

電子版:ISSN 1881-7297

日本保健物理学会専門研究会報告書シリーズ

Vol.13 No.1

人文・社会科学的視点から考察する  
自然起源放射性物質含有廃棄物の取扱い専門研究会

活動報告書

2023年2月

一般社団法人 日本保健物理学会

日本保健物理学会専門研究会報告書シリーズ ISSN 1881-7297 Vol.13, No.1,  
人文・社会科学的視点から考察する自然起源放射性物質含有廃棄物の取扱い  
専門研究会報告書

---

2023年2月

発行者 日本保健物理学会企画委員会  
発行所 一般社団法人日本保健物理学会  
〒105-0004 東京都港区新橋 3-7-2 四鹿ビル 3階  
日本保健物理学会事務局  
TEL：03-6205-4649  
FAX：03-6205-4659  
E-mail：exec.off@jhps.or.jp

「人文・社会科学的視点から考察する  
自然起源放射性物質含有廃棄物の取扱い専門研究会」

概 要

自然起源の放射性核種であるウラン及びその子孫核種によって汚染されたもの、いわゆる「ウラン廃棄物」の取扱いについては、近年原子力規制委員会等において自然科学や安全工学等の知見に基づき集中的な審議が行われ、令和4（2022）年現在、一定の方針が示されている。一方、筆者らは、将来世代に相当の負担をもたらし得るウラン廃棄物の処分にあたっては、これまで行われてきたような理工学的視点の検討だけでなく、人文・社会科学的視点からの考察が重要であると考え、2020年度より2年間、本専門研究会において、コアとなる本学会員の専門家（表1）と共に、関連する幅広い分野の専門家を交えた情報・意見交換を進めてきた（表2）。本報では、それらの議論を経て共有された知見や合意された考え方等について報告する。

表1. 研究会員（任期：2020年6月～2022年3月）

役割	氏名	所属
主査	保田 浩志	広島大学
幹事	麓 弘道	日本検査(株)
幹事	齋藤 龍郎	日本原子力研究開発機構
委員	笠井 篤	元 日本原子力研究所
委員	栗原 晃一	三菱重工業(株)
委員	下 道國	元 藤田保健衛生大学
委員	菅原 慎悦	関西大学
委員	土田 昭司	関西大学
委員	古田 定昭	古田技術士事務所

表 2. 本専門研究会の活動状況

回	開催日／期間	主な検討事項
1	2020年5月15日-6月30日 (メール審議)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・活動方針について</li> <li>・保物学会第53回研究発表会での発表内容について</li> </ul>
2	2020年7月31日	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ICRP Publication 138 の勧告内容とその東京電力福島第一原子力発電所事故への応用 (外部専門家 栗原千絵子主任研究員 量研機構 量子生命・医学部門)</li> <li>・ICRP Publication 122 の勧告内容と自然起源放射性物質含有廃棄物の処分への適用 意見交換</li> </ul>
3	2021年1月19日	<ul style="list-style-type: none"> <li>・論点整理の前提条件についての意見交換</li> <li>・今後の専門研究会の進め方について</li> </ul>
4	2021年4月5日	<ul style="list-style-type: none"> <li>・「超長期評価の不確かさ」をテーマとした意見交換</li> </ul>
5	2021年5月24日	<ul style="list-style-type: none"> <li>・下記をテーマとした意見交換</li> <li>「世代間倫理と持続性の問題」</li> <li>「将来世代の防護をめぐって」(菅原委員)</li> <li>「世代間倫理と持続性の問題：リスクコミュニケーションの立場から」(土田委員)</li> </ul>
-	2021年6月21日～6月22日	<ul style="list-style-type: none"> <li>・令和3年度日本保健物理学会企画シンポジウムでの趣旨説明</li> </ul>
6	2021年7月29日	<ul style="list-style-type: none"> <li>・「ウラン廃棄物処分の社会的受容性と回避すべき事象」をテーマとした意見交換</li> </ul>
7	2021年9月29日	<ul style="list-style-type: none"> <li>・「ウラン廃棄物処分オプションの現状について」をテーマとした意見交換</li> <li>・報告書目次案及び方向性について</li> </ul>
-	2021年12月1日～12月3日	<ul style="list-style-type: none"> <li>・日本保健物理学会第54回研究発表会での活動報告</li> </ul>
8	2022年1月18日	<ul style="list-style-type: none"> <li>・報告書草案についての審議</li> </ul>
9	2022年3月22日	<ul style="list-style-type: none"> <li>・報告書草案についての審議</li> </ul>

## 目次

第1章	緒言 .....	1
第2章	放射線防護とその人文・社会科学的基盤 .....	4
第3章	ウラン廃棄物処分の科学技術的課題とその対応策 .....	9
第4章	現状で可能なウラン廃棄物処分オプションについて .....	12
第5章	超長期評価の不確かさ .....	15
第6章	世代間倫理と持続性 .....	22
第7章	まとめ .....	24
	謝辞 .....	25
	参考文献 .....	25

## 第1章 緒言

### 1.1 背景

ウランは地球の地殻やマントルに広く存在する自然起源の放射性核種である。その半減期は、U-238 で約 45 億年、U-235 で約 7 億年と長く、壊変によって様々な子孫核種 (Ra, Rn, Bi, Po 等) を生み出しながら、安定元素の Pb になる。現在、我が国を含む多くの国で、自然界にあるウランを集めて、濃度を高めた U-235 が起こす核分裂連鎖反応を用いたエネルギー生産、すなわち原子力発電が行われている。その過程において、ウランの製錬、転換、濃縮、再転換、成型加工等に伴い、ウラン及びその子孫核種によって汚染された「ウラン廃棄物」が発生する。ウラン廃棄物には、一般に、産業廃棄物又は放射性廃棄物として処分されるものや、クリアランスされた後再利用される資材等も含まれる。

このウラン廃棄物をどのようなカテゴリで取扱いどう処分するかについては、我が国のみならず欧米等でも長く議論が行われてきた [1]。例えば、米国では、低レベル放射性廃棄物の中にウラン廃棄物という区分は存在せず、ウラン鉱さいは、放射性廃棄物として区分されているものの、副生成物 (残渣) として通常の原子力産業の廃棄物とは区別して処分される一方、廃棄劣化ウランは独自の流れ (unique stream) として別に扱われる等、通例の低レベル放射性廃棄物に対する措置とは異なる対応がとられている。また、フランスでは、ウラン鉱さいの堆積場は、その総放射能インベントリを判断基準として原子力関連施設には分類されておらず、一般の有害廃棄物処分場の一形態として取り扱われている。

我が国においては、当初ウラン廃棄物は低レベル放射性廃棄物に分類されているが、原子炉由来の低レベル廃棄物とも TRU 廃棄物 (超ウラン元素を含む廃棄物) と異なる区分で検討が進められ、その処分に係る方針は不明瞭なままであった (図 1 参照)。しかし、近年、原子力規制委員会 (以下「規制委」という) において本件についての集中的な審議が行われ、2020 年 12 月には原子力規制庁 (以下「規制庁」という) から「ウラン廃棄物のクリアランス及び埋設に係る規制の考え方」[2]が提示された。

上記の規制委により提示された考え方では、以下のような認識が記されている。

- ・ウラン廃棄物を人工起源核種として取り扱うことは妥当である一方、天然起源核種としての性格を併せ持つことを考慮することも可能。
- ・ウラン濃度を当初から十分低くする条件で、ウラン廃棄物を第二種廃棄物埋設の対象とする方向で検討。

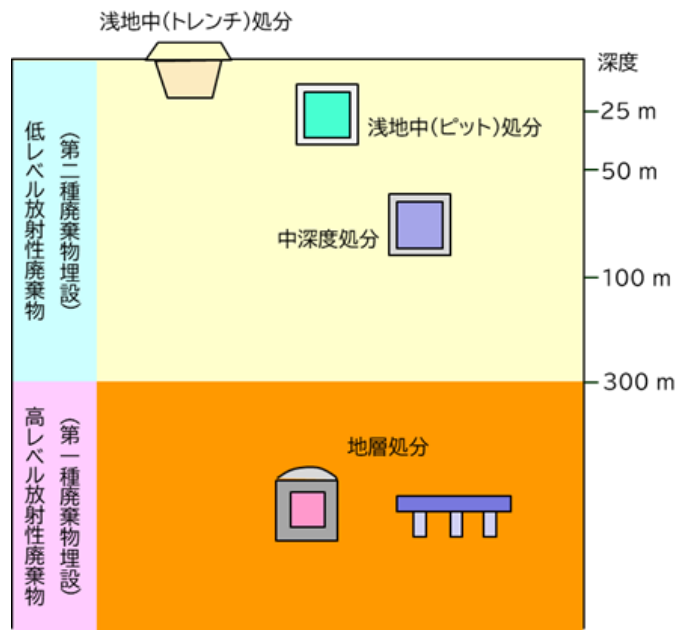


図 1 放射性固体廃棄物の処分方法; ウラン廃棄物処分の位置付けは長く不明瞭であった。

また、これらの認識に至るまでの考察の過程として、ウラン廃棄物埋設地の直上に居住する人が受ける線量を数十万年の時間スケールで評価した結果等が示されている（表 1）。この試算結果によると、ウランを埋設してから数万年～20 万年の時間が経過すると、子孫核種特にラドンの線量寄与が顕著に高まることが分かる。ちなみに、米国では、軍事利用向け高レベル放射性廃棄物処分場の連邦規則制定において線量評価の期間を最大 1 万年としており、欧州等でも浅地中処分の評価ではこれに準じた対応が採られている[1]。今回規制委が埋設後数十万年にわたる線量の予測を行い、そのピークが 1 万年を超える時期に現れる結果を明示したことは、我が国のウラン廃棄物処分に係る慎重な姿勢を表しているものと言える。

表 1 5%濃縮ウランの廃棄物埋設地において、埋設直後の U-234、U-235 及び U-238 の合計平均濃度が埋設直後に 1 Bq/g の場合についての線量評価結果<sup>[2]</sup>。

	居住シナリオ		
	ウラン及び瞬時平衡の子孫核種による被ばく	ラドンを除く子孫核種による被ばくを含む	ラドンによる被ばくを含む
流出を考慮	0.010 mSv/y (~1000 年後)	0.18 mSv/y (約 4 万年後※)	1.3 mSv/y (約 4 万年後※)
保守的に流出を考慮せず		0.82 mSv/y (約 20 万年後※)	5.9 mSv/y (約 20 万年後※)

※括弧内の数値は被ばく線量のピークの出現時期を示す。

一方、政府機関での検討と並行する形で、日本保健物理学会では、2017~2018 年度に「自然放射性核種を含む廃棄物の放射線防護に関する専門研究会」を組織し、ウラン鉱さいを含む自然放射性物質の取扱いに係る考え方や超長半減期の核種がもたらし得る被ばくのリスク等について議論を行い、社会に受容されるウラン廃棄物の処分方法等の提示を試みた。同専研で取り上げた主な事項を以下に記す。

- ・計画被ばく状況と現存被ばく状況の考え方
- ・除外、規制免除及びクリアランスに関する線量基準
- ・超長期の時間スケールと不確実性の取扱い
- ・安全評価におけるリスク論的考え方
- ・ラドンの取扱い
- ・化学的毒性の取扱い

これらの論点に関する議論を経て、同専研では、遠い将来増加するかもしれない潜在被ばくへの対応を将来世代に託すことについては、現世代が現時点で真摯な対応をすることが何より肝要との見解を示す一方、将来世代に受容される処分方法の確立には、理工学の視点に立った数量的予測に基づく考察だけでなく、人文・社会科学の視点を含めたより幅広い視野で深化した議論をすることが必要と結論付けた[3]。

この結論を受ける形で、筆者らは、2020 年度に日本保健物理学会に「人文・社会科学的視点から考察する自然起源放射性物質含有廃棄物の取扱い専門研究会」（以下「本専研」という。）を新たに立ち上げ、2 年近くにわたり人文・社会科学的な議論に重点をおいた活動に取り組んできた。ここで、「人文・社会科学」とは、人間の内面（感情や思考）や行動、それらが社会にもたらす影響の分析・解明を行う学問の総称であり、より具体的な分野としては、哲学、心理学、

社会学、文化人類学、政治学、歴史学、経済学、法学、言語学、文学、経営学等が挙げられる。一方、「理工学」は、自然の原理を客観的に捉えたりその原理を設計や製造に応用する分野で、物理学、化学、生物学、地球科学、数学、工学等がこれに含まれる。なお、古代ギリシャ文明を源流とするヨーロッパの学問体系（リベラル・アーツ）においては、人文・社会科学と理工学は一体を成すものとして、長く相互依存的／補完的な関係にあった。両者の分離が進んだのは、産業革命を経て自然科学の諸分野において専門分化が顕著になった 19 世紀以降である。なかでも、工業製品を生産するための技術の開発に主眼をおく工学分野において乖離が大きくなった。本専研では、それらの認識をメンバーと共有したうえで、特に世代間倫理の問題について人文・社会科学的な視点から解決の道を探る必要があるという問題意識[4]を持って、議論を深めてきた。本報告書は、その活動の内容について概説するとともに、幅広い議論を経て導かれた見解をとりまとめたものである。

## 第 2 章 放射線防護とその人文・社会科学的基盤

### 2.1 放射線防護の原則と我が国のウラン廃棄物処分の考え方

日本における放射線防護に係る考え方を考察するため、国際放射線防護委員会（ICRP）の 2007 年勧告（Publication 103）[5]を振り返る。この勧告は、

- (1) 行為の正当化<sup>1</sup>
- (2) 防護の最適化<sup>2</sup>
- (3) 個人の線量限度

の 3 つの原則から構成されている。法制度の基準値に広く用いられている線量限度に対して、正当化は行為を規定する概念として、最適化は放射線防護を規定する概念として取り入れられている。緊急時被ばくや現存被ばくについて基準値（参考レベル）が線量限度を超えた値をとるのは、線量限度を超えた事象の出現に対して、その低減措置である介入が正当化される基準であるためである。そして、廃棄物処分場の公衆被ばく防護は通常、線量拘束値によって最適化される。しかしながら、これを日本における具体的な課題としてのウラン廃棄物処分の考え方に適用するとき、特に当該処分に伴う潜在被ばくのように、将来生じ得る公衆被ばくのリス

---

<sup>1</sup> 放射線被ばくを伴うどのような行為も、その行為によって、被ばくする個人又は社会に対して、それが引き起こす放射線損害を相殺するのに十分な便益を生むのでなければ、採用すべきではない。

<sup>2</sup> ある行為内のどのような特定の線源に関しても、個人線量の大きさ、被ばくする人の数、及び受けることが確かでない被ばくの可能性の全てを、経済的及び社会的要因を考慮に加えた上、合理的に達成できる限り低く保つべきである。

クが正確に評価できず、不確かさの程度を拘束値以下に低減できない場合に、どのような正当化、最適化、線量限度を設ければ上記の三原則に従って許容されるのかの判断は極めて困難である。

## 2.2 ウラン廃棄物へ適用する場合の障害

ウラン廃棄物処分においては、第1章で述べたように、初めの1,000年程度は周辺に与える線量は低いが、1万年から数10万年の間に子孫核種が徐々に増え、放射平衡に達した後はその比較的高い線量レベルを維持すると予想される。また、それらの放射性核種には、閉じ込めや被ばく影響の評価が技術的に難しい放射性ガスであるラドンが含まれる。これは、一度分離され精錬されたウランが数10万年の期間を経た後に、天然の地殻中に存在するウランと同じ核種組成に戻ることを示している。このため、放射線防護の三原則のうち「個人の線量限度」の原則に照らして、数10万年後に基準を満足しているかどうかの確認が必要となる。この確認を実施し、数10万年後の被ばく線量を評価することや、数10万年間ウランと子孫核種を閉じ込めておくこと、さらに、その線量を個人の線量限度、或いは線量拘束値以下に確実に抑えるための考え方については、保物学会の2018-2019年度研究会「自然放射性核種を含む廃棄物の放射線防護に関する専門研究会」[6]はじめ、我が国では、何度も実施されたが、関係者の合意を十分に得ることはできなかった。

## 2.3 人文・社会科学が必要となる背景

我が国では、(1) 行為の正当化、被ばくと便益との比較を行うことについて、考え方を検討することが、功利主義的、より具体的には単なる経済的合理性を重視する考え方と混同されがちであった。しかしながら、正当化の原則の本来の定義は、ICRP Publication 103によれば「放射線被ばくの状況を変化させるようなあらゆる決定は、害よりも便益が大となるべきである」というものである。ALARA (As Low As Reasonably Achievable: 合理的に達成可能な限り低く) [5]としてより一般的に規制に用いられている(2) 防護の最適化とともに、むしろこれに先立つ概念として、立ち返って再考する必要があるだろう。数10万年後のウラン廃棄物処分場の状況を予測することは、それが高々数メートル深度の浅地中埋設処分である場合には非常に不確実性が高く、必要となる前提条件は数10万年という期間の評価に伴う不確かさを持ち、かつ実際に処分される土地の特性にも強く影響されると考えられてきた。これらの不確かさを伴う放射線防護策について、(3) 個人の線量限度として提示された線量基準を満たすために人為的な防護性能が必要であることは、本来の放射線防護の考え方としては前提条件である。しかしながら、ウラン廃棄物処分を考えると時のタイムスケールの考え方では、その注目する時間の長さによっては、逆に、人為的な防護性能が全て失われた状態を前提とすることが必要になることがあり得る。

この不確かさを全て取り除いた前提、すなわち、人為的な防護性能が全て失われた状態において、守られるべき基準とは何か。これを例えばガラス固化体と比較してみたい。ガラス固化体とウラン廃棄物には、その寿命の長さや、発生元がウラン鉱石であること等から類似性を持ち、良く比較される。「地層処分安全確保の考え方」（原子力発電環境整備機構）[7]によれば、地層処分によってガラス固化体は、10 万年後、加工前の原料相当量のウラン鉱石の放射能まで減衰する。ガラス固化体を人が手を加える前のウラン鉱石と同等の状態に戻すことが、地層処分の一つの目標になっていると解釈できる。これを考えれば、超長期の時間経過に伴う不確かさが初期の濃度や物量以外の全ての情報伝達を失わせ、防護性能の劣化が全ての覆土や防護壁を失わせた仮定においても、ウラン廃棄物を高レベル放射性廃棄物と同様に地層処分することが必ずしも正当化されない可能性がある。

放射線防護は、現実運用する場合には、具体的な数値としてどうしても線量が必要となる。例えば、我が国では、それぞれの状況について、線量限度から定められた線量基準値に対して、それよりもどこまで下げることができるかという観点で、ALARA が認識されている[8]。線量限度が最初に来て、それを守った上で、ALARA が来るのではなく、ALARA は(1)正当化にも(2)最適化にも係る概念であると考えるのが、その言葉の意味するところであり、そこに社会学的なアプローチが潜んでいる。

このように、ウラン廃棄物では、その長い寿命、子孫核種の発生と増大、中でも放射性ガスであるラドン発生の為に当初に定めた線量基準との比較は、不確かさを伴うことが避けられない。仮に地層処分したとして、埋設されたウラン廃棄物からの 10 万年後の公衆被ばくが浅地中処分されたものと比べて減じるかどうかは、10 万年後の地層処分防護性能の不確かさや、10 万年間の核種流出が一種の希釈過程として捉えられること、さらには、地中深くにおける還元的環境が地表近くの酸化的環境に比べ、ウランの移動性を抑えるとされていることを考慮すれば、必ずしも自明では無いとも考えられる。長期の放射線影響が議論されるウラン廃棄物と高レベル放射性廃棄物の放射線影響を比較すると、恐らくウランの天然賦存性、地殻中の平均的な濃度分布との比較が問われるだろうし、そもそものウラン廃棄物が、ウランの取り扱いによって汚染された廃棄物なのか、不要なウラン鉱石なのか、或いは精錬されたウラン燃料なのかによっても区別されてしかるべきである。また加えて、不確かさによる線量評価の意味づけや、防護性能の喪失を前提とした考え方を議論するためには、人文・社会科学的な視点に立った議論も必要である。前提条件としてのパラメータサーベイによる理工学的アプローチは、それぞれのシナリオに基づく線量評価値を提供するが、それらはいくまでスタートラインと言える。得られた数値の一つ一つの単なる説明ではなく、説明の全体としての偏りの無さ及び整合性について、全ての専門家が、自身の専門性だけにこだわることなく、人文・社会科学的な観点も含む広い視野で議論することが望ましい。理工学的な分析ではそれぞれの数値に分析者の意図があり、議論は尽きないが、人々はどこかで合意できるはずであり、それが社会生活を営む我々の実践であることは我々の日常生活のすべてが、社会の合意形成に基づいていることを見れば

明らかである。合意形成という社会生活を豊かにするプロセスが人類の知恵として用意されている訳で、そこに本テーマである人文・社会科学的アプローチを求める本専門研究会の基本姿勢がある。

ウラン廃棄物処分を検討する際には、主に理工学的アプローチによりそれぞれのシナリオに基づく線量評価値が提供される。一方、超長期を対象としたシナリオの前提の置き方や不確かさへの対処、評価された線量の意味、ウラン廃棄物自体の位置付け、世代間倫理などについて、より慎重かつ多角的な観点からの議論を要する。上記のような点について、人文・社会科学の視点を組み入れることによって議論内容をより豊かなものとし、当該問題に関する公共的な議論へとつなげていくことが重要と考える。これらの検討を公表することにより、非専門家の意見を含む多くの視点や考え方に足場と土台、共通的な基盤を与えるべきであろう。これまでも公共的な議論が続けられ、引き続き今後も議論と視点の広がりを許容し、推奨することで、ステークホルダーの自発的な議論への参加を促し、真摯な議論を続けることで、合意につながる可能性を高めることが期待される。

例えば、最近のウラン廃棄物の浅地中処分では、 $1 \text{ Bq/g}$  という濃度基準が線量基準に代わって採用されようとしている[2]。背景には公衆の線量限度  $1 \text{ mSv/y}$  [5]があるからと思われるが、廃棄の基準として IAEA RS-G-1.7 等における国際的な天然レベルの親核種濃度（U-238 や Ra-226 など）の最大値  $1 \text{ Bq/g}$  を取ると放射平衡条件では、この線量限度を超えることになる。日本の土壤のウラン平均含有値は  $0.033 \text{ Bq/g}$ （「日本の地球化学図」[9]）であるが、この値であるならば現に放射平衡にある日本国内においてもラドン被ばくは平均して線量限度  $1 \text{ mSv/y}$  以下となり、線量限度を守ることは可能となる。にもかかわらず  $1 \text{ Bq/g}$  が基準値として検討されているのは、不確かなシナリオに基づく線量の推定（例えば、覆土は永遠にもつのか等）ではなく、管理と測定が可能であり、現世代においては規制免除の基準値として国際的にも認められている  $1 \text{ Bq/g}$  の濃度基準を設け、この基準以下のウラン廃棄物については、処分場の防護機能である覆土や、自然な希釈による濃度低減を無視した場合においても、必ずしも介入措置が正当化されないとして、参考レベルとの比較が行われたためである。この  $1 \text{ Bq/g}$  という基準値が、現世代の線量限度に基づくものか、ウランの地殻分布の変動範囲上限濃度に基づくものなのかについては、国内の規制基準の根拠としては必ずしも明確ではないが、例えば今後、ラドン被ばくの線量換算係数が大きく変わる事等があれば、基準値の見直しに係る議論が必要になるだろう。

ステークホルダー間の対話では、これまでは減衰しない放射性廃棄物に係る説明は恒久的な閉じ込めであったが、想定は数百年程度の近未来に主な焦点を当てていた。一方、超長期にわたる影響評価においては、将来世代における線量及び線量限度の意味合いに関する議論と共に、放射線防護の原理原則である正当化についての議論が一層重要となるであろう。なぜ処分してよいのか、あるいは、なぜ処分してはならないのかといった点について、放射線防護の原則の1つである最適化についてのより具体的な議論も必要である。最適化は、技術的・経済的・社

会的に考えて線量を可能な限り低く保つという理念[5]を意味しており、これまでも議論されてきたが、ステークホルダー間の対話においては、廃棄物処分を実行する前に、放射能が人類史の長さでは消滅しない自然放射性核種をどのように捉えるのか、議論することが求められよう。

## 2.4 ICRP による倫理と放射線防護

ICRP Publication 138「放射線防護体系の倫理基盤」[10]では、4つの中核的価値として、「善行・無危害」、「慎重性」、「正義」そして「尊厳」が検討された。これらの価値に基づいて、

- (1) 行為の正当化
- (2) 防護の最適化及び
- (3) 個人の線量限度

の三原則が放射線防護として適用されてきた。そして、現在、これらの倫理価値を実践するために、

- (1) 説明責任
- (2) 透明性＝情報公開
- (3) ステークホルダー参画

が問われている。

ICRP は、現在の倫理価値に至るまで、以下の変遷を辿ってきたと考えられる。

- (1) 初期：徳の倫理(Virtue Ethics)、放射線の健康影響がX線やラジウム利用医療従事者やダイアルペインターに限定されていた時代
- (2) 中期：功利主義の倫理(Utilitarian ethics)、放射線影響をリスク/ベネフィットで議論していた時代
- (3) 現在：義務論(Deontology)、チョルノービリ事故以降

こうした放射線防護を支える倫理的考え方の変化は、放射線と社会や人々との関わり方が時代とともにより広がりを持つようになり、それに伴い便益や害の捉え方、すなわち正当化の概念がより多様化してきたことを示している。放射線被ばくによる便益が害よりも大きいために必要な条件が、初期の徳の論理の時代では、直接放射線を取り扱う作業員の被ばくの健康影響と、職業的便益との比較であり、中期の功利主義の倫理においては、被ばくを受ける公衆全体と受益者全体との比較或いは相殺が行われた時期があったが、チョルノービリ事故以降においては、被ばくを受けるステークホルダーと、ステークホルダー自身の受ける便益が正当化できるか、また、事故時に生じ得るリスクと電力や医療、科学技術的な受益とが正当化できるかが、多様なステークホルダーの立場毎にそれぞれ問われるようになってきたと言えるだろう。

## 2.5 まとめ

我が国では、ICRP の放射線防護原則(3) 線量限度の適用で、ウラン廃棄物の放射線防護が検討されてきた。2021 年、規制庁で十分濃度が低いウラン廃棄物について浅地中処分が認められたことは、これまでの我が国の放射線防護に何を考え方として加えることになったのか、(3) 線量限度の超長期評価における意味づけと、(1) 正当化、(2) 最適化による有効な防護の在り方についての考察がさらに必要である。

## 第3章 ウラン廃棄物処分の科学技術的課題とその対応策

本専研の討論では、自然科学的及び人文・社会的な立場から、ウラン廃棄物処分の安全評価に係る不確かさと定量的評価の扱いについて、以下の課題を抽出し、検討を行った。

- 不確かさによる定量的評価の有用性低下について<sup>3</sup>
- 定量的評価の有用性低下以降の被ばくへの配慮について
- ウラン廃棄物処分における頑健性の意味について

本章では、これらの課題に応える提案を科学・技術的に提示するために、ウラン廃棄物処分における超長期の被ばく線量モデルを説明することを通じて、公衆被ばくシナリオ中で最も影響が大きいと考えられる、処分場跡地居住シナリオにおけるラドンによる屋内被ばく評価とその対策を主に論じる。

### 3.1 ラドンによる被ばくは覆土でどこまで防げるのか

規制委資料「ウラン廃棄物のクリアランス及び埋設に係る規制の考え方」[2]を参考に試算し、本専研第6回において議論された結果、覆土<sup>4</sup>が2.5mあれば、保守的な流出を想定しても線量拘束値程度までラドン被ばくを低減できる見込みであることが示された。これは、土壌中のウラン濃度が平均1 Bq/gであり、かつ5%濃縮度のU-234, U-235及びU-238のみの組成の精製ウランによって汚染された場合を想定した屋外及び屋内における被ばく評価試算に基づくものである。

---

<sup>3</sup> ICRP publication 122[11] (86) 非常に遠い将来に起こると推定される実効線量とリスクの計算値の不確かさは、(処分システムの)最適化プロセスでのそれらの有用性を減じてしまう。

<sup>4</sup> 「ピット処分においては、廃棄体を埋設するために設置した設備などを土砂などで覆った部位、トレンチ処分においては、埋設した廃棄物を土砂などで覆った部位。」(AESJ-SC-F016:2016) [12]、ここでは放射性物質による汚染を含まない土壌を想定している。

浅地中処分におけるウランの流出は、非常に保守的な様式化によっても、かなり不確かさが大きい。これは、土壌の取着分配係数  $K_d$  (L/kg) が処分場立地箇所の水理、地質特性や土壌の特性により異なること等が主たる要因である。そのため規制委は、最も保守的に、流出が全くない場合を敢えて想定して、覆土を全喪失したときの線量を 5.9 mSv/y と評価した結果を公表した(第1章表1参照)。本専研では、これを踏まえつつ地表での被ばく線量を低減するための覆土の厚みを検討したところ、2.5mの覆土を設けることで 0.45 mSv/y まで低減することが分かった。これは一般的には 0.3 mSv/y とされる線量拘束値を上回るものの、事故時・現存被ばくの参考レベル下限値である 1 mSv/y を下回る結果となった。

なお、本試算には、一般的なラドン拡散モデルとされる「UNSCEAR2000 モデル」[13]を用いた。このモデルによれば、ラドン濃度を半減する覆土厚は、 $\sqrt{\ln 2 \cdot T_{Rn} \cdot D_w}$  ( $T_{Rn}$ : Rn-222 の半減期[sec],  $D_w$ : 土壌拡散係数[m<sup>2</sup>/sec]) に等しく、拡散による希釈と Rn-222 の半減期(約4日間)による低減を考慮したものである。今回の試算ではこの半減覆土厚を約 68 cm と評価している。

ここで、覆土厚の維持管理のみに頼らない屋内でのラドンによる被ばくに対する防護策を検討すべきとの本専研の議論を踏まえたラドン低減策について述べる。一般には屋内のラドン濃度は屋外の 10 倍程度とされるところ、生活様式や家屋の改装によって可能な防護としては、換気による外気取り入れや、床下からのラドン侵入防止が有効である。床下に溜まるラドン濃度は、UNSCEAR2000 モデルでは床下の換気が外気風速の約 1/10 と設定されるために、外気ラドン濃度の数 10 倍に濃縮される。この床下からのラドン侵入を防止すれば、理論上は外気と同じ濃度までラドンを低減できる。また、屋内換気率を 2 倍に上げることで、屋内のラドン濃度を屋外の 5 倍まで低減できる。

### 3.2 ウランは 10 万年でどこまで動くのか

前節と同様に規制委資料「ウラン廃棄物のクリアランス及び埋設に係る規制の考え方」によれば、砂地で 1,000 年後、日本国内の土壌侵食量に相当するウラン流出を想定した場合で 1 万年後をピークに、ラドン、ラジウムを含む子孫核種の減少が始まる。本専研においても、土壌中のウラン濃度が平均 1Bq/g、5%濃縮度の精製ウランによって汚染された場合を想定した被ばくを試算し、結果は概ね一致した。

当該試算では、汚染されたウランの流出影響について評価したが、一般に土壌を構成する粒径がきめ細かいほど、また石英質に比べ粘土質ほど重量当たりの吸着量が大きいと、イオン化した核種は土壌に吸着されやすい。そして、取着によるウランの土壌中濃度と間隙水中のウラン溶存濃度の比である取着分配係数  $K_d$  は、その値が大きいほど重量当たりの吸着量が大きく、ウラン及び子孫核種の流出による減少を遅延するものとして作用し、試算では  $10^6$ 以上の値では流出のピーク時期は流出ゼロを想定した場合と同時期となり、事実上流出による減少が無視で

きる。逆に  $10^3$ オーダーの砂地、 $10^4$ オーダーの国内土壌の侵食相当の流出を想定した場合には、約 20 万年とされる濃縮度 5%精製ウランのピークは、流出の影響が大きいほど、実効半減期、発生時期、ピーク濃度ともに短縮、低減される。

ここで国内土壌侵食相当の流出を想定した場合について補足すると、国内年間平均の土壌侵食によって処分場が削られる際のウラン喪失分に等しい量で流出したときの流出効果を意味している。

ただし、収着分配係数  $K_d$  は、土壌へのウランの吸着/脱離の化学平衡と、脱離したウランが何らかのイオン若しくは錯イオンとして溶存する化学平衡との、両者のバランスにより増減するため、既に言及した土壌種別或いは土壌粒径による依存性の他に、pH や全炭素、カルシウム、或いは海水の浸透等による増減が起き得ることを考慮したものである。また、ウランは、重金属として体内に摂取された場合の腎臓への化学毒性が報告されており[14]、我が国では、公共用水域の水質汚濁における要監視項目の1つとして、ウラン濃度 0.002 mg/L (2 ppb) 以下の基準値が暫定値として与えられている[15]。当然ながら収着分配係数が低い場合は、年当たり放出されるウラン量も多くなり、帯水層や河川の水量によっては飲料水や農業用水等に使用される生活圏の水質にも影響する可能性がある。ただし、日本の環境中ウランの暫定基準値 2 ppb は世界的にも厳しく、米国[16]及び WHO 飲料水基準[17]では 30 ppb とされている。

### 3.3 将来世代をラドンによる被ばくから守るにはどうすればよいか。

以上の議論から、ラドンによる被ばくを低減するための方法としては、まず適切な覆土厚が維持されれば、埋設されたウランの流出による低減を考慮しなくとも、最も影響が大きいと考えられる処分場跡地に居住するシナリオに対しても、能動的な被ばく対策を将来に要することはないといえる。この他、床下からのラドン侵入を防ぐ、換気を良くすること等が効果的である。

一方で、ウラン処分場跡地の住居床下から相当濃度のラドンが発生する等潜在被ばくが顕在化した場合には、ウラン処分場の存在に気づかない限り、ラドンを測る等の能動的な被ばく対策を取ることにはできない。このため、処分場の場所と処分量記録を、言い換えればリスクそのものの存在を後世に伝えることが防護上有効である。

しかしながらこれらの対策は、潜在被ばくの顕在化の際に介入措置として要求されるものであり、収着分配係数  $K_d$  を 1000-2000 L/kg 程度と想定する場合には覆土無しで線量拘束値から線量限度のオーダーのラドン被ばくに留まることが想定されており[2]、潜在被ばくとしては許容可能なレベルに留まっていると考えられる。その判断の根拠として、今回のウラン廃棄物処分の制度化では設計された防護性能から経年劣化あるいは人間活動を含む将来の予期せぬ事象により破損し、覆土等の防護性能を失ったウラン廃棄物処分場を現存被ばく状況として捉え、ラド

ンもしくは NORM、自然バックグラウンド放射線及び人間の居住環境中の放射性残渣における残存線量として、参考レベル[5]が援用されたと言えるだろう。

将来世代の人々を潜在的なラドン被ばくから守るには、上記の現存被ばく状況への備え、より具体的には、トレンチ処分で 50 年、コンクリートピットで 300 年の管理期間を過ぎた後においてもウラン埋設量等の情報を後世に伝えることのできる、長期にわたって効果が期待される情報伝達の方策が検討されることが望ましい。こうした方策は、ウラン平均濃度が地殻存在度平均に近い 1Bq/g 程度となる処分場では念のための措置と位置づけられるが、より濃度の高い放射性廃棄物の処分においては、より重要さを増すだろう。

#### 第 4 章 現状で可能なウラン廃棄物処分オプションについて

本章では、ウラン廃棄物の濃度に応じた処分オプションについて、特に、十分に少ないウラン量（天然起源のウラン親核種である、U-234, U-235 及び U-238 の総計が平均 1Bq/g）を超える濃度のウランについて、国内及び海外（米国、英国）の現在公表されている検討資料を概観・整理した。

1 Bq/g (= 7.7g/200L ドラム缶)を下回るウラン汚染物は、クリアランス制度による再利用の可能性があることから、一般産業廃棄物処分場に受け入れられる可能性がある。10 Bq/g (=約 60g/200L ドラム缶)のウラン汚染物は、将来の処分場の受入条件に従うこととなるが、第二種放射性廃棄物としての埋設処分が可能と判断される<sup>5</sup>。

上記の値を超える物、すなわち平均 1000 Bq/g 以上のウラン廃棄物、具体的にはウラン単体や劣化ウラン等、高濃度の不要核燃料物質等の処分オプションについては、原子炉等規制法施行令 31 条により、国内では、アルファ線を放出する放射性物質で  $10^5$  Bq/g の濃度までは、第二種埋設廃棄物、すなわち地層処分をしなくても良い廃棄物として、中深度処分以下の処分が許可される可能性がある。この濃度は金属単体の天然同位体比ウランの持つ比放射能濃度である  $2.54 \times 10^4$  Bq/g を超える数値であり、将来的な平衡状態を仮定しても汚染物であれば第二種廃棄物として取り扱えることが予想される。ただし、中深度処分場では設計要件として、「10 万年経過

---

<sup>5</sup> 規制委による検討評価（ウラン廃棄物のクリアランス及び埋設に係る規制基準等における要求事項について）[18]における、浅地中処分の廃棄物埋設地内で、ウラン濃度が著しく高い領域がないことを要求するめやすとして、廃棄物埋設地の一定の範囲（体積として 250～500 m<sup>3</sup> 程度、面積として 50～100 m<sup>2</sup> 程度）においてウランの平均放射能濃度が一定の上限値（10 Bq/g）を超えないようにすることが言及されている。

後に廃棄物との接近を仮定した公衆の被ばく線量が 20 mSv/y を超えないこと」が定められている[19]。

ここで中深度処分とは、地上から深さ 70 m 以上の地下深度に廃棄物を埋設処分する方法である[20]。「低レベル放射性廃棄物」のうち「放射能レベルの比較的高い廃棄物」についても、放射性物質濃度の減衰に応じた数百年の管理期間を経た後には一般的な土地の利用が可能と考えられている。その際に廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態に移行する見通しがあることは中深度処分場許可審査の項目とされている。以下に掲げる各シナリオは、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[18] 第 12 条第 8 項 2 号において、廃棄物埋設地の基本設計において埋設廃棄物の公衆影響評価の基準を満たすことが要求される。

- 自然事象シナリオ：「被ばくに至る経路」及び「人工バリア及び天然バリアの状態に係るパラメータの組み合わせ」について科学的に合理的と考えられる範囲で最も厳しい設定とした自然事象シナリオに基づき、評価される公衆の受ける線量が 300  $\mu$ Sv/年を超えないこと。これは線量拘束値に相当する値である。
- ボーリングシナリオ<sup>6</sup>：廃止措置の終了直後において廃棄物埋設地と地表との間に短絡経路が形成され、人工バリアと同等の機能を有する構築物で区画された廃棄物埋設地の区画内の放射性物質が漏えいすることを仮想した設定に基づき、評価される公衆の受ける線量が 20 mSv/年を超えないこと<sup>7</sup>。
- その他、放射能濃度制限要件（10 万年の経過後以降において海水準変動に伴う侵食の影響を受ける可能性のない場所に廃棄物埋設地を設置する場合を除く。）：10 万年が経過した後における廃棄物埋設地内の放射性廃棄物等と公衆との接触を仮想した設定に基づき、評価される公衆の受ける線量が 20 mSv/年を超えないこと。

---

<sup>6</sup> 廃止措置の終了直後における一回の鉛直方向のボーリングによって廃棄物埋設地が損傷し、人工バリア及び埋設する放射性廃棄物の受入れの開始後において廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を防止する機能を有するものにより区画された領域の放射性物質が漏えいすることを仮定した設定。この際、区画別放射線量が最も多くなる区画が損傷するとして評価すること[21]。

<sup>7</sup> ICRP Publication 122 「長寿命放射性固体廃棄物の地層処分における放射線防護」[11]において、「計画段階では、様式化又は簡素化された計算の結果は、必要に応じて、線量の数値と比較することによりシステムの頑健性の指標として使用することができる。このアプローチを採用する場合は、緊急時被ばく状況及び／又は現存被ばく状況に対して設定された参考レベルを使用することが勧告される。」とある。20 mSv/年は、この参考レベルの上限とされている。

これらのうち、自然事象シナリオは、合理的に想定される最も厳しい条件での被ばく影響評価であり、線量拘束値を公衆被ばくの基準とした処分場性能の頑健性を試すものである。一方、様式的な短絡経路を設けるボーリングシナリオは、処分場の放射性物質閉じ込め・移行抑制<sup>8</sup>を無視するシナリオであり、処分場に受け入れ可能な放射性核種の総量を規制している。また、放射能濃度制限要件は埋設施設敷地内における廃棄物と公衆の直接接触と、その摂取等に伴う被ばくを仮定しているため、処分場の覆土や処分深度を無視する要件となり、処分場に受け入れ可能な放射性核種の濃度を規制している。これらの要件は処分場の持つ公衆被ばく防護性能の基準ではなく、性能が経年劣化等により失われた時の設計外事象による一種の現存被ばく状況においても、公衆や意図しない侵入者への被ばく量が事故時等の参考レベルである 20 mSv/年以下に抑えられることを求めている。

これらの規制がウラン廃棄物の中深度処分に適用された場合には、ボーリングシナリオについては処分場近傍の帯水層の水量によって受入れウランの総量が決まり、また、放射能濃度制限要件についてはラドン被ばくを考慮するとすれば、覆土を完全に無視するの残すのか、また、評価に用いる処分場廃棄体層及び帯水層等、処分場敷地周辺地下土壌と間隙水における収着分配係数に基づくウランの流出が、処分可能な濃度と総量を定めることになる。もし覆土が全くなく、同時に収着分配係数が  $10^6$  L/kg を超える大きさの想定では、前章の試算に従えば、中深度処分が可能なウラン濃度はトレンチ、ピット処分と同じオーダーの値となるだろう。

海外では、多くの国が、劣化ウラン等、高濃度のウランについては資源として保管している[22]。米国では、WCS 社アンドリュートキサス処分場への受入れを開始し、浅地中処分のための安全規制方針を策定中である[23]。また、英国放射性廃棄物管理委員会 (CoRWM) は、分離ウランが廃棄物と宣言された場合の地層処分に関する勧告に劣化・天然・低濃縮ウラン (DNLEU) を含めた[24]。その一方で、委員会はこの物質の危険性が比較的低いことを認識しており、英国原子力廃止措置機関 (NDA) は、DNLEU の浅地中処分オプションとして、3 つの概念を検討し、浅地中処분을地層処分の代替手法となり得るかについて評価した[25]。

- 廃棄コンセプト NS1 は、表面から直接アクセスできるサイロ：大規模な侵入を防ぐために厚いカバーを必要とする。
- 廃棄コンセプト NS2 は、シャフト又はドリフトを介してアクセスできるサイロ；陸からアクセスできる陸の下又は海の下に建設することができ、数十 m 又は以深で建設可能。十分な深さがあれば、侵入を小規模にできる。
- 廃棄コンセプト NS3 は、廃棄物を設置するための保管庫で構成される。

この NDA による安全評価報告では、氷期の反復とその後の大規模な発掘に対して脆弱であると、浅地中処分は可能だが実行可能性はサイトに依存し、地層処分の評価も必要としている。

---

<sup>8</sup> 廃棄物埋設地から地下水を介して生活環境へ移動する放射性物質を低減させること。[11]

ここで注目すべき点はこれらの概念が「アクセスのしやすさ」すなわち、意図的であるか否かに係わらず、人間による処分場への接触・侵入のしやすさを評価軸としたことであり、人間侵入に起因する放射線防護機能や移行抑制機能への影響が評価結果を決定したことである。

処分方針に関して、英国は米国より慎重に見えるが、日本国内の規制の考え方は、英国 NDA の結論に整合するものであり、将来の超長期にわたる年代経過による中深度処分場の覆土や処分深度による被ばく防護性能の喪失を無視する、潜在被ばく評価を行う方針を示している[21]。

一方で、あまりに想定すべき年代経過が大きく、不確かさが大きすぎることにより、評価の設定によっては、浅地中処分と中深度処分との間で、処分可能なウラン濃度の差が無いという結論もあり得る。現実的には、70 m 以深の処分による防護性能が、高々数メートルのトレンチ・ピット処分と同オーダーのウラン濃度と受入上限が同じというのは、濃度の高いウラン廃棄物の処分オプションとしても、解決にむけた検討が不十分と思われる。中深度処分における処分可能なウラン濃度の検討には、潜在被ばく評価の活用に加えて、処分深度とは無関係に覆土と流出を無視する等の過度の保守的想定や不確実な評価の濫用を注意深く排するためにも、ラドン対策やインベントリを含めた、超長期評価の計算条件や仮定の置き方について妥当な（様々な観点から見て納得が得られるような）考え方が、放射線防護における知識継承の位置づけや、より持続的にするための継承方法の考え方の整理を含め、超長期評価の不確かさを低減するために必要と考えられる。

以上に加えて、将来世代の人々が現世代と全く同じ価値観や生活様式を有していると仮定して種々の予測を行うことは適切とは言い難い。例えば、現在は廃棄物とされているウラン含有物が、将来には重要な稀少資源として利用される可能性もある。そうした可能性を考慮し、今後の課題として、将来世代の人々により幅広い選択の余地を残しておくための対応についてのさらなる検討が望まれる。

## 第 5 章 超長期評価の不確かさ

### 5.1 超長期評価の不確かさとは

2020 年に意見公募された新しいウラン廃棄物処分概念の特徴は以下のとおりである。

1. 定量的評価期間の設置：処分場がウラン廃棄物を閉じ込め公衆を守る被ばく防護性能の維持を保証し、規制できるのは 1000 年までである。
2. 処分場上限濃度の設置：処分場の公衆被ばく防護性能が年代経過によりやむを得ず失われた時に備え、低濃度のウラン廃棄物を天然賦存の土壤濃度程度に定め、超長期の地質・人為のイベントに係わらず、事故時等の潜在被ばくの基準に照らし許容量の目安とする。

これらは、これまでの超長期評価の不確かさへの2つの考え方、処分場性能の維持に係る公衆被ばく評価と処分場潜在被ばく評価の発展的融合である一方、以下の課題を持つ。

1. 定量的評価期間の設置による、線量拘束値による評価から潜在被ばく評価への移行の考え方は被ばく防護の原則に照らして矛盾がないか。
2. 潜在被ばくが現実化した際の被ばく低減対策は、将来世代に依存することになる。このことへの後世への配慮をどうすればよいか。

本章では、この新しいウラン廃棄物規制の考え方の特徴を整理するとともに、人文・社会科学の観点からの整合性の検討を行った。

## 5.2 評価期間の設定と将来世代の防護

規制委は、浅地中処分の線量評価において信頼性を確保できる期間の目安を1000年と仮定し、それ以降の長期の評価においては不確かさが高まることから、自然事象シナリオにおいて考慮すべき評価期間の目安を「規制期間終了後1000年程度」としている。また、これを超える期間については、「明らかに保守的と考えられる設定の下で線量ピークまで計算し、その結果が自然事象シナリオの線量基準を著しく超えないこと」及び「廃棄物埋設地からの放射性物質の漏出を考慮しない等の明らかに保守的と考えられる設定で評価しても、ビルドアップやラドンの影響が顕著となる数万年以降の線量が著しく高くなることがないこと」を確認することにより、長期における評価の不確かさに対応するものとしている[26]。

IAEA SSG-23では、長半減期核種を浅地中処分する場合、遠い将来の評価の不確かさが非常に大きくなるため、定量的評価の時間軸を制限するかもしれないとも述べられている[27]。一方で「しかしながら、そのようなすべてのケースにおいて、定量的評価期間を超えた影響について、セーフティケースでは適切な仕方に対処されるべきである」との表現があり、ここでは、信頼性のある定量的評価を行い得るかどうにかかわらず、放射能のレベルが問題となる時間軸の全体にわたって安全についての考慮を尽くすべきであり、通常の定量的評価に限界がある場合には、それを補完ないし代替する方法によって長期の安全問題に向き合うことが要請されているものと解釈し得る。

例えば地層処分では、放射性物質が人工バリア及びその周辺の母岩という長期にわたって変化の極めて小さい領域に閉じ込められており、その領域が極端な外的擾乱から隔離されていることが10万年程度の長期の時間枠についても確実に予測できれば、人間活動や地表の生活環境の変遷についての将来予測は極めて不確実であっても、将来の生活環境に放射性物質の危険がもたらされないことを保証し得る、という考え方を練り上げてきた[28]。

ウラン廃棄物の場合、最も被ばく影響が出る時期が遠い将来（数万年～数十万年以降）と目されることから、工学システムの設計や定量的評価の長期的信頼性の限界という「技術側の事

情」と「影響を受け得る遠い将来世代の防護の保証」とのギャップが特に大きいという特徴がある。評価側の技術的な理由によって、最も影響が出ると目される時期を評価の範囲外とすることは許容されないだろう。また、「将来における個人と集団が、今日とられた行動から現在の世代が与えられているのと少なくとも同じレベルの防護を供与されるべきである」 [29]という基本原則からすれば、定量的評価が可能かどうかということを利用して、現世代と同等レベルの防護が供与される世代とそうでない世代とを区分することはおそらく許容されないし、また、定量的評価期間を超えた遠い将来世代の防護のレベルや質を落としてよいということにはならないと考えることが適切であろう。

ここで今一度線量限度を見てみたい。「同じレベルの防護」を「同じ線量限度」とすれば、戸惑いがある。しかし、ALARAは、合理的に達成可能なものである。線量評価そのものが合理的に達成可能でなければ、次は潜在被ばくを合理的に達成できるかという問いかけとなる。それも達成できなければ、最早、社会的合理性で判断することとなるという意味もALARAの精神の延長で考えられないだろうか。そこに社会学的アプローチの意味がある。

### 5.3 「ウラン流出なし」シナリオとその意味

放射性廃棄物処分の評価では、被ばくシナリオを「自然過程」と「人間侵入」の2つに大別する考え方が確立されてきた。前者の「自然過程」シナリオに対しては、評価された線量（又はリスク）を線量拘束値（又はリスク拘束値<sup>9</sup>）と比較することが求められている。一方、後者の「人間侵入」シナリオに対しては現存被ばく状況における参考レベル（1-20mSv/y）や緊急時被ばく状況における参考レベル（20-100mSv/y）が挙げられてきた。

「人間侵入」シナリオに拘束値を適用しない理由として、①「将来の人の行動の種類又は確率を予測する科学的根拠は乏しいかもしくはないから」、②「定義によって、侵入事象は防護の最適化の一部として設置されているバリアの一部又はすべてをバイパスするから」の2点が指摘されている [27]。処分システムの設計によって本来であれば機能し続けることが合理的に期待される防護を、敢えて無効化することを仮定したシナリオだからこそ、拘束値を目安とした最適化とは別枠で考慮することが正当化され得る。

---

<sup>9</sup>（潜在被ばくによる損害の確率という意味で）ある線源に起因する個人リスクの予測的な線源関連の制限値で、線源によるリスクが最も高い個人に対する防護の基本的レベルを規定し、その線源に対する防護の最適化において、個人のリスクの上限値として役立つ。このリスクは、線量をもたらす意図的でない事象の確率の、またその線量に起因する損害の確率の関数である。リスク拘束値は線量拘束値に対応するが、潜在被ばくに関連している。（ICRP publication 103） [5]

ウラン廃棄物処分の放射線防護が問題になる超長期的な時間軸においては、処分施設の人工構築物（コンクリートピット等）は徐々に機能を失い、計算上ピーク線量が出現する時期（数万～数十万年以降）には機能していないと考えられる。加えて、天然バリアとしての数m程度の厚さを持つ覆土層もまた、10 万年以降の超長期においては自然現象や人間・動植物等による擾乱によって失われると考えられる。実際、規制委の提示した試算では覆土層が完全に失われたものとして評価が行われている。すなわち、ウラン廃棄物の浅地中処分では地層処分の場合と異なり、超長期ではバリアが維持されないことを前提として処分システムが構築されていると言える。一方、最適化にあたり「人間侵入」シナリオを線量拘束値（又はリスク拘束値）の適用枠外に置く理由が、本来期待されるべきバリアを敢えて無効化して考えるからという点にあったことを踏まえると、「ウラン流出なし」シナリオで得られる線量を線量拘束値ではなく現存被ばく状況における参考レベルと比較してよいとする論拠は何であろうか。

#### 5.4 ウラン流出の希釈・分散戦略としての位置づけについて

思考実験として、「浅地中処分場の持つ閉じ込め性能の限界による、結果的な被ばく防護性能としてのウラン流出」という戦略を軸にして、長期評価の意味合いを検討してみたい。この戦略では、埋設時の廃棄物のウラン濃度制限とともに、処分施設周辺土壌の働きによるウランの長期にわたる緩慢な自然流出を、処分システムを構成する設計上の機能として位置付ける。すなわち、自然によるウラン流出の働きを織り込んだ形で処分概念を構築する。

この考え方に立てば、自然によるウラン流出は（その程度が問題にはなるものの）本来期待される機能となり、超長期の線量評価の意味も、地層処分などと同様に「システムの頑健性の指標」として捉えられるかもしれない。また、ウラン流出という機能を敢えて無効化して考えるシナリオは、「人間侵入」シナリオ相当すなわち線量拘束値（又はリスク拘束値）の適用枠外として考えることが正当化され得るだろう。いささか極端な例だが、処分施設の制度的管理期間の終了後、人間の土地利用によって処分施設の周囲に堅固な地中壁が設置され、自然によるウラン流出という本来期待される機能が発揮されなくなる場合がこれに相当するだろう。規制庁の示した「ウラン流出なし」シナリオも、同様な形で位置付けられるかもしれない。もちろん、こうしたシナリオを線量拘束値を用いた最適化のプロセスから外してよいとするためには、ウランの自然流出という機能が阻害されるような可能性をできるかぎり低くする対策を適切に実施した上で、という条件が付されるべきであり、それは結局、より深い深度での処分につながる可能性もある。ただ、地層処分のような非常に深い場所では物質の動きが極めて緩慢であるため、ウランの自然流出を機能の一環として位置づけようとするれば、却って望ましくないかもしれない。ウランの自然流出という機能の働きをできるだけ保証するために、外部からの擾乱の受けやすさと自然流出の速度とのバランスを適切に考えて深度や処分施設を設計することが、防護の最適化にとって鍵となり得るだろう。

但し、ウラン流出を設計上の機能と位置付けるには、流出速度の不確実性やウランの化学毒性等、考慮すべき課題が多く、ここではあくまでシナリオの整合性を検討する思考実験の一例として示している。

## 5.5 ウランを「自然」に還すことについて

規制委はウラン廃棄物処分における「十分に低い放射能濃度」として、ウランの天然賦存性に依拠した地殻分布の変動範囲上限濃度である  $1\text{Bq/g}$  を提案しているが、この背景には、この濃度であれば（自然流出を考慮した場合の）遠い将来の人や環境への影響と、元の天然賦存のウランによる影響とが同程度に収まるだろうという考えがうかがえる。対象となる個人の被ばく評価にくらべ、濃度による規制には不確実性の低減が期待できるだろう。ここで、長期評価において、遠い将来世代にとっては自然由来と廃棄物由来のラドンが区別できないだろうという理由で、まとめて現存被ばくとして扱ってもよいものだろうか。また、ウランを「自然」に還す努力を行い、その結果として生じ得る被ばくが「自然」と「人為」の識別が不能な程度であれば、遠い将来世代にとっても許容し得るという考え方は、適切と言えるだろうか。

リスク社会学では、科学技術の発展とともに「天災」とされていた事象が「人為」の所産として認識されるようになると、誰がその責を負うのかが社会的・政治的焦点になりやすいと指摘されている[31]。気候変動に対する技術的解決の一方策として提案されている気候工学のように、「人為」と「自然」の区別が曖昧化すると、逆に責任の範囲や帰属先の確定をめぐる激しい政治的論争をもたらし、そうした論争自体が将来世代にとっては大きな負担となり得る[32]。仮に、将来世代が高度な科学的知識を有していると仮定すると、彼らがラドン被ばくに対処しようとする際、ラドンの起源について可能なかぎり特定をし、その責任主体を明確化しようとする試みであろう。そして、ラドンの一部が遠い過去世代の廃棄物処分に由来すると知ったとき、彼らはおそらく、「本来は自分たちに帰されるべきではない負担を強いられている」と考えるであろう。

また、規制庁の評価では、遠い将来のラドンによる潜在被ばくを評価し、WHO 及び ICRP の基準（参考レベルとして一般住居環境で上限  $300\text{Bqm}^{-3}$ 、これは年当たり  $10\text{mSv}$  の被ばく線量に相当[33], [34]）と比較して、その適切性を判断する目安としている。他方で、特に欧州を中心としてラドン被ばくへの注目が高まりつつあり、職業被ばくに関する規制においてラドン被ばくの考慮を検討している国が現れているほか、一般の住居等についてもラドン被ばくについての注意喚起を促すべきかどうかといった議論が行われている[35]。

あるレベルのリスクが社会的に現存しているからといって、それが社会的に容認されているとは限らないという批判は、リスク認知研究の分野で盛んに指摘されてきた[36]。例えば、わが国における自動車による交通事故死者数は昭和 40 年代に年間 17,000 人近くにまで達していたが、

自動車利用が禁止されていなかったからといって、これほど高いリスクが社会的に受容されていたわけではなく、交通安全に関する様々な施策が行われ、交通事故を減らす努力が現在に至るまで続けられている。地質や密閉性の高い住居が多いスウェーデンをはじめとする諸外国では、現在も受容し難いほど高いレベルのラドン被ばくが起きており、リスクを低減する努力の必要性が社会的に認識されつつある状況とも解せるだろう。もちろん、一般の住居に対して費用のかかる追加的防護をすぐに強制することは現実的ではなく、被ばくの正当化について説明すること自体の倫理的な難しさなどもあり[37]、ラドン被ばくをめぐる議論では一筋縄ではいかない。

## 5.6 将来世代の被ばく低減対策への依存

本専研においては、処分場の防護性能が不確実となる期間がウラン半減期よりも早く到来することから、それ以降の現存被ばく状況への対策は将来世代に依存することとなり、遠い将来世代に対して放射性廃棄物の存在や処分・管理に係る考え方を確実に伝えるためにはどうすればよいか、といった問題提起がなされた。しかし、従来の放射性廃棄物処分の原則に照らして考えるならば、管理期間が終了した以後においては処分システムの機能によって安全が達成される保証が得られることが前提であり、遠い将来の人間による能動的な被ばく低減対策を安全機能の一部として組み込むことはできないはずである[38]。実際、他の放射性廃棄物の処分概念は、いずれもこの原則を満たすような形で構築されている。例えば短寿命核種の浅地中処分は、制度的管理が数十～数百年程度は有効であり続けるという前提で設計されるが、同時に、管理期間中に放射能が十分減衰し、期間終了時には人間侵入や擾乱を受けたとしても問題ないような程度の被ばくしか起こらないことが保証される必要があり、またそうなるようなインベントリの廃棄物のみが受け入れを許可されることとなる。

言い換えると、将来世代の能動的対応の必要性がないような形で処分概念を構築することが必要であり、処分方法をいったん決めた後でその必要性が生じた場合には、処分方法の選択の妥当性自体を再検討することが求められる。逆に、管理期間終了後の長期的な被ばく対策を安全対策の構成要素として認めるならば、高レベル放射性廃棄物の地層処分の必要性を裏付ける論理に対して大きな影響を及ぼすことになる。地層処分の選択に係る倫理的議論では、“rolling present”という考え方に基づく長期貯蔵（制度的管理）よりも、廃棄物の発生者である現在の世代が責任をもって処分する方が、将来世代に不当な負担をかけず倫理的であるとの主張がなされてきた[39]。もしウラン廃棄物の浅地中処分が遠い将来世代の能動的対応を前提とするのであれば、上記の倫理的正当化の判断が変わる可能性が出てくる。

ウラン廃棄物処分が将来世代の被ばく低減対策に依存しなければならないのであれば、処分概念自体を再考する必要があると考えられる。無論、そのような再考（受け入れ可能な濃度基準の再設定や、より深い深度での処分オプションの検討等）を行った上でもなお、様々な観点

から見て浅地中処分が最も合理的な取り組みであると言える可能性もある。その場合には、廃棄物処分の原則から見て例外的な処分概念がなぜ正当化し得るのかを、多くの論拠とともに丁寧に示すことが必要となる。

なお、安全確保に不可欠な要素の一つとしてではなく、処分システムの受動的な安全機能の働きをより確実なものとするために、記録保存やモニタリングの設置といった手段を検討することは、上記の倫理的判断を覆すものではない。ただし一般的な浅地中処分では、能動的管理が行われるのは操業段階のみであり施設閉鎖後は間接監視期間へと移行していくが、この段階では処分施設に対して直接的に手を加える能動的管理ではなく、モニタリングや土地利用制限といった間接的な監視（*watchful care*）が行われるものとされる[11]。仮に、ウラン廃棄物処分において、施設閉鎖後 1000 年間の定量的評価期間のうちに覆土の修復を実施するような場合、間接的な監視による *watchful care* の範囲を超えられると思われるため、この点でも議論が必要になると思われる。

## 5.7 小括

規制委の提案したウラン廃棄物の浅地中処分の考え方には、減衰や閉じ込めに期待できないという廃棄物の特性に鑑みて、前述の「技術側の事情」と「影響を受け得る遠い将来世代の防護の保証」とのギャップを乗り越えようとする工夫が随所に見られる。定量的評価期間とそれ以降の期間との区分や、複数のシナリオによる潜在被ばく評価など、いずれも様々な考慮の結果導かれており、通常の評価が成り立たないほど超長期の時間軸における遠い将来世代の防護を何とか保証しようとする努力が行われた結果と言え得る。ただ、本章において指摘したように、「ウラン流出なし」シナリオの評価に現存被ばく状況の参考レベルを用いることの妥当性など、既存の放射性廃棄物処分の考え方とは十分に整合しない点もあると考えられる。また、明文化はされていないものの現在の考え方の背後にあると思われる、ウランを「自然」に還すという考え方は、ウラン廃棄物の特性を踏まえて新たな戦略を示していると思われる一方、ラドン被ばくをめぐる「自然」と「人為」の識別などの点で、将来世代にとっての負担を増すことになるとの見方も成り立つ。この点は、人文・社会科学的な観点も含めて、より深い検討が必要であろう。

いずれにせよ、規制委が提示したウラン廃棄物処分における「十分に低い放射能濃度」という新たな概念と、これを踏まえた超長期の潜在被ばく評価による処分システムの提案は、「技術側の事情」と「影響を受け得る遠い将来世代の防護の保証」とのギャップを埋めるための有益な見方を示している一方で、その根本にある戦略の一層の確立と言語化が重要と思われる。そのことにより、シナリオの位置づけや比較に用いるべき基準の意味が明確となり、より一貫した処分概念の構築に寄与するであろうし、また社会的な議論にもつながりやすくなると考えられる。

## 第6章 世代間倫理と永続性

廃棄物処分場の管理期間は数百年とされるが、それをはるかに超える長寿命の人工放射性核種が有意に生成されることが判明し、更には、分離したウランのように、放射能が崩壊により次第に蓄積して、数10万年後に放射線影響の最大値が来るという予想が確かなものになってきた。

一方、我が国では、当然のごとく、現在の世代も将来の世代も同一の法体系で安全が確保されるとして放射性廃棄物処分の議論がなされてきた。その源泉は、人類が生み出した人工放射性物質は比較的短寿命であり、いずれ消滅するという見通しと、その見通しに沿った倫理観であろう。しかし、超長半減期を持つ放射性核種を扱う際には、いずれ放射能はなくなるという仮定は成立せず、時間が経つほど被ばく線量は小さくなるという前提での議論に矛盾が生じる。

すなわち、「将来世代の防護も現世代の防護と同じように配慮しなければならない」<sup>10</sup>という考え方[11, 29]を精緻に考察する必要性が出てきた。現在の原子力利用に係る規制では、行政・専門家・市民・事業者・メディアが良好なコミュニケーションを通じて共通理解のもとに合意が形成される前提となっており、放射線防護の専門家は、この枠のなかで、放射線防護体系の基盤を成す普遍的な倫理観に基づいて他のステークホルダーとのコミュニケーションを深めようと努めている。

一方、遙か未来の社会におけるコミュニケーションは、現在と同じく行政・専門家・市民・事業者・メディアがステークホルダーで現在と同じ知的基盤に立って放射線被ばくの影響を理解し対処しているとは限らない可能性を考慮しなければならない。

しかしながら、その変化を予測するのは困難であることから、現在我々は、今の状況が続くという仮定に立って検討を進めている。こうした状況にあって留意すべき点は、将来世代であっても、専門家等により評価された放射線被ばくの影響は、関係するステークホルダー間の良好なコミュニケーションで合意され社会に受け入れられるものであると期待されるものの、そ

---

<sup>10</sup> ICRP Publication 81 (1998) [30]には、“放射性固体廃棄物処分の主要な目標は、現在の世代が出した廃棄物の放射線影響からの、現在と将来の世代の防護である。しかし、完全な永久隔離は達成できそうもなく、廃棄物のインベントリの一部は生物圏へ移り、潜在的に数百年か数千年の将来に被ばくを引き起こし得る。そのような長い時間尺度にわたる個人と集団の線量は推定できるにすぎず、将来に向けての時間が増加するとともに、これらの推定値の信頼性は減少する。それにもかかわらず委員会は、将来における個人と集団が、今日とられた行動から現在の世代が与えられているのと少なくとも同じレベルの防護を供与されるべきである、という基本原則を認める。”との記述がある。また、ICRP Publication 122 (2013) [11]では、“将来世代の防護のため、委員会の勧告は、引き続き「将来の個人及び集団には、少なくとも、現在世代と同レベルの防護が与えられるべきである」(ICRP, 1998) という基本的原則に依拠している。”と記されている。

の合意点は静的に固定されているものではなく、価値観・倫理観や状況の変化にともなって時代と共に変化するということだ。

その考え方に立てば、現世代が将来起こり得る全ての問題を解決しようとするのはある意味傲慢であり、将来の世代に自由な選択肢を与え、現在とは異なる倫理観や価値観が主流となった未来の社会において、関係するステークホルダー間の議論で問題の解決が図られるべきであろう。なお、処分場の定量的評価は 1 万年までという現在の方針は、米国のエネルギー省（DOE）、環境保護庁（EPA）、原子力規制委員会（NRC）といった関連する政府機関の担当者が集まって、当時の常識的考え方に基づいて合意し制定したものである。こうしたアプローチが将来世代を適切に防護する鍵になると考えられる。

この問題は、現世代と将来世代との間の廃棄物処分についてのリスクコミュニケーションであると捉えることもできる。確かに、現世代の私たちは将来世代の考えや意向を知ることはできない。しかし、将来世代に対して現世代の考えや意向を伝えることは可能である。現世代が知り得ている放射性廃棄物についての知識・情報、それらに基づく現世代の認識と判断、現世代が放射性廃棄物について実際に為した対策とその対策に対する評価（自負や反省）を、隠すことなくすべてを誠実に将来世代に伝えることを将来世代に対するリスクコミュニケーションとして最低限おこなう必要がある。それらの情報が将来世代にとって現世代から残された放射性廃棄物をより適切に取り扱う助けとなると考えられるからである。そして願わくは、そのことによって将来世代から現世代に対する信頼を得たいものである。すなわち、将来世代から確か有益であると信頼される情報を現世代は将来世代に確実に伝える努力をするべきである。

「子どもは親を選ぶことができない」といわれるように、実際には後世代の者は前世代が残した遺産を、それが正の遺産であれ負の遺産であれ、すべて所与の条件として受け継がなければならない。そうであるからこそ、現世代が負の遺産となり得ると判断する事象については、世代間倫理として、関連するすべての情報を誠実に将来世代に伝えなければならないと考えられる。そのことによって将来世代が取り得る選択の幅が広がると期待できることから、将来世代を尊重することにつながるからである。

科学技術に関する情報は、一般に将来世代のほうが現世代よりも進んでいると期待される。そのため、科学技術に関する情報はあえて将来世代に伝える必要は低いのではないかとの考え方もあろう。しかしながら、リスクコミュニケーションとして将来世代に伝えるのは、現世代が選択した判断或いは対策の根拠とした科学技術情報である。現世代が何を知っており、また、何を知っていなかったかを将来世代に伝えておくことによって、現世代が為した判断と対策を将来世代が理解しやすくなり、将来世代が現世代の判断や対策の意味をふまえたより良い選択ができるようになると考えられる。

価値観や倫理観は時代によって変化する可能性はある。しかし、例えば、二千年以上前に成立した論語に代表される儒家の思想やユダヤ教の聖書の教えは、現代においても理解されており、これらを拠り所とする価値観や倫理観を持つ人々は現世代にも多くいる。普遍的な価値観・倫理観とまではいえなくとも、少なくとも、数千年にわたって受け継がれている価値観・倫理観は存在する。ただし、価値観や倫理観は単に文字或いは記録として残しておくだけで後世に受け継がれるものではない。儒家の思想や聖書の教えを現世代の私たちが理解できるのは、その価値観・倫理観を受容して体現する人々が幾世代にもわたって存在し続けてきたからである。

放射性廃棄物にかかる現世代の価値観・倫理観を将来世代に伝えて理解してもらうには、価値観・倫理観を記録として残すだけでは十分ではないであろう。少なくともその価値観・倫理観を理解できる人々が将来世代にも存在するように、現世代は次世代に働きかけてゆく必要がある。これは現世代の価値観・倫理観を将来世代に強制することではない。将来世代には現世代の価値観・倫理観を否定する自由がある。しかし、現世代の価値観・倫理観を将来世代が理解したうえで否定ができるように努めるのが現世代の倫理的責任ではないだろうか。

## 第7章 まとめ

本専研では、超長期の管理が必要となり得るウラン廃棄物の取扱いに関して、その処分量や処分方法の決定に係る判断根拠等について、現世代に広く許容されるだけでなく、それらをかき将来世代へ伝達するか等について、人文・社会科学的な視点を重視した議論を行い、今後の課題として下記に述べるような取組みが必要であるとの理解を共有した。

- ウラン廃棄物の管理に関する現行制度や、処分するウランの量や埋設方法等に係る情報伝達の仕組みは、技術的困難を伴う十万年オーダーの超長期にわたる防護性能の維持という、高レベル放射性廃棄物処分にも共通する課題を克服しようとする取組みであり、現世代の責務として、これに最大限の努力をすることが求められている。
- 人類史の観点等から推測されることとして、こうした法制度やその基盤となる考え方は、遠くない未来に不明瞭となり、将来世代に理解されなくなると考えるのが自然と言える。又、ウランの用途や土地利用形態等の変化に応じて、将来世代がウラン廃棄物処分施設の解体や移動を希望する可能性も考慮する必要がある。
- 今後の課題として、将来世代が地殻の平均濃度を超える状態で埋設するウラン及びその子孫核種の存在とそのリスクを確実に理解したうえで処分場所や管理方法を自らの判断と技術で柔軟に変更するのに効果的な方策について検討し、それらを取り入れたウラン廃棄物処分の具体的方法について明らかにしていく努力が望まれる。

## 謝辞

本報告書を取りまとめるに当たり、外部専門家として専門研究会の場において貴重な情報をご提供いただいた、量子科学技術研究開発機構主任研究員（当時）の栗原千絵子先生に深く感謝いたします。またシンポジウムの場において、貴重なご意見と忌憚ないコメントをいただいた指定発言者ならびに貴重な提言や情報提供をいただいたシンポジウム参加者の皆様に深く感謝いたします。そして最後になりますが、全9回にわたる研究会において貴重な提言や情報提供をしていただき、専門研究会の運営や報告書のとりまとめにご協力いただいたオブザーバー参加の皆様、中部電力・大森宏貴先生、鹿児島大学・小西恵美子先生、(株)千代田テクノル・草尾豊先生、電力中央研究所・杉山大輔先生、高木学校・瀬川嘉之先生、中部電力・玉越武先生、(株)ワカイダ・エンジニアリング・三ヶ尻元彦先生、国立保健医療科学院・山口一郎先生、日本原子力研究開発機構・山口文恵先生、並びに原子力環境整備促進・資金管理センター・山本正史先生に、心からの感謝の意を表します。

## 参考文献

1. 麓弘道. 放射性廃棄物の処分—廃棄物処分における自然放射性核種としてのウランの取り扱い—, *Radioisotopes*, 66, 641–693, 2017.
2. 原子力規制庁. 「ウラン廃棄物のクリアランス及び埋設に係る規制の考え方」令和3年3月10日 原規規発第2103109号 原子力規制委員会決定, 2021.
3. 齋藤龍郎, 小林慎一, 財津知久, 下道國, 麓弘道. 自然放射性核種を含む廃棄物の放射線防護に関する 専門研究会の活動報告. *Jpn. J. Health Phys.* 55, 86-91, 2020.
4. 保田浩志, 麓弘道, 齋藤龍郎. ウラン廃棄物処分における人文・社会科学的検討の重要性, *日本原子力学会誌「アトモス」*, 63, 610–614, 2021.
5. International Commission on Radiological Protection (ICRP). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP* 37 (2-4), 2007.
6. 一般社団法人 日本保健物理学会. 自然放射性核種を含む廃棄物の放射線防護に関する専門研究会, "日本保健物理学会専門研究会報告書シリーズ, Vol.11 No. 2, 自然放射性核種を含む廃棄物の放射線防護に関する専門研究会 報告書", ISSN 1881-7297, 2019.
7. 原子力発電環境整備機構「地層処分安全確保の考え方」, 2017.
8. 原子力規制庁, 中深度処分等に係る規制基準等の策定について-浅地中処分における ALARA 適用の考え方及び中深度処分等における人為事象シナリオの考え方について-, 第69回原子力規制委員会資料7, 2018.

9. 産業技術総合研究所地質調査総合センター「日本の地球化学図: 元素の分布から何が分かるか?」, 2004.
10. International Commission on Radiological Protection (ICRP). Ethical foundations of the system of radiological protection. ICRP Publication 138. Ann. ICRP 47(1), 2018.
11. International Commission on Radiological Protection (ICRP). Radiological protection in geological disposal of long-lived solid radioactive waste. ICRP Publication 122. Ann. ICRP 42(3), 2013.
12. 日本原子力学会. 「低レベル放射性廃棄物の埋設地に係る覆土の施工方法及び施設の管理方法ーピット処分及びトレンチ処分編ー: 2016」, 日本原子力学会標準, AESJ-SC-F016:2016, 2016.
13. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. 531 Vol. I, pp 83-156: SOURCES ANNEX B “Exposures from Natural Radiation Sources”, 2000.
14. 食品安全委員会、府食第 862 号「食品影響評価の結果の通知について 評価書 食品中に含まれる放射性物質」, 2011.
15. 環境省環境管理局水環境部長、環水企発 040331003・環水土発 040331005「水質汚濁に係る人の健康の保護に関する環境基準等の施行等について(通知)」(accessed on 30 June 2022).
16. National Primary Drinking Water Regulations, Code of Federal Regulations 40 CFR 141 (accessed on 30 June 2022).
17. World Health Organization (WHO), “Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum”, ISBN 978-92-4-154995-0, 2017.
18. 原子力規制委員会. 「ウラン廃棄物のクリアランス及び埋設に係る規制基準等における要求事項について」原規規発第 21031011 号, 2021 年 3 月 10 日.
19. 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 第 12 条第 1 項第 8 号, 2021/10/21 公布(改正)・施行.
20. 原子力規制委員会. 「核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則」昭和六十三年総理府令第一号、第 1 条の 2 第 2 項第 3 号、2021/10/21 公布(改正)・施行
21. 原子力規制委員会、廃棄物管理事業 内規「中深度処分の廃棄物埋設地の設計プロセスに関する審査ガイド」(令和 3 年 9 月 29 日制定、同年 10 月 21 日施行), 2021.
22. Nuclear Decommissioning Authority (NDA). . Geological Disposal: Investigating the Implications of Managing Depleted, Natural and Low Enriched Uranium through Geological Disposal. Report no. NDA/RWM/142, ISBN 978-1-84029-534-4, 2016.

23. Texas Commission on Environmental Quality (TCEQ). Radioactive Material License R04100 for Waste Control Specialists, Andrews, Texas. December 2015.
24. Committee on Radioactive Waste Management (CoRWM). Managing our radioactive waste safely: CoRWM's recommendations to Government. CoRWM Document 700, 2006
25. Bath, A. and Read, D. Integrated Project Team on Uranium: Phase 2 Task RUP-3.2A: Conceptual model of far-field uranium transport. Galson Sciences Ltd Report 1207-RUP-3.2A-1 Version 2.1 for RWM, October 2015
26. 原子力規制庁. 原規規発第 21031010 号「浅地中処分における評価期間について」令和 3 年 3 月 10 日, 2021.
27. International Atomic Energy Agency (IAEA). Safety Standards Series No. SSG-23, "The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste", IAEA, Vienna, 2012.
28. 増田純男. 「高レベル放射性廃棄物を地下深く終う地層処分」原子力環境整備促進・資金管理センター出版, 2016.
29. International Commission on Radiological Protection (ICRP). "Protection of the Public in Situations of Prolonged Radiation Exposure", Publication 82. 1999.
30. International Commission on Radiological Protection (ICRP). "Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste", Publication 81. 1998.
31. ウルリヒ ベック 著, 東廉・伊藤美登里訳. 『危険社会：新しい近代への道』, 法政大学出版局, 1998.
32. Szerszynski B, Kearnes M, Macnaghten P, Owen R and Stilgoe J, Why solar radiation management geoengineering and democracy won't mix, Environment and Planning A 45: 2809-2816, 2013.
33. World Health Organization (WHO): WHO Handbook on Indoor Radon, A Public Health Perspective, ISBN 978-92-4-154767-3, 2009.
34. International Commission on Radiological Protection (ICRP). Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115, Ann. ICRP 40(1), 2010.
35. The RICOMET conference on Social Sciences and Humanities in Ionizing Radiation Research, 8-11 September 2021.
36. Fischhoff B, Slovic P, Lichtenstein S, Read S and Combs B, How safe is safe enough? A Psychometric Study of Attitudes Towards Technological Risks and Benefits, Policy Sciences 9:127-152, 1978.

37. Oughton D, Meskens G, Geysmans R, Perko T and Mihok P, Ethical Challenges in Social Science Research related to Radon and NORM, Presentation at RICOMET 2021, Investigating societal aspects of radon and NORM: improving methodology, September 11, 2021.
38. International Atomic Energy Agency (IAEA). Safety Standards Series No. SSR-5, "Disposal of Radioactive Waste Specific Safety Requirements", IAEA, Vienna, 2011.
39. Organisation for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency (OECD/NEA). The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal, A Collective Opinion of the NEA RWMC, 1995.