

フレキシブルコンテナに収納した汚染土壌等の 単位濃度あたりの1cm線量当量率の算出

Calculation of the Dose Equivalent Rate Based on the Unit Concentration of
Contaminated Soil in a Flexible Container

菅谷 敏克 阿部 大智 武部 慎一 中谷 隆良
坂井 章浩

Toshikatsu SUGAYA, Daichi ABE, Shinichi TAKEBE, Takayoshi NAKATANI
and Akihiro SAKAI

バックエンド研究開発部門
廃棄物対策・埋設事業統括部

Radioactive Waste Management and Disposal Project Department
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

September 2016

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 (<http://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, 2016

フレキシブルコンテナに収納した汚染土壌等の単位濃度あたりの 1cm 線量当量率の算出

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門

廃棄物対策・埋設事業統括部

菅谷 敏克、阿部 大智^{*}、武部 慎一、中谷 隆良、坂井 章浩

(2016 年 7 月 19 日受理)

「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」が施行され、生活環境等の除染作業が行われてきており、自治体が管理する公共施設等の除染に伴って発生した土壌や草木（汚染土壌等）は各自治体でフレキシブルコンテナバック（通称フレコン）に収納して保管されている状況である。これら大量に発生した汚染土壌等の処理・処分や再利用・再生利用等を効率的に進めるためには、放射能濃度を簡易的に評価する方法が必要である。そこで、フレコンの表面で測定した線量から内容物の放射能濃度を推定するための単位放射能濃度あたりの 1cm 線量当量率について「点減衰核積分計算コード」QAD-CGGP2R を用いて算出した。

本報で示したフレコンに対する単位濃度あたりの 1cm 線量当量率の結果は、大量に発生した除染土壌等について、表面の線量が判っている場合には放射能濃度を合理的に求めることができるものとする。

**Calculation of the Dose Equivalent Rate Based on the Unit Concentration of
Contaminated Soil in a Flexible Container**

Toshikatsu SUGAYA, Daichi ABE[✽], Shinichi TAKEBE,
Takayoshi NAKATANI and Akihiro SAKAI

Radioactive Waste Management and Disposal Project Department
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 19 ,2016)

The Act on Special Measures concerning the Handling of Environmental Pollution by Radioactive Materials Discharged by the Nuclear Power Station Accident Associated with the Tohoku District-Off the Pacific Ocean Earthquake That Occurred on March 11, 2011 was enforced and decontamination in the living environment has been performed.

The contaminated soil and vegetation which occurred with decontamination where public facilities have been managed by local governments have been stored in the flexible container bag. We need a simple way to evaluate the activity concentration to carry out efficient processing, disposal, reuse, recycling, etc. of a huge amount of contaminated soil resulted from the accident. The dose equivalent rate per the unit activity concentration to presume an activity concentration of contents from the dose measured at the surface of the flexible container was calculated with QAD-CGGP2R.

We think the result indicated by this report can rationally estimate concentration of radioactivity of contaminated soil.

Keywords: Flexible Container Bag, Contaminated Soil, Dose Equivalent Rate

✽Collaborating Engineer

目次

1. はじめに	1
2. 実施内容	1
3. 結果	2
3.1 単位放射能濃度あたりの 1cm 線量当量率	2
3.2 線量から放射能濃度への換算例	3
3.3 Cs-134、Cs-137 の存在比による補正	3
3.4 事故後の経過年数と 1cm 線量当量率を用いた放射能濃度の簡易的な求め方	4
4. おわりに	4
謝辞	4
参考文献	4
付録-1 点減衰核積分法の概要	15
付録-2 評価条件一覧	16
付録-3 土壌組成の違いによる 1cm 線量当量率の比較	17
付録-4 厚生労働省ガイドラインの評価方法による放射能濃度の評価例	20

Contents

1. Introduction	1
2. Enforcement contents	1
3. Result	2
3.1 Unit of radioactivity per dose equivalent rate	2
3.2 Conversion example from dose equivalent rate to radioactivity concentration	3
3.3 Correction by abundance ratio of Cs-134, Cs-137	3
3.4 Simple way to get concentration of radioactivity	4
4. Summary	4
Acknowledgement	4
References	4
Appendix-1 Summary of point kernel method	15
Appendix-2 List of evaluation conditions	16
Appendix-3 Comparison of dose equivalent rate by difference in soil composition	17
Appendix-4 Evaluation example of radioactivity concentration by evaluation method of Ministry of Health, Labour and Welfare guidelines	20

図リスト

図 1. フレコン概念図及び評価体系	8
図 2. 土壌等、フレコン充填率 100%、Cs-134、Cs-137 の割合は 1 対 1 の時の 1cm 線量当量率（フレコン上部面の中心から高さ 1cm）と放射能濃度の関係	9
図 3. 草木等、フレコン充填率 100%、Cs-134、Cs-137 の割合は 1 対 1 の時の 1cm 線量当量率（フレコン上部面の中心から高さ 1cm）と放射能濃度の関係	9
図 4. Cs-134、Cs-137 の減衰曲線（初期の存在比を 1 対 1 に想定した場合）	10
図 5. 土壌等、フレコン充填率 100% の 1cm 線量当量率（フレコン上部面の中心から高さ 1cm）と放射能濃度の関係、平成 28 年 4 月（事故直後から 5 年経過）時点	11
図 6. 草木等、フレコン充填率 100% の 1cm 線量当量率（フレコン上部面の中心から高さ 1cm）と放射能濃度の関係、平成 28 年 4 月（事故直後から 5 年経過）時点	12
図 7. 事故後の経過年数に対する $1\mu\text{Sv/h}$ 当りの放射能濃度の変化（土壌等をフレコンに 100% 充填した場合）	13
図 8. 事故後の経過年数に対する $1\mu\text{Sv/h}$ 当りの放射能濃度の変化（草木等をフレコンに 100% 充填した場合）	13
図 9. 事故後の経過年数に対する $1\mu\text{Sv/h}$ 当りの放射能濃度の変化（土壌等をフレコンに 50% 充填した場合）	14
図 10. 事故後の経過年数に対する $1\mu\text{Sv/h}$ 当りの放射能濃度の変化（草木等をフレコンに 50% 充填した場合）	14

表リスト

表 1. 土壌の組成	6
表 2. 土壌等のフレコン充填割合 100% における各評価点の 1cm 線量当量率	6
表 3. 草木等のフレコン充填割合 100% における各評価点の 1cm 線量当量率	7
表 4. 土壌等のフレコン充填割合 50% における各評価点の 1cm 線量当量率	7
表 5. 草木等のフレコン充填割合 50% における各評価点の 1cm 線量当量率	8

1. はじめに

「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」が施行され、生活環境等の除染作業が行われてきた。また、自治体が管理する公共施設等の除染に伴って発生する土壌や草木（以下、「汚染土壌等」と言う。）は各自治体でフレキシブルコンテナバック（以下、「フレコン」と言う。）に収納して保管されている状況である。これら大量に発生した汚染土壌等の処理・処分や再利用・再生利用等を効率的に進めるためには、放射能濃度を簡易的に評価する方法が必要である。

厚生労働省では「除染等業務に従事する労働者の放射線障害防止のためのガイドライン」⁽¹⁾を定め、その中で放射能濃度の簡易測定手順として、丸型 V 式容器、土のう袋及びフレキシブルコンテナ等に収納した事故由来廃棄物等を一定の保守的な条件での評価方法を示している。したがって、特定の容器や廃棄物の条件で評価しようとした場合、その特定の条件に基づいて評価する方がより実際の値に近づくと考えられる。

以上のことから、フレコンの表面で測定した線量から内容物である汚染土壌等の放射能濃度を推定するための単位放射能濃度あたりの 1cm 線量当量率^{*1)}について「点減衰核積分計算コード」QAD-CGGP2R⁽²⁾を用いて算出した。（付録-1 に点減衰核積分法の概要を示す。）

算出にあたっては、フレコンへの汚染土壌等の充填割合の違い、フレコンの内容物として土壌、草木の違い及びサーベイメータによる測定位置の影響について検討するとともに、算出結果である単位放射能濃度あたりの 1cm 線量当量率を用いたフレコン表面の線量からの放射能濃度への換算例、Cs-134、Cs-137 の存在比による補正及び事故後の経過年数を考慮した簡易的な放射能濃度の求め方について整理した。

2. 実施内容

公共施設等の除染等で発生した汚染土壌等を保管しているフレコンを対象として、内容物の放射能濃度 (Bq/kg) と内容物から放出される放射線による 1cm 線量当量率 (μ Sv/h) との関係を求めた。

フレコンの内容物である汚染土壌等の単位放射能濃度あたりの線源に対する線量当量の計算は、QAD-CGGP2R によるガンマ線遮へい解析を支援するソフトウェア「Pre/GAM-D Version3.0」(伊藤忠テクノソリューションズ株式会社)⁽⁴⁾を用いて行った。算出にあたっては、ソフトウェア内に内蔵されている線量換算係数等のライブラリデータベース、線源スペクトルデータベース及び遮へい体物質データベースを利用した。

*1) 一般的に空間の線量測定用に用いられているサーベイメータで測定される値。

線源となる汚染土壌等中の放射性核種は、原子力発電所の事故によって放出された放射性核種のうち空間線量率に影響を与える主な核種⁽⁵⁾である Cs-134(半減期 2.06 年)、Cs-137(半減期 30.17 年)とし、汚染土壌等中の核種毎の単位濃度が 1,000 Bq/kg で存在したときの 1cm 線量当量率を求めた。1cm 線量当量率は、ICRP Pub.74⁽⁶⁾で公開された表 A.21、周辺線量当量の換算係数に基づいており、前述の通り「Pre/GAM-D Version3.0」ではデータベース化されている。

フレコン内の汚染土壌等は、除染に伴って発生する草木類が土壌と混ざった状態で収納されていることから、主に土壌を主体に収納した内容物(土壌等)の密度を 1.0g/cm³とするとともに、土壌と共に草木類を多めに収納した内容物(草木等)の密度を 0.5g/cm³とした。

フレコン内の汚染土壌等の元素の組成は、文献⁽⁷⁾に示された 1.7g/cm³の土壌の組成を表 1 のように想定し、土壌等、草木等で仮定した密度となるように元素ごとの密度を換算した。

フレコンの寸法は、直径 1.1m×高さ 1.1m(体積 1.04m³)とし、汚染土壌等が 100%充填された場合、50%充填された場合(フレコン高さを半分の 0.55m、体積 0.52m³)の 2 種類とした。また、前述の密度と容積から求められる重量については、100%充填された場合の土壌等は 1,040kg、草木等は 522kg、50%充填された場合の土壌等は 522kg、草木等は 261kg となる。

フレコンの 1cm 線量当量率の評価点は、フレコン上部面の中心から、高さ方向 1cm を基本点 P1 として、サーベイメータによる測定位置の影響を考慮して、高さ方向は 3cm、5cm、半径方向は、5cm、10cm、15cm とした。

フレコン概念図及び評価体系を図 1 に示す。また、付録-2 に評価条件一覧を示す。

3. 結果

3.1 単位放射能濃度あたりの 1cm 線量当量率

表 2、表 3 にフレコン充填割合 100%の土壌等及び草木等、表 4、表 5 にフレコン充填割合 50%の土壌等及び草木等における各評価点の 1cm 線量当量率を示す。

フレコン充填割合については、100%、50%で 1cm 線量当量率の違いはほとんど無かったことから、充填割合が多少変動しても放射能濃度への換算の影響は少ないと考える。

土壌等と草木等を比較すると、土壌等に対して草木等のほうが単位放射能濃度に対する 1cm 線量当量率は 20~25%程度低かった。また、フレコン内容物によって、今回の単位濃度あたりの 1cm 線量当量率を適切に使うことが必要である。更に、土壌の組成の影響を確認するため、付録-3 に土壌の組成の違いによる 1cm 線量当量率の計算結果を示す。本結果から、組成の違いの影響ではなく、土壌等、草木等に設定した密度の違いであることが分かる。

評価点については、土壌等では基本点 P1 に対して、高さ方向 P3 の 5cm に対しては 13% 程度、半径方向 P10 の 15cm に対しては 2% 程度、1cm 線量当量率は低下する方向である。また、草木等では基本点 P1 に対して、高さ方向 P3 の 5cm に対しては 16% 程度、半径方向 P10 の 15cm に対しては 2% 程度、1cm 線量当量率は低下する方向である。サーベイメータによる測定時の位置の影響としては高さ方向の影響が大きい。

3.2 線量から放射能濃度への換算例

本結果をもとに、土壌等の場合で、フレコン充填率 100%、Cs-134、Cs-137 が 1 対 1 の割合で存在したときの高さ 1cm である基本点 P1 における 1cm 線量当量率と放射能濃度の関係を図 2 に示す。関係式としては、フレコン上部面の中心から高さ 1cm の 1cm 線量当量率が $1.0 \mu\text{Sv/h}$ の場合、フレコン内の内容物の放射能濃度は $2,900 \text{ Bq/kg}$ と算出された。また、草木等については図 3 に示す。

ここで、サーベイメータによる測定時のばらつきの影響を考えると、前述のように、土壌等のフレコンの場合、評価点が高さ 5cm の値は 1cm に対して、1cm 線量当量率が 13% 低い値を示す結果であった。よって、サーベイメータによる測定について高さ 1cm を基本として濃度換算を行う場合に、サーベイメータによる測定が仮に高さ 5cm で測定された線量から濃度を換算すると、13% 程度濃度を低く評価することになる。図 2 に示した関係式で考えると、フレコン上部面の中心から高さ 1cm の 1cm 線量当量率が $1.0 \mu\text{Sv/h}$ の場合、放射能濃度は $2,900 \text{ Bq/kg}$ と算出されているが、サーベイメータで高さ 5cm の 1cm 線量当量率を $1.0 \mu\text{Sv/h}$ として測定された場合、 $2,900 \text{ Bq/kg} \times (1 - 0.13) = 2,500 \text{ Bq/kg}$ と評価することになる。

3.3 Cs-134、Cs-137 の存在比による補正

線量から放射能濃度への換算にあたっては、事故直後に放出された Cs-134、Cs-137 が物理的減衰によって、その存在比が経時変化していることから、1cm 線量当量率を測定した時期における Cs-134、Cs-137 の存在比を求めて、1cm 線量当量率と放射能濃度の関係を補正する必要がある。図 4 に Cs-134、Cs-137 の減衰曲線を示す。本図から、測定した時期の Cs-134、Cs-137 の存在比を読み取り、Cs-134、Cs-137 の $1,000 \text{ Bq/kg}$ の単位濃度あたりの 1cm 線量当量率に乗じて補正する。

例として、平成 28 年 4 月（事故後の平成 23 年 3 月から 5 年経過）時点の土壌等の場合のフレコン充填率 100% のフレコン上部面の中心から 1cm における 1cm 線量当量率と放射能濃度の関係を図 5 に示すとともに草木等の場合を図 6 に示す。Cs-134、Cs-137 の存在比は、図 4 より 4.58 年経過時点の 0.21 対 0.90 を使用した。これは、本報告では平成 23 年 3 月の事故 5 か月後（0.42 年）における Cs-134、Cs-137 の存在比として 1 対 1^{*2)} を用いた

*2) Cs-134、Cs-137 の存在割合は、第 64 回原子力安全委員会資料第 1-1 号「現在の空間線量率から将来の空間線量率を予測する考え方について」をもとに、事故後 5 か月の時点をもとに 1 対 1 とした。

ことによるものである。

また、参考として付録-4 に「厚生労働省ガイドラインの評価方法による放射能濃度の評価例」を示す。

3.4 事故後の経過年数と 1cm 線量当量率を用いた放射能濃度の簡易的な求め方

参考として、事故後の経過年数に対する $1\mu\text{Sv/h}$ 当りの放射能濃度の変化を表したグラフを図 7 から図 10 に示す。図 7 に土壤等をフレコンに 100% 充填した場合を示したが、図 2 の事故 5 か月後 (Cs-134、Cs-137 の割合が 1 対 1 の時) の $1\mu\text{Sv/h}$ 当りの放射能濃度は約 $2,900\text{Bq/kg}$ 、また、図 5 の事故 5 年後 (Cs-134、Cs-137 の割合が 0.21 対 0.90 の時) の $1\mu\text{Sv/h}$ 当りの放射能濃度は約 $4,100\text{Bq/kg}$ であることが、本グラフから読み取ることができる。そのため、これらのグラフを用いて、フレコンを測定した時点の経過年数から $1\mu\text{Sv/h}$ 当りの放射能濃度を読み取り、サーベイメータによる測定値であるフレコン上部 1cm の 1cm 線量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$) を乗じることで、測定した時点のフレコンの放射能濃度 (Bq/kg) を簡易的に算出することができる。

4. おわりに

これらの簡易的な試算により、フレコンの表面の線量から汚染土壤等の放射能濃度を求めることによって、大量に発生した汚染土壤等の放射能濃度を合理的に算出することができる。また、東北地方太平洋沖地震以後、大量に保管されている汚染土壤等の処理・処分や再利用・再生利用等を効率的に進めることが可能になると考える。

謝辞

本報告書をまとめるにあたり、貴重なご意見を頂いた廃棄物対策・埋設事業統括部設計技術課の天澤弘也課長に感謝致します。

参考文献

- (1) 厚生労働省：除染等業務に従事する労働者の放射線障害防止のためのガイドライン、平成 26 年 11 月 18 日付け基発 1118 第 6 号。
- (2) 日本原子力研究所・CRC ソリューションズ：「新法令対応 QAD-CGGP2R コードの整備」

- (3) Y. Sakamoto and S. Tanaka : “QAD-CGGP2 and G33-GP2 : Revised Versions of QAD-CGGP and G33-GP Code with Conversion Factors from Exposure to Ambient and Maximum Dose Equivalents” ,JAERI-M 90-110,1990, 95p.
- (4) 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 : 「3次元遮へい計算プログラム Pre/GAM-D Version3」 < <http://www.engineering-eye.com/PREGAMD/> >(accessed on 2016-06-03).
- (5) 原子力安全委員会 : 第64回原子力安全委員会資料第1-1号「現在の空間線量率から将来の空間線量率を予測する考え方について」、平成23年8月24日.
- (6) International Atomic Energy Agency : “Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation” , ICRP Publication 74, 1996.
- (7) N. Yamano : JSD1000 : Multi Group Cross Section Sets for Shielding Materials JAERI-M 84-038,1984,116p.

表 1. 土壌の組成

元素	原子番号	割合(重量%)
		土壌 ⁽⁷⁾ (JAERI-M 84-038)
H	1	0.96
C	6	-
N	7	-
O	8	54.37
Na	11	-
Mg	12	-
Al	13	12.86
Si	14	31.81
S	16	-
K	19	-
Ca	20	-
Ti	22	-
Mn	25	-
Fe	26	-
密度(g/cm ³)		1.7

表 2. 土壌等のフレコン充填割合 100%における各評価点の 1cm 線量当量率

評価点(cm)			単位濃度あたりの1cm線量当量率 (μ Sv/h per 1,000Bq/kg)	
位置	半径 方向	高さ 方向	土壌等(1.0g/cm ³)	
			Cs-134	Cs-137
P1	0	1	0.50	0.18
P2		3	0.47	0.17
P3		5	0.43	0.16
P4	5	1	0.50	0.18
P5		3	0.46	0.17
P6		5	0.43	0.16
P7	10	1	0.50	0.18
P8		3	0.46	0.17
P9		5	0.43	0.16
P10	15	1	0.49	0.18
P11		3	0.46	0.17
P12		5	0.42	0.15

表 3. 草木等のフレコン充填割合 100%における各評価点の 1cm 線量当量率

評価点 (cm)			単位濃度あたりの1cm線量当量率 ($\mu\text{Sv/h per } 1,000\text{Bq/kg}$)	
位置	半径 方向	高さ 方向	草木等 (0.5g/cm^3)	
			Cs-134	Cs-137
P1	0	1	0.40	0.15
P2		3	0.37	0.13
P3		5	0.34	0.12
P4	5	1	0.40	0.15
P5		3	0.36	0.13
P6		5	0.34	0.12
P7	10	1	0.40	0.15
P8		3	0.36	0.13
P9		5	0.33	0.12
P10	15	1	0.39	0.14
P11		3	0.36	0.13
P12		5	0.33	0.12

表 4. 土壌等のフレコン充填割合 50 %における各評価点の 1cm 線量当量率

評価点 (cm)			単位濃度あたりの1cm線量当量率 ($\mu\text{Sv/h per } 1,000\text{Bq/kg}$)	
位置	半径 方向	高さ 方向	土壌等 (1.0g/cm^3)	
			Cs-134	Cs-137
P1	0	1	0.50	0.18
P2		3	0.46	0.17
P3		5	0.43	0.16
P4	5	1	0.50	0.18
P5		3	0.46	0.17
P6		5	0.43	0.16
P7	10	1	0.49	0.18
P8		3	0.46	0.17
P9		5	0.43	0.16
P10	15	1	0.49	0.18
P11		3	0.45	0.17
P12		5	0.42	0.15

表 5. 草木等のフレコン充填割合 50 %における各評価点の 1cm 線量当量率

評価点 (cm)			単位濃度あたりの1cm線量当量率 ($\mu\text{Sv/h per } 1,000\text{Bq/kg}$)	
位置	半径方向	高さ方向	草木等 (0.5g/cm^3)	
			Cs-134	Cs-137
P1	0	1	0.38	0.14
P2		3	0.34	0.13
P3		5	0.32	0.12
P4	5	1	0.38	0.14
P5		3	0.34	0.13
P6		5	0.31	0.12
P7	10	1	0.37	0.14
P8		3	0.34	0.12
P9		5	0.31	0.11
P10	15	1	0.37	0.14
P11		3	0.33	0.12
P12		5	0.31	0.11

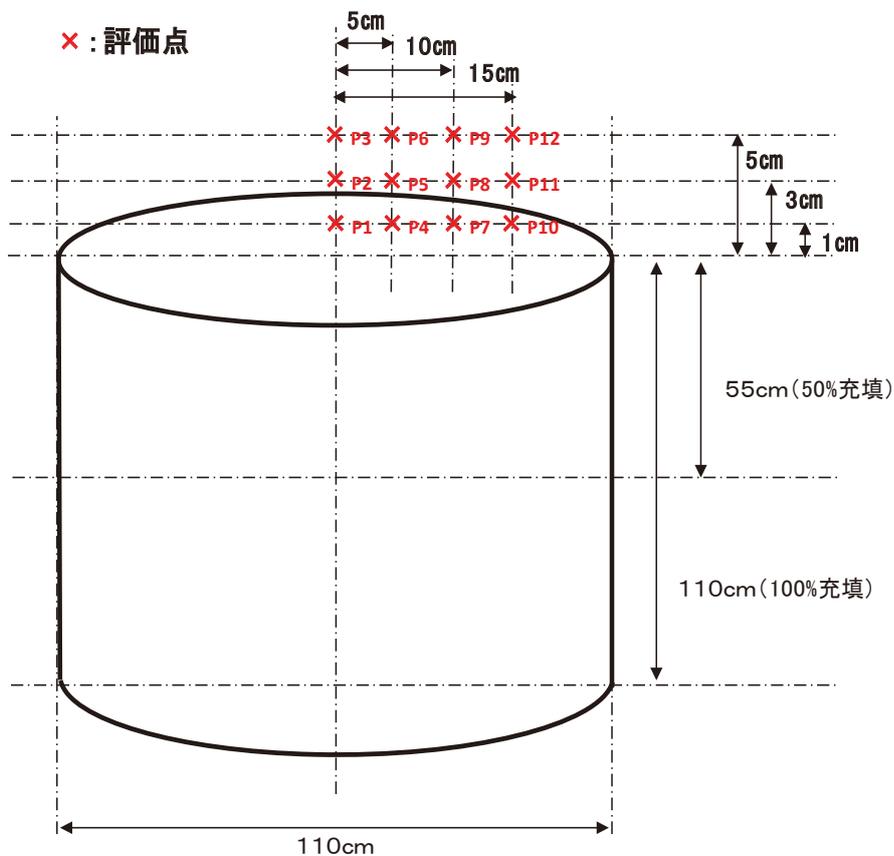
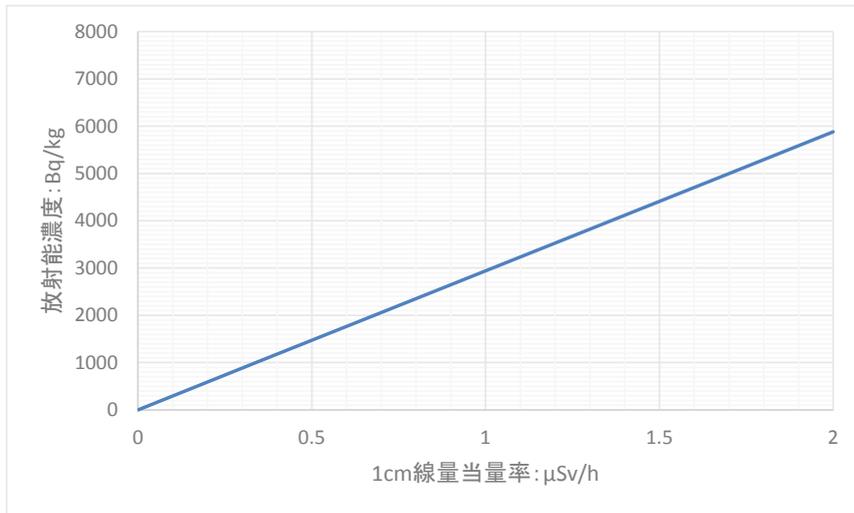


図 1. フレコン概念図及び評価体系

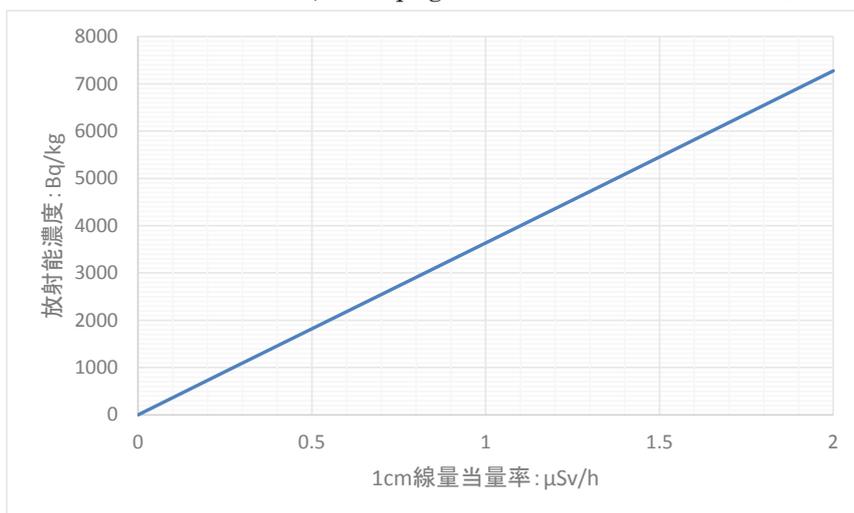
(関係式) : 表 2 から、Cs-134 及び Cs-137 における 1cm 線量当量率の合計は、 $0.50 + 0.18 = 0.68$ ($\mu\text{Sv/h per } 2,000 \text{ Bq/kg}$) となる。よって、 $1.0 \mu\text{Sv/h}$ の時の放射能濃度は $2,900 \text{ Bq/kg}$ (十の位四捨五入) となる。



$$\therefore \text{放射能濃度 (Bq/kg)} = 2,900 \times \text{1cm 線量当量率 (}\mu\text{Sv/h)}$$

図 2. 土壌等、フレコン充填率 100%、Cs-134、Cs-137 の割合は 1 対 1 の時の 1cm 線量当量率 (フレコン上部面の中心から高さ 1cm) と放射能濃度の関係

(関係式) : 表 2 から、Cs-134 及び Cs-137 における 1cm 線量当量率の合計は、 $0.40 + 0.15 = 0.55$ ($\mu\text{Sv/h per } 2,000 \text{ Bq/kg}$) となる。よって、上記から $1.0 \mu\text{Sv/h}$ の時の放射能濃度は $3,600 \text{ Bq/kg}$ (十の位四捨五入) となる。



$$\therefore \text{放射能濃度 (Bq/kg)} = 3,600 \times \text{1cm 線量当量率 (}\mu\text{Sv/h)}$$

図 3. 草木等、フレコン充填率 100%、Cs-134、Cs-137 の割合は 1 対 1 の時の 1cm 線量当量率 (フレコン上部面の中心から高さ 1cm) と放射能濃度の関係

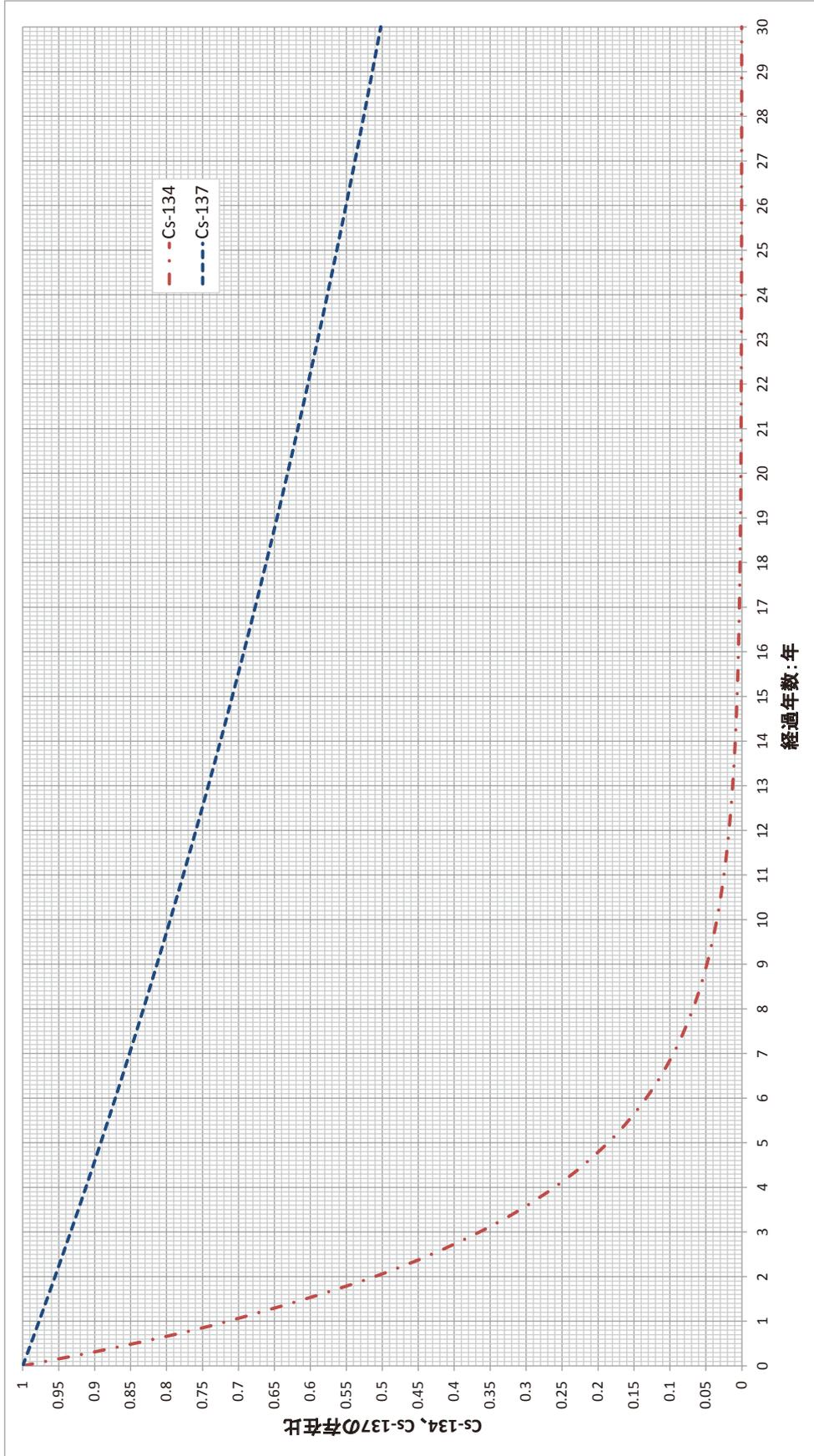
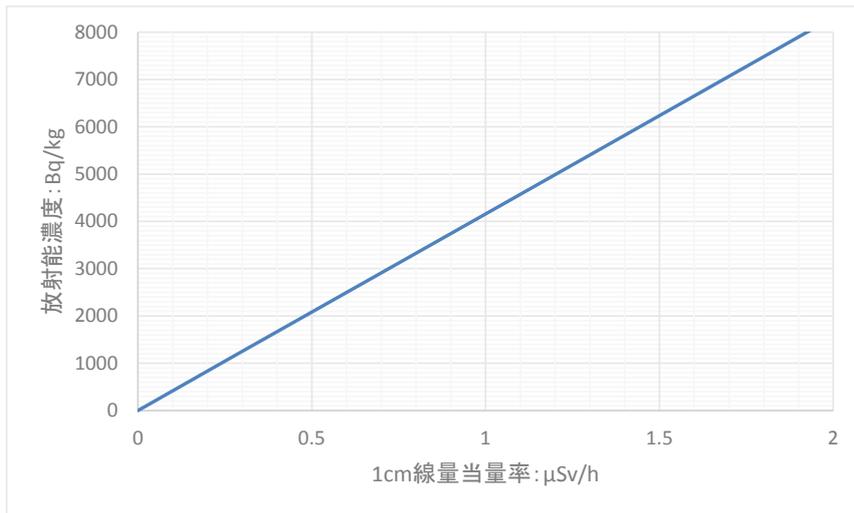


図4. Cs-134、Cs-137の減衰曲線（初期の存在比を1対1に想定した場合）

(減衰による補正)

- 図4から、平成28年4月(事故直後から5年経過、平成23年8月から4.58年後)時点のCs-134、Cs-137の存在比は、0.21対0.90(減衰前1対1)
- Cs-134の減衰補正： $0.21 \times 0.50 = 0.11$ ($\mu\text{Sv/h}$ per 210 Bq/kg)
- Cs-137の減衰補正： $0.90 \times 0.18 = 0.16$ ($\mu\text{Sv/h}$ per 900 Bq/kg)
- ∴ 上記から線量と濃度の関係は、 0.27 ($\mu\text{Sv/h}$ per 1,110 Bq/kg)となり、 1.0 $\mu\text{Sv/h}$ の時の放射能濃度をkg単位にすると4,100Bq/kg(十の位四捨五入)となる。

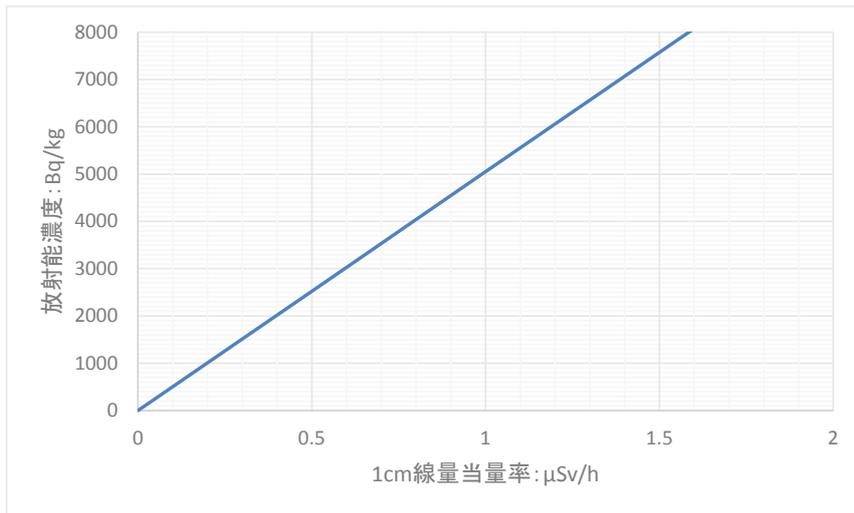


(関係式) ∴ 放射能濃度 (Bq/kg) = $4,100 \times 1\text{cm}$ 線量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)

図5. 土壤等、フレコン充填率100%の1cm線量当量率(フレコン上部面の中心から高さ1cm)と放射能濃度の関係、平成28年4月(事故直後から5年経過)時点

(減衰による補正)

- ・ 図4 から、平成 28 年 4 月（事故直後から 5 年経過、平成 23 年 8 月から 4.58 年後）時点の Cs-134、Cs-137 の存在比は、0.21 対 0.90（減衰前 1 対 1）
- ・ Cs-134 の減衰補正： $0.21 \times 0.40 = 0.08$ ($\mu\text{Sv/h}$ per 210 Bq/kg)
- ・ Cs-137 の減衰補正： $0.90 \times 0.15 = 0.14$ ($\mu\text{Sv/h}$ per 900 Bq/kg)
- ∴ 上記から線量と濃度の関係は、 0.22 ($\mu\text{Sv/h}$ per 1,110 Bq/kg) となり、 1.0 $\mu\text{Sv/h}$ の時の放射能濃度を kg 単位にすると 5,100 Bq/kg（十の位四捨五入）となる。



(関係式) ∴ 放射能濃度 (Bq/kg) = 5,100 × 1cm 線量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)

図 6. 草木等、フレコン充填率 100%の 1cm 線量当量率（フレコン上部面の中心から高さ 1cm）と放射能濃度の関係、平成 28 年 4 月（事故直後から 5 年経過）時点

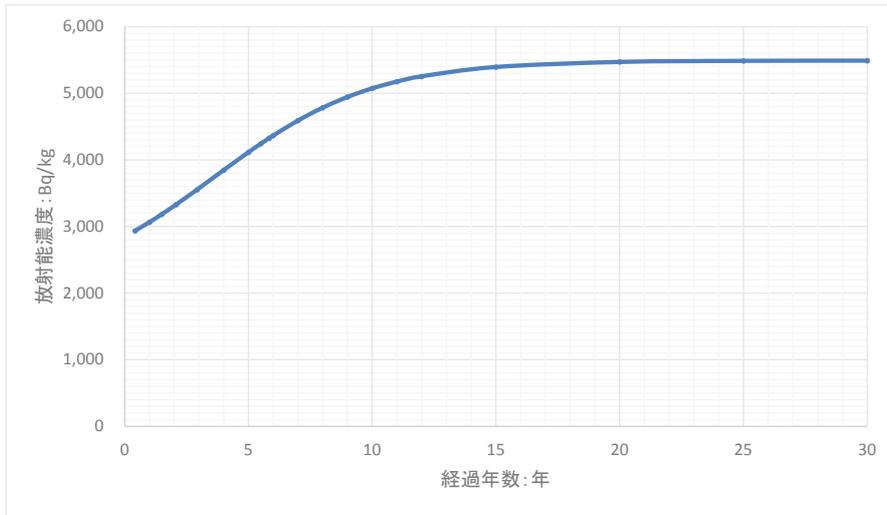


図 7. 事故後の経過年数に対する $1 \mu\text{Sv/h}$ 当りの放射能濃度の変化
(土壌等をフレコンに 100%充填した場合)

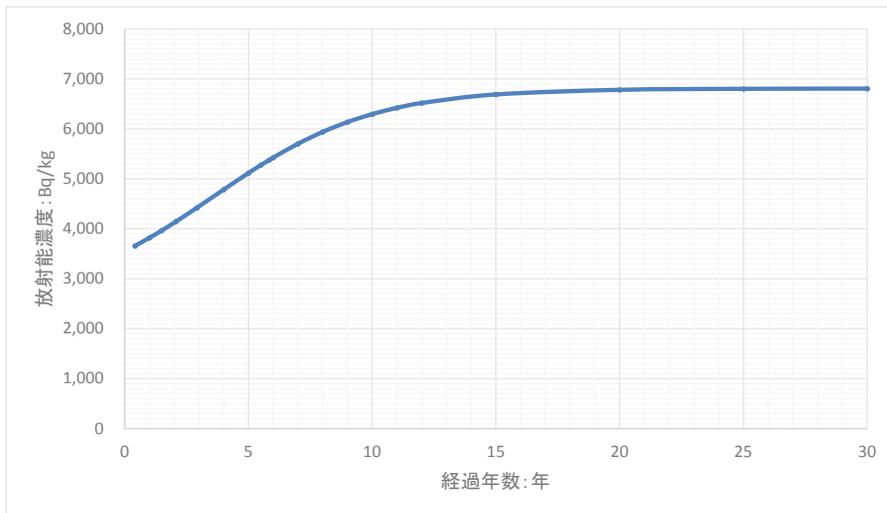


図 8. 事故後の経過年数に対する $1 \mu\text{Sv/h}$ 当りの放射能濃度の変化
(草木等をフレコンに 100%充填した場合)

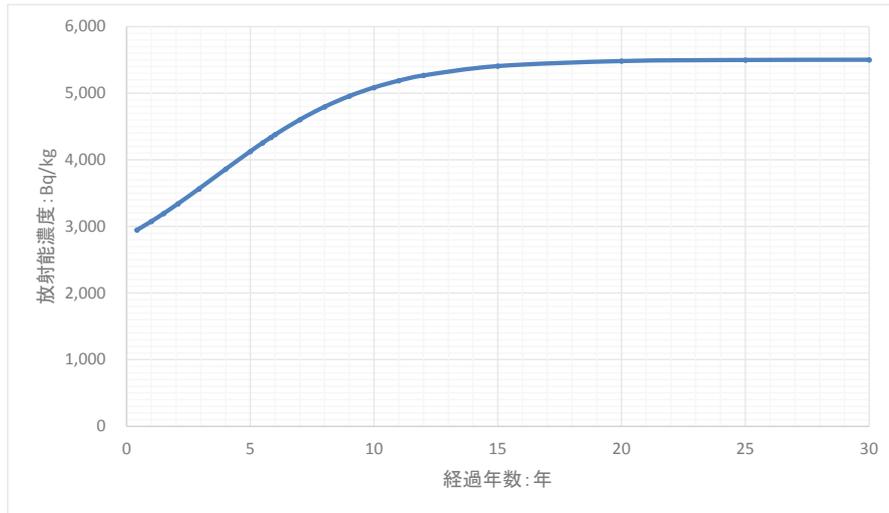


図 9. 事故後の経過年数に対する $1 \mu \text{Sv/h}$ 当りの放射能濃度の変化
(土壌等をフレコンに 50% 充填した場合)

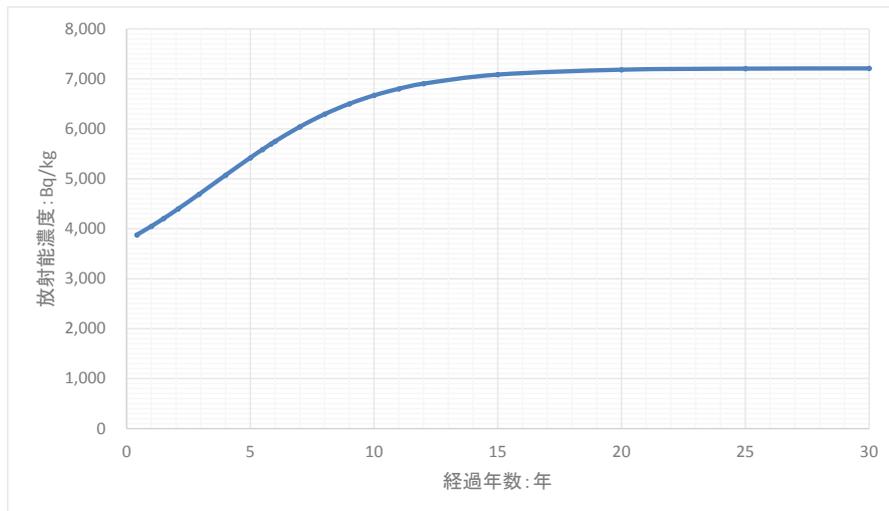
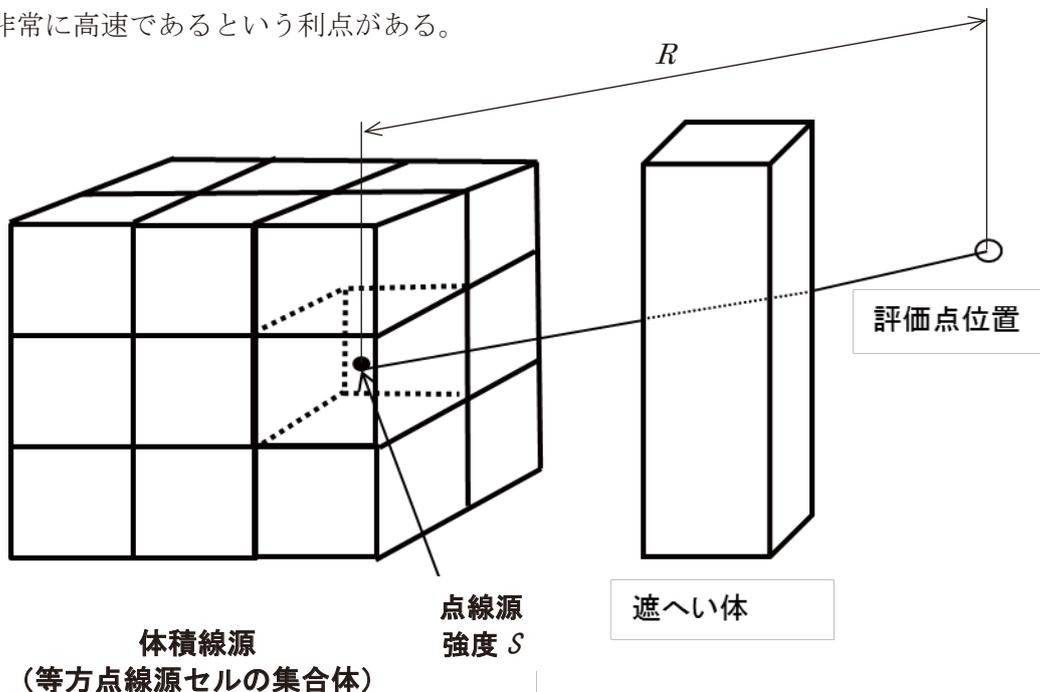


図 10. 事故後の経過年数に対する $1 \mu \text{Sv/h}$ 当りの放射能濃度の変化
(草木等をフレコンに 50% 充填した場合)

付録-1 点減衰核積分法の概要

点減衰核積分法は、線源から放出された光子（ガンマ線を量子化した粒子）が1度も散乱せずに評価点に到達した場合の線束を直接線と定義し、直接線の飛程中に存在する遮蔽体での散乱効果を表すガンマ線ビルドアップ係数を乗じることにより、光子の直接線、散乱線を合計した線量を算出する方法である。また、図のように体積線源を複数の等方点線源セルの集合体とみなし、各点線源から評価点までの距離を求め、各点線源からの寄与量に対して求める線量単位の変換係数を乗じ、全線源点からの寄与を積算することで体積線源からの寄与を算出するものである。

本手法では、線源と評価点を結ぶ直線上の減衰とその散乱効果補正によって線量を算出しているため、他の遮へい評価手法に比べて原理や使用法が比較的簡単であり、計算時間も非常に高速であるという利点がある。



$$(計算式) \quad D = \left(k \cdot \frac{S}{4\pi R^2} \cdot e^{-\mu t} \cdot B \right) + \dots \quad (\text{点線源分の積算})$$

D : 線量当量率、S : 線源強度、k : 線量当量率換算係数、R : 評価点までの距離
 μ : 線吸収係数、t : 遮へい体厚さ、B : ビルドアップ係数

図 点減衰核積分法の概念

付録-2 評価条件一覧

フレキシブルコンテナ内の汚染土壌等をガンマ線遮へい解析コード「Pre/GAM-D」で算出するにあたっての評価条件を以下に示す。

パラメータ		入力条件			単位	備考	
線源形状 :円柱	充填率100% 土壌等	半径	始点	0	cm	分割数100	
			終点	55			
		高さ	始点	-55			
			終点	55			
	充填率100% 草木等	半径	始点	0		分割数100	
			終点	55			
		高さ	始点	-55			
			終点	55			
	充填率50% 土壌等	半径	始点	0		分割数100	
			終点	55			
		高さ	始点	-28			
			終点	28			
充填率50% 草木等	半径	始点	0	分割数100			
		終点	55				
	高さ	始点	-28				
		終点	28				
全放射能量	充填率100% 土壌等	1.04E+06			Bq	-	
	充填率100% 草木等	5.22E+05					
	充填率50% 土壌等	5.22E+05					
	充填率50% 草木等	2.61E+05					
ビルドアップ係数		土壌と組成が比較的近い「コンクリート」とした。					
評価点	充填率100% 土壌等	高さ 方向	1	半径 方向	5	cm	-
	充填率100% 草木等		3		10		
	充填率50% 土壌等		5		15		
	充填率50% 草木等						

付録-3 土壌組成の違いによる 1cm 線量当量率の比較

1. 比較内容

本報告書では、フレコン内の汚染土壌密度の組成は、 1.7g/cm^3 の土壌組成を想定し、土壌等、草木等の算出したが、本章では、フレコン内の汚染土壌密度を 1.521g/cm^3 * の土壌の組成を想定し、1cm 線量当量率を算出して本報告書 (1.7g/cm^3) との比較をする。App3.1 に土壌の組成の違いを示す。

2. 結果

汚染土壌密度 1.521g/cm^3 の土壌組成における各評価点の 1cm 線量当量率について、App3.2 にフレコン充填割合 100%、App3.3 にフレコン充填割合 50%の結果を示す。また、汚染土壌密度 1.7g/cm^3 の土壌組成に対する 1.521g/cm^3 の土壌組成の 1cm 線量当量率の割合 (%) を App3.4、App3.5 に示す。

以上の結果から、土壌組成の違いによる 1cm 線量当量率への影響は 1%以下と小さいことが判る。

App3.1 土壌 (設定例)

元素	原子番号	割合(重量%)	
		土壌 (JAERI-M 84-038)	土壌*
H	1	0.96	2.5
C	6	-	-
N	7	-	-
O	8	54.37	56.9
Na	11	-	1.0
Mg	12	-	0.7
Al	13	12.86	10.0
Si	14	31.81	21.2
S	16	-	-
K	19	-	0.4
Ca	20	-	1.0
Ti	22	-	0.5
Mn	25	-	-
Fe	26	-	5.8
密度(g/cm^3)		1.7	1.521

*日本原子力研究所内部で設定された値。(私信)

App3.2 汚染土壌密度 1.521g/cm³ の土壌組成における
各評価点の 1cm 線量当量率 (フレコン充填割合 100%)

評価点 (cm)			単位濃度あたりの1cm線量当量率 (μ Sv/h per 1,000Bq/kg)			
位置	半径 方向	高さ 方向	土壌等 (1.0g/cm ³)		草木等 (0.5g/cm ³)	
			Cs-134	Cs-137	Cs-134	Cs-137
P1	0	1	0.49	0.18	0.40	0.15
P2		3	0.46	0.17	0.36	0.13
P3		5	0.43	0.16	0.34	0.12
P4	5	1	0.49	0.18	0.40	0.15
P5		3	0.46	0.17	0.36	0.13
P6		5	0.43	0.16	0.33	0.12
P7	10	1	0.49	0.18	0.39	0.14
P8		3	0.46	0.17	0.36	0.13
P9		5	0.43	0.16	0.33	0.12
P10	15	1	0.49	0.18	0.39	0.14
P11		3	0.45	0.16	0.35	0.13
P12		5	0.42	0.15	0.33	0.12

App3.3 汚染土壌密度 1.521g/cm³ の土壌組成における
各評価点の 1cm 線量当量率 (フレコン充填割合 50%)

評価点 (cm)			単位濃度あたりの1cm線量当量率 (μ Sv/h per 1,000Bq/kg)			
位置	半径 方向	高さ 方向	土壌等 (1.0g/cm ³)		草木等 (0.5g/cm ³)	
			Cs-134	Cs-137	Cs-134	Cs-137
P1	0	1	0.49	0.18	0.38	0.14
P2		3	0.46	0.17	0.34	0.13
P3		5	0.43	0.16	0.31	0.12
P4	5	1	0.49	0.18	0.37	0.14
P5		3	0.46	0.17	0.34	0.13
P6		5	0.43	0.16	0.31	0.12
P7	10	1	0.49	0.18	0.37	0.14
P8		3	0.45	0.17	0.34	0.12
P9		5	0.42	0.15	0.31	0.11
P10	15	1	0.48	0.18	0.37	0.13
P11		3	0.45	0.16	0.33	0.12
P12		5	0.42	0.15	0.31	0.11

App3.4 汚染土壌密度 1.7g/cm³ の土壌組成に対する
1.521g/cm³ の土壌組成の 1cm 線量当量率の割合 (%)
(フレコン充填割合 100%)

評価点 (cm)			1.7g/cm ³ の土壌組成に対する 1.521g/cm ³ の土壌組成の線量の割合 (%)			
位置	半径 方向	高さ 方向	土壌等		草木等	
			Cs-134	Cs-137	Cs-134	Cs-137
P1	0	1	99.0	99.1	99.4	99.5
P2		3	99.1	99.1	99.4	99.5
P3		5	99.1	99.1	99.4	99.5
P4	5	1	99.0	99.0	99.4	99.5
P5		3	99.1	99.1	99.4	99.5
P6		5	99.1	99.1	99.5	99.4
P7	10	1	99.1	99.1	99.4	99.4
P8		3	99.1	99.1	99.4	99.4
P9		5	99.1	99.1	99.5	99.4
P10	15	1	99.1	99.1	99.4	99.4
P11		3	99.1	99.1	99.4	99.5
P12		5	99.1	99.2	99.5	99.4

App3.5 汚染土壌密度 1.7g/cm³ の土壌組成に対する
1.521g/cm³ の土壌組成の 1cm 線量当量率の割合 (%)
(フレコン充填割合 50%)

評価点 (cm)			1.7g/cm ³ の土壌組成に対する 1.521g/cm ³ の土壌組成の線量の割合 (%)			
位置	半径 方向	高さ 方向	土壌等		草木等	
			Cs-134	Cs-137	Cs-134	Cs-137
P1	0	1	99.1	99.1	99.5	99.5
P2		3	99.1	99.1	99.5	99.5
P3		5	99.2	99.2	99.6	99.6
P4	5	1	99.1	99.1	99.5	99.5
P5		3	99.1	99.1	99.5	99.5
P6		5	99.2	99.2	99.6	99.6
P7	10	1	99.1	99.1	99.5	99.5
P8		3	99.1	99.2	99.6	99.5
P9		5	99.2	99.2	99.6	99.6
P10	15	1	99.1	99.1	99.5	99.6
P11		3	99.1	99.2	99.6	99.5
P12		5	99.2	99.2	99.6	99.6

付録-4 厚生労働省ガイドラインの評価方法による放射能濃度の評価例

厚生労働省では、平成 23 年 12 月に「除染等業務に従事する労働者の放射線障害防止のためのガイドライン」を定め、その中で放射能濃度の簡易測定手順として、丸型 V 式容器、土のう袋及びフレキシブルコンテナ等に収納した事故由来廃棄物等を対象に一定の保守的な条件による評価方法が示されている。この中で示されたフレキシブルコンテナの評価方法によると、平成 28 年 4 月時点で $1.0 \mu\text{Sv/y}$ の場合の放射能濃度 (Bq/kg) は、4,800 Bq/kg であった。

本編で報告した様に、フレキシブルコンテナの放射能濃度を算出するために用いた想定である土壌等（土壌の組成で密度を 1.0g/cm^3 とした場合）、草木等（土壌の組成で密度を 0.5g/cm^3 とした場合）について、上記同様の時期と線量の条件で放射能濃度を求めると、土壌等の場合 4,100 Bq/kg、草木等の場合 5,100 Bq/kg となる。また、QAD の評価条件である評価点の位置、距離及び線源分割数を厚生省ガイドラインと揃えた（評価点はフレキシブルコンテナ側面の中心表面から 3 cm、線源分割数 200 分割）時の評価結果では、土壌等の場合 5,300 Bq/kg、草木等の場合 6,400 Bq/kg となった。

上記のように、想定する密度、QAD の評価条件の違いにより、求められる放射能濃度が異なるが、評価結果に大きな違いはないと考えられる。また、汚染土壌等の処理・処分や再利用・再生利用等を目的にした場合、発生した汚染土壌等の条件（土壌等、草木等）に基づいて評価した方がより実際に近い合理的な評価につながると考えられる。

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량	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
比透磁率 ^(b)	(数字の)	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 ^(e)	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	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	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)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(e)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
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
酸素活性化	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及び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間には1:1の関係がある。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
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面積	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ 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	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	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
	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 ⁵ Pa
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
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ¹² cm ²) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	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 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G 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 _e =(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	f	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	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロ	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

