

埋設処分の評価経路に関するクリアランスレベルの試算に係る検討について

平成21年8月25日

放射線規制室

1. はじめに

第8回(前回)のクリアランス技術検討ワーキンググループ(以下、「クリアランスWG」という。)においては、社団法人日本アイソトープ協会(以下、「RI協会」という。)及び独立行政法人日本原子力研究開発機構(以下、「原子力機構」という。)により、放射性同位元素(以下、「RI」という。)を使用する施設等から発生するRIで汚染された物(以下、「RI汚染物」という。)の種類と物量についての考え方が示された。また、大学共同利用機関機構高エネルギー加速器研究機構(以下、「高エネ研」という。)により、放射線発生装置の解体等に伴って発生するRI汚染物(放射化物)の種類と物量についての考え方が示された。さらに、事務局より、放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律(以下、「放射線障害防止法」という。)に今後規定するクリアランスレベルの算出に係る評価経路や計算モデルの設定及び評価パラメータの整備の考え方について示した。

第8回クリアランスWGにおける審議では、放射線障害防止法に規定するクリアランスレベルのうち、主な核種についての試算に着手することが確認された。

第9回(今回)のクリアランスWGでは、主な核種についてのクリアランスレベルの試算を進めるうえで、以下の項目について、再度その妥当性について確認を行いたい。

- (1) クリアランス対象物の物量に係る考え方
- (2) クリアランスレベルを算出する対象核種の選定に係る考え方
- (3) クリアランス対象物の埋設処分に関する評価経路及び計算モデルの考え方

2. クリアランス対象物の物量に係る考え方

放射線障害防止法にクリアランス制度を導入した場合に、クリアランスの対象となるものは、以下の二つである。

- ① RIの使用等に伴って発生するRI汚染物
- ② 放射線発生装置の解体等に伴って発生するRI汚染物(放射化物)

2.1 RIの使用等に伴って発生するRI汚染物

クリアランスの対象と考えられるRI汚染物には、RI使用施設等から発生するもので、RIの使用等の許可・届出事業者(以下、「RI事業者」という。)(医療機関、研究機関、教育機関、民間企業等)から発生するもの、及びRI協会がこれまでに集荷し保管しているもの、並びに原子力機構におけるRIの使用等により発生するものがある。

2.1.1 クリアランス対象物の物量の考え方

国内には、医療機関、研究機関、教育機関、民間企業等のRI事業者が管理するRI使用施設が全国各地に存在し、これらの各施設でRI汚染物が発生している。また、上述のように、これらのRI汚染物は、現状ではRI協会により集荷され、保管されている。このよう

な状況を踏まえ、クリアランス制度の導入後の RI 汚染物のクリアランスが以下に示す「一括クリアランス」及び「個別クリアランス」の形態で行われることを考慮してクリアランス対象物の物量を推定することとしたい。なお、放射線安全規制検討会の「放射線障害防止法に規定するクリアランスレベルの設定に係る基本方針(案)」において、「クリアランスレベル設定において、対象物による有意な差が生じ、クリアランス判断時に実効性のある分類・判断が可能と考えられる場合、対象物の種類に応じてクリアランスレベルを設定することを必要に応じて考慮する。」としていることから、一括クリアランス及び個別クリアランスともに、種類別に求められた物量についても今回の試算のための想定物量とすることとしたい。

(1) 「一括クリアランス」におけるクリアランス対象物とその物量

一括クリアランスにおいては、全国各地の RI 使用施設等から 1 年間に発生し集荷された RI 汚染物、RI 協会により保管されている RI 汚染物、及び原子力機構から発生する RI 汚染物がクリアランスされた後に、1 箇所の処分場に埋設されるか、あるいは再利用等のために 1 箇所のリサイクル施設に運び込まれると仮定してクリアランス対象物の物量を想定することとしたい。

RI 協会及び原子力機構による調査の結果（資料第 8-3-1 号）に基づいた一括クリアランスにおける物量の算出結果を添付資料 1-1 に示す。まず、RI 使用施設等から 1 年間に発生するクリアランス対象物の想定物量については、RI 協会のここ 5 年間の集荷データをもとに算出している。集荷においては、「RI 廃棄物記録票」が RI 事業者より提出されていることから、記録票に記載された収納容器ごとの RI 汚染物の種類、核種、放射エネルギーの数値をもとに核種の放射能濃度が算出され、国際原子力機関(IAEA)の RS-G-1.7（以下、「RS-G-1.7」という。）で示されたそれぞれの核種の放射能濃度との比較が行われたうえで、RS-G-1.7 の放射能濃度以下になる物の物量をクリアランス対象物の物量としている。なお、添付資料 1-2 に示されるように、RI 協会のここ 5 年間の毎年の集荷量は、減少傾向にあり、これらのデータに基づいて 1 年間に発生する物量を想定することは、妥当であると考えられる。

また、RI 協会により保管されている RI 汚染物からの対象物の想定物量については、現在保管されている RI 汚染物の収納容器約 13 万本のうち、放射能濃度の高い RI 汚染物を除いた 10,650 トンについて、約 10 年間かけてクリアランスが行われることとして、1 年間に発生するクリアランス対象物の物量が算出されている。

さらに、原子力機構から発生するクリアランス対象物の物量については、ここ 5 年間に発生した RI 汚染物について、RS-G-1.7 に示されたそれぞれの核種の放射能濃度を参考にしてクリアランス対象物の発生量を検討し、1 年間の平均物量が算出されるとともに、過去からこれまでに発生した RI 汚染物の保管物量を 20 年で平均化した物量が算出され、これらの物量の合計を 1 年間に発生するクリアランス対象物の物量としている。

(2) 「個別クリアランス」を行う場合のクリアランス対象物とその物量

個別クリアランスにおいては、クリアランス対象物が各 RI 事業者によりクリアランスされた後に、1 箇所の処分場に埋設されるか、あるいは再利用等のために 1 箇所のリサイクル施設に運び込まれると仮定してクリアランス対象物の物量を想定することとしたい。

個別クリアランスにおける物量の算出結果を添付資料 1-3 に示す。2. 1. 1 (1) と同様の考え方で、まず、RI 協会のここ 5 年間の集荷データをもとに、1 年間に発生すると考えられるクリアランス対象物の物量を算出している。ここで、各 RI 事業者が RI 協会へ排出する物量にばらつきがあることを考慮し、例えば、発生した RI 汚染物を事業者が自らの施設で最長 5 年間保管した後に、RI 協会へ排出すると仮定して、1 年間に発生すると考えられるクリアランス対象物の物量の 5 倍の値を想定物量としたい。ただし、クリアランスの対象となっている土砂については、事業所の汚染土壌であること、廃止措置等で不定期に排出されること、年間の集荷量と関連が深くないことから、これまでの 1 事業所における最大発生量の 2 倍の値を想定物量としたい。

2. 2 放射線発生装置の解体等に伴って発生する RI 汚染物（放射化物）の物量

クリアランスの対象と考えられるものは、放射線発生装置の解体等に伴って発生する RI 汚染物（放射化物）である。放射線発生装置は、RI 使用施設等の場合と同様に、医療機関、研究機関、教育機関、民間企業等で使用されている。放射線発生装置のうち医療機関で使用されている加速エネルギーの小さな治療用電子リニアック（直線加速器）や PET 薬剤製造用小型サイクロトロンは小規模施設で使用されており、教育機関、研究機関、民間企業等で使用されている加速エネルギーの大きなサイクロトロン、シンクロトロンは大規模施設で使用されている。これらの放射線発生装置では、使用する電子または粒子の加速エネルギーの大きさによって、施設の規模、構成機器、設備、収納室の構成部材の放射化の程度が異なることから、放射線発生装置の解体等に伴って発生するクリアランス対象物の物量も大きく異なることが考えられる。

2. 2. 1 クリアランス対象物の物量の考え方

上述のように、放射線発生装置の解体等に伴って発生するクリアランス対象物の物量は、装置の加速エネルギーの大きさによって異なるものと考えられる。そこで、国内に設置されている放射線発生装置使用施設全体を対象とした調査の結果（資料第 8-3-2 号）から、添付資料 1-4 に示すように、加速エネルギーの種類や大きさに基づいて施設を分類した場合に、代表的な施設を対象として施設の解体等に伴って発生することが予想されるクリアランス対象物の物量を算出している。その結果、医療機関のような小規模施設で発生することが予想される物量と研究機関、教育機関のような大規模施設で発生することが予想される物量が大きく異なることから、クリアランスレベルの試算においては、大規模施設及び小規模施設それぞれに対して、物量を想定することとしたい。そこで、大規模施設については、E から J の施設で発生する鉄、SUS、アルミ、銅、コンクリートの最大物量の合計をクリアランス対象物の想定物量とすることとしたい。同様に、小規模施設については、A から D の施設で発生する各物品の最大物量の合計を想定物量とすることとしたい。なお、放射線安全規制検討会の「放射線障害防止法に規定するクリアランスレベルの設定に係る基本方針(案)」において、「クリアランスレベル設定において、対象物による有意な差が生じ、クリアランス判断時に実効性のある分類・判断が可能と考えられる場合、対象物の種類に応じてクリアランスレベルを設定することを必要に応じて考慮する。」としていることから、大規模施設及び小規模施設のそれぞれについて、金属の最大物量の合計及びコンク

リートの最大物量についても今回の試算のための想定物量とすることとしたい。

3. クリアランスレベルを算出する対象核種

3. 1 RI の使用等に伴って発生する RI 汚染物に係る対象核種の選定の考え方

対象核種の選定については、添付資料 2 に示された情報を基本として考え方を取りまとめた。クリアランスレベルを算出する対象核種は、RI 使用施設等において使用されている核種や保管されている RI 汚染物に含まれている核種の中から網羅的に選定することが適切であるため、RI 協会から RI 使用者等に供給されている主な核種、RI 協会において現在保管されている RI 汚染物に含まれている核種、原子力機構において使用・保管されている核種の中から選定することとしたい。なお、RS-G-1.7 に示された全ての核種のクリアランスレベル (Bq/g) の最大値と最小値の間に 6 桁の差があることを踏まえ、選定においては、放射エネルギーが最大となる核種の放射エネルギーを 1 として、他の核種の放射エネルギーの相対比を規格化した場合に、6 桁までの核種を対象核種として選定することとした。また、クリアランスの対象としている RI 汚染物は RI 使用施設等から発生する固体状廃棄物であるため、希ガスである放射性核種については選定の対象としない。

3. 1. 1 RI 協会から RI 使用者に供給されている主な核種

まず、平成 16 年度から平成 20 年度に RI 協会から RI 使用者等に供給された非密封の放射性同位元素及び放射性医薬品核種で、「アイソトープ等流通統計(2009)」に核種名が記載されている放射性同位元素 33 核種及び放射線医薬品核種 14 核種について、放射エネルギーが最大となる核種の放射エネルギーを 1 として、他の核種の放射エネルギーの相対比が評価されている。評価の結果、RI では H-3 が、また、放射性医薬品では Tc-99m が放射エネルギーが最大となり、これを除いた 32 核種と 13 核種の全てが相対比 6 桁以内に含まれることから、添付資料 2 の表 1 に示すように、クリアランスレベルを算出する対象核種として、非密封の放射性同位元素 33 核種及び放射性医薬品核種 14 核種を選定することとしたい。なお、ここで選定することとした 33 核種と 14 核種は、RI 協会が国内で供給する核種の放射エネルギーのほぼ 100% を包含している。

3. 1. 2 RI 協会において保管されている RI 汚染物に含まれる核種

次に、平成 20 年度現在の記録に基づいて、RI 協会において全国の RI 使用施設等から集荷され、保管されている RI 汚染物に含まれる放射性核種 166 種について、放射エネルギーが最大となる C-14 の放射エネルギーを 1 として、他の核種の放射エネルギーの相対比を評価した。評価の結果、放射エネルギーの相対比が 6 桁以内となる核種のうち、その核種によって汚染されたものを納めている容器が 100 個以下の核種については、対象核種から除外し、33 核種を評価対象として選定することとしたい。

なお、保管記録から半減期が 1 日未満の核種については対象から除外している。

3. 1. 3 原子力機構における RI 汚染物に含まれる核種

原子力機構の RI 使用施設等において平成 16 年度から平成 20 年度に RI の使用に伴い発

生ずる RI 汚染物及び保管されている RI 汚染物に含まれる放射性核種 146 種について、放射エネルギーが最大となる Ir-192 の放射エネルギーを 1 として、他の核種の放射エネルギーの相対比を評価した。その結果、相対比が 6 桁以内となる核種として 23 核種を評価対象として選定することとした。

なお、保管記録から半減期が 1 日未満の核種については 3. 1. 2 と同様に対象から除外している。

3. 2 放射線発生装置の解体等に伴って発生する RI 汚染物（放射化物）に係る対象核種の選定の考え方

対象核種の選定については、添付資料 3-1 に示された情報を基本として考え方を取りまとめる。さらに、選定においては、クリアランス WG が平成 18 年 6 月に取りまとめた「放射線障害防止法におけるクリアランス制度の整備に係る技術的検討について（中間報告）」（以下、「中間報告」という。）の評価結果、及び JAEA の LINAC（電子加速器）や高エネ研の粒子加速器施設をモデルとして行ったクリアランスの対象となる金属やコンクリート等の放射化計算の結果も参考にすることとした。

3. 2. 1 放射線発生装置の使用に伴う装置本体や周辺機器・構造物の放射化の考え方

上記の中間報告の中で、放射線発生装置の使用に伴う装置本体及びその周辺機器や構造物の放射化のメカニズムについて考察しており、放射線発生装置の運転に伴って生じる本体や周辺構造物の放射化は、加速する荷電粒子と加速器本体を構成する物質との相互作用によって生じる放射化（一次粒子による放射化）と、この相互作用の結果で発生する二次粒子（中性子）と加速器本体や周辺機器、遮へいコンクリート、建家構造物等との相互作用によって生じる放射化（中性子による放射化）に分けることができる。このため、基本的には原子炉施設のクリアランスレベルの算出に係る核種の選定手順を参考にすることができるものとする。ただし、高エネルギーの放射線発生装置の場合、発生する中性子のエネルギーが高く、原子炉で見られる熱中性子捕獲反応のみならず、速中性子反応も考慮に入れておく必要があるため、それぞれの材料毎に数核種の追加を行うこととした。

3. 2. 2 放射線発生装置の使用に伴い生成する核種のうちクリアランスの対象となる核種について

添付資料 3-1 によると、放射線発生装置及びその使用施設を構成する主要な材質は、鉄、ステンレス、銅、アルミニウム、鉛及びコンクリートであり、これらの材質に含まれる成分（元素）を基に、放射線発生装置の使用に伴い生成する核種の種類と放射能についての検討が行われている。なお、施設の解体を行った場合の放射化物のクリアランスレベルの評価過程を考慮して冷却期間は 1 年、半減期は 1 月を超える核種を対象として検討が行われている。

評価対象核種の選定に当たっては、核種の生成量(D)及び RS-G-1.7 の値(C)をもとに、主要核種の $(D/C)_{max}$ に対し、その核種の D/C 値の比 $[(D/C) / (D/C)_{max}]$ が算出され、その結果、コンクリートについては中間報告の表 6 に示された核種のうち、高エネ研の陽子加速器では $[(D/C) / (D/C)_{max}]$ 値が 4 桁目まで、その他の発生装置では 3 桁目までに含ま

れる核種が評価対象として選定されている。その他の材質については、JAEA の LINAC や高エネ研の粒子加速器施設に係る放射化計算の結果を参考にし、 $[(D/C) / (D/C)_{\max}]$ 値が 4 桁目までの核種を評価対象として選定する考えが示されている。

以上のような考え方に基づいて、放射線発生装置の解体等に伴って発生する RI 汚染物（放射化物）に係るクリアランスレベルの算出を行う対象核種として添付資料 3-2 に示した核種を評価対象として選定することとしたい。ここで、資料の▲印の核種は、高エネルギー粒子で照射された場合に検出される可能性があると考えられることから、評価対象の核種として追加することとしたい。また、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（以下、「原子炉等規制法」という。）で原子炉施設に係るクリアランスレベルとして既に規定されている核種の中からも今回のクリアランスレベルの試算を行う対象核種として選定する必要があるものについて検討を行うこととしたい。

4. 埋設処分の評価経路に関するクリアランスレベルの試算について

4. 1 クリアランスレベルの試算におけるクリアランス対象物とその物量の考え方

4. 1. 1 RI の使用等に伴って発生する RI 汚染物のクリアランス対象物とその物量

現在行われている産業廃棄物の処分において、プラスチック類、フィルタ、コンクリート、金属塊についても埋設処分の対象となっていることから、第 8 回クリアランス WG の資料第 8-3-1 号の表 1 及び表 2 で示された埋設処分の対象物の考え方について見直しを行い、添付資料 4-1 の「赤丸」に示すように、可燃性の RI 汚染物としてプラスチック類及びフィルタを、不燃性の汚染物としてコンクリート及び金属塊を埋設処分の対象とすることとしたい。これにより、添付資料 4-1 に示すように、一括クリアランスについては、埋設処分の評価経路におけるクリアランス対象物量が 1,428 トン／年であることから、試算に用いる物量を 1,500 トン／年とし、個別クリアランスについては、クリアランス対象物量が 9.3 トン／年であることから、試算に用いる物量を 10 トン／年とすることとしたい。

4. 1. 2 放射線発生装置の解体等に伴って発生する RI 汚染物（放射化物）のクリアランス対象物とその物量

第 8 回クリアランス WG の資料第 8-3-2 号の表 2 で示された埋設処分の対象物の考え方の見直しを行い、現在行われている産業廃棄物の処分において、埋設処分の対象となっている鉄についても埋設処分の対象物とすることとしたい。

2. 2. 1 で述べたとおり、放射線発生装置使用施設で発生することが予想されるクリアランス対象物の物量は、医療機関のような小規模施設と研究・教育機関のような大規模施設とで大きく異なることから、クリアランスレベルの試算においては、大規模施設及び小規模施設それぞれに対して、物量を想定することとしたい。これにより、大規模施設については、E から J の施設に係る調査結果を参考に、鉄、SUS、アルミ、銅、コンクリートの最大物量の合計が 82,600 トン／年となることから、83,000 トン／年をクリアランス対象物の想定物量とすることとしたい。同様に、小規模施設については、A から D の施設に係る調査結果を参考に、各物品の最大物量の合計が 260 トン／年となることから、300 トン／年を想定物量とすることとしたい。

4. 2 クリアランスレベルの試算における評価経路の考え方

RI の使用等に伴って発生する RI 汚染物及び放射線発生装置の解体等に伴って発生する RI 汚染物（放射化物）に係るクリアランスレベルの試算における評価経路としては、添付資料 5 に示すように原子力安全委員会が平成 11 年に取りまとめた「主な原子炉施設におけるクリアランスレベルについて」（以下、「原子炉クリアランス報告書」という。）で示された評価経路を用いることとしたい。なお、原子力安全委員が「原子炉施設及び核燃料使用施設の解体等に伴って発生するもののうち放射性物質として取り扱う必要のないものの放射能濃度について 平成 16 年 12 月 9 日（平成 17 年 3 月 10 日一部訂正及び修正）」（以下、「再評価報告書」という。）の取りまとめにおいて、他の評価経路に比べて線量が十分小さいと判断された評価経路については、検討の対象としなかったことを踏まえて、今回のクリアランスレベルの試算においても検討の対象としないこととしたい。

また、4. 1. 1 及び 4. 1. 2 で述べたとおり、第 8 回クリアランス WG の資料に比べて埋設処分の対象物の考え方について見直しを行ったことから、資料第 8-4 の図 2 及び図 4 を見直すこととしたい。

4. 3 クリアランスレベルの試算に用いる評価モデルの考え方

RI の使用等に伴って発生する RI 汚染物及び放射線発生装置の解体等に伴って発生する RI 汚染物（放射化物）に係るクリアランスレベルの試算に用いる評価モデルは、原子炉クリアランス報告書におけるクリアランスレベルの算出に使用した評価モデルに係る被ばく線量評価式を用いることを基本とし、さらに、再評価報告書において変更のうえ使用された被ばく線量評価式を用いるとともに、追加された被ばく形態も考慮してクリアランスレベルの試算を行うこととしたい。今回の試算に用いる被ばく線量評価式を添付資料 6 に示す。

RI 汚染物の一括クリアランスにおけるクリアランス対象物の物量について (案)

		クリアランス対象物の想定物量 (ton/year)						
区分	クリアランスの対象となる種別名称	RI 協会 (年間の集荷量に基づく想定)		RI 協会 (現在の保管量に基づく想定)		原子力機構 (ここ 5 年間の発生量、現在の保管量に基づく想定)	合計	
		研究 RI 汚染物	医療 RI 汚染物	研究 RI 汚染物	医療 RI 汚染物			
可燃性 RI 汚染物	紙類・布類・木片	7.0	3.0	50	3	7.8	71	
	プラスチック類	30	89	205	14	3.4	341	
	動物死体	0.83	—	18	—	—	19	
	ファイ ルタ	81	55	50	3	—	189	
	小 計	142	166	412	50	11.2	781	
不燃性 RI 汚染物	ガラス・薄肉金属等	20	44	178	136	3.5	382	
	コンクリート	17	0.5	136	4	8.3	166	
	金属塊	16	0.5	129	4	23.6	173	
	土砂	2	—	15	—	—	17	
	小 計	55	45	458	144	35.4	737	
合 計	197	211	870	194	46.6	1518		

RI 汚染物の発生量についての補足

平成 21 年 8 月 25 日
日本アイソトープ協会

1. RI 汚染物の集荷数量の推移

RI 汚染物は、放射線障害防止法及び医療関連法令によって規制される RI 使用施設等より発生している。RI 協会では、RI 使用施設において発生した RI 汚染物を、集荷スケジュールに基づき、集荷希望事業所より 1 年に 1 回以上の集荷を実施している。RI 協会が平成 16 年度から平成 20 年度に集荷した RI 汚染物の集荷量を図 1 に示す。

過去 5 年間集荷量の推移では、放射線障害防止法によって規制される事業所からの集荷量の減少が著しい状況である。これは、非密封放射性同位元素のトレーサー利用が減少していることを反映している。また、医療関連法令によって規制される事業所からの集荷量についても減少傾向にある。特に、臨床検査分野における放射性医薬品について、代替検査方法が普及したことにより、利用が減少している。

総じて、RI 使用事業所等における RI 汚染物の発生は減少傾向にあり、5 年間の平均値を基に設定した RI 汚染物の発生量は、今後（将来）発生すると予測される量を大きく上回るおそれは少なく、クリアランスレベル算出における対象物量として用いることは適切であると考えられる。

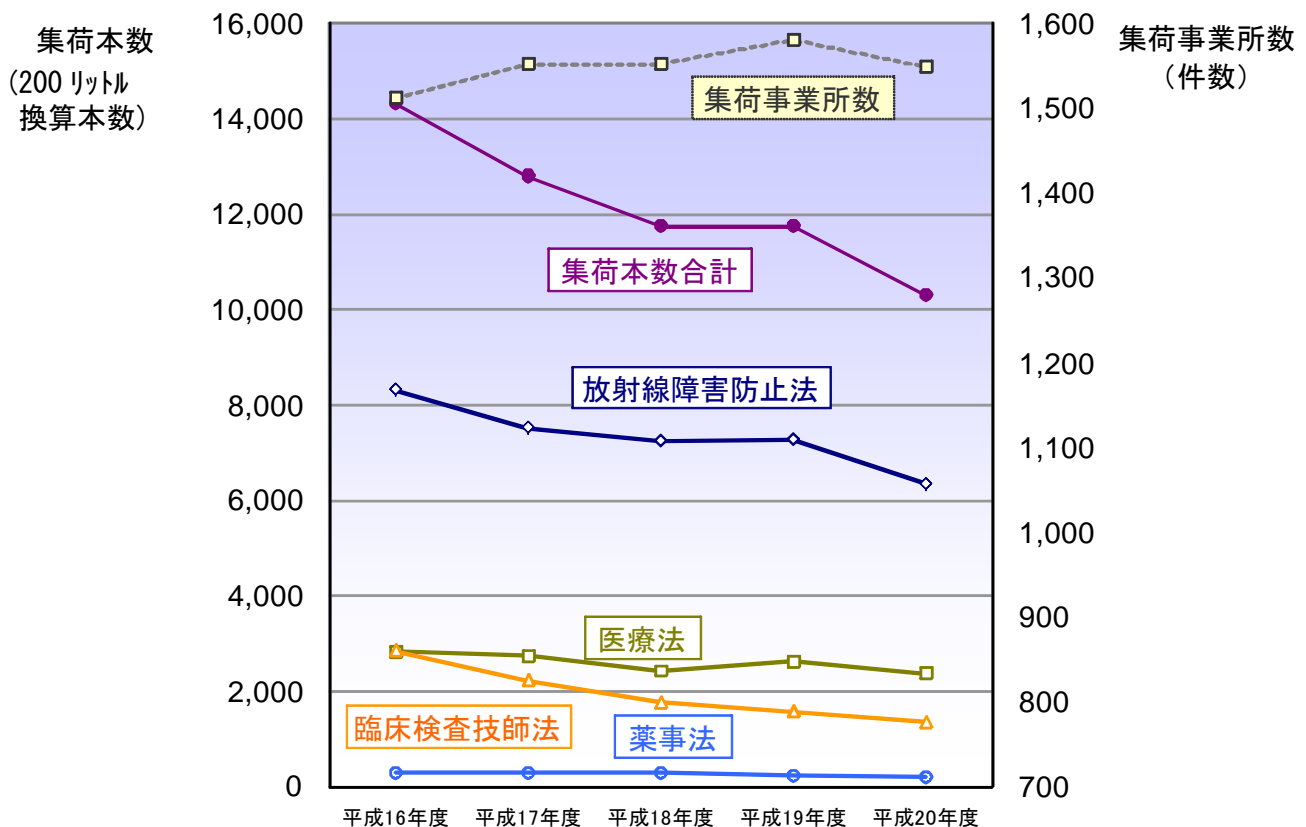


図 1 RI 汚染物集荷数量の推移

2. RI 汚染物の集荷物量の分布について

平成 16 年から平成 20 年度に集荷した RI 汚染物について、RI 使用施設等の一事業所あたりの RI 汚染物の集荷重量（5 年間平均）の分布を図 2 に示す。個別クリアランスにおける土砂を除くクリアランス対象物量である年間約 1,300kg 以下の発生事業所数は約 1,460 事業所となり、全体 1,520 事業所中の約 96%が個別クリアランスにおけるクリアランス対象物量を下回ることとなる。したがって、個別クリアランスにおいて設定した対象物量は RI 使用施設等の大部分を網羅することとなり、クリアランスレベル算出における対象物量として用いることは適切であると考えられる。

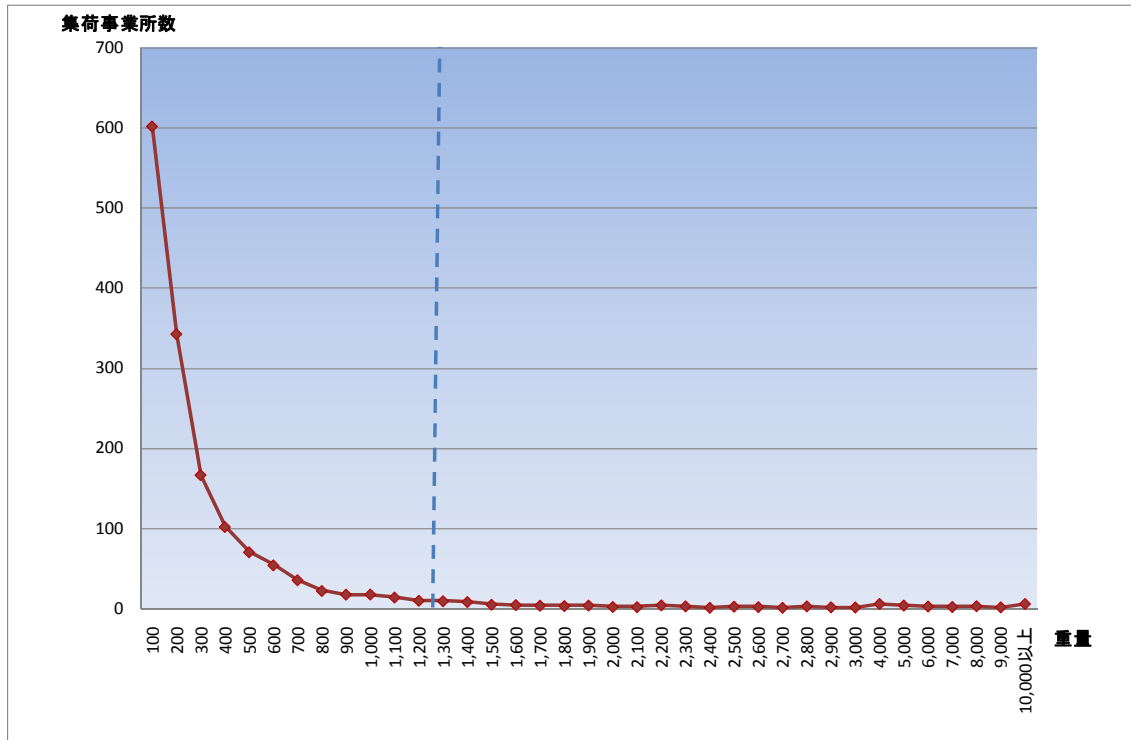


図 2 RI 汚染物集荷量の分布
(平成 16 年度~平成 20 年度の平均)

RI汚染物の個別クリアランスにおけるクリアランス対象物の物量について（案）

クリアランス対象物の想定物量				
区分	クリアランスの対象となる種別名称	1年間に発生すると考えられる想定物量(ton/year)*		
		研究RI汚染物 (研究施設等684事業所平均)	医療RI汚染物 (医療機関等839事業所平均)	RI汚染物 (1523事業所平均)
可燃性 RI汚染物	紙類・布類・木片	0.051	0.018	0.03
	プラスチック類	0.219	0.53	0.39
	動物死体	0.006	—	0.003
	HEPA, Pre フィルタ	0.592	0.328	0.45
	チャコール	0.168	0.113	0.14
小計		1.04	0.99	1.01
不燃性 RI汚染物	ガラス・薄肉金属等	0.146	0.262	0.21
	コンクリート	0.124	0.003	0.06
	金属塊	0.117	0.003	0.05
	土砂**	8	—	8
	小計	8.39	0.27	8.32
合計		9.42	1.26	9.33

* (社)日本アイソトープ協会が集荷したRI廃棄物より試算した事業所当りの年間平均クリアランス対象物量に5年間分の保管量を一度にクリアランスすることを想定して5倍の物量とした。(この物量は、全事業所の96%を包含する。)

** 土砂については、土壌汚染等によって突発的に活性することから、平均値ではなく、これまでの事例から1件当り4t程度の発生量があったため、2倍の尤度をとって8tとした。

RI 汚染物（放射化物）のクリアランス対象物の物量について（案）

区分		クリアランス対象物の想定物量 (ton)											
		小規模の施設						大規模の施設					
		医療機関			研究機関			教育機関			民間企業		
		リニアック		サイクロトロン	シンクロトロン		サイクロトロン	サイクロトロン		サイクロトロン		サイクロトロン	
クリアランスの対象となる主な物品名		A 施設 6MeV 電子加速	B 施設 10MeV 電子加速	C 施設 15MeV 電子加速	D 施設 7.5~18MeV 粒子加速	E 施設 8GeV 電子加速	F 施設 12GeV 粒子加速	G 施設 400MeV 粒子加速	H 施設 400MeV 粒子加速	I 施設 90MeV 粒子加速	J 施設 30MeV 粒子加速		
金 属	鉄	0	0	3.9	8	3200	4100	8600	1500	80	0		
	SUS	0	0.001	0	0.01	2.1	310	87	0.4	3.7	0		
	7/8ミ	0	0	0.2	0.1	0	0	1.5	0	0.32	0		
	銅	0	0.006	0.67	1.1	62	730	360	5	1.5	0		
	鉛	0	0	0.4	0	0	0	0	0	0	0		
コンクリート		0	0	0	250	0	73000	6200	47000	2000	2000		

* 集計結果からクリアランス対象汚染物の推定が最も大きい施設は、鉄及びアルミニウムについてはG施設、鉛についてはF施設、鉛についてはG施設、鉛については、医療機関の電子リニアックが、また SUS、銅及びコンクリートについてはF施設でそれぞれ包含される。

RI 汚染物に係るクリアランスレベル値の試算対象核種について

平成 21 年 8 月 25 日

日本アイソトープ協会

日本原子力研究開発機構

1. はじめに

前回の第 8 回クリアランス技術検討WGにおいて、放射性同位元素使用施設(以下、「RI 使用施設」という。)等から発生する RI 汚染物の種類と物量等について報告した。

本資料では、クリアランスレベル値の試算のため、対象物に含まれる核種から、試算対象とする核種選定方法について説明する。

2. 試算対象核種

RI 汚染物に係るクリアランスレベル値の試算対象核種の選定にあたっては、RI 使用施設において使用されている核種や保管されている RI 汚染物に含まれている核種を網羅的に対象とする必要がある。そのため、下記に示す RI 使用事業所に供給されている主な核種、社団法人日本アイソトープ協会(以下「RI 協会」という。)において保管されている RI 汚染物に含まれている核種、独立行政法人日本原子力研究開発機構(以下「原子力機構」という。)において使用・保管されている核種から試算対象核種を選定する。選定に際しては、リスク評価の観点から核種の放射能を規格化し、上位6桁に該当する核種を試算の対象とする。

なお、今回、試算の対象としている RI 汚染物は RI 使用施設等から発生する固体状廃棄物であるため、希ガスである放射性核種については対象外とする。

2.1 RI 使用事業所に供給されている主な核種

RI 協会が平成 16 年度から平成 20 年度に供給した「アイソトープ等流通統計(2009)」に核種名が記載されている非密封の放射性同位元素 33 核種及び放射性医薬品核種 14 核種を試算対象とした。なお、供給量が最大値となる核種の放射能を1として、他の核種の放射能を規格化したところ、相対比が6桁以内の範囲に全て対象核種が入ることとなった。

2.2 RI 協会が保管している RI 汚染物に含まれる放射性核種

RI 協会が全国の RI 使用施設から集荷し、平成 20 年度末に保管している RI 汚染物に含まれる放射性核種 166 種について、放射エネルギーが最大値となる核種の放射能を1として、他の核種の放射能を規格化した。規格化された相対比が6桁の範囲に入る核種のうち、核種を含有する容器が 100 個以下の放射性核種については、対象核種から除外し、33 核種を評価対象とした。

なお、保管記録から半減期が1日未満の核種については対象から除外した。

2.3 原子力機構における主な試算対象核種

原子力機構の RI 使用施設において平成 16 年度から平成 20 年度に使用及び保管されている RI 汚染物等に含まれる放射性核種 146 種について、放射エネルギーが最大値となる核種の放射能を1として、他の核種の放射能を規格化した。規格化された相対比が6桁の範囲に入る放射性同位元素 23 核種を評価対象とした。

なお、放射エネルギーについては、減衰補正はしていない。また、保管記録から半減期が1日未満の核種については対象から除外した。

3. まとめ

RI 使用事業所に供給されている主な核種、RI 協会が保管している RI 汚染物に含まれる放射性核種及び原子力機構における主な試算対象核種を表1に示す。核種の重なりなどを考慮すると、クリアランスレベル値の試算対象核種は表2に示すように 53 核種となる。

表1 クリアランス対象核種の放射エネルギーの相対比評価結果

規格化	主な非密封放射性同位元素供給核種	放射性医薬品供給核種	RI 協会 RI 汚染物保管核種	原子力機構 RI 汚染物使用保管核種	備考
放射エネルギー最大核種	H-3	Tc-99m	C-14	Ir-192	
1桁目	P-32,C-14, I-125	Mo-99	H-3,Ni-63, Cs-137, Pm-147	H-3	
2桁目	S-35,Ni-63, Mo-99,Cr-51, I-131,P-33, Tc-99m,F-18	I-123,Tl-201, F-18,I-131, Ga-67	Co-60		
3桁目	Re-186,Y-90, I-123,Ca-45, In-111,Fe-59, Tl-201,Ge-68	Rb-81	S-35,Sr-90, Ba-133	Sr-90,Fe-55, Au-198,Cs-137, Yb-169,Co-60	
4桁目	Rb-86,Fe-55, Ga-67,Cs-137, Co-57,Se-75, Na-22,Mn-54	In-111,Y-90, Sr-89,I-125	Na-22,P-32, Cl-36,Mn-54, Fe-55,Co-57, Zn-65,Te-99, Cd-109,I-125, Eu-152	Co-58,Re-186, Cm-244,Fe-59, Cr-51	
5桁目	Zn-65,Sr-85, Cd-109,Co-60, Ce-141	Cr-51	P-33,Ca-45, Cr-51,Sb-125, Ir-192,Tl-204, Am-241	C-14,Mn-54, Am-241,Tc-99	
6桁目		Fe-59	Fe-59,Ge-68, Se-75,I-131, Cs-134, Gd-153	V-49,Y-90, Ni-63,Sb-125, Co-57,W-188	
核種数	33	14	33	23	

表2. クリアランスレベル試算対象核種について

区分 核種			主な非密封放射性同位元素	放射性医薬品核種	RI協会 RI汚染物	原子力機構 RI汚染物
			供給核種 33核種	供給核種 14核種	保管記録 33核種	使用・保管記録 23核種
No.	核種	半減期 (y)				
1	H-3	1.20E+01	○		○	○
2	C-14	5.70E+03	○		○	○
3	F-18	2.10E-04	○	○		
4	Na-22	2.60E+00	○		○	
5	P-32	3.90E-02	○		○	
6	P-33	7.00E-02	○		○	
7	S-35	2.40E-01	○		○	
8	Cl-36	3.00E+05			○	
9	Ca-45	4.50E-01	○		○	
10	V-49	9.26E-01				○
11	Cr-51	7.60E-02	○	○	○	○
12	Mn-54	8.60E-01	○		○	○
13	Fe-55	2.70E+00	○		○	○
14	Fe-59	1.20E-01	○	○	○	○
15	Co-57	7.40E-01	○		○	○
16	Co-58	1.90E-01				○
17	Co-60	5.30E+00	○		○	○
18	Ni-63	9.60E+01	○		○	○
19	Zn-65	6.70E-01	○		○	
20	Ga-67	8.93E-03	○	○		
21	Ge-68	7.42E-01	○		○	
22	Se-75	3.30E-01	○		○	
23	Rb-81	5.22E-04		○		
24	Rb-86	5.10E-02	○			
25	Sr-85	1.80E-01	○			
26	Sr-89	1.40E-01		○		
27	Sr-90	2.90E+01			○	○
28	Y-90	7.30E-03	○	○		○
29	Mo-99	7.50E-03	○	○		
30	Tc-99	2.10E+05			○	○
31	Tc-99m	6.90E-04	○	○		
32	Cd-109	1.30E+00	○		○	
33	In-111	7.70E-03	○	○		
34	Sb-125	2.80E+00			○	○
35	I-123	1.50E-03	○	○		
36	I-125	1.63E-01	○	○	○	
37	I-131	2.20E-02	○	○	○	
38	Cs-134	2.10E+00			○	
39	Cs-137	3.00E+01	○		○	○
40	Ba-133	1.07E+01			○	
41	Ce-141	8.90E-02	○			
42	Pm-147	2.60E+00			○	
43	Eu-152	1.30E+01			○	
44	Gd-153	6.60E-01			○	
45	Yb-169	8.78E-02				○
46	W-188	1.90E-01				○
47	Re-186	1.00E-02	○			○
48	Ir-192	2.00E-01			○	○
49	Au-198	7.40E-03				○
50	Tl-201	8.30E-03	○	○		
51	Tl-204	3.80E+00			○	
52	Am-241	4.30E+02			○	○
53	Cm-244	1.80E+01				○

放射線発生装置の解体等に伴って発生する RI 汚染物中の核種の選定について

平成 21 年 8 月 25 日

高エネルギー加速器研究機構

1. はじめに

前回の第 8 回クリアランス技術検討WGにおいて、放射線発生装置使用施設から発生する RI 汚染物の種類と物量等について報告した。本資料ではクリアランスレベル値の試算のため、対象物に含まれる核種から、試算対象とする核種選定方法について説明する。

放射線発生装置で発生する RI 汚染物（放射化物）生成の主要な原因は、原子炉と同様に中性子によるものであることが先の中間報告で示されている。このため、基本的には原子炉で検討された核種の選定手順を参考にすることができる。

核種の選定に当たっては、「放射線障害防止法におけるクリアランス制度の整備に係わる技術的検討について」（中間報告書、平成 18 年、安全規制検討会クリアランス技術検討ワーキンググループ）における評価結果、及び電子加速器である JAEA の LINAC や高エネ研の粒子加速器施設をモデルとして行ったクリアランスの対象となる金属やコンクリート等の放射化計算の結果を参考にした。また、高エネルギーの放射線発生装置の場合、発生する中性子のエネルギーが高く、原子炉で見られる熱中性子捕獲反応のみならず、速中性子反応も考慮に入れておく必要があるため、それぞれの材料毎に数核種の追加を行った。

2. 物質組成について

評価対象となる材質は、鉄、ステンレス、銅、アルミニウム、鉛およびコンクリートである。鉄や銅は放射線発生装置の電磁石で主に使用されており、純度は高い。しかし、純鉄ではしばしばコバルトが不純物として含まれる。計算では炭素鋼の成分 (NUREG/CR3474) を用いている。ステンレスは配管材料などであり、SUS304 が代表的であることから、その NUREG/CR3474 の成分表を使用している。アルミニウムも低放射化を目的とした真空容器、配管材料、として用いられており、押し出し加工に優れた JIS の 6063 番がよく使用されていることから、JIS6063 番の成分表を用いている。鉛の不純物としては JT-60 の構造材分析値のデータを用いている。コンクリートは、セメントに粗骨材や細骨材として岩石が含まれている。主要成分の組成は変動が少ないが、微量に含まれる成分の濃度にはばらつきがある。そこで、一般には米国で用いられている NUREG/CR3474 のデータ、およびその他国内放射線発生装置使用施設などでのコンクリート分析結果を参考にしている。

3. 主要核種について

鉄、SUS、銅、アルミニウム、鉛及びコンクリート中の生成核種を検討するにあたり、解体時の放射化物の評価過程を考慮して冷却期間は 1 年、半減期は 1 月を超える核種とした。評価対象核種の選定に当たっては、核種の生成量 (D) 及び現在使用されている RS-G-1.7 の値 (C) をもとに、主要核種の (D/C) max に対し、その核種の D/C 値の比 $[(D/C) / (D/C) \max]$ をとることとした。コンクリートについては中間報告書表 6 に示された核種のうち、KEK 陽子加速器では $[(D/C) / (D/C) \max]$ 値が 4 桁目まで、その他の発生装置では 3 桁目までを選んだ。その他の材質については、「平成 17 年度 放射線発生装置、放射性同位元素使用施設及びウラン取扱施設等から

発生する廃棄物のクリアランスレベル設定に係る基礎調査」報告書の計算結果を参考にし、
 [(D/C) / (D/C)max] 値が4桁目までの核種を選定した。

以上により、クリアランス計算を行うために選定した核種を添付資料3-2の「放射線発生装置の使用に伴い放射化することが想定される核種」の欄に挙げた。材質毎に核種を示したが、
 ▲印は高エネルギー粒子で照射された場合に検出される可能性があると思われるために追加した核種である。

中間報告の表6：放射化コンクリートの放射能濃度に係る放射化計算結果と分析・測定結果に基づく評価対象核種の選定

(D/C) / (D/C)max*1	KEK 陽子加速器施設	JAEA LINAC	RI 協会 仁科記念サイクロトロンセンター
	装置停止1年後 (コンクリート表面から100cm深さ*2)	装置停止1年後 (コンクリート表面から80cm深さ*2)	装置停止1年後 (コンクリート表面*2)
最重要核種	Na-22	Co-60	Co-60
1桁目 (最重要核種の(D/C)maxとの比が1.0~1.0E-1)	Mn-54	Mn-54 Sb-125 Cs-134 Eu-152 Eu-154	Mn-54 Eu-152
2桁目 (最重要核種の(D/C)maxとの比が1.0E-1~1.0E-2)	Co-60	Na-22 Sc-46 Zn-65 Ba-133 Ta-182	H-3 Sc-46 Zn-65 Sb-125 Ba-133 Cs-134 Eu-154
3桁目 (最重要核種の(D/C)maxとの比が1.0E-2~1.0E-3)	H-3 Sc-46 Fe-55 Zn-65 Sb-125 Cs-134 Ba-133 Eu-152	H-3 Ag-110m Sn-113 Te-123m	Ca-45 Fe-55 Te-123m Ta-182
4桁目 (最重要核種の(D/C)maxとの比が1.0E-3~1.0E-4)	C-14 Co-57 Te-123m Cs-137 Ce-139 Eu-154 Ta-182	C-14 Ca-45 Fe-55 Fe-59 Sb-124 Te-127m Eu-155 Tb-160 Tl-204 Pu-239	C-14 Fe-59 Ag-110m Sn-113 Eu-155 Tl-204
5桁目 (最重要核種の(D/C)maxとの比が1.0E-4~1.0E-5)	Ca-45 Co-58 Sr-85 Ag-110m Sn-113 Te-127m Eu-150	Cl-36 Ca-41 Co-57 Co-58 Se-75 Sr-85 Nb-93m Nb-94 Zr-95 Ce-139 Gd-153	Cl-36 Ca-41 Co-58 Se-75 Sr-85 Nb-94 Te-127m Gd-153 Tb-160 Pu-239

*1：D:放射能濃度の計算値(Bq/g) C:RS-G-1.7の放射能濃度(Bq/g)

各放射性核種のD/Cの値を最重要核種(D/Cの値の最大となる核種)のD/Cの値で除して、その値の桁で分類した。また、半減期が1ヶ月未満、放射性希ガス及び天然起源の放射性核種を除外した。

*2：放射能濃度の測定部位の位置(深さ)を考慮し、放射化計算結果に基づいたクリアランス対象部位の近傍位置(深さ)

放射化物に係るクリアランスレベル値の試算対象核種

核種	IAEA RS-G-1.7 (Bq/g)	放射線発生装置の使用に伴い放射化することが想定される核種						原子炉等規制 法に規定され ている原子炉 施設のクリア ランスレベル
		放射化コンク リート中の評 価対象核種	放射化金属中の評価対象核種					
			ステンレス鋼	炭素鋼	銅	アルミ ニウム	鉛	
		23 核種	15 核種	10 核種	6 核種	8 核種	10 核種	33 核種
H-3	100	○				▲	▲	○
Be-7	10	▲				▲		
C-14	1	○						○
Na-22	0.1	○				○		
Cl-36	1	▲						○
Ca-41 (放射化)	-							○
Ca-45	100	○						
Sc-46	0.1	○	▲	▲		○		○
Ti-44	-		▲	▲				
Mn-54	0.1	○	○	○		○	○	○
Fe-55	1000	○	○	○				○
Fe-59	1		○	○		○		○
Co-56	0.1		▲	▲	▲			
Co-57	1	○	○	○	▲			
Co-58	1		○	○	▲			○
Co-60	0.1	○	○	○	○	○	○	○
Ni-59 (放射化)	100							○
Ni-63	100				○			○
Zn-65	0.1	○	○	○	▲	○	○	○
Sr-90 (FP)	1							○
Nb-94 (FP)	0.1							○
Nb-95 (FP)	1							○
Tc-99 (FP)	1							○
Ru-106 (FP)	0.1							○
Ag-108m (放射化)	-							○
Ag-110m	0.1	○	○					○
Sn-113	1	○					○	○
Sb-124	1		○				○	○
Sb-125	0.1	○					○	
Te-123m	1	○						○
I-129 (FP)	0.01							○
Cs-134	0.1	○	○					○
Cs-137	0.1	○						○
Ba-133	0.1	○						○
Ce-139	1	○						
Eu-152	0.1	○	○					○
Eu-154	0.1	○						○
Tb-160	1		○					○
Ta-182	0.1	○						○
Au-195	-						▲	
Hg-203	10						○	
Pu-239 (放射化)	0.1							○
Pu-241 (放射化)	0.1							○
Am-241 (放射化)	0.1							○

※黄色の欄の核種については、クリアランスレベルを算出する対象核種として選定する必要があるものについて検討を行う。

RI の使用等に伴って発生する RI 汚染物のクリアランス対象物とその評価経路について（案）

区分	クリアランス対象物		評価経路			
	クリアランスの対象となる種別名称	年間発生想定物量 (ton/year)	埋設処分	再利用	焼却処理	
可燃性 RI 汚染物	紙類・布類・木片	一括* 71	個別** 0.03	—	○	<ul style="list-style-type: none"> ・焼却灰の埋立処分**** ・溶融固化物の再利用***** ・焼却灰の溶融固化物の埋立処分
	プラスチック類	341	0.39	○	○	
	動物死体	19	0.003	—	○	
	フィルタ	HEPA, Pre 189	0.45	○	○	
		チャコール 161	0.14	○	—	
	小計	781	1.01			
不燃性 RI 汚染物	ガラス・薄肉金属等	382	0.21	○	○	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス等医療廃棄物は加熱処理後埋設処分
	コンクリート	166	0.06	○	—	
	金属塊	173	0.05	○	—	
	土砂	17	8****	○	—	
	小計	737	8.32			
	合計	1518	9.33			

* (社) 日本アイソトープ協会が集荷した RI 廃棄物のクリアランス対象物量について（平成 21 年 6 月 10 日）から引用

** (社) 日本アイソトープ協会が集荷した RI 廃棄物より試算した事業所当りの年間平均クリアランス対象物量に 5 年間の保管量を一度にクリアランスすることを想定して 5 倍の物量とした。（この物量は、全事業所の 96% を包含する。）

*** 土砂については、土壌汚染等によって突発的に活性することから、平均値ではなく、これまでの事例から 1 件当り 4 t 程度の発生量があったため、2 倍の尤度をとって 8 t とした。

**** 平成 12 年 6 月 16 日 原子力安全委員会放射性廃棄物安全基準専門部会 「核燃料使用施設、RI 法対象施設等におけるクリアランスレベルについて」における評価シナリオにおいて、焼却灰の埋立処分及び溶融固化物の再利用は検討が行われている。

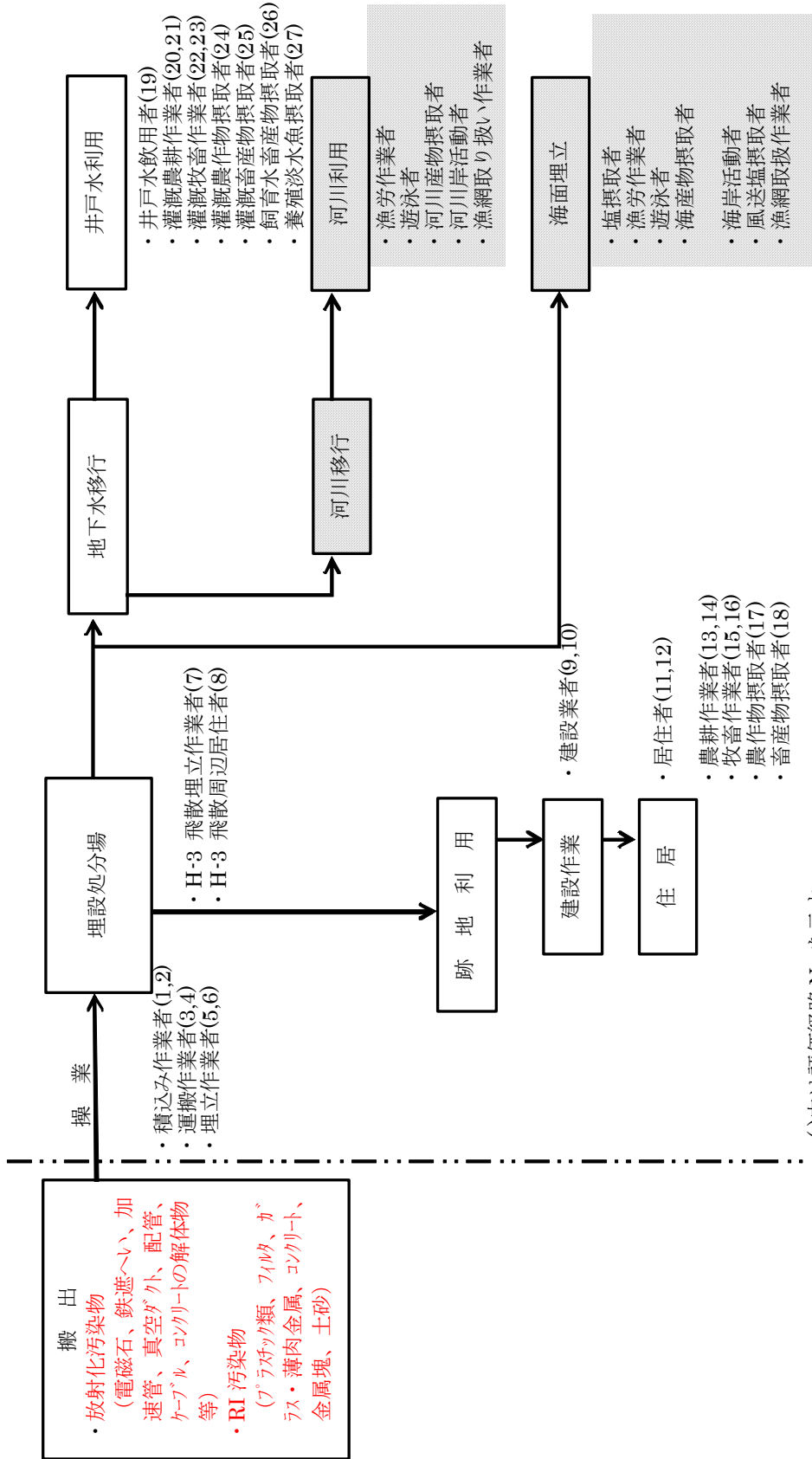
放射線発生装置の解体等に伴って発生するRI汚染物（放射化物）のクリアランス対象物とその評価経路について（案）

区分		クリアランス対象汚染物		評価経路		
		クリアランスの対象となる主な物品名	発生想定物量 (ton)	埋設処分	再利用	再使用
			大規模施設*	小規模施設**		
金	鉄	電磁石、鉄遮へい、 加速管他	8600	8	○	○
	SUS	真空ダクト、真空ポ ンプ、冷却水配管他	310	0.01	○	○
	アルミ	真空箱、配管他	1.5	0.2	○	○
	銅	電磁石コイル、ケー ブル他	730	1.1	○	○ (電磁石コイル)
属	鉛	鉛遮へい	0	0.4	—	○
	小計		9641.5	9.71		
コンクリート			73000	250	○ (一部)	○
合計			82641.5	259.71		

* : 研究機関等施設の想定物量 (最大)

** : 医療機関施設の想定物量 (最大)

放射線発生装置の解体等及び放射性同位元素の使用等に伴って発生する RI 汚染物に関するクリアランスレベルに係る埋設処分の評価経路



()内は評価経路 No.を示す

※網掛は、「原子炉施設及び核燃料施設の解体等に伴って発生するものうち放射性物質として取り扱う必要のないものの放射能濃度について」報告書において、対象物において、現実的に起こり得ると想定される全ての評価経路を考慮した上で、他の経路と比較して線量が十分小さいと判断された経路であり、今回の検討においても除く評価経路を示す。

埋設処分シナリオに係る評価経路での被ばく線量評価式について

RI 放射化物のクリアランスレベル評価の埋設シナリオに係る評価経路で用いる式は、原子炉のクリアランスレベル評価で用いたものを使用する。ただし、原子炉クリアランスレベル評価では、平成 16 年の再評価時に、以下の 4 点について、式の変更及び被ばく形態の追加が行われた。そのため、本 RI 放射化物クリアランス評価では再評価報告書¹⁾の式を用いる。平成 11 年で用いた式に対して再評価時の使用式で変更のあったのは次の 4 点である。

- (1) 操業の評価経路と跡地利用の外部被ばく経路、内部被ばく経路に対して被ばく期間中の放射能の減衰を考慮した。
- (2) ダストの吸入摂取による内部被ばくの評価式に、IAEA RS-G-1.7 の評価を参考とした、吸入するダストへの放射性核種の濃縮係数を取り入れた。
- (3) 皮膚汚染による皮膚被ばくを考慮した。
- (4) 汚染物質の直接経口による内部被ばくを考慮した。

なお、皮膚被ばくと直接経口による内部被ばくについては、再評価報告書に倣って個別の経路番号を与えていない。

放射化汚染物、R I 汚染物共に、埋設処分シナリオでは図 1 に示す評価経路でのクリアランスレベル評価を行う。表 1 に評価経路とその番号、使用する評価式に対応を示す。評価経路番号については図 1 では括弧内の数字で示す。

以下、1～3 章に評価で用いる式を示す。

¹⁾ 原子力安全委員会、「原子炉施設及び核燃料使用施設の解体等に伴って発生するもののうち放射性物質として取り扱う必要のないものの放射能濃度について」平成 16 年 12 月 16 日

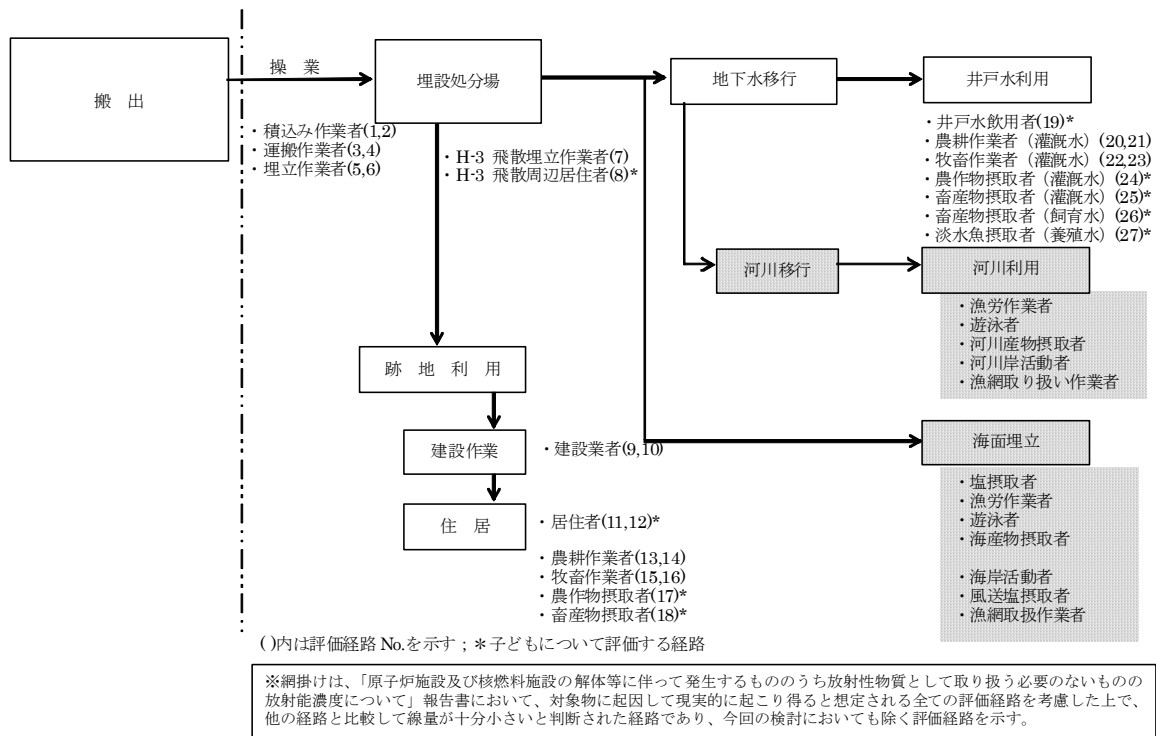


図 1 埋設シナリオに係る評価経路（放射化汚染物、RI 汚染物）

表 1 埋設処分シナリオでの評価経路一覧

No.	線量評価対象者	被ばく形態	経路番号	式番号	
1	処分施設への運搬作業	積込み作業	直接線・外部	1	
2			粉塵吸入・内部	2	
3		運搬作業	直接線・外部	3	1
4			粉塵吸入・内部	4	2
5	処分施設の埋立作業	埋立作業	直接線・外部	5	1
6			粉塵吸入・内部	6	2
7	トリチウムの飛散	埋立作業	空気吸入・内部	7	3,4
8		周辺居住者*	空気吸入・内部	8	3,4
9	埋設地の掘り返し	建設作業	土壤直接線・外部	9	7,8
10			粉塵吸入・内部	10	7,9
11		居住者*	土壤直接線・外部	11	7,8
12			粉塵吸入・内部	12	7,9
13		農耕作業	土壤直接線・外部	13	7,8
14			粉塵吸入・内部	14	7,9
15		牧畜作業	土壤直接線・外部	15	7,8
16			粉塵吸入・内部	16	7,9
17		農作物摂取者*	農作物摂取・内部	17	10,11
18		畜産物摂取者*	畜産物摂取・内部	18	10,12,13
19	地下水への漏出	井戸水飲用者	飲料水摂取・内部	19	14,15,16,17
20		農耕作業（灌漑水）	土壤直接線・外部	20	14,15,16,18,19
21			粉塵吸入・内部	21	14,15,16,18,20
22		牧畜作業（灌漑水）	土壤直接線・外部	22	14,15,16,18,19
23			粉塵吸入・内部	23	14,15,16,18,20
24		農作物摂取者（灌漑水）*	農作物摂取・内部	24	14,15,16,18,21,11
25		畜産物摂取者（灌漑水）*	畜産物摂取・内部	25	14,15,16,18,22,13
26		畜産物摂取者（飼育水）*	畜産物摂取・内部	26	14,15,16,23,21,13
27		水産物摂取者（養殖水）*	水産物摂取・内部	27	14,15,16,24,25
	*子どもの評価を行う経路				

1. 操業の評価経路（経路 No.1～8）

この評価経路では、廃棄物そのものが線源となるので、被ばく評価にあたっては廃棄物の放射性核種の濃度をそのまま用いる。ただし、クリアランス対象廃棄物は「放射性廃棄物でない廃棄物」と混合されるものとする。

1.1 積み込み作業、運搬作業及び埋立作業（経路 No.1～6）

廃棄物積み込み作業、運搬作業（運転手）及び埋立作業の被ばくについては、次式により、線量を求める。

$$D_{ext}(i) = C_w(i) \cdot S_o \cdot t_o \cdot DF_{ext}(i) \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i \cdot t_i)}{\lambda_i t_i} \dots\dots\dots (1)$$

$$D_{inh}(i) = C_w(i) \cdot C_{dust} \cdot f_{dust,inh} \cdot B_o \cdot t_o \cdot DF_{inh}(i) \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i \cdot t_i)}{\lambda_i t_i} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

- $D_{ext}(i)$: 放射性核種*i*による外部被ばく線量(μ Sv/y)
- $D_{inh}(i)$: 放射性核種*i*による吸入被ばく線量(μ Sv/y)
- $C_w(i)$: 「放射性廃棄物でない廃棄物」とクリアランス対象廃棄物が混合した廃棄物中の放射性核種*i*の濃度(Bq/g)
 $C_w(i) = C_{w0}(i) \cdot F_{wc}$
 $C_{w0}(i)$: クリアランス対象廃棄物中の放射性核種 *i* の濃度(Bq/g)
 F_{wc} : 廃棄物中に占められるクリアランス対象廃棄物の割合(-)
- C_{dust} : 積み込み・運搬、埋立作業時の空气中ダスト濃度 (g/m³)
- S_o : 外部被ばくに対する遮へい係数(-)
- $f_{dust,inh}$: 吸入するダストへの濃縮係数 (-)
- B_o : 作業者の呼吸量(m³/h)
- t_o : 年間作業時間(h/y)
- $DF_{ext}(i)$: 放射性核種*i*の外部被ばくに対する線量換算係数(μ Sv/h per Bq/g)
- $DF_{inh}(i)$: 放射性核種*i*の吸入被ばくに対する線量係数(μ Sv/Bq)
- λ_i : 核種*i*の崩壊定数(1/y)
- t_i : 被ばく中の減衰期間(y)

1.2 トリチウム吸入被ばく（埋立・周辺居住）（経路 No.7～8）

埋立作業者と処分場の周辺居住者を対象に、処分場から飛散したトリチウムを吸入することによる被ばく線量を求めるために必要な空気中のトリチウム濃度は、以下のように計算さ

れる。

$$C_T = \frac{C_w(T) \cdot W \cdot D_T}{H_e \cdot L_e \cdot U_w} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

- C_T : 空气中トリチウム濃度 (Bq/m³)
- $C_w(T)$: 廃棄物中トリチウム濃度 (Bq/g)
- W : 廃棄物総量(g)
- D_T : 処分場からの平均飛散率(s⁻¹)
- H_e : 有効高さ(m)
- L_e : 断面方向長さ (m)
- U_w : 風速 (m/s)

また、トリチウムの吸入による内部被ばく線量は次式で与えられる。

$$D_{inh}(T) = C_T \cdot B_T \cdot t_T \cdot DF_{inh}(T) \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i \cdot t_i)}{\lambda_i t_i} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、

- $D_{inh}(T)$: トリチウムの吸入による内部被ばく線量 (Sv/y)
- B_T : 呼吸量(m³/h)
- t_T : 年間被ばく時間 (h/y)
- $DF_{inh}(T)$: トリチウムの吸入内部被ばく線量換算係数 (Sv/Bq)

1.3 皮膚汚染による皮膚被ばく (積込・埋立)

クリアランス後の積込み作業から埋立作業までの作業者の皮膚汚染による被ばくは、以下の式で与えられる。

$$D_{skin}(i) = C_w(i) \cdot L_{dust} \cdot f_{dust,skin} \cdot \rho \cdot t_o \cdot DF_{skin}(i) \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i \cdot t_i)}{\lambda_i t_i} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、

- $D_{skin}(i)$: 核種*i*による皮膚汚染による皮膚被ばく線量 (Sv/y)
- L_{dust} : 皮膚に体積したダストの厚さ (cm)
- $f_{dust,skin}$: 皮膚被ばく経路における濃縮係数 (-)
- ρ : 皮膚に堆積したダストの密度 (g/cm³)
- t_o : 年間作業時間 (h/y)
- $DF_{skin}(i)$: 核種*i*の皮膚汚染による皮膚被ばく線量換算係数 ((Sv/h)/(Bq/cm²))

1.4 直接経口摂取による内部被ばく（積込・埋立）

クリアランス後の積込み作業から埋立作業において作業者が汚染物質を直接経口摂取することによる内部被ばくは、以下の式で与えられる。

$$D_{direct}(i) = C_w(i) \cdot f_{C,ing} \cdot q \cdot t_o \cdot DF_{ing}(i) \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i \cdot t_i)}{\lambda_i \cdot t_i} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、

- $D_{direct}(i)$: 年間直接経口摂取被ばく線量 (Sv/y)
- $C_w(i)$: 汚染物質中放射性核種*i*濃度 (Bq/g)
- $f_{C,ing}$: 直接経口摂取経路における濃縮係数 (-)
- q : 汚染物質の摂取率 (g/h)
- t_o : 年間作業時間 (h/y)
- $DF_{ing}(i)$: 経口摂取の内部被ばく線量換算係数 (Sv/Bq)
- λ_i : 放射性核種*i*の崩壊定数 (1/y)
- t_i : 被ばく期間中の減衰時間 (y)

2. 跡地利用の評価経路（経路 No.9～18）

跡地利用シナリオは、クリアランスされた廃棄物を処分した廃棄物処分場が、処分場閉鎖後に一般に開放され、その処分場跡地を公衆が利用することによって被ばくするシナリオである。

2.1 建設作業（経路 No.9～10）

2.1.1 土壌中の放射性核種の濃度

$$C_M(i) = C_w(i) \cdot \frac{T_U - T_C}{T_U} \cdot \frac{W}{L_D \cdot W_D \cdot H_D \cdot \rho_D \cdot 10^6} \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t_{dist}) \dots\dots\dots (7)$$

ここで、

- $C_M(i)$: 掘削土壌中の放射性核種*i*の濃度(Bq/g)
- T_C : 覆土厚さ(m)
- T_U : 建設掘削深さ(m)
- W : 廃棄物の総重量 (g) (クリアランス対象物量+放射性廃棄物でない廃棄物量)
- L_D : 処分場の長さ (m)
- W_D : 処分場の幅 (m)
- H_D : 処分場の深さ (m)

- ρ_D : 処分場嵩密度 (g/cm³)
 放射性核種 i の崩壊定数 (1/y)
 λ_i : $\lambda_i = \ln 2 / T_{1/2}(i)$
 $T_{1/2}(i)$: 放射性核種 i の半減期 (y)
 t_{dist} : 処分場閉鎖後から評価時点までの期間 (y)

2.1.2 建設作業中の外部被ばく

跡地利用シナリオにおける建設作業者の外部被ばく線量は、操業シナリオと同様に以下の式で与えられる。汚染土壌中の核種濃度は、建設作業時の掘削により廃棄物と覆土とが混合された場合を想定し、 $C_M(i)$ で与えられる掘削混合土壌中核種濃度を用いる。

$$D_{ext}(i) = C_M(i) \cdot S_C \cdot t_C \cdot DF_{ext}(i) \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i \cdot t_i)}{\lambda_i t_i} \dots \dots \dots (8)$$

ここで、

- S_C : 建設作業時における遮へい係数 (-)
 t_C : 建設作業時における年間作業時間 (h/y)

なお、線量換算係数については、線源の幾何形状を模擬し、点減衰核積分法による遮へい計算コード QAD-CGGP2 により算出する。

2.1.3 建設作業により発生する粉塵の吸入による内部被ばく

建設作業により発生する空气中粉塵の放射性核種の濃度を計算することにより、その粉塵を吸入する人の内部被ばく線量を次式で計算する。

$$D_{inh}(i) = C_M(i) \cdot C_{dust,C} \cdot f_{dust,inh} \cdot B_C \cdot t_C \cdot DF_{inh}(i) \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i \cdot t_i)}{\lambda_i t_i} \dots \dots \dots (9)$$

ここで、

- $C_{dust,C}$: 建設作業時の空气中ダスト濃度 (g/m³)
 B_C : 建設作業者の呼吸量 (m³/h)
 $f_{dust,inh}$: 吸入するダストの放射性核種 i の濃縮係数 (-)

2.1.4 皮膚汚染による皮膚被ばく

皮膚被ばくについては、1.3 項の積込み、運搬及び埋立作業での(5)式を用いて計算する。

ただし、 $C_w(i)$ を $C_M(i)$ に、年間作業時間 t_o を t_C に置き換える。

2.1.5 直接経口摂取による内部被ばく

直接経口摂取による内部被ばくについては、1.4 項の積込み、運搬及び埋立作業での(6)式を用いて計算する。ただし、 $C_w(i)$ を $C_M(i)$ に、摂取時間 t_0 を t_c に置き換える。

2.2 居住者（経路 No.11～12）

処分場跡地での居住中の外部被ばく線量には(8)式を、粉塵吸入による内部被ばく線量については(9)式を、直接経口摂取による内部被ばく（子どものみ）については(6)式を用いて計算する。ただし、全ての式中の年間作業時間 t_c を t_L に、(8)式中の遮へい係数 S_C を S_L に、また、(9)式中の空气中ダスト濃度 $C_{dust,C}$ を $C_{dust,L}$ に、呼吸量 B_C を B_L にそれぞれ置き換える。

t_L	:	年間居住時間 (h/y)
S_L	:	居住時の遮へい係数 (-)
$C_{dust,L}$:	居住時の空气中ダスト濃度 (g/m ³)
B_L	:	居住者の呼吸量 (m ³ /h)

2.3 農耕作業（経路 No.13～14）

農耕作業者は、処分場跡地を農地とするために掘削することにより、廃棄物が地表面に露出することで被ばくすることを評価する。その線源となる廃棄物を含んだ土壌中の放射性核種の濃度は(7)式で計算する。ただし、(7)式中の掘削深さ T_U を T_A に置き換える。

また、処分場跡地での農耕作業中の外部被ばく線量については(8)式を、粉塵吸入による内部被ばく線量については(9)式を用いて計算する。ただし、両式中の年間作業時間 t_c を t_A に、(8)式中の遮へい係数 S_C を S_A に、また、(9)式中の空气中ダスト濃度 $C_{dust,C}$ を $C_{dust,A}$ に、呼吸量 B_C を B_A にそれぞれ置き換える。

T_A	:	耕作深さ (m)
t_A	:	農耕作業時における年間作業時間 (h/y)
S_A	:	農耕作業時の遮へい係数 (-)
$C_{dust,A}$:	農耕作業時の空气中ダスト濃度 (g/m ³)
B_A	:	農耕作業者の呼吸量 (m ³ /h)

2.4 牧畜作業（経路 No.15～16）

処分場跡地での牧畜作業中の外部被ばく線量については(8)式を、粉塵吸入による内部被ばく線量については(9)式を用いて計算する。なお、牧畜作業場所における土壌中の放射性核種の濃度は、2.3 項で求めた農地土壌中の放射性核種の濃度と等しいものとする。ただし、年間作業時間 t_c を t_F に、(8)式中の遮へい係数 S_C を S_F に、また、(9)式中の空气中ダスト濃度 $C_{dust,C}$ を $C_{dust,F}$ に、呼吸量 B_C を B_F にそれぞれ置き換える。

t_F	:	牧畜作業時における年間作業時間 (h/y)
S_F	:	牧畜作業時の遮へい係数 (-)
$C_{dust,F}$:	牧畜作業時の空气中ダスト濃度 (g/m ³)
B_F	:	牧畜作業者の呼吸量 (m ³ /h)

2.5 農作物摂取者（経路 No.17）

2.5.1 農作物中の放射性核種の濃度

農作物栽培は処分場の跡地の直上で行われるとし、跡地における放射性核種の量の減衰は放射性崩壊によるもののみとする。放射性核種は、根を経由して、農作物に移行するものとする。なお、農業用水には放射能が含まれていないものとする。農作物中の放射性核種の濃度を次式で計算する。

$$C_{vk}(i) = T_k(i) \cdot K_N \cdot C_W(i) \cdot \frac{W}{L_D \cdot W_D \cdot H_D \cdot \rho_D \cdot 10^6} \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t_{dist}) \dots\dots\dots (10)$$

ここで、

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

2.5.2 農作物摂取による内部被ばく

この土地で収穫された農作物を摂取することによる内部被ばく線量は、次式で計算する。

$$D_{ing,vk}(i) = \sum_k C_{vk}(i) \cdot 10^3 \cdot Q_k \cdot G_k \cdot \exp(-\frac{\lambda_i \cdot t_{vk}}{365}) \cdot DF_{ing}(i) \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i \cdot t_i)}{\lambda_i t_i} \dots\dots\dots (11)$$

ここで、

- $D_{ing,vk}(i)$: 農作物の摂取に伴う放射性核種 i による内部被ばく線量 (μ Sv/y)
- Q_k : 農作物 k の年間摂取量 (kg-wet/y)
- G_k : 農作物 k の市場係数 (-)
- t_{vk} : 農作物 k の輸送時間 (d)
- $DF_{ing}(i)$: 放射性核種 i の経口摂取に対する内部被ばく線量係数 (μ Sv/Bq)

市場係数と輸送時間をそれぞれ保守的に 1 及び 0 と選定しているため、(11)式は以下のようになる。

$$D_{ing,vk}(i) = \sum_k C_{vk}(i) \cdot 10^3 \cdot Q_k \cdot DF_{ing}(i) \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i \cdot t_i)}{\lambda_i t_i} \dots\dots\dots (11')$$

2.6 畜産物摂取者（経路 No.18）

2.6.1 畜産物中の放射性核種の濃度

農作物（飼料）を摂取することによる畜産物中の放射性核種の濃度を次式で計算する。農業用水及び飼育に使用される用水には放射性核種が含まれていないものとする。畜産物の種類

としては卵、牛乳、牛肉、豚肉及び鶏肉を想定する。なお、飼料中の放射性核種 i の濃度は (10)式によって求める。ただし、(10)式の土壌から農作物 k への放射性核種 i の移行係数 $T_k(i)$ を土壌から農作物（飼料）への放射性核種 i の移行係数 $T_n(i)$ (Bq/g-dry 農作物 per Bq/g-dry 土壌)に置き換える。

$$C_{Fn}(i) = T_n(i) \cdot M_F \cdot C_{vk}(i) \cdot 10^3 \cdot Q_{vn} \dots\dots\dots (12)$$

ここで、

- $C_{Fn}(i)$: 畜産物 n 中の放射性核種 i の濃度 (Bq/kg または Bq/L)
- $T_n(i)$: 飼料から畜産物 n 中への放射性核種 i の移行係数 (d/kg または d/L)
- M_F : 放射性核種を含む飼料の混合割合 (-)
- Q_{vn} : 畜産物 n を生産する家畜の飼料摂取量 (kg-dry/d)

2.6.2 畜産物摂取による内部被ばく

放射性核種を含む飼料で生産された畜産物を摂取することによる内部被ばく線量は、次式で計算する。

$$D_{ing,F}(i) = \sum_n C_{Fn}(i) \cdot Q_n \cdot G_n \cdot \exp\left(-\frac{\lambda_i \cdot t_{Fn}}{365}\right) \cdot DF_{ing}(i) \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i \cdot t_i)}{\lambda_i t_i} \dots\dots\dots (13)$$

ここで、

- $D_{ing,F}(i)$: 畜産物摂取に伴う放射性核種 i による内部被ばく線量 (μ Sv/y)
- $C_{Fn}(i)$: 畜産物 n 中の放射性核種 i の濃度 (Bq/kg または Bq/L)
- Q_n : 畜産物 n の摂取量 (kg/y または L/y)
- G_n : 畜産物 n の市場係数 (-)
- t_{Fn} : 畜産物 n の輸送時間 (d)

市場係数と輸送時間をそれぞれ保守的に 1 及び 0 と選定しているため、(13)式は以下のようになる。

$$D_{ing,F}(i) = \sum_n C_{Fn}(i) \cdot Q_n \cdot DF_{ing}(i) \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i \cdot t_i)}{\lambda_i t_i} \dots\dots\dots (13')$$

3. 地下水移行の評価経路（経路 No.19～27）

地下水移行の評価経路では、埋設された廃棄物から放射性核種が浸透水中に漏出し、帯水層へ移行するものとする。この放射性核種を含む地下水を飲用、灌漑、飼育及び養殖に利用することを考慮する。なお、各経路において被ばく線量が最大となる時点の線量を評価するものとする。

3.1 井戸水飲用（経路 No.19）

3.1.1 処分場からの漏出モデル

政令濃度上限値の計算方法と同様に、IAEA 技術文書「TECDOC-401」における放出係数モデルを用いて、処分場からの放射性核種の漏出量を以下の式により求める。

$$J(t,i) = \eta_i \cdot C_w(i) \cdot W \cdot \exp\{-(\lambda_i + \eta_i) \cdot t\} \dots\dots\dots (14)$$

ここで、

$J(t,i)$: 時間 t における放射性核種 i の漏出量 (Bq/y)
放射性核種 i の漏出率 (1/y)

$$\eta_i = \frac{R_{IN}}{H_D} \cdot R_c(i)$$

R_{IN} : 浸透水量 (m/y)
 $R_c(i)$: 放出係数 (-)

3.1.2 帯水層中の放射性核種の移動

処分場から漏洩した放射性核種は、処分場と同一の幅を有する帯水層に流入するものとする。帯水層の厚さ (h_s) は一定で、土壌の空隙率、密度は一様とし、 x 方向のみに一定速度で流れているものとする。基礎式は次式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial t} R_s(i) \cdot C_{GW}(x,t,i) = D_x \cdot \frac{\partial^2 C_{GW}(x,t,i)}{\partial x^2} - U_s \cdot \frac{\partial C_{GW}(x,t,i)}{\partial x} \dots\dots\dots (15)$$

$$- R_s(i) \cdot \lambda_i \cdot C_{GW}(x,t,i)$$

ここで、

$C_{GW}(x,t,i)$: 地下水中の放射性核種 i の濃度 (Bq/m³)

U_s : 地下水流速 (m/y)

$R_s(i)$: 帯水層遅延係数 (-)

$$R_s(i) = 1 + \frac{1 - f_s}{f_s} \cdot Kd_s(i) \cdot \rho_s$$

f_s : 帯水層空隙率 (-)

ρ_s : 帯水層土壌真密度 (g/cm³)

$Kd_s(i)$: 帯水層土壌に対する放射性核種 i の分配係数 (mL/g)

D_x : x 方向の分散係数 (m²/y)

$$D_x = D_{mx} |U_s| + D_d$$

D_{mx} : 地下水流方向の分散長 (m)

D_d : 分子拡散係数 (3.15 × 10⁻² m²/y)

3.1.3 井戸水中の放射性核種の濃度

井戸水中の放射性核種の濃度は、井戸の汲み上げによる周囲の放射性核種を含まない地下水の流入を考慮して計算する。

$$C_{ww}(t,i) = C_{GW}(x_w,t,i) \cdot R_w \dots\dots\dots (16)$$

ここで、

- $C_{ww}(t,i)$: 時間 t における井戸水の放射性核種 i の濃度 (Bq/m³)
- x_w : 処分場下流端から井戸までの距離 (m)
- R_w : 井戸水の混合割合 (-)

3.1.4 飲料水摂取による内部被ばく

飲料水による内部被ばく線量は、井戸水中の放射性核種の濃度を用いて、次式で計算する。

$$D_{ing,w}(t,i) = C_{ww}(t,i) \cdot Q_w \cdot DF_{ing}(i) \dots\dots\dots (17)$$

ここで、

- $C_{ing,w}(t,i)$: 放射性核種 i による時間 t における飲料水摂取での内部被ばく線量 (μ Sv/y)
- Q_w : 人の年間飲料水摂取量 (m³/y)

3.2 灌漑利用 (経路 No.20~25)

3.2.1 灌漑土壌の放射性核種の濃度

農地には井戸水を灌漑用水として散布するものとし、灌漑用水中の放射性核種は蓄積するものとする。また、放射性核種の浸透による減衰効果を考慮する。灌漑土壌中の放射性核種の濃度は次式で計算する。なお、灌漑用水中の放射性核種の濃度は、井戸水中の放射性核種の濃度に等しいものとし、(16)式で計算する。

$$C_{S,k}(t,i) = F_R \cdot \int_0^t \frac{V_{lk} \cdot C_l(t,i)}{P_k} \cdot e^{-E_{lk}(i)t} dt \dots\dots\dots (18)$$

ここで、

- $C_{S,k}(t,i)$: 時間 t における農作物 k を生産する灌漑土壌中の放射性核種 i の濃度 (Bq/kg)
- F_R : 放射性核種の土壌残留係数 (-)
- V_{lk} : 農作物 k に対する灌漑水量 (m³/m²/y)
- $C_l(t,i)$: 時間 t における灌漑用水中の放射性核種 i の濃度 (Bq/m³)
- P_k : 農作物 k を生産する土壌実効表面密度 (kg/m²)

$E_{Lk}(i)$: 農作物 k を生産する土壤中放射性核種 i の実効減衰係数 (1/y)

$$E_{Lk}(i) = \lambda_i + R_{MSk}(i)$$

$R_{MSk}(i)$: 放射性核種 i の浸透による灌漑土壌からの減衰係数 (1/y)

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

α : 実効土壌深さ (m)
 f_u : 灌漑土壌空隙率 (-)
 s_{uk} : 土壌水分飽和度 (-)
 ρ_u : 灌漑土壌真密度 (g/cm³)
 $Kd_u(i)$: 灌漑土壌の分配係数 (mL/g)

3.2.2 農耕作業 (経路 No.20~21)

放射性核種を含む井戸水で灌漑した農地で農耕作業を行う者の外部被ばく線量は、次式を用いて計算する。

$$D_{ext}(t, i) = C_{S,k}(t, i) \cdot S_I \cdot t_I \cdot DF_{ext}(i) \dots\dots\dots (19)$$

ここで、

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

なお、線量換算係数については、線源の幾何形状を模擬し、点減衰核積分法による遮へい計算コード QAD-CGGP2 により算出する。

また、農耕作業により発生する空气中粉塵の放射性核種の濃度を計算することにより、その粉塵を吸入する者の内部被ばく線量を次式で計算する。

$$D_{inh}(t, i) = C_{S,k}(t, i) \cdot f_{dust,inh} \cdot 10^{-3} \cdot B_I \cdot t_I \cdot DF_{inh}(i) \cdot C_{dust,I} \dots\dots\dots (20)$$

ここで、

- $D_{inh}(t, i)$: 時間 t における放射性核種 i による吸入内部被ばく線量 (μ Sv/y)
- $C_{dust,I}$: 農耕作業時の空气中ダスト濃度 (g/m³)
- B_I : 農耕作業者の呼吸量 (m³/h)

3.2.3 牧畜作業 (経路 No.22~23)

放射性核種を含む井戸水で灌漑した農地で牧畜作業を行う者の被ばくは、(19)式及び(20)式で計算する。ただし、両式中の年間作業時間 t_I を t_B に、(19)式中の遮へい係数 S_I を S_B に、また(20)式中の空气中ダスト濃度 $C_{dust,I}$ を $C_{dust,B}$ に、呼吸量 B_I を B_B にそれぞれ置き換える。

- t_B : 牧畜作業時における年間作業時間 (h/y)

- S_B : 牧畜作業時の遮へい係数 (-)
 $C_{dust,B}$: 牧畜作業時の空气中ダスト濃度 (g/m³)
 B_B : 牧畜作業者の呼吸量 (m³/h)

3.2.4 農作物摂取者（経路 No.24）

(1) 灌漑農作物中の放射性核種の濃度

農作物（穀類、葉菜、非葉菜、果物）中の放射性核種の濃度は、灌漑土壌からの経根吸収と灌漑水の葉面沈着を考慮し、次式で計算する。

$$C_{vk}(t,i) = T_k(i) \cdot C_{S,k}(t,i) + \frac{C_l(t,i) \cdot V_{lk} \cdot F_{IEk} \cdot (1 - e^{-\lambda_{ei} \cdot T_l})}{\lambda_{ei} \cdot Y_{Bk}} \dots\dots\dots (21)$$

ここで、

- $C_{vk}(t,i)$: 時間*t*における農作物*k*中における放射性核種*i*の濃度 (Bq/kg)
 Y_{Bk} : 農作物*k*の栽培密度 (kg/m²)
 F_{IEk} : 放射性核種の農作物*k*表面への沈着割合 (-)
 T_l : 灌漑水年間生育期間 (y)
 λ_{ei} : 沈着した放射性核種*i*の実効減衰係数 (1/y)
 $\lambda_{ei} = \lambda_i + \lambda_{wi}$
 λ_{wi} : weathering効果による植物表面沈着放射性核種*i*の除去係数 (1/y)

(2) 農作物摂取による内部被ばく

灌漑土壌で生産された農作物摂取による内部被ばく線量は、(11)式を用いて計算する。ただし、農作物*k*中の放射性核種*i*の濃度 $C_{vk}(i)$ を $C_{vk}(t,i)$ に置き換える。ただし、放射性核種の崩壊による減衰は考えない。

3.2.5 畜産物摂取者（経路 No.25）

(1) 畜産物中の放射性核種の濃度

肉や牛乳などの畜産物中の放射性核種の濃度は、その家畜が摂取する飼料（牧草）中の放射性核種の濃度に依存するものとし、次式で計算する。

$$C_{Fn}(t,i) = T_n(i) \cdot C_{vk}(t,i) \cdot Q_{vn} \cdot M_F \dots\dots\dots (22)$$

ここで、

- $C_{Fn}(t,i)$: 時間*t*における畜産物*n*中の放射性核種*i*の濃度 (Bq/kg または Bq/L)

(2) 畜産物摂取による内部被ばく

灌漑土壌で生産された飼料を摂取した家畜の肉や牛乳などの畜産物摂取による内部被ばく線量は、(13)式を用いて計算する。ただし、(13)式中の畜産物*n*中の放射性核種*i*の濃度 $C_{Fn}(i)$ を $C_{Fn}(t,i)$ に置き換える。

3.2.6 飼育水利用（経路 No.26）

(1) 畜産物中の放射性核種の濃度

放射性核種を含む井戸水を飼育水として利用して生産される肉や牛乳などの畜産物中の放射性核種濃度は、その家畜が摂取する飼育水中の放射性核種の濃度に依存するものとし、次式で計算する。なお、飼育水中の放射性核種の濃度は、井戸水中の放射性核種の濃度に等しいものとし、(16)式で計算する。

$$C_{FWn}(t,i) = C_{FW}(t,i) \cdot 10^{-3} \cdot Q_{Wn} \cdot T_{Wn}(i) \dots\dots\dots (23)$$

ここで、

- $C_{FWn}(t,i)$: 時間*t*における畜産物*n*中の放射性核種*i*の濃度 (Bq/kg または Bq/L)
- $C_{FW}(t,i)$: 時間*t*における畜産物飼育水中濃度 (Bq/m³)
- Q_{Wn} : 畜産物*n*の飼育水摂取量 (L/d)
- $T_{Wn}(i)$: 放射性核種*i*の飼育水から畜産物*n*への移行係数 (d/L または d/kg)

(2) 畜産物摂取による内部被ばく

放射性核種を含む井戸水を飼育水として利用して生産される肉や牛乳などの畜産物摂取による内部被ばく線量は、(13)式を用いて計算する。ただし、(13)式中の畜産物 *n* 中の放射性核種 *i* の濃度 $C_{Fn}(i)$ を $C_{FWn}(t,i)$ に置き換える。ただし、放射性核種の崩壊による減衰は考えない。

3.2.7 養殖水利用（経路 No.27）

(1) 養殖淡水産物中の放射性核種の濃度

養殖淡水産物中の放射性核種の濃度は、養殖水中の放射性核種の濃度に依存し、両者の濃度間に平衡関係が成立しているものとする濃縮係数法によって求める。なお、養殖水中の放射性核種の濃度は、(16)式で計算される井戸水中の放射性核種の濃度と養殖淡水産物の地下水利用率を考慮して計算する。計算式を以下に示す。

$$C_{Sm}(t,i) = C_{WW}(t,i) \cdot R_{SW} \cdot 10^{-3} \cdot T_{Sm}(i) \dots\dots\dots (24)$$

ここで、

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

(2) 養殖淡水産物摂取による内部被ばく

養殖淡水産物摂取による内部被ばく線量は、次式で計算する。

$$D_{ING}(t,i) = \sum_m C_{Sm}(t,i) \cdot Q_m \cdot G_m \cdot \exp\left(-\frac{\lambda_i \cdot t_{Sm}}{365}\right) \cdot DF_{ing}(i) \dots\dots\dots (25)$$

ここで、

- $D_{ING}(t,i)$: 時間*t*における養殖淡水産物摂取による内部被ばく線量 (μ Sv/y)
- Q_m : 養殖淡水産物*m*の摂取量 (kg/y)
- G_m : 養殖淡水産物*m*の市場係数 (-)
- t_{Sm} : 養殖淡水産物*m*の輸送時間 (d)

市場係数と輸送時間をそれぞれ保守的に1及び0と選定しているので、(25)式は以下のようになる。

$$D_{ING}(t,i) = \sum_m C_{Sm}(t,i) \cdot Q_m \cdot DF_{ing}(i) \dots\dots\dots (25')$$