JAEA-Technology 2006-033



# ナトリウム洗浄技術開発

-湿り窒素ガス洗浄法によるナトリウム洗浄速度試験-

Development of Sodium Removal Technology - Basic Examination Results of Sodium Removal Rate by Wet Nitrogen Gas -

平川康 吉田 英一 郡司 茂\* Yasushi HIRAKAWA, Eiichi YOSHIDA and Shigeru GUNJI\*

> 大洗研究開発センター 技術開発部 Technology Development Department Oarai Research and Development Center

June 2006

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 +81-29-282-5901

© Japan Atomic Energy Agency, 2006

### ナトリウム洗浄技術開発 - 湿り窒素ガス洗浄法によるナトリウム洗浄速度試験 -

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

平川 康,吉田 英一,郡司 茂\*

(2006年2月15日受理)

高速炉では、金属ナトリウム(以下、Na)を冷却材として使用しているため、Na 冷却系の機器 配管等の点検や補修あるいは廃止措置時には、放射性物質を含む残留 Na の洗浄が必要となる。本 試験では、効率的な Na 洗浄条件を把握するために、容器下部に残留する Na や狭隘部(隙間)に残 存する Na などを模擬し、湿り窒素ガスによる定量的な Na 洗浄速度(反応速度)を評価した。実験 では、被洗浄物である Na の温度、キャリアガスである窒素ガスに含ませる湿分濃度、Na の洗浄 面積などをパラメータとした。

試験の結果は以下のように要約される。

- ・湿式洗浄法の影響因子を把握し、定量的な Na 洗浄速度データを取得した。
- ・被洗浄物となる Na の温度が 80~150 の場合、Na 洗浄速度は温度や Na 相(液相・固相)の影響はほとんど受けずにほぼ一定の値を示したが、Na 温度が 180 になると Na 洗浄速度は鈍化する傾向にあった。
- ・Na 洗浄速度は供給する窒素ガス中の湿分濃度の影響を大きく受け、湿分濃度の増加とともに速 くなる傾向が見られた。
- Na 洗浄速度に対する Na 洗浄面積の影響を調査した結果、0.1~200mm<sup>2</sup>の範囲では有意な差は認められなかった。
- ・Na 洗浄界面の方向(上向き、下向き)の違いにより Na 洗浄速度に差が生じ、Na 洗浄界面を上 に向けた場合は効率良く洗浄が進行する傾向にあった。
- ・湿り窒素ガスによる Na 洗浄の進行過程で、条件によっては燃焼現象にも似た発光現象を伴う不 安定な反応挙動が観察された。

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 4002 \*常陽産業株式会社

### Development of Sodium Removal Technology - Basic Examination Results of Sodium Removal Rate by Wet Nitrogen Gas -

Yasushi HIRAKAWA, Eiichi YOSHIDA and Shigeru GUNJI\*

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

(Received February 15, 2006)

The sodium removal technology containing radioactive nuclides is required for inspection and repair of sodium system components and decommissioning of sodium cooled fast reactors. In order to evaluate the efficient sodium removal conditions, the sodium removal rate by the moisture gas cleaning process was examined. Experiments were conducted by simulating residual sodium in the bottom of a vessel and in the crevice parts of components. The experimental parameters were sodium temperature, moisture concentration in career gas ( $N_2$ ), and surface area of sodium.

The results are summarized as follows.

• The effect of the moisture gas cleansing parameters has been investigated and quantitative data for the sodium removal rate were obtained in this study.

• Sodium temperature and sodium-phase (liquid or solid) did not affect sodium removal rate from 80 deg-c to 150 deg-c sodium temperature. However, at the 180 deg-c sodium temperature of sodium removal rate declined.

·Moisture concentration in the nitrogen gas greatly affected the sodium removal rate increased with increasing moisture.

 $\cdot 0.1$  to 200 mm<sup>2</sup> sodium surface area did not affect sodium removal rate.

• The sodium removal rate was influenced of sodium surface direction (facing upward or downward). Facing upward the sodium surface had higher sodium removal rate than facing downward.

•The unstable rapid reaction similar to combustion was observed in some cases during experiments of sodium removal by wet nitrogen gas.

Keywords : Sodium , Sodium Removal , Sodium Cleaning , Decommission , Nitrogen Moisture Gas

\* Joyo Industry Corporation , LTD

# 目 次

1.	緒	Í	言	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	1
2.	討	眜験	方	法	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	2
	2.1	訂	じ験	i装	置	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	2
	2.2	訂	じ験	i体	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	3
	2.3	訂	じ験	ì条	件	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	3
	2.4	訂	じ験	i手	順	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	4
	2.5	Ν	aż	洗氵	争ì	束厚	度の	D习	¢۵	りた	5.	• •	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	5
3.	洗氵	争迈	も度	E討	じ験	iの	結	果	お	よ	び	検	討	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	6
	3.1	汫	;浄	·速	度	に	及	ぼ	す	Ν	а	温	度	თ	影	響	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	6
	3.2	汫	;浄	·速	度	に	及	ぼ	す	湿	分	濃	度	Ø	影	響	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	7
	3.3	汫	;浄	·速	度	に	及	ぼ	す	Ν	а	洗	浄	表	面	積	Ø	影	響	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	7
	3.4	洴	;浄	·速	度	に	及	ぼ	す	Ν	а	洗	浄	方	向	Ø	影	響	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	8
4.	Na	反	応	進	展日	時(	刀材	羕材	泪復	誢죛	察	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	9
	4.1	٤ť	、較	的	穏	や	か	に	洗	浄	が	進	展	す	3	場	合	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	9
	4.2	不	安	定	反	応	が	生	じ	る	場	合	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	9
5.	結		<b>∃</b> •	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	• •	•		• •	•		•	•	11
謝	2	辞 ·	•	•				•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	12
参	考了	之南	ť۰	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	12

### Contents

1. Introduction • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
2. Experimental method $\cdot \cdot \cdot$
2.1 Test apparatus • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
2.2 Test specomen • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
2.3 Test condition • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
2.4 Test procedure • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
2.5 Calculation of sodium removal rate • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
3. Result of sodium removal rate test • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
3.1 Influence of sodium temperature on sodium removal rate • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
3.2 Influence of humidity on sodium removal rate • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
3.3 Influence of sodium surface area on sodium removal rate • • • • • • • • • • • • • • 7
3.4 Influence of sodium face direction on sodium removal rate • • • • • • • • • • • • 8
4. Visual observation of sodium removal reaction • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
4.1 Stable reaction • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
4.2 Unstable reaction • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
5. Conclusion • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
Acknowledgements • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
References • • • • • • • • • • • • • • • • • • •

# 図表リスト

### 【表リスト】

表1	試験装置主要仕様・	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	13
表 2	試験条件・・・・	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	13

# 【図リスト】

図 1	試験装置の構成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
図 2	試験体概略・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
図 3	湿り窒素中における固相 Na の反応深さの進展・・・・・・・15
図 4	湿り窒素中における液相 Na の反応深さの進展・・・・・・・15
図 5	湿り窒素条件下での Na 温度と Na 洗浄速度との関係・・・・・16
図 6	NaOHの液相範囲・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・16
図 7	Na 反応深さの進展に及ぼす湿り窒素中の湿分濃度・・・・・・17
図 8	湿り窒素ガス中の湿分濃度と Na 洗浄速度との関係・・・・・・17
図 9	Na 洗浄速度に及ぼす Na 洗浄面積の影響・・・・・・・・・18
図10	Na 反応深さの進展に及ぼす Na 洗浄方向の影響・・・・・・・18
図11	湿り窒素ガスによる Na 洗浄様相の模式図・・・・・・・・19
図12	不安定反応発生時の Na 温度の推移・・・・・・・・・・・19
図13	不安定反応挙動に至るまでの様相・・・・・・・・・・20

### 【写真リスト】

写真1	Na 洗浄界面に形成された反応性生物の様相・・・・・・・・2	0
写真 2	高湿分濃度条件下での水素ガス発生の様相・・・・・・・・2	1
写真 3	Na 洗浄方向をパラメータとした実験の様相・・・・・・・・2	1
写真 4	不安定反応発生時の様子・・・・・・・・・・・・・・・2	2

### 1.緒 言

ナトリウム(以下、Na)を冷却材として使用する高速炉プラントのメンテナンスや改 造、Na 漏えいや不純物混入等のトラブル時における補修および廃止措置時には、 機器に付着あるいは残留した Na の洗浄処理作業が必要となる。一次冷却系の場 合は、放射化 Na や放射性腐食生成物(CP)、さらに燃料破損を想定すると核分裂 生成物(FP)が含まれる Na(以下、放射性 Na)の処理が必要となる。特に、放射性 Na が残留する機器・配管等の洗浄処理においては、被ば〈抑制、汚染拡大防止、 放射性廃液の低減の面から適切な洗浄手法の計画が要求される。しかし、我が国 においては、放射性 Na を内包した大型機器・配管類の洗浄処理作業の経験や知 見がほとんどない。一方、非放射性 Na 残留機器等の洗浄処理は、上記に比べると 被洗浄物の取り扱いが容易であり、これまでに多くの経験、実績1-5)を有している。こ れらの蓄積された経験や技術は、放射性 Na が付着・残留する被洗浄物の洗浄処 理においても有効に活用できるが、被洗浄物の構造や付着状況に適した洗浄処理 条件の決定や、洗浄の終了判断などは、経験を頼りに設定している例が多く、必ず しも定量的なデータに基づく条件設定とはなっていない。今後、定量的な技術評価 に基づく放射性ナトリウムの洗浄処理技術を確立することは、Na 冷却型高速炉の 維持管理や廃止措置時において、安全性、経済性の向上と、かつ廃棄物の低減 に重要である。

以上のような背景を受け、放射性 Na が付着・残留した大型複雑構造の機器に適 用可能であり、かつ発生する洗浄廃液を高炉スラグとの混合により固化体とすること を可能 <sup>&,7</sup>とする「湿り窒素ガス洗浄手法」について、基礎試験を非放射性 Na を使 用して実施してきた。本基礎試験では、容器下部に残留する Na や複雑構造機器 の上部面や狭隘部に残存する Naを模擬し、これを効率良く洗浄するための技術開 発を目的に、湿り窒素ガスによる Na 洗浄速度(反応速度)データを取得するすると 共に、Na 相状態(固相・液相)、湿分濃度(キャリアガス中の湿分量)、洗浄表面積 (水蒸気との接触面積)をパラメータとし、定量的な Na 洗浄速度を検討した。

- 1 -

### 2. 試験方法

2.1 試験装置

本試験に使用した Na 洗浄基礎試験装置の外観と系統図を図1に示す。また、主要仕様を表1に示す。

装置は、窒素や二酸化炭素などのキャリアガスを供給する「ガス供給系」、 キャリアガスに含ませる湿分を供給する「蒸気供給系」、Naの反応を観察す る「試験部」、Naを充填した試験体を作製する「グローブボックス」等で構成される。

それぞれの特徴を以下に記す。

2.1.1 ガス供給系

ガス供給系は、窒素と二酸化炭素の2種類のガスを取り扱うことができ、 それぞれのガスを単独あるいは混合させて装置に供給することが可能であ る。特に窒素ガスは、建屋に付随している液体窒素設備と接続されており、 最大10Nm<sup>3</sup>/hの流量を確保できる能力を有している。

2.1.2 蒸気供給系

蒸気製造タンクは電気ヒータ加熱方式の小型ボイラであり、0.2m<sup>3</sup>の水を 貯留でき100~120の蒸気供給能力を有している。

2.1.3 試験部

試験容器はオーステナイト系ステンレス鋼で製作された約 0.2m<sup>3</sup> ( 500 ×<sup>+</sup>1000mm)の容量がある縦型円筒容器であり、外巻き式ヒータにて容器内部 温度を 80 まで温度制御することが可能である。また、容器内には試験体 に充填されている Na を最高 180 まで加熱することができるヒータが設置 されている。

2.1.4 真空系

試験容器及び配管内部の脱気を行うために、真空ポンプが設置されている。 2.1.5 排気系

発生する水素(H<sub>2</sub>)濃度を計測するために水素計2式、試験中の湿分濃度を 計測するための鏡面冷却式露点計、試験部への空気混入防止を監視するガル バニ電池式酸素濃度計などが設置されている。なお、発生した水素による燃 焼・爆発を防止するための保護系としてインターロックも具備されている。 2.1.6 グローブボックス

グローブボックスは、<sup>™</sup>970×<sup>D</sup>530×<sup>H</sup>640mm のオーステナイト系ステンレス 鋼製であり、 400mm の大口径サイドポートが取り付けられている。内部は 窒素ガス雰囲気である。

### 2.2 試験体

本試験で実験に用いた試験体の概略を図2に示す。実験に供したNaは純度 99.5%以上であり、そのNaを充填する容器にはガラス製の試験管や微細孔が 空けられているマイクロシリンジを用いた。これら試験体へのNaの充填に関 しては、2.5(1)を参照されたい。なお、試験体の外表面には1mm間隔の目盛 り線が刻まれており、反応したNaの深さの読み取りが可能となっている。

#### 2.3 試験条件

本試験で実施した試験条件を表2に示す。Na 洗浄特性に影響を及ぼす代 表的な因子として、Na 温度や洗浄雰囲気中の湿分量などが考えられる。ま た、Na が付着残留している構造物形状も因子の一つとして挙げられる。本 試験では、これら各種因子がNa 洗浄速度に及ぼす影響を把握するために以 下の試験を実施した。

2.3.1 Na 温度の影響確認試験

Na 洗浄速度は、Na が固体の場合と液体の場合では大きな差が生じ、また 同じ相状態でも高温ほど洗浄速度が速くなると予想し、Na 融点を少し下回 る 80 から装置運転最高温度である 180 までの温度範囲で実験を行った。 試験容器内への湿分供給は窒素をキャリアガスとして用い、湿分濃度を 150g/m<sup>3</sup>に設定した。

### 2.3.2 分量の影響確認試験

Na 洗浄速度に対する湿分濃度の影響を調査するため、湿分量を 5g/m<sup>3</sup>~250g/m<sup>3</sup>まで変化させて実験を実施した。Na は 30 と 80 の固体状態とした。キャリアガスは上記(1)の試験と同じである。なお、供給する湿り窒素ガス中の湿分を試験容器内で凝縮水とさせないように、相対湿度換算で約98%を最大とした。

### 2.3.3 Na 洗浄面積の影響試験

Na が残留する部位は、容器等の底部や壁面の他に部品の接合部やネジ部 などが想定される。これらの狭隘部では、洗浄媒体との接触により生成され た反応物の排出がスムーズに行われないことが想定でき、比較的広い面積の 部位より Na 洗浄速度が遅くなるものと予想される。そこで、試験体の開口 部面積(Na 露出面積)を0.1mm<sup>2</sup>~200mm<sup>2</sup>の範囲に設定し、Na 温度 30 、湿 分濃度 15g/m<sup>3</sup>の条件で実験データを取得した。

### 2.3.4 Na 洗浄面方向の影響試験

プラント停止後の Na の残留状態は、機器形状や運転状態により様々である。例えば容器を想定した場合は、下部にドレンしきれない塊状 Na、上部にはプラント運転中にNa液面から発生したNa蒸気が付着している。さらに、

鉛直方向の壁面には薄皮状態の Na が残留する。このような状況において、 容器を据え付けた状態のままで湿り窒素ガスによる Na 洗浄を行った場合に は、下部では生成した水酸化ナトリウム(以下、NaOH)水溶液がプール状で Na 洗浄界面に存在し、一方の上部側では反応により生成した NaOH は滴下す ることで Na 洗浄界面は薄膜の NaOH 水溶液で覆われることになる。そこで、 試験体である Na を充填したガラス管の開口部を上向きと下向きの2ケース で試験を実施した。

### 2.4 試験手順

試験部を所定の条件(温度、湿度)に静定させた後に、ガラス製容器に Na を充填した試験体を試験部内に格納し、実験を開始した。試験部内には 湿り窒素ガスを連続供給し、Na 洗浄の進行状況を映像として記録した。こ の映像記録から反応速度データを測定した。試験手順の詳細を以下に記す。

#### 2.4.1 試験体の作製

試験体であるガラス製容器(試験管、マイクロシリンジ)内への Na 充填 は、加温したガラス製注射器を用いて溶融 Na を注ぎ入れる手法で行った。 充填後はガス抜きを行い、自然冷却にて室温まで下げた。なお、これらの作 業は、乾燥した窒素ガス雰囲気のグローブボックス内で実施した。

### 2.4.2 温度·湿分濃度調整

試験体近傍に設置した温度計にて目標の試験条件に設定した。雰囲気温度 は試験容器外胴に取り付けられている予熱ヒータにより、湿分濃度は小型ボ イラの水温および窒素ガス供給量により調整した。また、Na 温度は、試験 体の底面を加熱する専用のヒータにて制御した。

2.4.3 試験開始

試験部の温度および湿分濃度等の諸条件が静定していることを確認し、Na を充填した試験体をグローブボックスから試験部内へ移動させて試験を開 始した。

### 2.4.4 反応状況の観察(映像記録)

試験容器の観察窓に取り付けた CCD カメラにて、試験体を真横方向(水平 位置)から撮影し、試験体内の Na 反応状況を1時間毎に1分間記録した。 この記録映像から、Na が反応した深さを読み取り Na 反応速度を算出すると ともに、Na 洗浄界面に生成した反応物などの状況観察を行った。

2.4.5 試験終了

被洗浄物である Na がすべて反応した時点で試験終了とした。生成した NaOH 水溶液は塩酸による中和処理を施し、Na を処理する専用の建屋に設置 されている廃液貯留槽に排出した。

### 2.5 Na 洗浄速度の求め方

Na洗浄速度を求める際の基となるNa反応量は、試験開始から経過時間毎に記録映像から計測し、そのデータを直線回帰して洗浄速度(mm/day)を求めた。

### 3.洗浄速度試験の結果および検討

#### 3.1 洗浄速度に及ぼす Na 温度の影響

Na 洗浄速度に及ぼす Na 温度の影響を調査した。Na 温度は、Na が個体で ある 80 と液体温度域である 113~120、150、180 で実験を展開した。 なお、いずれの条件も湿り窒素ガス中の湿分濃度は 150g/m<sup>3</sup>である。

Na が固体温度域である 80 での Na 反応深さの進展挙動を図 3 に示す。本 実験では 3 本の試験体を同時に試験容器に挿入しており、試験体毎に Na 反 応深さの推移とこれら試験体すべてのデータを直線回帰して求めた平均傾 向線を図中にプロットした。Na が雰囲気中の湿分と反応した深さ(Na 反応 深さ)は、湿り窒素の供給時間に比例し、ほぼ直線的に反応が進むことが観 察された。実験の後半(実験開始 2.5 日後)では、一部の試験体の Na 洗浄 界面上に、反応により生成された水素ガスが滞り、Na と湿分の反応が停滞 する挙動が観察された。

図4には、Na の融点を超える温度条件での実験結果を示す。図中には、 Na 温度 80 の実験データを直線近似した平均傾向線も併せて記載した。Na 温度が 113~120 および 150 の Na 反応深さは、前述した 80 の実験結果 とほぼ同じ傾向であり、Na 反応深さの進展に及ぼす Na 相(液体、固体)の 影響は明瞭に観察されなかった。さらに、Na を 180 まで加熱した場合は、 前述条件の実験結果と比較すると Na 反応深さの進展は極端に遅くなる結果 となった。図5には、Na 温度と Na 洗浄速度で整理した結果を示す。被洗浄 物である Na を加熱した場合は速度論的に湿り窒素ガス中の湿分との反応性 が高まり、特に Na が固体と液体とでは反応速度に大きな差が生じると予想 していたが、本実験の結果では Na 温度を高めても Na 洗浄速度を速める効果 が顕著に表れていない。むしろ、Na を 180 まで加熱した場合は Na 洗浄速 度が鈍化する結果となった。

そこで、この Na 反応速度の鈍化要因を実験中の Na の反応様相の観察結果 から検討した。Na 温度が 80 と 180 の試験体について、実験開始から約 6時間経過した時の様相を写真 1 に示す。Na 温度が 80 の場合、Na 洗浄界 面に生成した NaOH は水溶液の状態で観察されたが、Na 温度を 180 まで加 熱した場合の Na 洗浄界面には白色を呈する塊状物(以下、NaOH 塊状物)が 生成している。図 6 に示す NaOH 状態図<sup>®)</sup>によれば、180 の温度環境におい て NaOH が液体で存在できる濃度幅は約 70~83wt%と狭く、僅かに高濃度側 にシフトすると、被洗浄物である Na 洗浄界面に生成している NaOH 水溶液は 固相へと相変態する。その NaOH 水溶液は、供給する湿分との反応により生 成する NaOH 量や NaOH 水溶液の蒸発による NaOH の濃縮などのバランスによ り決定される。Na 温度 180 での Na 洗浄速度の鈍化は、洗浄界面部におけ る NaOH 水溶液の高濃度化、即ち固体化によるものと推定する。

#### 3.2 洗浄速度に及ぼす湿分濃度の影響

Na 洗浄速度に及ぼす湿分濃度の影響を調査するために、湿り窒素ガス中の湿分濃度を 5~250g/m<sup>3</sup>の範囲(相対湿度:約 15%~98%RH)に設定し実験を行った。この実験では、試験体内の Na は 80 以下の固体状態である。

図7に湿分濃度毎のNa反応深さの進展挙動を示す。いずれの湿分濃度条件下でも、Na反応深さは湿り窒素の供給時間に比例してほぼ直線的に増加する傾向にあることが判明した。また、高湿度条件になるほど単位時間当たりのNa反応深さは大きい値を示した。図8にはNa洗浄速度と湿分濃度との関係を示す。湿分濃度が5~30g/m<sup>3</sup>の条件下では、一日あたりのNaの反応量は約1mm以下(1mm/day)と極僅かであるが、湿分濃度を150g/m<sup>3</sup>まで高めた場合は約7~10mm、さらに湿分濃度を250g/m<sup>3</sup>まで上げると約20~30mmと、指数関数的に増大する傾向にあった。

Na 洗浄中の反応状況の例として、Na 反応速度が最も速かった湿分濃度が 250g/m<sup>3</sup>で実験を行った試験体の定時記録を写真2に示す。湿り窒素ガスの 供給を開始してから1時間程度で試験体のガラス容器内Na洗浄界面にNaOH 水溶液が溜まり、その量は試験時間の経過と共に増していた。また、反応に より発生した水素ガスはNaOH 水溶液中を通過して雰囲気中に放出されるが、 その溶液が白濁しているように観察されるほど、短時間で多量の水素を発し ていた。なお、この反応の様子は、試験体内のNa がすべて消滅するまで変 化することなく継続した。

この結果から、実機洗浄において Na 洗浄を短時間で完了させるには、単純に供給する湿分濃度を高めることでそれを達成することがきる見込みを得た。

### 3.3 洗浄速度に及ぼす Na 洗浄表面積の影響

湿り窒素ガス中の湿分と接触する Na 表面積(洗浄面積)をパラメータとし、洗浄速度データを取得した。実験では開口部の孔径が 0.37mm(約 0.1mm<sup>2</sup>) 0.5mm(約 0.2mm<sup>2</sup>) 1mm(約 0.8mm<sup>2</sup>)のマイクロシリンジと 16mm (約 200mm<sup>2</sup>)のガラス管を用い、湿分濃度 15g/m<sup>3</sup>の条件で実験を実施した。

図9に洗浄表面積とNa洗浄速度との関係を示す。狭隘部を想定し洗浄表 面積を0.1~0.8mm<sup>2</sup>に設定した条件でのNa洗浄速度は、約0.2~1mm/dayの 幅に収まっており、洗浄表面積200mm<sup>2</sup>のNa洗浄速度(約0.2~0.5mm/day) と比較してもほぼ同じデータ幅内であると判断できる。Na洗浄の進行性は、 洗浄界面に生成するNaOHの状態や発生する水素ガスの排出状態などの影響 を受けることがこれまでの実験で判明している。特に狭隘部では、発生した 水素ガスがスムーズに排出されないことから、狭隘部に気泡が滞り Na の反 応に必要な水分の供給を遮断してしまうことが反応速度を低下させると推 定される。本試験中では、マイクロシリンジの細孔内部に発生した水素ガス が長時間滞在することなくスムーズに気中に排出されていたことから、この ような結果が得られたと考える。なお同図に併記した NaK 共晶合金を用いた 同様の実験結果<sup>9)</sup>でも、試験体の開口面積を 0.8~177mm<sup>2</sup>の範囲で実験を行 っているが、その結果においても洗浄速度に対する洗浄面積の影響は認めら れていない。

### 3.4 洗浄速度に及ぼす Na 洗浄方向の影響

Na が充填されている試験体の開口部を上向きとした場合と下向きとした 場合の2つのパターンを設定し、Na が洗浄される方向をパラメータとした 実験を行った。実験はNa 温度80、湿分濃度150g/m<sup>3</sup>の条件でデータを取 得した。

実験中の様子を写真3に示す。試験体の開口部を上向きにした場合、洗浄 対象物であるNaの洗浄界面はプール状のNaOH水溶液に覆われ、湿り窒素の 供給時間の増加と共にその水溶液の嵩が増した。一方、開口部を下に向けた 場合は、Na洗浄界面に生成したNaOH水溶液はガラス管壁面を伝わり滴下流 出した。金属新生表面が表れている様相はなく、薄膜状のNaOH水溶液層が あり、小さな気泡が発生していることを確認した。

図 10 に上述の状況下での Na 反応の進展挙動を示す。実験開始から約1日 経過までの Na 反応深さは試験体の開口部の向きには影響を受けていないが、 さらに時間が経過すると僅かではあるが開口部を下向きにした試験体の Na 反応進展が遅くなる傾向にあった。この理由として、試験体開口部を上向き にした場合の Na 洗浄界面には、反応に必要な水分が液体(NaOH 水溶液)で 多量に存在するが、開口部を下向きにした場合は反応に必要な水分は気体で 存在することから、水分の絶対量の違いによるものと推察する。

### 4.Na 反応進展時の様相観察

本試験で観察された Na 洗浄時の過程は、比較的穏やかに洗浄が進展する ケースと発光現象を伴う燃焼挙動にも似た急激な反応(以下、不安定反応と 称す)を伴うケースの2つに大別できる。

### 4.1 比較的穏やかに洗浄が進展する場合

比較的穏やかに Na 洗浄が進展するケースでは、実験開始の初期段階で Na 洗浄界面に形成される NaOH の反応層が水溶液の場合と塊状となる場合が観察された。Na 温度が溶融温度以下の場合は水溶液、融点以上では塊状物を形成する傾向にある。それぞれの洗浄過程の代表的な様相を図 11 に示す。

### 4.1.1 Na 洗浄界面が常に透明な NaOH 水溶液に覆われるケース

- ・実験開始直後にNa洗浄界面に薄膜のNaOH水溶液が貯留。
- ・湿り窒素供給時間の経過と共に Na の高さが低下し、NaOH 水溶液の深さが 増大。
- ・生成された NaOH 水溶液は常に Na 洗浄界面の上部に位置し、未反応 Na と NaOH 水溶液の 2 層構造となり、Na が消滅するまで継続。
- ・反応によって生成した水素は、気泡となって NaOH 水溶液中上昇し、雰囲 気中に放出。
- 4.1.2 Na 洗浄界面に白色の塊状 NaOH が形成されるケース
- ・実験開始直後にNa洗浄界面に白色のNaOH膜が形成。
- ・湿り窒素ガス供給時間の経過と共に白色の膜は隆起・成長し塊状の NaOH を形成。
- ・塊状 NaOH の成長が停止した後に、その表面からゲル化が始まる。
- ・さらに表層に透明なNaOH水溶液が貯留され、未反応Na 白色のゲル状NaOH
   透明 NaOH 水溶液の3層構造を成し、Na が無くなるまで継続。
- ・反応により発生した水素ガスは、白色のゲル状 NaOH 表層から気泡となって出現し、NaOH 水溶液中を上昇し雰囲気中に放出。 水素ガスが NaOH 水溶液中に滞る状態になった場合は、不安定な反応を示
- す場合がある。

### 4.2 不安定反応が生じる場合

今回実施した実験条件のうち、被洗浄物である Na が燃焼挙動に似た不安 定な反応を示す場合があることが一部の実験で観察された。その反応様相を 示した試験体の温度記録を図 12、不安定反応発生状況を写真4に示す。ま た、映像記録から不安定反応に至るまでの様相を図 13 に模式的に示す。実 験条件は、Na 温度 120 、湿分濃度 150g/m<sup>3</sup>である。 実験の初期段階では、被洗浄物である Na 温度が急激に 170 近くまで上 昇した。この時の Na 洗浄界面の様相は、白色の塊状 NaOH が生成し、その後 ゲル状へ変化していた。さらに湿り窒素ガス中の湿分との反応により、Na 洗浄が進行し、不安定反応の現象が生じる前までに、20~30 幅で急激に Na 温度が上昇する挙動が確認された。試験開始約 240 分後では、Na 温度が 400 以上に上昇し、NaOH 水溶液の沸騰が生じている。沸騰により NaOH 水 溶液が激しく撹拌されることにより、試験体下部に位置していた Na が液面 に浮遊し、液面近傍で橙色の発光及び白色の煙伴う激しい反応が生じた。

現時点において、不安定反応が発生する条件の把握は不十分であるが、Na と NaOH 水溶液の接触反応では次の2つの反応が生じ、かつ白色の煙が観察 (酸化反応の発生)されていることから、この現象は通常の化学反応である 可能性が高い。

(1)Na [s,I] + H<sub>2</sub>O [I] NaOH [s,I] +  $\frac{1}{_2H_2}$  [g] H ° <sub>298</sub>=-142.349kj/mol (2)Na [s,I] + NaOH [I] Na<sub>2</sub>O [s] +  $\frac{1}{_2H_2}$  [g] H ° <sub>298</sub>=11.0kJ/mol

### 5.結 言

本試験では、被洗浄物の Na 温度、キャリアガス中の湿分濃度及び Na 洗浄 表面積などをパラメータとした洗浄試験を実施し、以下のような知見を得た。

- ・湿分濃度を一定とした場合、Na 温度 80~150 の範囲では、Na 洗浄速度に は、Na 温度に影響を受けず、Na の相状態の違い(固相・液相)にもほとん ど影響を受けずにほぼ一定の値を示した。ただし、Na 温度が 180 になると 洗浄速度が遅くなる傾向を示した。
- ・Na洗浄速度と湿分濃度には明瞭な相関が見られ、高湿度条件になるほど洗 浄速度が速くなる。
- ・ネジ部の溝などを代表とする狭隘部は、湿分供給や反応物の排出が効率的 に行われないことが予想され、広い面積の部位の Na 洗浄速度より遅くなる と推定されたが、その速度は一般部と同等であり Na 洗浄速度に対する Na 洗浄表面積の影響は認められない。
- ・NaOH 水溶液が常に流出するような Na 洗浄界面が下向きとなる場合と、NaOH 水溶液がプール状に貯留される上向きの場合の洗浄速度を比較すると、洗浄 初期には同等であるが、洗浄の進展に伴い、若干遅くなる傾向を示した。
- ・Na 洗浄の進行過程で、発光現象を伴う不安定な反応に至る場合があること が判明した。今後、発生条件やメカニズムを調査する。

#### 謝辞 辞

終りに、本試験研究を進めるに当たり、実験炉部の仲井悟次長及び新技術 開発試験グループの三宅収グループリーダから有益なご指導ならびにご助言 を賜りました。ここに感謝の意を表します。

### 参考文献

- (1) 軍司 稔、山本 晋平、小野島 貴光、"50MW 蒸気発生器試験施設 中間熱交換器(IHX)の解体・洗浄記録"、JNC TN9450 98-009、(1998)
- (2) 永井 桂一、赤井 昌紀、谷田部 敏男、"50MW 蒸気発生器試験施設の解体撤去、
  大型コールドトラップの解体洗浄"、JNC TN9410 2000-003、(1999)
- (3) 平川 康、仲井 悟、"大型 Na 機器の解体・洗浄手法の開発"、サイクル機構 技報 No.15、 (2002)
- (4) 松本 寿之、仲井 悟、川崎 弘嗣、大浦 正人、谷藤 康雄、"ナトリウム化合物の固化技術に関する基礎試験"、(社)原子力学会「春の年会」P722、(2003)
- (5) 松本 寿之、大浦 正人、谷藤 康雄、"ナトリウム化合物の固化技術に関する
  基礎試験(2)"、(社)原子力学会「春の年会」P691、(2005)
- (6) Diamond shamrock corporation, "Caustic Soda Handbook", (1979)
- (7) 平川 康、山本 晋平、仲井 悟、郡司 茂、"ナトリム洗浄技術開発 溶融 NaK 洗浄基礎実験"、JNC TN9400 2001-079、(2001)

部位	仕	様				
	型式/規格	縦型円筒容器 / 小型圧力容器				
	材質	SUS316L				
<u>≐</u> +##A giv 19	使用流体	水蒸気 / ガス(窒素、炭酸ガス)				
武歌谷裔	外形 / 内容席	<sup>ID</sup> 500 × <sup>H</sup> 1000mm / 0.222m <sup>3</sup>				
	設計圧力	13.3Pa ~ 0.098MPa				
	観察窓	360× <sup>t</sup> 15mm パイレックスガラス				
	材質	SUS316L				
グロープボックス	外形	<sup>L</sup> 970 × <sup>D</sup> 530 × <sup>H</sup> 640mm				
	設計圧力	0.1Torr ~ 0.098MPa				
	ヒータ容量 / 規格	17.5W / 小型ボイラ構造規格				
蒸気製造設備	外形 / 内容積	<sup>ID</sup> 500 × <sup>H</sup> 109 4mm / 0.2m <sup>3</sup>				
	設計温度/設計圧力	120 / 0.1Torr ~ 0.098MPa				
ガス設備	最大流量	10m <sup>3</sup> /h(Na処理室CE設備使用)				
-v≠≒↓(1)	検知方式	接触燃焼式				
小糸訂(1)	測定レンジ	約50volppm ~ 4vol%				
	検知方式	ポーラログラフィック式				
小系āT(2)	測定レンジ	~ 5vol%				
파르니	検知方式					
	測定レンジ	約80volppm ~ 25vol%				
	検知方式					
	露点計測範囲	- 35~ + 85				

表1 試験装置主要仕様

表2 試験条件

影響功物宿口	Na 温度	湿り室	素ガス	洗浄面積	冰海十古			
影響種認近日	()	<b>湿度(</b> g/m³)	温度()	(mm²)	<b>元</b> 净 <b>刀</b> 円			
	80							
い。海中	1 1 3 ~ 1 2 0	1 5 0	• •	200	Lėž			
Nd温度	150	150	8 U	200	7192			
	180							
		5						
	30	1 5	30					
		30						
湿分濃度		5 0		200	上向き			
	• •	150	9.0					
	00	200	8 U					
		250						
				0.1				
Na <b>洗浄面積</b>	2.0	1 5	20	0.2	上向主			
(接触面積)	50	15	50	0.8	ТЫс			
				200				
	0 1	1 5 0	9 0	200	上向き			
1113/元/尹国/刀円	00	150	0 V	200	下向き			



図2 試験体概略









- 16 -



### 図7 Na反応深さの進展に及ぼす湿り窒素中の湿分濃度





図9 Na洗浄速度に及ぼすNa洗浄面積の影響





### 図11 湿り窒素ガスによるNa洗浄様相の模式図





図13 不安定反応挙動に至るまでの様相



写真1 Na洗浄界面に形成された反応性生物の様相



### 写真2 高湿分濃度条件下での水素ガス発生の様相



写真3 Na洗浄方向をパラメータとした実験の様相



実験開始約240分後

写真4 不安定反応発生時の様子

表1. SI 基本単位

甘木县	SI 基本)	単位
<b></b> 本 平 里	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	А
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	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		
	名称	記号
面 積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	ロ 法 メ ー ト ル	m <sup>3</sup>
速 さ , 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)	キログラム毎立法メートル	$kg/m^3$
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /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
(物質量の)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 牽	(数の) 1	1

表 5. SI 接頭語													
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号								
$10^{24}$	日 夕	Y Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d								
$10^{21}$	ゼタ	Z	$10^{-2}$	センチ	с								
$10^{18}$	エクサ	E	$10^{-3}$	ミリ	m								
$10^{15}$	ペリ	P P	$10^{-6}$	マイクロ	μ								
$10^{12}$	テラ	Ϋ́Τ	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n								
$10^{9}$	ギュ	f G	$10^{-12}$	ピコ	р								
$10^{6}$	メガ	/ M	$10^{-15}$	フェムト	f								
$10^{3}$	キロ	ı k	$10^{-18}$	アト	а								
$10^{2}$	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	Z								
$10^{1}$	デオ	da da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	v								

\_

#### 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

			21 相丌由//	
組立量	h 11.	and the	他のSI単位による	SI基本単位による
	名杯	記号	表し方	表し方
平 面 角	ラジアン <sup>(a)</sup>	rad		$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$
立 体 角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	$\mathrm{sr}^{(c)}$		$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$
周 波 数	ヘルツ	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-2}$
圧力, 応力	パスカル	Pa	$N/m^2$	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N•m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
工率,放射束	ワット	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷, 電気量	クーロン	С		s•A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁東	ウエーバ	Wb	V·s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
磁東密度	テスラ	Т	$Wb/m^2$	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(d)</sup>	$^{\circ}$ C		K
光東	ルーメン	lm	$cd \cdot sr^{(c)}$	$\mathbf{m}^2 \cdot \mathbf{m}^{-2} \cdot \mathbf{cd} = \mathbf{cd}$
照 度	ルクス	1 x	$1 \text{m/m}^2$	$\mathbf{m}^2 \cdot \mathbf{m}^{-4} \cdot \mathbf{cd} = \mathbf{m}^{-2} \cdot \mathbf{cd}$
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量,質量エネル	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
イー 万 子 , カーマ 線長火長 国辺線長火				
林里日里, 回辺球里日 景 古向性線景出景 個	N - A IL b	Su	L/ka	m <sup>2</sup> • o <sup>-2</sup>
<u>一</u> <u>人線量当量</u> ,組織線量当		37	J/ Kg	m · s

(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。組立単位を形作るとき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℃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

	*	日本書	L.		Т					SI 組立車	单位
	不	보 꼬, 별	٢			1	名称			記号	SI 基本単位による表し方
粘				B	モノ	パス	力	ル	秒	Pa•s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力の	モ	-	×	ンコ	=		27	x - 1.	ル	N • m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表	面		張	1	5 =	ニュート	ン毎	メート	ル	N/m	kg • s <sup>-2</sup>
角		速		B	ミラ	, ジフ	~ >	毎	秒	rad/s	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{m}^{-1} \cdot \mathbf{s}^{-1} = \mathbf{s}^{-1}$
角	加		速	B	モラ	ジア:	ン毎	平方	秒	$rad/s^{2}$	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{m}^{-1} \cdot \mathbf{s}^{-2} = \mathbf{s}^{-2}$
熱流	密度	,	放射	照月	モワ	ット毎	平方,	メートノ	V	$W/m^2$	kg • s <sup>-3</sup>
熱容」	量, :	エン	1 1	1 ť-	- 2	ジュール	毎ク	アルビ	ン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量素	容量	(比	熱容	量)	, V	シュール	毎キ	ログラ.	4	$\mathbf{I}(\mathbf{h}_{\mathbf{a}}, \mathbf{k})$	$-2$ $-2$ $\nu^{-1}$
質量	т :	~ ŀ	D	Ľ° -	一街	「ケルビ	ン			J/ (Kg · K)	m · s · k
質量	I	ネ	N	ギー		214	缶キ	ロガラ	ĸ	I/kg	$m^2 + n^{-2} + V^{-1}$
(比	エン	ネル	・ギ	- )	ľ	- 10	н <b>у</b> - (	-//-	-	JING	m · s · k
赦	Æ		湔	22	12 D	ット毎	メー	トル毎	5	W/(m • K)	$m = k \sigma = \sigma^{-3} = K^{-1}$
201	IL.				- n	ノビン				"/ (m K/	m - kg - S - k
休 積	Т	ネ	N	# -	_ 2	シュール	每立	方メー	<u>ዞ</u>	I/m <sup>3</sup>	$m^{-1} \cdot ka \cdot s^{-2}$
FT= 104				·	1	·		12		J7 m	ш ку з
電	界	Ø	強		ゴオ	ベルトイ	毎メ		N	V/m	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3} \cdot \mathbf{A}^{-1}$
体	穑		雷	7	青ク	ーロン	毎立	方メー	ŀ	$C/m^3$	m <sup>-3</sup> • c • A
	10				1/1	/				07 11	11 3 A
雷	気		変	6	7 2	ーロン	毎平江	方メー	F	$C/m^2$	m <sup>-2</sup> • s • A
			~								-3 -1 4 2
誘		電		2	図 フ	アラト	毎フ	x -	ル	F/m	$\mathbf{m}^{3} \cdot \mathbf{kg}^{1} \cdot \mathbf{s}^{3} \cdot \mathbf{A}^{2}$
透		ANS.		2	× ^	、ンリー	・毎 >	x - F	N	H/m	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^2 \cdot \mathbf{A}^2$
モル	I	ネ	N	+ -	- 2		N	毎モ	N	J/mol	m <sup>*</sup> · kg · s <sup>*</sup> · mol <sup>-1</sup>
モル	エン	1	L L		<u>ا</u> ک	シュール	毎モノ	ル毎ケノ	V	J/(mol • K)	$\mathbf{m}^2 \cdot \mathbf{k} \mathbf{g} \cdot \mathbf{s}^{-2} \cdot \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{m} \mathbf{g} \mathbf{g}^{-1}$
モ	N	烈	谷		E E						-1
照射病	) 重	X 禄	及び	γ禄)	2		毎キ	277	4	C/kg	kg ' · s · A
败	41	称	重	2			1	田	砂	Gy/s	m • s
<i>I</i> X	羽		强	B	12	ット毎	人丁	728	-	W/sr	m··m··kg·s´=m··kg·s'
放	射		輝	B	モラ	ット毎	半方。	メートノ	V	$W/(m^2 \cdot sr)$	$\mathbf{m}^2 \cdot \mathbf{m}^{-2} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3} = \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3}$

#### 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	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	•	$1^{\circ} = (\pi / 180)$ rad
分	,	1' = $(1/60)^{\circ}$ = $(\pi/10800)$ rad
秒	"	1" = $(1/60)$ ' = $(\pi/648000)$ rad
リットル	1, L	$11=1 \text{ dm}^3=10^{-3}\text{m}^3$
トン	t	1t=10 <sup>3</sup> kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	В	$1B=(1/2)\ln 10(Np)$

	表	7. [	国際	里①	【糸と研	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							
		名称	;		記号	SI 単位であらわされる数値	
電	子	ボ	N	ŀ	eV	1eV=1.60217733(49)×10 <sup>-19</sup> J	

統一	-原子	質量	単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$
天	文	単	位	ua	lua=1.49597870691(30)×10 <sup>11</sup> 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			
1	ッ	ŀ		1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s			
7	-	N	а	$1 a=1 dam^2 = 10^2 m^2$			
$\sim$	クター	N	ha	$1 \text{ ha}=1 \text{ hm}^2=10^4 \text{m}^2$			
15	-	N	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 <sup>5</sup> Pa			
オン	グストロ・	- 4	Å	1 Å=0. 1nm=10 <sup>-10</sup> m			
13	-	ン	b	$1 b=100 fm^2=10^{-28}m^2$			

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

	X0. BH0/40/21800000000000							
	名称		記号	SI 単位であらわされる数値				
I.	N	グ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J				
ダ	イ	$\sim$	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N				
ポ	T	ズ	Р	1 P=1 dyn ⋅ s/cm²=0.1Pa ⋅ s				
ス	トーク	ス	St	1 St $=1 \text{ cm}^2/\text{s}=10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$				
ガ	ウ	ス	G	1 G 10 <sup>-4</sup> T				
I.	ルステッ	F	0e	$1 \text{ Oe} (1000/4 \pi) \text{A/m}$				
7	クスウェ	N	Mx	1 Mx 10 <sup>-8</sup> Wb				
ス	チル	ブ	sb	$1 \text{ sb } = 1 \text{ cd/cm}^2 = 10^4 \text{ cd/m}^2$				
ホ		F	ph	$1 \text{ ph}=10^{4} \text{lx}$				
ガ		N	Gal	1 Gal =1 cm/s <sup>2</sup> =10 <sup>-2</sup> m/s <sup>2</sup>				

	表10. 国際単位に属さないその他の単位の例						
	1	名称		記号	SI 単位であらわされる数値		
+	л	y	1	Ci	1 Ci=3. $7 \times 10^{10}$ Bq		
$\boldsymbol{\nu}$	$\sim$	トゲ	~	R	$1 R = 2.58 \times 10^{-4} C/kg$		
ラ			F	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy		
$\boldsymbol{\nu}$			4	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv		
Х	線	単	位		1X unit=1.002×10 <sup>-4</sup> nm		
ガ		ン	7	γ	$1 \gamma = 1 nT = 10^{-9}T$		
2	ヤン	スキ	-	Jy	$1 \text{ Jy}=10^{-26} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$		
7	x.	N	111		$1 \text{ fermi=1 } \text{ fm=10}^{-15} \text{m}$		
*-	ートル	系カラッ	/ ŀ		1 metric carat = 200 mg = $2 \times 10^{-4}$ kg		
F			N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa		
標	準	大 気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa		
力	D	y	-	cal			
3	7	17	~		$1 \text{ u} = 1 \text{ um} = 10^{-6} \text{ m}$		