

大量ナトリウムの処理技術開発  
—ナトリウム転換基礎試験装置の製作と試運転結果—  
(技術報告)



2002年3月

核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター

本資料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ください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section.  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2002

₹100

(KO)

# 大量ナトリウムの処理技術開発

## －ナトリウム転換基礎試験装置の製作と試運転結果－ (技術報告)

大道正雄<sup>\*1</sup>，川崎弘嗣<sup>\*1</sup>  
遠藤康志<sup>\*2</sup>，仲井 悟<sup>\*1</sup>

### 要　　旨

将来国内において、高速炉プラントの廃炉あるいはナトリウム試験施設の解体等に伴う大量の放射性ナトリウム処理に備え、安全で効率的、かつ経済的に処理するための技術開発を実施している。海外で実機レベルでの大量ナトリウム処理の実績がある苛性ソーダ処理法を採用し、これを国内で適用する上での基礎的な処理方法の確立を目指し、研究開発を開始した。

そこで、ナトリウムと苛性ソーダとの基礎的な反応特性の把握とその転換処理システムの最適仕様決定を目的とした「ナトリウム転換基礎試験装置(Sodium Conversion Test Apparatus: SCOT)」を設計・製作した。本装置のシステム機能を確認し、少量の反応試験を実施した結果、以下の知見と課題を得た。

- (1) 本試験装置のもつ各設備の機能試験においては、各機能及び制御性について、設計性能を十分満足した。
- (2) 苛性ソーダ濃度計の校正試験では、超音波音速値と苛性ソーダ濃度、温度との相関データを、従来より拡張された条件範囲で取得し、重回帰分析により校正曲線を得た。
- (3) ナトリウムを苛性ソーダに微量注入する反応試験においては、反応現象あるいはプロセス挙動等に安全上の問題は認められなかった。しかし、本試運転では、ノイズ影響によるナトリウム流量計指示値の変動、スプレーノズル部の閉塞、苛性ソーダ循環ラインへのアトマイジングガス巻き込み等、いくつかの問題が生じた。今後、抽出されたいくつかの課題について、装置改造及び運転要領の両面から対策する。

---

※1：大洗工学センター 要素技術開発部 新技術開発試験 Gr.

※2：常陽産業(株)

March, 2002

# Development of Sodium Conversion Technology

## — Fabrication of Sodium Conversion Test Apparatus and Results of Previously Test Run —

Masao Omichi<sup>\*1</sup>, Hirotugu Kawasaki<sup>\*1</sup>

Yasushi Endo<sup>\*2</sup>, Satoru Nakai<sup>\*1</sup>

### Abstract

It prepares for a large amount of radioactive sodium processing accompanied by final shutdown/decommissioning of First Reactor Plant, and/or dismantling of sodium experimental facilities in a domestic one, and the technical development for sodium processing safely, efficiently, and economically is carried out in the future. The sodium processing method with caustic soda, which has application in the actual sodium processing of abroad, was adopted, and the experimental research was started aiming at establishment of the fundamental processing method when applying this in our country.

Then, the sodium conversion test apparatus "SCOT" aiming at grasp of the basic reaction property of sodium and caustic soda, and the optimum specification determination of a sodium conversion processing system, was designed and fabricated. As a result of checking the system function of this apparatus and carrying out a small reaction test as a previously test run, the following findings and subjects of future were obtained.

- (1) In the functional test of each performance in this apparatus, the design performance was sufficiently satisfied on each function and controllability.
- (2) In the calibration test of a caustic soda concentration meter, the correlation data between ultrasonic velocity and caustic soda concentration as a function of caustic soda temperature was obtained in the condition range extended conventionally, and the calibration curve was proposed by multiple regression analysis.
- (3) In the reaction test which carries out very-small-quantity pouring of the sodium at caustic soda, the problem on the safety was not recognized a reaction phenomenon or a process behavior. However, some problems, such as fluctuation of the sodium flow meter indication by noise influence, plugging in the spray nozzle, and involvement atomizing gas in a caustic soda circulation line, were occurred in this test run. In the future, it will be coped with from both sides of the equipment modification and the operation point about extractive subjects.

---

\*1 : New Technology Development Group, Advance Technology Division, O-arai Engineering Center

\*2 : Joyo Industry Co., LTD

## 目 次

1. まえがき	1
2. 大量ナトリウム処理計画	2
2.1 研究の必要性	2
2.2 ナトリウム転換技術の達成目標	2
2.3 ナトリウム転換技術の反映先	2
2.4 ナトリウム処理に関する海外の動向	2
2.5 ナトリウム転換技術の現状と適用例	3
2.6 ナトリウム処理技術開発の流れ	4
2.7 ナトリウム転換の技術課題	5
2.8 ナトリウム転換技術開発のアプローチ	6
2.9 ナトリウム転換技術開発の開発工程	7
3. ナトリウム転換基礎試験装置の設計・製作	11
3.1 設計方針	11
3.1.1 試験装置の構成・概要	11
3.1.2 主要運転条件	13
3.2 製作方針	13
3.2.1 主要構成材料の選定	13
3.2.2 主要機器仕様	14
3.3 計画計画	14
3.4 検査	14
4. ナトリウム転換基礎試験装置の安全対策	18
4.1 インターロック	18
4.2 安全対策設備	18
4.3 操作上の安全対策	19
5. ナトリウム転換基礎試験装置の機能試験	23
5.1 システム機能試験	23
5.1.1 真空試験	23
5.1.2 予熱性能試験	23
5.1.3 アトマイジング用窒素ガス加熱試験	23
5.1.4 熱電対ツリー構造の昇降試験	24
5.1.5 厄性ソーダ循環試験	24

5.1.6 除熱系機能試験	24
5.1.7 反応容器液位制御試験	25
5.1.8 圧力制御試験	25
5.1.9 スプレー・ノズル性能試験	26
5.2 校正試験	27
5.2.1 液位計校正試験	27
5.2.2 超音波式濃度計校正試験	29
5.3 ナトリウム微量注入試験	31
5.3.1 試験条件	31
5.3.2 試験結果	31
6. 検討・考察	65
6.1 試験装置について	65
6.2 反応による安全性について	66
6.3 発生水素ガスについて	66
6.4 ナトリウム注入量について	67
7. まとめ	69
8. 謝辞	70
9. 参考文献	71
Appendix	72

## 【表リスト】

表 2.1 ナトリウム転換技術の現状と適用例	8
表 2.2 試験スケジュール	9
表 4.1 インターロックリスト	22
表 5.1 ナトリウム微量注入試験条件一覧	64

## 【図リスト】

図 2.1 ナトリウム処理技術全体フロー	10
図 3.1 ナトリウム転換基礎試験装置構成図	15
図 3.2 ナトリウム転換基礎試験装置外観	16
図 3.3 苛性割れに及ぼす温度、濃度の関係図	17
図 5.1 真空試験結果	33
図 5.2 予熱性能試験結果	34
図 5.3 アトマイジング用窒素ガス加熱試験結果	35
図 5.4 熱電対ツリー昇降試験結果	36
図 5.5 苛性ソーダ循環試験結果	37
図 5.6 除熱系機能試験結果①	38
図 5.7 除熱系機能試験結果②	39
図 5.8 除熱系機能試験結果③	40
図 5.9 除熱系機能試験結果④	41
図 5.10 反応容器液位制御試験結果	42
図 5.11 圧力制御試験結果	43
図 5.12 スプレーノズル性能試験結果①	44
図 5.13 スプレーノズル性能試験結果②	45
図 5.14 スプレーノズル性能試験結果③	46
図 5.15 スプレーノズル性能試験結果④	47
図 5.16 反応容器液位計校正試験結果	48
図 5.17 反応生成物貯蔵タンク液位計校正試験結果	49
図 5.18 超音波濃度計校正試験装置構成図及び取得データ範囲	50
図 5.19 苛性ソーダ濃度計校正曲線（重回帰分析結果）	51
図 5.20 サンプリングデータと重回帰分析結果との比較	52
図 5.21 ナトリウム貯蔵タンク圧力及び液位の挙動（試験①）	53
図 5.22 試験開始直後の排ガス中水素ガス濃度の挙動（試験①）	54
図 5.23 排ガス中水素ガス濃度の挙動（試験①）	55
図 5.24 苛性ソーダ及び排ガス温度の挙動（試験①）	56

図5.25 ナトリウム反応率と反応量の関係（試験①）	57
図5.26 ナトリウム貯蔵タンク圧力及び液位の挙動（試験②）	58
図5.27 試験開始直後のナトリウム貯蔵タンク圧力及び液位の挙動（試験②）	59
図5.28 排ガス中水素ガス濃度の挙動（試験②）	60
図5.29 排ガス中水素ガス濃度計測値と予想曲線との比較（試験②）	61
図5.30 苛性ソーダ及び排ガス温度の挙動（試験②）	62
図5.31 ナトリウム反応率と反応量の関係（試験②）	63

## 【Appendix リスト】

Appendix-1 主要機器仕様一覧	73
Appendix-2 ナトリウム転換基礎試験装置系統図	77～78
Appendix-3 ナトリウム転換基礎試験装置除熱系統図	79
Appendix-4 ナトリウム転換基礎試験装置配管配置図	81～82
Appendix-5 ナトリウム貯蔵タンク構造図	83
Appendix-6 ナトリウムフィルタ構造図	84
Appendix-7 反応容器構造図	85
Appendix-8 スプレー・ノズル構造図	86
Appendix-9 スプレー・ノズル噴霧状況	87
Appendix-10 反応生成物貯蔵タンク構造図	88
Appendix-11 スクラバ構造図	89
Appendix-12 ミストトラップ構造図	90
Appendix-13 窒素ガス加熱器構造図	91
Appendix-14 熱電対ツリー構造図（下部スプレー・ノズル用熱電対配置図）	92
Appendix-15 熱電対ツリー構造図（上部スプレー・ノズル用熱電対配置図）	93
Appendix-16 超音波式濃度計構造図	94

## 1. はじめに

液体金属ナトリウム（以下ナトリウム、Na）を冷却材とする「常陽」や「もんじゅ」をはじめとする高速炉プラントや、放射性ナトリウムを取り扱う研究施設の解体・廃炉時には、化学的に活性、かつ放射性物質を含むナトリウムを、最終的には放射性廃棄物として処分する必要がある。最終処分形態として安定な状態にするためには、安全かつ効率的にナトリウムを化学的に安定な物質（化合物）に転換することが必要である。また、転換された物質は、固化体として安定な状態とし、長期保管または埋設処分する必要がある。このように、大量の放射性ナトリウムを安定な物質に転換する技術は、放射性廃棄物としての最終形態を安定化する方法とも密接に関係するため、最終処分形態を念頭において技術開発を行うことが重要である。

放射性ナトリウムを安定な化合物へ転換する手法は、米国及び歐州で既に実機適用の例があり、実績を挙げている。ナトリウム－水反応を利用して、苛性ソーダ（NaOH、化学名「水酸化ナトリウム」）へ転換する方式である。<sup>(1) (2) (3) (4)</sup>一方、国内においては、大量放射性ナトリウムの処理技術に関する経験は皆無と言える状況である。将来国内において、高速炉プラントの廃炉あるいは試験施設の解体等に伴う大量のナトリウムを処理する必要があり、大量の放射性ナトリウムを安全で効率的、かつ経済的に処理するための技術開発を早急に推し進める必要がある。

そこで、ナトリウムを苛性ソーダへ転換する基礎的手法を開発し（フェーズⅠ）、実機適用へスケールアップしていく（フェーズⅡ）ため、基礎的な反応特性の把握と転換処理システムの最適仕様決定を目的とした、ナトリウム転換基礎試験装置（*Sodium Conversion Test Apparatus : SCOT*）の設計・製作を行った。

本報告は、国内では例のないナトリウム転換基礎試験装置の設計、製作に関する技術的情報、および本装置を用いての試運転結果について記載したものである。

## 2. 大量ナトリウム処理計画

### 2.1 研究の必要性

ナトリウムは化学的に活性な物質であり、消防法第3類危険物や劇物及び毒物取締法における劇物に指定されており、その取り扱いあるいは貯蔵、廃棄方法には注意が必要である。将来、「常陽」や「もんじゅ」をはじめとするナトリウム冷却高速炉の廃炉時には、約900トン（常陽：約120トン、もんじゅ：約760トン）の放射性ナトリウムが発生し、処分する必要がある。また、大洗工学センター内のナトリウム取扱研究施設においても、研究の終了に伴い一部解体計画が進行しており、排出されるナトリウムの処理が必要となっている。当面、大洗工学センター内のナトリウム取扱研究施設の一つである FSI (*Fuel and Sodium Interaction* : 溶解燃料&ナトリウム相互作用) 研究施設の解体計画において、貯蔵・保管されている約2.6トンの放射性ナトリウム処分計画に本研究で実施するナトリウム処理方法を適用するため、早急に技術開発する必要がある。

### 2.2 ナトリウム転換技術の達成目標

現状国内では、大量放射性ナトリウムの苛性ソーダへの転換について、今まで経験が皆無と言える状況であることから、制御された化学反応による安全な転換処理を実現するための基礎試験装置を製作し、基本反応特性へ影響を与えるパラメータを明らかにすることで、ナトリウムの苛性ソーダへの転換現象を把握する。また、本装置によりシステム性能を調べ、将来の実機への適用を行う上での装置仕様や運転手法を確立し、最適なシステムを決定する。これらの試験研究により得られた成果をナトリウム転換技術としてまとめ、安全で効率的、かつ経済的なナトリウム転換手法を確立するために幾多の重要な取り組むべき課題を有し、これらを解決して行かなければならない。（処理課題の詳細については、2.7項 ナトリウム転換の処理課題に記す）

### 2.3 ナトリウム転換技術の反映先

FSI 施設の解体において、平成16年度から約2トンの酸化ウラン含有ナトリウムの処理が計画されている。それまでにナトリウムの苛性ソーダへの転換技術を確立し、FSI 施設のナトリウム処理へ反映させることが当面の反映先となる。すなわち本技術開発は、高速炉のナトリウム処理の前段階として、管理区域内のナトリウム取扱施設から排出されたナトリウム処理の実機適用に反映する。

長期的には、「常陽」あるいは「もんじゅ」など将来のナトリウム冷却高速炉の廃止措置等において、放射性ナトリウムの処理に適用できる手法として確立する。

### 2.4 ナトリウム処理に関する海外の動向

現在、海外で実施されているナトリウム処理法には、以下に示すように化学反応の手法が若干異なるものの、米国と欧州とで基本的にナトリウム-水反応を利用した苛性ソーダへの転換処理を行っている。これら海外でのナトリウムを苛性ソーダに転換

する方法は、現状で実機適用実績のある方法である。

### (1)米国のナトリウム処理

米国アルゴンヌ国立研究所にある EBR-II 炉 (*Experimental Breeder Reactor-II*) は、その閉鎖プロジェクトにおいて、実機のナトリウム処理を実施した。EBR-II は、1964 年 8 月に運転を開始し、1994 年 9 月に停止するまで 30 年間燃料や材料の試験研究を行ってきた。1996 年 12 月に燃料の抜き取りが完了し、1998 年 12 月から SPF (*Sodium Process Facility* : ナトリウム処理施設) の運転を開始した。SPF にて Fermi-I の 1 次系 290m<sup>3</sup>、EBR-II の 2 次系 50m<sup>3</sup>、1 次系 330m<sup>3</sup> の実機ナトリウムの処理を実施した。

ナトリウム処理は、苛性ソーダ溶液中に窒素ガスアトマイジングにてナトリウムをスプレーし、ナトリウム-水反応によりナトリウムを苛性ソーダに転換する方法である。ここで生成される苛性ソーダ濃度は 70wt% に調整される。反応生成物である苛性ソーダはドラム缶に充填され、冷却固化 (NaOH 70wt% 溶液は常温で固化状態) の後に、低レベル放射性廃棄物として浅地処分している。

### (2)欧州のナトリウム処理

欧州では、フランスのカダラッシュ研究所にあるラプソディ炉において、1 次系ナトリウム 37 トンの処理を実施した。NOAH 法という方式で、基本的にはナトリウムを苛性ソーダ溶液にスプレーし苛性ソーダに転換する方法であり、ナトリウム-水反応による転換方法である<sup>(1)</sup>。米国との相違点は、低温、低濃度プロセスであること、及び NOAH 法では液面にナトリウムを直接スプレーする点である。また、本方式にて Super Phenix のナトリウムも苛性ソーダに転換される予定である。

英国 PFR 炉 (*Prototype Fast Reactor*) のナトリウム 1500 トンも、NOAH 法によりこれから処理される予定である<sup>(2)</sup>。

## 2.5 ナトリウム転換技術の現状と適用例

現状のナトリウム処理技術について、国内外での実施例、検討例等を調査し、比較した結果を表 2.1 に示す。

前述したように、ナトリウム-水反応による処理を利用した方法として苛性ソーダ処理法がある。これを実機高速炉に適用した例としては、フランス原子力庁 CEA (*Commissariat à l'Energie Atomique*) / DRN (*Direction Des Reacteurs Nucleaires*) で開発された NOAH Process による処理、および米国 EBR-II での実機ナトリウム処理がある。このように苛性ソーダ処理法は実機適用の実績がある方法であり、開発課題は少ないと考えられる。

蒸気処理は、安全性の問題で大量ナトリウム処理には適さないと考えられる。

炭酸ガス処理は、ナトリウムを直接炭酸化して安定化させるという利点があるが、反応速度が遅いため効率が悪い。また、大量ナトリウム処理の実績は無い。

溶融塩処理は、高温での化学反応となるため、設備コストが大となる。開発段階で

あり、大量ナトリウム処理の実績は無い。

アルコール処理は、廃液量が多いこと、その廃液処理が困難であること、経済性に關してもアルコールは高価であり、大量のナトリウム処理には適していないと考えられる。

直接ガラス固化による処理<sup>(3)(4)</sup>は、サイクロンリアクタ内に金属ナトリウムと空気及びガラス材料をそれぞれノズルから注入することにより、ナトリウム処理とガラス固化を同時に行う方法である。本方法は直接ガラス固化体とすることがができることが利点であるが、設備コストが大となる。大量のあるいは実機レベルでの確証はなされていない。

以上の検討から、現段階で実機高速炉のナトリウム処理に適用した技術は、苛性ソーダ処理法のみである。本技術は、排ガス及び廃液処理に改良の余地はあるものの、実機高速炉の大量放射性ナトリウムの処理に適用可能な技術であると考える。

## 2.6 ナトリウム処理技術開発の流れ

### (1) ナトリウム処理技術全体フロー

現状技術の適用性に関する比較検討から、ナトリウムの転換技術については、苛性ソーダ処理法について着手する。ここで、大量ナトリウムの処理について、全体フローを図2.1に示す。プラントから排出されるナトリウムは、放射性ナトリウムと非放射性ナトリウムとに分けられる。まず、これらのナトリウムを苛性ソーダに転換するための技術開発を行い、非放射性ナトリウムについては苛性ソーダ転換後、中和廃棄が可能である。この苛性ソーダへの転換技術は放射性ナトリウム、非放射性ナトリウムを問わず、同じ技術として適用できるものである。

放射性ナトリウムについては、苛性ソーダに転換後、その廃液に対して、最終的に低レベル放射性廃棄物として埋設処分あるいは長期保管とするためには、固化技術開発により、廃液を固化体にして安定な状態としておく必要がある。この時、廃棄物(固化体)発生量をできるだけ低減する固化技術開発が必要である。苛性ソーダ廃液の直接固化を基本とするが、中和処理工程や炭酸ナトリウム等のナトリウム塩への転換工程を経て固化するケースもオプションとして考えられる。この場合、埋設処分基準に適合する固化体とする。

一方、ナトリウム機器等の洗浄処理からも、濃度は薄いが洗浄廃液として苛性ソーダ廃液が排出される。この場合、放射性洗浄廃液は濃縮することで、ナトリウム転換廃液と同じ経路で固化処理が可能である。

### (2) 放射性ナトリウムの転換について

実機高速炉プラントから排出される放射性ナトリウムには、プラントの構成材料からナトリウム腐食によって溶出したFeや、材料中の不純物であるCoなどがそれぞれ次のような反応により放射化( $^{54}\text{Fe}(\text{n}, \text{p}) \xrightarrow{\gamma} {}^{54}\text{Mn}$ や $^{59}\text{Co}(\text{n}, \gamma) \xrightarrow{\beta^-} {}^{60}\text{Co}$ 、及び $^{23}\text{Na}(\text{n}, 2\text{n}) \rightarrow {}^{22}\text{Na}$ 等)し、これらの元素はナトリウム中に含まれたまま苛性ソーダ転換廃液中に移行し、固化体へ移行する。このため最終処分法によっては、不純物の

除去を行う必要がある。

FSI の酸化ウラン含有ナトリウムの含有する酸化ウランの量は、ナトリウム量約 2.6 トンに対し 100g 以下である。これはフィルタを通した後の残留量である。含有量は微量であることから、抽出は困難と考えられ、特に取り除く工程は考えないこととする。ここで、クリアランスレベルの動向によっては、苛性ソーダ廃液を固化しなくとも中和廃棄できる可能性も残されているが、本研究では固化処理を念頭に置いたフローで進めていくこととする。

ナトリウム中の放射性物質の除去に関しては、ナトリウムの精製技術の観点からの可能性も考えられる。例えば、コールドトラップを利用してある程度の不純物を取り除くことが考えられるが、コールドトラップによる捕獲は主に酸化物、水素化合物に限られるため、<sup>54</sup>Mn や <sup>60</sup>Co の除去にはあまり期待できない。ナトリウムイオンに対する選択透過性を有する β アルミナを用いたナトリウム精製技術を開発することも考えられるが、除去効率、実用性、二次廃棄物の発生等、開発課題は多いため、オプションとしては考えられるものの、現状では精製技術までスコープに入れないこととする。

## 2.7 ナトリウム転換の処理課題

国内で大量ナトリウムを、ナトリウムー水反応によって苛性ソーダに転換するためには、知見が乏しく、経験も無いことから、海外の先行例を参考にしつつ十分慎重に行う必要がある。また、ナトリウムの転換から固化体製作までの一貫した手法として確立していく必要がある。このため、ナトリウム転換技術を確立するために以下のような課題が挙げられる。

### [安全性]

本転換手法は、ナトリウムー水反応によって活性な金属ナトリウムを苛性ソーダに転換する処理方法である。ナトリウムー水反応は、発熱反応であり、また可燃性の水素ガスを発生するので、十分安全性を考慮する必要がある。苛性ソーダ、即ち水反応による大量のナトリウム処理は、反応状態を正確に把握し、ナトリウム供給量及び苛性ソーダ濃度（純水供給量）を適切に制御し、プロセスのデータを正確にモニターすることにより実施可能と考えられる。このため、制御された状態で化学反応を起こさせるシステムとして開発する必要がある。

### [効率性]

化学反応で最終生成物を作るには、多くの処理過程を経ず、できるだけシンプルな方法で生成できれば効率的である。また、反応を起こさせる方法についても、安全であることは勿論であるが、システム的に複雑でなく、制御性がよく、運転操作も容易で、効率的である必要がある。したがって、最適処理条件及び処理装置の最適仕様を基礎試験結果から決定する必要がある。

### [経済性]

基礎試験装置は開発段階の装置ではあるが、各種の試験条件においても安全な設計としなければならない反面、トータルコストにおいて経済的なシステムとする必要がある。このため、スケールアップにより実機適用するための装置仕様へ反映する知見を示し、設備規模や設備コストを低減化したシステム構成を提示する必要がある。また、設置するスペースが管理区域内であるため、できるだけコンパクトな装置にする必要がある。したがって、経済的な処理装置の最適仕様を基礎試験結果から決定する必要がある。

## 2.8 ナトリウム転換技術開発のアプローチ

### (1) 海外技術調査

放射性ナトリウムの苛性ソーダへの転換処理に関しては、先行する海外の技術情報を取り入れながら開発していくものとする。先述の2.5節でも述べたように、現状で実機ナトリウムの処理実績があるものは、米国EBR-IIにおけるSPFとフランスのNOAH法である。核燃料サイクル開発機構は、米国エネルギー省(DOE)と共同研究協定を結び、「高速炉における安全なナトリウム取扱技術」という共同研究により、米国アルゴンヌ国立研究所において、EBR-II閉鎖プロジェクトにおけるナトリウム取扱技術調査を行ってきた。欧州とは、共同研究協定EJCC専門家会議により、定期的な「ナトリウム技術に関する専門家会議」で情報交換を行っている。これら海外の技術調査から得られたシステム情報やトラブル経験等は、基礎試験装置製作や試験計画に反映している。

### (2) ナトリウム転換手法の確立

ナトリウム転換手法を確立するため、ナトリウム試験施設の解体撤去により排出された非放射性ナトリウムを用い、ナトリウム転換基礎試験装置を製作して、試験研究により手法を確立していくこととした。

海外実機をモデルに検討した本装置の概略構成を図-2に示す。本基礎試験装置は、苛性ソーダ水溶液を満たした反応容器にナトリウムを窒素ガスアトマイジング方式にてスプレー状に噴霧し、ナトリウム-水反応によりナトリウムを苛性ソーダ化する装置である。すなわち以下の化学反応を反応容器内で行わせるものである。



このため、反応により生じた余剰苛性ソーダを貯蔵するためのタンク、反応により生じた水素ガスの処理が必要となる。試験装置は主にナトリウム注入系、苛性ソーダ溶液循環系、排ガス放出系等で構成される。試験装置の詳細は後記3章で詳述する。

ナトリウム転換手法の確立は、以下の3つの試験により行う。

- ① 基本反応試験 → 最適処理条件の把握

基本反応試験は、その内容・目的により、ナトリウム微量注入試験と反応パラメータ試験の2つのステップに分類される。まず、基本反応特性を把握するために、流動苛性ソーダ液中で少量のナトリウムを用いての反応試験から反応モデルを確認する。次に、反応に支配的なパラメータを把握するため、各試験条件を変化させて試験を実施し、反応を制御するための最適な処理条件を決定する。

②システム性能試験 → 系統及び設備仕様の提示

定常時や異常時においても安全なシステムとするため、制御性を調べ、各系統の性能確認及び装置の健全性検査を行い、装置仕様や構成が実機適用する上で妥当なシステムであることを実証する。また、基礎試験装置の処理能力アップを検討し、実機ナトリウム処理へのスケールアップ性を調べる。

③長時間試験 → 転換手法及び安全性の実証

ナトリウム転換処理を実証するため、総合的なシステム性能を確認しながら連続運転による運転時間やナトリウム処理量の実績を得るとともに、運転要領を確立する。

上記試験により得られたデータ及び評価結果をナトリウム転換技術としてまとめ、システム仕様と構成、反応現象とその制御方法、最適処理条件、運転要領や保守方法、スケールアップ仕様、安全性評価結果、処理実績 等を、実機適用における装置設計、製作、運転、保守要領に反映する。試験スケジュールを表2.2に示す。

## 2.9 ナトリウム転換技術開発の開発工程

ナトリウム転換基礎試験は、平成12年度までに試運転としてのシステム性能試験、校正試験を終え、平成13年度は微量の非放射性ナトリウムを用いた転換試験を開始した。平成14年度以降からは本格的に基本反応特性を把握する試験とシステム性能を調べる試験を実施し、ナトリウム転換手法を確立し、長時間試験によりナトリウム転換手法を実証して、ナトリウム転換の原理的技術(案)としてまとめていく。本成果は、平成16年度から着手予定のFSI用ナトリウム処理の装置設計、製作へ反映する。

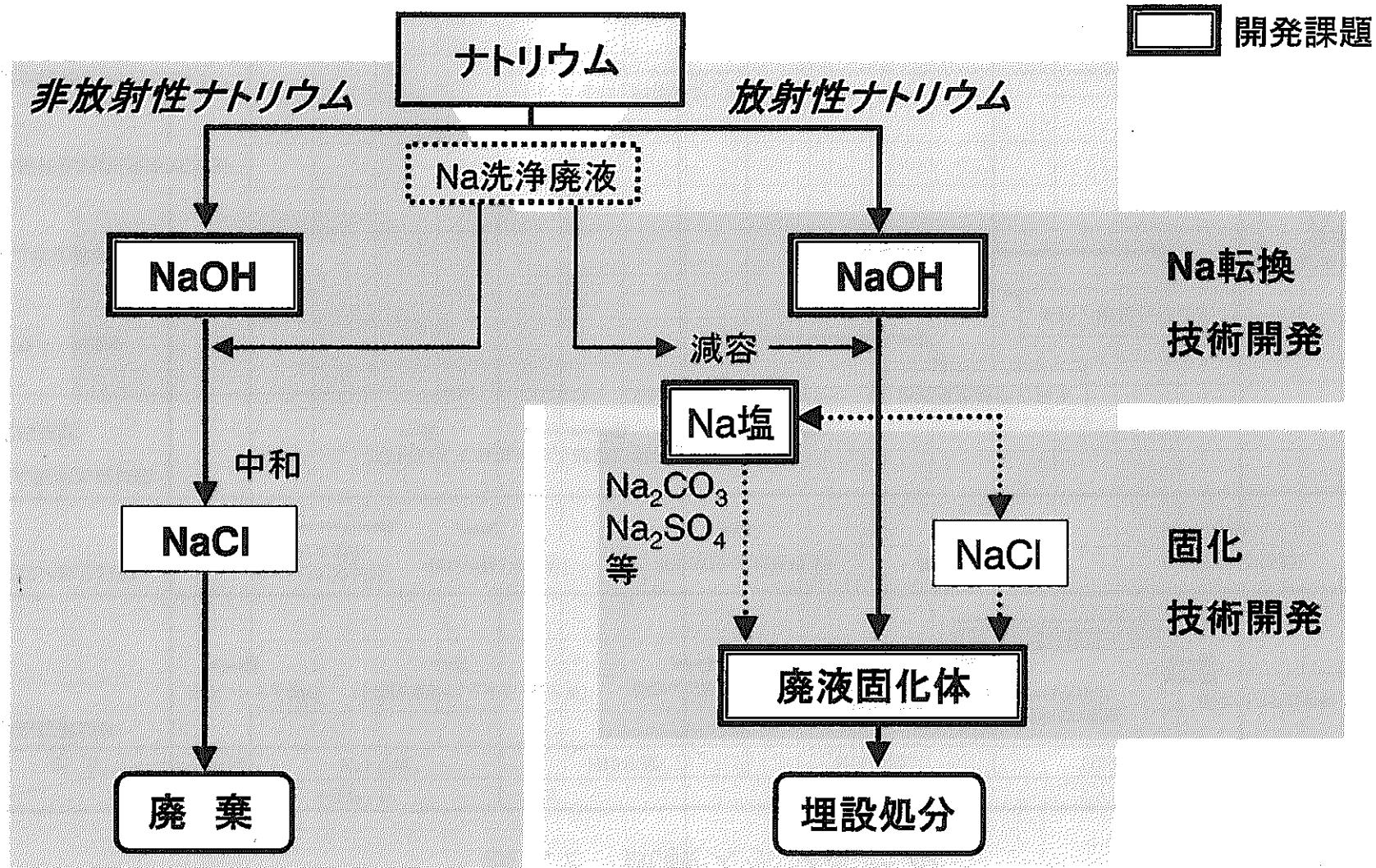
表2.1 ナトリウム転換技術の現状と適用例

処理方法	処理媒体	生成物	形態	特 徴
苛性ソーダ処理法	NaOH	NaOH	液体	米国EBR-II及びフランスで実機適用例があり、開発課題が少ない。
水／蒸気処理法	水／蒸気	NaOH	液体	既存技術であるが、大量Na処理には安全性の問題で適用例はない。
炭酸ガス処理法	CO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	固体	実機適用実績はなく、開発課題が多い。反応速度が遅い。
溶融塩処理法	O <sub>2</sub> 、CO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	固体	実機適用実績はなく、開発課題が多い。
アルコール処理法	アルコール	NaR	液体	既存技術であるが、廃液が多く処理も困難。
直接ガラス固化法	ガラス	ガラス体	固体	実機適用実績はなく、開発課題が多い。コスト高。

表2.2 試験スケジュール

項目	STEP 1			STEP 2			実機適用
	H11年度	H12年度	H13年度	H14年度	H15年度	H16年度	
1. 基礎試験装置製作							
	基本システム製作	付帯設備製作(冷却系・放出系)	連続Na処理系製作	系統構成/機器仕様(材質、型式等)改造 H14年度は主に排ガス系等、H15年度は 必要に応じ実施	固化システム製作		
				系統/機器仕様等の見直し			実機適用試験
2. 予備試験／校正試験	機能試験(水試験) ／校正試験	機能試験(冷却系)	機能試験(連続処理系)	機能試験(改造部)	機能試験(改造部)		
3. ナトリウム転換基礎試験							
(1) 微量反応試験		試運転としての微量注入確認試験を含む			最適反応条件の提示		
(2) 反応パラメータ試験					系統/機器仕様提示		
(3) システム性能評価試験							転換手法の実証 機器仕様確立 運転方法の確立
(4) 総合性能評価試験(長時間試験)							
(5) 装置健全性検査(メンテナンス時)			機能確認、肉厚測定、排ガス分析等				

## 図2.1 ナトリウム処理技術全体フロー



### 3. ナトリウム転換基礎試験装置の設計・製作

#### 3.1 設計方針

##### 3.1.1 試験装置の構成・概要

ナトリウム転換基礎試験装置の概略構成を図3.1に、外観写真を図3.2示す。

以下に、本試験装置が有する設備系統とその概要・特徴を述べる。

##### (1) ナトリウム処理系

- ① ナトリウム処理系は、ナトリウム受入ライン、ナトリウム貯蔵タンク、ナトリウム注入ライン、反応容器等で構成される。
- ② ナトリウム処理は、予め所定温度、所定濃度の苛性ソーダ溶液を充填した反応容器に、容器上部または下部側面よりナトリウム貯蔵タンクから移送された溶融ナトリウムをスプレー状で連続的に注入し、ナトリウム-水反応により苛性ソーダを生成する。
- ③ ナトリウム貯蔵タンクは、反応容器にナトリウムを注入するためのバッファタンク及び注入ナトリウムの計量を行うためのものである。ナトリウム貯蔵タンクへのナトリウムの受入は、ドラム缶より行う。タンクの下部出口にはナトリウム注入用スプレーノズルの閉塞防止のため、フィルターを有する。
- ④ ナトリウム貯蔵タンクから反応容器へのナトリウム注入は、窒素ガス加圧により行う。そのため、タンク及び注入ラインは予熱設備、窒素ガス加圧ラインを有する。またガス系へのナトリウムの移行を防止するため、ペーパートラップを有する。
- ⑤ 反応容器は、小型圧力容器規格である。反応容器には、上部及び下部側面部にナトリウム注入用のスプレーノズルを有する。
- ⑥ 反応容器下部側面部のスプレーノズルについては、ナトリウム注入が行われていない間、反応容器内苛性ソーダ溶液の逆流防止のため、窒素ガスを常時流動可能とした。
- ⑦ ナトリウム注入ノズルは、窒素ガス混合によるガスマトマイジング方式である。主要部材質はインコネル600である。また、そのアトマイジング用窒素ガスラインにはナトリウム化合物等によるノズル部閉塞防止のため窒素ガス加熱器及び蒸気供給設備を有する。

##### (2) 苛性ソーダ溶液循環系、除熱系

- ① 苛性ソーダ溶液循環系は、反応生成物貯蔵タンク、循環ポンプ、混合器等で構成される。また、除熱系は、冷却器、チラー等で構成される。
- ② 循環および除熱系は、系統内苛性ソーダ溶液の濃度制御及び反応熱の除去を行うためのものである。反応により生成した余剰苛性ソーダは、循環ラインの反応容器への戻りラインから分岐して、反応生成物貯蔵タンクに移送される。循環ラインには、苛性ソーダ濃度を一定に維持するため濃度確認用の超音波式濃度計および純水（イオン交換水）供給系統を有する。

- ③ 反応生成物貯蔵タンクは、苛性ソーダ溶液の受入、貯蔵タンクとして用いられる他、ナトリウムの転換によって発生する余剰苛性ソーダのバッファタンクとして用い、また、反応容器内における異常反応などによる急激な圧力上昇時のクッションタンク、気液分離としての機能も兼ねるため、タンク内部にはデミスタ、バッフル板等の気液分離装置を内包する。
- ④ 冷却器及びチラーは、発生する反応熱を除去するためのものであり、水冷却により除熱を行う。
- ⑤ 苛性ソーダは、特に本試験条件では高濃度の苛性ソーダであるため、腐食性が強い上に粘性も高い。故に、配管内における長時間の滞留が生じないよう、水平部配管部には傾斜を設けるなどドレン性を考慮した配管設計とした。

### (3) 排ガス処理系

- ① 排ガス処理系は、スクラバ、ミストトラップ、フィルタ、スタック、点火器、水素及び酸素濃度計等で構成され、排ガス中のミスト成分の補足、ナトリウムー水反応により生成する水素ガスの燃焼を行う。
- ② スクラバ、ミストトラップ、フィルタは、排ガス中に含まれる苛性ソーダミストの回収を行う。ミストトラップフィルターの設計上の捕集効率は 99.99%である。
- ③ 反応容器出口において、排ガス中に含まれるミスト成分を捕捉し、分析するための分析フィルタを設置した。
- ④ ナトリウム転換反応の過程で発生した反応容器内の水素ガス(Na 注入量 10 kg/h の場合、水素ガスが 5 Nm<sup>3</sup>/h 発生)は、スタック出口部に設置の点火器により、強制的に燃焼させ処理する。点火源はマイクロヒータで、水素の発火点 570°C (0.1 MPa 時) を考慮し、通常運転時のヒータ表面温度は 600°C である。尚、排ガスラインには、逆火防止措置として、スタックの上流側にフレームアレスタを設置した。

### (4) ユーティリティ設備

#### ① 窒素ガス供給設備

窒素ガス供給設備は、窒素ガスエルフ、ボンベ及びラックから成り、試験装置の窒素置換、ナトリウム貯蔵タンク及び反応容器へのナトリウム、苛性ソーダ溶液の充填・圧送の際に用いられる。

#### ② 真空設備

真空設備は、真空ポンプ及びミストフィルターから成り、系統内のガス置換時に用いられる。

#### ③ 圧縮空気設備

圧縮空気設備は、コンプレッサーから成り、空気作動弁等の作動用圧縮空気を供給するために用いられる。

#### ④ 純水供給設備

純水製造設備は、活性炭ろ過器、純水製造器及び純水ポンプから成り、苛性ソーダの濃度調整、系統内の洗浄時に用いられる。

**⑤工水供給設備**

工水供給設備は、チラー及び冷却器の冷却水、純水製造器の給水等に用いられる。

**⑥排水処理設備**

排水処理設備は、反応により生成した余剰苛性ソーダを廃棄するために、塩酸による中和処理を行う。

**⑦メンテナンス設備**

ナトリウム転換反応を行う反応容器の腐食、破損等を想定し、補修や健全性検査を可能とするため、反応容器を装置から取り外せる構造とし、反応容器を吊り上げ移動させるためのホイスト、吊りビーム、メンテナンス用台車が設置されている。

**⑧データ収録装置**

データ処理は、温度等各種の計測信号がデータロガー(Darwin)を介して、現場に設置の計算機(パソコン)に取り込まれ、リアルタイム監視が可能である。

**3.1.2 主要運転条件（計画ベース）**

- ・装置稼働時間 : 10,000 h r 程度
- ・ナトリウム注入速度 : 1 ~ 10 kg/h
- ・ナトリウム系運転温度 : 120 ~ 220 °C
- ・NaOH 系運転温度 : 40 ~ 170 °C  
(図 3.3 苛性割れに及ぼす濃度、温度の影響<sup>(5)</sup>)
- ・NaOH 濃度 : 0 ~ 70 wt%
- ・NaOH 循環流量 : 最大 2,500 kg/h
- ・NaOH 排出量 : 34.8 kg/h (at 50wt% NaOH)
- ・純水注入量 : 20 l/h (at 40wt% NaOH)
- ・発生水素量 : 最大 5 m<sup>3</sup>/h (Na 注入 10kg/h 時)
- ・反応容器運転圧力 : -0.098 ~ 0.098 MPa

**3.2 製作方針****3.2.1 主要構成材料の選定**

一般に、ナトリウムはステンレス鋼との共存性に優れており、ナトリウム貯蔵容器及び配管に用いる材料として、SUS304 鋼が広く使用されている。本試験装置においても、ナトリウム系には SUS304 鋼あるいは SUS316 鋼を使用した。

一方、苛性ソーダは材料への腐食影響が大きく、濃度や温度条件によっては SCC も発生する。フランスではアルカリ接液部にはニッケル(Ni)系材料のインコネルを使用しており、米国 EBR-II では反応容器やスプレーノズルにニッケルを使用している。ニッケル系材料は、耐アルカリ材料としては優れているものの非常に高価であり、コスト高となる。そこで本試験装置における材料の選定に関しては、試験条件である苛性ソーダ濃度や同試験温度等を制限し、ステンレス系の中では耐腐食性に優れた SUS316 鋼を使用して安全性や経済性、及び耐腐食性を考慮し、容器及び配管に用いる材料として実機適用に向けた SUS316 の適用性の確認を行う。

### 3.2.2 主要機器仕様

ナトリウム転換基礎試験装置の系統図あるいは主要機器仕様等の詳細については、Appendix に示す。

### 3.3 計装計画

以下に主要な計装計画の概要について述べる。

尚、各計測機器の仕様についても、試験装置の運転及び基礎試験の実施過程において、実機適用する上で妥当なものか検証していく必要がある。

#### ①温 度

各プロセス（ナトリウム、苛性ソーダ、窒素ガス、排ガス）温度データの取得、容器及び配管等の温度管理には、それぞれK型シーズ熱電対（クラス 2（旧 0.75 級））を設け計測する。特に反応容器内には、ナトリウム注入試験時の容器内苛性ソーダ温度及びボイド分布データから、反応進行状況を把握するため、60 本の熱電対と 20 本のボイド計熱電対が 3 次元的に挿入されている（Appendix-14, 15 参照）。

#### ②液 位

ナトリウム貯蔵タンクには、誘導型連続式液面計を設置し、試験時あるいはナトリウムドラム缶からの充填時の液位監視を行う。

また、苛性ソーダが充填される反応容器及び反応生成物貯蔵タンクには、差圧式液面計を採用し、液位の監視あるいは制御を行う。

#### ③流 量

ナトリウム注入流量範囲は、1 ~ 10kg/h と小さいため、一般にナトリウム流量計測において実績を有する電磁流量計の使用は困難である。よって、ナトリウム貯蔵タンク液位の時間当たりの変化（減少）率を演算処理し、ナトリウム注入流量を把握する。

苛性ソーダ循環流量は、ブロックオリフィスを用い、差圧を演算処理して流量を把握し、監視・計測する。

#### ④濃 度

苛性ソーダ濃度の測定には、配管内苛性ソーダの流速に影響を受けないことから、超音波式濃度計を採用することとした（Appendix-16 参照）。本濃度計の校正については後記 5.2.2 節にて詳述する。

測定された濃度データにて、純水注入量の制御を行う他、上述の苛性ソーダ循環流量の校正演算も行う。

### 3.4 検査

本装置を製作するに当たり、耐圧・気密漏洩試験、浸透探傷試験、ヘリウムリーク試験、放射線検査等により、問題無いことを確認した。

スプレーノズルについては、工場検査時において、水試験にて噴霧角度の確認、更に、位相ドップラー式レーザー粒子分析計による粒子径の確認を実施した。

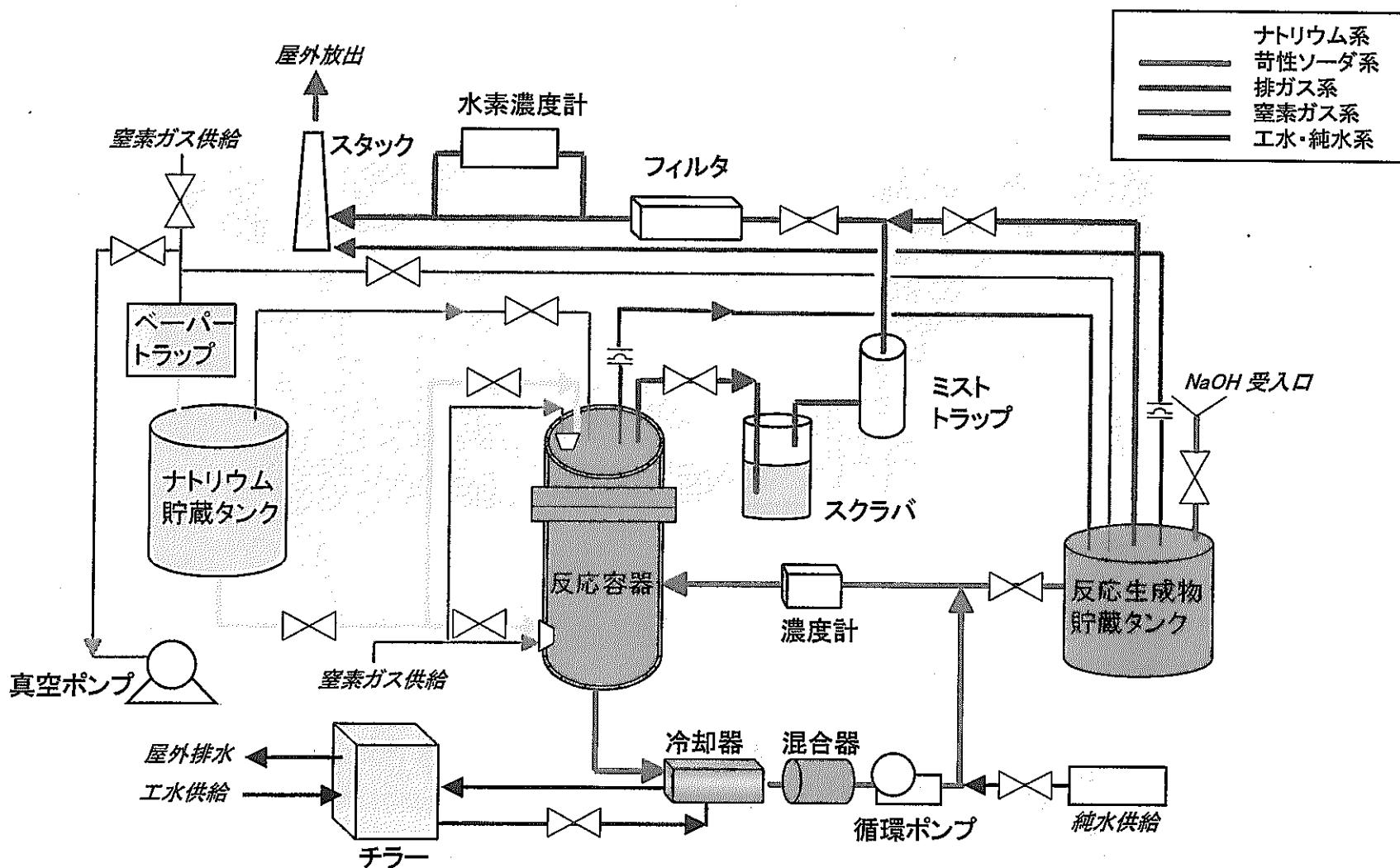


図3.1 ナトリウム転換基礎試験装置構成図

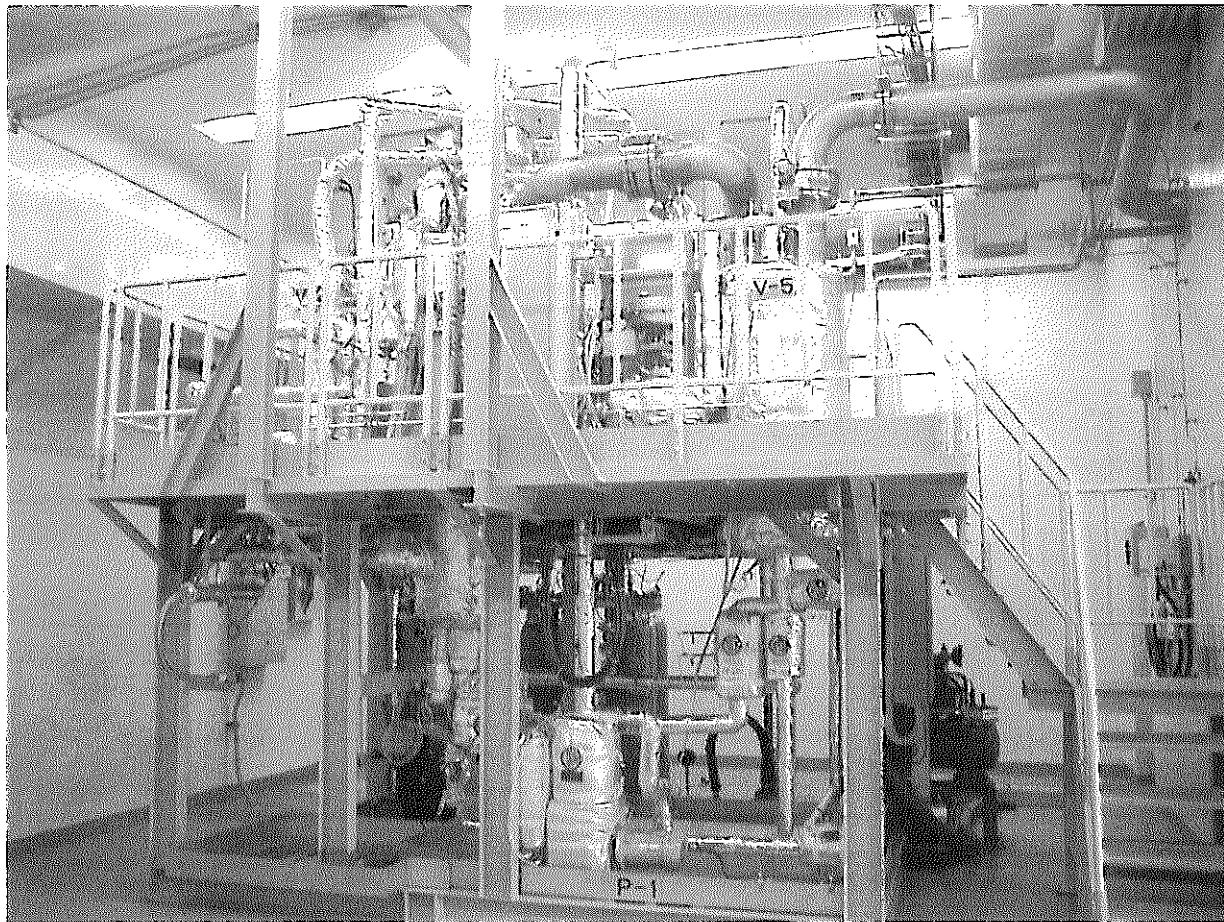


図3.2 ナトリウム転換基礎試験装置外観

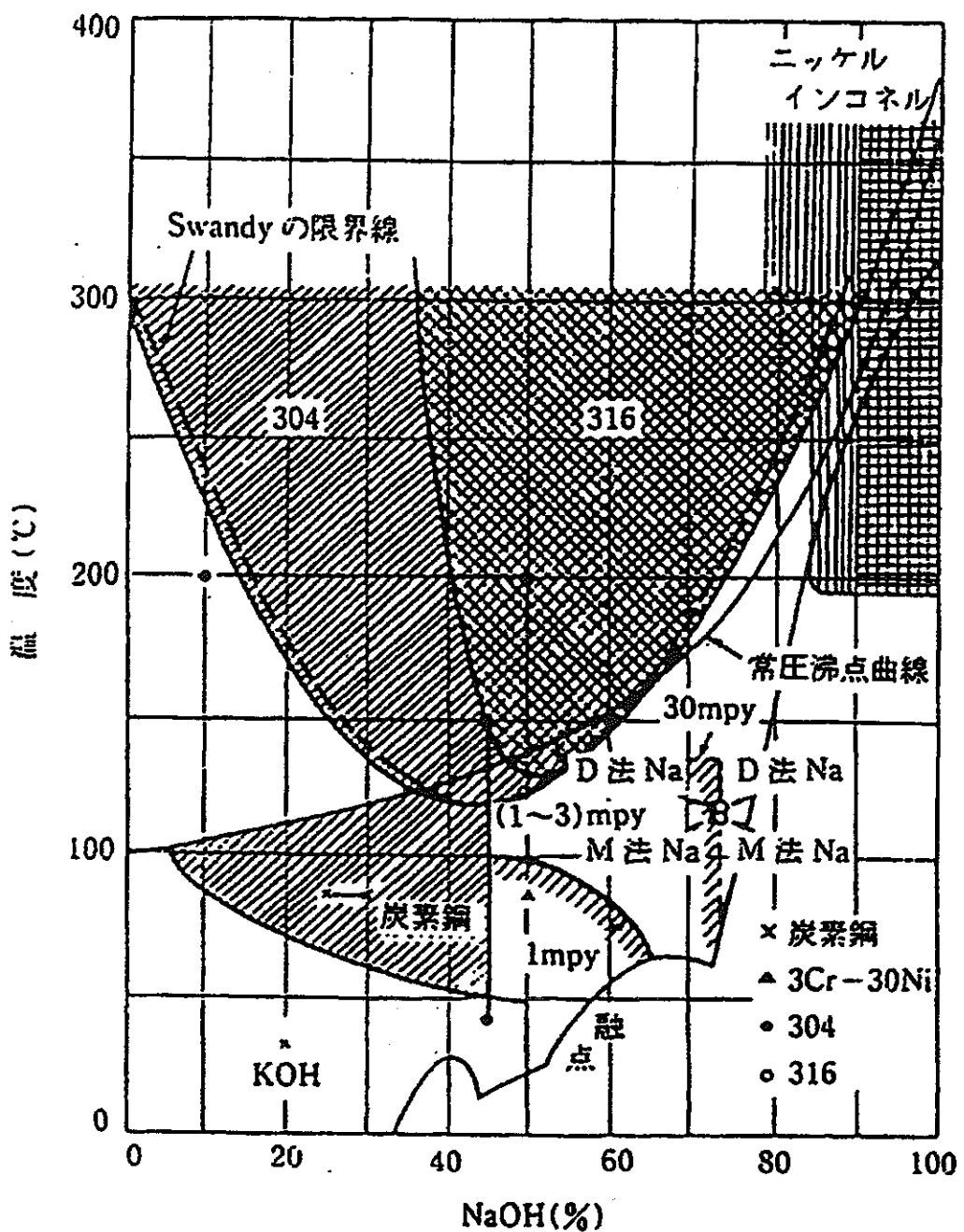


図 3.3 苛性割れに及ぼす温度、濃度の関係<sup>(5)</sup>

## 4. ナトリウム転換基礎試験装置の安全対策

### 4.1 インターロック

本装置におけるもっとも重大なトラブルはナトリウム漏洩である。苛性ソーダの漏洩は火災の危険性はないが、ナトリウム漏洩は火災にも繋がるため、ナトリウム漏洩を未然に防止するか、最小限にくい止めるかの手段が必要となる。表4.1にナトリウム転換基礎試験装置インターロックリストを示す。これらはいずれも、ナトリウム注入試験時の異常反応の抑止、あるいはナトリウム漏洩等の装置の重大故障に繋がる事象を抑制・防止するため、警報およびインターロックにより自動的にナトリウム注入遮断弁 AV-103 の閉操作を行うものである。

### 4.2 安全対策設備

#### (1) 異常反応ガス放出系（圧力開放系）

排ガス系閉塞や異常反応による系内圧力上昇が生じた場合には、苛性ソーダとの反応を停止させるため、圧力 0.05MPa にて「高」警報発生とし、作業員によるナトリウム注入停止操作ができるようにナトリウム注入遮断弁 AV-103 を設けた。また圧力 0.08MPa にて、「高高」警報発生とし、インターロックによりナトリウム注入遮断弁を自動閉とした。さらに圧力上昇が進み 0.098MPa に達した場合は、系内圧力をスタックから大気へ開放して圧力上昇を防止するため、反応容器上部および反応生成物貯蔵タンク上部にラプチャーディスクを設けた。

#### (2) 反応容器関連

##### ① 初期スパイク圧に対する対策

反応容器製作において、想定される現実的ケースにおける初期スパイク圧にも十分耐えうる強度を持つ構造とした。(初期スパイク圧: 0.55MPa に対し、設計圧: 1.47MPa)

##### ② スプレーノズル腐食に対する対策

スプレーノズル主要部材をインコネル 600 とし、苛性ソーダに対する耐腐食性を向上させ、スプレーノズル破損によるナトリウムの過剰注入や漏洩の防止を図った。

#### (3) ナトリウム漏洩対策設備

##### ① ナトリウム漏洩検知器

万一の漏洩に備えて、漏洩早期発見のための漏洩検知器（平型接触式）をナトリウム貯蔵タンク本体下部及びナトリウムを保有する配管直下の受け皿内にそれぞれ設置した。

##### ② ライナー設備

万一本体下部にナトリウムが漏洩した場合に、漏洩ナトリウムと床コンクリートとの接触を防止するためにライナー（ナトリウム受け皿）を設置した。

ナトリウム受け皿の容量は約 140 l であり、ナトリウム貯蔵タンク内の最大ナトリウム量である 5.0kg が全て漏洩した場合にも十分対応できる容量を有している。

### ③火災報知器

ナトリウム転換基礎試験装置が設置されている試験室内天井には、火災報知器（煙感知器及び熱感知器）が設置されており、万一のナトリウム漏洩による火災の感知を行う。また、ナトリウム使用量に応じたナトレックス消火器を設置している。

## (4) 水素ガス漏洩対策設備

### ①水素計

試験室内での万一の水素ガス漏洩を検知するため、装置上部の天井に水素計（可燃性ガス検知器）を設置し、現場及び制御室にて警報監視できるものとした。

### ②監視カメラ

スタック出口部の開放雰囲気中に監視カメラを設置し、点火器による燃焼（水素放出）状況を制御室から監視できるものとした。

### ③フレームアレスタ

スタックから装置排ガス配管内への逆火を防止するため、スタックの上流側にフレームアレスタを設置した。

## (5) 苛性ソーダ漏洩対策設備

### ①苛性ソーダ漏洩検知器

万一の漏洩に備えて、漏洩早期発見のための漏洩検知器（平型接触式）を反応容器本体下部、反応生成物貯蔵タンク本体下部、そして苛性ソーダを保有する配管直下の受け皿内にそれぞれ設置した。

### ②ライナー設備

万一苛性ソーダが漏洩した場合に、漏洩苛性ソーダがナトリウムエリアへの侵入あるいは床面上に拡散することを防止するためにライナー（苛性ソーダ受け皿）を設置した。苛性ソーダ受け皿の容量は約 450 リットルであり、反応容器の内容積 200 リットルおよび反応生成物貯蔵タンクの内容積 200 リットルの漏洩にも十分対応できる容量を有している。

### ③ナトリウム注入遮断弁

万一の漏洩時には、作業員により制御盤面上にて操作可能なナトリウム注入遮断弁（ON-OFF 弁）の閉操作により、反応を停止することができる。

### ④防護具

苛性ソーダの人体への影響は、接触による失明やアルカリ火傷あるいは吸引による粘膜の炎症などである。苛性ソーダ充填あるいは漏洩時等、直接苛性ソーダを取り扱う必要がある場合にはアルカリによる人体への接触・火傷等を防止する観点から、耐アルカリの防護具を必ず装着する。

## 4.3 操作上での安全対策

### (1) 試験装置の点検

試験装置の健全性維持により安全を確保するため、以下に示す点検を実施する。

#### ①起動前点検

試験装置初期起動時及び長期(半年程度)停止後の起動時に実施する。

- (a) ヒータ及び回転機器の抵抗測定、絶縁抵抗測定試験
- (b) 警報設定値確認
- (c) インターロック試験
- (d) 酸素濃度計、水素濃度計の校正
- (e) 回転機器・遠隔操作弁動作試験
- (f) 気密漏洩試験

②日常点検

日常的な安全点検パトロールとして実施する。

- (a) ナトリウム及び苛性ソーダ溶液漏洩の有無
- (b) 各系統の圧力及び容器類液位の変化の有無
- (c) 異音、異臭の有無の確認

③年次点検（健全性検査）

装置健全性の確認のため、1回／年の頻度で自主点検を実施する。

- (a) 配管及び容器類の肉厚測定
- (b) 反応容器覗き窓からの内部目視検査（亀裂の有無等）
- (c) スプレーノズル開放点検（目づまり、腐食の有無等）
- (d) 気密漏洩試験
- (e) 警報設定値確認
- (f) インターロック試験
- (g) 酸素濃度計、水素濃度計の校正
- (h) 回転機器・遠隔操作弁動作試験
- (i) フレームアレスタ分解点検（目づまり、腐食の有無等）

**(2) 試験実施上の対策**

①試験条件の設定

試験を開始するにあたり、反応現象に対する知見が乏しいことから、基本的に試験は現実的に生じると考えられる範囲内で安全側の条件設定を行うこととし、初期の試験においては、以下の通り実施する。

- (a) 苛性ソーダ濃度及び温度条件の設定は、使用材料であるSUS316鋼の苛性割れを引き起こさない範囲（図3.3）とする。
- (b) 未反応ナトリウムの液面でのプール可能性を抑制するため、苛性ソーダ溶液は必ず循環させる。
- (c) 注入したナトリウムが全量瞬時に反応したとしても、発生水素による圧力上昇をラップチャーディスクの破損圧力(0.098MPa(G))以下とするため、注入ナトリウム総量を100g以下に制限する。このため、ナトリウム注入速度は1kg/h程度とし、注入時間を6分以下とするか、もしくはナトリウム液面計により100g注入した時点で注入停止するかのどちらか早いほうとする。
- (d) 上記(c)にて異常な圧力挙動や異常な水素濃度変化がないことを確認した後、次

のステップの条件（基本的に反応量を徐々に高める）を決定する。

②試験中の監視

試験中は以下に示す各プロセス値を監視し、万一の異常の早期発見に努める。

- (a) 反応容器圧力
- (b) 反応容器出口苛性ソーダ温度
- (c) 反応容器液位
- (d) ナトリウム貯蔵タンク圧力
- (e) ナトリウム貯蔵タンク液位
- (f) ナトリウム注入流量
- (g) 苛性ソーダ循環流量
- (h) 排ガス放出系水素濃度、及び屋内水素濃度
- (i) 排ガス放出系酸素濃度
- (j) アトマイジングガス温度
- (k) 監視カメラによるスタック内の発生水素燃焼状況
- (l) 反応容器の振動状況
- (m) ナトリウム及び苛性ソーダ漏洩の有無

②試験終了の判定

以下を試験終了の判定条件とし、試験終了まで監視を継続する。

- (a) 放出系水素濃度が 0% になり、かつ安定していること。
- (b) 反応容器内部温度、出口温度の上昇が停止したこと。

表4.1 ナトリウム転換基礎試験装置インターロックリスト

No.	異常事象	現象	警報	制御動作	原因
1	ナトリウム流量増大	・反応容器温度上昇 ・苛性ソーダ濃度上昇	Na貯蔵タンク流量（液位変化率）「高」 Na貯蔵タンク流量（液位変化率）「高高」	・警報のみ ・警報 ・ナトリウム注入弁自動閉	・手動弁開度設定不良 ・窒素ガス系故障 ・注入ノズル破損
		・反応容器温度低下 ・苛性ソーダ濃度低下	Na貯蔵タンク流量（液位変化率）「低」	・警報のみ	
2	ナトリウム流量減少	・ナトリウム漏洩 ・ナトリウム火災	Na漏洩検出器「漏洩」	・警報のみ	・機器、配管破損
3	ナトリウム注入異常	・Naオーバーチャージ	Na貯蔵タンク液位「高」	・警報のみ	・Na貯蔵タンクへのNa過剰充填
			Na貯蔵タンク液位「低」	・警報のみ	・反応容器へのNa過剰注入
4	苛性ソーダ循環流量異常	・苛性ソーダ循環流量低下	苛性ソーダ循環流量「低」	・警報のみ	・ポンプ故障 ・配管閉塞
			苛性ソーダ循環流量「低低」	・警報 ・ナトリウム注入弁自動閉	
5	苛性ソーダ漏洩	・反応容器液位低下 ・苛性ソーダ漏洩	反応容器液位「低」	・警報のみ	・液位制御不良 ・機器、配管破損
			NaOH漏洩検出器「漏洩」	・警報のみ	・機器、配管破損
6	純水注水量増大	・反応容器温度低下 ・苛性ソーダ濃度低下	純水注水流量「高」	・警報のみ	・純水装置異常 ・流量調節弁不良
			反応容器液位「高」	・警報のみ	・液位制御不良
			反応生成物貯蔵タンク液位「高」	・警報のみ	・液位制御不良
7	純水注水量減少	・反応容器温度上昇 ・苛性ソーダ濃度上昇	純水注水流量「低」	・警報のみ	・純水装置異常 ・流量調節弁不良
			反応容器内(出口)苛性ソーダ温度「高」 反応容器内(出口)苛性ソーダ温度「高高」	・警報のみ ・警報 ・ナトリウム注入弁自動閉	・異常反応 ・除熱系装置異常
8	冷却系異常、異常反応	・苛性ソーダ温度上昇	反応容器内(出口)苛性ソーダ温度「低」	・警報のみ	
9	冷却系異常	・苛性ソーダ温度低下	冷却水流量「低」	・警報のみ	・除熱系装置異常 ・純水注入量増大
10	冷却水流量異常	・苛性ソーダ温度上昇	屋内水素濃度「高」	・警報のみ	・除熱系装置異常
11	冷却水流量異常	・苛性ソーダ濃度上昇	屋内水素濃度「高高」	・警報 ・ナトリウム注入弁自動閉	
12	系統外への水素漏洩	・屋内水素濃度上昇	反応容器内圧力「高」	・警報のみ	・機器、配管破損
13	排ガス系閉塞、異常反応	・容器内ガス圧上昇	反応容器内圧力「高高」	・警報 ・ナトリウム注入弁自動閉	・排ガス系閉塞 ・異常反応
			ラブチャディスク「閉」	・警報 ・水注入弁自動閉 ・ナトリウム注入弁自動閉	・排ガス系閉塞 ・異常反応
14	ラブチャディスク破裂	・高濃度水素放出	排ガス系酸素濃度「高」	・警報	
15	排ガス系内酸素濃度上昇	・排ガス系内での水素燃焼	点火器ヒータ温度「高」	・警報のみ	・配管破損 ・装置内負圧運転
16	点火器温度異常低下	・放出水素ガス未燃焼	点火器温度「低」	・警報のみ	・点火器ヒータ異常
17	窒素ガスヒーター異常加熱	・窒素ガスヒーター温度上昇	加熱器ヒータ温度「高」	・警報 ・ナトリウム注入弁自動閉	・窒素ガス加熱器ヒーター異常
			加熱器ヒータ温度「高高」	・警報 ・加熱器ヒータ自動停止	・窒素ガス流量低下 (配管閉塞、供給設備異常)
18	動力電源喪失	・動力機器停止(ポンプ等)	動力系電圧「低下」「不足」	・警報 ・水注入弁自動閉 ・ナトリウム注入弁自動閉	・電源供給不良 ・停電

## 5. ナトリウム転換基礎試験装置の試運転

### 5.1 システム機能試験

本装置を用いての試験を開始するにあたり、装置の持つ各部の働きを確認するための機能試験を実施した。各試験項目とその内容及び結果を以下に示す。

#### 5.1.1 真空試験

##### [目的]

試験装置系統内の窒素ガス置換前処理として、真空引き操作を実施する必要がある。この真空中度を確認するため、試験装置に設置の真空ポンプを用いて、所定の真空中度である $-0.098\text{ MPa}$ まで到達することを確認する。

##### [結果]

真空試験結果を図5.1に示す。

- ◇真空ポンプ起動後、約10分後に所定の真空中度に到達したことから、真空ポンプの能力は十分であることを確認した。
- ◇所定の真空中度において、30分間以上保持の後も圧力上昇は見られず、試験装置系統内の気密性に問題は無かった。

#### 5.1.2 予熱性能試験

##### [目的]

各系統の予熱昇温を実施し、所定の温度( $200^\circ\text{C}$ )まで設計昇温速度約 $70^\circ\text{C}/\text{h}$ にて昇温、制御可能なことを確認する。

##### [結果]

予熱昇温試験結果を図5.2に示す。

- ◇設計値を満足する昇温速度であることを確認した。
- ◇予熱設定値に対し、温度制御幅が設計値である $\pm 20^\circ\text{C}$ 以下になることを確認した。
- ◇保温材表面温度が、設計値である室温 $+40^\circ\text{C}$ 以下になることを確認した。

#### 5.1.3 アトマイジング用窒素ガス加熱試験

##### [目的]

スプレーノズルのアトマイジング用窒素ガスを流動させ、加熱器にて所定の温度( $350^\circ\text{C}$ )まで昇温、制御可能なことを確認する。更に、窒素ガス流量を変化させた場合の、マスフローコントローラによる流量調節挙動及び温度制御性を確認する。

##### [結果]

窒素ガス加熱試験結果を図5.3に示す。

- ◇窒素ガス流量一定の条件において、加熱器にて所定の温度まで問題なく昇温可能なことを確認した。
- ◇窒素ガス流量の設定値を変化させた際の流量制御挙動について確認したところ、設定値に対して瞬時に流量制御（マスフローコントローラ内蔵の自動流量調節弁の開度調整）が行われていた。

◇窒素ガス流量を変化させた際、所定温度に対するオーバーシュート及びアンダーシュートの幅が約±5°C以下であったことから、温度制御性に問題が無いことを確認した。

◇設計上の窒素ガス流量範囲内（最大 150NL/min）での必要な加熱器ヒータ電力値は、加熱器ヒータが有する能力に対し、十分余裕があることを確認した。

#### 5.1.4 热電対ツリー昇降試験

##### [目的]

反応容器内苛性ソーダの温度分布データを取得するため、手動昇降可能な热電対ツリーが設けられている。この热電対ツリーの操作性及び駆動部シール性を確認する。

##### [結果]

热電対ツリー昇降試験結果を図5.4に示す。

◇昇降操作がスムーズに行えることを確認した。

◇昇降操作の伴うシール部からの漏れが無いことを確認した。

#### 5.1.5 苛性ソーダ循環試験

##### [目的]

循環ポンプの流量は、手動設定によるインバータ制御により調整が行われる。この流量調整機能を確認するため、苛性ソーダに代わり、純水を用いて循環ポンプの挙動及び循環流量能力を確認する。

##### [結果]

苛性ソーダ循環試験結果を図5.5に示す。

◇循環流量設定値に対し、インバータにより流量制御されることを確認した。また、設計最大流量（2500kg/h）を流すことが出来ることを確認した。

◇循環流量制御に及ぼす循環水の温度による影響は見られなかった。

◇設計上の使用循環流量範囲内においては、ポンプモータ出力に十分余裕が有ることを確認した。

#### 5.1.6 除熱系機能試験

##### [目的]

ナトリウムと苛性ソーダとの反応に伴い発生する熱を除去し、苛性ソーダ温度を設定条件に維持するために設置した除熱系設備においては、苛性ソーダラインと冷却ラインに設けたそれぞれの制御弁により、苛性ソーダ流量と冷却水量の流量制御が行われる。このため、それぞれの流量制御モードの確認、冷却器の除熱性能の確認する。

##### [結果]

除熱系機能試験結果を図5.6～図5.9に示す。

◇図5.6及び図5.7には、冷却水温度及び流量、苛性ソーダ流量を変化させた場合の交換熱量を算出したシミュレーション結果である。この結果から、苛性ソーダ温度が低温、低濃度時には冷却水温度及び流量を制御させ、苛性ソーダ温度が

高温、高濃度時には冷却器流入苛性ソーダ流量を制御させるふたつの運転モードが有効である。

◇苛性ソーダ循環流量を調整するため、苛性ソーダバイパスラインに設置の手動弁(GV-231)及び冷却器入口苛性ソーダラインに設置のコントロール弁(FCV-232)のそれぞれの循環流量へ及ぼす開度の影響を確認した結果、GV-231は30%以下の開度で、FCV-232は60%以下の開度において影響が確認され、流量調整が可能であった。

◇試験上の最大苛性ソーダ循環流量 2500kg/h 時において、設計最大発熱量の 61,130kJ/h (ナトリウム処理量 10kg/h 時の発熱量に相当) の除熱が可能であることを確認した。尚、その時の冷却器入口苛性ソーダ温度と同入口冷却水との温度差は約 17°C であった。

### 5.1.7 反応容器液位制御試験

#### [目的]

試験を実施していく際、反応容器の液位を一定に制御するため、反応容器内にて生成した余剰苛性ソーダを反応生成物貯蔵タンクへ移送する必要がある。そこで、液位調節弁 AV-208 により、反応により生成した余剰苛性ソーダを反応生成物貯蔵タンクへ送ることで、反応容器の液位制御ができるかを確認する。

#### [結果]

反応容器液位制御試験結果を図 5.10 に示す。

◇ほぼ設定液位に制御されることを確認した。

◇反応容器内液位を 50mm 減少させた際の、制御開始から終了までの所用時間は、約 14 分であった。

### 5.1.8 圧力制御試験

#### [目的]

排ガス（反応により生成される水素ガス及びスプレーノズルのアトマイジング用窒素ガス）による系統内の圧力上昇を防ぐため、ミストラップ出口弁 AV-403 により系統内の圧力を一定に制御させる。このため、窒素ガスを用いて、圧力制御弁の動作により系統内圧力の制御性および制御限界を確認する。

#### [結果]

圧力制御試験結果を図 5.11 に示す。

◇排ガスを想定した窒素ガスの流量を変化させた場合においても、ミストトラップ圧力値は設定値 (0.01MPa) に制御されることを確認した。

◇ミストトラップ圧力値が設定値 (0.01MPa) に制御されている際、反応容器圧力値は約 0.015MPa を示していた。これにより、反応容器からミストトラップ出口までの配管圧力損失が約 0.005MPa であることが明らかとなった。

◇圧力制御が可能な排ガス最大流量は 206NL/min であることを確認した。

### 5.1.9 スプレーノズル性能確認試験

#### [目的]

スプレーノズルからのナトリウム注入流量の調整は、ナトリウム貯蔵タンク内の加圧ガス圧により調整される。また、注入されるナトリウムの噴霧粒径はアトマイジング用窒素ガス流量により調整することができる。そこで、スプレー流量や噴霧粒径に及ぼすパラメータの影響を検討するため、ナトリウムの代わりにアルコールを用いて、装置インストール後の本スプレーノズルが有する性能を確認する。

#### [結果]

スプレーノズル性能試験結果を図 5.12～5.15 に示す。

Appendix-8 に工場水試験時におけるスプレーノズル噴霧状況を撮影したものを示す。

◇工場試験において、液滴粒径に及ぼすアトマイジングガス流量の影響を確認した結果、試験条件として考えている液滴粒径  $100\mu\text{m}$  以下を満足させるために必要なアトマイジングガス流量は、上部スプレーノズル  $40\text{NL}/\text{min}$  以上、下部スプレーノズル  $20\text{NL}/\text{min}$  以上であった。

◇工場試験において、スプレー角度に及ぼすアトマイジングガス流量の影響を確認した結果、上部スプレーノズルの最大噴霧角度は  $38^\circ$  であり、設計角度  $40^\circ$  にほぼ近い値となった。また、その際に必要なアトマイジングガス流量は  $50\text{NL}/\text{min}$  以上であった。下部スプレーについては、設計角度  $20^\circ$  に対し、アトマイジングガス流量が  $28\text{NL}/\text{min}$  において噴霧角度は  $17^\circ$ 、 $55\text{NL}/\text{min}$  において噴霧角度  $20^\circ$  となつた。このことから、先の液滴粒径との関係も合わせ考慮し、試験条件としては、アトマイジングガス流量を  $30\text{NL}/\text{min}$  以上に設定することで、ほぼ設計値通りの液滴粒径及び噴霧角度を得ることができるものと考えられる。

◇スプレー流量に及ぼすナトリウム注入バルブ(NV-105)開度の影響を確認した結果、バルブ開度が約  $10\%$  以下において、スプレー流量の調整に効果が見られることが確認された。よって流量調整は、バルブ開度による流量影響が小さいことから、ナトリウム貯蔵タンクカバーガス圧による調整が有効である。

◇スプレー流量に及ぼすアトマイジングガス流量の影響を確認した結果、アトマイジングガス流量を変化させた場合においても、スプレー流量にほとんど変化は見られず、アトマイジングガス流量に影響を受けないことが確認された。

◇スプレー流量に及ぼす供給圧力（ナトリウム貯蔵タンクカバーガス圧）の影響を確認した結果、ナトリウム貯蔵タンクの設計圧力である  $0.98\text{MPa}$  のカバーガス圧において、下部スプレーノズルの現地性能試験時のスプレー流量は約  $5.5\text{L}/\text{h}$  となつた。このことから、本ノズルを使用して試験を行う際の試験条件としては、ナトリウム流量の最大を  $5\text{kg}/\text{h}$  以下とする必要がある。

## 5.2 校正試験

### 5.2.1 液位計校正試験

#### (1) 反応容器液位計

##### [目的]

反応容器の液位計は、差圧式液位計を採用している。この差圧式液位計の指示精度を確認する。

##### [原理]

本差圧式液位計の構成は図5.16の概略図に示す通り、差圧発信器へ繋がる反応容器上部及び下部からの差圧配管内圧力の差を感じ、演算して液位を計測するものである。反応容器上部からの差圧配管は気中であるが、水圧を伝えるために下部からの差圧配管には、初期投入時の液体を充満させておく必要がある。

実際の試験においては、反応容器内の液体（苛性ソーダ）の濃度は変動することから、初期投入時の液体濃度の比重と異なる場合が考えられる。よって反応容器液位の演算式は以下のように与えられる。

$$H = H_2 - H_1$$

$$H_1 = \{(\gamma_1 - \gamma_2) / \gamma_1\} \times H_2 + (\Delta P \times 10^6) / \gamma_1$$

$H$  : 反応容器内液位 (mm)

$H_2$  : 反応容器底部からの差圧発信器設置高さ (mm)

$\gamma_1$  : 反応容器内液体比重 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\gamma_2$  : 下部差圧配管内液体比重 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\Delta P$  : 差圧計測値 (kPa)

反応容器下部からの差圧配管内に充満している液体については、試験が実施されている場合においても液体の出入りが小さく、液体比重の変化は小さいものと考えられることから、 $\gamma_2$  は反応容器への初期投入液体比重を用いて演算した。

尚、演算のために必要な $\gamma_2$ 、 $H_2$  及び液位補正移動平均処理回数については、制御盤内に設置のタッチパネルから入力、変更することが可能である。実際の反応容器内の液体比重である $\gamma_1$ については、後述の苛性ソーダ濃度計の濃度計測値及び温度計測値から、シーケンサにて以下の演算式にて導き出される。

$$\alpha = C \times 4.9 \times 10^{-6} + 5.0 \times 10^{-4}$$

$$\gamma_1 = 1.02 + 0.0105 \times C - \alpha \times (T - 32) \times 10^3 / 1.8$$

$\gamma_1$  : 反応容器内液体比重 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

C : 苛性ソーダ濃度計測値 (wt%)

T : 苛性ソーダ温度計測値 (°C)

##### [試験方法]

- 1) 反応容器に仮設Uチューブ液位ゲージを設ける。
- 2) 苛性ソーダの代わりに純水を投入する。
- 3) 制御盤内のタッチパネルに初期データを入力し、演算による反応生成物貯蔵タンク液位を計測する。
- 4) 仮設Uチューブ液位ゲージの実測値と3)項の結果とを比較する。

## [結果]

反応容器液位計校正試験結果を図 5.16 に示す。

◇演算による液位計測値と実測値による誤差は、最大で 1.1% であった。このことから、差圧計測及び液位演算に問題無いことを確認した。

## (2) 反応生成物貯蔵タンク液位計

## [目的]

反応生成物貯蔵タンクの液位計は、反応容器液位計と同様に差圧式液位計を採用している。この差圧式液位計の指示精度を確認する。

## [原理]

本差圧式液位計の構成についても図 5.17 の概略図に示す通り、反応容器と同様である。

本タンクは、試験に際し生成する余剰苛性ソーダを受け入れることから、実際には初期投入時の液体濃度の比重と異なってくる場合が考えられる。しかし、本タンクの液位は試験条件に影響するものではなく、また、安全のために液位上昇が生じた場合には「高」警報が発生し、作業員により排水処理設備へのポンプ圧送を行うことが可能であることから、本タンクの液位演算式には、試験に伴う液体比重の変化を考慮せず、以下のように演算した。

$$\gamma_1 = \gamma_2$$

$$H = H_2 - (\Delta P \times 10^3) / \gamma_2$$

$H$  : 反応生成物貯蔵タンク内液位 (mm)

$H_2$  : 反応生成物貯蔵タンク底部からの差圧発信器設置高さ (mm)

$\gamma_1$  : 反応生成物貯蔵タンク内液体比重 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\gamma_2$  : 下部差圧配管内液体比重 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\Delta P$  : 差圧計測値 (kPa)

尚、反応容器液位計と同様に、演算のために必要な  $\gamma_2$ 、 $H_2$  及び液位補正移動平均処理回数については、制御盤内に設置のタッチパネルから入力、変更することが可能である。

## [試験方法]

- 1) 反応生成物貯蔵タンクに仮設 U チューブ液位ゲージを設ける。
- 2) 苛性ソーダの代わりに純水を投入する。
- 3) 制御盤内のタッチパネルに初期データを入力し、演算による反応生成物貯蔵タンク液位を計測する。
- 4) 仮設 U チューブ液位ゲージの実測値と 3) 項の結果とを比較する。

## [結果]

反応生成物貯蔵タンク液位計校正試験結果を図 5.17 に示す。

◇演算による液位計測値と実測値による誤差は、最大で 2.3% であった。このことから、差圧計測及び液位演算に問題無いことを確認した。

### 5.2.2 超音波式濃度計校正試験

ナトリウム転換試験においては、反応容器内苛性ソーダ濃度が重要な試験パラメータとなる。苛性ソーダ濃度を測定する超音波濃度計は、苛性ソーダ溶液中の超音波伝播速度がその濃度と温度に依存する特性を持つ点を利用し、超音波音速を測定して濃度を得るものである。本試験で計画している濃度(0~70wt%)や温度範囲(40~160°C)は、既存の校正曲線範囲より拡張された範囲にある。そこで、苛性ソーダ濃度及び温度をパラメータとして音速を測定し、音速-濃度-温度関係データを得て、従来より拡張された範囲の超音波濃度計の校正曲線を新たに作成する。

#### [超音波式濃度計仕様]

Appendix-16 に超音波濃度計本体（超音波伝送器）構造図を示す。

1) 計測方式 : 超音波音速計測方式

2) 計測範囲

- ・温 度 : 60°C~160°C
- ・音 速 : 1250~2500m/s
- ・精 度 : 最大+0.17% (at 30°C)

#### [試験方法]

図 5.18 に試験装置の概略構成図を示す。

1) 概略試験方法

試験は、苛性ソーダ溶液の濃度を一定とし、溶液温度を上限値（常圧沸点温度から上限値を決定した。図 5.18 に記載の取得データ範囲を参照）まで昇温し、静定したところでデータを採取する。以降 10°C 毎に下限値（常圧凝固点温度から決定）まで降温しながら、その都度データ採取を行った。以下に具体的試験手順を述べる。

尚、濃度確認は中和滴定法（中和液：1 規定塩酸、試薬：ニュートラルレッド）により実施した。中和反応における両者のグラム当量数は等しいことから、苛性ソーダ濃度 x (%) は以下の式から算出される。

$$\text{NaOH} \times x \div 100 \div 40 = N \times \text{HCl} \div 1000$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{NaOH} : \text{苛性ソーダサンプル量 (g)} \\ \text{HCl} : \text{中和に要した塩酸量 (cc)} \\ N : \text{中和液規定度 (水溶液 1000ml 中のグラム当量数)} \end{array} \right\}$$

ここで左辺の 40 は NaOH 分子量、右辺の 1000 は ml である。

2) 苛性ソーダ水溶液の準備

- ① 苛性ソーダ水溶液は、フレーク状の苛性ソーダ (JIS K 1202-1981 固形苛性ソーダ 1 号、純度 98% 以上) と純水をビーカー内で混合し、目標濃度の溶液を造る。
- ② ビーカーをスターラープレート載せ、スターラーによる自動攪拌が可能となるまで、液表面に微量の Ar ガスを流しながらガラス棒を用い苛性ソーダと純水を十分に攪拌する。

③ 空気中の炭酸ガスにより生成される炭酸ナトリウムの影響を排除するため、ゴム

パッキンとアルミ製蓋（Ar ガス及び熱電対挿入口付き）でビーカーを密閉し、スターラーにて攪拌開始する。一方ビーカー内空間部には Ar ガスを封入し、温度制御用 K 型熱電対（クラス 2（旧 0.75 級））を挿入する。

### 3) 超音波濃度計本体（音速伝送器）の昇温

苛性ソーダと純水を混合することにより発熱反応が生じ、特に高濃度になるほど発熱量も多くなる。一方で音速計伝送器は熱衝撃をきらうため、あらかじめ純水を満たしたビーカー中に伝送器を入れて、プレートヒーターにて昇温させ伝送器の予熱を実施する。

### 4) 苛性ソーダの昇温

苛性ソーダ溶液と伝送器挿入の純水温度差が約 10°C 以内に到達したことを確認した後、苛性ソーダ溶液のビーカーへ伝送器を挿入する。伝送器はフランジ構造となっているので、ビーカーとフランジボルト穴間をゴムパッキンでシールする。本パッキンにも、Ar ガス及び熱電対挿入口を設けて有り、Ar ガスの封入及び熱電対を挿入し、目標温度まで昇温開始する。

### 5) データの取得

目標温度に到達し、かつ音速が静定したらデータ採取する。10°C 降温毎にデータ取得を繰り返す。尚、音速静定の判定は、データロガーによるトレンドグラフを監視することにより行う。

## [精度(誤差)の検討]

### 1) 温度の精度

①制御用 K 型熱電対精度 : ±2.5°C (333°C 以下の場合)

②温度調節計指示値精度 : フルスパンの ±1% = 800°C × 0.001 = ±0.8°C

よって、上記①②の精度を合わせると、測定温度の精度は ±3.3°C となる。

### 2) 音速の精度

音速測定はセンサー熱膨張の補正を必要とする。本音速計付属のサーミスタ温度計の計測範囲は 60°C～160°C である。今回の校正試験での温度範囲は 30°C～160°C であり、60°C 未満の温度では音速は全て 60°C で補正されることから、試験温度最低条件の 30°C の時が誤差最大となり、その精度は +0.17% である。

### 3) 濃度の精度

濃度の確認は中和滴定法にて実施する。滴定液である塩酸の注入量は、ビュレットの目盛から目測する。従って、濃度の精度は塩酸注入量の読み取り値に左右される。結論としては、濃度の精度を定量的には決められないが、ビュレット目盛の読み取り誤差はおおよそ ±0.3ml 程度である。先述の苛性ソーダ濃度算出式から、この場合の濃度誤差は 1.2 / NaOH サンプル量(g) となる。今回の滴定実施時の NaOH サンプル量は 3～5g 程度であったことから、精度としては ±0.4wt% 程度であると考える。

## [結果]

試験により取得したデータのプロット及びその重回帰分析結果を図 5.19 及び 5.20 に示す。

重回帰分析結果から以下の超音波濃度計の校正曲線（関係式）を得た。

$$V = A0 + A1 \cdot T + A2 \cdot T \cdot Xc + A3 \cdot T \cdot Xc^2 + A4 \cdot Xc + A5 \cdot Xc^2$$

$$A0=1484.5 \quad A3=0.00152611$$

$$A1=0.478834 \quad A4=36.7052$$

$$A2=-0.128498 \quad A5=-0.330315$$

T : 苛性ソーダ温度 (°C)  $0 \leq T \leq 160$

Xc : 苛性ソーダ濃度 (wt%)  $0 \leq Xc \leq 75$

V : 苛性ソーダ溶液中の音速 (m/sec)

### 5.3 ナトリウム微量注入試験

#### 5.3.1 試験条件

試験条件を表5.1に示す。試験条件の設定に際しては、先述の4.3節の(2)項を準拠している。

#### 5.3.2 試験結果

##### (1) 試験①の結果 (図5.21～図5.25)

図5.21に注入試験開始後のナトリウム貯蔵タンクカバーガス圧力及び液位の挙動について示す。試験開始直後から、ナトリウムの移動に伴う液位及び圧力の低下が見られる。試験開始直後にナトリウム流量「高高」警報が発生し、ナトリウム注入遮断弁がインターロックにより自動閉となったが、直ちに手動弁で開とし、注入を継続させた。試験開始直後のナトリウム流量「高高」の発生は、ナトリウム注入遮断弁から反応容器までの配管内空間部へ、ナトリウムが急激に流れ込んだために、一時的に流量が増大したことによると考えられる。

試験開始13秒後、ナトリウム貯蔵タンク液位の減少が、試験終了条件である13mmに到達したため、遮断弁を手動閉とし、試験を終了させた。

図5.22及び図5.23に排ガス中水素濃度の挙動について示す。ナトリウム貯蔵タンク液位の減少、すなわちナトリウムの注入が開始されて約80秒後から排ガス中の水素ガス濃度の上昇が確認された。発生水素ガスの最大濃度は5.2vol%であった。水素ガス濃度は、試験開始の約75分後に初期値へ戻り静定した。

図5.24に示すように、ナトリウム注入時における排ガス及び反応容器内苛性ソーダ溶液の温度上昇は見られなかった。

図5.25では、本試験時に得られた発生水素ガス濃度データを元に、反応容器内でのナトリウム反応率及び積算反応量を算出した結果を示す。最終的に水素ガス濃度が静定するまでに反応したナトリウムの総量は20gと推計された。

##### (2) 試験②の結果 (図5.26～図5.31)

図5.26及び図5.27に注入試験開始後のナトリウム貯蔵タンクカバーガス圧力及び液位の変化について示す。試験①と同様の挙動を呈した。試験開始14秒後、

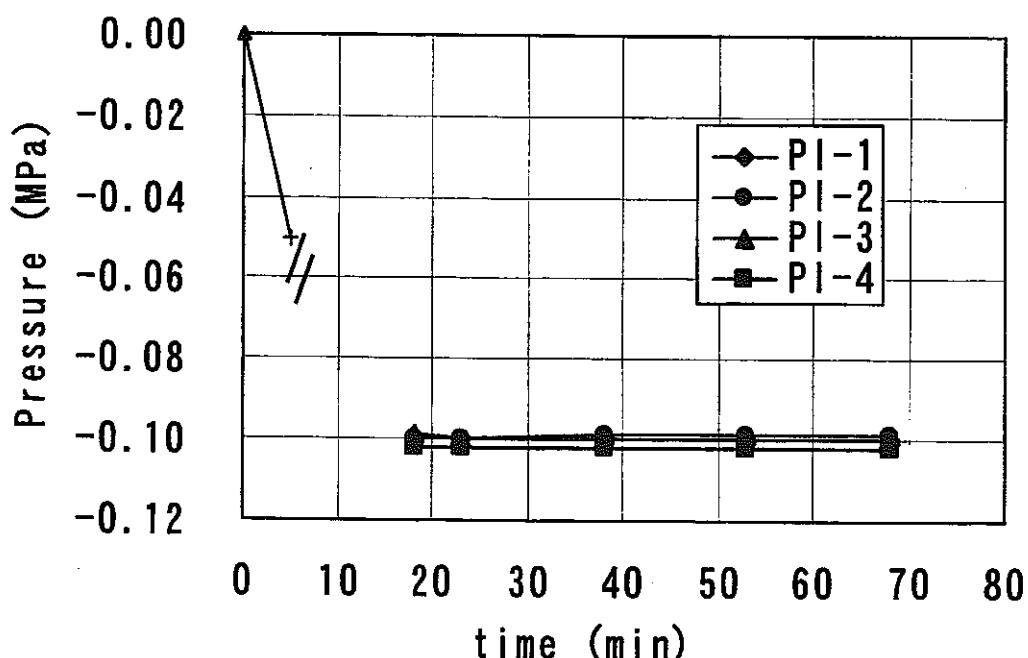
ナトリウム貯蔵タンク液位の減少が、試験終了条件である 13mm を越え、16.2mm に到達したため、ナトリウム注入遮断弁を手動閉とし、試験を終了させた。

図 5.28 に排ガス中水素濃度の挙動について示す。ナトリウム貯蔵タンク液位の減少、すなわちナトリウムの注入が開始されて約 60 秒後から排ガス中の水素ガス濃度の上昇が確認された。発生水素ガスの最大濃度は 13.2vol% であった。水素ガス濃度は、試験開始の約 65 分後に初期値へ戻り静定したが、途中（試験開始約 24 分後）に水素ガス濃度が再度上昇する現象が見られた。ナトリウム貯蔵タンクの液位及び圧力値に変化がないことから、反応容器内の苛性ソーダ溶液中及び苛性ソーダ液面に未反応ナトリウムがプールしていたか、あるいは、反応容器からの苛性ソーダ逆流防止のために、ナトリウム注入終了と同時に実施されるナトリウムライン窒素ガスブローの際に、配管内残留ナトリウムが押し出されたことが考えられる。尚、後述の図 5.31 の結果を元に、水素濃度再上昇の原因となったナトリウムが定常的に注入され、反応していた場合を想定した発生水素ガス濃度の予想曲線を図 5.29 に示す。この予想曲線から、発生水素ガス濃度の最大値は 24vol% 程度であったものと認められる。

図 5.30 に示すように、ナトリウム注入時における排ガス及び反応容器内苛性ソーダ溶液の温度上昇は見られなかった。

図 5.31 では、本試験時に得られた発生水素ガス濃度データを元に、反応容器内のナトリウム反応率及び積算反応量を算出した結果を示す。最終的に水素ガス濃度が静定するまでに反応したナトリウムの総量は約 73g と推計された。

## 圧力変化と経過時間との関係



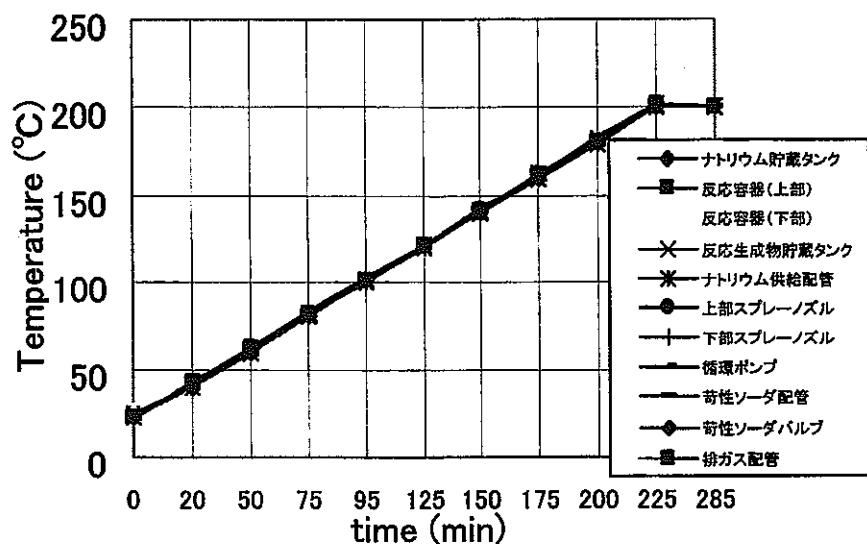
### [計測圧力計設置位置]

- PI-1 (ナトリウム貯蔵タンク)
- PI-2 (反応容器)
- PI-3 (反応生成物貯蔵タンク)
- PI-4 (スクラバ)

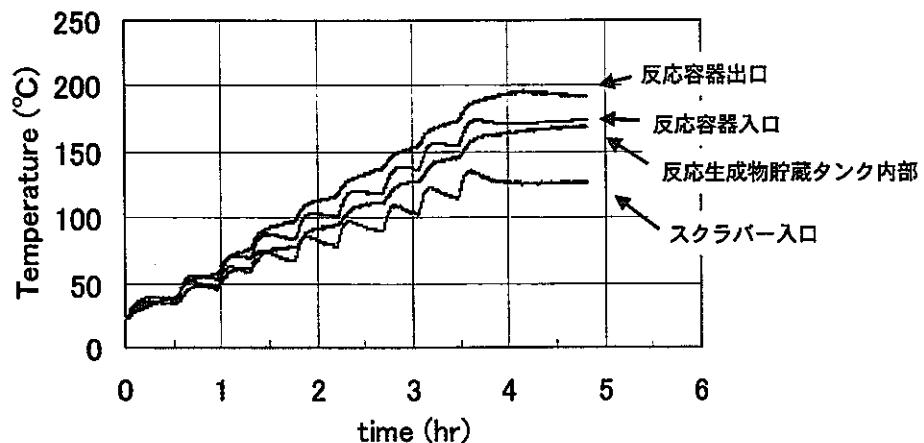
図5.1 真空試験結果

### 予熱設定温度に対する各温度制御点昇温挙動

20分刻みで設定値を20°C変更(上昇)させた。



### 系統内各温度計測点における昇温挙動（その1）



### 系統内各温度計測点における昇温挙動（その2）

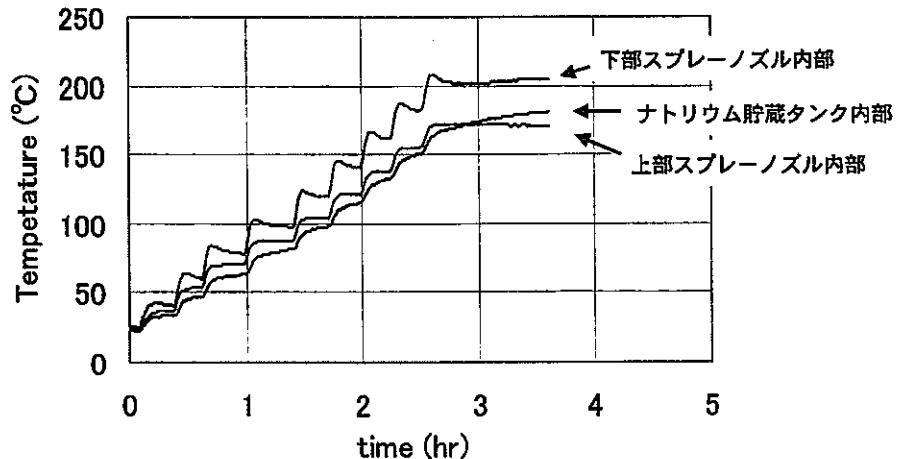
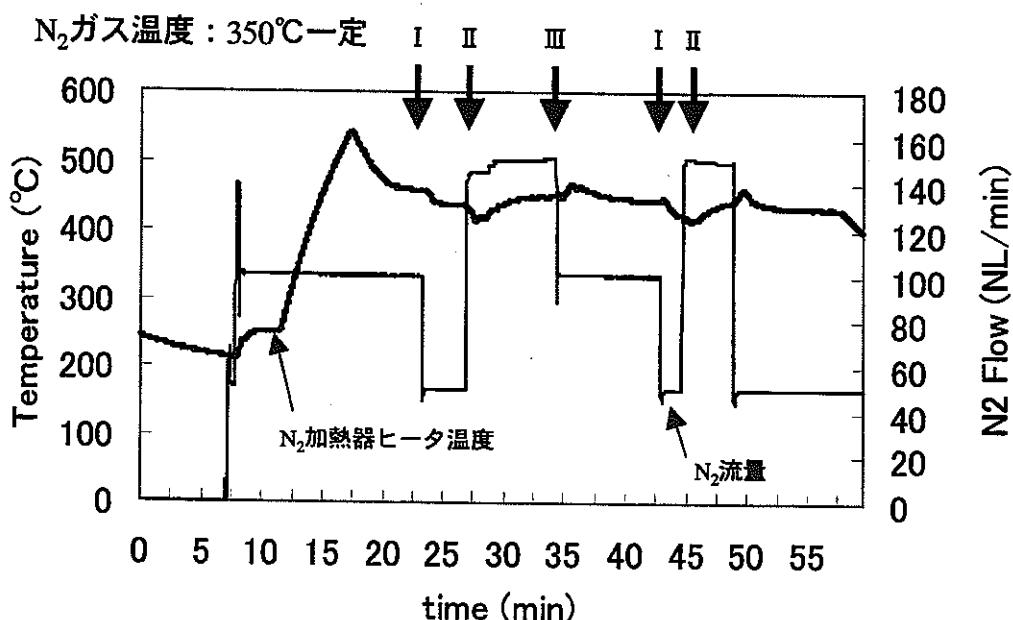


図5.2 予熱性能試験結果

## 窒素ガス流量設定変化操作による加熱器ヒータ温度及び流量自動調節弁制御挙動



### 加熱窒素ガス温度に及ぼす流量変化の影響

N <sub>2</sub> ガス流量変化	オーバーシュート	アンダーシュート
I : 100–50 (NL/min)	355°C	—
II : 50–150	353°C	347°C
III : 150–100	354°C	349°C

### 窒素ガス流量と加熱器ヒータ電力値の関係

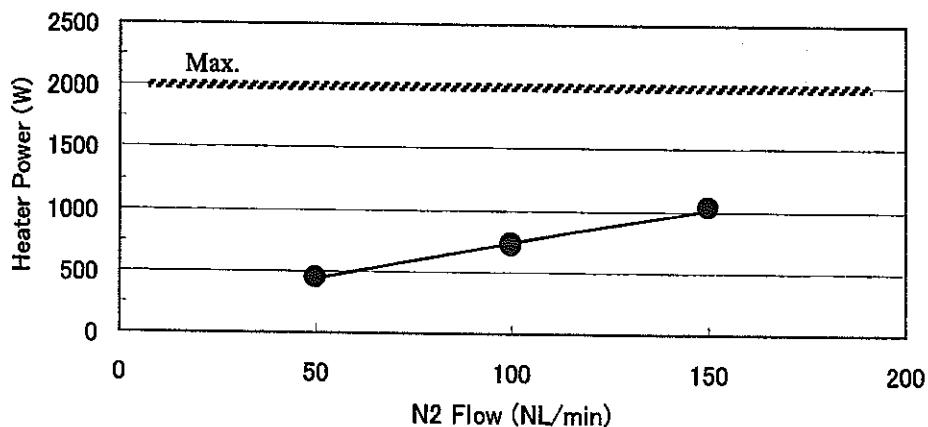
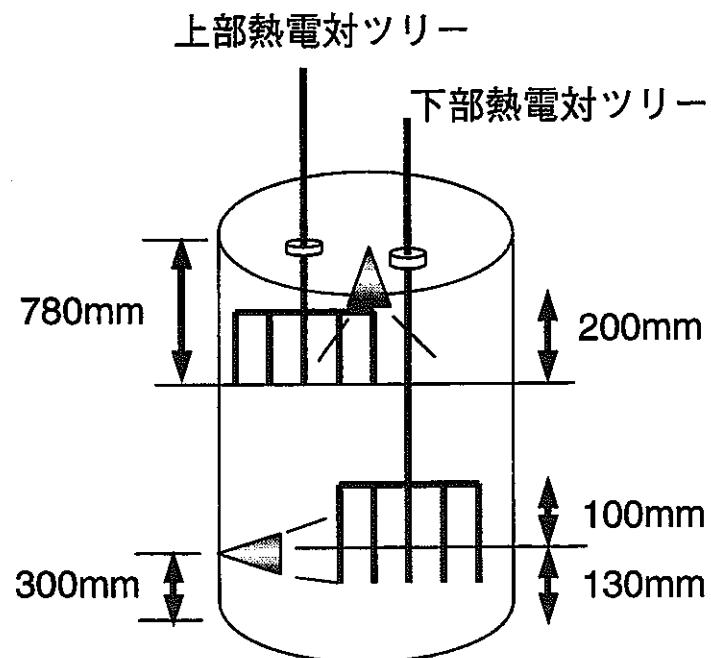


図5.3 窒素ガス加熱試験結果

◇反応容器熱電対ツリー昇降試験状況概略図



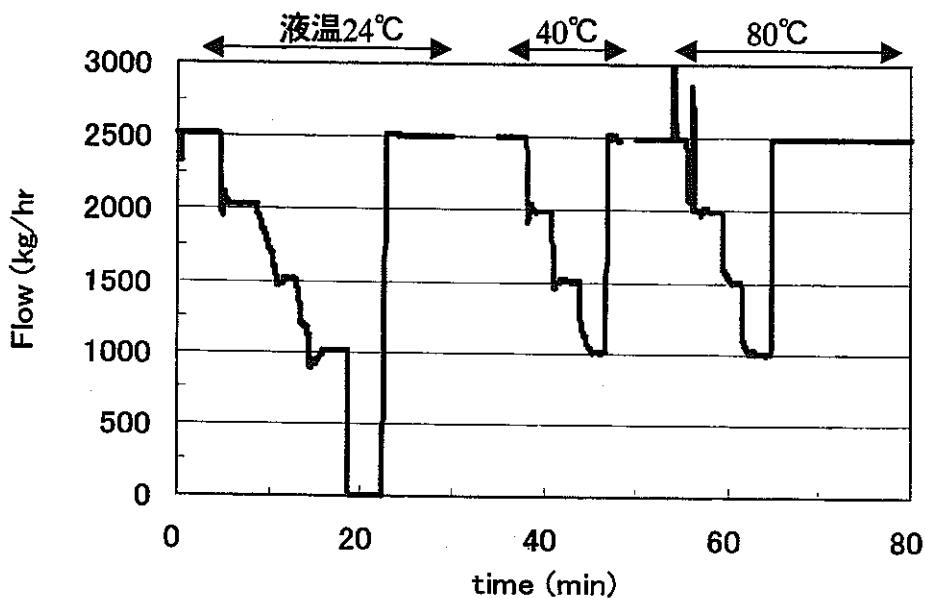
上部熱電対ツリー昇降ストローク : 200mm  
下部熱電対ツリー昇降ストローク : 230mm

試験開始前後の反応容器条件変化

	昇降試験開始前	昇降試験終了時
温 度	200°C	200°C
内 压	0.05MPa	0.05MPa

図5.4 热電対ツリー昇降試験結果

## 循環流量制御に及ぼす温度の影響



## 循環流量とインバータ周波数及びポンプモータ出力との関係

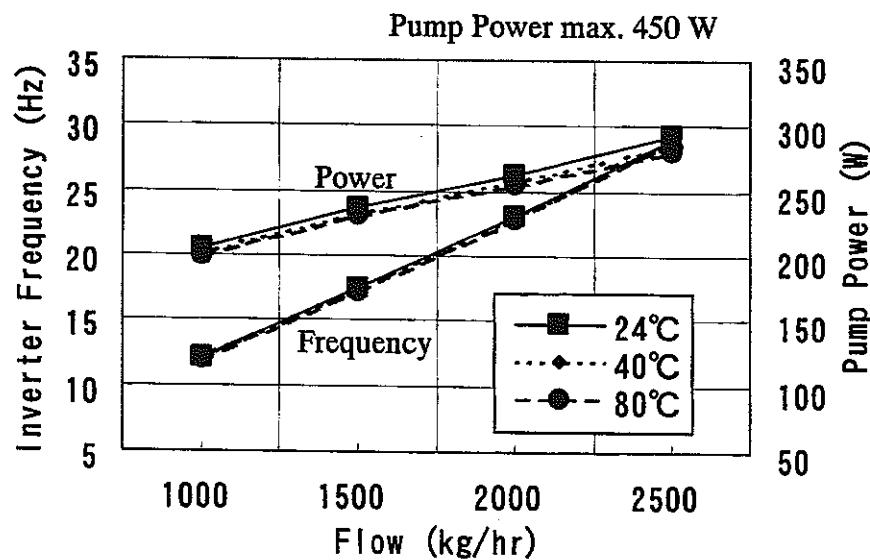
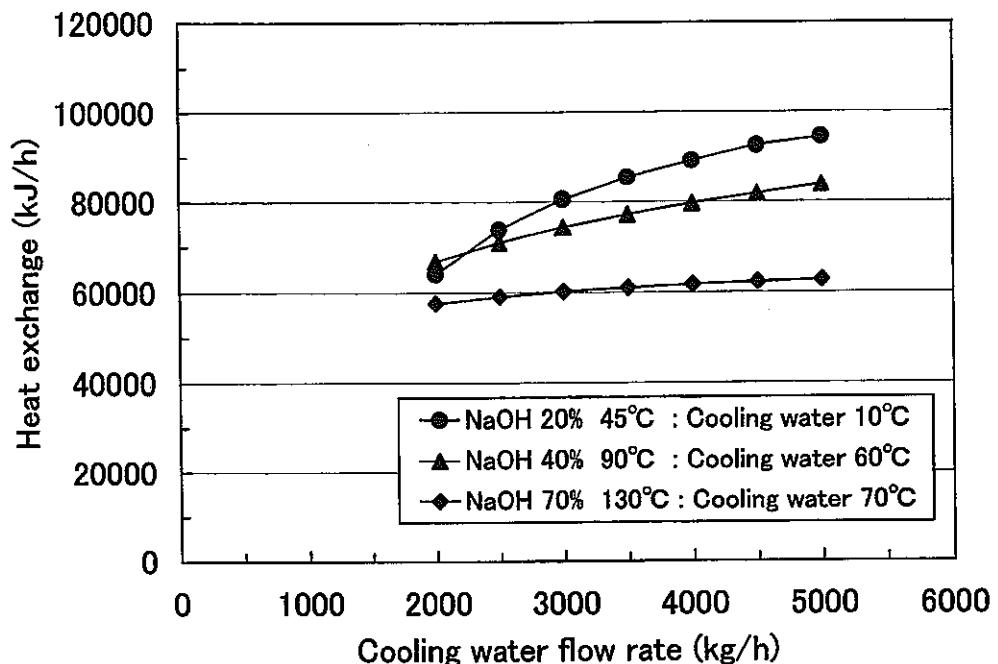


図5.5 循環試験結果

### 冷却水流量変化と交換熱量との関係



### 冷却水温度変化と交換熱量との関係

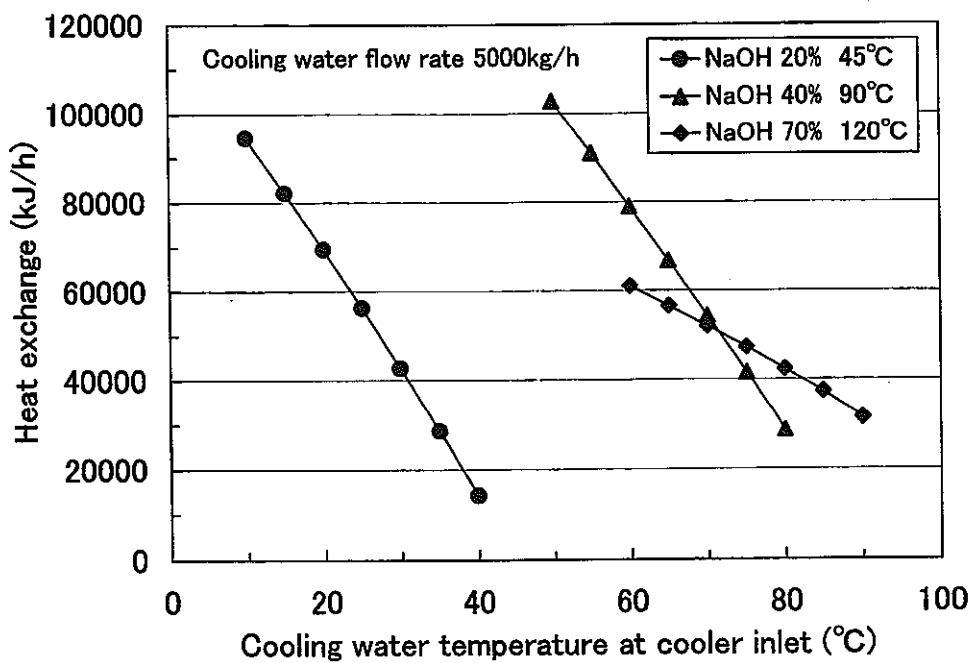


図5.6 除熱系機能試験結果①

## 苛性ソーダ流量変化と交換熱量との関係

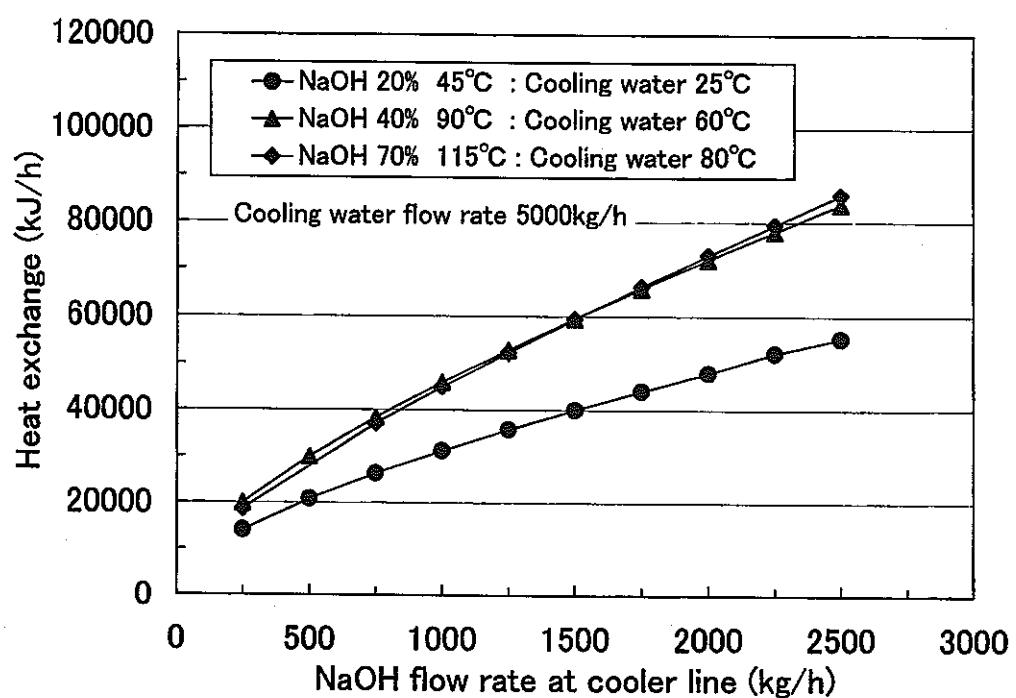
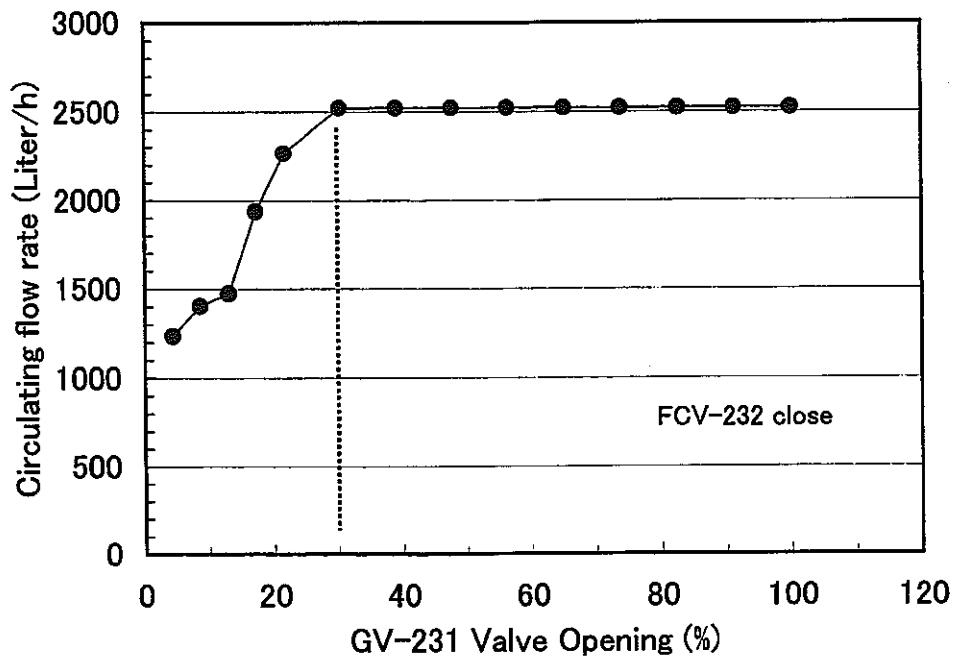


図5.7 除熱系機能試験結果②

### 苛性ソーダ循環流量へ及ぼす バイパス弁 (GV-231) の開度の影響



### 苛性ソーダ循環流量へ及ぼす コントロール弁 (FCV-232) の開度の影響

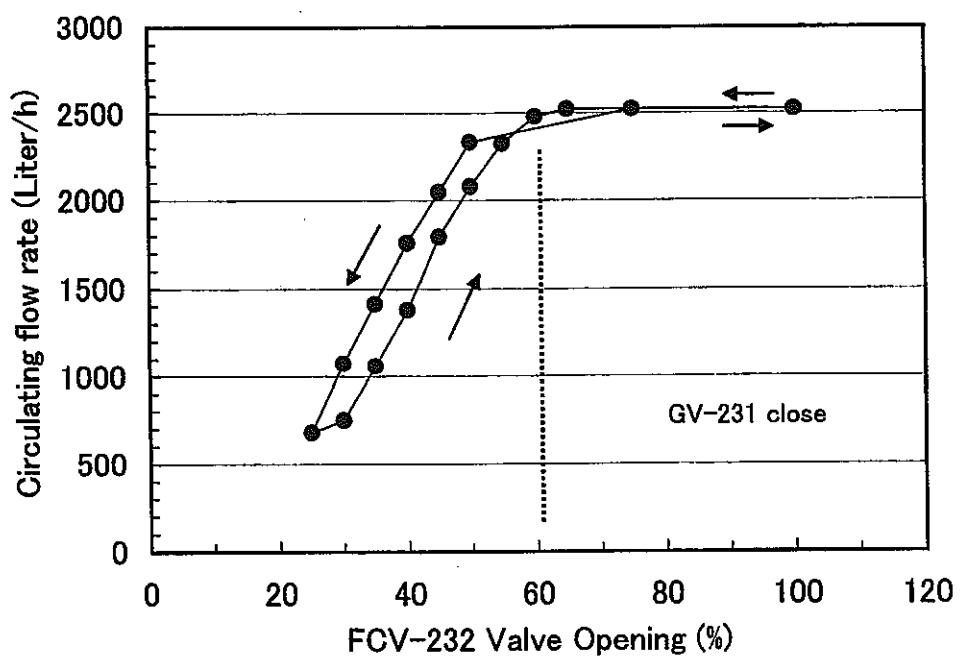


図5.8 除熱系機能試験結果③

## 交換(除去)熱量と冷却器入口温度差( $\Delta T$ )との関係

$\Delta T$  : (NaOH temp. at cooler inlet) – (Cooling water temp. at cooler inlet)

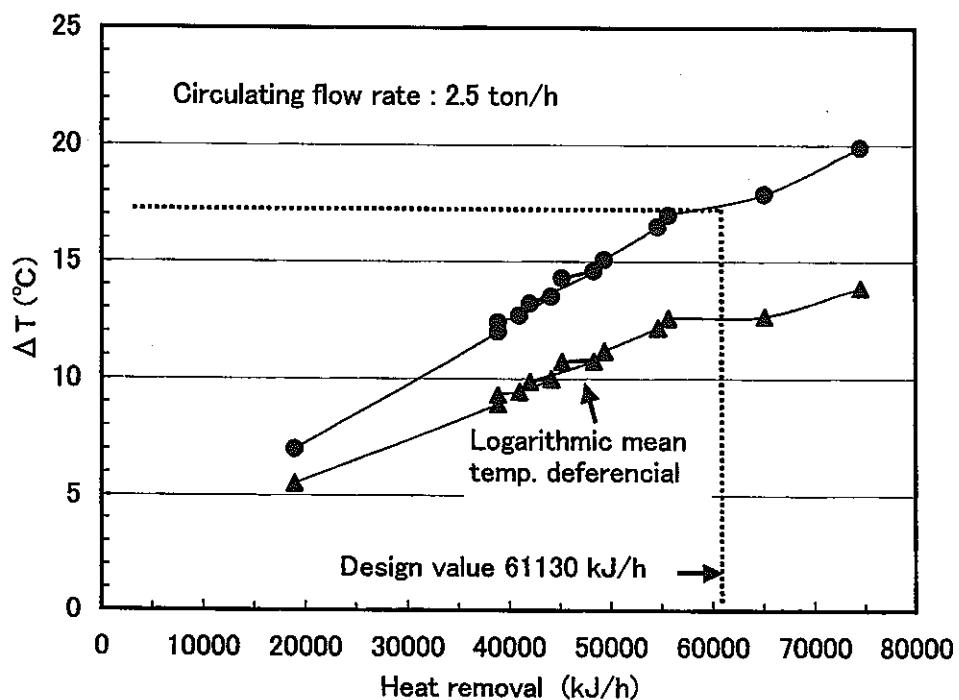
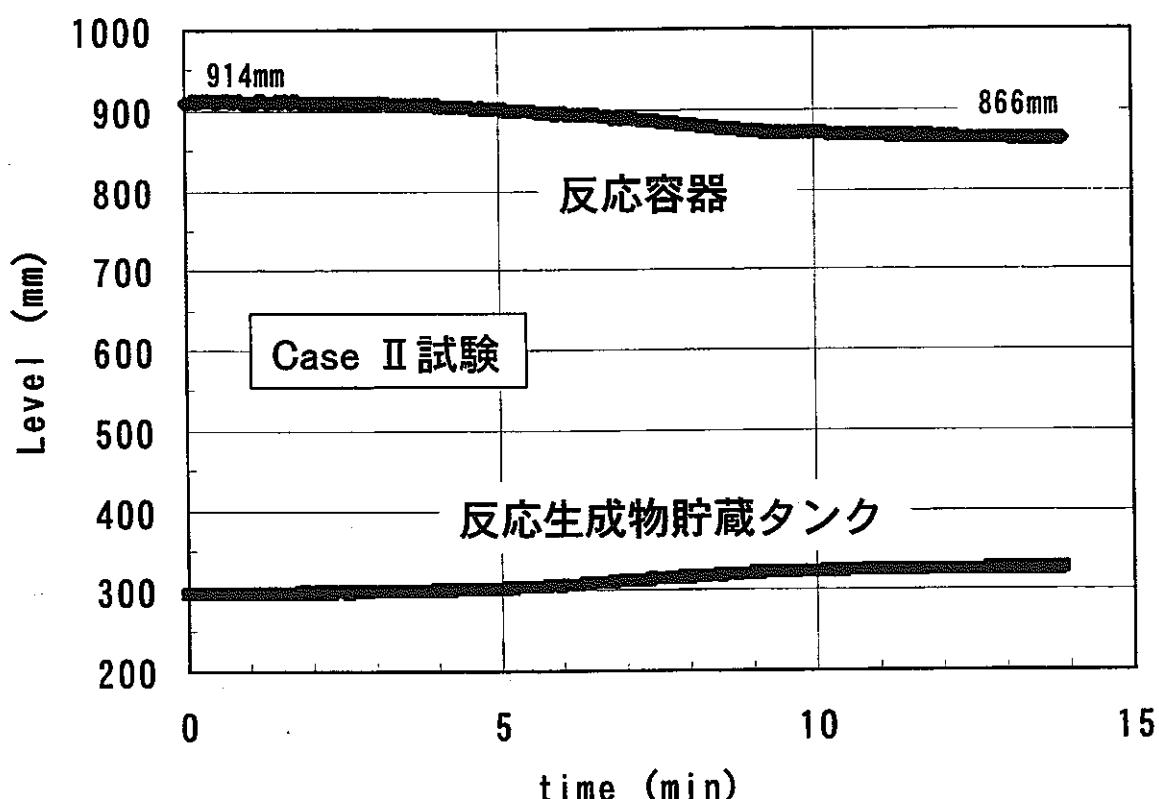


図5.9 除熱系機能試験結果④

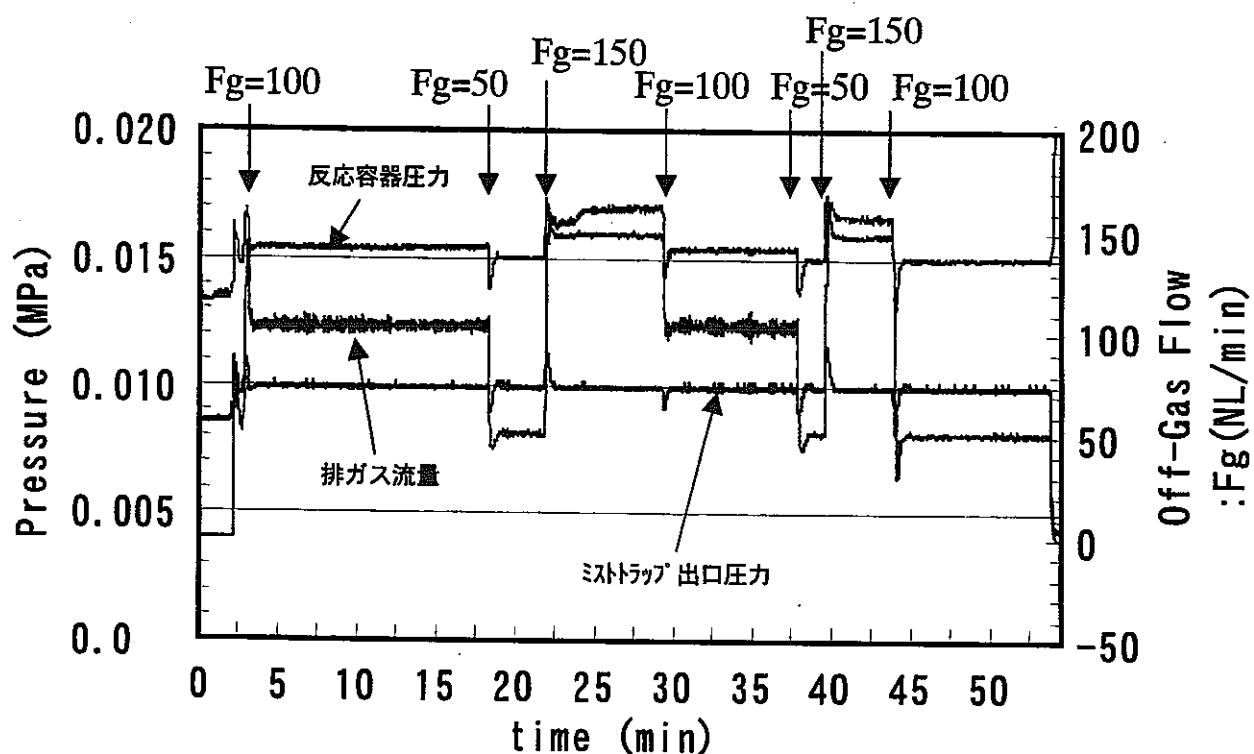
## 液位設定値に対する液位制御挙動



	設定液位	制御された液位
Case I	920 mm	914 mm
Case II	870 mm	866 mm

図5.10 反応容器液位制御試験結果

### 排ガス流量と圧力の関係（その1）



### 排ガス流量と圧力の関係（その2）

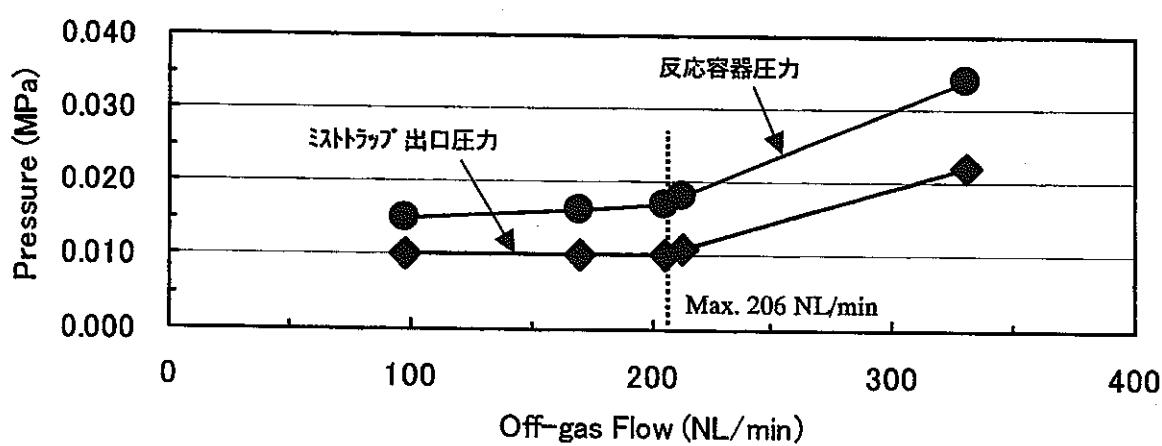
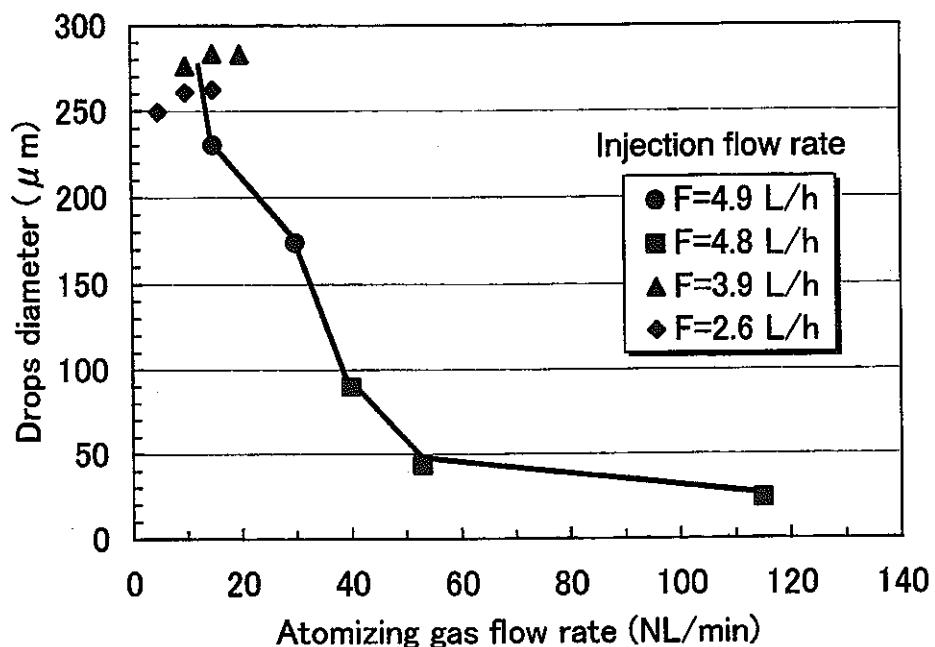


図5.11 圧力制御試験結果

### 液滴粒径に及ぼす アトマイジングガス流量の影響



### スプレー角度に及ぼす アトマイジングガス流量の影響

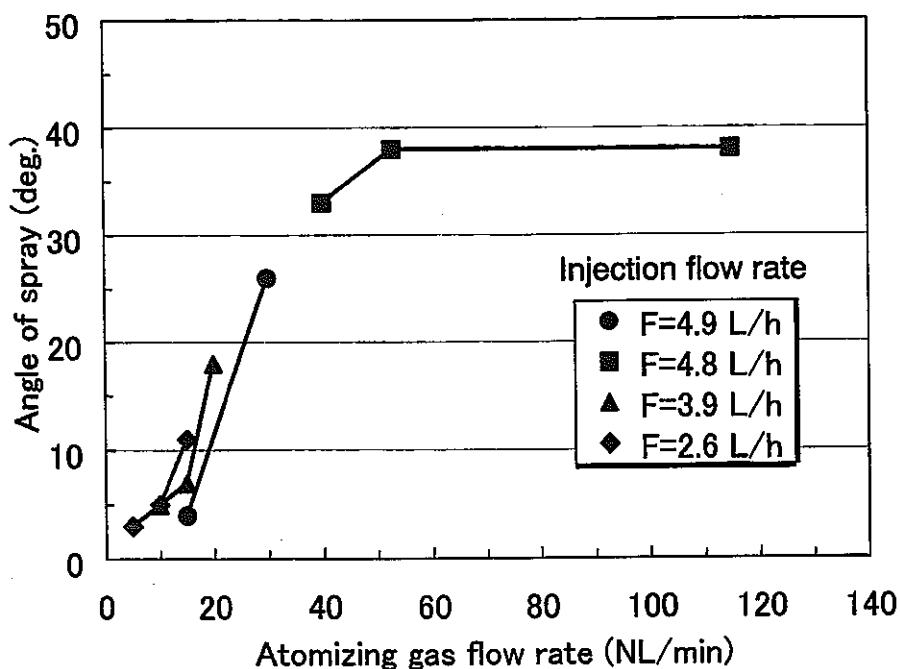
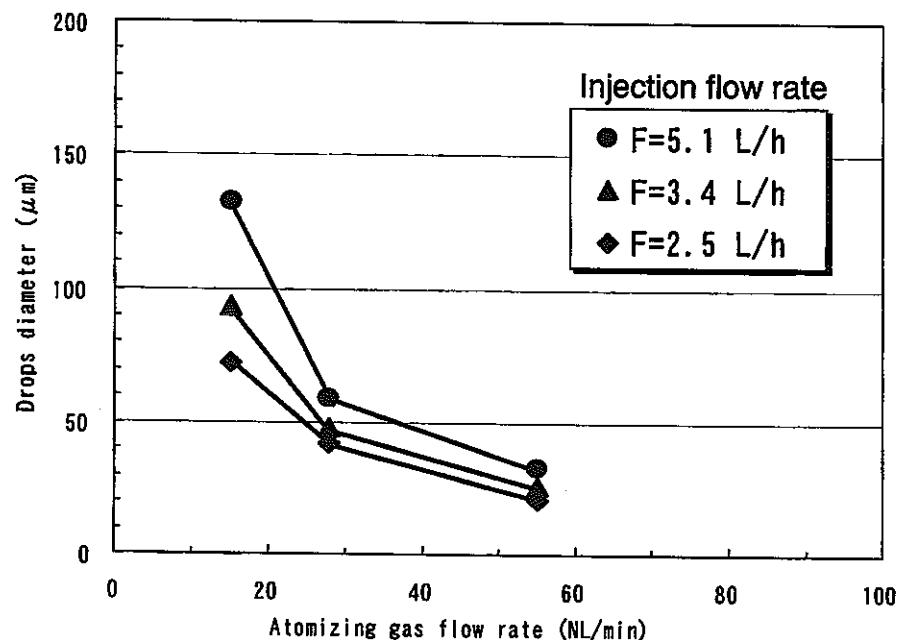


図5.12 スプレーノズル性能試験結果①  
(上部スプレーノズル工場水試験結果)

## 液滴粒径に及ぼす アトマイジングガス流量の影響



## スプレー角度に及ぼす アトマイジングガス流量の影響

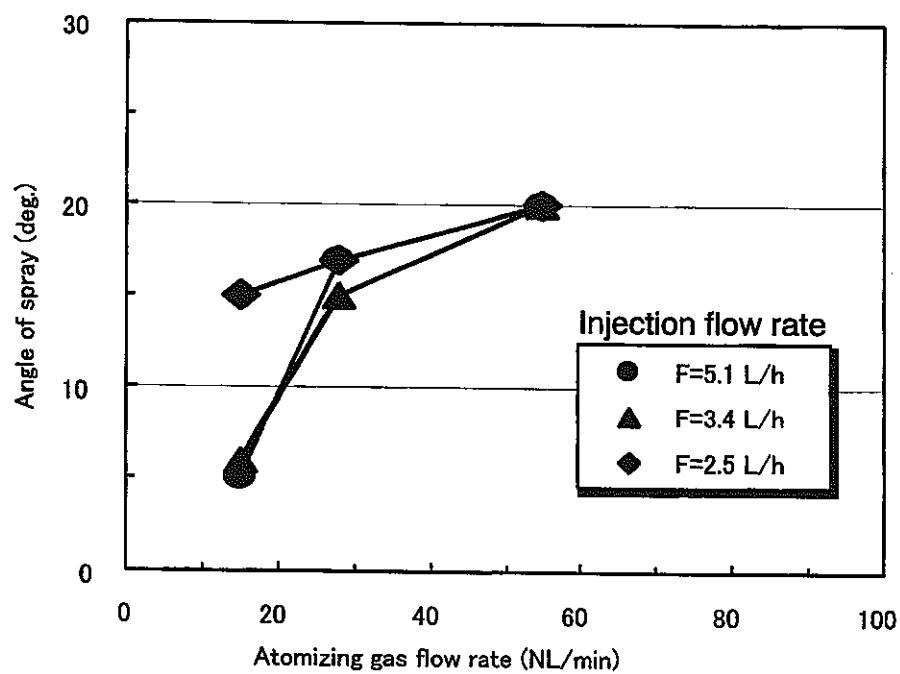
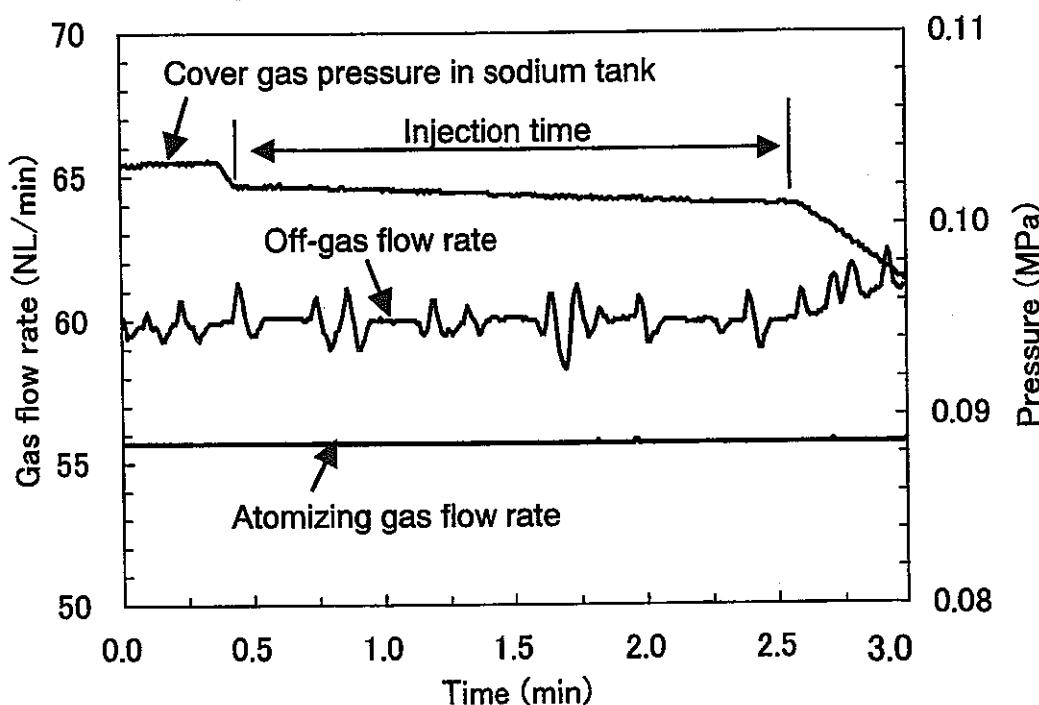


図5.13 スプレーノズル性能試験結果②  
(下部スプレーノズル工場水試験結果)

### 注入性能確認時取得データチャート



### スプレー流量に及ぼすナトリウム注入バルブ(NV-105)開度の影響

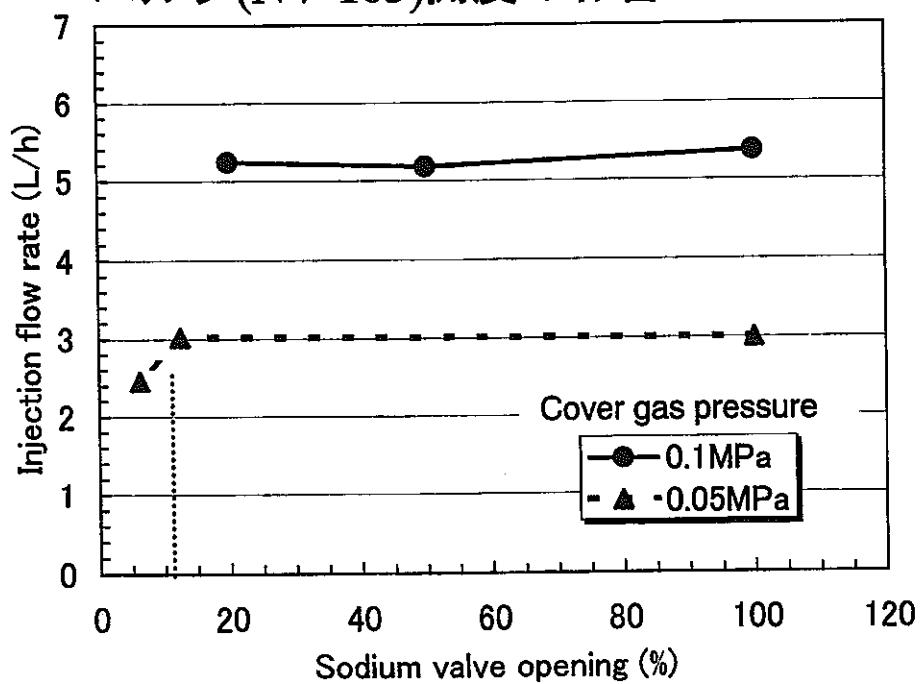
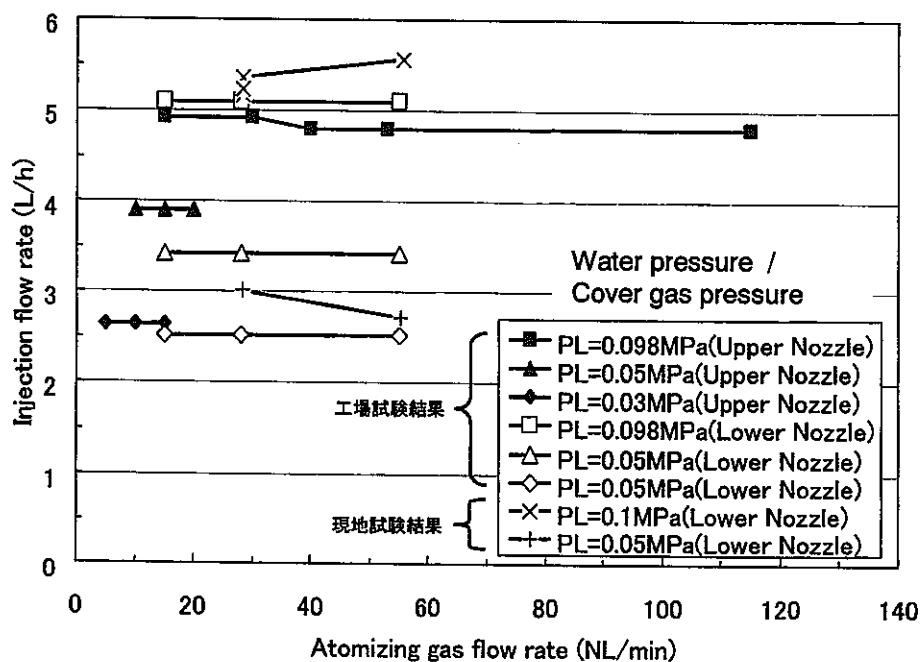


図5.14 スプレーノズル性能試験結果③  
(下部スプレーノズル現地性能試験結果)

## スプレー流量に及ぼす アトマイジングガス流量の影響



## スプレー流量に及ぼす供給圧力の影響

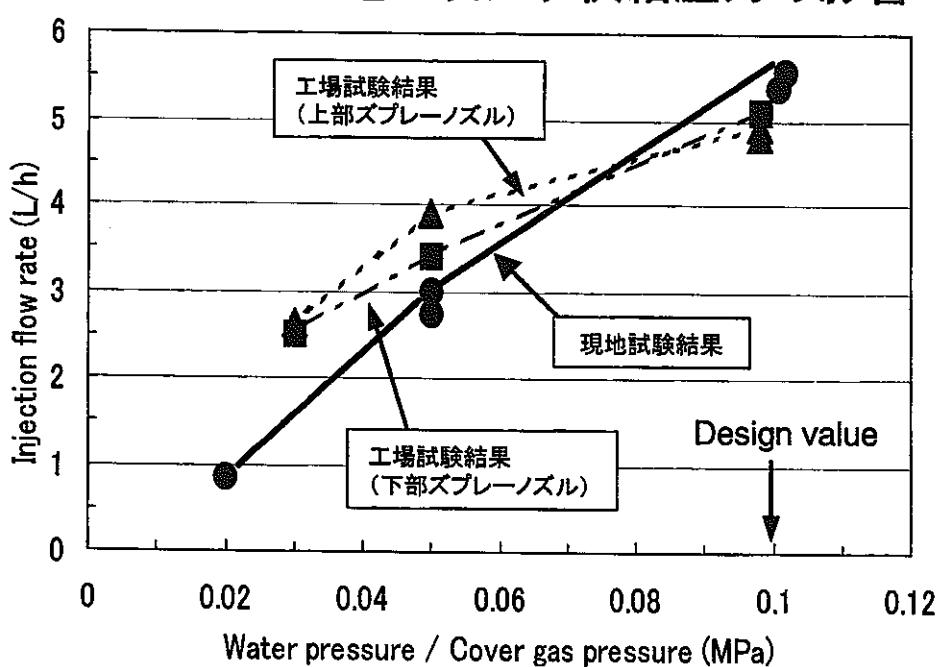
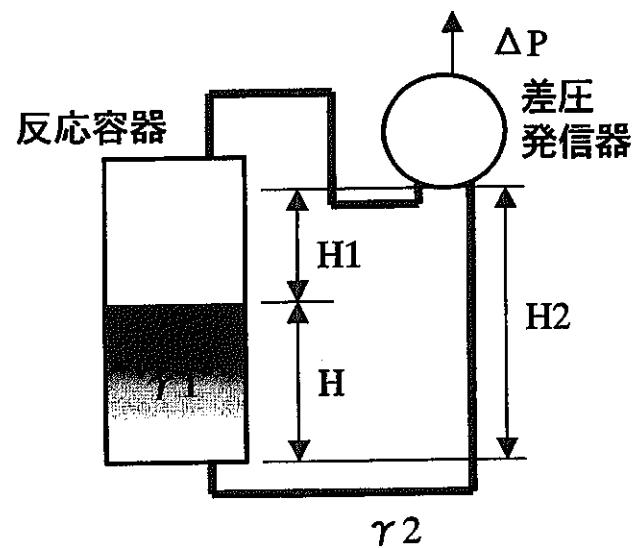


図5.15 スプレーノズル性能試験結果④  
(工場及び現地試験結果)

反応容器差圧液位計概略図



$$H = H_2 - H_1$$

$$H_1 = \{(\gamma_1 - \gamma_2) / \gamma_1\} \cdot H_2 + 1000 \Delta P / \gamma_1$$

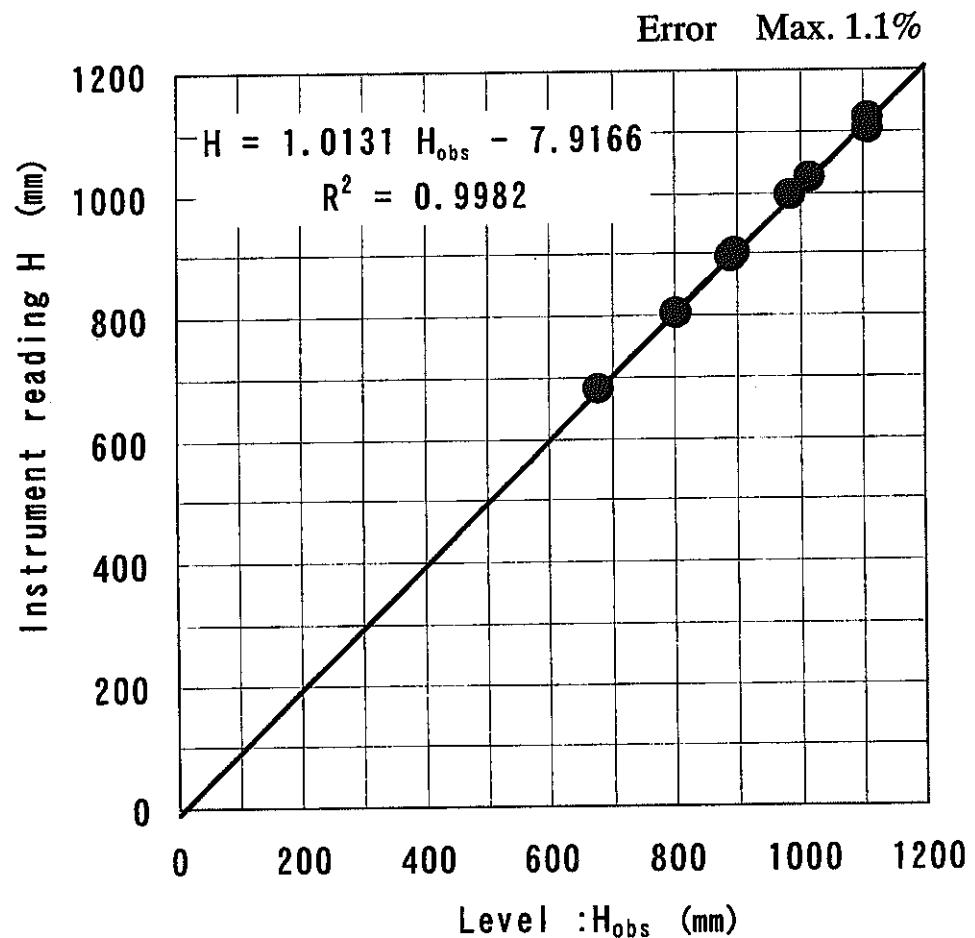
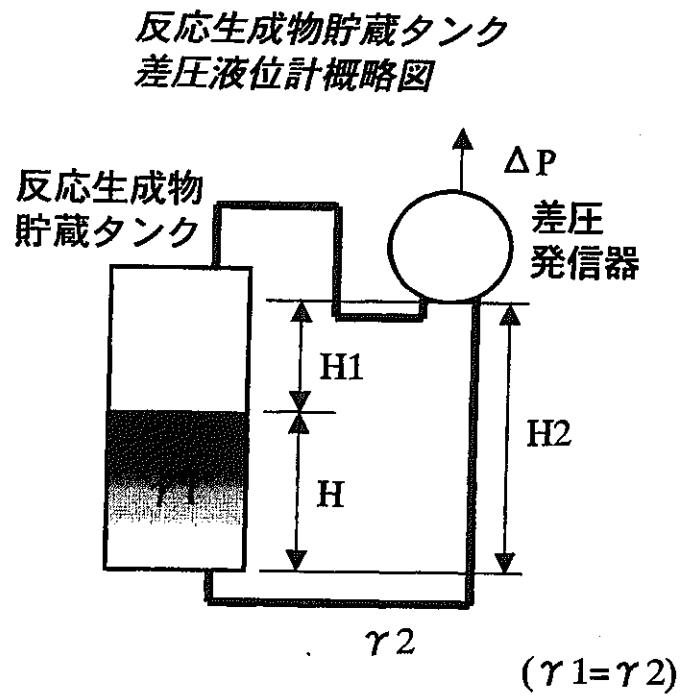


図5.16 反応容器液位計校正試験結果



$$H = H_2 - \frac{1000}{\gamma_2} \Delta P$$

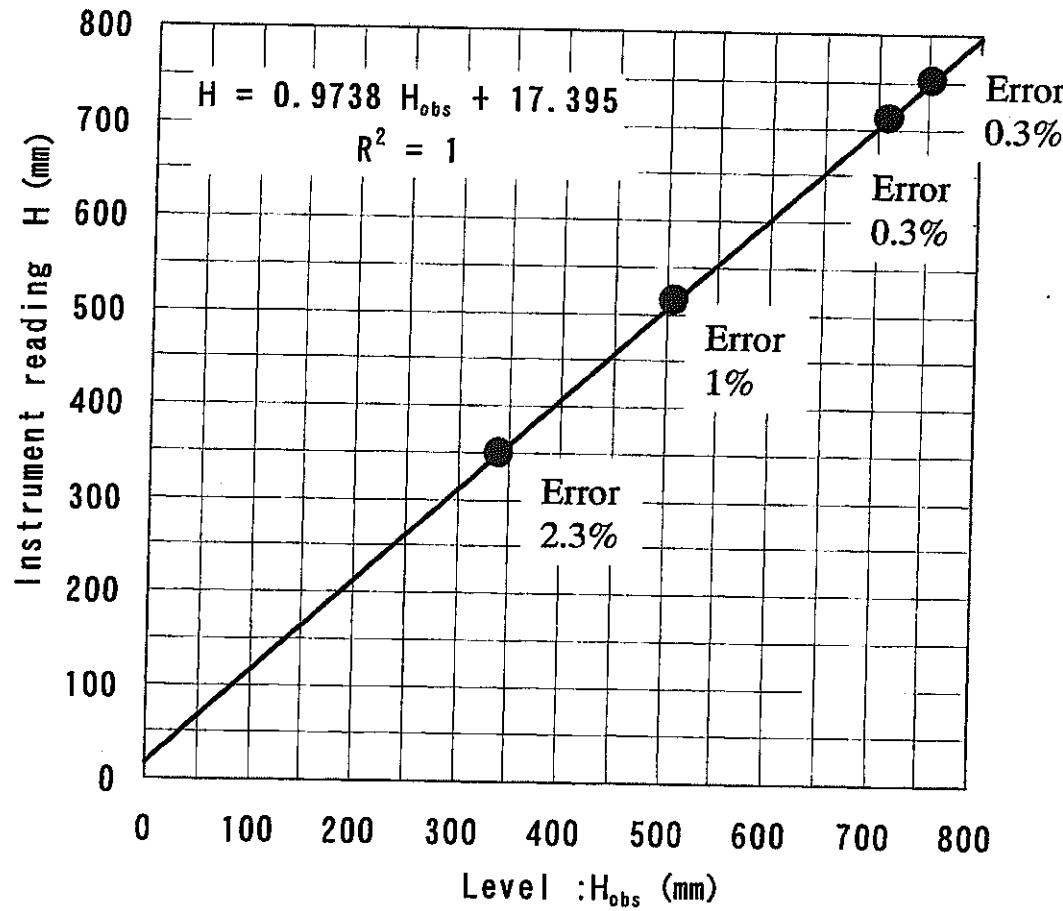
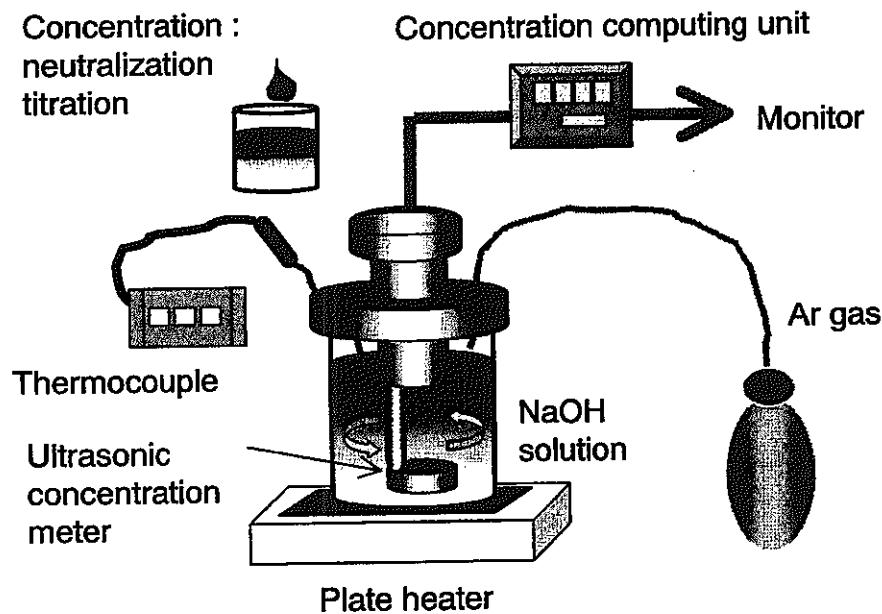


図5.17 反応生成物貯蔵タンク液位計校正試験結果

校正試験装置構成図



取得データ範囲 (●の位置)

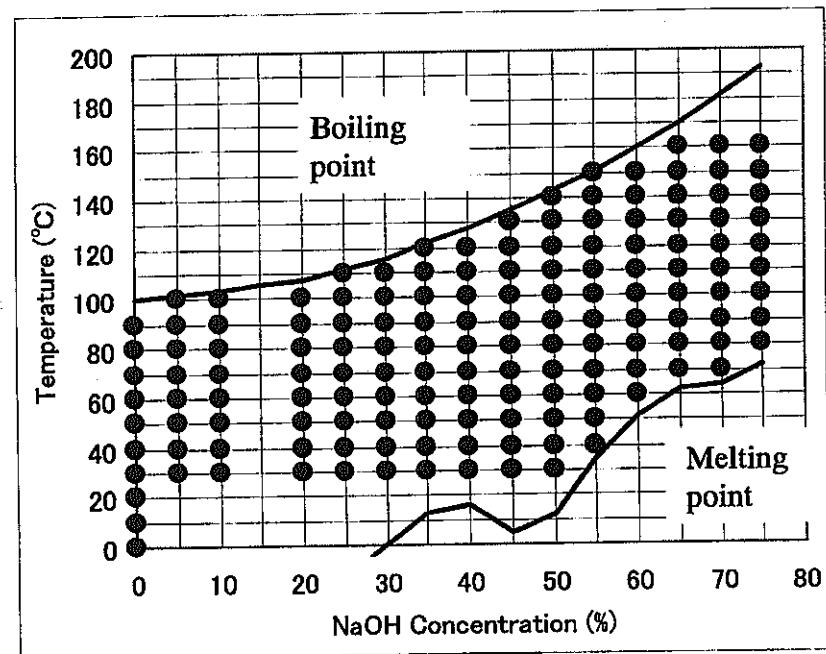


図5.18 超音波濃度計校正試験  
装置構成図及び取得データ範囲

## ◆重回帰分析結果

$$V = A_0 + A_1 \cdot T + A_2 \cdot T \cdot X_c + A_3 \cdot T \cdot X_c^2 + A_4 \cdot X_c + A_5 \cdot X_c^2$$

A0=1484.5

A1=0.478834

A2=-0.128498

A3=0.00152611

A4=36.7052

A5=-0.330315

T : Temperature (°C)  $0 \leq T \leq 160$ Xc : NaOH Concentration (%)  $0 \leq X_c \leq 75$ 

V : Sound Velocity (m/sec)

重相関係数 : 0.995811  
 修正R2 : 0.99568  
 分散 : 250.106

	DF	SumOfSq	MeanSq	FRatio	PValue
Model	5	$9.51323 \times 10^6$	$1.90265 \times 10^6$	7607.34	0.
Error	160	40017.	250.106		
Total	165	$9.55325 \times 10^6$			

<0.05  
有意図5.19 苛性ソーダ濃度計校正曲線  
(重回帰分析結果)

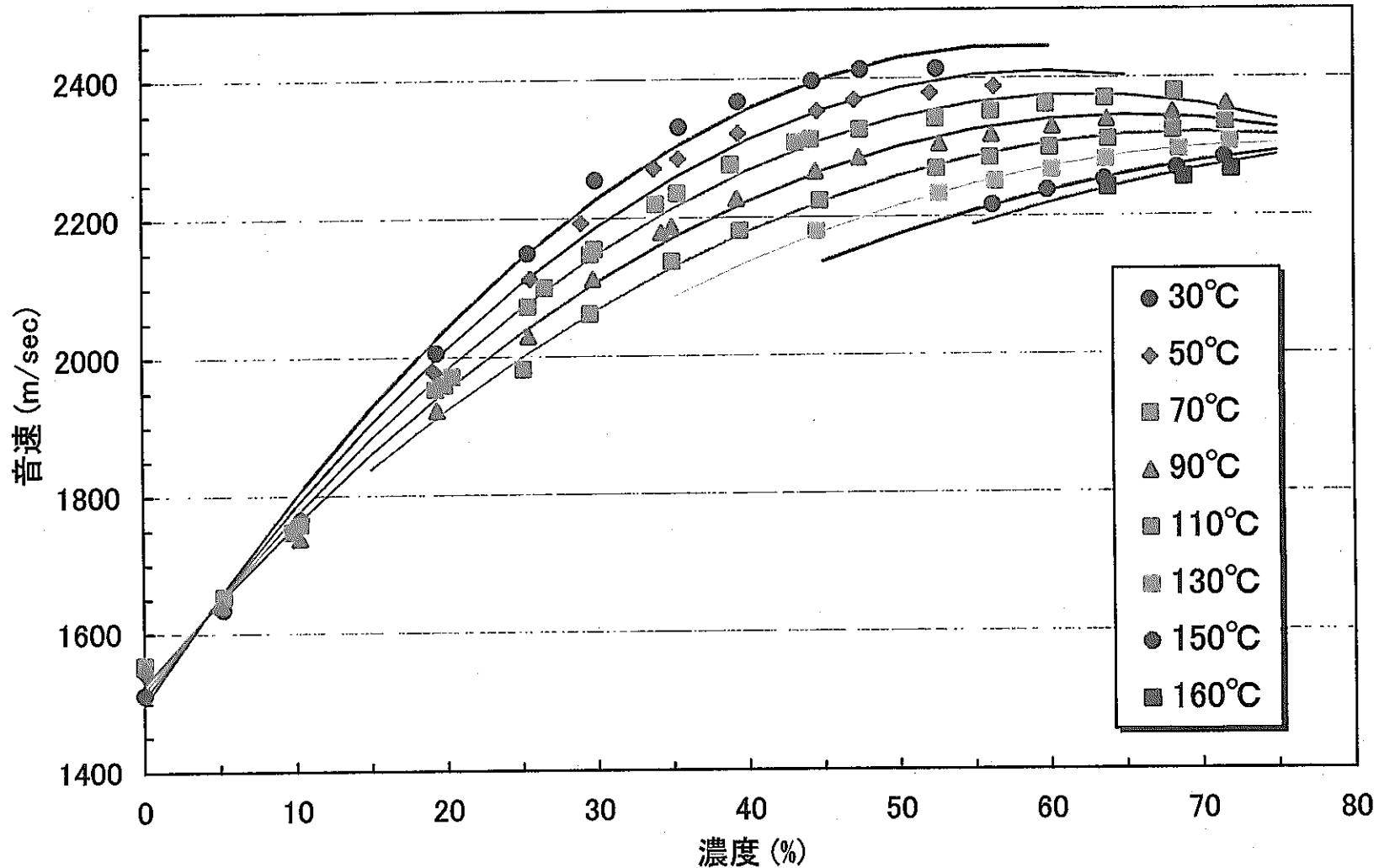


図5.20 サンプリングデータ(プロット)と重回帰分析結果(線)との比較

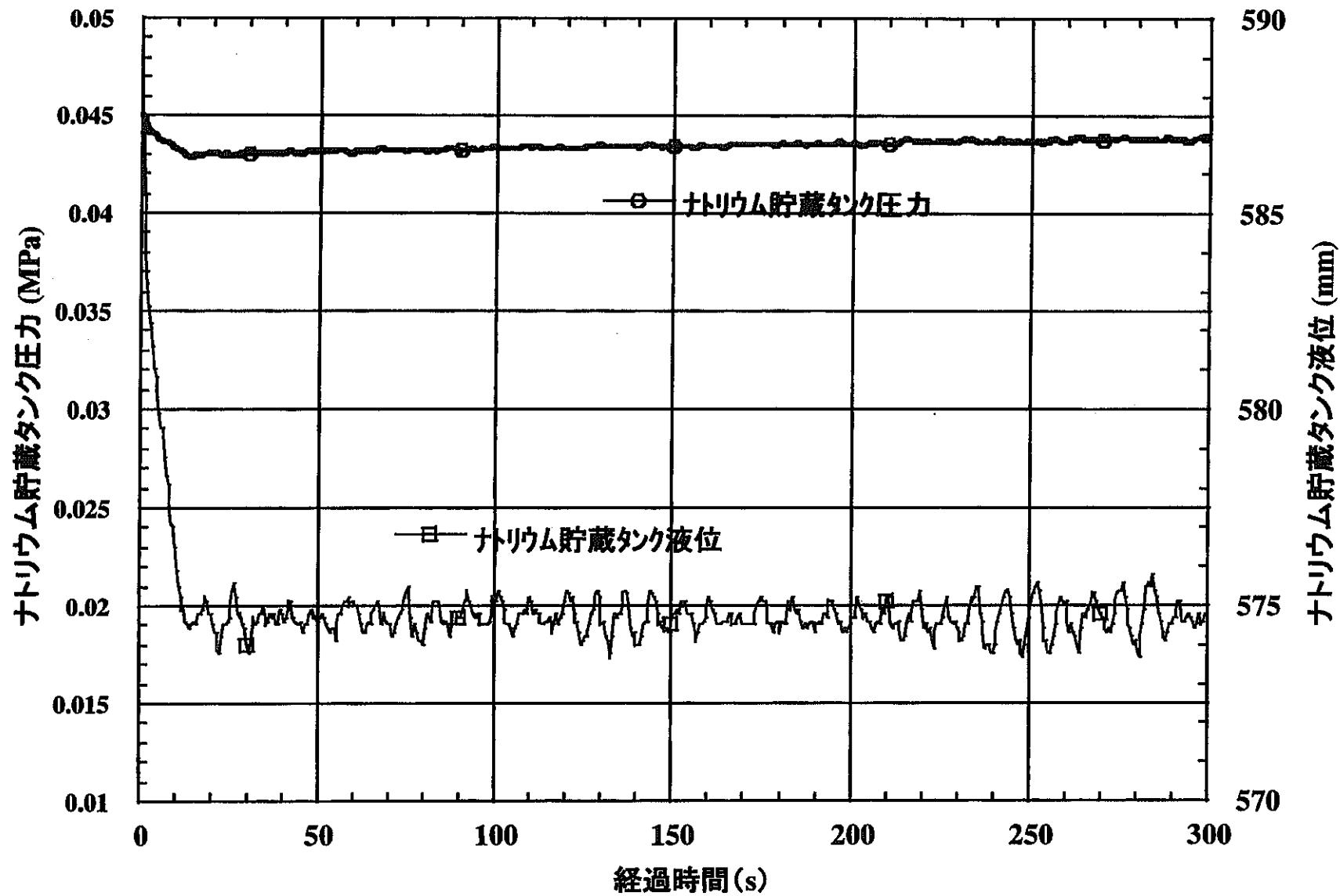


図5.21 ナトリウム貯蔵タンク圧力及び液位の挙動(試験①)

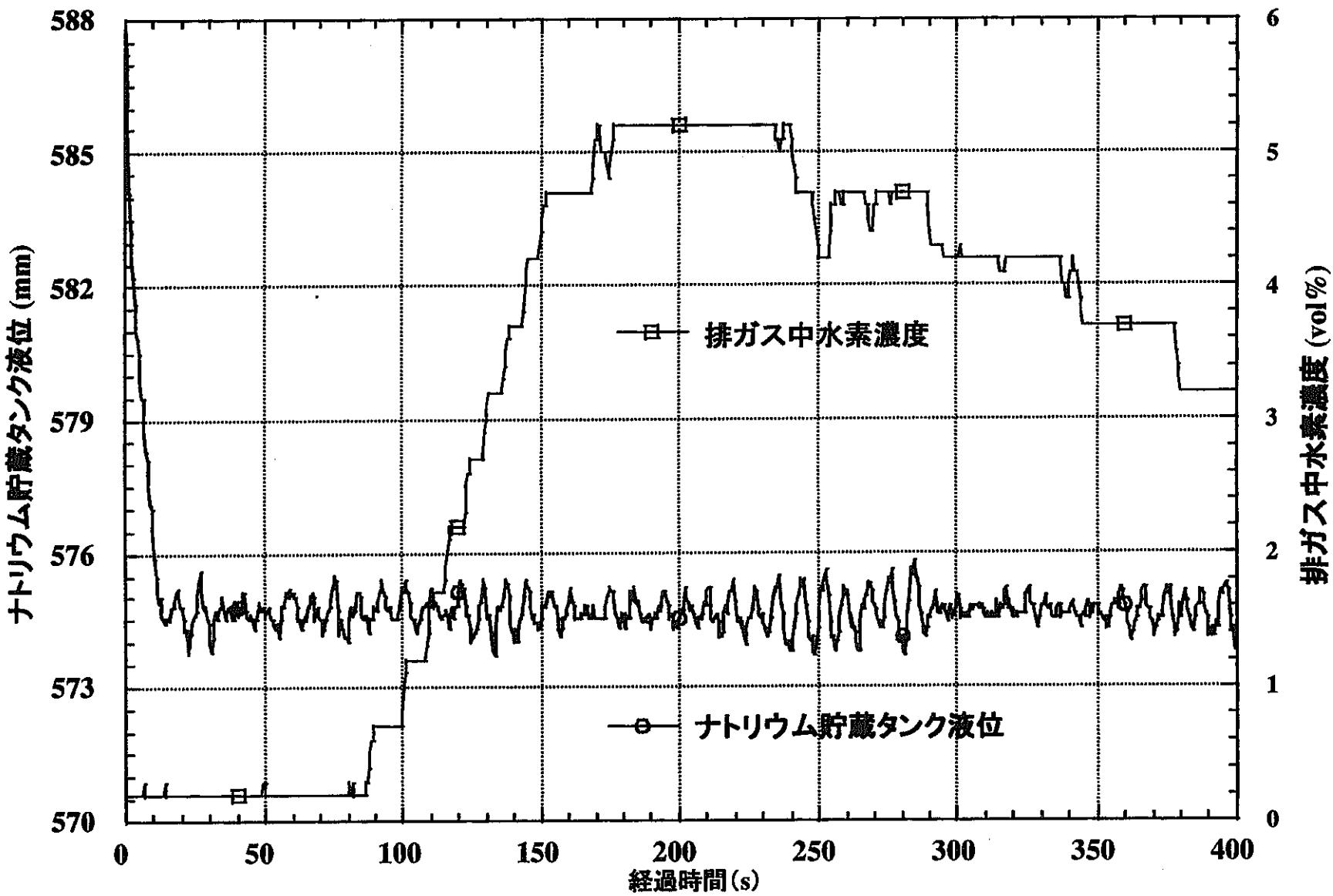


図5.22 試験開始直後の排ガス中水素濃度の挙動(試験①)

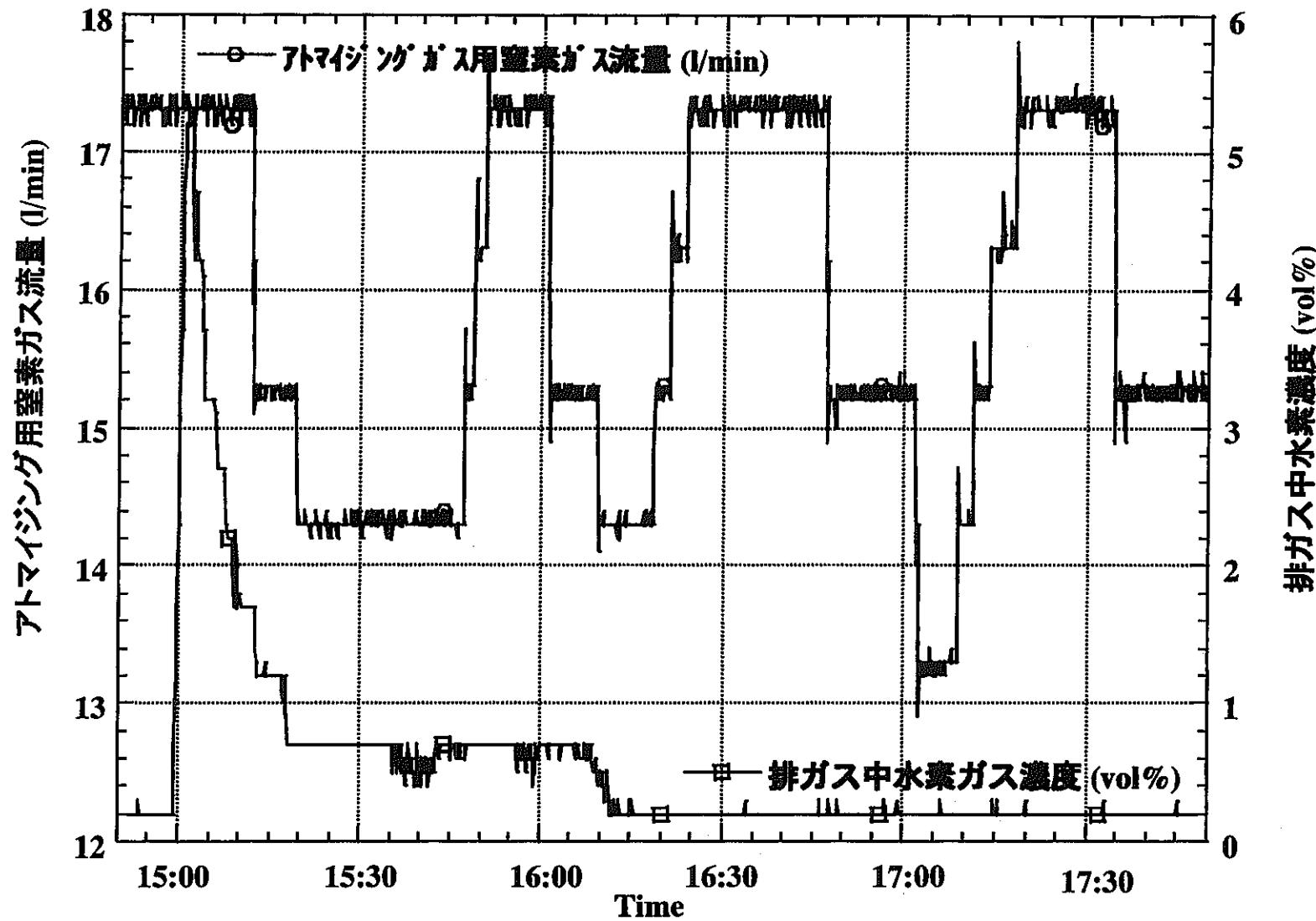


図5.23 排ガス中水素濃度の挙動(試験①)

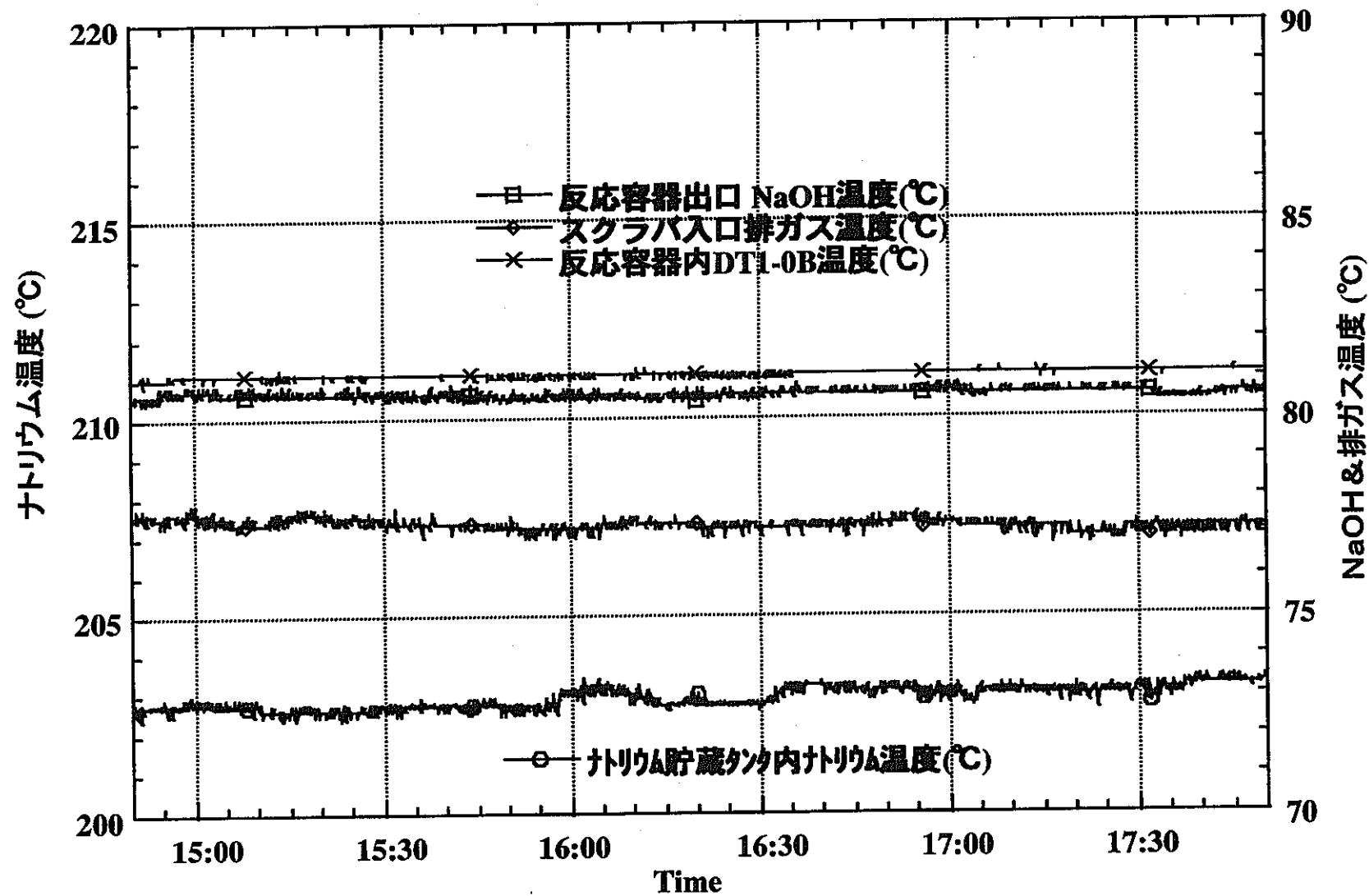


図5.24 厄性ソーダ及び排ガス温度の挙動(試験①)

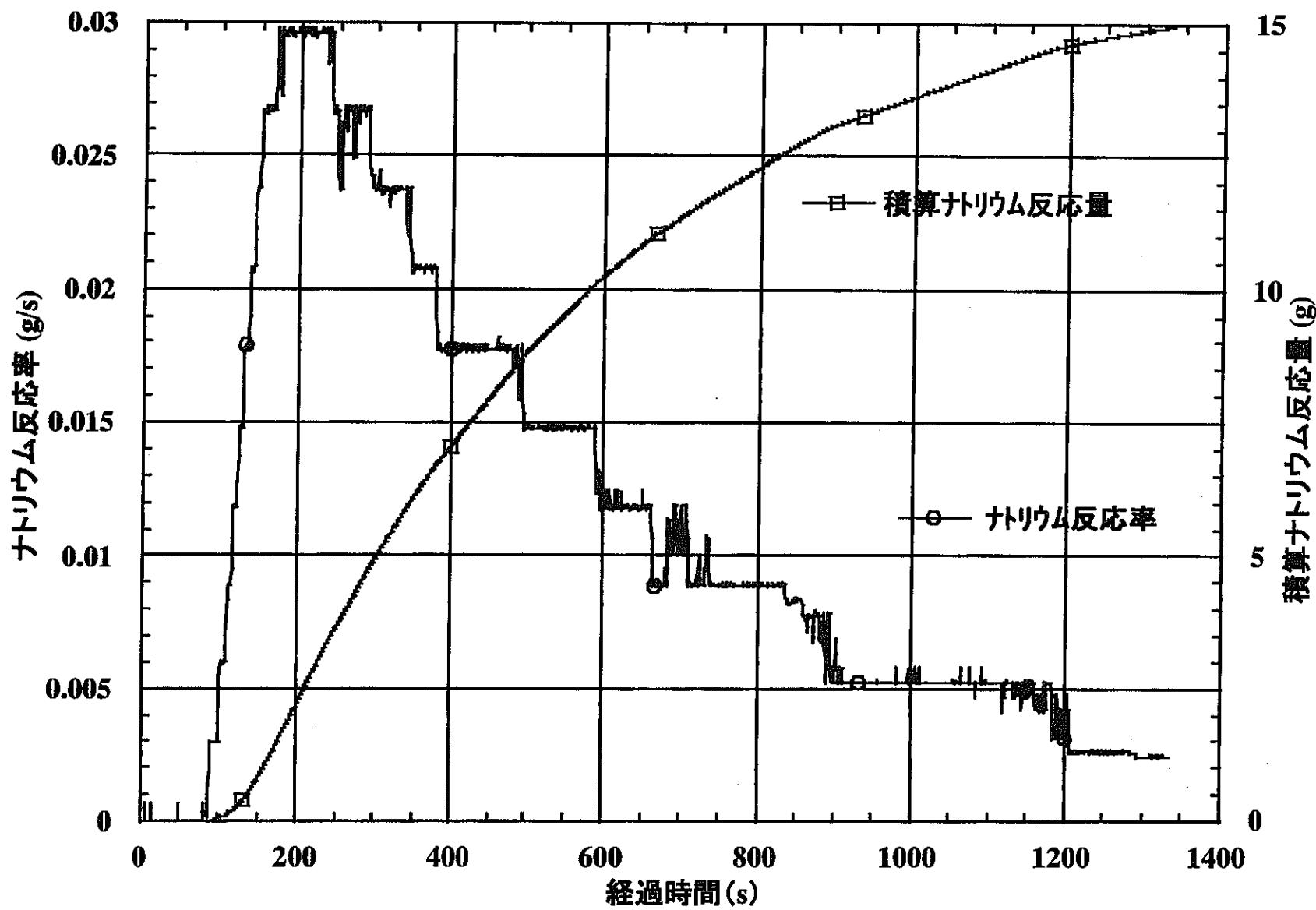


図5.25 ナトリウム反応率と反応量の関係(試験①)

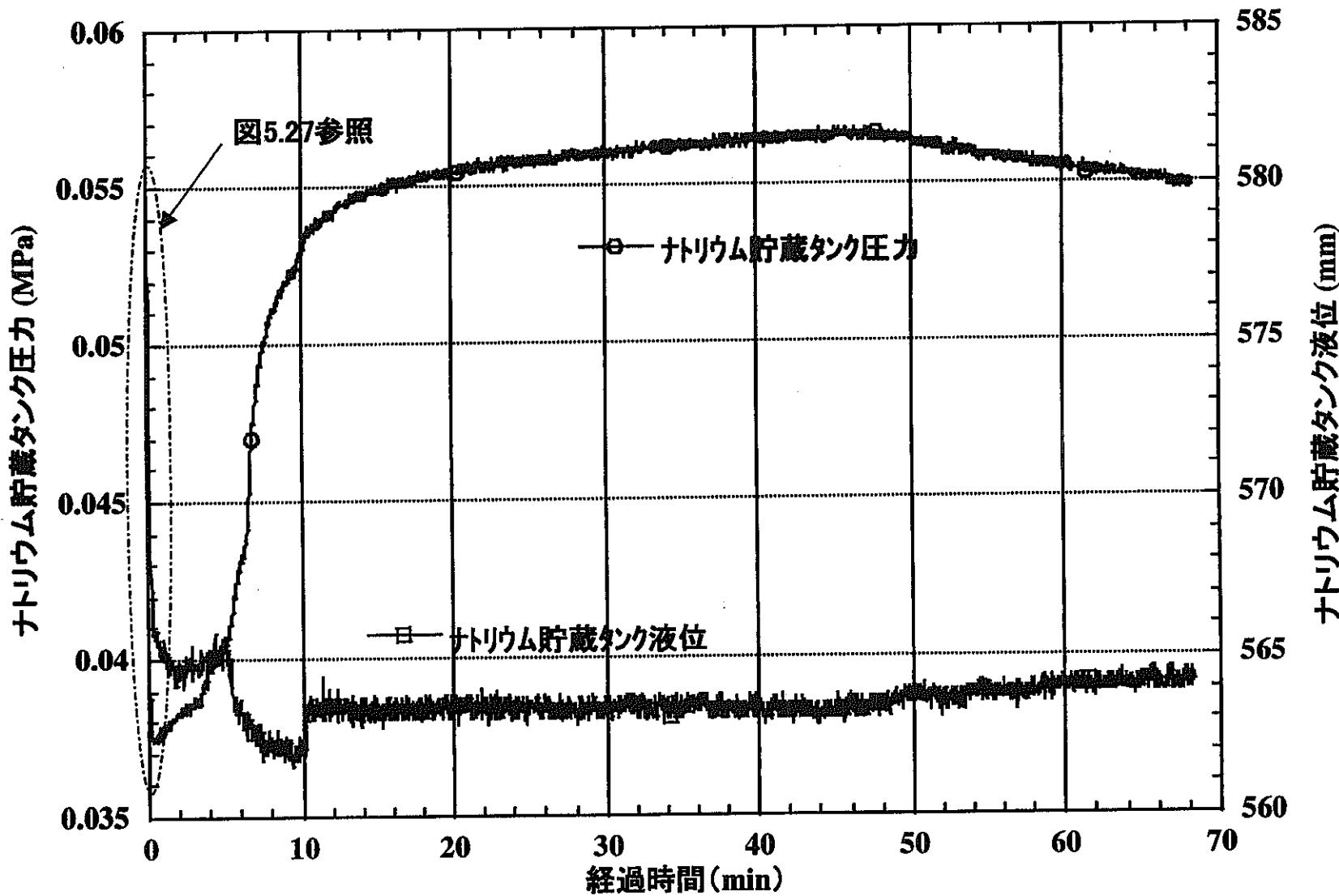


図5.26 ナトリウム貯蔵タンク圧力及び液位の挙動(試験②)

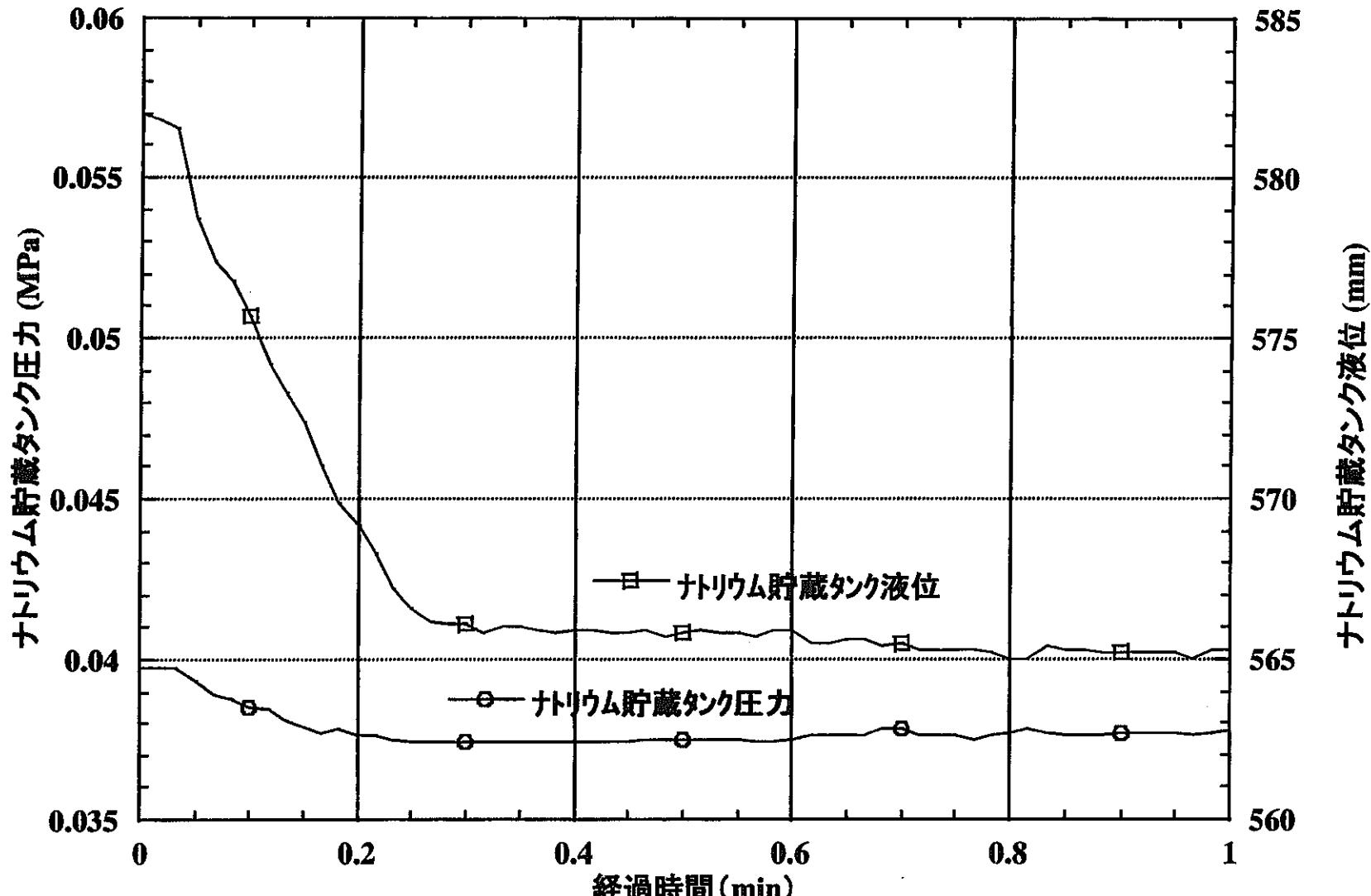


図5.27 試験開始直後のナトリウム貯蔵タンク圧力  
及び液位の挙動(試験②)

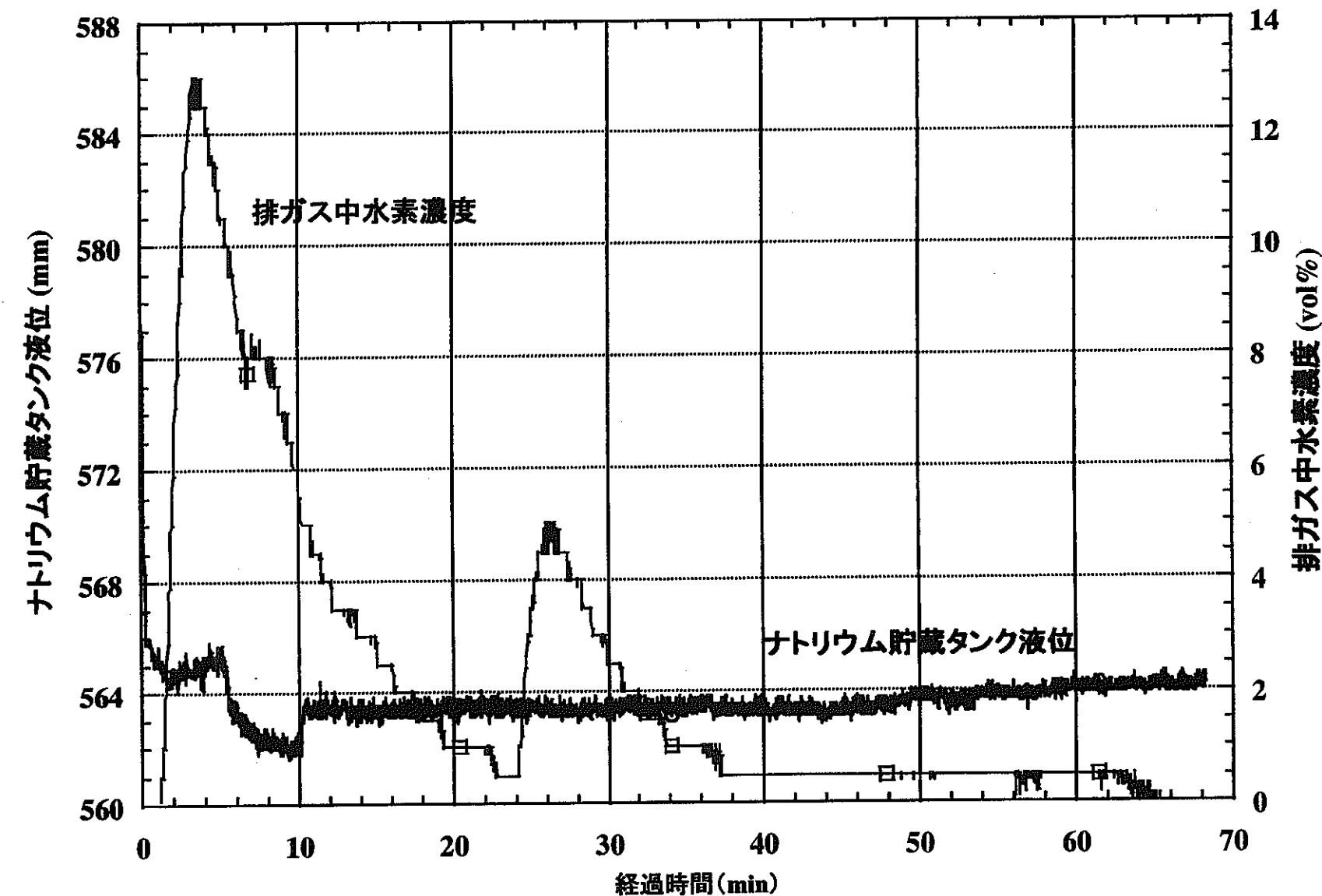


図5.28 排ガス中水素濃度の挙動(試験②)

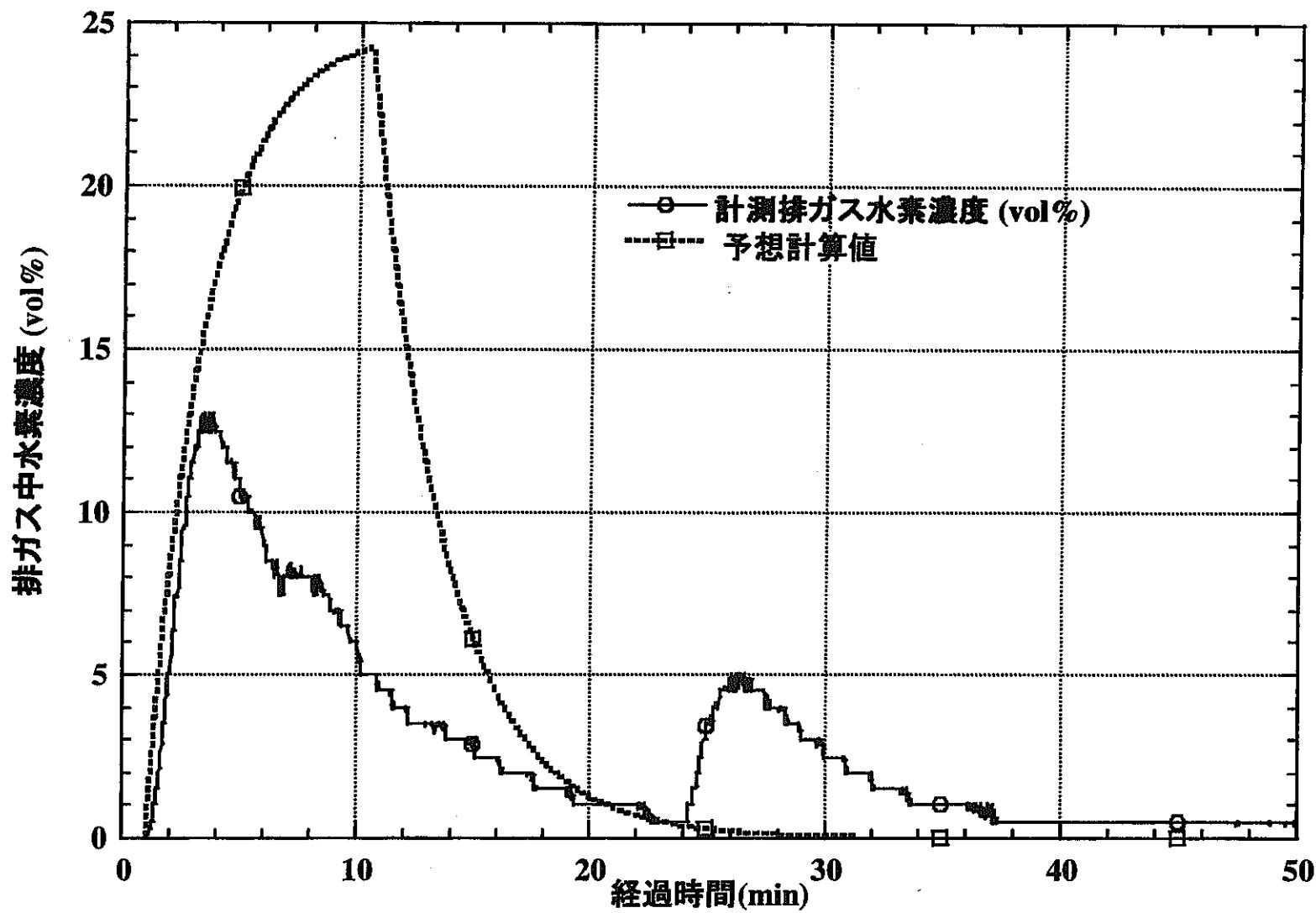


図5.29 排ガス中水素ガス濃度計測値と予想曲線との比較(試験②)

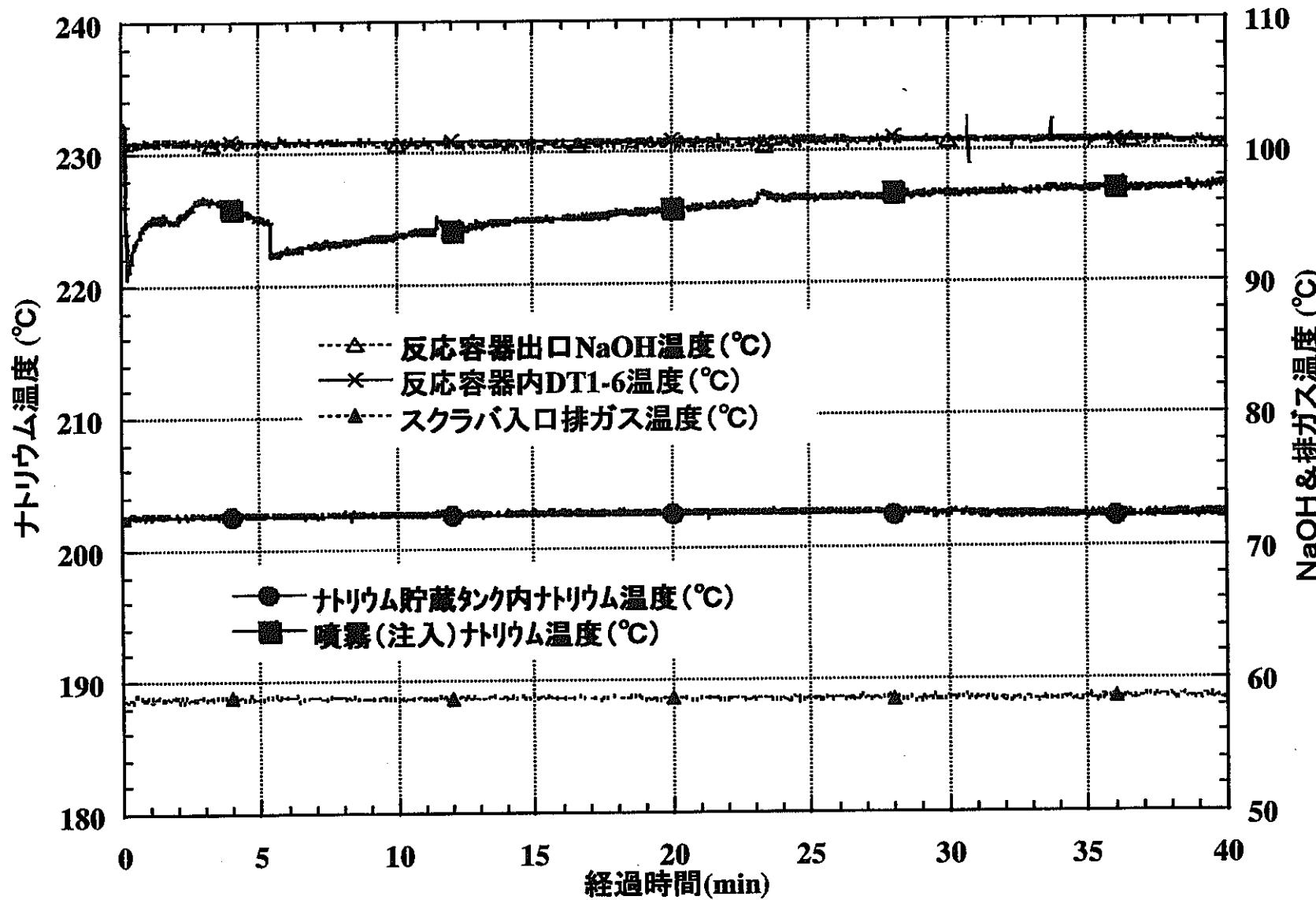


図5.30 苛性ソーダ及び排ガス温度の挙動(試験②)

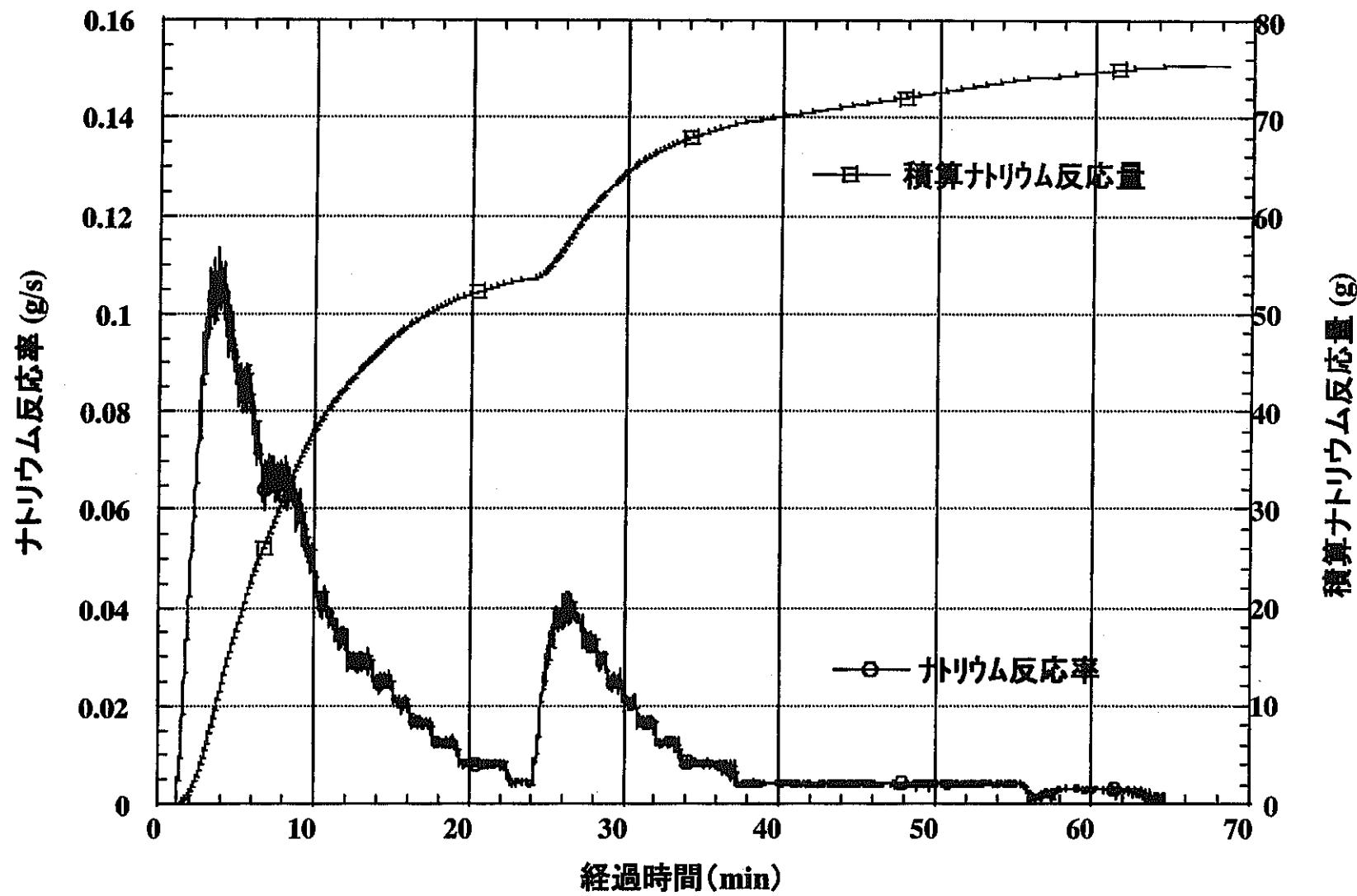


図5.31 ナトリウム反応率と反応量の関係(試験②)

## 表5.1 ナトリウム微量注入試験条件一覧

◆試験条件初期設定値

設定項目 試験No.	注入Na量 (kg)	注入Na流量 (kg/h)	Na温度 (°C)	NaOH濃度 (%)	NaOH温度 (°C)	NaOH循環流量 (kg/h)	反応容器液位 (mm)	アマイシングガス流量 (NLiter/min)	アマイシングガス圧 (MPa)	アマイシングガス温度 (°C)	V-2ガバーガス圧 (MPa)	使用注入ノズル
試験①	0.1	1.0	200	44	80	1000	1000	17	0.29	200	0.045	下部
試験②	0.1	1.0	200	47	80	1000	1000	20	0.29	200	0.04	下部

◆試験開始直前実測値

設定項目 試験No.	注入Na量 (kg)	注入Na流量 (kg/h)	Na温度 (°C)	NaOH濃度 (%)	NaOH温度 (°C)	NaOH循環流量 (kg/h)	反応容器液位 (mm)	アマイシングガス流量 (NLiter/min)	アマイシングガス圧 (MPa)	アマイシングガス温度 (°C)	V-2ガバーガス圧 (MPa)	使用注入ノズル
試験①	—	—	202.8	44	80.6	1004.6	995.5	17.3	0.3	200.4	0.045	下部
試験②	—	—	200	47	100.5	1007.7	1006	20.4	0.3	202.3	0.0397	下部

## 6. 検討・考察

### 6.1 試験装置について

本研究では、ナトリウム転換基礎試験装置を製作し、各種の機能試験から設備機能を確認し、ナトリウム微量注入試験により小規模な反応試験を実施した。これら一連の試運転結果を基に考察し、改善項目等の課題について以下に示す。

#### (1) ナトリウム流量指示

ナトリウム注入流量はナトリウム貯蔵タンクの液位変化率からの演算によって指示されるものとなっている。機能確認時において、ナトリウムが注入されていない状況にも係わらず、ノイズの影響と思われる大きな流量指示の変動が発生した。その後ノイズ対策を施したもの、その変動を無くすまでには至らず、最大3kg/h程度の振れを示していた。ナトリウム注入量の指示精度向上のためには、例えばナトリウム流量を直接計測するような流量計を用いる等、その形式も含め、新たな方式を検討する必要がある。

#### (2) 苛性ソーダ濃度計

下部スプレーノズルを用いた試験を実施した場合、アトマイジング用窒素ガス流量が大きくなるにつれ、苛性ソーダ循環ライン中へのアトマイジングガス巻き込み現象が生じ、液中の気泡が苛性ソーダ濃度を測定する超音波濃度計のセンサ一部へ回り込み、音速計測が困難となった。苛性ソーダの循環流量指示及び苛性ソーダ濃度調整用の純水注入量制御は、この濃度計指示値により演算が行われてなされている。今後安定した試験を実施するためには、濃度計音速測定箇所あるいは濃度計測手法等の見直し等の対策を講じる必要がある。

#### (3) スプレーノズル

スプレーノズルのアトマイジングガス用窒素ガスラインは、ナトリウム化合物等によるノズル部閉塞防止あるいは閉塞部開通のため窒素ガス加熱器及び蒸気供給設備を有している。一方、ナトリウム注入ラインは、ナトリウム注入停止後に苛性ソーダ逆流防止用の窒素ガスをブローできるガス供給ラインを有するのみである。また、この苛性ソーダ逆流防止用の窒素ガスは、液体窒素から気化された常温のガスであり、加熱ガスでは無い。加熱されたナトリウムの注入が継続している間は、加熱されたアトマイジングガス及び溶融ナトリウムの伝熱作用により、ナトリウムの融点以上の温度を確保できるため、ナトリウムのフリーズによる閉塞は無いと考えられる。しかし、ナトリウム注入を停止した場合には、苛性ソーダ逆流防止用の常温窒素ガスブローにより、残留ナトリウムの冷却効果による配管やノズルの閉塞が懸念される。また、反応容器内苛性ソーダ温度が100°C以下と低い場合には、反応容器内に突き出たスプレーノズル部で苛性ソーダ温度による冷却効果が考えられ、ノズル閉塞する可能性が懸念される。このようなノズル閉

塞の可能性をハード的に回避するためには、苛性ソーダ逆流防止用窒素ガスを加熱するための設備を設ける等の対策を検討する必要がある。

#### (4) 排ガスフィルタ

試験準備及び試験実施時において、排ガスに同伴する湿分により、大気放出スタック上流側に設置のフィルタ内カートリッジの破過に伴う目詰まりが生じ、圧損が高くなることで排ガス流量が低下する現象が見られた。現状、本フィルタは1系列のみの設置であり、試験中には水素ガス漏洩防止の観点から、破過したカートリッジを交換することが困難である。今後連続試験を実施するためには、試験中のメンテナンスができるよう改善すべきであり、並列に系列を増やすか、フィルタ能力をアップさせるか、あるいは除湿性能の向上を図るといった対策が必要となる。

### 6.2 反応による安全性について

ナトリウムの実液を用いた微量注入試験においては、ナトリウム注入量を最大100g程度までとして試験を実施した。（実質反応したナトリウム量は20g及び73g程度と推計された。）試験実施時の装置のプロセス挙動及び各種データに異常は見られなかったことから、この程度の注入量においては、安全性に特に問題は無いものと考える。ただし、反応容器内苛性ソーダ溶液中の温度上昇による反応領域を確認するまでには至らなかった。反応量が小さい場合には、苛性ソーダ循環による攪拌の効果が大きく、反応容器内の発熱を分散する作用があると考えられる。今後、ナトリウムの注入量を増やしつつ反応による安全性を確認する試験を実施する予定である。

### 6.3 発生水素ガスについて

先に示す通り、ナトリウムの注入に伴い排ガス中の水素濃度が上昇し、初期値に戻り静定するまでにかなりの時間を要した。この理由として以下の現象が考えられる。

- ①反応容器カバーガス及び排ガス系統内に存在する窒素ガスとの混合により、完全排出に至るまでに時間を要した。
- ②反応により発生した水素ガスの気泡が、反応容器内の粘性の高い苛性ソーダ液中に留まっており、更に循環流に同伴することで完全に抜け出すまでに時間を要した。
- ③微少なナトリウムの反応が継続していた。これは、未反応ナトリウムの存在とナトリウムの微少な注入が継続していた可能性と考えられる。

上記①及び②については、苛性ソーダ循環流量あるいはアトマイジング用窒素ガス流量の変化による影響の有無を確認する必要があり、③については、ナトリウム注入量を増加させることで、特に未反応ナトリウムの有無については、反応による温度上昇により確認することが必要であると考える。

## 6.4 ナトリウム注入量について

微量注入試験におけるナトリウム注入速度を把握するため、ナトリウム貯蔵タンクのカバーガス圧力との関係を考察する。ナトリウムの注入量を直接目視できるものはナトリウム貯蔵タンクの液位変化量である。実際反応したと考えられるナトリウム量は、5.3.2 項で水素発生量から算定しているが、ナトリウム注入速度を見積もる上で、注入時間に対する総ナトリウム移動量から見かけの注入速度として算定するよりは、スプレーノズルから噴霧されたナトリウム量とその噴霧時間から算定する方が実際の注入速度と言えよう。しかし、この噴霧時間は計測できず、推測も困難である。液位変化の演算により指示計に表示されるナトリウム注入速度は、先述したようにノイズの影響等で不安定な挙動を示し、確からしい値は確認できなかった。そこで、液位変化量と試験時観測された現象とから、見かけのナトリウム注入速度を推計してみる。

試験①において、試験前後のナトリウム貯蔵タンクの液位変化が 13.4mm であったことから、ナトリウム移動量は 101g に相当する。しかし、ナトリウム注入遮断弁から反応容器注入部（スプレーノズル先端）までの配管内容積から、液位変化が示す見かけの量は、その全量が反応容器内に注入されているのではなく、配管内付着あるいは残留分もあることを考慮しなければならない。尚、ナトリウム注入ラインに存在する配管内の全容量は、約 102g のナトリウム量に相当すると計算される。（ただし、いくつか設置してあるバルブ部内の容積まで正確に算定しているわけではないので、実際は 102g より若干多くなると予想される。）本試験終了直後、ナトリウムラインへの苛性ソーダ逆流防止用の窒素ガスの流動が確認されなかったことから、配管内残留ナトリウムが窒素ガスプローブにより反応容器へ押し出される前に、スプレーノズル先端部に閉塞が生じ、配管内部にはナトリウムが残留していたと考えられる。更に、本試験の前に実施したナトリウム注入のトライアル時において、試験開始直後にナトリウム流量「高高」警報が発生し、ナトリウム注入遮断弁がインターロックにより自動閉となったが、直ちに手動鉗で開とし、注入を継続させてないので、この時のナトリウム液位減少にして 3.4mm、25.6g 相当のナトリウムの移動が生じている。その際に水素ガスの発生が確認されなかったことから、このナトリウムは、全て配管内部に残留していたと考えられる。このため、注入時間内に反応容器内に注入された総ナトリウム量は  $(101g + 25.6g) - 102g = 24.6g$  程度であったと推測される。この結果は、先の水素ガス濃度データから算出したナトリウム反応量 20g と大きくかけ離れた値ではない。ここで、ナトリウム注入時間は 13sec であったため、見かけのナトリウム注入速度は  $(24.6g / 13sec) \times (3600 / 1000) = 6.8\text{kg/h}$  と推計できる。

また、試験②においては、試験前後のナトリウム貯蔵タンクの液位変化が 16.2mm であったことから、ナトリウム移動量は 122.2g に相当する。本試験終了直後、ナトリウムラインへの苛性ソーダ逆流防止用の窒素ガスの流動が確認されたことから、配管内残留ナトリウムが窒素ガスプローブにより押し出された可能性が高い。しかし、この窒素ガスの流動はそのうち止まってしまい、同ライン先端部の閉塞が生じた。更に、閉塞除去作業のためにスプレーノズルを取り外し、スプレーノズル及び接続フレキシブル配管内の閉塞状況を確認したところ、配管上部にガス流動があったものと確認できる空間部が存在していた。

これらのことから、窒素ガス流動に伴い配管内のナトリウムが一部押し出されたものと考えられ、その量は配管閉塞状況の確認により、40～50g程度であった。ただし、この量は注入停止後の窒素ガスブローにより反応容器内に押し出された量と考えられるため、結局注入時間内に反応容器内に注入された総ナトリウム量は、注入停止後の完全閉塞を仮定することにより、 $122.2\text{g} - 102\text{g} = 20.2\text{g}$ 程度と推測される。先の水素ガス濃度データから算出したナトリウム反応量73gと比較した場合、液位変化から考察されたナトリウム反応量は、 $20.2\text{g} + 40\sim 50\text{g} = 60.2\sim 70.2\text{g}$ となり、おおよそ近いものとなった。ナトリウム注入時間は14secであったため、見かけのナトリウム注入量は $(20.2\text{g}/14\text{sec}) \times (3600/1000) = 5.2\text{kg/h}$ と推計できる。

尚、ナトリウム注入速度は、ナトリウム貯蔵タンクのカバーガス圧に依存することが当初より予測されており、上述の試験①及び試験②の結果から、注入速度とカバーガス圧は比例関係にある（試験①：0.045MPa→6.8kg/h、試験②：0.04MPa→5.2kg/h）ことを確認できた。このことから、今後試験を展開する上で重要なパラメータであるナトリウム注入速度の可変は、ナトリウム貯蔵タンクカバーガス圧を制御することで可能であると考える。

## 7.まとめ

本書では、放射性ナトリウムを安定な化合物へ転換する手法を見出すための技術開発として、我が国では新しい苛性ソーダ処理法を用いたナトリウム転換基礎試験装置の製作と、その各種機能試験及び校正試験を含む試運転の結果から、以下のような知見と課題を得た。

- (1) 本試験装置のもつ各設備の機能試験においては、各機能及び制御性について、設計性能を十分満足した。
- (2) 苛性ソーダ濃度計の校正試験では、超音波音速値と苛性ソーダ濃度、温度との相関データを、従来より拡張された条件範囲で取得し、重回帰分析により校正曲線を得た。  
今後、各分野あるいは研究開発において、苛性ソーダ濃度を音速により計測する手法を用いる場合に活用できるものと考える。
- (3) ナトリウムを苛性ソーダに微量注入する反応試験においては、反応現象あるいはプロセス挙動等に安全上の問題は認められなかった。しかし、本試運転では、ノイズ影響によるナトリウム流量計指示値の変動、スプレーノズル部の閉塞、苛性ソーダ循環ラインへのアトマイジングガス巻き込み等、いくつかの問題が生じた。今後、抽出されたいいくつかの課題について、装置改造及び運転要領の両面から対策する。
- (4) ナトリウム微量注入試験では、ナトリウムの注入量が少量であったことから、反応容器内苛性ソーダ溶液中での温度変化分布による反応領域を確認するまでには至らなかった。今後、基本反応特性を把握する試験を実施していくため、ナトリウム注入量を増やしていく方向で、かつ、試験条件（アトマイジングガス流量、苛性ソーダ温度、苛性ソーダ循環流量など）を変化させた試験を実施し、反応に支配的なパラメータの把握や、システム性能の把握、安全性等を確認する。

## 8. 謝 辞

本試験装置の概念設計時に参画して頂いた宇宙開発事業団の谷田部敏男氏(当時要素技術開発部 施設保全グループ)、基本設計時に参画して頂いた(株)神菱ハイテック山本晋平氏(当時要素技術開発部 施設保全グループ)、及び本実験の実施に際し、多大なご助力・ご協力を頂いた要素技術開発部 新技術開発試験グループ副主任技術員 平川康氏及び同グループ所属常陽産業(株) 河井政隆氏、郡司茂氏に対し、ここに感謝の意を申し上げます。

## 9. 參考文献

- (1) N. de Seroux 他 , Contaminated Sodium Disposal NOAH process ,  
Safe Management and disposal of nuclear waste Vol. 3 , 1993
- (2) A. W. McIntyre , The Disposal of Liquid Coolants at PFR - A Decommissioning  
Challenge , The Nuclear Engineer, Volume38, No.1
- (3) John B. Rajan 他 , Improved Treatment/Disposal of Reactive Metals ,  
Nuclear Technology Vol.83 , Nov. 1998
- (4) Romesh Kumar 他 , Improved Treatment/Disposal of Reactive Metals. Phase II :  
Technical Research and Development , US DOE Rep , DOE-HWP-92 , May 1991

## Appendix

## Appendix-1 (1/3) 機器仕様一覧

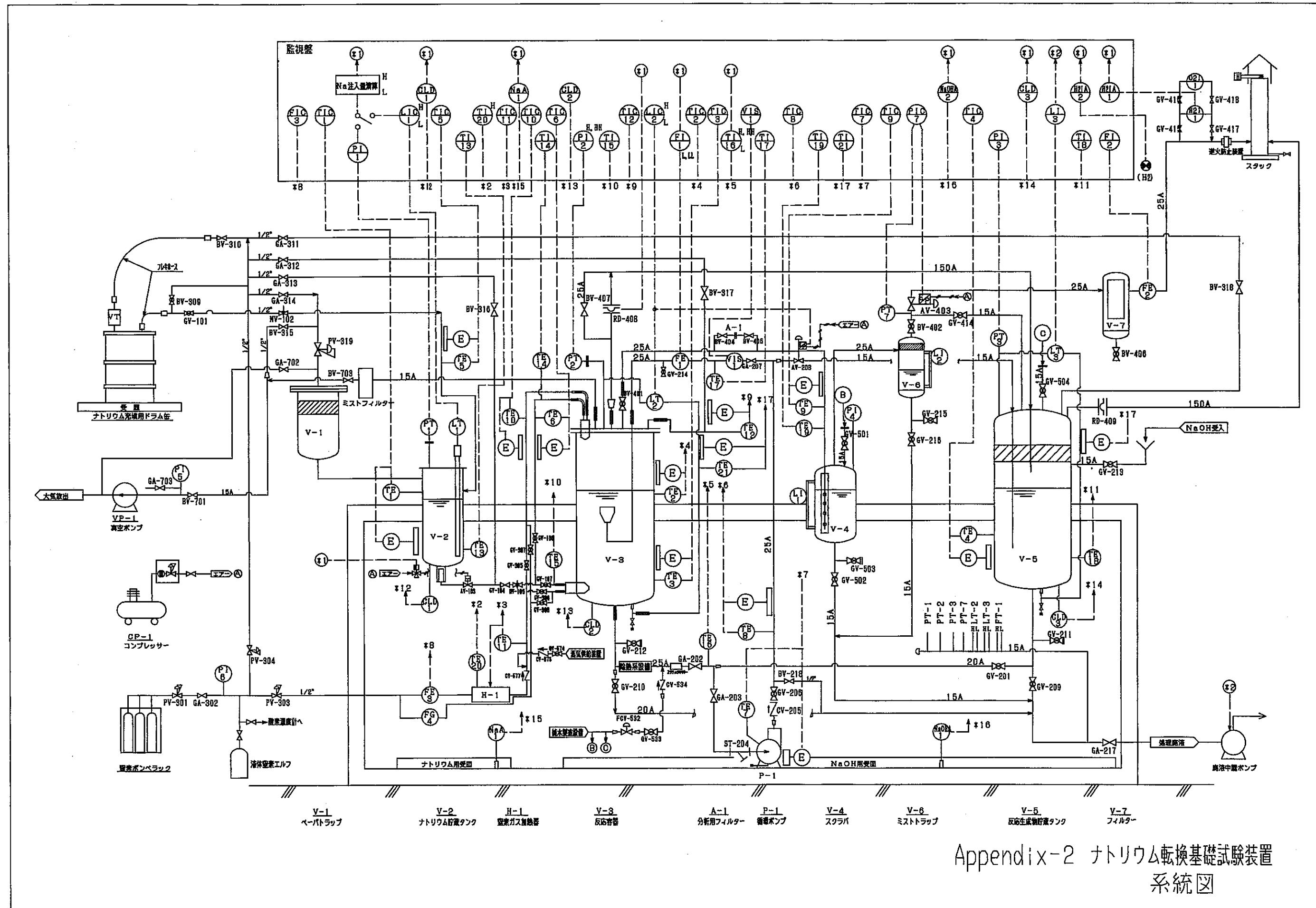
機器名称	項目	仕 様	備 考
<b>(1) ナトリウム処理系</b>			
反応容器	反応容器寸法 反応容器容量 通常NaOH容量 NaOH濃度 設計圧力 設計温度 反応容器制御温度 材 質 員 数	406.4 mmΦ × 1690 mmH 200 Liter 120 Liter 0~70 wt% -0.098~0.098 MPa 200°C ~200°C SUS316 1基	内径：390.4 mm 70%NaOH 沸騰温度+30°C
ナトリウム注入ノズル	ナトリウム流量 設計圧力 設計温度 材 質 設置箇所数 注入方式	~10 kg/h -0.098~0.098 MPa 350°C インコネル 600/SUS316 上部、下部ノズル各1基 ガスアトマイジング方式	
ナトリウム貯蔵タンク	貯蔵タンク寸法 ナトリウム貯蔵量 設計圧力 制御温度 設計温度 材 質 員 数	114.3 mmΦ × 1100 mmH 5.0 kg -0.098~0.098 MPa ~220°C 220°C SUS316 1基	消防申請済み最大取扱量
<b>(2) 荷性フーリング溶液循環・除熱系</b>			
反応生成物貯蔵タンク	貯蔵タンク寸法 貯蔵タンク容量 NaOH濃度 設計圧力 設計温度 制御温度 材 質 員 数	508 mmΦ × 1242 mmH 200 Liter 0~70 wt% -0.098~0.098 MPa 200°C ~200°C SUS316 1基	内径：496 mm
循環ポンプ	型 式 循環流量 NaOH濃度 設計温度 制御温度 材 質 員 数	マグネットシールレスポンプ 900~2500 kg/h 0~70 wt% 200°C (短期) ~200°C SUS316 1基	許容最小流量 0.6m³/h 連続最高使用温度 180°C
冷却器	交換熱量 材 質 員 数	61130 kJ/h SUS316 1基	Na処理量 10kg/h の時
チラー	型 式 冷却能力 冷水温度範囲 員 数	水冷式冷水機 69920 kJ/h 5~20°C 1基	at 冷水温 20°C
混合器	型 式 材 質 員 数	ラインミキサー SUS316 1基	

## Appendix-1 (2/3) 機器仕様一覧

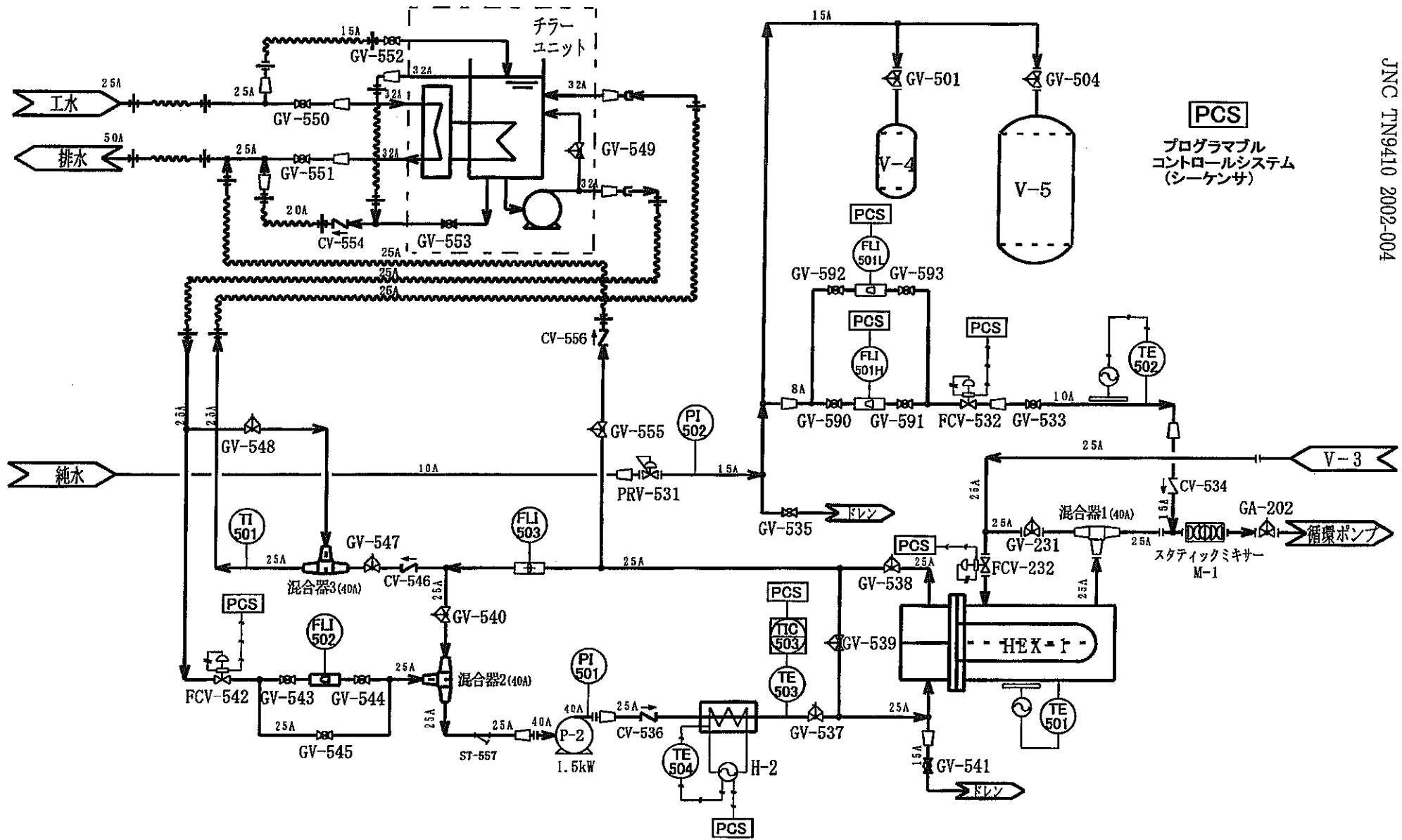
機器名称	項目	仕 様	備 考
<b>(3) 排ガス処理系</b>			
スクラバ	寸 法 流 体 設計圧力 設計温度 材 質 員 数	267.4 mmφ × 734 mmH H <sub>2</sub> 、窒素、NaOHミスト -0.098~0.098 MPa 200°C SUS316 1基	内径：254.4 mm
ミストトラップ	寸 法 流 体 設計圧力 設計温度 材 質 員 数	165.2 mmφ × 728 mmH 水素、窒素、NaOHミスト -0.098~0.098 MPa 常温 SUS316 1基	内径：155.2 mm
フィルタ	寸 法 流 体 設計圧力 設計温度 材 質 員 数	89.1 mmφ × 396 mmH H <sub>2</sub> 、窒素、NaOHミスト -0.098~0.098 MPa 常温 SUS304 1基	PPカートリッジ充填
スタック	寸 法 風 量 材 質 員 数	355.6 mmφ × 2000 mmH 10 m <sup>3</sup> /h (通常時) 2500 m <sup>3</sup> /h (異常時) SUS304 1基	・風量(通常時) Na=20kg/h注入時の水素 ガス発生量+ブレーカーの 窒素ガス必要流量 ・風量(異常時) 異常反応時のみ、過渡的 に≈15秒間
点火器	電気容量 材 質 員 数	2.5 kW SUS316(マイクロヒータ)/SUS304(本体) 1基	
分析用フィルタ	型 式 材 質 員 数	ラインホルダー SUS304 1基	
<b>(4) 窒素ガス供給系</b>			
窒素ガス供給 設備	型 式 容 量 氣化能力 員 数	エルフ 107 m <sup>3</sup> 10 m <sup>3</sup> /h 1基	バックアップとしてガスボンベ にても供給可能とする。
窒素ガス加熱器	設計流量 設計圧力 設計温度 制御温度 材 質 員 数	12 m <sup>3</sup> /h 0.294 MPa 350°C ~350°C SUS316 1基	
<b>(5) 真空設備</b>			
真空ポンプ	排氣能力 到達真空度 員 数	320 Liter/min 10~1.0 torr 1基	

## Appendix-1 (3/3) 機器仕様一覧

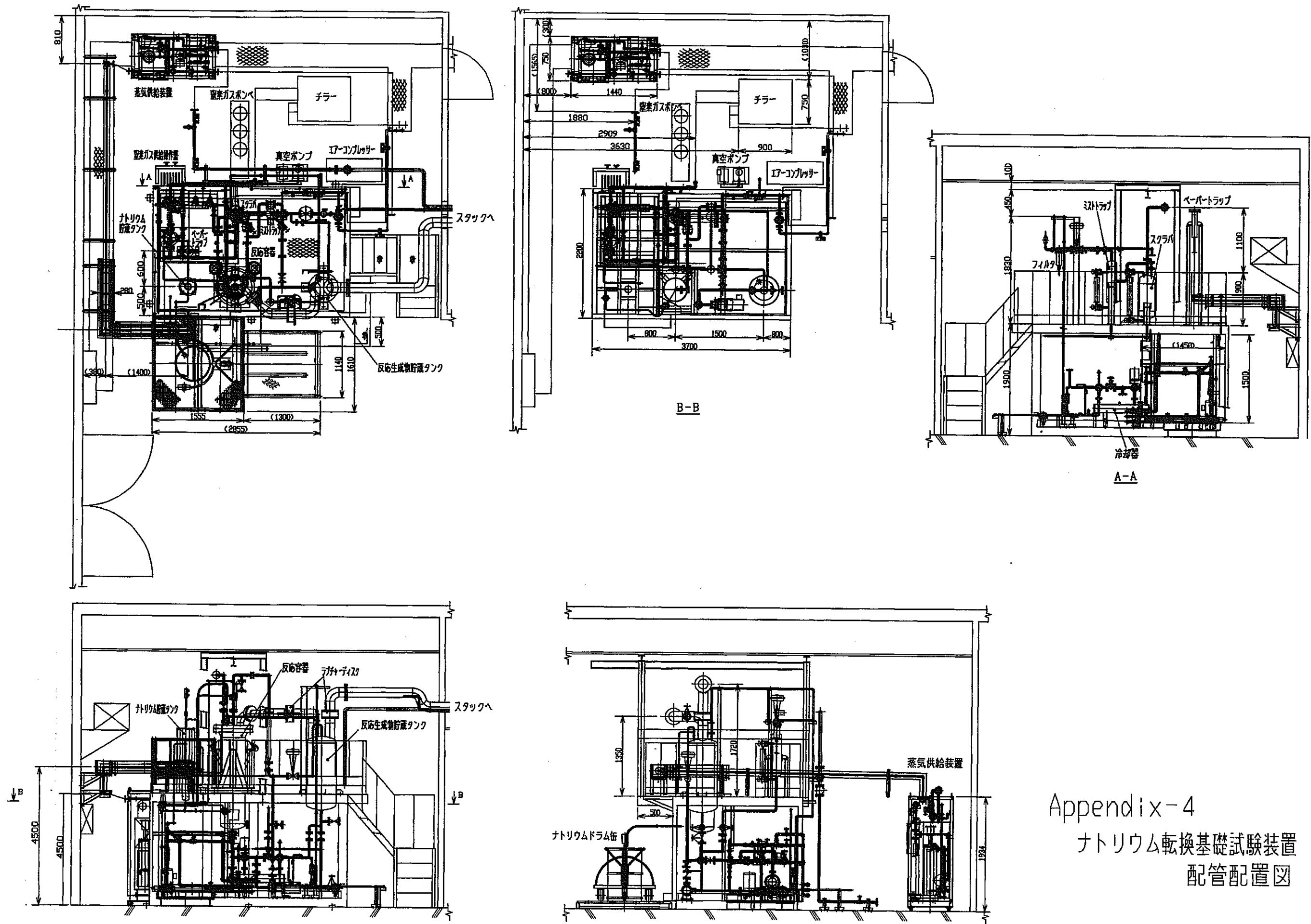
機器名称	項目	仕様	備考
(6) 壓縮空気設備			
コンプレッサ	型式 吐出能力 最高圧力 空気タンク容量 員数	パッケージオイルフリーベビコン 75 Liter/min 0.93 MPa 30 Liter 1基	エアードライヤー付き
(7) 純水供給設備			
活性炭フィルタ	型式 充填活性炭量 員数	カートリッジ式 30 Liter 1基	
純水器	型式 充填イオン交換樹脂量 員数	カートリッジ式 40 Liter/基 4基(2基予備)	
純水タンク	容量 材質 員数	200 Liter 難燃性FRP 1基	
純水ポンプ	型式 容量 材質 員数	ギアポンプ 100 Liter/h SUS303 1基	
(8) 排水処理設備			
粗中和槽、中和槽、 処理水槽	総容量 材質 員数	1.15 m <sup>3</sup> FRP 1基	粗中和槽および中和槽 には攪拌機が付属
排水中継ポンプ	型式 容量 材質 員数	ダイヤフラムポンプ 70 Liter/h テフロン／ハステロイC 1基	
処理水ポンプ	型式 容量 材質 員数	マグネットシールレスポンプ 4 m <sup>3</sup> /h カーボン繊維強化ETFE 1基	
塩酸タンク	容量 材質 員数	3 m <sup>3</sup> FRP 1基	シールボット付き
塩酸ポンプ	型式 容量 材質 員数	マグネットシールレスポンプ 1.5 m <sup>3</sup> /h カーボン繊維強化ETFE 1基	
(9) メンテナンス設備			
ホイスト	型式 定格荷重 材質 員数	ブレントロリ結合型 1 Ton FC 1基	
メンテ用台車	寸法 材質 員数	750 mm□ × 742 mmH FC 1基	キャスター付き



## Appendix-2 ナトリウム転換基礎試験装置 系統図

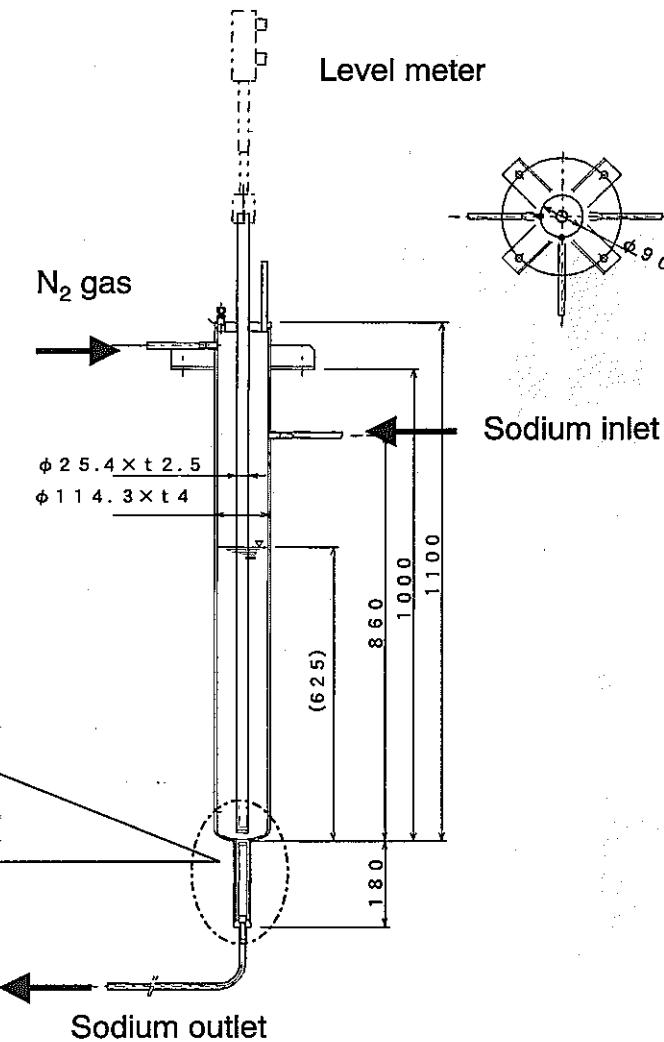
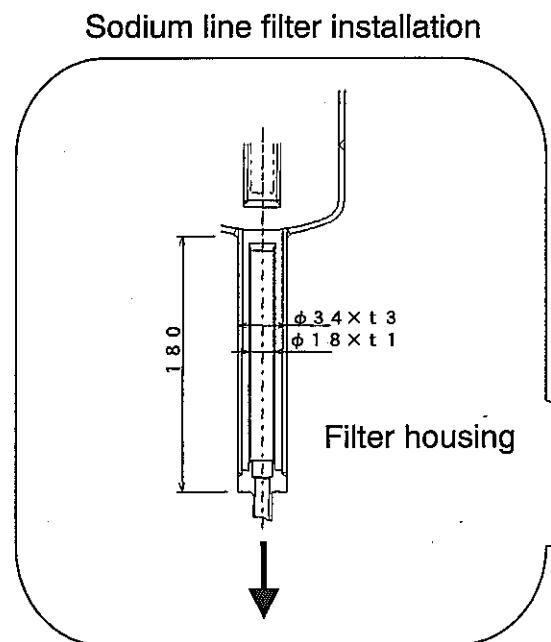


### Appendix-3 ナトリウム転換基礎試験装置除熱系統図

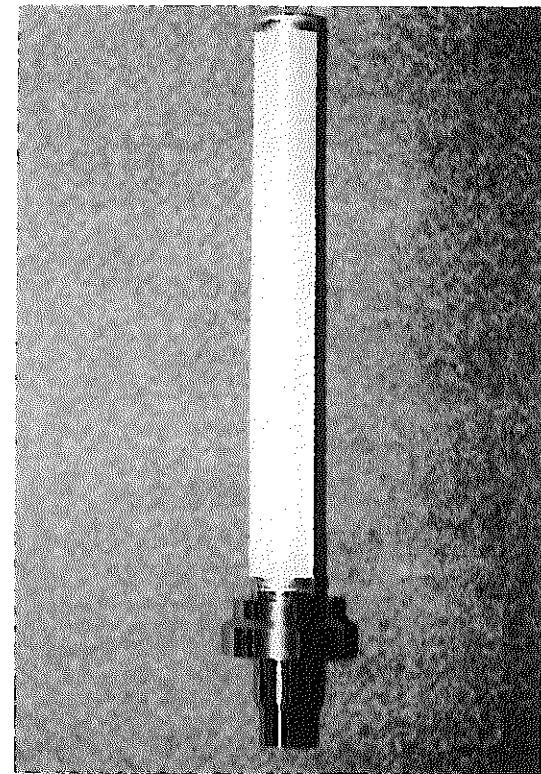
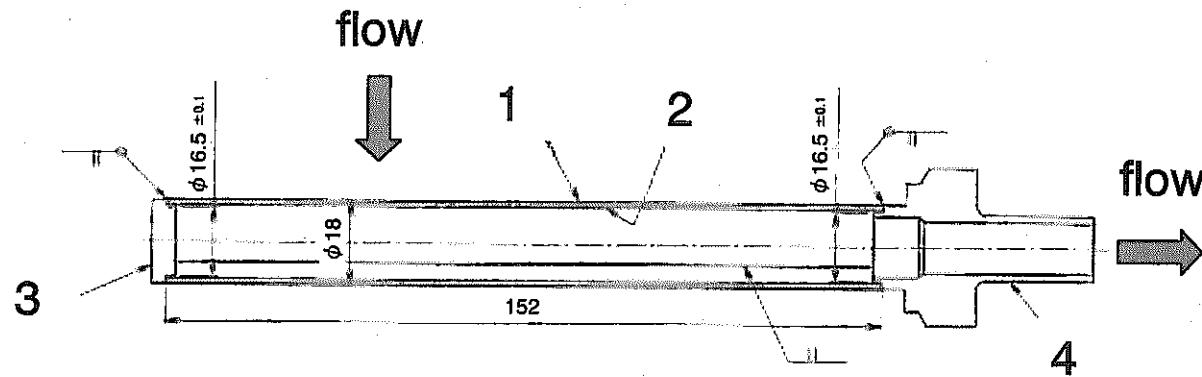


Appendix-4  
ナトリウム転換基礎試験装置  
配管配置図

Design Pressure	-0.098 to 0.0098MPa
Design Temperature	220°C
Inventory	5 kg
Material	SUS316
Net Weight	40 kg

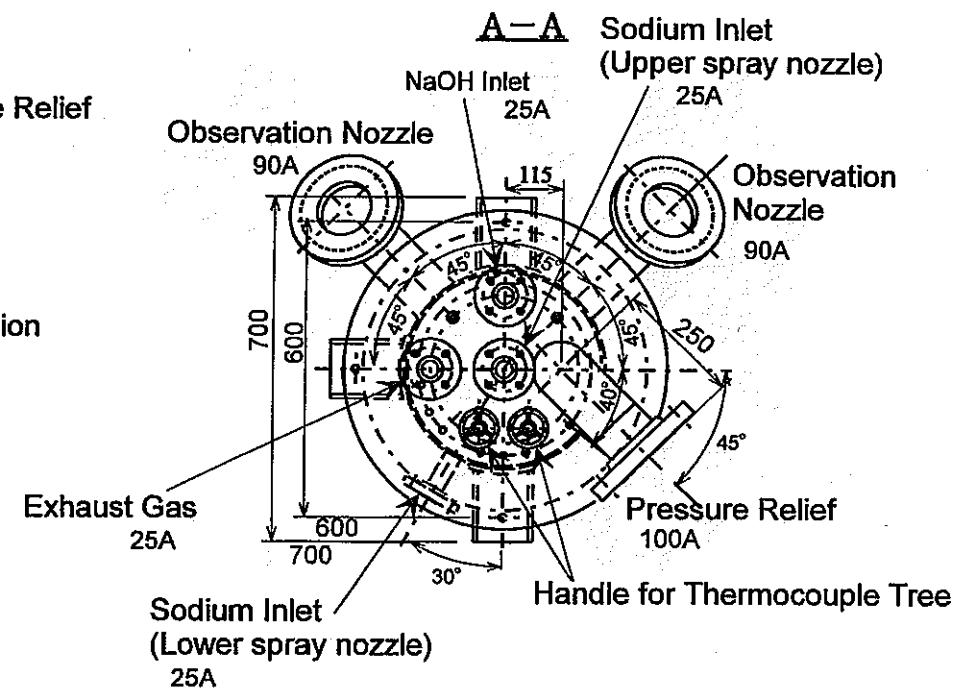
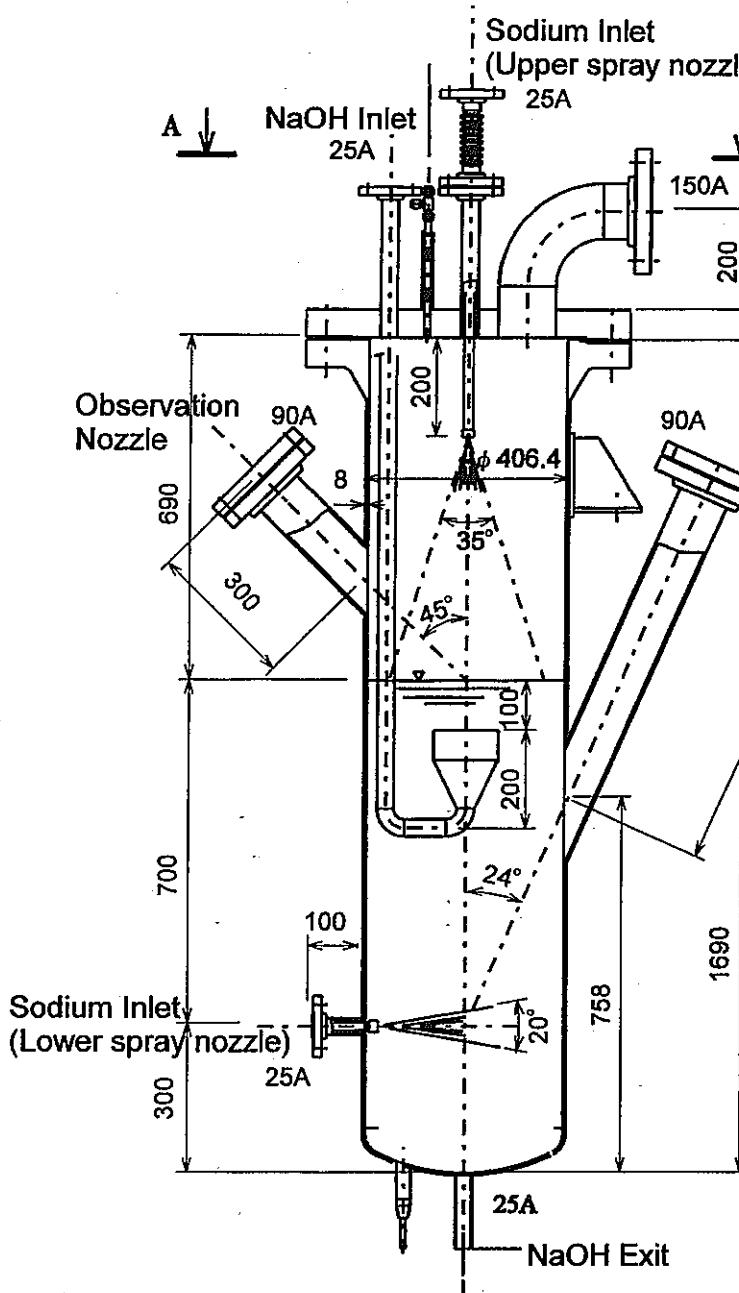


Appendix-5 ナトリウム貯蔵タンク構造図



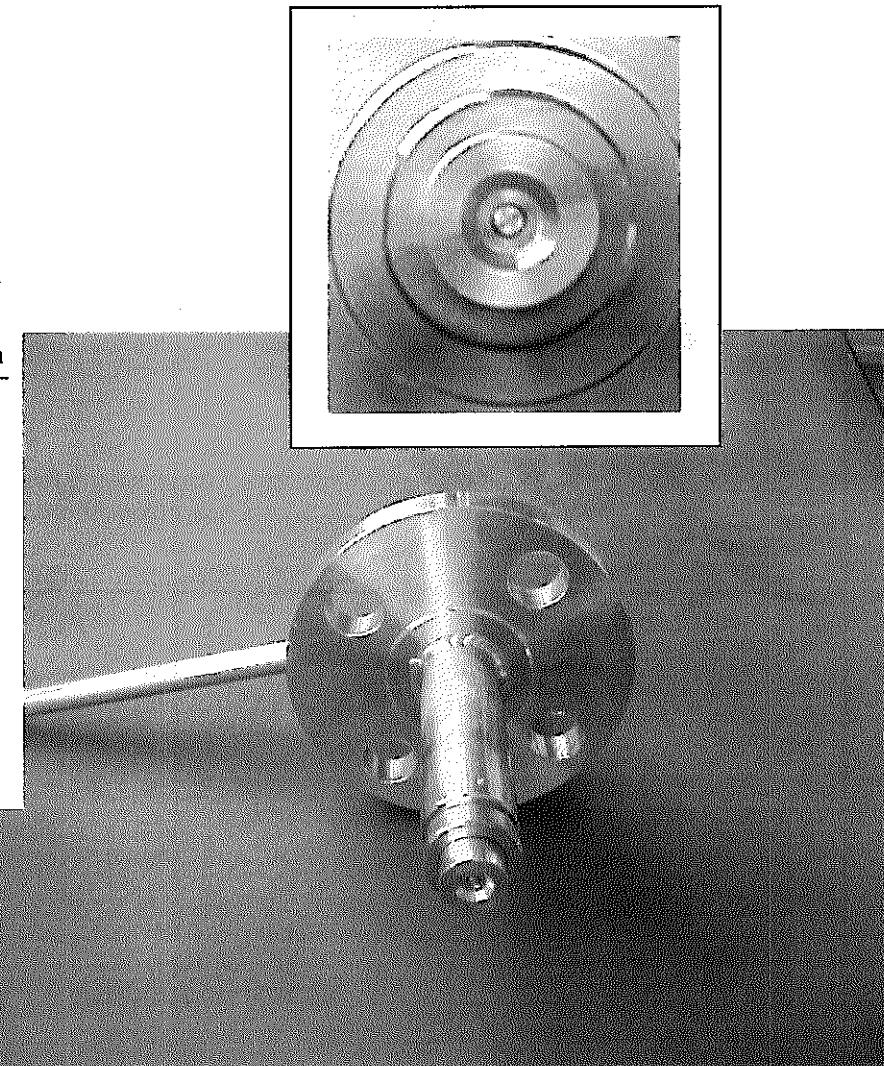
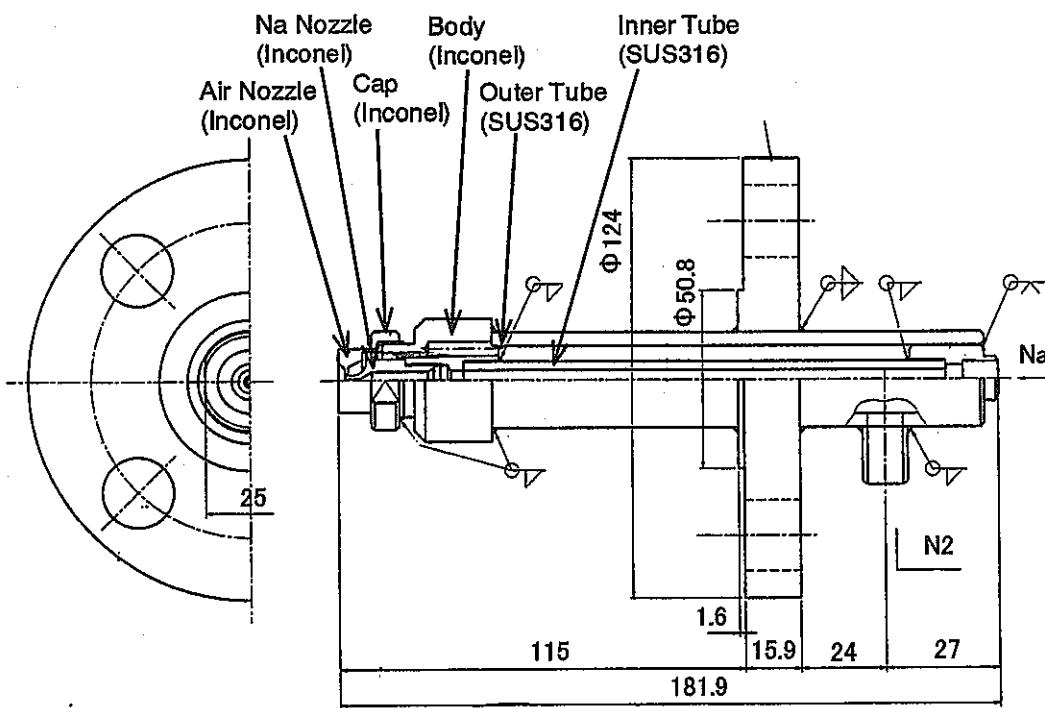
- |                  |              |
|------------------|--------------|
| 1. Mesh          | : SUS316     |
| 2. Punching tube | : SUS304     |
| 3. End plate     | : SUS304     |
| 4. Boss          | : SUS316     |
| Filtration       | : $50 \mu m$ |

Appendix-6 ナトリウムフィルタ構造図



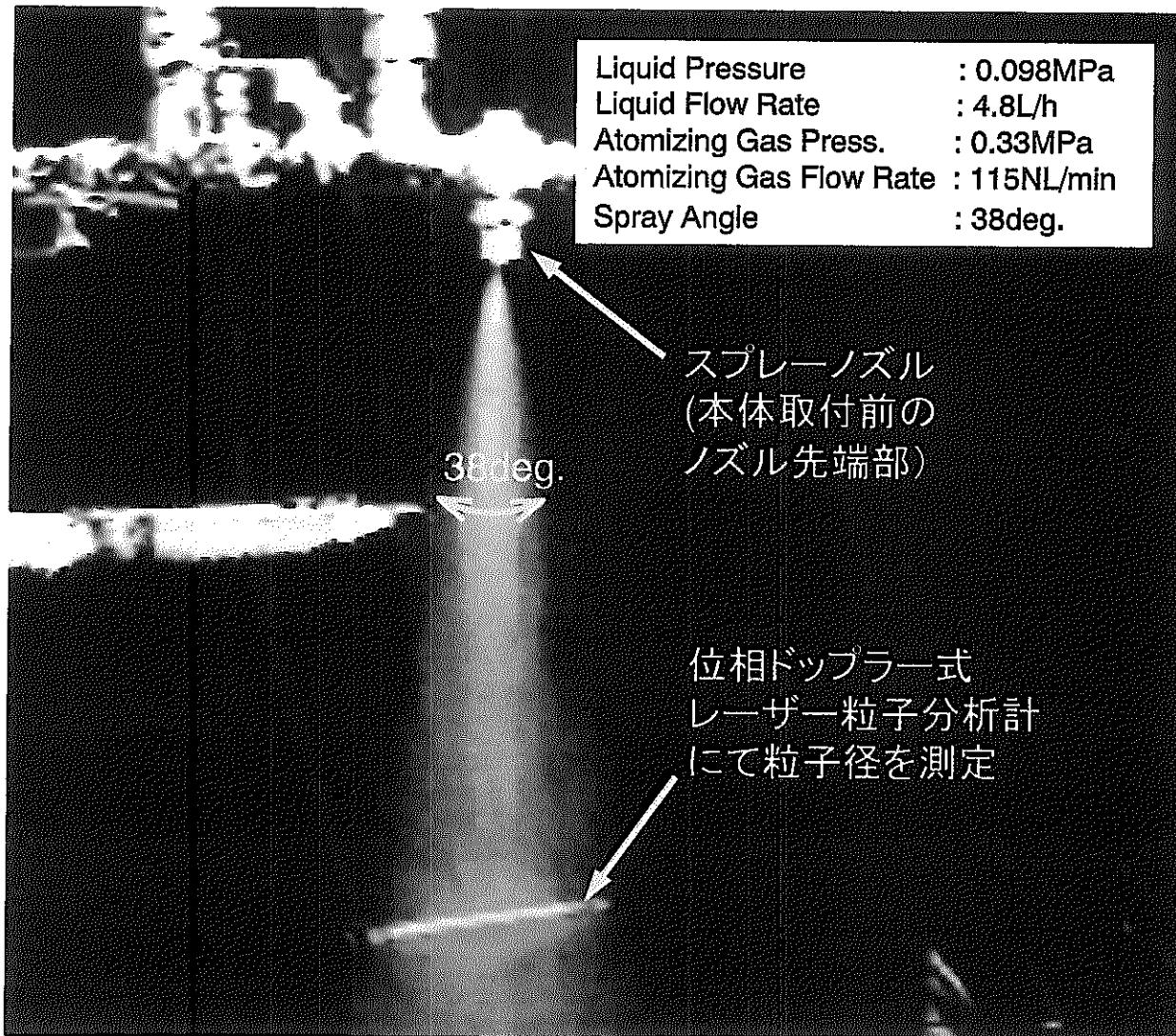
Design pressure	-0.098 to 0.098MPa
Design temperature	200 °C
Inventory	200 L
Material	SUS316
Net Weight	630kg

Appendix-7 反応容器構造図

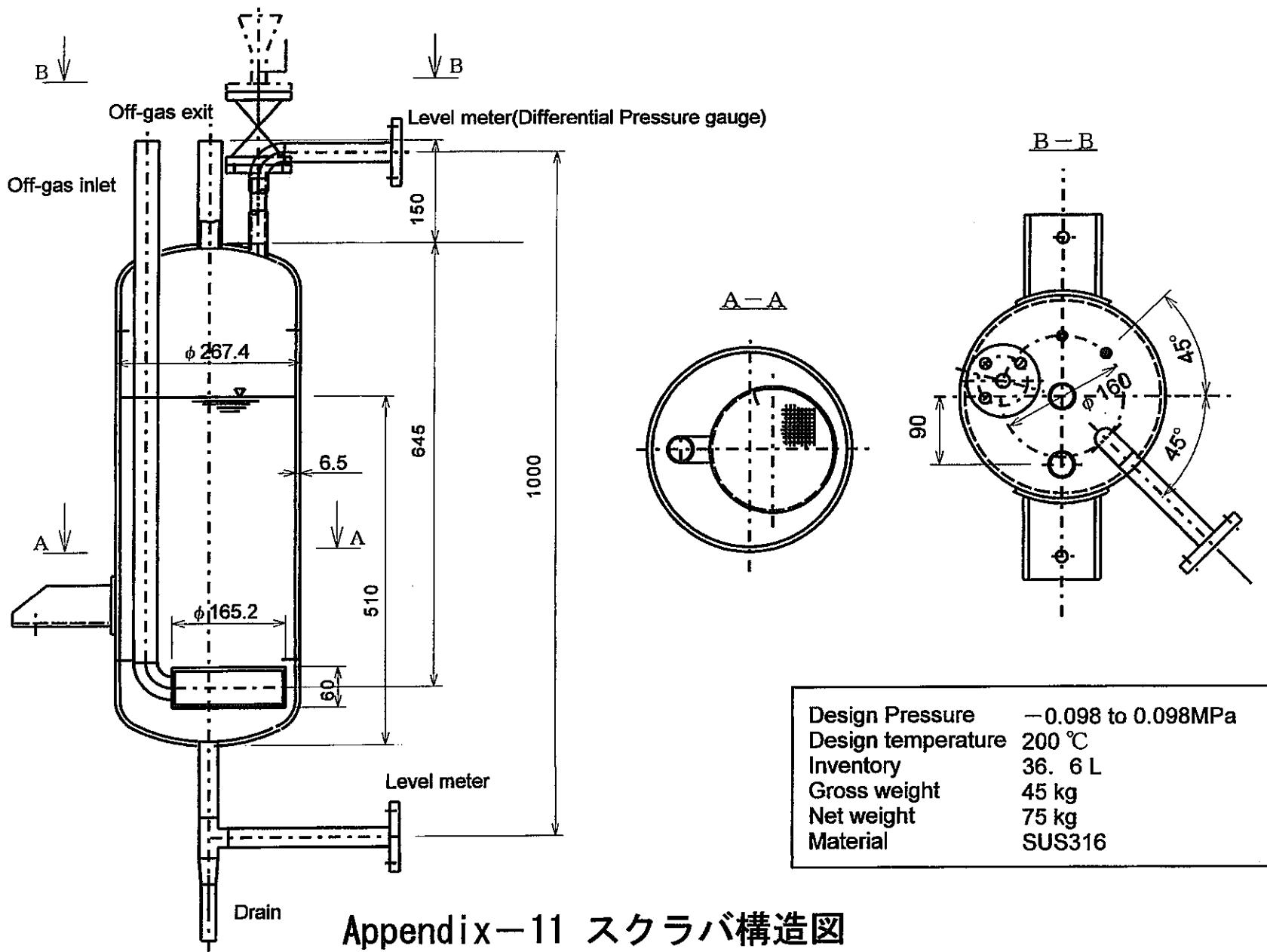


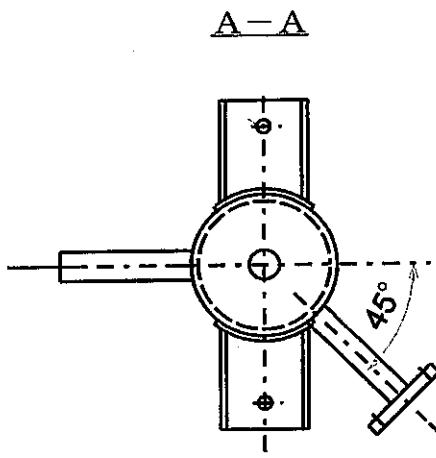
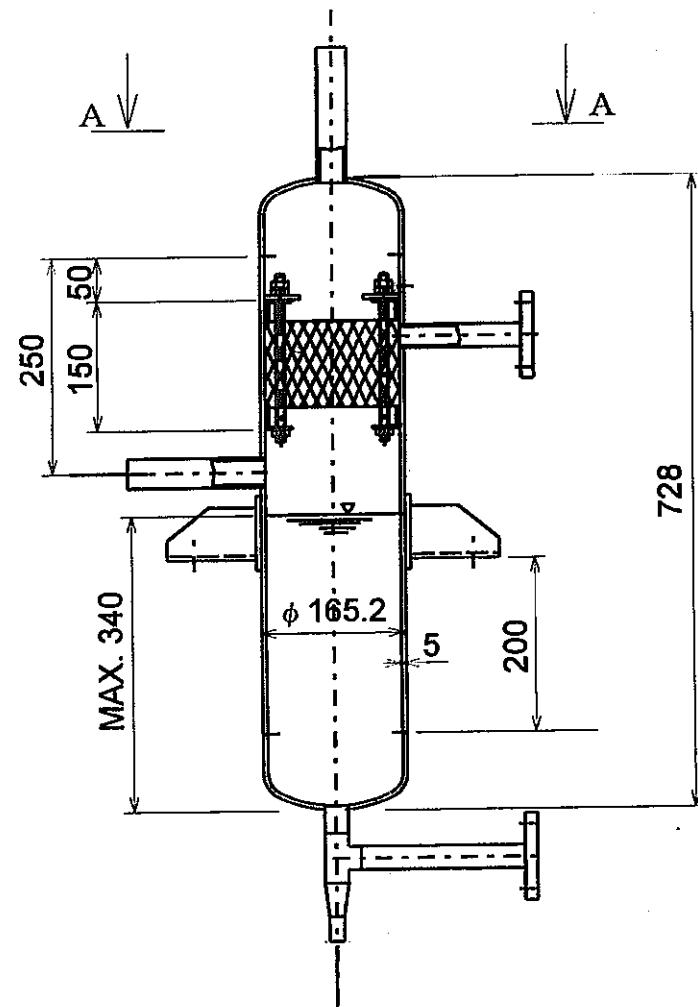
①Na pressure	: 0.098 MPa
②N2 pressure	: 0.3 MPa
③Na flow rate	: ~ 5 kg/h
④N2 flow rate	: 38 ~ 76 L/min
⑤Angle	: 20 deg.
⑥Type	: Full cone

Appendix-8 下部スプレーノズル構造図



Appendix-9 スプレー nozzle 噴霧状況 (工場水試験時)

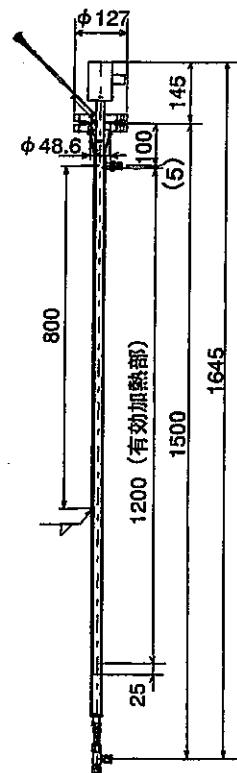




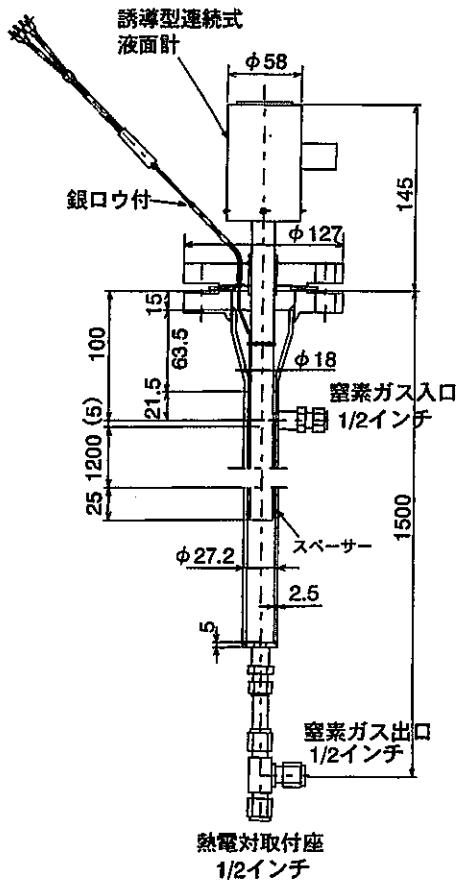
Design pressure	-0.098 to 0.098MPa
Design temperature	RT
Inventory	13.8 L
Material	SUS316
Net Weight	25kg

Appendix-12 ミストトラップ構造図

全体図

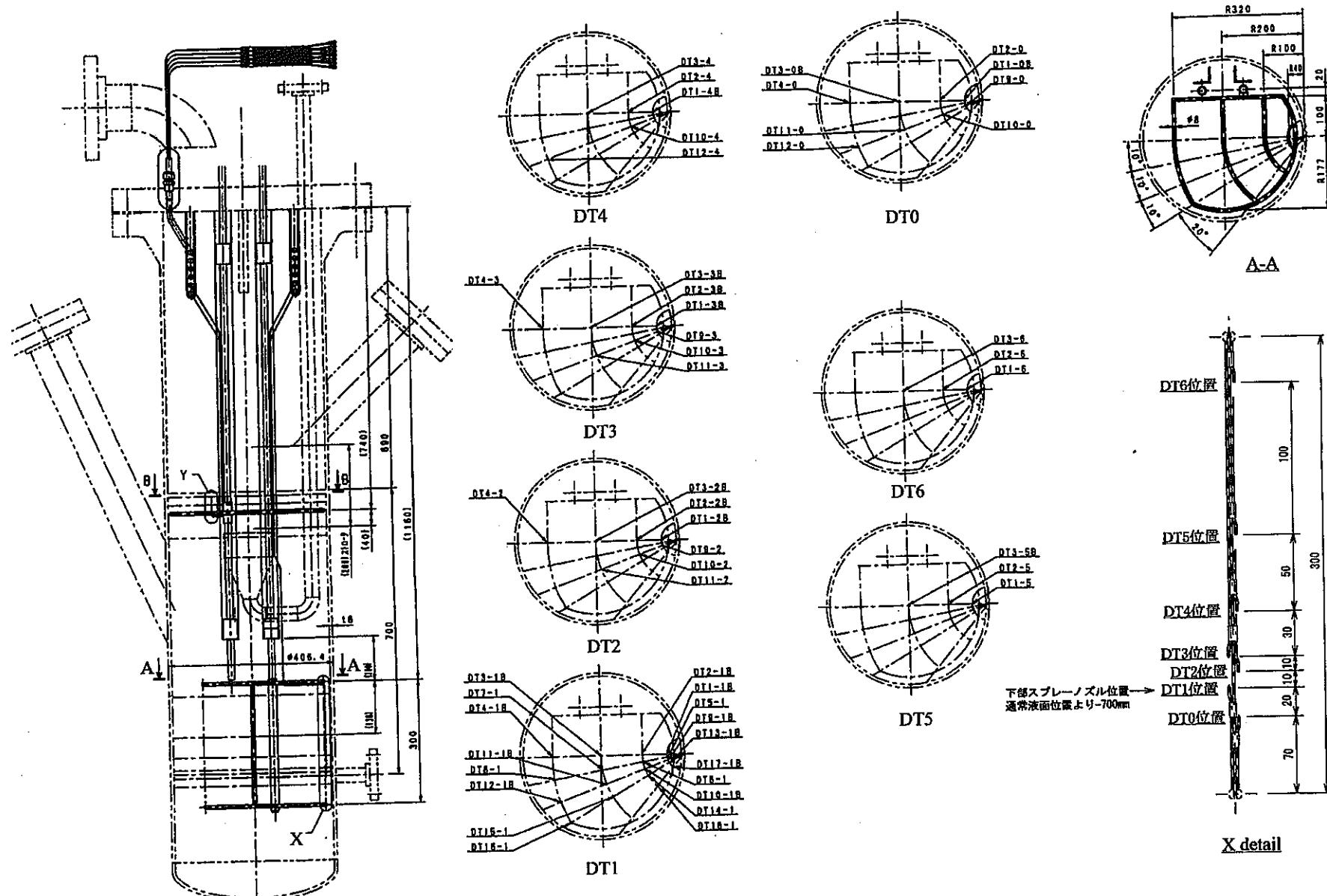


拡大図

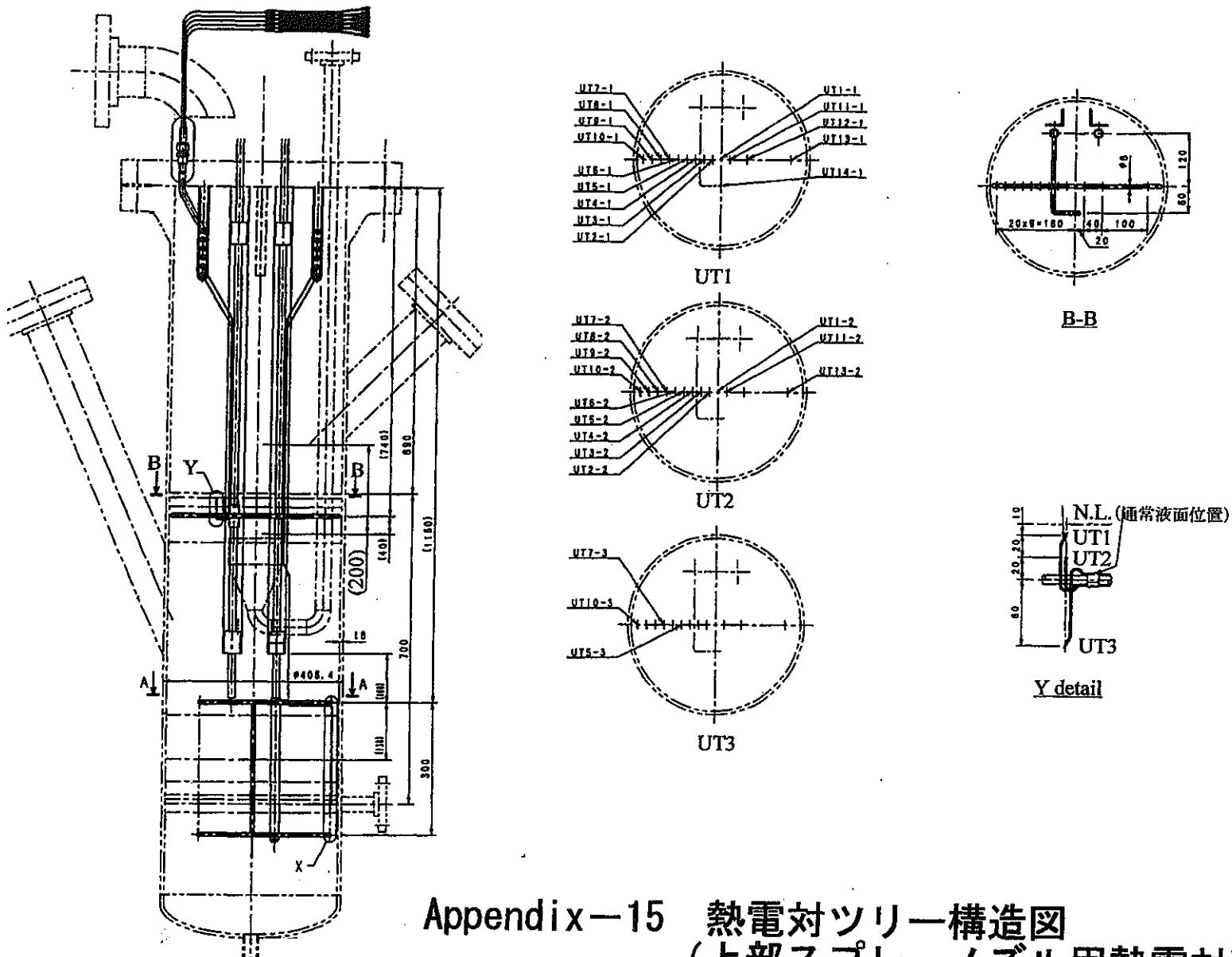


Design Press.	0.294MPa
Design Temp.	20°C (Inlet) / 350°C (Exit)
Heater Power	2 kW
Material	SUS316
Net Weight	4.5 kg

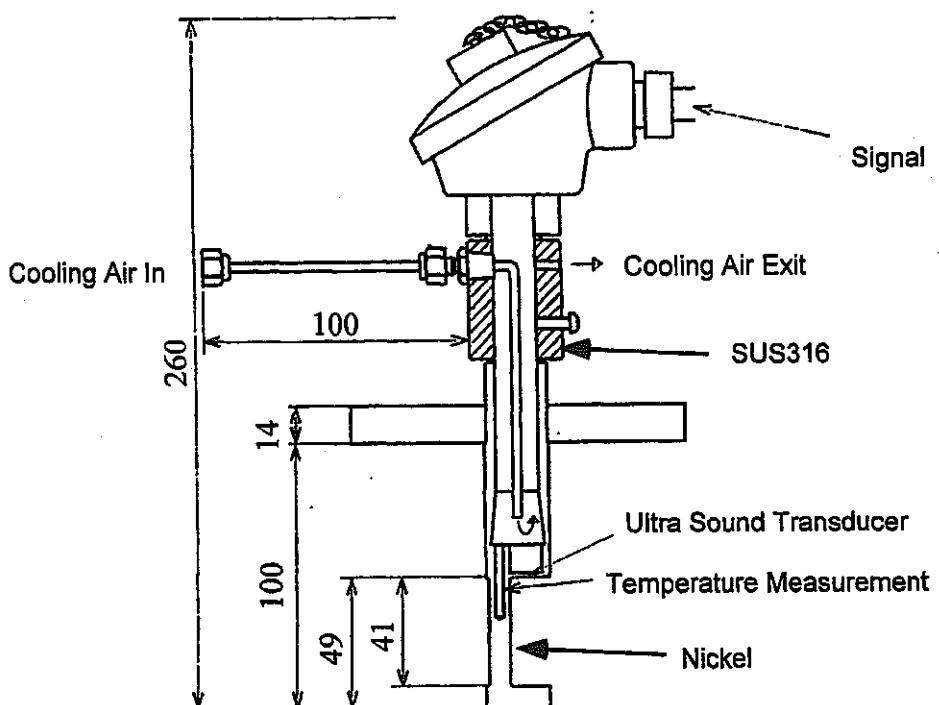
## Appendix-13 窒素ガス加熱器構造図



Appendix-14 热電対ツリー構造図(下部スプレーノズル用热電対配置図)



## Appendix-15 熱電対ツリー構造図 (上部スプレーノズル用熱電対配置図)



Appendix-16 超音波式濃度計構造図