JAEA-Research
2020-005
DOI:10.11484/jaea-research-2020-005

JAEA-Research

除去土壌の海岸防災林への再生利用に関する線量評価（受託研究）

Dose Estimation in Recycling of Removed Soil as Seaside Protection Forest
(Contract Research)

澤口 拓磨　高井 静霞　武田 聖司

Takuma SAWAGUCHI, Shizuka TAKAI and Seiji TAKEDA

安全研究・防災支援部門
安全研究センター
環境安全研究ディビジョン

Environmental Safety Research Division
Nuclear Safety Research Center
Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness

June 2020

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（https://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2020

JAEA-Research 2020-005

除去土壌の海岸防災林への再生利用に関する線量評価
（受託研究）

日本原子力研究開発機構　安全研究・防災支援部門
安全研究センター　環境安全研究ディビジョン
澤口　拓磨、高井　静霞、武田　聖司

（2020 年 3 月 18 日　受理）

福島第一原子力発電所事故後の除染活動等によって福島県内で発生した大量の除去土壌等は、中間貯蔵を経た後福島県外で最終処分されることとなっている。最終処分の実現に向けて、環境省は処分量の低減のため、除去土壌に適切な前処理を施し再生資材として管理主体が明確である公共事業等に限定して再生利用する方針を示した。そこで、本研究では、環境省が策定する除去土壌の再生利用に係る指針等に資するため、公共事業における海岸防災林盛土材への再生利用を対象に、安全を確保するための再生資材の放射能濃度および建設条件について検討した。評価の結果、施工時・供用時における作業者および一般公衆の追加被ばく線量が 1 mSv/y を満たすための再生資材中の放射性セシウム濃度レベルは 5,000 Bq/kg と算出された。この濃度の再生資材に対して、供用時の公衆の追加被ばく線量を 10 μSv/y まで低減させるためには、覆土厚さを 39 cm 以上にする必要があることを示した。さらに、再生利用可能な放射能濃度レベルの再生資材を使用した場合に、災害時に作業者および一般公衆が受ける追加被ばく線量が 1 mSv/y を超えないことを確認した。

本報告書は、環境省からの受託研究「平成 27 年度最終処分に向けた技術開発戦略策定調査」の成果である。
原子力科学研究所：〒319-1195　茨城県那珂郡東海村大字白方 2-4

JAEA-Research 2020-005

Dose Estimation in Recycling of Removed Soil as Seaside Protection Forest (Contract Research)

Takuma SAWAGUCHI, Shizuka TAKAI and Seiji TAKEDA

Environmental Safety Research Division, Nuclear Safety Research Center,
Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness,
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 18, 2020)

After the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident, large quantities of radiocesium-contaminated soil were generated from decontamination activities in the Fukushima prefecture. The removed soil has been stored in the prefecture until its final disposal. To complete the final disposal outside Fukushima prefecture, reducing the disposal volume through recycling can prove effective. The Ministry of the Environment, Japan (MOE) has presented a policy to recycle low-radioactive removed soil as recycled materials under the management of public authority. The recycling is limited to civil engineering structures in public projects. In this study, to contribute to guideline development for removed soil recycling by MOE, dose estimation in recycling of removed soil as embankment materials of seaside protection forest was conducted. First, additional doses to workers and the public in construction and service scenarios were evaluated. From the result, the radioactive cesium concentration level of recycled materials, where all additional doses meet the radiation criterion of 1 mSv/y, was derived to be 5,000 Bq/kg. Then, construction conditions were reviewed to reduce additional doses to the public in a service scenario. With the derived radioactivity level of 5,000 Bq/kg, the covered soil thickness of 39 cm or more limited the doses to less than 10 μSv/y. Finally, additional doses in a disaster scenario were evaluated. The doses were confirmed to be below 1 mSv/y when the removed soil of 5,000 Bq/kg was used.

Keywords: Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident, Dose Estimation, Recycling, Removed Soil, Embankment, Seaside Protection Forest

---

Present study is entrusted from Ministry of the Environment, Japan.

目　次

1. 序論 ----- 1
2. 海岸防災林への再生利用に対する線量評価の概要 ----- 1
2.1 評価の基本的考え方 ----- 1
2.2 評価シナリオの設定 ----- 2
2.3 評価モデルの設定 ----- 2
2.4 評価パラメータの設定 ----- 2
2.5 解析コード ----- 3
2.6 評価手順 ----- 3
3. 再生利用可能な放射能濃度レベルの評価 ----- 4
3.1 施工時・供用時シナリオの設定 ----- 4
3.2 施工時・供用時シナリオに対する評価パラメータの設定 ----- 12
3.3 施工時・供用時シナリオに対する評価結果 ----- 20
4. 追加被ばく線量の低減のための建設条件の検討 ----- 23
4.1 建設条件検討のための線量評価 ----- 23
4.2 建設条件検討のための評価パラメータの設定 ----- 24
4.3 建設条件検討に係る評価結果 ----- 25
5. 災害時の安全性評価 ----- 30
5.1 災害時シナリオに対する線量評価 ----- 30
5.2 災害時シナリオの設定 ----- 30
5.3 災害時シナリオに対する評価パラメータの設定 ----- 37
5.4 災害時シナリオに対する評価結果 ----- 40
6. 結論 ----- 43
参考文献 ----- 44

Contents

1. Introduction ---- 1
2. Overview of dose estimation for recycling as seaside protection forest ---- 1
2.1 Basic concept for dose estimation ---- 1
2.2 Development of exposure scenario ---- 2
2.3 Models for dose estimation ---- 2
2.4 Parameter settings for dose estimation ---- 2
2.5 Code for dose estimation ---- 3
2.6 Procedure for dose estimation ---- 3
3. Dose estimation for deriving recyclable radioactive concentration level ---- 4
3.1 Development of construction and service scenarios ---- 4
3.2 Parameter settings for dose estimation in construction and service scenarios ---- 12
3.3 Results of dose estimation in construction and service scenarios ---- 20
4. Review of construction conditions to reduce additional doses to the public ---- 23
4.1 Dose estimation for construction condition review ---- 23
4.2 Parameter settings for construction condition review ---- 24
4.3 Results of dose estimation for construction condition review ---- 25
5. Safety evaluation in the case of disaster ---- 30
5.1 Dose estimation for disaster scenario ---- 30
5.2 Development of disaster scenario ---- 30
5.3 Parameter settings for dose estimation in disaster scenario ---- 37
5.4 Results of dose estimation in disaster scenario ---- 40
6. Conclusion ---- 43
References ---- 44

表リスト

Table 1　海岸防災林施工の主な作業工程 ----- 5
Table 2　再生資材の海岸防災林盛土材への再生利用に係る評価経路 ----- 6
Table 3　海岸防災林完成後の伐採作業者、周辺居住者に係る評価で考慮した線源 ----- 9
Table 4　再生資材の海岸防災林盛土材への再生利用に係る評価経路パラメータ一覧 ----- 12
Table 5　各評価年に対する単位面積あたりの樹木の本数、高さおよび伐採木の重量 ----- 20
Table 6　樹木、伐採木からの外部被ばくに対する線量換算係数 ----- 20
Table 7　内部被ばく線量係数（施工時、供用時） ----- 20
Table 8　海岸防災林盛土材への再生利用に係る評価結果（施工時、供用時） ----- 21
Table 9　建設条件検討のための評価パラメータ一覧 ----- 24
Table 10　建設条件検討に係る評価結果（経路 No.13、植栽等作業者） ----- 26
Table 11　追加被ばく線量が 1 mSv/y または 10 μSv/y を超えないための覆土厚さ ----- 30
Table 12　1 mSv/y 相当濃度および作業者・一般公衆が受ける追加被ばく線量の最大値 ----- 30
Table 13　放射性 Cs の漏洩を引き起こす可能性のある自然災害に係る検討 ----- 31
Table 14　再生資材の海岸防災林への再生利用に係る評価経路（災害時・津波） ----- 32
Table 15　再生資材の海岸防災林への再生利用に係る評価経路（災害時・火災） ----- 33
Table 16　海岸防災林盛土および樹木（20 ha）に含まれる
放射性セシウム濃度から算出した地表面濃度 ----- 35
Table 17　再生資材の海岸防災林への再生利用に係る
評価経路パラメータ（災害時・津波） ----- 38
Table 18　内部被ばく線量係数（災害時・津波） ----- 39
Table 19　再生資材の海岸防災林への再生利用に係る
評価経路パラメータ（災害時・火災） ----- 39
Table 20　海岸防災林盛土材への再生利用に係る評価結果（災害時・津波） ----- 40
Table 21　全 Cs に対する単位再生資材中濃度あたりの年間被ばく線量（消防士） ----- 40
Table 22　全 Cs に対する単位再生資材中濃度あたりの年間被ばく線量（公衆）
（最も被ばく線量が高くなるケース抜粋） ----- 42
Table 23　海岸防災林盛土材への再生利用に係る評価結果（災害時・火災） ----- 42

図リスト

Fig. 1　海岸防災林盛土材への再生利用に対する線量評価の流れ----------4
Fig. 2　海岸防災林造成（盛土材の敷均し・締固め）時の
作業者および周辺居住者の評価体系----------8
Fig. 3　海岸防災林造成（樹木の植付）時の作業者の評価体系----------8
Fig. 4　海岸防災林完成後の伐採作業者および周辺居住者の評価体系----------10
Fig. 5　海岸防災林完成後の地下水移行に係る評価体系（海への核種流出）----------11
Fig. 6　海岸防災林完成後の地下水移行に係る評価体系（井戸水利用）----------11
Fig. 7　経路 No.14 の評価結果（海岸防災林完成後の伐採作業者、外部被ばく）----------21
Fig. 8　経路 No.15 の評価結果（海岸防災林完成後の周辺居住・成人、外部被ばく）--------22
Fig. 9　経路 No.16 の評価結果（海岸防災林完成後の周辺居住・子ども、外部被ばく）-----22
Fig. 10　建設条件検討のための評価体系（経路 No.13：植栽等作業者）----------23
Fig. 11　建設条件検討のための評価体系
（経路 No.14：伐採作業者、経路 No.15,16：周辺居住者（成人、子ども））-----24
Fig. 12　経路 No.13, 14, 15 に対する再生資材からの外部被ばく線量換算係数----------25
Fig. 13　建設条件検討に係る評価結果（経路 No.14：伐採作業者）----------26
Fig. 14　建設条件検討に係る評価結果（経路 No.15：周辺居住者・成人）----------27
Fig. 15　建設条件検討に係る評価結果（経路 No.16：周辺居住者・子ども）----------27
Fig. 16　5,000 および 8,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の外部被ばく線量
（経路 No.13：植栽等作業者）-----28
Fig. 17　5,000 および 8,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の外部被ばく線量
（経路 No.14：伐採作業者）-----29
Fig. 18　5,000 および 8,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の外部被ばく線量
（経路 No.15：周辺居住者・成人）-----29
Fig. 19　5,000 および 8,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の外部被ばく線量
（経路 No.16：周辺居住者・子ども）-----29
Fig. 20　再生資材の海岸防災林への再生利用に係る評価体系（災害時・津波）----------34
Fig. 21　全 Cs に対する単位再生資材中濃度あたりの年間被ばく線量（公衆）----------41

1. 序論

福島第一原子力発電所事故に伴い大気中に放出された放射性セシウム（Cs-134（半減期：2.06年）、Cs-137（半減期：30.0 年））により汚染された広範囲の地域では、放射性物質が付着した表土の削り取り、枝葉や落ち葉の除去、建物表面の洗浄等による除染が進められている。福島県内において除染等の措置に伴い生じた大量の土壌および廃棄物（以下、「除去土壌等」という）は、中間貯蔵施設で一旦保管した後、30年以内に福島県外で最終処分することになっている[1)]。しかしながら、福島県内の除去土壌等の発生量は最大で約 2,200 万 m^3（うち除去土壌 9 割、廃棄物焼却灰 1 割）と推計されており[2)]、これらの大量の除去土壌等の県外最終処分の実現に向けて、環境省は除去土壌等の減容・再生利用に関する技術開発、減容処理後の土壌等の再生利用の推進等に係る中長期的な方針（技術開発戦略）を公表した[3)]。また、環境省は、汚染の程度を低減させる適切な前処理によって放射能濃度の低い土壌を分離し、再生資材として管理主体が明確である公共事業等に限定して再生利用する「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」[4)]も示した。本考え方では、再生利用の用途先の例として、長期間にわたり人為的な形質変更が発生しにくく大量の土砂の利用が想定される、盛土材等の構造基盤の部材（道路・鉄道盛土、防潮堤盛土、海岸防災林盛土、廃棄物処分場の覆土・土堰堤等）が示されている。

本研究では、これら部材の一つである海岸防災林の盛土材へ除去土壌等が再生利用されることを想定して、再生利用に伴う作業者および一般公衆の追加被ばく線量を評価し、再生利用可能な再生資材中の放射性セシウム濃度を導出した。さらに、供用時の一般公衆に対する追加被ばく線量を低減するための設計条件および災害時の安全性に対する評価を行うことで、安全を確保した再生利用を行うための要件を検討した。

2. 海岸防災林への再生利用に対する線量評価の概要

2.1 評価の基本的考え方

上述の通り、再生資材は無条件に市場に流通できるクリアランス制度とは異なり、管理主体や責任体制が明確な公共事業等における土木構造物へ限定的に利用されることが前提である。本評価では海岸防災林の盛土材への再生利用を対象にするが、特定の場所での利用や特別な制限は想定せず、国内の建設基準等に基づいた典型的な作業工程や構造を設定することとした。なお、再生資材の利用の開始時期は福島第一原子力発電所事故から 5 年後とし、Cs-134 と Cs-137 の存在割合は 0.209 : 1 とした（事故直後の存在割合を 1 : 1 と仮定）。また、再生資材の利用に伴い作業者および一般公衆が受ける追加被ばく線量を評価するためには、「評価シナリオ・被ばく経路」、「評価モデル」、「評価体系・評価パラメータ」および「解析コード」が必要であり、それぞれ以下の考え方をもとに設定・選定した。

2.2 評価シナリオの設定

評価シナリオの設定にあたり、まず国内における海岸防災林の施工工程、利用状況および災害による損壊形態を整理した。これらに基づき、海岸防災林の施工時およびその完成後の供用時・災害時において、線源である再生資材からの直接的な被ばくや線源からの放射性セシウムの環境中への移行に伴い生じる被ばくの可能性のある状態を、評価シナリオとして具体的に設定する。施工時から供用時におけるシナリオを以下のように設定した。

施工時シナリオ

再生資材の運搬、海岸防災林の施工時における作業者および施工時の周辺住民の被ばくを対象としたシナリオである。通常の作業工程を調査し、再生資材（線源）からの被ばくを受けやすい工程、作業条件を抽出し、被ばく対象者と被ばく形態（外部被ばく、粉塵吸入や経口摂取による内部被ばく）を具体化し、被ばく経路として設定した。

供用時シナリオ

海岸防災林の完成後における通常の作業者および周辺住民の被ばくを対象としたシナリオである。供用時の作業者および一般公衆を対象に、被ばく形態を具体化し、被ばく経路として設定した。

災害時シナリオ

地震、豪雨等の自然災害の発生によって海岸防災林が破損した状況と、さらに復旧作業が行われている状況を仮に想定した場合のシナリオである。自然災害による破損事例および復旧方法を調べ、当該災害により放射性セシウムが環境中に漏洩する可能性を検討し、災害発生から復旧時の具体的な被ばく経路を設定した。

2.3 評価モデルの設定

それぞれの評価シナリオの被ばく経路における被ばく線量を計算するために必要な評価モデルを設定した。上記評価シナリオ・被ばく経路の評価モデルは、原子炉施設等のクリアランスレベル[5,6]を算出するための評価モデルと基本的に同じであり、そのモデルの多くは評価対象に即して条件を適宜変更することにより評価可能である。また、クリアランスレベル評価で対応していないシナリオの評価では、既往の評価実績のある評価モデルを参考とした。

2.4 評価パラメータの設定

上記評価モデルによる解析に必要となる評価体系および評価パラメータは、国内における海岸防災林の建設基準や過去の災害事例等に基づき、現実的・代表的な値を設定することを基本とした。ただし、いくつものバリエーションが考えられる場合や不確実性が高い場合は安全側に立った値を設定した。また既往のクリアランスレベル評価[5,6]を踏襲できると考えられるパラメータ（内部被ばくや地下水移行による被ばくに関するパラメータ）については、同一の値を設定した。

2.5　解析コード

追加被ばく線量は、日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」という）で開発したクリアランスレベル評価コード「PASCLR2」[7]により計算を行った。当該コードは、原子炉施設やウラン取扱施設等から発生する放射性廃棄物をクリアランスし、産業廃棄物としての埋設処分するシナリオ（埋設処分シナリオ）および再生材としての利用するシナリオ（再利用シナリオ）における作業者と一般公衆の被ばく線量を網羅的に評価可能なコードであり、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律等[8,9]のクリアランスレベル、放射性物質汚染対処特別措置法[10]（以下、「特措法」という）における濃度規準等を評価した実績を有している。

外部被ばくの線量換算係数は、直接線が卓越する線源体系では原子炉施設等の遮へい計算で実績のある遮へい計算コード「QAD-CGGP2R」[11]を使用し、さらにスカイシャインによる効果を考慮する必要がある場合は放射線輸送計算コード「MCNP5」[12]を使用した。その際の具体的な線源体系は、海岸防災林の設計や施工等に関する情報に基づき設定し、施工時から供用時までの評価経路ごとに保守性を確保できる作業者および一般公衆との評価位置を決め、外部被ばくの線量換算係数を計算した。

2.6　評価手順

汚染された再生資材の海岸防災林盛土材への再生利用に対しての安全を確保するためには、海岸防災林の施工時、供用時および災害時において作業者、一般公衆が受ける追加被ばく線量を基準値以下に制限する必要がある。本評価では、この基準値を満たす条件を把握するため、以下に示す 3 つの評価を行った。

①再生利用可能な放射性セシウム濃度レベルの決定

施工時から供用時において通常想定されるシナリオ・被ばく経路を対象に、再生資材中の放射性セシウムの単位濃度（1 Bq/g）による追加被ばく線量を導出した。また、特措法基本方針（平成 23 年 11 月閣議決定）では、除染等の措置による長期的な目標を「1 mSv/y」としていること、除去土壌の減容化、運搬、保管等に伴う追加被ばく線量を「1 mSv/年を超えないこと」としている。このことを踏まえ本評価では、当該線量評価結果から、作業者および一般公衆に対する全ての被ばく経路の追加被ばく線量が「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の濃度（1 mSv/y 相当濃度）を算出し、各被ばく経路の放射能濃度の最小値から、海岸防災林盛土材に再生利用可能な放射性セシウム濃度レベルを決定した。なお、この値は ICRP Pub.103[13]で示されている現存被ばく状況（1～20 mSv/y）の下方値であり、また計画被ばく状況での公衆被ばくに対する拘束値でもある。

②供用時の一般公衆に対する線量低減の条件検討のための追加被ばく線量評価

環境省は、除去土壌の再生利用に係る基本的な考えとして、「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/y）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」ことを示した[4]。この値は ICRP Pub.104[14]による個人に何ら懸

念を生じさせないと見なされるリスク 0.01～0.1 mSv/y の下方値であり、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。そこで本評価では、①の評価により決定した再生利用可能な放射性セシウム濃度レベル条件における線量評価を行い、その結果から通常の供用時の一般公衆に対する追加被ばく線量が 10 μSv/y（＝0.01 mSv/y）を満足する設計（遮へい材として働く覆土の厚さ）条件について検討を行った。また、確実に電離則[15]および除染電離則[16]の適用対象外となる濃度（放射性セシウム濃度：10,000 Bq/kg 以下）および特措法に基づく指定廃棄物の基準（8,000 Bq/kg 超）等を考慮し、再生資材の放射性セシウム濃度として 8,000 Bq/kg を選定した場合の試算も行った。

③災害による海岸防災林の変状・崩壊を想定した場合の追加被ばく線量評価

国内における海岸防災林の損壊事例に基づき災害時の評価シナリオを設定し、①の評価により決定した再生利用可能な放射性セシウム濃度レベルの条件のもと、万一の災害により海岸防災林が損壊した場合の追加被ばく線量を評価し、災害時および復旧時の作業者、周辺居住者の追加被ばく線量が 1 mSv/y を超えないことの確認を行った。また、②と同様に、再生資材の放射性セシウム濃度として 8,000 Bq/kg を選定した場合の試算も行った。

以上を踏まえた、海岸防災林への再生利用に対する線量評価の流れを Fig.1 に示す。

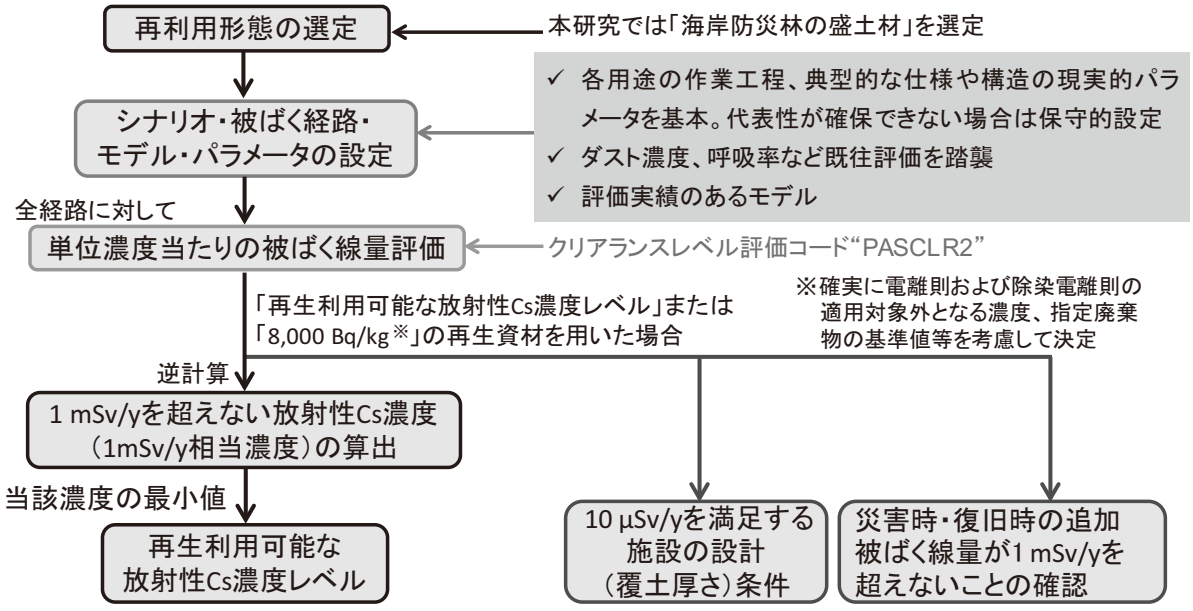

Fig.1　海岸防災林盛土材への再生利用に対する線量評価の流れ

3.　再生利用可能な放射能濃度レベルの評価

3.1　施工時・供用時シナリオの設定

海岸防災林へ再生利用可能な再生資材中の放射能濃度レベルを求めるために、まず施工時お

よび供用時の作業者、一般公衆の評価シナリオ・被ばく経路を設定した。

海岸防災林の施工に伴う主な作業工程および国土交通省の標準歩掛り[17]に基づく各工程の主な作業形態を Table 1 に示す。

Table 1　海岸防災林施工の主な作業工程

作業工程		作業形態
盛土施工	建設現場への盛土材の運搬	重機
	盛土材の積み下ろし	重機
	盛土材の敷均し・締固め	重機・人力
	法面の整形	重機・人力
	覆土の施工	重機・人力
	建設機械の洗浄	人力
植栽	樹木の植付	人力

施工時には、まずトラックにより再生資材（盛土材料）が建設現場に運搬され、バックホー等により施工場所に積み下ろされる。積み下ろされた再生資材はブルドーザー等によって一定の層厚さに敷均された後、タイヤローラー等で締固められ、バックホーにより法面が整形される。その後、再生資材上に植栽基盤である覆土が施工され、さらに、海岸防災林の造成として植栽が行われる。

本評価では、Table 1 に示す作業工程を対象として評価を行うこととした。各作業工程において、作業形態で重機と人力の両方が想定される場合は、重機による遮へいがない人力による作業を保守的に想定した。ただし、以下の作業工程については、評価対象から除外した。

盛土施工：法面整形作業・覆土の施工

盛土材の敷均し・締固め作業は盛土表面で行うのに対し、法面整形作業は法面上で行う。海岸防災林の面積は法面部分に比べ非常に大きく、盛土材の敷均し・締固め作業者の方がより外部被ばくの影響が大きいと想定される。また、覆土の施工作業は盛土材の敷均し・締固めと同じく盛土表面で行う作業であるが、覆土施工時には施工された覆土による遮へいが想定される。そのため、本評価では代表的に盛土材の敷均し・締固め作業を評価することとし、法面整形作業・覆土の施工を評価対象から除外した。

建設機械の洗浄

盛土の施工に使用される機械は、建設現場外への土砂飛散防止のために、建設現場入口等で洗浄される可能性がある。洗浄により機械に付着した土砂が排水とともに地面へ浸透し、土砂に含まれる核種が帯水層まで到達した場合、汚染した地下水の利用による被ばくが考えられる。しかしながら、地下水利用による被ばくについては、後述する海岸防災林への雨水浸透を想定した大規模な線源（盛土）に対する年間を通した地下水への移行を考慮しているとともに、当

該経路によって地下水へ浸透する核種の量は建設機械の洗浄よりもはるかに多いと考えられる。そのため、地下水移行については海岸防災林への雨水浸透に係る経路を代表的に評価することとし、建設機械の洗浄を評価対象から除外した。

一方、海岸防災林完成後の供用時には周辺居住者および伐採作業者の被ばくが想定される。また、海岸防災林は海岸近傍の平地部に施工されること、盛土崩壊に対し安全な設計が施されること、沈下変形を許容する構造物であること、樹木の植栽基盤（覆土）に覆われること等から、排水工が設置されない。そのため、海岸防災林完成後の雨水浸透による地下水移行についての評価を行うこととした。

以上を踏まえ、各施工工程、供用時における被ばく対象者と被ばく形態を具体化し、Table 2のように被ばく経路を設定した。

Table 2　再生資材の海岸防災林盛土材への再生利用に係る評価経路（1/2）

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		運搬作業		作業者	外部	
5		運搬経路周辺居住		公衆（子ども）	外部	
6	海岸防災林造成	建設作業	盛土	作業者	外部	盛土整備中
7					粉塵吸入	
8					直接経口	
9		周辺居住		公衆（成人）	外部	
10					粉塵吸入	
11				公衆（子ども）	外部	
12					粉塵吸入	
13		植栽等作業		作業者	外部	覆土施工後
14	海岸防災林完成後	伐採作業	盛土、樹木、伐採木（伐採前・後）	作業者	外部	植栽後 7～47 年
15		周辺居住		公衆（成人）	外部	覆土施工後、植栽後 2～47 年
16				公衆（子ども）	外部	
17	海岸防災林完成後の地下水移行（海側への流出）	海産物摂取	海産物（魚類、無脊椎動物、藻類）	公衆（成人）	経口	
18				公衆（子ども）	経口	

Table 2　再生資材の海岸防災林盛土材への再生利用に係る評価経路（2/2）

No	評価対象		線源	対象者	被ばく形態	備考
19	海岸防災林完成後の地下水移行（井戸水利用）	飲料水摂取	井戸水	公衆（成人）	経口	
20				公衆（子ども）	経口	
21		農耕作業	井戸水で灌漑した土壌	作業者	外部	
22					粉塵吸入	
23		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	
24				公衆（子ども）	経口	
25		畜産物摂取	灌漑した土壌で生産された畜産物	公衆（成人）	経口	
26				公衆（子ども）	経口	
27		畜産物摂取	井戸水で飼育された畜産物	公衆（成人）	経口	
28				公衆（子ども）	経口	
29		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	
30				公衆（子ども）	経口	

災害廃棄物を対象とした既往の海岸防災林への再利用評価[18]では、海岸防災林の幅・高さおよび覆土厚さに複数のバリエーションが考えられたため、評価体系を複数のケースに分けて評価している。本評価では、その中で最も大きな評価体系（盛土幅 200 m、盛土高さ 2 m）を想定した評価を行うこととした。また、覆土厚さは、「植栽基盤整備技術マニュアル」[19]を参考とし、樹高 7～12 m の樹木に望ましい植栽基盤が 80～100 cm であることから 1.0 m に設定した。Table 2 に示した各評価経路に対する評価概要を以下に示す。

各経路共通事項

- 上述した通り、Cs-134 と Cs-137 の存在割合は 0.209：1 とした。
- 全ての経路について、評価開始時期は保守的に 0 年からとした。
- 一般的な設定が困難な作業者（運搬・建設・植栽・伐採に係る作業者）の被ばく時間は、年間 1,000 時間（1 日 8 時間、年間 250 日の労働時間の半分の時間）とした。
- 運搬中における再生資材の密度および盛土の密度については、「道路橋示方書（Ⅰ共通編）・同解説」[20]を参考とし、それぞれ自然地盤での砂質土に対する値（1.7 g/cm^3）、砂および砂れきに対する値（2.0 g/cm^3）とした。覆土については保守的に 1.5 g/cm^3 とした。

建設現場への運搬（経路 No.1～5）

再生資材の運搬に対しては、再生資材を運搬するトラックの運転者、バックホー等による積み下ろし作業者の外部被ばくを、車両および重機による遮へいを考慮して評価した。また、バックホーには窓がない場合もあるため、積み下ろし作業者については内部被ばく（粉塵吸入・直接経口）も評価した。運搬経路沿いに居住する一般公衆に対しては、既往の海岸防災林への

再利用評価[18]と同様に、運搬トラックの走行台数（4,500 台）のうち半分が赤信号により 1 分間停車すると仮定し、その間の外部被ばくを評価した。

海岸防災林造成（盛土整備中）（経路 No.6～12）

海岸防災林盛土の施工に対しては、建設作業者（露呈している再生資材の敷均し・締固め作業者）および建設現場周辺居住者の外部被ばくを評価した（Fig.2 参照）。盛土の施工は主に重機で行われるが、補助的な作業は人力で行われることを考慮し、重機による遮へいは考慮しなかった。また、これらの作業にあたっては内部被ばくが生じるため、代表的に建設作業者の内部被ばく（粉塵吸入・直接経口）を評価した。周辺居住者は直接盛土と接触しないため、内部被ばくとしては粉塵吸入のみを評価した。なお、海岸防災林は海岸沿いに総延長約 140 km（連続した長さは 1～6 km）が計画されているが（林野庁私信）、外部被ばくの観点から周辺居住者に影響を及ぼす範囲は 500 m 程度と考えられる。そこで本評価では、当該範囲では盛土施工後すぐに覆土が施工されるとし、再生資材層が露出しているのは多くても 4 日間（96 時間）と仮定した。

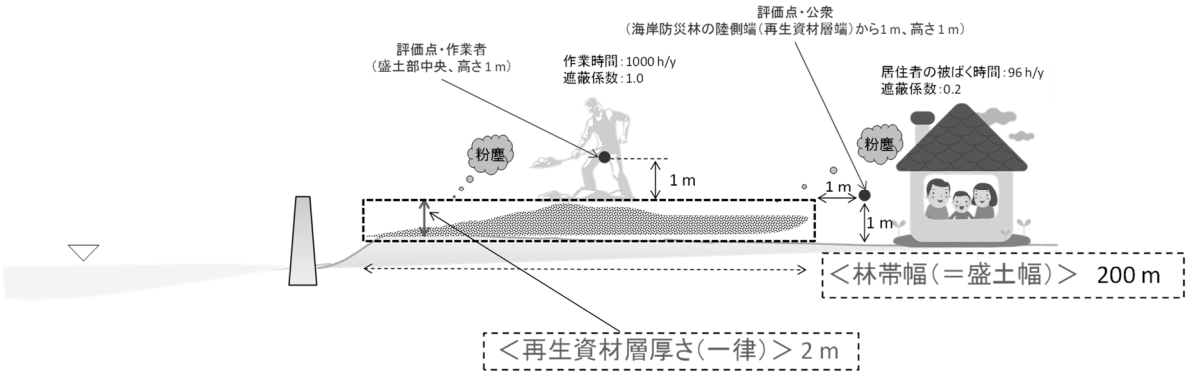

Fig.2　海岸防災林造成（盛土材の敷均し・締固め）時の作業者および周辺居住者の評価体系

海岸防災林造成（覆土施工後）（経路 No.13）

海岸防災林盛土上に覆土が施工された後の植栽作業に対しては、再生資材層の上に遮へい（覆土）がある状態を想定し、作業者の外部被ばくを評価した（Fig.3 参照）。また、当該作業では、再生資材が露呈していないため、内部被ばくは生じないとした。

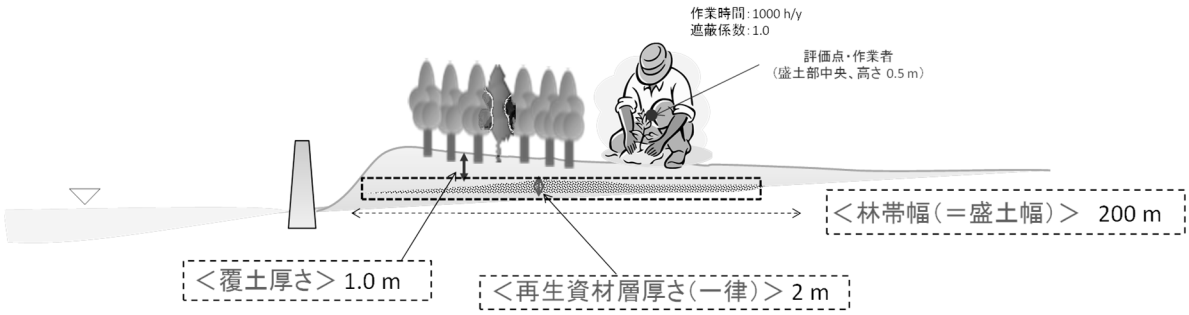

Fig.3　海岸防災林造成（樹木の植付）時の作業者の評価体系

海岸防災林完成後（伐採作業者、周辺居住者）（経路 No.14～16）

防風・防砂、津波被害減災等のため、海岸防災林完成後に樹木の定期的な伐採が行われる。これは、林木の間伐を行うことにより 1 本 1 本の成長が促され、根返りや幹折れが起きにくくなるからである。そこで本評価では、再生資材層上に覆土が施工された状態での伐採作業者および周辺居住者の外部被ばくを評価した（Fig.4 参照）。なお、これら経路では、再生資材からの外部被ばくの他に、成長した樹木（再生資材層へ根が到達後、樹木への Cs 移行を想定）および伐採により地面へ堆積された樹木（伐採木）の 3 つの線源からの外部被ばくを重畳して評価した。

具体的には、伐採作業者は最初の評価時期（植栽後 7 年、林齢 8 年）において、伐採前には再生資材および樹木から、伐採後にはそれらに加え、地面へ堆積された伐採木から放射線の影響を受けることになる。そのため、樹木の本数や高さ、伐採木の堆積量等を考慮し、これら線源から受ける、経時的に変化する外部被ばく線量を、最大値を得るまで評価する必要がある。本評価では、Cs-137 の半減期（30.0 年）を考慮し、さらに 10 年後の植栽後 17 年（林齢 18 年）、27 年（林齢 28 年）、37 年（林齢 38 年）、47 年（林齢 48 年）までの伐採作業に伴う外部被ばく線量の評価を、伐採前および伐採後に対して行った（後述の通り、当該経路の被ばく線量が最大となるのは植栽後 37 年であったため、48 年以降の評価は実施しないこととした）。

周辺居住者に対しては、伐採作業者と同様に、同じ評価時期において、再生資材、成長した樹木および伐採木の 3 つの線源からの放射線による外部被ばくを重畳して評価するとともに、覆土施工直後（0 年・植栽前）、および根が再生資材に到達し、放射性セシウムが樹木に移行する時点（植栽後 2 年*a）の外部被ばくも評価した。

各評価時期で考慮する線源を Table 3 に示す。

Table 3　海岸防災林完成後の伐採作業者、周辺居住者に係る評価で考慮した線源

線源	0 年 植栽前	植栽後				
		2 年	7 年		17,27,37,47 年	
			伐採前	伐採後	伐採前	伐採後
再生資材	○	○	○	○	○	○
樹木	－	○	○	○	○	○
伐採木	－	－	－	○	○	○

また、本評価においては、以下の式を用いて、単位濃度（1 Bq/g）の再生資材を盛土へ利用した場合における、当該経路の被ばく対象者の年間外部被ばく線量を算出した。

*a 覆土施工直後に植栽を行うと仮定。根系の伸長速度（4 cm/月、林野庁私信）を考慮し、覆土 1.0 m の場合は植栽後 2 年で根が再生資材層に到達し、樹木に Cs が移行するとした。

$$D_{ext,i} = C_i \cdot 10^{-3} \cdot \exp\left(-\lambda_i \cdot t_{fell}\right) \cdot t \cdot S \cdot \left[DF_{ext,reused,i} + T_{k,i} \cdot \left(DF_{ext,tree,i} + DF_{ext,felled,i}\right) \right] \cdot \frac{1-\exp(-\lambda_i \cdot t_a)}{\lambda_i \cdot t_a}$$

$D_{ext,i}$: 年間外部被ばく線量（mSv/y）
C_i : 再生資材中の核種 i 濃度（Bq/g）（=1）
λ_i : 核種 i の崩壊定数（1/y）
t_{fell} : 植栽後経過年数（y）
t : 被ばく時間（年間作業時間、居住時間）（h/y）
S : 遮へい係数（-）
$DF_{ext,reused,i}$: 核種 i を含む再生資材からの外部被ばくに対する線量換算係数（μSv/h per Bq/g）
$T_{k,i}$: 土壌から樹木への移行係数（-）
$DF_{ext,tree,i}$: 核種 i を含む樹木からの外部被ばくに対する線量換算係数（μSv/h per Bq/g）
$DF_{ext,felled,i}$: 核種 i を含む伐採木からの外部被ばくに対する線量換算係数（μSv/h per Bq/g）
t_a : 被ばく中の減衰期間（y）（＝1）

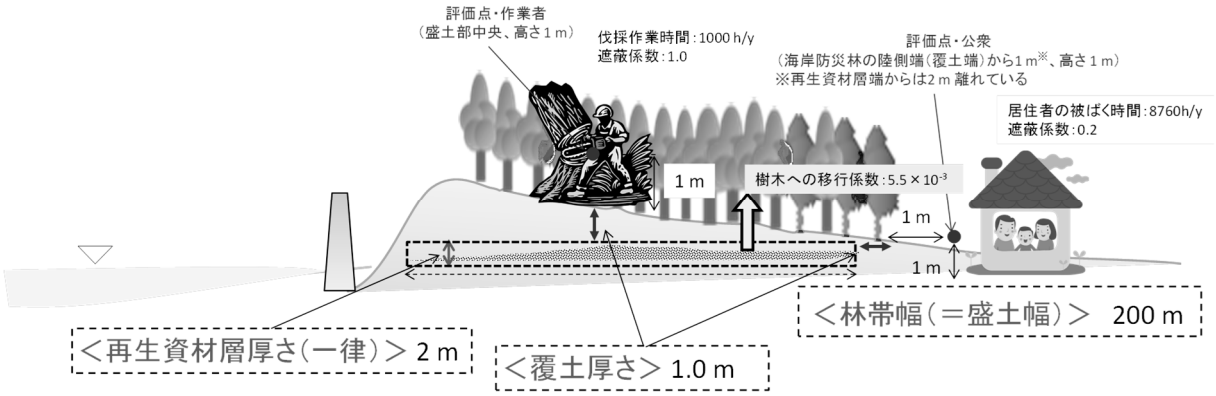

Fig.4　海岸防災林完成後の伐採作業者および周辺居住者の評価体系

地下水移行（経路 No.17～30）

地下水移行に対しては、海岸防災林への雨水浸透によって放射性 Cs が地下の帯水層に浸透し、そこから海側または陸側へ移行し、それぞれ海産物、井戸水由来で被ばくが起こると想定した。

具体的には、前者については、海産物（魚類、無脊椎動物、藻類）の摂取による被ばくを評価した（Fig.5 参照）。一方、後者については、井戸水の飲料水としての摂取、井戸水を灌漑に使用する農耕作業を行う作業者、灌漑した土壌で井戸水を使用して生育された農作物およびそれを飼料とする畜産物の摂取、井戸水で飼育された畜産物および淡水産物の摂取による被ばくを評価した（Fig.6 参照）。なお、盛土と帯水層の間には地表土や不透水層が存在するが、本評

価では保守的に盛土直下に帯水層があるとした。また、浸透水量は、既往の海岸防災林への再利用評価[18]に倣い、1.6 m/y とした。当該評価では、保守的に降雨全量が浸透するものとし、降雨量は気象庁 HP より浜通り沿岸の平年雨量（1981～2010 年）の最大値 1.6 m/y を設定している。

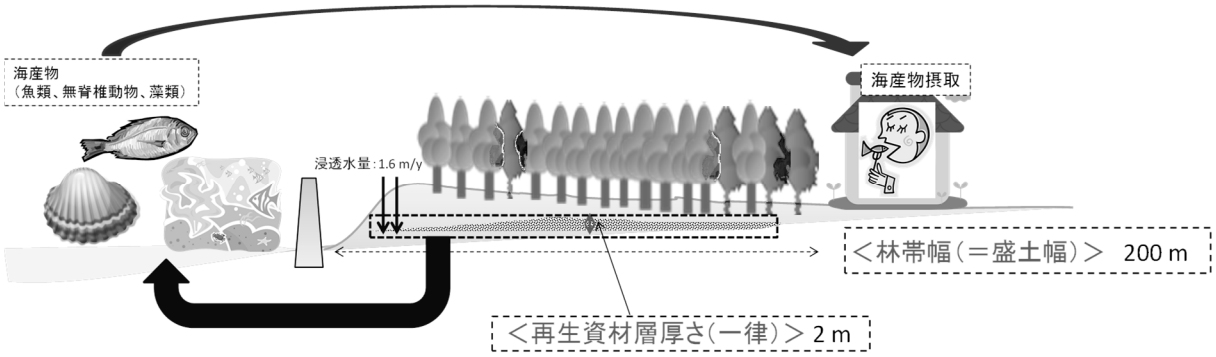

Fig.5　海岸防災林完成後の地下水移行に係る評価体系（海への核種流出）

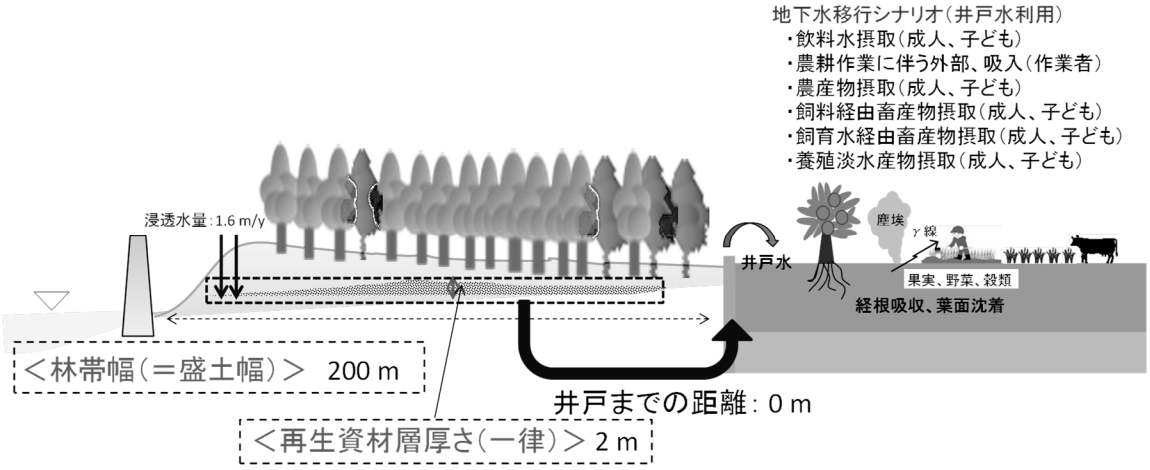

Fig.6　海岸防災林完成後の地下水移行に係る評価体系（井戸水利用）

3.2　施工時・供用時シナリオに対する評価パラメータの設定

評価に用いるパラメータを Table 4～7 に示す。

Table 4　再生資材の海岸防災林盛土材への再生利用に係る評価経路パラメータ一覧（1/8）

経路 No.	名称		単位	選定値	選定根拠
1-30	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こととした。
1-13	海岸防災林造成作業が開始されるまでの期間		y	0	保守的に、事故 5 年後すぐに再生資源化され、海岸防災林造成に使用されるものとした。
1-30	線源に対する希釈係数		－	1	海岸防災林の盛土として利用されるものは、すべて再生資材であるとした。
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 日の労働時間のうち半分の時間を再生資材のそばで作業するとした。ここでは、再生資材を海岸防災林造成現場へ運搬するための積み下ろし、運搬の作業が対象である。
1-5	運搬作業時における線源に対する希釈係数		－	1	作業者は、再生資材のみを取り扱うものとし、線源に対する希釈は保守的に 1 とした。
1,4	外部被ばくに対する線量換算係数（積み下ろし作業、運搬作業）	Cs-134	μSv/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 0.6 m、幅 2 m、長さ 5 m の直方体 線源のかさ密度：1.7 g/cm^3 評価点：0.6 m×5.0 m の中心から 1.0 m
		Cs-137		2.1E-02	
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 2 cm 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 および 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。
2,7	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。
2,7, 10,12	作業時の空気中ダスト濃度		g/m^3	5E-04	NUREG/CR-3585 に示された OPEN DUMP 時および 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気中ダスト濃度を採用した。
2,7, 10,12	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。
3,8	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。
3,8	ダストの経口摂取率		g/h	0.01	IAEA S.S. No.111-P-1.1 に示された値を用いた。
4	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 および 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。

※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

Table 4　再生資材の海岸防災林盛土材への再生利用に係る評価経路パラメータ一覧 (2/8)

経路 No.	名称		単位	選定値	選定根拠
5	外部被ばくに対する線量換算係数（運搬経路周辺居住、子ども）	Cs-134	μSv/h per Bq/g	2.0E-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 0.6 m、幅 2 m、長さ 5 m の直方体 線源のかさ密度：1.7 g/cm^3 評価点：0.6 m×5.0 m の底辺中央から 3.0 m
		Cs-137		6.8E-03	
5	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 分の間に被ばくすると仮定し、450 h/y としている。
5	運搬経路周辺居住時の遮へい係数		－	1.0	保守的な設定とした。
6-30	盛土の幅		m	200	海岸防災林の林帯部分 200 m に対し、一様に再生資材を盛土材として利用した場合を想定した。
6-30	盛土の長さ		m	500	MCNP5 コードの計算より、線源との評価距離が 1 m と近い場合、盛土の長さ 500 m 以上の条件では外部被ばく換算係数の値に有意な差異が確認されなかったため、保守的に 500 m と設定した。
6-30	盛土のかさ密度		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。
6-30	盛土材の厚さ		m	2.0	海岸防災林の盛土材として再生資材を利用する際の厚さを 2 m と仮定した。
6-8, 13	海岸防災林造成作業（建設作業、植栽等作業）に従事する年間作業時間		h/y	1,000	1 日 8 時間、年間 250 日の労働時間のうち半分の時間を海岸防災林造成作業するものとした。
6	外部被ばくに対する線量換算係数（海岸防災林造成・建設作業者）	Cs-134	μSv/h per Bq/g	4.2E-01	以下の条件で、MCNP5 コードにより算出した。 線源の形状：厚さ 2 m、幅 200 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：Fig.2 の評価点・作業者
		Cs-137		1.5E-01	
6,13	海岸防災林造成・建設作業、植栽等作業時における遮へい係数		－	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。
9-12	居住者の被ばく時間		h/y	96	盛土施工後はすぐに覆土の施工に取りかかることを想定。盛土材が露出しているのは多くても 4 日間とした。
9,11	外部被ばくに対する線量換算係数（海岸防災林造成・建設中現場周辺居住者）	Cs-134	μSv/h per Bq/g	2.1E-01	以下の条件で、MCNP5 コードにより算出した。 線源の形状：厚さ 2 m、幅 200 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：Fig.2 の評価点・居住者 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		7.5E-02	

Table 4　再生資材の海岸防災林盛土材への再生利用に係る評価経路パラメータ一覧 (3/8)

経路 No.	名称		単位	選定値	選定根拠
9,11	居住時の遮へい係数		－	0.2	IAEA-TECDOC-401 から、居住時間の 20%を戸外で過ごすと仮定した。
10	居住者の呼吸量（成人）		m^3/h	0.96	ICRP Publ.23 で示されている標準人の 1 日の呼吸量の数値 2.3×10^4 L/d を基に算定した。
12	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。
13	覆土のかさ密度		g/cm^3	1.5	保守的な値 1.5 g/cm^3 を設定した。
13	覆土の厚さ		m	1.0	海岸防災林の盛土材の上に敷設される覆土の厚さを 1 m と仮定した。
13	外部被ばくに対する線量換算係数（海岸防災林造成・植栽等作業者）	Cs-134	μSv/h per Bq/g	1.3E-05	以下の条件で、MCNP5 コードにより算出した。 線源の形状：厚さ 2 m、幅 200 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：厚さ 1.0 m、かさ密度 1.5 g/cm^3（土壌） 評価点：Fig.3 の評価点
		Cs-137		2.7E-06	
14-30	海岸防災林が完成するまでの期間		y	0	保守的な設定とした。
14-16	土壌から樹木への移行係数		－	5.5E-03	Tagami & Uchida (2010)※2 は、葉菜類中と樹葉（アカマツ、スギ、ヒノキ等）中の元素濃度の相関係数は高いこと（R＞0.90、p＜0.001）、また、樹葉中の元素濃度の幾何平均値のほとんどは葉菜類中のデータ範囲内にあることから、葉菜類中の濃度データに由来する移行係数は、樹葉中の移行係数にも適用できる可能性を示している。さらに葉菜類に対するセシウムの移行係数（3.3E-4～7.7E-2、18 データ）を整理し、幾何平均値 5.5E-3 を導出している。本評価では、この値は防災林（マツ等）の移行係数にも適用可能であると判断し、採用した。
14	再生資材からの外部被ばくに対する線量換算係数（伐採作業者）	Cs-134	μSv/h per Bq/g	1.3E-05	以下の条件で、MCNP5 コードにより算出した。 線源の形状：厚さ 2 m、幅 200 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：厚さ 1.0 m、かさ密度 1.5 g/cm^3（土壌） 評価点：Fig.4 の評価点・作業者
		Cs-137		2.6E-06	
14	海岸防災林造成後の伐採作業に従事する年間作業時時間		h/y	1,000	1 日 8 時間、年間 250 日の労働時間のうち半分の時間を伐採作業するものとした。
14	伐採作業時における遮へい係数		－	1.0	保守的な設定とした。

※2　K. Tagami and S. Uchida, Radiation and Environmental Biophysics,49, 583-590 (2010).

Table 4　再生資材の海岸防災林盛土材への再生利用に係る評価経路パラメータ一覧（4/8）

経路 No.	名称		単位	選定値	選定根拠
14-16	樹木、伐採木からの外部被ばくに対する線量換算係数		μSv/h per Bq/g	Table 6 参照	幅 200 m×長さ 500 m の再生資材、覆土の上に樹木が植生しているものとして、以下の条件で、MCNP5 コードにより算出した。 線源の形状： （樹木） 樹木の高さからなる直方体の線源とし、Table 5に示した各評価時期における樹木の重量、高さ、単位面積あたりの樹木の本数（伐採による経時変化），および樹木の密度（0.98 g/cm^3）から，樹木中の単位濃度 1 Bq/g に相当する直方体線源の総 Bq 数を設定した。直方体線源の材質は、保守的に遮へい効果が小さくなる空気とした。但し、伐採作業者に対しては、伐採作業者を中心とした 20 m×20 m の範囲に対しては、樹木を線線源として別途模擬し、この範囲に植生する樹木の本数および高さは、各評価年に対する ha あたりの植生本数、高さから設定した。 （伐採木） 林帯に密度 0.98 g/cm^3 の伐採木が一様に分布するものとした。伐採木の厚さは、Table 5 に示した各評価年に対する ha あたりの伐採木の重量から算出した。 評価点： （伐採作業者） 200 m×500 m の中央、覆土表面からの高さ 1 m（Fig.4）を評価点とした。 （周辺居住者） 盛土の上端から 1 m、地表面からの高さ 1 m（Fig.4）を評価点とした。 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。
15,16	年間居住時間		h/y	8,760	保守的に、1 年間絶えず海岸防災林周辺に居住しているとした。
15,16	再生資材からの外部被ばくに対する線量換算係数（海岸防災林周辺居住者）	Cs-134	μSv/h per Bq/g	7.1E-06	以下の条件で、MCNP5 コードにより算出した。 線源の形状：厚さ 2 m、幅 200 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：厚さ 1.0 m、かさ密度 1.5 g/cm^3（土壌） 評価点：Fig.4 の評価点・居住者 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		1.5E-06	
15,16	居住時の遮へい係数		－	0.2	IAEA-TECDOC-401 から、居住時間の 20%を戸外で過ごすと仮定した。
17-30	盛土の空隙率		－	0.25	再生資材の真密度（2.6～2.7g/cm^3）と当該盛土のかさ密度（2.0 g/cm^3）から導出し、0.25 とした。
17-30	Cs の盛土の分配係数		mL/g	2.7E+02	IAEA TRS No.364（有機土壌、砂）
17-30	浸透水量		m/y	1.6	既往の海岸防災林への再利用評価[18]と同じく、保守的に降雨全量が浸透するものとし、浜通り沿岸の平年雨量の最大値を使用した。
17-30	Cs の帯水層土壌の分配係数		mL/g	2.7E+02	IAEA TRS No.364（砂）
17-30	帯水層厚さ		m	3	IAEA-TECDOC-401 に示された値を用いた。

Table 4　再生資材の海岸防災林盛土材への再生利用に係る評価経路パラメータ一覧 (5/8)

経路 No.	名称		単位	選定値	選定根拠
17-30	地下水流速（ダルシー流速）		m/d	1	「新版地下水調査法」（山本荘毅、（株）古院書院、1983 年）
17-30	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）
17-30	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）
17-30	地下水流方向の分散長		m	0	保守的に選定した。
17-30	地下水流方向の分散係数		m^2/y	0	保守的に選定した。
17,18	盛土海側端から海岸までの距離		m	0	保守的に選定した。
17,18	海の交換水量		m^3/y	8.0E+09	「理科年表　平成 9 年」（国立天文台編）に記載された国内の平均大潮期における潮流の最小値 0.5 ノット（0.255 m/s）と、安全側に仮定した混合面積 1,000 m^2 から年間交換水量 8E+9 m^3/y を設定した。
17,18	Cs の海産物への濃縮係数	魚類	L/kg	30	IAEA TRS No.364 において示された値を使用した。
		無脊椎動物		20	
		藻類		20	
17,18	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。
17,18	海産物の輸送時間		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。
17	海産物の年間摂取量（成人）	魚類	kg/y	15.8	「平成 8 年版国民栄養の現状」（第一出版（株）、1996）に示された魚、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。
		無脊椎動物		8.1	
		藻類		2.2	
18	海産物の年間摂取量（子ども）	魚類	kg/y	6.3	「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、クリアランスレベル評価 [5,6]で設定された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。
		無脊椎動物		3.2	
		藻類		1.2	
19-30	海岸防災林（盛土）の陸側端から井戸までの距離		m	0	保守的に選定した。
19-30	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）
19	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 1.65 L として算定した。

Table 4　再生資材の海岸防災林盛土材への再生利用に係る評価経路パラメータ一覧（6/8）

経路 No.	名称		単位	選定値	選定根拠
20	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。
21-26	Cs の農耕土壌の分配係数		mL/g	2.7E+02	IAEA TRS No.364（有機土壌）
21-26	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 4 mm/d と年間灌漑日数 300 日程度に基づいて選定した。
21-26	土壌水分飽和度（畑、牧草地）		－	0.2	原子力機構原科研敷地内（砂層）における測定結果より選定した。
21-26	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。
21-26	灌漑土壌真密度		g/cm^3	2.60	「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。
21-26	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。
21-26	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。
21-26	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）
21,22	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 戸あたりの平均経営耕地面積 248a（水田率 54.4 %）、水稲 10 a あたりの労働時間 29.2 時間、小麦 10 a あたりの労働時間 5.6 時間を基に算出し、値に裕度を持って選定した。 248×0.544×2.92＋248×(1-0.544)×0.56＝457 (h/y)
21	外部被ばくに対する線量換算係数（農耕作業者：灌漑土壌からの外部被ばく）	Cs-134	μSv/h per Bq/g	4.7E-01	既往のクリアランスレベル評価[5,6]で設定されている換算係数を設定した。条件は以下の通りである。 線源の形状：高さ 10 m、半径 500 m の円柱 線源のかさ密度：2.0 g/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	
21	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。
22	農耕作業時の空気中ダスト濃度		g/m^3	5.0E-04	NUREG/CR-3585 に示された OPEN DUMP 時および 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気中ダスト濃度を採用した。
22	農耕作業者の呼吸量		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 を算定した。
22	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。
23-26	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（60 d/y）を使用した。
23-26	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）

Table 4　再生資材の海岸防災林盛土材への再生利用に係る評価経路パラメータ一覧（7/8）

経路 No.	名称		単位	選定値	選定根拠
23-26	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。
23-26	weathering 効果による植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。
23,24	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。
23,24	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。
23,24	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 24 mm/d と水田の年間湛水期間 100 日程度に基づいて選定した。
23,24	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。
23,24	Cs の米への移行係数		Bq/g-wet per Bq/g	7.1E-02	IAEA TRS No.364（シリアル）
23,24	Cs の葉菜、非葉菜、果実への移行係数		Bq/g-wet per Bq/g	5.7E-02	IAEA TRS No.364（ジャガイモ）
23	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	
24	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	
25-28	Cs の畜産物への移行係数	牛肉	d/kg	5.0E-02	IAEA TRS No.364 に示された値を用いた。
		豚肉		2.4E-01	
		鶏肉		1.0E+01	
		鶏卵		4.0E-01	
		牛乳	d/L	7.9E-03	
25-28	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。
25-28	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。
25,26	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。
25,26	Cs の飼料への移行係数		Bq/g-dry per Bq/g	5.3E-01	IAEA TRS No.364（牧草）

Table 4　再生資材の海岸防災林盛土材への再生利用に係る評価経路パラメータ一覧 (8/8)

経路 No.	名称		単位	選定値	選定根拠
25,26	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	
25,27	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	
26,28	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	
27,28	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	
29,30	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。
29,30	Cs の魚類への濃縮係数		L/kg	2.0E+03	IAEA TRS No.364 に示された値を用いた。
29,30	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。
29,30	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。
29	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。
30	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（96.9 g/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 0.7 kg/年に乗じた 0.33 kg/年を算出した。

Table 5　各評価年に対する単位面積あたりの樹木の本数、高さおよび伐採木の重量※

	評価年	0	2	7		17		27		37		47	
	林齢(年)	1	3	8		18		28		38		48	
				伐採前	伐採後	伐採前	伐採後	伐採前	伐採後	伐採前	伐採後	伐採前	伐採後
樹木	1ha当たりの樹木の本数(本/ha)	10,000	10,000	10,000	4,000	3,300	2,200	1,512	1,110	890	744	643	557
	樹木1本当たりの重量(kg/本)	0.1	1.5	5.1		36.1		134		290		486	
	樹木の高さ(m)	0.5	1.2	3.1		7.1		10.6		13.4		15.6	
伐採木	1ha当たりの伐採木の重量(kg/ha)	-※1	-※1	-※1	3.1E+4	4.1E+4	8.1E+4	1.3E+5	1.9E+5	2.3E+5	2.7E+5	3.1E+5	3.5E+5

※1 伐採作業開始前

※林野庁 東北森林管理局「第四次国有林野施業実施計画書（宮城南部森林計画区）（計画期間：平成 23 年 4 月 1 日-平成 28 年 3 月 31 日）」のアカマツに対する収穫予想表より設定。

Table 6　樹木、伐採木からの外部被ばくに対する線量換算係数

外部被ばく線量換算係数: μSv/h per Bq/g

		評価年	2	7		17		27		37		47	
		林齢(年)	3	8		18		28		38		48	
				伐採前	伐採後	伐採前	伐採後	伐採前	伐採後	伐採前	伐採後	伐採前	伐採後
作業者（伐採）	Cs-134	樹木		2.4E-02	9.3E-03	4.7E-02	3.1E-02	6.9E-02	5.1E-02	7.9E-02	6.8E-02	9.6E-02	8.0E-02
		伐採木			1.8E-02	2.5E-02	4.2E-02	6.2E-02	8.1E-02	9.4E-02	1.1E-01	1.2E-01	1.3E-01
	Cs-137	樹木		8.6E-03	3.3E-03	1.7E-02	1.1E-02	2.5E-02	1.8E-02	2.9E-02	2.5E-02	3.5E-02	2.9E-02
		伐採木			6.6E-03	9.0E-03	1.5E-02	2.3E-02	3.0E-02	3.5E-02	3.9E-02	4.3E-02	4.7E-02
周辺居住者、成人	Cs-134	樹木	4.9E-05	3.4E-03	1.4E-03	9.2E-03	6.1E-03	1.6E-02	1.2E-02	2.0E-02	1.7E-02	2.4E-02	2.1E-02
		伐採木			4.8E-04	6.2E-04	1.2E-03	1.8E-03	2.4E-03	2.9E-03	3.3E-03	3.7E-03	4.2E-03
	Cs-137	樹木	1.8E-05	1.2E-03	5.0E-04	3.3E-03	2.2E-03	5.8E-03	4.2E-03	7.4E-03	6.2E-03	8.8E-03	7.6E-03
		伐採木			1.8E-04	2.4E-04	4.4E-04	6.8E-04	9.1E-04	1.1E-03	1.3E-03	1.4E-03	1.6E-03

Table 7　内部被ばく線量係数（施工時、供用時）

内部被ばく線量係数(Sv/Bq)						
	作業者(ICRP Publ.68)		公衆(ICRP Publ.72)			
	吸入	経口	吸入		経口	
			成人	子ども	成人	子ども
Cs-134	9.6E-09	1.9E-08	6.6E-09	7.3E-09	1.9E-08	1.6E-08
Cs-137	6.7E-09	1.3E-08	4.6E-09	5.4E-09	1.3E-08	1.2E-08

3.3　施工時・供用時シナリオに対する評価結果

Cs-134 または Cs-137 濃度が 1 Bq/g の再生資材を、海岸防災林の盛土材に使用した場合における各被ばく経路に対する追加被ばく線量評価結果を Table 8 に示す。また、Cs-134 と Cs-137 の比（Cs-134/Cs-137）を 0.209 とした場合の全 Cs（Cs-134 + Cs-137）に対する単位濃度（1 Bq/g）あたりの線量値も併せて示す。なお、経路 No.14～16 では、最も被ばく線量が高く

なった評価時期の結果のみを表に記載した。被ばく線量の経時変化については Fig.7～9 にまとめる。

Table 8　海岸防災林盛土材への再生利用に係る評価結果（施工時、供用時）

シナリオ		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)
				Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)	
施工時	建設現場への運搬	1	積み下ろし作業者外部	2.0E-02	8.3E-03	1.0E-02	9.7E+04
		2	積み下ろし作業者吸入	2.0E-05	1.6E-05	1.7E-05	6.0E+07
		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
		4	運搬作業者外部	4.5E-02	1.9E-02	2.3E-02	4.3E+04
		5	運搬経路周辺居住者(子ども)外部	7.5E-03	3.0E-03	3.8E-03	2.6E+05
	海岸防災林造成	6	建設作業者外部	3.6E-01	1.5E-01	1.8E-01	5.4E+03
		7	建設作業者吸入	2.0E-05	1.6E-05	1.7E-05	6.0E+07
		8	建設作業者直接経口摂取	3.2E-04	2.6E-04	2.7E-04	3.7E+06
		9	周辺居住者外部(成人)	3.4E-03	1.4E-03	1.8E-03	5.6E+05
		10	周辺居住者吸入(成人)	1.8E-04	1.5E-04	1.5E-04	6.5E+06
		11	周辺居住者外部(子ども)	4.5E-03	1.9E-03	2.3E-03	4.3E+05
		12	周辺居住者吸入(子ども)	4.6E-05	3.9E-05	4.1E-05	2.5E+07
		13	植栽等作業者外部	1.1E-05	2.7E-06	4.1E-06	2.4E+08
供用時	海岸防災林完成後	14	伐採作業者外部(植栽後37年、伐採後)	3.3E-09	1.5E-04	1.2E-04	8.1E+06
		15	居住者・成人外部(植栽後37年、伐採前)	7.9E-10	3.6E-05	2.9E-05	3.4E+07
		16	居住者・子ども外部(植栽後37年、伐採前)	1.0E-09	4.6E-05	3.8E-05	2.6E+07
	海岸防災林完成後の地下水移行	17	海産物摂取(成人)	3.9E-09	3.7E-08	3.1E-08	3.2E+10
		18	海産物摂取(子ども)	1.4E-09	1.4E-08	1.2E-08	8.3E+10
		19	飲料水摂取(成人)	1.7E-05	1.6E-04	9.6E-05	1.0E+07
		20	飲料水摂取(子ども)	2.4E-06	2.5E-05	1.5E-05	6.7E+07
		21	地下水利用農耕作業者外部	3.7E-06	1.7E-04	9.6E-05	1.0E+07
		22	地下水利用農耕作業者吸入	1.8E-10	1.6E-08	8.9E-09	1.1E+11
		23	地下水利用農作物摂取(成人)	1.2E-05	4.0E-04	2.3E-04	4.4E+06
		24	地下水利用農作物摂取(子ども)	4.4E-06	1.7E-04	9.6E-05	1.0E+07
		25	飼料経由畜産物摂取(成人)	1.6E-05	3.9E-04	2.2E-04	4.5E+06
		26	飼料経由畜産物摂取(子ども)	7.9E-06	2.1E-04	1.2E-04	8.3E+06
		27	飼育水経由畜産物摂取(成人)	2.4E-06	2.3E-05	1.4E-05	7.2E+07
		28	飼育水経由畜産物摂取(子ども)	1.1E-06	1.2E-05	7.1E-06	1.4E+08
		29	養殖淡水産物摂取(成人)	9.8E-06	9.5E-05	5.7E-05	1.8E+07
		30	養殖淡水産物摂取(子ども)	3.9E-06	4.1E-05	2.4E-05	4.1E+07

※網掛けした経路は、各シナリオにおいて最も被ばく線量が高くなった経路である。

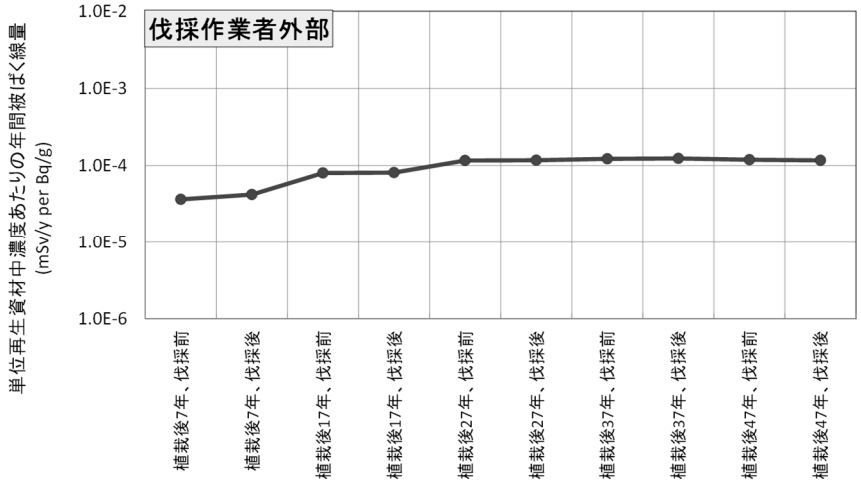

Fig.7　経路 No.14 の評価結果（海岸防災林完成後の伐採作業者、外部被ばく）

Fig.8　経路 No.15 の評価結果（海岸防災林完成後の周辺居住・成人、外部被ばく）

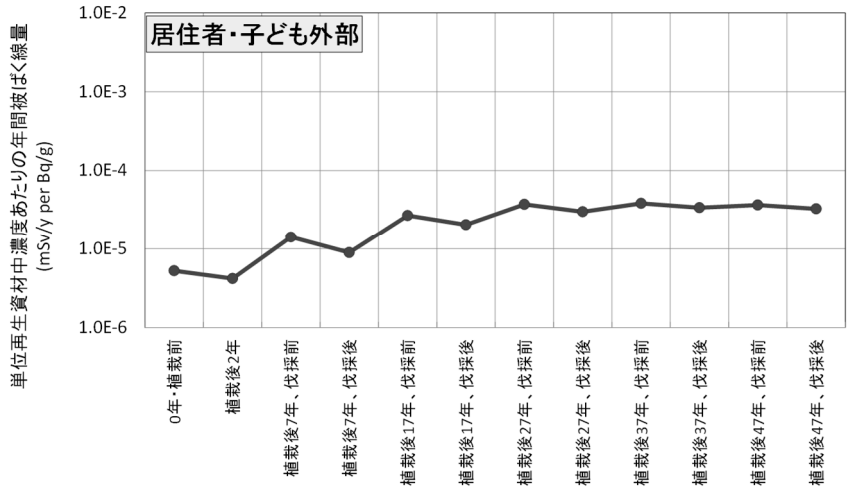

Fig.9　経路 No.16 の評価結果（海岸防災林完成後の周辺居住・子ども、外部被ばく）

海岸防災林の施工時において、追加被ばく線量が最も高い経路は、露呈した再生資材の直上で被ばくする「建設作業者・外部被ばく（No.6）」であった。一般公衆に対する追加被ばく線量が最も高い経路は「運搬経路周辺居住者（子ども）・外部被ばく（No.5）」であったが、その値は作業者に対する最大被ばく線量の 50 分の 1 程度である。また、当該経路の被ばく線量が「建設現場周辺居住者（成人、子供）・外部被ばく（No.10,11）」より高くなったのは、被ばく時間が 5 倍程度長いためである。

海岸防災林の供用時において、追加被ばく線量が最も高い経路は「地下水利用農作物摂取（成人）・内部被ばく（No.23）」であった。また、伐採作業者および周辺居住者の外部被ばく線量は、植栽後から時間の経過とともに上昇し、植栽後 37 年で最大となった。これは、再生資材から樹木や伐採木に移行し、蓄積した放射性 Cs からの被ばくの影響は無視できないことを示している。また、植栽後 47 年では被ばく線量は僅かに減少したが、これは樹木への移行の効果より、Cs-137 の減衰の効果が大きくなったためである。

全被ばく経路の中で追加被ばく線量が最も高い経路（＝決定経路）は「建設作業者・外部被ばく（No.6)」であり、全放射性 Cs 濃度が 1 Bq/g の再生資材を再生利用した場合、被ばく線量は 0.18 mSv/y となった。また、この被ばく線量が年間 1 mSv/y に相当するときの全放射性 Cs 濃度は 5,400 Bq/kg となる。この結果より、海岸防災林盛土材に再生利用可能な放射能濃度レベルを 5,000 Bq/kg に決定した。

4. 追加被ばく線量の低減のための建設条件の検討

4.1 建設条件検討のための線量評価

本検討は、上述したとおり、一般公衆の追加被ばく線量が 10 μSv/y（＝0.01 mSv/y）を超えないための覆土厚さ（10 μSv/y 相当厚さ）を把握するために実施した。第 3 章では、海岸防災林盛土上の覆土厚さを 1.0 m（100 cm）と設定した場合における作業者および一般公衆が受ける追加被ばく線量を評価したが、本検討では、「周辺居住者（成人、子ども）・外部被ばく（経路 No.15,16)」における覆土厚さの設定を 30、40、50、60、70、80、90 cm にした場合の追加被ばく線量評価を行った（Fig.10 参照)。さらに、覆土厚さの影響を受ける作業者に対しての経路（「海岸防災林造成中の植栽等作業者・外部被ばく（経路 No.13)」および「海岸防災林完成後の伐採作業者・外部被ばく（経路 No.14)」）についても同様の評価を実施し（Fig.11 参照)、基準値（1 mSv/y）を超えないかどうかを確認した。これは、一般公衆の追加被ばく線量の低減のための覆土厚さ（10 μSv/y 相当厚さ）とした場合に、作業者の追加被ばく線量が 1 mSv/y を超えてしまうならば、当該作業者に対し、何らかの被ばく管理が必要となるからである。

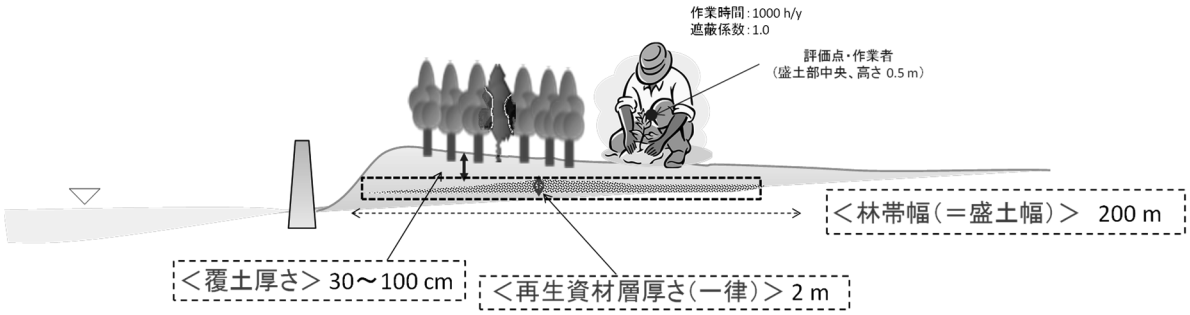

Fig.10 建設条件検討のための評価体系（経路 No.13：植栽等作業者）

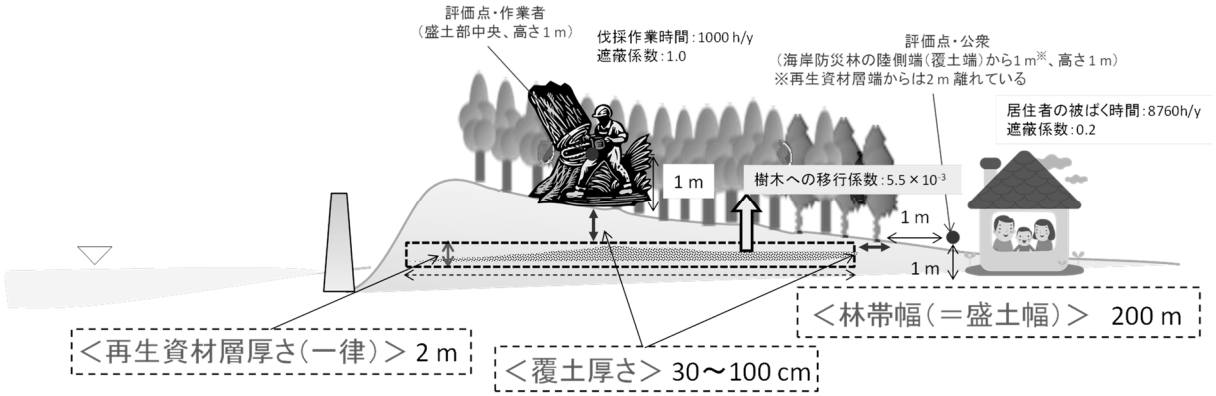

Fig.11　建設条件検討のための評価体系
（経路 No.14：伐採作業者、経路 No.15,16：周辺居住者（成人、子ども））

4.2　建設条件検討のための評価パラメータの設定

本検討で新たに設定したパラメータは上記対象者の外部被ばく換算係数である。これらパラメータを Table 9、Fig. 12 に示す。その他のパラメータについては、Table 4 と同様とした。

Table 9　建設条件検討のための評価パラメータ一覧

経路 No.	名称		単位	選定値	選定根拠
13	再生資材からの外部被ばくに対する線量換算係数（植栽等作業者）	Cs-134 Cs-137	μSv/h per Bq/g	Fig.12 参照	以下の条件で、MCNP5 コードにより算出した。 線源の形状：厚さ 2 m、幅 200 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：厚さ 30～90 cm、かさ密度 1.5 g/cm^3（土壌） 評価点：Fig.10 の評価点
14	再生資材からの外部被ばくに対する線量換算係数（伐採作業者）	Cs-134 Cs-137	μSv/h per Bq/g	Fig.12 参照	以下の条件で、MCNP5 コードにより算出した。 線源の形状：厚さ 2 m、幅 200 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：厚さ 30～90 cm、かさ密度 1.5 g/cm^3（土壌） 評価点：Fig.11 の評価点・作業者
15,16	再生資材からの外部被ばくに対する線量換算係数（海岸防災林周辺居住者）	Cs-134 Cs-137	μSv/h per Bq/g	Fig.12 参照	以下の条件で、MCNP5 コードにより算出した。 線源の形状：厚さ 2 m、幅 200 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：厚さ 30～90 cm、かさ密度 1.5 g/cm^3（土壌） 評価点：Fig.11 の評価点・居住者 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。

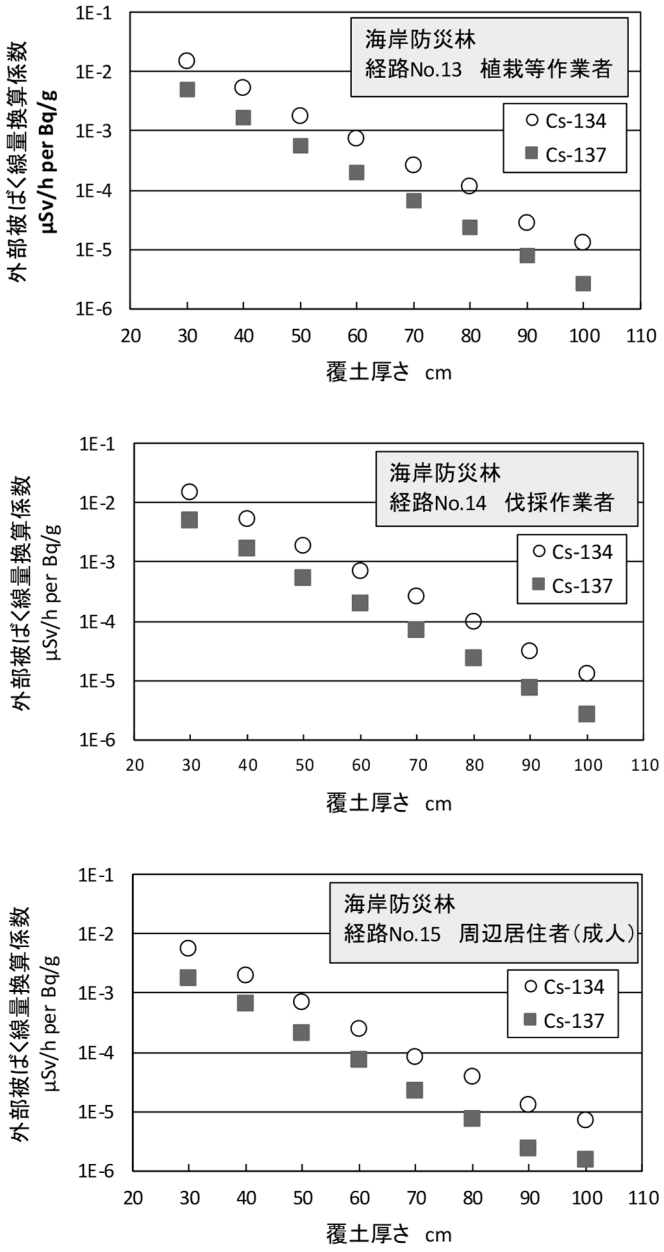

Fig.12　経路 No.13, 14, 15 に対する再生資材からの外部被ばく線量換算係数
※覆土厚さ 100 cm の当該換算係数は Table 6 に示した値である。

4.3　建設条件検討に係る評価結果

Table 10 に、経路 No.13（植栽等作業者）の Cs-134 および 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、3.3 と同様、Cs-134/Cs-137 を 0.209 とした場合の全 Cs（Cs-134 + Cs-137）に対する単位濃度（1 Bq/g）あたりの被ばく線量値も併せて示す。さらに、5,000 Bq/kg（再生利用可能な放射能濃度レベル）および 8,000 Bq/kg（指定廃棄物の基準）の再生資材を使用した場合における被ばく線量も併せて示す。樹木の成長、伐採を考慮した経路 No.14～16 についても同様の整理を行った。Fig.13～15 に、その一例として 5,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の年間被ばく線量を示す。

Table 10　建設条件検討に係る評価結果（経路 No.13、植栽等作業者）

No.	経路略称	覆土厚さ cm	単位廃棄物中濃度あたりの年間被ばく線量 (mSv/y per Bq/g)			5,000Bq/kgの再生資材を使用した場合の年間被ばく線量 (mSv/y)	8,000Bq/kgの再生資材を使用した場合の年間被ばく線量 (mSv/y)
			Cs-134	Cs-137	Cs(134+137)		
13	植栽等作業者外部	30	1.3E-02	5.0E-03	6.3E-03	3.2E-02	5.0E-02
		40	4.4E-03	1.7E-03	2.2E-03	1.1E-02	1.7E-02
		50	1.5E-03	5.7E-04	7.4E-04	3.7E-03	5.9E-03
		60	6.2E-04	2.0E-04	2.7E-04	1.3E-03	2.2E-03
		70	2.2E-04	6.5E-05	9.3E-05	4.6E-04	7.4E-04
		80	9.5E-05	2.3E-05	3.6E-05	1.8E-04	2.8E-04
		90	2.3E-05	8.0E-06	1.1E-05	5.3E-05	8.5E-05
		100	1.1E-05	2.7E-06	4.1E-06	2.1E-05	3.3E-05

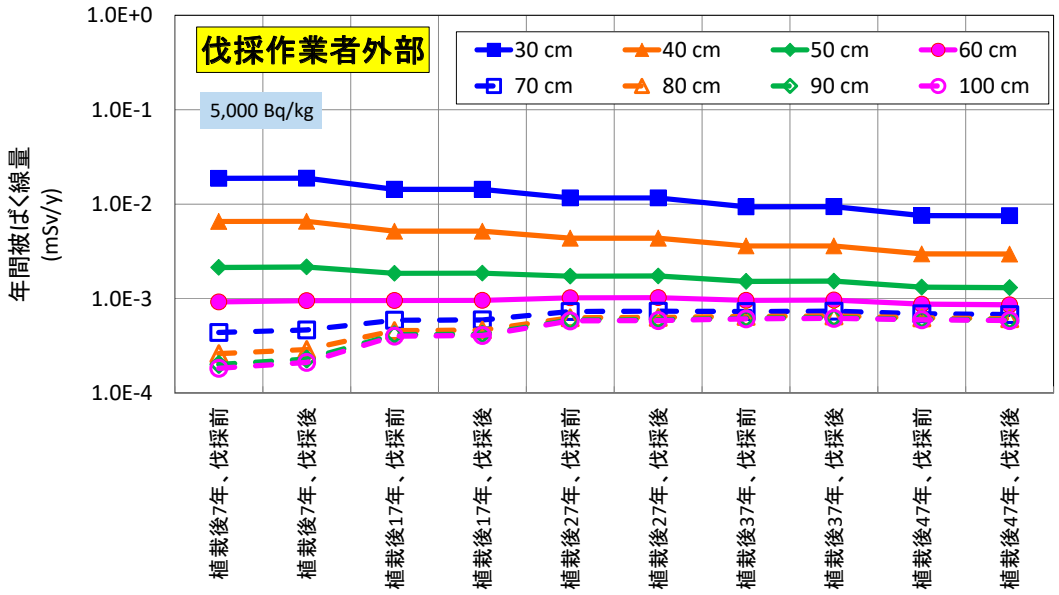

Fig.13　建設条件検討に係る評価結果（経路 No.14：伐採作業者）

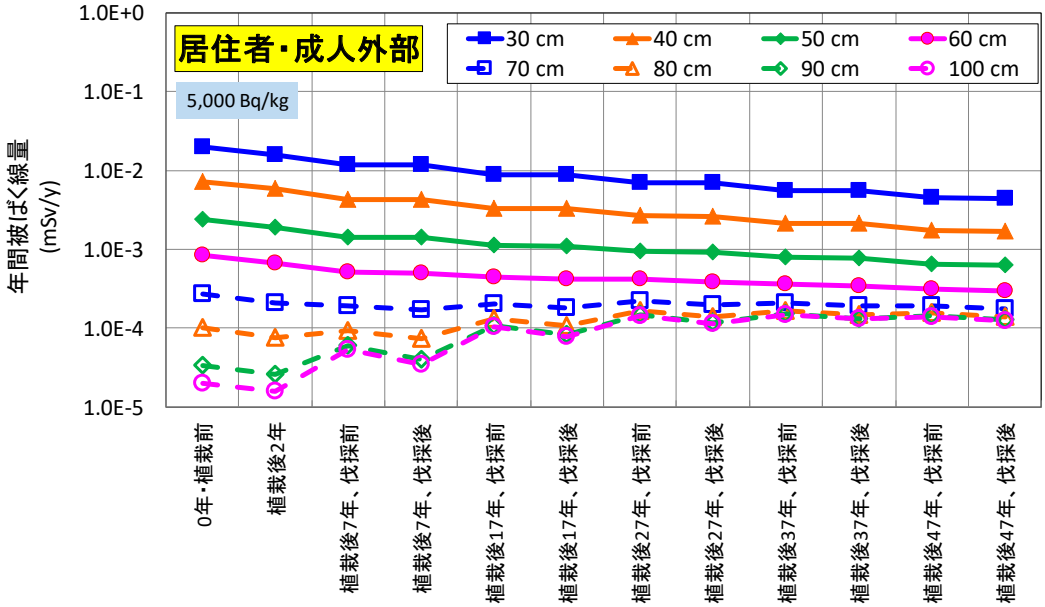

Fig.14　建設条件検討に係る評価結果（経路 No.15：周辺居住者・成人）

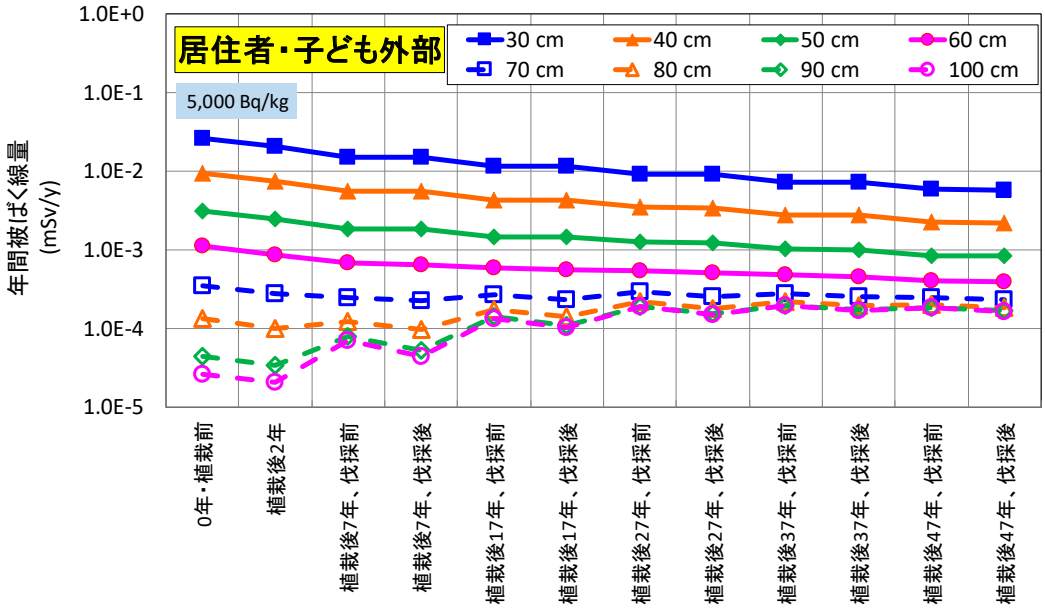

Fig.15　建設条件検討に係る評価結果（経路 No.16：周辺居住者・子ども）

さらに、上記結果を用いて「覆土厚さ」に対する「5,000 Bq/kg および 8,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の年間被ばく線量」を Fig.16～19 に整理した。また、各図のプロットから得られた関係式*bから、経路 No.13,14 に対しては線量のめやす値 1 mSv/y を超えない覆土厚さ

*b　Fig.17～19 に記した経路 No.14～16 の関係式は、1 mSv/y または 10 μSv/y を満たす覆土厚さが最大となる評価時期（経路 No.14 は 7 年伐採後、経路 No.15, 16 は 0 年植栽前）における線量評価結果から得られた関係式である。

（1 mSv/y 相当厚さ）を、経路 No.15,16 に対しては 10 μSv/y を超えない覆土厚さ（10 μSv/y 相当厚さ）を導出した。また、その結果を、Table 11 に整理した。

これら結果より、5,000 Bq/kg および 8,000 Bq/kg の再生資材を海岸防災林の盛土に使用する場合、それぞれ 39 cm、44 cm 以上の覆土厚さが確保できれば、一般公衆が受ける追加被ばく線量は、その他の経路も含め、10 μSv/y を超えないことが分かった（Table 12 参照）。また、これら覆土厚さは 100 cm よりも小さいことから、通常想定される設計条件は、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を満足していることが確認された。

一方、植栽等作業者および伐採作業者が受ける被ばくについては、5,000 Bq/kg の再生資材を利用する場合、覆土厚さに関わらず 1 mSv/y を超えない結果となった。しかしながら、8,000 Bq/kg の場合、植栽等作業者が同線量めやすを満足するための遮へい材厚さは 1.3 cm 以上となり、上記 44 cm（一般公衆が 10 μSv/y を満足する厚さ）より小さくなることが確認できたが、3.3 で示した決定経路である「建設作業者・外部被ばく（No.6）」の追加被ばく線量は 1 mSv/y を超える結果*cとなり（Table 12 参照）、当該作業者に対しては被ばく管理を行う必要性が示唆された。

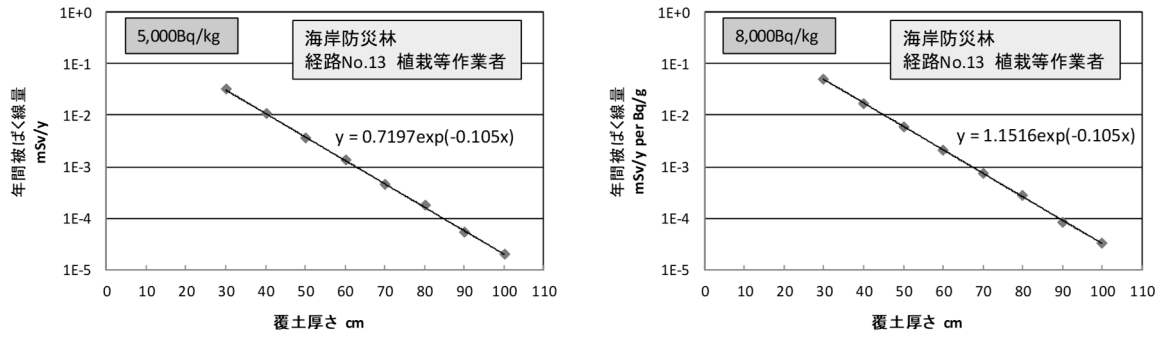

Fig.16　5,000 および 8,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の外部被ばく線量
（経路 No.13：植栽等作業者）

*c 「経路 No.6：単位再生資材中濃度あたりの年間被ばく線量（0.184 mSv/y per Bq/g）」×「再生資材中濃度（8 Bq/g）」＝1.47 mSv/y

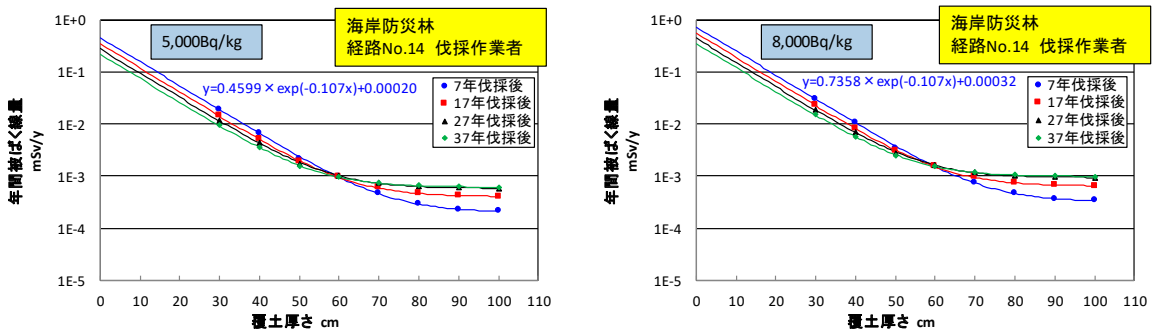

Fig.17　5,000 および 8,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の外部被ばく線量
（経路 No.14：伐採作業者）

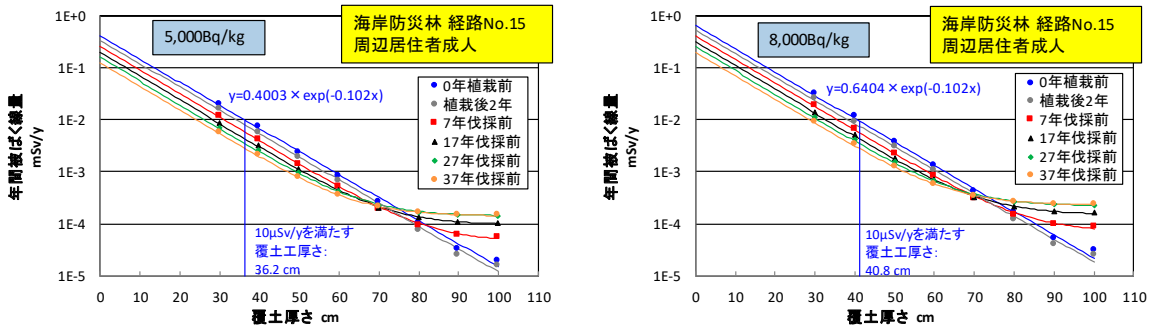

Fig.18　5,000 および 8,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の外部被ばく線量
（経路 No.15：周辺居住者・成人）

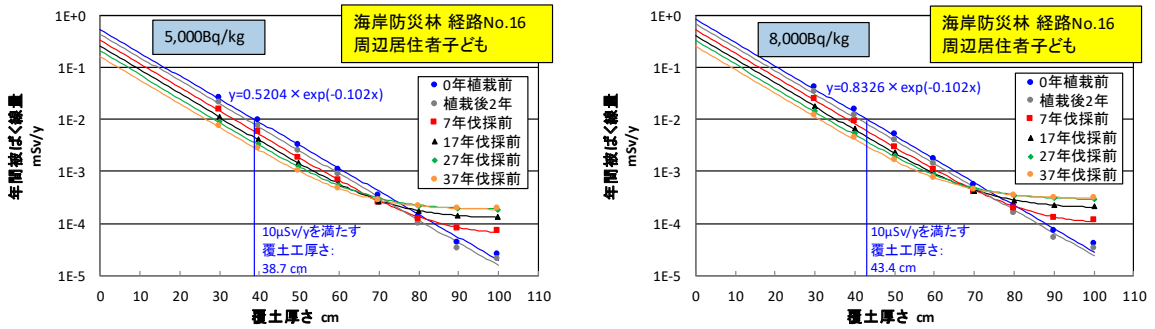

Fig.19　5,000 および 8,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の外部被ばく線量
（経路 No.16：周辺居住者・子ども）

Table 11　追加被ばく線量が 1 mSv/y または 10 μSv/y を超えないための覆土厚さ

経路No.	対象	1mSv/y相当厚さ cm		10μSv/y相当厚さ cm	
		5,000Bq/kg	8,000Bq/kg	5,000Bq/kg	8,000Bq/kg
13	植栽等作業者	ー*	1.3		
14	伐採作業者	ー*	ー*		
15	周辺居住者（成人）			36.2	40.8
16	周辺居住者（子ども）			38.7	43.4

＊ 覆土厚さ0cmでも1mSv/y以下となった。

Table 12　1 mSv/y 相当濃度および作業者・一般公衆が受ける追加被ばく線量の最大値

覆土厚さ（cm）	1mSv/y相当濃度（Bq/kg）		追加被ばく線量（mSv/y）							
			5,000Bq/kgの再生資材を使用した場合				8,000Bq/kgの再生資材を使用した場合			
		決定経路	作業者		一般公衆（供用時）		作業者		一般公衆（供用時）	
30	5,400	盛土施工作業者・外部	0.92	盛土施工作業者・外部	0.026	防災林周辺居住者（子ども）・外部	1.5	盛土施工作業者・外部	0.041	防災林周辺居住者（子ども）・外部
40					0.0094				0.015	
50					0.0031				0.0050	
60					0.0011	農作物摂取（成人）			0.0018	農作物摂取（成人）
70					0.0011				0.0018	
80					0.0011				0.0018	
90					0.0011				0.0018	
100					0.0011				0.0018	

※網掛けは、作業者（施工時、供用時）、一般公衆（供用時）が受ける追加被ばく線量がそれぞれ1mSv/y、10μSv/y（＝0.01mSv/y）を超えたケース

5.　災害時の安全性評価

5.1　災害時シナリオに対する線量評価

再生資材を海岸防災林盛土材へ再生利用した場合の災害時の安全性を確認するために、まず災害による海岸防災林盛土の損壊時および復旧時の作業者および一般公衆の評価シナリオ・被ばく経路を設定した。さらに過去の災害事例に基づき設定した評価パラメータを用いて、5,000 Bq/kg（再生利用可能な放射能濃度レベル）および 8,000 Bq/kg（指定廃棄物の基準）の再生資材を使用した場合の追加被ばく線量を算出し、作業者および一般公衆が受ける追加被ばく線量が 1 mSv/y を超えないことの確認を行った。

5.2　災害時シナリオの設定

評価シナリオを作成するため、海岸防災林盛土や樹木中に存在する放射性セシウムの環境中への漏洩を引き起こす可能性のある自然災害として、地震、津波、火災、暴風・竜巻、異常降雨（豪雨）の 5 つを対象にし、こられの災害事例に係る文献調査を実施した。調査は主に、土木学会、地盤工学会、応用地質学会、土木研究所等の土質構造物などを専門とする学会および林野庁、国土交通省地方整備局、各県庁等の刊行物[21~42]に対して行った。調査結果を踏まえ、当該評価の対象とすべきかどうかについて検討した結果を Table 13 に整理した。その結果、放射性セシウムの漏洩を引き起こす可能性のある自然災害としては津波および火災が選定された。

Table 13　放射性 Cs の漏洩を引き起こす可能性のある自然災害に係る検討

自然災害	検討結果	評価の必要性
地震	地震動による海岸防災林の変状・崩壊は考えられるが、本評価では再生資材を覆う覆土厚さが 1 m ある場合を考えており、考えられる崩壊（すべり崩壊、法面崩壊、分断崩壊）のいずれにおいても再生資材が露出する可能性は低いと想定される。 また、地震による海岸防災林への災害事例は確認できなかったため、評価対象から除外した。	×
津波	津波による海岸防災林盛土の流出の可能性が考えられる。 津波による海岸防災林の災害事例として、以下が挙げられた。 東日本大震災（2011）：宮城[27~32]、岩手[22,29,31]、福島[29,31,35]他	○
火災	海岸防災林に植栽されている樹木が火災した場合、盛土から樹木に移行した放射性 Cs を含んだプルームが発生する可能性が考えられる。火災による海岸防災林、森林火災の災害事例として、以下が挙げられた。 例）秋田県能代市（1943）：21ha 焼失[40]、福島県いわき市（2005）：36.40ha 被災[43] 等	○
暴風・竜巻	暴風による倒木で根返りが起こることが考えられるが、本評価では再生資材を覆う覆土厚さが 1 m ある場合を考えており、再生資材が露出する可能性は低いと想定される。また、暴風により倒木した樹木からの被ばくについては、伐採作業者において同様の評価をしているため評価対象から除外した。 【参考】過去 20 年間の主な風倒木被害例[44] ・台風 7 号災（1998） 大阪・奈良・和歌山、計 4,552ha ・台風 18 号災（1999） 熊本・大分・鹿児島、計 3,858ha	×
異常降雨（豪雨）	豪雨での盛土の含水状態の変化による変状･崩壊は考えられるが、本評価では再生資材を覆う覆土厚さが 1 m ある場合を考えており、考えられる崩壊（すべり崩壊、法面崩壊、分断崩壊）のいずれにおいても再生資材が露出する可能性は低いと想定されるため評価対象から除外した。	×

津波および火災による海岸防災林盛土の損壊時、復旧時の作業者および一般公衆に対する被ばく経路は以下のとおり設定した。

津波

津波が発生した場合に想定される被ばく経路としては、

・津波による海岸防災林の破壊で発生した津波堆積土による被ばく

・津波による再生資材の海への流出により汚染された海産物の摂取による被ばく

が挙げられる。本評価では覆土厚さ 1 m を想定しているため、通常の津波では上記被ばくが起こる可能性は小さいかもしれないが、ここでは保守的に大規模な津波によって盛土(再生資材)および覆土が均一に混合した土砂が堆積・流出する場合を想定することとした。また、大規模な津波発生時には周辺居住者は津波到達範囲外へ避難するものとし、評価対象としては、復旧作業者（堆積土撤去作業）および海産物を摂取する一般公衆を想定した。評価経路を Table 14 に示す。

Table 14　再生資材の海岸防災林への再生利用に係る評価経路（災害時・津波）

No	評価対象		線源	対象者	被ばく形態
1	復旧作業	堆積土撤去	津波堆積土	作業者	外部
2	海への流出	海産物摂取	海産物（魚類、無脊椎動物、藻類）	公衆（成人）	経口
3				公衆（子ども）	経口

火災

海岸防災林で火災が起こった場合、線源である盛土から Cs が移行した樹木が延焼することで、Cs を含んだプルームが発生し、作業者および周辺に居住する一般公衆が被ばくすると想定される。既往研究 [43]では、森林火災における消火に従事する消防士および一般公衆の被ばく線量を、原子力施設の影響評価に使用されている安全評価指針・気象指針等に基づき評価している。本評価では既往評価を参考に、再生資材を海岸防災林の盛土として使用した場合における、火災による作業者および一般公衆への被ばく線量評価を実施した。既往評価では、火災に伴い想定される被ばくの形態として、以下の 4 つを想定している。

・プルームに含まれる Cs による外部被ばく

・地表沈着した Cs による外部被ばく

・プルームに含まれる Cs の吸入による内部被ばく

・地表沈着した Cs の再浮遊による Cs の吸入による内部被ばく

本評価では既往評価と同様に、消火に従事する作業者（消防士）および一般公衆に対して、上記の 4 つの被ばくを評価した（Table 15 参照）。

Table 15　再生資材の海岸防災林への再生利用に係る評価経路（災害時・火災）

No	評価対象	線源	対象者	被ばく形態
4	消火作業	プルームに含まれる Cs	作業者（消防士）	外部
5		地表沈着した Cs		外部
6		プルームに含まれる Cs		吸入
7		地表沈着し、再浮遊した Cs		吸入
8	周辺居住	プルームに含まれる Cs	公衆	外部
9		地表沈着した Cs		外部
10		プルームに含まれる Cs		吸入
11		地表沈着し、再浮遊した Cs		吸入

Table 14, 15 に示した各評価経路に対する評価概要を以下に示す。

【津波】各経路共通事項

- Cs-134 と Cs-137 の存在割合は、前述の評価と同様に、0.209：1 とした。
- 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。

【津波】復旧作業者（経路 No.1）

海岸防災林が津波により破壊され、再生資材が津波堆積土として分布している上で復旧作業を行う作業者について、以下の条件で評価した（Fig.20 参照）。

・希釈係数の導出における津波堆積土の厚さは、東日本大震災での堆積土厚さ調査結果[39]の平均値 5.1 cm とした。

・津波により破壊された海岸防災林が流出した幅（流出幅）は、事例による情報がないため、「除去土壌の防潮堤盛土に係る再生利用評価」[45]に対して設定した決壊幅 500 m と同一と仮定した。

・東日本大震災における津波浸水範囲の面積の既往調査[46]より、浸水被害が大きかった 3 県（岩手県、宮城県、福島県）において、浸水面積が小さい 1 km² 以下を除いた 33 市町村（津波の浸水面積の合計値 490 km²）の平均値である 14.8 km² を津波堆積土の面積とした。津波によって 500 m 幅の海岸防災林を構成する再生資材全てが破壊され、海へ流出すること無くその全てが津波堆積土中に混合したと仮定すると、津波堆積土中に再生資材が含まれる体積割合は約 26 %となった。

（津波堆積土中に再生資材が含まれる割合）

$$\frac{\text{再生資材の体積}}{\text{津波堆積土の体積}} \times 100$$

$$= \frac{(\text{林帯幅 } 200\,\text{m}) \times (\text{再生資材の厚さ } 2\,\text{m}) \times (\text{流出幅 } 500\,\text{m})}{(\text{津波堆積土の面積 } 14{,}800{,}000\,\text{m}^2) \times (\text{津波堆積土の厚さ } 0.051\,\text{m})} \times 100$$

$$\fallingdotseq 26\ \%$$

よって、津波堆積土に対する線源の希釈係数を 0.3 とした。

・外部被ばく評価において、津波堆積土の厚さは、東日本大震災における堆積土厚さの調査結果[39]の最大値 28 cm から保守的に 30 cm とした。さらに、外部被ばく線量換算係数の値に有意な差異を与えない範囲として 500 m×500 m を想定した。

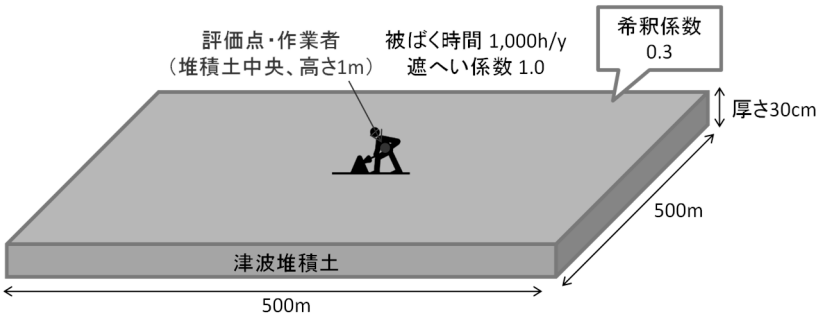

Fig.20 再生資材の海岸防災林への再生利用に係る評価体系（災害時・津波）

【津波】公衆・海産物摂取（経路 No.2,3）

・流出幅は、防潮堤評価に対して設定した決壊幅 500 m と同一と仮定した。そこで、保守的に流出幅 500 m の海岸防災林（幅 200 m）に使用される盛土全量が、海へ流出すると想定した。

・評価には以下の式を使用した。

$$A(i) = C_{w0}(i) \cdot V$$

$$D_{ing}(i) = \frac{A(i)}{Qs} \cdot DF_{ing}(i) \cdot G_n \cdot \exp\left(\frac{-\lambda_i \cdot t_{Fn}}{365}\right) \cdot \frac{1-\exp(-\lambda_i \cdot t_i)}{\lambda_i \cdot t_i} \sum M_f(j) T_{sm}(i,j)$$

$A(i)$	：	総インベントリ（Bq）
$C_{W0}(i)$	：	線源中の核種 i の濃度（Bq/g）
V	：	流出した線源の総重量（g）
$D_{ing}(i)$	：	核種 i による内部被ばく線量（mSv/y）
$DF_{ing}(i)$	：	核種 i に対する内部被ばく線量換算係数（経口）（Sv/Bq）
λ_i	：	核種 i の崩壊定数（1/y）
t_i	：	評価期間（y）（=1）
Qs	：	海の交換水量（m^3/y）
$M_f(j)$	：	海産物 j の年間摂取量（kg/y）
$T_{sm}(i, j)$	：	核種 i の海産物 j への濃縮係数（L/kg）
G_n	：	市場係数（－）
t_{Fn}	：	輸送時間（d）

【火災】各経路共通事項

・Cs-134 と Cs-137 の存在割合は、前述の評価と同様に、0.209：1 とした。
・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。
・火災による延焼面積は 20 ha とした（既往評価 [43]での最大値）。また延焼期間は、既往評価 [43]において火災の事例調査から求めた値である 1 日（＝24 時間、延焼面積 20 ha に対応する値）とした。
・風速は 1 m/s と仮定した。
・第 3 章では伐採作業者等に対して、評価時期を考慮した評価を行った。本評価で想定する火災の発生時期は、その中で海岸防災林に植栽された樹木中の放射性セシウム濃度が最も高くなる「植栽後 37 年」とし、その時点における地表面濃度を用いて評価を行った（Table 16 参照）。
※植栽後 37 年の海岸防災林・樹木（20 ha）中に含まれる総放射能量は、土壌から樹木への Cs 移行係数を 5.5×10^{-3} として算出した。

Table 16　海岸防災林盛土および樹木（20 ha）に含まれる放射性セシウム濃度から算出した地表面濃度

評価年	盛土濃度（Bq/g）		樹木(20ha)中に含まれる総放射能量（Bq）		地表面濃度（Bq/m^2）	
	Cs-134	Cs-137	Cs-134	Cs-137	Cs-134	Cs-137
0	1.0E+00	1.0E+00	1.1E+05	1.1E+05	5.5E-01	5.5E-01
2	5.1E-01	9.5E-01	8.4E+05	1.6E+06	4.2E+00	7.9E+00
7	9.5E-02	8.5E-01	5.3E+05	4.8E+06	2.7E+00	2.4E+01
17	3.3E-03	6.8E-01	4.3E+04	8.8E+06	2.1E-01	4.4E+01
27	1.1E-04	5.4E-01	2.5E+03	1.2E+07	1.3E-02	6.0E+01
37	3.9E-06	4.3E-01	1.1E+02	1.2E+07	5.6E-04	6.0E+01
47	1.4E-07	3.4E-01	4.7E+00	1.2E+07	2.3E-05	5.8E+01

【火災】消火作業（経路 No.4～7）

消防士は、火災（線源）の近傍で被ばくすると想定される。よって、プルームからの被ばくは半無限線源（サブマージョンモデル）、地表からの被ばくは無限平板線源からの被ばくと想定し、被ばく線量を評価した。評価に使用する式を以下に示す。なお、サブマージョンモデルでは線源の高さ方向の拡がりによって外部被ばく線量が変化するため、当該高さの拡がり（H）については 100、200、500、1,000 m としたケース解析を行った。

$$D_1 = \frac{C_{surf}\cdot r}{H}\cdot DF_1\cdot T\cdot 1000$$

D_1　：　プルーム中の Cs からの γ 線による外部被ばく（mSv）
C_{surf}　：　地表面の Cs 濃度（Bq/m^2）

r : 延焼速度と風速の比（－）
H : 線源の高さ方向の拡がり（m）
DF_1 : 半無限体積の線源に対する線量係数（Sv/s per Bq/m^3）
T : 被ばく時間（s）

$$D_2 = C_{surf} \cdot DF_2 \cdot T \cdot 1000$$

D_2 : 地表沈着した Cs からの γ 線による外部被ばく（mSv）
DF_2 : 無限平板の線源に対する線量係数（Sv/s per Bq/m^2）

$$D_3 = \frac{C_{surf} \cdot r}{H} \cdot K_{in} \cdot M \cdot T$$

D_3 : クラウド中の Cs の吸入摂取による内部被ばく（mSv）
K_{in} : 内部被ばく実効線量係数（成人）（mSv/Bq）
M : 呼吸率（成人）（m^3/s）

$$D_4 = C_{surf} \cdot K_{in} \cdot F \cdot M \cdot T$$

D_4 : 地表沈着した Cs の再浮遊による Cs の吸入摂取による内部被ばく（mSv）
F : 再浮遊率（1/m）

【火災】周辺居住（経路 No.8～11）

一般公衆に対しては、火災によるプルームが大気条件に従ってガウスプルームモデルで拡散し、地表に至った濃度を用いて被ばく線量を評価した。ガウスプルームモデルでは大気の状態によって濃度分布が変化するため、以下のパラメータについては既往の評価と同様にケース解析を行った。なお、濃度分布の拡がりのパラメータである σ_y と σ_z は、風下距離と大気安定度の関数として示されており、本評価では「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」[47] に準拠した値を使用した。

ガウスプルームモデル
・大気安定度 : A 型（不安定）、D 型（中立）、F 型（安定）
・火災プルーム上昇高さ（放出源の高さ）: 100、200、500 m

$$\chi(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot U} \cdot \exp(-\lambda \frac{x}{U}) \cdot \exp(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}) \cdot \left[\exp(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}) + \exp(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}) \right]$$

$\chi(x, y, z)$	:	点(x, y, z)における放射性物質の濃度（Bq/m^3）
Q	:	放出率（Bq/s）（=汚染濃度×汚染飛散率×積算延焼面積÷延焼時間）
U	:	放出源高さを代表する風速（m/s）
λ	:	放射性物質の物理的崩壊定数（1/s）
h	:	放出源の高さ（m）
σ_y	:	濃度分布の y 方向の広がりのパラメータ（m）
σ_z	:	濃度分布の z 方向の広がりのパラメータ（m）

また、線量評価に用いる式を以下に示す。

$$D_5 = K \cdot \frac{E_r}{0.5} \cdot Q_{Cs} \cdot \frac{D}{Q} \cdot 1000$$

D_5	:	プルーム中の Cs からの γ 線による外部被ばく（mSv）
K	:	空気カーマから実効線量への換算係数（Sv/Gy）
E_r	:	γ 線実効エネルギー（MeV）
Q_{Cs}	:	火災による Cs の大気放出量（Bq）
D/Q	:	相対線量（Gy/Bq）

$$D_6 = K_{ex} \cdot Q_{Cs} \cdot \frac{\chi}{Q} \cdot V \cdot f \cdot T \cdot 1000$$

D_6	:	地表沈着した Cs からの γ 線による外部被ばく（mSv）
K_{ex}	:	地表沈着による実効線量係数（成人）（Sv/s per Bq/m^3）
χ/Q	:	相対濃度（s/m^3）
V	:	沈着速度（m/s）
f	:	残存割合（－）

$$D_7 = M \cdot K_{in} \cdot Q_{Cs} \cdot \frac{\chi}{Q}$$

D_7	:	プルーム中の Cs の吸入摂取による内部被ばく（mSv）

$$D_8 = M \cdot K_{in} \cdot F \cdot Q_{Cs} \cdot \frac{\chi}{Q} \cdot V \cdot f \cdot T$$

D_8	:	地表沈着した Cs の再浮遊による Cs の吸入摂取による内部被ばく（mSv）

5.3　災害時シナリオに対する評価パラメータの設定

津波および火災による海岸防災林盛土の損壊時、復旧時の作業者および一般公衆に対する被ばく評価に用いるパラメータを Table 17～19 に示す。

Table 17　再生資材の海岸防災林への再生利用に係る評価経路パラメータ（災害時・津波）

経路 No.	名称		単位	選定値	選定根拠
1-3	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こととした。
1	津波堆積土厚さ		cm	30	東北地方太平洋地震での仙台市周辺での堆積土厚さ調査結果[39]の最大値 28 cm より、30 cm した。
1	線源に対する希釈係数		－	0.3	津波浸水範囲に対する既往の調査[46]より、東日本大震災時の津波浸水範囲内における津波堆積土平均面積は 14.8 km² であった。津波によって 500 m 幅の海岸防災林を構成する再生資材全てが破壊され、海へ流出すること無くその全てが津波堆積土中に混合したと仮定すると、津波堆積土に対する再生資材の割合は約 26 %となった。これより、希釈係数を 0.3 とした。
1	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。
1	外部被ばくに対する線量換算係数（復旧作業）	Cs-134	μSv/h per Bq/g	4.5E-01	以下の条件で、QAD–CGGP2R コードにより算出した。 線源の形状：500 m 四方、高さ 0.3 m の直方体 線源のかさ密度：1.7 g/cm³ 評価点：上面中心から高さ 1 m（Fig.20）
		Cs-137		1.6E-01	
1	作業時の遮へい係数		－	1.0	保守的に 1.0 と設定した。
2,3	流出した線源の総重量		g	4.0E+11	保守的に、海岸防災林（幅 200 m、津波により破壊された海岸防災林が流出した幅 500 m）に使用された盛土全量が流出すると想定した。
2,3	Cs の海産物への濃縮係数	魚類	L/kg	30	IAEA TRS No.364 において示された値を使用した。
		無脊椎動物		20	
		藻類		20	
2,3	海産物の年間摂取量（成人）	魚類	kg/y	15.8	「平成 8 年版国民栄養の現状」（第一出版（株）、1996）に示された魚、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。
		無脊椎動物		8.1	
		藻類		2.2	
2,3	海産物の年間摂取量（子ども）	魚類	kg/y	6.3	「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、CL 評価で設定された成人の摂取量にそれぞれ 0.40、0.40、0.53 を乗じた値を設定した。
		無脊椎動物		3.2	
		藻類		1.2	
2,3	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。
2,3	海産物の輸送時間		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。
2,3	海の交換水量		m³/y	8.0E+09	「理科年表　平成 9 年」（国立天文台編）に記載された国内の平均大潮期における潮流の最小値 0.5 ノット（0.255 m/s）と、安全側に仮定した混合面積 1,000 m² から年間交換水量 8E+9 m³/y を設定した。

Table 18　内部被ばく線量係数（災害時・津波）

核種	内部被ばく線量係数(Sv/Bq)	
	公衆(ICRP Publ.72)	
	経口	
	成人	子ども
Cs-134	1.9E-08	1.6E-08
Cs-137	1.3E-08	1.2E-08

Table 19　再生資材の海岸防災林への再生利用に係る評価経路パラメータ（災害時・火災）

経路 No.	名称		単位	選定値	出典
4-11	被ばく中の減衰期間		y	1	IAEA RS-G-1.7
4	延焼速度と風速の比		－	0.1	既往評価 [43]と同値とした。
4	線源の高さ方向の拡がり		m	半径：252 m 高さ：100 m, 200 m, 500 m	20ha 相当の円の半径
4	半無限体積に対する線量係数	Cs-134	Sv/s per Bq/m^3	6.8E-14	FGR-12（EPA-402-R-93-081）[48]
		Cs-137		2.4E-14	
4-11	被ばく時間		h/y	24	既往評価 [43]における延焼期間（火災の事例調査から求めた値）である 1 日（＝24 時間）を被ばく時間とした。
5	無限平板に対する線量係数	Cs-134	Sv/s per Bq/m^2	1.4E-15	FGR-12（EPA-402-R-93-081）[48]
		Cs-137		5.3E-16	
6,7, 10,11	内部被ばく線量換算係数（成人）	Cs-134	mSv/ Bq	2.0E-5	環境放射線モニタリング指針 [49]
		Cs-137		3.9E-5	
6,7, 10,11	呼吸率（成人）		m^3/d	22.2	安全評価指針 [50]
7,11	再浮遊率		m^{-1}	1E-6	一般公衆線量評価 [51]
8	空気カーマから実効線量への換算係数		Sv/Gy	1	既往評価 [43]と同値とした。
8	γ線実効エネルギー	Cs-134	MeV	1.56	一般公衆線量評価 [51]
		Cs-137		0.60	
9	地表沈着による実効線量係数（成人）	Cs-134	Sv/s per Bq/m^3	1.4E-15	FGR-12(EPA-402-R-93-081) [48]
		Cs-137		5.3E-16	
9-11	相対濃度		s/m^3	評価位置に応じて設定	JAERI-M 90-206[52]
9,11	沈着速度		m/s	0.01	一般公衆線量評価 [51]
9,11	残存割合		－	1.0	保守的に設定

5.4　災害時シナリオに対する評価結果

津波

Table 20 に、各評価経路の Cs-134、Cs-137 および全 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、5,000 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、5,000 Bq/kg、8,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の追加被ばく線量の最大値は、それぞれ 0.30 mSv/y、0.47 mSv/y（いずれも復旧作業者・外部被ばく経路）であり、作業者および一般公衆が受ける追加被ばく線量は 1 mSv/y を下回る結果となり、津波に対する安全性が確認された。

Table 20　海岸防災林盛土材への再生利用に係る評価結果（災害時・津波）

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)			5,000Bq/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（津波）外部	1.1E-01	4.7E-02	5.9E-02	3.0E-01	4.7E-01
2	海産物摂取（成人）	5.5E-04	4.4E-04	4.6E-04	2.3E-03	3.6E-03
3	海産物摂取（子ども）	1.9E-04	1.6E-04	1.7E-04	8.4E-04	1.3E-03

※網掛けした経路は、最も被ばく線量が高くなった経路である。

火災

Table 21、Fig.21 に、全 Cs（=Cs-134+Cs-137）の単位濃度（1 Bq/g）あたりの消防士および一般公衆に対する被ばく線量をそれぞれ示す。最も被ばく線量が高くなるケースは、前者で「線源の高さ方向の拡がりを 100 m としたケース」、後者で「大気安定度 A、放出源の高さ 100 m としたケース（Table 22 参照）」であった。

Table 23 に、各評価経路の Cs-134、Cs-137 および全 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（上述した最も被ばく線量が高くなるケースのみ）を示す。また、5,000 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、5,000 Bq/kg、8,000 Bq/kg の再生資材を使用した場合の追加被ばく線量の最大値は、それぞれ 2.8×10^{-4} mSv/y、4.5×10^{-4} mSv/y（いずれも消防士・プルーム吸入被ばく経路）であった。消防士および一般公衆が受ける追加被ばく線量は 1 mSv/y を大幅に下回る結果となり、火災に対する安全性が確認された。

Table 21　全 Cs に対する単位再生資材中濃度あたりの年間被ばく線量（消防士）

[単位：mSv/y per Bq/g]

No.	経路略称	線源の高さ方向の拡がり(m)			
		100	200	500	1000
4	消防士（プルーム）外部	1.0E-07	5.1E-08	2.1E-08	1.0E-08
5	消防士（地表沈着）外部	2.3E-06	2.3E-06	2.3E-06	2.3E-06
6	消防士（プルーム）内部	5.6E-05	2.8E-05	1.1E-05	5.6E-06
7	消防士（地表沈着再浮遊）内部	5.6E-08	5.6E-08	5.6E-08	5.6E-08

※網掛けしたケースは、最も被ばく線量が高くなったケースである。

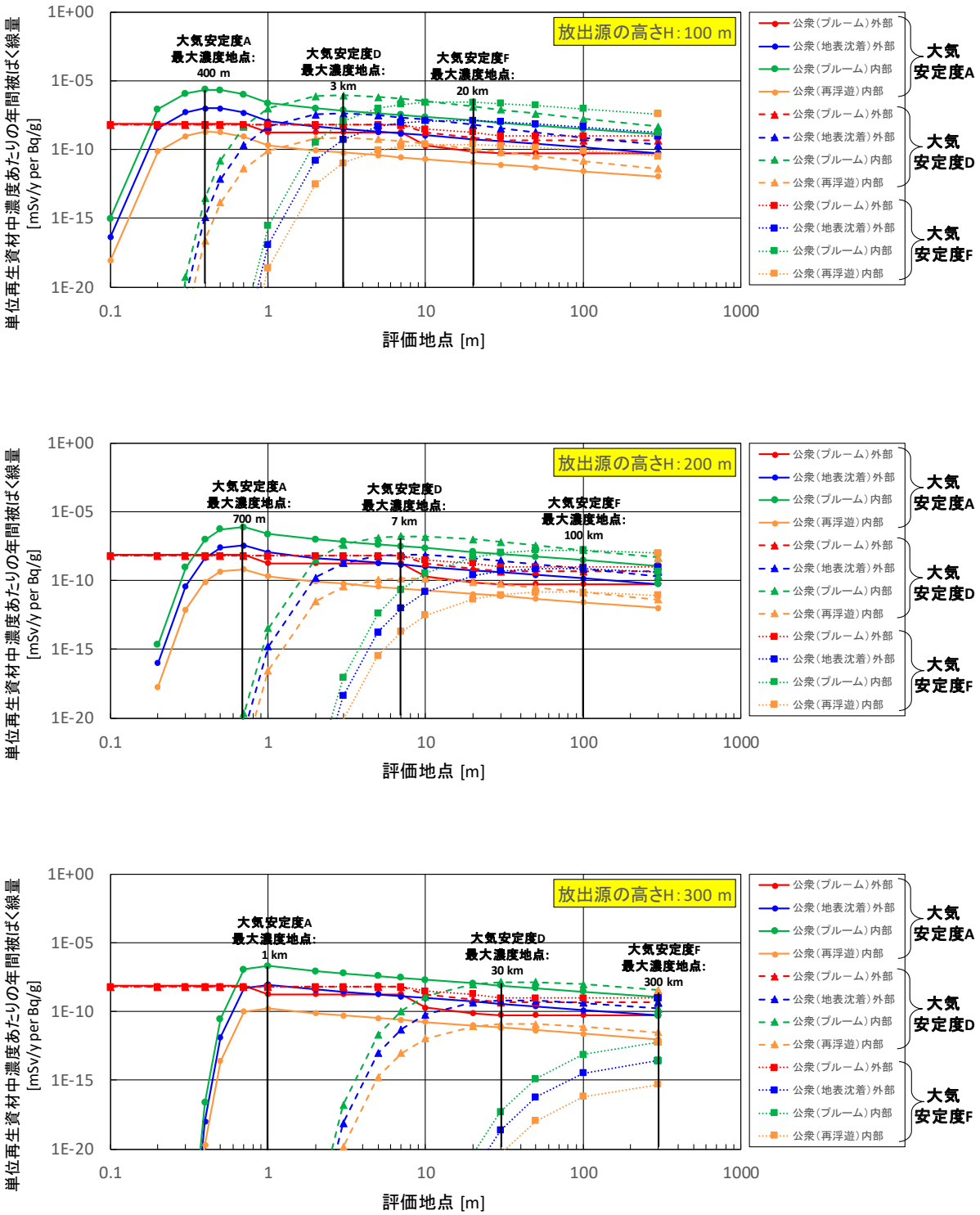

Fig.21　全 Cs に対する単位再生資材中濃度あたりの年間被ばく線量（公衆）

Table 22　全 Cs に対する単位再生資材中濃度あたりの年間被ばく線量（公衆）
（最も被ばく線量が高くなるケース抜粋）
[単位：mSv/y per Bq/g]

ケース	No.	経路略称	放出源の高さ H (m)		
			100	200	500
大気安定度A 最大濃度地点 （D2,D3,D4） H=100（@400m） H=200（@700m） H=500（@1km）	8	公衆（プルーム）外部	7.4E-09	7.4E-09	1.8E-09
	9	公衆（地表沈着）外部	1.0E-07	3.5E-08	9.0E-09
	10	公衆（プルーム）内部	2.2E-06	7.7E-07	2.0E-07
	11	公衆（地表沈着再浮遊）内部	1.9E-09	6.6E-10	1.7E-10
大気安定度D 最大濃度地点 （D2,D3,D4） H=100（@3km） H=200（@7km） H=500（@30km）	8	公衆（プルーム）外部	6.4E-09	6.4E-09	4.6E-10
	9	公衆（地表沈着）外部	4.0E-08	7.6E-09	6.3E-10
	10	公衆（プルーム）内部	8.8E-07	1.7E-07	1.4E-08
	11	公衆（地表沈着再浮遊）内部	7.6E-10	1.4E-10	1.2E-11
大気安定度F 最大濃度地点 （D2,D3,D4） H=100（@20km） H=200（@100km） H=500（@300km）	8	公衆（プルーム）外部	1.8E-09	9.2E-10	9.2E-10
	9	公衆（地表沈着）外部	1.3E-08	7.4E-10	2.7E-14
	10	公衆（プルーム）内部	2.7E-07	1.6E-08	5.8E-13
	11	公衆（地表沈着再浮遊）内部	2.4E-10	1.4E-11	5.0E-16

※網掛けしたケースは、最も被ばく線量が高くなったケースである。

Table 23　海岸防災林盛土材への再生利用に係る評価結果（災害時・火災）

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)			5,000Bq/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)		
4	消防士（プルーム）外部	3.3E-12	1.2E-07	1.0E-07	5.1E-07	8.2E-07
5	消防士（地表沈着）外部	6.8E-11	2.7E-06	2.3E-06	1.1E-05	1.8E-05
6	消防士（プルーム）内部	3.2E-10	6.7E-05	5.6E-05	2.8E-04	4.5E-04
7	消防士（地表沈着再浮遊）内部	3.2E-13	6.7E-08	5.6E-08	2.8E-07	4.5E-07
8	公衆（プルーム）外部	2.1E-13	8.9E-09	7.4E-09	3.7E-08	5.9E-08
9	公衆（地表沈着）外部	2.9E-12	1.2E-07	1.0E-07	5.0E-07	8.0E-07
10	公衆（プルーム）内部	1.2E-11	2.6E-06	2.2E-06	1.1E-05	1.8E-05
11	公衆（地表沈着再浮遊）内部	1.1E-14	2.3E-09	1.9E-09	9.5E-09	1.5E-08

※網掛けした経路は、最も被ばく線量が高くなった経路である。

6. 結論

環境省は、福島県内における除去土壌を再生資材化し、放射線影響に関する安全性を確保しつつ、適切な管理の下で再生利用する方針を示した。そこで、本研究では、海岸防災林の盛土材として除去土壌を再生利用することを想定し、施工時から供用時の作業者および一般公衆に対し 1 mSv/y をめやす値とした線量評価を行い、1 mSv/y 相当濃度を算出した。その結果、当該対象者が受ける追加被ばく線量が 1 mSv/y を満たす再生利用可能な再生資材中の放射性セシウム濃度レベルは 5,000 Bq/kg であることを示した。

また、5,000 Bq/kg の再生資材を利用した場合における追加被ばく線量の最大値から、供用時の一般公衆の追加被ばく線量が 10 μSv/y を満足する施設の設計条件は「覆土厚さ 39 cm 以上」であることを提示した。一方、8,000 Bq/kg の再生資材を利用した場合、一般公衆に対する同条件は「覆土厚さ 44 cm 以上」であったが、作業者が受ける追加被ばく線量は 1 mSv/y を超える結果となり、作業者に対しては被ばく管理を行う必要性が示唆された。本評価結果を踏まえ、環境省は「工事そのものの規模、再生資材の利用量、作業員の労務時間管理等により、作業員が 1 年間のうち再生資材に直接接触する作業（重機を用いた作業を除く）に従事する期間」を、例えば 6 ヶ月/年に制限することで、8,000 Bq/kg の再生資材を利用した場合の作業者の追加被ばく線量を 1 mSv/y 以下にできることを示した [4]。

さらに、海岸防災林盛土や樹木中に存在する放射性セシウムの漏洩を引き起こす可能性のある自然災害として津波・火災を選定するとともに、これらを想定した損壊時、復旧時の作業者および一般公衆の追加被ばく線量を評価した。その結果、5,000 Bq/kg および 8,000 Bq/kg の再生資材を利用した場合における追加被ばく線量はいずれも 1 mSv/y を超えない結果となり、当該再生利用に対する安全性が確認された。

参考文献

1) 環境省, 東京電力福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質による環境汚染の対処において必要な貯蔵施設等の基本的考え方について 平成 23 年 10 月 29 日, 2011, https://www.env.go.jp/jishin/rmp/attach/roadmap111029_a-0.pdf（参照 : 2019 年 12 月 19 日）.

2) 除染・廃棄物技術協議会, 除染・廃棄物技術協議会　減容・再生利用 WG 活動報告　減容・再生利用の物質収支に関する試算概要, 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 5 回）資料 3-2, 2016 年 12 月 12 日, 2016, http://josen.env.go.jp/chukanchozou/facility/effort/investigative_commission/pdf/proceedings_161212_03_02.pdf （参照：2019 年 12 月 19 日）.

3) 環境省, 中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略 平成 28 年 4 月, 2016, http://josen.env.go.jp/chukanchozou/facility/effort/investigative_commission/pdf/investigative_commission_text.pdf （参照：2019 年 12 月 19 日）.

4) 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, 2016, http://josen.env.go.jp/chukanchozou/facility/effort/investigative_commission/pdf/investigative_commission_160630.pdf （参照：2019 年 12 月 19 日）.

5) 原子力安全委員会, 原子炉施設及び核燃料使用施設の解体等に伴って発生するもののうち放射性廃棄物として扱う必要のないものの放射能濃度について 平成 16 年 12 月 16 日（平成 17 年 3 月 17 日一部改正及び修正）, 2005, http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/9483636/www.nsr.go.jp/archive/nsc/shinsashishin/pdf/3/ho3007.pdf （参照：2019 年 12 月 19 日）.

6) 文部科学省, 放射線障害防止法に規定するクリアランスレベルについて 平成 22 年 11 月 1 日（平成 24 年 3 月 27 日一部訂正）, 2012, https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/gijyutu/004/004/sonota/1301630.htm （参照：2019 年 12 月 19 日）.

7) 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/Code 2006-003, 2006, 137p.

8) 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律, 昭和三十二年法律第百六十六号.

9) 放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律, 昭和三十二年法律第百六十七号.

10) 平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法, 平成二十三年法律第百十号.

11) Sakamoto, Y. and Tanaka, S., QAD-CGGP2 and G33-GP2; Revised Versions of QAD-CGGP and G33-GP, JAERI-M 90-110, 1990, 95p.

12) The X-5 Monte Carlo Team, MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code

(Version 5), Los Alamos National Laboratory, LA-UR-03-1987, 2003, 416p.
13) ICRP, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Ann. ICRP 37 (2-4), 2007.
14) ICRP, Scope of Radiological Protection Control Measures, ICRP Publication 104, Ann. ICRP 37 (5), 2007.
15) 労働省, 電離放射線障害防止規則, 昭和四十七年労働省令第四十一号.
16) 厚生労働省, 東日本大震災により生じた放射性物質により汚染された土壌等を除染するための業務等に係る電離放射線障害防止規則, 平成二十三年厚生労働省令第百五十二号
17) 公共建築工事積算研究会, 公共建築工事積算研究会参考歩掛り 平成 27 年度版, 2015, https://www.mlit.go.jp/common/001089353.pdf （参照：2019 年 12 月 19 日）.
18) 澤口拓磨, 武田聖司, 木村英雄, 田中忠夫, 汚染された災害廃棄物等の再利用に向けた取り組み（その 1）–海岸防災林の盛土材への再利用にかかわる線量評価–, 日本原子力学会バックエンド部会第 29 回バックエンド夏期セミナー資料集, 2013, p.4.
19) 国土交通省都市局公園緑地・景観課緑地環境室, 植栽基盤整備技術マニュアル 改訂第 2 版, 日本緑化センター, 2013.
20) 日本道路協会, 道路橋示方書（Ⅰ共通編）・同解説, 1990.
21) 国土交通省東北地方整備局, 宮城県沿岸域現地連絡調整会議 平成 24 年 11 月 7 日, 2012, http://www.thr.mlit.go.jp/bumon/b00037/k00290/river-hp/kasen/shinsaikanren/data/04kaigankaigi/2.kaigisiryou/H24.11.7/H24.11.7%20kaigi_siryou.pdf （参照：2019 年 12 月 19 日）.
22) 岩手県, 高田地区海岸災害復旧事業概要, https://www.pref.iwate.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/014/485/takadakaigan_jigyougaiyou.pdf （参照：2019 年 12 月 19 日）.
23) 千葉大学院園芸研究科, 山武市小松地区海岸林再生プロジェクト 最終レポート, 千葉大学大学院園芸学研究科緑地科学プロジェクト演習 2013, 2013, http://www.h.chiba-u.jp/lab/helloeps/homepage/PE/2013/pic/sanmureport.pdf （参照：2019 年 12 月 19 日）.
24) 宮城県, 治山施設災害復旧事業（海岸防潮堤・防災林）に関する意見交換会の概要について, 平成 25 年 11 月 30 日～平成 27 年 2 月 28 日 https://www.pref.miyagi.jp/soshiki/ks-tihouken-r/ikenkoukankai.html （参照：2019 年 12 月 19 日）.
25) 千葉県農林水産部森林課, 千葉県海岸県有保安林整備指針（九十九里地区） 平成 24 年 5 月 15 日, 2012, https://www.pref.chiba.lg.jp/shinrin/documents/17syukusyouban.pdf（参照：2019 年 12 月 19 日）.
26) 鹿島建設, 陸前高田地区 海岸復旧工事 https://www.kajima.co.jp/tech/c_great_east_japan_earthquake/deconstruction/deconstruction02/index.html （参照：2019 年 12 月 19 日）.

27) 仙台市, 海岸公園復興基本計画 平成 25 年 11 月, 2013, https://www.city.sendai.jp/kaigankoensebi/kurashi/shizen/midori/koen/sebi/documents/zenbun.pdf （参照：2019 年 12 月 19 日）.
28) 林野庁東北森林管理局, 海岸防災林の再生 平成 26 年 3 月, 2014, https://www.rinya.maff.go.jp/tohoku/koho/saigaijoho/pdf/bousairin_pamphlet.pdf （参照：2019 年 12 月 19 日）.
29) 東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会, 今後における海岸防災林の再生について 平成 24 年 2 月, 2012, https://www.rinya.maff.go.jp/j/tisan/tisan/pdf/kaiganbousairinsaisyuuhoukoku.pdf（参照：2019 年 12 月 19 日）.
30) 林野庁東北森林管理局, 海岸防災林、防潮堤等施設の復旧, 海岸防災林等の復旧の考え方（仙台湾沿岸地区、東松島市矢本海岸地区、気仙沼地区）, https://www.rinya.maff.go.jp/tohoku/koho/saigaijoho/h23_higasinihon_daisinsai.html（参照：2019 年 12 月 19 日）.
31) 日本学術会議　東日本大震災復興支援委員会 災害に強いまちづくり分科会, 環境学委員会 環境政策・環境計画分科会, いのちを育む安全な沿岸域の形成に向けた海岸林の再生に関する提言 平成 26 年 4 月 23 日, 2014, http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-t140423.pdf（参照:2019 年 12 月 19 日）.
32) 仙台市, 海岸公園について, 仙台市震災復興検討会議 東部地域検討ワーキング（第 1 回）資料 5, 平成 23 年 8 月 17 日, 2011, https://www.city.sendai.jp/shinsaifukko/shise/daishinsai/fukko/kanren/kento/documents/5kaigankouen2_4070.pdf （参照：2019 年 12 月 19 日）.
33) 宮城県, 中島海岸及び津谷川・外尾川災害復旧事業に係わる取り組み状況, https://www.pref.miyagi.jp/soshiki/kasen/nakajima-tuya-torikumijyoukyou.html （参照：2019 年 12 月 19 日）.
34) 日本緑化センター, 日本の松原再生運動第2期の展開, 第5回　松原再生シンポジウム, 平成 24 年 6 月 27 日, 2012, http://www.jpgreen.or.jp/event/matsu_sympo/2012/seika02.pdf（参照：2019 年 12 月 19 日）.
35) 福島県森林保全課, 海辺の里山（海岸防災林）復旧方針について 平成 25 年 2 月, 2013.
36) 宮城県, これまでに実施した災害復旧事業等説明会について（気仙沼土木事務所）, https://www.pref.miyagi.jp/soshiki/ks-doboku/zissisetsumeikai.html（参照 : 2019 年 12 月 19 日）.
37) 新潟県, 治山事業における海岸保安林整備技術指針 平成 25 年 4 月, 2013, http://npdas.pref.niigata.lg.jp/chisan/5abd90b572b79.pdf （参照 : 2019 年 12 月 19 日）.
38) 静岡県, 静岡県海岸防災林における森林整備方針 平成 25 年 6 月, 2013, https://www.pref.shizuoka.jp/sangyou/sa-640/conservation/documents/kaiganbousairinseibihoushin.pdf （参照：2019 年 12 月 19 日）.
39) 常田賢一, Rakhmadyah BAYU, 谷本隆介, 中山義久, 2011 年東北地方太平洋沖地震の津

波による堆積土の堆積特性に関する調査, 土木学会論文集 A1（構造・地震工学）69 巻 4 号（地震工学論文集第 32 巻）, 2013, pp.I_235-I_251.

40) 大野泰宏, 「後世に伝えるべき治山」60 選シリーズ　能代の街を飛砂から守る海岸防災林造成事業（風の松原）（秋田県 能代市）, 水利科学 59 巻 6 号（No.347）, 2015, pp.140-154.

41) 宍倉正展, 藤原治, 澤井祐紀, 行谷佑一, 谷川晃一郎, 2011 年東北地方太平洋沖地震による津波堆積物の仙台・石巻平野における分布限界, 活断層・古地震研究報告, No. 12, 2012, pp.45-61.

42) 後藤和久, 西村裕一, 菅原大助, 阿部朋弥, 中村有吾, 藤野滋弘, 原口強, 仙台平野を中心とする津波被害実態と堆積物調査報告, 東北地方太平洋沖地震津波に関する合同調査報告会予稿集, 2011, pp.57-62.

43) 原子力安全基盤機構, 警戒区域及び計画的避難区域内での大規模火災の影響評価に関する調査報告書, JNES-RE-2011-0004, 2012.

44) 消防防災博物館, 2 風水害の種別別の基礎知識 風倒木被害, http://www.bousaihaku.com/cgi-bin/hp/index2.cgi?ac1=B102&ac2=&ac3=4938&Page=hpd2_view （参照：2016 年 3 月 10 日）.

45) Takai, S., Sawaguchi, T., Takeda, S., Dose Estimation in Recycling of Decontamination Soil Due to Fukushima NPS Accident as Coastal Levees, Proceedings of International Waste Management Symposia 2018 (WM 2018), 2018.

46) 国土地理院, 津波による浸水範囲の面積（概略値）について（第 5 報） 平成 23 年 4 月 18 日, 2011, https://www.gsi.go.jp/common/000059939.pdf （参照：2019 年 12 月 19 日）.

47) 原子力安全委員会, 発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針 昭和 57 年 1 月 28 日決定（平成 13 年 3 月 29 日一部改訂）.

48) Environmental Protection Agency, External Exposure to Radionuclides in Air, Water and Soil, Federal Guidance Report, No.12, EPA 402-R-93-081, 1993.

49) 原子力安全委員会, 環境放射線モニタリング指針 平成 20 年 3 月（平成 22 年 4 月一部改訂）.

50) 原子力安全委員会, 発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針, 昭和 56 年 7 月 20 日決定（平成 13 年 3 月 29 日一部改訂）.

51) 原子力安全委員会, 一般公衆線量評価「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, 平成元年 3 月 27 日了承（平成 13 年 3 月 29 日一部改訂）.

52) 滝光成, 小林秀雄, 鈴木隆, 清水勇, 排気筒から放出される放射性雲の等濃度分布図および放射性雲からの等ガンマ線量率分布図（Ⅱ）, JAERI-M 90-206, 1990, 345p.

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度(a)，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率(b)	（数字の） 1	1
比透磁率(b)	（数字の） 1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン(b)	rad	1(b)	m/m
立体角	ステラジアン(b)	sr(c)	1(b)	m^2/m^2
周波数	ヘルツ(d)	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		m kg s^{-2}
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	m^{-1} kg s^{-2}
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	m^2 kg s^{-2}
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	m^2 kg s^{-3}
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	m^2 kg s^{-3} A^{-1}
静電容量	ファラド	F	C/V	m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m^2 kg s^{-3} A^{-2}
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	m^2 kg s^{-2} A^{-1}
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	kg s^{-2} A^{-1}
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m^2 kg s^{-2} A^{-2}
セルシウス温度	セルシウス度(e)	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	m^{-2} cd
放射性核種の放射能(f)	ベクレル(d)	Bq		s^{-1}
吸収線量，比エネルギー分与，カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m^2 s^{-2}
線量当量，周辺線量当量，方向性線量当量，個人線量当量	シーベルト(g)	Sv	J/kg	m^2 s^{-2}
酸素活性	カタール	kat		s^{-1} mol

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号radおよびsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m^{-1} kg s^{-1}
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m^2 kg s^{-2}
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s^{-2}
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m^{-1} s^{-1}=s^{-1}
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	m m^{-1} s^{-2}=s^{-2}
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s^{-3}
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m^2 kg s^{-2} K^{-1}
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m^2 s^{-2} K^{-1}
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m^2 s^{-2}
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s^{-3} K^{-1}
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	m^{-1} kg s^{-2}
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s^{-3} A^{-1}
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	m^{-3} s A
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m^{-2} s A
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m^{-2} s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s^{-2} A^{-2}
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m^2 kg s^{-2} mol^{-1}
モルエントロピー，モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	kg^{-1} s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m^2 s^{-3}
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m^4 m^{-2} kg s^{-3}=m^2 kg s^{-3}
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m^2 m^{-2} kg s^{-3}=kg s^{-3}
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	m^{-3} s^{-1} mol

表５．SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm^2=$10^4$$m^2$
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm^3=$10^3$$cm^3$=$10^{-3}$$m^3$
トン	t	1 t=10^3 kg

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10^{-19}J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10^{-27}kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10^{11}m

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10^5Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	1 b=100fm^2=(10^{-12}cm)^2=$10^{-28}$$m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デシベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10^{-7} J
ダイン	dyn	1 dyn=10^{-5}N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm^{-2}=0.1Pa s
ストークス	St	1 St =1cm^2 s^{-1}=$10^{-4}$$m^2$ s^{-1}
スチルブ	sb	1 sb =1cd cm^{-2}=10^4cd m^{-2}
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm^{-2} =10^4lx
ガル	Gal	1 Gal =1cm s^{-2}=$10^{-2}$$ms^{-2}$
マクスウエル	Mx	1 Mx = 1G cm^2=10^{-8}Wb
ガウス	G	1 G =1Mx cm^{-2} =10^{-4}T
エルステッド(a)	Oe	1 Oe ≙ (10^3/4π)A m^{-1}

(a) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10^{10}Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10^{-4}C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10^{-2}Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10^{-2}Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10^{-9}T
フェルミ		1 フェルミ=1 fm=10^{-15}m
メートル系カラット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10^{-4}kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1 cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー），4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年）