

博士論文

放射性物質で汚染した物品の再生利用に関する
放射線防護上の考え方と安全評価手法の開発

三輪 一爾

目次

用語集.....	1
第1章 序論.....	3
1.1 背景.....	3
1.2 本研究の実施内容.....	4
第1章の参考文献.....	5
第2章 放射性物質で汚染した物品の再生利用に関する放射線防護上の考え方.....	6
2.1 既存の勧告や安全基準の整理.....	6
2.2 勧告や安全基準を再生利用の防護に適用するための考え方.....	19
2.2.1 勧告や安全基準の適用方法の整理.....	20
2.2.2 現存被ばく状況の汚染の程度に応じた適用方法の選択.....	23
2.3 法令や指針等で定められた基準値等に関する解釈.....	25
2.4 想定される多様な再生利用事例への勧告や安全基準の適用.....	28
2.4.1 再生利用事例における基準値の範囲の整理.....	28
2.4.2 再生利用事例における具体的な基準値の提案とその根拠.....	30
2.4.3 ステークホルダー関与に関する様々な意見に基づく基準値の選定根拠.....	34
2.4.4 公衆の防護が適切に行われていることの確認方法の提案.....	35
2.5 第2章のまとめ.....	36
第2章の参考文献.....	38
第3章 放射性防護上の考え方の現実的な適用における考察.....	40
3.1 オフサイトにおける除去土壌の再生利用の科学的可能性の検討.....	40
3.1.1 評価経路.....	42
3.1.1.1 施工時の評価経路.....	44
3.1.1.2 供用時の評価経路.....	49
3.1.1.3 施工時および供用時の評価経路のまとめ.....	49
3.1.2 被ばく評価に用いるモデルの検討.....	54
3.1.3 評価体系.....	59
3.1.3.1 海面埋立地の評価体系.....	59
3.1.3.2 評価経路の評価体系.....	61
3.1.4 海洋へ移行した核種からの被ばく線量評価の高度化.....	61
3.1.4.1 海洋中へ移行した核種からの被ばく評価への Sediment model の適用.....	61

3.1.4.2	沿岸域における核種移行評価への Sediment model の適用性の確認.....	64
3.1.4.3	施工時に海洋へ流出する核種量の評価	69
3.1.4.4	供用時に海洋へ流出する核種量の評価	75
3.1.4.5	海洋へ流出した核種からの被ばく線量評価方法.....	76
3.1.5	被ばく評価結果	78
3.1.5.1	各ケースにおける決定経路の 1mSv/y 相当濃度	78
3.1.5.2	各ケースにおける決定経路の 1mSv/y 相当濃度で再生利用した際の被ばく線量	82
3.1.5.3	供用時の被ばく線量が 10 μ Sv/y を下回る条件の検討	89
3.1.5.4	海洋へ移行した核種からの被ばく線量評価の高度化についての考察	93
3.1.5.5	海洋中核種からの被ばく線量評価における不確実性の考察.....	94
3.1.6	災害時の被ばく評価.....	96
3.1.6.1	評価対象とする災害の検討.....	96
3.1.6.2	地震が生じた際の被ばく評価	98
3.1.6.3	津波が生じた際の被ばく評価	99
3.1.6.4	異常降雨が生じた際の被ばく評価.....	100
3.1.7	3.1 のまとめ.....	103
3.1	の参考文献.....	104
3.2	オンサイトにおける汚染がれきの限定再生利用の科学的可能性の検討	107
3.2.1	限定再生利用において考慮すべき核種の検討.....	107
3.2.2	めやす濃度設定及びその妥当性確認の考え方	109
3.2.2.1	めやす濃度設定の考え方	109
3.2.2.2	めやす濃度の妥当性確認の考え方.....	111
3.2.3	各限定再生利用用途のめやす濃度の算出.....	113
3.2.3.1	道路材のめやす濃度の算出.....	113
3.2.3.2	建設用コンクリート.....	116
3.2.3.3	遮蔽用コンクリートブロック	118
3.2.4	めやす濃度の妥当性確認.....	121
3.2.4.1	道路材のめやす濃度の妥当性確認.....	124
3.2.4.2	建設用コンクリートのめやす濃度の妥当性確認.....	139
3.2.4.3	遮蔽用コンクリートブロックのめやす濃度の妥当性確認	145
3.2.4.4	遮蔽用鉄板のめやす濃度の妥当性確認	149
3.2.4.5	めやす濃度の妥当性確認から導出した再生利用を可能とする条件.....	150
3.2.5	3.2 のまとめ.....	151
3.2	の参考文献.....	153

第4章 結論.....	155
第4章の参考文献.....	159
付録.....	160
A.1.3.1 に関する付録.....	160
A.1.1 地下水移行経路の被ばく評価方法.....	160
A.1.2 海面埋立地の事例調査.....	168
A.1.3 評価経路の評価体系の詳細.....	172
A.1.4 海洋中における核種移行.....	209
A.1.5 施工時の核種流出量に関するパラメーター.....	214
A.1.6 施工時の核種移行評価結果.....	216
A.1.7 供用時の核種移行評価結果.....	227
A.1.8 海面埋立地への再生利用に係る評価経路のパラメーター.....	239
A.1.9 海面埋立地への再生利用に係る被ばく評価結果の詳細.....	265
A.1.10 災害時の評価の詳細.....	274
A.2.3.2 に関する付録.....	278
A.2.1 めやす濃度の計算方法.....	278
A.2.2 道路の評価パラメーター.....	280
A.2.3 基礎材の評価パラメーター.....	285
A.2.4 遮蔽用コンクリートブロックの評価パラメーター.....	286
A.2.5 遮蔽用鉄板の評価パラメーター.....	287
A.2.6 二酸化炭素吸入による内部被ばく線量の評価に用いたパラメーター.....	288
A.2.7 路盤材に再生利用した際の地下水移行評価に用いたパラメーター.....	290
A.2.8 基礎材に再生利用した際の地下水移行評価に用いたパラメーター.....	292
謝辞.....	294

用語集

本研究で用いる用語を以下のように定義する。用語の定義づけは基本的に本研究専用に行う。用語の中には一般的に用いられている定義づけ（例えば ICRP の勧告内の用語解説や IAEA Safety Glossary）と異なる部分がある。以下では、一般的に用いられている定義づけと異なる定義づけをした用語については、異なる部分を明示する。

● 基準値

- 放射線防護の数値的な安全基準を規定する際に用いる年間の実効線量および線量当量。なお、ICRP Publ.103 の用語解説では、「より明確な情報がない場合に、体内動態モデルに使用するため、ICRP が勧告するパラメーターの値。すなわち、この報告書に示された線量係数の計算に使用される正確な値。基準値は、計算における丸め誤差の集積をさけるため、実験値が持つと分かっている不確実性を反映するように選ばれるよりも高い精度で指定されることがある」と解説されている。本研究の定義では、体内動態モデルに使用するパラメーターの意味は含まないので、ICRP Publ.103 における基準値という用語の使い方とは異なる。また、一般的には線量のみならず、対象とする線量から誘導された放射能レベル等も基準値のひとつの形態として扱われることがあるが、本研究ではそれらを含めない。

● 再生資材

- 放射線災害により発生した、現存被ばく状況の環境中に現存する放射性核種で汚染した物品（土壌、コンクリートくず、鉄）を集積し、分級や加工、希釈が必要であればそれらを施して作った利用価値のある資材。

● 再生利用

- 再生資材を利用すること。

● 再生利用作業

- 線源を扱い再生利用作業に関わり、放射線安全の観点から防護の必要性を検討すべき対象の人。再生利用作業者は、ICRP の勧告における職業被ばくをする作業者に包含される。しかし、再生利用は公衆が居住する、放射線管理区域外の環境においても実施される可能性があり、再生利用作業者が作業により受ける被ばく線量は、作業内容の特性上、職業被ばくの線量限度に対して十分に小さく、場合によっては 1mSv/y 以内で管理できる場合がある。したがって再生利用における放射線防護では、線量限度に対して極めて小さい線量しか被ばくしないことが明らかな再生利用作業者の被ばくについては、一般的な職業被ばくに求められる管理ではなく、作業内容に応じた合理的な防護の実施を提案する。

- **線源**

- 放射線被ばくを引き起こすことがあるものであって、放射線防護の考慮と実施の範囲から免除、クリアランス、または除外されていない物。なお、IAEA Safety Glossary では「放射線被ばくを引き起こすことがあるもの—たとえば、電離放射線の放出又は放射性物質の放出によって—であって、防護と安全の目的では単一の実体として扱うことができる」と定義されている。本研究の定義では、「免除、クリアランス、除外されていない物」という条件をつけることで、IAEA Safety Glossary よりも定義の対象を限定している。

- **放射線災害**

- 緊急時被ばく状況を引き起こす、原子力施設の事故。

第1章 序論

1.1 背景

人間により営まれる様々な活動は、環境や生態系に影響を与え、それらに変化をもたらす。環境や生態系に変化が生じた場合、人類に対して思いがけない不利益が生じて持続的な発展が妨げられる可能性がある。したがって、人類が地球において持続的に発展していくためには、人間活動による環境や生態系への影響を正しく推定し、悪い影響をできるだけ低減するような取り組みが必要になる。

人間活動において考慮すべき課題のひとつとして、廃棄物があげられる。廃棄物は適切に扱われないと環境や生態系に様々な悪影響を与える可能性がある。廃棄物による悪影響の例として、廃棄物の処分場の建設に伴う環境破壊や、廃棄物の存在そのものから発生するさまざまなリスクがある。これらの課題の解決方法として、廃棄物の無害化や悪影響を合理的に最小限に抑えこんだ形での廃棄物の管理、物量の低減を目的とした廃棄物の再生利用等が実施されている。特に再生利用は、人口増加や経済発展による世界的な資源需要が急増している現在において、資源の消費を抑制し、環境への負荷を低減した循環型社会づくり¹の観点からも注目されている。日本では2000年に循環型社会形成推進基本法により3R (Reduce, Reuse, Recycle)の考え方が導入された。また、世界的にも同じような考え方が存在する(例えばEUでは5ステップからなるWaste hierarchy directive²が提案されている)。

現在の日本において、対策が必要と考えられる廃棄物の一つに放射性物質で汚染した物品や自然物があげられる。2011年3月に発生した福島第一原子力発電所(以下、1F)事故により環境中に大量の放射性物質が放出された。これに伴って福島県内外において放射性物質で汚染したがれきや土壌等が大量に発生した。これらの放射性物質で汚染した土壌やがれきの物量は大量であり、その全量を、現在運用されている国際的な枠組みにあてはめてそのまま放射性廃棄物として扱い最終処分することは、必要な規模の最終処分場の確保の観点から実現性が乏しいという議論がある³。また、その実施には非常に大きな環境負荷を伴うことになるであろう。放射性物質で汚染した物品等についても一般的な廃棄物と同様に、最終処分を必要とする物量の低減についての検討に関して、社会的要請は強くなっている³。

最終処分が必要な物量の低減に向けて放射性物質で汚染した物品を何らかの形で扱うためには、どのように放射線防護的な管理を行うかを議論する必要がある。そして、その議論は被ばく状況の考え方を考慮しながら行われるべきである。

被ばく状況とは、放射線防護の分野で国際的にコンセンサスを得ている国際原子力機関(IAEA)の基本安全基準が、その理念の策定のために参照した国際放射線防護委員会(ICRP)のPublication 103⁴において勧告された考え方である。被ばく状況には、「計画被ばく状況」、「緊急時被ばく状況」、「現存被ばく状況」がある。各被ばく状況について、ICRP Publ.103では以下のように記されている。

- 計画被ばく状況とは、線源の意図的な導入と運用を伴う状況である。(略)
- 緊急時被ばく状況とは、計画された状況を運用する間に、若しくは悪意ある行動から、あるいは他の予想しない状況から発生する可能性がある好ましくない結果を避けたり減らしたりするために緊急の対策を必要とする状況である。
- 現存被ばく状況とは、管理についての決定をしなければならない時に既に存在する、緊急事態の後の長期被ばく状況を含む被ばく状況である。

ICRP Publ.103 (176)⁴より抜粋

放射線災害により発生した放射性物質で汚染した物品の再生利用を検討するような環境は、現存被ばく状況であることも考えられる。緊急時被ばく状況及び現存被ばく状況の考え方は、チェルノブイリ事故を契機に、大規模な放射線災害後の長期的で広範囲な影響に対処するために検討が始められ、ICRP Publ.103 により 2007 年に勧告にされた新しい概念である。これらの被ばく状況の個別事例に対する適用についてはこれまで明確に示されていない。

1.2 本研究の実施内容

本研究では、最終処分を必要とする放射線災害で発生した放射性物質で汚染した物品等の物量低減策のひとつの手段として、循環型社会の観点からも注目が高い再生利用の可能性を、放射線防護の観点から検討を行う。

第2章では「放射性物質で汚染した物品の再生利用に関する放射線防護上の考え方」として、現存被ばく状況を含む環境における放射線防護の考え方の整理とその適用の提案をする。再生利用を想定する物品は、ここでは放射線災害等により発生した放射性物質で汚染した物品等とする。それらを再生利用する際は、すでに環境中に存在する線源（土壌やがれき等）を扱うことになるので、現存被ばく状況における放射性物質で汚染した物品の再生利用となる。しかし現在までに、現存被ばく状況における放射性物質で汚染した物品の再生利用に関して、その実施の際に参照できる放射線防護上の枠組みやプロセスに関するルールは国内にも国際的にも存在しない。そこで、2章において、現状で複数の解釈が可能な状態にある現存被ばく状況における再生利用に関する公衆の放射線防護について、想定されうる放射線防護の考え方を5通りに整理し、それらの考え方の再生利用事例に対する適用性の検討を行う。また本章では、ICRP が言及する、放射線防護に関する各種施策の現場への適用において重要となるステークホルダーの関与についても検討する。

第3章では「放射線防護上の考え方の現実的な適用における考察」として、第2章で示した放射線防護上の考え方に沿った再生利用の実施を想定した際の、作業員や公衆、環境への放射線影響について検討する。再生利用を想定する物品は、ここでは2011年の福島第一原

子力発電所(1F)事故により発生した土壌やがれきとする。これらは、1F 事故による発生量が多い^{3,5}こと、および資源としての価値がある^{3,5}との見解があることから選定されている。がれきとは震災および津波により発生したコンクリートや金属のことを指す。想定する再生利用のケースとして、福島県内に一時保管されている除去土壌(除染作業により発生した放射性物質で汚染した土壌)を、海面埋立地を造成する際の資材に再生利用する場合と、1F 敷地内に一時保管されている放射性物質で汚染したがれきを 1F 敷地内に限定して再生利用する場合を想定する。除去土壌の海面埋立地への再生利用に関する放射線影響の評価においては、海産物体内への核種濃縮に影響すると考えられる粒子に付着した核種を考慮できるように既往の被ばく評価方法の高度化を行う。1F 敷地内におけるがれきの再生利用の検討では、線量管理がなされている環境において再生利用を可能とする再生利用物中の核種濃度を設定するための考え方を提案する。

第 4 章は、結論である。本研究で実施した放射性物質で汚染した物品の再生利用についての放射線防護の概念的および自然科学的なアプローチの結果をまとめる。なお、放射性物質で汚染した物品の再生利用に関する議論には、放射線防護上の、放射線リスクに基づく整理のみではなく、倫理や心理、リテラシーや経済などを含む社会科学的な視点や整理も欠かすことができないことに十分な留意が必要である。そこで、第 4 章では社会科学的な視点を含めて放射性物質で汚染した物品の再生利用に関する議論を試みる際に参考となる既往研究について参照する。

第 1 章の参考文献

- 1 環境省. 日本の 3R 推進の経験－循環型社会の構築に向けて－. 2005 年 4 月, <https://www.env.go.jp/recycle/3r/approach/02.pdf>
- 2 European Commission HP, Directive 2008/98/EC on waste (Waste Framework Directive), <https://ec.europa.eu/environment/waste/framework/>
- 3 環境省. 再生資材化した除去土壌の安全な利用に係る基本的考え方について. 平成 28 年 6 月 30 日
http://josen.env.go.jp/chukanchozou/facility/effort/investigative_commission/pdf/investigative_commission_180601.pdf
- 4 International Commission on Radiological Protection, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Annals of the ICRP, Vol.37, No.2-4, 2007
- 5 東京電力ホールディングス株式会社. 福島第一原子力発電所保管管理計画の概要と更新方法について(特定原子力施設放射性廃棄物規制検討委員会(第 5 回)資料 1). 2017 年 2 月 10 日, <https://www.nsr.go.jp/data/000178232.pdf>

第2章 放射性物質で汚染した物品の再生利用に関する放射線防護

上の考え方

本章では、放射線災害で発生した放射性物質で汚染した物品を環境汚染がある中で再生利用することを想定して、現存被ばく状況における公衆の放射線防護上の考え方の提案を行う。現存被ばく状況では公衆被ばくに対する線源関連の管理として 1-20 mSv/y の参考レベルを用いることが ICRP Publ.103¹で示されている。しかし、既存の勧告や法令には参考レベルを用いた具体的な防護の考え方について明確に示されておらず、現存被ばく状況における解釈に幅がある状態である。また、具体的な再生利用事例を想定し、提案した考え方の適用を検討する。

本研究において、再生利用を放射線防護上の検討の対象に選んだ理由は、再生利用が復旧復興を実現する上での社会全体でのコストを下げる手段のひとつとなりうるからである。復旧復興における再生利用の位置づけを以下に整理する。緊急時被ばく状況により生じた汚染から公衆を防護するためには、線量率が高い場所を立ち入り制限区域とする必要がある。汚染の程度が大きい場合、国の面積に占める立ち入り制限区域が大きくなる。復旧復興のためには、立ち入り制限区域の割合を小さくしていくことが必要であるが、そのためには除染を実施し空間線量を低下させる必要がある。除染により発生した放射性物質で汚染した物の扱いについては、立ち入り制限区域内への仮置きや埋設処分等のいくつかの方法が考えられる。埋設処分を考えた場合に、汚染した物の再生利用は埋設処分を必要とする物量の低減につながる。これにより、利用国土の限られた貴重な土地を合理的に利用することができ、また埋設処分にかかる総合的なコストも抑えることができる。さらに、再生資材として利用することは、資源の乏しい我が国のとるべき一般的な方針にも合致することになる。これらのことから、放射能レベルの比較的低い物品等が大量に存在する場合、それらを国民や国際社会の合意を得て再生利用することは、復旧復興をさらに加速する観点でもひとつの力強い手段となりえるであろう。ここでは当該物質の再生利用に関連した放射線防護上の新たな整理について、主に放射線影響に着目した自然科学的な視点で議論するが、再生利用に関する議論には倫理や心理、リテラシーや経済などを含む社会科学的な視点や整理も欠かすことができないことに十分な留意が必要である。

2.1 既存の勧告や安全基準の整理

放射性物質で汚染した物品の再生利用に関する放射線防護上の考え方を検討するにあたって、既存の国際放射線防護委員会（ICRP）の勧告における記述の整理を行う。ICRP の勧告を対象とする理由は、ICRP の勧告は、国際的なコンセンサスのある IAEA による国際安

全基準の策定や各国の法制度のプロセスで重視されているからである。ICRP は、国連科学委員会（UNSCEAR）が放射線に関する幅広い研究・調査のデータを包括的に集積し、科学データに関する国際的なコンセンサスをまとめた報告書を基に、放射線防護の枠組みに関する理念とその履行に関する勧告を行っている²。また、ICRP の勧告は国際原子力機関（IAEA）が加盟各国代表による合意形成で策定する国際基準のよりどころとなっている²。

本研究では、再生利用に関する防護を考える際に線源関連のアプローチに着目する。線源関連のアプローチとは、ある線源に対して防護を考えた場合に、防護の対象とする人が受ける被ばく線量の上限值を管理するのではなく、その線源から受ける被ばく線量の上限值を管理することである¹。線源関連のアプローチとすることで、物品等の置かれた状況に常に視点を絞って防護の戦略を検討することができる。

放射性物質で汚染した物品の再生利用に関する放射線防護上の検討をするにあたり、関連のある既存の ICRP の勧告から線源関連の基準値についての記述を数値毎に以下に抽出する。また、ICRP を拠り所として策定された IAEA の安全基準からも関連する基準値についての記述を抽出する。下線は基準値についての具体的な記述の部分を示す。それらをもとに、各被ばくのカテゴリーにて適用される線源関連の基準値の被ばく状況に応じた整理を表 2-1 に示す。

「10 μ Sv/y オーダー」

ICRP Publ. 104（放射線防護の管理方策の適用範囲）³

- Publication 64において、委員会は免除のための判断基準を次のようにまとめた。すなわち、「通常被ばくの場合、行為は正当化されているが規制条項は不必要であることが明確なときには、ほとんどの規制体系は、その規制体系からの免除を認める条項を含んでいる。免除の根拠は、線源が小さな個人線量（1年あたり10 μ Svのオーダー）しか与えず、防護が最適化されていることである。すなわち、規制条項によって、線量低減がわずかしか、あるいはまったく改善されないということである。（もし、集団線量が小さく、例えば1年あたり1 man \cdot Svのオーダーであれば、防護は最適化されているとみなされることが多い）」（パラグラフ60）。
- IAEAとOECD/NEAによって1988年に定められた「放射線源および行為の規制管理からの免除のための国際的原則」は、免除の目的から低いと理解される典型的な個人のリスクレベルと、これに対応する個人線量について、初めてのガイダンスを提示した。これらの原則は、リスクまたは線量のレベルが低いかどうかを判定する場合に考慮できる2つの主要なアプローチを示している。最初のアプローチは、個人にとって何ら重要でないリスクレベルと、これに対応する線量を選択することであり、2つ目のアプローチは、これに関して通常程度でかつ不可避である自然バックグラウンド被ばくを参照として用いることである。このガイダンスの結論は、年に数十 μ Svのオーダーであれば、発生源に関わりなく、個人の放射線量は些細な量と見なされようだということであった。こ

の線量レベルは、ICRPによって勧告された公衆の年間線量限度の数パーセントにあたり、規制管理の対象となる行為に対し、監督官庁の定めているどの上限値よりもはるかに小さいことが注記された（パラグラフ66）。

- 国際的な原則は、推測ではあるが広く支持されている見解として、 10^{-5} の年死亡リスクの軽減に自ら資財を投入しようとする人はほとんどおらず、 10^{-6} の年死亡リスクのレベルで対策を講じようとする人はさらに少ないと述べている。些細な量として判断される個人線量の値を提案している著者の大部分は、個人に何ら懸念を生じさせないと見なされる年死亡リスクのレベルを 10^{-6} から 10^{-7} に設定している。全年齢および性別における大まかな平均値として全身被ばくに対する約 $5 \times 10^{-2}/\text{Sv}$ という名目リスク係数を考慮すると、些細な個人実効線量のレベルは年に $10 \sim 100 \mu\text{Sv}$ の大きさのオーダーになる。自然バックグラウンド放射線は、平均で年に約 2 mSv の個人線量を与えると推定されている。この平均値には、地中や建築材料中の放射性物質の濃度のほか、標高や生活様式の違いによる広範なばらつきが隠れている。地球平均では、この線量の半分はラドンによる被ばくであり、その線源に対する管理が提唱されている。残りの半分は、管理が実際的ではない宇宙放射線、地殻ガンマ線、および人体中の放射性核種による被ばくである。公衆の個々の構成員は、一般に、国内のある場所から別の場所に移動する場合や、休暇で出かける場合に、自然バックグラウンド放射線による被ばく量の違いを考えない。したがって、自然放射線バックグラウンド放射線の変動と比べて小さい線量レベルは些細な量と見なすことができる。これにもとづいて、自然バックグラウンド放射線の $1 \sim 数\%$ のオーダーの実効線量、すなわち、 $20 \sim 100 \mu\text{Sv}$ が提唱された。このように、これらの二つの考え方が、「年に数十 μSv 」という些細な個人線量についての判断規準をもたらしている（パラグラフ67）。

IAEA GSR Part 3（放射線防護と放射線源の安全：国際基本安全基準）⁴

- The government or the regulatory body shall determine which practices or sources within practices are to be exempted from some or all of the requirements of these Standards. The regulatory body shall approve which sources, including materials and objects, within notified practices or authorized practices may be cleared from regulatory control. (Requirement 8: Exemption and clearance)
- Exemption
 - The government or the regulatory body shall determine which practices or sources within practices are to be exempted from some or all of the requirements of these Standards, including the requirements for notification, registration or licensing, using as the basis for this determination the criteria for exemption specified in Schedule I or any exemption levels specified by the regulatory body on the basis of these criteria. (Paragraph 3.10.)
 - Exemption shall not be granted for practices deemed to be not justified. (Paragraph 3.11.)

- Clearance
 - The regulatory body shall approve which sources, including materials and objects, within notified or authorized practices may be cleared from regulatory control, using as the basis for such approval the criteria for clearance specified in Schedule I or any clearance levels specified by the regulatory body on the basis of these criteria. By means of this approval, the regulatory body shall ensure that sources that have been cleared from regulatory control do not again become subject to the requirements for notification, registration or licensing unless it so specifies. (Paragraph 3.12.)
- Schedule 1 Exemption and Clearance
 - Criteria for exemption

The general criteria for exemption of a practice or a source within a practice from some or all of the requirements of these Standards are that: (Paragraph I.1.)

(a) Radiation risks arising from the practice or from a source within the practice are sufficiently low as not to warrant regulatory control, with no appreciable likelihood of situations arising that could lead to a failure to meet the general criterion for exemption; or

(b) Regulatory control of the practice or the source would yield no net benefit, in that no reasonable measures for regulatory control would achieve a worthwhile return in terms of reduction of individual doses or of health risks.
 - A practice or a source within a practice may be exempted without further consideration from some or all of the requirements of these Standards under the terms of para. I.1(a) provided that under all reasonably foreseeable circumstances the effective dose expected to be incurred by any individual (normally evaluated on the basis of a safety assessment) owing to the exempt practice or the exempt source within the practice is of the order of 10 μ Sv or less in a year. To take into account low probability scenarios, a different criterion could be used, namely that the effective dose expected to be incurred by any individual for such low probability scenarios does not exceed 1 mSv in a year. (Paragraph I.2.)
 - Criteria for clearance

The general criteria for clearance are that: (Paragraph I.10.)

(a) Radiation risks arising from the cleared material are sufficiently low as not to warrant regulatory control, and there is no appreciable likelihood of occurrence for scenarios that could lead to a failure to meet the general criterion for clearance; or

(b) Continued regulatory control of the material would yield no net benefit, in that no reasonable control measures would achieve a worthwhile return in terms of reduction of

individual doses or reduction of health risks.

- Material may be cleared without further consideration under the terms of para. I.10(a) provided that in reasonably foreseeable circumstances the effective dose expected to be incurred by any individual owing to the cleared material is of the order of 10 μSv or less in a year. To take into account low probability scenarios, a different criterion can be used, namely that the effective dose expected to be incurred by any individual for such low probability scenarios does not exceed 1 mSv in a year. (Paragraph I.11.)

「0.3mSv/y」

ICRP Publ.60 (国際放射線防護委員会の1990年勧告)⁵

- 提案された行為および継続している行為に関して委員会が勧告する放射線防護体系は、次の一般原則に基づくものである。(略) (b) ある行為内のどんな特定の線源に関しても、個人線量の大きさ、被ばくする人の数、および、受けることが確かでない被ばくの起こる可能性、の3つすべてを、経済的および社会的要因を考慮したうえ、合理的に達成できるかぎり低く保つべきである。この手順は、本来の経済的、社会的な判断の結果生じそうな不公平を制限するよう、個人に対する線量に関する限定(線量拘束値)、あるいは、潜在被ばくの場合には個人に対するリスクに関する限定(リスク拘束値)によって、拘束されるべきである。(防護の最適化)(略)(パラグラフ112)
- 公衆被ばくにおける拘束値を組み込んだ最適化の主要な目的は、たとえば放射性廃棄物の環境への放出に関する制限といったかたちでの、被ばく源に対する実際的な制限を開発することにあるべきである。(パラグラフ187)

ICRP Publ.81 (長寿命放射性固体廃棄物の処分に適用する放射線防護勧告)⁶

- 線量拘束値は、防護の最適化の重要な構成要素である。この用語は委員会によって、「決定グループの構成委員への線量が拘束値を超える原因となるかもしれないような防護のいかなる選択肢をもそれ以上の検討から除くため、防護の最適化においてもつばら使用されている線源慣例の個人線量」(ICRP, 1997b, 41項)を意味するために使われている。このように拘束値は未来に対して前向きに使われ、それは線量限度と混同されるべきではない。拘束値の大きさと線源と状況に特有であり、全体の行為については同じであるべきである。しかし委員会は、放射性廃棄物処分活動からの公衆構成員に対する拘束値について、1年につき約0.3mSvを超えない値を勧告する。(パラグラフ34)
- “自然過程”という用語には、個人の被ばくに至る人間侵入以外のすべての過程が含まれる。重要な規準は個人の線源関連の拘束値である。委員会は通常の被ばく状況における適用について線量拘束値に対する高いほうの数値である1年間0.3mSvを勧告する。これは、年あたり10⁻⁵のオーダーのリスク拘束値に相当する。(パラグラフ55)

ICRP Publ. 103（国際放射線防護委員会の 2007 年勧告）¹

- 計画被ばく状況について、個人が受けるかもしれない線量に対する線源関連の制限は、線量拘束値である。潜在被ばくに対しては、対応する概念はリスク拘束値である。緊急時被ばく状況及び現存被ばく状況については、線源関連の制限は参考レベルである。線量拘束値と参考レベルの概念は、あらゆる被ばくを、社会的・経済的要因を考慮して、合理的に達成できる限り低く保つことの保証を支援するための防護における最適化のプロセスで用いられる。したがって、拘束値と参考レベルは、一般的な事情の下で最適な防護レベルを保証する最適化のプロセスの重要部分であると言えることができる（パラグラフ 198）。
- 線源関連の制限は、複数の線源がある場合には十分な防護を提供しないであろう、という議論もありうるであろう。しかし委員会は、大抵の場合そこには支配的な線源があり、適切な参考レベル又は拘束値の選択が適切な防護レベルを保証すると推測する。拘束値又は参考レベルより下での最適化の線源関連原則は、状況がどのようなものであれ、防護の最も有効なツールであると委員会は引き続き考える。（パラグラフ 199）

IAEA SSR-5⁷

- 2.15. The safety objective and criteria for the protection of people and the environment after closure of a disposal facility are as follows:
 - (b) To comply with this dose limit, a disposal facility (considered as a single source) is so designed that the calculated dose or risk to the representative person who might be exposed in the future as a result of possible natural processes affecting the disposal facility does not exceed a dose constraint of 0.3 mSv in a year or a risk constraint of the order of 10^{-5} per year.

「1mSv/y」

ICRP Publ.60（国際放射線防護委員会の 1990 年勧告）⁵

- 年実効線量が 1mSv-5mSv の範囲の継続した追加被ばく線量の影響は付属書 C に示してある。それらは判断のための基礎としてわかりやすいものではないが、1mSv をあまり超えない年線量限度の値を示唆している。一方、付属書 C の図 C-7 のデータは、たとえば 5 mSv y^{-1} の継続的被ばくによっても、年齢別死亡率の変化は非常に小さいことを示している。非常に変動しやすいラドンによる被ばくを除けば、自然放射線源からの年実効線量は約 1mSv であり、海拔の高い場所およびある地域では少なくともこの 2 倍である。これらすべてを考慮して、委員会は、年実効線量限度 1mSv を勧告する。時間平均については次項で議論する。（パラグラフ 191）
- 公衆の被ばく源に対する制限を導くさいには、人に至る環境経由の変動にいくぶん考

慮を払っているが、より大きな一時的な変化の可能性が常にある。線源に適用される管理手順の有効性にも変動があるから、そのような変動から生ずる線量の一時的な増加は線量限度の対象となる線量に含めるべきであることを、委員会は勧告する。重大な事故による線量は、介入によってのみ処置することができるので、線量限度の対象ではない。損害は多年にわたる線量の集積量の関数であるから、年線量限度に厳格に関連されるような管理を要求することはきびしすぎる制限であろう。その限度にある程度の柔軟性をもたせることが望ましい。委員会の以前の勧告は、年実効線量について基本限度を規定し、生涯にわたる平均実効線量が基本限度を超えないという条件で数年間の実効線量について補足的な限度をもうけた。この勧告は今でも原理的には適切であるが、委員会は、この補助的限度を平均する期間を非常に長くすることは柔軟性が大きすぎると結論した。今回、公衆の被ばくに関する限度は、1年について1mSvの実効線量として表されるべきであることを勧告する。しかしながら、特殊な状況においては、5年間にわたる平均が年あたり1mSvを超えなければ、単一年にこれよりも高い実効線量が許されることもありうる。このことは以前の勧告のわずかな変更であるから、委員会は、新しい勧告を施行しようとするときには、5年の期間をさかのぼって適用すべきであることを勧告する。この目的には、実効線量の値を以前の実効線量の値に加えてよい。この限度には暗に、新しい施設の設計における防護の最適化のための拘束値は1年について1mSv以下にすべきであるということが含まれている。(パラグラフ 192)

ICRP Publ.75 (作業者の放射線防護に対する一般原則)⁸

- 委員会は現在、個人モニタリングの記録レベルは、モニタリング期間と、1mSvを下回らない年実効線量、又は、関連する線量限度の約10%の年等価線量から導かれるべきであると考えている。しかし、いくつかの被ばく成分(たとえば特定の臓器の外部被ばくと内部被ばく)が総線量率に有意に寄与するようなまれな状況においては、各成分についてもっと低い記録レベルを導くのが適切かもしれない。その場合、各成分に対する記録のやり方を正式に定めて記録すべきである。(パラグラフ 232)

ICRP Publ. 82 (長期放射線被ばく状況における公衆の防護)⁹

- ある状況において長期被ばくの重要な要因となるある種の建材のような、介入を受け入れる主な種類の商品からの予測される個人年線量に対しては、およそ1mSvの一般介入免除レベルを勧告する。この勧告に基づき、関係する国の機関および、該当する場合には、国際機関は、個々の商品、特に特定の建材に対して、放射性核種別の一般介入免除レベルを誘導すべきである(パラグラフ126)。

ICRP Publ.103 (国際放射線防護委員会の2007年勧告)¹

- 1番目のバンドである1mSv以下は、個人が被ばくする被ばく状況—通常は計画被ば

く状況—に適用され、個人には直接的な便益がないかもしれないが、その被ばく状況が社会の役に立つことがあるかもしれない場合である。計画された通常操業による公衆構成員の被ばくはこの種の状況の主要な例である。このバンドの拘束値と参考レベルは、一般的な情報と環境サーベイランス若しくは環境のモニタリング又は評価があり、かつ個人が情報を知らされるかもしれないが訓練は必要でないような状況に対して選択されるであろう。このバンドに対応する線量は、自然バックグラウンドをわずかに超える増加を示し、参考レベルの最大値よりも少なくとも2桁低く、したがって厳しい防護レベルを提供する（パラグラフ239）。

- 現存被ばく状況の参考レベルは、予測線量 1 mSv から 20 mSv のバンドに通常設定すべきである。 関連する個人は、被ばく状況に関する一般情報と、彼らの線量の低減手段を受けべきである。個人の生活タイプが被ばくの重要な要因となるような状況では、教育や訓練とともに、個人のモニタリング又は評価が重要な要件であることがある。原子力事故又は放射線事象の後の汚染された土地における生活は、この種の典型的な状況である。（パラグラフ 287）

ICRP Publ.111（原子力事故または放射線緊急事態後の長期汚染地域に居住する人々の防護に対する委員会勧告の適用）¹⁰

- 緊急時被ばく状況に続く現存被ばく状況の場合、放射線源は制御可能になるが、状況の制御可能性は困難なままであり、日常生活において住民は常に警戒することが求められる。これは、汚染地域に居住する住民にとって、また、総じて社会にとって重荷となる。しかしながら、住民および社会のいずれも被災した地域に居住し続けることに便益を見出すであろう。国は一般にその領土の一部を失うことを受け入れることはできず、また住民のほとんどは 非汚染地域に（自発的であってもなくても）移住させられるよりも一般に自分の住居に留まる方を好んでいる。その結果、汚染レベルが持続可能な人間活動を妨げるほど高くない場合、当局は人々に汚染地域を放棄させるのではなく、むしろ汚染地域での生活を継続するために必要なすべての防護措置を履行しようとするであろう。これらを考慮すれば、適切な参考レベルは、できれば委員会によって提案された 1~20 mSv のバンドで選ばれるべきであると示唆される。（パラグラフ 48）
- 現存被ばく状況にとっての長期目標は、“被ばくを通常と考えられるレベルに近いあるいは同等のレベルまで引き下げること（ICRP Publ.103 パラグラフ 288）であることから、汚染地域内に居住する人々の防護の最適化のための参考レベルは、このカテゴリーの被ばく状況の管理のために Publication 103 で勧告された 1-20 mSv のバンドの下方部分から選択すべきであることを、委員会は勧告する。過去の経験は、長期の事故後の状況における最適化プロセスを拘束するために用いられる代表的な値が 1 mSv/年であることを示している。国の当局は、その時点で広く見られる状況を考慮に入れ、また、復旧プログラム全体のタイミングを利用して、徐々に状況を改善するための中間的な参

考レベルを採用しても良い（パラグラフ 50）。

IAEA GSR Part 3（放射線防護と放射線源の安全：国際基本安全基準）⁴

- Schedule 1 Exemption and Clearance

- Criteria for exemption

The general criteria for exemption of a practice or a source within a practice from some or all of the requirements of these Standards are that: (Paragraph I.1.)

- (a) Radiation risks arising from the practice or from a source within the practice are sufficiently low as not to warrant regulatory control, with no appreciable likelihood of situations arising that could lead to a failure to meet the general criterion for exemption; or
- (b) Regulatory control of the practice or the source would yield no net benefit, in that no reasonable measures for regulatory control would achieve a worthwhile return in terms of reduction of individual doses or of health risks.

- A practice or a source within a practice may be exempted without further consideration from some or all of the requirements of these Standards under the terms of para. I.1(a) provided that under all reasonably foreseeable circumstances the effective dose expected to be incurred by any individual (normally evaluated on the basis of a safety assessment) owing to the exempt practice or the exempt source within the practice is of the order of 10 μSv or less in a year. To take into account low probability scenarios, a different criterion could be used, namely that the effective dose expected to be incurred by any individual for such low probability scenarios does not exceed 1 mSv in a year. (Paragraph I.2.)

- Criteria for clearance

The general criteria for clearance are that: (Paragraph I.10.)

- (a) Radiation risks arising from the cleared material are sufficiently low as not to warrant regulatory control, and there is no appreciable likelihood of occurrence for scenarios that could lead to a failure to meet the general criterion for clearance; or
- (b) Continued regulatory control of the material would yield no net benefit, in that no reasonable control measures would achieve a worthwhile return in terms of reduction of individual doses or reduction of health risks.

- Material may be cleared without further consideration under the terms of para. I.10(a) provided that in reasonably foreseeable circumstances the effective dose expected to be incurred by any individual owing to the cleared material is of the order of 10 μSv or less in

a year. To take into account low probability scenarios, a different criterion can be used, namely that the effective dose expected to be incurred by any individual for such low probability scenarios does not exceed 1 mSv in a year. (Paragraph I.11.)

- Requirement 48: Justification for protective actions and optimization of protection and safety
 - 5.8. The regulatory body or other relevant authority and other parties responsible for remedial actions or protective actions shall ensure that the form, scale and duration of such actions are optimized. While this optimization process is intended to provide optimized protection for all individuals subject to exposure, priority shall be given to those groups for whom the dose exceeds the reference level. All reasonable steps shall be taken to prevent doses from remaining above the reference levels. Reference levels shall typically be expressed as an annual effective dose to the representative person in the range of 1–20 mSv or other corresponding quantity, the actual value depending on the feasibility of controlling the situation and on experience in managing similar situations in the past.

- Requirement 51: Exposure due to radionuclides in commodities
 - 5.22. The regulatory body or other relevant authority shall establish specific reference levels for exposure due to radionuclides in commodities such as construction materials, food and feed, and in drinking water, each of which shall typically be expressed as, or be based on, an annual effective dose to the representative person that generally does not exceed a value of about 1 mSv.

「5mSv/y」

ICRP Publ.60 (国際放射線防護委員会の1990年勧告)⁵

- 公衆の被ばく源に対する制限を導くさいには、人に至る環境経由の変動にいくぶん考慮を払っているが、より大きな一時的な変化の可能性が常にある。線源に適用される管理手順の有効性にも変動があるから、そのような変動から生ずる線量の一時的な増加は線量限度の対象となる線量に含めるべきであることを、委員会は勧告する。重大な事故による線量は、介入によってのみ処置することができるので、線量限度の対象ではない。損害は多年にわたる線量の集積量の関数であるから、年線量限度に厳格に関連させるような管理を要求することはきびしすぎる制限であろう。その限度にある程度の柔軟性をもたせることが望ましい。委員会の以前の勧告は、年実効線量について基本限度を規定し、生涯にわたる平均実効線量が基本限度を超えないという条件で数年間の実効線量について補足的な限度をもうけた。この勧告は今でも原理的には適切であるが、委員会は、この補助的限度を平均する期間を非常に長くすることは柔軟性が大きすぎると結論した。今回、公衆の被ばくに関する限度は、1年について1mSvの実効線

量として表されるべきであることを勧告する。しかしながら、特殊な状況においては、5年間にわたる平均が年あたり1mSvを超えなければ、単一年にこれよりも高い実効線量が許されることもありうる。このことは以前の勧告のわずかな変更であるから、委員会は、新しい勧告を施行しようとするときには、5年の期間をさかのぼって適用すべきであることを勧告する。この目的には、実効線量の値を以前の実効線量の値に加えてよい。この限度には暗に、新しい施設の設計における防護の最適化のための拘束値は1年について1mSv以下にすべきであるということが含まれている。(パラグラフ 192)

「10mSv/y」

ICRP Publ. 82 (長期放射線被ばく状況における公衆の防護)⁹

- 公衆の構成員が受ける現存年線量が約10mSvを下回るような状況では介入は正当化されそうもない。商品に起因し、介入を受け入れる年線量の成分がこのレベルに近づくことさえそれを許すのは不合理であろう。自然バックグラウンドの被ばくは少なくとも年当たり数mSvの年線量をもたらし、許可された行為から起こりうる年線量を考慮すると、介入から免除すべき全ての商品からの年線量について年当たり数mSvのオーダーの上限値が残される。数種類の商品が同時にある特定の個人に対して高められた長期被ばくの源となることはありそうもない (パラグラフ 125)。

「20mSv/y」

ICRP Publ. 60 (国際放射線防護委員会の1990年勧告)⁵

- (職業被ばくについて) (略) 委員会は、いかなる1年間にも実効線量は50mSvを超えるべきでないという付加条件つきで、5年間の平均値が年あたり20mSv(5年間に100mSv)という実効線量限度を勧告する。5年という期間は、たとえば始期を定めた暦上の5年間という具合に、規制機関が決めなければならないであろう。委員会は、この期間をまず取り入れて、これをさかのぼって適用することは期待しない。またこれらの勧告された線量限度は、最適化のための線量拘束値が1年につき20mSvを超えるべきでないことを暗に意味している。(パラグラフ 166)

ICRP Publ. 103 (国際放射線防護委員会の2007年勧告)¹

- 2番目のバンドは、1mSvよりも高いが20mSvを超えず、その被ばく状況から直接の便益を個人が受ける事情に適用される。このバンドの拘束値と参考レベルは、個人サーベイランス又は線量モニタリング若しくは評価があり、また個人が訓練又は情報から便益を受けるような事情の下でしばしば設定されるであろう。計画被ばく状況における職業被ばくに対して設定される拘束値はその例である。異常に高い自然バックグラウンド放射線又は事故後の復旧段階を含む被ばく状況も、このバンドに含まれることがある。(パラグラフ 240)

- 現存被ばく状況の参考レベルは、予測線量 1 mSv から 20 mSv のバンドに通常設定すべきである。 関連する個人は、被ばく状況に関する一般情報と、彼らの線量の低減手段を受けべきである。個人の生活タイプが被ばくの重要な要因となるような状況では、教育や訓練とともに、個人のモニタリング又は評価が重要な要件であることがある。原子力事故又は放射線事象の後の汚染された土地における生活は、この種の典型的な状況である（パラグラフ 287）。

ICRP Publ.111（原子力事故または放射線緊急事態後の長期汚染地域に居住する人々の防護に対する委員会勧告の適用）¹⁰

- 緊急時被ばく状況に続く現存被ばく状況の場合、放射線源は制御可能になるが、状況の制御可能性は困難なままであり、日常生活において住民は常に警戒することが求められる。これは、汚染地域に居住する住民にとって、また、総じて社会にとって重荷となる。しかしながら、住民および社会のいずれも被災した地域に居住し続けることに便益を見出すであろう。国は一般にその領土の一部を失うことを受け入れることはできず、また住民のほとんどは非汚染地域に（自発的であってもなくても）移住させられるよりも一般に自分の住居に留まる方を好んでいる。その結果、汚染レベルが持続可能な人間活動を妨げるほど高くない場合、当局は人々に汚染地域を放棄させるのではなく、むしろ汚染地域での生活を継続するために必要なすべての防護措置を履行しようとするであろう。これらを考慮すれば、適切な参考レベルは、できれば委員会によって提案された 1~20 mSv のバンドで選ばれるべきであると示唆される。（パラグラフ 48）
- 現存被ばく状況にとっての長期目標は、“被ばくを通常と考えられるレベルに近いあるいは同等のレベルまで引き下げること（ICRP Publ.103 パラグラフ 288）であることから、汚染地域内に居住する人々の防護の最適化のための参考レベルは、このカテゴリーの被ばく状況の管理のために Publication 103 で勧告された 1-20 mSv のバンドの下方部分から選択すべきであることを、委員会は勧告する。過去の経験は、長期の事故後の状況における最適化プロセスを拘束するために用いられる代表的な値が 1 mSv/年であることを示している。国の当局は、その時点で広く見られる状況を考慮に入れ、また、復旧プログラム全体のタイミングを利用して、徐々に状況を改善するための中間的な参考レベルを採用しても良い（パラグラフ 50）。

IAEA GSR Part 3（放射線防護と放射線源の安全：国際基本安全基準）⁴

- Requirement 48: Justification for protective actions and optimization of protection and safety
 - 5.8. The regulatory body or other relevant authority and other parties responsible for remedial actions or protective actions shall ensure that the form, scale and duration of such actions are optimized. While this optimization process is intended to provide optimized protection for all individuals subject to exposure, priority shall be given to those groups for

whom the dose exceeds the reference level. All reasonable steps shall be taken to prevent doses from remaining above the reference levels. Reference levels shall typically be expressed as an annual effective dose to the representative person in the range of 1–20 mSv or other corresponding quantity, the actual value depending on the feasibility of controlling the situation and on experience in managing similar situations in the past.

「50mSv/y」

ICRP Publ.60（国際放射線防護委員会の1990年勧告）⁵

- （職業被ばくについて）（略）委員会は、いかなる1年間にも実効線量は50mSvを超えるべきでないという付加条件つきで、5年間の平均値が年あたり20mSv（5年間に100mSv）という実効線量限度を勧告する。5年という期間は、たとえば始期を定めた歴上の5年間という具合に、規制機関が決めなければならないであろう。委員会は、この期間をまず取り入れて、これをさかのぼって適用することは期待しない。またこれらの勧告された線量限度は、最適化のための線量拘束値が1年につき20mSvを超えるべきでないことを暗に意味している。（パラグラフ166）

表 2-1 各被ばくのカテゴリーにて適用される線源関連の基準値の被ばく状況に応じた整理

場		現存被ばく状況		計画被ばく状況	
被ばくのカテゴリー		公衆被ばく	職業被ばく ※2	公衆被ばく	職業被ばく
mSv/y	0.01	-	-	線量拘束値 (免除、クリアランスレベル の下限值) ICRP publ.103, 104, IAEA GSR.3	-
	<0.1	-	-	線量拘束値 (免除、クリアランスレベルの 上限値) ICRP publ.103, 104, IAEA GSR.3	-
	0.3	-	-	線量拘束値 (複数線源のための代表値) ICRP publ.81, IAEA SSR-5	-
	1	参考レベル (下限値) ※ 1 ICRP Publ.103, IAEA GSR.3	-	線量拘束値 (一般的な公衆に対する上限 値) ICRP publ.103	線量拘束値 (記録レベルの下限値) ICRP publ.75
	5		-	線量拘束値 (特殊な状況下の公衆に対す る上限値) ICRP publ.103	-
	10	参考レベル (介入が 正当化されそうもな い値) ICRP Publ.82	-	-	-
	20	参考レベル (上限 値) ICRP Publ.103, IAEA GSR.3	-	-	線量拘束値 (職業被ばく の 100mSv/5y から導か れる年間の上限値) ICRP publ.103
	50	-	-	-	線量拘束値 (職業被ばく の線量限度 100mSv/5y の内で、ある 1 年間で超 えてはいけない値) ICRP Publ.60

※ 1 介入免除レベル(ICRP publ.82)と一致

※ 2 ICRP Publ.103 にて、現存する線源であっても長期的な改善作業や影響を受けた場所での長期の雇用によって生じる被ばくは計画職業被ばくの一部として扱うべきであることが示されている。

2.2 勧告や安全基準を再生利用の防護に適用するための考え方

表 2-1 で示した既存の勧告や安全基準の整理だけでは、場や被ばくのカテゴリーの捉え方について様々な解釈が可能であり、どの勧告や安全基準を適用しているのか明確にできない。想定される防護の事例を考慮しながら、既存の勧告や安全基準を再生利用の防護に適用するための考え方を検討する。

2.2.1 勧告や安全基準の適用方法の整理

現存被ばく状況における公衆の防護は、参考レベルを用いて行うことが ICRP Publ.103¹ の中で示されている。しかし参考レベルの具体的な適用方法については、いくつかの具体的な例（例えば、ICRP Publ.111¹⁰ で示された過去の核実験、原子力事故、放射線事故によって生じた長期汚染地域に関する参考レベルの適用についての記述）を除いて、これまでの勧告や安全基準では述べられていない。したがって、本研究で扱う再生利用に関する現存被ばく状況における公衆の防護について、現時点では複数の解釈ができる状態にある。

本章では、現存被ばく状況における放射性物質で汚染した物品の再生利用について、想定されうる放射線防護の考え方として以下の5通りを想定した。5通りの考え方の概念図を図2-1に示した。

- ① 再生利用を行う際の追加線量の管理として、最大 20mSv/y の参考レベルの設定が可能であるとする考え方
- ② 事故後新たに環境中に追加された線量と再生利用による追加線量の総量が 20mSv/y 以下の任意の値になるように再生利用を行う際の追加線量を管理するという考え方
- ③ 再生利用後の対象環境の総線量が 20mSv/y 以下の任意の値となるように再生利用を行う際の追加線量を管理するという考え方
- ④ 計画的に実施される再生利用については、線源関連の管理は再生利用を実施する場の被ばく状況にかかわらず計画被ばくの考え方を適用するという考え方（線量限度・線量拘束値の適用）
- ⑤ 再生利用による追加線量は原則容認しないという考え方（クリアランスレベルの適用）

各考え方の説明を以下に示す。

①再生利用を行う際の追加線量の管理として、最大 20mSv/y の参考レベルの設定が可能であるとする考え方

現存被ばく状況に存在する各線源に対して最大 20mSv/y（現存被ばく状況における参考レベルの最大値）の参考レベルを設定できると解釈する。この考え方の特徴として、再生利用による追加線量として 20mSv/y まで選択可能なので、計画被ばく状況における最大拘束値を超える値を設定する可能性がある点があげられる。汚染が生じた環境中の空間線量が高い場合であっても、20mSv/y まで再生利用による追加線量を許容する。従って、線源の重畳を考えた時に適切な防護が行われているとは限らない。また、計画被ばく状況における防護の考え方と異なるので、現存被ばく状況と計画被ばく状況をまたいで再生利用を行おうとした場合、考え方の整理と管理の実務が複雑になる可能性が高い。さらに、ある程度大きな追加線量を許容することになり公衆理解を得づらいつと考えられる。

②事故後新たに環境中に追加された線量と再生利用による追加線量の総量が 20mSv/y 以下の任意の値になるように再生利用を行う際の追加線量を管理するという考え方

緊急時被ばく状況にて発生した線源からの線量を追加線量と捉え、追加線量の合計値に対して最大 20mSv/y の参考レベルを設定できると解釈する。参考レベルの合計値の上限として 20mSv/y を設定しているので重畳を考えた場合でも、追加の総被ばく線量は現存被ばくで適用される線量規準の範囲の中で管理されることになる。この考え方の特徴として、再生利用による追加線量として 20mSv/y まで選択可能なので、計画被ばく状況における最大拘束値を超える値を設定する可能性がある点があげられる。したがって、現存被ばく状況と計画被ばく状況をまたいでの再生利用を行おうとした場合、考え方の整理と管理の実務が複雑になる可能性が高い。また、ある程度の大きな追加線量を許容することになり公衆理解を得づらいつとも考えられる。

③再生利用後の対象環境の総線量が 20mSv/y 以下の任意の値となるように再生利用を行う際の追加線量を管理するという考え方

環境中の全線量に対して最大 20mSv/y の参考レベルを設定できると解釈する。参考レベルの合計値の上限として 20mSv/y を設定しているので、重畳を考えた場合でも総被ばく線量は現存被ばくで適用される線量規準の範囲の中で管理されることになる。この考え方の特徴として、再生利用による追加線量として 20mSv/y まで選択可能なので、計画被ばく状況における最大拘束値を超える値を設定する可能性がある点があげられる。したがって、現存被ばく状況と計画被ばく状況をまたいでの再生利用を行おうとした場合、考え方の整理と管理の実務が複雑になる可能性が高い。また、②ほどではないが、ある程度の追加線量を伴うことも想定され、公衆理解を得ることは容易ではないかもしれない。

④計画的に実施される再生利用については、線源関連の管理は再生利用を実施する場の被ばく状況にかかわらず計画被ばくの考え方を適用するという考え方（線量限度・線量拘束値の適用）

被ばく状況にかかわらず計画的な被ばくについては線量拘束値で管理をすると解釈する。この考え方の特徴は、放射線防護を必要とする再生利用に関連した新たな活動をすべて計画被ばくと扱うことで場に関係のない統一した管理の考え方を適用する点である。現存被ばく状況でも計画被ばく状況でも統一の管理の仕方なので、被ばく状況間で不公平感が生じづらく公衆理解が得やすい可能性がある。一方この考え方は、高レベルの自然被ばくと事故後の復旧復興のために ICRP が 2007 年勧告中で新たに導入した現存被ばく状況における放射線防護の考え方を十分には活かし切れていないと言える。ただし、③の考え方もあり得ることを十分に念頭に置いた上で、運用の段階で最適化のプロセスを経た合理的な線量拘束値の選択をして、かつ、適切な防護の手段（線量制御の方法や実際の被ばくの確認等）を

適宜に採用することができる。

この考え方で防護を行う際に適用する基準値の提案を表 2-2 に示す。表 2-2 は表 2-1 で示した基準値をもとに、一度管理下に入った物品を対象にして、再生利用を想定する場合の線源関連の管理に用いる各被ばくのカテゴリーにおける基準値を示すものである。

⑤再生利用による追加線量は原則容認しないという考え方（クリアランスレベルの適用）

被ばく状況にかかわらず計画的な被ばくについては線量拘束値で管理をすると解釈する。その上で、放射線防護上措置がいらぬ程度の再生利用とする。この考え方の特徴は、有意な被ばく線量を追加しないので、公衆理解が得やすいという点である。しかし、現存被ばく状況の環境において過剰な防護となる可能性がある。

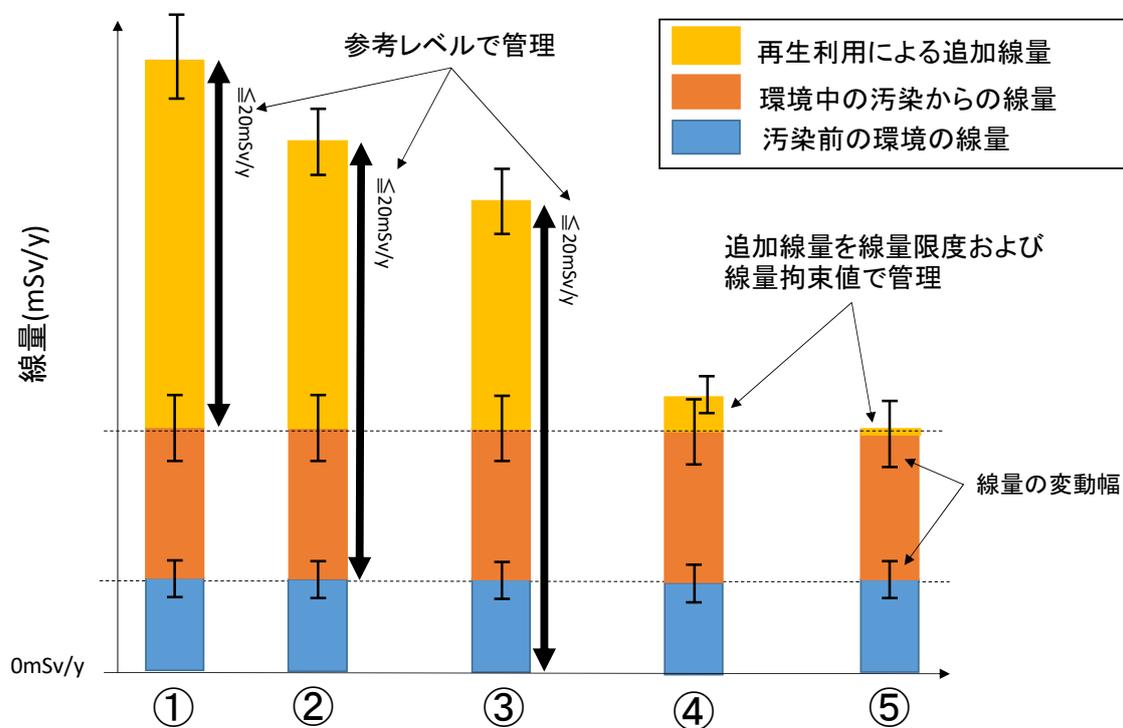


表 2-2 一度管理下に入った物品の再生利用を想定した場合に
線源関連の管理に用いる基準値に関する整理の私案

場		被ばく状況によらず	
被ばくのカテゴリー		公衆被ばく	職業被ばく
mSv/y	0.01	線量拘束値 (クリアランスレベルの下限值) [a]	-
	<0.1	線量拘束値 (クリアランスレベルの上 限値) [b]	-
	0.3	線量拘束値 (複数線源のための代表値) [c]	-
	1	線量拘束値 (一般的な公衆に対する上 限値) [d]	線量拘束値 (職業被ばくの記録レベルの下 限值) [f]
	5	線量拘束値 (特殊な状況下の公衆に対 する上限値) [e]	-
	10	-	-
	20	-	線量拘束値 (職業被ばくの 100mSv/5y か ら導かれる年間の上限值) [g]
	50	-	線量拘束値 (職業被ばくの線量限度 100mSv/5y の内で、ある 1 年間で超えては いけない値) [h]

※[]付のアルファベットは図 2-4 および図 2-5 との対応を示す。

2.2.2 現存被ばく状況の汚染の程度に応じた適用方法の選択

ここでは現存被ばく状況の汚染の程度に応じた①～⑤の考え方の適用について検討する。ICRP Publ.111¹⁰ では現存被ばく状況は前もって管理することができないので線量限度は適用されないとしている。また、現在、WS-G-3.1 (過去の事業活動及び事故により汚染された地域の浄化に関する安全指針議論)¹¹の改定に向けて議論が進んでいる IAEA DS468 (step8)¹² では、過去の放射線利用や放射線災害によって影響を受けた地域では、速やかな復旧のために参考レベルを適用すべきことが示されている。しかし、必ずしも参考レベルを用いることのみが重要なわけではなく、状況に応じて適切な考え方を適用することが、復旧においての合理的な放射線防護につながることも考えられる。

はじめに、勧告や安全基準を統一的に適用する地理的な範囲の検討を行う。勧告や安全基準を適用する範囲を決定する上では、被ばく線量に直接的に関係する汚染の程度に基づいた判断が不可欠である。また、放射線防護は法的枠組みの中で施策されるので、勧告や安全基準を適用する範囲の決定には、「ある法的枠組みが適用されている行政単位」という観点に基づいた政治的な判断も必要である。行政単位とは、国家機能を執行するために領土を細分化した区画である。ここでは国も行政単位のひとつに含めて議論する。行政単位は具体的には、日本においては国、都道府県、市町村および特別区があり、世界的には州や連邦制国家を構成する共和国などがある。

我が国における放射線防護は、歴史的および文化的に国の法律である原子力基本法に基づいて実施されている。我が国と同様に、放射線防護を国単位の法的枠組みに従って実施している国として、韓国などがある。一方、アメリカ合衆国やカナダ、オーストラリアなどは、州ごとの法的枠組みに沿って放射線防護が実施されている。また、欧州原子力共同体(Euratom)のように複数の国が、原子力に関する共通の法的枠組みを有する例もある。

勧告や安全基準を適用する範囲の検討を、具体的な事例に対して行う。

広大な国土面積を有する合衆国や連邦制国家における再生利用を想定した場合、物理的な距離による放射線リスクの偏り大きいこと、および歴史的、文化的に各行政単位の政治的な独立性が高いことから、勧告や安全基準を適用する行政単位は国を構成する共和国や州とすることが、放射線防護および政治的な観点から合理的である可能性がある。

一方、1F 事故後の我が国における再生利用を想定した場合、本研究では勧告や安全基準を適用する行政単位として国を提案する。1F 事故により主に東北地方および関東地方が放射性物質で汚染されたが、汚染の状況はブルームの挙動や沈着の状況によって差異が生じた。このため、最小単位である市町村間でも大きく異なり、また各市町村内でも偏在が見られた。よって、汚染の程度のみに着目した放射線防護の視点から判断した場合、緊急時には、勧告や安全基準を適用する行政単位は都道府県や市町村、あるいはそれよりも小さい地区単位のような国より小さい単位とすることも合理的である可能性があり、実際にかなり細かい単位を対象とした施策が採られた。しかしながら、本論文で対象としている再生利用の実施時期は既に平時と見なすことができ、平時において我が国が歴史的に採用してきた同分野の法的枠組みに沿った放射線防護を適用する場合、勧告や安全基準を適用する行政単位として国より小さい行政単位を積極的に選択する根拠を示すことは難しい。また、この文脈で、ひとつの行政単位において同一の安全基準に基づいて防護を行うことは、ステークホルダー間の不公平感を生じさせないという意味合いにおいて重要であり、再生利用に向けた是非に関する合意形成に繋がるものと本研究では考える。この考え方は、ICRP publ.138¹³において示されている不平等・不公平な形で個人がリスクを引き受けることは防ぐべきという内容にも準拠している。

なお、1F 事故後の我が国における再生利用を想定した場合、近隣諸国を対象とした防護についてはクリアランスの考え方に従うものと整理する。ここでは再生利用物が近隣諸国へ渡る可能性があるとするれば、それは完成した再生利用物が線源としての管理から外れた場合に限られる。ICRP はクリアランスされた物は有価物として海外へ輸出できることを示している。すなわち、国よりも大きな単位で統一する（国際的に同一の考え方をを用いる）ことは、再生利用物が国際間取引される可能性のある無条件クリアランスにおいては必要であり実施されているが、本考え方は国内に限定された再生利用を対象としており、再生利用物が国際間取引の対象とならないことから、国際的な統一は不要である。

我が国と異なり、たとえば複数の国が国境を接し、または面積の比較的小さな国が接近しているような事例においては、汚染の範囲の拡がりによっては、複数の国において同一の勧

告や安全基準を適用する必要がある可能性もあろう。

続いて、現存被ばく状況の汚染の程度に応じた適用方法の選択について検討する。汚染の程度は、汚染を受けた環境の範囲とその汚染から受ける線量のレベルなどで表現される。汚染の程度によって除染対象物の物量は変わるが、実際に埋設処分できる物量は社会的な要因により制限されている（例えば、環境への負荷や、埋設処分場の建設に否定的な自治体の存在、等）。したがって、総合的な判断に基づいて、社会的なベネフィットが大きくなる再生利用の考え方を、2.2.1 で示した①～⑤のなかから選択することが重要といえる。しかし、①～⑤の考え方は、それぞれ異なる放射線防護上の特徴を持ち、それにより社会的な受容の度合いも異なるため、どのような状況においても最適であるといえるひとつの解があるわけではない。この意思決定において、社会科学的な要因は考慮すべき重要な要素であるため、①～⑤のどの選択肢が合理的な防護であるかの判断基準を、汚染の程度のみに基づいて定量的に示すことはきわめて難しい。

ここでは、自然科学的な放射線のリスクの視点に基づき、考え方①～⑤の選定を、汚染の程度に関して、放射線災害が発生する前の平時において適用されていた防護の考え方を要するほどに大きいかどうかという観点から判断することにする。平時においては計画被ばくの考え方で公衆の放射線の防護は実施されていることから、その判断基準として、放射線災害により発生した汚染による追加線量としての 1mSv/y を用いることができるだろうと提案する。 1mSv/y は ICRP publ.103 において防護対策が必要な状況として示された現存被ばく状況の参考レベルの下限值である。また、かつて利用されていた介入免除レベル（ICRP Publ.82）⁹ も 1mSv/y に設定されていた。

2.3 法令や指針等で定められた基準値等に関する解釈

前項までで議論した、将来にわたって国際的にも適用できるように一般化された考え方を、実際の現場を有する我が国のなかで適用、展開するための可能性を検討するには、我が国の現時点での法的な考え方や定められた安全基準との整合性も整理しておく必要がある。周知の通り福島第一原子力発電所事故の後に、除染や除去土壌の再生利用に関する多くの我が国独自の放射線防護に関する基準値が設定された。しかし現状の法令や指針の多くについて、その基準値を選択するに至る科学的根拠やその論理的プロセスは、系統的また明解には整理されていない。ここでは、2.2 で示した放射線防護の考え方を適用して、我が国で設定された既存の基準値の解釈を行う。この解釈が矛盾なく成功すれば、本研究で提案する対応の方針を、より現実的な議論へと発展させることができる。

はじめに、福島第一原子力発電所事故による環境の汚染の程度から、①～⑤の中から事故後の環境において適用することがふさわしい考え方の選定を行う。福島第一原子力発電所事故後の日本においては、単純化された1時間当たりの場の線量計測値（線量当量）に基づき、追加線量として当時の年間実効線量が 1mSv/y を超える可能性が否定できない汚染が 8

県 104 市町村において確認された¹⁴。現存被ばく状況に該当する環境の線量レベルは ICRP の勧告にて明確に示されていないが、参考レベルの下限値の年間 1mSv 以上の追加線量が汚染から生じる環境を現存被ばく状況と考えると、8 県が現存被ばく状況に該当する市町村を含む可能性があることになる。現存被ばく状況に該当する市町村数は、日本の全市町村数に対して約 5%ほどである。人口密度も考慮すると現存被ばく状況に該当する市町村で生活を営んでいる人の割合は、全人口の 5%よりもさらに低い値となることが考えられる。2.2.2 で示した通り、本研究ではひとつの国内においては現存被ばく状況における再生利用に関する防護の考え方を統一して考える。一方、国内には複数の被ばく状況が同時に存在する可能性もある（例えば、行政区分により被ばく状況が異なる、等）。現存被ばく状況の考え方に沿った防護である①～③を選択した場合、その考え方による再生利用は現存被ばく状況に該当する地域のみで実施できることになる。現存被ばく状況に該当する地域が人口の 5%に満たない人たちが居住する地域のみである 1F 事故後の環境において、①～③を選択すると再生利用による放射線リスクを一部の人たちのみが被ることになる。ICRP publ.138¹³ が示す不平等・不公平な形で個人がリスクを引き受けることを防ぐべきという考え方によって、現存被ばく状況に該当する場でも計画被ばく状況に該当する場でも同じ防護策をとる④または⑤を選択することがリスクの公平性の上で我が国でも適切と判断した。④または⑤の選択については、再生利用による社会全体のベネフィットの大きさを比較する。再生利用を推進することにより復旧復興に要するコスト（例えば、埋設処分や復旧復興に要する人材、資材に要するコスト、等）を下げることができる。その観点では⑤は④に及ばない。また、現存被ばくの状況にある環境の修復を考えるべき段階で、事故の以前から環境に古くから存在する自然の放射線被ばくの変動レベルの 1～2 桁程度も低い極低レベルの物品を対象として扱う⑤は、国際合意に基づいて国際社会が歴史的に築いてきた放射線防護の枠組みでは適切に説明ができない（例えば、ICRP の Publ.103¹ では防護の最適化の考え方として、最善の選択肢は被ばく状況に特有のものであること、および防護の最適化は線量の最小化ではないことが示されている。放射線災害により環境中の線量が上昇し、現存被ばく状況に該当する地域を含む我が国において、2.2.2 の整理に基づき国内において統一した考え方による防護を行う場合、線源としての管理が必要ない線量レベルを線量拘束値に設定することは防護の最適化の考え方にそぐわない可能性がある。また、長期被ばくの管理を扱った ICRP Publ.82 では、介入免除レベルとして 1mSv/y を提示している点も、⑤を積極的に支持することを消極的にする一因となる。）。したがって、ここでは総合的な判断に基づき、④の整理に基づいて、事故後に設定された我が国の多様な基準値の意味を解釈することが適切だと判断した。

つづいて、この④の考え方によって我が国の法令や指針等で定められた基準値等についての解釈を行う。環境省は除去土壌の再生利用について以下のように示している。

再生利用に係る周辺住民・施設利用者及び作業員の追加被ばく線量については、1 mSv/年を超えないようにする。(中略) 破損時等を除く供用時においては、周辺住民・施設利用者に対する追加的な被ばく線量をさらに低減する観点から、放射線による障害防止のための措置を必要としないレベル(0.01 mSv/年)になるように適切な遮へい厚を確保する等の措置を講じる。

「再生資材化した除去土壌の安全な利用に係る基本的考え方, 5. 追加被ばく線量を制限するための考え方¹⁵⁾」より抜粋

除去土壌の再生利用が実施される場所は未定であり、再生利用の場として現存被ばく状況も計画被ばく状況も考えられるが、④の考え方は被ばく状況によらず物の管理として線量拘束値を用いるという考え方である。本研究では、再生利用に係る周辺住民・施設利用者の追加被ばく線量について定められた1 mSv/yは、計画被ばく状況における放射線業務従事者に対する一般的な公衆の線量拘束値の上限値と解釈する。再生利用に係る作業員の追加被ばく線量について定められた1 mSv/yは、計画被ばく状況における記録レベルの下限値に相当と解釈する。供用時の0.01mSv/yは、計画被ばく状況におけるクリアランスレベルに相当する線量拘束値と解釈する。

また、環境省は放射性物質汚染対処特措法に基づき追加被ばく線量が年間20 mSv未満である地域における除染目標として以下のように示されている。

長期的な目標として追加被ばく線量が年間1ミリシーベルト以下となること

「放射性物質汚染対処特措法の概要¹⁶⁾」より抜粋

除染の目標値として設定された年間1 mSvは、現存被ばく状況における参考レベルの下限値と解釈できる。④の考え方では汚染された物品を計画的に利用しようとした場合に線量拘束値を適用するとしているので、ただ現存しているだけの環境中の除染対象物については線量拘束値ではなく参考レベルを用いるのが適当であろう。

なお、本研究における立場とは異なるが、④ではなく①～③の考え方でも、環境省が示した「除去土壌の再生利用に係る周辺住民・施設利用者及び作業員の追加被ばく線量については、1mSv/年を超えないようにする」を解釈することは可能である。①～③の考え方の場合には、追加の1mSv/yは参考レベルの下限値となる。⑤の考え方は再生利用による追加線量を原則許容しないとしているので、これを⑤で解釈することはできない。

ここでは本研究の課題に近い案件を例題として、我が国の基準値についての解釈を試みた。その他、食品の安全基準値なども含め、④の整理に基づきいづれについても適切な解釈は可能である。

2.4 想定される多様な再生利用事例への勧告や安全基準の適用

2.2 で整理した勧告や安全基準を適用するための考え方を、想定される多様な再生利用事例へ適用することを考える。2.4.1 では一般的な再生利用事例において、放射線防護上選択することが可能な線源関連の基準値の範囲を整理する。再生利用事例としては、オフサイトにおける除去土壌の再生利用とオンサイトにおける敷地内に限定した汚染されたがれきの再生利用を想定する。2.4.2 では、適用可能な基準値の範囲内から合理的な防護を実施する上で適切と考えられる基準値の選定を行う。基準値の選定を行う上ではステークホルダーの関与も考慮する。なお、再生利用を実施する環境として、福島第一原子力発電所事故後の日本と同程度の汚染が生じた環境を想定する。その環境中における再生利用は、2.3 の検討に基づいて④の考え方により実施する。また、2.2 で示した勧告や安全基準を適用するための考え方はルールの上での管理なので、実際に公衆の防護が適切に行われているかの確認方法についても検討する。

2.4.1 再生利用事例における基準値の範囲の整理

初めに、オフサイトにおける除去土壌の再生利用について放射線防護上選択することが可能な線源関連の基準値の範囲の検討を行う。再生利用を実施する環境として、1F 事故後の日本と同程度の汚染が生じた環境を想定した。その環境中における再生利用は、2.3 の検討に基づいて④の考え方により実施する。④の考え方における基準値の範囲を示した表 2-2 に沿って再生利用に至るまでの各段階における基準値の範囲を図 2-2 に示す。

基準値を設定する段階として、「汚染した物品を集積・貯蔵する段階」、「再生利用物を造成している段階」、「再生利用物完成後の段階」を設定した。

「汚染した物品を集積・貯蔵する段階」では、集積・貯蔵に関する作業による職業被ばくと公衆被ばくについて基準値の範囲を検討する。この段階には集積、貯蔵に至るまでの作業（除染、運搬等）の管理も含む。この段階では表 2-2 に沿って公衆被ばくについては線源関連の管理として 0.01-5 mSv/y の線量拘束値、職業被ばくについては線源関連の管理として 0.01-50 mSv/y の線量拘束値が設定可能である。

「再生利用物を造成している段階」では、再生利用に関する作業による職業被ばくと公衆被ばくについて基準値の範囲を検討する。この時、再生利用が実施される場所として現存被ばく状況の場と計画被ばく状況の場の両方を想定する。この段階には貯蔵施設からの運搬作業に関する被ばくの管理も含む。この段階では表 2-2 に沿って公衆被ばくについては線源関連の管理として 0.01-5 mSv/y の線量拘束値、職業被ばくについては線源関連の管理として 0.01-50 mSv/y の線量拘束値が設定可能である。

「再生利用物完成後の段階」では、完成した再生利用物を一般に開放して、それらを利用することによる公衆被ばくについて基準値の範囲を検討する。この段階についても、再生利

用が実施される場所として現存被ばく状況の場と計画被ばく状況の場の両方を想定する。この段階では、再生利用物を一般に開放するので線源としての扱いではなくする必要があり。クリアランスレベル以下に相当する 0.01-0.1mSv/y の線量拘束値が設定可能である。

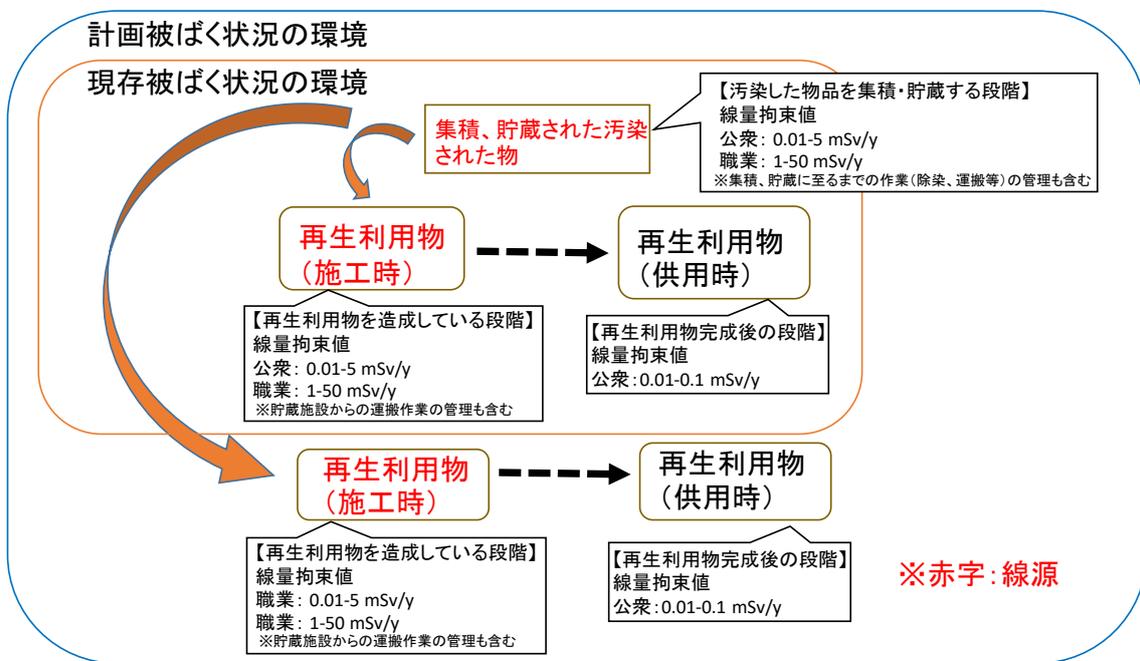


図 2-2 表 2-2 に基づいたオフサイトでの再生利用に関する線源関連の基準値の範囲

次に、オンサイトにおける敷地内に限定した汚染されたがれきの再生利用について放射線防護上選択することが可能な線源関連の基準値の範囲の検討を行う。オンサイトは現存被ばく状況にあると想定し、作業者はすべて線量管理がされていると仮定する。オンサイトにおける再生利用では、職業被ばくの防護は線量管理がされている作業者に対して行われ、公衆被ばくの防護はサイト内の非管理区域で働く人（従前からの整理に基づき公衆構成員とみなす）、サイト内へ訪れる見学者、サイト外の敷地境界付近にいる公衆を対象に行う。表 2-2 沿って再生利用に至るまでの各段階における基準値の範囲を図 2-3 に示す。

基準値を設定する段階として、「汚染した物品を集積する段階」、「再生利用物を造成している段階」、「再生利用物完成後の段階」を設定した。

「汚染した物品を集積する段階」では、集積に関する作業による職業被ばくと公衆被ばくについて基準値の範囲を検討する。この段階には集積に至るまでの作業（除染、運搬等）の管理も含む。この段階では表 2-2 に沿って公衆被ばくについては線源関連の管理として 0.01-5 mSv/y の線量拘束値、職業被ばくについては線源関連の管理として 0.01-50 mSv/y の線量拘束値が設定可能である。

「再生利用物を造成している段階」では、再生利用に関する作業による職業被ばくと公衆の被ばくについて基準値の範囲を検討する。この段階では表 2-2 に沿って公衆被ばくについ

では線源関連の管理として 0.01-5 mSv/y の線量拘束値、職業被ばくについては線源関連の管理として 0.01-50 mSv/y の線量拘束値が設定可能である。

「再生利用物完成後の段階」では、サイト内にて使用される再生利用物からの被ばくについて作業員や公衆の防護に用いる基準値の範囲を検討する。この段階では表 2-2 に沿って公衆被ばくについては線源関連の管理として 0.01-5mSv/y の線量拘束値、職業被ばくについては線源関連の管理として 0.01-50mSv/y の線量拘束値が設定可能である。

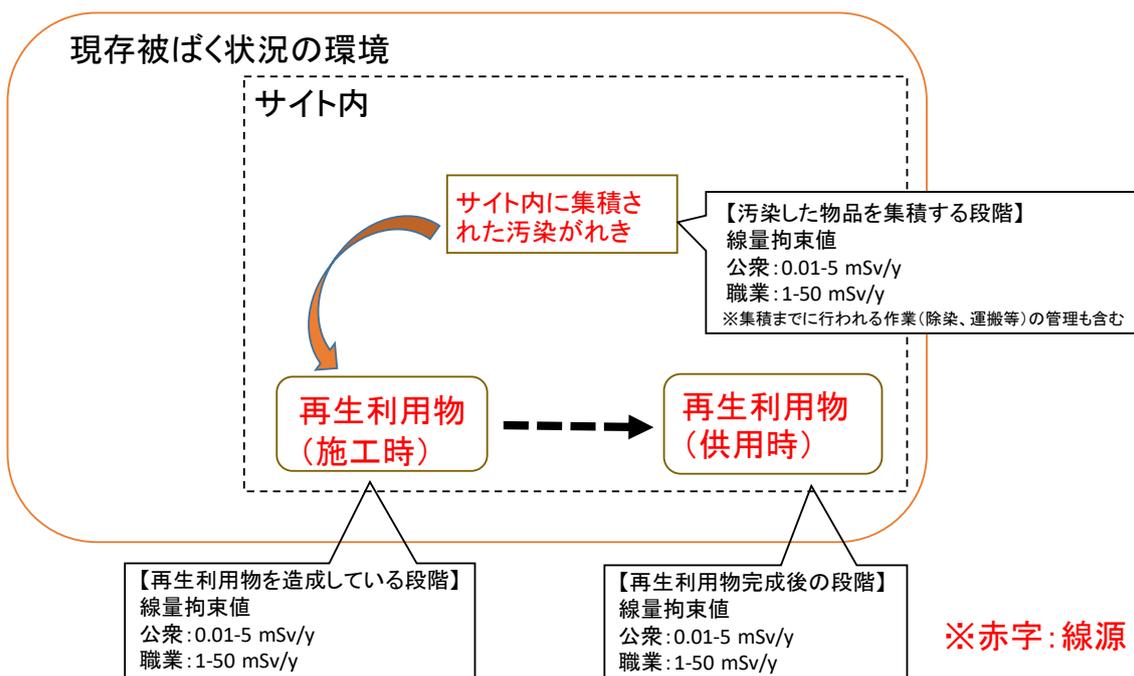


図 2-3 表 2-2 に基づいたオンサイトでの再生利用に関する線源関連の基準値の範囲

2.4.2 再生利用事例における具体的な基準値の提案とその根拠

2.41 で示した基準値の範囲から合理的な防護を行う上での具体的な基準値の選定を行う。基準値の選定には様々な主張があることを理解しつつ、本研究において値を選定するに至る根拠を記述する。再生利用を実施する環境として、1F 事故後の日本と同程度の汚染が生じた環境を想定した。その環境中における再生利用は、2.3 の検討に基づいて④の考え方により実施する。

基準値の設定の前に、職業被ばくにおいて管理の対象とする放射線業務に起因する追加線量の扱いについて整理する。計画被ばく状況における職業被ばくでは、放射線業務に起因する追加線量に対して線量限度を設定しており、外部被ばく線量を評価する際に作業員の個人線量計からはバックグラウンド線量が差し引かれている。職業被ばくの扱いを計画被ばく状況と現存被ばく状況で整合をとるうえでは、現存被ばく状況においても同様に放射

線業務に起因する追加線量に対して職業被ばくの線量限度を設定する方が適切である可能性がある。そこで本研究では、現存被ばく状況においても放射線業務に起因する追加線量に対して線量限度を設定する考え方を前提として基準値の選定を行う。

はじめにオフサイトにおける除去土壌の再生利用について、各段階の基準値の選定を行う。各段階において選定された基準値は図 2-4 に示す。オフサイトにおける再生利用は、再生資材として社会に出た物品に関する基準値が被ばく状況によって変化しないことが特徴である。

「汚染した物品を集積・貯蔵する段階」および「再生利用物を造成している段階」の再生利用作業者の基準値として、表 2-2 おける職業被ばくの 100 mSv/5y から導かれる年間の上限值である 20mSv/y を設定した。再生利用作業者の職業被ばくを 20 mSv/y の線源関連の基準値で管理するということは、再生利用作業者の被ばく線量が 20 mSv/y 以下になるように線源に対して線量拘束値を設定するということである。選定に至る根拠を以下に示す。

再生利用作業者の職業被ばくに対する線量拘束値は表 2-2 より 1 mSv/y と 20 mSv/y と 50 mSv/y が選択可能である。ここで、値が離散的であるのは既存の ICRP の勧告で提示された値に基づいて表 2-2 を整理したこと起因する。再生利用を目的とした作業に専門的に従事する職業人に線量拘束値として 1 mSv/y を設定すると、20 mSv/y の線量限度をもつ職業人に対して 1 mSv/y の被ばくが生じる作業のみが許容されることになり、他の整理とのバランスを崩すことになる。また、例えば 50 mSv/y については、緊急時被ばく状況から移行した現存被ばく状況を考える場合、緊急時被ばく状況の職業被ばくの参考レベル（緊急時被ばく状況における職業被ばくは 20~100mSv/y の参考レベルで管理することが ICRP で勧告されている¹⁾）を時間の経過にしたがって下げていく過程で現存被ばく状況下にある環境での線量限度に 20 mSv/y より大きな値を設定することは、防護上適切ではないケースが生じる可能性がある。

本研究では放射線防護のための線量拘束値の基準値として 20 mSv/y を設定したが、個別の再生利用事例における実際の管理においては、作業の実態に合わせて 20 mSv/y 以下の線量拘束値を設定することも、最適化のプロセスを経て可能であることはいうまでもない。線量限度に対して極めて小さい線量しか被ばくしないことが明らかな再生利用作業者については、一般的な職業被ばくに求められる管理ではなく、作業内容に応じた合理的な防護の実施を提案する。例えば、本研究で扱う除去土壌の再生利用事例のなかで、オフサイトにおいて実施するような場合、再生利用作業者の職業被ばくに対する線量拘束値として公衆被ばくの上限值と同値の 1 mSv/y を設定することも当然にあり得る。

「汚染した物品を集積・貯蔵する段階」および「再生利用物を造成している段階」の公衆の基準値は、表 2-2 における一般公衆の上限值である 1 mSv/y を設定した。公衆に対する線量拘束値は表 2-2 から 0.01 mSv/y、<0.1 mSv/y、0.3 mSv/y、1 mSv/y、5 mSv/y が選択可能である。ここでの最大値となる 5 mSv/y は、「特殊な状況においては、5 年間にわたる平均が年あたり 1 mSv を超えなければ、単一年にこれよりも高い実効線量が許されることもあり

うる」とのICRP勧告に基づく。再生利用の施工期間は1年を超えて続く可能性も考えられるので、単一年の防護にのみ適用できるこの5 mSv/yは不適切である。したがって0.01 mSv/yから1 mSv/yの範囲からの選択になるが、前述2.3で用いたアプローチ、即ち「現存被ばく状況にある環境の修復を考えるべき段階で、事故の以前から環境に古くから存在する自然の放射線被ばくの変動レベルの1～2桁程度も低い極低レベルの物品を対象として扱う⑤は、国際合意に基づいて国際社会が歴史的に築いてきた放射線防護の枠組みでは適切に説明ができない。」と、対象とする期間が工程中で限定的である特殊な状況から、ここでは総合的な判断に基づき、④の整理に基づいて、この範囲の最大値である1 mSv/yの線量拘束値を用いる。このことは、施工時において汚染された物を線源として扱うという意味と同義である。この整理に基づき、公衆の防護が適切に行われているかの現場での判断は2.4.4に示す方法により確認する。

「再生利用物の完成後の段階」では、再生利用物からの被ばく線量が十分に小さいことを確認した上で、長期的な視点で線源としての管理の体系から外すことが求められよう。ICRPは、線源が小さな個人線量しか与えない場合（1年あたり10 μSvのオーダー）は、その線源を管理から外す（クリアランス）ことができること示している。本研究で扱う事例はこのクリアランスとは本質的には異なるが、我が国の経験した環境汚染のレベルと現場への適用性と実現性の総合的な観点から、供用時の線源関連の基準値として日本が採用しているクリアランスレベルに相当する10 μSv/yの線量拘束値の適用を提案する。

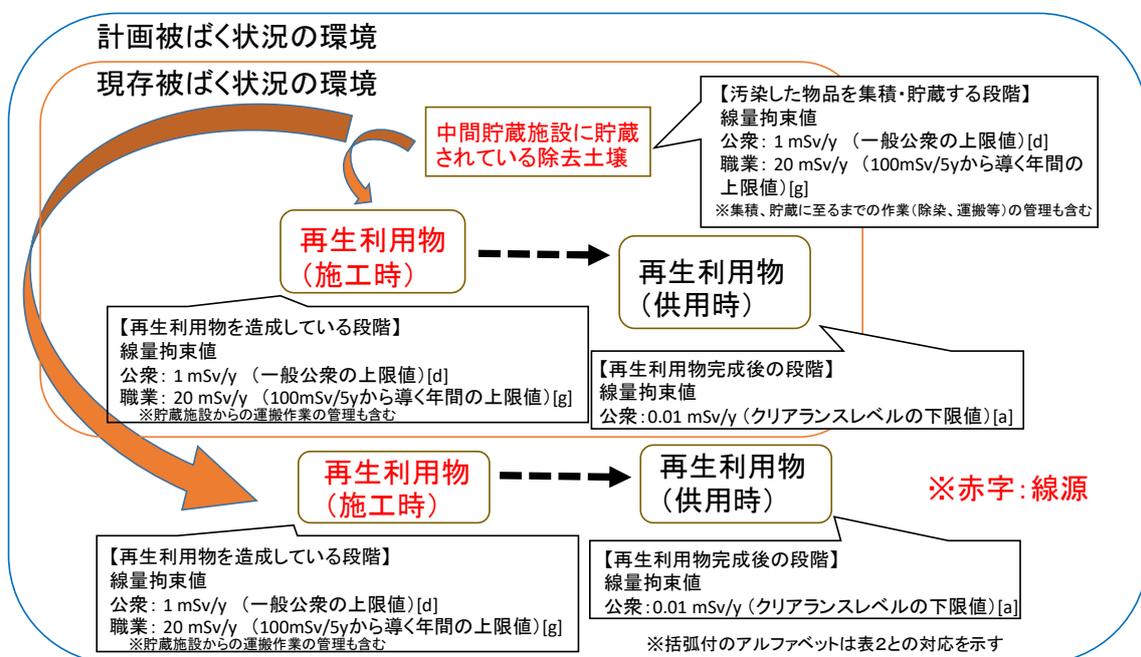


図 2-4 オフサイトでの再生利用に関する具体的な基準値の提案

※[]付のアルファベットは表 2-2 との対応を示す。

続いてオンサイトにおける敷地内に限定した汚染されたがれきの再生利用について、各段階の基準値の選定を行う。各段階において選定された基準値を図 2-5 に示す。

「汚染した物品を集積・貯蔵する段階」と「再生利用物を造成している段階」の再生利用作業者の基準値として、表 2-2 における職業被ばくの 100 mSv/5y から導かれる年間の上限値である 20 mSv/y を設定した。この値の設定に至る根拠は、前述のオフサイトにおける「汚染した物品を集積・貯蔵する段階」および「再生利用物を造成している段階」の再生利用作業者の基準値の選定プロセスと同じである。

「再生利用物完成後の段階」の再生利用作業者の基準値については、これまでの ICRP の勧告に記述が無く、表 2-2 に限定されない新しい考え方の整理に基づく¹⁷。我が国の 1F 事故後の経験では、現存被ばく状況の管理区域内における作業者は全員が放射線業務従事者として扱われている。管理区域内において再生利用作業以外の業務（例えば廃炉作業）に従事する放射線業務従事者については、再生利用物の存在に起因した追加被ばくを制限する目的で、本来の業務に充てられるべき作業時間を過度に制限する管理の方法は合理的とはいえない。すでにサイト内での作業環境線量が上昇している状態での防護戦略になるからである。ここでは、再生利用物からの追加被ばくの線量が作業環境中の空間線量率を大きく上昇させない程度の基準値を設定する方針を提案する。その値として、線量限度 20 mSv/y の 10% に相当する 2 mSv/y を再生利用のための線量拘束値として提案する。10% であれば、線量限度の枠を大きく占有することなく、かつ、1F サイト内で実施されている電離箱によるモニタリングの結果から算出される最も作業環境線量が低い区域と同等の線量レベルになっていることをその根拠とする。現場への適用プロセスの詳細を 3.2 に記述する。

「汚染した物品を集積・貯蔵する段階」、「再生利用物を造成している段階」および「再生利用物完成後の段階」の公衆の基準値として、表 2-2 における一般公衆の線量拘束値の上限値である 1mSv/y を設定した。この値の設定に至る根拠は、前述のオフサイトにおける「汚染した物品を集積・貯蔵する段階」および「再生利用物を造成している段階」の公衆の基準値の選定プロセスと同じである。

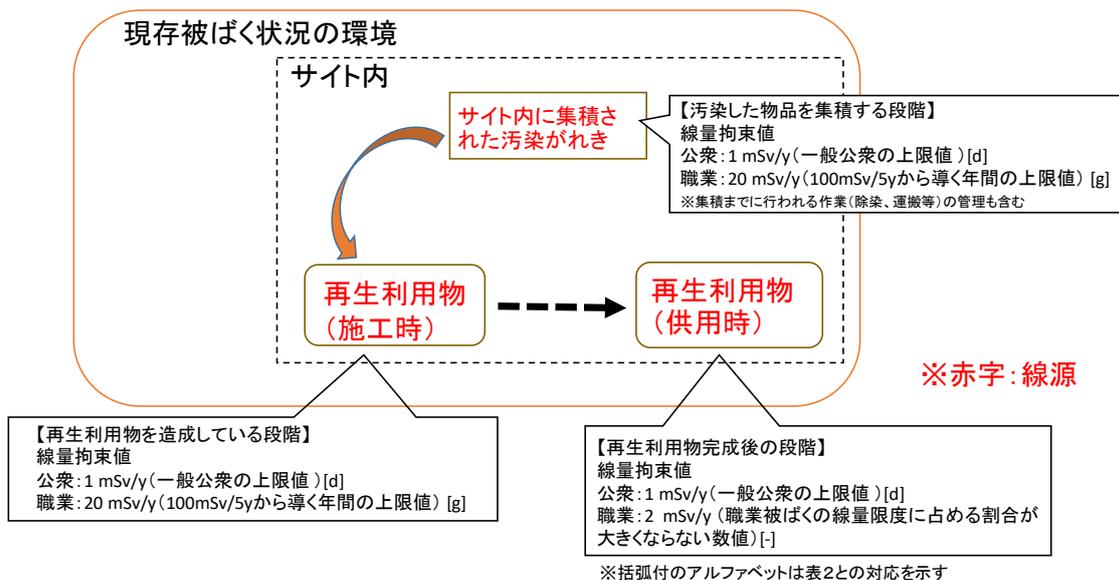


図 2-5 オンサイトでの再生利用に関する具体的な基準値の提案

※[]付のアルファベットは表 2-2 との対応を示す。

2.4.3 ステークホルダー関与に関する様々な意見に基づく基準値の選定根拠

2.4.2 で選定した基準値はあくまでも本研究が考える合理的な基準値であるので、その基準値についてステークホルダーから様々な意見がでることが考えられる。特に、普段の生活の中で一般公衆が影響を受けるオフサイトにおける再生利用について、ステークホルダーから様々な意見が出ることが想定される。そこで、想定されるステークホルダーからの意見と 2.4.2 で示した本研究における選定根拠とを比較し放射線防護上の合理性の検討を行う。

一つ目のステークホルダーからの意見として、「図 2-4 の汚染した物品を集積・貯蔵する段階と再生利用物を造成している段階の公衆被ばくに対して線量拘束値の上限値を設定してよいのか」という意見が考えられる。この意見は、計画被ばく状況において実施される廃棄物の処分等に線量拘束値を設定する際に 0.3 mSv/y が用いられていることから一般的に想起されると考えられる。しかし、本研究で示す考え方に沿ったオフサイトにおける再生利用を想定した場合、再生利用を実施する場合は現存被ばく状況と計画被ばく状況の可能性があり、現存被ばく状況を考えた場合、低い追加線量はバックグラウンド線量に隠れてしまいその線量を線量拘束値で管理することにほとんど意味がない。そこで現存被ばく状況において再生利用を実施する場合は、追加線量として 1 mSv/y を設定し、その上で防護が適切に行われているか 2.4.4 に示す現場の評価により確認する。ステークホルダーの理解を得ながら再生利用を実施する上では、どちらの被ばく状況においても統一的な管理とすることが重要であると考えられるので計画被ばく状況についても同様とする。なお、2.4.4 の確認があるので、実際には複数の線源からの影響を考慮した防護となっている。

二つ目のステークホルダーからの意見として、「再生利用物を造成している段階において公衆の被ばくに対して線量拘束値の上限値を設定しているが、計画被ばく状況でクリアランスレベルを超える物品を扱ってよいのか」という意見が考えられる。これは、線源を管理から外す（クリアランス）際にクリアランスレベルとして 0.01 mSv/y が利用されているので、意見として挙がるのが考えられる。しかし、本研究の考え方では再生利用物を造成している段階では再生資材を線源として管理しているのでクリアランスレベル以下である必要はない。線源として線量拘束値の上限値を設定して管理している。供用時に管理から外す際は、クリアランスレベル以下であることを確認する。

三つ目のステークホルダーからの意見として、「施工時の職業被ばくについて、敷地が区切られているわけではなく、公衆とほぼ同じ活動範囲において行われている作業の作業員に対して 20 mSv/y を設定することは、公衆の防護との間で整合が取れないのではないか」という意見が考えられる。図 2-4 では計画的な線源の利用についての職業被ばくの線量拘束値として上限値の 20 mSv/y を設定している。しかし、ICRP Publ.103¹ においては職業被ばくの線量拘束値として「1 mSv より高いが 20 mSv を超えない」と示されている。大きな被ばくが想定されない職業被ばくについては低い値を設定することも防護上可能である。したがって、線量拘束値の上限値として 20 mSv/y を設定しているが、ステークホルダーとの議論の中で 20 mSv/y より低い値が設定される可能性も考えられる。被ばく線量が低くなることが予想される作業員の線量拘束値として、例えば記録レベルの下限值が考えられる。

2.4.4 公衆の防護が適切に行われていることの確認方法の提案

ここまでで示した公衆を対象とした放射線防護の戦略が、被ばくを伴う現場で適切に履行されているかの具体的な確認方法について、ここで検討する。

ここで想定される公衆として、オフサイトにおける再生利用を実施する場合には住民（施工時）、オンサイトにおける再生利用を実施する場合にはサイト内への一時立入者（見学者など）、サイト外の公衆、サイト内の非管理区域内で働く人（従業員など）が考えられる。オフサイトにおける再生利用施工時の住民に関しては、再生利用を実施する環境が計画被ばく状況であれば、その環境が受ける原子炉施設等の稼働の影響と再生利用による影響の和が、線量拘束値以下であることを確認する。見学者などに関して、防護が適切に行われているかの判断は一般の原子力・放射線施設で実施されている方法に準拠し、一時的な貸し出しによる個人線量計の読み取り結果に基づけばよい。サイト外の公衆に関して、防護が適切に行われていることの判断はサイト境界における空間線量率等の環境モニタリングに基づくことになる。

オフサイト（現存被ばく状況）における再生利用を実施する場合の施工時の住民、およびサイト内の非管理区域内で働く人の防護に関しては、バックグラウンド線量と再生利用による追加線量を分けずに、被ばく線量の総量に着目した管理の実施を提案する。ここでバック

グラウンド線量と表現している線量は、放射線災害後の現存被ばく状況の環境における空間線量のことである。バックグラウンド線量が大きく変動する現存被ばく状況において、バックグラウンド線量と追加線量を厳密に分離することは低線量領域では容易ではないので、線量の総量で管理することが合理的であると考えられる。

防護が適切に実施されていることを担保するための被ばく線量の総量の基準値は、再生利用による被ばくを計画被ばくとして管理する考え方（④の考え方）に沿って、表 2-2 より選択する。バックグラウンド線量を含めていることを考慮すると、1mSv/y もしくは 5mSv/y を選択できる可能性がある。また、ここで想定しているのは現存被ばく状況における再生利用であることを考慮すると、現存被ばく状況において介入を正当化できない線量レベルの 10mSv/y（表 2-1）という選択肢も考えられなくはない。現存被ばく状況の環境に合わせた基準値の選択が必要となる。

被ばく線量の総量を施工時において評価する際は、外部被ばくと内部被ばくを対象とする。外部被ばくは環境モニタリングによる空間線量の測定で行う。内部被ばくは、施工時に巻き上がる粉塵吸入による内部被ばくの影響度を事前評価し、その影響度を事前に確認する。影響が小さくない可能性がある場合は現場において空気中の粉塵量を測定し内部被ばく線量を評価するか、現場にて内部被ばく線量が大きくなるような対策を実施する。供用時への移行に際して再生利用物が露出するような用途には使われていないことを確認し、供用時においては、外部被ばくのみを対象とする。

2.5 第 2 章のまとめ

第 2 章では、現存被ばく状況下にある公衆の放射線防護に用いる参考レベルの考え方の整理を行った。現状ではその具体的な現場適用の方法について国際的なコンセンサスはなく、複数の解釈が可能となっていたが、ここでは放射性物質の環境拡散で発生した汚染物品等の再生利用を想定するケースでの、放射線防護の考え方の多様性を 5 通りで整理した。この 5 つの整理は、「現存被ばく状況における公衆の防護には参考レベルを用いる」という 3 通りの考え方（①②③）と、「現存被ばく状況においても計画的に線源を扱う場合は、計画被ばくの考え方を適用し線量限度および線量拘束値を用いる」という 2 通りの考え方（④⑤）の、2 群に分類される。前者は参考レベルの設定対象となる線源の範囲をどのように定義するか、で 3 つに区分され、後者は、再生利用による追加の被ばく線量を防護体系の中の被ばくとして容認するか否か、で 2 つに区分される。放射性物質で汚染した物品の再生利用を想定した防護のための線量規準の可能性を検討するために、既存の ICRP の勧告や IAEA の安全基準を精査し、線源関連の管理に用いられる基準値を被ばく状況と被ばくのカテゴリーに応じて表 2-2 として整理した。

現存被ばく状況の環境汚染の程度に応じた①～⑤の考え方の現場への適用性について検討した。放射線災害が発生した国においては、国内には同時に複数の被ばく状況が存在する

可能性があるが、本研究では被ばくリスクのマネジメントに関する公平性の観点から、ひとつの国家においてはひとつの共通な防護基準を適用する方針が望ましいと考えた。実際の環境汚染の程度に応じて、それ以前の元の状態のときに適用されていた放射線防護の方針をどの程度大きく変更する必要があるかどうかの観点から、5つの防護の考えから適切なものを選定することとした。ここではその変更の要否に関する判断基準として、放射線災害により発生した環境汚染による公衆の追加被ばく線量が 1mSv/y を超えるときとした。この 1mSv/y は ICRP publ.103 において防護対策が必要な状況として示された現存被ばく状況の参考レベルの下限值であり、また、かつて利用されていた介入免除レベル (ICRP Publ.82)⁹ も 1mSv/y でもある。

事例研究として、福島第一原子力発電所(1F)事故の後に我が国の法令や指針で示された、除染の実施や除去土壌の再生利用に関する防護の基準値について、本研究で提案した整理に沿った解釈を試みた。1F 事故後の我が国が経験した環境汚染のレベルと、これまでに積み上げてきた放射線防護の歴史的な整理を総合的に考慮して、考え方④に基づき、対象となる環境がいかなる被ばく状況であっても、検討の対象となる線源を計画的に扱う場合には、計画被ばくに対応した防護の方針を適用するのが適切であると判断した。この整理に基づき、1F 事故の後の各種基準値が矛盾なく解釈できることを確認することができた。

本研究での防護の考え方の整理を、想定される多様な再生利用事例へ適用することを検討した。再生利用の事例として、ここではオフサイトにおける除去土壌の再生利用とオンサイトにおける敷地内に使用を限定した汚染がれきの再生利用の2つのケースを想定した。再生利用を実施する現場として、1F 事故後に我が国が経験した線量レベルの汚染環境を仮定し、具体的には考え方④について考察した。2つの再生利用の事例において、再生利用に至るまでの各段階における公衆と再生利用作業者に関して適用できる基準値の範囲を考察し、想定されるステークホルダーの意見も考慮しつつ、実際に適用する上で合理的とみなされる値を提案した。また、定められた基準値の運用に関して、公衆の防護の履行が適切に行われていることの現場での確認方法についても提案した。

2章の成果により放射性物質で汚染した物品等の再生利用について、放射線防護上の考え方の適用方法を国際的な防護体系の枠組みのなかで具体的かつ系統的に示すことができた。これにより、原子力災害後の環境復旧と復興に向けて、考慮される選択肢のひとつとしての汚染物品等の再生利用の可能性を、放射線防護の観点から議論するために必要となる情報を提供できるようになった。

第2章の参考文献

- 1 International Commission on Radiological Protection, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Annals of the ICRP, Vol.37, No.2-4, 2007
- 2 環境省・量子科学技術研究開発機構. 放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料 上巻 放射線の基礎知識と健康影響 平成30年度版.
https://www.env.go.jp/chemi/rhm/kisoshiryo/pdf_h30/2018tk1whole.pdf
- 3 International Commission on Radiological Protection, Scope of radiological protection control measures, ICRP Publication 104, Annals of the ICRP, 37, No.5, 2007
- 4 European Commission, Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Atomic Energy Agency, International Labour Office, OECD Nuclear Energy Agency, Pan American Health Organization, United Nations Environment Programme, World Health Organization, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standard Series No. GSR Part 3, 2014
- 5 International Commission on Radiological Protection, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Annals of the ICRP, Vol.21, No.1-3, 1991
- 6 International Commission on Radiological Protection, Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste, ICRP Publication 81, Annals of the ICRP, Vol.28, No.4, 1998
- 7 International Atomic Energy Agency, Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No.SSR-5, 2011
- 8 International Commission on Radiological Protection, General Principles for the Radiation Protection of Workers, ICRP Publication 75, Annals of the ICRP, Vol.27, No.1, 1997
- 9 International Commission on Radiological Protection, Protection of the Public in Situations of Prolonged Radiation Exposure, ICRP Publication 82, Annals of the ICRP, Vol.29, No.1-2, 1999
- 10 International Commission on Radiological Protection, Application of the Commission's Recommendations to the Protection of People Living in Long-term Contaminated Areas after a Nuclear Accident or a Radiation Emergency, ICRP Publication 111, Annals of the ICRP, Vol.39, No.3, 2009
- 11 International Atomic Energy Agency, Remediation Process for Areas Affected by Past Activities and Accidents, IAEA Safety Standards Series No.WS-G-3.1, 2007
- 12 International Atomic Energy Agency, Revision of Safety Guide WS-G-3.1 on

Remediation Process for Areas Affected by Past Activities and Accidents, DS468 Step8, 2016

- 13 International Commission on Radiological Protection, Ethical Foundations of the System of Radiological Protection, ICRP Publication 138, Annals of the ICRP, Vol.47, No.1, 2018
- 14 環境省. 放射性物質汚染対策特措法に基づく汚染状況重点調査地域の指定について（お知らせ）. 平成 24 年 2 月 24 日 <https://www.env.go.jp/press/press.php?serial=14879>
- 15 環境省. 再生資材化した除去土壌の安全な利用に係る基本的考え方について. 平成 28 年 6 月 30 日.
http://josen.env.go.jp/chukanchozou/facility/effort/investigative_commission/pdf/investigative_commission_160630.pdf
- 16 環境省. 放射性物質汚染対処特措法の概要.
<http://josen.env.go.jp/about/tokusohou/summary.html>
- 17 T. Shimada, K. Miwa, S. Takeda. Study on restricted use of contaminated rubble on Fukushima Daiichi NPS site (1) Estimation of reference radiocesium concentration for recycling materials, Progress in Nuclear Science and Technology, Vol. 6, 203-207 (2019)

第3章 放射性防護上の考え方の現実的な適用における考察

第3章では、第2章で整理した放射線防護上の考え方に沿った再生利用の実施を想定した際の、作業や公衆、環境への影響について検討する。

第2章では規制科学的な観点からのアプローチで、放射性物質で汚染した物品の再生利用に関する線源関連の管理の考え方の整理を実施した。第2章で検討した防護の対象は、放射性物質で汚染した物品の再生利用を想定した際に予想される被ばくであり、現実の環境中で生じている被ばくではない。

第3章では、第2章で整理を行った線源関連の管理の考え方を念頭におき、放射性物質で汚染した物品の再生利用を想定した際の被ばく線量を2つのケーススタディとして評価する。ここで、具体的な再生利用事例を想定して被ばく線量評価をすることになるが、被ばく線量を評価する上では、想定される様々な被ばく経路における現象を模擬したモデル等が必要となる。特に、規制科学上、既往研究において想定されていなかった現象による被ばくの評価が必要となる場合もある。

そこで第3章では、具体的な再生利用事例における被ばく線量評価を実施するため、環境システム学的な観点を規制科学の領域に取り込みつつ、適用範囲を限定せずに、一般的な環境における再生利用にかかる被ばくの線量を、「社会環境、日常生活の態様等を考慮して標準的な人」¹を対象として精度よく、合理的かつ保守的に評価できるようにする。

再生利用を想定する物品は、2011年の福島第一原子力発電所(1F)事故により発生した土壌やがれきとする。これらは、1F事故による発生量が多い^{2,3}こと、および資源としての価値がある^{2,3}ことから選定した。ここでがれきとは震災および津波により発生したコンクリートや金属のことを指す。想定する再生利用のケースとして、福島県内に一時保管されている除去土壌(除染作業により発生した放射性物質で汚染した土壌)を、海面埋立地を造成する際の資材に再生利用する場合と、1F敷地内に一時保管されている放射性物質で汚染したがれきを1F敷地内に限定して再生利用する場合を想定する。

3.1 オフサイトにおける除去土壌の再生利用の科学的可能性の検討

福島第一原子力発電所事故(1F)後の環境中の除染により発生した土壌(除去土壌)を本研究で提案した放射線防護の考え方に沿って再生利用した際の被ばく線量評価を実施し、作業や公衆への影響を確認する。除去土壌の再生利用に関する放射線防護には、2.3の検討より④の考え方(計画的に実施される再生利用については、線源関連の管理は再生利用を実施する場の被ばく状況にかかわらず計画被ばくの考え方を適用する)を適用する。除去土壌の再生利用を実施する場所は、④の考え方の適用性を確認する意味で現存被ばく状況と計画被ばく状況を含むと考えられる行政区分内とする。

除去土壌を処理した再生資材を海面埋立地造成の資材として利用した際の、作業員や周辺住民に与える被ばく線量を評価するため、評価経路、パラメーターを設定し、再生資材に含まれる Cs-134、Cs-137、全 Cs (=Cs-134+Cs-137) について、単位濃度 (1 Bq/g) あたりの被ばく線量を評価した。放射性セシウムは、1F 事故により環境中に放出された量が多く、また核種としての特徴 (半減期、ガンマ線放出核種、分配係数) から、再生利用に関する被ばく評価上、重要な核種である。

除去土壌の物量低減という観点では、造成に多量の再生資材を要する海面埋立は有力な用途のひとつであると考えられる。

再生資材の利用部材としては、埋立材及び護岸の中詰材を想定した (図 3.1-1)。埋立材は、海面に造成された護岸で囲まれた範囲に投入し埋立地を造成する際に利用する資材である。中詰材は護岸を造成する際に、護岸の強度を増すため護岸構造物 (ケーソン、鋼矢板、セル等) の内部に投入する資材である。

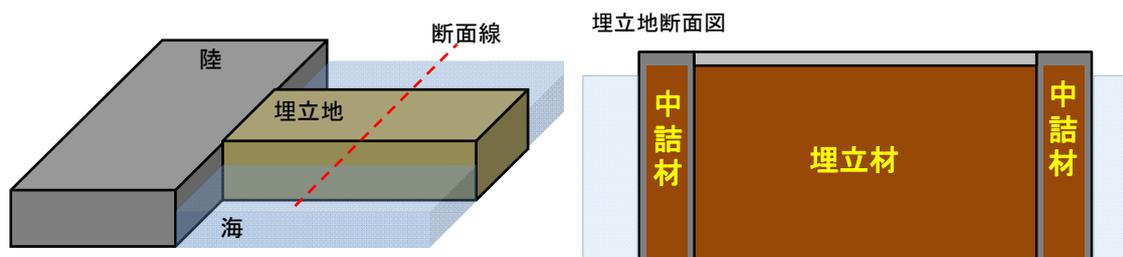


図 3.1-1 埋立地概念図 (左：埋立地俯瞰図、右：埋立地断面図)

埋立地完成後の土地利用としては、土地の利用用途に対して管理主体や責任体制が明確になっている公共事業等で、人為的な形質変更が想定されない用途とし、かつ基礎工事のための人為的な形質変更が伴う用途の場合は、再生資材に触らない基礎工事で足る用途に限定することとした。上記の条件により、供用時の公衆の無用な被ばくを防ぐことができる。

海面埋立地の一般的な利用用途として、工業用地、商業用地、緑地公園、コンテナターミナル、空港用地等が挙げられるが、上記の条件を満たす完成後の利用用途として「緑地公園」と「コンテナターミナル」を想定した (図 3.1-2)。緑地公園は埋立材の上に植栽に必要な覆土を施し、草本を植える。コンテナターミナルは埋立材の上に路盤材と舗装材を施し、コンテナターミナルとして必要な強度を確保する。

以上より、再生資材を海面埋立に用いた際の作業員・公衆に対する被ばく線量評価は、再生資材の利用部材 (埋立材と中詰材) と利用用途 (緑地公園とコンテナターミナル) を想定した 4 ケースに対して実施した。

既存の放射線に関する安全評価としてはクリアランスレベル評価^{1,4}や原子炉施設等の周辺の公衆に対する線量評価⁵、低レベル放射性廃棄物の埋設処分に係る安全評価⁶などがあ

る。除去土壌の海面埋立への再生利用に係る被ばく線量評価は本研究により初めて実施されるが、環境中へ移行した核種からの被ばく線量を評価する点、および管理から外れた状態の物に関する安全評価という点でクリアランスレベル評価とシナリオの類似性が高い。クリアランスレベルとは、「自然界の放射線レベルに比較して十分小さく、また、人の健康に対するリスクが無視できる線量」である。IAEA-TECDOC-855⁴では各核種のクリアランスレベルを評価している。また諸外国においてもクリアランスレベルの検討が行われており、一部の国ではクリアランスレベルが制度化されている¹。日本においても、IAEA 技術文書「IAEA-TECDOC-855⁴」を参考にしながら日本の日常生活の態様、社会環境等を基本とし、評価経路および評価パラメーターの選定を行い、クリアランスレベル評価を実施している¹。そこで、本研究では既往のクリアランスレベル評価¹を参考にした被ばく評価を実施する。被ばく評価にはクリアランスレベル評価コード PASCLR2^{7,8}を用いる。当該コードは、原子炉施設やウラン取扱施設等を対象に、クリアランス後の産業廃棄物としての埋設処分と再生材としての利用のシナリオに関する作業者と公衆の被ばく経路を網羅した線量評価が可能なコードであり、原子炉等規制法等のクリアランスレベル、放射性物質汚染対処特措法における濃度規準等を評価した実績を有する⁹。

海面埋立では、施工時に土砂の一部が海洋に流出する可能性がある。被ばく評価に用いるクリアランスレベル評価コード PASCLR2⁷においては、溶存した核種のみを考慮しているが、安全評価においては土粒子に付着した核種の影響も無視できない。そこで溶存した核種に加えて粒子に付着した核種の海洋中での移行を考慮した被ばく線量評価ができるようにコードの改良を行い評価の高度化を図った。

当該評価に用いる外部被ばく線量換算係数は、原子力施設等の遮蔽計算で実績のある MCNP5 コード¹⁰を使用して算出した。

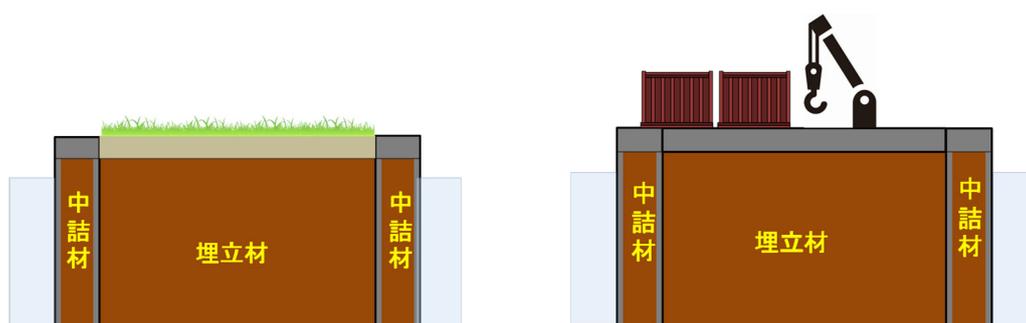


図 3.1-2 埋立地の利用用途（左：緑地公園、右コンテナターミナル）

3.1.1 評価経路

除去土壌の海面埋立地への再生利用に関する被ばく評価の対象とする評価経路の選定を行う。本研究の被ばく評価は、3.1 に示した通りクリアランスレベル評価¹を参考としつつ、

海面埋立地という用途に適した評価となるように評価経路や評価モデルの拡張を行った上で行う。従って評価経路の選定もクリアランスレベル評価¹を参考に行う。

クリアランスレベル評価^{1,7}の埋設処分シナリオでは、クリアランスされた廃棄物を埋設処分することを想定した評価経路を設定し被ばく評価を実施している。埋設処分シナリオは、操業に係る評価経路、跡地利用に係る評価経路、地下水移行に係る評価経路により構成されており、これらの評価経路により埋設処分に係る作業や埋設処分後の跡地利用、処分場への降雨浸透による核種の溶出による被ばくを評価している。操業に係る評価経路では、廃棄物処分場の建設を想定し、積込・運搬作業および埋立作業に従事する作業者の被ばくと周辺居住者の被ばくを評価対象としている。跡地利用に係る評価経路では、一般開放された処分場跡地にて建設・居住、農耕作業、牧畜作業を実施することを想定している。地下水移行に係る評価経路では、内陸に処分場を建設する場合と海水面埋立処分とする場合に分けて評価経路を設定している。内陸処分の場合は処分場から溶出した核種が井戸水と河川に流入することを想定した評価経路となっており、海水面埋立処分の場合は海洋へ流入することを想定した評価経路となっている。埋設処分シナリオでは、クリアランスされた廃棄物を埋設処分する際に現実的に起こりうると想定される評価経路を網羅的に 125 経路選定し、その中から線量評価を行うまでもなく他の経路と比較して線量が十分小さいと判断される経路、また、他の経路の評価結果に含まれてしまう経路を除き 41 経路を評価すべき経路として選定している¹。

本研究では、クリアランスレベル評価の評価経路を参考にしながら、操業に係る評価経路と跡地利用に係る評価経路を、海面埋立地という用途を考慮して独自に選定する。3.1.1.1 において、海面埋立地造成の事例調査を参考にして操業に係る評価経路の選定を行う。また、3.1.1.2 において、跡地利用に係る評価経路の選定を行う。

海面埋立地から海洋へ移行した核種からの被ばく経路は、埋設処分シナリオの「海水面埋立処分」で設定されている経路を参考に設定した。「海水面埋立処分」では、クリアランス対象物を海面埋立処分した際に海洋へ流出した核種からの評価経路を設定している。ただし、クリアランスレベル評価において海水中の核種からの被ばく線量は小さい（Cs-137 の 10 μ Sv/y 相当濃度 (Bq/g) を考えた場合、海水中の核種からの被ばくが最も大きい経路でも埋設処分シナリオにおける決定経路に比べて 6 桁ほど大きい）ことが示されているので、海水面埋立処分の評価経路のうち比較的影響が大きい「海岸作業」と「海産物摂取」のみを評価対象として選定した。また、海面埋立地は一般的に港湾内に造成されることを考慮して、本研究では「海水面埋立処分」では経路に含まれていない浚渫作業による被ばくも評価経路に加えた。さらに「海水面埋立処分」では処分場完成後に地下水移行による海洋への核種移行のみを評価対象としているが、海面埋立地への再生利用においては埋立地造成時に海洋へ核種が流出する可能性も考慮し、施工時に流出した核種からの被ばくも評価経路に含めることにした。

海面埋立地が造成される場所の特性上、陸域方向への地下水移行は考えづらいが、本評価

でシナリオ設定の参考にしたクリアランスレベル評価と整合を取るうえで、埋設処分シナリオの「内陸処分」で設定されている井戸水に移行した核種からの被ばく経路も評価対象とした。河川への核種の流入を想定した場合の評価経路は、クリアランスレベル評価により被ばく線量が小さい（Cs-137 の 10 μ Sv/y 相当濃度 (Bq/g) を考えた場合、河川水利用による評価経路は地下水利用による評価経路に比べて、その最低濃度が3桁ほど大きい）ことが示されているので、評価対象から外した。

本研究では、2.4.2 の検討内容に沿って海面埋立地の造成に用いる再生資材を、施工時には線源として扱い、埋立地完成後の供用時には線源としての管理から外す。再生資材の放射線防護上の扱いが変わることを考慮して、評価経路は施工時と供用時に分けて整理する。

3.1.1.1 施工時の評価経路

海面埋立地の施工時における主な作業工程、及び、国土交通省の標準歩掛り¹¹に基づく各工程の主な作業形態を表 3.1-1 に示す。

表 3.1-1 海面埋立における評価対象とする作業工程

工程段階	作業工程	作業形態
運搬、積み下ろし	埋立材・中詰材の積み下ろし	重機
	仮置き場への埋立材・中詰材の運搬	重機
	埋立材・中詰材の船舶への積み込み	重機
	船舶による埋立材・中詰材の運搬	重機
埋立地造成	中詰材の投入	重機
	中詰材の敷均し	重機・人力
	護岸上部工の設置	重機・人力
	埋立材の投入	重機
	埋立材の敷均し・締固め	重機・人力
	覆土・舗装の施工	重機
	建設機械の洗浄	人力
植栽	草本の植え付け	人力

表 3.1-1 に示した作業工程を踏まえ、施工時の作業員及び一般公衆に対する被ばく経路の選定を行う。なお、除染等により発生した除去土壌は再生資材化施設で再生資材化が行われ、その一部が再生資材として利用されることを想定している。施工時の埋立材・中詰材投入時には海洋へ核種が流出すると想定し、施工期間中に流出した核種からの公衆の被ばくも評価する。

・埋立柱材・中詰材の積み下ろし

再生資材化により生成した再生資材は再生資材化施設等で仮置きされた後、トラック等で港湾にある仮置き場まで運搬されることを想定した。この再生資材のトラックへの積み下ろし作業における作業者の被ばくを評価する。

なお、埋立柱材・中詰材をトラック等へ積み下ろす作業は、バックホウ等の重機を用いて行うものとし、作業者は重機の内部にいる想定で外部被ばくを評価する。

・仮置き場への埋立柱材・中詰材の運搬

再生資材化施設等の仮置き場から港湾にある仮置き場まではトラックで運搬されることを想定し、再生資材を運搬する運搬業者及びトラックが通行する道路周辺の居住者の被ばくを評価する。

なお、運搬業者はトラックの内部に、周辺居住者は住居の外部にいる想定で外部被ばくを評価する。

・埋立柱材・中詰材の船舶への積み込み

港湾に仮置きされた再生資材を建設現場まで運搬する船舶に積み込むことを想定した。この再生資材の船舶への積み込み作業における作業者の被ばくを評価する。

なお、海面埋立に用いる埋立柱材・中詰材を建設現場まで運搬する船舶への積み込み作業は、バックホウ等の重機を用いて行うものとし、作業者は重機の内部にいる想定で外部被ばくを評価する。

・船舶による埋立柱材・中詰材の運搬

港湾にある仮置き場から建設現場までは船舶で運搬されることを想定し、再生資材を運搬する運搬業者を評価する。

運搬に用いる船舶は、積載土量が多い大型の土運船を想定する。なお、運搬業者は船舶の内部にいる想定で外部被ばくを評価する。

・中詰材の投入

船舶により運搬した中詰材を海中に設置した護岸構造物中に投入することを想定した。中詰材の投入作業者の被ばくを評価する。

なお、投入作業者は甲板上の作業者と運転作業者を想定し、被ばくが最も大きくなる作業で代表して評価した。運転作業者については船舶の内部にいる想定で外部被ばくを評価した。なお、護岸上部工の設置は、敷均しが終了するまでされないものとする。

・中詰材の敷均し

護岸構造物に中詰材の投入が完了し、中詰材の中央で敷均し作業が行われることを想定し、敷均し作業を行う作業員及び施工地の周辺居住者における被ばくを評価する。

なお、護岸上部工の設置は、敷均しが終了するまでされないものとする。

中詰材の敷均し作業は、重機及び人力で行われるが、ここでは人力で行う想定で評価する。

・護岸上部工の設置

中詰材の上にコンクリート製の護岸上部工を設置することを想定した。この設置作業を行う作業員の被ばくを評価する。

ただし、護岸上部工は中詰材の敷均しと同じく中詰材表面で施工されるが、この時には設置された護岸上部工による遮蔽が想定される。

よって、本評価では代表的に「中詰材の敷均し」作業員を評価するものとし、護岸上部工の設置を評価対象から除外した。

・埋立柱材の投入

船舶により運搬した埋立柱材を護岸で囲まれた範囲に投入することを想定した。埋立柱材の投入作業員の被ばくを評価する。

なお、投入作業員は甲板上の作業員と運転作業員を想定し、被ばくが最も大きくなる作業員で代表して評価する。運転作業員については船舶・重機・車両の内部にいる想定で外部被ばくを評価する。

・埋立柱材の敷均し・締固め

埋立柱材の投入が完了し、埋立柱材の中央で敷均し・締固め作業が行われることを想定し、敷均し・締固め作業を行う作業員及び施工地の周辺居住者における被ばくを評価する。

なお、覆土・舗装の設置は、敷均し・締固めが終了するまでされないものとした。

埋立柱材の敷均し・締固め作業は、重機及び人力で行われるが、ここでは人力で行う想定で評価する。

・覆土・舗装の施工

植物の生育を促すため、及び強度を確保するため埋立柱材の上に覆土（緑地公園）・舗装（コンテナターミナル）を施工することを想定した。この設置作業を行う作業員の被ばくを評価する。

ただし、覆土・舗装は埋立柱材の敷均し・締固めと同じく埋立柱材表面で施工されるが、この時には施工された覆土・舗装による遮蔽が想定される。

よって、本評価では代表的に「埋立柱材の敷均し・締固め」作業員を評価するものとし、覆土・舗装の施工を評価対象から除外した。

・建設機械の洗浄

使用された機械は現場外への土砂拡散防止のために現場入口等で洗浄されることを想定し、洗浄により土砂に含まれる核種が排水とともに地面へ浸透し、帯水層まで到達して地下水が汚染され、この地下水の利用による被ばくが想定される。

しかし、地下水利用による被ばくについては、供用時の評価において大規模なソース（埋立柱材・中詰材）に対する年間を通した地下水への核種移行を想定しており、これは建設機械の洗浄によるものよりもはるかに大きいと考えられる。よって、地下水移行については埋立地への雨水浸透で代表して評価するものとし、建設機械の洗浄を評価対象から除外した。

・草木の植え付け

緑地公園を利用用途として埋立柱材の上に覆土した植生基盤に植栽が行われることを想定し、この時の植栽作業者を評価する。

ただし、植え付け作業は埋立柱材の敷均し・締固めと同じく埋立柱材表面で行われるが、この時には施工された覆土による遮蔽が想定される。よって、本評価では代表的に「埋立柱材の敷均し・締固め」作業を評価するものとし、草木の植え付けを評価対象から外した。

海面埋立地を造成する際の埋立柱材および中詰材の投入方法には複数の方法が想定される。埋立柱材の投入・中詰材の投入作業時の外部被ばく評価では、各投入法における線源となる埋立柱材・中詰材のサイズや作業者との位置関係が異なるため各投入方法の条件に応じた外部被ばく評価を行い、最も被ばく線量が大きくなる投入方法で評価を代表する。

埋立柱材・中詰材の投入について以下の方法・条件を設定した（図 3.1-3）。埋立柱材の投入では護岸の一部を開けて土砂を投入する方法と、護岸を閉じて土砂を投入する方法を想定した。護岸の一部を開けて土砂を投入する場合は、土運船が埋立地内に侵入し直接埋立柱材を投入する。この際、護岸開口部から土砂が流出する。投入時は汚濁防止膜により土砂の海洋への流出量の低減が図られる。護岸を閉じて投入する場合は、①揚土装置付自航運搬船、②揚土船＋土運船、③バックホウ＋土運船、④トラックによる投入が行われる。この際、土砂の流出は発生しない。中詰材の投入では、①揚土装置付自航運搬船、②揚土船＋土運船より投入が行われる。

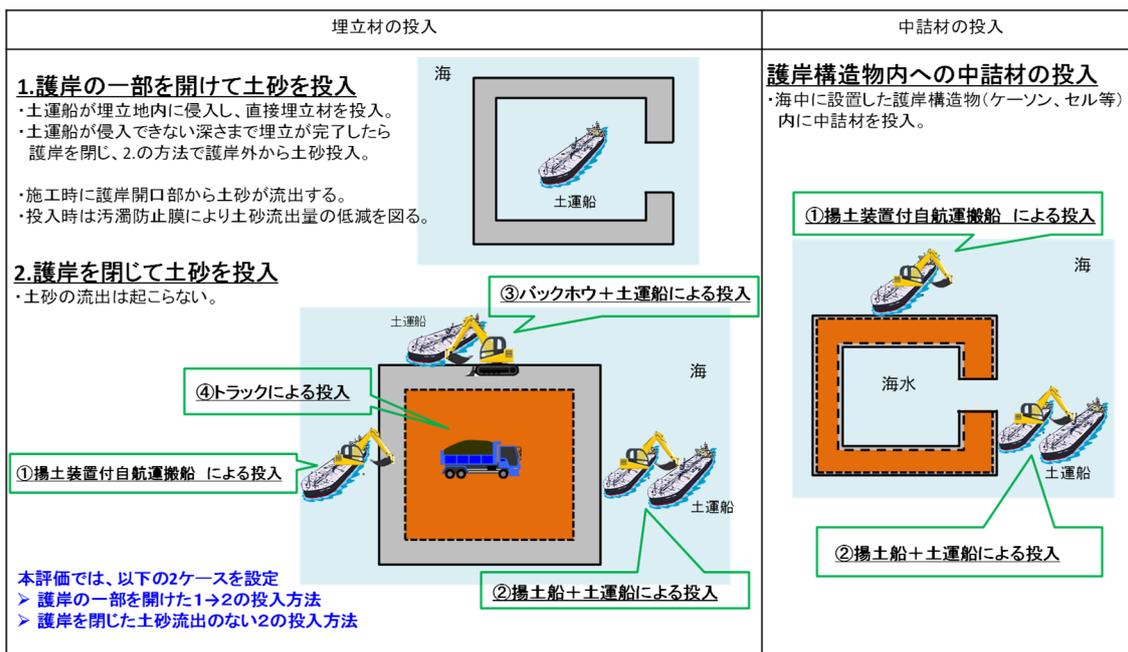


図 3.1-3 埋立材・中詰材の投入方法の設定

海面埋立地の造成では海洋へ核種の流出が想定されるので、海洋中の核種からの被ばく評価を実施する必要がある。海洋への核種の流出方法としては、施工による溶存した核種や粒子に付着した核種の流出と、護岸や帯水層を浸透水が移行することによる流出を想定した。護岸や帯水層を浸透水が移行することによる流出を想定する際の、ソース（埋立材もしくは中詰材）からの核種の流出量は分配係数モデルにより評価する（「A.1.1 地下水移行経路の被ばく評価方法」を参照）。施工時においては海洋へ流出した核種からの公衆の被ばくを評価する。ここで、本研究では海洋へ流出した核種からの被ばく線量について、規制科学分野の観点から評価することを目的としていることを考慮して、国際法及び我が国の関係法令に準じた「年あたりの線量拘束値」として扱うこととする。海洋へ流出した核種による1年間の線量影響を評価することにより、第2章で検討した年あたりの基準値と直接的に比較することが可能となる。海面埋立地が造成される場所の特性上、陸域方向への地下水移行は考えづらいが、本評価でシナリオ設定の参考にしたクリアランスレベル評価と整合を取るうえで、陸域方向へ移行した地下水による被ばく経路も評価対象とする。地下水移行による被ばく経路の井戸水利用による被ばく線量は施工途中の状態より施工が完了した状態の供用時の方が大きくなるので、施工時の評価は供用時の評価で代表する。評価対象は、既往評価⁷において、海洋へ流出した核種からの被ばくが大きい海産物摂取及び海岸活動を想定した。また、海洋へ流出した核種から被ばくする可能性がある活動として沿岸域において一般的に行われる作業である浚渫作業を想定し、浚渫作業も評価対象に加えた。

3.1.1.2 供用時の評価経路

水面埋立地完成後の被ばくとして、周辺居住者、利用者および草刈作業者の被ばくを評価する。

再利用用途として緑地公園を設定した場合、草本と木本の植栽を行うことが考えられるが、木本の植栽を行う際に必要な客土厚さは草本の場合に比べて厚く、遮蔽効果が大きくなるため、木本の評価はより保守的な草本の評価に包含することとする。なお、木本の評価においては再生資材中のセシウムが木本に吸収されるため、地表の線源として樹木、堆積有機物層、間伐木を考慮する必要があるが、それらを考慮しても草本の植栽を行った場合の方が保守的な評価になることが既往研究¹²によって確認されている（この既往研究¹²では、草本の根は覆土厚さより下まで到達しない、すなわち埋立材に到達しないとして、草本へのセシウムの取り込みは考慮していない）。

埋立地完成後には、雨水浸透により浸出水に溶存したセシウムが海洋へ移行することを想定した。浸透水による移行経路として、水平方向の地下水が卓越し護岸を透過する場合と鉛直方向の地下水が卓越し帯水層を移行する場合を想定した。浸透水が護岸を透過した場合は、海洋へ核種が流出すると想定した。浸透水が帯水層を移行する場合は、海洋方向に移行し核種が海洋へ流出する場合と、陸域方法へ移行し核種が井戸水中に流出する場合を評価対象とした。ここで、本研究では海洋へ流出した核種からの被ばく線量について、規制科学分野の観点から評価することを目的としていることを考慮して、国際法及び我が国の関係法令に準じた「年あたりの線量拘束値」として扱うこととする。海洋へ流出した核種による1年間の線量影響を評価することにより、第2章で検討した年あたりの基準値と直接的に比較することが可能となる。護岸や帯水層を浸透水が移行することによる流出を想定する際の、ソース（埋立材もしくは中詰材）からの核種の流出量は分配係数モデルにより評価する（「A.1.1 地下水移行経路の被ばく評価方法」を参照）。

3.1.1.3 施工時および供用時の評価経路のまとめ

3.1.1.1 および 3.1.1.2 より、除去土壌を海面埋立へ再生利用した際の評価経路を表 3.1-2 に示す。評価は表 3.1-3 に示すとおり、再生資材の利用部材及び完成後の利用用途に応じた 4 ケースについて行う。

表 3.1-2 再生資材の海面埋立地への利用に係る評価経路(1/4)

No	評価対象		線源	対象者	被ばく形態	備考
1	建設現場への運搬	積み下ろし作業	再生資材	作業者	外部	
2					粉塵吸入	
3					直接経口	
4		仮置き場への運搬作業		作業者	外部	
5		土運船への積み込み作業		作業者	外部	
6					粉塵吸入	
7					直接経口	
8		土運船による運搬		作業者	外部	
9		運搬経路周辺居住		公衆（成人）	外部	陸上での運搬のみ評価
10				公衆（子ども）	外部	
11	施工時 埋立地造成	中詰材の投入	中詰材、再生資材	作業者	外部	表 3.1-3 に示すケース 3,4 のみの評価経路。中詰材の投入方法には①と②がある。各投入方法による外部被ばく評価では、線源として船上の積載土と中詰材を想定し両方からの寄与を評価する。これらの線源サイズは、最大積載量及び投入作業が完了した時点の大きさを設定する。中詰材の線源サイズは最大となる島型（3.1.3.1 参照）を想定する。
12		②揚土船＋土運船による投入			粉塵吸入	
13					直接経口	
14		中詰材の敷均し			中詰材	
15	粉塵吸入					
16	直接経口					

表 3.1-2 再生資材の海面埋立地への利用に係る評価経路(2/4)

No	評価対象		線源	対象者	被ばく形態	備考		
17	埋立地	埋立材の投入	①揚土装置付自航運搬船による投入	埋立材、中詰材、再生資材	作業者	外部	埋立材の投入方法には①～④がある。ケース1,2では、投入される積載土と埋立材の両方の線源からの寄与を評価する。これらの線源サイズは、最大積載量及び投入作業が完了した時点の大きさを設定する。ケース3,4では造成された護岸中の中詰材が線源となる。ケース3,4では線源は造成が完了した護岸中にあるのでNo.18, 19は除外。	
			②揚土船+土運船による投入					
			③バックホウ+土運船による投入					
			④トラックによる運搬・投入					
18	施工時	埋立地造成				粉塵吸入		
19						直接経口		
20			埋立材の敷均し・締め	中詰材/埋立材	作業者	外部	ケース1,2では埋立材、	
21						粉塵吸入	ケース3,4では造成された護岸中の中詰材が線源となる。ケース3,4では線源は造成が完了した護岸中にあるのでNo.21, 22は除外。	
22						直接経口		
23								
24			周辺居住	中詰材/埋立材	公衆(成人)	外部	評価点までの距離が近くなるように、埋立地を陸	
25						粉塵吸入		拡張型(3.1.3.1参照)で造成した場合を想定。
26						外部		
27			土砂投入による海洋への核種流出	海産物摂取	海産物(遊泳性魚類、底生魚類、無脊椎動物、藻類)	公衆(成人)	経口	線源濃度は、遊泳性魚類は海洋層濃度、それ以外は海洋層、境界層、生物擾乱層のうち最も高い濃度を用いる。
28		公衆(子ども)			経口			
29	海岸活動	海岸砂		公衆(成人)	外部	線源濃度は海洋層濃度を用いる。		

表 3.1-2 再生資材の海面埋立地への利用に係る評価経路(3/4)

No	評価対象		線源	対象者	被ばく形態	備考				
30		浚渫作業	浚渫土	公衆（成人）	外部	線源濃度は生物擾乱層の濃度を用いる。				
31					粉塵吸入					
32					直接経口					
33	供 用 時	埋立地完 成後	中詰材/埋立材	公衆（成人）	外部	ケース 1,3 のみ評価を行う。中詰材の線源サイズが大きくなる鳥型を評価する。埋立材も中詰材に合わせて鳥型を評価する。				
34						緑地公園 の利用	中詰材/埋立材	公衆（成人）	外部	ケース 1,3 のみ評価を行う。中詰材の線源サイズが大きくなる鳥型（3.1.3.1 参照）を評価する。埋立材も中詰材に合わせて鳥型を評価する。
35								公衆（子ども）		
36						コンテナ ターミナル 利用	中詰材/埋立材	公衆（成人）	外部	ケース 2,4 のみ評価を行う。中詰材の線源サイズが大きくなる鳥型を評価する。埋立材も中詰材に合わせて鳥型（3.1.3.1 参照）を評価する。
37						周辺居住	中詰材/埋立材	公衆（成人）	外部	供用時用途として緑地公園、コンテナターミナルを想定し、それぞれを造成する場合を評価する。評価点までの距離が近くなる陸拡張型（3.1.3.1 参照）を評価する。
38	公衆（子ども）	外部								

表 3.1-2 再生資材の海面埋立地への利用に係る評価経路(4/4)

No	評価対象		線源	対象者	被ばく形態	備考		
39	地下水移行（海洋への移行）	海産物摂取	海産物(遊泳性魚類、底生魚類、無脊椎動物、藻類)	公衆（成人）	経口	線源濃度は、遊泳性魚類は海洋層濃度、それ以外は海洋層、境界層、生物擾乱層のうち最も高い濃度を用いる。		
40				公衆（子ども）	経口			
41		海岸活動		海岸砂	公衆（成人）		外部	線源濃度は海洋層濃度を用いる。
42		浚渫作業		浚渫土	公衆（成人）		外部	線源濃度は生物擾乱層の濃度を用いる。
43							粉塵吸入	
44	直接経口							
45	供用時	飲料水摂取	井戸水	公衆（成人）	経口	埋立地を陸拡張型に造成した場合で評価。		
46				公衆（子ども）	経口			
47		農耕作業	井戸水で灌漑した土壌	作業者	外部			
48					粉塵吸入			
49		農作物摂取	灌漑した土壌で生産された農作物	公衆（成人）	経口			
50				公衆（子ども）	経口			
51		畜産物摂取	灌漑した土壌で生産された飼料で飼育された畜産物	公衆（成人）	経口			
52				公衆（子ども）	経口			
53		畜産物摂取	井戸水で育てられた畜産物	公衆（成人）	経口			
54				公衆（子ども）	経口			
55		養殖淡水産物摂取	井戸水で養殖された淡水産物	公衆（成人）	経口			
56				公衆（子ども）	経口			

表 3.1-3 評価ケース

ケース	利用部材	利用用途	備考
1	埋立材	緑地公園	覆土 0.3m
2		コンテナターミナル	舗装 0.35m
3	中詰材	緑地公園	覆土 0.3m
4		コンテナターミナル	舗装 0.35m

3.1.2 被ばく評価に用いるモデルの検討

表 3.1-2 に示した評価経路における被ばく線量評価を実施するためには、再生利用により被ばくが生じる環境を数式により模擬（モデル化）する必要がある。現実の環境は様々な物理的、化学的な現象が複雑に絡み合って構成されているが、本研究におけるモデル化の目的は被ばく評価であるので、複雑な現実の環境を構成する現象の中から被ばく評価においてモデルに取り込むパラメーターの選定を行い、そのパラメーターを用いたモデル化を行う。

モデルに取り込むパラメーターの選定を行うにあたって、まずモデル化の目的を明確にする。被ばくが生じる環境をモデル化する目的は、安全評価として保守的に再生利用による年間の被ばく線量を評価することである。この際、再生利用を実施する場所は特定せず、一般的な環境における再生利用による被ばく線量の評価を行う。

上記のモデル化の目的から、パラメーター選定のための考え方の整理を行う。モデル化の目的は一般的な環境における再生利用による被ばく線量の評価であるので、ある特定の場所でしか生じないような現象はモデル化の対象外とする（再生利用を実施する場所については、3.1 に示す通り④の考え方の適用性を確認する意味で、現存被ばく状況と計画被ばく状況を含むと考えられる行政区分内とするという条件を設定している。ただし、この条件は具体的な場所を特定しないのでパラメーターの選定には影響しない。選定されたパラメーターに対して値を設定する際には影響する可能性がある）。評価は保守的に行うので、パラメーターの選定においてあるパラメーターを考慮することによる影響の大小を比較できる場合は、保守的な評価となるようなパラメーターを用いたモデルを選定する。上記の他にも、データを集めることができないパラメーターや、モデルの妥当性を示すことができないパラメーターは対象から除外する（例えば、波によって海水が埋立地の上面から浸透する量）。

被ばく評価に向けてモデル化の対象の整理を行う。再生利用において公衆や作業者は、再生資材もしくは再生資材から移行した核種によって外部被ばくおよび内部被ばくをする。

そこで本研究では再生利用により被ばくが生じる環境を「再生資材に関するモデル」、「核種移行に関するモデル」、「外部被ばくに関するモデル」、「内部被ばくに関するモデル」に分けてモデル化を行う。モデルにおいて考慮するパラメーターの選定は、上記のモデルの分類ごとに行う。

「再生資材に関するモデル」に用いるパラメーターの選定を行う。ここで再生資材とは埋

立材と中詰材である。再生資材からの核種移行や被ばくを評価する上で、質量に対する核種濃度が必要になる。質量に対する核種濃度を表現するため、再生資材に対して真密度とかさ密度、サイズをパラメーターとして設定した。埋立材と中詰材は海面埋立地の構造上、海水と混在していると考えられるが埋立材と中詰材の空隙中に海水を含まないとした方が質量に対する核種濃度は高くなるので、保守的な評価として再生資材中の海水質量に関するパラメーターを用いたモデルは用いないことにした。また、非汚染の資材が混合されることを考慮して、再生資材に対する希釈係数をパラメーターに含めた。

「核種移行に関するモデル」に用いるパラメーターの選定を行う。海面埋立地への再生利用にて想定される核種移行は、「施工による海洋への核種の移行」、「再生資材からの核種の溶出」、「再生資材から溶出した核種の地下水中の移行」、「海洋中における核種の移行」である。

「施工による海洋への核種の移行」として、埋立材を護岸で囲まれた範囲に投入による護岸外への溶存した核種と粒子に付着した核種の流出が考えられる。護岸外への核種の流出は、潮汐による1日の護岸内外の交換水量のパラメーターを用いてモデル化する。護岸外への核種の流出を引き起こす現象として、海流による護岸内外の海水の交換も考えられるが、海面埋立が主に行われる港湾内において海流の影響は大きくないと判断しパラメーターから除外した。また、護岸外に出た核種が護岸内に戻ることも考えられるが、海洋へ流出した核種からの被ばく評価においては、護岸内に戻ることを考慮しない方が保守的となるので護岸内に核種が戻ることを評価するためのパラメーターは除外した。中詰材を護岸構造物中に投入することによる海洋への核種の流出は、護岸構造物中に含まれていた海水が中詰材を投入することによりあふれ出ることを想定した。上記で検討したパラメーターによる「施工による海洋への核種の移行」のモデル化については3.1.4.3に示す。

「再生資材からの核種の溶出」として、海面埋立地上への降水や、波によって海水が浸透したりすることによる埋立材・中詰材からの核種の溶出が考えられる。そこで再生資材への降雨浸透水量をパラメーターとして選定し、浸透した水が再生資材と分配平衡することにより核種を含んだ水が再生資材から流出することを想定した。波によって海水が埋立地の上面から浸透する現象については、浸透する海水量のデータを得ることは困難であるので、海水の浸透水量はパラメーターから除外した。保守的な評価のために再生資材上部に位置する舗装や覆土による影響は無視し、それらの厚さはパラメーターから除外した。「海面埋立地への降雨浸透による再生資材からの核種の溶出」のモデルはA.1.1のソースタームモデルに示す。

「再生資材から溶出した核種の地下水中の移行」として、再生資材から溶出した核種が地下の不飽和層や不透水層を浸透していき、帯水層中に到達した後に地下水中进行していくことが考えられる。地下水中の核種は、帯水層中の土壌と分配平衡の関係になりながら、地下水の流れと分子分散により移行することが想定される。本研究では、地下水実流速と地下水流方向の分散係数および帯水層中の分配係数をパラメーターとして選定した。保守的

な評価として再生資材から溶出した核種は全量が直ちに帯水層中に流入すると仮定し、不飽和層や不透水層を表現するパラメーターは除外した。「再生資材から溶出した核種の地下水中の移行」は、A.1.1の帯水層移行モデルに示す。

「海洋中における核種の移行」として、溶存した核種と粒子に付着した核種が、海洋中で生じる様々な現象により移行することが考えられる。海洋中にて核種移行を引き起こす現象は多岐にわたる。例えば、海流による核種の移行、粒子に付着した核種の沈降、溶存した核種の拡散、溶存した核種の堆積物への分配、底生生物による核種を含んだ堆積物の巻き上がりなどが想定される。海洋における核種移行を引き起こす現象は複雑であり、核種は海洋中を三次元的に移行している。しかし、本研究では安全評価のために簡易的なモデルとして鉛直1次元の核種移行を評価するモデルの構築を行う。鉛直的な核種の移行を評価するためのパラメーターとして、海洋中の粒子濃度、粒子の沈降速度、拡散係数、生物擾乱係数、堆積速度を選定した。「海洋中における核種の移行」のモデルについては、3.1.4.1およびA.1.4に示す。

「外部被ばくに関するモデル」に用いるパラメーターの選定を行う。外部被ばくは、ある大きさをもつ再生資材付近にいることにより生じる。被ばく線量は、再生資材付近にいる時間に比例して大きくなる。外部被ばく線量を評価するパラメーターとして、外部被ばく線量換算係数と被ばく時間を選定した。外部被ばく線量換算係数は、A.1.3に示した評価体系についてMCNP5¹⁰を用いて評価した。

「内部被ばくに関するモデル」に用いるパラメーターの選定を行う。内部被ばくは、再生資材そのものを体内に取り込んだ場合、および再生資材から移行した核種を含む物（水、農畜産物、海産物など）を体内に取り込んだ場合に生じる。

再生資材そのものを体内に取り込むことは、再生資材が土壌であることを考えると巻き上がった粉塵を吸入する場合と、意図せず口に含んでしまう場合が考えられる。そこで、作業時の空気中ダスト濃度、微粒子の放射性物質の濃縮係数、作業者の呼吸量、ダストの経口摂取率、内部被ばく線量係数をパラメーターとして選定した。粉塵吸入と経口摂取による内部被ばく線量を評価するモデルはA.1.3に示す。

核種を含む井戸水を体内に取り込むことによる被ばく経路として表3.1-2では、再生資材から溶出した核種が流入した井戸水の摂取、地下水を用いて養殖した淡水産物の摂取、井戸水を灌漑に用いて育てられた農作物の摂取、飼料の飼育水および畜産物の飼育水に井戸水を利用して育てられた畜産物の摂取を設定している。

井戸水中の核種濃度は、帯水層中の核種を含む地下水をくみ上げる際に周囲の放射性核種を含まない水の流入を考慮して井戸水の混合割合をパラメーターに設定した。井戸水中核種濃度のモデルは数式A.1-5に示す。養殖による淡水産物中への核種移行は、水産物が水を体内に取り込むことにより生じると考えられる。保守的に水中の核種濃度と水産物体内の核種濃度が平衡関係にあることを仮定し、パラメーターとして濃縮係数を設定した。井戸水を灌漑水に用いた際の農作物および飼料中への核種移行は、核種を含んだ土壌からの経

根吸収と灌漑水中核種の植物表面への沈着により生じると考えられる。植物表面への沈着に関しては、降雨などにより核種が除去されることを想定する。そこでパラメーターとして、経根吸収による土壌から植物への核種の移行率、植物表面への沈着割合、降雨による植物表面汚染の除去係数を設定した。農作物や飼料の育成中には、落葉や動物および虫に食べられることにより核種が除去されることも想定されるが、その量を定量的に示すことは難しく、またモデルとしては核種の除去を考慮しない方が保守的なのでそれらの現象を表現するパラメーターは除外した。農作物および飼料中の核種量のモデルを数式 A.1-11 に示す。核種を含む飼料を摂取した畜産物中の核種濃度は、飼料の摂取量、核種を含む飼料の混合割合、畜産物への核種の移行率をパラメーターとして設定した。また、飼育水に井戸水を利用した際の畜産物中の核種濃度は、飼育水の摂取量と畜産物への核種の移行率をパラメーターとして設定した。

農作物や畜産物、淡水産物の摂取による内部被ばくは、核種を含んだ食物の摂取量に比例して大きくなる。核種を含んだ食物の摂取量を評価するために、農作物や畜産物、淡水産物の摂取量および摂取量の内の核種を含む割合（市場係数）をパラメーターとして設定した。市場係数は核種を含む食物を自給自足する場合 1 となる。また、食物が食べられるまでの核種の減衰も考慮するため、輸送時間もパラメーターとして設定した。内部被ばく線量評価のモデルを数式 A.1-12 および数式 A.1-15 に示す。

再生資材から移行した核種が海洋に移行した場合に核種を体内に取り込む経路としては、海産物摂取がある。海産物摂取による内部被ばく線量の評価の考え方は基本的に淡水産物と同じであるが、海面埋立においては施工時に粒子に付着した核種が海洋へ流出するので、海産物体内の核種濃度評価においては溶存した核種だけではなく粒子に付着した核種の影響も考慮する。海産物摂取による内部被ばく線量評価については 3.1.4.5 に詳細を示す。

ここまでで、被ばく評価に用いるモデルに取り込むパラメーターの選定を行った。続いて、被ばく評価に用いるパラメーター値の選定の方針を、既往の規制科学研究¹におけるパラメーター値選定の基本的考え方を参考にして以下のように整理した。

本研究における被ばく評価に用いるパラメーター値は、適用範囲を限定することなく、仮想的で一般的な環境における再生利用にかかる被ばく線量を規制科学の観点から保守的に評価できるように、評価に用いるパラメーターの値を選定する。すなわち、被ばく線量評価の「保守性」に求められる観点は、すべてのパラメーターについて、保守的、安全側に設定するのではなく、関連するパラメーターに関してその環境に相応しいもっともありそうな現実的な値とその幅を念頭におきつつ、線量の評価として合理的で、かつ結果としてグレーデッドアプローチの観点での保守性が担保されることが保証されなければならない。これはパラメーター値の設定のみによって担保されるのではなく、被ばくの評価に用いられるシナリオやモデルの選定も幅広く考慮して、総合的に担保される。

パラメーターの選定では、評価の対象とする環境に関連した現実的に起こり得るシナリオを想定し、「社会環境、日常生活の様態等を考慮して標準的である人」¹についての現実的

な値の範囲の中から、従前の規制科学的な評価における継続性も参照しつつ個々に決定する。具体的には、以下のプロセスによってパラメーター値の設定を行っている。

本研究で用いるモデルに組み込まれているパラメーターは、元素・核種によって数値が異なる「元素・核種に依存するもの（元素・核種依存性）」と「元素・核種に依存しないもの（元素・核種非依存性）」に分類される。

「元素・核種依存性」のパラメーターとしては、移行係数、分配係数、線量換算係数などが挙げられるが、これらはこれまでの試験・研究等によりデータが採取され評価された上、各文献にまとめられており、これらの値を用いるのが適切と判断した。

「元素・核種非依存性」のパラメーターとしては、作業者の呼吸量、作業時間、農畜産物の摂取量、海面埋立地の大きさ、降水量、作業者の作業環境などの社会環境、日常生活の態様等に関するものである。これらについては、参考となる文献等により、標準的な人や現象を対象として現実的な値をパラメーターとして選定する必要があるが、パラメーターによっては、直接参考となる文献等がないものもある。参考となる文献等がないパラメーターについては、他のパラメーターを参考に現実的と考えられる値をパラメーターとして選定する。その他データがないものについては、現実的な範囲で保守的に選定する。

「元素・核種非依存性」のパラメーター値の感度を考えた場合、「参考となる文献等により、標準的な人や現象を対象として現実的な値が設定されるパラメーター（文献値があるパラメーター）」、「直接参考となる文献等がなく、他のパラメーターを参考に現実的と考えられる値を設定するパラメーター（他の文献値を参考に設定するパラメーター）」、「データがないパラメーター」の順で不確かさが大きくなる。

被ばく評価を保守的に行う上で、パラメーター値の選定において保守性を考慮する必要があるパラメーターは、主に「他の文献値を参考に設定するパラメーター」と「データがないパラメーター」である。ただし、保守性を考慮する上では、そのパラメーターがとり得る幅の中で最も保守的な値を選定することは必ずしも要求されておらず、現実的な値を選定した上で評価が合理的かつ過分に非保守側にならないことが重要である。

「他の文献値を参考に設定するパラメーター」の値の選定においては、既往研究等で現実的な値として選定された「文献値があるパラメーター」の値を用いることができる場合がある。「他の文献値を参考に設定するパラメーター」の具体例としては、本研究における浸透水量がある。

既往研究¹において浸透水量は、我が国の平均年地下水流出量（浸透水量に相当）を基に0.4m/yが選定されている。また、既往研究¹において地下水流出量は河川の湧水流量とほぼ等しいことを前提としている。

海面埋立地への浸透水量を考えた場合、既往研究における天然環境のパラメーターを本研究での人工環境へそのまま適用し得るとは限らない。しかし、海面埋立地への浸透水量に直接的に適合しそうなその他のデータを文献等で確認することができなかつた現状もあり、ここでは0.4m/yを採用することとして、その設定の規制科学上の合理性を検討した。

本パラメーターは大きな値であるほど保守的な評価となる。具体的な用途事例として想定されているコンクリート舗装のコンテナターミナルに対する浸透水量は、ここでの設定値よりも小さくなると考えられるため、保守側評価となる。もうひとつの用途事例として想定されている土壤に植栽が施されている緑地公園に対する浸透水量の場合、地表面近傍の状態としては降雨が浸透しやすい可能性は否定し得ないものの、パラメーターの変動範囲（本パラメーターの最大値は蒸発散や表面流出を考慮しない場合の年間降水量程度と考えられ、設定値の4~5倍程度）を考慮すると、この経路については規制科学への適用の際に重要となる線量拘束値に基づく管理や判断のプロセスには、線量寄与の観点で結果的には影響しないことが確認されている。

「データがないパラメーター」については、文献値等によってではなく、評価対象として想定する系により総合的にその値の合理的な幅を推測することができる。そのようなパラメーターを仮に設定した上で、想定する系における当該パラメーター及びその他のパラメーターの感度をも併せて考慮し、総合的な被ばく評価に対して影響がないことを確認することもある。

3.1.3 評価体系

3.1.3.1 海面埋立地の評価体系

国内に既設の埋立港湾施設のうち緑地公園として利用されているものとコンテナターミナルとして利用されているものの規模に関する事例調査をもとに被ばく評価に用いる海面埋立地の体系を設定した（事例調査の詳細はA1.2参照）。それぞれの埋立地の一辺の平均の長さは、緑地公園185m、コンテナターミナル410mであった。本評価では埋立地のサイズ（埋立柱を投入する範囲）として、それぞれの埋立地の平均サイズ、及び500mを超える大規模な埋立地は数カ所に限定されることを踏まえ、幅500m×長さ500mを代表値として設定した。

護岸は護岸構造物を海中に設置し、護岸構造物中に中詰材を投入することにより造成されるが、中詰材を線源とする場合、護岸構造物の材質により遮蔽性能が大きく異なるため、護岸構造物の材質ごとに評価を行う。護岸構造物のタイプには図3.1-4に示すようにいくつかの種類があり、金属製の護岸構造物としてセルや鋼矢板、コンクリート製の護岸構造物としてケーソンがある。護岸サイズに関する事例調査の結果、金属製の護岸構造物による護岸幅は最大で約30m（鋼矢板セル製）、コンクリート製の護岸構造物による護岸幅は最大で約20m（長大ケーソン）であった（表A.1-3）。そこで、本評価では線源である中詰材の物量が最大となるように護岸構造物として幅30mのセルおよび幅20mのケーソンを想定した。以後、セルを用いて造成された護岸をセル式護岸、ケーソンを用いて造成された護岸を重力式護岸という。

海面埋立地建設場所の水深は、横浜港南本牧ふ頭 MC-3 を参考に、18m を想定した（表 A.1-3）。横浜港南本牧地区岸壁は、日本初の世界最大級のコンテナ船が停泊できる水深 18m を有するコンテナターミナルである。現在、海運業界ではコンテナ船の大型化が進んでおり、日本においても大型コンテナ船が停泊可能なコンテナターミナルが求められている。そこで、今後大型コンテナ船が停泊可能なコンテナターミナルが造成されることを想定して、造成場所の水深を 18m に設定した。緑地公園の造成場所の水深についてもコンテナターミナルとそろえた。

緑地公園に草本を植える際の覆土厚さは、国土交通省都市局公園緑地・景観課「植栽基盤の整備手順(案)」¹³等を参考に、最も保守的となるよう、0.3m とした。コンテナターミナルの舗装の厚さは、日本港湾協会「港湾の施設の技術基準・同解説(1999)」¹⁴に示された港湾エプロン部の強度を担保するのに必要な路盤・舗装の厚さの最低値から路盤材 0.15m+舗装材 0.2m とした。上部工厚さは埋立部の覆土・舗装厚さにそろえるとする。

上記の内容を踏まえて評価体系を図 3.1-5 に示す。なお、埋立を行う際は埋立地を陸続きに造成する場合（陸拡張型）と陸と繋がらないで造成する場合（島型）がある。各評価経路において評価が保守的になる方で評価を行う。

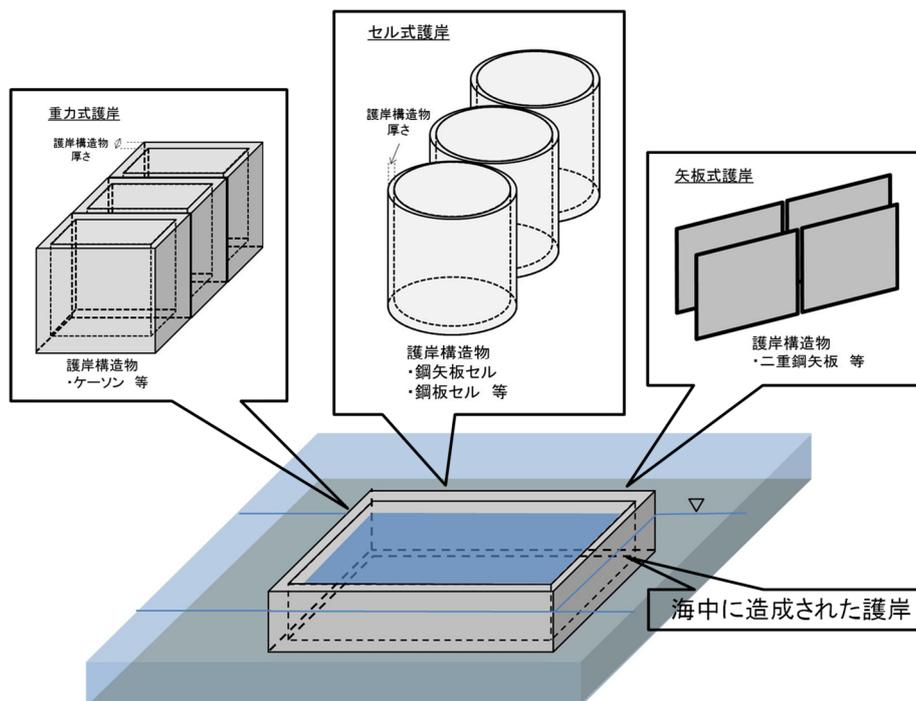


図 3.1-4 護岸構造物の概念図

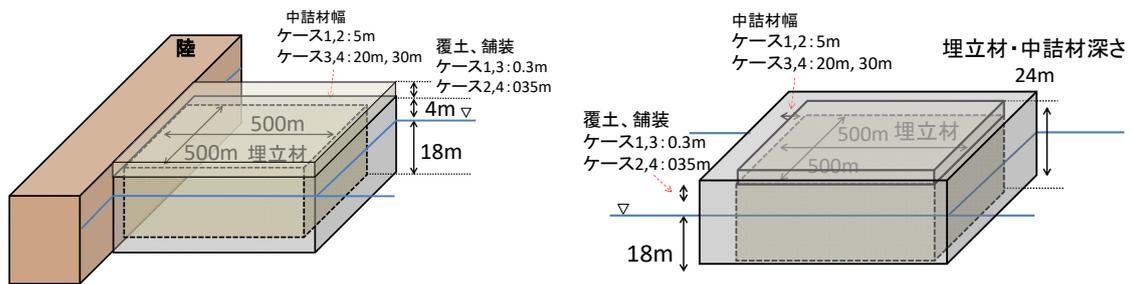


図 3.1-5 評価体系（左：陸拡張型、右：島型）

3.1.3.2 評価経路の評価体系

表 3.1-1 の評価経路にて評価対象とした建設現場への運搬、埋立地造成、土砂投入による海洋への核種流出、埋立地完成後、地下水移行（海洋への移行）、地下水移行（井戸水利用）について、想定される作業者と公衆の被ばくが最大となるように評価点を設定しながら評価体系の設定を行った。評価体系の設定については A.1.3 に示した。

3.1.4 海洋へ移行した核種からの被ばく線量評価の高度化

3.1.4.1 海洋中へ移行した核種からの被ばく評価への Sediment model の適用

海面埋立地を造成する際は、図 3.1-3 に示したように施工時に護岸の一部を開けて土砂を投入する場合は、海面埋立地外側の海洋へ再生資材が直接流出することが想定される。そのため海水に溶存した核種他に粒子（土粒子、有機物等）に付着した核種の影響評価を行う必要がある。さらに、水産庁「水産物の放射性物質の検査に係る報告書（平成 23 年 3 月～平成 27 年 1 月）」¹⁵によると魚介類の体内への核種濃縮には、海水に溶存した核種のみではなく堆積物や懸濁粒子に付着した核種も影響していることが示されている。

そこで本研究では、既往の除去土壌の再生利用に関する安全評価¹⁶の拡張として、粒子に付着した核種の海底付近の移行について評価できる Sediment model(OECD NEA, 1985)¹⁷を採用し、施工作業時の核種流出、埋立地完成後の核種溶出、及び海水－海底間の核種移行を PASCLR2⁷で評価できるようにした。Sediment model は、もともと北大西洋における放射性廃棄物の海洋投棄の影響評価を目的として作成されたモデルであるが、福島県沿岸における評価実績もある¹⁸。

Sediment model は海底付近を 4 つのコンパートメントに分割し、コンパートメント間の核種の移行を評価するモデルである。4 つのコンパートメントは、境界層（水相）、境界層（粒子相）、生物擾乱層、拡散層である。本評価では、上記 4 つのコンパートメントに加えて、海表面を表現するために海洋層というコンパートメントを独自に接続している。各コンパートメントにおいて、溶存した核種と粒子に付着した核種の存在量を定義し、それぞれの形

態で存在する核種の移行を鉛直一次元で評価する。Sediment model の 4 つのコンパートメントの厚さは、海洋処分場からの影響評価において OECD NEA にて用いられている値を利用し、境界層 (水相) 厚さを 10m、境界層 (粒子相) 厚さを 0.001m、生物擾乱層厚さを 0.1m、拡散層厚さを 1.9m とした。海洋層の厚さは、本研究で再生利用用途の条件から設定された海面埋立地を造成する海域の水深の 18m から、海底付近の海水の層にあたる境界層 (水相) の厚さを差し引いて 8m とした。

被ばく評価に用いる各コンパートメント中の核種濃度は、海洋層を含む Sediment model (鉛直一次元のコンパートメントモデル) で評価した各コンパートメント中の核種量をコンパートメントの体積で割ることで算出する。図 3.1-6 に本モデルにより模擬している現象を示す。コンパートメントモデルの支配方程式は A.1.4 に示した。

現実の海洋における核種の分布は、様々な現象による核種の移行により、時間的に連続した三次元の分布となる。環境システム学の観点から海洋における核種の移行を詳細に再現するためには、実測データに基づいた数多くのパラメーターを用いた複雑なモデルが必要となる。これまでに環境システム学の領域において、海洋循環を詳細に評価するために数多くの知見が積み上げられてきた。例として、京都大学が開発した海洋大循環モデル¹⁹等がある。また、環境システム学の領域における海洋中の核種移行評価に関する知見として、海洋大循環モデルを取り込んだ海洋中放射性核種移行モデル(SEA-GEARN)²⁰等がある。

これまでに積み上げられてきた環境システム学の知見を今回のケーススタディで規制科学領域へ適用するとき、たとえば海洋中の核種移行の評価において、規制科学としての被ばく線量評価を目的とした精度と保守性、合理性を追求することとなる。本研究では、以下に述べる理由で、核種移行評価に鉛直一次元のコンパートメントモデルを用いることとした。このモデルにより十分に本評価の目的が達成できると判断した。

ここでは、適切な被ばく評価を規定する条件のひとつとして、一般的な環境を想定した評価であること (本研究では、除去土壌の再生利用を実施する場所は「現存被ばく状況と計画被ばく状況を含むと考えられる行政区分内」という条件のみを設定しており、一般的な環境における再生利用を想定している)、および被ばく評価結果が保守的であることがあげられる。一般的な環境における再生利用を想定した被ばく評価においては、海洋中の核種移行を評価する上である特定の環境を想定した詳細なパラメーターを設定することは適切ではない。我が国の一般的な海域において核種移行を引き起こす現象として代表的な値を設定できそうなパラメーターには潮流や海流などが考えられる。これらのパラメーターを用いて海洋中の核種移行評価を実施する場合、3次元的に詳細な核種分布を評価することは現実的ではない。ただし、水平方向の核種の分布を考慮しない一次元的な核種移行評価であれば、潮流や海流などの限られたパラメーターを用いたモデルで評価できることを、後述の 3.1.4.2 で確認している。このことから、鉛直一次元のコンパートメントモデルを用い、保守的なパラメーターを設定して被ばく評価を実施することにした。

本研究で鉛直一次元のコンパートメントモデルに用いるパラメーターは、主に

OECD/NEA¹⁷にて利用されている全海域を対象とした汎用的な値である。しかし、本研究では既往の安全評価¹⁶における核種の希釈条件を再現するために独自に「海洋層」を Sediment model に接続しているため、海洋層に関連するパラメーターは本研究により設定した。独自に設定した海洋層に関連するパラメーターは、海洋層の体積、海水交換による外洋への核種の移行率である。また、我が国における再生利用を想定して、海底土の分配係数についても日本沿岸の実測値から設定した。これらのパラメーター値に関して、環境システム学の観点および規制科学の観点の双方から以下のように検討し、設定をした。

はじめに、海洋層について検討した。海洋へ流出した核種は、ある水量の海水に希釈され、ある範囲において核種濃度の分布が生じる。希釈に関わる水量として、潮流および海流として海面埋立地周辺を流れる海水量が考えられる。鉛直一次元のコンパートメントモデルにおける海洋層は、海水による核種の希釈を表現するコンパートメントであり、その中では核種は均一分布となる。鉛直一次元のコンパートメントモデルによる核種移行評価結果を被ばく評価に用いるためには、海水中の核種濃度を算出するためのコンパートメントの体積が必要となる。

本研究では、仮想的な一般海域における再生利用を想定し、核種濃度の算出に使用する海洋層体積としての代表値を設定した。海洋層の厚さの代表値を用いて、本モデルに適用する海洋層の体積を決定するために、評価対象とする海域の面積を設定する必要がある。ここでは、海洋へ流出した核種による被ばく線量の評価を規制科学の分野で適用することを考え、海面埋立地を造成した際の影響を評価する海域を行政区域程度の単位で想定し、以下に示す手順に基づいて評価対象とする海域の面積を設定することにより、仮想的な海洋層の体積としての $8.0 \times 10^9 \text{ m}^3$ を決定するに至った。

評価対象とする海域の海岸線方向の長さとして、行政区域程度の長さを考慮し数十 km～百数十 km 程度を想定した。沖合方向の長さとしては、前述した再生利用用途の条件から設定された海域の水深である 18m を基にモデル環境を想定して海域数 km～10km 程度と定めた。ここでは、水深 18m が沖合方向の長さ数 km～10km 程度における海域の水深の代表値となるが、本評価において被ばく線量への寄与が大きいコンパートメントは生物擾乱層であり、水深が浅ければ海水から海底土への移行量を大きく評価することになり、結果的に安全側の評価となる（鉛直一次元のコンパートメントモデルにおいて海洋層の厚さを薄く設定した方が海洋層以下の層に核種が移行しやすい方向の評価となり、結果的に、被ばく線量に効く生物擾乱層中の核種濃度が高くなる）。以上の海岸線方向の長さ（数十 km～百数十 km 程度）と沖合方向の長さ（海域数 km～10km 程度）の想定から、当該海域の面積として $1.0 \times 10^9 \text{ m}^2$ を設定した。さらに、前述の海洋層の厚さ（再生利用用途の条件から設定された海面埋立地を造成する海域の水深の 18m から、海底付近の海水の層にあたる境界層（水相）の厚さを差し引いて 8m）を乗じて、仮想的な海洋層の体積としての $8.0 \times 10^9 \text{ m}^3$ を決定した。

続いて、海洋層から評価対象系外である外洋への核種流出を評価するパラメーターである海水交換による外洋への核種の年あたりの移行率について検討した。このパラメーター

は、初期に当該コンパートメントに存在した核種がある期間に外洋（系外）に移行したのちに残存する核種の割合（残存割合）を想定して導出する。たとえば日本近海の場合、黒潮や親潮などの大規模な海流が存在しており、海水中の核種は比較的に移行しやすい環境にあるといえる。ここでは、海面埋立地を造成する海域において、海水の流れが速く、パルスとして流入した核種はある期間でほぼ全量が外洋へ流出すると仮定した。海洋層中を海流が通過する混合面積と日本近海におけるクリアランスレベル評価において利用される海水流速の代表値（0.5 ノット）を用いて、対象とする海洋層の体積に相当する水量が流入するのにかかる時間が一週間程度と評価されることから、ここでは安全側の評価として「ほぼ全量が外洋へ流出する」と仮定したある期間について、1 年間を採用した。また、「ほぼ全量が外洋へ流出する」として、残存割合を 100 万分の 1 とした。この場合、海水交換による外洋への核種の年あたりの移行率は、 $13.8(y^{-1})$ となる。この年あたりの移行率を決定する際に想定した 100 万分の 1 の残存割合を ± 1 オーダーのレベル（2 オーダー）で変化させても、規制科学への適用の結果として最終的に重要となる年あたりの線量拘束値に基づく管理や判断のプロセスには、線量寄与の観点で結果的には影響しないことが確認されている。

海底土の分配係数については、日本沿岸の実測データ²¹から 430 L/kg を設定した。パラメータは A.1.5 に示した。

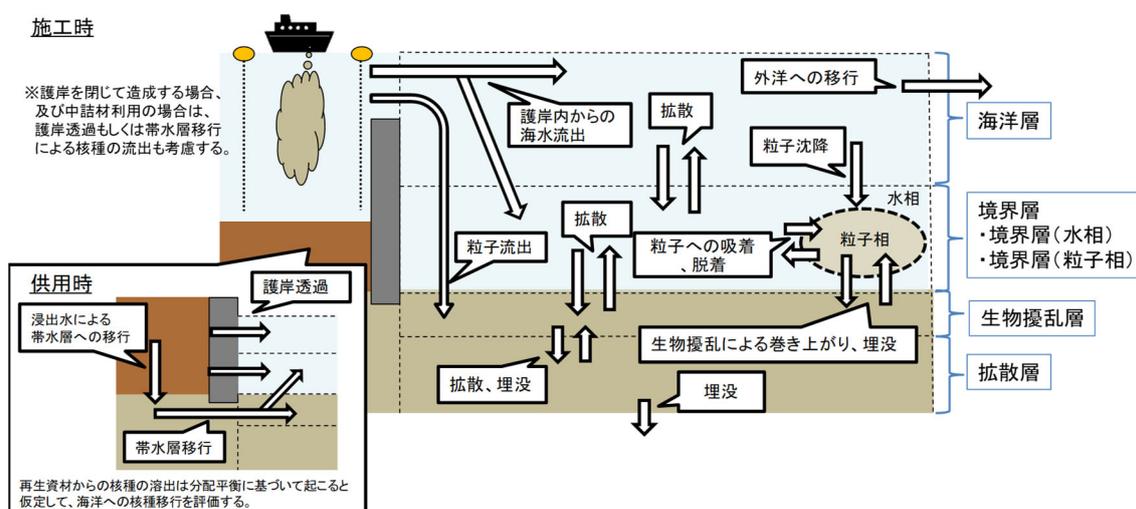


図 3.1-6 評価モデルの概念図

3.1.4.2 沿岸域における核種移行評価への Sediment model の適用性の確認

本研究で拡張した鉛直一次元の海洋層を含む Sediment model を、海面埋立を行うような水深 20m 程度の海域に適用する際のパラメータの妥当性の確認を行う。本研究で独自に設定したパラメータである海底土の分配係数について検討する。本研究で設定した分配係数と OECD¹⁷にて利用されている分配係数を用いて福島沿岸の核種分布の再現計算を実

施し、福島沿岸の実測値との比較から確認する。

はじめに、海面埋立地への再生利用に係る評価に用いるパラメーターの妥当性確認に、1F 事故後の福島沿岸のデータを利用することの妥当性について検討する。海面埋立地に除去土壌を再生利用する場合、核種は海面埋立地から海洋へ流出することになる。一方、1F 事故後の環境においては、核種は 1F から大気と海洋に放出され、大気へ放出された Cs-137 の量は海洋へ放出された量よりも数倍高いと推定されている²²。このことから海面埋立地に除去土壌を再生利用した場合と 1F 事故事例では、環境への核種の放出のされ方が異なることが考えられる。しかし、大気へ放出された核種量が海洋へ放出された量の数倍程度であること、および核種が広範囲に拡散していくことを考慮すると、1F 付近の海域（ここでは図 3.1-10 に示す測点が含まれる 1F を中心とした半径 20km の海域）への大気からの核種の沈着量は、最大でも海洋へ放出された核種量と同程度であろう。このことから大気に放出された核種の 1F 沿岸域の核種分布への寄与は相対的には小さく、海洋へ放出された核種が支配的であろうと判断した。なお、本項では福島沿岸における Cs-137 濃度の実測値および推定値の水中濃度と海底土中濃度の関係をオーダーレベルで確認しているため、核種量として最大でもファクター 2 程度の変化にしか寄与しない大気に放出された核種量の考慮の有無は、本評価の結論に影響を与えるものではない。

続いて、1F 事故後の福島沖における核種濃度の経時変化の確認をする。1F 事故後の福島沖における海水中と海底土中の Cs-137 濃度の実測値²³を、図 3.1-7 から図 3.1-9 に示す。測定点の位置関係を図 3.1-10 に示す。海底土中濃度は、乾燥土中の濃度(Bq/kg・乾土)で公表されているので、堆積物の真密度 (2600 kg/m³) と堆積物中の土壌の割合 (1-堆積物中間隙率 (0.4)) をかけることで体積濃度(Bq/m³)に変換した (堆積物の真密度と堆積物中間隙率の設定根拠については付録の表 A.1-5 に示した)。T-1 は 1F 直近の測点であり、水深は 0.5m である。T-4 は 1F から約 20km 離れた岩沢海岸付近の測点であり、水深は 0.5m である。T-D1 は 1F から 10km ほど北に位置する請戸川沖合 3km の測点であり、水深は 22m である。これらの測点における表層濃度は、事故直後は非常に高い値を示すが、一年以内に 2~4 桁ほど濃度が低下し、事故発生から 2 年後以降は緩やかに濃度が低下していく。海底土中濃度は、事故直後のデータはないが、事故後 1 年以降はほぼ一定の濃度となっている。これらの測点の表層濃度と海底土中濃度の関係に着目すると、事故から 2 年後以降は海底土中濃度が表層濃度に比べて 3~4 桁高い状態が続くという共通の傾向を持つ。

本研究で設定した分配係数(430 L/kg)と OECD の文献¹⁷ で用いられている分配係数(2000 L/kg)の妥当性の比較を行う。本研究で用いている 430 L/kg は、日本沿岸における実測値から設定された値²¹である。2000 L/kg は深海底の堆積物における分配係数として設定された値である。実環境を考えた場合、海底の土壌は様々な分配係数を持つ粒子が集まって構成されているが、本研究においては核種移行評価を実施するにあたって 430 L/kg および 2000 L/kg を海底土壌の分配係数として扱っている。海水中の土壌への核種の取着のしやすさは、環境中の様々な要因により変化し、分配係数は実測値としてオーダーレベルでばらつきが

ある。本研究で検討する 430 L/kg および 2000 L/kg という値を考えた場合、値の差を生じさせる原因を特定することは難しいが、ひとつの要因として海底土壌への核種の移行メカニズムが異なる点が考えられる。海水中の放射性核種の海底への移行に関して、不溶性となって沈降し堆積する過程や、間隙水中の核種が海底土へ収着する過程などが考えられる²⁴。深海底に人工放射性物質が移行する過程として、フォールアウトにより海水中に供給された核種が不溶性の粒子に吸着し沈降することが考えられている。溶存した核種は海水と同じ挙動を示すので、溶存核種の鉛直方向の移動は水温躍層により制限され、数十年単位では深海底までの大規模な拡散は起こらない²⁴。一方、沿岸域においては水深が比較的小さいため溶存核種も海底まで拡散し、海水から海底土壌に核種が分配される可能性がある。また、陸域に供給され土壌に付着した核種の、河川や風雨による海洋への流入も生じる。このような核種の移行メカニズムの違いが分配係数の差が生じる要因のひとつとして考えられる。

本評価においては分配係数が大きい方が、被ばく線量への影響が大きい生物擾乱層の核種濃度が高くなるので評価としては保守的ではあるが、海面埋立地を造成する環境を考慮した安全評価とするため分配係数として 430 L/kg を選択している。

それぞれの分配係数を用いて、1F 事故後の福島沖における表層中と海底土中の Cs-137 濃度の再現計算を行う。鉛直一次元のコンパートメントモデルによる評価結果は、初めのタイムステップにおける海洋層中の核種濃度を 1 として規格化する。また、1F からの Cs-137 供給量の経時的な変化を再現する。1F からの Cs-137 の供給量として、1F に最も近い測点である T1 の表層濃度を規格化した値を海洋層に経時的に与える。コンパートメントの面積は濃度の絶対値に影響するが、ここでは各コンパートメント中濃度を規格化しているので評価海域の面積は単位面積の 1km² とした。その他の評価条件は 3.1.4.1 と同じとした。

図 3.1-11 に分配係数を 430 L/kg とした場合の鉛直一次元のコンパートメントモデルによる海洋中核種移行評価の結果を示す。図 3.1-12 に分配係数を 2000 L/kg とした場合の鉛直一次元のコンパートメントモデルによる海洋中核種移行評価の結果を示す。評価結果は、海洋の表面における核種濃度を評価している「海洋層」を実測値の「表層濃度」と比較し、海底土の表面における核種濃度を評価している「生物擾乱層」を実測値の「海底土濃度」と比較する。ここで、海底土濃度として拡散層の濃度を用いないのは、拡散層は海水（境界層（水相））との核種移行を評価する層ではないからである。拡散層は生物擾乱層との間の、拡散および埋没による核種移行を評価している。海洋層の濃度は図 3.1-11 と図 3.1-12 とともに、0 年目は非常に高い値を示すが、一年以内に 2~4 桁ほど濃度が低下し、2 年目以降は緩やかに濃度が低下していく。これは実測値の表層濃度の傾向と一致している。生物擾乱層の濃度は図 3.1-11 と図 3.1-12 とともに、0 年目は海洋層濃度よりも低いが、1 年以内に濃度が 1 桁ほど上昇し、1 年目以降はほぼ一定の濃度となっている。これも実測値の海底土濃度の傾向と一致している。しかし、Kd が 430 L/kg の場合は生物擾乱層の濃度が上昇しても評価開始時の海洋層濃度より 1 桁ほど低いのにに対し、Kd が 2000 L/kg の場合は評価開始時の海洋層濃度とほぼ同値まで上昇する。これにより表層濃度と海底土中濃度の関係に着目すると、Kd

が 430 L/kg の場合は 2 年目以降の生物擾乱層濃度が海洋層濃度に比べて 3 桁ほど高いのに対し、Kd が 2000 L/kg の場合は 2 年目以降の生物擾乱層濃度が海洋層濃度に比べて 4 桁ほど高いという結果になる。実測値の図 3.1-7 から図 3.1-9 にて表層濃度と海底土中濃度の関係を見ると、T-D1 では海底土中濃度に幅があるが、おおむね海底土中濃度が表層濃度より 3 桁高い。また、図 3.1-7 から図 3.1-9 にて海底土中濃度がほぼ一定になった後の濃度は事故直後の表層濃度に比べて低い。これらのことから、海面埋立を行うような 20m 程度の海域における鉛直一次元のコンパートメントモデルの評価においては、分配係数は 2000 L/kg よりも 430 L/kg の方が妥当であると判断した。

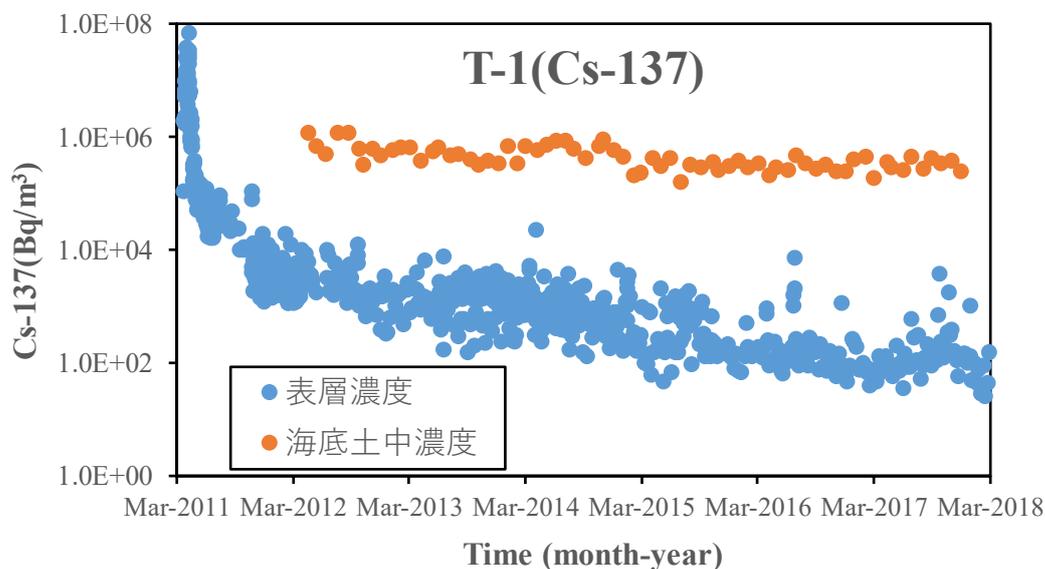


図 3.1-7 T-1 の実測値

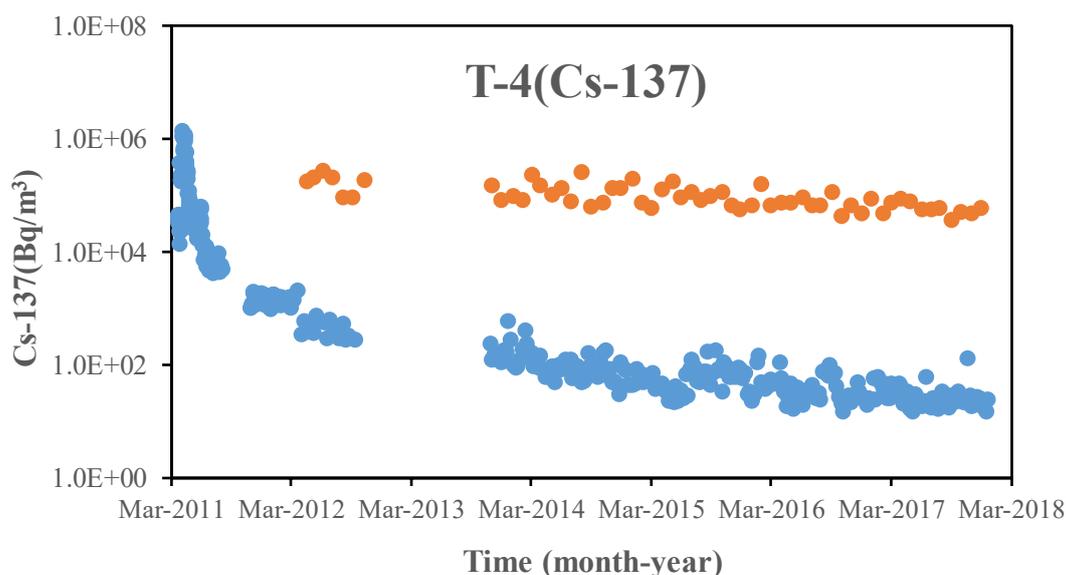


図 3.1-8 T-4 の実測値

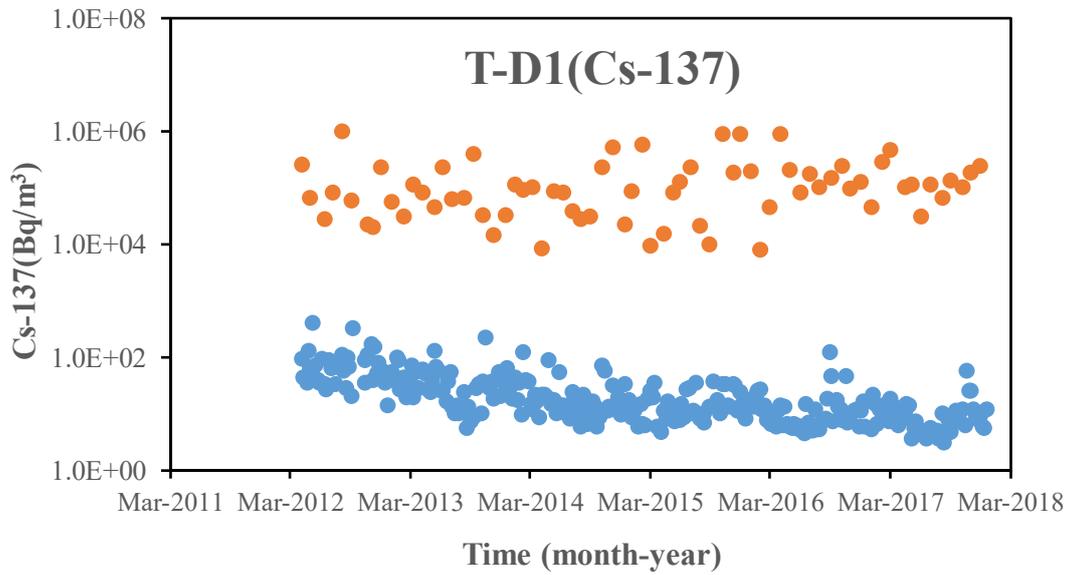


図 3.1-9 T-D1 の実測値

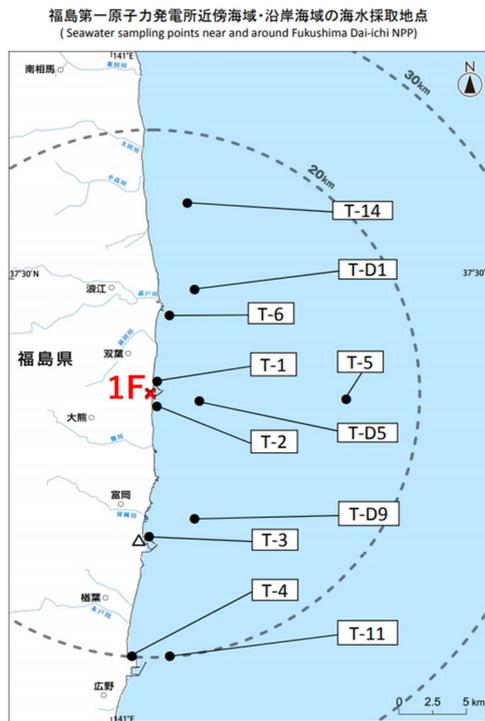


図 3.1-10 福島第一原子力発電所沿岸の測定点
(「原子力規制委員会 HP, 放射線モニタリング情報²³」より引用し加工)

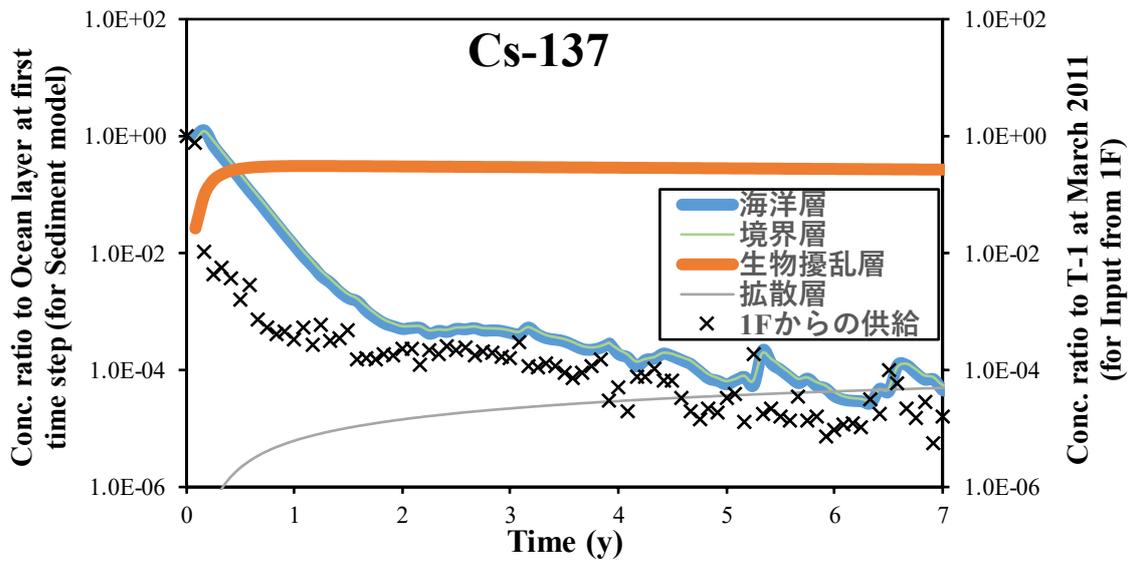


図 3.1-11 分配係数を 430 kg/L とした際の評価値

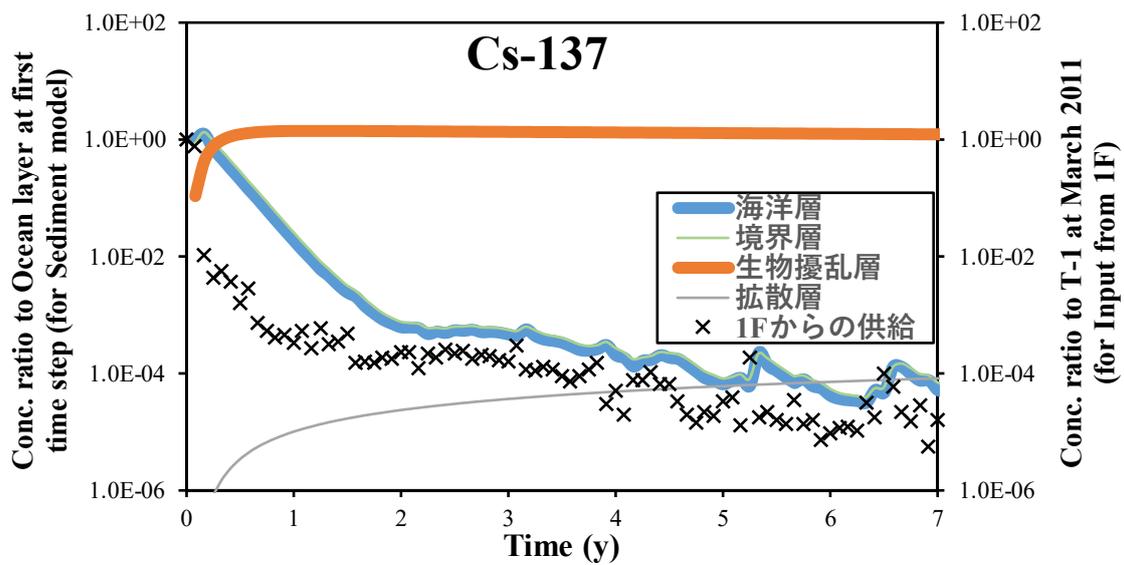


図 3.1-12 分配係数を 2000 kg/L とした際の評価値

3.1.4.3 施工時に海洋へ流出する核種量の評価

本モデルでは施工時の核種の流出を、海洋層、境界層（水相）、生物擾乱層への流入項 Q_0 、 Q_1 、 Q_2 で再現した。なお、施工時に流出した核種量は供用時の初期値として各コンパートメントに与える。以下の評価では、再生資材中のセシウム濃度を単位濃度(1,000 Bq/kg)として計算している。

施工時に護岸の一部を開けて造成する場合は、投入した土砂の流出を抑制するための汚濁防止膜を用いることを仮定した。ただし、汚濁防止膜を用いたとしても、その性能には限

界があり、ある程度の土砂は流出する²⁵。したがって、施工時に護岸の一部を開けて造成する場合は、溶存した核種量と粒子に付着した核種量が海洋へ流出すると想定した。なお、護岸の一部を開けて造成する場合は、核種流出方法として護岸開口部からの流出が優占的であると想定し、護岸透過もしくは帯水層移行による核種の流出評価は行わない。

溶存した核種の流出は、投入した土砂から海水中に移行した溶存核種が、潮汐による護岸内外の海水の交換により、護岸の外に流出するという現象を想定した。粒子に付着した核種の流出は、護岸で囲まれた範囲内に汚濁防止膜を設置し、その中に土砂を投入することによる核種の流出を想定する。護岸内の海水中には汚濁防止膜で流出を抑制できなかった分の土砂が存在し、その土砂を含む海水が潮汐による護岸内外の海水交換により護岸の外に流出することで、粒子に付着した核種が流出することを想定した。施工期間中に流出した溶存した核種量と粒子に付着した核種量(Bq)は以下の式で求める。パラメーターは付録の A.1.5 中の表 A.1-4 に示した。以下の式で求めた施工期間中に流出した核種量を表 3.1-4 に示す。

溶存した核種の流出量(Bq)

= 1日の護岸内外の交換水量(m³/d)×海水中に溶存した核種濃度(Bq/m³)×作業日数(d)

粒子に付着した核種の流出量(Bq)

= 1日の護岸内外の交換水量(m³/d)×海水中の埋立柱濃度(kg/m³)×埋立柱中核種濃度(Bq/kg)×作業日数(d)

溶存した核種と粒子に付着した核種は、施工期間中は一定の割合で流出するとして、各層への流入項は年あたりのフラックスとして評価した。フラックスは、施工期間中に流出した溶存した核種量と粒子に付着した核種量を算出し、それらを施工期間で割ることで算出した。溶存した核種のフラックスは海洋層(Q₀)と境界層(水相)(Q₁)に各層の厚さの割合で流入させた(図 3.1-13)。粒子に付着した核種のフラックスは、土砂がすぐに海底に堆積することを想定して生物擾乱層に流入させた(Q₂)。生物擾乱層はコンパートメント中の核種量として溶存した核種量と粒子に付着した核種量を持ち、上層の溶存核種濃度とは分配係数に基づく分配平衡の関係になる。生物擾乱層中の土壌中には分配係数に基づき水中の核種が濃縮される形になっており、海産物摂取経路に最も影響を与える層である。従って、施工時に流出した土砂に付着した核種量を生物擾乱層に加えるのは、シナリオとして保守的である。

護岸を閉じて造成する場合には、粒子に付着した核種の流出はない設定とした。溶存した核種の流出方法として、水平方向の地下水が卓越し護岸を透過する場合と鉛直方向への地下水浸透が卓越し帯水層中を移行する場合を想定し、それぞれの移行経路について評価した。核種の移行のイメージを図 3.1-13 に示す。護岸を透過して移行した核種は海洋層(Q₀)と境界層(水相)(Q₁)に各層の厚さの割合で流入させた。帯水層を移行した核種は境界層(水

相) (Q_1)と生物擾乱層(Q_2)に各層の厚さの割合で流入させた。各コンパートメントへの流入項は分配係数モデルを用いて経時的に算出した。この際、ソースとなる埋立柱の体系は線源サイズが最大となるよう投入作業完了時のサイズとする。

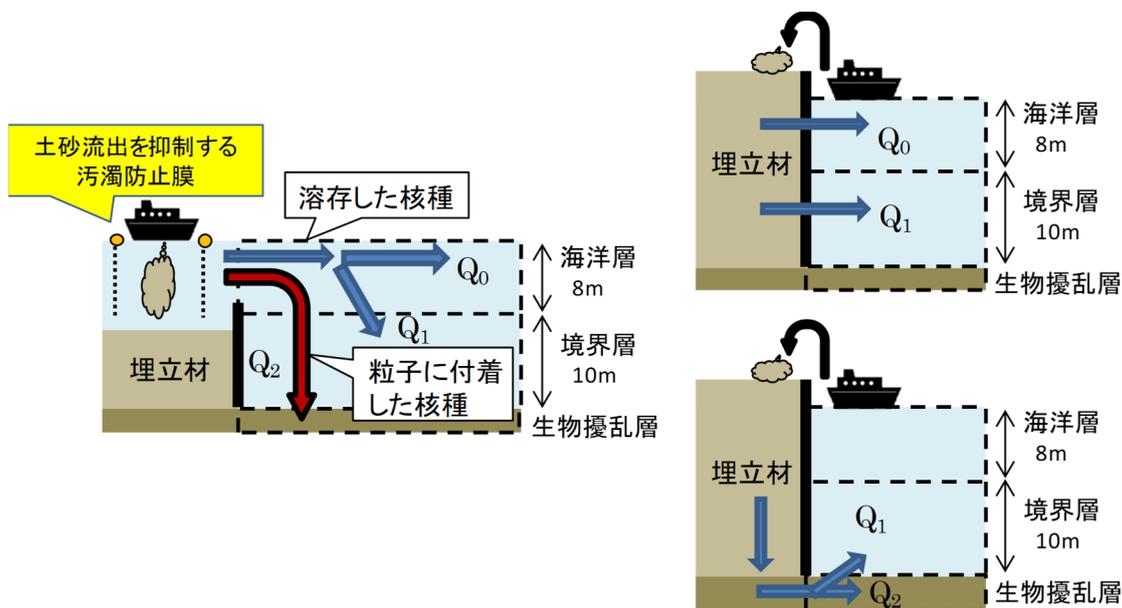


図 3.1-13 埋立柱投入時の核種流出図

(左：護岸の一部を開けて造成する場合、右上：護岸を閉じて造成し護岸透過による核種移行を想定する場合、右下：護岸を閉じて造成し帯水層移行による核種移行を想定する場合)

中詰材を護岸構造物に投入する際は、投入により護岸構造物中に入っていた海水があふれ出すことが考えられる。この場合、溶存した核種と粒子に付着した核種が海洋へ流出する。また、上記に加えて溶存した核種の流出方法として、水平方向の地下水が卓越し護岸を透過する場合と鉛直方向の地下水が卓越し帯水層を移行する場合を想定した。核種の移行のイメージを図 3.1-14 に示す。海水があふれ出すことによる核種の流出は、施工期間中は一定の割合で核種が流出すると仮定し、各層への流入項は年あたりのフラックスとして評価した。フラックスは、施工期間中に流出した溶存した核種量と粒子に付着した核種量を算出し、それらを施工期間で割ることで算出する。溶存した核種のフラックスは海洋層(Q_0)と境界層(水相) (Q_1)に各層の厚さの割合で流入させる。粒子に付着した核種のフラックスは生物擾乱層(Q_2)に流入させる。施工期間中に流出した溶存した核種量(Bq)と粒子に付着した核種量(Bq)は以下の式で求めた。パラメーターは付録の A.1.5 中の表 A.1-4 に示した。以下の式で求めた施工期間中に流出した核種量を表 3.1-4 に示す。

溶存した核種の流出量(Bq)

= 護岸構造物内から流出する海水量(m^3) \times 海水中に溶存した核種濃度(Bq/ m^3)

粒子に付着した核種の流出量(Bq)

= 護岸構造物内から流出する海水量(m^3) \times 護岸構造物内の海水中の中詰材濃度(kg/ m^3) \times 中詰材中核種濃度(Bq/kg)

護岸を透過して移行した核種は海洋層(Q_0)と境界層(水相) (Q_1)に各層の厚さの割合で流入させた。帯水層を移行した核種は境界層(水相) (Q_1)と生物擾乱層(Q_2)に各層の厚さの割合で流入させた。各コンパートメントへの流入項は分配係数モデルを用いて経時的に算出する。この際、ソースとなる中詰材の体系は線源サイズが最大となるよう投入作業完了時のサイズとした。

また本研究では、中詰材には核種が付着しているということを考慮して、中詰材投入時に土砂の流出を抑制するような手法が取られることを想定した。中詰材投入の際にろ過装置(フィルター等)を搭載したポンプ等を用いることを想定し、粒子に付着した核種の流出を抑制した場合についても評価を行った。この場合は、護岸透過もしくは帯水層移行による溶存した核種の流出と、ポンプ等により排水された海水に含まれている溶存した核種の流出を想定した。護岸透過および帯水層移行による溶存した核種の各コンパートメントへの流入項は分配係数モデルを用いて経時的に算出した。この際、ソースとなる中詰材の体系は線源サイズが最大となるよう投入作業完了時のサイズとした。ポンプにより排水された海水に含まれる溶存した核種量は上記の護岸構造物から海水が流出する場合の核種流出量から、粒子に付着した核種の流出量を差し引いた値とした。ポンプにより排水された海水に含まれる溶存した核種および護岸を透過した核種は海洋層(Q_0)と境界層(水相) (Q_1)に各層の厚さの割合で流入させる。帯水層を移行した核種は境界層(水相) (Q_1)と生物擾乱層(Q_2)に各層の厚さの割合で流入させた。

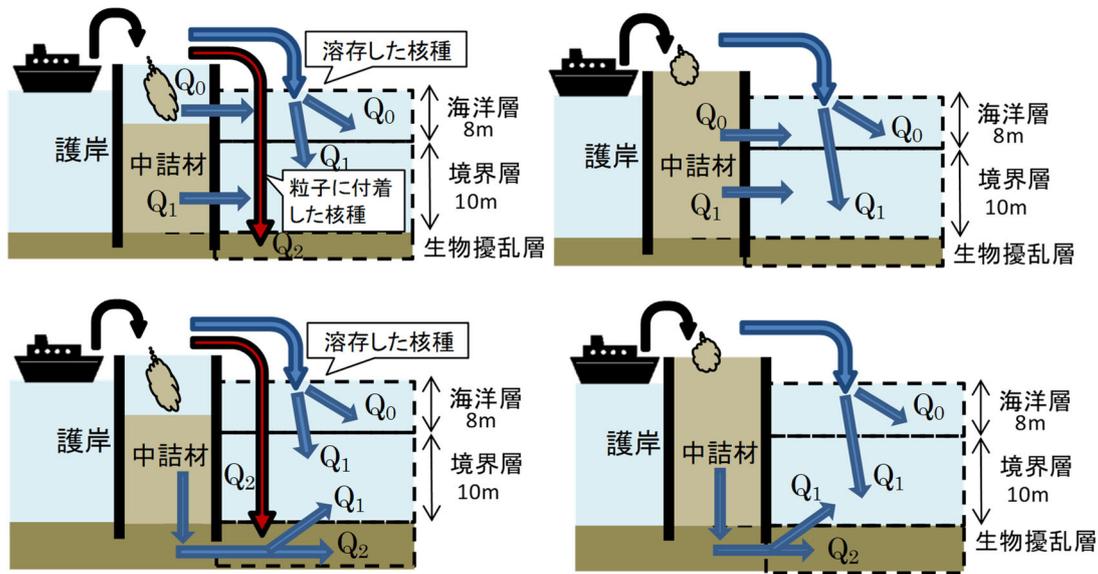


図 3.1-14 中詰材投入時の核種流出図

(左上：土砂投入により海水流出を想定した場合（護岸透過）、左下：土砂投入により海水流出を想定した場合（帯水層移行）、右上：ポンプにより粒子流出を抑制した場合（護岸透過）、右下：ポンプにより粒子流出を抑制した場合（帯水層移行））

表 3.1-4 施工期間中に流出する核種量(Bq)

ケース	施工方法	溶存した核種量(Bq)	粒子に付着した核種量(Bq)
ケース 1,2	護岸の一部を開けて造成した場合	8.0E+11	6.8E+08
	護岸を閉じて造成した場合	—	—
ケース 3,4 (セル式護岸)	土砂投入により海水流出を想定した場合	1.2E+09	4.2E+08
	ポンプにより粒子流出を抑制した場合	1.2E+09	—
ケース 3,4 (重力式護岸)	土砂投入により海水流出を想定した場合	9.7E+08	3.3E+08
	ポンプにより粒子流出を抑制した場合	9.7E+08	—

※「—」は施工による核種の流出を想定しないことを示す。

※施工時の核種移行評価では上記の値に加え護岸透過もしくは帯水層移行による核種の流出も評価する。

●施工時の核種移行評価結果

施工時の核種移行をケース 1,2 及び 3,4 に対して施工方法ごとに評価した。施工時の移行

評価は埋立柱材・中詰材の投入作業期間に対して行った。施工に要する期間は標準歩掛¹¹等を基に算出し、埋立柱材の投入作業期間は25ヶ月、中詰材の投入期間は6ヶ月と設定した。被ばく評価は施工期間中の各コンパートメントの最大濃度を用いて行う。核種移行評価は、再生資材中のセシウム濃度を単位濃度(1,000 Bq/kg)として計算した。施工時の核種移行評価結果は、付録の「A.1.6」に示した。

被ばく評価に用いる海洋層、境界層、生物擾乱層における核種の最大濃度を表3.1-5に示す。護岸を透過する場合と帯水層を移行する場合の濃度を比較して、被ばく評価に用いる濃度を黄色のマーカーで示す。

表 3.1-5 施工時の核種移行評価結果（最大濃度）

ケース	施工方法 ※1	溶存核種の 流出形態	海洋層 (Bq/m ³ per Bq/g)		境界層 (Bq/m ³ per Bq/g)		生物擾乱層 (Bq/m ³ per Bq/g)	
			Cs-134	Cs-137	Cs-134	Cs-137	Cs-134	Cs-137
			1,2	①	—※2	3.3E+00	3.5E+00	4.0E+00
1,2	②	護岸透過	4.0E-03	5.0E-03	5.0E-03	6.1E-03	5.2E-03	9.9E-03
		帯水層移行	4.6E-06	8.9E-06	6.4E-06	1.2E-05	6.4E-05	1.2E-04
3,4※3	③	護岸透過	2.3E-02	2.4E-02	2.8E-02	3.0E-02	3.9E+00	4.2E+00
		帯水層移行	2.0E-02	2.0E-02	2.4E-02	2.4E-02	3.9E+00	3.9E+00
	④	護岸透過	2.3E-02	2.4E-02	2.8E-02	3.0E-02	8.2E-03	9.1E-03
		帯水層移行	2.0E-02	2.1E-02	2.4E-02	2.5E-02	7.0E-03	7.7E-03
3,4※4	③	護岸透過	1.9E-02	2.0E-02	2.3E-02	2.4E-02	3.1E+00	3.3E+00
		帯水層移行	1.6E-02	1.6E-02	1.9E-02	2.0E-02	3.1E+00	3.3E+00
	④	護岸透過	1.9E-02	2.0E-02	2.3E-02	2.4E-02	6.7E-03	7.4E-03
		帯水層移行	1.6E-02	1.6E-02	1.9E-02	2.0E-02	5.6E-03	6.1E-03

※1 ①護岸の一部を開けて造成した場合、②護岸を閉じて造成した場合、

③土砂投入により海水流出を想定した場合、④ポンプにより粒子流出を抑制した場合

※2 核種流出方法として護岸開口部からの流出が優占的であると想定し、護岸透過もしくは帯水層移行による核種の流出評価は行わない

※3 セル式護岸の中詰材として利用した場合

※4 重力式護岸の中詰材として利用した場合

3.1.4.4 供用時に海洋へ流出する核種量の評価

供用時は、浸透水による核種移行を想定し粒子に付着した核種の流出はない設定とした。供用時の浸透水による移行経路として、水平方向の地下水が卓越し護岸を透過する場合と鉛直方向の地下水が卓越し帯水層を移行する場合を想定した。浸透水による核種の各コンパートメントへの流入項は分配係数モデルを用いて経時的に算出した。護岸を透過して流出した場合は海洋層(Q_0)と境界層(水相) (Q_1)に各層の厚さの割合で流入させた。帯水層を移行して流出する場合は、境界層(水相) (Q_1)と生物擾乱層(Q_2)に各層の厚さの割合で流入させた。

●供用時の核種移行評価結果

供用時の核種移行をケース 1,2 とケース 3,4 について施工時の施工方法及び核種の移行方法ごとに評価した。供用時の評価では施工完了時点の各コンパートメント中の濃度を初期値として与える。被ばく評価には、護岸を透過する場合と帯水層を移行する場合の移行評価の結果で濃度が高い方を用いた。また、被ばく評価には施工期間中の各コンパートメントの最大濃度を用いて行う。核種移行評価は、再生資材中のセシウム濃度を単位濃度(1,000 Bq/kg)として計算した。供用時の核種移行評価結果は、付録の A.1.7 に示した。

移行評価の結果から、海洋層、境界層、生物擾乱層の供用時における核種の最大濃度を表 3.1-6 に示す。護岸を透過する場合と帯水層を移行する場合の濃度を比較して、被ばく評価に用いる濃度を黄色のマーカーで示す。

表 3.1-6 供用時の核種移行評価結果（最大濃度）

ケース	施工方法 ※1	溶存核種の 流出形態	海洋層 (Bq/m ³ per Bq/g)		境界層 (Bq/m ³ per Bq/g)		生物擾乱層 (Bq/m ³ per Bq/g)	
			Cs-134	Cs-137	Cs-134	Cs-137	Cs-134	Cs-137
			1,2	①	護岸透過	3.3E+00	3.5E+00	4.0E+00
		帯水層移行	3.3E+00	3.5E+00	4.0E+00	4.2E+00	9.8E+00	1.4E+01
	②	護岸透過	2.2E-02	5.1E-03	2.3E-02	6.2E-03	3.9E-02	8.6E-02
		帯水層移行	5.1E-06	7.8E-05	7.0E-06	1.1E-04	1.5E-04	2.9E-02
3,4※2	③	護岸透過	2.3E-02	2.4E-02	2.8E-02	3.0E-02	3.9E+00	4.2E+00
		帯水層移行	2.0E-02	2.0E-02	2.4E-02	2.4E-02	3.9E+00	3.9E+00
	④	護岸透過	2.3E-02	2.4E-02	2.8E-02	3.0E-02	1.2E-02	6.8E-02
		帯水層移行	2.0E-02	2.1E-02	2.4E-02	2.5E-02	9.2E-03	1.2E-02
3,4※3	③	護岸透過	1.9E-02	2.0E-02	2.3E-02	2.4E-02	3.1E+00	3.3E+00
		帯水層移行	1.6E-02	1.6E-02	1.9E-02	2.0E-02	3.1E+00	3.3E+00
	④	護岸透過	1.9E-02	2.0E-02	2.3E-02	2.4E-02	9.9E-03	6.7E-02
		帯水層移行	1.6E-02	1.6E-02	1.9E-02	2.0E-02	7.3E-03	9.1E-03

※1 施工時の施工方法ごとに供用時の初期値を与える。施工方法は以下のとおり。

- ①護岸の一部を開けて造成した場合、②護岸を閉じて造成した場合、
- ③土砂投入により海水流出を想定した場合、④ポンプにより粒子流出を抑制した場合

※2 セル式護岸の中詰材として利用した場合

※3 重力式護岸の中詰材として利用した場合

3.1.4.5 海洋へ流出した核種からの被ばく線量評価方法

海洋へ流出した核種からの被ばくは、表 3.1-2 に示した経路 No.27~32 及び No.39~44 の「海産物摂取」、「海岸活動」、「浚渫作業」で評価する。各経路の被ばく評価に用いるコンパートメント濃度の選定の考え方を表 3.1-7 のように設定した。

ここで、海産物摂取経路の底生魚類、無脊椎動物、藻類については、海洋層、境界層、生物擾乱層のうち最も濃度が高い層を被ばく線量評価に用いることにしている。「生物擾乱層」の濃度を用いる場合は、溶存核種だけではなく粒子に付着した核種量も含めて、海産物体内への核種濃縮を計算することとなる。濃縮係数は一般的に水中濃度に対して適用される。しかし、海底付近に生息する底生魚類（ひらめやカレイ等を想定）の体内への核種濃縮には粒子に付着した核種が影響していることが既往研究¹⁵により示されている。そこで海底付近に生息する魚介類に対して、懸濁物濃度が高い状況における懸濁物に付着した核種濃度を

併せて海水中濃度として評価することにより保守的な評価となるようにした。評価に用いたパラメーターは付録の表 A.1-5 に示した。

表 3.1-7 各経路の被ばく評価に用いるコンパートメント濃度の選定の考え方

経路名称		評価に用いる コンパートメント	備考
海産物摂取	遊泳性魚類	海洋層	海産物の生息環境を考慮して、海産物の種類ごとに評価に用いるコンパートメント濃度を設定する。本評価では、クリアランスレベル評価 ⁷ で対象としている魚類、無脊椎動物、藻類のうち魚類を遊泳性魚類と底生魚類に分けた。遊泳性魚類は主に海洋の表層・中層に生息し、底生魚類は海底付近に生息する魚類として設定した。
	底生魚類	海洋層、境界層 ^{※1} 、 生物擾乱層のうち最も濃度が高い層	
	無脊椎動物		
	藻類		
海岸活動		海洋層	クリアランスレベル評価 ⁷ に沿って、海水中に溶存した核種が海岸砂へ移行し、その海岸上で活動する公衆への被ばくを想定した。
浚渫作業		生物擾乱層	浚渫作業（海底をさらって土砂などを取り除く作業）を行っている作業員への被ばくを想定。

※1: 本モデルでは境界層に含まれる溶存した核種と粒子に付着した核種の移行をそれぞれコンパートメントを設けて評価している。被ばく評価の際には両方の形態の核種量を合計して算出した核種濃度を用いる。

海産物中の核種濃度は既往の安全評価⁷で用いられている以下の式により求める。

$$C_{m,i}(t) = C_{c,i}(t) \cdot 10^{-3} \cdot T_{m,i} \quad \text{数式 3.1-1}$$

ここで、

- $C_{m,i}(t)$: 海産物 m 中の核種 i 濃度(Bq/kg)
- $C_{c,i}(t)$: コンパートメント c 中の核種 i 濃度(Bq/m³)
- $T_{m,i}$: 核種 i の海産物 m への濃縮係数(L/kg)

海産物摂取による内部被ばく線量は既往の安全評価⁷で用いられている以下の式により求める。

$$D_{ING,i}(t) = \sum_m C_{m,i}(t) \cdot Q_m \cdot G_m \cdot \exp\left(-\frac{\lambda_i \cdot t_{sm}}{365}\right) \cdot DCF_{ING,i} \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i t_i)}{\lambda_i t_i}$$

数式 3.1-2

ここで、

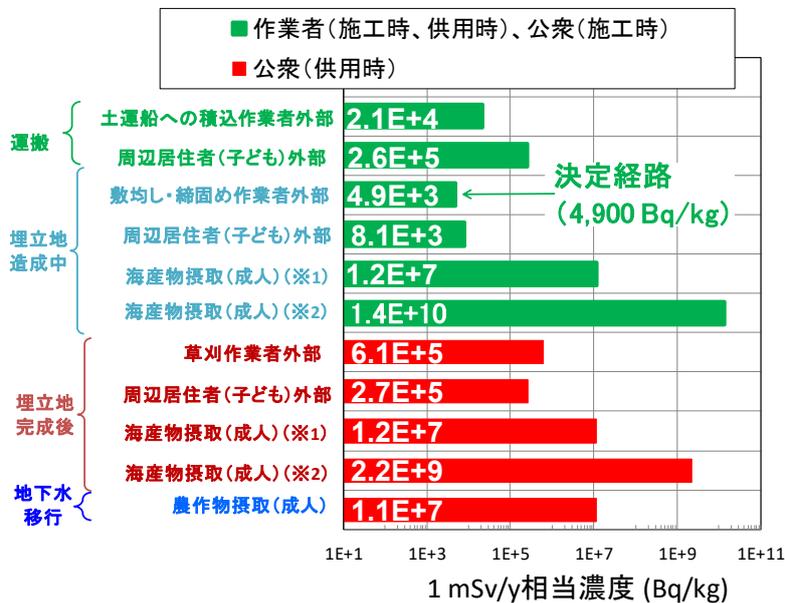
$D_{ING,i}(t)$:	核種 i の経口摂取による内部被ばく線量(Sv/y)
Q_m	:	海産物 m の摂取量(kg/y)
G_m	:	海産物 m の市場係数(-)
λ_i	:	核種 i の崩壊定数(1/y)
t_{sm}	:	海産物 m の輸送時間(d)
$DCF_{ING,i}$:	核種 i の経口内部被ばく線量換算係数(Sv/Bq)
t_i	:	被ばく中の減衰期間(y)

海岸活動による外部被ばく線量は既往の安全評価⁷と同様に算出することとする。海水中の核種が吸着した海岸砂上にて作業をすることを想定し、外部被ばく線量換算と作業時間から被ばく線量を評価する（外部被ばく線量換算および作業時間は、表 A.1-5 参照）。

3.1.5 被ばく評価結果

3.1.5.1 各ケースにおける決定経路の 1mSv/y 相当濃度

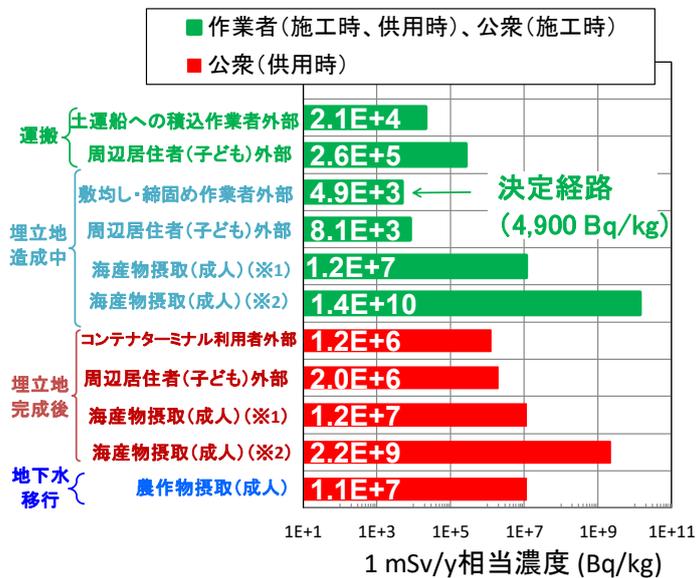
主要な経路における放射性セシウム(Cs-134 と Cs-137)の 1 mSv/y 相当濃度を図 3.1-15 から図 3.1-20 に示す。Cs-134 と Cs-137 の存在比は 1F 事故直後の存在比を 1:1 と仮定したうえで、再生利用開始が事故 5 年後であると想定し、それぞれの半減期から Cs-134 : Cs-137=0.209 : 1 とした。1 mSv/y 相当濃度とは、1 mSv/y を被ばく評価により求めた「単位再生資材中濃度あたりの年間被ばく線量(mSv/y per Bq/g)」で除して単位をそろえた値 (Bq/kg)である。各経路の「単位再生資材中濃度あたりの年間被ばく線量(mSv/y per Bq/g)」の評価結果は、「A.1.9 海面埋立地への再生利用に係る被ばく評価結果の詳細」に示した。1 mSv/y 相当濃度が低いほど被ばくが大きい経路であり、各ケースにて最も 1 mSv/y 相当濃度が低い経路を決定経路と呼ぶ。各ケースに対する決定経路及び 1 mSv/y 相当濃度は表 3.1-8 に示す。各決定経路における 1mSv/y 相当濃度は、海面埋立の埋立材利用時において 4,900Bq/kg、護岸の中詰材利用時では 6,300Bq/kg（セル式護岸）及び 6,500Bq/kg（重力式護岸）であった。全ての経路における被ばく評価結果は「A.1.9 海面埋立地への再生利用に係る被ばく評価結果の詳細」に示した。



※1：護岸の一部を開けて造成した場合

※2：護岸を閉じて造成した場合

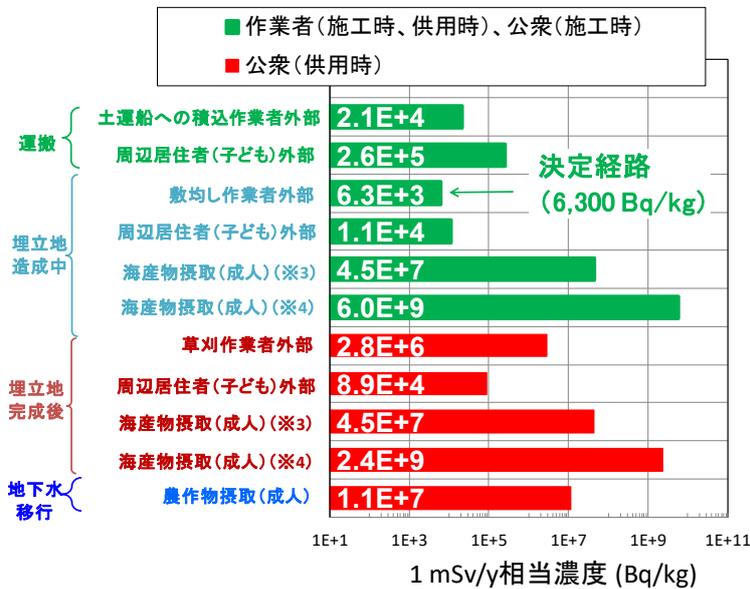
図 3.1-15 主要な経路の 1 mSv/y 相当濃度（ケース 1）



※1：護岸の一部を開けて造成した場合

※2：護岸を閉じて造成した場合

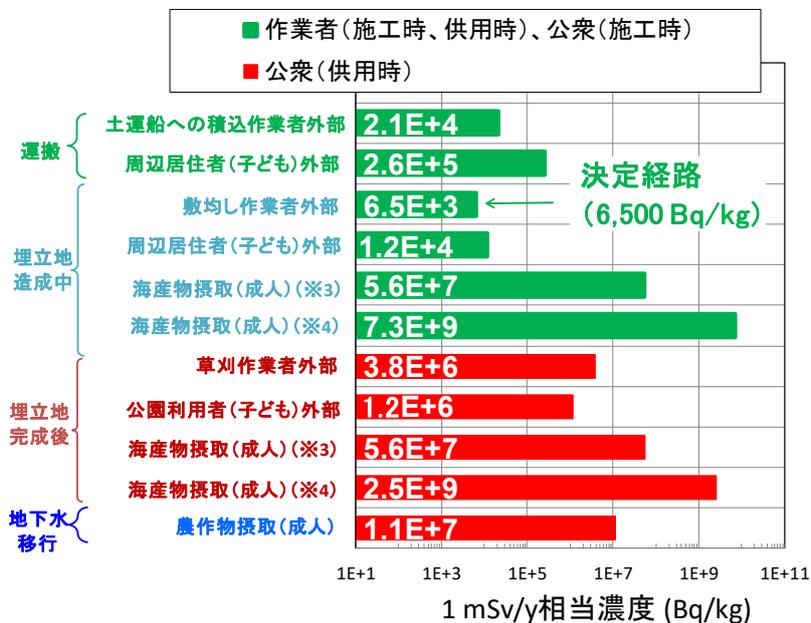
図 3.1-16 主要な経路の 1 mSv/y 相当濃度（ケース 2）



※3：土砂投入により海水流出を想定した場合

※4：ポンプにより粒子流出を抑制した場合

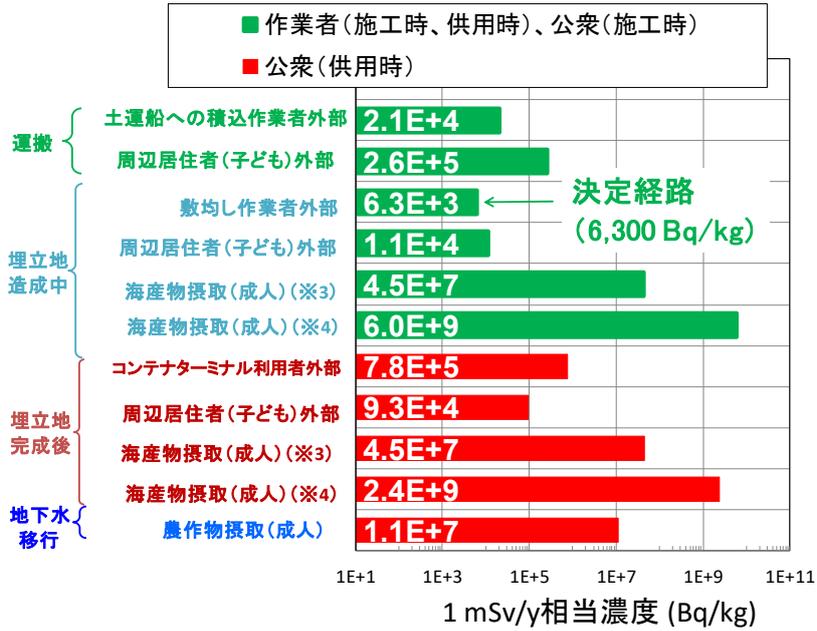
図 3.1-17 主要な経路の 1 mSv/y 相当濃度（ケース 3）、セル式護岸



※3：土砂投入により海水流出を想定した場合

※4：ポンプにより粒子流出を抑制した場合

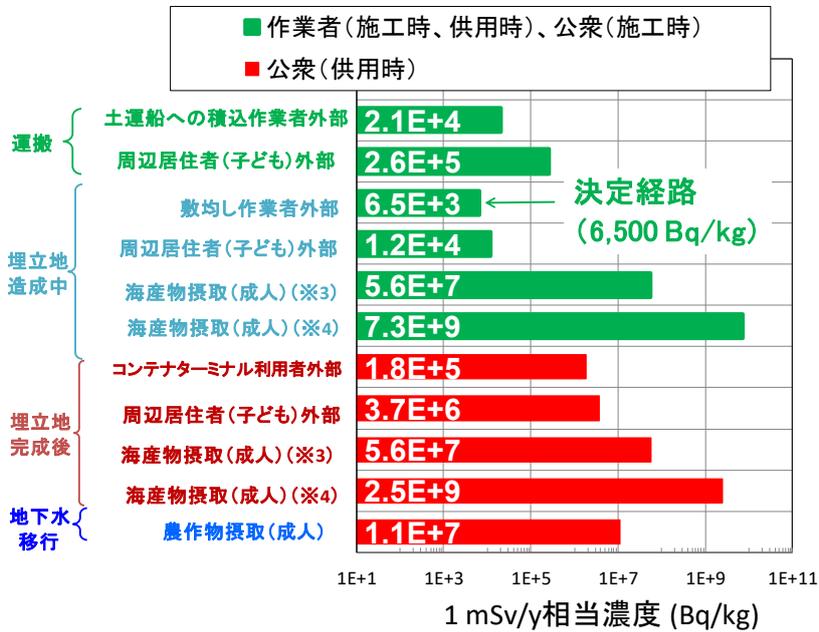
図 3.1-18 主要な経路の 1 mSv/y 相当濃度（ケース 3）、重力式護岸



※3：土砂投入により海水流出を想定した場合

※4：ポンプにより粒子流出を抑制した場合

図 3.1-19 主要な経路の 1 mSv/y 相当濃度（ケース 4）、セル式護岸



※3：土砂投入により海水流出を想定した場合

※4：ポンプにより粒子流出を抑制した場合

図 3.1-20 主要な経路の 1 mSv/y 相当濃度（ケース 4）、重力式護岸

表 3.1-8 決定経路及び 1mSv/y 相当濃度(Bq/kg)

決定経路				1mSv/y 相当濃度 (Bq/kg)
ケース No.	護岸タイプ	経路 番号	経路	
1	—	20	埋立材の敷均し・締固め作業者外部	4,900
2	—	20	埋立材の敷均し・締固め作業者外部	4,900
3	セル式護岸	14	中詰材の敷均し作業者外部	6,300
4	セル式護岸	14	中詰材の敷均し作業者外部	6,300
3	重力式護岸	14	中詰材の敷均し作業者外部	6,500
4	重力式護岸	14	中詰材の敷均し作業者外部	6,500

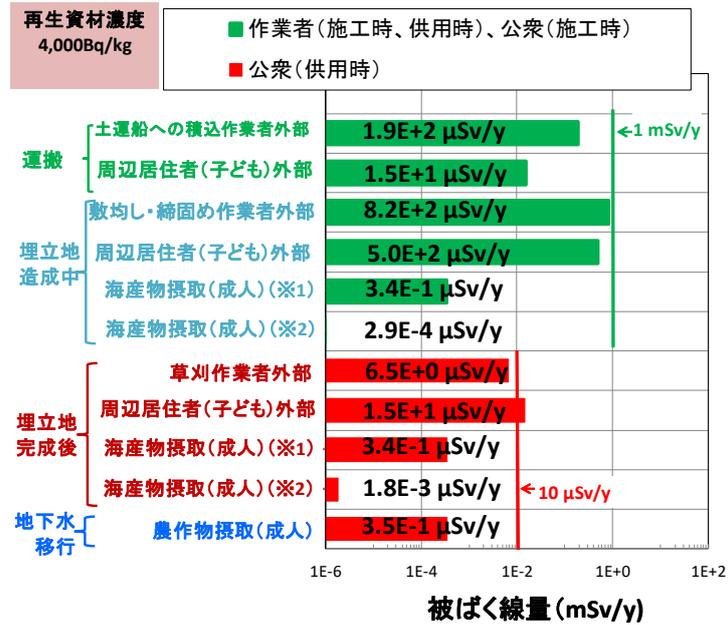
* ケース 1：埋立材に利用し緑地公園を造成 ケース 2：埋立材に利用しコンテナターミナルを造成

* ケース 3：中詰材に利用し緑地公園を造成 ケース 4：中詰材に利用しコンテナターミナルを造成

3.1.5.2 各ケースにおける決定経路の 1mSv/y 相当濃度で再生利用した際の被ばく

線量

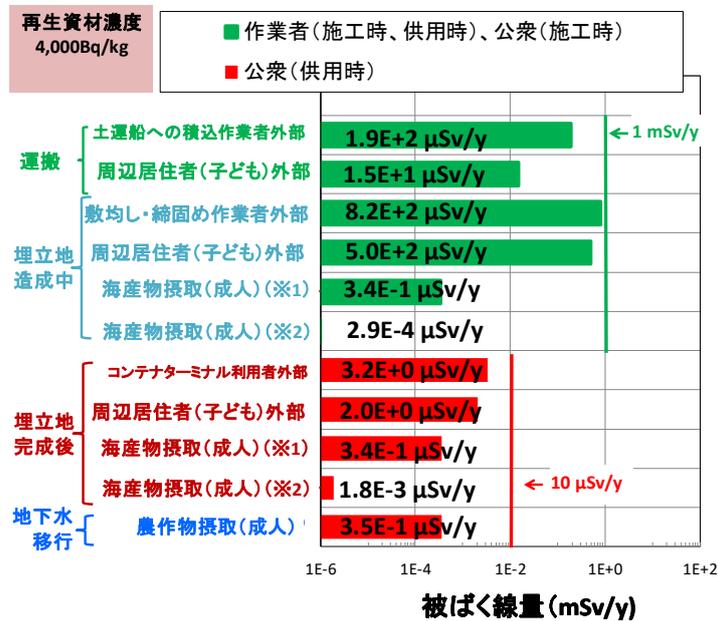
4,000 Bq/kg（埋立材利用時）及び 6,000 Bq/kg（中詰材利用時）の再生資材を使用した場合の被ばく線量を図 3.1-21 から図 3.1-26 に示す。また、環境省「再生資材化した除去土壌の安全な利用に係る基本的考え方について」²で示された再生資材として利用可能な放射能濃度レベル（8,000 Bq/kg 以下を原則）を考慮し、8,000 Bq/kg（埋立材・中詰材利用時）の再生資材を使用した場合の被ばく線量を図 3.1-27 から図 3.1-32 に整理した。



※1：護岸の一部を開けて造成した場合

※2：護岸を閉じて造成した場合

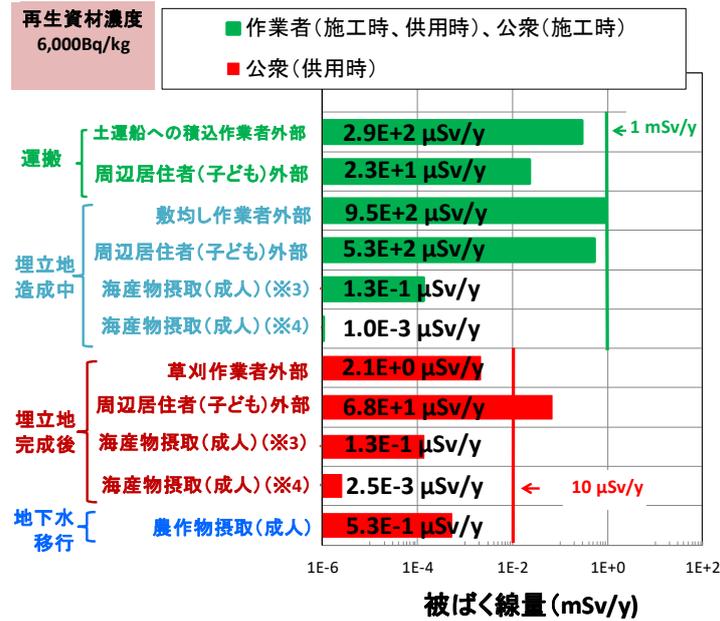
図 3.1-21 4,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の被ばく線量（ケース 1）



※1：護岸の一部を開けて造成した場合

※2：護岸を閉じて造成した場合

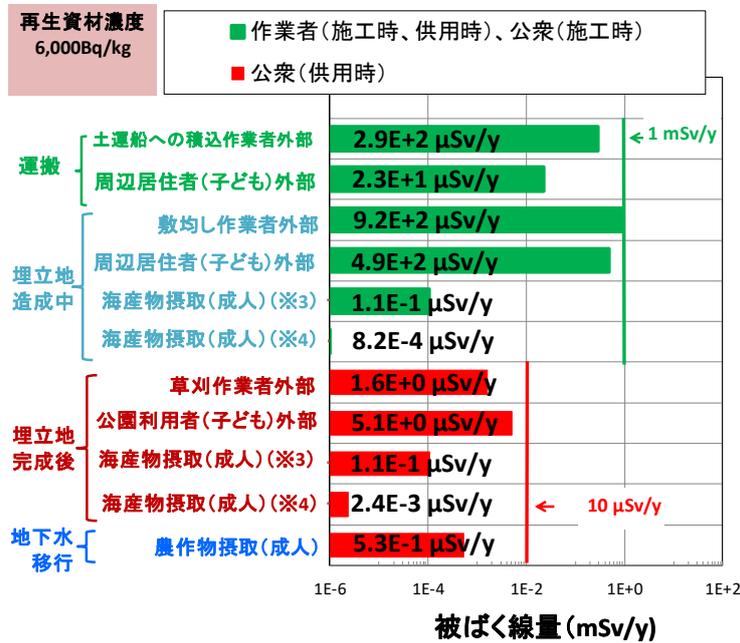
図 3.1-22 4,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の被ばく線量（ケース 2）



※3：土砂投入により海水流出を想定した場合

※4：ポンプにより粒子流出を抑制した場合

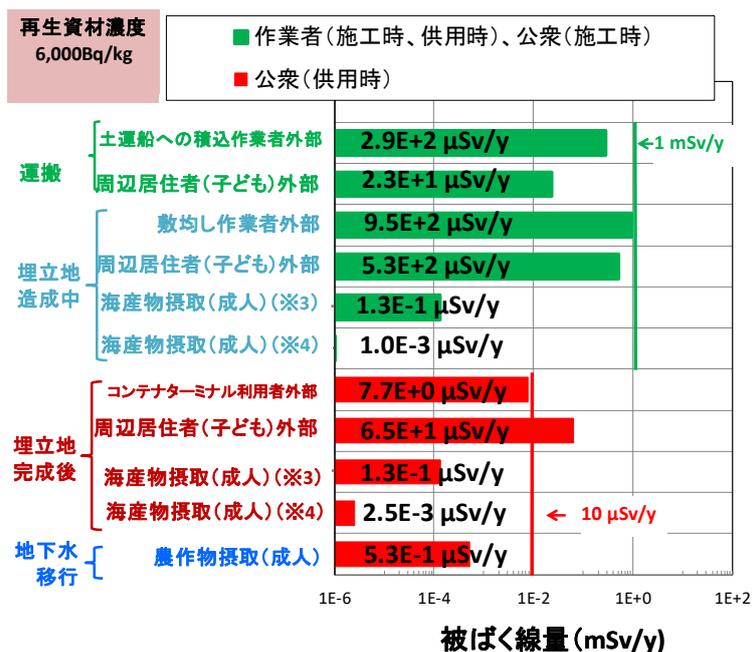
図 3.1-23 6,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の被ばく線量（ケース 3）セル式護岸



※3：土砂投入により海水流出を想定した場合

※4：ポンプにより粒子流出を抑制した場合

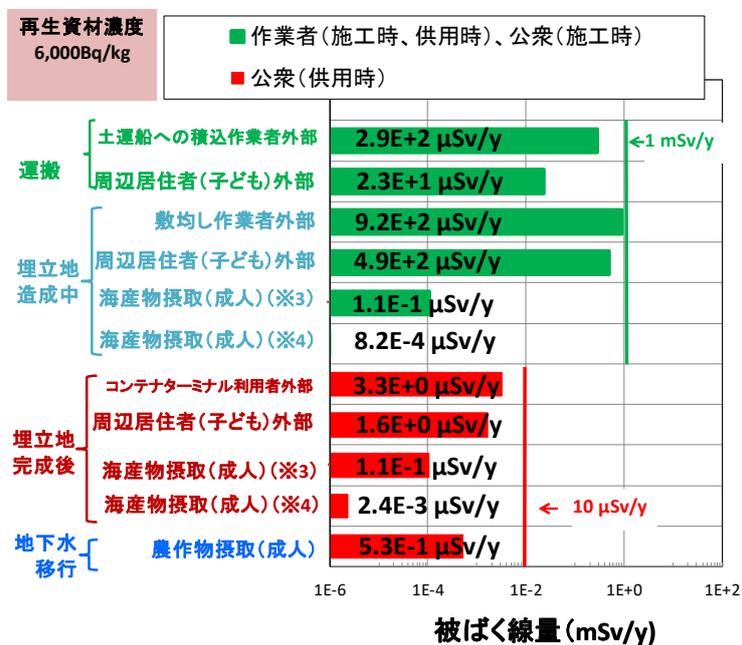
図 3.1-24 6,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の被ばく線量（ケース 3）重力式護岸



※3：土砂投入により海水流出を想定した場合

※4：ポンプにより粒子流出を抑制した場合

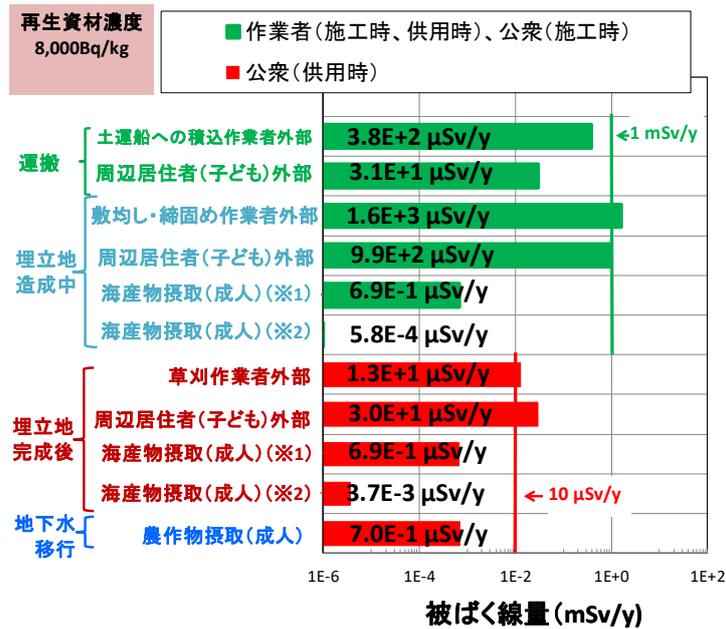
図 3.1-25 6,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の被ばく線量（ケース 4）セル式護岸



※3：土砂投入により海水流出を想定した場合

※4：ポンプにより粒子流出を抑制した場合

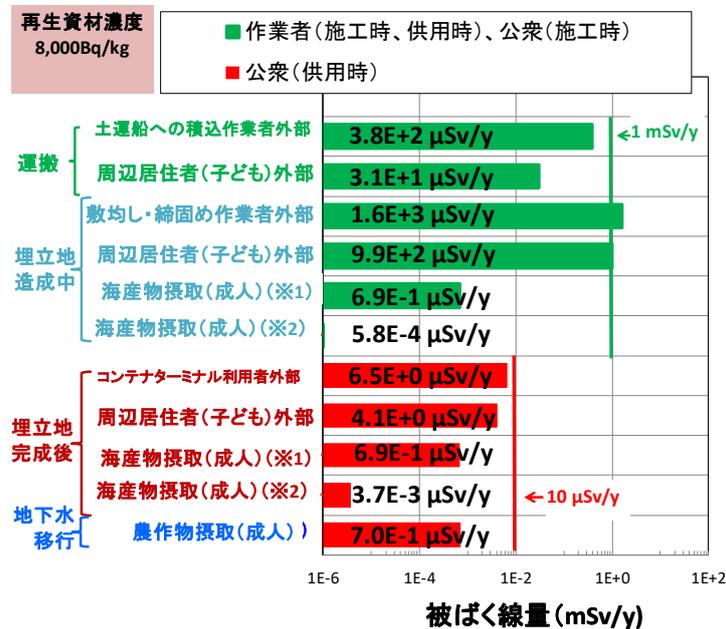
図 3.1-26 6,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の被ばく線量（ケース 4）重力式護岸



※1：護岸の一部を開けて造成した場合

※2：護岸を閉じて造成した場合

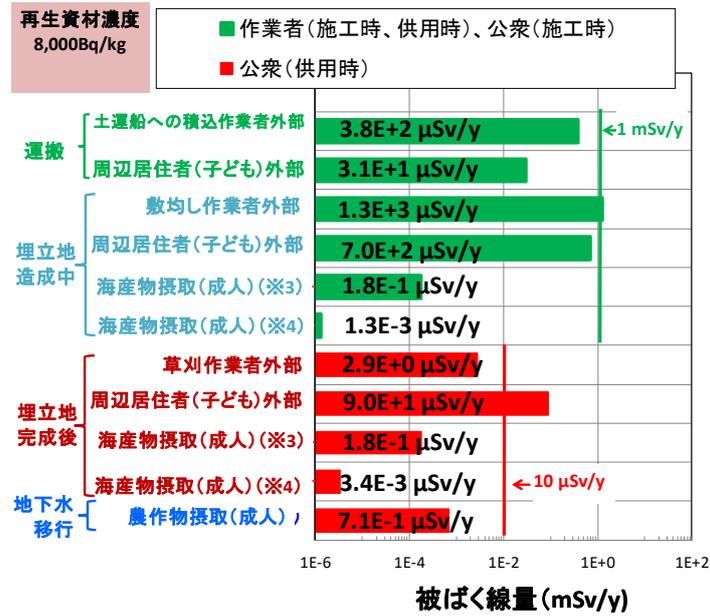
図 3.1-27 8,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の被ばく線量（ケース 1）



※1：護岸の一部を開けて造成した場合

※2：護岸を閉じて造成した場合

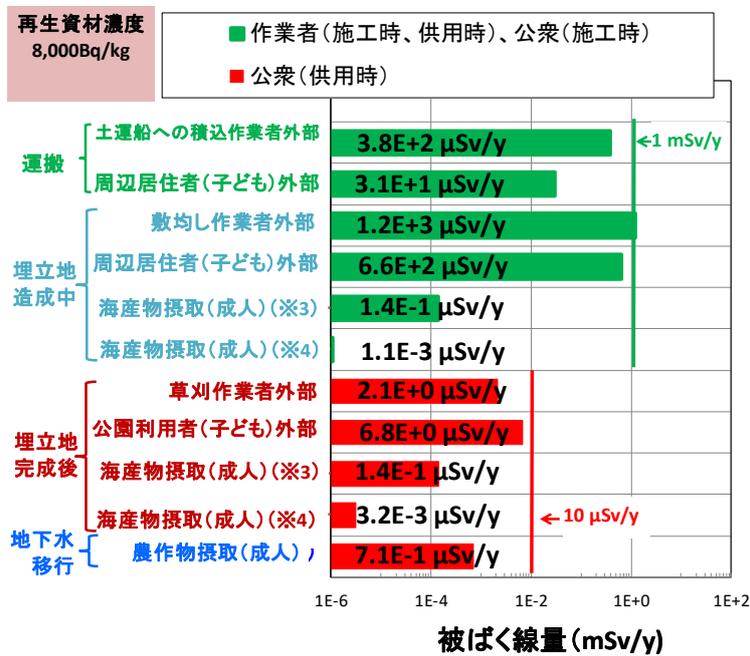
図 3.1-28 8,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の被ばく線量（ケース 2）



※3：土砂投入により海水流出を想定した場合

※4：ポンプにより粒子流出を抑制した場合

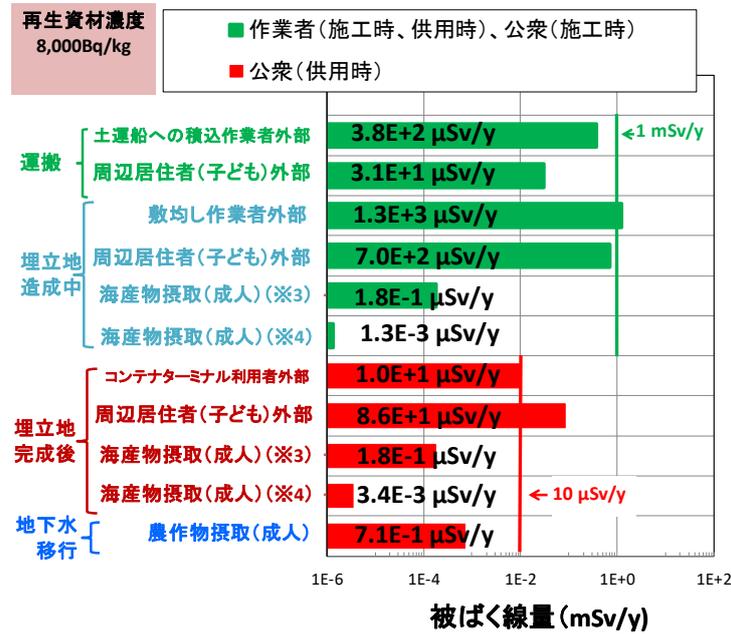
図 3.1-29 8,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の被ばく線量（ケース 3）セル式護岸



※3：土砂投入により海水流出を想定した場合

※4：ポンプにより粒子流出を抑制した場合

図 3.1-30 8,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の被ばく線量（ケース 3）重力式護岸



※3：土砂投入により海水流出を想定した場合

※4：ポンプにより粒子流出を抑制した場合

図 3.1-31 8,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の被ばく線量（ケース 4）セル式護岸



※3：土砂投入により海水流出を想定した場合

※4：ポンプにより粒子流出を抑制した場合

図 3.1-32 8,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の被ばく線量（ケース 4）重力式護岸

3.1.5.3 供用時の被ばく線量が 10 μ Sv/y を下回る条件の検討

評価の結果、再生資材を埋立材として利用しコンテナターミナルを造成した場合（ケース 2）および再生資材を重力式護岸の中詰材（ケース 3,4）として利用した場合は、放射能濃度を 8,000Bq/kg とした場合においても埋立地完成後の公衆の被ばく線量が 10 μ Sv/y を上回らないことが確認された。

一方、いくつかの経路においては埋立地完成後の公衆の被ばく線量が 10 μ Sv/y を上回る。ケース 1 の公衆で被ばく線量が 10 μ Sv/y を上回るのは、草刈作業員、緑地公園利用者（子ども）、周辺居住者（子ども）である。草刈作業員は、8,000Bq/kg の再生資材を埋立材として用いた場合にのみ、被ばく線量が 10 μ Sv/y を上回る（図 3.1-27）。緑地公園利用者（子ども、成人）（表 A.1-17）と周辺居住者（子ども、成人）（図 3.1-21、図 3.1-27）は 4,000Bq/kg および 8,000Bq/kg の再生資材を埋立材として用いた場合に被ばく線量が 10 μ Sv/y を上回る。ケース 1 の上記の被ばく経路の線量評価の詳細は表 A.1-17 に示す。ケース 2 で被ばく線量が 10 μ Sv/y を上回る公衆はいない。ケース 3 で公衆の被ばく線量が 10 μ Sv/y を上回るのは、セル式護岸を用いた際の周辺居住者（子ども、成人）である（図 3.1-23、図 3.1-29）。6,000Bq/kg および 8,000Bq/kg の中詰材を再生利用すると被ばく線量が 10 μ Sv/y を上回る。ケース 3 の上記の被ばく経路の線量評価の詳細は表 A.1-19 および表 A.1-21 に示す。ケース 4 で公衆の被ばく線量が 10 μ Sv/y を上回るのは、セル式護岸を用いた際のコンテナターミナル利用者と周辺居住者（子ども）である。コンテナターミナル利用者は、8,000Bq/kg の再生資材を中詰材として用いた場合にのみ、被ばく線量が 10 μ Sv/y を上回る（図 3.1-31）。周辺居住者（子ども、成人）は 6,000Bq/kg および 8,000Bq/kg の再生資材を埋立材として用いた場合に被ばく線量が 10 μ Sv/y を上回る（図 3.1-25、図 3.1-31）。ケース 4 の上記の被ばく経路の線量評価の詳細は表 A.1-20 および表 A.1-22 に示す。

ケース 1 の供用時の公衆の外部被ばく線量が 10 μ Sv/y を下回る条件の検討を行う。草刈作業員・緑地公園利用者（子ども）、周辺居住者（子ども）の被ばく線量が 10 μ Sv/y を下回る条件の検討として、覆土厚さによる被ばく線量の抑制を検討した。草刈作業員と緑地公園利用者（子ども）の評価点は同じで、被ばく時間が緑地公園利用の方が長いため、緑地公園利用（子ども）の評価で代表した。覆土厚さごとの被ばく線量を表 3.1-9 に示す。緑地公園利用者（子ども）、周辺居住者（子ども）への被ばく線量は、覆土厚さを 40cm とすれば 10 μ Sv/y を下回ることが確認できた。

表 3.1-9 覆土厚さに応じた緑地公園利用者（子ども）の追加被ばく線量（外部被ばく）

経路 No.	評価対象	ケース	再生資材の 放射能濃度[Bq/kg]	覆土厚さに応じた緑地公園利用者（子ども） の追加被ばく線量（外部被ばく） [mSv/y]		
				30cm	40cm	50cm
35	緑地公園利 用者（子ど も）外部	1	4,000	0.014	0.0048	0.0016
			8,000	0.027	0.0097	0.0031
38	周辺居住者 （子ども） 外部	1	4,000	0.015	0.0051	0.0018
			8,000	0.030	0.010	0.0035

ケース 3,4（セル式護岸）の供用時の公衆の外部被ばく線量が $10\mu\text{Sv/y}$ を下回る条件の検討を行う。ケース 3 では供用時の周辺居住者、ケース 4 では供用時の周辺居住者とコンテナターミナル利用者の外部被ばく線量が $10\mu\text{Sv/y}$ を上回る。周辺居住者（子ども）の被ばく線量が $10\mu\text{Sv/y}$ を下回る条件の検討として、埋立地からの距離による被ばく線量の抑制を検討した（図 3.1-33）。これは中詰材に利用した場合、周辺居住者の被ばくは護岸側面からの影響が大きく線源上方向に施す遮蔽の効果が低いからである。ここで距離とは岸壁と直行する方向の距離である。岸壁と直行する方向の距離を 5m 刻みでとり、その距離上で護岸と平行方向に 5m 刻みで評価点をとった際の護岸からの各距離のピークの値を用いて行う。評価結果は 6,000Bq/kg 及び 8,000Bq/kg で再利用した際の被ばく線量を示す。重力式護岸の場合は設定した評価体系において $10\mu\text{Sv/y}$ を下回っているため、セル式護岸の場合について評価する。距離ごとに被ばく線量を評価した結果を表 3.1-10 に示す。周辺居住者（子ども）の被ばく線量は、ケース 3,4 では 10m 以上の距離をとれば $10\mu\text{Sv/y}$ を下回ることが確認できた。

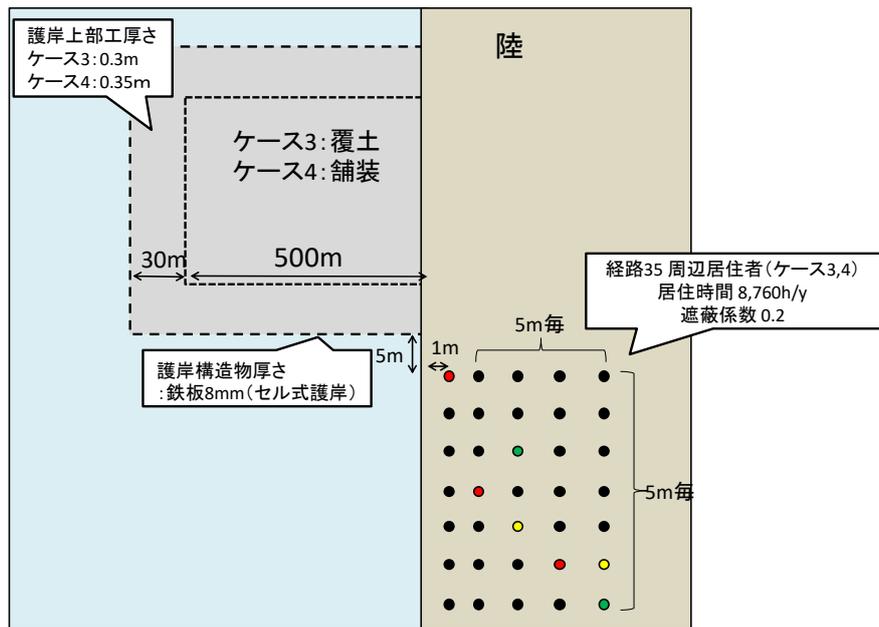


図 3.1-33 供用時周辺居住者（子ども）の評価体系

（ケース 3,4 は評価に用いた点を色で表示。赤：ケース 3,4 共通の評価点、緑：ケース 3 の評価点、黄：ケース 4 の評価点）

表 3.1-10 線源からの距離に応じた周辺居住者（子ども）の追加外部被ばく線量

経路 No.	評価対象	ケース	再生資材の放射能濃度 [Bq/kg]	線源からの距離に応じた周辺居住者（子ども）の追加被ばく線量（外部被ばく） [mSv/y]				
				1m	5m	10m	15m	20m
38	周辺居住者（子ども）外部	3	6,000	0.068	0.015	0.0075	0.0055	0.0039
			8,000	0.090	0.020	0.0099	0.0073	0.0052
		4	6,000	0.065	0.015	0.0068	0.0045	0.0032
			8,000	0.086	0.020	0.0090	0.0059	0.0042

また、ケース 3,4 の周辺居住者（子ども）の被ばく線量が $10\mu\text{Sv/y}$ を下回る条件の検討として、護岸構造物厚さ（セル式護岸の鋼板厚さ）による被ばく線量の低減についても確認した。セル式護岸の護岸構造物の厚さは、国土交通省港湾局監修の「日本港湾協会、港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁴⁾」に示された性能規定に適合するように設定される。そのため構造物厚さの規定値はない。セル式護岸の打設事例調査により 8~17mm の板厚のセルが確認されている（表 A.1-3）。そこで護岸構造物として 8mm と 17mm の鉄板を設定して評価を行った。評価の結果を表 3.1-11 に示す。護岸構造物厚さとして 17mm を設定した場合においても周辺居住者（子ども）の被ばく線量が $10\mu\text{Sv/y}$ 以上となった。そこで、護岸構造物の厚さを変更して周辺居住者（子ども）の被ばく線量が $10\mu\text{Sv/y}$ 以下となる条件を検討したと

ころ、鉄板厚さ 50mm 以上であれば 10 μ Sv/y 以下となった。セルの護岸構造物厚さは護岸の強度確保の観点から設定されており、その厚さは事例から一般的に 20mm 以下であると考えられるため、50mm の護岸構造物が利用される可能性については別途検討が必要である。

表 3.1-11 護岸構造物厚さに応じた周辺居住者（子ども）の追加外部被ばく線量

経路 No.	評価対象	ケース	再生資材の放射能濃度 [Bq/kg]	護岸構造物厚さに応じた周辺居住者（子ども）の追加被ばく線量（外部被ばく） [mSv/y]				
				セル厚さ(mm)				
				8	17	30	40	50
38	周辺居住者（子ども）外部	3	6,000	0.068	0.038	0.019	0.011	0.0068
			8,000	0.090	0.051	0.026	0.015	0.0090
	4	6,000	0.065	0.036	0.018	0.0099	0.0060	
		8,000	0.086	0.048	0.024	0.013	0.0080	

ケース 4 のコンテナターミナル利用者の被ばく線量が 10 μ Sv/y を下回る条件の検討として、舗装材厚さによる被ばく線量の抑制を検討した。舗装厚さごとによる被ばく線量を表 3.1-12 に示す。コンテナターミナル利用者への被ばく線量は、舗装厚さ 45cm（路盤材 15cm、舗装材 30cm）とすれば 10 μ Sv/y を下回ることが確認できた（舗装厚さを路盤材（15cm）に固定し、舗装材の厚さを 20cm から 10cm ずつ増やす評価とした）。

表 3.1-12 舗装厚さに応じたコンテナターミナル利用者の追加被ばく線量（外部被ばく）

経路 No.	評価対象	ケース	再生資材の放射能濃度 [Bq/kg]	舗装厚さに応じたコンテナターミナル利用者の追加被ばく線量（外部被ばく） [mSv/y]	
				35cm	45cm
36	コンテナターミナルの利用者外部	4	6,000	0.0077	0.0035
			8,000	0.010	0.0046

以上の評価から、供用時の公衆の被ばく線量が 10 μ Sv/y を下回るために必要な条件を表 3.1-13 に示す。

表 3.1-13 供用時の公衆の被ばく線量が 10 μ Sv/y 以下となる条件

ケース (利用部材)	護岸 タイプ	再生資材の放射能 濃度(Bq/kg)	供用時の公衆の被ばく線量が 10 μ Sv/y 以下となる条件
1 (埋立柱材)	—	4,000	覆土厚さ 40cm 以上
		8,000	覆土厚さ 40cm 以上
2 (埋立柱材)	—	4,000	一般的な設計（評価体系）で 10 μ Sv/y 以下
		8,000	一般的な設計（評価体系）で 10 μ Sv/y 以下
3 (中詰材)	セル式 護岸	6,000	住居との間に 10m 以上の離隔を確保する、もしくは鋼板厚さ 50mm 以上のセルを用いて造成する
		8,000	住居との間に 10m 以上の離隔を確保する、もしくは鋼板厚さ 50mm 以上のセルを用いて造成する
	重力式 護岸	6,000	一般的な設計（評価体系）で 10 μ Sv/y 以下
		8,000	一般的な設計（評価体系）で 10 μ Sv/y 以下
4 (中詰材)	セル式 護岸	6,000	住居との間に 10m 以上の離隔を確保する、もしくは鋼板厚さ 40mm 以上のセルを用いて造成する
		8,000	45cm 以上の舗装材厚さの確保に加え、住居との間に 10m 以上の離隔を確保する、もしくは鋼板厚さ 50mm 以上のセルを用いて造成する
	重力式 護岸	6,000	一般的な設計（評価体系）で 10 μ Sv/y 以下
		8,000	一般的な設計（評価体系）で 10 μ Sv/y 以下

3.1.5.4 海洋へ移行した核種からの被ばく線量評価の高度化についての考察

本研究で高度化を実施した海洋へ移行した核種からの被ばく線量評価方法について、既存の評価方法との比較と、その評価経路全体に対する影響度について確認する。既存の評価方法とは、これまでの除去土壌の再生利用についての安全評価¹⁶において実施されている、供用時の降雨浸透により帯水層に移行した溶存核種が海洋へ流出することを想定した被ばく評価方法である。本研究で高度化した評価方法との主な違いは、本研究の評価方法は供用時だけでなく施工時の核種の流出も考慮し、また溶存核種だけでなく粒子に付着した核種も考慮している点である。

本研究で高度化した評価方法を用いてケース 1（除去土壌を埋立柱材に再生利用、緑地公園）を護岸の一部を開けて造成した場合の海産物摂取（成人）の被ばく線量と、既存の評価方法の海産物摂取（成人）の被ばく線量を比較した。被ばく線量はどちらも供用時のものとした。本研究の評価方法による供用時の核種移行方法は帯水層移行とする。本研究で高度化した評価方法による被ばく線量評価は、施工時に埋立柱材投入により流出した核種と供用時に帯水層移行により海洋へ流出した溶存核種を、その形態（溶存核種と粒子に付着した核種）を

考慮して海洋中の分布を評価したうえで実施している。一方、既存の被ばく線量評価では、供用時に帯水層移行により海洋へ流出した溶存核種を、ある海水量（本研究で高度化した評価方法における海洋層と同体積）で希釈した核種濃度を用いている。供用時の帯水層移行による海洋への溶存核種の流出条件は両方法で同じである。これにより被ばく線量の違いは、施工時に流出した核種と海洋中の核種の分布およびその分布を被ばく評価に反映するためのパラメーターに起因することになる。

本研究で高度化した評価方法による海産物摂取（成人）の Cs-134 と Cs-137 による被ばく線量は、 8.6×10^{-5} mSv/y per Bq/g（図 A.1-11）となった。一方、既存の評価方法による海産物摂取（成人）の Cs-134 と Cs-137 による被ばく線量は、 8.7×10^{-9} mSv/y per Bq/g となり、本研究で高度化した評価方法に比べて4桁ほど被ばく線量が低かった。このことから、本研究の評価方法の方が保守的に被ばく線量を評価できていることが明らかになった。

ケース1の決定経路は「埋立柱材の敷均し・締固め作業外部」の 2.0×10^{-1} mSv/y per Bq/g である（図 A.1-8）。本研究で高度化した評価方法により求めた海産物摂取（成人）と比較して4桁ほど被ばく線量が多い。このことから、実際の施工方法や海洋中の核種の形態を考慮して本研究で高度化した評価方法は、既存の評価方法に比べて保守的な評価となるが、全体の被ばく経路に対しては影響が大きくないことが示された。

3.1.5.5 海洋中核種からの被ばく線量評価における不確実性の考察

本研究では既存の除去土壌の再生利用についての安全評価の拡張として海面埋立地への再生利用の安全評価を行い、その中で海洋中の核種移行を評価するモデルを追加した。海洋中の核種移行を評価するモデルを追加した理由は、海面埋立地への再生利用では既存の評価では考慮されていなかった海洋中の粒子に付着した核種の影響が大きくなることが考えられるからである。ここでは、海洋中の核種移行を評価するモデルを用いた被ばく線量評価の不確実性について言及する。本評価は安全評価であるので、評価全体として保守的になるようにしている。

モデルによって放射性核種の移行を評価する場合、不確実性に関する検討が重要であり、その不確実性は「シナリオ不確実性」、「モデル不確実性」、「パラメーター不確実性」に分類することができる²⁶。

シナリオ不確実性は、シナリオ設定をする際に重要な経路を見落としてしまうことによって発生する。本研究では、既存の再生利用についての安全評価の中で考慮されていたシナリオに加えて、海面埋立地への再生利用に特有のシナリオを追加することで、網羅的なシナリオの設定を行った。海面埋立地への再生利用を想定した際に、新たに設定しなければならないシナリオとして粒子に付着した核種による被ばくのシナリオがある。海底付近に生息する海産物体内への核種濃縮には、粒子に付着した核種も影響することが既往研究で報告されている¹⁵。本研究では、海産物体内の核種濃度評価を、溶存した核種のみではなく粒子

に付着した核種も含めて行うことで保守的なシナリオ設定を行った。

モデル不確実性は核種の移行挙動等を記述するために用いる数学モデルが含む不確実性である。本研究では、降雨浸透による海面埋立地からの核種流出量の評価、埋立地から流出した核種の帯水層中の移行の評価、海洋に流出した核種の海洋中における移行の評価について数学モデルを用いて評価を実施した。降雨浸透による海面埋立地からの核種流出量の評価、埋立地から流出した核種の帯水層中の移行の評価については、既存の除去土壌の再生利用についての安全評価^{12,16}と同様に保守的な評価として一次元の移行モデルを利用した。海洋に流出した核種の海洋中における移行の評価は、既存の除去土壌の再生利用についての安全評価¹⁶では供用時に帯水層移行して海洋に流出した溶存核種量を、ある海水量で希釈するモデルが用いられていた。本研究では、海水による希釈条件は既存評価とそろえた上で、鉛直一次元方向の核種濃度の分布を溶存した核種と粒子に付着した核種を考慮して評価できるモデル (Sediment model)¹⁷を用いた。また、施工時の核種流出も評価した。本モデルを用いることで、本研究で設定した保守的なシナリオを評価できるようになった。

パラメーター不確実性は、評価モデルに用いるパラメーター値を設定する際に生じる不確実性である。パラメーター不確実性を低減させるためには、モデルで評価しようとしている環境とパラメーターの関係性を明らかにすることが必要である。しかし、本研究では海面埋立地の造成場所として「現存被ばく状況と計画被ばく状況を含むと考えられる国内の行政区分内」という条件のみを設定した場所を特定しない除去土壌の海面埋立地への再生利用を検討している。

そこで、パラメーターは既存の安全評価¹⁶にて一般的な環境を対象とした評価に用いられた値を参考に設定した。あるパラメーターについて、海面埋立地の造成場所の条件（現存被ばく状況と計画被ばく状況を含むと考えられる国内の行政区分内）の環境内で値の幅が生じることが考えられる場合は、保守的な値を設定した（例えば、浸透水量、Csの葉菜、非葉菜、果実への移行係数、等）。国内の再生利用を想定した際に妥当性を高められそうなパラメーター（海面埋立地への浸透水量、海底土の分配係数、海産物摂取量、等）については、日本固有のパラメーターを設定した。

また、本研究で初めて考慮するパラメーターで、統計資料等ではなく、評価対象となる系を設定する段階で決定されるパラメーターについては、専門家による判断により代表的な値を設定した。例えば、鉛直一次元のコンパートメントモデルによる核種移行評価の結果から海洋層中の核種濃度を算出する際に用いる海洋層の体積は、 $8.0 \times 10^9 \text{ m}^3$ とした。この値は、海洋へ流出した核種による被ばく線量の評価を規制科学の分野で適用することを考え、海面埋立地を造成した際の影響を評価する海域を行政区域程度の単位で想定し、設定した代表値である。海洋層の体積は、想定する海域によりパラメーター値として最大2桁ほどの幅があると言える。海洋層体積の変動により各コンパートメント中の核種濃度は変化し、結果として被ばく線量も最大2桁異なることになるが、被ばく評価結果としては、海産物摂取による内部被ばく線量は決定経路の被ばく線量よりも4桁ほど低いため、規制科学としての

線量拘束値による管理に影響は与えない。

上記の「シナリオ不確実性」、「モデル不確実性」、「パラメーター不確実性」に対する検討により、規制科学として一般的な環境における再生利用にかかる被ばくの線量を、精度よく、合理的かつ保守的に評価できるようにした。

3.1.6 災害時の被ばく評価

3.1.4 で求めた再生利用の各ケースにおける 1mSv/y 相当濃度および 8000Bq/kg で再生利用を行った場合に、災害が発生することを想定して作業員や公衆に与える線量を評価する。災害が発生した場合においても、作業員や公衆の被ばく線量を計画被ばく状況における公衆の線量限度(1 mSv/y)で管理可能であるか検討する。

3.1.6.1 評価対象とする災害の検討

自然災害（地震、津波、火災、暴風・竜巻、異常降雨（豪雨））に対し、災害事例に対する事例調査を行い、海面埋立地に変状・崩壊をもたらす可能性のある自然災害を選定した（表 3.1-14）。表 3.1-14 から地震、津波、異常降雨を評価対象とした。

表 3.1-14 埋立材・中詰材に対して変状・崩壊をもたらす可能性のある自然災害の検討

自然災害	検討結果	評価の必要性
地震	<p>地震動により、護岸の破損、覆土・舗装のひび割れ・破損が発生する^{27,28}。護岸上部工や覆土・舗装が破損した場合、それらを修復する作業が行われる。その際、破損した護岸上部工、覆土・舗装を引きはがしてから作業することが考えられるので、保守的にそれらを全て引きはがし、線源となる埋立材、中詰材が露出した条件を用いて評価を行った。なお、護岸の破損や液状化現象により、海洋へ核種が流出することも想定されるが、そのケースの評価は、被害の規模が大きくなると考えられる下記の津波による流出を想定したケースの評価で代表する。</p> <p><埋立材> 覆土・舗装を全て引きはがし、埋立材が露出した条件で被ばく線量評価を行った。</p> <p><中詰材> 護岸上部工を全て引きはがし、中詰材が露出した条件で被ばく線量評価を行った。</p>	○

津波	<p>津波、津波を引き起こした地震により、護岸の破損、覆土・舗装のひび割れ・破損が発生する。東日本大震災の太平洋沿岸域全体をカバーした調査報告²⁹によると、地震・津波により護岸の一部が被害を受けたが、それらの多くは厳しい太平洋の波浪に対して設計されていて比較的粘り強く、震災の巨大津波でも壊滅的な被害には至らなかった。同文献では津波による被害のあった岸壁の沈下や地盤の洗掘が発生した範囲として、岸壁端から 34～52m の事例が示されている。そこで保守的に埋立地の岸壁端から陸側へ 50m、護岸幅の半分の範囲が津波による被害を受け、その範囲の土砂が流出すると想定する。</p> <p>なお、覆土・舗装のひび割れ・破損については同様の被害に対する評価を行っている地震の評価で代表する。</p> <p><埋立柱材への利用></p> <p>護岸厚さ 5m を考慮して岸壁から 45m、幅 250m、高さ 22m の範囲の埋立柱材が流出すると想定する。</p> <p><中詰材への利用></p> <p>セル式護岸の場合の評価は、護岸厚さ 30m、幅 280m、高さ 22m の範囲の中詰材が流出すると想定する。重力式護岸の場合の評価は、護岸厚さ 20m、幅 270m、高さ 22m の範囲の中詰材が流出すると想定する。</p>	○
火災	<p>緑地公園において草本の火災の可能性が考えられるが、覆土により草本類への核種移行は生じない¹²ため、被ばくは発生しないので評価の対象から外した。なお、既往の評価（土地造成事業）³⁰において、同様の線源体系で、草本類より保守的な評価である木本類の火災の評価で、最大で 10×10^4 (mSv/y) オーダーの被ばく線量（4000、7000Bq/kg 使用時）となっている</p>	×
暴風・竜巻	<p>暴風等により海面埋立地が崩壊する恐れは考えられないため、評価対象から除外した。</p>	×
異常降雨（豪雨）	<p>草地や林地での侵食土深は 0.1～0.01 mm/y であり、豪雨により 100 倍となった場合でも 1～10 mm ほどである³¹。また、一降雨により年間の土砂流出量を上回った事例として $10 \sim 30 \text{ m}^3/\text{ha}$（1～3 mm 相当）が報告されている³²。これらから、豪雨による覆土厚さの減少は津波の場合より少ないと考えられるため、より保守的な評価となる地</p>	○

	<p>震による埋立材・中詰材の露出を想定したケースの評価で代替する。一方、異常降雨の発生に伴う年間の浸透水量の増加が考えられる。そのため、核種の海洋への浸出と地下水移行による影響を評価した。埋立材利用時と中詰材利用時で核種移行の条件が異なるので、両部材へ利用した際の評価をそれぞれ行う。</p> <p><埋立材> 浸透水量の増加による核種の海洋への浸出と地下水移行による影響を評価する。</p> <p><中詰材> 浸透水量の増加による核種の海洋への浸出と地下水移行による影響を評価する。</p>	
--	---	--

3.1.6.2 地震が生じた際の被ばく評価

地震により護岸の破損、覆土・舗装のひび割れ・破損の被害を受けた場合に、再生資材である埋立材・中詰材の上部に施された覆土・舗装、護岸上部工を全て引きはがしてから修復作業を行うことを想定した。本評価では既往の評価を参考に、露出した埋立材・中詰材の上に再度覆土・舗装、護岸上部工を施工する復旧作業員に対して以下の被ばく評価を行った(表 3.1-15)。評価体系および評価に用いたパラメーターは A.1.10 に示す。

表 3.1-16 から表 3.1-18 に各評価経路の Cs-134、Cs-137 及び全 Cs (=Cs-134+Cs-137) の単位濃度 (1 Bq/g) あたりの影響を評価した結果を示す。Cs-134 と Cs-137 の存在比は 1F 事故直後の存在比を 1:1 と仮定したうえで、再生利用開始が事故 5 年後であると想定し、それぞれの半減期から Cs-134 : Cs-137 = 0.209 : 1 とした。また、埋立材利用時は 4,000 Bq/kg と 8,000 Bq/kg、中詰材利用時は 6,000 Bq/kg と 8,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の被ばく線量も併せて示す。最も被ばく線量が高くなるのは、復旧作業員の外部被ばくであった。

評価の結果、埋立材に 8,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の年間被ばく線量でも最大で 7.4×10^{-1} mSv/y であり、濃度レベル算出のための線量のめやす値 1 mSv/y を下回った。中詰材に 8,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の年間被ばく線量でも最大で 6.3×10^{-1} mSv/y であり、濃度レベル算出のための線量のめやす値 1 mSv/y を下回った。

表 3.1-15 再生資材の海面埋立地への利用に係る評価経路（災害時（地震））

No.	評価対象	線源	対象者	被ばく形態
1	復旧作業	埋立柱材・中詰材が露呈した埋立地	作業者	外部
2				粉塵吸入
3				直接経口

表 3.1-16 評価結果（海面埋立地（災害時：地震））（埋立柱材利用時）

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	4,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
1	復旧作業者外部	1.8E-01	7.4E-02	9.3E-02	1.1E+04	3.7E-01	7.4E-01
2	復旧作業者吸入	9.8E-06	7.9E-06	8.3E-06	1.2E+08	3.3E-05	6.6E-05
3	復旧作業者直接経口	1.6E-04	1.3E-04	1.3E-04	7.5E+06	5.4E-04	1.1E-03

表 3.1-17 評価結果（海面埋立地（災害時：地震））（中詰材利用時）（セル式護岸）

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	6,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
1	復旧作業者外部	1.5E-01	6.4E-02	7.9E-02	1.3E+04	4.7E-01	6.3E-01
2	復旧作業者吸入	9.8E-06	7.9E-06	8.3E-06	1.2E+08	5.0E-05	6.6E-05
3	復旧作業者直接経口	1.6E-04	1.3E-04	1.3E-04	7.5E+06	8.1E-04	1.1E-03

表 3.1-18 評価結果（海面埋立地（災害時：地震））（中詰材利用時）（重力式護岸）

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	6,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
1	復旧作業者外部	1.5E-01	6.2E-02	7.7E-02	1.3E+04	4.6E-01	6.2E-01
2	復旧作業者吸入	9.8E-06	7.9E-06	8.3E-06	1.2E+08	5.0E-05	6.6E-05
3	復旧作業者直接経口	1.6E-04	1.3E-04	1.3E-04	7.5E+06	8.1E-04	1.1E-03

3.1.6.3 津波が生じた際の被ばく評価

津波、及び津波を引き落とした地震により、護岸の破損、覆土・舗装のひび割れ・破損が発生し、埋立柱材・中詰材が海洋へ流出することを想定した。本評価では埋立柱材・中詰材が海洋へ流出したことにより公衆が受ける被ばくを評価した。評価結果を表 3.1-19 から表 3.1-21 に示す。評価体系および評価に用いたパラメーターは A.1.10 に示す。

評価の結果、埋立柱材に 8,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の年間被ばく線量でも最大で 4.8×10^{-1} mSv/y であり、濃度レベル算出のための線量のめやす値 1 mSv/y を下回った。中詰材に 8,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の年間被ばく線量でも最大で 1.9×10^{-1}

mSv/y であり、濃度レベル算出のための線量のめやす値 1 mSv/y を下回った。

表 3.1-19 評価結果（地下水移行（海洋への移行）（災害時：津波）（埋立材利用時）

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	4,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
1	海産物摂取(成人)	7.0E-02	5.7E-02	6.0E-02	1.7E+04	2.4E-01	4.8E-01
2	海産物摂取(子ども)	3.3E-02	2.7E-02	2.8E-02	3.6E+04	1.1E-01	2.2E-01
3	海岸活動者外部	6.9E-05	3.1E-05	3.8E-05	2.6E+07	1.5E-04	3.0E-04
4	浚渫作業者外部	2.3E-03	9.8E-04	1.2E-03	8.2E+05	4.9E-03	9.7E-03
5	浚渫作業者吸入	3.2E-07	2.6E-07	2.7E-07	3.7E+09	1.1E-06	2.1E-06
6	浚渫作業者直接経口	5.2E-06	4.2E-06	4.4E-06	2.3E+08	1.7E-05	3.5E-05

表 3.1-20 評価結果（地下水移行（海洋への移行）（災害時：津波）（中詰材利用時）
（セル式護岸）

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	6,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
1	海産物摂取(成人)	4.5E-02	3.6E-02	3.8E-02	2.6E+04	2.3E-01	3.0E-01
2	海産物摂取(子ども)	2.1E-02	1.7E-02	1.8E-02	5.7E+04	1.1E-01	1.4E-01
3	海岸活動者外部	4.8E-07	2.2E-07	2.6E-07	3.8E+09	1.6E-06	2.1E-06
4	浚渫作業者外部	1.5E-03	6.2E-04	7.7E-04	1.3E+06	4.6E-03	6.2E-03
5	浚渫作業者吸入	2.0E-07	1.6E-07	1.7E-07	5.9E+09	1.0E-06	1.4E-06
6	浚渫作業者直接経口	3.3E-06	2.6E-06	2.8E-06	3.6E+08	1.7E-05	2.2E-05

表 3.1-21 評価結果（地下水移行（海洋への移行）（災害時：津波）（中詰材利用時）
（重力式護岸）

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	6,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
1	海産物摂取(成人)	2.9E-02	2.3E-02	2.4E-02	4.1E+04	1.5E-01	1.9E-01
2	海産物摂取(子ども)	1.3E-02	1.1E-02	1.1E-02	8.8E+04	6.8E-02	9.1E-02
3	海岸活動者外部	4.0E-07	1.8E-07	2.2E-07	4.6E+09	1.3E-06	1.7E-06
4	浚渫作業者外部	9.6E-04	4.0E-04	5.0E-04	2.0E+06	3.0E-03	4.0E-03
5	浚渫作業者吸入	1.3E-07	1.1E-07	1.1E-07	9.1E+09	6.6E-07	8.8E-07
6	浚渫作業者直接経口	2.1E-06	1.7E-06	1.8E-06	5.6E+08	1.1E-05	1.4E-05

3.1.6.4 異常降雨が生じた際の被ばく評価

異常降雨の発生に伴う年間の浸透水量の増加が考えられ、その地下水移行（経路 No.39～56）への影響を評価した。評価経路は供用時と同じ想定であるが、浸透水量として、施工時と供用時の評価に用いた 0.4 m/y ではなくクリアランス評価のパラメーター設定において最大値とされている 1 m/y を用いて評価した。

地下水移行（海洋への移行）の結果を表 3.1-22 から表 3.1-24 に、地下水移行（井戸水利用）を表 3.1-25 から表 3.1-27 に示す。各評価経路の Cs-134、Cs-137 及び全 Cs (=Cs-

134+Cs-137) の単位濃度 (1 Bq/g) あたりの影響を評価した結果を示す。また、埋立材利用時は 4,000 Bq/kg と 8,000 Bq/kg、中詰材利用時は 6,000 Bq/kg と 8,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の被ばく線量も併せて示す。

評価の結果、全評価で濃度レベル算出のための線量のめやす値 1 mSv/y を下回った。

表 3.1-22 評価結果 (地下水移行 (海洋への移行) (災害時: 異常降雨 (豪雨)))
(埋立材利用時)

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	4,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
1	海産物摂取(成人)	8.2E-05	8.9E-05	8.7E-05	1.1E+07	3.5E-04	7.0E-04
2	海産物摂取(子ども)	3.7E-05	4.0E-05	4.0E-05	2.5E+07	1.6E-04	3.2E-04
3	海岸活動者外部	6.9E-05	3.1E-05	3.8E-05	2.6E+07	1.5E-04	3.0E-04
4	浚渫作業者外部	2.1E-06	1.2E-06	1.4E-06	7.3E+08	5.5E-06	1.1E-05
5	浚渫作業者吸入	2.8E-10	3.2E-10	3.2E-10	3.2E+12	1.3E-09	2.5E-09
6	浚渫作業者直接経口	4.7E-09	5.2E-09	5.1E-09	1.9E+11	2.1E-08	4.1E-08

表 3.1-23 評価結果 (地下水移行 (海洋への移行) (災害時: 異常降雨 (豪雨)))
(中詰材利用時) (セル式護岸)

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	6,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
1	海産物摂取(成人)	2.5E-05	2.2E-05	2.2E-05	4.5E+07	1.3E-04	1.8E-04
2	海産物摂取(子ども)	1.2E-05	1.0E-05	1.0E-05	9.6E+07	6.3E-05	8.3E-05
3	海岸活動者外部	1.3E-06	1.0E-06	1.1E-06	9.3E+08	6.4E-06	8.6E-06
4	浚渫作業者外部	8.2E-07	3.7E-07	4.5E-07	2.2E+09	2.7E-06	3.6E-06
5	浚渫作業者吸入	1.1E-10	9.8E-11	1.0E-10	1.0E+13	6.0E-10	8.0E-10
6	浚渫作業者直接経口	1.8E-09	1.6E-09	1.6E-09	6.2E+11	9.7E-09	1.3E-08

表 3.1-24 評価結果 (地下水移行 (海洋への移行) (災害時: 異常降雨 (豪雨)))
(中詰材利用時) (重力式護岸)

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	6,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
1	海産物摂取(成人)	2.0E-05	1.7E-05	1.8E-05	5.6E+07	1.1E-04	1.4E-04
2	海産物摂取(子ども)	9.2E-06	8.1E-06	8.3E-06	1.2E+08	5.0E-05	6.6E-05
3	海岸活動者外部	4.0E-07	1.8E-07	2.2E-07	4.6E+09	1.3E-06	1.7E-06
4	浚渫作業者外部	6.5E-07	3.0E-07	3.6E-07	2.8E+09	2.1E-06	2.9E-06
5	浚渫作業者吸入	8.8E-11	7.8E-11	8.0E-11	1.3E+13	4.8E-10	6.4E-10
6	浚渫作業者直接経口	1.5E-09	1.3E-09	1.3E-09	7.7E+11	7.7E-09	1.0E-08

表 3.1-25 評価結果（地下水移行（井戸水利用）（災害時：異常降雨（豪雨））
（埋立材利用時）

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	4,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
42	飲料水摂取(成人)	1.1E-05	1.1E-04	9.1E-05	1.1E+07	3.6E-04	7.3E-04
43	飲料水摂取(子ども)	1.5E-06	1.6E-05	1.4E-05	7.3E+07	5.5E-05	1.1E-04
44	地下水利用農耕作業外部	2.4E-06	1.1E-04	9.4E-05	1.1E+07	3.8E-04	7.5E-04
45	地下水利用農耕作業吸入	1.2E-10	1.1E-08	8.9E-09	1.1E+11	3.5E-08	7.1E-08
46	地下水利用農作物摂取(成人)	7.9E-06	2.6E-04	2.2E-04	4.5E+06	8.8E-04	1.8E-03
47	地下水利用農作物摂取(子ども)	2.8E-06	1.1E-04	9.1E-05	1.1E+07	3.6E-04	7.2E-04
48	飼料經由畜産物摂取(成人)	1.1E-05	2.6E-04	2.1E-04	4.7E+06	8.5E-04	1.7E-03
49	飼料經由畜産物摂取(子ども)	5.1E-06	1.3E-04	1.1E-04	8.9E+06	4.5E-04	9.0E-04
50	飼育水經由畜産物摂取(成人)	1.5E-06	1.5E-05	1.3E-05	7.9E+07	5.1E-05	1.0E-04
51	飼育水經由畜産物摂取(子ども)	7.2E-07	7.7E-06	6.5E-06	1.5E+08	2.6E-05	5.2E-05
52	養殖淡水産物摂取(成人)	6.3E-06	6.2E-05	5.2E-05	1.9E+07	2.1E-04	4.2E-04
53	養殖淡水産物摂取(子ども)	2.5E-06	2.7E-05	2.3E-05	4.4E+07	9.1E-05	1.8E-04

表 3.1-26 評価結果（地下水移行（井戸水利用）（災害時：異常降雨（豪雨））
（中詰材利用時）（セル式護岸）

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	6,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
42	飲料水摂取(成人)	1.1E-05	1.1E-04	9.1E-05	1.1E+07	5.5E-04	7.3E-04
43	飲料水摂取(子ども)	1.5E-06	1.6E-05	1.4E-05	7.3E+07	8.2E-05	1.1E-04
44	地下水利用農耕作業外部	2.3E-06	1.1E-04	9.4E-05	1.1E+07	5.6E-04	7.5E-04
45	地下水利用農耕作業吸入	1.1E-10	1.1E-08	8.9E-09	1.1E+11	5.3E-08	7.1E-08
46	地下水利用農作物摂取(成人)	7.9E-06	2.6E-04	2.2E-04	4.5E+06	1.3E-03	1.8E-03
47	地下水利用農作物摂取(子ども)	2.8E-06	1.1E-04	9.1E-05	1.1E+07	5.4E-04	7.3E-04
48	飼料經由畜産物摂取(成人)	1.1E-05	2.6E-04	2.1E-04	4.7E+06	1.3E-03	1.7E-03
49	飼料經由畜産物摂取(子ども)	5.1E-06	1.3E-04	1.1E-04	8.9E+06	6.8E-04	9.0E-04
50	飼育水經由畜産物摂取(成人)	1.5E-06	1.5E-05	1.3E-05	7.9E+07	7.6E-05	1.0E-04
51	飼育水經由畜産物摂取(子ども)	7.1E-07	7.7E-06	6.5E-06	1.5E+08	3.9E-05	5.2E-05
52	養殖淡水産物摂取(成人)	6.3E-06	6.2E-05	5.2E-05	1.9E+07	3.1E-04	4.2E-04
53	養殖淡水産物摂取(子ども)	2.5E-06	2.7E-05	2.3E-05	4.4E+07	1.4E-04	1.8E-04

表 3.1-27 評価結果（地下水移行（井戸水利用）（災害時：異常降雨（豪雨））
（中詰材利用時）（重力式護岸）

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	6,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
42	飲料水摂取(成人)	1.1E-05	1.1E-04	9.1E-05	1.1E+07	5.5E-04	7.3E-04
43	飲料水摂取(子ども)	1.5E-06	1.6E-05	1.4E-05	7.3E+07	8.2E-05	1.1E-04
44	地下水利用農耕作業外部	2.3E-06	1.1E-04	9.4E-05	1.1E+07	5.6E-04	7.5E-04
45	地下水利用農耕作業吸入	1.1E-10	1.1E-08	8.9E-09	1.1E+11	5.3E-08	7.1E-08
46	地下水利用農作物摂取(成人)	8.0E-06	2.6E-04	2.2E-04	4.5E+06	1.3E-03	1.8E-03
47	地下水利用農作物摂取(子ども)	2.9E-06	1.1E-04	9.1E-05	1.1E+07	5.4E-04	7.3E-04
48	飼料經由畜産物摂取(成人)	1.1E-05	2.6E-04	2.1E-04	4.7E+06	1.3E-03	1.7E-03
49	飼料經由畜産物摂取(子ども)	5.1E-06	1.3E-04	1.1E-04	8.9E+06	6.8E-04	9.0E-04
50	飼育水經由畜産物摂取(成人)	1.6E-06	1.5E-05	1.3E-05	7.9E+07	7.6E-05	1.0E-04
51	飼育水經由畜産物摂取(子ども)	7.2E-07	7.7E-06	6.5E-06	1.5E+08	3.9E-05	5.2E-05
52	養殖淡水産物摂取(成人)	6.4E-06	6.2E-05	5.2E-05	1.9E+07	3.1E-04	4.2E-04
53	養殖淡水産物摂取(子ども)	2.5E-06	2.7E-05	2.3E-05	4.4E+07	1.4E-04	1.8E-04

3.1.7 3.1 のまとめ

3.1 章では、オフサイトにおいて除去土壌を海面埋立地に再生利用した際の安全評価を、海洋中の核種の形態を考慮して実施するために、海洋へ流出した核種からの被ばく線量の評価方法の開発を行った。被ばく線量評価方法の開発は、既往の被ばく線量評価コード⁸を拡張する形で行い、拡張したコードを用いて作業者と公衆の被ばく線量の評価を行った。

被ばく線量の評価は、福島第一原子力発電所事故(1F)後の環境中の除染により発生した土壌(除去土壌)を、本研究で提案した防護の考え方に沿って再生利用することを想定して実施した。1F 事故後の環境における除去土壌の再生利用に関する放射線防護は、2章の検討内容に沿って再生利用を計画被ばくの考え方で行うこととして(④の考え方)、施工時の線源関連の管理として作業者と公衆に1 mSv/y、供用時の公衆に10 μSv/yの線量拘束値を設定した。ここで施工時の作業者も1 mSv/yとしているのは、再生利用に係る作業環境が、公衆の行動範囲とほぼ同じであることを考慮したためである。

除去土壌の再生利用用途として、海面埋立に用いる埋立材と中詰材を設定した。海面埋立地完成後の利用用途は、緑地公園とコンテナターミナルとした。これら4つの再生利用ケースにおける被ばく経路は、既往の除去土壌の再生利用に関する安全評価^{12, 16}および日本における海面埋立地の事例調査から、海面埋立地の造成から完成後の利用において想定される経路を設定した。各被ばく経路の評価体系は、被ばく評価において保守的となるように設定した。

海面埋立地への再生利用では、既往の除去土壌の再生利用に関する安全評価^{12, 16}とは異なり、海洋へ核種が付着した土砂が流出することが考えられる。魚介類の体内への核種濃縮には粒子に付着した核種の影響していることが既往研究¹⁵で示されている。そこで、既往の安全評価¹⁶方法の拡張として、海洋中の核種の移行を溶存した核種と粒子に付着した核種を考慮して評価可能なSediment modelを取り込んだ。Sediment modelを取り込む際は、本研究で独自に設定したパラメーターである海底土の分配係数の妥当性の確認を、1F 事故後の福島沿岸における放射性セシウムの分布の再現計算により行った。

拡張した被ばく評価手法を用いて被ばく経路における被ばく評価を実施し、施工時に1 mSv/y、供用時に10 μSv/yの被ばく線量以下となる除去土壌の濃度を計算した。その結果、埋立材に再生利用した際の1 mSv/y相当濃度は4000 Bq/kgであり、中詰材に再生利用した際の1 mSv/y相当濃度は6000 Bq/kgであった。また、供用時に公衆の被ばく線量が10μSv/yとなる、設計上の条件の検討も行った(表 3.1-13)。なお、本研究で拡張した鉛直一次元のコンパートメントモデルを用いて海洋に流出した核種からの被ばく線量を評価すると、既往の安全評価¹⁶方法に比べて4桁ほど保守的な評価となるが、評価経路全体における決定経路を変えるほどの影響はなかった。

海面埋立地完成後に災害が発生することを想定し、作業者や公衆に与える線量を評価した。災害が発生した場合においても、作業者や公衆の被ばく線量を計画被ばく状況における

公衆の線量限度(1 mSv/y)で管理可能であるか検討した。災害による海面埋立地の破損事例を調査し、それらを包含する災害として、地震、津波、異常降雨が生じた際の被ばく評価を実施した。評価の結果、どの災害においても作業者と公衆の被ばく線量は1 mSv/y以下であった。

3.1 の参考文献

- 1 原子力安全委員会. 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 17 日 <https://www.rwmc.or.jp/law/file/2-12.pdf>
- 2 環境省. 再生資材化した除去土壌の安全な利用に係る基本的考え方について. 平成 28 年 6 月 30 日
http://josen.env.go.jp/chukanchozou/facility/effort/investigative_commission/pdf/investigative_commission_180601.pdf
- 3 東京電力ホールディングス株式会社. 福島第一原子力発電所保管管理計画の概要と更新方法について (特定原子力施設放射性廃棄物規制検討委員会 (第 5 回) 資料 1) . 2017 年 2 月 10 日 <https://www.nsr.go.jp/data/000178232.pdf>
- 4 International Atomic Energy Agency, Clearance levels for radionuclides in solid materials ; Application of exemption principles interil report for comment, IAEA-TECDOC-855, 1996
- 5 原子炉安全専門審査会・被ばく線量評価検討会. 発電用軽水型原子炉施設の安全審査における一般公衆の被ばく線量評価について. 昭和 52 年 6 月
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/ugoki/geppou/V22/N06/197731V22N06.html>
- 6 原子力安全委員会. 放射性廃棄物埋設施設の安全審査の基本的考え方. 昭和 63 年 3 月 17 日 (一部改訂 平成 5 年 1 月 7 日) <https://www.rwmc.or.jp/law/d2/no3.html>
- 7 高橋知之、武田聖司、木村英雄. クリアランスレベル設定のための確率論的解析コードシステム; PASCLR ユーザーマニュアル. JAERI-Data/Code2000-041, 2001
- 8 武田聖司、菅野光大、佐々木利久、水無瀬直史、木村英雄. ウラン及び TRU 核種を含む放射性廃棄物に対するクリアランスレベル評価コードシステム PASCLR 第 2 版の開発. JAEA-Data/Code2006-003, 2006
- 9 大越実、高橋知之、木村英雄、関武雄、坂井章浩、吉森道郎、山本英明. 主な原子炉施設におけるクリアランスレベルの算出方法について. 保健物理、34 巻、2 号、p.187-197, 1999
- 10 X-5 Monte Carlo Team, MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, LA-UR-03-1987
- 11 建設物価調査会. 国土交通省土木工事積算基準 平成 28 年度版.
- 12 日本原子力研究開発機構. 土地造成事業における再生資材の利用に係る線量評価について

-
- て。平成 29 年 4 月 26 日,
http://josen.env.go.jp/chukanchozou/facility/effort/investigative_commission/pdf/proceedings_170327_08.pdf
- 13 国土交通省都市局公園緑地・景観課. 植栽基盤の整備手順(案)
 - 14 日本港湾協会. 港湾の施設の技術基準・同解説. 1999
 - 15 水産庁. 水産物の放射性物質の検査に係る報告書 (平成 23 年 3 月～平成 27 年 1 月)
http://www.jfa.maff.go.jp/j/housyanou/pdf/report_zenbun.pdf
 - 16 日本原子力研究開発機構. 中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略検討会 (第 4 回) 資料 4 の参考資料 植栽覆土で被覆された盛土 (例: 海岸防災林等) への再生資材の利用に係る線量評価について. 平成 28 年 6 月 10 日
http://josen.env.go.jp/chukanchozou/facility/effort/investigative_commission/pdf/proceedings_160607_05.pdf
 - 17 OECD/Nuclear Energy Agency. Review of the Continued Suitability of the Dumping site for Radioactive waste in the North-East Atlantic. OECD, Paris, 1985
 - 18 松浦昇、和田明、佐々木孝、高野泰隆. 福島第一原子力発電所から海へ漏洩したセシウム 137 の拡散計算. 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.69, No.4, 2013
 - 19 豊田隆寛. 北太平洋亜熱帯モード水及び亜寒帯中暖水の海洋モデリング研究. 京都大学修士論文、2002
 - 20 T. Kobayashi, S. Otsuka, O. Togawa, K. Hayashi. Development of a non-conservative radionuclides dispersion model in the ocean and its application to surface cesium-137 dispersion in the Irish Sea. Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.44, 238-247, 2007
 - 21 S. Uchida, K. Tagami. Comparison of coastal area sediment-seawater distribution coefficients (K_d) of stable and radioactive Sr and Cs. Applied Geochemistry. Vol.85. B, 148-153, 2017
 - 22 G. katata, M. Chino, T. Kobayashi, H. Terada, M. Ota, H. Nagai, M. Kajino, R. Draxler, C. Hort, A. Malo, T. Torii, Y. Sanada. Detailed source term estimation of the atmospheric release for the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident by coupling simulations of an atmospheric dispersion model with an improved deposition scheme and oceanic dispersion model. Atmospheric Chemistry and Physics. Vol.15 1029-1070, 2015
 - 23 原子力規制委員会 HP. 放射線モニタリング情報.
<https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/512/list-1.html#chapter-11>
 - 24 原子力環境整備センター、環境パラメーター・シリーズ 7 海洋における放射性核種の移行パラメーター、1996
 - 25 内山一郎、国栖広志. 埋立工事等における汚濁拡散防止技術の開発－超大型汚濁防止柵船を用いた土砂投入工法－. 五洋建設技術年報 Vol.29, 1999

-
- 26 高橋千太郎、高橋知之、谷垣実、稲葉次郎、久保田善久、山西広城、木梨友子、塚田祥文、田上恵子、青野辰雄、八島 浩、鳥居 建男、斎藤 公明、藤井 俊行、佐藤 信浩、中村 秀仁、仲谷 麻希. 原子力安全基盤科学 3 放射線防護と環境放射線管理、京都大学学術出版会、2017
- 27 佐伯公康、佐藤秀政、西本敦範、藤井輝久、梅津建夫、浅川典敬、三上信雄. 東北地方太平洋沖地震における地震動による漁港施設の被害の事後推定. 土木学会論文集 B3 (海洋開発)、Vol. 69, No.2, I_281-I_286, 2013
- 28 佐村維要、垣見年和、森山信、上村誠. 阪神・淡路大震災における被災港湾施設の復旧・補強技術－神戸港を中心とした港湾施設の復旧事例－. 大林組技術研究所報特別号、1996
- 29 港湾空港技術研究所. 港湾空港技術研究所資料 No.1231 2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報. 2014年4月
- 30 日本原子力研究開発機構. 土地造成事業における再生資材の利用に係る線量評価について. 平成 29 年 4 月 26 日
- 31 北原曜. 植生の表面侵食防止機能. 砂防学会誌 54(5) pp.92-101, 2002
- 32 早川博. 圃場の耕起方法の違いによる地表面流発生メカニズムの解明.
http://www.ric.or.jp/profile/works/kiyou/H25_3.pdf

3.2 オンサイトにおける汚染がれきの限定再生利用の科学的可能性の検討

オンサイトにおける放射性物質で汚染した物品の再生利用に防護の体系を適用することを検討する。2.4.3 で示した防護の体系の適用方法に沿って防護を行った際の、作業員や環境への影響を評価する。

作業員や環境への影響を評価する上で、3.1 と同様のアプローチを取る。つまり、これまでに積み上げられてきた環境システム学の知見を今回のケーススタディで規制科学領域へ適用するとき、規制科学としての被ばく線量評価を目的とした精度と保守性、合理性を追求することとなる。

東京電力福島第一原子力発電所(1F)敷地内には、大量の汚染がれき(コンクリート、金属、木材等)が保管されており、その一部は散乱している。1F 敷地内において低線量の汚染がれきを安全性を確保しつつ適切に再生利用することにより、1F 敷地内へ新たに搬入する資材量の抑制ができ将来の処分対象となる放射性廃棄物の物量を低減することが可能となる。

1F 敷地内での汚染したがれきの再生利用では、1F 敷地内が緊急時被ばく状況から移行した現存被ばく状況にあること、および 1F 敷地内に立ち入る者がすべて放射線管理下にあることなどから、再生利用に伴う被ばくについて既存の計画被ばくの考え方と異なる防護が必要になる。本研究では、作業員への追加被ばくを抑制しつつ管理された状態での用途を限定した再生利用(限定再生利用)の考え方を構築し^{1,2}、限定再生利用を可能とする汚染がれきの放射性セシウムのめやす濃度を算出する。また、算出しためやす濃度で再生利用を実施した際の作業員や環境への影響を評価することで、めやす濃度の妥当性を確認した。汚染がれきの再生利用用途は 1F 敷地内における再生利用可能性を考慮して、道路材、建設用コンクリート、遮蔽用ブロック、遮蔽用鉄板とした。

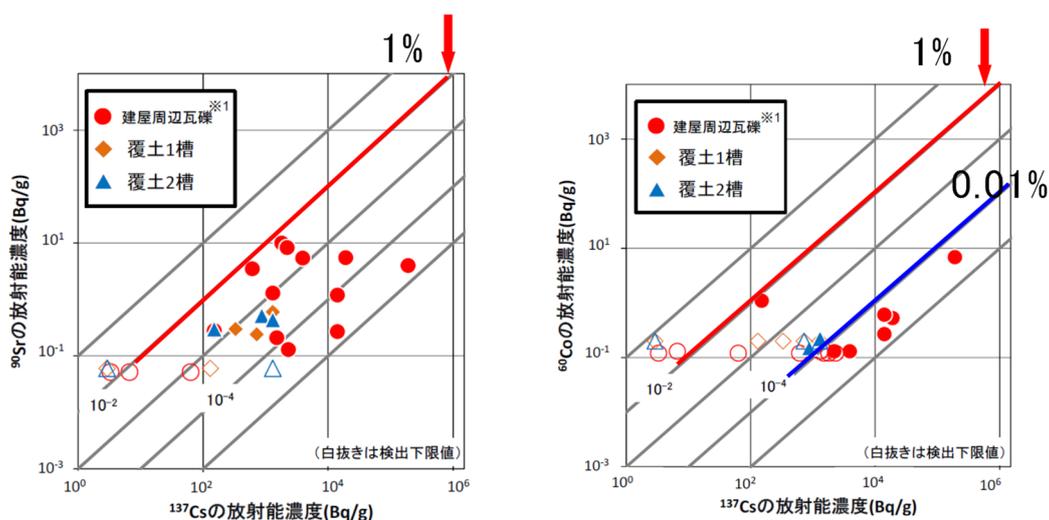
3.2.1 限定再生利用において考慮すべき核種の検討

国際廃炉研究開発機構(IRID: International Research Institute for Nuclear Decommissioning)が公表した資料³を基に、これまでのがれき中核種濃度の分析結果を整理した。建屋外がれきで検出下限を上回った核種は線放出核種では Cs-137, Cs-134 及び Co-60 で、β 線放出核種では Sr-90, H-3 及び C-14 であった。IRID が公表した資料³において、がれき中の Cs-137 と Co-60, Sr-90, C-14, H-3 との組成比を検討している。このうち Sr-90 及び Co-60 は、幅広い濃度範囲に分布する Cs-137 に対して正の相関があることが図 3.2-1 により示されている。そのため、基準となる核種濃度(ここでは Cs-137)にスケーリングファクターを掛け合わせることで間接的に対象核種濃度(ここでは Co-60, Sr-90)を推定する核種組成比法が適用できる可能性がある。一方、図 3.2-2 に示すように、H-3 及び C-14 については幅広い濃度範囲に分布する Cs-137 と濃度の相関がみられない。基準となる核種(ここでは Cs-137)濃度と評価対象核種(ここでは Co-60, Sr-90)の濃度に相関がみられず、評価対象核種の放射能濃度

データが一定範囲に分布する場合は平均放射能濃度法が適用できる。H-3 及び C-14 についてはがれき中核種濃度推定手法として平均放射能濃度法が適用できる可能性がある。がれき中の H-3 の最大値は 2 Bq/g であり、現行のクリアランスレベル 100 Bq/g と比べて十分に低い値となっている。C-14 については、最大値は 3Bq/g となっており、クリアランスレベル 1 Bq/g と比較して大きい値を示している。

限定再生利用において考慮すべき核種は 1F 敷地内のがれき中に検出下限を超えて存在することが示された核種 Cs-134, Cs-137, Co-60, Sr-90, C-14, H-3 の中から選定する。このうち Co-60 と Sr-90 については Cs-137 の濃度との間に相関があり核種組成比法が適用可能であると考えられる。Co-60 は Cs-137 と同様 γ 線放出核種であり限定再生利用により外部被ばくへの影響が考えられるが、核種組成比法を適用した場合、その影響は Cs-137 からの影響を評価することにより推定することが可能である。しかし、現状の Cs-137 に対する Co-60 の濃度比は 0.01 %程であり、Cs-137 からの影響に比べて十分に小さいので Co-60 を考慮すべき核種から除外した。Sr-90 は Cs-137 に対する濃度比が約 1%であり、その存在量を無視できるほど小さいとは言えない。また、 β 線放出核種であることから、Cs-137 と異なり内部被ばくによる影響を考慮する必要がある。よって Sr-90 は限定再生利用において考慮すべき核種とした。C-14 と H-3 は Cs-137 濃度との相関がないが、濃度が一定範囲内に分布することから平均放射能濃度法が適用可能であると考えられる。C-14 はがれき中の最高濃度が 3 Bq/g でありクリアランスレベルの 1 Bq/g を上回っていることから限定再生利用において考慮すべき核種とする。H-3 の最高濃度は 2 Bq/g であり現行のクリアランスレベル 100 Bq/g と比べて十分に低い値であったため、限定再生利用において考慮すべき核種から除外した。

上記から、限定再生利用において考慮する核種は Cs-134, Cs-137, Sr-90, C-14 とした。

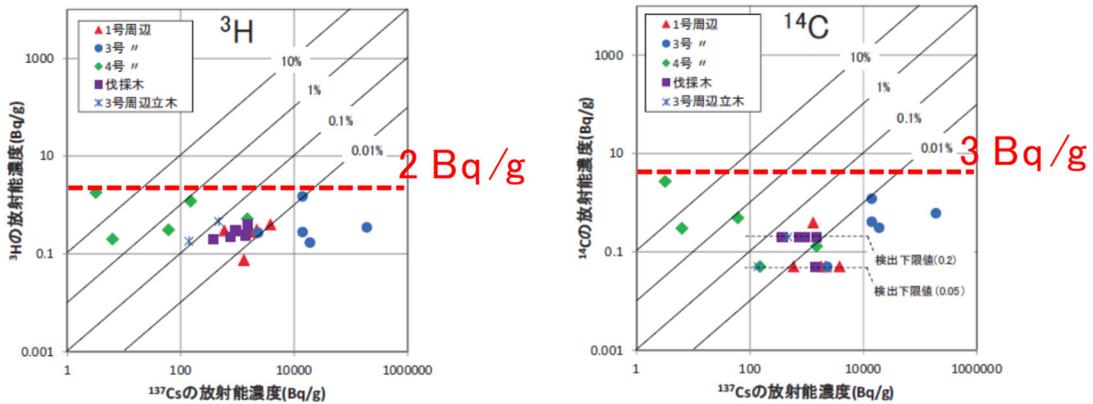


(a) Sr-90 の Cs-137 に対する組成比

(b) Co-60 の Cs-137 に対する組成比

図 3.2-1 建屋外（建屋周辺及び覆土槽）保管がれき中の核種組成比（Sr-90, Co-60）

（IRID が公表した資料³を基に作成）



(a) H-3 の Cs-137 に対する組成比

(b) C-14 の Cs-137 に対する組成比

図 3.2-2 建屋周辺がれき及び伐採木等中の核種組成比 (H-3, C-14)

(IRID が公表した資料³を基に作成)

3.2.2 めやす濃度設定及びその妥当性確認の考え方

3.2.2.1 めやす濃度設定の考え方

放射性物質で汚染した資機材の再生利用については、放射線による障害防止のための措置を必要としないレベルである $10 \mu\text{Sv/y}$ の線量のめやす値から算出されたクリアランスレベル⁴以下の資機材については、用途を限定しないクリアランスが行われている。しかし、クリアランスレベルを超える資機材の再生利用はこれまで経験がなく、ICRP、IAEA などの国際機関においても放射能汚染を有する資機材の限定的な再生利用による被ばく線量に関して参考レベルなどの値は示されていない。そのため、限定再生利用を実施するためには新たに限定再生利用を可能とするめやす濃度設定の考え方が必要であるが、その考え方は既往の放射線防護の考え方に準じていなければならない。ICRP の 2007 年勧告⁵において、被ばく状況に応じた放射線防護の方法の必要性が示されており、限定再生利用においても被ばく状況を設定し適切な防護が行われるべきである。

本研究においては、限定再生利用を実施する 1F 敷地内の被ばく状況を現存被ばく状況と設定する。これは、1F 敷地内においていまだに現存被ばく状況の参考レベルである $1 \sim 20 \text{ mSv/y}$ の被ばくをする可能性があるからである。一方、1F 敷地内の作業者は全員線量管理下にあり、作業者の放射線防護の方法としては計画被ばく状況と同様に線量限度が設けられている。

1F 敷地内の作業者は 20 mSv/y で線量管理がされているため限定再生利用によって線量限度を超過することはないが、限定再生利用による追加の被ばく線量が大きくなってしまうと本来の作業である廃止措置作業の時間が制限されてしまう恐れがある。したがって、現存

被ばく状況において限定再生利用を実施する際は、現存する放射線源に対して追加の線源を抑制する必要がある。

そこで、本研究では再生利用を可能とするめやす濃度は、再生利用物による追加線量により敷地内の作業が大きく制限されることを防ぐため、作業環境中の空間線量率を大きく上昇させない程度の追加線量に相当する濃度とした^{1,2}。作業環境中の空間線量率は、1F内のサーベイマップを示した図3.2-3によると、多くの測点で1 μ Sv/hである。1 μ Sv/hは空間線量率の測定に用いられている電離箱のディテクションリミットである。そこで本研究では、1F敷地内の屋外作業において、再生利用物による作業環境の空気線量率への寄与がモニタリングに用いられている電離箱のディテクションリミットである1 μ Sv/h以下である場合、その再生利用物による追加線量は環境中の空間線量率を大きく上昇させない程度であると判断した。ここで、再生利用物による作業員への年間の追加線量を抑制するために、再生利用物による空間線量率（1時間あたりの線量）の上昇を管理するという考え方であることに注意が必要である。

一方、再生資材の限定再生利用先として建屋内に利用されることも考えられる。建屋内の空間線量率は、一般的な建屋を考えた場合、建屋自体の遮蔽効果により建屋外の空間線量率よりも低くなることが考えられるが、固体廃棄物貯蔵庫のように建屋内に線源となる物を貯蔵する場合、貯蔵した線源により建屋内の空間線量率は建屋外より高くなる可能性がある。本研究においては、1F敷地内にある建屋はすべて1F敷地内に現存する線源からの影響を受けているものと仮定し、建屋内も現存被ばく状況と判断した。建屋内の空間線量率が建屋外よりも高くない一般的な建屋に再生利用する場合は、再生利用による追加線量が建屋内の空間線量率の最低値の対数丸め値以下になるように、めやす濃度の算出を行う。建屋内の空間線量率が高い建屋に再生利用する場合は、屋外への再生利用と同様に1 μ Sv/hからめやす濃度の算出を行う。本検討においては、一般的な建屋内の空間線量率として敷地内の大型休憩所（非管理区域）の空間線量率データ⁶の最小値0.06 μ Sv/h（H27.3.11測定）を用いて、その対数丸め値である0.1 μ Sv/hを一般的な建屋における追加線量の上昇幅と設定する。本研究で対象としている用途の内、建屋内での利用が想定される再生利用用途は放射線遮蔽材等（遮蔽用コンクリートブロック、遮蔽用鉄板）と建設用コンクリートである。これらの用途については、めやす濃度設定時に放射性セシウムに起因する追加線量率の上昇幅として0.1 μ Sv/h及び1 μ Sv/hを用いることが考えられる。

めやす濃度を設定する核種は、3.2.1で示した限定再生利用において考慮すべき核種のうち敷地内線量率への寄与を考慮して線放出核種である放射性セシウム（Cs-134, Cs-137）とした。Cs-134とCs-137の存在比は、事故発生当時（2011年3月時点）でおおよそ1:1であったと仮定し、本検討においては事故発生から5年後（2016年3月時点）を想定してCs-134:Cs-137=0.209:1とした。

福島第一構内 サーベイマップ（2019年9月4日測定分）

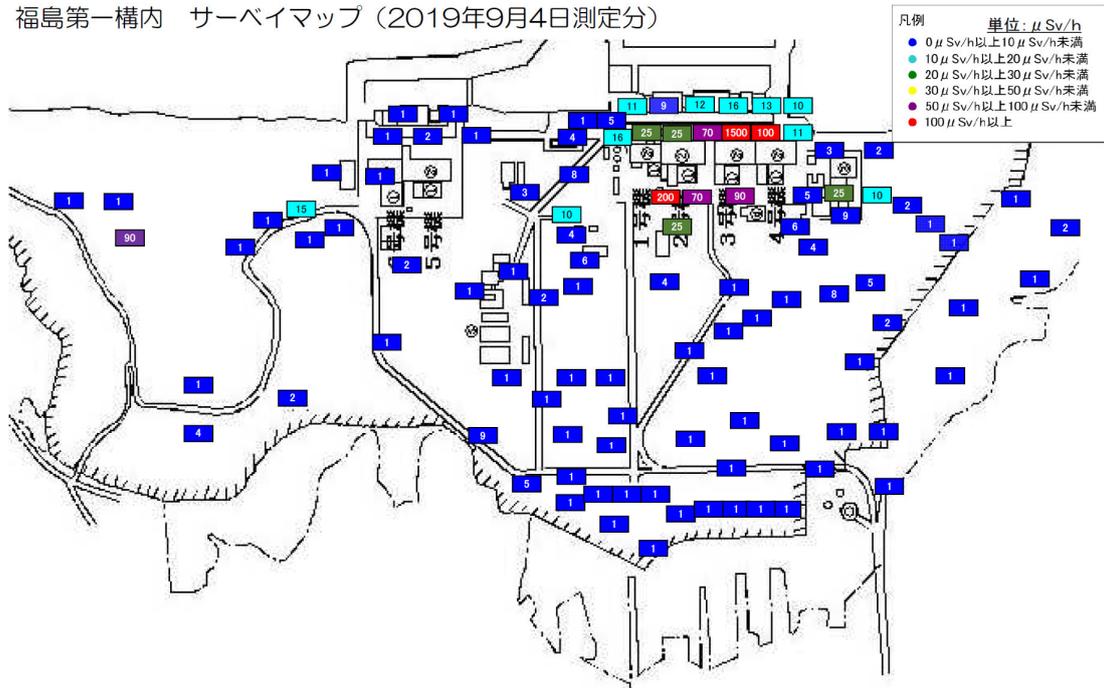


図 3.2-3 2019 年 9 月 4 日現在の構内サーベイマップ⁷

3.2.2.2 めやす濃度の妥当性確認の考え方

めやす濃度で限定再生利用を行う際は、限定再生利用を行う現存被ばく状況下で実施されている放射線管理の運用に影響を与えないことを確認し、放射性セシウムに対して設定しためやす濃度の妥当性を確認する。1F 内の限定再生利用においては、①従事者被ばく線量、②敷地境界における評価線量、③海洋へ放出される地下水について現在の運用を満たしているか確認する。①従事者被ばく線量は、線量限度である 20 mSv/y に占める限定再生利用による追加被ばく線量の割合が高くなることを確認する。追加被ばく線量が線量限度に占める割合が大きくなるように、追加被ばく線量が線量限度の 10 % 以下となることを確認する。ここで対象とする作業者とは敷地内で廃炉作業に従事する者である。再生利用作業に従事する者は廃炉作業に従事する者とは別に動員されていると仮定し、再生利用作業に従事する者は対象外とした。②敷地境界における評価線量は、現存する線量と追加被ばく線量を合計しても目標値である 1 mSv/y 以下となる条件を検討する。③海洋へ放出される地下水については、排水運用目標⁸以下となる条件を検討する。めやす濃度設定の考え方のフローを図 3.2-4 に示す。

めやす濃度で再生利用を行った時に上記①～③に対する影響を評価する核種は、3.2.1 で示した限定再生利用において考慮すべき核種である Cs-134, Cs-137, Sr-90, C-14 とする。Cs-134 及び Cs-137 による①～③への影響評価に用いる再生資材中の核種濃度は、それぞれの

核種濃度が、設定しためやす濃度中に Cs-134:Cs-137=0.209:1 の割合で存在するとして評価を行う。Sr-90 による①～③への影響評価に用いる再生資材中の Sr-90 濃度は、3.2.1 においてがれき中の Sr-90 濃度が Cs-137 の核種濃度の約 1%の割合で存在していることが示されているので、保守的に放射性セシウムに対して設定した各用途のめやす濃度の 1 %の濃度とした。Sr-90 は β 線放出核種であり、内部被ばくによる影響を考慮する必要がある一方、外部被ばくによる影響は小さいと考えられる。クリアランスレベル評価⁽⁴⁾では、多くの評価経路において Sr-90 による外部被ばくは影響なし（クリアランスレベルである $10 \mu\text{Sv/y}$ 相当濃度が $1.0 \times 10^{10} \text{Bq/kg}$ 以上）となっており、外部被ばくが最大となる経路（埋立作業）においても内部被ばくによる寄与より 5 桁低い値であった。よって、Sr-90 による外部被ばくへの影響及び敷地境界への影響は十分に小さいものとみなし、①の評価のうち外部被ばくへの影響と②の評価時は、Sr-90 は評価対象核種から除外する。C-14 による①～③への影響評価に用いる再生資材中の C-14 濃度は、3.2.1 においてがれき中の C-14 濃度は Cs-137 の核種濃度と相関せずに一定範囲に分布していることが示されているので平均放射能濃度法により設定することができる。しかし、本検討においては保守的にがれき中の C-14 濃度の最高値である 3Bq/g を、全ての再生利用用途において再生資材中の核種濃度として評価を行う。C-14 は β 線放出核種であるため内部被ばくを考慮する必要がある。また、1F 敷地内の排水基準である運用目標⁸では β 線放出核種も評価対象核種となっているので C-14 の地下水中濃度も評価する。C-14 による外部被ばく線量は、クリアランスレベル評価⁴では全ての評価経路において C-14 による外部被ばくは影響なし（クリアランスレベルである $10 \mu\text{Sv/y}$ 相当濃度が $1.0 \times 10^{10} \text{Bq/kg}$ 以上）となっているので、C-14 による外部被ばく線量の影響は非常に小さいものとして、①の評価のうち外部被ばくへの影響と②の評価時は、C-14 は評価対象核種から除外する。

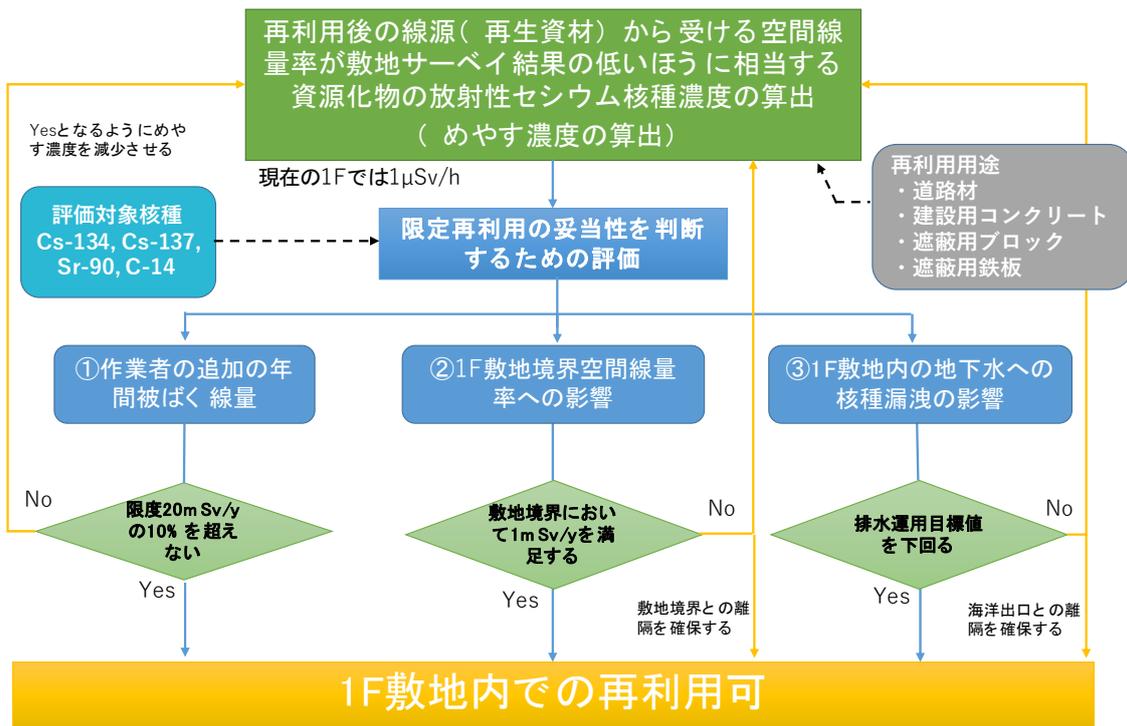


図 3.2-4 めやす濃度設定の考え方

3.2.3 各限定再生利用用途のめやす濃度の算出

1F 敷地内限定再生利用を対象にする場合、汚染がれきの資源化処理及び加工は、1F 敷地内で実施され、敷地外に持ち出すことは想定されないため、再生利用に供する直前の濃度として設定することが可能である。すなわち、限定再生利用におけるめやす濃度は、資源化物及び資源化物で作製される製品（再生資源）を対象として設定する。ここで再生資源とは、コンクリートくずの場合は、破碎して取り出した骨材・路盤材の状態を指す。また金属の場合は、溶融して鋳造した加工品・またはインゴットを指す。めやす濃度の算出においては、資源化物中の核種濃度は均一化されていると仮定する。

めやす濃度の算出に用いる外部被ばく線量換算係数は、3次元輸送計算コード MCNP5⁹により評価した。めやす濃度算出の方法は A.2.1 に示す。

3.2.3.1 道路材のめやす濃度の算出

汚染がれきのうちコンクリートくずを資源化し道路材に再生利用する際のめやす濃度の算出を行った。道路完成後の空間線量率への寄与が 1 μ Sv/h を超えない核種濃度をめやす濃度として算出した。道路材として路盤材と舗装材を想定した。

(1) シナリオ

道路の敷設が完了し、1F敷地内作業者が利用し始めたのちを想定する。

(2) 評価体系

事例調査の結果から、評価体系を図 3.2-5 のように設定した。評価に用いたパラメーターは A.2.2 に示す。

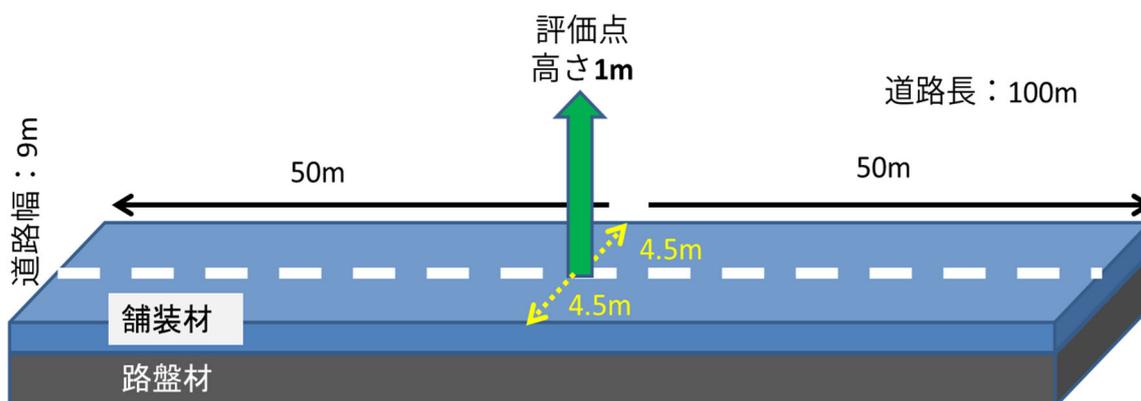


図 3.2-5 道路の評価体系

(a) 道路の厚さ

舗装形態（アスファルト舗装・コンクリート舗装）によって舗装材や路盤材の厚さの基準が異なる点、舗装材と路盤材の両方に再生資源を利用する点を考慮し、4 ケースのめやす濃度を評価した。

4 つのケースにおける道路材の厚さを表 3.2-1 に示す。ケース No.1~No.2 はアスファルト舗装、ケース No.3~No.4 はコンクリート舗装の場合とする。舗装・路盤の厚さは、舗装に関する技術基準等を参考に、現実的な値の範囲で、各ケースにおいて保守的な数値を設定する。すなわち、線源となる部分は最大厚さとし、遮蔽となる部分は最小厚さとした。No.1 と No.3 は各舗装形態で路盤にコンクリートくずから加工した再生路盤材を利用する。No.2 と No.4 は、舗装材（それぞれアスファルトとコンクリート）にコンクリートくずから加工した再生骨材を利用する。線源が舗装材にある場合、それより下の層である路盤材は遮蔽として働かないため、路盤厚さは設定しない。道路厚さ設定に関する詳細は A.2.2 に示す。

表 3.2-1 道路材の厚さ

No.	舗装形態	コンクリートくずの用途 (放射線源)	舗装厚さ(cm)	路盤厚さ(cm)
1	アスファルト	路盤材	5	80
2		舗装材	20	-
3	コンクリート	路盤材	15	80
4		舗装材	30	-

(b)再生利用に伴う希釈効果

再生利用の際の希釈効果を反映するため、線源中に含まれる再生資源使用率を各ケースの計算結果にかける。路盤材はコンクリートくずを破砕したものを直接利用するため、使用率は100%とする。舗装材の使用率は、材質中に含まれる骨材（粗骨材・細骨材）比率である。アスファルト舗装材の場合は、参考文献¹⁰中に示された「代表的なアスファルト混合物」の図において例示されている全てのアスファルト混合物の粗骨材・細骨材比率が85～95%の範囲に収まっていることから、再生資源使用率を90%とした。コンクリート舗装材の場合は、参考文献¹¹の空気・水・粗骨材・細骨材・セメントの容積比と、それぞれの密度から計算し、再生資源使用率を80%とした。

(3) めやす濃度

(2) で示した条件に基づき、ケース No.1～No.4、核種 Cs-134 および Cs-137 について、外部被ばく線量換算係数を計算した。Cs-134 の場合、Cs-137 の場合、Cs-134 と Cs-137 の合計の場合の外部被ばく線量換算係数を、表 3.2-2 に示す。

表 3.2-2 道路への再生利用における、外部被ばく線量換算係数

ケース	舗装形態	用途 (放射線源)	外部被ばく線量換算係数($\mu\text{Sv/h per Bq/kg}$)		
			Cs-134	Cs-137	合計
No.1	アスファルト	路盤材	1.6E-04	5.7E-05	7.5E-05
No.2	アスファルト	舗装材	2.9E-04	1.0E-04	1.4E-04
No.3	コンクリート	路盤材	2.1E-05	7.2E-06	9.6E-06
No.4	コンクリート	舗装材	2.6E-04	9.4E-05	1.2E-04

外部被ばく線量換算係数を用いて、道路への再生利用におけるめやす濃度（空間線量率への寄与が $1\mu\text{Sv/h}$ を超えない核種濃度）を算出する。表 3.2-2 において示した Cs-134 と Cs-137 の合計の場合の外部被ばく線量換算係数で $1\mu\text{Sv/h}$ を割り、その数値を表 3.2-3 に示した。

表 3.2-3 道路への再生利用におけるめやす濃度

ケース	舗装形態	用途（放射線源）	1 μ Sv/h相当核種濃度(Bq/kg)
No.1	アスファルト	路盤材	1.3E+04
No.2		舗装材	7.4E+03
No.3	コンクリート	路盤材	1.0E+05
No.4		舗装材	8.1E+03

アスファルト舗装・コンクリート舗装の両方で、路盤材への再生利用を行ったケース（No.1、No.3）の方が、舗装材への利用を行ったケース（No.2、No.4）よりも1 μ Sv/hのめやすに対して利用できる核種濃度が高い。これは、路盤材に線源を置いた場合、舗装材が遮蔽となるため、実効線量が大きく低減されることを示している。

また、同じ路盤材に利用した場合でも、コンクリート舗装（No.3）がアスファルト舗装（No.1）に比べ利用できる核種濃度が低いが、これは舗装形態によって舗装材の厚さを変えたことによる。

3.2.3.2 建設用コンクリート

（1）シナリオ

コンクリートくずを建造物の基礎部へ再生利用することを想定する。建造物完成後に基礎部直上階の作業空間における空間線量率への寄与が1 μ Sv/hを超えない核種濃度を試算した。

（2）評価体系

（a）基礎材の厚さ

基礎部の体系は、現在1F内に建設中の固体廃棄物貯蔵庫第9棟¹²の基礎部を参考に設定する。固体廃棄物貯蔵庫第9棟の断面図を図3.2-6に示す。建造物の基礎部にあたる構造は、基礎梁、基礎スラブ等複数あるがそれら全てに再生資材を利用し、その厚さは参考文献¹²より2mと設定した。固体廃棄物貯蔵庫第9棟の断面図から想定した基礎部の断面図を図3.2-7に示す。以後、基礎部に用いる再生資材を「基礎材」と呼ぶ。

固体廃棄物貯蔵庫第9棟を参考に設定した評価体系を図3.2-8に示す。実際の基礎部は複数の構造により構成されているが、保守的に基礎部が全て再生骨材由来の基礎材で建設されているものと仮定した。基礎部の上には床スラブを設定する。床スラブは床構造を作り、面に垂直な荷重を支える板である。床スラブは基礎構造ではないので、再生コンクリートは用いない。倉庫のような大きな積載荷重がある場合、一般的に床スラブ厚さは20～30cmを要する¹³。上部構造部の体系も固体廃棄物貯蔵庫第9棟を参考にし、作業空間となる地下2階部を模した体系を設定した。実際の貯蔵庫内には柱や梁があるが、評価上これらは無視し

た。評価に用いたパラメーターは A.2.3 に示す。

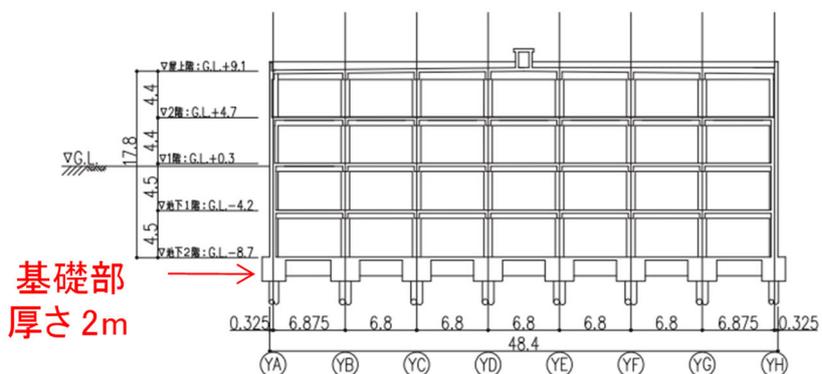


図 3.2-6 固体廃棄物貯蔵庫第 9 棟の断面図

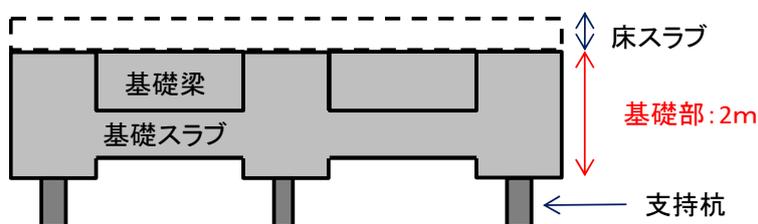


図 3.2-7 固体廃棄物貯蔵庫第 9 棟の断面図から想定した基礎部断面図

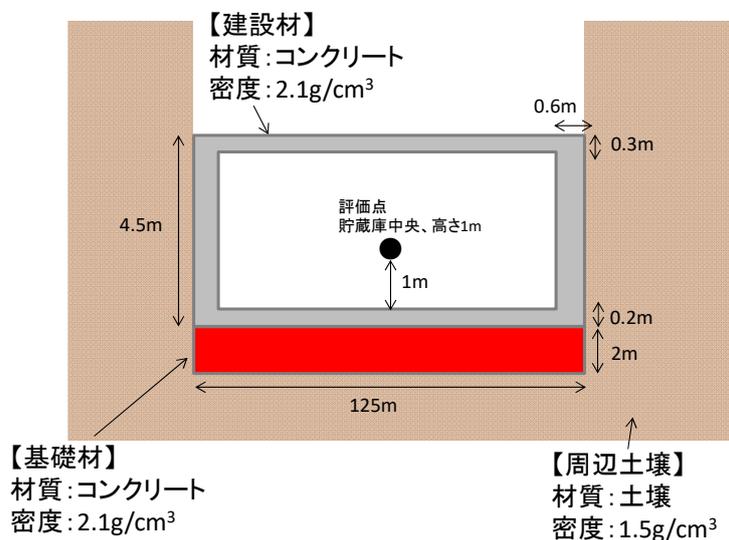


図 3.2-8 基礎部への利用時の評価体系

(b)再生利用に伴う希釈効果

基礎材に用いる再生コンクリートは、コンクリートくずから取り出した骨材を汚染されていないセメントに混ぜることで作られる。再生利用の際の希釈効果を反映するため、線源

中に含まれる再生資源使用率を計算結果にかける。参考文献中¹⁴に示された空気・水・粗骨材・細骨材・セメントの容積比とそれぞれの密度から計算し、再生資源使用率を 80 %とした。

(3) めやす濃度

Cs-134 および Cs-137 について、外部被ばく線量換算係数を計算した。計算結果は Cs-134 のみの場合、Cs-137 のみの場合、Cs-134 と Cs-137 の合計の場合の外部被ばく線量換算係数を、表 3.2-4 に示す。

表 3.2-4 基礎材への再生利用における外部被ばく線量換算係数

核種	外部被ばく線量換算係数 ($\mu\text{Sv/h per Bq/kg}$)
Cs-134	1.4E-05
Cs-137	4.5E-06
合計	6.1E-06

外部被ばく線量換算係数を用いて、基礎材への再生利用におけるめやす濃度（空間線量率への寄与が $1 \mu\text{Sv/h}$ を超えない核種濃度）を算出する。

$$\frac{1\mu\text{Sv/h}}{6.1 \times 10^{-6} \mu\text{Sv/h per Bq/kg}} = 1.6 \times 10^5 \text{ Bq/kg}$$

よってその数値は、160,000 Bq/kg である。

このめやす濃度は遮蔽として 20cm の床スラブを考慮した値であり、道路材への再生利用において遮蔽として 15 cm の舗装材を考慮した路盤材のめやす濃度である 100,000 Bq/kg より高い値となった。

3.2.3.3 遮蔽用コンクリートブロック

(1) シナリオ

遮蔽用コンクリートブロックは、原子炉建屋周辺の施設などに設置される前に、資材置き場に一時的に保管されるようなことも想定される。資材置き場は不特定多数の作業者が利用することから、廃止措置に向けた作業に従事する作業者が被ばくを受ける可能性がある。またそのような場所では線源である遮蔽用コンクリートブロックが大量にかつ長期間にわたり集中する可能性があり、空間線量率への寄与としては、最大となるシナリオであると判断した。よって遮蔽用コンクリートブロックの空間線量率寄与は、そのような資材置き場に

保管されたシナリオにより評価することとした。

(2) 評価体系

評価体系を、図 3.2-9 のように設定した。想定する資材置き場には、フォークリフトが通れる広さの通路があり、その両側に遮蔽用コンクリートブロックが積み重なっていると仮定した。遮蔽用コンクリートブロックは小さな直方体で、隙間なく積み重ねることができ、全体として大きなコンクリートのかたまりを成している。コンクリートのかたまりは直方体とし、通路の両側に 1 つずつ接して平行に置かれている。評価に用いたパラメーターは A.2.4 に示した。

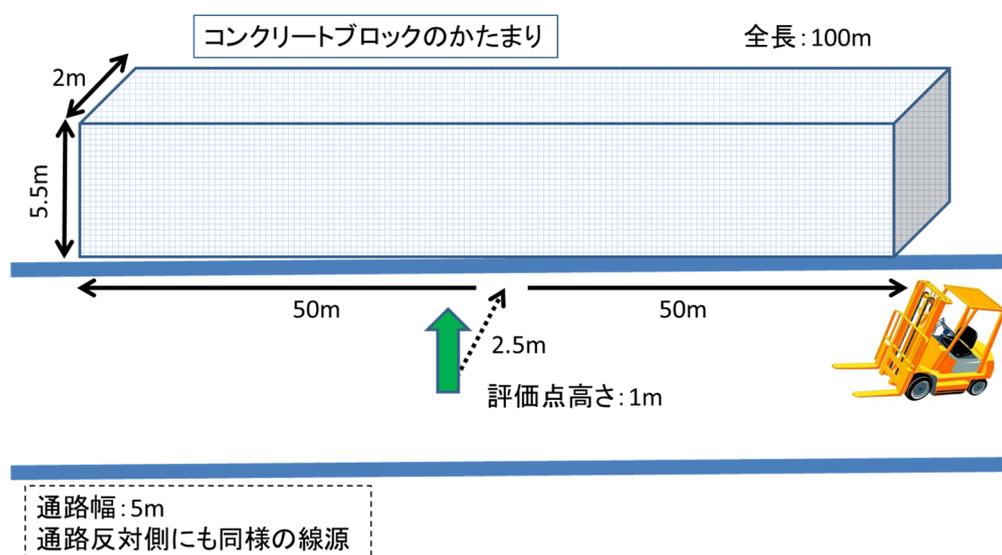


図 3.2-9 遮蔽用コンクリートブロックの評価体系

(3) めやす濃度

資材置き場を通る通路の中央の高さ 1 m を評価点とし、単位核種濃度当たり（核種 Cs-134 および Cs-137）の実効線量を計算し、外部被ばく線量換算係数を求めた。その結果を、表 3.2-5 に示す。

表 3.2-5 遮蔽用コンクリートブロックへの再生利用における外部被ばく線量換算係数

核種	外部被ばく線量換算係数 ($\mu\text{Sv/h per Bq/kg}$)
Cs-134	2.0 E-04
Cs-137	7.0 E-05
合計	9.2 E-05

合計の外部被ばく線量換算係数を用いて、めやす濃度（空間線量率への寄与が 1 μSv/h を超えない核種濃度）を算出する。

$$\frac{1\mu\text{Sv/h}}{9.2 \times 10^{-5} \mu\text{Sv/h per Bq/kg}} = 1.1 \times 10^4 \text{Bq/kg}$$

よってその数値は、11,000 Bq/kg である。

3.2.3.4 遮蔽用鉄板

(1) シナリオ

3.2.3.3 の (1) で示した、遮蔽用コンクリートブロックの評価シナリオと同様とした。

(2) 評価体系

評価体系を、図 3.2-10 に示すように設定した。遮蔽鉄板は十分に薄く平らで、均一な品質の鉄板が大量に存在すると仮定した。鉄板は一定の高さまで積み上げられており、かつ同じ高さの束が縦横に複数並び、全体として大きな直方体を成している。よって基本的には、3.2.3.3 の遮蔽用コンクリートブロックの評価体系と同様とする。評価に用いたパラメーターは A.2.5 に示した。

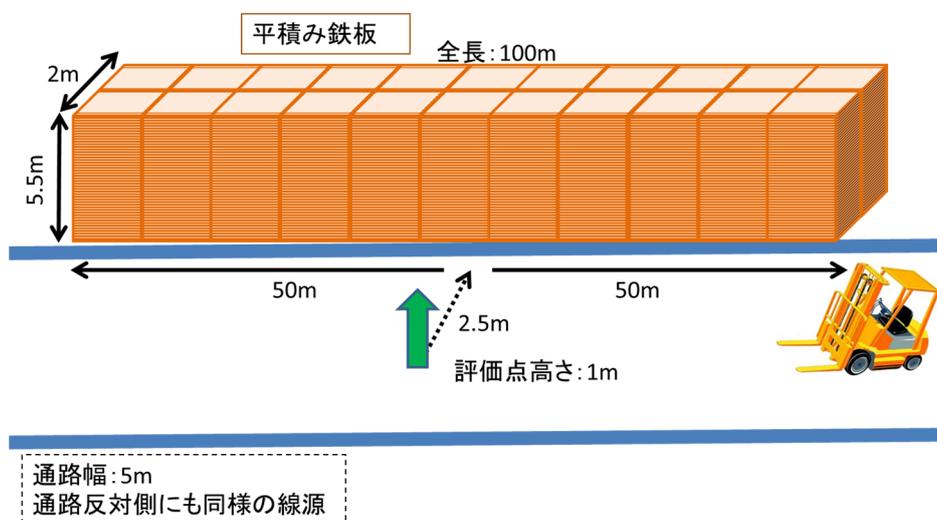


図 3.2-10 遮蔽鉄板の評価体系

(3) めやす濃度

資材置き場を通る通路の中央の高さ 1 m を評価点とし、単位核種濃度当たり（核種 Cs-134 および Cs-137）の実効線量を計算し、外部被ばく線量換算係数を求めた。表 3.2-6 に示す。

表 3.2-6 遮蔽鉄板への再生利用における外部被ばく線量換算係数

核種	外部被ばく線量換算係数 ($\mu\text{Sv/h per Bq/kg}$)
Cs-134	3.1E-04
Cs-137	1.1E-04
合計	1.4E-04

合計の外部被ばく線量換算係数を用いて、めやす濃度（空間線量率への寄与が $1\mu\text{Sv/h}$ を超えない核種濃度）を算出する。

$$\frac{1\mu\text{Sv/h}}{1.4 \times 10^{-4} \mu\text{Sv/h per Bq/kg}} = 7.0 \times 10^3 \text{Bq/kg}$$

よってその数値は、7,000Bq/kg である。

3.2.4 めやす濃度の妥当性確認

めやす濃度の妥当性を、めやす濃度で再生利用を実施した際の①作業者の追加の年間被ばく線量、②1F 敷地境界空間線量率への影響、③1F 敷地内の地下水への核種漏洩の影響、から確認する。

①作業者の追加の年間被ばく線量については、1F 敷地内はすべての作業者に対して被ばく線量が管理されており、限定再生利用が行われても線量限度を超えるおそれはないが、限定再生利用された汚染がれきにより受ける被ばく線量が大きければ、本来の廃止措置に向けた作業に充てられる作業時間が減少するため、1F 敷地内での限定再生利用による追加被ばく線量を一定程度抑制する必要がある。汚染がれきについて資源化を行ったり、資源化物を製品に加工したり、道路を設置したりするような限定再生利用のために実施する作業に従事する作業者は、廃止措置に関する作業への従事者とは別に確保されると考えられるため、それらの作業者の受ける被ばくは廃止措置に向けた作業へ影響を与えることはない。よって抑制の対象となる作業者は、廃止措置に向けた作業に従事する作業者で、限定再生利用が行われることにより追加被ばくを受ける作業者である。限定再生利用において作業者の被ばくシナリオは、廃止措置に向けた作業中に再生資源から受ける被ばくのうち、作業者が最も多くの被ばくを受けると考えられる状況に基づいて設定する。

②1F 敷地境界空間線量率への影響については、敷地境界における空間線量は 1 mSv/y （東京電力が設定した目標値）に抑える必要がある。そのためには、現在の敷地境界上における空間線量を把握したうえで、再生利用による追加線量をどれだけ許容できるかを評価する必要がある。東京電力では、1F の事故後施設内に保管しているがれき類や汚染水からの放射線、環境へ放出している放射性物質に起因する敷地境界における空間線量を評価している¹⁵。各方角にある敷地境界上の評価点を図 3.2-11 に示す。平成 27 年 9 月 30 日に

東京電力より提出され、原子力規制委員会が公表した「福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画」¹⁶のIII-3-2-2-2-添4-1（その3）に記載された、敷地内各施設からの直接線・スカイシャイン線の評価値をプロットし、図3.2-12に示す。図3.2-12から読み取れることとしては、敷地境界上において一部1 mSv/yに近い値をとる評価点もあるが、ほとんどの点では1 mSv/yを下回っている。このことから場所を選べば限定再生利用が可能であると考えられる。

そこで、今後敷設されると想定されるコンクリートくずを再生利用した道路と、コンクリートくずを再生利用して作られる遮蔽用コンクリートブロック（以下コンクリートブロック）が敷地境界へ与える線量寄与を評価することとした。敷地境界においては、線源からの直接線の他にスカイシャイン線も考慮する必要があるため、3次元輸送計算コードMCNP5⁹により外部被ばく線量換算係数を算出した。



図 3.2-11 敷地境界上の評価点

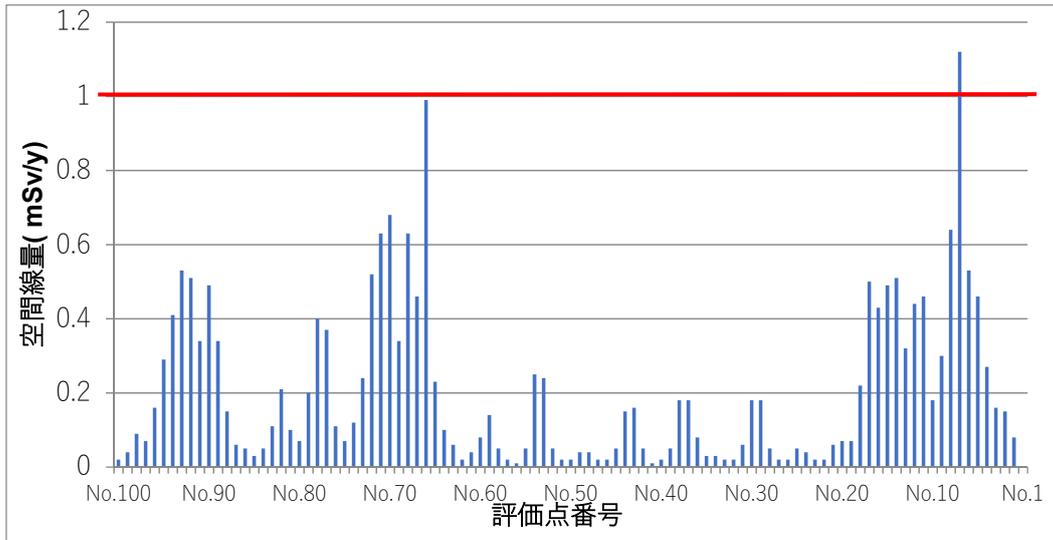


図 3.2-12 敷地境界における空間線量（東京電力による評価、平成 27 年 9 月 30 日）

③1F 敷地内の地下水への核種漏洩の影響については、1F 敷地内で限定再生利用を行った場合、降雨などにより再生資材から漏えいした核種が帯水層へ流出し、核種を含んだ地下水が海洋へ放出されることが考えられる。限定再生利用により地下水中の核種濃度が上昇すると、1F における運用目標値を超過する可能性がある。そこでめやす濃度で限定再生利用を行った場合の地下水中の核種濃度を評価し、地下水核種濃度からめやす濃度の妥当性の評価を行う。帯水層中の核種の移行は、分配平衡を仮定した 1 次元移行解析を、クリアランスレベル評価コード PASCLR2¹⁷を用いて行う。路盤材からの核種流出の評価は、再生資材への放射性セシウム及び Sr-90 の取着を考慮した分配係数モデルを用いて行う。分配係数モデルでは、再生資材からの放射性セシウム及び Sr-90 の溶出が分配平衡に基づいて起こると仮定し、漏えい率は以下の式により算出される。

$$\eta = \frac{P}{H_w \cdot (\varepsilon_w + \rho_w \cdot Kd_w)} \quad \text{数式 3.2-1}$$

- η : 路盤材からの漏えい率 (1/y)
- P : 路盤材への浸透水量 (m/y)
- H_w : 路盤材の厚さ(m)
- ε_w : 路盤材の空隙率 (-)
- ρ_w : 路盤材のかさ密度 (g/cm³)
- Kd_w : 再生資材の分配係数 (ml/g)

対象核種は Cs-134, Cs-137 およびベータ線放出核種で土壌中の移行性が高い Sr-90, C-14 とする。

めやす濃度を正当化する地下水中の核種濃度の基準として運用目標値を用いる。運用目標値⁸とは東京電力が 1F 敷地内の排水に対して設定している排水基準である。1F 敷地内の地下水バイパスの排水においては、告示濃度限度に対して約 10 %の裕度を持って設定された排水許容限度が示されている。しかし実際の排水にあたっては、漁業関係者等の意見を考慮して設定された運用目標値が用いられている。1F 敷地内では核種濃度をモニタリングし、運用目標以下の場合のみ排水を行っている。各核種の運用目標値は Cs-134 : 1 Bq/L, Cs-137 : 1 Bq/L, Sr-90 : 5 Bq/L, C-14 : 5 Bq/L である。めやす濃度で限定再生利用を行った際の海洋出口における地下水中核種濃度が運用目標以下となっていることをもって、めやす濃度の妥当性を確認する。

3.2.4.1 道路材のめやす濃度の妥当性確認

表 3.2-3 に示した道路材のめやす濃度の妥当性確認を、①作業者の追加の年間被ばく線量、②1F 敷地境界空間線量率への影響、③1F 敷地内の地下水への核種漏洩の影響により実施する。

①作業者の追加の年間被ばく線量

3.2.3.1 で求めた道路材のめやす濃度で再生利用した場合の、作業者の年間被ばく線量を求める。道路材に再生利用した際の作業員への被ばくは、外部被ばくと内部被ばく（粉塵吸入、二酸化炭素吸入）を想定する

(a) 外部被ばく線量の評価

評価点は 3.2.3.1 と同様とし、遮蔽は考慮しない。年間作業時間は 1,430 h/y とした。これは入退域管理に割かれる時間を考慮し、1F 敷地内作業員の 1 日当たりの作業時間を平均 5.5 時間、また、週 2 日の休業日を想定し、1 年あたりの勤務日数 260 日に基づくものである。

各ケースにおける年間被ばく線量の計算結果を、表 3.2-7 に示す。すべてのケースで 1.3 mSv/y となった。1.4 mSv/y を下回るのは、被ばく期間である 1 年間の放射性崩壊による放射能の減衰を考慮しているためである。

表 3.2-7 道路への再生利用における作業者の年間被ばく線量

ケース	舗装形態	用途（放射線源）	年間被ばく線量(mSv/y)
No.1	アスファルト	路盤材	1.3E+00
No.2	アスファルト	舗装材	1.3E+00
No.3	コンクリート	路盤材	1.3E+00
No.4	コンクリート	舗装材	1.3E+00

(b) 粉塵吸入による内部被ばく線量の評価

コンクリートくずを道路表面の舗装材に再生利用する場合、核種を含んだ舗装材が車輛の通行により摩耗し、核種を含んだ粉塵が舞い上がることが考えられる。その粉塵を作業者が吸入することにより内部被ばくをする可能性がある。そこでアスファルト道路の舗装材およびコンクリート道路の舗装材に再生利用した際の、作業者の内部被ばく線量を評価する。道路材への再生利用で最もめやす濃度が高い用途はコンクリート道路の路盤材であるが、路盤材は舗装材の下に敷設される部材であり摩耗により粉塵が巻き上がることは起こらないので評価対象から外す。対象核種は Cs-134, Cs-137 および β 線放出核種であり内部被ばくを考慮する必要がある Sr-90, C-14 とする。

吸入による内部被ばく線量は、クリアランスレベル評価⁴に用いられた以下の式により算出した。

$$D_{inh,i}(t) = C_{W,i}(t) \cdot Cd_w \cdot Br_w \cdot t_w \cdot DF_{inh,i} \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i t_i)}{\lambda_i t_i} \quad \text{数式 3.2-2}$$

- $D_{inh,i}(t)$: 核種 i による吸入経路の内部被ばく線量(Sv/y)
- $C_{W,i}(t)$: 舗装材中の核種 i 濃度(Bq/kg)
- Cd_w : 作業時の空气中ダスト濃度(kg/m³)
- Br_w : 作業者の呼吸量(m³/h)
- t_w : 年間作業時間(h/y)
- $DF_{inh,i}$: 核種 i の吸入経路による内部被ばく線量係数(Sv/Bq)
- t_i : 被ばく中の減衰期間(y)

作業時の空气中ダスト濃度は、既往の研究¹⁸より道路近傍の空气中アスファルト濃度 2.8×10^{-5} g/m³ が示されているが、保守的にクリアランスレベル評価で用いられている埋立作業時のダスト濃度 5×10^{-4} g/m³ を採用した。作業者の呼吸量と吸入経路による内部被ばく線量係数はクリアランスレベル評価で用いられている値である 1.2 m³/h と 5.6×10^{-10} Sv/Bq を用いた。年間作業時間は 1,430 h/y とした。評価時期は、保守的に再生利用開始直後(0 年目)とした。

舗装材中の核種濃度は全セシウムのめやす濃度を基に設定した。セシウム存在比は Cs-134:Cs-137 = 0.209:1 とし、この比から舗装材中の Cs-134, Cs-137 濃度を算出した。Sr-90 濃度は全セシウム濃度の 1/100 として算出した。舗装材中の C-14 濃度は、保守的に建屋外がれき中の C-14 濃度の最高値である 3 Bq/g とした。舗装材中の核種濃度は表 3.2-8 に示す。

表 3.2-8 舗装材中の核種濃度

利用用途	Cs-134 (Bq/kg)	Cs-137 (Bq/kg)	Sr-90 (Bq/kg)	C-14 (Bq/kg)
アスファルト道路の舗装材	1,300	6,100	74	3,000
コンクリート道路の舗装材	1,400	6,700	81	3,000

吸入による内部被ばく線量の計算結果を表 3.2-9 に示す。

表 3.2-9 吸入による内部被ばく線量

利用用途	内部被ばく線量(mSv/y)			
	Cs-134	Cs-137	Sr-90	C-14
アスファルト道路の舗装材	1.6E-05	4.6E-05	2.2E-05	1.4E-06
コンクリート道路の舗装材	1.7E-05	5.0E-05	2.4E-05	1.4E-06

(c) 二酸化炭素吸入による内部被ばく線量の評価

アスファルト道路とコンクリート道路の道路材（路盤材及び舗装材）に再生資材を再生利用した際の二酸化炭素吸入による作業者の内部被ばく線量を評価する。実際の道路材はアスファルト及びコンクリートであるが、評価は保守的に土壌を透過して二酸化炭素が放出される場合を想定して行う。評価体系を図 3.2-13 に示す。

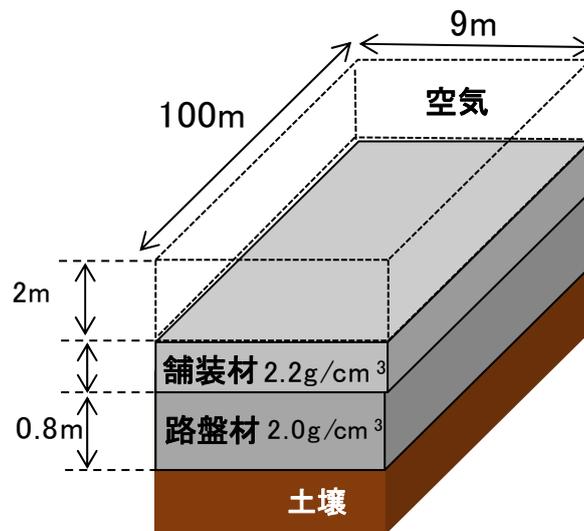


図 3.2-13 二酸化炭素吸入による内部被ばく線量評価体系図（道路材）

二酸化炭素吸入による内部被ばくの評価は、再生資材から放出された C-14 の空気中濃度を算出し、吸入量と内部被ばく線量換算係数を用いて評価する。再生資材から放出された二酸化炭素の空気中濃度は、廃止措置終了確認に用いられる RESRAD コードマニュアル¹⁹に示された以下の式により算出する。

$$C_{C-14} = \frac{3.17 \times 10^{-8} \times 0.5 \times EVSN \times \sqrt{A}}{H_{mix} \times U} \quad \text{数式 3.2-3}$$

ここで、

C_{C-14}	:	C-14 の空気中濃度(Bq/m ³)
3.17×10^{-8}	:	単位換算係数(y/s)
0.5	:	評価点方向へ風が向かう時間割合(-)
$EVSN$:	線源領域からの C-14 のフラックス(Bq/m ² /y)
A	:	線源の面積 (m ²)
H_{mix}	:	空気の混合領域の高さ(m)
U	:	年間平均風速(m/s)

であり、線源領域からの C-14 のフラックスは以下の式で示される。

$$EVSN = S_{C-14} \times E_{C-14} \times \rho_b \times d_{ref} \quad \text{数式 3.2-4}$$

ここで、

S_{C-14}	:	線源中の C-14 濃度(Bq/kg)
E_{C-14}	:	線源領域からの C-14 散逸率(1/y)
ρ_b	:	線源のかさ密度(kg/m ³)
d_{ref}	:	線源厚さ(m)

である。空気中の C-14 吸入による内部被ばく線量は以下の式で表される。

$$D_{inh,C-14} = C_{C-14} \times Br_w \times T_w \times DF_{inh,C-14} \quad \text{数式 3.2-5}$$

ここで

$D_{inh,C-14}$:	C-14 の吸入による内部被ばく線量(Sv/y)
Br_w	:	作業者呼吸量(m ³ /h)
T_w	:	年間作業時間 (h/y)
$DF_{inh,C-14}$:	C-14(CO ₂)吸入による内部被ばく線量換算係数(Sv/Bq)

である。評価に用いるパラメーターは A.2.6 に示した。

各用途に再生利用した場合の内部被ばく線量を表 3.2-10 に示す。

表 3.2-10 各用途における二酸化炭素吸入による C-14 からの内部被ばく線量

再生利用用途	部材	CO ₂ 吸入による内部被ばく線量(mSv/y)
アスファルト道路	路盤材(80cm)	1.7E-04
	舗装材(20cm)	4.7E-05
コンクリート道路	路盤材(80cm)	1.7E-04
	舗装材(30cm)	7.0E-05

表 3.2-11 に再生利用に伴う外部被ばくと内部被ばく（粉塵吸入、二酸化炭素吸入）の評価結果をまとめる。評価の結果、外部被ばく線量と内部被ばく線量を合わせても線量限度 20 mSv/y の 10%に当たる 2 mSv/y に対して十分小さいことが確認できた。

表 3.2-11 作業者の再生利用物からの被ばく線量総量

用途	部材	内部被ばく線量(mSv/y)					外部被ばく線量(mSv/y)	全被ばく線量(mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Sr-90	C-14	4核種合計		
アスファルト道路	路盤材	-	-	-	1.7E-04	1.7E-04	1.3	1.3
	舗装材	1.6E-05	4.6E-05	2.2E-05	4.8E-05	1.3E-04	1.3	1.3
コンクリート道路	路盤材	-	-	-	1.7E-04	1.7E-04	1.3	1.3
	舗装材	1.7E-05	5.0E-05	2.4E-05	7.1E-05	1.6E-04	1.3	1.3

②1F 敷地境界空間線量率への影響

道路敷設による敷地境界への線量寄与評価は、道路表面に利用される舗装材を対象とした評価を行うことで路盤材の評価も代表する。道路敷設による敷地境界への線量寄与評価として、以下の2種類の評価を行う。

- (a) 一本の道路から敷地境界への線量寄与の評価
- (b) 一定面積内に含まれる道路から敷地境界への線量寄与の評価

(a) は一本の道路を線源として敷地境界への線量寄与を評価する。(b) は一定面積内に現実的に敷設され得る道路すべてを線源として敷地境界への線量寄与を評価する。

- (a) 一本の道路から敷地境界への線量寄与の評価

評価体系を図 3.2-14 と図 3.2-15 に示す。

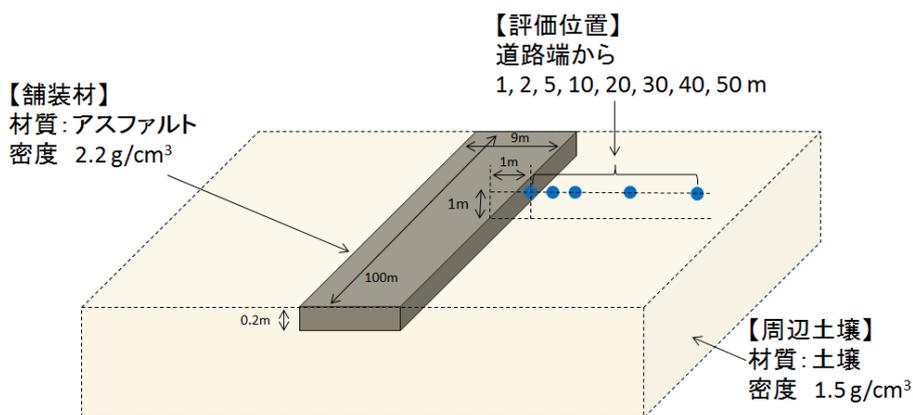


図 3.2-14 敷地境界評価体系 (アスファルト舗装道路)

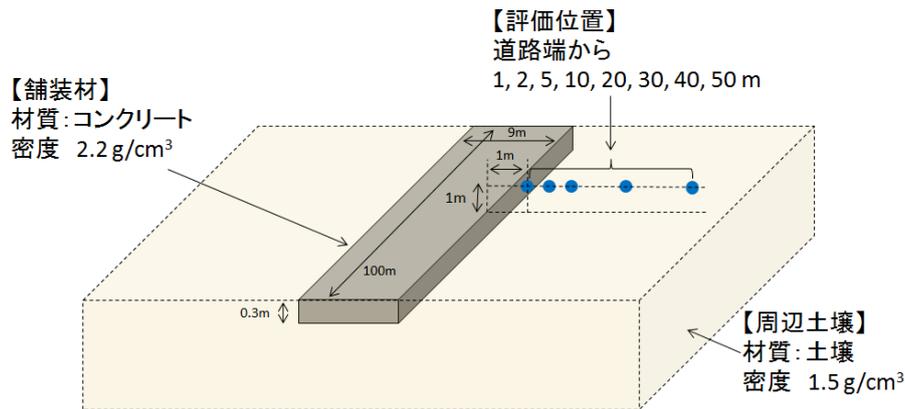


図 3.2-15 敷地境界評価体系 (コンクリート舗装道路)

(1) シナリオ

敷地境界付近に道路が一本敷設された状態を想定する。舗装材にはコンクリートくずを再生利用して作られたアスファルト舗装材、もしくはコンクリート舗装材が用いられている。それぞれの舗装材の骨材には、めやす濃度の放射性セシウムが含まれる。めやす濃度は、アスファルト舗装 7,400 Bq/kg、コンクリート舗装 8,100 Bq/kg である。

(2) 線源の体系

3.2.3.1 に沿って、アスファルト舗装材は幅 9 m×長さ 100 m×厚さ 0.2 m、コンクリート舗装材は幅 9 m×長さ 100 m×厚さ 0.3 m とした。

(3) 物質組成・再生利用に伴う希釈効果

アスファルトとコンクリートの物質組成や骨材の比率は、それぞれ道路のアスファルト舗装材、コンクリート舗装材と同様とした。周辺土壌の密度と組成は既往研究²⁰をもとに決定した。

(4) 評価点

長さ 100 m の辺の中心線上、高さ 1 m、道路端から 1 m, 2 m, 5 m, 10 m, 20 m, 30 m, 40 m, 50 m を評価点とする。

(5) 評価結果

アスファルト舗装の結果を表 3.2-12 に、コンクリート舗装の結果を表 3.2-13 に示した。アスファルト舗装とコンクリート舗装の外部被ばく線量換算係数にそれぞれの舗装材中セシウムの核種濃度をかけて、線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) を求めた (表 3.2-14、表 3.2-15)。また、線量率に 8,760 時間 (=1 年間) をかけて空間線量 (mSv/y) を算出した (表 3.2-16、表 3.2-17)。図 3.2-16 に全セシウムによる空間線量寄与をアスファルト舗装とコンクリート舗装ごとに示した。

計算の結果、コンクリートくずをアスファルト舗装材に再生利用した場合と、コンクリート舗装材に再生利用した場合で空間線量への寄与はほとんど変わらなかった（図 3.2-16）。道路端からの距離が 1m の際の空間線量が 1.4 mSv/y であり、基準となる 1 mSv/y を超えてしまうため、道路一本を敷地境界付近に敷設する際は敷地境界から 2 m 以上離す必要があることが分かった。東京電力が平成 27 年 9 月 30 日に公表した敷地境界上の空間線量¹⁵によると、敷地境界における空間線量は一部 1 mSv/y に近い値をとるが、ほとんどの点で 0.6 mSv/y 以下であった（図 3.2-12）。今回の評価の結果から、線源から 5 m 離れた場所への線量寄与は、アスファルトで 0.29 mSv/y、コンクリートで 0.28 mSv/y であった。このことから、コンクリートくずを一本の道路の舗装材に再生利用する場合、敷地境界から 5 m 以上離せば追加線量を考慮してもほとんどの地点で 1 mSv/y を超えず限定再生利用可能である。

表 3.2-12 アスファルト舗装材への再生利用における外部被ばく線量換算係数

道路端からの距離	外部被ばく線量換算係数 (μSv/h per Bq/kg)		
	Cs-134	Cs-137	合計
1m	4.7E-05	1.7E-05	2.2E-05
2m	2.6E-05	9.2E-06	1.2E-08
5m	9.4E-06	3.4E-06	4.4E-06
10m	4.3E-06	1.6E-06	2.0E-06
20m	2.0E-06	7.4E-07	9.6E-07
30m	1.3E-06	4.7E-07	6.1E-07
40m	9.0E-07	3.4E-07	4.3E-07
50m	6.7E-07	2.5E-07	3.2E-07

表 3.2-13 コンクリート舗装材への再生利用における外部被ばく線量換算係数

道路端からの距離	外部被ばく線量換算係数 (μSv/h per Bq/kg)		
	Cs-134	Cs-137	合計
1m	4.3E-05	1.5E-05	2.0E-05
2m	2.3E-05	8.3E-06	1.1E-05
5m	8.5E-06	3.1E-06	4.0E-06
10m	3.9E-06	1.4E-06	1.9E-06
20m	1.8E-06	6.8E-07	8.8E-07
30m	1.2E-06	4.3E-07	5.6E-07
40m	8.3E-07	3.0E-07	4.0E-04
50m	6.2E-07	2.3E-07	3.0E-04

表 3.2-14 アスファルト舗装材への再生利用における線量率

道路端からの距離	線量率 (μSv/h)		
	Cs-134	Cs-137	合計
1m	3.5E-01	1.3E-01	1.6E-01
2m	1.9E-01	6.8E-02	8.9E-02
5m	7.0E-02	2.5E-02	3.3E-02
10m	3.2E-02	1.2E-02	1.5E-02
20m	1.5E-02	5.5E-03	7.1E-03
30m	9.6E-03	3.5E-03	4.5E-03
40m	6.7E-03	2.5E-03	3.2E-03
50m	5.0E-03	1.9E-03	2.4E-03

表 3.2-15 コンクリート舗装材への再生利用における線量率

道路端からの距離	線量率 (μSv/h)		
	Cs-134	Cs-137	合計
1m	3.5E-01	1.2E-01	1.6E-01
2m	1.9E-01	6.7E-02	8.9E-02
5m	6.9E-02	2.5E-02	3.2E-02
10m	3.2E-02	1.1E-02	1.5E-02
20m	1.5E-02	5.5E-03	7.1E-03
30m	9.7E-03	3.5E-03	4.5E-03
40m	6.7E-03	2.4E-03	3.2E-03
50m	5.0E-03	1.9E-03	2.4E-03

表 3.2-16 アスファルト舗装材への再生利用における空間線量

道路端からの距離	空間線量 (mSv/y)		
	Cs-134	Cs-137	合計
1m	3.0E+00	1.1E+00	1.4E+00
2m	1.7E+00	6.0E-01	7.8E-01
5m	6.1E-01	2.2E-01	2.9E-01
10m	2.8E-01	1.0E-01	1.3E-01
20m	1.3E-01	4.8E-02	6.2E-02
30m	8.4E-02	3.0E-02	4.0E-02
40m	5.8E-02	2.2E-02	2.8E-02
50m	4.3E-02	1.6E-02	2.1E-02

表 3.2-17 コンクリート舗装材への再生利用における空間線量

道路端からの距離	空間線量 (mSv/y)		
	Cs-134	Cs-137	合計
1m	3.1E+00	1.1E+00	1.4E+00
2m	1.6E+00	5.9E-01	7.8E-01
5m	6.0E-01	2.2E-01	2.8E-01
10m	2.8E-01	9.9E-02	1.4E-01
20m	1.3E-01	4.8E-02	6.2E-02
30m	8.5E-02	3.1E-02	4.0E-02
40m	5.9E-02	2.1E-02	2.8E-02
50m	4.4E-02	1.6E-02	2.1E-02

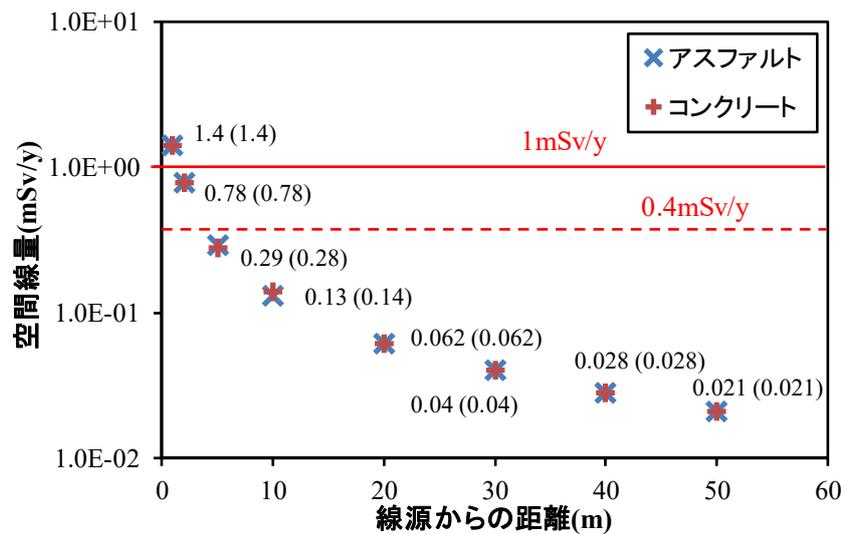


図 3.2-16 全セシウムによる道路端からの距離ごとの空間線量率寄与

() なし数字はアスファルトによる線量、() つき数字はコンクリートによる線量

(b) 一定面積内に含まれる道路から敷地境界への線量寄与の評価

一定面積内に現実的に敷設される可能性がある道路すべてを線源として敷地境界への線量寄与を評価する。一定の面積内に含まれる道路の占有率は、1F 敷地内に新設された雑固体廃棄物焼却設備周辺 500 m 四方を対象として航空写真 (図 3.2-17) をもとに推定を行い約 9 %とした。今後、道路が増設されることも考慮して道路占有率 20 %として評価を行った。



図 3.2-17 雑固体廃棄物焼却設備周辺の航空写真（道路と判断した部分に黄色線を合成）

評価体系を図 3.2-18 に示す。

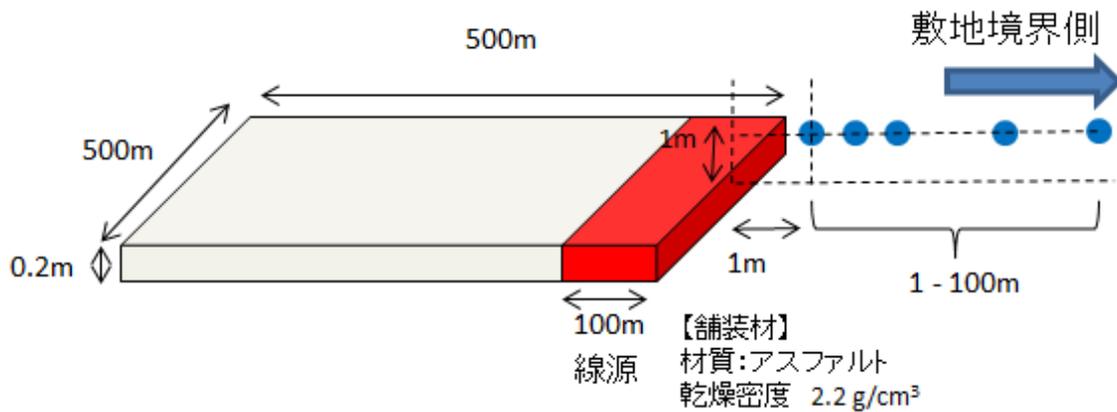


図 3.2-18 敷地境界評価体系（一定の面積内に含まれる道路からの線量寄与）

(a)の評価より、敷地境界への線量寄与はアスファルト舗装の場合とコンクリート舗装の場合でほとんど差がないので、代表してアスファルト舗装を評価した。区画中敷地境界側の20%を道路が占めていると仮定する。

(1) シナリオ

1F 敷地境界付近の 500 m×500 m の区画内に占有率 20 %で道路が敷設されている状態を想定する。舗装材には、コンクリートくずを再生利用して作られたアスファルト舗装材を用いた。舗装材中セシウムの核種濃度は 7,400 Bq/kg とした。

(2) 線源の体系

500 m×500 m の区画の 20 %にあたる、幅 100 m、長さ 500 m の道路舗装材部を線源とする。線源厚さは 3.2.3.1 に沿って、0.2 m とする。

(3) 物質組成・再生利用に伴う希釈効果

アスファルトの物質組成や骨材の比率は、道路のアスファルト舗装材と同様とする。周辺土壌の密度と組成は既往研究²⁰をもとに決定した。

(4) 評価点

長さ 500 m の辺の中心線上、高さ 1 m、道路端から 1 m, 2 m, 5 m, 10 m, 25 m, 50 m, 75 m, 100 m を評価点とする。

(5) 評価結果

外部被ばく線量換算係数を計算し表 3.2-18 に示した (核種 Cs-134 および Cs-137)。外部被ばく線量換算係数に舗装材中セシウムの核種濃度をかけて線量率($\mu\text{Sv/h}$)を求め表 3.2-19 に示した。また、線量率に 8,760 時間 (=1 年間) をかけて空間線量 (mSv/y) を算出した (表 3.2-20)。図 3.2-19 に全セシウムによる空間線量寄与を示した。

500 m×500 m の区画の 20 %に、アスファルト舗装を施した道路を敷設する場合、道路端 1 m における空間線量が 2.0 mSv/y 、2 m における空間線量が 1.3 mSv/y であり、基準となる 1 mSv/y を超えてしまうため最低でも敷地境界から 5 m 離さないといけないことが分かった。東京電力が平成 27 年 9 月 30 日に公表した敷地境界上の空間線量¹⁵によると、敷地境界における空間線量は、一部 1 mSv/y に近い値をとるが、ほとんどの点で 0.6 mSv/y 以下であった (図 3.2-12)。今回の評価の結果から、線源から 25 m 離れた場所への線量寄与は、0.34 mSv/y であった。このことから、コンクリートくずを、500 m×500 m の区画に占有率 20 % で道路を敷設する際の舗装材に再生利用する場合、敷地境界から 25 m 以上離せば追加線量を考慮してもほとんどの点で 1 mSv/y を超えず限定再生利用可能である。

現在、1F 敷地内には 27,800 m^3 の限定再生利用対象となるがれきが存在している。それらのがれきをアスファルト舗装材として再生利用し、500 m×500 m の区画に占有率 20 % で道路を敷設する場合、幅 100 m×長さ 500 m×厚さ 0.2 m の道路舗装材のうち 90 % がアスファルト混合物の粗骨材・細骨材なので、 $100 \text{ m} \times 500 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 0.9 = 9,000 \text{ m}^3$ のがれきを再生利用することができる。これは限定再生利用対象がれき総量の約 32% に相当する。

表 3.2-18 一定の面積内に含まれる道路による外部被ばく線量換算係数

線源端からの距離	外部被ばく線量換算係数 ($\mu\text{Sv/h per Bq/kg}$)		
	Cs-134	Cs-137	合計
1m	6.6E-05	2.4E-05	3.1E-05
2m	4.3E-05	1.5E-05	2.0E-05
5m	2.5E-05	8.9E-06	1.2E-05
10m	1.8E-05	6.4E-06	8.3E-06
25m	1.1E-05	4.0E-06	5.2E-06
50m	6.8E-06	2.5E-06	3.3E-06
75m	4.5E-06	1.7E-06	2.2E-06
100m	2.5E-06	8.9E-07	1.2E-06

表 3.2-19 一定の面積内に含まれる道路による線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)

線源端からの距離	線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)		
	Cs-134	Cs-137	合計
1m	4.9E-01	1.8E-01	2.3E-01
2m	3.2E-01	1.1E-01	1.5E-01
5m	1.9E-01	6.6E-02	8.9E-02
10m	1.3E-01	4.7E-02	6.1E-02
25m	8.1E-02	3.0E-02	3.8E-02
50m	5.0E-02	1.9E-02	2.4E-02
75m	3.3E-02	1.3E-02	1.6E-02
100m	1.9E-02	6.6E-03	8.9E-03

表 3.2-20 一定の面積内に含まれる道路による空間線量 (mSv/y)

線源端からの距離	線量率 (mSv/y)		
	Cs-134	Cs-137	合計
1m	4.3E+00	1.6E+00	2.0E+00
2m	2.8E+00	9.7E-01	1.3E+00
5m	1.6E+00	5.8E-01	7.8E-01
10m	1.2E+00	4.1E-01	5.4E-01
25m	7.1E-01	2.6E-01	3.4E-01
50m	4.4E-01	1.6E-01	2.1E-01
75m	2.9E-01	1.1E-01	1.4E-01
100m	1.6E-01	5.8E-02	7.8E-02

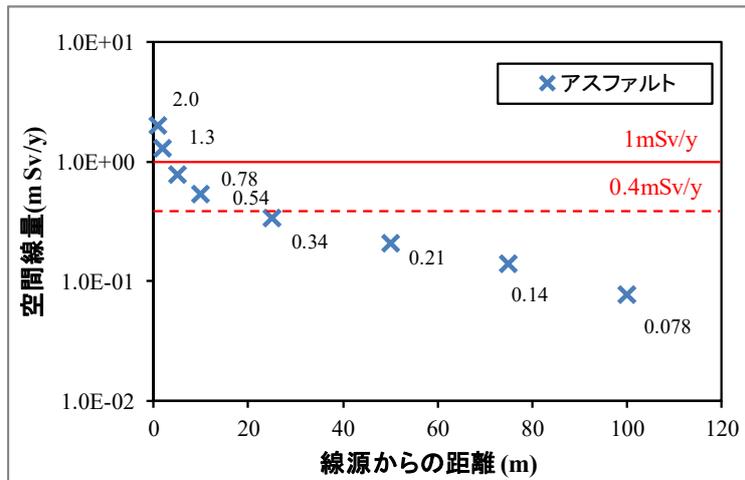


図 3.2-19 全セシウムによる道路端からの距離ごとの空間線量寄与

③1F 敷地内の地下水への核種漏洩の影響

(1) シナリオ

完成した道路に降雨が浸透しコンクリート道路の路盤材から核種が漏えいして帯水層に流入することを想定する。浸透水量としては、路盤材上に位置する舗装材中を通過した水量を設定した。帯水層に流入した核種は、帯水層中を移行し海洋側へ移行していく。評価は、めやす濃度が最も高かったコンクリート道路の路盤材に再生利用した場合で代表した。

(2) 評価体系

評価体系を図 3.2-20 に示す。道路は海に向かう方向に長さ 100 m を設定し、1次元移行解析において最も保守的になるようにしている。評価に用いたパラメーターは A.2.7 に示した。

評価では海洋へ放出される時点での地下水中核種濃度が運用目標以下となるための条件を探るため、路盤材下流端からの距離ごとの地下水中核種濃度を計算し、海岸からどれだけの離隔を持って再生利用を行えば運用目標以下となるかを確認する。実際には路盤材と帯水層の間には遮水性が高い層が存在するが、保守的にこれらを見逃した設定とした。

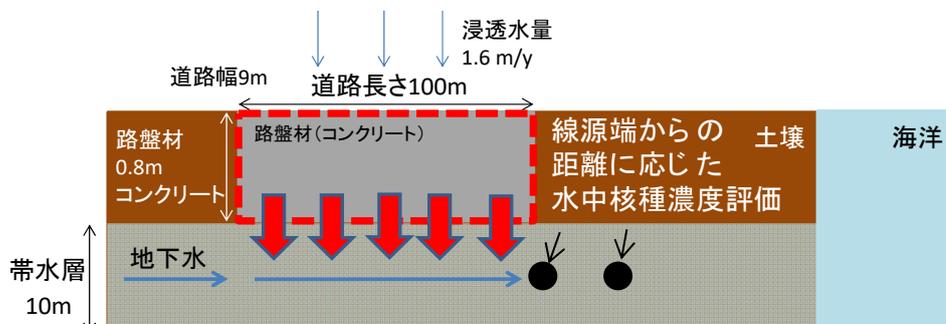
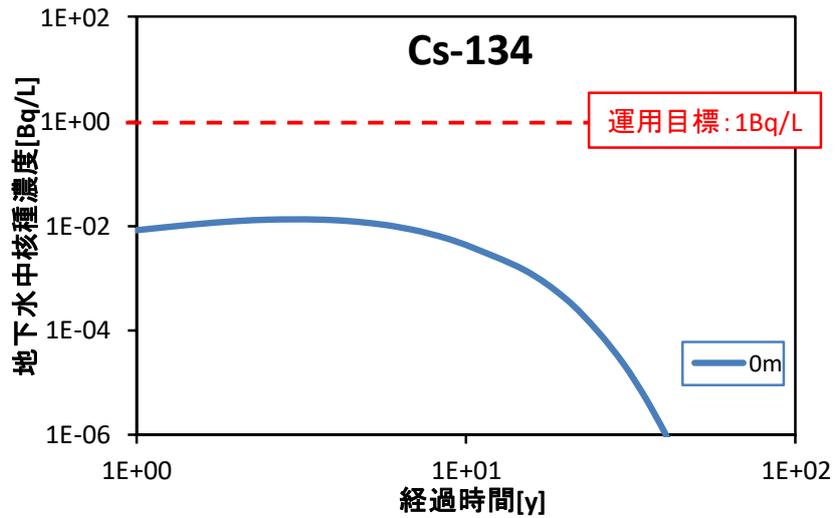


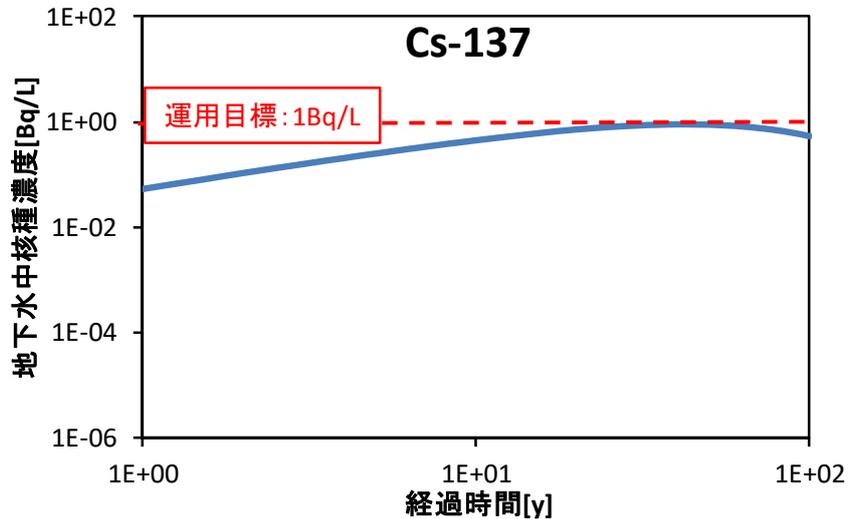
図 3.2-20 路盤材へ再生利用した際の地下水移行評価体系

(3) 評価結果

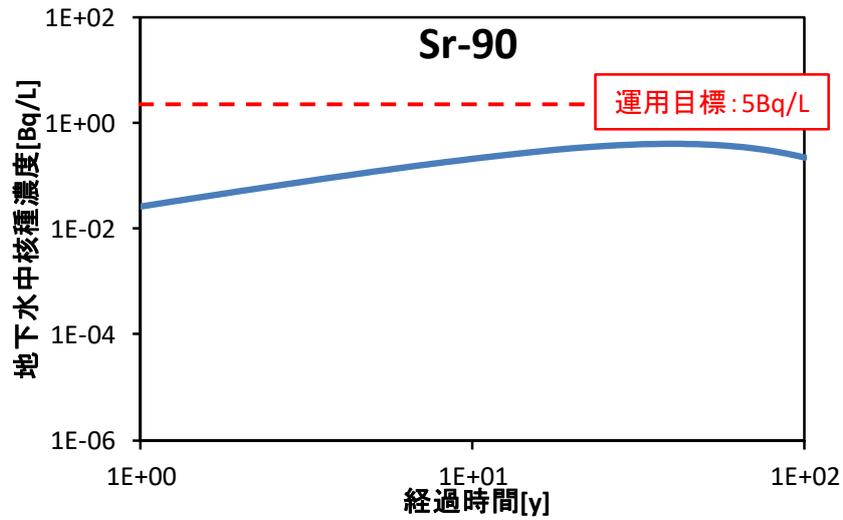
土壌への浸透を想定して地下水中核種濃度を評価した結果を図 3.2-21 に示す。4 核種とも路盤材端から 0m の位置ですでに運用目標を下回った。地下水中 β 線放出核種濃度については、0m 地点における Sr-90 の最高濃度は 0.4 Bq/L で C-14 濃度は最大で 2.8 Bq/L であったので、合計が 5 Bq/L 以下であることが確認された。



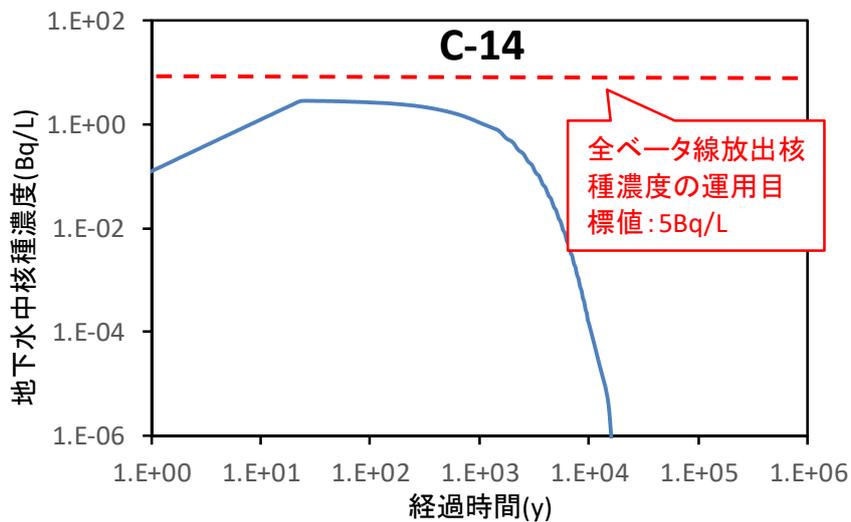
(a)Cs-134 の地下水中核種濃度 (0m の最大濃度 1.3×10^{-2} Bq/L < 1Bq/L)



(b)Cs-137 の地下水中核種濃度 (0m の最大濃度 9.8×10^{-1} Bq/L < 1Bq/L)



(c)Sr-90 の地下水中核種濃度 (0m の最大濃度 4.0×10^{-1} Bq/L < 5Bq/L)



(d)C-14 の地下水中核種濃度 (0m の最大濃度 2.8×10^{-1} Bq/L < 5Bq/L)

図 3.2-21 道路端からの距離及び再生利用開始からの期間に対する地下水中核種濃度

表 3.2-3 に示した道路材のめやす濃度の妥当性の確認を①～③の評価により行い、再生利用を可能とする条件を確認した。再生利用を可能とする条件を図 3.2-29 に示す。

3.2.4.2 建設用コンクリートのめやす濃度の妥当性確認

①作業者の追加の年間被ばく線量

基礎材に再生コンクリートを利用した建造物の中で作業する作業者に対する、再生利用による追加の年間被ばく線量を評価した。

対象とする作業者は、貯蔵庫完成後に基礎直上階である地下 2 階で作業をする作業者と

した。作業者は再生コンクリートを利用した基礎部から外部被ばくを受ける。評価対象とする核種は、Cs-134 と Cs-137 とする。基礎部は作業空間に露出していないので、外部被ばくのみを評価することとし、内部被ばくに寄与する Sr-90 は評価の対象外とした。作業内容は、廃棄物の運搬・配置作業を想定する。評価点は図 3.2-8 と同様とし、遮蔽は考慮しない。年間作業時間は、1,430 h/y とした。これは入退域管理に割かれる時間を考慮し、1F 敷地内作業者の 1 日当たりの作業時間を平均 5.5 時間、また、週 2 日の休業日を想定し 1 年あたりの勤務日数を 260 日とした設定に基づくものである。

上記条件のもと外部被ばくによる年間被ばく線量を算出する。本評価では基礎材の上に非汚染コンクリートで作られた床スラブが設置されるので、想定する作業内容において作業者は吸入および直接経口、皮膚への付着による被ばくは発生しないとして評価対象から除外した。

年間被ばく線量の計算結果は、1.3 mSv/y となった。1.4 mSv/y を下回るのは、被ばく期間である 1 年間の放射性崩壊による放射能の減衰を考慮しているためである。

評価結果からコンクリートくずを固体廃棄物貯蔵庫第 9 棟と同型施設の基礎材に使った場合の作業員への追加被ばく線量は 1.3 mSv/y であり、作業員の個人線量限度 20 mSv/y に対して 7%未満であった。これは十分に低い値と見ることができ、空間線量率への寄与が 1 μ Sv/h を超えないように算出しためやす濃度が、作業員の年間追加被ばく線量の観点でも抑制されていることが確認できた。

②1F 敷地境界空間線量率への影響

基礎材に再生利用した際の敷地境界における空間線量を 1 mSv/y 以内に抑えるために必要となる離隔距離の確認及び、めやす濃度の妥当性について確認を行う。

(1) シナリオ

敷地境界付近に基礎材に再生資材を利用した建造物が建てられることを想定する。基礎材中の骨材には、めやす濃度の放射性セシウムが含まれている。めやす濃度は 3.4.1 で行った試算結果から 160,000 Bq/kg とする。

(2) 評価体系

固体廃棄物貯蔵庫第 9 棟と同型施設を想定し基礎部は幅 48 m×長さ 125 m×厚さ 2 m とした。上部構造部の体系も固体廃棄物貯蔵庫第 9 棟を模して作成した。建造物自身による遮蔽は、保守的に外壁のみとして設定した。評価体系を図 3.2-22 に示す。

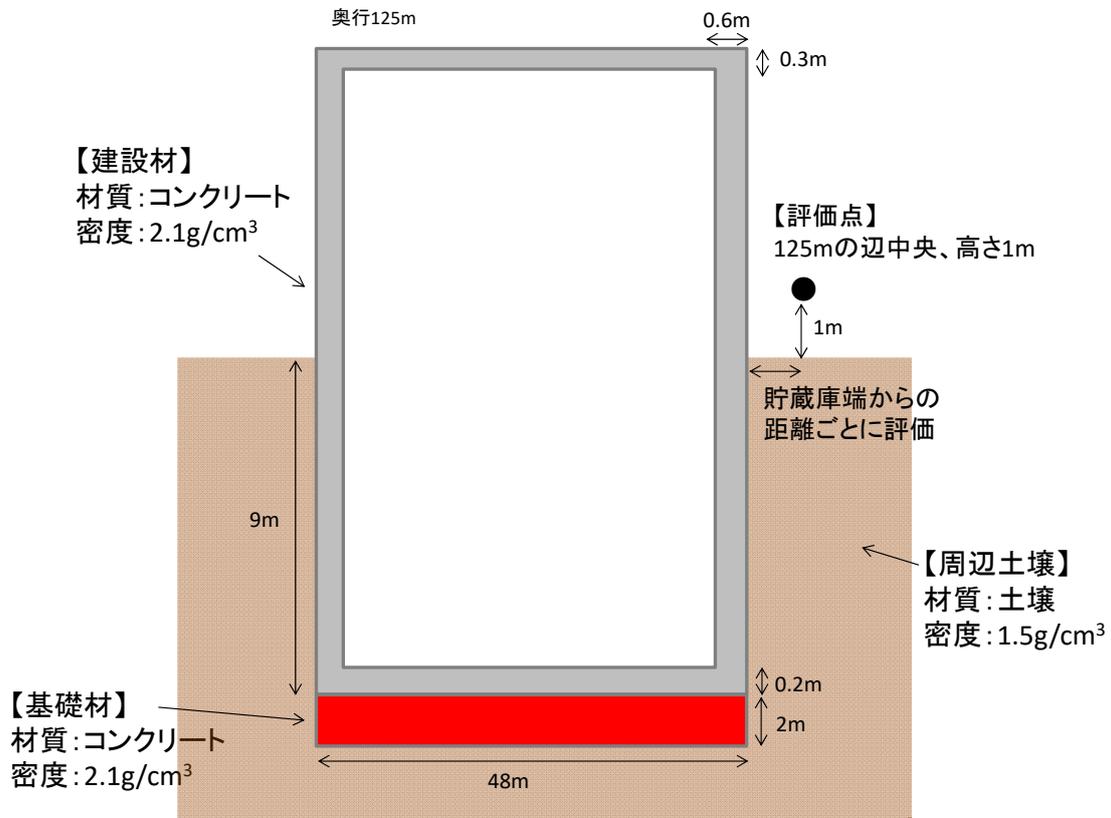


図 3.2-22 敷地境界評価体系

(3) 物質組成・再生利用に伴う希釈効果

物質組成や骨材の比率は 3.2.3.2 で示した値を用いた。

(4) 評価点

長さ 125 m の辺の中心線上、高さ 1 m で建造物からの距離を振って評価する。

(5) 計算結果

外部被ばく線量換算係数を計算した。外部被ばく線量換算係数を表 3.2-21 に示す。外部被ばく線量換算係数に基礎材中のセシウムのみやす濃度 (Cs-134、Cs-137) をかけて線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) を求めた (表 3.2-22)。また、線量率に 8,760 時間 (=1 年間) をかけて空間線量 (mSv/y) を算出した (表 3.2-23)。

(2) の結果より、基礎材に再生資材を利用した建造物を建設する場合、建造物からの距離が 1m の地点であっても再生利用による空間線量寄与は $7.1 \times 10^{-4} \text{ mSv/y}$ であり、限定再生利用による空間線量率への寄与は 1 mSv/y に対して十分に小さい値であることが確認された。

表 3.2-21 基礎材への再生利用における外部被ばく線量換算係数

貯蔵庫端からの距離	外部被ばく線量換算係数 (μSv/h per Bq/kg)		
	Cs-134	Cs-137	合計
1m	1.2E-09	3.4E-10	4.9E-10

表 3.2-22 基礎材への再生利用における線量率

貯蔵庫端からの距離	線量率 (μSv/h)		
	Cs-134	Cs-137	合計
1m	3.5E-05	4.6E-05	8.1E-05

表 3.2-23 基礎材への再生利用における空間線量

貯蔵庫端からの距離	空間線量 (mSv/y)		
	Cs-134	Cs-137	合計
1m	3.0E-04	4.0E-04	7.1E-04

③1F 敷地内の地下水への核種漏洩の影響

(1) シナリオ

貯蔵庫は地下水が流れていく方向に対して長辺方向 (125 m) を向いて建設されることを想定した。完成した固体廃棄物貯蔵庫の基礎部から核種が漏えいし地下水に流入することを想定した。帯水層に流入した核種は、帯水層中を移行し海洋側へ移行していく。

評価は保守的にコンクリートにひびがあり水を通しやすい状態を想定して行った。基礎材中の浸透水量は、ひびがあるコンクリート (基礎材) 及び帯水層の透水係数と間隙率を用いて地下水流動解析を行い設定した。

(2) 評価体系

評価体系を図 3.2-23 に示す。貯蔵庫は海に向かう方向に長さ 125 m を設定し、1次元移行解析において最も保守的になるようにしている。核種移行評価に用いたパラメーターは、A.2.8 に示した。

評価上、基礎部が帯水層に浸っている体系を設定し、帯水層を流れる地下水が基礎材中を浸透することを想定した。浸透水量設定のための地下水流動解析の評価概念図を図 3.2-24 に示す。また、地下水流動解析に用いたパラメーター設定は、A.2.8 に示した。

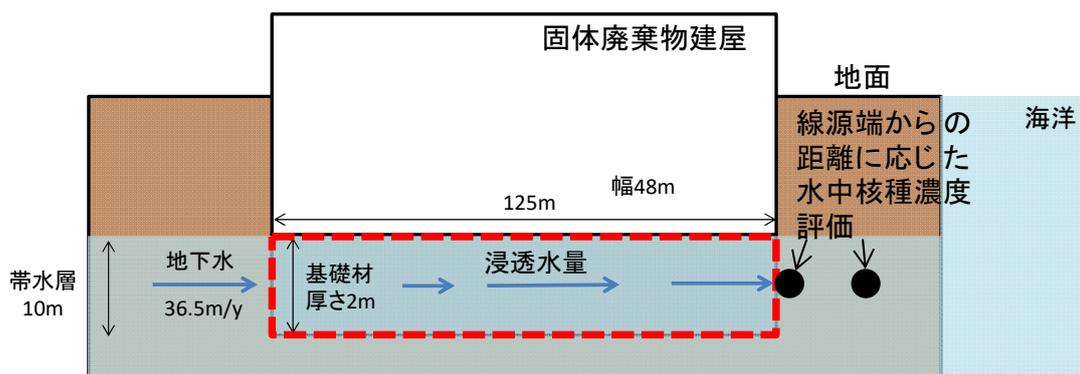


図 3.2-23 基礎材へ再生利用した際の地下水移行評価体系

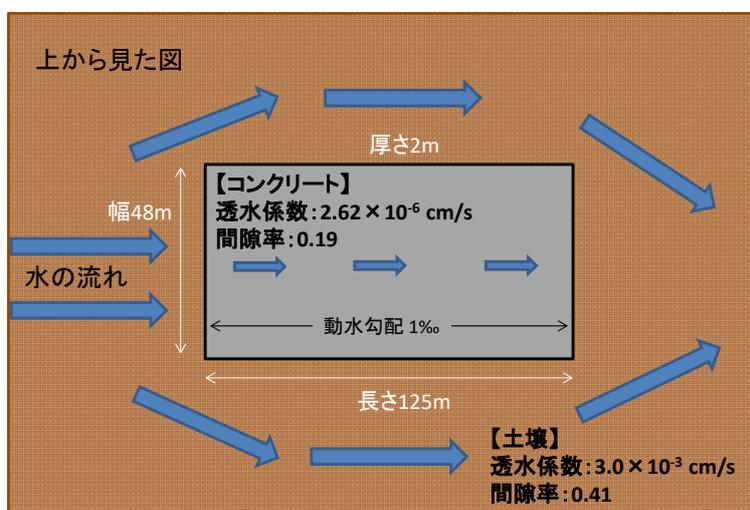
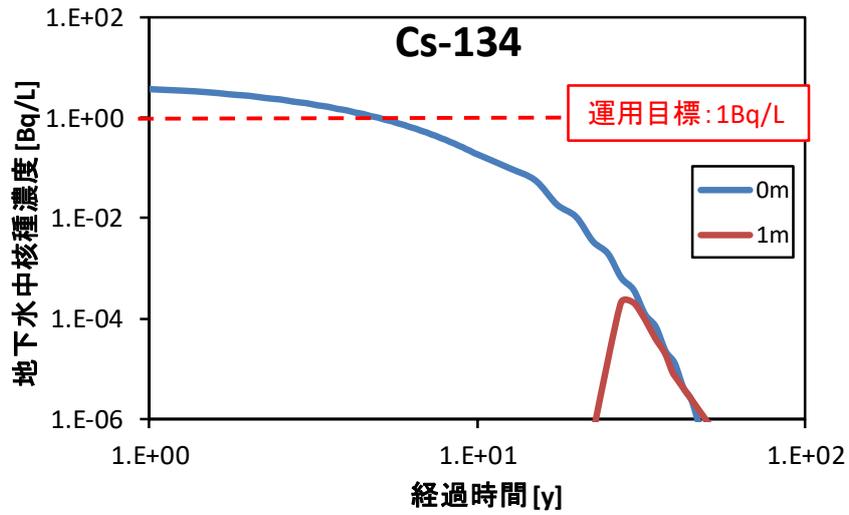


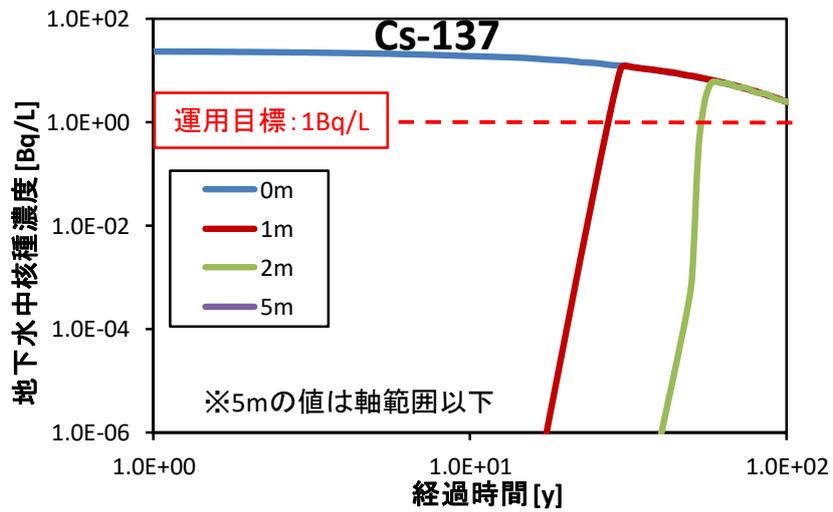
図 3.2-24 地下水流動解析の概念図

(3) 評価結果

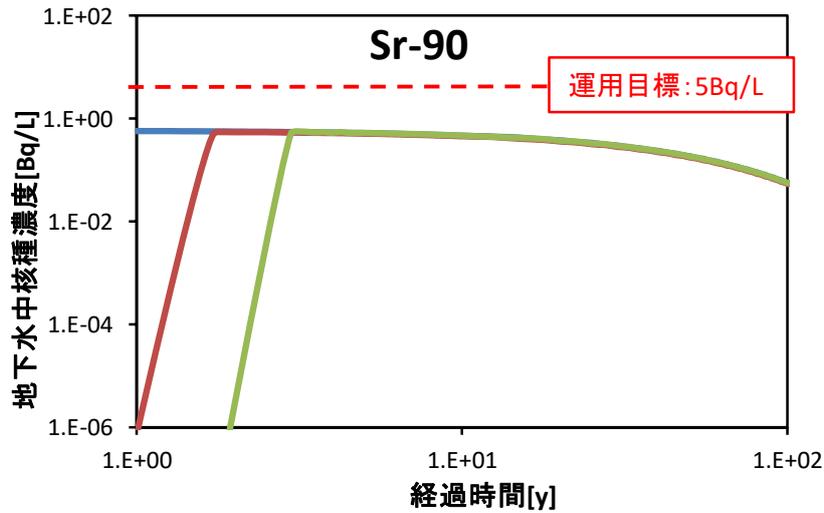
地下水中核種濃度を評価した結果を図 3.2-25 に示す。Cs-134 は基礎材端から 1 m の地点で最大濃度が 2.1×10^{-4} Bq/L となり運用目標値を下回った。Cs-137 は基礎材端から 5 m の地点で最大濃度が 1.1×10^{-7} Bq/L となり運用目標値を下回った。地下水中 β 線放出核種濃度については 0 m 地点における Sr-90 の最大濃度は 5.9×10^{-1} Bq/L で C-14 の最大濃度は 3.0×10^{-1} Bq/L であったので、0m の地点で合計が 5 Bq/L 以下であることが確認された



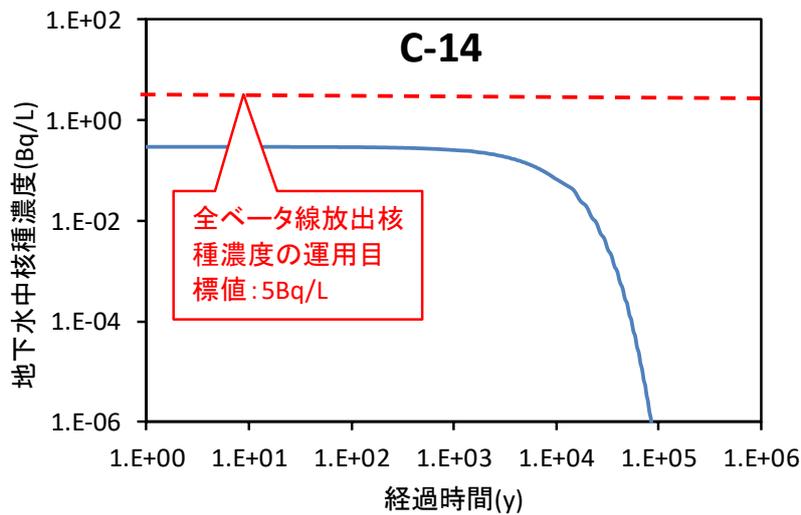
(a)Cs-134 の地下水中核種濃度 (1m の最大濃度 2.1×10^{-4} Bq/L < 1 Bq/L)



(b)Cs-137 の地下水中核種濃度 (5m の最大濃度 1.1×10^{-7} Bq/L < 1 Bq/L)



(c)Sr-90 の地下水中核種濃度 (0m の最大濃度 5.9×10^{-1} Bq/L < 5 Bq/L)



(d)C-14 の地下水中核種濃度 (0m の最大濃度 3.0×10^{-1} Bq/L < 5 Bq/L)

図 3.2-25 貯蔵庫端からの距離及び再生利用開始からの期間に対する地下水中核種濃度 (基礎材としてひびのあるコンクリートを設定、凡例の 0m、1m、2m、5m は建造物端からの距離)

3.2.4.3 遮蔽用コンクリートブロックのめやす濃度の妥当性確認

①作業者の追加の年間被ばく線量

3.2.3.3 で求めた核種濃度 11,000 Bq/kg を、遮蔽コンクリートブロックに再生利用した場合の作業者の年間被ばく線量を求めた。評価点は 3.2.3.3 と同様とし、年間作業時間は 1,430 h/y で遮蔽は考慮しない。

この条件で、年間被ばく線量を計算した結果は 1.3mSv/y であった。これは、放射線作業

従事者の年間被ばく線量限度である 20 mSv/y の 7%未満である。

② 1F 敷地境界空間線量率への影響

コンクリートくずを再生利用して作られた遮蔽用コンクリートブロックが資材置き場に大量に積まれて保管されていると想定し、それらを線源とした場合の敷地境界への線量寄与を評価した。

(1) シナリオ

1F 敷地境界付近に、コンクリートくずを再生利用して作ったコンクリートブロックを保管する倉庫があると想定した。

(2) 評価体系

コンクリートブロックが保管されている資材置き場は、1F 敷地内に設置されている定検資材倉庫を想定し、そのサイズは航空写真から幅 18 m、長さ 96 m と推定した (図 3.2-26)。資材置き場の高さは、3.2.3.2 をもとに 5.5 m と設定した。コンクリートブロックはこの資材置き場に隙間なく敷き詰められているものと想定し、線源体系は大きさに余裕をもって幅 18 m×長さ 100 m×高さ 5.5 m とした。なお、保守的な評価として倉庫による遮蔽効果は考慮しない。評価体系を図 3.2-27 に示す。

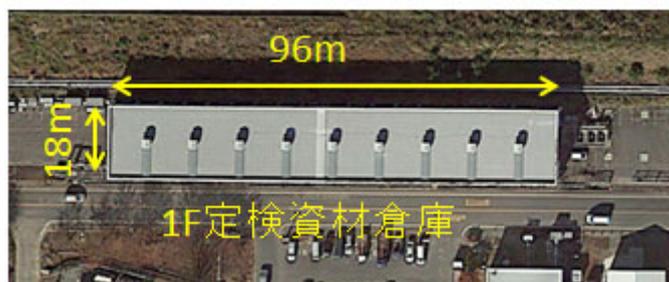


図 3.2-26 1F 敷地内に設置されている定検資材倉庫

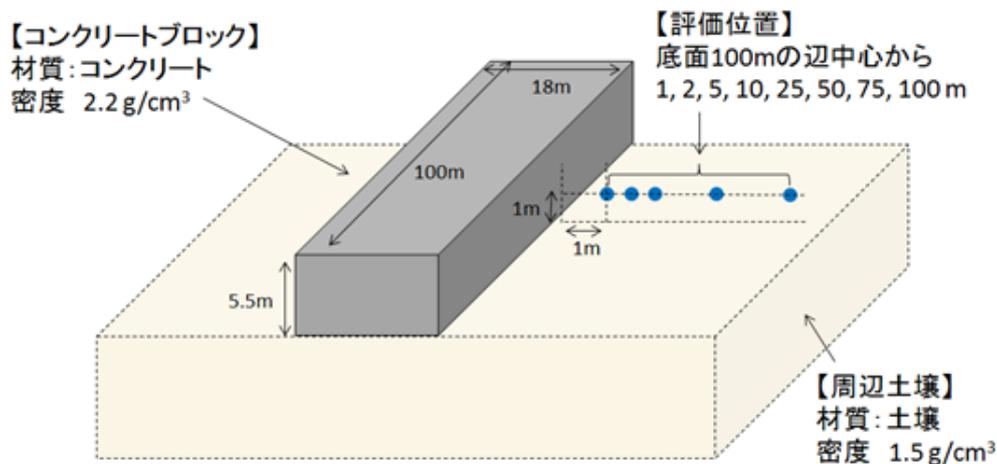


図 3.2-27 敷地境界評価体系（コンクリートブロックからの線量寄与）

(3) 物質組成・再生利用に伴う希釈効果

コンクリートの物質組成や骨材の比率は、道路のコンクリート舗装材と同様とする。周辺土壌の密度と組成は既往研究²⁰をもとに決定した。

(4) 評価点

長さ 100 m の辺の中心線上、高さ 1 m、コンクリートブロック端から 1 m, 2 m, 5 m, 10 m, 25 m, 50 m, 75 m, 100 m を評価点とする。

(5) 評価結果

評価体系に基づき、外部被ばく線量換算係数を算出し、表 3.2-24 に示した（核種 Cs-134 および Cs-137）。外部被ばく線量換算係数にコンクリートブロック中のセシウム核種濃度をかけて線量率($\mu\text{Sv/h}$)を求め、表 3.2-25 に示した。また、線量率に 8,760 時間 (=1 年間)をかけて空間線量 (mSv/y) を算出し、表 3.2-26 に示した。図 3.2-28 に全セシウムによる空間線量寄与を示した。

コンクリートブロックを保管する倉庫を設置する際、倉庫からの距離が 1~10 m の場合は空間線量が 1.6~6.1 mSv/y となり、基準となる 1 mSv/y を超えてしまうため、最低でも敷地境界から 25 m 離して設置しないといけないことが分かった。東京電力が平成 27 年 9 月 30 日に公表した敷地境界上の空間線量¹⁵によると、敷地境界における空間線量は、一部 1 mSv/y に近い値をとるが、ほとんどの点で 0.6 mSv/y 以下であった（図 3.2-12）。今回の評価の結果から、線源から 50m 離れた場所への線量寄与は、0.22 mSv/y であった。このことから、コンクリートくずを、コンクリートブロックに再生利用する場合、敷地境界から 50 m 以上離せば追加線量を考慮してもほとんどの点で 1 mSv/y を超えず限定再生利用可能である。

現在、1F 敷地内には 27,800 m^3 の限定再生利用対象となるがれきが存在している。それらのがれきを、幅 18 m×長さ 100 m×高さ 5.5 m の倉庫ひとつ分相当の遮蔽用コンクリートブ

ロックとして再生利用する場合、使われるがれき量は、コンクリートブロック中の粗骨材・細骨材割合が80%なので、 $18\text{ m}\times 100\text{ m}\times 5.5\text{ m}\times 0.8=7,920\text{ m}^3$ となる。これは限定再生利用対象がれき総量の約28%に相当する。

表 3.2-24 コンクリートブロックによる外部被ばく線量換算係数

線源端からの距離	外部被ばく線量換算係数($\mu\text{SV/h per Bq/kg}$)		
	Cs-134	Cs-137	合計
1m	1.4E-04	4.8E-05	6.3E-05
2m	1.1E-04	3.7E-05	4.9E-05
5m	6.4E-05	2.3E-05	3.0E-05
10m	3.6E-05	1.3E-05	1.7E-05
25m	1.3E-05	4.8E-06	6.3E-06
50m	4.9E-06	1.8E-06	2.3E-06
75m	2.4E-06	8.4E-07	1.1E-06
100m	1.3E-06	4.7E-07	6.1E-07

表 3.2-25 コンクリートブロックによる線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)

線源端からの距離	線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)		
	Cs-134	Cs-137	合計
1m	1.5E+00	5.3E-01	6.9E-01
2m	1.2E+00	4.1E-01	5.4E-01
5m	7.0E-01	2.5E-01	3.3E-01
10m	4.0E-01	1.4E-01	1.9E-01
25m	1.4E-01	5.3E-02	6.9E-02
50m	5.4E-02	2.0E-02	2.5E-02
75m	2.6E-02	9.2E-03	1.2E-02
100m	1.4E-02	5.2E-03	6.7E-03

表 3.2-26 コンクリートブロックによる空間線量 (mSv/y)

線源端からの距離	空間線量 (mSv/y)		
	Cs-134	Cs-137	合計
1m	1.3E+01	4.6E+00	6.1E+00
2m	1.1E+01	3.6E+00	4.7E+00
5m	6.2E+00	2.2E+00	2.9E+00
10m	3.5E+00	1.3E+00	1.6E+00
25m	1.3E+00	4.6E-01	6.1E-01
50m	4.7E-01	1.7E-01	2.2E-01
75m	2.3E-01	8.1E-02	1.1E-01
100m	1.3E-01	4.5E-02	5.9E-02

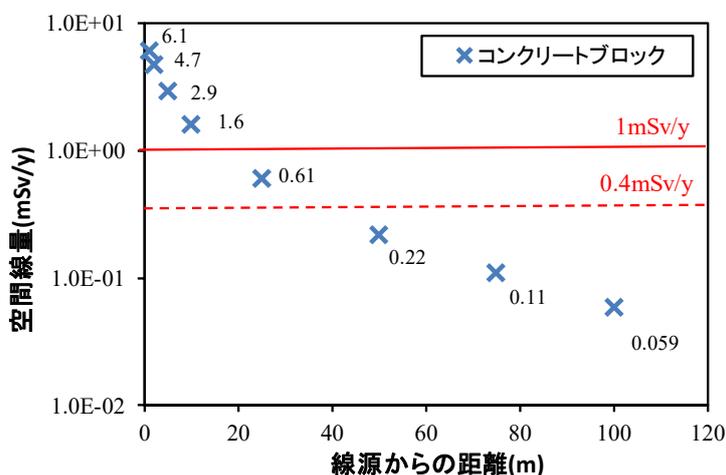


図 3.2-28 全セシウムによるコンクリートブロックからの距離ごとの空間線量寄与

③1F 敷地内の地下水への核種漏洩の影響

遮蔽用コンクリートブロックは屋内に保管されている仮定なので、地下水への移行は評価しない。

3.2.4.4 遮蔽用鉄板のめやす濃度の妥当性確認

①作業者の追加の年間被ばく線量

3.2.3.4 で求めた濃度の 7,000 Bq/kg を遮蔽鉄板に再生利用した場合の作業者の年間被ばく線量を求める。評価点は 3.2.3.4 と同様とし、年間作業時間は 1,430 h/y で遮蔽は考慮しない。

この条件で、年間被ばく線量を計算した結果は、1.3 mSv/y であった。これは、放射線作業従事者の年間被ばく線量限度である 20 mSv/y の 7%未満である。

②1F 敷地境界空間線量率への影響

評価体系が同じである遮蔽用コンクリートブロックの評価で代表した。

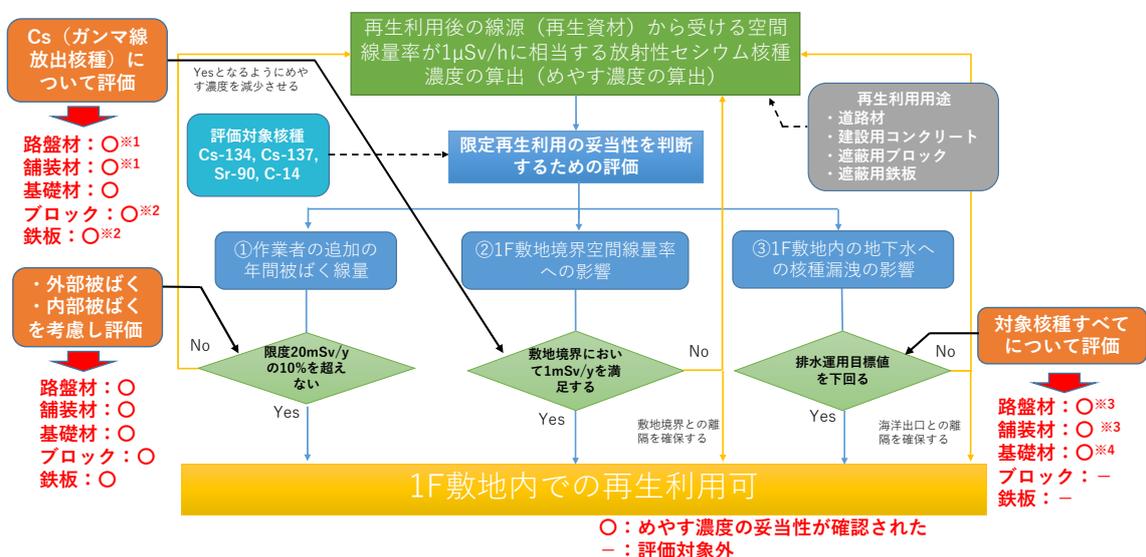
③1F 敷地内の地下水への核種漏洩の影響

遮蔽用鉄板は屋内に保管されている仮定なので、地下水への移行は評価しない。

3.2.4.5 めやす濃度の妥当性確認から導出した再生利用を可能とする条件

道路材、建設用コンクリート、遮蔽用コンクリートブロック、遮蔽用鉄板のめやす濃度の妥当性確認を行い、各用途においてめやす濃度による再生利用を可能とする条件を導出した。各用途の再生利用を可能とする条件を図 3.2-29 に示す。

再生利用用途として道路材を想定した場合、道路と敷地境界および海洋出口までの離隔をそれぞれ 25 m および 5 m 以上保つことで、めやす濃度による再生利用が可能となる。再生利用用途として建設用コンクリートを想定した場合、建設用コンクリートを用いて造成する建物と海洋出口の離隔を 5 m 以上保つことで、めやす濃度による再生利用が可能となる。再生利用用途として遮蔽用コンクリートブロックおよび遮蔽用鉄板を想定した場合、遮蔽用コンクリートブロックおよび遮蔽用鉄板を保管する倉庫と敷地境界の離隔を 50 m 以上保つことで、めやす濃度による再生利用が可能となる。



限定再利用を可能とする条件

- ※1: 敷地境界から25m以上の離隔を保てば敷地境界への線量寄与が 1mSv/y 以下
- ※2: 敷地境界から50m以上の離隔を保てば敷地境界への線量寄与が 1mSv/y 以下
- ※3: 道路から海洋出口まで5m以上の離隔を確保すれば運用目標値以下
- ※4: 建屋から海洋出口まで5m以上の離隔を確保すれば運用目標値以下

図 3.2-29 めやす濃度による再生利用を可能とする条件

3.2.5 3.2 のまとめ

3.2 章では、線量管理がなされている 1F 敷地内において、放射性物質で汚染されたがれきの再生利用を可能とする再生利用物中の核種濃度（めやす濃度）を設定するための考え方を提案した。また、めやす濃度の妥当性確認の方法を、1F 敷地内における放射線防護の運用を参考に構築した。1F 内における再生利用可能性を考慮して設定した用途について、めやす濃度の算出とその妥当性確認を行った。

めやす濃度の算出およびその妥当性確認は、福島第一原子力発電所事故(1F)後に 1F 敷地内に保管されている放射性物質で汚染したがれきを、本研究で提案した防護の考え方に沿って 1F 敷地内で用途を限定した再生利用をすることを想定し行った。1F 事故後の環境における除去土壌の再生利用に関する放射線防護は、第 2 章の検討内容に沿って再生利用を計画被ばくの考え方で行うこととした。しかし、1F 敷地内での汚染したがれきの再生利用では、1F 敷地内が緊急時被ばく状況から移行した現存被ばく状況にあること、および 1F 敷地内に立ち入る者がすべて放射線管理下にあることなどから、再生利用に伴う被ばくについて既存の計画被ばくの考え方と異なる防護が必要になる。こういった状況で計画被ばくの考え方で線源関連の管理を行うためには、再生利用を可能とする再生利用物からの追加線量を設定する必要がある。1F 敷地内のすべての作業者は被ばく線量が管理されており、限定再生利用が行われても線量限度を超えるおそれはないが、限定再生利用された汚染がれきにより受ける被ばく線量が大きければ、本来の廃止措置に向けた作業に充てられる作業時間が減少することになる。したがって、1F 敷地内での限定再利用による追加被ばく線量を一定程度抑制する必要がある。

本研究では再生利用を可能とするめやす濃度は、再生利用物による追加線量により敷地内の作業が大きく制限されることを防ぐため、環境中の空間線量を大きく上昇させない程度の追加線量に相当する濃度とした。1F 敷地内の屋外作業においては、モニタリングに用いられている電離箱のディテクションリミットである $1\ \mu\text{Sv/h}$ を環境中の空間線量率を大きく上昇させない程度の追加線量として設定した。この $1\ \mu\text{Sv/h}$ の条件を満足する再生資材中の核種の濃度をめやす濃度と呼ぶ。

本研究では、めやす濃度の妥当性確認の方法も構築した。めやす濃度で再生利用を実施した際に、1F 敷地内で行われている放射線管理の運用に影響を与えないことを確認することにした。1F 内の限定再生利用においては、①従事者被ばく線量、②敷地境界における評価線量、③海洋へ放出される地下水について現在の運用を満たしているか確認する。①従事者被ばく線量については、線量限度の 10 %にあたる $2\ \text{mSv/y}$ 以下であることを条件として設定した。これは再生利用物による追加線量が線量限度の 10 %以下であれば、作業者の線量限度に占める割合が大きくないと判断したからである。

1F 内での再生利用可能性を考慮して設定した再生利用用途である、道路材（路盤材、舗装材）、建設用コンクリート、遮蔽用コンクリート、遮蔽用鉄板の放射性セシウムのめやす

濃度の算出を行った。各用途のめやす濃度は道路材で 1.3×10^4 Bq/kg（アスファルト路盤材の場合）、建設用コンクリートで 1.6×10^5 Bq/kg、遮蔽用コンクリートで 1.1×10^4 Bq/kg、遮蔽用鉄板で 7.0×10^3 Bq/kg となった。これらのめやす濃度で再生利用を実施した際のめやす濃度の妥当性確認を行った。用途毎のめやす濃度および再生利用を可能とする条件を表 3.2-27 に示した。

本研究では、各再生利用用途のめやす濃度の算出を行い、そのめやす濃度による再生利用を可能とするための条件を確認した。しかし、実際に再生利用の実施を想定した場合、敷地内の広範な場所にてどの用途でも再生利用できるようなめやす濃度以下の濃度を採用することも、放射線防護の運用の合理化の観点からあり得るであろう。

表 3.2-27 用途ごとの放射性セシウムのめやす濃度と再生利用を可能とする条件

材質	再利用用途	用途	めやす濃度 (Bq/kg)	条件
コンクリート	アスファルト道路	路盤材	13,000	舗装厚 5cm の場合において ・敷地境界から 25m 以上の離隔 ・海洋出口から 5m 以上の離隔
		舗装材	7,400	・敷地境界から 25m 以上の離隔 ・海洋出口から 5m 以上の離隔
	コンクリート道路	路盤材	100,000	舗装厚 15cm の場合において ・敷地境界から 25m 以上の離隔 ・海洋出口から 5m 以上の離隔
		舗装材	8,100	・敷地境界から 25m 以上の離隔 ・海洋出口から 5m 以上の離隔
	建設用コンクリート	基礎材	16,000*	・海洋出口から 5m 以上の離隔
	コンクリートブロック	遮蔽用	1,100*	倉庫保管時において ・敷地境界から 50m 以上の離隔
金属	鉄板	遮蔽用	700*	倉庫保管時において ・敷地境界から 50m 以上の離隔

*付きの濃度は空間線量率が高い建屋内への用途の場合 10 倍の濃度がめやす濃度となる

3.2 の参考文献

- 1 T. Shimada, K. Miwa, S. Takeda. Study on restricted use of contaminated rubble on Fukushima Daiichi NPS site (1) Estimation of reference radiocesium concentration for recycling materials. Progress in Nuclear Science and Technology, Vol. 6, 203-207, 2019
- 2 島田太郎、三輪一爾、武田聖司. クリアランスの現状と課題、5；福島第一原子力発電所における低線量がれきの限定的な再利用の考え方. 原子力学会誌、Vol.61, 7, 531-534, 2019
- 3 技術研究組合（IRID 及び JAEA）. 福島第一発電所構内で採取した建屋内瓦礫、立木、落葉及び土壌の放射能分析. 平成 27 年 3 月 26 日
http://irid.or.jp/wp-content/uploads/2015/03/20150326_2.pdf
- 4 原子力安全委員会. 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 17 日 <https://www.rwmc.or.jp/law/file/2-12.pdf>
- 5 日本アイソトープ協会. ICRP Publication 103 国際放射線防護委員会の 2007 年勧告.
- 6 東京電力. 大型休憩所設置に伴う管理対象区域図の変更について
<https://www.nsr.go.jp/data/000101230.pdf>
- 7 東京電力. 福島第一原子力発電所サーベイマップ敷地全体（2019 年 9 月 4 日測定分）
<http://www.tepco.co.jp/decommission/data/surveymap/pdf/2019/f1-sv2-20190927-j.pdf>
- 8 東京電力. 地下水バイパスの排水基準について
http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2014/images/handouts_140203_04-j.pdf
- 9 X-5 Monte Carlo Team. MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 5, LA-UR-03-1987
- 10 一般社団法人 日本アスファルト協会. <http://www.askyo.jp/knowledge/06-3.html>
- 11 麻生セメント株式会社. 建設技術講習会資料, “セメントについて考える その 2”.
http://www.qsr.mlit.go.jp/onga/cpds/images/h25/siryoku_0222_1.pdf
- 12 原子力規制委員会. 東京電力株式会社 福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画 2.10 放射性固体廃棄物等の管理施設.
<https://www.nsr.go.jp/data/000163505.pdf>
- 13 小森清司. 鉄筋コンクリート・プレストレストコンクリート設計計算入門 1/10 8.部材の設計計算（基本的な考え方）. 1974.コンクリートジャーナル Vol.12 No.4, April.
- 14 一般社団法人 日本アスファルト協会. <http://www.askyo.jp/knowledge/06-3.html>
- 15 東京電力. 福島第一原子力発電所敷地境界における実効線量について.
http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/140218/140218_01e.pdf
- 16 原子力規制委員会. 東京電力株式会社「福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画」変更認可申請 78「敷地境界における実効線量の評価の見直し」一部補正 1”.

<http://www.nsr.go.jp/disclosure/law/FAM/00000194.html>

- 17 武田聖司、菅野光大、佐々木利久、水無瀬直史、木村英雄. ウラン及び TRU 核種を含む放射性廃棄物に対するクリアランスレベル評価コードシステム PASCLR 第 2 版の開発. JAEA-Data/Code2006-003(2006)
- 18 谷中隆明、漆山佳雄、北島永一、福崎紀夫、田村良三、丸山隆雄. 道路粉じんによる大気汚染. 全国公害研究誌. Vol. 10, No.1, 1985
- 19 Environmental Assessment Division, Argonne National Laboratory. User's Manual for RESRAD Version 6, 2001
- 20 澤口拓磨、武田聖司、木村英雄、田中忠夫. 放射性物質により汚染された災害廃棄物の道路への再利用に伴う被ばく線量評価. 保健物理, Vol50(1),36~49, 2015

第4章 結論

本研究は、人類が地球において持続的に発展していく上で考慮すべき課題のひとつである廃棄物に着目した。現在の日本において対策が必要と考えられる廃棄物の一つに、放射性物質で汚染した廃棄物があげられる。2011年3月に発生した福島第一原子力発電所(1F)事故により環境中に大量の放射性物質が放出され、福島県内外において放射性物質で汚染したがれきや土壌等が発生した。これらの放射性物質で汚染した土壌やがれきの物量は大量であり、全量をそのまま放射性廃棄物として扱い最終処分することは、環境負荷の観点や最終処分場の確保の観点から実現性が乏しいであろう。放射性物質で汚染した物品についても一般的な廃棄物と同様に、最終処分が必要な物量の低減に関する検討の社会的要請が強くなっている。

そこで本研究では、最終処分が必要な、放射線災害で発生した汚染物品の物量低減策として、循環型社会の観点からも注目が高い再生利用の可能性を、放射線防護の観点から検討を行った。

第2章は「放射性物質で汚染した物品の再生利用に関する放射線防護上の考え方」として、現存被ばく状況下にある公衆の放射線防護に用いる参考レベルの考え方の整理を行った。現状ではその具体的な現場適用の方法について国際的なコンセンサスはなく、複数の解釈が可能となっていたが、ここでは放射性物質の環境拡散で発生した汚染物品等の再生利用を想定するケースでの、放射線防護の考え方の多様性を5通りで整理した。この5つの整理は、「現存被ばく状況における公衆の防護には参考レベルを用いる」という3通りの考え方(①、②、③)と、「現存被ばく状況においても計画的に線源を扱う場合は、計画被ばくの考え方を適用し線量限度および線量拘束値を用いる」という2通りの考え方(④、⑤)の、2群に分類される。前者は参考レベルの設定対象となる線源の範囲をどのように定義するか、で3つに区分され、後者は、再生利用による追加の被ばく線量を防護体系の中の被ばくとして容認するか否か、で2つに区分される。放射性物質で汚染した物品の再生利用を想定した防護のための線量規準の可能性を検討するために、既存のICRPの勧告やIAEAの安全基準を精査し、線源関連の管理に用いられる基準値を被ばく状況と被ばくのカテゴリーに応じて表2-2として整理した。

5通りに整理した放射線防護の考え方の、具体的な事例に対する適用性を確認するため、1F事故後に我が国の法令や指針で示された、除染の実施や除去土壌の再生利用に関する防護の基準値について、本研究で提案した整理に沿った解釈を試みた。1F事故後の我が国が経験した環境汚染のレベルと、これまでに積み上げてきた放射線防護の歴史的な整理を総合的に考慮して、考え方④に基づき、対象となる環境がいかなる被ばく状況であっても、検討の対象となる線源を計画的に扱う場合には、計画被ばくに対応した防護の方針を適用するのが適切であると判断した。

本研究での防護の考え方の整理を、想定される再生利用事例へ適用することを検討した。

再生利用の事例として、ここではオフサイトにおける除去土壌の再生利用とオンサイトにおける敷地内に使用を限定した汚染がれきの再生利用の2つのケースを想定した。再生利用を実施する現場として、1F 事故後に我が国が経験した線量レベルの汚染環境を仮定し、具体的には考え方④について考察した。2つの再生利用の事例において、再生利用に至るまでの各段階における公衆と再生利用作業員に関して適用できる基準値の範囲を考察し、想定されるステークホルダーの意見も考慮しつつ、実際に適用する上で合理的とみなされる値を提案した。また、定められた基準値の運用に関して、公衆の防護の履行が適切に行われていることの現場での確認方法についても提案した。

第2章で実施した、現存被ばく状況にある放射性物質で汚染した物品の再生利用に関する放射線防護の考え方の整理と、その考え方の一般的な再生利用事例への適用の検討によって、最終処分が必要な汚染物品の物量低減策として、再生利用の可能性を放射線防護の観点から議論ができる基盤を整えた。

第3章では、「放射線防護上の考え方の現実的な適用における考察」として、第2章で整理した放射線防護上の考え方をオフサイトおよびオンサイトにおける具体的な再生利用事例へ適用することを想定し、作業員や公衆、環境への放射線影響について検討した。オフサイトにおける再生利用事例の検討では、海洋中の核種形態を考慮した被ばく評価方法の開発を行った。オンサイトにおける再生利用事例の検討では、線量管理がなされた環境中において再生利用を可能とする再生資材中の濃度（めやす濃度）の設定に関する考え方を提案した。

オフサイトにおける放射線防護上の考え方の適用例として、福島県内に一時保管されている除去土壌（除染作業により発生した放射性物質で汚染した土壌）を、海面埋立地を造成する際の資材に再生利用する場合を想定した。第2章の検討内容に沿って再生利用を計画被ばくの考え方で行うこととして、施工時の線源関連の管理として作業員と公衆に1 mSv/y、供用時の公衆に10 μSv/yの線量拘束値を設定した。ここで施工時の作業員も1 mSv/yとしているのは、再生利用に係る作業環境が、公衆の活動範囲とほぼ同じであるからである。被ばく評価を行う評価経路は、既存の除去土壌の再生利用に関する安全評価と海面埋立地造成に係る事例調査を参考に設定した。海面埋立地への再生利用に特有の現象として、施工による海洋への粒子に付着した核種の流出が考えられる。既存の除去土壌の再生利用に関する安全評価では、海洋中の核種からの被ばくとして溶存した核種からの被ばくのみを考慮していた。しかし、海産物の体内への核種濃縮には粒子に付着した核種も影響することが報告されている。

そこで本研究では、海洋中の核種移行を溶存した核種と粒子に付着した核種を考慮して評価できるSediment modelを既存被ばく線量評価コードPASCLR2に取り込み、海洋中の核種の形態を考慮して被ばく線量を評価できるようにした。Sediment modelを取り込む際は、本研究で独自に設定したパラメーターである海底土の分配係数の妥当性の確認を、1F事故後の福島沿岸における放射性セシウムの分布再現計算により行った。海産物摂取による内

部被ばく線量を評価する際は、海産物の生態を考慮した評価とするため、懸濁態が多く存在する海底付近に生息する海産物については粒子に付着した核種の体内濃縮の影響を考慮した。

本研究で開発した評価方法を用いて海洋へ流出した核種からの被ばく評価を実施したところ、既存の安全評価よりも保守的な評価となった。一方、拡張した評価方法で評価しても、評価経路全体では海洋へ流出した核種からの被ばく線量は小さいことが示された。

評価経路全体での決定経路は、海面埋立地造成時の埋立材の敷均し・締固め作業者の外部被ばくであり、放射性セシウムの 1 mSv/y 相当濃度は 4000 Bq/kg であった（埋立材に再生利用した場合）。また、災害時についても被ばく評価を行い、一般公衆の線量限度である 1mSv/y を超えないことを確認した。

オンサイトにおける放射線防護上の考え方の適用例として、1F 敷地内に一時保管されている放射性物質で汚染したがいきを 1F 敷地内に限定して再生利用（限定再生利用）する場合を想定した。限定再生利用の防護は、第 2 章の検討内容に沿って計画被ばくの考え方で行うこととした。1F 敷地内のすべての作業者は被ばく線量が管理されており、限定再利用が行われても線量限度を超えるおそれはないが、限定再利用された汚染がいきにより受ける被ばく線量が大きければ、本来の廃止措置に向けた作業に充てられる作業時間が減少することになる。したがって、1F 敷地内での限定再利用による追加被ばく線量を一定程度抑制する必要があるが、これまでに線量管理がされた環境において再生利用物からの追加被ばく線量の管理に関する考え方は明記されていない。

そこで本研究では、再生利用を可能とする再生資材中のめやす濃度設定の考え方と、めやす濃度の妥当性確認の考え方を新しく提案した。再生利用を可能とするめやす濃度は、再生利用物による追加被ばく線量により敷地内の作業が大きく制限されることを防ぐため、環境中の空間線量を大きく上昇させない程度の追加被ばく線量に相当する濃度とした。1F 敷地内の屋外作業を考えた場合には、モニタリングに用いられている電離箱のディテクションリミットである 1 μ Sv/h を環境中の空間線量率を大きく上昇させない程度の追加被ばく線量として設定した。めやす濃度の妥当性の確認は、めやす濃度で再生利用を実施した際に 1F 敷地内で行われている放射線管理の運用に影響を与えないことにより行った。1F 内の限定再生利用においては、「従事者被ばく線量」、「敷地境界における評価線量」、「海洋へ放出される地下水」について現在の運用を満たしているか確認した。

1F 敷地内における再生利用の可能性を考慮して、道路材（路盤材、舗装材）、建設用コンクリート、遮蔽用コンクリート、遮蔽用鉄板を再生利用用途として、めやす濃度の算出とその妥当性確認を行った。めやす濃度は用途により 700~110,000 Bq/kg と大きく異なった。めやす濃度の妥当性確認として、1F 敷地内で行われている放射線管理の運用に影響を与えない条件の評価を行った。敷地境界からの離隔の条件は、最大で 50 m であった。

本研究では放射性物質で汚染した物品の再生利用を対象として、第 2 章において放射線防護の規制科学的なアプローチをおこない、第 3 章において環境科学的なアプローチを実

施した。しかし、放射性物質で汚染した物品の再生利用に関する議論には、ここで検討されたような放射線防護上の、放射線リスクに基づく整理のみではなく、倫理や心理、リテラシーや経済などを含む社会科学的な視点や整理も欠かすことができないことに十分な留意が必要である。

社会科学的な視点を含めて、放射性物質で汚染した物品の再生利用に関する検討を行う際には、過去に公共事業等の実施に向けて社会科学的なアプローチが行われた事例や社会科学的なアプローチについての既往研究を参考にすることで重要な示唆を得ることができるとであろう。

例えば、社会科学的なアプローチにおける合意形成プロセスに着目すると、放射性物質に関連する難しい課題で合意に至った事例として、フィンランドにおける放射性廃棄物の埋設処分場の選定などがあげられる。フィンランドは2001年に、世界で初めて高レベル放射性廃棄物の埋設処分場の選定を完了した国である^{1,2,3,4}。現時点で処分場の建設地の安全審査を終えて建設段階に入っている国は世界中にフィンランドの他になく¹、埋設処分場の選定は放射性物質に関連する合意形成の難しい事例のひとつであると言える。フィンランドの事例の合意形成プロセスにおけるステークホルダー関与の特徴は、自治体・住民・個人の意見を反映させる手続きが法令により制度化されていることである¹。放射性物質で汚染した物品の再生利用に関する議論を実施する際にも、合意形成プロセスにおいて自治体・住民・個人のステークホルダーの意見を事業に反映させるために、それらのステークホルダーを合意形成プロセスに含めることが重要であろう。

また、日本において原子力政策やエネルギー政策について合意形成が試みられた事例として、原子力政策円卓会議⁵がある。原子力政策円卓会議では、“原子力に反対の立場の人も含め様々な意見の人をとりあえず集め、試行錯誤により進められてきた。（中略）その結果、「幅広い立場の人の参加」の下、「選択肢を示しそれに基づく評価を行う」という、その後の原子力政策やエネルギー政策の決定のあり方の流れをつくった。（国吉、2007⁵）”というある程度の成果は得られた。一方、円卓会議に対する本質的な批判として政策への反映が約束されていない事があげられている⁵。原子力政策円卓会議の事例から、合意形成プロセスにおいては参加するステークホルダーの意見が事業に反映されることが約束されていることが重要であると考えられる。そうでない場合は、政策決定側や事業者側のアリバイ作りの意味合いしか持たない取り組みと捉えられかねない。

合意形成を目指す上ではステークホルダー間のコミュニケーションの方法論について検討することが重要である。WHOの屋内ラドンハンドブック⁶においては、人々にラドンのリスクを知ってもらい予防のための対策を取ってもらうためのコミュニケーションについて検討されている。屋内ラドンハンドブックでは、情報を伝えたいと思う対象を直接的なカテゴリーと間接的なカテゴリーに分類している。放射性物質で汚染した物品の再生利用に関する合意形成プロセスを検討する際にも、情報を伝えたいと思う対象を直接的なカテゴリーと間接的なカテゴリーに分類し、カテゴリーごとに情報の内容や伝達方法を検討するこ

とは有効であるかもしれない。

本研究では、放射性物質で汚染した物品の再生利用について放射線防護の規制科学および環境科学的なアプローチを実施した。これにより、最終処分が必要な汚染物品の物量低減策として、再生利用の可能性を多角的な視点から議論できる基盤を整えた。しかし、放射性物質で汚染した物品の再生利用に関する議論には、本研究で十分に検討していない倫理や心理、リテラシーや経済などを含む社会科学的な視点や整理も欠かすことができないことを改めて強調する。

本研究では、主に日本における事例を想定し調査や検討を行ったが、本研究の議論の内容は国際安全基準作成の策定や各国の法制度で重視されている ICRP の勧告に準拠しており、今後、国際的な課題の解決に向けての議論のきっかけとなることを希望する。

第4章の参考文献

- 1 経済産業省. 諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について. 2019
- 2 佐藤温子. フィンランドにおける放射性廃棄物処分政策形成の歴史的背景—ドイツとの比較の視座から—. 北ヨーロッパ研究、第13巻、2017
- 3 坂本修一、神田啓治. 高レベル放射性廃棄物処分地選定の社会的受容性を高めるための課題に関する考察. 日本原子力学会和文論文誌、Vol.1, No.3, 2002
- 4 大越実、鳥井弘之、藤井靖彦. 放射性廃棄物管理施設の立地におけるリスクコミュニケーション. 日本原子力学会和文論文誌、Vol.6, No.4, 2007
- 5 国吉浩. 原子力政策円卓会議の再評価. 日本原子力学会誌、Vol.49, No.3, 2007
- 6 独立行政法人 放射線医学総合研究所 (監訳). WHO 屋内ラドンハンドブック—公衆衛生の観点から—. 2015年

付録

A.1 3.1 に関する付録

A.1.1 地下水移行経路の被ばく評価方法

地下水移行経路の被ばく評価は、クリアランスレベル評価コード PASCLR2¹における評価に沿って、「ソースタームモデル」、「帯水層移行評価モデル」、「土壌コンパートメントモデル」、「被ばく線量評価モデル」により実施した。

ソースタームモデル

地下水移行経路の被ばく評価では、海面埋立地の中の再生資材部（埋立材、中詰材）をコンパートメントとして表現し、崩壊系列及び降雨浸透による処分場からの核種の漏洩を考慮した非定常的な再生資材内における核種濃度の変化を動的コンパートメントモデルにより解析する。動的コンパートメントモデルは、以下の連立常微分方程式により記述される。

$$\frac{d}{dt}C_{d,i}(t) = -(\eta_i + \lambda_i) \cdot (C_{d,i}) + Br_{i-1,i} \cdot \lambda_{i-1} \cdot C_{d,d-1}(t) \quad \text{数式 A.1-1}$$

ここで、

$C_{d,i}(t)$:	再生資材内の核種 i 濃度 (Bq/g)
λ_i	:	核種 i の崩壊定数 (1/y)
η_i	:	核種 i の再生資材からの漏洩率 (1/y)
$Br_{i-1,i}$:	核種 $i-1$ から核種 i への分岐比 (-)

である。

再生資材からの漏洩率 η_i は、再生資材からの核種の溶出が分配係数に基づいて起こると仮定し、以下の分配係数モデルで評価する。

$$\eta_i = \frac{P}{H \cdot (\varepsilon + \rho \cdot Kd_i)} \quad \text{数式 A.1-2}$$

ここで、

P	:	再生資材への降雨浸透水量 (m/y)
H	:	再生資材中の移行距離 (m)
ε	:	再生資材の空隙率 (-)
ρ	:	再生資材のかさ密度 (g/cm ³)
Kd_i	:	再生資材の分配係数 (ml/g)

である。

また、再生資材から地下水へ流入する核種 i の漏洩量は以下の式で与えられる。

$$C_{f,i}(t) = \eta_i \cdot C_{d,i}(t) \cdot L \cdot H \cdot \rho \cdot 10^6 \quad \text{数式 A.1-3}$$

ここで、

$C_{f,i}(t)$:	再生資材から地下水へ流入する核種 i の漏洩量 (Bq/y)
L	:	再生資材の長さ (m)
W	:	再生資材の幅 (m)
H	:	再生資材の厚さ (m)

本研究では、施工時（ケース 1,2 で護岸の一部を空けて造成する場合を除く）および供用時に再生資材（埋立材、中詰材）から降雨浸透により核種が溶出し、海洋および井戸水に流入することを想定している。井戸水への核種の移行を評価する際は、既存の安全評価¹に沿って帯水層中を移行した核種が井戸水に流入する評価とする。この際、海面埋立地から井戸に至るまでの移行距離が近くなるように埋立地を陸拡張型（図 3.1-5）で造成する設定とする。海洋への核種の移行を評価する際は、既存の安全評価¹対象としている帯水層移行だけでなく、核種を含んだ浸出水が護岸を透過することによる移行も考慮することにした。この際、海面埋立地に浸透した水が埋立地から四方に流出することを想定して埋立地を島型（図 3.1-5）で造成する設定とした。護岸透過を想定する際は、海面埋立地の上面の面積に浸透した水量が再生資材の側面 4 方向に流出すると仮定した。

帯水層移行評価モデル

帯水層移行評価モデルは、再生資材より漏洩した核種の帯水層中における移行を評価し、生物圏に流入する核種移行量を評価するモデルである。帯水層中の核種移行は、分配平衡を仮定した以下の 1 次元移流分散モデルにより表される。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} Rt_i \cdot C_{gw,i}(x,t) \\ & = D_x \cdot \frac{\partial^2 C_{gw,i}(x,t)}{\partial x^2} - U_{gw} \cdot \frac{\partial C_{gw,i}(x,t)}{\partial x} - Rt_i \cdot \lambda_i \\ & \quad \cdot C_{gw,i}(x,t) + Br_{i-1} \cdot Rt_{i-1} \cdot \lambda_{i-1} \cdot C_{gw,i-1}(x,t) + Q_i(t) \end{aligned} \quad \text{数式 A.1-4}$$

ここで、

Rt_i : 核種 i の帯水層遅延係数 (-)

$$Rt_i = 1 + \frac{1-\varepsilon_s}{\varepsilon_s} \cdot \rho_s \cdot Kd_{s,i}$$

ε_s : 帯水層空隙率 (-)

ρ_s : 帯水層真密度 (g/cm³)

$Kd_{s,i}$: 帯水層分配係数 (ml/g)

$C_{gw,i}(x,t)$: 地点 x 、時刻 t における地下水中核種濃度 (Bq/m³)

D_x : 地下水流方向 (x 方向) の分散係数 (m²/y)

$$D_x = D_l \cdot |U_{gw}| + D_m$$

D_l : 地下水流方向の分散長 (m)

D_m : 分子分散係数 (=3.15×10⁻² m²/y)

U_{gw} : 地下水実流速 (m/y)

$Q_i(t)$: 核種 i の流入量 (Bq/m³/y)

$$Q_i(t) = \frac{C_{f,i}(t)}{h_s \cdot w} \cdot \delta(x - x_0)$$

h_s : 帯水層厚さ (m)

$\delta(x - x_0)$: デイラックのデルタ関数 (1/m)

である。

帯水層中の井戸における取水を想定した場合、海面埋立地端から x_w (m)地点にある井戸水中の核種濃度は、井戸のくみ上げによって周囲の放射性核種を含まない水の流入を考慮して、以下の式で表される。

$$C_{ww,i}(t) = C_{gw,i}(x_w, t) \cdot R_w \quad \text{数式 A.1-5}$$

ここで、

$C_{ww,i}(t)$: 井戸水中核種 i 濃度 (Bq/m³)

$C_{gw,i}(x_w, t)$: 地下水中の核種 i 濃度 (Bq/m³)

R_w : 井戸水の混合割合 (-)

である。

土壌コンパートメントモデル

土壌コンパートメントモデルは、放射性核種を含む井戸水を灌漑水として利用した場合に、水中の放射性核種が土壌に残留する濃度を計算するモデルである。核種を含む灌漑水から土壌に残留する核種濃度は、動的コンパートメントモデルを適用して、以下の常微分方程式で記述される。

$$\frac{dC_{s,i}(t)}{dt} = -(K_i + \lambda_i) \cdot C_{s,i}(t) + Br_{i-1} \cdot \lambda_{i-1} \cdot C_{s,i-1}(t) + Q_i(t) \quad \text{数式 A.1-6}$$

ここで、

$C_{s,i}(t)$: 灌漑土壌中の核種 i の濃度 (Bq/g)

K_i : 核種 i の灌漑土壌からの浸透による減衰率 (1/y)

$Q_i(t)$: 灌漑土壌への核種移行量 (Bq/g/y)

である。

核種 i の灌漑土壌からの浸透による減衰率 K_i および核種移行量 $Q_i(t)$ は、以下の式で表される。

$$K_i = \frac{P_s + I r_s}{H_s \cdot (\varepsilon_s + \rho_s \cdot K d_{s,i})} \quad \text{数式 A.1-7}$$

$$Q_i(t) = C_{irr,i}(t) \cdot \frac{I r_s}{H_s \cdot \rho_s \cdot 10^6} \quad \text{数式 A.1-8}$$

ここで、

- P_s : 灌漑土壌への浸透水量 (m/y)
- $I r_s$: 灌漑水量 (m/y)
- H_s : 実効土壌深さ (m)
- ε_s : 灌漑土壌空隙率 (-)
- ρ_s : 灌漑土壌かさ密度 (g/cm³)
- $K d_{s,i}$: 灌漑土壌分配係数 (ml/g)
- $C_{irr,i}(t)$: 灌漑水 (井戸水) 中核種 i 濃度 (Bq/m³)

である。

被ばく線量評価モデル

海面埋立地に再生利用を実施した際に設定した、地下水移行 (井戸水利用) の被ばく経路の線量評価は以下の評価モデルにより計算する。

① 飲料水摂取による内部被ばく

飲料水として井戸水を想定すると、飲料水摂取による内部被ばく線量は次式で与えられる。

$$D_{ING,i}(t) = C_{ww,i}(t) \cdot Q_w \cdot DCF_{ING,i} \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i t_i)}{\lambda_i t_i} \quad \text{数式 A.1-9}$$

ここで、

- $D_{ING,i}(t)$: 核種 i の経口摂取による内部被ばく線量 (Sv/y)
- Q_w : 年間飲料水摂取量 (m³/y)
- $DCF_{ING,i}$: 核種 i の経口内部被ばく線量換算係数 (Sv/Bq)
- t_i : 被ばく中の減衰期間 (y)

である。

② 淡水産物による内部被ばく

水産物中の核種 i 濃度は、養殖水中の核種濃度に依存し、両者の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。養殖による淡水産物の核種 i 濃度は、養殖水の地下水利用率を考慮して以下の式により計算する。

$$C_{m,i}(t) = C_{ww,i}(t) \cdot R_{SW} \cdot 10^{-3} \cdot T_{m,i} \quad \text{数式 A.1-10}$$

ここで、

- $C_{m,i}(t)$: 淡水産物 m 中の核種 i 濃度 (Bq/kg)
- $C_{ww,i}(t)$: 井戸水中核種 i 濃度 (Bq/m³)
- R_{SW} : 養殖水への地下水利用率 (-)
- $T_{m,i}$: 核種 i の淡水産物 m への濃縮係数 (L/kg)

である。

淡水産物摂取による内部被ばく線量は、3.1.4.5 に示した海産物摂取による内部被ばく線量の評価式を用いて評価する。ただし、摂取量、市場係数、輸送時間は淡水産物に対するパラメーターに変更する。

③ 農作物摂取による内部被ばく (灌漑)

農作物は核種を含んだ土壌からの経根吸収と灌漑水中核種の植物表面への沈着により汚染される。植物表面への沈着に関しては、降雨などにより核種が除去されることを想定する。井戸水を灌漑水として利用した場合の農作物中の核種 i 濃度は以下の式で表される。

$$C_{j,i}(t) = C_{s,i}(t) \cdot T_{i,j} \cdot 10^3 + C_{ww,i}(t) \cdot \frac{I r_j \cdot R_v \cdot |1 - \exp(-\lambda_{e,i} \cdot t_{ir,j})|}{Y_j \cdot \lambda_{e,i}} \quad \text{数式 A.1-11}$$

ここで、

- $C_{j,i}(t)$: 農作物 j の可食部における核種 i 濃度 (Bq/kg)
- $T_{i,j}$: 核種 i の土壌から農作物 j への移行係数 (Bq/kg per Bq/kg)
- $I r_j$: 農作物 j の灌漑水量 (m³/m²/y)
- R_v : 植物表面への沈着割合 (-)
- $\lambda_{e,i}$: 沈着した核種 i の実行減衰係数 (1/y)
- $\lambda_{e,i} = \lambda_i + \lambda_w$
- λ_w : weathering による表面沈着核種の除去係数 (1/y)
- $t_{ir,j}$: 農作物 j の灌漑期間 (y)
- Y_j : 農作物 j の栽培密度 (kg/m²)

である。

農作物摂取による内部被ばく線量は、次式で計算する。

$$D_{ING,i}(t) = \sum_j C_{j,i}(t) \cdot Q_j \cdot G_j \cdot \exp\left(-\frac{\lambda_i \cdot t_{v,j}}{365}\right) \cdot DCF_{ING,i} \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i t_i)}{\lambda_i t_i} \quad \text{数式 A.1-12}$$

ここで、

- $D_{ING,i}(t)$: 核種 i の経口摂取による内部被ばく線量(Sv/y)
- Q_j : 農作物 j の摂取量(kg/y)
- G_m : 農作物 j の市場係数(-)
- λ_i : 核種 i の崩壊定数(1/y)
- $t_{t,j}$: 農作物 j の輸送時間(d)
- $DCF_{ING,i}$: 核種 i の経口内部被ばく線量換算係数(Sv/Bq)
- t_i : 被ばく中の減衰期間(y)

である。

④ 畜産物摂取による内部被ばく（飼料・飼育水経由）

核種を含む飼料を与えた畜産物中の核種 i 濃度は以下の式で計算する。畜産物の種類としては、卵、牛乳、牛肉、豚肉、鶏肉を想定する。なお、核種を含む井戸水の灌漑により育てられた牧草等の飼料中の放射性核種の濃度は③の $C_{j,i}(t)$ によって求める。

$$C_{Fn,i}(t) = T_{n,i} \cdot M_F \cdot C_{j,i}(t) \cdot 10^3 \cdot Q_{Fn} \quad \text{数式 A.1-13}$$

ここで、

- $C_{Fn,i}(t)$: 飼料を経由した畜産物 n 中の核種 i 濃度 (Bq/kg または Bq/L)
- $T_{n,i}$: 核種 i の飼料および飼育水から畜産物 n への移行係数(d/kg または d/L)
- M_F : 放射性核種を含む飼料の混合割合 (-)
- $C_{j,i}(t)$: 農作物（飼料） j の可食部における核種 i 濃度 (Bq/kg)
- Q_{Fn} : 畜産物 n を生産する家畜の飼料摂取量 (kg-dry/d)

である。

また、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畜産物中の核種 i 濃度は以下の式で計算する。

$$C_{FWn,i}(t) = C_{ww,i}(t) \cdot T_{n,i} \cdot Q_{Wn} \cdot 10^{-3} \quad \text{数式 A.1-14}$$

ここで、

- $C_{FWn,i}(t)$: 飼育水を経由した畜産物 n 中の核種 i 濃度 (Bq/kg または Bq/L)
- $T_{n,i}$: 核種 i の飼料および飼育水から畜産物 n への移行係数(d/kg または d/L)
- Q_{Wn} : 畜産物 n の飼育水摂取量 (L/d)

である。

核種を含む畜産物を摂取することによる人の内部被ばく線量は次式で計算する。

$$D_{ING,i}(t) = \sum_n (C_{Fn,i}(t) + C_{FWn,i}(t)) \cdot Q_n \cdot G_n \cdot \exp\left(-\frac{\lambda_i \cdot t_{Fn}}{365}\right) \cdot DCF_{ING,i} \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i t_i)}{\lambda_i t_i}$$

数式 A.1-15

ここで、

- $D_{ING,i}(t)$: 核種 i の経口摂取による内部被ばく線量(Sv/y)
- $C_{Fn,i}(t)$: 資料を経由した畜産物 n 中の核種 i 濃度(Bq/kg または Bq/L)
- $C_{FWn,i}(t)$: 飼育水を経由した畜産物 n 中の核種 i 濃度(Bq/kg または Bq/L)
- Q_n : 畜産物 n の摂取量(kg/y または Bq/L)
- G_n : 畜産物 n の市場係数(-)
- λ_i : 核種 i の崩壊定数(1/y)
- t_{Fn} : 畜産物 n の輸送時間(d)
- $DCF_{ING,i}$: 核種 i の経口内部被ばく線量換算係数(Sv/Bq)
- t_i : 被ばく中の減衰期間(y)

である。

⑤ 外部および吸入による内部被ばく（農耕・牧畜作業）

灌漑土壌において農耕作業を行う農耕作業者の外部被ばく及び粉塵の吸入による内部被ばく線量は、以下の式で評価する。ただし、核種を含んだ灌漑土壌中の核種濃度 $C_{M,i}(t)$ は、前述の土壌コンパートメントモデルにより評価する。

$$D_{ext,i}(t) = C_{M,i}(t) \cdot Fs_{a,i} \cdot t_a \cdot DF_{a,ext,i} \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i t_i)}{\lambda_i t_i}$$

数式 A.1-16

$$D_{inh,i}(t) = C_{M,i}(t) \cdot Cd_a \cdot Br_a \cdot t_a \cdot DF_{inf,i} \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i t_i)}{\lambda_i t_i}$$

数式 A.1-17

ここで、

- $D_{ext,i}(t)$: 核種 i による外部被ばく線量 (Sv/y)
- $D_{inh,i}(t)$: 核種 i による吸入経路の内部被ばく線量 (Sv/y)
- $Fs_{a,i}$: 農耕・牧畜作業者に対する核種 i の外部被ばくに関する遮蔽係数(-)
- t_a : 年間農耕・牧畜作業時間 (h/y)
- $DF_{a,ext,i}$: 農耕・牧畜作業時における核種 i の外部被ばく線量係数((Sv/y)/(Bq/kg))
- $DF_{inf,i}$: 核種 i の吸入経路による内部被ばく線量係数 (Sv/Bq)
- t_i : 被ばく中の減衰期間 (y)
- Cd_a : 農耕・牧畜作業時の空气中ダスト濃度 (kg/m³)

Br_a : 農耕・牧畜作業者の呼吸量 (m^3/h)
である。

-
- 1 武田聖司、菅野光大、佐々木利久、水無瀬直史、木村英雄. ウラン及び TRU 核種を含む放射性廃棄物に対するクリアランスレベル評価コードシステム PASCLR 第 2 版の開発. JAEA-Data/Code2006-003, 2006

A.1.2 海面埋立地の事例調査

日本国内において海面埋立地を緑地公園として利用している事例の調査を実施し、そのサイズをまとめた。事例調査の結果を表 A.1-1 に示す。また、日本国内において海面埋立地をコンテナターミナルとして利用している事例の調査を実施し、そのサイズをまとめた。事例調査の結果を表 A.1-2 に示す。

日本国内の海面埋立地に用いられている護岸タイプの事例調査を実施した。事例調査の結果を表 A.1-3 に示す。

表 A.1-1 海面埋立地の緑地公園への利用事例

施設名	面積(m ²)	一辺長さ (m) ※	引用文献
金沢港みなと小公園	2,130	46	1
七尾港みなと小公園	2,401	49	2
金沢港近岡緑地公園	3,100	56	1
金沢港五郎島公園	5,671	75	1
金沢港みなと中央公園	6,679	82	1
金沢港東公園	11,371	107	1
七尾港尾湾公園	12,770	113	2
金沢港みなと公園	12,911	114	1
金沢港大野お台場公園	20,009	141	1
七尾港七尾マリンパーク	25,110	158	2
名古屋港ガーデンふ頭臨港緑園	149,000	386	3
葛西臨海公園	805,861	898	4

※緑地公園面積の平方根をとり仮想の一辺の長さを計算した。

表 A.1-2 海面埋立地のコンテナターミナルへの利用事例

施設名	面積(m ²)	一辺長さ (m) ※	引用文献
鍋田ふ頭拡張地	57,186	239	5
青海コンテナ埠頭第0号バース	66,946	259	6
青海コンテナ埠頭第2号バース	72,255	269	6
大黒ふ頭 T-9 バース	84,400	291	7
青海コンテナ埠頭第1号バース	100,755	317	6
本牧ふ頭 D-5 バース	105,000	324	7
青海コンテナ埠頭第3号バース	116,623	342	6
青海コンテナ埠頭第4号バース	122,500	350	6
鍋田ふ頭 T3 岸壁	125,000	354	5
大黒ふ頭 C-4 バース	153,500	392	7
本牧ふ頭 A-7・8 バース	165,000	406	7
南本牧ふ頭 MC-1 バース	175,000	418	7
大黒ふ頭 C-3 バース	175,000	418	7
本牧ふ頭 D-4 バース	187,000	432	7
高砂コンテナターミナル	215,900	465	8
本牧埠頭 A-5・6 バース	221,000	470	7
南本牧ふ頭 MC-3 バース	225,000	474	7
南本牧ふ頭 MC-2 バース	229,000	479	7
川崎港コンテナターミナル	245,000	495	9
本牧ふ頭 D-1 バース	310,000	557	7
鍋田ふ頭 T1, T2 岸壁	350,000	592	5
本牧ふ頭 BC バース	456,000	675	7

※コンテナターミナル面積の平方根をとり仮想の一辺の長さを計算した。

表 A.1-3 タイプごとの護岸事例

護岸 タイプ	利用場所	水深 (m)	護岸幅 (m) ※	構造・形式	護岸構造厚さ (mm)	引用 文献
重力式 護岸	神戸港第七防波堤	-15	7.4	ケーソン	-	10
	神戸港第八防波堤(南)	-16.3	7.4	ケーソン	-	10
	高知港三里地区	-	19.7	長大ケーソン	-	11
	茨城港常陸那珂港区	-	5.5	ハイブリット ケーソン	-	12
矢板式 護岸	寒川東部臨海土地造成工事の 外周護岸	-	15	二重鋼矢板式構造	-	13
セル式 護岸	境港 7-3 工区産業廃棄物処分 地護岸	-8.5	23.424	鋼矢板セル	12.7	14
	徳山港内汚泥処理地護岸	-9	17.578	鋼矢板セル	12.7 9.5	14
	横浜市本牧ふ頭 D 突堤地先産 業廃棄物処理場護岸	-25	24.97	鋼矢板セル	12.7	14
	荏田港砂埋立地護岸	-7	29.54	鋼矢板セル	9.5	14
	浮島地先産業廃棄物埋立護岸	-16	15.796 18.852	鋼矢板セル	9.5	14
	水俣港緑鼻地区岸壁	-9.6	29.54	鋼矢板セル	12.7	14
	名古屋港第二 P-I・ABC 工区	-6	19.616	鋼矢板セル	9.5, 12.7	14
	中部電力碧南火力発電所灰捨 場護岸	-5	17.07	鋼矢板セル	12.7	14
	東京湾横断道路木更津人工島 護岸	-25.5	22.282	鋼矢板セル	12.7	14
	住友金属和歌山製鉄所西防沖 埋立護岸	-18~- 10	19.5	根入れ式鋼板セル	12	14
	名古屋港第二ポートアイラン ド	-5.5	20	根入れ式鋼板セル	10	14
	徳島市小松島港沖洲地区外周 護岸	-5.4	9.45	根入れ式鋼板セル	8	14
	関西国際空港 C 護岸	-	23	根入れ式鋼板セル	13	14
	島根県三隅発電所仕切護岸・ 揚炭岸壁	-	21	根入れ式鋼板セル	12	14
	神戸港新港地区東岸壁	-12	20	根入れ式鋼板セル	10	14
	石川県七尾港大田地区岸壁	-13.5	20.5	根入れ式鋼板セル	12	14
	大阪港新島地区大阪沖埋立処 分場東護岸	-14.5	18.5	根入れ式鋼板セル	9	14
	横浜港南本牧地区岸壁	-16	24.5	根入れ式鋼板セル	17	14
	茨城港常陸那珂港区	-	21	鋼板セル	-	12
横浜港南本牧ふ頭 MC-3	-18	24.5	鋼板セル	-	15	

※セル式の場合はセルの直径

-
- 1 国土交通省北陸地方整備局金沢港湾・航空整備事務所 HP
<http://www.kanazawa.pa.hrr.mlit.go.jp/114/115/118/>
 - 2 石川県 HP. 七尾港港湾施設一覧.
<http://www.pref.ishikawa.lg.jp/nanaokouwan/sisetu.html>
 - 3 名古屋港管理組合 HP. 名古屋港のあらまし（ふ頭紹介）.
<http://www.port-of-nagoya.jp/aramashi/index.html>
 - 4 東京都公園協会 HP. 葛西臨海公園.
<http://www.tokyo-park.or.jp/park/format/about026.html>
 - 5 名古屋港埠頭株式会社 HP.
<http://www.nptc.co.jp/container/index2.html>
 - 6 東京港埠頭株式会社 HP.
<http://www.tptc.co.jp/guide/aomi/about>
 - 7 横浜港ふ頭株式会社 HP.
<http://www.yokohamaport.co.jp/facilities/>
 - 8 国土交通省東北地方整備局 塩釜港湾・航空整備事務所 HP.
<http://www.pa.thr.mlit.go.jp/shiogama/introduction/sendai/takasago.html>
 - 9 川崎市 HP. 川崎港コンテナターミナル
<http://www.city.kawasaki.jp/580/page/0000022057.html>
 - 10 国土交通省国土技術研究会. 神戸港 [PI2 期地区] 第八防波堤(南)流用函の補強対策工
法検討 神戸港湾空港技術調査事務所、平成 16 年度
 - 11 一般社団法人日本埋立浚渫協会 HP. マリンボイス 21. Vol.216, November 2000
<http://www.umeshunkyo.or.jp/>
 - 12 茨城港常陸那珂港区中央ふ頭地区次期処分場工事関係者連絡協議会 HP. 事業紹介（工
事編） 茨城港常陸那珂港区次期廃棄物処分場建設事業.
 - 13 宇佐美俊輔、東悦男、河野謙治. ポケット付き鋼矢板「J ポケットパイル」の開発と廃棄
物処分場向け遮水壁への適用. JFE 技報 No.26, P.17-23、2010 年 8 月
 - 14 佐藤茂. 鋼板セル式岸壁の地震時挙動に関する研究 パシフィックコンサルタンツ株式
会社. 2014 年 12 月
 - 15 一般社団法人 日本海上起重技術協会. 海技協会報 Vol.116. p.2-7. 2015. 7.

A.1.3 評価経路の評価体系の詳細

●共通

- ・ Cs-134 と Cs-137 の存在割合は 0.209 : 1 とする。
→再生資材の利用開始時期は福島第一原子力発電所事故から 5 年後、事故直後の Cs-134 (半減期 2.06 年) と Cs-137 (半減期 30.0 年) の存在割合を 1:1 と仮定。
- ・ 全ての経路について、評価開始時期は保守的に 0 年からとする。
- ・ 土壌の密度は、「道路橋示方書 (I 共通編)・同解説」(日本道路協会)¹に基づき設定した。埋立材については締め固めた土壌の値：2.0g/cm³、運搬中の再生資材・中詰材については自然地盤での密度のおおよその平均値：1.7g/cm³、覆土については保守的に 1.5g/cm³ とした。

●評価体系における被ばく線量の評価方法

- ・ 外部被ばく線量は、MCNP5 コードを用いて算出した外部被ばく線量換算係数 (μSv/h per Bq/g) に各被ばく経路の被ばく時間をかけることにより、単位濃度あたりの被ばく線量を算出する。
- ・ 粉塵吸入による内部被ばく線量は以下の式により評価する。

$$D_{inh,i}(t) = C_{m,i}(t) \cdot Cd_o \cdot f_{d,inh} \cdot Br_o \cdot t_o \cdot DF_{inh}(i) \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i \cdot t_i)}{\lambda_i \cdot t_i} \quad \text{数式 A.1-18}$$

ここで、

- $D_{inh}(i)$: 核種 i による吸入経路の内部被ばく線量 (Sv/y)
- $C_{m,i}(t)$: 再生資材中の核種 i 濃度 (Bq/g)
- Cd_o : 作業時の空气中ダスト濃度 (kg/m³)
- $f_{d,inh}$: 微粒子への放射性物質の濃縮係数 (吸入摂取) (-)
- Br_o : 作業者の呼吸量 (m³/h)
- t_o : 年間作業時間 (h/y)
- $DF_{inh}(i)$: 核種 i の吸入経路による内部被ばく線量係数 (Sv/Bq)
- t_i : 被ばく中の減衰期間 (y)

である。

- ・ 直接経口による内部被ばく線量は以下の式により評価する。

$$D_{dir,i}(t) = C_{m,i}(t) \cdot f_{d,ing} \cdot q \cdot t_o \cdot DF_{ing}(i) \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i \cdot t_i)}{\lambda_i \cdot t_i} \quad \text{数式 A.1-19}$$

ここで、

- $D_{dir,i}(t)$: 核種 i による経口経路の内部被ばく線量 (Sv/y)
 $f_{d,ing}$: 微粒子への放射性物質の濃縮係数 (経口摂取) (-)
 q : ダストの年間経口摂取量 (g/y)
 $DF_{ing}(i)$: 核種 i の経口経路による内部被ばく線量係数 (Sv/Bq)

●建設現場への運搬

- ・経路 No.1～4 (建設現場への積み下ろし・運搬作業)
 - ・積載量 10t の大型トラックによる運搬を想定する。

- ・経路 No.5～7 (土運船への積み込み作業) (図 A.1-1)
 - ・仮置きされた土砂を、重機を用いて船舶へ積み込むことを想定する。
 - ・仮置きされた土砂と土運船に積載された土砂からの作業者の外部被ばくを評価する。
 - ・仮置き土砂の線源体系は実在する仮置き場²の大きさから面積を 10,000m² (一辺 100m) と想定し、仮置き場の半分の面積に再生資材が 5m の高さで置かれていると設定した。
 - ・土運船に積載された線源のサイズは実在する大型土運船の事例調査³から 70m×13m×6m と設定した。
 - ・被ばく時間は 1,000h/y、遮へい係数は 0.4 とする (詳細は表 A.1-5 参照)。
 - ・粉塵吸入、直接経口摂取による内部被ばくも評価対象とする。

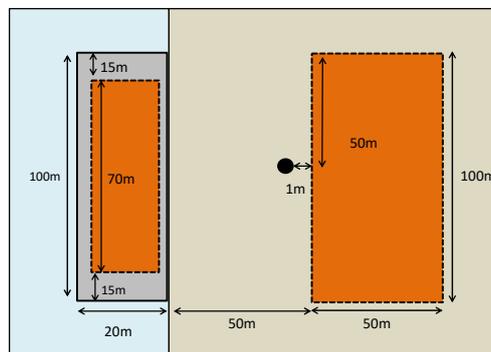
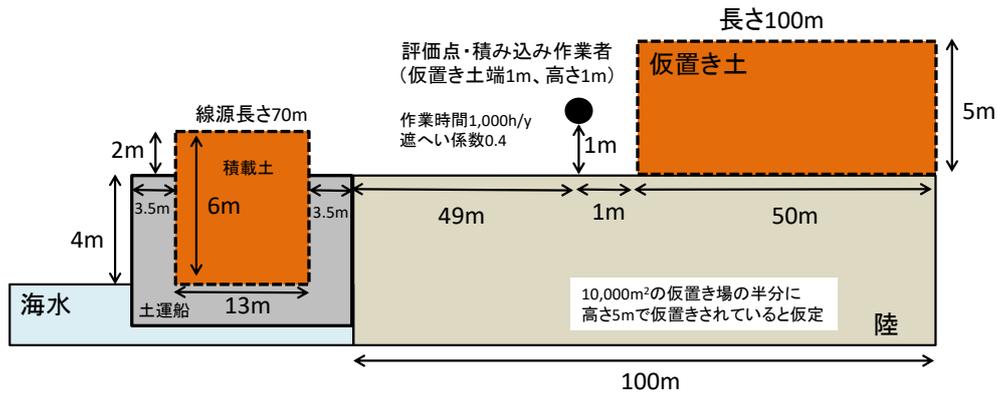


図 A.1-1 土運船への積み込み作業時の評価体系

(上：横から見た図、下：上から見た図、線源部は点線で囲ったオレンジ色の部分)

・経路 No.8 (土運船による運搬) (図 A.1-2)

- ・積載された土砂からの作業員への外部被ばくを評価する。
- ・評価位置は大型土運船の運転作業員を想定して、積み込み土砂端 2m、高さは甲板上 3m (線源上面端 1m) とする。
- ・被ばく時間は 1,000h/y、遮へい係数は 0.4 とする。
- ・運搬事故による再生資材の流出は、再生資材の流出量がより大きい災害時評価の津波による被ばく評価に包含する。

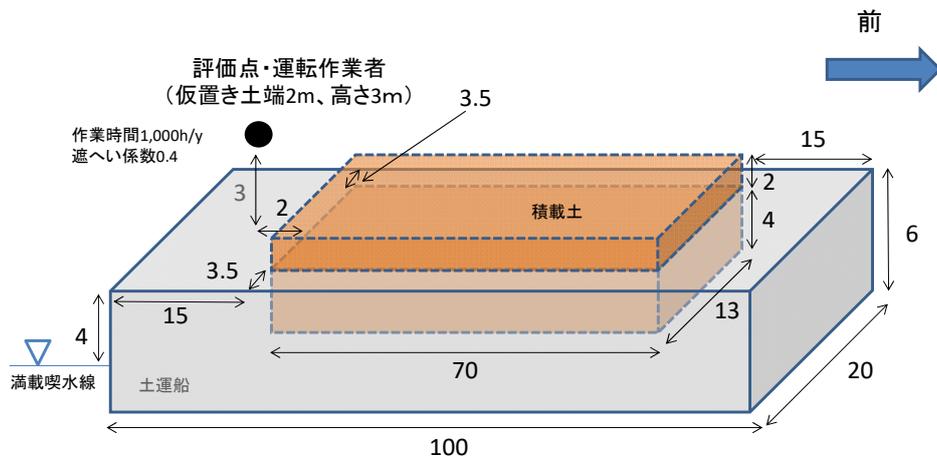


図 A.1-2 土運船による建設現場への運搬の評価体系
(線源部は点線で囲ったオレンジ色の部分)

- ・ 経路 No.9、10 (運搬経路周辺居住者)
 - ・ 既往の評価と同様に、運搬トラックの走行台数のうち半分が赤信号により停車している時間 1 分の中に被ばくすると想定する。

●埋立地造成

- ・ 経路 No.11～13 (中詰材の投入)
 - ・ 中詰材の投入方法は揚土装置付自航運搬船による投入、揚土船+土運船による投入がある。各投入方法について評価を行い、被ばくが最も大きくなる投入方法で評価を代表する。
 - ・ 護岸構造物はセルとケーソンを想定し、それぞれで護岸を造成した場合を評価する。
 - ・ ケース 3 とケース 4 で厳密には護岸上部工高さが 5cm 異なるが、その差による外部被ばく線量への影響は小さいものと仮定し、評価体系としては護岸上部工高さを 0.3m で統一した。
 - ・ 粉塵吸入と直接経口摂取による内部被ばくも評価対象とする。

○「揚土装置付自航運搬船による投入 (ケース 3,4、図 A.1-3、図 A.1-4)」

- ・ 揚土装置付自航運搬船は大型のものを想定し、事例調査⁴の結果から線源サイズは 35×11×6m と設定した。
- ・ 作業者は、積載された中詰材 (積載土) と護岸構造物中に投入された中詰材から外部被ばくをする。
- ・ 評価点は運転作業者と甲板での作業者を想定して船上で複数点とる。また、積載土

を満載した場合と積載土なしの場合についても評価する。なぜならば、積載土なしの場合の線源は護岸構造物中に投入された中詰材のみになる一方、船舶が軽くなったことにより船が浮上し甲板作業者の評価点において投入された中詰材からの被ばくを受けやすくなるためである。これらの評価条件を考慮し最も被ばくが大きくなる条件を用いて評価する。

- ・護岸構造物としてセルを用いた場合の護岸サイズは、表 A.1-3 においてセル式護岸の中で最も護岸幅が大きかった水俣港緑鼻地区岸壁を参考に半径 30m の鋼矢板セルの護岸を想定した。実際のセルは円筒形であるが、評価体系上は幅 30m の枠型として設定した。護岸構造物厚さは表 A.1-3 において鋼矢板セル・鋼板セルの護岸構造物の厚さが最も薄い 8mm を設定した。
- ・護岸構造物としてケーソンを用いた場合の護岸サイズは、表 A.1-3 において重力式護岸の中で最も護岸幅が大きかった高知港三里地区を参考に護岸幅 20m の護岸を想定した。護岸構造物厚さはコンクリートの函であるケーソンの側壁の厚さとする。側壁の厚さは、国土交通省港湾局監修の「日本港湾協会、港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁴」に示された性能規定に適合するように設定される。上記文献において、ケーソンの側壁の厚さは 30～60cm にすることが多いと示されているので、その下限値である 30cm を側壁厚さとして設定した。
- ・線源サイズが大きくなる島型を設定。

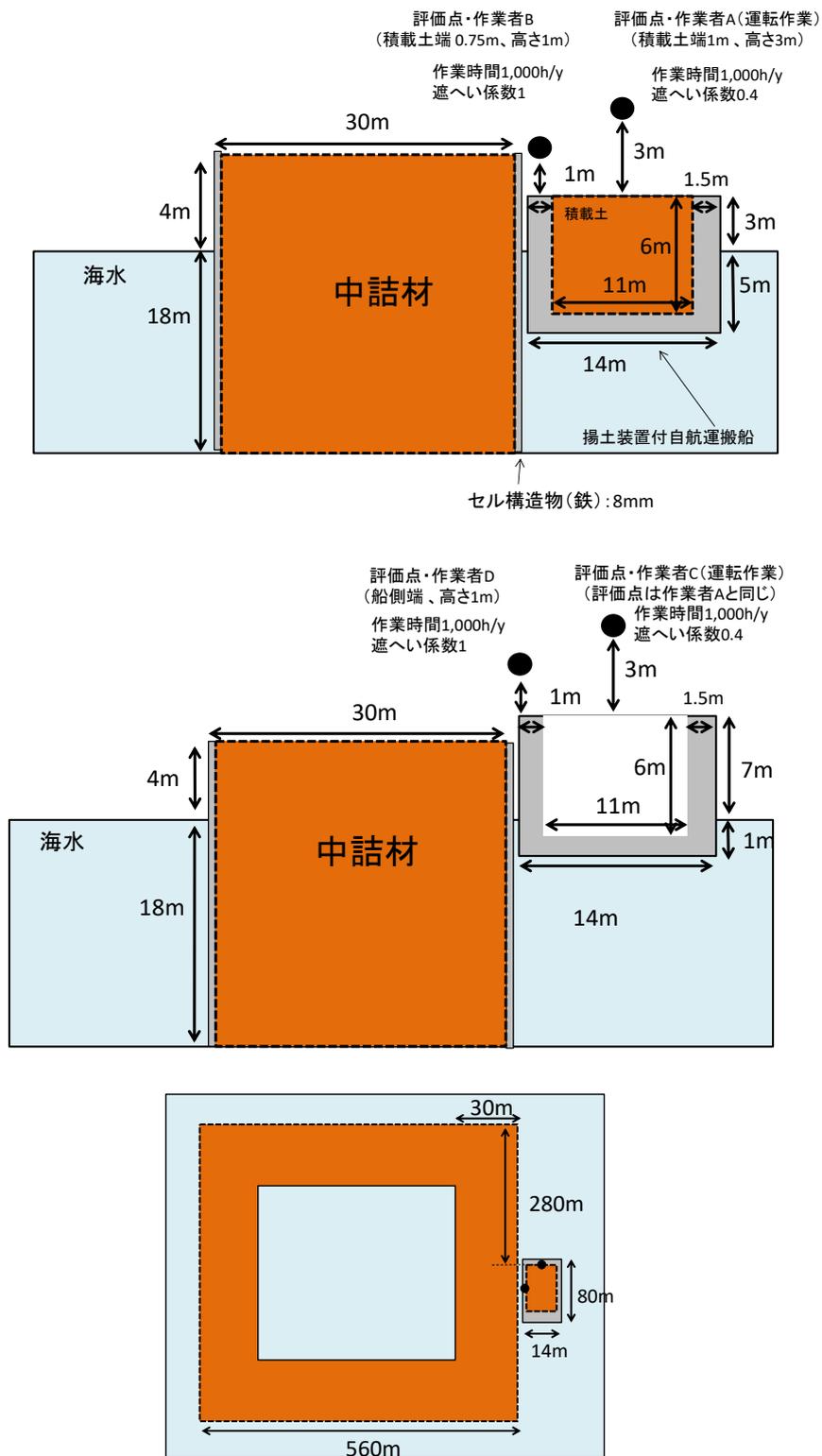


図 A.1-3 揚土装置付自航運搬船による投入の評価体系 (ケース 3,4) セル式護岸の場合
(上：満載時、中段：積載土なしの時、下：上から見た図)

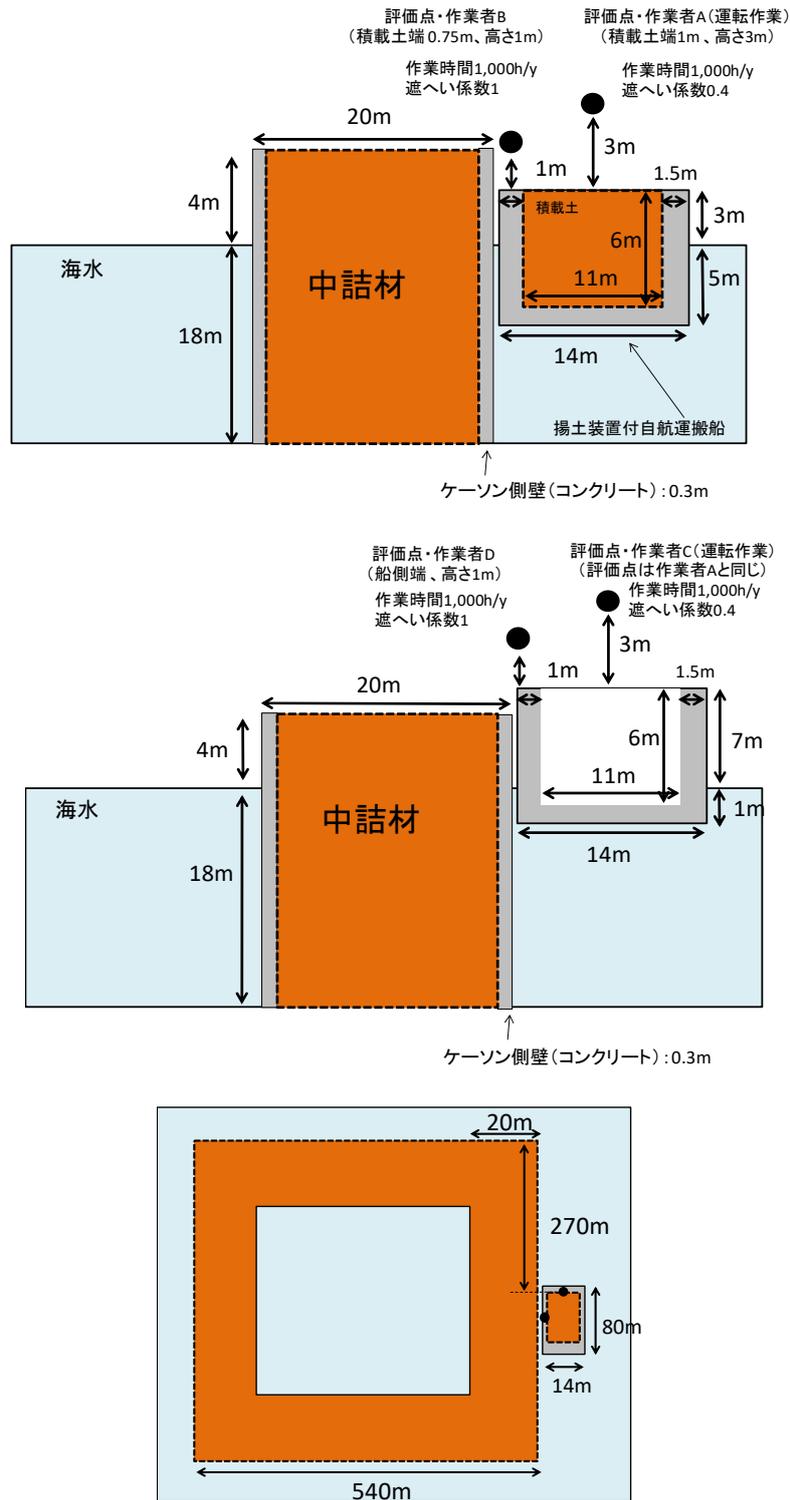


図 A.1-4 揚土装置付自航運搬船による投入の評価体系 (ケース 3,4) 重力式護岸の場合
 (上：満載時、中段：積載土なしの時、下：上から見た図)

○「揚土船+土運船による投入（ケース3,4、図A.1-5、図A.1-6）」

- ・揚土船のサイズは、事例調査の結果から幅22m×長さ55m×高さ4mとした。
- ・作業者は、土運船に積載された中詰材（積載土）と護岸構造物中に投入された中詰材から外部被ばくをする。
- ・評価点は運転作業者と甲板での作業者を想定して船上で複数点とり、最も被ばくが大きくなる点を評価する。
- ・セル式護岸の護岸幅は30m、護岸側面への遮へいとして8mm鉄板を設定。
- ・重力式護岸の護岸幅は20m、護岸側面への遮へいとして0.3mのコンクリートを設定。
- ・線源サイズが大きくなる島型を設定。

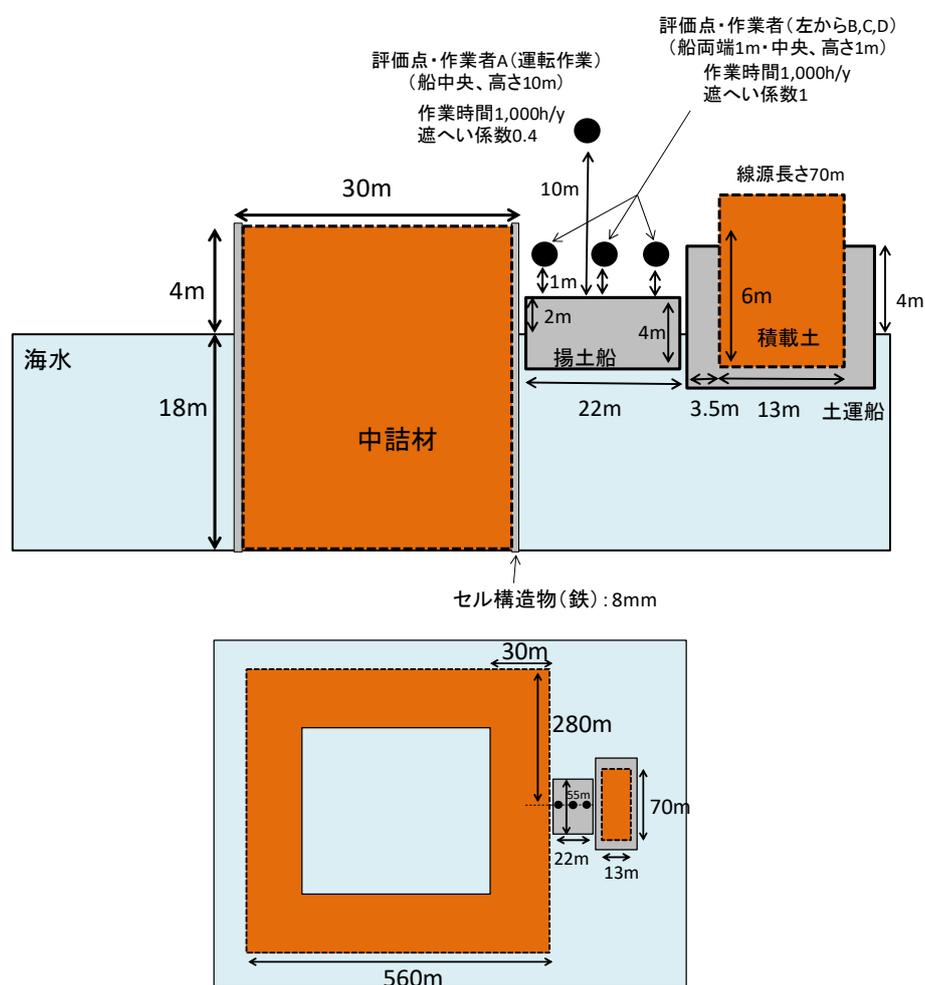


図 A.1-5 揚土船+土運船による投入の評価体系（ケース3,4）セル式護岸の場合
（上：断面図、下：上から見た図）

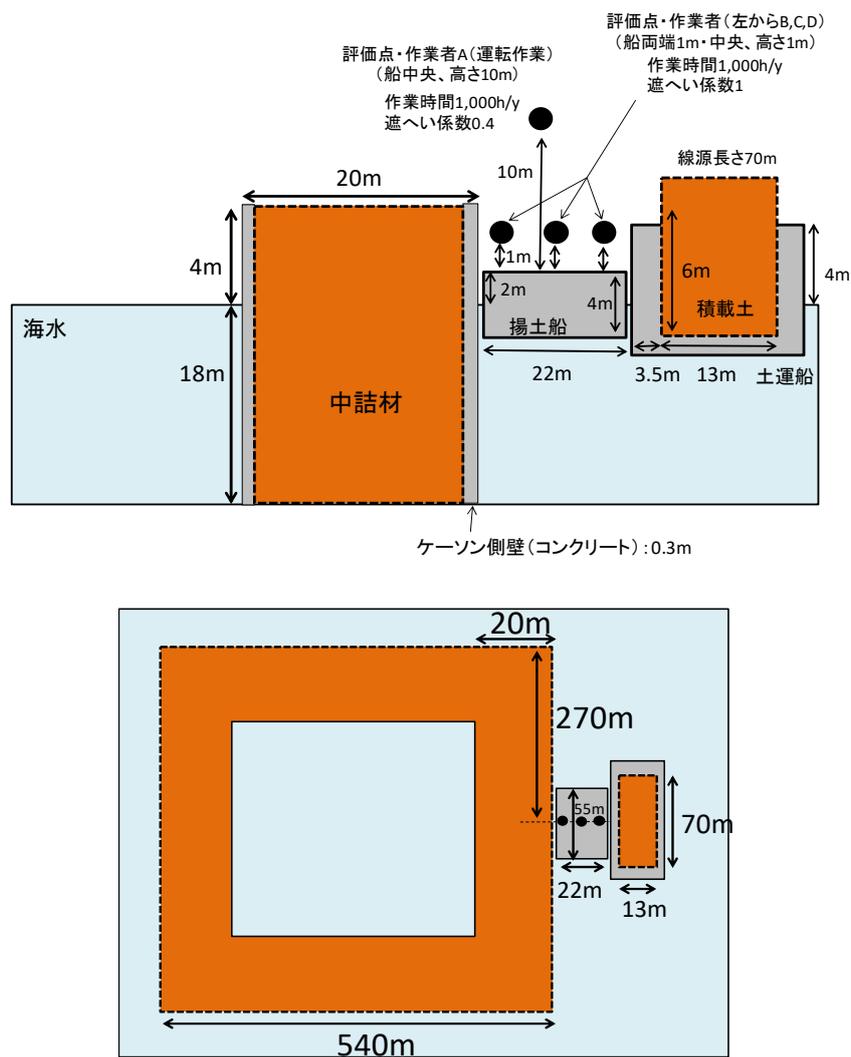


図 A.1-6 揚土船+土運船による投入の評価体系 (ケース 3,4) 重力式護岸の場合
(上:断面図、下:上から見た図)

- ・ 経路 No.14~16 (中詰材の敷均し) (図 A.1-7、図 A.1-8)
 - ・ ケース 3,4 (中詰材の利用) のみ評価。
 - ・ 評価点は高さ 1m、護岸屈曲部 (護岸端から 15m 位置) とする。
 - ・ 線源サイズが大きくなる島型を設定。

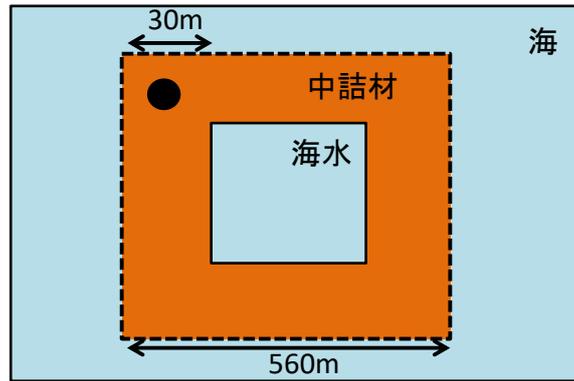


図 A.1-7 中詰材の敷均しの評価体系（ケース 3,4、上から見た図）セル式護岸の場合

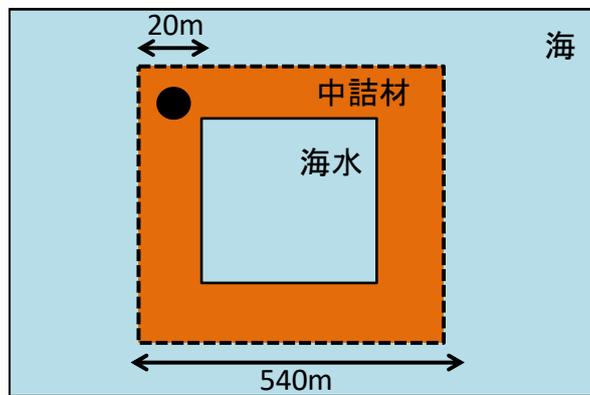


図 A.1-8 中詰材の敷均しの評価体系（ケース 3,4、上から見た図）重力式護岸の場合

・ 経路 No.17～19（埋立柱の投入）

- ・ 埋立柱の投入方法は図 3.1-3 に示したとおり土運船のみによる投入、揚土装置付自航運搬船による投入、揚土船+土運船による投入、バックホウ+土運船による投入、トラックによる投入がある。外部被ばくについては各投入方法について評価を行い、被ばくが最も大きくなる投入方法で評価を代表する。なお、土運船のみによる投入による外部被ばく評価は経路 No.8 に内包する。
- ・ ケース 1,2（再生資材を埋立柱として利用）では、投入された埋立土および船舶・トラックの積載土のどちらかもしくは両方からの被ばくを評価する。
- ・ ケース 3,4（再生資材を中詰材として利用）では、護岸構造物中に投入された中詰材からの被ばくを評価する。この際、セル式護岸および重力式護岸の両方について評価する。
- ・ ケース 1,3 とケース 2,4 で厳密には護岸上部工高さが 5cm 異なるが、その差による外部被ばく線量への影響は小さいものと仮定し、評価体系としては護岸上部工高さを 0.3m で統一した。

- ・粉塵吸入と直接経口摂取による内部被ばくも評価対象とする。
- 「揚土装置付自航運搬船による投入（ケース 1,2、図 A.1-9）」
 - ・揚土装置付自航運搬船は大型のものを想定し、事例調査⁴の結果から線源サイズは 35×11×6m と設定した。
 - ・作業者は、積載された埋立材（積載土）と投入された埋立材（埋立土）から外部被ばくをする。
 - ・評価点は運転作業者と甲板での作業者を想定して船上で複数点とる。また、積載土を満載した場合と積載土なしの場合についても評価する。なぜならば、積載土なしの場合は線源が埋立土のみになる一方、船舶が軽くなったことにより船が浮上し甲板作業者の評価点において埋立土からの被ばくを受けやすくなるためである。これらの評価条件を考慮し最も被ばくが大きくなる条件を用いて評価する。
 - ・埋立材として投入する際の護岸厚さは、表 A.1-3 の護岸サイズに関する事例調査の結果から、評価点と埋立土が近くなるように 5m と設定した。

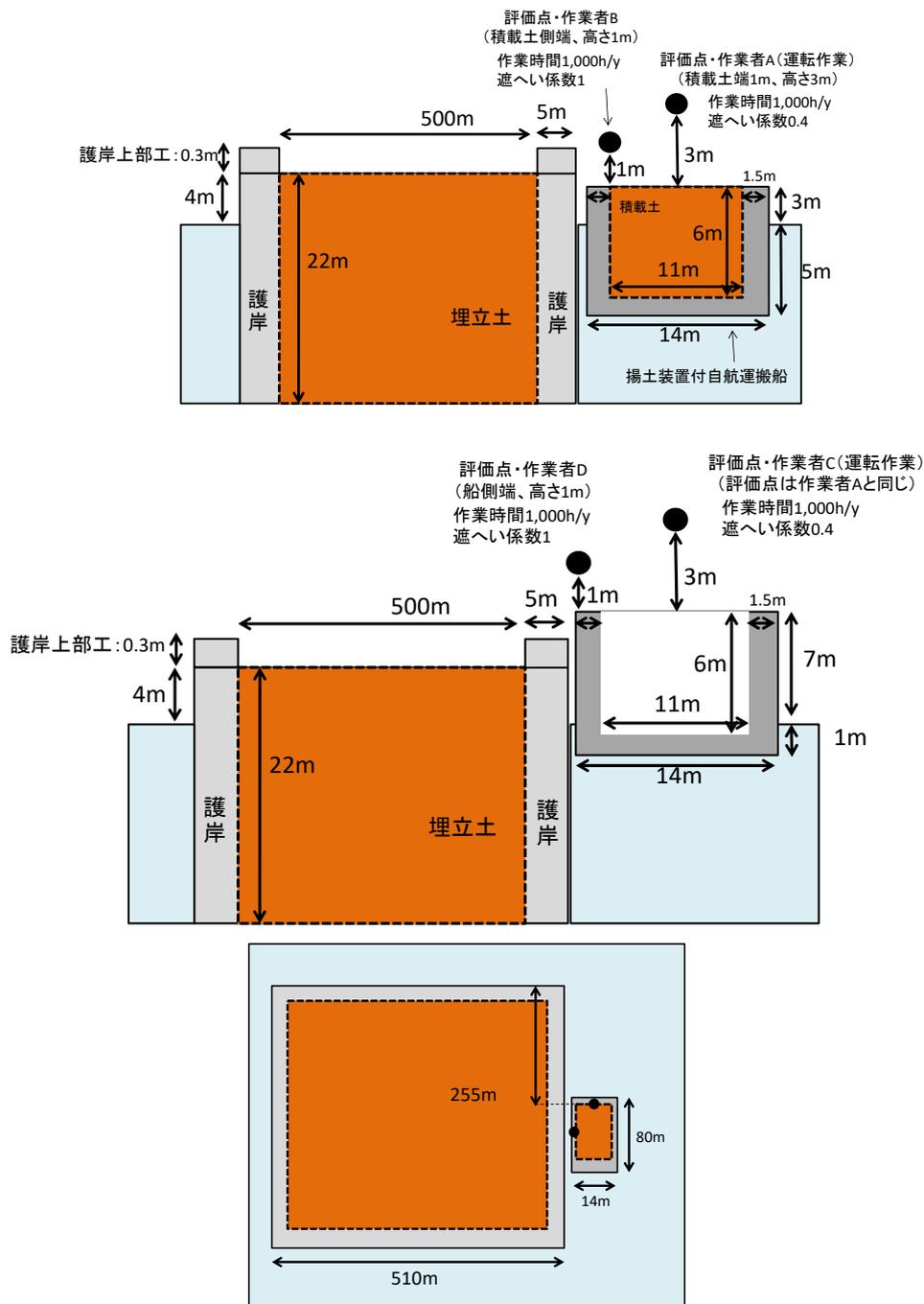


図 A.1-9 揚土装置付自航運搬船による投入の評価体系 (ケース 1,2)
(上：満載時、中段：積載土なしの時、下：上から見た図)

- 「揚土装置付自航運搬船による投入 (ケース 3,4、図 A.1-10、図 A.1-11)」
 - ・作業者は、護岸構造物中に投入された中詰材から外部被ばくをする。
 - ・評価体系は埋立作業開始時点进行を想定し、護岸で囲まれた範囲には埋立土が含まれないとする。

- ・評価点と線源が近くなる積載土満載時を評価した。
- ・セル式護岸の護岸幅は30m、護岸側面の遮へいとして8mm鉄板を設定。
- ・重力式護岸の護岸幅は20m、護岸側面の遮へいとして0.3mのコンクリートを設定。

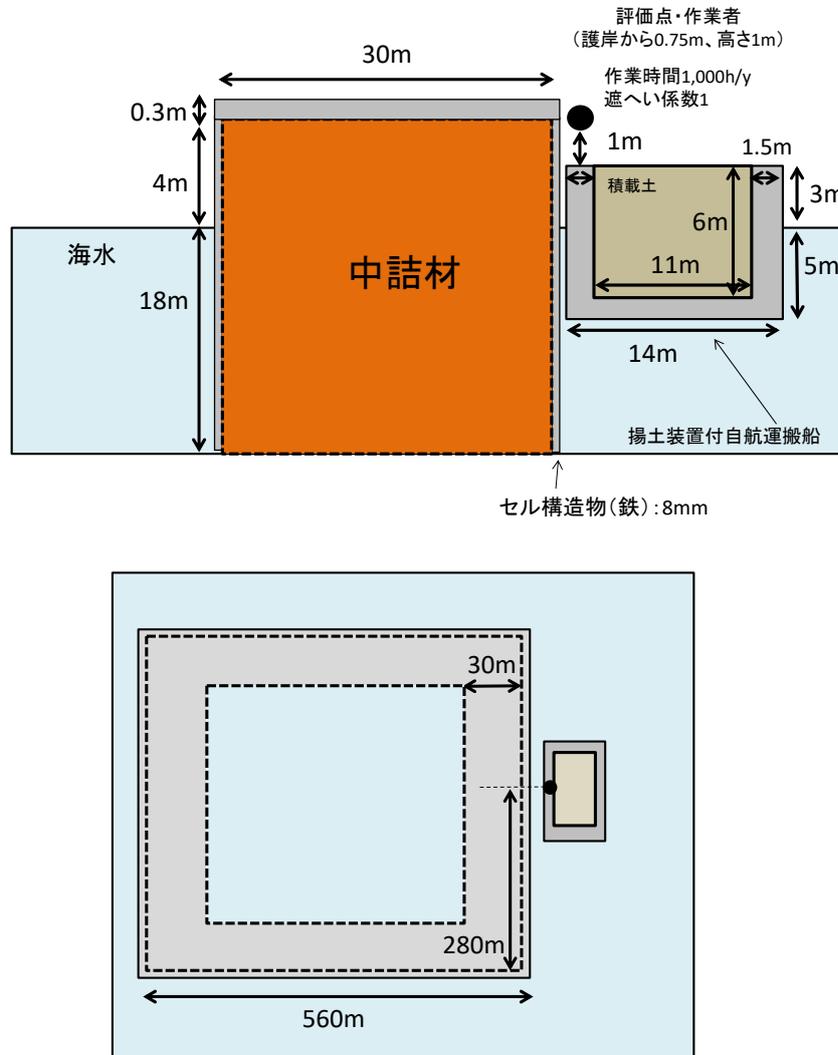


図 A.1-10 揚土装置付自航運搬船による投入の評価体系（ケース3,4）セル式護岸の場合
(上：断面図、下：上から見た図)

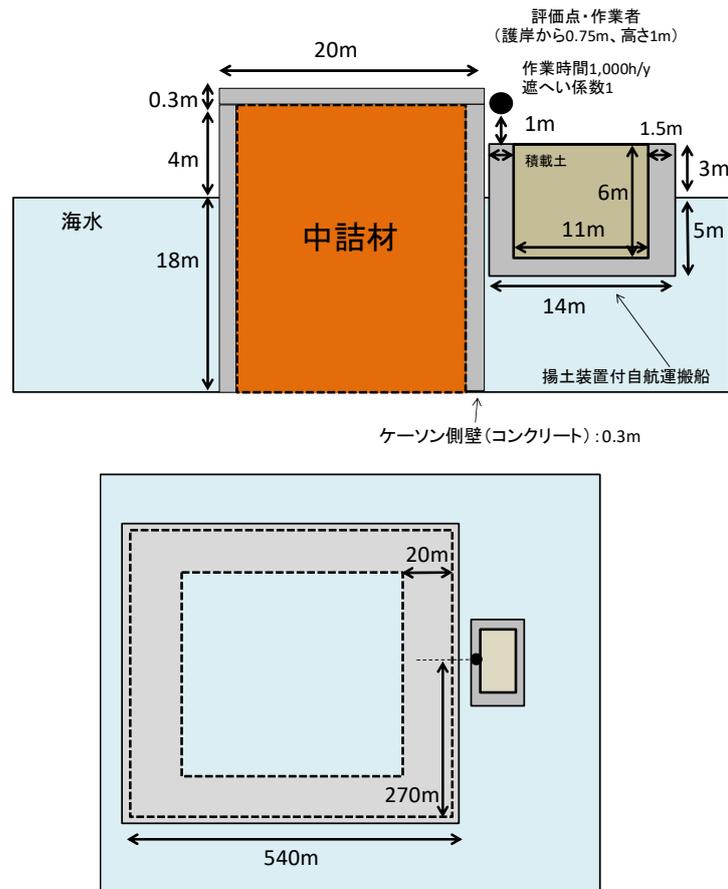


図 A.1-11 揚土装置付自航運搬船による投入の評価体系（ケース 3,4）重力式護岸の場合
（上：断面図、下：上から見た図）

○「揚土船+土運船による投入（ケース 1,2、図 A.1-12）」

- ・揚土船のサイズは、事例調査の結果から幅 22m×長さ 55m×高さ 4m とした。
- ・作業者は、土運船に積載された埋立材（積載土）と投入された埋立材（埋立土）から外部被ばくをする。
- ・評価点は運転作業者と甲板での作業者を想定して船上で複数点とり、最も被ばくが大きくなる点を評価する。
- ・埋立材として投入する際の護岸厚さは、表 A.1-3 の護岸サイズに関する事例調査の結果から、評価点と埋立土が近くなるように 5m と設定した。

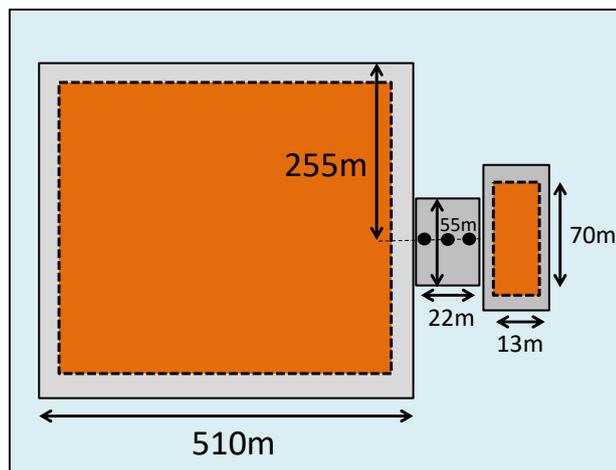
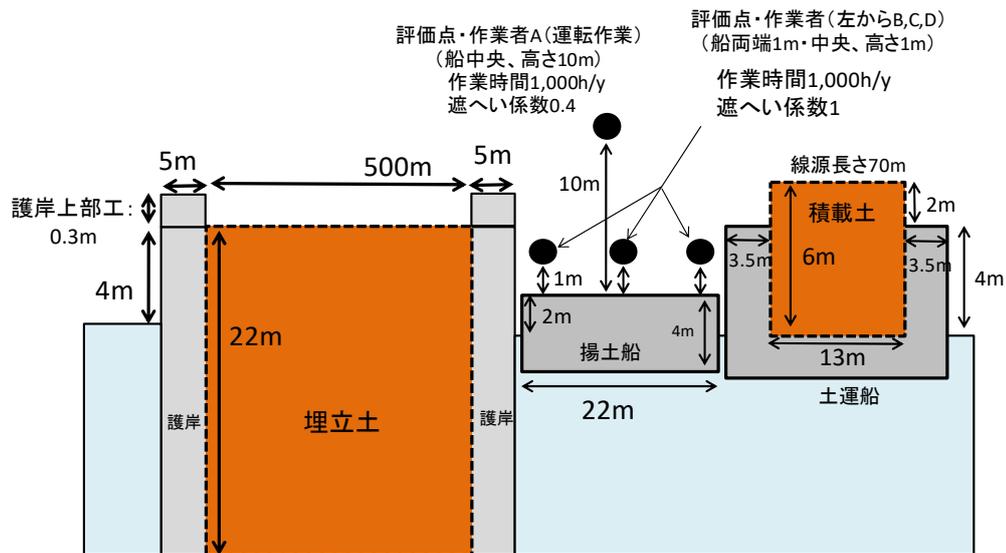


図 A.1-12 揚土船+土運船による投入の評価体系 (ケース 1,2)
(上: 断面図、下: 上から見た図)

- 「揚土船+土運船による投入 (ケース 3,4、図 A.1-13、図 A.1-14)」
 - ・作業者は、護岸構造物中に投入された中詰材から外部被ばくをする。
 - ・評価体系は埋立作業開始時点を想定し、護岸で囲まれた範囲には埋立土が含まれないとする。
 - ・セル式護岸の護岸幅は 30m、護岸側面の遮へいとして 8mm 鉄板を設定。
 - ・重力式護岸の護岸幅は 20m、護岸側面の遮へいとして 0.3m のコンクリートを設定。

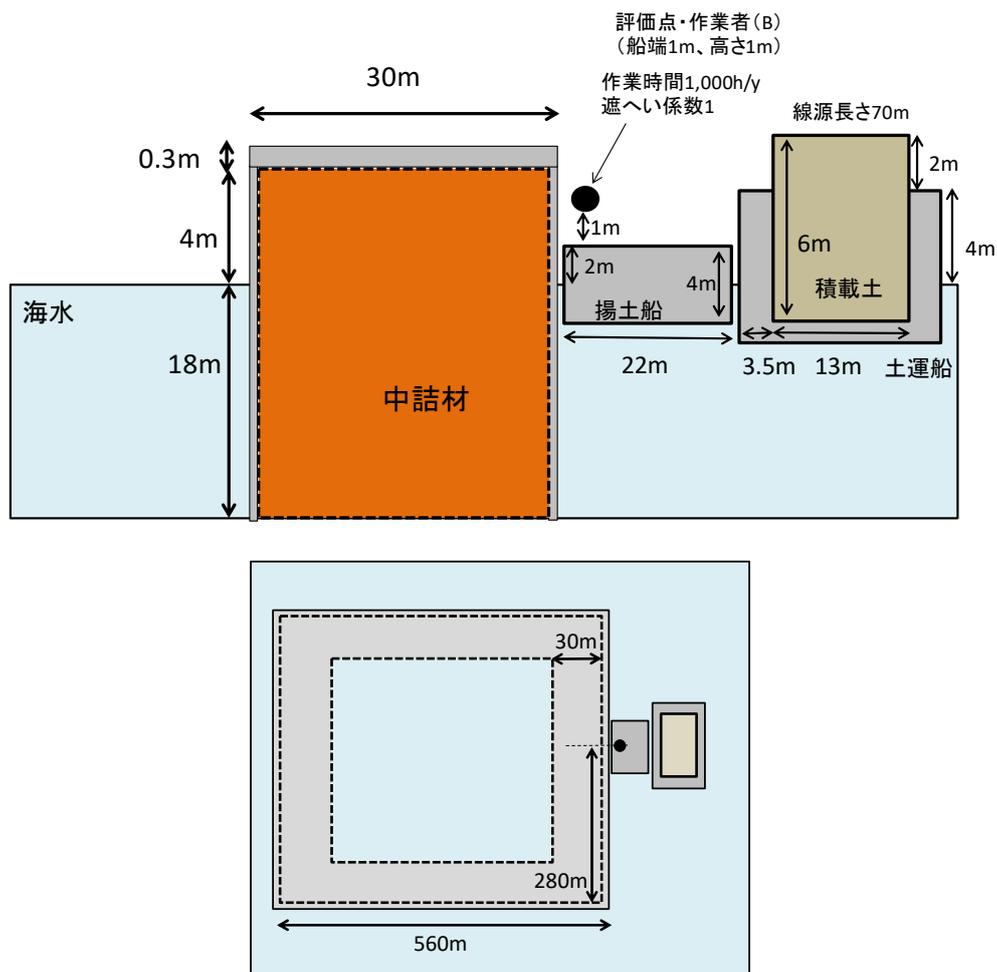


図 A.1-13 揚土船+土運船による投入の評価体系 (ケース 3,4) セル式護岸の場合
(上:断面図、下:上から見た図)

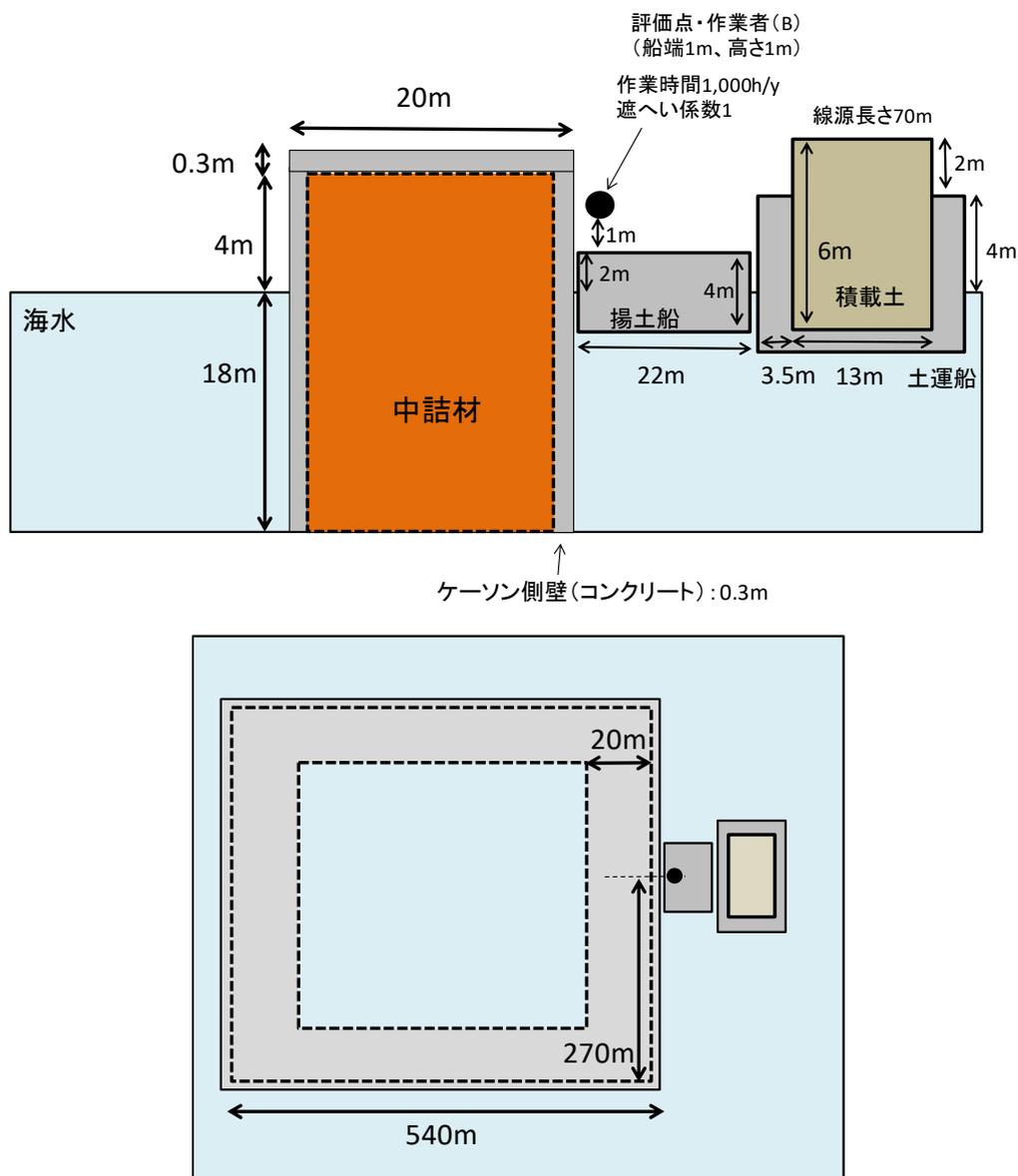


図 A.1-14 揚土船+土運船による投入の評価体系（ケース 3,4）重力式護岸の場合
（上：断面図、下：上から見た図）

○「バックホウ+土運船による投入（ケース 1,2、図 A.1-15）」

- ・護岸上のバックホウによる埋立材の投入を想定する。
- ・作業者は、土運船に積載された埋立材（積載土）と投入された埋立材（埋立土）から外部被ばくをする。
- ・評価は埋立が最終段階にある場合を想定し、線源体系は埋立材投入完了時と同じとする。
- ・評価点は、護岸上を往復しながら投入することを想定し、護岸端 1m 及び埋立土端 1m の間で複数点とり、被ばく量が最も大きい点を評価することとした。

- ・埋立材として投入する際の護岸厚さは、表 A.1-3 の護岸サイズに関する事例調査の結果から、評価点と埋立土が近くなるように 5m と設定した。

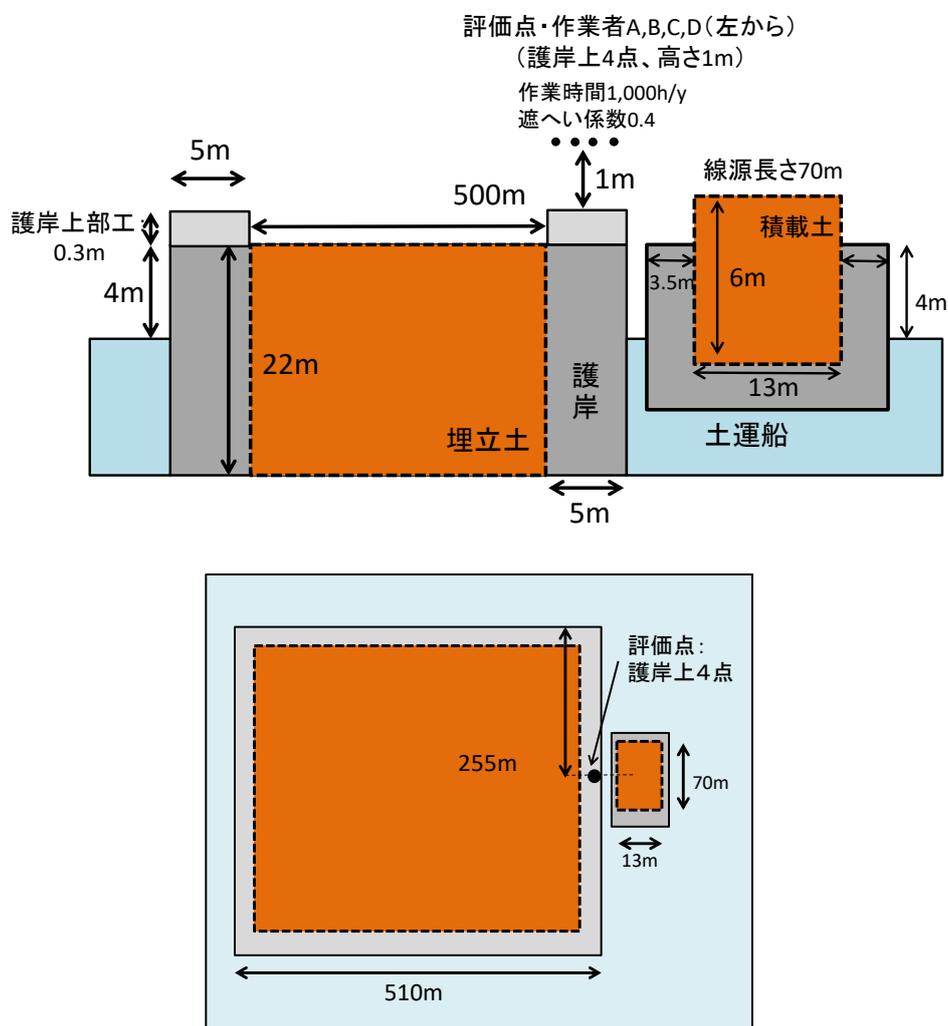


図 A.1-15 バックホウ+土運船による投入の評価体系 (ケース 1,2)
(上：断面図、下：上から見た図)

- 「バックホウ+土運船による投入 (ケース 3,4、図 A.1-16、図 A.1-17)」
 - ・作業者は、護岸構造物中に投入された中詰材から外部被ばくをする。
 - ・評価体系は埋立作業開始時点进行想定し、護岸で囲まれた範囲には埋立土が含まれないとする。
 - ・セル式護岸の護岸幅は 30m、護岸側面の遮へいとして 8mm 鉄板を設定。
 - ・重力式護岸の護岸幅は 20m、護岸側面の遮へいとして 0.3m のコンクリートを設定。

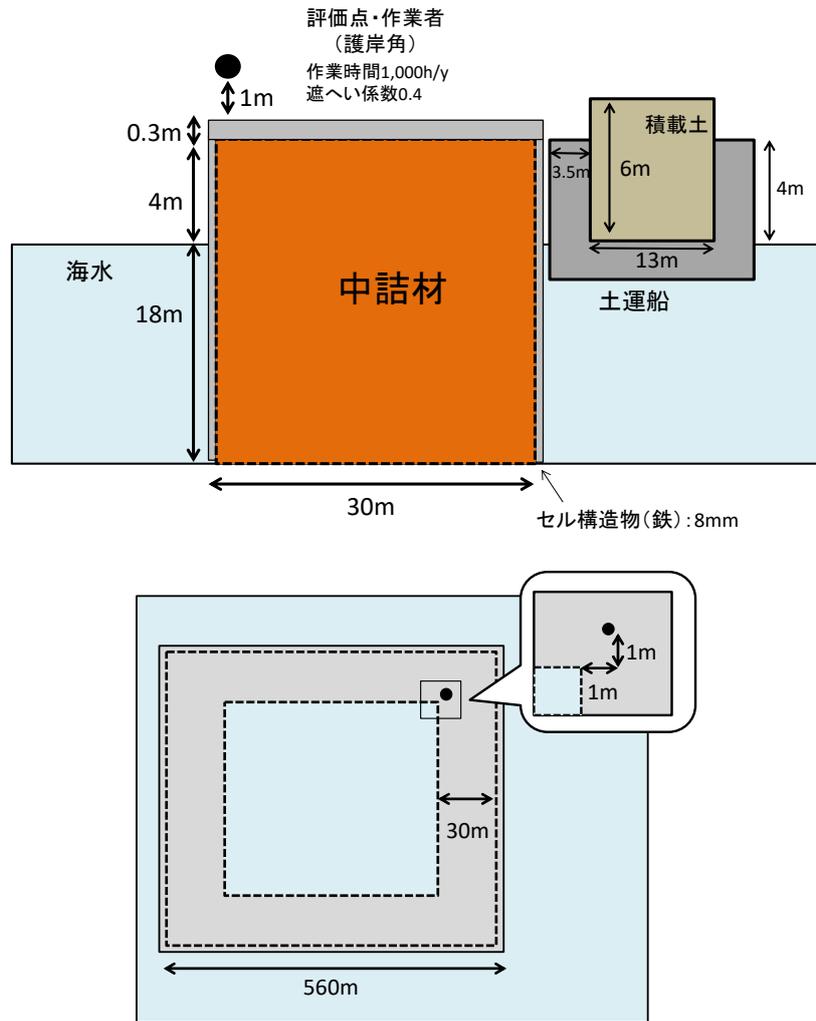


図 A.1-16 バックホウ+土運船による投入の評価体系 (ケース 3,4) セル式護岸の場合
(上:断面図、下:上から見た図)

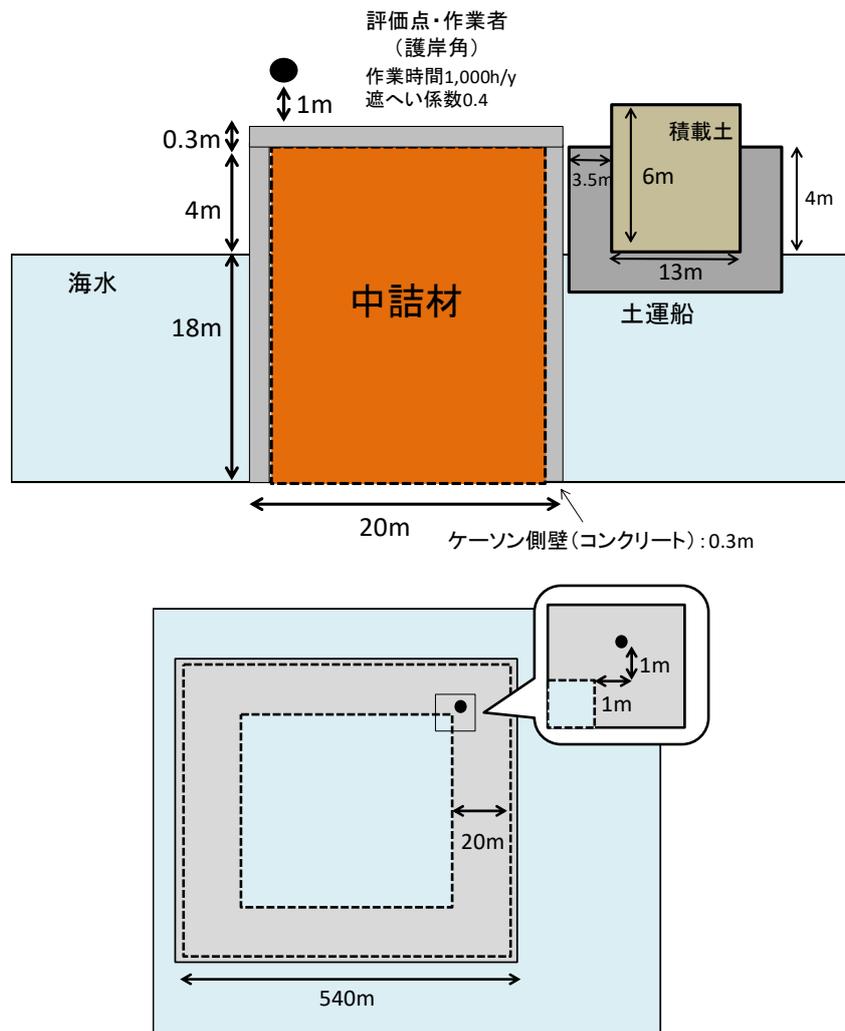


図 A.1-17 バックホウ+土運船による投入の評価体系（ケース 3,4）重力式護岸の場合
（上：断面図、下：上から見た図）

○「トラックによる投入（ケース 1,2、図 A.1-18）」

- ・トラックにより埋立材を運搬・投入することを想定する。
- ・作業者はトラックに積載した埋立材（積載土）と投入された埋立材（埋立土）から外部被ばくをする。
- ・トラックによる運搬・投入ではトラックのサイズにより運転作業者の位置と積載土の量が異なるため、大型トラック及び中型トラックの条件の評価を行い、外部被ばくが大きい方で代表させる。
- ・トラックに積載された線源体系は事例調査^{5,6}を基に、大型トラックは 5m×2m×0.6 m、中型トラックは 5m×2m×0.3m とした。
- ・作業者は保守的に最も埋立土からの被ばくを受ける埋立地中央で通年作業するとする。

- ・評価点高さは、事例調査^{5,6}を基に大型トラックは2m、中型トラックは1.5mとする。積載土からの距離は両方1mとする。
- ・外部被ばく線量換算係数を計算する際は、埋立土と積載土両方の線源に対してトラックによる遮へいを考慮する。遮へい係数は両方ともに0.9とする（詳細は表A.1-5参照）。
- ・被ばく時間は1,000h/yとする。

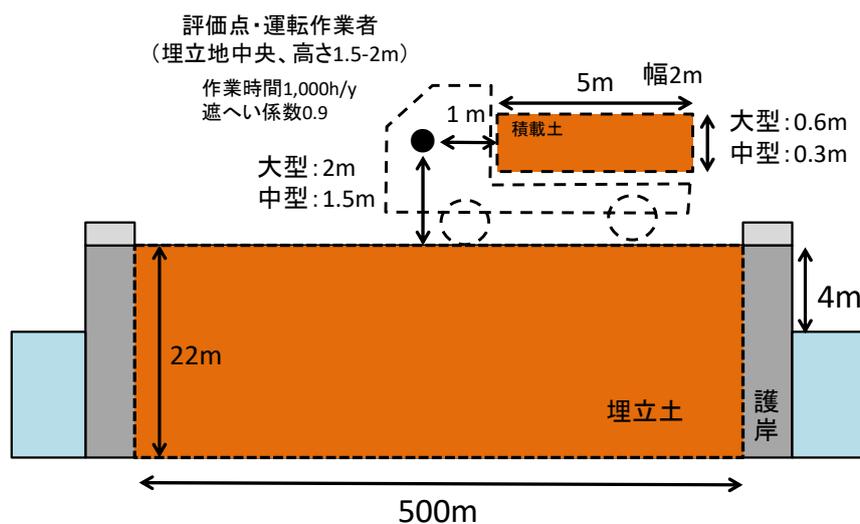


図 A.1-18 トラックによる投入の評価体系（ケース 1,2）

- 「トラックによる投入（ケース 3,4、図 A.1-19、図 A.1-20）」
 - ・作業者は、護岸構造物中に投入された中詰材から外部被ばくをする。
 - ・トラックによる投入作業は埋立土が水面の高さまで投入された後に行われると想定する。
 - ・中型トラックによる投入を想定する。
 - ・セル式護岸の護岸幅は 30m、護岸側面の遮へいとして 8mm 鉄板を設定。
 - ・重力式護岸の護岸幅は 20m、護岸側面の遮へいとして 0.3m のコンクリートを設定。

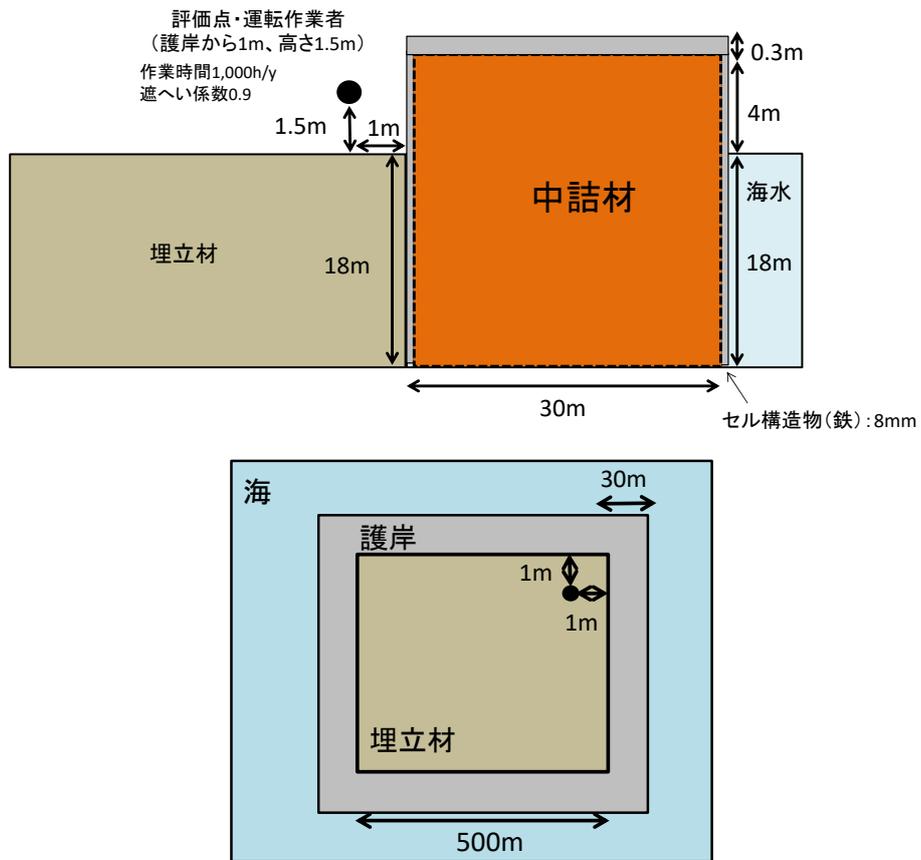


図 A.1-19 トラックによる投入の評価体系 (ケース 3,4) セル式護岸の場合
 (上: 断面図、下: 上から見た図)

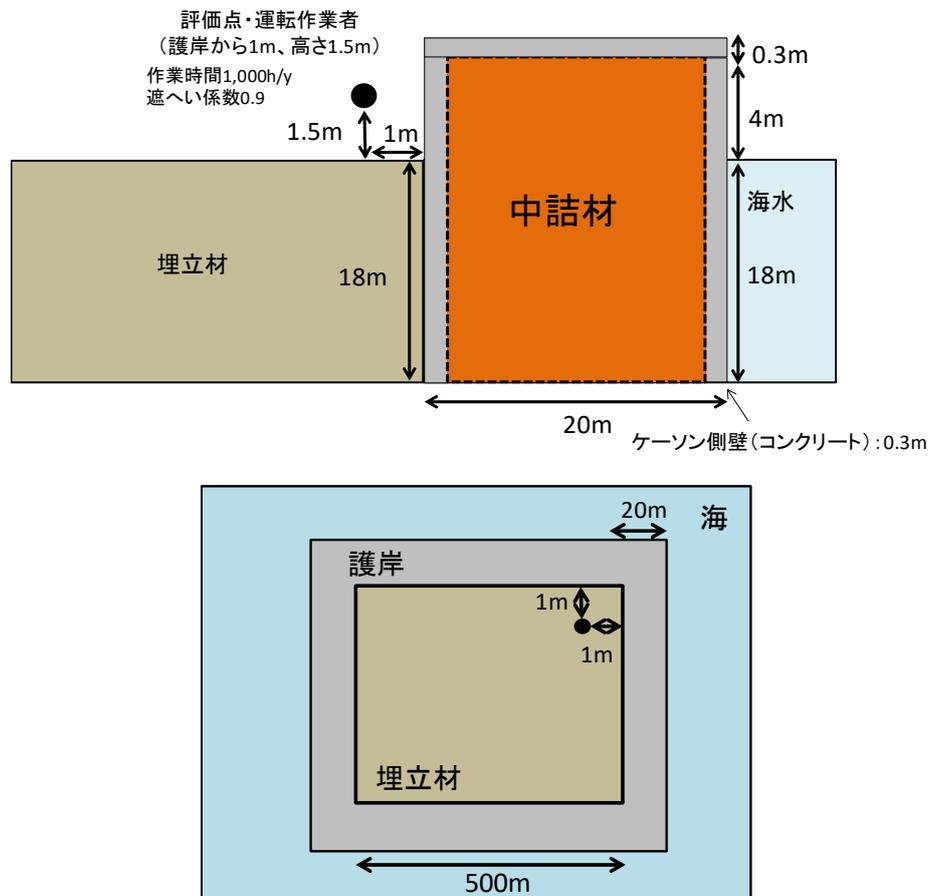


図 A.1-20 トラックによる投入の評価体系（ケース 3,4）重力式護岸の場合
（上：断面図、下：上から見た図）

- ・経路 No.20～22（埋立材の敷均し・締固め）（図 A.1-21、図 A.1-22、図 A.1-23）
 - ・ケース 1,2（再生資材を埋立材として利用）では、投入された埋立土からの被ばくを評価する。評価点は埋立地中央高さ 1m とする。
 - ・ケース 3,4（再生資材を中詰材として利用）では、護岸構造物中に投入された中詰材からの被ばくを評価する。評価点は埋立地角から 1m 位置の高さ 1m とする。
 - ・ケース 3,4 の場合の敷均し・締固め作業は、埋立土が水面の高さまで投入された後に行われると想定する。セル式護岸と重力式護岸を想定し、護岸幅 30m、護岸構造物の厚さ 8mm の護岸と、護岸幅 20m、護岸構造物の厚さ 0.3m の護岸を設定する。
 - ・ケース 1,3 とケース 2,4 で厳密には護岸上部工高さが 5cm 異なるが、その差による外部被ばく線量への影響は小さいものと仮定し、評価体系上、護岸上部工高さは 0.3m で統一した。

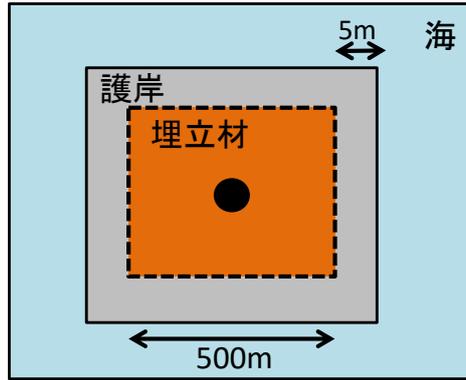


図 A.1-21 埋立材の敷均し・締固めの評価体系（ケース 1,2）
（上から見た図）

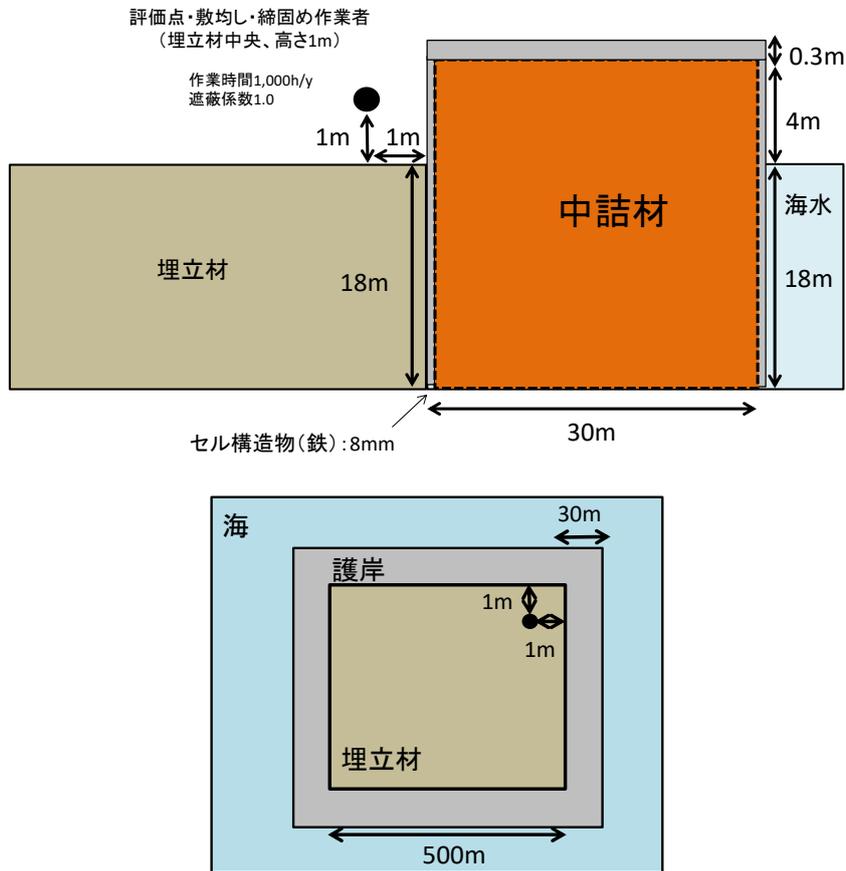


図 A.1-22 埋立材の敷均し・締固めの評価体系（ケース 3,4）セル式護岸の場合
（上：断面図、下：上から見た図）

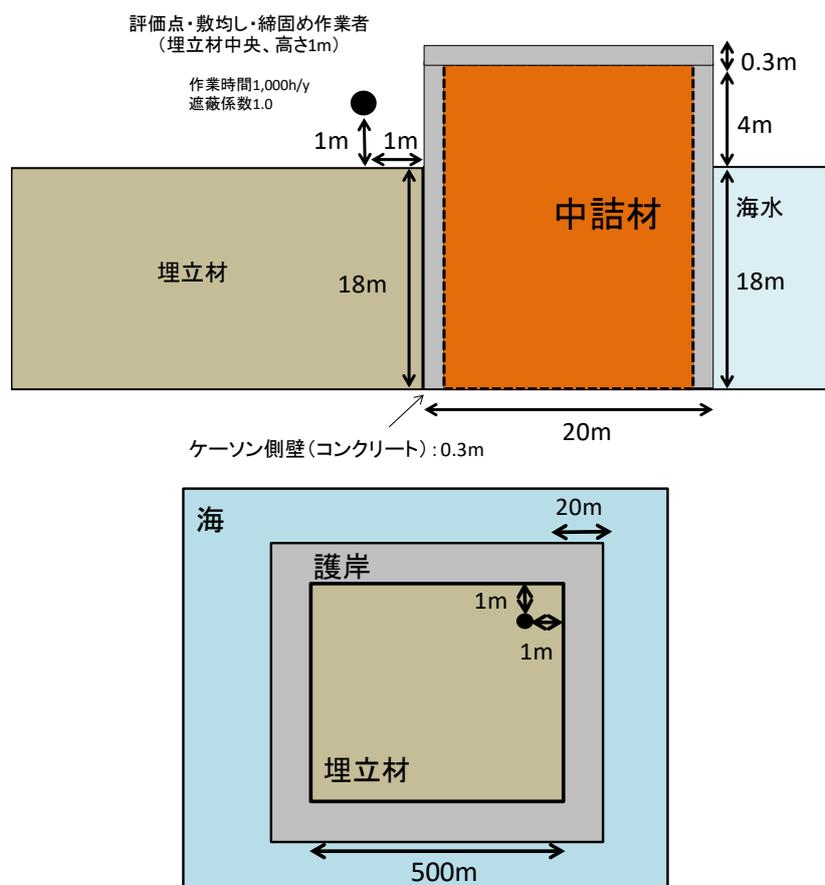


図 A.1-23 埋立材の敷均し・締固めの評価体系（ケース 3,4）重力式護岸の場合
（上：断面図、下：上から見た図）

- ・ 経路 No.23～26（周辺居住）（図 A.1-24、図 A.1-25、図 A.1-26）
 - ・ 埋立材及び中詰材に利用した際の周辺居住者への影響を評価する。
 - ・ 評価点は岸壁から 1m、高さ 1m とする。
 - ・ ケース 3,4 ではセル式護岸と重力式護岸について評価を行う。
 - ・ ケース 1,3 とケース 2,4 で厳密には護岸上部工高さが 5cm 異なるが、その差による外部被ばく線量への影響は小さいものと仮定し、評価体系上、護岸上部工高さは 0.3m で統一した。
 - ・ ケース 1 と 2 及びケース 3 と 4 の評価体系は同一とする。

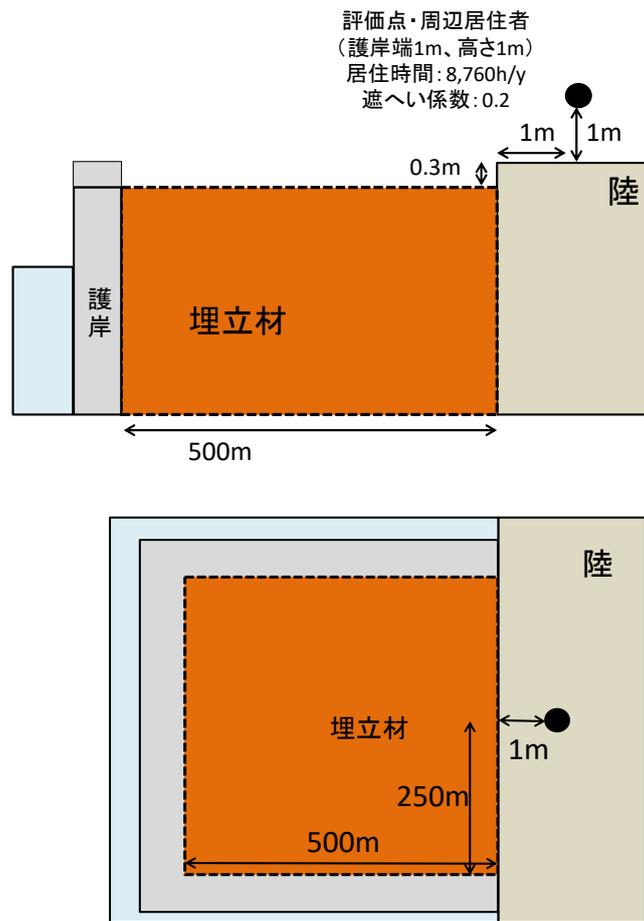


図 A.1-24 周辺居住の評価体系 (ケース 1,2)
 (上: 断面図、下: 上から見た図)

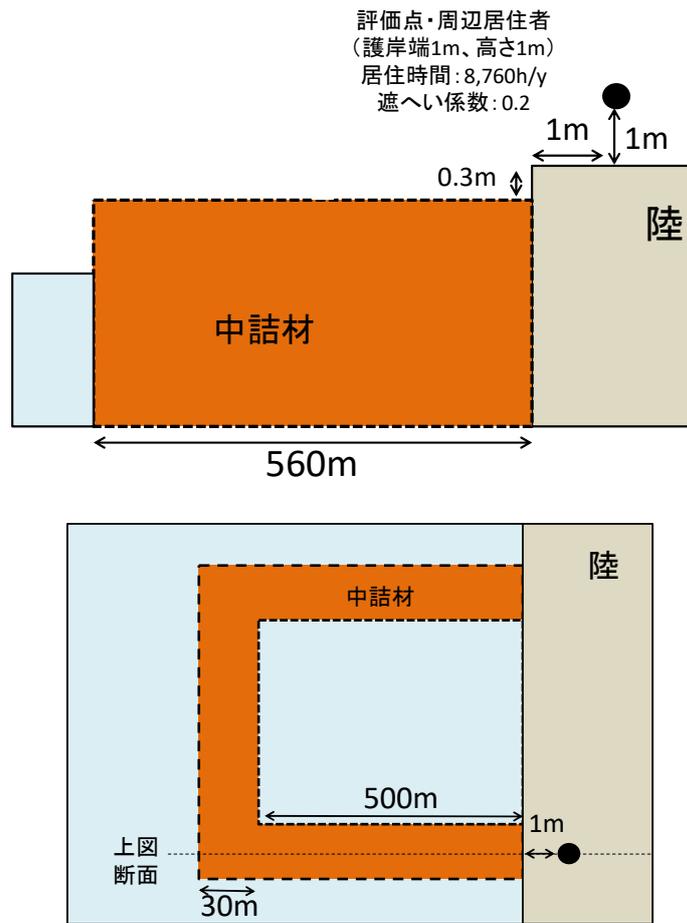


図 A.1-25 周辺居住の評価体系 (ケース 3,4) セル式護岸の場合
 (上: 断面図、下: 上から見た図)

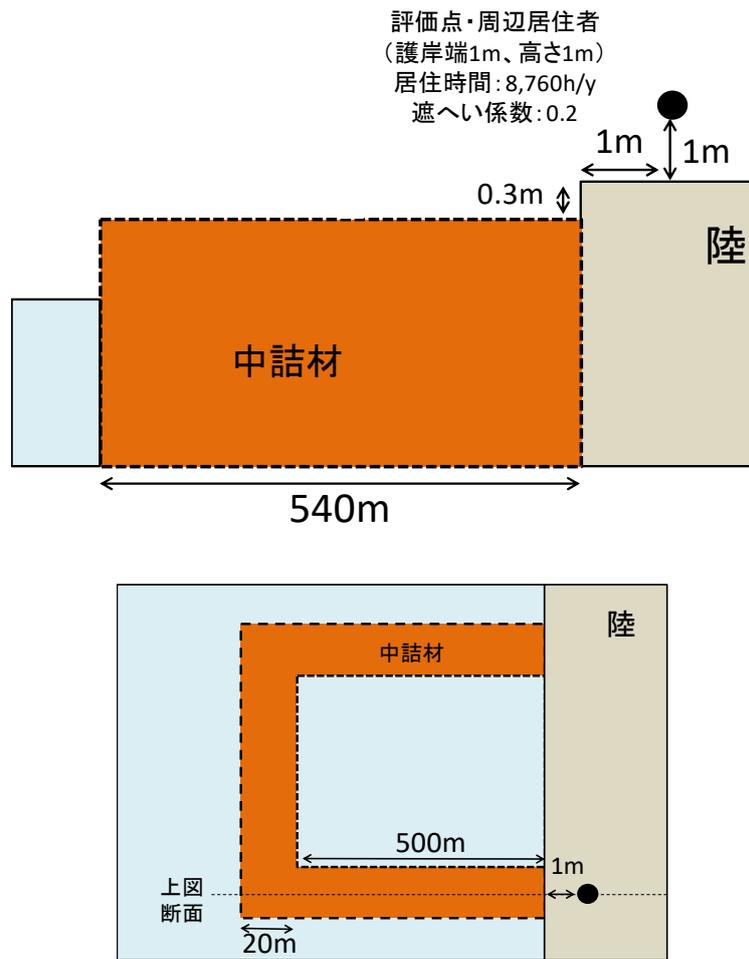


図 A.1-26 周辺居住の評価体系 (ケース 3,4) 重力式護岸の場合
 (上: 断面図、下: 上から見た図)

- 土砂投入による海洋への核種流出
 - ・施工により海洋へ核種が流出することを想定する。
 - ・海洋へ流出した核種からの公衆の被ばくを評価する。
- ・経路 No.27～28 (海産物摂取)
 - ・施工時に海洋へ流出した核種を体内に濃縮した海産物を摂取することによる公衆の被ばくを評価する。
- ・経路 No.29 (海岸活動)
 - ・施工時に海洋へ流出した核種と分配平衡した海岸砂からの外部被ばくを評価。
 - ・評価体系はクリアランスレベル評価⁷と同様とする。

・経路 No.30～32（浚渫作業）（図 A.1-27）

- ・浚渫作業者が、核種が付着した浚渫土から被ばくすることを想定する。
- ・浚渫土中の核種濃度は、生物擾乱層と拡散層の濃度が高い方を用いて設定する。
浚渫土中の核種濃度は、浚渫土が乾燥し核種全てが土砂に付着していることを想定して、生物擾乱層中の核種量を生物擾乱層中の土砂質量で（生物擾乱層中に体積割合 4 割で存在）割ることで算出する。
- ・浚渫船に積載可能な浚渫土の量は事例調査⁷から、25m×10m×3m とする。
- ・評価点は、甲板での作業を想定して、線源端、高さ 1m とする。

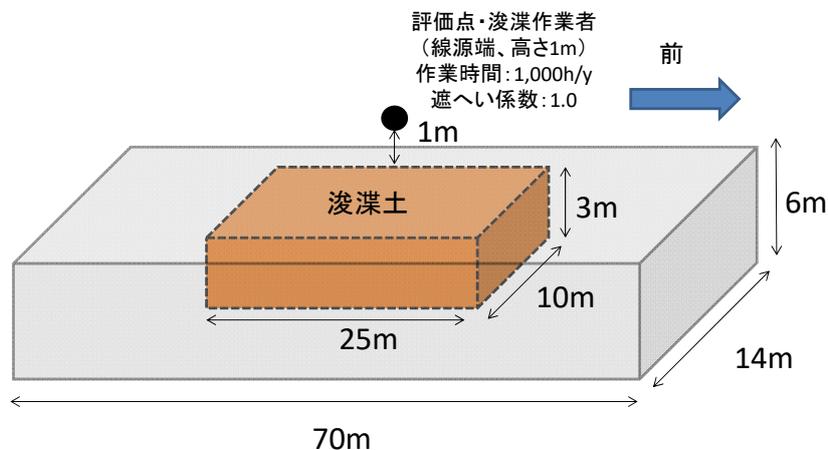


図 A.1-27 浚渫作業の評価体系

●埋立地完成後

・経路 No.33（草刈作業）（図 A.1-28、図 A.1-29、図 A.1-30）

- ・ケース 1 及びケース 3 について評価。
- ・評価点は、ケース 1 において埋立地中央、高さ 1m、ケース 3 において草刈作業は覆土上のみで行われると想定し覆土端、高さ 1m とする。
- ・ケース 3 ではセル式護岸と重力式護岸について評価を行う。

・経路 No.34～35（緑地公園の利用）（図 A.1-28、図 A.1-29、図 A.1-30）

- ・ケース 1 及びケース 3 について評価。
- ・評価点は、ケース 1 は埋立地中央、高さ 1m、ケース 3 は護岸屈曲部、高さ 1m とする。
- ・ケース 3 ではセル式護岸と重力式護岸について評価を行う。

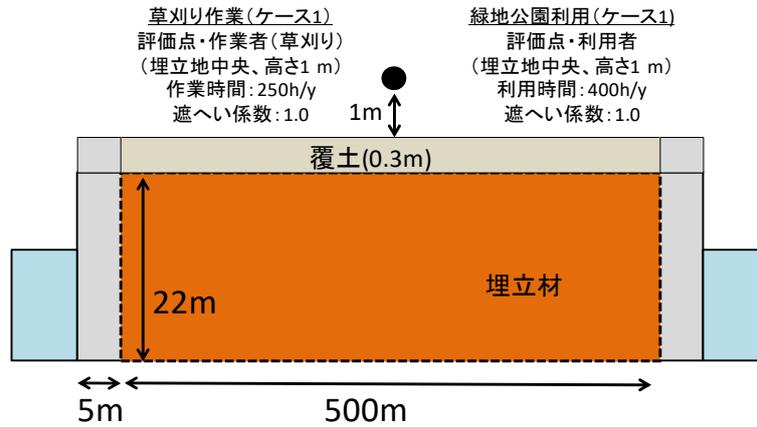


図 A.1-28 草刈作業、緑地公園の利用の評価体系 (ケース 1)

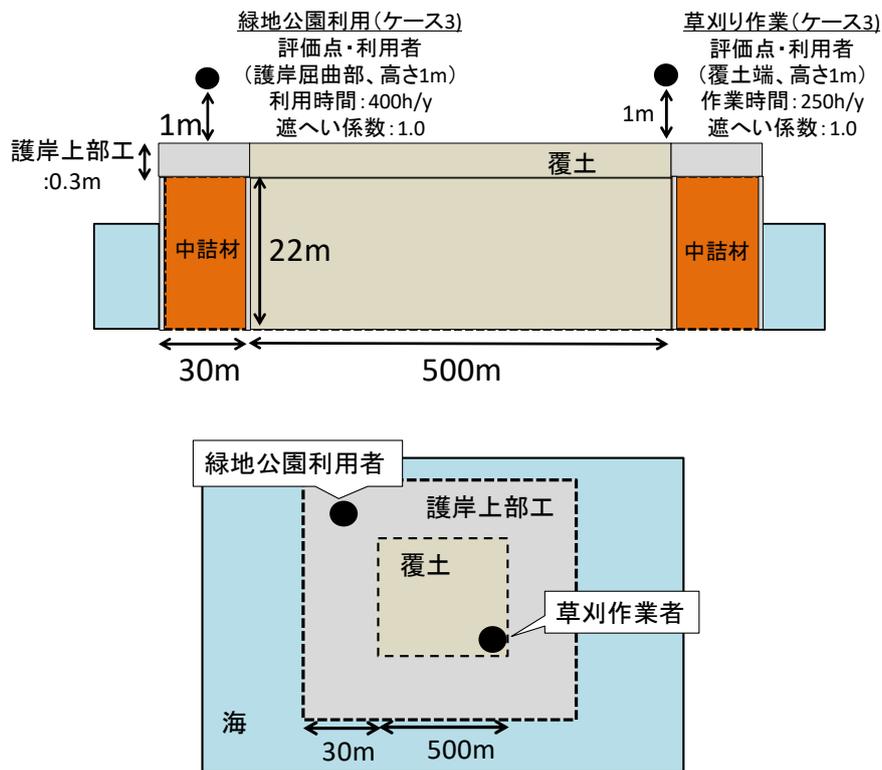


図 A.1-29 草刈作業、緑地公園の利用の評価体系 (ケース 3) セル式護岸の場合
(上: 断面図、下: 上から見た図)

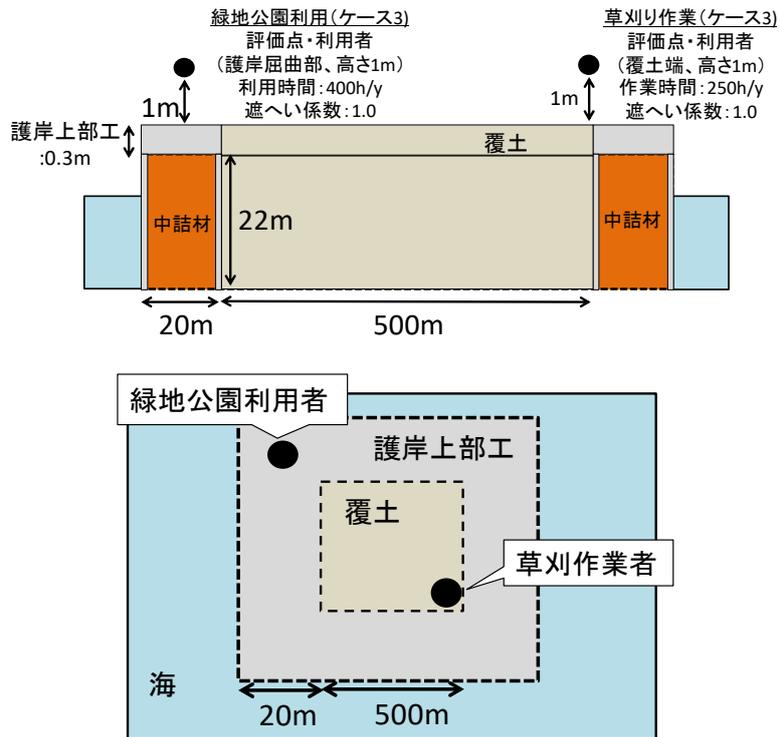


図 A.1-30 草刈作業、緑地公園の利用の評価体系（ケース3）重力式護岸の場合
（上：断面図、下：上から見た図）

- ・ 経路 No.36（コンテナターミナル利用）（図 A.1-31、図 A.1-32、図 A.1-33）
 - ・ ケース 2 及びケース 4 について評価。
 - ・ 評価点は、ケース 2 は埋立地中央、高さ 1m、ケース 4 は護岸屈曲部、高さ 1m とする。
 - ・ ケース 4 ではセル式護岸と重力式護岸について評価を行う。

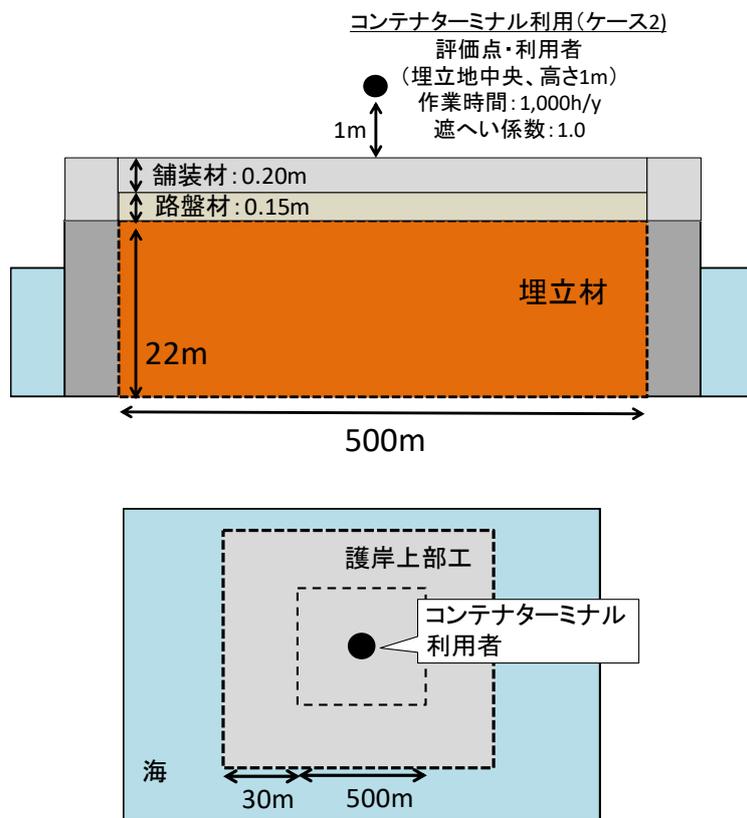


図 A.1-31 コンテナターミナルの利用の評価体系 (ケース2)
 (上: 断面図、下: 上から見た図)

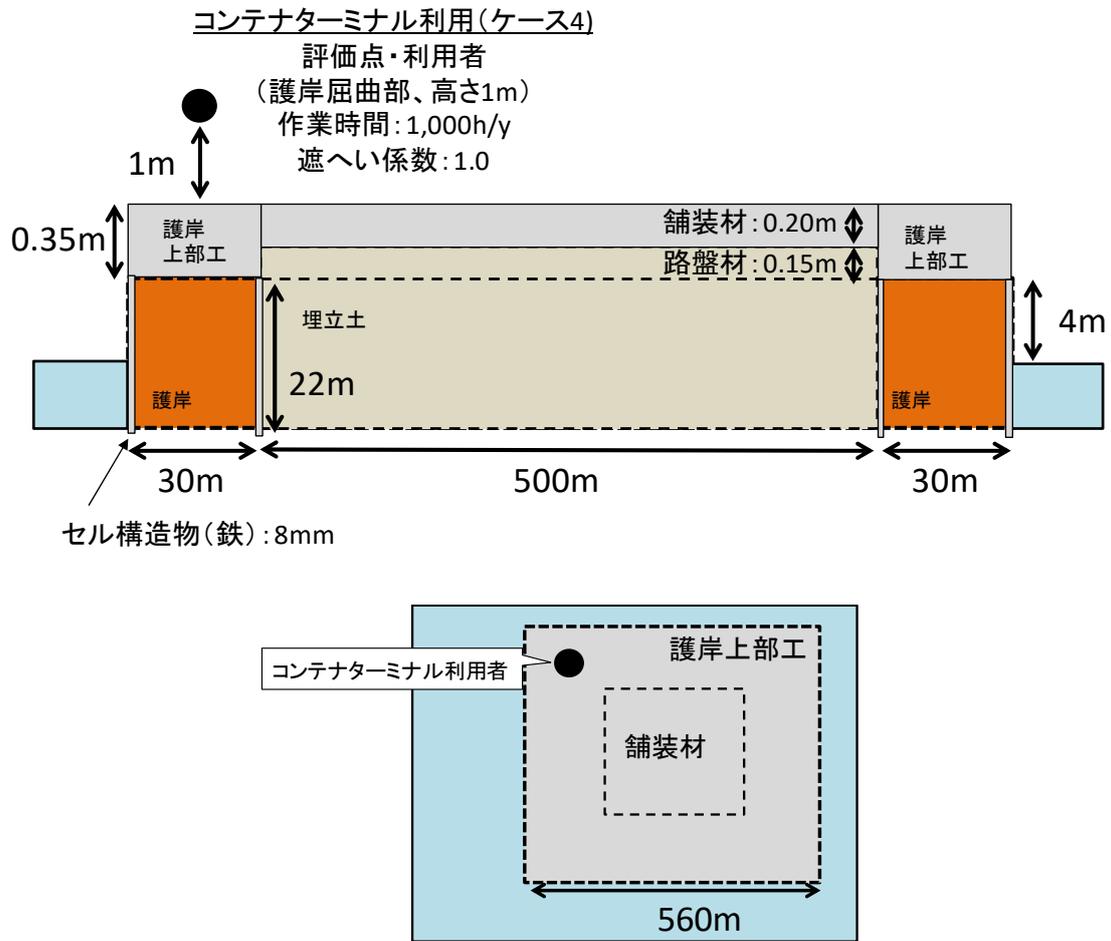


図 A.1-32 コンテナターミナルの利用の評価体系 (ケース4) セル式護岸の場合
 (上: 断面図、下: 上から見た図)

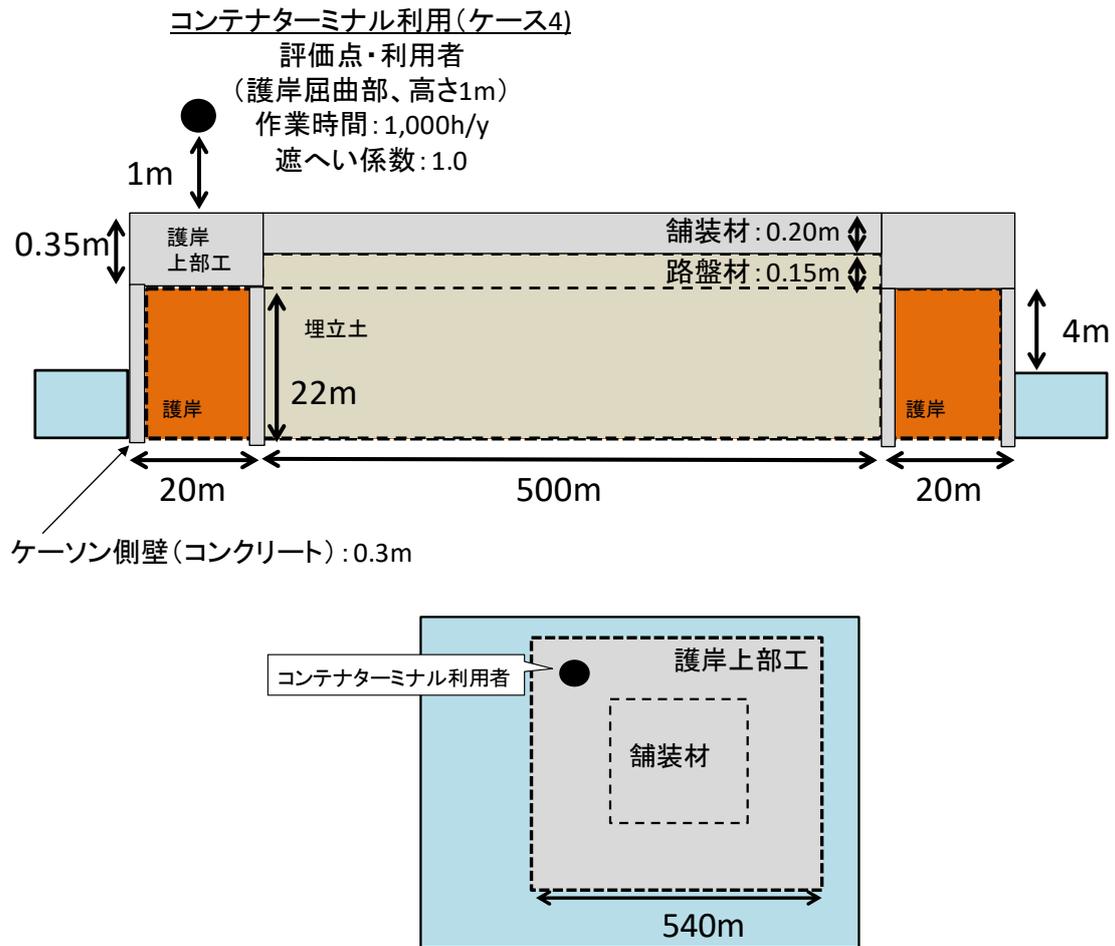


図 A.1-33 コンテナターミナルの利用の評価体系(ケース4)重力式護岸の場合
 (上:断面図、下:上から見た図)

・経路 No.37~38 (周辺居住)

- ・評価体系は No.23,25 に覆土・舗装・護岸上部工による遮へいを考慮したものとする。
- ・埋立材・中詰材上面には、ケース1は覆土0.3m、ケース2は路盤材0.15m+舗装材0.2m、ケース3は護岸上部工0.3m、ケース4は護岸上部工0.35mが施される。
- ・ケース1,2の評価点は No.23,25 と同じとする。ケース3,4は護岸側面からの影響を受けやすくなるため、岸壁からの距離1m、護岸側面から5mの位置の高さ1mとする。護岸側面からの距離は、護岸側面からの距離ごとに複数の評価点を取り被ばく線量が最大となる点から設定した。
- ・セル式護岸の護岸幅は30m、護岸側面の遮へいとして8mm鉄板を設定(図A.1-34)。
- ・重力式護岸の護岸幅は20m、護岸側面の遮へいとして0.3mのコンクリートを設定(図A.1-35)。

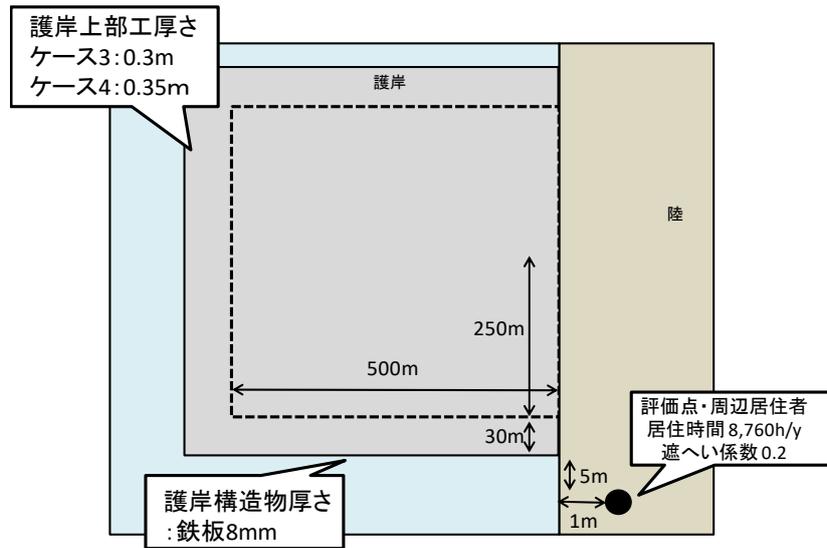


図 A.1-34 周辺居住の評価体系（ケース 3,4、上から見た図）セル式護岸の場合

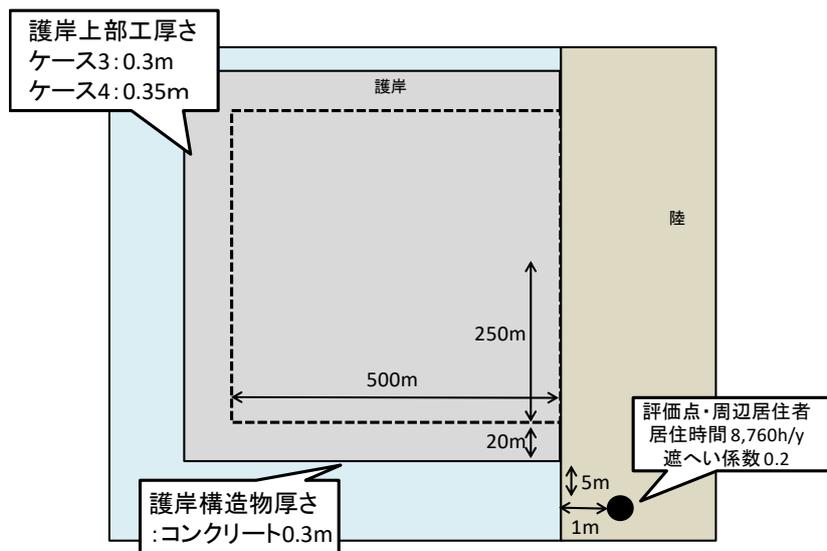


図 A.1-35 周辺居住の評価体系（ケース 3,4、上から見た図）重力式護岸の場合

●地下水移行（海洋への移行）

- ・評価は保守的に施工期間を 0 年間として、供用開始時を評価上の 0 年目（福島第一原子力発電所事故から 5 年後）とする（平成 28 年 3 月時点の核種存在比 Cs-134:Cs-137=0.209:1）。
- ・施工期間中に流出した核種量を考慮し、施工完了時の核種濃度を供用時の初期値として与える。
- ・浸透水による移行経路として、水平方向の地下水が卓越し護岸を透過する場合と鉛直

方向の地下水が卓越し帯水層を移行する場合を想定する。

- ・本評価では、埋立材・中詰材に使用される再生資材へのCsの収着を考慮した分配係数モデルを用い、地下水移行に係る全経路を評価した（分配係数モデルについては「A.1.1 地下水移行経路の被ばく評価方法」参照）。
- ・経路 No. 39～44（海洋への移行）（図 A.1-36）
 - ・埋立材・中詰材から核種が護岸を透過若しくは帯水層を移行し海洋へ流出することを想定。
 - ・埋立材・中詰材からの核種の流出は分配係数モデルを用いて評価するとし、埋立材から核種が流出する際の護岸による流出の遅延及び中詰材から核種が流出する際の護岸構造物による流出の遅延は無視した。
 - ・経路 No.39～44 は経路 No.27～32 と同様の項目を評価した。
- 地下水移行（井戸水利用）
 - ・埋立材・中詰材と帯水層の間には「不透水層」があるが、本評価ではこれらの影響は無視し、埋立材・中詰材の真下に帯水層があるとした。
 - ・本評価では、埋立材・中詰材に使用される再生資材へのCsの収着を考慮した分配係数モデルを用い、地下水移行に係る全経路を評価した。
 - ・経路 No.45～56（井戸水利用）（図 A.1-36）
 - ・埋立材・中詰材から核種が流出し、井戸水へ移行することを想定。
 - ・埋立材・中詰材の下端から井戸までの距離は保守的に0mとした。

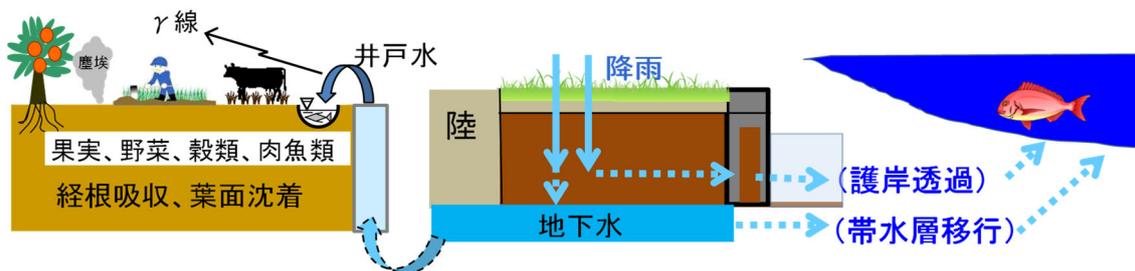


図 A.1-36 地下水移行概念図（海洋への移行と井戸水への移行）

-
- 1 日本道路協会. 道路橋示方書 (I 共通編)・同解説. 平成 2 年
 - 2 松浦企業株式会社 HP. http://www.matuura.com/profile/pdf/matsuura_profile.pdf
 - 3 海洋開発興業 HP. 土運船一覧 KDB-3502 一般配置
<http://www.kaiyokaiatsu.com/barge-list.html>
 - 4 聖朋海運株式会社 HP. 所有船 聖嶺 (一般配置図) <http://www.syoho.co.jp/ship/>
 - 5 いすゞ自動車 HP. 主要緒元・車両外観図 大型車ダンプ 6 × 4
<http://www.isuzu.co.jp/cv/data/giga/05shogen.html>
 - 6 いすゞ自動車 HP. 緒元表 平ボディ完成車・GVW11 トン
http://www.isuzu.co.jp/product/forward_post/variation/pdf/2017_11tsyogen_HP.pdf
 - 7 東京都港湾局 HP. ～新しゅんせつ船 海竜～
<http://www.kouwan.metro.tokyo.jp/pamphlet/kairyuu.pdf>

A.1.4 海洋中における核種移行

海洋中における核種の移行を、Sediment model¹を参考に本研究で拡張した以下の式により評価する。

$$\begin{aligned} \text{海洋層} \quad \frac{d}{dt} I_0^i &= -(\lambda_{d0,1}^i + \lambda_{s0,2} + \lambda_{a0,6} + \lambda^i) I_0^i + \lambda_{d1,0}^i I_1^i \\ &\quad + \lambda^{i-1} I_0^{i-1} + Q_0^i \end{aligned} \quad \text{数式 A.1-20}$$

$$\begin{aligned} \text{境界層 (水相)} \quad \frac{d}{dt} I_1^i &= \lambda_{d0,1}^i I_0^i - (\lambda_{d1,0}^i + \lambda_{d1,3}^i + k_1^i + \lambda^i) I_1^i + k_2 I_2^i \\ &\quad + \lambda_{d3,1}^i I_3^i + \lambda^{i-1} I_1^{i-1} + Q_1^i \end{aligned} \quad \text{数式 A.1-21}$$

$$\begin{aligned} \text{境界層 (粒子相)} \quad \frac{d}{dt} I_2^i &= \lambda_{s0,2} I_0^i + k_1^i I_1^i - (\lambda_{b2,3} + \lambda_{s2,3} + k_2 + \lambda^i) I_2^i \\ &\quad + \lambda_{b3,2} I_3^i + \lambda^{i-1} I_2^{i-1} \end{aligned} \quad \text{数式 A.1-22}$$

$$\begin{aligned} \text{生物擾乱層} \quad \frac{d}{dt} I_3^i &= \lambda_{d1,3}^i I_1^i + (\lambda_{b2,3} + \lambda_{s2,3}) I_2^i \\ &\quad - (\lambda_{d3,1}^i + \lambda_{b3,2} + \lambda_{d3,4}^i + \lambda_{s3,4} + \lambda^i) I_3^i \\ &\quad + \lambda_{d4,3}^i I_4^i + \lambda^{i-1} I_3^{i-1} + Q_2^i \end{aligned} \quad \text{数式 A.1-23}$$

$$\begin{aligned} \text{拡散層} \quad \frac{d}{dt} I_4^i &= (\lambda_{d3,4}^i + \lambda_{s3,4}) I_3^i - (\lambda_{d4,3}^i + \lambda_{s4,5} + \lambda^i) I_4^i \\ &\quad + \lambda^{i-1} I_4^{i-1} \end{aligned} \quad \text{数式 A.1-24}$$

ここで、

- I_0^i 海洋層中の核種 i の量(Bq)
- I_1^i 境界層 (水相) 中の核種 i の量(Bq)
- I_2^i 境界層 (粒子相) 中の核種 i の量(Bq)
- I_3^i 生物擾乱層中の核種 i の量(Bq)
- I_4^i 拡散層中の核種 i の量(Bq)
- Q_0^i 海洋層への溶存した核種 i の流入(Bq/y)
- Q_1^i 境界層 (水相) への溶存した核種 i の流入(Bq/y)
- Q_2^i 生物擾乱層への溶存した核種 i の流入(Bq/y)
- λ^i 核種 i の崩壊定数(y⁻¹)

- $\lambda_{a0,6}$ 海水交換による外洋への核種の移行率 (y^{-1})
- $\lambda_{d0,1}$ 海洋層から境界層（水相）への拡散による溶存した核種の移行率 (y^{-1})
- $\lambda_{d1,0}$ 境界層（水相）から海洋水への拡散による溶存した核種の移行率 (y^{-1})
- $\lambda_{s0,2}$ 海洋層から境界層（粒子相）への沈降による粒子に付着した核種の移行率 (y^{-1})
- $\lambda_{d1,3}$ 境界層（水相）から生物擾乱層への拡散による溶存した核種の移行率 (y^{-1})
- $\lambda_{d3,1}$ 生物擾乱層から境界層（水相）への拡散による溶存した核種の移行率 (y^{-1})
- $\lambda_{d3,4}$ 生物擾乱層から拡散層への拡散による溶存した核種の移行率 (y^{-1})
- $\lambda_{d4,3}$ 拡散層から生物擾乱層への拡散による溶存した核種の移行率 (y^{-1})
- $\lambda_{s2,3}$ 境界層（粒子相）から生物擾乱層への埋没による粒子に付着した核種の移行率 (y^{-1})
- $\lambda_{s3,4}$ 生物擾乱層から拡散層への埋没による粒子に付着した核種の移行率 (y^{-1})
- $\lambda_{s4,5}$ 拡散層から深層への埋没による粒子に付着した核種の移行率 (y^{-1})
- $\lambda_{b2,3}$ 境界層（粒子相）から生物擾乱層への生物擾乱による粒子に付着した核種の移行率 (y^{-1})
- $\lambda_{b3,2}$ 生物擾乱層から境界層（粒子相）への生物擾乱による粒子に付着した核種の移行率 (y^{-1})
- k_1 海水相から粒子相への収着による移行率 (y^{-1})
- k_2 粒子相から海水相への脱着による移行率 (y^{-1})

である。

コンパートメント間の移行率は以下の式で求める。

$$\lambda_{a0,6} = n \quad \text{数式 A.1-25}$$

$$\lambda_{d0,1}^i = \frac{2K_{v0}^i}{z_0(z_0 + z_1)} \quad \text{数式 A.1-26}$$

$$\lambda_{d1,0}^i = \frac{2K_{v0}^i}{z_1(z_0 + z_1)} \quad \text{数式 A.1-27}$$

$$\lambda_{d1,3}^i = \frac{2K_v^i}{z_1(z_1 + z_3)} \quad \text{数式 A.1-28}$$

$$\lambda_{d3,1}^i = \frac{2K_v^i}{z_3(z_1 + z_3)} \cdot \frac{1}{k_3^i} \quad \text{数式 A.1-29}$$

$$\lambda_{d3,4}^i = \frac{2K_v^i}{z_3(z_3 + z_4)} \cdot \frac{1}{k_3^i} \quad \text{数式 A.1-30}$$

$$\lambda_{d4,3}^i = \frac{2K_v^i}{z_4(z_3 + z_4)} \cdot \frac{1}{k_4^i} \quad \text{数式 A.1-31}$$

$$\lambda_{s0,2} = \frac{Kd \cdot v_s \cdot S_S \cdot A}{V_0} + \frac{Kd \cdot v_L \cdot S_L \cdot A}{V_0} \quad \text{数式 A.1-32}$$

$$\lambda_{s2,3} = \frac{S}{z_2} \quad \text{数式 A.1-33}$$

$$\lambda_{s3,4}^i = \frac{S}{z_3} \cdot \frac{k_3^i - 1}{k_3^i} \quad \text{数式 A.1-34}$$

$$\lambda_{s4,5}^i = \frac{S}{z_4} \cdot \frac{k_4^i - 1}{k_4^i} \quad \text{数式 A.1-35}$$

$$\lambda_{b2,3} = \frac{2B}{z_2(z_2 + z_3)} \quad \text{数式 A.1-36}$$

$$\lambda_{b3,2}^i = \frac{2B}{z_3(z_2 + z_3)} \cdot \frac{k_3^i - 1}{k_3^i} \quad \text{数式 A.1-37}$$

$$k_1^i = k_2 K_d^i \sigma \quad \text{数式 A.1-38}$$

$$k_j^i = 1 + \frac{f_j}{1 - f_j} \rho K_d^i \quad (j = 3, 4) \quad \text{数式 A.1-39}$$

ここで、パラメーターは以下のとおりである。

- n 任意の数 (y^{-1})
- V_0 海洋層の体積 (m^3)
- z_0 海洋層の厚さ (m)
- z_1 境界層 (水相) の厚さ (m)
- z_2 境界層 (粒子相) の厚さ (m)
- z_3 生物擾乱層の厚さ (m)
- z_4 拡散層の厚さ (m)
- K_{v0} 拡散係数 ($m^2 y^{-1}$)
- K_v 間隙水中拡散係数 ($m^2 y^{-1}$)
- K_d セシウムの分配係数 ($m^3 kg^{-1}$)
- v_s 小粒子の沈降速度(m/y)

v_L	大粒子の沈降速度(m/y)
S_S	海洋層の小粒子濃度(kg/m ³)
S_L	海洋層の大粒子濃度(kg/m ³)
A	海洋層の面積(m ²)
B	生物擾乱係数 (m ² y ⁻¹)
S	堆積速度 (m y ⁻¹)
σ	浮遊している粒子の濃度 (kg m ⁻³)
k_2	脱着係数(y ⁻¹)
ρ	堆積物の真密度 (kg m ⁻³)
f_j	コンパートメント j において堆積物が占める体積割合(1-間隙率)

コンパートメント間の接続関係図を図 A.1-37 に示す。

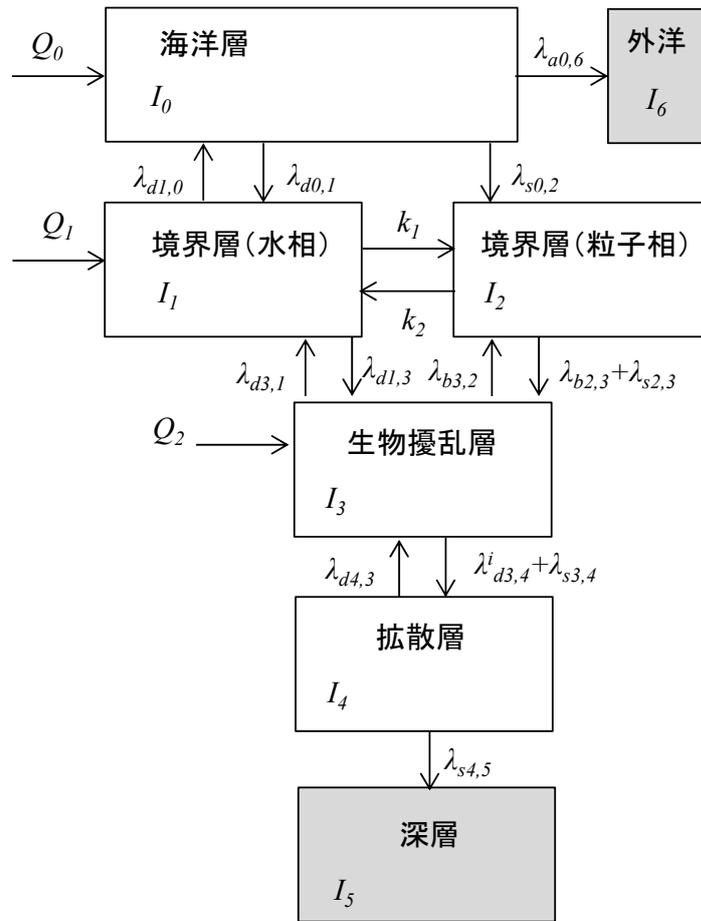


図 A.1-37 コンパートメント間の接続関係図 (外洋、深層は系外)

1 OECD/Nuclear Energy Agency. Review of the Continued Suitability of the Dumping site for Radioactive waste in the North-East Atlantic. OECD, Paris, 1985

A.1.5 施工時の核種流出量に関するパラメーター

施工時の核種流出量に関するパラメーターを表 A.1-4 に示す。

表 A.1-4 施工時の核種流出量に関するパラメーター

パラメーター名	単位	選定値	備考
1日の護岸内外の交換水量	m ³ /d	4.5E+05	護岸で囲まれた面積×1日の潮位差より算出。海面埋立地は3.1に示すとおり現存被ばく状況と計画被ばく状況を含むと考えられる行政区分(1F事故後の福島県が該当)内に造成すると想定し、潮位差は2015年の小名浜 ¹⁾ の平均最高潮位と平均最低潮位から求めた潮位差1.8mを用いた。
海水中に溶存した核種濃度	Bq/m ³	2.33E+03	再生資材中のCs濃度を単位濃度(1,000 Bq/kg)として分配係数の関係から算出。海水と土壌間の核種の分配なので、分配係数として表 A.1-5より海底土壌の分配係数430 L/kgを採用。
海水中の埋立材濃度	mg/L	2	水産用水基準第7版(2012年版) ²⁾ における「人為的に加えられる懸濁物質は2mg/L以下であること」という基準より設定。
埋立材投入作業期間	d	760	事例調査から求めた総施工期間3年間に占める投入作業の割合を標準歩掛 ¹⁾ から求め作業期間を25ヶ月(760日)と推定した。
護岸構造物から流出する海水量(セル式護岸)	m ³	5.24E+05	セル1本から流出する海水量×セル本数により算出。セル1本から流出する海水量は、水深18mの海に直径30m、高さ22mのセルを設置し、空隙率0.35の中詰材を投入した際に溢れ出る水量を計算して7.28E+03 m ³ とする。セル本数は一辺500mの埋立土投入範囲を直径30mのセルで囲む場合の本数を計算し72本。
護岸構造物から流出する海水量(重力式護岸)	m ³	4.16E+05	水深18mの海に幅20m、高さ22m、外壁厚さ30cmのケーソンを設置し、空隙率0.35の中詰材を投入した際に溢れ出る水量を計算して4.16E+05 m ³ とする。重力式護岸はコンクリートの函であるケーソンを並べて造成されるが、保守的に隣接するケーソンとの間の壁面は無視した。
護岸構造物内の海水中の中詰材濃度	mg/L	800	水槽に土砂を投入したときの粒子濃度の観測実験 ³⁾ における観測最大値。
中詰材投入作業期間	d	183	事例調査から求めた総施工期間3年間に占める投入作業の割合を標準歩掛 ¹⁾ から求め作業期間を6ヶ月(183日)と推定した。

-
- 1 気象庁 HP. 各年の潮汐 2015 年の小名浜の潮汐概況
<http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/tide/gaikyo/nenindex.php>
 - 2 日本水産資源保護協会. 水産用水基準第 7 版. 2012
 - 3 内山一郎、国栖広志. 埋立工事等における汚濁拡散防止技術の開発－超大型汚濁防止枠船を用いた土砂投入工法－. 五洋建設技術年報 Vol.29, 1999

A.1.6 施工時の核種移行評価結果

施工時に流出した Cs-134 の核種移行評価結果を図 A.1-38 から図 A.1-48 に示す。施工時に流出した Cs-137 の核種移行評価結果を図 A.1-49 から図 A.1-59 に示す。

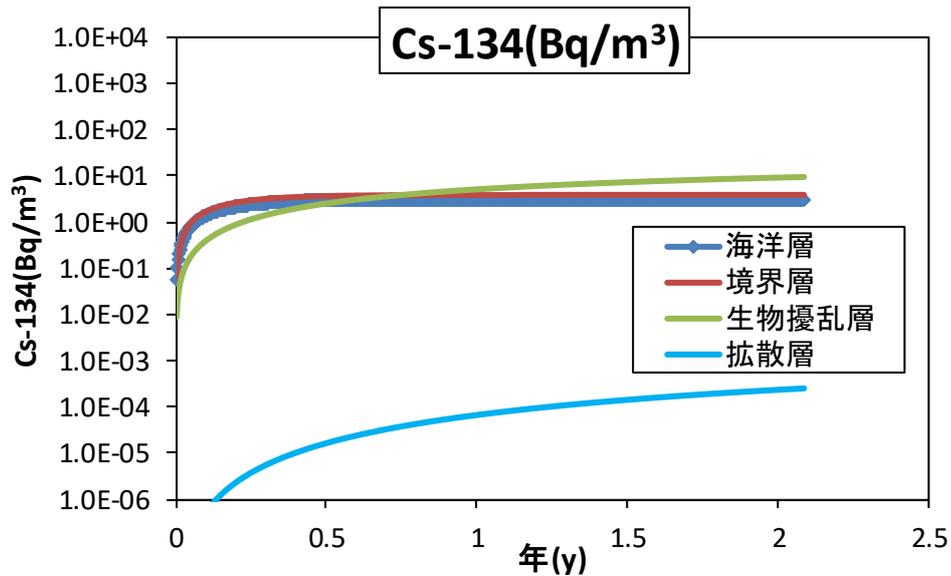


図 A.1-38 ケース 1,2 護岸の一部を開けて造成した場合 (Cs-134)

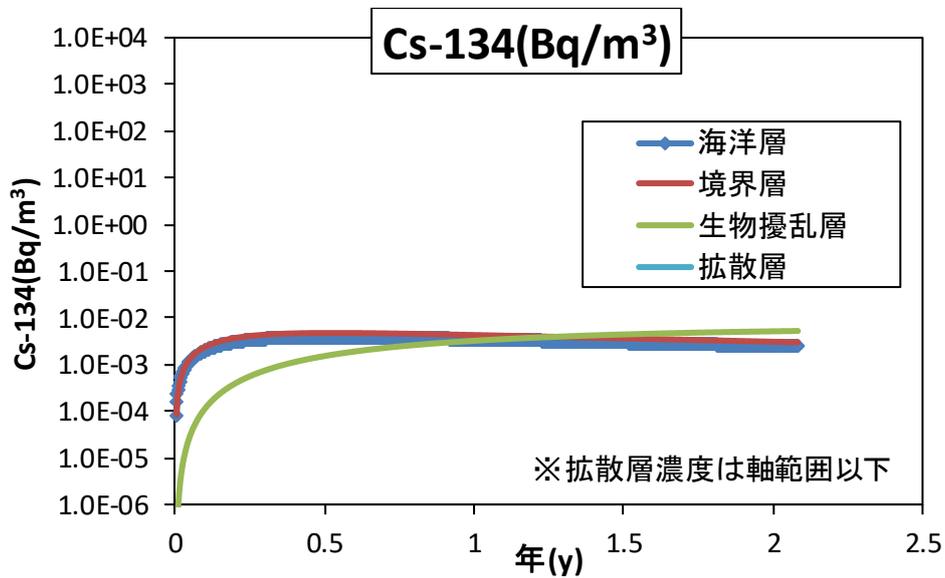


図 A.1-39 ケース 1,2 護岸を閉じて造成した場合 護岸透過 (Cs-134)

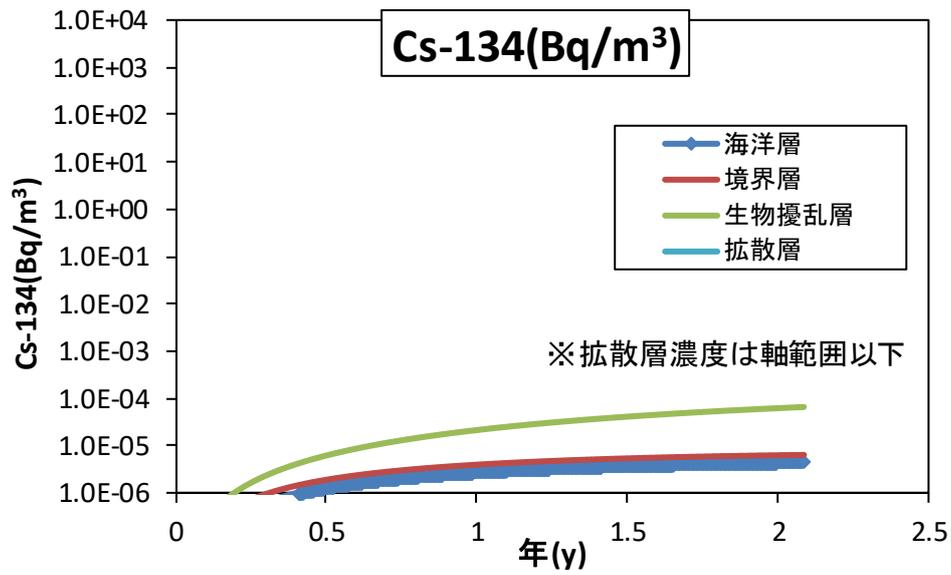


図 A.1-40 ケース 1,2 護岸を閉じて造成した場合 帯水層移行 (Cs-134)

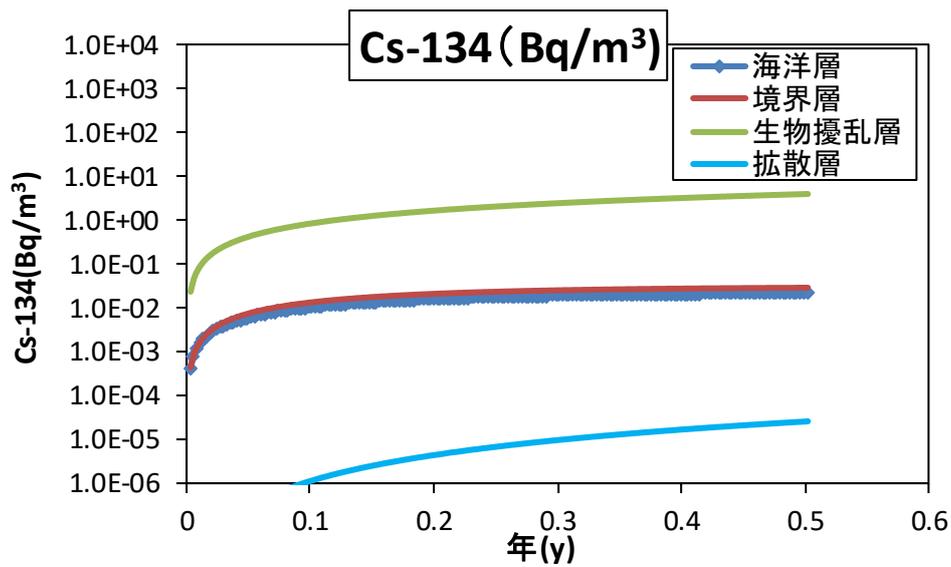


図 A.1-41 ケース 3,4 土砂投入により海水流出を想定した場合 護岸透過 (Cs-134)、セル式護岸

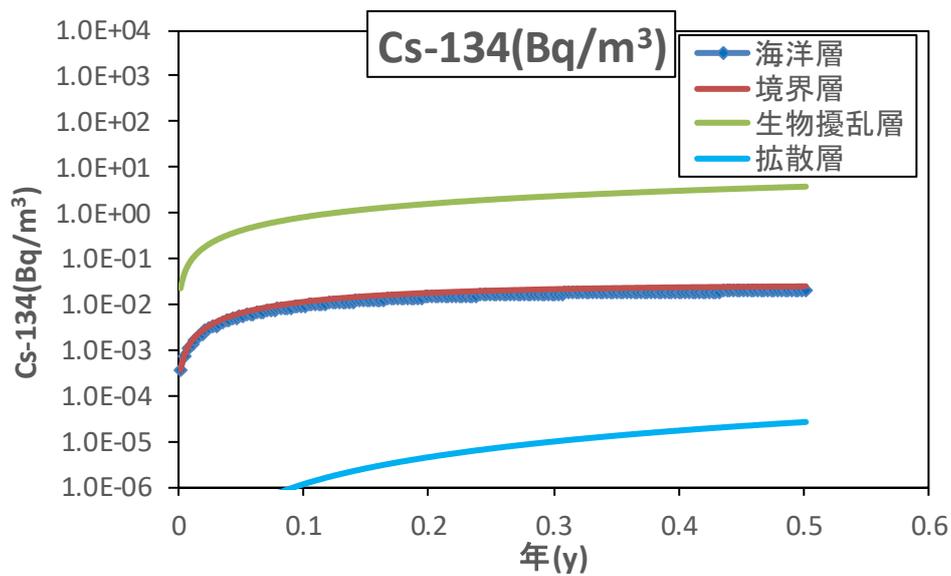


図 A.1-42 ケース 3,4 土砂投入により海水流出を想定した場合 帯水層移行 (Cs-134)、セル式護岸

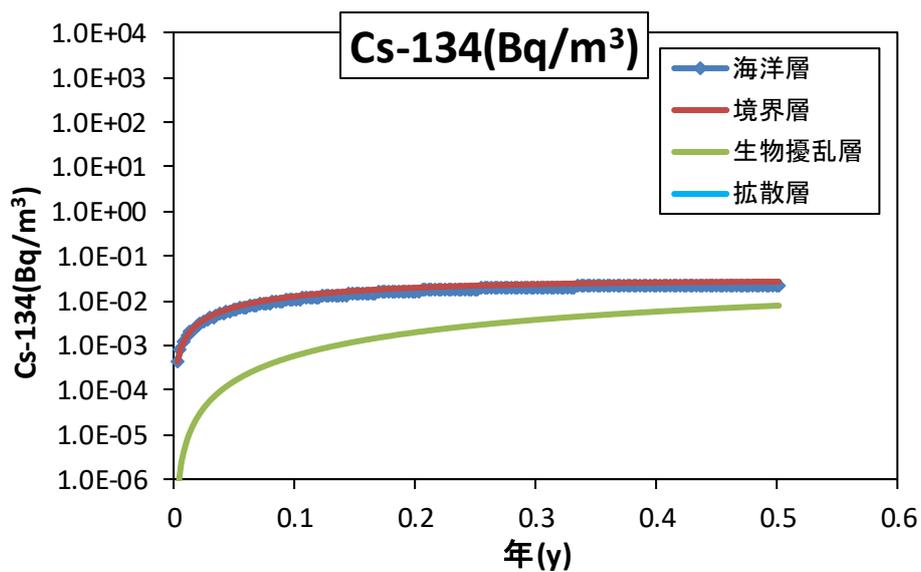


図 A.1-43 ケース 3,4 ポンプにより粒子流出を抑制した場合 護岸透過(Cs-134)、セル式護岸

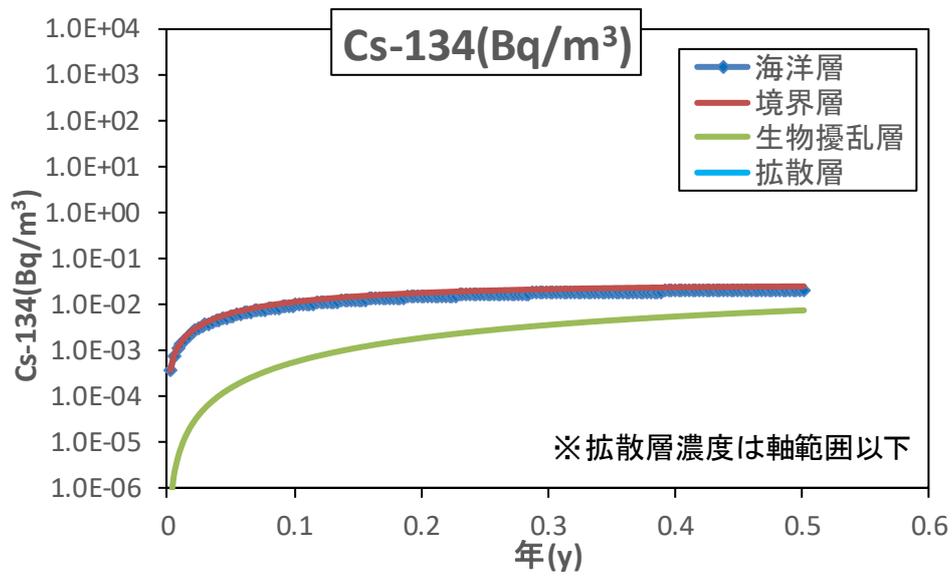


図 A.1-44 ケース 3,4 ポンプにより粒子流出を抑制した場合 帯水層移行(Cs-134)、セル式護岸

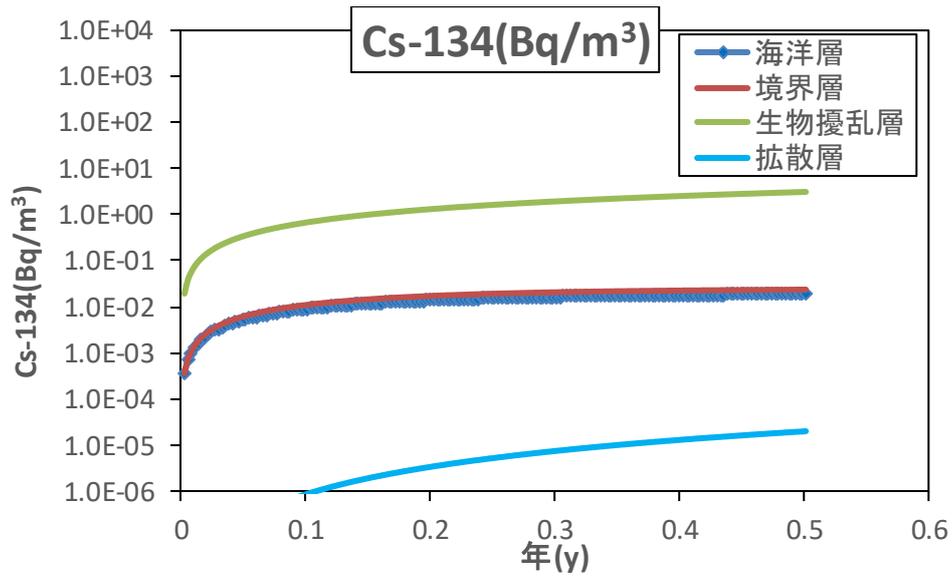


図 A.1-45 ケース 3,4 土砂投入により海水流出を想定した場合 護岸透過 (Cs-134)、重力式護岸

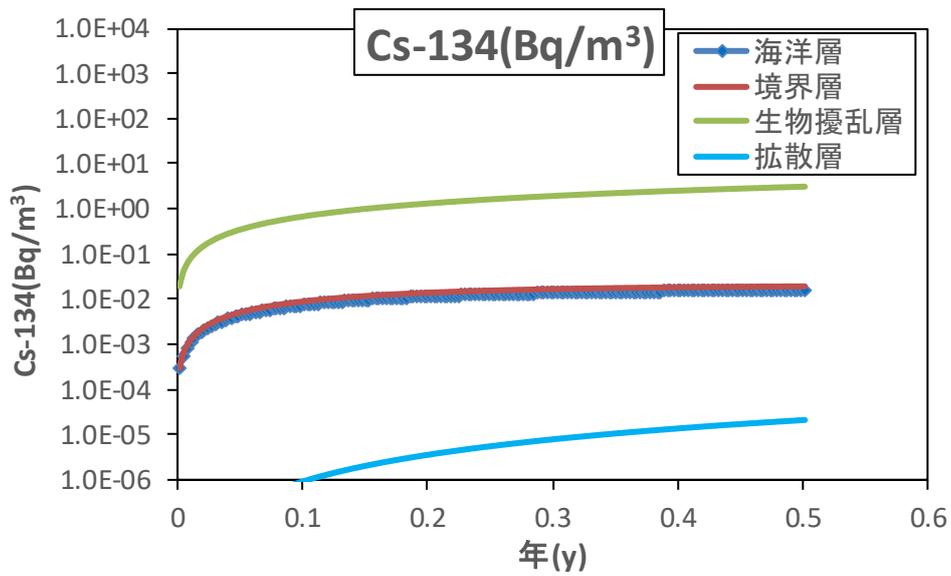


図 A.1-46 ケース 3,4 土砂投入により海水流出を想定した場合 帯水層移行 (Cs-134)、重力式護岸

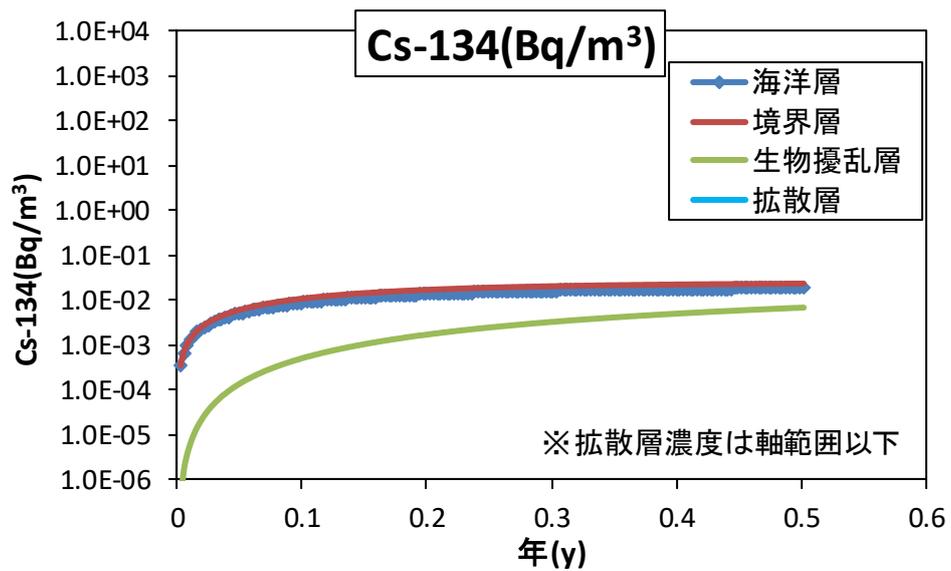


図 A.1-47 ケース 3,4 ポンプにより粒子流出を抑制した場合 護岸透過(Cs-134)、重力式護岸

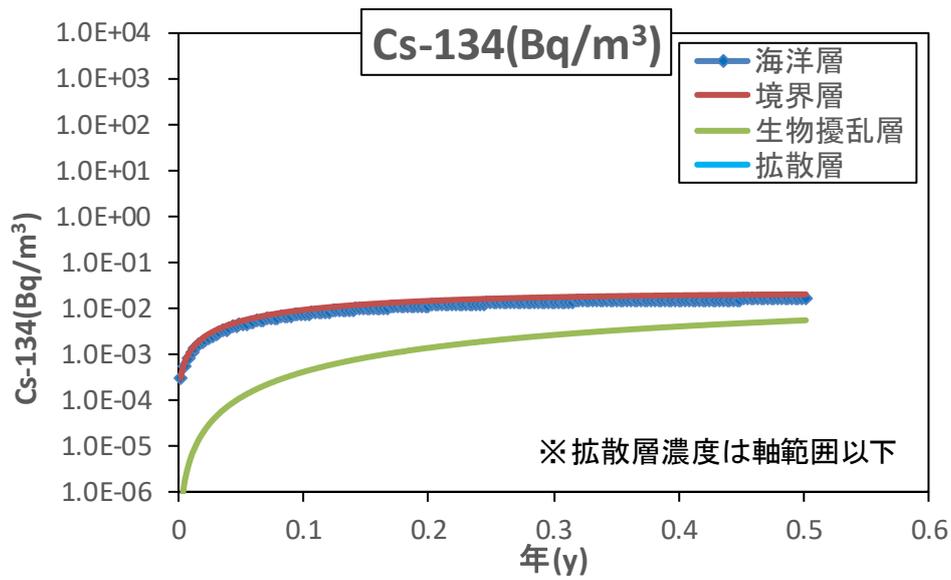


図 A.1-48 ケース 3,4 ポンプにより粒子流出を抑制した場合 帯水層移行(Cs-134)、重力式護岸

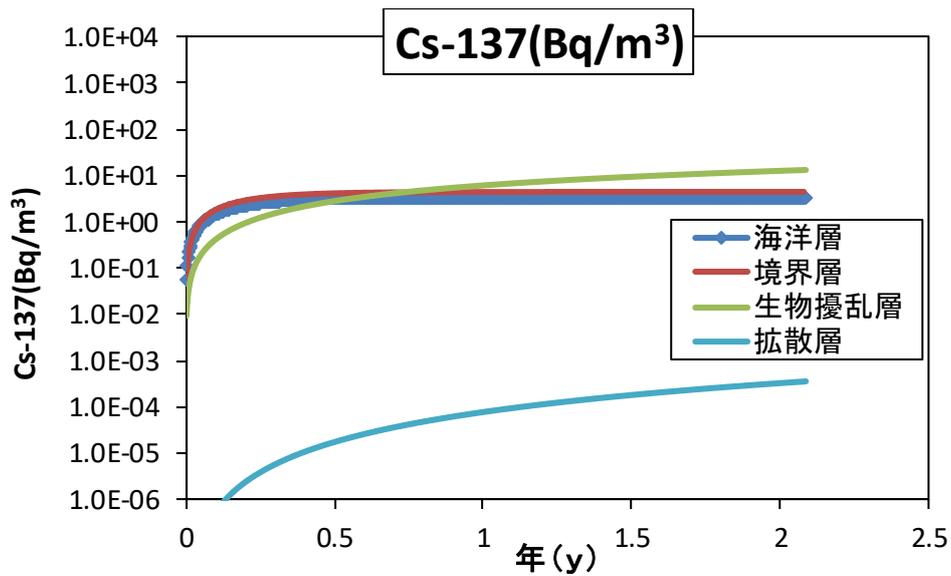


図 A.1-49 ケース 1,2 護岸の一部を開けて造成した場合 (Cs-137)

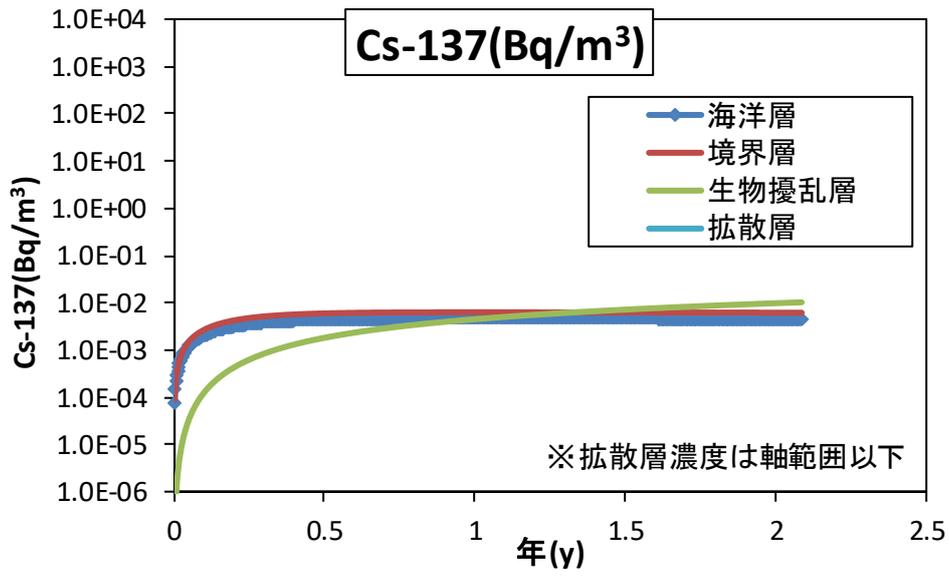


図 A.1-50 ケース 1,2 護岸を閉じて造成した場合 護岸透過 (Cs-137)

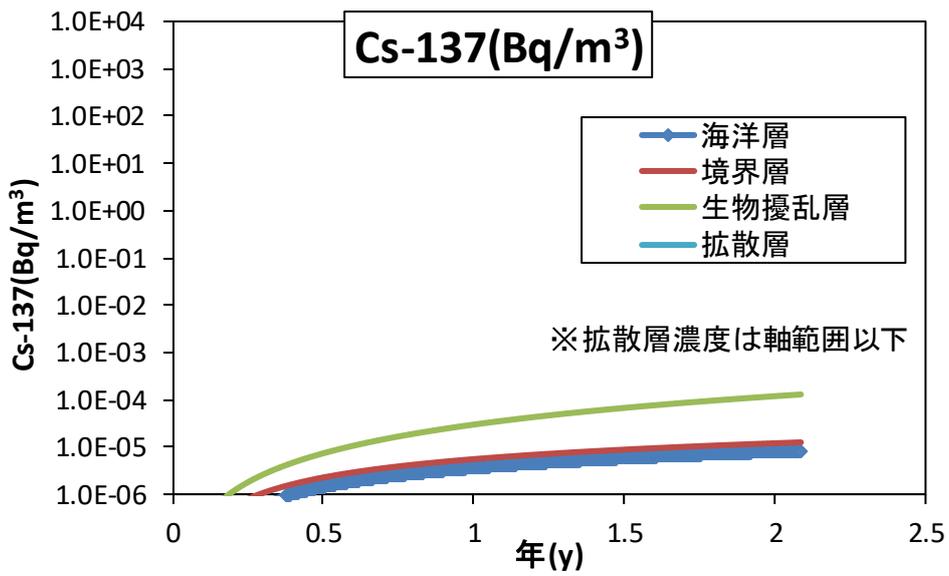


図 A.1-51 ケース 1,2 護岸を閉じて造成した場合 帯水層移行 (Cs-137)

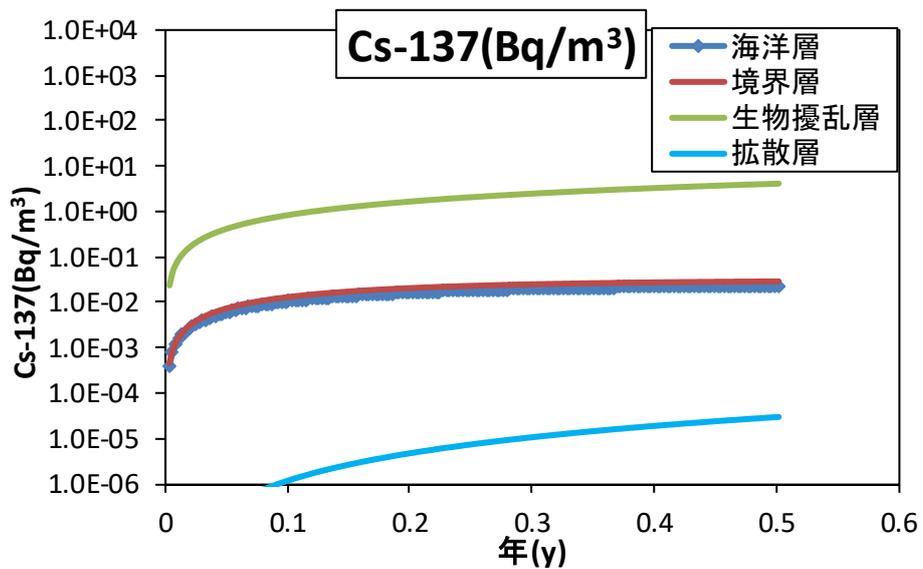


図 A.1-52 ケース 3,4 土砂投入により海水流出を想定した場合 護岸透過 (Cs-137)、セル式護岸

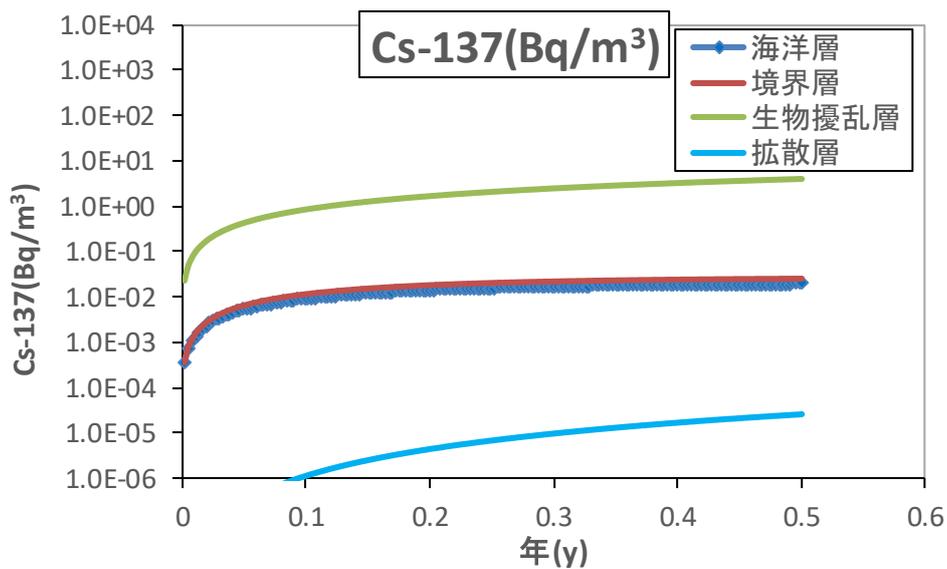


図 A.1-53 ケース 3,4 土砂投入により海水流出を想定した場合 帯水層移行 (Cs-137)、セル式護岸

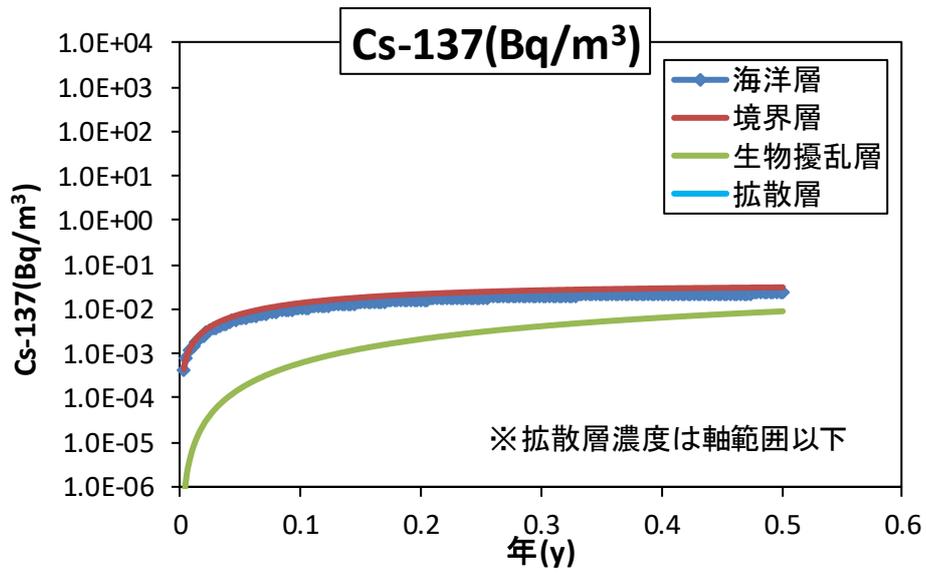


図 A.1-54 ケース 3,4 ポンプにより粒子流出を抑制した場合 護岸透過 (Cs-137)、セル式護岸

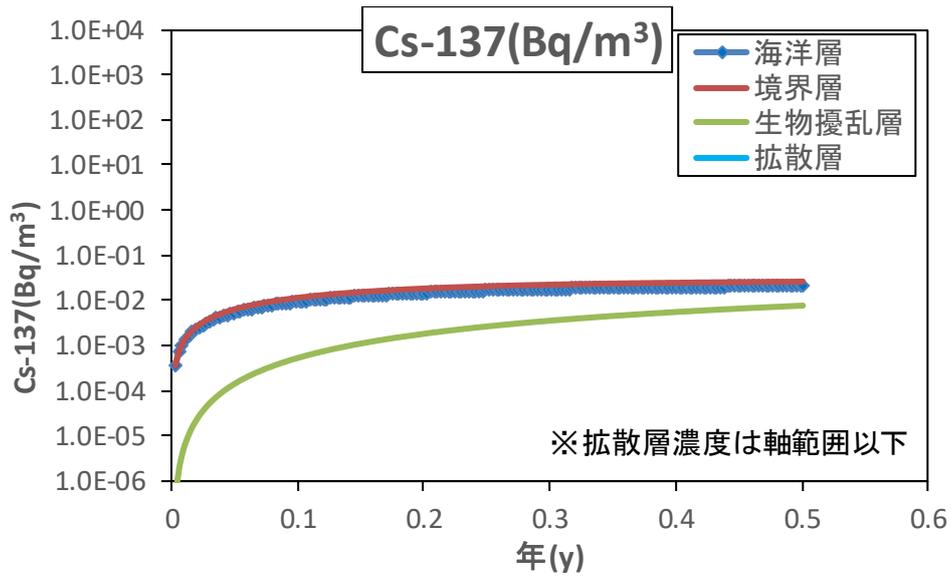


図 A.1-55 ケース 3,4 ポンプにより粒子流出を抑制した場合 帯水層移行 (Cs-137)、セル式護岸

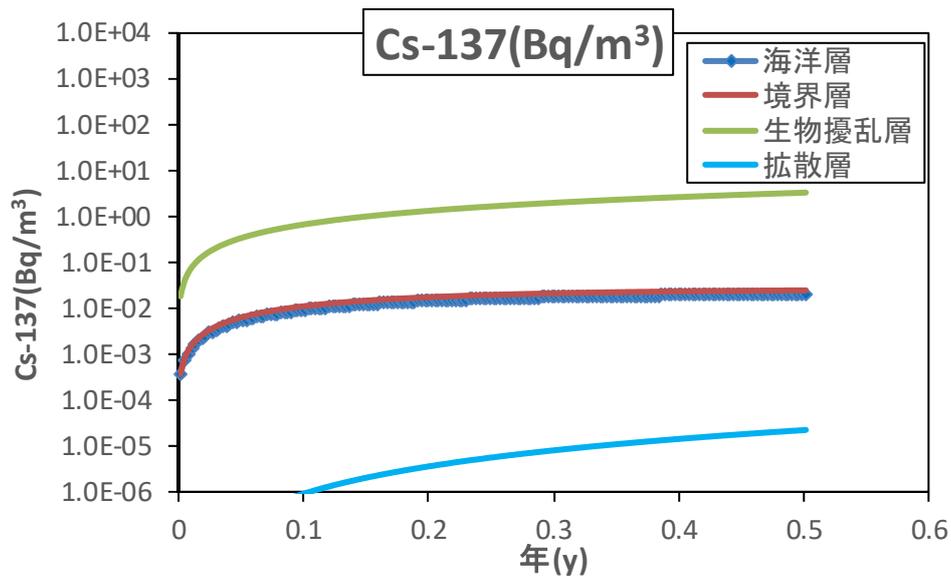


図 A.1-56 ケース 3,4 土砂投入により海水流出を想定した場合 護岸透過 (Cs-137)、重力式護岸

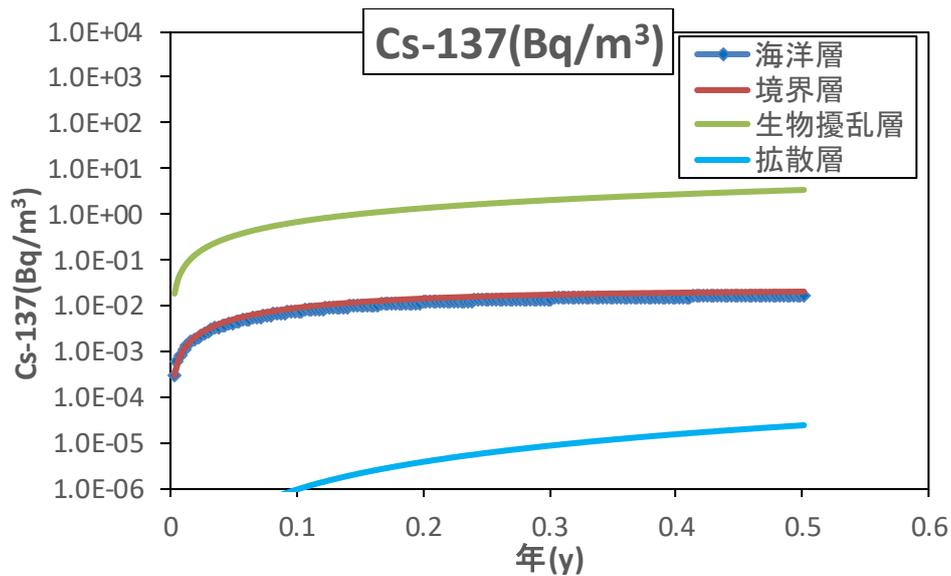


図 A.1-57 ケース 3,4 土砂投入により海水流出を想定した場合 帯水層移行 (Cs-137)、重力式護岸

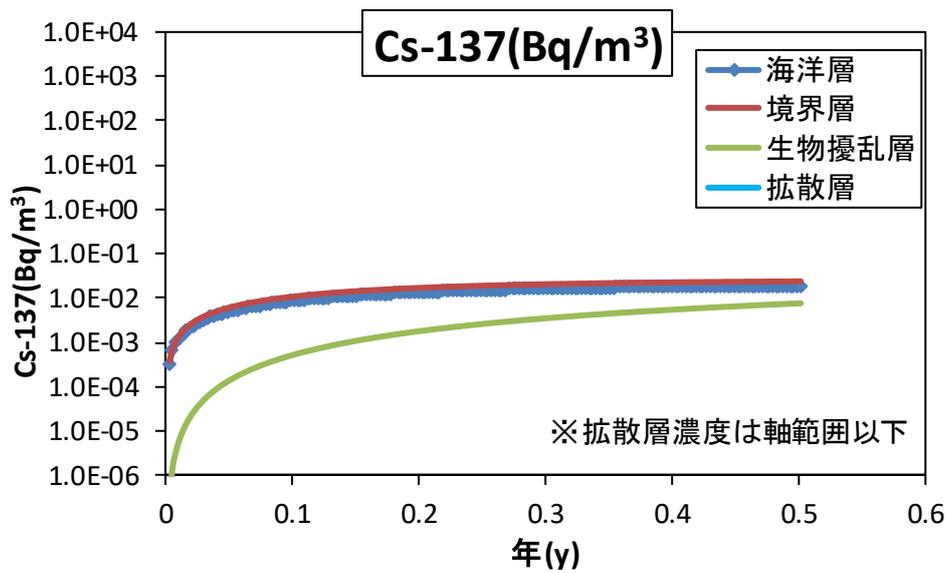


図 A.1-58 ケース 3,4 ポンプにより粒子流出を抑制した場合 護岸透過 (Cs-137)、重力式護岸

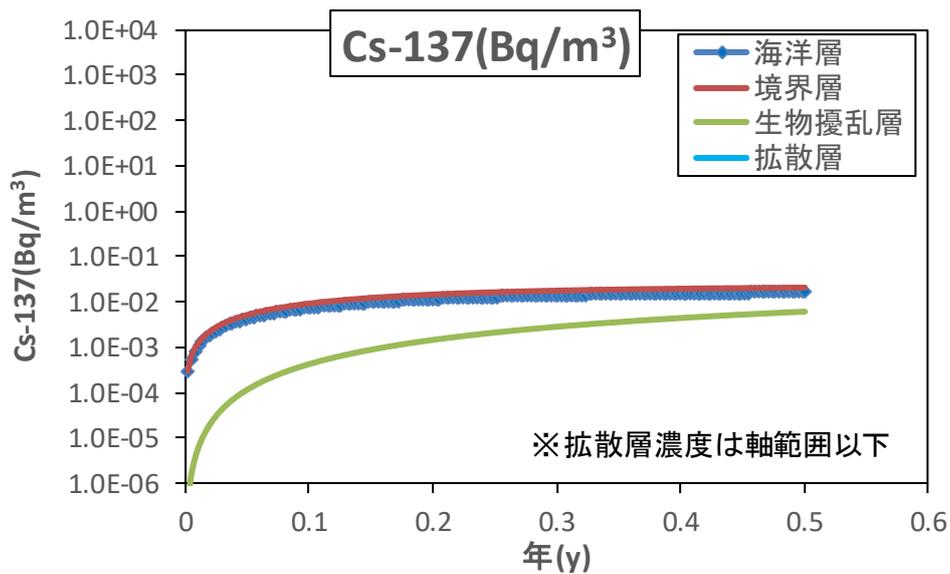


図 A.1-59 ケース 3,4 ポンプにより粒子流出を抑制した場合 帯水層移行 (Cs-137)、重力式護岸

A.1.7 供用時の核種移行評価結果

供用時の Cs-134 の核種移行評価結果を図 A.1-60 から図 A.1-71 に示す。供用時の Cs-137 の核種移行評価結果を図 A.1-72 から図 A.1-83 に示す。

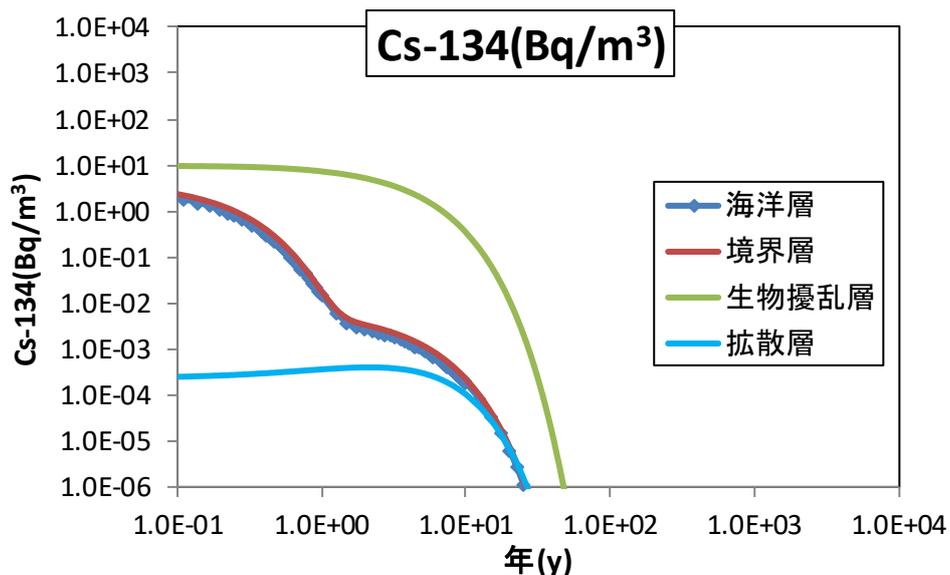


図 A.1-60 ケース 1,2 施工時に護岸の一部を開けて造成した場合 護岸透過(Cs-134)

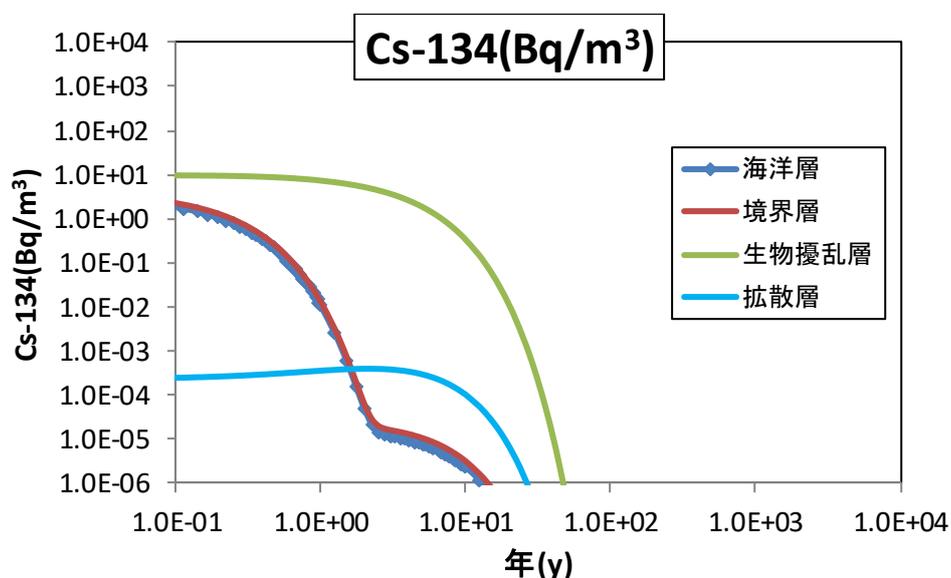


図 A.1-61 ケース 1,2 施工時に護岸の一部を開けて造成した場合 帯水層移行(Cs-134)

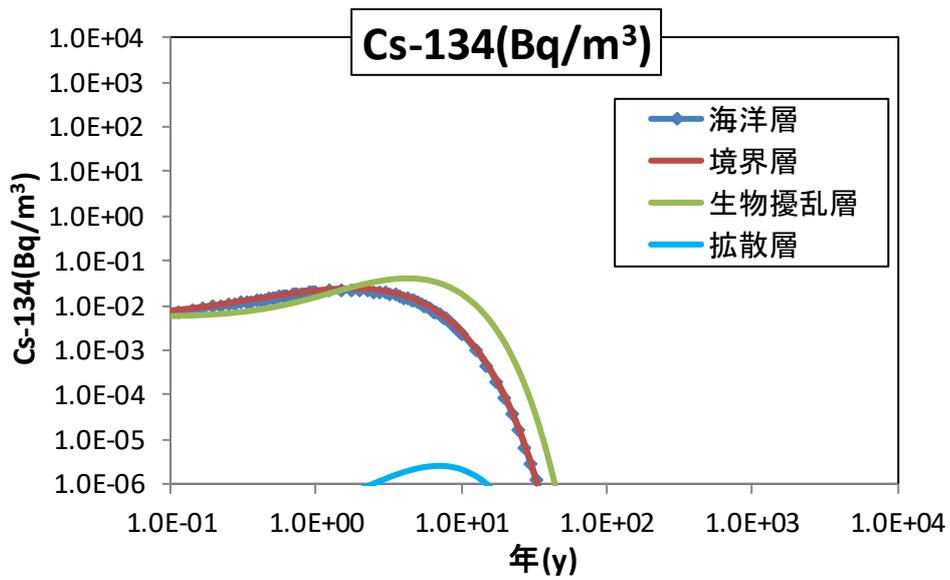


図 A.1-62 ケース 1,2 施工時に護岸を閉じて造成した場合 護岸透過(Cs-134)

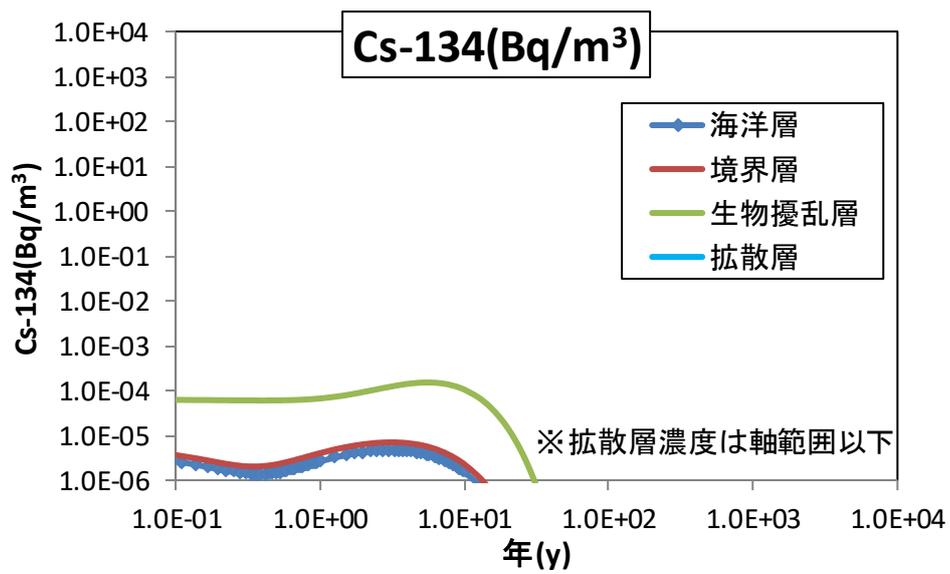


図 A.1-63 ケース 1,2 施工時に護岸を閉じて造成した場合 帯水層移行(Cs-134)

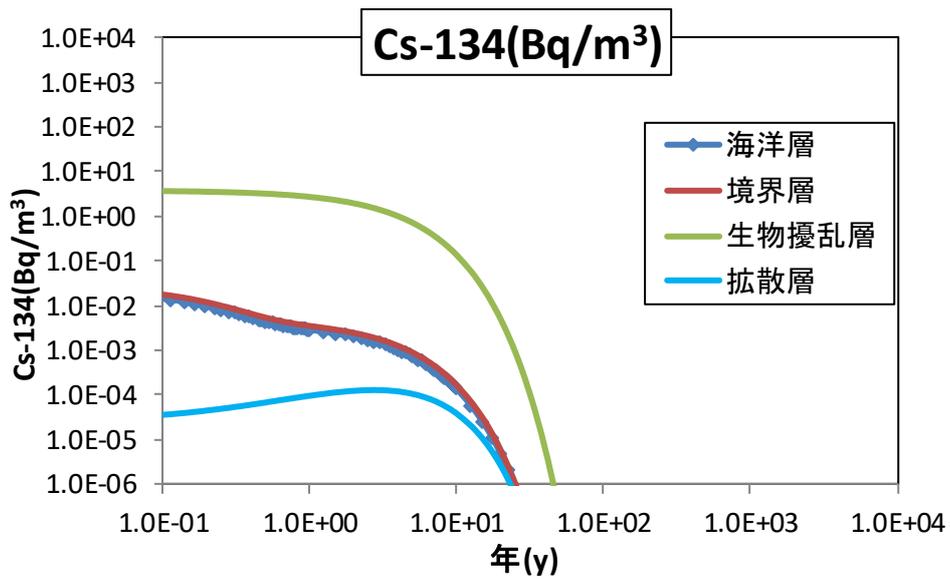


図 A.1-64 ケース 3,4 施工時に土砂投入により海水流出を想定した場合 護岸透過(Cs-134)、セル式護岸

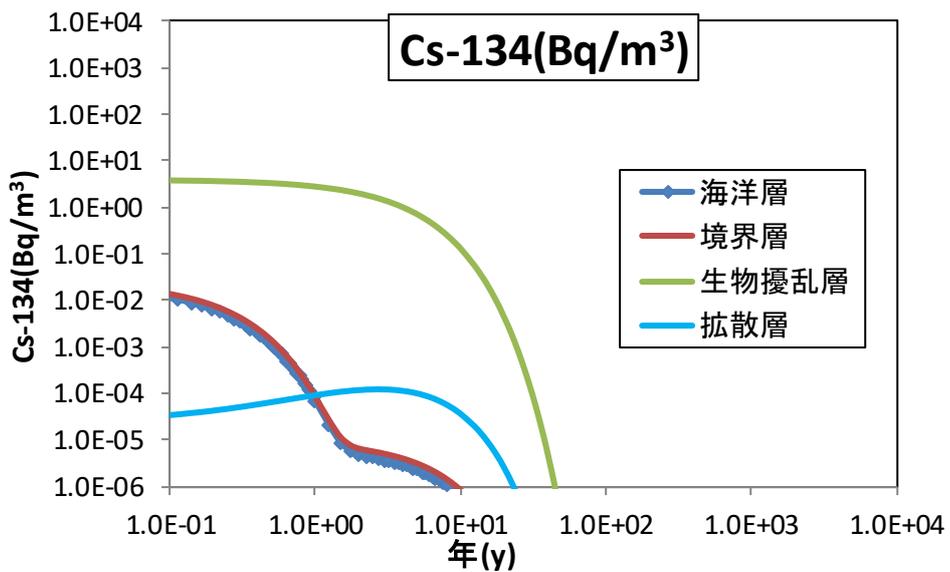


図 A.1-65 ケース 3,4 施工時に土砂投入により海水流出を想定した場合 帯水層移行(Cs-134)、セル式護岸

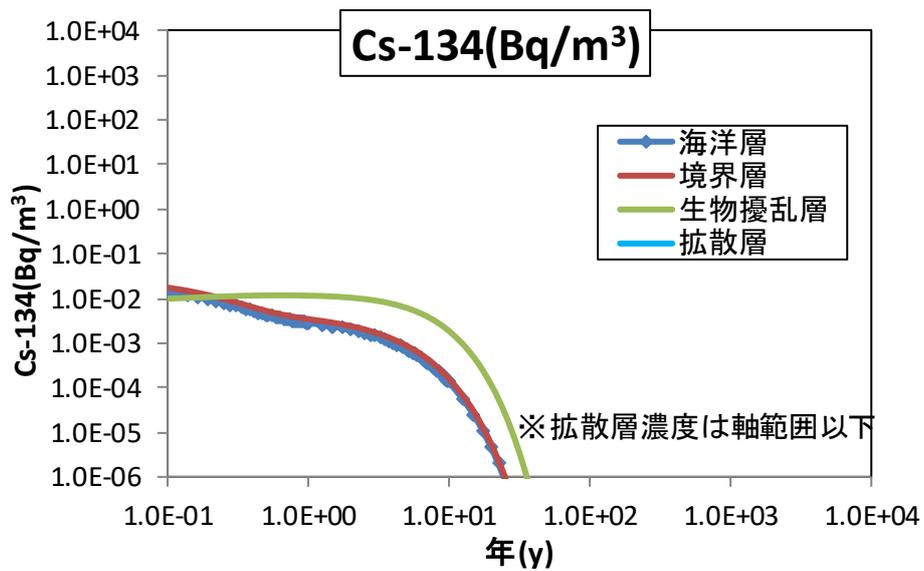


図 A.1-66 ケース 3,4 施工時にポンプにより粒子流出を抑制した場合 護岸透過(Cs-134)、セル式護岸

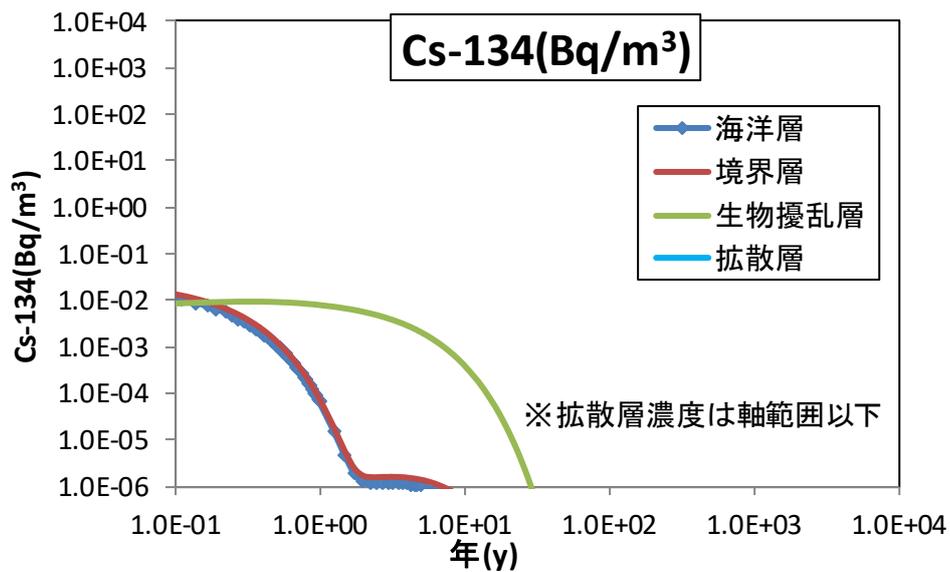


図 A.1-67 ケース 3,4 施工時にポンプにより粒子流出を抑制した場合 帯水層移行(Cs-134)、セル式護岸

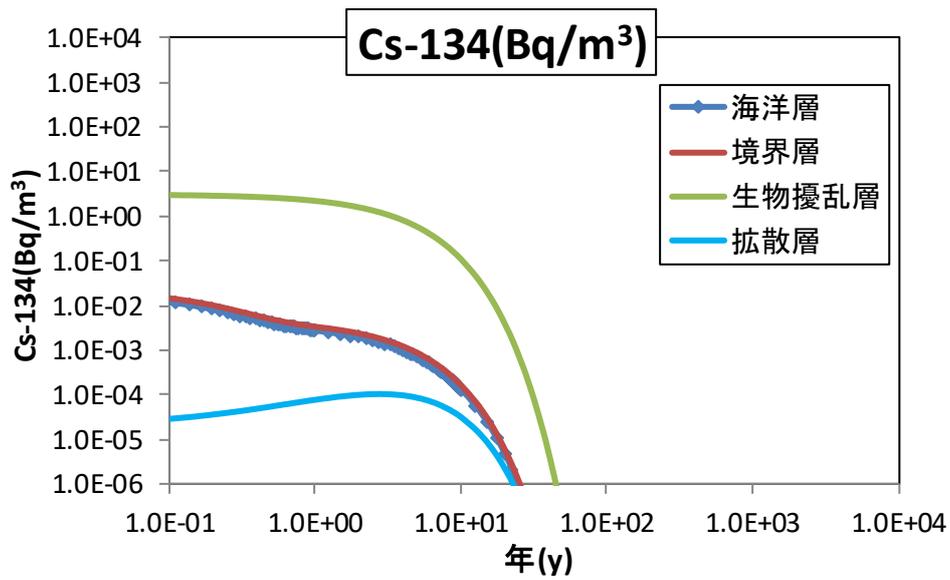


図 A.1-68 ケース 3,4 施工時に土砂投入により海水流出を想定した場合 護岸透過(Cs-134)、重力式護岸

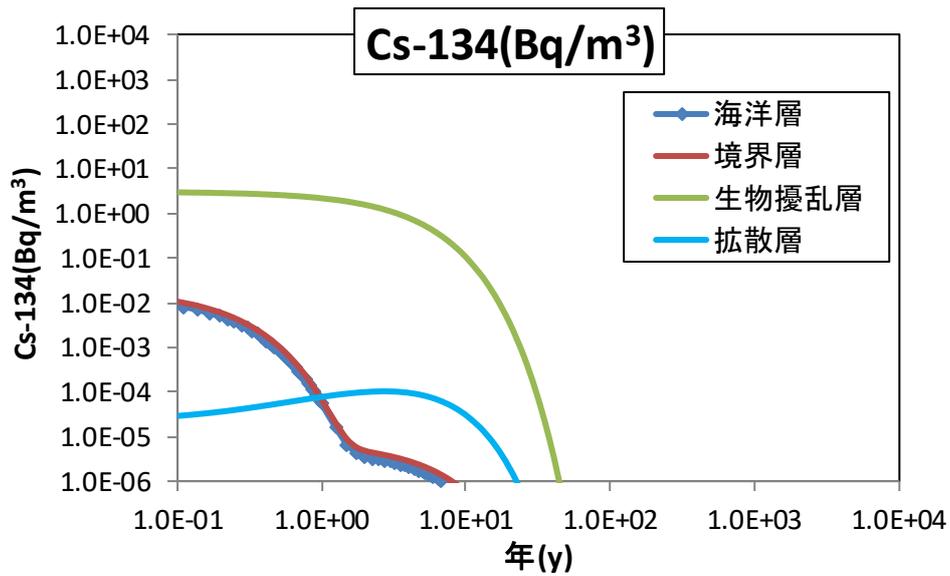


図 A.1-69 ケース 3,4 施工時に土砂投入により海水流出を想定した場合 帯水層移行(Cs-134)、重力式護岸

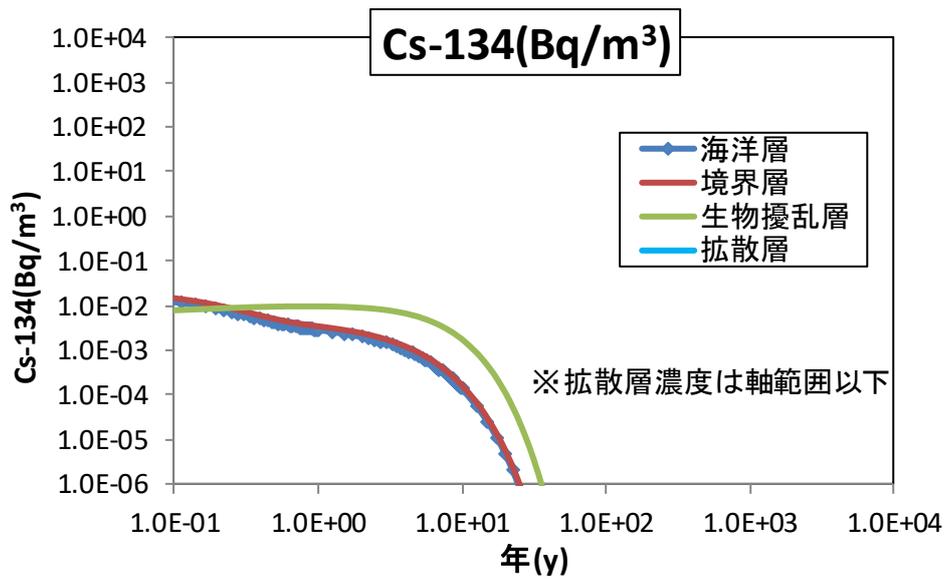


図 A.1-70 ケース 3,4 施工時にポンプにより粒子流出を抑制した場合 護岸透過(Cs-134)、重力式護岸

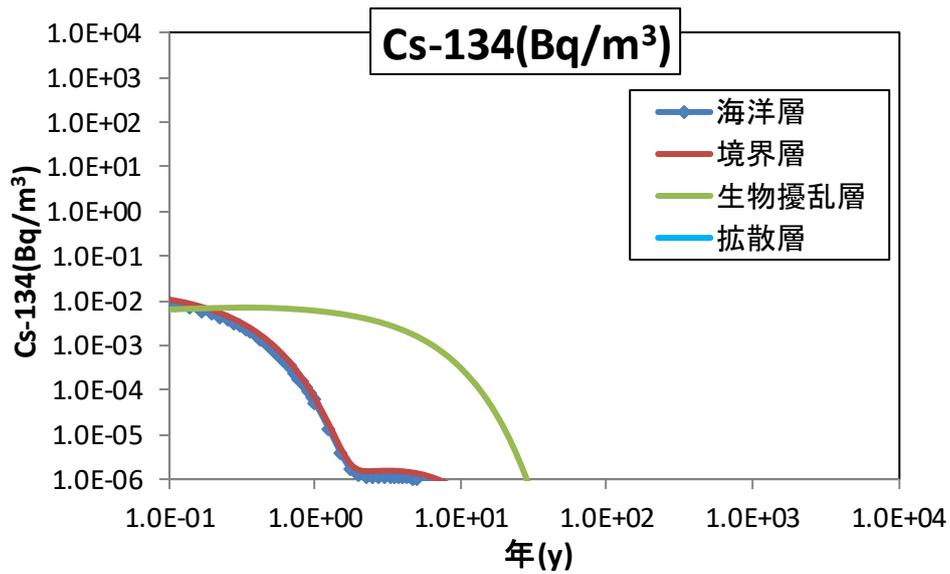


図 A.1-71 ケース 3,4 施工時にポンプにより粒子流出を抑制した場合 帯水層移行(Cs-134)、重力式護岸

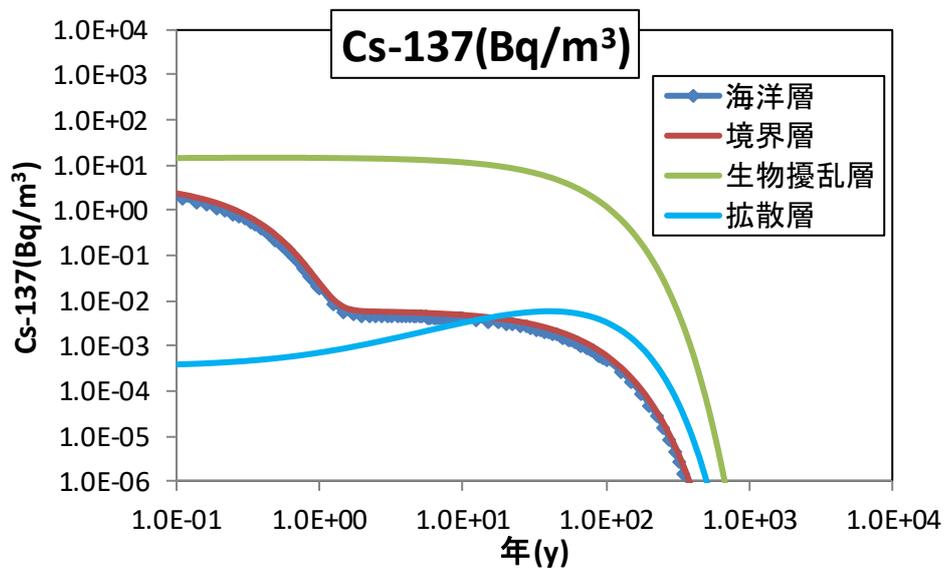


図 A.1-72 ケース 1,2 施工時に護岸の一部を開けて造成した場合 護岸透過(Cs-137)

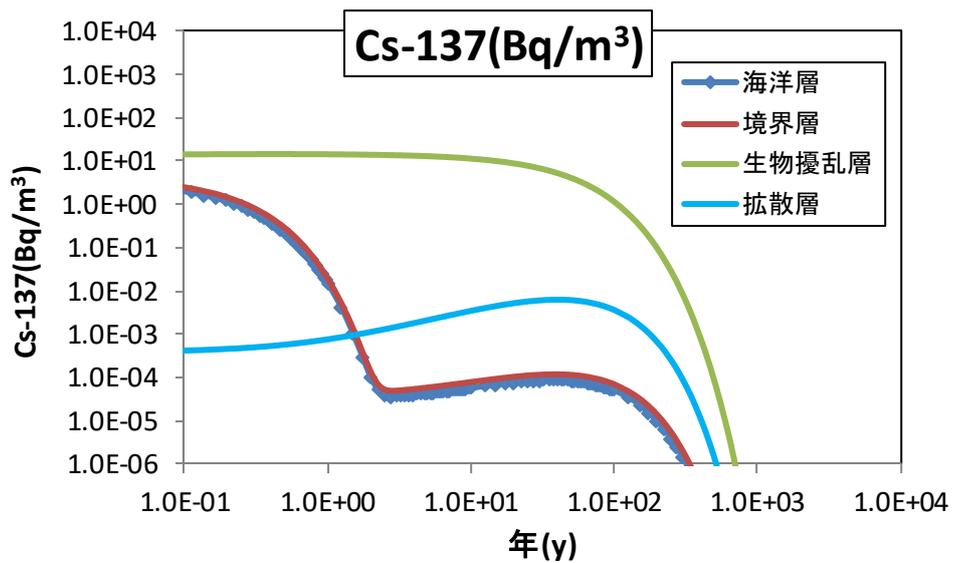


図 A.1-73 ケース 1,2 施工時に護岸の一部を開けて造成した場合 帯水層移行(Cs-137)

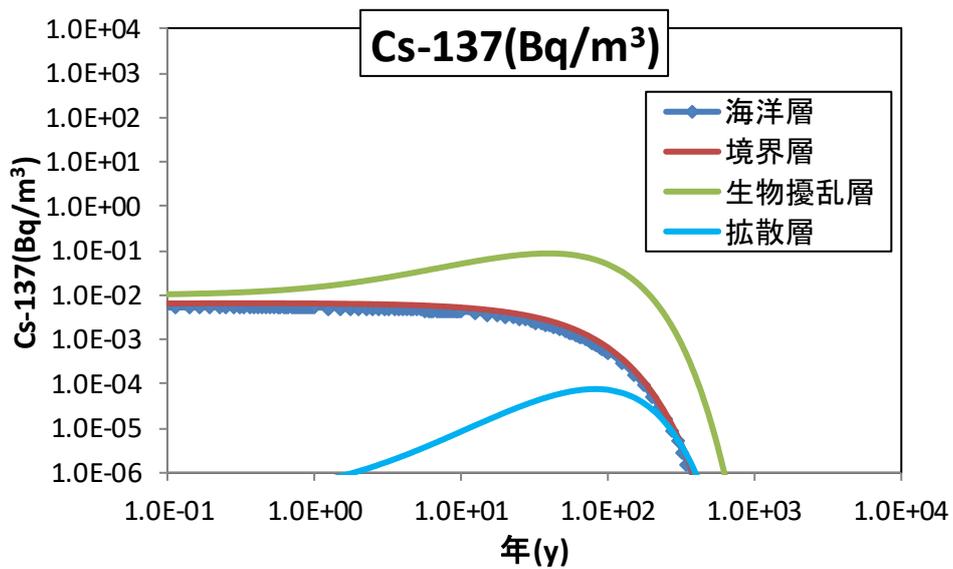


図 A.1-74 ケース 1,2 施工時に護岸を閉じて造成した場合 護岸透過(Cs-137)

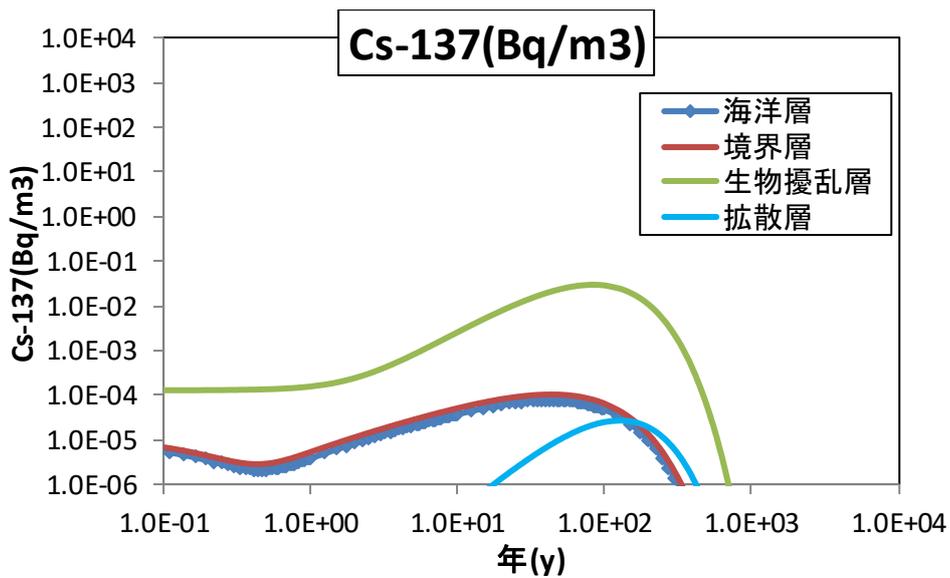


図 A.1-75 ケース 1,2 施工時に護岸を閉じて造成した場合 帯水層移行(Cs-137)

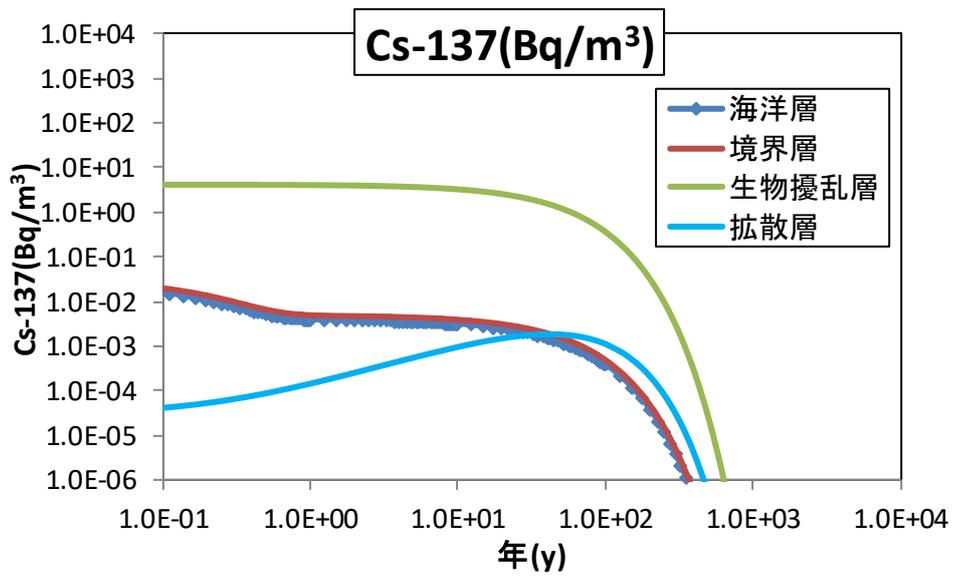


図 A.1-76 ケース 3,4 施工時に土砂投入により海水流出を想定した場合 護岸透過(Cs-137)、セル式護岸

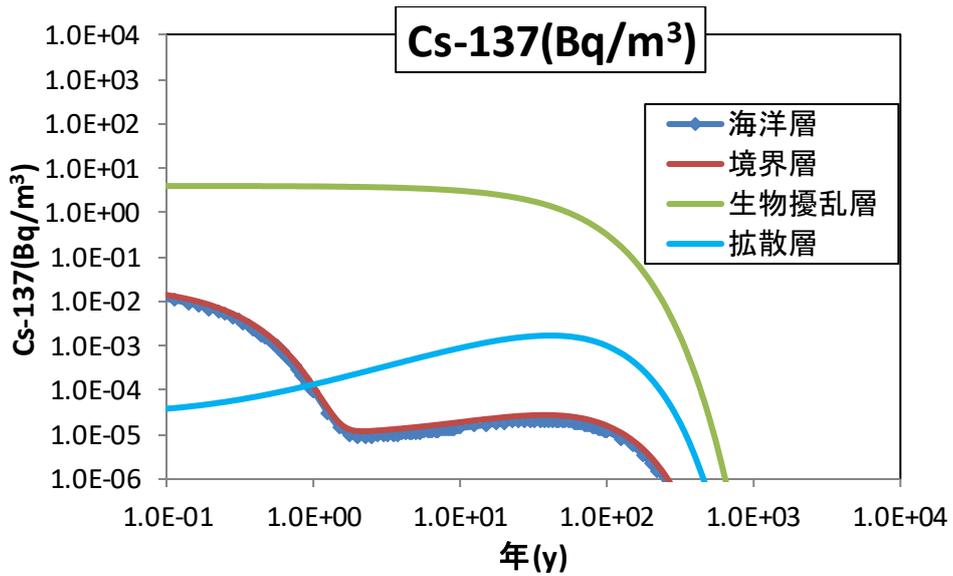


図 A.1-77 ケース 3,4 施工時に土砂投入により海水流出を想定した場合 帯水層移行(Cs-137)、セル式護岸

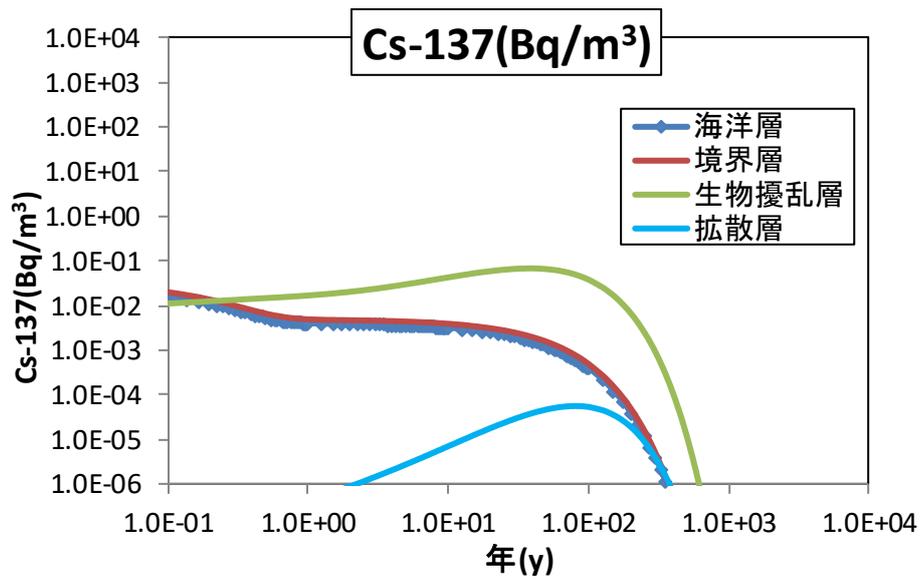


図 A.1-78 ケース 3,4 施工時にポンプにより粒子流出を抑制した場合 護岸透過(Cs-137)、セル式護岸

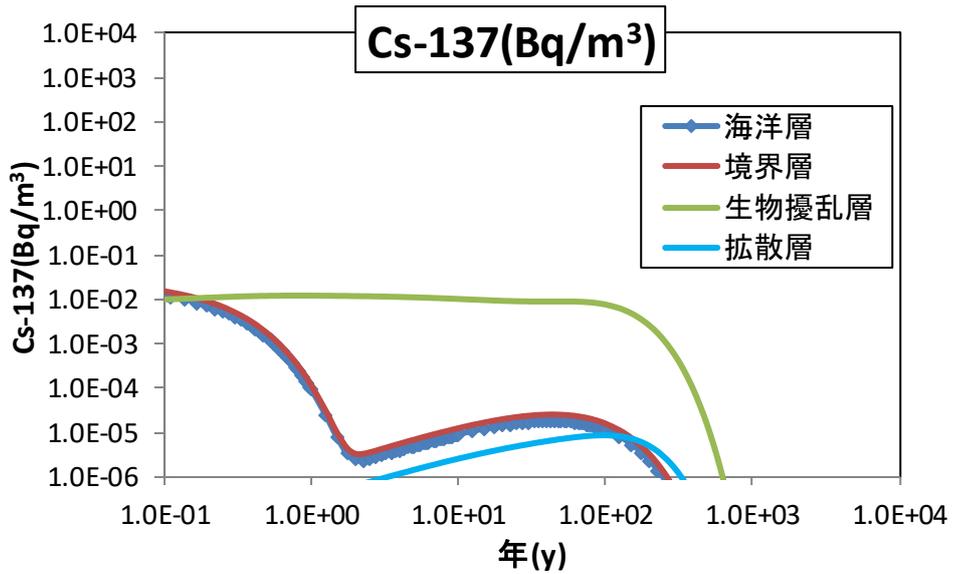


図 A.1-79 ケース 3,4 施工時にポンプにより粒子流出を抑制した場合 帯水層移行(Cs-137)、セル式護岸

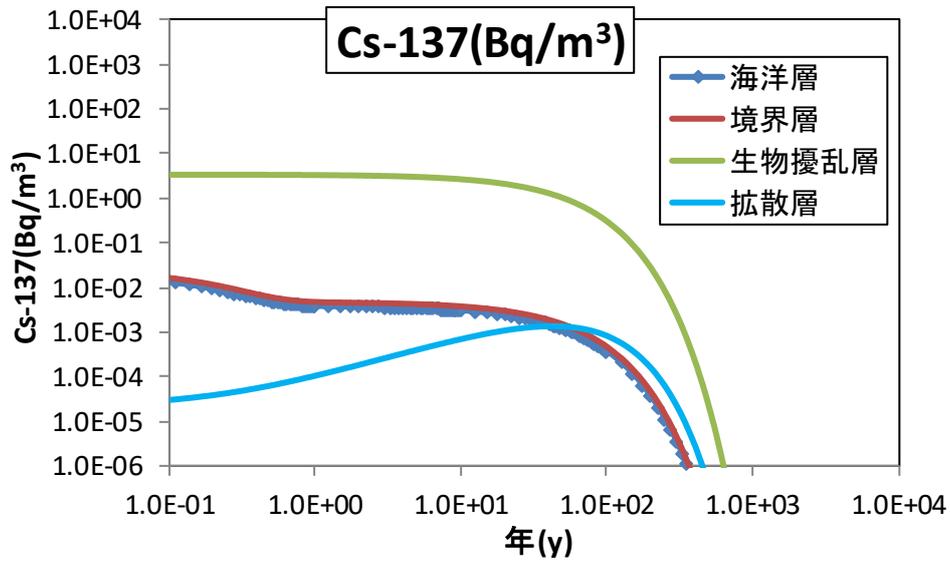


図 A.1-80 ケース 3,4 施工時に土砂投入により海水流出を想定した場合 護岸透過(Cs-137)、重力式護岸

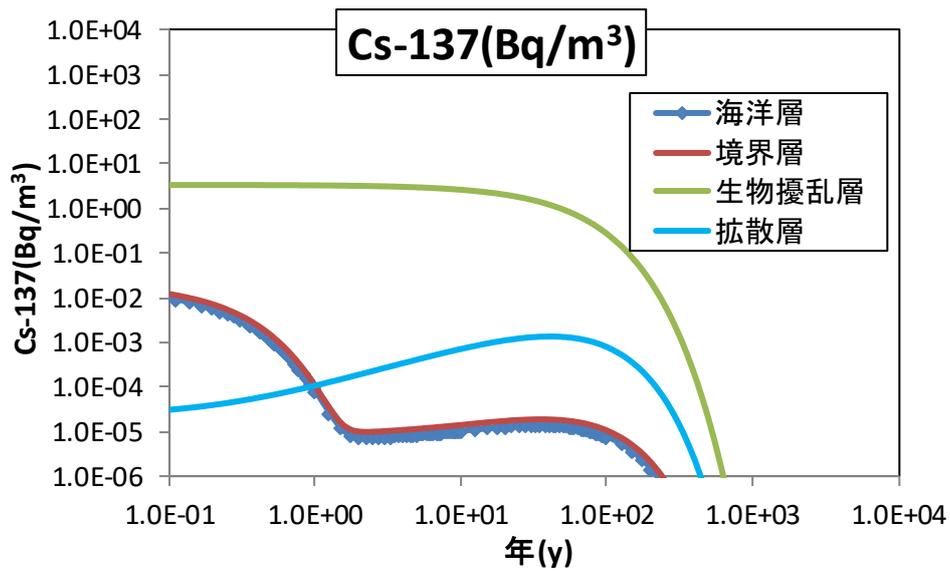


図 A.1-81 ケース 3,4 施工時に土砂投入により海水流出を想定した場合 帯水層移行(Cs-137)、重力式護岸

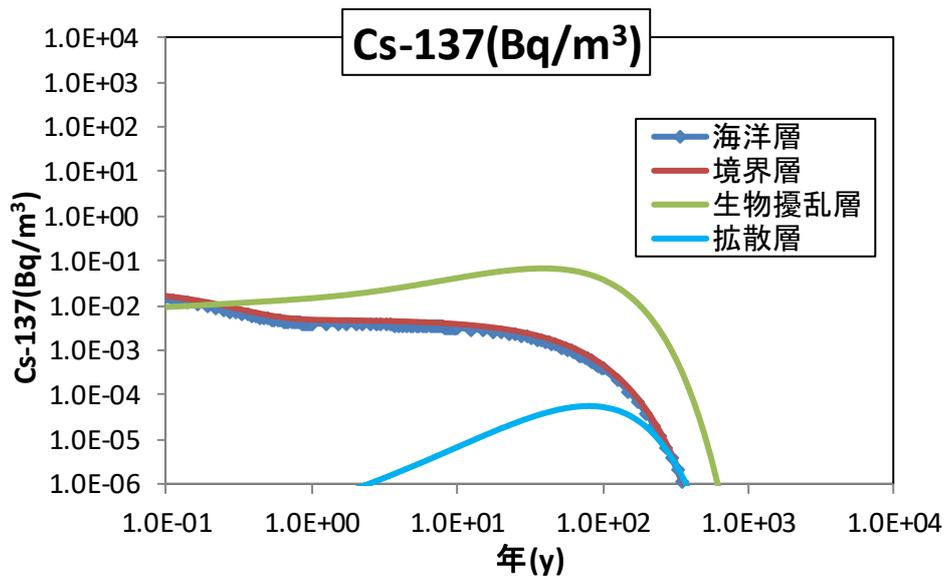


図 A.1-82 ケース 3,4 施工時にポンプにより粒子流出を抑制した場合 護岸透過(Cs-137)、重力式護岸

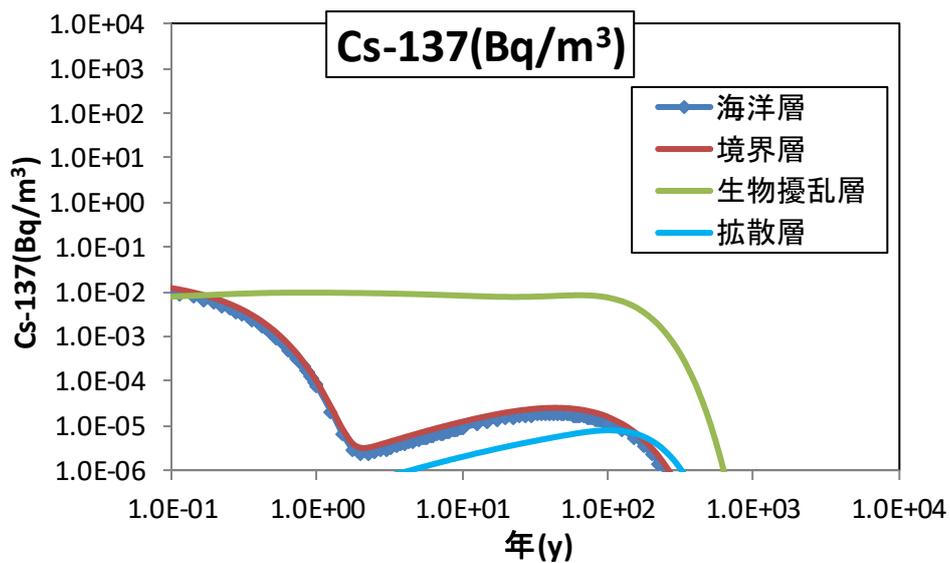


図 A.1-83 ケース 3,4 施工時にポンプにより粒子流出を抑制した場合 帯水層移行(Cs-137)、重力式護岸

A.1.8 海面埋立地への再生利用に係る評価経路のパラメーター

海面埋立地への再生利用に係る評価経路のパラメーターを表 A.1-5 に示す。

表 A.1-5 海面埋立への再生資材利用に係る評価経路のパラメーター一覧(1/21)

経路No	名称	単位	選定値	選定根拠
1~56	被ばく中の減衰期間	y	1	IAEA RS-G-1.7 では、各評価経路について被ばく期間(1年)の減衰を考慮しており、本試算でも被ばく期間(1年)中の放射能の減衰を考慮する。
1~56	海面埋立地の造成が開始されるまでの期間	y	0	保守的に、再生資材が事故5年後すぐに再生資源化され、海面埋立地造成に使用されるものとした。
1~56	海面埋立地の造成が開始されるまでの期間	y	0	保守的に、再生資材が事故5年後すぐに再生資源化され、海面埋立地造成に使用されるものとした。
1~56	線源に対する希釈係数	-	1.0	海面埋立地の造成に利用されるものは、全て再生資源であるとした。
1~56	再生資材の真密度	g/cm ³	2.6	「土質工学ハンドブック」(土質工学会編、1982年)に示された砂の粒子密度を基に選定した。
1,4,9,10	再生資材幅(運搬時)	m	2.0	大型トラックの荷台の寸法を基に選定した。
1,4,9,10	再生資材長さ(運搬時)	m	5.0	大型トラックの荷台の寸法を基に選定した。
1,4,9,10	再生資材厚さ(運搬時)	m	0.6	大型トラックの荷台の寸法を基に選定した。
5	再生資材幅(仮置き土)	m	50	仮置き土の大きさは、仮置場面積の半分に高さ5mで再生資材が積み上げられていると仮定して算出する。仮置場面積は松浦企業株式会社 HP ² に示された仮置場サイズ約 3,600~7,800m ² を基に、仮置場の大きさを 10,000m ² (1辺 100m) と設定。仮置き土高さは上記 HP 掲載の写真より 5m と設定。仮置場面積の半分に仮置き土がある設定は、土運船積載量(経路 No.5~8 再生資材幅、長さ、厚さ(積載土))に対して十分な量の仮置き土が常にある状態を想定して設定した。
5	再生資材長さ(仮置き土)	m	100	
5	再生資材厚さ(仮置き土)	m	5	

表 A.1-5 海面埋立への再生資材利用に係る評価経路のパラメーター一覧(2/21)

経路 No	名称	単位	選定値	選定根拠
5,8	再生資材幅 (積載土)	m	13	大型の土運船(参考：KDB-3502 (海洋開発興業所有)) ³ の寸法図より設定した。
5,8	再生資材長さ (積載土)	m	70	
5,8	再生資材厚さ (積載土)	m	6	
1~10	再生資材のかさ密度	g/cm ³	1.7	自然地盤でのおおよその平均値 1.7 g/cm ³ とした。
11~56	水深	m	18	横浜港南本牧ふ頭 MC-3 を参考に、大型船舶も停泊可能な水深である 18m (干潮時) を採用した。
11~56	埋立材幅	m	500	大規模な海面埋立地を想定し、500m×500m の埋立部に対し、一様に再生資材を埋立材として利用した場合を想定した。
11~56	埋立材高さ	m	22	岸壁の水面上高さを、大型船舶も停泊可能な横浜港南本牧ふ頭 MC-3 を基に 4m と設定し、水深 18m と足し合わせた高さを舗装・覆土を施していない状態の埋立材高さとした。
11~56	埋立材のかさ密度	g/cm ³	2.0	土壌を締め固めた場合の密度の最大値 2.0 g/cm ³ とした。
23,25, 33,34, 35,37, 38	覆土厚さ(緑地公園の利用)	m	0.3	草本を植栽することを想定し、国土交通省都市局公園緑地・景観課 植栽基盤の整備手順 (案) ¹³ を参考にして敷設される覆土の厚さを 0.3m と設定。
23,25, 36,37, 38	舗装 (路盤材) 厚さ	m	0.15	日本港湾協会 港湾の施設の技術基準・同解説 (1999) ¹⁴ に示されている、港湾のエプロン部への利用に必要な路盤材厚の最小値を設定。
	舗装 (コンクリート舗装) 厚さ	m	0.2	日本港湾協会 港湾の施設の技術基準・同解説 (1999) ¹⁴ に示されている、港湾のエプロン部への利用に必要なコンクリート版厚の最小値を設定。

表 A.1-5 海面埋立への再生資材利用に係る評価経路のパラメーター一覧(3/21)

経路 No	名称	単位	選定値	選定根拠
23,25, 33,34, 35,37, 38	覆土のかさ密度	g/cm ³	1.5	日本道路公団 設計容量 第一集(1983)に示されている道路の盛土材の単位体積重量を参考に、保守的な値 1.5g/cm ³ を設定した。
23,25, 36,37, 38	舗装(路盤材)のかさ密度	g/cm ³	2.0	「澤口拓磨、武田聖司、木村英雄、田中忠夫. “放射性物質により汚染された災害廃棄物の道路への再利用に伴う被ばく線量評価”. Jpn.J.Health Phys.50(1), 36~49(2015)」に示された「道路及び歩道・上層/下層路盤材」のかさ密度の値を用いた。
	舗装(コンクリート舗装)のかさ密度	g/cm ³	2.2	「 Yukio SAKAMOTO and Shun-ichi TANAKA. “QAD-CGGP2 and G33-GP2: Revised Versions of QAD-CGGP AND G33-GP”. JAERI-M90-110(1990)」の表 9.4-1 (普通コンクリートの元素組成例)より、花崗岩を粗骨材とした場合の値を用いた。
11~56	中詰材の幅(セル式護岸)	m	30	表 A.1-3 よりセル式護岸の最大径を設定
11~56	中詰材の幅(重力式護岸)	m	20	表 A.1-3 より重力式護岸の最大幅を設定
11~56	中詰材の長さ(セル式護岸)	m	560	埋立材幅 500m と埋立材を取り囲む護岸幅 30m より設定
11~56	中詰材の長さ(重力式護岸)	m	540	埋立材幅 500m と埋立材を取り囲む護岸幅 20m より設定
11~56	中詰材の高さ	m	22	岸壁の水面上高さを大型船舶も停泊可能な横浜港南本牧地区岸壁を基に 4m と設定し、水深 18m と足し合わせた高さを舗装・覆土を施していない状態の中詰材高さとした。
11~56	中詰材のかさ密度	g/cm ³	1.7	中詰材は締固めを行わないので自然地盤でのおおよその平均値 1.7 g/cm ³ とした。
34,35	護岸上部工厚さ(緑地公園)	m	0.3	覆土厚さとそろえた。

表 A.1-5 海面埋立への再生資材利用に係る評価経路のパラメーター一覧(4/21)

経路 No	名称		単位	選定値	選定根拠
36,37,38	護岸上部工厚さ (コンテナターミナル)		m	0.35	舗装厚さとそろえた。
11~56	海面埋立地が完成するまでの期間		y	0	保守的な設定とした。
1~4	再生資材の積み下ろし、 運搬の年間作業時間		h/y	1,000	1日8時間、年間250日の労働時間の半分の時間で、再生資材の運搬作業を行うものとした。
1	積み下ろし作業時の 遮へい係数		-	0.4	重機を使用した際の遮へい(鉄板2cm相当)を考慮する。災害廃棄物評価 ¹ で埋設作業時の重機を使用したCs-134及びCs-137に対する遮へい係数はQAD-CGGP2Rより0.4と計算され、積み下ろし作業時の遮へい係数も同様に設定した。
1,4	外部被ばくに対する線量換算係数(積み下ろし、仮置き場への運搬)	Cs-134	$\mu\text{Sv/h}$ per Bq/g	5.9E-02	以下の条件で、QAD-CGGP2Rコードにより算出した。線源の形状：高さ0.6m、幅2m、長さ5mの直方体線源 線源のかさ密度：1.7g/cm ³ 評価点：0.6m×5.0mの中心から1.0m
		Cs-137		2.1E-02	
2,6,12, 15,18, 21,24, 26,31, 43,48,	作業時の空气中ダスト濃度		g/m^3	5.0E-04	NUREG/CR-3585に示されたOPEN DUMP時及びIAEA-TECDOC-401に示された埋設処分場での埋め立て作業時における空气中ダスト濃度を採用した。
26,31, 43,48,	微粒子の放射性物質の濃縮係数(吸入摂取)		-	4	IAEA Safety Reports Series No.44に示された吸入可能な粒子の濃縮係数を使用した。
2,6,12, 15,18, 21,31, 43,48,	作業者の呼吸量		m^3/h	1.2	ICRP Publ.23で示されている標準人の労働(軽作業)時の呼吸量の数値20L/minを基に算定した。

表 A.1-5 海面埋立への再生資材利用に係る評価経路のパラメーター一覧(5/21)

経路 No	名称		単位	選定値	選定根拠
3,7,13, 16,19, 22,32, 44	微粒子の放射性物質の濃縮係数（経口摂取）		-	2	IAEA Safety Reports Series No.44 に示された経口摂取被ばくに関する粒子の濃縮係数を使用した。
3,7,13, 16,19, 22,32, 44	ダストの経口摂取率		g/h	1.0E-02	IAEA S.S. No.111-P-1.1 に示された値を用いた。
4	仮置き場への運搬作業時の遮へい係数		-	0.9	車両による遮へい（鉄板 3mm 相当）を考慮する。災害廃棄物評価 ¹ で埋設作業時の Cs-134 及び Cs-137 に対する車両による遮へい係数は QAD-CGGP2R より 0.9 と計算され、運搬作業時の遮へい係数も同様に設定した。
5~7	土運船への積み込みの年間作業時間		h/y	1,000	1日8時間、年間250日の労働時間の半分の時間で、再生資材の運搬作業を行うものとした。
5	外部被ばくに対する線量換算係数（土運船への積み込み）	Cs-134	μSv/h per Bq/g	2.7E-01	以下の条件で、MCNP5 コードにより算出した。 線源の形状（仮置き土）：高さ 5m、幅 50m、長さ 100m の直方体 線源の形状（積載土）：高さ 6m、幅 13m、長さ 70m の直方体 線源のかさ密度：1.7g/cm ³ 評価点：仮置き土の 5m×100m の面の長さ中心から 1m、積載土 6m×70m の面の長さ中心から 52.5m（二つの線源からの影響を重畳して評価）。図 A.1-1 参照。
		Cs-137		9.7E-02	

表 A.1-5 海面埋立への再生資材利用に係る評価経路のパラメーター一覧(6/21)

経路 No	名称	単位	選定値	選定根拠	
5	土運船への積み込み作業時の遮へい係数	-	0.4	重機を使用した際の遮へい(鉄板 2cm 相当)を考慮する。災害廃棄物評価 ¹ で埋設作業時の重機を使用した Cs-134 及び Cs-137 に対する遮へい係数は QAD-CGGP2R より 0.4 と計算され、積み込み作業時の遮へい係数も同様に設定した。	
8	土運船による運搬の年間作業時間	h/y	1,000	1 日 8 時間、年間 250 日の労働時間の半分の時間で、再生資材の運搬作業を行うものとした。	
8	外部被ばくに対する線量換算係数(土運船による運搬)	Cs-134	μSv/h	1.1E-01	以下の条件により MCNP5 コードにより算出した。 線源の形状:高さ 6m、幅 13m、長さ 70m の直方体 線源のかさ密度:1.7g/cm ³ 評価点:6m×13m の面の幅中央、面から 2m
		Cs-137	Bq/g	4.0E-02	
8	土運船による運搬作業時の遮へい係数	-	0.4	重機を使用した際の遮へい(鉄板 2cm 相当)を考慮する。災害廃棄物評価 ¹ で埋設作業時の重機を使用した Cs-134 及び Cs-137 に対する遮へい係数は QAD-CGGP2R より 0.4 と計算され、土運船による運搬作業時の遮へい係数も同様に設定した。	
9,10	運搬経路周辺居住時の遮へい係数	-	1.0	保守的に 1 と設定した。	

表 A.1-5 海面埋立への再生資材利用に係る評価経路のパラメーター一覧(7/21)

経路 No	名称		単位	選定値	選定根拠
9,10	運搬経路沿いの居住者の被ばく時間		h/y	450	災害廃棄物安全評価検討会（第9回）資料11-2「災害廃棄物等の処理・処分のシナリオに対する線量評価結果の整理」に示された値を踏襲した。当該資料では、運搬トラックが月に4,500台走行し、そのうちの半分のトラックが赤信号により停車している時間1分間に被ばくと仮定し、450h/yとしている。
9,10	外部被ばくに対する線量換算係数（運搬経路周辺居住、成人）	Cs-134	μSv/h per Bq/g	1.5E-02	以下の条件で、QAD-CGGP2Rコードにより算出した。線源の形状：高さ0.6m、幅2m、長さ5mの直方体、評価点：0.6m×5.0mの底辺中央から3.0m、線源のかさ密度：1.7g/cm ³ 。なお、子どもの外部被ばく線量換算係数は成人の計算値を1.3倍した。
		Cs-137		5.2E-03	
11~22	埋立地造成作業(中詰材の投入、中詰材の敷均し、埋立柱材の投入、埋立柱材の敷均し・締固め)に係わる年間作業時間		h/y	1,000	保守的に1日8時間、年間250日の労働時間の半分の時間を、当該作業に従事するとした。
11,14, 17,20, 23,25, 33~38	護岸構造物厚さ（セル式）		mm	8	表 A.1-3 より最も薄い8mmを選定。
	護岸構造物密度（セル式）		g/cm ³	7.86	JAEA-data/code 2008-001（鉄）
	護岸構造物厚さ（重力式）		cm	30	引用文献 ¹⁴ より側壁厚さの下限値を設定。
	護岸構造物密度（重力式）		g/cm ³	2.0	コンクリート製の舗装（路盤材）と同様の値を設定。
11	投入作業時の遮へい係数 （①揚土装置付自航運搬船による投入、作業員A,C）		-	0.4	作業員AとCは揚土装置（クレーンを想定）の運転作業員なので重機を使用した際の遮へい（鉄板2cm相当）を考慮する。災害廃棄物評価 ¹ で埋設作業時の重機を使用したCs-134及びCs-137に対する遮へい係数はQAD-CGGP2Rより0.4と計算され、投入作業時の遮へい係数も同様に設定した。

表 A.1-5 海面埋立への再生資材利用に係る評価経路のパラメーター一覧(8/21)

経路 No	名称	単位	選定値	選定根拠
11	投入作業時の遮へい係数 (①揚土装置付自航運搬船 による投入、作業員 B,D)	-	1.0	作業員 B と D は甲板上にいる作業員を 想定するので、保守的な設定とした。
11	投入作業時の遮へい係数 (②揚土船による投入、 作業員 A)	-	0.4	作業員 A は揚土装置（バックホウを想 定）の運転作業員なので重機を使用した 際の遮へい（鉄板 2cm 相当）を考慮す る。災害廃棄物評価 ¹ で埋設作業時の重 機を使用した Cs-134 及び Cs-137 に対す る遮へい係数は QAD-CGGP2R より 0.4 と計算され、投入作業時の遮へい係数も 同様に設定した。
11	投入作業時の遮へい係数 (②揚土船による投入、作 業員 B, C, D)	-	1.0	作業員 B, C, D は甲板上にいる作業員を 想定するので、保守的な設定とした。
11	投入作業時の遮へい係数 (③バックホウによる投 入、作業員 A, B, C, D)	-	0.4	作業員 A, B, C, D はバックホウの運転作 業員なので重機を使用した際の遮へい （鉄板 2cm 相当）を考慮する。災害廃棄 物評価 ¹ で埋設作業時の重機を使用した Cs-134 及び Cs-137 に対する遮へい係数 は QAD-CGGP2R より 0.4 と計算され、 投入作業時の遮へい係数も同様に設定 した。
11	投入作業時の遮へい係数 (④トラックによる投入)	-	0.9	車両による遮へい（鉄板 3mm 相当）を 考慮する。災害廃棄物評価 ¹ で埋設作業 時の Cs-134 及び Cs-137 に対する車両に よる遮へい係数は QAD-CGGP2R より 0.9 と計算され、運搬・投入作業時の遮 へい係数も同様に設定した。
14	中詰材の敷均し作業時の 遮へい係数	-	1.0	重機を使用した作業を想定せず、保守的 な設定とした。

表 A.1-5 海面埋立への再生資材利用に係る評価経路のパラメーター一覧(9/21)

経路 No	名称		単位	選定値	選定根拠	
20	埋立柱の敷均し・締固め作業時の遮へい係数		-	1.0	重機を使用した作業を想定せず、保守的な設定とした。	
23,25	居住者の遮へい係数		-	0.2	IAEA-TECDOC-401 から、居住時間の 20% を戸外で過ごすとして仮定した。	
23~26	居住者の被ばく時間		h/y	8,760	大規模な海面埋立を行う場合、建設期間は 1 年以上の長期にわたる可能性がある。よって、保守的に年間にわたって被ばくするとした。	
11	外部被ばくに対する線量換算係数（中詰材の投入・セル式護岸）	Cs-134	μSv/h per Bq/g	2.6E-01	外部被ばく線量換算係数を投入方法、評価位置ごとにそれぞれ MCNP5 コードを用いて導出した。被ばく線量が最大となる投入方法・評価点の値を用いた（別表 1 参照）。	
		Cs-137		9.3E-02		
	外部被ばくに対する線量換算係数（中詰材の投入・重力式護岸）	Cs-134	μSv/h per Bq/g	1.9E-01		外部被ばく線量換算係数を投入方法、評価位置ごとにそれぞれ MCNP5 コードを用いて導出した。被ばく線量が最大となる投入方法・評価点の値を用いた（別表 2 参照）。
		Cs-137		6.9E-02		
17（ケース 1,2 で使用）	外部被ばくに対する線量換算係数（埋立柱の投入）	Cs-134	μSv/h per Bq/g	4.4E-01	再生資材を埋立柱として再利用し護岸で囲まれた範囲に投入する際の外部被ばく線量換算係数を投入方法、評価位置ごとにそれぞれ MCNP5 コードを用いて導出した。被ばく線量が最大となる投入方法・評価点の値を用いた（別表 3 参照）。	
		Cs-137		1.6E-01		
17（ケース 3,4 で使用）	外部被ばくに対する線量換算係数（埋立柱の投入・セル式護岸）	Cs-134	μSv/h per Bq/g	2.6E-01		再生資材を中詰材として利用し造成された護岸で囲まれた範囲に埋立柱（再生資材ではない）を投入する際の外部被ばく線量換算係数を投入方法、評価位置ごとにそれぞれ MCNP5 コードを用いて導出した。被ばく線量が最大となる投入方法・評価点の値を用いた（別表 4 参照）。
		Cs-137		9.1E-02		

表 A.1-5 海面埋立への再生資材利用に係る評価経路のパラメーター一覧(10/21)

経路 No	名称		単位	選定値	選定根拠
17 (ケース 3,4 で使用)	外部被ばくに対する線量換算係数 (埋立材の投入・重力式護岸)	Cs-134	μSv/h per Bq/g	7.1E-03	外部被ばく線量換算係数を投入方法、評価位置ごとにそれぞれ MCNP5 コードを用いて導出し、被ばく線量が最大となる値を用いた (別表 5 参照)。
		Cs-137		2.3E-03	
14,20,23,25	外部被ばくに対する線量換算係数 (中詰材の敷均し、埋立材の敷均し・締固め、周辺居住)	Cs-134	μSv/h per Bq/g	別表 6 参照	再生資材を埋立材・中詰材として再利用し海面埋立地を造成した場合の各評価位置の外部被ばく線量換算係数をそれぞれ MCNP5 コードを用いて導出した。なお、子どもの外部被ばく線量換算係数は成人の計算値を 1.3 倍した。
Cs-137					
24	居住者の呼吸量 (成人)		m ³ /h	0.96	ICRP Publ.23 で示された標準人の 1 日の呼吸量の数値 2.3×10 ⁴ (L/d)を基に算定。
26	居住者の呼吸量 (子ども)		m ³ /h	0.22	IAEA Safety Reports Series No.44 に示されていた 1~2 歳の居住者の呼吸率として示されている値を採用した。
33	草刈作業の年間作業時間		h/y	250	1 回の草刈りの期間を 10 日、1 日 8 時間、年 3 回として設定するものとした。
33	草刈作業時の遮へい係数		-	1.0	保守的な設定とした。
34,35	緑地公園の年間利用時間		h/y	400	1 日 1 時間、毎日緑地公園を利用すると、約 365 時間/年の利用時間となる。この結果から、年間の対象埋立地利用時間を 400 時間に設定した。
34,35	緑地公園の遮へい係数		-	1.0	保守的な設定とした。
36	コンテナターミナルの年間利用時間		h/y	1,000	保守的に 1 日 8 時間、年間 250 日の労働時間の半分の時間コンテナターミナルを利用するものとした。
36	コンテナターミナル利用時の遮へい係数		-	1.0	保守的に遮へい係数を 1.0 に設定した。
37,38	年間居住時間		h/y	8,760	保守的に、1 年間絶えず埋立地付近に居住しているものとした。
37,38	埋周辺居住時の遮へい係数		-	0.2	IAEA-TECDOC-401 から、居住時間の 20%を戶外で過ごすものと仮定した。

表 A.1-5 海面埋立への再生資材利用に係る評価経路のパラメーター一覧(11/21)

経路 No	名称		単位	選定値	選定根拠
33,34, 35,36, 37,38	外部被ばくに対する線量換算係数(草刈作業、緑地公園の利用、コンテナターミナルの利用、周辺居住))	Cs-134	μSv/h per Bq/g	別表 7 参照	再生資材を埋立柱材・中詰材として再利用し緑地公園・コンテナターミナルを造成した場合の各利用形態での外部被ばく線量換算係数を、それぞれ MCNP5 コードを用いて導出した。なお、子どもの外部被ばく線量換算係数は成人の計算値を 1.3 倍した。
Cs-137					
11~56	埋立柱材の空隙率		-	0.25	再生資材の真密度 (2.6~2.7 g/cm ³) と埋立柱材のかさ密度 (2.0 g/cm ³) から導出し、0.25 とした。
11~56	中詰材の空隙率		-	0.35	再生資材の真密度 (2.6~2.7g/cm ³) と中詰材のかさ密度 (1.7 g/cm ³) から導出し、0.35 とした。
27~32,3 9~56	Cs の再生資材の分配係数		L/kg	270	IAEA TRS No.364 (有機土、砂)
27~32,3 9~56	浸透水量		m/y	0.4	クリアランスレベル評価で使用している、日本の浸透水量の平均値である 0.4 とした。
39~56	Cs の帯水層土壌の分配係数		L/kg	270	IAEA TRS No.364 (砂)
27~32, 39~44	Cs の海底土壌の分配係数		L/kg	430	(Uchida & Tagami, 2016)から、日本沿岸の海水中 Cs 濃度及び堆積物中 Cs 濃度のデータから求められた分配係数を設定。
39~56	帯水層厚さ		m	3	IAEA-TECDOC-401 に示された値を用いた。
39~56	地下水流速(ダルシー流速)		m/d	1.0	「新版地下水調査法」(山本 莊毅、(株)古院書院、1983 年)
39~56	帯水層空隙率		-	0.3	「水理公式集」(土木学会水理公式集改訂委員会、土木学会、1971 年)
39~56	帯水層土壌密度		g/cm ³	2.6	「土質工学ハンドブック」(土質工学会編、1982 年)
39~56	地下水流方向の分散長		m	0	保守的に選定した
39~56	地下水流方向の分散係数		m ² /y	0	保守的に選定した

表 A.1-5 海面埋立への再生資材利用に係る評価経路のパラメーター一覧(12/21)

経路 No	名称	単位	選定値	選定根拠
27~32, 39~56	再生資材の利用部材から 海までの距離	m	0	保守的な設定とした。
27~32, 39~56	海水交換による外洋への核 種の年あたりの移行率 ($\lambda_{a0,6}$)	1/y	13.8	日本沿岸には大規模な海流が定常的に存在 することを考慮し、海域にパルスで流入し た核種は単位時間で全量が外洋へ流出する と想定した。海洋層から外洋への核種移行 のみを想定した場合に1年間で全量が外洋 へ流出することを移行率で表現するため に、1年間で核種量が100万分の1になる 移行率の13.8を設定(ある時間における海 洋層中の核種量は直前のタイムステップに おける核種量の $1/\exp(\lambda_{a0,6}t)$ 倍となる)。
27~32, 39~44	海洋層の体積	m ³	8.0E+09	海洋へ流出した核種による被ばく線量の評 価を規制科学の分野で適用することを考 え、海面埋立地を造成した際の影響を評価 する海域を行政区域程度の単位で想定し、 仮想的な海洋層の体積として代表的な値を 設定。
27~32, 39~44	海洋層の厚さ	m	8	大型船舶が停泊できる水深18mから境界層 10mを差し引いて算出した
27~32, 39~44	海洋層の面積	m ²	1.0E+09	海洋層の体積を海洋層の厚さで割って算出
27~32, 39~44	境界層(水相)の厚さ	m	10	(OECD/NEA,1985)の Table2.5.6 に示された Depth of water in BBL を設定。
27~32, 39~44	境界層(粒子相)の厚さ	m	1.0E-03	(OECD/NEA,1985) の Table2.5.6 に示された Depth of sediment in BBL を設定。
27~32, 39~44	生物擾乱層の厚さ	m	1.0E-01	(OECD/NEA,1985) の Table2.5.6 に示された Depth of bioturbation layer を設定。

表 A.1-5 海面埋立への再生資材利用に係る評価経路のパラメーター一覧(13/21)

経路 No	名称	単位	選定値	選定根拠
27~32, 39~44	拡散層の厚さ	m	1.9	(OECD/NEA,1985) の Table2.5.6 に示された Depth of diffusive layer を設定。
27~32, 39~44	海水中拡散係数 (海洋水と境界層との間の鉛直混合係数)	m ² /s	1.0E-04	(OECD/NEA,1985)の 4.3.4 mixing rate に示された渦拡散率。
27~32, 39~44	間隙水中拡散係数	m ² /s	1.0E-09	(OECD/NEA,1985)の Table2.5.6 に示された Pore water diffusion rate を設定。
27~32, 39~44	生物擾乱係数	m ² /s	3.0E-13	(OECD/NEA,1985) の Table2.5.6 に示された Bioturbation rate を設定。
27~32, 39~44	堆積速度	m/y	1.0E-05	(OECD/NEA,1985) の Table2.5.6 に示された Sedimentation rate を設定。
27~32, 39~44	堆積物中間隙率	-	0.6	(OECD/NEA,1985) の Table2.5.6 に示された Volume fraction of sediment の 0.4 より算出。

表 A.1-5 海面埋立への再生資材利用に係る評価経路のパラメーター一覧(14/21)

経路 No	名称	単位	選定値	選定根拠
27~32, 39~44	小粒子の沈降速度	m/y	3.00E+02	(OECD/NEA,1985)の Table2.5.15 より設定。
27~32, 39~44	大粒子の沈降速度	m/y	3.65E+04	(OECD/NEA,1985) の Table2.5.15 より設定。
27~32, 39~44	海洋層の小粒子濃度	kg/m ³	1.00E-05	(OECD/NEA,1985) の Table2.5.15 より設定。
27~32, 39~44	海洋層の大粒子濃度	kg/m ³	2.00E-07	(OECD/NEA,1985) の Table2.5.15 より設定。
27~32, 39~44	堆積物の真密度	kg/m ³	2,600	生物擾乱層と拡散層中の堆積物の真密度を想定し、帯水層土壌密度と同値とした。
27~32, 39~44	境界層 (粒子相) から境界層 (水相) への脱着による移行率	1/y	1.5E+04	(OECD/NEA,1985) の Table2.5.6 に示された Desorption rate を設定。
27~32, 39~44	浮遊している粒子濃度 (境界層 (粒子相) 中)	kg/m ³	1.0E-01	(OECD/NEA,1985) の Table2.5.6 に示された Suspended sediment load in BBL を設定。

表 A.1-5 海面埋立への再生資材利用に係る評価経路のパラメーター一覧(15/21)

経路 No	名称		単位	選定値	選定根拠
27,28, 39,40	Cs の海産物 への濃縮係 数	遊泳性魚類	L/kg	35	本評価で新たに追加した遊泳性魚類と底生魚類については、日本沿岸における各海洋生物中の Cs-137 の濃縮係数を示した (Tagami & Uchida, 2013) を基に設定した。上記文献では遊泳性魚類 (Pelagic Fish) に対して 13 種 41 個体、底生魚類 (Benthic Fish) に対して 5 種 16 個体、無脊椎動物 (Crustaceans で代表) に対して 8 種 14 個体、藻類 (Macroalgae) に対して 13 種 116 個体の濃縮係数を調査しており、本評価ではそれぞれの魚種の平均濃縮係数を用いた。
		底生魚類		36	
		無脊椎動物		36	
		藻類		48	
27,28, 39,40	海産物の市場係数		-	1	自給自足を考慮して、最も保守的に選定した。
27,28, 39,40	海産物の輸送時間		h	0	保守的に漁獲後直ちに消費する人を評価対象とした

表 A.1-5 海面埋立への再生資材利用に係る評価経路のパラメーター一覧(16/21)

経路 No	名称		単位	選定値	選定根拠
27,28, 39,40	海産物の 年間摂取量 (成人)	遊泳性魚類	kg/y	9.9	「国民栄養・健康調査 (http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/GL08020101.do?_toGL08020101_&tstatCode=000001041744&requestSender=dsearch)」に示された平成 27 年の魚、無脊椎動物、海草類の全国平均の 1 人 1 日あたりの摂取量のデータから設定した。遊泳性魚類と底生魚類の摂取量は、上記の文献に魚として定められている魚種を (Tagami & Uchida, 2013)等を参考に遊泳性魚類と底生魚類に分け、それらの摂取量から設定した。魚種ごとの摂取量は、日本における各魚種の水揚量と摂取量の割合が同じであると仮定し、各魚種の水揚量から摂取量を見積もった。各魚種の水揚量は、「農林水産省 産地水産物流通調査 上場水揚量・価額・価格 品目別 2015 年」から求めた。
		底生魚類		1.8	
		無脊椎動物		3.7	
		藻類		3.7	
27,28, 39,40	海産物の 年間摂取量 (子ども)	遊泳性魚類	kg/y	4.0	「平成 21 年国民健康・栄養調査報告書」の「第 5 表の 1 食品群別摂取量 (総数、年齢階級別)」によると、魚介類の 1 人 1 日あたりの摂取量の平均値は、子ども (1~6 歳) で 32.1 g、成人 (20 歳以上) で 79.8 g であり、成人に対する子どもの摂取量の比は約 0.40 となる。また、藻類の一人一日あたりの摂取量の平均値は、子ども (1~6 歳) で 5.8 g、成人 (20 歳以上) で 10.9 g であり、成人に対する子どもの摂取量の比は約 0.53 となる。これより、子どもの海産物 (魚類、無脊椎動物、藻類) の摂取量は、成人の摂取量にそれぞれ 0.40、0.40、0.53 を乗じた値を設定する。
		底生魚類		0.7	
		無脊椎動物		1.5	
		藻類		2.0	

表 A.1-5 海面埋立への再生資材利用に係る評価経路のパラメーター一覧(17/21)

経路 No	名称		単位	選定値	選定根拠
29,41	年間海岸活動時間		h/y	500	「発電用軽水型原子炉施設の安全審査における一般公衆の線量評価について」に示されている海浜作業の実働時間数の最大値のうち、最も大きな数値を採用した。
29,41	海岸砂の密度		kg/m ³	1,500	「発電用軽水型原子炉施設の安全審査における一般公衆の線量評価について」に示された値を採用した。
29,41	海水から海岸砂への移行係数		L/kg	430	(Uchida & Tagami, 2016)から、日本沿岸の海水中 Cs 濃度及び堆積物中 Cs 濃度のデータから求められた分配係数を設定。
29,41	外部被ばくに対する線量換算係数（海岸活動者成人）	Cs-134	μSv/h per Bq/g	1.2E-01	「発電用軽水型原子炉施設の安全審査における一般的公衆の線量評価について（平成13年3月29日原子力安全委員会）」に基づき QAD-CGGP2R コードにより算出した。
		Cs-137		4.3E-02	
30~32, 42~44	浚渫作業者年間作業時間		h/y	1,000	保守的に1日8時間、年間250日の労働時間の半分の時間を、当該作業に従事とした。
30,42	外部被ばく線量換算係数（浚渫作業成人）	Cs-134	μSv/h per Bq/g	1.7E-01	以下の条件により MCNP5 コードにより算出した。 線源の形状：高さ3m、幅10m、長さ25mの直方体 線源のかさ密度：1.7g/cm ³ 評価点：10m×25mの面の中央端、高さ1m
		Cs-137		6.1E-02	
30,42	浚渫作業時の遮へい係数		-	1.0	甲板で作業する作業者を想定して保守的な値とした。
45~56	再生資材の利用部材から井戸までの距離		-	0	保守的な設定とした。
45~56	井戸水の混合割合		-	0.33	「地下水ハンドブック」(地下水ハンドブック編集委員会編、(株)建設産業調査会、1979年)

表 A.1-5 海面埋立への再生資材利用に係る評価経路のパラメーター一覧(18/21)

経路 No	名称	単位	選定値	選定根拠
45	人の年間飲料水摂取量 (成人)	m ³ /y	0.61	ICRP Publ.23 の標準人の値を参考に、1日の摂取量を 1.65L として算定した。
46	人の年間飲料水摂取量 (子ども)	m ³ /y	0.1	IAEA Safety Reports Series No.44 に示された値を用いた。
47,48	Cs の農耕土壌の分配係数	mL/g	270	IAEA TRS No.364 (有機土壌)
49~52	灌漑水量 (畑、牧草地)	m ³ /m ² /y	1.2	「日本の農業用水」(農業水利研究会編、(株)地球社、1980 年) に示された畑地に対する平均単位用水量 4mm/d と年間灌漑日数 300 日程度に基づいて選定した。
49~54	土壌水分飽和度 (畑、牧草地)	-	0.2	JAEA 原科研敷地内(砂層)における測定結果より選定した。
49~54	土壌実効表面密度	kg/m ²	240	U.S.NRC Regulatory Guide 1.109 に示された値を用いた。
49~54	灌漑土壌真密度	g/cm ²	2.6	「土質工学ハンドブック」(土質工学会編、1982 年) に示された砂の粒子密度を基に選定した。
49~54	実効土壌深さ	cm	15	U.S.NRC Regulatory Guide 1.109 に示された値を用いた。
49~54	放射性核種の土壌残留係数	-	1	保守的に、全ての灌漑水中の放射性核種が土壌に残留するものとした。
49~54	灌漑土壌空隙率	-	0.3	「水理公式集」(土木学会水理公式集改訂委員会、土木学会、1971 年)
47,48	農耕作業による年間作業時間	h/y	500	「日本の統計 2009 年版」(総務庁統計局編、2009 年) に記載されている平成 18 年度の 1 戸当たりの平均経営耕地面積 248a (水田率 54.4%)、水稲 10a 当たりの労働時間 29.2 時間、小麦 10a 当たりの労働時間 5.6 時間を基に算出し、値に裕度を持って選定した。 $248 \times 0.544 \times 2.92 + 248 \times (1 - 0.544) \times 0.56 = 457 \text{ (h/y)}$

表 A.1-5 海面埋立への再生資材利用に係る評価経路のパラメーター一覧(19/21)

経路 No	名称		単位	選定値	選定根拠
47	外部被ばくに対する線量換算係数(農耕作業時:灌漑土壌からの外部被ばく)	Cs-134	μSv/h per Bq/g	4.7E-01	従来のクリアランスレベル評価で設定されている換算係数を設定した。条件は以下のとおりである。 線源の形状:高さ 10m、半径 500m の円柱、 線源のかさ密度:2.0g/cm ³ 以上の条件で QAD-CGGP2R コードにより算出されている。
		Cs-137		1.7E-01	
47	農耕作業時の遮へい係数		-	1.0	保守的に遮へいを考慮しない。
49~52	灌漑水年間生育期間		d	60	「発電用軽水型原子炉施設の安全審査における一般公衆の線量評価について」に示された葉菜に関する栽培期間の値(60d/y)を使用した。
49~52	農作物(葉菜、牧草)の栽培密度		kg/m ²	2.3	「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に対する評価指針」(原子力安全委員会、平成元年3月27日)
49~52	放射性核種の農作物(葉菜、牧草)表面への沈着割合		-	1	保守的に全ての放射性核種が、農作物表面へ沈着するとした。
49~52	weathering 効果による食物表面沈着放射性核種の除去係数		1/y	18.08	「発電用軽水型原子炉施設の安全評価における一般公衆の線量評価について」に基づき、weathering half-life を 14 日として計算した。
49,50	農作物の市場係数		-	1	自給自足を考慮して、最も保守的に選定した。
49,50	農作物の輸送時間		d	0	保守的に、生産された農作物を直ちに消費する人を評価対象とした。
49,50	灌漑水量(田)		m ³ /m ² /y	2.4	「日本の農業用水」(農業水利研究会、(株)地球社、1980年)に示された水田に対する平均単位用水量 24mm/d と水田の年間湛水期間 100 日程度に基づいて選定した。
49,50	土壌水分飽和度(田)		-	1	田の土壌水分飽和度は、水田を想定しており、1 と選定した。

表 A.1-5 海面埋立への再生資材利用に係る評価経路のパラメーター一覧(20/21)

経路 No	名称		単位	選定値	選定根拠
49,50	Cs の葉菜、非葉菜、果実への移行係数		Bq/g-wet per Bq/g	0.057	IAEA TRS No.364 (ジャガイモ)
49	農作物の年間摂取量(成人)	米	kg/y	71	「平成8年版国民栄養の現状」(厚生省保健医療局健康増進栄養課監修、第一出版(株)、1996年)
		葉菜		12	
		非葉菜		45	
		果実		22	
50	農作物の年間摂取量(子ども)	米	kg/y	25	「平成9年版国民栄養の現状」(厚生省保健医療局健康増進栄養課監修、第一出版(株)、1997年)
		葉菜		5	
		非葉菜		23	
		果実		22	
51~54	Cs の畜産物への移行係数	牛肉	d/kg	0.05	IAEA TRS No.364 に示された値を用いた。
		豚肉		0.24	
		鶏肉	d/L	10	
		鶏卵		0.4	
		牛乳	d/L	0.0079	
51~54	畜産物の市場係数		-	1	自給自足を考慮して、最も保守的に選定した。
51~54	畜産物の輸送時間		d	0	保守的に、生産された畜産物を直ちに消費する人を評価対象とした。
51,52	放射性核種を含む飼料の混合割合		-	1	保守的に、放射性核種を含む飼料のみで家畜を飼育するとした。
51,52	Cs の飼料への移行係数		Bq/g-dry per Bq/g	0.53	IAEA TRS No.364 (牧草)
51,52	家畜の飼料摂取量	肉牛	kg-dry/d	7.2	IAEA TRS No.364 において示された値を使用した。
		乳牛		16.1	
		豚		2.4	
		鶏		0.07	

表 A.1-5 海面埋立への再生資材利用に係る評価経路のパラメーター一覧(21/21)

経路 No	名称		単位	選定値	選定根拠
51,53	畜産物の 年間摂取量 (成人)	牛肉	kg/y	8	「平成 8 年版国民栄養の現状」(厚生省保健 医療局健康増進栄養課監修、第一出版(株)、 1996 年)
		豚肉		9	
		鶏肉		7	
		鶏卵		16	
		牛乳	L/y	44	
52,54	畜産物の 年間摂取量 (子ども)	牛肉	kg/y	3	「平成 9 年版国民栄養の現状」(厚生省保健 医療局健康増進栄養課監修、第一出版(株)、 1997 年)
		豚肉		4	
		鶏肉		5	
		鶏卵		10	
		牛乳	L/y	29	
53,54	家畜の飼育 水摂取量	肉牛	L/d	50	PNL-3209 に示された値を用いた。
		乳牛		60	
		豚		10	
		鶏		0.3	
55,56	養殖淡水産物の地下水 利用率		-	0.25	「日本の水資源 (平成 19 年版)」(国土庁長 官官房水資源部編、大蔵省印刷局、2008 年) より選定した。
55,56	Cs の魚類への濃縮係数		L/kg	2,000	IAEA TRS No.364 に示された値を用いた。
55,56	養殖淡水産物の市場係数		-	1	自給自足を考慮して、最も保守的に選定し た。
55,5	養殖淡水産物の輸送時間		d	0	保守的に、養殖された淡水産物を直ちに消 費する人を評価対象とした。
55	養殖淡水産物 (魚類) の 年間摂取量 (成人)		kg/y	0.7	「日本の統計 1997 年版」に記載されている 平成 6 年の内水面養殖業の生産量の内、魚 類の生産量の合計値 76,579 トンを人口 1 億 2 千万人で除して算出した。
56	養殖淡水産物 (魚類) の 年間摂取量 (子ども)		kg/y	0.33	全年齢の魚介類合計摂取量の平均値(96.9g/ 日)と 1-6 歳の平均値(45.7g/日)の比 (0.47) を成人の年間摂取量 0.7kg/年に乗じた 0.33kg/年を算出した。

別表 1 投入方法ごとの外部被ばく線量換算係数（ケース 3,4、セル式護岸）

投入方法	積載 状況	対象作業 者	遮へい 係数	外部被ばく線量換算係数 ($\mu\text{Sv/h per Bq/g}$) (上:Cs-134、下:Cs-137)	被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)
揚土装置付自航運 搬船	満載	作業 者 A	0.4	1.8E-01	3.3E-02
				6.6E-02	
	満載	作業 者 B	1.0	2.6E-01	1.1E-01
				9.3E-02	
	空	作業 者 C	0.4	3.2E-02	5.7E-03
				1.2E-02	
	空	作業 者 D	1.0	7.5E-02	3.0E-02
				2.4E-02	
揚土船+土運船	満載	作業 者 A	0.4	1.0E-01	1.8E-02
				3.8E-02	
	満載	作業 者 B	1.0	1.5E-01	6.5E-02
				5.3E-02	
	満載	作業 者 C	1.0	6.2E-02	2.7E-02
				2.2E-02	
	満載	作業 者 D	1.0	1.1E-01	4.5E-02
				3.3E-02	

別表2 投入方法ごとの外部被ばく線量換算係数（ケース3,4、重力式護岸）

投入方法	積載 状況	対象作業 者	遮へい 係数	外部被ばく線量換算係数 ($\mu\text{Sv/h per Bq/g}$) (上:Cs-134、下:Cs-137)	被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)
揚土装置付自航 運搬船	満載	作業 者 A	0.4	1.6E-01	2.8E-02
				5.7E-02	
	満載	作業 者 B	1.0	1.9E-01	8.5E-02
				6.9E-02	
	空	作業 者 C	0.4	1.4E-02	2.4E-03
				4.9E-03	
	空	作業 者 D	1.0	1.3E-02	5.3E-03
				4.2E-03	
揚土船+土運船	満載	作業 者 A	0.4	7.8E-02	1.4E-02
				3.0E-02	
	満載	作業 者 B	1.0	2.4E-02	1.1E-02
				8.6E-03	
	満載	作業 者 C	1.0	3.7E-02	1.7E-02
				1.4E-02	
	満載	作業 者 D	1.0	9.6E-02	3.9E-02
				2.9E-02	

別表3 投入方法ごとの外部被ばく線量換算係数（ケース1,2）

投入方法	積載状況	対象作業者	遮へい係数	外部被ばく線量換算係数 ($\mu\text{Sv/h per Bq/g}$) (上:Cs-134、下:Cs-137)	被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)
揚土装置付自航運 搬船	満載	作業者A	0.4	1.7E-01	3.0E-02
				6.2E-02	
	満載	作業者B	1.0	2.1E-01	9.2E-02
				7.5E-02	
	空	作業者C	0.4	6.3E-02	1.1E-02
				2.2E-02	
	空	作業者D	1.0	9.2E-02	4.1E-02
				3.4E-02	
揚土船+土運船	満載	作業者A	0.4	1.0E-01	1.8E-02
				3.7E-02	
	満載	作業者B	1.0	3.1E-02	1.4E-02
				1.1E-02	
	満載	作業者C	1.0	5.3E-02	2.3E-02
				1.9E-02	
	満載	作業者D	1.0	9.5E-02	4.4E-02
				3.5E-02	
バックホウ+ 土運船	満載	作業者A	0.4	1.7E-01	2.9E-02
				5.6E-02	
	満載	作業者B	0.4	1.3E-01	2.4E-02
				4.9E-02	
	満載	作業者C	0.4	1.3E-01	2.3E-02
				4.7E-02	
	満載	作業者D	0.4	1.4E-01	2.5E-02
				5.1E-02	
トラック（大型）	満載	作業者	0.9	4.4E-01	1.8E-01
				1.6E-01	
トラック（中型）	満載	作業者	0.9	4.4E-01	1.8E-01
				1.6E-01	

別表4 投入方法ごとの外部被ばく線量換算係数（ケース3,4、セル式護岸）

投入方法	積載状況	対象作業者	遮へい係数	外部被ばく線量換算係数 ($\mu\text{Sv/h per Bq/g}$) (上:Cs-134、下:Cs-137)	被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)
揚土装置付自航 運搬船	満載	作業者	1.0	8.0E-02	3.5E-02
				2.8E-02	
揚土船 +土運船	-	作業者	1.0	1.3E-01	5.5E-02
				4.4E-02	
バックホウ+ 土運船	-	作業者	0.4	1.0E-02	1.7E-03
				3.3E-03	
トラック (中型)	-	作業者	0.9	2.6E-01	1.0E-01
				9.1E-02	

別表5 投入方法ごとの外部被ばく線量換算係数（ケース3,4、重力式護岸）

投入方法	積載状況	対象作業者	遮へい係数	外部被ばく線量換算係数 ($\mu\text{Sv/h per Bq/g}$) (上:Cs-134、下:Cs-137)	被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)
揚土装置付自航 運搬船	満載	作業者	1.0	1.9E-03	8.3E-04
				6.7E-04	
揚土船 +土運船	-	作業者	1.0	3.5E-03	1.4E-03
				1.1E-03	
バックホウ+ 土運船	-	作業者	0.4	4.2E-03	6.6E-04
				1.3E-03	
トラック (中型)	-	作業者	0.9	7.1E-03	2.6E-03
				2.3E-03	

別表6 施工時のケースごとの外部被ばく線量換算係数

ケース (線源)	護岸タイプ	外部被ばく線量換算係数 (μSv/h per Bq/g) 上: Cs-134、下 Cs-137		
		作業者		周辺居住者 (成人)
		中詰材の敷均し	埋立材の 敷均し・締固め	埋立地からの距離 1m
1,2 (埋立材)	—	-	4.3E-01	1.2E-01
		-	1.5E-01	4.5E-02
3,4 (中詰材)	セル式護岸	3.5E-01	2.5E-01	9.0E-02
		1.3E-01	8.7E-02	3.2E-02
3,4 (中詰材)	重力式護岸	3.5E-01	6.4E-03	8.2E-02
		1.3E-01	2.1E-03	3.0E-02

別表7 供用時のケースごとの外部被ばく線量換算係数

ケース (線源、用途)	護岸 タイプ	外部被ばく線量換算係数 (μSv/h per Bq/g) (上: Cs-134、下 Cs-137)			
		作業者	利用者		周辺居住者 (成人)
		草刈り作業	緑地公園の 利用	コンテナター ミナルの利用	埋立地から の距離 1m
1 (埋立柱材、緑地公園)	—	1.6E-02	1.6E-02	-	3.9E-03
		5.1E-03	5.1E-03	-	1.3E-03
2 (埋立柱材、コンテナターミナル)	—	-	-	2.1E-03	5.7E-04
		-	-	6.1E-04	1.7E-04
3 (中詰材、緑地公園)	セル式 護岸	3.6E-03	4.7E-03	-	1.1E-02
		1.1E-03	1.5E-03	-	4.1E-03
4 (中詰材、コンテナターミナル)	セル式 護岸	-	-	3.2E-03	1.1E-02
		-	-	1.0E-03	3.8E-03
3 (中詰材、緑地公園)	重力式 護岸	2.6E-03	4.1E-03	-	4.0E-04
		8.2E-04	1.3E-03	-	1.2E-04
4 (中詰材、コンテナターミナル)	重力式 護岸	-	-	1.4E-03	3.0E-04
		-	-	4.14E-04	9.3E-05

¹ 災害廃棄物安全評価検討会 (第9回) 資料 11-1. 平成 23 年 11 月 15 日

A.1.9 海面埋立地への再生利用に係る被ばく評価結果の詳細

表 3.1-2 で示した評価経路の被ばく評価を行った。評価に用いたパラメーターは表 A.1-5 に示した。表 A.1-6 から表 A.1-31 に、各評価経路の Cs-134 及び Cs-137 の単位濃度 (1 Bq/g) あたりの影響を評価した結果を示す。また、Cs-134 と Cs-137 の比は $Cs-134/Cs-137=0.209$ と仮定[※]し、Cs-134 と Cs-137 の和 (全 Cs) による単位濃度 (1 Bq/g) あたりの線量に換算した値も併せて示す。さらに、1mSv/y を超えない条件を満足する再生資材中の放射性セシウムの濃度 (1mSv/y 相当濃度) を示す。

表 A.1-6 から表 A.1-31 においては、作業員及び一般公衆の被ばく線量が 1 mSv/y を超えない条件を満足する再生資材中の放射性セシウム濃度として 4,000 Bq/kg (埋立材利用時) 及び 6,000 Bq/kg (中詰材利用時) を選定した場合の被ばく線量も示す。また、環境省「再生資材化した除去土壌の安全な利用に係る基本的考え方について」(平成 28 年 6 月 30 日、平成 29 年 4 月 26 日一部追加) で示された再生資材として利用可能な放射能濃度レベル (8,000 Bq/kg 以下を原則) を考慮し、8,000Bq/kg (埋立材・中詰材利用時) の濃度条件に対する再生資材を使用した場合の被ばく線量も併せて示す。

※再生資材の利用開始時期は福島第一原子力発電所事故から 5 年後、事故直後の Cs-134 (半減期 2.06 年) と Cs-137 (半減期 30.0 年) の存在割合を 1:1 と仮定する。

表 A.1-6 評価結果（建設現場への運搬）ケース 1,2 共通

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	4,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
1	積み下ろし作業者外部	2.0E-02	8.3E-03	1.0E-02	9.7E+04	4.1E-02	8.3E-02
2	積み下ろし作業者吸入	2.0E-05	1.6E-05	1.7E-05	6.0E+07	6.6E-05	1.3E-04
3	積み下ろし作業者直接経口摂取	3.2E-04	2.6E-04	2.7E-04	3.7E+06	1.1E-03	2.1E-03
4	運搬作業者外部	4.5E-02	1.9E-02	2.3E-02	4.3E+04	9.3E-02	1.9E-01
5	土運船への積み込み作業者外部	9.2E-02	3.8E-02	4.8E-02	2.1E+04	1.9E-01	3.8E-01
6	土運船への積み込み作業者吸入	2.0E-05	1.6E-05	1.7E-05	6.0E+07	6.6E-05	1.3E-04
7	土運船への積み込み作業者経口摂取	3.2E-04	2.6E-04	2.7E-04	3.7E+06	1.1E-03	2.1E-03
8	土運船による運搬作業者外部	3.7E-02	1.6E-02	2.0E-02	5.1E+04	7.8E-02	1.6E-01
9	運搬経路周辺居住者(成人)外部	5.9E-03	2.3E-03	2.9E-03	3.4E+05	1.2E-02	2.4E-02
10	運搬経路周辺居住者(子ども)外部	7.6E-03	3.0E-03	3.8E-03	2.6E+05	1.5E-02	3.1E-02

表 A.1-7 評価結果（建設現場への運搬）ケース 3,4 共通

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	6,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
1	積み下ろし作業者外部	2.0E-02	8.3E-03	1.0E-02	9.7E+04	6.2E-02	8.3E-02
2	積み下ろし作業者吸入	2.0E-05	1.6E-05	1.7E-05	6.0E+07	9.9E-05	1.3E-04
3	積み下ろし作業者直接経口摂取	3.2E-04	2.6E-04	2.7E-04	3.7E+06	1.6E-03	2.1E-03
4	運搬作業者外部	4.5E-02	1.9E-02	2.3E-02	4.3E+04	1.4E-01	1.9E-01
5	土運船への積み込み作業者外部	9.2E-02	3.8E-02	4.8E-02	2.1E+04	2.9E-01	3.8E-01
6	土運船への積み込み作業者吸入	2.0E-05	1.6E-05	1.7E-05	6.0E+07	9.9E-05	1.3E-04
7	土運船への積み込み作業者経口摂取	3.2E-04	2.6E-04	2.7E-04	3.7E+06	1.6E-03	2.1E-03
8	土運船による運搬作業者外部	3.7E-02	1.6E-02	2.0E-02	5.1E+04	1.2E-01	1.6E-01
9	運搬経路周辺居住者(成人)外部	5.9E-03	2.3E-03	2.9E-03	3.4E+05	1.8E-02	2.4E-02
10	運搬経路周辺居住者(子ども)外部	7.6E-03	3.0E-03	3.8E-03	2.6E+05	2.3E-02	3.1E-02

表 A.1-8 評価結果（埋立地造成）ケース 1,2 共通

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	4,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
11	中詰材の投入作業者外部	-	-	-	-	-	-
12	中詰材の投入作業者粉塵吸入	-	-	-	-	-	-
13	中詰材の投入作業者経口摂取	-	-	-	-	-	-
14	中詰材の敷均し作業者外部	-	-	-	-	-	-
15	中詰材の敷均し作業吸入	-	-	-	-	-	-
16	中詰材の敷均し作業者経口摂取	-	-	-	-	-	-
17	埋立柱材の投入作業者外部(中型トラック)	3.4E-01	1.4E-01	1.8E-01	5.7E+03	7.0E-01	1.4E+00
18	埋立柱材の投入作業者吸入	2.0E-05	1.6E-05	1.7E-05	6.0E+07	6.6E-05	1.3E-04
19	埋立柱材の投入作業者経口摂取	3.2E-04	2.6E-04	2.7E-04	3.7E+06	1.1E-03	2.1E-03
20	埋立柱材の敷均し・締固め作業者外部	4.0E-01	1.6E-01	2.0E-01	4.9E+03	8.2E-01	1.6E+00
21	埋立柱材の敷均し・締固め作業者粉塵吸入	2.0E-05	1.6E-05	1.7E-05	6.0E+07	6.6E-05	1.3E-04
22	埋立柱材の敷均し・締固め作業者経口摂取	3.2E-04	2.6E-04	2.7E-04	3.7E+06	1.1E-03	2.1E-03
23	建設現場周辺居住者(成人)外部	1.8E-01	7.8E-02	9.5E-02	1.0E+04	3.8E-01	7.6E-01
24	建設現場周辺居住者(成人)粉塵吸入	9.4E-05	7.6E-05	8.0E-05	1.3E+07	3.2E-04	6.4E-04
25	建設現場周辺居住者(子ども)外部	2.3E-01	1.0E-01	1.2E-01	8.1E+03	5.0E-01	9.9E-01
26	建設現場周辺居住者(子ども)粉塵吸入	2.4E-05	2.1E-05	2.1E-05	4.7E+07	8.5E-05	1.7E-04

※「-」は対象外の評価経路

表 A.1-9 評価結果（埋立地造成）ケース 3,4 共通、セル式護岸

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	6,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
11	中詰材投入作業員外部(自航運搬船)	2.2E-01	9.2E-02	1.1E-01	8.8E+03	6.9E-01	9.1E-01
12	中詰材投入作業員粉塵吸入	2.0E-05	1.6E-05	1.7E-05	6.0E+07	9.9E-05	1.3E-04
13	中詰材投入作業員経口摂取	3.2E-04	2.6E-04	2.7E-04	3.7E+06	1.6E-03	2.1E-03
14	中詰材の敷均し作業員外部	3.0E-01	1.3E-01	1.6E-01	6.3E+03	9.5E-01	1.3E+00
15	中詰材の敷均し作業員吸入	2.0E-05	1.6E-05	1.7E-05	6.0E+07	9.9E-05	1.3E-04
16	中詰材の敷均し作業員経口摂取	3.2E-04	2.6E-04	2.7E-04	3.7E+06	1.6E-03	2.1E-03
17	埋立柱材の投入作業員外部(中型トラック)	2.0E-01	8.1E-02	1.0E-01	9.9E+03	6.1E-01	8.1E-01
18	埋立柱材の投入作業員吸入	-	-	-	-	-	-
19	埋立柱材の投入作業員経口摂取	-	-	-	-	-	-
20	埋立柱材の敷均し・締固め作業員外部	2.1E-01	8.6E-02	1.1E-01	9.3E+03	6.4E-01	8.6E-01
21	埋立柱材の敷均し・締固め作業員粉塵吸入	-	-	-	-	-	-
22	埋立柱材の敷均し・締固め作業員経口摂取	-	-	-	-	-	-
23	建設現場周辺居住者(成人)外部	1.3E-01	5.5E-02	6.9E-02	1.5E+04	4.1E-01	5.5E-01
24	建設現場周辺居住者(成人)粉塵吸入	9.4E-05	7.6E-05	8.0E-05	1.3E+07	4.8E-04	6.4E-04
25	建設現場周辺居住者(子ども)外部	1.7E-01	7.2E-02	9.0E-02	1.1E+04	5.4E-01	7.2E-01
26	建設現場周辺居住者(子ども)粉塵吸入	2.4E-05	2.1E-05	2.1E-05	4.7E+07	1.3E-04	1.7E-04

※「-」は対象外の評価経路

表 A.1-10 評価結果（埋立地造成）ケース 3,4 共通、重力式護岸

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	6,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
11	中詰材投入作業員外部(自航運搬船)	1.6E-01	6.9E-02	8.5E-02	1.2E+04	5.1E-01	6.8E-01
12	中詰材投入作業員粉塵吸入	2.0E-05	1.6E-05	1.7E-05	6.0E+07	9.9E-05	1.3E-04
13	中詰材投入作業員経口摂取	3.2E-04	2.6E-04	2.7E-04	3.7E+06	1.6E-03	2.1E-03
14	中詰材の敷均し作業員外部	3.0E-01	1.2E-01	1.5E-01	6.5E+03	9.2E-01	1.2E+00
15	中詰材の敷均し作業員吸入	2.0E-05	1.6E-05	1.7E-05	6.0E+07	9.9E-05	1.3E-04
16	中詰材の敷均し作業員経口摂取	3.2E-04	2.6E-04	2.7E-04	3.7E+06	1.6E-03	2.1E-03
17	埋立柱材の投入作業員外部(中型トラック)	5.4E-03	2.0E-03	2.6E-03	3.8E+05	1.6E-02	2.1E-02
18	埋立柱材の投入作業員吸入	-	-	-	-	-	-
19	埋立柱材の投入作業員経口摂取	-	-	-	-	-	-
20	埋立柱材の敷均し・締固め作業員外部	5.4E-03	2.1E-03	2.6E-03	3.8E+05	1.6E-02	2.1E-02
21	埋立柱材の敷均し・締固め作業員粉塵吸入	-	-	-	-	-	-
22	埋立柱材の敷均し・締固め作業員経口摂取	-	-	-	-	-	-
23	建設現場周辺居住者(成人)外部	1.2E-01	5.1E-02	6.3E-02	1.6E+04	3.8E-01	5.1E-01
24	建設現場周辺居住者(成人)粉塵吸入	9.4E-05	7.6E-05	8.0E-05	1.3E+07	4.8E-04	6.4E-04
25	建設現場周辺居住者(子ども)外部	1.6E-01	6.6E-02	8.2E-02	1.2E+04	4.9E-01	6.6E-01
26	建設現場周辺居住者(子ども)粉塵吸入	2.4E-05	2.1E-05	2.1E-05	4.7E+07	1.3E-04	1.7E-04

* ケース 1：埋立柱材に利用し緑地公園を造成 ケース 2：埋立柱材に利用しコンテナターミナルを造成

* ケース 3：中詰材に利用し緑地公園を造成 ケース 4：中詰材に利用しコンテナターミナルを造成

※「-」は対象外の評価経路

表 A.1-11 評価結果（土砂投入による海洋への核種流出）ケース 1,2 共通
（護岸の一部を開けて造成した場合）

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	4,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
27	海産物摂取(成人)	8.2E-05	8.7E-05	8.6E-05	1.2E+07	3.4E-04	6.9E-04
28	海産物摂取(子ども)	3.7E-05	4.0E-05	3.9E-05	2.6E+07	1.6E-04	3.1E-04
29	海岸活動者外部	6.9E-05	3.1E-05	3.8E-05	2.6E+07	1.5E-04	3.0E-04
30	浚渫作業者外部	2.1E-06	1.2E-06	1.4E-06	7.4E+08	5.4E-06	1.1E-05
31	浚渫作業者粉塵吸入	2.8E-10	3.2E-10	3.1E-10	3.2E+12	1.2E-09	2.5E-09
32	浚渫作業者経口摂取	4.7E-09	5.1E-09	5.0E-09	2.0E+11	2.0E-08	4.0E-08

表 A.1-12 評価結果（土砂投入による海洋への核種流出）ケース 1,2 共通
（護岸を閉じて造成した場合）

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	4,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
27	海産物摂取(成人)	5.7E-08	7.5E-08	7.2E-08	1.4E+10	2.9E-07	5.8E-07
28	海産物摂取(子ども)	2.5E-08	3.4E-08	3.2E-08	3.1E+10	1.3E-07	2.6E-07
29	海岸活動者外部	8.6E-08	4.5E-08	5.2E-08	1.9E+10	2.1E-07	4.2E-07
30	浚渫作業者外部	1.1E-09	8.8E-10	9.2E-10	1.1E+12	3.7E-09	7.3E-09
31	浚渫作業者粉塵吸入	1.5E-13	2.3E-13	2.2E-13	4.6E+15	8.7E-13	1.7E-12
32	浚渫作業者経口摂取	2.4E-12	3.7E-12	3.5E-12	2.8E+14	1.4E-11	2.8E-11

表 A.1-13 評価結果（土砂投入による海洋への核種流出）ケース 3,4 共通
（土砂投入により海水流出を想定した場合）、セル式護岸

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	6,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
27	海産物摂取(成人)	2.5E-05	2.2E-05	2.2E-05	4.5E+07	1.3E-04	1.8E-04
28	海産物摂取(子ども)	1.2E-05	1.0E-05	1.0E-05	9.6E+07	6.3E-05	8.3E-05
29	海岸活動者外部	4.8E-07	2.2E-07	2.6E-07	3.8E+09	1.6E-06	2.1E-06
30	浚渫作業者外部	8.2E-07	3.7E-07	4.5E-07	2.2E+09	2.7E-06	3.6E-06
31	浚渫作業者粉塵吸入	1.1E-10	9.8E-11	1.0E-10	1.0E+13	6.0E-10	8.0E-10
32	浚渫作業者経口摂取	1.8E-09	1.6E-09	1.6E-09	6.2E+11	9.7E-09	1.3E-08

表 A.1-14 評価結果（土砂投入による海洋への核種流出）ケース 3,4 共通
（ポンプにより粒子流出を抑制した場合）、セル式護岸

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	6,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
27	海産物摂取(成人)	1.9E-07	1.6E-07	1.7E-07	6.0E+09	1.0E-06	1.3E-06
28	海産物摂取(子ども)	7.8E-08	6.9E-08	7.1E-08	1.4E+10	4.2E-07	5.6E-07
29	海岸活動者外部	4.8E-07	2.2E-07	2.6E-07	3.8E+09	1.6E-06	2.1E-06
30	浚渫作業者外部	1.7E-09	8.1E-10	9.7E-10	1.0E+12	5.8E-09	7.7E-09
31	浚渫作業者粉塵吸入	2.4E-13	2.1E-13	2.2E-13	4.6E+15	1.3E-12	1.7E-12
32	浚渫作業者経口摂取	3.9E-12	3.4E-12	3.5E-12	2.9E+14	2.1E-11	2.8E-11

表 A.1-15 評価結果（土砂投入による海洋への核種流出）ケース 3,4 共通
（土砂投入により海水流出を想定した場合）、重力式護岸

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	6,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
27	海産物摂取(成人)	2.0E-05	1.7E-05	1.8E-05	5.6E+07	1.1E-04	1.4E-04
28	海産物摂取(子ども)	9.2E-06	8.1E-06	8.3E-06	1.2E+08	5.0E-05	6.6E-05
29	海岸活動者外部	4.0E-07	1.8E-07	2.2E-07	4.6E+09	1.3E-06	1.7E-06
30	浚渫作業者外部	6.5E-07	3.0E-07	3.6E-07	2.8E+09	2.1E-06	2.9E-06
31	浚渫作業者粉塵吸入	8.8E-11	7.8E-11	8.0E-11	1.3E+13	4.8E-10	6.4E-10
32	浚渫作業者経口摂取	1.5E-09	1.3E-09	1.3E-09	7.7E+11	7.7E-09	1.0E-08

表 A.1-16 評価結果（土砂投入による海洋への核種流出）ケース 3,4 共通
（ポンプにより粒子流出を抑制した場合）、重力式護岸

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	6,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
27	海産物摂取(成人)	1.5E-07	1.3E-07	1.4E-07	7.3E+09	8.2E-07	1.1E-06
28	海産物摂取(子ども)	6.4E-08	5.7E-08	5.8E-08	1.7E+10	3.5E-07	4.6E-07
29	海岸活動者外部	3.9E-07	1.8E-07	2.2E-07	4.6E+09	1.3E-06	1.7E-06
30	浚渫作業者外部	1.4E-09	6.6E-10	7.9E-10	1.3E+12	4.8E-09	6.3E-09
31	浚渫作業者粉塵吸入	1.9E-13	1.7E-13	1.8E-13	5.6E+15	1.1E-12	1.4E-12
32	浚渫作業者経口摂取	3.2E-12	2.8E-12	2.9E-12	3.5E+14	1.7E-11	2.3E-11

* ケース 1：埋立材に利用し緑地公園を造成 ケース 2：埋立材に利用しコンテナターミナルを造成

* ケース 3：中詰材に利用し緑地公園を造成 ケース 4：中詰材に利用しコンテナターミナルを造成

表 A.1-17 評価結果（埋立地完成後）ケース 1

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	4,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
33	草刈作業者外部	3.4E-03	1.3E-03	1.6E-03	6.1E+05	6.5E-03	1.3E-02
34	緑地公園の利用者(成人)外部	5.4E-03	2.0E-03	2.6E-03	3.8E+05	1.0E-02	2.1E-02
35	緑地公園の利用者(子ども)外部	7.1E-03	2.6E-03	3.4E-03	3.0E+05	1.4E-02	2.7E-02
36	コンテナターミナルの利用者外部	-	-	-	-	-	-
37	周辺居住者(成人)外部	5.8E-03	2.3E-03	2.9E-03	3.5E+05	1.1E-02	2.3E-02
38	周辺居住者(子ども)外部	7.5E-03	3.0E-03	3.8E-03	2.7E+05	1.5E-02	3.0E-02

※「-」は対象外の評価経路

表 A.1-18 評価結果（埋立地完成後）ケース 2

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	4,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
33	草刈作業者外部	-	-	-	-	-	-
34	緑地公園の利用者(成人)外部	-	-	-	-	-	-
35	緑地公園の利用者(子ども)外部	-	-	-	-	-	-
36	コンテナターミナルの利用者外部	1.8E-03	6.0E-04	8.1E-04	1.2E+06	3.2E-03	6.5E-03
37	周辺居住者(成人)外部	8.4E-04	3.0E-04	3.9E-04	2.6E+06	1.6E-03	3.1E-03
38	周辺居住者(子ども)外部	1.1E-03	3.9E-04	5.1E-04	2.0E+06	2.0E-03	4.1E-03

※「-」は対象外の評価経路

表 A.1-19 評価結果（埋立地完成後）ケース 3、セル式護岸

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	6,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
33	草刈作業者外部	7.6E-04	2.7E-04	3.6E-04	2.8E+06	2.1E-03	2.9E-03
34	緑地公園の利用者(成人)外部	1.6E-03	5.9E-04	7.7E-04	1.3E+06	4.6E-03	6.1E-03
35	緑地公園の利用者(子ども)外部	2.1E-03	7.7E-04	1.0E-03	1.0E+06	6.0E-03	8.0E-03
36	コンテナターミナルの利用者外部	-	-	-	-	-	-
37	周辺居住者(成人)外部	1.7E-02	7.0E-03	8.7E-03	1.2E+05	5.2E-02	6.9E-02
38	周辺居住者(子ども)外部	2.2E-02	9.1E-03	1.1E-02	8.9E+04	6.8E-02	9.0E-02

※「-」は対象外の評価経路

表 A.1-20 評価結果（埋立地完成後）ケース 4、セル式護岸

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	6,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
33	草刈作業者外部	-	-	-	-	-	-
34	緑地公園の利用者(成人)外部	-	-	-	-	-	-
35	緑地公園の利用者(子ども)外部	-	-	-	-	-	-
36	コンテナターミナルの利用者外部	2.7E-03	9.9E-04	1.3E-03	7.8E+05	7.7E-03	1.0E-02
37	周辺居住者(成人)外部	1.7E-02	6.6E-03	8.3E-03	1.2E+05	5.0E-02	6.6E-02
38	周辺居住者(子ども)外部	2.1E-02	8.6E-03	1.1E-02	9.3E+04	6.5E-02	8.6E-02

※「-」は対象外の評価経路

表 A.1-21 評価結果（埋立地完成後）ケース 3、重力式護岸

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	6,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
33	草刈作業者外部	5.6E-04	2.0E-04	2.6E-04	3.8E+06	1.6E-03	2.1E-03
34	緑地公園の利用者(成人)外部	1.4E-03	5.0E-04	6.5E-04	1.5E+06	3.9E-03	5.2E-03
35	緑地公園の利用者(子ども)外部	1.8E-03	6.5E-04	8.5E-04	1.2E+06	5.1E-03	6.8E-03
36	コンテナターミナルの利用者外部	-	-	-	-	-	-
37	周辺居住者(成人)外部	5.3E-04	2.0E-04	2.6E-04	3.9E+06	1.6E-03	2.1E-03
38	周辺居住者(子ども)外部	7.0E-04	2.6E-04	3.4E-04	3.0E+06	2.0E-03	2.7E-03

※「-」は対象外の評価経路

表 A.1-22 評価結果（埋立地完成後）ケース 4、重力式護岸

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	6,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
33	草刈作業者外部	-	-	-	-	-	-
34	緑地公園の利用者(成人)外部	-	-	-	-	-	-
35	緑地公園の利用者(子ども)外部	-	-	-	-	-	-
36	コンテナターミナルの利用者外部	1.2E-03	4.1E-04	5.4E-04	1.8E+06	3.3E-03	4.3E-03
37	周辺居住者(成人)外部	4.4E-04	1.6E-04	2.1E-04	4.8E+06	1.3E-03	1.7E-03
38	周辺居住者(子ども)外部	5.7E-04	2.1E-04	2.7E-04	3.7E+06	1.6E-03	2.2E-03

* ケース 1：埋立材に利用し緑地公園を造成 ケース 2：埋立材に利用しコンテナターミナルを造成

* ケース 3：中詰材に利用し緑地公園を造成 ケース 4：中詰材に利用しコンテナターミナルを造成

※「-」は対象外の評価経路

表 A.1-23 評価結果（地下水移行（海洋へ移行））ケース 1,2 共通
（施工時に護岸の一部を開けて造成した場合）

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	4,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
39	海産物摂取(成人)	8.2E-05	8.7E-05	8.6E-05	1.2E+07	3.4E-04	6.9E-04
40	海産物摂取(子ども)	3.7E-05	4.0E-05	3.9E-05	2.6E+07	1.6E-04	3.1E-04
41	海岸活動者外部	6.9E-05	3.1E-05	3.8E-05	2.6E+07	1.5E-04	3.0E-04
42	浚渫作業者外部	2.1E-06	1.2E-06	1.4E-06	7.4E+08	5.4E-06	1.1E-05
43	浚渫作業者粉塵吸入	2.8E-10	3.2E-10	3.1E-10	3.2E+12	1.2E-09	2.5E-09
44	浚渫作業者経口摂取	4.7E-09	5.1E-09	5.0E-09	2.0E+11	2.0E-08	4.0E-08

表 A.1-24 評価結果（地下水移行（海洋へ移行））ケース 1,2 共通
（施工時に護岸を閉じて造成した場合）

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	4,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
39	海産物摂取(成人)	3.7E-07	4.7E-07	4.6E-07	2.2E+09	1.8E-06	3.7E-06
40	海産物摂取(子ども)	1.7E-07	2.2E-07	2.1E-07	4.8E+09	8.4E-07	1.7E-06
41	海岸活動者外部	4.6E-07	4.6E-08	1.2E-07	8.5E+09	4.7E-07	9.4E-07
42	浚渫作業者外部	8.2E-09	7.7E-09	7.8E-09	1.3E+11	3.1E-08	6.2E-08
43	浚渫作業者粉塵吸入	1.1E-12	2.0E-12	1.9E-12	5.4E+14	7.5E-12	1.5E-11
44	浚渫作業者経口摂取	1.8E-11	3.3E-11	3.0E-11	3.3E+13	1.2E-10	2.4E-10

表 A.1-25 評価結果（地下水移行（海洋へ移行））ケース 3,4 共通
（施工時に土砂投入により海水流出を想定した場合）、セル式護岸

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	6,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
39	海産物摂取(成人)	2.5E-05	2.2E-05	2.2E-05	4.5E+07	1.3E-04	1.8E-04
40	海産物摂取(子ども)	1.2E-05	1.0E-05	1.0E-05	9.6E+07	6.3E-05	8.3E-05
41	海岸活動者外部	4.8E-07	2.2E-07	2.6E-07	3.8E+09	1.6E-06	2.1E-06
42	浚渫作業者外部	8.2E-07	3.7E-07	4.5E-07	2.2E+09	2.7E-06	3.6E-06
43	浚渫作業者粉塵吸入	1.1E-10	9.8E-11	1.0E-10	1.0E+13	6.0E-10	8.0E-10
44	浚渫作業者経口摂取	1.8E-09	1.6E-09	1.6E-09	6.2E+11	9.7E-09	1.3E-08

表 A.1-26 評価結果（地下水移行（海洋へ移行））ケース 3,4 共通
（施工時にポンプにより粒子流出を抑制した場合）、セル式護岸

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	6,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
39	海産物摂取(成人)	2.1E-07	4.7E-07	4.2E-07	2.4E+09	2.5E-06	3.4E-06
40	海産物摂取(子ども)	8.9E-08	2.1E-07	1.9E-07	5.2E+09	1.1E-06	1.5E-06
41	海岸活動者外部	4.8E-07	2.2E-07	2.6E-07	3.8E+09	1.6E-06	2.1E-06
42	浚渫作業者外部	2.5E-09	6.0E-09	5.4E-09	1.8E+11	3.3E-08	4.3E-08
43	浚渫作業者粉塵吸入	3.4E-13	1.6E-12	1.4E-12	7.3E+14	8.2E-12	1.1E-11
44	浚渫作業者経口摂取	5.5E-12	2.6E-11	2.2E-11	4.5E+13	1.3E-10	1.8E-10

表 A.1-27 評価結果（地下水移行（海洋へ移行））ケース 3,4 共通
（施工時に土砂投入により海水流出を想定した場合）、重力式護岸

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	6,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
39	海産物摂取(成人)	2.0E-05	1.7E-05	1.8E-05	5.6E+07	1.1E-04	1.4E-04
40	海産物摂取(子ども)	9.2E-06	8.1E-06	8.3E-06	1.2E+08	5.0E-05	6.6E-05
41	海岸活動者外部	4.0E-07	1.8E-07	2.2E-07	4.6E+09	1.3E-06	1.7E-06
42	浚渫作業者外部	6.5E-07	3.0E-07	3.6E-07	2.8E+09	2.1E-06	2.9E-06
43	浚渫作業者粉塵吸入	8.8E-11	7.8E-11	8.0E-11	1.3E+13	4.8E-10	6.4E-10
44	浚渫作業者経口摂取	1.5E-09	1.3E-09	1.3E-09	7.7E+11	7.7E-09	1.0E-08

表 A.1-28 評価結果（地下水移行（海洋へ移行））ケース 3,4 共通
（施工時にポンプにより粒子流出を抑制した場合）、重力式護岸

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	6,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
39	海産物摂取(成人)	1.7E-07	4.4E-07	4.0E-07	2.5E+09	2.4E-06	3.2E-06
40	海産物摂取(子ども)	7.4E-08	2.0E-07	1.8E-07	5.6E+09	1.1E-06	1.4E-06
41	海岸活動者外部	3.9E-07	1.8E-07	2.2E-07	4.6E+09	1.3E-06	1.7E-06
42	浚渫作業者外部	2.1E-09	6.0E-09	5.3E-09	1.9E+11	3.2E-08	4.2E-08
43	浚渫作業者粉塵吸入	2.8E-13	1.6E-12	1.3E-12	7.4E+14	8.1E-12	1.1E-11
44	浚渫作業者経口摂取	4.7E-12	2.5E-11	2.2E-11	4.6E+13	1.3E-10	1.7E-10

* ケース 1：埋立材に利用し緑地公園を造成 ケース 2：埋立材に利用しコンテナターミナルを造成

* ケース 3：中詰材に利用し緑地公園を造成 ケース 4：中詰材に利用しコンテナターミナルを造成

表 A.1-29 評価結果（地下水移行（井戸水の利用））ケース 1,2 共通

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	4,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
45	飲料水摂取(成人)	4.4E-06	4.3E-05	3.6E-05	2.7E+07	1.5E-04	2.9E-04
46	飲料水摂取(子ども)	6.1E-07	6.5E-06	5.5E-06	1.8E+08	2.2E-05	4.4E-05
47	地下水利用農耕作業者外部	9.5E-07	4.5E-05	3.8E-05	2.7E+07	1.5E-04	3.0E-04
48	地下水利用農耕作業者吸入	4.6E-11	4.3E-09	3.5E-09	2.8E+11	1.4E-08	2.8E-08
49	地下水利用農作物摂取(成人)	3.2E-06	1.1E-04	8.8E-05	1.1E+07	3.5E-04	7.0E-04
50	地下水利用農作物摂取(子ども)	1.1E-06	4.4E-05	3.6E-05	2.8E+07	1.5E-04	2.9E-04
51	飼料経由畜産物摂取(成人)	4.2E-06	1.0E-04	8.5E-05	1.2E+07	3.4E-04	6.8E-04
52	飼料経由畜産物摂取(子ども)	2.0E-06	5.4E-05	4.5E-05	2.2E+07	1.8E-04	3.6E-04
53	飼育水経由畜産物摂取(成人)	6.2E-07	6.0E-06	5.1E-06	2.0E+08	2.0E-05	4.1E-05
54	飼育水経由畜産物摂取(子ども)	2.9E-07	3.1E-06	2.6E-06	3.9E+08	1.0E-05	2.1E-05
55	養殖淡水産物摂取(成人)	2.5E-06	2.5E-05	2.1E-05	4.8E+07	8.4E-05	1.7E-04
56	養殖淡水産物摂取(子ども)	1.0E-06	1.1E-05	9.1E-06	1.1E+08	3.6E-05	7.3E-05

表 A.1-30 評価結果（地下水移行（井戸水の利用））ケース 3,4 共通、セル式護岸

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	6,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
45	飲料水摂取(成人)	4.4E-06	4.3E-05	3.6E-05	2.7E+07	2.2E-04	2.9E-04
46	飲料水摂取(子ども)	6.0E-07	6.5E-06	5.5E-06	1.8E+08	3.3E-05	4.4E-05
47	地下水利用農耕作業外部	9.3E-07	4.5E-05	3.8E-05	2.7E+07	2.3E-04	3.0E-04
48	地下水利用農耕作業吸入	4.6E-11	4.3E-09	3.6E-09	2.8E+11	2.1E-08	2.8E-08
49	地下水利用農作物摂取(成人)	3.2E-06	1.1E-04	8.8E-05	1.1E+07	5.3E-04	7.1E-04
50	地下水利用農作物摂取(子ども)	1.1E-06	4.4E-05	3.6E-05	2.8E+07	2.2E-04	2.9E-04
51	飼料經由畜産物摂取(成人)	4.2E-06	1.0E-04	8.6E-05	1.2E+07	5.1E-04	6.8E-04
52	飼料經由畜産物摂取(子ども)	2.0E-06	5.4E-05	4.5E-05	2.2E+07	2.7E-04	3.6E-04
53	飼育水經由畜産物摂取(成人)	6.1E-07	6.0E-06	5.1E-06	2.0E+08	3.1E-05	4.1E-05
54	飼育水經由畜産物摂取(子ども)	2.8E-07	3.1E-06	2.6E-06	3.9E+08	1.6E-05	2.1E-05
55	養殖淡水産物摂取(成人)	2.5E-06	2.5E-05	2.1E-05	4.8E+07	1.3E-04	1.7E-04
56	養殖淡水産物摂取(子ども)	1.0E-06	1.1E-05	9.1E-06	1.1E+08	5.4E-05	7.3E-05

表 A.1-31 評価結果（地下水移行（井戸水の利用））ケース 3,4 共通、重力式護岸

No.	経路略称	単位再生資材中濃度 あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			1mSv/y相当濃度 (Bq/kg)	6,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生 資材を使用した 場合の被ばく線量 (mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)			
45	飲料水摂取(成人)	4.4E-06	4.3E-05	3.6E-05	2.7E+07	2.2E-04	2.9E-04
46	飲料水摂取(子ども)	6.1E-07	6.5E-06	5.5E-06	1.8E+08	3.3E-05	4.4E-05
47	地下水利用農耕作業外部	9.4E-07	4.5E-05	3.8E-05	2.7E+07	2.3E-04	3.0E-04
48	地下水利用農耕作業吸入	4.6E-11	4.3E-09	3.6E-09	2.8E+11	2.1E-08	2.8E-08
49	地下水利用農作物摂取(成人)	3.2E-06	1.1E-04	8.8E-05	1.1E+07	5.3E-04	7.1E-04
50	地下水利用農作物摂取(子ども)	1.1E-06	4.4E-05	3.6E-05	2.8E+07	2.2E-04	2.9E-04
51	飼料經由畜産物摂取(成人)	4.3E-06	1.0E-04	8.6E-05	1.2E+07	5.1E-04	6.8E-04
52	飼料經由畜産物摂取(子ども)	2.0E-06	5.4E-05	4.5E-05	2.2E+07	2.7E-04	3.6E-04
53	飼育水經由畜産物摂取(成人)	6.2E-07	6.0E-06	5.1E-06	2.0E+08	3.1E-05	4.1E-05
54	飼育水經由畜産物摂取(子ども)	2.9E-07	3.1E-06	2.6E-06	3.9E+08	1.6E-05	2.1E-05
55	養殖淡水産物摂取(成人)	2.5E-06	2.5E-05	2.1E-05	4.8E+07	1.3E-04	1.7E-04
56	養殖淡水産物摂取(子ども)	1.0E-06	1.1E-05	9.1E-06	1.1E+08	5.5E-05	7.3E-05

* ケース 1：埋立材に利用し緑地公園を造成 ケース 2：埋立材に利用しコンテナターミナルを造成

* ケース 3：中詰材に利用し緑地公園を造成 ケース 4：中詰材に利用しコンテナターミナルを造成

A.1.10 災害時の評価の詳細

評価概要

- ・ Cs-134 と Cs-137 の存在割合は 0.209 : 1 とした。
→再生資材の利用開始時期は福島第一原子力発電所事故から 5 年後、事故直後の Cs-134 (半減期 2.06 年) と Cs-137 (半減期 30.0 年) の存在割合を 1:1 と仮定。
- ・ 全ての経路について、評価開始時期 (= 災害発生時期) は保守的に 0 年からとした。
- ・ 応急復旧に要する期間は、阪神淡路大震災後の神戸港の応急復旧計画¹より 3 か月と設定した。
- ・ 評価体系は図 A.1-84 のように設定した。

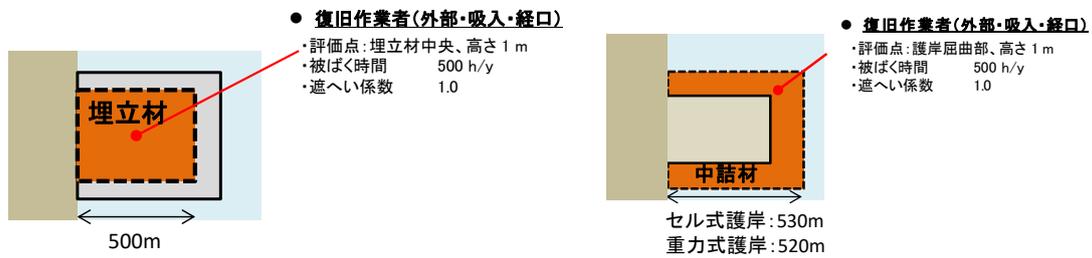


図 A.1-84 災害(地震)後の修復時における作業員の評価体系
(左:埋立材利用時、右:中詰材利用時)

評価パラメーター

評価に用いるパラメーターを表 A.1-32 に示す。

表 A.1-32 災害時（地震）に係る評価経路パラメーター(1/2)

名称	単位	選定値	選定根拠
被ばく中の減衰期間	y	1	IAEARS-G-1.7では、各評価経路について被ばく期間（1年）の減衰を考慮しており、本試算でも被ばく期間（1年）中の放射能の減衰を考慮することとした。
復旧作業が開始されるまでの期間	y	0	保守的に、再生資材が事故5年後すぐに再生資源化され、海面埋立地に使用された直後に災害が発生するものとした。
埋立材幅	m	500	大規模な海面埋立地を想定し、500m海面埋立地の埋立部に対し、一様に再生資材を埋立材として利用した場合を想定した。
埋立材長さ	m	500	大規模な海面埋立地を想定し、500m海面埋立地の埋立部に対し、一様に再生資材を埋立材として利用した場合を想定した。
埋立材高さ	m	22	岸壁の水面上高さを、大型船舶も停泊可能な横浜港南本牧ふ頭MC-3を基に4mと設定し、水深18mと足し合わせた高さを舗装・覆土を施していない状態の埋立材高さとした。
埋立材のかさ密度	g/cm ³	2.0	土壌を締め固めた場合の最大密度を設定。
セル式護岸の中詰材幅	m	30	国内で利用されている最大級のセル式護岸の幅から設定。
重力式護岸の中詰材幅	m	20	国内で利用されている最大級の重力式護岸の幅から設定。
セル式護岸の場合の中詰材長さ	m	530	施工時の評価と揃えて陸拡張型で造成することを想定した。
重力式護岸の場合の中詰材長さ	m	520	施工時の評価と揃えて陸拡張型で造成することを想定した。
中詰材高さ	m	22	岸壁の水面上高さを、大型船舶も停泊可能な横浜港南本牧ふ頭MC-3を基に4mと設定し、水深18mと足し合わせた高さを護岸上部工を施していない状態の中詰材高さとした。
中詰材のかさ密度	g/cm ³	1.7	中詰材は締め固めを行わないので自然地盤でのおよその平均値1.7g/cm ³ とした。
復旧作業時における遮へい係数（作業員）	—	1.0	重機を使用した作業を想定せず、保守的な設定とした。

表 A.1-32 害時（地震）に係る評価経路パラメーター(2/2)

名称	単位	選定値	選定根拠
復旧作業に従事する年間作業時間	h/y	500	復旧期間 3 ヶ月のうち、1 日 8 時間・60 日の労働時間を、当該作業に従事すると 480 h/y となる。この結果から 500 h/y と設定した。
外部被ばくに対する線量換算係数（埋立材利用時、復旧作業時、復旧業者）	Cs-134	4.3E-01	以下の条件で MCNP5 コードにより算出した。 線源の形状：高さ 22m、幅 500 m、長さ 500 m の直方体（土壌） 線源のかさ密度：2.0 g/cm ³ 遮蔽体：なし 評価点：図 A.1-84 の評価点・作業時
	Cs-137	1.50E-01	
外部被ばくに対する線量換算係数（中詰材利用時、復旧業者）セル式護岸	Cs-134	3.5E-01	以下の条件で MCNP5 コードにより算出した。 線源の形状：高さ 22m、幅 30 m、長さ 530 m 線源のかさ密度：1.7 g/cm ³ 遮蔽体：なし 評価点：図 A.1-84 の評価点・作業時
	Cs-137	1.3E-01	
外部被ばくに対する線量換算係数（中詰材利用時、復旧業者）重方式護岸	Cs-134	3.5E-01	以下の条件で MCNP5 コードにより算出した。 線源の形状：高さ 22m、幅 20 m、長さ 520 m 線源のかさ密度：1.7 g/cm ³ 遮蔽体：なし 評価点：図 A.1-84 の評価点・作業時
	Cs-137	1.3E-01	
作業時の空气中ダスト濃度	g/m ³	5.0E-04	NUREG/CR-3585 に示された OPEN DUMP 時及び IAEA-TECDOC-401 に示された埋設処分場での埋め立て作業時における空气中ダスト濃度を採用した。
微粒子への放射性物質の濃縮係数（吸入摂取）	—	4	IAEA Safety Reports Series No.44 に示された吸入可能な粒子の濃縮係数を使用した。
作業者の呼吸量	m ³ /h	1.2	ICRP Publ.23 で示されている標準人の労働（軽作業）時の呼吸量の数値 20 L/min を基に算定した。
微粒子への放射性物質の濃縮係数（経口摂取）	—	2	IAEA Safety Reports Series No.44 に示された経口摂取被ばくに関する粒子の濃縮係数を使用した。
ダストの経口摂取率	g/h	1.0E-02	IAEA S.S. No.111-P-1.1 に示された値を用いた。

津波が生じた際の被ばく評価

評価経路は経路 No.39～44 と同じ想定であるが、津波により流出した土砂に付着した分の核種量をコンパートメントモデルの生物擾乱層の初期値に加える。なお、災害時の核種移行評価は、通常時の移行評価において、コンパートメント濃度がより高い条件（埋立材：護岸の一部を開けて造成した場合・護岸透過による核種流出、中詰材：土砂投入により海水流出を想定した場合・護岸透過による核種流出）で行う。

津波により流出した土砂に付着した核種量は以下の式により算出する。核種流出量に関するパラメーターを表 A.1-33 に示す。

$$\begin{aligned} & \text{津波により流出した土砂に付着した核種量 (Bq)} \\ & = \text{流出した土砂量(kg)} \times \text{再生資材中核種濃度(Bq/kg)} \end{aligned}$$

表 A.1-33 核種流出量に関するパラメーター

名称	単位	選定値	選定根拠
流出した土砂量 (埋立材利用時)	kg	5.0E+08	以下の条件で土砂が流出したと設定した。 土砂量：幅 250m、奥行 45m、高さ 22m 埋立材密度：2.0g/cm ³
流出した土砂量 (中詰材利用時) セル 式護岸	kg	3.1E+08	以下の条件で土砂が流出したと設定した。 土砂量：幅 280m、奥行 30m、高さ 22m 中詰材密度：1.7g/cm ³
流出した土砂量 (中詰材利用時) 重力 式護岸	kg	2.0E+08	以下の条件で土砂が流出したと設定した。 土砂量：幅 270m、奥行 20m、高さ 22m 中詰材密度：1.7g/cm ³

-
- 1 及川研、輪湖建雄、松永康男、成瀬英治. 神戸港の港湾施設の復旧・復興. 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、1996年1月

A.2.3.2 に関する付録

A.2.1 めやす濃度の計算方法

放射性核種は Cs-134 および Cs-137 のみと仮定し、放出される γ 線を評価の対象とする。なお、Cs-137 は Ba-137m を経由した場合のみ γ 線を放出するが、その確率は 94.4%を用いる。

めやす濃度は、放射性 Cs の外部被ばく線量換算係数 (Cs-134 と Cs-137 が合わせて 1Bq/kg ある場合の実効線量) の逆数より算出する。外部被ばく線量換算係数は、点減衰核積分法による遮へい計算コード QAD-CGGP2R¹を用いて算出する。放射性 Cs の外部被ばく線量換算係数は、Cs-134 の外部被ばく線量換算係数 (Cs-134 が 1Bq/kg ある場合の実効線量) と、Cs-137 の外部被ばく線量換算係数 (Cs-137 が 1Bq/kg ある場合の実効線量) をそれぞれ算出し、以下の方法で換算する。

Cs-134 と Cs-137 の核種濃度比は、事故発生当時 (2011 年 3 月時点) でおおよそ 1:1 であったと仮定する。

$$C_{134}(0) = C_{137}(0) \quad \text{数式 A.2- 1}$$

$C_{134}(0)$: 事故直後の、Cs-134 の核種濃度
 $C_{137}(0)$: 事故直後の、Cs-137 の核種濃度

事故発生から時間 t 経過後の核種濃度は以下で得られる。

$$C_{134}(t) = C_{134}(0) \times 2^{-t/T_{134}} \quad \text{数式 A.2- 2}$$

$$C_{137}(t) = C_{137}(0) \times 2^{-t/T_{137}} \quad \text{数式 A.2- 3}$$

$C_{134}(t)$: 事故発生から時間 t 経過後の、Cs-134 の核種濃度
 $C_{137}(t)$: 事故発生から時間 t 経過後の、Cs-137 の核種濃度
 T_{134} : Cs-134 の半減期(30.0yr)
 T_{137} : Cs-137 の半減期(2.06yr)

本研究では事故発生から 5 年後 (2016 年 3 月時点) を想定する。5 年間(5.0yr)経過時の核種濃度比は、以下の通り算出される。

$$C_{134}(5.0\text{yr}): C_{137}(5.0\text{yr}) = 0.186: 0.891 = 0.209: 1 \quad \text{数式 A.2- 4}$$

これを用いて、放射性 Cs の外部被ばく線量換算係数は、Cs-134 および Cs-137 の外部被ばく線量換算係数から、以下のように換算する。

$$D_{Cs} = \frac{D_{134} \times C_{Cs}(5.0\text{yr}) + D_{137} \times C_{137}(5.0\text{yr})}{C_{134}(5.0\text{yr}) + C_{137}(5.0\text{yr})}$$

数式 A.2- 5

$$= \frac{D_{134} \times 0.209 + D_{137} \times 1}{0.209 + 1}$$

D_{Cs} : 放射性 Cs の外部被ばく線量換算係数
 D_{134} : Cs-134 の外部被ばく線量換算係数
 D_{137} : Cs-137 の外部被ばく線量換算係数

1 Y. Sakamoto, S. Tanaka. QAD-CGGP2 and G33-GP2: Revised Versions of QAD-CGGP AND G33-GP. JAERI-M90-110, 1990

A.2.2 道路の評価パラメーター

道路材（路盤材、舗装材）への再生利用に関するパラメーターを表 A.2-1 に示す。

表 A.2-1 道路の評価パラメーター

No.	名称	単位	選定値	選定理由
1	道路長さ	m	100	無限長を想定するが、50m を超える距離の実効線量寄与は、有効数字 2 桁の範囲では有意な値を持たないため。
2	道路幅	m	9	1F 敷地内の航空写真より計測。
3	舗装材厚さ	m	-	ケースにより異なる。表 3.2-1 のように設定。
4	路盤材厚さ	m	-	
5	コンクリート密度	g/cm ³	2.2	参考文献 ¹ の表 9.4-1 (普通コンクリートの元素組成例) より、花崗岩を粗骨材とした場合の値を用いた。
6	アスファルト密度	g/cm ³	2.2	参考文献 ² の「道路・不透水性アスファルト」のかさ密度の数を用いる。
7	路盤材密度	g/cm ³	2.0	参考文献 ² の「道路及び歩道・上層/下層路盤材」のかさ密度の値を用いた。
8	アスファルト中骨材比率	-	0.9	詳細は (2) に示す。
9	コンクリート中骨材比率	-	0.8	

(1) 道路の厚さの設定

ケース No.1~4 における道路厚さは、表 A.2-2~表 A.2-5 を参考に、以下の考えに基づき設定した。

アスファルト舗装道路における、舗装厚さの基準 (参考文献³、表 1-3) を表 A.2-2 に示す。また、路盤厚さの基準 (参考文献⁴、表-6-III-7) を表 A.2-3 に示す。ただし路盤厚さは、D 交通 (1 日かつ方向当たりの交通量が 3,000 台以上) の場合である。

ケース No.1 (路盤材) では、舗装厚さを表 A.2-2 における最小の厚さ 5cm (交通量 T<250 台/日の場合) とした。また路盤厚さを、表 A.2-3 における設計 CBR が 4 (設計 CBR が低いほど地盤の強度が低く、より大きい路盤厚さが要求される) の場合のデータをもとに設定した。このデータにおける、再生路盤材が利用されるのは上層路盤の「粒度調整 (粒度調整砕石)」と下層路盤の「RC-40 (クラッシュラン)」であるため、これらの層の和 80cm を用いた。

ケース No.2 (舗装材) では、舗装厚さを表 A.2-2 における最大の厚さ 20cm (交通量 T ≥ 3,000 台/日かつ瀝青安定処理工法を用いない場合) とした。

表 A.2-2 アスファルト舗装の道路における舗装厚さ

舗装計画交通量 (台/日)	表層と基層を加えた最小厚さ (cm)
$T < 250$	5
$250 \leq T < 1,000$	10(5)
$1,000 \leq T < 3,000$	15(10)
$3,000 \leq T$	20(15)

() 内は、瀝青安定処理工法を用いる場合。

表 A.2-3 アスファルト舗装道路における路盤厚さ

設計条件		舗装設計交通量		3000 台/日・方向以上 交通区分 N7 (D 交通)	
		設計期間		20 年	
		信頼度		90%	
舗装構成		設計 CBR			
		4	6	8	12
表層	加熱混合物	5	5	5	5
中間層	加熱混合物	5	5	5	5
基層	加熱混合物	5	5	5	5
上層路盤	瀝青安定処理	9	8	8	8
	粒度調整	40	30	20	20
下層路盤	RC-40	40	40	40	20
合計厚さ		104	93	83	63
設計 T_A'		46.2	41.3	38.0	33.4
目標 T_A		46	41	38	33

コンクリート舗装道路における、舗装厚さの基準⁵を、表 A.2-4 に示す。また、路盤厚さの基準³を、表 A.2-5 に示す。

ケース No.3 (コンクリート舗装、路盤材) では、舗装厚さを表 A.2-4 における最小の厚さ 15cm (L 交通の場合) とした。また路盤厚さを表 A.2-5 において粒度調整碎石とクラッシュチャランの厚さの最大の和 80cm (交通量 $250 \leq T < 1,000$ (台/日)、路床の設計 CBR が 2 かつ、セメント安定処理路盤を使用しない場合) とした。

ケース No.4 (コンクリート舗装、舗装材) では、舗装厚さを表 A.2-4 における最大の厚さ 30cm (D 交通の場合) とした。

表 A.2-4 コンクリート舗装の場合の舗装厚さについて

交通量の評価（区分）	大型車交通量（台/日、方向） (L)100 未満 (A)100～250 (B)250～1,000 (C)1,000～3,000 (D)3,000 以上
コンクリート版厚	L 交通 15(20)cm A 交通 20(25)cm B 交通 25cm C 交通 28cm D 交通 30cm

（注）コンクリート版厚のかっこ内はコンクリートの設計曲げ強度 40kgf/cm^2 の場合、かっこ外は 45kgf/cm^2 の場合。

表 A.2-5 コンクリート舗装の場合の路盤厚さについて

舗装計画交通量 (台/日)	路床の設計 CBR	アスファルト中 間層(cm)	粒度調整砕石 (cm)	クラッシュラン (cm)
T<250	2	0	25(20)	40(30)
	3	0	20(15)	25(20)
	4	0	25(15)	0
	6	0	20(15)	0
	8	0	15(15)	0
	12 以上	0	15(15)	0
250≦T<1,000	2	0	35(20)	45(45)
	3	0	30(20)	30(25)
	4	0	20(20)	25(0)
	6	0	25(15)	0
	8	0	20(15)	0
	12 以上	0	15(15)	0
1,000≦T	2	4(0)	25(20)	45(45)
	3	4(0)	20(20)	30(25)
	4	4(0)	10(20)	25(0)
	6	4(0)	15(15)	0
	8	4(0)	15(15)	0
	12 以上	4(0)	15(15)	0

1. 粒度調整砕石の欄の()内の値:セメント安定処理路盤の場合の厚さ
2. クラッシュランの欄の()内の値:上層路盤にセメント安定処理路盤を使用した場合の厚さ
3. 路床の設計 CBR が2 のときには、遮断層を設けるものとする。
4. 設計 CBR 算出時の路床の厚さは 1m を標準とする。ただし、その下面に生じる圧縮応力が充分小さいことが確認される場合においては、この限りではない。

(2) 再生利用に伴う希釈効果

再利用の際の希釈効果を反映するため、線源中に含まれる再生資源使用率を各ケースの計算結果に掛ける。路盤材はコンクリートくずを破碎したものを直接利用するため、使用率は 100%とする。舗装材の使用率は、材質中に含まれる骨材（粗骨材・細骨材）比率である。アスファルト舗装材の場合は、参考文献⁶中に示された「代表的なアスファルト混合物」において例示されている全てのアスファルト混合物の粗骨材・細骨材比率が 85～95%の範囲に収まっていることから、再生資源使用率を 90%とした。コンクリート舗装材の場合は、参考文献⁷の空気・水・粗骨材・細骨材・セメントの容積比と、それぞれの密度から計算し、

再生資源使用率を80%とした。参考文献⁷から設定したコンクリート骨材比率を表A.2-6に示す。

表 A.2-6 コンクリート骨材比率

	容積比(%)	密度(g/cm ³)	質量比(%)
空気	5	0.00	0
水	15	1.00	6
セメント	10	3.15	14
細骨材	30	2.55	33
粗骨材	40	2.70	47
骨材和	70		80
総和	100		100

-
- 1 Y. Sakamoto, S. Tanaka. QAD-CGGP2 and G33-GP2: Revised Versions of QAD-CGGP AND G33-GP. JAERI-M90-110, 1990
 - 2 澤口拓磨、武田聖司、木村英雄、田中忠夫. 放射性物質により汚染された災害廃棄物の道路への再利用に伴う被ばく線量評価. Jpn.J.Health Phys.50(1),36~49, 2015
 - 3 国土交通省. 舗装の構造に関する技術基準について.
<http://www.mlit.go.jp/road/sign/pavement3.html>
 - 4 国土交通省 中部地方整備局. 道路設計要領(2015) 第6章 舗装.
http://www.cbr.mlit.go.jp/road/sekkeiouryou/pdf/cb006_hosou_v201403.pdf
 - 5 国土交通省. 道路舗装に関する設計基準.
http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/inter/keizai/gijyutu/pdf/road_design_j2_01.pdf
 - 6 一般社団法人 日本アスファルト協会. <http://www.askyo.jp/knowledge/06-3.html>
 - 7 麻生セメント株式会社. 建設技術講習会資料, “セメントについて考える その2”.
http://www.qsr.mlit.go.jp/onga/cpds/images/h25/siryou_0222_1.pdf

A.2.3 基礎材の評価パラメーター

基礎材の再生利用に関する評価に用いたパラメーターを表 A.2-7 に示す。

表 A.2-7 基礎材の評価パラメーター

No	名称	単位	選定値	選定理由
1	線源長さ	m	125	固体廃棄物貯蔵庫第9棟 ¹ の長さ
2	線源幅	m	48	固体廃棄物貯蔵庫第9棟 ¹ の幅
3	線源厚さ	m	2	固体廃棄物貯蔵庫第9棟 ¹ の断面図より推定
4	床スラブ厚さ	m	0.2	倉庫のような重い積載荷重が作用する床スラブの一般的な厚さ 0.2～0.3m ² より保守的に選出
5	基礎材密度	g/cm ³	2.1	セメントモルタルの密度 ³ より設定
6	建設材密度	g/cm ³	2.1	セメントモルタルの密度 ³ より設定
7	基礎材中骨材比率	-	0.8	表 A.2-6 より設定。
8	周辺土壌密度	g/cm ³	1.5	既往評価 ⁴ と同値を設定
9	壁厚さ	m	0.3	固体廃棄物貯蔵庫第9棟 ⁵ の壁厚さ
10	天井厚さ	m	0.6	固体廃棄物貯蔵庫第9棟 ⁵ の天井厚さ

- 1 原子力規制委員会. 東京電力株式会社 福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画 2.10 放射性固体廃棄物等の管理施設.
<https://www.nsr.go.jp/data/000163505.pdf>
- 2 小森清司. 鉄筋コンクリート・プレストレストコンクリート設計計算入門 1/10 8.部材の設計計算 (基本的な考え方).コンクリートジャーナル Vol.12 No.4, April. 1974
- 3 日本原子力研究開発機構. RU 廃棄物処分技術検討書－第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－. JNC TY1400 2005-013, 2005
- 4 澤口拓磨、武田聖司、木村英雄、田中忠夫. 放射性物質により汚染された災害廃棄物の道路への再利用に伴う被ばく線量評価. Jpn.J.Health Phys.50(1),36~49, 2015
- 5 原子力規制委員会. 東京電力株式会社 福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画. 2.10 放射性固体廃棄物等の管理施設.
<https://www.nsr.go.jp/data/000163505.pdf>

A.2.4 遮蔽用コンクリートブロックの評価パラメーター

コンクリートブロックの寸法について、通路に平行な方向の大きさを長さ、鉛直方向の大きさを高さ、両方に垂直な方向の大きさを厚さと定義し、表 A.2-8 のように定めた。

表 A.2-8 遮蔽用コンクリートブロックの評価パラメーター

No.	名称	単位	選定値	選定理由
1	線源長さ	m	100	1F 敷地内にある定期検査用機材倉庫の長さを航空写真より計測し、98m であったため。また、50m を超える距離の実効線量寄与は、有効数字 2 桁の範囲では有意な値を持たない。
2	線源高さ	m	5.5	フォークリフトにより積み上げ積み下ろしが可能な最大高さ。フォークリフトのアームが届く最大高さ 4.1m に 1.3m を加えた。なお参考にした機種は、最大荷重 3.5t のカウンターバランス式フォークリフト (KOMATSU 社、FH35-2 ¹)。1.3m は、最大荷重 3.5t に相当するコンクリートの積み上げ高さ。
3	線源厚さ	m	2	厚さによる被ばく線量換算係数の変化を評価し、2m 以上の厚さによる寄与がないことを確認したためこの値を用いた。
4	通路幅	m	5	No.2 と同型のフォークリフトの実用直角積付通路幅 4.8m より。
5	コンクリート密度	g/cm ³	2.2	道路舗装材におけるコンクリートの密度と同様とした。
6	コンクリート中骨材比率	-	0.8	道路舗装材におけるコンクリートの骨材比率と同様とした。

1 コマツリフト株式会社. 製品カタログ (FH35-2/FH40-2/FH45-2/FH50-2) .

http://www.lift.co.jp/distrib/engine/fh50/pdf/lift_catalog_fh50.pdf

A.2.5 遮蔽用鉄板の評価パラメーター

遮へい鉄板の寸法について、通路に平行な方向の大きさを長さ、鉛直方向の大きさを高さ、両方に垂直な方向の大きさを厚さと定義し、表 A.2-9 のように定めた。

表 A.2-9 遮へい鉄板の評価パラメーター

No.	名称	単位	選定値	選定理由
1	線源長さ	m	100	1F 敷地内にある定期検査用機材倉庫の長さを航空写真より計測し、98m であったため。また、50m を超える距離の実効線量寄与は、有効数字 2 桁の範囲では有意な値を持たない。
2	線源高さ	m	5.5	表 A.2-8 で示したコンクリートブロックの高さを用いた。同じ考え方で算出すると、最大荷重分の鉄（底面積 1.1m×1.1m、密度 7.85g/cm ³ ）の高さは 37cm 程度であるため、より保守的な評価となっている。
3	線源厚さ	m	2	厚さによる被ばく線量換算係数の変化を評価し、2m 以上の厚さによる寄与がないことを確認したためこの値を用いた。
4	通路幅	m	5	No.2 と同型のフォークリフトの実用直角積付通路幅 4.8m より。
5	鉄板密度	g/cm ³	7.85	鉄の密度より。
6	鉄板中再生資材使用率	-	1.0	鉄板は全て金属くずから再利用されたものとする。

A.2.6 二酸化炭素吸入による内部被ばく線量の評価に用いたパラメーター

二酸化炭素吸入による内部被ばく線量の評価に用いたパラメーターを表 A.2-10 に示す。

表 A.2-10 二酸化炭素吸入による内部被ばく線量の評価に用いたパラメーター

No.	名称	単位	選定値	選定理由
1	線源の面積	m ²	900	道路幅 9m、道路長さ 100m より設定
2	空気の混合領域の高さ	m	2	RESRAD コードマニュアル ¹ にて吸入による内部被ばく評価用いられている値
3	年間平均風速	m/s	1.6	福島県浪江町の 1981～2017 年までの平均風速（気象庁 HP ² より）を設定
4	線源中の C-14 濃度	Bq/kg	3,000	参考文献 ³ より最高濃度を設定
5	線源領域からの C-14 散逸率	1/y	22	保守的に RESRAD コードマニュアル ¹ にて土壌(Organic soils)からの散逸率として設定されている値を選定
6	線源のかさ密度（路盤材）	kg/m ³	2,000	参考文献 ⁴ の「道路及び歩道・上層/下層路盤材」のかさ密度の値を用いる。
7	線源のかさ密度（アスファルト道路の舗装材）	kg/m ³	2,200	参考文献 ⁴ の「道路・不透水性アスファルト」のかさ密度の数を用いる。
8	線源のかさ密度（コンクリート道路の舗装材）	kg/m ³	2,000	参考文献 ⁵ の表 9.4-1（普通コンクリートの元素組成例）より、花崗岩を粗骨材とした場合の値を用いた。
9	線源厚さ（路盤材）	m	0.8	表 3.2-1 から設定。
10	線源厚さ（アスファルト道路の舗装材）	m	0.2	表 3.2-1 から設定。
11	線源厚さ（コンクリート道路の舗装材）	m	0.3	表 3.2-1 から設定。
12	作業呼吸量	m ³ /y	1.2	クリアランスレベル評価で建設作業者の呼吸量として設定されている値を選定
13	C-14(CO ₂)吸入による内部被ばく線量換算係数	Sv/Bq	6.30E-12	JAERI-M 87-172 にて二酸化炭素吸入による C-14 からの預託実効線量等量として設定された値を選定

-
- 1 Environmental Assessment Division, Argonne National Laboratory. User's Manual for RESRAD Version 6, 2001
 - 2 国土交通省 気象庁 HP.
http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/nml_amd_ym.php?prec_no=36&block_no=0295&year=&month=&day=&view=
 - 3 技術研究組合（IRID 及び JAEA）. 福島第一発電所構内で採取した建屋内瓦礫、立木、落葉及び土壌の放射能分析
[9http://irid.or.jp/wp-content/uploads/2015/03/20150326_2.pdf](http://irid.or.jp/wp-content/uploads/2015/03/20150326_2.pdf)
 - 4 澤口拓磨、武田聖司、木村英雄、田中忠夫. 放射性物質により汚染された災害廃棄物の道路への再生利用に伴う被ばく線量評価. Jpn.J.Health Phys.50(1),36~49, 2015
 - 5 Y. Sakamoto, S. Tanaka. QAD-CGGP2 and G33-GP2: Revised Versions of QAD-CGGP AND G33-GP. JAERI-M90-110, 1990

A.2.7 路盤材に再生利用した際の地下水移行評価に用いたパラメーター

路盤材に再生利用した際の地下水移行評価に用いたパラメーターを表 A.2-11 に示す。

表 A.2-11 2.7 路盤材に再生利用した際の地下水移行評価に用いたパラメーター

No	名称	単位	選定値	選定理由
1	路盤材中セシウム濃度 (Cs-134+Cs-137)	Bq/kg	100,000	コンクリート道路の路盤材に再生利用した際のめやす濃度。
2	路盤材中 Sr-90 濃度	Bq/kg	1,000	1F 敷地内の Cs-137 に対する Sr-90 の核種濃度率 1% にセシウムのめやす濃度をかけることで設定。
3	路盤材中 C-14 濃度	Bq/kg	3,000	参考文献 ¹ で観測された敷地内がれき中濃度の最高値
4	路盤材のかさ密度	g/cm ³	2.0	参考文献 ² で設定した上層/下層路盤材のかさ密度。
5	路盤材の間隙率	—	0.1	路盤材の空隙率を 10%、絶乾密度を 2.25g/cm ³ として算出した既往評価 ² の値を設定
6	Cs のコンクリートに対する分配係数	ml/g	2.5	セメントモルタルに対する分配係数 ³
7	Sr のコンクリートに対する分配係数	ml/g	1.25	セメントモルタルに対する分配係数 ³
8	炭素のコンクリートに対する分配係数	ml/g	5.0	参考文献 ⁴ で採用した放出係数 0.1 を分配係数に換算し丸めた値
9	線源厚さ	m	0.8	表 3.2-1 から設定。
10	浸透数量 (コンクリートへの浸透)	m/y	7.2E-03	大気圧下におけるコンクリートへの透水実験 ⁵ より求めた透水係数の値を浸透水量として設定
11	帯水層土壌真密度	g/cm ³	2.6	「土質工学ハンドブック」(土質工学会編、1982 年)
12	帯水層土壌の間隙率	—	0.41	1F 敷地内の地下貯水槽から漏えいした汚染水の地下水移行評価 ⁶ において設定されている値
13	Cs の帯水層土壌に対する分配係数	ml/g	270	IAEA TRS No.364 (砂)
14	Sr の帯水層土壌に対する分配係数	ml/g	13	IAEA TRS No.364 (砂)
15	炭素の帯水層土壌に対する分配係数	ml/g	2.0	クリアランスレベル評価 ⁴ の中で用いられている IAEA-TECDOC-401 をもとに設定した値
16	地下水流速	m/y	36.5	既往研究 ⁶ にて、東京電力から入手した 1F 敷地内の地下水実流速として示された値約 0.1m/d から算出。
17	帯水層厚さ	m	10	既往研究 ⁶ にて、1F 敷地内の地下貯水槽付近の帯水層厚さとして示されている値を設定。

-
- 1 技術研究組合（IRID 及び JAEA）. 福島第一発電所構内で採取した建屋内瓦礫、立木、落葉及び土壌の放射能分析. 平成 27 年 3 月 26 日
http://irid.or.jp/wp-content/uploads/2015/03/20150326_2.pdf
 - 2 澤口拓磨、武田聖司、木村英雄、田中忠夫. 放射性物質により汚染された災害廃棄物の道路への再利用に伴う被ばく線量評価. Jpn.J.Health Phys.50(1),36~49, 2015
 - 3 日本原子力研究開発機構. TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－. JNC TY1400 2005-013, 2005
 - 4 原子力安全委員会. 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 17 日 <https://www.rwmc.or.jp/law/file/2-12.pdf>
 - 5 岸本嘉彦、佐藤靖彦、中村麻里亜、銚井修一. コンクリートの透水性が中性化の進行に及ぼす影響. コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, 2007
 - 6 日本原子力研究開発機構 環境影響評価研究グループ. 地下貯水槽から漏えいした汚染水に含まれる放射性核種の移行評価. 特定原子力施設監視・評価検討会（第 9 回）資料 1-4, 2013 <http://www.nsr.go.jp/data/000050926.pdf>

A.2.8 基礎材に再生利用した際の地下水移行評価に用いたパラメーター

基礎材に再生利用した際の地下水移行評価に用いたパラメーターを表 A.2-12 に示す。

表 A.2-12 基礎材に再生利用した際の地下水移行評価に用いたパラメーター

No	名称	単位	選定値	選定理由
1	基礎材中セシウム濃度 (Cs-134 + Cs-137)	Bq/kg	160,000	基礎材への再生利用時のめやす濃度
2	基礎材中 Sr-90 濃度	Bq/kg	1,600	1F 敷地内の屋外集積がれき中核種濃度測定により求めた、Cs-137 に対する Sr-90 の核種濃度比率 1% にセシウムのめやす濃度をかけることで設定
3	基礎材のかさ密度	g/cm ³	2.1	セメントモルタルのかさ密度 ¹
4	基礎材の間隙率	—	0.19	セメントモルタルの間隙率 ¹
5	Cs のコンクリートに対する分配係数	ml/g	2.5	セメントモルタルに対する分配係数 ¹
6	Sr のコンクリートに対する分配係数	ml/g	1.25	セメントモルタルに対する分配係数 ¹
7	線源長さ	m	125	固体廃棄物貯蔵庫第 9 棟 ² の長さ
8	浸透水量 (ひびのあるコンクリートへの浸透)	m/y	3.65E-2	帯水層とひび割れのあるコンクリートの透水係数及び間隙率を用いた流動解析の結果より、コンクリート中の流速が帯水層中流速の 1/1000 ほどであると設定。地下水流速に 1/1000 をかけた値を浸透水量と設定。
9	浸透水量 (ひびのないコンクリートへの浸透)	m/y	7.2×10 ⁻³	大気圧下におけるコンクリートへの透水実験 ³ により求めた透水係数の値を浸透水量として設定
10	帯水層土壌真密度	g/cm ³	2.6	土質工学ハンドブック (土質工学会編、1982 年)
11	帯水層土壌の間隙率	—	0.41	1F 敷地内の地下貯水槽から漏えいした汚染水の地下水移行評価 ⁴ において設定されている値
12	Cs の帯水層土壌に対する分配係数	ml/g	270	IAEA TRS No.364 (砂)
13	Sr の帯水層土壌に対する分配係数	ml/g	13	IAEA TRS No.364 (砂)
14	地下水流速	m/y	36.5	既往研究 ⁴ にて、1F 敷地内の地下水実流速 (東京電力提供) として示された約 0.1m/d から算出。
15	帯水層厚さ	m	10	既往研究 ⁴ にて、1F 敷地内の地下貯水槽付近の帯水層厚さとして示されている値を設定。

地下水流動解析にて用いたパラメーターを表 A.2-13 に示す。

表 A.2-13 地下水流動解析のパラメーター

No	名称	単位	選定値	選定理由
1	基礎材の間隙率	—	0.19	セメントモルタルの間隙率 ¹
2	ひび割れがあるコンクリートの透水係数	cm/s	2.62E-6	コンクリートに人為的にひびを入れ、透水係数を測定した実験結果より設定 ⁵ 。30cm 四方のコンクリートの立方体に幅 2mm、深さ 25cm のひび割れがある場合の透水係数を採用。
3	帯水層土壌の間隙率	—	0.41	「1F 敷地内の地下貯水槽から漏えいした汚染水の地下水移行評価 ⁴ 」において設定されている値
4	帯水層の透水係数	cm/s	3.0E-3	「1F 敷地内の地下貯水槽から漏えいした汚染水の地下水移行評価 ⁴ 」において設定されている値

-
- 1 日本原子力研究開発機構. TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－. JNC TY1400 2005-013, 2005
 - 2 原子力規制委員会. 東京電力株式会社 福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画. 2.10 放射性固体廃棄物等の管理施設.
<https://www.nsr.go.jp/data/000163505.pdf>
 - 3 岸本嘉彦、佐藤靖彦、中村麻里亜、銚井修一. コンクリートの透水性が中性化の進行に及ぼす影響. コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, 2007
 - 4 日本原子力研究開発機構 環境影響評価研究グループ. 地下貯水槽から漏えいした汚染水に含まれる放射性核種の移行評価. 特定原子力施設監視・評価検討会（第 9 回）資料 1-4, 2013 <http://www.nsr.go.jp/data/000050926.pd>
 - 5 遠藤孝夫、広永道彦、名倉健二、田辺忠顕. 非貫通ひび割れを有するコンクリートの水密性評価法の検討. コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, 21, 1999

謝辞

本研究を遂行し学位論文をまとめるにあたり、多くのご支援とご指導を賜りました指導教官の飯本武志教授に深く感謝いたしております。常に明るく前向きに、私を導いてくださった先生の姿は、私にとって理想の研究者像のひとつでございませう。また、先生が持つ、人との繋がりの中で研究を推進していく能力は、私も見習いたいと思ひます。

博士論文の執筆に際しまして、多大なご指導を賜りました京都大学の高橋知之准教授に深く感謝いたしております。ご多忙の中にも関わらず、何度もお時間を頂き誠にありがとうございました。緻密なロジックを組み立て、課題解決に立ち向かう姿勢は、私に研究者とは何たるかを教えてくださいました。

本論文審査にあたり、審査委員として多くのご助言を頂きました、多部田茂教授、徳永朋祥教授、布浦鉄兵准教授には深く感謝いたします。

本論文の内容に関して、多くのご指導をいただきました日本原子力研究開発機構の武田聖司様、島田太郎様には深く感謝しております。本論文の第3章は、おふたりのご指導のもとで実施した研究内容です。普段の研究生活において、温かくご支援いただいていることにも感謝しております。

本論文の第2章の検討に際し、多くの有意義なご助言をいただきました、電力中央研究所の服部隆利博士、杉山大輔博士、原子力規制庁の荻野晴之博士には深く感謝いたします。

東京大学飯本研究室の皆様には、研究以外の場においてもご支援いただき、常に元気をいただきました。ありがとうございました。今後とも末永くよろしくお願ひいたします。

日本原子力研究開発機構へ入社2年目に、修士までの専攻と異なる分野の博士後期課程へ進学することを悩んでいた際に、温かいお言葉で背中を押してくださった、北海道大学の太田敦之准教授と東京大学の小畑元教授には深く感謝しております。いつか何らかの形で、先生たちの専門である地球化学、海洋化学の分野に、研究者として貢献したいと思ひています。

最後に、これまで温かく見守りご支援してくださった両親に対して深い感謝の意を表して、謝辞といたします。

2020年4月

本論文の「3.2 オンサイトにおける汚染がれきの限定再生利用の科学的可能性の検討」の一部は、原子力規制委員会原子力規制庁「平成27～29年度 廃棄物の限定再利用に関する検討」として実施したものである。