

テーマ「仮置場等の安全性評価及び住民合意形成手法に関する研究」

仮置場等の安全性評価について

1. 背景・目的

除染によって生じた放射性物質を含む土壌や可燃物(以下「除去土壌等」という。)は国が設置する中間貯蔵施設へ搬入されるまでの間、仮置場や現場保管場(以下「仮置場等」という。)にて保管されることとされている。除染で生じた除去土壌等の量は膨大であることから、生活環境から隔離された保管場を確保し全量を保管することは困難であり、除染実施場所毎あるいは地域毎に保管する手法が採用されている。これらの仮置場等は公衆の生活圏に存在することから、仮置場等での除去土壌等の管理による人の健康や生活環境への影響が懸念される。そのため、仮置場の管理に際しては必要に応じた安全対策を実施することで、公衆の被ばく線量を合理的に達成可能な範囲で低く保つことが重要である。また、施設の管理上の安全対策をとったうえでも、何らかの事故が生じてしまった場合に備え、事故の種類に応じた事故対応を検討しておくことは重要であると思われる。

そこで、本研究では、除去土壌等の管理に起因する公衆の被ばくについての重要なシナリオを特定することを目的とし、事故時を含めた公衆の被ばく経路を整理し評価する。また、評価結果については、後述する除去土壌等の管理の際の放射線防護の考え方と照らし合わせることで、仮置場等の安全性についても判断を行うこととした。

2. 方法・実施内容

2. 1. 評価対象地域

東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故(以下「原発事故」という。)に伴い放出された放射性物質に汚染された地域の除染は、市町村及び国によって実施されることとなり、市町村が除染を行う汚染状況重点調査地域は図1のように定められている。県は市町村除染の支援を行う役割を担うこととなっていることから、本研究では汚染状況重点調査地域を評価対象地域とした。

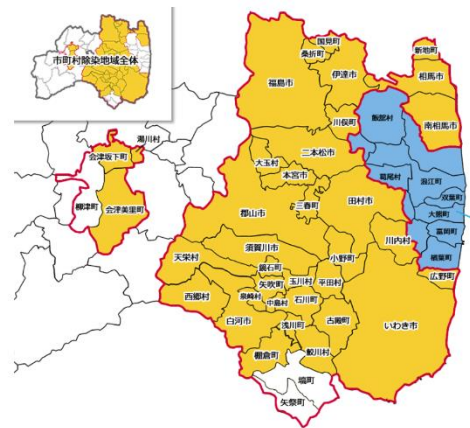


図1 評価対象地域

2. 2 除去土壌等の管理の現状及び評価のスコープ

除染により生じる放射性物質を含む除去土壌等は図2に示すスキームで管理されることとなっている。除去土壌等は、既に表1に示す量の除去土壌等が発生しており、こ

れらが県内の仮置場や現場保管において保管されている。また、今後のフォローアップ除染を含む除染で生じうる除去土壌の総量は、環境省の試算では最大で 2,800 万 m³とされている¹⁾。本報告書においては、現在の最も主要な管理工程である仮置場等での保管工程を評価の対象とした。

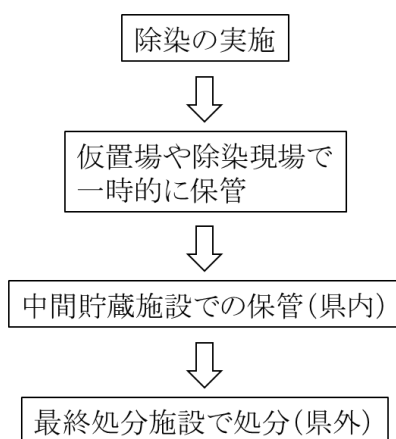


図2 除去土壌等のフロー

表1 県内の除染に伴い生じた除去土壌等の仮置場等における保管状況^{2),3)}

地域	保管状況	箇所数	総発生数・保管物数 (万 m ³)
除染特別地域 (平成 31 年 3 月末時点) *1	仮置場	194	565
汚染状況重点調査地域*2 (福島県内のみ、平成 31 年 3 月末時点)	仮置場	616	529
	現場保管	86,175	
合計			1,094

*1 仮置場のほか、一時保管所、仮仮置場等を含む。

*2 檜葉町、富岡町、大熊町、双葉町、浪江町、葛尾村、飯舘村を除く 52 市町村が対象

2. 3. 一般的な仮置場の構造

仮置場における安全対策として求められる施設要件は、①遮へいと離隔、②除去土壌の飛散防止、③雨水等の侵入の防止の3つが示されている⁴⁾。仮置場の保管形式や構造は、上記の施設要件に加え、撤去時の作業性や確保可能な敷地面積に留意し設置されている。図3に一般的な地上保管型の仮置場の構造を示す。本構造は対象核種が放射性セシウムであることを鑑み設計されている。具体的な留意事項としては、以下の項目が挙げられる⁴⁾。

- ・ 柵の設置による無用な立ち入りの禁止
- ・ 遮へい用土のうの設置による適切な遮へい又は居住地からの離隔
- ・ 遮水シートの利用などによる雨水侵入防止措置
- ・ 集水柵の確保や下部遮水シートによる放射性物質の漏えい防止
- ・ ガス抜き管の設置による可燃物の腐敗に伴うガスの発生および蓄熱への対策

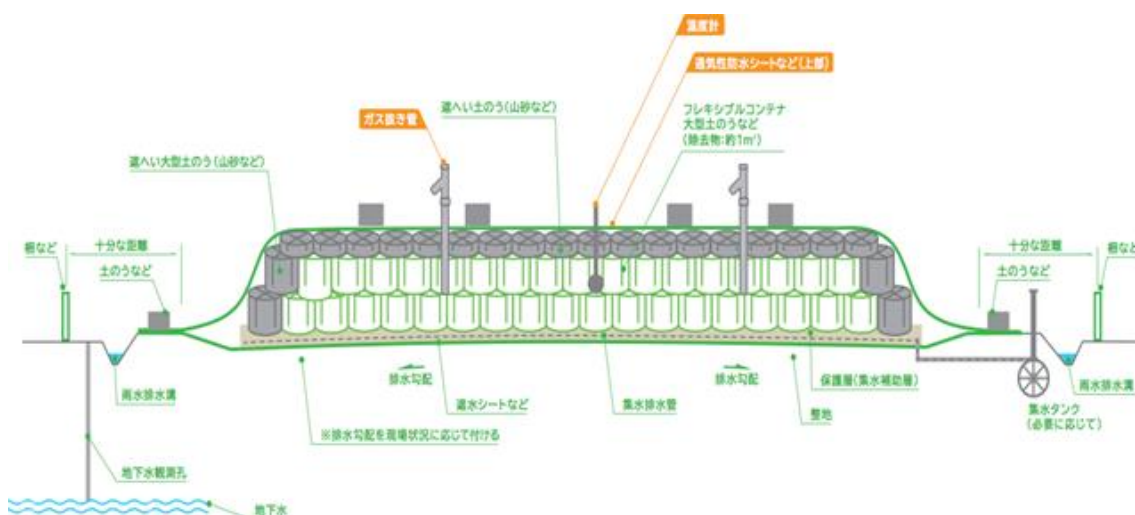


図3 一般的な地上保管型の仮置場の構造⁵⁾

2. 4. 除去土壌等の管理における放射線防護の考え方

除去土壌等からの放射線の影響を受ける対象は、除染や仮置場等の設置等作業に係る作業員、定期的なモニタリング等の軽作業員及び一般公衆が挙げられる。そこで、これらの対象に対する放射線防護上の規制について、以下において整理する。

除染等業務に従事する労働者の放射線障害防止のため、厚生労働省により、「東日本大震災により生じた放射性物質により汚染された土壌等を除染するための業務等に係る電離放射線障害防止規則」⁶⁾（以下「除染電離則」という。）が施行されている。除染電離則の適用対象業務には、安全評価の対象となる除去土壌等の収集、運搬又は保管の業務が含まれており、除染や仮置場等の設置等作業に係る作業員については本規則が適用される。一方、一般公衆や定期的なモニタリング等の軽作業員は除染電離則の適用外

であり、除染関係ガイドラインにおいては、「除去土壌からの放射線による公衆の追加被ばく線量が年間 1mSv 以下となるように施設を設計する」とされている。これは、原子力安全委員会が平成 23 年 6 月に示した「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故の影響を受けた廃棄物の処理処分等に関する安全確保の当面の考え方について」⁷⁾において、“処理等に伴い周辺住民の受ける線量が 1mSv/年を超えないようにするとともに、(中略) 周辺住民の被ばくを抑制するように特段の配慮が必要である。”という考え方に沿ったものであると考えられる。また、事故時の評価においては、「中間貯蔵施設の概略安全評価」や「浅地中トレンチ処分の安全評価手法：2013」において、発生事故あたり 5mSv を超えなければ、過度の放射線被ばくを及ぼさないと判断する、とされている。したがって、本研究では、表 2 のとおりに関連規制と除去土壌等からの放射線の影響を受ける対象との関係を整理した。

表 2 関連規制と除去土壌等からの放射線の影響を受ける対象との関係

	除染電離則が適用 (線量限度：年間 50mSv、 5 年で 100mSv)	除染電離則が非適用 (参考レベル： 年間 1mSv、事故時 5mSv)
除染や仮置場等の設置 等作業に係る作業員	○	×
定期的なモニタリング 等の軽作業員	×	○
一般公衆	×	○

ここで、除染電離則が適用される作業員については、個人線量の管理がなされることから評価対象外とし、除染電離則が適用されないケースについてのみ評価対象として取り扱うこととした。

2. 5 モデル仮置場の設定

県内には約 800 箇所及び仮置場等が存在し、これらを個別に評価することは困難である。したがって、代表的な仮置場等を適切に設定しこれを評価することで、全体の仮置場の安全評価を行う。主要なパラメータ及び代表的な値を表 3 のとおり設定した。ここで、規模については、現場保管と仮置場では大きく異なることから、それぞれについて代表的なケースを設定した。仮置場の規模については、県内仮置場の箇所あたりの保管量の平均値を基にして設定した。また、土壌の放射能濃度については、県内の避難指示区域外における第 3 次航空機モニタリングによる空間線量率の最大値を基に、地表面が一様に汚染された場合の地表面汚染密度 (Bq/m²) と空間線量率 (μSv/h) 間の換算係数から地表面汚染密度を算出した。得られた地表面汚染密度の値を用い、表層 5cm を除染したと仮定して土壌濃度 (Bq/kg) を算出し、平成 27 年 4 月時点の濃度に減衰補正し、

500Bq/kg 毎に切り上げた値を採用した。この時、平成 23 年 3 月時点におけるセシウム 134 とセシウム 137 の比率が 1:1 であると仮定した。なお、放射能濃度については、百の位で切り上げた値を採用した。

表 3 モデル仮置場の設定

No.	パラメータ名	単位	値	
1	規模	m ³	仮置場	800
			現場保管	4
2	除去土壌等の放射能濃度	Bq/kg	¹³⁴ Cs	2500
			¹³⁷ Cs	8500
3	除去土壌の密度	kg/m ³	1600 ⁷⁾	

2. 6 被ばく経路の設定

仮置場において保管されている除去土壌等から想定される被ばく経路は、対象核種がセシウム 134 及びセシウム 137 であることを考慮し、保管時における想定被ばく経路を表 4 のとおりに設定した。

表 4 保管時のシナリオ

	事象	線源	被ばく形態	評価対象
平常時	近隣での居住	定置された除去土壌等	外部 (経路 1)	公衆
	定期モニタリング	定置された除去土壌等	外部 (経路 2)	作業員
事故時	火災による除去土壌等の放出及び遮へい機能の喪失	大気中へ放出された粉塵	吸入 (経路 3)	公衆
			外部 (経路 4)	公衆
		地表面に沈着した除去土壌等	外部 (経路 5)	公衆
		敷地内に残留した除去土壌等	外部 (経路 6)	公衆
	大雨による除去土壌等の流出	汚染された農作物 (自家栽培)	経口 (経路 7)	公衆
			地表面に流出した 除去土壌	外部 (経路 8)
	施設外への漏えい防止機能の喪失	飲用水	経口 (経路 9)	公衆
	河川の氾濫による除去土壌等の流出	汚染された農作物 (自家栽培)	経口 (経路 10)	公衆
			汚染された土壌	外部 (経路 11)
		汚染された土壌	吸入 (経路 12)	公衆

2. 7 評価方法

<除去土壌等からの外部被ばく評価、経路>

$$D_{\text{ext}}(i) = C_{\text{waste}}(i) \cdot S_0 \cdot t \cdot DF_{\text{ext}}(i) \cdot (1 - \exp(-\lambda \cdot t)) / (\lambda \cdot t) \quad (1)$$

ここで、

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

$C_{\text{waste}}(i)$: 除去土壌等中の放射性核種 i の濃度 (Bq/kg)

t : 被ばく時間 (平常時 : h/y , 事故時 : $\text{h}/\text{事故}$)

$DF_{\text{ext}}(i)$: 放射性核種 i の外部被ばくに対する線量換算係数 ($\mu\text{Sv}/\text{h}) / (\text{Bq}/\text{kg})$)

λ : 放射性核種 i の崩壊定数 ($1/\text{h}$)

S_0 : 外部被ばくに対する遮へい係数 (-)

とした。任意の3次元形状を有する体積線源からの外部被ばく線量を評価する際の線量換算係数 $DF_{\text{ext}}(i)$ は、MCNP コード、QAD - CGGP2R を用いて求めた。

<地表面からの外部被ばく評価、経路>

$$D_{\text{ext}}(i) = C_{\text{ground}}(i) \cdot S_0 \cdot t \cdot DF_{\text{ext}}(i) \quad (2)$$

ここで、

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

$C_{\text{ground}}(i)$: 地表面の放射性核種 i の濃度 (Bq/m^2)

t : 被ばく時間 (h)

$DF_{\text{ext}}(i)$: 放射性核種 i の外部被ばくに対する線量換算係数 ($\mu\text{Sv}/\text{h}) / (\text{Bq}/\text{m}^2)$)

λ : 放射性核種 i の崩壊定数 ($1/\text{h}$)

S_0 : 外部被ばくに対する遮へい係数 (-)

また、地表面の放射性核種濃度に関しては、汚染の経路に応じて以下のとおり求めた。

・大気放出経路における地表面の放射性核種濃度

大気放出経路による地表面の汚染に関しては(3)式により求める。

$$C_{\text{ground}}(i) = Q_A(i) \cdot (\chi/Q) \cdot V_g \cdot \frac{f_1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda T_0}) \quad (3)$$

$Q_A(i)$: 放出される放射性核種 (Bq/s)

χ/Q : 大気中相対濃度 (s/m^3)

V_g : 放出粒子の沈着速度 (m/s)

f_1 : 沈着した放射性核種のうち残存する割合 (-)

T_0 : 核種放出期間 (h)

なお、大気中相対濃度 (χ/Q) の導出方法について詳細は省略するが、大気中相対濃度 (χ/Q) の導出には、「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」に基づくプ

ルーム式を用いた。本報告書では、仮置場から仮置場敷地境界である除去土壌等表面から 8m 以遠のエリア内で、乾性沈着による最大着地濃度地点を評価点とし、当該地点の大気中相対濃度 (χ/Q) を導出した。

・水系放出経路（除去土壌の河川への流出）における灌漑利用により汚染された土壌の放射性核種濃度

水系放出経路による灌漑に伴う土壌の汚染に関しては(4)式により求める。ここで、灌漑水から土壌への放射性核種の移行は瞬時平衡を仮定した。

$$C_{\text{ground}}(i) = C_{\text{soil}}(i) \cdot \rho_v \quad (4)$$

$$C_{\text{soil}}(i) = C_{\text{water}}(i) \cdot \left(K_d(i) + \frac{\varepsilon}{\rho(1-\varepsilon)} \right) \quad (5)$$

$$C_{\text{water}}(i) = C_{\text{waste}}(i) \cdot \left(\frac{C_{\text{ss}}}{1 + K_{\text{dss}}(i) \cdot C_{\text{ss}}} \right) \quad (6)$$

$$C_{\text{ss}} = \rho \cdot V_{\text{waste}} / (V_{\text{river}} \cdot t) \quad (7)$$

$C_{\text{soil}}(i)$: 灌漑により汚染された農地土壌中の放射性核種濃度 (Bq/kg)

ρ : 土壌密度 (kg/m³)

V_{waste} : 河川に流出した除去土壌等の体積 (m³)

V_{river} : 河川流量 (m³/d)

t : 流出した除去土壌等が全て下流に流されるまでに要する期間 (d)

C_{ss} : 河川中の除去土壌等由来の懸濁物質 (kg/m³)

$C_{\text{waste}}(i)$: 除去土壌等中の放射性核種 i の濃度 (Bq/kg)

$C_{\text{water}}(i)$: 河川水中の放射性核種 i の濃度 (Bq/m³)

$K_{\text{dss}}(i)$: 河川中懸濁物質 - 河川水間の放射性核種 i に対する収着分配係数 (m³/kg)

$K_d(i)$: 農地土壌 - 灌漑用水間の放射性核種 i に対する収着分配係数 (m³/kg)

ρ_v : 土壌の有効密度 (kg/m²)

<粉じんからの外部及び吸入被ばく評価、経路>

$$D_{\text{sub}}(i) = C_{\text{air}}(i) \cdot DF_{\text{sub}}(i) \cdot t \quad (8)$$

$$D_{\text{inh}}(i) = C_{\text{air}}(i) \cdot R_{\text{inh}} \cdot DF_{\text{inh}}(i) \cdot t \quad (9)$$

ここで、

$D_{\text{sub}}(i)$: 大気中の放射性核種 i による外部被ばく線量 ($\mu\text{Sv}/\text{y}$)

$DF_{\text{sub}}(i)$: 大気中の放射性核種 (i) からの浸漬による外部被ばくに対する換算係数 ($\mu\text{Sv}/\text{h}) / (\text{Bq}/\text{m}^3)$

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

R_{inh} : 呼吸率 (m³/h)

$DF_{\text{inh}}(i)$: 放射性核種 i の吸入被ばくに対する線量換算係数 ($\mu\text{Sv}/\text{h}) / (\text{Bq}/\text{m}^3)$

$C_{air}(i)$: 大気中の放射性核種 i の濃度 (Bq/m³)

t : 被ばく時間 (h)

なお、短時間の事故時の評価であること、また評価対象核種の半減期が長いことから、物理減衰については考慮していない。

また、大気中の放射性核種濃度に関しては、汚染の経路に応じて以下のとおり求めた。

・大気放出経路における大気中の放射性核種濃度

$$C_{air}(i) = Q_A \cdot (\chi/Q) \quad (10)$$

ここで、

$Q_A(i)$: 放出される放射性核種 (Bq/s)

χ/Q : 大気中相対濃度 (s/m³)

・水系放出経路（除去土壌の河川への流出）における灌漑利用により汚染された土壌の舞い上がりにおける大気中の放射性核種濃度

$$C_{air}(i) = C_{soil}(i) \cdot d_R \quad (11)$$

ここで、

d_R : 大気中ダスト濃度 (kg/m³)

なお、 $C_{soil}(i)$ については(5)～(7)により求めた。

<経口被ばく評価、経路>

$$D_{ing} = C_{food}(i) \cdot H_f \cdot DF_{ing}(i) \cdot G_f \quad (12)$$

ここで、

D_{ing} : 放射性核種 i による経口被ばく線量 (μ Sv/y)

$C_{food}(i)$: 食品中の放射性核種 i の濃度 (Bq/kg)

H_f : 食品摂取量 (kg/y)

DF_{ing} : 放射性核種 i の経口被ばくに対する線量換算係数 (μ Sv/h) / (Bq/kg)

G_f : 食品の市場希釈係数 (-)

検討している経路において、汚染が生じると設定した食品類は、農産物、飲用水である。食品としては市場非流通物の摂取が想定される食品を対象としており、例えば川魚については、福島県の摂食制限が依然多くの地域でなされている現状を鑑み、対象外とした。畜産についても、自家消費用に畜産を行うことは一般的に想定されないため、対象外とした。また、農産物の具体的な評価対象は、葉物野菜、米、その他（果実、非葉菜）の3種に大別した。それぞれの汚染経路ごとの食品中の放射性核種濃度は以下のとおり算出した。

・大気放出経路における農産物の放射性核種濃度

$$C_{\text{leaf}}(i) = Q_A(i) \cdot (\chi/Q) \left(\frac{V_g \cdot (1 - e^{-\lambda_{\text{eff}} T_0})}{\lambda_{\text{eff}} \rho_V} + \frac{V_g \cdot \text{TF}_{\text{soil-leaf}}(i) \cdot (1 - e^{-\lambda t_0})}{\lambda(i) P_V} \right) f_t f_d \quad (13)$$

$$C_{\text{rice}}(i) = C_{\text{soil}}(i) \cdot \text{TF}_{\text{soil-rice}}(i) \quad (14)$$

$$C_{\text{other}}(i) = C_{\text{soil}}(i) \cdot \text{TF}_{\text{soil-other}}(i) \quad (15)$$

$$C_{\text{soil}}(i) = C_{\text{ground}}(i) / P_V \quad (16)$$

ここで、

$C_{\text{leaf}}(i)$: 葉菜中の放射性核種濃度 (Bq/kg)

$Y_{\text{Ground-veg}}$: 葉菜の栽培密度 (kg/m²)

$\text{TF}_{\text{soil-leaf}}(i)$: 葉菜-土壌間の移行係数 (Bq/kg-wet / Bq/kg-dry)

$C_{\text{rice}}(i)$: 米中の放射性核種濃度 (Bq/kg)

$\text{TF}_{\text{soil-rice}}(i)$: 米-土壌間の移行係数 (Bq/kg-wet / Bq/kg-dry)

$C_{\text{other}}(i)$: その他の農産物中の放射性核種濃度 (Bq/kg)

$\text{TF}_{\text{soil-other}}(i)$: その他の農産物-土壌間の移行係数 (Bq/kg-wet / Bq/kg-dry)

P_V : 土壌実効表面密度 (kg/m²)

なお、 $C_{\text{ground}}(i)$ は(3)式により求める。

・水系放出経路 (除去土壌層から地下水への放射性核種の移行) における飲用水の放射性核種濃度

$$V_I = R_I \times A_P \times N_P \times DR_P \quad (17)$$

$$R_{Fi} = 1 + (\rho_w \times K_{di} \div W_{RW}) \quad (18)$$

$$L_{Ri} = R_I \div (W_{RW} \times H_P \times R_{Fi}) \quad (19)$$

$$V_{Ai} = H_P \times A_P \times N_P \times DR_P \times \rho_w \times C_{wi} \times L_{Ri} \quad (20)$$

$$C_{Gi} = V_{Ai} \div (V_I + V_G) \times 0.001 \text{ m}^3/\text{L} \quad (21)$$

ここで、

V_I : 浸出水の一年あたりの流出量 (単位 : m³/year)

R_I : 浸出水の単位面積当たりの流出速度 (m/year)

A_P : フレキシブルコンテナの底面積 (m²)

N_P : フレキシブルコンテナの個数 (-)

DR_P : フレキシブルコンテナの破損割合 (-)

R_{Fi} : 放射性核種 i の遅延係数 (-)

ρ_w : 保管物の密度 (kg/m³)

K_{di} : 放射性核種 i の吸着分配係数 (Bq/kg-dry per Bq/L)

W_{RW} : 含水率 (-)

L_{Ri} : 放射性核種 i の年間あたりの流出率 (-)

H_P : フレキシブルコンテナの高さ (m)

V_{Ai} : 放射性核種 i の一年あたりの流出量 (Bq/year)

$C_{\#i}$: 保管物中の放射性核種 i の濃度 (Bq/kg)

C_{Gi} : 地下水中の放射性核種 i の濃度 (Bq/L)

・水系放出経路 (除去土壌の河川への流出) における農産物の放射性核種濃度

$$C_{\text{leaf}}(i) = C_{\text{soil}}(i) \cdot \text{TF}_{\text{soil-leaf}}(i) \quad (22)$$

なお、 $C_{\text{soil}}(i)$ は式(5)～(7)により求めた。また、葉菜以外の米やその他農産物中放射性核種濃度は式(14)～(17)により求めた。

2. 8 評価パラメータ

ここでは、各シナリオの評価に用いたパラメータを示す。

<近隣での居住 (経路 1) >

経路 1 に設定した仮置場に保管されている除去土壌等の保管場近隣での居住時に生じる外部被ばく評価は式(1)を用いて行う。式(1)に使用されるパラメータについて、表 5 に示す。ここで、直接線及びスカイシャインによる外部被ばくに対する線量換算係数は国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が MCNP コードを用いて導出した結果を提供いただき、使用した。

表5 経路1の評価に用いるパラメータ

パラメータ名称		式中記号	単位	設定値	設定根拠
放射性核種濃度	¹³⁴ Cs	$C_{waste}(i)$	Bq/kg	2500	表3
	¹³⁷ Cs			8500	
外部被ばくに対する遮へい係数		S_0	-	0.6	1日のうち、16時間屋内に滞在すると仮定し、屋内滞在時の遮へい係数を1.0、屋外滞在時の遮へい係数をIAEA TECDOC-1162の0.4を採用した。
被ばく時間		t_0	h/y	8760	1年間を想定した。
外部被ばくに対する線量換算係数(仮置場)	¹³⁴ Cs	$DF_{ext}(i)$	μSv/h per Bq/kg	2.15E-06	MCNPコードを用い、以下の体系で解析を行った。遮へい条件についてはガイドラインに従い設定した。 線源の形状：20m×20m×2m 線源の密度：1.5g/cm ³ 遮へい条件：側面遮へい30cm 評価点：20m×2mの面から8m 評価高さ：1m
	¹³⁷ Cs			8.17E-07	
外部被ばくに対する線量換算係数(現場保管)	¹³⁴ Cs	$DF_{ext}(i)$	μSv/h per Bq/kg	5.02E-07	MCNPコードを用い、以下の体系で解析を行った。遮へい条件についてはガイドラインに従い設定した。 線源の形状：2m×2m×1m 線源の密度：1.5g/cm ³ 遮へい条件：なし 評価点：公衆は2m×1mの面から4m 評価高さ：1m
	¹³⁷ Cs			1.91E-07	
放射性核種の崩壊定数	¹³⁴ Cs	λ	1/y	0.336	ICRP Publ.107の半減期より設定した。
	¹³⁷ Cs			0.023	

<定期的なモニタリング(経路2)>

経路2に設定した仮置場に保管されている除去土壌等の保管場でのモニタリング作業時における外部被ばくについて、式(1)により評価を行う。式(1)に使用されるパラメータについて、表6に示す。

表 6 経路 2 の評価に使用するパラメータ

パラメータ名称		式中記号	単位	設定値	設定根拠
放射性核種の濃度	^{134}Cs	$C_A(i)$	Bq/kg	2500	表 3
	^{137}Cs			8500	
外部被ばくに対する遮へい係数		S_0	-	1.0	保守的に 1 とした。
被ばく時間		t_0	h / y	365	毎日 1 時間かけて仮置場内のモニタリングを行うと想定した。
スカイシャイン+ 直接線 (仮置場)	^{134}Cs	$DF_{ext}(i)$	$\mu\text{Sv/h}$ per Bq/kg	6.75E-06	MCNP コードを用い、以下の体系で解析を行った。遮へい条件についてはガイドラインに従い設定した。 線源の形状：20m×20m×2m 線源の密度：1.5g/cm ³ 遮へい条件：側面遮へい 30cm 評価点：20m×2m の面から 1m 評価高さ：1m
	^{137}Cs			2.57E-06	
放射性核種の崩壊 定数	^{134}Cs	λ	1/y	0.336	ICRP Publ. 107 の半減期より設定した。
	^{137}Cs			0.023	

<火災による除去土壌等の放出および遮へい機能の喪失（経路 3～7）>

経路 3～7 に設定した大気への放射性核種の放出において想定した事故の状況を図 4 に示す。

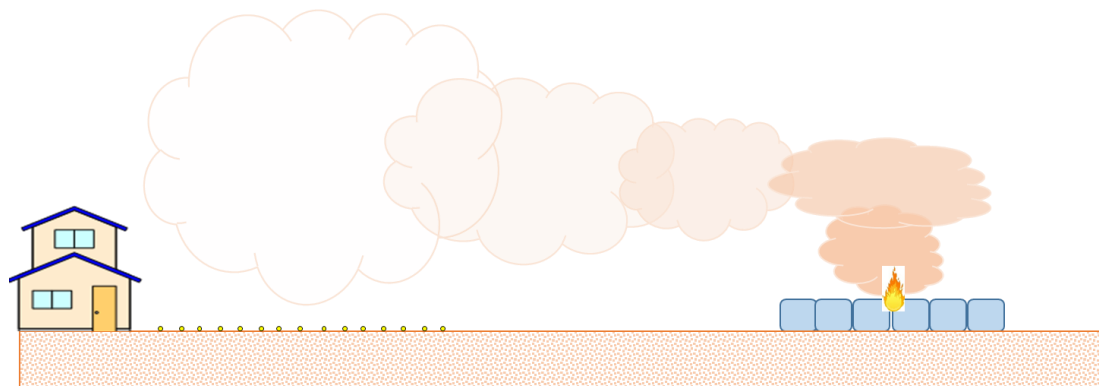


図 4 除去土壌等の大気放出事故時に想定される状況例

(a) 大気中へ放出された粉じんによる外部被ばくおよび吸入被ばく（経路 3 及び経路 4）

経路 3 及び経路 4 に示す被ばく経路は、式(8)～(10)を用いて評価を行った。式(8)～(10)に使用されるパラメータを表 7 に示す。

表7 経路3及び経路4の評価に使用するパラメータ

パラメータ名称	式中記号	単位	設定値	設定根拠	
放射性核種の濃度	¹³⁴ Cs	$C_A(i)$	Bq/kg	2500	表3
	¹³⁷ Cs			8500	
大気中相対濃度	χ/Q	s/m ³	2.74E-02	福島県の気象統計の結果を基に、大気拡散計算を行い、最も安全側となる最大濃度を採用した。	
被ばく時間(火災発生から鎮火まで)	t_0	h/事故	12	消火完了に要する時間を12時間と想定した。	
火災により燃焼する廃棄物等の重量	W_w	kg	1.28E+5	影響を受ける割合を、IAEA-TECDOC-401, Tranche Fire Scenarioの表4のRelease Fractionsを参考に、保守的に幅の上限である0.1とし、表3のパラメータを基に導出した。	
火災における放射性核種の排気への移行率	R_{Cs}	-	1	セシウムの全量が排気に移行すると仮定した。	
外部被ばくに対する線量換算係数(ブルーム)	¹³⁴ Cs	$DF_{ext}(i)$	μSv/h per Bq/m ³	2.51E-04	RI クリアランス評価で設定されているブルームに対する換算係数の値を用いた。
	¹³⁷ Cs			9.09E-05	
吸入被ばくに対する線量換算係数	¹³⁴ Cs	$DF_{inh}(i)$	μSv/Bq	6.6E-03	ICRP Publ.72で示された、一般公衆(成人)の吸入による被ばく換算係数を設定した。
	¹³⁷ Cs			4.6E-03	

なお、大気中相対濃度は、福島県の気象統計の結果を基に主要なパラメータを以下のとおり設定し算出した。

- 風速(m/s) 2(m/s)
- 大気安定度 D
- 放出幅 0m
- 放出高さ 2m
- 評価高さ 1m

ここで、大気中相対濃度は距離に対する最大着地濃度を示す地点の値を採用した。

(b) 地表面に沈着した除去土壌等による外部被ばく(経路5)

経路5に示す被ばく経路は式(2)及び(3)を用いて評価を行う。式(2)及び(3)において使用されるパラメータを表8に示す。

表 8 経路 5 の評価に使用するパラメータ

パラメータ名称		式中記号	単位	設定値	設定根拠
放射性核種の濃度	¹³⁴ Cs	Cground(i)	Bq/kg	2500	表 3
	¹³⁷ Cs			8500	
被ばく時間		t_0	h/y	8760	保守的に除染をしないと仮定した。
火災により燃焼する除去土壌の重量		W_w	Kg	1.28E+5	影響を受ける割合を、IAEA-TECDOC-401, Tranch Fire Scenario の表 4 の Release Fractions を参考に、保守的に幅の上限である 0.1 とし、表 3 のパラメータを基に導出した。
火災における放射性核種の排気への移行率			-	1	影響を受けた廃棄物中に含まれるセシウムの全量が排気に移行すると仮定した。
外部被ばくに対する遮へい係数 (事故時)	公衆	S_0	-	0.6	1 日のうち、屋内滞在時 (16 時間) の遮へい効果 (遮へい係数: 0.4) を考慮して設定した
放射性核種の土壌残留係数		f_1	-	1	保守的に全て残留すると仮定した。
外部被ばくに対する線量換算係数 (核種が沈着した土壌)	¹³⁴ Cs	$DF_{ext}(i)$	Sv/s per Bq/m ²	1.6E-15	US EPA Federal Guidance Report No. 12 を基に設定した。
	¹³⁷ Cs			5.7E-16	
放出粒子の沈着速度 (乾性沈着)		V_g	m/s	0.0015	IAEA TECDOC-1777 を基に設定した。
放射性核種の崩壊定数	¹³⁴ Cs	λ	1/y	0.336	ICRP Publ. 107 の半減期より設定した。
	¹³⁷ Cs			0.023	
核種放出期間		T_0	h	12	消火完了に要する時間を 12 時間と想定した。
大気中相対濃度		χ/Q	s/m ³	2.74E-02	福島県の気象統計の結果を基に、大気拡散計算を行い、最も安全側となる最大濃度を採用した。

(c) 敷地内に残留した除去土壌等 (経路 6)

経路 6 に示す被ばく経路は式 (1) を用いて評価を行う。ここでは、事故の影響に伴い、遮へい機能が失われた状況を想定し、近隣居住者の受ける外部被ばくを想定している。式(1)で用いるパラメータを表 9 に示す。

表 9 経路 6 の評価に使用するパラメータ

パラメータ名称		式中記号	単位	設定値	設定根拠
放射性核種の濃度	^{134}Cs	$C_A(i)$	Bq/kg	2500	表 3
	^{137}Cs			8500	
外部被ばくに対する遮へい係数		S_0	-	0.6	1 日のうち、16 時間屋内に滞在すると仮定し、屋内滞在時の遮へい係数を 1.0、屋外滞在時の遮へい係数を IAEA TECDOC-1162 の 0.4 を採用した。
被ばく時間		t_0	h / y	730	仮置場の修復に 1 か月を要すると仮定した。
スカイシャイン+ 直接線 (仮置場)	^{134}Cs	$DF_{ext}(i)$	$\mu\text{Sv/h}$ per Bq/kg	1.78E-05	MCNP コードを用い、以下の体系で解析を行った。遮へい条件についてはガイドラインに従い設定した。 線源の形状：20m×20m×2m 線源の密度：1.5g/cm ³ 遮へい条件：なし 評価点：20m×2m の面から 8m 評価高さ：1m
	^{137}Cs			6.79E-06	
放射性セシウムの 崩壊定数	^{134}Cs	λ	1/y	0.336	ICRP Pub1. 107 の半減期より設定した。
	^{137}Cs			0.023	

(d) 汚染された農作物の摂取による内部被ばく (経路 7)

経路 7 に示す被ばく経路は式 (12)～(16) を用いて評価を行う。ここでは、事故の影響に伴い、周辺の農耕土壌の汚染を通じて汚染された農産物を摂取することによる内部被ばくを想定している。式 (12)～(16) で使用されるパラメータを表 10 に示す。なお、 $C_{\text{ground}}(i)$ は表 8 で示したパラメータを用いて算出した値を用いた。

表 10 経路 7 の評価に使用するパラメータ

パラメータ名称		式中記号	単位	設定値	設定根拠	
土壌実効表面密度		P_v	kg/m ²	280	U. S. NRC Regulatory Guide 1. 109 において使用している値を設定した。	
年間食品摂取量	葉菜類	H_f	kg/y	20. 3	浅地中トレンチ処分の安全評価手法:2013 を基に設定した。	
	米類			58. 5		
	その他農産物			160. 5		
	米類	1	浅地中トレンチ処分の安全評価手法: 2013 を基に、保守的に 1 とした。			
市場希釈係数	葉菜類	G_f	-	0. 1	浅地中トレンチ処分の安全評価手法:2013 を基に自家栽培の値を設定した。	
	その他農産物			0. 1		
線量換算係数	¹³⁴ Cs	$DF_{ing}(i)$	Sv / Bq	1. 30E-8	IAEA-SS-115 の値を用いた。	
	¹³⁷ Cs			1. 90E-8		
土壌-農作物間の移行係数	米類	$TF_{soil-leas}(i)$	(Bq/kg-wet/ Bq/kg-dry)	0. 0016	IAEA TECDOC 1616 (P248) に示されるフォールアウトの ¹³⁷ Cs についての日本における実測値(white rice)を採用した。	
	葉菜類	$TF_{soil-leas}(i)$,		0. 04		IAEA SRS 19 の値を採用した。
	その他農産物	$TF_{soil-others}(i)$				
栽培密度(葉菜)		ρ_v	Kg/m ²	2	一般公衆線量評価を基に設定した。	
放射性核種の崩壊定数	¹³⁴ Cs	λ	1/y	0. 336	ICRP Publ. 107 の半減期より設定した。	
	¹³⁷ Cs			0. 023		
放射性核種の葉菜上の実効減衰定数	¹³⁴ Cs	λ_{eff}	1/y	18. 436	一般公衆線量評価を基に設定した。	
	¹³⁷ Cs			18. 123		
放出粒子の沈着速度(乾性沈着)		V_g	m/s	0. 0015	IAEA TECDOC-1777 を基に設定した。	
栽培期間年間比		f_t	-	1	保守的に 1 とした。	
摂取前洗浄による残留比		f_d	-	1	保守的に 1 とした。	

<大雨による除去土壌等の流出（経路 8）>

経路 8 に示す被ばく経路は式 (1) を用いて評価を行う。なお、経路 8 の事故では図 5 に示すとおり、道路側溝に除去土壌が流出したのち堆積した側溝上を歩行する際に受ける外部被ばくを想定した。式 (1) で使用されるパラメータを表 10 に示す。

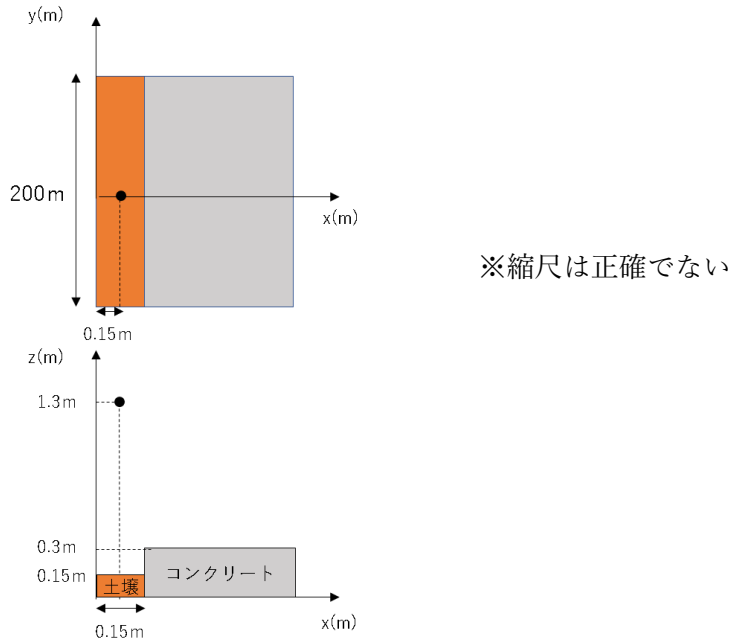


図 5 大雨に伴う除去土壌等の流出事故

表 11 経路 8 の評価に使用するパラメータ

パラメータ名称		式中記号	単位	設定値	設定根拠
放射性核種の濃度	^{134}Cs	$C_A(i)$	Bq/kg	2500	表 3
	^{137}Cs			8500	
外部被ばくに対する遮へい係数		S_0	-	1.0	保守的に 1 とした。
被ばく時間		t_0	h / y	365	道路上を毎日 1 時間歩行する生活様式を想定した。
外部被ばく線量換算係数	^{134}Cs	$DF_{ext}(i)$	$\mu\text{Sv/h}$ per Bq/kg	2.6E-05	大雨により 10%の除去土壌等が流出し、その 10%が側溝上に堆積すると仮定した。QAD-CGGP2R コードを用い、以下の体系で解析を行った。 線源の形状：0.15m×0.3m×180m 線源の密度：1.5g/cm ³ 遮へい条件：なし 評価点：図 5 のとおり
	^{137}Cs			9.5E-06	
放射性セシウムの崩壊定数	^{134}Cs	λ	1/y	0.336	ICRP Pub1. 107 の半減期より設定した。
	^{137}Cs			0.023	

<水系を通じた施設外への漏えい防止機能の喪失（経路9）>

経路9として、水を介した除去土壌等からの放射性セシウムの漏えいを防ぐための機能が失われるシナリオを設定し、上部及び下部遮水シートの破れや保管容器の損傷が生じた状況を想定した。被ばく経路としては、仮置場外へ漏えいした放射性セシウムが地下水へ移行したのち飲用水利用される経路を想定した。想定した事故の状況を図6に示す。以上を基に放射性セシウムが地下水を経由して漏えいした際に生じる追加被ばく線量を式(12)及び(18)～(22)を用いて評価した。評価に用いたパラメータを表12に示した。

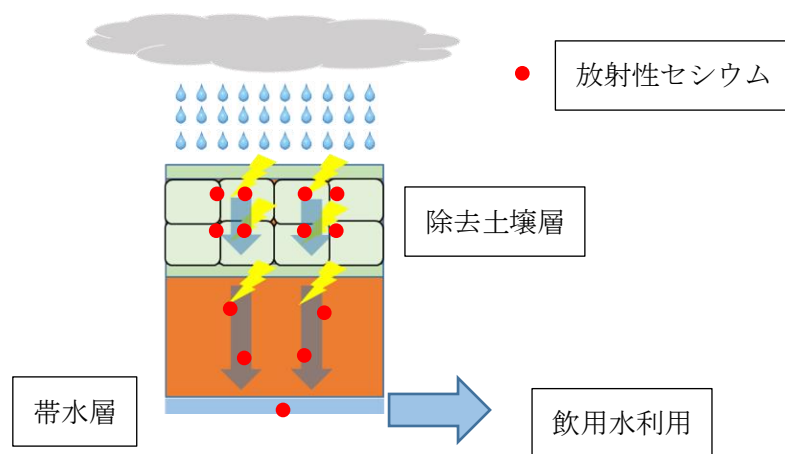


図6 雨水侵入に伴う地下水への放射性セシウム漏えい

表 12 経路 9 の評価に使用するパラメータ

パラメータ名称	式中記号	設定値	単位	設定根拠
コンテナの高さ	H_P	m	1.1	除染関係ガイドライン
コンテナの底面積	A_P	m ²	1.1	
コンテナの破損割合	DR_P	—	0.2	20%が破損すると仮定
仮置場の地下水の流れと垂直な幅	W_S	m	20	仮置場の長辺の長さを設定
保管物の密度	ρ_W	g-dry /cm ³	1.6	中間貯蔵施設の概略安全評価について
含水率	WR_W	—	0.3	浅地中トレンチ処分の安全評価手法:2013 を基に設定した。
収着分配係数	K_{di}	Bq/kg-dry	270	IAEA TRS-364 ⁴⁾
単位面積当たりの浸出水の流出速度	R_I	m/year	0.4	地下水ハンドブック ⁵⁾
帯水層の厚さ	T_G	m	5	設定値
帯水層の有効空隙率	EP_G	—	0.3	保管物と同様
地下水の流速	R_G	m/d	1	同上 ⁵⁾
飲用水に関する放射性物質濃度から被ばく線量への換算係数	DCF_{di}	μSv/year per Bq/L	¹³⁴ Cs: 15.45 ¹³⁷ Cs: 10.57	IAEA SRS-19 ⁷⁾

＜河川の氾濫による除去土壌等の流出（経路 10）＞

経路 10 では河川の氾濫による除去土壌等の放出シナリオとして、河川底に除去土壌等の一部が堆積し、定常的に放射性セシウムが河川水へ溶出することで汚染された河川水を灌漑用水として利用することによる、汚染された農産物の摂取、汚染された土壌からの外部被ばく及び舞い上がり土壌の吸入被ばくを想定した。本被ばく経路は式(12)を用いて評価を行う。また、式(12)で用いる食品中の放射性核種濃度は式(5)～(7)、(14)、(15)、(23)を用いて求めた。図7に想定した事故状況を示す。また、式(5)～(7)に用いたパラメータを表13に示す。なお、式(14)、(15)、(23)で用いるパラメータは表10と同様の値を用いた。

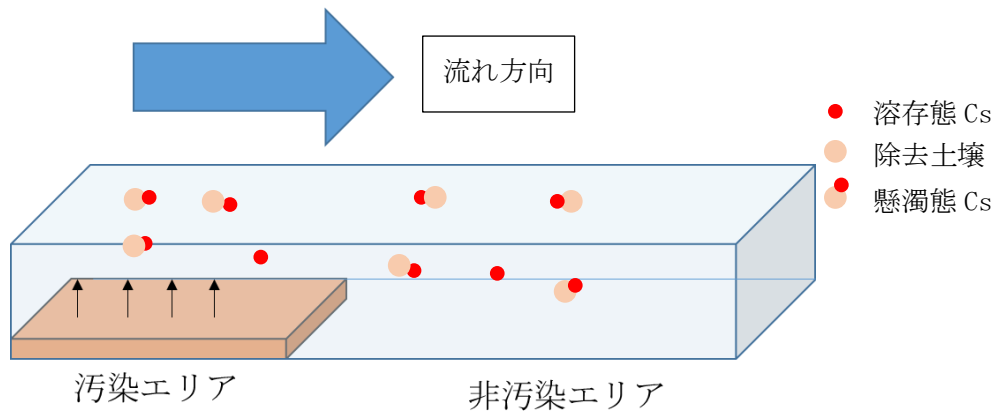


図7 河川氾濫後の除去土壌の堆積

表 13 河川氾濫に伴う水系放出経路による灌漑に伴う土壤汚染評価に使用するパラメータ

パラメータ名称		式中記号	単位	設定値	備考
除去土壤残留時間		t	d	365	一年間で除去土壤がすべて底質から流されると想定
土壤密度		ρ	kg/m ³	1600	表 3
土壤流出量		V_{waste}	m ³	800	全体の 100%が流出し河川底にとどまると仮定した。
放射性核種の濃度	¹³⁴ Cs	$C_{\text{waste}}(i)$	Bq/kg	2500	表 3
	¹³⁷ Cs			8500	
放射性核種の崩壊定数	¹³⁴ Cs	λ	1/y	0.336	ICRP Publ. 107 の半減期より設定した。
	¹³⁷ Cs			0.023	
土壤-河川水間の収着分配係数		Kd_{ss}	m ³ /kg	1000	ORNL-5786 より設定した。
河川流量		V_{river}	m ³ /d	5.7×10^6	本宮観測所における過去5年間の阿武隈川の流量の平均値を利用した。
土壤間隙率		ε	-	0.38	浅地中トレンチ処分の安全評価手法:2013 を基に設定した。

表 14 経路 10 の評価に用いるパラメータ

パラメータ名称		式中記号	単位	設定値	設定根拠
土壌中放射性核種濃度	¹³⁴ Cs	$C_{soil}(i)$	Bq/kg	6.6E-1	表 10 に示すパラメータを用いて式 (5) により求めた。
	¹³⁷ Cs			2.3	
年間食品摂取量	葉菜類	H_f	kg/y	20.3	平成 16 年国民健康・栄養調査報告における値を用いた。
	米類			58.5	
	その他農産物			160.5	
市場希釈係数	葉菜類	G_f	-	0.1	浅地中トレンチ処分の安全評価手法:2013 を基に農耕者の値を設定した。
	米類			1	浅地中トレンチ処分の安全評価手法:2013 を基に、保守的に 1 とした。
	その他農産物			0.1	浅地中トレンチ処分の安全評価手法:2013 を基に農耕者の値を設定した。
線量換算係数	¹³⁴ Cs	$DF_{ing}(i)$	Sv / Bq	1.30E-8	IAEA-SS-115 の値を用いた。
	¹³⁷ Cs			1.90E-8	
土壌-農作物間の移行係数	葉菜類	$TF_{soil-leas}(i)$	(Bq/kg-wet/ Bq/kg-dry)	0.04	IAEA SRS 19 の値を採用した。
	米類	$TF_{soil-leas}(i)$		0.0016	IAEA TECDOC 1616(P248)に示されるフォールアウトの放射性セシウムについての日本における実測値(white rice)を採用した。
	その他農産物	$TF_{soil-others}(i)$		0.04	IAEA SRS 19 の値を採用した。
放射性セシウムの崩壊定数	¹³⁴ Cs	λ	1/y	0.336	ICRP Publ. 107 の半減期より設定した。
	¹³⁷ Cs			0.023	

<河川の氾濫による除去土壌等の流出（経路 11）>

経路 11 に示す被ばく経路は式(2)及び(4)～(7)を用いて評価を行う。また、式(2)及び式(4)で用いるパラメータを表 15 に示す。なお、式(5)～(7)で用いるパラメータは表 13 と同様の値を用いた。

表 15 経路 11 の評価に用いたパラメータ

パラメータ名称	式中記号	単位	設定値	設定根拠	
地表面の放射性核種濃度	¹³⁴ Cs	$C_{ground}(i)$	Bq/m ²	1.9E+2	式(4)より導出した。
	¹³⁷ Cs			6.3E+2	
被ばく時間	t_0	h/y	500	浅地中トレンチ処分の安全評価手法:2013 を基に農耕者の値を設定した。	
外部被ばくに対する遮へい係数	S_0	-	1	保守的に 1 とした。	
外部被ばくに対する線量換算係数（核種が沈着した土壌）	¹³⁴ Cs	$DF_{ext}(i)$	Sv/s per Bq/m ²	1.6E-15	US EPA Federal Guidance Report No. 12 を基に設定した。
	¹³⁷ Cs			5.7E-16	
放射性セシウムの崩壊定数	¹³⁴ Cs	λ	1/y	0.336	ICRP Publ. 107 の半減期より設定した。
	¹³⁷ Cs			0.023	
土壌実効表面密度	P_v	kg/m ²	280	U. S. NRC Regulatory Guide 1.109 において使用している値を設定した。	

<河川の氾濫による除去土壌等の流出（経路 12）>

経路 12 に示す被ばく経路は式(5)～(7)、(9)及び(11)を用いて評価を行う。また、式(9)、(11)で用いるパラメータを表 16 に示す。なお、式(5)～(7)で用いるパラメータは表 13 と同様の値を用いた。

表 16 経路 12 の評価に用いたパラメータ

パラメータ名称	式中記号	単位	設定値	設定根拠
大気中ダスト濃度	d_R	kg/m ³	5.0E-7	浅地中トレンチ処分の安全評価手法:2013 を基に農耕者の値を設定した。
大気中の放射性核種濃度	¹³⁴ Cs	$C_{air}(i)$	3.3E-7	式(11)より導出した。
	¹³⁷ Cs		1.1E-6	
被ばく時間	t_0	h/y	500	浅地中トレンチ処分の安全評価手法:2013 を基に農耕者の値を設定した。
吸入被ばくに対する線量換算係数	¹³⁴ Cs	$DF_{inh}(i)$	μSv/Bq	ICRP Publ. 72 で示された、一般公衆(成人)の吸入による被ばく換算係数を設定した。
	¹³⁷ Cs		4.6E-03	
放射性セシウムの崩壊定数	¹³⁴ Cs	λ	1/y	ICRP Publ. 107 の半減期より設定した。
	¹³⁷ Cs		0.023	
呼吸率	R_{inh}	m ³ /h	1.2	ICRP Publ. 89 を基に算定した。

3. 評価結果

表 4 に示したシナリオに関する線量評価の結果を表 17 に示す。

表 17 各シナリオの線量評価

経路	状況	被ばく線量(mSv)	対象
1-(a)	平常時	6.0×10^{-2}	公衆
1-(b)		1.4×10^{-2}	公衆
2		7.9×10^{-3}	モニタリング作業員
3	事故時	5.2×10^{-2}	公衆
4		1.5×10^{-3}	公衆
5		3.0×10^{-1}	公衆
6		4.6×10^{-2}	公衆
7		8.4×10^{-1}	公衆
8		4.9×10^{-2}	公衆
9		3.0×10^{-5}	公衆
10		1.2×10^{-4}	公衆
11		3.2×10^{-3}	公衆
12		1.3×10^{-8}	公衆

平成 27 年 4 月時点のモデル仮置場を対象に、想定される被ばくシナリオを評価した結果、平常時における追加被ばく線量は参照値とした年間 1mSv を下回ることが予想された。また、事故時における追加被ばく線量は参照値とした事故あたり 5mSv を下回ることが予想された。

事故時の評価において、最も影響が大きいと想定されたのは、火災事象の発生時における汚染された農産物の経口被ばく経路であった。したがって、生活圏に存在する仮置場において大規模な火災事故が発生した場合においては、本経路については注意を払う必要がある。すなわち、農産物の汚染が懸念されるレベルであるかを判断するための空間線量率の測定を行う、またその結果に基づき汚染が懸念される場合には、特に初期沈着による汚染が懸念される葉菜について放射能測定を行うこと等が挙げられる。これらの対応を適切にとることで、仮に大規模な事故が生じたとしても無用な被ばくを防ぐことが可能である。

また、平常時の被ばく経路として設定した公衆の外部被ばく経路は、ガイドラインに沿った仮置場の設計を行うことで、追加被ばく線量が 0.06 mSv/年と低く抑えられることが示されたが、本シナリオは必ず発生するものであることから、今回想定したシナリオの中でも重要なシナリオと考えられる。

なお、本報告書においてはあくまで各被ばく経路におけるハザードの大きさについてのみ評価を行っており、発生確率に関する言及はしていないが、リスクとはハザードと発生確率により評価されるものであり、ハザードが大きい事故であっても、その発生確率が小さければ、リスクとしては小さくなる。例えば、今回最も影響が大きいと推定された火災事故の発生確率は、最終処分場の例でみると平成 16-19 年度において約 0.1% であるとの報告がされている他、県内の除去土壌等の仮置場においてもこれまで発生が明らかになっているのはわずか 1 件にとどまっている。これらのことを踏まえると、仮置場において火災や豪雨等が生じることによる除去土壌等の大気や水系といった外部環境への流出事象のリスクは十分に小さいと判断してよいと考えられる。

なお、今回は保管時を対象としたことから、遮へいや離隔が適切になされた体系を評価したが、今後の除去土壌等の輸送時においては、遮へい土の撤去により一時的に周辺の空間線量率が上昇する可能性があることから、輸送計画の段階で遮へい土の撤去による影響を十分に検討する必要がある。

謝辞

外部被ばく線量換算係数の導出に際し、ご協力いただいた国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の山田様に感謝いたします。

参考文献

- 1) 中間貯蔵施設に係る「当面 5 年間の見通し」、環境省、2016 年、

- http://josen.env.go.jp/chukanchozou/action/acceptance_request/pdf/correspondence_160327_01.pdf（令和2年3月5日最終閲覧）。
- 2) 除染仮置場等の状況（福島県内）、
http://josen.env.go.jp/plaza/info/data/pdf/data_1907_02.pdf（環境再生プラザ、令和2年3月5日最終閲覧）。
 - 3) 除去土壌等の保管状況を更新しました（平成31年3月末時点）、
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/hokanjyoukyou.html>（ふくしま復興ステーション、令和2年3月5日最終閲覧）。
 - 4) 除染関係ガイドライン - 除去土壌の保管に係るガイドライン、環境省、H25年
 - 5) 除染情報サイト - 仮置場について、
http://josen.env.go.jp/soil/temporary_place.html（令和2年3月5日最終閲覧）。
 - 6) 平成23年厚生労働省令第152号、厚生労働省、2011年、
<https://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-11300000-Roudoukijunkyokuanzeneiseibu/0000030858.pdf>（令和2年3月5日最終閲覧）。
 - 7) 東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故の影響を受けた廃棄物の処理処分等に関する安全確保の当面の考え方について、原子力安全委員会、2011年、
https://www.env.go.jp/jishin/rmp/conf/18/ref01_1r.pdf（令和2年3月5日最終閲覧）。
 - 8) 中間貯蔵施設の概略安全評価について、環境省、2013年、
http://josen.env.go.jp/soil/pdf/safety_measure_04_02.pdf（令和2年3月5日最終閲覧）。