

ウラン廃棄物の安全評価

木村英雄*

ウラン廃棄物の浅地中処分及び余裕深度処分（50～100m程度の深さへの処分）に関する安全解析を実施した。浅地中処分では、サイト再利用のラドンガス被ばく経路が重要となるが、この被ばく経路は評価パラメータの不確かさの影響が大きく、線量は10桁以上も変動することが明らかとなった。一方、余裕深度処分では、ラドンガスによる被ばくは顕著ではなく、 $1 \times 10^4 \text{Bq/g}$ 程度の廃棄物まで処分可能であることがわかった。

Keywords:ウラン廃棄物、浅地中処分、地下水移行、サイト再利用、ラドンガス、核種移行、安全評価、被ばく線量

Safety analyses were performed for the shallow-land disposal and disposal into 50-100m depth of uranium wastes generated from the nuclear fuel fabrication plants. The safety analyses for shallow-land disposal show that the dose due to radon gas inhalation in the site-reuse scenario is remarkable, however the peak dose due to radon gas varies more than 10 figures because of model parameter uncertainties. The safety analyses for disposal into 50-100m depth show that the dose due to radon gas is not significant and uranium waste containing up to about $1 \times 10^4 \text{Bq/g}$ can be disposed safely.

Keywords: uranium wastes, shallow-land disposal, groundwater migration, site-reuse, radon gas, radionuclide migration, safety assessment, dose equivalent

1 はじめに

ウラン廃棄物とは、原子炉等規制法に定める放射性廃棄物のうち、核燃料サイクル施設で発生する TRU 及び高レベル放射性廃棄物以外のウラン等で汚染された放射性廃棄物を示すものであり (Fig.1 参照), 極めて半減期の長いウラン核種及びその娘核種を含む放射性廃棄物である。核燃料加工施設等から発生する放射能レベルの低いウラン廃棄物は、簡易な方法による浅地中処分が可能と考えられている。ここでは、その処分方策及び安全性を検討するため、ウラン廃棄物の浅地中処分及び余裕深度処分（50～100m程度の深さへの処分）を対象に安全解析を実施した結果について報告する。

2 ウラン廃棄物の発生量等について

現在、核燃料加工施設において保管されているウラン廃

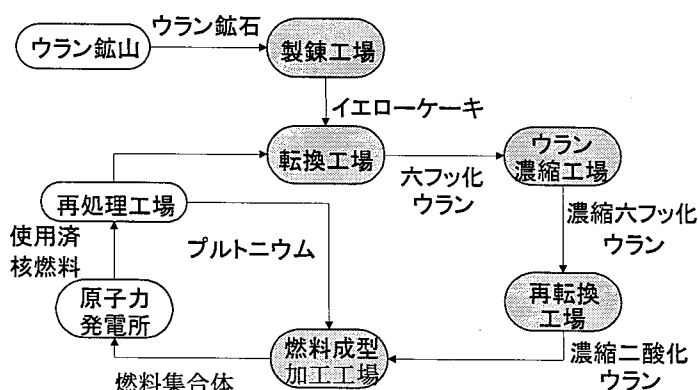


Fig. 1 Concept of nuclear fuel cycle

Safety assessments of uranium waste disposal, by Hideo Kimura (hkimura@popsvr.tokai.jacri.go.jp).

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会第17回夏季セミナーにおける講演内容に加筆したものである。

* 日本原子力研究所 燃料サイクル安全工学部 廃棄物安全評価研究室
Japan Atomic Energy Research Institute, Department of Fuel Cycle Safety Research, Waste Disposal Safety Assessment Lab.
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

棄物量は200リットルドラム缶換算で約33,000本であり、2030年までに約135,000本（27,000m³）の廃棄物が発生すると推定されている[1,2]。ウラン廃棄物は、①スラッジ類（鉄澱物、ろ過助剤等）、②焼却灰、③フィルター類、④雑固体（金属類、耐火物等）に分類され、現在保管されている廃棄物の割合は、それぞれ約21%、4%、7%、67%である。これらの廃棄物を除染処理すると、全体の90%以上は、50Bq/g以下のウラン濃度になると推定されており（Fig.2参照）、廃棄物の大部分は浅地中処分できるものと考えられている。その濃度を上回る濃度の廃棄物は余裕深度への処分に対応できると考えられる。本検討では、人工バリアの長期健全性を期待できないという観点から、ウラン廃棄物の浅地中処分概念として、簡易な埋設（トレンチ処分）を想定する。

3 安全評価シナリオ及びモデル

ウラン廃棄物は崩壊連鎖を伴う極めて長い半減期の核種を含み、その娘核種として気体状のラドン（Rn-222）を生成するなど、他の低レベル放射性廃棄物とは異なる特性がある。このため、原子炉運転に伴って発生する低レベル放射性廃棄物の浅地中処分と同じ評価手法を用いて、処分に伴う長期的な放射線影響を評価することはできない。

安全評価のシナリオの考え方としては、評価結果の妥当性が重要であり、そのためには、評価期間を考慮して想定した事象が妥当であること、そして想定した被ばく経路の網羅性を確認することが必要である。本研究では、これらのウラン廃棄物の特性を考慮した上で、評価シナリオとして、クリアランスレベル設定解析[3]を参考とする。クリアランスレベル評価では、本研究と同様に簡易な浅地中処分が想定されており、我が国で一般的に想定される被ばく事象をすべて包含するという観点では、その網羅性が十分検討されているものである。クリアランスレベルの設定解析では、埋設施設跡地の再利用に伴う被ばく事象を対象とし

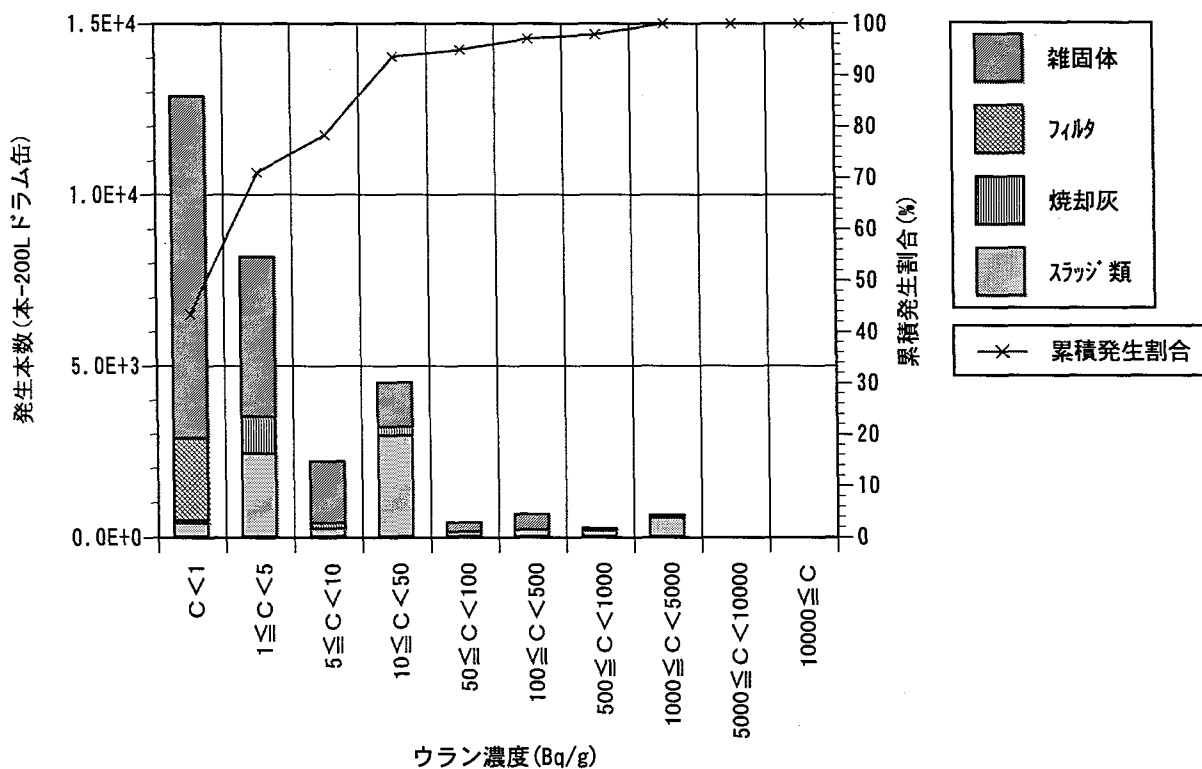


Fig. 2 Concentration profiles of U-wastes after decontamination

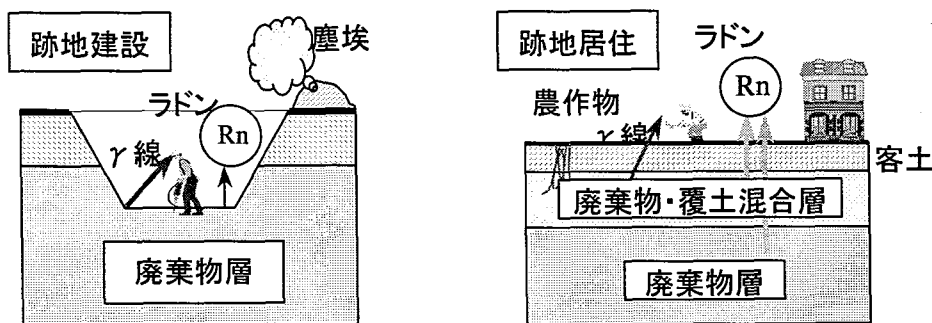


Fig. 3 Dose pathways of site-reuse scenario

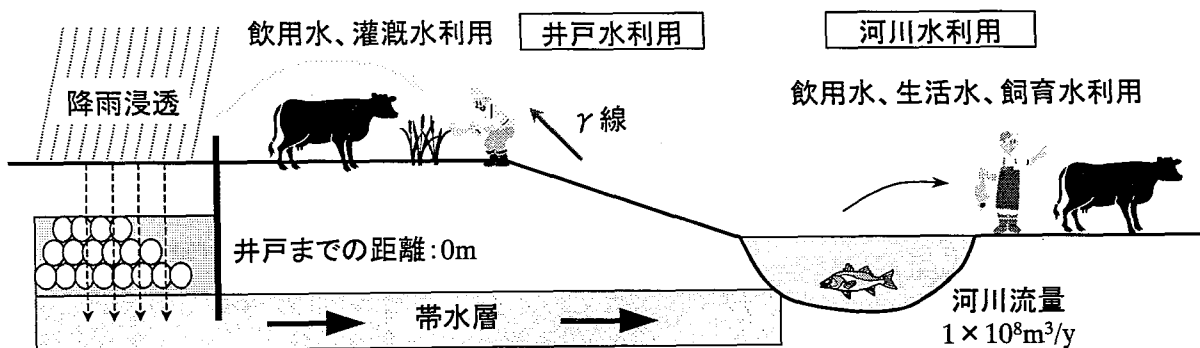


Fig. 4 Dose pathways of groundwater migration scenario

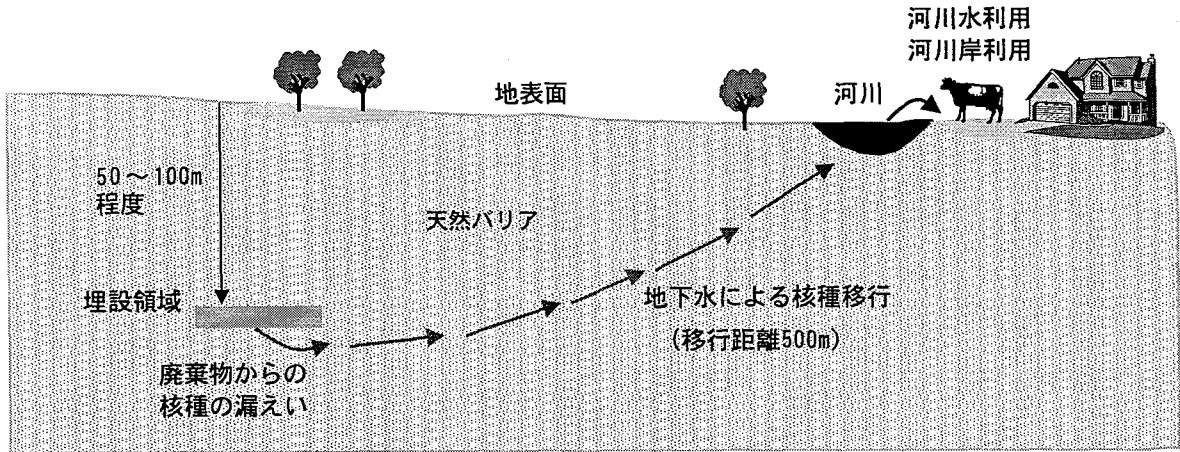


Fig.5 Concept of assessment scenario on waste disposal at 50-100m depth

たサイト再利用シナリオ、及び埋設施設から地下水への核種漏洩に伴い発生する被ばく事象を対象とした地下水移行シナリオが設定された。本研究でも、同様にこの2つのシナリオを想定する。サイト再利用シナリオでは、クリアランスレベル評価において想定されている汚染土壌からの外部及び吸入被ばくなど10の被ばく経路に、ラドンガスの吸入による内部被ばくの4経路を追加した合計14経路を考慮した。地下水移行シナリオでは、井戸水利用などクリアランスレベル評価で想定された主要な13の被ばく経路に、ラドンガスの吸入による内部被ばく3経路を追加した合計16経路を考慮した。本研究で想定した評価経路をTable1に示す。また、本研究で想定したサイト再利用シナリオ及び地下水移行シナリオの概念図をそれぞれFig.3及び4に示す。さらに、余裕深度処分の評価シナリオ概念図をFig.5に示す。ここでは、原子力安全委員会の「低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について(第3次中間報告)」[4]に倣って、河川水利用及び河川岸利用(建設, 居住, 農耕)の評価シナリオを設定した。

これらのシナリオに対する公衆の被ばく線量を評価するために、評価モデルを開発・整備した。評価モデルの構成図をFig.6に示す。各シナリオの評価モデルは、ソースタームモデル、地下水移行モデル、土壌コンパートメントモデル、ラドンガス移行評価モデル及び被ばく線量評価モデルから構成される。サイト再利用の評価モデルでは、評価期間が極めて長期に及ぶことを考慮して、地下水移行シナリオと同様に、埋設施設から地下水により核種が流出し、埋設施設の放射能インベントリが減少することの影響も評価できるようになっている。

ソースタームモデルは、分配平衡に基づいて廃棄物層から浸透地下水中に放射性核種が漏出するモデルであり、埋設施設からの核種漏洩フラックスを算出する。地下水移行モデルは、埋設施設から漏洩した放射性核種の帯水層中に

おける移行を評価し、生態圏に流入する核種移行量を算出する。帯水層中における核種移行は、地下水流による移流-分散、核種の土壌への吸着-脱着、及び崩壊連鎖を考慮した1次元モデルによって表される。

ラドンガス移行評価モデルは、埋設施設内のウラン廃棄物から発生したRn-222の土壌中における拡散移行を評価し、地表面からの散逸率を算定して、大気中におけるラドンガス濃度を算出するものである。本検討ではFig.7に示すように、ウラン廃棄物を起源とし地表面から散逸率 $J_c(\text{Bq}/\text{m}^2/\text{s})$ で散逸するラドンは、 $a(\text{m}) \times b(\text{m})$ の発生源から評価高さ $H(\text{m})$ までの領域(ボックス)を一様に分布すると想定する。

ここで、屋外大気中ラドン濃度は、式(1)で表される。(ここで、 $Co_{Rn}(t)$:時間 t における屋外大気中ラドン濃度(Bq/m^3), J_c :地表面からのラドン散逸率($\text{Bq}/\text{m}^2/\text{s}$), H :評価高さ(m), λ_{Rn} :ラドンの崩壊定数(s^{-1}), U :風速(m/s), a :発生源長さ(m)である。)また、処分場跡地への居住を想定する場合、ウラン廃棄物から発生するラドンは住居の床下及び換気より屋内に侵入する。床下から及び換気によって侵入するRn-222の屋内大気中濃度は、式(2)及び式(3)で表され、屋内大気中ラドン濃度は両式の和によって求められる。(ここで、 λ_c :床下空間の換気率(s^{-1}), h_c :床下空間高さ(m), I :床下空間から屋内へのRn-222侵入率(s^{-1}), h_i :屋内空間高さ(m), λ_i :屋内換気率(s^{-1})である。)

$$\frac{\partial Co_{Rn}(t)}{\partial t} = \frac{J_c(t)}{H} - \left(\lambda_{Rn} + \frac{U}{a} \right) \cdot Co_{Rn}(t) \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$Cci_{Rn}(t) = \left\{ \frac{I_c \cdot \left[1 - \exp\left[-(\lambda_{Rn} + \lambda_c) \cdot t\right] \right]}{h_c \cdot (\lambda_{Rn} + \lambda_c)} + \frac{Co_{Rn}(t) \cdot \lambda_c}{\lambda_c + \lambda_{Rn}} \right\} \cdot \frac{I \cdot h_c}{h_i \cdot (\lambda_i + \lambda_{Rn})} \quad (2)$$

$$Coi_{Rn}(t) = \frac{Co_{Rn}(t) \cdot \lambda_i}{\lambda_{Rn} + \lambda_i} \quad \dots \dots \dots (3)$$

Table 1 Assessment scenario of shallow land disposal of U-wastes

評価シナリオ	利用形態	被汚染物	線量評価対象者	被ばく形態	評価経路 No.
サイト再利用シナリオ	処分場の再利用	廃棄物との混合土壌	建設作業員	土壌直接線・外部	1
				塵埃吸入・内部	2
				ラドンガス吸入・内部	3
			居住者	土壌直接線・外部	4
				塵埃吸入・内部	5
				ラドンガス吸入・内部	6
			農耕作業者	土壌直接線・外部	7
				塵埃吸入・内部	8
				ラドンガス吸入・内部	9
			牧畜作業員	土壌直接線・外部	10
				塵埃吸入・内部	11
				ラドンガス吸入・内部	12
			農作物消費者	農作物摂取・内部	13
			畜産物消費者	畜産物摂取・内部	14
地下水移行シナリオ	井戸水利用	井戸水生活用水	周辺居住者	井戸水飲用・内部	15
				ラドンガス吸入・内部	16
		灌漑土壌	農耕作業者	土壌直接線・外部	17
				塵埃吸入・内部	18
				ラドンガス吸入・内部	19
			牧畜作業員	土壌直接線・外部	20
				塵埃吸入・内部	21
				ラドンガス吸入・内部	22
		灌漑水	農作物消費者	農作物摂取・内部	23
		飼育水	畜産物消費者	畜産物摂取・内部	24
	飼料	畜産物消費者	畜産物摂取・内部	25	
	養殖水	水産物消費者	水産物摂取・内部	26	
	河川水利用	河川水	河川産物消費者	河川産物摂取・内部	27
			河川水面活動者	河川面直接線・外部	28
				河川水サブマージョン・外部	29
			漁労作業員	漁網直接線・外部	30

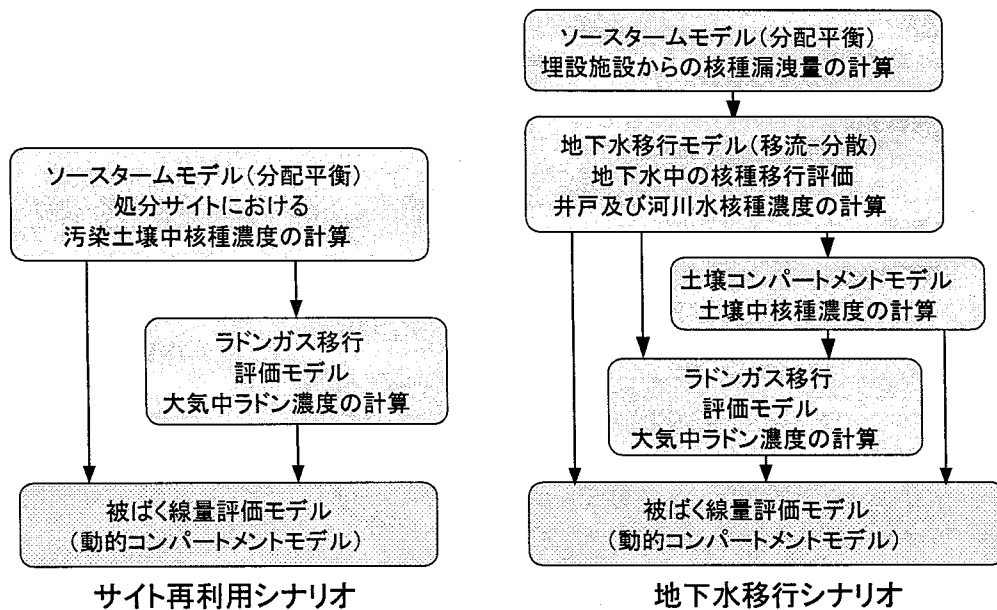


Fig.6 Assessment models for shallow land disposal of U-wastes

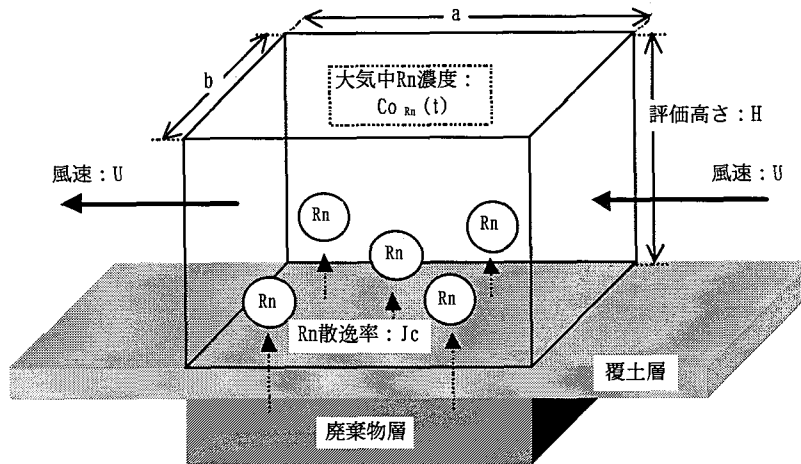


Fig. 7 Conceptual model of radon-gas in the atmosphere

4 評価パラメータの設定

【ウランの同位体組成】

ウラン廃棄物中に含まれる濃縮ウランの同位体組成は、現在、ウラン燃料の主流となっている 4.5%濃縮ウランの値 (^{238}U : 13.08Bq%, ^{235}U : 3.96Bq%, ^{234}U : 82.97Bq%) を代表値として設定する。

【評価シナリオに関連するパラメータ】

評価シナリオに関連するパラメータとしては、処分場に関連するパラメータ、サイト再利用に関連するパラメータ、地下水移行に関連するパラメータがあげられる。本研究では、これらのパラメータ値として、「クリアランスレベル評価」及び「現行の政令濃度上限値評価」[4-6]の設定値から各々設定する。

【核種及び元素依存パラメータ】

線量換算係数に関しては、内部被ばく換算係数は ICRP の Pub.68[7]より設定し、外部被ばく換算係数は簡易遮蔽計算コード QAD-CGGP2[8]を用いて算出し、設定した各評価

シナリオにおける被ばく形態を考慮した値を設定する。

廃棄物層の分配係数に関しては、基本的に実測値[9, 10]及び廃棄物の存在割合を考慮して設定する。帯水層及び灌漑土壌の分配係数に関しては、IAEA TRS No.364[11]の報告値に基づいて設定する。

農作物及び畜産物の移行係数、淡水産物の濃縮係数は、IAEA TRS No.364, IAEA SS No.57[12]等に基づいて設定する。

【ラドン評価に関連するパラメータ】

ラドンの散逸率、屋外及び屋内ラドンの算定に用いるパラメータ等のラドン濃度算出に関連するパラメータ、ラドン吸入による被ばく線量評価に関連するパラメータは、UNSCEAR の報告[13,14]を参考として適切な値を設定する。

5 解析結果

ウラン廃棄物浅地中処分(トレンチ処分)の安全解析として、以下の解析を実施した。

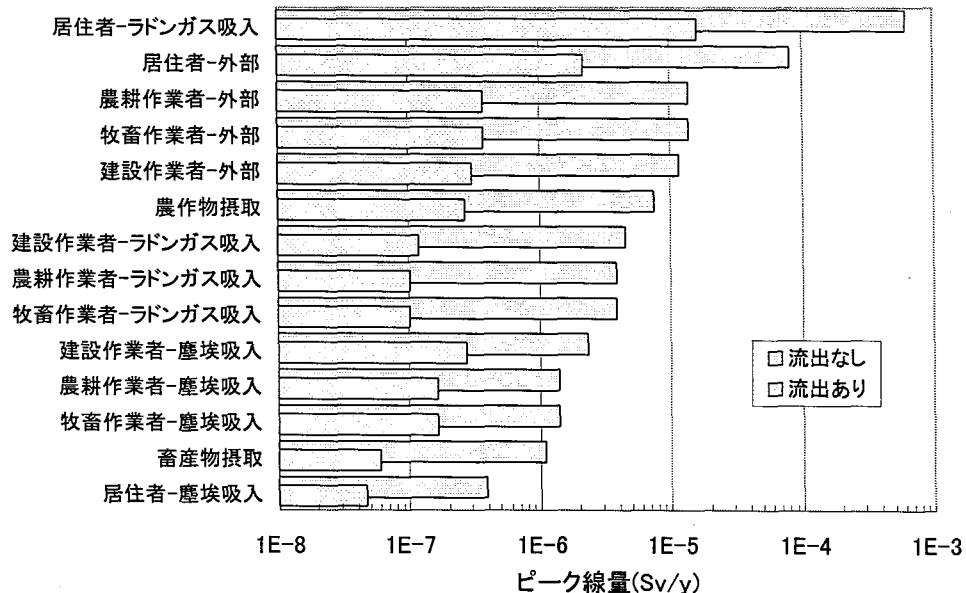


Fig. 8 Peak dose rates of various pathways in the site-reuse scenario (based on the clearance-level analysis)

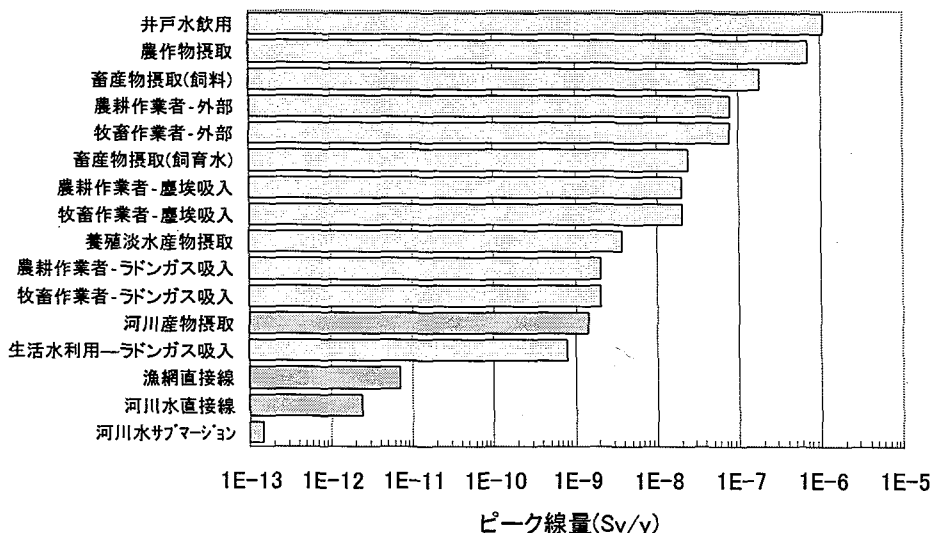


Fig. 9 Peak dose rates of various pathways in the groundwater migration scenario (based on the clearance-level analysis : dark indicates river-water use)

- ①クリアランスレベル評価に準拠した解析
 - ②現行の政令濃度上限値評価に準拠した解析
 - ③政令評価に①の解析で抽出された重要経路を追加した解析
 - ④重要被ばく経路に関する確率論的解析 (パラメータ不確かさ解析)
 - ⑤余裕深度処分 (第3次中間報告) に準拠した解析
- さらに、以上の解析では、長期評価の観点から、埋設施設からの核種の流出を考慮した場合と考慮しない場合の2通りの解析を実施した。

Figure8 及び 9 に、それぞれクリアランスレベル評価に準拠したサイト再利用シナリオ及び地下水移行シナリオに基づく被ばく経路別ピーク線量の解析結果を示す。サイト再利用シナリオでは、居住者のラドンガス吸入及び外部

被ばく経路、農耕-牧畜作業者の外部被ばく経路、建設作業者の外部被ばく経路等の線量が、埋設施設からの核種の流出を考慮する場合も考慮しない場合も大きいことがわかる。また、核種の流出の有無はピーク線量を1桁以上も変化させており、この現象をどのように評価に取り込むかが重要であることも明らかとなった。一方、地下水移行シナリオでは、井戸水飲用経路、農作物摂取経路、畜産物摂取経路、農耕作業者の外部被ばく経路等の線量が大きくなっており、井戸水利用経路が重要であることが明らかとなった。

さらに、サイト再利用シナリオの上位3経路における被ばく線量経時変化を Fig.10 に示す。この図から、最大の被ばくは、処分後数万年以降に生じることがわかる。

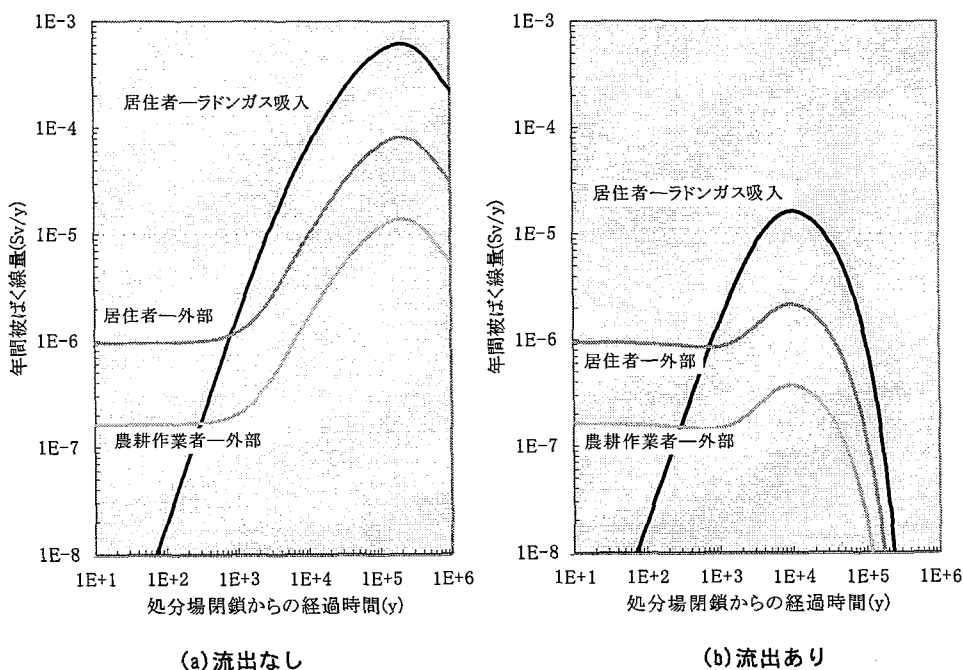


Fig. 10 Time dependent profiles of dose rates in the Site-reuse Scenario

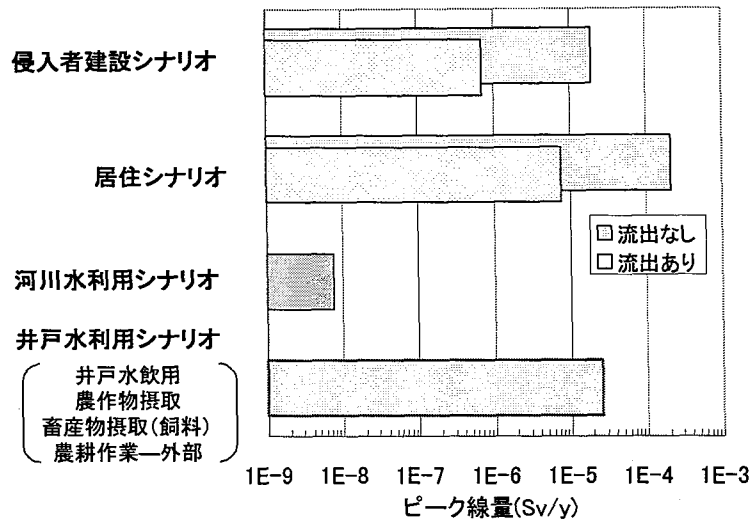


Fig. 11 Peak dose rates of various scenarios

現行の政令濃度上限値評価に準拠した解析では、侵入者建設シナリオ、居住シナリオ及び河川水利用シナリオの各々にラドンガス吸入被ばく経路を追加して、公衆の被ばく線量を評価した。その結果、サイト再利用シナリオの居住シナリオ及び侵入者建設シナリオのピーク線量が、地下水移行シナリオの河川水利用シナリオのピーク線量に比べて著しく大きいことが明らかとなった。この結果をクリアランスレベル評価に準拠した解析結果と比較すると、政令濃度上限値評価に準拠した評価では、クリアランスレベル評価に準拠した解析で重要な被ばく経路として抽出された井戸水利用経路が包含されていないことがわかる。

このため、重要被ばく経路を考慮した解析では、政令評価に、この井戸水利用経路の主要4経路を追加してピーク線量を評価した。その結果を Fig.11 に示す。この図からわかるように、埋設施設からの核種の流出を考慮する場合には、井戸水利用シナリオのピーク線量が居住シナリオのピーク線量を上回っており、井戸水利用に係る被ばく経路が濃度上限値設定の支配経路になりうる可能性のあることが明らかとなった。

ウラン廃棄物浅地中処分の決定論的解析の結果、処分サイトの再利用に伴う被ばく経路は線量評価上重要な経路と同定された。そこで、現行の政令濃度上限値評価（トレンチ処分）における居住シナリオの被ばく経路（農作物摂取経路及び外部被ばく経路）に、ラドンガス吸入被ばく経路を加えた3経路を対象に、確率論的解析を行い、パラメータ不確かさの影響を評価した。Table2及び3に本確率論的解析で設定したパラメータの分布特性を示す。これらのパラメータ条件は、クリアランスレベル設定における確率論的評価等を参考に設定した。なお、Table2の処分場関連パラメータのうち、廃棄物総量、埋設効率、覆土厚さ及び床下空間高さについては、パラメータ不確かさ解析において、それぞれ一定の値とした。

Fig.12に各被ばく経路のピーク被ばく線量に関する補果

積分分布関数（CCDF）を示す。クリアランスレベル設定における確率論的解析では、信頼区間の下限値（線量としては上限値になる）として、97.5%下限値（確率=0.025）を採用しており、その下限値で解析結果を比較すると、最も高い被ばく線量を示す被ばく経路は、核種の流出を考慮する考慮しないに関わらず、農作物摂取経路であることがわかる。ラドンガス吸入の被ばく経路は、他の2経路と比較して、ピーク被ばく線量の変動幅が10桁以上と大きく、ラドンガス吸入被ばくに関するパラメータ不確かさの影響が大きいことがわかる。これらのパラメータのピーク被ばく線量に対する感度として、偏順位相関係数（PRCC）を算出した。その結果を、Fig.13に示す。客土厚さには、強い負の相関が見られ、ラドンガスの拡散係数については、特に客土層における拡散係数の感度が高くなっている。他に重要なパラメータとしては、掘削深さ及びウランの廃棄物層中における分配係数があげられる。

ウラン廃棄物浅地中処分に関する決定論的解析結果を取りまとめ、簡易埋設（トレンチ処分）についての濃度上限値を試算すると、Table4のようにまとめられる。

ここで、井戸水利用に関しては、埋設施設の立地条件から考えて、井戸水利用可能な流量の確保できる帯水層が存在する可能性が低いことも想定し、目安線量を1mSv/yとした場合も考慮した。核種の流出を考慮しない場合、10 μ Sv/y相当の廃棄体濃度はラドンガスによる被ばくのため0.041Bq/gと極めて低い値となる。一方、核種の流出を考慮する場合は、井戸水利用に関する目安線量の違いで、1.1Bq/g、0.38Bq/gと変化することがわかった。

Table5に余裕深度処分に関する解析結果を示す。この表からわかるように、余裕深度処分では、浅地中処分とは被ばく経路が異なるため、ラドン吸入による線量は浅地中処分ほど顕著ではなく、農作物摂取経路が決定経路となっている。第3次中間報告に準じた解析によれば、余裕深度処分の濃度上限値は1 \times 10⁴Bq/g程度となり、浅地中処分

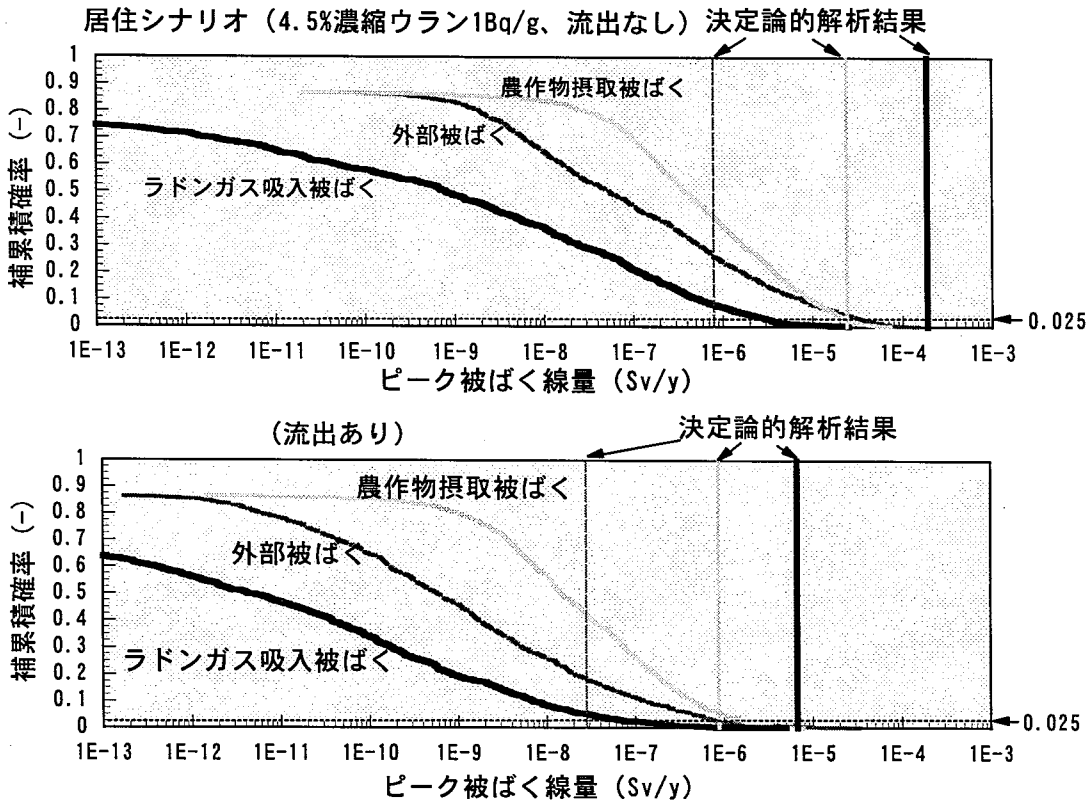


Fig. 12 Probabilistic assessment results of U-wastes shallow land disposal (Complementary Cumulative Distribution Function : CCDF)

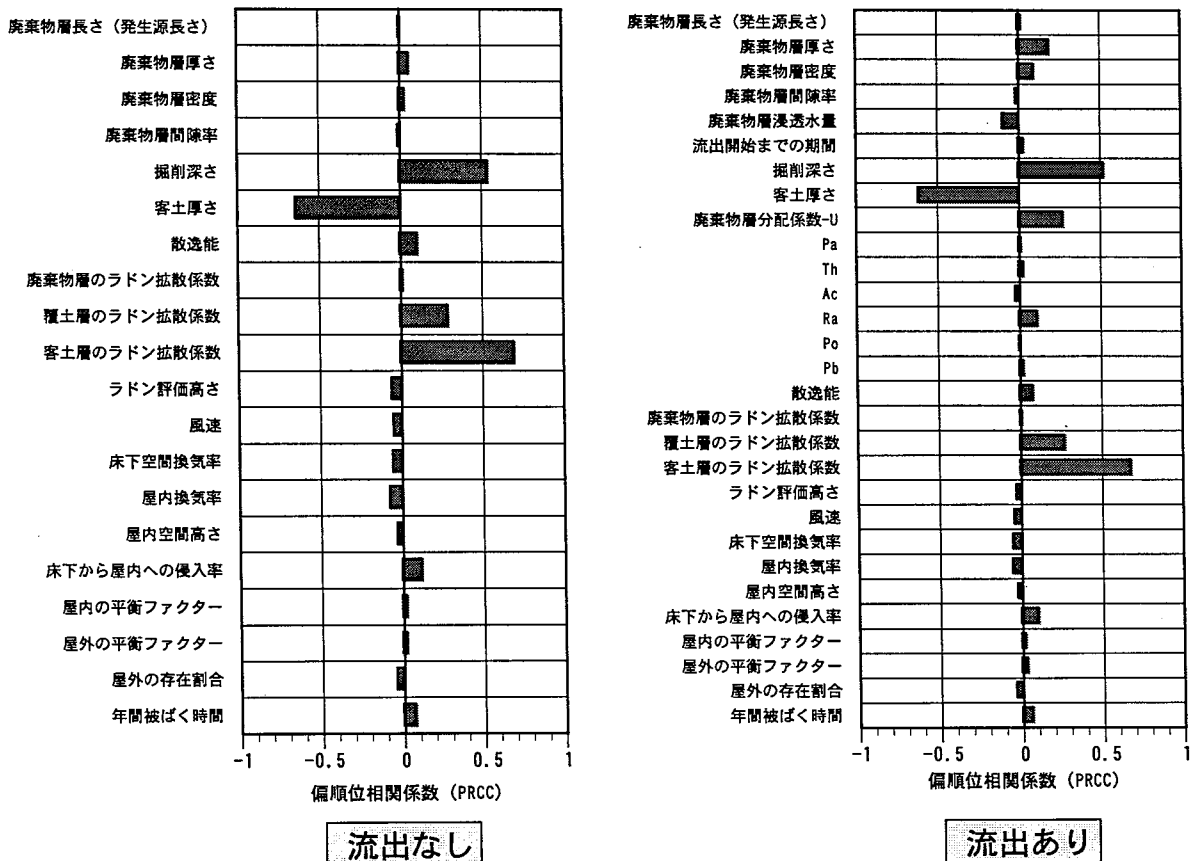


Fig. 13 Probabilistic assessment results of U-wastes shallow land disposal (Complementary Cumulative Distribution Function : CCDF)

Table 2 Parameter distributions (non-nuclide depend)

No.	パラメータ	単位	選定値	分布型	最小値	最大値
＜処分場関連パラメータ＞						
1	廃棄物の総量	m ³	27,000	一定値	-	-
2	廃棄物層幅	m	180	計算値	-	-
3	廃棄物層長さ	m	180	対数正規	70	700
4	廃棄物層厚さ	m	5	正規	1	10
5	廃棄物埋設効率	-	0.167	一定値	-	-
6	廃棄物層嵩密度	g/cm ³	2	一様	1	2.3
7	廃棄物層空隙率	-	0.2	正規	0.15	0.3
8	廃棄物層浸透水量	m/y	0.4	対数正規	0.1	1
9	処分場閉鎖から流出開始までの期間	y	0	一様	0	300
10	覆土厚さ	m	1.8	一定値	-	-
11	掘削深さ	m	3	一様	0.5	10
＜外部被ばく経路パラメータ＞						
12	年間被ばく時間(居住者-外部)	h/y	8760	正規	3000	8760
13	居住時の遮蔽係数	-	0.2	一様	0	0.66
＜農作物摂取被ばく経路パラメータ＞						
14	根からの吸収割合	-	1	対数一様	0.002	1
15	農作物摂取量(米)	kg/y	71	正規	0(-7)	149
16	農作物摂取量(葉菜)	kg/y	12	正規	0(-2)	36
17	農作物摂取量(非葉菜)	kg/y	45	正規	0(-49)	139
18	農作物摂取量(果実)	kg/y	22	正規	0(-37)	81
19	農作物市場係数	-	1	一様	0	1
＜ラドン吸入被ばく経路パラメータ＞						
20	客土厚さ	m	0.3	一様	0	1
21	散逸能	-	0.2	対数正規	0.01	0.8
22	廃棄物層のラドン拡散係数	m ² /s	1.0E-06	対数正規	1.0E-10	1.0E-06
23	覆土層(汚染残土)のラドン拡散係数	m ² /s	1.0E-06	対数正規	1.0E-10	1.0E-06
24	客土層のラドン拡散係数	m ² /s	1.0E-06	対数正規	1.0E-10	1.0E-06
25	評価高さ	m	3	一様	1	3
26	発生源長さ	m	180	対数正規	70	700
27	風速	m/s	3	正規分布	1.4	5.5
28	床下空間換気率	s ⁻¹	9.9E-04	対数正規	5.6E-05	3.1E-03
29	床下空間高さ	m	0.45	一定値	-	-
30	屋内換気率	s ⁻¹	1.1E-04	対数正規	1.4E-05	1.4E-03
31	屋内空間高さ	m	2.5	対数一様	2	5
32	床下から屋内への侵入率	s ⁻¹	1.0E-04	対数正規	1.40E-06	1.00E-04
33	屋内平衡ファクタ	-	0.4	正規	0.1	0.7
34	屋外平衡ファクタ	-	0.8	正規	0.1	1
35	屋外の居住係数	-	0.2	一様	0	0.66
36	年間被ばく時間	h/y	8760	正規	3000	8760

Table 3 Parameter distributions (nuclide depend)

Nb.	パラメータ	単位	選定値	分布型	最小値	最大値
37-1	廃棄物層分配係数 (U)	ml / g	100	対数正規	0.055	2.0E+04
37-2	廃棄物層分配係数 (Pa)	ml / g	1700	対数正規	54	5.4E+03
37-3	廃棄物層分配係数 (Th)	ml / g	1700	対数正規	45	2.0E+05
37-4	廃棄物層分配係数 (Ac)	ml / g	1700	対数正規	45	4.5E+03
37-5	廃棄物層分配係数 (Ra)	ml / g	1700	対数正規	0.82	3.0E+05
37-6	廃棄物層分配係数 (Po)	ml / g	1700	対数正規	6	3.6E+03
37-7	廃棄物層分配係数 (Pb)	ml / g	1700	対数正規	2.7	2.7E+04
38-1	米への移行係数 (U)	-(*)	1.1E-03	対数正規	1.1E-04	1.1E-02
38-2	米への移行係数 (Pa)	-	3.0E-04	対数正規	3.0E-05	3.0E-03
38-3	米への移行係数 (Th)	-	1.9E-05	対数正規	1.9E-06	1.9E-04
38-4	米への移行係数 (Ac)	-	1.1E-04	対数正規	1.1E-05	1.1E-03
38-5	米への移行係数 (Ra)	-	6.6E-04	対数正規	6.6E-05	6.6E-03
38-6	米への移行係数 (Po)	-	2.0E-03	対数正規	2.0E-04	2.0E-02
38-7	米への移行係数 (Pb)	-	4.0E-03	対数正規	4.0E-04	4.0E-02
39-1	葉菜への移行係数 (U)	-	1.0E-03	対数正規	1.0E-04	1.0E-02
39-2	葉菜への移行係数 (Pa)	-	5.3E-02	対数正規	5.3E-03	5.3E-01
39-3	葉菜への移行係数 (Th)	-	2.2E-04	対数正規	2.2E-05	2.2E-03
39-4	葉菜への移行係数 (Ac)	-	1.2E-04	対数正規	1.2E-05	1.2E-03
39-5	葉菜への移行係数 (Ra)	-	5.9E-03	対数正規	5.9E-04	5.9E-02
39-6	葉菜への移行係数 (Po)	-	1.4E-04	対数正規	1.4E-05	1.4E-03
39-7	葉菜への移行係数 (Pb)	-	1.2E-03	対数正規	1.2E-04	1.2E-02
40-1	非葉菜への移行係数 (U)	-	5.3E-03	対数正規	5.3E-04	5.3E-02
40-2	非葉菜への移行係数 (Pa)	-	7.0E-04	対数正規	7.0E-05	7.0E-03
40-3	非葉菜への移行係数 (Th)	-	3.5E-03	対数正規	3.5E-04	3.5E-02
40-4	非葉菜への移行係数 (Ac)	-	1.5E-04	対数正規	1.5E-05	1.5E-03
40-5	非葉菜への移行係数 (Ra)	-	1.8E-03	対数正規	1.8E-04	1.8E-02
40-6	非葉菜への移行係数 (Po)	-	1.5E-03	対数正規	1.5E-04	1.5E-02
40-7	非葉菜への移行係数 (Pb)	-	7.6E-03	対数正規	7.6E-04	7.6E-02
41-1	果実への移行係数 (U)	-	1.0E-04	対数正規	1.0E-05	1.0E-03
41-2	果実への移行係数 (Pa)	-	2.8E-04	対数正規	2.8E-05	2.8E-03
41-3	果実への移行係数 (Th)	-	1.0E-05	対数正規	1.0E-06	1.0E-04
41-4	果実への移行係数 (Ac)	-	6.1E-05	対数正規	6.1E-06	6.1E-04
41-5	果実への移行係数 (Ra)	-	3.0E-03	対数正規	3.0E-04	3.0E-02
41-6	果実への移行係数 (Po)	-	1.0E-02	対数正規	1.0E-03	1.0E-01
41-7	果実への移行係数 (Pb)	-	1.0E-02	対数正規	1.0E-03	1.0E-01

Table4 Waste concentration corresponding to dose rate 10 μ Sv/y (Shallow land)

	目安線量	ケース	評価シナリオ		決定シナリオ	目安線量相当濃度(Bq/g)		
			サイト再利用	地下水移行		実測Kd	変動幅	
流出なし	10 μ Sv/y	1:政令準拠	建設、居住	河川水	居住(ラドン)	0.041	—	
		2:ラドン除外			居住(農作物)	0.18	—	
		3:井戸追加			河川水、井戸水	居住(ラドン)	0.041	—
		4:2+井戸				居住(農作物)	0.18	—
	通常:10 μ Sv/y 確率:1mSv/y*	5:3と同じ		居住(ラドン)	0.041	—		
流出あり	10 μ Sv/y	1:政令準拠	建設、居住	河川水	居住(ラドン)	1.1	0.061~12	
		2:ラドン除外			居住(農作物)	4.7	0.53~12	
		3:井戸追加		河川水、井戸水	井戸水飲用	0.38	0.055~0.38	
		4:2+井戸			井戸水飲用	0.38	0.055~0.38	
	通常:10 μ Sv/y 確率:1mSv/y*	5:3と同じ		居住(ラドン)	1.1	0.061~12		

* : 井戸水利用を確率的シナリオとした場合

Table5 Waste concentration corresponding to dose rate 10 μ Sv/y (50-100m depth)

シナリオ	被ばく経路	ピーク線量(μ Sv/y)	10 μ Sv/y相当濃度(Bq/g)	支配核種
河川水利用	飲料水摂取	5.4E-05	1.9E+05	Pb-210
	生活水-ラドン吸入	4.3E-07	2.3E+07	Rn-222
	農耕作業・外部	2.6E-05	3.8E+05	Ra-226
	農耕作業・塵埃吸入	8.9E-06	1.1E+06	Ac-227
	農耕作業・ラドン吸入	5.4E-07	1.8E+07	Rn-222
	農作物摂取	1.1E-04	9.0E+04	Pb-210
	畜産物摂取	8.0E-07	1.2E+07	Pb-210
	河川産魚摂取	3.0E-04	3.4E+04	Pb-210
	合計	5.0E-04	2.0E+04	
河川岸建設作業	外部	3.6E-05	2.8E+05	Th-234
	塵埃吸入	1.2E-05	8.0E+05	Ac-227
	ラドン吸入	2.8E-06	3.6E+06	Rn-222
	合計	5.1E-05	2.0E+05	
河川岸居住	外部	2.5E-04	4.0E+04	Th-234
	塵埃吸入	2.1E-06	4.7E+06	Ac-227
	ラドン吸入	4.3E-04	2.3E+04	Rn-222
	合計	6.8E-04	1.5E+04	
河川岸農耕作業	外部	7.2E-05	1.4E+05	Th-234
	塵埃吸入	1.2E-05	8.0E+05	Ac-227
	ラドン吸入	2.8E-06	3.6E+06	Rn-222
	農作物摂取	6.1E-04	1.6E+04	Pb-210
	畜産物摂取	2.4E-05	4.1E+05	Po-210
	合計	7.2E-04	1.4E+04	

の濃度上限値を上回る大部分のウラン廃棄物を処分できることとなる。ただし、ウラン廃棄物のように長期評価を前提とする廃棄物に対しては、処分環境等の長期的な変化を考慮する必要がある、第3次中間報告で採用した被ばく経路以外も検討対象とする必要がある。

6 まとめ

ウラン廃棄物の浅地中処分及び余裕深度処分に関する安全解析を実施して、当該廃棄物の各々の処分概念に対する濃度上限値を試算した。その結果、簡易埋設の $10\mu\text{Sv/y}$ 相当濃度は、核種の流出を考慮しない場合 0.041Bq/g 、流出を考慮する場合 0.38Bq/g であった。一方、余裕深度処分の $10\mu\text{Sv/y}$ 相当濃度は、ラドンガス吸入被ばくの影響は顕著ではなく、 $1.4\times 10^4\text{Bq/g}$ と大きな値が得られた。

浅地中処分のサイト再利用の重要被ばく経路に関する確率論的解析では、ラドンガス吸入被ばくの特徴として、パラメータ不確かさの影響が大きく、被ばく線量の変動幅が10桁以上と大きいということが明らかとなった。そして、その重要なパラメータが客土層中における拡散係数、客土厚さ、掘削深さ等であることを考慮すると、ラドンガスによる被ばくは跡地利用の形態に強く依存することが明らかであり、数万年以降の遠い将来における人間の生活様式を推定することの難しさも考慮すれば、極めて不確定要因の大きな被ばく事象である。

以上の検討結果を整理すると、ウラン廃棄物の浅地中処分における重要な被ばく経路は、

- ・居住者のラドンガス吸入被ばく
- ・井戸水飲用による内部被ばく

等があげられる。さらに、ラドンガスの吸入被ばくについては、評価パラメータの不確かさの影響が大きく、線量は10桁以上も変動し、不確定要因が大きいという特徴を有している。井戸水飲用については、処分サイトの立地条件に強く依存すると考えられるので、その取り扱いには注意が必要である。最後に、埋設施設からの核種の流出については、評価期間が数年以上の長期に及ぶこと及び処分環境が酸化雰囲気であることを考慮すれば、実際に起こる現象としてとらえることが必要と考えられるが、そのためには、核種の流出を左右する廃棄体の分配係数、浸出率等のデータを整備する必要がある。

参考文献

- [1] 原子力環境整備センター：平成7年度ウラン廃棄物処理処分システム開発調査報告書。平成8年3月(1996)。
- [2] 原子力環境整備センター：平成8年度ウラン廃棄物処理処分システム開発調査報告書。平成9年3月(1997)。
- [3] 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(1999)。
- [4] 原子力安全委員会 放射性廃棄物安全規制専門部会：低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について(中間報告)。昭和61年(1986)。
- [5] 原子力安全委員会 放射性廃棄物安全規制専門部会：低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について(第3次中間報告)。平成12年(2000)。
- [6] 原子力安全委員会 放射性廃棄物安全規制専門部会：低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について(第2次中間報告)。平成4年(1992)。
- [7] ICRP: ICRP Publication 68, Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers, Replacement of ICRP Publication 61. (1994).
- [8] Sakamoto, Y., Tanaka, S.: QAD-CGGP2 and G33-GP2: Revised Versions of QAD-CGGP2 and G33-GP. JAERI-M 90-110, (1990).
- [9] 原子力環境整備センター：平成9年度ウラン廃棄物処理処分システム開発調査報告書。平成10年3月(1998)。
- [10] 原子力環境整備センター：平成10年度ウラン廃棄物処理処分システム開発調査報告書。平成11年3月(1999)。
- [11] IAEA: Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in temperate environments. Technical Report Series No. 364(1994).
- [12] IAEA: Generic models and parameters for assessing the environmental transfer of radionuclides from routine releases. IAEA Safety Series No.57(1985).
- [13] UNSCEAR 1988 Report: Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. (1988).
- [14] UNSCEAR 1993 Report: Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. (1993).