

水素製造用 Sr-90/Y-90 線源の製造法開発

Development of Production Methods of the Sr-90/Y-90
Source for Hydrogen Production Experiments

本木 良蔵 青木 博道 内田 昇二 永石 隆二
山田 禮司

Ryozo MOTOKI, Hiromichi AOKI, Syoji UCHIDA, Ryuji NAGAISHI
and Reiji YAMADA

東海研究開発センター
原子力科学研究所
研究炉加速器管理部

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center

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つております。

〒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

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

水素製造用 Sr-90/Y-90 線源の製造法開発

日本原子力研究開発機構東海研究開発センター

原子力科学研究所研究炉加速器管理部

本木 良蔵、青木 博道※、内田 昇二※、永石 隆二⁺、山田 禮司⁺

(2008 年 1 月 15 日受理)

現在、放射性廃棄物の有効利用の一環として、核分裂生成物である Sr-90/Y-90 を用いた水素製造実験が計画されている。効率よく水素製造を行うために、Sr-90 と水素製造触媒を固化体とする方法を開発した。この方法はシリカゲル内に $^{90}\text{SrTiO}_3$ と TiO_2 、または、 $^{90}\text{SrSO}_4$ と TiO_2 を固化する方法である。この固化体は多孔質であり、耐放射線性と耐薬品性を有し、また、Sr-90 の娘核種の Y-90 も水素製造に利用できる物である。

原子力科学研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

※技術開発協力員（東京ニュークリアサービス株式会社）

+ 原子力基礎工学研究部門 環境・放射線工学ユニット

Development of Production Methods of the Sr-90/Y-90
Source for Hydrogen Production Experiments

Ryozo MOTOKI , Hiromich AOKI[※] , Syoji UCHIDA[※] , Ryuji NAGAISHI⁺ and Reiji YAMADA⁺

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 15 , 2008)

The study of producing hydrogen with a Sr-90/Y-90 source is planned to utilize the radioactive waste effectively. Therefore we developed two methods of caking Sr-90 and a catalyst for the production of hydrogen effectively. One is a method of caking $^{90}\text{SrTiO}_3$ and TiO_2 in a silica gel. And another is a method of caking $^{90}\text{SrSO}_4$ and TiO_2 in a silica gel. These solid matters are porous materials, which has a radiation resistant and chemical resistant. In addition, Y-90 which is a daughter nuclide of Sr-90 can be also used for hydrogen production.

Keywords: Hydrogen Production, Sr-90/Y-90 Source, Production Method

[※]Collaborating Engineer (Tokyo Nuclear Service Co. Ltd.)

⁺ Division of Environment and Radiation Science, Nuclear Science and Engineering Directorate

目次

1.はじめに	1
2. Sr-90 固化体製造の課題	1
2.1 課題	1
2.2 課題の解決	2
3. シリカゲルの調製	2
3.1 ゲル化方法	2
3.2 ゲルの熟成	3
3.3 シリカゲルの調製実験	3
3.3.1 ゲル化時の Na_2SiO_3 の濃度	3
3.3.2 洗浄によるゲル中の Na_2SO_4 の除去	3
3.3.3 乾燥と焼結	3
3.3.4 焼結したゲルの健全性	4
4. Sr-90/Y-90 線源の製造方法の開発	4
4.1 SrTiO_3 ・シリカゲル法による製造方法の開発	4
4.1.1 バッチ式による Sr Treat の反応量	4
4.1.2 カラム式による Sr Treat の反応量	5
4.1.3 SrTiO_3 粉末の化学的安定性	5
4.1.4 SrTiO_3 粉末を含むシリカゲルの調製	6
4.1.5 SrTiO_3 ・シリカゲル法の製造工程	6
4.2 SrSO_4 ・シリカゲル法による製造方法の開発	7
4.2.1 SrSO_4 の化学的安定性	7
4.2.2 SrSO_4 と TiO_2 粉末を含むシリカゲルの調製	8
4.2.3 TiO_2 の化学的安定性	8
4.2.4 SrSO_4 ・シリカゲル法の製造工程	8
5.まとめ	8
6.今後の課題	9
謝辞	10
参考文献	10

Contents

1. Introduction	1
2. Problem of the Sr-90/Y-90 solid matter production	1
2.1 Problem	1
2.2 Solution of the problem	2
3. Preparation of the Silica Gel	2
3.1 Choice of the gelation method	2
3.2 Aging of the gel	3
3.3 Production experiment of the Silica Gel	3
3.3.1 Concentration of Na_2SiO_3 in the gel point	3
3.3.2 Removal of Na_2SO_4 in gel by the washing	3
3.3.3 Drying and sintering	3
3.3.4 Soundness of the sintered gel	4
4. Development of the production methods of the Sr-90/Y-90 Source	4
4.1 Development of the production method by the $\text{SrTiO}_3 \cdot$ Silica Gel method	4
4.1.1 Quantity of reaction of Sr Treat by the batch method	4
4.1.2 Quantity of reaction of Sr Treat by the column method	5
4.1.3 Chemical stability of the SrTiO_3 powder	5
4.1.4 Preparation of the Silica Gel including the SrTiO_3 powder	6
4.1.5 Production process by the $\text{SrTiO}_3 \cdot$ Silica Gel method	6
4.2 Development of the production method by the $\text{SrSO}_4 \cdot$ Silica Gel method	7
4.2.1 Chemical stability of the SrSO_4 powder	7
4.2.2 Preparation of a the Silica Gel including the SrSO_4 and TiO_2 powder	8
4.2.3 Chemical stability of the TiO_2	8
4.2.4 Production process by the $\text{SrSO}_4 \cdot$ Silica Gel method	8
5. Conclusions	8
6. Future problems	9
Acknowledgement	10
Reference	10

1. はじめに

放射線を用いた水素製造として、酸化物の微粒子を含む懸濁液に γ 線を照射し、水素を製造する方法^{1) 2) 3)}と金属や金属イオンを含む水に放射線を照射し、水素を製造する方法⁴⁾が報告されている。この方法は金属酸化物触媒の表面水はG値が高く、放射線分解しやすいこと、並びに、金属は放射線を二次電子線や紫外線、可視光線等に変換する機能を有することを利用している。この実験は γ 線を用いて、水素製造を行ったもので、 β 線源を用いた水素製造実験は報告されていない。 β 線源を溶液内部に用い、水素を製造する方法も有効と考えられる。これには強い β 線エネルギーを有するRIが適している。Y-90($T_{1/2}$:64.1 h)はSr-90($T_{1/2}$:28.8y)の娘核種であって、核燃料の再処理で生じた核分裂生成物(以下FP)の一つである。FPは放射性廃棄物として取り扱われ、資源として有効利用されていない。Sr-90とY-90は永続平衡(以下、この状態をSr-90/Y-90と示す)であり、Sr-90は最大エネルギー0.54 MeVの β 線を、Y-90は最大エネルギー2.27 MeVの強い β 線を放射する。 β 線は γ 線と比べ、飛程が短いので、水中に存在させ、水素製造の内部線源とするのに適している。

研究炉加速器管理部研究炉技術課は原子力基礎工学部門、環境・放射線工学ユニット、放射性廃棄物資源化研究グループから、今後の β 線による水素製造実験のためのSr-90/Y-90線源の開発を依頼された。この水素製造方法はSr-90/Y-90の固化体を溶液中に置き、水素を生成させる内部線源方式である。この方式による水素製造では、触媒となる酸化物や金属とSr-90を近接し固化する等、使用に適した固化体が必要と想定し、これを開発した。

2. Sr-90 固化体製造の課題

2.1 課題

- 1) 放射線により水を分解し、水素を製造する実験では、酸化物粉末や金属粉末等の触媒が用いられる。触媒となる酸化ケイ素(SiO₂)、酸化チタン(TiO₂)、アルミナ(Al₂O₃)の酸化物粉末では、表面に付着している水のみが放射線分解されやすいので、Sr-90と触媒を効果的に固化体にする必要がある。
- 2) FPには、多くの放射性同位元素が含まれている。Sr-90のみを利用するには、これらから分離する必要がある。この分離時にSr-90を固体として回収できれば、Sr-90固化体の製造工程を簡略化できる。この分離法の選択は重要となる。
- 3) β 線は γ 線と比べ、飛程が短いので、水中に存在させて水素製造の放射線源とするのには、線源と触媒と近接させ、固化体にしなければならない。また、FPから分離したSr-90からのY-90は無担体として遊離する。このY-90を固化体内に留められる構造としなければならない。
- 4) β 線と触媒を用いて水素を製造する場合、固化体内でのエネルギーの吸収を減少させ、触媒と溶液にエネルギーを伝える構造にしなければならない。
- 5) Sr-90固化体の製造に用いるSr-90の化合物は水や酸に安定である必要がある。また、これを含有する固化材も同様である。
- 6) Sr-90/Y-90の固化体は使用後、放射性廃棄物として長期間保管される。そのため固化体は耐

放射線性を有し、健全性を確保できる物でなければならない。

2.2 課題の解決

1) シリカゲル (SiO_2) は、自身が水素製造の酸化物触媒であり、耐放射線性を有し、水や酸に安定なガラス質である。また、シリカゲルは多孔質であって、細孔を有する。一般的に乾燥に使用するシリカゲルの孔径は 2~7nm である。これを固化材に用いると Sr-90 と Y-90 からの β 線の吸収が少なく、近接する触媒や溶液に効率的に照射できることになる。また、シリカゲルは耐放射線性及び耐薬品性を有するので、この固化体は長期間使用でき、放射性廃棄物として長期の保管を可能とする。

2) チタン酸ストロンチウム (SrTiO_3) ・シリカゲル法

Sr 吸着体の Sr Treat [(Na, H) TiO_4] を用い、FP の中の Sr-90 と反応させ、 SrTiO_3 とする方法⁵⁾ は、既に、開発されている。Sr Treat は Sr-90 と反応し、 SrTiO_3 となる。この方法により、Sr-90 を化学的に安定性の高い固体にできる。その後、未反応の Sr Treat は高温で加熱すれば、水素製造の触媒効果を持つ TiO_2 にできる。

Sr-90 と反応後の Sr Treat はケイ酸ナトリウム (Na_2SiO_3 、別名水ガラス) 溶液を用いて、シリカゲル中に分散させて、固化可能である。

3) 硫酸ストロンチウム (SrSO_4) ・シリカゲル法

Sr-90 は硫酸 (H_2SO_4) との反応で、容易に SrSO_4 沈殿となる。 H_2SO_4 溶液中の SrSO_4 沈殿は Na_2SiO_3 溶液を用いて、シリカゲル中に分散させて、固化可能である。また、水素製造に触媒効果を持つ TiO_2 粉末も同時に分散して、固化可能である。

4) Y-90 について

FP 廃液から分離後、Sr-90 の娘核種の Y-90 は無担体で生成する。Sr-90 を含む多孔質の固化体には、水や溶液がしみ込む。この状態で、液性を弱アルカリ性とするなら、遊離して存在する Y-90 は多孔質の固化体内で沈殿となり、内部に留まる。この結果、Sr-90 と Y-90 の両者の β 線を水素製造に利用できる。

以上の理由から、シリカゲルの調製実験を基に SrTiO_3 ・シリカゲル法と SrSO_4 ・シリカゲル法の開発を行った。

3. シリカゲルの調製

シリカゲルは Na_2SiO_3 を酸で中和・ゲル化し、洗浄後、乾燥、焼結して製造されるが、具体的な詳細な製造工程が不明であり、粉末を含むシリカゲルの製造には、シリカゲルのみの調製条件を確立する必要がある。そこで、中和とゲル化の条件、洗浄とゲル中の硫酸ナトリウム (Na_2SO_4) の除去の関係、乾燥、焼結時の加熱条件について検討した。実験に用いた Na_2SiO_3 溶液は和光純薬工業 KK 製、濃度：52%~57%、 SiO_2 と Na_2O のモル比：2.0~2.3 である。

3.1 ゲル化方法

Na_2SiO_3 と H_2SO_4 を反応させ、ゲルを調製する場合、 Na_2SiO_3 を H_2SO_4 に加えると酸性側で、逆の場合はアルカリ側でゲル化する。アルカリ側でゲル化する方法では、乾燥中のゲルは切断時の形状が残存せず、液状となつた。酸性側では、乾燥中に液化することはなく、初期の形状のまま縮小した。Sr-90 固化体の製造では、形状が予測できる酸性側の方が適しているので、 H_2SO_4 に Na_2SiO_3 を加え、ゲル化する方法を選択した。

3.2 ゲルの熟成

H_2SO_4 に Na_2SiO_3 を加え、ゲル化する方法では、このゲル調整時の pH により、ゲル化に要する時間が変わる。pH4~5 では、直ぐに固化するが、これより酸性が強まるほど時間を要する。そこで、ゲルの調整に熟成期間を考慮する必要があるのか、実験で確認した。ゲル化時の Na_2SiO_3 の濃度を 5% とし、pH5 でゲル化し、1.7~7.8 日と時間を変えて放置した後、洗浄、乾燥、焼結し、シリカゲルの健全性を比較した。この結果、焼結ゲルは同一であり、ゲルの熟成は特に考慮する必要ないことが分かった。

3.3 シリカゲルの調製実験

3.3.1 ゲル化時の Na_2SiO_3 の濃度

H_2SO_4 の濃度や量、 Na_2SiO_3 の濃度や量を変え、pH4~4.5 でゲル化し、焼結体の健全性を確認する実験を行つた。Table 1 に実験の組合せを示す。

3.3.2 洗浄によるゲル中の Na_2SO_4 の除去

H_2SO_4 と Na_2SiO_3 の反応では、ゲル中に Na_2SO_4 が生成する。多孔質とするには、ゲルを水洗し、 Na_2SO_4 を除く必要がある。この洗浄方法には 流水方式とろ過方式等が考えられる。流水方式では、放射性廃液となる洗浄液が多量となり、実用的ではない。ろ過方式では、ゲル下部からと上澄液のろ過方式がある。ゲルは通水性が無いので、ゲル下部からのろ過はできない。上澄液のろ過はこの問題がないので、この方式を実験に用いた。

Table 1 の No. 1~4 に示すゲルを、カッターナイフで約 1 cm 角に切断し、水道水 1ℓ で 8 回洗浄後、最後に精製水 1ℓ で洗浄した。このときの溶液の攪拌は圧空ポンプからの空気を用い、30 分間行った。また、上澄み液のろ過には、水切り袋を用いた。洗浄液中の Na_2SO_4 の濃度は上澄液の導電率を測定し確認した。この結果を Table 2 に示す。

洗液の導電率は 初期は 17.2~13.4 mS/cm である。8 回の洗浄で水道水の導電率（約 120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ）に近い値となり、これ以上に洗浄するには、精製水による洗浄が必要であった。また、水道水を直接用いると、焼結したゲルは褐色となる。これは水道水中の鉄がゲル内に集積するためである。これを防ぐため、ろ過水を用いた。

3.3.3 乾燥と焼結

洗浄したゲル内には、水が含まれている。これを高温で急激に加熱すると突沸し、飛散する。

そのため、乾燥後に焼結する必要がある。この乾燥時もゲル内の水を除々に蒸発させる必要がある。そこで、穴を開けたアルミフォイルを容器に被せ、120～150℃で水蒸気を徐々に排出させて乾燥する、蒸らし乾燥方式とした。

乾燥したゲルの健全性を増すためには、焼結して固化する必要がある。ゲルは細孔を有する多孔質と考えられ、長時間加熱し、乾燥しても、微量の水分が残っている可能性がある。そこで約6～7時間かけて徐々に昇温し、700℃で焼結した。

3.3.4 焼結したゲルの健全性

得られたシリカゲルの健全性をTable 3に示す。

シリカゲルの状態はゲル化時の Na_2SiO_3 濃度10.3%までは、透明性を有する硬い粒であった。この濃度以上では細粒のものが増え、17.0%では白色の細粒となる。この結果から、12.5% Na_2SiO_3 を用い、ゲル化時の Na_2SiO_3 の濃度を10.3%以下で製造すると、ガラス質の物が得られることが判明した。

4. Sr-90/Y-90線源の製造方法の開発

この実験では、Sr-90は予め、FPより分離されているものとした。また、Sr-90の化学形はFP中と同じ、硝酸ストロンチウム $[\text{Sr}(\text{NO}_3)_2]$ の化学形とした。

Srの反応量やSr化合物の溶解率等を求めるため、JRR-3の水力ラビット照射設備で $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ 30mgを3時間照射し、Sr-85($T_{1/2}:64.8\text{day}$)のトレーサーを製造した。以下に SrTiO_3 ・シリカゲル法と SrSO_4 ・シリカゲル法による固化体の製造方法の開発について示す。

4.1 SrTiO_3 ・シリカゲル法による製造方法の開発

$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ の化学形のSrを SrTiO_3 とするため、商品名：Sr Treat[FinlandのSELION OY社製、化学形： $(\text{Na}, \text{H})\text{TiO}_4$ 、粒径：0.3～0.85mm]を用いた。これはオルトチタン酸 (H_4TiO_4) をpH10 NaOH溶液中に保管している物である。Sr TreatとSrとの反応の最適条件はpH9～11であり、 NaNO_3 の濃度は0.2M以上でも反応する。そこで、この条件の基にSr Treatと反応するSrの化学量をバッチ式とカラム式で求めた。次に、 SrTiO_3 粉末を H_2SO_4 と混ぜ、 Na_2SiO_3 液により、酸性側でゲル化した。次にゲルを切断し、洗浄、乾燥後、焼結の工程を経て、 TiO_2 も含む固化体を調製した。以下にバッチ式とカラム式による SrTiO_3 の調製と固化体の製造実験について記す。

4.1.1 バッチ式によるSr Treatの反応量

1) Srの溶液

$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ 14.6gを0.2M NaNO_3 で溶解後、これにSr-85トレーサーを加え、3M NaOHでpH10.85とし、全量を605ml(Srの濃度：10.05mg/ml)とした。

2) Sr Treatの量

Sr Treatを約30ml(約20g)採取し、用いた。

3) 反応と測定

Sr Treat と Sr の溶液を混ぜ、スターラで攪拌した。ここでは、Sr の濃度が高いと $(Na, H)TiO_4 + Sr^{2+} \rightarrow (Sr)TiO_4 + H^+ + Na^+$ の反応により、液性が酸性側に変化し、pH9 以下になる。そこで、攪拌中は 3 M NaOH を適時加え、混合液を pH9~11 の範囲に調節した。この pH の変化について、Fig. 1 に NaOH により調節しない場合と比較して示す。両者とも反応初期に pH9 以下となる。3 M NaOH 加えない場合は、約 10 分経過後 pH9 以上となる。この結果では、pH の調節は特に重要でないことになるが、3 M NaOH を適時加えた方が、反応率が高いことから、pH の調節は必要である。

吸着量を求めるため、時間の経過と共に上澄液 2 ml を 9 回採取し、No. 5C ろ紙で減圧ろ過後、ろ液を回収して測定試料とした。測定は Ge 半導体検出器を用い、Sr-85 からの γ 線 ($E\gamma : 0.5$ 14MeV) を測定した。

4) Sr Treat と Sr の反応量

Table 4 に測定結果を基に反応量を示す。

Sr Treat と Sr の反応率は初期の 57.8% から、180 分後には 70.1% となり、平衡状態となつた。この結果から、Sr Treat 1g と反応する Sr の量は約 0.21g が上限であることが分かった。

4.1.2 カラム式による Sr Treat の反応量

1) Sr²⁺の溶液の調製

Sr(NO₃)₂ の溶液と ⁸⁵Sr トレーサ液に 3M NaOH を加え pH10.9、600ml (Sr の濃度 5.0mg/ml) としカラムに通液した。

2) Sr Treat カラムの調製

Sr Treat を約 16ml (約 10g) 採取し、ID 12.5mm カラムに充填後、pH10.4 とした水で微粉末の流出が止まるまで洗浄した。

3) 吸着と測定

Sr²⁺の溶液を流速約 6ml/min で通液した。吸着時の流出液は 50ml 毎に約 5ml を回収し、次に 4ml を秤量し、測定試料とした。流出液中の Sr の定量結果を Table 5 及び Fig. 2 に示す。

4) 結果

流出液中の Sr の量は 200ml 近くまで、検出限界以下であるが、その後、増加する。この性能低下時の流出液は pH7 であった。これは Sr の濃度が高い場合、反応によって生ずる H⁺の濃度が増し、最適 pH である 9~11 の範囲をはずれるためである。この条件では、必要量以上の Sr を通液しても飽和に達しない。この実験での Sr の反応量は約 0.183g/g であって、バッチ式の約 0.21g/g より低い結果であった。

カラム方式による Sr と Sr Treat との反応位置はカラムの上部から下部に移行する。この方式では、反応位置の pH の調節が困難である。カラム式と比較し、全体の pH 調節が容易であるバッチ式の方が、SrTiO₃ の製造に適している。

4.1.3 SrTiO₃ 粉末の化学的安定性

4.1.1 の 1) と同様の Sr 溶液と Sr Treat 約 30 ml を用い、調製した SrTiO₃ をろ過洗浄し、乾燥後、電気炉で 700°Cまで加熱し、回収した。回収後の電気炉内を GM サーベイメータで汚染検査した。加熱により分解生成した Sr-85 の汚染がないことから、700°Cまで、安定して SrTiO₃ を加熱できることを確認した。

シリカゲルにより固化体とするためには、ゲル化反応時に SrTiO₃ が固体として存在する必要がある。そこで、回収した SrTiO₃ 粉末に 6 M HNO₃, 6 M H₂SO₄, 6 M HCl, 6 M NaOH の各 100 ml を加え、1 時間加熱後、ろ過し、ろ液を Ge 半導体検出器で測定し、Sr²⁺の溶出率を求めた。結果を Table 6 に示す。

SrTiO₃ は 6 M HNO₃ と 6 M HCl に溶け、6 M H₂SO₄ には安定である。この結果、SrTiO₃ は 6 M H₂SO₄ 中で、Na₂SiO₃ 溶液と混合することにより、酸性側でゲル化が可能であることが分かった。

次に、装置の材質により、HNO₃ や HCl と Na₂SiO₃ によるゲル化が必要になった場合を想定し、溶解実験をおこなった。6 M H₂SO₄ 5 ml+6 M HNO₃ 50 ml と 6 M H₂SO₄ 5 ml+6 M HCl 50 ml の溶液中に約 7 日間浸し、間歇的に攪拌した。これをろ過し、ろ液を Ge 半導体検出器で測定して溶出率を求めた。この場合の Sr²⁺の溶出について Table 7 示す。

6 M H₂SO₄ 5 ml+6 M HNO₃ 50 ml と 6 M H₂SO₄ 5 ml+6 M HCl 50 ml の溶液では、Sr の溶解は微量であることが分かった。この結果から、HNO₃ や HCl 溶液でも、H₂SO₄ を混合すれば、ゲル化が可能である。

4.1.4 SrTiO₃ 粉末を含むシリカゲルの調製

1) SrTiO₃ 粉末の調整

4.1.1 の 1) と同様の Sr 溶液と Sr Treat 約 30 ml を用い、Sr-85 を含まない SrTiO₃ を調製し、ろ過水洗後、200°Cで乾燥し、ミキサーで粉末とした。

2) SrTiO₃ 粉末を含むシリカゲルの調製

SrTiO₃ 粉末の量を変えて、6 M H₂SO₄ 33.3 ml に混入し、12.5% Na₂SiO₃ 溶液 156 ml を攪拌中の溶液に徐々に加入し、ゲル化とした。次に、ゲルを約 1cm 角に切断し、1ℓ のろ過水を用い、上澄液の導電率が 200 μS/cm 以下となるまで、多数回洗浄した。それから、120~150°Cで、約 12 時間かけて乾燥し、約 7 時間をかけて 700°Cまで昇温し、焼結した。実験の組合せと焼結体の状態を比較した結果を Table 8 に示す。また、この写真を Photo. 1 に示す。Photo. 2 にはシリカゲルと No. 4 の固化体を比較して示す。

SrTiO₃ 細末を含むシリカゲル焼結体は塊状と粒状が混在する固化体である。No. 1 から No. 3 までは、指で壊せる物である。何れも、硬く安定している。No. 4 は脆い。しかし、細粒や粉末として水素製造に使用するなら、SrTiO₃ 34.1%の混入率まで、使用可能である。

4.1.5 SrTiO₃・シリカゲル法の製造工程

実験を基に確立した Sr-90 のシリカゲル固化体の製造工程を下記に示す。また、このフローシートを Fig. 3 に示す。但し、ここでは、再処理廃液中の FP から、Sr-90 は Sr(NO₃)₂ として分離されているものとする。

- 1) Sr-90 [Sr(NO₃)₂] の溶液を最適反応範囲の pH9~11 とし、Sr Treat とバッチ式で攪拌し、SrTiO₃ を調製する。ここで Sr Treat は攪拌中に破碎され、スラリーとなる。次にろ過洗浄する。
- 2) SrTiO₃ スラリーと 6 M H₂SO₄ と混合する。ここで SrTiO₃ は固化体への混入率を 34%以下となる量とする。
- 3) 12%Na₂SiO₃ 溶液を攪拌中の前記混合液に加え、ゲル化する。ゲル化時の Na₂SiO₃ の濃度は約 10%以下とする。
- 4) ゲルを切断する。
- 5) ロ過水で多数回、洗浄し、上澄液をろ過してゲル中の Na₂SO₄ を除く。ここで洗浄は導電率 200 μS/cm 以下となるまで行う
- 6) ゲルを加熱し、徐々に乾燥する。
- 7) 約 6 時間をかけて、徐々に約 700°C に昇温し、焼結して Sr-90 固化体とする。

この製造工程の問題は SrTiO₃ の化学的安定性のみを確認し、Sr Treat については、確認していないことである。工程 2) では、未反応の Sr Treat を含む SrTiO₃ を 6 M H₂SO₄ と混合する。ここで Sr Treat が溶解する場合は、予め 6 M H₂SO₄ と 12%Na₂SiO₃ を反応させ、ゲル化前の状態とし、これに SrTiO₃ を加え、攪拌し、ゲル化する方法により、問題は解消できる。

4.2 SrSO₄・シリカゲル法による製造方法の開発

SrSO₄ は Sr(NO₃)₂ と H₂SO₄ により生成させ、沈殿とした。この反応によらない場合は、市販の SrSO₄ 粉末を用いた。TiO₂ については、和光純薬工業株式会社製の粉末を用いた。この TiO₂ は光による水素製造に使用される。光触媒として使用されるアナターゼ型の TiO₂ は 700°C 以上でルチル型の結晶となる。現在、放射線による水素製造にどちらが適しているのかは不明であるが、放射線を用いる場合も光触媒と同様と考え、700°C 以下で使用することとした。

以下に実験について記す。

4.2.1 SrSO₄ の化学的安定性

Sr-85 トレーサーを含む Sr(NO₃)₂ 溶液(Sr の濃度 : 101.2 mg/ml) 20 ml に 6 M H₂SO₄ 8 ml と水 20 ml を加え、沸点以下で加熱攪拌し、SrSO₄ 沈殿を生成させた。沈殿をろ過回収し、赤外線ランプで乾燥後、600°C で焼結した。同一工程で 2 ケの焼結粉末を調製し、これに 6 M HNO₃, 6 M HCl を各々 100 ml 加え、3 時間攪拌した。次に上澄液 1 ml をろ過し、ろ液中の Sr-85 を Ge 半導体検出器により測定し、沈殿の溶解率を求めた。結果を Table 9 に示す。

SrSO₄ 沈殿の溶解率は 6 M HNO₃ では 5.2%、6 M HCl では 2.3% である。

次にこの試料に 6 M H₂SO₄ 5 ml を加え、約 4 時間過熱攪拌後、上澄液 1 ml をろ過し、ろ液中の Sr-85 を Ge 半導体検出器により測定し、沈殿の溶解率を求めた。結果を Table 10 に示す。

SrSO₄ 沈殿は H₂SO₄ を加えることで、溶解率が低下、又は不溶となるので、SrSO₄ 沈殿のゲル化は H₂SO₄ 溶液だけでなく、HNO₃ と H₂SO₄、HCl と H₂SO₄ を用いても可能である。

4.2.2 SrSO₄ と TiO₂ 粉末を含むシリカゲルの調製

6 M H₂SO₄ 33 ml に SrSO₄ 粉末と TiO₂ 粉末の量を変えて加え、攪拌して粉末を均一に分散させた。これに約 12.5% Na₂SiO₃ 溶液を滴下し、ゲルを調製した。このゲル化時の Na₂SiO₃ の濃度は約 10% である。Table 11 に実験の組合せを示す。

次にゲルをカッターナイフで約 1cm 角に切断し、ゲル量の約 10 倍量のろ過水を用い、160 μS/cm 以下に洗浄後、乾燥器を用い 150°C で徐々に乾燥した。それから電気炉を用い、約 5 時間をかけて 600°C に昇温し、焼結して固化体とした。Table 12 に焼結後の粉末の混率や固化体の重量を示す。又、固化体の写真を Photo. 3 に示す。Photo. 4 には No. 1 と No. 5 の固化体を比較して示す。

No. 1 は粉末を含まない固化体であって、健全性の比較の基準として調製したもので、粒状半透明のガラス質である。その他は硬い白色の固化体で、No. 2 と No. 3 は No. 1 に近い形状である。No. 4 と No. 5 は粉末の混合率が増しているので、塊状の固化体が多くなる。この塊状の固化体は指で壊せる硬さである。いずれの固化体も、目視では、SrSO₄ 粉末と TiO₂ 粉末を均一に含む物であり、溶液中で水素製造に使用できるものである。

4.2.3 TiO₂ の化学的安定性

TiO₂ は水には不溶であるが、酸には溶解する。そこで 6 M H₂SO₄ と 12.5% Na₂SiO₃ 溶液で、ゲルを調製する場合、この反応を進行させ、ゲル化する直前の液状の時に TiO₂ の粉末を加え、攪拌して均一に分散し、その後ゲル化することで、TiO₂ の溶解を防ぐことができる。

4.2.4 SrSO₄・シリカゲル法の製造工程

実験を基に、製造工程を下記に示す。また、このフローシートを Fig. 4 に示す。但し、ここでは、再処理廃液中の FP から、Sr-90 は Sr(NO₃)₂ として分離されているものとする。

- 1) 加熱攪拌中の Sr(NO₃)₂ 溶液に H₂SO₄ を加え、SrSO₄ の沈殿を生成させる。
- 2) ろ過洗浄する。
- 2) H₂SO₄ を加え、6 M H₂SO₄ 溶液に調製する。
- 3) SrSO₄ 沈殿を含む溶液を攪拌し、均一に分散させた状態に 12.5% Na₂SiO₃ 溶液を加える。
- ゲル化前に TiO₂ 粉末を加え、ゲル化する。ゲル化時の Na₂SiO₃ の濃度は 10% 程度とする。
- 4) ゲルを切断する。
- 5) ろ過水で多数回、攪拌洗浄する。ここでは、洗浄毎に上澄液をろ過し、ゲル中の Na₂SO₄ を除く。上澄液の導電率の測定により、洗浄効果を確認し、200 μS/cm 以下にする。
- 6) 洗浄液を分離後、ゲルを加熱して、徐々に乾燥する。
- 7) 約 6 時間をかけて、徐々に約 700°C に昇温し、焼結して、Sr-90 固化体とする。

5.まとめ

現在、β線源を用いた水素製造例は見当たらない。γ線による水素製造例を基に、触媒効果を

有するシリカゲルを用いて、 SrTiO_3 ・シリカゲル法と SrSO_4 ・シリカゲル法の Sr-90 固化体を製造する方法を開発した。ここで、 SrSO_4 ・シリカゲル法は固化体中の触媒の種類や濃度、 SrSO_4 の濃度を変えることが可能であり、 SrTiO_3 ・シリカゲル法より多様性がある。

再処理廃液は硝酸又は硝酸塩の溶液である。Sr Treat はこの硝酸系の使用に適するので、 SrTiO_3 ・シリカゲル法はこれに応用しやすい特徴を有する。

開発した固化体のどちらが水素製造に適しているかは、実際に実験し、比較しないと判定できない。

2 種類の Sr-90 固化体は化学的に安定性が高く、耐放射線性を有する物と考える。また、Sr-90 の化合物と酸化物触媒を近接含有させた多孔体に固化しているので、水素製造には、効果的である。この Sr-90 固化体は弱アルカリ状態で、無担体の Y-90 を固化体内に沈殿とし保持できるので、Sr-90 と Y-90 の両者を水素製造に利用できる。この方法による固化体は大半がガラス質なので、廃棄物として長期間の安全な保管が容易である。

6. 今後の課題

文献に示されている水素製造実験には、Co-60 線源からの γ 線が用いられている。放射線による水素製造には、 β 線による水素製造実験も必要である。現在、原子力基礎工学研究部門が計画している放射性廃棄物からの β 放射線による水素製造実験や方法について、不明な点が多い。この線源開発は文献の情報を基に、水素製造実験に最適な物を目指した。今後、開発した Sr-90 固化体により、水素製造実験を行い、より最適な物を見出さなければならない。

Sr-90 固化体は β 線による水素製造実験に用いるための物である。実際に、Sr-90/Y-90 を用いて固化体を製造するには、FP から Sr-90 のみを分離しなければならない。これには、新たな施設や装置の設置が必要となる。既存の施設を用い、装置を開発し、分離する場合でも、長期間を要する。

水素製造実験用の β 線源として原子炉を用い、 $^{89}\text{Y}(\text{n}, \gamma)^{90}\text{Y}$ により生成させた Y-90 を用いる方法が考えられる。 ^{89}Y の存在比は 100%、中性子捕獲断面積は 1.28b であり、大量製造が可能である。当面、Y-90 を用いた実験の方が、Sr-90/Y-90 線源を用いるより、早期に実験可能で、水素製造条件の確立に役立つと考えられる。

将来に向けては、FP からの分離工程も含め、一連の Sr-90 固化体の大量製造方法の確立が必要である。このためには量産化実験を行い、ゲルの切断、洗浄、乾燥等の具体的条件を確立しておく必要がある。

この Sr-90/Y-90 線源の製造方法開発では、金属粉末や金属イオンを含む固化体の開発は実施していない。この開発も今後の課題である。

β 線または γ 線の個々による効率的な水素製造方法が開発され、実用性を有するなら、FP を固化体とし内部線源とする方法が具体化する。FP を触媒と共にシリカゲルで固化体とし、使用できるなら、放射性廃棄物を資源化することが可能となる。

謝辞

シリカゲルの製造について、富士シリシア化学株式会社の伊藤陸弘工学博士から、具体的なご指導を頂いた。燃料サイクル安全工学部プロセス安全研究室の森田泰治氏からは、Sr Treat の譲渡や Sr-90 との反応について、ご指導頂いた。また、本報告を纏めるにあたり、橋本和幸氏と佐川尚司氏にご指導頂いた。各位に深く感謝する。

参考文献

- 1) Y. Wada, et al., Prog. Nucl. Energy, 29 251 (1995)
- 2) S. Seino, et al., Radioisotops, 49 354 (2000)
- 3) K. Takayanagi , T. Kojima , R. Taniguchi , S. Okuda , S. Seino , T. Yamamoto
“PULSE RADIOLYSIS ON NANOPARTICLE DISPERSING AQUEOUS SOLUTION”
Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan
the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan (August4–6, 2004, Funabashi Japan)
- 4) 吉田 明子、田辺 哲郎、発明の名称：水素製造方法、公開番号：特開 2002-338201
(P2002-338201A)
- 5) 山岸 功、山口五十夫、久保田益充：“吸着及び触媒酸化法による郡分離試験廃液からの放射性核種の除去” JAERI-Research 2000-038 (2000) 2000 年 9 月

Table 1 実験の組合せ

No.	H ₂ SO ₄		Na ₂ SiO ₃		ゲル化時の Na ₂ SiO ₃ の濃度 (%)
	濃度 (M)	量 (ml)	濃度 (%)	量 (ml)	
1	1	200	12.5	152	5.4
2	2	100	12.5	155	7.6
3	4	50	12.5	155	9.5
4	6	33	12.5	154	10.3
5	3	67	24.0	79	13.0
6	4	50	24.0	79	14.7
7	6	62	24.0	151	17.0

Table 2 洗浄回数と導電率の関係

洗浄回数	ゲル化時水ガラス濃度			
	5.4%	7.6%	9.5%	10.3%
	導電率 (mS/cm)	導電率 (mS/cm)	導電率 (mS/cm)	導電率 (mS/cm)
1	13.4	16.4	15.3	17.2
2	5.11	4.99	3.80	2.57
3	3.52	2.90	1.91	1.72
4	2.28	1.18	1.06	1.10
5	1.49	0.74	0.54	0.30
6	0.98	0.36	0.32	0.21
7	0.54	0.21	0.20	0.15
8	0.29	0.19	0.15	0.13
9	0.17	0.05	0.03	0.02

Table 3 シリカゲルの健全性

No.	ゲル化時 Na_2SiO_3 濃度 (%)	シリカゲルの状態
1	5.4	透明性を有し、硬い粒
2	7.6	透明性を有し、硬い粒
3	9.5	透明性を有し、硬い粒
4	10.3	透明性を有し、硬い粒
5	13.0	約 50%が白色細粒
6	14.7	約 80%が白色細粒
7	17.0	白色細粒

Table 4 バッチ式による Sr Treat と反応した Sr^{2+} の量

試料 No.	経過時間 (min)	反応率 (%)	反応した Sr^{2+} の量 (g/g)
1	10	57.8	0.175
2	30	60.6	0.184
3	60	60.4	0.183
4	90	64.8	0.196
5	120	65.5	0.199
6	180	70.1	0.212
7	240	71.4	0.216
8	300	72.0	0.218
9	420	70.4	0.213

Table 5 カラム式による Sr Treat と反応した Sr²⁺の量

注液量 (ml)	注入 Sr 量 (mg)	流出した Sr の量 (mg/50ml)	Sr の反応量 (mg)
50	250	ND	250
100	500	ND	500
150	750	ND	750
200	1000	13	987
250	1250	60	1177
300	1500	111	1316
350	1750	133	1433
400	2000	159	1524
450	2250	129	1645
500	2500	186	1709
550	2750	175	1784
600	3000	201	1833

ND:検出限界以下

Table 6 Sr²⁺の溶出

SrTiO ₃ の試料量 (g)	溶液	Sr ²⁺ の溶出率 (%)
7.14	6 M HNO ₃	71.6
6.52	6 M H ₂ SO ₄	0
5.97	6 M HCl	40.6

Table 7 H₂SO₄を混合した酸による Sr²⁺の溶出

SrTiO ₃ の試料量 (g)	溶液	Sr ²⁺ の溶出率 (%)
4.359	6 M H ₂ SO ₄ 5 ml + 6 M HNO ₃ 50 ml	0.105
4.495	6 M H ₂ SO ₄ 5 ml + 6 M HCl 50 ml	0.018

Table 8 SrTiO₃ 粉末を含む固化体の比較

No.	SrTiO ₃ 粉末の混合量 (g)	SrTiO ₃ の混合率 [#] (%)	焼結体の状態
1	0.542	4.8	硬く安定している
2	1.564	12.6	硬く安定している
3	3.326	23.5	硬く安定している
4	5.588	34.1	硬いが脆い

#SrTiO₃ 粉末を含まない焼結ゲルの重量を 10.8 g とした。Table 9 SrSO₄ 沈殿の化学的安定性

酸の種類	Sr の溶解量 (mg)	溶解率 (%)
6M HNO ₃	106	5.2
6M HCl	47	2.3

Table 10 SrSO₄沈殿の化学的安定性

酸の種類	Sr の溶解量 (mg)	溶解率 (%)
6M HNO ₃ + 6M H ₂ SO ₄	19.3	0.95
6M HCl + 6M H ₂ SO ₄	0	0

Table 11 実験の組合せ

No.	12.5% Na ₂ SiO ₃ の量 (ml)	SrSO ₄ の量 (g)	TiO ₂ の量 (g)
1	156	0	0
2	154	0.305	0.304
3	156	0.623	0.620
4	154	1.026	1.031
5	155	1.543	1.513

Table 12 粉末の混合率と固化体の重量

No.	混合粉末の量 (g)	粉末の混合率 (%)	固化体の重量 (g)
1	0	0	12.718
2	0.609	4.6	13.266
3	1.243	8.9	13.912
4	2.057	14.0	14.683
5	3.056	19.5	15.693

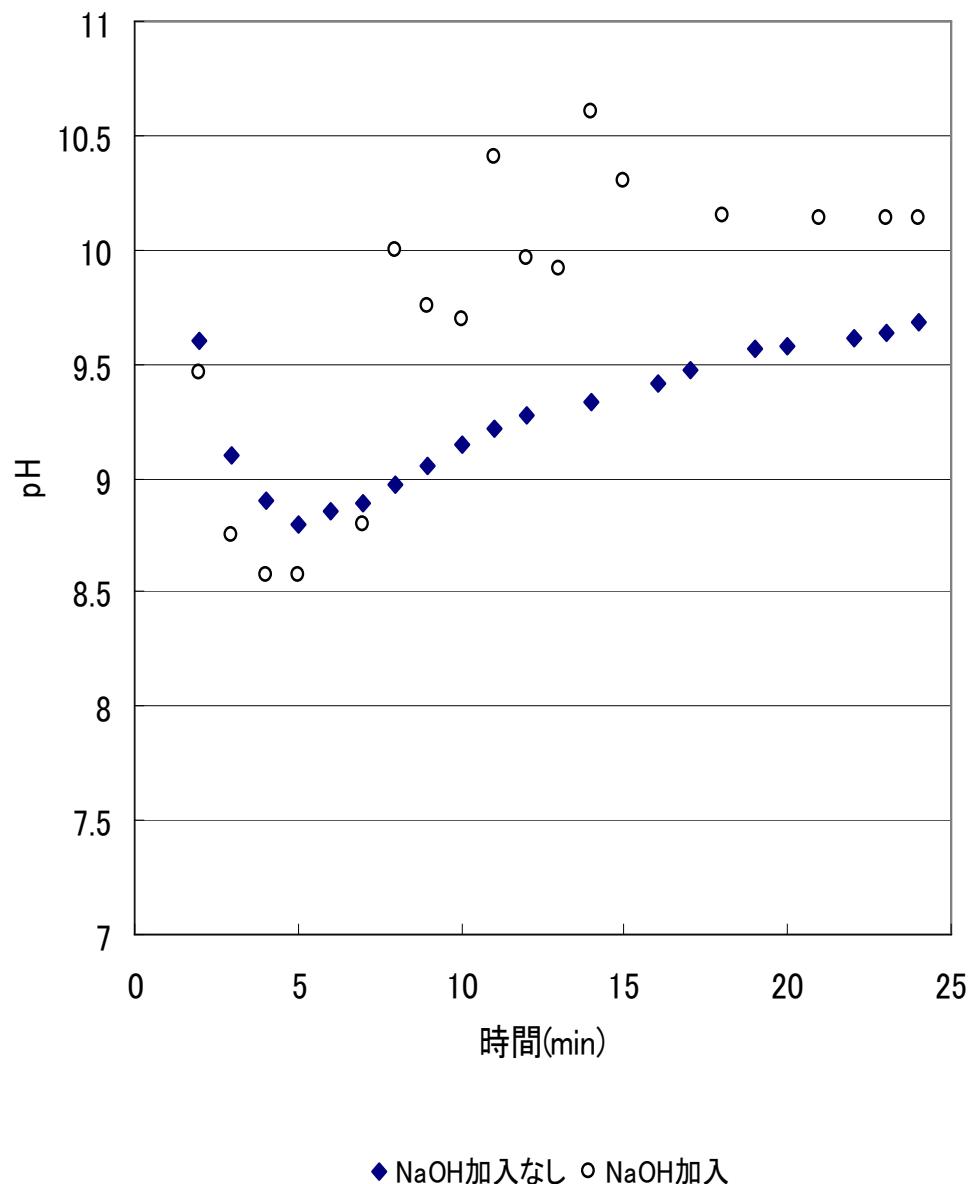


Fig. 1 Srのバッチ式吸着時のpH

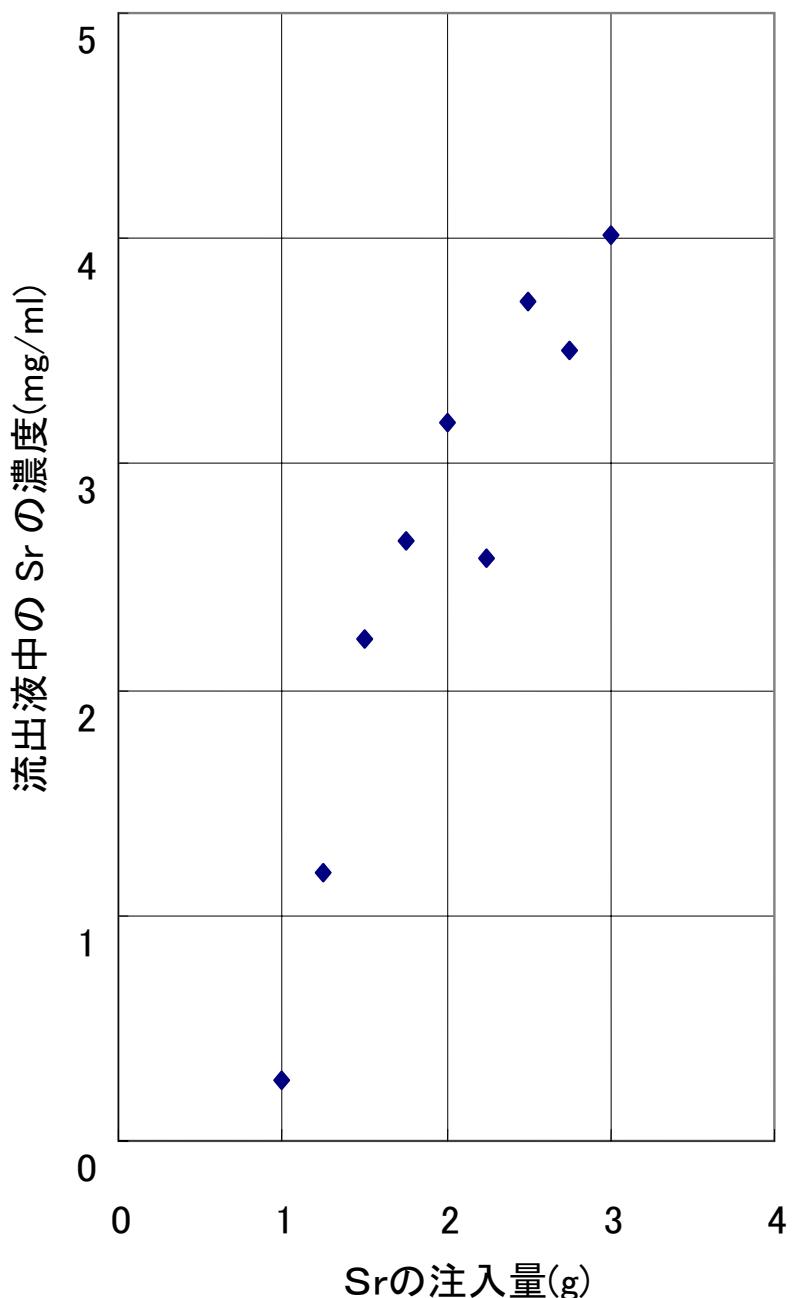
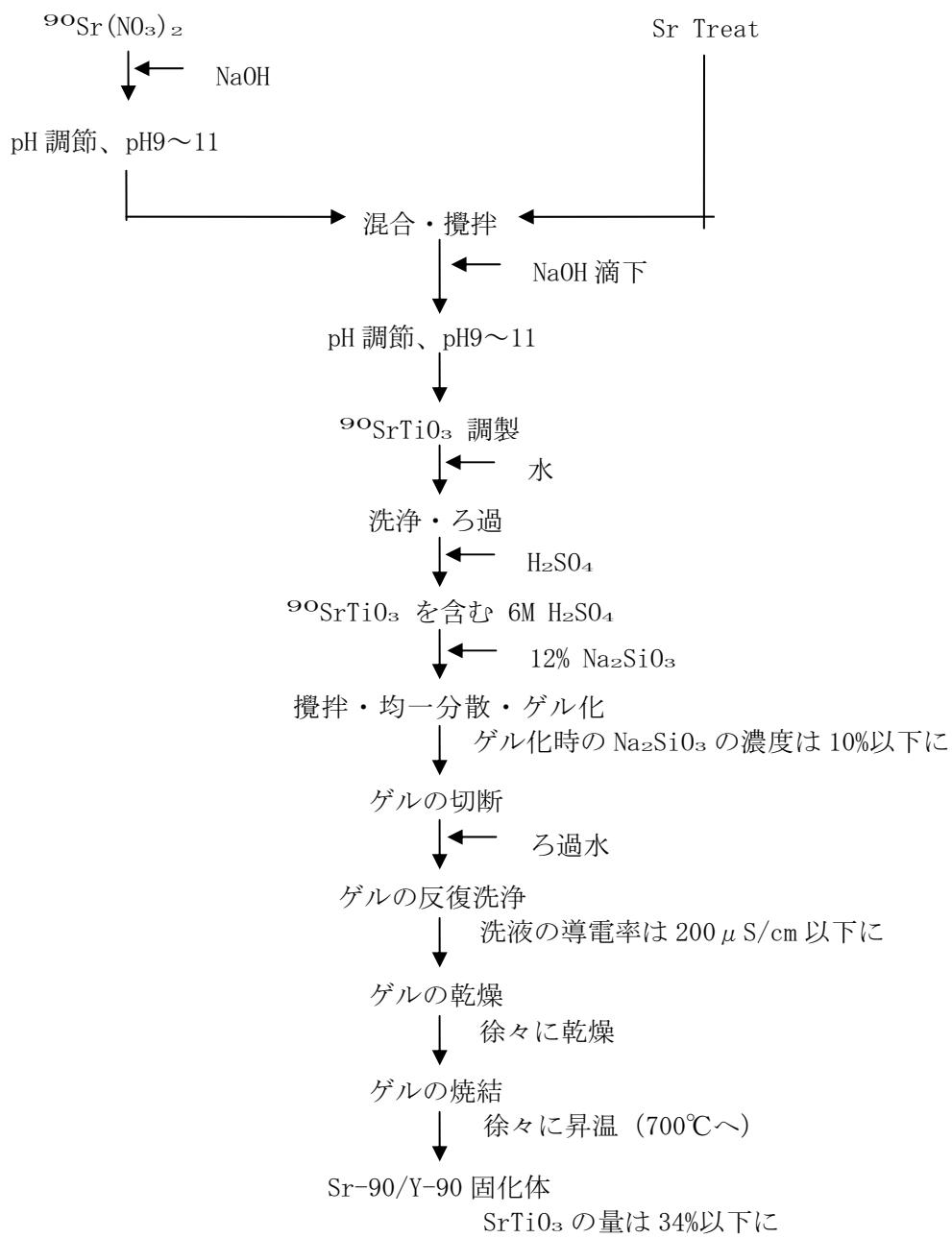


Fig.2 Sr Treat カラムによる Sr の吸着

Fig. 3 SrTiO_3 ・シリカゲル法のフローシート

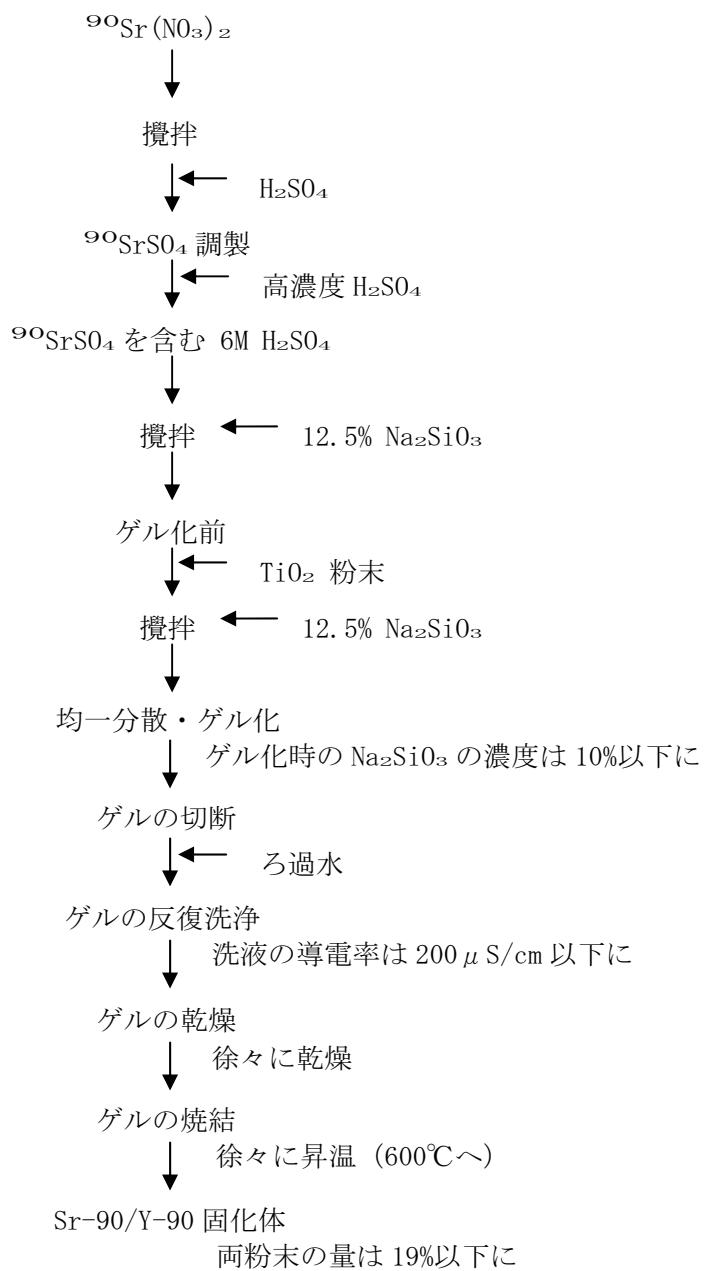
Fig. 4 SrSO₄ · シリカゲル法のフローシート



Photo. 1 SrTiO₃の固化体

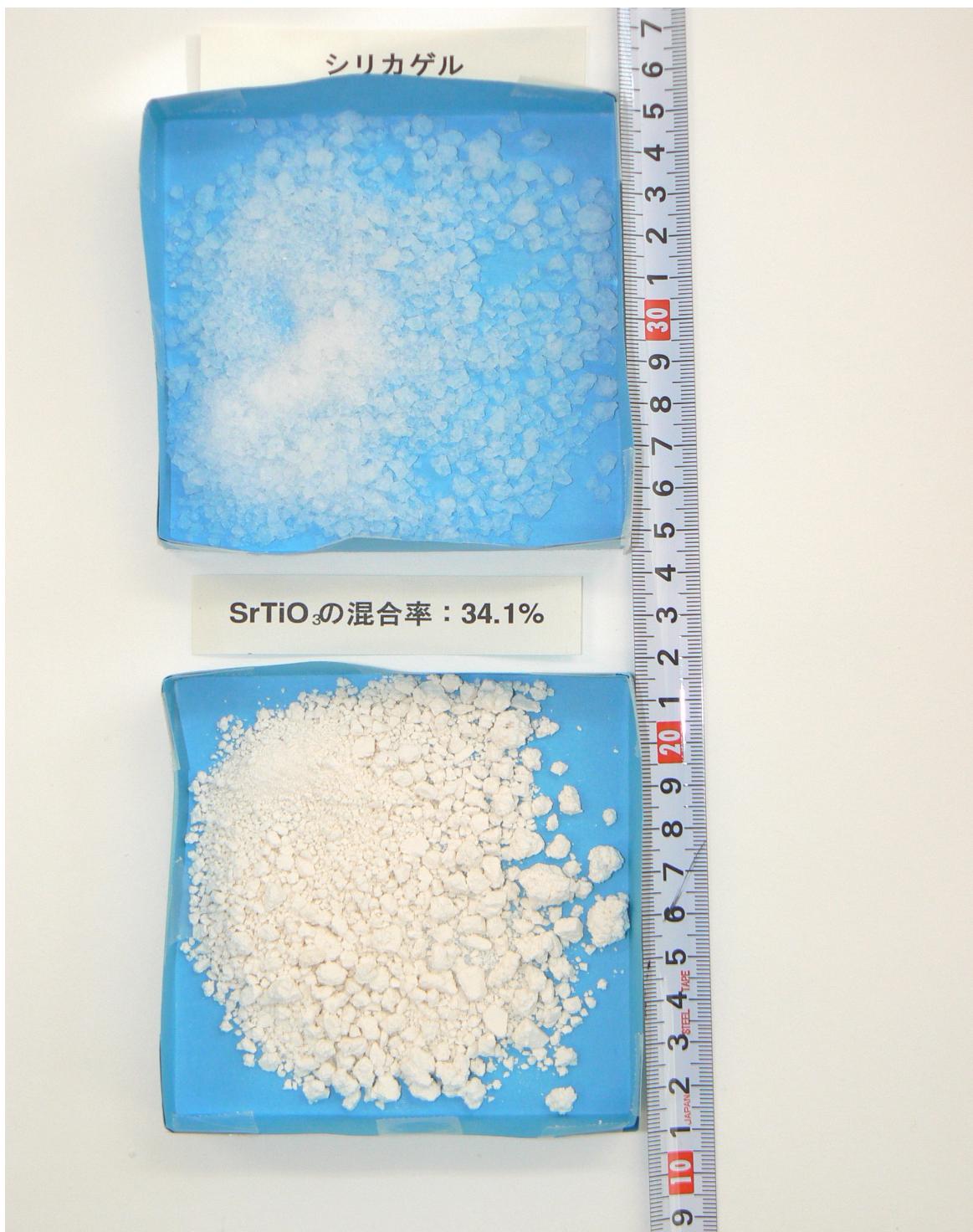


Photo. 2 シリカゲルと SrTiO₃の固化体との比較



Photo. 3 SrSO_4 と TiO_2 の両粉末の固化体

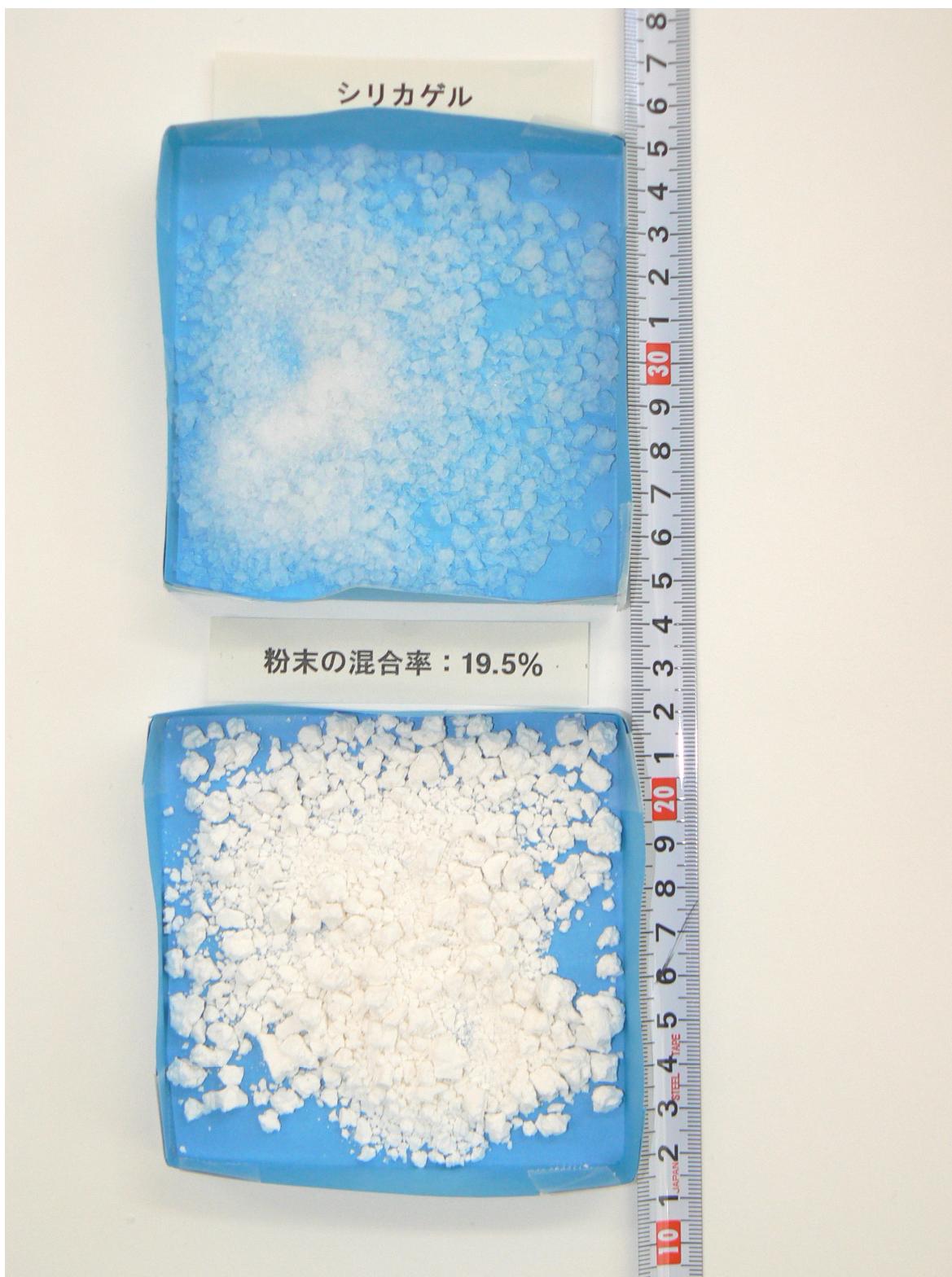


Photo. 4 シリカゲルと粉末の固化体との比較

This is a blank page.

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
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
屈折率	(数の)1	1

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
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$m \cdot m^{-1}=1^{(b)}$
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2}=1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
功率、放射束	ワット	W	J/s
電荷、電気量	クーロン	C	$s \cdot A$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	フアラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	$m^2 \cdot kg \cdot s^4 \cdot A^2$
コンダクタンス	ジemens	S	V/A
磁束密度	テスラ	T	A/V
インダクタンス	ヘンリー	H	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^2$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C	Wb/m^2
光束度	ルーメン	lm	Wb/A
(放射性核種の)放射能吸収線量、質量エネルギー分与、カーマ線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個々人線量当量、組織線量当量	ベクレル	Bq	$cd \cdot sr^{(c)}$
	グレイ	Gy	lm/m^2
			$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd=m^{-2} \cdot cd$
			s^{-1}
			J/kg
			$m^2 \cdot s^{-2}$
			J/kg
			$m^2 \cdot s^{-2}$

(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る性質をもつ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°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
粘度	パスカル秒	Pa·s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N·m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートン每メートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット每平方メートル	W/m ²	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エントロピー	ジユール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジユール毎キログラム	J/(kg·K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エントロピー	モル毎ケルビン	J/(mol·K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー(比エネルギー)	ジユール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m·K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジユール毎立方メートル	J/m ³	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジユール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー	ジユール毎モル每ケルモル	J/(mol·K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	ビン		
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量率	グレイ每秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每平方メートル	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m ² ·sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨーダ	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	ヘクタ	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

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	°	$1^\circ=(\pi/180) \text{ rad}$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(\pi/10800) \text{ rad}$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000) \text{ rad}$
リットル	L	$1L=1 \text{ dm}^3=10^{-3} \text{ m}^3$
トン	t	$1t=10^3 \text{ kg}$
ネーベル	Np	$1Np=1$
ベル	B	$1B=(1/2) \ln 10 (Np)$

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	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19} \text{ J}$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} \text{ kg}$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} \text{ m}$

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	里	1 海里=1852m
ノット	ト	1 ノット=1 海里每時=(1852/3600)m/s
アード	ル	$1a=1 \text{ dam}^2=10^2 \text{ m}^2$
ヘクタール	ha	$1ha=1 \text{ hm}^2=10^4 \text{ m}^2$
バル	bar	$1 \text{ bar}=0.1 \text{ MPa}=100 \text{ kPa}=1000 \text{ hPa}=10^5 \text{ Pa}$
オンストローム	Å	$1 \text{ Å}=0.1 \text{ nm}=10^{-10} \text{ m}$
ペー	ン	$1b=100 \text{ fm}^2=10^{-28} \text{ m}^2$

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	$1 \text{ erg}=10^{-7} \text{ J}$
ダイニン	dyn	$1 \text{ dyn}=10^{-5} \text{ N}$
ボアズ	P	$1 P=1 \text{ dyn} \cdot s/cm^2=0.1 \text{ Pa} \cdot s$
ストーカス	St	$1 St=1cm^2/s=10^4 \text{ m}^2/s$
ガウス	G	$1 G=10^{-4} \text{ T}$
エルステッド	Oe	$1 Oe=(1000/4\pi) \text{ A/m}$
マクスウェル	Mx	$1 Mx=10^{-8} \text{ Wb}$
スチール	sb	$1 sb=1cd/cm^2=10^4 \text{ cd/m}^2$
ホル	ph	$1 ph=10^4 \text{ lx}$
ガル	Gal	$1 Gal=1 \text{ cm/s}=10^{-2} \text{ m/s}$

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	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$
ラド	rad	$1 rad=1 \text{ cGy}=10^{-2} \text{ Gy}$
レム	rem	$1 rem=1 \text{ cSv}=10^{-3} \text{ Sv}$
X線単位		$1X \text{ unit}=1.002 \times 10^{-4} \text{ nm}$
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 \text{ nT}=10^{-9} \text{ T}$
ジャンスキ	Jy	$1 Jy=10^{-26} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$
フェルミ	fermi	$1 fermi=1 \text{ fm}=10^{-15} \text{ m}$
メートル系カラット		$1 \text{ metric carat}=200 \text{ mg}=2 \times 10^{-4} \text{ kg}$
トル	Torr	$1 \text{ Torr}=(101.325/760) \text{ Pa}$
標準大気圧	atm	$1 \text{ atm}=101.325 \text{ Pa}$
力口リ	cal	
ミクロ	μ	$1 \mu \text{u}=1 \mu \text{m}=10^{-6} \text{ m}$

