

ウラン廃棄物に着目した 諸外国の放射性廃棄物処分の情報整理

Survey on Uranium Bearing Waste Disposal Facilities in Foreign Countries

齋藤 龍郎 坂井 章浩 佐藤 和彦 八木 直人
秦 はるひ 麓 弘道 川越 浩 長谷川 信

Tatsuo SAITO, Akihiro SAKAI, Kazuhiko SATO, Naoto YAGI

Haruhi HATA, Hiromichi FUMOTO, Hiroshi KAWAGOSHI and Makoto HASEGAWA

バックエンド推進部門

Nuclear Cycle Backend Directorate

July 2014

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

ウラン廃棄物に着目した諸外国の放射性廃棄物処分の情報整理

日本原子力研究開発機構 バックエンド推進部門

齋藤 龍郎、坂井 章浩⁺¹、佐藤 和彦、八木 直人、
秦 はるひ⁺²、麓 弘道*、川越 浩、長谷川 信

(2014年3月31日受理)

日本原子力研究開発機構（JAEA）では、計画中の研究施設等廃棄物浅地中処分施設に、放射能濃度の低いウランを含む廃棄物も処分するための検討を進めている。IAEA や ICRP の提案する考え方、調査対象国（米国、カナダ、英国、フランス、スウェーデン）で行われているウラン廃棄物に類似した長寿命放射性廃棄物の処分方策や法規制をまとめ、我が国の処分制度への適用性を整理した。

放射能濃度の低いウランを含む廃棄物を第二種廃棄物埋設で処分することを想定したときの課題を、埋設するウランからのラドンに係る被ばく評価、ウラン子孫核種に係る被ばく評価、地質の安定性等の観点から整理した。その結果、人間侵入シナリオの評価期間が長期の処分場と、短期の処分場に分けられた。各国の先行事例が多いことから、第二種廃棄物埋設における処分検討の優先度が最も高いと思われる。制度化にあたっては、この二通りの処分場の対応を踏まえて検討すべきと考える。

次に、第二種廃棄物埋設の代替案となり得る処分方法として、処分限定クリアランス及び極低レベル放射性廃棄物（VLLW）の産廃処分との混合処分の様な処分方策の海外情報を整理したところ、およそ 10Bq/g 前後を下回る濃度までのウランを含有している廃棄物であれば処分場受入の対象とされており、これらの処分場においては処分後の評価においてラドンの生成は考慮されていなかった。

この他、より高い濃度のウラン廃棄物の処分概念検討のため、長寿命低レベル放射性廃棄物の処分と長期保管について海外情報を整理した。

さらに、処分に係る規制が明確になっていない核原料物質で汚染された廃棄物処分の規制についても、今後の検討課題を示した。

Survey on Uranium Bearing Waste Disposal Facilities in Foreign Countries

Tatsuo SAITO, Akihiro SAKAI⁺¹, Kazuhiko SATO, Naoto YAGI, Haruhi HATA⁺²,
Hiromichi FUMOTO*, Hiroshi KAWAGOSHI and Makoto HASEGAWA

Nuclear Cycle Backend Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Naka-gun, Tokai-mura, Ibaraki-ken
(Received March 31, 2014)

Japan Atomic Energy Agency surveyed the reference cases for the disposal of uranium bearing waste in low activity concentration as the contents of their own category 2 waste disposal facility for the research and development activities. We reviewed the concepts mentioned in IAEA and ICRP documents, reference cases of uranium bearing waste disposal in selected countries (USA, Canada, UK, France and Sweden), and the disposal styles of long-lived radioactive waste were summarized, and the action items for application to the disposal system of our country was arranged.

The disposal facilities in selected countries can be classified into 2 types with the length of performance assessment period for intruder scenario. They are long term assessment type and short term assessment type.

It seems that the disposal system construction in category 2 waste disposal is the most realistic since there are many precedence examples of each country.

Correspondence of 2 types of these disposal facilities is useful as a reference case.

Keywords: Uranium Bearing Waste, France, UK, Sweden, USA, Canada, Radioactive Waste Disposal, Performance Assessment, Near Surface Disposal Facility, Landfill

+1 Low-level Radioactive Wastes Disposal Project Center

+2 Ningyo-toge Environmental Engineering Center

* Mitsubishi Nuclear Fuel Co., Ltd.

目 次

1. はじめに.....	1
2. ウラン廃棄物等について想定する制度的枠組み	3
3. 国際機関のウラン廃棄物等処分の考え方.....	5
3.1 IAEA 及び ICRP における主な文書について.....	5
3.2 IAEA 及び ICRP における主な考え方	5
4. 第二種廃棄物埋設の浅地中処分での課題と海外の対応状況	12
4.1 ウランを含む廃棄物を第二種廃棄物埋設する場合の課題の抽出.....	12
4.2 課題に対する海外の対応.....	15
5. 第二種廃棄物埋設の枠組みに入らない廃棄物の問題点と情報整理.....	20
5.1 第二種廃棄物埋設以外の浅地中処分等の方法	20
5.2 VLLW の産廃処分と処分限定クリアランス.....	20
5.3 長寿命低レベル放射性廃棄物等の処分	22
5.4 長期管理	23
5.5 鉱山/NORM 廃棄物の処分.....	25
6. まとめ.....	26
参考文献.....	27
付録：用語集	30

Contents

1. Preface	1
2. Review of Regulations in Japan for Category 2 Waste Disposal of Uranium Bearing Wastes	3
3. Survey on IAEA and ICRP	5
3.1 Documents.....	5
3.2 Concepts	5
4. Survey on Foreign Disposal Facilities' Approach	12
4.1 Requirements for Land Surface Disposal of Uranium Bearing Wastes in Japan	12
4.2 Foreign Disposal Facilities' Approach.....	15
5. Survey on Alternative Approach of Category 2 Waste Disposal	20
5.1 Review of Alternative Approach in Japan of Category 2 Waste Disposal	20
5.2 Exemption and Clearance Only for Disposal.....	20
5.3 Long Term Assessment.....	22
5.4 Long Term Management.....	23
5.5 Wastes out of Category 2 Waste Disposal Regulation in Japan.....	25
6. Summary of Survey Results.....	26
References.....	27
Appendix : Glossary	30

図リスト

図 2-1	ウラン廃棄物等について想定する制度的枠組み.....	4
図 3-1	廃棄物分類スキームの概念説明図.....	6

表リスト

表 3-1	ICRP 及び IAEA におけるウラン廃棄物等の浅地中処分に参考となる考え方.....	10
表 4-1	ウランを含む廃棄物を第二種廃棄物埋設事業の対象とする際の整理項目.....	14
表 4-2	課題への各国の対応	17
表 4-3	長期評価処分場と短期評価処分場の対応整理	19
表 5-1	ウラン廃棄物等を処分する場合の諸外国の免除・クリアランス基準.....	21
表 5-2	米国、フランスにおける長寿命核種の処分の検討状況.....	23

Figure Index

Figure 2-1	Concept Image of Uranium Bearing Waste Stream.....	4
Figure 3-1	Conceptual Illustration of the Waste Classification Scheme	6

Table Index

Table 3-1	Mentioned for Safety Disposal of Uranium Bearing Waste in IAEA and ICRP Documents.....	10
Table 4-1	Action Items for Category 2 Waste Disposal of Uranium Bearing Waste	14
Table 4-2	Practices of Foreign Countries' Disposal of Uranium Bearing Waste	17
Table 4-3	Comparative Chart of Disposal Facilities with Long Term and Short Term Assessment.....	19
Table 5-1	Standard of Exemption and Clearance of Uranium Bearing Waste from Regulation of Radioactive Waste Disposal.....	21
Table 5-2	Current State of Concept model for Safety Disposal of Long Lived Radioactive Waste.....	23

1. はじめに

平成 10 年 5 月に原子力委員会バックエンド対策専門部会は、「RI・研究所等廃棄物処理処分の基本的考え方」^[1]の中で、研究所等廃棄物の中にウラン廃棄物に相当する廃棄物があり、それは今後検討される処分方策に準じて埋設処分する必要があることを示した。また、同専門部会は平成 12 年 12 月に「ウラン廃棄物処理処分の基本的考え方について」^[2]をまとめ、ウラン廃棄物¹の安全かつ合理的な処分方策を確立するとともに、諸制度の整備を図るための具体的な取組みを早急かつ着実に進める必要があることを指摘している。

一方、原子力安全委員会は「研究所等から発生する放射性固体廃棄物の浅地中処分の安全規制に関する基本的考え方」(平成 18 年 4 月)^[3]の中で、「浅地中処分におけるウランに対する放射線防護基準については、ウランが天然に存在すること、時間の経過に伴って、子孫核種が生成・累積することにより全体として放射エネルギーが増加すること等の特徴を考慮し、国際原子力機関 (IAEA) や国際放射線防護委員会 (ICRP) の提案する考え方や諸外国の規制を参考にすることを検討すべきである。その際、その他の核種の浅地中処分における放射線防護基準との整合性について留意する必要がある」とした。また、平成 21 年 10 月に原子力安全委員会が「ウラン取扱施設におけるクリアランスレベルについて」^[4]を了承したことを受け、文部科学省は平成 23 年 2 月、経済産業省は平成 23 年 6 月に、ウラン取扱施設から発生する金属のクリアランスを制度化している。原子力委員会が基本的考え方を示してから 15 年以上、原子力安全委員会が基本的考え方を示してから 8 年以上経過しているにもかかわらず、制度化されているのはウラン取扱施設で用いた金属のクリアランスのみであり、放射性廃棄物としての処分は制度化されていない。そのため、ウラン取扱施設や研究施設では、廃棄物貯蔵施設での保管量は限界に近づきつつある。ウラン廃棄物等を処分するための安全規制の整備を加速し、処分事業を早急に開始することが、廃棄物貯蔵施設の満杯を回避することや事業及び研究の継続に不可避の課題である。

ところで、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律 (原子炉等規制法)、特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律、及び関連規則等により、第一種廃棄物埋設事業 (地下 300m 以深の地層処分対象となる主に放射能レベルの高い放射性廃棄物の埋設処分) と第二種廃棄物埋設事業 (地層処分以外の主に放射能レベルの低い放射性廃棄物の埋設処分) はすでに制度化されているが、第二種廃棄物埋設事業にウラン廃棄物は適用されず、積み残しとなっている。その一方で、日本原子力研究開発機構 (JAEA) では、計画中の研究施設等廃棄物浅地中処分施設に、放射能濃度の低いウランを含む廃棄物も処分するための検討を進めており、処分するための検討を進め、その事業計画を立案している。

ここでは、原子力安全委員会が示した基本的考え方に沿って検討を進めるための一助として、関連する海外情報を整理する。IAEA や ICRP の提案する考え方、諸外国で行われてい

¹ 「ウラン廃棄物処理処分の基本的考え方」^[2]によれば、「原子炉施設の運転に使用されるウラン燃料は、その原料となるウラン鉱石から、製錬、転換、濃縮、再転換、成型加工などの工程を経て製造される。これらの各工程を行う施設の運転・解体に伴い放射性廃棄物が発生する。これらの放射性廃棄物をウラン廃棄物という。」と定義している。これ以外に、原子炉等規制法における核原料物質を使用する施設からも同様にウランを含む放射性廃棄物が発生する。この扱いについては現在決められていないがここではそのような廃棄物も含めて整理する。なお、この報告書ではウラン廃棄物と核原料物質使用施設から発生する廃棄物を含めて、「ウラン廃棄物等」と呼称する。

るウラン廃棄物等に類似した長寿命放射性廃棄物の処分方策や法規制をまとめ、わが国の処分制度への適用性を考える。

2. ウラン廃棄物等について想定する制度的枠組み

ウラン廃棄物の処分方法等の海外情報を整理するにあたり、ウラン廃棄物全体の処分等の方策を区分し、その区分を踏まえ海外情報の整理を行う。

JAEA では、原子力安全委員会報告書「研究所等から発生する放射性固体廃棄物の浅地中処分の安全規制に関する基本的考え方」^[5]を踏まえ、放射能濃度の低いウランを含む廃棄物を国内の試験研究炉等の原子炉施設及び放射性同位元素使用施設等から発生する廃棄物と一緒に浅地中処分を行う計画としている。特にウランの半減期が長期であるため、人工バリアの寄与が小さいと考えられることから、主にトレンチ処分の対象とすることを考えている。今回の取りまとめにあたって、放射能濃度の低いウランを含む廃棄物は、第二種廃棄物埋設の主にトレンチ処分の対象となることを想定し、その際の課題に対して、海外情報の整理を行う。

次にウランの放射能濃度が比較的高い場合は、第二種廃棄物埋設のトレンチ処分の対象とならない場合が想定される。そのような放射能濃度の比較的高い廃棄物の処分方法について検討する。例えば、米国原子力規制委員会（NRC）では、クライブに劣化ウラン及びそれに汚染された廃棄物を埋設する計画^[6]があり、そのような長寿命核種を含む廃棄物の処分の安全規制及び基準を構築するため、連邦規則 10CFR61^[6]の改訂作業中^[7]である。カナダのポートホープサイトでは、ウラン製錬及び転換などの事業により 1985 年以前に発生した歴史的廃棄物について、処分ではなく 500 年間の長期管理による方法^[8]を採用している。フランスでは、ラジウム廃棄物等の長寿命低レベル放射性廃棄物の処分方法が検討されている^[9]。これらの長寿命低レベル放射性廃棄物の処分等の情報については、放射能濃度が比較的高く、第二種廃棄物埋設のトレンチ処分を想定することが必ずしも妥当と言えないウランを含む廃棄物の浅地中処分等の方法として整理する。

一方、英国やスウェーデンなど、放射能濃度が低く、第二種廃棄物埋設のトレンチ処分に相当するような放射能濃度のウランを含む廃棄物を極低レベル放射性廃棄物（VLLW）等の処分方策として産業廃棄物処分場への埋設処分や処分に限定したクリアランス制度などを運用している国もある。この対象となる廃棄物は、第二種廃棄物埋設のトレンチ処分を想定する廃棄物と同レベルの放射能濃度と考えられるが、選択可能な管理方法として整理しておくことは将来の制度化の検討にあたって有意義であると考えられる。このため、第二種廃棄物埋設以外の管理方策として海外情報を整理する。

さらに、放射能濃度が高いウランを含む廃棄物については、浅地中処分が難しいと想定され、その場合は、余裕深度処分や地層処分等の深い地層に処分する方法、また、廃棄物中でのウラン含有量が大きいことから、廃棄物からのウランを回収処理する方法が想定される。したがって、放射能濃度の高いウランを含む廃棄物の余裕深度処分等やウラン回収の方法について制度的枠組みとして想定する。ただし、この方法については、これまでの海外調査の内容に含まれていないため、本報告書の情報整理の対象とせず、今後の課題とする。

なお、核原料物質又は核原料物質によって汚染された物で廃棄しようとするもの（以下、「核原料廃棄物」という）の処分に係る規制については、現在、第一種及び第二種廃棄物埋設の対象とされていない。この核原料廃棄物の処分方策についても、将来的に検討する

必要があると考えられる。そのため、核原料廃棄物の管理・処分に関して、国内の状況を踏まえつつ、今後の海外の状況を情報収集するための課題を整理する。

上記の考え方にに基づき、ウラン廃棄物等について想定する制度的枠組みを図 2-1 に示す。

本報告書では、各処分・管理方策の整理を行う前に、IAEA や ICRP の国際機関の考え方を 3 章で整理する。その後、4 章では第二種廃棄物埋設の浅地中処分、5 章では第二種廃棄物埋設以外の浅地中処分、処分限定クリアランス、VLLW 等として産業廃棄物と混合処分に関する海外情報を整理することとする。

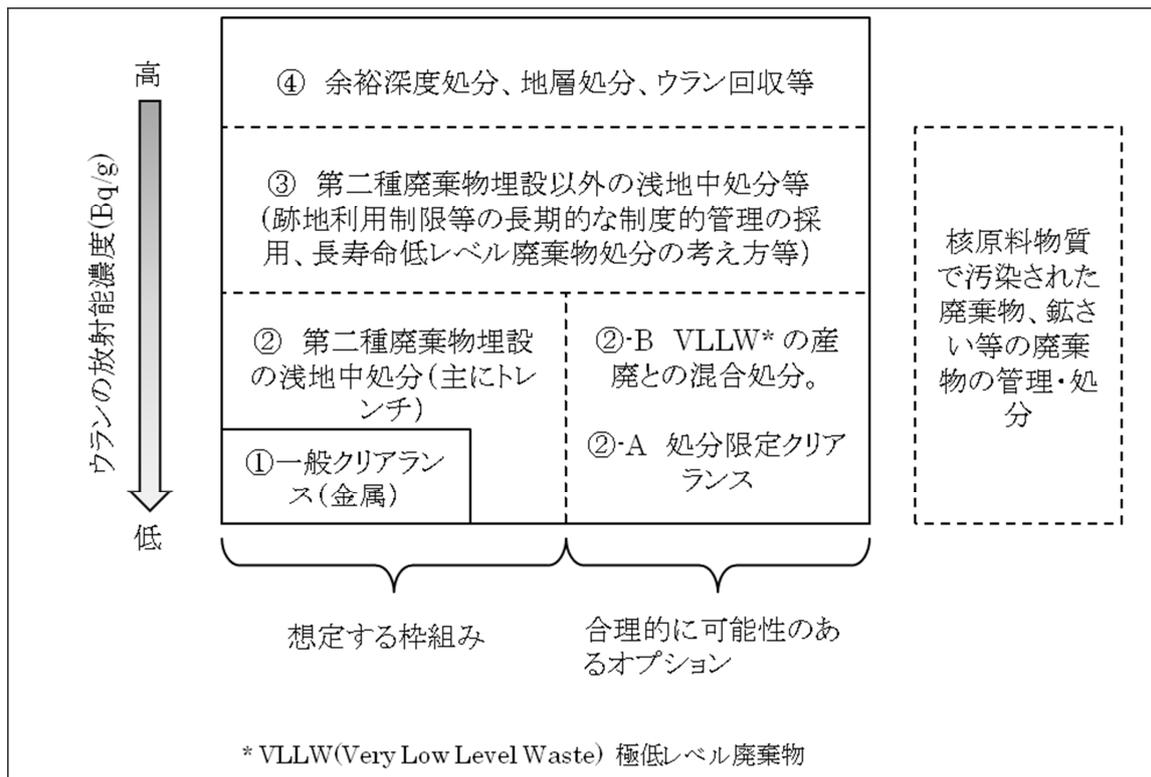


図 2-1 ウラン廃棄物等について想定する制度的枠組み

3. 国際機関のウラン廃棄物等処分の考え方

本章では、IAEA、ICRPにおけるウランを含む廃棄物の特に浅地中処分参考となる考え方についてまとめる。

3.1 IAEA 及び ICRP における主な文書について

IAEA については、現在出版されている放射性廃棄物処分に関する以下の文書から、ウランを含む廃棄物処分に関連する主な考え方を引用する。

- ・ 一般安全指針 GSG-1「放射性廃棄物の分類」(2009) [10]
- ・ 個別安全要件 SSR-5「放射性廃棄物の処分」(2012) [11]
- ・ 個別安全指針 SSG-23「放射性廃棄物処分のセーフティケースと安全評価」(2012) [12]

また、ICRP では、放射性廃棄物処分に関連する主な文書は以下のとおりである。

- ・ Publ. 46「放射性固体廃棄物処分に関する放射線防護の諸原則」(1985) [13]
- ・ Publ. 77「放射性廃棄物の処分に対する放射線防護の方策」(1997) [14]
- ・ Publ. 81「長寿命放射性固体廃棄物の処分に適用する放射線防護勧告」(1999) [15]
- ・ Publ. 82「長期放射線被ばく状況における公衆の防護」(1999) [16]
- ・ Publ. 103「2007年勧告」(2007) [17]

以上のうち、より最近の文書に基づいて放射性廃棄物処分の考え方を引用する。

また、ラドンの住居や作業場内における被ばくに関しては、

- ・ Publ. 65「家庭と職場におけるラドン - 222 に対する防護」(1993) [18]
 - ・ Publ. 115「ラドンと子孫核種からの肺がんリスク及びラドンに対する声明」(2010) [19]
- を引用する。

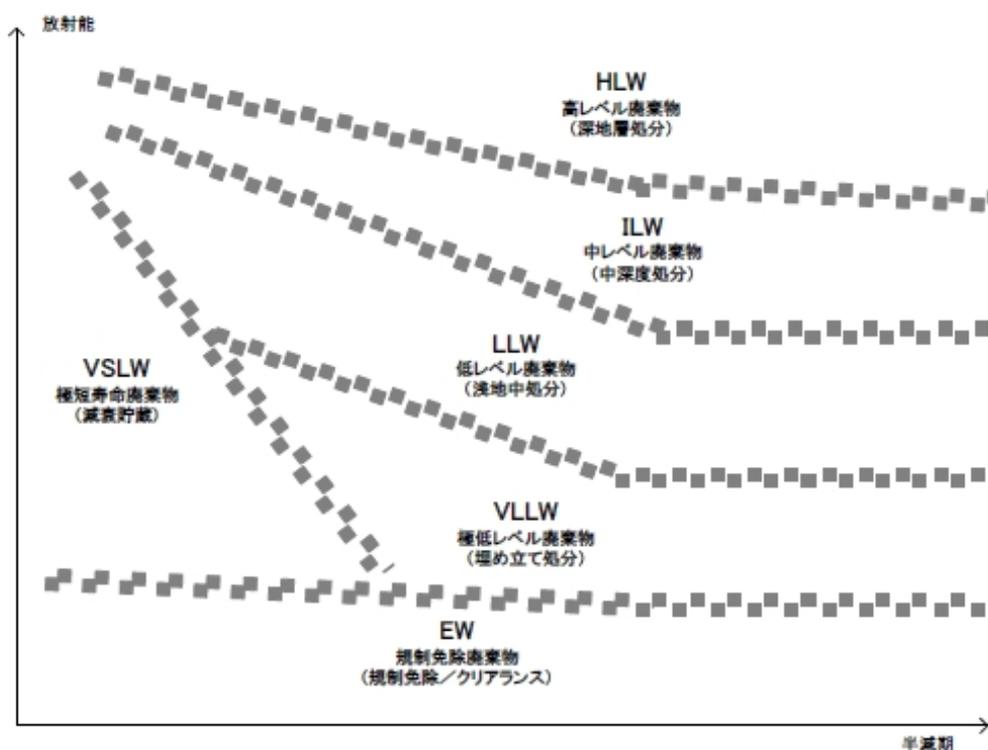
なお、ICRP は放射線防護に係る勧告を示す機関であることから、安全評価方法や処分施設の管理等に係る記載については、引用しない。

3.2 IAEA 及び ICRP における主な考え方

(1) 廃棄物の分類について

ICRP では Publ.81 の長寿命放射性廃棄物の処分に関する勧告や Publ. 82 における長期被ばくに関する勧告など、廃棄物の発生源に限定せず、長半減期性や被ばく影響の長期性に関する勧告が示されている。

IAEA では、GSG-1 において、放射性廃棄物(規制免除廃棄物を含む)を図 3-1 のように区分し、それぞれの廃棄物の処分概念の概要について説明している。核燃料の製造に伴って発生するウランを含む廃棄物は、核燃料サイクルの操業に伴って発生する廃棄物の一種として扱われており、他の放射性廃棄物と同様に扱われている。また、自然起源の放射性核種を含む鉱石や鉱物の採鉱あるいは製錬に由来する廃棄物(以下、「鉱さい等の廃棄物」という)も VLLW 及び低レベル放射性廃棄物(LLW)に含まれると示されている。



(文献^[10] 図1を転載)

図 3-1 廃棄物分類スキームの概念説明図

(2) 放射能濃度限度について

IAEA の GSG-1 では、VLLW 及び LLW の処分における長寿命核種の放射能濃度について以下のような主旨が示されている。

VLLW は、原子力施設の操業及び解体、また、鋳さい等の廃棄物も含まれ、クリアランスレベル付近または少し上回るレベルの廃棄物である。処分方式は、表層埋め立て方式が考えられ、短寿命の人工放射性核種を含む廃棄物では、規制免除廃棄物 (EW) の放射能レベルの1桁から2桁上のレベルが考えられ、自然起源の放射性核種を含む廃棄物では、長半減期という観点から、短寿命の人工放射性核種に比べて低いレベルとなることが考えられる。

LLW では、低濃度の長寿命放射性核種も含まれるかもしれない。特定の浅地中処分施設に対する受け入れ規準は、廃棄体における長寿命放射性核種の平均放射能濃度によって制限され、また、処分施設内での高い放射能濃度の廃棄物の定置場所を制限するような作業上の管理によって補完されることも可能である。

長寿命放射性核種に関する浅地中処分の制限を定めるべきであるとし、いくつかの国では、平均放射能濃度の限度を 400Bq/g、個々の廃棄物パッケージでの限度を 4,000Bq/g としている例を示している。

(3) 線量等の評価基準について

ICRP では、Publ.81 において、線量評価のめやすを自然過程を表すシナリオに対して 300

$\mu\text{Sv/年}$ の線量拘束値または年あたり 10^{-5} のオーダーのリスク拘束値を、偶発的に埋設地を掘り返すような人間侵入シナリオに対して介入の一般的参考レベルとして、介入（現在の分類として現存被ばく状況）に適用する年線量として $10\text{mSv}\sim 100\text{mSv}$ を提案した。Publ.82 では、長期被ばくに関する放射線防護の考え方が示され、線量拘束値は最大で 1mSv/年 以下及び 0.3mSv/年 を超えない値と示しているが、長寿命核種からの長期成分に対し、線量の組合せのいかなる考えうる状況の下においても、適合を保証するための線量率算定法が利用できない特定の状況において、 0.1mSv/年 の線量拘束値が示されている。

その後、Publ. 103 「2007 年勧告」では、放射性廃棄物処分は計画被ばく状況とし、線量拘束値は $300\mu\text{Sv/年}$ 、長寿命核種からの長期成分の被ばくに対して、Publ.82 と同様に 0.1mSv/年 を提案している。人間侵入シナリオや自然過程のシナリオに関して明確な言及はないが、Publ.81 が引き続き有効であると示している。一方で、介入の参考レベルの考え方を 1mSv/年 以下、 $1\text{mSv/年}\sim 20\text{mSv/年}$ 、 $20\text{mSv/年}\sim 100\text{mSv/年}$ に区分し、 1mSv/年 から 20mSv/年 を自然起源放射性物質（NORM）^[19] や自然バックグラウンド放射線、人間の居住環境中の放射性残渣の現存被ばくに対する介入の参考レベルとして提案している。

IAEA では、SSR-5 において閉鎖後期間の放射線防護規準を「処分施設に影響する可能性のある自然過程の結果について 0.3mSv/年 の線量拘束値又は 10^{-5} 年のオーダーのリスク拘束値を超えないように設計されること。偶発的に埋設地を掘り返すような人間侵入シナリオの影響について、サイトの周辺住民で 1mSv/年 未満の評価であれば、その事前対策が正当化されると考えられ、 20mSv/年 を上回る評価であれば地下深部への処分などの代替オプションが考慮されるべきであること。 $1\sim 20\text{mSv/年}$ であれば、施設の開発段階で侵入確率の低減や、施設設計の最適化によって、侵入した際の影響を限定する合理的な取組が正当化される。」のように示している。

なお、IAEA は、RS-G-1.7^[20] において、規制除外の概念を使用し、世界規模での土壤中の放射能濃度分布の上限に対する考察により、 ^{40}K を除くウラン等の自然放射性物質を含む大量物質の免除・クリアランスレベルを 1Bq/g として示した。この値に基づき、現在公開されている BSS の暫定版 [21] では、 1Bq/g より低い物質は、計画被ばく状況の範囲外であると示している。また、同書において、自然放射性物質を含む大量物質のクリアランスについては、クリアランスレベル（ウランの場合は 1Bq/g ）より低いか、または、物質の種類ごと、処分に限定する場合など個別にレベルを検討する場合は、バックグラウンドレベルである 1mSv/y のオーダーを線量基準とすることを示している。

(4) 評価期間について

IAEA では、SSG-23 において、安全評価の期間に関して、「ウラン採鉱廃棄物等のような長半減期核種を含む場合、長期にわたり線量とリスクが一定又は上昇する可能性があるが、長期においては評価の不確実性が著しく大きくなるため、定量的な評価期間が制限される可能性がある。そのような廃棄物を処分する様な地上処分施設では、その不確実性の大きさから定量評価は 1,000 年の期間を超えると無意味になるかもしれない。人工バリアを備えた浅地中処分施設の場合、表層の処分施設より、侵食や人間侵入等の影響がより小さいまたは確率が低いことから、数千年の期間は合理的となるかもしれない。」のように示されている。

(5) 人間侵入シナリオについて

IAEA では、SSG-23 においてウラン廃棄物等に限らず、浅地中処分における人間侵入シナリオを特定の課題として詳細に考察している。その中の主な考えは以下の通りである。

- ・ 人間侵入シナリオの安全評価では、侵入の確率に関する想定は不確実であるため、侵入の確率と侵入により生じる線量の積を評価基準として使用するリスクに基づく考え方を使用すべきでない。
- ・ 人間侵入シナリオは、侵入の性質と侵入者の行為の様式化に基づき設定されるべきである。
- ・ 受動的な制度的管理（例えば、記録、施設の標識）は奨励されるものであるが、人間侵入の防止又は確率を低減する上で有効にはならないと保守的に想定すべきである。
- ・ 人間侵入の評価においては廃棄物の不均一性（ホットスポット）についてその影響を評価すべきである。
- ・ 人間侵入の可能性を低減し影響を緩和させるための措置として、能動的な制度的管理、耐久性のある物理的バリアシステム、廃棄物の分割化、廃棄物の定置深さを深くすることなどが考えられる。

(6) 制度的管理について

IAEA 文書 GSG-1 では、LLW の浅地中処分では、最長で 300 年前後の制度的管理は信頼できると想定されているが、ウラン採鉱等の廃棄物では、放射能の減少量が小さいため、施設の定期安全レビューにおいて、より長期的な制度的管理の期間が求められる必要があると示されている。

SSR-5 では、放射性廃棄物の処分施設の閉鎖後期間と制度的管理の要件として、

- ・ 処分施設の長期安全性は能動的制度的管理に依存してはならない。
- ・ 長半減期核種を含み大量である採鉱等の廃棄物の浅地中処分の場合、安全策として継続中の能動的な制度的管理に依存することのないように放射能濃度を制限されなければならない。
- ・ 処分施設の能動的制度的管理期間を超えた処分施設の状態は、制限なしのサイト解放が通常意図されていないことから、原子炉施設等の廃止措置後のサイト解放と異なる。

と記載されている。

SSG-23 では、

- ・ 処分施設の長期安全は制度的管理に依存すべきでない。
- ・ 制度的管理は、浅地中処分においては一定期間にわたって人間侵入を防止するための重要な安全構成要素である。
- ・ 受動的管理は推奨されるが、長期にわたって人間侵入の防止に有効になると想定するべきではない。
- ・ 大量の自然起源放射性物質を含む廃棄物を処分するような場合、継続的な制度的管理を伴う管理オプションを用いることが考えられ、これは防護の最適化の結果となるかもしれない。

と記載されている。

(7) ラドンによる被ばくについて

ICRP では、Publ.65 において、住居内及び作業場内におけるラドンの年間平均空気中濃度に対して、3mSv/年～10mSv/年に相当する 200 Bq/m³～600 Bq/m³及び 500 Bq/m³～1500 Bq/m³をそれぞれ対策レベルとして示した。Publ.103 では、Publ.65 の考え方に基づき、高い方の 10mSv/年に相当する濃度で、住居内 600Bq/m³、作業場内 1500Bq/m³を参考レベルとして示し、各国が独自の参考レベルを防護の最適化に基づいて設定すべきと示している。

IAEA では、ICRP の Publ.65 を受けて、1996 年版の国際基本安全基準 BSS (Basic Safety Standard) において、住居における対策レベルを 200 Bq/m³～600 Bq/m³としながら、作業場所における対策レベルは、国際的調和を図るため、ICRP の値を参照し、1,000Bq/m³を対策レベルとして提示している。この IAEA のレベルを ICRP Publ.103 において容認することが示されている。

一方、ICRP では、2009 年にラドンに関する声明、2010 年に Publ.115 を出版し、ラドン被ばくによるリスク係数の値が約 2 倍程度大きくなることが示され、その結果、住居における濃度の推奨値の高い方の値を 300Bq/m³とすることが示された。低い方の値は、各国の機関が地域の状況を考慮して考えるべきだと示している。

IAEA においても、BSS の暫定版^[21]を 2011 年に出版し、住居や公衆の滞在時間が長い建物におけるラドンの年間平均放射能濃度の対策レベルを 300Bq/m³とすることが示された。一方、作業場所の対策レベルは 1,000Bq/m³から変更していない状況である。

上記の ICRP 及び IAEA におけるウラン廃棄物等の浅地中処分に参考となる考え方について、表 3-1 にまとめる。

表 3-1 ICRP 及び IAEA におけるウラン廃棄物等の浅地中処分に参考となる考え方 (1/2)

	ICRP の考え方	IAEA の考え方
廃棄物の分類	廃棄物の発生源に限定せず、長半減期性や被ばく影響の長期性に関する勧告が示されている。(publ.81、publ.82)	ウランを含む廃棄物、銩さい等の廃棄物も VLLW 及び LLW に含めて議論されている。(GSG-1)
放射能濃度限度について	----	長寿命放射性核種に関しては浅地中処分の制限を定めるべきである。いくつかの国では、平均放射能濃度 400Bq/g、個々の廃棄物パッケージの限度を 4,000Bq/g までを採用している。(GSG-1)
線量等の評価基準について	自然過程を表すシナリオに対して 300 μ Sv/年の線量拘束値または年当たり 10 ⁻⁵ のオーダーのリスク拘束値を、偶発的に埋設地を掘り返すような人間侵入シナリオに対して介入の一般的参考レベルとして現存年線量で 10mSv~100mSv (Publ.81) Publ.103 では、Publ.81 の考え方は有効としつつも、介入の参考レベルを 1mSv/y~20mSv/y に改正	処分施設に影響する可能性のある自然過程の結果について 0.3mSv/年の線量拘束値又は 10 ⁻⁵ /年のオーダーのリスク拘束値。人間侵入シナリオの影響について、サイトの周辺住民で 1mSv 年未満であれば、その事前対策が正当化されると考えられ、20mSv/y を上回れば地下深部への処分などの代替オプションが考慮されるべきであること。 1~20mSv/年であれば、施設の開発段階で侵入確率の低減や、施設設計の最適化によって、侵入した際の影響を限定する合理的な取組が正当化される。(SSR-5)
評価期間について	----	ウラン銩さい等の廃棄物のような長半減期核種を含む場合、長期においては評価の不確実性が著しく大きくなるため、定量的な評価期間が制限される可能性がある。そのような廃棄物を処分する地上処分施設では、その不確実性の大きさから定量評価は 1,000 年の期間を超えると無意味になるかもしれない。人工バリアを備えた浅地中処分施設の場合、数千年間は合理的になるかもしれない。(SSG-23)
人間侵入シナリオについて	----	<ul style="list-style-type: none"> ・ 人間侵入シナリオの安全評価では、侵入の確率の想定が不確実であるため、侵入の確率と生じる線量の積を評価基準として使用するリスクに基づく考え方を使用すべきでない。 ・ 人間侵入シナリオは、侵入の性質と侵入者の行為の様式化に基づき設定されるべきである。 ・ 受動的な制度的管理（例えば、記録、施設の標識）は奨励されるものであるが、人間侵入の防止又は確率を低減する上で有効にはならないと保守的に想定すべきである。 ・ 人間侵入の評価においては廃棄物の不均一性(ホットスポット)について、その影響を評価すべきである。 ・ 人間侵入の可能性を低減し影響を緩和させるための措置として、能動的な制度的管理、耐久性のある物理的バリアシステム、廃棄物の分割化、廃棄物の定置深さを深くすることなどが考えられる。

表 3-1 ICRP 及び IAEA におけるウランを含む廃棄物の浅地中処分に参考となる考え方 (2/2)

	ICRP の考え方	IAEA の考え方
制度的管理について	----	<ul style="list-style-type: none"> • ウランの採鉱等の廃棄物では、放射能の減少量が小さいため、施設の定期安全レビューにおいて、より長期的な制度的管理の期間が求められる必要がある。 (GSG-1) • 処分施設の長期安全性は能動的制度的管理に依存してはならない。(SSR-5、SSG-23) • 長半減期核種を含み大量である採鉱等の廃棄物の浅地中処分の場合、安全策として継続中の能動的な制度的管理に依存することのないように放射能濃度を制限されなければならない。(SSR-5) • 処分施設の能動的制度的管理期間を超えた処分施設の状態は、制限なしのサイト解放が通常意図されていないことから、原子炉施設等の廃止措置後のサイト解放と異なる。(SSR-5) • 制度的管理は、浅地中処分においての一定期間にわたって人間侵入を防止するための重要な安全構成要素である。受動的管理は推奨されるが、長期にわたって人間侵入の防止に有効になると想定すべきではない。(SSG-23) • 大量の自然起源放射性物質を含む廃棄物を処分するような場合、継続的な制度的管理を伴う管理オプションを用いることが考えられ、これは防護の最適化の結果となるかもしれない。(SSG-23)
ラドンによる被ばくについて	<p>Publ.65 では、空气中濃度の対策レベルを住居内 200～600 Bq/m³、作業場内 500～1500 Bq/m³（それぞれ 3mSv～10mSv/年に相当する。）として示した。</p> <p>Publ.103 では、Publ.65 の考え方に基づき、高い方の 10mSv/年に相当する濃度 600Bq/m³、(住居内)、1500Bq/m³を（作業場内）を参考レベルとして示した。</p> <p>2009 年にラドンに関する声明、2010 年に Publ.115 を出版し、ラドン被ばくによるリスク係数の値が約 2 倍程度大きくなることから、住居における濃度の高い方の推奨値を 300Bq/m³として示した。低い方の値は、各国の機関が地域の状況を考慮して考えるべきだと示している。</p>	<p>ICRP の Publ.65 を受けて、住居における対策レベルを 200～600 Bq/m³としながら、作業場所における対策レベルは、国際的調和を図るため、ICRP の値を参照し、1,000Bq/m³を対策レベルとして提示した。(BSS 1996)</p> <p>BSS の暫定版では、ICRP の声明 (2009) に基づき、住居や公衆の滞在時間が長い建物におけるラドンの年間平均放射能濃度の対策レベルを 300Bq/m³として示した。一方、作業場所の対策レベルは 1,000Bq/m³から変更していない。</p>

4. 第二種廃棄物埋設の浅地中処分での課題と海外の対応状況

4.1 ウランを含む廃棄物を第二種廃棄物埋設する場合の課題の抽出

放射能濃度の低いウランを含む廃棄物を研究施設等廃棄物²として、試験研究炉や RI 使用施設等から発生する廃棄物と一緒に第二種廃棄物埋設事業において浅地中処分することを想定する。

前述のとおり、研究所等廃棄物の浅地中処分の安全規制の基本的考え方の報告書では、放射能濃度の低いウランを浅地中処分することが可能であることが示されているが、この報告書を取りまとめる審議の過程において、ウランの浅地中処分の濃度上限値や長半減期であることの特徴を考慮した長期の安全評価方法については具体的に検討が行われなかった。

その後の検討として行われた「低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について（平成 19 年 5 月）」^[22]、（以下、「濃度上限値報告書」という）、「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）」^[23]（以下、「第二種埋設指針」という）において、ウラン廃棄物は、自然起源の放射性物質を主たる組成とする放射性廃棄物であり、長期にわたり放射能の減衰が期待できず、かつ、安全性の判断に当たり自然環境中の放射能との関連等も考慮する必要があることから、適用対象外とし、埋設計画が具体化する段階で検討することとなっている。

このような国内の状況に対して、海外におけるウランを含む廃棄物の処分について、以下の点に着目して情報を整理する。

- ① 短寿命低レベル放射性廃棄物の浅地中処分等におけるウランを含む廃棄物の取扱い
- ② 低レベル放射性廃棄物の処分におけるウランを含む廃棄物の放射能濃度等の基準について

次に、ウラン廃棄物が第二種埋設指針の適用対象外となっている理由の一つに、精製されたウランは長期にわたって子孫核種が生成して放射能が増加する傾向があり、このため、浅地中処分において長期の安全評価の取扱いを構築しなければならない点にあると考えられる。したがって、海外におけるウランを含む廃棄物も埋設対象とした浅地中処分場における管理期間終了以後の安全評価方法について整理する。第二種埋設指針及び原子力規制委員会が示した「第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」^[24]（以下、「施設基準に関する規則の解釈」という）に示された管理期間終了以後の安全評価方法を参照し、以下の観点から整理する。

- ③ シナリオの種類と対応する線量基準
- ④ ウランの子孫核種であり、自然起源の放射性物質で線量への寄与が大きいラドン²²²の線量評価について
- ⑤ 管理期間終了以後の安全評価期間について
- ⑥ 長期的な評価における地質環境、バリア機能及び生活環境の変化の設定について

²原子力機構を含め、全国各地の研究機関、大学、民間企業、医療機関等で発生する多種多様な低レベル放射性廃棄物

- ⑦ 長期的に生成するウランの子孫核種の評価における取扱いについて
- ⑧ 跡地利用（人間侵入）シナリオの長期評価における埋設施設の廃棄物層の放射能インベントリの減少について

また、ウランを含む廃棄物を研究施設等廃棄物として処分する場合、核種組成の異なる廃棄物を混合して処分する方法となる。この特徴を踏まえ、以下の安全評価の情報について整理する。

- ⑨ 安全評価における埋設施設の廃棄物層の放射能濃度の平均化の設定、これに基づく実際の廃棄物の埋設方法の管理について

次に、ウランを含む廃棄物を第二種廃棄物埋設の対象とするにあたって、管理期間終了以後における安全評価以外の観点から第二種埋設指針及び施設基準に関する規則の解釈で考慮すべきと考えられる項目は以下のように挙げられる。

- ⑩ 管理期間の長さについて
- ⑪ 管理期間終了後の土地利用について
- ⑫ ウランの化学物質としての環境影響について
- ⑬ 放射線監視の方法（ウラン、ラドンのモニタリング）について

また、ウランが核燃料物質であることを考慮し、原子炉等規制法に示された第二種廃棄物埋設規則の内容から、以下の項目が挙げられる。

- ⑭ 核物質防護・保障措置について

北米、欧州の放射性廃棄物の処分場での以上の項目への対応について整理することとした。表 4-1 に抽出した課題項目を示す。

表 4-1 ウランを含む廃棄物を第二種廃棄物埋設事業の対象とする際の整理項目

	課題項目	課題において整理すべき内容	課題抽出の根拠	
1	浅地中処分における長半減期核種の取扱い	短寿命低レベル放射性廃棄物の浅地中処分等におけるウランを含む廃棄物の取扱い	第二種埋設指針、施設基準に関する規則の解釈	
2	埋設における放射能濃度等の基準	ウランを含む廃棄物の浅地中処分等における放射能濃度等の基準	濃度上限値報告書	
3	管理期間終了以降の安全評価の方法	シナリオの種類と対応する線量基準	第二種埋設指針、施設基準に関する規則の解釈	
4		ウランの子孫核種であるラドンの線量評価		
5		評価期間		
6		浅地中処分の長期評価において地質環境、バリア機能、生活環境の変化の設定		
7		ウランの子孫核種の生成		
8		跡地利用（人間侵入）シナリオの長期評価における廃棄物層の放射能インベントリの減少		
9		安全評価における埋設施設の廃棄物層の放射能濃度の平均化の設定、及び実際の廃棄物の埋設方法の管理について		
10		管理期間		管理期間の長さ
11				管理期間終了後の土地利用
12	化学物質の考慮	ウランの化学物質としての環境影響		
13	放射線監視	ウラン、ラドンのモニタリング		
14	その他考慮すべき事項	核物質防護・保障措置について	第二種埋設規則、施設基準に関する規則の解釈	

4.2 課題に対する海外の対応

表 4-1 にあげた各項目について、米国、カナダ、英国、フランス、スウェーデン（以下、調査対象国）の処分場での対応を整理した。その概要を以下に、また調査対象となった各国ごとに整理した結果を表 4-2 に示す。

(1) 海外の低レベル放射性廃棄物の処分場におけるウランを含む廃棄物の取扱い

ウラン取扱施設から発生した低レベル放射性廃棄物は、日本では第二種埋設指針の対象から外されているが、調査対象国では定められた放射能濃度基準を満たしていれば他の放射性廃棄物と区別されずに処分されていた。

(2) 低レベル放射性廃棄物の処分におけるウランを含む廃棄物の放射能濃度等の基準

ウランを含む廃棄物が調査対象国で処分された場合の処分場受入基準濃度を整理したところ、ウラン又は α 核種濃度の廃棄物パッケージ基準がおよそ平均で数百 Bq/g、最大で 1000Bq/g 程度の範囲であった。

(3) シナリオの種類と対応する線量基準

調査対象国の対応は、公衆と人間侵入に対する線量防護の基準値は異なり、公衆防護基準は米国、フランスで $250 \mu \text{ Sv/年}$ が共通で、線量拘束値相当の値であった。英国はリスク基準で、確率 1 の事象であれば $20 \mu \text{ Sv/年}$ に相当する。一方、人間侵入への基準値は米国、フランスでは基準値が規定されず、英国とカナダでは数十 mSv/年程度の範囲の介入もしくは現存被ばく状況に相当する値が採用されていた。

(4) ウランの子孫核種であり、自然放射性物質で線量への寄与が大きいラドンの線量評価
処分施設等における廃棄物中のウラン核種を起源とするラドン発生について評価しているのは、フランス長寿命低レベル放射性廃棄物 (FA-VL) 処分概念、英国ドリッグ、カナダ廃棄物長期管理施設、米国クライブであった。そのほかの処分場ではラドンを評価していない。理由としては、処分場内のウラン濃度が低いこと、評価期間が短いことが挙げられた。

(5) 管理期間終了後の安全評価期間

公衆防護基準の多くで決定シナリオとなる地下水シナリオは、各国で年数の長さは様々であったが、シナリオにおけるピーク線量の発生年代まで評価を実施する点では共通していた。一方で、人間侵入シナリオでは調査対象国の処分場は 2 つにグループ化された。評価期間が 500 年以下であり、処分場の管理期間相当で評価を打ち切る短期評価処分場と、評価期間が 1 万年程度でその後は定性的評価を実施する長期評価処分場である。長期評価処分場は(4)でウラン起源のラドン評価を実施しているグループと一致した。長期評価処分場と短期評価処分場の各課題への対応を整理して、表 4-3 に示す。

(6) 長期的な評価における地質環境、バリア機能及び生活環境の変化の設定

バリア機能の変化の設定については、長期評価の有無を問わず、計画段階の FA-VL 処分概念、産廃処分場のグリタを除いて何らかの考慮をしている。ただし、短期評価処分場は、規制に則り監視段階時の保護を想定するフランスや、人工バリア全喪失で評価する英国クリフトンマーシュのように、比較的単純なモデルで想定している。これに対し、長期評価処分場でのバリア機能変化は、侵食水路形成やパラメータスタディ、処分場自体の崩壊等のより複雑な評価を行っている。なお、長期的な評価における地質環境の変

化、及び、長期的に生成するウランの子孫核種の評価における取扱いの評価を人間侵入シナリオで実施しているのは、いずれも(5)の長期評価処分場である。

(7)跡地利用（人間侵入）シナリオの長期評価における埋設施設の廃棄物層の放射能インベントリの減少

本項目を考慮している処分場は、調査対象国で基本的には事例がない。

(8)安全評価における埋設施設の廃棄物層の放射能濃度の平均化の設定、これに基づく実際の廃棄物の埋設方法の管理

廃棄物の定置管理方法について整理した。短期評価処分場では米国 WCS 処分場を除いて処分場内配置による放射能濃度平均化を考慮しているが、長期評価処分場のうち米国クライブ、カナダ廃棄物長期管理施設、英国ドリッグが平均化ではなく深度管理を実施していた。

(9)管理期間の長さ

各処分場とも数百年までとしているが、短期評価処分場に 30 年等期間が短い処分場が多く、長期評価処分場では 100 年以上 500 年以下である。

(10)管理期間終了後の土地利用

米国では連邦法により州または連邦政府の所有する土地での処分が規定されているため、処分場跡地の責任を公的機関が持つことになる。また、英国及びスウェーデンでは管理終了時の公文書館への記録移管検討を事業者に義務付けており、カナダでは管理期間は確認のための年限であり終了期限ではない。このように未定のフランスを除く各国で何らかの制度的管理が決められている。その一方で長期評価処分場の米国、フランス FA-VL 処分概念では、管理期間後は処分場記録が不明確となる可能性が懸念として文書に明記されている。

(11)その他の表 4-1 の項目

「ウランの化学物質としての環境影響」及び「核物質防護・保障措置について」については、当初の調査範囲には含めていなかったため情報が不足している。また、「放射線監視の方法（ウラン、ラドンのモニタリング）」については、多くの処分場で実施されているが、モニタリング項目（ウラン、ラドン、空気、水）の選択について、明確な共通性やグループ分けを見いだせなかった。これらの分析は、今後の検討課題としたい。

表 4-2 課題への各国の対応 (1/2) [5], [31]

課題項目	課題内容	フランス FA-VL 処分概念	フランス オーブ	フランス モルグリエ	英国 クリフトンマージュ	英国 ドリッグ	スウェーデン グリタ	カナダ 廃棄物長官管理施設	米国 WCS(閉鎖)	米国 クライブ*
1	浅地処分における長半減期核種の取扱い	ウラン廃棄物を特定しない。	ウラン廃棄物を特定しない。	ウラン廃棄物を特定しない。	ウラン廃棄物を特定しない。	ウラン廃棄物を特定しない。	ウラン廃棄物を特定しない。	ウラン廃棄物を特定しない。	劣化ウランを特定。	劣化ウランを特定。
2	埋設における放射能濃度の基準	サイト選定後、環境に合わせた設定。	α核種： 処分場平均 <370Bq/g。 廃棄物ごと <3,700Bq/g。	ウラン： パッチごと <100Bq/g。 廃棄物ごと <1,000Bq/g。	10トントラックで <200Bq/g、 廃棄物ごと ≦1,000Bq/g。	α核種 <4,000Bq/g。	有害物として の天然ウラン 核種で10Bq/g 以下。	受入基準無し。	劣化ウラン ≦370Bq/g。 (安全評価は 一部の施設は約 800Bq/gで実 施)。	劣化ウラン <666 Bq/g うち U-238 <611 Bq/g**。
3	シナリオの種類と対応する線量基準	0.25mSv/年 (線量拘束値)。	1mSv/年 (規制値)。 250pSv/年 (ANDRA の目標値)。	基準値無し (参考値 0.25mSv/y)。	リスク基準 10 ⁻⁴ /年。 (発生確率が1の時は20pSv/年に相当)。	3~20mSv/年の範囲。	数 10pSv/年以下。	線量基準無し。 (流出水の 水質基準 5μg/D)。	250pSv/年。	250pSv/年 であるが地下 水濃度基準 (核種毎)に 対して評価。
4	ウランの子孫核種であるラドン線量評価	○評価している。	×評価していない。 (ウラン濃度低いため)。	○評価している。	×評価していない。	○評価している。	×評価していない。	○評価している。	×評価していない。 (評価期間が100年 だから)。	○評価している。
5	管理期間終了以降の安全評価の方法	1万年 (安全性担保) 以降は定性的評価。	1万年 (ピーク評価が数千年以内のため)。 施設閉鎖後300年後。	施設閉鎖後50年後。	10万年。 線量ピークを含む期間。	施設閉鎖後10万年 (参考評価25万年、侵食なし)。 施設閉鎖後10万年 (参考評価なし)。	長期評価しない [20]。 施設閉鎖時点 [20]。	最大5千万年。 管理期間終了直後の500年と最大放射能の8,000年。	10万年 (3.6万年でピーク)。 施設閉鎖後100年。	500年。 施設閉鎖後1万年。 (以降は定性的な評価を実施)。
6	浅地処分長期評価において地質環境、バリア機能及び生活環境の変化の設定	○地質の安定性により処分場の安全性を最低1万年担保。 処分場設計の具体的な評価や設定は、今後検討。	△法規制あり。(被覆材の厚さは監視段階の間、腐食や人間の侵入などから廃棄物を保護するのに十分でなければならぬ)。(RIS I-2) [20]。	△地下水シナリオ ○人工バリアを全て喪失したモデルで評価。	○気候変動時の河川による施設侵食シナリオを評価。 不明だが、処分場自体の崩壊を想定。	×長期評価を実施していない。	×長期評価しない。 (産廃処分場であるためとしている)。	○オンタリオ湖水位変化を考慮。	△地下水シナリオで考慮。	○200 万年後まで地質環境の定性的評価を実施。 処分場設計の具体的な評価は、今後検討。

表 4-2 課題への各国の対応 (2/2)

課題項目	課題において整理すべき内容	フランス FA-VI 処分 概念	フランス オーブ	フランス モルヴァリエ	英国 クリフトンマッシュ	英国 ドリッグ	スウェーデン グリタ	カナダ 廃物長期管理施設	米国 WCS	米国 クライブ*
7	ウランの子孫核種の生成	○評価している。	×評価していない。	×評価していない。	○評価している。 (但し評価期間まで)	○評価している。	人間侵入シナリオでは Pa-234 までは Pa-234, Th-234, Th-231) である。	○評価している。	△地下水シナリオで考慮。 (人間侵入シナリオでは Pa-234, Th-234, Th-231) である。	○評価している。
8	管理期間終了以降の安全評価の方法	×考慮していない。	×考慮していない。	×考慮していない。	×考慮していない。	×考慮していない。 (浸出量の妥当性証明が困難)	×考慮していない。 人間侵入は処分時濃度。	×考慮していない。	×考慮していない。	△報告書では、浸透水、空気、土壌への移行を考慮する記載あり。
9	安全評価における埋設施設の廃棄物層の放射能濃度の平均化の設定、及び実際の廃棄物の埋設方法の管理について	処分場設計の具体的な評価や設定は、今後検討。	ピット、トレンチ単位で行っている。	ピット、トレンチ単位で平均化	平均化している。 (2000Bq/gと評価)。	ピットの厚み、覆土の放射能濃度を考慮して平均化。	人間侵入シナリオにおける評価は平均化。	濃度を平均化の管理はしない。	濃度の平均化の管理はしない。	濃度の平均化のための配置管理はしないが、性状による深層管理実施、高濃度ラジウム廃棄物等)。
10	管理期間の長さ	500 年以降の記録が不明確となること	300 年 (RFS 1.2) [6]。	30 年。 安全評価はそれ以後の保守管理がないものとして実施。	定期レビュー (5 年程度) を繰り返す。	100 年 (最長の管理期間)。	30 年。	(500 年) で再確認。	100 年。 (10CFR61) [6]。	
11	管理期間	管理期間終了後の土地利用	モニタリング期間終了後、10 数年から 10 年、州の土地管理等による再利用制限の可能性が詳細未定。		評価上、管理期間終了後 500 年の人間侵入を想定。	機器者は許可期間中の記録を保存し、許可期間終了時に、公共の記録保管所での記録保管を検討 [6]。	モニタリングで放射能濃度が安定した時点で終了を議論。	管理期間終了後に再考。	100 年間に以上になると管理が期待できない可能性がある [6]。	
12	化学物質の考慮	ウランの化学物質としての環境影響			Δ指針あり (Sniffer manual) [6]。			○オンタリオ州基準あり。	○ウランの MCL (最大汚染レベル) は 30µg/L (40CFR141.66(2)(b)) [6]。	
13	放射線監視	ウラン、ラドンのモニタリング	Δウランにつき ASN の認可を受け実施 (定期検査受検)。	ウラン、ラドン実施 (単の規定に基づき空気、堆積物、水飲料測定)。	ラドンおよび全 α をモニタリング。	ウラン、ラドンは空気のみ、ラドンは四半期毎)。	Δ水質中ウラン濃度モニタリング (ラドン不明)。	○ウラン、ラドンとも実施 (全 α 四半期 1 回、ウラン制限超過時)。	○ウラン、ラドンとも実施 (ラドン及び全 α 週 2 回、ウラン 1 回)。	
14	その他考慮すべき事項	核物質防護の方法	濃縮度 1% 以上で、核分裂性物質に対して 0.1g/L (処分場廃棄体仕様)。			ウランは劣化 U-235 含有量が 60 g 未満)。				処分場への輸送・保管中の U-233, U-235 他への廃棄体中の重量、濃度規制値あり (各州からの処分場ライセンスより)。

* : 安全評価の記載は、2011 年に報告された劣化ウランで汚染された廃棄物の安全評価の内容。

凡例 ○ : 受入/評価の実施、△ : 受入/評価の一部実施又は想定・検討、× : 受入/評価せず、- : 今後の調査課題

** : 安全評価では 10,000Bq/g のレベルを想定。

表 4-3 長期評価処分場と短期評価処分場の対応整理

課題において整理すべき内容		長期評価処分場 ・米国 クライブ ・カナダ 廃棄物長期管理施設 ・英国 ドリッグ ・フランス FA-VL 処分概念	短期評価処分場 ・米国 WCS ・英国 クリフトンマーシュ ・フランス オープ、モルヴィリエ ・スウェーデン グリタ
1	短寿命低レベル放射性廃棄物の浅地中処分等におけるウランを含む廃棄物の取扱	ウラン廃棄物を特定しない。	
2	ウランを含む廃棄物の浅地中処分等における放射能濃度等の基準	平均で数百 Bq/g、最大で数千 Bq/g 程度の範囲*。	
3	シナリオの種類と対応する線量基準	地下水シナリオ	0.25mSv/年（線量拘束値）。
		人間侵入シナリオ	基準値無しもしくは数十 mSv/年程度。
4	ウランの子孫核種であるラドンの線量評価	ウラン起源	評価している。
		(参考) ラジウム起源	評価していない。
5	評価期間	地下水シナリオ	各国で年数の長さは様々であったが、シナリオにおけるピーク線量の発生年代まで評価を実施する点では共通。
		人間侵入シナリオ	1 万年程度。 その後は定性的評価。
6	浅地中処分の長期評価において地質環境、バリア機能及び生活環境の変化の設定	地質環境の変化の設定	500 年以下。 処分場の管理期間相当。
		バリア機能の変化の設定	評価していない。
7	ウランの子孫核種の生成	パラメータスタディや処分場崩壊含めた複雑評価。	人工バリア全喪失または損傷なし等の単純評価(WCS 地下水シナリオ除く)。
8	ウランの子孫核種の生成	評価している。	評価していない。
9	跡地利用（人間侵入）シナリオの長期評価における廃棄物層の放射能インベントリの減少	考慮していない。	
10	安全評価における埋設施設の廃棄物層の放射能濃度の平均化の設定、及び実際の廃棄物の埋設方法の管理について	平均化ではなく深度管理 (FA-VL 処分概念は未定)。	平均化実施 (WCS 除く)。
11	管理期間の長さ	100 年以上 500 年以下。	5 年～30 年 (オープと WCS 除く)。
12	管理期間終了後の土地利用	未定のフランスを除く各国で何らかの制度的管理が決められている。	
13	ウランの化学物質としての環境影響	今後の検討課題。	
14	ウラン、ラドンのモニタリング		
14	核物質防護の方法		

*米国クライブの安全評価では 10,000Bq/g のレベルを想定。

5. 第二種廃棄物埋設の枠組みに入らない廃棄物の問題点と情報整理

5.1 第二種廃棄物埋設以外の浅地中処分等の方法

第4章では、現行の第二種埋設の制度にウラン廃棄物を対象とし、浅地中処分することを想定して、関連する海外情報を整理した。第4章で指摘したように、諸外国の事例では、放射能濃度の低いウランを含む廃棄物は、他の原子力施設から発生する放射性廃棄物とあわせて第二種埋設と同様な方法により浅地中処分されている。一方、ウラン廃棄物の放射能濃度が高いまたは埋設量が多く埋設放射能が多くなると、ウラン廃棄物の長半減期核種で子孫核種がビルドアップすることにより放射能が増加する特徴が処分システムの安全性に顕著に関わってくるため、ウラン廃棄物を第二種埋設の方法で浅地中処分することが困難になる可能性が考えられる。

ここでは、浅地中処分として、図 2-1 に示す② 第二種廃棄物埋設の浅地中処分の代替案と想定できる②-A 処分限定クリアランス及び②-B VLLW の産廃処分との混合処分の様な処分方策、より高い濃度のウラン廃棄物を処分する③ 第二種廃棄物埋設以外の浅地中処分等に関連する海外情報を整理する。なお、ここで整理される考え方は、②、②-A 及び②-B に係るウランの放射能濃度の範囲の廃棄物を一つの処分施設で処分する際にも参考とすることができると考えられる。さらに、処分に限らない廃棄物管理方策として、浅地中における埋設という形態をとった長期管理に係る情報を示す。

これらは、廃棄の事業として法体系の枠組みに含まれている核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物で廃棄しようとするもの（以下「核燃料廃棄物」という。）に係る管理方策の例である。一方、核原料廃棄物の処分に係る規制については、現在廃棄の事業として考慮されていない。この核原料廃棄物については、届出値未満の核原料物質を扱う事業者を対象としたウラン又はトリウムを含む原材料、製品等の安全確保に関するガイドライン^[30]が運用されている。それ以上の核原料物質を扱う事業者には、このガイドラインも参考にしつつ、法令に従った措置をすることが求められており、将来的にはその方向性を提案していくことが必要になってくると考えられる。そこで、規制体系の在り方として、原子炉施設及び核燃料施設に係る規制と核原料物質を取り扱う施設の規制についての海外情報および調査の課題を列挙する。なお、核原料廃棄物の処分等については、管理の初期段階から廃棄物中に含まれるラジウムを起源としたラドンを管理する必要があるものの、核燃料廃棄物を対象とする処分施設等での管理と大きく違いはないと考えられることから、技術的な課題整理は注目すべき点がある以外、行わないこととする。

5.2 VLLW の産廃処分と処分限定クリアランス

フランスのモルヴィリエ、英国のクリフトンマーシュではウラン廃棄物を放射性廃棄物処分場ではなく産廃処分場に処分している^[31]。この2カ国の内、英国では4Bq/g以下のウラン廃棄物は免除として産廃処分場に処分することが可能である^[32]。この場合、処分する産廃処分場では放射性廃棄物処分場としての許可は不要である。また、スウェーデンやドイツでは制度として処分限定のクリアランス制度が成立しており、ウラン廃棄物も産廃処分場に処分されている。スウェーデンのクリアランスレベルは有害物として取り扱う場合で

10Bq/g^[25]、ドイツの場合、年間 100 トンまでの廃棄物を処分する場合でクリアランスレベルは 6Bq/g となっている^[33]。

米国では環境修復計画で 0.05wt%以下のウラン（濃縮ウラン除く）、トリウムについては Source Material^[用語] から免除され、RCRA(資源保護回復法)処分場^[用語]での処分が可能である^[5]。0.05wt%の劣化ウランを Bq/g に換算すると濃縮度によるがおよそ 10Bq/g 前後の値となる。英国、ドイツ、スウェーデンの免除・クリアランスでは子孫核種の生成は考慮されないが(文献^[25],^[33]によれば、²³⁴Th, ^{234m}Pa, ²³⁴Pa まで考慮)、米国でも免除についてはクリアランス同様子孫核種の生成は考慮されない。

これらの事例は子孫核種の生成をどのように評価するかを考える上で参考となる。

上記を表にまとめると表 5-1 となる。

表 5-1 ウラン廃棄物等を処分する場合の諸外国の免除・クリアランス基準

国	免除/クリアランスの別	免除/CL レベル	備考
米国	免除 ¹⁾	0.05 wt%	劣化ウランで換算すると 10Bq/g 前後
英国	免除 ²⁾	4Bq/g	核種に依存しない
ドイツ	処分限定クリアランス	6Bq/g	年間 100 トン以下を処分する場合
スウェーデン	有害物のクリアランス	10Bq/g	有害物として処分する場合

1) 核原料物質から免除され RCRA 処分場で処分する場合

2) VLLW として処分場で処分する場合

これらのレベル以下の廃棄物は産廃処分場で処分可能で、子孫核種の評価は不要としている。

フランス、英国でクリアランスとは別に VLLW の処分が行われている。VLLW として扱われているウランを含む廃棄物の最大濃度はフランス、英国で同じ濃度である 1000Bq/g、平均濃度はフランスで 100Bq/g、英国で 200Bq/g となっている。ただし文献^[31]によれば、VLLW を受け入れているフランスのモルヴィリエではウラン濃度として最大 1000Bq/g、平均 100Bq/g として他の核種とは相対的重要度で評価しているのに対し、同様に VLLW を受け入れているクリフトンマーシュでは、核種を問わず最大 1000Bq/g、平均 200Bq/g としている。また、これらの廃棄物を受け入れている処分場での安全評価では廃棄物の平均ウラン濃度が数 Bq/g 以下であることから免除/クリアランスの場合と同様に、ラドンの評価はなされていない。

このように、諸外国では平均数 Bq/g 以下、最大濃度 1000Bq/g までのウラン廃棄物等についてはラドンの評価は求められていない。

クリアランスや免除については元々子孫核種の評価は不要であるが、VLLW の産廃処分場への処分においても人間侵入における評価期間は多くの場合で数十～数百年であり、数十万年後のウランの子孫核種の評価は求められない。

処分限定クリアランス制度や産廃処分場へのウラン廃棄物の処分は濃度の低いウラン廃

棄物の処分の合理的な選択肢の一つとして検討する価値がある。

5.3 長寿命低レベル放射性廃棄物等の処分

米国ではウラン濃縮事業の民間移転に伴い、劣化ウランを米国エネルギー省（DOE）が受け取ることとなっている。その選択肢の一つとして民間放射性廃棄物処分場での劣化ウランの処分があり、クライブ処分場で劣化ウランの処分が予定されている^[5]。

これまでも劣化ウランに汚染された廃棄物や遮蔽体、また、航空機のバランスが処分されてきた。今般、大量の劣化ウランそのものを処分することについて大きな反対もあり、NRCでは劣化ウランを固有の廃棄物としてサイトスペシフィックな評価を求めることとしている。10CFR61は、劣化ウランの評価についてもカバーできるように改訂を予定している^[7]。10CFR61改訂案では定量的評価期間を明記し、長寿命核種の含有率が370Bq/g未満の廃棄物については評価期間を1万年までと設定した。そしてまた、このしきい値である370Bq/gを超える長寿命核種を含有する廃棄物については、1万年を超える定性的な評価を実施する。1万年までの定量的な評価については、従前の10CFR61に記載の線量基準25mrem/年(250 μ Sv/年)とは別に意図的でない人間侵入に適用する500mrem/年(5mSv/年)という線量基準が提案されている。これらの250 μ Sv/年や5mSv/年という線量基準は1万年以降の定性的な安全評価では参考値としての取り扱いでこれらの線量基準を満足することは求められない。

フランスでは長寿命核種を含む低レベル放射性廃棄物FA-VLの処分概念(FA-VL処分概念)の建設が検討されている。その安全評価期間は10万年まで想定しているがガイダンスによると定量的な評価は1万年までで、1万年以降は定性的な評価となる^[31]。

米国クライブやフランスFA-VL処分概念に代表される長寿命核種の処分の評価に当たって、1万年までは線量基準に基づく定量的評価が実施されるが、1万年以降は定性的な評価で安全を確保する考え方が定着しつつある。

各国が長期間にわたる定量的な評価の限界を理解して長期の評価では線量基準ではなく定性的な評価で利害関係者の合理的な合意形成を求める方向にあることは、我が国で浅地中処分における長期評価の考え方を考える場合には大いに参考とすべきと考える。

上記を表5-2にまとめる。

表 5-2 米国、フランスにおける長寿命核種の処分の検討状況

	想定される処分場	処分対象物	評価期間	評価手法
米国	クライブ	劣化ウラン	長寿命核種の平均濃度が 370Bq/g 以下は 1 万年まで、370Bq/g 以上は 1 万年以上の期間についても定性的な評価が求められる。	1 万年までは定量的評価で公衆 250 μ Sv/年、意図的でない人間侵入以上は 1 万年以上の 5mSv/年を満たす。1 万年以降は定性的な評価で線量評価の値は参考値。
フランス	FA-VL 処分概念	ラジウム廃棄物	10 万年まで、ラジウム廃棄物に適用される。ウラン濃度は廃棄体化等の処理の前段階で約 20Bq/g ^[34] 。	1 万年までは 250 μ Sv/年、1 万年以降は定性的評価で 250 μ Sv/年は参考値。 人間侵入については基準値はない ^[35] 。

5.4 長期管理

第 4 章、5.2 及び 5.3 では、放射性廃棄物について埋設の方法で処分する方策について、海外情報を整理した。我が国では処分以外の固体廃棄物を管理する方法として、保管廃棄(貯蔵)及び廃棄物管理(最終的な処分がされるまでの間において行われる放射線による障害の防止を目的とした管理その他の管理又は処理であって政令で定めるもの)がある。また、廃棄物ではないが、核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の貯蔵という方法もある。これらは、地上の施設で管理をする方法であり、管理区域などの場所の管理が必要になる。一方、埋設の方法での処分とまではならないものの、カナダにおいて浅地中において長期的な管理をする「長期管理」という方法がある。ここでは、埋設の方法による長期保管について、カナダでの事例を整理する。処分との関連性を理解するために、①制度の概要、②処分との違い、③管理基準、④施設の設計方法、⑤管理期間終了以降の評価方法について示し、我が国での適用性について整理する。

①制度の概要

放射性廃棄物管理の長期安全性の評価に係る規制指針 G-320^[36]によると、長期管理(long-term waste management)は、地表・浅地中施設、並びに深地層施設(処分施設又は貯蔵施設)とし、限定的な施設を想定していない。なお、ウラン加工工場、原子力発電所、原子力研究施設から発生する低レベル放射性廃棄物は、地上施設及び浅地中施設に貯蔵されることとなっている。

また、廃棄物が貯蔵施設または処分施設のいずれにある場合にも、長期管理の概念は廃棄物の閉じ込めと隔離に基づいている。閉じ込めは、深層防護を具備する多重バリアに基づく頑健性を有する設計によって達成できる。隔離は、適切なサイト選定、ならびに、必要な場合には、立入り及び土地利用を制限する制度的管理により達成される。

長期管理は、廃棄物が施設から取り除かれ廃止措置が取られたり、あるいは原位置処分として廃棄することが決定されたりするまで、認可された管理の方法が継続していることが仮定されており、管理期間終了時には、廃棄物の取出しもしくは処分ということが検討されることになる。管理期間は明示されていない。

オンタリオ州ポートホープにおける歴史廃棄物の長期管理の事例では、「マウンド」と呼ばれる地表部構造を持つ施設で管理を行っており、閉じ込めを多層構造の覆土及びライニングにより行っている。隔離は、将来の土地利用を公園のような住民に利用できる形態にしつつ、利用制限をかけて制度的管理が働くようにしている。管理期間については、地元地域との協議の上、500年間という期間を設けている。

②処分との違い

長期管理の施設としては、貯蔵もしくは処分施設で行うことができるが、管理を継続し続けることが前提である。積極的な制度的管理を伴わない処分とするには、管理期間終了の時点において、そのための判断が必要とされる。一方、処分は一般的に、許認可の時点で将来の受動的な制度的管理に移行する、もしくは管理を不要とすることを前提としている。どの時点で処分、あるいは廃棄物の取出しを判断するかの違いであることが分かる。

③管理基準

管理基準としては、1) 人間の電離放射線防護、2) 有害物からの人間の防護、3) 環境の電離放射線防護及び4) 有害物からの環境の防護の4つの規制要件が決められている。これらのうち、人間に係る防護である1)及び2)を示す。

1) 人間の電離放射線防護

公衆の被ばくに対する規制線量限度(1mSv/年)を適用している。最適化として使用するIAEAの示す線量拘束値(0.3mSv/年)は、設計目標としては使用するが、順守限度としては使用しない。特に、評価モデルを用いた予測の不確実性を説明する際には線量拘束値は使用すべきでないとしている。

オンタリオ州ポートホープにおける事例では、被ばく線量における基本的なシナリオの線量基準として線量限度を用いている。稀頻度の事象に対しては、ICRPの考え方を参考にしながら20mSv/年の値を参照値としている。

2) 有害物からの人間の防護

連邦と州の環境基本方針や指針に示されるベンチマーク値を使用する。可能であれば、人間の健康を防護するためのカナダ環境関係閣僚会議(CCME)のカナダ環境品質指針^[37]をベンチマークまたは毒物学的参照値に使用すべきである。CCMEの人間の健康指針が使用できない場合、カナダの飲料水水質指針^[38]やオンタリオ州環境・エネルギー省の指針^[39]のような人間の健康影響ベースの州指針を使用すべきであるとしている。その他、適当な値がない場合は、米国環境保護庁の指針^[40]に基づくとしている。

④施設の設計方法

長期管理施設の設計には、規制制度を満足するだけでなく、長期の不確実性、将来の人間活動に関する不確実性、及び複数の被ばく線源が存在する可能性を考慮して、長期における安全性を確保されることを保証するような一定の裕度をもって線量限度となるように設計することが求められている。

⑤管理期間終了以降の評価方法

長期安全性の立証のために、セーフティケースを開発することが求められている。その中核をなす安全評価として、サイトまたは施設の変遷について予測されるシナリオに基づく経路解析が求められる。また、長期安全性を立証するために、1) 長期安全性に重要な諸因子を例証するスコーピング評価、2) 起こり得る影響の限度を示すバウンディング評価、3) 廃棄物管理システムの性能の現実的最適評価を与える予測、または起こり得る影響を意図的に過大評価する保守的予測、4) データの不確実性を反映し、評価の目的に適した、決定論的予測または確率論的予測等を行うことが求められている。このようなセーフティケースの開発とは別に、カナダ環境影響評価法に基づく環境影響評価も求められる。

なお、オンタリオ州ポートホープにおける事例では、この指針に則る必要のない施設であるため、長期のサイト及び施設の変遷を反映させた厳密な評価まではなされていない。

このように、カナダにおける長期保管は、貯蔵もしくは処分という廃棄物管理の中で、長期間の能動的な制度的管理（例えば、モニタリング、監視、維持管理等）を継続し、管理期間終了後に廃棄物の回収や処分を決めるという方策である。技術的な基準は、産業廃棄物処分場や放射性廃棄物処分場の安全性に係るものと同じである。

我が国への適用性を考えた場合、埋設の方法での貯蔵の様な施設を廃棄物管理事業のような能動的な管理を行う規制で見ると、それとも第二種埋設の様な管理期間終了後にはあっても能動的な制度的管理を行う規制で見るとかというところの判断が求められると想定される。また、監視を積極的に行うことを基本としてきた保管管理（貯蔵）や廃棄物管理事業とは異なり、埋設の方法での貯蔵が、長期の安全性の観点からどの程度の優位性があるのかを理解することが必要であり、これらのことを検討していくことが必要であると考えられる。

5.5 鉱山/NORM 廃棄物の処分

核原料物質を取り扱う事業者は、発生過程によって核燃料サイクルの中の原子力事業者と核燃料サイクル外の非原子力事業者に分かれる。非原子力事業者については、NORM の規制免除の考え方に見られるように、計画被ばく状況（行為）ではなく、現存被ばく状況（介入）の観点で規制されることが適切である。日本では、NORM の扱いについて「ウラン・トリウムを含む原材料、製品等の安全確保に関するガイドライン」^[30]が制定されている。このガイドラインでは、関係する作業員及び公衆が1mSv/年を下回ると線量評価された場合、一般の事業者へ引き渡すことができるとされている。また、ウラン鉱山を規制している鉱山保安法では、そこで発生する廃棄物は放射性廃棄物と扱っておらず、鉱業廃棄物として管理される。

原子力事業者から発生する核原料物質に汚染された廃棄物の扱いは、核燃料サイクルに携わるものであるが、現状、試験段階で発生したもののみであることから、大学等で発生した廃棄物の扱いと同様であるとも言える。

NORM や核原料物質の規制については、核燃料物質と同じ法律の中で規制している国（例えば、英国、カナダ、オーストラリア）と、そうでない国（アメリカ、ドイツ、フランス）がある。特に、アメリカは重要分野から規制制度を作ってきた過程が日本と似通っている。また、ドイツでは、東西融合の際に発生した課題解決のために、東ドイツの旧法を適用している。

核燃料物質と同じ法律の下で規制されている場合とそうでない場合の二つの枠組みに対して、それぞれの廃棄物の処分の取扱いを整理する必要がある。また、管理期間、モニタリング（能動的な制度的管理）、土地利用制限（受動的な制度的管理）についても各国の実情を調査する必要がある。

6. まとめ

調査対象国（米国、カナダ、英国、フランス、スウェーデン）で行われている、ウラン廃棄物に相当する、長寿命低レベル放射性廃棄物の処分方策や法規制をまとめ、我が国での処分制度の参考となるように整理した。

諸外国では、ウランを含む廃棄物をその他の低レベル放射性廃棄物と区別していない。この状況を踏まえ、濃度の低いウランを含む廃棄物を第二種廃棄物埋設処分事業の対象に含めた場合の課題を、現行の放射性廃棄物処分事業の規制を基に抽出・整理した。その結果、埋設するウランからのラドンに係る被ばく評価、ウラン子孫核種に係る被ばく評価、地質の安定性等の観点から、次のような二通りの対応が見られた。一つは、サイト内侵入シナリオの評価期間が1万年程度で、その後は定性的な評価を行う長期評価処分場（米国クライブ、カナダ長期廃棄物管理施設、英国ドリッグ及びフランス FA-VL 処分概念）であり、もう一つは、評価期間が処分場管理期間である数百年までの短期評価処分場であった。各国の先行事例が多いことから、第二種廃棄物埋設における処分検討の優先度が最も高いと思われる。制度化にあたっては、この二通りの処分場の対応を踏まえて検討すべきと考える。

次に、第二種廃棄物埋設の代替案となり得る処分方法として、処分限定クリアランス及び VLLW の産廃処分との混合処分の様な処分方策の海外情報を整理した。VLLW の産廃処分と処分限定クリアランスの基準は、各国で数 Bq/g～10Bq/g であった。これらを下回るレベルのウランでは、ラドンの生成は考慮されていなかった。

さらに、より高い濃度のウラン廃棄物等の処分概念検討のため、長寿命低レベル放射性廃棄物の処分と長期保管について海外情報を整理した。米国、フランスにおける長寿命低レベル放射性廃棄物の処分では、1万年までは定量的な評価、1万年以降は定性的な評価が求められている。1万年までの評価ではウラン起源のラドンも評価されている。長期保管については、長期間の能動的な制度的管理（例えば、モニタリング、監視、維持管理等）を継続し、管理期間終了後に廃棄物の回収や処分を決めるというカナダの事例を調べた。技術的な基準は、産業廃棄物処分場や放射性廃棄物処分場の安全性に係るものと同じであった。長期保管という考え方を我が国に適用することを考えた場合、例えば既存の制度にある貯蔵または廃棄物管理事業をベースとした規制とするのか、それとも廃棄物埋設事業をベースとした規制とするのかについて判断が求められると想定される。加えて、埋設の方法としての貯蔵が、従来の埋設処分に対して長期安全性の観点からどの程度の優位性があるのかを検討していくことが必要であると考えられる。

参考文献

- [1] 原子力委員会バックエンド対策専門部会, “RI・研究所等廃棄物処理処分の基本的考え方”, (1998).
- [2] 原子力委員会バックエンド対策専門部会, “ウラン廃棄物処理処分の基本的考え方について”, (2000).
- [3] 原子力安全委員会, “研究所等から発生する放射性固体廃棄物の浅地中処分の安全規制に関する基本的考え方”, (2006).
- [4] 原子力安全委員会, “ウラン取扱施設におけるクリアランスレベルについて”, (2009).
- [5] 長谷川 信他, “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”, JAEA-Review 2013-043, (2013).
- [6] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Title 10, Code of Federal Regulations part 61, Licensing Requirements for Land Disposal of Radioactive Waste.
- [7] U.S. Nuclear Regulatory Commission, NRC-2011-0012-0045, “NOVEMBER 2012 PRELIMINARY RULE LANGUAGE FOR PROPOSED REVISIONS TO LOW-LEVEL WASTE DISPOSAL REQUIREMENTS (10 CFR PART 61)”, (2012).
- [8] 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).
- [9] ANDRA, “Etude des scénarios de gestion à long terme des déchets de faible activité”, (2012).
- [10] IAEA 安全基準 安全指針 No. GSG-1, “放射性廃棄物の分類”, 公益財団法人 原子力安全研究協会 日本語翻訳版, (2012).
- [11] IAEA 安全基準 個別安全要件 No. SSR-5, “放射性廃棄物の処分”, 公益財団法人 原子力安全研究協会 日本語翻訳版, (2012).
- [12] IAEA, Specific Safety Guide No SSG-23, “The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste”, (2012).
- [13] ICRP Publication 46, “Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste”, (1985).
- [14] ICRP Publication 77, “Radiological Protection Policy for the Disposal of Radioactive Waste”, (1997).
- [15] ICRP Publication 81, “Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste”, (1998).
- [16] ICRP Publication 82, “Protection of the Public in Situations of Prolonged Radiation Exposure”, (1999).
- [17] ICRP Publication 103, “The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection”, (2007).
- [18] ICRP Publication 65, “Protection Against Radon-222 at Home and at Work”, (1993).

- [19] ICRP Publication 115, “Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon”, (2010).
- [20] IAEA Safety Standards Series, Safety Guide No. RS-G-1.7, “Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance”, (2004).
- [21] IAEA Safety Standards Series GSR Part 3, “Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards - Interim Edition”, (2011).
- [22] 原子力安全委員会, “低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について”, (2007).
- [23] 原子力安全委員会, “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”, (2010).
- [24] 原子力規制委員会, “第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈”, (2013) .
- [25] SSMFS 2011:2, “The Swedish Radiation Safety Authority’ s regulations and general advice concerning clearance of materials, rooms, buildings and land in practices involving ionising radiation”, (2011).
- [26] Conseil suprieur de la surete nucleaire (CSSN), RFS I.2, “Objectifs de surete et bases de conception pour les centres de surface destines au stockage a long terme de dechets radioactifs solides de periode courte ou moyenne et de faible ou moyenne activite massique”, (1984).
- [27] 原子力安全・保安院放射性廃棄物規制課, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 二分第 18-1-1 号, “諸外国における地層処分、浅地中処分での制度的管理”, (2009).
- [28] Scotland and Northern Ireland Forum for Environmental Research (SNIFFER), Project UKRSR03, “Development of a Framework for assessing the Suitability of controlled and fills to accept Disposals of Solid Low-level Radioactive Waste: Principles Document: Principles Document”, (2005).
- [29] U.S. EPA, Title 40 CFR PART 141, “NATIONAL PRIMARY DRINKING WATER REGULATIONS” .
- [30] 文部科学省, “ウラン・トリウムを含む原材料、製品等の安全確保に関するガイドライン”, (2009).
- [31] 佐藤 和彦他, “欧州地域のウラン廃棄物処分に関する調査”, JAEA-Review 2014-006, (2014).
- [32] Environment Agency, Environmental Permitting Regulations (England and Wales) 2010, “How to comply with your environmental permit for radioactive substances on a nuclear licensed site”, (2010, revised 2012).
- [33] Bundesamt fuer Strahlenschutz, “Ordinance on the Protection against Damage and Injuries Caused by Ionizing Radiation (Radiation Protection Ordinance)”, (2012).
- [34] ANDRA, “Etude des Scenerios de Gestion a Long Terme des Dechets de Faible Activite Massique a Vie Longue”, December, 2012.

- [35] Assemblée National, France, “Les Consequences des Installatione de Stockage des Dechets Nucleaires”, <http://www.assemblee-nationale.fr/11/rap-off/r2257-1.asp>.
- [36] CNSC,Regulatory Guide G-320, “Assessment the Long Term Safety of Radioactive Waste Management”, (2006).
- [37] Canadian Council of Ministers of the Environment, “Canadian Environmental Quality Guidelines and Summary Table”, 2014年3月31日アクセス.
- [38] Health Canada, “Canadian Drinking Water Guidelines”, (2014年3月31日アクセス).
- [39] Ontario Ministry of the Environment and Energy, “Guideline for Use at Contaminated Sites in Ontario”, (1997).
- [40] U.S. Environmental Protection Agency, “Child-Specific Exposure Factors Handbook, Interim Report”, (2002).
- [41] 日本原燃株式会社、独立行政法人日本原子力研究開発機構、株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン、三菱原子燃料株式会社、原子燃料工業株式会社、株式会社ジェー・シー・オー, “ウラン廃棄物の処分及びクリアランスに関する検討書”, (2006).

付録：用語集

(順序はアルファベット順)

NORM	Naturally Occurring Radioactive Material、自然起源放射性物質
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
WCS	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	V s
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
光照射度	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	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間は同一である。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
角加速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
角加速	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱流密度、放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量、エン트로ピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量、比エン트로ピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² 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	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエン트로ピー、モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ¹ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	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 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単位との数値的關係は、 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	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 ^(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)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

