



JAEA-Testing
2012-004

Sr の回収に使用する無機イオン交換体としての 含水チタン酸の調製方法

Preparation of Hydrous Titanic Acid as an Inorganic Ion Exchanger for Sr Recovery

藤原 武

Takeshi FUJIWARA

安全研究センター
サイクル施設等安全研究ユニット

Fuel Cycle Safety Research Unit
Nuclear Safety Research Center

November 2012

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Testing

本レポートは独立行政法人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>)
より発信されています。

独立行政法人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
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

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, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2012

Sr の回収に使用する無機イオン交換体としての含水チタン酸の調製方法

日本原子力研究開発機構 安全研究センター サイクル施設等安全研究ユニット
藤原 武

(2012 年 9 月 13 日受理)

日本原子力研究所(現・日本原子力研究開発機構)で開発を進めてきた 4 群群分離プロセスでは、使用済核燃料の再処理に伴って発生する高レベル廃液(HLLW)から発熱性の元素群である Sr-Cs 群を分離回収する方法として、無機イオン交換体(天然ゼオライトと含水チタン酸の混合物)による吸着法を採用している。Sr の回収のために使用する含水チタン酸は、その機械的な強度が Cs の回収に使用するゼオライトと混合して使用する場合には十分ではなく、ゼオライト粒子によって破碎されて微粒子を発生することが知られている。調製法を検討した結果、既往の調製手順のうち、含水チタン酸の乾燥方法を変更した調製手順を採用したところ、ゼオライトとの混合物にしても容易には破碎されないだけの機械的な強度を持った含水チタン酸の粒子を得ることができた。

本報告書は、これらの変更点を導入した場合における含水チタン酸の調製手順と各調製操作における注意事項を取りまとめたものである。

Preparation of Hydrous Titanic Acid as an Inorganic Ion Exchanger for Sr Recovery

Takeshi FUJIWARA

Fuel Cycle Safety Research Unit, Nuclear Safety Research Center,
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 13, 2012)

In the 4-Group partitioning process developed in Japan Atomic Energy Research Institute (presently: Japan Atomic Energy Agency), a heat-generating nuclide group including Sr and Cs is separated by inorganic ion exchangers. Hydrous titanic acid and zeolite are used as the inorganic ion exchangers. The mechanical durability of the particles of hydrous titanic acid used for Sr recovery is not enough in case of mixing with zeolite used for Cs recovery. The method of drying the hydrous titanic acid was improved to provide sufficient mechanical durability to the product of hydrous titanic acid in case of mixing with zeolite.

A procedure of producing hydrous titanic acid from the raw material, titanyl sulfate, was established and documented with cares to be taken at each step.

Keywords : Hydrous Titanic Acid, Zeolite, Inorganic Ion Exchanger, Strontium, Cesium

目 次

1. 序論	1
2. 試薬	1
3. 調製手順	2
3.1 硫酸チタニルの溶解	2
3.2 含水チタン酸沈殿の生成	2
3.3 含水チタン酸沈殿の洗浄	3
3.4 含水チタン酸沈殿の固形化	4
4. まとめ	5
参考文献	6

Contents

1. Introduction	1
2. Reagent	1
3. Composite Procedure	2
3.1 Dissolution of Titanyl Sulfate	2
3.2 Preparation of Precipitate of Hydrous Titanic Acid	2
3.3 Rinsing of Precipitate of Hydrous Titanic Acid	3
3.4 Solidification of Precipitate of Hydrous Titanic Acid	4
4. Conclusion	5
References	6

This is a blank page.

1. 序論

日本原子力研究所(現・日本原子力研究開発機構)で開発を進めてきた群分離プロセス⁽¹⁾では、使用済核燃料の再処理に伴って発生する高レベル廃液(HLLW)に含まれる元素を、その半減期、発熱量、資源としての有用性等に応じて超ウラン元素群(Np、Pu、Am、Cm)、Sr-Cs 群、Tc-白金族元素群、その他の元素群の4群に分離することができる。これにより HLLW を一括でガラス固化することによって最終処分を行うよりも、より合理的な処分や有効利用を行うための選択肢を提供している。Fig.1 に4群群分離プロセスのフロー図を示す。4群群分離プロセスでは、HLLW から発熱性の元素群である Sr-Cs 群を分離回収する方法として、無機イオン交換体(天然ゼオライトと含水チタン酸の混合物)による吸着法を採用している⁽²⁾。これらの無機イオン交換体のうち、Sr の分離回収のために使用する含水チタン酸は、硫酸チタニル溶液をアンモニア水で中和することによって生成した沈殿物を洗浄したのちに 110°C の乾燥器内で乾燥し、所定の粒度に整粒したものを使用してきた^{(3),(4)}。しかし、この調製法で得られる含水チタン酸の機械的な強度は、Cs の分離回収に使用する無機イオン交換体であるゼオライトと混合して使用する場合には十分ではなく、含水チタン酸とゼオライトとの混合物を、例えば NUCEF 群分離試験装置⁽⁵⁾で採用している吸着カラムに充填して Sr-Cs 群の回収工程に使用すると、ゼオライト粒子との接触によって破碎された含水チタン酸の微粒子によって、吸着カラム出口の焼結金属フィルターが目詰まりすることが課題となっていた⁽⁶⁾。一方、上記の方法で調製した含水チタン酸にバインダを添加することによって造粒することも検討されたが、バインダの添加によって造粒した含水チタン酸では、造粒しない場合と比較して吸着速度が遅い上に吸着容量も低下してしまうことが知られていた⁽⁷⁾。このため、Sr-Cs 群の分離回収工程において天然ゼオライトと含水チタン酸の混合物を無機イオン交換体として使用するためには、ゼオライトとの混合物にしても容易には破碎されないだけの機械的な強度を持った含水チタン酸の粒子を調製する方法の開発が課題として残されていた。

筆者は上記の調製法のうち、含水チタン酸の乾燥方法を 110°C の乾燥器内で行う方法から 5°C の冷蔵庫内で行う方法を採用する等、調製法の一部を変更して独自の調製法を確立した。この調製法で得られた含水チタン酸の粒子は、ゼオライトとの混合物にしても容易には破碎されないだけの機械的な強度を持っており、含水チタン酸とゼオライトを対象とした焼結試験⁽⁸⁾において問題なく使用することができた。本報告書は、Sr の回収に使用する無機イオン交換体としての含水チタン酸の調製において筆者が採用した調製手順と、その各調製操作における注意事項を取りまとめたものである。

2. 試薬

含水チタン酸調製の原料試薬としては、キシダ化学株式会社製の硫酸チタニル(品位：化学用)を使用した。硫酸チタニル水溶液から含水チタン酸沈殿を生成させるための中和処理に使用するアルカリ試薬としては、小宗化学薬品株式会社製アンモニア水(品位：試薬特級)を使用した。硫酸チタニル試薬の溶解や含水チタン酸沈殿の洗浄には、メルク株式会社製の純粋製造装置 Milli-Q Biocel A-10 で製造した超純水を使用した。

3. 調製手順

群分離プロセスの開発において、Srの回収に使用する無機イオン交換体としての含水チタン酸には、これまで主に三井金属工業株式会社製の含水チタン酸を採用してきた。しかし、この含水チタン酸の調製法については、その濃度が約 2 mol/dm^3 の硫酸チタニル水溶液をアンモニア水で中和し、生成した沈殿を洗浄・乾燥(110°C)するとの調製手順の概略のみが知られていた。このため、Srの回収に使用する無機イオン交換体としての含水チタン酸を、独自に調製するに足るだけの具体的な調製操作に関する知見がなかった。一方、既往の調製法を整理すると、以下に示す調製手順を採用していることが分かる。

- ①硫酸チタニルの溶解
- ②含水チタン酸沈殿の生成
- ③含水チタン酸沈殿の洗浄
- ④含水チタン酸沈殿の固形化

そこで筆者は、各調製手順における具体的な調製操作を検討しつつ、Srの回収に使用する無機イオン交換体としての含水チタン酸を独自に調製することを試みた。以下に筆者が採用した各調製手順における具体的な調製操作と、その調製操作における注意事項等を述べる。なお、本調製手順によって得られた含水チタン酸を無機イオン交換体として使用するためには、含水チタン酸沈殿の固形化操作で得られた含水チタン酸の固まりを粉砕、ふるい分けしたのち、使用条件に応じたコンディショニング操作を行う必要がある。

3.1 硫酸チタニルの溶解

Fig.2 に含水チタン酸調製の原料試薬である硫酸チタニル($\text{TiOSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$: $n=1\sim 2$)から硫酸チタニル水溶液を調製する操作手順を示す。硫酸チタニルは水溶性の白色粉末であり、水に対するその溶解度は約 0.5 kg/dm^3 であることが知られている⁽⁹⁾。そこで、所定の硫酸チタニル試薬を秤量してガラス製ビーカーに投入したのち、硫酸チタニルの濃度が溶解度の半分以下となるように超純水を添加した。その後、テフロンライニングした攪拌子で連続的に攪拌することによって、硫酸チタニル水溶液を調製した。

本操作における注意点としては、溶解度に十分な余裕がある条件であっても、硫酸チタニルの試薬は水にすぐには溶解しないこと、並びに、得られる硫酸チタニル水溶液が強い酸性の水溶液となることである。なお、硫酸チタニル試薬と超純水を混合させた直後の懸濁状態が解消し、完全に溶解できたと判断できるまでには1時間以上の攪拌が必要であるものの、最終的には僅かに黄色みを帯びた硫酸チタニル水溶液を得ることができた。

3.2 含水チタン酸沈殿の生成

Fig.3 に硫酸チタニル水溶液から含水チタン酸沈殿を生成させる操作手順を示す。前述のように3.1の硫酸チタニルの溶解操作で得られる硫酸チタニル水溶液は酸性の水溶液であり、これにアルカリ試薬を添加することによって中和処理をおこなうと、含水チタン酸の沈殿物が生成する。添加するアルカリ試薬には既往の調製法と同様にアンモニア水を採用した。なお、アンモニア水

の添加量は 3.1 の操作で溶解した硫酸チタン試薬の量から予想される当量点に相当する量の 2 割増し程度とした。中和処理に際しては、3.1 の操作で使用した攪拌子を取り出したのち、シリコンゴム製の「へら」等を用いて手動で攪拌しながらアンモニア水を添加した。所定量のアンモニア水を添加後は沈殿物が均一になるようによく攪拌したのち、翌日まで放置することによって沈殿を熟成させてから後述する 3.3 の含水チタン酸沈殿の洗浄処理に進んだ。

本操作における注意点としては、この中和処理操作によって得られる含水チタン酸の沈殿物が非常に「かさ高い」沈殿物であるうえに、特に当量点付近では沈殿物の粘度がかなり高くなる傾向にあったことである。この当量点付近における沈殿物の粘度が高くなる領域においては、沈殿物を攪拌子による攪拌でスラリー状にすることは困難であり、十分な強度を持った攪拌棒等を使用して手動での攪拌混合操作を実施することが必須である。一方、今回実施した一連の含水チタン酸調製操作においては、3.1 から 3.3 の操作を 5 dm³ のガラス製ビーカーを調製容器として使用したため、金属製のさじ類を攪拌操作に使用すると、攪拌操作の過程で調製容器を破損することが危惧された。そこで、所定量のアンモニア水を添加し終えるまでの手動での攪拌操作に使用する攪拌棒には、シリコンゴム製の「へら」を採用した。なお、前述のように含水チタン酸沈殿の熟成を意図して翌日まで放置したとしても含水チタン酸沈殿は殆ど沈降せず、含水チタン酸沈殿が分散した含水チタン酸スラリーの状態が維持される。このため、3.3 の処理において最初に除去できる上澄み液はごく僅かにしかない。

3.3 含水チタン酸沈殿の洗浄

Fig.4 に含水チタン酸沈殿の洗浄の操作手順を示す。前述の 3.2 の含水チタン酸沈殿の生成操作で得られた含水チタン酸スラリーには、過剰に添加したアンモニア水や中和処理の結果として遊離した硫酸根等、最終的な含水チタン酸製品には不要な成分が含まれている。そこで、これらの含水チタン酸製品には不要な成分を除去することを目的として、含水チタン酸スラリーの上澄み液のたまかな pH を pH 試験紙で監視しながら、上澄み液の pH がほぼ中性になるまで含水チタン酸スラリーを超純水で繰り返し洗浄した。なお、洗浄対象となる含水チタン酸スラリーの量が少ない場合であれば、遠心分離後に上澄み液を排出して洗浄液としての超純水を添加し、振とう機で振とうすることによって、再度、含水チタン酸スラリーを分散させる操作を繰り返す方法を採用できる。一方、洗浄対象となる含水チタン酸スラリーの量が遠心分離処理にかけるには多すぎる場合には、静置によって出てきた上澄み液を排出したのちに洗浄液としての超純水を添加し、3.2 の操作と同様の方法で含水チタン酸スラリーを攪拌して再度分散させ、また静置することによって固液分離を行う操作を繰り返す方法で代用した。Fig.5 に静置によって出てきた上澄み液を除去する方法で含水チタン酸沈殿を洗浄した場合における洗浄回数と、上澄み液の pH および上澄み液中の硫黄の濃度との関係の一例を示す。なお、図に示した洗浄操作の際には、洗浄液として添加する超純水の量を洗浄操作一回当たり 2 dm³ に固定したが、洗浄操作一回当たりに排出できる上澄み液の量が一定ではないので、洗浄液による容存成分の希釈効果は一定ではない。上澄み液中に残留する硫黄の濃度測定のために分取した上澄み液の pH は、株式会社堀場製作所製のハンディメータ pH/COND METER D-54 により測定した。上澄み液中の硫黄濃度は、エスアイアイ・ナノテクノロジー株式会社製の卓上型 ICP 発光分光分析装置 SPS-7800 を用いてプラズマ発

光分光分析法により測定した。図に示すように、洗浄回数の増加に伴って上澄み液中の硫黄濃度は順次低下しており、上澄み液の pH が中性付近になるまで洗浄を繰り返した場合、含水チタン酸製品に不要な成分である硫黄濃度は4桁以上低減できるものと見込まれる。

本操作における注意点としては、超純水による含水チタン酸スラリーの洗浄を繰り返すにつれて含水チタン酸スラリーから得られる上澄み液の白濁が激しくなり、上澄み液と含水チタン酸スラリーとの境界の見極めが難しくなることが挙げられる。なお、この上澄み液の白濁は、一週間以上にわたる静置や卓上型遠心機(株式会社コクサン製 H-103N、ローター半径 16.5 cm)を用いた回転数 3,000 rpm での 10 分程度の遠心分離処理では解消しないが、孔径 450 nm のメンブレンフィルターを用いたろ過処理を施せば、上澄み液中から白濁粒子を除去することが可能であった。一方、含水チタン酸スラリーから得られる上澄み液の白濁が激しくなるにつれて、含水チタン酸スラリーから含水チタン酸沈殿は沈降しやすくなる傾向にあった。このことは、含水チタン酸スラリーには沈降性の良い成分と悪い成分が混在しており、洗浄操作を繰り返す過程で含水チタン酸沈殿から沈降性の悪い成分が除去されていることを示しているものと考えられる。ちなみに、調製する含水チタン酸製品に許容できる不要な成分の残留量は、その含水チタン酸製品の使用目的によって異なることが予想されるので、意図する含水チタン酸製品を得るために必要となる洗浄回数については別途検討が必要である。

3.4 含水チタン酸沈殿の固形化

Fig.6 に含水チタン酸沈殿の固形化の操作手順を示す。前述の含水チタン酸沈殿の洗浄操作で得られた洗浄後の含水チタン酸スラリーは、含水チタン酸の沈殿が水中に分散している状態にあり、そのままでは Sr を回収するための無機イオン交換体としてカラムに充填して使用することができない。そこで、この洗浄後の含水チタン酸スラリーから余分な水分を除去することによって含水チタン酸沈殿として固形化するため、遠心分離や圧搾等の機械的な方法で可能な限り脱水したのちに厚さが 2~3 cm になるような大きさの平滑なトレー状の容器に移し、庫内温度を 5°C に設定した冷蔵庫の中で水気がなくなるまで乾燥させた。なお、このような機械的な方法での脱水処理を施したのちであっても、まだかなりの水分が含水チタン酸スラリーの中には残っていたので、含水チタン酸スラリーを乾燥させていく過程でその体積は概ね 1/3 程度にまで収縮した。また、含水チタン酸スラリーから十分に水分が抜けて硬質のプラスチック状になるまでには、一週間程度の時間が必要であった。本操作によって得られた含水チタン酸沈殿の固まりの外観の一例を Fig.7 に示す。

本操作における注意点としては、3.3 の含水チタン酸沈殿の洗浄操作で得られる含水チタン酸スラリーの中には非常に粒子の細かい含水チタン酸の沈殿が含まれている関係上、ろ過による脱水が困難であることが挙げられる。ろ過以外の方法による脱水法を検討した結果、脱水処理の対象となる含水チタン酸スラリーの量が少ない場合であれば遠心分離による脱水が効率的であった。一方、遠心分離処理にかけるには多すぎる場合は、含水チタン酸スラリーを二重にした不織布に取り出し、圧搾によって脱水する方法で代用した。なお、これら何れの脱水方法を採用した場合でも、除去される水は含水チタン酸の微粒子が分散して白濁した懸濁液となることは避けられない。

4. まとめ

Sr の分離回収のために無機イオン交換体として使用する含水チタン酸は、既往の含水チタン酸の調製法によって調製した場合には、Cs の分離回収のために使用する無機イオン交換体であるゼオライトと混合して使用すると、微細な粒子に粉碎されてしまうことが課題として残されていた。筆者は、含水チタン酸の既往の調製手順を参考にしつつ、各調製手順における具体的な調製操作を検討し、ゼオライトとの混合物にしても容易には破碎されないだけの機械的な強度を持った含水チタン酸の粒子の調製を可能としたため、その調製手順を取りまとめた。今後の課題としては、本報告書で報告した含水チタン酸の調製手順では含水チタン酸の沈殿の洗浄や乾燥に非常に時間がかかること、吸着容量等の無機イオン交換体としての性能への影響も未解明であること等が挙げられる。

参考文献

- (1) M. Kubota, S. Dojiri, I. Yamaguchi, Y. Morita, I. Yamagishi, T. Kobayashi and S. Tani; "Development of Partitioning Method for Management of High-Level Liquid Waste", High Level Radioactive Waste and Spent Fuel Management, (*Proc. 1989 Joint Int. Waste Manage. Conf.*), **2**, p.537 (1989).
- (2) M. Kubota, K. Okada, I. Yamaguchi and Y. Morita: "Immobilization of Strontium and Cesium Using Hydrous Titanium Oxide and Zeolite", *Radioactive Waste Management Nuclear Fuel Cycle*, **7**(3), pp.303-316 (1986).
- (3) 久保田益充, 山口五十夫, 中村治人, 岡田賢造, 水野文夫, 佐藤淳和: "群分離法の開発: 無機イオン交換体カラム法による ^{90}Sr 及び ^{137}Cs を含む廃液の処理法の開発(共同研究成果報告)", JAERI-M 82-144 (1982).
- (4) 森良平, 山口五十夫, 久保田益充: "群分離法の開発: チタン酸、ゼオライト混合交換体カラムの Sr,Cs イオンに対する動的吸着特性", JAERI-M 86-013 (1986).
- (5) 山口五十夫, 龍ヶ江良三, 森田泰治, 近藤康雄, 白橋浩一, 山岸功, 藤原武, 藤本啓一, 谷津修, 藤田民義, 黒羽根史郎, 青山三郎, 久保田益充: "群分離法の開発: NUCEF 内に建設した群分離試験施設", JAERI-Tech 94-030 (1994).
- (6) 山口五十夫, 森田泰治, 近藤康雄, 山岸功, 藤原武, 渡邊雅之, 溝口研一, 龍ヶ江良三, 青山三郎, 久保田益充: "群分離法の開発: NUCEF 内群分離試験装置によるコールド試験(I)", JAERI-Tech 96-009 (1996).
- (7) 溝口研一, 山口五十夫, 森田泰治, 山岸功, 藤原武, 久保田益充: "群分離法の開発: バインダで造粒したチタン酸への Sr の吸着挙動", JAERI-Research 98-026 (1998).
- (8) 日本原子力研究開発機構: "平成 20 年度先進的地層処分概念・性能評価技術高度化開発報告書", (2009).
- (9) 日本化学会編: 改訂 4 版化学便覧基礎編 II, 丸善, p.171 (1993).

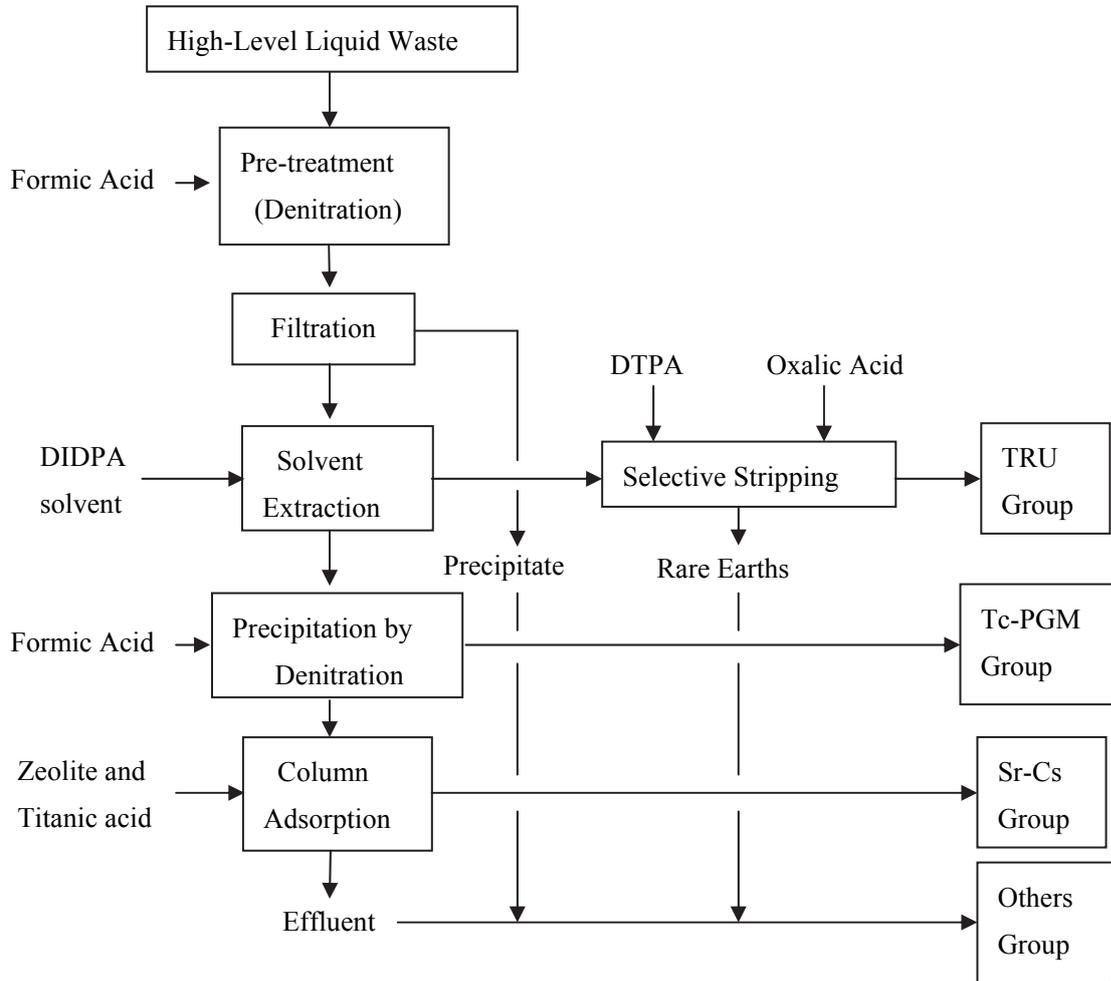


Fig.1 Flow sheet of 4-Group partitioning process.

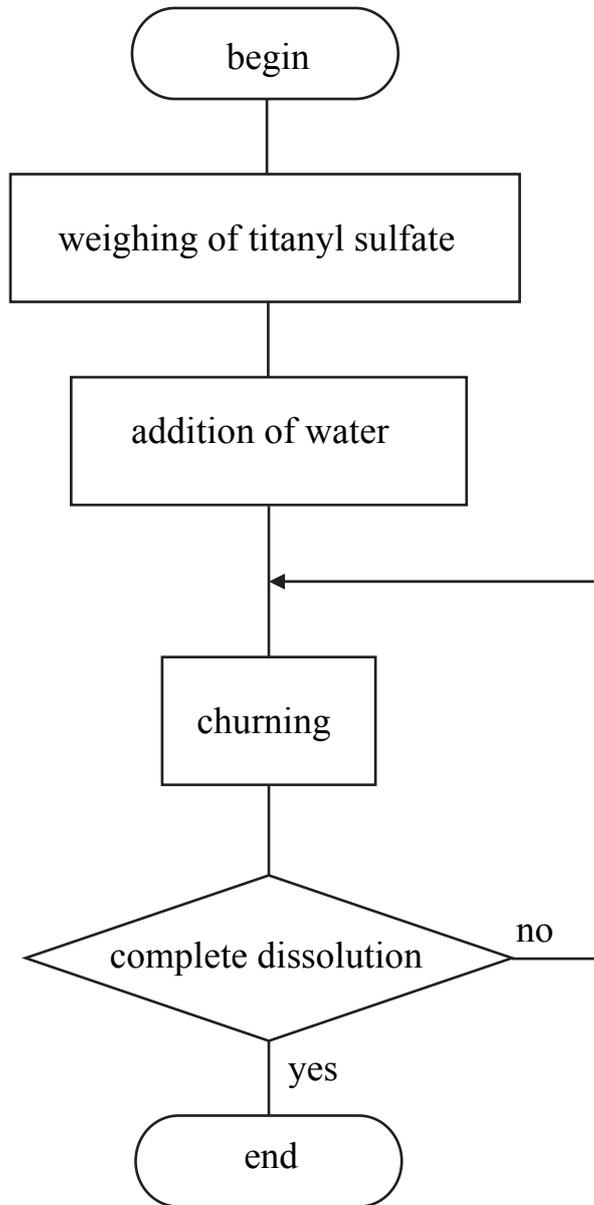


Fig.2 Dissolution procedure of titanyl sulfate.

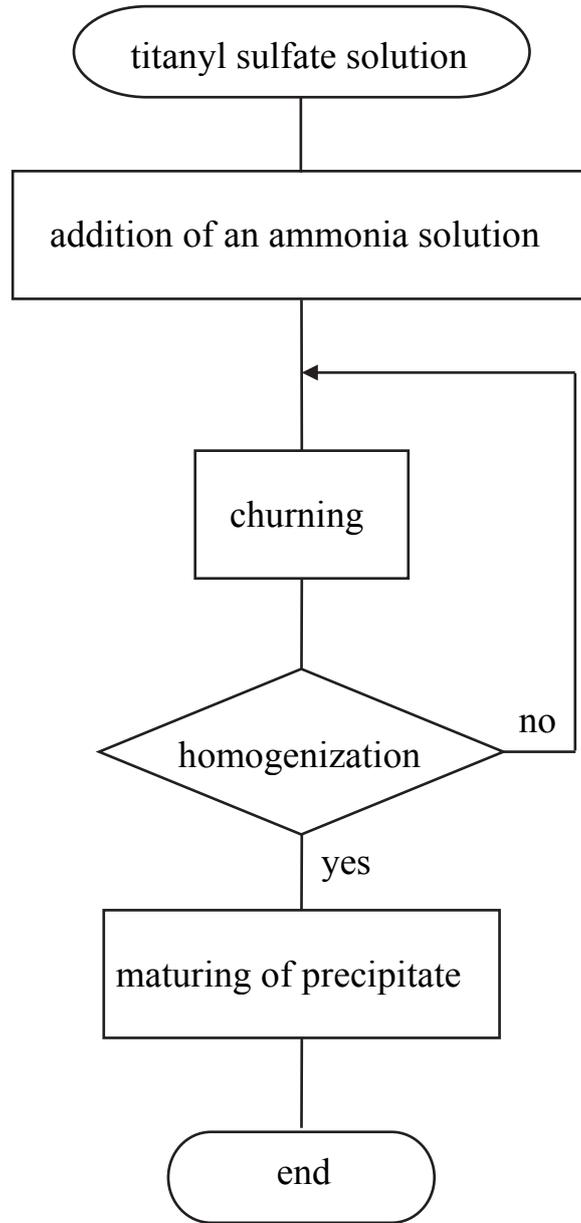


Fig.3 Preparation procedure of precipitate of hydrous titanic acid.

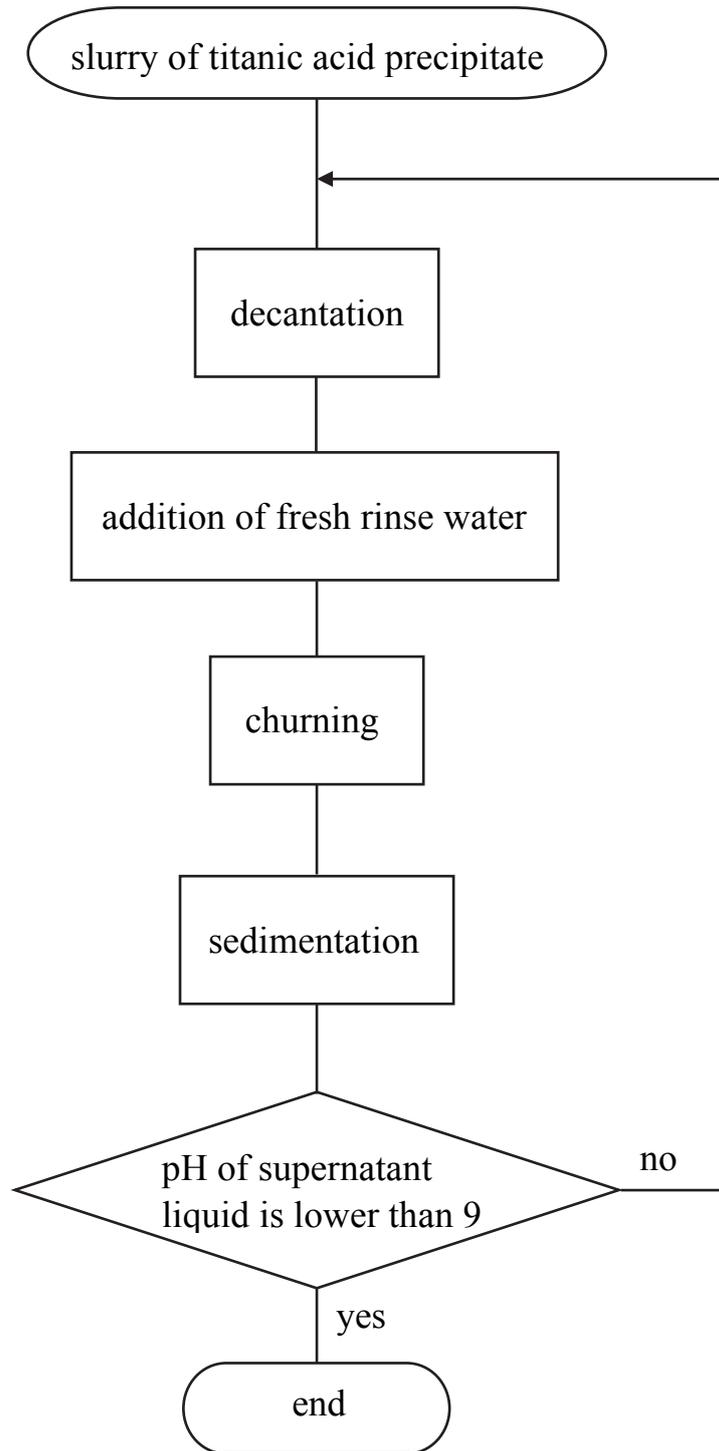


Fig.4 Rinsing procedure of precipitate of hydrous titanate acid.

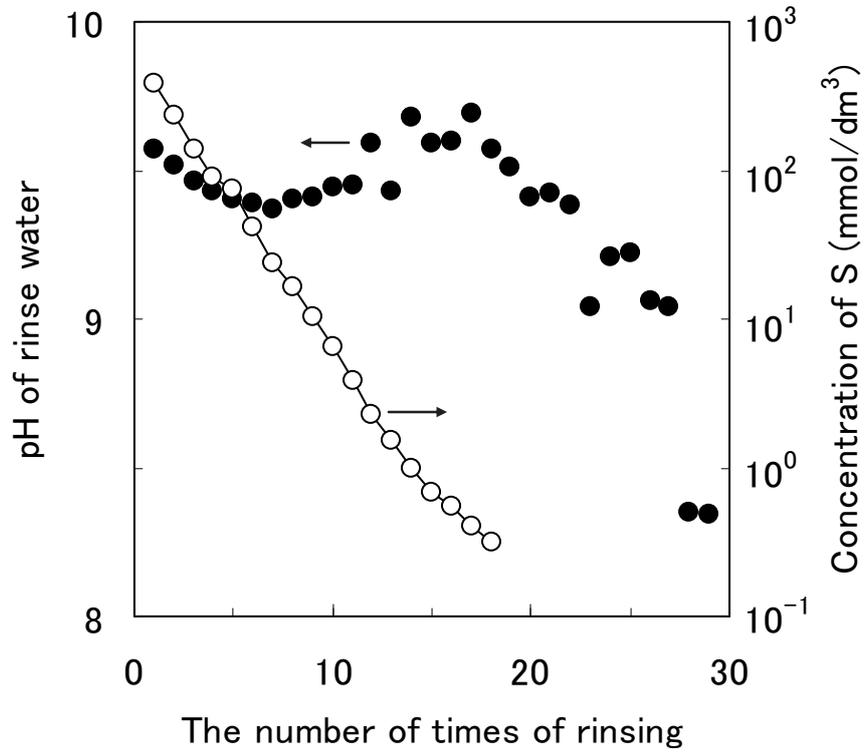


Fig.5 Transition of pH of rinse water and sulfur concentration accompanying a repetition of rinsing.

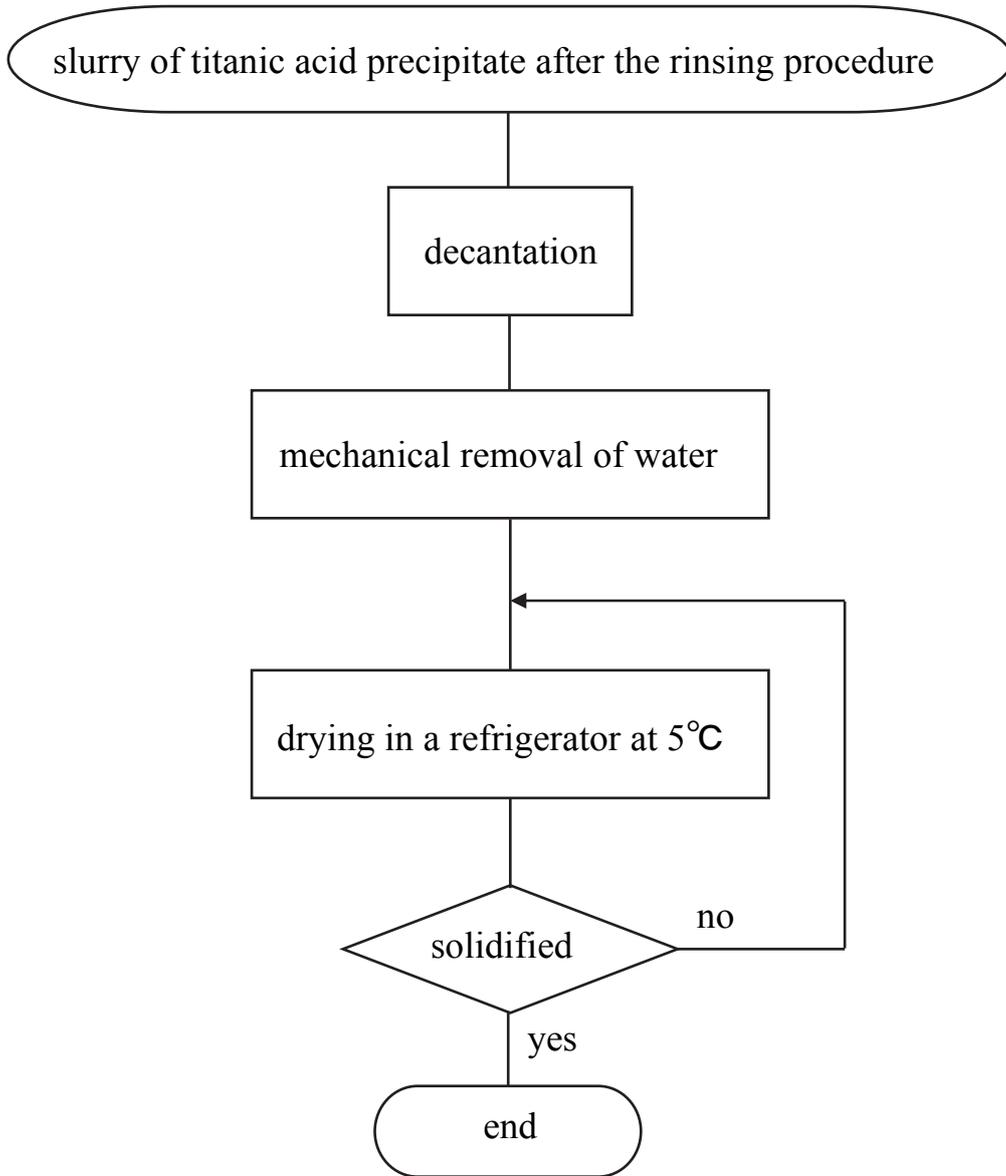


Fig.6 Solidification procedure of precipitate of hydrous titanic acid.



Fig.7 A lump of the dried hydrous titanic acid.

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	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	数メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方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
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表される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 ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz	1	s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射	ワット	W	J/s	m ² kg 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 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 s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束密度	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm		cd sr ^(c)
放射線核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。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である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみに使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CF-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含む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
粘着力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エントロピー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg 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 s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電表面積電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 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 ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg 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 ³ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg 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 s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

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6. SIに属さないが、SIと併用される単位

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=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、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単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm ²)=10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エル	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 ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
ストルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1G cm ² =10 ⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≡ (10 ³ /4π)A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≡」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
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
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	fm	1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

