

JAEA-Testing 2019-003 DOI:10.11484/jaea-testing-2019-003

共存物質を含むウラン廃液を対象とした廃液処理作業

Waste Liquid Treatment for Uranium Liquid Waste Containing Impurities

佐藤 義行 青野 竜士 原賀 智子 石森 健一郎 亀尾 裕

Yoshiyuki SATO, Ryuji AONO, Tomoko HARAGA, Ken-ichiro ISHIMORI and Yutaka KAMEO

原子力科学研究部門 原子力科学研究所 バックエンド技術部 Department of Decommissioning and Waste Management Nuclear Science Research Institute Sector of Nuclear Science Research

December 2019

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発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(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 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 Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, 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, 2019

JAEA-Testing 2019-003

共存物質を含むウラン廃液を対象とした廃液処理作業

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 原子力科学研究所 バックエンド技術部 佐藤 義行、青野 竜士、原賀 智子、石森 健一郎、亀尾 裕

(2019年10月9日受理)

放射性廃棄物管理技術課では、天然ウランを使用した試験で発生した廃液を許可条件に基づ き保管してきた。保管上のリスク低減の観点からは、処理を行い固形化することが望ましいが、これ まで安全かつ効率的な試験廃液の処理方法が確立されていなかった。そこで、ウラン吸着剤(タン ニックス)を使用した廃液の処理方法を検討した。把握した処理条件に基づき、ウランの吸着処理 等を行うとともに、最終的にセメント固化による安定化を行った。本報告では、類似した試験廃液を 処理する際の参考となるように、廃液処理における一連の作業に関して得られた知見をまとめた。 JAEA-Testing 2019-003

Waste Liquid Treatment for Uranium Liquid Waste Containing Impurities

Yoshiyuki SATO, Ryuji AONO, Tomoko HARAGA, Ken-ichiro ISHIMORI and Yutaka KAMEO

Department of Decommissioning and Waste Management Nuclear Science Research Institute Sector of Nuclear Science Research Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 9, 2019)

In the Radioactive Waste Management Technology Section, the radioactive liquid waste generated in the test using natural uranium in the past has been stored based on the contents of permission. Although we decided to perform solidification treatment in order to reduce the risk in storage, no rational treatment method has been established so far. Therefore, we examined adsorption treatment of natural uranium using uranium adsorbent (Tannix), and finally stabilized treatment by cement solidification. The treatment methods and findings obtained for a series of operations in waste liquid treatment are summarized in this report for reference when treating similar liquid waste.

Keywords : Natural Uranium, Tannix, Solid Phase Extraction, Cement Solidification

目次

1.	はじめに1
2.	ウラン廃液の概要2
3.	有機廃液の処理
4.	無機廃液の処理
5.	タンニックスの乾燥14
6.	セメント固化作業17
7.	まとめ
謝問	辞
参	考文献

Contents

1.	Introduction1
2.	Outline of radioactive waste liquid2
3.	Treatment of organic waste liquid5
4.	Treatment of inorganic waste liquid9
5.	Drying of Tannix14
6.	Cement solidification17
7.	Summary19
Ac	knowledgement
Re	ferences

図リスト

図1	処理前のウラン廃液	3
図 2	ウラン廃液処理フロー	4
図 3	有機廃液の逆抽出	7
図 4	有機廃液中の沈殿物	7
図 5	逆抽出で有機相と水相が混和した様子	8
図6	蛍光X線測定スペクトル	8
図 7	無機廃液中の結晶化した沈殿物	12
図 8	中和時に析出した沈殿物	12
図 9	タンニックスを用いたウラン吸着処理概略図	13
図 10	タンニックスを用いたウラン吸着処理	13
図 11	タンニックス乾燥後、全量灰化した様子(乾燥条件:450℃、1時間)	15
図 12	最適条件での乾燥前のタンニックス	15
図 13	最適条件での乾燥後のタンニックス(乾燥条件:200℃、4時間)	16
図 14	セメント固化後	18

表リスト

表 1	試験に使用したウラン廃液の概要	2
表 2	廃液濃度の測定結果	10
表 3	α 線測定結果	11

1. はじめに

バックエンド技術部放射性廃棄物管理技術課では、天然ウランを使用した試験で発生し た廃液を許可条件に基づき保管管理してきた。これらの廃液は試験の過程で添加された共 存物質を含んでおり、適切な安定化処理を行うためには、ウランを一度、共存物質から取り 除く必要がある。しかし、試験廃液の様な共存物質を含む溶液中からウランを分離するため の安全かつ効率的な処理方法が確立されていないことが課題であった。

そこで、ウラン廃液の処理に関して多くの知見と経験を有する三菱原子燃料株式会社の 協力のもと、三菱原子燃料株式会社製のウラン吸着剤(以下、「タンニックス」という。)¹⁾ を使用したウランの吸着処理方法について検討した。タンニックスを使用した場合、廃液を そのままセメント固化する場合に比べて、最終的なセメント固化体の容積が小さくなると 期待できる。また、廃液の処理方法として一般的な蒸発濃縮操作が不要となるため、試験廃 液の様な多種多様な共存物質を含むウラン廃液に対しては、特に高い安全性が期待できる。

本報告では、類似した試験廃液を処理する際の参考となるように、共存物質を含むウラン 廃液に対するタンニックスを使用した処理作業について検討し、処理方法の詳細な条件や、 得られた知見をまとめた。

2. ウラン廃液の概要

本試験で処理対象としたウラン廃液の概要を表1に示す。

表1 試験に使用したウラン廃液の概要

液性、含有物質	液量	核燃料の種類	核燃料質量	備考
	(L)		(g)	
有機(TBP*+ドデカン)、	8	天然ウラン	35	溶液中に赤褐色~黄色
その他共存物質有				の沈殿が存在
無機 (硝酸)、	12.5	天然ウラン	39	溶液中に薄黄色の結晶
一部有機物有				化した沈殿が存在

※TBP はリン酸トリ-n-ブチルの略である。

図1に示すウラン廃液は、天然ウランを使用した試験において発生したもので、試験の過 程でトレーサーとして添加された種々の共存物質を含んでいる。

ウラン廃液の液性及び共存物質を考慮して作成した基本処理フローを図 2 に示す。当課 では、通常、試験で発生した放射性廃液をエバポレーターにより蒸発濃縮しているが、ウラ ン廃液中に含まれる有機物や共存物質の影響で、濃縮した際に予期せぬ化学反応等が発生 する可能性を考慮し、吸着剤であるタンニックスを使用した処理工程を基本とした。なお、 段階ごとの操作については、個別の章で詳しく記載する。ウランを除去した後の廃液は、硝 酸性窒素濃度が排水限度を超えないように 10 倍以上希釈をすることを想定したため、α 線 放出核種の排水限度の 10 倍の値である 2×10⁻³ Bq/mL を処理後の放射能濃度の目標値とし た。



図1 処理前のウラン廃液



図2 ウラン廃液処理フロー

3. 有機廃液の処理

3.1. 概要

表1に示す通り、有機廃液中に沈殿物が存在しているため、まずデカンテーションにより 有機廃液と沈殿物とを分けた。廃液の主要成分はリン酸トリ-n-ブチル(以下、「TBP」とい う。)及びドデカンであるため、TBPにおけるウランの抽出挙動²⁾から、有機廃液に純水を 加えて振盪することによりウランの逆抽出を行った。逆抽出によりウランを除いた有機廃 液は、有機溶媒吸収材(以下、「SPHAG SORBTM」という。)に染み込ませて固形化処理を行 った。デカンテーションにより分けた沈殿物は、セメント固化の際にウラン吸着剤と混ぜて 安定化した。

3.2. 試薬·器具

- ・硝酸
- SPHAG SORBTM(Earth Care Products 製)
- ·酸素無透過袋
- ・ポリエチレン製 500 mL 分液ロート
- ハンドヘルド蛍光 X 線分析計(HORIBA 製 MESA Portable)
- 3.3. 操作
- 3.3.1. 有機廃液の逆抽出

沈殿物の性状を確認するために有機廃液と廃液中の沈殿物をデカンテーションによって 分離した。有機廃液については、ポリエチレン製 500 mL 分液ロートを使用して、有機廃液 中のウランの逆抽出を行った(図 3)。分液ロートに有機廃液 200 mL を入れた後、純水を 200 mL 加え蓋を閉め、有機相と水相を接触させるように、1 分×3 回振盪させた。振盪後、 10 分ほど静置させ、有機相と水相が分かれたことを確認してから、分液ロートを用いて分 離した。逆抽出によりウランを除いた有機廃液は、酸素無透過袋の中に SPHAG SORB[™]を 1 L 程度入れ、そこに 700-800 mL の割合で染み込ませた。

3.3.2. 有機廃液中の沈殿物の処理

有機廃液中の沈殿物については、一部を採取した後(図 4)、性状確認のためにハンドヘルド蛍光 X 線分析計を使用して、金属元素を対象とした元素分析を実施した。沈殿物には デカンテーションで完全に分離できない TBP が含まれていることから、溶液化して上澄み を混合した場合、TBP の影響によりタンニックスへのウランの吸着が妨げられることが予 想されたため、沈殿物はセメント固化の際に混ぜて安定化させた。

3.4. 結果

3.4.1. 有機廃液の逆抽出

有機廃液を保管している容器(5本)のうち、1本の容器において、純水を加え振盪させた後、有機相と水相が混和し分相できなかった(図 5)。TBPは硝酸等の接触による加水分解を起こすこと³⁾、また、Zrと混合により分解が促進されること⁴⁾が知られており、ジブチルリン酸、モノブチルリン酸、及びブタノールに分解され、それら分解物とZrが錯体を形成する。分解物であるジブチルリン酸及びブタノールは水にも有機溶媒にも溶ける性質を持つため、有機相と水相が混和したのは有機物の構造が長期保管により壊れていたこと、あるいは有機物が共存元素と結合するなどして親水基が生じた可能性が考えられる。

3.4.2. 有機廃液中の沈殿物の処理

金属元素を対象として測定した蛍光 X 線の結果を図 6 に示す。なお、沈殿物と同形状の 標準試料を作成することができなかったため、定性分析のみを実施した。蛍光 X 線分析の 結果、沈殿には Ca、Fe、U、及び Zn が含まれていることがわかった。長期保管により、抽 出剤である TBP の構造が壊れたために U-TBP 錯体が壊れ、U は親水性の化合物に変化した ために U を含む沈殿が生じた可能性が考えられる。



図3 有機廃液の逆抽出



図4 有機廃液中の沈殿物



図5 逆抽出で有機相と水相が混和した様子



図6 蛍光X線測定スペクトル

4. 無機廃液の処理

4.1. 概要

無機廃液の処理については、3 章において記述した逆抽出ウラン水溶液を合わせて処理を 行った。一部の廃液中に溶解度を超えて結晶化した沈殿物が確認されたため、デカンテーシ ョンにより無機廃液と沈殿物を分けて処理をした。廃液の液性は硝酸酸性であり、pH 測定 を行いながら中和処理を実施した。中和の過程で発生した沈殿物を濾過して、タンニックス を使用したウラン吸着処理を行った。

4.2. 試薬·器具

- ・硝酸
- ・2 mol/L 水酸化ナトリウム
- ・定性濾紙 No.2 (ADVANTEC 製)
- ・ タンニックス (三菱原子燃料製)
- ・カラム(内径 80 mm, 高さ 450 mm)
- ・pHメーター (SANSYO 製 SPH-71)
- ・定量送液ポンプ(EYELA 製 MP-2000)
- ・シリコンチューブ (EYELA 製 125520)
- ・プラスチックシンチレーション検出器(日立アロカメディカル製 JDC-5300)
- ・α線検出器 (ORTEC 製 Alpha Ensemble)

4.3. 操作

無機廃液と廃液中の沈殿物をデカンテーションによって分離した。分離して残った沈殿 物を図7に示す。沈殿物は溶解度を超えて析出した硝酸ウラニルであると考えられたため、 硝酸を加えるか、沈殿物が析出していない廃液と混合させることで全て溶解させた。全ての 無機廃液は酸性であったので、タンニックスのウラン吸着条件である pH 5 に調整するため 水酸化ナトリウムを少量ずつ加えて pH を調整した。pH 調整時に発生した沈殿については、 定性濾紙 No.2 を使用して濾過した。濾過時に回収した沈殿を図8に示す。少量の中和液で あれば、セメント固化の際の水として使用できるため、2回目以降はデカンテーションで上 澄み液のみを分離し、少量の中和液と沈殿物はセメント固化の際に混ぜて安定化した。

pH 調整した廃液は、約1Lのタンニックスを充填したカラムに通液してウランを吸着させた。このとき、定量送液ポンプを使用して通液速度を1Lhとなるように調整し、1次吸着液については再度約1Lのタンニックスを充填したカラムに通液させた(図9、10)。通液後の廃液は、プラスチックシンチレーション検出器を用いて放射能濃度を測定した。

pH 調整後の廃液と1次吸着液をそれぞれ3 mL 分取し、ステンレス皿に焼き付けて測定 試料の調製を行った。測定試料は、α線検出器(以下、「SSD」という。)を用いて測定し、 除染係数(以下、「DF」という。)を算出した。算出の際は、^{234,238}Uとして 3-4.8 MeV のエ ネルギー範囲での計数率を比較した。

4.4. 結果

全ての無機廃液で pH を 5 程度に調整する際に、薄黄色の沈殿が析出した。本廃液中のウ ラン濃度と水酸化ウラニル (UO₂(OH)₂)の溶解度積 Log K_{sp} = -20.87 を考慮すると⁵⁾、 pH 5 程度で溶液中のウランの一部が水酸化ウラニルとして沈殿する可能性がある。そのため、 pH 調整中に生じた黄色の沈殿物は水酸化ウラニルであると考えられる。一方で pH が 2 程度で 沈殿が析出する廃液もあり、共存物質が凝集核としてウランを共沈させたのではないかと 推測される。有機廃液に鉄が含まれていたように、無機廃液にも鉄が含まれていたと仮定す ると、水酸化鉄は鉄の濃度にもよるが pH 2~3 から沈殿を生じるため、鉄が凝集核として働 いた可能性が考えられる。

プラスチックシンチレーション検出器を用いた廃液濃度の測定結果を表2に示す。

	α線放出核種濃度(Bq/mL)
目標値	2×10 ⁻³
最終値	ND (< 1.2×10^{-3})

表2 廃液濃度の測定結果

廃液は硝酸性窒素の排水限度を超えないために 10 倍希釈することを想定しており、 α 線放出核種の排水限度は 2×10⁻⁴ Bq/mL であるため、2×10⁻³ Bq/mL を目標として廃液処理を 実施した。タンニックスによる 2 段階の吸着処理を通して、廃液の α 線放出核種濃度は検 出下限値で 1.2×10⁻³ Bq/mL という結果が得られ、目標を達成することができた。

初期のウラン廃液の濃度は約1×10⁻² Bq/mL であり、DF を下記の式を用いて算出し、

$DF = \frac{初期の廃液(Bq/mL)}{最終濃度(Bq/mL)}$

廃液処理全体で DF >8.3 となった。プラスチックシンチレータを用いた測定では、α 線の測 定に加え、β 線を同時に測定することができるが、機器のバックグラウンドが高いため、検 出下限値が高くなってしまう課題がある。

そこで、タンニックスによる1段あたりのウランのDFを算出するためにSSDによる長時間測定を行うこととした。しかし、pH 調整後の廃液と1次吸着液を3mL ずつ分取し、 それぞれステンレス皿に焼き付けたところ、どちらも多量の塩が析出した。これは廃液中の 硝酸と中和のために加えた水酸化ナトリウムによる硝酸ナトリウム塩であると考えられる。 pH 調整後の廃液と1次吸着液の塩の析出量は同程度であったため、自己吸収によるDFの 値に影響ないと判断し、SSDによるα線測定を行った。測定の結果を表3に示す。

表 3 α 線測定結果

	測定時間(sec)	計数 (cnt)	計数率(cps)
pH 調整後の廃液	70,000	321	4.6×10 ⁻³
1次吸着液	300,000	513	1.7×10^{-3}
BG	500,000	25	5.0×10 ⁻⁵

DF の算出は下記の式を用いて算出し、

$DF = \frac{pH 調整後の廃液(cps) - BG(cps)}{1 次吸着液(cps) - BG(cps)}$

DF=約3という結果になった。タンニックスは三菱原子燃料株式会社の転換工場廃液で使用されており、DFとして100程度で運用されている。一方、廃液中に共存物質が多い場合や、錯形成剤が混入している場合には、吸着性能が低下することが確認されており、本処理作業においても、同様の影響が出たものと考えられる。共存物質が多く含まれた廃液にタンニックスを用いる場合において効率よくウランの吸着を行うためには、あらかじめ共存物質の除去を行うことを検討する必要があることがわかった。なお、本廃液においては、2段のタンニックスカラムを使用することで共存物質の除去を行わなくても十分なDFが得られることがわかったため、共存物質の除去は実施せず2段のカラムを用いてウランの吸着を実施した。



図7 無機廃液中の結晶化した沈殿物



図8 中和時に析出した沈殿物



図9 タンニックスを用いたウラン吸着処理概略図



図 10 タンニックスを用いたウラン吸着処理

5. タンニックスの乾燥

5.1. 概要

タンニックスの乾燥については、最初に純水で湿らせたタンニックスを使用した乾燥条 件の検討を行った。その後、電気炉を使用してウランを吸着させたタンニックスの乾燥処 理を行い、減容させた。

- 5.2. 試薬·器具
- ・磁性皿
- ・時計皿
- ・ 電気炉(SHIROTA 製)

5.3. 操作

ウランを吸着させる前のタンニックス(非放射性)を少量磁性皿に取り、純水を滴下し 湿らせたものを作製した。飛散防止のため時計皿で蓋をして、電気炉を使用した乾燥条件 の検討を行った。その後、検討により決定した時間と乾燥温度を用いて、4章で記述した ウランを吸着させたタンニックスを磁性皿に入れ、電気炉で乾燥させた。最終的には電気 炉での乾燥条件を200℃、4時間とし、比較的低温で乾燥させた。

5.4. 結果

ウランを吸着させる前のタンニックスを使用した乾燥条件の検討では、タンニックスを 完全に灰化させると電気炉内で飛散する可能性があることから、微粉化が進まないように 450℃、1時間で乾燥させるのが最適であると判断した。この時の乾燥前と乾燥後の減容率 を目視で評価し、約1/3であることを確認した。

しかし、ウランを吸着させたタンニックスは、上記の最適条件でも完全に灰化してしまっ た。なお、時計皿で蓋をしていたため、電気炉内への飛散はなかった。灰化したタンニック スの様子を図 11 に示す。これは廃液中に含まれる共存物質が触媒となり、局所的に酸化反 応が進行したのではないかと推測される。例えば、タンニックスが鉄を多量に含む場合には、 酸化した際に発熱するため注意が必要である。含まれている共存物質等により灰化する温 度が異なるため、乾燥条件決定の際は、実際にウランを吸着させたタンニックスを少量使用 した検討を行う必要があることがわかった。

ウラン吸着済みタンニックスを磁性皿の中心に少量とり、200℃、4 時間で乾燥させたと ころ、表面が灰化する程度で、十分に乾燥することがわかった。ウラン吸着済みタンニック スを使用し、決定した最適条件(200℃、4 時間)で乾燥前のタンニックスと乾燥後のタン ニックスを図12、13 に示す。この乾燥条件では、表面以外は灰化せず、目視で評価し、高 温条件と同等の約1/3 まで減容することがわかった。



図 11 タンニックス乾燥後、全量灰化した様子(乾燥条件:450℃、1時間)



図 12 最適条件での乾燥前のタンニックス



図 13 最適条件での乾燥後のタンニックス(乾燥条件:200℃、4時間)

6. セメント固化作業

6.1. 概要

セメント固化については、3~5 章で記載した有機廃液中の沈殿物、中和処理で発生した 析出物、ウランを吸着させたタンニックスの乾燥体を混合する形で行った。

6.2. 試薬·器具

・200 mL ポリ瓶

- ・3Lポリ瓶
- ・セメント

6.3. 操作

固化対象物に有機物が含まれているとセメント固化を阻害することが考えられたため、 200 mL ポリ瓶を使用した予察試験を行った。200 mL ポリ瓶に有機廃液中の沈殿物や逆抽出 の際に水相と有機相が混和して分離できなくなった溶液などを少量ずつ加え、150 mL 程度 充填した後、セメントを約 30 mL 入れ、よくかき混ぜた。1 週間保管して固形化状況を確認 した。

予察試験の後、3Lポリ瓶に有機廃液中の沈殿物、中和処理で発生した析出物、ウランを 吸着させたタンニックスの乾燥体、水を加え、2L程度充填した後、セメントを約400mL加 え、よくかき混ぜた。かき混ぜることにより、水分がなくなってきたところで3Lポリ瓶の 蓋を閉め、約2週間フード内に静置して養生した。

6.4. 結果

予察試験の結果、共存物質などの沈殿物により固化が阻害されることなく固形化できる ことが確認された。3L ポリ瓶にスケールアップしても、同様の条件で問題なく固形化する ことができた。

保管されていたウランの放射性廃液は、初期量として約20Lであったが、最終的には3 Lポリ瓶2本でセメント固化することができた。ポリ瓶2本のセメント固化の様子について 図14に示す。有機廃液中の共存物質等の沈殿物が最終的なセメント固化対象物のうち半分 以上を占めていたため、沈殿物が生じない廃液であればさらなる減容効果が見込まれる。



図 14 セメント固化後

7. まとめ

長期保管されてきた天然ウランの放射性廃液に対して、三菱原子燃料株式会社の協力の もと、タンニックスを使用して固形化処理を実施した。一連の作業において、安全かつ効率 的に作業を行うことができ、目標とする放射能濃度までウラン濃度を低減させることがで きた。また、保管されていたウランの放射性廃液は、初期量が約20Lあったが、最終的に は3Lポリ瓶2本でセメント固化をすることができ、直接固化した場合と比較し、減容率と しては約1/4となった。有機廃液中の共存物質等の沈殿物が最終的なセメント固化対象物の うち半分以上を占めているため、このような減容率となったが、沈殿物のない廃液であれば、 3Lポリ瓶1本未満でセメント固化をすることができたと考えられる。

タンニックスを使用したウランの処理については、廃液中に抽出剤などが含まれている 場合、DFが低下するという課題が見つかったが、本廃液では抽出剤を除去せずにウランを 廃液中から除去することができた。抽出剤を除去した場合、抽出剤の除去作業に伴う2次廃 液が発生するが、タンニックスカラムへの通液回数を増やした場合は、タンニックスは乾燥 により減容できるため、最終的な放射性廃棄物量を減容することができた。タンニックスを ウランの廃液処理に適用する場合は、要求される放射性核種の除去率によって、廃液の性状 に合わせた前処理を実施するか、タンニックスへの通液回数を増加させるかを検討する必 要がある。

本報告では、種々の性状を有するウラン含有廃液を対象に処理方法や得られた知見をまとめた。今後、類似する試験廃液等を処理する際に参考にされることを期待する。

謝辞

共存物質を含むウラン廃液を対象とした廃液処理作業にあたりご協力をいただきました、 三菱原子燃料株式会社の濱口和彦氏、大和田進氏、渡辺瑞岐氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) K. Hamaguchi et al., Application of insoluble tannin to recovery of uranium, TRU and heavy metals elements from radioactive liquid waste, JAERI-Conf 99-004, pp.596-604, 1999.
- 2) P. Giridhar et al., Extraction of uranium(VI) from nitric acid medium by 1.1 M tri-n-butylphosphate in ionic liquid diluent, J. Radioanal. Nucl. Chem., Vol. 265, No. 1, pp.31-38, 2005.
- 3) L. L. Burger, The Chemistry of TBP, Hanford Atomic Products Operation, HW-40910, 1958.
- 4) 木羽敏泰, 試薬中不純物の実験過程への影響例について, 分析化学, Vol. 17, No. 9, pp.1160-1165, 1968.
- 5) Sillen, L. G. et. al., Stability constants of metal ion complexes, Chemical Society, No. 17, pp.1-865, 1971.

_

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本単位				
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	Α			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
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							
AI 立 是 SI 組 立 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 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 ⁸						
質量濃度 キログラム毎立方メートル	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

	SI 旭立単位			
組立量	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
立体鱼	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 (b)	m^2/m^2
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	-	s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
E 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 束	ワット	W	J/s	m ² kg 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	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$
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	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{-2} A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	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
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(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

酸素活性(1) ダール kat [s¹ mol]
 (w)SH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。
 (h)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。
 (a)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)へルツは周期現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。 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。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)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物告2(CI-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

	SI 組立単位		
組立量	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 kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	リ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)	$m^{2} s^{2} K^{1}$
比エネルギー	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
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘 電 卒	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ペンリー毎メートル	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
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
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	名称	記号	乗数	名称	記号		
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	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}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ		
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n		
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р		
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f		
10^3	+ 1	k	10^{-18}	アト	а		
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z		
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v		

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=60 s	
時	h	1 h =60 min=3600 s	
日	d	1 d=24 h=86 400 s	
度	۰	1°=(π/180) rad	
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad	
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad	
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²	
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³	
トン	t	$1 t=10^3 kg$	

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	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J	
ダル	- F	\sim	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg	
統一原	子質量単	単位	u	1 u=1 Da	
天 文	単	位	ua	1 ua=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=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{ m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	ci単位しの粉結的な間接け
ベル	В	対数量の定義に依存。
デシベル	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		
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J		
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N		
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s		
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$		
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$		
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx		
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²		
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$		
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T		
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)A m ⁻¹		
(a) 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	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$				L	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	"		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メー	ートル	/系	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
+1	ы		11	_		1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J
15	Ц		9		cal	(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$