原著論文

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

武田 聖司^{*1}, 木村 英雄^{*1}

(2010 年 4 月 28 日受理)

(2010 年 7 月 15 日再受理)

Clearance Levels for U-234, U-235 and U-238 Derived on the Basis of Dose Calculation Approach in IAEA Safety Reports Series No. 44

Seiji TAKEDA^{*1} and Hideo KIMURA^{*1}

In IAEA SRS No. 44, clearance levels for radionuclides of natural origin (e. g. U-235 and U-238) are judged to be 1 Bq/g from consideration of the upper end of the worldwide distribution of activity concentration in soil. However, a result of estimating the radiological effect of the clearance level is not shown. In this paper, in order to confirm the radiological effect of the clearance level (1 Bq/g) based on the activity concentration in ubiquitous unmodified soil, we estimate the clearance levels for major radionuclides of U-234, U-235 and U-238 in the solid materials contaminated with uranium on the basis of dose calculation approach for radionuclides of artificial origin in IAEA SRS No. 44, which are generated from the processes of nuclear fuel cycle facilities such as conversion, enrichment and fuel manufacturing. The activity concentrations of U-234, U-235 and U-238 are calculated to be 1.2 Bq/g, 0.53 Bq/g and 1.1 Bq/g respectively for applying effective dose criteria and a skin equivalent dose limit. It is confirmed that the activity concentrations estimated using the dose calculation approach are consistent with the clearance levels of IAEA derived on the basis of the worldwide distribution of activity concentration in soil.

KEY WORDS: Clearance Level, U-234, U-235, U-238, IAEA SRS No. 44, Dose Calculation, Scenario, Model, Parameter.

I 緒 論

原子炉施設等の管理区域から発生する放射性物質のうち、放射性物質として扱う必要がないものを区分するための放射能濃度、いわゆるクリアランスレベルに関する法制度は、経済産業省及び文部科学省の省令として平成 17 年 12 月 1 日に施行された。これらの省令では、原子

炉施設及び核燃料使用施設（照射済燃料及び材料の取り扱い施設）から発生する放射性物質に対するクリアランスが対象であるものの、ウランの転換、濃縮、加工などのウランを取り扱う施設に対するクリアランスレベルは定められていなかった。原子力安全委員会は、クリアランスレベルに関する法制度化に向けて、報告書「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）¹⁾を公表し、ウランクリアランスレベルを提示している。同報告書におけるクリアランスレベルの試算では、ウランクリアランスの対象となる物質の約 90% が金属であることから金属の再利用に関するシナリオを評価対象とし、原子炉施設等のクリアランスレベル試算で使用した評価モデル・パラメータを基本に被ばく線量

^{*1} (独) 日本原子力研究開発機構安全研究センター廃棄物安全研究グループ；茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4 (〒319-1195)

Japan Atomic Energy Agency, Nuclear Safety Research Center,
Waste Safety Research Group; 2-4 Shirane, Shirakata, Tokai-mura,
Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan.
E-mail: takeda.seiji@jaea.go.jp

計算を行い、実効線量基準に対する放射能濃度を推定している。

一方、国際原子力機関（IAEA）は、2004年8月に「Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance」の安全指針²⁾（以下、RS-G-1.7）を出版し、天然起源及び人工起源の放射性核種に対する規制除外、規制免除及びクリアランスレベルとして適用可能な放射能濃度を示している。これらの放射能濃度の算出の考え方や具体的な算出方法は、「Derivation of Activity Concentration Values for Exclusion, Exemption and Clearance」³⁾（以下、SRS No. 44）の安全報告書としてとりまとめられている。SRS No. 44によると、U-235、U-238等の天然起源の放射性核種に対しては、世界的な土壤中の放射能濃度分布のデータを基に規制除外の概念から、クリアランスのために適用できる放射能濃度を1 Bq/gと提示しているが、被ばく線量計算をベースとした放射能濃度の導出を行っていない。

わが国におけるウランクリアランスの対象物は、精錬後の転換、濃縮、再転換、加工の工程においてU-234、U-235、U-238等による汚染した機器類や設備であり、クリアランス対象物中のそれらの子孫核種の存在は自然

環境中の土壌等に賦存する場合と異なる。さらに、転換から加工までの工程は規制体系に組み込まれていることから、人工起源の放射性核種を対象としたクリアランスレベル評価に用いられている線量計算をU-234、U-235、U-238等に対し行い、その結果と土壌中の放射能濃度分布のデータから導き出されたIAEAのクリアランスレベルとの整合性を検討しておくことは重要である。そこで、ウラン取り扱い施設における主要核種であるU-234、U-235及びU-238を対象に、SRS No. 44で用いられている人工起源の放射性核種のクリアランスレベル解析のための線量評価手法を適用し、これらの核種のクリアランスレベルを算出した。

本報告では、U-234、U-235及びU-238のクリアランスレベルの解析に用いた一連の評価手法（シナリオ、モデル、パラメータ）とその手法により計算したクリアランスレベルについて述べる。

II 評価手法

1. シナリオ及び被ばく経路

SRS No. 44では、Table 1に示す11通りのシナリオについて個人への被ばく経路を設定している。SRS No. 44

Table 1 Scenarios and exposure pathways for estimating clearance levels

シナリオ	記述	被ばく者	被ばく経路
WL	処分場あるいはその他の施設（鋳物工場以外）の作業者の被ばく	作業者	処分場での外部被ばく 処分場での吸入 汚染物質の直接摂取
WF	鋳物工場の作業者の被ばく	作業者	鋳物工場での機器あるいはスクラップの山からの外部被ばく 鋳物工場での吸入 汚染物質の直接摂取
WO	その他の作業者（例、トラック運転手）の被ばく	作業者	機器あるいはトラックの荷からの外部被ばく
RL-C	処分場あるいはその他の施設近傍の居住者の被ばく	子供	処分場あるいはその他の施設近傍での吸入 汚染された土地で生育した食物の摂取
RL-A		成人	処分場あるいはその他の施設近傍での吸入 汚染された土地で生育した食物の摂取
RF	鋳物工場近傍の居住者の被ばく	子供	鋳物工場近傍での吸入
RH	汚染された物質で建設された建屋の居住者の被ばく	成人	建物の中での外部被ばく 外部被ばく
RP	汚染された物質で建設された公共の場所の居住者（子供）の被ばく	子供	汚染されたダストの吸入 汚染された物質の直接摂取
RW-C	個人の井戸からの水による利用あるいは汚染された河川からの魚の消費をしている居住者の被ばく	子供	汚染された飲料水の摂取 汚染された食物の摂取 汚染された魚の摂取
RW-A		成人	汚染された飲料水の摂取 汚染された食物の摂取 汚染された魚の摂取
SKIN	スクラップ置き場、金属リサイクル施設及び処分場の作業者の被ばく（低確率シナリオのみ）	作業者	汚染されたダストによる皮膚被ばく

（注）現実的パラメータの設定ケースはWLからRW-Aまで（SKINを除く）のシナリオを対象とし、低確率なパラメータの設定ケースはWLからSKINまでの全てのシナリオを対象としている。

におけるクリアランスレベル導出のアプローチは、まずクリアランス対象物の単位濃度（1 Bq/g）に対する線量を計算し、次いで線量計算結果に基づき実効線量基準に対応するクリアランスレベルによる導出の方法が用いられている。具体的には以下の2種類の方法が適用されている。

- ・ 現実的なパラメータを用いた線量計算の結果に対し $10 \mu\text{Sv/y}$ の実効線量基準を適用する。
- ・ 低確率なパラメータを用いた線量計算の結果に対し、 1 mSv/y の実効線量基準を適用し、ただし、皮膚被ばくの経路に対しては 50 mSv/y の皮膚の等価線量限度を使用する。

本解析においても、同様のクリアランス導出のアプローチを採用し、Table 1 に示した評価シナリオの各被ばく経路の線量を計算した。また、SRS No. 44 では、Table 1 に示すように評価シナリオにおいて想定される複数の経路から被ばくを考慮しており、本解析においても同様に、同一の評価シナリオにおける個人に対する複数の被ばく経路からの線量の重畳を考慮した。

2. モデル

SRS No. 44 で示されたシナリオ及び被ばく経路について線量を計算するためのモデルは、SRS No. 44 と同じ評価モデルを用いた。U-234、U-235 及び U-238 に対する

一連の線量計算に使用した評価モデルの一覧を付録に示した。

3. 評価期間及び子孫核種の生成

U-234、U-235 及び U-238 のクリアランスレベル算出のための一連の線量計算では、子孫核種の生成により長期的に被ばく線量が増加することが想定され、その影響を考慮する必要がある。SRS No. 44 においては、子孫核種が放射性核種である場合、子孫核種の生成の影響による線量の過小評価にならない期間として 100 年間を設定し、100 年間におけるビルドアップする子孫核種の最大寄与を求め、その親核種に対する比を線量計算の中で考慮している。U-234、U-235 及び U-238 を対象とした本解析では、SRS No. 44 と同様に 100 年間における U-234、U-235 及び U-238 の子孫核種の生成寄与を考慮した。

U-234、U-235 及び U-238 の崩壊系列図を Fig. 1 及び Fig. 2 に示す。本解析では、図中の子孫核種に対して、半減期が 10 日未満の子孫核種は、親核種と放射平衡にあるとして、親核種の線量換算係数に子孫核種の寄与を含めて評価した。一方、半減期が 10 日以上放射性核種は、崩壊連鎖に伴う減衰／生成を計算し、それら核種全ての寄与を重ね合わせて評価した。試算の結果、U-234、U-235 及び U-238 のいずれの核種についても、

Fig. 1 Decay chains of uranium series (4n + 2 Series).

Fig. 2 Decay chains of actinium series (4n + 3 Series).

100年後に子孫核種の寄与が最大となった。100年後の時点について計算したU-234, U-235及びU-238に対する各子孫核種の最大濃度の割合をTable 2に示す。

4. パラメータ

解析に使用したパラメータは、SRS No. 44における現実的及び低確率なパラメータとして設定されている値を

基本的に踏襲した。ただし、U-234, U-235及びU-238及びそれらの子孫核種については、外部被ばくに対する実効線量換算係数、吸入及び経口摂取に対する実効線量係数、皮膚被ばくに対する等価線量換算係数の設定値が与えられていないため、本解析で新たに設定した。また、土壌から農作物への移行係数などの元素に依存するパラメータについても、SRS No. 44に与えられていないものは、新たに設定した。パラメータ設定の考え方を以下に示す。

(1) 外部被ばく実効線量換算係数

Table 1の被ばく経路のうち以下に示す外部被ばく経路について、U-234, U-235, U-238及びそれらの子孫核種の実効線量換算係数を新たに設定した。

- WL シナリオ (処分場での作業員の外部被ばく)
- RP シナリオ (汚染された物質で建設された公共の場所での子供の外部被ばく)
- RH シナリオ (汚染された物質で建設された建屋の居住者の外部被ばく)
- WF シナリオ (鋳物工場での機器あるいはスクラップの山からの作業員の外部被ばく)
- WO シナリオ (機器あるいはトラックの荷からの作業員の外部被ばく)

これらのシナリオに基づく外部被ばく実効線量換算係数は、SRS No. 44に記述されている計算条件を基に、点減衰核積分法による遮蔽計算コード(QAD-CGGP2)⁴⁾を

Table 2 Maximum concentration rate of respective progeny radionuclide to U-234, U-235 and U-238 in 100 years.

核種	100年間における子孫核種の最大濃度の割合(-)*1
U-234	1.00E+00
Th-230	9.19E-04
Ra-226	1.96E-05
Pb-210	1.09E-05
Po-210	1.08E-05
U-235	1.00E+00
Pa-231	2.11E-03
Ac-227	1.48E-03
Th-227	1.46E-03
Ra-223	1.48E-03
U-238	1.00E+00
Th-234	1.00E+00
U-234	2.83E-04
Th-230	1.30E-07
Ra-226	1.85E-09
Pb-210	8.62E-10
Po-210	8.46E-10

(*1) U-234, U-235, U-238の子孫核種は、100年後が最大濃度となる。

用いて算出した。

外部被ばく実効線量換算係数の計算条件を **Table 3** に示す。ここで、U-234, U-235, U-238 及びそれらの子孫核種の光子エネルギー及び発生率は、JAERI-Data/Code 2001-004⁵⁾ のデータを使用した。また、対象核種の光子エネルギーと各シナリオで想定した材料の厚さに対応するビルドアップ係数は、JAEA-Data/Code 2008-001⁶⁾ に整備されている各照射ジオメトリ (AP, ISO, ROT) に対する光子エネルギーと材料の厚さとの関係に基づき設定した。算出した外部被ばく実効線量換算係数の結果一覧を **Table 4** に示す。SRS No. 44 では、子供を評価対象としたシナリオ RH (汚染された物質で建設された建屋の居住者の外部被ばく) の評価において、成人に対する外

部被ばく実効線量換算係数を 1.2 倍している。本解析においても同様に、子供については成人に対する外部被ばく実効線量換算係数を 1.2 倍した値を用いた。

(2) 吸入及び経口摂取に対する実効線量係数、皮膚被ばくの等価線量換算係数

U-234, U-235, U-238 及びそれらの子孫核種の吸入及び経口摂取による実効線量係数、及び皮膚被ばくの等価線量換算係数は、SRS No. 44 に示されていない。本解析では、作業者に対する吸入及び経口摂取による実効線量係数としては ICRP Publ. 68⁷⁾ に与えられている値を、また一般公衆 (成人, 子ども) に対しては ICRP Publ. 72⁸⁾ に与えられている値を用いた (**Table 5**)。

皮膚被ばくの等価線量換算係数に関しては、CEC の

Table 3 Analysis condition for estimating external effective dose conversion factors.

シナリオ	被ばく形態	外部被ばく実効線量換算係数の計算条件
WL	処分場での作業者の外部被ばく	幾何形状：半無限媒体 評価点：地表から 1 m 照射ジオメトリ：ROT 材料：コンクリート 材料の密度：1,500 kg/m ³
RP	汚染された物質で建設された公共の場所の居住者 (子供) の外部被ばく	幾何形状：天井, 壁 2 面 3 × 4 m ² , 高さ 2.5 m, 壁厚 0.2 m 評価点：床から 1 m 照射ジオメトリ：ROT 材料：コンクリート 材料の密度：1,500 kg/m ³
RH	汚染された物質で建設された建屋の中での居住者 (成人) の外部被ばく	幾何形状：天井, 壁 2 面 3 × 4 m ² , 高さ 2.5 m, 壁厚 0.2 m 評価点：床から 1 m 照射ジオメトリ：ROT 材料：コンクリート 材料の密度：1,500 kg/m ³
WF	鋳物工場での機器あるいはスクラップの山からの外部被ばく	1m 離れた 5 × 2 × 1 m ³ の大きさの平板 評価点：平板 (2 × 1 m ²) から 1 m 照射ジオメトリ：AP 材料：鉄 材料の密度：1,500 kg/m ³
WO	機器あるいはトラックの荷からの外部被ばく	材料：鉄 材料の密度：1,500 kg/m ³

Table 4 External effective dose conversion factors of U-234, U-235, U-238 and the progeny radionuclides.

放射性核種		外部被ばく実効線量換算係数 (Sv/h per Bq/kg)			放射平衡を仮定した子孫核種 *1
		WL, RP	RH	WF, WO	
ウラン系列 (4n+2 系列)	U-238	1.8E-13	1.4E-13	4.2E-14	—
	Th-234	4.1E-12	3.2E-12	8.3E-13	Pa-234m, Pa-234
	U-234	9.6E-15	9.5E-15	6.9E-16	—
	Th-230	3.2E-14	3.1E-14	3.0E-15	—
	Ra-226	3.4E-10	2.4E-10	7.6E-11	Rn-222, Po-218, At-218, Rn-218, Pb-214, Bi-214, Po-214, Tl-210
	Pb-210	4.8E-14	4.9E-14	2.4E-15	Bi-210, Hg-206, Tl-206
	Po-210	1.7E-15	1.3E-15	3.8E-16	—
アクチニウム系列 (4n+3 系列)	U-235	2.2E-11	2.1E-11	3.0E-12	Th-231
	Pa-231	5.9E-12	5.1E-12	1.1E-12	—
	Ac-227	8.9E-14	8.0E-14	1.3E-14	Fr-223, At-219
	Th-227	1.5E-11	1.4E-11	2.7E-12	—
	Ra-223	4.5E-11	3.9E-11	8.6E-12	Rn-219, Po-215, Pb-211, Bi-211, Po-211, Tl-207

(*1) 半減期が 10 日未満の子孫核種は親核種に含めて線量換算係数を算出した。

Table 5 Inhalation and ingestion effective dose coefficients of U-234, U-235, U-238 and the progeny radionuclides.

放射性核種		内部被ばく実効線量係数（Sv/Bq）						放射平衡を仮定した子孫核種 *1
		作業者		居住者（成人）		居住者（子供）		
		WL, WF		RL-A	RW-A	RL-C, RP, RF	RL-C, RP, RW-C	
		吸入 *2	経口 *3	吸入 *4	経口 *5	吸入 *4	経口 *5	
ウラン（4n+2系列）	U-238	5.70E-06	4.40E-08	2.90E-06	4.50E-08	9.40E-06	1.20E-07	—
	Th-234	5.80E-09	3.40E-09	7.70E-09	3.40E-09	3.10E-08	2.50E-08	Pa-234m, Pa-234
	U-234	6.80E-06	4.90E-08	3.50E-06	4.90E-08	1.10E-05	1.30E-07	—
	Th-230	2.80E-05	2.10E-07	1.40E-05	2.10E-07	3.50E-05	4.10E-07	—
	Ra-226	2.20E-06	2.80E-07	3.50E-06	2.80E-07	1.10E-05	9.60E-07	Rn-222, Po-218, At-218, Rn-218, Pb-214, Bi-214, Po-214, Tl-210
	Pb-210	1.20E-06	6.80E-07	1.20E-06	6.90E-07	4.00E-06	3.60E-06	Bi-210, Hg-206, Tl-206
	Po-210	2.20E-06	2.40E-07	3.30E-06	1.20E-06	1.10E-05	8.80E-06	—
アクチニウム（4n+3系列）	U-235	6.10E-06	4.60E-08	3.10E-06	4.70E-08	1.00E-05	1.30E-07	Th-231
	Pa-231	8.90E-05	7.10E-07	1.40E-04	7.10E-07	2.30E-04	1.30E-06	—
	Ac-227	6.30E-04	1.10E-06	5.50E-04	1.10E-06	1.60E-03	3.10E-06	Fr-223, At-219
	Th-227	7.60E-06	8.90E-09	1.00E-05	8.80E-09	3.00E-05	7.00E-08	—
	Ra-223	5.70E-06	1.00E-07	7.40E-06	1.00E-07	2.10E-05	1.10E-06	Rn-219, Po-215, Pb-211, Bi-211, Po-211, Tl-207

(*1) 半減期が 10 日未満の子孫核種は親核種に含めて線量換算係数を算出した。

(*2) ICRP Publ. 68⁷⁾ を基に、以下の手順により値を選定した。

- ・ ICRP Publ. 68 では、職業被ばくにおいて吸入摂取する粒子の空気力学的放射能中央径 (AMAD) に関して、ICRP Publ. 30¹⁵⁾ のデフォルト値である 1 μm より、作業場のエアロゾルをもっとよく代表するとして、5 μm をデフォルト値としているため、ここでは 5 μm に対する実効線量係数を採用した。
- ・ 放射性元素の化合物の種類に対する肺からの吸収タイプに関しては、ICRP Publ. 68 において一つだけ与えられている場合はその吸収タイプに対する実効線量係数を、複数与えられている場合は、線量評価において放射性元素の化合物を一意に決定することが困難なため、保守的に最も実効線量係数の高い吸収タイプを採用した。
- ・ Ra-226 については、ICRP Publ. 72⁸⁾ に記載されている改定値を用いた。

(*3) ICRP Publ. 68 を基に、以下の手順により値を選定した。

- ・ ICRP Publ. 68 において、化合物の種類の違いにより複数の値が与えられている場合は、保守的に最大値を採用した。

(*4) ICRP Publ. 72 を基に、以下の手順により値を選定した。

- ・ 居住者 (成人) の実効線量係数は ICRP Publ. 72 の “Adult” から引用した。
- ・ 居住者 (子供) の実効線量係数は ICRP Publ. 72 の “1 Year” から引用した。
- ・ ICRP Publ. 72 では、一般公衆に対する実効線量係数を、空気力学的放射能中央径 (AMAD) を 1 μm として求めている。
- ・ ICRP Publ. 72 において、肺からの吸収タイプとして、放射性核種の化合物に関する情報が利用できない場合の推奨デフォルトタイプが示されている元素については、推奨デフォルトタイプに対する実効線量係数を採用した。また、推奨デフォルト値が示されていない元素については、保守的に最も実効線量係数の高い吸収タイプを採用した。

(*5) ICRP Publ. 72 を基に、以下の手順により値を選定した。

- ・ ICRP Publ. 72 において、化合物の種類の違いにより複数の値が与えられている場合は、保守的に最大値を採用した。

Radiation Protection 65⁹⁾ の値を基本とし、当該文献に値がない放射性核種については、Kocher 等¹⁰⁾ の値を選定した (Table 6)。

(3) 元素依存性のパラメータ

地下水による核種移行を対象としたシナリオ (RW-C, RW-A シナリオ) では、U-234, U-235, U-238 及びそれらの子孫核種の元素に依存する評価パラメータ (汚染層及び不飽和層における分配係数、土壌から農作物への移行係数、河川水から魚類への濃縮係数) が必要である。これらのパラメータは、基本的には SRS No. 44 に記載されている値を使用した。ただし、SRS No. 44 に値が与えられていないものについては、SRS No. 44 で引用している文献に遡って値を決定した。SRS No. 44 に値が与え

られていないパラメータの設定の考え方を以下に示す。

- ① 汚染層及び不飽和層の分配係数は、SRS No. 44 と同様に、現実的なパラメータの設定ケースでは地下水による核種移行の線量を評価するコード RESRAD のマニュアル¹¹⁾ で設定されているデフォルト値を使用した。低確率なパラメータの設定ケースでは、同文献の中で設定されている分配係数の最小値を保守的に選定した。汚染層及び不飽和層における分配係数を Table 7 に示す。
- ② 土壌から農作物への移行係数及び河川水から魚類への濃縮係数は、SRS No. 44 の引用文献である IAEA の SRS No. 19¹²⁾ の値を使用した。土壌から農作物への移行係数を Table 8 に示す。

- ③ 河川水から魚類への濃縮係数も、SRS No. 19 の値を使用した。河川水から魚類への濃縮係数を **Table 9** に示す。

一方、溶融過程に関する WF 及び RF シナリオの吸入被ばくの評価で使用する微粒子への放射性物質の濃縮係数については、SRS No. 44 において設定されている

値を用いた。ただし、SRS No. 44 において設定されていない Ac の濃縮係数は、SRS No. 44 の引用文献である EC の Radiation Protection 89¹³⁾ の中でさらに参照されている EC Radiation Protection 117¹⁴⁾ に基づき、溶融後の生成物に対する重量比と溶融過程におけるインゴットやダストへの移行係数から推定した。結果として、U, Th,

Table 6 Skin equivalent dose coefficients of U-234, U-235, U-238 and the progeny radionuclides.

放射性核種		皮膚被ばくの等価線量換算係数 (Sv/y per Bq/m ²)			放射平衡を仮定した子孫核種 *6
		β 4 mg/cm ² *1	γ 7 mg/cm ² *2	$\beta + \gamma$	
ウラン系 (4n+2 系列)	U-238	3.7E-09 *4	7.5E-09 *3 *7	1.10E-08	—
	Th-234	3.4E-06 *4 *7	1.0E-09 *3	3.40E-06	Pa-234m, Pa-234
	U-234	6.5E-09 *3	2.4E-09 *3	8.80E-09	—
	Th-230	9.1E-08 *3	3.3E-09 *3	9.40E-08	—
	Ra-226	5.2E-06 *3 *7	9.6E-08 *3 *7	5.30E-06	Rn-222, Po-218, At-218, Rn-218, Pb-214, Bi-214, Po-214, Tl-210
	Pb-210	2.3E-06 *3	7.3E-09 *3	2.30E-06	Bi-210, Hg-206, Tl-206
	Po-210	0.0E+00 *3	4.2E-13 *3	4.20E-13	—
アクチニウム系 (4n+3 系列)	U-235	2.2E-06 *3	9.5E-09 *3	2.20E-06	Th-231
	Pa-231	1.3E-07 *3	2.5E-09 *3	1.30E-07	—
	Ac-227	3.6E-08 *3 *7	1.8E-10 *5	3.60E-08	Fr-223, At-219
	Th-227	2.4E-07 *3	7.3E-09 *3	2.50E-07	—
	Ra-223	3.2E-06 *3	8.1E-09 *3	3.20E-06	Rn-219, Po-215, Pb-211, Bi-211, Po-211, Tl-207

(*1) β 線による皮膚被ばくの等価線量換算係数は体表面下 4 mg/cm² の深さの値である。

(*2) γ 線による皮膚被ばくの等価線量換算係数は体表面下 7 mg/cm² の深さの値である。

(*3) CEC Radiation Protection 65⁹⁾ に記載されている値を選定した。

(*4) Health Physics Vol. 53, No. 2¹⁰⁾ に記載されている値を選定した。

(*5) CEA-R-5441¹⁶⁾ に記載されている値を選定した。

(*6) 半減期が 10 日未満の子孫核種は親核種に含めて線量換算係数を算出した。

(*7) 当該核種において放射平衡を仮定した子孫核種が引用した文献と異なるので、分岐比を考慮して加減演算により当該核種の皮膚被ばくの等価線量換算係数を算出した。

Ra 等と同じ微粒子への濃縮係数である 10 を設定した (**Table 10**)。

Table 7 Distribution coefficients in the contaminated zone and the unsaturated zone.

汚染層及び不飽和層の分配係数		
単位	(m ³ /kg)	
元素	現実的なパラメータの設定ケース	低確率なパラメータの設定ケース
Pb	0.1 *	0.1 *
Po	0.01 *	0.01 *
Ra	0.07 *	0.07 *
Ac	0.02 *	0.02 *
Th	60	1.378
Pa	0.05 *	50 *
U	0.05	0.02
選定手順 (根拠)	・ IAEA SRS No. 44 ³⁾ で分配係数を引用している文献 (RESRAD ¹¹⁾) に記載されている値より選定することとした。分配係数は IAEA SRS No. 44 と同様に、現実的なパラメータの設定ケースには RESRAD のデフォルト値を、低確率なパラメータの設定ケースには RESRAD に記載されている分配係数の最小値を選定した。	

(注)「*」は IAEA SRS No. 44 に分配係数の値が記載されていないことを示す。

Table 8 Soil-to-plant transfer factors.

土壌からの農作物 (葉菜、非葉菜、果実) への移行係数	
単位	(Bq/kg-wet) / (Bq/kg-dry)
元素	選定値
Pb	2.00E-02
Po	2.00E-03
Ra	4.00E-02
Ac	1.0E-03 *
Th	1.00E-03
Pa	1.00E-02
U	1.00E-02
選定根拠	・ IAEA SRS No. 44 ³⁾ で土壌から農作物への移行係数を引用している文献 (IAEA SRS No.19 ¹²⁾) に記載されている値を選定することとした。

(注)「*」は IAEA SRS No. 44 に土壌から農作物への移行係数の値が記載されていないことを示す。

III 解析結果と考察

Table 1 の各被ばく経路に対する U-234, U-235 及び U-238 の線量を計算した。現実的なパラメータと低確率なパラメータを用いた場合の U-234, U-235 及び U-238 に対する線量計算の結果を **Table 11** に示す。**Table 11** は、各被ばく経路のクリアランス対象の物質の単位濃度 (1 Bq/g) に対する最大線量の結果を示している。現実的なパラメータ条件の中では、U-234 と U-238 に対し WL シナリオの処分場等での作業者の吸入被ばく経路が、U-235 に対し同シナリオの作業者の外部被ばく経路がそれぞれ最大線量となり、それらの線量値は $10 \mu\text{Sv/y}$ 以下の値となった。一方、低確率なパラメータ条件を適用した場合、汚染層に対するウランの分配係数や帯水

層の地下水流速が現実的な条件よりも保守的なパラメータ設定であるため、3 核種ともに地下水による核種移行を想定した RW-C シナリオの井戸水摂取による内部被ばく経路の線量が $100 \mu\text{Sv/y}$ を超える値を示した。また、U-235 と U-238 では、皮膚被ばく経路の線量もそれぞれ $100 \mu\text{Sv/y}$ を超える値を示した。

次に、各シナリオの被ばく経路に対する最大線量を重畳した結果から、実効線量基準に対する U-234, U-235 及び U-238 のクリアランス対象物質中の放射能濃度を求めた。その結果を **Table 12** に示す。

Table 12 に示した U-234 と U-238 の実効線量基準に対するクリアランス対象物質中の放射能濃度が最も小さくなる決定シナリオ及び決定経路は、現実的なパラメータを用いた WL シナリオの処分場等での作業者に対する吸入被ばくとなった。また、U-235 に対する決定シナリオは、U-234 及び U-238 と同様に、現実的なパラメータを用いた WL シナリオとなったが、決定経路は WL シナリオにおける作業者の外部被ばくとなった。これらの決定シナリオの実効線量基準に対する U-234, U-235 及び U-238 の放射能濃度は、それぞれ 1.2 Bq/g , 0.53 Bq/g , 1.1 Bq/g である。SRS No. 44 で採用されている、放射能濃度の計算値に基づく規制免除レベルの導出は、計算値が 3×10^x と $3 \times 10^{x+1}$ の間の値である場合、 10^{x+1} と評価している。この導出方法を適用した場合、**Table 13** に示すように U-234, U-235 及び U-238 に対するクリアランスレベルはともに 1 Bq/g となる。

以上の解析から、SRS No. 44 の中で人工起源の放射性核種に対し用いられている線量評価の手法を適用して求めた U-234, U-235 及び U-238 のクリアランスレベル (1 Bq/g) は、RS-G-1.7 において世界的な土壤中の放射能濃度分布のデータを基に規制除外の概念から設定されている放射能濃度 (1 Bq/g) と整合していることが確認できた。

IV 結 論

IAEA は、世界的な土壤中の放射能濃度分布のデータを基に、クリアランスのために適用できる U-235, U-238 等の天然起源の放射性核種の放射能濃度を 1 Bq/g と提示している。本研究では、土壤中の放射能濃度分布のデータから導き出された IAEA のクリアランスレベルについて、U-234, U-235 及び U-238 の被ばく線量の影響を確認するための解析を行った。得られた結果をまとめると次のようになる。

・ IAEA の SRS No. 44 に示されている人工起源の放射

Table 9 Concentration factors of fish in river water.

河川水から魚類への濃縮係数	
単位	(m^3/kg)
元素	選定値
Pb	0.3 *
Po	0.05 *
Ra	0.05 *
Ac	0.015 *
Th	0.1
Pa	0.01 *
U	0.01
選定根拠	・ IAEA SRS No. 44 ³⁾ で河川水から魚類への濃縮係数を引用している文献 (IAEA SRS No. 19 ¹²⁾) に記載されている値を選定することとした。

(注)「*」は IAEA SRS No. 44 に河川水から魚類への濃縮係数の値が記載されていないことを示す。

Table 10 Concentration factor of specific activity in the fine fraction.

微粒子への放射性物質の濃縮係数	
単位	(-)
元素	選定値
Pb	70
Po	10
Ra	10
Ac	10 *
Th	10
Pa	10
U	10
選定根拠	・ Ac 以外の元素は、IAEA SRS No. 44 ³⁾ において設定されている値を用いた。Ac に対する微粒子への濃縮係数は、EC Radiation Protection 117 ¹⁴⁾ の溶融後の生成物に対する重量比と溶融過程におけるインゴットやダストへの移行係数から推定し、U、Th、Ra 等と同じ微粒子への濃縮係数である 10 を設定した。

(注)「*」は IAEA SRS No. 44 に微粒子への放射性物質の濃縮係数の値が記載されていないことを示す。

Table 11 Calculated maximum dose of U-234, U-235 and u-238 for cleared materials of 1Bq/g in exposure pathways of realistic and low probability scenarios.

シナリオ			被ばく形態	被ばく者	実効線量 (μ Sv/y)		
					U-234	U-235	U-238
現実的なパラメータの設定ケース	WL	処分場あるいはその他の施設（鋳物工場以外）の作業者の被ばく	外部	作業者	7.3E-03	1.0E+01	1.9E+00
			吸入		7.4E+00	7.8E+00	6.2E+00
			直接摂取		9.8E-01	9.9E-01	9.5E-01
	WF	鋳物工場の作業者の被ばく	外部	作業者	9.8E-05	1.4E-01	3.9E-02
			吸入		3.7E-01	3.3E-01	3.1E-01
			直接摂取		9.8E-01	9.9E-01	9.5E-01
	WO	その他の作業員（例、トラック運転手）の被ばく	外部	作業者	2.0E-04	2.7E-01	7.8E-02
	RL-C	処分場あるいはその他の施設近傍の居住者（子供）の被ばく	吸入	居住者（子供）	9.7E-03	1.1E-02	8.3E-03
			経口摂取		8.9E-01	9.5E-01	8.3E-01
	RL-A	処分場あるいはその他の施設近傍の居住者（成人）の被ばく	吸入	居住者（成人）	1.7E-02	2.0E-02	1.4E-02
			経口摂取		4.3E-01	4.3E-01	4.0E-01
	RF	鋳物工場近傍の居住者（子供）の被ばく	吸入	居住者（子供）	4.9E-03	5.7E-03	4.2E-03
	RH	汚染された物質で建設された建屋の居住者（成人）の被ばく	外部	居住者（成人）	6.4E-03	9.4E+00	1.5E+00
	RP	汚染された物質で建設された公共の場所の居住者（子供）の被ばく	外部	居住者（子供）	7.8E-04	1.1E+00	2.1E-01
			吸入		3.9E-02	4.5E-02	3.3E-02
			直接摂取		6.5E-01	7.0E-01	7.3E-01
低確率なパラメータの設定ケース	RW-C	個人の井戸からの水による利用あるいは汚染された河川からの魚の消費をしている居住者（子供）の被ばく	井戸水摂取	居住者（子供）	5.2E-01	5.8E-01	4.8E-01
			農作物摂取		8.2E-02	9.1E-02	7.5E-02
			魚摂取		2.5E-05	3.0E-05	2.3E-05
	RW-A	個人の井戸からの水による利用あるいは汚染された河川からの魚の消費をしている居住者（成人）の被ばく	井戸水摂取	居住者（成人）	6.8E-01	7.3E-01	6.2E-01
			農作物摂取		6.9E-02	7.4E-02	6.3E-02
			魚摂取		2.3E-05	2.6E-05	2.1E-05
	WL	処分場あるいはその他の施設（鋳物工場以外）の作業者の被ばく	外部	作業者	2.9E-02	4.0E+01	7.7E+00
			吸入		5.9E+01	6.3E+01	4.9E+01
			直接摂取		4.9E+00	4.9E+00	4.7E+00
	WF	鋳物工場の作業者の被ばく	外部	作業者	3.9E-03	5.4E+00	1.6E+00
			吸入		1.5E+01	1.6E+01	1.2E+01
			直接摂取		4.9E+00	4.9E+00	4.7E+00
	WO	その他の作業員（例、トラック運転手）の被ばく	外部	作業者	3.9E-03	5.4E+00	1.6E+00
	RL-C	処分場あるいはその他の施設近傍の居住者（子供）の被ばく	吸入	居住者（子供）	4.3E+00	5.0E+00	3.6E+00
					2.7E+01	2.9E+01	2.5E+01
	RL-A	処分場あるいはその他の施設近傍の居住者（成人）の被ばく	吸入	居住者（成人）	7.4E+00	8.9E+00	6.1E+00
			経口摂取		1.3E+01	1.3E+01	1.2E+01
	RF	鋳物工場近傍の居住者（子供）の被ばく	吸入	居住者（子供）	1.1E+00	1.2E+00	9.1E-01
	RH	汚染された物質で建設された建屋の居住者（成人）の被ばく	外部	居住者（成人）	6.3E-02	9.1E+01	1.5E+01
	RP	汚染された物質で建設された公共の場所の居住者（子供）の被ばく	外部	居住者（子供）	9.8E-03	1.3E+01	2.6E+00
			吸入		4.9E+00	5.7E+00	4.2E+00
			直接摂取		1.3E+01	1.4E+01	1.5E+01
	RW-C	個人の井戸からの水による利用あるいは汚染された河川からの魚の消費をしている居住者（子供）の被ばく	井戸水摂取	居住者（子供）	1.0E+02	1.1E+02	9.6E+01
			農作物摂取		2.5E+01	2.5E+01	2.3E+01
			魚摂取		6.6E-03	6.9E-03	6.2E-03
	RW-A	個人の井戸からの水による利用あるいは汚染された河川からの魚の消費をしている居住者（成人）の被ばく	井戸水摂取	居住者（成人）	1.4E+02	1.4E+02	1.3E+02
			農作物摂取		2.1E+01	2.1E+01	1.9E+01
			魚摂取		6.2E-03	6.2E-03	5.7E-03
	SKIN	スクラップ置き場、金属リサイクル施設及び処分場でのダストによる皮膚被ばく	皮膚	作業者	5.6E-01	1.4E+02	2.1E+02

Table 12 Activity concentration values of U-234, U-235 and U-238 calculated by applying the radiological criteria.

シナリオ					実効線量基準に対する放射能濃度 (Bq/g)		
					U-234	U-235	U-238
現実的なパラメータの設定ケース	WL	処分場あるいはその他の施設（鋳物工場以外）の作業者の被ばく	外部, 吸入, 直接摂取	作業者	1.2E+00	5.3E-01	1.1E+00
	WF	鋳物工場の作業者の被ばく	外部, 吸入, 直接摂取	作業者	7.4E+00	6.9E+00	7.7E+00
	WO	その他の作業者（例, トラック運転手）の被ばく	外部	作業者	5.1E+04	3.7E+01	1.3E+02
	RL-C	処分場あるいはその他の施設近傍の居住者（子供）の被ばく	吸入, 経口摂取	居住者（子供）	1.1E+01	1.0E+01	1.2E+01
	RL-A	処分場あるいはその他の施設近傍の居住者（成人）の被ばく	吸入, 経口摂取	居住者（成人）	2.2E+01	2.2E+01	2.4E+01
	RF	鋳物工場近傍の居住者（子供）の被ばく	吸入	居住者（子供）	2.1E+03	1.8E+03	2.4E+03
	RH	汚染された物質で建設された建屋の居住者（成人）の被ばく	外部	居住者（成人）	1.6E+03	1.1E+00	6.7E+00
	RP	汚染された物質で建設された公共の場所の居住者（子供）の被ばく	外部, 吸入, 直接摂取	居住者（子供）	1.4E+01	5.5E+00	1.0E+01
	RW-C	個人の井戸からの水による利用あるいは汚染された河川からの魚の消費をしている居住者（子供）の被ばく	経口摂取	居住者（子供）	1.7E+01	1.5E+01	1.8E+01
	RW-A	個人の井戸からの水による利用あるいは汚染された河川からの魚の消費をしている居住者（成人）の被ばく	経口摂取	居住者（成人）	1.3E+01	1.2E+01	1.5E+01
低確率なパラメータの設定ケース	WL	処分場あるいはその他の施設（鋳物工場以外）の作業者の被ばく	外部, 吸入, 直接摂取	作業者	1.6E+01	9.3E+00	1.6E+01
	WF	鋳物工場の作業者の被ばく	外部, 吸入, 直接摂取	作業者	5.1E+01	3.8E+01	5.4E+01
	WO	その他の作業者（例, トラック運転手）の被ばく	外部	作業者	2.6E+05	1.8E+02	6.4E+02
	RL-C	処分場あるいはその他の施設近傍の居住者（子供）の被ばく	吸入, 経口摂取	居住者（子供）	3.2E+01	3.0E+01	3.5E+01
	RL-A	処分場あるいはその他の施設近傍の居住者（成人）の被ばく	吸入, 経口摂取	居住者（成人）	4.9E+01	4.6E+01	5.5E+01
	RF	鋳物工場近傍の居住者（子供）の被ばく	吸入	居住者（子供）	9.4E+02	8.0E+02	1.1E+03
	RH	汚染された物質で建設された建屋の居住者（成人）の被ばく	外部	居住者（成人）	1.6E+04	1.1E+01	6.9E+01
	RP	汚染された物質で建設された公共の場所の居住者（子供）の被ばく	外部, 吸入, 直接摂取	居住者（子供）	5.6E+01	3.0E+01	4.7E+01
	RW-C	個人の井戸からの水による利用あるいは汚染された河川からの魚の消費をしている居住者（子供）の被ばく	経口摂取	居住者（子供）	7.8E+00	7.5E+00	8.4E+00
	RW-A	個人の井戸からの水による利用あるいは汚染された河川からの魚の消費をしている居住者（成人）の被ばく	経口摂取	居住者（成人）	6.3E+00	6.4E+00	6.9E+00
最小となる経路					1.2E+00	5.3E-01	1.1E+00
					現実的なパラメータの設定ケース WL (主に吸入)	現実的なパラメータの設定ケース WL (主に外部, 吸入)	現実的なパラメータの設定ケース WL (主に吸入)

(注) 現実的なパラメータを用いた線量計算の結果に対し 10 μ Sv/y の実効線量基準を適用する。低確率なパラメータを用いた線量計算の結果に対し、1 mSv/y の実効線量基準を適用し、ただし、皮膚被ばくの経路に対しては 50 mSv/y の皮膚の等価線量限度を使用する。

Table 13 Clearance levels for U-234, U-235 and U-238 derived on the basis of dose calculation approach of iaea srs no. 44.

放射性核種	実効線量基準に対する放射能濃度 (Bq/g)	決定経路		クリアランスレベル (Bq/g)
		シナリオ及び評価経路名	対象者	
U-234	1.2E+00	現実的なパラメータの設定ケース WL 処分場, 工場の作業員 (主に吸入)	成人	1
U-235	5.3E-01	現実的なパラメータの設定ケース WL 処分場, 工場の作業員 (主に外部, 吸入)	成人	1
U-238	1.1E+00	現実的なパラメータの設定ケース WL 処分場, 工場の作業員 (主に吸入)	成人	1

(注) 計算した放射能濃度が、 3×10^x と $3 \times 10^{x+1}$ の間の値である場合、 10^{x+1} としてクリアランスレベルを求めた。

性核種に対し用いられている線量評価の手法を基に、U-234、U-235 及び U-238 のクリアランスレベルを評価し、その結果、決定シナリオの実効線量基準に対する U-234、U-235 及び U-238 の放射能濃度は、それぞれ 1.2 Bq/g、0.53 Bq/g、1.1 Bq/g となった。

- ・本解析結果に対し、SRS No. 44 において採用されているクリアランスレベルの算定方法を適用すると、U-234、U-235 及び U-238 とともに 1 Bq/g となり、IAEA の推奨値と一致した。
- ・原子力安全委員会は、原子炉施設等のクリアランスレベル評価に用いられた線量評価手法を基本にウランクリアランスの対象物が金属であることを踏まえた解析から、U-234、U-235 及び U-238 のクリアランスレベルとして、1 Bq/g を示しており¹⁾、IAEA の人工起源の放射性核種に対する線量評価手法を踏襲して評価した本解析結果は、原子力安全委員会によるクリアランスレベルの妥当性を支持するものである。

謝 辞

本研究を取りまとめるに当たって、東京大学大学院工学系研究科教授 小佐古敏荘氏、(独) 日本原子力研究開発機構安全研究センター廃棄物安全研究グループ 研究主幹 田中忠夫氏に貴重なご助言、ご助力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 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)。
- 2) IAEA; Application of the concepts of exclusion, exemption and clearance, Safety Guide, IAEA Safety Standard Series, No. RS-G-1.7 (2004).
- 3) IAEA; Derivation of activity concentration values for exclusion, exemption and clearance, Safety Reports Series No. 44 (2005).
- 4) Y. SAKAMOTO and S. TANAKA; QAD-CGGP2 and G33-GP2: Revised version of QAD-CGGP and G33-GP, JAERI-M 90-110 (1990).
- 5) A. ENDO and Y. YAMAGUCHI; Compilation of nuclear decay data used for dose calculation: revised data for radionuclides listed in ICRP publication 38, JAERI-Data/Code2001-004 (2001).
- 6) 渡邊正敏, 武田聖司, 木村英雄；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/Code2008-001 (2008).
- 7) ICRP; Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers, ICRP Publication 68 (1994).
- 8) ICRP; Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 5, ICRP Publication 72 (1995).
- 9) CEC; Principles and methods for establishing concentrations and qualities (Exemption values) below which reporting is not required in the european directive, Radiation Protection 65 (1993).
- 10) D. C. KOCHER and K. F. ECKERMAN; Electron dose-rate conversion factors for external exposure of the skin from uniformly deposited activity on the body surface, Health Phys., **53** (2), 135-141 (1987).
- 11) C. YU, A. J. ZIELEN, J. J. CHENG, D. J. LEPOIRE, E. GNANAPRAGASAM, S. KAMBOJ, J. AMISH, A. WALLO, W. A. WILLIAMS and H. PETERSON; User's manual for RESRAD Version 6, ANL/EAD-4, (2001).
- 12) IAEA; Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment, Safety Reports Series No. 19 (2001).
- 13) EC; Recommended radiological protection criteria for the recycling of metals from the dismantling of nuclear Installations, Radiation Protection 89 (1998).
- 14) EC; Methodology and models used to calculate individual and collective doses from the recycling of metals from the

dismantling of nuclear installations, Radiation Protection 117 (2000).

15) ICRP; Limits for the intake of radionuclides by workers, ICRP Publication 30 (1981).

16) Commissariat a l'énergie atomique; dosimetrie et therapeutique des contaminations cutanees, CEA-R-5441 (1988).

付 録

評価モデルの一覧

U-234, U-235 及び U-238 のクリアランスレベル算出のための一連の線量計算では、子孫核種の生成による被ばく線量の増加の影響を考慮することとし、次の連立常微分方程式により U-234, U-235, U-238 及び各子孫核種の濃度を計算する。

$$\frac{d}{dt} C_i(t) = -\lambda_i \cdot C_i(t) + Br_{i-1 \rightarrow i} \cdot \lambda_i \cdot C_{i-1}(t) \quad (1)$$

ここで、

C_i : 汚染物質の放射性核種 i の濃度 (Bq/kg)

λ_i : 放射性核種 i の崩壊定数 (1/y)

$Br_{i-1 \rightarrow i}$: 放射性核種 $i-1$ から放射性核種 i への分岐比

U-234, U-235 及び U-238 の単位濃度 (1 Bq/g) に対し、子孫核種の寄与が最大となるクリアランスから 100 年後の核種濃度を (1) 式により求め (Table 2 参照)、本論文の Table 1 に示した各被ばく経路に対する U-234, U-235 及び U-238 の線量を計算した。各線量のモデル式の一覧を以下に示す。

1. 外部被ばく (WL, WF, WO, RH, RP シナリオ)

外部被ばくによる線量は、次式で計算する。

$$E_{ext,i} = C_i \cdot e_{ext,i} \cdot t_e \cdot f_d \quad (2)$$

ここで、

$E_{ext,i}$: 外部被ばくによる放射性核種 i の年間の実効線量 (Sv/y)

C_i : 汚染物質の放射性核種 i の濃度 (Bq/kg)

$e_{ext,i}$: 外部被ばくによる放射性核種 i の実効線量換算係数 (Sv/h per Bq/kg)

t_e : 被ばく時間 (h/y)

f_d : 希釈係数 (-)

2. 吸入による被ばく (WL, WF, RL, RF, RP シナリオ)

吸入による線量は、次式で計算する。

$$E_{inh,i} = C_i \cdot e_{inh,i} \cdot t_e \cdot f_d \cdot f_{c,i} \cdot C_{dust} \cdot V \quad (3)$$

ここで、

$E_{inh,i}$: 吸入による放射性核種 i の年間の実効線量 (Sv/y)

C_i : 汚染物質の放射性核種 i の濃度 (Bq/kg)

$e_{inh,i}$: 吸入による放射性核種 i の実効線量係数 (Sv/Bq)

t_e : 被ばく時間 (h/y)

f_d : 希釈係数 (-)

$f_{c,i}$: 微粒子への放射性核種 i の濃縮係数 (-)

C_{dust} : 空気中のダスト濃度 (kg/m³)

V : 呼吸率 (m³/h)

また、WF 及び RF シナリオにおいては、元素に依存した微粒子への放射性核種 i の濃縮係数を用いるが、その他のシナリオでは元素に依存しない濃縮係数を計算に使用した。

3. 経口摂取による被ばく (WL, WF, RP, RL シナリオ)

汚染物質の直接摂取または農作物の経口摂取による線量は、次式で計算する。

$$E_{ing,i} = C_i \cdot e_{ing,i} \cdot q \cdot f_d \cdot f_c \cdot f_i \quad (4)$$

ここで、

$E_{ing,i}$: 経口摂取による放射性核種 i の年間の実効線量 (Sv/y)

C_i : 汚染物質の放射性核種 i の濃度 (Bq/kg)

$e_{ing,i}$: 経口摂取による放射性核種 i の実効線量係数 (Sv/Bq)

q : 年間摂取量 (kg/y)

f_d : 希釈係数 (-)

f_c : 微粒子への放射性物質の濃縮係数 (-)

f_i : 根からの移行係数 (-)

なお、微粒子への放射性物質の濃縮係数は汚染物質の直接摂取による線量の計算にのみ用い、根からの移行係数は農作物の経口摂取による線量の計算にのみ用いる。

4. 皮膚被ばく (SKIN シナリオ)

皮膚被ばくによる線量は、次式で計算する。

$$E_{skin,i} = C_i \cdot e_{skin,i} \cdot t_e \cdot L_{dust} \cdot f_d \cdot f_c \cdot \rho \quad (5)$$

ここで、

$E_{skin,i}$: 皮膚被ばくによる放射性核種 i の年間の等

価線量 (Sv/y)

- C_i : 汚染物質の放射性核種 i の濃度 (Bq/kg)
 $e_{skin,i}$: 皮膚被ばくによる放射性核種 i の等価線量
 換算係数 (Sv/y per Bq/m²)
 t_e : 被ばく時間 (h/y)
 L_{dust} : 皮膚に載っているダストの厚さ (m)
 f_d : 希釈係数 (-)
 f_c : 微粒子への放射性物質の濃縮係数 (-)
 ρ : 表面層の密度 (kg/m³)

5. 地下水による移行経路の被ばく (RW-C, RW-A シナリオ)

RW-C, RW-A シナリオでは、クリアランス対象物である汚染物質が地表付近の土壤中にあるとき (これを汚染層と呼ぶ。), 放射性核種が汚染層から放出され、不飽和層を通過して地下水に移行して、この汚染された地下水を利用することによる被ばくを想定する。地下水を利用することによる被ばくとしては、以下に示す3つの被ばくを考慮する。

- 汚染された地下水が井戸に移行したときの井戸水飲用による被ばく
- 汚染された地下水を農作物の灌漑用水として利用したときの農作物摂取による被ばく
- 汚染された地下水が河川に移行して、その河川の魚を摂取することによる被ばく

(1) 放射性核種の線源からの漏出率

地下水による移行経路では、放射性核種が汚染層から放出される割合は分配係数モデルを使って求める。放射性核種 i の線源からの漏出率は、次式で求める。

$$L_i = \frac{I}{\theta^{cz} \cdot z^{cz} \cdot R_i^{cz}} \quad (6)$$

ここで、

- L_i : 放射性核種 i の線源からの漏出率 (1/y)
 I : 浸透率 (m/y)
 θ^{cz} : 汚染層の水分含有率 (-)
 z^{cz} : 汚染層の厚さ (m)
 R_i^{cz} : 放射性核種 i の遅延係数 (-)

遅延係数は、次式で与えられる。

$$R_i^{cz} = 1 + \frac{\rho^{cz} \cdot K_{d,i}^c}{\theta^{cz}} \quad (7)$$

ここで、

- ρ^{cz} : 汚染層の密度 (kg/m³)
 $K_{d,i}^c$: 汚染層における放射性核種 i の分配係数 (m³/kg)

(2) 汚染層からの浸出水の放射性核種濃度

汚染層からの浸出水中の放射性核種 i の濃度は、次式で与えられる。

$$C_i^s = \frac{M \cdot c_i \cdot L_i}{U^s} \quad (8)$$

ここで、

- C_i^s : 汚染層からの浸出水中放射性核種 i の濃度 (Bq/m³)
 M : 汚染物質の全重量 (kg)
 c_i : 汚染物質中の放射性核種 i の比放射能 (Bq/kg)
 L_i : 放射性核種 i の線源からの漏出率 (1/y)
 U^s : 汚染層を通る浸出水の量 (m³/y)

汚染層を通る浸出水の量は、次式で与えられる。

$$U^s = I \cdot A^{cz} \quad (9)$$

ここで、

- I : 浸透率 (m/y)
 A^{cz} : 汚染層の表面積 (m²)

(3) 不飽和層からの浸出水の放射性核種濃度

汚染層からの浸出水は帯水層に排出されると想定する。現実的なパラメータの設定ケースでは、汚染物質と帯水層との間に不飽和層があると想定する。不飽和層のあることが、帯水層に移行する浸出水中の汚染物質の最終的な濃度に及ぼす影響は、不飽和層を通過して移行する間の放射性核種の崩壊によるものだけである。不飽和層を通過する放射性核種 i の移行時間は次式で与えられる。

$$t_i = \frac{z^{uz} \cdot R_i^{uz} \cdot p^{uz} \cdot s^{uz}}{I} \quad (10)$$

ここで、

- t_i : 放射性核種 i の不飽和層の移行時間 (y)
 I : 浸透率 (m/y)
 z^{uz} : 不飽和層の厚さ (m)
 R_i^{uz} : 放射性核種 i の不飽和層における遅延係数 (-)
 p^{uz} : 不飽和層の有効空隙率 (-)
 s^{uz} : 不飽和層の飽和率 (-)

放射性核種 i の不飽和層における遅延係数は、次式で与えられる。

$$R_i^{uz} = 1 + \frac{\rho^{uz} \cdot K_{d,i}^c}{\theta^{uz}} \quad (11)$$

ここで、

- ρ^{uz} : 不飽和層の密度 (kg/m³)

$K_{d,i}$: 不飽和層における放射性核種 i の分配係数
(m^3/kg)

θ^{uz} : 不飽和層の水分含有率 (-)

不飽和層の飽和率は、次式で与えられる。

$$s^{uz} = \frac{\theta^{uz}}{P_t^{uz}} \quad (12)$$

ここで、

θ^{uz} : 不飽和層の水分含有率 (-)

P_t^{uz} : 不飽和層の全空隙率 (-)

不飽和層からの浸出水中の放射性核種 i の濃度は、クリアランス後の汚染層からの放射性物質の漏出開始までの時間と不飽和層を通過する放射性核種 i の移行時間の減衰を考慮した次式で与えられる。

$$C_i^u = C_i^s \cdot e^{-\lambda_i \cdot (t_0 + t_i)} \quad (13)$$

ここで、

C_i^u : 不飽和層からの浸出水中の放射性核種 i の濃度 (Bq/m^3)

C_i^s : 汚染層からの浸出水中の放射性核種 i の濃度 (Bq/m^3)

λ_i : 放射性核種 i の崩壊定数 ($1/\text{y}$)

t_0 : クリアランス後の汚染層からの放射性物質の漏出開始までの時間 (y)

t_i : 放射性核種 i の不飽和層の移行時間 (y)

ただし、子孫核種の半減期が短く、その上位の親核種と放射平衡と見なせる場合には不飽和層の移行時間の減衰はその親核種に対する減衰として計算する。

また、低確率なパラメータの設定ケースでは不飽和層の存在を全く考慮しない。

(4) 井戸水中の放射性核種濃度

被ばく評価では、汚染源の下流にある個人の井戸を想定する。この井戸は保守的に、汚染源と非常に近くにあるので汚染源の影響を受けていない地下水による希釈が起きないと想定する。帯水層中の放射性核種の輸送モデルでは分散や拡散効果を考慮していない。これも保守的な想定である。

これらの想定範囲で、井戸水中の放射性核種濃度は汚染層の下を流れている地下水の量で希釈することで得られる。地下水の量は次式で与えられる。

$$U^{gw} = z^{gw} \cdot w^{gw} \cdot v^{gw} \cdot p^{gw} \quad (14)$$

ここで、

U^{gw} : 地下水の量 (m^3/y)

z^{gw} : 帯水層の厚さ (m)

w^{gw} : 帯水層の流速に直角の方向の汚染層の幅 (m)

v^{gw} : 地下水の実流速 (m/y)

p^{gw} : 帯水層の有効間隙率 (-)

(9), (13) 及び (14) 式から、井戸水中の放射性核種 i の濃度は、地下水の量により希釈されるとした次式で与えられる。

$$C_i^w = \frac{U^s}{U^{gw} + U^s} \cdot C_i^u \quad (15)$$

ここで、

C_i^w : 井戸水中の放射性核種 i の濃度 (Bq/m^3)

U^s : 汚染層を通る浸出水の量 (m^3/y)

U^{gw} : 地下水の量 (m^3/y)

C_i^u : 不飽和層からの浸出水中の放射性核種 i の濃度 (Bq/m^3)

(5) 農作物中の放射性核種濃度

井戸水を個人の菜園で育てられる農作物の灌漑用水に使用することによる放射線学的影響を評価するために、水から農作物への放射性核種の移行を考慮する必要がある。そのため、水から農作物への放射性核種の移行係数は、IAEA の SRS No. 19 (2001)¹²⁾ に示されている次式により求められる。農作物への放射性核種の移行は、葉面沈着による葉からの放射性核種の農作物への取り込みと根からの放射性核種の吸収を考慮する。

$$F_{ti} = \frac{I_{rr} \cdot f_r \cdot T_f \cdot (1 - e^{-\lambda_w \cdot t_e})}{Y_w \cdot \lambda_w} + \frac{I_{rr} \cdot (1 - f_r) \cdot f_{ti} \cdot (1 - e^{-L_i \cdot t_e})}{\rho^e \cdot L_i} \quad (16)$$

ここで、

F_{ti} : 水から農作物への放射性核種 i の移行係数 (m^3/kg)

I_{rr} : 灌漑率 (m/y)

f_r : 農作物に保持される付着した放射性核種の割合 (-)

T_f : 葉から農作物への移行係数 (-)

λ_w : 農作物に対する風雨による除去係数 ($1/\text{y}$)

t_e : 農作物の生育期間 (y)

Y_w : 湿式重量での農作物の栽培密度 (kg/m^2)

f_{ti} : 放射性核種 i の根から農作物への移行係数 (-)

L_i : 放射性核種 i の線源からの漏出率 ($1/\text{y}$)

ρ^e : 土壌の有効表面密度 (kg/m^2)

農作物中の放射性核種濃度は、(16) 式で求められる水から農作物への放射性核種 i の移行係数を用いて、次式で与えられる。

$$C_i^c = C_i^w \cdot F_{t,i} \quad (17)$$

ここで,

- C_i^c : 農作物中の放射性核種 i の濃度 (Bq/kg)
 C_i^w : 井戸水中の放射性核種 i の濃度 (Bq/m³)
 $F_{t,i}$: 水から農作物への放射性核種 i の移行係数 (m³/kg)

(6) 河川水産物中の放射性核種濃度

河川中の放射性核種 i の濃度は、河川水の流量により希釈されるとした次式で与えられる。

$$C_i^r = \frac{U^s}{U^r + U^s} \cdot C_i^u \quad (18)$$

ここで,

- C_i^r : 河川中の放射性核種 i の濃度 (Bq/m³)
 U^s : 汚染層を通る浸出水の量 (m³/y)
 U^r : 河川の流量 (m³/y)
 C_i^u : 不飽和層からの浸出水中の放射性核種 i の濃度 (Bq/m³)

河川水産物中の放射性核種 i の濃度は、(9) 式で求めた河川中の放射性核種 i の濃度より河川水産物への濃縮を考慮した次式で与えられる。

$$C_i^f = C_i^r \cdot f_{c,i} \quad (19)$$

ここで,

- C_i^f : 河川水産物中の放射性核種 i の濃度 (Bq/kg)
 C_i^r : 河川中の放射性核種 i の濃度 (Bq/m³)
 $f_{c,i}$: 放射性核種 i の河川水産物への濃縮係数 (m³/kg)

(7) 井戸水, 農作物, 河川水産物摂取による被ばく線量

井戸水, 農作物, 河川水産物摂取による線量は、(17),

(18) 及び (19) 式で求められる井戸水, 農作物, 河川水産物中の放射性核種 i の濃度を用いて, 汚染飲料水, 汚染農作物, 汚染した河川水産物の割合を考慮した次式で与えられる。

$$E_{ing,i}^w = (C_i^w \cdot q^w \cdot F^w + C_i^c \cdot q^c \cdot F^c + C_i^f \cdot q^f \cdot F^f) \cdot e_{ing,i} \quad (20)$$

ここで,

- $E_{ing,i}^w$: 井戸水, 農作物, 河川水産物摂取による放射性核種 i の年間の実効線量 (Sv/y)
 C_i^w : 井戸水中の放射性核種 i の濃度 (Bq/m³)
 C_i^c : 農作物中の放射性核種 i の濃度 (Bq/kg)
 C_i^f : 河川水産物中の放射性核種 i の濃度 (Bq/kg)
 q^w : 井戸水の年間摂取量 (m³/y)
 q^c : 農作物の年間摂取量 (kg/y)
 q^f : 河川水産物の年間摂取量 (kg/y)
 F^w : 摂取される汚染飲料水の割合 (–)
 F^c : 摂取される汚染農作物の割合 (–)
 F^f : 摂取される汚染河川水産物の割合 (–)
 $e_{ing,i}$: 経口摂取による放射性核種 i の実効線量係数 (Sv/Bq)

武田 聖司 (たけだ せいじ)

(独) 日本原子力研究開発機構安全研究センター, 研究副主幹。低レベル放射性廃棄物処分の濃度上限値評価, クリアランスレベル評価に携わり, 高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全評価手法に関

する研究に取り組んでいる。

E-mail: takeda.seiji@jaea.go.jp