験の主な目的は次の 5 項目である。

- ① 起動停止試験—水素製造開始停止条件選定に関する試験
- ② 起動停止試験—ヘリウムガス冷却器の温度制御特性に関する試験
- ③ プラント特性試験—プロセス変動特性試験
- ④ プラント特性試験—連続水素製造試験
- ⑤ 化学反応停止試験

各試験の成果については以下の章で詳細に述べる。なお、第 5 回試験運転終了後の平成 15 年 1 月 21 日、点検のため窒素ガスによる気密試験を実施したところ、後処理設備の触媒粉塵用フィルタのノズルフランジ部に損傷のあることが分かり、平成 16 年 3 月までに損傷の原因調査を実施した。その結果、当該部位に凝縮水が溜まり、塩化物イオン等による応力腐食割れが生じたことが原因と判明した⁽¹⁰⁾。

4. 1 試験と運転の工程

平成 15 年 5 月 22 日から 7 月 5 日の約 2 ヶ月間に第 4 回試験運転を、平成 15 年 10 月 28 日から 12 月 11 日の期間に第 5 回試験運転を実施した。Fig.4.1.1 と Fig.4.1.2 にそれぞれの試験運転の実績工程を示す。

第 4 回試験運転は、平成 15 年 5 月 12 日から起動準備に入り、5 月 21 日に系統昇圧、5 月 22 日にヘリウムガス加熱器を起動して運転に入り、同日、水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度 180°C まで昇温した。5 月 25 日から 26 日にかけて水蒸気改質器入口ヘリウムガス圧力 3.7MPa、温度 700°C まで昇温・昇温した。その後、5 月 29 日に水素製造を開始、各種試験を経て 7 月 4 日に降温降圧して、運転を終了した。

第 5 回試験運転は、平成 15 年 10 月 20 日から起動準備に入り、10 月 27 日に系統昇圧、10 月 28 日にヘリウムガス加熱器を起動して運転に入り、同日、水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度 180°C まで昇温した。10 月 31 日に水蒸気改質器入口ヘリウムガス圧力 3.6MPa、温度 700°C まで昇温・昇温した。10 月 31 日、水蒸気改質器入口ヘリウムガス圧力 3.6MPa、温度 700°C まで昇温・昇温した。その後、11 月 4 日に水素製造を開始したが、水蒸気改質器上部フランジの保温材内ガス検知器の指示値が上昇したため、原因調査のために降温降圧して運転を停止し、点検を行った。その後、気密試験を経て、11 月 28 日から再び運転に入り、蒸気を通気して水蒸気改質器

の原料ガス側を高温状態とし指示値上昇の原因調査、並びに蒸気と低濃度の水素ガスを通気して水蒸気改質器上部フランジの高温状態での気密試験を実施した。その結果、指示値上昇の原因是フランジガスケットならびに保温材内の脱ガスによるもので、可燃性ガスの漏えいが無いことを確認して調査を終了し、12月10日から降温降圧して12月11日に試験運転を終了した。これについて4.6節に述べる。

以下に実施した試験項目についての詳細を記す。

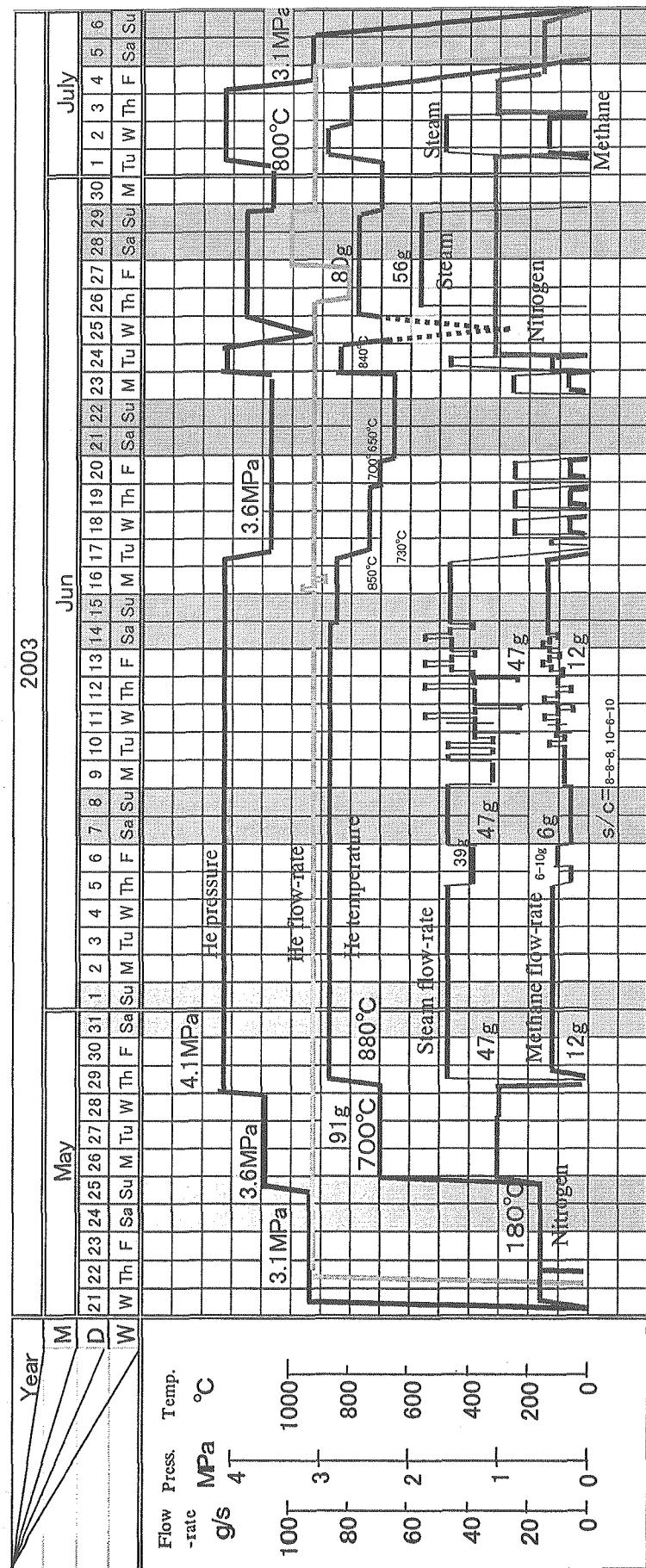


Fig.4.1.1 Time record of the 4th experimental test operation

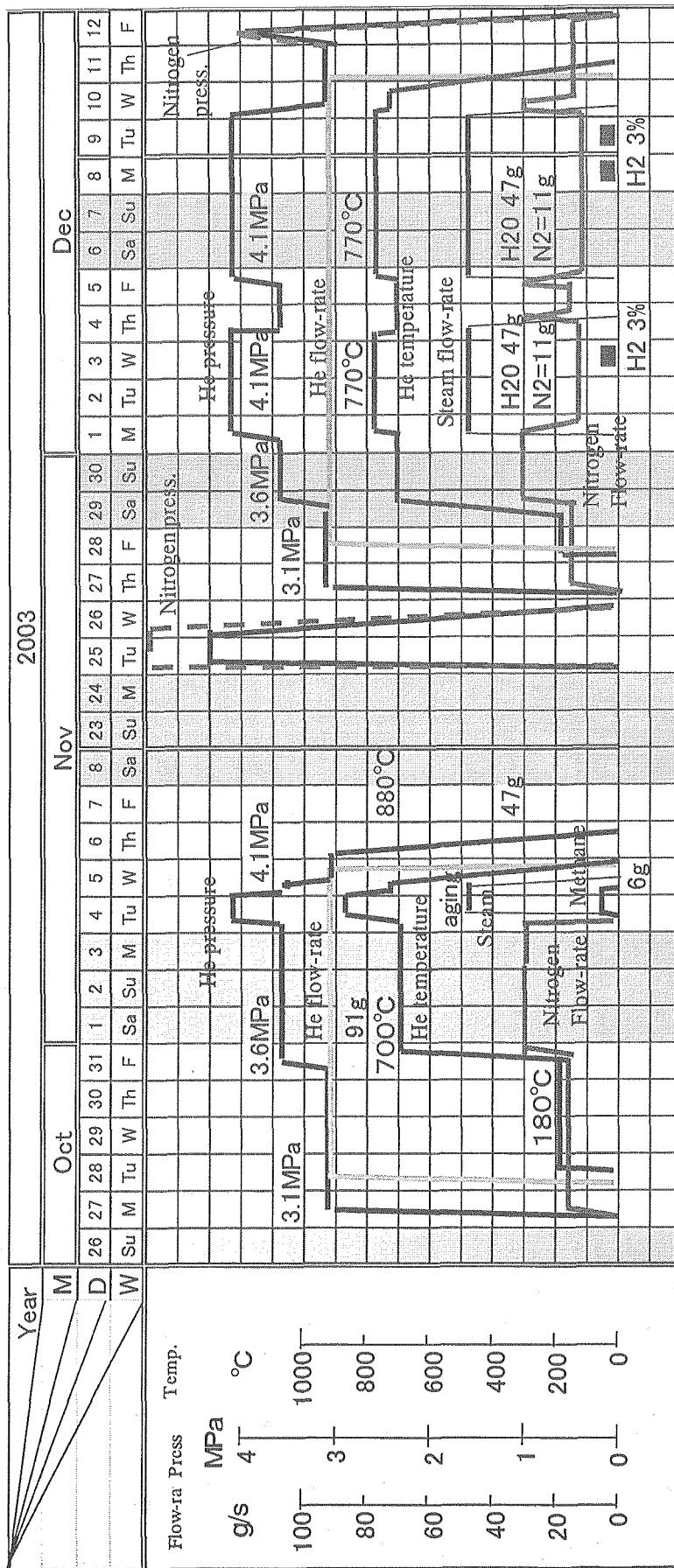


Fig. 4.1.2 Time record of the 5th experimental test operation

4. 2 起動停止試験

4. 2. 1 水素製造開始停止条件選定

(1) 試験目的

平成 14 年度第 3 回試験運転において HTTR の運転を模擬した水蒸気改質水素製造システムの起動停止試験を実施し、その結果、起動停止時における水蒸気改質器反応管内外差圧の制御、並びに水蒸気改質器出口ヘリウムガス温度変動の蒸気発生器による緩和が、ともに目標の変動幅以内に行えることを確認している⁽⁹⁾。ただし、その試験条件では水蒸気改質器出口ヘリウムガス温度が短時間に約 100°C 变化したので、水蒸気改質器反応管の熱疲労を緩和するという観点から、水素製造開始停止時の温度変動幅を減少させるための起動停止条件を検討することにした。平成 15 年度は、温度変動幅を決定する原料ガス供給流量（メタン流量）と、反応に必要な環境温度（触媒層温度）をパラメータとして試験を実施し、検討用のデータを取得した。

(2) 試験方法及び条件

試験条件を Table 4.2.1 に示す。表中の M1～M4 は、各試験条件に対応した試験 No. を表し、A は起動時の試験、B は停止時の試験を表す。以下、試験条件について説明する。

1) 原料ガス供給開始温度

水蒸気改質法による HTTR 水素製造システムは、原子炉出力 100%，原子炉出口温度 950°C のとき、水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度は 880°C であり、水素製造量はこの時の値を定格としている。ちなみに、1/30 スケールの本試験装置は定格時の水素製造量 120Nm³/h に対して、原料ガス流量は 12g/s、蒸気流量は 47.2g/s と定めている。この条件で、水素製造システムの起動運転における水素製造開始点、すなわち原料ガス供給開始点をどこに置くのが良いかを下記の通り検討した。

① 触媒還元

水蒸気改質器反応管の触媒は初期装荷時には酸化状態にあり、また使用開始後も前回の停止運転で行った蒸気通気により酸化状態にあるので、水素製造開始前に触媒還元を行う必要がある。還元は触媒層温度が 500°C 以上の状態で行う。起動運転においては昇温途中の水蒸気改質器入口 2 次ヘリウムガス温度が 500°C から 650°C の期間（約 11.5 時間）に水素ガスを用いた触媒還元を実施する必要がある。

② 炭素析出と蒸気供給

水蒸気改質触媒は供給する原料ガス（メタン）に対して十分な蒸気を供給しないと反応管内の触媒層に炭素析出を生じる可能性があり、一旦炭素が析出すると触媒の有効面積を減少させるだけでなく触媒の破損並びに流路閉塞の原因となる。そこで、メタンを通気する前に十分な蒸気を単独で供給し、またメタン通気時は S/C（水蒸気・カーボン比）を 3.5 以上とする。高温条件下での触媒層への蒸気の単独通気は触媒を酸化し不活性にさせるので、その影響を低減するために、蒸気の単独通気時間を 1 時間以内に制限する。

③ ニッケル・アルミナ反応

水素製造は水蒸気を供給した後にメタンを供給することにより開始されるが、触媒層温度が 800°C 以上の条件で触媒に蒸気を単独通気した場合、触媒の酸化だけでなく、非可逆反応であるニッケル・アルミナ反応を引き起こし、触媒を不活性化する恐れがある。これを防止

するためには、メタンの供給開始は触媒層温度が800°C以下で行う必要がある。

以上の検討から、原料ガス供給開始は水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度が650°Cから800°Cの範囲にあることが必要条件と考えられる。一方、水蒸気改質反応による吸熱量は反応温度が低くなると減少するので、原料ガス供給開始をこの温度範囲の低い側に選ぶことにより水素製造開始時の温度変動は原理的に減少できるはずである。先に第3回試験運転で実施したHTTRの運転を模擬した起動停止試験では、起動・停止時に生じる温度、圧力等の変動（システムに対する外乱）を保守的に評価する見地から、比較的大きな変動が期待される730°Cに水素製造開始点を選定し、既にデータを取得済みである。したがって、本試験では、730°C以下の低温側について検討すれば良く、水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度は730°Cを基準に、700°C、650°Cを加えた合計3点を試験パラメータに選定した。

なお、HTTR水素製造システムの起動運転ではヘリウムガス循環ループが13°C/hで昇温中に水素製造を開始するが、昇温による温度変化分が測定データに重畠して評価が複雑化するのを避けるため、本試験では水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度は一定とした。他の条件は次の通りである。

- ・水蒸気改質器入口ヘリウムガス圧力 約4.1MPa一定
- ・水蒸気改質器入口ヘリウムガス流量 91g/s一定
- ・水蒸気改質器入口原料ガス温度 450°C一定
- ・蒸気発生器内蒸気圧力 4.6MPa一定

2) 原料ガス供給開始流量

原料ガス供給流量は、蒸気とともに化学反応量を決定する要素の1つであり、その増減によって吸熱量が増減する。水素製造開始時においても原料ガス供給流量を小さくすれば、吸熱も小さくなり、結果的にヘリウムガスの温度変動も低減できる。HTTRの運転を模擬した起動停止試験では、起動・停止時に生じるシステムに対する外乱を保守的に評価する見地から、原料ガス供給初期流量は6g/s(定格流量の50%)と設定した。本試験では、原料ガス供給初期流量は6g/sを基準に、約4g/sを加えた合計2点を試験パラメータに選定した。

3) 蒸気と不活性ガスの供給停止条件

蒸気と不活性ガスの供給・停止は各ケースとも同一条件で行った。蒸気供給は原料ガス供給開始の50分前に開始し、HTTRの運転を模擬した起動停止試験と同様に初期流量約11g/s、蒸気供給開始後約30分で28g/sまで上昇させた。次に約50分間で定格の47g/sまで増加させることにし、その途中、約20分経過した蒸気流量約32g/sの時点から原料ガス供給を開始した。不活性ガスは原料ガス供給開始の50分前に定格流量30g/sから減少を開始し、原料ガス供給時には最低流量11g/sで一定とし、10分以内に停止させた。

蒸気供給停止時は、水蒸気供給設備の準備として蒸気プローラインの暖機を原料ガス供給停止の170分前から開始し、蒸気を蒸気プローラインに90分間で最大約8g/sまで分流することにより、水蒸気改質器に供給する蒸気を47g/sから39g/sまで減少させた。次に80分前から原料ガス供給停止を挟んだ10分後までの90分間に蒸気を39g/sから28g/sまで減少させた。その途中の

約 32g/s で暖機を終了させ、約 30g/s の時に原料ガスの供給を停止した。蒸気は 28g/s 到達後、約 18 分で 11g/s まで減少させてから停止した。不活性ガスは原料ガス供給停止の 10 分前に最低流量 11g/s で供給開始し、原料ガス供給停止後 50 分以内に定格流量 30g/s まで増加させた。

4) 計測点とデータの評価

水素製造開始、停止時における水蒸気改質器反応管の温度変化を測定するに当たり、反応管外壁に垂直方向に配置された 5 つの熱電対を用いた。反応管外壁温度 1 から反応管外壁温度 5 の配置は、Fig.4.2.1 に示すように、全長約 6.8m の反応管の下部を 0 点として、垂直方向に 6.3m, 4.5m, 3m, 1.5m および 0m の位置である。これらの計測値に基づき、温度変化ならびに温度変化率(°C/s)を評価した。

(3) 試験結果

1) 起動試験時の反応管温度の変化

Fig.4.2.2 に一例として起動試験 M2A(原料ガス供給開始温度 730°C、原料ガス供給流量 4.2g/s) で得られた 5 つの反応管外壁温度の温度、ならびにその温度変化率の時系列データを示す。

図(a)を見ると分かるように、蒸気供給を開始すると最上部の反応管外壁温度 1 だけに大きな温度降下が現れ、さらに蒸気流量増加時にも同様の傾向が見られた。原料ガス供給を開始して水素製造を始めると、全ての外壁温度が温度降下を始めた。最も大きな変化を示したのは原料ガス入口側の最も低温側に位置する反応管外壁温度 1 で、原料ガス供給後 672°C から 617°C まで約 70 分で約 55°C の減少、蒸気通気による降下も含めると約 100°C 程度の減少であった。最も高温側に位置する反応管外壁温度 5 は最も温度降下が少なかった。

温度変化率については図(b)を見ると分かるように、原料ガス供給後では反応管外壁温度 2 が最も大きな値を示し、次いで反応管外壁温度 3、4 が大きな値を示していた。これは反応管外壁温度 1 の位置には伝熱促進用粒子が充填されて、反応を起こす触媒は反応管外壁温度 2 の位置から下側にのみ充填されているためである。したがって、触媒層の最上部が最も大きな温度変化率(-0.086°C/s) を示し、また水蒸気改質反応による吸熱が反応管外壁温度 2、3、4 の領域で起きていたことが分かる。

一方、蒸気の供給開始と流量増加の影響は、反応管外壁温度 1 に強く現れ、その下流の反応管外壁温度 2 にも僅かに見られ、温度変化率は蒸気の供給開始時に反応管外壁温度 1 に現れたもの(-0.116°C/s) が最も大きく、メタンの吸熱反応によるものよりも大きかったが、これについては蒸気の初期流量をさらに小さくする等の対策により低減できると考える。

2) 原料ガス流量の効果

水蒸気改質器ヘリウムガス入口温度を 730°C で一定とし、原料ガス流量を 4.2g/s と 6g/s に設定して、それぞれ原料ガス供給開始と停止を実施した。試験データ M1、M2 の結果を整理し、原料ガス供給開始温度に対する反応管外壁温度の最大変化幅、ならびに最大変化率を図示したものが、Fig.4.2.3 である。

これによると、原料ガス流量 6g/s 時に温度変化幅は起動時に約 -100°C、停止時に約 +100°C あったが、4.2g/s 時には起動時に約 -60°C、また停止時に約 +80°C と変化幅が小さくなることが示された。

また、温度変化率は原料ガス供給時の温度変化だけを整理したもので、これによると、起動時には 6g/s では約 -0.13°C/s であったが 4.2g/s では約 -0.8°C/s となり変化率が縮小したことが分かる。また、停止時は 6g/s では約 0.1°C/s であったが、 4.2g/s では半分以下に小さくなっている。原料ガス流量の計測点が 2 点なので大雑把な傾向を把握するにとどまるが、原料ガス流量を約 30% 減少することにより、温度変化率を少なくとも 30% 程度小さくできることが示された。

3) 原料ガス供給開始温度の効果

原料ガス流量 6g/s 一定で水蒸気改質器ヘリウムガス入口温度を 730°C 、 700°C 、 650°C に設定し、それぞれ原料ガス供給開始ならびに原料ガス供給停止を実施した。試験データ M1、M3、M4 の結果を整理し、原料ガス供給開始温度に対する反応管外壁温度の最大変化幅、ならびに最大変化率を図示したものが、Fig.4.2.4 である。ここでは、原料ガス供給開始時の変化だけでなく蒸気供給による変化分も含めている。これによると、原料ガス供給開始温度 730°C では温度変化幅（一は減少、+は増加）は起動時約 -100°C 、停止時約 $+100^\circ\text{C}$ であったが、開始温度を 650°C にすると起動時には約 -50°C と 50% 程度小さくできることが、また停止時には約 $+70^\circ\text{C}$ と 30% 程度小さくできることが示された。

以上の結果から、水素製造開始時に生じる反応管外壁の温度変動は、原料ガス流量の減少ならびに原料ガス供給開始温度を低温側とすることで、より低減できることを定量的に確認した。

4. 2. 2 ヘリウムガス冷却器の温度制御特性

(1) 試験目的

HTTR 水素製造システムでは化学反応器（水蒸気改質器）と蒸気発生器が 2 次ヘリウムガスループの主な負荷を形成し、また蒸気発生器下流に設置したヘリウムガス冷却器が負荷の微調整を行う。HTTR の起動停止時には出力の上昇下降に合わせて蒸気発生器の蒸気製造量が増減することにより負荷調整が為される。また、さらに高い出力領域では、出力の上昇下降に合わせて水素製造の開始停止と製造量の調整により負荷を増減させるとともに、水蒸気改質器で生じるヘリウムガス温度変動は蒸気発生器の緩和機能により減少させ、結果的に負荷変動に対する自動調整が為される。蒸気発生器は 2 次ヘリウムガス温度が水の飽和温度以上にある時には負荷の自動調整や負荷変動の緩和機能を有するが、2 次ヘリウムガスを水の飽和温度以下には冷却できないので、中間熱交換器に戻すヘリウムガス温度を所定の温度範囲に制御するためにヘリウムガス冷却器を用いた除熱を行う。

本試験装置のヘリウムガス冷却器は、Fig.2.1 に示すように、ヘリウムガス循環機出口のバイパスラインならびに水蒸気改質器を通るヘリウムガスラインが合流した点に設置され、ヘリウムガス循環機入口温度が一定になるよう制御する機器である。ヘリウムガス冷却器出口ヘリウム温度の制御は、ヘリウムガス冷却器をバイパスするラインの流量を調節する自動制御系により行われる。本試験では、ヘリウムガス冷却器出口のヘリウムガス温度を中間熱交換器へ戻る 2 次ヘリウムガス温度と見立てて、HTTR の昇温降温時に所定の温度に制御できることを確認する。

(2) 試験方法及び条件

試験は、ヘリウムガス冷却器出口ヘリウムガス温度の制御目標値を変化させ、実測の温度が制御目標値に対してどの程度の誤差で追従できるかを調べるため、制御目標値の変化速度は±40°C/h と±13°C/h の2つのケースについて測定を実施した。試験手順は、以下の通りである。

(1a) +40°C/h で、80°C→100°C(30分)、

(1b) 100°Cで60分ホールド、

(1c) -40°C/h で、100°C→80°C(30分)、

(1d) 80°Cで、60分ホールドとする。

(2a) +13°C/h で、80°C→100°C(90分)、

(2b) 100°Cで60分ホールド、

(2c) -13°C/h で、100°C→80°C(90分)、

(2d) 80°Cで、60分ホールドとする。

また、ヘリウムガス温度、圧力、流量等の条件は次の通りである。

- ・水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度 700°C
- ・水蒸気改質器入口ヘリウムガス圧力 約 3.6MPa
- ・水蒸気改質器入口ヘリウムガス流量 91g/s
- ・ヘリウムガス循環機出口流量 350g/s

(3) 試験結果

Fig.4.2.5に試験時の時系列データを示す。試験中、水蒸気改質器下流の水予熱器出口ヘリウムガス温度は約122°C、圧力は約3.56MPa、ヘリウムガス循環機流量は350g/sで一定であった。ヘリウムガス冷却器入口温度約108°C、ヘリウムガス冷却器出口温度80°Cにおいて、手順(1a)の+40°C/hでの昇温を開始し、以後(2d)まで実施した。

試験の結果、ヘリウムガス冷却器出口ヘリウムガス温度は、±40°C/hの昇温降温時に目標値に対して誤差±1.7°C以内で、また±13°C/hの昇温降温時に誤差±0.8°C以内で追従しており、ヘリウムガス冷却器を用いて中間熱交換器へ戻る2次ヘリウムガスの温度を制御できることを確認した。

Table 4.2.1 Test conditions of start-up and shut-down test

Test item	Contents	Run No.	Steam reformer inlet helium gas temperature	Methane gas flow-rate	Nitrogen gas and steam flow-rates
Start-up test	Reference;	M1A	730°C	0→6g/s	At 50min before of methane gas supply, nitrogen gas flow rate control starts; (30g/s→11g/s)/50min, then stop.
	Low flow-rate	M2A	730°C	0→4.2g/s	At 50min before of methane gas supply, steam gas flow rate control starts; (0g/s→11g/s)/1.5min, then hold 11g/s
	Low temperature No.1	M3A	700°C	0→6g/s	during 12min, next (11g/s→28g/s)/15min, then (28g/s→47g/s)/90min.
	Low temperature No.2	M4A	650°C	0→6g/s	
Shut-down test	Reference;	M1B	730°C	6g/s→0g/s	At 10min before of methane gas stop, nitrogen gas flow rate control starts; 0g/s→11g/s, then (11g/s→30g/s)/50min.
	Low flow-rate	M2B	730°C	4.2g/s→0g/s	At 270min before of methane gas stop, steam gas flow rate control starts; (47g/s→39g/s)/90min, then hold 39g/s
	Low temperature No.1	M3B	700°C	6g/s→0g/s	during 100min. next (39g/s→28g/s)/90min, then (28g/s→11g/s)/16min, then (11g/s→0g/s)/1.5min.
	Low temperature No.2	M4B	650°C	6g/s→0g/s	

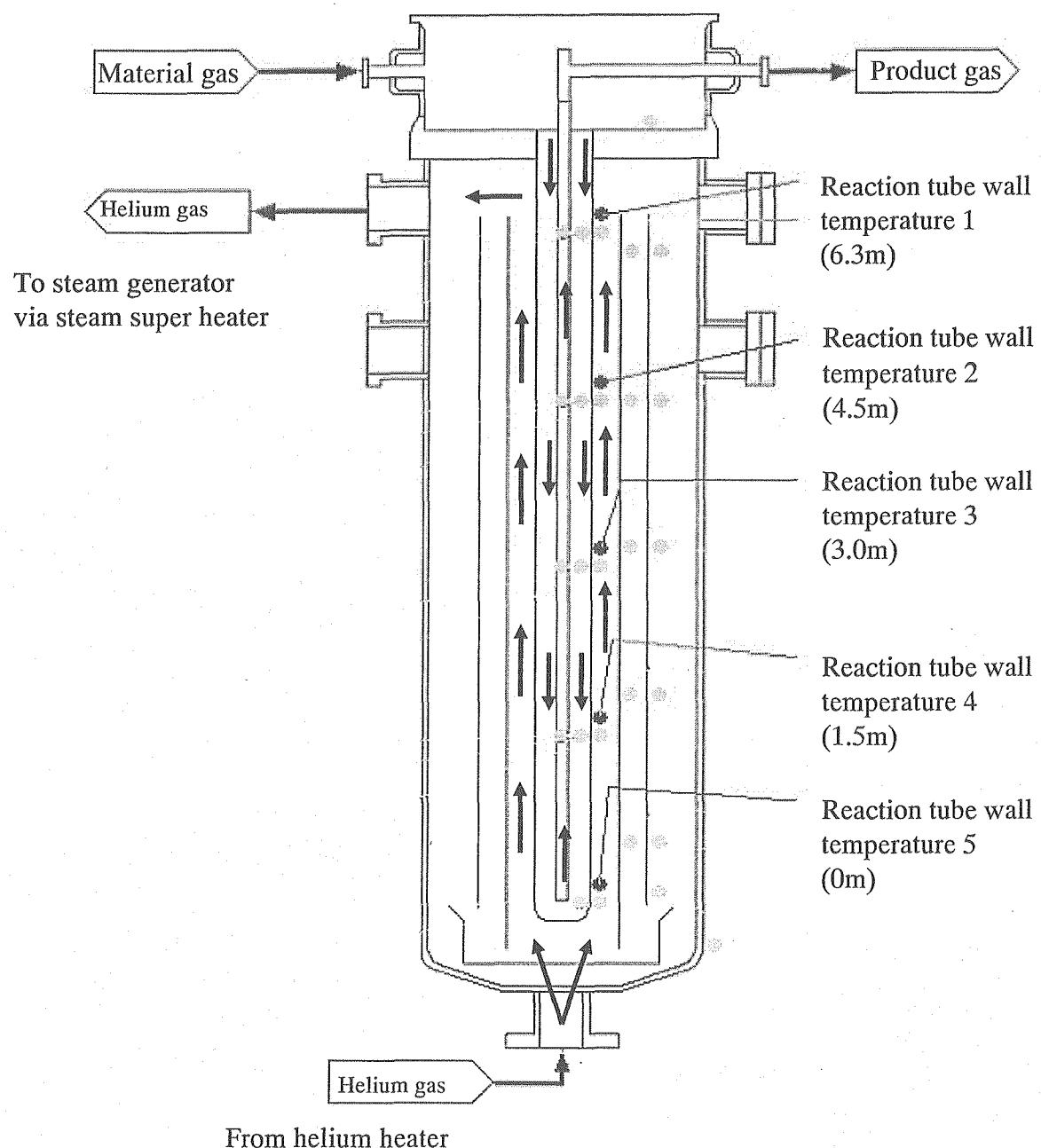
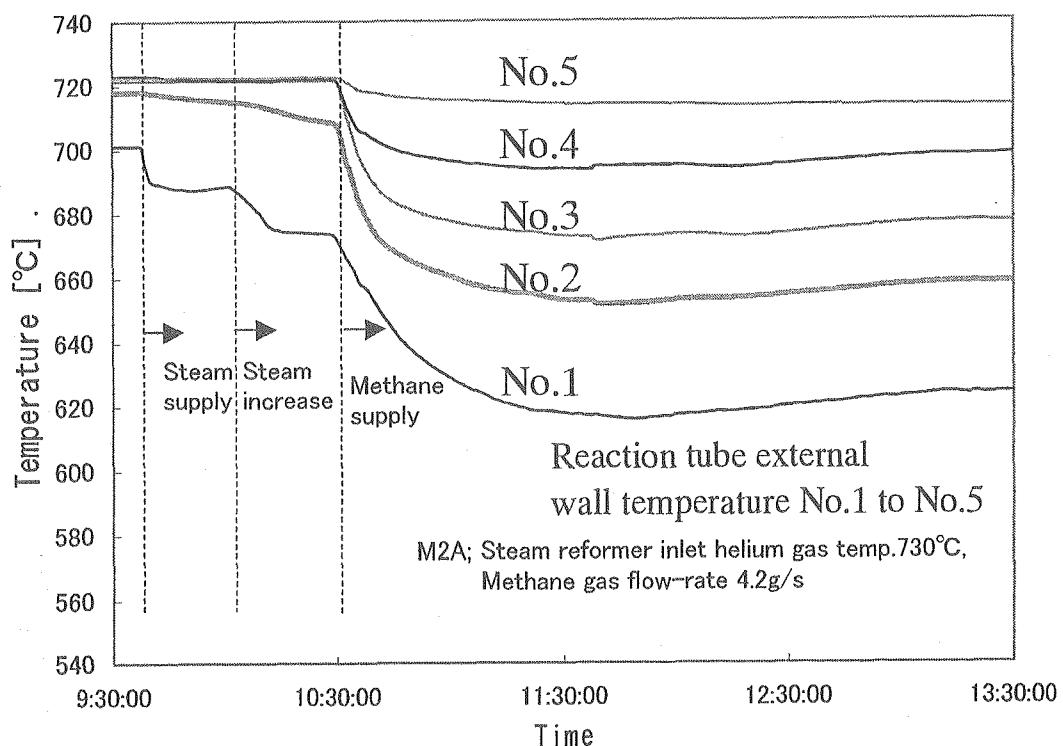
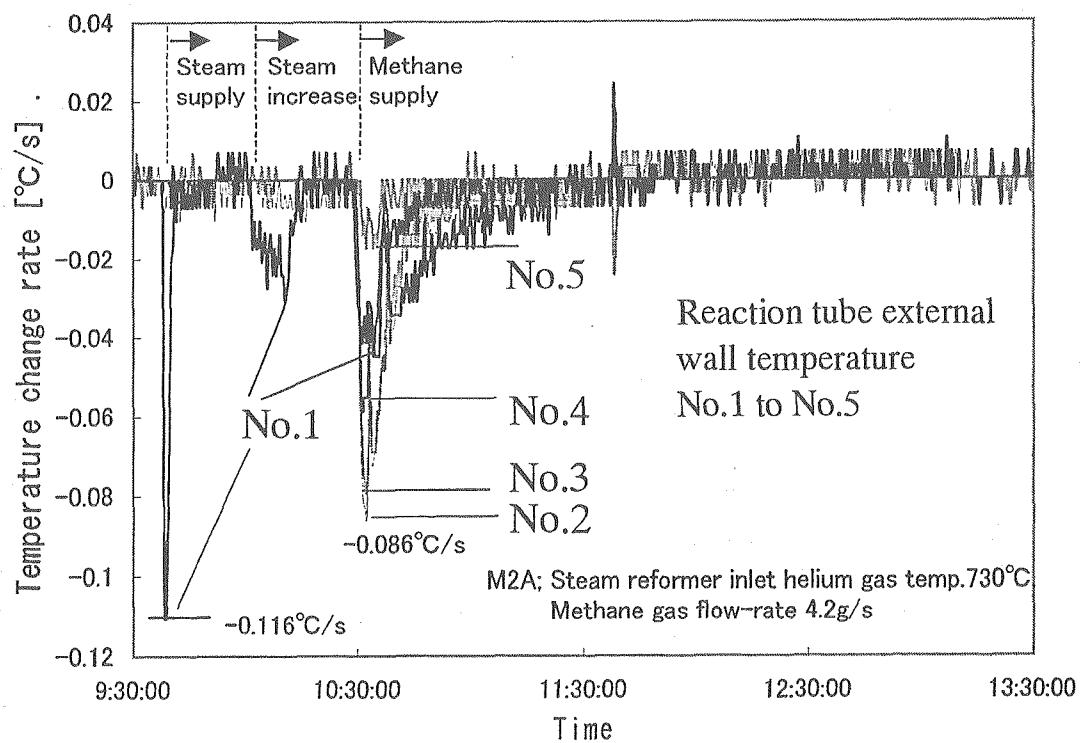


Fig.4.2.1 Measuring points of the catalyst tube temperature of steam reformer

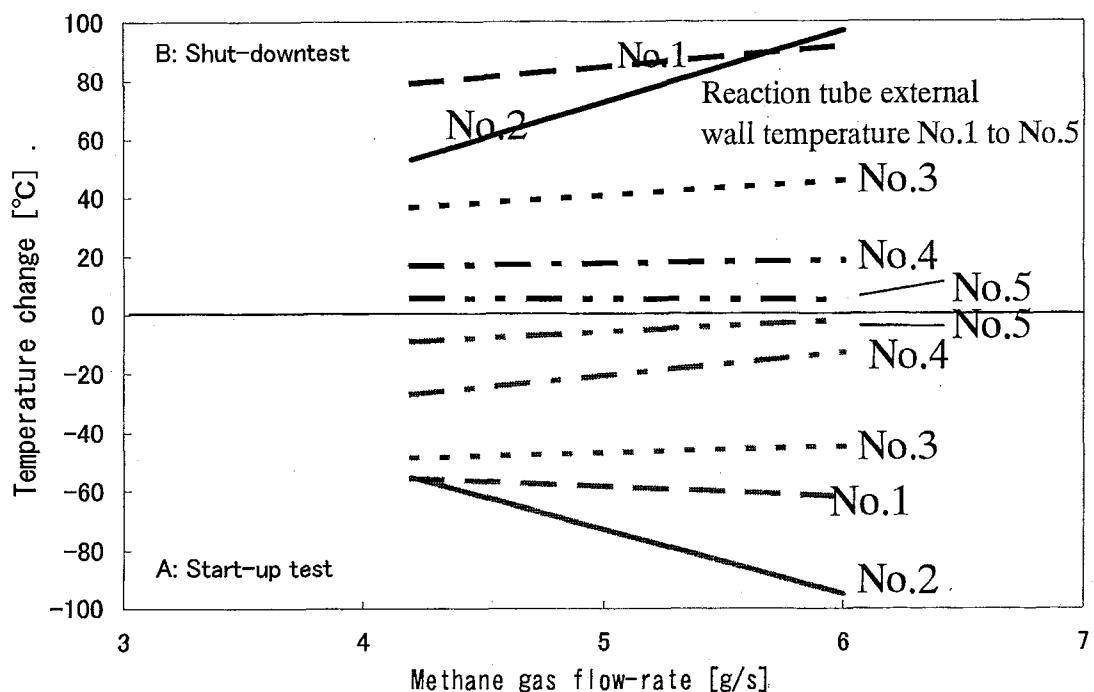


(a) Temperature changes of reaction tube external wall

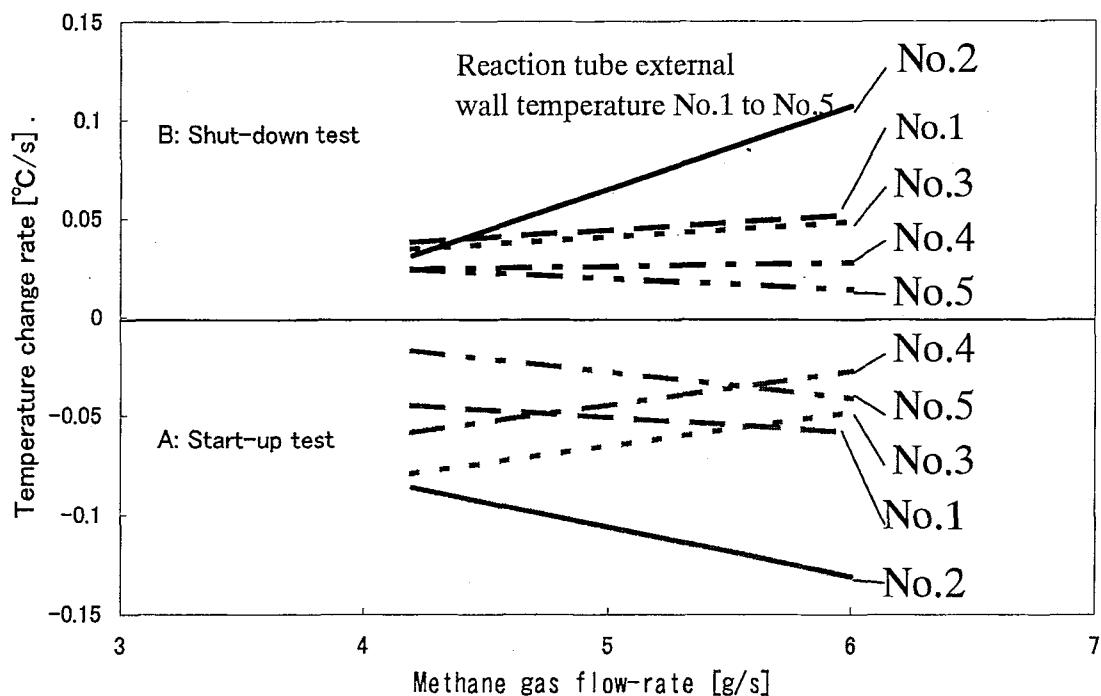


(b) Temperature change- rate of reaction tube wall

Fig.4.2.2 Temperature changes and temperature change- rate of catalyst tube wall measured at the beginning of hydrogen production process at start- up operation with conditions of steam reformer inlet temperature 730 °C and raw- material gas flow- rate 4.2g/s

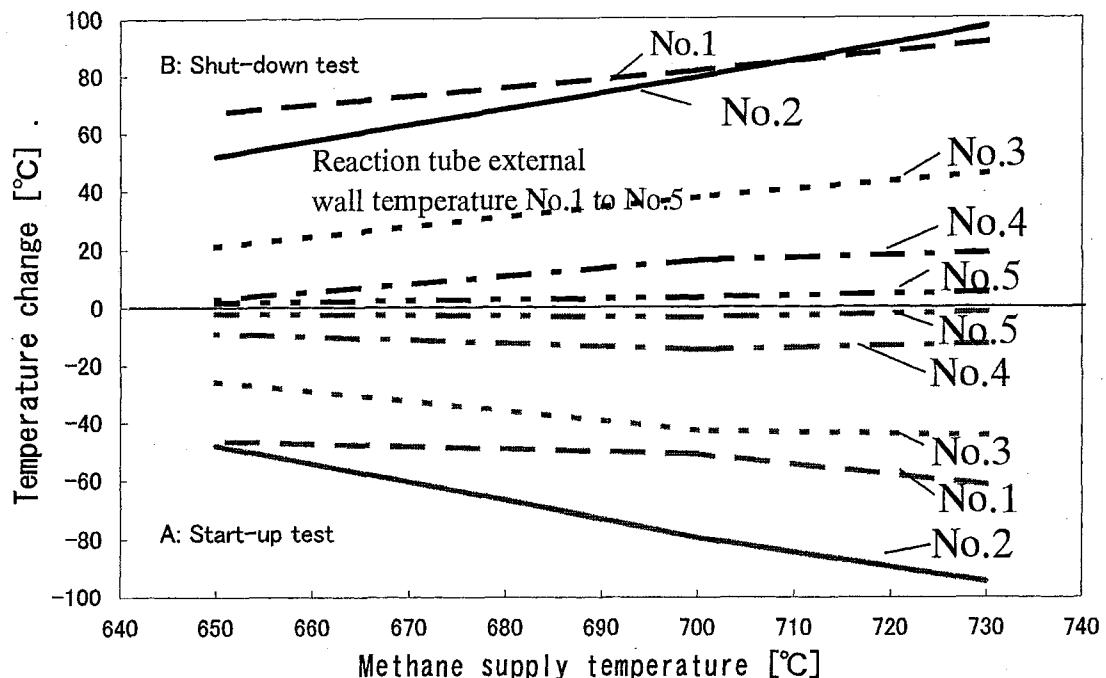


(a)Temperature changes at reaction tube external wall

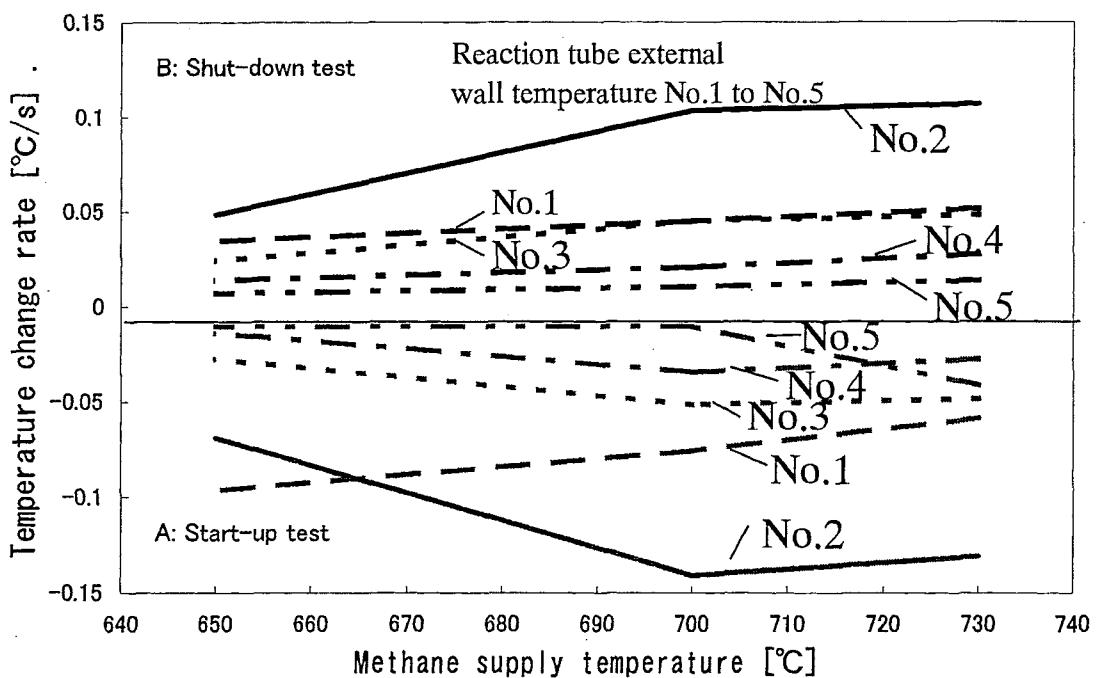


(b)Temperature change rates at reaction tube external wall

Fig.4.2.3 Temperature changes and temperature change- rates at reaction tube wall vs methane gas flow- rate, measured during start- up and shut- down test.



(a)Temperature changes at reaction tube external wall



(b)Temperature change rates at reaction tube external wall

Fig.4.2.4 Temperature changes and temperature change- rates at reaction tube wall vs methane gas supply temperature, measured during start- up and shut- down test.

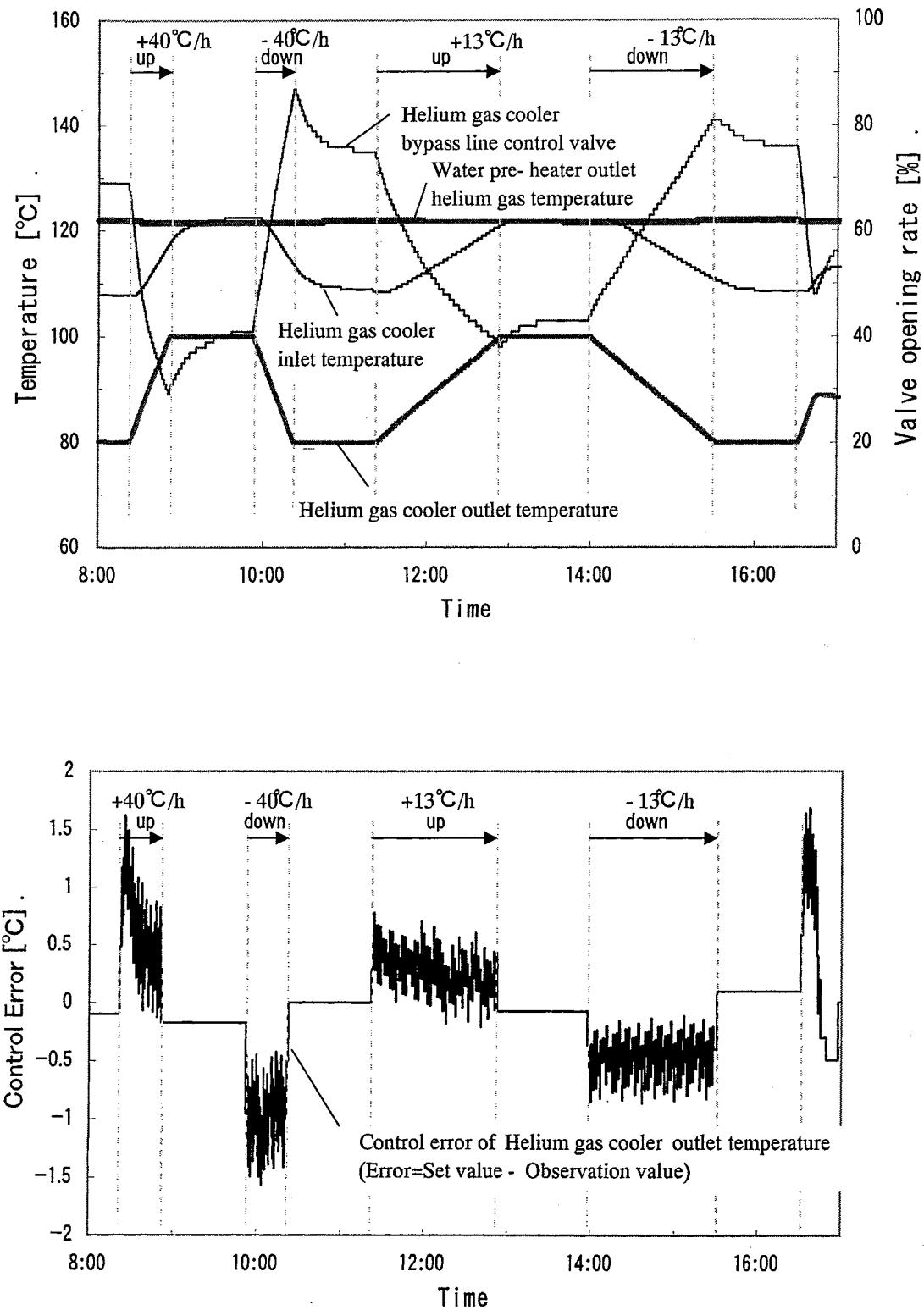


Fig.4.2.5 Result of helium gas temperature control test using helium gas cooler

4. 3 プロセス変動試験

(1) 試験目的

プロセス変動試験は、ある一定条件で運転し定常状態にあるプラントにおいて1つまたは複数のプロセス量をステップ状に変動させてその時の応答を観測し、システム全体の動特性の把握や安定性の評価を行うものである。本試験は、制御特性の把握と解析コードの検証用データの取得を目的とし、定常状態としては、定格条件（水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度 880°C、ヘリウムガス流量 91g/s、ヘリウムガス圧力 4.1MPa、原料ガス流量 12g/s、蒸気流量 47.2g/s）周りでの応答特性を反映したデータを取得するために定格条件を定常状態とした場合、並びに水蒸気改質器の化学反応による非線形応答を明確に反映するデータを取得するため原料ガスや蒸気流量だけを定格条件よりやや下げた状態を定常状態とした場合の2ケースとした。

(2) 試験方法及び条件

平成15年度は、Table 4.3.1に挙げるよう、ステップを入力する変数として、①原料ガス(天然ガス)供給流量、②蒸気流量、③ヘリウムガス流量の3つを選定した。また蒸気・原料ガスの供給比率を一定に制御するS/C制御の稼動状況(自動・解除)を試験条件に加えた。

定格条件のケースでは、原料ガスならびに蒸気流量のステップ振幅値は、それぞれ定常値の約17%、ヘリウムガス流量のステップ振幅値は定常値91g/sの約3%を選定した。ステップの振幅を大きくとるケースでは、原料ガス流量と蒸気流量の定常値をそれぞれ10g/s、39.3g/sとし、ステップ振幅値は定常値の40%という大きな値に設定した。

ステップの入力パターンは、いずれのケースも1時間間隔に、①定常状態から、②正側のステップ、③負側のステップ、④同じく負側のステップ、⑤正側のステップ、の順に入力するもので、定常値が初期値に復帰できるだけでなく、積分要素の残留によりシステムの状態が変化していくのを極力防止するために正側負側とも同じ回数・同じ継続時間となるよう配慮した。

(3) 試験結果

Fig.4.3.1に、原料ガス流量をステップ状に変化させた試験の一例を示す。原料ガス流量10g/s、S/C制御自動の条件で定常値の40%(+4g/s、-4g/s)のステップを加えた時の応答である。蒸気流量は、S/C制御のため、原料ガス流量に連動して+40%、-40%の変動を起こしている。水蒸気改質器反応管差圧(定常値0.04MPa)は、+40%ステップの時、数分以内に最大値0.101MPa(変化幅+0.071MPa)を示し、また-40%ステップの時、最小値-0.068MPa(変化幅-0.108MPa)を示した。差圧設計値は外圧-0.5MPa並びに内圧+1.0MPaであって、負のステップ条件で評価しても外圧条件における差圧設計値の約20%に抑えることができた。このことから、化学反応量の変化による水蒸気改質器の圧力変化に対して差圧自動制御系の応答は十分速く、安定で、また十分な制御性能を有していることが確かめられた。一方、水蒸気改質器出口ヘリウムガス温度(定常値約660°C)は、+40%ステップの時、指數関数的に増加し1時間後に+32°C、また-40%ステップの時、1時間後に+52°Cを示した。この間、水素製造システム全体は極めて安定で特に問題は見られなかった。

また、水蒸気改質器の非線形応答であるが、上記データを検討すると、原料ガス流量と蒸気流量がそれぞれ10g/s、39.3g/sを定常値とする状態における正側と負側の40%ステップ入力では、水蒸気改質器の応答は非対称で、反応管差圧とヘリウムガス温度がともに負側に大きな応答を示

すことが確かめられた。

次に、蒸気発生器によるヘリウムガスの温度変動緩和効果を検討した。蒸気発生器入口ヘリウムガス温度の変化が+40%ステップの時に-35℃、また-40%ステップの時に+58℃であったのに対し、蒸気発生器出口ヘリウムガス温度の変化は、1℃以内であり、目標値±10℃に対して十分な緩和性能を有していることを確認した。このことから、軽微な機器故障や制御系異常により水蒸気改質器の化学反応の変動が起きても水素製造システムは安定に運転でき、原子炉の運転に影響を及ぼすことはないことが確かめられた。

この他、原料ガス流量と蒸気流量をそれぞれ単独でステップ状に変化させた試験等を実施し、プロセス変動試験を計画通り終了した。

Table 4.3.1 Test conditions of process change test

Test Item	Contents	Step No.	Helium Gas (g/s)		Methane Gas (g/s)		Steam (g/s)		S/C and Control mode	
			Mean	Step	Mean	Step	Mean	Step		
Methane gas and steam flow-rate change	Methane 10±4g/s with S/C control	I11			10	0	39.3			
		I12			10	+4	39.3	+16	Auto	3.5
		I13	91		14	-4	55.0	-16		
		I14			10	-4	39.3	-16		
		I15			6	+4	23.6	+16		
	Methane gas 12±2g/s with S/C control	I21			12	0	47.2			
		I22			12	+2	47.2	+8	Auto	3.5
		I23	91		14	-2	55.0	-8		
		I24			12	-2	47.2	-8		
		I25			10	+2	39.3	+8		
Methane gas flow-rate change	Methane gas 10±4g/s without S/C control	IG11			10	0			Off	3.5 2.5 3.5 5.833 3.5
		IG12			10	+4				
		IG13	91		14	-4	39.3			
		IG14			10	-4				
		IG15			6	+4				
	Methane gas 12±2g/s without S/C control	IG21			12	0			Off	3.5 2.99 3.5 4.18 3.5
		IG22			12	+2				
		IG23	91		14	-2	47.2			
		IG24			12	-2				
		IG25			10	+2				
Steam flow-rate change	Methane gas 10g/s Steam 39.3 +16/-6.4 g/s without S/C control	IB11					39.3		Off	3.5 4.898 3.5 0.248 3.5
		IB12					39.3	+16		
		IB13	91				55.0	-16		
		IB14					39.3	-6.2		
		IB15					33.1	+6.2		
	Methane gas 12g/s Steam 47.2 +8/-8g/s without S/C control	IB21					47.2		Off	3.5 4.07 3.5 0.29 3.5
		IB22					47.2	+8		
		IB23	91				55.0	-8		
		IB24					47.2	-8		
		IB25					39.3	+8		
Helium gas flow-rate change	Helium gas 91±3g/s	IH 1	91	0					Off	3.5
		IH2	91	+3						
		IH3	94	-3						
		IH4	91	-3						
		IH5	88	+3						

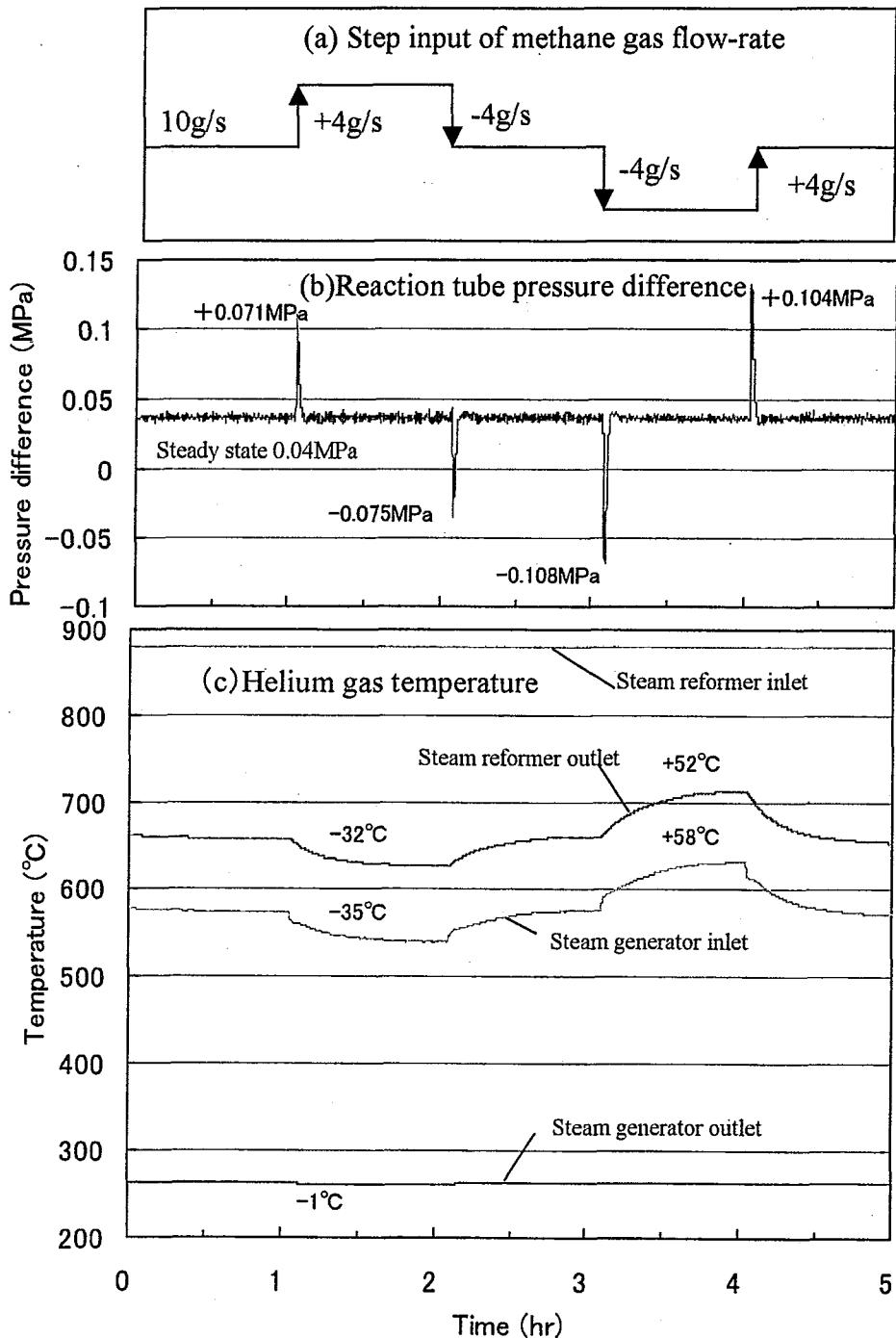


Fig.4.3.1 An example of test result, the responses of pressure difference and temperatures to step inputs of the raw-material gas flow-rate with amplitude +4g/s and -4g/s under S/C controlled.

4. 4 水素連続製造試験

(1) 試験目的

定格運転を長期間継続し、温度、流量及び圧力等の制御が問題なくシステム全体が安定であることを確認する。

(2) 試験方法及び条件

定格条件で1週間の連続運転を行い、温度、流量、圧力の各プロセス値及び水素製造量の計測を行った。

(3) 試験結果及び考察

Fig.4.4.1に水素製造量、ヘリウムガス及びプロセスガスの水蒸気改質器入口温度、流量及び圧力を示す。水素製造量は試験開始直後の約 $115\text{m}^3/\text{h}$ から減少傾向を示し、試験開始後6日において最低値約 $100\text{m}^3/\text{h}$ を示した。その後は増加傾向を示し、試験開始後7日において約 $108\text{m}^3/\text{h}$ まで増加した。このように水素製造量が安定しなかった理由は、触媒の還元が不十分であったためと考えられる。本試験以前に起動停止操作を繰り返したため、蒸気のみを触媒層に通気する時間の合計時間が長くなつたために触媒が酸化され、触媒活性が低下したと考えられる。その後、本試験の直前に水素を用いた触媒の還元運転を実施したが、水素濃度が低濃度であったこと及び還元運転時間が短時間であったために、触媒が完全に還元されなかつたと考えられる。このため、その後の運転では、触媒還元運転の条件を見直すこととした。しかし、ヘリウムガス及びプロセスガスの水蒸気改質器入口温度、流量及び圧力の各プロセス値は、全て安定であり、水素製造システム全体の制御に問題のないことが確認できた。

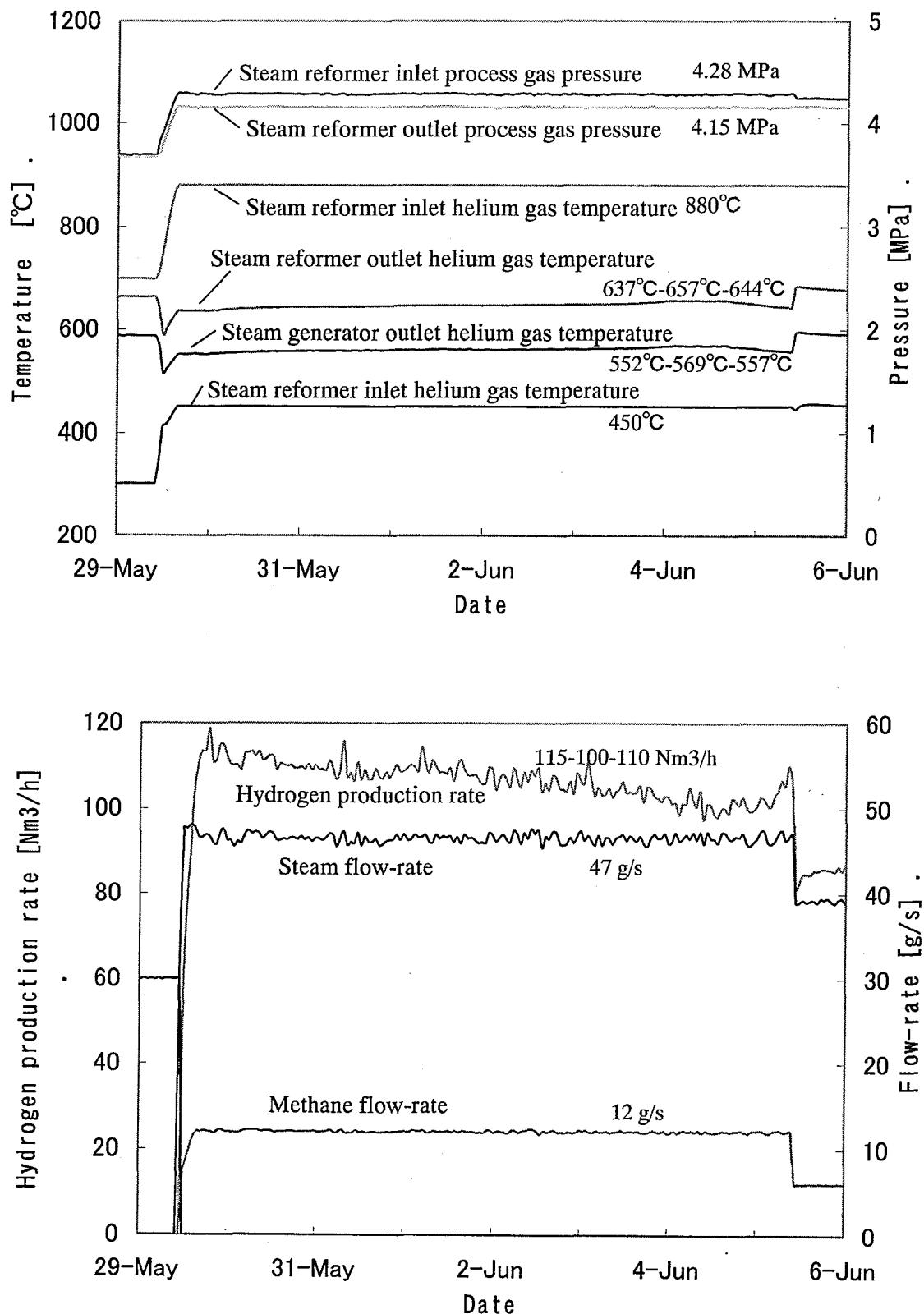


Fig. 4.4.1 Results of a week continued hydrogen production test

4. 5 化学反応停止試験

(1) 目的

本試験は、水蒸気改質器での化学反応停止の異常発生時における HTTR 水素製造システムの停止方法を確立することを目的とし、HTTR 水素製造システムの安全審査・設工認に必要なデータとして蒸気発生器と放熱器によるヘリウムガス冷却システムの成立性を実証するとともに、解析コード検証に必要なデータを取得する。今回は第 3 回試験運転における水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度 800°C の条件での試験に引き続き、ヘリウムガス温度 840°C として同様の試験を実施し、化学反応停止後、放熱器冷却空気風量（以下、「空気風量」）を増減させることによりシステムに変動を与える、蒸気発生器圧力が整定していく過程のシステムの動特性データを取得した。さらに、蒸気発生器を用いたヘリウムガス温度変動の緩和効果について、蒸気発生器出口における温度変動緩和目標値（±10°C 以内）に対する成立性の確認を行った。

(2) 試験

1) 冷却システムの構成及び計測項目

蒸気発生器周りの系統図を Fig.4.5.1、蒸気発生器及び放熱器の構造図を Fig.4.5.2 及び Fig.4.5.3 に示す。

2) 試験条件及び試験方法

今回の試験運転では、以下に示す条件下で 12 時間以上の水素製造を継続した定常運転状態から原料ガス供給を停止し、放熱器を使用した系統に切り替える試験を 2 回実施した。

ヘリウムガス

- 水蒸気改質器入口温度 : 840°C
- 水蒸気改質器入口圧力 : 4.1MPa (定格条件)
- 水蒸気改質器入口流量 : 91g/s (定格条件)

プロセスガス

- 水蒸気改質器入口温度 : 450°C (定格条件)
- 水蒸気改質器入口圧力 : 4.3MPa (定格条件)
- 水蒸気改質器入口流量 : 原料ガス : 12g/s (定格条件)
- 蒸気 : 47.2g/s (定格条件)

両試験における操作記録を Table 4.5.1 及び Table 4.5.2 に示す。両試験の大きな相違点は、空気風量についてである。6 月 24 日に実施した試験 (Run No.A2) では空気風量の増減を繰り返し、蒸気発生器内圧力を 3.6~4.7MPa の範囲内で変動させた。具体的には、①蒸気発生器内圧力の 4.7MPa 到達または風量変更後 1 時間経過の後に空気風量を増加、②蒸気発生器内圧力の 3.6MPa 到達または空気風量変更後 1 時間経過の後に空気風量を減少させる操作を原料ガス供給停止後約 12 時間まで繰り返した。また、7 月 3 日に実施した試験 (Run No. A3) では、蒸気発生器出口におけるヘリウムガス温度変動を ±10°C 以内に緩和することを目的とし、系統切替操作

時に蒸気発生器内圧力を定格運転時の条件と等しい 4.6MPa で保持することを目標として空気風量の調整を行い、その後、ほぼ一定の空気風量の条件を約 24 時間保持した。なお、空気風量の増減は、冷却ファンインバータ設定値変更によるファン回転数の増減によって行い、放熱器ルーバー開度は 25% で一定とした。また、系統切替操作手順は第 3 回試験運転とほぼ同様であるが、放熱器入口遮断弁開操作から放熱器出口遮断弁開操作までの時間間隔を第 3 回試験運転での約 12 分から約 30 秒へと短縮した点が大きな相違点である。

(3) 試験結果および考察

1) 反応管差圧制御

反応管差圧制御

Fig.4.5.4 に水蒸気改質器への各ガスの供給流量、水素製造量、水蒸気改質器入口ヘリウムガス圧力及び反応管差圧を示す。試験開始前の水素製造量は約 112m³/h であり、原料ガスの供給停止に伴い 0 となった。また、反応管差圧変動は、Case1 の結果とほぼ同様であり、制御値 0.04MPa に対して最大値 0.07MPa、最小値 -0.16MPa であり、警報設定値 (-0.32~+0.4MPa) 以内であった。

2) ヘリウムガス温度変動の緩和抑制)

Fig.4.5.5 に試験結果を示す。原料ガスの停止に伴い、水蒸気改質器出口ヘリウムガス温度は試験開始前の 610°C から約 1.2 時間後に最大値 800°C まで上昇し、その後、緩やかに変化し 795°C で静定した。これより、水蒸気改質器出口ヘリウムガス温度の上昇は最大で 190°C、静定時で 185°C であった。また、蒸気発生器入口ヘリウムガス温度は、試験開始前の 531°C から約 1.4 時間後に最大値 762°C まで上昇し、その後、緩やかに変化し 759°C で静定した。これより、蒸気発生器入口ヘリウムガス温度の上昇は最大で 231°C、静定時で 228°C であった。化学反応停止後、蒸気発生器圧力が制御値 4.61MPa に対して、4.68MPa まで上昇した時点で放熱器入口遮断弁開操作、その約 30 秒後に放熱器出口遮断弁開操作を行った。これに伴い蒸気発生器圧力は下降し、最低値 3.89MPa を示した。このときの蒸気発生器出口ヘリウムガス温度は 257.0°C であり、試験開始前の 262.5°C に対して、5.5°C 下降した。また、放熱器入口遮断弁開操作から放熱器出口遮断弁開操作までの時間間隔を Case 1 での約 12 分から約 30 秒へと短縮したことにより、切り替え操作に伴う蒸気発生器圧力変動が 1 回となった。その後、蒸気発生器入口ヘリウムガス温度の上昇に伴い蒸気発生量が増加し、蒸気発生器圧力は徐々に上昇した。これに伴い、空気風量を段階的に増加させ、蒸気発生器内圧力が定格条件である 4.6MPa で静定するように調整し、その後は、空気風量をほぼ一定とした。この結果、原料ガス供給停止から約 1 時間以降では、蒸気発生器内液相温度および蒸気発生器圧力が比較的安定していることが確認できる。しかし、蒸気発生器圧力が試験開始前の 4.6MPa とほぼ同じ条件であっても、蒸気発生器入口ヘリウムガス温度が 228°C 上昇するため、蒸気発生器出口ヘリウムガス温度は試験開始前と比較して 3.5°C 上昇した 266.0°C で静定した。これより、試験開始 6 時間後までの蒸気発生器出口ヘリウムガス温度範囲は 257.0~266.0°C、定常運転時の温度 (262.5°C) に対する変動は -5.5~+3.5°C と目標値 (±10°C 以内) の範囲内であった。

Table 4.5.1 Test procedure of Run No. A-2

Run No. : A-2

Date : 2003/06/24

Time	Elapsed time	Operation
10:00:27	0	Suspension of methane feed
10:00:46	19sec	Start of nitrogen supply to steam reformer
10:10:37	10min 10sec	Close stop valve at steam trap inlet (AV80S)
10:10:49	10min 22sec	Open stop valve at steam super-heater inlet (AV10S)
10:11:03	10min 36sec	Close stop valve for water feed at steam generator inlet (AV8S)
10:11:31	11min 4sec	Close stop valve at radiator inlet (AV18S)
10:12:15	11min 48sec	Open stop valve at radiator outlet (AV19S)
12:58	2h 58min	Cooling fan inverter: 30%→60% (Fan rotation : 221rpm→336rpm)
13:47	3h 46min	Cooling fan inverter: 60%→20% (Fan rotation : 336rpm→177rpm)
14:37	4h 36min	Cooling fan inverter: 20%→55% (Fan rotation : 177rpm→316rpm)
15:38	5h 38min	Cooling fan inverter: 55%→25% (Fan rotation : 316rpm→196rpm)
16:40	6h 39min	Cooling fan inverter: 25%→50% (Fan rotation : 196rpm→297rpm)
17:42	7h 42min	Cooling fan inverter: 50%→35% (Fan rotation : 297rpm→240rpm)
18:44	8h 44min	Cooling fan inverter: 35%→45% (Fan rotation : 240rpm→278rpm)
19:45	9h 44min	Cooling fan inverter: 45%→40% (Fan rotation : 278rpm→259rpm)

Table 4.5.2 Test procedure of Run No. A-3

Run No. : A-3

Date : 2003/07/03

Time	Elapsed time	Operation
10:00:07	0	Suspension of methane feed
10:00:17	10sec	Start of nitrogen supply to steam reformer
10:10:06	9min 59sec	Close stop valve at steam trap inlet (AV80S)
10:10:16	10min 9sec	Open stop valve at steam super-heater inlet (AV10S)
10:10:34	10min 27sec	Close stop valve for water feed at steam generator inlet (AV8S)
10:10:48	10min 41sec	Close stop valve at radiator inlet (AV18S)
10:11:24	11min 17sec	Open stop valve at radiator outlet (AV19S)
10:33:46	33min 39sec	Cooling fan inverter: 0%→10% (Fan rotation : 101rpm→139rpm)
10:36:14	36min 7sec	Cooling fan inverter: 10%→20% (Fan rotation : 139rpm→177rpm)
10:40:24	40min 17sec	Cooling fan inverter: 20%→30% (Fan rotation : 177rpm→221rpm)
10:59:30	59min 23sec	Cooling fan inverter: 30%→35% (Fan rotation : 221rpm→240rpm)
11:24	1h 24min	Cooling fan inverter: 35%→33% (Fan rotation : 240rpm→228rpm)
2:01	16h 1min	Cooling fan inverter: 33%→35% (Fan rotation : 228rpm→240rpm)

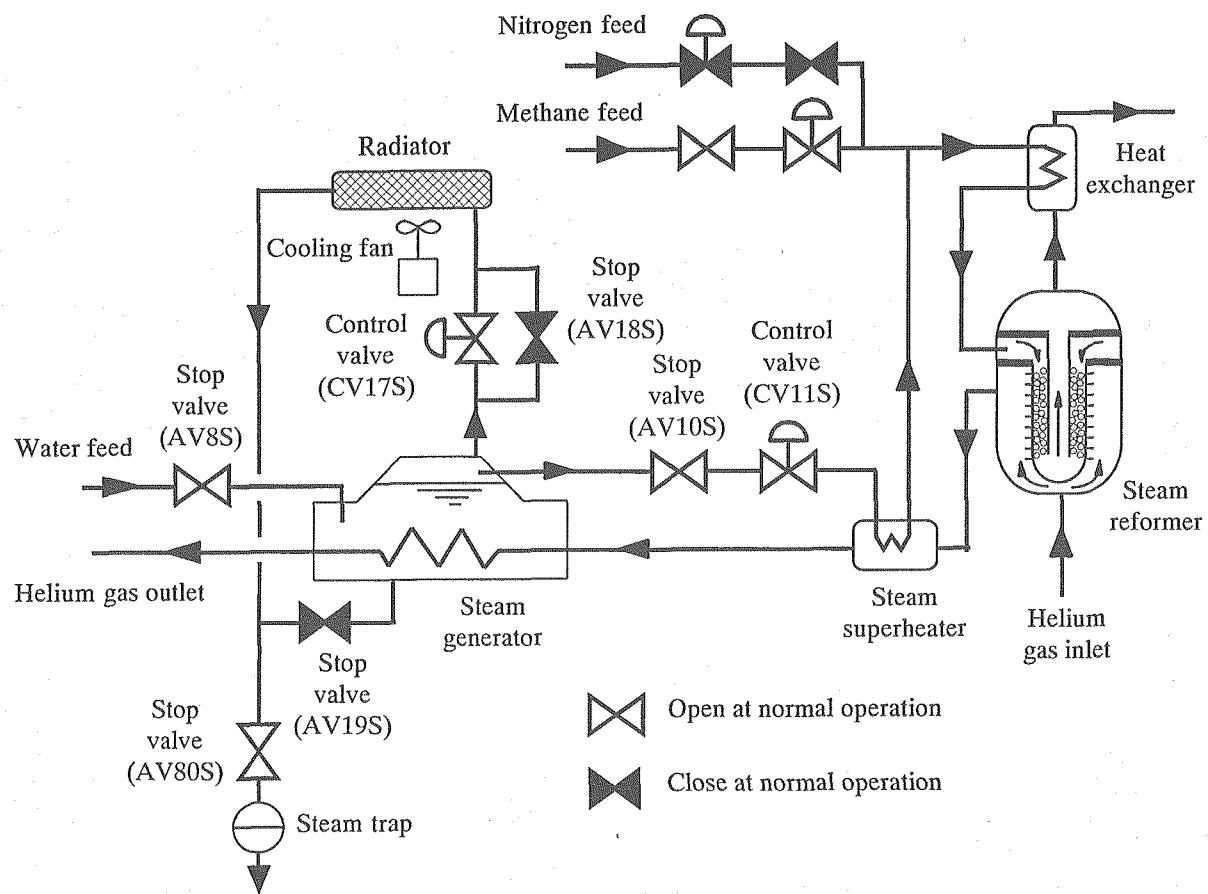


Fig.4.5.1 Schematic flow diagram of a helium-gas cooling system consist of steam generator, radiator, steam superheater and steam reformer with valves.

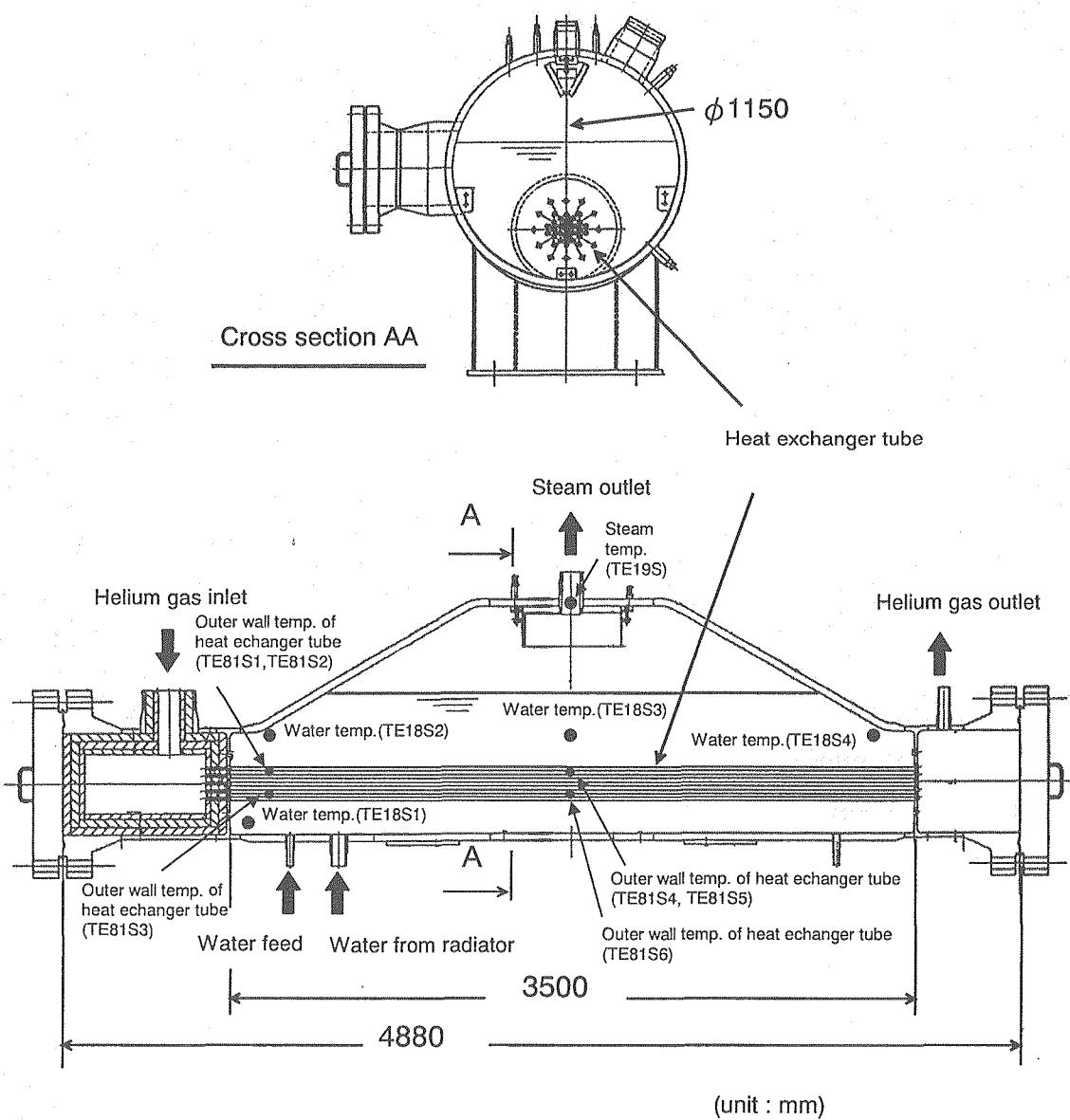


Fig.4.5.2 Schematic view of steam generator of mock-up test facility.

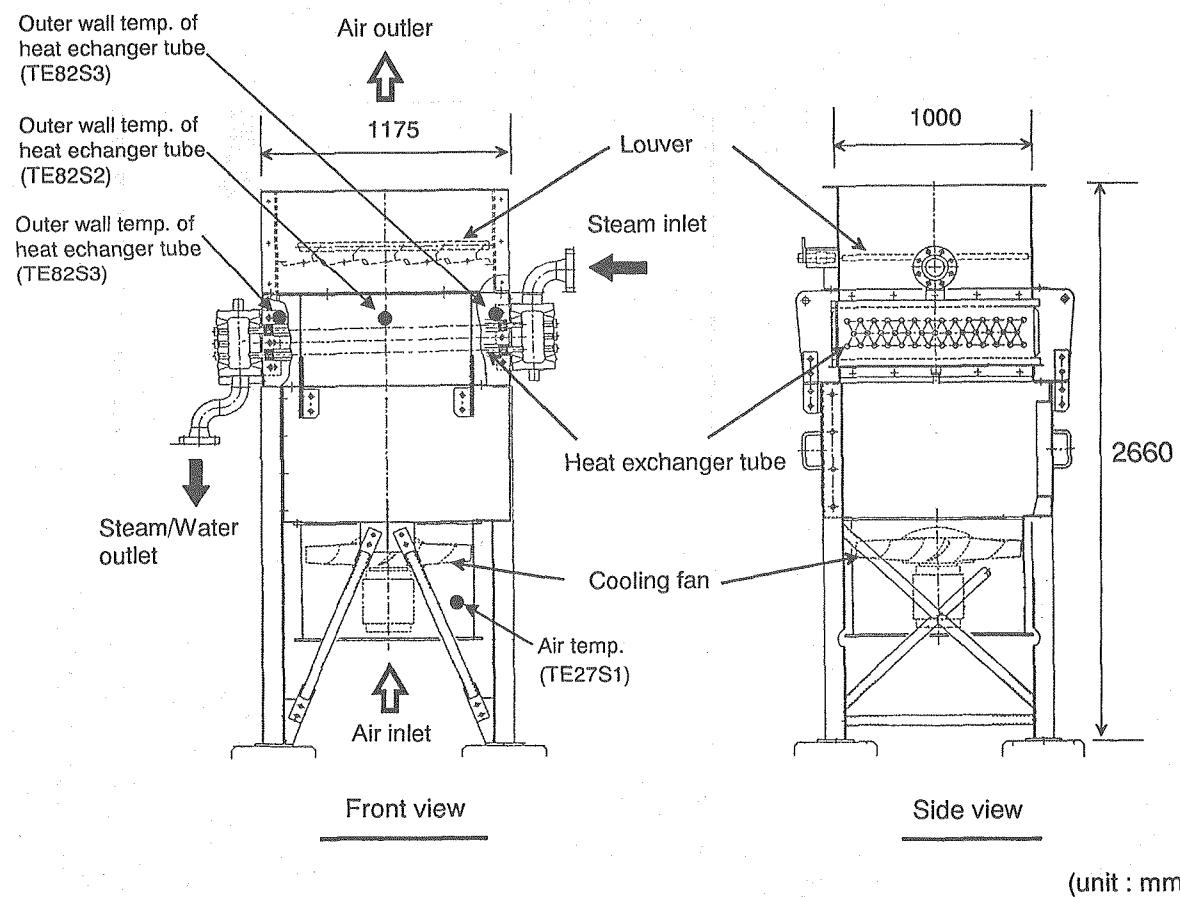


Fig4.5.3 Schematic view of radiator of mock-up test facility.

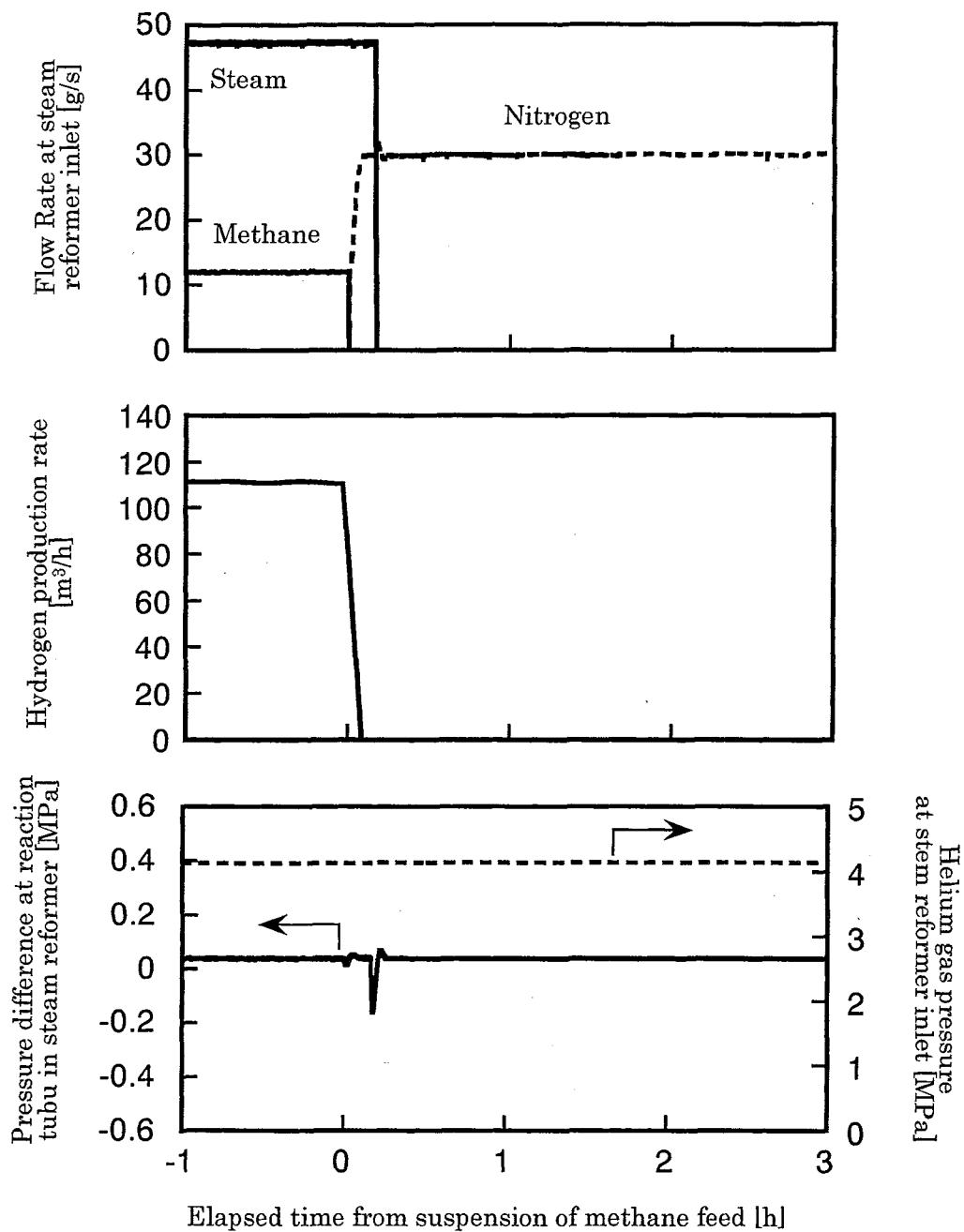


Fig.4.5.4 Result of chemical reaction shut-down test - Run No.A-2

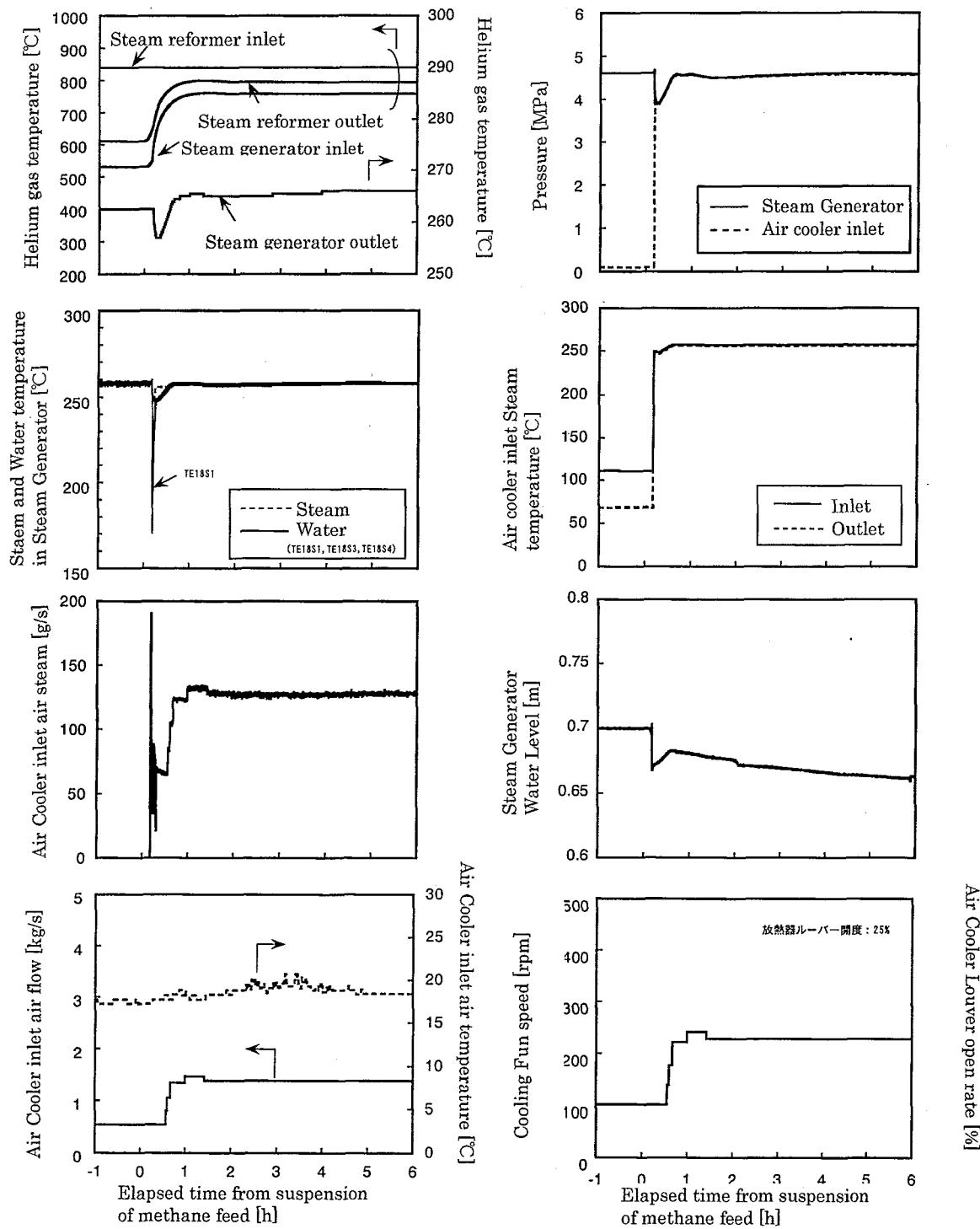


Fig.4.5.5 Result of chemical reaction shut-down test - Run No.A-3

4. 6 水蒸気改質器上部ガス検知器指示値上昇の原因調査

(1) 可燃性ガス検知器の指示値上昇の経緯

第5回試験運転において、水蒸気改質器入口ヘリウムガス昇温中の平成15年11月4日10時頃に水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度が730℃になった。この時点では水蒸気改質器に原料ガスを供給し水素製造を開始したところ、水蒸気改質器の閉止フランジの保温材に設置した定置型の可燃性ガス検知器(以下「定置型ガス検知器」)の指示値が上昇し、16時頃に約800ppm、18時頃に約1000ppm、21時18分に約1400ppmと指示値が次第に上昇する傾向を示した。このとき、携帯型ガス検知器により測定を行い、同レベルの指示値を得て定置型ガス検知器が正常である事を確認した。この指示値上昇の原因として可燃性ガスの漏えいが考えられた。定置型ガス検知器の警報(設定値:5000ppm)は発報していなかったが、その後、警報値に至る可能性もあると判断し、点検を行うため、水素製造を中止し、11月5日1時35分頃からヘリウムガスの降温・降圧、水蒸気改質器への原料ガスの供給停止と窒素ガスによる置換等の操作を開始した。その後、原料ガスの供給停止、降温後、定置型ガス検知器の指示値は低下した。

(2) 原因調査

定置型ガス検出器の指示値上昇の原因として、閉止フランジからの可燃性ガスの漏えい、並びに閉止フランジのボルト、ガスケットの塗布剤からの脱ガス(以下「塗布剤脱ガス」)が考えられた。後者は、平成15年7月～9月に実施した定期自主検査において閉止フランジを開放して内部の点検を行った後、再度取り付けの際、ボルト、ガスケットに新たに塗布したことによる。そのため、以下の調査を実施した。

① 定期自主検査における気密試験、及びボルト締め付け状態のデータ確認

定期自主検査の記録により、(a)気密試験の結果、(b)ボルト締め付け状態のデータを確認した。

(a) 気密試験

定期自主検査の気密試験ではフランジからの漏えいは確認されなかった。また、定期自主検査後の保安検査において、茨城県庁の立ち会いの下に実施した気密試験でも漏えいは確認されておらず、保安検査証を取得している。

(b) ボルト締め付け状態

トルクレンチを用いて原研指定のトルクでボルトが締め付けられている事を確認した。また、締め付け後のフランジ間の間隔は、ほぼ均一であった。

② 運転データの確認

定置型ガス検知器の指示値上昇前後の、ヘリウムガス、窒素ガス、原料ガス、蒸気等の温度、圧力、流量等の値並びに変化速度は、通常の運転の範囲内であり、ボルトのリラクセーション、閉止フランジの熱変形の要因は認められなかった。

③ 窒素ガスによる気密試験

窒素ガスにより水蒸気改質器のプロセスガス側の系統を常用の圧力(ゲージ圧4.91MPa)まで昇圧し、対象部位の漏れの有無を発泡試験により検査した。発泡試験は

JIS Z 2329 の「発泡漏れ試験方法」の加圧法に基づいて行い、漏えいは確認されなかった。

④ 定置型ガス検知器に与える塗布剤からの脱ガスの影響調査

定置型ガス検知器に与える塗布剤脱ガスの影響を調査するために(a)塗布剤単体による調査、(b)閉止フランジを加熱した影響調査を実施した。

(a) 塗布材単体による調査

閉止フランジを加熱する試験の前に、ボルトの塗布剤及びガスケットの塗布剤からの脱ガスの影響について事前の調査を行った。各々の塗布剤約 10g を個別に金属容器にとり、電熱器で加熱し、携帯型ガス検知器で測定した。ボルトの塗布剤では、温度約 100°Cにおいて携帯型ガス検知器の指示値が上昇し、250°Cに達した時には 300ppm の指示値を示した。約 250°Cの状態を維持したところ、指示値はさらに上昇し、500ppm を示し、その後指示値は減少した。ガスケットの塗布剤については、100°C以上に加熱すると携帯型ガス検知器の指示値が約 100ppm を指示した後、徐々に減少した。このことから、塗布剤脱ガスが、ガス検知器で検知されることが判明した。

(b) 閉止フランジを加熱した影響調査

次に閉止フランジを加熱した影響を調査するため、水蒸気改質器へ供給するプロセスガス（蒸気、窒素ガス）を定格条件の 450°Cまで昇温し、定置型ガス検知器の指示値の変化を測定した。塗布剤脱ガスの影響、漏えいが生じていたときに低濃度の水素の検知を容易にするために、測定に当たり閉止フランジ周囲をアルミ及びステンレスフィルムで覆い、その中に閉止フランジ保温材に設置しているものと同じ仕様の定置型ガス検知器の吸気管を設置した。プロセスガス温度に対する定置型ガス検知器指示値の変化を Fig. 4.6.1 に示す。窒素ガス温度が約 300°Cの時、定置型ガス検知器 B の指示値が約 850ppm まで上昇し、その後徐々に下降していった。その後、定置型ガス検知器 B の指示値が約 60ppm に低下してからプロセスガスの温度を 450°Cまで昇温したところ、約 750ppm まで上昇後、徐々に下降していった。

このことから、水蒸気改質器へ供給するプロセスガスの温度を上昇させることによって、ボルト、ガスケットからの塗布剤脱ガスが定置型ガス検知器の指示値を上昇させることが明らかになった。

⑤ 高温時における水素漏えい確認試験

水蒸気改質器へ供給するプロセスガスを定格条件の 450°Cまで昇温し、約 3%濃度の水素を供給して定置型ガス検知器の指示値の変化を測定した。その結果を Fig. 4.6.2 に示す。指示値は水素を供給しなくても時間によって変動しており、水素を供給しても有意な変化は確認されなかった。また、HTTR 1 次冷却設備のフランジ継手からの 1 次冷却材の想定漏えい率（0.1acc/s：圧力 4MPa, 温度 400°C）に相当する定置型ガス検知器の指示値と比較しても十分小さな値であった。これより、気密性は十分に確保されているものと考えられた。

以上の検証結果から、定置型ガス検知器の指示値が上昇した原因是、可燃性ガスの漏えいで

はなく、水蒸気改質器のプロセスガス温度上昇と共に生じたボルト、ガスケットからの塗布剤脱ガスによるものと判断された。

(3) 対 策

今後、ボルト、ガスケット等に新規に塗布剤を塗布した場合には、水素製造試験を行う前に雰囲気温度を上昇させ、脱ガスを放出させることとした。また、今回実施した検討を基に、警報発報レベル以下の可燃性ガスの漏えいに関する処置についてマニュアルを改善した。

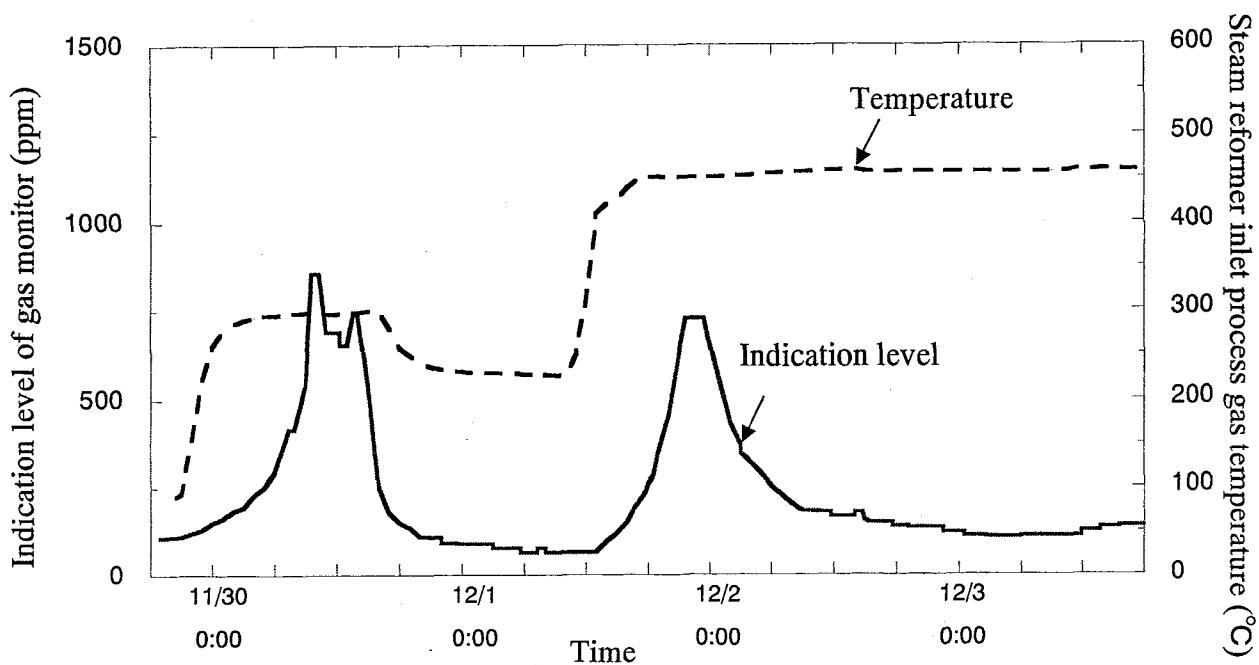


Fig.4.6.1 Historical trend of indication level of gas monitor for steam reformer top during the process gas heating operation

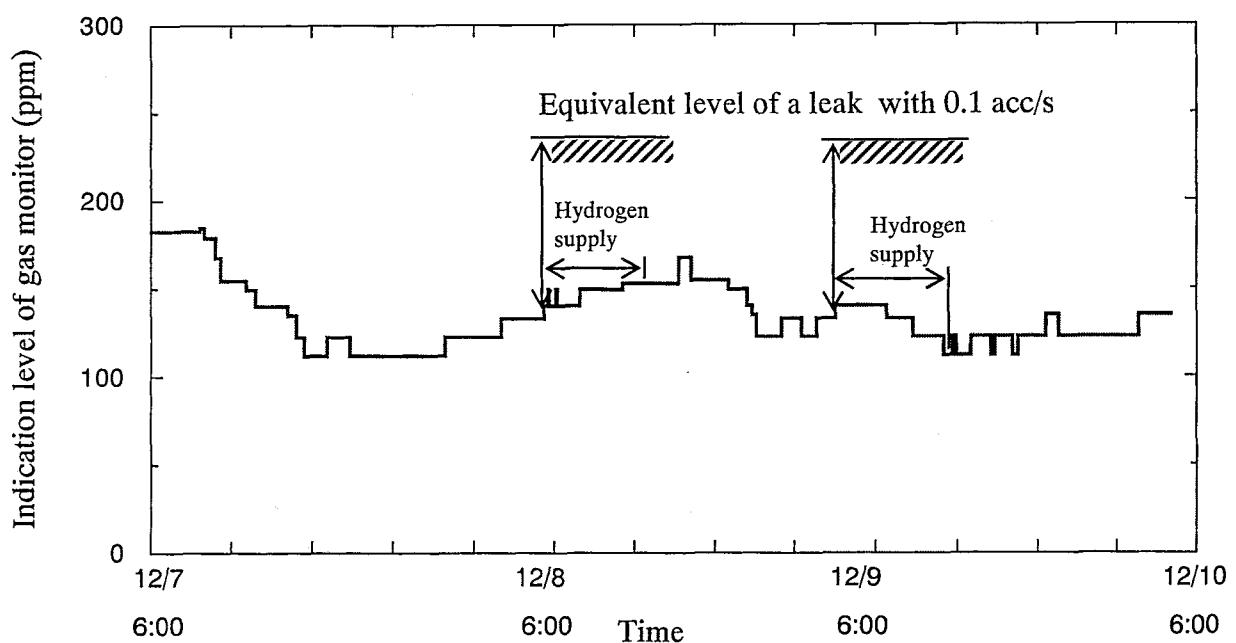


Fig.4.6.2 Result of confirmation test on gas seal of steam reformer top flange using hydrogen gas under the high temperature condition

5. 運転記録

5. 1 第4回試験運転

5. 1. 1 運転履歴

第4回試験運転は平成15年5月22日から7月6日までの46日間に実施した。プラントの温度、流量、圧力、差圧のトレンド・グラフをFig.5.1に示す。

5月12日から水蒸気供給設備の常温クリーンアップ及び冷却水設備の起動準備を行い、5月21日にヘリウムガス供給設備を3.1MPaまで昇圧し、その後、ヘリウムガス加熱器を起動し、昇温を開始して運転に入った。ヘリウムガス循環機流量 350g/s、水蒸気改質器ヘリウムガス流量 91g/sに達し、水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度 180°Cで一旦状態を保持、水蒸気供給系は常温クリーンアップから温水クリーンアップ状態に入った。次に、5月25日に水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度を180°Cから700°Cに昇温、蒸気クリーンアップに入り、5月28日に水蒸気改質器触媒の水素還元を実施して水素製造の準備を完了した。5月28日から7月4日まで各種試験を実施した。7月4日には全ての試験を終了し、停止操作に入った。7月7日にヘリウムガス加熱器を停止して第4回試験運転を終了した。

5. 1. 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ガス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としている。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、ヘリウムガス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4回試験運転の水分計ならびにガスクロマトグラフィーの監視結果をFig.5.2に示す。試験装置は平成15年5月22日に昇温を開始し、ヘリウムガス精製設備による不純物除去を開始しているが、昇温後は水分濃度は減少し警報点10ppmを十分下回る値で推移した。6月20日に水分突然約8ppmまで上昇したが、これはヘリウムガス精製設備の精製能力が低下したためである。ヘリウムガス精製設備はヘリウムガスを精製するための2つの系統を交互に運用しており、使用中の系統の精製能力が落ちた場合、待機中の系統に切り替えるとともに、休止した系統は精製能力を回復するための再生を行い、完了後は待機状態に入ることとしている。そこで、待機中の系統に切り替えたところ水分は減少した。ガスクロマトグラフィー分析によるガスについては、水素ガスが検出されている。精製能力が落ちて待機中の系統に切り替える直前の6月20日に約4ppmが検出された他、880°C、原料ガス6g/sで水素製造中の6月6日に約2ppm、また6月24日の反応停止試験時に約2ppmが検出された。

5. 1. 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ガス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や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⁽¹⁾。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、JIS B 8223-1999にある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、JIS B 8223-1999にある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つて行い、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つて行う。

第4回試験運転の水質分析値の変遷はFig.5.3に示す通りである。運転前の平成15年5月に補給水の水質改善のためセパレータからの復水を純水受入タンクに戻すライン（凝縮水戻りライン）にドレンを取り付ける工事を実施し、復水をドレンする運用に変えた。5月22日の第4回試験運転の運転開始日に180℃まで昇温して温水クリーンアップ運転に入った。その後、5月25日に水

蒸気改質器入口ヘリウムガス温度を180°Cから700°Cに昇温し、蒸気クリーンアップ状態に移行した。5月29日から6月17日まで水素製造運転を行った。6月18日から23日までは1日のうちに水素製造開始停止を繰り返す運転を行い、その後6月24日に水素製造を開始して、同日反応停止試験にともない蒸気発生器の給水を停止し放熱器による冷却に入った。6月25日には再び蒸気クリーンアップ状態に入り、6月26日には熱流動試験のため改質器に蒸気を供給、6月29日に一旦蒸気クリーンアップ状態にもどってから7月1日水素製造に入り、2回目の反応停止試験に入り、その後降温した。

(a)pHは、凝縮水戻りラインのドレン工事により、給水タンク（出口）は運転期間中管理目標値を満足できるようになった。蒸気発生器（ドラム水）は温水クリーンアップや蒸気クリーンアップへの切替の過渡時に一時的に下降した以外は管理目標値を満足するようになった。蒸気過熱器は参考値である。

(b)電気伝導度は、蒸気発生器ドラム水は運転期間中に徐々に上昇する傾向を示したが、運転期間を通じて管理目標値内にあった。

(c)溶存酸素は、給水タンクにおいて常温クリーンアップ時に管理目標値20~200μg/l以内にあったが、温水クリーンアップから蒸気クリーンアップにおいては管理目標値を超えて約100~1000μg/lの間で変動し、水素製造に入ると1週間程で変動範囲が狭まり約100から400μg/lの間の変動となった。その後6月24日の反応停止試験にともない蒸気発生器への給水を停止し、水予熱器で加熱された給水を給水タンクに戻す循環運転を開始したため、翌日の6月25日に700μg/lまで増加したが、その後は管理目標値に近づいた。

(d)給水タンクの鉄分は、初めに約120μg/lまで上昇したが、蒸気クリーンアップ後は管理目標値30μg/lをほぼ満たすようになった。ボイラ水の鉄分は参考値であるが、6月24日に反応停止試験にともない蒸気発生器の給水とドレンを閉止したため約1日分の汚れが蓄積される状態になり、翌日試験を終了した時のドレン水の鉄分は500μg/lであった。

(e)塩化物イオンは、蒸気発生器では管理目標値0.05mg/l以下を満足していた。蒸気過熱器は参考値である。全硬度、シリカは図示していないが、管理目標値を満足していた。

以上から、第4回試験運転の水質管理では、凝縮水戻りラインのドレン工事により、給水タンクのpH管理が正常にできるようになったことが分かった。溶存酸素は管理目標値を維持するのがまだ難しいが設備の改善と高温運転が進んだことにより水質の安定化が進んできたこともあり、変動範囲が狭まり目標値に近づいている。また、鉄分に関しては標準値近傍で整定していた。

5. 1. 4 ガス・水・電気の消費統計

第4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

第4回試験運転でのLNGローリーによる充填実績をFig. 5.4(a)に、またLNGタンクの液位の記録をFig. 5.4(b)に示す。さらに、フレアスタックの種火用に使用されるLPGガスの充填実績をFig. 5.4(c)に示す。水素還元運転用水素ボンベは、5月28日に4本を使用し、蒸気通気後の還元運転では6月30日に27本を使用した。

(2) ヘリウムガス

第4回試験運転では、ヘリウムガス・カーボルは、低圧側 13.55MPa、高圧側 15.90MPa の状態で試験運転に入り、運転終了後の 7月5日には、低圧側 9.55MPa、高圧側 14.32MPa で使用を終えたことから、圧力降下から計算された消費量は約 354 m³(Normal)であった。

(3) 窒素ガス

第4回試験運転での LN₂ ローリーによる充填実績を Fig. 5.4(d)に示す。

(4) 純水

第4回試験運転での純水のローリーによる補給実績を Fig. 5.4(e)に示す。合計約 320t であった。水蒸気供給設備の純水は、ヘリウムガス昇温とともに、系統のクリーン・アップ作業や蒸気製造開始後にあっては余剰蒸気のプローラインでの放出を行うため相当量を継続的に消費する。

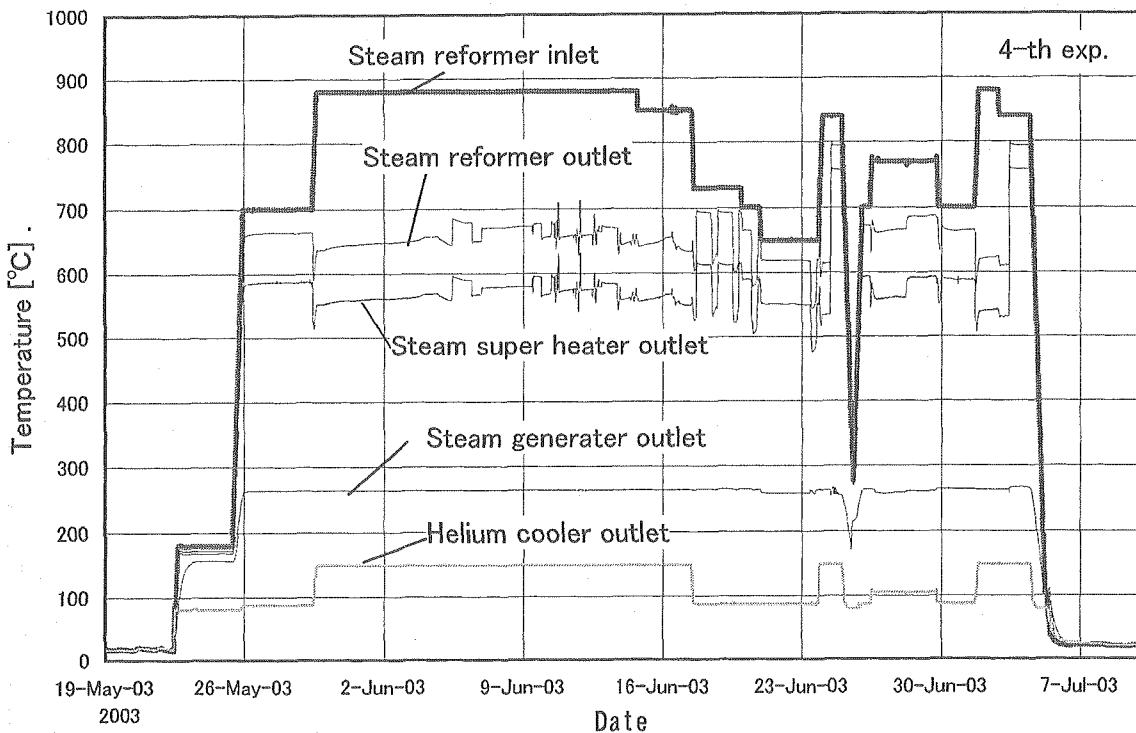
(5) 電気

第4回試験運転の使用実績を Fig. 5.4(f)に示す。なお、kVA は 1日 1回実施する電源設備の点検の時刻における電圧値と電流値の積から算出した使用電力、また MWh は積算電力計の指示値から前日分を差し引いて算出した 1日当たりの積算電力（電力使用量）である。

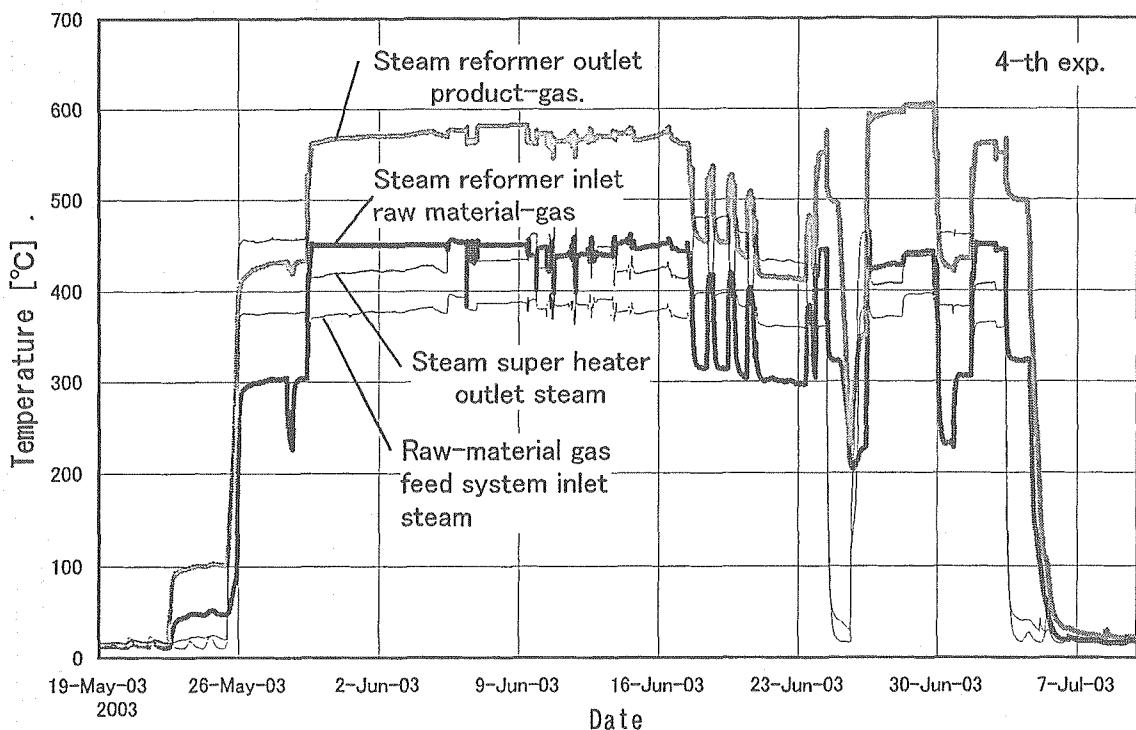
Table 5.1 Criteria of water examination

	Sample point	pH at 25°C	Electric conductivity μs/cm	Total hardness mg/l	DO2 mg/l	T-Fe μg/l	Cl- mg/l	SiO2 μg/l
Original water	Tank-lorry water		(≤ 1.0) (No Detection)	—	—	—	—	—
	Water tank		(≤ 1.0)	—	—	—	—	—
Processed water	Water refiner (outlet)	(6.0~7.5)		—	—	—	—	—
	Deaerator inlet tank (outlet)		(≤ 0.2)	—	—	—	—	—
	Deaerator (outlet)			— (0.02~0.2)	—	—	—	—
	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	Steam generator (dram water)	≤ 3.0	—	—	—	≤ 0.05	≤ 300
Steam	Steam super heater (outlet steam)	—	—	—	—	—	—	—

JIS B 8223-1999

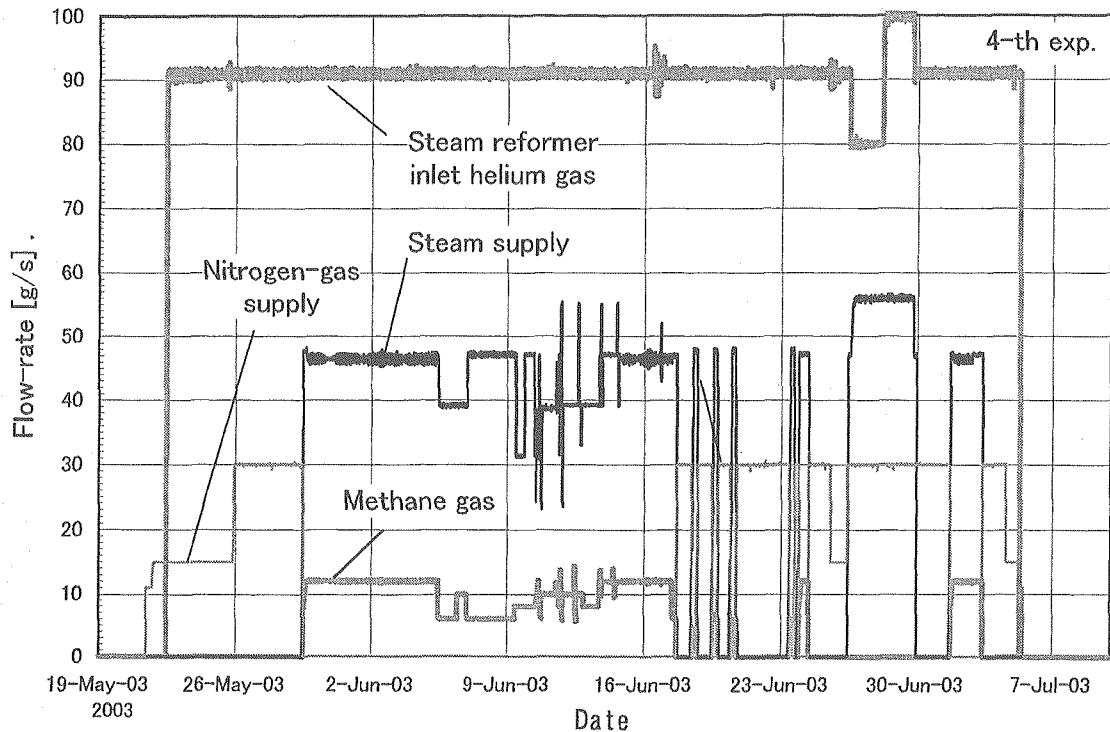


(a) Helium gas temperature

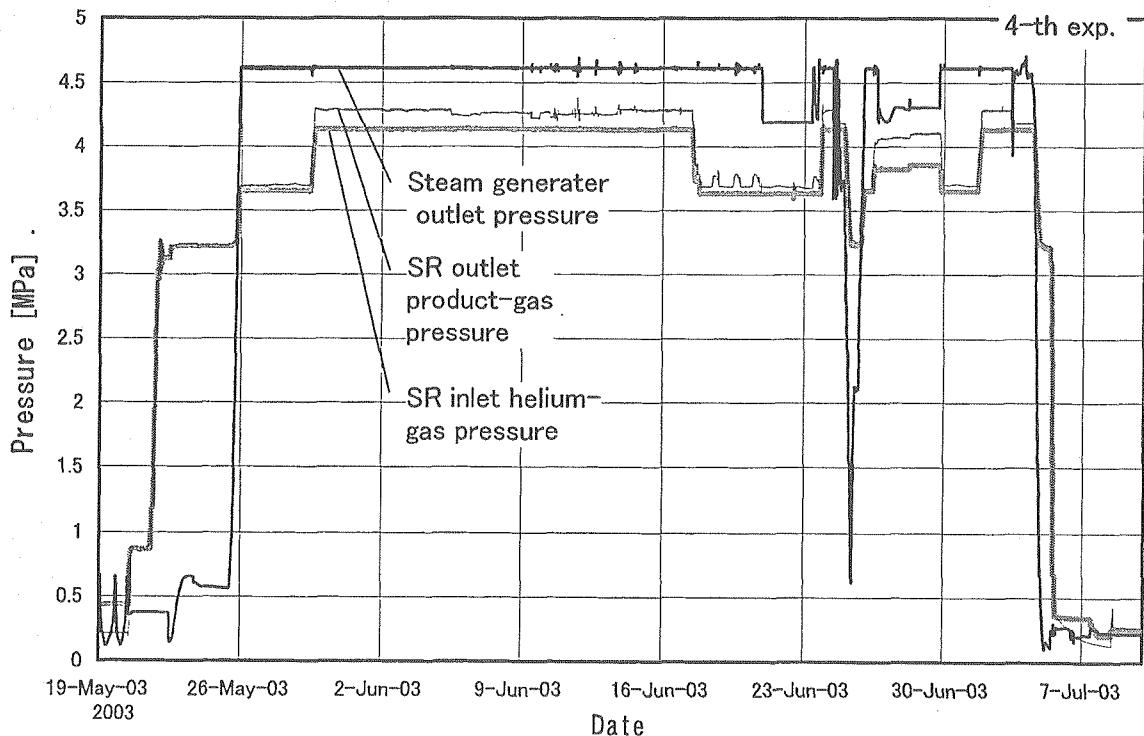


(b) Process gas temperature

Fig.5.1 Operational records of the 4-th experimental operation

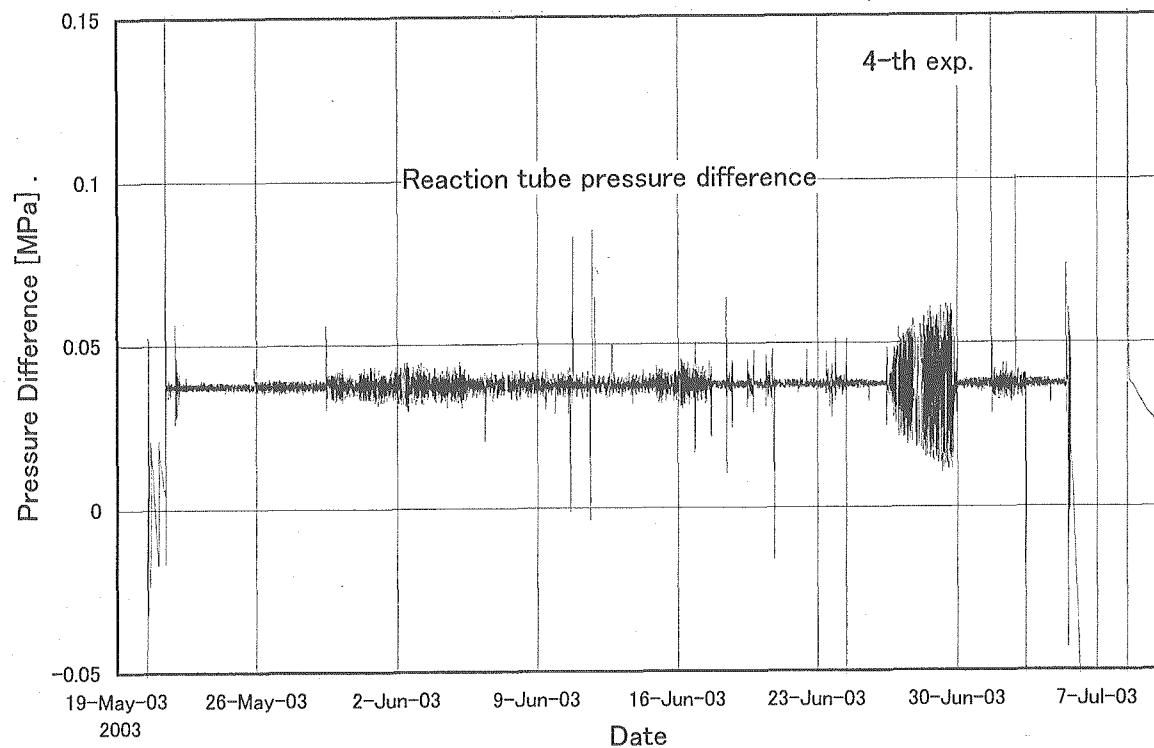


(c) Process-gas flow-rate



(d) Gas pressure

Fig.5.1 Operational records of the 4-th experimental operation (Continued)



(e) Pressure difference

Fig.5.1 Operational records of the 4- th experimental operation (Continued)

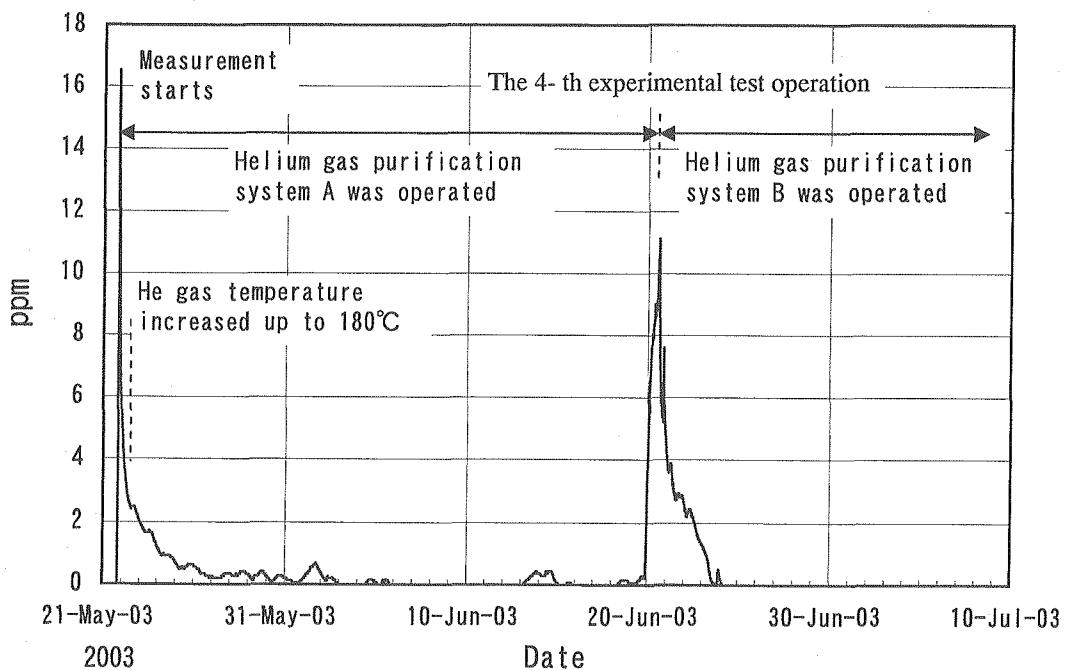


Fig. 5.2(a) Historical record of concentration of H₂O including in helium gas

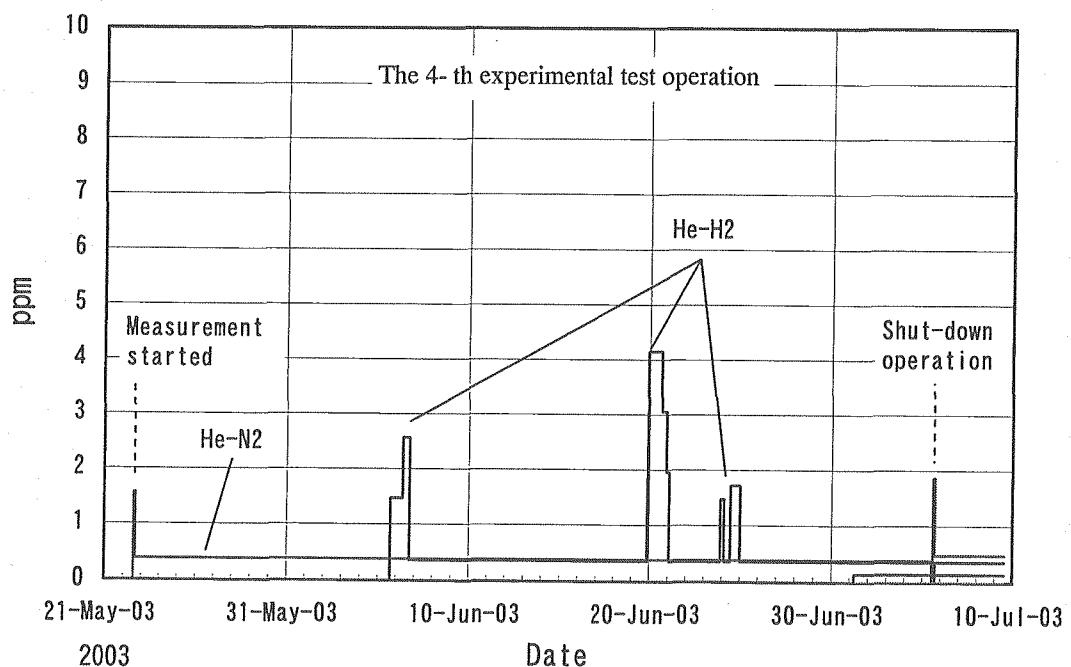
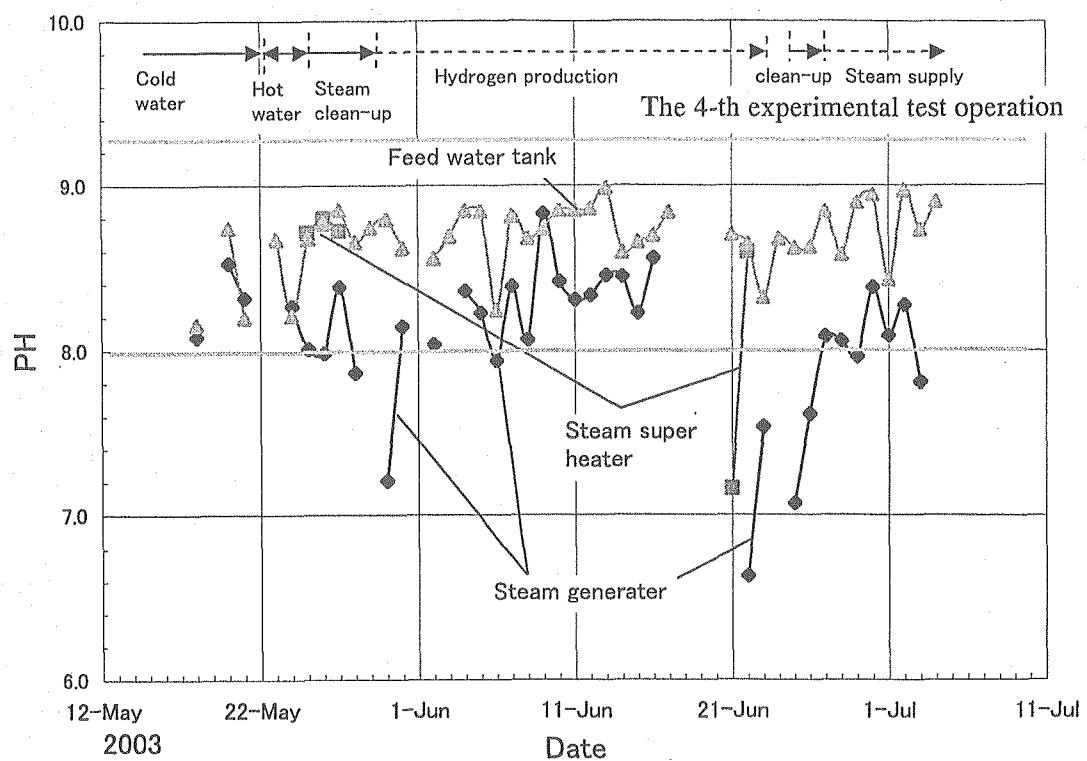
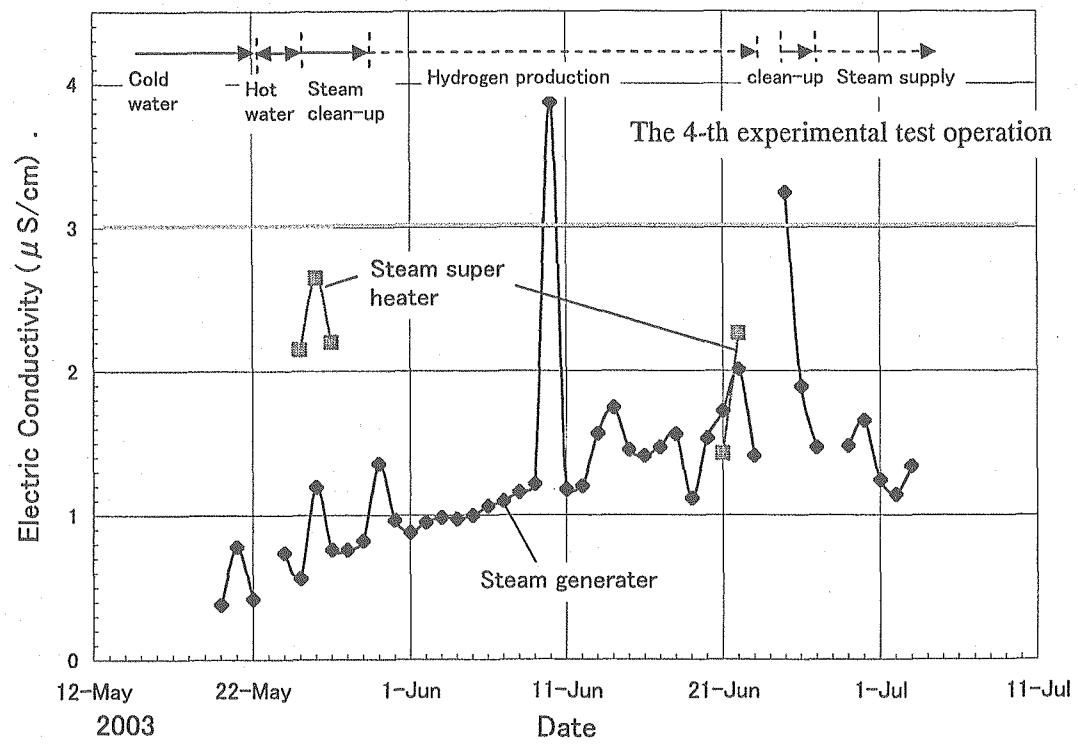


Fig. 5.2(b) Historical record of concentrations of N₂ and H₂ including in helium gas

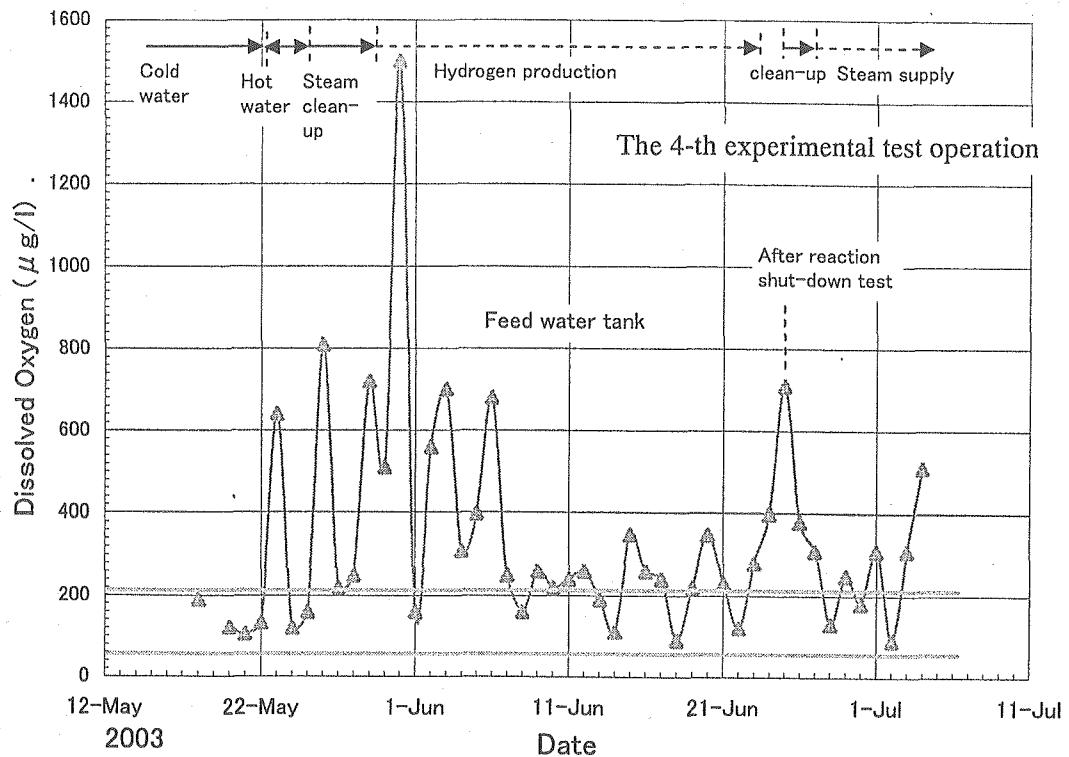


(a) PH

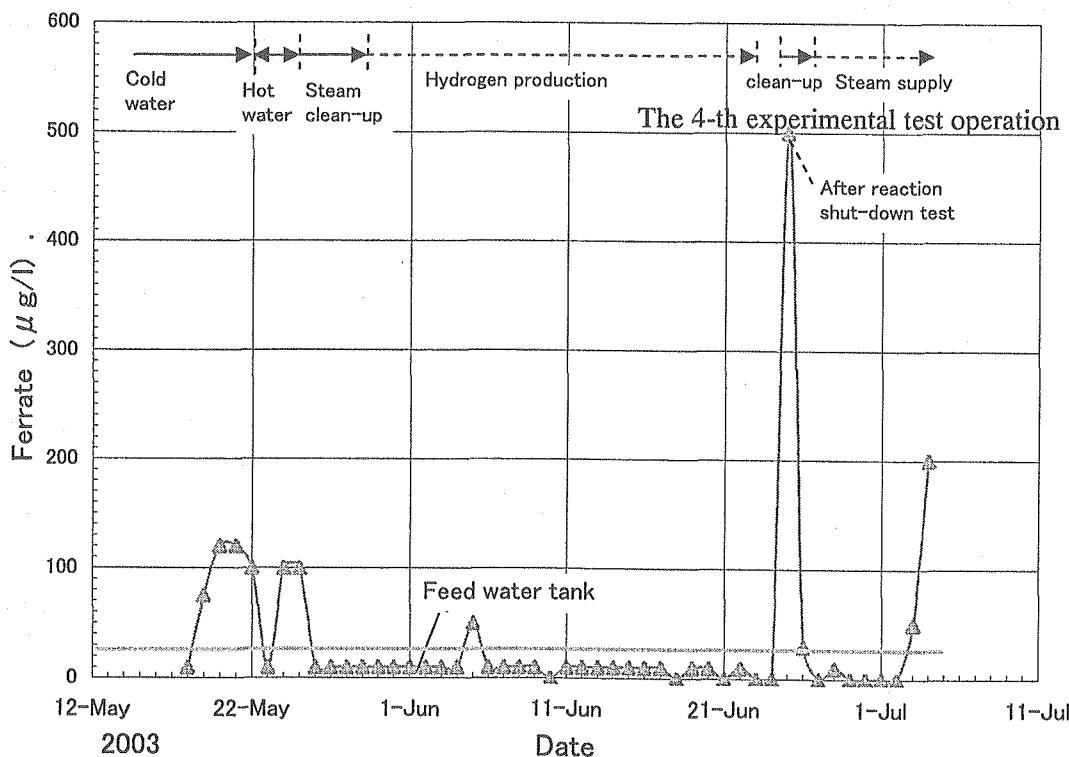


(b) Electric conductivity

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)

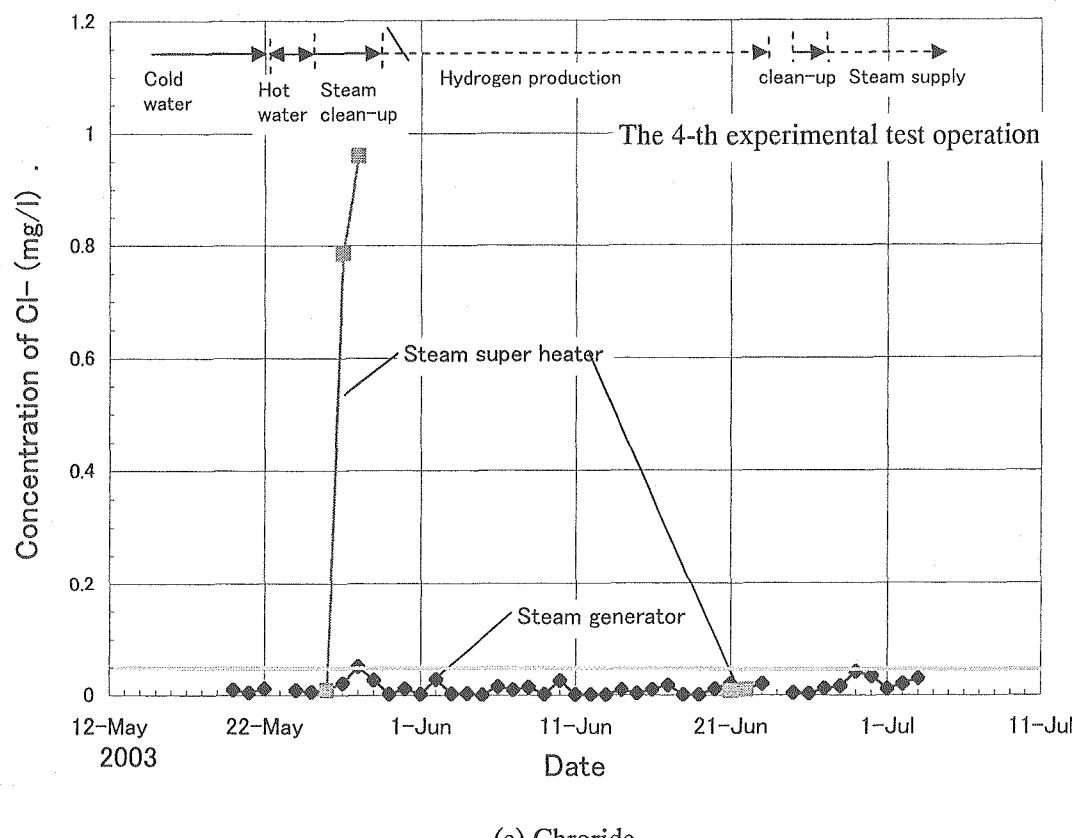


Fig.5.3 Historical records of water quality control of steam supply system (Continued)

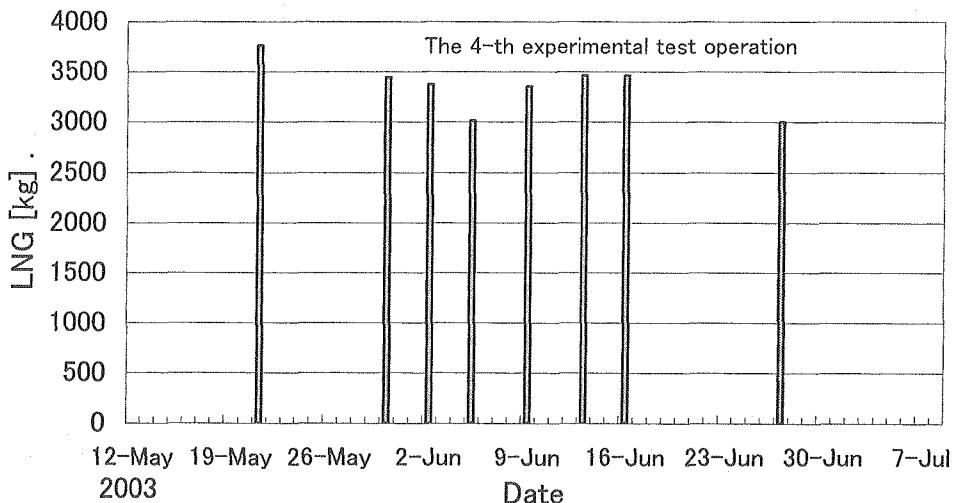


Fig.5.4(a) Mount of liquefied natural gas supply

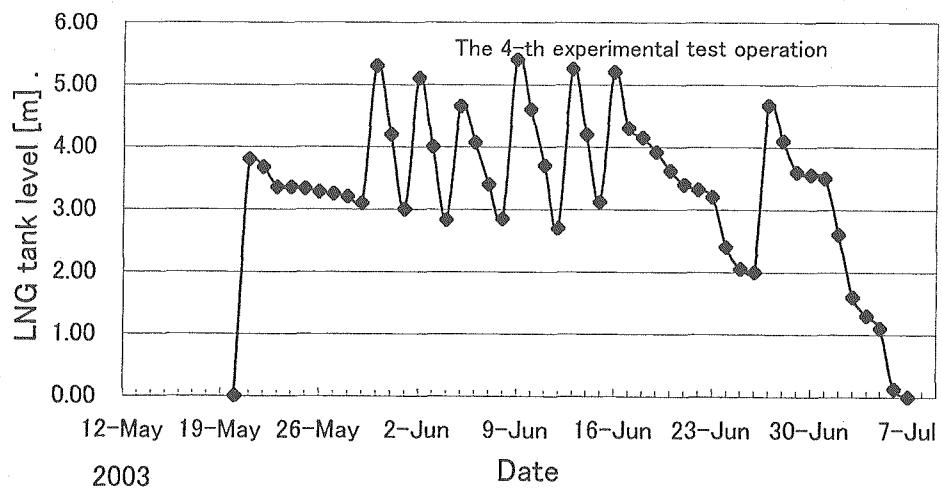


Fig.5.4(b) Record of liquefied natural gas tank level

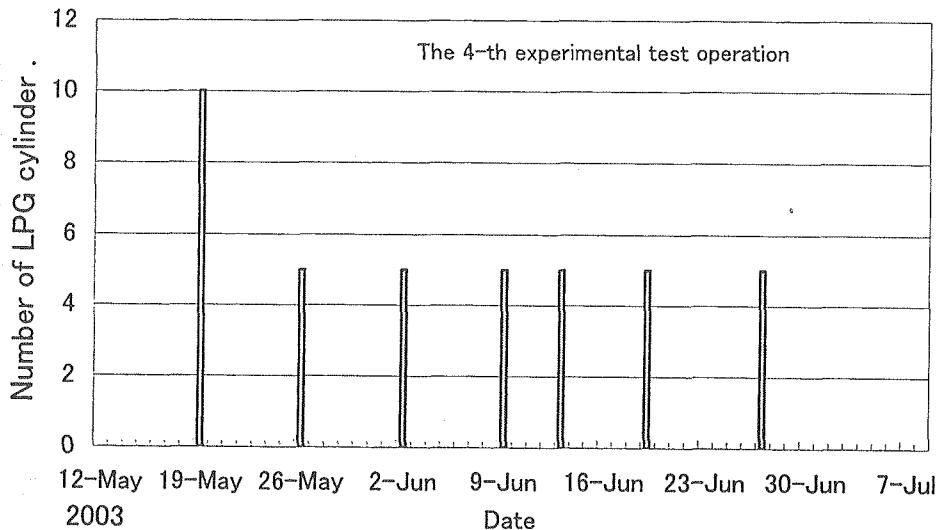


Fig.5.4(c) Mount of LPG supply (cylinder)

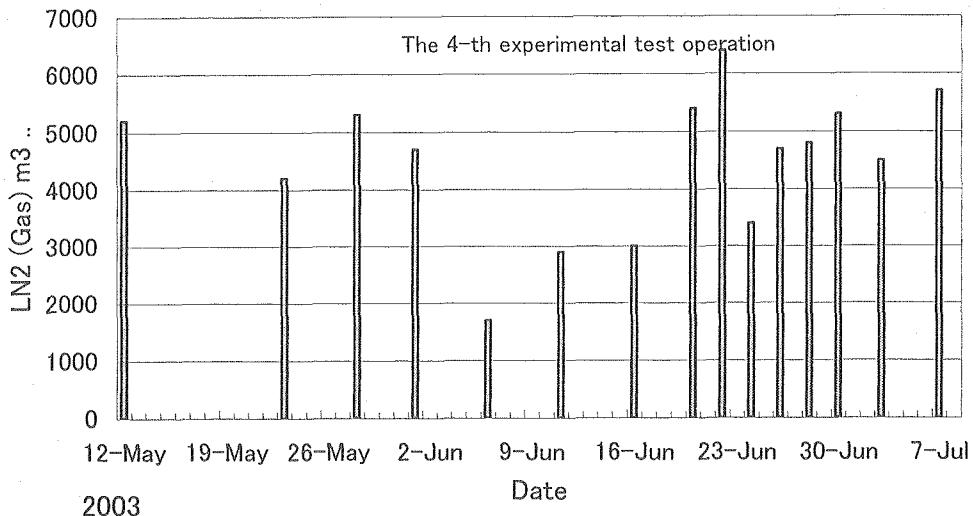


Fig.5.4(d) Mount of liquefied nitrogen gas supply

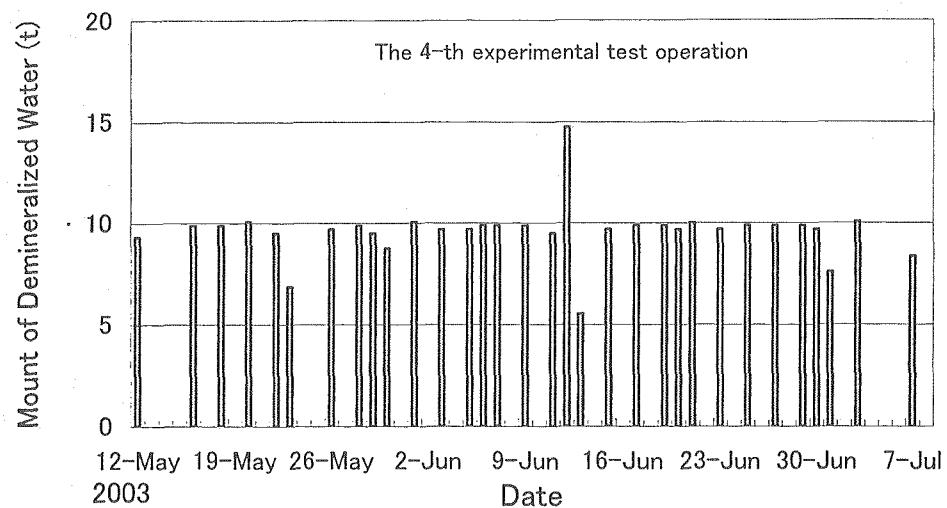


Fig.5.4(e) Mount of demineralized water supply

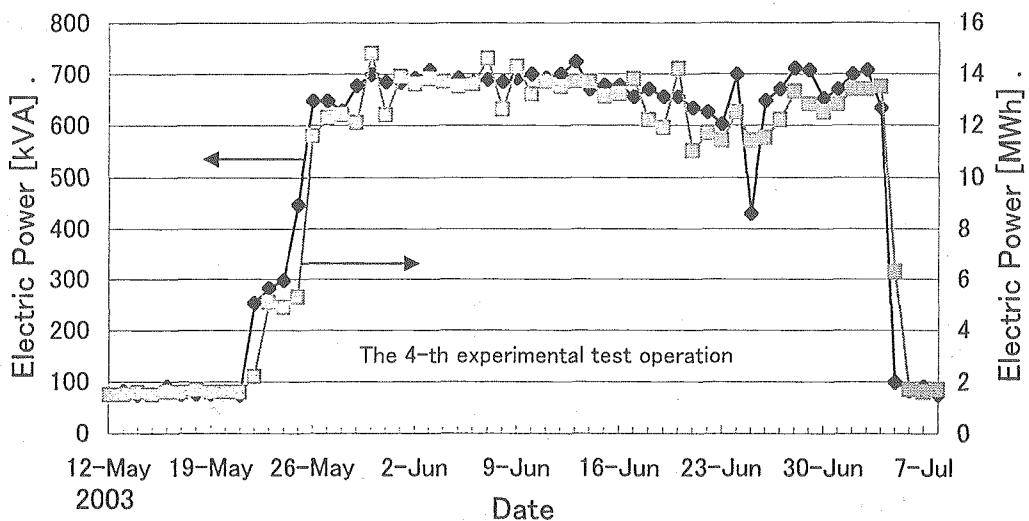


Fig.5.4(f) Mount of electricity supply

5. 2 第5回試験運転

5. 2. 1 運転履歴

第5回試験運転は平成15年10月28日から12月10日までの44日間に実施した。プラントの温度、流量、圧力、差圧のトレンド・グラフをFig.5.5に示す。

10月20日から10月26日に水蒸気供給設備の常温クリーンアップ及び冷却水設備の起動準備を行い、10月27日にヘリウムガス供給設備を3.1MPaまで昇圧し、その後、ヘリウムガス加熱器を起動し、昇温を開始して運転に入った。ヘリウムガス循環機流量350g/s、水蒸気改質器ヘリウムガス流量91g/sに達し、水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度180°Cで一旦状態を保持、水蒸気供給系は常温クリーンアップから温水クリーンアップ状態に入った。次に、10月31日に水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度を180°Cから700°Cに昇温、蒸気クリーンアップに入り、11月1日から11月2日に水蒸気改質器触媒の水素還元を実施して水素製造の準備を完了した。11月4日に水素製造を開始したが、水蒸気改質器上部フランジの保温材内ガス検知器の指示値が上昇したため、原因調査のために降温降圧し、点検に入った。

その後、11月25日から気密試験、11月28日から蒸気と低濃度の水素ガスを通気しての高温試験を通じて水蒸気改質器上部フランジの健全性確認試験を実施し、指示値上昇の原因是フランジガスケットならびに保温材内の脱ガスによるもので、可燃性ガスの漏えいが無いことを確認して、試験運転を終了し、12月10日から降温降圧して運転を終了した。

5. 2. 2 ヘリウムガス循環設備の純度管理履歴

第5回試験運転における水分計の監視結果をFig.5.6に示す。計測は平成14年10月27日 начиная с, 翌10月28日に試験装置の改質器入口温度180°Cまでの昇温を開始し、またヘリウムガス精製設備による不純物除去を開始している。昇温後水分濃度は上昇し警報点の10ppmを超える最高約38ppmに達した。この間インターロックにより昇温は中断し精製系の不純物除去運転による減少を待った。以後、順調に濃度は数ppmまで減少した。次に改質器入口温度700°Cまでの昇温では約8ppmまで上昇したが同様に減少した。11月4日に水素製造を開始したが5日に降温し運転を停止している。11月28日に運転を再開し180°Cまでの昇温、次いで11月29日に700°Cまでの昇温を実施したが、この間に約8ppmから徐々に減少し、その後水分計濃度が有意な値に上昇することはなかった。ガスクロマトグラフィーの監視結果も運転期間全体を通じて特に不純物は検出されなかった。

以上から、今試験運転の水分濃度上昇は、運転の初期に集中し、その原因是、第2回試験運転と同様に高圧ガス保安法に基づくヘリウムガス設備の開放点検時に侵入した空気中の水分の除去に時間がかかったものと言える。

5. 2. 3 水蒸気供給系の水質管理履歴

Fig.5.7に第5回試験運転の水質分析値の変遷を示す。管理目標値はTable5.1の通りである。10月28日の第5回試験運転の運転開始日に180°Cまで昇温して温水クリーンアップ運転に入った。10月31日に水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度を180°Cから700°Cに昇温し、蒸気クリーンアップ状態に移行した。11月4日から水素製造を開始したが5日に降温し運転を停止している。

その後、11月27日まで常温クリーンアップを行った。11月28日に運転を再開し 180°Cまでの昇温にともない温水クリーンアップ、次いで11月29日に700°Cまでの昇温にともない蒸気クリーンアップに入った。その後、改質器上部フランジのガス漏えい検査のため、12月1日から4日までの期間と12月6日から12月10日までの期間、改質器に蒸気を供給し、その後降温した。

(a)pHは、給水タンク（出口）は運転期間中管理目標値8.0～9.3を満足していた。蒸気発生器（ボイラ水）は蒸気クリーンアップ開始後減少傾向を示し約7.8まで下がったが、その後運転停止中の常温クリーンアップでは管理目標値以内にあった。また、再昇温後の蒸気供給においては再び減少傾向を示して管理目標値を下回り、蒸気を供給停止すると復帰した。2回目の蒸気供給再開でも同様に減少傾向を示した。

(b)電気伝導度は、蒸気発生器ドレン水は蒸気クリーンアップ以降上昇傾向を示したが、運転期間を通じて管理目標値 $3\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下を満足していた。蒸気過熱器出口ドレン水は参考値であるが、水素製造直前で $7\mu\text{S}/\text{cm}$ 、また、一旦停止し再立ち上げ後の12月に実施した蒸気供給時には $14\mu\text{S}/\text{cm}$ を示し、上昇傾向を示した。

(c)溶存酸素は、給水タンクにおいて常温クリーンアップから水素製造までの間、管理目標値20～ $200\mu\text{g/l}$ をほぼ満足できた。また、一旦停止後12月に実施した蒸気供給では約 $130\sim250\mu\text{g/l}$ とやや高い値を示した。

(d)鉄分は、約 $100\mu\text{g/l}$ から減少し、水素製造の11月5日には管理目標値 $30\mu\text{g/l}$ に入ったが、その後降温操作したため上昇した。また、一旦停止後12月に実施した蒸気供給では管理目標値 $30\mu\text{g/l}$ を満足した。

(e)塩化物イオンは、蒸気発生器では運転期間を通じて全般的に管理目標値 0.05mg/l 以下を満足していたが、運転停止し常温クリーンアップ状態にあった11月16日に1回だけ 0.2mg/l を超える計測値があったが、以後復帰している。また、一旦停止後12月に実施した蒸気供給運転では1回だけ約 0.2mg/l の計測値があった。

以上から、第5回試験運転の水質管理では、概ね管理目標値を満足する運転が実施できた。ただし、給水のpHが高いにもかかわらず蒸気発生器のpHが減少する傾向が見られた。

5. 2. 4 ガス・水・電気の消費統計

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

第5回試験運転でのLNGローリーによる充填実績をFig. 5.8(a)に、またLNGタンクの液位の記録をFig.5.8(b)に示す。さらに、フレアスタックの種火用に使用されるLPGガスの充填実績をFig. 5.8(c)に示す。水素ボンベは、11月1日に水素還元運転用に27本を使用し、再立ち上げ後に実施した水蒸気改質器閉止フランジの高温試験における水素ガス通気では、合計27本を使用した。

(2) ヘリウムガス

第5回試験運転では、ヘリウムガス・カードルは、低圧側9.0MPa、高圧側13.2MPaの状態で試験運転に入り、運転終了後の12月11日には、低圧側6.72MPa、高圧側12.71MPaで使用を終えたことから、圧力降下から計算された消費量は約 $132\text{ m}^3(\text{Normal})$ であった。第4回に比べ

て少ないのでヘリウムガス循環設備が高温状態になく、この間、ヘリウムガスのガスクロ分析による消費がなかったことによると考えられる。

(3) 窒素ガス

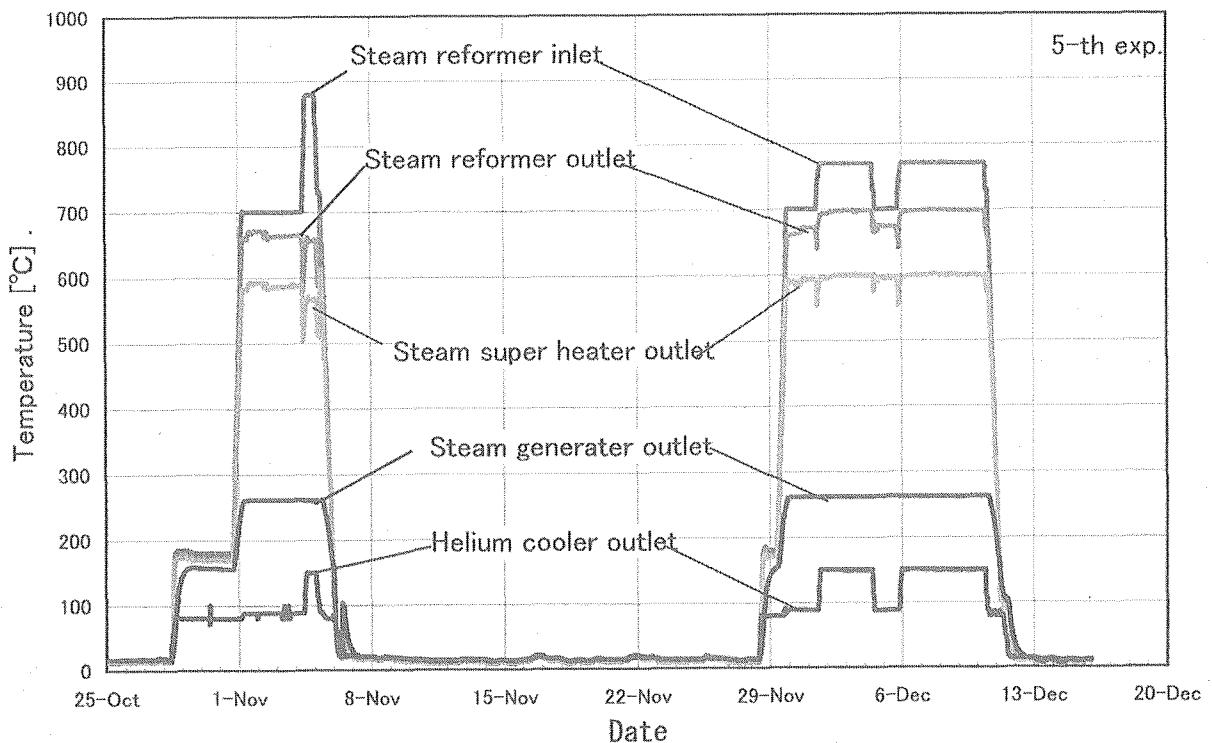
第5回試験運転でのLN2ローリーによる充填実績をFig. 5.8(d)に示す。

(4) 純水

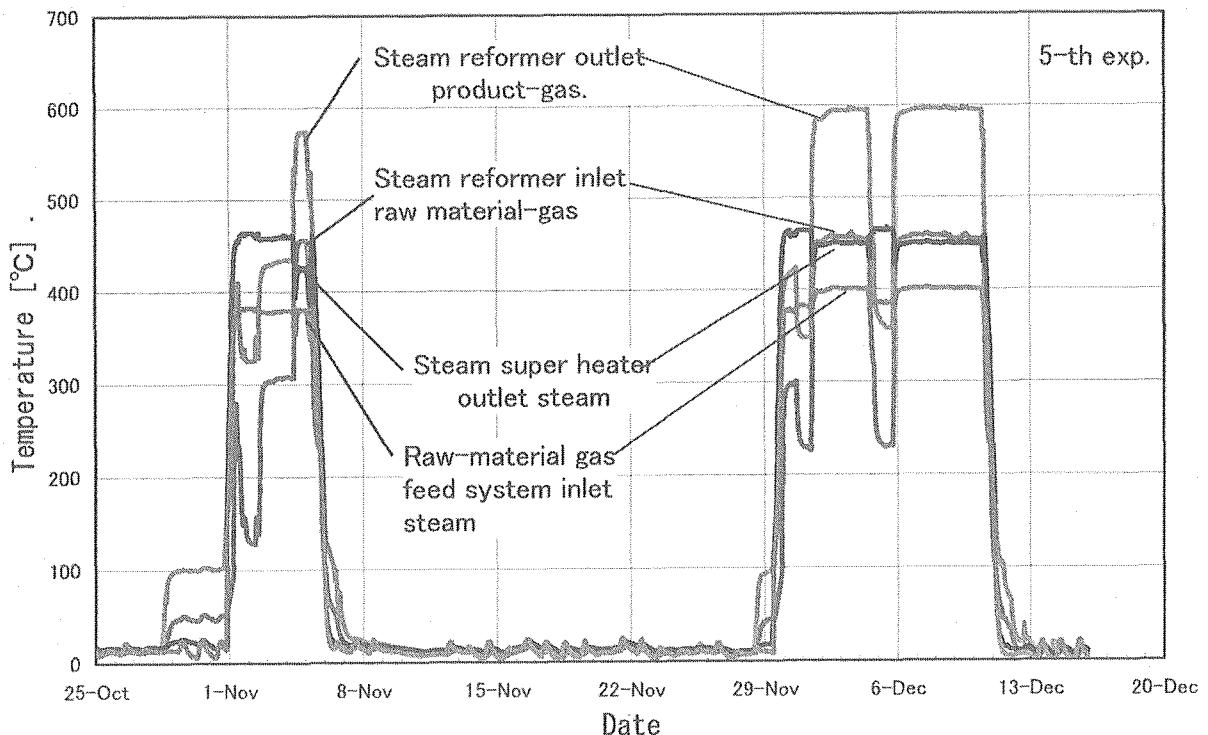
第5回試験運転での純水のローリーによる補給実績をFig. 5.8(e)に示す。合計約270tであった。

(5) 電気

第5回試験運転の使用実績をFig. 5.8(f)に示す。なお、kVAは1日1回実施する電源設備の点検の時刻における電圧値と電流値の積から算出した使用電力、またMWhは積算電力計の指示値から前日分を差し引いて算出した1日当たりの積算電力（電力使用量）である。

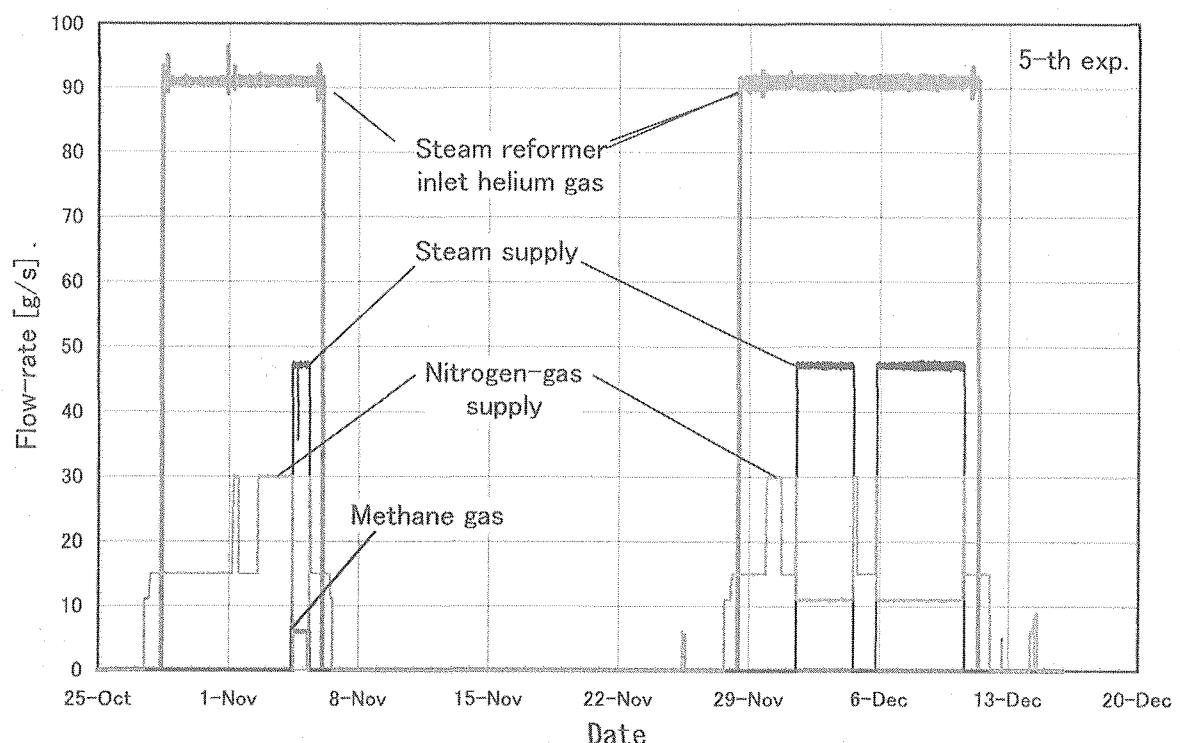


(a) Helium gas temperature

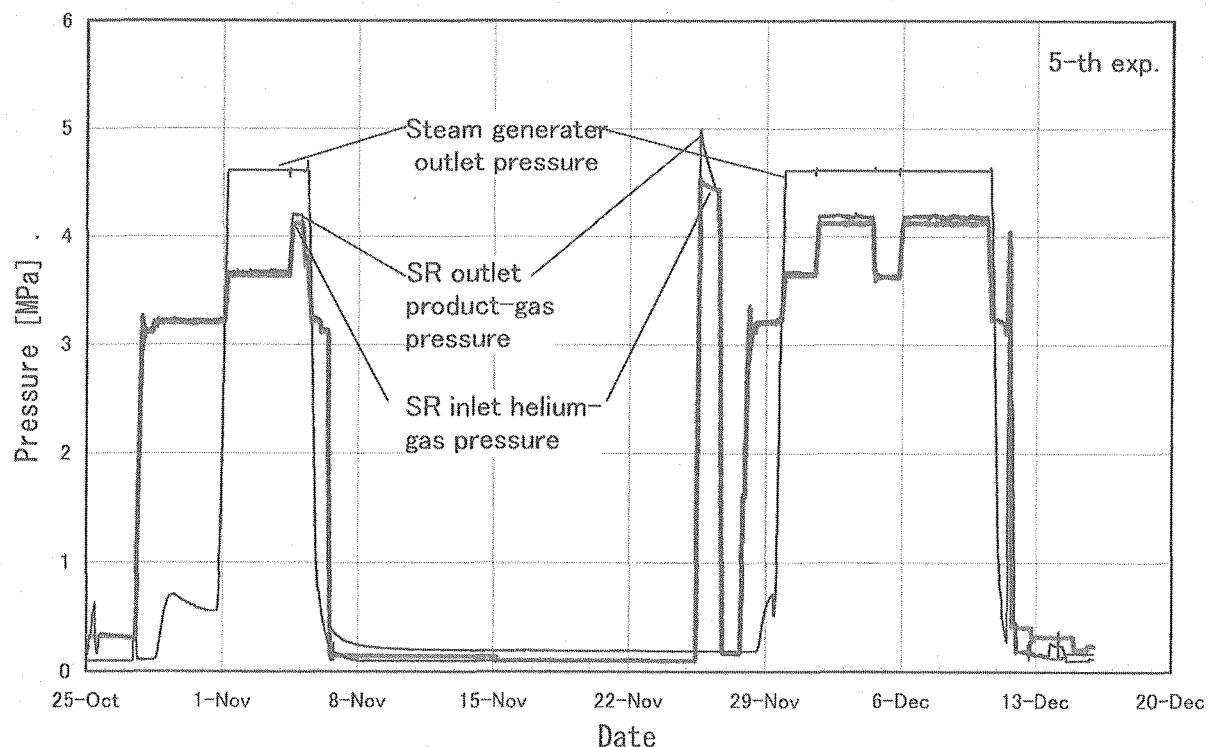


(b) Process gas temperature

Fig.5.5 Operational records of the 5-th experimental operation

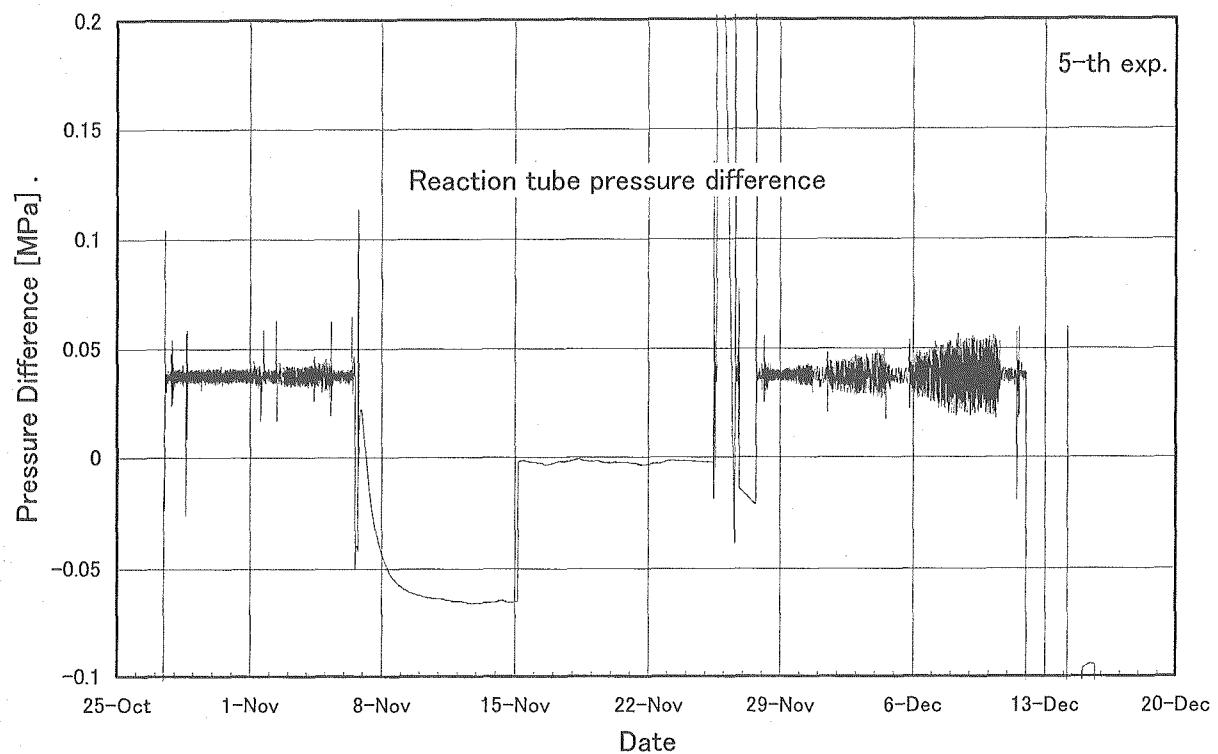


(c) Process-gas flow-rate



(d) Gas pressure

Fig.5.5 Operational records of the 5-th experimental operation (Continued)



(e) Pressure difference

Fig.5.5 Operational records of the 5-th experimental operation (Continued)

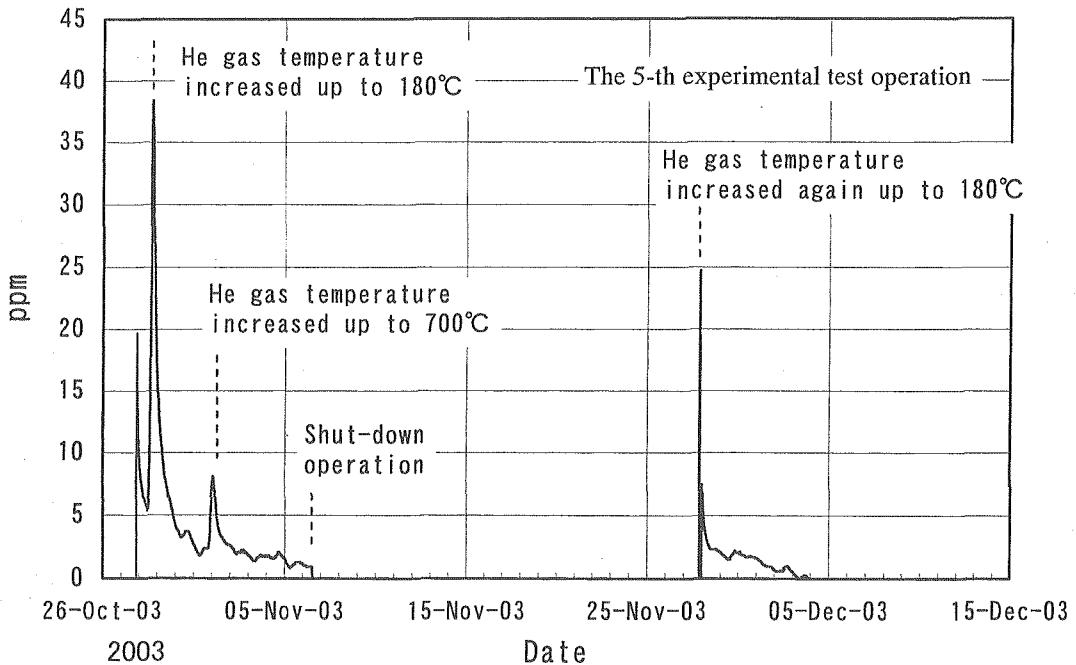


Fig. 5.6(a) Historical record of concentration of H₂O including in helium gas

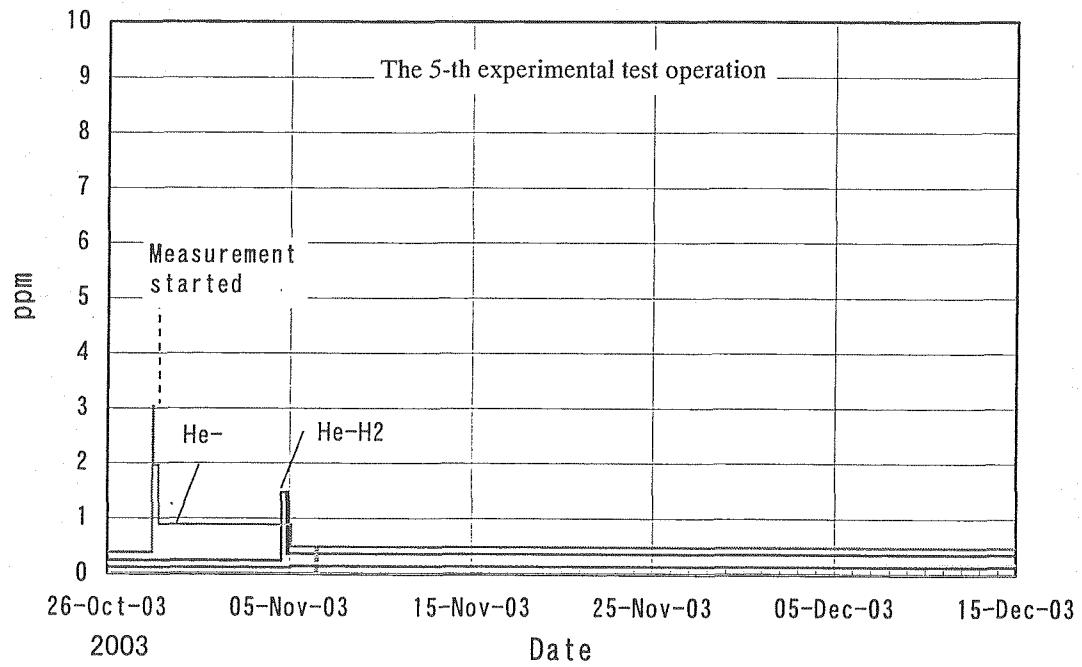


Fig. 5.6(b) Historical record of concentrations of N₂ and H₂ including in helium gas

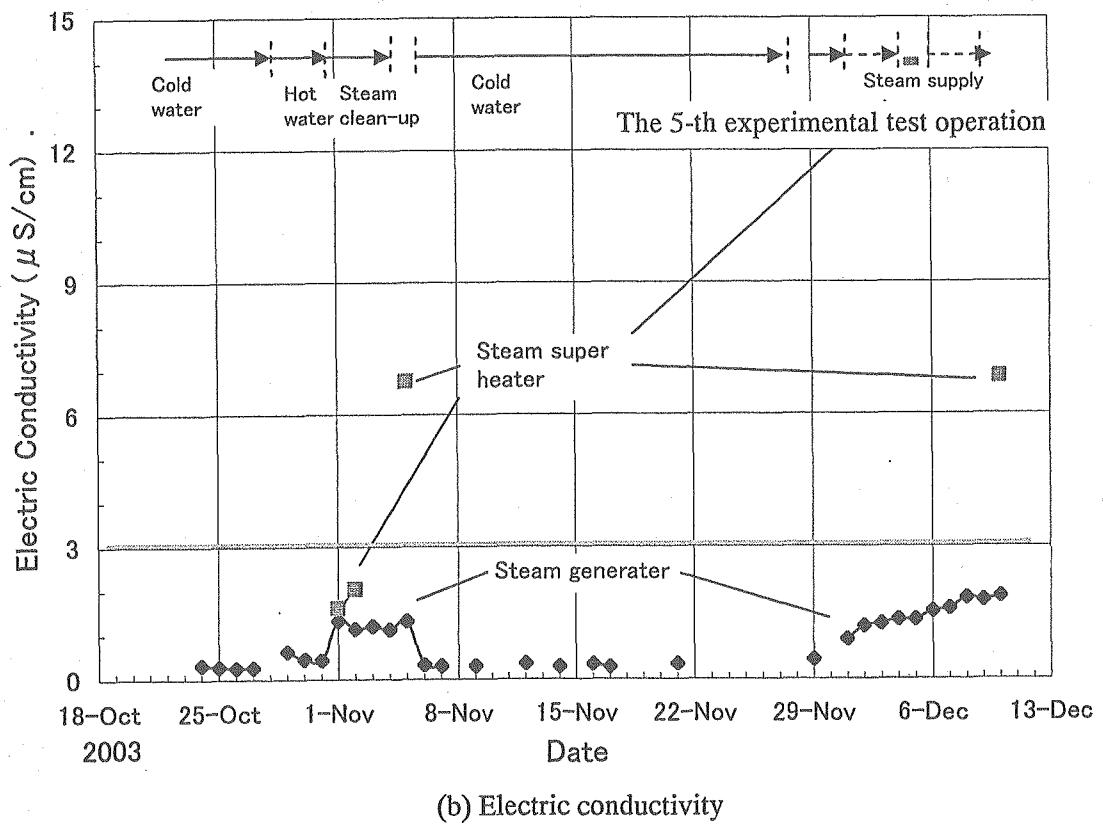
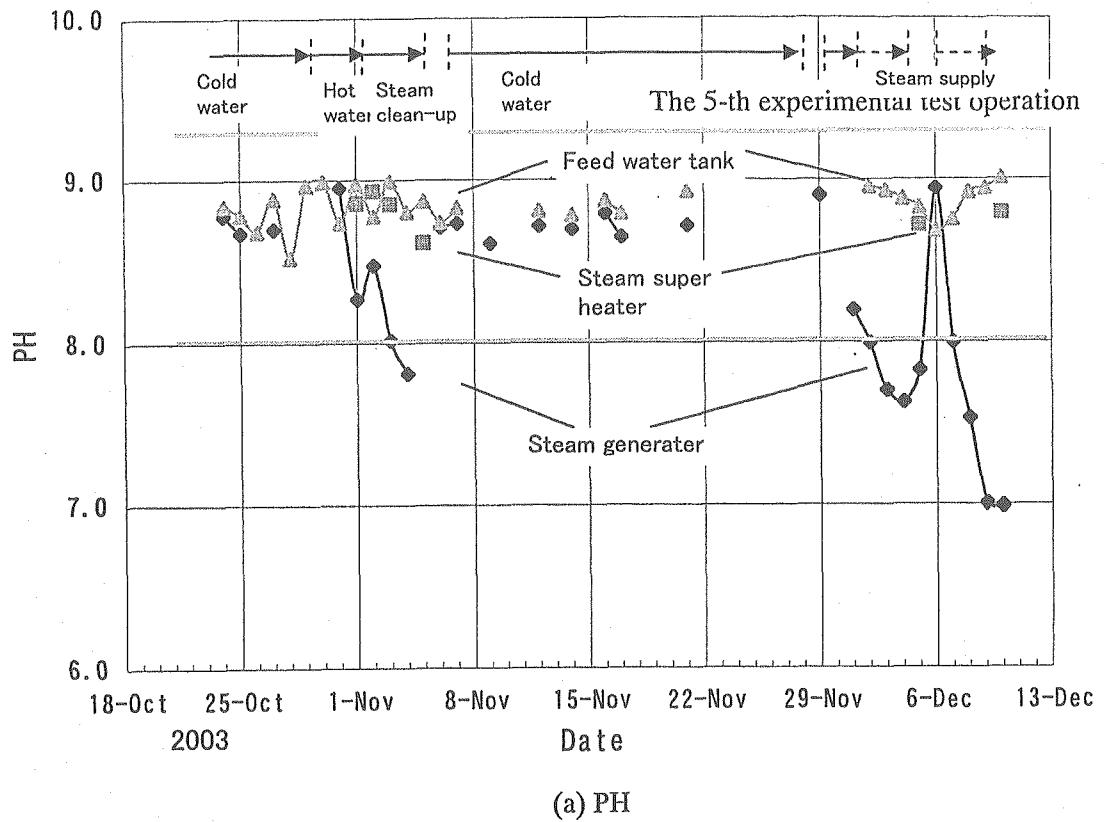
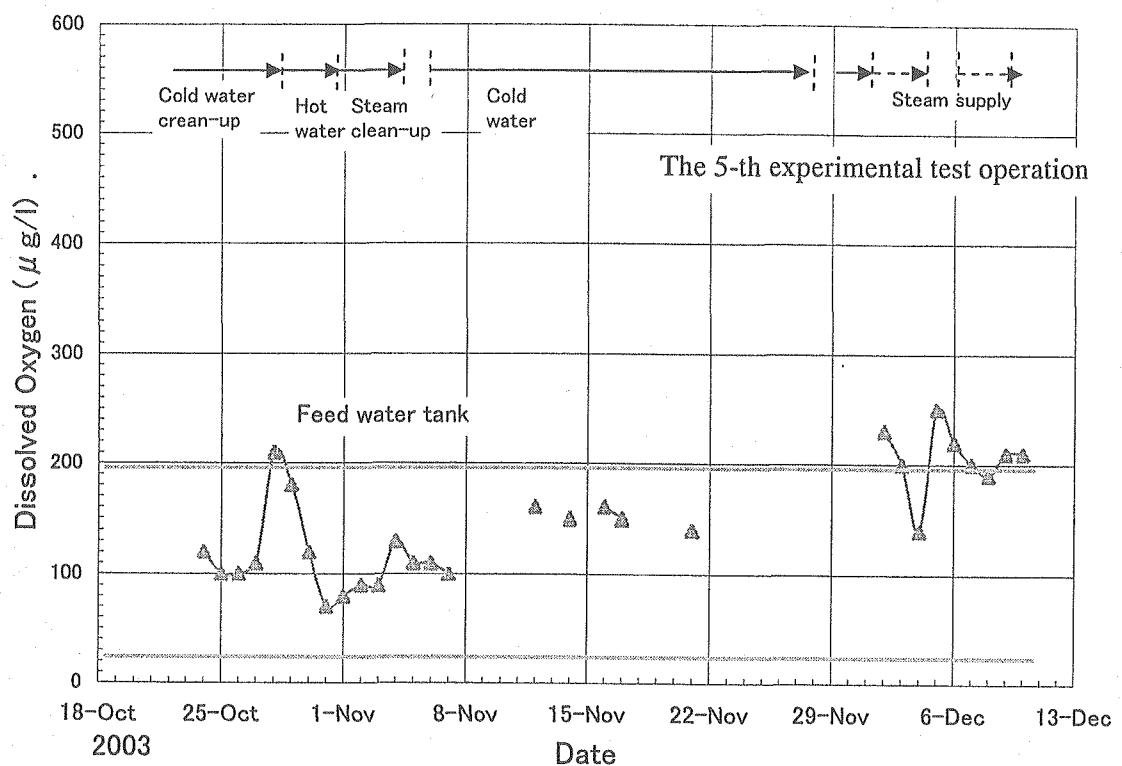
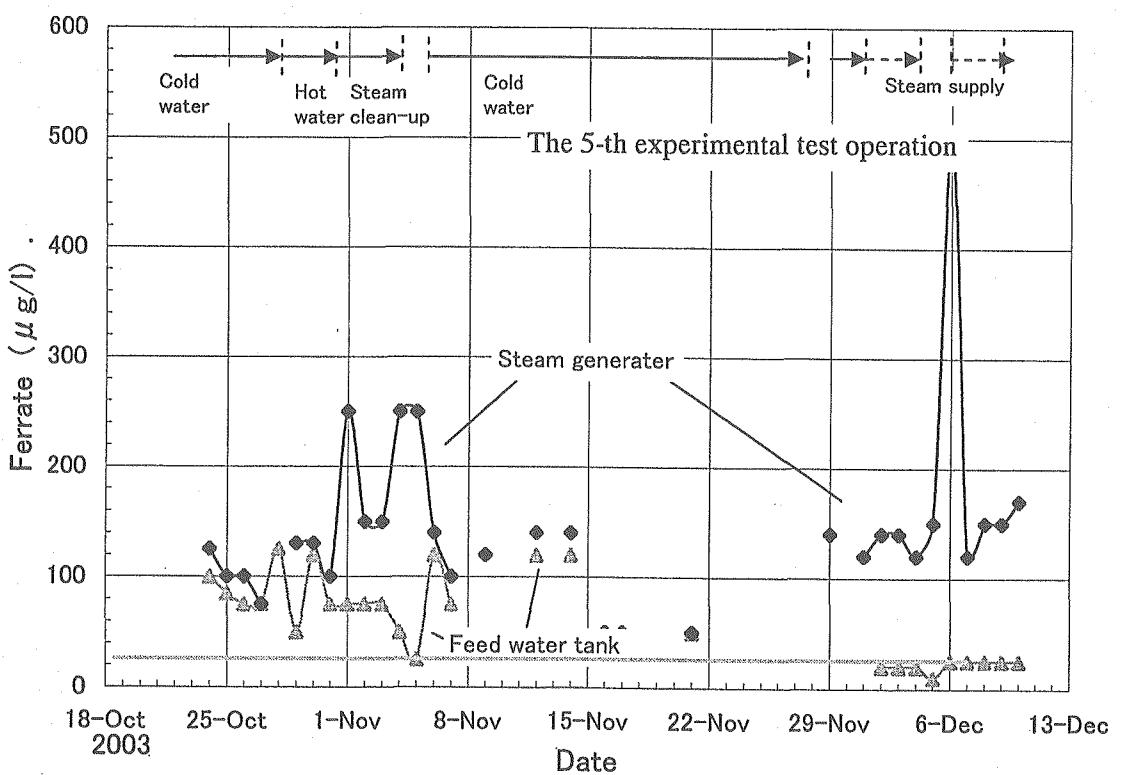


Fig.5.7 Histroical records of water quality control in steam supply system

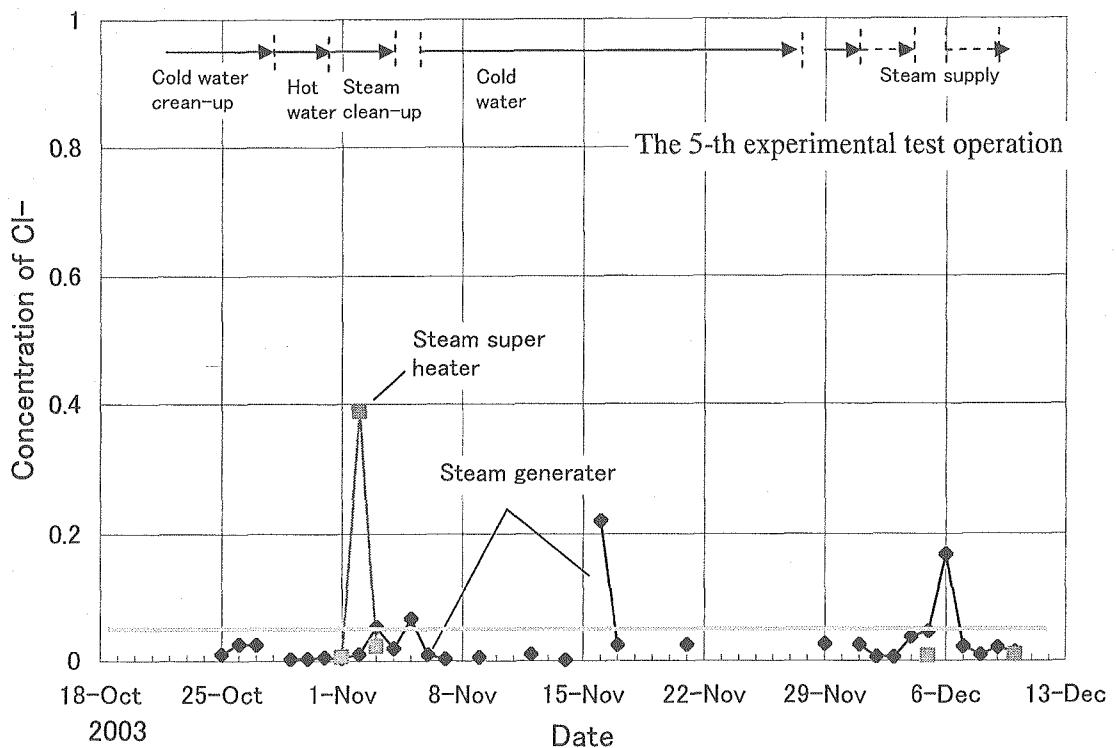


(c) Dissolved oxygen



(d) Ferrate

Fig.5.7 Histroical records of water quality control in steam supply system (continued)



(e) Chloride

Fig.5.7 Histroical records of water quality control in steam supply system (continued)

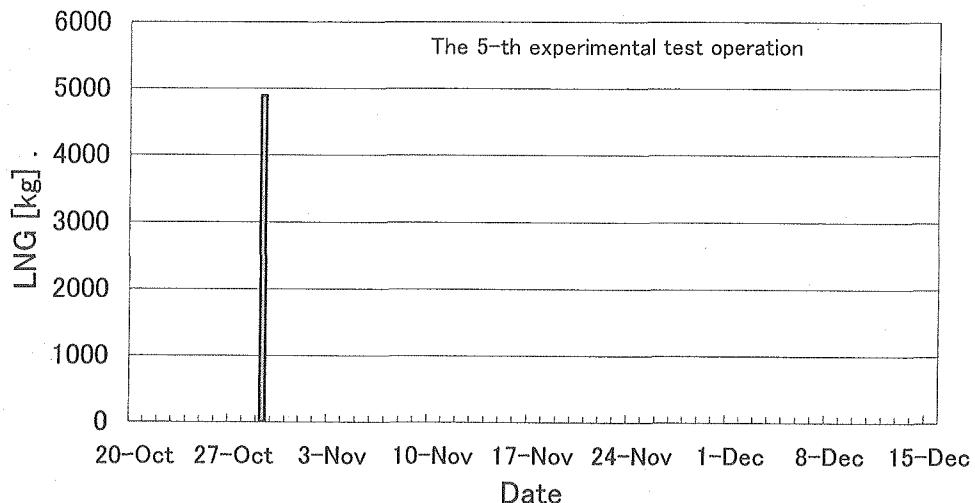


Fig.5.8(a) Mount of liquefied natural gas supply

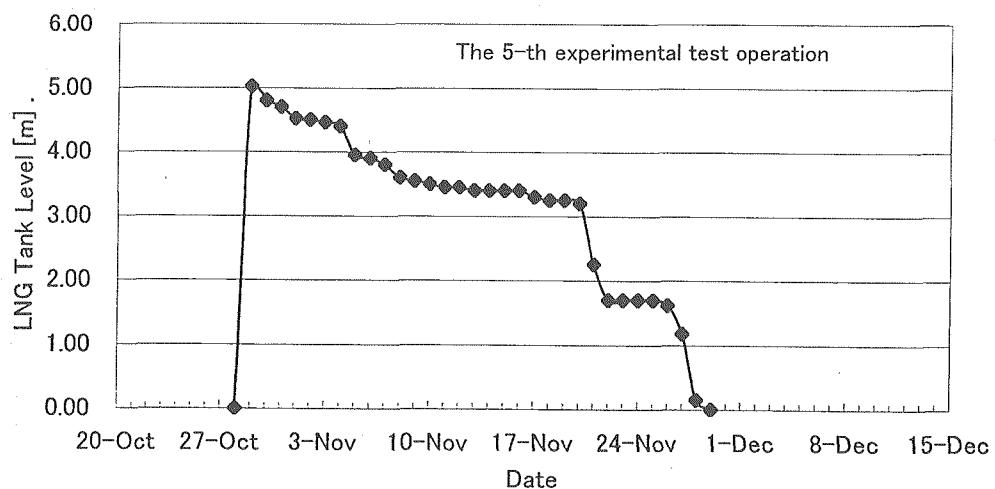


Fig.5.8(b) Record of liquefied natural gas tank level

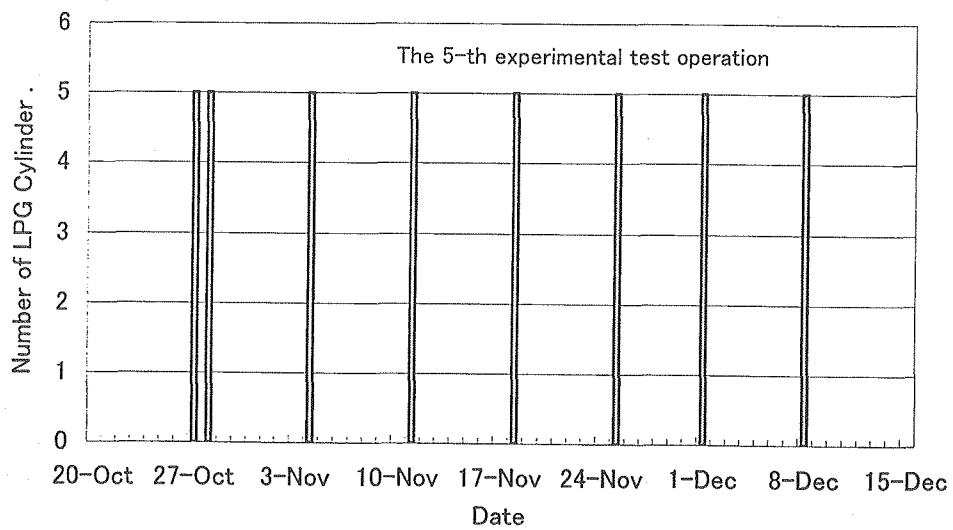


Fig.5.8(c) Mount of LPG supply (cylinder)

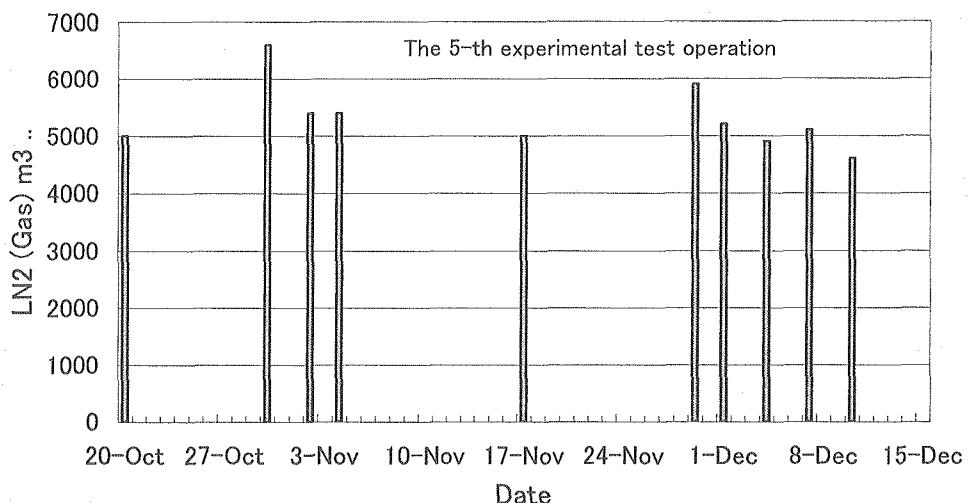


Fig.5.8(d) Mount of liquefied nitrogen gas supply

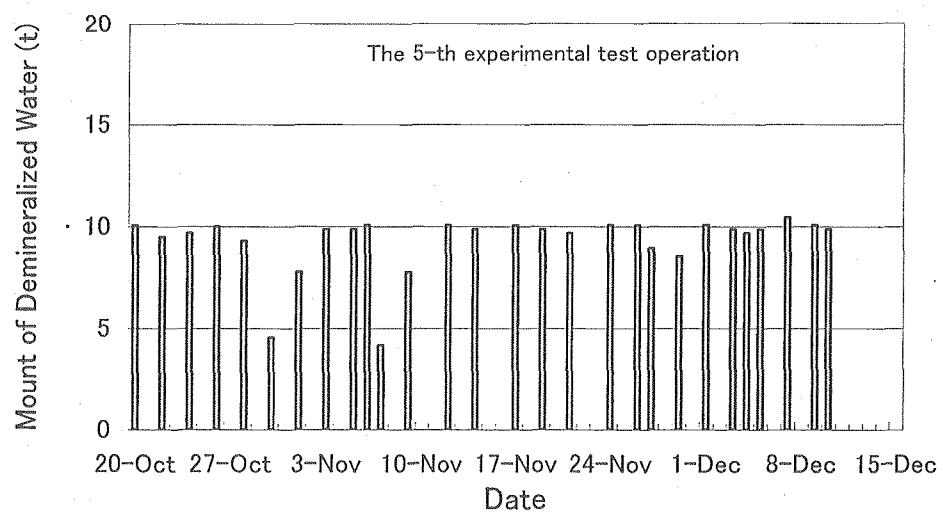


Fig.5.8(e) Mount of demineralized water supply

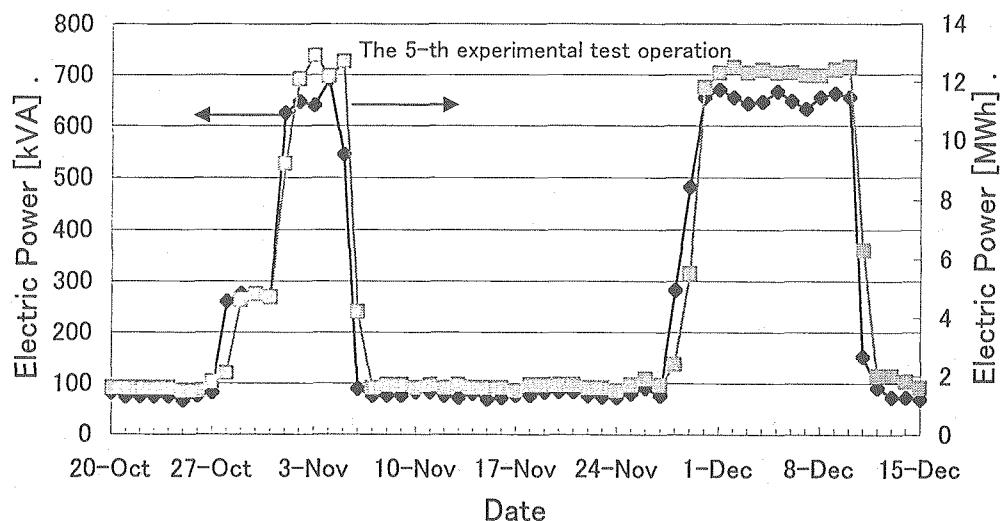


Fig.5.8(f) Mount of electricity supply

6. 結 言

HTTR 水素製造システム実規模単一反応管試験装置では、動特性解析コードの検証用データ取得等を目的として、平成 15 年 5 月に第 4 回試験運転を、また平成 15 年 10 月に第 5 回の試験運転を実施し、起動停止に関する試験、プロセス変動特性に関する試験、水素製造システムの長期安定性に関する試験、並びに水蒸気改質器反応停止時に対応する放熱器を用いた冷却システムに関する試験を行った。その結果、検証用データを取得するとともに、起動停止時における反応管温度変化に対する原料ガス流量やヘリウムガス温度の影響評価を行い、また、システムの長期安定性、水蒸気改質器で生じるプロセスガス圧力変動に対する反応管差圧制御系の制御性能、水蒸気改質器で生じるヘリウムガス温度変動に対する蒸気発生器による緩和効果、等について当初の予想通りの性能を持つことを確認した。

また試験装置の保守管理としては、平成 15 年 7 月から 9 月にかけて整備作業と定期自主検査を実施し、水蒸気供給設備のボイラ並びに第一種圧力容器性能検査、高圧ガス製造設備の保安検査に合格した。

謝 辞

試験装置の改造工事、試験運転の実施、試験装置の保守管理、ならびに試験データの整理に当たり、当時核熱利用研究部に在籍していた清水明（現、三菱重工業）、柳明裕（現、三菱重工業）、前田幸政（現、日立製作所）、佐藤博之（現、石川島播磨重工業）、塙博美（現、原子力エンジニアリング）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、試験装置の改造工事、試験運転の実施、ならびに試験装置の保守管理に当たり、原子力エンジニアリング（株）米川日出男、照沼孝志、滑川勝徳、柴田一之、川邊勝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。

最後に、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, 楠, 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) 林, 稲垣, 加藤, 藤崎, 会田, 武田, 西原, 稲葉, 大橋, 片西, 高田, 清水, 森崎, 楠, 前田, 佐藤, "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)," JAERI-Tech 2005-035 (2005).
- (9) 林, 大橋, 稲葉, 前田, 加藤, 藤崎, 会田, 森崎, 武田, 西原, 片西, 高田, 稲垣, "HTTR 水素製造システム 実規模単一反応管試験装置 平成 14 年度試験運転報告 (受託研究)," to be published in JAEA-Technology (2005).
- (10) 森崎, 林, 稲垣, 加藤, 藤崎, 前田, 水野, "HTTR 水素製造システム 実規模単一反応管試験装置 触媒粉塵用フィルタノズル部損傷の原因調査と再発防止対策に関する報告(受託研究)," JAERI-Tech 2005-009 (2005).
- (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).