

# NRA 技術報告

NRA Technical Report Series

## ウラン廃棄物のクリアランス及び埋設に関する 線量評価

**Dose assessments based on scenarios for clearance and disposal of  
uranium waste**

青木 広臣 室田 健人 木嶋 達也 市来 高彦 山田 憲和

AOKI Hiroomi, MUROTA Kento, KIJIMA Tatsuya, ICHIKI Takahiko, and YAMADA Norikazu

核燃料廃棄物研究部門

Division of Research for Nuclear Fuel Cycle and Radioactive Waste

原子力規制庁

長官官房技術基盤グループ

Regulatory Standard and Research Department,  
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

原子力規制委員会

Nuclear Regulation Authority

令和3年10月

October 2021

本報告は、原子力規制庁長官官房技術基盤グループが行った安全研究等の成果をまとめたものです。原子力規制委員会は、これらの成果が広く利用されることを期待し適時に公表することとしています。なお、本報告の内容を規制基準、評価ガイド等として審査や検査に活用する場合には、別途原子力規制委員会の判断が行われることとなります。

本報告の内容に関するご質問は、下記にお問い合わせください。

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ 核燃料廃棄物研究部門  
〒106-8450 東京都港区六本木 1-9-9 六本木ファーストビル  
電話：03-5114-2225  
ファックス：03-5114-2235

## ウラン廃棄物のクリアランス及び埋設に関する線量評価

原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ  
核燃料廃棄物研究部門

青木 広臣 室田 健人 木嶋 達也 市来 高彦 山田 憲和

### 要 旨

原子力規制委員会は、2019年からウラン廃棄物のクリアランス及び埋設に関する規制基準の検討に着手し、2021年3月に「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」（以下「規制の考え方」という。）を決定した。本報告では、「規制の考え方」の検討に際し参考としたウラン廃棄物のクリアランス及び埋設に関する線量評価の詳細について述べる。

ウラン廃棄物のクリアランスについては、IAEA GSR Part 3 では天然線源による被ばくは基本的に現存被ばくとして考えとし、クリアランスレベルについても、天然起源核種と人工起源核種とを分けて示している。一方、欧州理事会指令 2013/59/EURATOM では、「原子力利用のために天然起源核種を処理する行為によって生じた核種を含む物質については、人工起源核種を含む物質と同様にクリアランスレベルを設定すべき」と明記されている。

「規制の考え方」では、この原子力利用に供されたウランを人工起源核種と同様に取り扱うという考え方を参考にしている。本報告では、人工起源核種のクリアランスレベルの設定で用いられた、評価シナリオを設定し、シナリオに応じた線量評価を行い、線量評価の結果から線量基準に基づきクリアランスレベルを導出するという手順を適用した。評価シナリオ及びその線量評価に用いるモデルについては、原子力安全委員会のクリアランスに関連する報告書に準拠した。 $^{234}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$  及び  $^{238}\text{U}$  それぞれに対するクリアランスレベルとして、1 Bq/g という数値を導出した。

ウラン廃棄物の埋設については、廃棄物埋設地のウランの放射能濃度（5%濃縮ウランの同位体の放射能濃度の合計）が 1 Bq/g と仮定した場合における居住シナリオの評価を行った。本評価では、ウラン及び子孫核種が地下水によって流出することを想定したケースと保守的に流出を全く考慮しないケースを評価した。さらに、それぞれのケースにおいて JAEA が開発した線量評価に係るモデルを用いてラドンによる被ばくへの影響を評価した。約 1 万年以降において有意にビルドアップするラドンによる被ばくは、保守的にウラン等の流出を考慮しないケースにおいても、WHO 等の一般公衆に対する指標である 10 mSv/y を超えないことが分かった。

## Dose assessments based on scenarios for clearance and disposal of uranium waste

AOKI Hiroomi, MUROTA Kento, KIJIMA Tatsuya, ICHIKI Takahiko, and YAMADA Norikazu  
Division of Research for Nuclear Fuel Cycle and Radioactive Waste,  
Regulatory Standard and Research Department,  
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

### Abstract

The NRA has been studying the regulation of the clearance and disposal of uranium waste since 2019. After 2 years of discussion, finally, the NRA decided the “Basis policy on regulation of the clearance and disposal of uranium waste” (hereinafter “Basic policy”) in March 2021. This NRA technical report provides the details of dose assessments based on the scenarios for the disposal and clearance of uranium waste that was referred to in the discussion of the NRA Basic Policy on uranium waste regulation.

Regarding the clearance of uranium waste, IAEA GSR Part 3 says “*Exposure due to natural sources is, in general, considered an existing exposure situation*” and shows two tables of clearance levels: one for the radionuclides of natural origin and the other for the radionuclides of artificial origin. On the other hand, EU Council Directive 2013/59/EURATOM says “*for the clearance of materials containing naturally-occurring radionuclides, where these result from authorised practices in which natural radionuclides are processed for their radioactive, fissile or fertile properties, the clearance levels comply with the dose criteria for clearance of materials containing artificial radionuclides.*”. Basic policy refers to the concept that uranium used in a nuclear installation must be treated similar to radionuclides of artificial origin. Applying the procedure of determination of the clearance levels of radionuclides of artificial origins, this report calculated the clearance levels of uranium based on the dose criteria and several scenarios of clearance which were described in the reports by the Nuclear Safety Commission of Japan. The calculated clearance level is 1 Bq/g for each of  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  and  $^{238}\text{U}$ .

Regarding the disposal of uranium waste, we evaluated the dose based on a habitation scenario in which the uranium activity concentration in a facility was 1 Bq/g (activity concentration of uranium isotopes in 5% enriched uranium). There are two cases: a case in which the groundwater flow and leaching rate of uranium and progeny nuclides from the facility are evaluated, and a conservative case in which there is no release of uranium and progeny nuclides from the facility.

Additionally, we evaluated the radon exposure dose for each case adopting a model developed by JAEA. It is shown that even in the no-release case, in which the buildup would come to the surface after 10,000 years, the exposure dose of radon might not be over the WHO's dose criterion for public (10 mSv/y).

## 目次

1.	はじめに.....	1
1.1	背景及び目的.....	1
1.2	ウラン廃棄物の定義.....	2
1.3	線量評価を行う上で考慮すべきウランの特徴.....	2
2.	ウラン廃棄物のクリアランスに関する線量評価の試算.....	6
2.1	我が国におけるクリアランスレベルの導出の経緯.....	6
2.2	ウラン廃棄物のクリアランスレベルの導出.....	7
2.2.1	評価シナリオ.....	7
2.2.2	線量評価の試算に用いるモデル及びパラメータ.....	9
2.2.3	評価結果.....	13
3.	ウラン廃棄物の埋設に関する線量評価の試算.....	19
3.1	評価シナリオ.....	19
3.1.1	状態設定.....	19
3.1.2	評価シナリオと被ばく経路.....	21
3.1.3	評価ケース.....	22
3.2	線量評価の試算に用いるモデル及びパラメータ.....	22
3.2.1	廃棄物埋設地の放射能濃度算定モデル.....	22
3.2.2	居住シナリオにおける被ばく線量評価の試算に用いるモデル.....	23
3.2.3	ラドンによる被ばく線量評価の試算に用いるモデル.....	28
3.3	線量評価の試算結果.....	28
3.3.1	ウランの流出を考慮した場合の線量評価の試算結果.....	28
3.3.2	保守的にウランの流出を考慮しない場合の線量評価の試算結果.....	29
3.3.3	ラドンによる被ばくの線量評価の試算結果.....	30
3.4	感度解析.....	31
4.	結論.....	33
	謝辞.....	33
	参考文献一覧.....	35
	付録 1 本報告におけるクリアランスレベルの算定に係る線量評価の試算に用いたモデル及びパラメータ.....	38
	付録 2 本報告におけるクリアランスレベルの算定に係る線量評価の試算に用いたモデルの妥当性検証.....	55
	付録 3 本報告におけるラドンによる被ばくの線量評価の試算に用いたモデル及びパラメータ.....	59
	執筆者一覧.....	65

## 表 目 次

表 1.1	天然ウランの組成.....	3
表 1.2	5%濃縮ウランの組成.....	3
表 2.1	原子力安全委員会の報告書における評価シナリオと評価核種.....	7
表 2.2	スラグの埋立処分のシナリオの評価対象経路 .....	9
表 2.3	産業廃棄物処分の施設に関するパラメータ .....	11
表 2.4	地下水移行に関するパラメータ .....	12
表 2.5	線量評価結果（クリアランス対象物は単位濃度（1 Bq/g）、流出を考慮） .....	14
表 2.6	線量評価結果（クリアランス対象物は単位濃度（1 Bq/g）、流出を考慮せず） .....	15
表 2.7	ラドンによる被ばくの線量評価結果（クリアランス対象物の濃度は単位濃度（1 Bq/g）） .....	16
表 2.8	クリアランス対象物の放射能濃度を単位濃度（1 Bq/g）としたときの線量評価結果のまとめ .....	17
表 2.9	線量基準を満足する放射能濃度 .....	17
表 2.10	線量基準を満足する放射能濃度（対数丸め後） .....	18
表 3.1	廃棄物埋設地の大きさ等の比較.....	20
表 3.2	居住時における直接線による外部被ばくに係るパラメータ .....	24
表 3.3	被ばく線量換算係数.....	25
表 3.4	粉じん吸入による内部被ばくに係るパラメータ .....	26
表 3.5	農作物摂取による内部被ばくに係るパラメータ .....	27
表 3.6	土壌から農作物 $k$ への移行係数 .....	28
表 3.7	ウラン廃棄物の埋設に係る線量評価の試算結果のまとめ.....	30
表 3.8	自然環境における土壌中のウランの放射能濃度及びラジウムの放射能濃度と本評価における評価条件との比較.....	31
表 3.9	自然環境におけるラドンによる被ばく線量と本評価における評価結果との比較 .....	31
表 3.10	ウランの流出に係る感度解析の結果 .....	32

## 目 次

図 1.1	ウランの壊変系列.....	4
図 1.2	ウラン及びその子孫核種の放射能濃度の時間変化.....	5
図 3.1	廃棄物埋設施設（トレンチ処分）の概念 .....	19
図 3.2	ウラン廃棄物の埋設における被ばく評価シナリオ.....	22
図 3.3	ウラン廃棄物の埋設に係る評価の経時変化 .....	29
図 3.4	ウランの流出に係る感度解析の結果 .....	32

## 略 語 表

EU	European Union (欧州連合)
IAEA	International Atomic Energy Agency (国際原子力機関)
ICRP	International Commission on Radiological Protection (国際放射線防護委員会)
JAEA	Japan Atomic Energy Agency (国立研究開発法人日本原子力研究開発機構)
NRA	Nuclear Regulation Authority (原子力規制委員会)
WHO	World Health Organization (世界保健機関)

## 用語の定義

基本的には 2018 年版 IAEA 用語集 (IAEA Safety Glossary Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection 2018 Edition) の内容に基づく。

### ウラン廃棄物

ウランの製錬、転換、濃縮、再転換、成型加工等の工程によって生じる、専らウラン及びその子孫核種によって汚染された物。クリアランスされる予定の物質も含む。

### クリアランス (clearance)

何らかの規制による許認可を受けている放射性物質を規制の対象から外すこと。

### 免除 (exemption)

ある線源又は行為を規制の一部又は全部の対象としないと規制機関が決めること。

### 除外 (exclusion)

規制による管理ができない被ばくを規制対象から除くこと (地表での宇宙放射線、人体中の  $^{40}\text{K}$  及び地中にそのまま存在する物質からの被ばく等)。

### 行為 (practices)

便益を得るために人の被ばく線量又は被ばくする人数を増加させるような人間の活動  
※EU においては異なる定義がなされている。

### 現存被ばく状況 (existing exposure situation)

管理についての決定がなされる時点ですでに存在している被ばく状況

### 天然起源核種 (radionuclides of natural origin 又は naturally occurring radionuclides)

天然で相当量生じた放射性核種

一般的には、地球創世時に生成された核種である  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  とそれらの子孫核種

### 人工起源核種 (radionuclides of artificial origin)

天然起源核種に当てはまらない、人為的に生成された放射性核種

### 天然線源 (natural source)

天然起源の線源

例えば星、岩石、土壌その他事実上天然起源核種由来の放射能しかない物質（例えば鉱石の処理によって生じる製品又は残さ）

ただし、ウラン・トリウム鉱山及び放射性廃棄物処分施設以外の原子力施設（nuclear installation）で用いられる放射性物質又は排出される放射性廃棄物は除く。

## 原子力利用

放射性、核分裂性又は核分裂性物質生成性（fertile）の利用

## 評価期間

放射性廃棄物埋設の線量評価又はリスク評価の対象とする施設閉鎖後からの期間

## 1. はじめに

### 1.1 背景及び目的

原子力規制委員会は、ウラン廃棄物のクリアランス及び埋設に関する規制基準の検討に着手し<sup>1</sup>、令和3年3月に「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」（以下「規制の考え方」という。）を決定した<sup>2</sup>。さらに、「規制の考え方」を踏まえ、関連する原子力規制委員会規則等に反映される予定である。本報告では、同委員会が「規制の考え方」の検討に際し参考としたウラン廃棄物のクリアランス及び埋設に関する線量評価の詳細について報告する。

「規制の考え方」の参考1に示されているように、我が国のウラン廃棄物は、主に雑固体、使用済みフィルタ、スラッジ、焼却灰などであり、2050年頃までに約11万トンの発生が見込まれ、各事業者等によって保管管理されている<sup>3</sup>。これらウラン廃棄物は、クリアランス又は埋設処分（以下「埋設」という。）が検討されており、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律上の廃棄物埋設事業（未申請）としてその一部を埋設するための廃棄物埋設施設を設計・検討している<sup>4</sup>。ウラン廃棄物のクリアランスについては、原子力安全委員会が平成21年に報告書を取りまとめ<sup>5</sup>（以下「ウランクリアランス報告書」という。）、対象物を金属に限り、その再利用に係る我が国の状況を考慮した評価を行い、<sup>234</sup>U、<sup>235</sup>U及び<sup>238</sup>Uについて、それぞれ1 Bq/gというクリアランスレベルを導出した。同報告書を基に、当時のクリアランスに関する規則<sup>6,7</sup>において、金属に限定して、<sup>234</sup>U、<sup>235</sup>U及び<sup>238</sup>Uに対し1 Bq/gというクリアランスレベルが規定された。一方、金属以外の対象物のクリアランスレベルは、現行のクリアランスに関する規則<sup>8</sup>においても規定されていない。これは、再利用以外のシナリオ、特に産業廃棄物として最終処分するシナリオにおける子孫核種の影響について整理されていなかったことが背景にあると推察される。ウラン廃棄物の埋設については、原子力安全委員会が平成22年に策定した第二種廃棄物埋設事業の安全審査の基本的考え方<sup>9</sup>の中で、「ウラン系列核種が主な核種となるいわゆるウラン廃棄物については、天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と考えられる」とし、適用対象外とした。また、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は、令和元年12月5日の改正により、埋設の対象となる廃棄物の発生施設の範囲を拡大したが、引き続きウラン廃棄物は対象から除かれている。

一方、海外におけるウラン廃棄物のクリアランスについては、「規制の考え方」の参考3に示されているように、クリアランスを制度化している国は、子孫核種を含まない<sup>\*1</sup>ウランのクリアランスレベルとして、人工起源核種と同じ線量基準に基づくシナリオ評価による値を採用している。専ら天然起源核種を含み、原子力施設から発生するという両者の特

---

\*1 正確には、瞬時平衡の子孫核種（Th-234, Pa-234m, Pa-234）のみ含む。

徴を併せ持つウラン廃棄物については、EU Council Directive 2013/59/EURATOM<sup>10</sup>は人工起  
源核種を含む物質と同様にクリアランスレベルを設定すべきであると明示しているのに対  
し、IAEA 一般安全要件 No. GSR Part 3<sup>11</sup>（以下「IAEA GSR Part 3」という。）はその点が  
明確ではない。また、ウラン廃棄物の廃棄物埋設については、放射性廃棄物の埋設処分に  
関する国際基準において、他の放射性核種と区別し、ウランに特化した基準を設けている  
ものはない。即ち、ウランを特別視せず長寿命核種のひとつとして捉えているものと考え  
られる。ウラン廃棄物を既に埋設（浅地中処分）している国においては、ウラン廃棄物の  
みを埋設するための埋設施設を設置する例は見当たらず、他の放射性廃棄物とともにウラ  
ン廃棄物を浅地中処分している又は計画している例がある。

なお、これらのウラン廃棄物の埋設及びクリアランスに関する国際基準及び海外の規制  
については、NRA 技術ノート<sup>12</sup>に整理した。

## 1.2 ウラン廃棄物の定義

原子力委員会は、ウラン廃棄物を「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<sup>13</sup>。

本報告では、ウラン廃棄物は、「規制の考え方」に示されているように、我が国のウラン  
の製錬、転換、濃縮、再転換、成型加工等の工程によって生じる、専らウランによって汚  
染された物と定義する。ウラン廃棄物に含まれるウランは、原子力利用を目的とした製錬  
等の処理を経て子孫核種が除去されており、天然に存在するウラン及びその子孫核種を含  
む鉱物や残渣とは核種組成が異なる。このようなウラン廃棄物に含まれるウランの特徴に  
ついては次節に示す。

## 1.3 線量評価を行う上で考慮すべきウランの特徴

天然に存在するウランは、一般に、図 1.1 に示す子孫核種と永続平衡状態にあり、ウラ  
ンと個々の子孫核種は同じ強さの放射能を有する。一方、上述したように、ウラン廃棄物  
に含まれるウランは、原子力利用を目的とした製錬等の処理を経て子孫核種が除去されて  
おり、天然に存在するウラン及びその子孫核種を含む鉱物や残渣とは核種組成が異なる。  
このため、時間の経過とともに子孫核種が生成し、これらを含めた総放射能が増大して  
いく（5%濃縮ウランの場合には数万年後以降、約 20 万年後に最大。図 1.2 参照。以下「ビ  
ルドアップ」という。）。

図 1.2 における「ウラン同位体の合計」とは、ウランの同位体である  $^{234}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$  及び  $^{238}\text{U}$   
のそれぞれの放射能濃度（単位は Bq/g）を合計したものである。一般的に、放射能（単位  
は Bq）は半減期（崩壊定数）の関数であるため、半減期の異なる放射性物質の放射能を合  
計することに物理的な意味はない。しかし、ウランについては、物質中のウラン同位体の

放射能をその物質に含まれるウラン質量で除したものを「濃度」とし、その合計を「ウラン濃度」として用いられることがある<sup>14</sup>。そのため、本報告においてはウラン同位体の放射能濃度を「合計」という表現を用い、ウラン同位体のそれぞれの放射能濃度を合計した値を用いている。なお、ウランの同位体比は、ウラン燃料の濃縮度に応じて変動する。本報告で用いた同位体比については 3.1.3 に示す。

ビルドアップの影響を評価する場合は、子孫核種の挙動及び被ばく形態を考慮する必要がある。子孫核種のうちラドン ( $^{238}\text{U}$  の場合は  $^{222}\text{Rn}$ 、半減期 3.8 日) 以外のものは固体であり、地下水に溶解することによる移行や廃棄物埋設地の直上への居住等の経路を想定し、それらに伴う外部被ばく又は内部被ばくを評価する。他方、ラドンは希ガスであり、その挙動及び被ばくへの寄与は他の子孫核種とは異なる。ラドンはガス状態で地中から地表へ放出された場合にのみ人への被ばくに寄与することになり、地中にとどまる場合には、被ばくへの寄与は極めて小さい。そのため、ラドンによる被ばくを評価するには特別のモデルが必要となる。

表 1.1 天然ウランの組成

	$^{234}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$
半減期	$2.46 \times 10^5$ 年	$7.04 \times 10^8$ 年	$4.47 \times 10^9$ 年
天然存在比	0.0053 wt%	0.711 wt%	99.2837 wt%
比放射能	$1.24\text{E}+4$ Bq/gU	$5.7\text{E}+2$ Bq/gU	$1.24\text{E}+4$ Bq/gU
放射能割合	48.88 Bq%	2.25 Bq%	48.88 Bq%

出典) 日本原燃株式会社ら<sup>14</sup>

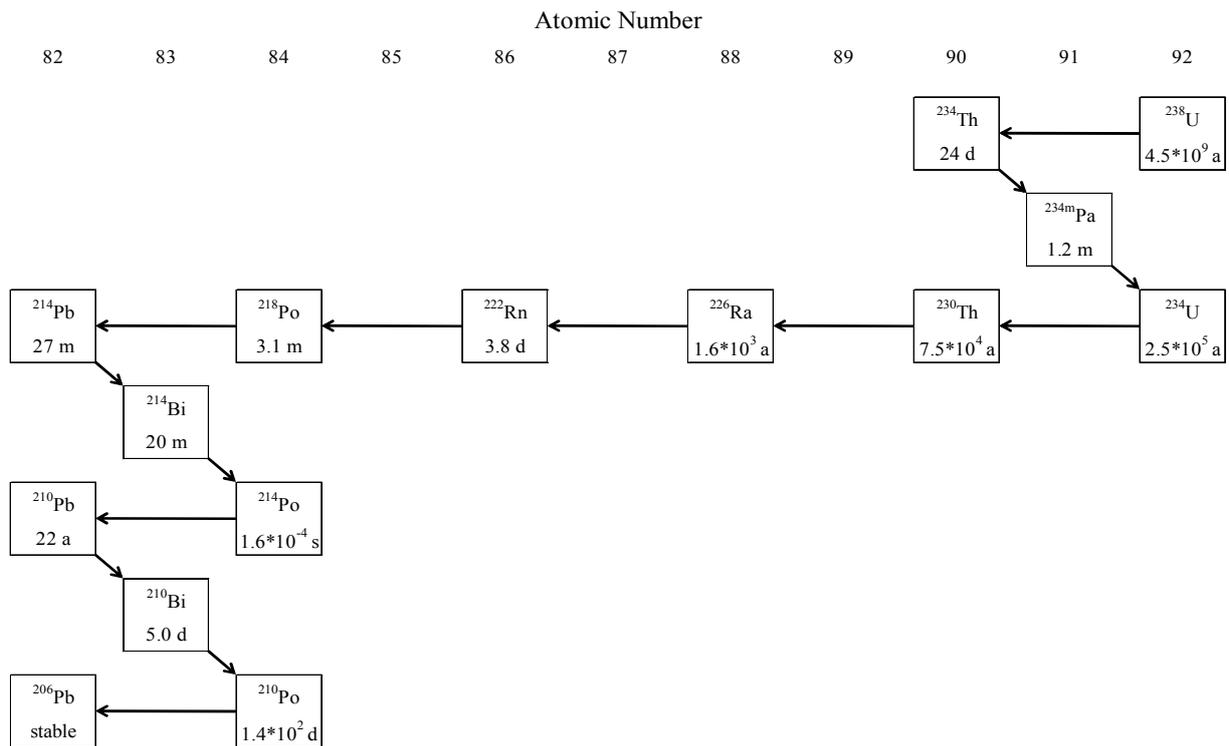
(Referred to the Japan Nuclear Fuel Limited et al.<sup>14</sup>)

表 1.2 5%濃縮ウランの組成

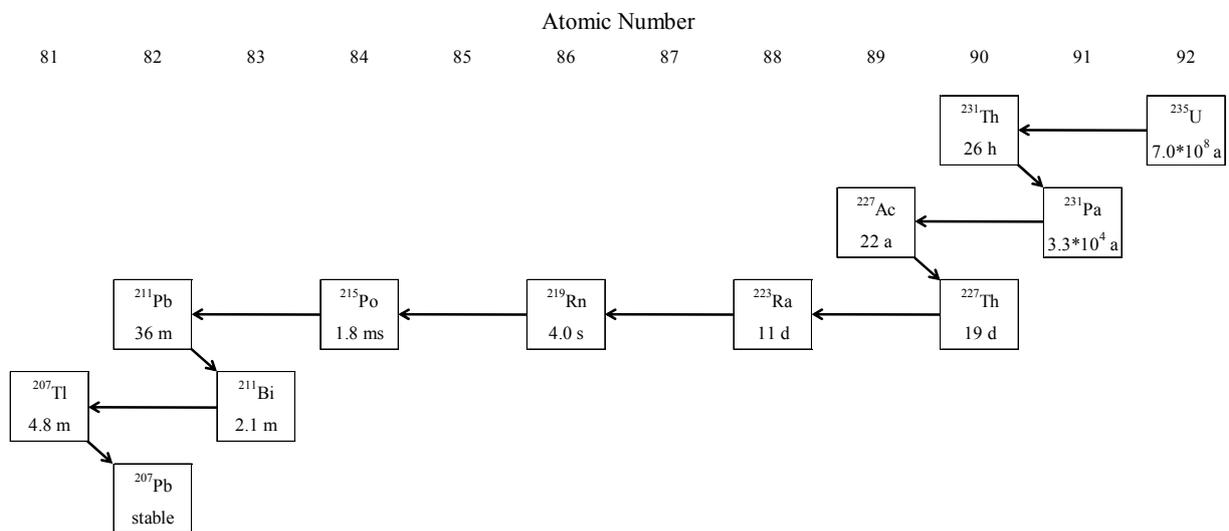
	$^{234}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	合計
比放射能	$3.632\text{E}-4$ g/gU	$5.000\text{E}-2$ g/gU	$9.496\text{E}-1$ g/gU	$1.000$ g/gU
	$8.416\text{E}+4$ Bq/gU	$4.007\text{E}+3$ Bq/gU	$1.184\text{E}+4$ Bq/gU	$1.000\text{E}+5$ Bq/gU

出典) 日本原燃株式会社ら<sup>14</sup>

(Referred to the Japan Nuclear Fuel Limited et al.<sup>14</sup>)



(a)  $^{238}\text{U}$  の壊変系列



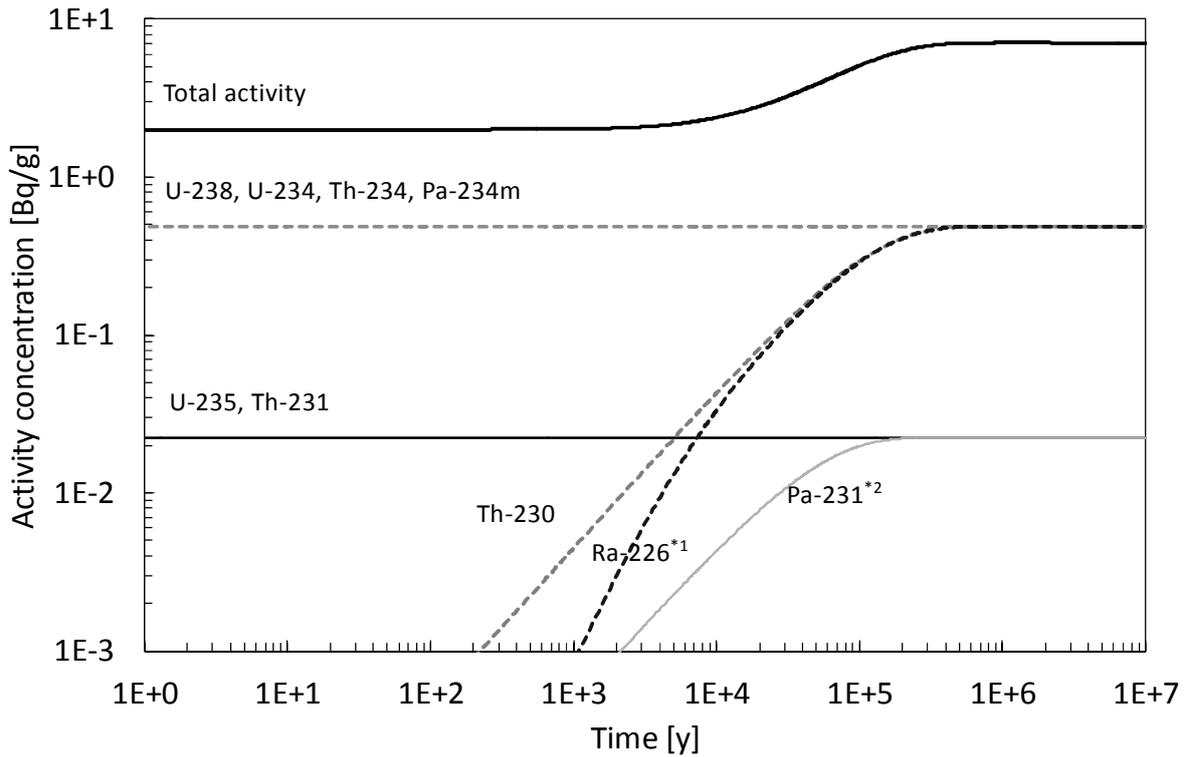
(b)  $^{235}\text{U}$  の壊変系列

図 1.1 ウランの壊変系列

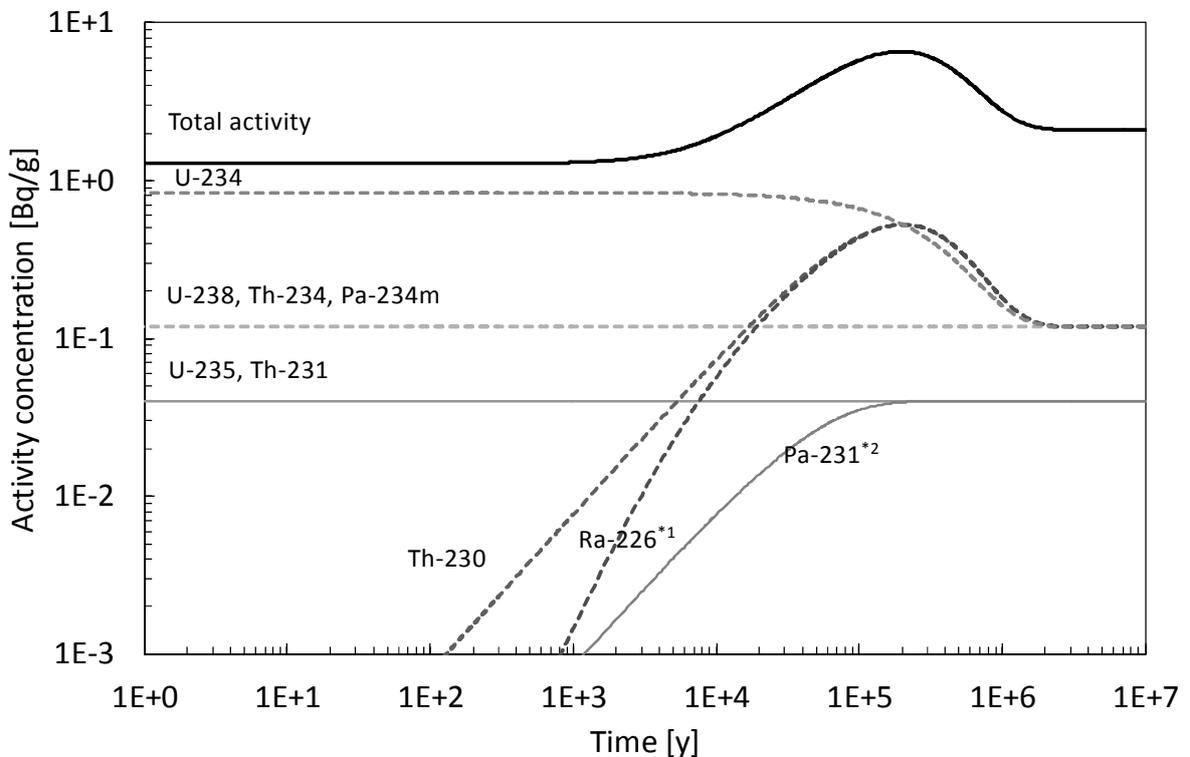
(主な核種のみ表示。ICRP Publ.107<sup>15</sup>を基に作成)

Fig. 1.1 Decay chains of uranium

(Only major radionuclides are shown, illustrated based on ICRP Publ. 107)



(a) 天然ウラン ( $^{235}\text{U}$ : 0.711%、ウラン同位体合計の初期放射能濃度 1 Bq/g)



(b) 濃縮ウラン ( $^{235}\text{U}$ : 5%、ウラン同位体合計の初期放射能濃度 1 Bq/g)

図 1.2 ウラン及びその子孫核種の放射能濃度の時間変化

Fig. 1.2 Time sequences of activity concentrations of uranium and its progeny

\*1: about the same as  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Po}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Bi}$ ,  $^{210}\text{Po}$

\*2: about the same as  $^{227}\text{Ac}$ ,  $^{227}\text{Th}$ ,  $^{223}\text{Ra}$ ,  $^{219}\text{Rn}$ ,  $^{215}\text{Po}$ ,  $^{211}\text{Pb}$ ,  $^{211}\text{Bi}$ ,  $^{207}\text{Tl}$

## 2. ウラン廃棄物のクリアランスに関する線量評価の試算

### 2.1 我が国におけるクリアランスレベルの導出の経緯

我が国におけるクリアランスレベルについては、これまで原子力安全委員会が導出し、以下に示す報告書を取りまとめ、国内法令に取り入れられてきた。

- 主な原子力施設におけるクリアランスレベルについて（平成 11 年 3 月 17 日）<sup>16</sup>
- 重水炉、高速炉等におけるクリアランスレベルについて（平成 13 年 7 月 16 日）<sup>17</sup>
- 核燃料使用施設（照射済燃料及び材料を取り扱う施設）におけるクリアランスレベルについて（平成 15 年 4 月 24 日）<sup>18</sup>
- 原子炉施設及び核燃料施設の解体等に伴って発生するもののうち放射性物質として取り扱う必要のないものの放射能濃度について（平成 16 年 12 月 16 日（平成 17 年 3 月 17 日一部訂正及び修正））<sup>19</sup>（以下「クリアランス報告書」という。）
- ウラン取扱施設におけるクリアランスレベルについて（平成 21 年 10 月 5 日）<sup>20</sup>

国内法令への免除レベルの取り入れに当たっては、平成 14 年に放射線審議会基本部会が検討結果を取りまとめ<sup>21</sup>、我が国における線量規準として 10  $\mu\text{Sv/y}$  が妥当であること、国際基本安全基準免除レベルを取り入れた場合でも、免除した放射性同位元素からの被ばくに対する国民の安全性を担保する観点で問題は無いことを示している。また、免除レベルとクリアランスレベルとの整合性について、クリアランスレベルは免除レベルより高くないように決めるとする当時の国際基本安全基準<sup>22</sup>を引用している。

原子力安全委員会におけるクリアランスレベルに関する報告書で共通している点は、我が国において考慮すべき被ばくに係るシナリオ及び被ばく経路を想定し、線量基準 10  $\mu\text{Sv/y}$  に対応する放射性核種ごとの放射能濃度を算出していることである。

クリアランス報告書では、それ以前に報告された原子力施設におけるクリアランスに関する 3 つの報告書<sup>16,17,18</sup>について、当時の最新知見を踏まえ、クリアランスレベルの再評価を行った上で、国際基準である IAEA RS-G-1.7<sup>23</sup>で示されたクリアランスレベルとの比較評価を行っている。ただし、<sup>234</sup>U、<sup>235</sup>U 及び <sup>238</sup>U については評価の対象としていない。

表 2.1 に、原子力安全委員会におけるクリアランス評価のシナリオと評価核種を示す。クリアランスレベルを算定するための評価シナリオは、大別して、再利用と埋立処分（産業廃棄物処分）に分けられる。ウランクリアランス報告書では、金属の再利用に限定して <sup>232</sup>U、<sup>234</sup>U、<sup>235</sup>U、<sup>236</sup>U 及び <sup>238</sup>U のクリアランスレベルを算定しており、<sup>232</sup>U に対して 0.1 Bq/g、<sup>234</sup>U、<sup>235</sup>U 及び <sup>238</sup>U に対して 1 Bq/g、並びに <sup>236</sup>U に対して 10 Bq/g という基準値をそれぞれ導出している。その際、金属の耐用年数が 100 年未満であることから、評価期間を 100 年と設定している。また、同報告書では、金属の再利用に伴って発生するスラグの埋立処分（産業廃棄物処分）について評価を行っている。評価のパラメータ等はクリアランス報告書と同一としているが、<sup>234</sup>U、<sup>235</sup>U 及び <sup>238</sup>U に対して不足しているパラメータについては同報告書の付属資料において新たに設定したとしている。その際、<sup>234</sup>U、<sup>235</sup>U 及び <sup>238</sup>U に対してスラグの埋立作業のシナリオは評価しているが、埋立処分後のシナリオについて

は評価していない。また、その結果については、自然環境中の放射能濃度との比較にとどめている。

表 2.1 原子力安全委員会の報告書における評価シナリオと評価核種

Table 2.1 Evaluation scenarios and radionuclides by the Nuclear Safety Commission of Japan

評価シナリオ		クリアランス報告書 <sup>19</sup>	ウランクリアランス報告書 <sup>20</sup>
再利用シナリオ		58 核種 (U を含まず)	<sup>232</sup> U, <sup>236</sup> U, <sup>234</sup> U, <sup>235</sup> U, <sup>238</sup> U (金属の再利用に限定)
埋立処分シナリオ	埋立作業	58 核種 (U を含まず)	<sup>232</sup> U, <sup>236</sup> U, <sup>234</sup> U, <sup>235</sup> U, <sup>238</sup> U (金属の再利用に伴って発生するスラグの埋設処分)
	埋立処分後	58 核種 (U を含まず)	<sup>232</sup> U, <sup>236</sup> U (金属の再利用に伴って発生するスラグの埋設処分)

## 2.2 ウラン廃棄物のクリアランスレベルの導出

### 2.2.1 評価シナリオ

本報告では、評価の基本的な考え方については、クリアランス報告書及びウランクリアランス報告書を踏襲する。その上で、<sup>234</sup>U、<sup>235</sup>U 及び <sup>238</sup>U に対して、材料の種類を限定せず、クリアランス後の利用方法も限定しないクリアランスレベルを導出するために、原子力安全委員会では評価されなかった、<sup>234</sup>U、<sup>235</sup>U 及び <sup>238</sup>U に対するクリアランス後の埋立処分（産業廃棄物処分）に係るシナリオについても評価する。

埋立処分に係るシナリオについては、ウランクリアランス報告書において、金属の再利用時に発生するスラグについて、表 2.2 に示すシナリオ及び被ばく経路について検討されている。

#### (1) 埋立処分シナリオのうち埋立作業に係るシナリオ

<sup>234</sup>U、<sup>235</sup>U 及び <sup>238</sup>U の埋立作業に係るシナリオ（表 2.2 の No.1 から No.10）についてはウランクリアランス報告書で既に評価されており、再利用のシナリオに比べて十分低い線量となることが示されている（同報告書付属資料 8）。

金属の再利用に伴い発生するスラグについては、その発生量は少ないものの、金属の溶解の過程においてウランがスラグ側に多く移行することから、スラグ中のウランの放射能濃度はクリアランス対象物の約 10 倍となることが同報告書で示されている。そのため、スラグの埋立作業時には約 10 倍の放射能濃度の対象物を扱うことを想定していることから、金属以外のクリアランス対象物の産業廃棄物処分場への埋立作業においては、スラグの埋立作業より低い線量となるものとする。

よって、本報告においては、クリアランス対象物の産業廃棄物処分場への埋立作業に係

るシナリオは評価しない。

(2) 埋立処分シナリオのうち埋立処分後に係るシナリオ

ウランクリアランス報告書では、埋立処分（産業廃棄物処分）に係るシナリオのうち、埋立処分後に係るシナリオ（表 2.2 の No.11 から No.41）については、表 2.2 に示すように、人工起源核種である  $^{232}\text{U}$  及び  $^{236}\text{U}$  について評価しているが、 $^{234}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$  及び  $^{238}\text{U}$  については評価していない。

よって、本報告では、材料の種類を限定せず、クリアランス後の利用方法も限定しないクリアランスレベルを設定するため、 $^{234}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$  及び  $^{238}\text{U}$  に対して、ウランクリアランス報告書で評価されていない埋立処分後に係るシナリオについて評価を行う。埋立処分後に係るシナリオは、表 2.2 に示すように、「跡地利用」と「地下水移行」の2つのシナリオに分けて評価する。

なお、跡地利用のシナリオのうち、跡地での居住については、居住に伴うラドンによる被ばくが想定されるため、クリアランス報告書及びウランクリアランス報告書では評価されていないが、本報告では、ラドンについても評価を行う。トレンチ処分におけるラドンの吸入による被ばく線量について評価が行われており<sup>24</sup>、その手法を参考にして埋立処分後に係るシナリオにおけるラドンによる被ばくを評価する。

表 2.2 スラッグの埋立処分のシナリオの評価対象経路

Table 2.2 Exposure pathways for evaluation of clearance level related to slag disposal

No.	シナリオ	被ばく線源	被ばく形態	被ばく者	評価対象核種											
					U-234	U-235	U-238	U-232	U236							
1	埋立作業	積込み作業	外部 直接線 皮膚	作業員	○	○	○	○	○							
2					○	○	○	○	○							
3					内部 粉塵吸入 直接経口	○	○	○	○	○						
4						○	○	○	○	○						
5					運搬作業	外部 直接線	作業員	○	○	○	○	○				
6								○	○	○	○	○				
7					埋立作業	外部 直接線 皮膚	作業員	○	○	○	○	○				
8								○	○	○	○	○				
9								内部 粉塵吸入 直接経口	○	○	○	○	○			
10									○	○	○	○	○			
11	跡地利用	建設作業	外部 土壌直接線 皮膚	作業員				○	○							
12									○	○						
13					内部 粉塵吸入 直接経口					○	○					
14										○	○					
15					跡地での居住	廃棄物混合土壌	外部 土壌直接線 土壌直接線	居住者	成人				○	○		
16									子供					○	○	
17									内部 粉塵吸入 直接経口	成人					○	○
18										子供						○
19					跡地での農作業	外部 土壌直接線	農作業員					○	○			
20								内部 粉塵吸入						○	○	
21	外部 土壌直接線	牧畜作業員								○	○					
22	埋立処分後	跡地での牧畜作業	内部 粉塵吸入	消費者	成人					○	○					
23					子供							○	○			
24					廃棄物混合土壌	農作物	内部 摂取	成人					○	○		
25								子供							○	○
26					畜産物	内部 摂取	成人						○	○		
27							子供							○	○	
28					井戸水	飲料水	内部 摂取	成人						○	○	
29								子供							○	○
30								地下水移行	灌漑水	外部 土壌直接線 内部 粉塵吸入	農作業員					
31	灌漑した農地	外部 土壌直接線	牧畜作業員										○	○		
32		内部 粉塵吸入												○	○	
33	灌漑した牧場	外部 土壌直接線	牧畜作業員											○	○	
34		内部 粉塵吸入													○	○
35	農作物	内部 摂取	消費者	成人										○	○	
36				子供												○
37	畜産物	内部 摂取	消費者	成人										○	○	
38				子供								○	○			
39	飼育水	畜産物	内部 摂取	消費者	成人						○	○				
40					子供								○	○		
41	養殖水	淡水産物	内部 摂取	消費者	成人						○	○				
					子供						○	○				

出典) 原子力安全委員会<sup>20</sup>

(Referred to the Nuclear Safety Committee of Japan<sup>20</sup>)

### 2.2.2 線量評価の試算に用いるモデル及びパラメータ

#### (1) 線量評価の試算に用いるモデル

本報告における線量評価の試算に用いるモデルは、クリアランス報告書及びウランクリアランス報告書並びにクリアランス報告書で引用している我が国最初のクリアランスレベルを算定した原子力安全委員会専門部会報告書で用いられている数式モデルとする。クリアランスレベルの算定に係る線量評価の試算に用いるモデルの詳細については、[付録1](#)に

示す。

また、本報告における線量評価の試算に用いるモデルについては、ウランクリアランス報告書で示されている  $^{232}\text{U}$  及び  $^{236}\text{U}$  に対する評価結果をトレースすることで、その妥当性を検証している。線量評価の試算に用いるモデルの妥当性検証の詳細については、[付録 2](#) に示す。

### (2) 線量評価の試算に用いるパラメータ

本報告における線量評価の試算に用いるパラメータは、クリアランス報告書及びウランクリアランス報告書で用いられているパラメータを用いる。これら報告書で用いられていないパラメータについては、ウランクリアランス報告書において  $^{232}\text{U}$  及び  $^{236}\text{U}$  のクリアランスレベル評価のために引用されている文献（例えば、IAEA TSR 364 <sup>25</sup>）に遡り、 $^{234}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$  及び  $^{238}\text{U}$  の評価のために引用する。クリアランスレベルの算定に係る線量評価の試算に用いるパラメータの詳細については、[付録 1](#) に示す。

### (3) 産業廃棄物処分施設に係るパラメータの比較

クリアランス報告書ではクリアランス対象物を産業廃棄物処分することを想定した評価を行い、一方、ウランクリアランス報告書ではスラグを埋立処分（産業廃棄物処分）することを想定したシナリオを評価している。これらの評価における処分施設の放射能濃度の算定に係るパラメータの設定を表 2.3 に比較した。本報告では、ウラン以外の放射性核種との整合性の観点から、クリアランス報告書に準じた産業廃棄物処分施設に係るパラメータを採用した。

さらに、クリアランス報告書及びウランクリアランス報告書における地下水移行に関するパラメータについて表 2.4 に比較して示す。地下水移行に関するパラメータはこれら報告書間において差はない。

表 2.3 産業廃棄物処分の施設に関するパラメータ

Table 2.3 Parameters for industrial waste disposal facility

パラメータ	クリアランス報告書 <sup>19</sup> (本報告書で採用)	ウランクリアランス報告書 <sup>20</sup> スラグの埋立処分
産業廃棄物の総量 [t]	500,000	
クリアランス対象物の量 [t]	50,000	2,000
混合率(クリアランス対象物と非対象物の混合の割合) A [-]	0.1	1 (クリアランス対象物と非対象物の混合の割合 0.1 に対してスラグへの濃縮率 10 を乗じた値)
産業廃棄物処分場の大きさ		
幅 [m]	200	100
長さ [m]	200	100
深さ [m]	10	5
処分場のかさ密度 [t/m <sup>3</sup> ]	2	2
処分場重量に対する産業廃棄物総量の比 B [-]	$\frac{500,000 \text{ t}}{200 \text{ m} * 200 \text{ m} * 10 \text{ m} * 2 \text{ t/m}^3}$ = 0.625	$\frac{2,000 \text{ t}}{100 \text{ m} * 100 \text{ m} * 5 \text{ m} * 2 \text{ t/m}^3}$ = 0.02
覆土厚さ [m]	0.5	0.5
客土*の厚さ [m]	0	0
掘採深さ [m]	3	3
跡地居住に係る覆土と廃棄物埋設地の混合による希釈割合 C [-]	$\frac{3 \text{ m} - 0.5 \text{ m}}{3 \text{ m}} = 0.83$	$\frac{3 \text{ m} - 0.5 \text{ m}}{3 \text{ m}} = 0.83$
クリアランス物の放射能濃度に対する跡地利用に係る土壌の放射能濃度との比(希釈率) A×B×C [-]	0.1 * 0.625 * 0.83 = 0.052	1 * 0.02 * 0.83 = 0.017

\* 廃棄物埋設地外から持ち込まれる汚染されていない土壌

表 2.4 地下水移行に関するパラメータ

Table 2.4 Parameters for groundwater pathway

パラメータ	クリアランス報告書 <sup>19</sup>	ウランクリアランス報告書 <sup>20</sup> スラグの埋立処分(参考)
浸透水量 [m/y]	0.4	0.4
帯水層厚さ [m]	3	3
地下水流速(ダルシー流速) [m/d]	1	1
帯水層空隙率 [-]	0.3	0.3
帯水層土壌密度(真密度) [kg/m <sup>3</sup> ]	2,600	2,600
地下水流向方向の分散長 [m]	0	0
x 方向の分散係数 [m <sup>2</sup> /y]	0	0
処分場下流端から井戸までの距離 [m]	0	0
井戸水の混合割合 [-]	0.33	0.33

#### (4) 評価ケース及び線量基準

IAEA GSR Part 3<sup>11</sup>では、被ばくリスクが十分に小さいこと、又は線量やリスクを低減するに値する合理的な対策がないことから規制を継続するメリットが小さいことが、クリアランスすることができる一般的な基準であるとしている。主に人工起源核種に対しては、ある物質に含まれる放射性物質に起因する人の被ばく線量が以下の(a)と(b)のいずれも満たしていることとし、これらを満たす場合にその物質はクリアランスレベル以下であるとする考え方を示している。

(a) 合理的に予見可能な被ばくシナリオ(以下「合理的に予見可能なシナリオ」という。)を考えた場合には、年間10マイクロシーベルトのオーダー又はそれ以下であること。

(b) 発生確率の低い被ばくシナリオ(以下「低確率シナリオ」という。)を考えた場合には、年間1ミリシーベルトを超えないこと。

IAEA Safety Report Series No.44<sup>26</sup>では、上記(a)及び(b)を満足する放射能濃度(単位:Bq/g)をシナリオごとに算出している。この際、それぞれのシナリオに基づいて算出された放射能濃度が異なる場合は、小さい方(すなわち基準として厳しい方)の値を採用している。IAEA GSR Part 3はこれらの値をクリアランスレベルとして規定している(IAEA GSR Part 3のTable I.2)。

本報告においてウランのクリアランスレベルを導出するに当たり、線量基準については、IAEA GSR Part 3に従い、合理的に予見可能なシナリオに対し10μSv/y、低確率シナリオに対し1mSv/yを適用した。

本報告では、ウラン及びその子孫核種が地下水によって流出することを考慮したケースを合理的に予見可能なシナリオとし、流出せず産業廃棄物処分場にウラン及びその子孫核種がとどまり続けると保守的に想定したケースを低確率シナリオとした。

また、これら2ケースにおいて、跡地での居住におけるラドンによる被ばくについて参考として評価を行った。ここでラドンによる被ばくとは、ウランの子孫核種のうち唯一の気体であるラドンが大気中に放出され、そのラドンを体内に吸入することにより、その壊変によって内部被ばくすることを想定する。ラドンによる被ばくの線量評価に用いるモデル及びパラメータの詳細については、[付録3](#)に示す。

### 2.2.3 評価結果

ウラン廃棄物のクリアランスレベルの導出に係る全ての被ばく経路の線量評価結果を表 2.5 及び表 2.6 に示す。なお、線量評価結果は、クリアランス対象物の放射能濃度を単位濃度 (1 Bq/g) と仮定したときの値である。表 2.5 はウラン及びその子孫核種が地下水によって流出することを考慮したケースの評価結果について、表 2.6 はウラン及びその子孫核種が流出せず産業廃棄物処分場にとどまり続けると保守的に想定したケースの評価結果についてそれぞれ示した。流出を考慮しないケースでは、放射性物質が地下水に移行しないため、地下水移行シナリオは評価していない。

表 2.5 線量評価結果（クリアランス対象物は単位濃度（1 Bq/g）、流出を考慮）

Table 2.5 Evaluation results (a unit concentration (1 Bq/g), case with release)

No.	シナリオ		被ばく線源		被ばく形態		被ばく者		評価結果 [μSv/y]			
									<sup>234</sup> U	<sup>235</sup> U	<sup>238</sup> U	
11	跡地利用	建設作業	廃棄物混合土壌	外部	土壌直接線	作業者		1.2	1.0	0.20		
12				皮膚				1.7	3.2	4.0		
13				内部	粉じん吸入			0.61	17	0.36		
14				内部	直接経口			0.24	0.37	0.042		
15		跡地での居住		廃棄物混合土壌	外部	土壌直接線	居住者	成人	8.4	7.1	1.4	
16					外部	土壌直接線		子供	11	9.2	1.8	
17					内部	粉じん吸入		成人	0.061	2.7	0.030	
18					内部	粉じん吸入		子供	0.040	1.6	0.022	
19					内部	直接経口		子供	9.4	7.5	1.5	
20					外部	土壌直接線		農業者	1.4	1.2	0.24	
21		内部	粉じん吸入	0.37	9.9	0.21						
22		跡地での牧畜作業	廃棄物混合土壌	外部	土壌直接線	牧畜業者	1.4	1.2	0.24			
23				内部	粉じん吸入		0.37	9.9	0.21			
24		跡地で収穫された食物の摂取	廃棄物混合土壌	農作物	内部	摂取	消費者	成人	4.3	7.0	0.70	
25					内部	摂取		子供	13	10	2.0	
26				畜産物	内部	摂取		成人	0.16	0.10	0.030	
27					内部	摂取		子供	0.47	0.31	0.078	
28		地下水移行	地下水利用	井戸水	飲料水	内部	摂取	消費者	成人	0.81	0.43	0.13
29					内部	摂取	子供		0.85	0.21	0.13	
30				灌漑水	灌漑した農地	外部	土壌直接線	農業者	0.45	0.10	0.070	
31						内部	粉じん吸入		0.33	1.4	0.051	
32					灌漑した牧場	外部	土壌直接線	牧畜業者	0.45	0.10	0.070	
33						内部	粉じん吸入		0.33	1.4	0.051	
34	農作物				内部	摂取	消費者	成人	7.2	5.5	1.1	
35					内部	摂取		子供	21	7.5	3.2	
36	畜産物			内部	摂取	成人		0.29	0.071	0.046		
37				内部	摂取	子供		0.87	0.23	0.14		
38	飼育水			畜産物	内部	摂取		成人	0.0067	0.0014	0.0011	
39					内部	摂取		子供	0.021	0.0034	0.0022	
40	養殖水			淡水産物	内部	摂取	成人	0.024	0.0016	0.0037		
41					内部	摂取	子供	0.067	0.0035	0.010		
最大値*								21 μSv/y	17 μSv/y	3.2μSv/y		
決定経路*								No. 35	No. 13	No. 35		

※No.12 の皮膚被ばく経路は、線量基準が 50 mSv/y のため、No.12 を除く最大値及びその経路

表 2.6 線量評価結果（クリアランス対象物は単位濃度（1 Bq/g）、流出を考慮せず）

Table 2.6 Evaluation results (a unit concentration (1 Bq/g), case without release)

No.	シナリオ		被ばく線源		被ばく形態		被ばく者		評価結果 [μSv/y]		
									<sup>234</sup> U	<sup>235</sup> U	<sup>238</sup> U
11	跡地利用	建設作業	廃棄物混合土壌	外部	土壌直接線	作業者		3.9	2.3	6.6	
12				皮膚	5.4			6.9	13		
13				内部	粉じん吸入			1.5	46	2.9	
14				内部	直接経口			0.75	1.0	1.3	
15		跡地での居住		外部	土壌直接線	居住者	成人	27	16	46	
16				外部	土壌直接線		子供	35	21	60	
17				内部	粉じん吸入		成人	0.16	7.4	0.30	
18				内部	粉じん吸入		子供	0.10	4.6	0.20	
19				内部	直接経口		子供	30	21	51	
20		跡地での農作業		外部	土壌直接線	農業者	4.6	2.8	7.9		
21				内部	粉じん吸入		0.90	28	1.7		
22		跡地での牧畜作業		外部	土壌直接線	牧畜業者	4.6	2.8	7.9		
23			内部	粉じん吸入	0.90		28	1.7			
24		跡地で収穫された食物の摂取	廃棄物混合土壌	農作物	内部	摂取	消費者	成人	14	19	23
25					内部	摂取		子供	40	28	69
26				畜産物	内部	摂取		成人	0.51	0.27	0.89
27					内部	摂取		子供	1.5	0.86	2.6
28		地下水移行	地下水利用	井戸水	飲料水	内部	摂取	消費者	成人		
29					内部	摂取	子供				
30				灌漑水	灌漑した農地	外部	土壌直接線	農業者			
31						内部	粉じん吸入				
32					灌漑した牧場	外部	土壌直接線	牧畜業者			
33						内部	粉じん吸入				
34	農作物				内部	摂取	消費者	成人			
35					内部	摂取		子供			
36	畜産物			内部	摂取	成人					
37				内部	摂取	子供					
38	飼育水			畜産物	内部	摂取		成人			
39					内部	摂取		子供			
40	養殖水			淡水産物	内部	摂取	成人				
41					内部	摂取	子供				
最大値*								40 μSv/y	46 μSv/y	69 μSv/y	
決定経路*								No. 25	No. 13	No. 25	

※No.12 の皮膚被ばく経路は、線量基準が 50 mSv/y のため、No.12 を除く最大値及びその経路

表 2.7 に、跡地利用の居住者（表 2.2 の No.15～No.19）に対するラドンによる被ばくの評価結果を示す。ラドンによる被ばくは、ラドンの親核種であるラジウムの放射能濃度に依存するため、表 2.7 に示したラドンによる線量の値は、跡地におけるラジウムの放射能濃度が最大となるときの値である。

表 2.7 ラドンによる被ばくの線量評価結果（クリアランス対象物の濃度は単位濃度（1 Bq/g））

Table 2.7 Evaluation results of radon exposure for clearance (a unit concentration (1 Bq/g))

ケース	$^{234}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$
流出を考慮	100 $\mu\text{Sv/y}$	85 $\mu\text{Sv/y}$	15 $\mu\text{Sv/y}$
流出を考慮せず	330 $\mu\text{Sv/y}$	240 $\mu\text{Sv/y}$	560 $\mu\text{Sv/y}$

表 2.5 から表 2.7 までに示した評価結果について、表 2.8 にまとめて示す。

表 2.8 の結果から、線量基準を合理的に予見可能なシナリオに対し 10  $\mu\text{Sv/y}$ 、低確率シナリオに対し 1 mSv/y としたときの当該線量基準を満足するウランの放射能濃度を算出し、表 2.9 に示す。また、クリアランスにおけるラドンによる被ばくに対する線量基準については、IAEA GSR Part 3 では示されていないが、本報告では、ラドンによる被ばくに対する線量基準を低確率シナリオの線量基準である 1 mSv/y と仮定し、参考のため比較を行った。

さらに、表 2.9 を基に、対数丸め<sup>注2</sup>を行った後のウランの放射能濃度を表 2.10 に示す。これによれば、 $^{234}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$  及び  $^{238}\text{U}$  のそれぞれについて最も厳しい数値をとると、いずれも 1 Bq/g となる。なお、金属くずに対して設定されているウランのクリアランスレベルは、 $^{234}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$  及び  $^{238}\text{U}$  のそれぞれについて、これと同じく 1 Bq/g である。

注2  $10^{x+0.5}$  から  $10^{x+1.5}$  までの値を  $10^{x+1}$  と端数を処理する方法

表 2.8 クリアランス対象物の放射能濃度を単位濃度（1 Bq/g）としたときの線量評価結果のまとめ

Table 2.8 Evaluation results of clearance when the radioactivity concentration is 1 Bq/g including cleared material

シナリオの特徴		$^{234}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$
流出を考慮		21 $\mu\text{Sv/y}$	17 $\mu\text{Sv/y}$	3.2 $\mu\text{Sv/y}$
流出を考慮せず		40 $\mu\text{Sv/y}$	46 $\mu\text{Sv/y}$	69 $\mu\text{Sv/y}$
【参考】 ラドンによる被ばく（跡地居住）	流出を考慮	100 $\mu\text{Sv/y}$	85 $\mu\text{Sv/y}$	15 $\mu\text{Sv/y}$
	流出を考慮せず	330 $\mu\text{Sv/y}$	240 $\mu\text{Sv/y}$	560 $\mu\text{Sv/y}$

表 2.9 線量基準を満足する放射能濃度

Table 2.9 Radioactivity concentrations meeting the dose criteria

シナリオの特徴		適用する 線量基準	$^{234}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$
流出を考慮		10 $\mu\text{Sv/y}$	0.48 Bq/g	0.59 Bq/g	3.1 Bq/g
流出を考慮せず		1 mSv/y	25 Bq/g	22 Bq/g	14 Bq/g
【参考】 ラドンによる被ばく（跡地居住）	流出を考慮	1 mSv/y	10 Bq/g	12 Bq/g	66 Bq/g
	流出を考慮せず		3.0 Bq/g	4.2 Bq/g	1.8 Bq/g

表 2.10 線量基準を満足する放射能濃度（対数丸め後）

Table 2.10 Radioactivity concentrations meeting the dose criteria (with logarithmic round)

シナリオの特徴		適用する 線量基準	$^{234}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$
流出を考慮		10 $\mu\text{Sv}/\text{y}$	1 Bq/g	1 Bq/g	1 Bq/g
流出を考慮せず		1 mSv/y	10 Bq/g	10 Bq/g	10 Bq/g
【参考】 ラドンによる被 ばく（跡地居住）	流出を考慮	1 mSv/y	10 Bq/g	10 Bq/g	100 Bq/g
	流出を考慮せず		10 Bq/g	10 Bq/g	1 Bq/g

### 3. ウラン廃棄物の埋設に関する線量評価の試算

比較的放射能濃度の低いウラン廃棄物については、トレンチ処分又はピット処分（以下この両処分方法を合わせて「浅地中処分」という。）で埋設することが計画されている<sup>27</sup>。また、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下「JAEA」という。）は、ウラン廃棄物を埋設しようとするトレンチ処分について、埋設施設に遮水機能を設置した付加機能型の埋設施設を提案している<sup>28</sup>。

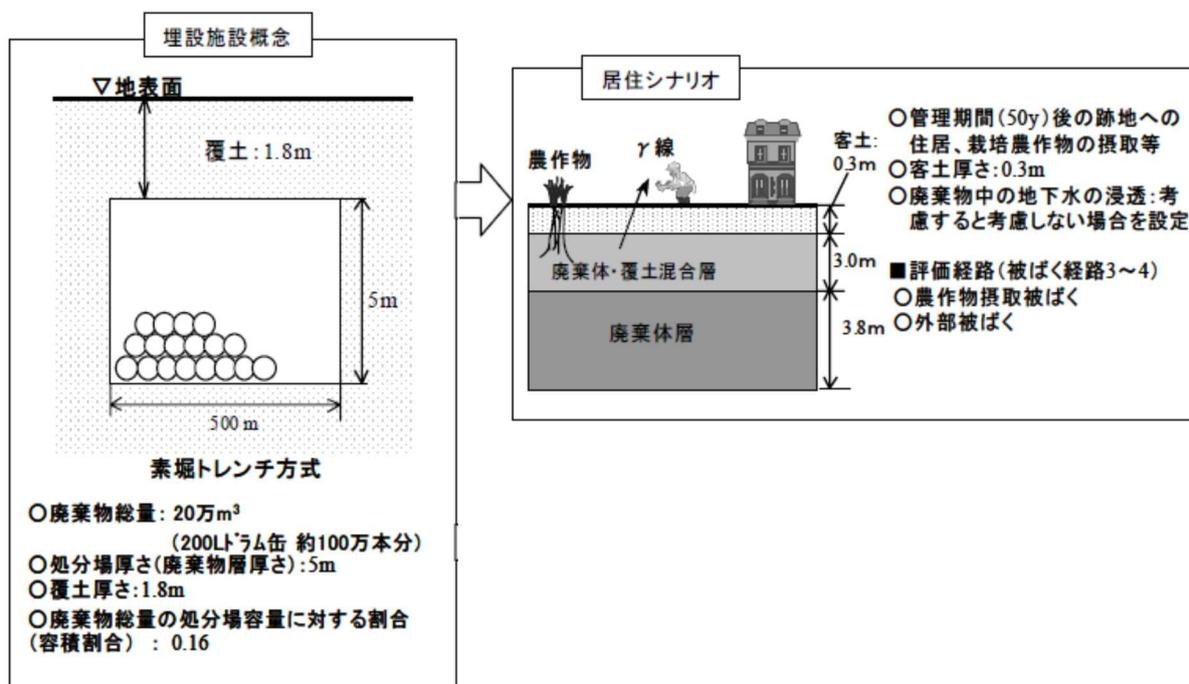
本報告では、ウラン廃棄物を浅地中処分した場合の線量評価の試算を行った。線量評価に当たっては、評価シナリオ、線量評価の試算に用いるモデル及びパラメータについて、原子力安全委員会による低レベル放射性廃棄物の濃度上限値の算出<sup>29</sup>（以下「濃度上限値報告書」という。）を参照し、踏襲することとした。

#### 3.1 評価シナリオ

##### 3.1.1 状態設定

廃棄物埋設地の大きさや処分場容量に対する廃棄物総量の割合は濃度上限値報告書に準拠し設定した。

濃度上限値報告書では、図 3.1 に示すように、埋設施設の上部に 1.8 m の厚さの覆土があり、さらに、居住シナリオでは埋設施設と覆土とが掘削、混合された場所（図 3.1 では「廃棄体・覆土混合層」と呼称している。）の上に 0.3 m の厚さの客土を想定している。



出典) 原子力安全委員会<sup>29</sup>より抜粋、改編

Referred to the Nuclear Safety Commission of Japan<sup>29</sup> with modification by authors

図 3.1 廃棄物埋設施設（トレンチ処分）の概念

Fig. 3.1 Illustration of waste disposal facility (trench disposal)

ここで、表 3.1 に廃棄物埋設地の大きさ等の設定を比較する。クリアランス報告書における産廃処分シナリオでは、覆土の厚さは 0.5 m とし、客土は想定されていない。また、令和 3 年 7 月時点において検討中である中深度処分の放射能濃度制限シナリオにおける設定では、覆土及び客土を想定せずに評価することが示されている<sup>30</sup>。これら覆土及び客土は、被ばく線量を評価する上で放射能濃度の希釈又は放射線の遮蔽等の効果があることから、その設定によっては評価結果に影響を及ぼすものである。本報告では、ウラン廃棄物の埋設による被ばく線量の評価は長期的な評価が必要であり、評価の不確かさが大きいことから、より保守的な設定として覆土及び客土をしない状態を想定し、評価を行った。

表 3.1 廃棄物埋設地の大きさ等の比較

Table 11 Comparison of properties such as scales of waste disposal facilities

項目	クリアランス 産廃処分シナリオ <sup>19</sup>	トレンチ処分 居住シナリオ <sup>29</sup>	中深度処分 放射能濃度制限シナリオ <sup>30</sup>
廃棄物埋設地の大きさ	200 m×200 m×10 m	500 m×500 m×5 m	処分空洞の断面積×長さ
廃棄物の放射能濃度に対する廃棄物埋設地全体の希釈割合	0.0625 (内訳) 全廃棄物中に占められるクリアランス対象廃棄物の割合：0.1 処分場容積に対する全廃棄物の総量： 50 万 t/80 万 t=0.625	0.16 (内訳) 処分場容積に対する全廃棄物の総量： 20 万 m <sup>3</sup> /125 万 m <sup>3</sup> =0.16	(廃棄物と人工バリア等の構造物との混合を考慮)
覆土の厚さ	0.5 m	1.8 m	0 m
客土の厚さ	0 m	0.3 m	0 m
跡地居住に係る掘削深さ	3 m	3 m	3 m
跡地居住に係る覆土と廃棄物埋設地の混合による希釈割合	$\frac{3\text{ m} - 0.5\text{ m}}{3\text{ m}} = 0.83$	$\frac{3\text{ m} - 1.8\text{ m}}{3\text{ m}} = 0.4$	1
被ばく評価シナリオ ・被ばく経路	跡地での居住シナリオ <sup>注)</sup> ・土壌直接線による外部被ばく (成人) ・土壌直接線による外部被ばく (子供) ・粉じん吸入による内部被ばく (成人) ・粉じん吸入による内部被ばく (子供) ・直接経口による内部被ばく (子供)	居住シナリオ ・土壌直接線による外部被ばく ・農作物摂取による内部被ばく	居住シナリオ ・土壌直接線による外部被ばく ・農作物摂取による内部被ばく ・粉じん吸入による内部被ばく

注) クリアランスでは被ばく経路の重ね合わせ (合算) はせず、被ばく経路ごとに線量を評価し、最も高い被ばく線量からクリアランスレベルを算出している。

### 3.1.2 評価シナリオと被ばく経路

ウラン廃棄物の埋設に関する評価では、図 3.2 に示すように、大別して、地下水による放射性物質の流出に伴う被ばく（①地下水シナリオ）及び廃棄物埋設地の直上における居住に伴う被ばく（②居住シナリオ）がある。また、廃棄物埋設地の直上において居住する場合には、ラドンによる被ばくを考慮する必要もあるため、参考としてラドンによる被ばく経路も評価した（③ラドンによる被ばく）。ここで「ラドンによる被ばく」とは、ウランの子孫核種のうち唯一の気体であるラドンが大気中に放出され、そのラドンを体内に吸入することにより、その壊変によって内部被ばくすることを想定するものである。

①地下水シナリオは、廃棄物埋設地全体から地下水を介し、帯水層を経由して人の被ばくへとつながることを想定したシナリオであるため、廃棄物埋設地に埋設される総放射能量（Bq）によって被ばく線量が決まるシナリオである。

一方、②居住シナリオは、ある一定の広さからの直接線、粉じん吸入等による被ばく評価を行うことになるため、一定の広さの範囲における土壌中の平均的な放射能濃度（Bq/g）によって被ばく線量が決まるシナリオである。居住シナリオの被ばく経路は、直接線による外部被ばく、粉じん吸入による内部被ばく及び農作物摂取による内部被ばくの3つであり、これらの合算で被ばく量を算出する。なお、濃度上限値報告書<sup>29</sup>では居住時の客土を想定していることから粉じん吸入による内部被ばくを含めていないが、本試算では客土がない想定で評価を行うことから粉じん吸入による被ばくも考慮する。

なお、居住シナリオと同様に、③ラドンによる被ばくも一定の広さの平均的な放射能濃度によって被ばく線量が決まる。

濃度上限値報告書で示されているように、ウランの場合は地下水を介した被ばくよりも廃棄物に含まれるウラン及びその子孫核種からの直接的な被ばくの方が大きいため、本報告では②居住シナリオ及び③ラドンによる被ばくについて試算した。

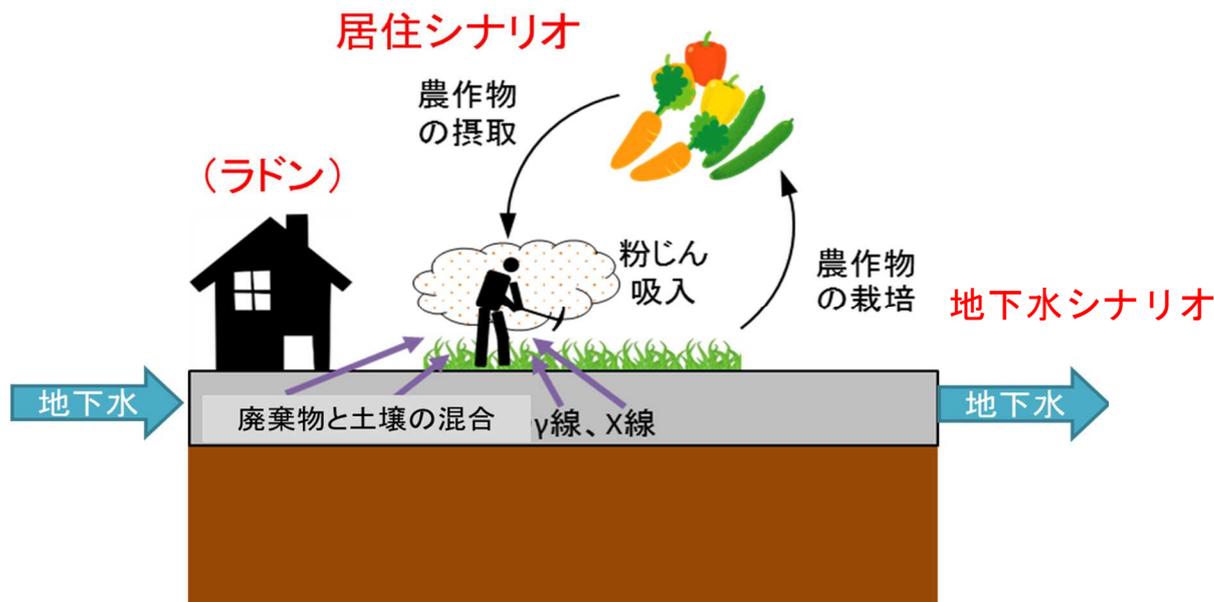


図 3.2 ウラン廃棄物の埋設における被ばく評価シナリオ

Fig. 3.2 Dose assessment scenario for disposal of uranium waste as radioactive waste

### 3.1.3 評価ケース

居住シナリオの評価では、燃料加工メーカーの許認可上の最大値である濃縮度 5%のウラン<sup>14</sup>が 1 Bq/g (<sup>234</sup>U、<sup>235</sup>U 及び <sup>238</sup>U のそれぞれの放射能濃度の合計) で廃棄物埋設地内に一様に分布するものと仮定し評価した。ウランの組成については、IAEA SSG 26<sup>31</sup>に示されている比放射能を基に、参考文献 14 と同様の方法により、以下のように設定した。

<sup>234</sup> U	<sup>235</sup> U	<sup>238</sup> U	合計
3.632E-4 g/gU	5.000E-2 g/gU	9.496E-1 g/gU	1.000 g/gU

本報告では、ウランが地下水によって廃棄物埋設地から流出する現実的な想定ケースと、数万年以上にわたり、ウラン及びその子孫核種の全量が流出せず廃棄物埋設地にそのままとどまり、また、廃棄物埋設地の状態が埋設の時点から変化せず、更にその直上に建屋を建築して居住するとの仮想的なケースを想定して評価した。

上記 2 ケースに対し、ラドンによる被ばくを含まない場合と含む場合について評価を行い、計 4 ケースについて評価を行った。

## 3.2 線量評価の試算に用いるモデル及びパラメータ

### 3.2.1 廃棄物埋設地の放射能濃度算定モデル

現実的な想定として地下水によりウランが流出するものとし、流出の程度は、英国の廃棄物処分場で計算された浸出水中と廃棄物中との物質濃度の比の平均値 (ウランは 3E-4) とシルト層を仮定した年間浸透水量 0.3 m/y から算定する<sup>32</sup>。

$$\frac{dM(i,t)}{dt} = -(\eta(i) + \lambda(i)) \cdot M(i,t) + \lambda(p) \cdot M(p,t) \frac{m(i)}{m(p)} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

$$\eta(i) = \frac{v_{IN}}{H} \cdot \frac{1}{\varepsilon_c \cdot R_c(i)} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

$$R_c(i) = 1 + \frac{1 - \varepsilon_c}{\varepsilon_c} \cdot \rho_c \cdot Kd_c(i) \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

ここに、

- $M(i,t)$  : 放射性核種  $i$  の時刻  $t$  における質量 [kg]
- $M(p,t)$  : 放射性核種  $i$  の親核種  $p$  の時刻  $t$  における質量 [kg]
- $\eta(i)$  : 放射性核種  $i$  の廃棄物層からの漏えい率 [1/y]
- $\eta(p)$  : 放射性核種  $i$  の親核種  $p$  の廃棄物層からの漏えい率 [1/y]
- $\lambda(i)$  : 放射性核種  $i$  の崩壊定数 [1/y]
- $\lambda(p)$  : 放射性核種  $i$  の親核種  $p$  の崩壊定数 [1/y]
- $m(i)$  : 放射性核種  $i$  の原子量 [kg/mol]
- $m(p)$  : 放射性核種  $i$  の親核種  $p$  の原子量 [kg/mol]
- $v_{IN}$  : 廃棄物埋設地の浸透水量 [m/y]
- $H$  : 廃棄物埋設地の高さ [m]
- $\varepsilon_c$  : 土壌の空隙率 [-]
- $R_c(i)$  : 放射性核種  $i$  の遅延係数 [-]
- $\rho_c$  : 土壌の密度 [kg/m<sup>3</sup>]
- $Kd_c(i)$  : 放射性核種  $i$  の分配係数 [m<sup>3</sup>/kg]

### 3.2.2 居住シナリオにおける被ばく線量評価の試算に用いるモデル

ウラン廃棄物を埋設した浅地中処分における居住シナリオでは、以下の被ばく経路を想定し評価した。

- ・居住時における直接線による外部被ばく
- ・居住時における粉じん吸入による内部被ばく
- ・農作物摂取による内部被ばく

以下に各被ばく経路の試算に用いるモデルを示す。

#### (1) 居住時における直接線による外部被ばく

廃棄物埋設地に含まれるウラン及びその子孫核種からの直接線による外部被ばくは、次式によって評価する。また、居住時における直接線による外部被ばくの評価に必要なパラメータを表 3.2 及び表 3.3 に示す。

$$D_{EXT}(t) = \sum_i C_S(i, t) \cdot t_L \cdot S_L \cdot DCF_{EXT}(i) \dots\dots\dots (3.4)$$

ここに、

- $D_{EXT}(t)$  : 時刻  $t$  における居住時における直接線による外部被ばく [ $\mu\text{Sv/y}$ ]
- $C_S(i, t)$  : 放射性核種  $i$  の時刻  $t$  における廃棄物埋設地の放射能濃度 [ $\text{Bq/kg}$ ]
- $t_L$  : 年間居住時間 [ $\text{h/y}$ ]
- $S_L$  : 屋外滞在時間割合 [-]
- $DCF_{EXT}(i)$  : 放射性核種  $i$  の外部被ばくに係る線量換算係数 [ $(\mu\text{Sv/h})/(\text{Bq/kg})$ ]

表 3.2 居住時における直接線による外部被ばくに係るパラメータ

Table 3.2 Parameters on external exposure from direct radiation in habitation scenario

パラメータ	値	設定根拠
年間居住時間 [h/y]	8760	処分場跡地に建設した住居に 1 年中居住すると仮定。
屋外滞在時間割合 [-]	0.2	IAEA-TECDOC-401 <sup>33</sup> を参考に、居住シナリオ者は居住シナリオ時間の 20%を戸外で過ごすとして仮定。

表 3.3 被ばく線量換算係数

Table 3.3 Dose conversion factors

放射性核種		外部*	吸入	経口
		( $\mu\text{Sv/h}$ ) / ( $\text{Bq/g}$ )	$\text{Sv/Bq}$	$\text{Sv/Bq}$
ウラン系列	$^{238}\text{U}$	2.7E-4	2.9E-6	4.5E-8
	$^{234}\text{Th}$	7.2E-3	7.7E-9	3.4E-9
	$^{234}\text{U}$	2.7E-5	3.5E-6	4.9E-8
	$^{230}\text{Th}$	9.0E-5	1.4E-5	2.1E-7
	$^{226}\text{Ra}$	5.0E-1	3.5E-6	2.8E-7
	$^{210}\text{Pb}$	1.8E-4	1.2E-6	6.9E-7
	$^{210}\text{Po}$	2.5E-6	3.3E-6	1.2E-6
アクチニウム系列	$^{235}\text{U}$	5.1E-2	3.1E-6	4.7E-8
	$^{231}\text{Pa}$	1.1E-2	1.4E-4	7.1E-7
	$^{227}\text{Ac}$	2.1E-4	5.5E-4	1.1E-6
	$^{227}\text{Th}$	3.1E-2	1.0E-5	8.8E-9
	$^{223}\text{Ra}$	8.7E-2	7.4E-6	1.0E-7
出典		JAEA-Data/Code 2008-003 <sup>34</sup>	ICRP Pub.72 <sup>35</sup>	

※無限平板線源として算出された値

(2) 粉じん吸入による内部被ばく

廃棄物埋設地に含まれるウラン及びその子孫核種からの粉じん吸入による内部被ばくは、次式によって評価する。また、粉じん吸入による内部被ばくの評価に必要なパラメータを表 3.4 に示す。

$$D_{INH}(t) = \sum_i C_S(i, t) \cdot f_L \cdot B_L \cdot t_L \cdot t_{out} \cdot DCF_{INH}(i) \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

ここに、

$D_{INH}(t)$  : 時刻  $t$  における居住時における粉じん吸入による内部被ばく  
[ $\mu\text{Sv/y}$ ]

$f_L$  : 居住時の空气中ダスト濃度 [ $\text{kg/m}^3$ ]

$B_L$  : 居住者の呼吸量 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

$t_{out}$  : 屋外滞在時間割合 [-]

$DCF_{INH}(i)$  : 放射性核種  $i$  の吸入内部被ばくに係る線量換算係数 [ $\mu\text{Sv/Bq}$ ]

表 3.4 粉じん吸入による内部被ばくに係るパラメータ

Table 3.4 Parameters on internal exposure by inhalation of dust

パラメータ	値	設定根拠
居住時の空气中ダスト濃度 [kg/m <sup>3</sup> ]	6E-6	IAEA-TECDOC-401 <sup>33</sup> で提案されている居住時のダスト濃度に設定する。
居住者の呼吸量 [m <sup>3</sup> /h]	0.93	ICRP Pub.71 <sup>36</sup> で示される標準人の1日の数値 22.2 (m <sup>3</sup> /d) を基に設定。22.2 (m <sup>3</sup> /d) ÷ 24 (h/d) = 0.93 (m <sup>3</sup> /h)。
屋外滞在時間割合 [-]	0.2	IAEA-TECDOC-401 <sup>33</sup> を参考に、居住シナリオ者は居住シナリオ時間の 20%を戸外で過ごすとして仮定。

(3) 農作物摂取による内部被ばく

農作物  $k$  に含まれる放射性物質  $i$  の放射能濃度は、次式によって計算する。

$$C_{V_k}(i, t) = C_S(i, t) \cdot T_k(i) \cdot K_N \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

ここに、

- $C_{V_k}(i, t)$  : 時刻  $t$  における農作物  $k$  中の放射性核種  $i$  の放射能濃度 [Bq/kg]
- $T_k(i)$  : 土壌から農作物  $k$  への放射性核種  $i$  の移行係数 [Bq/g-wet 農作物 / Bq/g-dry 土壌]
- $K_N$  : 根からの放射性核種の吸収割合 [-]

ここで、農作物  $k$  は米、葉菜、非葉菜及び果実に分類して計算する。

農作物摂取による内部被ばく線量は次式によって計算する。

$$D_{ING}(t) = \sum_i \sum_k C_{V_k}(i, t) \cdot Q_k \cdot G_k \cdot \exp(-\lambda(i) \cdot t_{V_k}) \cdot DCF_{ING}(i) \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

ここに、

- $D_{ING}(t)$  : 時刻  $t$  における農作物摂取に伴う内部被ばく線量 [ $\mu$ Sv/y]
- $Q_k$  : 農作物  $k$  の年間摂取量 [kg/y]
- $G_k$  : 農作物  $k$  の市場係数 [-]
- $t_{V_k}$  : 農作物  $k$  の輸送時間 [y]
- $DCF_{ING}(i)$  : 放射性核種  $i$  の経口摂取被ばくに係る線量換算係数 [ $\mu$ Sv/Bq]

農作物摂取による内部被ばくの評価に必要なパラメータを表 3.5 及び表 3.6 に示す。

表 3.5 農作物摂取による内部被ばくに係るパラメータ

Table 3.5 Parameters on internal exposure by ingestion of agricultural products

パラメータ	値	設定根拠
根からの放射性核種の吸収割合 [-]	1	保守的に根からの吸収係数を 1 に設定。
農作物 $k$ の年間摂取量 [kg/y]	米 130 葉菜 30 非葉菜 90 果実 40	<p>「平成 15 年国民健康・栄養調査報告」<sup>37)</sup>に示された摂取量より設定。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・米：1 人 1 日当たりの米類の摂取量 350.4 g より設定（<math>350.4 \text{ g} \times 365 \text{ 日} = 128 \text{ kg/y}</math> を四捨五入してまるめた）</li> <li>・葉菜：1 人 1 日当たりの葉菜類（ほうれん草 20.5 g、キャベツ 21.3 g、白菜 19.1 g、葉類つけもの 6.4 g）の摂取量 67.3 g より設定（<math>67.3 \text{ g} \times 365 \text{ 日} = 25 \text{ kg/y}</math> を四捨五入してまるめた）</li> <li>・非葉菜：1 人 1 日当たりのいも類 59.7 g、緑黄色野菜 94.2 g 及びその他の野菜 161.0g の合計 314.9 g から葉菜の摂取量（67.3 g）を除いた 247.6 g を非葉菜の摂取量として設定（<math>247.6 \text{ g} \times 365 \text{ 日} = 90 \text{ kg/y}</math> を四捨五入してまるめた）</li> <li>・果実：1 人 1 日当たりの果実の摂取量 115.1 g より設定（<math>115.1 \text{ g} \times 365 \text{ 日} = 42 \text{ kg/y}</math> を四捨五入してまるめた）</li> </ul>
農作物 $k$ の市場係数 [-]	0.1	汚染された農作物以外の摂取を考慮して設定。
農作物 $k$ の輸送時間 [y]	0	保守的に輸送時間を 0 に設定。

表 3.6 土壌から農作物  $k$  への移行係数

Table 3.6 Transfer coefficients from soil to agricultural product  $k$

元素	米	葉菜、非葉菜、果実	出典
	(Bq/g-wet)/(Bq/g-dry)	(Bq/g-wet)/(Bq/g-dry)	
Pb	1.0E-2	1.0E-2	IAEA-TECDOC-1380 <sup>38</sup>
Po	2.0E-4	2.0E-4	
Ra	4.0E-2	4.0E-2	
Ac	1.0E-3	1.0E-3	
Th	5.0E-4	5.0E-4	
Pa	4.0E-2	4.0E-2	
U	1.0E-4	1.0E-3	

居住シナリオにおける被ばく線量  $D_H(t)$  は、これらの被ばく経路の和とし、次式によって計算する。

$$D_H(t) = D_{EXT}(t) + D_{INH}(t) + D_{ING}(t) \dots\dots\dots (3.8)$$

### 3.2.3 ラドンによる被ばく線量評価の試算に用いるモデル

ラドンによる被ばく評価については、JAEA が開発したモデル<sup>24</sup>を用いた。このモデルでは、土壌中のラジウムの放射能濃度に応じて希ガスであるラドンが生成し、地中から地表へのラドンガスの散逸、床下等から家屋内へのラドンの侵入、家屋内と家屋外との換気を考慮している（付録3）。

評価期間については、浅地中処分の場合は地表面近くの環境変化が大きく、1000年を超えるような評価は確実性が乏しいと考えられるが、今回は期間を限定せず試算を行う。

## 3.3 線量評価の試算結果

図 3.3 に、ウランの流出を考慮した場合と考慮しない場合、さらに、それぞれにラドンの影響を含む場合と含まない場合に分けて試算をした居住シナリオの評価結果を示す。また、表 3.7 に各評価結果の被ばく線量のピークの数値とその出現時期を整理した。

### 3.3.1 ウランの流出を考慮した場合の線量評価の試算結果

ウランの流出を想定した試算では、流出の程度は英国の廃棄物処分場からの浸出水中の物質濃度を基に計算された浸出水中と廃棄物中との物質濃度の比の平均値（ウランは  $3E-4$ ）とシルト層を仮定した年間浸透水量を  $0.3 \text{ m/y}$  として試算した。この流出の程度は試算結果に大きく影響を及ぼすことから、3.4.に後述するように、その影響について感度解析を

行っている。

$^{238}\text{U}$  と瞬時平衡の子孫核種による被ばく線量は約  $0.01 \text{ mSv/y}$  である。なお、これはウランの流出の想定の有無とは関係しない。ラドンによる被ばくを除いた被ばく線量（図 3.3 における太実線）は最大で約  $0.18 \text{ mSv/y}$ 、これにラドンによる被ばくを加えた被ばく線量（同図の太破線）は最大で約  $1.3 \text{ mSv/y}$  である。両評価の最大線量が出現するのは約 4 万年後である。

### 3.3.2 保守的にウランの流出を考慮しない場合の線量評価の試算結果

保守的にウランの流出を考慮しない場合、最大線量は約 20 万年後に出現する。ラドンによる被ばくを除いた被ばく線量（図 3.3 における細実線）は最大で約  $0.82 \text{ mSv/y}$ 、これにラドンによる被ばくを加えた被ばく線量（同図の細破線）は最大で約  $5.9 \text{ mSv/y}$  である。

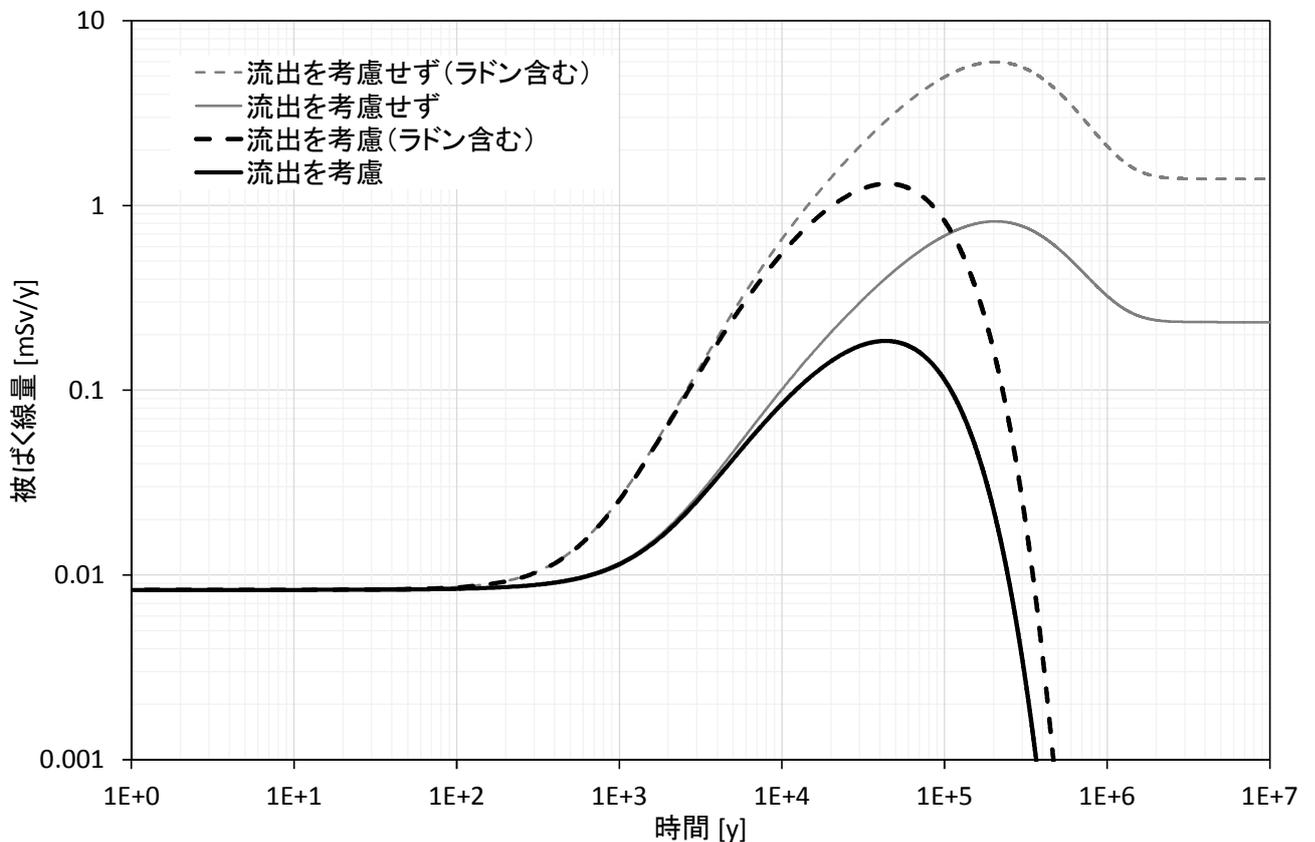


図 3.3 ウラン廃棄物の埋設に係る評価の経時変化

(5%濃縮ウランの廃棄物埋設地における平均放射能濃度が埋設直後に  $1 \text{ Bq/g}$  ( $^{234}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$  及び  $^{238}\text{U}$  のそれぞれの放射能濃度の合計))

Fig. 3.3 Calculated time sequences of doses for disposal of uranium waste as radioactive waste (Average concentration of 5% enriched uranium in disposal facility is  $1 \text{ Bq/g}$  (summation of radioactivity concentrations of  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  and  $^{238}\text{U}$ ) at the time just after the disposal of waste)

表 3.7 ウラン廃棄物の埋設に係る線量評価の試算結果のまとめ  
 (5%濃縮ウランの廃棄物埋設地における平均放射能濃度が埋設直後に 1 Bq/g ( $^{234}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$   
 及び  $^{238}\text{U}$  のそれぞれの放射能濃度の合計))

Table 3.7 Summary of dose assessments for disposal of uranium waste as radioactive waste  
 (Average concentration of 5% enriched uranium in disposal facility is 1 Bq/g (summation of  
 radioactivity concentrations of  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  and  $^{238}\text{U}$ ) at the time just after the disposal of waste)

ケース	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	0.01 mSv/y (<約 1000 年)	0.18 mSv/y (約 4 万年後 <sup>※</sup> )	1.3 mSv/y (約 4 万年後 <sup>※</sup> )
保守的に流出を考慮せず		0.82 mSv/y (約 20 万年後 <sup>※</sup> )	5.9 mSv/y (約 20 万年後 <sup>※</sup> )

※ 被ばく線量のピークの出現時期

### 3.3.3 ラドンによる被ばくの線量評価の試算結果

既述したように、ラドンによる被ばくの線量評価の試算では、土壤中のラジウムの放射能濃度に応じて希ガスであるラドンが生成し、地中から地表へのラドンガスの散逸、床下等から家屋内へのラドンの侵入、家屋内と家屋外との換気を考慮した試算を行った（試算に用いたモデルについては 3.2.3 及び付録 3 参照）。

ウラン及びその子孫核種が廃棄物埋設地に 20 万年以上とどまり続けるという保守的に流出を考慮しない評価では、合計で約 5.9 mSv/y となった（表 3.7）。この内訳は  $^{226}\text{Ra}$  による外部被ばく及び内部被ばくが約 0.7 mSv/y、ラドンによる被ばくが約 5.0 mSv/y となっており、ラドンによる被ばくがその大半を占める。ウランの放射能濃度が廃棄物埋設地平均 1 Bq/g (5%濃縮) のときのラドンによる被ばくは約 5.0 mSv/y であり、このことは、ウランの放射能濃度が廃棄物埋設地平均 1 Bq/g 以下であれば、世界保健機関 (WHO) 等が屋内におけるラドンによる被ばくの基準としている 10 mSv/y<sup>39</sup> を超えそうにないことを示す。

既述したように、ラドンによる被ばくの評価のモデルでは、地中から地表へのラドンガスの散逸、床下等から家屋内へのラドンの侵入、家屋内と家屋外との換気といった評価が必要であり、評価の不確かさが大きい。本報告で用いたモデルによる評価結果と、日本の自然環境における土壤中のウランの放射能濃度及びラドンからの被ばく線量との関係を表 3.8 及び表 3.9 に整理した。線量評価による被ばく線量と自然環境における被ばく線量を比較する際には、土壤中のウランの放射能濃度を比較するのではなく、土壤中のラジウム（ラドンの親核種）の放射能濃度を比較すべきであることに留意する必要がある。

表 3.8 自然環境における土壌中のウランの放射能濃度及びラジウムの放射能濃度と本評価における評価条件との比較

Table 3.8 Comparison between uranium and radium radioactivity concentrations in natural soil and those in calculation condition in this study

元素	自然環境（日本） <sup>40</sup>	本報告における評価条件 （ウラン廃棄物（5%濃縮））
ウラン	<sup>238</sup> U : 0.03 Bq/g <sup>234</sup> U : 0.03 Bq/g	1 Bq/g ( <sup>238</sup> U : 0.12 Bq/g, <sup>234</sup> U : 0.84 Bq/g)
ラジウム	<sup>226</sup> Ra : 0.03 Bq/g (放射平衡)	<sup>226</sup> Ra : 0.53 Bq/g (20 万年後、流出を考慮しない場合)

表 3.9 自然環境におけるラドンによる被ばく線量と本評価における評価結果との比較

Table 3.9 Comparison between dose due to radon in natural condition and that calculated in this study

項目	自然環境（日本） <sup>41</sup>	本報告における評価結果 （ウラン廃棄物（5%濃縮））
ラドンによる被ばく線量	0.37 mSv/y	5.0 mSv/y

自然環境の土壌中のラジウムの放射能濃度とラドンによる被ばく線量が比例関係にあると仮定すると、

$$0.03 \text{ Bq/g} : 0.53 \text{ Bq/g} = 0.37 \text{ mSv/y} : X \text{ mSv/y}$$

$$X = 6.5 \text{ mSv/y}$$

となり、自然環境におけるラドンによる被ばく線量と本報告における評価結果とはおおむね整合していることが分かる。

### 3.4 感度解析

ウランの流出を考慮した線量評価の試算では、流出の程度によってウラン及びその子孫核種の放射能濃度が変化し、被ばく線量が増加する。そのため、流出の割合（漏出率  $\eta$ ）をパラメータとした感度分析を行った（図 3.4 及び表 3.10）。

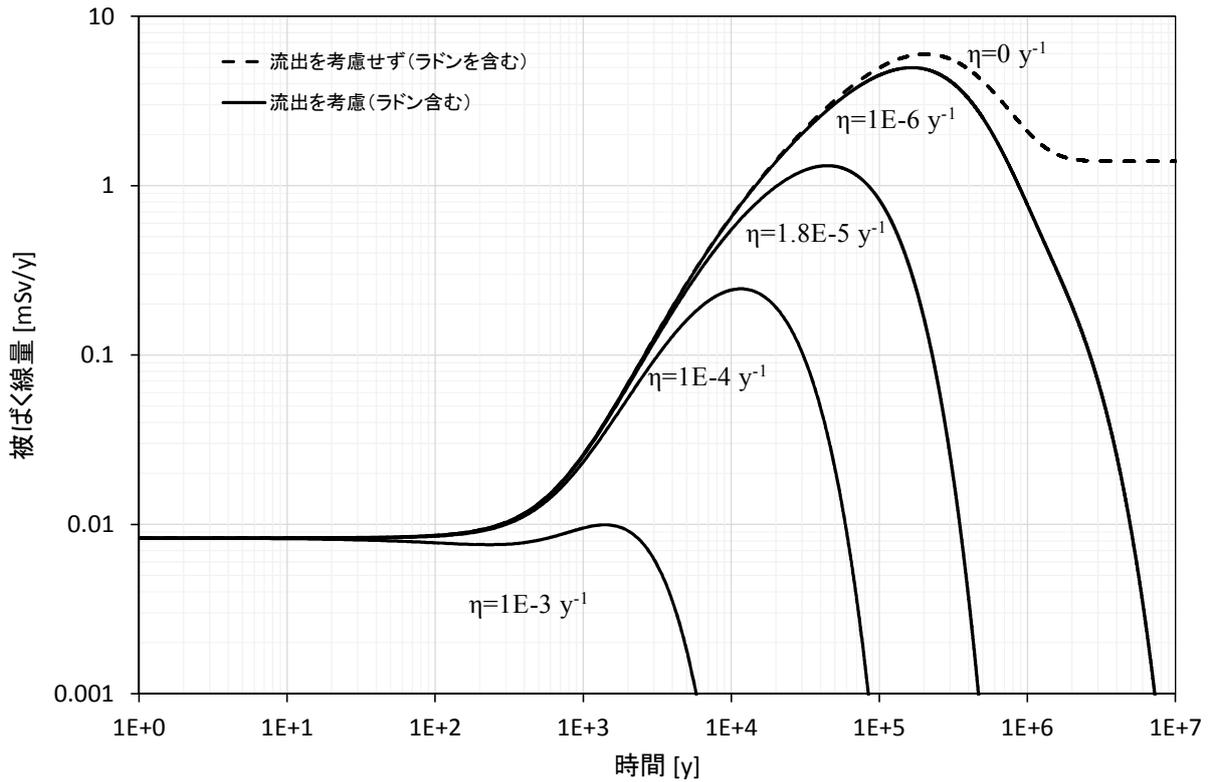


図 3.4 ウランの流出に係る感度解析の結果

Fig. 3.4 Results of sensitivity analyses on release ratio of uranium

表 3.10 ウランの流出に係る感度解析の結果

Table 3.10 Results of sensitivity analyses on release ratio of uranium

項目	流出を考慮				流出を考慮せず
	1E-3 <sup>*1</sup>	1E-4 <sup>*2</sup>	1.8E-5 <sup>*3</sup>	1E-6 <sup>*4</sup>	0 <sup>*5</sup>
放射性核種の漏出率 η [y <sup>-1</sup> ]	1E-3 <sup>*1</sup>	1E-4 <sup>*2</sup>	1.8E-5 <sup>*3</sup>	1E-6 <sup>*4</sup>	0 <sup>*5</sup>
最大線量 (ラドンによる被ばく含む) [mSv/y]	0.01	0.25	1.3	5.0	5.9

- ※1 砂に対する代表的な分配係数 0.033 m<sup>3</sup>/kg 及び平均的な浸透水量 0.3 m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup> を設定した場合の漏出率に相当
- ※2 我が国の代表的な侵食速度 数 m/1 万年で削られる廃棄物埋設地の割合を漏出率と見なした場合に相当
- ※3 英国の放出係数 3E-4 相当の分配係数 1.67 m<sup>3</sup>/kg 及び平均的な浸透水量 0.3 m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup> を設定した場合の漏出率に相当
- ※4 我が国の代表的な風化速度 数 cm/1 万年で削られる廃棄物埋設地の割合を漏出率と見なした場合に相当
- ※5 現実には想定されない。

#### 4. 結論

本報告では、ウラン廃棄物のクリアランス及び埋設に関する線量評価の詳細について報告した。

ウラン廃棄物のクリアランスについては、ウランを人工起源核種と同様に取り扱うという考え方の下、評価シナリオを設定し、シナリオに応じた線量基準に基づきクリアランスレベルを導出した。評価シナリオ及びその線量評価の試算に用いたモデルについては、原子力安全委員会のクリアランスに関連する報告書に準拠した。クリアランスレベルの導出に係る評価の結果(表 2.8)から、線量基準を合理的に予見可能なシナリオに対し  $10 \mu\text{Sv/y}$ 、低確率シナリオに対し  $1 \text{ mSv/y}$  としたときの当該線量基準を満足するウランの放射能濃度を算出した(表 2.9)。また、クリアランスにおけるラドンによる被ばくに対する線量基準については、IAEA GSR Part 3 では示されていないが、本報告では、ラドンによる被ばくに対する線量基準を低確率シナリオの線量基準である  $1 \text{ mSv/y}$  と仮定し、参考のため比較を行った。さらに、線量基準を満足するウランの放射能濃度(表 2.9)を基に、対数丸めを行った後のウランの放射能濃度(表 2.10)によれば、 $^{234}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$  及び  $^{238}\text{U}$  のそれぞれについて最も厳しい数値をとると、いずれも  $1 \text{ Bq/g}$  となることを導いた。なお、金属くずに対して設定されているウランのクリアランスレベルは、 $^{234}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$  及び  $^{238}\text{U}$  のそれぞれについて、これと同じく  $1 \text{ Bq/g}$  である。

ウラン廃棄物の埋設については、廃棄物埋設地のウランの放射能濃度(5%濃縮ウランの同位体の放射能濃度の合計)が  $1 \text{ Bq/g}$  と仮定した場合における居住シナリオの評価を行った。本評価では、ウラン及び子孫核種が地下水によって流出することを想定したケースと保守的に流出を考慮しないケースを評価した。さらに、それぞれのケースにおいてラドンによる被ばくの影響を評価した。ウランの流出を想定したケースでは、 $^{238}\text{U}$  と瞬時平衡の子孫核種による被ばく線量は約  $0.01 \text{ mSv/y}$  である。ラドンによる被ばくを除いた被ばく線量は最大で約  $0.18 \text{ mSv/y}$ 、これにラドンによる被ばくを加えた被ばく線量は最大で約  $1.3 \text{ mSv/y}$  である。両評価の最大線量が出現するのは約 4 万年後である。保守的にウランの流出を考慮しない場合、最大線量は約 20 万年後に出現する。ラドンによる被ばくを除いた被ばく線量は最大で約  $0.82 \text{ mSv/y}$ 、これにラドンによる被ばくを加えた被ばく線量は最大で約  $5.9 \text{ mSv/y}$  である。いずれのケースにおいても、ラドンによる被ばくは、WHO 等の指標である  $10 \text{ mSv/y}$  を超えていない。

本報告におけるウラン廃棄物のクリアランス及び埋設に関する線量評価の結果については、原子力規制委員会が 2021 年 3 月に決定した「規制の考え方」<sup>2</sup>の検討に際し参考とされたものである。

#### 謝辞

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構安全研究センターの武田聖司グループリーダーには、クリアランスレベルの導出に係る線量評価の試算に用いたモデル及びパラメー

タについての的確なご助言を頂いた。また、原子力規制庁長官官房技術基盤グループ核燃料廃棄物研究部門の片山次郎・核燃料廃棄物政策研究官及び川崎智・技術参与には、本報告の推敲及び精査に当たって多くのご助言を頂いた。ここに深謝申し上げる。

## 参考文献一覧

- 1 原子力規制委員会: 「原子力規制委員会令和2年度重点計画」の制定について. 原規総発第2003303号原子力規制委員会決定, 令和2年3月30日 (2020).
- 2 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の考え方. 原規総発第2103109号, 令和3年3月10日 (2021).
- 3 一般社団法人日本原子力学会「東京電力福島第一原子力発電所事故以降の低レベル放射性廃棄物処理処分の在り方」特別専門委員会: 低レベル放射性廃棄物処分におけるウランの扱いについてー浅地中トレンチ処分に係る規制への提言ー平成26年度報告書、平成27年3月.
- 4 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構: バックエンドロードマップ、2018年12月26日.
- 5 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、平成21年10月5日.
- 6 製錬事業者等における工場等において用いた資材その他の物に含まれる放射性物質の放射能濃度についての確認等に関する規則 (平成17年経済産業省令112号)、令和2年8月13日廃止.
- 7 試験研究の用に供する原子炉等に係る放射能濃度についての確認等に関する規則 (平成17年文部科学省令第49号)、令和2年8月13日廃止.
- 8 工場等において用いた資材その他の物に含まれる放射性物質の放射能濃度が放射線による障害の防止のための措置を必要としないものであることの確認等に関する規則 (令和2年原子力規制委員会規則第16号)、令和2年8月13日制定.
- 9 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、平成22年8月9日.
- 10 European Union: Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. OJ L 013, 17.1.2014, p. 1, (2014).
- 11 International Atomic Energy Agency: Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, General Safety Requirements Part 3, No. GSR Part 3 (2014).
- 12 室田健人, 青木広臣: ウラン廃棄物の埋設及びクリアランスに関する海外の規制. NRA Technical Note Series NTEN-2020-3001, September 2020 (2020).
- 13 原子力委員会 原子力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. 平成12年12月 (2000).

- 14 日本原燃株式会社ら：ウラン廃棄物の処分及びクリアランスに関する検討書。平成 18 年 3 月 (2006)。
- 15 ICRP: Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. ICRP Publication 107, Ann. ICRP 38(3), (2008)。
- 16 原子力安全委員会放射性廃棄物安全基準専門部会：主な原子炉施設におけるクリアランスレベルについて。平成 11 年 3 月 17 日 (1999)。
- 17 原子力安全委員会：重水炉、高速炉等におけるクリアランスレベルについて。平成 13 年 7 月 16 日 (2001)。
- 18 原子力安全委員会：核燃料使用施設（照射済燃料及び材料を取り扱う施設）におけるクリアランスレベルについて。平成 15 年 4 月 24 日 (2003)。
- 19 原子力安全委員会：原子炉施設及び核燃料施設の解体等に伴って発生するもののうち放射性物質として取り扱う必要のないものの放射能濃度について。平成 16 年 12 月 16 日（平成 17 年 3 月 17 日一部訂正及び修正）(2004)。
- 20 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。平成 21 年 10 月 5 日 (2009)。
- 21 放射線審議会基本部会：「規制免除について」国際基本安全基準における規制免除レベルの国内法令取り入れ検討結果。平成 14 年 10 月、平成 15 年 7 月修正 (2002)。
- 22 International Atomic Energy Agency: International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series No.115, (1996)。
- 23 International Atomic Energy Agency: Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance. Safety Guide No. RS-G-1.7 (2004)。
- 24 武田聖司ら：TRU 核種を含む放射性廃棄物及びウラン廃棄物のトレンチ処分に対する濃度上限値の評価（受託研究）。JAEA-Research 2008-044, Japan Atomic Energy Agency, March 2008 (2008)。
- 25 International Atomic Energy Agency: Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environments. IAEA Technical Report Series No.364 (1994)。
- 26 International Atomic Energy Agency: Derivation of Activity Concentration Values for Exclusion, Exemption and Clearance. Safety Report Series No.44 (2005)。
- 27 天澤弘也ら：研究施設等廃棄物浅地中処分施設の概念設計。JAEA-Technology 2012-031, Japan Atomic Energy Agency, October 2012 (2012)。
- 28 日本原子力研究開発機構埋設事業センター：研究施設等廃棄物の埋設事業の物量の見直しについて。原子力規制庁令和元年 12 月 17 日面談資料 (2019)。
- 29 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。平成 19 年 5 月 21 日 (2007)。

- 30 原子力規制庁: 中深度処分に係る規制基準等における要求事項. 令和 2 年度第 16 回原子力規制委員会, 資料 3, 令和 2 年 7 月 15 日 (2020).
- 31 International Atomic Energy Agency: Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (2012 Edition). Specific Safety Guide No. SSG-26 (2014).
- 32 A.V. Pinner., et al: An Assessment of the Radiological Protection Aspects of Shallow Land Burial of Radioactive Wastes. NRPB-R-161 (1984).
- 33 International Atomic Energy Agency: Exemption of Radiation Sources and Practices from Regulatory Control. IAEA-TECDOC-401 (1987).
- 34 佐々木ら: 埋設処分における濃度上限値評価のための外部被ばく線量換算係数. JAEA-Data/Code 2008-003, Japan Atomic Energy Agency, February 2008 (2008).
- 35 ICRP: Age-dependent Doses to the Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 5. Compilation of Ingestion and Inhalation Coefficients. ICRP Publication 72 (1996).
- 36 ICRP: Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 4. Inhalation Dose Coefficients. ICRP Publication 71 (1995).
- 37 厚生労働省: 平成 15 年度 国民健康・栄養調査報告. 平成 17 年 8 月 (2005).
- 38 International Atomic Energy Agency: Derivation of Activity Limits for the Disposal of Radioactive Waste in Near Surface Disposal Facilities. IAEA-TECDOC-1380 (2003).
- 39 World Health Organization: WHO Handbook on Indoor Radon, A Public Health Perspective. ISBN 978 92 4 154767 3 (2009).
- 40 国連科学委員会: 放射線の線源と影響, 原子放射線の影響に関する国連科学委員会の, 総会に対する 2000 年報告書. 科学付属書 B, 放射線医学総合研究所監訳 (2002).
- 41 原子力安全研究協会: 新版 生活環境放射線 (国民線量の算定). 平成 23 年 12 月 (2011).

## 付録 1

### 本報告におけるクリアランスレベルの算定に係る線量評価の試算に用いたモデル及びパラメータ

本付録で用いる被ばく経路 No. は本文の表 2.2 に示すものであり、また数式及び記号は、読者の理解を容易にするため、クリアランス報告書及びウランクリアランス報告書、並びにクリアランス報告書で引用している我が国ではじめてクリアランスレベルを導出した原子力安全委員会専門部会報告書<sup>1</sup>で用いられている記号と同じ記号を用いることとする。ただし、これら報告書において記載がない数式及び記号については、本付録において定義したものもある。

本報告における線量評価の試算に用いたパラメータについては付表 1.1 から付表 1.7 に示す。各パラメータの設定根拠については、原典を参照いただきたい。

#### (1) 跡地利用

No.11 から No.19 までの跡地利用のシナリオにおいて用いる土壌中の放射性核種の放射能濃度は、廃棄物が混入した土壌中における放射性核種に対し、処分場の埋め戻しに用いられる土砂及び覆土の量を考慮し、次式を用いて算定する。この際、放射性核種の放射能濃度の算定に当たっては、放射性崩壊による減衰のみを考慮し、地下水への漏出は考慮していない。

$$C_M(i) = C_W(i) \cdot \frac{T_U - T_C}{T_U} \cdot \frac{W}{L_D \cdot W_D \cdot H_D \cdot \rho_D} \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t_K) \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

ここに、

- $C_M(i)$  : 掘削土壌中の放射性核種  $i$  の放射能濃度 [Bq/kg]
- $C_W(i)$  : クリアランス対象物と放射性廃棄物でない廃棄物 (NR) とが混合した廃棄物中の放射性核種  $i$  の放射能濃度 [Bq/kg]
- $C_W(i) = C_{W0}(i) \cdot F_{WC} \quad \dots\dots\dots (1.2)$
- $C_{W0}(i)$  : クリアランス対象物中の放射性核種  $i$  の放射能濃度 [Bq/kg]
- $F_{WC}$  : 廃棄物中に占められるクリアランス対象物の割合 [-]
- $T_C$  : 覆土厚さ [m]
- $T_U$  : 建設掘削深さ [m]
- $W$  : 廃棄物の総重量 [kg]
- $L_D$  : 処分場の長さ [m]
- $W_D$  : 処分場の幅 [m]
- $H_D$  : 処分場の深さ [m]
- $\rho_D$  : 処分場のかさ密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$\lambda_i$  : 放射性核種  $i$  の崩壊定数 [1/y]

$$\lambda_i = \ln(2)/T_{\frac{1}{2}}(i) \dots\dots\dots (1.3)$$

$T_{\frac{1}{2}}(i)$  : 放射性核種  $i$  の半減期 [y]

$t_K$  : 処分場閉鎖後から評価時点までの期間 [y]

① 建設作業（被ばく経路 No.11～No.14）

建設作業のシナリオのうち、No.11 の掘削された土壌の直上における建設作業者の外部被ばく線量は次式によって計算する。

$$D_{EXT}(i) = C_M(i) \cdot S_C \cdot t_C \cdot DCF_{EXT}(i) \dots\dots\dots (1.4)$$

ここに、

$D_{EXT}(i)$  : 放射性核種  $i$  による外部被ばく線量 [ $\mu\text{Sv/y}$ ]

$S_C$  : 建設作業時における遮へい係数 [-]

$t_C$  : 建設作業における年間作業時間 [h/y]

$DCF_{EXT}(i)$  : 放射性核種  $i$  の外部被ばくに係る線量換算係数 [( $\mu\text{Sv/h}$ )/(Bq/kg)]

建設作業のシナリオのうち、No.12 の作業者の皮膚被ばく線量は次式によって計算する。

$$H_{skin}(i) = (D_{\beta}(i) + D_{\gamma}(i)) \cdot t_{ex} \cdot f_{c\_skin} \cdot f_{d\_skin} \cdot L_{dust} \cdot \rho \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t_1) \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i \cdot t_2)}{\lambda_i \cdot t_2} \dots\dots\dots (1.5)$$

ここに、

$H_{skin}(i)$  : 皮膚被ばく線量 [mSv/y]

$D_{\beta}(i)$  :  $\beta$  線による皮膚被ばくの線量換算係数 [(Sv/h)/(Bq/cm<sup>2</sup>)]

$D_{\gamma}(i)$  :  $\gamma$  線による皮膚被ばくの線量換算係数 [(Sv/h)/(Bq/cm<sup>2</sup>)]

$t_{ex}$  : 年間被ばく時間 [h/y]

$f_{c\_skin}$  : 希釈係数 [-]

$f_{d\_skin}$  : 濃縮係数 [-]

$L_{dust}$  : 皮膚表面のダスト層の厚さ [cm]

$\rho$  : ダストの密度 [kg/cm<sup>3</sup>]

$t_1$  : 被ばく開始までの減衰時間 [y]

$t_2$  : 被ばく中の減衰時間 [y]

建設作業のシナリオのうち、No.13 の建設作業により発生する粉じんの吸入による内部

被ばく線量を次式で計算する。

$$D_{INH}(i) = C_M(i) \cdot f_C \cdot B_C \cdot f_{d_{particle}} \cdot t_C \cdot DCF_{INH}(i) \dots\dots\dots (1.6)$$

ここに、

- $D_{INH}(i)$  : 放射性核種  $i$  による吸入内部被ばく線量 [ $\mu\text{Sv/y}$ ]
- $f_C$  : 建設作業時の空气中ダスト濃度 [ $\text{kg/m}^3$ ]
- $B_C$  : 作業者の呼吸量 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]
- $f_{d_{particle}}$  : 微粒子への放射性物質の濃縮係数 (吸入可能な粒子) [-]
- $DCF_{INH}(i)$  : 放射性核種  $i$  の吸入被ばくに係る線量換算係数 [ $\mu\text{Sv/Bq}$ ]

建設作業のシナリオのうち、No.14 の建設作業中の直接経口による内部被ばく線量については、次式を用いて計算する。

$$D_{ING_D}(i) = C_M(i) \cdot d_C \cdot t_C \cdot DCF_{ING}(i) \dots\dots\dots (1.7)$$

ここに、

- $D_{ING_D}(i)$  : 放射性核種  $i$  による直接経口摂取の内部被ばく線量 [ $\mu\text{Sv/y}$ ]
- $d_C$  : 建設作業時の経口摂取率 [ $\text{kg/h}$ ]
- $DCF_{ING}(i)$  : 放射性核種  $i$  の経口摂取被ばくに係る線量換算係数 [ $\mu\text{Sv/Bq}$ ]

② 跡地での居住 (被ばく経路 No.15~No.19)

跡地での居住のシナリオのうち、No.15 (成人) 及び No.16 (子ども) の居住中の外部被ばく線量については、(1.4)式を用いて計算する。このとき、年間作業時間 $t_C$ を $t_L$ に、遮へい係数 $S_C$ を $S_L$ にそれぞれ置き換える。

ここに、

- $t_L$  : 年間居住時間 [ $\text{h/y}$ ]
- $S_L$  : 居住時の遮へい係数 [-]

この際、子どもの外部被ばくの線量換算係数は、成人の線量換算係数を 1.3 倍した値を用いる。

跡地での居住のシナリオのうち、No.17 (成人) 及び No.18 (子ども) の居住中の吸入被ばく線量については、(1.6)式を用いて計算する。このとき、年間作業時間 $t_C$ を $t_L$ に、空气中ダスト濃度 $f_C$ を $f_L$ に、呼吸量 $B_C$ を $B_L$ にそれぞれ置き換える。

ここに、

- $f_L$  : 居住時の空气中ダスト濃度 [ $\text{kg/m}^3$ ]
- $B_L$  : 居住者の呼吸量 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

跡地での居住のシナリオのうち、No.19（子ども）の居住中の直接経口による内部被ばく線量については、(1.7)式を用いて計算する。このとき、経口摂取率 $d_C$ を $d_L$ に置き換える。

ここに、

$d_L$  : 居住時の経口摂取率（子ども） [kg/h]

### ③ 跡地での農作業（被ばく経路 No.20 及び No.21）

No.20 及び No.21 の跡地での農作業のシナリオにおいて用いる農地土壌中の放射性核種の放射能濃度は、(1.1)式を用いて計算する。このとき、掘削深さ $T_U$ を $T_A$ に置き換える。

ここに、

$T_A$  : 耕作深さ [m]

跡地での農作業のシナリオのうち、No.20 の農耕作業中の外部被ばく線量については、(1.4)式を用いて計算する。このとき、年間作業時間 $t_C$ を $t_A$ に、遮へい係数 $S_C$ を $S_A$ にそれぞれ置き換える。

ここに、

$t_A$  : 農耕作業時における年間作業時間 [h/y]

$S_A$  : 農耕作業時の遮へい係数 [-]

跡地での農作業のシナリオのうち、No.21 の農耕作業中の粉じん吸入による内部被ばく線量については、(1.6)式を用いて計算する。このとき、年間作業時間 $t_C$ を $t_A$ に、空气中ダスト濃度 $f_C$ を $f_A$ に、呼吸量 $B_C$ を $B_A$ にそれぞれ置き換える。

ここに、

$f_A$  : 農耕作業時の空气中ダスト濃度 [kg/m<sup>3</sup>]

$B_A$  : 農耕作業者の呼吸量 [m<sup>3</sup>/h]

### ④ 跡地での牧畜作業（被ばく経路 No.22 及び No.23）

No.22 及び No.23 の跡地での牧畜作業のシナリオにおいて用いる牧畜作業場所における土壌中の放射性核種の放射能濃度は、③跡地での農作業で求めた農地土壌中の放射性核種の放射能濃度と等しいものとする。

跡地での牧畜作業のシナリオのうち、No.22 の牧畜作業中の外部被ばく線量については、(1.4)式を用いて計算する。このとき、年間作業時間 $t_C$ を $t_F$ に、遮へい係数 $S_C$ を $S_F$ にそれぞれ置き換える。

ここに、

$t_F$  : 牧畜作業時における年間作業時間 [h/y]

$S_F$  : 牧畜作業時の遮へい係数 [-]

跡地での牧畜作業のシナリオのうち、No.23 の牧畜作業中の粉じん吸入による内部被ばく線量については、(1.6)式を用いて計算する。このとき、年間作業時間 $t_C$ を $t_A$ に、空気中ダスト濃度 $f_C$ を $f_F$ に、呼吸量 $B_C$ を $B_F$ にそれぞれ置き換える。

ここに、

- $f_F$  : 牧畜作業時の空気中ダスト濃度 [kg/m<sup>3</sup>]
- $B_F$  : 牧畜作業者の呼吸量 [m<sup>3</sup>/h]

⑤ 跡地で収穫された食物の摂取（被ばく経路 No.24～No.27）

農作物の栽培は処分場の跡地の直上で行われるものとし、土壌に含まれる放射性核種は根を介して農作物に移行するものとして評価する。このとき、農業用水には放射性物質は含まれておらず、土壌中の放射性物質の減衰は放射性崩壊のみとし、農作物中の放射性核種の放射能濃度を次式で計算する。

$$C_{Vk}(i) = T_k(i) \cdot K_N \cdot C_W(i) \cdot \frac{W}{L_D \cdot W_D \cdot H_D \cdot \rho_D} \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t_K) \dots\dots\dots (1.8)$$

ここに、

- $C_{Vk}(i)$  : 農作物  $k$  中の放射性核種  $i$  の放射能濃度 [Bq/g]
- $T_k(i)$  : 土壌から農作物  $k$  への放射性核種  $i$  の移行係数 [(Bq/g-wet 農作物)/(Bq/g-dry 土壌)]
- $K_N$  : 根からの放射性核種  $i$  の吸収割合 [-]

跡地で収穫された食物の摂取のシナリオのうち、No.24（成人）及びNo.25（子ども）の農作物を摂取することによる内部被ばく線量は、次式を用いて計算する。

$$D_{ING\_A}(i) = \sum_k C_{Vk}(i) \cdot Q_k \cdot G_k \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t_{Vk}) \cdot DCF_{ING}(i) \dots\dots\dots (1.9)$$

ここに、

- $D_{ING\_A}(i)$  : 農作物摂取に伴う放射性核種  $i$  による内部被ばく線量 [ $\mu$ Sv/y]
- $Q_k$  : 農作物  $k$  の年間摂取量 [kg/y]
- $G_k$  : 農作物  $k$  の市場係数 [-]
- $t_{Vk}$  : 農作物  $k$  の輸送時間 [y]

ここで、農作物  $k$  は、米、葉菜、非葉菜及び果実に分類して計算する。

跡地で収穫された飼料を家畜が摂取し、その畜産物中の放射性核種の放射能濃度を次式を用いて計算する。このとき、農業用水及び飼育水に使われる用水には放射性物質は含まれていないものとし、跡地で収穫された飼料中の放射性核種  $i$  の放射能濃度は(1.8)式を用

いて計算する。畜産物の種類としては、牛乳、牛肉、豚肉、鶏肉及び鶏卵を想定する。

$$C_{Fn}(i) = T_n(i) \cdot M_F \cdot C_{Vn}(i) \cdot Q_{Vn} \dots\dots\dots(1.10)$$

ここに、

- $C_{Fn}(i)$  : 畜産物  $n$  中の放射性核種  $i$  の放射能濃度  
牛乳 [Bq/L]、牛肉、豚肉、鶏肉及び鶏卵 [Bq/kg]
- $T_n(i)$  : 飼料から畜産物  $n$  中への放射性核種  $i$  の移行係数  
牛乳 [d/L]、牛肉、豚肉、鶏肉及び鶏卵 [d/kg]
- $M_F$  : 放射性核種を含む飼料の混合割合 [-]
- $Q_{Vn}$  : 畜産物  $n$  を生産する家畜の飼料摂取量 [kg-dry/d]

跡地で収穫された食物の摂取のシナリオのうち、No.26（成人）及びNo.27（子ども）の畜産物を摂取することによる内部被ばく線量は、次式を用いて計算する。

$$D_{ING\_F}(i) = \sum_k C_{Fn}(i) \cdot Q_n \cdot G_n \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t_{Fn}) \cdot DCF_{ING}(i) \dots\dots\dots(1.11)$$

ここに、

- $D_{ING\_F}(i)$  : 畜産物摂取に伴う放射性核種  $i$  による内部被ばく線量 [ $\mu$ Sv/y]
- $Q_n$  : 畜産物  $n$  の年間摂取量  
牛乳[L/y]、牛肉、豚肉、鶏肉及び鶏卵 [kg/y]
- $G_n$  : 畜産物  $n$  の市場係数 [-]
- $t_{Fn}$  : 畜産物  $n$  の輸送時間 [y]

## (2) 地下水移行

地下水移行のシナリオは、産業廃棄物処分場からその下にあると想定した帯水層に放射性物質が流入し、その地下水を利用する被ばく経路を想定する。

産業廃棄物処分場からの放射性物質の漏えいは次式により算定する。

$$J(t, i) = \eta_i \cdot C_W(i) \cdot W \cdot \exp(-(\lambda_i + \eta_i) \cdot t) \dots\dots\dots(1.12)$$

$$\eta_i = (R_{IN}/H_D) \cdot Rc(i) \dots\dots\dots(1.13)$$

ここに、

- $J(t, i)$  : 時間  $t$  における放射性核種  $i$  の漏出量 [Bq/y]
- $t$  : 漏出開始後の経過時間 [y]
- $\eta_i$  : 放射性核種  $i$  の漏出率 [1/y]
- $\lambda_i$  : 放射性核種  $i$  の崩壊定数 [1/y]
- $R_{IN}$  : 浸透水量 [m/y]

$H_D$  : 処分場深さ [m]  
 $Rc(i)$  : 放射性核種  $i$  の放出係数 [-]

地下水中での放射性核種の移行速度は次式を用いて評価する。その際、 $x$  方向の移流及び拡散・分散を評価する。

$$\frac{\partial}{\partial t} R_S(i) \cdot C_{GW}(x, t, i) = D_x \cdot \frac{\partial^2 C_{GW}(x, t, i)}{\partial x^2} - U_S \frac{\partial C_{GW}(x, t, i)}{\partial x} - R_S(i) \cdot \lambda_i \cdot C_{GW}(x, t, i)$$

.....(1.14)

$$R_S(i) = 1 + \frac{1 - f_S}{f_S} \cdot Kd_S(i) \cdot \rho_S$$

..... (1.15)

ここに、

$R_S(i)$  : 帯水層における放射性核種  $i$  の遅延係数 [-]  
 $C_{GW}(x, t, i)$  : 位置  $x$ 、時間  $t$  における地下水中の放射性核種  $i$  の放射能濃度 [Bq/m<sup>3</sup>]  
 $U_S$  : 地下水流速 [m/y]  
 $f_S$  : 帯水層空隙率 [-]  
 $\rho_S$  : 帯水層土壌真密度 [kg/m<sup>3</sup>]  
 $Kd_S(i)$  : 帯水層土壌に対する放射性核種  $i$  の分配係数 [m<sup>3</sup>/kg]  
 $D_x$  :  $x$  方向の分散係数 [m<sup>2</sup>/y]  
 $D_x = D_{mx}|U_S| + D_d$  .....(1.16)  
 $D_{mx}$  : 地下水流方向の分散長 [m]  
 $D_d$  : 分子拡散係数 [3.15×10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup>/y]

この放射性物質を含む地下水は、井戸水として飲用する経路 (No.28 及び No.29)、灌漑用水として利用する経路 (No.30 から No.37)、飼育水として利用する経路 (No.38 及び No.39) 及び養殖に利用する経路を想定する。なお、各被ばく経路において被ばく線量が最大となる時点の線量を評価する。

① 地下水利用のうち井戸水 (被ばく経路 No.28 及び No.29)

井戸水中の放射性核種の放射能濃度は、井戸のくみ上げによる周囲の放射性核種を含まない地下水 (非汚染の地下水) の流入・混合を考慮して計算する。

$$C_{WW}(t, i) = C_{GW}(x_W, t, i) \cdot R_W$$

.....(1.17)

ここに、

$C_{WW}(t, i)$  : 時間  $t$  における井戸水中の放射性核種  $i$  の放射能濃度 [Bq/m<sup>3</sup>]

$x_W$  : 処分場下流端から井戸までの距離 [m]  
 $R_W$  : 井戸水の混合割合 [-]

地下水利用のシナリオとして、No.28（成人）及び No.29（子ども）の井戸水の飲用による内部被ばく線量は、次式を用いて計算する。

$$D_{ING\_WW}(t, i) = C_{WW}(t, i) \cdot Q_W \cdot DCF_{ING}(i) \dots\dots\dots (1.18)$$

ここに、

$D_{ING\_WW}(t, i)$  : 放射性核種  $i$  による時間  $t$  における井戸水摂取による内部被ばく線量 [ $\mu\text{Sv/y}$ ]  
 $Q_W$  : 人の年間飲料水摂取量 [ $\text{m}^3/\text{y}$ ]

② 地下水利用のうち灌漑水（被ばく経路 No.30～No.37）

農地には井戸水を灌漑用水として散水するものとし、灌漑用水中の放射性核種は灌漑土壌中に蓄積することを想定する。また、放射性核種の浸透による減衰効果を考慮し、灌漑土壌中の放射性核種の放射能濃度は、次式を用いて計算する。このとき、灌漑用水中の放射性核種の放射能濃度は、井戸水中の放射性核種の放射能濃度に等しいものとする。

$$C_{Sk}(t, i) = F_R \int_0^t \frac{V_{Ik} \cdot C_I(t, i)}{P_k} \cdot \exp(-E_{Lk}(i) \cdot t) dt \dots\dots\dots (1.19)$$

ここに、

$C_{Sk}(t, i)$  : 時間  $t$  における農作物  $k$  を生産する灌漑土壌中の放射性核種  $i$  の放射能濃度 [ $\text{Bq/kg}$ ]  
 $F_R$  : 放射性核種  $i$  の土壌残留係数 [-]  
 $V_{Ik}$  : 農作物  $k$  に対する灌漑水量 [ $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{y}$ ]  
 $C_I(t, i)$  : 時間  $t$  における灌漑用水中の放射性核種  $i$  の放射能濃度 (=  $C_{WW}(t, i)$ ) [ $\text{Bq/m}^3$ ]  
 $P_k$  : 農作物  $k$  を生産する土壌実効表面密度 [ $\text{kg/m}^2$ ]  
 $E_{Lk}(i)$  : 農作物  $k$  を生産する土壌中放射性核種の実効減衰係数 [ $1/\text{y}$ ]  
 $E_{Lk} = \lambda_i + R_{MSk}(i) \dots\dots\dots (1.20)$   
 $R_{MSk}(i)$  : 放射性核種  $i$  の浸透による灌漑土壌からの減衰係数 [ $1/\text{y}$ ]

$$R_{MSk}(i) = \frac{R_{IN} \cdot V_{Ik}}{\alpha \cdot \{f_u \cdot s_{uk} + (1 - f_u) \cdot \rho_u \cdot Kd_u(i)\}} \dots\dots\dots (1.21)$$

$\alpha$  : 実効土壌深さ [m]  
 $f_u$  : 灌漑土壌空隙率 [-]  
 $s_{uk}$  : 土壌水分飽和度 [-]

- $\rho_u$  : 灌漑土壌真密度 [kg/m<sup>3</sup>]  
 $Kd_u(i)$  : 灌漑土壌における放射性核種  $i$  の分配係数 [m<sup>3</sup>/kg]

放射性核種を含む井戸水を灌漑用水として用いた農地（灌漑土壌）において、No.30 の農耕作業を行う者の外部被ばく線量は、次式を用いて計算する。

$$D_{EXT}(t, i) = C_{Sk}(t, i) \cdot S_I \cdot t_I \cdot DCF_{EXT}(i) \dots \dots \dots (1.22)$$

ここに、

- $D_{EXT}(t, i)$  : 時間  $t$  における放射性核種  $i$  による外部被ばく線量 [μSv/y]  
 $S_I$  : 農耕作業時の遮へい係数 [-]  
 $t_I$  : 農耕作業時における年間作業時間 [h/y]

また、No.31 の農耕作業を行う者の粉じん吸入による内部被ばく線量は、次式を用いて計算する。

$$D_{INH}(t, i) = C_{Sk}(t, i) \cdot f_I \cdot B_I \cdot t_I \cdot DCF_{INH}(i) \dots \dots \dots (1.23)$$

ここに、

- $D_{INH}(t, i)$  : 時間  $t$  における放射性核種  $i$  による吸入内部被ばく線量 [μSv/y]  
 $f_I$  : 農耕作業時の空气中ダスト濃度 [kg/m<sup>3</sup>]  
 $B_I$  : 農耕作業者の呼吸量 [m<sup>3</sup>/h]

放射性核種を含む井戸水を灌漑用水として用いた農地（灌漑土壌）において、No.32 の牧畜作業を行う者の外部被ばく線量は、(1.22)式を用いて計算する。このとき、年間作業時間  $t_I$  を  $t_B$  に、遮へい係数  $S_I$  を  $S_B$  にそれぞれ置き換える。

ここに、

- $t_B$  : 牧畜作業時における年間作業時間 [h/y]  
 $S_B$  : 牧畜作業時の遮へい係数 [-]

また、No.33 の牧畜作業を行う者の粉じん吸入による内部被ばく線量は、(1.23)式を用いて計算する。このとき、年間作業時間  $t_I$  を  $t_B$  に、空气中ダスト濃度  $f_I$  を  $f_B$  に、呼吸量  $B_I$  を  $B_B$  にそれぞれ置き換える。

ここに、

- $B_B$  : 牧畜作業者の呼吸量 [m<sup>3</sup>/h]

放射性核種を含む井戸水を灌漑用水として用いた農地（灌漑土壌）において作られた農作物（米、葉菜、非葉菜、果実）中の放射性核種の放射能濃度は、次式によって計算する。

このとき、農作物が灌漑土壌からの根を介して放射性物質を吸収することを想定し ((1.24)式右辺第一項)、さらに、葉菜については、灌漑水の葉面沈着を考慮し ((1.24)式右辺第二項)、計算する。

$$C_{VIk}(t, i) = T_k(i) \cdot C_{Sk}(t, i) + \frac{C_I(t, i) \cdot V_{Ik} \cdot F_{IEk} \cdot (1 - \exp(-\lambda_{ei} \cdot T_I))}{\lambda_{ei} \cdot Y_{Bk}} \dots\dots\dots (1.24)$$

ここに、

- $C_{VIk}(t, i)$  : 時間  $t$  における農作物  $k$  中の放射性核種  $i$  の放射能濃度 [Bq/kg]
- $Y_{Bk}$  : 農作物  $k$  の栽培密度 [kg/m<sup>2</sup>]
- $F_{IEk}$  : 放射性核種の農作物  $k$  表面への沈着割合 [-]
- $T_I$  : 灌漑水年間成育期間 [y]
- $\lambda_{ei}$  : 沈着した放射性核種  $i$  の実効減衰係数 [1/y]
- $\lambda_{ei} = \lambda_i + \lambda_{wi} \dots\dots\dots (1.25)$
- $\lambda_{wi}$  : 植物表面に沈着した放射性核種  $i$  に対する weathering 効果による除去係数 [1/y]

農地（灌漑土壌）で収穫された農作物の摂取のシナリオのうち、No.34（成人）及び No.35（子ども）の農作物を摂取することによる内部被ばく線量は、(1.9)式を用いて計算する。このとき、農作物中の放射性核種  $i$  の放射能濃度  $C_{V_k}(i)$  を  $C_{VIk}(t, i)$  に置き換える。

放射性核種を含む井戸水を灌漑用水として用いた農地（灌漑土壌）において生産された飼料（牧草）を家畜（乳牛、肉牛、豚、鶏）が摂取し、畜産物（牛乳、牛肉、豚肉、鶏肉、鶏卵）中に蓄積される放射性核種  $i$  の放射能濃度を、次式を用いて計算する。

$$C_{FIn}(t, i) = T_n(i) \cdot C_{VIk}(t, i) \cdot Q_{Vn} \cdot M_F \dots\dots\dots (1.26)$$

ここに、

- $C_{FIn}(t, i)$  : 時間  $t$  における畜産物  $n$  中の放射性核種  $i$  の放射能濃度  
牛乳 [Bq/L]、牛肉、豚肉、鶏肉、鶏卵 [Bq/kg]

農地（灌漑土壌）で生産された飼料（牧草）を摂取した家畜の畜産物（牛乳、牛肉、豚肉、鶏肉、鶏卵）を摂取することによるシナリオのうち、No.36（成人）及び No.37（子ども）が畜産物を摂取することによる内部被ばく線量は、(1.11)式を用いて計算する。このとき、畜産物中の放射性核種  $i$  の放射能濃度  $C_{F_n}(i)$  を  $C_{FIn}(t, i)$  に置き換える。

③ 地下水利用のうち飼育水（被ばく経路 No.38 及び No.39）

放射性核種を含む井戸水を飼育水として用い、その飼育水を家畜（乳牛、肉牛、豚、鶏）

が摂取し、畜産物（牛乳、牛肉、豚肉、鶏肉、鶏卵）中に蓄積される放射性核種  $i$  の放射能濃度を、次式を用いて計算する。このとき、飼育水中の放射性核種の放射能濃度は、井戸水中の放射性核種の放射能濃度に等しいものとする。

$$C_{FWn}(t, i) = C_{FW}(t, i) \cdot Q_{wn} \cdot T_{wn}(i) \dots\dots\dots(1.27)$$

ここに、

- $C_{FWn}(t, i)$  : 時間  $t$  における畜産物  $n$  中の放射性核種  $i$  の放射能濃度  
牛乳 [Bq/L]、牛肉、豚肉、鶏肉、鶏卵 [Bq/kg]
- $C_{FW}(t, i)$  : 時間  $t$  における家畜の飼育水中の放射性核種  $i$  の放射能濃度  
[Bq/m<sup>3</sup>]  
(=  $C_{WW}(t, i)$ )
- $Q_{wn}$  : 畜産物  $n$  の飼育水摂取量 [L/d]
- $T_{wn}(i)$  : 放射性核種  $i$  の飼育水から畜産物  $n$  への移行係数  
牛乳 [d/L]、牛肉、豚肉、鶏肉、鶏卵 [d/kg]

放射性核種を含む井戸水を飼育水として用い、その飼育水を摂取した家畜から生産される畜産物（牛乳、牛肉、豚肉、鶏肉、鶏卵）を摂取するシナリオのうち、No.38（成人）及びNo.39（子ども）が畜産物を摂取することによる内部被ばく線量は、(1.11)式を用いて計算する。このとき、畜産物  $n$  中の放射性核種  $i$  の放射能濃度  $C_{Fn}(i)$  を  $C_{FWn}(t, i)$  に置き換える。

④ 地下水利用のうち養殖水（被ばく経路 No.40 及び No.41）

養殖淡水産物中の放射性核種の放射能濃度は、養殖水中の放射性核種の放射能濃度に依存し、両者の放射能濃度の間に平衡関係が成立しているものとする。このとき、養殖水中の放射性核種の放射能濃度は、井戸水中の放射性核種の放射能濃度  $C_{WW}(t, i)$  と養殖水の地下水利用率を用い、次式を用いて計算する。

$$C_{Sm}(t, i) = C_{WW}(t, i) \cdot R_{SW} \cdot T_{Sm}(i) \dots\dots\dots(1.28)$$

ここに、

- $C_{Sm}(t, i)$  : 時間  $t$  における養殖淡水産物  $m$  中の放射性核種  $i$  の放射能濃度  
[Bq/kg]
- $R_{SW}$  : 養殖水の地下水利用率 [-]
- $T_{Sm}(i)$  : 放射性核種  $i$  の養殖淡水産物  $m$  への濃縮係数 [L/kg]

地下水利用のうち養殖水を利用するシナリオとして、No.40（成人）及びNo.41（子ども）の内部被ばく線量は、次式を用いて計算する。

$$D_{ING}(t, i) = \sum_m C_{Sm}(t, i) \cdot Q_m \cdot G_m \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t_{Sm}) \cdot DCF_{ING}(i) \dots\dots\dots(1.29)$$

ここに、

- $D_{ING}(t, i)$  : 時間  $t$  における養殖淡水産物摂取に起因する放射性核種  $i$  による  
内部被ばく線量 [ $\mu\text{Sv/y}$ ]
- $Q_m$  : 養殖淡水産物  $m$  の摂取量 [ $\text{kg/y}$ ]
- $G_m$  : 養殖淡水産物  $m$  の市場係数 [-]
- $t_{Sm}$  : 養殖淡水産物  $m$  の輸送時間 [ $\text{y}$ ]

付表 1.1 放出係数及び分配係数

Appendix table 1.1 Release ratio and distribution coefficients

元素	放出係数	帯水層土壌の分配係数	農耕土壌の分配係数
	—	m <sup>3</sup> /kg	m <sup>3</sup> /kg
	No.11～No.41	No.28～No.41	No.30～No.41
Pb	3.0E-4	2.7E-1	2.2E+1
Po	3.0E-4	1.5E-1	6.6E+0
Ra	3.0E-4	4.9E-1	2.4E+0
Ac	3.0E-4	4.5E-1	5.4E+0
Th	3.0E-4	3.0E+0	8.9E+1
Pa	3.0E-4	5.4E-1	6.6E+0
U	3.0E-4	3.3E-2	4.0E-1

付表 1.2 外部被ばく及び内部被ばくに関するパラメータ

Appendix table 1.2 Parameters on external exposure and internal exposures

パラメータ		建設作業員	居住者		農耕作業者	牧畜作業員
			大人	子ども		
共通	年間作業時間 又は 居住時間 [h/y]	500	8,760	8,760 (1,752) <sup>*</sup>	500	500
土壌直接線による外部被ばく		No.11	No.15	No.16	No.20, No.30	No.22, No.32
	遮へい係数 [-]	0.5	0.2	0.2	1	1
粉じん吸入による内部被ばく		No.13	No.17	No.18	No.21, No.31	No.23, No.33
	ダスト濃度 [g/m <sup>3</sup> ]	5E-4	6E-6	6E-6	5E-4	5E-4
	呼吸量 [m <sup>3</sup> /h]	1.2	0.96	0.22	1.2	1.2
	微粒子への放射性物質の濃縮係数 [-]	4	4	4	4	4
直接経口摂取による内部被ばく		No.14	—	No.19	—	—
	経口摂取率 [g/h]	0.01	—	0.02	—	—
	微粒子への放射性物質の濃縮係数 [-]	2	—	2	—	—

※居住者（子ども）の直接経口摂取による内部被ばく（被ばく経路 No.19）では、屋外滞在中（年間の20%）のみに手等に土壌が付着している状態を想定する。

付表 1.3 食物等の摂取による内部被ばくに関するパラメータ

Appendix table 1.3 Parameters on internal exposure related to ingestion of foods etc.

パラメータ	飲料水		農作物		畜産物		淡水産物	
	成人	子ども	成人	子ども	成人	子ども	成人	子ども
	No.28	No.29	No.24 No.34	No.25 No.35	No.26 No.36 No.38	No.27 No.37 No.39	No.40	No.41
年間摂取量	水 0.61 m <sup>3</sup> /y	水 0.1 m <sup>3</sup> /y	米 71 kg/y 葉菜 12 kg/y 非葉菜 45 kg/y 果実 22 kg/y	米 25 kg/y 葉菜 5 kg/y 非葉菜 23 kg/y 果実 22 kg/y	牛乳 44 L/y 牛肉 8 kg/y 豚肉 9 kg/y 鶏肉 7 kg/y 鶏卵 16 kg/y	牛乳 29 L/y 牛肉 3 kg/y 豚肉 4 kg/y 鶏肉 5 kg/y 鶏卵 10 kg/y	魚 0.7 kg/y	魚 0.33kg/y
市場係数 [-]	—	—	1	1	1	1	1	1
輸送時間 [d]	—	—	0	0	0	0	0	0

付表 1.4 外部被ばく線量換算係数

Appendix table 1.4 Dose conversion factors for external exposure

放射性核種		作業者及び居住者（成人） <sup>※1</sup>	居住者（子ども） <sup>※2</sup>
		( $\mu$ Sv/h) / (Bq/g)	( $\mu$ Sv/h) / (Bq/g)
		No.11, No.15, No.20, No.22, No.30, No.32	No.16
ウラン系列	<sup>238</sup> U	2.7E-4	3.5E-4
	<sup>234</sup> Th	7.2E-3	9.4E-3
	<sup>234</sup> U	2.7E-5	3.5E-5
	<sup>230</sup> Th	9.0E-5	1.2E-4
	<sup>226</sup> Ra	5.0E-1	6.5E-1
	<sup>210</sup> Pb	1.8E-4	2.3E-4
	<sup>210</sup> Po	2.5E-6	3.3E-6
アクチニウム系列	<sup>235</sup> U	5.1E-2	6.6E-2
	<sup>231</sup> Pa	1.1E-2	1.4E-2
	<sup>227</sup> Ac	2.1E-4	2.7E-4
	<sup>227</sup> Th	3.1E-2	4.0E-2
	<sup>223</sup> Ra	8.7E-2	1.1E-1

※1 ウランクリアランス報告書に準じ、渡邊ら<sup>2</sup>が算定した値

※2 子どもの外部被ばく線量換算係数は作業者及び居住者（成人）の値を 1.3 倍したもの

付表 1.5 内部被ばく線量換算係数

Appendix table 1.5 Dose conversion factors for internal exposures

放射性核種		作業者		居住者（成人）		居住者（子ども）	
		吸入 <sup>※1</sup>	経口 <sup>※1</sup>	吸入 <sup>※2</sup>	経口 <sup>※2</sup>	吸入 <sup>※2</sup>	経口 <sup>※2</sup>
		Sv/Bq	Sv/Bq	Sv/Bq	Sv/Bq	Sv/Bq	Sv/Bq
		No.13, No.21, No.23, No.31, No.33	No.14	No.17	No.24, No.26, No.28, No.34, No.36, No.38, No.40	No.18	No.19, No.25, No.27, No.29, No.35, No.37, No.39, No.41
ウラン系列	<sup>238</sup> U	5.7E-6	4.4E-8	2.9E-6	4.5E-8	9.4E-6	1.2E-7
	<sup>234</sup> Th	5.8E-9	3.4E-9	7.7E-9	3.4E-9	3.1E-8	2.5E-8
	<sup>234</sup> U	6.8E-6	4.9E-8	3.5E-6	4.9E-8	1.1E-5	1.3E-7
	<sup>230</sup> Th	2.8E-5	2.1E-7	1.4E-5	2.1E-7	3.5E-5	4.1E-7
	<sup>226</sup> Ra	2.2E-6	2.8E-7	3.5E-6	2.8E-7	1.1E-5	9.6E-7
	<sup>210</sup> Pb	1.2E-6	6.8E-7	1.2E-6	6.9E-7	4.0E-6	3.6E-6
	<sup>210</sup> Po	2.2E-6	2.4E-7	3.3E-6	1.2E-6	1.1E-5	8.8E-6
アクチニウム系列	<sup>235</sup> U	6.1E-6	4.6E-8	3.1E-6	4.7E-8	1.0E-5	1.3E-7
	<sup>231</sup> Pa	8.9E-5	7.1E-7	1.4E-4	7.1E-7	2.3E-4	1.3E-6
	<sup>227</sup> Ac	6.3E-4	1.1E-6	5.5E-4	1.1E-6	1.6E-3	3.1E-6
	<sup>227</sup> Th	7.6E-6	8.9E-9	1.0E-5	8.8E-9	3.0E-5	7.0E-8
	<sup>223</sup> Ra	5.7E-6	1.0E-7	7.4E-6	1.0E-7	2.1E-5	1.1E-6

※1 ウランクリアランス報告書に記載の値（ICRP Publ.68）

※2 ウランクリアランス報告書に準じ、ICRP Publ.72 の値。値の選択方法等は武田ら<sup>3</sup>を参照。

付表 1.6 土壌から農作物への移行係数

Appendix table 1.6 Transfer coefficients from soil to agricultural products

元素	米			葉菜、非葉菜、果実			飼料		
	(Bq/g-wet)/(Bq/g-dry)			(Bq/g-wet)/(Bq/g-dry)			(Bq/g-wet)/(Bq/g-dry)		
	No.24, No.35	No.25,	No.34,	No.24, No.35	No.25,	No.34,	No.26, No.37, No.38, No.39	No.27,	No.36,
Pb	4.0E-3			2.0E-3			1.0E-1		
Po	2.0E-3			2.0E-3			9.0E-2		
Ra	6.6E-4			4.0E-2			8.0E-2		
Ac	1.0E-3			1.0E-3			4.0E-3		
Th	1.9E-5			1.0E-3			1.1E-2		
Pa	4.0E-2			1.0E-2			1.0E-1		
U	1.1E-3			1.0E-2			2.3E-2		

付表 1.7 飼料・飼育水から畜産物への移行係数及び濃縮係数

Appendix table 1.7 Transfer coefficients and concentration factors from feedstuff and water to animal products

元素	牛乳	牛肉	豚肉	鶏肉	鶏卵	淡水魚
	(Bq/L-wet) / (Bq/L-dry)	(Bq/g-wet) / (Bq/g-dry)	(Bq/g-wet) / (Bq/g-dry)	(Bq/g-wet) / (Bq/g-dry)	(Bq/g-wet) / (Bq/g-dry)	L/kg
	No.26, No.27, No.36, No.37, No.38, No.39	No.26, No.27, No.36, No.37, No.38, No.39	No.26, No.27, No.36, No.37, No.38, No.39	No.26, No.27, No.36, No.37, No.38, No.39	No.26, No.27, No.36, No.37, No.38, No.39	No.40, No.41
Pb	3.0E-4	4.0E-4	7.0E-4	1.2E+0	1.2E+0	3.0E+2
Po	3.4E-4	5.0E-3	5.0E-3	-	-	5.0E+1
Ra	1.3E-3	9.0E-4	3.5E-2	4.8E-1	2.5E-1	5.0E+1
Ac	2.0E-5	2.0E-5	1.0E-2	6.6E-3	1.6E-2	1.5E+1
Th	5.0E-6	1.0E-4	4.6E-3	1.8E-1	1.8E-1	1.0E+2
Pa	5.0E-6	1.0E-3	3.5E-2	4.1E-3	4.1E-3	1.0E+1
U	4.0E-4	3.0E-4	6.2E-2	1.0E+0	1.0E+0	1.0E+1

## 付録 1 の参考文献一覧

- 1 原子力安全委員会放射性廃棄物安全基準専門部会: 主な原子炉施設におけるクリアランスレベルについて. 平成 11 年 3 月 17 日 (1999).
- 2 渡邊正敏ら: ウラン及び TRU 廃棄物のクリアランスレベル評価のための外部被ばく線量換算係数. JAEA-Data/Code 2008-001 (2008).
- 3 武田聖司, 木村英雄: IAEA SRS No.44 の評価手法に準拠した U-234, U-235 及び U-238 のクリアランスレベルの解析. Jpn. J. Health Phys., 45 (4), p.p.342-356 (2010).

## 付録 2

### 本報告におけるクリアランスレベルの算定に係る線量評価の試算に用いたモデルの妥当性検証

本報告における線量評価の試算に用いたモデルは、シミュレーションコード GoldSim<sup>1</sup> を用いて構築した。同モデルは、[付録 1](#) に示した数式に基づき構築しており、そのモデルの妥当性の検証のため、ウランクリアランス報告書<sup>2</sup>において示されている <sup>232</sup>U 及び <sup>236</sup>U を対象としたスラグの埋立処分シナリオにおける線量めやす値 10 $\mu$ Sv/y に相当する放射能濃度の評価結果（付表 2.1）を基に、トレース計算を行った。<sup>232</sup>U 及び <sup>236</sup>U に係る評価に用いたパラメータについては、原典を参照されたい。

ウランクリアランス報告書の計算結果とトレース計算結果との比較を付表 2.2 に示す。本報告における線量評価の試算に用いたモデルでは、地下水利用のシナリオ（No.28 から No.41 まで）に対して放射性物質が産業廃棄物処分場から流出しないことを想定した設定（流出なし）で計算すると、その結果は 0  $\mu$ Sv/y という結果が出るため、同表に計算結果を記載していない。ウランクリアランス報告書において、跡地利用のシナリオ（No.11 から No.27 まで）及び地下水利用のシナリオ（No.28 から No.41 まで）に対して、「処分場跡地利用のシナリオの長期的評価の前提条件として、全く処分場からの放射性核種の漏えいを考慮しないケース」（ケース C）と「処分場跡地利用のシナリオの長期的評価の前提条件として、処分場からの放射性核種の漏えいを現実的に考慮するケース」（ケース B）の値が示されているが、両ケースは上記のように「処分場跡地利用のシナリオ」についてのケースであるので、地下水利用シナリオ（No.28 から No.41 まで）では両ケースについて同じ数値が記載されている。

ウランクリアランス報告書の計算結果とトレース計算の結果は、No.24（跡地利用シナリオー跡地で収穫された食物の摂取ー農作物ー成人）及び No.25（同一子供）を除き、ほぼ一致している。なお、No.24 及び No.25 の計算結果が異なる理由は、パラメータの入力値の違いであることを確認している。

付表 2.1 ウランクリアランス報告書におけるスラグ埋立処分シナリオの評価結果<sup>2</sup>  
 Appendix table 2.1 Evaluation results of clearance scenario of disposal of slag as industrial waste described in uranium clearance report by the Nuclear Safety Commission of Japan

表2 スラグの埋立処分のシナリオの線量のめやす値に相当する放射能濃度 (1/4)

クリアランスレベルを算出するための線量のめやす値に相当する放射能濃度 (Bq/g)												
被ばく線源	埋立										跡地利用	
	積込み作業				運搬作業		埋立作業				建設作業	
被ばく形態	廃棄物										廃棄物混合土壌	
	外部 直接線	皮膚	内部 粉塵吸入	内部 直接線	外部 直接線	内部 粉塵吸入	外部 直接線	皮膚	内部 粉塵吸入	内部 直接線	外部 直接線	
被ばく者	作業者				運転手		作業者				作業者	
放射性核種/経路No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	U232	1.2E+01	1.1E+04	3.8E+00	6.0E+01	5.4E+00	-	3.1E+00	1.1E+04	3.8E+00	6.0E+01	5.9E+00
2	U-236(*1)	4.0E+05	1.3E+07	3.3E+01	5.4E+02	1.8E+05	-	9.6E+04	1.3E+07	3.3E+01	5.4E+02	1.8E+05
3	U-236(*2)	4.0E+05	1.3E+07	3.3E+01	5.4E+02	1.8E+05	-	9.6E+04	1.3E+07	3.3E+01	5.4E+02	1.8E+05
4	U-236(*3)	4.0E+05	1.3E+07	3.3E+01	5.4E+02	1.8E+05	-	9.6E+04	1.3E+07	3.3E+01	5.4E+02	2.0E+03

(\*1):放射性核種の漏えいなし、子孫核種が生成しないとしたケース(ケースA)  
 (\*2):放射性核種の漏えいあり、子孫核種の生成を考慮したケース(ケースB)  
 (\*3):放射性核種の漏えいなし、子孫核種の生成を考慮したケース(ケースC)

表2 スラグの埋立処分のシナリオの線量のめやす値に相当する放射能濃度 (2/4)

クリアランスレベルを算出するための線量のめやす値に相当する放射能濃度 (Bq/g)												
被ばく線源	跡地利用											
	建設作業				跡地での居住				跡地での農作業			
被ばく形態	廃棄物混合土壌											
	皮膚	内部 粉塵吸入	内部 直接線	外部 直接線	外部 直接線	内部 粉塵吸入	内部 粉塵吸入	内部 直接線	外部 直接線	内部 粉塵吸入	内部 直接線	外部 直接線
被ばく者	成人				子供		成人				子供	
放射性核種/経路No.	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
1	U232	2.6E+04	9.2E+00	3.8E+02	8.5E-01	6.5E-01	6.5E+01	8.8E+01	4.9E+00	4.9E+00	1.5E+01	4.9E+00
2	U-236(*1)	3.2E+07	7.9E+01	1.3E+03	2.6E+04	2.0E+04	9.3E+02	1.3E+03	6.6E+01	1.5E+05	1.3E+02	1.5E+05
3	U-236(*2)	3.2E+07	7.9E+01	1.3E+03	2.6E+04	2.0E+04	9.3E+02	1.3E+03	6.6E+01	1.5E+05	1.3E+02	1.5E+05
4	U-236(*3)	9.5E+06	7.9E+01	1.3E+03	2.9E+02	2.2E+02	9.3E+02	1.3E+03	6.6E+01	1.7E+03	1.3E+02	1.7E+03

(\*1):放射性核種の漏えいなし、子孫核種が生成しないとしたケース(ケースA)  
 (\*2):放射性核種の漏えいあり、子孫核種の生成を考慮したケース(ケースB)  
 (\*3):放射性核種の漏えいなし、子孫核種の生成を考慮したケース(ケースC)

表2 スラグの埋立処分のシナリオの線量のめやす値に相当する放射能濃度 (3/4)

クリアランスレベルを算出するための線量のめやす値に相当する放射能濃度 (Bq/g)												
被ばく線源	跡地利用						地下水移行					
	跡地での牧畜作業		跡地で収穫された食物の摂取				井戸水		地下水利用			
被ばく形態	廃棄物混合土壌											
	農作物		畜産物		飲料水		灌漑した農地		灌漑した牧場		灌漑した牧場	
被ばく者	粉塵吸入				摂取		摂取		直接線		粉塵吸入	
	牧畜作業者		消費者		消費者		消費者		農作業者		牧畜作業者	
放射性核種/経路No.	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	
1	U232	1.5E+01	6.1E+01	4.1E+01	2.2E+02	1.5E+02	4.0E+02	9.7E+02	3.5E+03	1.1E+04	3.5E+03	1.1E+04
2	U-236(*1)	1.3E+02	4.0E+02	2.6E+02	1.4E+03	9.1E+02	2.4E+03	5.3E+03	3.6E+07	3.1E+04	3.6E+07	3.1E+04
3	U-236(*2)	1.3E+02	4.0E+02	2.6E+02	1.4E+03	9.1E+02	2.4E+03	5.3E+03	4.0E+06	3.1E+04	4.0E+06	3.1E+04
4	U-236(*3)	1.3E+02	4.0E+02	2.6E+02	1.4E+03	9.1E+02	2.4E+03	5.3E+03	4.0E+06	3.1E+04	4.0E+06	3.1E+04

(\*1):放射性核種の漏えいなし、子孫核種が生成しないとしたケース(ケースA)  
 (\*2):放射性核種の漏えいあり、子孫核種の生成を考慮したケース(ケースB)  
 (\*3):放射性核種の漏えいなし、子孫核種の生成を考慮したケース(ケースC)

表2 スラグの埋立処分のシナリオの線量のめやす値に相当する放射能濃度 (4/4)

クリアランスレベルを算出するための線量のめやす値に相当する放射能濃度 (Bq/g)												
被ばく線源	スラグの埋立処分のシナリオに係る結果								最小値となる経路			
	地下水移行				地下水利用				最小値	No.	経路	
被ばく形態	農作物		畜産物		飼育水		養殖水					
	被ばく者	内部				外部						
粉塵吸入				摂取								
放射性核種/経路No.	消費者				消費者							
	成人	子供	成人	子供	成人	子供	成人	子供				
1	U232	7.2E+02	6.8E+02	2.7E+03	1.9E+03	1.8E+04	1.3E+04	1.3E+05	1.1E+05	6.5E-01	16	跡地(居住-外部-子供)
2	U-236(*1)	2.5E+03	1.8E+03	1.3E+04	8.5E+03	1.1E+05	6.9E+04	8.4E+05	6.4E+05	3.3E+01	3.9	埋立(積込み-吸入、埋立-吸入)
3	U-236(*2)	2.5E+03	1.8E+03	1.3E+04	8.5E+03	1.1E+05	6.9E+04	8.4E+05	6.4E+05	3.3E+01	3.9	埋立(積込み-吸入、埋立-吸入)
4	U-236(*3)	2.5E+03	1.8E+03	1.3E+04	8.5E+03	1.1E+05	6.9E+04	8.4E+05	6.4E+05	3.3E+01	3.9	埋立(積込み-吸入、埋立-吸入)

(\*1):放射性核種の漏えいなし、子孫核種が生成しないとしたケース(ケースA)  
 (\*2):放射性核種の漏えいあり、子孫核種の生成を考慮したケース(ケースB)  
 (\*3):放射性核種の漏えいなし、子孫核種の生成を考慮したケース(ケースC)

付表 2.2 スラグの埋立処分シナリオ評価のトレース計算結果 ( $^{232}\text{U}$  及び  $^{236}\text{U}$ )

Appendix table 2.2 Trace calculation of clearance scenario of disposal of slag as industrial waste ( $^{232}\text{U}$  and  $^{236}\text{U}$ )

被ばく経路 No.	ウランクリアランス報告書 <sup>2</sup>			トレース計算の結果		
	線量めやす値 10 $\mu\text{Sv/y}$ に相当する 放射能濃度 [Bq/g]			線量めやす値 10 $\mu\text{Sv/y}$ に相当する 放射能濃度 [Bq/g]		
	$^{232}\text{U}$	$^{236}\text{U}$ (漏えいあり)	$^{236}\text{U}$ (漏えいなし)	$^{232}\text{U}$	$^{236}\text{U}$ (漏えいあり)	$^{236}\text{U}$ (漏えいなし)
No.11	5.9E+00	1.8E+05	2.0E+03	5.9E+00	1.8E+05	2.1E+03
No.12	2.6E+04	3.2E+07	9.5E+06	2.6E+04	3.2E+07	9.5E+06
No.13	9.2E+00	7.9E+01	7.9E+01	9.2E+00	7.9E+01	7.9E+01
No.14	3.8E+02	1.3E+03	1.3E+03	1.4E+02	1.3E+03	1.3E+03
No.15	8.5E-01	2.6E+04	2.9E+02	8.5E-01	2.6E+04	3.0E+02
No.16	6.5E-01	2.0E+04	2.2E+02	6.5E-01	2.0E+04	2.3E+02
No.17	6.5E+01	9.3E+02	9.3E+02	6.5E+01	9.3E+02	9.3E+02
No.18	8.8E+01	1.3E+03	1.3E+03	8.8E+01	1.3E+03	1.3E+03
No.19	4.9E+00	6.6E+01	6.6E+01	4.9E+00	6.6E+01	6.6E+01
No.20	4.9E+00	1.5E+05	1.7E+03	4.9E+00	1.5E+05	1.8E+03
No.21	1.5E+01	1.3E+02	1.3E+02	1.5E+01	1.3E+02	1.3E+02
No.22	4.9E+00	1.5E+05	1.7E+03	4.9E+00	1.5E+05	1.8E+03
No.23	1.5E+01	1.3E+02	1.3E+02	1.5E+01	1.3E+02	1.3E+02
No.24	6.1E+01	4.0E+02	4.0E+02	1.7E+01	1.2E+02	1.2E+02
No.25	4.1E+01	2.6E+02	2.6E+02	1.1E+01	7.3E+01	7.3E+01
No.26	2.2E+02	1.4E+03	1.4E+03	2.0E+02	1.4E+03	1.4E+03
No.27	1.5E+02	9.1E+02	9.1E+02	1.4E+02	9.1E+02	9.1E+02
No.28	4.0E+02	2.4E+03	2.4E+03	4.4E+02	2.4E+03	
No.29	9.7E+02	5.3E+03	5.3E+03	1.1E+03	5.3E+02	
No.30	3.5E+03	4.0E+06	4.0E+06	3.5E+03	4.1E+06	
No.31	1.1E+04	3.1E+04	3.1E+04	1.1E+04	3.1E+04	
No.32	3.5E+03	4.0E+06	4.0E+06	3.5E+03	4.1E+06	
No.33	1.1E+04	3.1E+04	3.1E+04	1.1E+04	3.1E+04	
No.34	7.2E+02	2.5E+03	2.5E+03	7.0E+02	2.5E+03	
No.35	6.8E+02	1.8E+03	1.8E+03	6.1E+02	1.8E+03	
No.36	2.7E+03	1.3E+04	1.3E+04	2.9E+03	1.3E+04	
No.37	1.9E+03	8.5E+03	8.5E+03	2.1E+03	8.6E+03	
No.38	1.8E+04	1.1E+05	1.1E+05	2.0E+04	1.1E+05	
No.39	1.3E+04	6.9E+04	6.9E+04	1.4E+04	6.9E+04	
No.40	1.3E+05	8.4E+05	8.4E+05	1.5E+05	8.4E+05	
No.41	1.1E+05	6.4E+05	6.4E+05	1.1E+05	6.5E+05	
最小値	6.5E-01	6.6E+01	6.6E+01	6.5E-01	6.6E+01	6.6E+01
最小被ばく経路	No.16	No.19	No.19	No.16	No.19	No.19

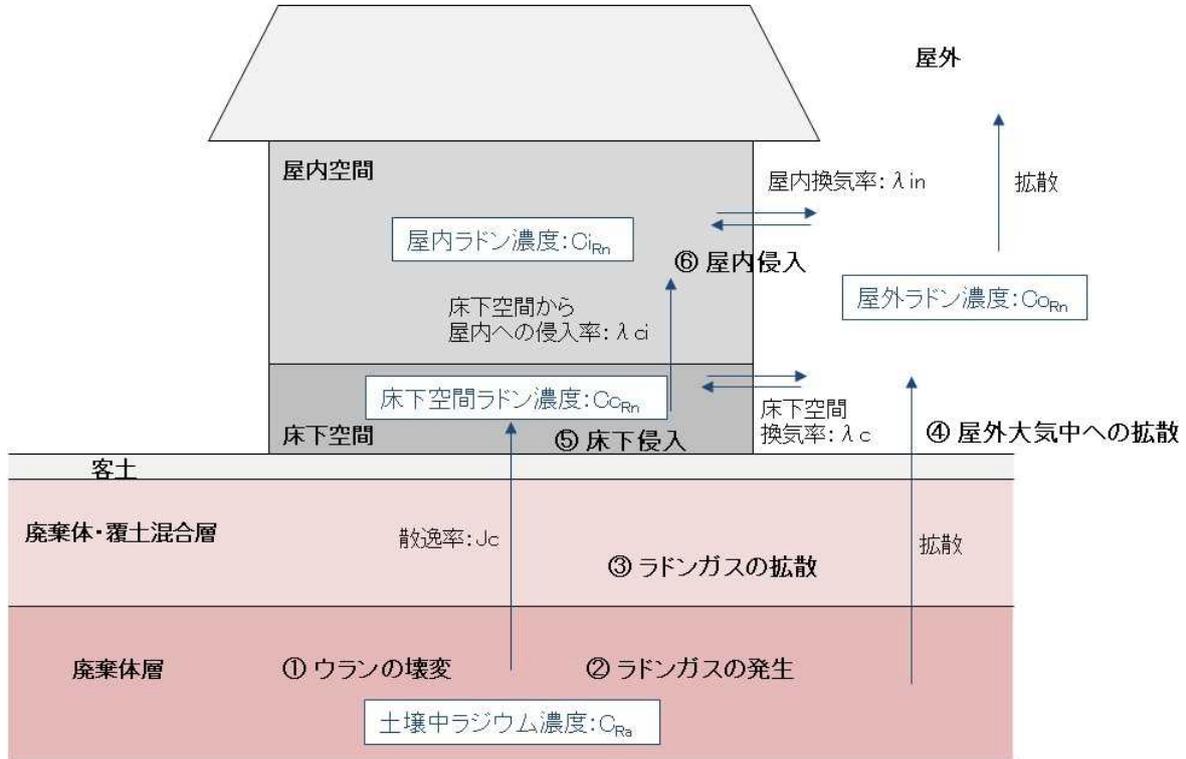
## 付録 2 の参考文献一覧

- 1 GoldSim Technology Group LLC: GoldSim User's Guide, Version 12.1, June 2018 (2018).
- 2 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. 平成 21 年 10 月 5 日 (2009).

付録 3

本報告におけるラドンによる被ばくの線量評価の試算に用いたモデル及びパラメータ

本報告におけるラドンによる被ばくの線量評価は、JAEA が開発したモデル及びパラメータ<sup>1</sup>を用いて試算を行った。



付図 3.1 ラドンによる被ばくの線量評価の試算に用いたモデルの概念図

Appendix figure 3.1 Illustration of calculation model for radon exposure

(1) ラドンガス散逸率に係るモデル及びパラメータ

ウランの子孫核種の一つであるラドン ( $^{222}\text{Rn}$  及び  $^{220}\text{Rn}$ ) は、ウラン廃棄物に含まれるウランの崩壊によって生じたラジウムの放射性壊変により発生する放射性的希ガスである。埋設され土壌中に存在するラジウムから発生したラドンは、土壌中を拡散によって地表面へ移行し、地表面から大気中に散逸する。このときの土壌中から大気中へのラドンの散逸は、次式によって表される。

$$J_w(t) = C_{Ra}(t) \cdot \rho \cdot F \cdot \lambda_{Rn} \cdot \sqrt{\frac{D_w}{\lambda_{Rn}}} \cdot \tanh \frac{X_w}{\sqrt{\frac{D_w}{\lambda_{Rn}}}} \dots\dots\dots (3.1)$$

ここに、

- $J_w(t)$  : 時刻  $t$  におけるラドンの土壌からの散逸率 [ $\text{Bq m}^2 \text{s}^{-1}$ ]
- $C_{Ra}(t)$  : 時刻  $t$  における土壌中のラジウムの放射能濃度 [ $\text{Bq/kg}$ ]

- $\rho$  : 土壌のかさ密度 [kg/m<sup>3</sup>]
- $F$  : ラドンの土壌からの散逸能 [-]
- $\lambda_{Rn}$  : ラドンの崩壊定数 [1/s]
- $D_w$  : ラドンの土壌中の拡散係数 [m<sup>2</sup>/s]
- $X_w$  : 発生源の厚さ [m]

本評価では、ラドンの発生源を、廃棄体層、廃棄体・覆土混合層の2層を想定している。廃棄体・覆土混合層とは、地表面からの掘削を想定し、覆土と廃棄体とが混合された状態を想定するものであり、その厚さについて次式の関係が成り立つ。

$$X_1 = H_w - (H_u - H_c) \dots\dots\dots (3.2)$$

$$X_2 = H_u \dots\dots\dots (3.3)$$

ここに、

- $X_1$  : 廃棄体層の厚さ [m]
- $X_2$  : 廃棄体・覆土混合層の厚さ [m]
- $H_w$  : 埋設当初の廃棄体層の厚さ [m]
- $H_u$  : 掘削深さ [m]
- $H_c$  : 覆土の厚さ [m]

廃棄物層からの散逸率を $J_1(t)$ 、混合層からの散逸率を $J_2(t)$ とすると、(3.1)式より、以下の式により求める。

$$J_1(t) = C_{Ra1}(t) \cdot \rho_1 \cdot F_1 \cdot \lambda_{Rn} \cdot \sqrt{\frac{D_1}{\lambda_{Rn}}} \cdot \tanh \frac{X_1}{\sqrt{\frac{D_1}{\lambda_{Rn}}}} \dots\dots\dots (3.4)$$

$$J_2(t) = C_{Ra2}(t) \cdot \rho_2 \cdot F_2 \cdot \lambda_{Rn} \cdot \sqrt{\frac{D_2}{\lambda_{Rn}}} \cdot \tanh \frac{X_2}{\sqrt{\frac{D_2}{\lambda_{Rn}}}} \dots\dots\dots (3.5)$$

ここに、

- $C_{Ra1}(t)$  : 時刻  $t$  における廃棄体層中のラジウムの放射能濃度 [Bq/kg]
- $\rho_1$  : 廃棄体層のかさ密度 [kg/m<sup>3</sup>]
- $F_1$  : 廃棄体層の散逸能 [-]
- $D_1$  : ラドンの廃棄体層中の拡散係数 [m<sup>2</sup>/s]
- $C_{Ra2}(t)$  : 時刻  $t$  における廃棄体・覆土混合層中のラジウムの放射能濃度 [Bq/kg]
- $\rho_2$  : 廃棄体・覆土混合層のかさ密度 [kg/m<sup>3</sup>]

- $F_2$  : ラドンの廃棄体・覆土混合層の散逸能 [-]
- $D_2$  : ラドンの廃棄体・覆土混合層中の拡散係数 [m<sup>2</sup>/s]

武田ら<sup>1</sup>は、混合層の上に客土を想定し大気中へのラドンの散逸率を求めているが、本報告では、客土を想定せず、次式を用いて大気中へのラドンの散逸率を求める。

$$J_c(t) = J_1(t) \cdot \exp\left(-\frac{X_2}{\sqrt{\frac{D_2}{\lambda_{Rn}}}}\right) + J_2(t) \quad \dots\dots\dots(3.6)$$

ここに、

$J_c(t)$  : 時刻  $t$  における大気中へのラドン散逸率 [Bq m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>]

付表 3.1 にラドンガス散逸率評価に係るパラメータを示す。

付表 3.1 ラドンガス散逸率評価に係るパラメータ

Appendix table 3.1 Parameters in calculation for dissipation ratio of radon gas

パラメータ	単位	設定値
埋設された廃棄物の見かけ密度	kg/m <sup>3</sup>	2000
散逸能	-	0.2
ラドン崩壊定数	s <sup>-1</sup>	2.1E-06
拡散係数	m <sup>2</sup> /s	2.0E-06
発生源長さ	m	564

(2) 屋外大気中のラドンの放射能濃度の算定に係るモデル及びパラメータ

地表面から散逸したラドンから、屋外大気中のラドンの放射能濃度は、次式によって求める。

$$\frac{\partial Co_{Rn}(t)}{\partial t} = \frac{J_c(t)}{H} - \left(\lambda_{Rn} + \frac{U}{a}\right) \cdot Co_{Rn}(t) \quad \dots\dots\dots(3.7)$$

ここに、

- $Co_{Rn}(t)$  : 時刻  $t$  における屋外大気中のラドンの放射能濃度 [Bq/m<sup>3</sup>]
- $H$  : 評価高さ [m]
- $U$  : 風速 [m/s]
- $a$  : 発生源長さ（風向方向） [m]

ここで、 $U/a = \lambda_U$ とする。また、(3.6)式に示すように、 $J_c(t)$ において時間依存するパラ

メータはラジウムの放射能濃度のみであるため、ラドンの半減期に比べて時間変化が少ないものと仮定し、定数とみなす。この仮定のもと、 $t = 0$ のとき $C_{oRn} = 0$ とし、(3.7)式を $C_{oRn}(t)$ について解くと、次式のように表せる。

$$C_{oRn}(t) = \frac{J_c(t)}{H \cdot (\lambda_{Rn} + \lambda_U)} \{1 - e^{-(\lambda_{Rn} + \lambda_U) \cdot t}\} \dots\dots\dots (3.8)$$

付表 3.2 に屋外大気中のラドンの放射能濃度評価に係るパラメータを示す。

付表 3.2 屋外大気中のラドンの放射能濃度評価に係るパラメータ

Appendix table 3.2 Parameters in calculation for radon radioactivity concentration at outdoor atmosphere

パラメータ	単位	設定値
評価高さ	m	3
風速	m/s	3

(3) 床下空間のラドンの放射能濃度の算定に係るモデル及びパラメータ

床下換気に伴い、床下空間にラドンが侵入することを想定し、床下空間のラドンの放射能濃度は、次式によって求める。

$$C_{cRn}(t) = \frac{J_c(t)}{h_c \cdot (\lambda_{Rn} + \lambda_c)} \{1 - e^{-(\lambda_{Rn} + \lambda_c) \cdot t}\} + C_{oRn}(t) \cdot \frac{\lambda_c}{\lambda_{Rn} + \lambda_c} \dots\dots\dots (3.9)$$

ここに、

- $C_{cRn}(t)$  : 時刻  $t$  における床下空間のラドンの放射能濃度 [Bq/m<sup>3</sup>]
- $\lambda_c$  : 床下空間換気率 [1/s]
- $h_c$  : 床下空間高さ [m]

(3.9)式の右辺第一項は地表面から床下空間へラドンの散逸を、第二項は屋外空間から換気孔を通じた床下空間へのラドンの侵入をそれぞれ表している。

付表 3.3 に床下空間のラドンの放射能濃度評価に係るパラメータを示す。

付表 3.3 床下空間のラドンの放射能濃度評価に係るパラメータ

Appendix table 3.3 Parameters in calculation for radon radioactivity concentration in space under the floor

パラメータ		単位	設定値
換気率	床下空間	s <sup>-1</sup>	9.9E-04
	屋内	s <sup>-1</sup>	1.1E-04
床下空間高さ		m	0.45

(4) 屋内空間のラドンの放射能濃度の算定に係るモデル及びパラメータ

屋内空間へのラドンの侵入について、床下空間から屋内空間への侵入、換気による屋外大気中のラドンの屋内への侵入をそれぞれ想定する。屋内空間のラドンの放射能濃度は、次式によって求める。なお、武田ら<sup>1)</sup>は、屋内空間のラドンの放射能濃度の算定に生活水中のラドンの散逸も考慮しているが、本報告では割愛する。

$$Ci_{Rn}(t) = Cc_{Rn}(i) \cdot \frac{I \cdot h_c}{h_{in}(\lambda_{Rn} + \lambda_{in})} + Co_{Rn}(t) \cdot \frac{\lambda_{in}}{\lambda_{Rn} + \lambda_{in}} \dots\dots\dots (3.10)$$

ここに、

- $Ci_{Rn}(t)$  : 時刻  $t$  における屋内のラドンの放射能濃度 [Bq/m<sup>3</sup>]
- $I$  : 床下空間から屋内へのラドン侵入率 [1/s]
- $h_c$  : 床下空間高さ [m]
- $h_{in}$  : 屋内空間高さ [m]
- $\lambda_{in}$  : 屋内換気率 [1/s]

付表 3.4 に屋内空間のラドンの放射能濃度評価に係るパラメータを示す。

付表 3.4 屋内空間のラドンの放射能濃度評価に係るパラメータ

Appendix table 3.4 Parameters in calculation for radon radioactivity concentration at indoor atmosphere

パラメータ		単位	設定値
床下空間高さ		m	0.45
屋内空間高さ		m	2.5
換気率	床下空間	s <sup>-1</sup>	9.9E-04
	屋内	s <sup>-1</sup>	1.1E-04
床下空間から屋内へのラドン侵入率		s <sup>-1</sup>	1.0E-04

(5) ラドンの吸入による内部被ばくの線量評価に係るモデル及びパラメータ

ラドンの吸入による内部被ばく線量は、次式を用いて求める。

$$D_{Rn}(t) = \{C_{oRn}(t) \cdot R_r \cdot F_o + C_{iRn}(t) \cdot (1 - R_r) \cdot F_i\} \cdot T \cdot K \quad \dots\dots\dots(3.11)$$

ここに、

$D_{Rn}(t)$  : 時刻  $t$  におけるラドン吸入による内部被ばく線量 [Sv/y]

$R_r$  : 居住係数 (屋外にいる割合) [-]

$F_o$  : 屋外平衡ファクタ [-]

$F_i$  : 屋内平衡ファクタ [-]

$T$  : 年間被ばく時間 [h/y]

$K$  : 線量換算係数 [Sv Bq<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup> m<sup>3</sup>]

付表 3.5 にラドンの吸入による内部被ばく線量評価に係るパラメータを示す。

付表 3.5 ラドンの吸入による内部被ばく線量評価に係るパラメータ

Appendix table 3.5 Parameters in dose calculation of internal exposure by inhalation of radon

パラメータ		単位	設定値
平衡ファクタ	屋外	-	0.6
	屋内	-	0.4
被ばく時間		h/y	8760
線量換算係数	屋内	Sv Bq <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> m <sup>3</sup>	9.0E-09
	屋外		9.0E-09

### 付録 3 の参考文献一覧

- 1 武田聖司ら : TRU 核種を含む放射性廃棄物及びウラン廃棄物のトレンチ処分に対する濃度上限値の評価 (受託研究) . JAEA-Research 2008-044, Japan Atomic Energy Agency, March 2008 (2008).

## 執筆者一覧

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ

核燃料廃棄物研究部門

青木 広臣 主任技術研究調査官

室田 健人 技術研究調査官

木嶋 達也 技術研究調査官

市未 高彦 技術研究調査官

山田 憲和 首席技術研究調査官