JAEA-Research 2013-042



廃ゼオライトの長期保管方策の検討

— ゼオライト吸着塔を用いた塩分洗浄挙動評価(第1報)—

An Investigation for Long-term Storage of a Spent Zeolite Adsorption Vessel -Estimation of Washing Out Salt Component in a Spent Zeolite Adsorption Vessel (Part 1) -

佐藤 博之 寺田 敦彦 林田 均 上地 優 小林 順 山岸 功 森田 圭介 加藤 千明

Hiroyuki SATO, Atsuhiko TERADA, Hitoshi HAYASHIDA, Yu KAMIJI Jun KOBAYASHI, Isao YAMAGISHI, Keisuke MORITA, Chiaki KATO

> 大洗研究開発センター 大洗研福島技術開発特別チーム

Fukushima Project Team Oarai Research and Development Center

March 2014

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) 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, 2014

廃ゼオライトの長期保管方策の検討 -ゼオライト吸着塔を用いた塩分洗浄挙動評価(第1報)-

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター 大洗研福島技術開発特別チーム 佐藤 博之、寺田 敦彦、林田 均+1、上地 優 小林 順+1、山岸 功+2、森田 圭介+2、加藤 千明+2

(2013年10月23日 受理)

福島原発事故の滞留水処理でセシウム除去に使用されたゼオライト吸着塔(セシウム吸着装置) は、内部をろ過水で洗浄し保管されている。洗浄後に残留する塩分量によっては、吸着塔容器材 料の健全性への影響も懸念されることから、海水系小規模試験を通して、塩化物イオン(CI)の洗 浄効果の検証を進めている。洗浄状態は対象となる装置に依存することが考えられることから、 洗浄効果を確認するためには、実規模のセシウム吸着装置を用いた洗浄試験が必要である。

試験は、セシウム吸着装置内を 1,650 ppm-NaCl 水 (1,000 ppmCl⁻相当)で満水にした後に体 積流量 4.5 m³/h で純水を注入して洗浄し、吸着塔の排水からサンプルを取って Cl⁻イオン濃度を 計測した。その結果、吸着塔内の Cl⁻濃度は、吸着材充填体積の約 2 倍の通水量で 1,000 ppm か ら 0.5 ppm 以下にまで低下し、セシウム吸着装置において洗浄効果が高いことを確認した。

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 4002

+1 技術開発部

+2 東海研究開発センター 原子力科学研究所 原科研福島技術開発特別チーム

An Investigation for Long-term Storage of a Spent Zeolite Adsorption Vessel - Estimation of Washing Out Salt Component in a Spent Zeolite Adsorption Vessel (Part 1) -

Hiroyuki SATO, Atsuhiko TERADA, Hitoshi HAYASHIDA⁺¹, Yu KAMIJI Jun KOBAYASHI⁺¹, Isao YAMAGISHI⁺², Keisuke MORITA⁺², Chiaki KATO⁺²

Fukushima Project Team, Oarai Research and Development Center, Japan Atomic Energy Agency Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received October 23, 2013)

Spent zeolite adsorption vessels for cesium removal (Cesium adsorption vessels) in the Fukushima No.1 nuclear power plant are kept for long-term with washing out with fresh water. Soundness of adsorption vessels is concerned by residual concentration of salt component, effect of washing out chloride ion (Cl⁻) is inspected with miniature experiments using zeolite and seawater. It is considered that washing out condition is depending on that candidate, thus washing out experiment is necessary to carry out using full-scale and unspent adsorption vessel (KURION).

Cesium adsorption vessel is filled with 1,650 ppm of sodium chloride (1,000 ppm of chloride ion) and washed out with filtrate water for estimating washing effect in this experiment. Pure water is streamed with volume flow rate 4.5 m³/h, chloride concentration in vessel is measured with sample of drainage. 1,000 ppm of chloride concentration is decreased till 0.5 ppm and below by washing out with about double pure water volume of adsorbing material filling volume in vessel, washing out is more effective in Cesium adsorption vessel.

Keywords: Fukushima Nuclear Power Plant, Contaminated Stagnant Water, Zeolite Adsorption Vessel, Long-term Storage, Corrosion by Remaining Salt Component

⁺¹ Technology Development Department

⁺² Fukushima Project Team, Nuclear Science Research Institute, Tokai Research and Development Center

目 次

1.	はじめに	1
2.	試驗方法	2
2.1	1 吸着塔初期状態観察	2
2.2	2 塩分洗浄試験	2
3.	試験条件	3
4.	試験結果および考察	4
4.1	1 吸着塔初期状態観察	4
4.2	2 塩分洗浄試験	4
5.	まとめ	8
謝辞	<u>a</u>	8
参考	文献	9

CONTENTS

1.	Intr	oduction	.1
2.	Exp	erimental method	.2
	2.1	Observation of beginning condition of adsorption vessel	2
	2.2	Experiment washing out salt component	.2
3.	Exp	erimental condition	.3
4.	Res	ults and discussion	.4
	4.1	Observation of beginning condition of adsorption vessel	4
	4.2	Experiment washing out salt component	.4
5.	Con	clusion	.8
Ac	know	ledgement	.8
Re	eferen	ces	.9

表リスト

Table 3.1	NaCl水注入条件	.10
Table 3.2	残留塩分洗浄試験条件	.10
Table 4.1	NaCl水注入時試験結果	.11
Table 4.2	純水洗浄時試験結果	.13
Table 4.3	吸着塔純水洗浄後と NaCl 水注入直後の排水の Cl 濃度	18

図リスト

Fig. 1.1	福島第一原子力発電所水処理施設	19
Fig. 2.1	浄化装置に用いられている吸着塔概要	19
Fig. 2.2	試験装置概要	20
Fig. 4.1	試験に用いた吸着塔概要と吸着塔内部観察結果	21
Fig. 4.2	吸着塔排水の Cl 濃度(塩水注入時および洗浄時(4.5m ³ /h))	22
Fig. 4.3	吸着塔排水の Cl 濃度(純水流量の影響)	22
Fig. 4.4	吸着塔重量変化	23
Fig. 4.5	吸着塔圧力損失(NaCl水注入時)	23
Fig. 4.6	吸着塔排水の pH	24
Fig. 4.7	吸着塔純水維持中の Cl 濃度変化	24
Fig. 4.8	純水洗浄後 CI 濃度に対する CI 濃度割合と維持日数の影響	25

1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震と津波により、福島第一原子力発電 所では商用電源および自家発電が絶たれ、炉心に冷却水を供給できないことからシビアアク シデントに至り、さらに原子炉格納容器の健全性が維持できない状態に至った。その際、炉 心冷却用純水が不足したことから一時的に海水を冷却水として用いたが、炉心を通り汚染さ れた海水と津波により建屋に侵入した海水、炉心冷却のために系統外から注入された真水、 さらには原子炉建屋破損部分から流入していると考えられている地下水が混じり大量の汚染 水が建屋内に滞留することになった。この滞留水中のセシウム処理を目的として、発電所敷 地内に水処理施設が造られ、滞留水はセシウムを吸着する浄化装置、塩分を逆浸透膜で除去 する淡水化装置を経て原子炉圧力容器に再注水する循環注水冷却システムが構築された。セ シウムを吸着する浄化装置にはKURION社のセシウム吸着装置が用いられている(Fig. 1.1)。 浄化装置に用いられている吸着塔は、内部をアルミノケイ酸塩ゼオライトである Herschelite で充填されており、塩分の混じった汚染水からセシウムを吸着し、一定の放射線レベルに達 した時点で吸着塔の交換作業が行なわれている。使用済みの吸着塔は、塩分による腐食を抑 制するためにろ過水を通して吸着塔内を洗浄し、水抜き・乾燥を行った後に処理・処分技術 が確立するまで長期保管される。しかしながら、洗浄後に残留する塩分量によっては腐食へ の影響も懸念される。

原子力機構では、海水系小規模試験[1]を実施し、塩化物イオン(CI)の洗浄効果の検証を進めている。長期保管を想定した使用済み吸着塔腐食評価に必要な洗浄状態は、洗浄対象となる装置に依存することから、本試験では、未使用のセシウム吸着装置を用いて洗浄試験を行うこととした。試験計画としては、純水の体積流量 9.0 m³/h まで実施する予定である。本報告書は、通水量の影響を確認するために行った残存塩分挙動評価についてまとめたものである。

2. 試験方法

2.1 吸着塔初期状態観察

未使用のセシウム吸着装置の初期状態(塩分洗浄試験前の状態)を把握するために、吸着 塔内の観察および重量測定を実施した。吸着塔概略図を Fig. 2.1 に示す。

(1) 吸着塔内部観察

未使用のセシウム吸着装置内の状況を把握するために、吸着塔を試験ループに接続する前 に、吸着塔上部のベント管接続部から吸着塔内部にファイバースコープを挿入し、吸着塔内 部状況の観察・写真撮影を行った。

(2) 水分状態測定

ファイバースコープを吸着塔出口配管から挿入し、吸着塔内部の残留水の確認を行った。 また、吸着塔重量をロードセルで計測し、内部水分状態を推測した。

2.2 塩分洗浄試験

試験ループは、吸着塔本体、NaCl水供給装置、純水供給装置からなる。NaCl水供給装置 は吸着塔に供給する NaCl水を製造し、タンク貯蔵及び供給する設備であり、純水製造装置 は水流動伝熱試験室の各試験装置に供給する純水または純化水を製造し、タンク貯蔵及び供 給する設備である。

吸着塔内の残存塩分の推定評価を行うために、吸着塔内に NaCl 水を注水し一定濃度に達した後に純水を注入して洗浄した。洗浄時間および純水の体積流量を試験条件として、純水による洗浄を実施し、排水中の塩化物イオン(以下、Cl)濃度の時間変化を測定した。試験ループの概要を Fig. 2.2 に示す。

(1) NaCl 水注入時

NaCl水供給装置で1,000 ppm Cl (1,650 ppm NaCl 相当)濃度のNaCl 水 3,000 L を作製した。NaCl 水作製の際には、NaCl が溶けずに残留する可能性があるので、NaCl 水供給装置を4.5 m³/h (75 L/min) で循環させながら、別の小さな容器でNaCl を徐々に溶かしてからNaCl 水タンクに注入し、再度 NaCl 水タンクから水を小さなタンクに汲み出して NaCl を溶かした。

次に、バルブを切り替え NaCl 水供給装置から NaCl 水を吸着塔の入口管へ 4.5 m³/h (75 L/min) で給水した。このとき、吸着塔出口液の Cl 濃度を導電率計、イオンメーターにて測定・監視した。吸着塔出口液の Cl 濃度がほぼ 1,000 ppm で一定になるまで NaCl 水を NaCl 水供給装置から供給した。NaCl 水注水時には、吸着塔の圧力損失計測用としてポンプ出口 圧力および吸着塔出口圧力を計測した。また、吸着塔の重量をロードセルで計測した。Cl 濃度については、ICP 発光分析装置(高周波誘導結合プラズマ発光分光分析装置)による測定用として、一定時間ごとに排水をサンプリングした。

(2) 純水洗浄時

CI 濃度が一定になった吸着塔に純水を純水供給装置から給水ポンプで送り、バルブを切り 替えることにより吸着塔の入口管へ純水を供給した。3.の試験条件に従い、4.5 m³/h(75 L/min)、3.0 m³/h(50 L/min)または 1.5 m³/h(25 L/min)一定で給水した。このとき、吸 着塔出口からの排水を導電率計およびイオンメーターにて連続測定・監視した。また、吸着 塔の重量をロードセルで計測を行った。CI 濃度については、ICP 測定用サンプリング水を一 定時間ごとに採取した。

3. 試験条件

(1) NaCl 水注入条件

Table 3.1 に NaCl 水注入条件を示す。NaCl 水注入は、流速の変化等で吸着塔内の塩分濃度 分布が不均一にならないように体積流量 4.5 m³/h 一定の注入条件とした。注入時間は標準 30 分としたが、Cl 濃度または導電率計の指示が一定にならない場合は継続して NaCl 水注入を 行った。

(2) NaCl 水洗浄条件

Table 3.2 に残留塩分洗浄試験条件を示す。洗浄試験は、初期の Cl 濃度を 1,000 ppm 一定に し、純水の体積流量(4.5 m³/h (75 L/min)、3.0 m³/h (50 L/min)、1.5 m³/h (25 L/min)) および純水を流す時間(20、40、80、120 min)をパラメータとした。純水の体積流量は最大 9 m³/h の条件を予定しているが、通水量の影響を確認するために、今回は最大 4.5 m³/h の純 水洗浄条件で試験を実施した。

試験結果および考察

4.1 吸着塔初期状態観察

(1) 吸着塔内部観察

吸着塔は、吸着塔上部の入口配管に接続された吸着塔内上端のリング状の水入口管から注 水し、ゼオライト充填部を通過後に、同様に吸着塔内下端に設置されたリング状の水出口管 から排水され、リング状の水出口管に接続された吸着塔上部の出口配管から排水される。吸 着塔ベント管接続部からファイバースコープを挿入し撮影した内部写真を Fig. 4.1 に示す。 内部は砂状のゼオライトが、吸着塔内面の下面から約 1.78 m の高さまで充填されている。

(2) 水分状態測定

吸着塔出口配管からファイバースコープを挿入し、内部の水の状態を観察した。吸着塔内 面の下面から約 50 cm の高さで水面を確認し、メーカー搬出時の吸着塔内のゼオライトは湿 った状態で搬出されていると考えられる。ロードセルで計測した吸着塔重量は 2,175 kg であ った。

実測した吸着塔重量と設計上の吸着塔容器重量およびゼオライト充填量から内部水分量約 511 kg が得られた。ゼオライト充填層の充填密度および体積分率を考慮すると、高さ 50 cm 以下の水没部分だけでなく、高さ 50 cm 以上にあるゼオライトの粒子間にも水が存在してい ると考えられる。

4.2 塩分洗浄試験

吸着塔内のリング状の水出口管の入口部にはフィルタが設置されており、据付時の状態で使 用すると吸着塔の内のゼオライト粉末でフィルタが詰まってしまう恐れがある。実際に浄化装 置に使われている吸着塔は使用前に出口配管から注水し、入口配管から排水する「逆洗」を実 施している。そこで洗浄試験前の吸着塔について、3 m³/h で 60 分間、2 m³/h で 60 分間の逆洗 を行った。また、通常流れ方向で 2 m³/h で 60 分間洗浄を実施した。その後、ゼオライト内の 気泡を抜くために吸着塔を満水にした状態で2 日静置させ試験を実施した。

(1) 塩分濃度

吸着塔内に NaCl 水注入時の試験結果を Table 4.1 に、また、吸着塔内に純水注入時の試験 結果を Table 4.2 に示す。

吸着塔内に 4.5 m³/h で NaCl 水注水および純水洗浄した際の Cl 濃度の結果を Fig. 4.2 に 示す。横軸は NaCl 水注入および純水による洗浄時を含めた積算通水流量を吸着材の充填体 積で規格化し、縦軸は通水時の Cl 濃度を対数表示としている。なお、今回使用した NaCl 水は、希薄水溶液であることから、密度を 1 g/ml と見なし、Cl 濃度 1 ppm=1 mg/L として いる。

NaCl水の注入時の Cl 濃度は、1回目~3回目の試験の平均値である。NaCl水の注入時は、 吸着材充填体積の約 0.5 倍の注水量で Cl 濃度が上昇し始めている。これはゼオライト充填層 上部のヘッドスペースと、充填層のゼオライト粒子間の空隙の合計が充填層体積の 0.5 倍程 度であり、純水が押し流された後に NaCl 水により Cl 濃度が上昇したものと考えられる。その後、吸着材充填体積の約2倍の給水量より大きくなると Cl 濃度の減少傾向は小さくなる。

次に、純水による洗浄時の CI 濃度は、1 回目、2 回目、12 回目の試験の平均値である。純 水による洗浄時は、吸着材充填体積の約 0.5 倍の給水量で CI 濃度は低下し始め、吸着材充填 体積の約 2 倍の給水量で CI 濃度は 0.5 ppm 以下、洗浄前の 1/2,000 以下まで低下する。吸 着材充填体積の約 2 倍以上の給水量によりさらに CI 濃度が低下する傾向があり、Table 4.2

(5/5)の13回目の試験結果を見ると、吸着材充填体積の約4倍以上の給水量でさらに一桁 下がる傾向がみられるが、吸着材充填体積の約2倍までの給水量の洗浄効果に比べ著しく効 果は低下する。

純水による洗浄時の体積流量を 4.5、3.0、1.5 m³/h とした場合の CI 濃度の結果を Fig. 4.3 に示す。流量 3.0 m³/h の条件は、7 回目~9 回目の試験の平均値である。流量 1.5 m³/h の条 件は、10 回目、11 回目の試験の平均値である。いずれも流量 4.5 m³/h の条件と同様に吸着 材充填体積の約 0.5 倍の給水量で CI 濃度は低下し始め、その後、ほぼ同様の減少傾向が見ら れる。その後、吸着材充填体積の約 2 倍の給水量より大きくなると、流量 3.0 m³/h のデータ にばらつきがみられるが、流量 1.5 m³/h の条件においても CI 濃度の減少傾向は小さくなる。

流量条件により生じている CI 濃度の減少傾向の差異については、今後流量条件の範囲を広 げてその傾向を確認する予定である。

(2) 吸着塔重量

NaCl 水注入時の吸着塔重量を Fig. 4.4 に示す。吸着塔にはホースが接続されているため、 参考値である。横軸は NaCl 水注入および純水による洗浄時を含めた積算通水流量/吸着材 充填体積を、縦軸は通水時の吸着塔時間平均重量を示す。吸着塔は洗浄試験の最初に吸着塔 上部のベント管から空気を抜いた状態から大きな重量変化がないことから、試験条件によら ず吸着塔内水量はほぼ一定の条件で試験を実施していることを確認した。

(3) 吸着塔圧力損失変化

NaCl 水注入の際の吸着塔圧力損失を Fig. 4.5 に示す。横軸は、NaCl 水注入時(4.5 m³/h) の積算通水流量を吸着材の充填体積で規格化している。圧力損失は、NaCl 水注入時に NaCl 水タンクに設置されている圧力計と吸着塔出口に設置されている圧力計より出入口差圧を 求め、ヘッド分および配管の圧力損失を差し引いている。

吸着塔のリング状出口配管にはフィルタが設置されている。使用中にゼオライトから生じ た微粒子が徐々にフィルタに詰まり、吸着塔の圧力損失が増加することが懸念される。図よ り、流量 4.5 m³/h で NaCl 水を注入した場合、大きな圧力損失の変動は見られない。したが って、本試験のように希薄な NaCl 水と純水とを吸着材充填体積の約 50 倍流した程度では、 フィルタの目詰まりを起こすほどの圧力変動には至らないことがわかる。

(4) 水素イオン指数 (pH)

吸着塔内の pH の変化を Fig. 4.6 に示す。図の NaCl 水注水時のデータは、体積流量 4.5 m³/h

で吸着塔に NaCl 水を注水した 1回目~3回目の pH の平均値である。純水洗浄時のデータ は、体積流量 4.5 m³/h で吸着塔に純水を注水した 1回目、2回目の pH の平均値である。NaCl 水には NaCl 純度 99.5%以上の特級精製塩を用いており、NaCl 水および超純水の pH は 6.55 ~7.73の範囲であることから、塩分洗浄時における吸着材充填体積の約 1倍以降および NaCl 水注入時における吸着材充填体積の約 1倍までで観察される pH の上昇 (9.8~10.3) は、ゼ オライトとの相互作用によるものと考えられる。天然の Herschelite 鉱物を構成する主な元 素として、Na、K、Ca、Al、Si が報告されている[2]。KURION 社の Herschelite 吸着材が、 天然の組成に近いとすれば、Al と Si は Herschelite 構造に使われ、Na 等が交換可能なイオ ンとして存在している可能性がある。すなわち、純水と Herschelite が接触しているときは、 純水中の H+と Herschelite 中の Na 等交換可能イオンがイオン交換することで pH が上昇し、 NaCl 水と接触しているときは、水中に多量の Na+が存在するため H+とのイオン交換が抑制 され pH は 7 付近になったものと考えられる。

(5) Herschelite 吸着材層からの CIイオン浸み出し現象

アルミノケイ酸塩ゼオライトである Herschelite 自体は陽イオン交換性であり、CI イオン を取り込む能力は低い。しかし、何らかの理由で NaCl 水に浸された Herschelite 吸着材層 に CI が残留し、吸着塔純水洗浄後に時間をかけて浸み出す可能性も検討しておく必要があ る。例えば、吸着塔底部にある水出口管フィルタ面と底面の間には発熱対策のために隙間が あり、このような箇所で Herschelite 粒子間の洗浄が不完全となる可能性がある。吸着塔を 純水で洗浄後、再び吸着塔内を 1,000 ppm CI 濃度とするために NaCl 水を注入するが、そ の際、NaCl 水注入開始時に排出される洗浄水に浸み出した CI が含まれていることに着目し た。吸着塔洗浄後の CI 濃度と NaCl 水注入開始時の CI 濃度及び純水洗浄後の純水状態での 維持日数を合わせて Table 4.3 に示す。試験番号の 1~2 は、第1回純水洗浄終了後 CI 濃度 と第2回 NaCl 水注入直後の吸着塔出口の CI 濃度を示し、純水維持開始及び終了時の状態 を示す。

吸着塔純水維持中の CI 濃度変化を Fig. 4.7 に示す。試験番号ごとに純水洗浄後と NaCl 水 注入直後の CI 濃度を並べて記載している。図より、CI 濃度 1 ppm 以上の範囲では、純水維 持期間中に CI 濃度は若干の増減はあるがほぼ変わらない。一方、純水洗浄後の CI 濃度 1 ppm 以下の範囲では、純水維持期間中に一様に CI 濃度が増加していることから、NaCl 水で満た された吸着塔を洗浄後、極低 CI 濃度で維持した場合、吸着材層から CI イオンが浸み出し、 吸着塔上部より NaCl 水を注入することにより押し出されていると考えられる。Fig. 4.3 の NaCl 水注入時の給水量/吸着材充填体積が 0.5 以下の範囲においても、洗浄終了時 0.15 ppm 以下だった吸着塔内部の CI 濃度が、NaCl 水注入直後に 0.9 ppm 程度まで増加してか ら減少しており、これも吸着材層からの CI イオンの浸み出しによるものと考えられる。

純水洗浄後 CI 濃度に対する NaCl 水注入直後/純水洗浄後の CI 濃度割合と維持日数の影響を Fig. 4.8 に示す。図より純水洗浄後の CI 濃度 1 ppm 以下で NaCl 水注入直後/純水洗 浄後 CI 濃度は 1 以上となり、純水洗浄後 CI 濃度がさらに低くなると NaCl 水注入直後/純 水洗浄後 CI 濃度の割合は大きくなり、吸着材層からの浸み出しが顕著になることがわかる。 吸着塔内を純水状態で維持した場合の日数については、1 日以上 4 日以下の場合、ほぼ同様 の傾向を示しているが、0 日(約 3 時間)維持した場合、NaCl 水注入直後/純水洗浄後 CI 濃度は 1 日以上維持した場合の傾向より小さくなり、CI イオンが十分に浸み出していない状 態であると考えられる。

以上より、吸着塔内の NaCl 水を純水で洗浄後、Cl イオンが純水に浸み出す現象が確認さ れた。原因として、吸着材層に残留した Cl イオンが、ゆっくりと純水へ拡散していると考 えられる。今回の結果から、浸み出しの影響を緩和させるためには Cl 濃度が十分低くなる まで洗浄した後、吸着塔内を純水で満たした状態で1日程度維持し、Cl イオンが浸み出した 後に再洗浄することで、さらに洗浄効果を高める可能性がある。また、ある程度洗浄した段 階で、逆洗(底部から上部方向に純水を流す操作)して底部水を攪拌させ、再度、下方向へ 洗浄して終了することも洗浄効果を高める可能性がある。

現地での操作改善という観点では、再洗浄、逆洗などが容器腐食抑制に必須であるかを総合的に評価することが必要である。例えば、洗浄で 1/2000 まで CI 濃度を下げておけば、浸み出しによる CI 濃度の増加はほぼ変わらないか数倍程度である。また、実際の洗浄に使用されるろ過水に CI イオンが含まれている可能性があり、この場合、ろ過水の CI 濃度で洗浄効果が決まってしまう。

5. まとめ

福島第一原子力発電所で浄化装置に使われたセシウム吸着装置内の残留塩分の洗浄効果に ついて確認するために、未使用のセシウム吸着装置を用いた洗浄試験を行った。吸着塔内の Cl⁻濃度は、純水を体積流量 4.5 m³/h で吸着材充填体積の約2倍の通水量を流すことにより、 1,000 ppm から 0.5 ppm 以下にまで低下したことから、セシウム吸着装置における洗浄効 果が高いことを確認した。

また、吸着塔出口配管のフィルタにゼオライト微粒子が徐々に詰まることにより、吸着塔の圧力損失が増加することが懸念されたが、今回の試験のように純水および希薄な NaCl 水を体積流量 4.5 m³/h(浄化装置に使われている吸着塔は4系列で15 m³/h 程度~50 m³/hの処理流量)[3]の条件下で、吸着材充填体積の約50倍の積算通水量の範囲で流した限りでは、 圧力損失の増加はなかった。

塩分洗浄後の吸着塔内を純水維持中に吸着材層から Cl イオンが浸み出す現象を確認した。 操作改善により洗浄効果をより高める可能性はあるが、現地で調達できるろ過水中の Cl 濃 度等を踏まえた総合的な評価が必要である。

純水による洗浄時の体積流量により、CI 濃度の減少傾向に差異がみられたことから、今後、 体積流量 9.0 m³/h までの高流量条件の洗浄試験を実施し、吸着塔における洗浄効果について、 流速の影響を評価する予定である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、東京電力株式会社 石川敬司氏、山本敏雅氏、上西修司氏に はセシウム吸着装置の貸与にご尽力いただきました。また、大洗研福島技術開発特別チーム 茶谷恵治氏および沢和弘氏には試験実施、報告書作成にご協力いただきました。液体金属試 験技術課の関係者ならびに株式会社アセンドの業務協力員の方々には試験装置の運転、デー タ取得にご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 山岸、森田、"汚染水処理に伴う廃ゼオライトの性状調査-海水系カラム試験-"、日本原子力 学会「2012 年秋の大会」予稿集 C35(2012).
- [2] Akizuki, M., Nishido, H., Fujimoto, M., "Herschelite: Morphology and growth sector", American Mineralogist, Volume 74, pp.1337-1342(1989).
- [3] 東京電力株式会社、"福島第一原子力発電所放射性滞留水の回収・処理の取組み~水処理(放 射能除去)の仕組み~"、平成23年10月29日プレス資料.

Table 3.1 NaCl水注入条件

	塩水注入条件	
Cl濃度	体積流量	給水量/
ppm	m ³ /h	吸着材体積
1000	4.5	2.03

Table 3.2 残留塩分洗浄試験条件

	塩水条件	純水洗浄条件					
No.	Cl濃度	体積流量	給水量/	准书			
	ppm	m ³ /h	吸着材体積	加方			
1	1000	4.5	2.71				
2	1000	4.5	2.71				
3	1000	4.5	2.71				
4	1000	4.5	1.35				
5	1000	4.5	1.35				
6	1000	4.5	1.35				
7	1000	3	2.71				
8	1000	3	2.71				
9	1000	3	2.71				
10	1000	1.5	2.71				
11	1000	1.5	2.71				
12	1000	4.5	2.71				
13	1000	4.5	5.42				
14	1000	6	1.35	実施予定			
15	1000	6	2.71	実施予定			
16	1000	6	5.42	実施予定			
17	1000	9	1.35	実施予定			
18	1000	9	2.71	実施予定			
19	1000	9	5.42	実施予定			

	条件	給水量/吸着 材充填体積	CI ⁻ 濃度 ppm	pН	pH測定時 液温 ℃	吸着塔 重量 kg	吸着塔差 圧 MPa	総通水量/吸 着材充填体積
塩水タンク			1167	7.75	19.7			
流量4.5 m ³ /h	NaCl注水	0	<0.17	10.20	20.1	2585	0.0149	1.91
(1回目)		0.14	0.21	10.06	19.5			
(1回目)		0.27	< 0.17	10.07	19.5			
		0.41	0.21	10.09	20.0			
		0.54	19.8	10.07	20.1			
		0.68	204	9.76	19.8			
		0.81	427	9.40	20.3			
		0.95	614	8.97	20.0			
		1.08	824	8.66	20.0			
		1.22	880	7.27	20.0			
		1.35	943	8.06	19.9			
		1.49	970	8.00	19.7			
		1.63	1004	7.96	19.4			
		1.76	990	7.68	19.3			
		1.90	987	7.87	19.4			
		2.03	1003	7.59	19.6			
		2.17	999	7.87	20.4			
温水タンク			9/9.6	6./6	18.9			
流量4.5 m°/h	NaCl注水	0	0.//	9.92	18.8	2577	0.0152	6.42
(2回目)		0.14	< 0.58	9.81	18.5			
		0.27	< 0.58	9.82	18./			
		0.41	< 0.58	9.83	18.5			
		0.54	8.31	9.85	18.6			
		0.08	124	9.//	18.9			
		0.81	500	9.48	19.4			
		0.95	000	9.17	19.0			
		1.00	070	0.70	19.2			
		1.22	918	8 2 8	18.8			
		1 4 9	947	8.09	18.2			
		1.10	933	7.93	18.9			
		1.76	941	7.93	18.8			
		1.90	947	8.05	18.7			
		2.03	983	7.98	17.9			
		2.17	978	7.91	17.8			
塩水タンク			967					
流量4.5 m ³ /h	NaCl注水	0	0.64	9.81	20.7	2577	0.0156	11.02
(3回目)		0.14	0.57	9.66	20.7			
		0.27	0.51	9.65	20.7			
		0.41	0.46	9.61	20.7			
		0.54	27.3	9.63	20.7			
		0.68	197	9.41	20.7			
		0.81	445	9.19	20.7			
		0.95	643	8.72	20.7			
		1.08	795	8.37	20.7			
		1.22	771	7.95	20.7			
		1.35	945	7.59	20.7			
		1.49	937	7.32	20.7			
		1.63	976	7.10	20.7			
		1.76	948	7.20	20.7			
		1.90	942	7.06	20.7			
		2.03	942	7.06	20.7			

Table 4.1 NaCl水注入時試験結果(1/2)

冬州	給水量/吸着	Cl¯濃度	- U	pH測定時	吸着塔	吸着塔差	総通水量/吸
*1	材充填体積	ppm	рп	液温 ℃	重量 kg	圧 MPa	着材充填体積
塩水タンク	塩水タンク	983	6.55	21.0			
流量4.5 m ³ /h NaCl注水	0	3.48	9.71	21.0	2577	0.0155	15.63
(4回目)	2.03	964	7.34	21.0			
塩水タンク		962	7.73	21.0			
流量4.5 m ³ /h NaCl注水	0	8.72	9.86	21.0	2581	0.0150	18.96
(5回目)	2.37	957	7.32	21.0			
塩水タンク		982	_	_			
流量4.5 m ³ /h NaCl注水	0	8.33	—	—	2581	0.0147	22.31
(6回目)	2.03	1012	—	-			
塩水タンク		991	-	-			
流量4.5 m ³ /h NaCl注水	0	10.5	—	—	2577	0.0148	25.61
(7回目)	2.03	972	_	_			
塩水タンク		1030					
流量4.5 m ³ /h NaCl注水	0	0.60	-	-	2577	0.0138	30.21
(8回目)	2.03	995	_	_			
塩水タンク		1014	_	_			
流量4.5 m ³ /h NaCl注水	0	0.49	—	—	2577	0.0136	34.82
(9回目)	2.03	1021	_	_			
塩水タンク		1016	-	-			
流量4.5 m ³ /h NaCl注水	0	0.77	—	—	2577	0.0136	39.40
(10回目)	2.03	1018	-	-			
塩水タンク		1030	_	_			
流量4.5 m ³ /h NaCl注水	0	0.57	_	_	2581	0.0134	43.78
(11回目)	2.03	1050	_	-			
塩水タンク		1000	_	_			
流量4.5 m ³ /h NaCl注水	0	0.35	_	—	2582	0.0131	47.98
(12回目)	2.03	974					
塩水タンク		973					
流量4.5 m ³ /h NaCl注水	0	0.62	—	—	2585	0.0128	52.50
(13回目)	2.03	978		_			

Table 4.1 NaCl水注入時試験結果(2/2)

条件	給水量/吸着 材充填体積	CI ⁻ 濃度 ppm	рН	pH測定時 液温 ℃	吸着塔 重量 kg	総通水量/吸 着材充填体積
流量3.0 m ³ /h	0	109.7	8.18	22.0		
	0.45	1313.7	8.10	22.0		
	2.71	2.8	9.53	22.0		
流量20 m ³ /h 逆洗終了時	1.81	< 0.44	10.07	22.0		
通常方向(2.0 m3/h)での洗浄 終了時	2.58	<0.17	10.17	20.7		
純水タンク		0.32	7 52	18.9		
<u>赤景45 m³/b </u>	0	985	7.98	19.6	2577	4 4 8
	0.14	968	8 40	19.5	2077	
	0.27	958	8 4 4	19.5		
	0.41	959	8.46	19.5		
	0.54	931	8.53	19.4		
	0.68	729	8.82	19.3		
	0.81	416	9.32	19.2		
	0.95	175	9.62	19.0		
	1.08	71.1	10.05	19.4		
	1.22	29.2	10.18	20.3		
	1.35	11.6	10.28	19.4		
	1.49	5.3	10.32	19.7		
	1.63	2.3	10.37	19.7		
	1.76	<0.47	10.38	18.9		
	1.90	0.54	10.41	19.0		
	2.03	0.27	10.43	18.7		
	2.17	0.23	10.43	18.9		
	2.30	0.17	10.42	18.9		
	2.44	0.18	10.45	18.7		
	2.57	0.16	10.44	18.6		
	2.71	0.11	10.31	18.7		
純水タンク	-	< 0.11	6.86	20.7		
流量4.5 m³/h 洗浄試験	0	929	6.34	20.7	2578	9.09
(2回目)	0.14	945	6.98	20.7		
	0.27	943	7.00	20.7		
	0.41	953	7.77	20.7		
	0.54	906	7.77	20.7		
	0.08	/23	/.88	20.7		
	0.01	430	0.93	20.7		
	0.95	200	9.01	20.7		
	1.00	32.1	10.00	20.7		
	1.22	123	10.00	20.7		
	1.00	5.04	10.20	20.7		
	1.43	2 23	10.22	20.7		
	1.00	1.06	10.10	20.7		
	1.90	0.59	10.25	20.7		
	2.03	0.32	10.22	20.7		
	2.17	0.17	10.25	20.7		
	2.30	0.18	10.23	20.7		
	2.44	<0.13	10.26	20.7		
	2.57	<0.13	10.25	20.7		
	2.71	0.14	10.23	20.7		

Table 4.2 純水洗浄時試験結果(1/5)

冬卅	給水量/吸着	CΓ濃度		pH測定時	吸着塔	総通水量/吸
	材充填体積	ppm	рп	液温 ℃	重量 kg	着材充填体積
純水タンク		2.79	7.02	20.7		
流量4.5 m ³ /h 洗浄試験	0	982	6.76	20.7	2577	13.70
(3回目)	2.71	3.25	9.49	21.0		
純水タンク		2.02	7.93	21.0		
流量4.5 m ³ /h 洗浄試験	0	1003	6.97	21.0	2581	17.01
(4回目)	1.35	11.1	9.90	21.0		
純水タンク		0.31	7.95	21.0		
	0	990	6.82	21.0	2579	20.37
(5回目)	0.14	993	6.84	21.0		
	0.27	956	7.03	21.0		
	0.41	959	7.11	21.0		
	0.54	919	7.19	21.0		
	0.68	664	7.34	21.0		
	0.81	355	8.56	21.0		
	0.95	161	9.36	21.0		
	1.08	56.5	9.83	21.0		
	1.22	22.0	9.96	21.0		
	1.35	8.62	10.00	21.0		
純水タンク		1.48	—	—		
流量4.5 m ³ /h 洗浄試験	0	1027	—	—	2578	23.67
(6回目)	1.35	13.0	_	_		
純水タンク		0.33	-	—		
流量3.0 m ³ /h 洗浄試験	0	1000	—	—	2578	28.26
(7回目)	0.18	981	-	—		
	0.36	971	-	—		
	0.54	928	—	—		
	0.72	559	_	_		
	0.90	220	_			
	1.08	60.7	_	_		
	1.26	16.9	_			
	1.44	4.97	_	_		
	1.63	1.77	_			
	1.81	0.75	_	_		
	1.99	0.44	_	_		
	2.17	0.38	_	_		
	2.35	0.30	_			
	2.53	0.33	_			
	2.71	0.39		_		

Table 4.2 純水洗浄時試験結果(2/5)

条件	給水量/吸着	Cl¯濃度	рΗα	pH測定時	吸着塔	総通水量/吸
	材充填体積	ppm	P	液温 ℃	重量 kg	 看材充填体積
純水タンク		<0.22	—	_		
流量3.0 m ³ /h 洗浄試験	0	990	—	—	2575	32.88
(8回目)	0.18	1020	_	_		
	0.36	958	_	_		
	0.54	919	_	_		
	0.72	487	—	_		
	0.90	187	—	_		
	1.08	50.3	—	_		
	1.26	14.1	—	_		
	1.44	4.06	—	_		
	1.63	1.24	_	_		
	1.81	0.56	_	_		
	1.99	0.48	—	-		
	2.17	0.25	_	_		
	2.35	0.27	_	_		
	2.53	0.31	_	_		
	2.71	0.28	_	_		
純水タンク		0.33	—	_		
流量3.0 m ³ /h 洗浄試験	0	1002	_	_	2577	37.45
(9回目)	0.18	1010	—	_		
	0.36	1008	_	_		
	0.54	917	—	_		
	0.72	475	—	_		
	0.90	172	—	_		
	1.08	45.6	—	-		
	1.26	12.7	—	_		
	1.44	4.05	_	_		
	1.63	3.70	_	_		
	1.81	0.50	_	_		
	1.99	0.31	—	_		
	2.17	0.29	_	_		
	2.35	0.55	_			
	2.53	0.18	—	_		
	2.71	0.48	_	_		
純水タンク		0.12	_	_		
流量1.5 m³/h 洗浄試験	0	1030	_	_	2578	41.84
(10回目)	0.14	1007	_	_		
	0.27	1024	_	_		
	0.41	1012	—	_		
	1.22	8.51	_	_		
	1.35	3.41	_	_		
	1.49	1.32	_	_		
	1.63	0.61	—	_		
	1.76	0.32	—			
	1.90	0.21	—	_		
	2.17	0.16	—	—		
	2.44	0.14	—	—		
	2.71	0.19	—	- 1		

Table 4.2 純水洗浄時試験結果(3/5)

冬姓	給水量/吸着	CΓ濃度	ъH	pH測定時	吸着塔	総通水量/吸
	材充填体積	ppm	рп	液温 ℃	重量 kg	着材充填体積
純水タンク		0.08	_	—		
流量1.5 m ³ /h 洗浄試験	0	995	-	—	2578	46.02
(11回目)	0.14	978	_	_		
	0.27	996	-	—		
	0.41	961		—		
	0.54	905		—		
	0.68	492	-	—		
	0.81	208	_	—		
	0.95	76.7	_	—		
	1.08	24.9	_	_		
	1.22	9.45	_	—		
	1.35	3.92	_	_		
	1.49	1.61	_	—		
	1.63	0.68	_	—		
	1.76	0.27	_	_		
	1.90	0.12	_	—		
	2.17	0.14	_	_		
	2.44	0.10	_	—		
	2.71	0.15		—		
純水タンク		<0.05	_	—		
流量4.5 m ³ /h 洗浄試験	0	974	_	—	2586	50.57
(12回目)	0.14	980	_	—		
	0.27	986	_	—		
	0.41	983	_	_		
	0.54	924	_	_		
	0.68	733	_	—		
	0.81	406	_	—		
	0.95	195	_	—		
	1.08	80.8	_	—		
	1.22	30.3	_	_		
	1.35	13.5	-			
	1.49	5.07	-	_		
	1.63	1.93	-			
	1.76	0.95	_	_		
	1.90	0.50	-			
	2.03	0.37		—		
	2.17	0.23	_	—		
	2.30	0.18	_	—		
	2.44	0.18	_	—		
	2.57	0.15	_	—		
	2.71	0.19	—	—		

Table 4.2 純水洗浄時試験結果(4/5)

	給水量/吸着	CΓ濃度	٦U	pH測定時	吸着塔	総通水量/吸
*1	材充填体積	ppm	рн	液温 ℃	重量 kg	着材充填体積
純水タンク		<0.05	_	_		
流量4.5 m ³ /h 洗浄試験	0	982	-	-	2589	57.67
(13回目)	0.14	983	_	_		
	0.27	980	_	_		
	0.41	980				
	0.54	943	-			
	0.68	718	l			
	0.81	395				
	0.95	204				
	1.08	78.9	—	-		
	1.22	28.5	1	1		
	1.35	10.9	_			
	1.49	4.48	1	1		
	1.63	2.04	-	_		
	1.76	0.86	—	-		
	1.90	0.79	_			
	2.03	0.31	_			
	2.17	0.27	-	_		
	2.30	0.24	_	_		
	2.44	0.18	—	_		
	2.57	0.12	_	_		
	2.71	0.14	—	_		
	2.84	0.16	_	_		
	2.98	0.16	_	_		
	3.52	0.06	_	_		
	4.47	0.06	_	_		
	5.42	< 0.014	_	_		

Table 4.2 純水洗浄時試験結果(5/5)

試験番号	純水洗浄後の	洗浄後の	NaCl水注入直後	NaCl水注入直後/
	CI ⁻ 濃度 ppm	維持日数	CI 濃度 ppm	純水洗浄後Cl¯濃度
1~2	0.11	1	0.77	7.00
2~3	0.14	4	0.64	4.57
3~4	3.25	2	3.48	1.07
4~5	11.1	1	8.72	0.79
5~6	8.62	3	8.33	0.97
6 ~ 7	13.0	1	10.5	0.81
7~8	0.39	1	0.60	1.54
8~9	0.28	3	0.49	1.75
9~10	0.48	1	0.77	1.60
10~11	0.19	1	0.57	3.00
11~12	0.15	0	0.35	2.33
12~13	0.19	1	0.62	3.26

Table 4.3 吸着塔純水洗浄後とNaCl水注入直後の排水のCl-濃度



Fig. 1.1 福島第一原子力発電所水処理施設



Fig. 2.1 浄化装置に用いられている吸着塔概要



Fig. 2.2 試験装置概要



Fig. 4.1 試験に用いた吸着塔概要と吸着塔内部観察結果



Fig. 4.2 吸着塔排水のCl⁻濃度(塩水注入時および洗浄時(4.5m³/h))













Fig. 4.8 純水洗浄後CI 濃度に対するCI 濃度割合と維持日数の影響

This is a blank page.

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本単位				
盔半里	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	Κ			
物質量	モル	mol			
光度	カンデラ	cd			

表2. 基本甲位を用	いて表されるSI組立単位	立の例				
和辛雪	SI 基本単位					
和立里	名称	記号				
面 積平	方メートル	m^2				
体 積立	法メートル	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 数每	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 度力	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 concentra	ation)は臨床化学の分野では	物質濃度				
(substance concentration) Lt. FIFTI Z						

(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 租立单位	
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
亚	5.37 v (b)	red	1 (b)	m/m
	() / / / / / / (b)	(c)	1 1 (b)	2/ 2
		sr II-	1	m m -1
同 仮 多		пг		S .
カ	ニュートン	N		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	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
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	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$
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	2 × 2 2 (g)	C	T/la a	2 -2
性線量当量,個人線量当量		SV	J/Kg	ms
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(カタール) kat [s¹ 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 ュ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。
 (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)へルツは周崩現象についてのみ、ペシレルは抜焼性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (a)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度度を表すために使用される。
 (d)やレ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。
 (d)かけ性核種の放射能(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 (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

	S	[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	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 sA
表 面 電 荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
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	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 sA
吸収線量率	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	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
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
酸素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ e ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語								
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	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	~ 9 P		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	M	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=60s			
時	h	1h =60 min=3600 s			
日	d	1 d=24 h=86 400 s			
度	٥	1°=(п/180) rad			
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad			
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad			
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²			
リットル	L, 1	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

衣される剱値が美缺的に侍られるもの					
名称 記号				記号	SI 単位で表される数値
電	子 >	ボル	ŀ	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダ	N	ŀ	\sim	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統-	一原子	質量単	单位	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	-	N	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	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海		里	М	1 M=1852m
バ	-	\sim	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²
1	ッ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネ	-	パ	Np	の形法はいかおはない
ベ		N	В	31単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
デ	ジベ	N	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	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} = 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$				
スチルブ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd } \text{ cm}^{\cdot 2} = 10^4 \text{ cd } \text{ m}^{\cdot 2}$				
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				
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$				
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$				
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 尾	禹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	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	ン	トゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ			K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$			ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ	:	\sim	7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	I.	N	"		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	ートルネ	系カラ:	ット		1メートル系カラット=200 mg=2×10-4kg
ŀ			N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	進	大気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力	П	IJ	ļ	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	カ	17	~		$1 = 1 = 10^{-6} m$

この印刷物は再生紙を使用しています