

人形峠鉱山における坑廃水処理の沿革と現状

History and Current Situation of Mine Water Treatment in Ningyo-toge Uranium Mine

長安 孝明 瀧 富弘 福島 繁

Takaaki NAGAYASU, Tomihiro TAKI and Shigeru FUKUSHIMA

バックエンド研究開発部門

人形峠環境技術センター

環境保全技術開発部

Environmental Research and Development Department

Ningyo-toge Environmental Engineering Center

Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

February 2017

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 (<http://www.jaea.go.jp>)
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, 2017

人形峠鉱山における坑廃水処理の沿革と現状

日本原子力研究開発機構
バックエンド研究開発部門 人形峠環境技術センター
環境保全技術開発部
長安 孝明、瀧 富弘、福島 繁※

(2016 年 10 月 31 日受理)

人形峠鉱山では人形峠産鉱石を対象に、国産ウラン鉱石から四フッ化ウランまでの湿式一貫製錬法の工業化試験を行うために、鉱山保安法に基づく認可を得て昭和 39 年（1964 年）に製錬所を建設して、技術開発に取り組んだ。

製錬所の操業に伴い発生する鉱さい等をたい積する目的で鉱さいたい積場を設置し、鉱さいたい積場からの上澄水は、同たい積場下流側に設けられた坑廃水処理施設で適切に処理を行ってきた。

昭和 57 年（1982 年）に製錬所の工業化試験は終了し、その後は主に旧坑道から発生する坑水の一時的貯留場として、鉱さいたい積場を活用している。

人形峠環境技術センターではこれまで、核原料物質鉱山特有の課題である坑廃水中に含まれる微量のウランやラジウムの処理技術開発に取り組み、安全な処理に努めてきた。

現在も鉱さいたい積場からの上澄水は坑廃水処理施設で処理を行った後に吉井川水系池河川（いけごうがわ）へ排出しているが、処理水の水質は、当センターで定める河川への排出基準を十分満足しており、安定した処理を継続している。

本資料は、人形峠鉱山における坑廃水処理の沿革、処理技術開発の取り組みおよび坑廃水処理の現状についてまとめたものである。

人形峠環境技術センター：〒708 - 0698 岡山県苫田郡鏡野町上齋原 1550

※ 技術開発協力員

History and Current Situation of Mine Water Treatment in Ningyo-toge Uranium Mine

Takaaki NAGAYASU, Tomihiro TAKI and Shigeru FUKUSHIMA※

Environmental Research and Development Department
Ningyo-toge Environmental Engineering Center
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management
Japan Atomic Energy Agency
Kagamino-cho, Tomata-gun, Okayama-ken

(Received October 31, 2016)

Atomic Fuel Corporation, the forerunner of Japan Atomic Energy Agency (JAEA), found a smelter in 1964 to do industrialization tests of hydrometallurgical extraction process from domestic uranium ore to uranium tetrafluoride, extracted at Ningyo-toge, with approval based on Mining Safety Act.

Yotsugi Mill Tailings Pond was constructed for the purpose of depositing slag and other things generated due to the operation of the smelter. Furthermore supernatant water from the deposition field had been treated appropriately at wastewater treatment facilities, which has been provided in the downstream site of the pond.

We have been utilizing the Yotsugi Mill Tailings Pond as a temporary storage field of mine water generated from the old mining gallery, mainly. After filing an abolition report of facilities of the smelter, on the basis of the Mine Safety Act, with the completion of industrial trials of refinery in 1982.

Ningyo-toge Environmental Engineering Center has studied for processing uranium and radium, in wastewater, which must be reduced more safely by advancing these (uranium and radium) processing technical development.

Supernatant water of the Yotsugi Mill Tailings Pond is treated at the wastewater treatment facilities before discharging to Ikegogawa-river, tributary of Yoshiigawa-river. And those collateralize the emission standards to discharge to the river set at the Center with continuing stable processing.

This document summarized the history of the wastewater treatment, technical development for the water treatment, and the current situation of the water treatment.

Keywords : Uranium Mine, Mill Tailings Pond, Wastewater , Radium, Uranium

※ Collaborating Engineer

目 次

1. はじめに	1
2. 坑廃水処理の沿革	1
2.1 法律等の要求事項	1
2.1.1 法律上の要求事項	1
2.1.2 環境保全協定	11
2.2 鉱さいたい積場および坑廃水処理	13
2.2.1 主な沿革	13
2.2.2 製錬所操業中の鉱さいたい積場の水質	30
3. 処理技術開発の取組み	30
3.1 重晶石によるラジウム除去	30
3.2 塩化バリウム溶液によるラジウム除去	31
3.3 酸性リン酸塩溶液によるウラン除去	32
3.4 イオン交換樹脂によるウラン除去	34
3.5 マンガン砂によるラジウム除去	37
4. 坑廃水処理の現状	42
4.1 鉱さいたい積場のたい積物	42
4.2 坑水の発生場所	44
4.3 鉱さいたい積場の水質	45
4.4 処理方法	46
4.5 坑廃水処理施設の構造、能力等	51
4.6 運転体制	67
4.7 運転方法	67
4.8 運転実績	70
4.9 主な補修実績	71
4.10 安全管理	73
5. おわりに	74
参考文献	75
付録	76

Contents

1. Introduction	1
2. History of the mine water treatment	1
2.1 Requirements in the related laws	1
2.1.1 Stipulated requirements on the laws	1
2.1.2 Environmental protection of agreement	11
2.2 Mill Tailings Pond and mine water treatment	13
2.2.1 History	13
2.2.2 Quality of the mine water during smelter operation	30
3. Processing technology development	30
3.1 Radium removal by barite	30
3.2 Radium removal by BaCl ₂ solution	31
3.3 Uranium removal by acidic phosphoric acid	32
3.4 Uranium removal by ion exchange resin	34
3.5 Radium removal by manganese sand	37
4. Current status of the mine water treatment	42
4.1 Sediments of the Mill Tailings Pond	42
4.2 Location of the mine water	44
4.3 Quality of the mine water	45
4.4 Processing method	46
4.5 Structure and capacity of the mine water treatment facilities	51
4.6 Operating system	67
4.7 Operating method	67
4.8 Operation results	70
4.9 Main repair record	71
4.10 Safety management	73
5. Conclusion	74
References	75
Appendix	76

1. はじめに

原子力基本法（昭和 30 年法律第 186 号）に基づき昭和 31 年 8 月に発足した原子燃料公社は、昭和 34 年当時、輸入イエローケーキから金属ウランを製造する処理技術開発に取り組むとともに、国産ウラン鉱石からイエローケーキを製造する基礎的研究も進められていた。

その結果、イエローケーキの製造工程を省略して、鉱石から四フッ化ウランまで一貫した湿式法で製造できる製錬技術の見通しが得られたことから、湿式一貫製錬法の工業化試験を行うため、鉱山保安法（昭和 24 年法律第 70 号）に基づく認可を得て、昭和 39 年に当時の人形峠出張所にパイロットプラント（以下「製錬所」という。）を建設した。

製錬所（処理能力 50t 鉱石/日）において人形峠の鉱石を対象に処理プロセスの開発に取り組み、ウラン鉱石から四フッ化ウランまで一貫して製造する製錬技術を確立¹⁾（「PNC プロセス」と命名。）し、昭和 57 年にその役割は終了した。その間約 30,000t の鉱石を処理し、生産した約 50t のウランは、新型転換炉（ふげん）の初期装荷燃料に利用されたのをはじめ各種研究開発に供給された²⁾。

製錬所操業中においては、鉱石から希硫酸によってウランを浸出した後の残渣（以下「鉱さい」という。）や各工程からの廃水を中和した際の沈殿物は、金属鉱山等保安規則（昭和 24 年通商産業省令第 33 号）に定める「鉱さいたい積場」を所内に設けてたい積し、鉱さいたい積場からの上澄水は同たい積場の下流側に設けた坑廃水処理施設で放射性物質の除去処理を適切に行い、清澄水として池河川に排出した。

その後昭和 55 年 9 月に放流方式を連続方式からバッチ方式に変更するため、2 槽の放流水槽を建設した。

これまで鉱山保安法に基づき坑水または廃水による鉱害を防止するため、核原料物質鉱山特有の課題である廃水中に含まれる放射性物質の除去方法の技術開発に取り組み、安全な処理に努めてきた。

昭和 57 年に製錬試験が終了してからは、主に旧坑道（ウラン鉱石を採掘するために労働者の往復、または通気などのためにつくられた地下道で現在は使われていない坑道のこと。）から恒常的に流出する坑水の一時貯留場として鉱さいたい積場を活用している。鉱さいたい積場に流入している坑水は、下流側の坑廃水処理施設で処理し、バッチ方式で池河川に排出している。池河川に排出するにあたっては、ウラン濃度等がセンターの定める排出基準を満足していることを確認しており、安定した処理を継続している。

本資料は、人形峠鉱山における坑廃水処理の沿革、処理技術開発の取り組みおよび坑廃水処理の現状についてまとめたものである。

2. 坑廃水処理の沿革

2.1 法律等の要求事項

2.1.1 法律上の要求事項

(1) 鉱業法

鉱業法とは国内における鉱物資源を合理的に開発することによって公共の福祉の増進

に寄与するため、鉱業に関する基本的制度を定めることを目的とする。

鉱業権には「試掘権」と「採掘権」があり、試掘権とは鉱物の有無、品位、鉱量等を調査・確認するための権利で、採掘権とは登録を受けた一定の区域(鉱区)において、登録を受けた鉱物を採掘し取得するための権利である。鉱業法では 41 種の法定鉱物を定めているが、平成 24 年法改正によりその鉱物のうち国民経済上重要な鉱物であって、その合理的な開発が特に必要なものとして政令で定める鉱物が「特定鉱物」と呼ばれ、ウラン鉱も含まれている。

鉱業権を得るためには、経済産業大臣に出願してその許可を受けることが必要であり、鉱業権の設定後、事業に着手する前に鉱業法で規定する施業案(事業計画書)の認可および関係諸法令等の許認可が必要となる。

人形峠鉱山においても鉱業権を取得し、施業案の認可を受けている。

(2) 鉱山保安法

鉱業の保安監督を強化するため鉱業法とは別の独立した法律として、鉱山保安に関する新たな基本法として鉱山保安法が昭和 24 年 5 月 16 日に制定され、同日に施行された。鉱山保安法とは鉱山労働者に対する危害を防止するとともに鉱害を防止し、鉱物資源の合理的開発を図ることを目的とする。

鉱山保安法に鉱業権者の講ずべき措置として、「坑水または廃水の処理に伴う危害又は鉱害の防止」について定めている。また、金属鉱山、石灰鉱山など各種鉱山で遵守すべき基準等を定める省令について金属鉱山においては、昭和 24 年 8 月 12 日に「金属鉱山等保安規則」が制定され施行された。しかし、各種鉱山の各省令間で表現の異同等の不都合が生じたため見直され、各省令を一本化した「鉱山保安規則」が平成 6 年 4 月 1 日に施行された。

その後、国の関与の在り方を見直し民間の自主性を活かした保安確保への取組みを可能とするため、平成 16 年 7 月に鉱山保安法の一部改正および関係省令等の改正が行われ、鉱山保安規則は廃止となり関連する内容は新たに鉱山保安法施行規則(平成 16 年経済産業省令第 96 号)として制定された。これにより鉱業権者に関し各種自主検査および届出等を、鉱山労働者に対しては保安に関する必要事項の順守をそれぞれ義務付けている。

鉱山保安法に基づく坑水または廃水による鉱害の防止に関する省令の主な沿革を表-1 に示す。

坑廃水処理施設は鉱山保安法で定める「特定施設(保安上重要な施設)」に該当し、「設置または変更の工事を行う場合はその工事計画を産業保安監督部長に届出なければならない。またその計画を変更しようとするときも同様とする。」と定められている。

なお鉱山保安法に定める「坑水」とは、鉱物を採掘するため掘採した地下から湧出する水のことで、「廃水」とは、選鉱場・製錬場等において使用後に排出される水および捨石または鉱さいの集積場等から流出する水のことをいう³⁾。

表-1 鉱山保安法に基づく坑水または廃水による鉱害の防止に関する省令の沿革 (1/7)

法令及び適用期間	条 項	条文および条文の概要
金属鉱山等保安規則 【適用期間】 昭和 24 年 8 月 12 日～ 平成 7 年 3 月 31 日	【保安規定】 第 294 条	坑水または廃水による鉱害の防止については、左の各号の事項について、その細目を保安規定に定めなければならない。
	一号	坑水または廃水の処理施設に関すること。
	二号	坑水または廃水の量およびその水素イオン濃度その他の水質の測定に関すること。
	三号	施設の故障、破損、停電その他の事故が発生し、または暴風雨その他の特別の事由により、坑水または廃水の処理に支障を生じたときの措置に関すること。
	【坑廃水排出基準等】 第 295 条	鉱業権者は、坑水または廃水による鉱害を防止するため、排水口において規制基準省令の規定による坑水または廃水の排出基準に適合しない坑水または廃水を水質汚濁防止法に規定する公共用水域に排出してはならない。 ⇒昭和 46 年 6 月 23 日通商産業省令第 63 号による改正
	2 項	鉱業権者は、坑水若しくは廃水の発生施設または坑水若しくは廃水の処理施設について、故障、破損、停電その他の事故が発生し、坑廃水排出基準に適合しない坑水または廃水を排出するおそれが生じたときは、ただちにその事故について応急の措置を講じ、かつ、その事故をすみやかに復旧しなければならない。
	第 296 条	鉱山保安監督部長の指示に関すること。
	【遵守事項】 第 297 条	鉱害防止係員は、坑水または廃水による鉱害を防止するため、次の各号の規定を守らなければならない。
	一号	坑水または廃水の処理施設を毎日巡視し、その結果を保安日誌に記載すること。

表-1 鉱山保安法に基づく坑水または廃水による鉱害の防止に関する省令の沿革 (2/7)

法令及び適用期間	条 項	条文および条文の概要
金属鉱山等保安規則 【適用期間】 昭和 24 年 8 月 12 日～ 平成 7 年 3 月 31 日	二号	別に告示する方法により、水素イオン濃度については一日一回以上、坑水または廃水の量及びその水質（水素イオン濃度を除く）については、七日に一回以上（常時五百人未満の鉱山労働者を使用する鉱山にあっては、月一回以上）測定し、その結果を保安日誌に記載すること。
	三号	前号の場合において、坑水または廃水による鉱害を生ずるおそれが多いときは、直ちに管理者に報告すること。
	第 298 条	特別の事由があつて、鉱山保安監督局長または鉱山保安監督部長の許可を受けたときは、前条第一号及び第二号の規定によらないことができる。
	【報告】 第 299 条	鉱業権者の事故対応に関すること。
	【保安規定】 第 772 条	坑水または廃水による鉱害の防止については、左の各号の事項について、その細目を保安規定に定めなければならない。
鉱山保安規則 【適用期間】 平成 7 年 4 月 1 日～ 平成 17 年 3 月 31 日	二号	坑水または廃水の処理施設に関すること。
	三号	坑水または廃水の量及びその水素イオン濃度その他の水質の測定に関すること。
	五号	施設の故障、破損、停電その他の事故が発生し、または暴風雨その他の特別の事由により、坑水または廃水の処理に支障を生じたときの措置に関すること。

表-1 鉱山保安法に基づく坑水または廃水による鉱害の防止に関する省令の沿革 (3/7)

法令及び適用期間	条 項	条文および条文の概要
鉱山保安規則 【適用期間】 平成 7 年 4 月 1 日～ 平成 17 年 3 月 31 日	【届出】 第 773 条	石油鉱山及び金属鉱山等において、水質汚濁防止法第四条の二第一項に規定する指定地域、瀬戸内海環境保全特別措置法第五条第一項に規定する区域及び湖沼水質保全特別措置法第二十三条第一項に規定する総量削減指定地域において鉱山又は付属施設から水質汚濁防止法第二条第一項に規定する公共用水域に坑水又は廃水を排出する鉱業権者は、同条第二項に規定する特定施設にあつては、同法第十四条の規定により特定施設とみなされる施設を含む。次条及び第 778 条において特定施設を設置しようとするときは、様式第二十五号により、坑水または廃水の排水系統別の汚染状態及び量を鉱山保安監督部長に届出なければならぬ。
	【坑廃水排出基準等】 第 776 条	鉱業権者は、坑水又は廃水による鉱害を防止するため、排水口において規制基準省令の規定による坑水又は廃水の排出基準に適合しない坑水又は廃水を公共用水域およびその他の海域に排出してはならない。
	2 項	鉱業権者は、規制基準省令で定める要件に該当する坑水又は廃水を地下に浸透させてはならない。
	3 項	鉱業権者は、坑水もしくは廃水の発生施設又は坑水若しくは廃水の処理施設について、故障、破損、停電その他の事故が発生し、坑廃水排出基準に適合しない坑水若しくは廃水を排出し、若しくは排出する恐れが生じたとき又は前項に規定する坑水若しくは廃水が地下に浸透し、若しくは地下に浸透するおそれが生じたときは、直ちにその事故について応急の措置を講じ、かつ、その事故を速やかに復旧しなければならない。
	4 項	鉱業権者は、鉱業上使用する施設の破損その他の事故が発生し、油の排出による鉱害を生じ、又はそのおそれが生じたときは、直ちにその事故について応急の措置を講じ、かつ、その事故を速やかに復旧しなければならない。

表-1 鉱山保安法に基づく坑水または廃水による鉱害の防止に関する省令の沿革 (4/7)

法令及び適用期間	条 項	条文および条文の概要
鉱山保安規則 【適用期間】 平成 7 年 4 月 1 日～ 平成 17 年 3 月 31 日	第 777 条	石油鉱山及び金属鉱山等において、湖沼水質保全特別措置法第三条第二項に規定する指定地域を設置する鉱山または附属施設で別に告示で定める規模以上のものに係る鉱業権者は、同法第七条第一項に規定する汚濁負荷量が規制基準省令の規定による坑水又は廃水の汚濁負荷量規制基準に適合しない坑水又は廃水を湖沼指定地域内鉱山等から公共用水域に排出してはならない。
	第 779 条	金属鉱山等において、特別措置法第二条第三項に規定する特定施設に該当する坑道であつて使用を終了したものについては、当該坑道から流出する坑水による鉱害を防止するため、当該坑道の坑口の閉そく、坑水の処理施設の設置等の適当な措置を講じなければならない。
	第 781 条	鉱業権者は、前八条の規定によるほか、鉱山保安監督部長が特に必要と認め、坑水又は廃水の排出の制限等坑水又は廃水による鉱害を防止するため適当な措置を講ずべきことを指示した時は、これによらなければならない。
	第 782 条	鉱害防止係員は、坑水又は廃水による鉱害を防止するため、次の各号の規定を守らなければならない。
	一号	坑水又は廃水の処理施設並びに石油鉱山における泥水処理施設及びろ過池を毎日巡視し、その結果を保安日誌に記載すること。
	二号	別に告示する方法により、坑水又は廃水の量及びその水質については一月に一回以上（常時五百人以上の鉱山労働者を使用する金属鉱山等にあつては、七日に一回以上。石炭鉱山及び金属鉱山等における水素イオン濃度については、一日に一回以上）測定し、その結果を保安日誌に記載すること。

表-1 鉱山保安法に基づく坑水または廃水による鉱害の防止に関する省令の沿革 (5/7)

法令及び適用期間	条 項	条文および条文の概要
鉱山保安法施行規則 【適用期間】 平成 17 年 4 月 1 日～ 現在に至る	【坑水又は廃水の処理等】 第 19 条	法第八条の規定に基づき、坑水又は廃水の処理について鉱業権者が講ずべき措置は、次に掲げるものとする。
	一号	坑道の坑口の閉そく、坑水又は廃水の処理施設の設置その他の坑水又は廃水による鉱害を防止するための措置を講ずること。
	二号	水質汚濁防止法第二条第一項に規定する公共用水域又は海域に排出する坑水又は廃水又は、同法第三条第一項又は第三項の排水基準に適合すること。
	三号	排水基準を定める省令第二条の環境大臣が定める方法により前号の坑水又は廃水の水質を測定し、その結果を記録し、これを三年間保存すること。
	四号	湖沼水質保全特別措置法第三条第二項に規定する指定地域において、同法第七条第一項に規定する湖沼特定施設に該当する施設を設置する鉱山等であって同項の政令で定める規模以上のものから公共用水域に排出する坑水又は廃水は、同項の規制基準に適合すること。
	五号	水質汚濁防止法第四条の二第一項 に規定する指定地域及び湖沼水質保全特別措置法第二十三条第一項に規定する総量削減指定地域又は瀬戸内海環境保全特別措置法第五条第一項に規定する区域において、水質汚濁防止法第二条第二項に規定する特定施設に該当する施設を設置する鉱山等であって同法第四条の五第一項の環境省令で定める規模以上のものから公共用水域に排出する坑水又は廃水に係る同法第四条の二第一項及び湖沼水質保全特別措置法第二十三条第一項に規定する汚濁負荷量は、それぞれ水質汚濁防止法第四条の五第一項 若しくは第二項又は瀬戸内海環境保全特別措置法第十二条の三第二項の基準に適合すること。

表-1 鉱山保安法に基づく坑水または廃水による鉱害の防止に関する省令の沿革 (6/7)

法令及び適用期間	条 項	条文および条文の概要
鉱山保安法施行規則 【適用期間】 平成 17 年 4 月 1 日～ 現在に至る	六号	特定水道利水障害の防止のための水道水源水域の水質の保全に関する特別措置法(以下「水道水源法」という。)第二条第六項に規定する特定施設等に該当する施設を設置する鉱山等であって同項の政令で定める規模以上のものから水道水源法第四条第一項に規定する指定地域内の水道水源水域に排出する坑水又は廃水は、水道水源法第九条第一項の特定排水基準に適合すること。
	七号	水質汚濁防止法第二条第八項に規定する有害物質使用特定施設に該当する施設(以下「有害物質使用特定施設」という。)を設置する鉱山等から地下に浸透する水であって有害物質使用特定施設に係る坑水又は廃水(これを処理したものを含む。)を含むものは、同法第八条の環境省令で定める要件に該当しないこと。
	八号	有害物質使用特定施設(当該有害物質使用特定施設に係る鉱山等から水質汚濁防止法第二条第八項に規定する特定地下浸透水を浸透させる場合を除く。)又は同法第五条第三項に規定する有害物質貯蔵指定施設に該当する施設については、同法第十二条の四の環境省令で定める基準に適合すること。
	九号	坑水又は廃水が浸透する土壌(事業活動その他の人の活動に伴って汚染された土地に限り、法第十七条第一項に規定する集積場等、別表第二の第二十一号、第二十二号、第二十七号及び第二十八号に規定する施設の鉱業廃棄物及び沈殿のための施設に沈殿しているものを除く。第四十六条第一項の表において同じ。)については、土壌汚染対策法第六条第一項第一号の環境省令で定める基準に適合すること。
	十号	坑水若しくは廃水の発生施設又は処理施設において、故障、破損その他の事故が発生し、排水基準に適合しない坑水若しくは廃水を排出したとき又は第七号に規定する要件に該当する坑水若しくは廃水が地下に浸透したときは、応急の措置を講じ、かつ、速やかにその事故を復旧すること。

表-1 鉱山保安法に基づく坑水または廃水による鉱害の防止に関する省令の沿革 (7/7)

法令及び適用期間	条 項	条文および条文の概要
鉱山保安法施行規則 【適用期間】 平成 17 年 4 月 1 日～ 現在に至る	十一号	鉱業上使用する施設の破損その他の事故（前号に規定するものを除く。）が発生し、水質汚濁防止法第二条第二項第一号に規定する物質若しくは同法第二条第四項に規定する物質を含む坑水若しくは廃水の排出若しくは地下への浸透又は油の排出若しくは地下への浸透による鉱害が発生し、若しくは発生するおそれがあるときは、応急の措置を講じ、かつ、速やかにかつその事故を復旧すること。
	十二号	金属鉱山等の鉱業権者が特別措置法第二条第五項に規定する使用済特定施設について第一号の規定により講ずべき措置については、特別措置法第五条第一項の規定に基づき産業保安監督部長に届け出た鉱害防止事業計画（同項の規定による変更の届出があったときは、その変更後のもの）に従うこと。

(3) 瀬戸内海環境保全特別措置法

水質汚濁防止法には適用除外があり、放射性物質の規制と鉱山施設については除外されているが、瀬戸内海環境保全特別措置法には鉱山施設の除外規定がないことから、対象施設となる。

水質汚濁防止法の特別法である瀬戸内海環境保全特別措置法(昭和48年法律第110号、昭和48年11月2日施行)の第1条に「この法律は、瀬戸内海の環境の保全上有効な施策の実施を推進するための瀬戸内海の環境の保全に関する計画の策定等に関し必要な事項を定めるとともに、特定施設の設置の規制、富栄養化による被害の発生の防止、自然海浜の保全、環境保全のための事業の促進等に関し特別の措置を講ずることにより、瀬戸内海の環境の保全を図ることを目的とする。」と定められている。

したがって、人形峠事業所(当時)から公共用水域(河川)に排出される汚濁負荷に寄与する施設と排水は特定施設の扱いを受けることになり、既に設置していた坑廃水処理施設については昭和48年11月30日付けで岡山県に「鉱山等に係る特定施設使用届出書」を提出した。届出内容に係る変更が生じた場合はその都度「特定施設使用(変更)許可申請書」を提出し、岡山県知事の許可を得なければならない。

現在処理している露天採掘場跡坑水、大排水溝坑水、見学坑道坑水は、届出の「工程別排水系統図」に記載されている。

河川へ排出する排水の水質に係る届出値を表-2に示す。

上記の届出値は「特定施設等の構造等変更許可申請」により、昭和60年10月7日付けで岡山県の許可を得たものである。ただし、リンおよび窒素は、平成5年12月の変更許可申請の際に岡山県から追加要求されたものであり、フッ素は平成13年6月の変更届出申請の際に届出した数値である。

数値の根拠については、センターで保管されている資料からは確認できなかったが、坑廃水の処理後の測定実績や事業所内の水域における濃度を勘案して設定されたものと推察される。

特記すべきことは、クラーク数(地球上に存在する元素の割合を示す存在率)が4番目である鉄濃度が法令値の1/10と非常に厳しい数値を届け出していることである。

表-2 河川へ排出する排水の水質に係る届出値

項目	pH	BOD (mg/ℓ)	COD (mg/ℓ)	SS (mg/ℓ)	油分 (mg/ℓ)	T-N (mg/ℓ)	T-P (mg/ℓ)	Fe (mg/ℓ)	Mn (mg/ℓ)
通常	5.8～8.6	6.0	10.0	6.0	<1.0	5.0	<1.0	<1.0	3.0
最大	5.8～8.6	10.0	15.0	10.0	1.0	20.0	3.0	1.0	5.0

項目	F (mg/ℓ)	Cd (mg/ℓ)	Pb (mg/ℓ)	Cr (mg/ℓ)	As (mg/ℓ)	Cu (mg/ℓ)	Hg (mg/ℓ)	Zn (mg/ℓ)
通常	0.2	<0.005	<0.1	<0.1	<0.02	<0.1	<0.0005	<0.1
最大	0.5	0.005	0.1	0.1	0.02	0.1	0.0005	0.1

また水質汚濁防止法および瀬戸内海環境保全特別措置法に基づく総量規制として、環境庁長官（当時）から岡山県知事に対して昭和 54 年 7 月 13 日付けで「磷及びその化合物による削減指導方針の策定について」の指示が出された。その後平成 14 年 10 月 1 日に特定施設に対して化学的酸素要求量、窒素含有量およびリン含有量に係る総量規制基準が適用された。

2.1.2 環境保全協定

岡山県と上齋原村（当時）は、濃縮パイロットプラントおよび製錬パイロットプラントの建設同意条件として環境協定を結ぶことを求め、昭和 54 年 7 月 28 日付けで動力炉・核燃料開発事業団（当時）は、岡山県・上齋原村との間で「動力炉・核燃料開発事業団人形峠事業所周辺環境保全等に関する協定書」（以下「環境保全協定」という。）を締結した。締結の趣旨は、事業所施設周辺における住民の健康保護と地域の生活環境保全、良好な自然環境確保を行うことにあった。これにより環境保全協定に定める坑廃水処理施設を含む施設の新增設を計画し、またはその計画を変更しようとするときは、岡山県および上齋原村の了解を得ることになった。

放射性物質については法令値よりさらに厳しい管理目標値が求められ、特に坑廃水処理と密接に関連する「河川水の敷地境界における数値」でウランについては、事業所周辺の河川水の分析値を勘案して法令値を下回る値が、またラジウムについては、周辺河川水の測定値および事業所放流水の測定実績を勘案してそれぞれ設定された。それによってウランは法令値の 1/20、ラジウムは同 1/10 を管理目標値として定められた。

その後、平成元年に国際放射線防護委員会（以下「ICRP」という。）より出された勧告（Publication 26）の国内法への取入れにより原子炉等規制法が改正された。これに伴い放射能単位が Ci（キュリー）から Bq（ベクレル）に変更され、放射性物質に対する濃度限度についても見直しが行われた。

環境保全協定においては、放射能単位の変更は行なわれたが管理目標値そのものは変更されなかった。そのため、法令の濃度限度の変更に伴い管理目標値のウランは法令値の 1/18、ラジウムは同 1/81 となり、特にラジウムは従来に比較して法令値よりさらに厳しくなった。また平成 13 年には ICRP 勧告（Publication 60）の日本国内法への取入れによってラジウムは 3×10^{-3} Bq/cm³ から 2×10^{-3} Bq/cm³ に変更された。

なお河川水の敷地境界におけるフッ素については、法令値の 15 mg/l に対して水産資源保護協会資料に示される魚卵の孵化率が減少する境界値と言われている 1.5 mg/l が管理目標値となった。

その後、水質汚濁に係る環境基準の一部改正により環境基準に河川水のフッ素が 0.8 mg/l と規定されたことから、岡山県から環境保全協定の見直しの提案を受けて、平成 12 年 4 月 1 日付け「核燃料サイクル開発機構人形峠環境技術センター周辺環境保全等に関する変更協定書」によって、1.5 mg/l から 0.5 mg/l に改められた。

環境保全協定に定める管理目標値と法令値の比較を表-3 に示す。

表-3 環境保全協定に定める河川水の管理目標値と法令値との比較

日付	^{238}U		
	管理目標値 (敷地境界における数値)	法令値	法令値 との割合
昭和 54 年 7 月 28 日 (締結)	$3 \times 10^{-8} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$	$6 \times 10^{-7} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$	1/20
平成元年 (単位の改正)	$1.1 \times 10^{-3} \text{Bq}/\text{cm}^3$	$2 \times 10^{-2} \text{Bq}/\text{cm}^3$	1/18
平成 12 年 4 月 1 日 (変更協定書)	$1.1 \times 10^{-3} \text{Bq}/\text{cm}^3$	$2 \times 10^{-2} \text{Bq}/\text{cm}^3$	1/18
平成 13 年 4 月 1 日 (ICRP1990 年勧告)	$1.1 \times 10^{-3} \text{Bq}/\text{cm}^3$	$2 \times 10^{-2} \text{Bq}/\text{cm}^3$	1/18

日付	^{226}Ra		
	管理目標値 (敷地境界における数値)	法令値	法令値 との割合
昭和 54 年 7 月 28 日 (締結)	$1 \times 10^{-9} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$	$1 \times 10^{-8} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$	1/10
平成元年 (単位の改正)	$3.7 \times 10^{-5} \text{Bq}/\text{cm}^3$	$3 \times 10^{-3} \text{Bq}/\text{cm}^3$	1/81
平成 12 年 4 月 1 日 (変更協定書)	$3.7 \times 10^{-5} \text{Bq}/\text{cm}^3$	$3 \times 10^{-3} \text{Bq}/\text{cm}^3$	1/81
平成 13 年 4 月 1 日 (ICRP1990 年勧告)	$3.7 \times 10^{-5} \text{Bq}/\text{cm}^3$	$2 \times 10^{-3} \text{Bq}/\text{cm}^3$	1/54

日付	F		
	管理目標値 (敷地境界における数値)	法令値	法令値 との割合
昭和 54 年 7 月 28 日 (締結)	1.5mg/ℓ	15mg/ℓ ^{*1}	1/10
平成 12 年 4 月 1 日 (変更協定書)	0.5mg/ℓ	0.8mg/ℓ ^{*2}	1/16
平成 13 年 4 月 1 日 (ICRP1990 年勧告)	0.5mg/ℓ	0.8mg/ℓ ^{*2}	1/16

*1：フッ素の排水基準

*2：フッ素の環境基準

2.2 鉍さいたい積場および坑廃水処理

2.2.1 主な沿革

(1) 鉍さいたい積場

昭和 39 年 8 月人形峠産ウラン鉍石を用いた製錬試験の開始に伴い、製錬所から発生する鉍さい等をたい積することを目的とした鉍さいたい積場は、昭和 40 年 6 月（落成検査）に完成した。

その後、鉍さいたい積場の能力およびたい積物の安定化を図るため昭和 46 年 2 月（落成検査）に、幅 64m、高さ 10m のコンクリートかん止堤を建設し、かん止堤による廃泥たい積場とその上流側斜面の法尻部に石積擁壁を設けてその上流側を廃砂たい積場とした。さらに、鉍さいたい積場の能力の増強と坑廃水処理操業を安定させるため、昭和 55 年 11 月（落成検査）にコンクリートかん止堤を 1 m 嵩上した（写真-1）。

また鉍さいたい積場における坑水の一時貯留はウラン探鉍活動の進展に伴い、夜次 1 号坑の坑内水を一時貯留して以来、露天採鉍時の浸透水、大排水溝坑水、見学坑道坑水をそれぞれ受け入れてきた。

鉍さいたい積場からの漏湧水は「鉍さいたい積場漏湧水中和処理施設」で pH 調整を行い池河川へ排出していたが、その後鉍さいたい積場に流送して坑廃水処理施設で処理する方法に変更された（瀬戸内海環境保全特別措置法に基づく許可書、昭和 55 年 6 月 30 日）。

製錬試験およびヒープリーチング試験の終了後は、主に旧坑道（大排水溝、露天採掘場跡、見学坑道）からの坑水の一時貯留場として鉍さいたい積場を活用している。



写真-1 鉍さいたい積場の全景

(2) 坑廃水処理

製錬所からの鉍さいや廃水は、消石灰 (Ca(OH)_2) で中和して鉍さいたい積場へ流送

され、鉄、ウラン、ラジウムなどの重金属類は鉱さいたい積場に沈積するとともに、廃水は中性か弱アルカリ性となるが、微量のラジウム、硫酸イオン、カルシウムイオン等を含んでいる。また処理を必要とする坑水は、鉱さいたい積場に一時貯留した後、鉱さいたい積場の廃水とともに坑廃水処理施設で処理を行った。

なお鉱さいたい積場からの漏湧水は坑廃水処理施設で処理を行っていたが、その後坑廃水処理施設の逆洗ピットを経由して鉱さいたい積場に返送する廃水処理系統に変更された。

鉱さいたい積場からの上澄水は、製錬所の近傍に設置された坑廃水処理施設に流送され、上澄水に含まれる微量のラジウムは塩化バリウム溶液を添加して化学沈殿による処理を行った後に、処理水の pH および放射性物質の測定を行い、池河川に排出していた。また、ウランについては、昭和 54 年から技術開発に取り組んだヒープリーチング試験（海外も含め高品位のウラン鉱石が枯渇し、低品位鉱石を処理する必要に迫られた場合に備え、ヒープリーチングあるいはバットリーチングおよびその関連技術を確認しておくべきとの見地から、低品位ウラン鉱床の開発を目的に人形峠の鉱石を対象に実施された処理技術開発）に伴って発生する中和沈殿物等は鉱さいたい積場にたい積するとともに、同時期に坑廃水処理施設に化学沈殿法によるウランの除去処理設備が配置された。

その後製錬試験の終了に伴い、金属鉱山等保安規則に基づき昭和 57 年 12 月 9 日付けで「製錬施設廃止届」が提出された。また、ヒープリーチング施設についても今後使用する予定がないことから、鉱山保安規則に基づき平成 14 年 8 月 27 日付けで「使用廃止届」が提出された。

現状、鉱さいたい積場からの上澄水の水質は法令値を満足するものの、鉄およびラジウムが瀬戸内海環境保全特別措置法に基づく届出値および環境保全協定に定める管理目標値を超えているため、坑廃水処理施設(写真-2)で処理を継続している。

坑廃水処理に関連する施設の主な沿革および主な坑廃水処理方法を表-4、表-5 に示す。



写真-2 坑廃水処理施設の全景

表-4 人形峠鉱山における坑廃水処理に関連する施設の主な沿革 (1/9)

認可日または報告日 【交付年月日】	製錬所	鉱さいたい積場	坑廃水処理施設
昭和 38 年 10 月 29 日 【昭和 39 年 9 月 21 日】	試験製錬所の新設	該当なし	該当なし
昭和 39 年 9 月 5 日	該当なし	鉱さいたい積場の新設 面 積 : 38, 000m ² たい積量 : 55, 000m ³	該当なし
昭和 42 年 4 月 18 日	製錬工程中の酸性廃液及び場内床洗等により生じた酸性廃液は中和槽にて石灰中和し、沈殿物は試験製錬所に接した道路より新たに沈殿池式のたい積槽 (第三沈殿池) を設けてたい積する。その他の中性廃液は苛性ソーダを加えて中和し、サンドフィルタで処理して清澄にし、pH および放射性物質濃度の測定を行って、池河川に排出する。サンドフィルターの目詰まり砂は、鉱さいたい積場にたい積する。	該当なし	該当なし
【昭和 45 年度】	昭和 44 年度で試験製錬が終了し、昭和 45 年度から本格的に操業を開始。	該当なし	該当なし

表-4 人形峠鉾山における坑廃水処理に関連する施設の主な沿革 (2/9)

認可日または報告日 【交付年月日】	製錬所	鉾さいたい積場	坑廃水処理施設
昭和 45 年 4 月 16 日	該当なし	鉾さいたい積場の面積を 38,000m ² から 30,400m ² に変更。 (本認可で変更) 鉾さいたい積場は、コンクリート重力式かん止堤による廃泥たい積場とその上流側に法尻石積擁壁による廃砂たい積場を設ける。 廃砂に含まれる廃水は、放出口に粉体分離機(サイクロン)を設けて分離し、下流の廃泥たい積場に流入させる。	該当なし
昭和 45 年 4 月 16 日 【昭和 46 年 6 月 28 日】	該当なし	該当なし	鉾さいたい積場の上澄水は、廃水処理場で塩化バリウムを添加し沈殿池で沈殿除去した後、さらに砂ろ過槽及び重晶石ろ過槽を通し、池河川に排出する。

表-4 人形峠鉍山における坑廃水処理に関連する施設の主な沿革 (3/9)

認可日または報告日 【交付年月日】	製錬所	鉍さいたい積場	坑廃水処理施設
昭和 46 年 5 月 10 日 【昭和 46 年 7 月 30 日】 (完成届提出日)	該当なし	該当なし	夜次 1 号坑内水の放射性物質等を 除去するために、鉍さいたい積場 に流送し、製錬廃水とともに処理 する。
昭和 46 年 8 月 26 日 昭和 46 年 11 月 15 日 (完成届提出日)	該当なし	鉍さいたい積場下流からの漏湧水を ダム内にリサイクルする。	該当なし
昭和 47 年 2 月 17 日 昭和 47 年 3 月 1 日 (完成届提出日)	該当なし	該当なし	製錬所の計画生産量達成のため、 処理能力が不足している廃水処理 施設の増設を行う。
昭和 47 年 7 月 5 日	製錬工程からの廃液及び酸性の床 洗水は、一旦廃液処理槽に貯留の 上、中和槽に送り他の鉍さいとも に石灰中和処理を施し、鉍さいたい 積場へ流送する。 製錬所からの鉍さいは、0.149 mm以 下の廃泥と 3 mm～0.149mm の廃砂に 区別し、鉍さいたい積場に流送す る。	廃泥と廃砂に区別された鉍さいは、そ れぞれ廃泥たい積場とその上流側の 廃砂たい積場に水平たい積する。	該当なし

表-4 人形峠鉱山における坑廃水処理に関連する施設の主な沿革 (4/9)

認可日または報告日 【交付年月日】	製錬所	鉱さいたい積場	坑廃水処理施設
昭和 49 年 6 月 25 日	該当なし	従来鉱さいを廃泥と廃砂に分離して別々にたい積していたものを、以下の理由から今後分離せず廃泥たい積場にたい積することとした。 ①たい積終了後の措置に便利である。 ②分離せずにたい積しても廃泥たい積場での鉱さいのたい積は十分余裕がある。 ③鉱さいたい積場のコンクリート重力式かん止堤の強度について十分安全である。	該当なし
【昭和 49 年 9 月 10 日】	該当なし	該当なし	鉱さいたい積場からの上澄水は、廃水処理施設の末端施設として重晶石ろ過槽によりろ過し放流していたが、重晶石ろ過槽前の砂ろ過槽設備で排水基準値以下となっていることから、この処理法を廃止し、砂ろ過槽のみに変更する。

表-4 人形峠鉱山における坑廃水処理に関連する施設の主な沿革 (5/9)

認可日または報告日 【交付年月日】	製錬所	鉱さいたい積場	坑廃水処理施設
昭和 53 年 5 月 24 日 【交付年月日】	該当なし	鉱さいたい積場周辺に 200t 製錬パイロットプラント敷地及びリーチング試験施設敷地造成のため、たい積場内の範囲を 30,400m ² から 28,080m ² へ変更する。	該当なし
【昭和 54 年 10 月 9 日】	該当なし	バットリーチング施設の鉱さい及び廃水の中和处理によって発生した沈殿物は、同施設の沈殿地を通してパイプ流送によりたい積場に水平たい積する。	該当なし
【昭和 55 年 11 月 22 日】	該当なし	鉱さいたい積場における貯水量の増加のため、コンクリート重力式かん止堤を 1m 嵩上げする。	該当なし
昭和 54 年 12 月 24 日 【昭和 55 年 6 月 27 日】	該当なし	該当なし	鉱さいたい積場上澄水の廃水処理について、ラジウムの除去処理を行っているが、新しくウランの除去処理を追加する。 このため、第 1 廃水処理場の設備の改造および第 2 廃水処理場を増設する。

表-4 人形峠鉱山における坑廃水処理に関連する施設の主な沿革 (6/9)

認可日または報告日 【交付年月日】	製錬所	鉱さいたい積場	坑廃水処理施設
昭和 57 年 12 月 9 日 【昭和 57 年 12 月 9 日】	製錬施設廃止届提出	該当なし	該当なし
昭和 57 年 11 月 5 日 【昭和 58 年 6 月 17 日】	該当なし	該当なし	従来、試薬添加によって沈殿処理していた鉱さいたい積場からの上澄水中のウラン除去をイオン交換法により回収し、再利用に供するため新規に低濃度ウラン回収設備を増設する。
平成 10 年 10 月 1 日 【平成 11 年 2 月 8 日】	該当なし	鉱さいたい積場は、コンクリート重力式かん止堤による廃泥たい積場とその上流側に廃砂たい積場を設け、鉱山保安規則に基づき非常用排水路を設置しているが、非常用排水路から排出される廃水の水質が環境保全協定を満足する水質に改善され、かつ坑水処理が必要なくなるまでの間、非常用排水路を改修し、非常用排水路を設置しないこととした。	該当なし

表-4 人形峠鉾山における坑廃水処理に関連する施設の主な沿革 (7/9)

認可日または報告日 【交付年月日】	製錬所	鉾山側の山腹水路へ 流入する集水区域及び集水面積を変更 する。	坑廃水処理施設
平成 10 年 10 月 1 日 【平成 11 年 2 月 8 日】	該当なし	鉾山側の山腹水路へ流入する水量を低減 化し、豪雨時に貯水量にゆとりを持た せるため、現在場内へ導水している右 岸側の水路を場外へ排出するよう排水 先の変更を行う。それに伴い集水区域、 集水面積の変更を行う。	大排水溝ピットに流入している坑水 と雨水を分け、坑水のみを大排水溝 ピットに導くように坑水導水路を設 ける。
平成 11 年 8 月 6 日 【平成 12 年 2 月 17 日】	該当なし	該当なし	該当なし
【平成 14 年 10 月 3 日】 (完成届提出)	該当なし	該当なし	坑水の処理系統の変更。 従来、鉾山側の山腹水路の上澄水中の ラジウムは、化学沈殿法により除去 していたが、SSF に充填されたマン ガン砂による除去処理の実証をする ため、活性炭塔、樹脂塔を流送せず SSF 処理水から直接化学沈殿工程へ 流送できるよう新たに配管を設置す る。

表-4 人形峠鉱山における坑廃水処理に関連する施設の主な沿革 (8/9)

認可日または報告日 【交付年月日】	製錬所	鉱さいたい積場	坑廃水処理施設
平成 16 年 9 月 17 日	該当なし	鉱さいたい積場上流部に設置されている試験浸出槽はたい積場外であることから、鉱さいたい積場の面積から除外する。	該当なし
【平成 16 年 11 月 8 日】 (完成届提出)	該当なし	たい積場に旧ヒープリーチング施設から発生するろ過材を追加する。	該当なし
平成 20 年 8 月 4 日	該当なし	該当なし	マンガン砂によるラジウム除去した水は、既存の化学沈殿法の設備を経由して放流水槽へ流送していたが、プロセスの簡略化をはかるため直接放流水槽へ流送できる配管を設置する。
【平成 24 年 12 月 28 日】 (特定施設の使用の開始届)	該当なし	鉱さいたい積場上流側の廃砂たい積場の跡措置工事終了に伴う変更（集積場の面積、高さの最大値、集積量）	該当なし
平成 25 年 1 月 16 日	該当なし	該当なし	放流水槽からの排出時間を短縮するため第 2 放流水槽に排出用ポンプを設置する。
平成 25 年 10 月 24 日	該当なし	鉱さいたい積場の集積方法の変更（旧ヒープリーチング中和施設からの沈殿物の集積をとりやめる。）	該当なし

表-4 人形峠鉾山における坑廃水処理に関連する施設の主な沿革 (9/9)

認可日または報告日 【交付年月日】	製錬所	鉾さいたい積場	坑廃水処理施設
平成 26 年 9 月 30 日	該当なし	該当なし	第 1 放流水槽からの排出時間を短縮 するため排水配管（φ 400mm）及び流 量計を設置する。
【平成 26 年 11 月 27 日】 (特定施設の使用の開始届)	該当なし	鉾さいたい積場上流側の廃砂たい積場 の跡措置工事後、地表面において雪解 け及び豪雨によるガリ浸食が見られた ことから、今後の維持管理及び補修作 業を低減させるため、地表面の浸食対 策（防草シート被覆工及び植生シー ト工）を行う。	該当なし

表-5 人形峠鉍山における主な坑廃水処理方法の沿革 (1/6)

処理期間	坑水の処理方法	廃水の処理方法	鉍さいたい積場からの 上澄水の処理
昭和 40 年～	坑内水の河川に流入する量は僅かであり、その性質は中性で銅、鉛および亜鉛等の重金属ならびに放射性物質等の含有は極めて少なく、坑水処理を必要とすることはないものと考ええる。坑水およびこれが流入する水系の水について、各坑口を基点として広範囲に水質調査箇所を測定し、水量、汚濁濃度、水素イオン濃度ならびに放射性物質について、定期的に検査を行い、必要があれば、随時中和、希釈もしくは沈殿池の設置等を適宜講ずることとする。	試験製錬所の洗鉍用水は、第 2 沈殿池に流入し、上澄水は水量、汚濁程度ならびに放射性物質等について定期的に検査を行い、もし必要があれば中和希釈もしくはろ過等の措置を講じた後、モニターにより放射性物質を測定し、池河川に放流する。	鉍さいたい積場の上澄水は、パイプにより廃水処理場に送り、沈殿槽、珪砂ろ過槽、重晶石ろ過槽を通してろ過し、清澄水とした後、モニターにより放射線量を測定し、池河川に放流する。
昭和 41 年～	該当なし	場内床洗等により生じた酸性廃液とその他の中性廃液は中和後、砂ろ過によりろ過し、清澄水とした後、水素イオン濃度、放射性物質濃度等を測定し、池河川に放流する。	該当なし

表-5 人形峠鉍山における主な坑廃水処理方法の沿革 (2/6)

処理期間	坑水の処理方法	廃水の処理方法	鉍さいたい積場からの 上澄水の処理
昭和 45 年～	夜次 1 号坑内水の放射性物質等を除去するために、鉍さいたい積場に流送し、処理する。	該当なし	製錬所および夜次 1 号坑坑内水より鉍さいたい積場へポンプ流送された坑廃水の上澄水は、一部を製錬用水として循環使用し、残りを廃水処理場で塩化バリウム、その他沈降剤等の試薬を添加し、沈殿池で放射性物質等を沈殿除去した後、さらに砂ろ過槽および重晶石ろ過槽を通し、池河川に放流する。
昭和 49 年～	該当なし	中性床洗水は砂ろ過によりろ過し清澄水とした後、水素イオン濃度、放射性物質濃度等をサンプリング法その他の方法で測定し、池河川に放流する。	鉍さいたい積場の上澄水は、廃水処理場で塩化バリウム等の薬品を添加して沈殿池および砂ろ過池で放射性物質等を除去し、清澄水とした後、水素イオン濃度、放射性物質濃度等をサンプリング法その他の方法で測定し、池河川に放流する。

表-5 人形峠鉍山における主な坑廃水処理方法の沿革 (3/6)

処理期間	坑水の処理方法	廃水の処理方法	鉍さいたい積場からの上澄水の処理
昭和 49 年～	該当なし	廃水の処理によって生じるたい積物は、年間に 1 回ポンプにて一旦製錬所内の廃液ピットに流送し、さらに鉍さいたい積場に再流送し同場にたい積させる。	たい積場から排出される廃水の処理方法について、従来ラジウム除去のため廃水処理の末端施設として重晶石ろ過槽によりろ過し放流していたのを、重晶石前の砂ろ過槽でラジウムは排水基準値以下となり、重晶石槽のろ過前後におけるラジウム濃度の変化も余り認められないので廃止する。
昭和 52 年～	坑内水に関しては、坑道採鉍、坑内採鉍の終了に伴って今後多量の坑内水が湧水することは考えられない。水質については、水素イオン濃度は大体内性であり、カドミウム、鉛、亜鉛およびその他の重金属ならびに放射性物質の含有量は極めて少なく坑水処理を必要とせず、そのまま河川へ放流しているが、万一水質に変化が起こり、排水基準値を超える場合には中和沈殿その他必要な処理を行い、有害物質の除去を行う。	製錬関係の廃水については、製錬場内の廃液ならびに酸性床洗水は中和槽で消石灰中和処理を行った後、鉍さいたい積場へポンプ流送する。	該当なし

表-5 人形峠鉍山における主な坑廃水処理方法の沿革 (4/6)

処理期間	坑水の処理方法	廃水の処理方法	鉍さいたい積場からの上澄水の処理
昭和 52 年～	露天採鉍の雨水については、沈殿池を設けて濁りを沈殿させ河川へ放流する。また、鉍体内の浸透水については、予め旧坑道に敷設した暗渠により集水して必要に応じ鉍さいたい積場へ流送する。	製錬関係の廃水については、製錬場内の廃液ならびに酸性床洗水は中和槽で消石灰中和処理を行った後、鉍さいたい積場へポンプ流送する。	該当なし
昭和 54 年～	旧峠 2 号坑関係大排水溝排水処理関係の導水ピットおよび導水管等の施設を設置する。	該当なし	該当なし
昭和 55 年～ (昭和 57 年 12 月 9 日 製錬施設廃止届提出)	該当なし	該当なし	鉍さいたい積場から排出される廃水は、第 1 および第 2 廃水処理場へパイプ流送し、同施設の試薬添加室において塩化バリウム、第 2 リン酸ナトリウム、ベントナイトおよび高分子凝集剤等の試薬の他、必要に応じて pH 調整のため苛性ソーダを添加し、沈殿池で廃水中のウラン、ラジウムの放射性物質を沈殿除去させ、さらにサンドフィルターによってろ過した後、放流水槽から池河川に放流する。

表-5 人形峠鉱山における主な坑廃水処理方法の沿革 (5/6)

処理期間	坑水の処理方法	廃水の処理方法	鉱さいたい積場からの上澄水の処理
昭和 55 年～ (昭和 57 年 12 月 9 日 製錬施設廃止届提出)	該当なし	該当なし	放流にあたっては、pH 及びこれらの放射性物質濃度を測定し、環境保全協定に定める排出基準値以下であることを確認してから放流する。 もし、放流水の排出基準値を超える場合は、ポンプにて鉱さいたい積場へ流送後、再び坑廃水処理施設で廃水処理を行う。
昭和 58 年～	該当なし	該当なし	上澄水を低濃度ウラン回収設備に流送して次亜塩素酸ナトリウムを添加し、殺菌・ろ過を行い、順次イオン交換塔に導入してウラン除去を行った後、第 1 又は第 2 廃水処理場へ流送してラジウムの除去を行う。その後、放流水槽に排出する。

表-5 人形峠鉾山における主な坑廃水処理方法の沿革 (6/6)

処理期間	坑水の処理方法	廃水の処理方法	鉾さいたい積場からの 上澄水の処理
平成 14 年～	該当なし	該当なし	鉾さいたい積場からの上澄水を低濃度ウラン回収施設のスーパーサイフォンフィルターに通液して、ラジウムを除去する処理を実証するため、坑廃水処理方法を追加し、それに伴う廃水配管を新たに設置する。
平成 20 年～ 平成 28 年	該当なし	該当なし	低濃度ウラン回収施設のスーパーサイフォンフィルターに充填されているマンガン砂で処理された処理水を直接放流水槽へ流送するための配管を新設する。

2.2.2 製錬所操業中の鉱さいたい積場の水質

人形峠鉱山のウラン鉱石の平均品位は 0.05%-U 程度で、世界のウラン鉱山と比較すると低品位ウラン鉱石といえる。また、ヒ素、カドミウム、水銀などの有害物質は含まれていないので、鉱さいたい積場の水質で特に着目すべき成分は、ウランとラジウムといえる。

製錬所操業中（昭和 53 年当時）における鉱さいたい積場上澄水の主な成分の平均的な濃度を表-6 に示す⁴⁾。ラジウムのみが排出基準値を超えるため上澄水の処理は、坑廃水処理施設で行われた。

表-6 製錬所操業中における鉱さいたい積場上澄水の主な水質

主な成分	平均濃度	排出基準値
U ($\times 10^{-7} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$)	0.5~1.0	6
^{226}Ra ($\times 10^{-8} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$)	7~50	1
F ⁻ (mg/ℓ)	0.1~0.5	15
SO ₄ ²⁻ (mg/ℓ)	200~500	—
pH	7~8	5.8~8.6

3. 処理技術開発の取組み

法令値および環境保全協定を満足するために、鉱さいたい積場からの上澄水に微量含まれるウランやラジウムの処理技術開発に取り組んできた。

3.1 重晶石によるラジウム除去

重晶石（Barite）を用いた水中のラジウム除去方法は一般的に知られている処理方法⁵⁾であり、重晶石の化学組成は硫酸バリウム（BaSO₄）で水には不溶性である。

重晶石を用いた処理量の違いによる廃水中のラジウム除去率の関係を表-7 に示す。この表から分かるように、厚さ 20cm の重晶石層に処理量を 4.5ℓから 8ℓと変えて流速 133ml/min のろ過速度でろ過した結果、ラジウム濃度は法令値（ $1 \times 10^{-8} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ ）以下となり処理量の違いによる影響は見られなかった。

本処理方法は、金属鉱山等保安規則に基づき昭和 38 年 10 月 29 日付けで認可を得た。

その後、重晶石ろ過槽によるラジウム除去は、重晶石ろ過槽通水前の砂ろ過槽ですでに排出基準値以下となっていたため、昭和 49 年 6 月 25 日付けで認可を得て重晶石による処理方法は廃止され砂ろ過槽だけで処理する方法に変更した。

表-7 重晶石を用いた処理量の違いによるラジウム除去率との関係

処理量 (ℓ)	処理前の ^{226}Ra 量		処理後の ^{226}Ra 量		BaSO ₄ に吸着した ^{226}Ra 量	
	濃度 ($\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$)	全量 (μCi)	濃度 ($\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$)	全量 (μCi)	量 (μCi)	除去率 (%)
4.5	2.1×10^{-7}	9.45×10^{-4}	3.4×10^{-9}	15.30×10^{-6}	929.70×10^{-6}	98.38
6	2.1×10^{-7}	12.45×10^{-4}	1.5×10^{-9}	9.00×10^{-6}	1251.00×10^{-6}	99.29
8	2.1×10^{-7}	16.80×10^{-4}	2.1×10^{-9}	16.80×10^{-6}	1663.20×10^{-6}	99

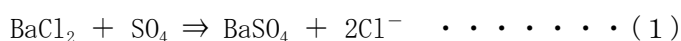
<実験条件> 使用重晶石粒度：-10+32 メッシュ、使用石層厚：20 cm、処理流速：133mℓ/min
処理量：4.5ℓ、6ℓ、8ℓ

3.2 塩化バリウム溶液によるラジウム除去

水中のラジウムは消石灰を加え中和することによってラジウムは減少するが、さらに減少させたい場合には塩化バリウム溶液を添加して除去する。この処理法は海外で多くのウラン製錬所で採用されており⁶⁾、実績を挙げている。

塩化バリウムは、廃水中に含まれる硫酸イオンと(1)式のように反応して生成する白色の硫酸バリウムが沈殿する際にラジウムも共沈することで知られている。これはラジウムの化学的性質やイオン半径が、アルカリ土類金属の中で Ba に似ていることを利用している。

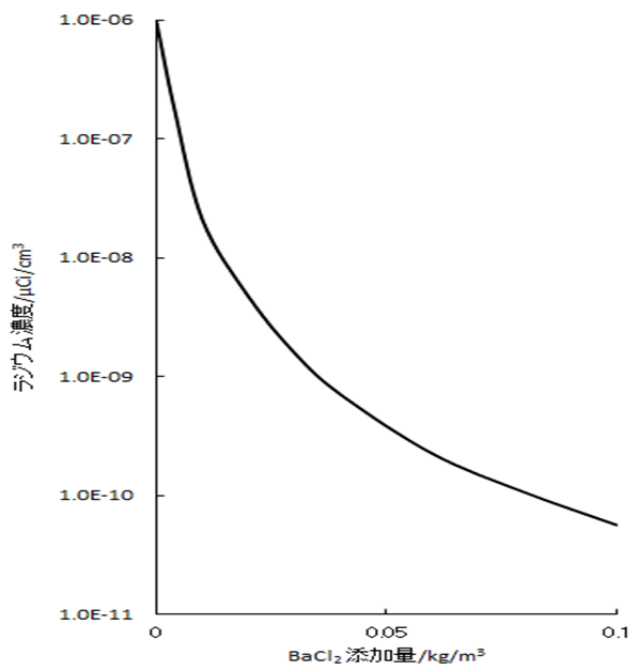
塩化バリウム溶液添加後の鉍さいたい積場上澄水中のラジウム濃度との関係を図-1⁵⁾に示す。この図から分かるように、鉍さいたい積場上澄水 1m³に余裕をみて 0.04kg 程度の塩化バリウムを添加することによって、処理水中のラジウム濃度は法令値 ($1 \times 10^{-8} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$) 以下になる。



鉍さいたい積場上澄水 1ℓに上記濃度の塩化バリウムを添加すると硫酸バリウムが沈殿するので、沈殿物を分離するために沈殿池および砂ろ過池を設置する。また塩化バリウムによるラジウム沈殿法で生成される硫酸バリウムの粒子は 1～2 μm 、沈降速度は 0.2mm/min と非常に遅いので有機系凝集沈殿剤やベントナイトなどを加えて、沈降を速める必要がある⁴⁾。

本処理方法は金属鉍山等保安規則に基づき、昭和 45 年 4 月 16 日付けで認可を得た。

なお坑廃水処理施設に設置されている沈殿池の沈殿物および砂ろ過池の表層にたい積する硫酸バリウムは、砂ろ過のろ過速度を低下させる原因となるため、定期的に目詰まり砂の掻き出しが必要となる。

図-1 塩化バリウム (BaCl₂) とラジウム濃度の変化

3.3 酸性リン酸塩溶液 (Na₂HPO₄、(NH₄)₂HPO₄ など) によるウラン除去

水中にカルシウムイオン (Ca²⁺) が存在すれば次のような反応が起こる⁷⁾。



CaHPO₄ の生成によって水中のウランと共沈してウランは除去される。生成した CaHPO₄ はやがて安定な Ca₃(PO₄)₂ となり、条件さえそろえばウラン鉱床と同じように Autunite (リン灰ウラン石、Ca(UO₂)₂(PO₄)₂・10-12H₂O) が生成されるが、生成される Autunite は少量で微量のためになかなか沈殿しない。そのため、実際には多くの Na₂HPO₄ を使用して多くの CaHPO₄ を沈殿させてウランを共沈する。

リン酸水素二アンモニウム ((NH₄)₂HPO₄) の添加量と添加後の廃水中のウラン濃度との関係を図-2 に示す。また比較として PAC (ポリ塩化アルミニウム) による実験結果も同図に示す。

この図から分かるように、廃水中のウラン濃度が 0.1mg/ℓ の場合に、(NH₄)₂HPO₄ を約 0.075kg/m³ 添加するとウラン濃度は 0.01mg/ℓ と初めの 1/10 に低下する。また、廃水中のウラン濃度が 2mg/ℓ の場合に、(NH₄)₂HPO₄ を約 0.2kg/m³ 添加するとウラン濃度は 0.01mg/ℓ と初めの 1/200 に低下する。

一方 PAC も (NH₄)₂HPO₄ と同じようにウラン濃度を低下させる効果があることが分かった。次に (NH₄)₂HPO₄ 添加量とウラン除去率との関係を図-3 に示す。この図から分かるように、

ある程度以上に $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ を添加してもあまり効果がないことが分かった。

以上のことを踏まえ、廃水中のウラン除去に酸性リン酸塩の添加は効果的ではあるが、ある量以上添加してもそれに伴う効果はあまり期待できないので、排出基準値 ($3 \times 10^{-8} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$) 以下のウラン濃度にするための適したリン酸塩を添加する必要がある。

なお本処理方法は金属鉱山等保安規則に基づき昭和 55 年 4 月 23 日付けで認可を得た。

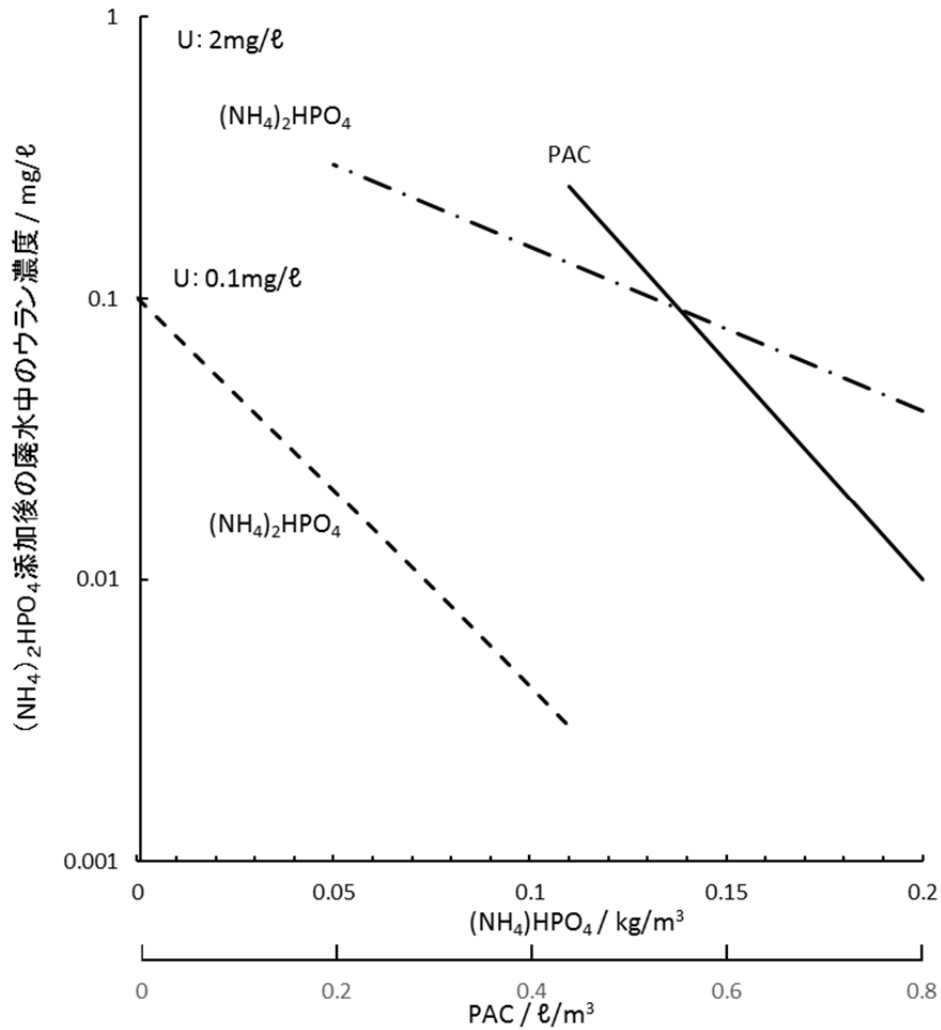


図-2 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 添加後の廃水中のウラン濃度

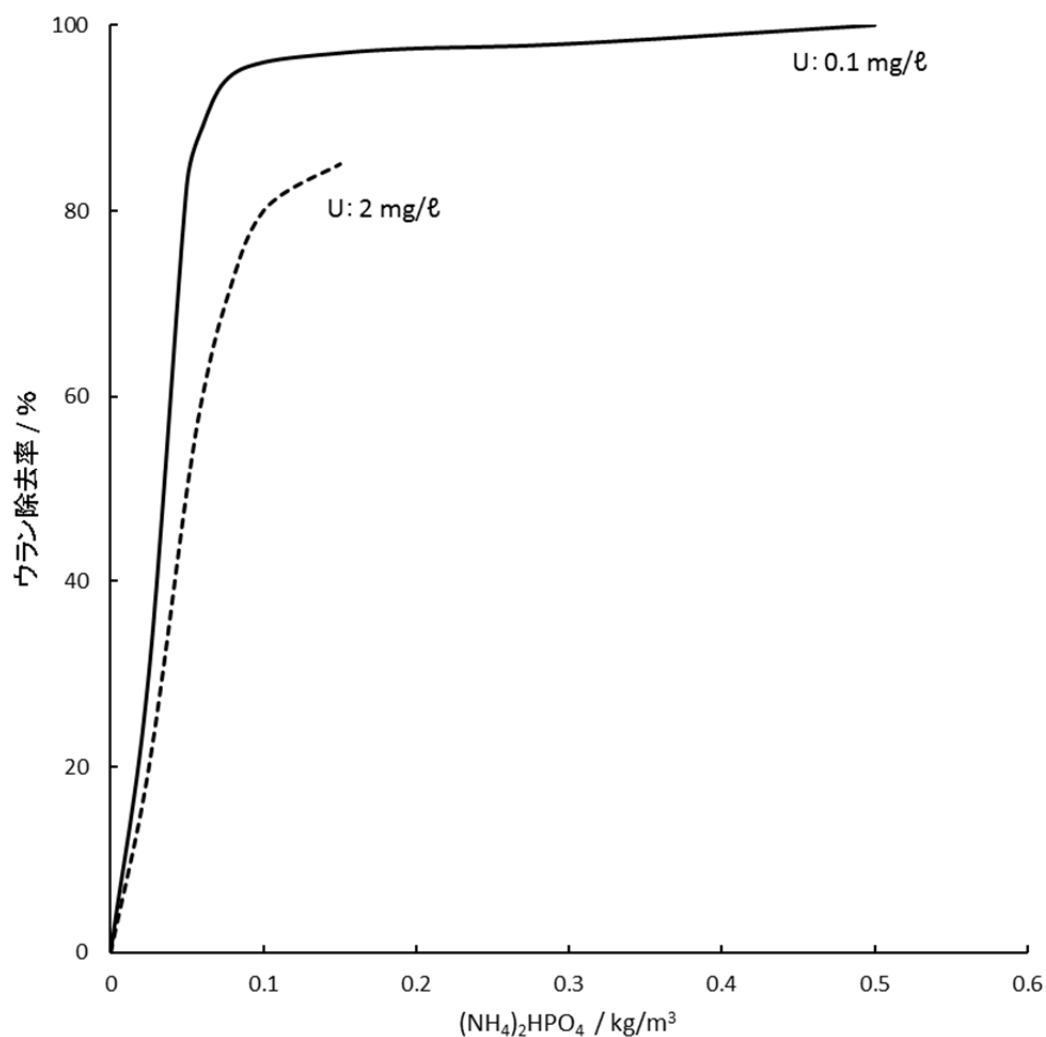


図-3 (NH₄)₂HPO₄ 添加量とウラン除去率との関係

3.4 イオン交換樹脂によるウラン除去

従来、鉍さいたい積場上澄水中のウランは、酸性リン酸二ナトリウム溶液 (Na₂HPO₄) を添加してその際に生成するリン酸カルシウムとの共沈でウラン (UO₂²⁺) を除去する化学沈殿法を用いていた。この方法はウラン除去には効果的であるが、砂ろ過等の設備にかなりのスペースを要するうえ、スラッジ（沈殿物や砂ろ過槽の表面を掻きとった目詰まり砂）の発生量も多いなどの問題点があった。また、2.1.1(2) で述べたように、昭和 54 年に環境庁（当時）は総量規制に係る河川に排出する排水中のリンの削減指導を岡山県に対して行っている。

そこで、これらの問題点を改善するとともにウランを回収して資源化することを目的に、新たにイオン交換樹脂を用いたウランの除去・回収技術開発に取り組んだ。

鉍さいたい積場の上澄水を用いて昭和 55 年度から 2 年間に亘って小型試験装置による連

続通水試験を行った結果、上澄水中に微量含まれるウランを吸着させる樹脂として、アミドキシム型キレート樹脂が優れていることが分かった。通液速度の違いによる破過曲線を図-4 に、通液速度一定でウラン濃度の違いによる破過曲線を図-5 にそれぞれ示す。また、1N-硫酸によるウランの溶離曲線を図-6 に示す。なお空間速度 (SV) とは Space Velocity、1 時間当たりの樹脂容積の何倍量を通液するかという単位であり、BV とは Bed volume、樹脂量に対し通水する流量倍数のことである。また破過とは、排出基準値までウランを吸着できる容量のことを意味する。

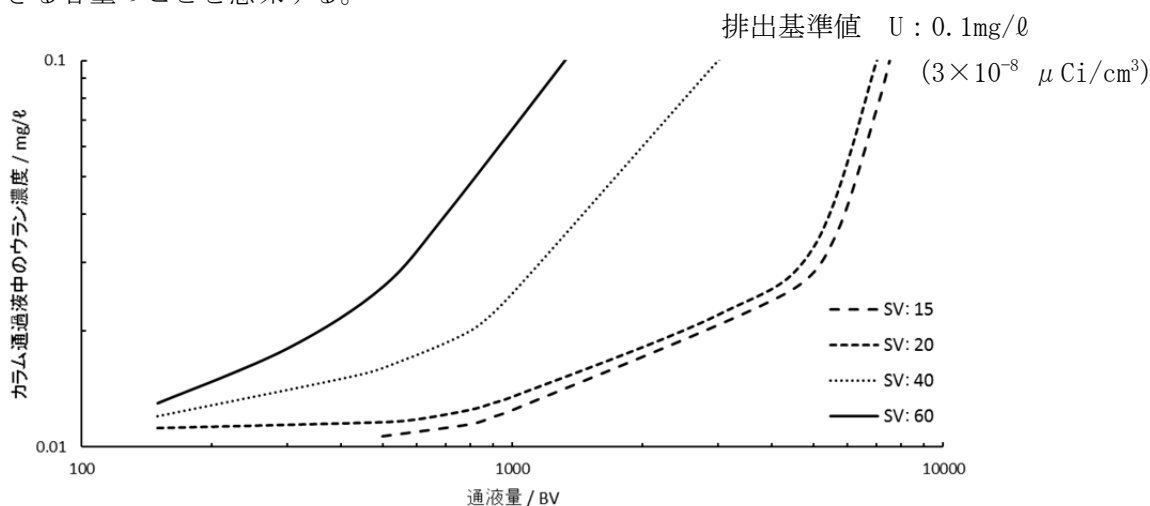


図-4 通液速度 (SV) の違いによる破過曲線

<実験条件> 樹脂：アミドキシム型キレート樹脂、原水中のウラン濃度：1.1mg/L、樹脂量：15mL、温度：室温

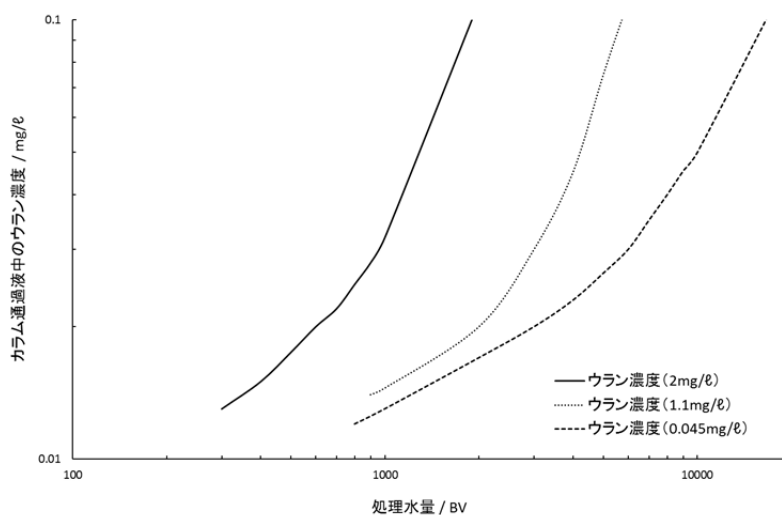


図-5 通液速度一定でウラン濃度の違いによる破過曲線

<実験条件> 樹脂：アミドキシム型キレート樹脂、樹脂量：15mL、温度：室温、空間速度 (SV)：20/H

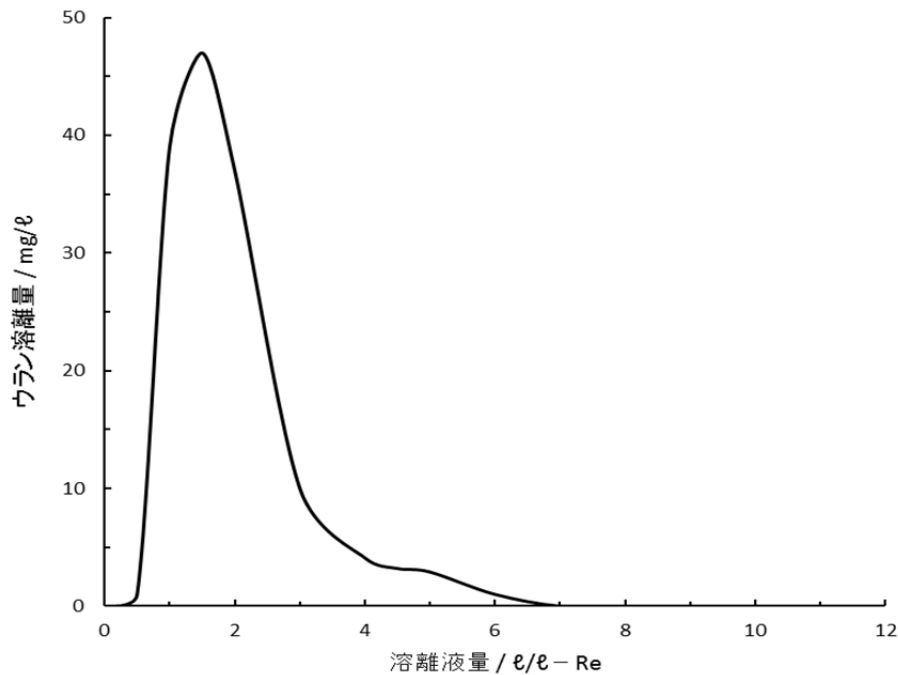


図-6 1N-硫酸によるウランの溶離曲線

<実験条件> 樹脂：アミドキシム型キレート樹脂、空間速度(SV)：5/H、温度：室温

アミドキシム型キレート樹脂を用いた処理方法の特徴は次の通りである⁸⁾。

- ① 多量の塩類を含む溶液からウランを選択的に吸着する。
- ② 通液速度が速くても処理水中のウラン濃度が排出基準値 ($3 \times 10^{-8} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$) に達するまでの平均処理量は $4\text{m}^3/\text{l-Re}$ で、平均交換容量は $3.8\text{g-U}/\text{l-Re}$ と吸着性能に優れている。
- ③ 樹脂に吸着されたウランは、1N-硫酸溶液により空間速度(SV)3/H でほぼ 100%溶離可能である。
- ④ 2年間に渡って吸着－溶離を繰返し行い、ウランは安定かつ確実に除去され、問題なく処理できることを確認した。

上記の結果を踏まえ、鉱山保安規則に基づき昭和 57 年 11 月 5 日付けで認可を得て、低濃度ウラン回収設備（イオン交換樹脂によるウラン除去処理設備およびその付帯設備）は昭和 58 年 4 月に完成し、設備の性能を確認するための試運転期間を経て実操業に移行した。

イオン交換樹脂を用いた鉱さいたい積場澄水からのウラン回収フローシートを図-7に示す。

なお、平成 11 年に回収ウラン転換実用化試験の運転終了に伴い、本処理法によって回収したウランの搬出先がなくなり、資源化の目的は消失した。

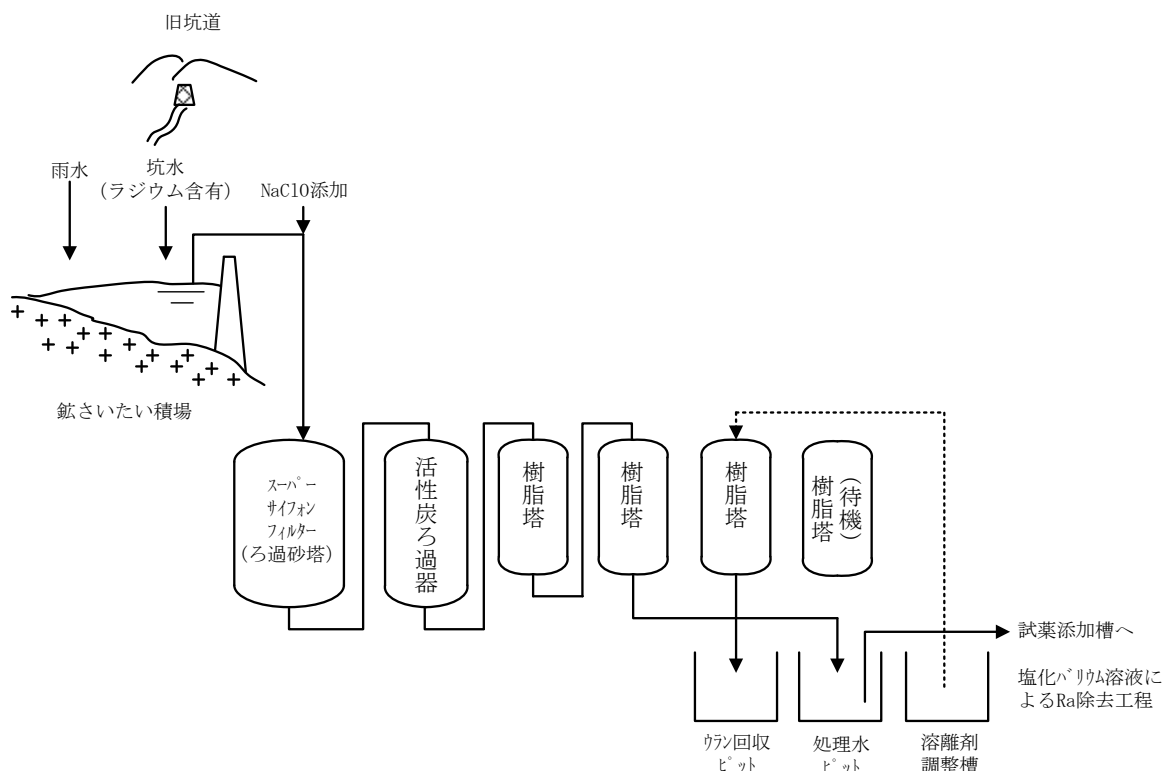


図-7 イオン交換樹脂を用いたウラン回収フローシート

3.5 マンガン砂によるラジウム除去

従来、鉍さいたい積場上澄水に含まれるラジウムは、塩化バリウム溶液を添加して硫酸バリウムの沈殿を生成させ、これとの共沈によって除去している。

通常用いられている共沈法は、イオン交換樹脂あるいは無機イオン交換体による吸着法に比べてラジウムの除去効果が高く、処理プロセスは単純で低コストであるため海外のウラン製錬所で活用されている⁹⁾。しかしこの方法は、沈殿池、ろ過設備などに広いスペースを必要とする上、添加する塩化バリウムは劇物で取扱いに注意を要する。また共沈によって発生する沈殿物量が多いなどの問題点を有していた。

そこで、当時、従来の共沈法に変わる新たなラジウム除去処理技術開発に取り組んでいた長沼と瀧（原子力機構職員）は、既設の坑廃水処理施設におけるウラン、ラジウム等の挙動調査を行っていたところ、化学沈殿処理する前段の工程である低濃度ウラン回収設備に設置されているスーパーサイフォンフィルター（珪砂を主成分とするろ過砂が充填されたろ過槽）に通水した処理水で、すでにラジウムは排出基準値（ 3.7×10^{-5} Bq/cm³）以下に低下している現象を発見した。

そこでスーパーサイフォンフィルターに充填されている砂を採取して観察したところ、元々白色であった砂表面が黒色に変色していた（写真-3）。また砂表面の付着物を採取し、化学分析およびX線光電子分光分析装置（XPS）で分析した結果、主成分はマンガンとラジウムでマンガンは二酸化マンガンであることが分かった。

スーパーサイフォンフィルターは、上澄水に含まれるマンガン、鉄、有機物等を除去するために酸化剤である次亜塩素酸ナトリウム溶液を添加して浮遊物や沈殿物をろ過するた

めに珪砂を主成分とするろ過砂を充てんしている。次亜塩素酸ナトリウム溶液の添加によって水中に溶存している二価のマンガンは四価に酸化され、時間経過とともに自然にろ過砂表面に被着し黒色に変色したものと推察された¹⁰⁾。

砂粒子表面に人工的に二酸化マンガン被着させたろ過砂は、地下水中に含まれるマンガン除去する目的で「マンガン砂」として一般に市販されている。

そこで、従来の処理方法に比べて二次固体廃棄物の発生量および処理コスト面で優位性が高いと考えられるマンガン砂によるラジウム除去法の実用化への可能性を探るために、スーパーサイフォンフィルターに充填されているマンガン砂に変質したろ過砂を採取し、ラジウムの分配係数を求めた。なお比較のために除マンガン用ろ材として市販されているマンガン砂と酸化マンガンβ型の2種類についても同様な試験を行った。その結果を図-8に示す。この図から分かるように、市販の除マンガン用ろ材は、スーパーサイフォンフィルターのろ過砂と同等のラジウムを吸着する能力を有している。

これら基礎試験結果を基に低濃度ウラン回収設備に設置されているスーパーサイフォンフィルター（すでにマンガン砂に変質したろ過材が充填されているろ過砂塔）を用いた実証試験を平成14年10月から2年間に亘って行い次のような成果を得ることができた¹²⁾。

なおマンガン砂によるラジウム除去法は、国内外での報告事例がないことから特許を取得した（公開番号：特開2003-185791）。

実証試験中のスーパーサイフォンフィルターにおける入口と出口のマンガンおよびラジウム濃度をそれぞれ図-9、10に示す。また、実証試験の処理フローを図-11に示す。

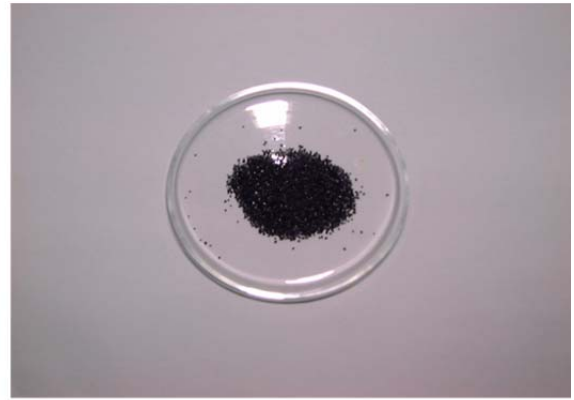
実証試験から次のようなことが成果として得られた。

- ①マンガンおよびラジウムを含む鉱さいたい積場澄水に次亜塩素酸ナトリウム溶液を添加し、マンガン砂を充填したろ過砂塔に通水することによって、ろ過砂表面に被着した二酸化マンガンが自触媒となって溶存マンガン酸化し、さらに塩素酸化によって四価のマンガンとしてろ過砂表面に被着する一連の過程で、廃水中のラジウムはほぼ永続的に吸着される。
- ②ラジウム除去レベルは共沈法と比較して優位な差はなく、同等の除去性能を有している。
- ③処理によって発生する廃棄物量は従来用いられている塩化バリウムによる共沈法と比べて約1/30に低減し、また処理経費も約1/8程度に削減できる見通しを得た。
- ④マンガン砂法は処理プロセスが非常に単純で、かつ処理設備は大幅な簡素化が期待される。

上記を踏まえ、マンガン砂によるラジウム除去法は新規の処理技術として鉱山保安法施行規則に基づき平成20年8月4日付で認可を得るとともに、マンガン砂を充填したスーパーサイフォンフィルターからの処理水を直接、放流水槽に流送するための新たな配管を敷設して、平成21年1月23日から実処理運転を開始した。



スーパーサイフォンフィルタに充填している使用前のろ過砂(H8.8)



スーパーサイフォンフィルタから採取したろ過砂(H13.4)

写真-3 スーパーサイフォンフィルターに充填されていたろ過砂

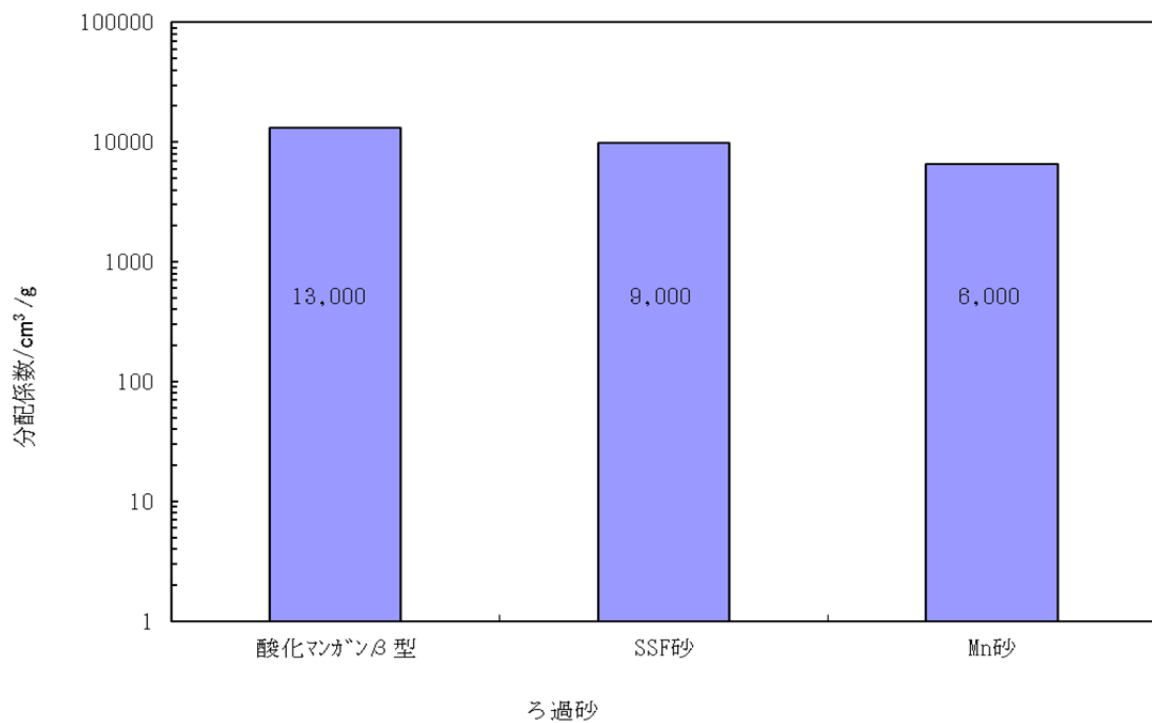


図-8 市販のマンガン砂およびスーパーサイフォンフィルターのマンガン砂を用いたラジウムの分配係数

<実験条件>

原水：2ℓ (NaClO 添加して鉄を除去した後の廃水)、接触時間：24 時間
 原水中の Ra 濃度： $7.26 \times 10^{-4} \text{Bq/cm}^3$ 、砂量：0.1g、温度：室温、pH：7.1
 分配係数＝砂に吸着した Ra (Bq/g) / 液相に残った Ra (Bq/cm³)

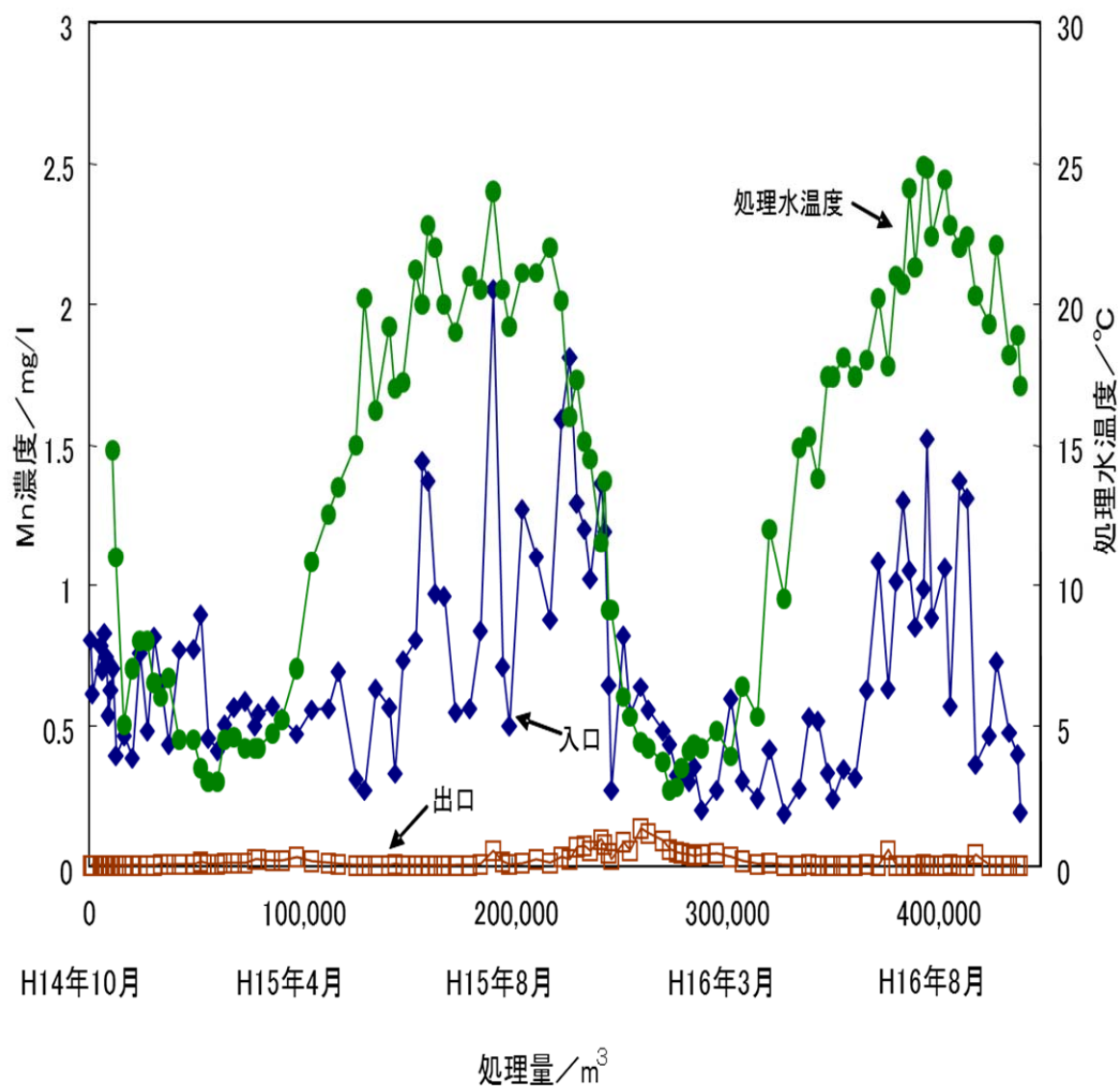


図-9 スーパーサイフォンフィルター入口・出口におけるマンガン濃度

< 処理条件 >

処理速度：180m³/h、空間速度 (SV)：13/h、処理水温度：3℃～25℃

NaClO：10mℓ/m³ ～28mℓ/m³

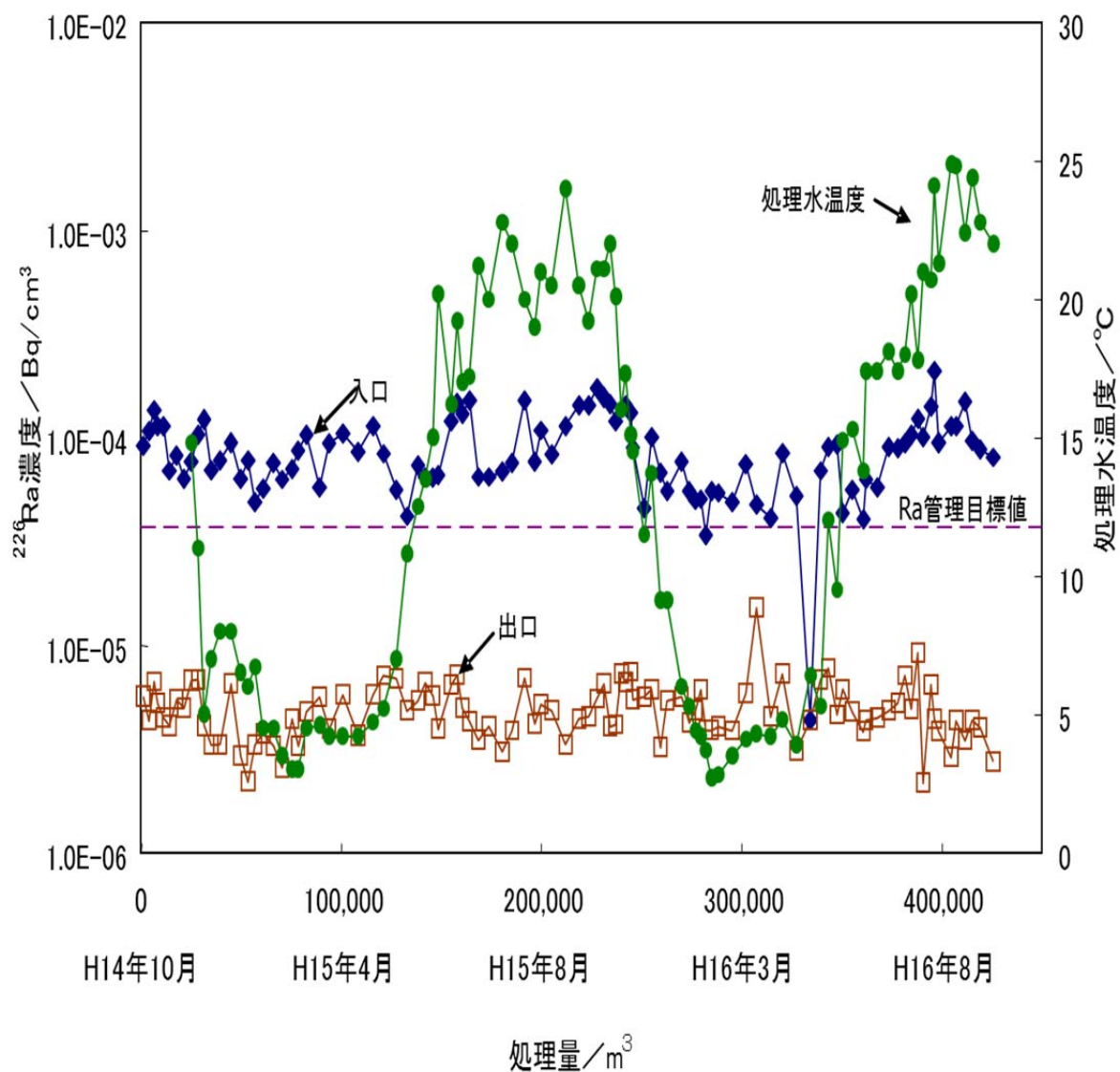


図-10 スーパーサイフォンフィルター入口・出口におけるラジウム濃度

< 処理条件 >

処理速度：180m³/h、空間速度（SV）：13/h、処理水温度：3℃～25℃

NaClO：10ml/m³ ～28ml/m³

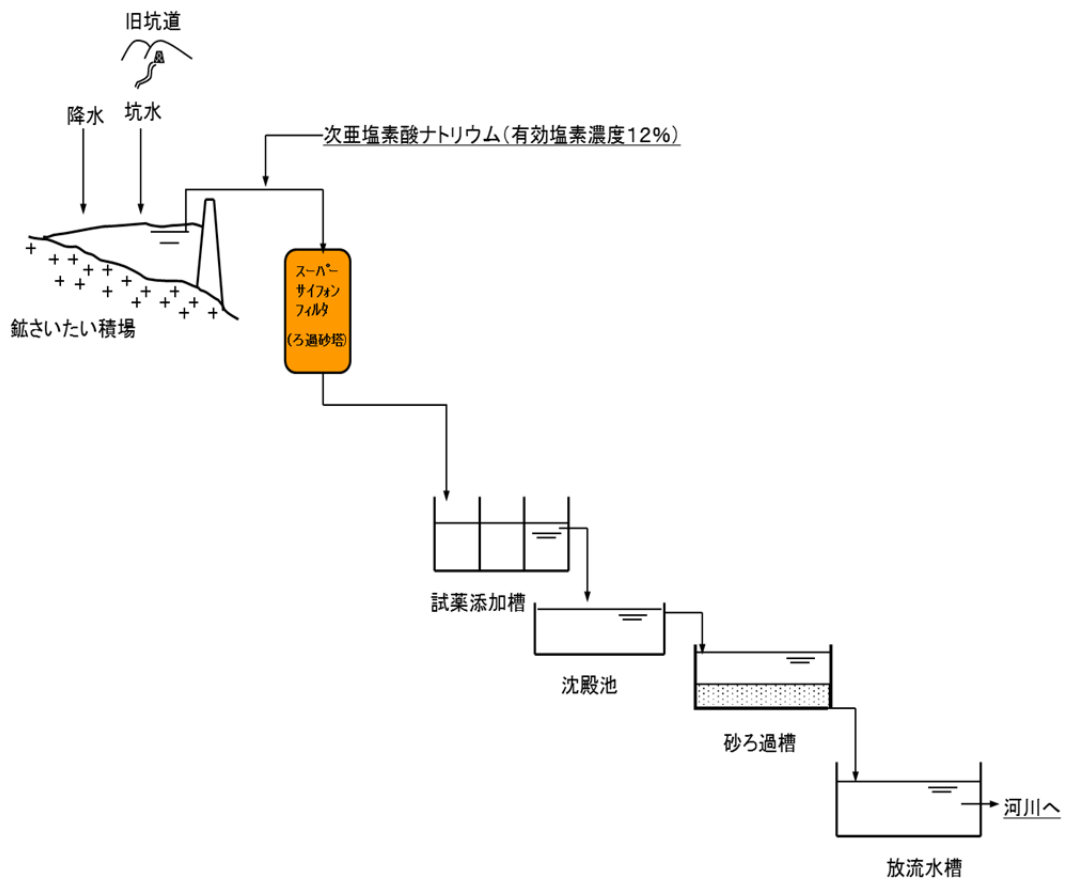


図-11 坑廃水処理施設による実証試験処理フロー

4. 坑廃水処理の現状

製錬試験およびヒープリーチング試験が終了してから鉍さいたい積場は主に旧坑道からの坑水の一時貯留場として活用し、鉍さいたい積場上澄水は、鉍さいたい積場の下流に設置されている坑廃水処理施設で処理を実施している。

4.1 鉍さいたい積場のたい積物

鉍さいたい積場の概略を図-12 に示す。

現状、鉍さいたい積場にたい積しているたい積物は次の通りである。

①製錬所から発生した鉍さい等

製錬所から発生した鉍さいや廃水の中和沈殿物をたい積している。

製錬所の操業当初は、鉍さいを粒度 0.149mm 以下の廃泥と粒度 3 mm から 0.149mm の廃砂に区別して鉍さいたい積場にたい積していたが、分離せずにたい積しても廃泥たい積場の鉍さいたい積量には十分余裕があり、鉍さいたい積場のコンクリートかん止堤の強度についても十分に安全であるとの理由から、金属等鉍山保安規則に基づき昭和 49 年 6 月 25 日付けで認可を得て、その後は分離しないでたい積している。

②ヒープリーチング施設から発生した中和沈殿物

イオン交換装置の吸着廃液および水洗工程終了後の廃水の中和沈殿物をたい積している。

③坑廃水処理施設から発生する沈殿物等

スーパーサイフォンフィルターの使用済みマンガン砂や、化学沈殿処理工程から発生する沈殿物およびろ過工程から発生する目詰まりした砂等をたい積している。

たい積量は、認可たい積量 $53,579 \text{ m}^3$ に対し、平成 24 年度に行った廃砂たい積場の覆土措置に用いた覆土量を含めて、平成 28 年 3 月末現在で $49,210 \text{ m}^3$ （認可たい積量に対して約 92%に相当）である。鉍さいたい積場のたい積物の放射性核種濃度としては、平均して ^{238}U で約 3Bq/g 、 ^{226}Ra で約 16Bq/g である。

人形峠鉍山におけるウラン資源開発に係る当初の使命はすでに終了していることから、現在、鉍さいたい積場の跡措置（鉍山保安法に基づく鉍害防止および放射線防護上の観点からの恒久的措置）に取り組んでおり、鉍さいたい積場の上流部に位置する廃砂たい積場は、平成 23 年度から 2 年間に亘って跡措置工事（原位置による覆土施工）を実施した。

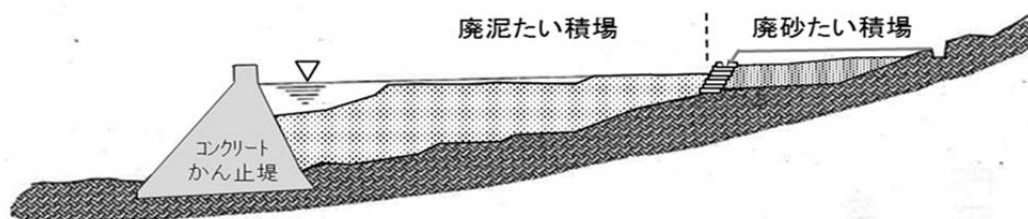


図-12 鉍さいたい積場の概略

4.2 坑水の発生場所

現状鉱さいたい積場に流送し処理している坑水は、大排水溝、見学坑道および露天採掘場跡の3ヶ所である。

- ・大排水溝坑水とは、坑内採掘が行われた「峠2号坑」の坑道から恒常的に発生する地下水である。
- ・見学坑道坑水とは、坑内採掘が行われた「夜次南2号坑」の坑道から恒常的に発生する地下水である。
- ・露天採掘場跡坑水とは、坑内採掘および露天採掘によってウラン鉱石の採鉱が行われた場所から恒常的に発生する地下水である。なお、鉱石を採鉱した後の露天採掘場は、表土および客土（まさ土）による覆土施工が実施された。

平成23年度から平成27年度における各坑水の主な成分の平均濃度および年間平均発生量を表-8に示す。また、坑水等の発生場所および坑廃水処理の流れを図-13に示す。

表-8 坑水の水質および水量

成 分	大排水溝	見学坑道	露天採掘場跡	排出基準値
^{238}U ($\times 10^{-3}$ Bq/cm ³)	0.115	0.209	0.553	1.0×10^{-3} Bq/cm ³
^{226}Ra ($\times 10^{-3}$ Bq/cm ³)	0.233	0.106	1.59	3.7×10^{-5} Bq/cm ³
Fe (mg/ℓ)	3.2	0.3	17.5	1
Mn (mg/ℓ)	1.6	0.1	3.1	5
Ca (mg/ℓ)	15.4	4.1	15.1	—
SO_4^{2-} (mg/ℓ)	13.2	5	82.6	—
pH	6.6	6.1	6.1	5.8～8.6
年間平均発生量 (m ³ /年) (H23年度～H27年度)	73,770	13,274	18,129	

表-8 からウランは各坑水とも排出基準値以下であるが、ラジウムはそれぞれ排出基準値を超えている。特に露天採掘場跡からの坑水の水質は、他の坑水と比べてラジウムと鉄は二桁から一桁濃度が高く、その要因として考えられるのは露天採掘場跡には、ヒープリーチング施設からのウランを浸出した後の残渣を埋戻しているため、そのことによる水質へ

の影響が考えられる。現在、鉄およびラジウムについて地下水の挙動調査を行っており、水質改善および水量低減化に向けて検討を行っている。

図-13 に示す「ダム下湧水」とは、鉍さいたい積場コンクリートかん止堤の下流側で観測されている湧水のこと、その水は坑廃水処理施設の逆洗ピットに集水し鉍さいたい積場に返送している。



図-13 鉍さいたい積場に一時貯留する坑水等および坑廃水処理の流れ

4.3 鉍さいたい積場の水質

各坑水を鉍さいたい積場に一時貯留した後、鉍さいたい積場からの上澄水は坑廃水処理施設で処理され、バッチ方式で放流水槽を経由して排水口より自然流下にて池河川に排出される。平成 23 年度から平成 27 年度における坑廃水処理施設で処理する前の鉍さいたい積場上澄水の主な成分を表-9 に示す。

昭和 63 年から鉍さいたい積場上澄水の水質分析を行っているが、大きな変動もなく、特にウラン濃度はこれまで一度も排出基準値を超えたことがなく、長期に亘って安定した濃度を維持している。この状況を踏まえ、今後の事業内容から判断して鉍さいたい積場の水質が変化する可能性（例えば、ウラン濃度が高くなる物質を鉍さいたい積場にたい積するとか）は考えられないことから、ウラン除去は行わない処理運転の実施について、環境保全協定に基づき平成 14 年 6 月 16 日付け新增設協議書に於いて岡山県および上齋原村（当時）の了解を得た。ただし、鉍さいたい積場からの上澄水中のウランを 1 週間に 1 回定期的に分析し、処理の必要性の有無を確認するとともに、鉍さいたい積場の貯水に何らかの水質変化（例えば、鉍さいたい積場の措置工事等による変化）が認められた場合は、鉍さいたい積場上澄水のウラン分析等を密に行い、必要に応じてウランの処理を行うこととしている。

表-9 鉍さいたい積場からの上澄水の水質

主な成分	平均濃度 (H23 年度～H27 年度)	排出基準値
^{238}U ($\times 10^{-3}$ Bq/cm ³)	0.03	1
^{226}Ra ($\times 10^{-5}$ Bq/cm ³)	16	3.7
Fe (mg/ℓ)	0.69	1
Mn (mg/ℓ)	0.72	5
SO_4^{2-} (mg/ℓ)	68.8	—
pH	6.84	—

4.4 処理方法

坑廃水処理施設とは、集水施設（坑水設備、鉍さいダム下設備、施設排水移送機器、鉍さいたい積場返送設備および導水配管設備）と廃水処理施設（低濃度ウラン回収設備、第1処理系設備、第2処理系設備、処理水集水設備および放流設備）から構成される。

坑廃水の処理系統を図-14 に示す。また、坑廃水処理施設のうち廃水処理施設の配置を図-15 に示す。

通常の処理系統では、鉍さいたい積場からの上澄水を坑廃水処理原水として、サイフォンにより低濃度ウラン回収設備に導水される。低濃度ウラン回収設備では次亜塩素酸ナトリウム溶液を添加して上澄水中の微生物、藻類を殺菌し、マンガン、鉄を酸化した後、マンガン砂が充填されているスーパーサイフォンフィルターに通水し、鉄、マンガンおよびラジウムを除去した後に（マンガン砂の交換時期は、砂 1g 当たり 10Bq 程度のラジウム吸着量を目安としている。）処理水は放流設備に流送される。但し、スーパーサイフォンフィルターでマンガンイオンの漏出傾向が確認された場合あるいは設備の異常が見られた場合は、上澄水は低濃度ウラン回収設備を経由しないで、第1処理系設備または第2処理系設備のいずれかに流送して化学沈殿によるラジウム除去を行う。

大雨または融雪時等で鉍さいたい積場の貯水量が通常よりも多い場合は、スーパーサイフォンフィルターでのラジウム除去とともに第1あるいは第2処理系設備の化学沈殿によるラジウム除去を加えた2系列処理運転に切替える。その際には第1または第2試薬添加室において、塩化バリウム溶液および沈降を促進するための凝集剤を添加する。

一方ウランを除去する場合は、鉍さいたい積場上澄水はスーパーサイフォンフィルターに通水してラジウムを除去し、続いて低濃度ウラン回収設備の活性炭塔で余剰の塩素を除去した後にイオン交換樹脂塔に通水してウランを除去する。スーパーサイフォンフィルターで何らかの異常が見られた場合あるいは鉍さいたい積場の貯水量が多い場合は、鉍さいたい積場上澄水は第1または第2処理系設備あるいは同時に第1および第2処理系設備へ流送して化学沈殿によりラジウムおよびウランを除去する。

化学沈殿により処理された処理水は、沈殿池で硫酸バリウム（ラジウムを含む）およびリン酸カルシウム（ウランを含む）の沈殿物をそれぞれ沈降分離し、上澄み液は砂を敷き詰めているサンドフィルターに通水して微小の浮遊物をろ過する。

なお廃水処理施設で発生するラジウムを吸着したマンガン砂およびマンガン砂の下に敷かれている碎石、沈殿池にたい積した沈殿物、サンドフィルターのろ過砂に付着したろ過残渣を含む目詰まり砂やろ過砂およびろ過砂の下部に敷かれている碎石は、車両にて鉋さいたい積場へ搬送して、たい積する。

廃水処理施設の処理速度は通常時 180 m³/h であるが、大雨または融雪時等で鉋さいたい積場の貯水量が増量した場合は 2 系列処理に切り替え最大 360 m³/h の処理が可能となる。

第 1 または第 2 処理設備の処理水は、処理水集水設備を経由して放流設備に流送される。

大雨等で鉋さいたい積場から上澄水が溢流する恐れが発生した場合で、かつ瀬戸内海環境保全特別措置法に基づいて届出した排出量を超えて処理せざるを得ない場合には、事前の手続きとして中国四国産業保安監督部および環境保全協定に基づき岡山県および鏡野町（市町村合併による地名改称）へそれぞれ通報連絡した上で処理を実施する。

製錬転換施設などからの施設排水は、第 1 または第 2 放流水槽へ、専用水道施設の排水は第 2 処理設備の第 3 沈殿池に受け入れる。なお濃縮工学施設の排水は連続排水のため、放流水槽の分析待機中は第 1 処理系設備の第 2 沈殿池に流送する。

放流水槽では、放射性物質濃度、フッ素および水質項目が排出基準を満足していることを確認した後に、排水口を通して池河川へ排出する。池河川への排水の排出量は、通常時で 1,498.5 m³/日、最大で 4,282.5 m³/日の数量を届出している。

放流水槽から池河川へ排出する前の排水の測定項目・排出基準値を表-10 に示す。また放流水槽から排水口を経由して池河川へ排出される排水の放流水排出口の測定項目・排出基準値を表-11 に示す。放流水槽からの排出基準は、瀬戸内海環境保全特別措置法に基づく公共河川に排出される排水の水質に関する届出の最大値および環境保全協定の河川水の敷地境界における管理目標値に準拠した数値で定めている。

表-10 に示す放流水槽排出前の測定対象項目は瀬戸内海の環境保全を考慮して pH、総量規制対象成分、全 α および全 β 放射能と定めている。なおウランについては短時間で測定が可能な全 α 放射能の測定結果をもって確認しているが、ラジウムの測定には長時間を要するため排出毎に確認することは物理的に困難なため以下に述べるように後追分析で確認している。万一、ラジウム濃度が排出基準値（管理目標値）を超えていた場合は、池河川の敷地境界で河川水量を基に水質評価を行うことになるが、これまで排出基準値を超えたことは一度もない。なお、放流水槽排出前の排出基準を満足しない等が発生した場合で、池河川へ排出できない場合には鉋さいたい積場に返送する。

次に表-11 に示す放流水排出口の測定対象項目であるウランおよびラジウムの分析については、放流水槽から排水を排出する毎に採水した試料の一部を 1 ヶ月分保管し、それをまとめて混合したものを月合成試料として測定する。ウランは α 線スペクトル分析、ラジウムはエマネーション法を採用している。この操作を 3 ヶ月間繰り返しそれぞれの月合成試料の測定値を加重平均して求めている。

万が一ラジウム濃度が排出基準値（管理目標値）を超えた場合は、池河川の敷地境界で河川水量を基に水質評価を行うことになるが、これまでラジウム濃度が排出基準値（管理目標値）を超えたことは一度もない。

表-10 放流水排出前の測定項目・排出基準値

測定対象項目	排出基準値	測定頻度等
p H	5.8～8.6 ^{*2}	排出毎
ふっ素	0.5 mg/ℓ ^{*1}	
COD	15.0 mg/ℓ ^{*2}	
全リン	3.0 mg/ℓ ^{*2}	
全窒素	20.0 mg/ℓ ^{*2}	
全α放射能	1×10 ⁻³ Bq/cm ³	
全β放射能	3×10 ⁻² Bq/cm ³	

*1：環境保全協定の河川水に係る値に準拠

*2：瀬戸内海環境保全特別措置法に係る岡山県への届出値

表-11 放流水排出口の測定項目・排出基準値（1/2）

測定対象項目	排出基準値	測定頻度等
p H	5.8～8.6 ^{*2}	1回／月以上
ふっ素	0.5 mg/ℓ ^{*1}	
COD	15.0 mg/ℓ ^{*2}	
全リン	3.0 mg/ℓ ^{*2}	
全窒素	20.0 mg/ℓ ^{*2}	
BOD	10.0 mg/ℓ ^{*2}	
SS	10.0 mg/ℓ ^{*2}	
ノルマルヘキサン抽出物	1.0 mg/ℓ ^{*2}	
溶解性鉄	1.0 mg/ℓ ^{*2}	
溶解性マンガン	5.0 mg/ℓ ^{*2}	
U-234	1×10 ⁻³ Bq/cm ³ ^{*1}	基準値は3ヶ月平均値
U-235	1×10 ⁻³ Bq/cm ³ ^{*1}	
U-238	1×10 ⁻³ Bq/cm ³ ^{*1}	
Ra-226	3.7×10 ⁻⁵ Bq/cm ³ ^{*1}	
カドミウム	0.005 mg/ℓ ^{*2}	1回／6ヶ月以上
鉛	0.1 mg/ℓ ^{*2}	
クロム	0.1 mg/ℓ ^{*2}	
砒素	0.02 mg/ℓ ^{*2}	
銅	0.1 mg/ℓ ^{*2}	
水銀	0.0005 mg/ℓ ^{*2}	
亜鉛	0.1 mg/ℓ ^{*2}	

表-11 放流水排出口の測定項目・排出基準値（2/2）

測定対象項目	排出基準値	測定頻度等
その他、上記以外で水質汚濁防止法第2条第2項第1号および第2号に掲げる項目	水質汚濁防止法の排出基準	1回／6ヶ月以上

*1：環境保全協定の河川水に係る値に準拠

*2：瀬戸内海環境保全特別措置法に係わる岡山県への届出値

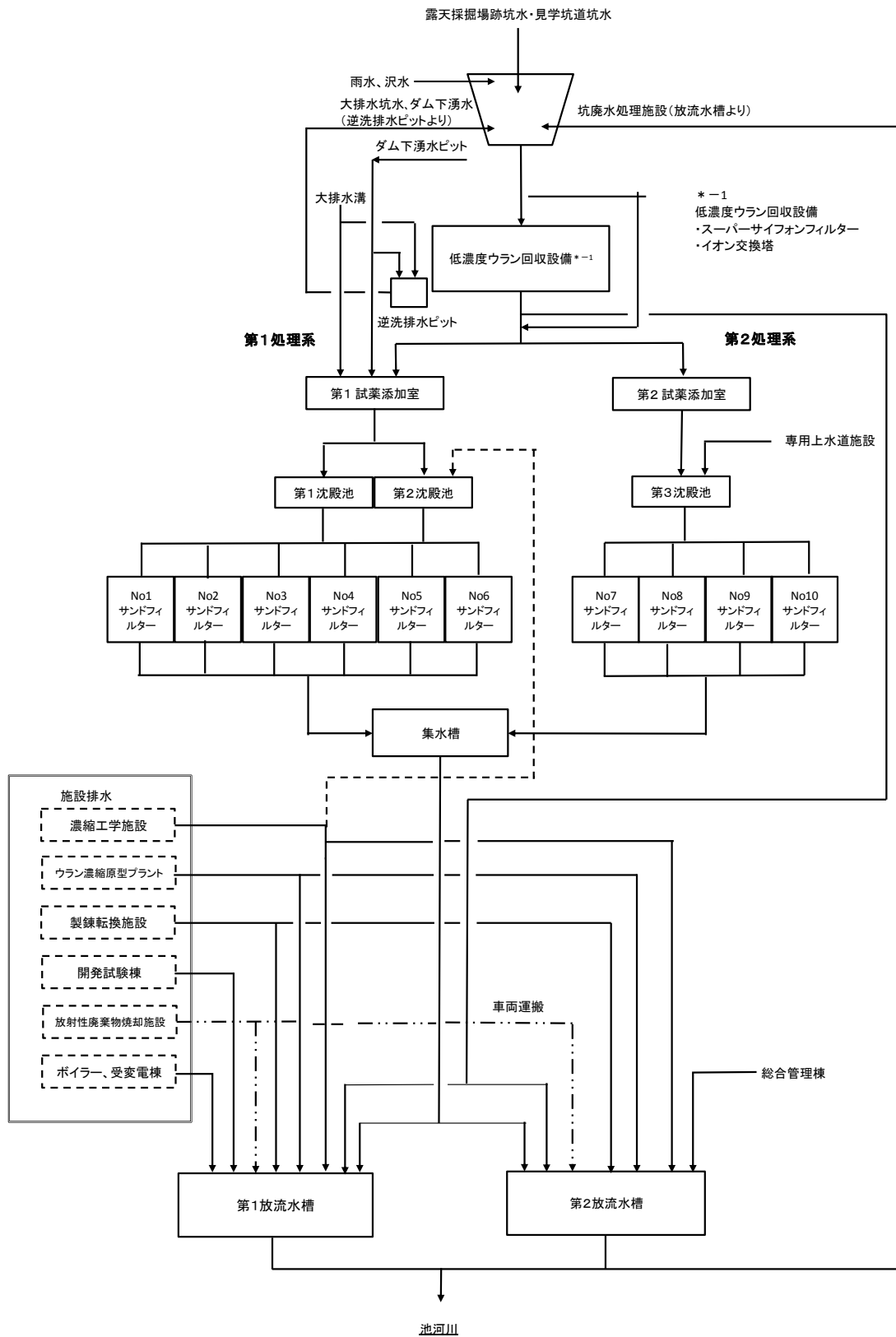


図-14 坑廃水の処理系統

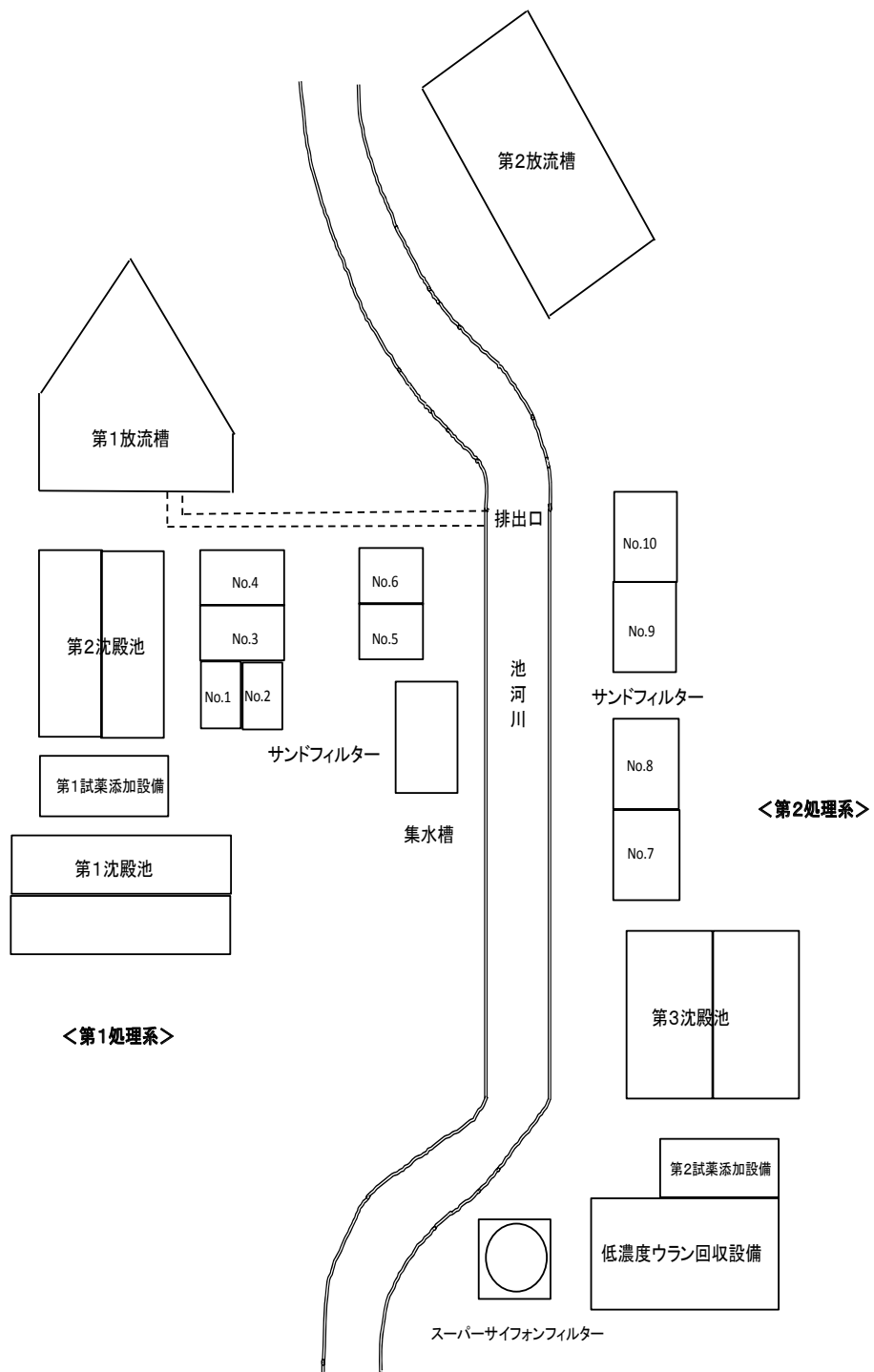


図-15 廃水処理施設の配置

4.5 坑廃水処理施設の構造・能力等

坑廃水処理施設の構造および能力等を表-12 (1) ～12 (5) に示す。

表-12 (1) 廃水処理施設（低濃度ウラン回収設備）の構造および能力（1/6）

設置場所	名称	種類	形式及び寸法	構造	最大能力	個数
低濃度ウラン回収設備	スーパーサイフォンフィルター	円筒型	φ:6, 270mm H:6, 112mm	材質:SS41 内面エポキシ系塗装	200m ³ /h	1
	次亜塩素酸ソーダタンク	円筒型	φ:1, 094mm H:1, 160mm	材質:PE	1m ³	1
	次亜塩素酸ソーダ注入ポンプA	往復動	ダイヤフラム	材質:PVC	0.2kW 16ℓ/h	1
	次亜塩素酸ソーダ注入ポンプB	往復動	ダイヤフラム	材質:PVC	0.2kW 14ℓ/h	1
	逆洗排水ピット	コンクリート角槽	W:7, 000mm D:8, 000mm H:2, 700mm	構造:RC	120m ³	1
	逆洗排水ポンプA	水中	遠心水中式	材質:FC	5.5kW 0.4m ³ /min 40m	1
	逆洗排水ポンプB	水中	遠心水中式	材質:FC	5.5kW 0.4m ³ /min 40m	1
	ろ過					

表-12 (1) 廃水処理施設（低濃度ウラン回収設備）の構造および能力（2/6）

設置 場所	名 称	種 類	形式及び寸法	構 造	最大能力	個数
低濃度ウラン回収設備	ろ過水ピット	コンクリート角槽	W:3,850mm D:4,680mm H:1,850mm	構造:RC	25m ³	1
	ろ過水ポンプA	横型渦巻	遠心自吸式	材質:FC グラウンドシール	75kW 4m ³ /min 55m	1
	ろ過水ポンプB	横型渦巻	遠心自吸式	材質:FC メカニカルシール	75kW 4m ³ /min 55m	1
	活性炭塔	円筒縦型	φ:3,000mm H:2,000mm	材質:SS41 内面エポキシ系塗装	200m ³ /h 0.588MPa	1
	樹脂塔A	円筒縦型	φ:2,600mm H:2,000mm	材質:SS41 硬質ゴムライニング	100m ³ /h 0.588MPa	1
	樹脂塔B	円筒縦型	φ:2,600mm H:2,000mm	材質:SS41 硬質ゴムライニング	100m ³ /h 0.588MPa	1
	樹脂塔C	円筒縦型	φ:2,600mm H:2,000mm	材質:SS41 硬質ゴムライニング	100m ³ /h 0.588MPa	1
	樹脂塔D	円筒縦型	φ:2,600mm H:2,000mm	材質:SS41 硬質ゴムライニング	100m ³ /h 0.588MPa	1

表-12 (1) 廃水処理施設（低濃度ウラン回収設備）の構造および能力（3/6）

設置場所	名称	種類	形式及び寸法	構造	最大能力	個数
低濃度ウラン回収設備	処理水ピット	コンクリート角槽	W:3,700mm D:4,680mm H:1,850mm	構造:RC	25m ³	1
	処理水ポンプA	横型渦巻	遠心自吸式	材質:FC グラインドシール	30kW 2m ³ /min 45m	1
	処理水ポンプB	横型渦巻	遠心自吸式	材質:FC グラインドシール	30kW 2m ³ /min 45m	1
	溶離剤調整ピット	コンクリート角槽	W:3,780mm D:4,680mm H:1,850mm	構造:RC FRP ライニング	25m ³	1
	溶離剤ポンプA	横型渦巻	遠心自吸式	材質:PVC メカニカルシール	5.5kW 0.3m ³ /min 20m	1
	溶離剤ポンプB	横型渦巻	遠心自吸式	材質:PVC メカニカルシール	5.5kW 0.3m ³ /min 20m	1

表-12 (1) 廃水処理施設（低濃度ウラン回収設備）の構造および能力（4/6）

設置場所	名称	種類	形式及び寸法	構造	最大能力	個数
低濃度ウラン回収設備	溶離剤回収ピット	コンクリート角槽	W:7,700mm D:4,680mm H:1,850mm	構造:RC FRPライニング	50m ³	1
	溶離剤回収ポンプ	横型渦巻	遠心自吸式	材質:PVC メカニカルシール	5.5kW 0.3m ³ /min 20m	1
	ウラン回収ピット	コンクリート角槽	W:7,850mm D:4,680mm H:1,850mm	構造:RC FRPライニング	50m ³	1
	ウラン回収ポンプA	横型渦巻	遠心自吸式	材質:PVC メカニカルシール	3.7kW 0.2m ³ /min 20m	1
	ウラン回収ポンプB	横型渦巻	遠心自吸式	材質:PVC メカニカルシール	3.7kW 0.2m ³ /min 20m	1
	洗浄液ピット	コンクリート角槽	W:3,700mm D:4,680mm H:1,850mm	構造:RC FRPライニング	25m ³	1

表-12 (1) 廃水処理施設（低濃度ウラン回収設備）の構造および能力（5/6）

設置場所	名 称	種 類	形式及び寸法	構 造	最大能力	個数
低濃度ウラン回収建屋	洗浄液ポンプA	横型渦巻	遠心自吸式	材質:PVC メカニカルシール	3.7kW 0.4m ³ /min 10m	1
	洗浄液ポンプB	横型渦巻	遠心自吸式	材質:PVC メカニカルシール	3.7kW 0.4m ³ /min 10m	1
	濃硫酸タンク	円筒型	φ:1,450mm H:2,600mm	材質:SS41	4m ³	1
	濃硫酸ポンプ	往復動	ダイヤフラム	材質:PVC	0.4kW 0.1m ³ /h	1
	苛性ソーダタンク	円筒型	φ:1,500mm H:1,200mm	材質:SS41	1m ³	1
	洗浄液ポンプA	横型渦巻	遠心自吸式	材質:PVC メカニカルシール	3.7kW 0.4m ³ /min 10m	1
	苛性ソーダタンク攪拌機	機械攪拌式	プロペラ型	材質:SUS304	0.4kW 360rpm	1
	攪拌ブロー	ルーツ型	ルーツ型	材質:FC	7.5kW 4m ³ /min 39.2kPa	1

表-12 (1) 廃水処理施設（低濃度ウラン回収設備）の構造および能力 (6/6)

設置場所	名 称		種 類	形式及び寸法	構 造	最大能力	個数
	計装						
低濃度ウラン回収設備		空気槽	円筒型	φ:750mm H:2,430mm	材質:SS41	1. 1m ³ 7kg/cm ²	1
		空気圧縮機	往復動	ベビコン		2. 2kW 220ℓ/min 7kg/cm ²	1
		空気脱湿器	冷凍式			0. 2kW 220ℓ/min 7kg/cm ²	1
	付帯	ホイス	電動式	チェーンブロック		1. 6kW 1t	1

表-12 (2) 廃水処理施設（第1処理系設備）の構造および能力（1/4）

設置場所	名称	種類	形式及び寸法	構造	最大能力	個数
第1処理系設備	試薬添加槽	角槽攪拌機付	W:7,500mm D:1,100mm H:2,250mm	材質:SUS304	3m ³ /min	1
	試薬添加槽攪拌機 No1	機械攪拌式	プロペラ型	材質:SUS304	1.5kW 420rpm	1
	試薬添加槽攪拌機 No2	機械攪拌式	プロペラ型	材質:SUS304	1.5kW 420rpm	1
	第2リン酸ソーダ調整槽	円筒型攪拌機付	φ:1,400mm H:1,450mm	材質:PE	2m ³	1
	第2リン酸ソーダ調整槽攪拌機	機械攪拌式	プロペラ型	材質:SUS304	0.4kW 420rpm	1
	第2リン酸ソーダ調整槽ポンプ	往復動	ダイヤフラム	材質:PVC	0.1kW 1.9ℓ/min	1
	塩化バリウム調整槽	円筒型攪拌機付	φ:1,400mm H:1,450mm	材質:PE	2m ³	1
	塩化バリウム調整槽攪拌機	機械攪拌式	プロペラ型	材質:SS、HRL	0.75kW 120rpm	1
	塩化バリウム調整槽ポンプ	往復動	ダイヤフラム	PVC	0.1kW 1.9ℓ/min	1

表-12 (2) 廃水処理施設 (第 1 処理系設備) の構造および能力 (2/4)

設置場所	名称	種類	形式及び寸法	構造	最大能力	個数
第 1 処理系設備	苛性ソーダ調整槽	円筒型攪拌機付	φ : 1, 400mm H : 1, 450mm	材質 : PE	2m ³	1
	苛性ソーダ調整槽攪拌機	機械攪拌式	プロペラ型	材質 : SUS304	0. 4kW 120rpm	1
	苛性ソーダ調整槽ポンプ	往復動	ダイヤフラム	材質 : PVC	0. 1kW 1. 9ℓ/min	1
	ベントナイト調整槽	円筒型攪拌機付	φ : 1, 400mm H : 1, 450mm	材質 : PE	2m ³	1
	ベントナイト調整槽攪拌機	機械攪拌式	プロペラ型	材質 : SUS304	0. 4kW 120rpm	1
	ベントナイト調整槽ポンプ	往復動	ダイヤフラム	材質 : PVC	0. 1kW 1. 9ℓ/min	1
	凝集剤調整槽	円筒型攪拌機付	φ : 1, 400mm H : 1, 450mm	材質 : PE	2m ³	1
	凝集剤調整槽攪拌機	機械攪拌式	プロペラ型	材質 : SUS304	1. 5kW 420rpm	1
	凝集剤調整槽ポンプ	往復動	ダイヤフラム	材質 : PVC	0. 1kW 1. 9ℓ/min	1
	ホイス 付帯	電動式	ワイヤロープ 吊上げ高さ 6m		1t	1

表-12 (2) 廃水処理施設（第1処理系設備）の構造および能力（3/4）

設置場所	名称	種類	形式及び寸法	構造	最大能力	個数
第1処理系設備	沈殿	第1沈殿池	W:30.0m D:16.0m H:1.4m	構造:RC	480m ³	1
		第2沈殿池	W:30.0m D:20.0m H:1.4m	構造:RC	600m ³	1
	ろ過	No1 サンドフィルタ	W:6.25m D:10.30m H:2.3m	構造:RC	64m ³	1
		No2 サンドフィルタ	W:6.25m D:10.30m H:2.3m	構造:RC	64m ³	1
		No3 サンドフィルタ	W:7.50m D:12.70m H:2.3m	構造:RC	95m ³	1
		No4 サンドフィルタ	W:7.50m D:12.70m H:2.3m	構造:RC	95m ³	1

表-12 (2) 廃水処理施設 (第1処理系設備) の構造および能力 (4/4)

設置場所	名称	種類	形式及び寸法	構造	最大能力	個数
第1処理系設備	ろ過	No5 サンドフィルタ	W:8.42m D:9.00m H:2.3m	構造:RC	75m ³	1
		No6 サンドフィルタ	W:8.42m D:9.00m H:2.3m	構造:RC	75m ³	1

表-12 (3) 廃水処理施設 (第2処理系設備) の構造および能力 (1/4)

設置場所	名称	種類	形式及び寸法	構造	最大能力	個数
第2処理系設備	試薬添加	試薬添加槽	W:7,500mm D:1,100mm H:2,250mm	材質:SUS304	3m ³ /min	1
		試薬添加槽攪拌機 No1	プロペラ型	材質:SUS304	1.5kW 420rpm	1
		試薬添加槽攪拌機 No2	プロペラ型	材質:SUS304	1.5kW 420rpm	1
		第2リン酸ソーダ調整槽	φ:1,410mm H:1,560mm	材質:PE	2m ³	1

表-12 (3) 廃水処理施設（第2処理系設備）の構造および能力（2/4）

設置場所	名称	種類	形式及び寸法	構造	最大能力	個数
第2処理系設備	第2リン酸ソーダ調整槽攪拌機	機械攪拌式	プロペラ型	材質:SUS304	0.4kW 420rpm	1
	第2リン酸ソーダ調整槽ポンプ	往復動	ダイヤフラム	材質:PVC	0.1kW 1.9ℓ/min	1
	塩化バリウム調整槽	円筒型攪拌機付	φ:1,410mm H:1,560mm	材質:PE	2m ³	1
	塩化バリウム調整槽攪拌機	機械攪拌式	プロペラ型	材質:SS、HRL	0.75kW 120rpm	1
	塩化バリウム調整槽ポンプ	往復動	ダイヤフラム	材質:PVC	0.1kW 1.9ℓ/min	1
	苛性ソーダ調整槽	円筒型攪拌機付	φ:1,410mm H:1,560mm	材質:PE	2m ³	1
	苛性ソーダ調整槽攪拌機	機械攪拌式	プロペラ型	材質:SUS304	0.4kW 120rpm	1
	苛性ソーダ調整槽ポンプ	往復動	ダイヤフラム	材質:PVC	0.1kW 1.9ℓ/min	1
	ベントナイト調整槽	円筒型攪拌機付	φ:1,410mm H:1,560mm	材質:PE	2m ³	1
	ベントナイト調整槽攪拌機	機械攪拌式	プロペラ型	材質:SUS304	0.4kW 120rpm	1

表-12 (3) 廃水処理施設（第2処理系設備）の構造および能力（3/4）

設置場所	名称	種類	形式及び寸法	構造	最大能力	個数
第2処理系設備	ベントナイト調整槽ポンプ	往復動	ダイヤフラム	材質:PVC	0.1kW 1.90/min	1
	凝集剤調整槽	円筒型攪拌機付	φ:1,400mm H:2,100mm	材質:PE	2m ³	1
	凝集剤調整槽攪拌機	機械攪拌式	プロペラ型	材質:SUS304	1.5kW 420rpm	1
	凝集剤調整槽ポンプ	往復動	ダイヤフラム	材質:PVC	0.1kW 1.90/min	1
	ホイス 付帯	電動式	ワイヤロープ 吊上げ高さ6m		1t	1
第2処理系設備	第3沈殿池	コンクリート角槽	W:20.0m D:25.2m H:1.6m	構造:RC	500m ³	1
	No7 サンドフィルター	コンクリート角槽	W:6.25m D:10.30m H:2.3m	構造:RC	125m ³	1
	No8 サンドフィルター	コンクリート角槽	W:6.25m D:10.30m H:2.3m	構造:RC	125m ³	1

表-12 (3) 廃水処理施設（第2処理系設備）の構造および能力（4/4）

設置場所	名称	種類	形式及び寸法	構造	最大能力	個数
第2処理系設備	ろ過	No9 サンドフィルター	W:7.50m D:12.70m H:2.3m	構造:RC	125m ³	1
		No10 サンドフィルター	W:7.50m D:12.70m H:2.3m	構造:RC	125m ³	1

表-12 (4) 廃水処理施設（処理水集水設備）の構造および能力（1/1）

設置場所	名称	種類	形式及び寸法	構造	最大能力	個数
処理水集水設備	集水槽	コングリート角槽	W:12.0m D:4.0m H:2.7m	構造:RC	100m ³	1
	集水槽ポンプ No1	水中	遠心水中式	材質:FC	7.5kW 1.5m ³ /min 13m	1
	集水槽ポンプ No2	水中	遠心水中式	材質:FC	7.5kW 1.5m ³ /min 13m	1
	集水槽ポンプ No3	水中	遠心水中式	材質:FC	22.0kW 4.0m ³ /min 15m	1

表-12 (5) 廃水処理施設（放流設備）の構造および能力（1/1）

設置場所	名称	種類	形式及び寸法	構造	最大能力	個数
放流設備	第1放流水槽	コンクリート多角槽	面積:542m ² H:2.8m	構造:RC	1,500m ³	1
	第2放流水槽	コンクリート多角槽	W:35.0m D:18.0m H:2.6m	構造:RC	1,500m ³	1

4.6 運転体制

坑廃水処理施設の通常時および大雨や融雪時等で鉋さいたい積場の貯水量が増量した場合の非通常時における運転体制を表-13 に示す。

表-13 坑廃水処理施設の運転体制

	運転人数	運転時間
通常時	3名	9時～16時まで (鉋さいたい積場の水位を常に低水位で維持)
非通常時	4名 (2交代勤務)	鉋さいたい積場の水位が、通常時の水位に回復するまで運転を行う。

4.7 運転方法

坑廃水の処理フローを図-16 に示す。坑廃水処理施設は2通りの運転操作を定めている。

鉋さいたい積場上澄水をスーパーサイフォンフィルターに通水して処理を行った後に、処理水を放流水槽へ流送する運転操作を「ダイレクト処理」と呼んでいる。一方、スーパーサイフォンフィルターを経由しないで、第1処理系設備または第2処理系設備で処理した後に、集水槽を経由して放流水槽へ流送する運転操作を「ストレート処理」と呼んでいる。

通常時はダイレクト処理運転を行うが、スーパーサイフォンフィルター出口の処理水中にマンガンの漏出傾向が見られた場合は、化学沈殿による処理に切り替える。

ストレート処理運転は、大雨等で鉋さいたい積場の上澄水が濁っている場合や、処理量を増やさないと鉋さいたい積場の水位が「注意水位」(鉋さいたい積場コンクリートかん止堤の堤頂から下 70cm の水位レベルを注意水位と呼んでいる。)に達する恐れがあると判断された場合等に行う運転方法である。

施設排水については水量および流送時間を施設側と調整して放流水槽に受け入れる。

放流水槽から排出口を通して池河川への排出は、自然流下によるバッチ(回分式)方式である。

なお次亜塩素酸ナトリウム溶液は分解しやすいので、直射日光を避け低濃度ウラン回収建屋内の保管棚で貯蔵しているが、図-17 に示すように購入時に 12%以上含まれていた有効塩素濃度は、時間とともに分解されて低下する。また次亜塩素酸ナトリウム溶液の供給タンク内においても有効塩素濃度は図-18 に示すように時間とともに分解されるので、上澄水に添加する次亜塩素酸ナトリウム溶液の流量調整については特に注意を要する。

次亜塩素酸ナトリウム溶液の添加量については、運転の都度実施しているスーパーサイフォンフィルター処理水中の残留遊離塩素濃度の分析結果と、処理に必要な有効塩素濃度を考慮して処理水中に有効残留塩素濃度が 0.3 mg/ℓ 以上含まれるよう上澄水への流量調整を行っている。

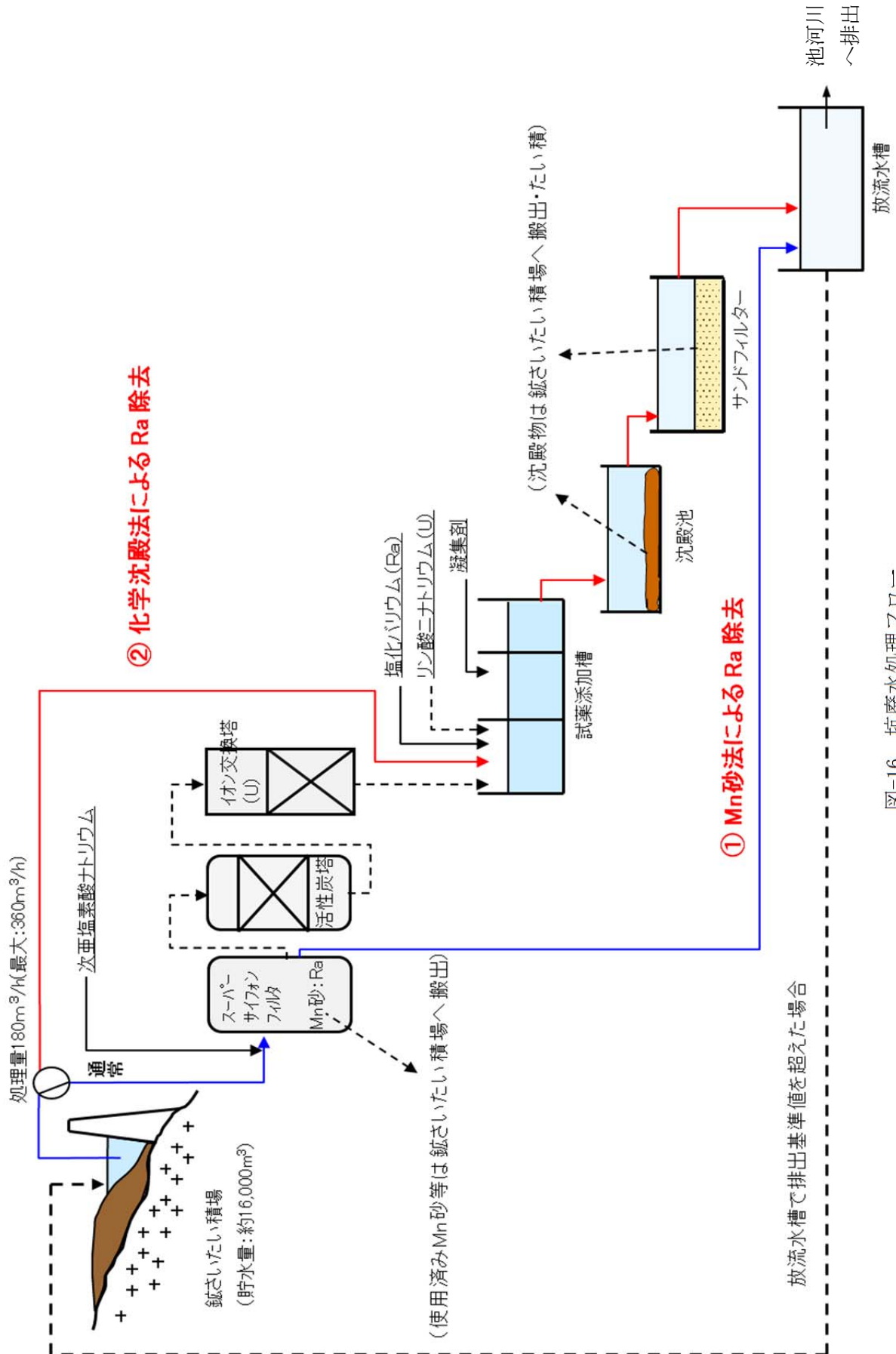


図-16 坑廃水処理フロー

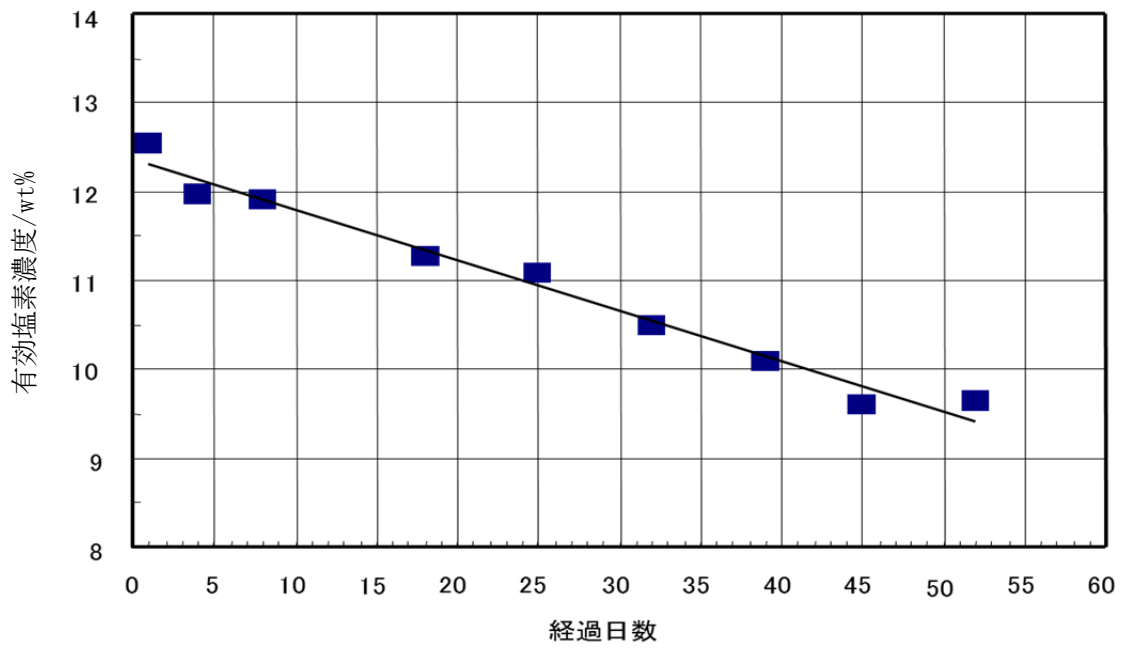


図-17 貯蔵している次亜塩素酸ナトリウム溶液中の有効塩素濃度の経時変化

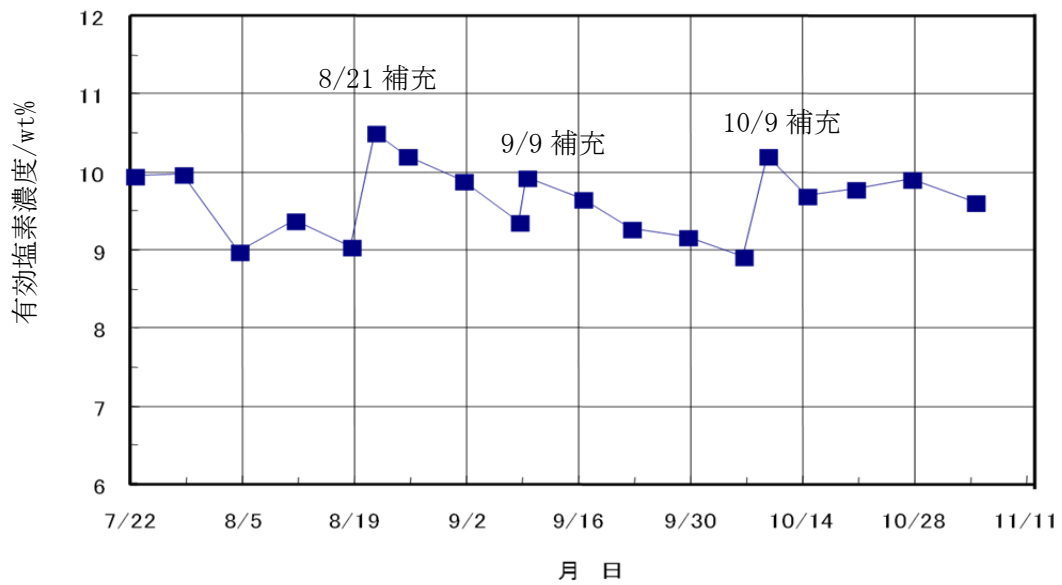


図-18 次亜塩素酸ナトリウム供給用タンク内での有効塩素濃度の経時変化

4.8 運転実績

昭和40年6月に鉱さいたい積場を建設して上澄水の処理を開始してからこれまで、池河川に排出する排水の水質に異常が認められたことは一度もない。

処理実績として、平成18年度から平成27年度における各年度の坑廃水処理量と降水量および貯水位の変動を表-14 および図-19 に示す。

表-14 坑廃水処理量と降水量

年度	坑廃水処理量 (m ³ /年度)	降水量 (mm/年度)	年平均貯水位 (堤頂-m)	備考
平成18年度	232,098	2,142	—	貯水位の連続観測記録なし
平成19年度	208,299	2,444	-1.55	
平成20年度	225,069	2,251	-1.57	
平成21年度	212,515	2,295	-1.53	
平成22年度	218,504	2,635	-1.51	
平成23年度	308,526	3,535	-1.48	廃砂たい積場覆土措置工事 台風12号、日降水247mm (9/2)
平成24年度	231,804	2,287	-1.61	廃砂たい積場覆土措置工事完了
平成25年度	211,196	2,823	-1.67	
平成26年度	249,842	2,579	-1.56	
平成27年度	215,184	2,300	-1.57	

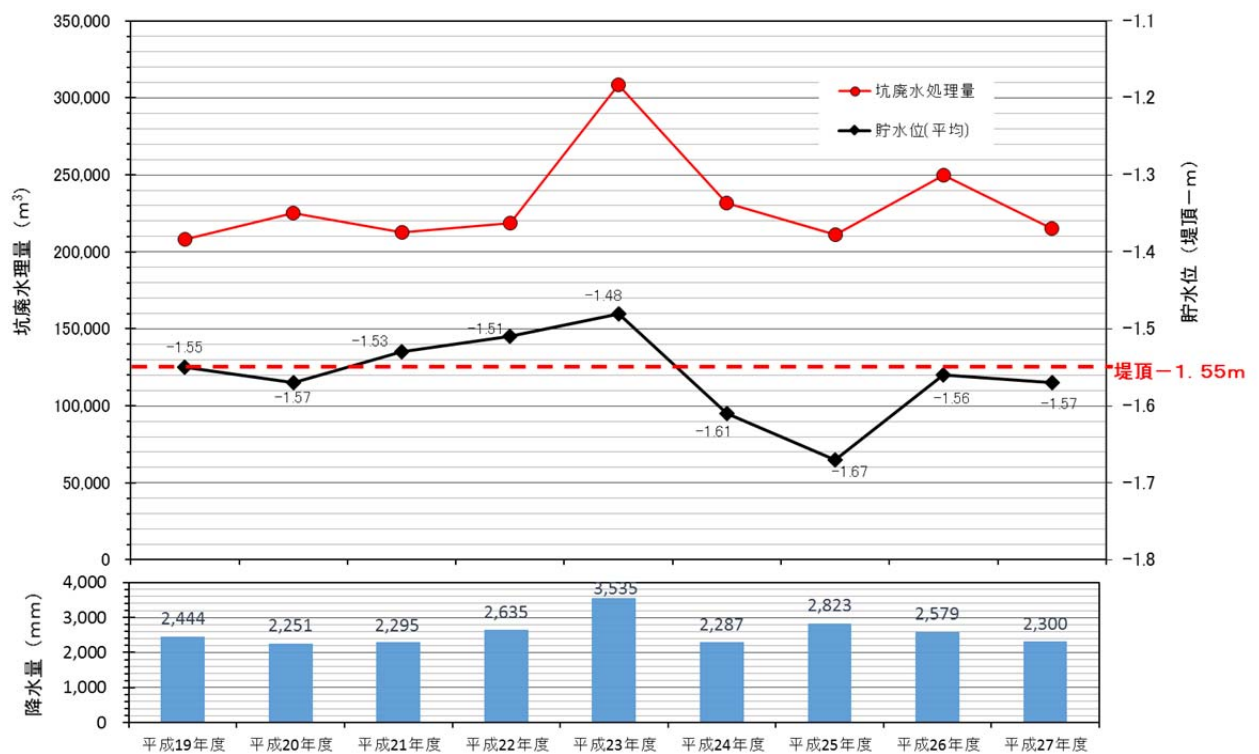


図-19 坑廃水処理量と降水量および貯水位の変動

(1) 坑廃水処理量と鉱さいたい積場貯水位との関係

坑廃水処理は鉱さいたい積場の貯留水を汲み上げた水量のみを処理することから、処理水量が鉱さいたい積場に流入する水量より多い場合は貯水位が低下し、逆に少ない場合は上昇する。また山間の谷地形を利用して貯水することにより、貯水位と周辺地山との地下水位の平衡状態が保たれていることから、貯水位が坑廃水処理により低下すると周辺地山から地下水が鉱さいたい積場に供給され、汲水終了後に水位が上昇する関係にある（付録参照）。

図-19 より、平成 24 年以降の坑廃水処理量と貯水位の関係をみると貯水位が堤頂から 1.55 m より低い位置になるように管理していることがわかる。これは気象変動に伴い近年多く発生しているゲリラ豪雨に備えるためである。当センターでは平成 23 年の 9 月 2 日に発生した台風 12 号により 247 mm/日の豪雨を経験し、これ以後、当施設でも 100 mm/h の豪雨を貯水できるように、平時より貯水位を堤頂から下 1.55 m 以下にするように貯水位の変動状況を確認しながら、天候に応じた坑廃水処理を実施している。

(2) 廃砂たい積場の覆土施工前と施工後による坑廃水処理量への影響

平成 24 年度に完了した鉱さいたい積場上流部の廃砂たい積場の覆土は、ラドン散逸量の低減化とともに雨水の浸透を抑制することを目的に、表流水は廃砂たい積場の降水が廃泥たい積場へ流入しないように覆土勾配にそって場外排水路へ導かれ排出されるよう施工を行った。

覆土の雨水浸透抑制効果については、鉱さいたい積場に流入する表流水の集水面積は減少し、水量の減少量は別添資料の水収支計算で試算されているとおり、その量は、覆土施工前と比較して廃泥たい積場へ流入する表流水量の約 6 割減と見込まれる。また坑廃水処理量の約 3.5～5.1%を占めていた表流水量は約 1.5%に低下し、その効果を確認している。

廃砂たい積場の覆土施工による坑廃水処理量の影響については、施工前のほぼ同じ降水量の年度の坑廃水処理量と比較して若干増加傾向が見られるもののデータ数が少ないことから今後も継続してデータを蓄積し、その傾向を把握する必要がある。

4.9 主な補修実績

平成 18 年度から平成 27 年度に実施した主な坑廃水処理施設の補修実績を表-15 に示す。設備の経年劣化対応と予防保全的な補修が主なものである。

表-15 主な補修実績 (1/2)

年度	対象施設	補修の概要
平成 18 年度	廃水処理施設	・スーパーサイフォンフィルターからのオーバーフロー配管サポートの一部が腐食し、使用に耐えられない状況であったため更新を実施。
平成 19 年度	廃水処理施設	・スーパーサイフォンフィルター内部の腐食が進んでいたことから撤去を行い、新たに同等のスーパーサイフォンフィルターの交換作業を実施。
		・ウラン回収設備で処理した処理水を直線距離で 120m 先の放流水槽まで直接流送する配管の設置作業を実施。
平成 20 年度	廃水処理施設	・サンドフィルター (No.7～No.10) のろ過砂が目詰まりしていたので、サンドフィルター内のろ過砂及び碎石を全量抜き出し、新たに碎石及びろ過砂の充填作業を実施。
平成 21 年度	坑水処理施設	・坑水処理施設に設置している変電設備内の高圧交流遮断器、交流負荷開閉器及びこれらに関連する継電器類や限流ヒューズ等が経年劣化により誤作動する懸念があったことから部品交換作業を実施。
	廃水処理施設	・ろ過水ピット内の排水は処理運転時には渦を巻くことから、据付のレベル計（フロート式）では損傷する恐れがあったことから、電極式のレベル計に変更を実施。 ・逆洗廃水ピット内の逆洗廃水ポンプは水位に関係なく常時 2 台運転をしていたため、ピット内に流入する坑水の量が少ない場合にはポンプ 1 台運転となるよう制御の変更を実施。
平成 22 年度	廃水処理施設	・集水槽ピットから放流水槽へ流送を行うポンプの配管の腐食が進んでいたことから更新を実施。
		・第 1 放流水槽内面塗装の劣化・剥離および点検通路の腐食が進んでいたため、塗装および点検通路橋脚の更新を実施。
平成 23 年度	集水施設	・大排水溝ピットからスーパーサイフォンフィルターへ坑水を流送する配管の経年劣化に伴い配管の更新を実施。
平成 24 年度	廃水処理施設	・第 2 放流水槽からの排出時間を短縮するために、水中ポンプの設置及び配管の変更を実施。
		・スーパーサイフォンフィルターに添加している次亜塩素酸ナトリウム溶液の流送ポンプの腐食による劣化が進んでいたことから、流送ポンプの交換を実施。
		・スーパーサイフォンフィルターに充填されているマンガン砂の表面の砂に目詰まり等が進んでいたため、槽内の半分（約 9m³）を新しいマンガン砂の交換を実施。

表-15 主な補修実績（2/2）

年度	対象施設	補修の概要
平成 25 年度	集水施設	・ 鉋さいたい積場の取水口から導水管へつなぐ配管（サクショ ンホース）の経年劣化が進んでいたことから更新を実施。
	廃水処理施設	・ ウラン回収建屋内の樹脂塔に充填している樹脂はすでに破化 していることから新しい樹脂を充填できるよう抜出作業を 実施。
		・ 第 2 放流水槽内面塗装の劣化・剥離および点検通路の腐食が 進んでいたことから内面塗装の更新を実施。
		・ サンドフィルター（No.2）のろ過砂の目詰まり及び砂の掻き 出しにより減量していたため、ろ過砂を全量抜き出し新たに 30m ³ ろ過砂の充填を実施。
平成 26 年度	廃水処理施設	・ 第 1 放流水槽からの排出時間を短縮するために、新たに 400A の抜き出し配管及び積算流量計の設置作業を実施。
平成 27 年度		・ 実績なし

4.10 安全管理

鉋さいたい積場および坑廃水処理施設の安全管理として、次のような対策を講じている。

(1) 鉋さいたい積場

① 鉋さいたい積場の水位監視

大雨、融雪時等には鉋さいたい積場に直接流入する水量や坑水量も増すため、鉋さいたい積場からの上澄水が施設外へ溢流しないようコンクリートかん止堤に水位計を設置して監視している。

鉋さいたい積場の水位が上昇して鉋さいたい積場コンクリートかん止堤の堤頂から下 70 cm に達すると、水位測定装置からメールで休日・昼夜問わず当該施設管理者の携帯電話にその時点の水位が伝送されるので、当該施設管理者の指示により直ちに坑廃水処理運転に対応できる体制を整備している。

② 鉋さいたい積場上澄水の水質管理

鉋さいたい積場上澄水中のウランは 1 週間に 1 回の頻度で定期的に分析しており、排出基準値を超えている場合、あるいは超える恐れがある場合は、直ちにウランを処理する運転方法に切り替える。

③ 鉋さいたい積場コンクリートかん止堤の健全性調査

コンクリートかん止堤については日常点検でコンクリートの変形等の有無を目視確認している。また詳細な健全性調査を昭和 61 年度に初めて実施したが、それ以降は 10 年毎にコンクリート強度、中性化、安定解析等を行い、堤体の安定性を評価している。

(2) 坑廃水処理施設

① スーパーサイフォンフィルターの水質管理

スーパーサイフォンフィルターの出口において、定期的に処理水中の遊離残留塩素濃度やマンガン濃度の分析を行い、マンガン砂の性能を把握している。また、上澄水中の溶存マンガンがマンガン砂に吸着されないで処理水中に漏えいする傾向が見られた場合は、次亜塩素酸ナトリウム溶液の添加量を増やしてその効果を確認する。それでもマンガンの漏出傾向が認められるときは、化学沈殿による処理系統に切り替えて処理を行う。

② サンドフィルターの水位監視

運転中サンドフィルターの水位は目視により監視しているが、万一水位が上昇した場合にはサンドフィルターに設置されている水位計が感知して、低濃度ウラン回収施設内の制御盤に設置されている警報が吹鳴するので、直ちに水位を下げるよう対応を図る。

③ 放流水槽の水位監視

運転中放流水槽の水位は目視により監視しているが、万一水位が上昇した場合には放流水槽に設置されている水位計が感知して、低濃度ウラン回収施設内の制御盤に設置されている警報が吹鳴するので、直ちに水位を下げるよう対応を図る。

④ 放流水の管理

関係管理者の職務を詳しく定めており、それに基づいて放流水の管理を行っている。

5. おわりに

鉍さいたい積場に一時貯留されている坑廃水は坑廃水処理施設で適切に処理し、当センターで定める排出基準を満足していることを確認した後に、バッチ方式で放流水槽から池河川へ排出している。

当センターで定める放流水槽の排出基準で特にウランおよびラジウム濃度は、環境保全協定によって法令値よりもさらに厳しい上乗せ基準が課せられている。また鉄濃度は、瀬戸内海環境保全特別措置法に基づき法令値に比べて非常に厳しい数値の届出を行っている。

坑水は恒常的に流出し続けるため坑水の水質を改善できない限り、収益性のない坑廃水処理を永続的に実施しなければならない。

現在、鉍害防止対策の一環として露天採掘場跡坑水の水量低減および水質改善等を図ることを目的に発生源対策に取り組んでいる。しかし、発生源対策を行い水質が改善されたとしても、排出基準を満足しなければ処理は永続的に実施せざるを得ない。

これらのことを踏まえ、瀬戸内海環境保全特別措置法に基づく排水の水質に係る鉄の届出値および環境保全協定に定める管理目標値に準拠した排出基準について、見直しあるいは改善に向けた取組みが望まれる。また、処理コストの更なる削減化に向けた坑廃水処理技術開発も重要なテーマである。

鉍害防止対策に積極的に取り組み、坑廃水処理の終結を考慮した合理的な坑廃止処理システムを構築することが今後の重要な課題といえる。

参考文献

- 1) 高田真吾, 人形峠ウラン鉱石の湿式一貫製錬法に関する研究(1980).
- 2) 動燃三十年史編集委員会, 動燃三十年史; 動力炉・核燃料開発事業団(1998).
- 3) 原子力安全・保安院 鉱山保安課, 鉱山保安法令の解説; 原子力安全・保安院(2007).
- 4) 岩田一郎, 人形峠鉱業所における廃水処理について; 日本鉱業会誌, Vol. 94, No.1082, (1978) pp. 247-249.
- 5) L. STOICA et al., Removal of $^{226}\text{Ra}(\text{II})$ from uranium mining and processing effluents; Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol.229 No. 1, 2, (1998) pp. 139-142.
- 6) R. S. WANG et al., Studies on the adsorption and migration of radium in natural minerals; Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol.171 No. 2, (1993) pp. 347-364.
- 7) 広野修一郎, ウラン製錬, PNC-TN454 82-03, 1982.
- 8) 河本薫明, ダム廃水からのウラン回収; 動燃技報 No. 54, (1985) pp. 90-95.
- 9) P.M. HUCK, W. B. ANDERSON, Removal of ^{226}Ra from uranium mining effluents and leaching from sludges; The environmental behaviour of radium, IAEA technical reports Series No. 310, Vol. 2, (1990) pp. 135-162.
- 10) 長沼政喜, 瀧富弘, ろ過砂による坑水中のラジウム除去方法; 資源と素材 Vol. 119 No. 4. 5, (2003) pp. 225-229.
- 11) 高井雄, 中西弘, 用水の除鉄・除マンガン処理; 産業用水調査会(1997).
- 12) 長沼政喜, 瀧富弘, 坑水中のラジウム除去方法; JAEA-Conf 2006-007, (2006) pp. 55-58.

付録

鉋さいたい積場における水収支の検討

1. 水収支検討の目的

平成 24 年度に完了した廃砂たい積場覆土施工による坑廃水処理量の影響をとらえることを主な目的として、鉋さいたい積場下流の廃泥たい積場に流入する水量と流出する水量の収支（「水収支」）計算を行い、廃砂たい積場覆土工の施工前と施工後の収支結果について比較検討した。

1.1 鉋さいたい積場の水収支の考え方

鉋さいたい積場下流の廃泥たい積場への貯水を基準として水収支を考えると図-1.1 に示す流入と流出の項目があげられる。廃砂たい積場覆土工施工前と施工後で異なる点は、廃砂たい積場覆土工により雨水の浸透は抑制される覆土仕様のため、廃砂たい積場への降水のほとんどは表流水として覆土勾配にそって場外排水路へ導かれ排出される。

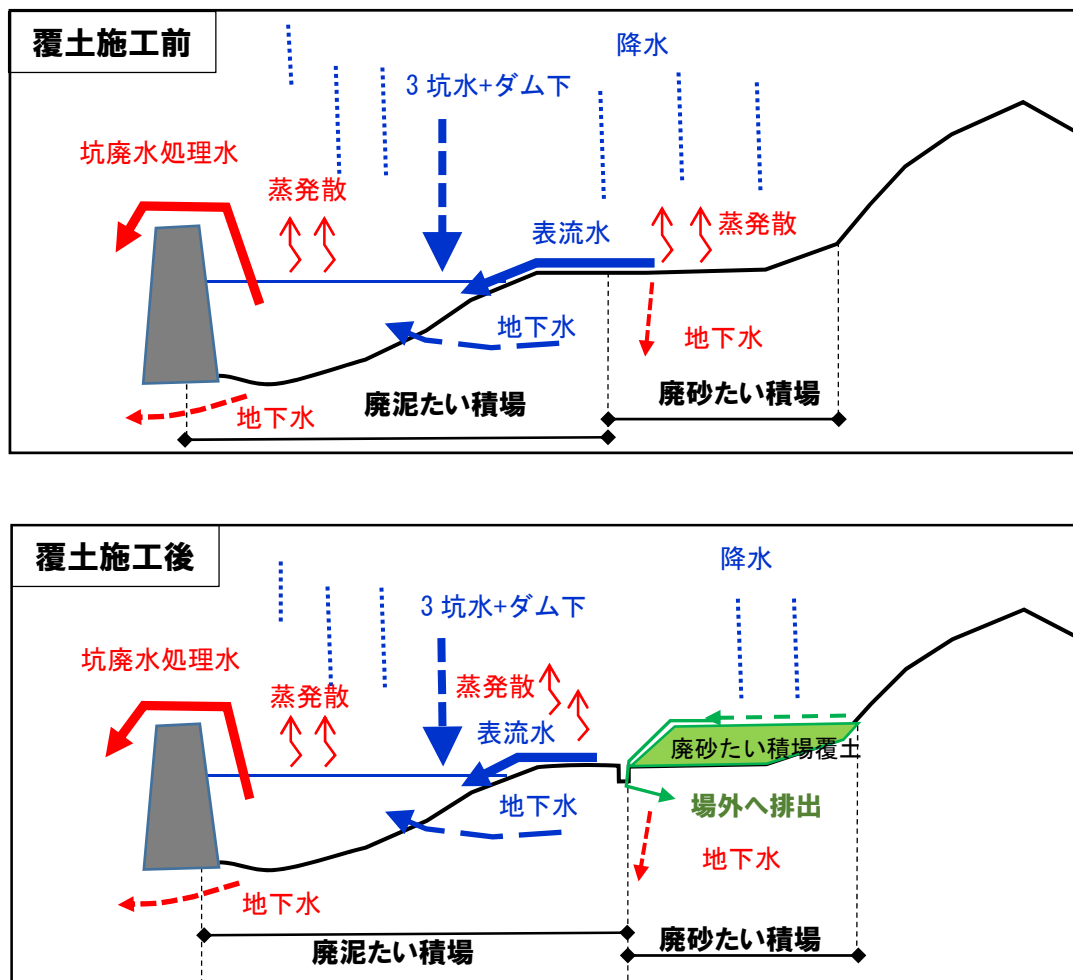


図-1.1 鉋さいたい積場の水収支

1.2 水収支式

鉱さいたい積場の水収支式を以下に示す。

$$\text{坑廃水処理量} = \text{廃泥たい積場への降水} - \text{蒸発散} + \text{表流水}^{*1)} + 3 \text{ 坑水} \\ + \text{ダム下湧水} + \text{地下水}$$

$$(\text{表流水}^{*1}) = (\text{降水} - \text{蒸発散}) \times \text{流域面積} \times \text{表面流出率}$$

水収支に用いる数値の根拠を表-1.1 に示す。この水収支式の項目で未知数となるのが流入・流出する「地下水」である。この収支計算で求められる地下水の値がプラスであれば流入量が多く、マイナスであれば流出量が多いことを示す。

表-1.1 水収支で取り扱う数値の根拠

項目	根拠・算出方法
降水量	当センター観測値を用いた。
蒸発散	当センターの気象データとアメダス「上長田」の日照時間数値からペンマン法で算出した。
3 坑水+ダム下湧水	3 坑水とは、大排水溝、見学坑道、露天採掘場跡をいう。ダム下湧水と 3 坑水の水量は、各地点のポンプ流送記録値を用いた。
坑廃水処理量	坑廃水処理施設の処理実績値を用いた。
流域面積	降水時に廃泥たい積場に表流水として流入する集水面積。 廃砂たい積場の覆土施工前と施工後で面積が異なる。
表面流出率	廃砂たい積場上部覆土部における覆土効果確認試験結果を引用した。「降水－蒸発散」の年平均 44%とした。

1.3 坑廃水処理量

廃泥たい積場へ一時貯留された水は、坑廃水処理施設で全量进行处理した後に河川へ排出していることから、坑廃水処理水量は、廃泥たい積場に流入する水量から蒸発散量を除いた全量を意味する。

$$\text{坑廃水処理量} = \text{廃泥たい積場へ流入する水の全量} = 3 \text{ 坑水} + \text{ダム下湧水} + \text{廃泥たい積場への降水} - \text{蒸発散} + \text{表流水} + \text{地下水}$$

平成 18 年度から平成 27 年度における坑廃水処理量の内訳と降水－蒸発散量を表-1.2 に示す。また坑廃水処理量の年変動を図-1.2 に示す。

図-1.2 から分かるように、平成 23 年度の坑廃水処理量が最も多い。その理由は豪雨や台風による降水量に起因する表流水と地下水の流入が多かったことによるものと考えられる。この豪雨による坑廃水処理運転の経験を踏まえ、廃泥たい積場の水位をできる限り低く（堤頂から下 1.55m の水位）保ち、想定外の短時間豪雨にも備えられるような処理運転としたことで、平成 24 年度以降の坑廃水処理量は増加した。このことを表すものとして、廃泥たい積場の貯水位の変動を図-1.3 に示す。この図から平成 23 年度以前の水位と比較して平成 24 年度以降の水位は低くなっていることがわかる。

表-1.2 年度別坑廃水処理量の内訳と降水－蒸発散量

	年度別 坑廃水 処理量 (m^3)	3 坑水+ダム下湧水のポンプ送水量(m^3)					廃泥たい積場 流域流入量 (m^3)	降水-蒸発散 ($\text{mm}/\text{年度}$)
		ダム下 湧水	大排水溝	見学坑道	露天採掘場跡	計		
平成 18 年度	232,098	15,736	71,040	11,827	20,728	119,331	112,767	1,501
平成 19 年度	208,299	13,973	65,359	10,686	20,159	110,175	98,124	1,819
平成 20 年度	225,069	13,883	68,265	12,054	21,982	116,184	108,885	1,648
平成 21 年度	212,515	16,188	68,628	11,545	17,500	113,860	98,655	1,632
平成 22 年度	218,504	13,555	71,706	11,542	15,590	112,393	106,111	1,906
平成 23 年度	308,526	8,197	84,311	16,632	21,393	130,532	177,994	2,924
平成 24 年度	231,804	6,264	73,822	13,650	19,410	113,146	118,658	1,622
平成 25 年度	211,196	10,026	70,384	13,001	16,750	110,161	101,035	1,597
平成 26 年度	249,842	11,900	76,385	15,122	19,687	123,093	126,749	2,195
平成 27 年度	215,184	11,328	70,755	12,835	18,002	112,920	102,264	1,603

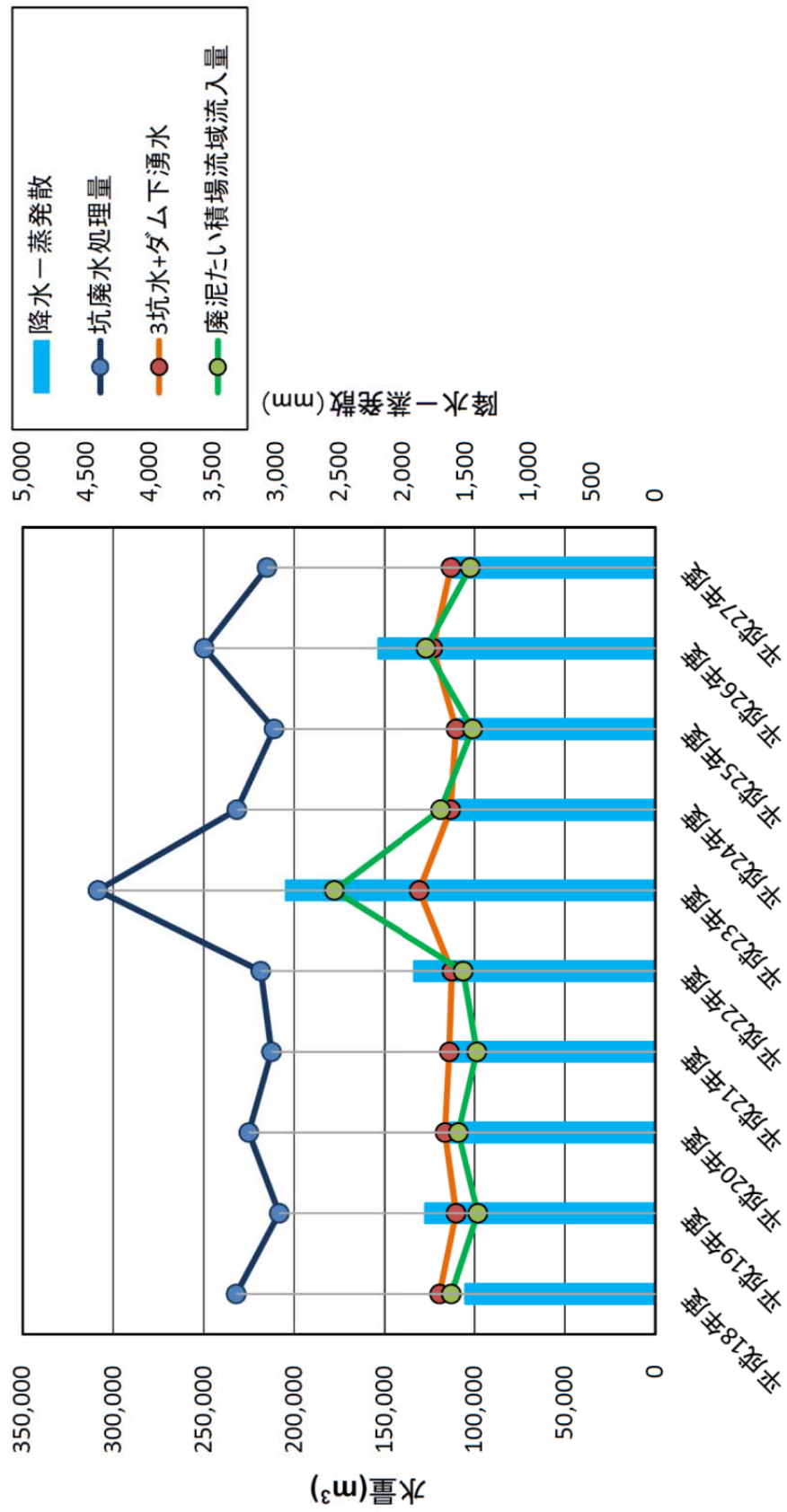


図-1.2 坑廃水処理量の変動

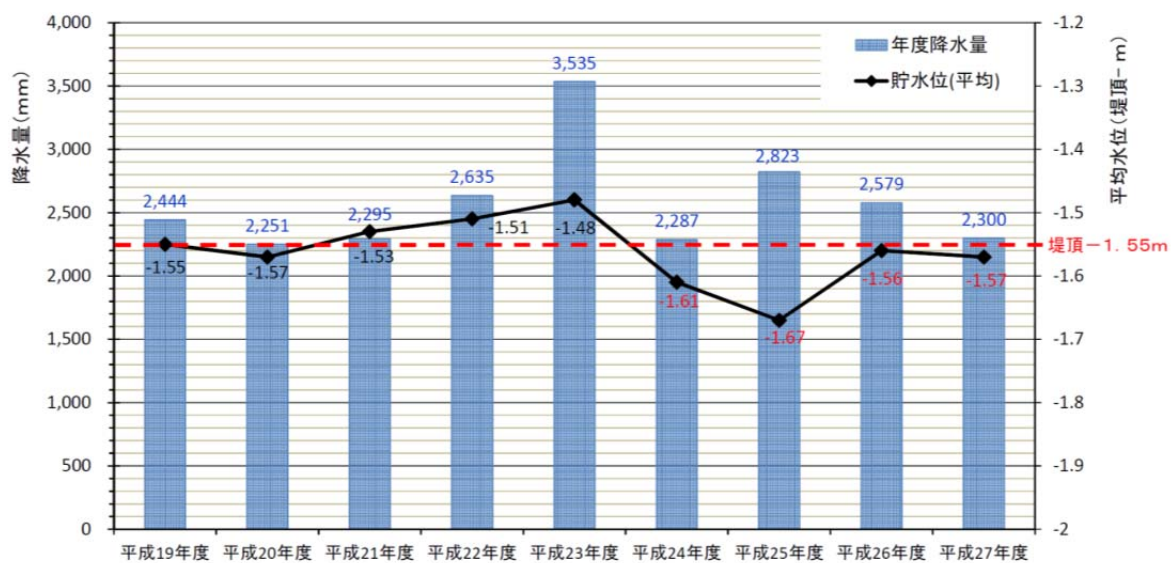


図-1.3 廃泥たい積場の貯水位の変動

2. 水収支の計算

1.2 で示した水収支式を用いて水収支計算を行った。結果を表-2.1 および図-2.1 に示す。

表-2.1 水収支の試算結果

	年度別 坑廃水 処理量 (a) (m^3)	3坑水+ダム下 (b)					廃泥 ^{たい積場} 流域流入量 (a-b) (m^3)	廃泥直接流入+表流水 (c)							地下水 (a-b-c) (m^3)	備考
		ダム下 湧水 (m^3)	大排水 (m^3)	見学 坑道 (m^3)	露天 坑水 (m^3)	計 (m^3)		降水量 (mm/年度)	蒸発散量 ^{※1} (mm/年度)	集水面積 (m^2)	集水面積 (m^2)	表流水 流域面積	廃泥 ^{※2} 直接流入 (m^3)	表流水 ^{※3} (m^3)		
平成18年度 (4～3月)	232,098	15,736	71,040	11,827	20,728	119,331	112,767	2,142	641	18,419	12,257	27,638	8,092	35,730	77,037	平成23年度以降は、豪雨に備え、鉱さいダム管理水位を低く設定する
	208,299	13,973	65,359	10,686	20,159	110,175	98,124	2,444	625			33,504	9,810	43,314	54,810	
	225,069	13,883	68,265	12,054	21,982	116,184	108,885	2,251	603			30,345	8,885	39,230	69,655	
	212,515	16,188	68,628	11,545	17,500	113,860	98,655	2,295	663			30,051	8,799	38,849	59,805	
	218,504	13,555	71,706	11,542	15,590	112,393	106,111	2,635	729			35,103	10,278	45,381	60,730	
	308,526	8,197	84,311	16,632	21,393	130,532	177,994	3,535	611			53,848	15,767	69,615	108,379	
	231,804	6,264	73,822	13,650	19,410	113,146	118,658	2,269	647			29,866	8,745	38,611	80,047	
平成25年度 (4～3月)	211,196	10,026	70,384	13,001	16,750	110,161	101,035	2,287	690	4,450	29,415	3,127	32,542	68,493	施工後	
平成26年度 (4～3月)	249,842	11,900	76,385	15,122	19,687	123,093	126,749	2,823	628		40,430	4,298	44,728	82,021		
平成27年度 (4～3月)	215,184	11,328	70,755	12,835	18,002	112,920	102,264	2,300	697		29,526	3,139	32,664	69,600		

※1：ペンマン法
 ※2：廃泥直接流入＝ 廃泥面積 × (降水-蒸発量)
 ※3：表流水＝ 表流水流域面積 × (降水-蒸発量) × 0.44

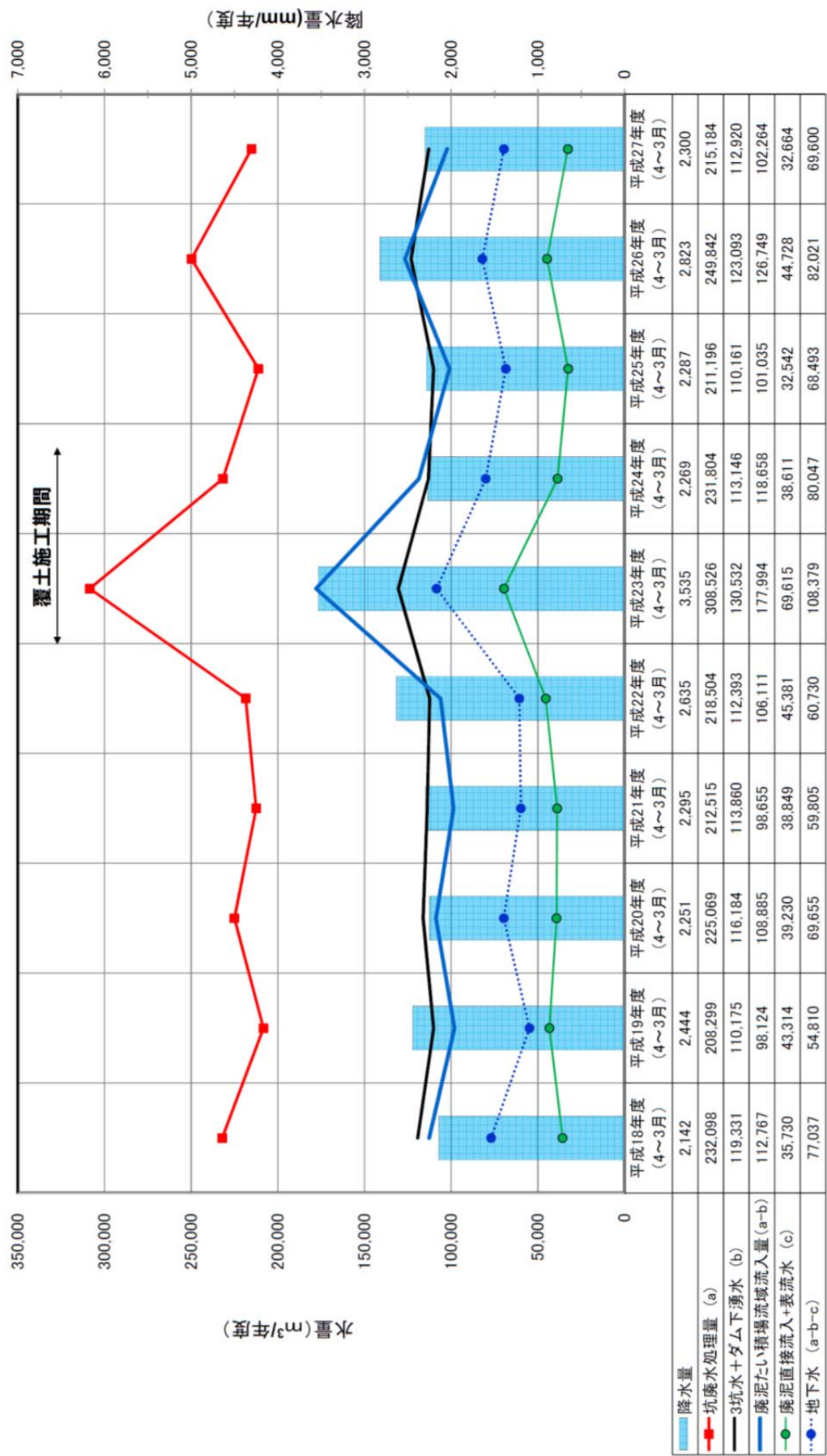


図-2.1 水収支結果（流入量と流出量の変動）

表-2.1 および図-2.1 から次のことが分かった。

- ①坑廃水处理量は、3 坑水（大排水溝、見学坑道、露天採掘場跡）＋ダム下湧水からの坑水量とほぼ同等の廃泥たい積場流域からの流入量の合計に相当する（黒折れ線と青折れ線の比較）。
- ②廃泥たい積場流域からの流入水は、降水による廃泥たい積場への直接流入と流域からの表流水および地下水であり、このうち地下水は、廃泥たい積場への降水の直接流入と流域からの表流水量を合わせた量の約 2 倍量が流入すると試算される。
- ③廃泥たい積場への降水の直接流入と流域からの表流水量（緑折れ線）は、覆土施工以後は降水量の増加による流量の増加は認められない。
- ④坑廃水处理量（赤折れ線）は、覆土施工以後若干の増加傾向が見られる。

3. 覆土施工による効果

廃砂たい積場の覆土施工により鉱さいたい積場の表流水の流域面積が、12,257 m²から 4,450 m²に減少した。この面積減少分に相当する表面排水は鉱さいたい積場の場外排水路へ導かれて排出されるため、この水量減少が覆土施工の効果としてあげられる。

廃砂たい積場の覆土の表面流出量については平成 27 年度から観測され、その観測結果から表面流出率は年平均 0.44（44%）が求められている。この比率を覆土以前の表面流出率にも適用して、降水による鉱さいたい積場への流入水を計算した結果を、表-3.1 に示す。

表-3.1 覆土効果の試算

		年度別 坑廃水处理量 (m ³)	降水－蒸発散 (mm/年度)	表流水の 流域面積 (m ²)	廃泥たい 積場の面 積 (m ²)	表面流出 率 (%)	降水による表面流入			表流水/坑 廃水处理量 (%)
							表流水 流入量 (m ³)	廃泥直接 流入量 (m ³)	廃泥+表流水 水量 (m ³)	
覆土 施工前	平成18年度 (4～3月)	232,098	1,501	12,257	18,419	44%	8,092	27,638	35,730	3.5%
	平成19年度 (4～3月)	208,299	1,819				9,810	33,504	43,314	4.7%
	平成20年度 (4～3月)	225,069	1,648				8,885	30,345	39,230	3.9%
	平成21年度 (4～3月)	212,515	1,632				8,799	30,051	38,849	4.1%
	平成22年度 (4～3月)	218,504	1,906				10,278	35,103	45,381	4.7%
覆土 施工中	平成23年度 (4～3月)	308,526	2,924	4,450			15,767	53,848	69,615	5.1%
	平成24年度 (4～3月)	231,804	1,622				8,745	29,866	38,611	3.8%
覆土 施工後	平成25年度 (4～3月)	211,196	1,597				3,127	29,415	32,542	1.5%
	平成26年度 (4～3月)	249,842	2,195	4,298			40,430	44,728	1.7%	
	平成27年度 (4～3月)	215,184	1,603	3,139			29,526	32,664	1.5%	

※施工後、表流水の流域面積は施工前・中の64%に減少

表-3.1 を用いて、廃砂たい積場の覆土施工前と施工後の「降水による廃泥たい積場への直接流入と流域からの表流水の合計値」と「降水量－蒸発散量」の関係を図-3.1 に示す。

鉦さいたい積場には、降水量から蒸発散を除いた水量が廃泥たい積場に直接流入し、周辺流域からは表面流出率を乗じた水量が流入することから、横軸に降水量から蒸発散量を除いた値、縦軸に廃泥たい積場に直接流入する水量と表流水として流入する流域水量を合計した水量をとり、覆土施工前と施工後で比較した。その結果、施工前は「降水量－蒸発散量 (mm)」の約 23.8 倍が「廃泥直接流入＋表流水量 (m³/年)」として換算された流入量が、施工後は約 20.4 倍に低下したことを示す相関を得た。この水量の減少は、表 3-1 から、表流水の流域面積が施工前より約 64 % 減少したことが原因であると推察される。

また、この覆土施工による表流水量の減少効果が、坑水処理量をどの程度、減少させることが出来たかについて、坑水処理量に占める表流水量の割合を求めたところ、施工前は 3.5%～5.1% を占めた表流水の割合が、覆土施工後は約 1.5～1.7% に低下したことが分かった。

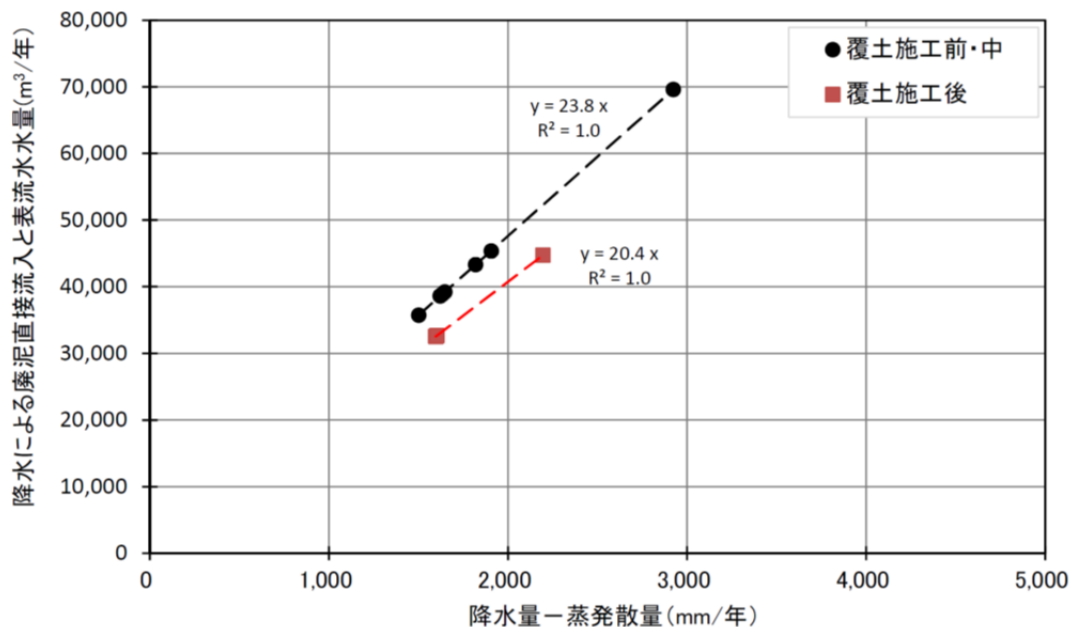


図-3.1 廃砂たい積場覆土施工による廃泥直接流入と表流水量の変化

4. 平成 24 年以降の水位低下管理手法について

坑水処理量は、鉦さいたい積場からのサイフォンで人為的に汲み上げられる水量であり、かつ平成 23 年度の台風や豪雨により、坑水処理の負荷が大きかったことがきっかけとなり、平成 24 年度以後の鉦さいたい積場の水位を以前より低く管理するようにした。この貯水位（貯水位＝堤頂－水位）を低く管理したことによって、鉦さいたい積場にどのような影響があるのかを水収支結果を用いて考察した。

4.1 坑水処理量と貯水位との関係

年度別に坑水処理量と貯水位の関係を図-4.1 に示す。この図から、平成 23 年以前は貯水位を堤頂から-1.57 m 以上、以降は-1.56 m 以下で管理していることが伺える。

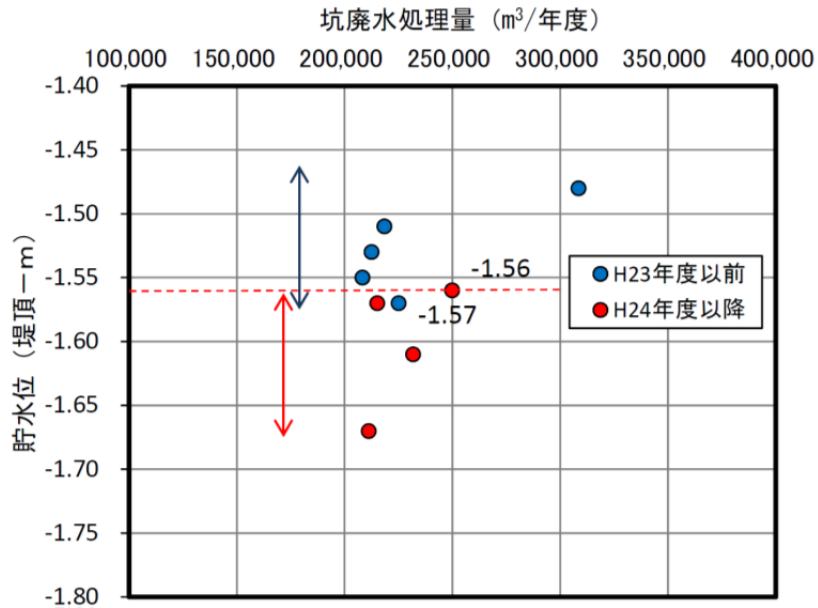


図-4.1 坑廃水処理量と貯水位の関係

4.2 廃泥たい積場直接流入+表流水量と貯水位との関係

降水により発生する廃泥たい積場直接流入+表流水量と貯水位との関係を図-4.2 に示す。

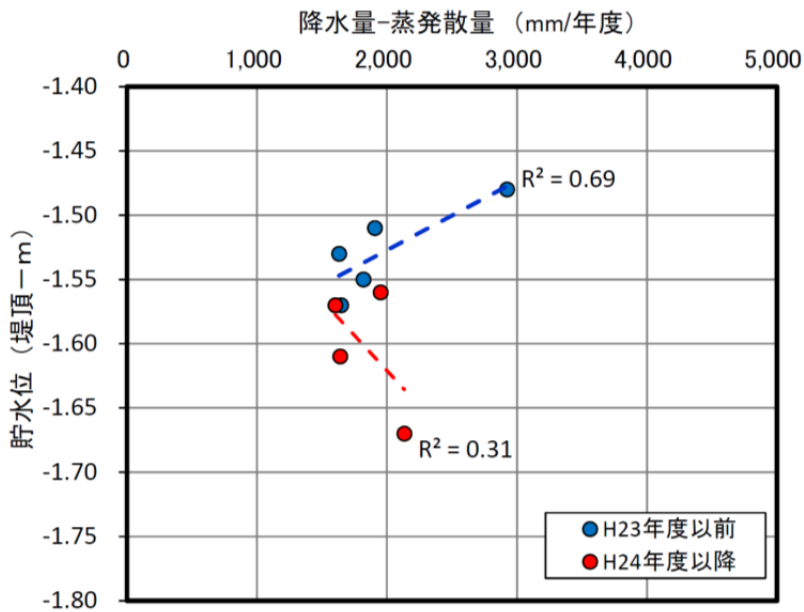


図-4.2 降水により発生する廃泥たい積場直接流入+表流水量と貯水位との関係

この図から平成 23 年以前は降水による直接流入量が増加すると貯水位が上昇する傾向が見られたが、平成 24 年度以降はその関係が認められない。その理由として 2 つ要因が考えられる。

1 つは、図-1.3 や図-4.1 に示されるように、貯水位を低い位置で管理する平成 24 年度以降、大雨や雪解けで流入量が多いと判断される状態になると、人為的に坑廃水処理量を増加させて、人為的に貯水位を低くしたことが原因であるという考え方。そしてもう 1 つは、覆

土施工の効果により水位が上昇しにくくなったという考え方である。しかしながら、覆土施工の効果は前述したように、流域面積の減少に伴い表流水量が 64%減少したことであり、その量が坑廃水处理量全体に占める割合は、覆土施工前で約 4 %、施工後はさらに小さく約 1.5 %でしかなく水位低下に大きく影響したとは考えにくい。

4.3 地下水流入量と貯水位との関係

水収支計算で求められた地下水の流入量と貯水位との関係を図-4.3 に示す。

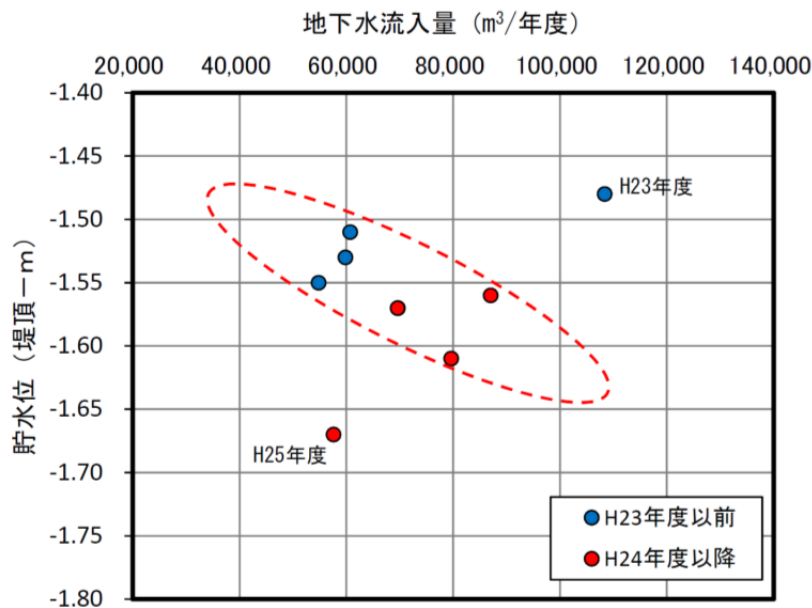


図-4.3 地下水の流入量と貯水位との関係

この図から、貯水位が低下すると地下水の流入量が増加する相関（赤破線）が認められる。しかしながら、その相関から外れる点が2点ある。1つは平成23年度である。この年度は前年度の積雪量も多く、梅雨時期の雨量も多い。そして、夏期の豪雨や台風による雨量のため地山の水位は例年より常に高い状態で推移したと考えられることから、貯水位は常に高い状態にあったと考えられる。次に平成25年度は水位が低い部分で相関から外れるが、これは地下水の流入量が少ない年度であったことが原因として考えられる。その理由は、前年度の積雪量が例年より少ない記録によるものであるが、積雪の少ない時期の観測点が1点しかないため、この関係については今後の調査データに委ねたい。

4.4 鉱さいたい積場の上澄水の水質変化

鉱さいたい積場の上澄水は、週に1度の頻度で採水して水質分析を実施している。平成18年度から平成27年度の期間における分析項目は、水温、pH、ORP、Fe、Mn、SO₄、As、²³⁸U、²²⁶Raである。この項目の内、Fe、Mn、SO₄、As、²³⁸U、²²⁶Raの結果を月平均の値に整理して分析値の変動をみると、Fe、Mn、SO₄、Asは、ばらつきはあるものの経年で増加や減少の傾向は認められなかった。²³⁸Uは平成18年度から平成27年度にかけ、若干濃度が低下する傾向が認められた。一方²²⁶Raは、図-4.4に示すように若干ではあるが、濃度が上昇する傾向が見られた。

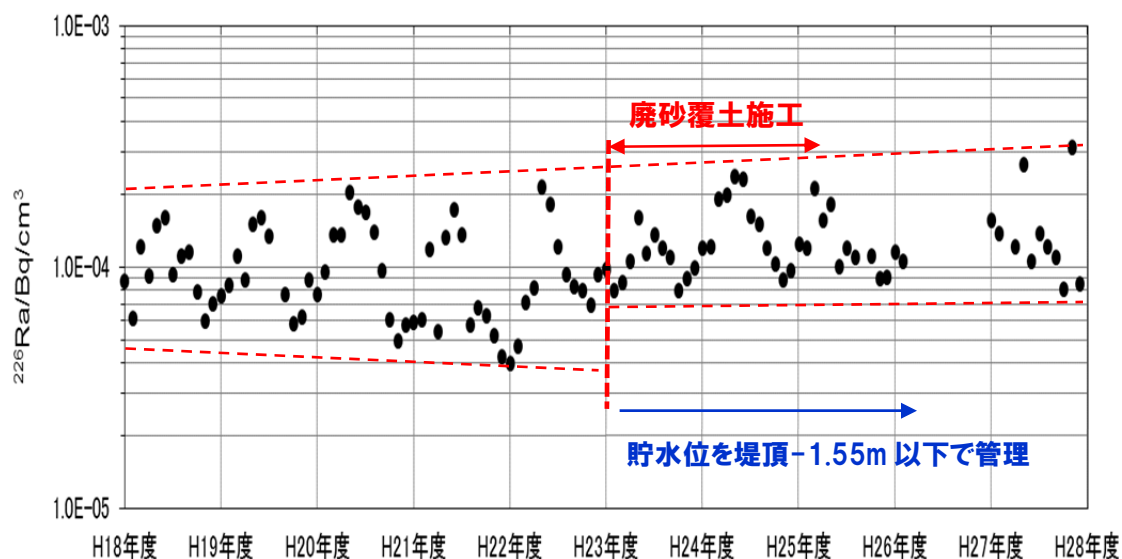


図-4.4 鉍さいたい積場上澄水のラジウム濃度の変化

5. 考察

廃砂たい積場覆土施工による坑廃水処理量の影響について次のように考察する。

- ①坑廃水処理量は、3 坑水（大排水溝、見学坑道、露天採掘場跡）＋ダム下湧水からの水量とほぼ同等の鉍さいたい積場流域からの流入量の合計に相当する。
- ②鉍さいたい積場流域からの流入水量のうち地下水流入が占める水量は、降水による廃泥たい積場への直接流入と流域からの表流水を合わせた水量の約 2 倍量に相当する。
- ③廃砂たい積場覆土施工による流域面積の変化により、鉍さいたい積場への表面流入量は覆土施工以前より約 64%減少した。
- ④坑廃水処理量に占める表面流入量は覆土施工以前では約 3.5%～5.1%あったが、覆土施工後は約 1.5～1.7%に低下した。
- ⑤豪雨対策として貯水位を堤頂から下 1.55 m 以下となるよう低く管理することは、処理を必要としない周辺からの地下水流入量を増加させる要因となり、結果的に処理量は増加することに繋がるので、その点を考慮した水位管理が求められる。
- ⑥鉍さいたい積場上澄水の水質分析の結果から ^{226}Ra 濃度は平成 23 年度以降に若干の上昇傾向が見られた。この傾向を変動範囲ととらえるのか、あるいは廃砂たい積場覆土施工によるたい積物の圧縮による脱水や鉍さいたい積場の貯水位を堤頂から下 1.55 m 以下で管理したことによる影響なのか、要因はいろいろと考えられるので、今後の水質分析を継続しその傾向を把握する必要がある。
- ⑦廃砂たい積場の覆土施工による坑廃水処理量の影響は、ほぼ同じ降水量の年度で施工前と施工後の坑廃水処理量を比較すると若干増加傾向が見られるもののデータ数が少ないことから今後も調査を継続する必要がある。

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량	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 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 ³
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

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		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, 放射束	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	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	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
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射度	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
酸素活性化	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のみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。
(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 (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

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	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面積	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ 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	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	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
	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	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=60 s
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/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, l	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
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	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=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm 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。
ベレル	B	
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	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 =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx 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=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g = 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	1 cal=4.1858 J (「15℃」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ =1 μm=10 ⁻⁶ m

