

大量ナトリウムの安定化処理に関する技術開発

－ナトリウム転換基礎装置の開発－

Development of Sodium Conversion Technology

- Development of Sodium Conversion Basic Experiment Apparatus -

松本 寿之 吉田 英一 鈴木 重哲* 安 智久*

Toshiyuki MATSUMOTO, Eiichi YOSHIDA, Shigeaki SUZUKI* and Tomohisa YASU*

大洗研究開発センター

技術開発部

Technology Development Department
Oarai Research and Development Center

March 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 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
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

大量ナトリウムの安定化処理に関する技術開発 － ナトリウム転換基礎装置の開発－

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター
技術開発部

松本 寿之[※]、吉田 英一、鈴木 重哲^{*}、安 智久^{*}

(2007年2月22日受理)

将来国内において、ナトリウムを冷却材とした高速プラントや放射性ナトリウムの試験施設の解体、廃止措置に伴い発生する放射性ナトリウムを処分する必要性が生じている。しかしながら、放射性廃棄物としての直接処分方法は、既存の技術では確立していない。このため、経済性や安全性等を考慮して、ナトリウムを化学的に安定な物質に転換した後に処分する方法が考えられる。そこで、ナトリウム転換基礎試験装置の改良を図りながら、水酸化ナトリウム濃度 45～50wt%、水酸化ナトリウム温度 100℃の水溶液中に、ナトリウムを注入速度 10kg/h で注入して水酸化ナトリウム転換する基礎的な試験を実施した。その結果、注入されたナトリウムは水酸化ナトリウム水溶液中で全て反応し、排ガス、水酸化ナトリウム温度、濃度等を適切に制御することができ、本装置のシステムが妥当であることを検証した。また、水酸化ナトリウム水溶液中にナトリウムを注入する際にノズルが頻繁に閉塞するため、その原因を抽出し排除するためのノズルの検討を行い、ノズル特性評価の方法および手順を設定した。

大洗研究開発センター：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀 4002

※：派遣職員

*：常陽産業株式会社

Development of Sodium Conversion Technology
— Development of Sodium Conversion Basic Experiment Apparatus —

Toshiyuki MATSUMOTO[✳], Eiichi YOSHIDA, Shigeaki SUZUKI^{*} and Tomohisa YASU^{*}

Technology Development Department
Oarai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received February 22, 2007)

In the future, a large amount of sodium (Na) containing radioactive wastes must be processed at the time of final shutdown/ decommissioning of FBR plant or radioactive sodium facilities in Japan. Therefore, its disposal technology should be established in consideration of economical efficiency, safety, etc.

In the existing technology, since the method of processing sodium directly into radioactive waste is not established, conversion of sodium into chemically stable material can be considered. Then, basic experiments in which sodium was injected at 10 kg/h into solution of sodium hydroxide (NaOH) were conducted, with the improved Sodium Conversion Test Apparatus (SCOT). The conditions of NaOH solution were temperature of 100 degree C, and NaOH concentration of 45 - 50wt%. Consequently, the injected sodium reacted completely in the NaOH solution, and NaOH temperature, NaOH concentration, etc. were controlled properly. It validated that the system of this apparatus was appropriate. Moreover, in case sodium is injected into NaOH solution, a nozzle blockades sometimes. Therefore, the methods to eliminate the cause of nozzle blockage were examined.

Keywords: Decommissioning, Sodium (Na), Sodium Hydroxide (NaOH), Conversion

✳ : Attached Staff

* : Joyo Industry Co. , LTD

目 次

1	はじめに	1
2	試験装置の構成と改良	2
2.1	試験装置の概要	2
2.2	試験装置の改良	2
2.2.1	システムシステムの改良	3
2.2.2	Na 注入ノズル閉塞に関する改良	3
3	試験方法	6
3.1	装置構成系統と運転方法	6
3.1.1	Na 系	6
3.1.2	NaOH系	6
3.1.3	排ガス系	6
3.1.4	窒素ガス供給系	7
3.1.5	蒸気供給系	7
3.2	Na 転換試験の計測	7
3.3	ナトリウム注入方法	8
4	試験結果	10
4.1	Na 連続転換試験の結果	10
4.2	Na 転換システムの妥当性	10
5	試験の考察	13
5.1	未反応Na の残留評価	13
5.2	Na 注入ノズルの設定手順	14
5.3	今後の試験展開に関する提案	15
6	ま と め	16
	謝 辞	17
	参考文献	17

Contents

1	Introduction	1
2	Configuration and Improvement of Apparatus	2
2.1	Apparatus outline	2
2.2	Apparatus improvement	2
2.2.1	Improvement of system	3
2.2.2	Improvement for Na injection nozzle blockade	3
3	Experimental Procedure	6
3.1	Apparatus composition and the operational procedure	6
3.1.1	Na system	6
3.1.2	NaOH system	6
3.1.3	Off-gas system	6
3.1.4	Nitrogen-gas system	7
3.1.5	Steam system	7
3.2	Measurement Techniques	7
3.3	Sodium injection	8
4	Experiment Result	10
4.1	Result of Na conversion experiment	10
4.2	Validity of Na conversion system	10
5	Considerations	13
5.1	Estimation of unreacted Na	13
5.2	Procedure of Na injection nozzle	14
5.3	Future test plan	15
6	Conclusion	16
	Acknowledgements	17
	References	17

図表リスト

【表リスト】

表 1-1	海外における原子炉廃止措置の状況例	18
表 2-1	試験装置改良点の概要	18
表 3-1	反応容器内熱電対比較校正値	19
表 4-1	Na 連続転換試験の反応容器内部温度挙動データ	20

【図リスト】

図 1-1	ナトリウム処理技術の全体フロー	21
図 2-1	ナトリウム転換基礎試験装置構成図	21
図 2-2	ナトリウム転換基礎試験装置 系統図	22
図 2-3	苛性割れに及ぼす温度、濃度の関係	23
図 2-4	当初のNa 注入ノズル	24
図 2-5	改造ノズル	24
図 2-6	改良Na 注入ノズル構造図	25
図 2-7	ノズルチップ概要図	25
図 3-1	反応容器構造図	26
図 3-2	反応容器熱電対ツリー取付図	26
図 4-1 (1)	Na 連続転換試験	27
図 4-1 (2)	Na 連続転換試験 (Na 系温度、排ガス系温度の関係)	27
図 4-2	Na 連続転換試験の反応容器内温度分布 (横断面)	28
図 4-3	Na 連続転換試験の反応容器内温度分布 (縦断面)	29
図 4-4	Na 転換試験①ー (ノズルスペーサ 0.8mm)	30
図 4-5	Na 転換試験②ー (ノズルスペーサ 1.5mm)	30
図 4-6	Na 連続転換試験の排ガス流量および水素濃度プロセス応答遅れ	31
図 5-1	Na 連続転換試験の注入停止後プロセス挙動	31
図 5-2	Na 注入ノズル特性試験フロー図	32

【写真リスト】

写真 2-1	ナトリウム転換基礎試験装置外観	33
写真 2-2	Na 注入ノズルの水中挙動	34
写真 2-3	Na 注入ノズルNaOH閉塞状況	35

1 はじめに

将来、ナトリウム（以下、Na）を冷却材とする高速炉プラントを廃止措置する時には、大量の放射性Naが発生する。Naは化学的に活性であるため、安定化物質に転換し放射性廃棄物として処分する必要がある。国内で実施している既存の処分技術には放射性Naを直接処理する手法が確立していない。このため、Naを化学的に安定な化合物に転換した後、固化体として処分することが考えられる。

Naを転換する手法として蒸気処理、炭酸ガス処理、水酸化ナトリウム処理、アルコール処理、熔融塩処理等があるが、大量処分時の安全性、開発コスト、設備コストを考慮すると、Na-水反応により水酸化ナトリウム（以下、NaOH）に転換するNaOH処理方法が有望である¹⁾。本転換方法は、海外で既に実機適用の例があり実績を挙げている²⁾。表 1-1 に海外における原子炉廃止措置の状況例を示す。本研究は、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開始した。Na処理技術における本研究の位置づけを図 1-1 の全体フローに示す。

本試験では、基本的なNa転換装置のシステム開発とその運転手法を確立することを目的に、Na転換基礎試験装置の課題点について改良を図るとともに、Na注入速度 10kg/h で連続してNaOHに転換する試験を実施し、試験装置のシステムを実験的に検証した。本報告は、これらハード的な改良点、効果的な運転手法および基礎的な検証試験結果等について記載したものである。

2 試験装置の構成と改良

ナトリウム転換基礎試験装置(Sodium Conversion Test Apparatus : SCOT)は、化学的に活性な液体金属 Na を水と反応させて化学的に安定な NaOH へ転換する装置であり、実規模にスケールアップしていくための第一ステップとして、基礎的な反応特性と転換処理システムの最適仕様決定を目的に設計・製作されたものである¹⁾。Na の NaOH への転換は、反応容器内で以下の反応を行わせることである。



ここでは、SCOT の概要とこれまでにやってきた試験装置の改良点などについて述べる。

2.1 試験装置の概要

SCOT の概略構成を図 2-1 に、系統構成を図 2-2 に、外観を写真 2-1 にそれぞれ示す。本装置は、NaOH を充填した反応容器に Na を溶解して圧送する Na 系、NaOH を循環し転換時に発生する反応熱を除去する NaOH 系、Na-水反応によって生成される水素ガスを安全に大気へ排出する排ガス系、システムの安全性を常時監視する計測制御系、およびその他のユーティリティ設備から構成される。Na 系に使用する主要部材は、Na との共存性に優れる SUS304 或いは SUS316 を使用している。反応容器並びに NaOH 系は NaOH の濃度や温度条件によっては材料への腐食や、苛性割れ(Stress Corrosion Cracking : SCC)が発生する可能性がある。このため、耐アルカリ材料として優れているニッケル系材料の採用も考えられたが、コスト高となる。そこで、図 2-3 の腐食境界³⁾を考慮した上で、温度および濃度の運転条件に制限を与えることによって SCC を極力抑制し、ステンレス鋼の中で耐食性に優れた SUS316 を主に使用した。

以下に、試験装置の能力を示す。

Na 注入速度	: 1~10 kg/h
Na 注入系運転温度	: 120~220 °C
NaOH 系運転温度	: 100 °C以下 (最高 170 °C)
NaOH 濃度	: 最大 70 wt% (通常 48 wt%前後)
NaOH 循環流量	: 最大 2,500 kg/h
除熱系出力	: 約 61,000 kJ/h
純水注入量	: 約 20 Nℓ/h (注入速度 10kg/h、40wt%に NaOH 濃度制御)
反応容器運転圧力	: -0.098 MPa~0.098MPa

2.2 試験装置の改良

Na 転換基礎試験装置は 2001 年に据付けが完了し、機器の性能・特性・校正試験を実施した後、予備的な少量の Na 注入試験(以下、予備試験)を行い、これらの中から、長時間での連続的な Na 転換試験を効率良く実施するために改良点を抽出し、本装置のシステムや Na 注入ノズルなどのいくつかの改良工夫を行ってきた。表 2-1 にこれまでの改良点の概要を示す。

2.2.1 系統システムの改良

(1) 処理用 Na 供給タンクおよび Na 注入流量計、Na 系配管の改良

当初の Na 貯蔵タンク容積は 10ℓ で、連続注入できる Na 量は最大 5.5kg までであった。本格的な Na 連続転換試験へ向け、継続した Na 注入量の確保を狙いに容積約 360kg の Na 供給タンクを設置し、直接タンクから Na を供給できるように改良した。また、Na 注入量を計測するためのコリオリ式の流量計、Na 中に含まれる不純物等を除去するため等価直径 50 μm の粒子フィルタを取付けた。Na 注入量の制御は、操作の難しいバルブ開度操作から Na タンクカバーガスの圧力制御に変更した。また、バルブ配置や配管勾配を見直し、ドレン後の Na 残留物除去の効率が向上し、安定した Na 供給ができるようになった。

(2) NaOH 濃度計の改良

当初の NaOH 濃度計は超音波式を用いた。しかし、予備試験の結果から Na 注入ノズルのアトマイジングガスおよび Na-水反応により発生する水素ガスの気泡や NaOH 水溶液の濁り、非溶解粒子等の影響により計測できない状態となり、連続的に定量的な濃度が測定できないことが判明した。このため、上記の影響を受けず連続測定ができる屈折率計を用いた計器に変更した。この変更により Na 注入量やアトマイジングガス量を制限することなく運転が可能となり、精度良く NaOH 濃度を測定できるようになった。

(3) 排ガス系の改良

排ガスに含まれている湿分を除去するために、スクラバやミストトラップ、フィルタを設置している。しかし、排ガス量が多い場合は、フィルタの下流側まで湿分が排出され、排ガス流量計に水分が付着し計測できない状態となることがわかった。このため、排ガス系の配置を見直すとともに、スクラバ水の冷却装置を設置し除湿効率を向上させることで連続して計測することが可能となった。また、フィルタの目詰まり対策として、流量計およびフィルタを 2 系列にして切替え運転を可能とした。

2.2.2 Na 注入ノズル閉塞に関する改良

Na 注入ノズルは、反応容器内の NaOH 水溶液中へ溶融 Na を注入するための重要な機器の一つである。Na と水の反応は激しいため Na 注入ノズルは、安全で効率よく転換するよう Na を微粒化して NaOH 水溶液中へ注入するアトマイジング方式の二流体ノズルを採用している。ノズルの中心には Na 噴出口があり、その同軸上にアニュラス形状のアトマイジングガス噴出口が配置されている。ノズルは大気中においてアトマイジングガス量により粒径制御が可能である。また、ノズル内で Na が低温固化により閉塞することを防止するため、アトマイジングガスは加熱窒素ガスを用いてノズル内部を加温している。更に、ノズル先端部での閉塞時の回復操作として、アトマイジングガスに蒸気を混合させることによって、Na 化合物等を溶融し回復させることができる。

(1) 当初の Na 注入ノズルの概要

当初のノズルは、市販の大気中で使用するスプレーノズルの形状を用い、大気中で噴霧角 20°、液滴粒径 200 μm 以下とした設計条件を十分満足する性能であった。しかし、ノズルは液中における挙動は解明されておらず、運転状態も確認されていなかった。そのため、Na 注入条件は、大気中での設計条件を満足する運転条件を採用した。

しかしながら、このノズルでは、注入した Na が NaOH 水溶液に接触した時に閉塞する他、停止時や注入前の準備状態でもノズルが閉塞する現象が発生した。このため、ノズルが閉塞する要因を究明しノズルの改良を行った。

(2) Na 注入ノズルの閉塞現象とその要因

Na 注入ノズルが閉塞に至った試験条件、操作方法、プロセス挙動の検討を行った。

ノズルが閉塞する要因は、以下のとおりと考えられる。

① 試験注入手順等による閉塞

- ・ Na 注入開始時の注入遮断弁とパージガス遮断弁の切り替え手順の誤操作により Na 注入ノズルに NaOH が逆流しノズル内で Na と反応して閉塞
- ・ Na 注入停止後の Na ドレンおよびフラッシング時における Na 注入ノズルに NaOH が逆流し残留により閉塞

② 装置に係わる閉塞要因

- ・ Na 注入配管におけるコールドポイントによる Na の低温固化による流動停止

③ NaOH 乾燥固化付着による閉塞

- ・ アトマイジングガスによる拡散効果が不足し、NaOH がノズル先端に付着し閉塞

(3) 閉塞要因の対策

上記①項目について、試験装置は異常時に Na 注入を緊急停止させるため、Na 注入遮断弁は遠隔操作弁とした他は手動弁としていた。このため、パージガス遮断弁操作との切替えタイミングや開閉の時間差により、ノズル内に NaOH が逆流し閉塞することが考えられる。そのため、本バルブの切替えを同時操作させるためパージガス遮断弁を遠隔操作弁に変更し、さらに Na 注入遮断弁と同時に切替えできる機構を設ける等のハード対応により注入手順の見直しの対策を行った。

②項目について、ノズル内部は 250℃の高温のアトマイジングガスで加温しているが、Na 注入量、アトマイジングガス量の変化に伴いノズル内部温度が変動することが考えられる。そのため、ノズル内部配管に直接ヒータを設置して一定に温度を制御した。また、熱電対をノズル先端部に近い位置に設置し温度監視を行えるよう改良を行った。

③項目の NaOH 乾燥固化付着による閉塞については、水溶液中のノズル挙動は十分に把握されていなく不明な点が多い。Na 注入ノズルのアトマイジングガスによる拡散角度、粒径等の特性は、あくまでも大気中試験で得られたものであり、NaOH 水溶液中でアトマイジングガスによる拡散効果を発揮せず、注入された Na が要求通りに粒子化されていない可能性が考えられる。粒子化されていない Na がノズル先端部で局部的に反応した場合、ノズル部での NaOH 濃度の急上昇、反応熱による乾燥・固化・付着する現象が発生しノズルを閉塞させると考えられる。当初の Na 注入ノズルの閉塞時の予想図を図 2-4 に示す。当初のノズルにアトマイジングガスを流して水中挙動を確認した。当初設定していたアトマイジングガス量は水中では少なく、Na 噴出口とアトマイジングガス噴出口とのギャップが大きいと、ノズル先端部での拡散効果、保護効果が見られないことから、ノズル先端部で NaOH が付着しても排除することができず閉塞したものと思われる。そのため、Na 噴出口とアトマイジングガスとのギャップを小さくする改良を行った。

(4) 注入ノズルの改良

上記対策により製作した改造ノズルを図 2-5 に、改造ノズルによる水中でのアトマイジングガスによる保護効果を確認した結果を写真 2-2 に示す。水中でのアトマイジングガスの拡散効果や先端部の保護効果が期待できる 60Nℓ/min を Na 注入時の設定値とした。しかし、ノズルにパージガス最小流量 10Nℓ/min を流動させた状態で、NaOH を充填してアトマイジングガスを設定流量 60Nℓ/min に増やしたところ、パージガス流量は徐々に減少しノズルが閉塞した。閉塞したノズルの状況を写真 2-3 に示す。

NaOH 充填時にアトマイジングガス量が少ないと、ガスキャップ内に NaOH が流入し、ガスキャップ内の NaOH は流量増加した 250℃のアトマイジングガスとともに放出され、200℃に加温されたノズルの先端部で濃度が高くなり、析出するような状態で NaOH が付着したと推定される。NaOH 水溶液を充填する前からアトマイジングガス量を 60Nℓ/min にした場合は上記の閉塞現象が見られなかったことから、ガスキャップ内に流入した NaOH が原因であることを確認した。

また、Na 注入前のアトマイジング量を 100Nℓ/min と多くした場合も、パージガス流量が減少しはじめ閉塞した。これは、過大なアトマイジングガスによりノズル付近の流れに乱れが生じて (写真 2-2 : アトマイジング量 100Nℓ/min 参照)、N₂ と NaOH・H₂O が混合した複雑な流れ場になると推定される。この混合ガスにエントレインされる NaOH 水溶液の液滴は高温ガスにより温度が高くなることにより NaOH 濃度が高くなり、ノズル先端に析出する状態で付着したと推定される。図 2-5 に NaOH 付着による閉塞概念図を示す。

このことから、ノズルを閉塞させる主要因は NaOH であり、NaOH から Na 噴出口周りをアトマイジングガスによってカバーし拡散できるよう、さらにノズルの改良および手順を定める必要があることを確認した。このため、ノズル先端部の保護効果を向上できるよう、ノズル内部にスペーサを組込みガスキャップ可動させる機能を設けたノズルに改良した。図 2-6 に改良 Na 注入ノズル構造図、図 2-7 にノズルチップ概要図を示す。

改良ノズルを用いて、アトマイジングガスによるノズル保護効果を水中試験および NaOH 溶液試験を行った。スペーサを取付けない場合は、図 2-7 に示すノズルギャップがゼロとなり、ガスキャップの傾斜部の始端と Na 噴出口の先端の位置は一致する。スペーサが無い場合と、0.8, 1.0, 1.5mm のスペーサを取り付けた場合とで比較したところ、スペーサが無い時、水中ではノズルの保護効果が有るように見られたが、NaOH 溶液内では徐々に閉塞する傾向が見られた。スペーサを組込みノズル先端が内側へ入るほど NaOH 乾燥固化付着は起こりにくくなる傾向があったが、何れの位置においてもアトマイジングガス流量 60Nℓ/min を超えると、徐々に閉塞する傾向を示し、Na 注入試験においても大きな差は見られなかった。そこで、Na 注入速度が一番安定していたノズルギャップ 1.0mm を適正と判定した。

一方、NaOH により閉塞したノズルは、アトマイジングガス中に蒸気を流すことでノズル先端の NaOH が溶解して閉塞が解除され、パージガスが復帰したことを確認した。また、NaOH 水溶液充填時にガスキャップ内に NaOH が流入した場合も、閉塞前にノズルを蒸気洗浄したところ、パージガス量が回復し安定したことから蒸気洗浄の有効性が確認された。

3 試験方法

3.1 装置構成系統と運転方法

SCOT を構成する各系統とそれらの運転方法について以下に説明する。

3.1.1 Na 系

Na は Na 貯蔵タンク内で電気式予熱ヒータによって熔融され、タンクとの差圧を利用して Na 注入ノズルから反応容器に注入される。タンク内の Na 温度は 110℃としている。これは、Na 噴出口が $\phi 1\text{mm}$ と小径であるため、Na 中の不純物溶解度を低く保ち不純物による閉塞を防止するためである。Na 配管および Na 注入ノズルは 200℃に保ち常に監視している。Na 注入量はタンクのカバーガス圧力を調整することにより約 10kg/h に制御している。また、Na 流量計内のガス溜りを防止するため、注入開始前に Na 注入遮断弁まで真空チャージし待機状態としている。Na 注入ノズルは、Na 注入時の拡散および待機時のノズル先端保護用としてアトマイジング方式を採用して、常時 250℃に加熱した窒素ガスを流動させている。待機状態時の Na 注入ノズルには、NaOH 水溶液の逆流防止にパージ窒素ガス約 10N ℓ /min を供給・流動させている。Na 注入開始時は、Na 注入遮断弁の開操作と連動してパージガス供給止め弁が閉止され Na が注入される。Na 注入停止時は、Na 注入遮断弁を閉操作によりパージガスが供給される。

3.1.2 NaOH 系

反応容器は NaOH 水溶液を充填・加温して、Na 注入ノズルから注入された Na を反応させる小型圧力容器である。図 3-1 に反応容器構造図を示す。反応容器に NaOH 水溶液を約 180kg 充填、100℃に加温して、Na は反応容器下部より 300mm（液面下 700mm）の位置に接続した Na 注入ノズルから連続注入される。反応容器内の NaOH は循環ポンプにより循環させ、反応熱の除去、濃度制御、余剰 NaOH 水溶液の排出し反応容器の液位制御を行っている。NaOH 温度は反応容器の出入口温度を常に監視し、冷却器の通水量を調整することにより制御している。NaOH 濃度は屈折率計で濃度計を連続監視し、Na 注入量から換算して混合器から純水を供給して制御している。反応容器内の NaOH 量は液位計で常に監視し、余剰分は反応生成物貯蔵タンクに移送することにより、一定に制御している。反応生成物貯蔵タンクに移送した NaOH は排水処理設備で中和処理する。

3.1.3 排ガス系

反応容器からの排ガス成分は、アトマイジングガスの窒素、転換により発生する水素、飽和蒸気および NaOH を含んだミストである。飽和蒸気は結露することにより計装機器の誤作動を、NaOH は計装機器や配管などの腐食を及ぼすため、これらの除去装置としてミストトラップ、スクラバ、フィルタを設置している。排ガスは、まずミストトラップを通し冷却設備を有するスクラバで約 12℃まで冷却された後、予熱ヒータにより排ガス温度を露点以上に上昇させ、さらにフィルタを通過して屋外に放出している。放出配管側には、排ガス流量計と排ガス水素計を設置して反応状況を常時監視し、安全上の監視として酸素計も設置している。

3.1.4 窒素ガス供給系

窒素ガス供給系は、Na 注入ノズルのアトマイジングガスおよびパージガス、Na 注入量制御用の Na 貯蔵タンクカバーガス等に使用される窒素ガスを供給する設備である。アトマイジングガス供給は、コントローラ機能付マスフローメータで流量を制御している。また、Na 注入ノズルで Na の低温固化を防止するために加熱器を通して高温アトマイジングガスを供給している。Na 注入待機状態時に Na 配管内に NaOH 水溶液の逆流を防止しているパージガス流量を適正に保つことにより、Na 注入ノズルの NaOH 付着による閉塞を防止している。

3.1.5 蒸気供給系

蒸気供給系は、Na 注入ノズル閉塞解除および、Na 注入ノズル洗浄に使用する蒸気を供給する設備である。ノズル先端部が NaOH により閉塞した場合、アトマイジングガスに蒸気をミキシングして、湿分を送り込むことによりノズル先端に固着した高濃度 NaOH を溶解させ、ノズル閉塞を解除する。また、Na 注入開始前にガスキャップ内の NaOH を排出させるノズル洗浄用に使用する。蒸気の供給開始・停止時はアトマイジングガス量を低下させないよう調整しながらバルブの開閉操作を行う。また、NaOH 濃度計のセンサープリズム部の洗浄用としても蒸気を使用している。

3.2 Na 転換試験の計測

本試験は Na 注入量および反応容器内の NaOH 量、NaOH 濃度、NaOH 温度、NaOH 循環流量、アトマイジングガス量を一定に保ち、Na を連続注入したときの反応挙動および反応容器内 NaOH の温度変動領域を観察し、安定した Na 注入ができるノズルの検討および運転手法を確認することを目的に実施した。Na-水反応により NaOH 温度が上昇、あるいは変動することから反応容器内に設置した熱電対 46 本を取付けた熱電対ツリーにより温度を測定し、温度変動領域を観察した。図 3-2 に反応容器内設置した可動式の熱電対ツリーを示す。図に示すように熱電対は Na 注入の妨げにならず、十分に拡散されるよう間隔をとり容器の片側に配置している。温度測定点が少ないため、測定時はノズル位置と熱電対 DT-1 が同じ高さの時を基準位置として -20mm~60mm まで 20mm 間隔で熱電対ツリーを上下に移動させ、各移動位置で 5 分間温度測定を行った。なお、各プロセス値および熱電対ツリー等の測定は 0.5 秒で収集し、温度分布状態を可視化処理ソフトウェア FIELDVIEW (Ver. 10)により 2 次元処理した。表 3-1 に熱電対比較校正値を示す。校正により、熱電対の測定精度は $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内である。

シース熱電対仕様

熱電対外径： $\phi 1.6 \text{ mm}$

シース材質：NCF600

型 式：T35

規格・階級：JIS C1602-1981、0.75 級

3.3 ナトリウム注入方法

(1) Na 注入時間の考え方と反応温度の計測

Na の連続注入時間は、一日の作業工程の内、装置の起動から Na 注入準備作業および、Na 注入停止後の装置停止操作等の時間を考慮した 4 時間とした。試験当日は、始業時より装置全系の予熱操作およびユーティリティー設備等の起動操作を開始し、11 時から 15 時まで Na 転換試験を実施し、試験終了後に Na 注入配管ドレン、フラッシング、反応容器からの NaOH 移送等の装置停止操作を実施した。

(2) Na 注入操作手順

SCOT における Na 転換試験時の操作手順について以下に説明する。

① 予熱温度設定

Na 貯蔵タンク、Na 系配管、反応容器、NaOH 系配管、窒素ガス加熱器を、50°C/h で予め定めた Na 転換試験設定温度まで加温する。

② NaOH 充填

NaOH 系が所定の温度に達していることを確認後、以下の手順にて反応容器に NaOH の充填を行う。

- i) スクラバ水冷却装置、蒸気供給装置を起動させる。
- ii) パージガスおよびアトマイジングガス流量を所定の流量に設定する。
- iii) 反応生成物貯蔵タンクから予め定めた反応容器液位まで NaOH を充填する。
- iv) NaOH 循環ポンプを起動し、所定の NaOH 循環流量に調整する。
- v) NaOH 冷却設備を起動し、待機状態に設定する。

③ Na 系配管 Na 充填

Na 系が所定の温度に達していることを確認後、Na 注入遮断弁まで Na を真空チャージする。本操作は、Na 流量計内のガス溜まりを除去する目的で実施している。

④ Na 転換試験前ノズル洗浄

Na 系配管への Na チャージ終了後、アトマイジングラインより蒸気を流し、ノズルを洗浄する。パージガスが所定の流量になるまで洗浄する。

⑤ Na 注入開始

ノズル洗浄後、Na 貯蔵タンクのカバーガス、アトマイジングガス圧力を Na 転換試験開始圧力に設定し、Na 注入遮断弁の開操作により Na の注入を開始する。

⑥ Na 注入流量調整

Na 貯蔵タンク圧力調整により、所定の流量に調整する。

⑦ Na 転換試験中の操作

Na 転換試験中は、必要により以下の操作を実施する。

- i) 冷却器への NaOH 通水量を調整し、所定の NaOH 温度に調整する。
- ii) 純水供給量を調整し、所定の NaOH 濃度に調整する。
- iii) 反応容器液位を監視し、必要により NaOH を反応生成物貯蔵タンクへ移送する。
- iv) 反応生成物貯蔵タンク液位およびスクラバ水液位を監視し、必要により排水処理設備へドレンする。

- v) 排ガス水素濃度、排ガス流量等を監視し、異常のないことを確認する。
- vi) 現場確認を適宜実施し、Na 漏洩、NaOH 漏洩の有無を確認する。
- vii) Na 注入停止時にパージガス確保してノズル閉塞を防止するため、パージガス圧力を準備時の圧力値に設定する。
- viii) その他、異常の有無を確認し、必要な処置を講じる。

⑧ Na 転換試験停止

運転停止は、Na 注入遮断弁の閉操作により Na の注入を停止する。停止後は、水素濃度、排ガス流量、反応容器圧力等を監視し、反応による水素の発生が終了したことを確認後、各装置を順次停止モードに切り替える終了する。

(3) Na 注入操作条件

Na 転換試験を実施した際の Na 注入条件を以下に示す。

① 運転時の基本条件

Na タンク (チャージ) 温度	: 110 °C
Na 系統温度	: 200 °C
Na 注入ノズル温度	: 220 °C
アトマイジング流量	: 60 Nℓ/min
アトマイジングガス温度	: 250 °C
NaOH 温度	: 100 °C
NaOH 循環流量	: 2,500 kg/h
NaOH 濃度	: 約 48 wt%
NaOH 液位 (反応容器内量)	: 約 1,000 mm (約 180kg)
NaOH 総量 (含機器、配管)	: 約 230 kg

② 注入開始前

Na チャージ圧力	: 0.05 MPa*
パージガス圧力 (準備時)	: 0.07 MPa (パージガス流量 11 Nℓ/min)
(注入直前)	: 0.04 MPa* (パージガス流量最小値)

* : Na 注入開始時ノズル内に NaOH 流入を防止のため、パージガス圧より高くする。

③ 連続注入時 (安定時)

Na 供給圧力	: 0.03 MPa (Na 注入速度 10 kg/h 時の圧力)
Na 注入速度	: 10 kg/h

4 試験結果

4.1 Na 連続転換試験の結果

(1) プロセス状況

4時間の連続転換試験を実施時の主要プロセス挙動を図4-1(1)、(2)に示す。Na注入初期時、ノズルにNaOHを逆流させないようにパージガス圧(最小値)よりNaチャージ圧力を高く設定しているため、Na注入量は一時的に20kg/hを超え、Na貯蔵タンクを加圧するガス圧と共に変動した。その後はガス圧を調整することにより10kg/hで安定した供給が行われた。反応容器はNa注入量が過渡的に20kg/hとなることを考慮しており、本試験においてNa注入量が10kg/hになるまでの2分間に注入した量は約570gであり、反応容器の容量で十分制御できる範囲であった。Na注入温度(ノズル先端温度)は、注入開始から60分後に約190℃に安定した。注入開始におけるNa注入温度の変化は、Na貯蔵タンクから温度110℃のNaが供給されるため、この影響を受けてノズル設定温度200℃から約190℃に低下したものである。排ガス流量はスクラバ内の水中を通して排出されるため変動しているが、その変動は小さいことから反応容器内での異常反応はないと判定できる。一方、Na転換経過約2時間後に排ガス系のスクラバ水温度が上昇した。この温度上昇は、スクラバ冷却水の循環量不足が発生しスクラバ水冷却用チラーがインターロックにより停止したためであったが、スクラバ水温度上昇によるシステムや他の計器に影響を及ぼすことなく運転ができた。

(2) 反応容器内部温度挙動

転換試験時のプロセス値が安定した状態の反応容器内部温度のデータを表4-1に、反応容器内温度分布(横断面)を図4-2、温度分布(縦断面)を図4-3に示す。横断面は、ノズルを中心として反時計方向へ0°~50°を平面に、ノズルからの高さ-10mm、0mm、10mm、50mm、100mmとした。縦断面は、反応容器を縦300mm×横200mmを平面に、ノズルを基準に0°、10°、20°、30°、50°の位置とした。温度変動範囲は、ノズルより反応容器中心方向へ約100mm、周方向へは約50°の扇状に広がり上昇している。NaOHは反応容器下側に2500kg/hで流動しているが、NaOHの比重量約1.49g/cm³に対しNaは約0.97g/cm³であること、反応容器内の温度はNa注入ノズル位置より上で最も上昇していることから、注入したNaはアトマイジングガスや生成水素ガスと共に上昇しながら反応していると思われる。Naは注入後直ぐに反応が始まりノズル直近で約126℃となり温度変動範囲外では温度変化がないこと、排ガス中の水素濃度が安定していることからNaは残留することなくNaOH内で反応が終了していると思われる。

本試験データから、Na転換が連続して安定した状態で行われ、Na注入ノズルの注入条件の検証および各システム機器の機能が確認された。

4.2 Na 転換システムの妥当性

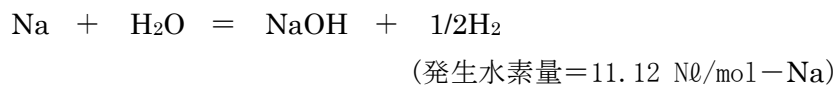
これまでの転換試験より反応現象、或いはプロセス挙動等において設計性能を十分に満足した結果が得られ様々な知見を得た。Na流量計、排ガス流量計及び水素ガス濃度計は、試験における反応状況を監視する他、Na転換量を算出する重要な計測器である。システムを安全に

保つ上ではこれらは特に重要な事であるため、転換試験で得られた Na 流量計、排ガス流量計、水素濃度計の挙動をもとにそれぞれの機能について評価した。なお、NaOH 濃度、温度および液位 (NaOH 量) は一定値に自動制御されているため除外した。

① 指示計の評価

それぞれの指示計において、Na 転換時の各プロセスが安定している任意の時間帯における指示値を基に、Na 転換量へ変換して比較した。使用したデータは、Na 連続転換試験および Na 注入ノズルのガスキャップ位置を決定するために行った Na 転換試験①、②のデータを用いた。なお、Na 連続転換試験における指示値の評価には、試験開始の前後に Na 貯蔵タンクを可搬式液位計により計測した Na 積算転換量 45.5kg を用いた。

Na 積算転換量は、下記の Na と水との反応式をもとに算出した。



W1 : 【Na 流量計指示値からの Na 積算転換量】

$$W1 = \int F_a(t) dt$$

W2 : 【排ガス流量計指示値と水素濃度からの Na 積算転換量】

F_2 : 発生水素量(Nℓ), F_b : 排ガス流量(Nℓ/min), C_H : 水素濃度(vol%)

$$F_2 = \int (F_b(t) \cdot C_H(t)) dt$$

$$W2 \text{ (kg)} = F_2 \text{ (Nℓ)} \div 22.413 \text{ (Nℓ/mol)} \times 2 \text{ (mol)} \times 23 \times 10^{-3} \text{ (kg/mol)}$$

W3 : 【排ガス流量計とアトマイジングガス流量計指示値からの Na 積算転換量】

F_3 : 発生水素量(Nℓ), F_b : 排ガス流量(Nℓ/min), F_c : アトマイジングガス量(Nℓ/min)

$$F_3 = \int (F_b(t) - F_c(t)) dt$$

$$W3 \text{ (kg)} = F_3 \text{ (Nℓ)} \div 22.413 \text{ (Nℓ/mol)} \times 2 \text{ (mol)} \times 23 \times 10^{-3} \text{ (kg/mol)}$$

図 4-4 に示す Na 転換試験①および図 4-5 の Na 転換試験②は、ノズルのガスキャップ位置を決定するために行った試験で、それぞれスパーサ 0.8mm と 1.5mm のデータである。使用したデータ使用範囲は、Na 転換試験①において Na 転換開始後 10 分から 50 分までの 40 分間、Na 転換試験②は Na 転換開始後 5 分から 22 分までの 17 分間、Na 連続転換試験は注入開始から注入停止までを用いた。それぞれの Na 積算転換量を以下の表に示す。

表 Na 転換試験時の Na 積算転換量

	W1	W2	W3	液位計からの算出値 W4
Na 転換試験 ①	8.0	8.4	11.0	—
Na 転換試験 ②	2.8	3.2	3.8	—
Na 連続転換試験	42.2	49.4	59.5	45.5

(単位 kg)

なお、排ガス中への飽和蒸気による影響は、Na 転換時の排ガス処理後の温度 25°C であるから、蒸気表 (日本機会学会編) より飽和蒸気圧は 3.17kPa であり、体積流量の約 3% である。

Na 積算転換量についてそれぞれの算出値を比較すると、W1 と W2 は概ね一致し Na 連

続転換試験時は Na 貯蔵タンク液位計による測定値W4 と概ね一致していることから、Na 注入流量指示計、排ガス流量指示計及び水素濃度指示計の指示値が妥当であると考えられる。しかし、排ガス流量計とアトマイジングガス流量計指示値からの Na 積算転換量 W3 は、W1、W2 およびW4 に比べ大きく算出された。これは、装置構成および運転手法等からアトマイジングガスが排ガス系以外に混入する可能性は低いことから、アトマイジングガス流量計において何らかの要因で特性が変化していると考えられる。これに対する対策は今後の点検等において調査することとした。

② 応答特性について

Na 連続転換試験の注入初期データにおいてそれぞれのプロセス値の応答性を図 4-6 に示す。Na 注入開始後の応答遅れは、排ガス流量計において約 2 秒であり、水素濃度計では約 22 秒要している。一方、これらの検出器が発生水素ガスに反応し注入量に見合った指示値までに到達する時間は、排ガス流量および水素濃度も約 45 秒と同程度であった。そこで、この水素濃度計における応答遅れについて、発生した水素ガスが水素濃度検知器へ到達するまでの時間により評価した。なお、水素の拡散は大きくほぼ排ガス流体に一瞬にして拡散すると考えられ、また、注入ノズル噴出した Na は瞬時に反応し液面まで上昇する時間は、Na 注入開始後の排ガス流量計の応答遅れ時間と同じとした。それぞれの水素ガスの移動時間の概算を以下に示す。

a) Na 注入ノズル～液面までの移動時間

=Na 注入開始後の排ガス流量計の応答遅れ時間=約 2sec

b) 液面～反応容器出口排ガス配管まで（反応容器気相部）の移動時間

排ガス流量 180Nℓ/min=0.003m³/sec として

$$0.6\text{m} \div (0.003\text{m}^3/\text{sec} \div ((390.4 \times 10^{-3}\text{m})^2 \times \pi/4)) = \text{約 } 23.9\text{sec}$$

c) 反応容器出口～水素濃度検出配管までの移動時間

配管は全て 25A-Sch20 として

$$13\text{m} \div (0.003\text{m}^3/\text{sec} \div ((28.0 \times 10^{-3}\text{m})^2 \times \pi/4)) = \text{約 } 2.7\text{sec}$$

以上の計算より、Na が注入され水素濃度検出器までの到達時間は約 28.6 秒と推定される。反応容器内での反応速度、水素気泡の速度及び水素輸送を考慮すれば妥当な時間であり、各検出器への輸送遅れ時間は妥当であると考えられる。

また、検出器の応答遅れについては図 4-6 に示した様に、注入開始時は瞬時に多量の Na が注入され、Na 注入速度の安定とともに検出値が安定していること、排ガス流量計および水素ガス検出器の応答性は同程度であることから問題はないと考える。

以上、これまでの評価によりこれらのプロセス値は、ほぼ妥当な指示、特性を有しており有効性が確認された。

5 試験の考察

5.1 未反応 Na の残留評価

Na 転換試験において反応容器内に未反応 Na が残存した場合、Na は NaOH 液面に浮遊すると思われ、時間と共に残留量が増加し注入停止後も反応が持続することが考えられる。また、浮遊 Na による急激な反応が発生し、反応容器の圧力上昇、衝撃による振動及び機器の破損および、NaOH 循環系へ Na が混入することによる機器及び配管類への影響が懸念される。

本装置の未反応 Na の残留を確認するプロセスとしては、

- ・ Na 注入量に対して発生する水素ガス濃度及び排ガス流量挙動
- ・ 反応容器内部温度の温度状況
- ・ Na 注入量に対する NaOH 濃度挙動
- ・ Na 注入量に対する NaOH 温度挙動

などがあるが、後者の 2 項目の NaOH については常時制御しリアルタイムな評価が困難であることから、本項では水素ガス濃度及び排ガス流量挙動および反応容器内部の温度状況により、未反応 Na の有無を評価した。

(1) Na 注入量に対して発生する水素ガス濃度及び排ガス流量挙動からの評価

Na 連続転換試験における Na 注入直後、安定期および停止後の水素ガス濃度及び排ガス流量挙動から残留ナトリウムの有無を確認した。図 4-6 の注入開始直後の排ガス流量および水素濃度プロセス応答遅れと、図 5-1 に示した Na 連続転換試験の Na 注入停止後のプロセス挙動とともに評価した。

図 4-6 に示す通り Na 注入開始から排ガス流量は、2 秒の遅れで上昇して 45 秒後に静定しはじめた。水素濃度はおよそ 22 秒の時間遅れを生じ、45 秒後に概ね注入初期の水素濃度上昇が飽和している。そこで、注入開始から 45 秒迄の Na 流量計からの Na 積算量と、時間遅れを考慮した水素濃度及び排ガス流量からの Na 換算量を比較した。

注入開始から 45 秒迄の Na 流量計から積算した Na 注入量は約 218.8g である。注入開始 22 秒後から 45 秒間における排ガス流量計指示値と水素濃度計指示値から算出した発生水素量約 67.9Nℓ から換算すると約 139.4g で、約 79.4g の Na が残留していると思われる。同じく、排ガス流量計とアトマイジングガス流量計指示値から算出した発生水素量約 106.1Nℓ から換算すると約 217.8g の Na が転換されたことになり、残留する Na はないと思われる。

一方、図 5-1 に示す Na 注入停止後のプロセス挙動から、排ガス流量が低下し一定となるまでの時間は約 1.78 分であった。注入停止後の一時的な排ガス流量上昇は、注入停止時に Na 供給圧力より高く設定したパージガスラインへ切替えていることから、ノズル内に残留する Na が注入速度 12kg/h-5 秒間で約 17g 注入されたためである。

前述の Na 注入時から排ガス量計測までの時間遅れ 45 秒あることから、Na 注入停止時も同様に遅れ時間があると仮定し、Na 注入停止前の排ガス流量 167.4Nℓ/min、アトマイジングガス流量 60.6Nℓ/min から、停止後 45 秒間に放出される水素ガス量は 80.1Nℓ である。また、停止操作時の Na 注入量 17g から放出される水素ガスは約 8.2Nℓ である。図 5-1 で停止操作から 1.78 分間の水素ガス放出量は 97.8Nℓ であり、その差 9.5Nℓ のガスから算出すると

約 19g の Na が残留していると思われる。

Na 注入停止後の水素濃度が完全に 0 を示すのに時間がかかっている。これは、水溶液中の気泡は小さいほど浮上するのに時間を要し、特に NaOH 水溶液中の気泡は容易に抜けないこと、循環する NaOH 内にもガスが残留しているためと考えられる。また、Na が残留した場合、プロセス挙動に影響を及ぼすことが考えられるが、挙動に変化が見られないことから、残留する Na はないと思われる。

(2) 反応容器内部温度分からの評価

反応容器内の残留 Na を評価する一つの手段として、反応容器内の NaOH 温度分布より評価した。図 4-2 の反応容器内周方向温度分布、図 4-3 の反応容器内軸方向温度分布から、Na 注入ノズルより注入された Na による温度上昇領域は、ノズル直近より反応容器中心方向へ約 100mm、周方向へはノズルを中心として約 50° の扇状に広がって、上方へ徐々に狭めながら約 100mm まで達している。温度はノズル直近が最も高く、平均で 126°C 最大 190°C まで達し、20 ミリ上部では大きな温度上昇がないことから、反応は局所的であると思われる。

この温度分布から推定すると温度上昇領域は約 29,000mm³ であり、約 φ82mm 球体と同等の領域となる。Na 注入速度 10kg/h、水中における Na の反応速度 10⁻⁵ mol/sec・mm² (4) とした場合、NaOH-48wt% 中での必要反応面積は約 17,000 mm² で約 φ37mm の球体の表面積と同等である。よって、この温度上昇領域中で全て NaOH に転換されたと推定される。一方、実際の反応領域が拡大しているのは、アトマイジングガスによる拡散と反応生成物の高温水素ガスの拡散によるものと考えられる。

以上、反応容器内部の温度挙動から、実際の注入速度に対する反応領域は十分に許容し、かつ、アトマイジングガス効果により Na 径が小さくされ局所的な反応が回避され、反応領域内で全量 NaOH に転換されて残留 Na は存在していないと思われる。

5.2 Na 注入ノズルの設定手順

改良ノズルにより安定した Na 転換が可能となったが、最適なノズルを製作するには、個々の運転条件により Na 注入ノズルを製作し、事前に適正なアトマイジングガス量のサーベイ、Na 注入手法の検討等ノズル性能確認試験を実施し注入条件を得ることが必要である。

図 5-2 に Na 注入ノズル特性試験フローを示し、以下にノズルの閉塞現象およびノズル保護効果等ノズル特有の特性を把握する試験手順について記述する。

[ノズル閉塞確認] では、パージガス流量挙動から NaOH 水溶液がガスキャップに流入しない最小アトマイジングガス量を特定する。[ノズル保護効果確認] では、ガスキャップに流入した NaOH が最小アトマイジングガス量により放出されノズルを閉塞するため、蒸気洗浄によりパージガス流量が復帰・安定し、最小アトマイジングガス量でノズル保護効果を確認する。ここで得られたアトマイジングガス量は注入前の設定量とする。[最適アトマイジング量確認] では、パージガス流量が低下するまでアトマイジングガス量を増加させ、Na 注入時の最適量を決定する。ここで得られたアトマイジングガス量は Na 注入後の設定量とする。

5.3 今後の試験展開に関する提案

これまでNa転換試験の結果から、NaOH濃度45～50wt%、NaOH温度100℃中にNa注入量10kg/hにおいて安定した転換が行われることを確認した。今後の課題は、実規模レベルの装置を想定した最適な運転条件を取得するため、運転条件を変動させたパラメータ試験や長時間転換試験等の実施、Na注入量200kg/h等を想定した転換装置のシステム構築するため技術の習得および問題点を抽出する必要がある。

① パラメータ試験

NaOHの濃度および温度が低く抑えることが可能であれば、SUS316製の反応容器が苛性割れを起こすことなく、安全性が保たれ経済的にも有効である。また、NaOH排出先要求濃度においてナトリウム転換が迅速に行われるための最適な運転手法を設定するために、NaOH濃度、NaOH温度等をパラメータにした試験を実施する。

② 長時間転換試験

各種パラメータ試験を実施し得られた最適設定条件により、長時間安定して健全に運転できることを確認する。また、長時間運転後の装置点検を実施し装置内の損傷、腐食割れ等の有無を確認し実規模装置へ反映する。

6 まとめ

これまでの試験から、ナトリウム転換試験で最大の課題は、放射性ナトリウムを安定な化合物に転換する手法の技術開発として、ナトリウム転換基礎試験装置を用いて連続転換試験を実施した結果から、以下の知見を得た。

- (1) 水酸化ナトリウム水溶液中のナトリウム注入ノズルが閉塞する主な要因として、注入ノズル形状とアトマイジング量の関係が重要であり、注入前準備試験としてノズル構造の検討、注入・停止手順、ノズルの特性評価の手法を設定した。
- (2) 本基礎試験装置において、水酸化ナトリウム濃度 48wt%、水酸化ナトリウム温度 100°C、ナトリウム注入量 10kg/h で4時間の連続転換試験を行い、安定した状態で水酸化ナトリウムに転換されたことから、システム制御等が安全で妥当であることを検証した。

謝 辞

本ナトリウム転換試験において液体金属試験技術課の関係者および常陽産業(株)河井政隆氏、郡司茂氏他、業務協力員の方々に多大なる御協力とご助言を頂いたことに熱く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 大道 正雄、川崎 弘嗣、遠藤 康志、仲井 悟「大量ナトリウム処理技術開発ーナトリウム転換基礎試験装置の製作と試運転結果ー」JNC TN9410 2002-004
- (2) 中山 富佐雄、榎戸 裕二、吉田 英一、松本 寿之、長谷部 慎一「放射性ナトリウムの洗浄・処理技術に関する調査」JNC TN9420 2005-001
- (3) 腐食防食データブック平成7年6月15日発行 社団法人腐食防止協会 大久保ら：化学工学便覧. Vol140. p. 577 (1976)
- (4) A. B. ASHWORTH et al., “Novel Study of the Reaction of Molten Sodium-Potassium and Sodium with Liquid Water”, proc. 3rd Int. conf., Oxford United Kingdom, April 9-13, 1984, Vol. 3, British Nuclear Energy Society, London(1984).

表 1-1 海外における原子炉廃止措置の状況例

施設名	出力 (MW)	区分 型式	一次系 Na 量 (ton)	運転期間	現状計画
Rapsodie (仏)	(40MWt)	実験炉	約 37	1967～1982	Na 除去後安全容器等を含む原子炉部をコンクリートで遮蔽、Na は NOAH 法で処理済
Super-Phénix (仏)	124MWe	実証炉	約 3300	1986～1998	安全貯蔵準備中、Na 抜き取り
Dounreay PFR (英)	250MWe (600MWt)	原型炉	約 915	1975～1995	安全貯蔵準備中、Na 処理中
Karlsruhe KNK-II (独)	21MWe	実験炉	約 36	1979～1991	解体中、Na 処理中
Enrico Fermi-1 (米)	65MWe	実験炉	約 290	1966～1972	安全貯蔵中 (Na は安定化処理済)
EBR-II (米)	20MWe	実験炉	約 290	1965～1994	安全貯蔵中 (Na は安定化処理済)
BN-350 (カザフスタン)	350MWe	原型炉	約 550	1973～1999	安全貯蔵中準備中

* 出典 : IAEA-TECDOC-866, “Fast Reactor Database” (February, 1996)

表 2-1 試験装置改良点の概要

	設備系統	目的	改良内容	改良時期
1	Na 注入設備	Na 連続転換試験へ向けて、Na 制御系の改造	大容量 Na 貯蔵タンク設置 Na 注入流量の設置	2002. 2
2	NaOH 濃度計	NaOH の濁り、気泡、非溶解粒子等に影響されない濃度計を採用	屈折率計の濃度計に変更	2002. 12
3	排ガス処理系	フィルタ、流量計の目詰まりによる、排ガス流量測定不良を改善	フィルタ、流量計を 2 系列化	2003. 1
4	窒素ガス供給系	操作の難しいバルブによる Na 注入速度の制御の改善	Na 貯蔵タンクカバーガス圧力制御に変更	2003. 1
5	Na 注入系	Na 注入時の弁の切替え操作の簡素化	ページガス遮断弁と Na 注入遮断弁を相互インターロック機構の自動化	2003. 1
6	排ガス処理系 除湿設備	排ガスの除湿効率の向上	スクラバ水の冷却装置の設置	2003. 12～
7	Na 注入配管	Na 配管への残留ガス除去、ドレン後の残留 Na を防止対策	Na 注入配管に真空引き配管を接続	2004. 7
8	反応容器	Na 注入ノズルの取付等の操作性、容器内部および溶接部の腐食割れの確認	反応容器に更新	2004. 7
9	Na 注入ノズル	ノズル閉塞を防止対策	ノズル径の変更、アトマイジングとの距離を狭隘、ヒータ・熱電対の設置等	(2000, 2001) 2002, 2003

表 3-1 反応容器内熱電対比較校正値

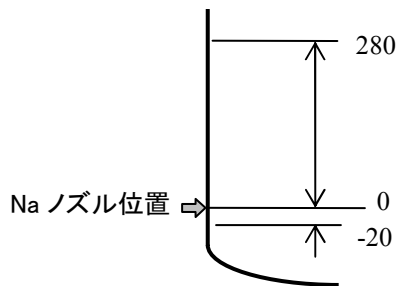
単位: °C

基準温度 反応容器出口温度 (TE-16)		24.06		54.26		97.41	
測定位置 バルからの 高さ (mm)	Ch No.	指示値	誤差	指示値	誤差	指示値	誤差
200	DT 3-6	24.02	0.04	54.20	0.06	97.37	0.04
200	DT 2-6	24.03	0.03	54.23	0.03	97.50	-0.09
200	DT 1-6	24.03	0.03	54.27	-0.01	97.50	-0.09
100	DT 3-5B	24.32	-0.26	54.45	-0.19	97.82	-0.41
100	DT 2-5	24.01	0.05	54.24	0.02	97.46	-0.05
100	DT 1-5	23.99	0.06	54.35	-0.10	97.59	-0.18
50	DT12-4	23.99	0.07	54.22	0.04	97.50	-0.09
50	DT10-4	23.97	0.09	54.22	0.04	97.47	-0.06
50	DT 3-4	23.99	0.07	54.21	0.05	97.42	-0.01
50	DT 2-4	24.00	0.06	54.24	0.02	97.54	-0.13
50	DT 1-4B	24.10	-0.04	54.44	-0.19	97.75	-0.34
20	DT11-3	23.98	0.07	54.25	0.00	97.55	-0.14
20	DT10-3	24.00	0.06	54.29	-0.03	97.54	-0.13
20	DT 9-3	24.05	0.01	54.40	-0.14	97.67	-0.26
20	DT 4-3	24.04	0.02	54.59	-0.34	97.83	-0.42
20	DT 3-3B	24.31	-0.25	54.52	-0.26	97.88	-0.47
20	DT 2-3B	24.05	0.00	54.47	-0.22	97.86	-0.45
20	DT 1-3B	24.08	-0.03	54.20	0.06	96.95	0.47
10	DT11-2	23.99	0.07	54.27	-0.01	97.56	-0.15
10	DT10-2	24.04	0.02	54.58	-0.33	97.82	-0.41
10	DT 9-2	24.05	0.01	54.40	-0.14	97.70	-0.29
10	DT4-2	23.96	0.10	54.29	-0.03	97.61	-0.20
10	DT3-2B	24.31	-0.25	54.50	-0.24	97.87	-0.46
10	DT 2-2B	24.05	0.01	54.51	-0.25	97.91	-0.50
10	DT 1-2B	24.07	-0.02	54.44	-0.18	97.84	-0.43
0	DT18-1	23.85	0.21	54.16	0.10	97.45	-0.04
0	DT16-1	23.95	0.11	54.30	-0.04	97.62	-0.21
0	DT15-1	23.95	0.10	54.22	0.04	97.49	-0.08
0	DT14-1	23.97	0.09	54.19	0.07	97.48	-0.07
0	DT12-1B	24.30	-0.24	54.52	-0.26	97.91	-0.50
0	DT11-1B	24.30	-0.25	54.47	-0.21	97.91	-0.49
0	DT10-1B	24.31	-0.26	54.54	-0.28	97.92	-0.50
0	DT 8-1	24.03	0.03	54.39	-0.13	97.68	-0.27
0	DT 7-1	24.05	0.00	54.42	-0.16	97.70	-0.29
0	DT 6-1	24.11	-0.06	54.41	-0.15	97.72	-0.31
0	DT 4-1B	24.31	-0.26	54.55	-0.29	97.90	-0.49
0	DT 3-1B	24.02	0.03	54.74	-0.48	97.91	-0.50
0	DT 1-1B	24.05	0.00	54.49	-0.23	97.87	-0.46
-20	DT12-0	23.95	0.10	54.22	0.04	97.52	-0.11
-20	DT11-0	23.97	0.09	54.22	0.04	97.49	-0.08
-20	DT10-0	24.02	0.04	54.39	-0.14	97.70	-0.28
-20	DT 9-0	24.03	0.02	54.42	-0.16	97.72	-0.31
-20	DT 4-0	23.94	0.11	54.21	0.05	97.53	-0.11
-20	DT 3-0B	24.01	0.04	54.54	-0.28	97.91	-0.49
-20	DT 2-0	23.98	0.07	54.23	0.03	97.53	-0.12
-20	DT 1-0B	24.03	0.03	54.57	-0.31	97.91	-0.50

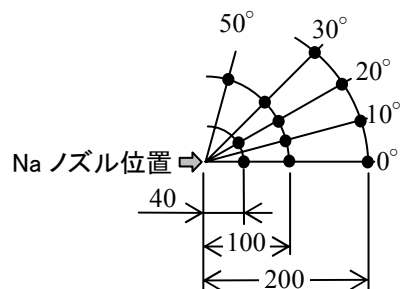
表 4-1 Na 連続転換試験の反応容器内部温度挙動データ

位置 Na ノズル からの高さ (mm)	測定角度 0°			(Na 連続転換試験時の5分間測定平均値:°C)					
	Na ノズルからの距離(mm)			測定角度 10°			測定角度 20°		
	40	100	200	Na ノズルからの距離(mm)			Na ノズルからの距離(mm)		
	40	100	200	40	100	200	40	100	200
260	98.53	98.53	98.5						
240	98.53	98.53	98.5						
220	98.53	98.53	98.5						
200	100.11	99.51	99.0						
180	99.80	99.27	98.9						
160	100.23	99.31	99.2						
140	100.59	99.17	99.2						
120	100.97	101.27	100.1						
110	101.50	99.37	98.9						
100	101.02	99.55	99.2						
90	101.90	99.09	98.9						
80	101.75	100.27	99.32	測定 点 なし	—	—	—	—	—
70	103.21	100.96	99.56		—	—	103.19	99.16	99.05
60	104.23	99.04	99.30		—	—	103.81	100.19	99.12
50	106.54	100.04	99.14		99.27	99.19	103.32	99.07	98.99
40	108.94	101.53	99.71		—	—	104.86	99.33	99.03
30	108.23	104.59	99.58		99.15	99.13	104.09	99.54	99.43
20	123.33	100.01	99.78		—	—	103.62	99.72	99.98
10	126.29	100.25	99.49		101.00	100.00	107.70	99.53	99.49
0	123.18	100.09	99.82		—	—	113.57	99.48	99.26
-10	101.38	99.45	99.41		99.34	99.32	101.17	99.53	99.53
-20	99.44	99.14	99.62	—	—	99.87	99.38	99.15	
					99.26	99.26	99.35	99.37	99.31

位置 Na ノズル からの高さ (mm)	測定角度 30°			測定角度 50°		
	Na ノズルからの距離(mm)			Na ノズルからの距離(mm)		
	40	100	200	40	100	200
60	測定 点 なし	99.00	99.01	測定 点 なし	98.84	測定 点 なし
40		98.94	98.98		98.97	
20		99.90	99.91		99.79	
0		99.14	99.17		99.03	
-20		99.05	99.08		98.94	



Na ノズルからの高さ(たて断面)



Na ノズルからの距離(横断面)

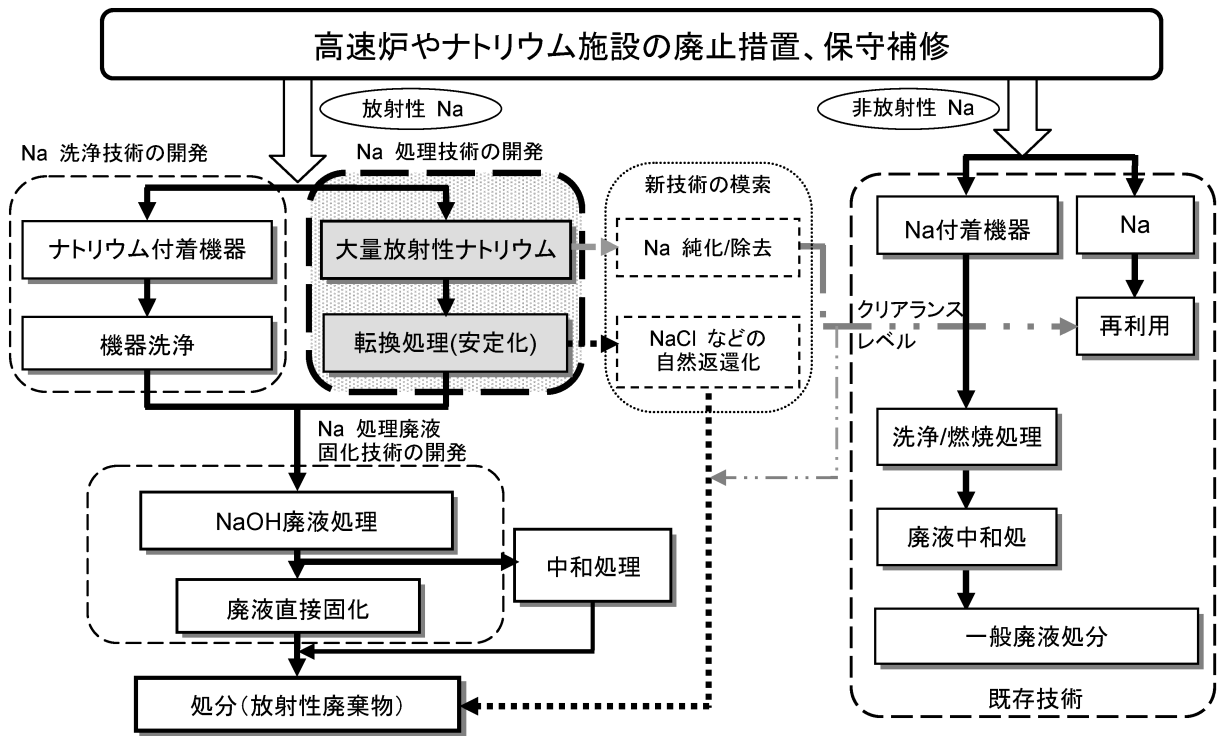


図 1-1 ナトリウム処理技術の全体フロー

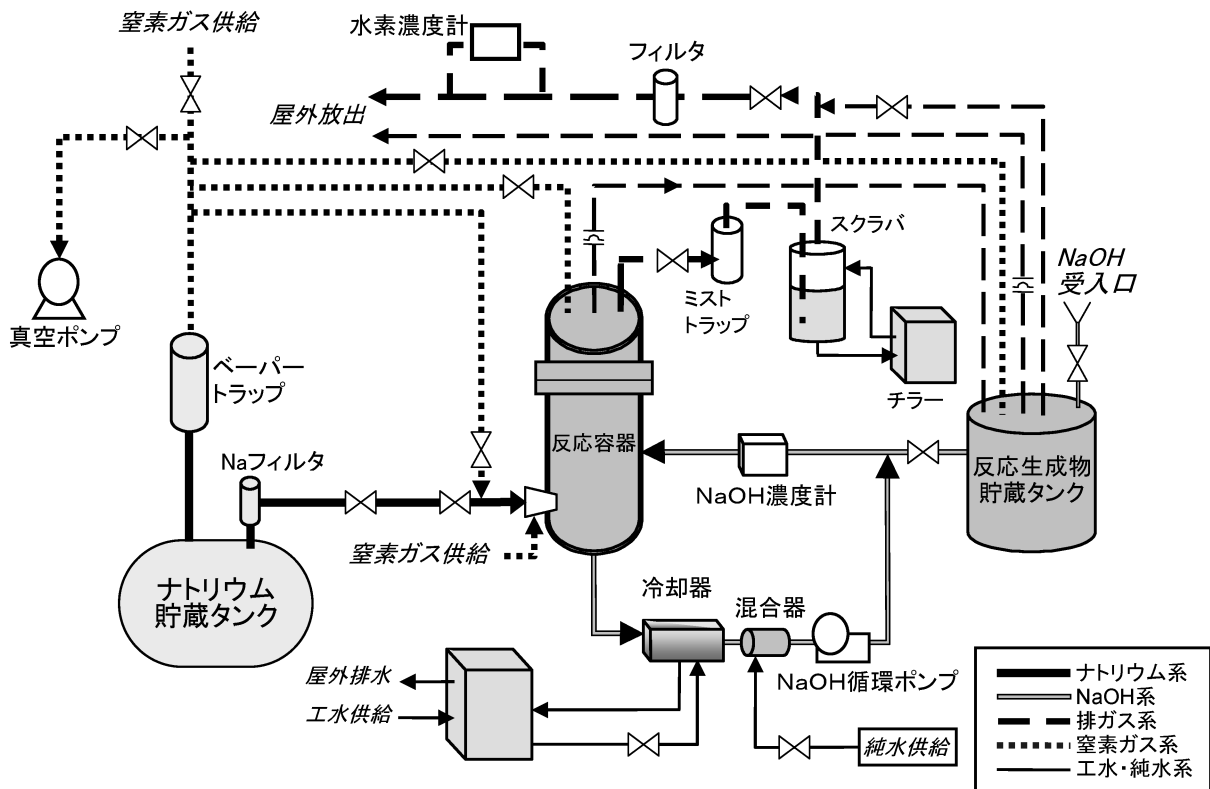


図 2-1 ナトリウム転換基礎試験装置構成図

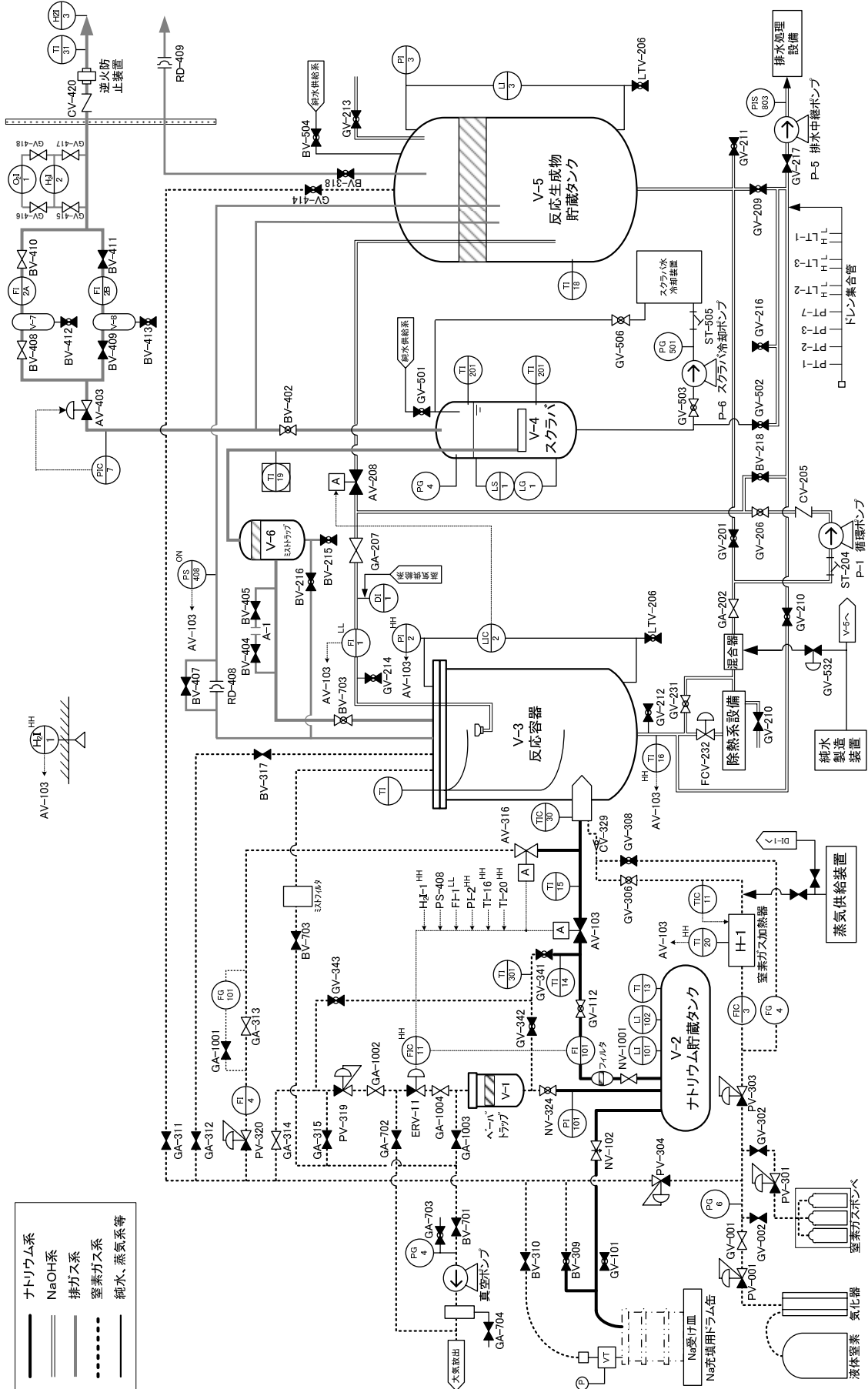
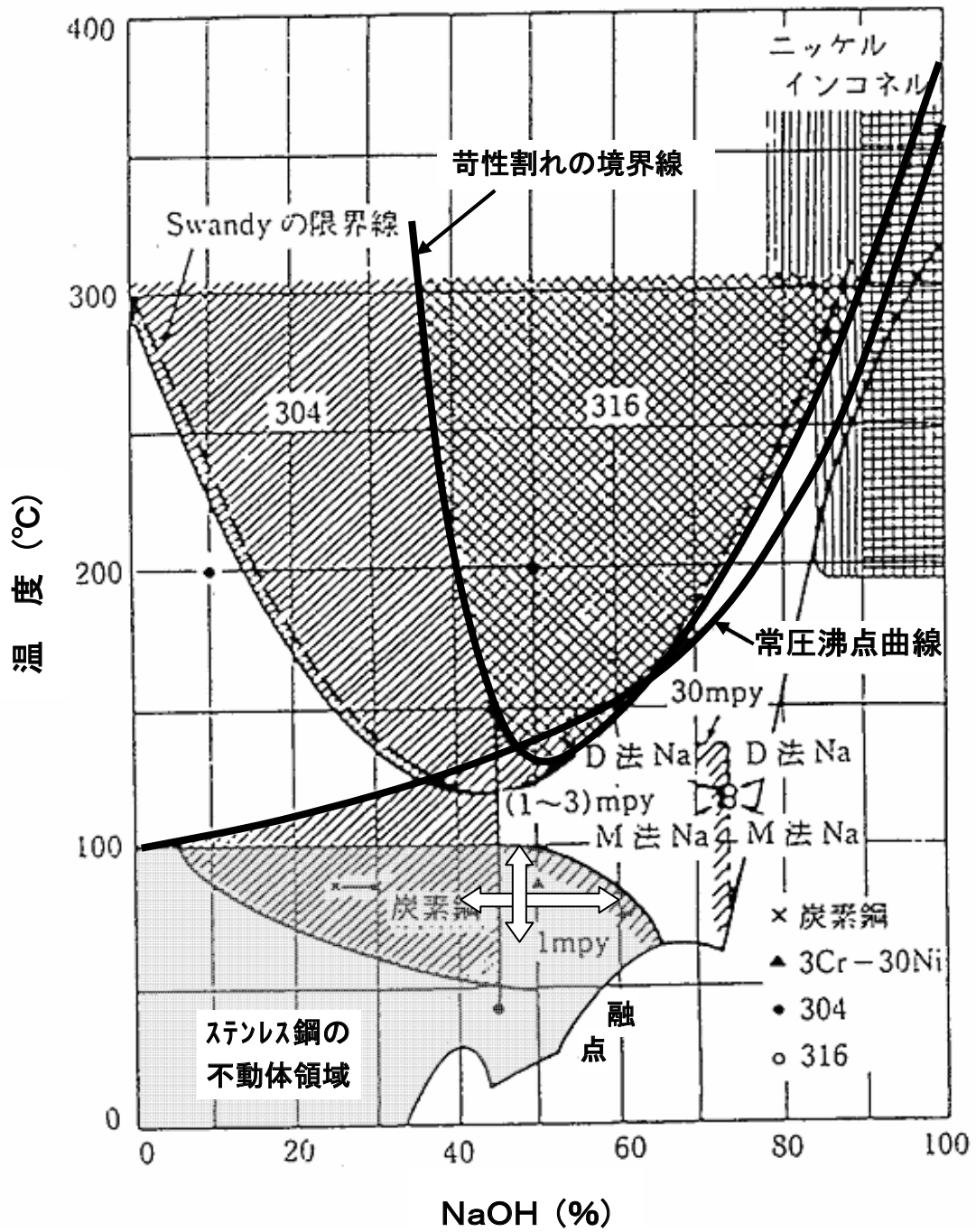


図2-2 ナトリウム転換基礎試験装置 系統図

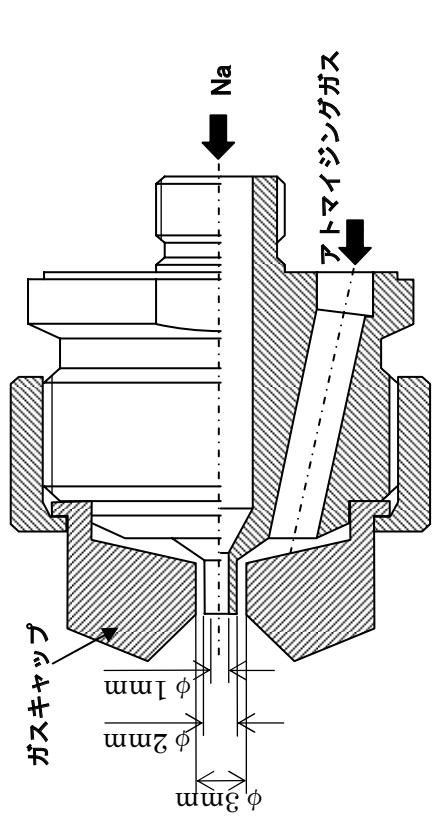


斜線部:各構造材における苛性割れを起こす領域

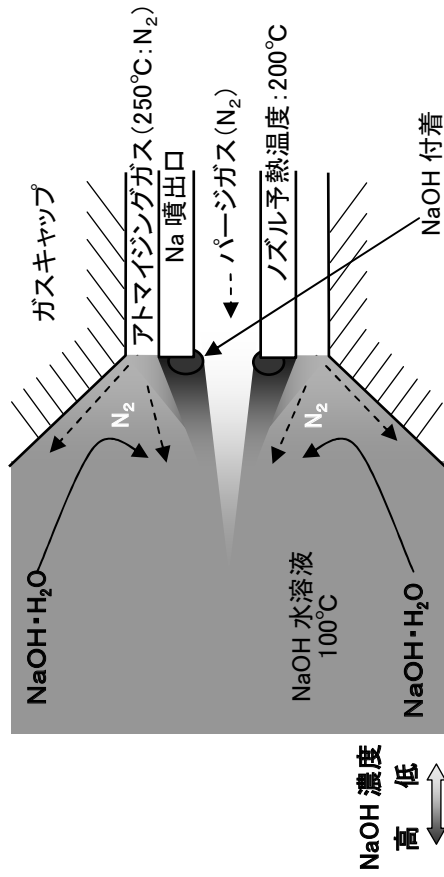
⇔ 計画試験範囲

出典 腐食防食データブック平成7年6月15日発行 社団法人腐食防止協会 大久保ら：
化学工学便覧.Vol140.p.577 (1976)

図 2-3 苛性割れに及ぼす温度、濃度の関係

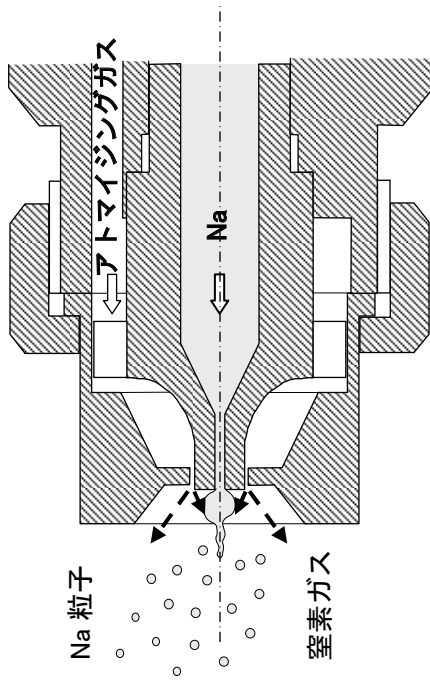


改造ノズル構造図

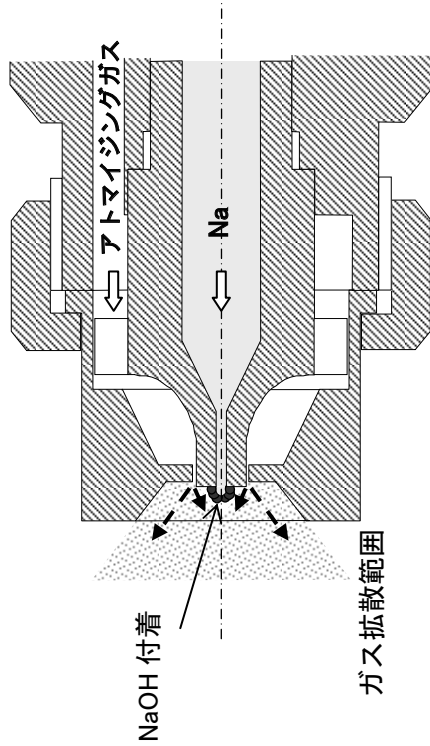


NaOH 付着による閉塞概念図

図 2-5 改造ノズル



Na 注入状態の予想図



ノズル閉塞時の予想図

図 2-4 当初の Na 注入ノズル

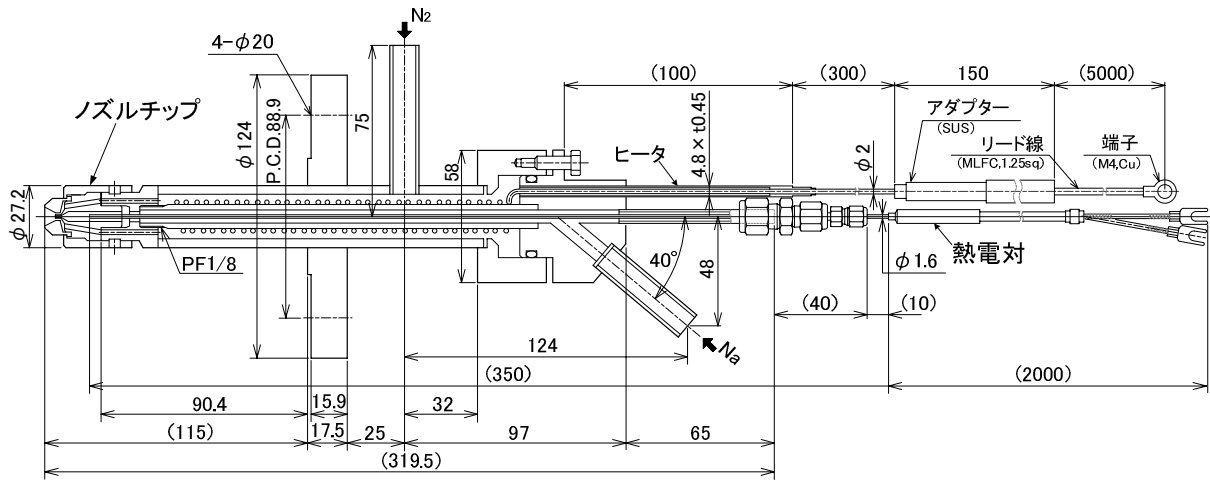


図 2-6 改良 Na 注入ノズル構造図

〔ノズルギャップ〕

スペーサをNaノズルとガスキャップとのシート面へはめ込み、ガスキャップをスライドさせてNa噴出口との位置関係を容易に変化させる

ノズルギャップ＝スペーサ厚さ

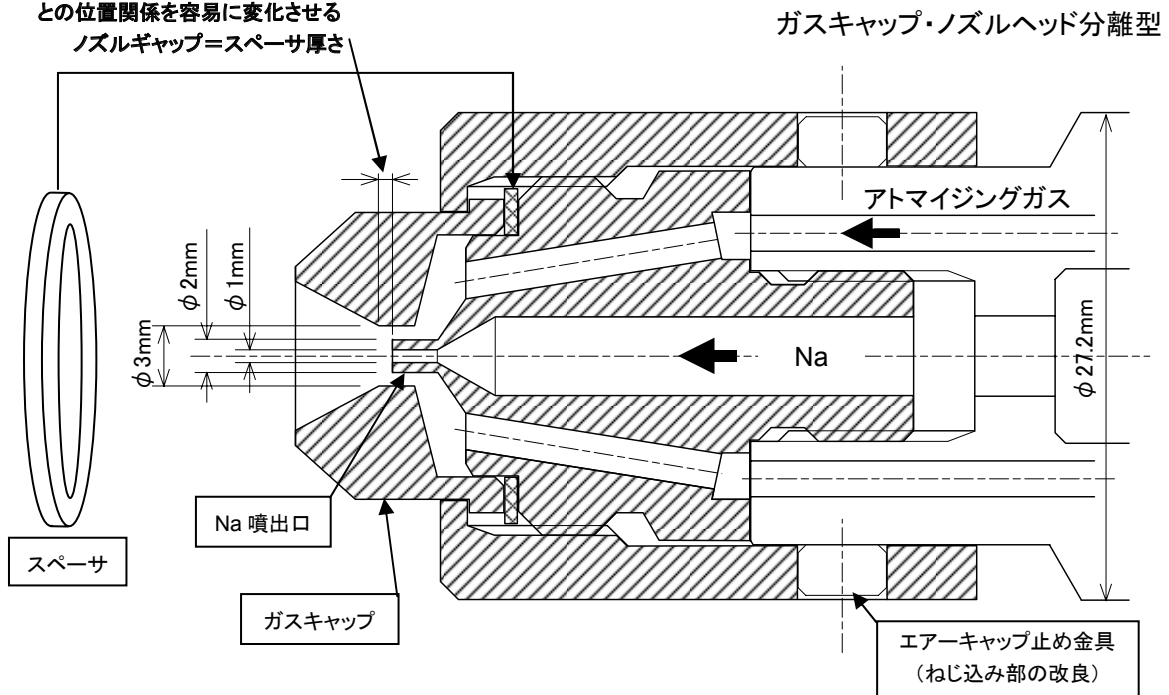
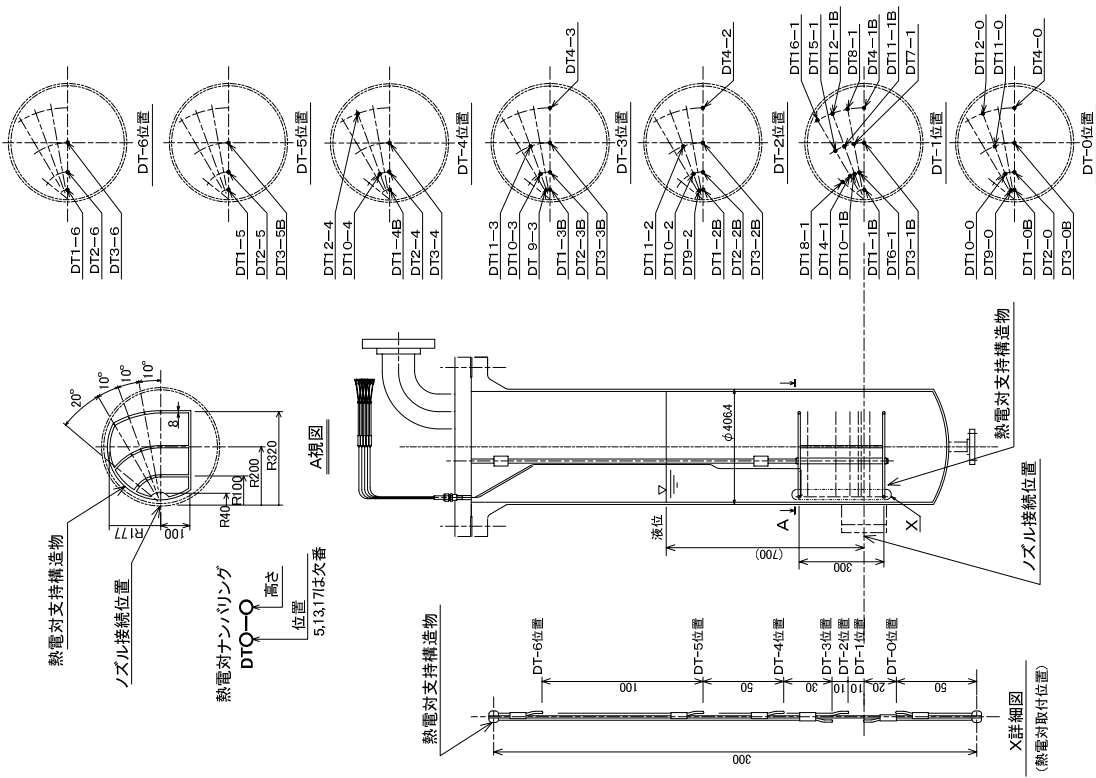


図 2-7 ノズルチップ概要図



材質 : SUS316
 容量 : 0.198m³
 使用圧力 : -0.098 ~ 0.098MPa

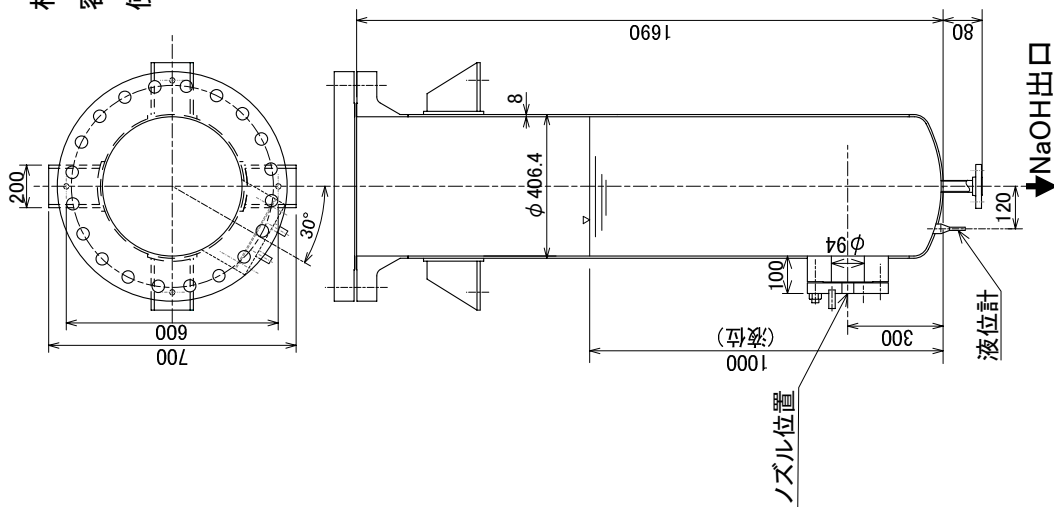


図 3-2 反応容器熱電対ツリ取り取付図

図 3-1 反応容器構造図

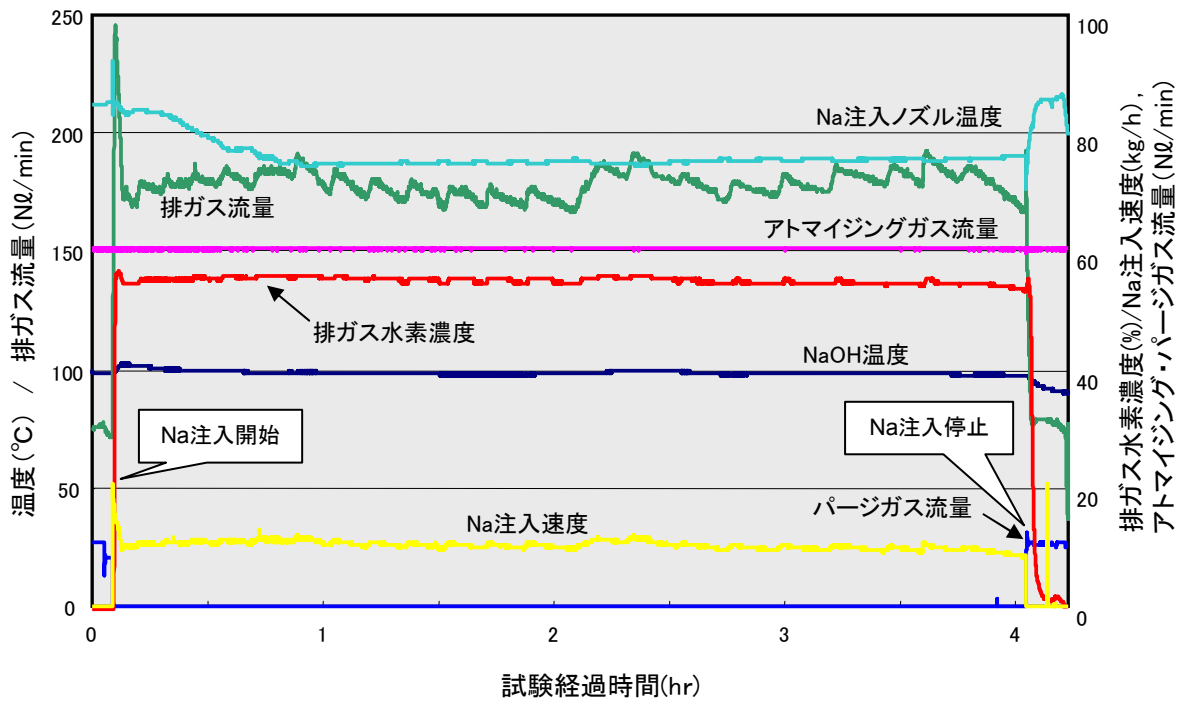


図4-1(1) Na連続転換試験

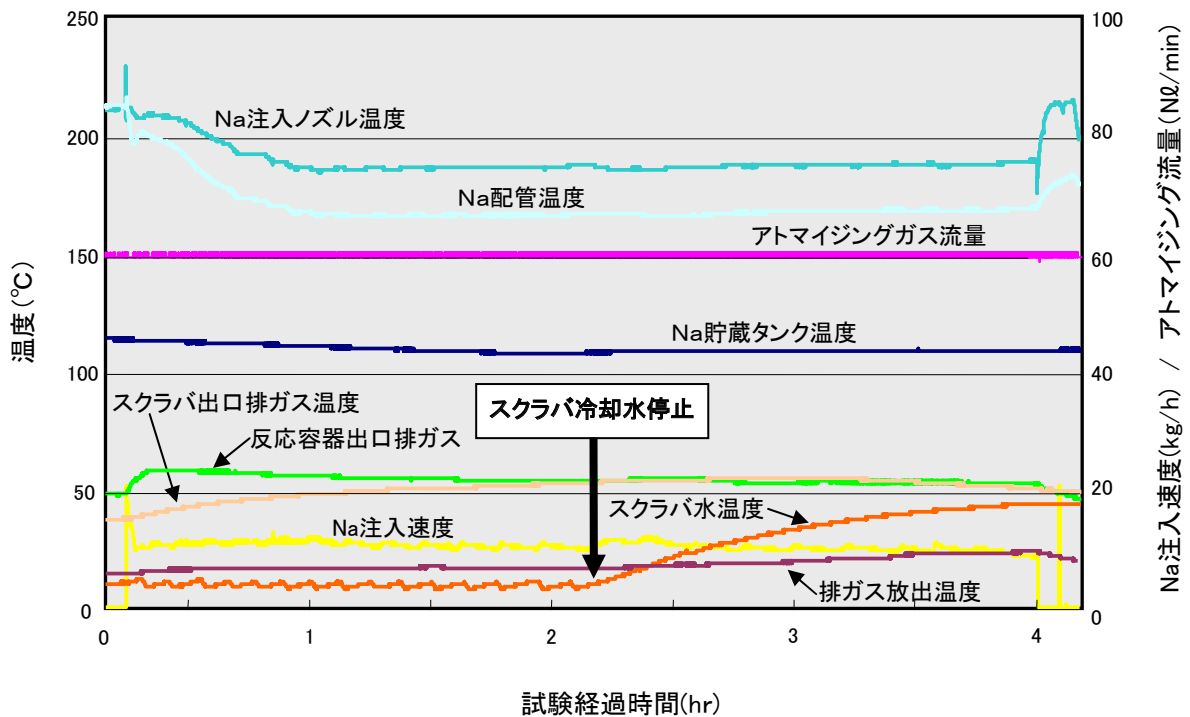
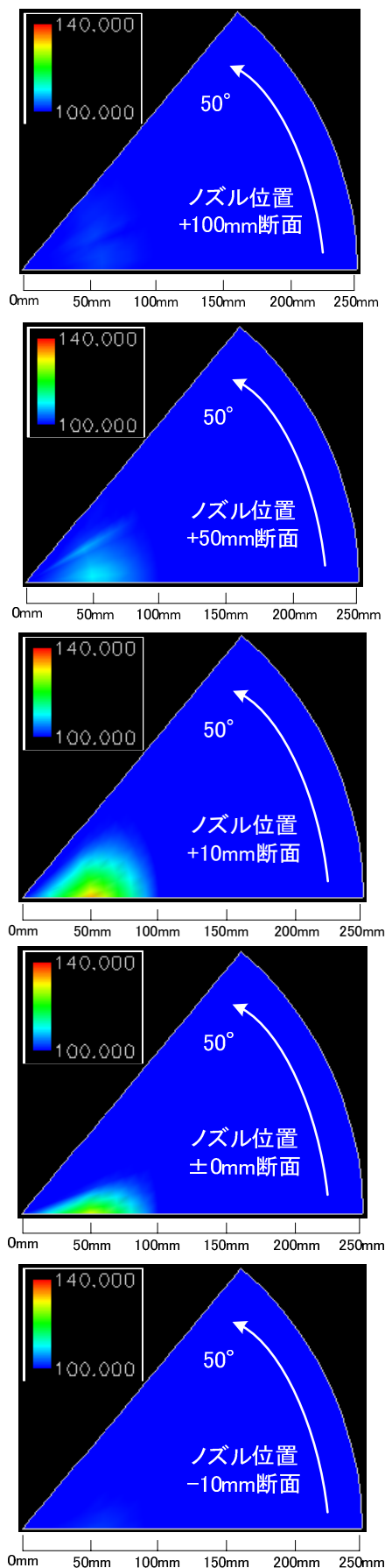


図4-1(2) Na連続転換試験

(Na系温度、排ガス系温度の関係)



Na注入試験条件

Na注入ノズル	: $\phi 1.0\text{mm}$
	スペーサ1.0mm
Na注入温度	: 200°C
NaOH温度	: 100°C
Na注入流量	: 10kg/h
アトマイジング流量	: 60ℓ/min
NaOH濃度	: 45%
NaOH循環流量	: 2500kg/h

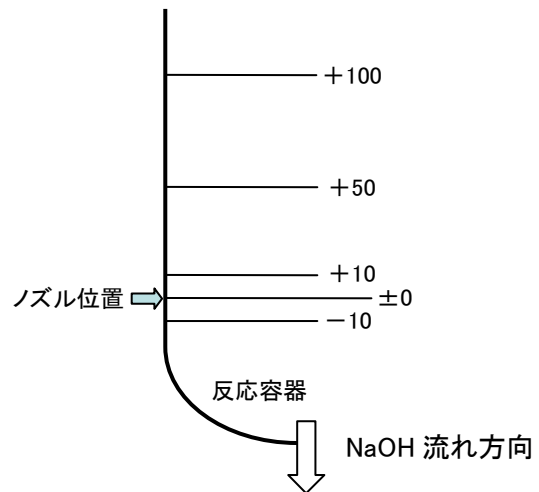
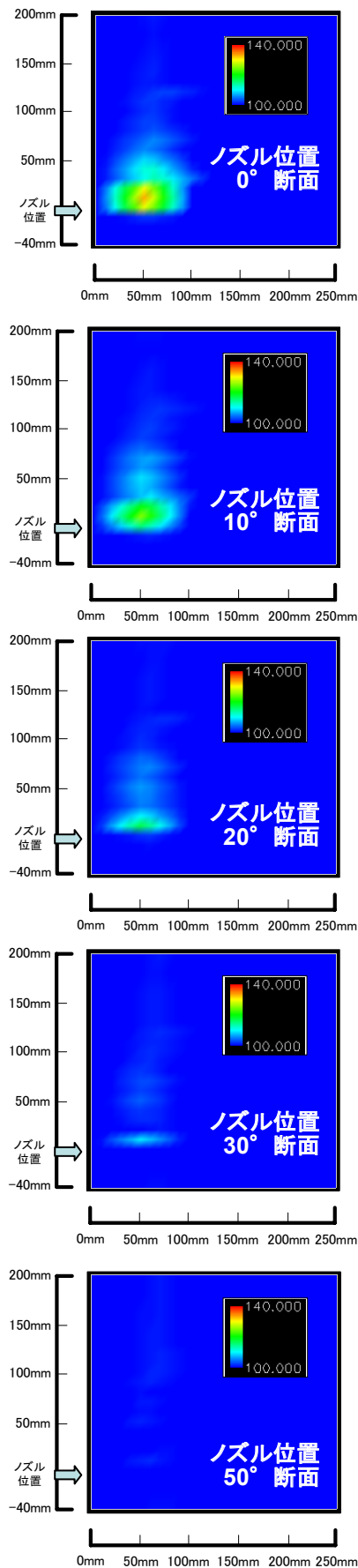


図4-2 Na連続転換試験の
反応容器内温度分布(横断面)



Na注入試験条件

Na注入ノズル : $\phi 1.0\text{mm}$
 スペーサ1.0mm
 Na注入温度 : 200°C
 NaOH温度 : 100°C
 Na注入流量 : 10kg/h
 アトマイジング流量 : 60ℓ/min
 NaOH濃度 : 45wt%
 NaOH循環流量 : 2500kg/h

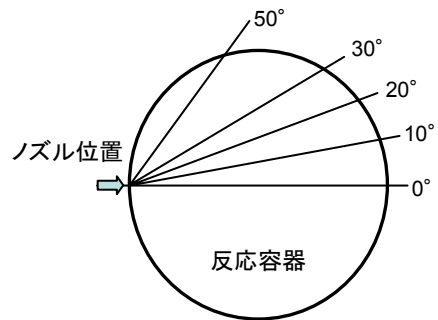


図4-3 Na連続転換試験の
 反応容器内温度分布(縦断面)

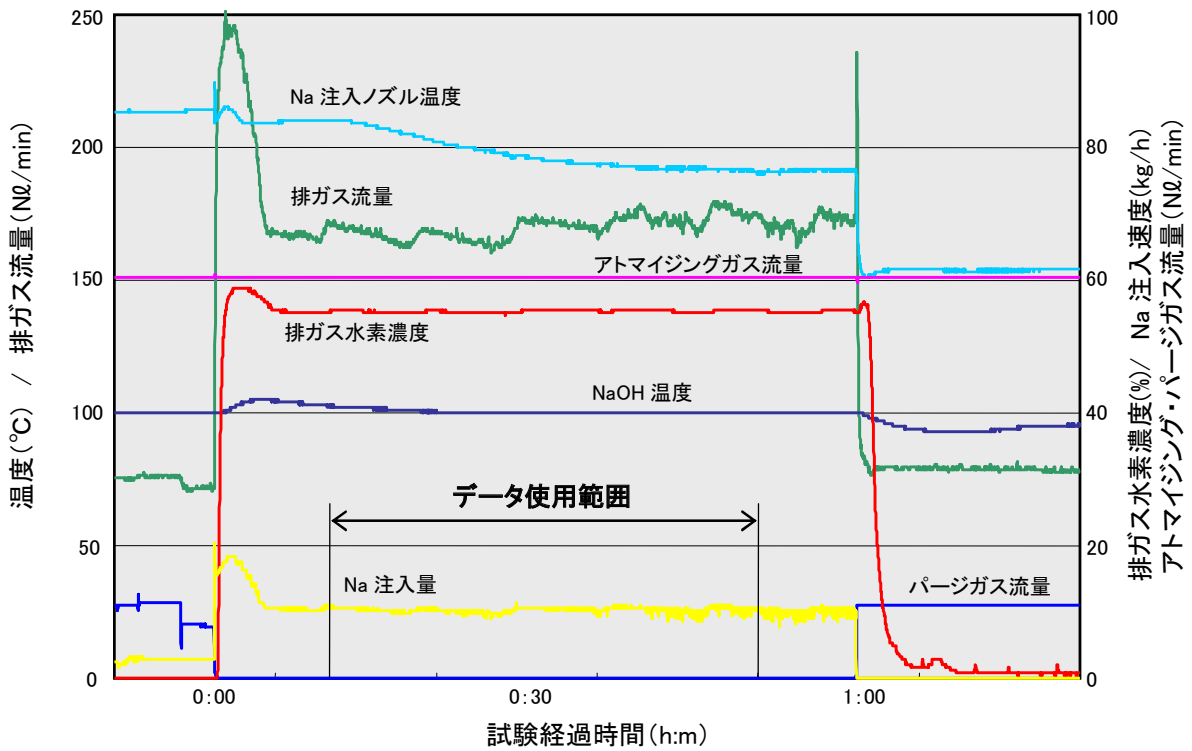


図 4-4 Na 転換試験①-(ノズルスペース 0.8mm)

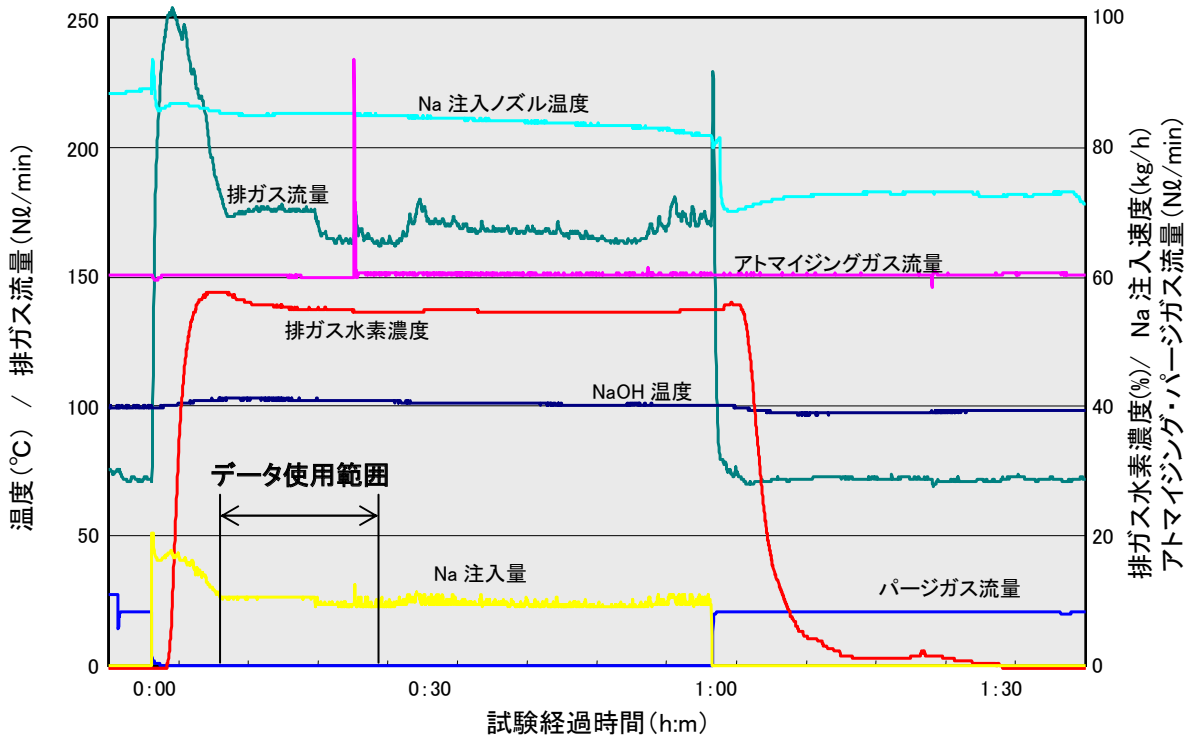


図 4-5 Na 転換試験②-(ノズルスペース 1.5mm)

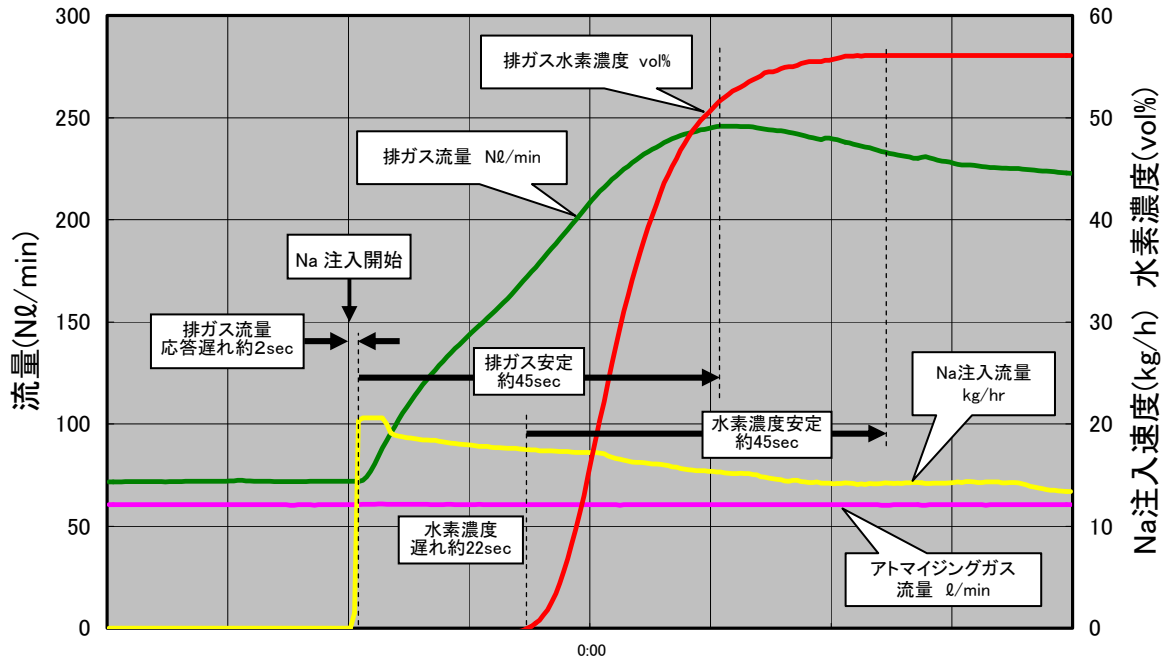


図 4-6 Na 連続転換試験の排ガス流量 および水素濃度プロセス応答遅れ

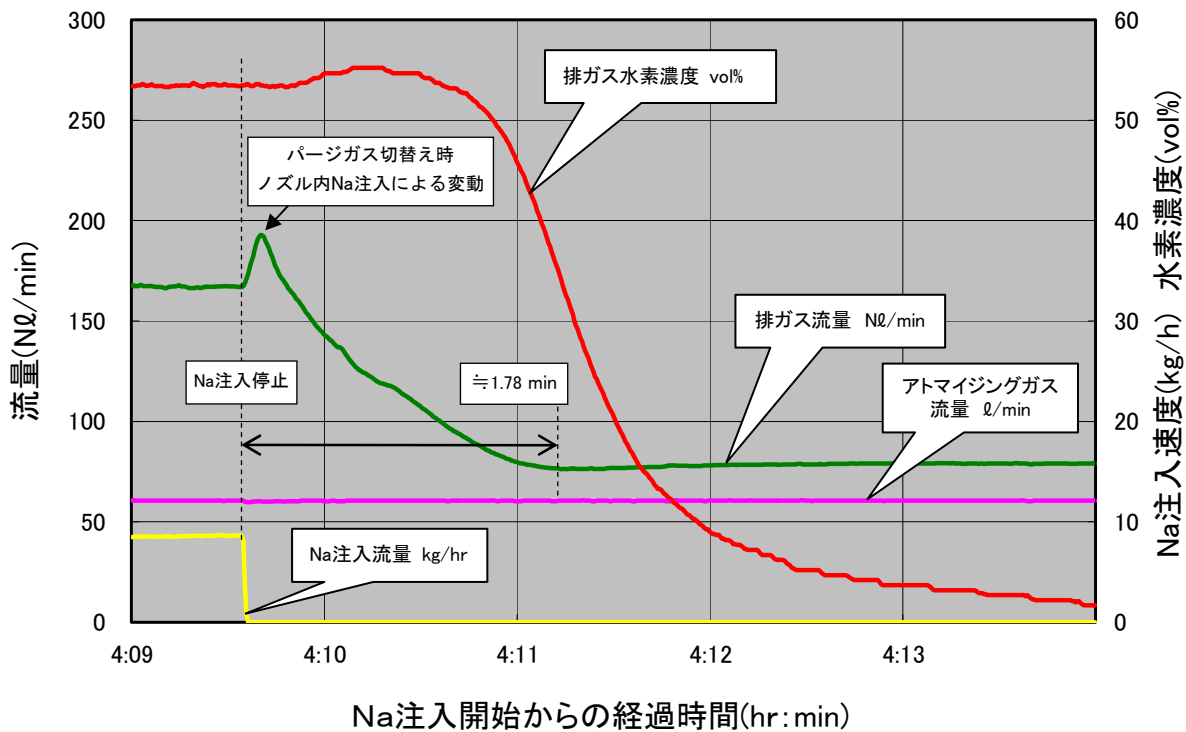


図 5-1 Na 連続転換試験の注入停止後プロセス挙動

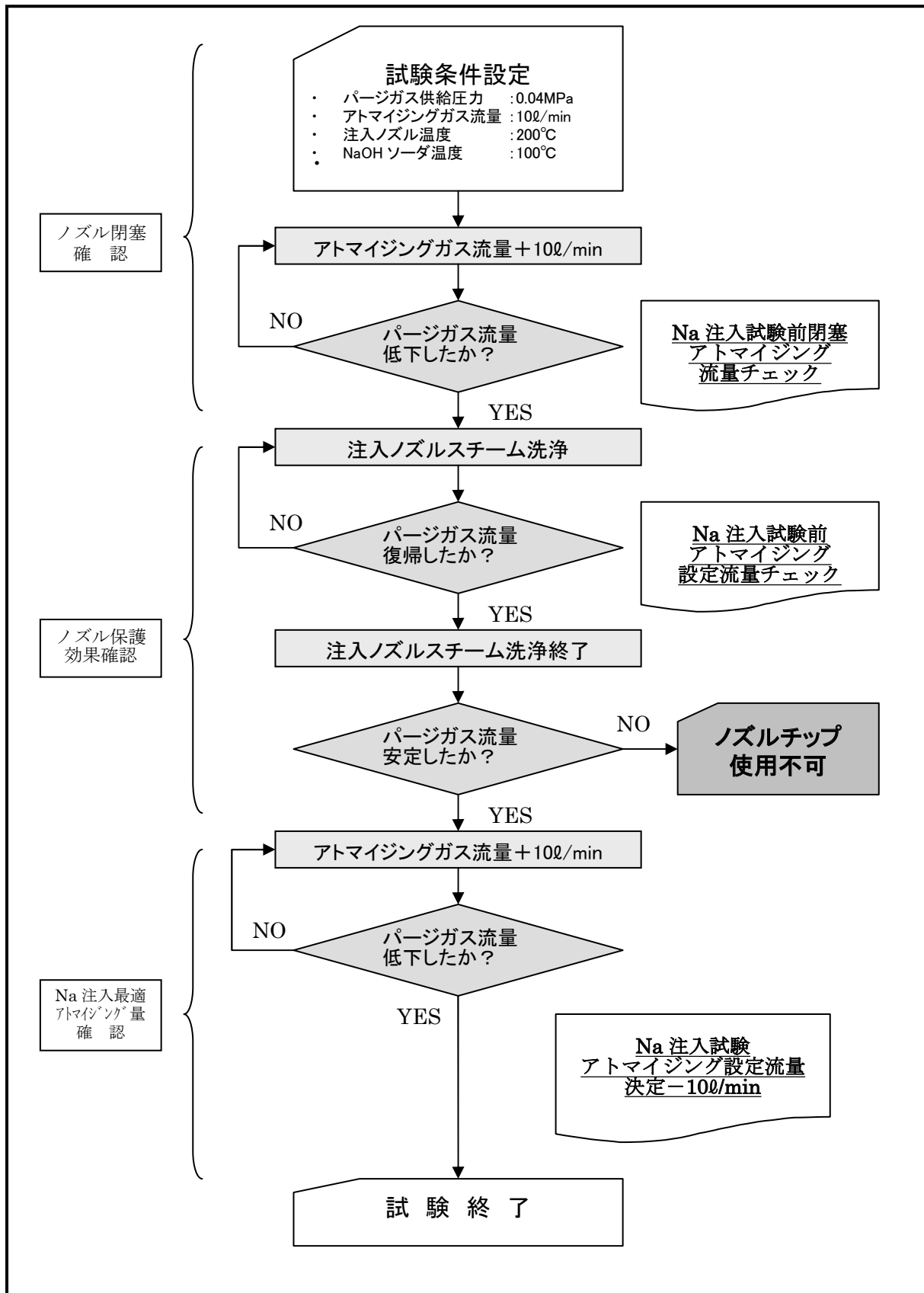


図 5-2 Na 注入ノズル特性試験フロー図



写真 2-1 ナトリウム転換基礎試験装置外観

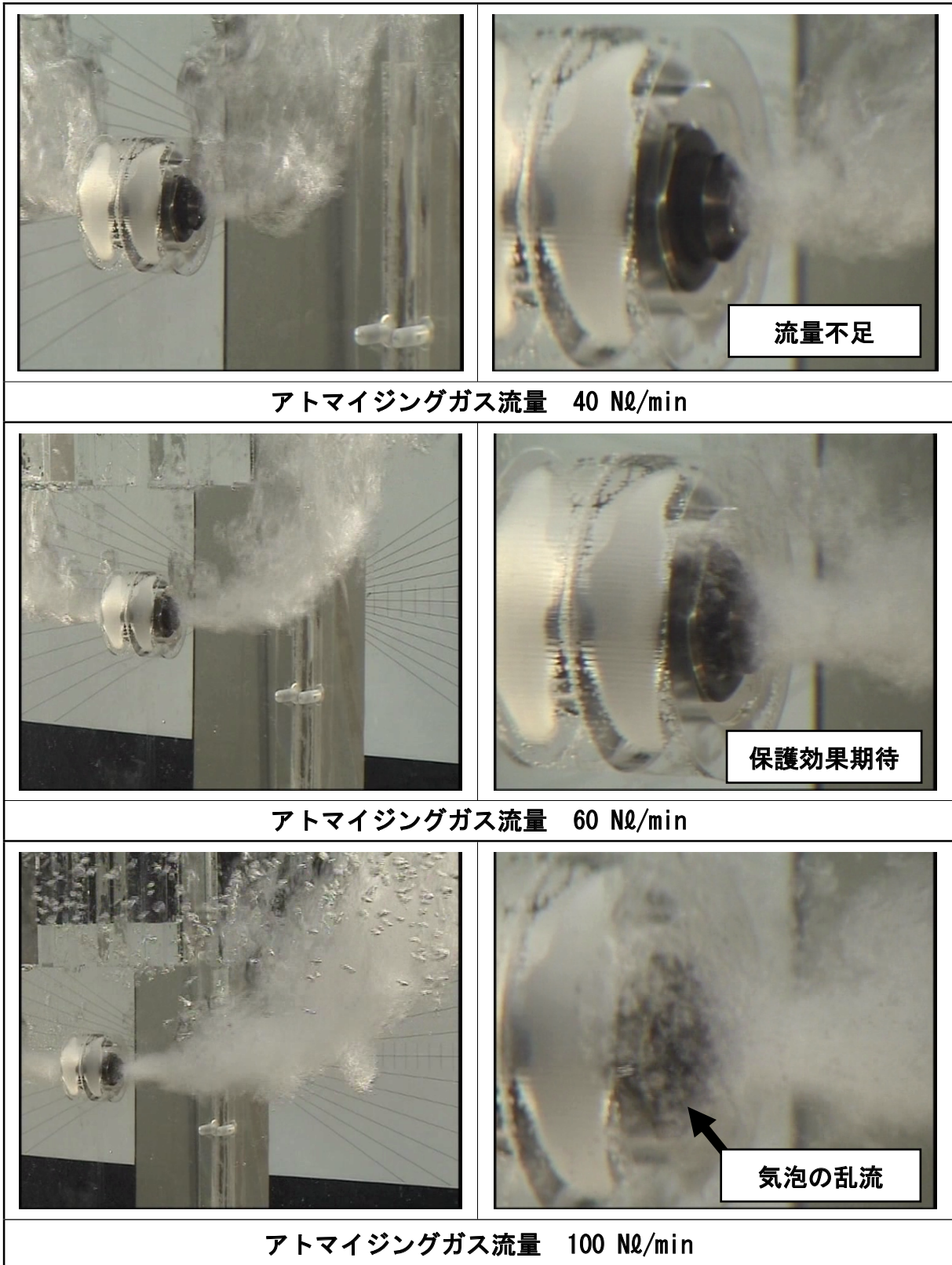
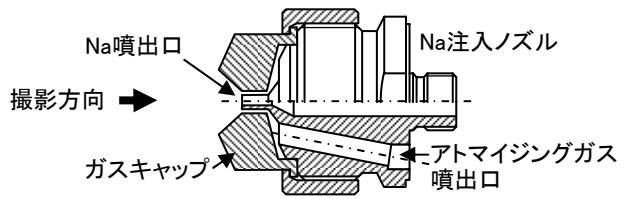
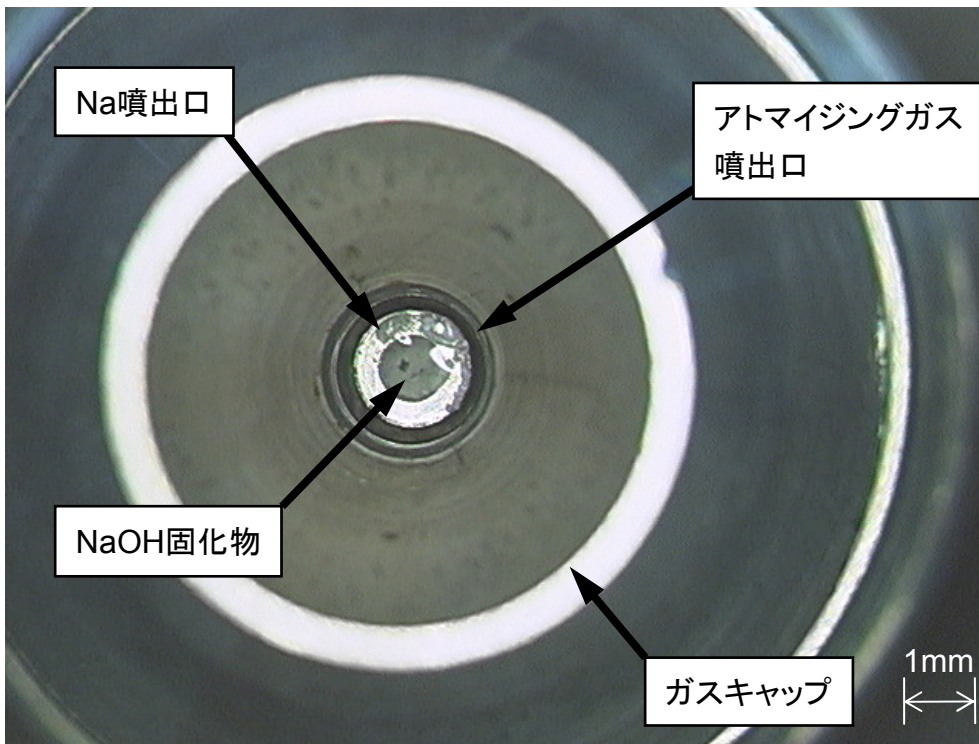


写真 2-2 Na 注入ノズルの水中挙動
(アトマイジングガスによる保護効果の確認)



ガスキャップ取り外し

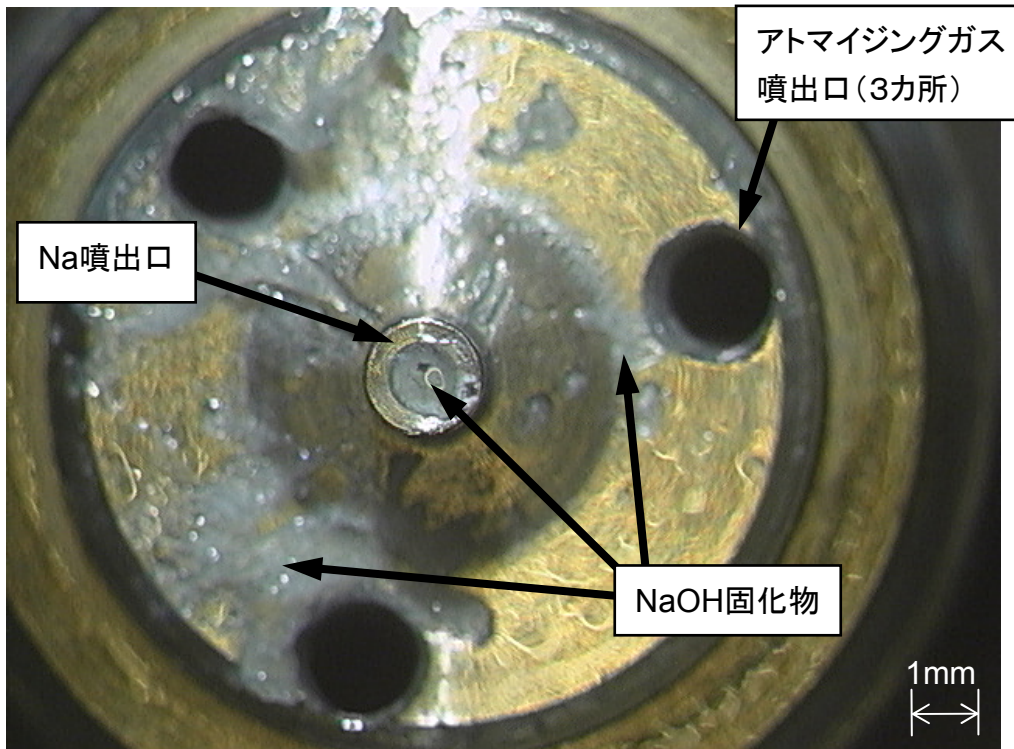


写真 2-3 Na 注入ノズル NaOH 閉塞状況

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m ² ・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ² ・kg ² ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ² ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ² ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度 ^(d)	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
放射能	ベクレル	Bq	lm/m ²	m ² ・m ⁻¹ ・cd=m ⁻² ・cd
吸収線量, 質量エネルギー当量	グレイ	Gy	J/kg	s ⁻¹
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作る際のいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m ⁻¹ ・kg ² ・s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg ² ・s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg ² ・s ⁻³
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム	J/K	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ² ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s・A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg ² ・s ⁻³ =m ² ・kg ² ・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg ² ・s ⁻³ =kg ² ・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1 海里=1852m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バール	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
スチル	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1cSv=10 ⁻² Sv
X線単位		1 X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ジャンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ		1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101325/760) Pa
標準気圧	atm	1 atm=101325 Pa
カロリー	cal	
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

