



JAEA-Technology

2006-013



JP0650353

## HTTR水素製造システム実規模單一反応管試験装置

平成16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 2004 Fiscal Year (Contract Research)

林 光二 大橋 弘史 森崎 徳浩 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, Hirofumi OHASHI, Norihiro MORISAKI, 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

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単一反応管試験装置  
平成 16 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<sup>+</sup>・大橋 弘史・森崎 徳浩※・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 水素製造実規模単一反応管試験装置の平成 16 年度試験運転報告である。平成 16 年 5 月に後処理設備の触媒粉塵用フィルタの改修工事を実施した。平成 16 年 6 月に第 6 回試験運転を実施し性能の改善を確認した。平成 16 年 7 月に定期検査を実施し、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。また平成 16 年 10 月から第 7 回試験運転を実施し、化学反応停止試験を行った。その結果、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等を確認した。

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㈱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 2004 Fiscal Year  
(Contract Research)

Koji HAYASHI<sup>†</sup>, Hiroyumi OHASHI, Norihiro MORISAKI<sup>‡</sup>, 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 annual report on the experimental test operations and maintenances of the mock-up test facility with a full-scale reaction tube for the HTTR hydrogen production system in 2004 fiscal year. The improvement work of catalyst dust filter in combustion system was performed in May 2004, and the performance was confirmed. The sixth experimental test operation was performed from June to July 2004. Periodic inspections on boiler equipment and high-pressure gas production facilities were performed from end of July to September 2004. The seventh experimental test operation was performed from October to December 2004 for chemical reaction shutdown test. From the results, a behavior of the helium-gas cooling system, consists of steam generator and radiator, during chemical reaction shutdown was confirmed.

This report is summarized with the outline and the results of the test, maintenance works and inspections, and operation records in mentioned above.

Keywords; Nuclear Heat Utilization, HTTR, Hydrogen Production System, Steam Reforming, Mock-up Facility, Sixth Experimental Test Operation, Seventh 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 触媒粉塵用フィルタの改修 .....	12
3. 1. 1 触媒粉塵用フィルタ損傷及び対策の概要 .....	12
3. 1. 2 触媒粉塵用フィルタの改修と完成検査 .....	14
3. 2 定期検査 .....	17
3. 2. 1 ボイラ並びに第一種圧力容器の性能検査 .....	17
3. 2. 2 高圧ガス製造施設の保安検査 .....	23
4. 試験運転の概要 .....	29
4. 1 第6回試験運転 .....	29
4. 1. 1 試験と運転の工程 .....	29
4. 1. 2 触媒粉塵用フィルタ本体フランジの漏えい調査と対策 .....	29
4. 2 第7回試験運転 .....	32
4. 2. 1 試験と運転の工程 .....	32
4. 2. 2 化学反応停止試験 .....	34
4. 2. 3 ヘリウムガス精製設備の不具合 .....	45
5. 運転記録 .....	46
5. 1 第6回試験運転 .....	46
5. 1. 1 運転履歴 .....	46
5. 1. 2 ヘリウムガス循環設備の純度管理履歴 .....	46
5. 1. 3 水蒸気供給系の水質管理履歴 .....	47
5. 1. 4 ガス・水・電気の消費統計 .....	48
5. 2 第7回試験運転 .....	60
5. 2. 1 運転履歴 .....	60
5. 2. 2 ヘリウムガス循環設備の純度管理履歴 .....	60
5. 2. 3 水蒸気供給系の水質管理履歴 .....	61
5. 2. 4 ガス・水・電気の消費統計 .....	62
6. 結 言 .....	72
謝 辞 .....	72
参考文献 .....	73

## 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 Improvement of catalyst dust filter .....	12
3.1.1 Outline of damage and improvement of catalyst dust filter .....	12
3.1.2 Improvement work and completion test of the catalyst dust filter .....	14
3.2 Periodic inspection of the facility .....	17
3.2.1 Performance inspection of boiler and the first seed pressure vessels .....	17
3.2.2 Periodic inspection of high-pressure gas production facilities .....	23
4. Outline of experimental test operations .....	29
4.1 The sixth experimental test operation .....	29
4.1.1 Schedule of experimental test and operation .....	29
4.1.2 Countermeasure of gas leak from top flange of catalyst dust filter .....	29
4.2 The Seventh experimental test operation .....	32
4.2.1 Schedule of experimental test and operation .....	32
4.2.2 Chemical reaction shutdown test .....	34
4.2.3 Trouble in helium gas purification control .....	45
5. Operation records .....	46
5.1 The sixth experimental test operation .....	46
5.1.1 Historical records of the experimental test operation .....	46
5.1.2 Historical records of helium gas purity control .....	46
5.1.3 Historical record of water quality control .....	47
5.1.4 Statistics on consumptions of gas, water and electricity .....	48
5.2 The Seventh experimental test operation .....	60
5.2.1 Historical records of the experimental test operation .....	60
5.2.2 Historical records of helium gas purity control .....	60
5.2.3 Historical record of water quality control .....	61
5.2.4 Statistics on consumptions of gas, water and electricity .....	62
6. Concluding remarks .....	72
Acknowledgement .....	72
References .....	73

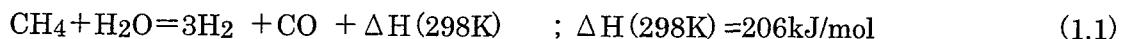
## 1. 緒 言

日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」と呼ぶ）では、将来の水素利用社会への貢献を目指して、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<sup>(1)</sup>。

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CO<sub>2</sub>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、CO<sub>2</sub>の排出が少ないので、環境に優し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、HTTR とメタンの水蒸気改質法による水素製造システムとの接続が検討された<sup>(2,3)</sup>。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、水素製造システムの動特性挙動の研究、等を目的として、炉外試験を計画し<sup>(4,5,6)</sup>、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）を作製した。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 120Nm<sup>3</sup>/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<sup>(7)</sup>。その後、平成 14 年 3 月には第 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測定を行っている<sup>(8)</sup>。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<sup>(9)</sup>。平成 15 年度には水蒸気改質器の触媒交換、後処理設備凝縮水ラインの改修工事を実施するとともに、第 4 回と第 5 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、水素連続製造試験、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実施し、動特性解析用コードの検証用データの取得、水素製造システムの制御性能の評価等を計画通りに実施している<sup>(10)</sup>。

本書はその後の平成 16 年度に実施した第 6 回と第 7 回試験運転、試験の結果、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。

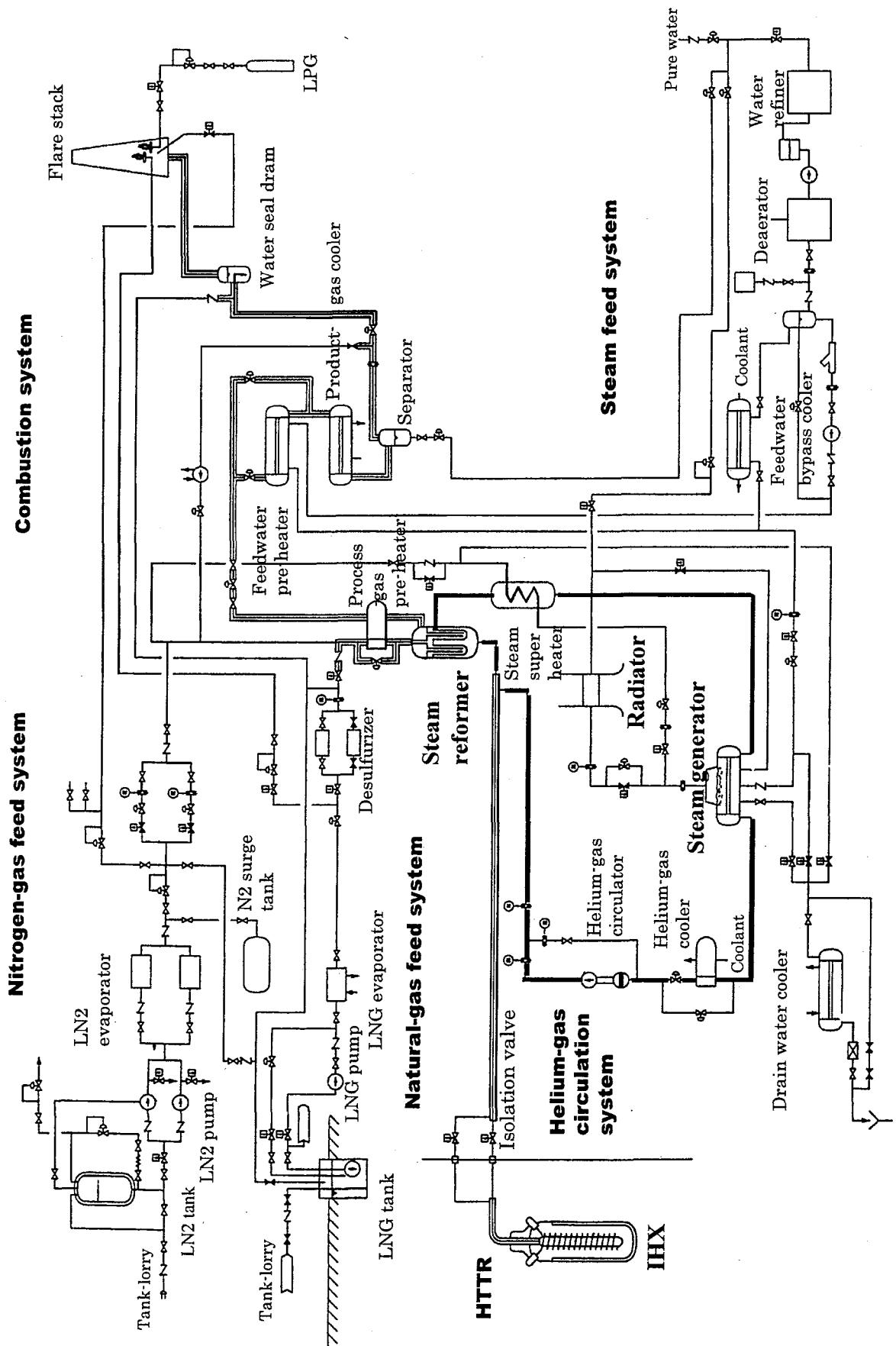


Fig.1.1 Schematic flow diagram of HTTR hydrogen production system

## 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<sub>2</sub>)を貯蔵する LN<sub>2</sub> タンク、LN<sub>2</sub> ポンプ、気化させる LN<sub>2</sub> 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 <sup>3</sup> /h	110 Nm <sup>3</sup> /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 <sup>3</sup> /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)

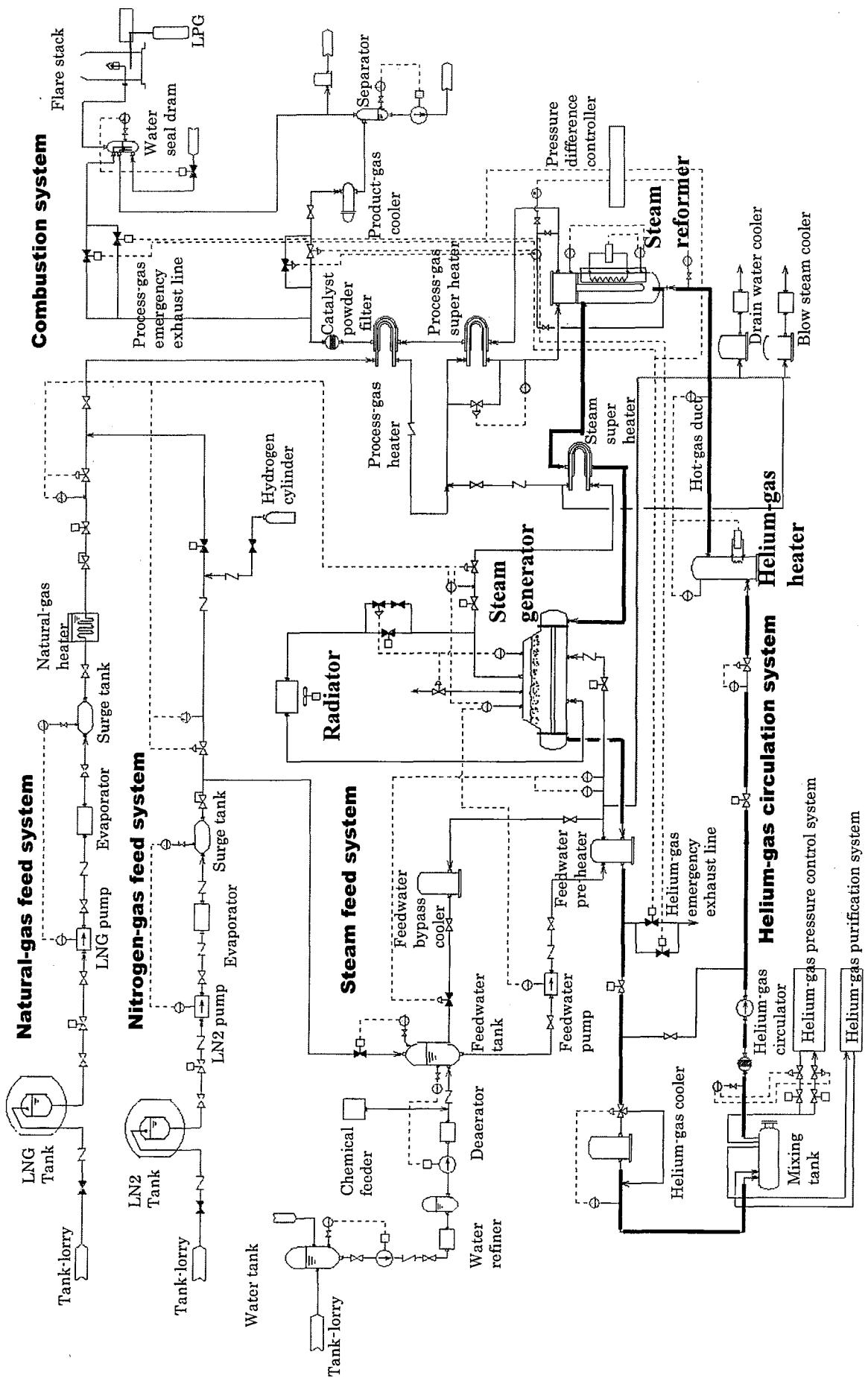


Fig. 2.1 Schematic flow diagram of the mock-up test facility

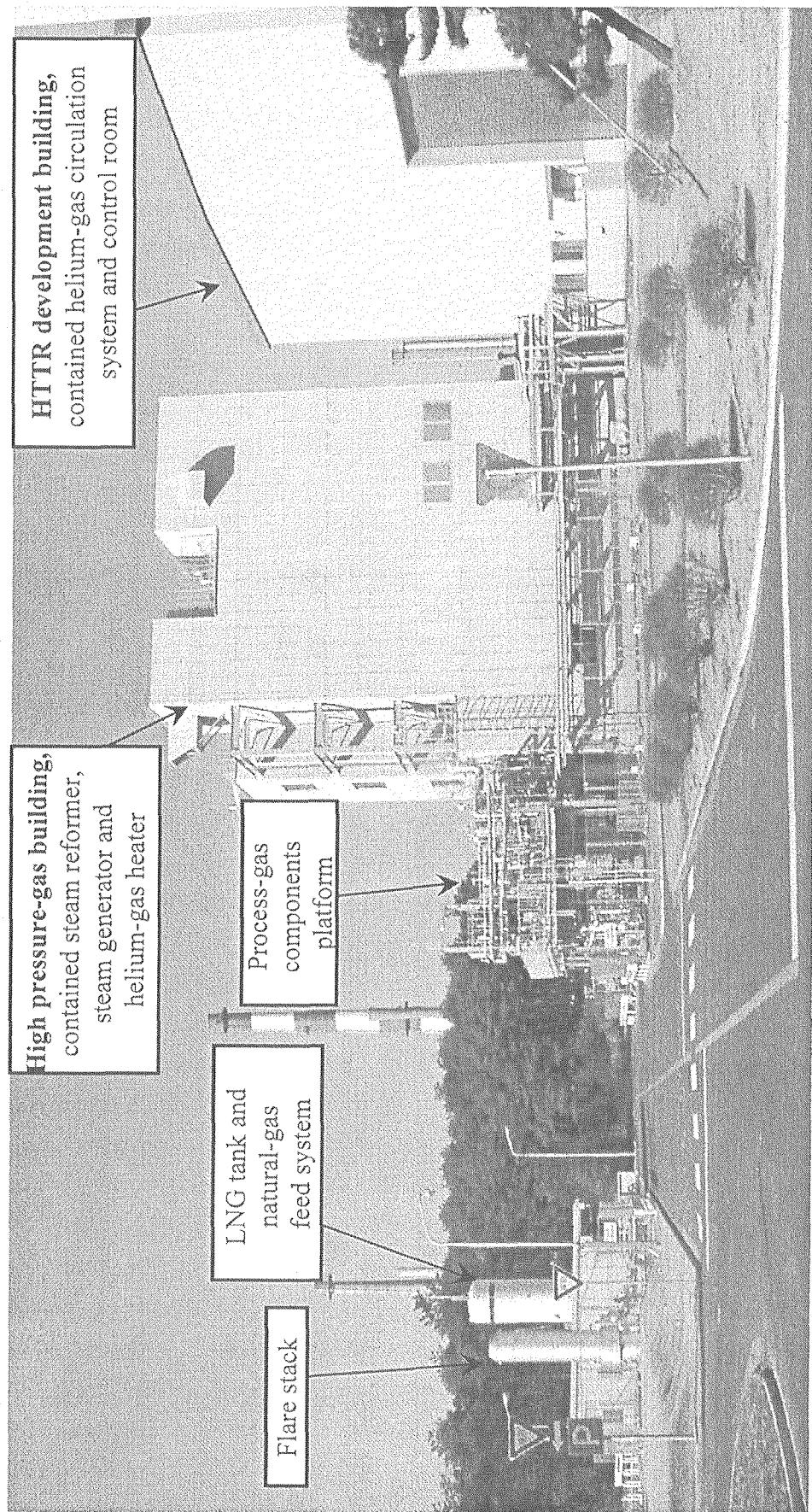


Fig.2.2(a) Overview of the mock-up test facility

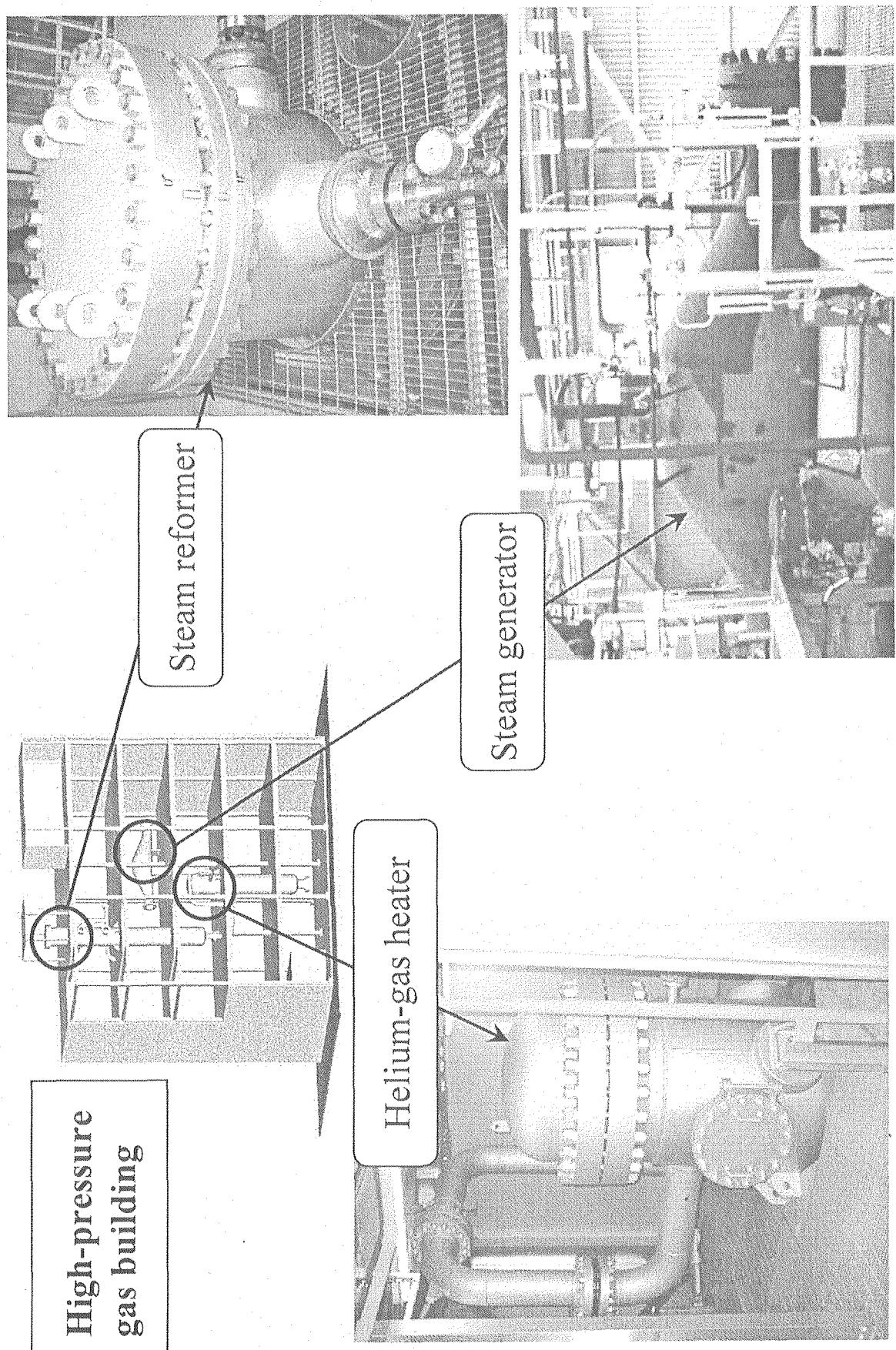


Fig.2.2(b) Main components of the mock-up test facility

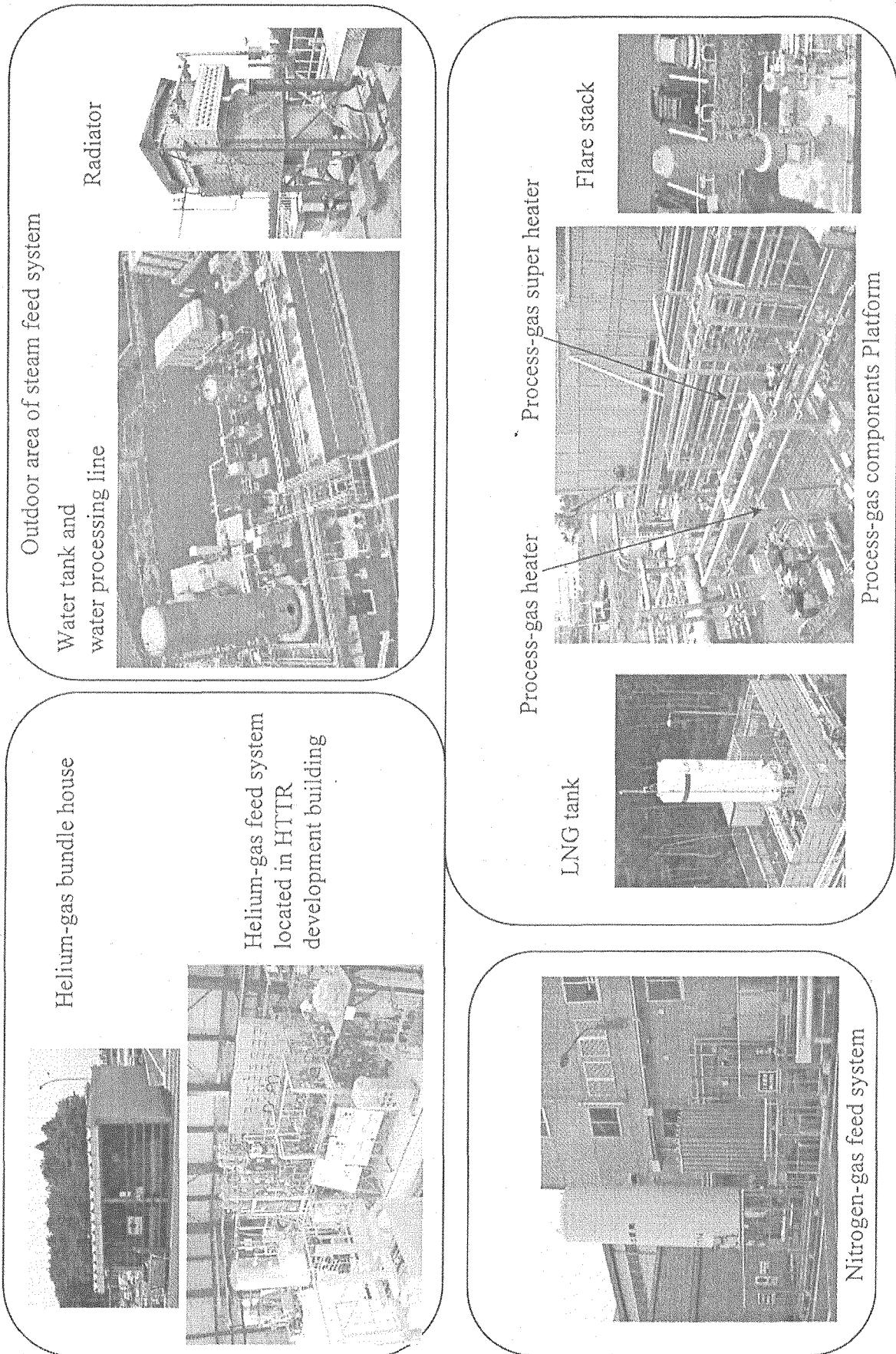


Fig.2.2(c) Other components of the mock-up test facility

### 3. 工事と保守の概要

本試験装置は、平成 16 年 4 月から後処理設備の触媒粉塵用フィルタの改修工事を実施し、平成 16 年 5 月 31 日に高圧ガス製造施設の完成検査を受検し合格した。また、平成 16 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 16 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 16 年 9 月にそれぞれ官庁検査に合格し終了した。以下にその詳細について述べる。

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 触媒粉塵用フィルタの改修

##### 3. 1. 1 触媒粉塵用フィルタ損傷及び対策の概要

後処理設備の触媒粉塵用フィルタは水蒸気改質器と差圧調整弁の間に設置しており、水蒸気改質器触媒の粉末が差圧調整弁に付着するのを防ぐため事前に収集する設備である。

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の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 26 日に高圧ガス製造施設の変更申請を行い、1 月 29 日に許可が得られ、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。応力腐食割れは 3 つの発生因子が同時に存在する場所に発生することから、以下の発生要因を 1 つ以上低減する方針とした。

- a) フィルタ内の凝縮水の発生を極力防止する。(環境因子の低減)
- b) 溶接残留応力を低減する。(応力因子の低減)
- c) 溶接鋭敏化を低減する。(材料因子の低減)

発生因子 a)に対する対策

- ① ノズルフランジを削除し、放熱を低減する。
- ② フィルタ内にガイド管を設け、入口ノズルから流入するガスを鏡の底面へ導き、鏡の高温化を図る。
- ③ 胴と支持脚の間に断熱材を設け、支持脚からの放熱を低減する。
- ④ 鏡部並びに配管の断熱を強化し、放熱を低減する。

発生因子 b)及び c)に対する対策

- ①' 上記①にてノズルフランジを削除したことにより、溶接部を無くす。
- ⑤ 入口ノズルを改良し、溶接残留応力及び溶接鋭敏化を低減する。具体的には、入口ノズルの厚肉トランジション構造から配管肉厚と同じ厚さの管を配管肉厚の 2 倍以上設け、配管と溶接する。

対策を行った結果を Fig.3.1.1 に示す。なお、詳細については別報<sup>(11)</sup>に示す。

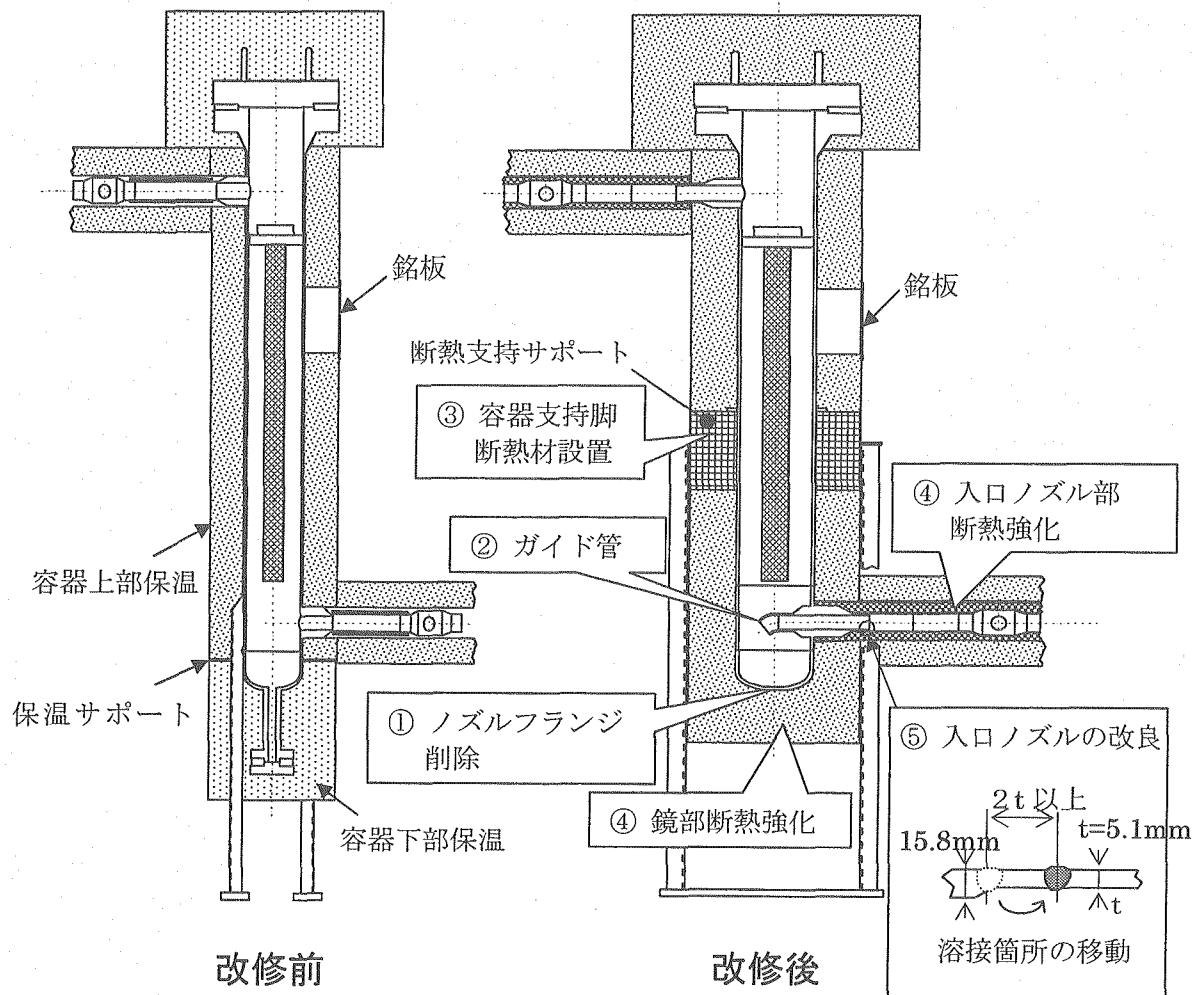


Fig.3.1.1 Improvement of catalyst dust filter

### 3. 1. 2 触媒粉塵用フィルタの改修と完成検査

触媒粉塵用フィルタの改修のため、高圧ガス保安法に基づき、平成 16 年 4 月 19 日に茨城県に高圧ガス製造施設等変更申請を提出し変更許可を得るとともに、触媒粉塵用フィルタは高圧ガス特定設備であるため、平成 16 年 4 月 26 日に高圧ガス保安協会に改造後の委託検査（高圧ガス保安法第 56 条の 3 に基づき実施する特定設備の検査）を申請した。その後、触媒粉塵用フィルタ（出入口ノズル部を含む）の改修をメーカー工場で実施し、完成後の委託検査に合格して「委託検査等成績証明証」の交付を受けた。次に、据付工事を実施し、本体接続に関わる新設配管部（溶接部を含む）について、平成 16 年 5 月 31 日に茨城県の完成検査を受験し合格した。

#### (1) 事前検査および検査項目

完成検査の受検に先立ち平成 16 年 5 月 25 日から 5 月 27 日の期間において、完成検査の対象となる変更箇所について、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完成検査の事前検査を実施した。また検査項目については、一般高圧ガス保安規則第 6 条第 1 項及び第 2 項の技術上の基準に対応する事項について検査を実施した。

なお検査対象部位の検査等については、事前に監督官庁と協議し了解を得た。Table 3.1.2-1 に検査項目一覧を示す。

#### (2) 事前検査とその結果

対象設備の検査方法及び検査結果を Table 3.1.2-2～Table 3.1.2-4 に示す。各検査の結果、全ての検査項目において有害な欠陥等は無く、高圧ガス製造施設の変更箇所が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。

#### (3) 完成検査とその結果

完成検査は、平成 16 年 5 月 31 日に書類審査と立会検査（気密試験、肉厚測定）が行われ、合格し「完成検査証」の交付を受けた。

なお、第 6 回運転終了後に触媒粉塵用フィルタを開放し、内部状況を調査したところ問題がない事が確認された。

Table 3.1.2-1 Inspection Items

検査項目		対象設備(数)	備考
1	肉厚測定	配管8箇所について実施。	Table 3.1.2-2
2	非破壊検査	配管2箇所について目視検査、浸透探傷試験を実施。	Table 3.1.2-3
4	耐圧試験	常用の圧力の1.25倍以上の圧力にて実施。	Table 3.1.2-4
5	気密試験	常用の圧力以上の圧力にて実施。	

Table 3.1.2-2 Results of thickness inspection on high pressure gas tubes

## 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、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。	法定肉厚以上であること。

## 2. 検査結果

検査年月日	平成16年5 月27日	測定器 DM-4	接触媒質 マシン油	測定精度		測定方式 2回測定法
				設計値	仕様	
1	F6C 入口配管(L3C-1)	SUS316TP-S	4	1.66	5.1	4.9 合格
2	F6C 出口配管(L3C-2)	SUS316TP-S	4	1.66	5.1	4.9 合格

Table 3.1.2-3 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。
浸透探傷試験(PT)	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) 浸透探傷検査(PT)

探傷剤:低ハロゲン・低イオウ 栄進化学機製(浸透液、洗浄液、現像剤)

浸透時間:15 分 現像時間:20 分

## 3. 検査結果

検査年月日		平成 16 年 5 月 27 日				
検査設備名		検査方法	検査個所	欠陥の有無	欠陥の処理	結果
1	触媒粉塵用フィルタ入口配管 (W23Y、W24Y)	目視検査	外面の外観検査	無	-	合格
		PT	外面の溶接線			
2	触媒粉塵用フィルタ出口配管 (W15Y、W16Y)	目視検査	外面の外観検査	無	-	合格
		PT	外面の溶接線			

Table 3.1.2-4 Results of pressure proof test and tightness leak test

## 1. 試験方法

試験方法				判定基準	
〔耐圧試験〕不活性ガスを用いて常用の圧力の 1.25 倍以上の圧力にて昇圧し、その圧力で 30 分間保持する。				異常な変形等の無いこと。	
〔気密試験〕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。				漏洩のないこと。	

## 2. 検査結果

検査年月日	平成 16 年 5 月 27 日	検査媒体	窒素ガス	検査方法	発泡試験	
検査対象個所	常用 圧力 [MPa]	耐圧試験		気密試験		結果
		検査圧力 [MPa]	保持時間	検査圧力 [MPa]	保持時間	
新設入口配管接続部 容器フランジ部	4.91	6.20	30 分	5.0	10 分	合格
新設出口配管接続部 容器フランジ部	4.91	6.20	30 分	5.0	10 分	合格

### 3. 2 定期検査

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、官庁検査を受検した。

#### 3. 2. 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 16 年 8 月に実施し、平成 16 年 8 月 27 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 3.2.1-1 に、ボイラ及び第一種圧力容器主要設備仕様一覧を Table 3.2.1-2 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(PT)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 PT 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 3.2.1-3 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 3.2.1-1 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
水蒸気供給系	蒸気発生器	ボイラ	第3655号	平成17年9月10日	平成16年8月27日	開放点検
	放熱器	第一種圧力容器	第4498号	平成17年9月10日	平成16年8月27日	開放点検
	給水ババパス冷却器	第一種圧力容器	第4499号	平成17年9月10日	平成16年8月27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	
水蒸気供給系	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	給水ババパス冷却器	分解点検/ 設定圧力調整	
		PV-172S	99FY059 25A×50A	トレン水冷却器	分解点検/ 設定圧力調整	
		PV-22S	99FY055 25A×50A	給水タク	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	
水蒸気供給系	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	給水ババパス冷却器	基準圧力計との 比較検査	

Table 3.2.1-2 Specification of the boiler and the first category pressure vessels

機器名称	蒸気発生器	放熱器	給水バイパス 冷却器
検査証番号	第3655号	第4498号	第4499号
型式	炉筒煙管式	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 $7.54 \text{ m}^2$	内容積 $0.067 \text{ m}^3$	内容積 外管 $0.018 \text{ m}^3$ 内管 $0.007 \text{ m}^3$
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 ATPT410, 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 3.2.1-3 (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 3.2.1-3 (b) Inspection results of boiler and the first category pressure vessels(2/3)

対象機器	点検項目	点 検 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 3.2.1-3 (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)	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 $\phi$ 34)及び外管(外径 $\phi$ 60.5)の溶接部(周方向) 4 1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-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. 2. 2 高圧ガス製造施設の保安検査

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施設の定期自主検査ならびに保安検査の事前検査を平成 16 年 8 月から 9 月にかけて実施し、平成 16 年 9 月 10 日に茨城県検査官の立会いのもと保安検査を受検し合格した。

高圧ガス製造施設に該当する部位は、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、後処理系設備、防消火設備であり、定期自主検査作業は約 1 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 16 年 8 月初旬より、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。検査項目は保安検査の検査項目と同じであるが、耐圧性能に関する検査項目だけは免除されている。

#### (2) 検査項目と対象設備

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 3.2.2-1 に検査項目一覧とその対象設備を示す。なお、同規則の「耐圧試験」については機器の種類毎に検査の猶予期間が定められており、それに基づき本試験装置の機器も検査周期を定めているが、前年度に全ての機器の検査を終えているため、今期は開放検査の対象機器は無かった。

#### (3) 事前検査とその結果

事前検査の方法、使用測定機器ならびに検査結果を Table 3.2.2-2 から Table 3.2.2-3 に示す。気密試験では窒素ガスを用いて常用の圧力以上の圧力にて行った結果、手動グローブ弁のグランド部等から洩れが 23 箇所、機器付フランジ部からの洩れが 3 箇所あったが、グランドパッキンの交換、本体シートの摺り合せ、ガスケット交換等の措置を講じた後、再度の試験を実施し全系統の洩れの無いことと確認した。

温度計検査では対象計器 44 本について比較検査を実施した結果、ヘリウムガス精製設備チャコールベッド用熱電温度計の示度誤差が不適合であったため、較正された新品の温度計に交換した。また、保護管等を用いずに配管等に直接設置してある温度計 10 本については、取外し時ににおける取付け部の損傷や漏えい等を避けるため、外観検査、絶縁抵抗測定及び導通試験を実施し、異常のないことを確認した。

その他の試験、検査において異常等は無く、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

保安検査は、平成 16 年 9 月 10 日に書類審査と立会検査（気密試験、肉厚測定、安全弁作動試験、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）が行われ合格し、設備が技術上の基準に適合していることを確認した「保安検査証」の交付を受けた。

Table 3.2.2-1 Inspection Items

検査項目		対象設備(数)	備考
1	肉厚測定	配管 152 箇所について実施。	Table 3.2.2-2
2	気密試験	全系統の対象設備について実施。	Table 3.2.2-3
3	不同沈下測定	貯槽4基について実施。 ・液化天然ガス貯槽、原料サージタンク ・液化窒素ガス貯槽、窒素ガスサージタンク	
4	温度計検査	熱電対温度計 39 本、抵抗温度計4本 バイメタル式温度計1本について実施。	
5	圧力計検査	ブルドン管式圧力計 30 台、圧力伝送器 14 台 差圧伝送器 25 台について実施。	
6	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。	
7	遮断弁機能検査	3台の遮断弁について実施。 ・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	
8	可燃性ガス漏洩検知器警報設備検査	21 台について実施。	
8	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	
9	接地抵抗測定	5箇所の測定点について実施。	

Table 3.2.2-2 (a) Results of thickness inspection on high pressure gas tubes

## 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。	法定肉厚を有し、かつ、前回の測定値と著しく違わないこと。

## 2. 検査結果

検査年月日	平成16年8月23日～8月27日	測定器	接触媒質	測定精度	測定方式
		22HR DM-4 AD-3251F	ソニコート グリセリン グリセリン	±0.1mm	2回 測定法
	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	14.8	5.7	14.7
3	改質器出口配管(L12H)	4	15.0	5.7	14.9
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	3.6
7	混合タンク出口配管(L24H)	4	5.4	1.90	5.4
8	B3U 出口配管(L12U)	4	4.1	3.05	4.2
9	高圧ヘリウムカードル(L34U)	4	4.2	3.05	4.3
10	低圧ヘリウムカードル(L32U)	4	4.1	3.05	4.2
11	原料ガス加温器出口配管(L7G)	4	3.7	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	2.7
14	AV14G 出口配管(L10G)	4	4.3	1.10	4.4
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

Table 3.2.2-2 (b) Results of thickness inspection on high pressure gas tubes (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
17	原料ガス過熱器出口配管(L11G)	3	3.4	0.70	3.4	合格
18	水蒸気供給系取合い点(L52G)	4	4.8	0.82	5.0	合格
19	温度調節用バイパスライン分岐点(L15G)	4	3.8	0.88	3.8	合格
20	原料ガス過熱器出口配管(L16G)	4	4.0	2.04	4.1	合格
21	原料ガス過熱器出口配管(L17G)(17-2)	4	4.8	1.74	4.8	合格
22	原料ガス過熱器出口配管(L17G) (17-13)	4	4.1	1.74	4.2	合格
23	LNGタンク・ポンプ廻り(L64G)	4	2.4	0.17	2.4	合格
24	原料ガス過熱器出口配管(L2C)	4	4.5	1.76	4.5	合格
25	原料ガス過熱器出口配管(L3C)	4	4.6	1.66	4.6	合格
26	生成ガス放出ライン(L32C)	4	4.5	1.16	4.5	合格
27	触媒粉塵用フィルター入口(L3C)	4	4.9	1.66	4.9	合格
28	CV3C出口配管(L4C)	4	5.5	3.47	5.6	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	3.2	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	4.1	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	2.1	0.49	2.0	合格
37	水素ライン一次側配管(L87N)	4	1.9	0.26	1.9	合格
38	水素ライン二次側配管(L88N)	4	1.9	1.00	2.0	合格

Table 3.2.2-3 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を昇圧し、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 16 年 9 月 1 日～9 月 3 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	4.54	30 分	合格	
	4.2	4.54	30 分	合格	
ヘリウムガス圧調設備	4.42	4.42	30 分	合格	
	14.8	14.85	30 分	合格	
ヘリウムガス精製設備	0.589	0.595	30 分	合格	
	0.932	0.950	30 分	合格	
	4.42	4.54	30 分	合格	
水蒸気供給設備	4.91	4.97	30 分	合格	
不活性ガス供給設備	0.69	0.70	30 分	合格	
	1.8	1.82	30 分	合格	
	3.5	3.5	30 分	合格	
	5.89	5.95	30 分	合格	
	14.7	15.1	30 分	合格	
	19.6	19.9	30 分	合格	
後処理設備	4.91	4.97	30 分	合格	
原料ガス供給設備	0.8	0.84	30 分	合格	
	0.491	0.50	30 分	合格	
	4.91	4.97	30 分	合格	
	5.89	5.95	30 分	合格	
	19.7	19.9	30 分	合格	
水蒸気改質器	4.91	4.97	30 分	合格	

#### 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<sup>(7)</sup>。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、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<sup>(8)</sup>。平成 14 年度には、一部系統の改修工事を経て、第 2 回及び第 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<sup>(9)</sup>。平成 15 年度には、第 4 回及び第 5 回試験運転を実施し、起動停止試験のうち水素製造開始停止条件の選定並びにヘリウムガス冷却器の温度制御特性に関する試験、プラント特性試験のプロセス変動特性試験並びに連続水素製造試験、化学反応停止試験を実施した<sup>(10)</sup>。

平成 16 年度は、触媒粉塵用フィルタの改修工事を完了させた後、平成 16 年 6 月 7 日から 6 月 29 日までの 22 日間に第 6 回試験運転を、また平成 16 年 10 月 19 日から 11 月 21 日までの 33 日間に第 7 回試験運転を実施した。

##### 4. 1 第 6 回試験運転

###### 4. 1. 1 試験と運転の工程

平成 16 年 6 月 7 日から 6 月 29 日の期間に第 6 回試験運転を実施した。第 6 回試験運転の目的は、①触媒粉塵用フィルタの改修工事とともに確認試験、並びに②研究項目としての化学反応停止試験の 2 項目であった。Fig.4.1.1 に試験運転工程の実績を示す。

平成 16 年 5 月 25 日から直運転体制に入り 6 月 5 日まで起動準備を実施し、6 月 6 日に系統昇圧、6 月 7 日にヘリウムガス加熱器を起動し運転に入り、改質器入口ヘリウムガス温度 180°C まで昇温を開始、6 月 10 日に水蒸気改質器入口ヘリウムガス圧力 3.5MPa、温度 700°C まで昇温・昇温した。その後、6 月 17 日に水素製造の準備として水素ガスを用いた水蒸気改質器の触媒還元を実施中に、触媒粉塵用フィルタ保温材内に設置された可燃性ガス検知器の指示値が上昇したため、還元作業を中止して窒素ガスによる発泡試験を実施したところ触媒粉塵用フィルタ本体法兰ジから微少な漏えいを確認したため、原因調査のために試験装置を一旦停止した。その後、原因調査のための運転を 6 月 22 日から 6 月 29 日まで実施して、第 6 回試験運転を終了した。

なお、当初の試験運転の目的①については、運転終了後に触媒粉塵用フィルタを開放点検し、内部を観察した結果全く異常はなく、改修方法が妥当であったことを確認できた。目的②の試験項目は第 7 回試験で実施することにした。

###### 4. 1. 2 触媒粉塵用フィルタ本体法兰ジの漏えい調査と対策<sup>(12)</sup>

第 6 回試験運転中の平成 16 年 6 月 16 日から 17 日にかけて、水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度 700°Cにおいて、プロセスガス側に窒素ガスを通気している状態で、水蒸気改質器触媒の水素ガスによる還元を実施した。6 月 17 日に濃度 30% の水素ガスを供給したところ、後処理設備の触媒粉塵用フィルタ保温材内に設置した可燃性ガス検知器の指示値が急激に上昇した(367ppm)。運転マニュアル上ではまだ対策を要しない値であるが、指示値の更なる上昇が予想さ

れたためボンベからの水素ガス供給を停止し、点検を行った。窒素ガスのみを通気している状態（触媒粉塵用フィルタ入口温度 30°C、圧力 3.64 MPa）で、触媒粉塵用フィルタ本体フランジの気密性を確認する発泡試験を実施したところ、フランジから微少な漏えいを確認した。そこで、試験装置を停止し原因調査を行った。

フランジの開放点検後、ガスケットを交換し、6月21日に本体フランジ部の常温、窒素ガス圧力 4MPa での気密試験を実施し、漏えいが無いことを確認した。次に、熱サイクルの漏えいへの影響確認のため、6月22日から6月29日にかけて試験装置を運転し、窒素ガスと蒸気を通気して運転中の高温状態を作り、触媒粉塵用フィルタを昇温、ガスケットの脱ガスを促進させた後、蒸気通気を止めて触媒粉塵用フィルタを降温し、窒素ガス 3.5MPa の状態で再び窒素ガス圧力 3.54MPa での気密試験を実施した。その結果、再度漏えいを確認した。

このため、漏えい原因としてフランジの不良、ガスケットの不良、施工方法の不良の3つの側面から調査検討を行った。その結果、漏えい原因としては施工方法の不良であることが分かった。具体的にはガスケットの面圧不足、ガスケット塗布材の影響、ガスケットとボルトとの接触が挙げられる。対策として、①適切なガスケット面圧確保のためボルト、ナットに潤滑剤を塗布すること、②ガスケットに塗布剤を塗らないこと、③ボルトの形状を変更し、ガスケットとボルトとの接触を防ぐこと、の3つを行うこととし、8月末までに対策を完了した。

対策後、平成16年9月に常温の窒素ガスにて当該機器の気密試験を行い、漏えいが無い事を確認した。その後、第7回試験運転時に触媒粉塵用フィルタ保温材に設置した可燃性ガス検知器の指示値を経過観察したが、有意な値に上昇することは無く、対策は適切であったことが確認できた。

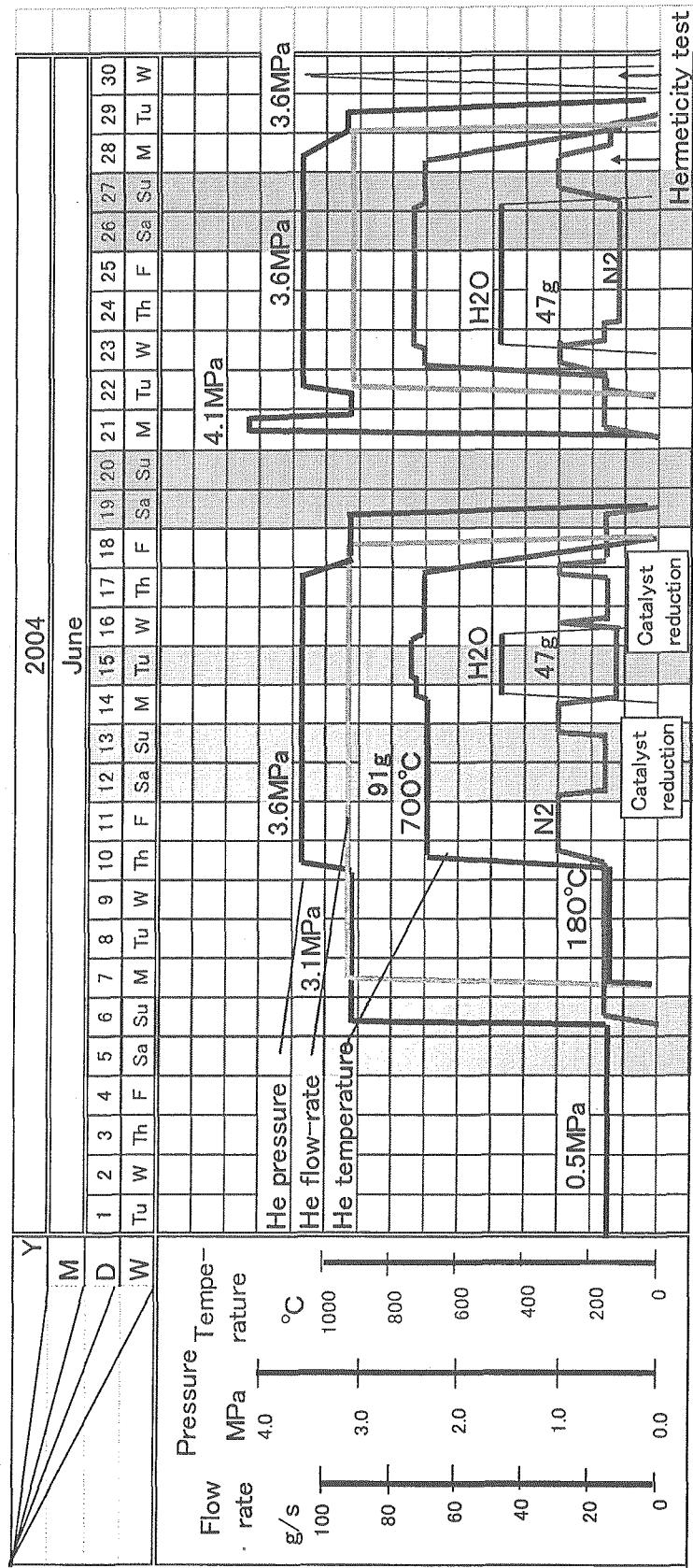


Fig. 4.1.1 Time record of the 6th experimental test operation.

#### 4. 2 第7回試験運転

##### 4. 2. 1 試験と運転の工程

平成 16 年 10 月 19 日から 11 月 21 日の期間に化学反応停止試験を目的として第7回試験運転を実施した。Fig.4.2.1 に試験運転工程の実績を示す。

第7回試験運転は、平成 16 年 10 月 13 日から 10 月 16 日まで起動準備を実施し、10 月 18 日に系統昇圧、10 月 19 日にヘリウムガス加熱器を起動し運転に入った。水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度 180°Cまで昇温を開始、10 月 25 日に水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度 700°C、圧力 3.6MPa まで昇温・昇温した。その後、状態を維持して水蒸気供給設備の蒸気クリーンアップを実施していたところ 10 月 28 日に蒸気発生器側面のフランジから蒸気の漏えいが認められたため、点検のため試験装置を降温降圧し運転を停止した。蒸気発生器側面のフランジの増し締めを実施後、蒸気発生器の気密・水圧試験を 11 月 4 日に実施し漏えいが無いことを確認した。11 月 5 日に再度ヘリウムガス加熱器を起動して運転に入り昇圧・昇温を開始し、11 月 7 日に水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度 700°C、圧力 3.5MPa に到達した。その後水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度 720°Cにて、11 月 8 日から 11 月 9 日にかけて触媒粉塵用フィルタの脱ガス運転を実施、水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度 700°Cにて水素還元を実施した。11 月 12 日から水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度 880°Cにて水素製造を開始し、11 月 15 日から化学反応停止試験を実施し、水素製造を停止した後、水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度並びに放熱器風量を変えながら 19 日まで試験を実施し、試験の目的は計画通りに達成した。11 月 19 日に降温降圧を開始し、11 月 21 日に試験装置を停止して試験運転を終了した。以下に試験運転の詳細を記す。

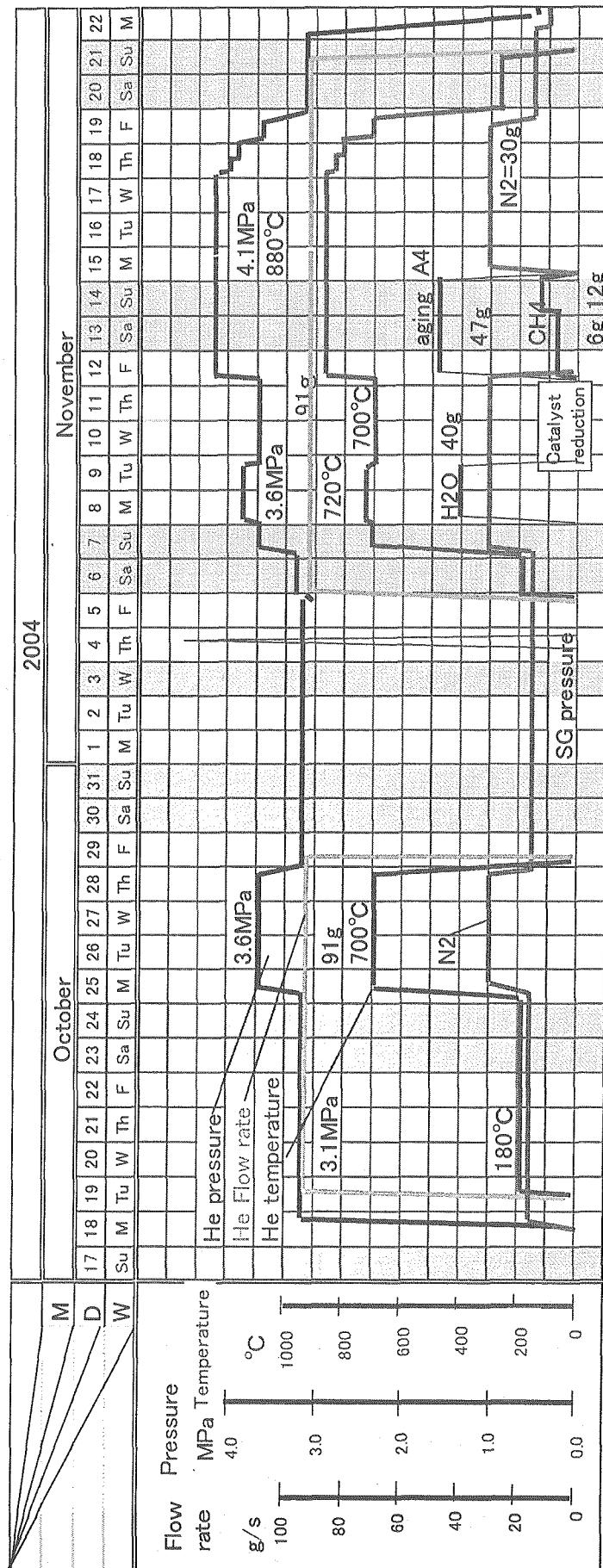


Fig. 4.2.1 Time record of the 7th experimental test operation.

#### 4. 2. 2 化学反応停止試験

##### (1) 目的

本試験の目的は、水素製造設備において化学反応停止という化学反応器の完全負荷喪失が生じた場合においても、水素製造設備での2次ヘリウムガス除熱量を維持するためのヘリウムガス冷却システムを確立することである。水蒸気改質法による HTTR 水素製造システムでは、水蒸気改質器で化学反応が停止し除熱能力を喪失した場合においても、原子炉をスクラムさせずに通常停止に導くことを目標としている。そこで、化学反応停止時における2次ヘリウムガスの冷却を水蒸気改質器の下流に設置した蒸気発生器内の保有水を利用して行い、中間熱交換器 2次ヘリウムガス戻り側温度を許容値内に制御するために、蒸気発生器出口ヘリウムガス温度変動を±10°C以内に抑制することを目標としている。このためには、蒸気発生器内保有水温度を一定、すなわち、蒸気発生器内圧力を一定に制御することが重要である。また、化学反応停止時に除熱すべき 2次ヘリウムガスの熱量は通常運転時に対して 2倍以上となるため、蒸気発生器での蒸気生成量が 2倍以上となり、給水量も通常運転時の 2倍以上が必要となる。このため、本システムでは、化学反応停止等の異常時には、蒸気発生器で生成した蒸気を蒸気発生器上部に設置した放熱器で冷却し、凝縮水を蒸気発生器へと戻す閉サイクルを形成し、蒸気発生器への給水を不要としている。本試験では、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、動特性解析コードの検証に必要なデータを取得する<sup>(13)</sup>。今回は、第4回試験運転で実施した化学反応停止試験の実績（水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度 840°Cで実施）に基づき水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度を定格の 880°Cに設定して化学反応停止を行い、蒸気発生器を用いたヘリウムガス温度変動緩和効果について、蒸気発生器出口における温度変動緩和目標値（±10°C以内）に対する成立性を確認した。また、解析コードの検証を行う上で必要な放熱器の冷却特性の把握を目的として、化学反応停止後、蒸気発生器-放熱器間で自然循環が成立している状態において放熱器の冷却特性に対する外気温の影響、並びに放熱器空気風量の影響を測定した。

##### (2) 試験条件及び試験方法

###### (a) 化学反応停止試験 (Run No. A4-1)

定常運転状態で水素製造中に原料ガス供給を遮断して改質反応を停止させ、蒸気発生器と放熱器によるヘリウムガス冷却を開始する。試験装置は試験開始前に以下の運転条件で 12 時間以上水素製造するものとする。

###### ヘリウムガス

水蒸気改質器入口温度 : 880°C (定格条件)

水蒸気改質器入口圧力 : 4.1 MPa (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 : 4.3 MPa (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)

計測点の位置関係を示す資料として、蒸気発生器周りの系統図を Fig.4.2.2-1、蒸気発生器及び放熱器の構造図を Fig.4.2.2-2 及び Fig.4.2.2-3 に示す。

試験における操作記録を Table 4.2.2-1 に示す。最初に水蒸気改質器への原料ガスの供給を停止した。次に、水蒸気改質器内反応管の差圧を維持するため、窒素ガスを水蒸気改質器へ供給した。さらに水蒸気改質器への蒸気の供給停止、蒸気発生器への給水停止を行った後、発生する蒸気の全量を放熱器へと導入し、蒸気発生器—放熱器の間を蒸気—凝縮水が自然循環する閉サイクルを形成した。本試験では蒸気発生器出口ヘリウムガス温度変動ができるだけ小さくすることを目標とし、放熱器入口遮断弁 (AV18S) の開操作前に蒸気発生器圧力調整弁の開度を全開とし、放熱器側の圧力を上昇させることにより、蒸気発生器と放熱器ラインが均圧する際の圧力変動を緩和させた。また、系統切り替え後は蒸気発生器液相温度、つまり蒸気発生器圧力を一定に維持するように手動で放熱器のファン回転数を増減させた。

#### (b) 空気風量の放熱器冷却特性に対する影響の把握

放熱器の冷却特性を支配する放熱器伝熱管外の空気側熱伝達特性を明らかにするために、蒸気発生器と放熱器で蒸気／凝縮水が自然循環している状態において、放熱器の空気風量を変化させ、空気風量と温度、圧力および蒸気流量の関係に関する定常データを取得した。放熱器空気風量の条件は、蒸気発生器圧力を約 1.6MPa～4.6MPa の範囲で静定させることとし、Table 4.2.2-2 に示す 4 ケースとした。

### (3) 試験結果

#### (a) 化学反応停止試験 (Run No. A4-1)

##### 1) 反応管差圧

Fig.4.2.2-4 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。水素製造量は原料ガスの停止に伴い、試験開始前の約 120m<sup>3</sup>/h から 0 へと減少した。また水蒸気改質器入口ヘリウムガス圧力は、ほぼ一定値 4.1MPa であった。一方、反応管差圧は、各ガスの供給開始・供給停止の操作毎に変動を示し、原料ガスの供給停止操作では定常値 0.04MPa から 0.02MPa まで減少し、変動幅は-0.02MPa であった。窒素ガスの供給による差圧の変動幅は+0.03MPa であった。蒸気の停止操作では最初に-0.19MPa まで減少した後、0.09MPa まで増加し、その後制御目標値近傍に静定した。変動幅は-0.19MPa ならびに 0.05MPa であり、目標値 (-0.32～+0.4MPa) の範囲内であった。

##### 2) ヘリウムガス温度変動の緩和効果

Fig.4.2.2-5 に試験結果を示す。原料ガスの停止に伴い、水蒸気改質器内の化学反応が停止するため、水蒸気改質器出口ヘリウムガス温度は試験開始前の 632°C から約 1.2 時間後に最大値 837°C まで上昇し、その後、緩やかに変化し 833°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 205°C、静定时で 201°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 548°C から約 1.4 時間後に最大値 796°C まで上昇し、その後、緩やかに変化し 793°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 248°C、静定時で 245°C であった。これに対して、蒸気発生器出口ヘリウムガス温度は蒸気発生器液相温度、つまり蒸気発生器圧力と同様なプロファイルを示した。蒸気発生器圧力は原料ガス停止後、蒸気発生器入口ヘリウムガス温度が上昇するため蒸気発生量が増加し、放熱器入口遮断弁の開操作前までに徐々に圧力が上昇し、試験前 4.61MPa に対して 4.75MPa まで上昇した。この時、蒸気発生器液相温度が試験前の 258.7°C から 260.2°C まで上昇し、それに伴って蒸気発生器出口ヘリウムガス温度は試験開始前の 262.5°C から 264.5°C と 2.0°C 上昇した。圧力が目標の 4.75MPa に到達したのを契機に放熱器入口遮断弁の開操作、その後 30 秒後に放熱器出口遮断弁の開操作を実施した。この結果、圧力は最低値 4.26MPa まで下降し、その後上昇に転じた。この時、蒸気発生器液相温度は 256.2°C まで下降し、それに伴って蒸気発生器出口ヘリウムガス温度は 261.3°C まで下降し、試験前と比較すると、-1.2°C 下降した。放熱器入口蒸気流量は放熱器入口遮断弁の開操作時に急激に増加し、流量計の測定最大値 200g/s を示したが、その後、約 140g/s に静定した。蒸気発生器水位は、放熱器入口遮断弁操作により急激に減少し、試験前の制御値 0.755m から 0.716m まで減少した。その後、放熱器出口遮断弁の開操作により、放熱器で冷却され凝縮した水が蒸気発生器内へ流入するため、蒸気発生器水位は 0.733m まで上昇し、ほぼ安定した。蒸気発生器液相温度は放熱器出口遮断弁の開操作時に、放熱器からの凝縮水入口位置近傍に設置された計測点(TE18S1)の温度が 184.8°C まで急激に下降したが、その後、他の計測点とほぼ同温度まで上昇した。蒸気／凝縮水の自然循環開始後、放熱器ファン回転数により空気風量を調整し、蒸気発生器内圧力を約 4.3MPa とした結果、蒸気発生器出口ヘリウムガス温度を試験開始前と同温度に維持することができた。これより、蒸気発生器出口ヘリウムガス温度の変動は -1.2 ~ +2.0°C であり、目標値 (±10°C 以内) の範囲内であった。

#### (b) 放熱器空気風量の影響確認 (Run No. A4-2~5)

蒸気発生器と放熱器で蒸気／凝縮水が自然循環を行っている状態において、蒸気発生器圧力は、①蒸気発生器におけるヘリウムガスと保有水との交換熱量と②放熱器における蒸気と冷却空気との交換熱量の大小関係により増減し、①と②が等しくなる状態で静定する。例えば、蒸気発生器における交換熱量が放熱器における交換熱量よりも小さい場合は、蒸気発生器内圧力が減少する。しかし、蒸気発生器内圧力の減少に伴い、水の飽和温度が減少するため、ヘリウムガスと保有水の温度差が増加し蒸気発生器における交換熱量は増加する。一方、蒸気発生器内圧力の減少に伴い、蒸気と冷却空気の温度差が減少するため、放熱器における交換熱量は減少する。この結果、蒸気発生器内圧力は、蒸気発生器における交換熱量と放熱器における交換熱量がバランスする圧力で静定する。Fig.4.2.2-6 に放熱器空気風量を変化させた時の試験結果として、蒸気発生器圧力、放熱器入口圧力、蒸気発生器液相温度、放熱器出口蒸気/凝縮水温度、蒸気発生器出口ヘリウムガス温度、蒸気発生器熱交換量を示す。空気風量が増加すると放熱器での熱交換量が増加する。これに伴い、放熱器入口圧力及び放熱器出口蒸気/凝縮水温度が低下すると共に、蒸気発生器圧力及び蒸気発生器液相温度も低下した。そして、蒸気発生器液相温度の低下により、蒸気発生器出口ヘリウムガス温度が下降し、蒸気発生器での熱交換量が増加した。

#### (4) まとめ

今回の試験では、水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度 880°Cの定格条件で原料ガスの供給停止を行い、放熱器を使用した系統への切り替えを実施した。その結果、ヘリウムガス冷却システムの成立性について、蒸気発生器出口における温度変動抑制目標値（±10°C以内）に対して、本試験結果が-1.2～2.0°Cであることを確認し、定格条件において化学反応停止、すなわち化学反応器の完全負荷喪失が生じた場合にも原子炉の運転に影響を与えない見通しを得た。さらに、放熱器入口空気温度すなわち外気温の影響、及び放熱器空気風量の影響についてのデータを取得することができ、これらのデータを用いて解析コードの検証を行う。

本試験により、系統切り替え時における蒸気発生器内圧力変動及び蒸気発生器出口ヘリウムガス温度等のシステムの挙動を明らかにすると共に、解析コード検証に有用なデータを取得することができた。

Table 4.2.2-1 Test procedure of run no. A4-1

Run No. : A4-1

Date : 2004/11/15

Time	Elapsed time	Operation
10:00:08	0	Suspension of methane feed
10:00:18	18sec	Start of nitrogen supply to steam reformer
10:10:18	10min 10sec	Close stop valve at steam super-heater inlet (AV10S)
10:10:29	10min 21sec	Close stop valve at steam trap inlet (AV80S)
10:10:48	10min 40sec	Close stop valve for water feed at steam generator inlet (AV8S)
10:19:14	19min 6sec	Open stop valve at radiator inlet (AV18S)
10:19:44	19min 36sec	Open stop valve at radiator outlet (AV19S)

Table 4.2.2-2 Test conditions of run no.A4-2 to A4-5

Date	Run No.	Steam reformer inlet helium gas temperature [°C]	Flow rate of cooling air at radiator inlet [kg/s]
2005/11/16	A4-2	880	1.511
2005/11/17	A4-3		1.806
2005/11/18	A4-4		2.354
2005/11/19	A4-5		3.027

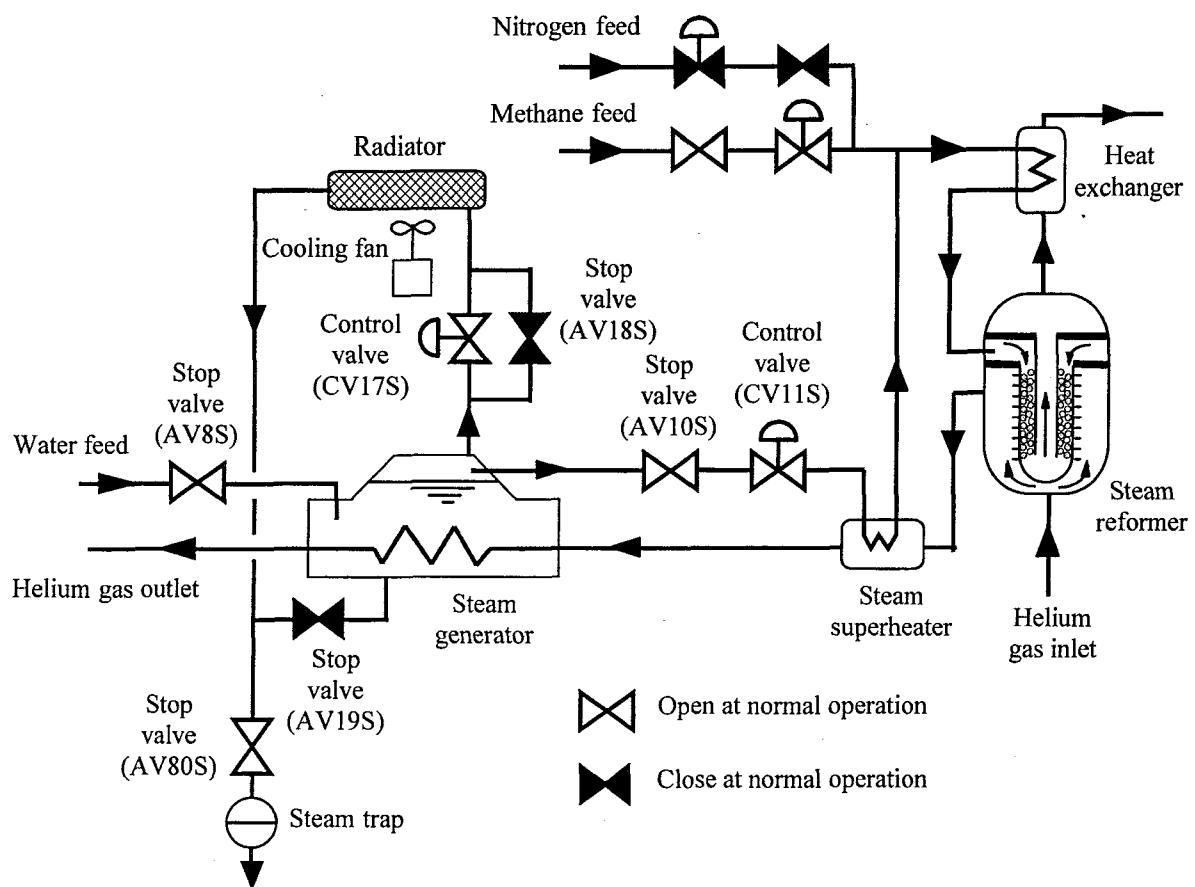


Fig.4.2.2-1 Schematic flow diagram of a helium-gas cooling system consist of steam generator, radiator, steam superheater and steam reformer with valves

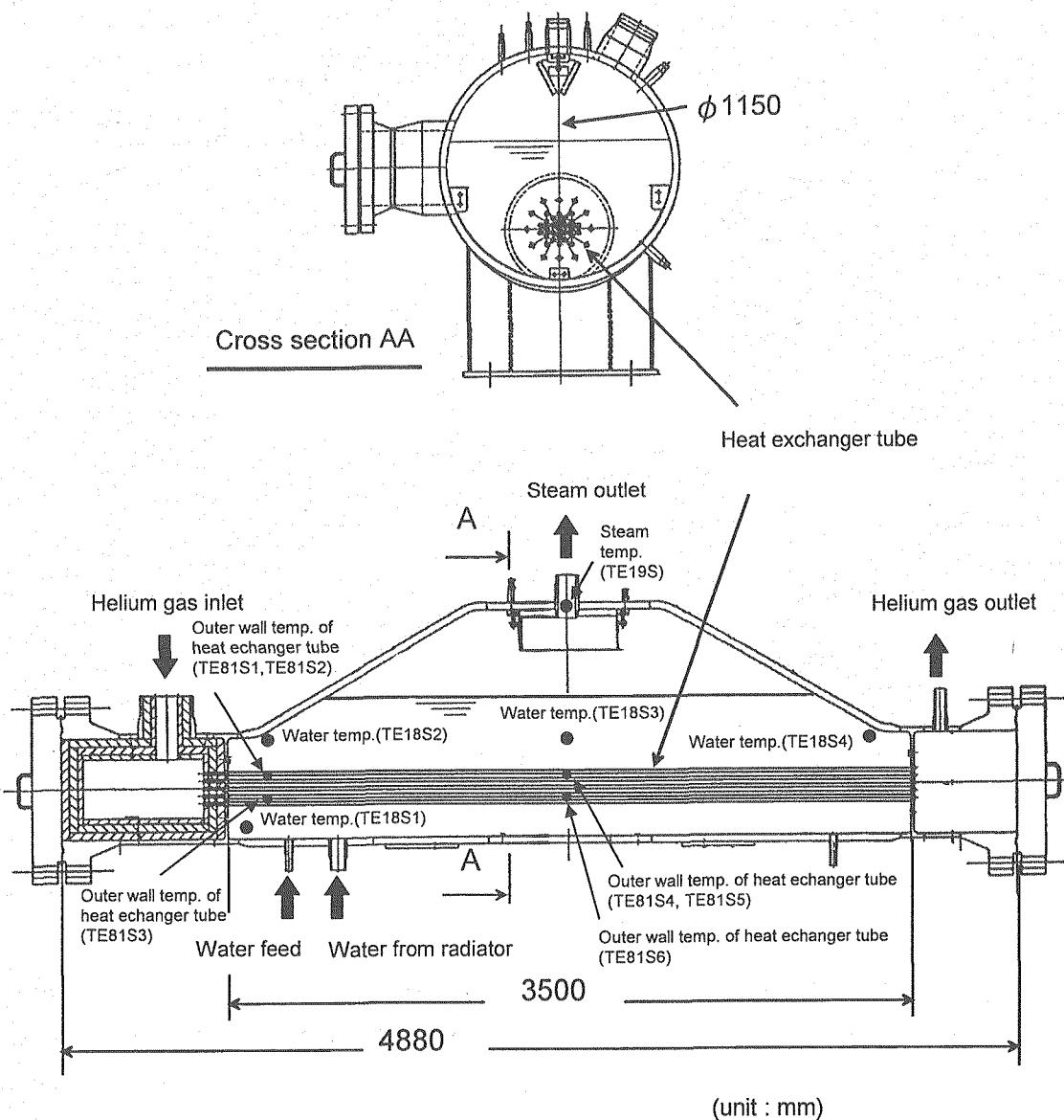


Fig.4.2.2-2 Schematic view of steam generator of mock-up test facility

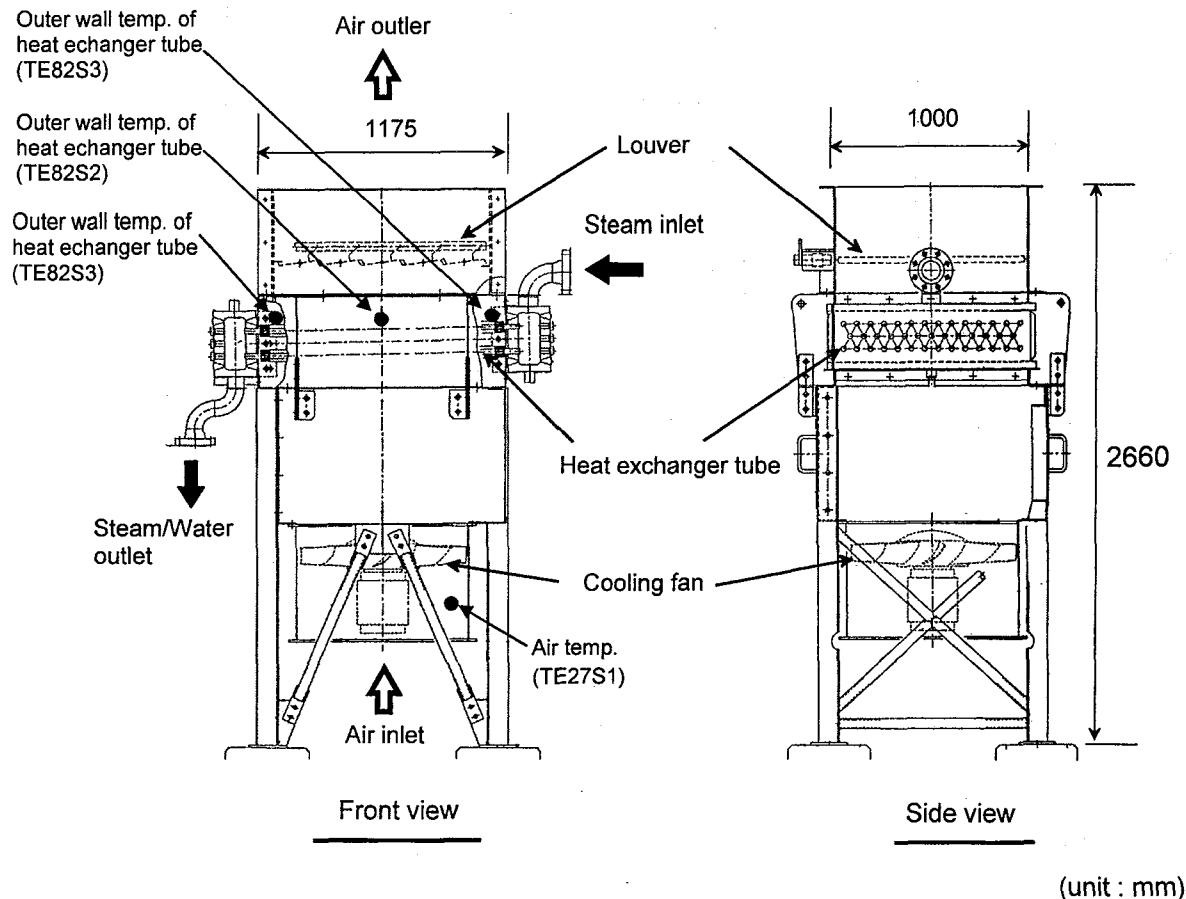


Fig4.2.2-3 Schematic view of radiator of mock-up test facility

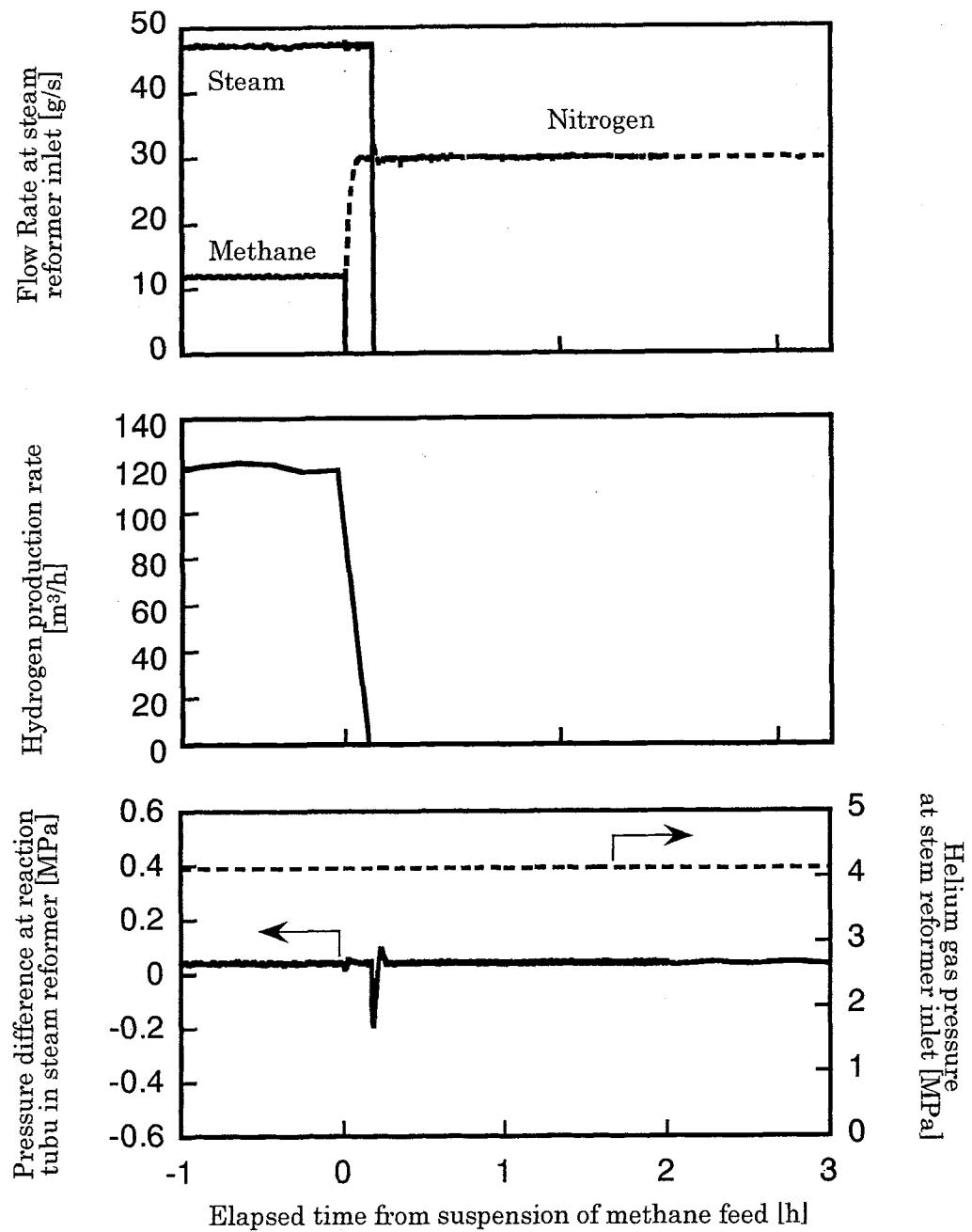


Fig.4.2.2-4 Result of chemical reaction shut-down test(1)

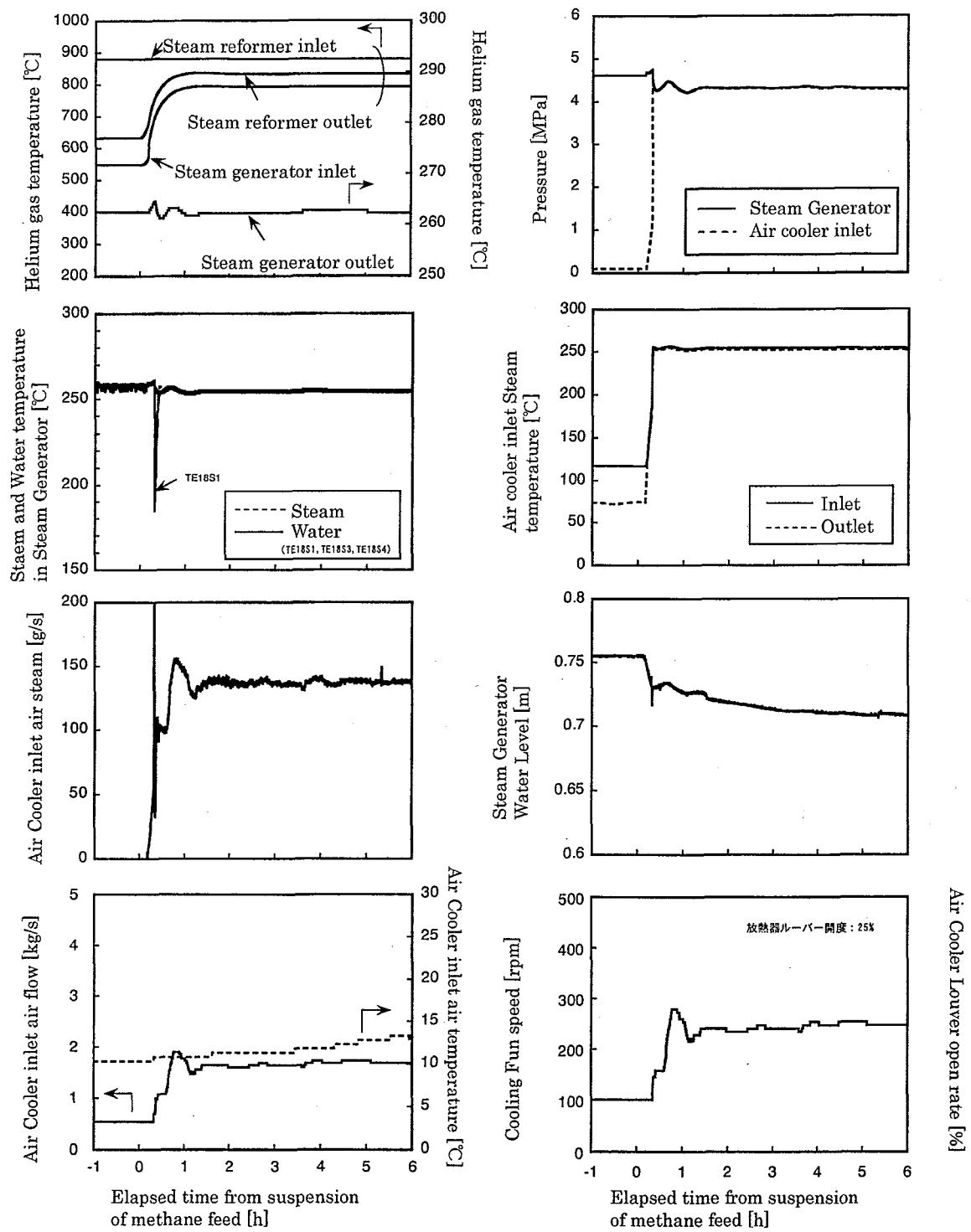


Fig.4.2.2-5 Result of chemical reaction shut-down test (2)

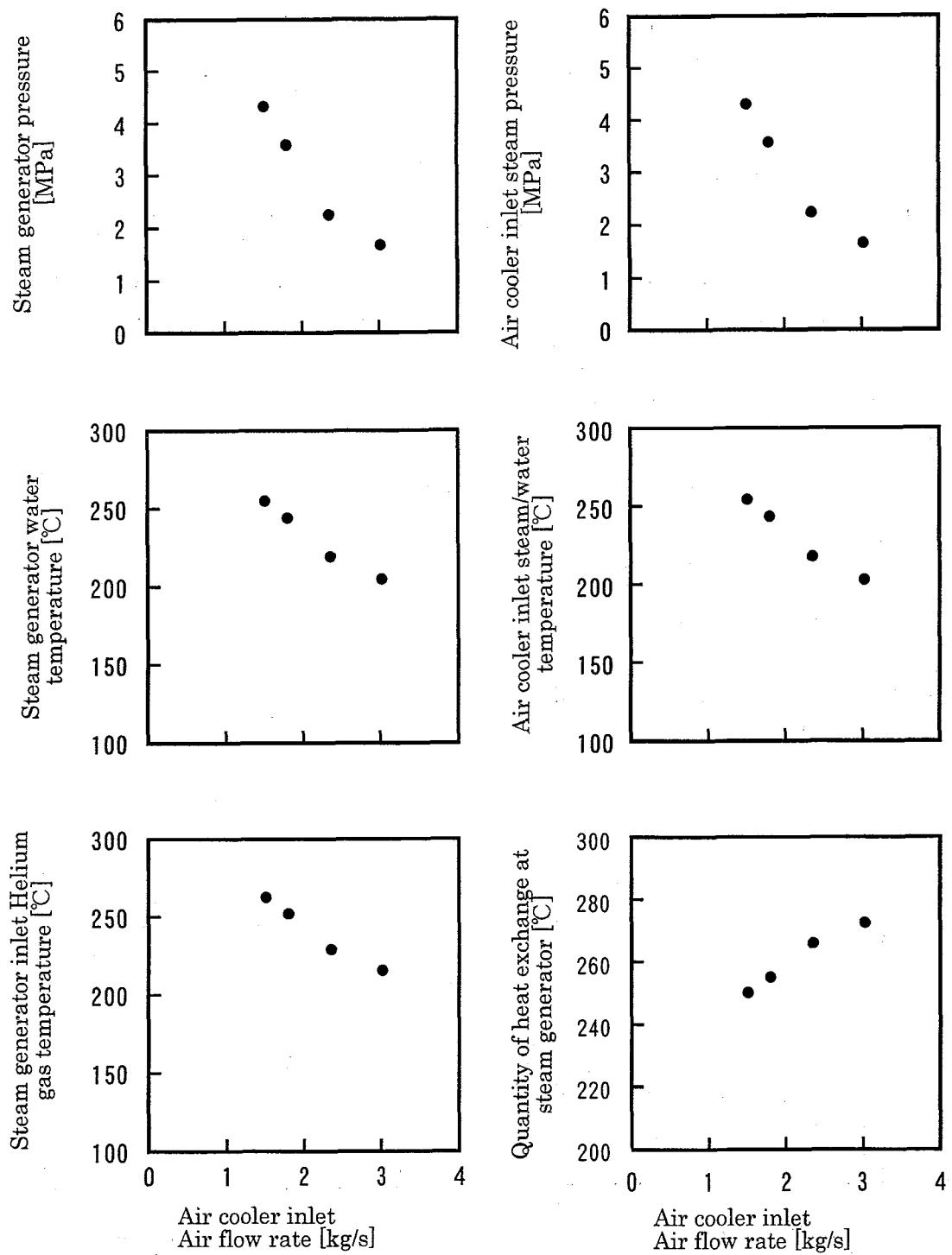


Fig.4.2.2-6 Result of chemical reaction shut-down test (3)

#### 4. 2. 3 ヘリウムガス精製設備の不具合

ヘリウムガス精製設備はヘリウムガス循環設備のヘリウムガス中の不純物を取り除き純化する設備である。運転開始前日の平成 16 年 10 月 18 日のヘリウムガス昇圧中に、精製設備の A 系、B 系の 2 系統のうち、B 系を起動させ精製運転の準備を完了した。片側の A 系は自動的に再生・待機に入るが、この日、A 系のチャコールベット(CB551)用の液体窒素槽(CB553)の LN<sub>2</sub> 液位を調整するための制御弁 LA5501 にシートリーク生じていることが分かった。液体窒素槽の液位調整は不活性ガス供給設備の LN<sub>2</sub> タンクから真空断熱配管を経由して送られてくる液体窒素を LA5501 により遮断または充填させることにより行うものであるから、シートリークを生じると満液の場合はオーバーフローを引き起こす可能性を生じた。しかし、A 系が起動・精製モードにある場合は液体窒素の消費があるので液位は減少し、シートリークに対して制御弁 LA5501 の操作で液位制御ができる。そこで、A,B 両系の運転モードを切替え、A 系を起動し B 系を待機状態とした。こうして平成 16 年 10 月 19 日から試験装置は運転に入り、ヘリウムガス精製設備は純化を開始した。

平成 16 年 11 月 15 日化学反応停止試験を開始してからヘリウムガス中の不純物濃度が上昇し水分濃度も上昇したため、精製設備の純化能力が減少したと判断し、現在使用中の A 系を待機中の B 系に切り替えた。A 系は再生運転に入った。11 月 16 日に A 系は再生を完了した。そこで、液体窒素槽(CB553)の LN<sub>2</sub> 液位を調整するため、現在使用中の B 系から待機中の A 系に切り替えた。B 系は再生運転に入った。11 月 18 日には水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度 880°C から 840°C まで降温し、その後からヘリウムガス中の水分濃度は上昇を見せたが時間とともに下降した。さらに、11 月 19 日に水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度 700°C までの降温途中に、ヘリウムガス中の不純物濃度が上昇し、水分は約 60ppm に達した。B 系は再生が完了しておらず切り替えができなかった。点検の結果 B 系の液体窒素槽(CB554)のヒータ(H559)の断線が見つかった。この故障のため B 系は使用不能となった。その後、水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度 250°C までの降温を実施し、不純物の放出が減少したことと A 系による精製が進んだことにより水分濃度は数 ppm 以下にまで復帰し、また水素並びに二酸化炭素も減少した。しかし、11 月 21 日になって行われた LN<sub>2</sub> タンクの充填の際に、A 系の液体窒素槽(CB553)の LN<sub>2</sub> 液位を調整しようとしたところ、A 系の調整弁 LA5501 に故障を生じた。

## 5. 運転記録

### 5. 1 第6回試験運転

#### 5. 1. 1 運転履歴

第6回試験運転は平成16年6月7日から6月29日までの22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28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、6月6日にヘリウムガス供給設備を3.1MPaまで昇圧し、6月7日にヘリウムガス加熱器を起動して運転に入った。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で、水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度180°Cまで昇温し、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入った。次に、6月10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状態に入った。この状態で6月12日から13日にかけて1回目の水蒸気改質器触媒の水素還元を実施した。次に、触媒粉塵用フィルタのフランジ部や保温材は温度を上昇させると可燃性ガス検知器で感知されるガスを放出于するため、運転開始後昇温のたびにその指示値の変遷を監視してきたが、水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度700°Cで4日経過しても指示値は十分に下がらないので、触媒粉塵用フィルタに蒸気を通気して脱ガスを促進させる運転を6月14日から2日間実施した。

その後6月16日から2回目の水素還元を実施し、6月17日に濃度30%の水素ガスを通気したところで、触媒粉塵用フィルタ保温材内の可燃性ガス検知器指示値が急上昇したため水素通気を中止した。窒素ガスにより触媒粉塵用フィルタフランジ部の発泡試験を行ったところ漏えいが確認された。そのため、試験運転を降温し運転を停止し、原因調査を開始した。6月21日に触媒粉塵用フィルタのガスケットを交換して、窒素ガス4.1MPaにて発泡試験を実施し漏えいがないことを確認した。次に触媒粉塵用フィルタフランジ部の気密性が熱サイクルにより変化するか否かを確認するため、6月22日に試験装置の運転を開始、ヘリウムガスの昇温を開始し6月23日から6月27日まで水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度720°Cで蒸気を通気し触媒粉塵用フィルタの温度を上げて脱ガス運転を行った。終了後、蒸気を停止し700°Cに降温し、触媒粉塵用フィルタの温度を常温まで下げ、翌28日に窒素ガス3.6MPaにて発泡試験を行ったところ再度漏えいが確認されたため、6月29日に試験装置を常温まで降温して運転を停止し、第6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6回試験運転における水分計の監視結果をFig.5.2(a)に示す。計測は平成16年6月6日 начиная с, またヘリウムガス精製設備による不純物除去も同日開始した。翌6月7日に試験装置は運転を開始し、水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度180°Cまでの昇温を実施した。水分計は計測開始直後の過渡を経て約5ppmまで減少し、試験装置の昇温とともに約7ppmに上昇したが精製が進むとともに減少した。6月17日に試験装置は停止操作に入り、ヘリウムガスの降温とともに水分計を停止した。6月22日に水分計の再起動を行い、試験装置は2回目の運転を開始した。水分は約3ppmから運転とともに減少し、6月28日に試験装置の停止操作に入り計測を終了した。

一方、ガスクロマトグラフィーの監視結果をFig.5.2(b)に示す。6月6日、6月22日、6月17日に計測開始、停止等の操作による過渡を生じているが、それ以外の期間では全体を通じていずれのガスも特に問題は無かった。

### 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<sup>(14)</sup>。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6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。第6回試験運転では水素製造は行われず、水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度の変化に伴い、それぞれ常温、温水、蒸気クリーンアップ状態を維持した。

(a)pHは、給水タンク(出口)については運転期間中、管理目標値8.0~9.3を満足していた。蒸気発生器(ドラム水)については温水クリーンアップや蒸気クリーンアップ切り替えの過渡時に一時的に下降した部分を除き、管理目標値8.0~9.3を満足できた。蒸気過熱器は参考データである。

(b)電気伝導度は、運転期間を通じて管理目標値内にあった。

(c)溶存酸素は、給水タンク出口において常温クリーンアップ開始時に管理目標値20~200 $\mu\text{g/l}$ の範囲を少し超えたが、その後管理目標値内に入り、運転期間を通して管理目標値内にあった。

(d)鉄分は、運転期間中を通して管理目標値よりも高い値で推移した。

(e)塩化物イオンは管理目標値を満足していた。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6回試験運転の水質管理では、鉄分が高めに推移した。しかし、第6回試験運転後に行ったボイラ及び第一種圧力容器の開放点検では、不純物の堆積や孔食の発生は無いことが確認されているので、水質管理は特に問題無かったといえる。

## 5. 1. 4 ガス・水・電気の消費統計

第6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6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。

### (2) ヘリウムガス

第6回試験運転では、ヘリウムガスカーボルは、低圧側5.82MPa、高圧側14.2MPa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5.55MPa、高圧側12.6MPa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175m<sup>3</sup>(Normal)であった。

### (3) 窒素ガス

第6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6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。純水の補給量は合計約 159t であった。

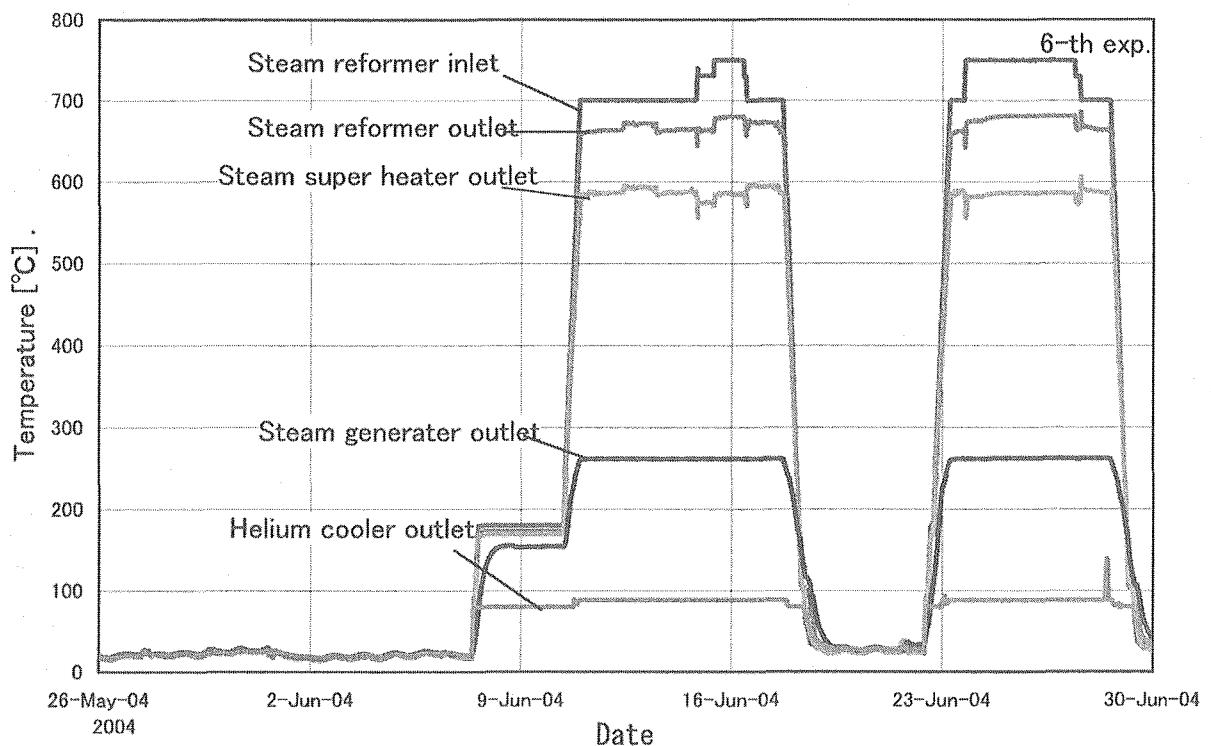
#### (5) 電気

第6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。

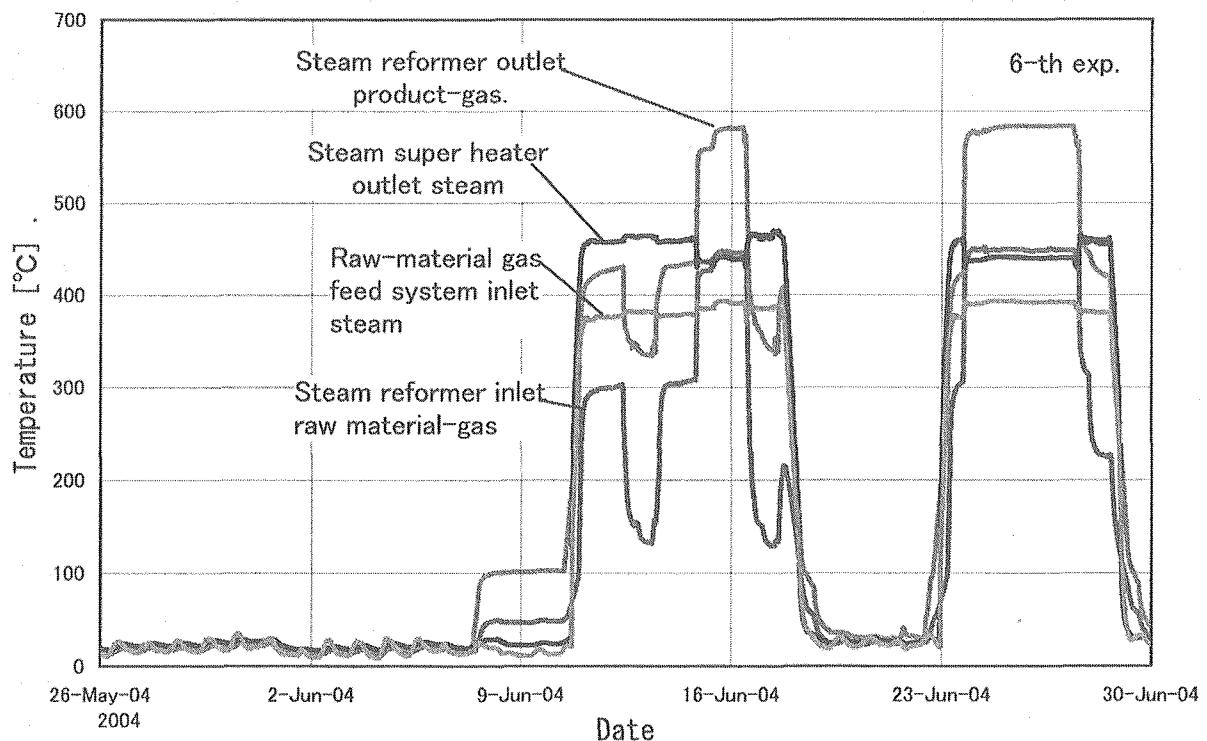
Table 5.1 Criteria of water examination

	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)	—	—	—	—
Processed water	Water tank	(6.0 ~ 7.5)	—	—	—	—	—	—
	Water refiner (outlet)		—	—	—	—	—	—
	Deaerator inlet tank (outlet)		—	—	—	—	—	—
	Deaerator (outlet)		—	(0.02 ~ 0.2)	—	—	—	—
Feed water	Feedwater tank (outlet)	8.0 ~ 9.3	≤ 0.2	No Detection	0.02 ~ 0.2	≤ 30	—	—
	Feedwater preheater (inlet)						—	—
	Feedwater preheater (outlet)						—	—
	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

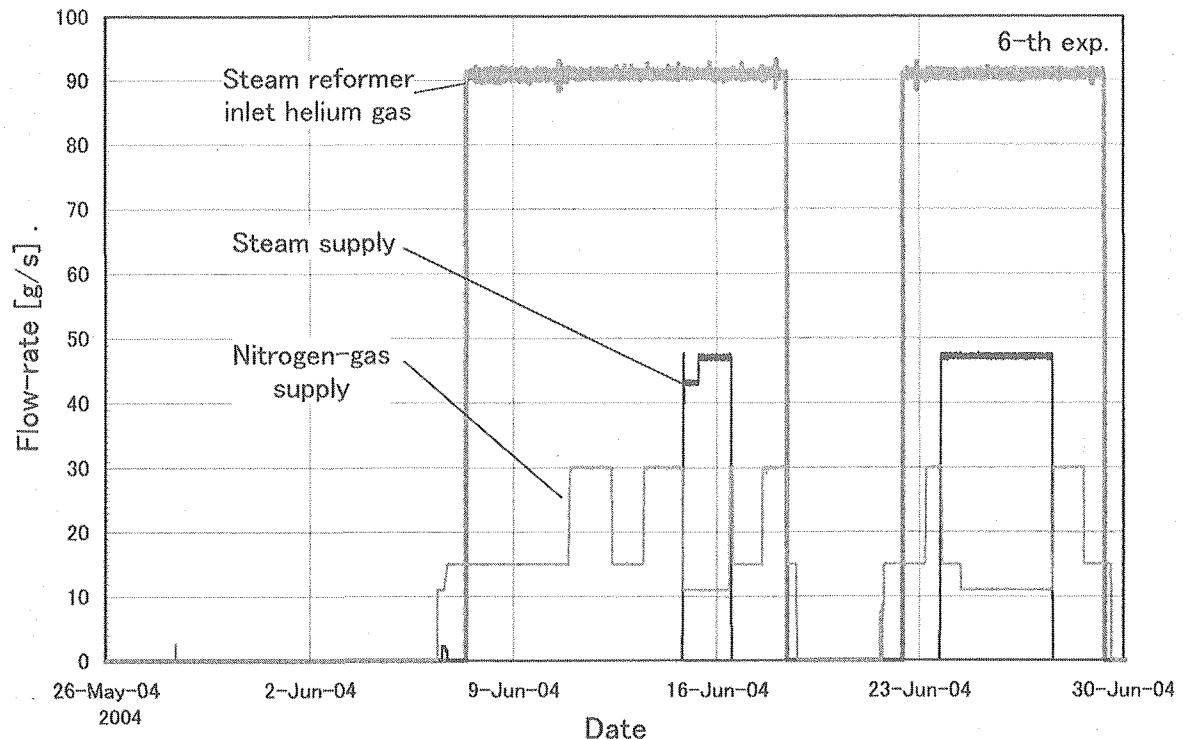


(a) Helium gas temperature

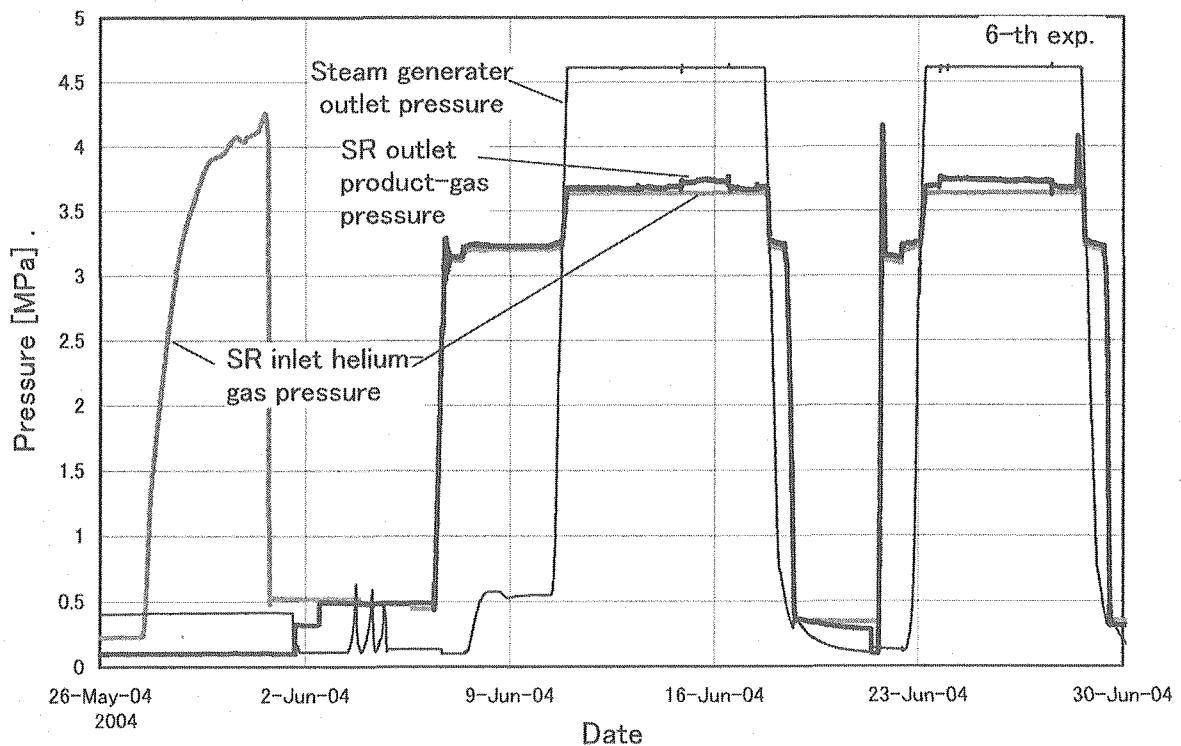


(b) Process gas temperature

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

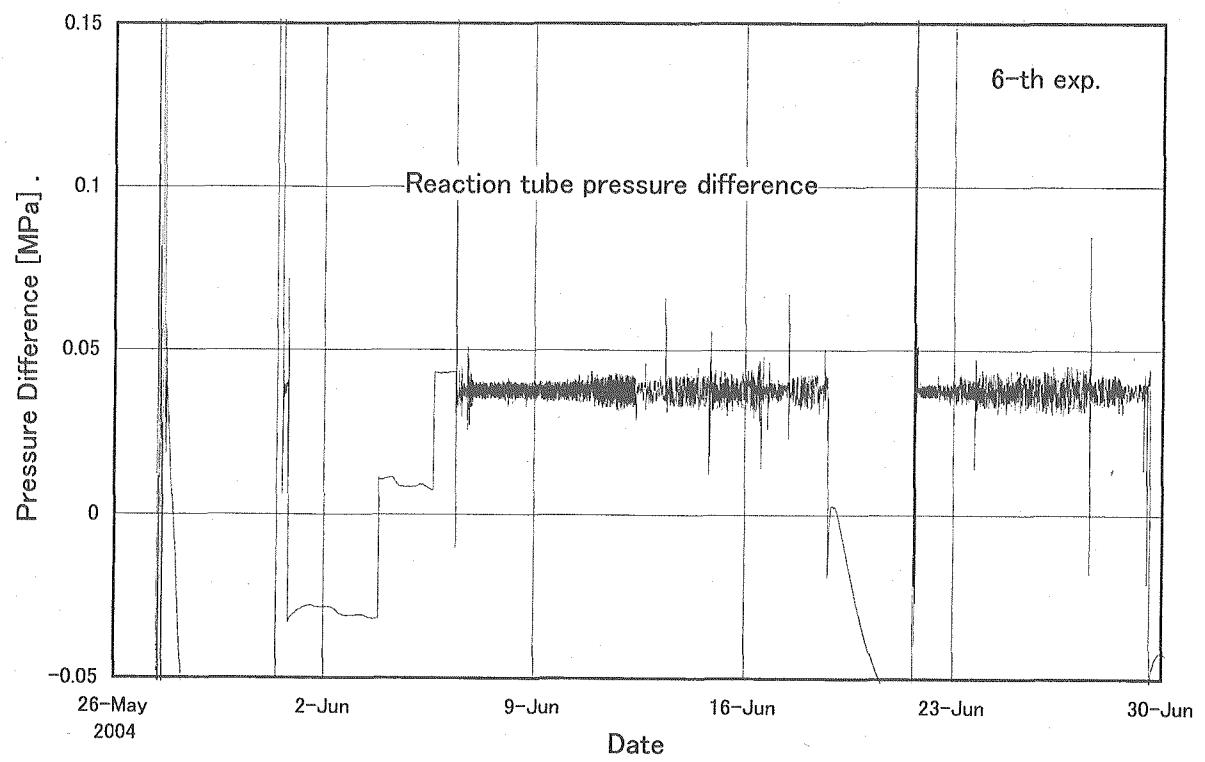


(c) Process-gas flow-rate



(d) Gas pressure

Fig.5.1 Operational records of the 6-th experimental operation (Continued)



(e) Pressure difference

Fig.5.1 Operational records of the 6-th experimental operation (Continued)

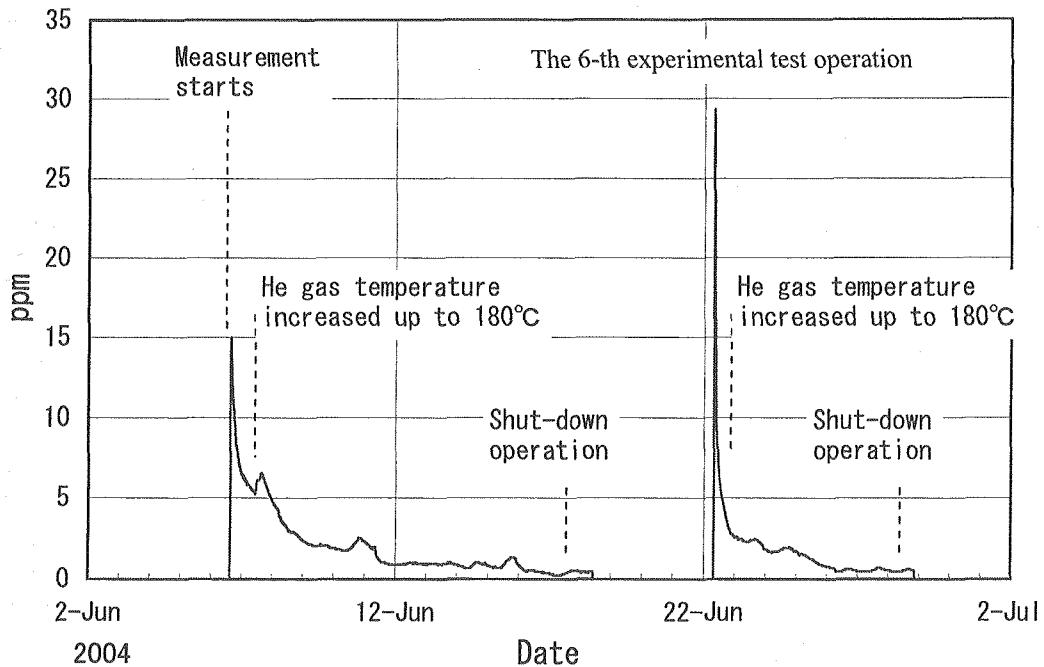


Fig. 5.2(a) Historical record of concentration of H<sub>2</sub>O including in helium gas

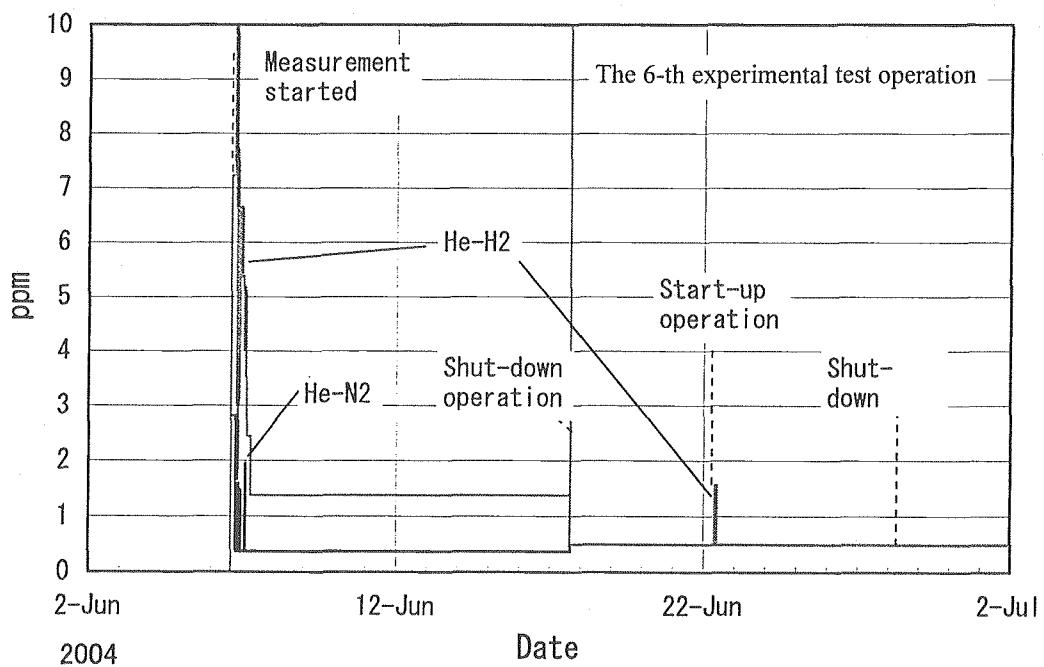
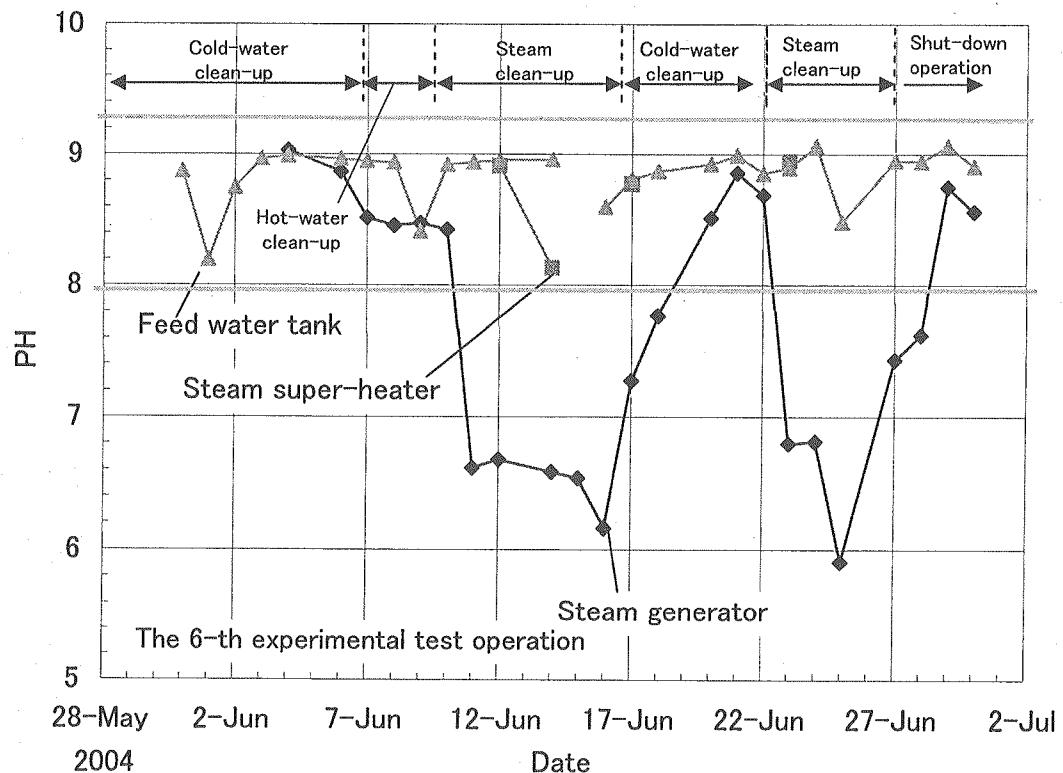
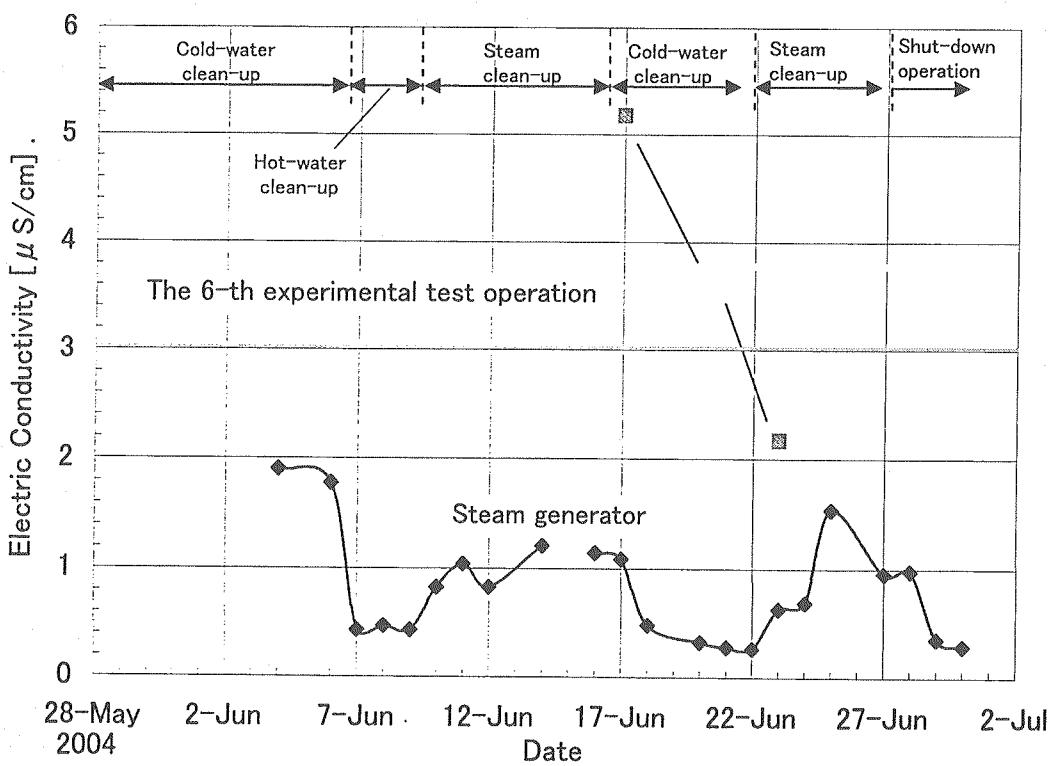


Fig. 5.2(b) Historical record of concentrations of N<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> including in helium gas

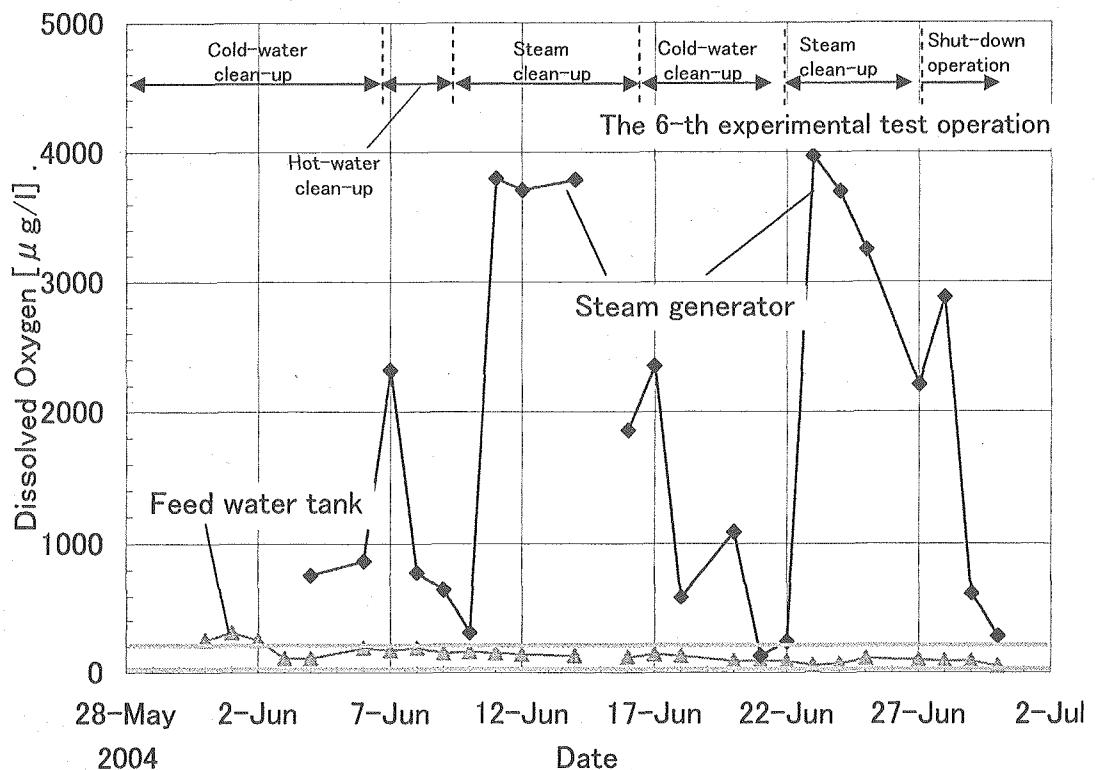


(a) PH

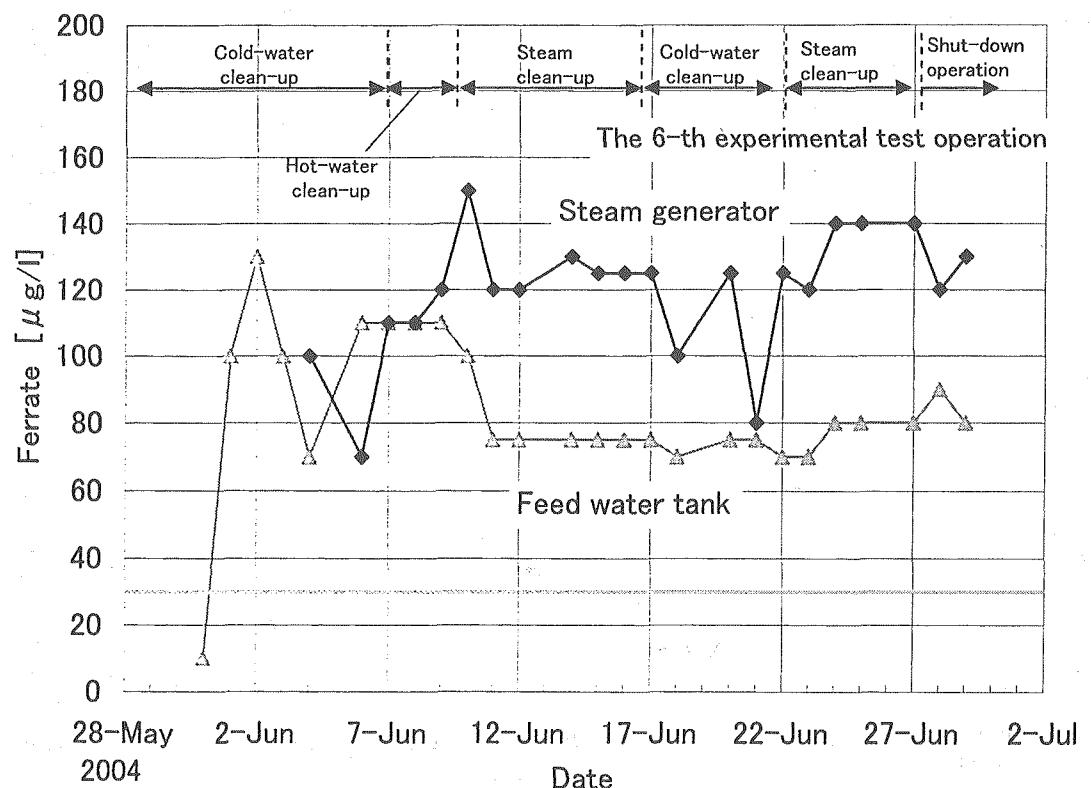


(b) Electric conductivity

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

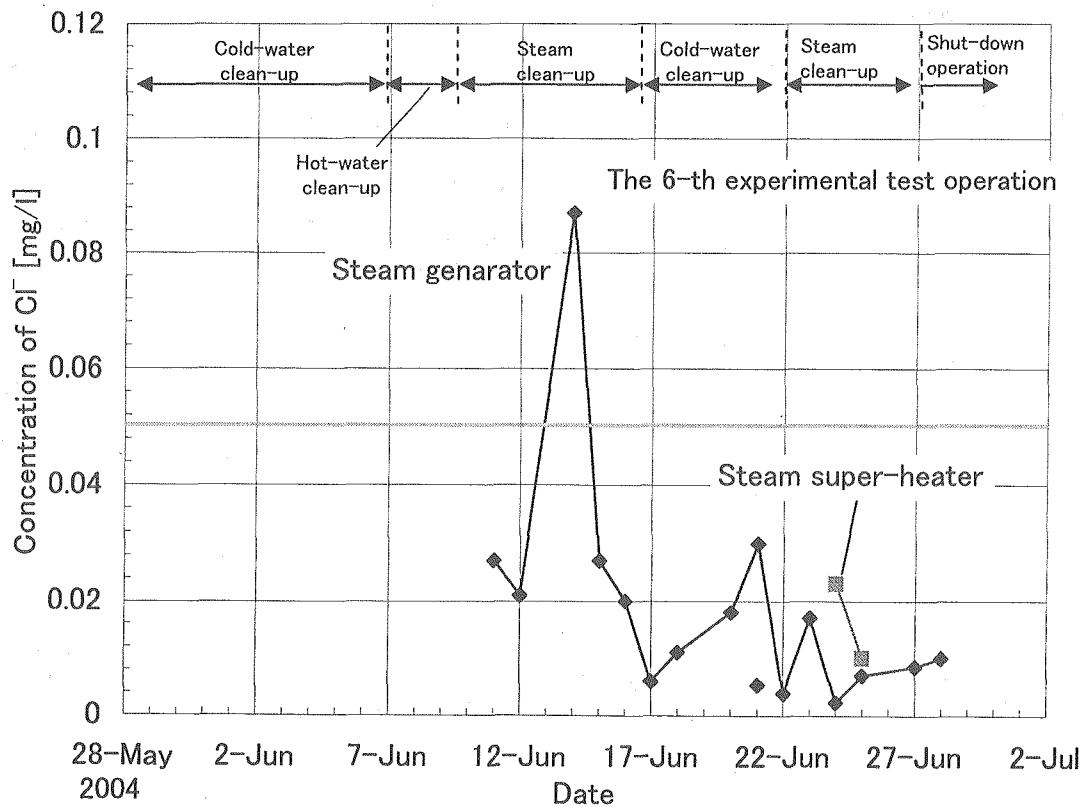


(c) Dissolved oxygen



(d) Ferrate

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



(e) Chroride

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

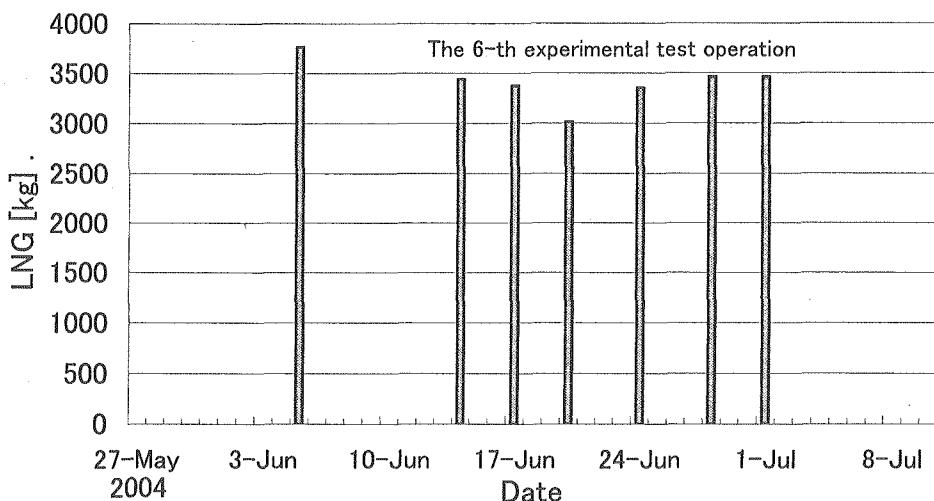


Fig.5.4(a) Mount of liquefied natural gas supply

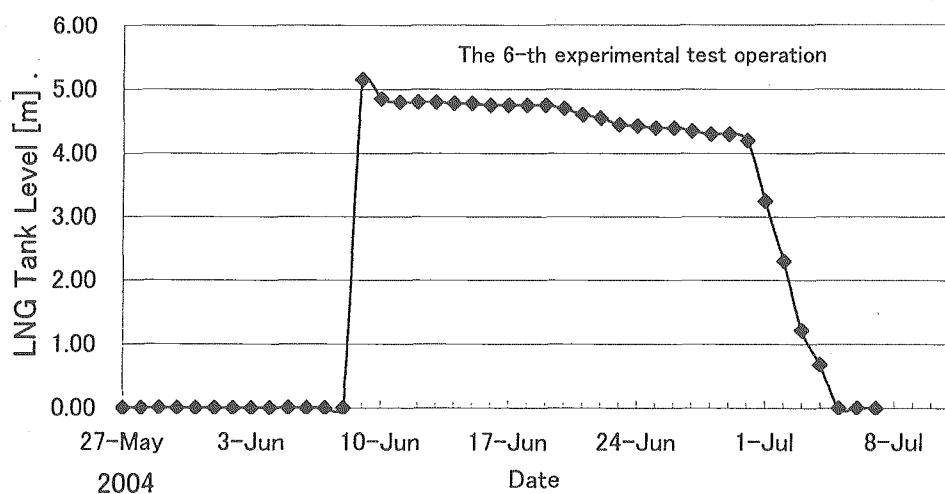


Fig.5.4(b) Record of liquefied natural gas tank level

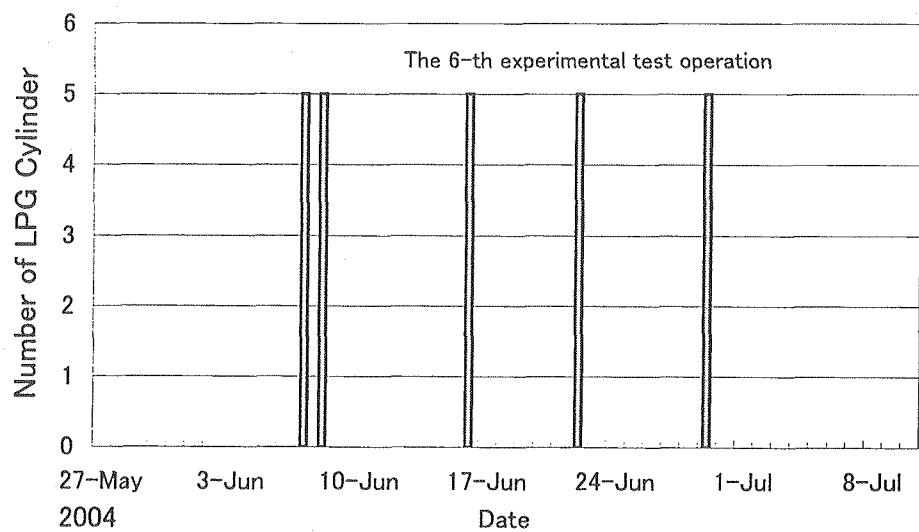


Fig.5.4(c) Mount of LPG supply (cylinder)

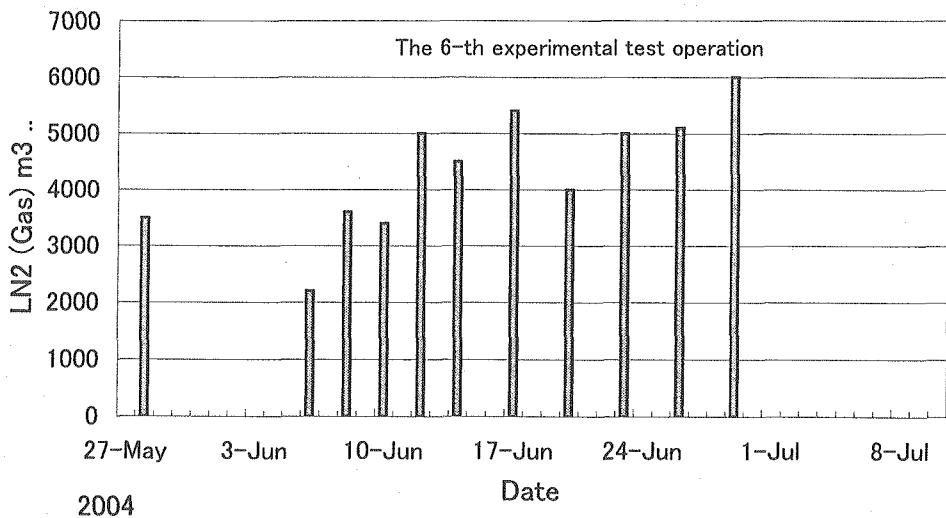


Fig.5.4(d) Mount of liquefied nitrogen gas supply

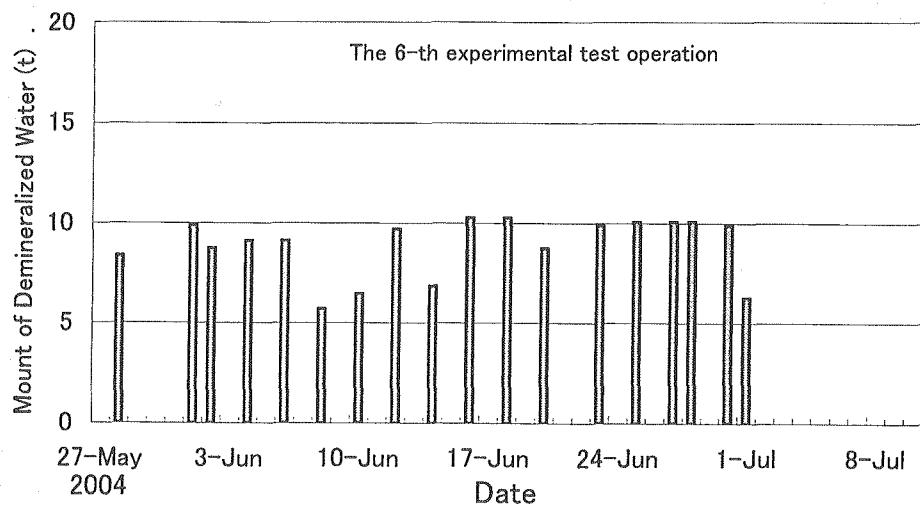


Fig.5.4(e) Mount of demineralized water supply

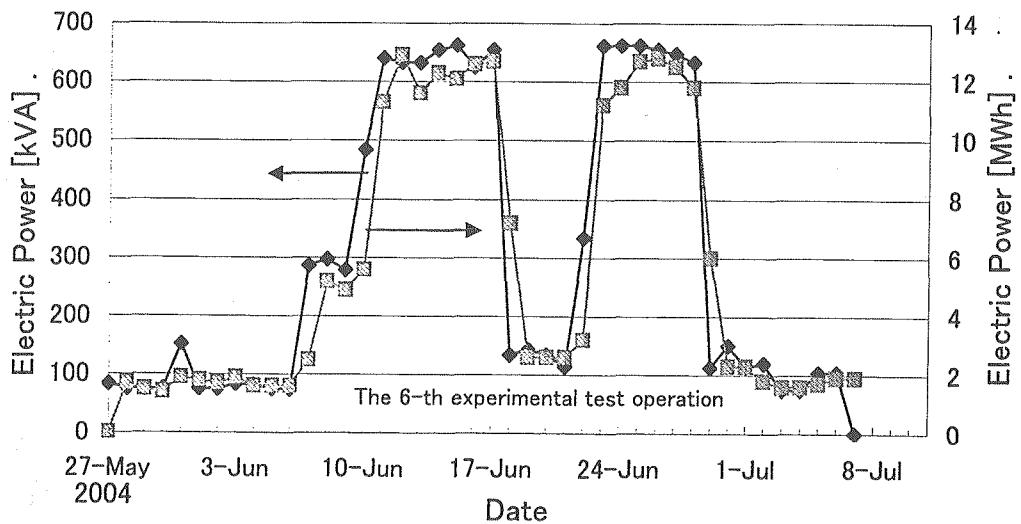


Fig.5.4(f) Mount of electricity supply

## 5. 2 第7回試験運転

### 5. 2. 1 運転履歴

第7回試験運転は平成16年10月19日から11月21日までの33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13日から起動準備を開始し、10月16日から水蒸気供給設備の常温クリーンアップを開始した。10月18日にヘリウムガス供給設備を3.0MPaまで昇圧し、10月18日にヘリウムガス加熱器を起動して運転に入った。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を180°Cまで昇温して一旦状態を保持し、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25日に水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度を700°Cに昇温して蒸気クリーンアップに入ったが、10月28日に蒸気発生器マンホール部のフランジから蒸気漏えいを認めたため、同日降温を開始し10月29日に試験装置を停止した。フランジの点検、増し締めを実施し、水圧・気密試験により漏えいが無いことを確認した。11月5日に試験装置の運転を再開し、水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度180°Cまで昇温して温水クリーンアップに入った。11月7日に700°Cまでの昇温を行い、蒸気発生器マンホール部に蒸気漏えいの無い事を確認した。次に、第6回試験運転後に対策した触媒粉塵用フィルタ本体フランジの熱サイクル経験後の気密性を確認するため、8日から9日に後処理設備に蒸気を通気して触媒粉塵用フィルタの本体フランジを高温にする脱ガス促進運転を実施し、冷却後漏えいが無い事を確認した。その後、11月10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、11月12日から水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度を880°C、圧力4.1MPaで水素製造を開始した。原料ガス流量は始めに6g/sで約2日間継続し触媒のエージングを行った後、定格の12g/sでの水素製造に移行し、11月15日に化学反応停止試験を開始した。11月19日まで試験データの取得を行った。その後、降温を開始して水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度250°Cとしたが、11月21日にヘリウムガス精製設備の不具合を生じ、さらに降温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7回試験運転における水分計の監視結果をFig.5.6(a)に示す。またガスクロマトグラフィーの監視結果をFig.5.6(b)に示す。

水分の計測ならびにヘリウムガス精製設備による不純物除去を平成16年10月18日に開始し、翌10月19日に試験装置の昇温を開始した。水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度180°Cまでの昇温途中、水分は約20ppmまで上昇したが、インターロックにより昇温が中断している際に精製設備による除去が進み徐々に減少した。10月25日には700°Cまでの昇温を実施したが、この時には約5ppmまでしか増加しなかった。その後、蒸気漏えい点検のため運転を一時停止し、11月5日に運転を再開し水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度180°Cまで昇温し、さらに11月7日に700°Cまで昇温した。この間、水分の増加は見られなかった。11月12日に水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度880°Cで水素製造を開始すると、水分は約3ppmのピークが現れたが時間とともに徐々に減少した。11月15日に化学反応停止試験を開始すると水分は再度増加し始め約10ppmに達した。ガスクロマトグラフィーでは水素約28ppm並びに二酸化炭素約14ppmが検

出された。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にしている。そこで、現在使用中の系統(A系)を待機中の系統(B系)に切り替えたところ水分並びに水素、二酸化炭素は減少した。翌日11月16日にA系は再生を終了したので再び系統切替を行いA系による精製を開始した。この時B系は再生に入った。11月18日に試験条件を変更し水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度880°Cから840°Cまで降温したところ、水分が約8ppmまで上昇し、水素約10ppm並びに二酸化炭素約5ppmのピークが見られたが、精製が進み減少を見せた。同日さらに840°Cから800°Cまで降温した。翌11月19日に試験条件を変更し水蒸気改質器入口ヘリウムガス温度800°Cから700°Cまで降温する途中で、水分は約60ppmまで増加し、水素は約24ppm、二酸化炭素は約16ppmまで増加した。A系の精製能力が落ちたと考えられるが、B系は再生が完了しておらず切替ができなかった。B系の点検の結果、液体窒素槽のヒータH559の断線が分かり、B系は使用できないことを確認した。そこで、A系のみを使用して運転を継続し、所定の目的を達成して試験装置の停止作業を行った。その後、11月21日に精製設備のA系のコールドチャコールベッドに液体窒素を供給する流量調節弁に故障（作動不良）が発生した。A系とB系の両方が故障したことによりヘリウムガスの精製が不可能になったため、同日試験装置の運転を終了した。

### 5. 2. 3 水蒸気供給系の水質管理履歴

第7回試験運転の水質分析値の変遷はFig.5.7(a)～(e)に示す通りである。

(a)pHは、給水タンク（出口）、蒸気発生器（ボイラ水）のいずれも温水クリーンアップや蒸気クリーンアップへの切り替えの過渡時に一時的に下降した以外は運転期間中管理目標値8.0～9.3を満足していた。

(b)電気伝導度は、蒸気発生器ドレン水は、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。

(c)溶存酸素は、給水タンクにおいて運転期間を通じて管理目標値 $20\sim200\mu\text{g/l}$ を満足できた。蒸気発生器ドレン水は、参考データである。

(d)鉄分は、給水については、温水クリーンアップ状態では水予熱器で加熱された給水が蒸気発生器手前で循環しているため水質が悪化した。しかし蒸気クリーンアップ状態では常に水が入れ替わるため、水質が次第に好転し、管理目標値である $30\mu\text{g/l}$ 以下を満足することができた。蒸気発生器内の水質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もに管理目標値 $30\mu\text{g/l}$ 以上であった。

(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 $0.05\text{mg/l}$ 以下を満足していた。蒸気過熱器は参考データである。なお、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7回試験運転の水質管理では、ほぼ水質管理目標値を満足することができた。

### 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7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。

#### (2) ヘリウムガス

第7回試験運転では、ヘリウムガスカーボルは、低圧側12.3MPa、高圧側12.0MPaの状態で試験運転に入り、運転終了後には、低圧側8.2MPa、高圧側11.8MPa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287m<sup>3</sup>(Normal)であった。

#### (3) 窒素ガス

第7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7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。純水の補給量は合計約196tであった。

#### (5) 電気

第7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。

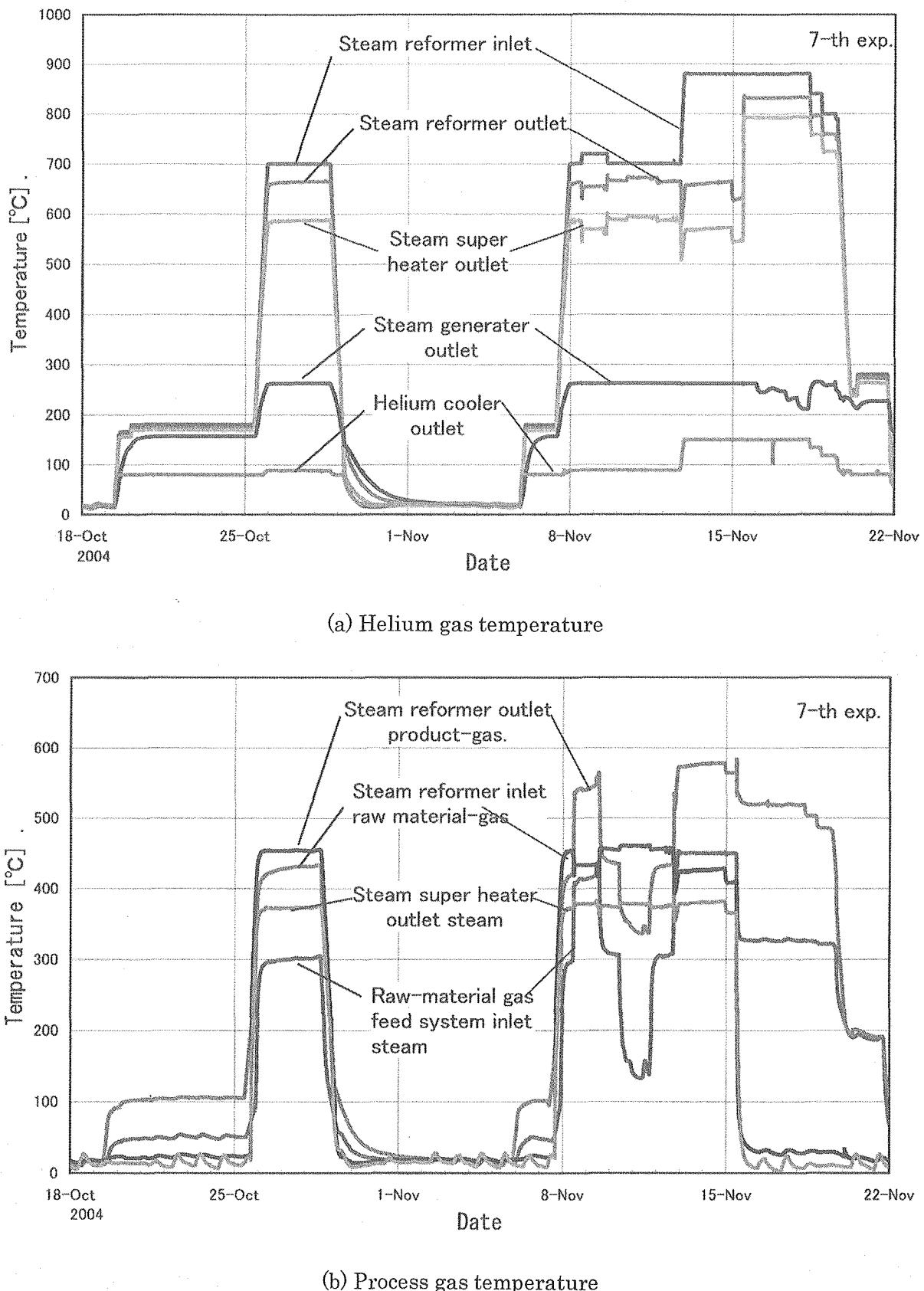
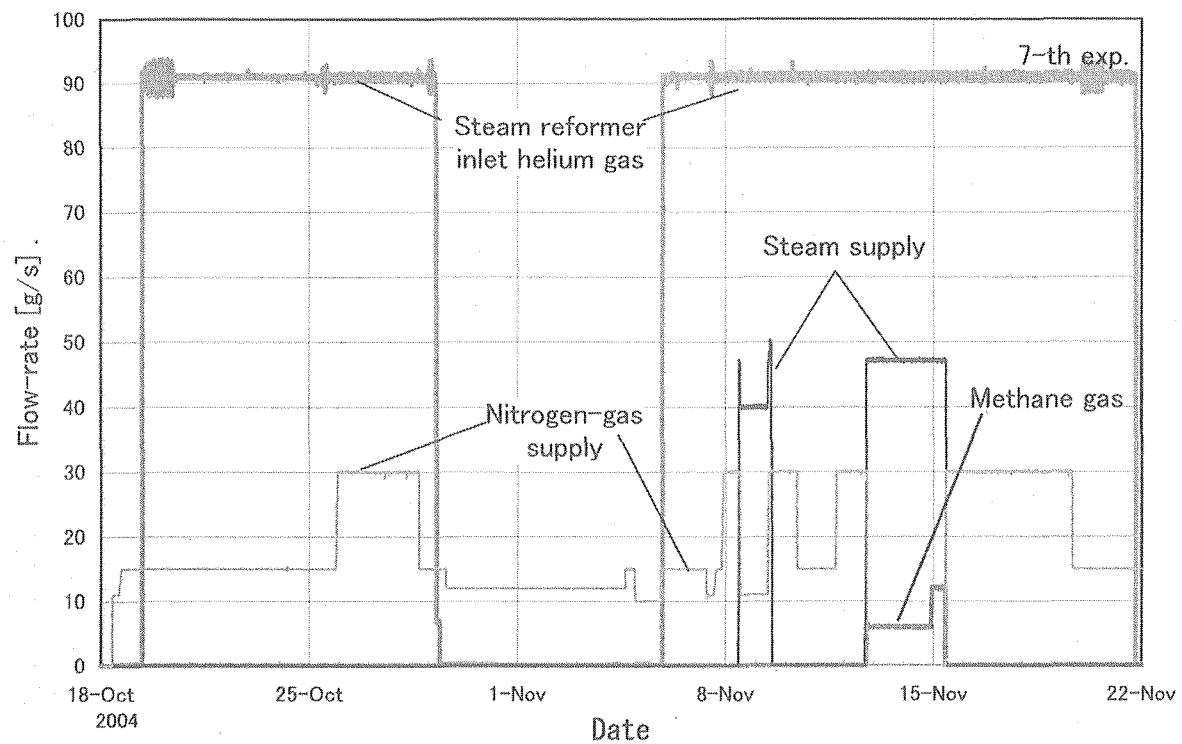
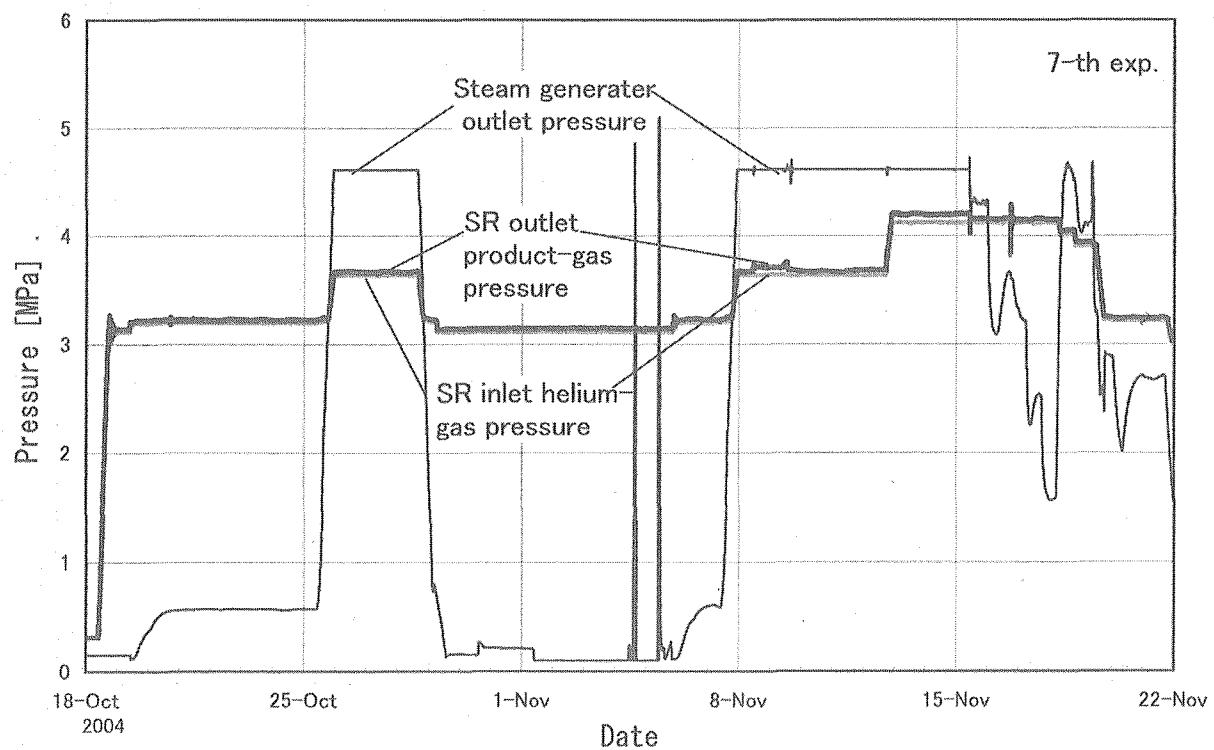


Fig.5.5 Operational records of the 5-th experimental operation

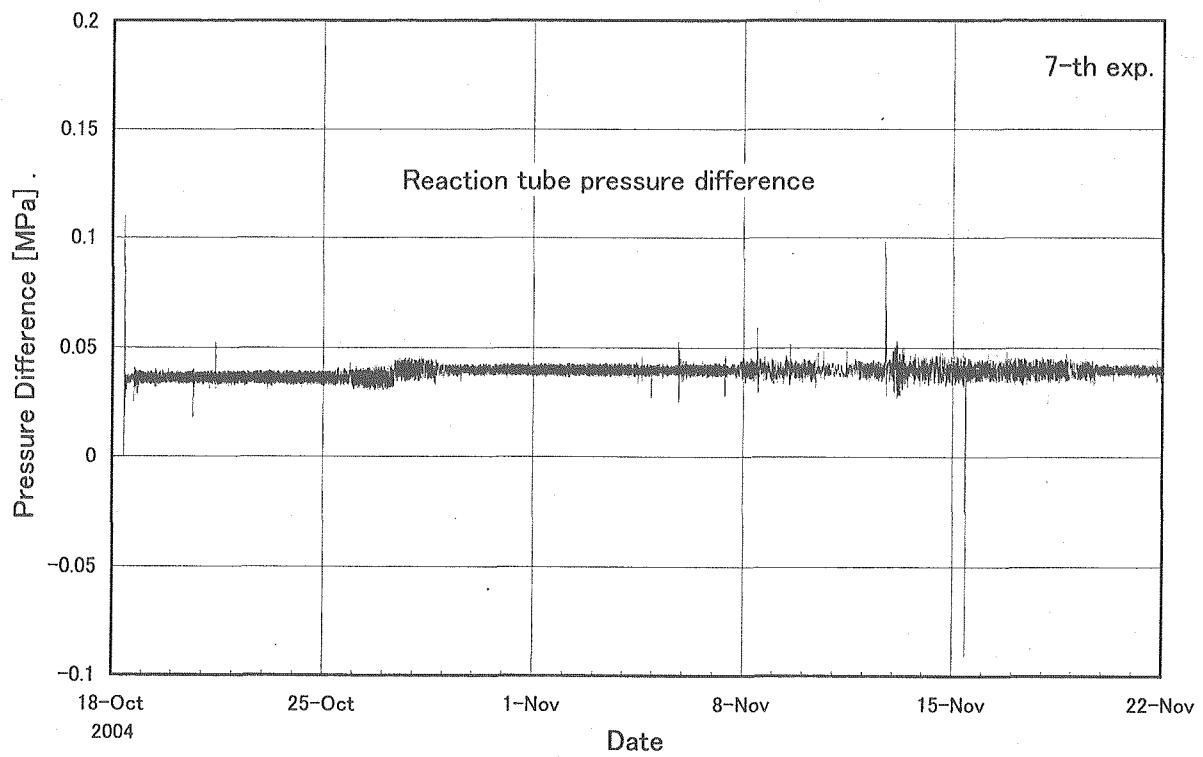


(c) Process-gas flow-rate



(d) Gas pressure

Fig.5.5 Operational records of the 7-th experimental operation (Continued)



(e) Pressure difference

Fig.5.5 Operational records of the 7-th experimental operation (Continued)

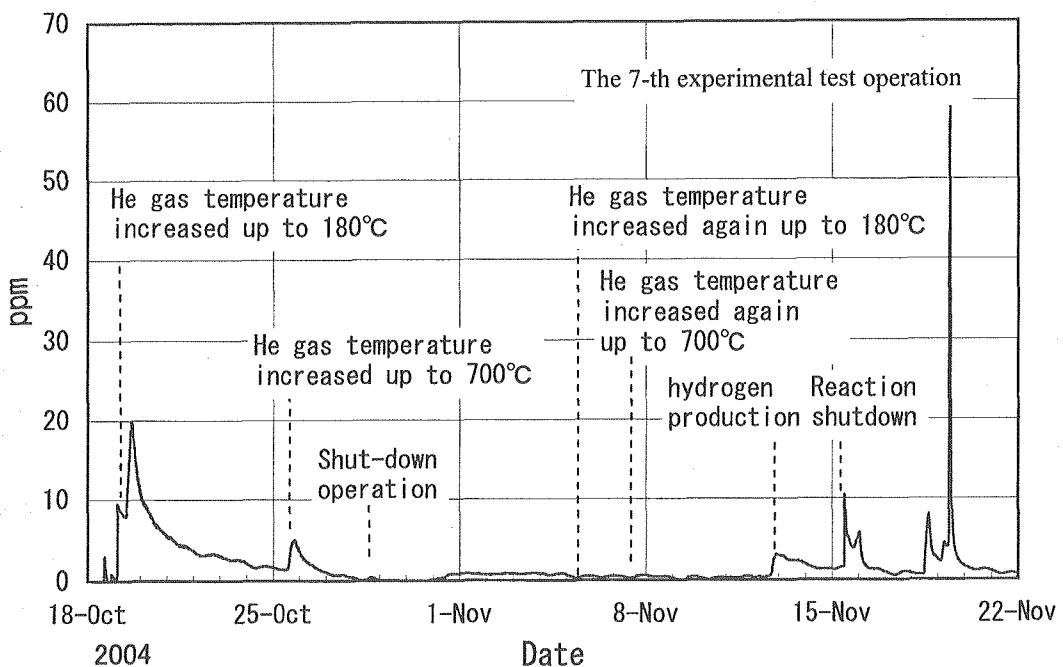


Fig. 5.6(a) Historical record of concentration of H<sub>2</sub>O including in helium gas

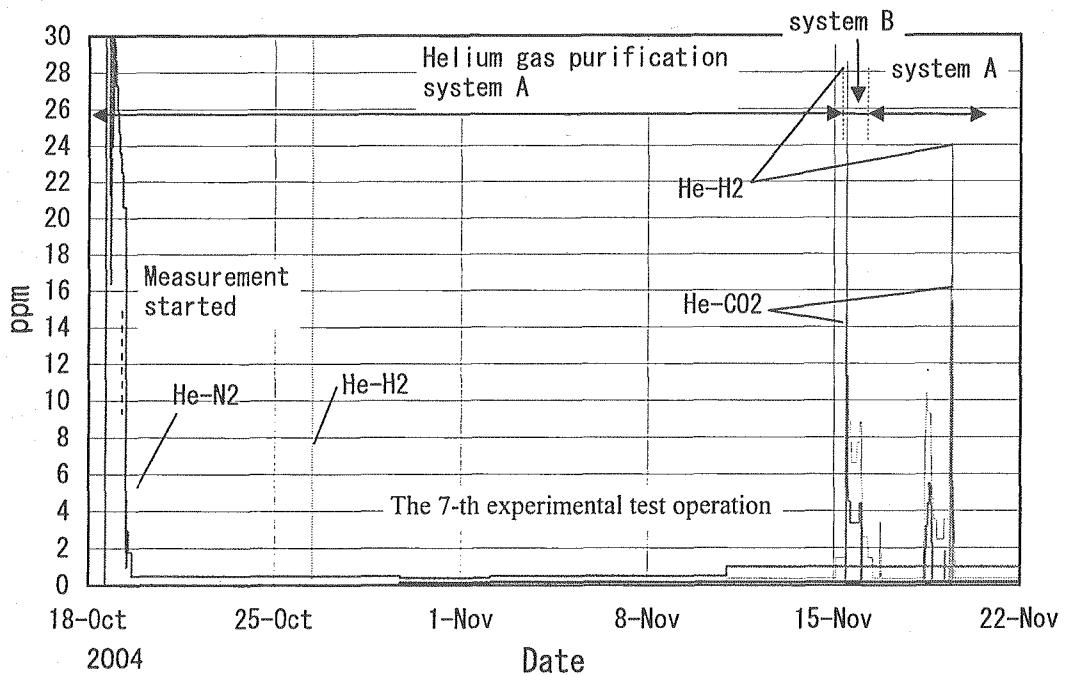


Fig. 5.6(b) Historical record of concentrations of N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> including in helium gas

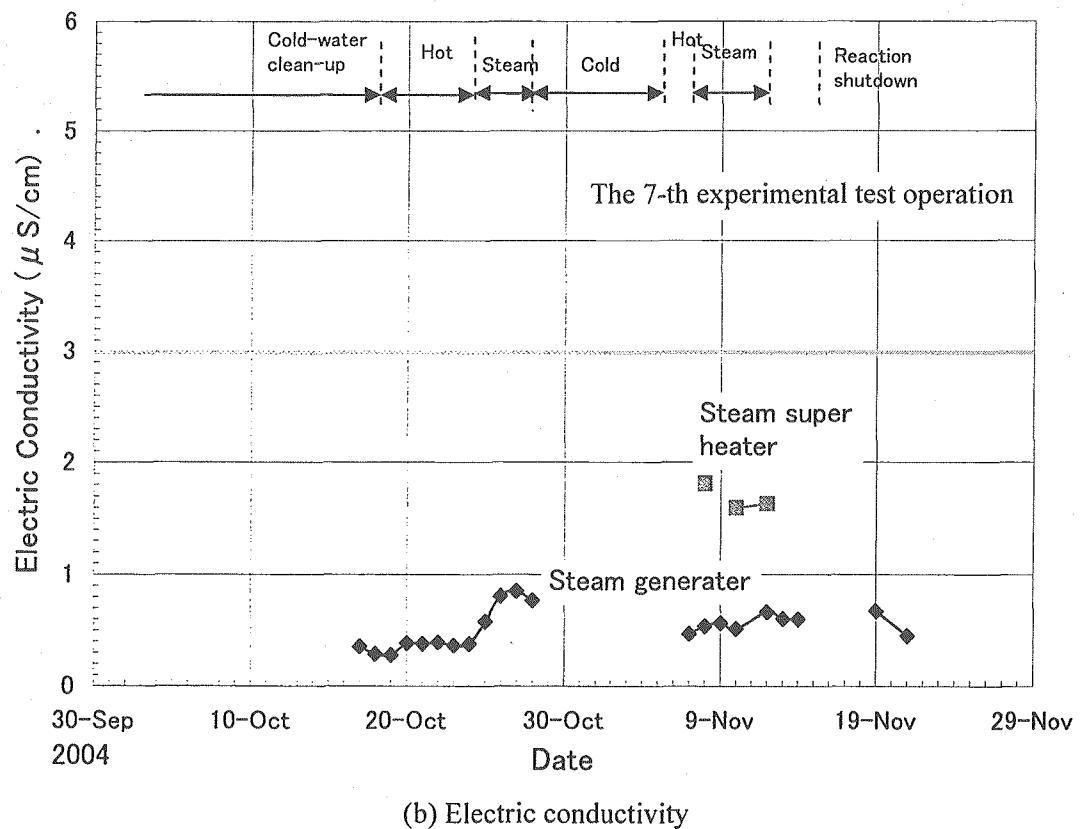
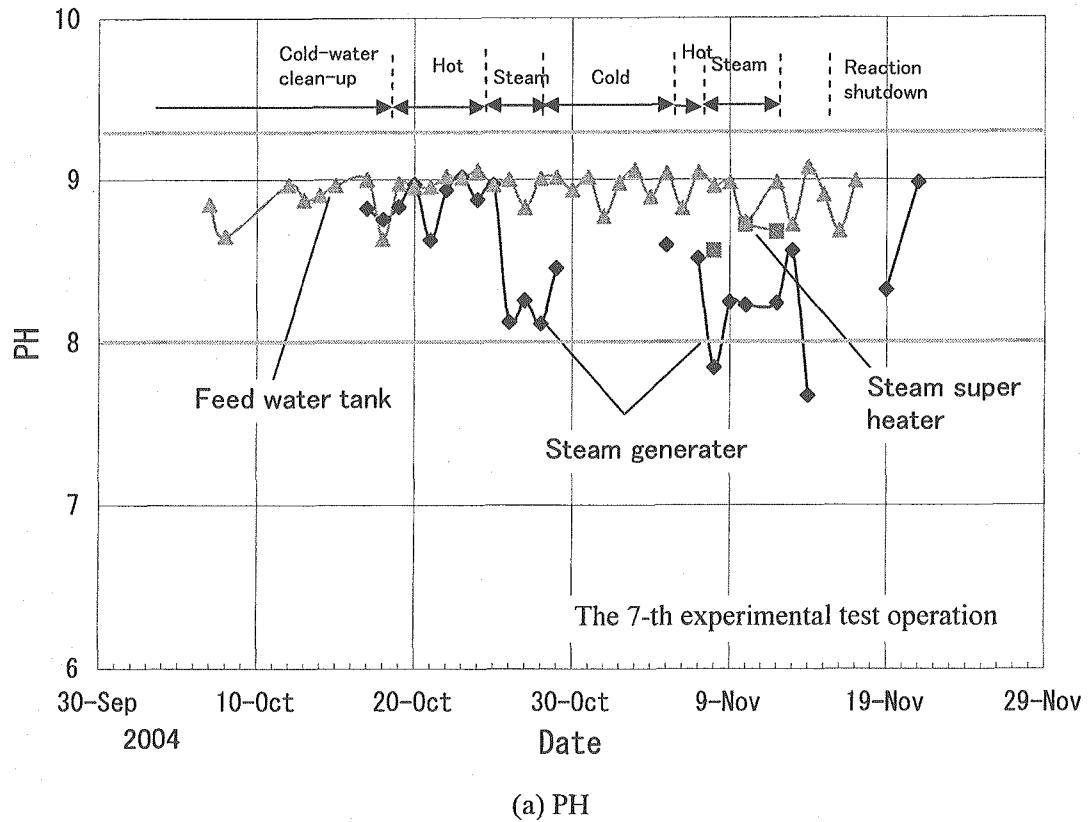
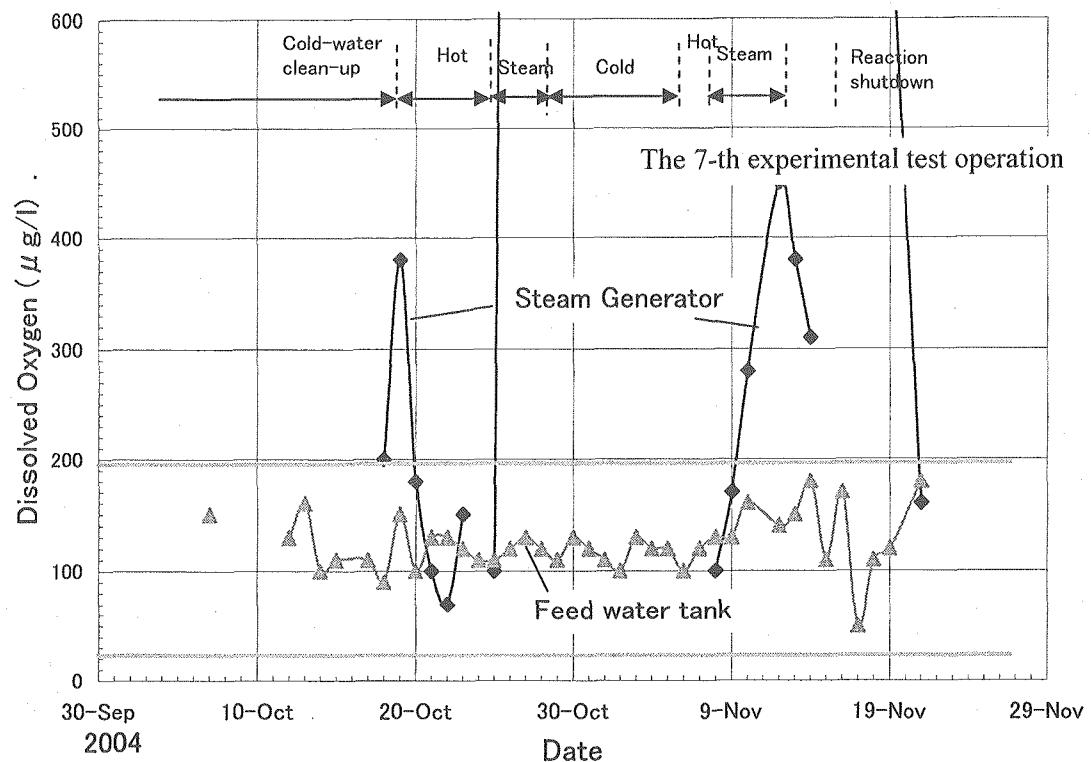
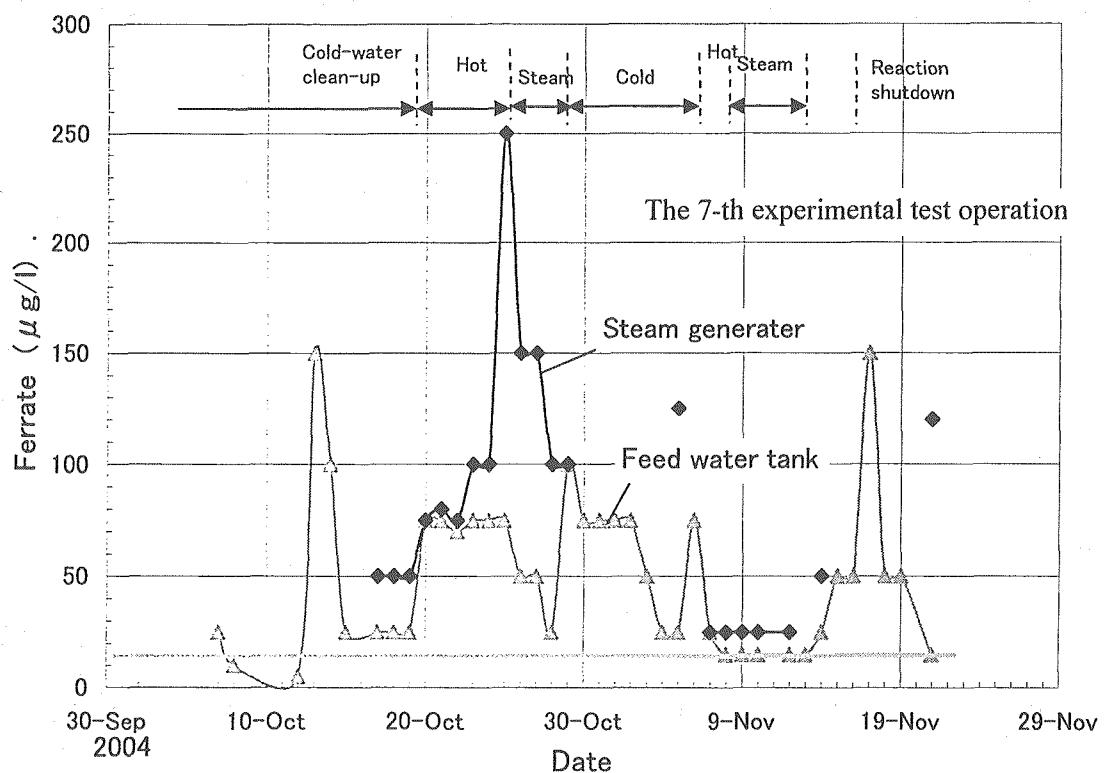


Fig.5.7 Histroical records of water quality control in steam supply system

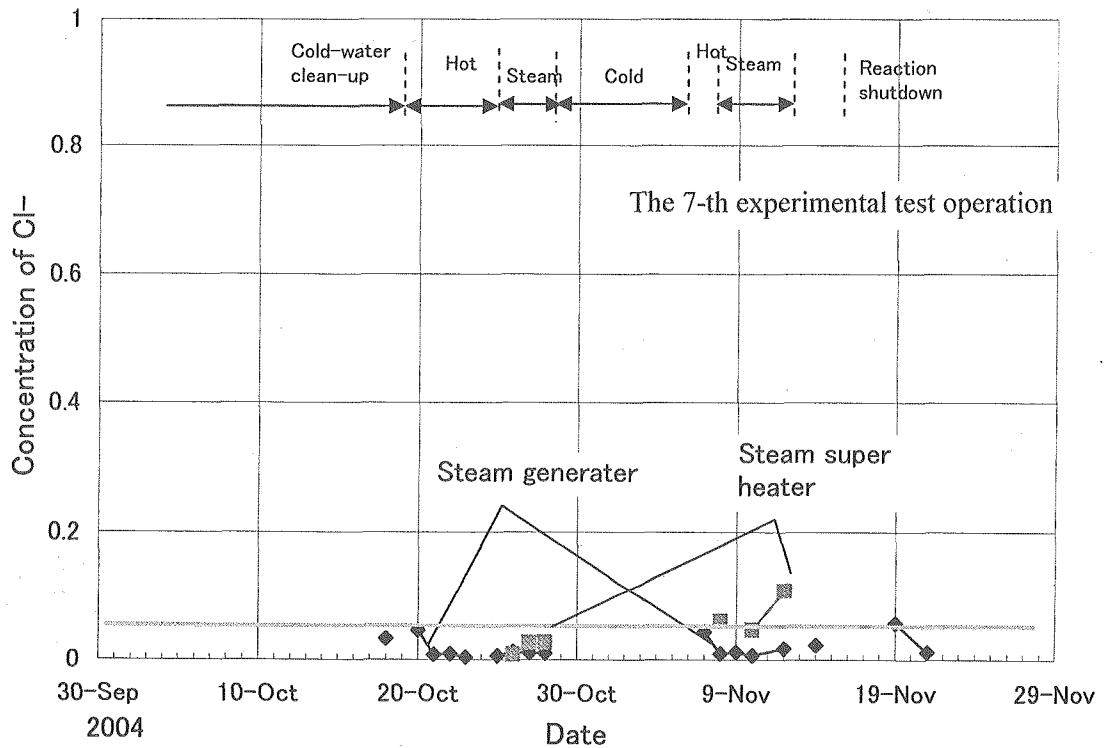


(c) Dissolved oxygen



(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)

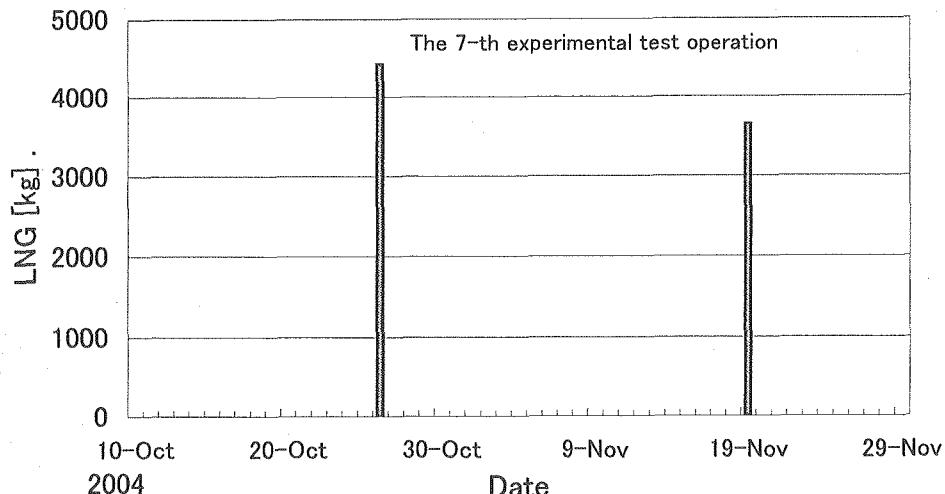


Fig.5.8(a) Mount of liquefied natural gas supply

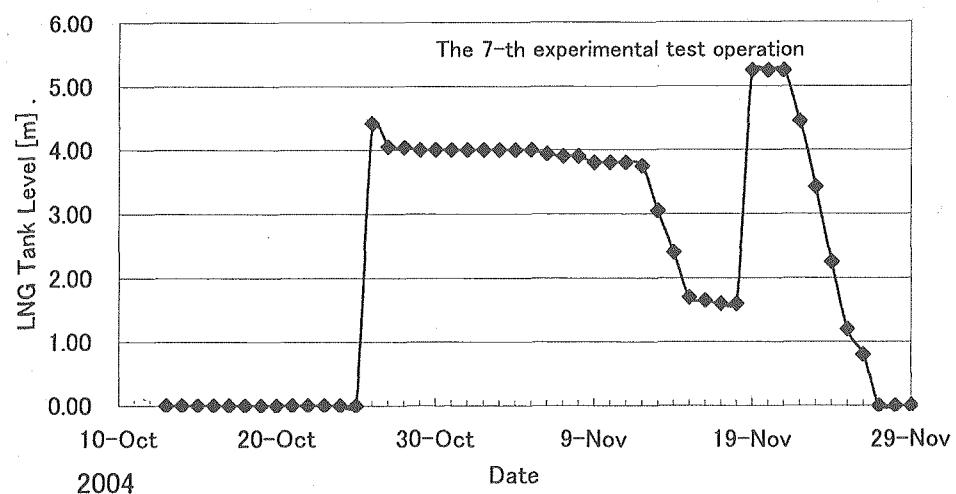


Fig.5.8(b) Record of liquefied natural gas tank level

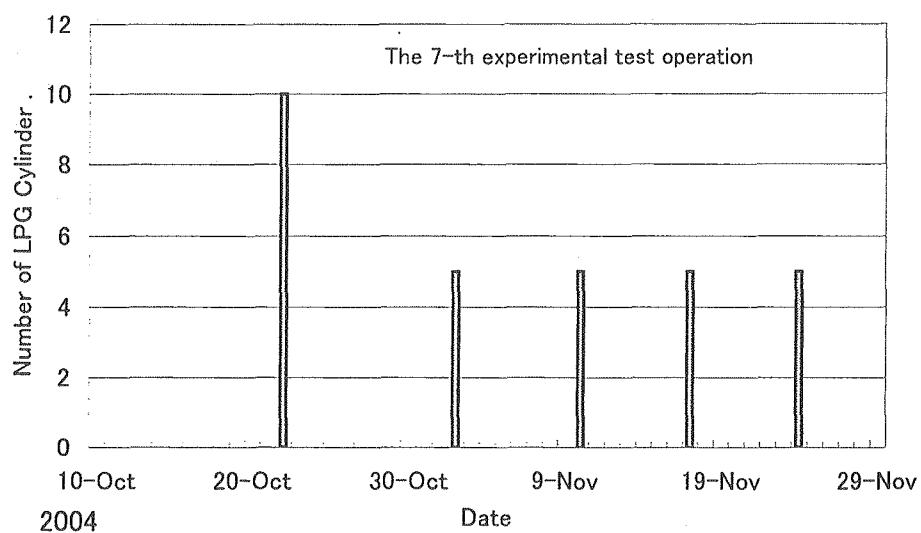


Fig.5.8(c) Mount of LPG supply (cylinder)

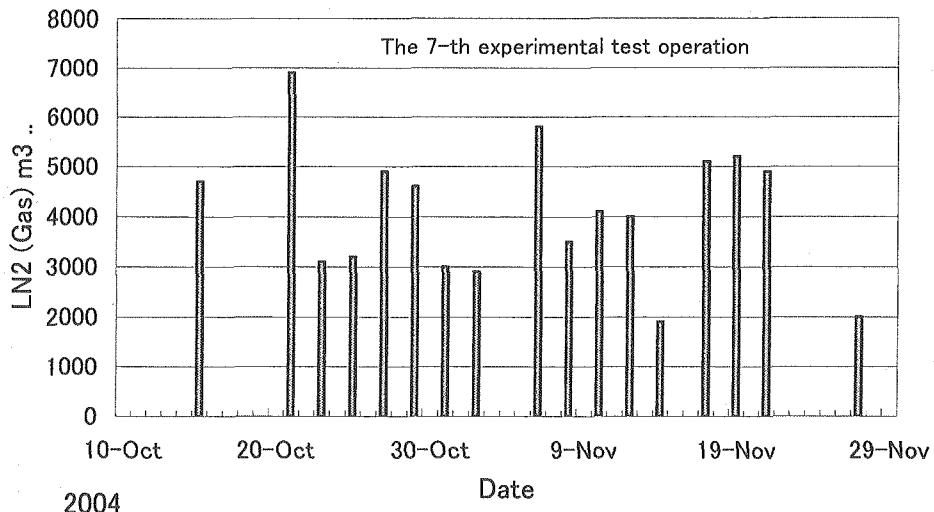


Fig.5.8(d) Mount of liquefied nitrogen gas supply

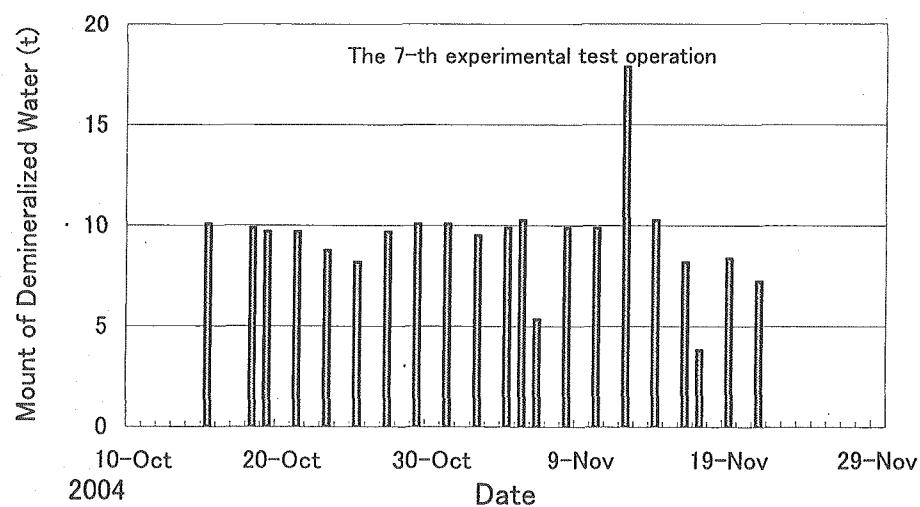


Fig.5.8(e) Mount of demineralized water supply

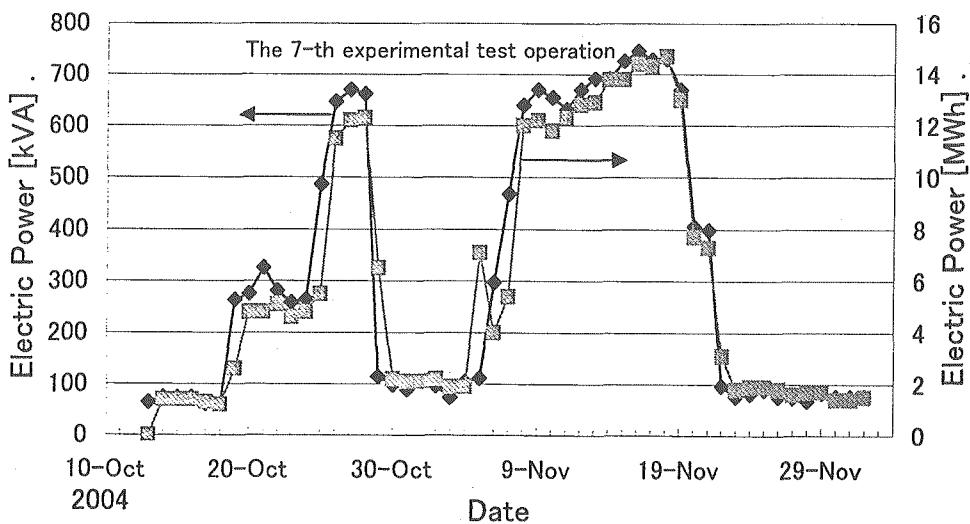


Fig.5.8(f) Mount of electricity supply

## 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、平成 16 年 5 月に触媒粉塵用フィルタの改修工事を実施し、高圧ガス保安法上の完成検査に合格した。その後、平成 16 年 6 月に第 6 回試験運転を実施し、改修箇所の改善を確認した。次に平成 16 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。また平成 16 年 10 月から第 7 回試験運転を実施し、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、水蒸気改質器入口温度 880°C の定格の条件で行った。その結果、解析コード検証用データを取得するとともに、水蒸気改質器で生じるヘリウムガス温度変動に対する蒸気発生器による緩和効果、放熱器の冷却特性等を確認した。

## 謝 辞

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佐藤博之（現、石川島播磨重工業）、清水明（現、三菱重工業）、榎明裕（現、三菱重工業）、前田幸政（現、日立製作所）、塙博美並びに米川日出男（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。ここに深い謝意を表します。

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）照沼孝志、滑川勝徳、柴田一之、川邊 勝、中島利幸の各氏に多大なるご協力をいただいた。ここに深い謝意を表します。

## 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, 柳, 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, 柳, 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) 林, 森崎, 大橋, 加藤, 藤崎, 会田, 武田, 西原, 稲葉, 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 15 年度試験運転報告 (受託研究)," to be published in JAEA-Technology (2005).
- (11) 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部損傷ノズルの原因究明と再発防止対策に関する報告, (受託研究)" JAERI-Tech 05-009 (2005).
- (12) 柳, 加藤, 林, 藤崎, 会田, 稲葉, 大橋, 高田, 清水, 森崎, 前田, 佐藤, 塙, 米川, 稲垣 "HTTR 水素製造システム 実規模単一反応管試験装置 運転における改善事項,(受託研究)," " JAERI-Tech 2005-023 (2005).
- (13) 佐藤、大橋、稲葉、前田、武田、西原、稻垣 "HTTR 水素製造システム 実規模単一反応管試験装置を用いた動特性解析コードの検証 –蒸気発生器及び放熱器を用いた 2 次ヘリウムガス冷却システム –,(受託研究)" JAERI-Tech 05-014 (2005).
- (14) 日本機械学会編 :"機械工学便覧 (新版)," 日本機械学会 B6-34 (1987).