

IAEA ENVIRONET への関与及び 鉱山跡措置に係る海外事例調査

Involvement in IAEA ENVIRONET and Research on Overseas Reference Cases
regarding Environmental Remediation of Closed Uranium Mine

齊藤 宏

Hiroshi SAITO

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

July 2016

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

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, 2016

IAEA ENVIRONET への関与及び鉱山跡措置に係る海外事例調査

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
齊藤 宏

(2016 年 4 月 15 日 受理)

人形峠環境技術センターでは、ウラン鉱山の探鉱・採鉱・製錬試験を終了し、現在、鉱山保安法に基づき人に対する危害及び鉱害の防止の観点から保安巡視等を行い鉱山施設の維持管理を行うとともに、鉱山跡措置を進めている。

これまでに、鉱山跡措置を効率的に進めるために、必要な調査検討項目、進め方、施設間の優先順位、具体的な方法等について検討してきた。また、それと並行して、その都度必要とされる調査試験を対象施設において行ってきた。その結果、今後検討し解決しなくてはならない課題が残されていることが分かってきた。

そこで、豊富な経験を有する関連分野の専門家や IAEA 関係者との意見交換等を行うことにより知見を得るとともに、海外の休止ウラン鉱山において先行して実施された又は現在実施中の跡措置の事例を参考にするため、情報取得を目的として事例調査を進めてきた。

具体的には、IAEA が構築した環境修復に係る多国間ネットワークである“ENVIRONET”に平成 21 年の構築以降継続して関与し、Plenary Meeting（年次総会）に出席するとともに Steering Committee（運営委員会）会合に出席することにより、今後の鉱山跡措置に参考となる情報を取得し、効率的に情報取得が行えるような方向性の検討も並行して行った。これにより IAEA が期待する ENVIRONET への貢献を行うとともに、同様な課題を有する出席者との関係を強化してきた。

また、これと並行して、追加して必要となる情報を取得することを目的に文献及びウェブサイトから事例調査を行った。これにより得られた情報と ENVIRONET への関与により取得した上記の情報とあわせて、追加して情報取得を行う休止ウラン鉱山とそこで取得すべき具体的な情報を事前に抽出したうえで、該当する鉱山を対象に現地調査及び打合せを行った。これにより得られた情報を検討し、今後のセンターの跡措置に反映できる情報及び今後さらに追加取得する必要がある情報の整理を行った。

Involvement in IAEA ENVIRONET and Research on Overseas Reference Cases
regarding Environmental Remediation of Closed Uranium Mine

Hiroshi SAITO

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 April 15, 2016)

Environmental remediation has been conducted in closed Ningyo-toge Uranium Mine, after decades of mine-related activities. Its purposes are to take measures to ensure safety and radiation protection from the exposure pathways to humans in future, and to prevent the occurrence of mining pollution. During the remediation, whole procedure, necessary investigations, priority and specific methods have been examined. From the examination, challenges are clarified which should be tackled and solved in the future.

For these challenges, it has been recommended that opinions are exchanged among specialists with deep expertise in related fields overseas to acquire information. Besides, similar precedent cases are studied to refer by literature survey and site visits if necessary.

As part of these activities, Ningyo-toge Environmental Engineering Center has been involved continuously in the IAEA ENVIRONET, multinational network for environmental remediation. Through attending meetings and acting as a member of its Steering Committee, necessary information are acquired. Also, bonds are tightened among participants and IAEA by exchanging opinions, sharing challenges and making contribution to the ENVIRONET.

In parallel, literature survey has been conducted to supplement the information obtained from above-mentioned ENVIRONET, and to clarify necessary information and targeted sites. Information are obtained from visits to these targeted sites, and have been re-organized as those which could be utilized for future remediation, and another information additionally required to obtain is clarified.

Keywords: IAEA ENVIRONET, Environmental Remediation, Closed Uranium Mine, Mill Tailings Pond, Reference Case, Literature Survey, Site Visit

目 次

1. はじめに	1
2. とりまとめの対象及び観点	3
2.1 対象	3
2.2 観点	3
3. 結果（IAEA ENVIRONET への関与）	5
3.1 ENVIRONET の経緯、目的、構成等	5
3.1.1 構築の経緯	5
3.1.2 目的	5
3.1.3 スコープ	5
3.1.4 トピックス	5
3.1.5 組織	5
3.1.6 参加国及び機関の顔ぶれ	6
3.1.7 主な会議	6
3.1.8 IAEA の他ネットワークや関係機関との協働	7
3.2 センターの関与の経緯	7
3.3 実施内容及び得られた情報	8
3.3.1 主なスコープ及びトピックス	8
3.3.2 技術的なスコープに係る議論	9
3.3.3 トピックス「エントステート」に係る議論	10
3.3.4 トピックス「ステークホルダー・インボルブメント」に係る議論	12
3.3.5 環境修復後の跡地の有効利用に係る議論	13
3.3.6 その他のトピックスに係る議論	14
3.3.7 ワーキンググループ及びプロジェクトの設置	15
3.3.8 他機関との協働	17
3.3.9 会議外の情報交換の場提供	17
3.4 ENVIRONET の課題	18
3.5 これまでの関与で得られた利点	19
3.6 今後の関与の必要性	21
4. 結果（海外事例調査（現地調査・打合せ及び文献調査））	22
4.1 調査に至る経緯及び必要性	22
4.2 これまでの実施概要及び目的とした情報	22
4.3 現地調査及び打合せで得られた情報	24
4.3.1 Ronneburg サイト Lichtenberg 露天採掘場跡地、Seelingstädt サイト Culmitzsch 鉱さいたい積場（ドイツ・WISMUT 社）	24
4.3.2 Rožná K1 鉱さいたい積場（チェコ・DIAMO 社）	27
4.3.3 Bessines サイト LavauGrasse 鉱さいたい積場等（フランス・AREVA 社）	29
4.3.4 Bois Noirs Limouzat 鉱さいたい積場（フランス・AREVA 社）	33
4.3.5 Sillamäe 鉱さいたい積場（エストニア・ÖKOSIL 社）	37

4.3.6	Pécs 鉱さいたい積場（ハンガリー・PURAM 社）	42
4.3.7	Kowary 鉱さいたい積場（ポーランド・ヴロツワ工科大学）	48
4.4	センター跡措置へ反映できる情報及び今後追加取得する必要がある情報検討	51
4.4.1	湛水した細粒分が卓越する鉱さいの安定化方法	52
4.4.2	露天採掘場跡地からの浸出水対策	54
4.4.3	たい積場からの浸出水対策	56
4.4.4	覆土構造（材料、厚さ、構造等）	58
4.4.5	跡措置後のモニタリング	60
4.4.6	跡措置後の浸食対策及び発生後の維持管理	62
4.4.7	長期的維持管理	65
4.4.8	跡措置後のサイト有効利用、ステークホルダー・エンボルブメント	68
4.5	文献調査で得られたセンター跡措置へ反映できる情報検討	70
4.5.1	Sydney Tar Pond における鉱さい固結（カナダ・Sydney Tar Pond 社）	70
5.	まとめ	72
5.1	IAEA ENVIRONET への関与	72
5.2	海外事例調査（現地調査・打合せ及び文献調査）	73
	参考文献	78

Contents

1. Introduction	1
2. Covered contents and thematic organization	3
2.1 Covered contents	3
2.2 Thematic structure	3
3. Results (involvement in IAEA ENVIRONET)	5
3.1 Outline of ENVIRONET	5
3.1.1 Foundation	5
3.1.2 Purpose	5
3.1.3 Scope	5
3.1.4 Topics	5
3.1.5 Structure	5
3.1.6 Participants	6
3.1.7 Meetings	6
3.1.8 Collaborations with other networks and related initiatives	7
3.2 Previous involvement of JAEA Ningyo-toge	7
3.3 Main scopes, topics and discussions	8
3.3.1 Main scopes and topics	8
3.3.2 Discussions in technical aspect	9
3.3.3 Discussions related to end-state	10
3.3.4 Discussions related to stakeholder involvement	12
3.3.5 Discussions related to post-remedial site utilization	13
3.3.6 Discussions related to other topics	14
3.3.7 Establishment of “Working Group” and “Project”	15
3.3.8 Collaborations with other networks and related initiatives	17
3.3.9 Post-meeting information exchange	17
3.4 Needs for improvement	18
3.5 Expected benefit obtained from the involvement	19
3.6 Future involvement	21
4. Results (research on the reference cases overseas).....	22
4.1 Necessity	22
4.2 Method and targeted information	22
4.3 Acquired information from visit to each site	24
4.3.1 Lichtenberg former Open-pit Mine, Ronneburg Site and Culmitzsch Mill Tailings Pond, Seelingstädt Site (Wismut GmbH, Germany)	24
4.3.2 Rožná K1 Mill Tailings Pond (DIAMO state enterprise, Czech) ...	27
4.3.3 LavauGrasse Mill Tailings Pond, Bessines Site (AREVA, France) ·	29
4.3.4 Bois Noirs Limouzat Mill Tailings Pond (AREVA, France)	33

4.3.5	Sillamäe Mill Tailings Pond (ÖKOSIL, Estonia)	37
4.3.6	Pécs Mill Tailings Ponds (PURAM, Hungary)	42
4.3.7	Kowary Mill Tailings Pond (Wrocław University of Technology, Poland)	48
4.4	Beneficial information to remediation of Ningyo-toge Uranium Mine ...	51
4.4.1	Stabilization of submerged and fine-grained tailings	52
4.4.2	Seepage control from backfilled open-pit mine	54
4.4.3	Seepage control from tailings pond.....	56
4.4.4	Capping(material, thickness, structure).....	58
4.4.5	Post-remedial monitoring for confirmation of capping effectiveness	60
4.4.6	Post-remedial countermeasure against erosion	62
4.4.7	Post-remedial long-term maintenance	65
4.4.8	Post-remedial site utilization and stakeholder involvement	68
4.5	Acquired information from literature survey	70
4.5.1	Solidification of mill tailings at Sydney Tar Pond (Sydney Tar Pond Agency, Canada)	70
5.	Summary	72
5.1	Involvement in IAEA ENVIRONET	72
5.2	Research on the reference cases overseas	73
References		78

1. はじめに

現在進めている人形峠環境技術センター（以降、“センター”という。）の鉱山跡措置の考え方、進め方、具体的内容等に反映することを目的として行ってきた、IAEA が構築した環境修復に係る多国間ネットワーク“ENVIRONET”¹⁾への関与及び海外事例調査について、これまでその都度行っていたとりまとめを集約し、得られた情報、センター跡措置に参考となる情報及び今後取得すべき情報毎に整理し再とりまとめを行った。

現在、センターで進めている鉱山跡措置は、鉱業活動を終了したウラン鉱山の跡措置を確実にを行うため、平成 14 年 4 月に策定した“人形峠環境技術センターにおける鉱山跡の措置に関する基本計画”²⁾（以下「基本計画」という。）に基づき進めている。そのなかで、関係法令である鉱山保安法の下で長期的な安全確保を構築し、放射線防護については安全解析による安全性の見通しをつけ、その見通しをより確かにするための対策を強化するとともに鉱害防止の観点も含め長期的な安全性を考慮し行うこととしている。

センターではそれ以降、鉱山跡措置に必要な調査検討項目、進め方、施設間の優先順位、具体的方法等について検討してきた。また、それと並行して、その都度必要とされる調査試験を対象施設において行ってきたが、その結果、以下の項目を含む課題が残されていることが分かってきた。

- ・ 坑水の水量及び水質、その負荷低減化の可能性
- ・ 鉱さいたい積場の措置工法に伴い発生する水量及び水質
- ・ 上記坑水及び発生水に対する坑水処理施設の処理能力
- ・ 鉱さいたい積場が貯留する坑水等の水質に対する寄与
- ・ かん止堤の場内水を貯留する機能
- ・ 最適な長期的管理の在り方（浸食対策、モニタリング、坑水処理、施設の維持管理等）
- ・ ステークホルダー・インボルブメント
- ・ 跡措置後のサト有効利用

あわせて、サト内を流下する河川最上流部に設置された鉱さいたい積場の跡措置をこれまで是最優先としてきたが、跡措置に先立ち、跡措置中～後に発生する水量・水質やその坑水処理施設における処理の可否やその結果を反映した鉱さいたい積場の在り方等についての検討を行うべきであると判断した。また、維持管理についても最終的になしとすることができず長期的になるのであれば最低限にする方向への見直しが必要であると判断した。

そのため、現在はこのような考え方に従った場合に行うべき跡措置全体の進め方や方法についても検討している。これらを検討する上では、関連する分野の豊富な知見を有する海外の専門家との意見交換やヒアリングを通して得た知見を参考にしている。また、基本計画²⁾にも記載されているが、海外ウラン鉱山の先行事例や並行して行っている事例に係る情報を文献調査等により得て参考にしている。

具体的には、IAEA が構築した環境修復に係る多国間ネットワークである ENVIRONET³⁾ に平成 21 年の構築以降継続して関与し、“Plenary Meeting”（年次総会、当初は“Annual Forum”）に出席するとともに“Steering Committee”（主要国から構成される運営委員会）会合に出席することにより、今後の鉱山跡措置に参考となる情報を取得した。あわせて、センターにとって効率的に情報取得が行えるような ENVIRONET の方向付けを試みるとともに、IAEA が期待する ENVIRONET への貢献を行い、同様な課題を有する出席者との関係を強化してきた。

また、これと並行して、同様に今後の鉱山跡措置に参考となる情報を取得することを目的として、文献及びウェブサイトの調査を行った。次に、これにより得られた情報を上記の ENVIRONET への関与により取得した情報とあわせて、追加して取得すべき具体的な情報及びそのために訪問する休止坑/鉱山を抽出した。その後、該当する鉱山を訪問し現地調査及び打合せを行い、情報を取得したのち、得られた情報を検討し、今後のセンターの跡措置に反映できる情報及び今後さらに追加取得する必要がある情報の整理を行った。

2. とりまとめの対象及び観点

2.1 対象

とりまとめの対象を、表 2.1-1 及び 2.1-2 に示す。

IAEA ENVIRONET への関与

表 2.1-1 ENVIRONET における実施内容

内容	発表の有無	出席年
“Plenary Meeting” 出席	有り（平成 21～25 年） 無し（平成 26～27 年）	平成 21 年～
“Steering Committee” 会合出席		平成 23 年～

海外事例調査（現地調査・打合せ及び文献調査）

表 2.1-2 海外事例調査の対象

調査対象	国・会社	実施年
Seelingstädt サイト Culmitzsch 鉱さいたい積場 Ronneburg サイト Lichtenberg 露天採掘場跡地 等	ドイツ・WISMUT 社	平成 18 年 ※1
Rožná 鉱さいたい積場	チェコ・DIAMO 社	平成 21 年
Bessines サイト LavauGrasse 鉱さいたい積場 劣化ウラン貯蔵庫 等	フランス・AREVA 社	平成 22 年 ※1
Bois Noirs Limouzat 鉱さいたい積場	フランス・AREVA 社	平成 25 年 ※2
Sillamäe 鉱さいたい積場	エストニア・ÖKOSIL 社	平成 25 年 ※2
Pécs 鉱さいたい積場	ハンガリー・PURAM 社	平成 26 年 ※2
Kowary 鉱さいたい積場	ポーランド・ヴロツワ工科大学	平成 26 年 ※2
Sydney Tar Pond	カナダ・Sydney Tar Pond 社	文献調査のみ

※1：現地調査ののち ENVIRONET であらためて情報取得。

※2：ENVIRONET から取得した情報を契機に現地調査を行った。

2.2 観点

従来は、上記 2.1 に示す IAEA ENVIRONET 出席や海外事例調査実施の都度、個別に目的、実施内容、成果、課題等を取りまとめており、一部については鉱山跡措置技術委員会において報告しているが、公開資料化は行っていない。

そこで、今回は案件ごとではなく、これまで得られた結果の総括として、以下の観点から取りまとめを行う。

IAEA ENVIRONET への関与 (3. 参照)

ENVIRONET の経緯、目的、構成等 (3. 1 参照)

センターの関与の経緯 (3. 2 参照)

実施内容及び得られた情報 (3. 3 参照)

ENVIRONET の課題 (3. 4 参照)

これまでの関与で得られた利点 (3. 5 参照)

今後の関与の必要性 (3. 6 参照)

海外事例調査（現地調査・打合せ及び文献調査） (4. 参照)

調査に至る経緯及び必要性 (4. 1 参照)

これまでの実施概要及び目的とした情報 (4. 2 参照)

現地調査及び打合せで得られた情報 (4. 3 参照)

センター跡措置へ反映できる情報及び今後追加取得する必要がある情報検討 (4. 4 参照)

文献調査で得られたセンター跡措置へ反映できる情報検討 (4. 5 参照)

3. 結果（IAEA ENVIRONET への関与）

3.1 ENVIRONET の経緯、目的、構成等

経緯、目的、構成等の基本的事項は以下の通りである。

3.1.1 構築の経緯

平成 21 年に IAEA（具体的には、Division of nuclear fuel cycle and waste technology 内 Waste Technology Section（以降、“WTS” という。））の主導により、環境修復に係る多国間ネットワークとして構築された。

3.1.2 目的

世界では、ウラン鉱山跡等の周辺環境に及ぼす影響が問題となっている。各国で有する経験、ノウハウ、情報等にもとづき環境修復を計画・実施しているが、有する経験等に差があり、かつ十分に共有されていないため環境修復が適切になされていない例がある。これに対し、ネットワークを構築することで経験や得られた知見等を共有することができ、それにより、環境修復がより適切に実施されるよう促進することを目的とする。

3.1.3 スコープ

ウラン鉱山跡措置だけでなく、NORM（Naturally Occurring Radioactive Materials：自然起源放射性物質）関連施設、放射性廃棄物処分場跡、事故による汚染地域の環境修復も含まれる。

3.1.4 トピックス

全体から各部に至る全てを包含する（例えば、サイト特性調査、サイト評価（データ処理・モデル構築・解析）、具体的な工法・適用性検討、長期的維持管理・坑水処理・モニタリング、エントステート・制度的管理、ステークホルダー関与を含む意思決定プロセス 等）。

3.1.5 組織

Steering Committee

Plenary Meeting での議題や進め方を事前に検討、会議後に結果を総括し、参加者の意見も合わせ翌年の議題や今後の方向性を検討する。決定事項や意見を、後述する IAEA Scientific Secretary に答申する。環境修復のノウハウや（失敗も含め）経験が多く、構築以降継続して関与している主要メンバーが選ばれ、多くは平成 27 年に立ち上がるワーキンググループやプロジェクトの中心メンバーになっている。現在の構成は以下のとおり。

- 英国 1 名 （議長）
- ドイツ 2 名 （エントステートプロジェクト 中心メンバー）
- カナダ、オーストラリア 各 1 名 （放射性廃棄物トレンチ処分ワーキンググループ 中心メンバー）
- 米国、フランス 各 1 名 （NORM プロジェクト 中心メンバー）
- IAEA 1 名 （In-SITU ワーキンググループ 中心メンバー）
- 日本 1 名

IAEA Scientific Secretary

Steering Committee の提言にもとづき会議を運営する事務局である。IAEA WTS 及び Waste and Environmental Safety Section (以降、“WES” という。) の各 1 名、計 2 名から構成される。

参加国

Steering Committee を含め毎年 30～40 カ国程度。Plenary Meeting (3.1.7 参照) に参加するとともに、任意でそれぞれの個別のテーマに特化した下記のワーキンググループ及びプロジェクトに参加する (図 3.1-1)。

ワーキンググループ 及び プロジェクト

参加国が抱える課題やそれに対応した議論を行うため、選定されたテーマに対し下部組織として設置されている (3.3.7 参照)。構成や進め方は、それぞれのワーキンググループ及びプロジェクト毎に参加国が決定しており、一律ではない。ワーキンググループは期限を定めず、プロジェクトは 2～3 年間で終了を目指すという違いがあるが、進める上で必要に応じ変更することもある。

3.1.6 参加国及び機関の顔ぶれ

出席する国及び機関の顔ぶれにはおおむね変化はない。しかしながら、ノウハウを有する国々の参加が十分でない。例えば、休止ウラン鉱山の環境修復に係る例では、自国での環境修復を終えたのちその評価を行っているフランスは、数回の出席にとどまっている。また、米国エネルギー省 (DOE) は Steering Committee にメンバーがいるもののそれ以外ではほとんど出席していない。また、冷戦時代に起因する問題を抱える東ヨーロッパ諸国においては ENVIRONET の存在は認知されていないか重要性が認められていない。また、それぞれの国から実施機関、規制機関、いずれでもない機関等がバランス良く参加している訳ではない。

なお、各参加者はそれぞれの国を代表して参加している訳ではないことから、あくまでも関連する専門知識を有する個人あるいは所属する母体を代表して参加しているとみなされる。

3.1.7 主な会議

年 1 回の Plenary Meeting が行われ、前年の活動報告と成果や課題に係る議論がなされ、翌年の活動方針について検討する。

この前後 1 日間の計 2 日間を用いて Steering Committee の会合が開催され、前 1 日間においては Plenary Meeting の内容や進め方が確認されるとともに、後 1 日間においては Plenary Meeting での決定事項や抽出された課題・各 Steering Committee 委員に対する次回までの依頼事項等が確認される。Steering Committee の会合は、これ以外にも必要に応じ開催される。

また、これとは別に、ワーキンググループ 及び プロジェクト毎に会議が開催される。あわせて、特定のテーマに特化した会議や、これまで様々な問題に対し新たに取り組む国々を対象としたワークショップやトレーニングコース等も年数回不定期に開催される。

3.1.8 IAEA の他ネットワークや関係機関との協働

IAEA が構築した多国間ネットワークとも連携し活動を行っている。特に、環境修復と関係の深い廃止措置に係るネットワーク“IDN”（IAEA が ENVIRONET 同様に平成 21 年に構築。正式名“International Decommissioning Network”）とは、Plenary Meeting の一部を平成 22 年から共同開催し、課題やそれに対する方策等の議論がなされている。これは、廃止措置後においても跡地の環境修復が必要であり、両分野は不可分なものであるためであり、そのなかで、関係者間の情報共有や意見交換がなされてきた。

その他のネットワークとは、平成 24 年には UMREG（※）との合同開催も行われたのみでその他にほとんどつながりはなかったが、近年はウェブ上でネットワーク間の情報共有を行うことができるシステム“CONNECT”³⁾が構築され運用されている（図 3.1-1）。また、環境修復という共通する目的を有する IAEA 内の他部署、IAEA 外のネットワーク、IAEA がノウハウや経験を持っていない国々に対し行う環境修復に係る活動“Technical Cooperation Project”（以降、“TC”という。）や国際機関とも新たな協働が試みられはじめた（3.3.8 参照）。

※：米国 DOE が行った米国ユタ州の Moab 鉱さいたい積場環境修復のためのプロジェクト“UMTRA”（正式名“Moab Uranium Mill Tailings Remedial Action”）のメンバーと、ドイツ国 WISMUT 社のメンバーとの技術的意見交換の場から発展し現在に至っている専門家会合。年 1 回程度会合を実施。

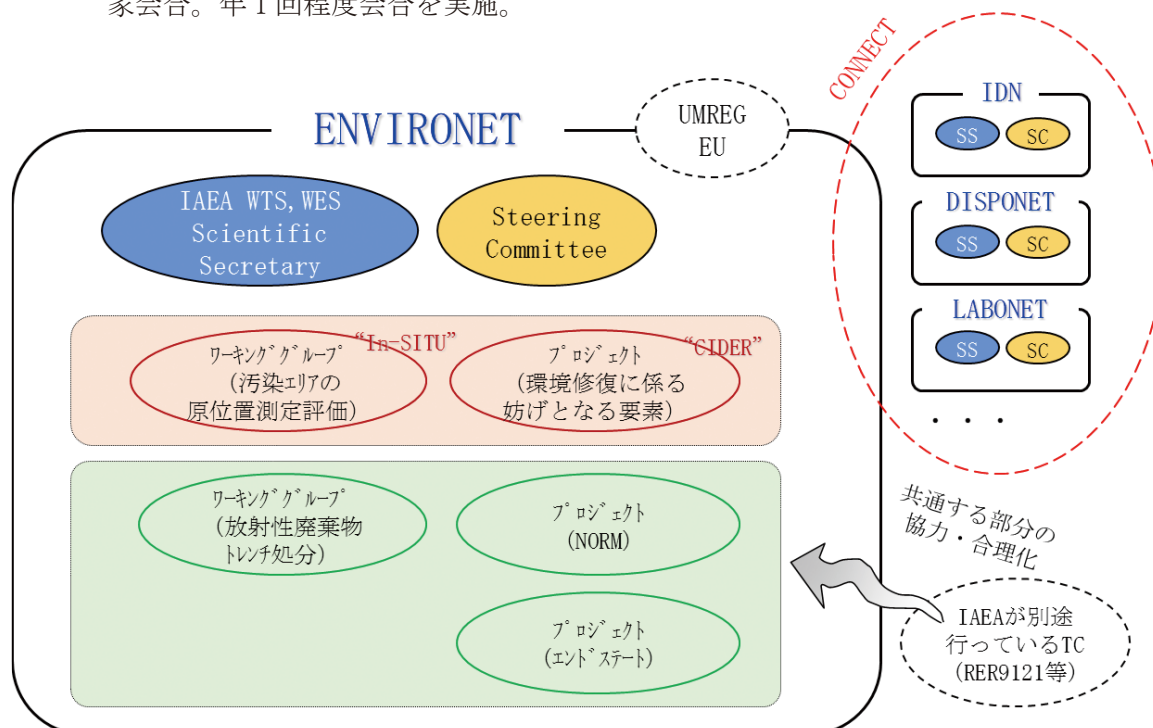


図 3.1-1 ENVIRONET の構成

3.2 センターの関与の経緯

平成 21 年の構築時に、IAEA から現・国際室及び現・バックエンド研究開発部門を経由して参加招請が来た。これを受け、今後の鉱山跡措置に活用できる情報を取得するとともに、情報発信も行い、さらには対外的な意見を反映しながら行っていることをステークホルダーに示し跡措置を

進めるべきとの理由から、参加することとなった。それ以降、継続して Plenary Meeting に出席している。Steering Committee へは、IAEA Scientific Secretary から専門家としての出席依頼を受け、平成 23 年から継続し出席している。

構築時に、各国の抱える環境修復に係る経緯・課題・対策等を参加国間で共有するため、IAEA Scientific Secretary からの要請を受け口頭発表を行った。以降、類似事例（特に先行事例）を有する国々からの意見を得るとともに事務局が期待する ENVIRONET への貢献を行うとの観点から、平成 25 年まで継続して口頭発表を行った。発表内容は以下のとおりであり、当初はセンターの鉱山跡措置の基本的考え方、対象施設の紹介等であったが、徐々に跡措置後の長期的維持管理やモニタリングにシフトすることとなった。また、事務局からの依頼を受けて、センターのこれまでの ENVIRONET への関与から受けた利点についても口頭発表を行った（図 3.2-1）。

この間、ENVIRONET への関与と関連して、フランス原子力・代替エネルギー庁（CEA）から依頼を受け同期間主催のセミナー（“CETAMA Seminary”）において口頭発表を行うとともに、国際学会（ICEM2013）においても口頭発表を行っている。

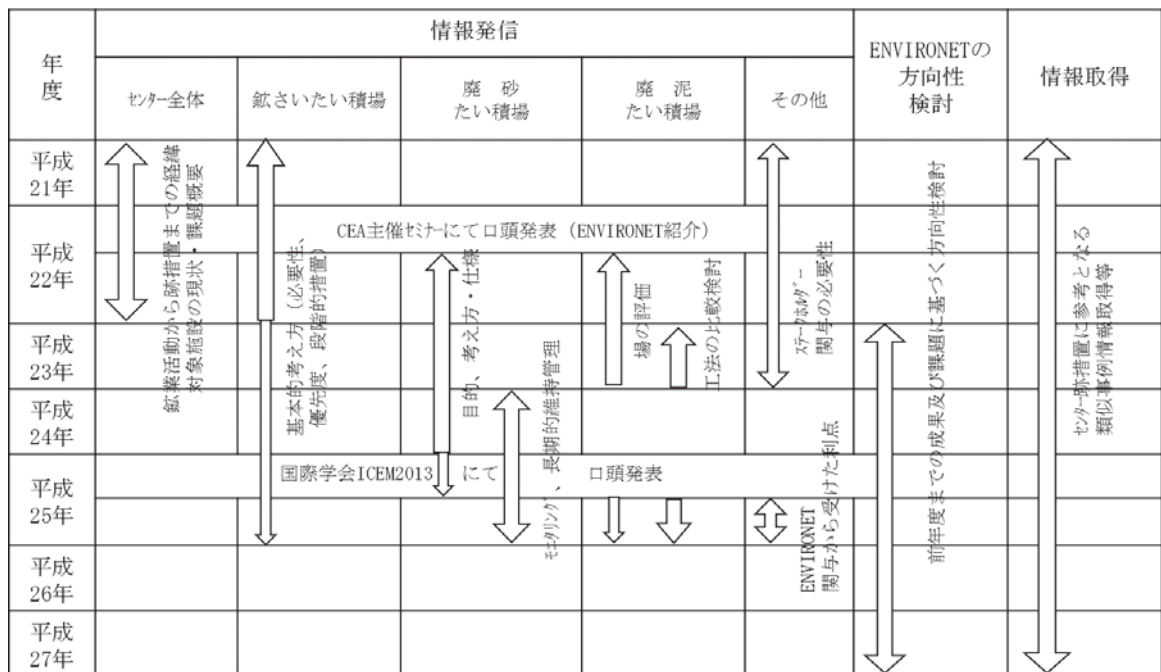


図 3.2-1 これまでに ENVIRONET において行った情報発信

3.3 実施内容及び得られた情報

3.3.1 主なスコープ及びトピックス

平成 21 年には、各国からの環境修復という広範囲にわたる課題に対するプレゼンにより、経緯・課題・対策等が情報共有された。その結果、本ネットワークにおけるスコープは以下の 3 つに大別できることが示された（3.1.3 参照）。近年は、これらのうち議題や発表内容はウラン鉱山に係るものが主となる傾向が強くなっている。

- ウラン鉱山（例えば、鉱さいたい積場、坑水処理、製錬所跡地）
- NORM 関連施設（例えば、放射性鉱物鉱山、油井・天然ガス井のセパレータ）
- 放射性廃棄物処分場跡

同様にトピックスについては 3.1.4 に示す全てを含むが、条件の異なるサイトや国をこえ共通する以下のトピックスが議論の中心となってきた。

- 長期的維持管理（“long-term stewardship” と呼ばれる。浸食対策含む。）
- 坑水処理
- モニタリング
- エントステート（上記 3 つの項目含む）
- ステークホルダー・インボルブメント

ここで、毎回の Plenary Meeting で議論されるスコープ及びトピックスについては、必ずしも複数年の計画をたて、それに基づき決定される訳ではないものの、毎年 Steering Committee において、前年までの議論の結果や参加国の意向を基に決定される。

3.3.2 技術的なスコープに係る議論

平成 21 年の構築時から参加国がそれぞれ有する課題を共有してきたものの、上記のとおりの議題は計画的に決められているわけではない。傾向としては、本ネットワークの目的が経験やノウハウを有する参加国から有していない参加国への提供であるため、大規模な未措置のたい積場を有し現状でも住民の被ばくの問題を抱える国々（例えば、キルギスにおける山地斜面上に位置するたい積場の長期安定性や雨水による浸食）や、過去の原子力災害後の環境修復の問題を抱える国々（例えば、ウクライナにおけるチェルノブイリ原子力発電所周辺の修復）の課題に係る情報が多い。また、少ないながらも、NORM 関連施設や放射性廃棄物処分場跡に係る情報もある。逆に、すでに跡措置工事等が終了した後のモニタリング、坑水処理、長期的維持管理の考え方や具体的な工法等についての情報は少ない。

しかしながら、その中で、これまでに今後のセンターの跡措置に反映できると思われる項目に係る情報が取得できた事例について、以下に概要を示す。なお、これらの多くは前後して現地調査・打合せも行っている。

ドイツ Seelingstädt 鉱さいたい積場では、盆状のたい積場における細粒の鉱さいを湛水管理していたが、水位を低下させたのちジオテキスタイルやドレーンを併用した載荷盛土により鉱さいを脱水安定させたのち、覆土による跡措置を行った。谷地形に設置されていないことから地下水の流入は考慮する必要がないものの、湛水していることや主に細粒分から構成されることがセンターの鉱さいたい積場と同じ条件であり、参考となる先行事例である。これについては、平成 24 年に議論がなされたが、これに先立ち平成 18 年に現地調査及び打合せを行った（4.3.1 参照）。

フランス Bois Noirs Limouzat 鉱さいたい積場では、上記 Seelingstädt 鉱さいたい積場と異なり、自然の谷地形に細粒の鉱さいを湛水管理している。政府の決定により管理方法を変更することとなり、フランス国内での議論の末に複数の方法から水位低下し脱水安定させたのち覆土による跡措置を行う方法を選定した。これもセンターの鉱さいたい積場とほぼ同じ条件であり、かつ工事等は行われていないものの考え方が参考とできる並行事例である。これについては、平成 24 年に ENVIRONET から既往文献に示されていない仕様や考え方について情報を得ることができ、平成 25 年に現地調査及び打合せを行った（4.3.4 参照）。

同様に鉍さいの安定化方法についてであるが、カナダの Sydney Tar Pond の跡措置事例の情報が得られた。ここでは、海域に繋がる入江にたい積され PCB や重金属溶出が問題視されていたタルを、セメントにより原位置で固結した。当事例は、固結工法による鉍さいの安定化について収集できた唯一の事例である。これについては、平成 25 年に国際学会での場外での議論から、また、かつて他機関においてその業務に関与していた IAEA 関係者から平成 26 年に情報を得ることができた。現在は、セメント跡措置に反映できるかどうかを検討するため、たい積物、固化材、固化方法、溶出抑制の対象元素等の項目について文献調査を継続している（4.5.1 参照）。

エストニア Sillamäe 鉍さいたい積場では、覆土を設置するとともに、地下水面を低下させ鉍さいと地下水が接触することのないよう遮水壁及び透水壁を設置した。また、覆土上及び周辺にモータリソグ機器を設置し、複数の項目についてデータ取得及び評価を行っているが、これについてはセメントの廃砂たい積場と同様であり、モータリソグ項目や頻度等が参考とできる先行事例である。平成 24 年に議論がなされたが、引き続き平成 25 年に現地調査及び打合せを行った（4.3.5 参照）。

3.3.3 トピックス「エンド・ステート」に係る議論

特に平成 26 年から重点が置かれ議論がなされている。

エンド・ステートは、環境修復を行う上で重要な要素であるにも関わらず事前に明確にされていないため環境修復の妨げになっている例が多々あることが示され、その上でエンド・ステートに至るまでの理想的な進め方が以下のとおり示された。

施設のライフサイクルは最終的には施設を解体または閉鎖等の運用終了ののち維持管理等で終了する。理想的には、施設のライフサイクルが始まる時点で以下の項目等について決定しておくべきである。

- 状態（地形、植生等）（図 3.3-1 “End state”）
- 利用の可否及び可能な場合の制限の有無（図 3.3-1 “Future use”）
- 線量・水質等の基準値（図 3.3-1 “Remediation targets & limits”）

しかしながら、実際には運用開始時点で上記の項目は決定しておらず、また運用終了に先立ちエンド・ステートの設定をしようとしても、以下に示すような問題が残る。したがって、これらを考慮しながらエンド・ステート及びそれまでの進め方を設定することとなる。

- より長期間の維持管理やコスト増につながる想定外のイベントも起こりうる（図 3.3-2）。したがって、多くの場合においてエンド・ステートは手放しの状態とはできず、長期間に及ぶ維持管理が残る。
- しかしながら、これに対しては通常は現事業者やそれを引き継ぐ国や自治体が行うこととなるが、責任の所在（誰が実施するのか？誰がコストを負担するのか？想定外のイベントに対してはどうか？）を明確にすることは容易でない。
- また、エンド・ステートはステークホルダーも含め決定すべきであるが、これも容易でない。

- これらについては、関係法規にすべて具体的に記載されているわけではなく、対象となるサイトの特性（環境修復の技術的可否、周辺を流下する河川の有無や利用の可能性に影響を及ぼす地形、周辺の市街地やインフラの有無、ステークホルダーが要求する環境修復の程度等）を考慮しながら最適な落としどころを決定する必要がある。特に技術的に最適な方法等は、調査試験の結果をみながら絞り込む必要がある。

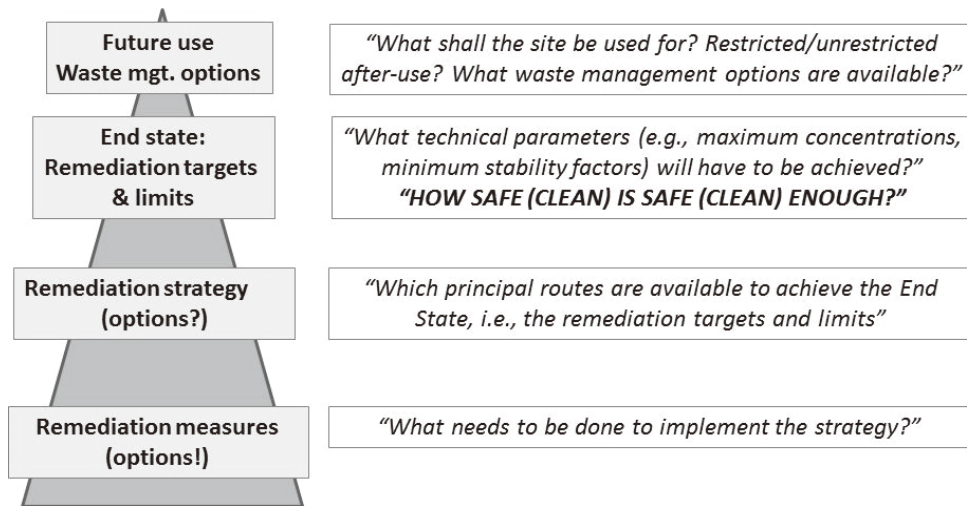


図 3.3-1 エンド・ステートの設定とそれに続く具体的な設定項目⁴⁾

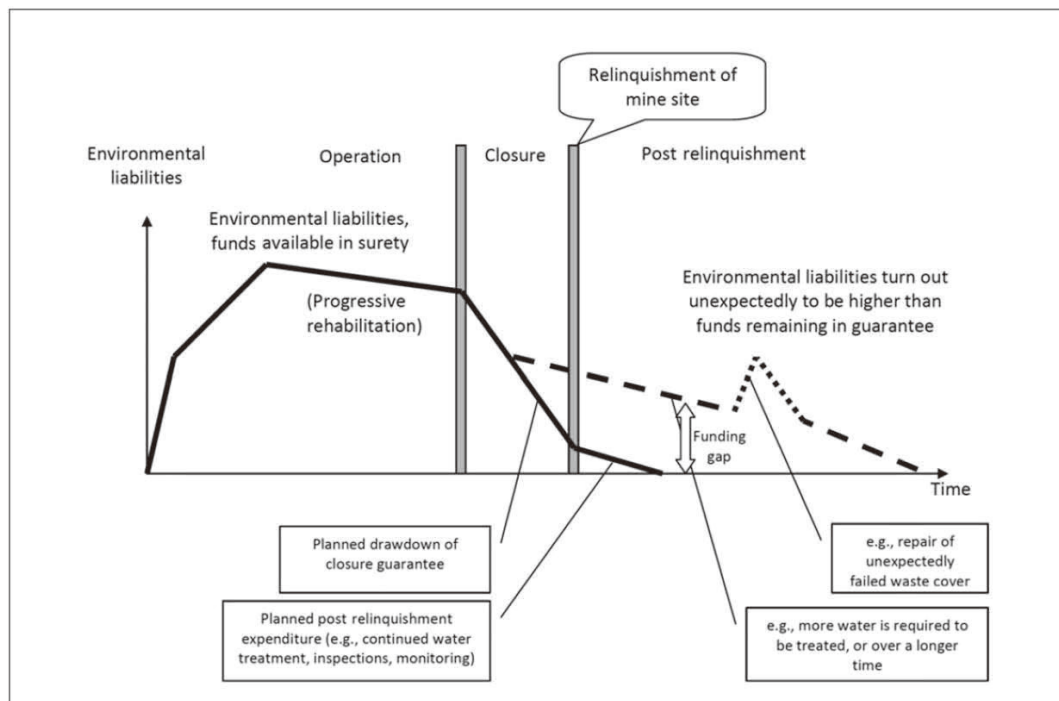


図 3.3-2 エンド・ステートに至るまでの維持管理等の負荷⁵⁾

したがって、理想的には図 3.3-1 の“Future use”や“End state: Remediation targets & limits”を定めた上で、“Remediation strategy”とその後に“Remediation measures”を定め、並行して想定外のイベントに対する責任の所在や実施内容についても決定しておく必要がある。

図 3.3-2 に示す進め方を行った場合、必要以上のコストや時間を費やすことなく資源の無駄のない最適な跡措置が行われる。したがって、現時点において明確にエンドステートを定めることなく環境修復が行われている場合や、予算や国の政策等の状況が変わったことにより当初想定していたエンドステートが現実的でなくなった場合においては、早急に検討を行い、可能な限りこのような進め方を目指すべきである。

3.3.4 トピックス「ステークホルダー・インボルブメント」に係る議論

効率的な環境修復を行うためには、技術的及び経済的な観点だけでなく社会的な観点が必要不可欠であることは、ENVIRONET の構築を待たず多くの既往文献に示されてきた。ENVIRONET においても、主要なトピックスとしては取り上げられないものの、議論が断続的になされ、多くの知見が示されてきた。

しかしながら、ほとんどの議論は一般的な内容に留まっている。具体的には、技術的及び経済的に最適な方法であったとしても社会的な観点の欠如により業務が滞りうること、関与すべきステークホルダーをどう定義づけるか、また彼らを業務に係る意思決定にどのように関与させるか、情報共有・提供をどのように行うべきか、といった内容に終始している。

ステークホルダーとの最適な関与の方法は国やサイト毎に異なることを鑑みると、議論の内容をセンターの跡措置に反映するためには、実際の事例の成功・失敗事例（例えば、キルギス・Mailuu Suu 第 3 鉱さいたい積場、写真 3.3-1）をセンターが有する特性と比較しなくてはならない。



賛成派・反対派の討議



反対派住民による妨害活動（道路封鎖）

写真 3.3-1 ステークホルダー・インボルブメントの事例（キルギス・Mailuu Suu 第 3 鉱さいたい積場）⁶⁾

Source: Presentation by Peter Schmidt, Wismut GmbH and Christian Kunze, WISUTEC GmbH, Germany, ENVIRONET2012; with allowance of the authors

また、Plenary Meeting の主要なテーマとしては取り上げられなかったものの、ステークホルダー・インボルブメントは効率的な環境修復に不可欠な要素であるとの認識は参加国の間で共通しており、平成 23 年の Plenary Meeting で出された提案を受け、平成 24 年 11 月に ENVIRONET の一環としてワークショップが開催された⁷⁾。ここでは 2 日間にわたり、一般的な内容（ステーク

ダーの定義、環境修復に対する考え方の傾向、信頼醸成等)だけでなく実際の事例研究(ブルガリアの原子力施設、ドイツ・Sachsen 及び Thüringen 州鉱山施設、ザンビア・Kitwe 鉱さいたい積場、ロシア Lermontov 地区鉱山施設の環境修復におけるステークホルダーとのコミュニケーション方策、結果、課題等)における発表がなされた。しかしながら、このワークショップは継続的に開催されるものではなく、その後開催されていない。

なお、ステークホルダー・インボルブメントについては、下記 3.3.7 に示した CIDER プロジェクトにおいて環境修復の障害となる項目の一つとして検討がなされている。

3.3.5 環境修復後の跡地の有効利用に係る議論

上記 3.3.4 同様、主要なテーマとしては取り上げられないものの、議論が断続的になされている。跡地有効利用は、大きく分けてハード面とソフト面からの二つに大別できる。

ハード面からの利用では、一般的に行われている手法として、覆土表面を利用した太陽光発電施設設置(ドイツ WISMUT 社 Ronneburg、フランス Belleval、チェコ Rožná 等)、公園(ドイツ WISMUT 社 Ronneburg、カナダ Sydney Tar Pond)が挙げられる。また、覆土表面を利用したレクリエーション施設(ドイツ Schlema)、旧坑道を利用した健康施設設置(ドイツ Bad Gastein 等)、冠水した露天採掘場跡地を利用したレクリエーション施設(フランス Puy de l'Age ドイツ Schlema 等)等の例もある(写真 3.3-2)。

ソフト面からの利用とは、既存資源の再利用である。例えば、ロシアにおいては同国営原子力企業 RosAtom 社傘下の、原子力関連施設や旧軍事施設跡地等の環境修復を行っている子会社 RosRAO 社が、経験豊富な技術者およびノウハウを有すること、使用できる施設があること、当面資金面で問題がないことを利点として、環境修復従事者に対するトレーニング・センターとして上記施設を利用できるよう環境を整備し、ENVIRONET での利用を積極的に働きかけている。チェコにおいては、東西冷戦時代に旧施設がウラン資源の開発により周辺環境に与えた影響に対し国営企業 DIAMO 社が環境修復を行っているが、同社はこれまでの鉱業活動で豊富な経験を有しかつての設備やインフラが残されていることから、同社が立地する Straz pod Ralskem に、2006 年に採鉱から環境修復まで広範囲にわたる教育を行う機関である“International Training Center (ITC)”が設置された(写真 3.3-2)。同センターは IAEA や OECD NEA 等を核とするパートナーシップである“World Nuclear University”が行うプログラムの一つである。

また、フランスにおいては、かつて鉱業活動が行われていた Bessines サイトに報告書、分析試料、スキル・経験を有する技術者といったソフト面の資源が残されていただけでなく、施設・土地といったハード面の資源が残されており、かつ地元の雇用問題やウラン産業への受容の寛容さがあったことから、跡地をウラン産業に係る一大センターとして有効利用がなされている(4.3.3 参照)。同様にドイツにおいては、鉱業活動が行われ露天採掘場跡地や複数の捨石たい積場が集中する Ronneburg サイトの環境修復を行い、現在は上記の太陽光発電施設や公園等として有効利用がなされている(4.3.1 参照)。これらについては、それぞれ平成 22 年及び平成 24 年に ENVIRONET でも紹介がなされるとともに、それぞれ平成 22 年及び平成 18 年に現地調査及び意見交換を行っている。



太陽光発電施設（ドイツ・Ronneburg）⁸⁾



フィッシング施設（フランス・Puy de l'Age）⁹⁾



温泉保養施設（ドイツ・Schlema）⁸⁾



ウラン鉱業に係る教育施設（チェコ・Stráž pod Ralskem）¹⁰⁾

写真 3.3-2 跡地有効利用の事例

Source: Wismut GmbH, Germany, with allowance of the company, copyrights@Wismut（左上及び左下）

Source: copyright@AREVA（右上）

3.3.6 その他のトピックスに係る議論

覆土表面の浸食・植物根侵入対策や跡措置後の被ばく評価の考え方・方法に係る議論はなされていない。特に、前者は IAEA が覆土の長期安定性に対する課題として頻繁に挙げられており、かつ多くの国において鉱さいたい積場の跡措置には天然材料を用いた覆土が用いられているにも係らず、一部の事例紹介で触れられている程度にとどまっている（図 3.3-3, 写真 3.3-3）。また、跡措置の効果を期待する期間設定の考え方や、跡措置に係る法体系及びその問題に係る議論がなされていない。

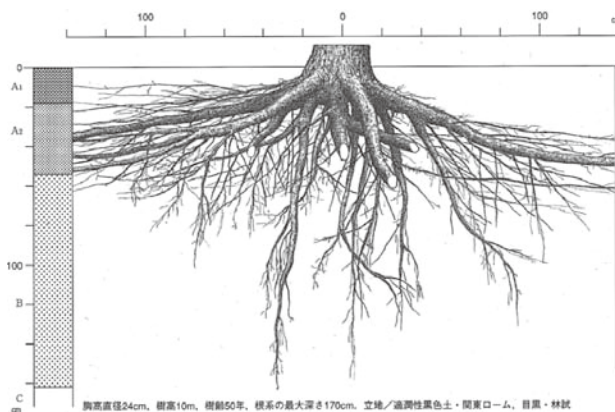


図 3.3-3 覆土への植物根侵入¹¹⁾



写真 3.3-3 動物による覆土への侵入¹²⁾

3.3.7 ワーキンググループ及びプロジェクトの設置

ENVIRONET 構築時から、全体的な議論を行う Plenary Meeting のみでなく、参加国が抱える課題やそれに対応した議論を行うため、ワーキンググループ等が必要であるとの意見が出されてきた。これを受け、今後本格的に活動を開始する 3 件を含め、ワーキンググループ及びプロジェクトが計 5 件活動している（図 3.3-4）。

現時点では、「汚染エリアにおける原位置での測定評価に係るワーキンググループ」（以降、「In-SITU」）及び「環境修復の妨げとなる要素への対応に係るプロジェクト」（以降、「CIDER」）の 2 件が活動を行っている。これにくわえ、平成 27 年からは、これまで多くの国及び機関から必要であるとされてきた、放射性廃棄物トレンチ処分に係るワーキンググループと、NORM に係るプロジェクト、エンドステートに係るプロジェクトの 3 件が立ち上げられた。

これらのうちセンターの跡措置に反映できる情報を取得できると考えられるものは、エンドステートプロジェクト、CIDER プロジェクト及び In-SITU ワーキンググループの 3 件である。

	名称	目的	これまでの成果
平成 27 年以前から実施中	In-SITU	・汚染地域における低コスト、安全、迅速な原位置での測定及びデータの処理評価方法の情報共有 ・上記内容に係るサービスの提供	・実際の汚染地域での機器の原位置測定、適用性評価のワークショップ実施済み。
	CIDER	・環境修復における障害（資源不足、ステークホルダーの反対意見、不明瞭なエンドステートや法的枠組み）の除去 ・現在の事例への対策（内容、手順等）を政策決定者に提案	・障害である要素抽出及びそれぞれへの対策取りまとめ報告書作成済み（第 1 フェーズのみ）。
平成 27 年から実施	放射性廃棄物トレンチ処分	・過去のトレンチ/ピット処分サイトの管理や今後必要な調査及びモニタリング等の検討	・各国の有する問題及び対策の整理、情報共有 ・中心となり活動する国を選定し、内容、スケジュール、参加国等検討中
	NORM	・NORM 廃棄物の管理や再利用方法等に係る指針の策定	
	エンドステート	・各国がエンドステートを定めるために具体的に 必要な項目や考え方の整理	

※ : ワーキンググループ（期間を設定しない）
 ※ : プロジェクト（期間を数年間と設定）

図 3.3-4 実施中及び計画中のワーキンググループ及びプロジェクト

エンドステートプロジェクトについては、平成 27 年から活動が開始した。

エンドステートに係る議論は 3.3.3 に示した通りであるが、現状においてエンドステートが適切に定義・設定されていない場合や、また先行して環境修復が行われている場合が多い。これに対し改めてエンドステートを設定することは容易ではなく、コストや時間を費やし資源の無駄につながる事が予想される。また、これまでも国際的な文書でエンドステートが十分検討されてきたとは言えない。

そのため、今後検討を開始する当プロジェクトにおいては、事前にエンドステートを定義・設定する重要性の理解促進や、それを行わない場合に想定される障害やそれに対する方策の検討を行うこととした。

現在は、基本的事項を明記した“Terms of Reference”（以降、“ToR”という。）策定が進められているが、今後は下位グループ設置、初期の打合せへの参加、これらの調整に係る業務が行われることとなる。

現在 Steering Committee 委員 1 名と豊富な経験を有するメンバー 5 名がいる。なかでも、メンバー 1 名が所属するカナダ国サスカチュワン州は、ウラン鉱山の事業開始前から事業休止後のモニタリング及び維持管理をへて休止ウラン鉱山の跡措置後の制度的管理に至るまでに決定・実施すべき内容、責任の所在、期間の設定、終了するための考え方等を網羅したプログラムに基づき管理を行っている¹³⁾。また、英国 Nuclear Decommissioning Authority (NDA) 社は原子力施設の廃止措置に多く関与しており、エンドステートの定義・設定においても多くの知見を有する。

CIDER プロジェクトは、各国の環境修復の妨げとなっている要素をとりまとめ各国の意思決定機関に知らせ、それに対する対策案を提案することにより、対策の一助とすることを目的とする、平成 25 年に設置されたプロジェクトである。これまでに、事務局の下位に 3 つのグループ（政策・予算、技術、ステークホルダー）を設置し、各国からの具体的な妨げとなる要素及びそれに対しなされた対策を整理し、各要素に対する望ましい対策案の提案を行い、2 つのフェーズのうち第 1 フェーズを終了し報告書として取りまとめが行われている。

今後は、具体的な案件を抽出し、具体的な対策案を策定するとともに責任の所在の明確化を行うこととしている。本件はセンターが鉱山跡措置を円滑に進めるために検討しているステークホルダー・インボルブメントに係るものであるが、詳細については今後調査することが必要である。例えば、各国における妨げとなっている要素、それに対してとられた対策やその結果等について議論されているものと思われる。

In-SITU ワーキンググループは、汚染サイトにおいてモニタリング、分析及び結果の解析評価(図 3.3-5)を精度を犠牲にすることなく低コストかつ短時間で行う最適な手法を各サイトの条件に合わせ選定し、さらには追加で必要なモニタリングや分析等の項目・位置・数量等を抽出する技術開発のため、平成 24 年に設置されたワーキンググループである。これまで汚染サイトでのモニタリングや分析等を行った経験のある国及び機関が中心となり、経験のない国々の休止ウラン鉱山（例えば、中央アジア）や NORM 施設（例えば、アゼルバイジャン）に対しノウハウ、製品、サービス（測定・教育等）の提供を行っている。

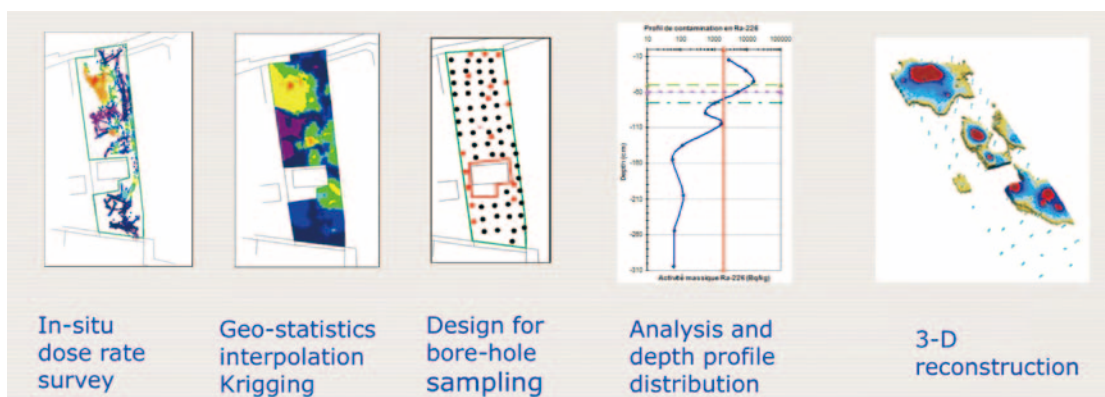


図 3.3-5 モニタリング等の結果の解析評価方法¹⁴⁾

3.3.8 他機関との協働

他機関との協働については 3.1.8 に示したとおりであるが、これに加えて、ここ数年は特段の関連はなかったものの環境修復という共通する目的を有する以下のような IAEA 内の他部署や IAEA 外のネットワークや国際機関等とも新たな協働が試みられはじめた(表 3.3-1、図 3.1-1 参照)。

表 3.3-1 協働を行っている他機関の例

他分類	具体名
IAEA 内のネットワーク・部署	IDN (3.1.8 参照) Nuclear Knowledge Management Section
IAEA 外のネットワーク・国際機関	UMREG (3.1.8 参照) 国際連合工業開発機関 (UNIDO) 欧州復興開発銀行 (EBRD)
TC	RER9121 “Supporting Safe Management of Uranium Production Legacy Site”) (3.1.8 参照)

この中では、ENVIRONET の活動を拡充するための資金調達の観点から EBRD や UNIDO との協働にも重きが置かれるようになった。また、効率的な環境修復を行う上では、これまで蓄積された知見やノウハウを記録、保管、共有、継承等によりうまく活用（“レッジ・マネジメント”）し、コストや時間の無駄のない進め方が必要となることから、環境修復に限らないが、すでにレッジ・マネジメントを行っている IAEA 内の部署とも今後協働することとなった。

また、初の試みとして、平成 28 年 5 月に廃止措置及び環境修復に係る国際会議を IAEA が開催することとなった。

3.3.9 会議外の情報交換の場提供

平成 21 年の構築以降 Plenary Meeting における主な内容は参加国間の共有を目的とした各国の事例紹介であり、参加国はそれぞれの目的に応じ、事例紹介から取捨選択し必要な情報を取得することができた。

これに対し、ここ数年は、徐々に ENVIRONET における議論がワーキンググループやプロジェクト(3.3.7 参照)を中心としたものに推移しつつあることから、会議内における情報取得が難しくなってきた。そのため、Plenary Meeting と比較して会議外（具体的には、会議後に個別に先方と調整し確保する時間）の方が情報交換の場としての役割を担う状況となっている。

センターにとっても、平成 21 年に ENVIRONET へ関与するとした主な目的は今後の鉱山跡措置に活用できる情報の取得であった。しかしながら、近年は上記の状況の変化に対応し、事前に先行あるいは並行事例であるサイトを文献調査により抽出したのち、取得が必要な項目をあらかじめ準備した上で、それらに関する情報を主に会議外において取得してきた。得られた情報にはセンターの跡措置に活用できるものが含まれるとともに、今後追加して取得が必要な情報についても抽出することができた。詳細については 4. に示す。

3.4 ENVIRONET の課題

当ネットワークは構築から 7 年が経過し、参加国それぞれの抱いていた期待との乖離が顕在化してきた。センターからはこれまで構築時以降継続して Plenary Meeting に、また平成 23 年以降は Steering Committee にも出席してきたが、特に後者においては課題が声高に議論されている。今後改善すべき点と当面の対策として挙げられた点を以下に示す。

1 点目：環境修復のノウハウや経験を有する国等に対する意識付け・認知度の改善

平成 21 年の構築以降、出席する国及び機関の顔ぶれにはおおむね変化はない。環境修復のノウハウ、失敗も含めて経験が多く、ほぼ皆勤のメンバーが Steering Committee となっているが、十分な顔ぶれが揃っているとはいえない。例えば、休止ウラン鉱山の環境修復に関しては、自国での環境修復を終えたのち評価を行っているフランスは、数回の出席にとどまっている。また、米国 DOE は Steering Committee にメンバーがいるものの、それ以外ほとんど出席していない。また、旧ソビエトによる核兵器用ウラン開発のため鉱業活動が行われた東欧諸国の多くが同様な問題を抱えており環境修復を進めているにも係らず、ENVIRONET の存在は認知されていないか重要性が認められていない。

これに対しては、Scientific Secretary が IAEA 内部や外部から問われている存在意義について危機感を感じていることも考慮し、Scientific Secretary が上記の国々に対し今後個別にアンケートやヒアリングを行うことを Steering Committee として提案した。

2 点目：毎回の主要なスコープ及びトピックスの決定方法の改善

すでに、毎年 Steering Committee において前年までの議論の結果や参加国の希望から、次回のスコープ及びトピックスが選定・決定されると示した（3.3.1 参照）。しかしながら実際には、さらに数ヵ月前に Steering Committee の中の一部と IAEA Scientific Secretary が打合せ（“Consultancy Meeting” と呼ばれる）大枠を決定している。しかしながら、これは必ずしも今後複数年の計画をたてた上でそれに基づき決定されている訳ではなく、また参加国の希望が反映されにくい仕組みとなっていることから、参加国としては直前まで内容が分からず、Plenary Meeting への参加の必要性を検討しにくい。

これに対しては、従来より早い時期に IAEA Scientific Secretary と Steering Committee メンバー間で情報共有と要望等の表示ができるよう、Plenary Meeting 開催の遅くとも半年前にメール等で調整するよう Steering Committee として提案した。

3 点目：ENVIRONET と重複する IAEA の活動の合理化

ENVIRONET の活動内容と IAEA が別途ノウハウや経験を持っていない国々に対し行っている環境修復に係る TC（3.1.8 参照）は、詳細な対象や内容は異なっているものの、休止ウラン鉱山の環境修復といった点では共通している。また、後者への参加国（主に中央アジア）が近年 ENVIRONET に参加するようになってきている。したがって、両者を並行して行うのではなく、共通する箇所を ENVIRONET に吸収するようなかたちで活動することが検討された（特に 3.3.8 に示した RER9121）。

これに対しては、IAEA Scientific Secretary と TC それぞれの所管部署が調整を行うこととした。

4 点目 : Scientific Secretary の取組み方の改善

以前から参加国の間では Scientific Secretary による運営に改善の余地がある旨の意見が出されている。上記 2 点目に示したとおり直前までスコープ 及び トピックスが分からないことに対してだけでなく、以下に示す内容についても改善の要求がなされた。

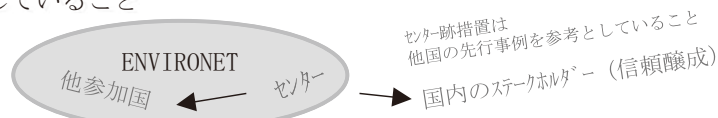
- 想定される参加者が直前まで知らされない。また、その人たちが自国でどのような立場であり、本人も含め Plenary Meeting においてどのような役割を期待されるのか明確でない（本来であれば、それが各国が出席の必要性や人選を検討する上での材料となる）。
- プレゼンテーションの内容が直前まで知らされないことから、当日の活発な議論につながらない。
- ワーキンググループ やプロジェクトの進捗が、関与している人にしか分からない。
- ENVIRONET のウェブサイト更新の頻度が低く、最新の情報が分からない。
- Scientific Secretary のレスポンスが悪く、個別にも情報を得ることが難しい。

これらに対しては、Steering Committee の場等を利用して継続して声が挙げられており、最近徐々にではあるが改善されてきている。

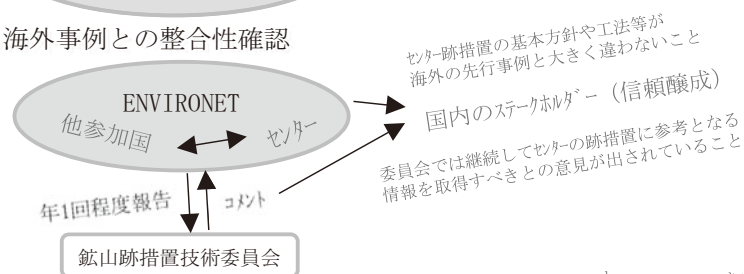
3.5 これまでの関与で得られた利点

今後の継続関与の必要性については、これまでの関与により得られた利点や ENVIRONET の課題（3.4 参照）を考慮した上で検討することとなるが、以下の 4 点に要約される（図 3.5-1）。

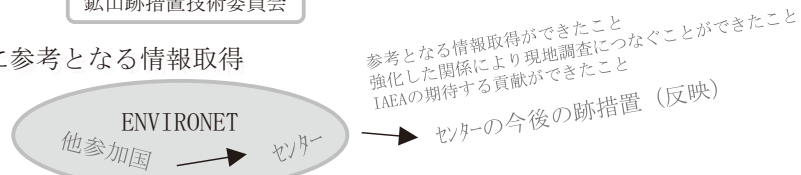
(1) 継続的に関与していること



(2) 情報発信による海外事例との整合性確認



(3) セクターの跡措置に参考となる情報取得



(4) 各国出席者との関係強化、ENVIRONET への貢献

図 3.5-1 これまでの ENVIRONET への関与により得られた利点

図 3.5-1 の(1) : 継続的関与そのものによる対外的アピール

図 3.5-1 の(2) : 情報発信による海外事例との整合性確認

我が国においては関係法令に具体的な跡措置の手順や工法等詳細が示されていないが、同様な状況にありながら跡措置が行われ水質等の基準値を満足する跡措置を行うことができた（あるいは現在行っている）海外事例との整合性を確認することは、国内のステークホルダーに対し人形峠が妥当な跡措置を行っていることを示す上で不可欠なことである。センターの跡措置を報告することで、環境修復に係る経験豊富な IAEA や出席者から、センターの跡措置の進め方や具体的な内容等について問題点の有無や過不足を問うことができる。実際には、これまで 5 年間にわたりセンター跡措置の基本的考え方、各施設の有する課題やそれに対するこれまでの取り組み（廃砂たい積場への覆土設置や効果確認のためのモニタリングを含む）について報告を行ってきた（図 3.2-1 参照）。これに対しては、類似の環境修復を行ってきた国々からは特に異議や問題提起はなく、逆にセンターと同様な進捗状況にある国々やこれから同様の跡措置を行う国々から参考にするための質問が出されることが多く、ENVIRONET に対し貢献を行うことができたと考えられる。また、報告内容は、IAEA のウェブサイトプレゼン資料 PDF としてある期間公開され、誰でも閲覧が可能となる。

ENVIRONET への継続的関与や IAEA 等から出されたセンター跡措置への意見については、センターの外部委員会である鉱山跡措置技術委員会において報告を行っており、それを含めた委員会からのコメントがセンターのウェブサイトに公開される。したがって、これもステークホルダーへのアピールとなりうる。

これら両者は、センターの跡措置が自らの判断のみではなく専門家を含む第三者にも評価を受けながら進めていることを示すものであり、センターの跡措置に対する信頼感や安心感の醸成につながるものと考えられる。

図 3.5-1 の(3) : 跡措置に参考となる情報取得

図 3.5-1 の(4) : 各国出席者との関係強化、ENVIRONET への貢献

ENVIRONET は環境修復に係る多国間ネットワークであり、同様な経験を有している（あるいは今後行う）専門家との様々な分野における情報交換がなされる場である。出席に先立ち議論をしたいターゲットを絞り込むことが難しく、また出席したとしても自動的にかつ容易に必要な情報が取得できる訳ではないという課題は残されているものの、当初は Plenary Meeting から、近年は会議外で情報取得を行うことができた（3.3.9 参照）。

また、得られた情報にはセンターの跡措置に活用できるものが含まれるとともに、今後追加して取得が必要な情報についても抽出することができた。また、これらの情報は、強化した関係から海外事例調査につながった、あるいは海外事例調査を行ったのちに情報が取得でき調査結果を確認できたものも多い。これは、いずれも継続的関与により得られた各国出席者との関係強化によるものである。

なお、IAEA Scientific Secretary ではない IAEA 関係者が ENVIRONET に出席することも多く、これらの方々からの情報取得も可能である（例えば、カナダ・Sydney Tar Pond）。

また、継続的に関与してきたこと、センター跡措置についての情報発信を行ってきたことで、IAEA が期待する ENVIRONET への貢献も行うことができたと言える。

3.6 今後の関与の必要性

今後は、現在の ENVIRONET の方向性、センターが鉱山跡措置に今後必要となる情報やその情報が取得できる可能性、そのために必要となる出席者の資質（英語によるプレゼンテーションや議論ができるコミュニケーションのスキル、鉱山跡措置に必要な技術及び法体系に係る知識）、ENVIRONET が有する課題、IAEA がセンターに期待する貢献、それに対応するために必要な負荷、これまでの関与から得られた利点を考慮した上で、今後の関与の必要性、方法、程度について検討する必要がある。

4. 結果（海外事例調査（現地調査・打合せ及び文献調査））

4.1 調査に至る経緯及び必要性

先述のとおり、センターの鉱山跡措置は関係法令である鉱山保安法等に基づき行っているが、関係法令には具体的な実施項目、具体的内容、手順がすべて示されている訳ではない。また、跡措置を行うにあたっては技術的な観点だけでなく、経済的や社会的な観点も含めたうえで最適なものとする必要がある。そのためには、先行あるいは並行事例を、失敗例も含めて参考としなくてはならない。

そのため、海外における事例を参考とすることを目的とし、ENVIRONET への継続的な関与とあわせて、ENVIRONET や文献調査から抽出した事例を対象に現地調査及び打合せによる調査を行うこととした。

なお、平成 14 年に策定した基本計画²⁾においては、海外においてもセンターと同様に跡措置が進められ鉱害防止の安定化措置や放射線防護措置等がそれぞれの国情に応じて実施されている旨が記載されている。しかしながら、2. に示したセンター跡措置に残された課題を含む項目についての具体的な情報はなく、かつ各国の跡措置はセンターの基本計画策定以降進捗していると思われることから、情報を取得する必要があるとの考えに至った。

4.2 これまでの実施概要及び目的とした情報

鉱山跡措置は、一般的には計画策定から具体的な対策の実施をへて、最終的には坑水処理やモニタリングを含めた維持管理、エンド・ステートに至る。上記の計画策定からエンド・ステートまで全てを調査対象とすることは現実的ではないが、センターで鉱山跡措置後今後進めるために今後取得して参考としなくてはならない項目が 1. に示すとおり抽出されていることから、これらの項目を中心に調査を行うこととした。

次に、その項目に係る情報を有すると思われる事例を文献調査等から集めるとともに先述の ENVIRONET に出席している関係者にヒアリングを行うことにより、最適な調査対象としてのサイトを選定した。そのうち、ENVIRONET の会議出席等と時期をあわせて現地調査及び意見交換を行った。なお、現地調査及び打合せは限られた時間内で行うため、各調査においては事前に選定した、そこで取得すべき項目を中心に情報取得を行っており、すべての項目についての情報は取得していない。

調査対象としたサイト及び調査項目は表 4.2-1 のとおりである。

表 4.2-1 海外事例調査の対象としたサイト及び調査項目等

サイト	項目	実施年
Seelingstädt サイト Culmitsch 鉱さいたい積場 Ronneburg サイト Lichtenberg 露天採掘場跡地 等 (ドイツ・WISMUT 社)	・湛水した細粒分が卓越する鉱さいの安定化方法 ・露天採掘場跡地からの浸出水対策 ・跡措置後のサイト有効利用	平成 18 年 ※1
Rožná K1 鉱さいたい積場 (チェコ・DIAMO 社)	・湛水した細粒分が卓越する鉱さいの安定化方法 ・覆土構造	平成 21 年
Bessines サイト LavauGrasse 鉱さいたい積場 劣化ウラン貯蔵庫 等 (フランス・AREVA 社)	・跡措置後のサイト有効利用 ・ステークホルダー・インボルブメント	平成 22 年 ※1
Bois Noirs Limouzat 鉱さいたい積場 (フランス・AREVA 社)	・谷地形にたい積され、湛水した細粒分が卓越する鉱さいの安定化方法 ・覆土構造 ・長期的維持管理	平成 25 年 ※2
Sillamäe 鉱さいたい積場 (エストニア・ÕKOSIL 社)	・湛水した細粒分が卓越する鉱さいの安定化方法 ・たい積場からの浸出水対策 ・跡措置後のモニタリング ・覆土構造 ・覆土の浸食対策及び発生後の維持管理	平成 25 年 ※2
Pécs 鉱さいたい積場 (ハンガリー・PURAM 社)	・湛水した細粒分が卓越する鉱さいの安定化方法 ・覆土構造 ・覆土の浸食対策及び発生後の維持管理 ・長期的維持管理	平成 26 年 ※2
Kowary 鉱さいたい積場 (ポーランド・ヴロツワ工科大学)	・覆土構造 ・覆土の浸食対策及び発生後の維持管理	平成 26 年 ※2

※1：現地調査ののち ENVIRONET であらためて情報取得（3.3.2 参照）。

※2：ENVIRONET から取得した情報を契機に現地調査を行った。

4.3 現地調査及び打合せで得られた情報

以下に、表 4.2-1 に示すサイトごとに、調査対象とした施設の概要や経緯、これまでに行われた跡措置の内容、現状、課題及び今後の計画等について示す。あわせて、同表に示した項目に対する調査結果についても示す。

なお、これらに対し今後のセンターの鉱山跡措置に反映できると思われる情報については、項目ごとに 4.4 に示す。

4.3.1 Ronneburg サイト Lichtenberg 露天採掘場跡地、Seelingstädt サイト Culmitzsch 鉱さいたい積場 (ドイツ・WISMUT 社)

これらの施設が位置する旧・東ドイツのザクセン (Sachsen) 州及びチューリンゲン (Thuringen) 州においては、1947 年に現在の WISMUT 社がウラン資源を核兵器に利用するため旧ソヴィエトにより国営企業として設立され、1991 年の東西ドイツ統一まで鉱業活動を行っていた。その結果、多くの鉱さいたい積場、捨石たい積場、坑水処理施設を含む数多くの鉱山施設がそのままの状態に残された。東西ドイツ統一ののち、連邦政府により WISMUT 社は鉱業活動により乱された環境を修復することを目的とした会社として再編され、現在まで鉱山跡措置を行っている。

鉱さいは、廃棄物の放射能濃度に応じ、「放射性廃棄物」、「放射性放出」及び「一般産業廃棄物」のいずれかに位置付けられる。管理方法等の詳細については不明である。

Lichtenberg 露天採掘場跡地

当跡地を含む Ronneburg サイト内に散在していたボタ山状の捨石たい積場の捨石を、露天採掘場跡地内に運搬したのち埋め戻し、最上位に覆土を設置した (図 4.3-1、写真 4.3-1)。当跡地は、埋め戻し前は約 1,600m×約 900m の面積を有する凹地であり、一般市民が近くに居住することや凹地側壁が物理的に不安定であったことから、従来から埋め戻しの必要性が指摘されていた。そこでこの条件を利用して、当跡地周辺に散在していたたい積場の捨石を搬入し、埋め戻し材として利用することとなった。

これにより、複数の地形的に不安定な捨石たい積場の管理をなくすることができ、あわせて地形的に不安定な凹地そのものをなくすることができ、捨石及び浸出水の一元的管理を行うことができるようになった。また、過去に存在した負の遺産を形にして後世に残したいという地元住民の意思を反映したものであった。

埋め戻し作業は 1995 年に開始した。捨石は 5%程度 of 黄鉄鉱が含まれる黒色頁岩であり (U 約 80ppm 程度)、硫酸酸性の浸出水が発生することが予想されていたことから、黄鉄鉱を多く含む岩石を覆土後の予想地下水面以深 (還元環境となる) に埋め戻し、上位ほど黄鉄鉱を多く含まない捨石を用いた (図 4.3-2)。覆土設置が終了するまでは雨水が浸透し酸化環境の下で酸性の浸出水が発生することから、これらを集水する暗渠が埋設され、集められたのち坑水処理施設に送られ処理された。発生する廃棄物は WISMUT 社が他所において管理している捨石たい積場に搬出・たい積された。なお、捨石の掘り返しは、基盤岩が露出した時点まで行われ、基盤岩を分析しウラン含有量が十分低いと判断された時点で終了した。

なお、覆土にはベントナイト混合土のような厳しい雨水浸透量低減化の目的は与えられていない。理由としては、a)コスト、b)社会的問題（住民は降水の浸透を妨げるようなシートで覆われた地域に隣接した地域に住むことを望まない）、c)防災上の問題（浸透しない降水は露天跡地の表面を流下し、これは洪水の危険性を高めることとなる）である。



写真 4.3-1 埋め戻し前後の Lichtenberg 露天採掘場跡地（左：1991 年、右：2010 年）⁸⁾

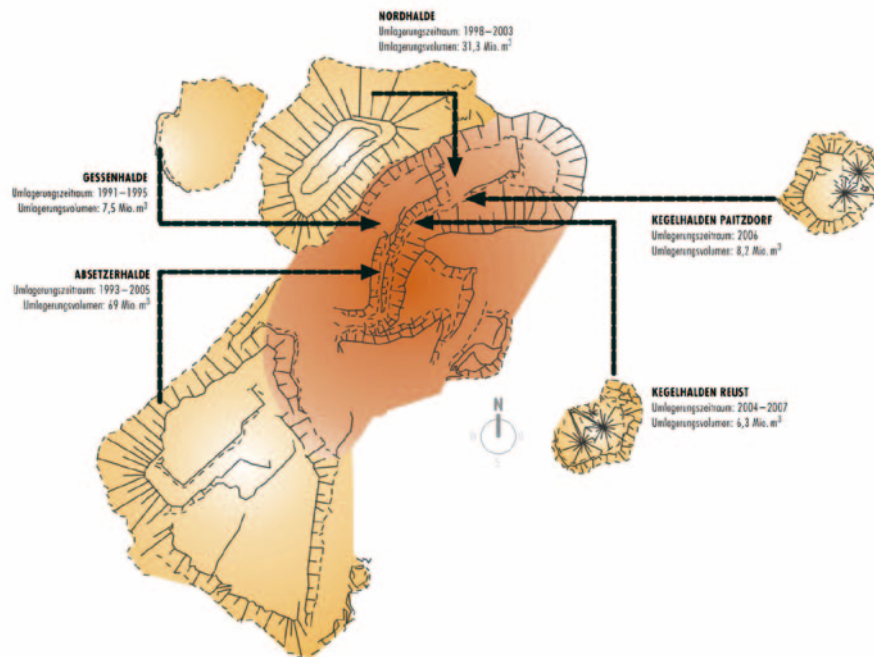


図 4.3-1 露天採掘場跡地と埋め戻しが適用された捨石たい積場⁸⁾

埋め戻し及び覆土設置がなされた跡地は、現在広く一般市民が利用できる公園として維持管理されている。2007 年 4～10 月には、WISMUT 社が実施している鉱山跡措置の成果の一般市民に対する理解促進活動の一環として、当跡地に隣接するゲーラ（Gera）市においてイベント（“German Federal Garden Show”）が開催された。また、跡地には、かつてウラン鉱山であったことを示すためのモニュメントが斜面に設置され、植え込みによって WISMUT 社のロゴマークを作るなどの積極的な一般市民への働きかけや情報公開がなされている。

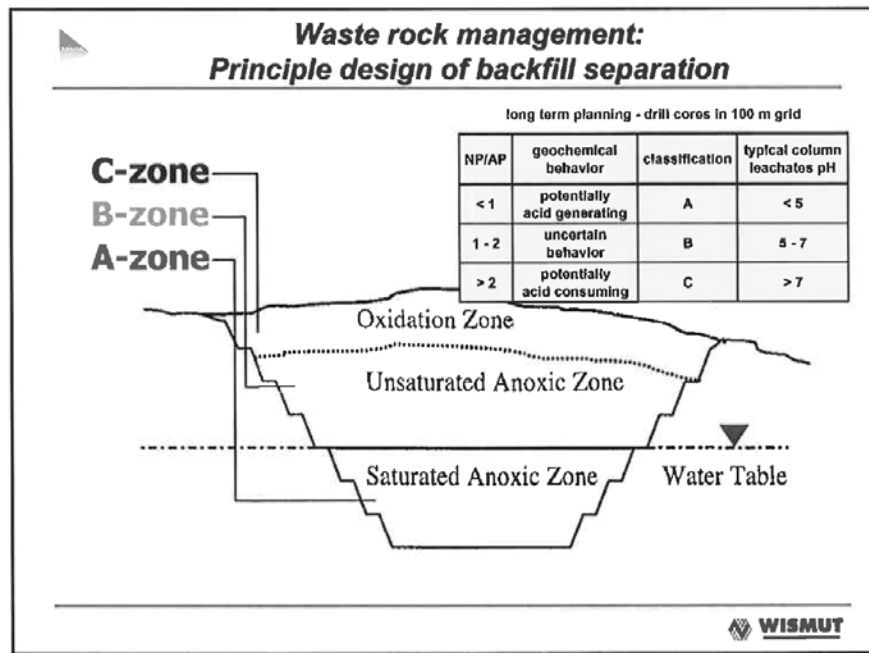


図 4.3-2 露天採掘場跡地への区分した捨石の埋め戻し¹⁵⁾

Culmitzsch 鉱さいたい積場

当たい積場は、かつての露天採掘場跡地を利用し鉱さいたい積場としているものであり、240ha の面積を有する。盆状のたい積場における細粒の鉱さいを湛水管理していたが、水位を低下させたのち鉱さいを脱水するために、たい積場の周辺から中心部に向かいジオキスタイルを設置し、新たに掘削したボーリング孔にドレーンを設置した上で载荷盛土を行った（図 4.3-3、写真 4.3-2～4.3-3）。これにより鉱さいが周辺部から安定化することで中心部へのアクセスが可能となる。これを繰り返したのち、覆土を設置した。

鉱さいの脱水により発生する水は、近傍に位置する製錬所に送られウランを回収したのち、坑水処理施設に送られ処理されている。

調査を行った平成 18 年時点では脱水圧密が行われており、平成 27 年までに雨水浸透量低減化等を目的とした覆土・植栽まで終了するとのことであったが、その後の状況は不明である。また、跡措置後は制限（農業活動、井戸等による採水の禁止等）を設けた跡地利用を行うとのことであった。

なお、これらの施設に対する覆土表面の浸食対策、モニタリング、長期的維持管理についての情報は得られなかった。また、覆土の仕様（構造・材料）を設定する上で覆土に機能を要求する期間についても情報は得られなかった。



写真 4. 3-2 跡措置中の Culmitzsch 鉱さいたい積場



写真 4. 3-3 排水用ドレーン

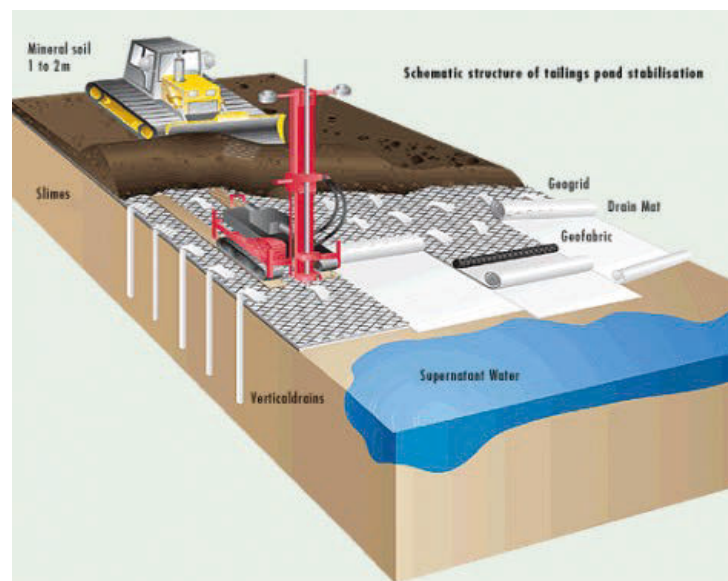


図 4. 3-3 鉱さい安定化概念図¹⁶⁾

4. 3. 2 Rožná K1 鉱さいたい積場 (チェコ・DIAMO 社)

上記 4. 3. 1 同様、旧ソヴェット崩壊まで旧チェコスロヴァキア国内においてウラン資源を核兵器に利用するため鉱業活動が行われており、その結果、多くの鉱さいたい積場、捨石たい積場、坑水処理施設を含む数多くの鉱山施設がそのままの状態に残された。DIAMO 社は、チェコスロヴァキア政府と旧ソヴェットとの間で鉱業活動で得られたウランを旧ソヴェットに送るとの協定が 1945 年に締結された際に設立された法人を前身とし、現在は国営企業として鉱山跡措置を行っている。

鉱さいは、放射性廃棄物としては扱われず、「二次原料」(“Secondary Raw Material”)との位置付けである。それぞれの管理方法等の詳細については不明である。

Rožná K1 鉱さいたい積場

当たい積場は、1957 年に鉱業活動が開始され現在も国内で唯一操業している Rožná 鉱山において生産されるウラン鉱石の製錬により生じた鉱さいを現在もたい積しているたい積場の一つである（写真 4.3-4～4.3-5）。当たい積場は、面積 64.5ha、最大たい積量約 1,100 万 m³、鉱さいの最大厚約 48m の規模を有し、周囲には捨石を用いた堤防状のダムが設置されている。鉱さいは縁辺部に設置されたパイプラインで流入するため、粗流部分がダム近傍で落ち、場内中心部が細粒となっている。

たい積場を取り囲むように鉱さい下位に“drainage pipe”が設置されている。鉱さいから地下へ浸透する漏水は地下水とあわせてたい積場中心部に設置されたピットに集められ、場内へ戻される。上澄水は集水ポンプにより坑水処理施設へ送られ処理される（図 4.3-4）。また、坑道から発生する坑水は、坑道内の地下水位の指標を定め、水位がそれ以上になったときにのみ坑水処理施設に送水、処理される。処理の結果得られたウランは売却される。

現在、鉱体の枯渇とともに閉山に向けた鉱山跡措置を実施中である。このうち当たい積場については、たい積物等の現状の把握、措置工法、今後の管理方法等が検討されている。その中では、鉱さいの脱水後に線量低減化および遮水を目的とした、複数の材料・目的を持つ層から構成される覆土を設置することとしている。鉱さいの粒度、化学組成等が場所により不均一であるため覆土後に地表面に凹凸ができることが予想されるが、これに対しては必要に応じ整形を行うことにより対応し、最終的には植栽を行う。なお、水収支からは場内水は年々増加していると推定され（＋約 33 万 m³/年）、また他施設からの固体廃棄物も受け入れている（＋約 12 万 m³/年）が、これらの増加分だけ坑水処理を行っており（－約 45 万 m³/年）、これにより場内の水および鉱さいの総量は平衡が保たれている（図 4.3-4）。ここで、総量は変わらないものの全体に占める水分比が減少することから長期的には鉱さいからの脱水がなされ、また降水量も少ないことから（約 600mm/y）覆土を行うに先立ち荷重をかけての鉱さいの脱水は不要とされている。

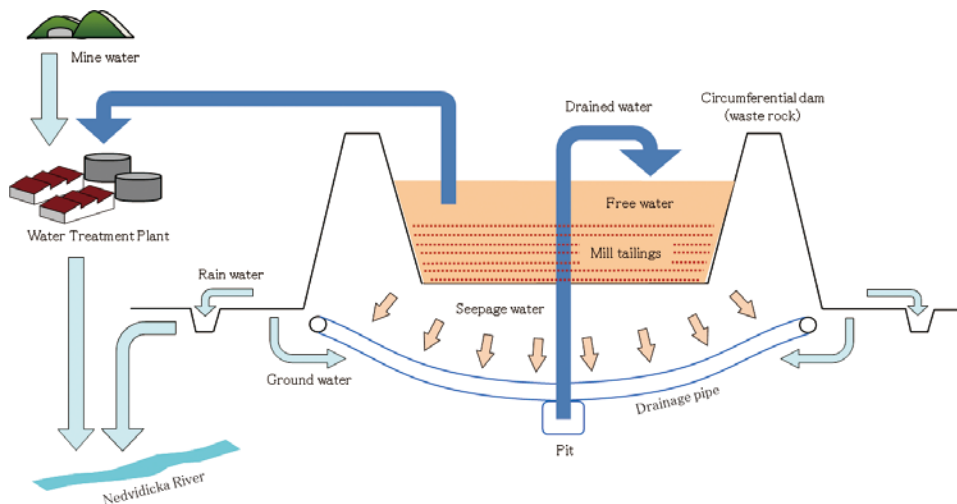


図 4.3-4 Rožná K1 鉱さいたい積場の坑水処理概要

覆土については、線量及び雨水浸透量低減化を目的とし、厚さ 100cm、異なる材料を用いた複数の層から構成される。構造としては、排水のため下流方向に 3%勾配させ、そのため最下部に厚さを変えた捨石を用いる。雨水浸透量低減化のためのレイヤーとしては、ベントナイトの両側を合成繊維で挟んだ厚さ 5cm のシートを設置する。透水係数は $1 \times 10^{-12} \text{m/s}$ の性能が期待される。天然材料である必要はなく人工材料でよいと判断した理由としては、①降水量が約 600mm/y と少ない、②水収支調査結果からは全降水量の約 3 割しかベントナイトシートまで到達しないと推定される、③ベントナイトシートの一部に孔が開いたとしても地下水の水質に無視できない影響を与えることはない、④孔が開いた場合でも浸透した水により内部のベントナイトが膨潤し修復されることが期待される、の 4 点である。最上位には植物が生育するための土壌から構成される層を設置する。

写真 4. 3-4 Rožná K1 鉱さいたい積場¹⁷⁾

写真 4. 3-5 鉱さいのたい積、太陽光発電パネル設置

なお、これらの施設に対する覆土表面の浸食対策、長期的維持管理についての情報は得られなかった。また、覆土の仕様（構造・材料）を設定する上で覆土に機能を要求する期間についても情報は得られなかった。

モニタリングを行う期間は、隣接する K2 鉱さいたい積場を含めたエリアを対象とした地下水流動解析の結果に余裕分を加味し 100 年程度と設定された。坑水処理を行う期間は設定せず、濃度は経時に低下することが期待されていることから法令値（例えばウランの場合 0.3mg/L）を満足する値となった時点で終了する。また、自治体との間に定めた上乗せ基準もない。跡地利用としては、公園等の一般への開放は可能であるが、居住、飲料水の採取等は制限される。また、太陽光発電パネルが設置されている（写真 4. 3-5）。

4. 3. 3 Bessines サイト LavauGrasse 鉱さいたい積場等 （フランス・AREVA 社）

1948 年にウラン鉱床が発見されてから鉱業活動が続けられてきたが、ウランの市場価格が低迷するとともに 1993 年に鉱業活動が終了した。従来フランスの原子力政策は、従来は原子力・代替エネルギー庁（CEA）が主導し、核燃料製造を CEA 子会社の旧・Cogema 社が、またプラント製造を民間企業旧・Framatome 社が行ってきた。現在の鉱山跡措置は、旧・Cogema 社が主体となって設立された AREVA 社が実施している。

鉱さいは、廃棄物の放射能濃度と含まれる核種の半減期に応じた分類により、超低レベル放射性廃棄物（“VLLW”）との位置付けである。それぞれの管理方法等の詳細については不明である。

LavauGrasse 鉱さいたい積場

当サイトでの主な鉱業活動は、1950 年代～70 年代に行われた坑道および露天採掘である。採掘された鉱石は、当サイト南東方 3km に位置する別サイトで採掘された鉱石とあわせて当サイト内で製錬された。発生した鉱さいは、斜面にかん止堤を構築して設置した LavauGrasse 鉱さいたい積場と Le Brugeaud 露天採掘場跡地内にたい積され、その後は、上記別サイトの露天採掘場内にたい積された（図 4.3-5、写真 4.3-6）。

当たい積場の跡措置は、1993 年から行われた。このうちたい積場については、線量および放射性物質の散逸率の低減化を目的とし、主に捨石およびその上位の土壌を用いた覆土により措置された。覆土の構造や材料についての詳細は不明であるが、サイト内および隣接するサイト間で鉱さい及び捨石を跡措置そのものの材料として利用している。具体的には、鉱さいたい積場の堤防には分級して得た鉱さいのうちの粗粒部を、また、露天採掘場跡地の堤防には捨石を用いている。このことにより、管理対象となる施設数が低減化でき、かつ対象となるそのものである鉱さい及び捨石も管理を分散することなく効率的に行っている。

鉱さいたい積場及び露天跡地から発生する浸出水については、処理したのち河川へ放流している。坑水処理の結果発生する廃棄物は上記別サイトにたい積される。坑水処理は化学沈殿であるが、コスト低減化の観点から植物の適用が試みられている。具体的には、排水をマツ科植物の“Douglas fir”（ヘイマツまたはダグラスファー）の樹皮に 1 分間浸すことでラジウムや重金属濃度が低下することである。これは北米に自生し我が国では建築材料として輸入され広く用いられている樹木であるが、樹皮等の詳細については不明である。

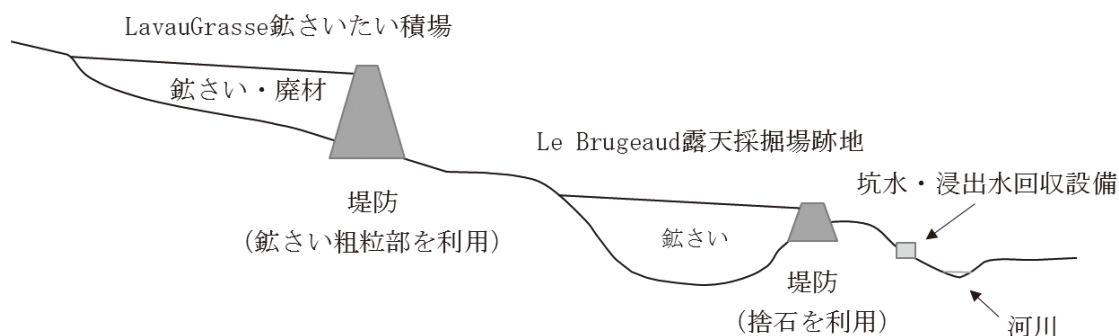


図 4.3-5 鉱さいに対する跡措置の概要

サト全体

AREVA 社は、跡措置の大半が終了しつつあるいま、当サトの有効利用のためウランの鉱業活動に係る一大センター（“excellence center”）化を進めている。これには鉱山施設だけでなく核燃料施設も含まれる（表 4.3-1、報告書発行時点では一部のみ運用中）。これは、センター（約 260 万 m²）と同規模な約 150 万 m²のサトに、休止ウラン鉱山の施設と核燃料施設（具体的には、劣化ウラン貯蔵庫）が共存しており、かつ地元自治体との関係を保ちつつ跡地が有効利用されている事例である。

ただし、現地調査を行った時点で計画されていた有効利用は、本報告書発行時点では計画通り進捗していないとの情報が得られている。



写真 4.3-6 鉱山跡措置前後の Bessines サト(上:1978 年、下:2001 年)¹⁸⁾一部加筆

Source: copyright@AREVA

表 4.3-1 Bessine サイトの跡地有効利用

名 称	目 的
Pôle Géosciences	ウランに係る研究センター ※ 2012 年運用開始予定であったが、現時点では建設されていない
U Mining Data Center	国内外の鉱業活動に係る報告書やデータの保管・管理
Visitor Center	一般市民および研究者を対象とした展示施設 ※ 2011 年夏開所予定であったが、現時点では建設されていない
SEPA (Service of studies of procedures and analysis)	試料の分析・保管 (固体：ウラン鉱石、液体：環境モニタリング用河川/地下水等) ※ 2013 年運用開始であったが、現時点では建設されていない
劣化ウラン貯蔵庫	劣化ウラン約 12.5 万 t を U_3O_8 の化学形態で貯蔵
Mining walks and reclamation discovery	不明 (旧坑道等施設の保存、一般への公開と思われる)
AREVA Med	放射性元素 (^{212}Pb) の医学への適用に係る研究施設
ATEF (AREVA Thorium Extraction Facility)	ウラン鉱石からのトリウム回収に係る研究施設
ALGADE	放射線管理に係る業務を行う別会社

このような一大センターを設置するに至った理由としては、以下の理由が挙げられる。

- ・ 資源としての建屋、施設、報告書、人、試料、人及びそれに付随する経験が多く残されている。
- ・ 人や経験が跡措置終了に伴い、人材の高齢化や退職などにより失われ、負の遺産である捨石や鉱さいに係る記録のトレーサビリティが確保できない。
- ・ ウラン価格が近年上昇してきたことにより、AREVA 社が権益を保有している低品位ウラン鉱床のデータの重要性が見直されるようになってきた。

また、当サイトがセンターの立地場所として選定された理由は、以下の理由が挙げられる。

- ・ 国内のウランの約 40%が生産されており、施設、ノウハウ、試料、報告書等の資源が残っていた。
- ・ 地理的にフランスの中央部に位置する。
- ・ これまでウラン鉱業活動を行っていた土地であり新たなサイトへの立地と比較し容易であると思われた。
- ・ 地元民の雇用の観点からは跡措置終了後に何らかの対策が必要であった。
(かつては約 3,000 人の住民が住む地元から約 800 人の労働者がいた。平成 22 年の現地調査当時は約 180 人、AREVA 社職員 175 名常駐。)
- ・ 特に劣化ウランの貯蔵に関しては、フランス南部に製錬転換施設および国内もう一つの劣化ウラン貯蔵庫の立地するサイトからのアクセス道路や鉄道等のインフラが存在した。

あわせて、ステークホルダー・インボルブメントの観点からも特記すべき点が多くある。例えば、積極的にステークホルダーとの関与を行うため、地元自治体および住民に対しモニタリング結果等を定期的に報告書等により開示している（“Global View” と呼ばれる）。また、地質、環境、法規、放射線防護等の専門家からなる、目的を特化した部門（“Reclamation Management Department”：RMD）により、当サイトを含めフランス国内で跡措置が行われたサイトを含む 210 にも及ぶサイトを対象に鉱さいや捨石の分布範囲を再チェックし、結果を大学等の有識者、関係機関、NGO、地元自治体等と話し合いを行い、今後の管理の必要性・仕様について決定することとしている。また、分析結果についてもチェックのため他機関で再確認を行うなど、徹底した方針のもと活動がなされている。

なお、これらの施設に対する覆土表面の浸食対策、長期的維持管理については、当面定期的に草刈を行うこと以外に情報は得られなかった。また、覆土の仕様（構造・材料）を設定する上で覆土に機能を要求する期間、坑水処理やモニタリングを行う期間についても情報は得られなかった。

4.3.4 Bois Noirs Limouzat 鉱さいたい積場 （フランス・AREVA 社）

上記 4.3.3 の Bessines サイト同様、AREVA 社が鉱山跡措置を実施している。

鉱さいの位置付けは、上記 4.3.3 と同様。

Bois Noirs Limouzat 鉱さいたい積場

1950 年代に行われた採鉱活動ののち 1956～1980 年に坑道及び露天採掘による採鉱活動及び製錬活動が行われ、谷地形にかん止堤を設置してその上流側に鉱さいがたい積された。面積 18ha、最大たい積量約 70～130 万 m³ の規模を有し、かん止堤の上流側は流入する雨水・地下水により湛水しており常時 2m 程度の水深である。現在は跡措置実施中であり、旧坑道の埋め戻しや地上施設の解体は終了している。最も近い集落がかん止堤の約 2km 程度下流側に位置する（図 4.3-6、写真 4.3-7）。

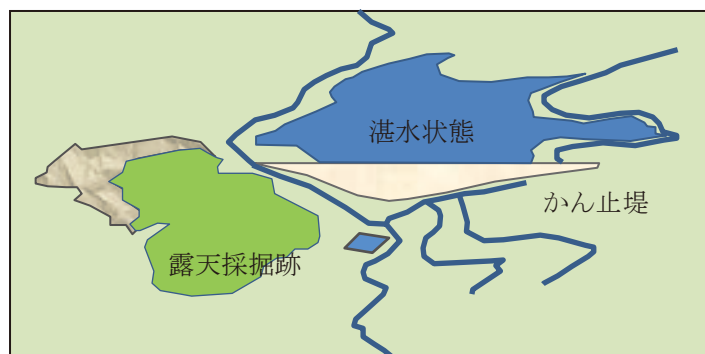


図 4.3-6 現状の鉱さいたい積場



写真 4.3-7 現状のかん止堤（左）及びたい積場全景（右）

当たい積場の跡措置は、谷地形に設置されている状況を利用し、1982年に監督官庁の命令により線量低減化及び鉍さい飛散対策として場内を湛水するという方法をとった。そののち、フランス国内に散在する鉍さいたい積場の跡措置は覆土を用いたものが主流となり、その時点で当たい積場はフランス国内で唯一の湛水鉍さいたい積場であったことや、湛水状態は長期的な廃水処理を含めた管理の負荷が大であることから、1993年に監督官庁から覆土による措置を行うよう提言がなされた。これを受け、AREVA社はこのようなたい積場に適用できると考えられる方法を組み合わせた下記の4つの方法を候補として挙げ（図4.3-7）、これらが比較検討された。

- 方法 1 : かん止堤を補強し、場内は湛水状態のままとする。右岸側に設けた排水路により迂回させていた流入河川水は、新たに左岸側に排水路を設け迂回させる。
- 方法 2 : かん止堤中央に水路を構築し水質に問題のない上澄水を排水、現状より水位低下させ維持する。場内に流入していた河川は右岸側に設けた排水路により迂回させていたが、再度たい積場に流入するようにする。
- 方法 3 : 湛水状態のまま鉍さい上位にシートを設置したのち、捨石を設置し安定化、そののち排水する。最上位の覆土材料には、捨石でない材料を用いる。河川流路は、方法 1 と同じ。
- 方法 4 : 排水後に鉍さいを撤去する。たい積場に隣接し露天採掘場跡地があることからこれを利用し、跡地内に鉍さいを埋設する。覆土材料については、方法 3 と同じ。そののち、場内には水と鉍さいのいずれもなくなることから、かん止堤を撤去する。

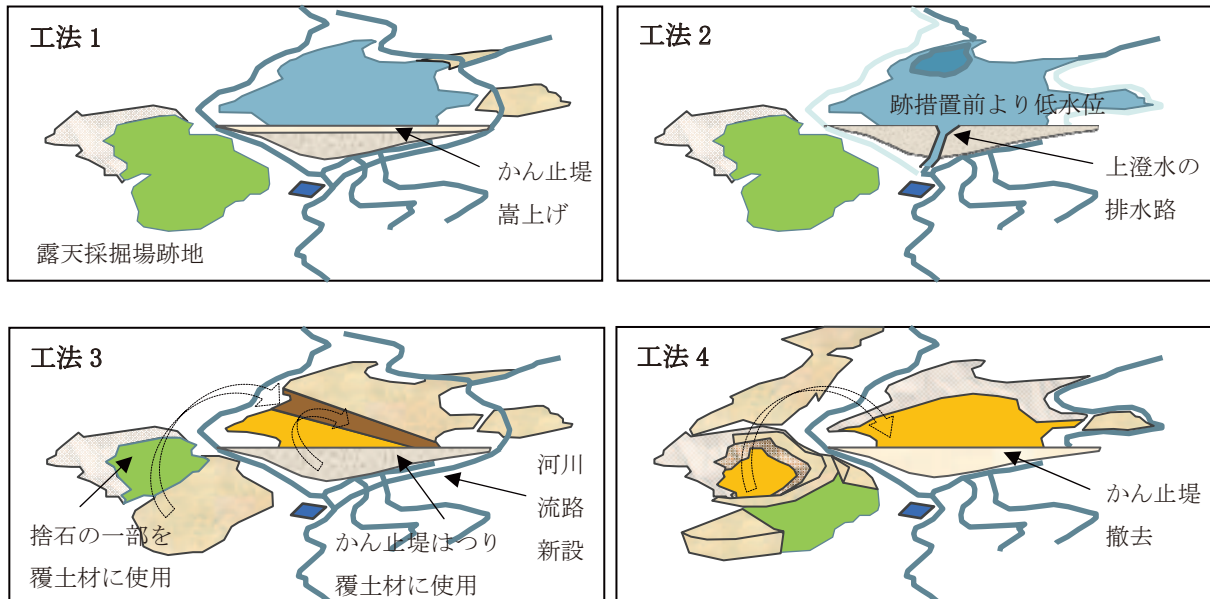


図 4.3-7 検討された跡措置方法

最終的に選定される方法に対しては、たい積物の物性・覆土構造・沈下量推定・水質・廃水処理等の研究が行われ、結果を元に覆土の構造・材料等を決定するとともに、覆土を行った場合の環境社会影響評価（Environmental and Social Impact Assessment: “ESIA” と呼ばれる。）が作成されることとなる。現地調査時には、担当者によれば方法 3 が有望であるとのことであり、監督官庁との間で ESIA 報告書の記載内容調整中であった。しかしながら、本報告書発行時点では跡措置は一時中断しているとの情報が得られている。理由や期間等の詳細は不明である。

なお、方法 3 の手順は以下のとおりである。

- 手順 1 左岸側にたい積場を迂回する新たな河川流路を設ける（排水路ではない）。
- 手順 2 湛水状態のまま、場内に捨石を約 50cm たい積する。捨石のたい積は、跡措置中の鉱さいからの作業員の被ばくや飛散・流出防止を目的として行う。
- 手順 3 捨石上位にライナーを設置する（詳細は不明）。
- 手順 4 ライナー上位に捨石をたい積するとともに場内水を排水する。
- 手順 5 場外の表土を用いた覆土を捨石の上位に設置する。

また、一般的な覆土の構造・材料等を当たい積場に適用するのであれば、仕様等は以下のとおりとなるとのことであった（図 4.3-8）。

- 覆土表面は河川流下方向に軸を設け、両岸側へ 1.2%、下流方向へ 0.5% とする（勾配設定根拠は不明であるが、地表面浸食対策として緩くしたのではない）。
- 覆土材料には、捨石を用いる。捨石は、露天跡地にたい積している捨石と、現在のかん止堤上部を覆土天端の高さまではつることによって生じる捨石の 2 つを用いる。

- 用いる捨石の透水性を小さくするため、たい積時に転圧する。事前に転圧と透水性の相関を試験により確認することはしない。捨石の透水性を十分小さくできると判断したこと、また予算上の制約から、ベントナイトを用いた低透水性層は設置しない。
- 最上位に、場外の表土を用いたレイヤーを設置する。

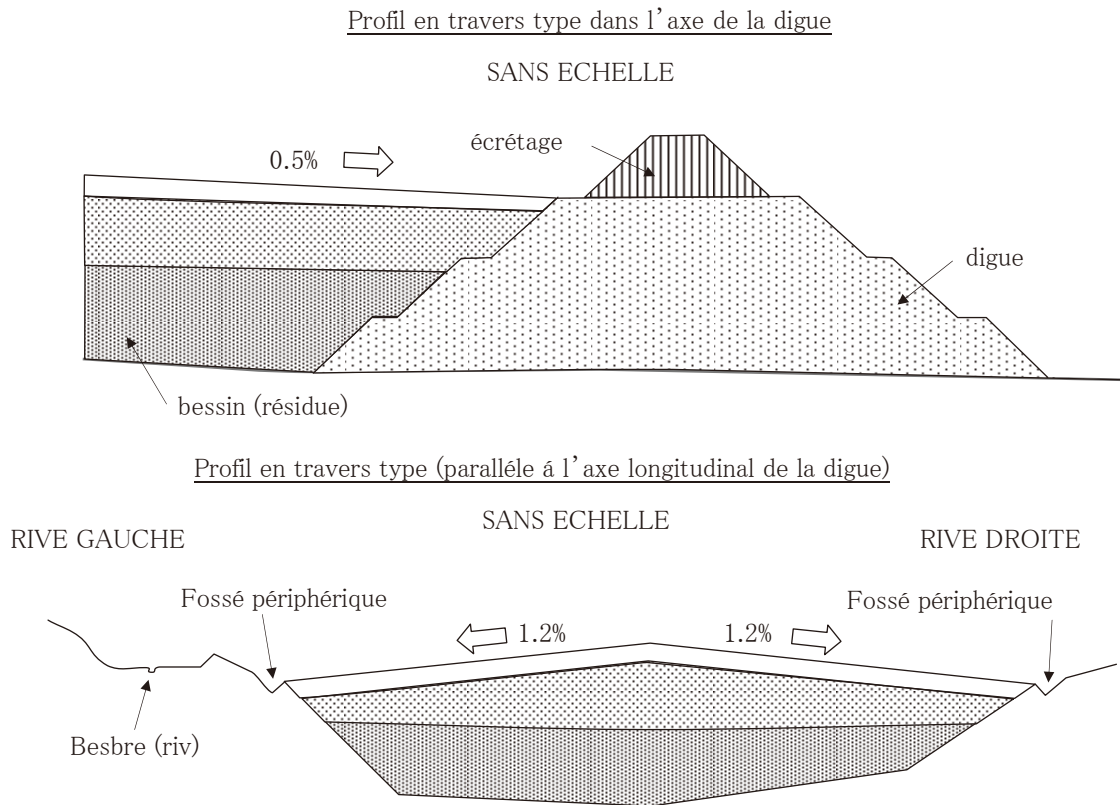


図 4.3-8 覆土断面図（縦断及び横断面）¹⁹⁾に加筆

なお、上記の認可が得られるまで、同たい積場においては維持管理がなされている。主な維持管理項目と内容は以下のとおりである。

- かん止堤の安定性
 - ・ かん止堤の伸長方向と鉛直に測線を 6 本設置し、これに沿ってかん止堤の小段ごとにレベルメータを設置し、2 週間ごとにかん止堤内水位を測定している（かん止堤の高さは、定期的なモニタリングが義務付けられている 20m を上回る 42m）。
 - ・ かん止堤天端の高さ及び水平方向の変位を、かん止堤右岸に設置した基準点を用いて 1 年ごとに測定している。mm 単位での変位も見られないとの結果が得られている（4.4.7 及び写真 4.4-2 参照）。
 - ・ 日本のようなプレート境界に発生する地震は起きないものの、監督官庁からの指示を受け耐震評価を行っている。

- ・ 安定性確保のため、かん止堤下流側の前面に横ボーリングを行い近傍の地表面に排水している。
- 場内からの漏水
 - ・ かん止堤の底部において漏水を集水し、希釈のために河川水と混合したのち化学沈殿処理し河川へ放流している。経験上基準値を満足するとの判断から、機器によるモニタリングはしているが分析ののち放流するというバッチ方式は採用していない。
- 起こりうる豪雨への対策
 - ・ 豪雨時に場内水位が上昇し越流やかん止堤が崩壊することを防ぐため、かん止堤のすぐ上流側左岸側に場内水を河川へバイパスさせる水路入口が設けられている。かん止堤上部が捨石でできているため、かん止堤そのものの健全度が失われることを防ぐことが最重要であり、場内水の河川への流出については問題ないとの考えである（そのような豪雨時には水量により希釈され、特に河川へ流れる上澄水は水質に問題がないとの判断、写真 4. 4-3 参照）。
- 起こりうる水位低下への対策
 - ・ 渇水時に水位が低下し鉍さいの一部が水面上に現れトリチウム散逸量が上昇しないよう、河川流路変更部分の最上流部に設備を設け、水位低下時には河川水を場内へ誘導できるような仕組みが取られている。
- かん止堤表面の管理（草刈り、豪雨後の浸食補修等）
 - ・ かん止堤は捨石を用いているため、時間の経緯とともに植生が生育することとなる。監督官庁からは、かん止堤の機能に問題が生じないようにすることとの要求があるのみであり、十数年前に 1 回草刈をし、除草剤を散布したのみである。今後の頻度や期間は不明。

なお、覆土の仕様（構造・材料）を設定する上で覆土に機能を要求する期間、坑水処理やモニタリングを行う期間についての情報は得られなかった。

4. 3. 5 Sillamäe 鉍さいたい積場（エストニア・ÖKOSIL 社）

上記 4. 3. 1～4. 3. 2 同様、1940 年代から旧ソヴィエト崩壊までエストニア国内において核兵器に利用するため鉍業活動が行われていた。対象は頁岩に含まれていた希土類元素であったが微量のウランも含まれており、それとあわせ旧東側諸国（東ドイツ、ハンガリー、チェコスロヴァキア）から算出したウラン鉍石を製錬した結果ウランを含む鉍さいが発生し、現地にたい積された。ソヴィエト崩壊ののちそのままの状態が残されたが、2000～2009 年に跡措置が行われ、跡措置終了後から ÖKOSIL 社がモニタリングを行っている。

鉍さいの法的位置づけは不明である。跡措置は EU の定める“Directive”（「指令」）に基づき行われたが、エストニアに当時関連する法令がなく、また当たい積場の跡措置前の問題の一つがバルト海の汚染であり沿岸諸国には EU 加盟国が含まれるためかと推定される。

Sillamäe 鉱さいたい積場

バルト海に隣接する製錬所等の敷地内に堤防を設置したのち鉱さいがたい積された。たい積場は面積 50ha、たい積量約 400～800 万 m^3 の規模の台地状をなし、堤防（高さ最大 25m）内の鉱さいはバルト海方向にやや傾斜する平坦面を構成していた。海側ほど細粒分が卓越し、かつ雨水により湛水しており、排水用に設置されたボーリング孔から海へ上澄水をそのまま排出していた（写真 4.3-8）。なお、当たい積場から 1.5～2km の距離には、Sillamäe 市が位置する。

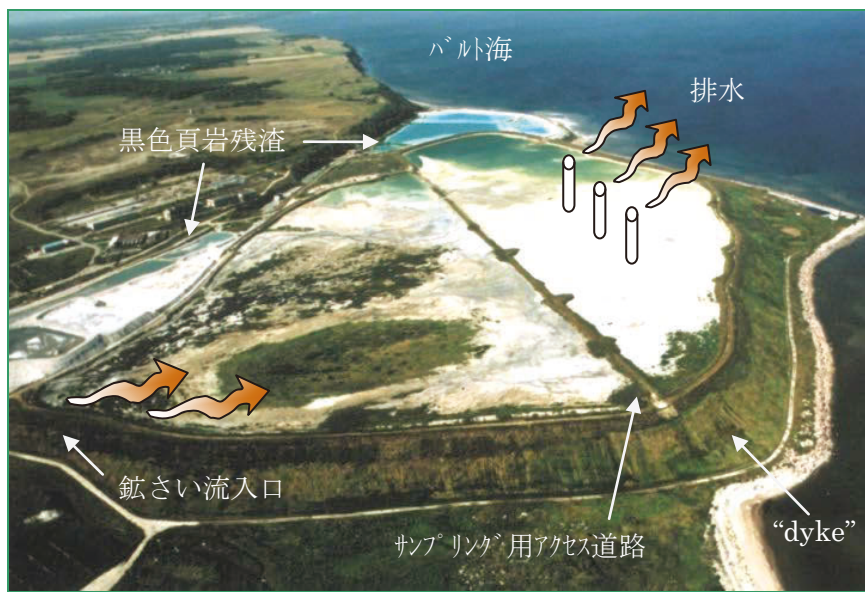


写真 4.3-8 Sillamäe 鉱さいたい積場（跡措置前）²⁰⁾

当たい積場の跡措置は、1998～2000 年にドイツ WISMUT 社及び複数の国家が参加し構成する事業体（“PHARE” project）により設計が行われたのち、2000～2009 年に跡措置工事が行われた。目的は、その他のたい積場同様に線量及び雨水浸透量低減化に比べ、鉱さいからの浸出水による海洋汚染防止及び海に面している箇所への浸食防止であった。

跡措置は、天然材料を用いた多重覆土及び遮水・透水壁の設置、護岸から構成される（写真 4.3-9～4.3-10、図 4.3-9）。鉱さいは長年にわたり自重ですでに圧密されているが、覆土の最下位には“interim cover”を載荷し、覆土構造に勾配を持たせるとともにある程度の脱水圧密は行われた。

－ 覆土

- ・ 雨水浸透率（目標：5%以下、2 万 m^3 以下）及び地下水流入量低減化（現状の 9～22 万 m^3 を 3 万 m^3 /年以下とする）及び地下水面の鉱さい分布深度以深への低下を目的とする
- ・ 機能保持期間少なくとも 1,000 年、天然材料のみを用いる

- ・ 異なる目的を有する多層構造、低透水性粘土層含む
- ・ 長期安定性のため鉱さい表面成型（上面：5.5～6.6%、法面：V/H=1:3）
- ・ 鉱さいの管理及びコスト低減を目的とし、一部の材料に場外にたい積していた鉱さい（黒色頁岩残渣）を用いる
- 遮水壁
 - ・ 地下水流動系上流側に設置、地下水面の鉱さい分布深度以深への低下を目的とする
 - ・ ベントナイト/セメントを用いる
 - ・ 低透水性の基盤岩の分布深度まで設置する（深度最大 18m）
- 透水壁
 - ・ 場外から流入する地下水を迂回させることを目的とし、トレンチ掘削後に礫充填
 - ・ 遮水壁端部から連続して設置（深度 9m）
- 植栽・覆土上への排水路設置
 - ・ 覆土表面（頂部及び法面）に浸食防止を目的として植付け
 - ・ 礫を用いた小規模な排水路を頂部から法面をへてたい積場底部まで設置



写真 4.3-9 Sillamäe 鉱さいたい積場における遮水壁及び透水壁等（跡措置中）²⁰⁾

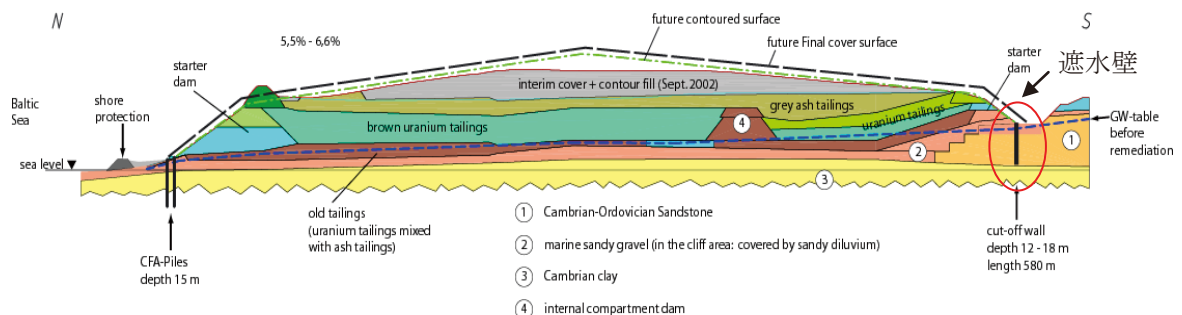


図 4.3-9 Sillamäe 鉱さいたい積場における覆土構造及び遮水壁等 設置計画図²⁰⁾

（原図を縦方向 2 倍に拡大）



写真 4.3-10 Sillamäe 鉱さいたい積場（跡措置後）²⁰⁾

また、跡措置工事が終了した 2009 年以降、2013 年までの 5 年間の“Post-remediation”モニタリングを行った（図 4.3-10）。その結果、特段の問題や予測範囲を越えた悪い方向での結果は確認されていない（表 4.3-2）。なお、このうちの浸出水水質については、バルト海周辺関係国との間で放出された総量を問わないことを合意済みではあるものの、濃度は自主的に測定している。

“Post-remediation”モニタリング終了後は、測定頻度を減らし測定を継続、その後は測定データの評価結果から頻度の減少や継続不要との判断を行う（表 4.3-3）。決まった測定期間は設定しない。

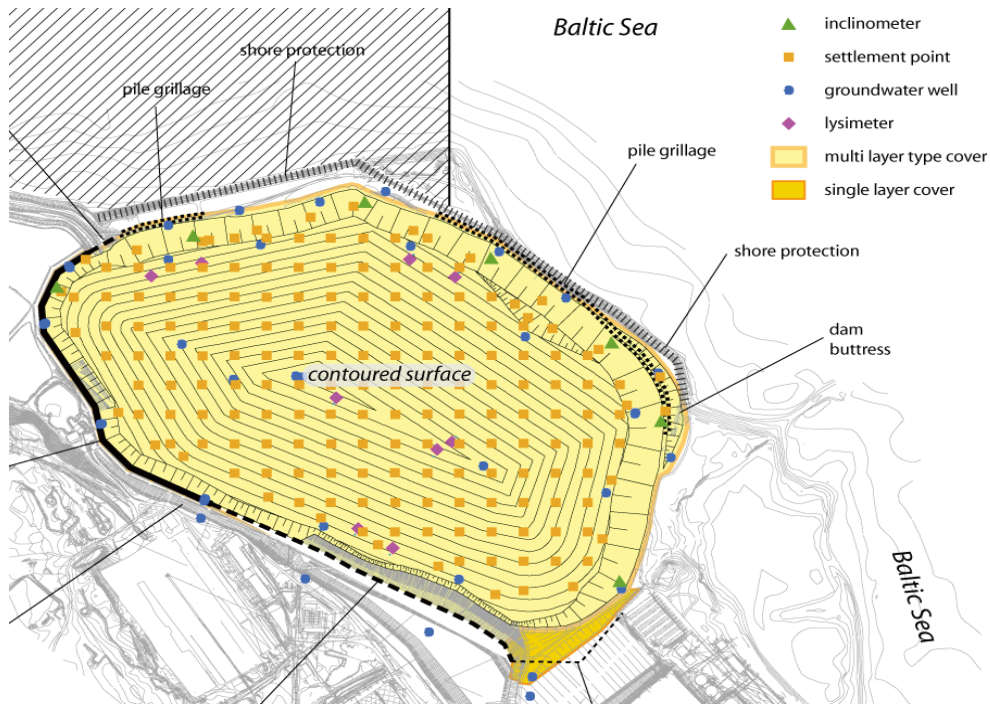
図 4.3-10 Sillamäe 鉱さいたい積場におけるモニタリング項目及び箇所²⁰⁾

表 4.3-2 モニタリング項目毎の点数・確認項目・結果

項目	測定点数	確認項目	結果
沈下量	177	地表面の鉛直変位	即時沈下：終了 圧密沈下：予測範囲内
傾斜 間隙水圧	7（堤防上）	法面の水平変位	顕著な変位なし
地下水分量	9	ライシメータを用いた雨水浸透量	予想通り（雨水浸透率 0.7～2.9%）
地下水位	4 組 （遮水壁内/外）	場内の水位 （遮水壁内/外のセット： 遮水壁の効果確認も 兼ねる）	場内では鉱さい分布深度以深であること確認 遮水壁の効果確認（内外で最大 7m の水位差）
	11 （たい積場内）		
	10 （バルト海沿い）		
浸出水水質	12（上記と重複）	鉱さいからの溶出	濃度が減少したものもある。ただし今後さらに減少する傾向は見られない。
線量	不明	線量低減効果	バックグラウンドと同等
放射性物質散逸量	不明	放射性物質散逸量低減効果	覆土設置直後から低下

表 4.3-3 モニタリング項目毎の 2014 年以降の測定点数・頻度

項目	測定点数	頻度
目視		4 回/年
沈下量	2014 年 以前と同じ	1 回/年
傾斜		2 回/年
間隙水圧		気象データ（降雨量、風速、風向、気温）のみ継続
地下水分量		2 回/年（4 月及び 10 月）
地下水位		2 回/年
浸出水水質		2 回/年
線量	不明	覆土機能に影響があったと判断された場合のみ、地上 1m
ラドン散逸量	5	1 回/年（夏）

なお、覆土表面の浸食対策、長期的維持管理については、当面定期的に草刈を行うとの情報が得られた。頻度等は以下のとおり。

- ・頻度 : 2 回/年（6 月及び 9 月）
- ・目的 : 主目的は、工業団地（“Sillamäe Free Zone”）内に位置するため常に整備された状況に保つことと、上記頻度で草刈りを行うことで次回の草刈が容易にする（成長すると茎が固くなる植物が繁茂）ことの 2 点である。植物根侵入対策は副次的な目的である。
- ・必要性 : たい積場に隣接して Sillamäe 港（“SILPORT”）及び工業団地があることから、覆土後のたい積場を含むこのエリアの維持管理が不要となることはない。なお、港は 2005 年から稼働しているが、維持管理の必要性を訴えるため港を建設した訳ではない。

4.3.6 Pécs 鉱さいたい積場（ハガリー・PURAM 社）

上記 4.3.1～4.3.2 及び 4.3.5 同様、1955 年代から旧ソヴィエト崩壊まで国内において核兵器に利用するため鉱業活動が行われていた。その結果採掘されたウラン鉱石を製錬した結果ウランを含む鉱さいが発生し、現地にたい積された。ソヴィエト崩壊ののちそのままの状態が残されたが、2000～2009 年に跡措置が行われ、跡措置終了後から現・PURAM 社がモニタリングを行っている。

鉱さいは、原則として放射性廃棄物としては扱われず、“radioactively contaminated material”との位置付けである。ただし、放射能（Total activity (Bq)）及び放射能濃度（Activity concentration (Bq/g)）の両者が上限値を超えた場合、放射性物質との位置付けとなる。それぞれの管理方法等の詳細については不明である。

Pécs 鉱さいたい積場

1955 年から採鉱が始まったウラン鉱石の製錬により発生した鉱さいがパイプラインで流送され、1960 年代から 1990 年代にかけて鉱さいたい積場にたい積された。TP-I 及び TP-II の 2 つのたい積場があり、ともに縁辺が鉱さいを分級し得られた粗粒の鉱さいを用いた堤防により囲まれている。面積及びたい積量は、TP-I が約 100 万 m² 及び 1,780 万 t、TP-II が約 60 万 m² 及び約 460 万 t である。このうち TP-I については、たい積場中央部に細粒部が卓越し湛水しており、かつ TP-II と比較して TP-I は最近までたい積が行われていたため乾固の程度が低く、特に安定化が必要である状況であった（写真 4.3-11）。なお、これらは Pécs 市近傍に位置するが、同市よりさらに近くの約 1km の距離に小規模な集落があり、井戸水が上水として利用されている。

当たい積場の跡措置については、1977 年から確認されていた近傍の地下水の汚染に対し、1997 年に跡措置の必要性がうたわれ、現・PURAM 社の前身が跡措置計画を策定、政府の認可を受けた。こののち、1998～1999 年にドイツ WISMUT 社及び複数の国家が参加し構成する事業体（“PHARE” project）により設計が行われたのち、ハンガリー政府が予算を拠出し 2000 年から跡措置が行われた。目的は、その他のたい積場同様である（ただし、汚染は核種ではなく全蒸発残留物（TDS: Total Dissolved Solid、SO₄²⁻、Mg²⁺、Cl⁻等）による。

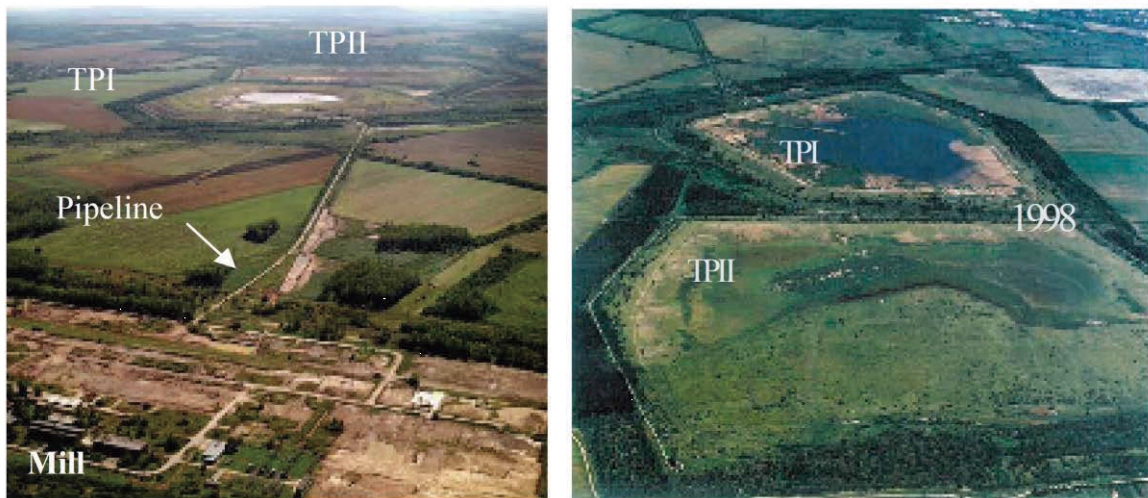


写真 4.3-11 Pécs 鉱さいたい積場（跡措置前）²¹⁾

跡措置は、鉱さいを脱水压密等により安定化したのち天然材料を用いた多重覆土を設置した。安定化は載荷盛土による圧密だけでなく、鉱さい内に掘削したトンネルからの脱水も用いている（図 4.3-11）。それぞれの仕様等は以下のとおり。

- 覆土
 - ・ 雨水浸透量低減化（目標：現状の 660mm/y のうち 30～40mm/y とする）を目的とする
 - ・ 機能保持期間少なくとも 200 年、天然材料のみを用いる

- ・異なる目的を有する多層構造、低透水性層含む。これには、試験の結果ベントナイトと同様の性能を有し、近傍で算出され、安価である粘土を選定した。
 - ・パラメータ（植物根侵入深度、各層の透水係数、地表面勾配、覆土排水長、低透水性の層の厚さ）の値を変えた感度解析を行い、TP-I, II それぞれに対し最適な仕様を選定した。
 - ・植生層は、浸食防止だけでなく蒸発散促進のため必要である。
- － 鉱さい安定化
- ・覆土前に場内水を排水し数ヵ月放置したのち、ジオグリッド、ジオテキスタイル及びバーチカルドレーンを用いて載荷盛土を行い脱水を行った。
 - ・鉱さい内にトレンチを掘削し（掘削深度 4～6m、幅 16cm）脱水を促進した（図 4.3-12）。
- － 植栽及び覆土上への排水路設置
- ・覆土表面（頂部及び法面）に浸食防止を目的として植付け
 - ・礫を用いた小規模な排水路を頂部から法面をへてたい積場底部まで設置

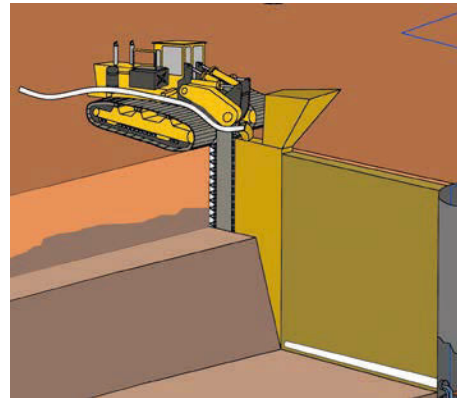


図 4.3-11 鉱さい安定化のための鉱さい脱水用トレンチ設置²²⁾

このうち、浸食防止については、管理の必要性、寿命、景観上の問題からシートやアスファルト舗装は適切でないと判断し、植生層設置を最適な方法として植栽を選定した（写真 4.3-12）。具体的には、

- ・植物種 21 種混合（①特別の管理を必要とせず、②サトの環境に適応し、③植物根侵入により覆土構造を破壊しない、④自生種である、との 4 つの条件から選定）
- ・種子量 200kg/ha
- ・苗木（bushes, seedling）量 8,000 本/ha（1～2 年生）
- ・初期の施肥が必要
- ・ただし、コスト等の理由から、根系侵入深度を調査するための育成試験は行わなかった。



写真 4.3-12 Pécs 鉱さいたい積場覆土上に行われた植栽²¹⁾

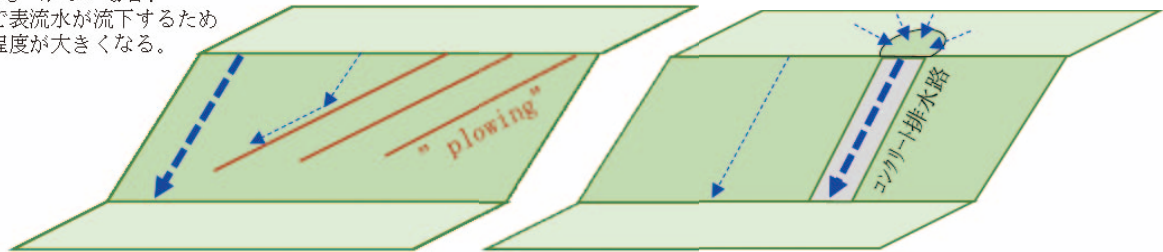
これに対し、TP-I の主に斜面長の大きい法面に、植生層設置後まもなくの降雨により大規模な浸食が見られた（写真 4.3-13）。想定される原因は以下のとおり。原因としては、斜面長が大きすぎた（通常の斜面長は 20～30m であるのに対し、最も浸食の程度が大きい箇所は 90m）や覆土の排水能力を適切に評価できていなかったことが挙げられた。

しかしながら、これに対し斜面長を短くするために既存の法面を整形し小段（“猫走り”）を設けることはコスト的に現実的でないと判断した。また、現在の覆土上に小段を有する新たな覆土を設置することは上記同様にコスト的に現実的でなく、技術的にも難しいと判断した。

そこで、応急対策として浸食の都度覆土材の充填を行ったのち、現在の覆土表面を流下する地表水の流下距離を短くするために法面の傾斜方向に対し斜めに溝を掘削する“plowing”を行った（図 4.3-12）。

最も浸食の程度が大きい箇所には、たい積場頂部に表流水となる水を集水できるような簡易な設備を設け、そこから発生する水を集中的に排水するコンクリート排水路を設置した（図 4.3-12、写真 4.3-14）。しかし、これは今後長期間にわたり維持管理が必要となることを意味する。

“plowing”がない場合、
法尻まで表流水が流下するため
浸食の程度が大きくなる。



斜面に対し少しでも角度を持たせた“plowing”を
設置することで表流水の流速を小さくできる。 覆土頂部の水をコンクリート排水路に集中させることで
法面を流下する表流水量を少なくできる。

図 4.3-12 “plowing” 及びコンクリート排水路の考え方



写真 4.3-13 浸食状況²³⁾



写真 4.3-14 コンクリート製排水路

また、浸食対策としてその他にいくつかの方法についても検討している。具体的には、

- ・ 小段毎にリップラップ層を設置することによりさらに表流水の流速を小さくする（スロベニア国 Zirovski Vrh ウラン鉱山に適用例ありとのことであった）。
- ・ マルチングを行い、目に見えるサイズからミクロのサイズの表面の凹凸により表流水の流速を低減化し、同時に浸透を促す。植物の侵入も抑制できる（ドイツ国 WISMUT 社による適用例あり）。

ここで PURAM 社が考えている浸食が発生した原因は、浸食防止対策として植生層を選定したことや植生層の仕様が適切でなかったということではなく、植生層を設置するのであれば表流水による浸食の程度を考慮して最適な斜面長を定めた上で設計がなされなかったということである。

結果として、応急対策としての覆土材充填、“plowing”設置、コンクリート製排水路設置を余儀なくされ、さらには排水路の長期的な維持管理が必要な状況となった。また、適切な設計をしていた場合と比較してコスト高となるという結果となった。

また、跡措置に効果を期待する期間として、200 年間が設定された。ただし、この値は短すぎかつ非現実的な長期間でもない値として設定された値であり、経年劣化により覆土の仕様（材料、工法等）が要求される機能を満足すると期待できる期間として設定された訳ではない。

また、その間に必要な維持管理、モニタリング、坑水処理については以下のとおりであった（図 4.3-13）。

- ・ 維持管理、モニタリング、坑水処理等の長期間に及ぶ業務については、複数の規制機関が関与し、かつ書類手続きが複雑であり、それらを実施する者にとって要求事項が理解しにくい状況となっている。そのため、各機関に対する要求事項を明確にすべきである。
- ・ 維持管理は、当面は PURAM 社が行う。長期的な施設の維持管理や運用は、国が今後責任の所在を明らかにし、定められた機関が行うとともに負荷低減化も検討する。例えば、TP-II の植生層の維持管理は、負荷低減化に成功している。具体的には、跡措置後にも PURAM 社が鉱さいたい積場を継続し使用する代りに、土地所有者である農家は草を飼料として活用して良いとの交換条件である。これにより、景観上の問題や植物根侵入の問題がクリアできた。
- ・ モニタリングは、監督官庁が各分野の専門家からの意見を反映して実施者、頻度、期間、終了するための基準を決定する。頻度や期間等の仕様は①想定されるモニタリング値の大小やその変動、②要求される精度等より決定される。
- ・ たい積場近傍の集落の井戸水が汚染しないよう動力によりたい積場近傍の水位を低く維持している（動水勾配をたい積場に向かう方向としている）ことから、坑水処理を継続し行う必要がある。

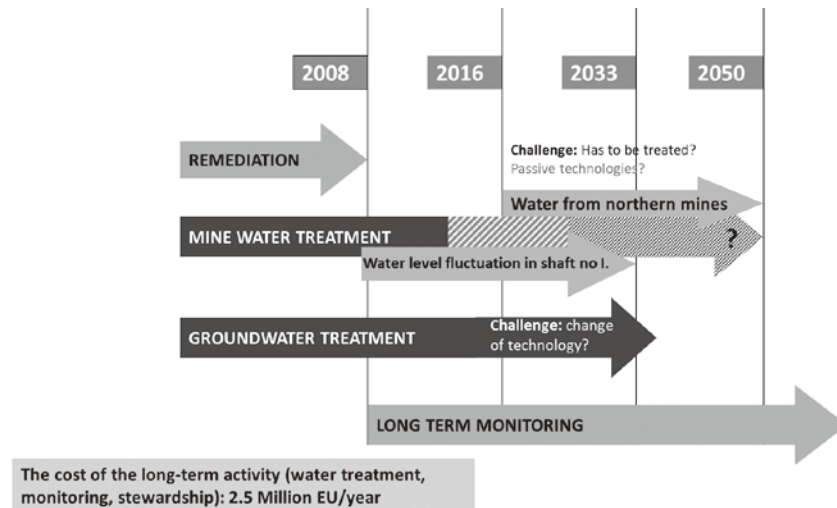


図 4.3-13 維持管理、モニタリング、坑水処理の考え方²²⁾

跡地利用については、跡措置が“pathway change”の場合は制限ありとし（制度的管理が必要となる），“source removal”の場合は制限なしとする。

4.3.7 Kowary 鉱さいたい積場 (ポーランド・ワロツワ工科大学)

上記 4.3.1～4.3.2 及び 4.3.5～4.3.6 同様、旧ワグニェで核兵器用に利用するため 1966 年から 5 つの鉱山においてウラン鉱石の採鉱が行われた。高品位の鉱石は旧ワグニェに輸送されたが、低品位の鉱石が国内で製錬されたのち発生した鉱さいが近傍のたい積場にたい積された。

鉱さいは、原則として放射性廃棄物として扱われず、天然起源の同位体濃度を高めた物質 (material with increased contents of natural radioactive isotopes) との位置付けである。それぞれの管理方法等の詳細については不明である。

Kowary 鉱さいたい積場

近傍に隣接する上記 5 つのウラン鉱山の一つ Podgórze 鉱山近傍の小規模な河川に面する斜面に設置されている。面積 2.3ha、たい積量約 11.4 万 m³ の規模を有し、粗粒の鉱さいを用いた堤防により囲まれており、湛水状態にあった (写真 4.3-15)。1971 年から 1997 年まで希土類元素回収を目的とした研究規模の製錬により発生した鉱さいもたい積された。同年の洪水被害等や広く知られていた健康被害を契機に現・EU (European Union) が跡措置の必要性を認め、2000～2001 年に Pécs 鉱さいたい積場 (4.3.6 参照) 等の PHARE Project で得られた知見を活用し跡措置が行われた。目的は、その他のたい積場同様であるが、河川に面したたい積場法面の長期安定性確保も含まれる。たい積場直下に小規模な集落が存在する。



Fig. 1 Situation on site prior to remediation

写真 4.3-15 Kowary 鉱さいたい積場 (跡措置前) ^{24), 25)}

跡措置は、鉱さいを脱水压密等により安定化したのち天然材料を用いた多重覆土を設置した (図 4.3-14)。それぞれの仕様等は以下のとおり。

－ 覆土

- ・ 異なる目的を有する多層構造。雨水浸透量低減化のためのレイヤーとして、輸送費を伴わず安価なペントナイトマット (厚さ 1cm) を含む。
- ・ 浸食防止のための植生層設置。
- ・ 覆土表面を凹型とし、谷の下方に排水用暗渠を設置することで浸透水と鉱さいの接触を低減化する。

- 鉱さい安定化
 - ・ 覆土前の場内水排水、石灰散布等による脱水を行った。
 - ・ 上記排水用暗渠からの脱水により安定化を促進した。
- 浸食防止
 - ・ 覆土表面（恐らく頂部のみ）に浸食防止を目的として植生層設置
- 表流水集水排水路
 - ・ 場外水の場内への流入量を低減化

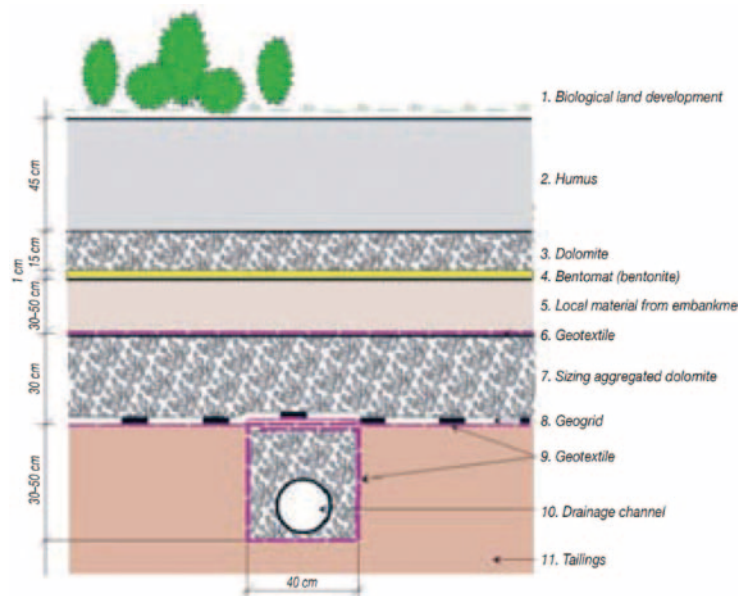


FIG. 1. Schematic surface cover design and horizontal internal drainage channel.

図 4. 3-14 覆土の模式断面 ²⁵⁾

このうち浸食防止については、植生層設置を最適な方法として選定した。具体的には、

- ・ 近傍の植生に調和的な植生を想定。まず、雑草の種子を播くことにより速やかに植生を確保し浸食防止対策とする。
- ・ 覆土の最上位には厚さ 45cm の腐植土及び植生層（草及び低木）を設置した。
- ・ 植生には、植物根侵入深度が浅いものを選定した。ただし、植物種等を選定するために事前に育成試験を行い根系侵入深度を調査した実績はないと思われる。

あわせて、たい積場法面をより緩くなるよう整形し勾配を 30～35 度から 20～25 度とするとともに、河川沿いの法尻に浸食対策用のふとん籠を設置した。

これらに対し、覆土表面には浸食が起きており、これらに対する補修や維持管理がなされていないままとなっている。具体的には、

- ・ たい積場頂部においては雑草、低木及び僅かながら高木（高さ～10m 程度）が見られる。また、跡措置において覆土上面を凹型に整形した地形も明瞭でない状況となっている（写真 4. 3-16）。
- ・ 覆土法面の植生により浸食の有無は目視により確認できないが、地形の凹凸があり、植生が繁茂する過程で根茎の侵入により堤防の構造は乱され、ある程度の浸食を受けていると思われる（写真 4. 3-17）。これに対し、2002 年までにモタリング機器を設置

したのち 2003 年に政府がそれ以降の線量を除くモニタリングは不要との判断をして以降、当たい積場に対して特段の浸食対策を含めた維持管理はなされていない。

- ・ 法肩にモニタリング機器設置のために立てられたポストが川方向に傾いているが、補修されていない。
- ・ 河川沿い法尻のふとん籠のみ、維持管理がなされている。



写真 4.3-16 たい積場頂部の植生状況



写真 4.3-17 法面中腹の植生状況

跡措置に効果を期待する期間は、明確に設定されていない。

モニタリングについては、上記のとおり 2003 年に国の政策の変換により線量を除きモニタリングは必要ないとの判断がなされ行われなかった。機器は設置されなかったが、モニタリング項目には植生の成長や法面浸食が含まれていた。

同様に、必要な維持管理や坑水処理も実施内容や期間等を定めることなく現在に至っている。

跡地利用については、当初は、維持管理コストの小さい自然の状態の草地に戻し、積極的に利用はしない（例えば、レクリエーション施設としての森林）との考えであった。

なお、当たい積場の跡措置後の跡地利用ではないが、たい積場近傍に位置する旧坑道が、一般向けに見学施設として開放されている。内部では、当時の鉱業活動の設備（切羽、トロコ、道具等）、写真、放射性鉱物、原子爆弾レプリカ等の多彩な展示とともにガイドによる説明がなされている。また、隣接して宿泊施設や汗蒸浴を含む健康施設があるが、詳細は不明である。

4.4 センター跡措置へ反映できる情報及び今後追加取得する必要がある情報検討

4.3 においてサイト毎に得られた情報を示した。各サイトで得た情報は、事前に行った文献調査等によりセンター跡措置に反映できる可能性があると考え現地調査の対象とした情報であり、サイト毎に項目が異なる（表 4.2-1 参照）。当節では、これらの項目毎に得られた情報を整理した（表 4.4-1）。4.4.1 以降には、それぞれの項目毎に整理した情報を示す。

- (1) センター跡措置の妥当性を確認した又は反映できると思われる情報
- (2) 今後反映するために追加取得する必要がある情報

表 4.4-1 検討項目及び取得箇所

項目	取得箇所
湛水した細粒分が卓越する鉱さいの安定化方法	・ Seelingstädt サイト - Culmitzsch 鉱さいたい積場（ドイツ） ・ Rožná K1 鉱さいたい積場（チェコ） ・ Bois Noirs Limouzat 鉱さいたい積場（フランス） ・ Sillamäe 鉱さいたい積場（エストニア） ・ Pécs 鉱さいたい積場（ハンガリー）
露天採掘場跡地からの浸出水対策	・ Ronneburg サイト - Lichtenberg 露天採掘場跡地（ドイツ）
たい積場からの浸出水対策	・ Sillamäe 鉱さいたい積場（エストニア）
覆土構造（形状、厚さ、材料等）	・ Rožná K1 鉱さいたい積場（チェコ） ・ Bois Noirs Limouzat 鉱さいたい積場（フランス） ・ Sillamäe 鉱さいたい積場（エストニア） ・ Pécs 鉱さいたい積場（ハンガリー） ・ Kowary 鉱さいたい積場（ポーランド）
跡措置後のモニタリング	・ Sillamäe 鉱さいたい積場（エストニア）
覆土の浸食対策及び発生後の維持管理	・ Sillamäe 鉱さいたい積場（エストニア） ・ Pécs 鉱さいたい積場（ハンガリー） ・ Kowary 鉱さいたい積場（ポーランド）
長期的維持管理	・ Bois Noirs Limouzat 鉱さいたい積場（フランス） ・ Pécs 鉱さいたい積場（ハンガリー）
跡措置後のサイト有効利用 ステークホルダー・インボルブメント	・ Ronneburg サイト - Lichtenberg 露天採掘場跡地（ドイツ） ・ Bessines サイト - LavauGrasse 鉱さいたい積場 等（フランス）

また、2.1 及び 3.3.2 に文献調査のみから取得したセンター跡措置へ反映できる可能性のある情報について 1 件示している。これについては、情報の概要及びセンター跡措置への反

映の可能性について、4.5 で検討する。検討項目及びその内容が実施された箇所は、表 4.4-2 のとおりである。

表 4.4-2 検討項目及び実施箇所

項目	実施箇所
鉍さいのセメント固化による安定化	・ Sydney Tar Pond (カナダ)

なお、各サイトにおける現地調査以降の進捗については、把握しているものについては 4.3 にその旨示したが、多くのサイトでは把握できていない。当節では、原則として現地調査時に取得した情報に基づき検討を行っている。

4.4.1 湛水した細粒分が卓越する鉍さいの安定化方法

今回情報を取得した 5 カ所のたい積場において適用された安定化方法は以下のとおりである。

- ・ Culmitzsch 鉍さいたい積場
水位を低下させたのち、周辺から中央部に向かって鉍さいの脱水が行われた。この中で、ドレン、載荷盛土、ジオキスタイルが用いられた（写真 4.3-3、図 4.3-3）。
- ・ Rožná K1 鉍さいたい積場
平成 23 年に確認した時点では安定化は行われておらず方法も不明。なお、水収支から場内水量は減少しており長期的には鉍さいの脱水がなされるという理由から載荷盛土による脱水は不要としている。
- ・ Bois Noirs Limouzat 鉍さいたい積場
平成 23 年時点では安定化は行われていない。湛水状態のまま捨石を載荷し圧密したのち水位低下・脱水との手順となる。
- ・ Sillamäe 鉍さいたい積場
鉍さいは長年にわたり自重で圧密されているが、載荷盛土を行うことで脱水圧密を行った。
- ・ Pécs 鉍さいたい積場
水位を低下させたのち、周辺から中央部に向かって鉍さいの脱水が行われた。この中で、ドレン、載荷盛土、ジオキスタイルが用いられた。あわせて、鉍さい内に脱水を促進するためのトレンチが掘削された（図 4.3-11）。

この 5 つの事例はいずれも細粒分が卓越する鉍さいをたい積しており湛水状態であるという共通点がある。これらのうち 3 件（Culmitzsch, Rožná K1, Pécs 鉍さいたい積場）は、平坦地に堤防状のダムを設置して内部に鉍さいをたい積したたい積場であり地下水の流入は無視してよいが、Rožná K1 鉍さいたい積場を除く 2 つのたい積場においては脱水圧密が必要とされ行われた。唯一、Rožná K1 鉍さいたい積場においては長期的に鉍さいの脱水が行われるとの理由から脱水圧密による安定化は不要とされた。これに対し、残る 2 件（Bois Noirs Limouzat, Sillamäe 鉍さいたい積場）はそれぞれ谷地形及び斜面

に設置され地下水の流入を無視できないことから、これも脱水压密が必要とされた。

(1) センター跡措置の妥当性を確認した又は反映できると思われる情報

廃砂たい積場は細粒分が少なく、数値解析により圧密沈下がほとんどないと推定されたことから覆土設置前に脱水压密による载荷盛土は不要と判断した。また、覆土設置中から場内 2 ヶ所において沈下量を測定しているが最大で 14cm 程度でほぼ収束しており、排水のため付けた勾配への影響もない。海外事例調査では細粒部分が卓越する鉱さいをたい積している場合にのみ脱水压密を行っていることと、上記のとおり廃砂たい積場では長期間にわたる沈下がないことを考え合わせると、廃砂たい積場において脱水压密による载荷盛土は不要であったと結論付けて良い。

これに対し、下流側の廃泥たい積場は細粒分である粘土～シルトが約 9 割を占め湛水している。また、湛水状態にあり Bois Noirs Limouzat 鉱さいたい積場と同様に谷地形に設置され常時地下水が流入している。同たい積場では圧密を行う予定としているが、廃泥たい積場においても上記の理由から覆土設置前の脱水压密は必要であると考えられる。

(2) 今後反映するために追加取得する必要がある情報

今後は具体的には、上記たい積場で採用された周辺から中心部へ向かうという進め方、脱水促進のためドレン等を用いること、アクセスのためゾナキスタイル等を用いることも参考とする。あわせて、以下の 3 点についても今後センターの跡措置に反映する上で情報を追加取得し検討する必要がある。

- 跡措置において湛水状態のままではなく乾固状態を最終的な状態としている（“Wet remediation”ではなく“Dry remediation”）。
- 安定化の方法として、圧密を採用し固結は採用していない。
- 圧密に伴い発生する水を処理する必要がある。また、谷地形にあるのであれば跡措置後に流入する地下水と鉱さいとの接触及びそれに対し必要となる対応策を評価しておく必要がある。

1 点目については、湛水状態に保たれることで線量及びトリチウム散逸量低減化はできるものの、たい積場全体の安定性には乏しいものとなる。この考えは、Culmitzsch 鉱さいたい積場を含む WISMUT 社の跡措置でも議論されている。また、Bois Noirs Limouzat 鉱さいたい積場では、監督官庁の命令により湛水による跡措置を行ったものの、そののち国内の鉱さいたい積場の跡措置は覆土による措置が主流となり、湛水状態は長期的な廃水処理を含め管理の負荷が大であることから監督官庁が“Dry remediation”を行うよう提言し、現在の跡措置方針が決定された経緯がある（図 4.3-6～4.3-7）。

センターの跡措置においては、従来は鉱さいたい積場は岡山三大河川である吉井川の最上流部に位置するため環境への影響が大であり跡措置を最優先で行うとの考えに基づいていた。しかしながら、これは“Dry”な跡措置をすることを意味するものではない。これまでに、場内の物質収支から、現状では坑水を鉱さいたい積場内で一時貯留することにより放射性核種や重金属等が沈降し坑水処理の負荷を低減化できている可能性が指摘されていることから、たい積場を現状の“Wet”にしておくメリットもある。

2 点目については、鉍さいたい積場のうち湛水し細粒部が卓越する廃泥たい積場について、これまでセンターにおいては圧密及び固結工法を比較検討してきた。圧密工法の適否はたい積物の粒度、間隙比、沈下量や時間等により決定されるのに対し、固結工法の適否は固化材との混合後の強度や核種等溶出量等により決定される。また両者とも適否には、発生水の水量及び水質（処理できるか、処理する必要があるか）が重要な要素となる。上記たい積場においても圧密及び固結の長短（例えば、維持管理の負荷、発生水量・水質、コスト、工期等）が比較検討されたと考えられる。

3 点目については、Culmitzsch 鉍さいたい積場においては発生する水は坑水処理施設に流送され処理される。Pécs 鉍さいたい積場においては、圧密により発生する水だけでなく鉍さいに掘削したトレンチから発生する水も含め鉍さいと接触した高濃度の水が発生するが、鉍さいたい積場以外の複数の鉍山施設から発生する坑水等と混合させ濃度を調整しつつ坑水処理を行っている。

これらについては、いずれの事例においても既存の坑水処理施設での処理の可否（及び坑水処理施設への設備・機能の追加）が検討された結果と考えられるが、センターにおいても同様の検討が行われている。例えば、比較検討している複数の工法それぞれに対し発生する水量及び水質を推測し、それらが既存の坑水処理施設で処理設備を有していないまたは濃度が高く処理できない元素はないかを検討している。また、上記発生水とは別に旧坑道から発生する坑水についても、発生水を希釈する役割を担わせるかどうかについても検討している。上記たい積場においても、トータルでの坑水処理の考え方や具体的な処理方法・期間等について検討されたと考えられる。

これらのことから、下記の点について今後は情報を取得する必要がある。

- 湛水状態のままではなく乾固状態を最終的な状態とする考え方
- 固結工法の検討の有無、ある場合圧密との比較項目・結果
- 安定化に伴い発生する水の処理期間や処理の可否検討結果

4.4.2 露天採掘場跡地からの浸出水対策

Ronneburg サイトの Lichtenberg 露天採掘場跡地においては、鉍山施設及び浸出水の一元的管理を目的として、近傍に位置するボタ山状の捨石を埋め戻し材として露天採掘場跡地内へ搬入したのち覆土を設置した。

ここで、捨石は少なくとも 5 ヲ所のボタ山（図 4.3-1）にたい積していたものであり、それぞれ硫化鉄の含有率に代表される化学組成等の性状が異なる。したがって、これらを事前に調査し把握した。次に、それぞれを埋め戻した場合に地下水との接触により発生する水の pH 等を推定するため、25m 四方の試験フールド（“test pit”）を作成し性状が異なるそれぞれの捨石と地下水を接触させ、酸化環境において場合に発生する水の pH 等の水質を推定した¹⁵⁾。その結果、想定される埋め戻し後に発生する水の推定 pH から捨石を 3 つに大別し、pH<5 と推定されるものを覆土後の露天跡地内の想定地下水面よ

り下位に（つまり酸化環境に置かないことで酸を生成しないように還元環境下に）たい積した（図 4.3-2 A-zone）。さらに上位には $5 < \text{pH} < 7$ と推定されるものをたい積し（図 4.3-2 B-zone）、最上位には $\text{pH} > 7$ と推定されるものをたい積した（図 4.3-2 C-zone）。

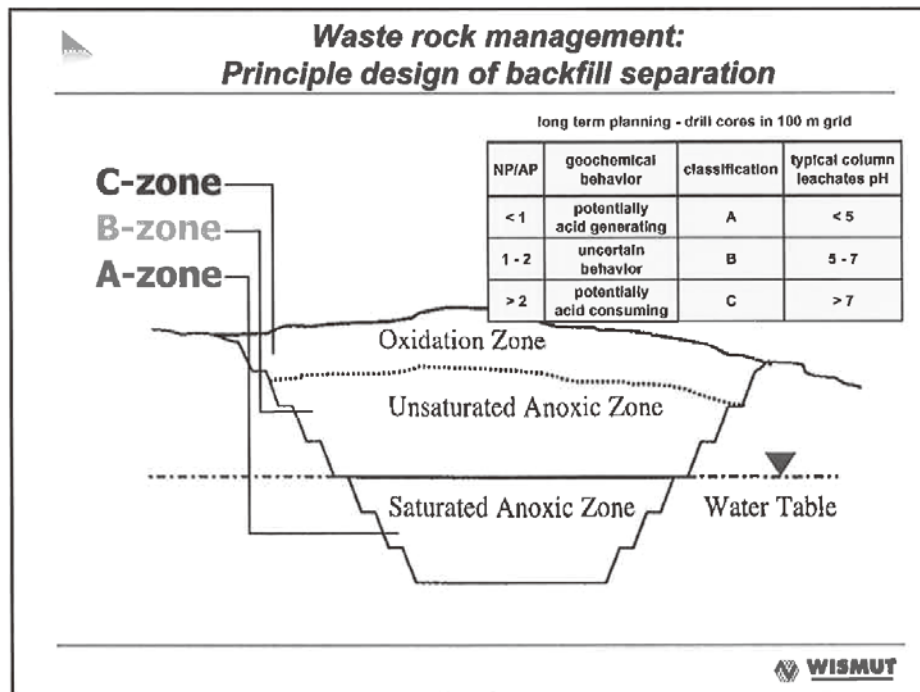


図 4.3-2 露天採掘場跡地への区分した捨石の埋め戻し¹⁵⁾（再掲）

(1) センター跡措置の妥当性を確認した又は反映できると思われる情報

センターの露天採掘場跡地では採鉱したウラン鉱石から硫酸浸出によりウランを回収したのち中和し生成した捨石を埋め戻しており、現在まで旧坑道から坑水が発生している。このような状況に対し現在は、捨石等が流入する地下水とどのような反応を起こし現状の坑水となっているかのメカニズムを検討するとともに、今後用いるべき最適な発生源対策について検討しているが、本事例から得られた情報はまだ反映していない。

(2) 今後反映するために追加取得する必要がある情報

Lichtenberg 露天採掘場跡地においても酸性坑水の発生の可能性を検討していることから、埋め戻したものの構成鉱物等と地下水の pH や酸化還元、さらにはこれら条件の下での化学反応系を調査していると考えられる。したがって、これらとセンターで行っている検討内容を比較検討することで、露天採掘場跡地からの Fe 濃度の高い坑水への対策の検討の一助となることが期待できる。

以上、下記の点について今後は情報を取得する必要がある。

- 浸出水の水質のうち懸念された項目（pH のみか）
- 事前に調査した捨石の性状（硫化鉄の含有率のみか）

- フィールド試験の仕様（内容、期間等）
- 発生源と地下水の接触による溶出のメカニズム（解析結果）
- 埋め戻し及び覆土後の水量・水質の経時変化（モニタリング結果）

4.4.3 たい積場からの浸出水対策

Sillamäe 鉱さいたい積場の跡措置においては、目的の一つは鉱さいからの浸出水による海洋汚染防止であった。鉱さいからの浸出水量低減化のため、地下水面を低下させることを目的として覆土の設置と遮水・透水壁が設置された。このうちの遮水壁は、地下水流入量を低減化させるため地下水流動系の上流側の低透水性基盤岩の分布深度まで設置された。また、迂回した地下水はそののち地下水流動系の下流方に流下させ、トレンチを掘削し礫を充填した透水壁の方向へ流れ、透水壁内を海に通じる水路まで流下する（写真 4.3-9）。

これらが設置された結果、地下水面は鉱さい分布深度以深に低下し（図 4.3-9）、場内への流入水と鉱さいの接触が抑制された結果、水質は向上した。また、設置以降継続して遮水壁内外の水位モニタリングが続けられ、設置後は継続して効果が見られることが確認されている（図 4.4-1）。



写真 4.3-9 Sillamäe 鉱さいたい積場における遮水壁及び透水壁等（跡措置中）²⁰⁾（再掲）

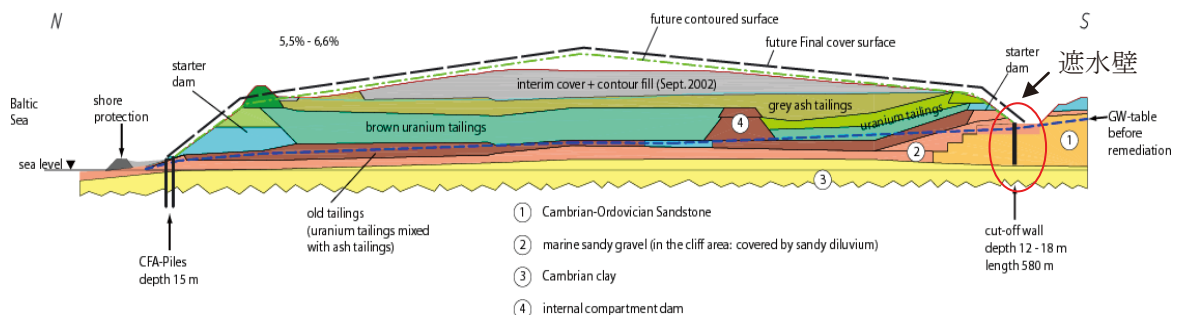


図 4.3-9 Sillamäe 鉱さいたい積場における覆土構造及び遮水壁等 設置計画図²⁰⁾（再掲）
（原図を縦方向 2 倍に拡大）

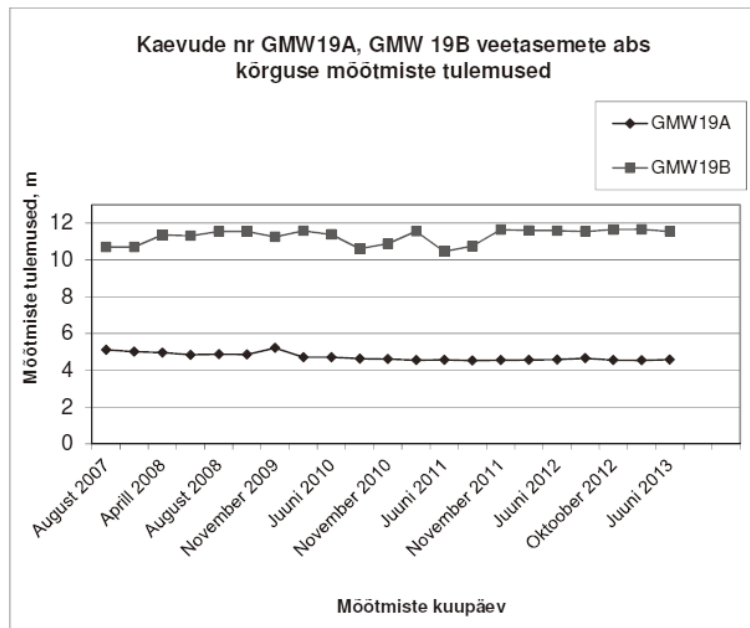


図 4.4-1 遮水壁内外の水位モニタリング結果²⁶⁾

遮水壁は透水係数を 1×10^{-9} [m/s] と定め、また効果を期待する期間として 1,000 年を定めたことから、材料には天然材料のみを用いた。材料は、複数のベントナイトやセメント等の組合せについて強度、透水係数、硬化時間等を比較し最適なものが選定された。

なお、透水壁を併用したのは、遮水壁と比較して低コストであることと掘削土を覆土材として用いることができるとの理由である。

(1) センター跡措置の妥当性を確認した又は反映できると思われる情報

センターの露天採掘場跡地においては、地下水とたい積物の接触による溶出が坑水の高い鉄分濃度に寄与していると推定されている。ここで、捨石と地下水が接触していること（つまり地下水面以深にある捨石）と地下水に鉄が溶出することとは同義ではないが、地下水面以深に分布する捨石の厚さは約 1～2.5m 程度あり、地下水位を数 m 低下させ鉋さいと地下水の接触をなくした当たい積場のように地下水位を低下できるかどうかを検討することとした。その結果、平成 26 年に露天跡地に覆土や地下水流入を抑制するための遮水壁を設置した場合のシミュレーションを行い、大きな効果は期待できないとの結果が得られた（具体的には、難透水性の基盤岩まで遮水壁を根入れしたものの、遮水壁設置範囲外から地下水が流入し、結果として水位が十分低下しなかった）。

(2) 今後反映するために追加取得する必要がある情報

今後センターの鉋さいたい積場において遮水・透水壁を設置する可能性も残されていることから、遮水壁材料の選定及び試験項目や透水壁の仕様は参考とできる。

今後は以下の項目に係る情報を取得する必要がある。

- 所定の期間（ここでは 1,000 年間）、遮水性や構造物としての安定性等の機能が期待できるとした根拠
- そのために行った材料・耐久性試験
- コスト評価
- 設置後の水質の経時変化

4.4.4 覆土構造（材料、厚さ、構造等）

情報を取得した Rožná K1, Bois Noirs Limouza, Sillamäe, Pécs, Kowary 鉱さいたい積場のいずれにおいても、線量及び雨水浸透量低減化（透水係数： 1×10^{-9} [m/s] 程度）を目的とした多重覆土である。

材料については、天然材料のみであるが、最上位以外には捨石を用いる場合もある。また、雨水浸透量低減化の目的に対応するレイヤーには、低透水性の粘土やベントナイトが用いられている。ただし、これらの材料は用いず転圧のみ行い低透水性とする例もある（Bois Noirs Limouzat 鉱さいたい積場）。また、下記の理由によりベントナイトを挟んだ合成繊維等のシートで十分と判断した例もある。

- ①降水量が約 600mm/y と少ない、②水収支調査結果からは全降水量の約 3 割しか遮水レイヤーまで到達しない、③ベントナイトシートの一部に孔が開いたとしても地下水の水質に無視できない影響は出ない、④孔が開いた場合でも浸透した水により内部のベントナイトが膨潤し修復されることが期待される。（Rožná K1 鉱さいたい積場）
- 輸送費が少なく済み、また厚くする必要がないため安価である。（Pécs, Kowary 鉱さいたい積場）

厚さについては、2m 程度からそれ以上でありオーダーの違いはない。

構造については、場内における降水に起因する表流水や覆土内の浸透水を場外に排水するため、場外方向に勾配がつけられている。勾配は覆土の下部レイヤーの厚さを変えて確保し、これには捨石を用いることが多い。設定根拠は得られなかったものの情報が得られた勾配は以下のとおりであり、大差ない。

- 平坦面 3%：下流方向（Rožná K1 鉱さいたい積場）
- 平坦面 1.2%：両岸方向、0.5%：下流方向（Bois Noirs Limouzat 鉱さいたい積場）
- 平坦面 5.5～6.6%：中心から周縁、法面 V/H=1:3（Sillamäe 鉱さいたい積場）

ここで、Bois Noirs Limouzat 鉱さいたい積場については他より緩いが、これは浸食対策として緩く設定された訳ではない。また、例外として Kowary 鉱さいたい積場については、目的は同じであるものの、場内方向に勾配が付けられている。

覆土表面については、最上位に浸食防止や景観上の配慮から植生層が設置される。

(1) センター跡措置の妥当性を確認した又は反映できると思われる情報

上記たい積場同様の覆土は線量・ γ 線散逸量・雨水浸透量低減化の目的を有し、廃砂たい積場に設置した覆土と同じである。その上で材料、厚さ、構造（形状、層構成）を比較すると、以下のとおりの結果となった。

- 材料については、センターでは捨石は用いていないものの主に天然材料を用いている点は同じ。
- 厚さについては、センターでは勾配調整層を除き 1.25～1.5m、勾配調整層を含むと最大 3～4m 程度となり、オーダーの違いはない。
- 構造については、全てのたい積場に雨水浸透量低減化のため勾配が付けられている。勾配の方向はほぼ凸型（Kowary 鉱さいたい積場のみ凹型）である。勾配についてはセンターの 5%とオーダーの違いはない。また、複数の目的を有する多重覆土となっている点も同じ。最上位に浸食防止等を目的とした植生層を設置している点も共通している。

以上のことから、海外事例調査で得た情報は、廃砂たい積場における覆土が目的に対し概ね逸脱した仕様となっていないことの傍証となった。

(2) 今後反映するために追加取得する必要がある情報

廃泥たい積場を含めた鉱さいたい積場を最終的にどのような状態とするのかは、現在行っている当たい積場における物質収支の検討、各坑水の個別処理の可能性検討、坑水処理施設の最適化等の結果による。その結果、廃泥たい積場に同様な覆土を設置することとなれば、その最適な仕様（材料、厚さ、構造）を決定する必要があるが、それには覆土を含めた跡措置に機能を期待する期間、許容される維持管理の負荷、要求される浸食対策を決めておかななくてはならない。例えば、後述する長期的維持管理（4.4.7 参照）の期間と比べて覆土に機能を期待する期間が短くても、維持管理を定期的に行えば問題はない。これに対し、維持管理をできるだけ低減化するのであれば、覆土には長期的維持管理を行う期間は機能が維持される必要がある。これまでの調査では、下記のとおり一部のたい積場については具体的な期間に係る情報が得られている。

1,000 年間 （Sillamäe 鉱さいたい積場）

200 年間 （Pécs 鉱さいたい積場）

これらのたい積場においては期間の設定に係る検討がなされていることが予想される。これらたい積場については覆土に機能を期待する期間をどのように設定したのか、また期間に係る情報がないたい積場については期間について情報を取得すれば、今後の廃泥たい積場を含めた鉱さいたい積場跡措置に参考とすることができる。

今後は以下の項目に係る情報を取得する必要がある。

- 維持管理が必要な期間、根拠（Sillamäe, Pécs 鉱さいたい積場）
（関係法令に定めているかどうか、用いる材料の物性値をパラメータに感度解析を行い得られた結果に基づくか、中間評価を行うまでの期間として適当に決めた値か、等）

- 覆土機能が期待できるとした期間、根拠（Sillamäe, Pécs 鉱さいたい積場以外）
- 勾配の設定根拠（Rožná K1, Bois Niors Limouzat, Sillamäe 鉱さいたい積場）

4.4.5 跡措置後のモニタリング

期間

いずれのたい積場も、跡措置後にモニタリングを行い、結果と基準値との比較や経時変化を見ながら負荷を低減化していくとの考えである。言い換えれば、エンドステートまでの負荷低減化や期間は現時点では決定できず、中間評価結果により決定していくとの考えである。そこでは、中間評価までの期間を仮に設定し、その時点で、特段の問題や予測範囲を越えた悪い方向での結果の有無を確認する。これらの期間が明示されているたい積場は、

100 年間	（終了まで）、なし	（中間評価まで）	:	Rožná K1 鉱さいたい積場
なし	（終了まで）、5 年間	（中間評価まで）	:	Sillamäe 鉱さいたい積場
なし	（終了まで）、5 年間	（中間評価まで）	:	Pécs 鉱さいたい積場

このうち、中間評価までの期間は、Sillamäe 鉱さいたい積場では中間評価までは“Post-remediation”モニタリングと呼ばれ、こののち測定頻度を減らし測定を継続し、その測定データの評価結果から頻度の減少や継続不要との判断がなされる。

これに対し Pécs 鉱さいたい積場では“Control period”と呼ばれ、その測定データの評価結果から継続不要との判断がなされるとの違いがある（ただし線量を除く）。

また、Culmitzsch 鉱さいたい積場の跡措置を行った WISMUT 社では“Post remedial phase”を 5 年間としているが、これも同様にモニタリング結果と基準値との比較や経時変化を見ながら負荷を低減化していくとの考えであると思われる。

項目・測定点数

今回の調査対象のうち Sillamäe 鉱さいたい積場においては考え方や具体的な内容等について詳細な情報が得られた（図 4.3-10）。モニタリング項目及び点数は 4.3.5 及びその中で表 4.3-2 に示したとおりである。

項目については、センターでは傾斜・間隙水圧及び場内の地下水位は測定していない。また、気象観測装置や蒸発散計等を用いて水収支の検討は行っているが地下水分量は測定していないという違いはある。しかしながら、ほぼセンターの廃砂たい積場で実施している項目と同じである。

測定点数については、沈下量は約 50m メッシュであり廃砂たい積場と比較して密に設定されている。地下水位の測定点数が多いが、場内においても測定していることと遮水壁の内外をセツで測定しているためである。地下水水質の測定点数も多いが、これは海洋汚染の確認という観点があるためである。線量及びトロン散逸量については不明であるため比較できない。

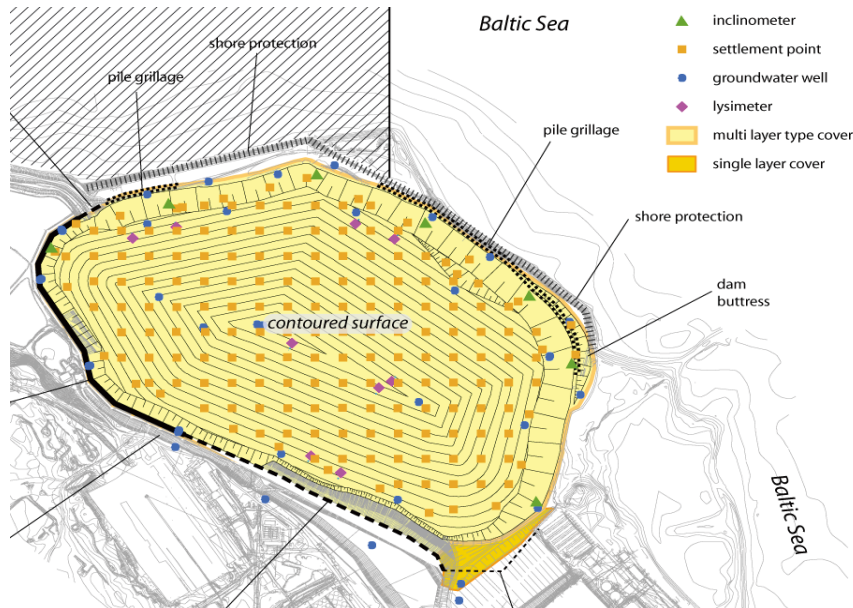


図 4.3-10 Sillamäe 鉱さいたい積場におけるモニタリング項目及び箇所²⁰⁾ (再掲)

(1) センサ跡措置の妥当性を確認した又は反映できると思われる情報

廃砂たい積場で行っているモニタリングは、跡措置の目的や覆土構造が同様である Sillamäe 鉱さいたい積場と、項目及びそれに対応する目的がほぼ同様であることを確認できた。また、モニタリングの結果を見ながら（つまり、エンド・ステートは始めに定めていない状況で）エンド・ステートまでの負荷低減化や期間を定めていくとの観点はセンターと共通していることを確認できた。また、遮水壁を設置する場合はその効果を確認するため壁の内外に対で地下水位モニタリングを行う必要があり効果を確認できることについての情報も得ることができた。これも含め、今後廃泥たい積場に同様の覆土を行うのであれば、モニタリング項目を同様に設定すればよいと思われる。

(2) 今後反映するために追加取得する必要がある情報

廃砂たい積場でモニタリングを行っていない傾斜・間隙水圧・地下水位についてはたい積場の構造物としての安定性を評価するための項目であると思われるが、どのような考えに基づきモニタリング項目とし箇所及び点数を設定したのかを追加調査する必要がある。このうち地下水位については、覆土を貫いてモニタリング孔を設置しなくてはならないが、他の方法や項目で代用できる可能性の有無についても検討する必要がある。

また、多くのたい積場においてモニタリング期間（中間評価の必要性やそれまでの期間含む）に係る情報が得られておらず、その設定に係る考え方についての情報は全てのたい積場で得られていない。しかしながら、少なくとも期間が設定された事例においては、ある考えに基づいて設定されていると思われることから、今後はそれについて情報取得をすることが必要である。

今後は以下の項目に係る情報を取得する必要がある。なお、これは長期的維持管理（4.4.7 参照）と深く関係するものであり、下記項目のうち期間、実施者及びその決定根拠については同様に情報を取得する必要がある。

- （現在情報が得られていないたい積場について）終了までの期間及び中間評価までの期間、設定の考え方、どのように負荷を低減化していくか
- センターで行っていない項目の必要性
- モーニング開始からの経時変化
- 実施者及びその決定根拠

4.4.6 跡措置後の浸食対策及び発生後の維持管理

跡措置後の降雨や融雪による浸食対策としては、覆土表面への植栽、覆土頂部から法面にかけての排水路設置、法面への緩い勾配適用、草刈等の維持管理が行われている。

覆土表面への植栽

降雨や融雪による浸食対策については、主な方法は植栽であり、覆土頂部と法面の覆土頂部を含むもの（Sillamäe, Pécs 鉱さいたい積場）が見られる。覆土頂部のみと明示しているものはなく、また、法面への必要性に係る情報は得られなかった。また、多くの場合、管理の必要性、寿命、景観上の問題からシートやアスファルト舗装は適切でないと判断されている。

植栽についての仕様は様々であるが、要求条件はおおむね同様である。具体的には、

- 複数の植物種を混合する（全てが枯死するリスク低減化）
- 播種ののち速やかに生育する（他種の侵入抑制）
- 特別の管理を必要とせずサバの環境に適応する（維持管理の負荷低減化）
- 植物根侵入により覆土構造を破壊しない（維持管理の負荷低減化）
- 自生種であり外来種でない（環境への配慮）

覆土頂部から法面にかけての排水路設置

覆土頂部と比較し法面は勾配が大きく、かつ頂部から表流水が法面を流下することから、法面に天然材料を用いた排水路が設置されている例もある（写真 4.4-1 Sillamäe, Pécs 鉱さいたい積場）。ドイツ国 Trünzig 鉱さいたい積場の跡措置に見られるが、詳細は不明である²⁷⁾。

法面への緩い勾配適用

法面勾配をより緩くなるよう整形した例もある（Kowary 鉱さいたい積場：30～35度を20～25度とした）。



写真 4. 4-1 覆土頂部からの排水路（左上：Sillamäe 鉋さいたい積場、
右上：Pécs 鉋さいたい積場、左下・右下：Trünzig 鉋さいたい積場²⁷⁾）

草刈等の維持管理

覆土表面の植栽は、他種が侵入し植物根により覆土機能に影響を及ぼすことのないよう、継続した草刈等の維持管理が必要であり、これを不要としている事例はない。

例えば Sillamäe 鉋さいたい積場においては、年 2 回（6 月、9 月）に定期的な草刈を実施することで植物根侵入防止を行うとともに、次回の草刈を容易にしている。また、Bois Noirs Limouzat 鉋さいたい積場においては捨石を材料として用いたかん止堤に対して、時間の経緯とともに植生が生育するため必要に応じ草刈等を行うこととしている。しかしながら、ほとんどの事例では期間、頻度、方法等は明確に示されていない。

また、Kowary 鉋さいたい積場については跡措置後の維持管理がほとんど行われていない状況であり、近傍から植生が侵入し覆土頂部や法面に高木が自生している状況となっていた（写真 4. 3-16）。法面については地形に凹凸が見られ、浸食も起きている（写真 4. 3-17）ことから、草刈等の維持管理は不可欠であるとの証左となる。



写真 4.3-17 法面中腹の植生状況（再掲）

浸食発生後の維持管理

今回の調査対象のうち覆土設置が終了したものは Sillamäe, Pécs, Kowary 鉱さいたい積場のみである。このうち Sillamäe 鉱さいたい積場については特段の浸食は起こっていない。Pécs 鉱さいたい積場については 4.3.6 に示したとおり、当初は応急的な対策がとられていたものの、最終的にはコスト増となり半永久的な対策を取らざるを得ない状況を受容するに至った。たい積場を管理している PURAM 社が仕様決定時に浸食の影響に対し適切な評価がなされていなかったと結論付けた。

ただし、生育を促進するための腐植土層の設置（Kowary 鉱さいたい積場では厚さ 45cm）や初期の施肥（Pécs 鉱さいたい積場）が必要とされる場合もある。

(1) センター跡措置の妥当性を確認した又は反映できると思われる情報

覆土を行った廃砂たい積場の浸食対策について植栽を含む複数の方法を比較検討し、その結果、当面の期間における最適な方法として植栽を選定したが、これは他の同様なたい積場でも用いられていることを確認できた。つまり、今後廃泥たい積場を含む鉱さいたい積場においても覆土最上位の浸食対策としては植栽を採用すれば良いと思われる。

ただし、浸食対策として植栽を設置したとしても、事前に浸食が覆土に及ぼす影響を適切に評価しておかない場合、その都度対策を講じる必要が生じ、長期的にみると維持管理のコストや期間が長くなるとの事例を得た。Kowary 鉱さいたい積場の事例から適切な浸食対策が不可欠であるとの事例も得た。これらのことから、浸食の度合いやその経時変化を適切に評価した上で浸食対策の仕様を決定する必要があることが分かった。

(2) 今後反映するために追加取得する必要がある情報

上記のたい積場において行われた検討は、どのような期間を想定したものか不明である（上記 4.4.4「覆土構造（材料、厚さ、構造等）」においては、Sillamäe 鉱さいたい積場及び Pécs 鉱さいたい積場では維持管理の期間をそれぞれ 1,000 年及び 200 年としている。）。また、必要となる浸食対策はサハ毎の降水量と大きく関係することから、上記たい積場において想定した降水量についても調査が必要である（なお、平成 25 年に廃砂たい積場覆土に対する浸食が起きた際の降水量は、39mm/h であった）。

また、浸食対策も含め無管理とすることはできず必要最低限の管理は残るとの判断が受容されたと思われることから、その考え方についても今後参考とすべきであるが情報は得られていない。

また、少しでも浸食対策の負荷を低減化するために植栽の具体的な仕様についても検討していると思われる。例えば、覆土に用いる材料を使用した土層を構築し複数種の植物種を播種し根系侵入深度を観察し評価したと思われる例がドイツ国 Trünzig 鉱さいたい積場の跡措置に見られるが、詳細は不明である²⁸⁾ (図 4.4-2)。これは、センターがこれまで取得してきた、国内における覆土や試験のため構築された土層の仕様 (材料、勾配、締固めの程度等)、その表面に見られる植物種や根系深度、浸食の程度、構築後の経過年数等に係るデータとあわせて検討する必要がある。

今後は以下の項目に係る情報を取得する必要がある。

- 期間設定の考え方 (4.4.4「覆土構造 (材料、厚さ、構造等)」と同じ)
- (植栽を含む) 複数の浸食対策方法の比較検討内容
- 植物種を選定するための事前の育成試験の必要性検討内容
- 上記試験を実施している場合、その仕様、目的、期間等

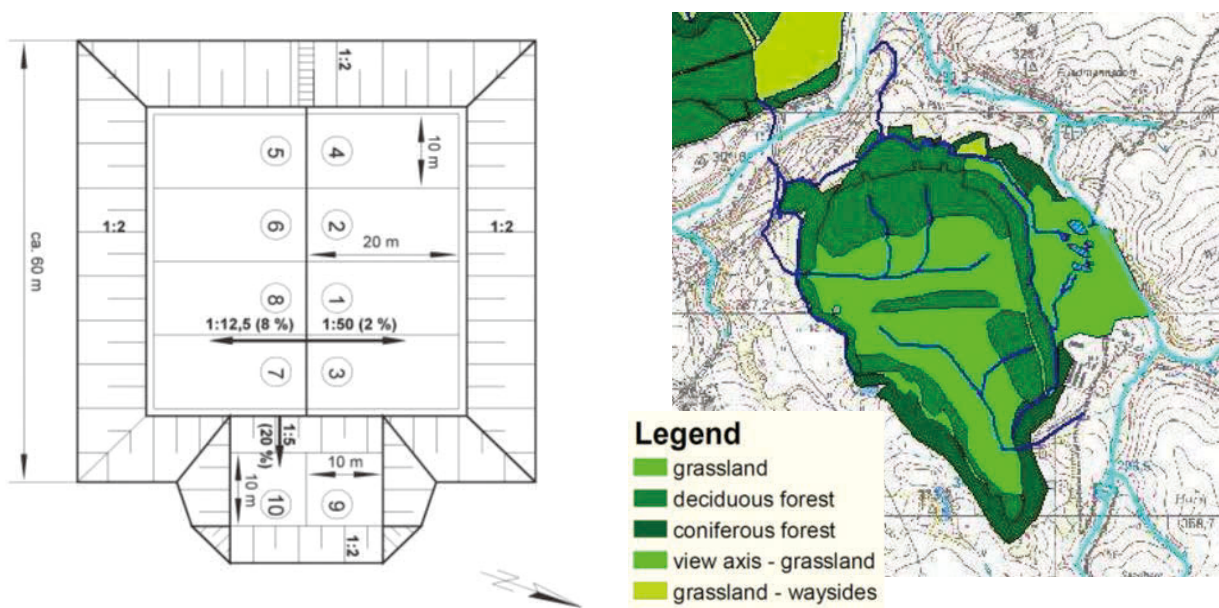


図 4.4-2 Trünzig 鉱さいたい積場跡措置における試験土層²⁸⁾及び最終的な植生²⁷⁾

4.4.7 長期的維持管理

跡措置後の維持管理は、エンドーストまで (あるいはエンドーストが必要最低限の維持管理を含むものである可能性もあるが) その負荷を低減化しながらも長期間に継続することとなる。維持管理には以下のような要素が含まれるが、これらは独立したものではなく相互に関連したものとなる (図 4.3-13 参照)。

- ・ 覆土の浸食対策
- ・ 施設・機器（坑水処理施設、モニタリング機器含む）
- ・ 監視（跡地利用/制限/標識）
- ・ 記録の保存

制度的管理

今回の調査対象においては、跡措置を行っている機関あるいは過去に行った機関、国等が制度的管理を行っている。いずれの事例においても、維持管理が長期に及ぶこと、その責任の所在を明確にする必要があることは認識されている。これはまさに IAEA が言うところの法令に基づいて指定された当局または公的機関によるサイトの管理である「制度的管理（“institutional control”）」を意味するが、いずれの調査対象においても期間の明示や責任の所在明確化はできておらず、課題となっている。

例えば、Pécs 鉱さいたい積場においては、IAEA による Peer Review²³⁾で「維持管理、モニタリング、坑水処理等の長期間に及ぶ業務については、複数の規制機関が関与し、かつ書類手続きが複雑であり当事者にとって要求事項が理解しにくい状況となっている。そのため、各機関に対する要求事項を明確にすべきである。」とのコメントが出されたのを受け、以下に示した 3 点を実施できるよう進めている。

- ・ 国が今後責任の所在を明らかにすること
- ・ 定められた機関が行うとともに負荷低減化も検討すること
- ・ モニタリングや坑水処理は監督官庁が各分野の専門家からの意見を反映して実施者・頻度・期間・終了するための基準を決定すること

モニタリング及び浸食対策については、4.4.5 及び 4.4.6 に示していることから、以下に、その他に得られた情報を示す。

施設・機器

Bois Noirs Limouzat 鉱さいたい積場においては、かん止堤の上流側に鉱さいをたい積し現在も湛水状態にあることから、かん止堤の安定性に係る維持管理がなされている。具体的には、

- ・ かん止堤伸長方向と鉛直に設置した測線に沿ってかん止堤小段ごとにピエゾメータを設置、2 週間ごとに堤内水位を測定している（堤高は、定期的なモニタリングが義務付けられている 20m 以上）。
- ・ かん止堤天端高さ及び水平変位を、かん止堤外に設置した基準点を用い毎年測定している（写真 4.4-2）。
- ・ 監督官庁からの指示を受け、想定される震度を上回る耐震評価を実施している。

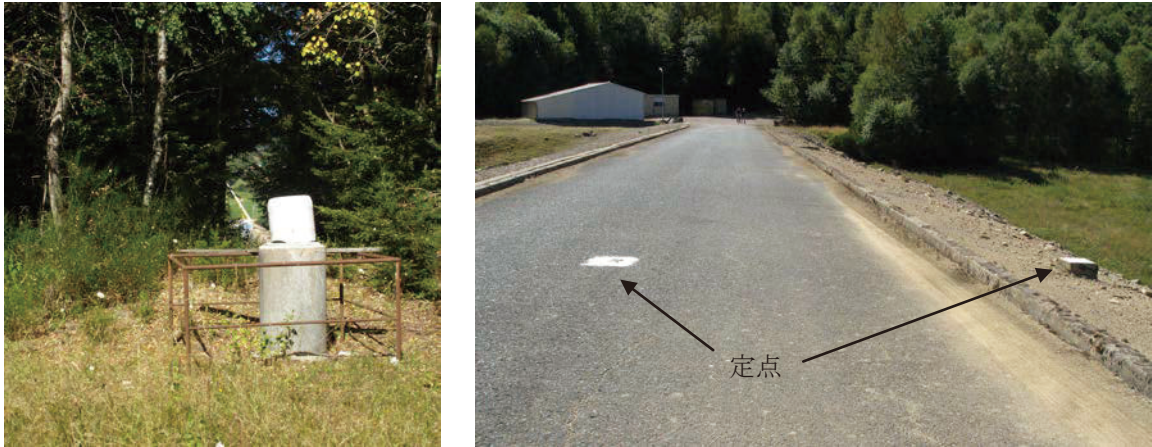


写真 4.4-2 かん止堤外に設置された基準点（左）、かん止堤上に設置された定点（右）

また、起こりうる豪雨への対策として、以下の方法が採られている。

- ・ 場内水位が上昇し越流やかん止堤が崩壊することを防ぐため、かん止堤のすぐ上流側左岸側に場内水を河川へバypassさせる水路入口を設置（写真 4.4-3）。かん止堤上部が捨石でできているため、かん止堤そのものの健全度が失われることを防ぐことが最重要であり、また、豪雨時には場内水が希釈され河川へ流れる上澄水は水質に問題がないとの判断に基づく。



写真 4.4-3 豪雨時に場内水を河川へバypassさせる水路入口

(1) センター跡措置の妥当性を確認した又は反映できると思われる情報

長期間にわたる維持管理を行う必要があることはいずれの国でも同様であるが、近年 ENVIRONET でもエンドステートに係る問題として（長期的維持管理だけでなく、事業休止後の維持管理、制度的管理を経てエンドステートに至るまでの実施すべき内容、責任の所在、期間の設定、終了とする考え方含む）議論され始めた（3.3.3 参照）。

これまでに、ENVIRONET で得られた情報をきっかけに、今後のセンターの鉱山跡措置に反映できる情報として、ウラン鉱山の事業開始前から制度的管理にいたるまでの上記項目を網羅したプログラムを策定し休止鉱山の管理を行っているカナダ国サスカチュワン州における情報¹³⁾に対し文献調査を行っている。

(2) 今後反映するために追加取得する必要がある情報

センターの鉱さいたい積場同様に谷地形に設置され細粒分が卓越する鉱さいを湛水した状態でたい積している Bois Noirs Limouzat 鉱さいたい積場におけるかん止堤の維持管理の考え方については、当たい積場における情報は今後のセンター跡措置にとって参考となると言える。

今後は以下の項目に係る情報を取得する必要がある。

- かん止堤耐震評価の考え方及び内容
- かん止堤の健全性に係る維持管理の考え方及び内容
- たい積物の流出に係る評価の有無、あれば考え方及び内容
- 豪雨時の越流を許容するとした考え方

あわせて、上記のカタ国サスカチュワン州の制度的管理プログラムについても調査を継続し情報を取得する必要がある。

4.4.8 跡措置後のサイト有効利用、ステークホルダー・インボルブメント

今回の調査対象のうち、跡措置後が終了したものについては程度の差こそあれサイト有効利用がなされている。

しかしながら、多くの場合、有効利用は小規模であり得られた情報も少なく、センター跡措置に活用できるものではなかった。例えば、Sillamäe 鉱さいたい積場は港湾に隣接する工業団地内に位置するため常に整備された状況に保たれているが、具体的な有効利用はされていない。Pécs 鉱さいたい積場は近傍の集落の農家による放牧や小規模なバイオマス燃料用の植物生育地として用いられている程度である。また、Kowary 鉱さいたい積場は維持管理コストの小さい自然の状態の草地に戻し、積極的に利用はしない（例えば、レクリエーション施設としての森林）との考えであったが、国の方針により維持管理が放置された状況となっている。

(1) センター跡措置の妥当性を確認した又は反映できると思われる情報

Ronneburg サイト Lichtenberg 露天採掘場跡地（4.3.1 参照）や Bessines サイト LavauGrasse 鉱さいたい積場等（4.3.3 参照）は大規模なサイト有効利用がなされており、このうち Bessines サイトはセンターとの共通点が多くあり、今後の跡措置後の在り方の検討に参考となる情報が得られた。例えば、

- ・ 休止ウラン鉱山施設及び核燃料施設が共存しており、かつ地元自治体との関係が良好である。
- ・ 資源としての建屋、施設、報告書、人、試料、人及びそれに付随する経験が多く残されている。
- ・ しかしながら、跡措置終了に伴い人材の高齢化や退職などにより、蓄積されたノウハウや経験が失われ、捨石や鉱さいに係る記録のトレーサビリティが確保できなくなる恐れがある。

- ・ これまでもウランの鉱業活動を行っていた土地柄であり、新たなサイトへの立地と比較し容易であると思われる。
- ・ 跡措置終了後も地元民の雇用の観点からは何らかの対策が必要と思われる。

(2) 今後反映するために追加取得する必要がある情報

今後は、Bessines サイトについて、センターの跡措置後の在り方を具体化するためには、このような条件を活用した大規模な跡地利用に至るまでの進め方、特に、どのようにステークホルダー・インボルブメントを行い意思決定したのかに係る情報やその後の状況に係るフォローアップの有無や結果について情報を取得する必要がある。具体的には、

- ・ ステークホルダー・インボルブメントにより意思決定した項目
(サイトの利用の是非、想定する期間、制限の有無、設置施設の種類・仕様、雇用等)
- ・ ステークホルダーの構成
(AREVA 社、国、監督官庁、地元自治体、地元住民、大学等の有識者、関係機関等)
- ・ 意思決定における関与の程度
(項目毎。ステークホルダー毎。対等な立場での意思決定／決定事項の連絡のみ等)
- ・ 事業者とステークホルダーの双方にとってより質の高い情報共有方法
(講演会、モニタリングの共同実施、第三者機関による分析実施・確認等)

一方でセンターにおいてもステークホルダー・インボルブメントに係る検討がなされている。具体的には、ステークホルダーとの関わりを整理・分析し今後の円滑な事業の運営を支援する対策をまとめることを目的とし、これまでの捨石たい積場における問題発生時の対応を含む過去事例の分析、今後の課題となりうる項目の抽出、抽出された課題への対策の検討等を行っており、あわせて検討すべきであると考え。



図 4.4-3

“GEP” が 2013 年に発行した報告書²⁹⁾

また、当サイトを含むフランス国リムザン地域圏においては多くの休止ウラン鉱山があり跡措置を行っていたが、国と監督官庁である原子力安全局（ASN）等が、様々なバックグラウンドを有する専門家等から構成される会議体“GEP”（Groupe d’expertise pluraliste）を設置し、ここでの議論に基づきその後の鉱山跡措置の進め方について 2009 年及び 2013 年に提言がなされた²⁷⁾（図 4.4-3）。“GEP”はあらゆる技術的な観点からの検討だけでなく、長期的管理やステークホルダー・インボルブメントにいたるまで幅広く検討を行っており、検討結果は当サイトの有効利用に係る意思決定の一翼となっていることが想定される。したがって、“GEP”についても情報を取得する必要がある。なお、これについては過去にセンターで調査がなされていることから、この結果もあわせて検討すべきであると考え。

4.5 文献調査で得られたセンター跡措置へ反映できる情報検討

前 4.4 節においては、類似事例の現地調査及び打合せを通して得られた情報を整理し示した。当節では、これとは独立して行った文献調査により取得した情報を整理し、センター跡措置への反映について検討する。検討項目及びその内容が実施された箇所は、以下のとおりである。

表 4.4-2 検討項目及び実施箇所（再掲）

項目	実施箇所
鉱さいのセメント固化による安定化	Sydney Tar Pond（カナダ）

4.5.1 Sydney Tar Pond における鉱さい固結（カナダ・Sydney Tar Pond 社）

カナダ国ハブ・スコシア州 Sydney 地区において、コークス炉から発生した PCB を多く含む副産物であるタールが河川を経て流下し約 90 年間もの間河口にたい積した（面積約 31 万 m²、約 70 万 t）。同地域は住民の癌り患率が高く、技術的及び政治的な論争及びステークホルダーを含めた議論をへて、国及び州が環境修復のための調査を行うに至った。2006 年に最適な工法としてポルランドセメントを用いた固結工法が選定され、2009～2012 年にたい積物安定化が行われた（写真 4.4-4）。さらに、覆土及び遮水壁設置が行われた³⁰⁾。

これら環境修復を行ったのは、主に同国において休止鉱山の環境修復・分析・モニタリング等の作業を多く行ってきた SRC 社である。同社は、環境修復の一つの手法として汚染土壌に固結工法を適用しており（例えば、レー射撃場跡地、メッキ工場跡地、産廃集積場跡地）、汚染土壌の強度を高め、透水性を下げ、有害物質を溶出しにくい化学組成にするという特性があり、跡地が有効利用されている例もある。

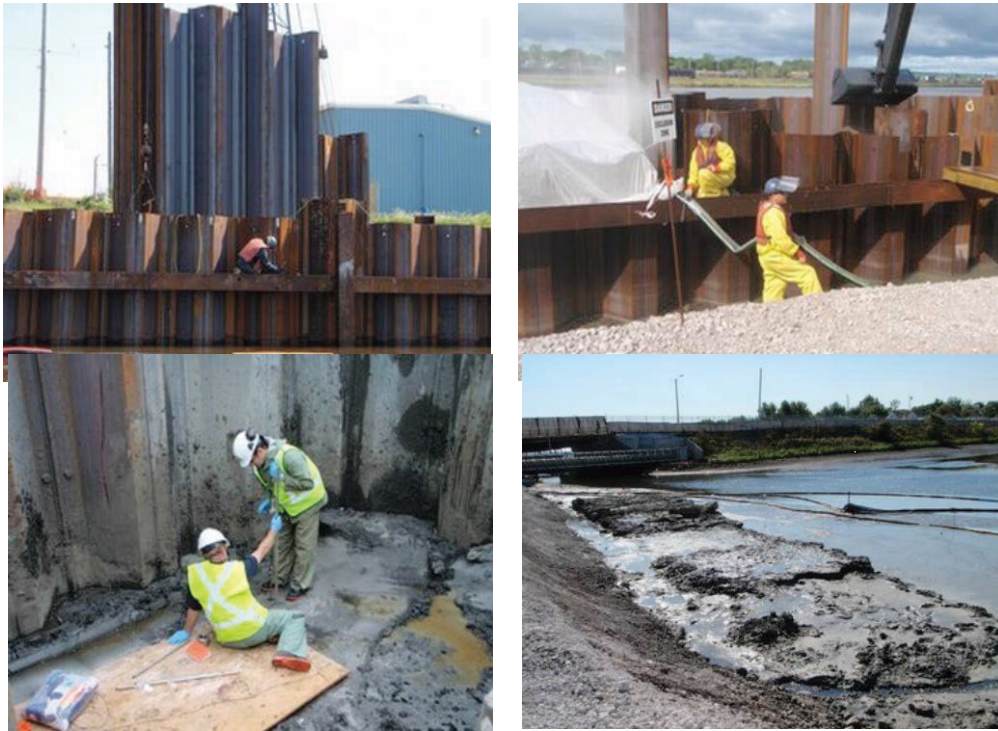


写真 4.4-4 左上：区画設定、右上：固化材投入、左下：固結後強度確認、右下：固結済みエリア³⁰⁾

センターにおいても、固結工法を、廃泥たい積場の跡措置における鉍さいの安定化方法として圧密工法とともに比較検討してきた。これら両工法は全く原理が異なり、比較する上では一般的な工法としての長短だけでなく、実際の適用例における基本的考え方から具体的な工法・仕様等の情報を得て比較検討すべきであるためである。

これまでの結果、圧密工法と異なり跡措置中に発生する処理が必要な水量は少ないという利点はあるものの、固化後に ^{226}Ra の溶出量が低減化せず、かつ固化剤とともに加える添加剤の種類によっては固化後の強度が十分でないとの結果が得られた。

したがって、固結工法の唯一の適用例である本件から、たい積物の性状、固化材や添加剤の種類、要求される強度・溶出量や、コストについての情報が必要である。

そのため、今後は以下の項目に係る情報を取得する必要がある。

- ・ たい積物の性状（化学組成、含水比等）
- ・ 事前に比較した固化材・添加剤の種類、量（添加剤については必要性）
- ・ 法的要求事項（対象元素とその濃度の基準値）
- ・ 技術的な要求事項（強度、溶出量、透水性、養生時間等）
- ・ 安定化後のモニタリングの考え方（期間、項目、終了するための基準）及び結果
- ・ 圧密工法との比較の有無、あれば比較項目及び結果

5. まとめ

センターが進めている鉱山跡措置の考え方、進め方、具体的な内容等に反映することを目的として、IAEA が構築した環境修復に係る多国間ネットワークである ENVIRONET に平成 21 年から継続的に関与し、海外事例調査については平成 18 年から継続して行ってきた。

ENVIRONET については、継続的な関与により得られた情報・成果を再整理し、今後行うべき関与の検討に資するためのとりまとめを行った。

海外事例調査については、継続的な関与により得られた情報を再整理し、センター跡措置に反映できる情報及び今後追加取得する必要がある情報をとりまとめた。

とりまとめ結果は以下のとおりである。

5.1 IAEA ENVIRONET への関与

得られた情報・成果

これまでの Plenary Meeting 及び Steering Committee 会合出席により、会期内に参加者が行う報告からセンター跡措置に類似し反映できる情報を取得するとともに、事前に文献調査によりターゲットを絞っていた事例に係る情報を会議外で参加者へのヒアリングにより取得することができた。

また、センターが行っている鉱山跡措置の基本的考え方、進め方、具体的な方法等について報告を行った結果、環境修復に係る経験豊富な IAEA や出席者から意義や問題提起はなされず、先行事例や並行して行われている事例と比較して大きく考え方、目的、実施内容の異なるものではないと判断することができた。

あわせて、センターの跡措置は、自らの判断だけでなく ENVIRONET への継続的な関与により対外的な意見を反映しながら行っていることをステークホルダーに対し示すための材料を揃えることができた（具体的には、ENVIRONET のウェブサイトの説明資料等が公開されている等）。

なお、参加者からの情報取得はその後の海外事例の現地調査及び打合せにつなげることができたが、これは継続的関与を行うことで醸成された各国からの出席者との関係強化によるものである。

また、ENVIRONET の方向性がシフトするとともに、特定のトピックスに係るワーキンググループ等が設置され、センターにとっての今後の関与の必要性検討に資する情報も得た。

継続的な関与及びセンター跡措置に係る情報発信により IAEA が期待する ENVIRONET への貢献も同時に行うことができた。

今後は、現在の ENVIRONET の方向性、センターが鉱山跡措置に今後必要となる情報やその情報が取得できる可能性、そのために必要となる出席者の資質、ENVIRONET が有する課題、IAEA が期待する貢献、それに対応する場合の負荷、これまでの関与から得られた利点を考慮した上で、今後の関与の必要性、方法、程度について検討する必要がある。

5.2 海外事例調査（現地調査・打合せ及び文献調査）

センター跡措置に反映できる情報

これまでに行ってきた跡措置の基本的考え方、進め方、施設間の優先順位、具体的な方法等についての検討により抽出された課題に対し、またこれまでの方針を見直し最低限の維持管理は必要としたことも考慮し海外事例調査を行った。その結果、センター跡措置に反映できる情報を取得し、今後追加取得する必要がある情報を整理することができた。

このうち、すでに行った廃砂たい積場跡措置については、鉱さいが粗粒であり安定化が不要であること、覆土構造（材料、厚さ、構造等）、モニタリング（項目等）が妥当であったと評価できた。また、露天跡地において遮水壁等の効果が小さいと予測したことにも取得情報を反映できた。

これから行う廃泥たい積場跡措置については、鉱さいが細粒であり安定化が必要であると思われること、覆土構造やモニタリングは廃砂たい積場と同様な考えでよいこと、他施設も含めモニタリングについては結果を見つつエンド・ステートまでの負荷低減化や期間を定めていくこと、維持管理を低減化するためには事前に浸食の影響を評価しておく必要があることとの知見を取得情報から得ることができた。

項目毎の情報は以下のとおりである。

- ・ 湛水した細粒分が卓越する鉱さいの安定化方法

細粒分が卓越する場合にのみ脱水压密を行っており、細粒分が少なく解析により圧密沈下量がほとんどないと推定された廃砂たい積場において載荷盛土による脱水压密を行わなかったことが妥当であったと評価できた。

これに対し、海外では、湛水状態にあり地下水が流入する立地条件にある事例(Bois Noirs Limouzat 鉱さいたい積場)も含め細粒分が卓越する鉱さいたい積場においては覆土設置前に脱水压密による安定化を行っている、あるいは行うこととしている。また、全てのたい積場で湛水状態ではなく乾固状態を最終的な状態としている。これらのことから、廃泥たい積場においては覆土を設置するのであれば事前に脱水压密等による安定化が必要であるとの結論を得た。

- ・ 露天採掘場跡地からの浸出水対策

Lichtenberg 露天採掘場跡地において、維持管理低減化等の観点から露天跡地を捨石で埋め戻している事例があった。ここでは、捨石の化学組成の違いにより雨水・地下水の反応により発生する発生水の水質を推定し、埋め戻し後の発生水の処理負荷を低減化するため最適な埋め戻しについて検討している。これは現在センターで検討している露天跡地からの坑水に対する発生源対策に反映できる可能性があるが、具体的な情報は取得していない。

- ・ たい積場からの浸出水対策

Sillamäe 鉱さいたい積場において、浸出水量低減化及び水質改善のため地下水位を低下させることを目的として遮水壁及び透水壁を設置した事例があった。ここでは、地下水位を低下させ場外から流入する地下水と鉱さいの接触による溶出抑制に成功している。この情報はセンターに反映することができた。具体的には、露天跡地に地下水流入を抑制するための遮水壁を設置した場合の効果を評価するためのシミュレーションを行い、地下水位低下には大きな効果が得られないとの結果が得られた。

- ・ 覆土構造（材料、厚さ等）

センターの跡措置と同様な目的（線量、ラドン散逸量、雨水浸透量低減化）を有する覆土の事例が多くあり、材料、厚さ、構造等についての情報が得られた。材料については、長期安定性の観点から主に天然材料を用いており、雨水浸透量低減化のためのレイヤーに低透水性の粘土やベントナイトが用いられている。厚さについては、多少の違いはあるもののオーダーの違いはない。構造については、異なる目的を有する多層覆土を適用していること、浸透水の排水のため数%程度の勾配を持たせていること、最上位に浸食防止を目的とした植生層を有していることが共通している。これらは廃砂たい積場に設置した覆土と大きな違いはなく、目的に対し妥当な仕様であったとの結論を得た。

- ・ 跡措置後のモニタリング

跡措置後の鉱さいたい積場においては同様な項目についてのモニタリングが行われており、特に廃砂たい積場と同様な覆土を設置した Sillamäe 鉱さいたい積場においては項目、測定点数等の情報も得られた。いずれの鉱さいたい積場においても（Sillamäe 鉱さいたい積場は海に面しているため海洋汚染防止の観点があるという違いはあるものの）、項目及び目的に大きな違いはない。また、モニタリングの結果を見ながらエントストまでの負荷低減化や期間を定めていくとの観点もセンターと違いはなかった。

これらのことから、現在廃砂たい積場で行っているモニタリングは妥当であり、廃泥たい積場に覆土設置及びモニタリングを行うのであれば同様な考え方でよいと評価した。

- ・ 覆土の浸食対策及び発生後の維持管理

覆土を設置した鉱さいたい積場において浸食対策として多くの場合は表面に植栽がなされ、その後は植栽の浸食防止として草刈等の維持管理が継続されているとの情報が得られた。これに対して、植栽後の維持管理がなされず当初の機能が失われている事例に係る情報（Kowary 鉱さいたい積場）も得られた。あわせて、浸食が覆土に及ぼす影響を事前に評価しない場合、長期的には維持管理のコスト及び期間が長くなるとの結果が得られた（Pécs 鉱さいたい積場）。

これらのことから、覆土表面の浸食対策としては植栽で問題ないこと、また同時に維持管理の負荷を低減化するためには事前に浸食による影響を評価する必要があることを確認できた。また、情報は、今後のセンター跡措置における最適な浸食対策の仕様や想定される期間設定に反映できる。

- ・ 長期的維持管理

いずれの事例とも、上記のモニタリングや坑水処理を含め長期的維持管理が必要であるとはされているものの、項目、期間、終了させる基準、最終的に許容する内容等の制度的管理が十分整備されていない例がほとんどであった。しかしながら、近年 ENVIRONET でも長期的維持管理に係る問題としてエンド・スタートについて（事業休止後の維持管理、制度的管理を経てエンド・スタートに至るまでの実施すべき内容、責任の所在、期間の設定、終了とする考え方も含む）議論がなされ始めた（3.3.3 参照）。

これまでに、ENVIRONET で得られた情報をきっかけに、今後のセンターの鉱山跡措置に反映できる情報として、ウラン鉱山の事業開始前から制度的管理にいたるまでの上記項目を網羅したプログラムを策定し休止鉱山の管理を行っているカナダ国サスカチュワン州における情報¹³⁾に対し文献調査を行っている。詳細は現在取りまとめ中であるが、今後センター跡措置に活用できると思われる。

- ・ 跡措置後のサイト有効利用及びステークホルダー・インボルブメント

サイト有効利用については、各たい積場とも、跡措置が終了したものについては程度の差こそあれなされているが得られた情報は少ない。唯一、Bessines サイトについては大規模な有効利用がなされる計画であった。条件もセンターと類似しており、ある程度の情報は得られた。ステークホルダー・インボルブメントについては、センター跡措置に活用できる情報は得られていない。

今後取得すべき情報

センター跡措置に反映できる情報は先述のとおりであるが、詳細な内容、仕様、手順については比較できる情報が十分得られたとは言えない。特に、これらを決定するに至る考え方やプロセスについては今後のセンター跡措置の方向性を決定するにあたって参考となるにも係らず、多くを得ることができなかった。表 5.2-1 に、これらの一覧表を示す。

当方に参考とできる情報が十分取得できなかった理由としては、以下の理由が挙げられる。

- ・ 過去に科学的な根拠に基づくことなく経験的に決定された。
- ・ 先行する事例との横並びによる決定がなされた。
- ・ 現地調査を担当して頂いた方々より上位の決定事項であり、現地調査時には回答が得られなかった。
- ・ 現地調査を行う上での主目的ではなく、付随的に得られた情報である。

しかしながら、これらの情報の多くは、今後センター跡措置を進めていく上では必要であると思われる。今後は、IAEA ENVIRONET への今後の関与とあわせて、センター跡措置の進捗を見ながら必要性及び優先度をつけ、表 5.2-1 に示す情報を取得すべきであると考ええる。

表 5.2-1 今後取得すべき情報

項目	実施箇所
湛水した細粒分 が卓越する 鉱さいの安定化 方法	- 湛水状態のままではなく乾固状態を最終的な状態とする考え方 <u>C, R, Bo, Si, P</u> - 固結工法の検討の有無、ある場合圧密との比較項目・結果 <u>C, R, Bo, Si, P</u> - 安定化に伴い発生する水の処理期間や処理の可否検討結果 <u>C, R, Bo, Si, P</u> - たい積物の性状（化学組成、含水比等） <u>Sy</u> - 事前検討した固化材・添加剤の種類、量（添加剤については必要性） <u>Sy</u> - 法的要求事項（対象元素とその濃度の基準値） <u>Sy</u> - 技術的な要求事項（強度、溶出量、透水性、養生時間等） <u>Sy</u>
露天採掘場跡地 からの浸出水 対策	- 浸出水の水質のうち懸念された項目（pHのみか） <u>L</u> - 事前に調査した捨石の性状（硫化鉄の含有率のみか） <u>L</u> - フィールド試験の仕様（内容、期間等） <u>L</u> - 発生源と地下水の接触による溶出のメカニズム（解析結果） <u>L</u> - 埋め戻し及び覆土後の水量・水質の経時変化（モニタリング結果） <u>L</u>
たい積場からの 浸出水対策	- 遮水/透水壁が所定の期間において機能が期待できるとした根拠 <u>Si</u> - そのために行った材料・耐久性試験 <u>Si</u> - 設置後の水質の経時変化 <u>Si</u>
覆土構造(材料、 厚さ、構造等)	- 機能が期待できるとした期間とその設定根拠 <u>R, Bo, S, P, K</u>
跡措置後の モニタリング	- 終了までの期間及び中間評価までの期間、設定の考え方 <u>全て</u> - センターで行っていない項目の必要性 <u>Si</u> - モニタリング開始からの経時変化 <u>Si</u> - 実施者及びその決定根拠 <u>全て</u>
跡措置後の浸食 対策及び発生後 の維持管理	- （植栽を含む）複数の浸食対策方法の比較検討内容 <u>全て</u> - 植物種を選定するための事前の育成試験の必要性検討内容 <u>全て</u> - 上記試験を実施している場合、その仕様等 <u>全て</u> - 長期的維持管理を合わせた考え方 <u>全て</u> - 実施者及びその決定根拠 <u>全て</u>
長期的維持管理	- かん止堤耐震評価の考え方及び内容 <u>C, R, Bo, Si, P, K（特に Bo）</u> - かん止堤の健全性に係る維持管理の考え方及び内容 <u>C, R, Bo, Si, P, K（特に Bo）</u> - たい積物の流出に係る評価の有無、あれば考え方及び内容 <u>Bo</u> - 豪雨時の越流を許容するとした考え方 <u>Bo</u>
跡措置後のサイト 有効利用、 ステークホルダー・ インボルブメント	- ステークホルダー・インボルブメントにより意思決定した項目 <u>全て（特に L, Be）</u> - ステークホルダーの構成 <u>全て（特に L, Be）</u> - 意思決定における関与の程度 <u>全て（特に L, Be）</u> - 事業者とステークホルダーの双方に有益・効率的な情報共有方法 <u>全て（特に L, Be）</u>

L: Lichtenberg, C: Culmitzsch, R: Rožná K1, Bo: Bois Noirs Limouzat, Si: Sillamäe, P: Pécs, K: Kowary, Be: Bessines, Sy: Sydney Tar Pond, T: Trünzig

また、各国とも跡措置は関係法令に記載されている位置づけにもとづき行われていることから、関係法令に定められている鉱さいや捨石の位置付け（4.3における各たい積場の記載参照）及びそれに関連する項目・内容についても調査する必要がある。

なお、情報取得は必ずしも現地調査を前提とするものではない。3.5に示した IAEA ENVIRONET への継続的関与により強化した各国出席者との関係を利用して情報取得をすることも可能であると思われる。

また、追加で行う海外調査と並行して、国内の金属鉱山の先行事例や並行して行っている事例についても調査を行う必要がある。

基本計画¹⁾においては、休止した金属鉱山の鉱さいたい積場や捨石たい積場の跡措置事例を6件示している。これらのほとんどは覆土・植栽が施され、浸出水は処理したのち水質を基準値以下としたのち河川に放流している。ここで、鉱業活動を終了したのちに最終鉱業権者は環境負荷の軽減及び鉱害危害の防止の対策を講じた上で鉱業権を放棄することになるが、鉱山保安法では放棄後5年以内に産業保安監督部長が鉱害発生防止措置をとるよう命令することができること、また鉱業法では危害鉱害の発生により他人に損害を与えたときは最終鉱業権者が賠償責任を負うことがそれぞれ示されている。したがって、いずれの事例においても最終鉱業権者は維持管理の低減化のための努力はしているものの、維持管理は永続的であるとしている。

これについては、国内の休廃止鉱山の発生源対策・坑廃水処理についての、地方公共団体等へ鉱害防止に係る技術支援、技術開発、情報提供等を昭和48年から行っている現・（独）石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）も豊富なノウハウを有しており参考となる情報を得ることができる。これまでに同機構が開催する「鉱害環境情報交換会」に出席しセンターの跡措置に係る情報発信を行い広く意見を頂くとともに、センター跡措置に活用できる情報取得を行ってきた。

あわせて、センターと同様な問題を有しており対策を行ってきた休止金属鉱山との間でも情報交換を行ってきた（例えば、坑水処理については岩美^{いわみ}鉱山（鳥取県）、たい積場覆土については^{かしらるがねいだに}榎銀井谷^{やなはら}鉱山（岡山県）、覆土表面植栽については柵原^{さくはら}鉱山（岡山県）等）。これらはいずれも鉱山保安法の定める核原料物質鉱山ではないものの、休止鉱山であり長期的維持管理の低減化を目指している点ではセンターと共通しており、得られた情報は参考とできるものである。

ここで、上記の国内休廃止鉱山には核原料物質鉱山は含まれないことから、放射線防護の観点から別途調査を行う必要がある。

これに対しては、基本計画においても示されているとおり、IAEAの作成した関連する報告書や国際放射線防護委員会（ICRP）の勧告³¹⁾における考え方を考慮する。このうち、IAEAが作成した Safety Standards Series はその内容により上位から Fundamentals, Requirements, Guides の構成となっており、鉱山跡措置に係る報告書が含まれる（例えば、WS-G-1.2³²⁾、WS-G-3.1³³⁾、WS-G-5.1³⁴⁾）。また、ICRPの勧告は日本においても放射線防護方策の検討や実際の法制度の中でも尊重されている。

これらを用いて、放射線防護の観点のみならず、上記の国内の休廃止鉱山に対して行う調査の観点もあわせ、調査を行い情報取得を行う予定である。

参考文献

- 1) IAEA Network of Environmental Management and Remediation (ENVIRONET),
<https://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/WTS-Networks/ENVIRONET/overview.html> (参照：2016年5月26日)。
- 2) 核燃料サイクル開発機構 人形峠環境技術センター：人形峠環境技術センターにおける鉱山跡の措置に関する基本計画, JNC TN6410 2002-001, 2002, 208p.
- 3) IAEA : IAEA Networks hosted on CONNECT,
https://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/WTS-Networks/Networks_hosted_on_CONNECT.html (参照：2016年5月26日)。
- 4) Kunze, C. : DERES - Definition of Site End-States in Environmental Remediation Projects: Perspectives on Definition of ER Site End States, IAEA DERES Consultancy Meeting, Vienna, 2015.
- 5) Kunze, C. : Financial assurance for unknown post-closure liabilities, ENVIRONET Plenary Meeting and RER9121 Joint Meeting, 2014.
- 6) Schmidt, P., Barnekow, U., Walter, U., Wagner, F., Kunze, C. : Rehabilitation of U Mining & Milling Legacies in Mailuu Suu, Kyrgyzstan, Lessons Learned During Implementations of the Disaster Hazardous Mitigation Project DHPM, 2005-2012, ENVIRONET Plenary Meeting and UMREG Joint Meeting, 2012.
- 7) IAEA : Workshop on Stakeholder Involvement and Communication in Remediation Projects from 12 to 14 November, 2012 in Roskilde, Denmark,
<https://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/WTS-Networks/ENVIRONET/WkpStakeholder-Denmark2012.html> (参照：2016年5月26日)。
- 8) Metschies, T. : Strategic Considerations & Decision Making for Accident and Legacy Sites - the WISMUT Remediation Programme, ENVIRONET Plenary Meeting, 2013.
- 9) Crochon, P. : French U Mining Reclamation, ENVIRONET Plenary Meeting, 2010.
- 10) Trojáček, J. : Transfer of Know how and Technology at School of Uranium Production, ENVIRONET Plenary Meeting and UMREG Joint Meeting, 2012.
- 11) 荻住昇：新装版 樹木根系図説, 1987.
- 12) IAEA : Monitoring and Surveillance of Residues from the Mining and Milling of Uranium and Thorium, Safety Reports Series No.27, 2002.
- 13) Ministry of Energy and Resources, Canada : Institutional Control Program, Post Closure management of Decommissioned Mine/Mill Properties Located on Crown Land in Saskatchewan, 2009.
- 14) Darby, I., Alvarez, R.P. : InSITU: A Working Group within ENVIRONET, ENVIRONET Plenary Meeting, 2014.
- 15) Paul, M. : The WISMUT experience in remediation of Uranium Mining & Milling Legacies, IAEA Technical Meeting, 2007.

- 16) Wismut GmbH: ウェブサイト (Stabilisation of tailings management areas (TMA))
http://www.wismut.de/en/tailings_pond_remediation.php (参照 : 2016 年 5 月 26 日) .
- 17) Toman, F., Jež, J., Trojáček, J. Urban, P. : Current status of remediation progress at selected areas, DIAMO, S.E., 2012.
- 18) Blaszczyk, L. : Découverte de l' établissement, AREVA NC Bessines, 2010.
- 19) AREVA : Réaménagement du site des Bois Noirs Limouzat, Demande d' autorisation au titre de la Loi sur l' eau, Site de Saint-Priest-la-Prugne (42) (Version decembre 2012), 2012.
- 20) Jaaksoo, R., Siinmaa, A., Barnekow, U., Schmidt, P., Jakubick, A.T. : The Sillamäe legacy site: The problem, its remediation, present state and future tasks, ENVIRONET Plenary Meeting and UMREG Joint Meeting, 2012.
- 21) Mylona, E., Xenidis, A., Paspaliaris, I., Csöväri, M., Németh, G., Földing, G. : Implementation and Improvement of Closure and Restoration Plans for Disused Tailings Facilities, Sustainable Improvement in Safety of Tailings Facilities, TAILSAFE, 2004.
- 22) Németh, G., Várhegyi, A. : Introduction of the Uranium Remediation Works and the Environment Protection Centre of PURAM Ltd., 2014.
- 23) IAEA : An International Peer Review of the Long Term Care Programme of the Former Site of Uranium Production, Near Pecs, Hungary, Report of the IAEA International Review Team, 2011.
- 24) Görner, R., Hartsch, J., Koszela, J., Krzyskow, A., Machniewicz, B., Sennewald, R., Sowa, J. : Remediation of the Low-level Radioactive Waste Tailing Pond at Kowary, Poland, Final Report, 2001.
- 25) IAEA : Environmental Contamination from Uranium Production Facilities and their Remediation, Paper8, Remediation of the Low Level Radioactive Waste Tailings Pond in Kowary (Poland), Proceedings of an International Workshop, IAEA, 2004.
- 26) ÖKOSIL : Kaevude nr GMV19A, GMW19B veetasemete abs korguse mootmiste telemused, 2013.
- 27) Barnekow, U., Roscher, M., Merkel, G. : Final Covering and Diversion of Runoff from Wismut' s Uranium Tailings Ponds at Seelingstadt (Germany) - Status achieved from Concepts to Realization, Tailings and Mine Waste ' 11, 2011.
- 28) IAEA : Recent developments in uranium exploration, production and environmental issues, Re-contouring and Final Covering of Trünzig and Culmitzsch Tailing Ponds at Wismut, Proceedings of a technical meeting organized by the IAEA in cooperation with the OECD Nuclear Energy Agency and DIAMO State Owned Enterprise held in Straz, Czech Republic, IAEA-TECDOC-1463, pp.33-40, 2005.
- 29) Groupe d' expertise pluraliste : RAPPORT GEP, Mission complémentaire du groupe d' expertise pluraliste sur les sites miniers d' uranium, Presentation aux instances locales et evaluation de la mise en œuvre des recommandations por la gestion des anciens sites miniers d' uranium en France, 2013.

- 30) Sydney Tar Ponds Agency : Remediation of the tar ponds and coke ovens sites, Design and construction oversight services, Final Pilot Scale Report, 97918-TP6-REP-N-001-RB, 2009.
- 31) ICRP : The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP Publication 103), Annals of the ICRP, Vol.37, Nos.2-4, 2007.
- 32) IAEA : Management of Radioactive Waste from the Mining and Milling of Ores, Safety Guide No.WS-G-1.2, IAEA Safety Standards Series, 2002.
- 33) IAEA : Remediation Process for Areas Affected by Past Activities and Accidents, Safety Guide No.WS-G-3.1, IAEA Safety Standards Series, 2007.
- 34) IAEA : Release of Sites from Regulatory Control on Termination of Practices, Safety Guide No.WS-G-5.1, IAEA Safety Standards Series, 2006.

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
電表面電位	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
エルグ	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
フオット	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)
ミクロン	μ	1 μ =1 μm=10 ⁻⁶ m

