



北米地域のウラン廃棄物処分に関する調査

—米国ユタ州、テキサス州及びカナダ オンタリオ州における処分及び規制の現状—

Survey on Uranium Bearing Waste Disposal Facilities in North American Continent

長谷川 信 齋藤 龍郎 財津 知久 佐藤 和彦
坂井 章浩 麓 弘道

Makoto HASEGAWA, Tatsuo SAITO, Tomohisa ZAITSU, Kazuhiko SATO
Akihiro SAKAI and Hiromichi FUMOTO

バックエンド推進部門

Nuclear Cycle Backend Directorate

December 2013

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2013

北米地域のウラン廃棄物処分に関する調査
-米国ユタ州、テキサス州及びカナダ オンタリオ州における処分及び規制の現状-

日本原子力研究開発機構
バックエンド推進部門
長谷川 信、齋藤 龍郎
財津 知久⁺¹、佐藤 和彦⁺¹、坂井 章浩⁺²、麓 弘道*

(2013年10月8日受理)

ウラン廃棄物は、第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方（平成22年8月9日、原子力安全委員会決定）において、第二種廃棄物の埋設事業の処分対象外とされている。このため、国内においてウラン廃棄物に係る浅地中処分の制度化を検討する必要があるが、検討にあたっては、海外におけるウラン廃棄物処分の実績及び安全規制制度の情報を参考にすることが有効と考えられる。ウラン廃棄物の処分については各国とも時代とともに規制の考え方や事業が進展しており、既存の調査から得た情報の更新が必要である。さらに、劣化ウランの安全な浅地中処分のための米国連邦規則改定が進みつつあり、これに関連した最新の情報を収集して整理することが重要である。そのため、以下の4つの項目に注目し、米国とカナダにおけるウラン廃棄物の処分場や歴史的廃棄物(Historic waste)の処分実施主体及び規制機関を訪問し、施設調査及び聞き取り調査を行った。

①「米国連邦規則の改定」は、多量の劣化ウラン等の廃棄物の処分が必要となり、現行規制の中でどのように適合させるかの検討が行われたものである。超長期評価を要する廃棄物について1万年までの定量評価と1万年以降の定性評価という2段階アプローチを採用することが改定の主要な部分であった。この安全評価期間に係る技術的根拠と今後の改定スケジュールを入手した。②「ウラン廃棄物の安全評価」では、人間侵入シナリオにおける処分施設内ウランインベントリへの浸透水影響考慮に関して米国規制当局の認識を確認するとともに、米国におけるラドン放出に対するモニタリング及び工学バリアによる対処の実情と、ウラン廃棄物の規制免除基準及び処分状況を、実施主体及び規制当局に確認した。③「処分場設計」に関しては、ウラン廃棄物を他の廃棄物とともに処分する評価事例、ラドン及び浸透水を抑制するための多層のカバーシステムの仕様、廃棄物埋設深度等の情報を入手することができた。また、④「ステークホルダーとのかかわり方」に関しては、カナダ ポートホープ市でのウラン製錬及び転換などの歴史的廃棄物に関連する環境修復及び浅地中埋設の進め方について、処分ではなく管理として、「常時監視」という考え方を重視し、市民にも示していることを確認した。

原子力科学研究所（駐在）：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

+1 人形峠環境技術センター

+2 埋設事業推進センター

*一般社団法人 新金属協会（現 三菱原子燃料株式会社）

Survey on Uranium Bearing Waste Disposal Facilities in North American Continent

Makoto HASEGAWA, Tatsuo SAITO, Tomohisa ZAITSU⁺¹, Kazuhiko SATO⁺¹, Akihiro SAKAI⁺²
and Hiromichi FUMOTO*

Nuclear Cycle Backend Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 8, 2013)

Uranium bearing waste in Japan is not included in Category-2 radioactive waste (low level waste) disposal in NSCRG: F-RW-I.02 “Basic Guide for Safety Review of Category 2 Radioactive Waste Disposal” (published in August 2010, NSC Japan). This guide must be revised for the disposal of uranium bearing waste. Therefore, it is thought to be effective to refer to the proven strategies of the uranium waste disposal in overseas and the information on a safe regulatory system. Since regulations and enterprises in this field are progressing day by day, renewal of the existing information on disposal of the uranium bearing waste in each country is required. Furthermore, amendment of the U.S. federal regulation aiming at safety disposal of depleted uranium is in progress. It is important to collect and classify the latest information on the two above-mentioned points.

Therefore, paying attention to the following four items,

- (1) "amendment of the U.S. 10CFR61":
- (2) "Safety evaluation of uranium bearing waste":
- (3) "Disposal site design":
- (4) "Stakeholder involvement":

we visited the organization responsible for disposal and the regulatory agency of the disposal site for uranium bearing waste in the U.S.A. and Canada, and performed facility investigations and interviews.

Keywords: Uranium Bearing Waste, U.S.A, Canada, Radioactive Waste Disposal, Performance Assessment, Near Surface Disposal Facility

+1 Ningyo-toge Environmental Engineering Center

+2 Low-level Radioactive Wastes Disposal Project Center

* Japan Society of Newer Metals (currently, Mitsubishi Nuclear Fuel Co., Ltd.)

目 次

1. まえがき	1
2. 調査の目的	1
3. 調査団メンバー	1
4. 訪問先機関	1
5. 訪問先調査内容	4
5.1 カナダ（ポートホープ環境修復サイト及び関連機関）	4
5.1.1 概要	4
5.1.2 入手情報	4
5.1.3 まとめ	6
5.2 米国 Waste Control Specialists 社（WCS 社）処分場	10
5.2.1 概要	10
5.2.2 入手情報	10
5.2.3 まとめ	14
5.3 米国 テキサス州環境品質委員会（TCEQ）	18
5.3.1 概要	18
5.3.2 入手情報	18
5.3.3 まとめ	21
5.4 米国 Energy Solutions 社（ES 社）クライブ処分場	22
5.4.1 概要	22
5.4.2 入手情報	22
5.4.3 まとめ	25
5.5 米国 ユタ州環境品質局（UDEQ）	28
5.5.1 概要	28
5.5.2 入手情報	28
5.5.3 まとめ	31
5.6 米国 原子力規制委員会（NRC）	32
5.6.1 概要	32
5.6.2 入手情報	32
5.6.3 まとめ	34
6. 全体まとめ	36
謝辞	38
参考文献	39
付録 略語・用語集	41

Contents

1. Preface	1
2. Purpose	1
3. Member list	1
4. Date of visit, place and meeting participants	1
5. Review of the visit	4
5.1 Canada Port Hope Project Clean-up Sites (PHAI, AECL, CNSC and Cameco llc.)	4
5.1.1 Outline	4
5.1.2 Discussions	4
5.1.3 Conclusion	6
5.2 Texas Commercial Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility (Waste Control Specialists LLC.)	10
5.2.1 Outline	10
5.2.2 Discussions	10
5.2.3 Conclusion	14
5.3 Texas Commission on Environmental Quality (TCEQ)	18
5.3.1 Outline	18
5.3.2 Discussions	18
5.3.3 Conclusion	21
5.4 Utah Clive Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility (Energy Solutions Inc.)	22
5.4.1 Outline	22
5.4.2 Discussions	22
5.4.3 Conclusion	25
5.5 Utah Department of Environmental Quality (UDEQ)	28
5.5.1 Outline	28
5.5.2 Discussions	28
5.5.3 Conclusion	31
5.6 Nuclear Regulatory Commission (NRC)	32
5.6.1 Outline	32
5.6.2 Discussions	32
5.6.3 Conclusion	34
6. Summary of Survey Results	36
Acknowledgement	38
References	39
Appendix: Glossary	41

図リスト

図 4.1	北米調査行程図	3
図 5.1.1	ポートホーププロジェクトの概要	7
図 5.1.2	PHAI との打合せの出席者	7
図 5.1.3	環境修復対象場所（廃棄物の貯蔵場所及び汚染箇所）	8
図 5.1.4	長期廃棄物管理施設	8
図 5.1.5	長期廃棄物管理施設の構造（多層覆土及び底部ライナー）	9
図 5.1.6	Public Attitude Survey の結果	9
図 5.2.1	WCS サイトの処分場の配置図	15
図 5.2.2	処分場周辺の地質及び水理状態	16
図 5.2.3	CWF 処分施設の概念図	16
図 5.2.4	管理期間終了後の安全評価の概要	17
図 5.2.5	廃棄物層への浸透水量の計算モデルの概要	17
図 5.4.1	クライブ処分場の施設配置図	26
図 5.4.2	Class A West 施設のバリア構成	26
図 5.4.3	劣化ウラン廃棄物の安全評価の概要	27
図 5.4.4	処分場内での廃棄物の放射能の設定モデル	27
図 5.5.1	クライブに立地する劣化ウラン貯蔵庫	31

表リスト

表 5.2.1	LLRW 処分場の受入れ廃棄物量及び放射能レベル	15
---------	--------------------------	----

This is a blank page.

1. まえがき

米国、カナダにおけるウラン廃棄物の処分場や歴史的廃棄物に関連する環境修復実施地域を調査し、ウラン廃棄物の安全な処分及び環境修復のための安全評価、処分場設計及びステークホルダーとのかかわり方に関して処分実施主体及び規制機関と打合せを行った。

2. 調査の目的

今回の調査の主要目的は、米国、カナダにおけるウラン廃棄物の処分場や歴史的廃棄物に関連する環境修復実施地域を調査し、ウラン廃棄物の安全な処分及び環境修復のための安全評価、処分場設計及びステークホルダーとのかかわり方に関して情報を得ることである。

3. 調査団メンバー

独立行政法人	日本原子力研究開発機構
バックエンド推進部門	長谷川 信、齋藤 龍郎
人形峠環境技術センター	財津 知久、佐藤 和彦
埋設事業推進センター	坂井 章浩
ワシントン事務所	佐藤 一憲、櫛田 浩平
社団法人	新金属協会 麓 弘道

4. 訪問先機関

訪問先は、北米地区における歴史的廃棄物に関連する環境修復実施サイト及びウラン廃棄物の処分実績のある処分場を選定した。ウラン廃棄物に係る歴史的廃棄物に関連する環境修復サイトとしては、カナダのポートホープ環境修復サイトを訪問した。また、ウラン廃棄物処分場としては、米国における最も新しい低レベル放射性廃棄物（LLRW）処分場であり、処分場設計等に最新の規制を反映していることから Waste Control Specialists 社（WCS 社）処分場を訪問先とした。また、Energy Solutions 社（ES 社）クライブ処分場は、米国原子力規制委員会（NRC）が検討をすすめている劣化ウランの安全な処分のための米国連邦規則 10CFR part61^[1]改定について、検討開始理由の一つとなった劣化ウラン受入の一時停止（モラトリアム）が実施されていることから、情報入手のため訪問先とした。この他、ウランに係る法令改定含め、ウラン廃棄物処分規制の最新情報を得るために、法令改定実施中の NRC に加え、上記の訪問先処分場にライセンスを与えている規制当局であるテキサス州環境品質委員会（TCEQ）及びユタ州環境品質局（UDEQ）を訪問した。

訪問行程を図 4.1 及び参考資料 1-1 に示す。訪問先ごとの日時、場所、出席者は下記の通り。

(1) ポートホープにおける打合せ

日 時：2013 年 3 月 12 日（火）09:00～14:30

場 所：Port Hope Area Initiative (PHAI) 事務所（カナダ オンタリオ州ポートホープ市）

出席者：カナダ原子力安全委員会(CNSC)) Don Howard, Director, Milena Kostova
カナダ原子力公社(AECL)及び PHAI) Glenn Case, Director, Walter van Veen,
Director, Sandra Faught, Judy Herod, Sandy Holmes, Masato Ishiguro, Evelyn Wash,
Kathy Galbraith
Cameco 社) Bill Koch, Director, Tom Smith
原子力機構) 長谷川、財津、佐藤 (和)、坂井、齋藤、榎田
新金属協会) 麓

(2) Cameco 社における打合せ

日 時：2013 年 3 月 12 日 (火) 15:00～18:00
場 所：Cameco 社 Fuel Services Division Headquarters
(カナダ オンタリオ州ポートホープ市)

出席者：Cameco 社) Bill Koch, Director, Tom Smith
原子力機構) 長谷川、財津、佐藤 (和)、坂井、齋藤、榎田
新金属協会) 麓

(3) 米国 Waste Control Specialists 社(WCS 社)処分場における打合せ

日 時：2013 年 3 月 13 日 (水) 13:00～17:00
場 所：Waste Control Specialists 社処分場 (米国 テキサス州アンドリュース郡)
出席者：WCS 社) Scott Kirk (Vice President), Matthew Aubert (Radiation & Safety Training
Coordinator)

原子力機構) 長谷川、財津、佐藤 (和)、坂井、齋藤、榎田
新金属協会) 麓

(4) 米国テキサス州環境品質委員会(TCEQ) における打合せ

日 時：2013 年 3 月 15 日 (金) 14:00～16:00
場 所：テキサス州環境品質委員会会議室 (米国 テキサス州オースチン市)
出席者：TCEQ) Charles W. Maguire(Director), Brad Broussard (Technical Specialist, Health
Physicist), Tonya Baer (Assistant Director)

原子力機構) 長谷川、財津、佐藤 (和)、坂井、齋藤、榎田
新金属協会) 麓

(5) 米国 Energy Solutions 社(ES 社)クライブ処分場における打合せ

日 時：2013 年 3 月 18 日 (月) 10:30～15:30
場 所：クライブ処分場サイト (米国 ユタ州グランツビル市)
出席者：ES 社) Vern Rogers(Environment Manager), Curtis R. Kirk (Clive Facility QA Manager),
Tom Brown, Mike Lebaron (Green Planet Emissions & Environmental
Consultants 社副社長)

原子力機構) 財津、佐藤 (和)、坂井、齋藤、佐藤 (一)
新金属協会) 麓

(6) 米国 ユタ州環境品質局 (UDEQ) における打合せ

日 時 : 2013 年 3 月 19 日 (火) 15:00~17:00

場 所 : ユタ州環境品質局会議室 (米国 ユタ州ソルトレークシティ市)

出席者 : UDEQ) Rusty Lundberg (Director), Phillip R. Goble (Compliance Manager)

原子力機構) 財津、佐藤 (和)、坂井、齋藤、佐藤 (一)

新金属協会) 麓

(7) 米国 原子力規制委員会 (NRC) における打合せ

日 時 : 2013 年 3 月 21 日 (木) 14:00~16:00

場 所 : NRC 本部 (米国 ワシントン DC)

出席者 : NRC) Larry Camper (Director), Aby Mohseni (Deputy Director), Chris Mckenney

(Chief, PA Branch), Harry Felsher (Acting Chief, LLW Branch) , Mike Lee

(Sr. Project Manager), Kirk Foggie (Team Leader and Inter'l Relation Office)

原子力機構) 財津、佐藤 (和)、坂井、齋藤、佐藤 (一)

新金属協会) 麓



図 4.1 北米調査行程図

5. 訪問先調査内容

5.1 カナダ（ポートホープ環境修復サイト及び関連機関）

5.1.1 概要

カナダ、オンタリオ州ポートホープ市では、ウラン製錬及び転換などの事業により発生した歴史的廃棄物に関連する環境修復及び浅地中埋設が、地元自治体と関係当局により構成される Port Hope Area Initiative (PHAI) により進められている (図 5.1.1)。このポートホーププロジェクト^[2]における廃棄物管理方策について、調査を行った。なお、PHAI では、他に廃棄物管理施設の移設を含む Port Granby プロジェクト^[2]も実施しているが、今回の調査では割愛している。

打合せでは、規制機関のカナダ原子力規制委員会 (CNSC)、実施主体の PHAI が出席 (冒頭のみ、関連事業者の Cameco 社の担当者も同席) し、①原子力機構の概要説明、②PHAI によるプロジェクト説明、③CNSC によるプロジェクト許認可に係る規制側の対応の説明、④現場視察、⑤質疑応答の順で進められた (図 5.1.2)。Cameco 社の事業については、別途打合せが設定され、⑥事業概要及び原子力機構からの質問応答がなされた。

①については、原子力機構全体の活動内容、埋設センター及び人形峠センターの活動内容について説明した。②～⑤及び提供いただいた資料と併せ原子力機構からの質問に関連する情報を、次章の 5.1.2 入手情報の中で詳述する。

5.1.2 入手情報

(1) プロジェクトの概要

ポートホーププロジェクトにおける廃棄物管理 (浅地中埋設) は、処分ではなく、Waste Nuclear Substance License (5年ごとに更新) とし、500年の長期管理という形式を採用している。管理期間の決定は単なる技術的な検討結果ではなく、地域との議論によるものである。管理としては、「常時監視」という姿勢を市民に示すことが目的である。関連予算は、連邦政府から支出される (ポートホーププロジェクトの全体予算として、12.8億カナダドル)。プロジェクトは、Phase 1 (2001～2008年；環境影響評価及び許認可作業) 及び Phase 1A (2008～2012年；詳細設計及び経費見積もり) が終了し、Phase 2 (2012～2021年；建設及びクリーンアップ) が開始された。その後、Phase 3 (2021年～；長期管理) へ移行する。

(2) 廃棄物の管理施設

対象廃棄物は、低レベル放射性廃棄物の一つのカテゴリである歴史的廃棄物 (1985年以前に発生したもの) 約 120 万 m³ (図 5.1.3) であり、人工放射性核種は含まれていない。長期廃棄物管理施設 (Long-Term Waste Management Facility; LTWMF) は、「マウンド」と呼ばれる地表部構造を持つ施設で、13ha (敷地全体 15ha) の面積に 190 万 m³ の容量を有する (図 5.1.4)。

基本的な設備は、上部に多層覆土、底部に集水設備を伴うライナー、そして排水処理施設である。多層覆土及びライナーには高密度ポリエチレン (HDPE) 及び粘土を用い、10⁻⁹m/sec オーダの透水係数を有する (図 5.1.5)。廃棄物層は 3 つに区画され、その一つ

には有機物を含む廃棄物が埋設されるためベンチレーションシステムを導入している。

LTWMF の設計に係るガイドラインは、カナダ規格協会 (CSA)^[3]カナダ環境関連閣僚会議 (CCME)^[4]等 が発行している。

それぞれのセルの中での廃棄物の配置は、ラドン散逸及び人間侵入への防護を考慮し、上層に低濃度廃棄物 (汚染土壌)、下層に高濃度の廃棄物が定置される。

(3) 管理期間終了後の評価方法

安全評価としては、修復活動、LTWMF 等の建設工事、メンテナンス及びサーベイランスに係るものが基本的に行われる。500 年の管理期間は維持管理が行われることが前提であるが、確実に起こる (credible) 機能不全 (malfunction) シナリオ及び事故 (accident) シナリオが評価される。管理期間を超えた期間については、起こりうる環境変化を反映した地下水移行シナリオ、低頻度 (low-probability) の機能不全 (malfunction) 及び事故 (accident) を想定した人間侵入シナリオの評価が行われている。

地下水シナリオでは、降水量が増加した状態での(a)機能保持、(b)ドレンの劣化 (目詰まり)、(c)メンブレン (膜、通例遮水性を持つ) の劣化 (破壊) + ドレン機能の保持、(d)メンブレンの劣化 (破壊) + ドレンの劣化 (目詰まり) の 4 ケースで、重要化学種 (ウラン及び Ra-226 を含む) について地下水浸透による核種の溶出及び移行を一次元計算している。計算式では、ソースタームでは、対象元素の減少を考慮しているが、子孫核種の生成は考慮されていない (したがって、ラドンの評価は行われていない)。評価期間は、最大 5 千万年である。評価基準は、オンタリオ州の水質基準及び飲料水基準である*¹。

人間侵入シナリオは、(a)LTWMF の直上での居住、(b)工事、(c)廃棄物の掘り出しである。(a)及び(b)は意図しない侵入である一方、(c)は意図した侵入である。評価では、ガンマ線による直接被ばく及びラドンガスによる吸入被ばくを考慮している。ソースタームとしては、施設の機能が保全されていることを仮定して、放射性崩壊及び子孫核種の生成は考慮するものの、地下水浸透による対象元素の減少は考慮されない。評価期間は、カナダ政府規制政策 (Government of Canada regulatory policy) により、ピーク発生年代又は 1 万年まで*² となっているが、管理期間終了直後の 500 年後と最大放射能となる 8,000 年後の計算を行っている。比較基準としては、(a)及び(b)のシナリオに対しては、ICRP publ.77^[9]、81^[10]及び 82^[11]を引用し、介入レベルとして勧告されている 10~100mSv/年を参考としている。

(4) 利害関係者の関与

利害関係者関与の仕組みとして、以下の取り組みを行い住民とコンタクトして要望を確認している。

*1 : オンタリオ州のウランに係る水質基準^[5]及び飲料水基準^[6]は、それぞれ 5 μ g/L 及び 20 μ g/L である。

*2 : 現行のガイドライン「G-320 Assessing the Long Term Safety of Radioactive Waste Management^[7]」では、ピークが検出されるまでと規定されている。この妥当性については、Clarke (2000)^[8]を引用し、意図しない人間侵入に対しては、介入レベルを参照することが国際的に理解されているとしている。また、(c)のシナリオに対する評価基準は、ポートホーププロジェクトのライセンス基準であり、公衆への線量限度の 1mSv/年である。なお、覆土の設計に係るラドンの評価は、浅地中処分ガイドラインに沿った覆土の設計を行い、それによるソースタームからのラドン散逸率を評価する形で行われている。ラドン散逸率の設計は、バックグラウンドを基準としている。

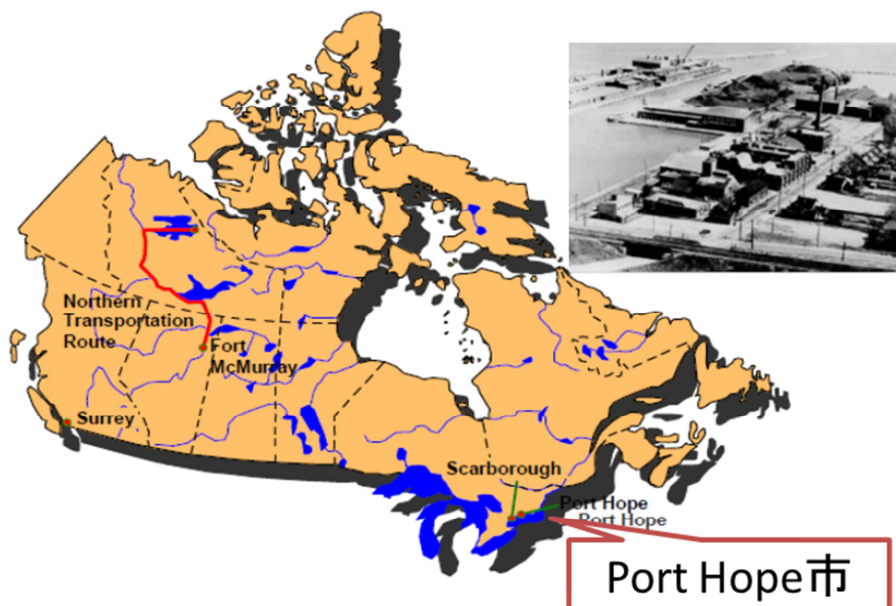
- ・ 情報提供：パンフレット配布、ニュースレターの発行（1～4回/年）、モニタリングレポートの発行、見学ツアー、説明会
- ・ 双方向コミュニケーション：戸別訪問、ワークショップの開催、Project Information Exchange の設置、環境影響評価やライセンス申請に係る公聴会や意見公募、Citizen Liaison Group（市民代表として各地区から選出）からの意見聴取
- ・ その他：地域の高校への講師派遣、居住空間の除染デモンストレーション、土地資産の売却及びリース価格が風評被害などにより下落した場合の損失を補償する補償システム制度化

プロジェクト評価として、市民に対する電話調査によるプロジェクトへの評価及び市民の関心事の調査（Public Attitude Survey; PAS^[12]）が行われている（文献[12]等参照）。2002年から開始され、これまで11回実施されており、PHAIの活動への注目及び廃棄物管理への信頼性が年々向上してきている（図5.1.6）。PASは同じポートホープ市でウラン転換事業を推進している Cameco 社においても行われており、市民の関心事は、放射性廃棄物ではなく、化学薬品（フッ素等）であることがわかっている。

5.1.3 まとめ

カナダ ポートホープ市では、ウラン製錬及び転換などの事業により発生した歴史的廃棄物に関連する環境修復及び浅地中埋設が進められている。浅地中埋設は、処分ではなく500年の長期管理という方式を採用、管理期間は技術的な検討ではなく地域との議論で決められている。管理としては、「常時監視」という姿勢を市民に示すことが目的である。

公衆とのコミュニケーションは、書類による情報提供の他、説明会、ワークショップ、市民連携委員会からの意見聴取、環境影響評価等の申請文書の意見公募等により行われており、市民アンケートによる受容性評価も行われ、常に住民とコンタクトして要望を確認している。



マンハッタン計画等により進められたウラン製錬及び転換等の事業により発生した廃棄物の環境修復及び浅地中埋設。自治体の主導により、カナダ原子力公社(AECL)などとともにイニシアティブを形成し、展開している。

図 5.1.1 ポートホーププロジェクトの概要
(PHAI プレゼンテーション資料より作成)



図 5.1.2 PHAI との打合せの出席者



図 5.1.3 環境修復対象場所（廃棄物の貯蔵場所及び汚染箇所）
（PHAI プレゼンテーション資料より作成）



図 5.1.4 長期廃棄物管理施設
（PHAI プレゼンテーション資料より作成）

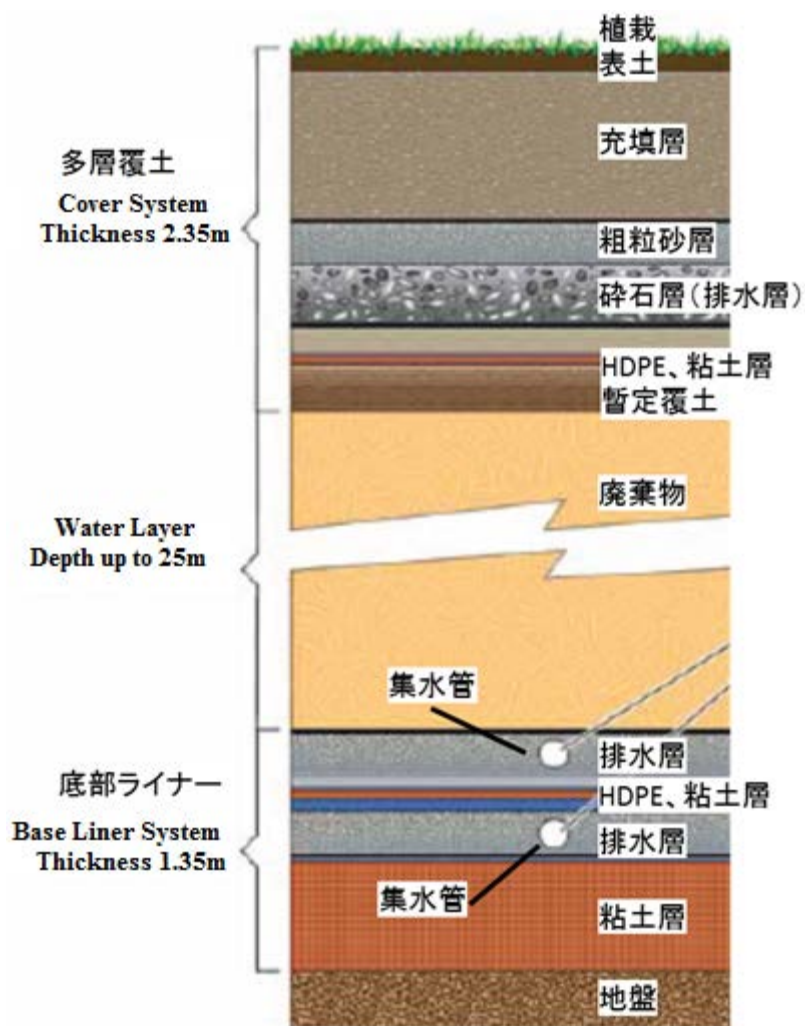


図 5.1.5 長期廃棄物管理施設の構造（多層覆土及び底部ライナー）
 (PHAI プレゼンテーション資料より作成)

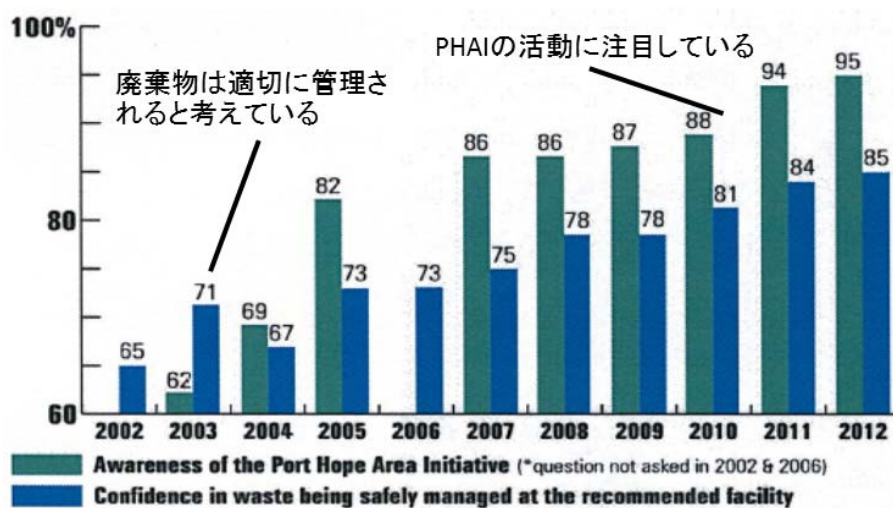


図 5.1.6 Public Attitude Survey の結果
 (PHAI プレゼンテーション資料より作成)

5.2. 米国 Waste Control Specialists 社 (WCS 社) 処分場

5.2.1 概要

Waste Control Specialists 社が運営する処分サイト (以下、「WCS 社処分場」という) は、テキサス州のニューメキシコ州境界付近に位置し、低レベル放射性廃棄物 (LLRW) 処分施設、ウラン鉱さい(米国では法令上 11.e(2)廃棄物と言われる^{※1}。)の処分施設、RCRA (資源保護回収法, Resource Conservation and Recovery Act^[13])で規制される有害物を含む廃棄物 (RCRA 廃棄物) の処分施設が設置されている。

今回は、WCS 社処分場でウラン廃棄物の埋設の実施状況、ウラン廃棄物の安全評価の方法、処分施設におけるウランに関連する管理方法についての調査を実施した。WCS 社処分場を訪問し、WCS 社の担当者から LLRW の処分施設の運転状況について、説明を受けた。その後、LLRW 及びウラン廃棄物の処分に着目した質疑応答を行った。その際、安全評価に関する質問については、ここ数年、WCS 社処分場の安全評価のコンサルタントを行っている Risk Assessment Cooperation の John. Till 氏 (参考資料 4-2-2 参照) に相談してほしいとの紹介を受けた。後日、Till 氏に E メールで連絡を取り、安全評価に関して質問し、E メールで回答を得た。以下に、調査結果について示す。事前に設定した質問事項に対する調査結果の詳細について、参考資料 3-2 に示す。

5.2.2 入手情報

(1) 施設の概要

図 5.2.1 に WCS 社処分場の配置図を示す。LLRW 処分施設は、テキサスコンパクトの放射性廃棄物を処分する CWF 施設 (Compact Waste Facility) と DOE の廃棄物を処分する FWF 施設 (Federal Waste Facility) がある。FWF 施設は、コンテナを用いない廃棄物を埋設する施設 (FWF-NCDU: Non-Canister Disposal Unit) とコンテナに入れた廃棄物を埋設する施設 (FWF-CDU: Canister Disposal Unit) に分かれて設置する計画であるが、現在、FWF 施設として 1 施設が建設されている。それぞれの処分場の受入れ放射能レベル、埋設物量を表 5.2.1 に示す。CWF 施設は 2012 年 4 月から操業が開始されている。FWF 施設は 2012 年 9 月から操業が開始できる状態であるが、廃棄物の受け入れはまだである。CWF 施設、FWF 施設では、Class B^{※2}、Class C^{※2} の廃棄物を積極的に受け入れる計画である。

ウラン廃棄物は、安全評価書^[14]によれば、CWF 施設では受け入れを想定する廃棄物に含まれていない。一方で、FWF-CDU 施設では、全体の廃棄物量約 69 万 m³ のうち劣化ウラン等で汚染された廃棄物が 1 万 m³ を占め、FWF-NCDU 施設では、全体の廃棄物量約 92 万 m³ のうち主にウランで汚染された廃棄物 (Fernald サイト等の環境汚染修復サイトからのもの) が約 50 万 m³ を占める放射能インベントリが想定されている。現行の許可書では、Class A^{※2} の α 核種の上限值である 10nCi/g (370 Bq/g) 以下の廃棄物が対象となっている。

※1 11.e(2)廃棄物：米国原子力法 (The Atomic Energy Act) 11e.(2)節に定義される、主として原料物質 (Source Material) からなる鉱石の処理からのウラン及びトリウムの抽出又は濃縮によって発生する鉱さいまたは廃棄物。

※2 Class A, B, C：10 CFR part61.55 における低レベル放射性廃棄物の廃棄物分類。

(2) 立地条件

処分場周辺の地質及び水理状態を図 5.2.2 に示す。処分施設を設置する深さの地層は、Red bed と呼ばれる低透水性の粘土層（透水係数は、 1×10^{-9} cm/s）で、不飽和層となっている。図 5.2.2 の 180 foot sandstone（地下約 55m）の層は途中で途切れているため、225 foot sandstone（地下約 69m）の層が、地下水を含む層で、安全評価における施設近傍の井戸水利用シナリオの条件として用いられ、また、地下水のモニタリングに利用されている。ただし、225 foot の層についても、透水係数が 1.0×10^{-8} cm/s と低いいため、地下水流速は 1.26×10^{-3} (m/y)（安全評価の条件）と小さく、実際に地域の生活に利用できるほどの地下水流量ではない。

(3) 施設の構造

LLRW 処分施設は、テキサス州の規則及び米国連邦規則 10CFR part 61 の廃棄物の処分施設の要件から、5m より深く設置するとともに、粘土層の中に処分施設全体を設置することとし、場所に応じて 25 feet（約 7.6m）から 45 feet（約 13.7m）の深さとするとしている。廃棄物層及び底部のライナー層の深度方向の厚さは、約 60feet（約 18.3m）であるため、処分施設底面から地下水層（225 foot 層）までの深さは、30m 以上となっている。

CWF 施設の概念図を図 5.2.3 に示す。処分施設は最終的に廃棄物層の上部に 3 層からなるカバーシステムを設置している。カバーシステムの機能は廃棄物層から近い順に以下の通り。

- ・ Performance Cover System : 雨水等による浸透水の浸入を抑制するカバー。圧縮した粘土混合土層（図の緑色の層）、砂や砂利の層による排水層（図の青い層）、鉄筋吹付けコンクリート層（図の灰色の層）で構成される。FWF 施設では、粘土層と排水層の間に高密度ポリエチレン（HDPE）の遮水ライナー層が設置される。
- ・ Biobarrier Cover System : 図の緑と灰色の縞模様の層は、丸石等から構成され、草の根や生物の侵入の防止、及び人の掘削時の発見に役立つカバーである。茶色い層は、周囲の粘土（red bed）を用いた層である。
- ・ Evapotranspiration Cover System : 風雨による侵食を抑え、長期の安定性を保つためのカバー。

CWF 及び FWF 施設ともに、廃棄物層の底部及び側部にも圧縮した粘土層、鉄筋吹付けコンクリート層が設置されている。ラドンガスの放出抑制に特に着目したバリアは設定していないが、線量評価においては、覆土の厚さ（計算条件は 9m）によるラドンの移行抑制を見込んでいる。

(4) 管理期間終了後の安全評価に関する情報

1) 管理期間終了後の安全評価の全体概要

埋設施設の安全評価は、操業中、管理期間中の作業員及び周辺公衆、管理期間終了後の侵入者及び周辺公衆、事故時の作業員と周辺公衆の評価が実施されている^[14]。そのうち、管理期間終了後の安全評価に関する全体概要は以下の通りである。安全評価

の概要を図 5.2.4 に示す。

侵入者の線量評価では、処分サイトで廃棄物層を掘削するボーリングを行う人（以下、「ボーリングシナリオ」という）と、ボーリングを行った後、処分サイトで生活する人（以下、「居住シナリオ」という）の 2 つのシナリオが評価されている。ボーリングシナリオでは、覆土を通過した放射性ガスの吸入（以下、「放射性ガス吸入経路」という）による被ばく線量とボーリング試料を埋めた場所からの外部被ばく（以下、「ボーリングによる外部被ばく経路」という）線量が合計されて評価されている。また、居住シナリオでは、図 5.2.4 に示すように、放射性ガス吸入経路、ボーリングによる外部被ばく経路、ボーリングにより設置した井戸の水を飲用及び井戸水を飼育水として利用し生産された畜産物（牛乳、肉）の摂取（以下、「井戸水経路」という）による被ばく線量が合計されて評価されている。

周辺公衆の線量評価では、放射性ガス吸入経路及び井戸水経路による被ばく線量が合計されて評価されている。周辺公衆の線量評価における放射性ガスの吸入被ばく線量と井戸水経路による被ばく線量は、居住シナリオと同じ評価結果を用いている。

一般公衆への線量基準は、テキサス州法で $250\mu\text{Sv/y}$ と定められており^[15]、WCS 社処分場における LLRW の処分施設については、侵入者の線量も、周辺公衆の線量についても、 $250\mu\text{Sv/y}$ を超えない評価であることが確認されている。

また、テキサス州法では、地下水シナリオの評価期間が、最小 1000 年、または動きやすい長半減期核種からの最大線量が現れる期間までとなっている^[15]ため、地下水シナリオに相当する井戸水経路では 10 万年を評価期間として実施し、線量が最大となる時期は 36,000 年後で、最大線量は $34\mu\text{Sv/y}$ であることを確認している。

なお、ボーリングシナリオでは、放射性ガス吸入経路とボーリングによる外部被ばく経路の 2 経路の合計線量、居住シナリオでは、放射性ガス吸入経路とボーリングによる外部被ばく経路及び井戸水経路の 3 経路の合計線量が評価されているが、経路毎の線量の最大値を合計しており、経路毎の最大線量が発生する年代のずれを考慮していない。具体的には、放射性ガス吸入経路とボーリングによる外部被ばく経路における管理期間終了直後に相当する 100 年後の線量と、井戸水経路において線量が最大となる 36,000 年後の線量を合計する評価となっている。

2) ウラン廃棄物に着目した管理期間終了後の安全評価方法

上記の管理期間終了後の安全評価において、ウラン廃棄物の特徴（長期間における子孫核種の生成、放射能の増加及びラドンガスによる被ばく）に着目した評価方法の調査結果を以下に示す。

① ウラン廃棄物と他の LLRW の取扱い

ウラン廃棄物と他の LLRW は、地下水シナリオに相当する井戸水経路の評価では区別されていない。跡地利用シナリオに相当するボーリングシナリオと居住シナリオにおけるボーリングによる外部被ばく経路の評価では、ウランだけでなく他の放射性核種も含め、発生施設を考慮したインベントリに基づく各放射性廃棄物の評価が行われている。したがって、ウラン廃棄物だけが特別に扱われていない。

② 処分場の放射能のモデル化

井戸水経路の評価では処分場内の放射能は均一として評価している。ボーリングによる外部被ばく経路では放射性廃棄物の発生施設区分毎の平均放射能濃度による評価を実施し、各施設区分の評価結果の中で最も高い値を評価結果としている。

③ 子孫核種のビルドアップ

ボーリングによる外部被ばく経路では、ウランの子孫核種は Th-234 と Pa-234m が考慮されている。井戸水経路では、全部の子孫核種が計算されるが、線量の値は現れていない。ボーリングによる外部被ばく経路と井戸水経路で対象とする子孫核種が異なっているのは、評価期間の違いによるものと想定される。放射性ガス吸入経路では、ウランからのラドンは評価されておらず、埋設初期から含まれるラジウムからのラドンを評価されている。

④ 侵入者の線量評価における浸透水による処分施設内の放射能の減少の考慮

安全評価書の線量評価では上記の放射能減少は考慮されていない。ただし、テキサス州環境品質局（TCEQ、5.3 節参照）からは、劣化ウランのような長半減期核種の評価においては、考慮することが考えられるとのコメントがあった。

⑤ ラドンの評価

ラジウムからのラドンによる線量は、放射性ガス吸入経路において、他の放射性ガスとなる核種からの線量と合計し、線量基準値以下であることが確認されている。その線量評価において、覆土厚さ（9m）を通過する際の減衰が考慮されており、処分場を掘り返した掘削土等から直接的に吸入被ばくする経路は計算されていない^[14]。

⑥ 覆土の侵食、気候変化やカバーの劣化など

井戸水経路の評価における感度解析において、気候変化（浸透水量変化）、土壌、粘土の透水係数変化、侵食を想定している。侵食量は 0.012mm/y が想定されている。また、浸透水量の計算において、コンクリート、遮水シートは計算条件から外し、粘土層、砂層の重ね合わせによって計算されている。図 5.2.5 に廃棄物層への浸透水量の計算モデルの概要を示す。

(5) 施設管理に関する情報

ウラン廃棄物に着目した管理について、以下の項目に着目し入手情報を整理した。

1) 処分施設内のウランの放射能濃度の管理

ウラン廃棄物と他の施設からの廃棄物を埋設する場合、施設内ウラン濃度の偏りによるラドンの生成量の偏り等が懸案事項となることが考えられるが、LLRW の処分施設では、施設内の放射能濃度の平均化を図るような廃棄物の配置管理は行っていないとのことであった。線量の高い廃棄物が多いので、取扱時間を短くするため受入れた順に定置している。

2) ウラン、ラドンに関するモニタリング

260 本を超える井戸から 4 半期に 1 回サンプリング分析を行っている。通常時のモニタリングは全 α の測定であり、全 α の線量値が制限値を超えた場合にウラン、Am、Th の分析が行われるとモニタリング計画書^[14]に記載されている。

敷地内におけるラドンのモニタリングは実施しているが検出はされていない。

3) 管理期間

管理期間は、LLRW 処分場とウラン鉱さい処分場で 100 年、RCRA 処分場で 30 年である。テキサス州環境品質委員会（TCEQ）が土地を所有するが、制度的管理を TCEQ が自ら行うとは限らず、第 3 者に任せる可能性もあるとの意見であった。

5.2.3 まとめ

操業が開始したばかりで、ウラン廃棄物の FWF 施設での処分についてはまだ始まっていない現状であるが、安全評価の内容については、聞き取り及び安全評価書によって情報を得ることができた。

調査の結果、侵入者の線量評価は、長期における線量評価を実施しておらず、したがって、ウランの子孫核種のビルドアップは上位 2 核種までしか考慮されていなかった。また、浸透水による放射性物質の処分施設外への移行による施設内の放射能濃度の変化は考慮されていないことがわかった。

ラドンについては、ウランからの生成ではなく、初期インベントリに含まれるラジウムからの生成による被ばくを評価している。ただし、覆土が十分に存在する状態での評価であり、線量の評価結果は大きくなっていないことがわかった。

表 5.2.1 LLRW 処分場の受入れ廃棄物量及び放射能レベル

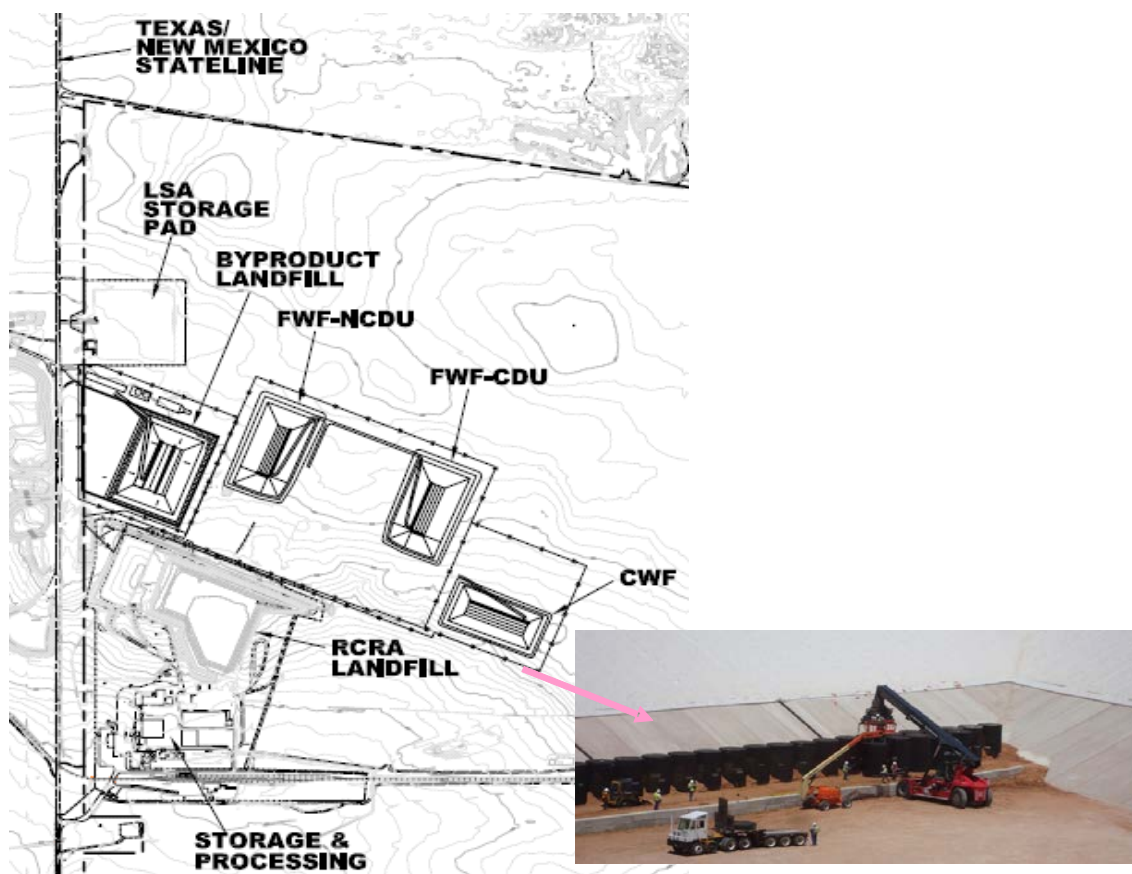
	対象廃棄物	放射能レベル	埋設廃棄物体積 ^{*2} (m ³)	埋設放射能 ^{*2} (Bq)	U-238の想定 濃度 ^{*3} (Bq/g)
CWF	Texas Compact ^{*1} の廃棄物を処分	Class A, B, C	6.5E+04	1.4E+17	0.06
FWF	DOEの廃棄物を処分	Class A, B, C	7.4E+05	2.1E+17	
FWF-CDU (コンテナ)			2.3E+05	2.0E+17	800
FWF-NCDU (コンテナなし)		Class A	*4	*4	80

*1: Texas Compact テキサス州とバーモント州の州間協定(略語・用語集参照)

*2: 許可書に記載されている量

*3: 安全評価書に記載されている放射能と重量から算出した平均放射能濃度

*4: 許可書に明記されていない



※Byproduct Landfill : 副生成物(ウラン鉱山等から発生する廃棄物)浅地中処分場
RCRA(Resource Conservation and Recovery Act) Landfill

: 有害廃棄物等の処分場(規制免除された放射性物質を含む、略語・用語集参照)

図5.2.1 WCSサイトの処分場の配置図

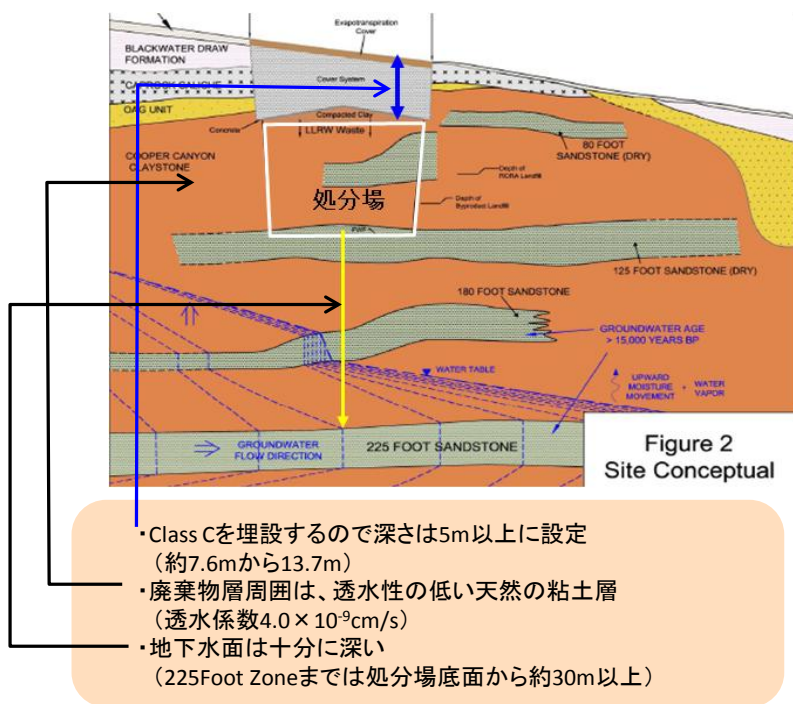
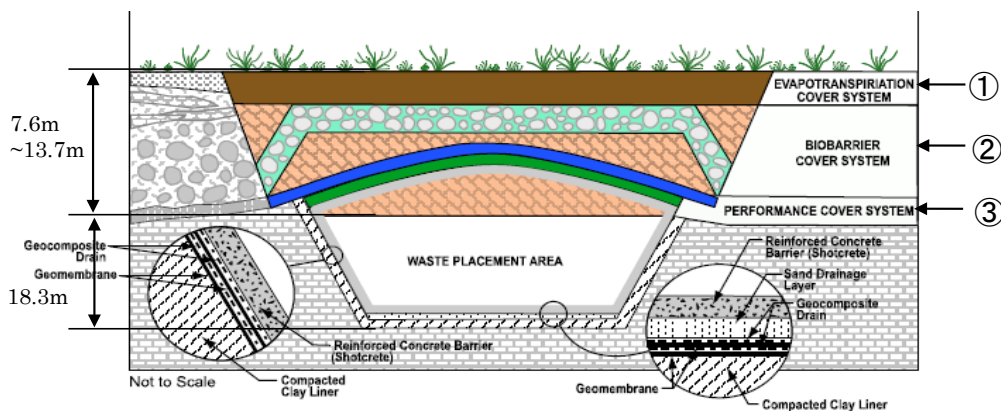


図5.2.2 処分場周辺の地質及び水理状態



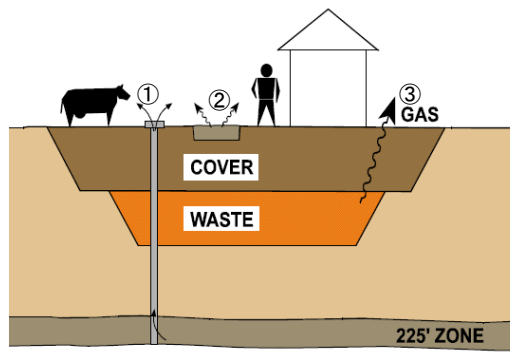
埋設施設は多層のカバーシステムを設置

- ① 地形の侵食を抑制するカバーシステム
- ② 生物、草の根の侵入の抑制や掘削時の発見に役立つカバー
- ③ 浸透水の浸入及び浸出を抑制するカバーシステム

鉄筋コンクリート層
低透水性粘土層
遮水シート層
排水層(砂層)

ラドンに特定したバリアは設定していないが、評価においては、覆土の厚さ(計算条件は9m)によるラドンの移行抑制を見込んでいる

図5.2.3 CWF処分施設の概念図



居住シナリオの被ばく経路の概要

- ① 井戸をボーリングし、地下水を飼育水として生育した畜産物の摂取及び地下水の飲用
- ② 井戸をボーリングした際の廃棄物層を掘った土からの外部被ばく
- ③ 覆土を通過したガスの吸入

● 評価の概要

操業中、管理期間中、管理期間終了後の線量を評価している。

・線量基準 作業員: 50mSv/y、一般公衆: 250μSv/y

・主要な評価経路 地下水シナリオ(井戸水利用)
ガス吸入シナリオ
人間侵入シナリオ

・評価期間 地下水シナリオについては、10万年。

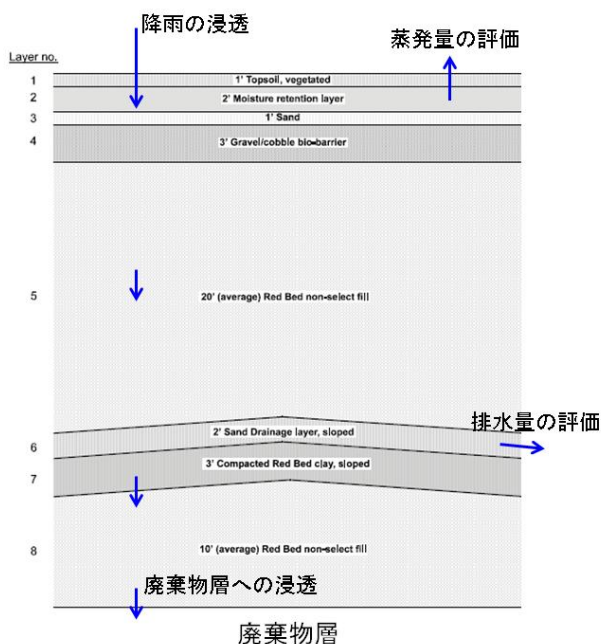
(最大線量は、36000年)

ガス吸入シナリオ、人間侵入シナリオについては100年後(管理期間終了時)における評価。

※ テキサス州規則では、最小1000年、または動きやすい長半減期核種からの最大線量が現れる期間となっているため、地下水シナリオでは10万年としている。

・評価結果 地下水シナリオ 34μSv/y (36,000年 FWF-NCDU Tc-99)
人間侵入シナリオ 67μSv/y (管理期間(100年)終了後、CWF)

図5.2.4 管理期間終了後の安全評価の概要



・多層に重ね合わせたバリア層による浸透水量の低減効果を計算し、放射性物質の移行評価に使用

・WCS、クライブともに同じコードで評価を実施

The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model

・WCSでは、コンクリート、遮水シートなど人工的なバリアを除外(クライブでは、コンクリート層、遮水シート層は設置されていない。)

図5.2.5 廃棄物層への浸透水量の計算モデルの概要

5.3 米国 テキサス州環境品質委員会 (TCEQ)

5.3.1 概要

テキサス州は NRC との合意に基づき、州の放射性物質に関する許可の責任を州で持つ Agreement State である。従って、米国連邦規則 10CFR part61 が改定されると、それに従いテキサス州政府の放射性物質に関する州規則も改定されることになる。

前節 5.2 で取り上げた WCS 社処分場に許可を与えた TCEQ を訪問し、ウラン廃棄物処分場の規制当局としての規制について、安全評価方法を中心に質疑を行った。

TCEQ は 2007 年にそれまで規制を担当していた TDSHS (Texas Department of State Health Services) から民間放射性廃棄物の処理処分に関する規制と許認可権限を引き継いで発足した^[16]。WCS 社処分場の規制は、廃棄物室 放射性物質課 (Office of Waste Radioactive Material Division) が所掌している。

TCEQ 放射性物質課は①ウラン鉱物、②ウラン鉱さい、③低レベル放射性廃棄物(LLRW)、④NORM、⑤連邦政府活動からの放射性廃棄物といった放射性物質の貯蔵、処理、処分に関する設備の許可を担当する。

5.3.2 入手情報

(1) テキサス州における浅地中埋設処分場規制

テキサス州規則 30TAC336 Subchapter H^[15]と現地での質疑応答により、テキサス州における浅地中埋設処分場の規制を示す。

1) 処分可能な廃棄物の規定

LLRW 及びウラン鉱物・鉱さい等の処分が可能であるが、Class C を超える廃棄物は処分しないこととする規定がある。

廃棄物は、廃棄物の種類(RCRA、ウラン鉱さい、LLRW (CWF、FWF))毎に独立に処分施設を設置している。これは州法における規制法令が分けられているからであるとの回答があった。

2) 制度的管理の規定

制度的管理の期間の規定は、ウラン鉱さい、LLRW は 100 年までとされるが規制除外された RCRA は 30 年である。モニタリングについては (3) モニタリング、処分場閉鎖後の管理に示す。

3) 処分場のバリア性能規定

処分場バリア性能の規定は、カバー厚さは最低 5m、または最小 500 年間の意図しない侵入者保護性能を求めている。

ラドンに関する基準について現地で確認したところ、ラドン固有の基準があるのはウラン鉱さいの処分場のみ。地表からのラドンフラックスが $20\text{pCi/m}^2/\text{sec}$ で規制されている。RCRA 処分施設、LLRW 処分施設にはラドン独自の基準はないが、核種を問わず施設全体からの公衆被ばくは $250\mu\text{Sv/年}$ を超えてはならないとの回答があった。

また、「公衆被ばく防護基準 $250\mu\text{Sv/年}$ にラドン被ばくは含まれるか」との質問については、年間 $250\mu\text{Sv/年}$ を維持しているとの回答があった。

有害物としてのウランの規制について質問したところ、RCRA 施設の地下水ウラン濃度に対して適用されていることが分かった。基準値は飲料水基準ではなく、テキサス州で基準を定めているとの回答があった。

4) 安全評価時の経路の規定

安全評価に必要とされる評価経路はテキサス州規則で規定されており、大気、土壌、地下水/地表水、植物による吸い上げ、動物による穿孔を考慮し、閉鎖後、浸食や雨水侵入を考慮しても継続する能動的管理が必要でないことを示すこととされている。

5) 安全評価期間の規定

安全評価期間の現行のテキサス州規則における規定は 1,000 年もしくはピーク発生時のいずれか長い方とされる。WCS 社による安全評価^[14]では評価期間として 10 万年までとしているため、これについてのコメントを TCEQ に求めたところ、WCS 社処分場では、ピークが 16,000 年位に出現することが確認されたことから(ピーク線量を与える核種はウランではない)住民への安心感を考慮して評価期間を 10 万年としたとのコメントがあった。この他の安全評価に関する入手情報は (2) 安全評価に示す。

(2) 安全評価

安全評価の考え方として、TCEQ からの情報を以下に示す。

1) 評価データ・手法・シナリオ

① ウラン核種の移行

ウラン核種の移行で評価すべき事項について TCEQ のコメントを求めた。ウランが移行し易いかどうかは化学形に依存する。また、pH 条件により大きく変わる。現在 WCS 社にはこれらを考慮した評価を TCEQ は求めているとのことであった。また、浸透水によるサイト内ウランの経年減少については、今後の劣化ウラン埋設の許可申請書における事業者の安全評価書では考慮されることを TCEQ としては想定しているとのことであった。

② WCS 社処分場のピーク線量を与える核種

WCS 社処分場のピーク線量を与える核種については、Tc-99 等が設定されている。この Tc-99 の発生源を質問したところ、回収ウラン起源に限定される訳ではなく、原子炉水の浄水システムのレジン等からも検出されるとのことであった。

③ 人間侵入シナリオ

人間侵入シナリオで評価すべき事項について質問したところ、NRC の指針に従い、人間侵入シナリオを以下のシナリオで評価することが推奨されるとの回答であった。

- ・ 掘削者は廃棄物から放射性物質を漏れいさせる。
- ・ 居住農耕者は家畜を飼って作物を収穫する。

④ 覆土の浸食

覆土の浸食について安全規制上の取扱いを質問した。TCEQ によれば、事業者は覆土の浸食をモデル化しようとしたが不確実性が大きすぎて断念し、代替策として浸入する水量を増大させることで覆土劣化を表現することを選んだとの回答があった。

⑤ 長期評価における不確実性

長期評価における不確実性の規制上の取扱い事例を質問した。TCEQ からの回答によれば、不確実性を考慮してモンテカルロシミュレーションを実施している申請例があり、評価基準はパラメータ範囲を設定して 95%で 100 μ Sv/年未満であれば許容される。詳細は NUREG-1573^[17]に記載されている。

⑥ 長期評価における気候変動

長期にわたる安全評価での気候変動の取扱いについて質問した。TCEQ によれば、既存の申請で気候変動は評価時に考慮されており、現在の降水量 20 インチ/年を将来予測では 2 倍にする形で取り扱われていると回答があった。

⑦ 評価期間の決定手順

評価期間をどのように決めるべきか、その考え方を TCEQ に質問した。TCEQ のコメントは以下の通り。

- ・ 劣化ウランのようにピーク発生が数百万年後になるような処分の安全評価では、評価期間は政策的または経済的な観点から定められなければならない。不確実性が非常に大きいからである。
- ・ 評価期間に関する議論は公聴会記録^[16]として Web に公開されている。

(3) モニタリング、処分場閉鎖後の管理

モニタリング、処分場閉鎖後の管理方法に係る下記の項目について情報収集を行った。

1) ラドンモニタリング実施の有無

ラドンモニタリングは実施されているが、ラドンの基準は (1) 3)項のバリア性能に関して述べた通りウラン鉱さいにのみ定められている。特に RCRA 処分施設では線量に関して規制免除されているため、制度上のラドンモニタリング要求はない。事業者は予備的にラドン測定をしている。

2) 地下水モニタリングの実施項目

地下水モニタリングの実施項目は、全 β 、全 γ 、ウラン濃度である。

3) 制度的管理期間

施設ごとに規定する法規と年数が異なる。RCRA で 30 年間、ウラン鉱さいと LLRW 処分場は 100 年間である。

4) 管理期間終了後の制度的管理主体

TCEQ が管理することが規定されている。実施時には第三者に委託する可能性が高いと TCEQ では想定している。

(4) 劣化ウランに係る法令改定及び最近の動向

劣化ウラン処分に係る最近の動向として、下記の項目の情報収集を行った。

1) 米国連邦規則 10CFR part61 の改定に係る意見交換とテキサス州規則への反映

①NRC とテキサス州との意見交換

NRC と TCEQ は米国連邦規則 10CFR part61 の改定案に関して意見交換をしており、改定案についてもテキサス州からコメントを出す等の寄与をしていた。

②テキサス州規則への改定反映

テキサス州は、5.3.1 でも述べた NRC から廃棄物埋設の許可権限を委託されている Agreement State であるため連邦規制と州規制が適合している必要がある。このため連邦規制に合わせて州規制を改定するが、要求される適合の度合いは廃棄物の種類により一様ではない。今後 NRC の改定結果に従って TCEQ は米国連邦規則 10CFR part61 が改定後 3 年以内に州の規制を適合させる計画であった。

2) 劣化ウラン受入の可能性

テキサス州での今後の劣化ウラン受入の可能性について質問した。TCEQ によれば、WCS 社の処分場から 20 マイル離れた場所で UF₆ を酸化物に再転換する施設の計画があり、劣化ウランを WCS 社が受け入れる可能性があるとの回答であった。なお、WCS 社処分場のすぐ近くに URENCO 社の濃縮工場がある。

5.3.3 まとめ

TCEQ を訪問し、ウラン廃棄物処分場の規制に関して、安全評価方法を中心に質疑を行い、安全評価期間の考え方、ラドン基準とモニタリング、劣化ウランに関する動向、ウランの化学毒性規制についての情報を得た。

安全評価期間の考え方としては、WCS 社処分場では、線量ピークが 16,000 年位に出現することが確認されたことから(ピーク線量を与える核種はウランではない)住民への安心感を考慮して評価期間を 10 万年としていた。ラドン基準とモニタリングに関する情報としては、RCRA と LLRW にラドンの基準はなく、ウラン鉱さいについてのみ基準が設定されている一方、処分施設では予備的にラドンがモニタリングされている状況が分かった。劣化ウランに関する動向としては、今後 WCS 社の廃棄物処分場で劣化ウランの処分が検討される可能性が高いことが分かった。また、ウランの化学毒性規制としては、ウランの化学毒性に関連して環境中のウラン濃度である地下水中のウラン濃度の規制は連邦の飲料水基準ではなく、テキサス州が独自に定める基準に従っていることが情報収集できた。

5.4 米国 Energy Solutions 社 (ES 社) クライブ処分場

5.4.1 概要

クライブ処分場は、ユタ州のソルトレークシティ市の西およそ 80mile に位置しており、Energy Solutions 社 (以下、「ES 社」という) により、運営されている。

クライブ処分場の見取り図を図 5.4.1 に示す。現在は、Class A の LLRW の処分場である Class A west 施設、ウラン鉱さい処分施設 (図中 “Byproduct”)、Mixed waste の処分施設が操業中であり、廃棄物の処理、保管施設も操業中である。

過去にはウラン鉱さいは VITRO 施設 (過去における VITRO Chemical Company 社に由来するミルテーリングの処分サイト) に埋設され、ウラン廃棄物は Class A 廃棄物として扱われ、他の廃棄物と一緒に処分されてきた。また、2009 年までの 4 キャンペーンで既に 20,000 本の劣化ウランがサバンナリバーサイトからクライブに持ち込まれていた。しかし、2009 年にサバンナリバーサイトから残りの 15,000 本の劣化ウランをクライブに持ち込もうとしたが住民の反対で実現できなかった[18]。その後、ガス拡散プラントの廃棄物も含めて 70 万トンの大量の劣化ウランで汚染された廃棄物 (以下、「劣化ウラン汚染廃棄物」という) をクライブ処分場で処分する計画が上がった。一方で、ウランの放射能濃度が長期間にわたって増加する等の問題から、劣化ウラン汚染廃棄物を単純に Class A とみなすべきでないという点が議論となり、2010 年 4 月にユタ州放射線管理委員会が劣化ウラン汚染廃棄物の処分の安全評価に関する規則 (R313-25-8) [19]を定め、それに従った安全評価が行われ、劣化ウラン汚染廃棄物の処分の安全性が確認されるまでの間、少量を除いて劣化ウラン汚染廃棄物を処分しないことが決められた (少量:劣化ウランの重量が 5wt%を超えないもの)。

これを受け、ES 社は、計画中の劣化ウラン汚染廃棄物を処分するため、Class A South 施設 (図 5.4.1 参照) において劣化ウラン汚染廃棄物の安全評価[20]を実施し、2011 年 6 月に取りまとめた。現在、ユタ州規制当局で安全評価のレビューが行われているところである。また、NRC も現在、劣化ウラン汚染廃棄物のような長半減期核種を含む廃棄物の安全評価の方法を検討するため、米国連邦規則 10CFR part61 の改定作業中であり、ユタ州においてもこの動向を踏まえることとなっている。

これらの状況を踏まえ、今回は、ES 社が実施した劣化ウラン汚染廃棄物の Class A South 施設における安全評価の内容を調査するとともに、これまでウラン廃棄物やウラン鉱さいの処分が実施されてきたことを踏まえ、処分施設のバリア機能、処分施設におけるウランに関連する管理方法についての調査を実施した。

ES 社及びクライブ処分場を訪問し、ES 社の担当者から LLRW の処分施設の運転状況について説明を受けた。その後、劣化ウラン汚染廃棄物の処分に係る安全評価、ウラン廃棄物の管理に着目した質疑応答を行った。以下に、調査結果について示す。事前に設定した質問事項に対する調査結果について、参考資料 3-4 に示す。

5.4.2 入手情報

(1) 施設の配置、規模

現在、Class A の LLRW の処分施設として操業中の Class A West 施設は、敷地面積 690m×780m、体積 $6.7 \times 10^6 \text{m}^3$ で、埋設最大放射能量は、 $7.4 \times 10^{14} \text{Bq}$ である。

上記に加えて図 5.4.1 に示すように、劣化ウラン汚染廃棄物を処分する施設として Class A

South 施設をウラン鉱さい処分施設（図 5.4.1 中 “Byproduct”）に近接した場所に計画していた。しかし、Class A South 施設とウラン鉱さい処分施設は最終的に覆土がつながった構造となる設計であり、Class A South 施設はユタ州の所有、ウラン鉱さい処分施設は DOE が所有する施設であるため、覆土後に施設の所有者が問題となることから、Class A West 施設で劣化ウラン汚染廃棄物を処分する計画に修正したとのことであった。

(2) 施設の構造

現在操業中の Class A West 施設は、地下数メートルから高さ最大 23m に設計された地表部構造を持つ施設であり、廃棄物層の底部、側部、上部に粘土層、砂利等の排水層の浸透水の抑制バリア、覆土の侵食を抑制する等の多層のバリアを備えている。図 5.4.2 に施設のバリア構成を示す。多層のバリアのうち、Environmental Protection Agency（米国環境保護庁、以下 EPA）のラドンの放出率の基準^[21] ($20\text{pCi/m}^2/\text{s} = 0.74\text{Bq/m}^2/\text{s}$ を超えないこと) に従うため、ラドンバリア（上下 2 層、合わせて厚さ 2 feet（約 0.6m））が設置されている。従前に設計された VITRO では、7 feet（2.1m）の厚さを必要としたが、現在の設計のバリア厚に改良されたとのことであった。

(3) 劣化ウラン汚染廃棄物処分に関する管理期間終了後の安全評価に関する情報

1) 管理期間終了後の安全評価の全体概要

ES 社は劣化ウラン汚染廃棄物処分のための安全評価を 2011 年 6 月に取りまとめた^[20]。安全評価の概要は以下の通りである。

受入れを想定する劣化ウラン汚染廃棄物は約 70 万トンで、サバンナリバーサイトからの UO_3 で汚染された廃棄物が 3.6 千トン、ガス拡散プラントからの廃棄物量が 68 万トン、ウランの平均放射能濃度が 1.2 万 Bq/g と評価されている。ウラン以外にも、Sr-90、Tc-99、I-129、Cs-137 の FP 核種、Ra-226 等のウランの子孫核種、Np-237、Pu-238、Pu-239、Pu-240、Pu-241、Am-241 の TRU 核種も評価されている。

管理期間終了後の線量評価が実施され、施設跡地において放牧をする作業員、レクリエーションで狩猟をする人、オフロードカーの運転をする人について、ダスト及び放射性ガスの吸入、獲物又は放牧した家畜（牛）の肉の摂取、外部被ばくが評価されている。また、現在の施設周辺の状況にしたがって、国道を利用する人やクライブ施設の南に位置する訓練施設の職員などの線量も評価されている。線量の評価期間は、ユタ州の安全評価に関する規則（R313-25-8）に従って 1 万年としており、線量基準は $250\mu\text{Sv/y}$ である。

地下水シナリオについては、線量で評価せず、ユタ州の地下水濃度基準を満足していることの評価が実施される。対象核種は、Sr-90、Tc-99、I-129、Th-230、Th-232、Np-237、U-233、U-234、U-235、U-236、U-238 であり、評価期間は 500 年である。

ユタ州の安全評価に関する規則では、線量評価期間の 1 万年以降、線量が最大となると想定されるまでの期間の定性的な評価を実施することとなっている。これに従い、安全評価では、線量ではなく湖水及び堆積物中の放射能濃度の評価をウランが放射平衡になる約 200 万年まで実施している。

評価は、各パラメータに分布を設定したモンテカルロシミュレーションを行い、線

量の評価結果の平均値、中央値、95%信頼区間の上限の値を算出し、線量基準または地下水濃度基準を満足することの確認を行っている。図 5.4.3 に安全評価モデルの主な概要を示す。

2) ウラン廃棄物に着目した管理期間終了後の安全評価方法

定量的な線量評価、地下水濃度評価におけるウラン廃棄物の特徴（長期間における子孫核種の生成、放射能の増加及びラドンガスによる被ばく）を考慮した評価方法の調査結果を以下にまとめる。

① ウラン廃棄物と他の LLRW の取扱い

直近の安全評価^[20]では劣化ウラン汚染廃棄物についてのみ評価を実施しているが、劣化ウランと LLRW で評価を分ける必要はないとのコメントが ES 社からあった。放射能濃度の低いウラン廃棄物の場合は一緒に埋設され、安全評価では、合計の線量で評価される。

② 処分場の放射能のモデル化

処分場内の深さを考慮し、埋設するエリアが設定されている。設定されたエリア内の放射能濃度は均一に設定されている。図 5.4.4 に処分施設内の廃棄物の放射能の設定モデルを示す。

③ 子孫核種のビルドアップ

ウラン (U-232, -233, -234, -235, -236, -238) の子孫核種 (Pb-210, Rn-222, Ra-226, -228, Ac-227, Th-228, -229, -230, -232, Pa-231) の生成が考慮されている。

④ 人間侵入シナリオにおける浸透水による処分施設内の放射能の減少考慮

直近の安全評価^[20]では、浸透水、空気、土壌への様々な移行を考慮することが記されているが、ソースタームの評価でそれぞれの物質への移行を一緒に計算しているか、別々に計算しているかは確認できなかった。

⑤ ラドンの評価

線量は、他のガス状核種と合計し、線量基準値以下であることを確認している。ただし、人間侵入シナリオでは、処分施設を掘り返すシナリオは想定されていない。ラドンバリア及び覆土の機能を評価に用いている。

⑥ 覆土の侵食、気候変化やカバーの劣化

覆土の侵食が起こらないケースと雨水の流れる水路が形成され、覆土が侵食されることを想定したケースの両方を想定して計算している。覆土の侵食を想定する場合、侵食形状を設定して計算しており、時間的な変化は想定していない。覆土の形状については、モンテカルロシミュレーションにより分布に従った様々な形状が設定されている。

定量的評価の期間内における気候変化、カバーの劣化などについては、時間的な変化ではなく、パラメータに分布幅を持たせたモンテカルロシミュレーションにより評価されている。

(4) 施設管理に関する情報

ウラン廃棄物の管理に着目した情報として、以下の情報を得た。

1) 処分施設内のウランの放射能濃度の管理

ウラン廃棄物と他の施設からの廃棄物を埋設する場合、施設内ウラン濃度の偏りによるラドンの生成量の偏り等が懸案事項となることが考えられるが、クライブ処分場では、放射能濃度を平均化するような廃棄物の定置管理は行っていないとのことであった。放射性物質に関して例えば Ra-226 の放射能濃度の高い廃棄物を深い場所に埋設するような、平均化を目的としない廃棄物性状による埋設深度管理は行っている。

2) ウラン、ラドンに関するモニタリング

ラドンのモニタリングは処分セルの上、敷地境界等で行っており（データでは3日に1度程度）、バックグラウンドレベルであることを確認している。地下水のモニタリングでは、全 α と全 β の測定を週2回実施し、核種ごとの放射能濃度測定（ウラン等）は年に1回実施しているとのことであった。

3) 制度的管理

制度的管理について、ES社は制度的管理期間中の資金の責任があり、処分サイトの管理はユタ州が方針を決めると考えられるとのことであった。VITROとウラン鉱さい処分施設はDOEが所有者であり、それら以外は、ユタ州が所有者である。

5.4.3 まとめ

大量の劣化ウラン汚染廃棄物の処分については、安全評価のレビューの最中であるが、その他のLLRW処分施設やウラン鉱さい処分施設は操業され、濃度の低いウラン廃棄物は処分が実施されている状況であった。

NRCにおける米国連邦規則10CFR part61の改定のドラフトにおいて、ウランのような長半減期核種の放射能濃度が10nCi/g(370 Bq/g)以上の廃棄物については、1万年以内の期間における線量評価と1万年以降は線量が最大となる期間を含む期間における定性的な評価を実施することが示されており、ES社が行っている線量評価と同様の方法である。このことから、ES社が行っている評価は、NRCの規則改定案に従っていると考えられる。

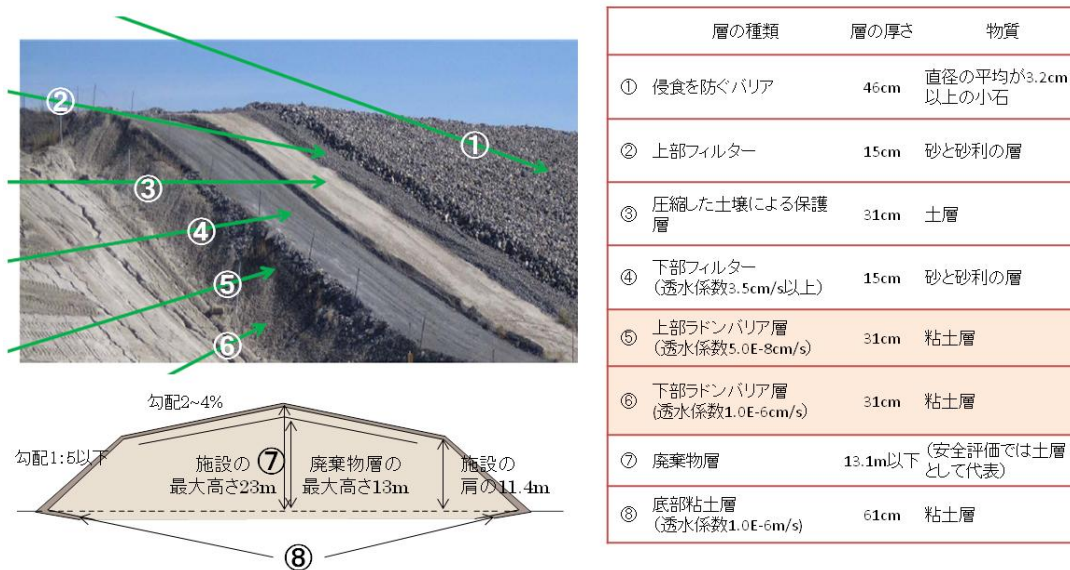
人間侵入の線量基準は250 μ Sv/yで、NRCで示された5mSv/yを使用していない。ただし、地下水が利用できない状況ではあるが、処分場を廃棄物層まで掘り返すシナリオは想定しておらず、覆土が存在する状態での線量評価となっている。覆土の透水性等の性能は、パラメータに分布を持たせたモンテカルロシミュレーションであるため、劣化した状態の評価は含まれている。

覆土の侵食については、時間的变化はなく、形状を想定した一定の状態であるが、形状をきめるパラメータに分布があるため、様々な形状を想定した評価となっている。

現在、ユタ州の規制当局で安全評価のレビュー中であり、また、NRCにおいて規則の改定も並行して行われていることから、今後の動向に注目しておくことが重要と考えられる。



図5.4.1 クライブ処分場の施設配置図



※ EPAのラドンの放出率の基準 (20pCi/m²s = 0.74Bq/m²s) に従うため、ラドンバリアを設置。
従前に設計されたVITROでは、7 feet (2.1m) の厚さを必要としたが、2 feet (0.6m) の厚さのバリアに改良された。

図5.4.2 Class A West施設のバリア構成

● 評価の概要

管理期間終了後の線量を評価している。

・線量基準: 一般公衆: 250 μ Sv/y

・線量評価: 土地利用シナリオ(牧場作業者、ハンター、オフロードカー運転者、畜産物摂取等)

・地下水中の放射能濃度評価 地下水シナリオ(井戸)

→ ユタ州では地下水中の放射能濃度の規制値が設定されているため

・評価期間 線量評価は1万年まで。

地下水濃度の評価は500年後まで

1万年以降は定性的評価(湖水、湖の堆積物濃度の評価)

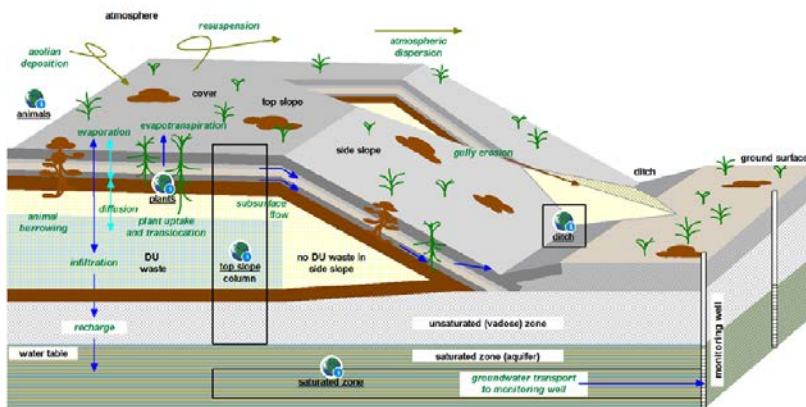


図5.4.3 劣化ウラン廃棄物の安全評価の概要

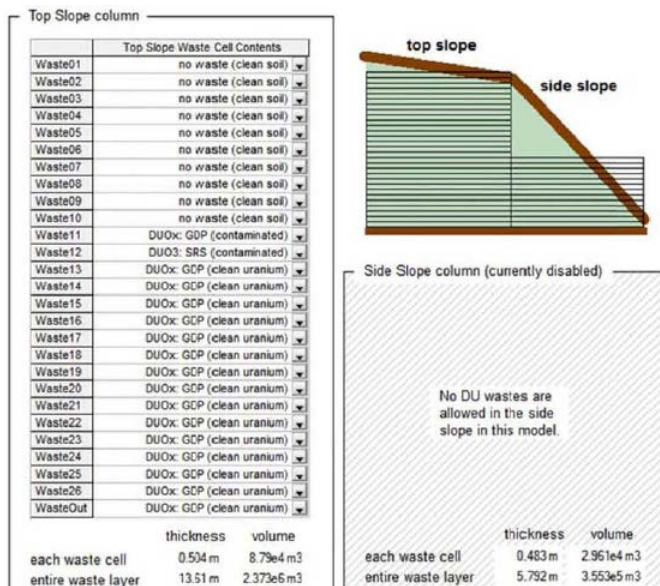


図5.4.4 処分場内での廃棄物の放射能の設定モデル

5.5 米国 ユタ州環境品質局 (UDEQ)

5.5.1 概要

ユタ州は NRC との合意に基づき、州の放射性物質に関する許可の責任を州で持つ Agreement State である。従って、米国連邦規則 10CFR part61 が改定されると、それに従い、ユタ州政府の放射性物質に関する州法も改定される。

前節 5.4 で取り上げた ES 社の処分場に許可を与えた UDEQ 放射線規制課(UDEQ-DRC, Division of Radiation Control)を訪問し、ウラン廃棄物処分場の規制当局としての規制について、安全評価方法を中心に質疑を行った。UDEQ の放射線規制課は放射性廃棄物処分の他、原子炉施設への立ち入り、医療放射線の管理も行っているが、環境有害物質については、UDEQ-DSHW (Division of Solid & Hazardous Waste)が担当し所掌を分けている。

5.5.2 入手情報

(1) ユタ州における浅地中埋設処分場規制

ユタ州規則 UAC R-313-025 と現地での質疑応答により、ユタ州における浅地中埋設処分場の規制を示す。

1) 処分可能な廃棄物の規定

Class A, B, C 以外の LLRW 廃棄物の処分は許可しないこととする規定があり、クライブ処分場には LLRW では Class A 廃棄物のみの処分が認められている。この他、ウラン鉱物・鉱さい、NORM 等の処分が可能である。廃棄物の種類毎に独立に処分施設を設置している。

廃棄物の種類により処分施設を分ける理由について現地で確認したところ、VITRO, ウラン鉱さい用の処分施設はユタ州の所有ではなく、連邦の廃棄物を取り扱っているため、混在しないように区画するとの回答があった。

2) 劣化ウランに関する規定

劣化ウラン受入に関する規定として、米国連邦規則 10CFR part61 の Class A 制限検討時に考慮されていなかった廃棄物 (劣化ウランはこれに該当) や、最大線量が公衆線量限度の 10%を超える廃棄物等については、受入前に安全評価を実施しなければならないことがユタ州規則に定められている。

3) 制度的管理の規定

制度的管理の期間の規定は 100 年までとされる。モニタリングについては (3) モニタリングに示す。

4) 処分場のバリア性能規定

処分場バリア性能の規定は、Class C の廃棄物について定められており、カバー厚さは最低 5m、または最小 500 年間の意図しない侵入者を保護できる設計性能を求めている。

ラドンに関する基準について現地で確認したところ、ラドンのみを規制する線量基準は無く、フラックス (単位時間単位面積当たりに放出される (または流入する) 放

射能)については 40CFR part 192 によりウラン鉱さいについて $20\text{pCi}/\text{m}^2/\text{sec}$ を超えないことが要求される。閉鎖後の連邦政府所掌の施設でモニタリングが規定されており、フラックスが基準値を超えればより強力なラドンバリアを設置して対応する。

ラドンバリアの厚さ設計が処分施設ごとに異なるのは何故かを現地で確認したところ、VITRO 施設の設計時には DOE によりバリア厚さは7フィートと設定されたが、その他の処分施設は NRC の設計に基づくのでラドンバリアの値は2フィートとされた。ラドンバリアの設計仕様は規制者に依存するとの回答があった。なお、ウランの処分施設中の分布については、Class A の処分場の中で $300\text{pCi}/\text{g}$ で一様に分布していると評価上想定されていることを確認した。

5) 安全評価時の経路の規定

安全評価に必要とされる評価経路として、大気、土壌、地下水/地表水、植物の吸い上げ、動物による穿孔を考慮することと、閉鎖後、浸食や雨水侵入を考慮しても継続する能動的管理が必要でないことを示すことが規定されている。

6) 安全評価期間の規定

ユタ州法 UAC R313-25 では、1 トンを超える劣化ウラン処分では少なくとも1万 年の安全評価を実施しピーク線量時までの定性的評価を実施すべきであると現時点で規定されている。「安全評価期間について」UDEQ にコメントを求めたところ、上記の線量ピークの時点までのシミュレーション要求については期間に明示された制限がないこと、米国連邦規則 10CFR part 61 の改定はまだ公式なものではないが短寿命核種についての取り扱いは従前通りと UDEQ が想定していることが回答された。安全評価に関する入手情報は (2) 安全評価に示す。

(2) 安全評価

安全評価の考え方として、UDEQ からの情報を以下に示す。

1) 評価データ・手法・シナリオ

① ウランの核種移行

ウラン核種の移行で評価すべき事項について UDEQ のコメントを求めた。分配係数等の安全評価に用いるパラメータには平均値が採用される。この妥当性については、平均値は不確実性を数値自体には考慮していないが、分配係数を用いる場合には、不確実性の観点から平均値採用は十分に保守的と考えたとのコメントを得た。

② 評価期間の決定手順

評価期間をどのように定めるべきか、その考え方を UDEQ に質問した。UDEQ のコメントは以下の通り。

- ・ 120 万年間の評価の要請が公衆からあった。科学的というよりも、社会的な何らかの意思表示が求められていた。公衆は防護を更に追加することによる信頼性を求めていた。劣化ウランの子孫核種生成による放射エネルギーのピークである数百万年後までの評価は、住民の安心を得るために技術的と

いうよりも社会的に要求されたものであった。

- ・ より高い防護にはより大きな不確実性が伴う。例えばユタ州は現在乾燥しているが、25 万年前は水没していた。全ての規制変更は、保健と安全のために柔軟性を持つべきである。
- ・ 原子力規制では評価期間の限度はないが、不確実性があり、不確実性が評価期間の限度を決めると認識している。

(3) モニタリング

モニタリングの管理方法に係る下記の項目の情報収集を行った。

1) ラドンモニタリング

ラドンモニタリングは実施されている。他の同位体と同様にラドンについても空气中のサンプリングが必要である。年に 4 回のサンプリングが要求される。UDEQ は基準値よりもその傾向(上がっていくかどうか)を重視する。

2) 有害物モニタリング

有害物については UDEC-DSHW が担当する。年間の地下水サンプル採取によるモニタリング等が要求事項である。モニタリングの値があるレベルを超えるとサンプリングの頻度を月一回に上げることが要求される。

(4) 劣化ウランに係る法令改定及び最近の動向

劣化ウラン処分に係る最近の動向として、下記の項目の情報収集を行った。

1) 米国連邦規則 10CFR part61 の改定に係る意見交換とユタ州規則への反映

① NRC とユタ州との意見交換

ユタ州は、改定後も廃棄物分類は改定前と同一に保たなければならないという趣旨で、Class A 区分に影響がないようにすることを重視し、NRC に要請している。要請内容は、国際基準に追いつくための線量評価上の技術的な更新は問題ないが、非技術的な修正による変更はあってはならないという主張を行っている。

② ユタ州規則への連邦規則の改定取り入れ

今後の NRC による改定スケジュールは UDEQ によれば、今年 7 月位にドラフトが NRC 委員長に提出される。また、その後のユタ州規則への連邦規則改定事項の反映には約 3 年間かかるとのことである。

2) 劣化ウラン受入の可能性

ユタ州での劣化ウラン受入停止の経緯と、その後の規制の進め方について質問した。

① 劣化ウランの受入一時停止（モラトリアム）の経緯

UDEQ のコメントによれば、モラトリアム以前は軍用の遮蔽材のような Discrete 廃棄物（個数が変化せず、自然に崩壊することの無い安定な形状の廃棄物）が処分されたが、大量で、かつ土壌のように形状が不安定な固体廃棄物は処

分されなかった。数千本のドラム缶に入った劣化ウランを一つのサイトに集約したことが問題視されたという(図 5.5.1 にクライブに立地する劣化ウラン貯蔵庫を示す)。公衆はサバンナリバーサイトからの廃棄物は本質的に米国連邦規則 10CFR part61 を反映していないので、固有の廃棄物系統(Unique Stream)とすべきと主張した。

② その後の劣化ウラン規制

ES 社が提出したレポート”Final Report for the Clive DU PA Model/1 June 2011”^[20]はまだ公式にはレビューされていないが、今年の夏から秋にかけて主要個所についてのレビューコメント公開を予定しており、公開されれば UDEQ から原子力機構に連絡するとのことであった。

5.5.3 まとめ

UDEQ を訪問し、ウラン廃棄物処分場の規制当局としての規制について、安全評価方法を中心に質疑を行い、安全評価期間の考え方、ウランの核種移行、ラドン基準とモニタリング及び劣化ウランに関する動向に関して情報を得た。

安全評価期間の決定経緯として、劣化ウランの子孫核種生成による放射量のピークである数百万年後までの評価は住民の安心を得るために技術的というよりも社会学的に要求されたものであったことが分かった。ウランの核種移行に関しては、ウラン核種の移行で分配係数を用いる際の平均値採用が不確実性の観点からも十分に保守的との考え方を聴くことができた。ラドン基準とモニタリングの運用について、ラドンの線量評価基準は定めていないが、年 4 回のモニタリングを課してその傾向を確認していることが分かった。また、劣化ウランに関する動向としては、まず経緯について、劣化ウランの受入に関し従前受け入れた劣化ウランが形状が安定した小規模なものであったのに対して、形状が不安定な大量の廃棄物を受け入れる計画が明らかになり、住民が難色を示したことがモラトリアムの発端となったことが分かった。また、今後の動向としては、ES 社が提出した劣化ウランの安全評価書に対する UDEQ の正式なコメントは今年の夏から秋にかけて公開される予定であるとの情報を入手した。



図 5.5.1 クライブに立地する劣化ウラン貯蔵庫
(Energy Solutions 社提供)

5.6 米国 原子力規制委員会 (NRC)

5.6.1 概要

NRC への訪問目的は、現在 NRC において多量の劣化ウラン等の処分に関する安全規制要件を明確にすべく米国連邦規則 10CFR part61 の改定作業を進めており、その最新情報を入手することにある。

今回の打合せでは、①NRC による米国連邦規則 10CFR part61 に関連した状況説明、②原子力機構の事前質問事項に関する回答、③原子力機構の概要説明が行われた。

①に関しては米国連邦規則 10CFR part 61 のこれまでの経緯、多量の劣化ウラン等の処分に対応するための現在の改定状況、安全評価の考え方について説明が行われた（参考資料 4-4-1, 参考資料 4-4-2, 参考資料 4-4-3 を参照）。

②の事前質問事項に関する回答に関しては、①の説明の中で回答が示された。

③の概要説明では、機構全体の活動内容と人形峠センターの活動内容について説明したが、時間が限られていたため、埋設事業に関しては資料のみ提出した。

5.6.2 入手情報

(1) 現状の米国連邦規則 10CFR part 61 の記載内容のポイント

米国連邦規則 10CFR part 61 の対象となる廃棄物は、高レベル廃棄物、使用済み燃料、TRU 廃棄物、ウラン鉱さい等 (NORM 含む) を除く低レベル廃棄物であり、かつ DOE 廃棄物を除く商用廃棄物が対象となっている。

低レベル廃棄物の分類には、Class A、B、C と 3 区分あり浅地中処分を想定しているが、濃度が Class C を超える廃棄物に対しては地層処分ないしは NRC が許可した方法による処分ができるとしている。

浅地中処分の制度的管理期間に関しては、100 年以上 (最大 600 年)、廃棄体の健全性は少なくとも 300 年を期待し、工学バリアによる寄与を含めると 500 年まで健全性を期待している。

安全評価の方法に関しては、歴史的には 1990 年代にテストケースとして、保守的に湿地条件での処分を前提に、評価期間としてはピーク線量が 5 千年から 7 千年であることを踏まえ 2 万年から 10 万年を想定した評価を行っているが、2000 年にはこの考え方を公衆からのコメントを踏まえ NUREG-1573 として公表している。

(2) 米国連邦規則 10CFR part 61 の改定に向けた動きとその経緯

1) 改定の発端

従来クライブ処分場などでは、劣化ウランなど長寿命廃棄物を Class A 廃棄物として処分を実施してきた。しかしながら、これに対してステークホルダーからは劣化ウランを Class A 廃棄物として処分することを疑問視する声上がり、NRC はこの疑問に対して検討を進め、その検討結果を 2009 年 3 月には SRM-SECY-08-0147^[22]として公表した。その中で①1~10 トン程度の少量の場合には劣化ウランは処分可能であること、②ウランの子孫核種がウラン鉱さいの主要な核種として処分されていることから、①、②を考慮すればウランの廃棄物分類を現状の Class A から変更する必要は無いという見解を示した。一方、劣化ウランを多量処分する場合にはサイト固

有の評価を実施することを義務付けることを推奨するとともに、劣化ウランは処分場を乾燥地帯に立地し、埋設深度を現行の 3 メートルよりも深くするかあるいは十分な堅牢性を持つラドンを低減させるバリアを設置するなどして、1,000 年から 100 万年までの評価期間で米国連邦規則 10CFR part61 に示す性能目標を満足させる必要があるとしている。

2) NRC による改定作業

その後、公開討論や諮問委員会などでの検討を経て、2011 年の秋には、米国連邦規則 10CFR part61 の改定に向けた一次案を取りまとめた。この中で、性能評価に関しては 2 万年までは定量評価を行い、2 万年以降はピーク線量までの評価をおこなうこととし、人間侵入に対する解析に関しては、500 ミリレム (5mSv/y) の年間線量限度を用いることとしている。さらに 2012 年 1 月には、上記の検討を踏まえ、多量の劣化ウラン等を含む場合の米国連邦規則 10CFR part61 の改定案について、SRM (NRC 事務局規制メモ) として公表^[23]した。

主要な点は、既存の ICRP 勧告の線量評価手法に関してはフレキシブルに対応し、安全評価に関しては合理的に予見可能なコンプライアンス期間 (定量的評価を求められ、線量限度の遵守を求められる期間) 内の評価と、サイト特性やピーク線量をベースとした長期の評価の 2 段階アプローチを採用し、サイト特有の地下水移行の性能評価や侵入者評価に応じたフレキシブルな廃棄物受け入れ基準を設けている点である。

3) パブリックコメントにおける反応

このような提案に対してのパブリックコメントとしては、ICRP 勧告に対する考え方、2 段階アプローチ、廃棄物受け入れ基準の考え方に関しては概ね支持であり、コンプライアンス期間に関しては 1000 年以下から 1 年以上のさまざまな意見やコンプライアンス期間を定めるべきでないという意見もあった。コメント数としては 2 段階アプローチやコンプライアンス期間に関するものが最も多く全体コメントの 2 割を占めている。

(3) 現時点の改定案の内容

2012 年 12 月には、パブリックコメントを踏まえた米国連邦規則 10CFR part61 の改定案^[24]が公開されたところであり、要点は以下の通りである。

1) コンプライアンス期間

前述のようにステークホルダーから様々な意見 (1000 年以下から 1 年以上) が出ているが、これまでの検討状況や他の廃棄物処分の考え方を踏まえ、コンプライアンス期間として処分場閉鎖後 1 万年を明記している。

2) 安全評価

安全評価に関しては、コンプライアンス期間内とそれ以降の性能期間に分けた 2 段階アプローチを採用している。

コンプライアンス期間内（1 万年以内）の評価方法としては、放射性核種の放出に対する一般公衆の放射線防護要件は 0.25mSv/y とし、防護要件を満足していることの実証方法（解析方法）としては、処分システムに影響を与える処分場の特徴の整理、発生するイベント、サイトスペシフィックな経年変化プロセスの特定、周辺環境への影響評価を踏まえた年間線量の推定をおこなうこととしている。一方、故意でない処分場への侵入者（Inadvertent Intruder）に対する放射線防護要件は 5mSv/y とし、防護要件を満足していることの実証方法としては、処分場があることを知らないで人間が入り込み生活すると仮定し、侵入防止用のバリアの有効性評価、不確実性を考慮した被ばく評価を行うこととしている。

コンプライアンス期間（1 万年）をこえる性能期間の評価方法としては、放射性核種の放出に対する一般公衆の放射線防護に関しては、可能な限り放射性核種の放出を低く抑えるよう努力することとしているが、放射防護の数値目標は明記していない。また、故意でない処分場への侵入者（Inadvertent Intruder）に対する放射線防護に関しても、極力被ばくを少なくするよう努力することとしながらも、放射防護の数値目標は明記していない。また防護要件を実証するための解析方法（一般公衆、Inadvertent Intruder 共通）としては、処分施設やサイトの特徴が長期にわたってどのように影響を与えるかの評価解析（ケースバイケース）を行うこととしている。

なお、コンプライアンス期間を超える性能期間の評価に必要な要件としては、全 α の濃度が 10nCi/g 以上の場合、米国連邦規則集 10CFR part61.55 の表 1 で定める濃度の 10 分の 1 以上の核種が含まれる場合、その他、サイトスペシフィックな要因（処分場設計、操業方法、サイトの特徴など）により必要と認めた場合をあげている。

3) 長寿命廃棄物の定義

長寿命廃棄物の定義としては以下をあげている。

- 1 万年後の放射能濃度が初期の 10%以上の廃棄物（例えば親核種が長寿命）
- 1 万年後に子孫核種により放射能がピークになる廃棄物(例えば親核種が長寿命、子孫核種が短寿命)
- 1 万年以内に放射能はピークになるが 1 万年後もピーク放射能の 10%以上が残る廃棄物（例えば親核種が短寿命で、子孫核種が長寿命）

(4)今後の予定

2013 年 7 月に改定案を委員会に提出し、パブリックコメントの後、2014 年後半に制定される予定。そのあと、州政府の規制改定には 3 年程度を要し、実際に運用されるのは 2017 年後半の見通しである。

5.6.3 まとめ

今回の米国連邦規則 10CFR part 61 の改定のポイントは、従来の考え方を基本的には変えずに多量のウランを含んだ廃棄物にも適用できるようなルール改定にある。すなわちコンプライアンス期間を超えた期間に関して、ケースバイケースの評価で対応している点で

ある。我が国の安全評価手法は、ウラン廃棄物を除いて定められているが、ある意味、NRCのアプローチは今後の我が国におけるウラン廃棄物の安全規制、安全評価方法を策定していく上で、十分参考になるものと考えられ、今後の動向については注意深く見守っていく必要がある。

また、今回の NRC との打合せでは、こちらの訪問目的を十分承知したうえで対応していただき、予想以上の情報収集が図れた。また、今後とも情報交換できるパイプができたことは極めて有意義であり、NRC との関係を今後とも大事にしていく必要がある。

6. 全体まとめ

米国、カナダにおけるウラン廃棄物の処分場やウラン取扱施設の廃止措置に伴う環境修復実施地域を調査し、ウラン廃棄物の安全な処分及び環境修復のための安全評価、処分場設計、及びステークホルダーとのかかわり方に関して各訪問機関にあらかじめ質問書を送付し、現地で回答を得る形で打合せを行った。

その結果、(1)米国連邦規則 10CFR part61 改定及び超長期評価、(2)浸透水によるサイト内ウランの経年減少、(3)ウラン廃棄物の規制免除基準、(4)ラドン被ばく基準と被ばく線量の扱い、(5)地域住民へのウラン廃棄物処分安全性説明、(6)処分場設計（カバーシステム、ウラン廃棄物の取扱い、安全評価等）についての情報を得ることができた。

(1) 米国連邦規則 10CFR part61 改定及び超長期評価についての検討の発端

米国連邦規則 10CFR part61 改定は、多量の劣化ウラン等の廃棄物の処分の安全規制が従来の規則では不十分なことから行われたものであり、劣化ウランのクライブ処分場への受入一時停止措置として表面化した。クライブ処分場では、以前は軍用の遮へい材等の形状が安定した劣化ウラン廃棄物が少量処分されてきたが、大量の廃棄物は処分されてこなかった。その後、民間のより大量の不安定な形態の劣化ウラン廃棄物が処分されるようになり、より厳しいライセンス要件が必要となったため受入を一時停止している。

連邦規則改定の主要な部分は超長期評価を要する廃棄物についての 2 段階アプローチの採用である。このアプローチでは 1 万年までは定量評価を行い、1 万年以降は定性評価を実施する。節目となる安全評価期間 1 万年を決めた技術的根拠については、NRC によれば、バーンウェル処分場をモデルに 10 万年までの評価を実施した結果、5000-7000 年後にピークが出現したためである。また、1 万年以降の定性的評価期間に関しては廃棄物特性やサイト特性によって異なるのでケースバイケースで考えるべきとの事である。改定作業への関係者からのコメントは概ね良好である。今後の改定スケジュールは、2013 年 7 月に改定案を委員長に提出、パブリックコメント公募の後 2014 年後半に制定、それから 3 年で 2017 年の後半に州の規制が改定される予定となっている。

この他の今後の動向については、WCS 処分場では劣化ウラン処分許可申請が予定されており、クライブ処分場では劣化ウラン処分の安全評価報告書の最初のレビューが 8 月末等に予定されているとのことであった。今後はこれら報告書の安全評価を注視し、定性的・定量的評価の具体的な実施方法を確認していく必要がある。

(2) 浸透水によるサイト内ウランの経年減少

テキサス州環境品質委員会 (TCEQ)、ユタ州クライブ処分場及び NRC においては、浸透水によるサイト内ウランの経年減少を線量評価で考慮することを妥当とする見解であり、TCEQ から、ウランの移行については化学形態や pH が重要であり、その考慮を WCS 社に求めているところであるとのこと。WCS 社処分場で劣化ウラン処分申請の計画があるため、今後申請書公開時にはこの点も注目したい。

(3) ウラン廃棄物の規制免除基準

WCS 処分場では放射性廃棄物処分場に隣接して規制免除された廃棄物 (RCRA) を浅地

中処分している。劣化ウランについては、免除基準となるウラン濃度は0.05重量%であり、IAEA TS-G-1.1 準拠の0.45重量%劣化ウランで9Bq/gに相当する。これらについてはラドンを含めた線量評価及びモニタリングについて埋設後の規制が無いが、補足的にモニタリング管理がなされている。

(4) ラドン被ばく基準と被ばく線量の扱い

米国ではラドンのみを規制する基準があるのはウラン鉱さい処分場だけであり、20pCi/m²/secを超えないように工学的バリアについて規制されている。Class Aとしてのウラン廃棄物には劣化ウランを含めてラドン独自の規制はない。なお、公衆防護基準250μSv/yにラドン被ばく分が含まれるか否かについては回答が得られなかったが、公衆防護基準が守られるように管理しているとのテキサス州規制局からコメントが得られている。

(5) 地域住民へのウラン廃棄物処分安全性説明

カナダ ポートホープ市では、ウラン製錬及び転換などの事業により発生した歴史的廃棄物に関連する環境修復及び浅地中埋設が進められている。浅地中埋設は、処分ではなく500年の長期管理という方式を採用、管理期間は技術的な検討ではなく地域との議論で決められている。管理としては、「常時監視」という姿勢を市民に示すことが目的である。公衆とのコミュニケーションは、書類による情報提供の他、説明会、ワークショップ、市民連携委員会からの意見聴取、環境影響評価等の申請文書の意見公募等により行われており、市民アンケートによる受容性評価も行われ、常に住民とコンタクトして要望を確認している。

(6) 処分場設計

処分場設計（①ウラン廃棄物の受入と埋設深度、②カバーシステム、③安全評価等）に関してまとめる。まずWCS処分場では、①LLRWとしてのウラン廃棄物受入はまだないが、ウラン廃棄物を他の廃棄物とともに処分する想定で安全評価書上では評価されている。また、Class B、Cの廃棄物を積極的に埋設するため地上から7.6m以上の深度としている。②廃棄物を乾燥した粘土質の地盤に埋設し、廃棄物層の全周に浸透水を抑制するための多層のカバーシステムを設置している。③線量は基準の250μSv/yより低い100μSv/y以下となっている。評価期間はテキサス州法に則り、地下水シナリオに関してピーク線量が現れるまでの期間を含む10万年まで評価されている。

クライブ処分場では、①LLRWの処分施設はClass A廃棄物を処分するための地表部構造を持つ。廃棄物層は地下3mから高さ12m程度である。②EPAやNRCの基準値に従って廃棄物層の上部及び側部には厚さ60cmの粘土層のラドンバリアが設置され、その上部は約1mの保護層や排水層が設置される。③劣化ウランを除くウラン廃棄物は他のClass A廃棄物と一緒に処分され、線量評価も合計して評価している。劣化ウラン廃棄物も一緒に埋設することが検討されているが、現在は劣化ウラン廃棄物の処分に関する性能評価書は別に作成されているところである。その線量評価期間は1万年であり、それ以降10万年までは定性的な評価（環境中濃度の評価）となっている。

謝辞

本調査報告書をまとめるにあたって、訪問先の各機関でご対応頂いた方々はもとより、日本原子力研究開発機構 国際部 ワシントン事務所長 佐藤 一憲氏、櫛田 浩平氏他多くの方々から種々の協力や助言を頂いた。ここに、深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- [1] U.S. Nuclear Regulatory Commission : Title 10, Code of Federal Regulations part 61 "Licensing Requirements for Land Disposal of Radioactive Waste".
- [2] Government of Canada. "Canadian National Report for the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste management", (2011).
- [3] Canadian Standards Association (CSA) N292.3 08 "Management of Low and Intermediate Level Radioactive Waste".
- [4] Canadian Council of Ministries of the Environment (CCME), "National Guidelines for Hazardous Waste Landfill", PN 1365.
- [5] Ministry of Environment and Energy, "Water Management, Policies, Guidelines, Provincial Water Quality Objectives" (1994).
- [6] Ministry of the Environment, "Technical Support Document for Ontario Drinking Water Standards, Objectives and Guidelines", (2003).
- [7] G-320, "Assessing the Long Term Safety of Radioactive Waste Management".
- [8] Clarke, R.H. " Recommendations on Radioactive Waste Management from the International Commission on Radiological Protection", IAEA Bulletin 42/3/2000,(2000).
- [9] ICRP, "Radiological Protection Policy for the Disposal of Radioactive Waste", Publication 77. Ann. ICRP 27 (S).
- [10] ICRP, "Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste", Publication 81. Ann. ICRP 28 (4),(1998).
- [11] ICRP, "Protection of the Public in Situations of Prolonged Radiation Exposure ", Publication 82. Ann. ICRP 29 (1-2),(1999).
- [12] IntelliPulse Inc. Public Attitude Research Regarding the Port Hope Area Initiative. Port Hope Project Wave 11, (2012).
- [13] United States : "Resource Conservation and Recovery Act", 42 U.S.C § 6901 et seq. (1976).
- [14] WASTE CONTROL SPECIALISTS LLC : "APPLICATION FOR LICENSE TO AUTHORIZE NEAR-SURFACE LAND DISPOSAL OF LOW-LEVEL RADIOACTIVE WASTE"(2007).
- [15] Texas Administrative Code(TAC) : "Title 30 Rule § 336.Subchapter H LICENSING REQUIREMENTS FOR NEAR-SURFACE LAND DISPOSAL OF LOW-LEVEL RADIOACTIVE WASTE".
- [16] TCEQ, Susan Jablonski, P.E. and Devane Clarke, "TCEQ Status of Waste Management and Disposal", (2010).
- [17] NUREG-1573, "A Performance Assessment Methodology for Low-Level Radioactive Waste Disposal Facilities" U.S. Nuclear Regulatory Commission Recommendations Performance Assessment Working Group, (2000).
- [18] "Management Alert on Environmental Management's Select Strategy for Disposition of Savannah River Site Depleted Uranium Oxides, Audit Report", OAS-RA-10-07, DOE (2010).
- [19] Utah Administrative Code (UAC): R313-25 "License Requirements for Land Disposal of Radioactive Waste - General Provisions".

- [20] Neptune and Company, Inc : "Final Report for the Clive DU PA Model version 1.0 " (2011).
- [21] 40CFR Chapter I, Subchapter F -RADIATION PROTECTION PROGRAMS Part192 "Health and Environmental Protection Standards for Uranium and Thorium Mill Tailings".
- [22] STAFF REQUIREMENTS - SECY-08-0147 - RESPONSE TO COMMISSION ORDER CLI-05-20 REGARDING DEPLETED URANIUM (2009).
- [23] STAFF REQUIREMENTS - COMWDM-11-0002/COMGEA-11-0002 - REVISION TO 10 CFR PART 61 (2011).
- [24] NOVEMBER 2012 "PRELIMINARY RULE LANGUAGE FOR PROPOSED REVISIONS TO LOW-LEVEL WASTE DISPOSAL REQUIREMENTS (10 CFR PART 61) " [NRC-2011-0012].

付録 略語・用語集

11e.(2)	米国原子力法（ The Atomic Energy Act） 11e.(2)節に定義される、主として原料物質（Source Material） からなる鉱石処理からのウラン及びトリウムの抽出又は濃縮によって発生する鉱さいまたは廃棄物。「副生成物」（Byproduct)には 11e.(2)の他に、特別核物質から発生する放射性物質、ラジウム廃棄物、粒子加速器からの廃棄物、Source material を除く NORM が含まれる。
AECL	Atomic Energy of Canada ltd. カナダ原子力公社
Agreement State	米国原子力法（ The Atomic Energy Act） 274 節に定義される NRC との合意を結んだ州のこと。Agreement State は、LLRW の埋設の規制を NRC から委任される。
CCME	Canadian Council of Ministers of the Environment カナダ環境関連閣僚会議
Class A, B, C	10 CFR part61.55 における低レベル放射性廃棄物の廃棄物分類
CNSC	Canadian Nuclear Safety Commission カナダ原子力安全委員会
Compact	Low-Level Radioactive Waste Policy Amendments Act（低レベル放射性廃棄物政策修正法）によって定義される、各州が単独または他の州との共同で LLRW を処分するための地域的な州間協定
CSA	Canadian Standards Association カナダ規格協会
CWF	Compact Waste Facility コンパクト廃棄物埋設施設
DOE	Department of Energy 米国エネルギー省
EPA	Environmental Protection Agency 米国環境保護庁
ES 社	EnergySolutions 社
FWF	Federal Waste Facility 連邦政府廃棄物埋設施設
FWF-NCDU	Non-Canister Disposal Unit コンテナを用いない廃棄物を埋設する施設
FWF-CDU	Canister Disposal Unit コンテナに入れた廃棄物を埋設する施設
HDPE	High Density Polyethylene 高密度ポリエチレン
LTWMF	Long-Term Waste Management Facility 長期廃棄物管理施設
LLRW	Low Level Radioactive Waste 低レベル放射性廃棄物 Low-Level Radioactive Waste Policy Amendments Act（低レベル放射性廃棄物政策修正法）によって定義される、高レベル放射性廃棄物と副生成物を除く放射性廃棄物。
Mixed waste	米国法における放射性廃棄物と有害廃棄物(hazardous waste)が混在した廃棄物。米国原子力法と資源保護回収法（RCRA）の双方の規制を受ける。
NORM	Naturally Occurring Radioactive Material 自然起源放射性物質
NRC	Nuclear Regulatory Commission 米国原子力規制委員会
PHAI	Port Hope Area Initiative
RCRA	Resource Conservation and Recovery Act (資源保護回収法) 及び、資源保全回復法の所掌廃棄物。劣化ウランでは 0.05wt%(9Bq/g 相当)が Source Material からの免除基準であり、基準未満は RCRA 所掌廃棄物となる。

Source Material	米国で規制される核原料物質
SRM	Staff Requirements Memoranda NRC 事務局規制メモ
TCEQ	Texas Commission on Environmental Quality テキサス州環境品質委員会
TDSHS	Texas Department of State Health Services テキサス州保健省
UDEQ	Utah Department of Environmental Quality ユタ州環境品質局
DSHW	Division of Solid & Hazardous Waste ユタ州固体・有害廃棄物局
VITRO 施設	過去における VITRO Chemical Company 社に由来するミルテーリングの処分サイト
WCS 社	Waste Control Specialists 社

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
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立法メートル	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
比透磁率 ^(b)	(数字の)	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
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)
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
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s
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
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウエーバ	Wb	Vs
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C	K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr ^(c)
放射線量	グレイ	Gy	J/kg
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
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
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み、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (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
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s
表面張力	ニュートンメートル	N m
角速度	ニュートン毎メートル	N/m
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³
電表面電位	ジュール毎立方メートル	J/m ³
電束密度, 電気変位	ジュール毎立方メートル	J/m ³
誘電率	ジュール毎立方メートル	J/m ³
透磁率	ジュール毎立方メートル	J/m ³
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎キログラム	J/kg
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, 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単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	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 ^(c)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π) A m ⁻¹

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

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=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=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロ	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

