

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計算平成22年6月3日
日本原子力研究開発機構
安全研究センター

1. はじめに

IAEA SRS No. 44⁽¹⁾（以下、SRS No. 44）では、天然起源の放射性核種である U-234、U-235 及び U-238 に対して、線量計算をベースとした基準線量に対する放射能濃度によるクリアランスレベルの推定が行われていない。本資料では、SRS No. 44 の評価に使用されているモデルを用いた場合の U-234、U-235 及び U-238 に対するクリアランスレベルの計算を行った。また、パラメータについては、SRS No. 44 におけるパラメータ設定を基本的に踏襲し使用するが、外部被ばくの実効線量換算係数、吸入及び経口摂取に対する実効線量係数、皮膚被ばくの等価線量換算係数については、U-234、U-235 及び U-238 及びそれらの子孫核種に対し、本解析の中で新たに設定した。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のうち SRS No. 44 において記載のない元素のパラメータについても、新たに設定をした。

2. 評価方法

(1) シナリオ及び被ばく経路

SRS No. 44 では、表 1 に示すようなシナリオにおける個人への被ばく経路を想定している。

表 1 シナリオと被ばく経路

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
RL-A		成人	処分場あるいはその他の施設近傍での吸入
RF	鋳物工場近傍の居住者の被ばく	子供	汚染された土地で生育した食物の摂取
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	鋳物工場近傍での吸入
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	建物の中での外部被ばく
			外部被ばく
			汚染されたダストの吸入
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	汚染された物質の直接摂取
			汚染された飲料水の摂取
			汚染された食物の摂取
RW-A		成人	汚染された魚の摂取
			汚染された飲料水の摂取
			汚染された食物の摂取
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	汚染された魚の摂取
			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。

SRS No. 44 におけるクリアランスレベル導出のアプローチとして、クリアランス対象の物質の単位濃度 (1Bq/g) に対する線量計算による導出の方法が用いられており、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、 1mSv/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 50mSv/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、表 1 に示した評価シナリオの各被ばく経路の線量を計算する。なお、同一の評価シナリオにおける個人に対する影響する被ばく経路の重量を考慮した線量を評価するものとする。

(2) モデル及びパラメータ

評価モデルに関しては、SRS No. 44 における同じ評価モデルを用いることとし、U-234, U-235 及び U-238 のクリアランスレベルを計算した。使用した評価モデルについては、参考資料 1 に示す。

クリアランスレベルの計算では、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、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することとした。

U-234, U-235 及び U-238 の崩壊系列図を図 1 及び図 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、半減期が 10 日未満の子孫核種は親核種の線量換算係数に子孫核種の寄与を含めて、半減期が 10 日以上放射性核種は崩壊連鎖に伴う減衰/生成を計算した。その結果、U-234, U-235 及び U-238 の 3 核種の場合、100 年後が子孫核種の寄与が最大となり、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表 2 に示す。

また、パラメータについては、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使用するが、外部被ばくの実効線量換算係数、吸入及び経口摂取に対する実効線量係数、皮膚被ばくの等価線量換算係数については、U-234, U-235 及び U-238 及びそれらの子孫核種に対し、本解析の中で新たに設定した。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のうち SRS No. 44 において記載のない元素のパラメータについても、新たに設定をした。以下に新たに設定したパラメータを示す。

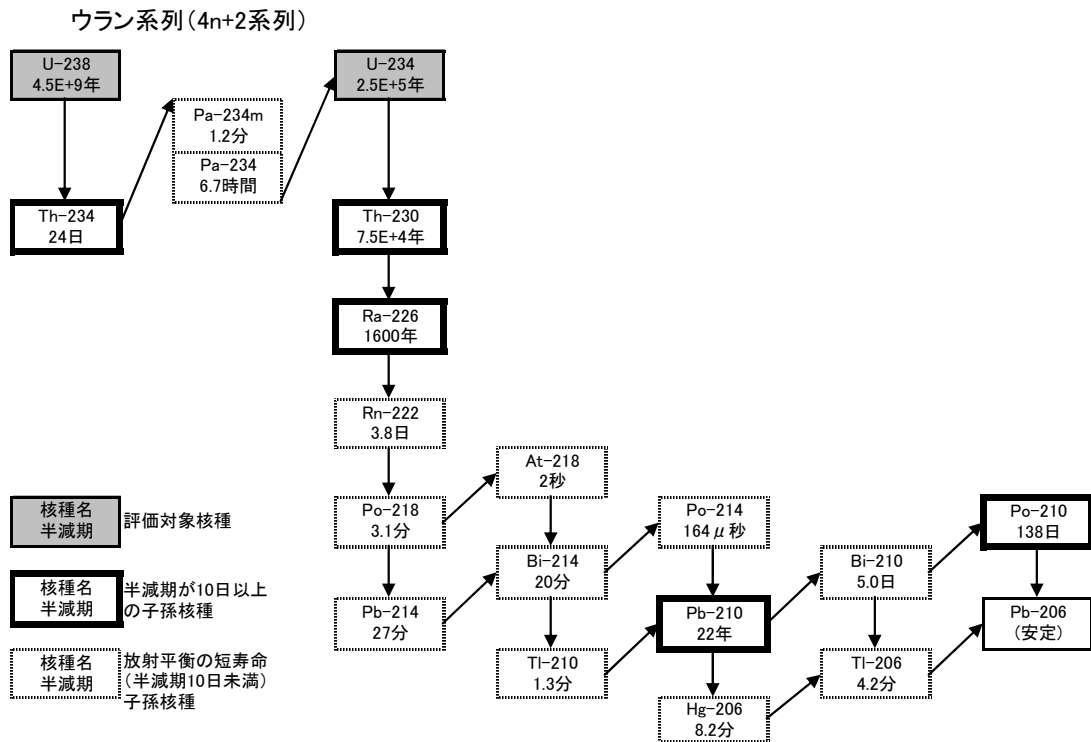


図1 ウラン系列 (4n+2 系列) の崩壊系列図

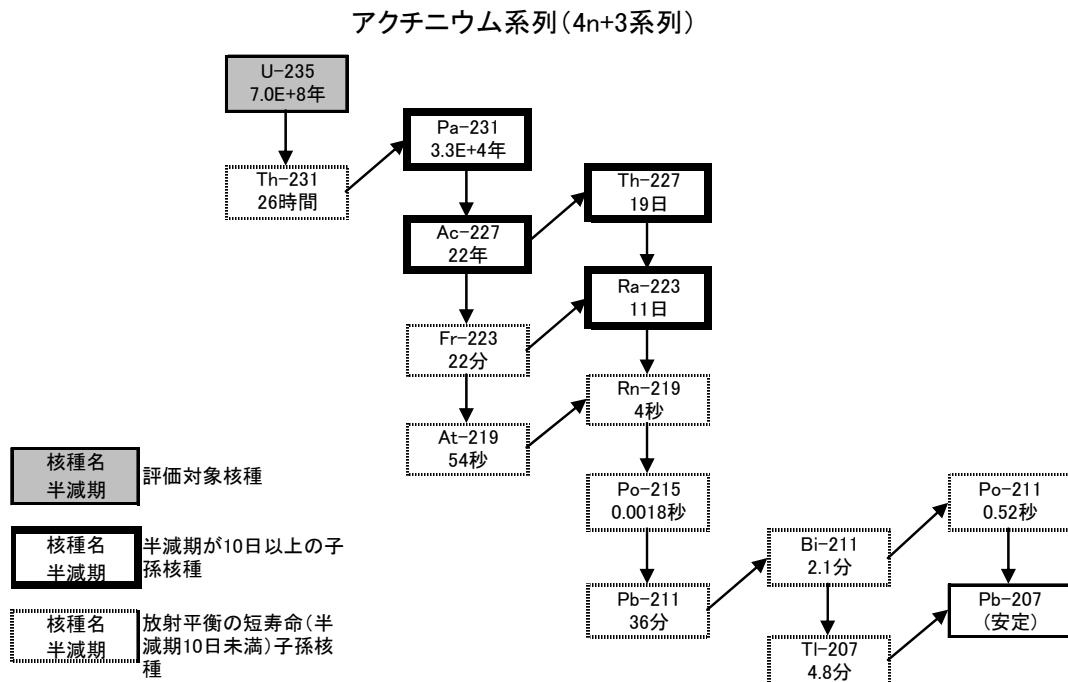


図2 アクチニウム系列 (4n+3 系列) の崩壊系列図

表 2 100 年間に於ける子孫核種の最大濃度の割合

核種	100年間に於ける子孫核種の最大濃度の割合(-) *1
U 234	1.00E+00
TH230	9.19E-04
RA226	1.96E-05
PB210	1.09E-05
PO210	1.08E-05
U 235	1.00E+00
PA231	2.11E-03
AC227	1.48E-03
TH227	1.46E-03
RA223	1.48E-03
U 238	1.00E+00
TH234	1.00E+00
U 234	2.83E-04
TH230	1.30E-07
RA226	1.85E-09
PB210	8.62E-10
PO210	8.46E-10

(*1) U-234, U-235, U238 の子孫核種は 100 年後が最大濃度となる。

①外部被ばく実効線量換算係数

U-234、U-235、U-238 及びそれらの子孫核種の以下に示す外部被ばく経路に対する実効線量換算係数を、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である QAD-CGGP2⁽²⁾により算出した。

- シナリオ WL（処分場での作業者の外部被ばく）及び RP（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）
- 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）
- シナリオ WF（鋳物工場での機器あるいはスクラップの山からの作業者の外部被ばく）及び W0（機器あるいはトラックの荷からの作業者の外部被ばく）

外部被ばく実効線量換算係数の計算条件を表 3 に示す。光子エネルギー及び発生率は JAERI-Data/Code 2001-004⁽³⁾のデータを使用した。また、JAEA-Data/Code 2008-001⁽⁴⁾において、コンクリート及び鉄のビルドアップ係数が各照射ジオメトリ（AP、ISO、ROT）に対する光子エネルギー及び材料の厚さの条件との関係で整備されており、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を使用した。算出した外部被ばく実効線量換算係数の結果一覧を表 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 倍しており、同様に、成人に対する外部被ばく実効線量換算係数を 1.2 倍した値を用いることとした。

表 3 外部被ばく実効線量換算係数の計算条件

シナリオ	被ばく形態	外部被ばく線量換算係数の計算条件
WL	処分場での作業員の外部被ばく	幾何形状: 半無限媒体 評価点: 地表から1m
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	照射ジオメトリ: ROT 材料: コンクリート 材料の密度: 1.5g/cm 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3×4m ² 、高さ2.5m、壁厚 20cm 評価点: 床から1m 照射ジオメトリ: ROT 材料: コンクリート 材料の密度: 1.5g/cm 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5×2×1m ³ の大きさの平板 評価点: 平板(2×1m ²)から1m 照射ジオメトリ: AP
WO	機器あるはトラックの荷からの外部被ばく	材料: 鉄 材料の密度: 1.5g/cm ³

表 4 U-234、U-235 及び U-238 の外部被ばく実効線量換算係数一覧

放射性核種		外部被ばく線量換算係数 (μ Sv/h per Bq/g)			放射平衡を仮定した子孫核種 *1
		WL, RP	RH	WF, WO	
ウラン系列 (⁴ n+2 系列)	U-238	1.8E-04	1.4E-04	4.2E-05	—
	Th-234	4.1E-03	3.2E-03	8.3E-04	Pa-234m, Pa-234
	U-234	9.6E-06	9.5E-06	6.9E-07	—
	Th-230	3.2E-05	3.1E-05	3.0E-06	—
	Ra-226	3.4E-01	2.4E-01	7.6E-02	Rn-222, Po-218, At-218, Rn-218, Pb-214, Bi-214, Po-214, Tl-210
	Pb-210	4.8E-05	4.9E-05	2.4E-06	Bi-210, Hg-206, Tl-206
	Po-210	1.7E-06	1.3E-06	3.8E-07	—
アクチニウム系列 (⁴ n+3 系列)	U-235	2.2E-02	2.1E-02	3.0E-03	Th-231
	Pa-231	5.9E-03	5.1E-03	1.1E-03	—
	Ac-227	8.9E-05	8.0E-05	1.3E-05	Fr-223, At-219
	Th-227	1.5E-02	1.4E-02	2.7E-03	—
	Ra-223	4.5E-02	3.9E-02	8.6E-03	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 の中に示されていない。本解析では、作業員に対する吸入及び経口摂取による線量係数は ICRP Publ. 68⁽⁵⁾、一般公衆（成人、子ども）に対しては ICRP Publ. 72⁽⁶⁾ の線量係数を設定した（表 5 参照）。皮膚被ばくの等価線量換算係数に関しては、Radiation Protection 65⁽⁷⁾ の値を基本に、値がない放射性核種に対する皮膚被ばくの等価線量換算係数は Health Physics Vol. 53⁽⁸⁾ 等より値を設定した（表 6 参照）。

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）に必要な 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）は、SRS No. 44 に記載されているものを使用する。ただし、SRS No. 44 において記載のない元素については、

SRS No. 44 の中で引用している文献からその値を決定することとした。

SRS No. 44 において記載のない元素に対する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⁽⁹⁾ で設定されているデフォルト値（参考文献 7 の表 E. 4 の値）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使用した。

また、SRS No. 44 において記載のない元素に対する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 SRS No. 19⁽¹⁰⁾ の値を使用することとした。汚染層及び不飽和層における分配係数を表 7 に示し、土壌から農作物への移行係数を表 8 に示す。また、河川水から魚類への濃縮係数を表 9 に示す。

また、SRS No. 44 の溶融過程に関する WF 及び RF シナリオの吸入被ばくについては、微粒子への放射性物質の濃縮係数（1 から 70）が用いられている。Ac 以外の元素は、SRS No. 44 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、SRS No. 44 の引用文献である European Commission(EC) RP-89⁽¹¹⁾ の中でさらに参照されている EC RP-117⁽¹²⁾ 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（表 10 参照）。

表 5 U-234、U-235 及び U-238 の吸入及び経口摂取被ばくの実効線量係数一覧

放射性核種		内部被ばく線量係数(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	
ウラン系列 (4n+2系列)	U-238	5.7E-06	4.4E-08	2.9E-06	4.5E-08	9.4E-06	1.2E-07	-
	Th-234	5.8E-09	3.4E-09	7.7E-09	3.4E-09	3.1E-08	2.5E-08	Pa-234m, Pa-234
	U-234	6.8E-06	4.9E-08	3.5E-06	4.9E-08	1.1E-05	1.3E-07	-
	Th-230	2.8E-05	2.1E-07	1.4E-05	2.1E-07	3.5E-05	4.1E-07	-
	Ra-226	2.2E-06	2.8E-07	3.5E-06	2.8E-07	1.1E-05	9.6E-07	Rn-222, Po-218, At-218, Rn-218, Pb-214, Bi-214, Po-214, Tl-210
	Pb-210	1.2E-06	6.8E-07	1.2E-06	6.9E-07	4.0E-06	3.6E-06	Bi-210, Hg-206, Tl-206
	Po-210	2.2E-06	2.4E-07	3.3E-06	1.2E-06	1.1E-05	8.8E-06	-
アクチニウム系列 (4n+3系列)	U-235	6.1E-06	4.6E-08	3.1E-06	4.7E-08	1.0E-05	1.3E-07	Th-231
	Pa-231	8.9E-05	7.1E-07	1.4E-04	7.1E-07	2.3E-04	1.3E-06	-
	Ac-227	6.3E-04	1.1E-06	5.5E-04	1.1E-06	1.6E-03	3.1E-06	Fr-223, At-219
	Th-227	7.6E-06	8.9E-09	1.0E-05	8.8E-09	3.0E-05	7.0E-08	-
	Ra-223	5.7E-06	1.0E-07	7.4E-06	1.0E-07	2.1E-05	1.1E-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.68⁽⁵⁾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. 30⁽¹³⁾のデフォルト値である1 μ m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 μ mをデフォルト値としているため、ここでは5 μ m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.72⁽⁶⁾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 Pub.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 Pub.72の“Adult”から引用した。
- ・居住者(子供)の実効線量係数はICRP Pub.72の“1 Year”から引用した。
- ・ICRP Pub.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 μ mとして求めている。
- ・ICRP Pub.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。

注) 作業者に対してはICRP Publ.68を、居住者に対してはICRP Publ.72を使用する。

表 6 U-234、U-235 及び U-238 の皮膚被ばくの等価線量換算係数の一覧

放射性核種		皮膚被ばく線量換算係数(Sv/y per Bq/cm ²)			放射平衡を仮定した子孫核種 *4
		β 4mg/cm ²	γ 7mg/cm ²	$\beta + \gamma$	
ウラン系列 (⁴ n+2 系列)	U-238	3.7E-05 *2	7.5E-05 *1 *5	1.1E-04	-
	Th-234	3.4E-02 *2 *5	1.0E-05 *1	3.4E-02	Pa-234m, Pa-234
	U-234	6.5E-05 *1	2.4E-05 *1	8.8E-05	-
	Th-230	9.1E-04 *1	3.3E-05 *1	9.4E-04	-
	Ra-226	5.2E-02 *1 *5	9.6E-04 *1 *5	5.3E-02	Rn-222, Po-218, At-218, Rn-218, Pb-214, Bi-214, Po-214, Tl-210
	Pb-210	2.3E-02 *1	7.3E-05 *1	2.3E-02	Bi-210, Hg-206, Tl-206
	Po-210	0.0E+00 *1	4.2E-09 *1	4.2E-09	-
アクチニウム系列 (⁴ n+3 系列)	U-235	2.2E-02 *1	9.5E-05 *1	2.2E-02	Th-231
	Pa-231	1.3E-03 *1	2.5E-05 *1	1.3E-03	-
	Ac-227	3.6E-04 *1 *5	1.8E-06 *3	3.6E-04	Fr-223, At-219
	Th-227	2.4E-03 *1	7.3E-05 *1	2.5E-03	-
	Ra-223	3.2E-02 *1	8.1E-05 *1	3.2E-02	Rn-219, Po-215, Pb-211, Bi-211, Po-211, Tl-207

(*1) Radiation Protection 65⁽⁷⁾に記載されている値を選定した。

(*2) Health Physics Vol.53, No.2⁽⁸⁾に記載されている値を選定した。

(*3) CEA-R-5441⁽¹⁴⁾に記載されている値を選定した。

(*4) 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。

(*5) 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線量換算係数を算出した。

表 7 汚染層及び不飽和層の分配係数

汚染層及び不飽和層の分配係数		
単位	(mL/g)	
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	100 *	100 *
Po	10 *	10 *
Ra	70 *	70 *
Ac	20 *	20 *
Th	60000	1378
Pa	50 *	50 *
U	50	15
(選定根拠手順)	・SRS No.44 ⁽¹⁾ で分配係数を引用している文献(RESRAD ⁽⁹⁾)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SRS No.44に分配係数の値が記載されていないことを示す。

表 8 土壌から農作物への移行係数

土壌からの農作物(葉菜、非葉菜、果実)への移行係数	
単位	(Bq/g-wet)/(Bq/g-dry)
元素	選定値
Pb	2.0E-02
Po	2.0E-03
Ra	4.0E-02
Ac	1.0E-03 *
Th	1.0E-03
Pa	1.0E-02
U	1.0E-02
選 定 根 拠	・SRS No.44 ⁽¹⁾ 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 ⁽¹⁰⁾)に記載されている値を選定することとした。

(注)「*」は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。

表 9 河川水から魚類への濃縮係数

河川水から魚類への濃縮係数	
単位	(L/kg)
元素	選定値
Pb	300 *
Po	50 *
Ra	50 *
Ac	15 *
Th	100
Pa	10 *
U	10
選 定 根 拠	・SRS No.44 ⁽¹⁾ 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 ⁽¹⁰⁾)に記載されている値を選定することとした。

(注)「*」は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。

表 10 微粒子への放射性物質の濃縮係数

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、SRS No.44 ⁽¹⁾ 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 RP-117 ⁽¹²⁾ 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。

3. 計算結果

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表11及び表12に示す。表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(1Bq/g)に対する最大線量の結果を示しており、表12は各シナリオにおける被ばく経路を重畳した最大線量の結果である。また、実効線量基準に対するU-234、U-235及びU-238の放射能濃度の結果を表13に示す。

U-234とU-238の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経路となった。また、U-235に対する決定シナリオ、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経路となった。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、1.2Bq/g、0.53Bq/g、1.1Bq/gである。この各核種に対する放射能濃度の結果に対し、SRS No.44で規制免除レベルに係る放射能濃度を評価する際に用いる手法(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} と評価する方法)を適用すると、表14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1Bq/gとなった。

表 11 各被ばく経路に対する U-234、U-235、U-238 の最大線量の結果

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	その他の作業者(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
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	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	その他の作業者(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
			経口摂取		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

表 12 各シナリオにおける U-234、U-235、U-238 の最大線量の結果

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、吸入、直接摂取	作業者	8.4E+00	1.9E+01	9.0E+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	1.4E+00	1.5E+00	1.3E+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	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、経口摂取	居住者(子供)	9.0E-01	9.6E-01	8.4E-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)	4.5E-01	4.5E-01	4.1E-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、吸入、直接摂取	居住者(子供)	6.9E-01	1.8E+00	9.6E-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)	6.0E-01	6.7E-01	5.5E-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)	7.5E-01	8.0E-01	6.9E-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	6.4E+01	1.1E+02	6.2E+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	2.0E+01	2.6E+01	1.9E+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	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、経口摂取	居住者(子供)	3.1E+01	3.3E+01	2.9E+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)	2.0E+01	2.2E+01	1.8E+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、吸入、直接摂取	居住者(子供)	1.8E+01	3.3E+01	2.1E+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)	1.3E+02	1.3E+02	1.2E+02
	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)	1.6E+02	1.6E+02	1.4E+02
	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

表 13 実効線量基準に対する U-234、U-235 及び U-238 の放射能濃度の結果

シナリオ			被ばく形態	被ばく者	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	作業員	1.2E+00	5.3E-01	1.1E+00
	WF	鋳物工場の作業員の被ばく	外部、吸入、直接摂取	作業員	7.4E+00	6.9E+00	7.7E+00
	WO	その他の作業員(例、トラック運転手)の被ばく	外部	作業員	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)の作業員の被ばく	外部、吸入、直接摂取	作業員	1.6E+01	9.3E+00	1.6E+01
	WF	鋳物工場の作業員の被ばく	外部、吸入、直接摂取	作業員	5.1E+01	3.8E+01	5.4E+01
	WO	その他の作業員(例、トラック運転手)の被ばく	外部	作業員	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
	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	作業員	9.0E+04	3.7E+02	2.4E+02
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)

表 14 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計算結果

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) 計算値が、 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。

参考文献

- (1) IAEA: Derivation of Activity Concentration Values for Exclusion, Exemption and Clearance, Safety Reports Series No. 44 (2005).
- (2) Yukio Sakamoto, Shun-ichi Tanaka: QAD-CGGP2 and G33-GP2: Revised Version of QAD-CGGP and G33-GP, JAERI-M 90-110 (1990).
- (3) 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/Code 2001-004 (2001)
- (4) 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/Code 2008-001 (2008)
- (5) ICRP: Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers, ICRP Publication 68 (1994).
- (6) ICRP: Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 5, ICRP Publication 72 (1995).
- (7) 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).
- (8) 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 Physics. Vol. 53, No. 2, 135-141 (1987).
- (9) C. Yu, et al. : User's Manual for RESRAD Version 6, ANL/EAD-4, Environment Assessment Division Argonne National Laboratory (2001).
- (10) IAEA: Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, Safety Reports Series No. 19 (2001).
- (11) EC: Recommended Radiological Protection Criteria for the Recycling of Metals from the Dismantling of Nuclear Installations, Radiation Protection-89 (1998).

- (12) 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).
- (13) ICRP: Limits for the Intake of Radionuclides by Workers, ICRP Publication 30 (1981).
- (14) Commissariat à l'Énergie Atomique: Dosimétrie et thérapeutique des contaminations cutanées, CEA-R-5441 (1988).

評価モデルの一覧

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。

$$E_{ext,i} = C_i \cdot e_{ext,i} \cdot t_e \cdot f_d \cdot e^{-\lambda_i \cdot t_1} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_i \cdot t_2}}{\lambda_i \cdot t_2} \quad (1)$$

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 (μ Sv/y)

C_i : 汚染物質の放射性核種 i の濃度 (Bq/g)

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

t_e : 被ばく時間 (h/y)

f_d : 希釈係数 (-)

λ_i : 放射性核種 i の崩壊定数 (1/y)

t_1 : クリアランスされてから被ばく開始までの減衰時間 (y)

t_2 : 被ばく線量積算期間 (y)

ただし、U-234、U-235、U-238 に対する線量計算において、式(1)の崩壊定数による減衰は 100 年間の評価期間において生じない。

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。

$$E_{inh,i} = C_i \cdot e_{inh,i} \cdot t_e \cdot f_d \cdot f_{c,i} \cdot C_{dust} \cdot V \cdot e^{-\lambda_i \cdot t_1} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_i \cdot t_2}}{\lambda_i \cdot t_2} \quad (2)$$

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 (μ Sv/y)

C_i : 汚染物質の放射性核種 i の濃度 (Bq/g)

$e_{inh,i}$: 吸入による放射性核種 i の実効線量係数 (μ 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 (g/m³)

V : 呼吸率 (m³/h)

λ_i : 放射性核種 i の崩壊定数 (1/y)

t_1 : クリアランスされてから被ばく開始までの減衰時間 (y)

t_2 : 被ばく線量積算期間 (y)

ただし、U-234、U-235、U-238 に対する線量計算において、式(2)の崩壊定数による減衰は 100 年間の評価期間において生じない。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, 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。

$$E_{ing,i} = C_i \cdot e_{ing,i} \cdot q \cdot f_d \cdot f_c \cdot f_t \cdot e^{-\lambda_i \cdot t_1} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_i \cdot t_2}}{\lambda_i \cdot t_2} \quad (3)$$

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 (μ Sv/y)

C_i : 汚染物質の放射性核種 i の濃度 (Bq/g)

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

q : 年間摂取量 (g/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_t : 根からの移行係数 (-)

λ_i : 放射性核種 i の崩壊定数 (1/y)

t_1 : クリアランスされてから被ばく開始までの減衰時間 (y)

t_2 : 被ばく線量積算期間 (y)

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。また、U-234、U-235、U-238 に対する線量計算において、式(3)の崩壊定数による減衰は 100 年間の評価期間において生じない。

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。

$$E_{skin,i} = C_i \cdot e_{skin,i} \cdot t_e \cdot L_{dust} \cdot f_d \cdot f_c \cdot \rho \cdot e^{-\lambda_i \cdot t_1} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_i \cdot t_2}}{\lambda_i \cdot t_2} \quad (4)$$

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 (μ Sv/y)

C_i : 汚染物質の放射性核種 i の濃度 (Bq/g)

$e_{skin,i}$: 皮膚被ばくによる放射性核種 i の等価線量換算係数 (μ Sv/y per Bq/cm²)

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 (cm)

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 (g/cm³)

λ_i : 放射性核種 i の崩壊定数 (1/y)

t_1 : クリアランスされてから被ばく開始までの減衰時間 (y)

t_2 : 被ばく線量積算期間 (y)

なお、U-234、U-235、U-238 に対する線量計算において、式(4)の崩壊定数による減衰は 100 年間の評価期間において生じない。

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壌中にあるとき (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。

$$L_i = \frac{I}{\theta^{cz} \cdot z^{cz} \cdot R_i^{cz}} \quad (5)$$

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 R_i^{cz} は、次式で与えられる。

$$R_i^{cz} = 1 + \frac{\rho^{cz} \cdot K_{d,i}^c}{\theta^{cz}} \quad (6)$$

ここで、

ρ^{cz} : 汚染層の密度 (g/cm³)

$K_{d,i}^c$: 汚染層における放射性核種 i の分配係数 (cm³/g)

(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。

$$C_i^s = \frac{M \cdot c_i \cdot L_i}{U^s} \quad (7)$$

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 (g)

c_i : 汚染物質中の放射性核種 i の比放射能 (Bq/g)

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 (m^3/y)

汚染層を通る浸出水の量 U^s は、次式で与えられる。

$$U^s = I \cdot A^{cz} \quad (8)$$

ここで、

I : 浸透率 (m/y)

A^{cz} : 汚染層の表面積 (m^2)

(3) 不飽和層からの浸出水の放射性核種濃度

汚染源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。

$$t_i = \frac{z^{uz} \cdot R_i^{uz} \cdot p^{uz} \cdot s^{uz}}{I} \quad (9)$$

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 R_i^{uz} は、次式で与えられる。

$$R_i^{uz} = 1 + \frac{\rho^{uz} \cdot K_{d,i}}{\theta^{uz}} \quad (10)$$

ここで、

ρ^{uz} : 不飽和層の密度 (g/cm^3)

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

θ^{uz} : 不飽和層の水分含有率 (-)

不飽和層の飽和率 s^{uz} は、次式で与えられる。

$$s^{uz} = \frac{\theta^{uz}}{p_t^{uz}} \quad (11)$$

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。

$$C_i^u = C_i^s \cdot e^{-\lambda_i \cdot (t_0 + t_i)} \quad (12)$$

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/m³)

C_i^s : 汚染層からの浸出水中の放射性核種 i の濃度 (Bq/m³)

λ_i : 放射性核種 i の崩壊定数 (1/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。

これらの想定の範囲で、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。

$$U^{gw} = z^{gw} \cdot w^{gw} \cdot v^{gw} \cdot p^{gw} \quad (13)$$

ここで、

U^{gw} : 地下水の量 (m³/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} : 地下水の間隙水速度 (m/y)

p^{gw} : 帯水層の有効間隙率 (-)

式(7)、(8)、(9)及び(13)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。

$$C_i^w = \frac{U^s}{U^{gw} + U^s} \cdot C_i^u \quad (14)$$

ここで、

- C_i^w : 井戸水中の放射性核種 i の濃度 (Bq/m³)
- U^s : 汚染層を通る浸出水の量 (m³/y)
- U^{gw} : 地下水の量 (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)

(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 SRS No. 19⁽¹⁾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。

$$F_{t,i} = \frac{I_{rr} \cdot f_r \cdot T_f \cdot (1 - e^{-\lambda_w \cdot t_e})}{Y_w \cdot \lambda_w} + \frac{I_{rr} \cdot (1 - f_r) \cdot f_{t,i} \cdot (1 - e^{-L_i \cdot t_e})}{\rho^e \cdot L_i} \quad (15)$$

ここで、

- $F_{t,i}$: 水から農作物への放射性核種 i の移行係数 (m³/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/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/m²)
- $f_{t,i}$: 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/y)
- ρ^e : 土壌の有効表面密度 (kg/m²)

農作物中の放射性核種濃度は、式(15)で求められる水から農作物への放射性核種の移行係数を用いて、次式で与えられる。

$$C_i^c = C_i^w \cdot F_{t,i} \quad (16)$$

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。

$$C_i^r = \frac{U^s}{U^r + U^s} \cdot C_i^u \quad (17)$$

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、式(17)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。

$$C_i^f = C_i^r \cdot f_{c,i} \quad (18)$$

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、式(16)、(17)、(18)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。

$$E_{ing,i}^w = (C_i^w \cdot q^w \cdot F^w + C_i^c \cdot q^c \cdot F^c + C_i^f \cdot q^f \cdot F^f) \cdot e_{ing,i} \quad (19)$$

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 (μ 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 : 摂取された汚染飲料水の割合 (-)
- F^c : 摂取された汚染農作物の割合 (-)
- F^f : 摂取された汚染した河川水産物の割合 (-)
- $e_{ing,i}$: 経口摂取による放射性核種 i の実効線量係数 (μ Sv/Bq)