JAEA-Data/Code
2014-017

JAEA-Data/Code

平均的成人日本人男性ファントムを用いた光子及び電子比吸収割合の評価

Assessment of Specific Absorbed Fractions for Photons and Electrons Using Average Adult Japanese Male Phantom

真辺 健太郎　佐藤 薫　高橋 史明

Kentaro MANABE, Kaoru SATO and Fumiaki TAKAHASHI

原子力科学研究部門
原子力基礎工学研究センター
環境・放射線科学ユニット

Environment and Radiation Sciences Unit
Nuclear Science and Engineering Center
Sector of Nuclear Science Research

October 2014

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政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。

独立行政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白方白根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 Shirane, 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, 2014

JAEA-Data/Code 2014-017

平均的成人日本人男性ファントムを用いた光子及び電子比吸収割合の評価

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門
原子力基礎工学研究センター 環境・放射線科学ユニット
真辺　健太郎、佐藤　薫、高橋　史明

（2014 年 8 月 18 日受理）

現在、国際放射線防護委員会（ICRP: International Commission on Radiological Protection）は、2007 年勧告を受けて、線量係数（放射性核種 1 Bq 摂取に対する実効線量及び等価線量）の改訂を進めている。新しい線量係数の算出において、コーカソイドの標準的な体格及び臓器質量（身体的特性）を有するボクセルファントムの比吸収割合（SAF: Specific Absorbed Fraction）が用いられている。SAF は、その評価に使用するファントムの体格や臓器質量に依存するため、ICRP の線量係数は、コーカソイドの身体的特性を反映したものとなる。一方、成人日本人の体格は、成人コーカソイドに比べて一般的に小柄であり、臓器質量も異なる。したがって、成人日本人の身体的特性を考慮した SAF 及び線量係数は、ICRP の各値とは異なることが予想される。以上のことから、ICRP の SAF や線量係数を日本人の放射線防護の目的に利用するにあたり、人種間の身体的特性の違いが SAF や線量係数に及ぼす影響を把握しておくことは重要である。

そこで、日本人の身体的特性が反映された内部被ばく線量を評価するため、原子力機構で開発した男女の平均的成人日本人ファントム（男性 : JM-103、女性 : JF-103）を用いて、光子、電子、α粒子及び中性子に対する網羅的な SAF データセットの開発に着手した。本報告書は、JM-103 の光子及び電子 SAF を評価した結果を取りまとめたものである。SAF は、JM-103 を汎用放射線輸送計算コード MCNPX 2.6.0 に組み込み、67 個の線源領域と 41 個の標的臓器の組合せについて、10 keV から 10 MeV の範囲の 25 種類の単色光子及び電子に対して計算した。また、計算した JM-103 の SAF と、ICRP の成人男性標準ファントムの SAF とを比較することにより、日本人とコーカソイド間の体格や臓器質量特性の違いが SAF に及ぼす影響についても検討した。

本研究で評価した光子及び電子に対する JM-103 の SAF は、本報告書に添付の CD-ROM に電子データとして収録した。本データを用いることにより、光子及び電子以外の放射線を放出しないすべての放射性核種の摂取に対し、成人日本人男性の平均的な身体的特性を反映した線量係数の評価が可能となる。

原子力科学研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

JAEA-Data/Code 2014-017

Assessment of Specific Absorbed Fractions for Photons and Electrons Using Average Adult Japanese Male Phantom

Kentaro MANABE, Kaoru SATO and Fumiaki TAKAHASHI

Environment and Radiation Sciences Unit, Nuclear Science and Engineering Center,
Sector of Nuclear Science Research, Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 18, 2014)

The International Commission on Radiological Protection (ICRP) is revising dose coefficients, which are effective and equivalent doses per unit intake of radionuclides, based on the 2007 Recommendations. Specific absorbed fractions (SAFs) of voxel phantoms having standard physiques and organ masses (physical characteristics) of Caucasian are used for calculation of the new dose coefficients. SAFs depend on physical characteristics of a phantom used for assessment of the SAFs. Therefore, the SAFs and the dose coefficients developed by ICRP reflect physical characteristics of Caucasian. On the other hand, physiques of adult Japanese are generally smaller than those of adult Caucasian, and organ masses are also different from each other. Consequently, it is expected that SAFs and dose coefficients with physical characteristics of adult Japanese are different from those of ICRP. It is important to understand the influence of the differences in physical characteristics between both races on SAFs and dose coefficients when using the SAFs and dose coefficients of ICRP for radiation protection for Japanese.

In order to evaluate internal doses considering the physical characteristics of adult Japanese, the Japan Atomic Energy Agency plans to develop a comprehensive data set of SAFs for photons, electrons, alpha particles and neutrons using average adult Japanese male and female phantoms (male: JM-103, female: JF-103). This report presents a data set of photon and electron SAFs for JM-103. JM-103 was incorporated into the general purpose radiation transport code, MCNPX 2.6.0, and the SAFs were calculated by the MCNPX 2.6.0 for 25 energies from 10 keV to 10 MeV and for combinations of 67 source regions and 41 target organs. Influences of differences in physical characteristics between adult Japanese and Caucasian on SAFs was also examined by comparison between the calculated SAFs in this study and the SAFs of the reference adult male phantom of ICRP.

The photon and electron SAFs of JM-103 assessed in this study are contained in the CD-ROM attached to this report. These data enable to evaluate dose coefficients reflecting the physical characteristics of the average Japanese male for intakes of all radionuclides not to emit other than photons and electrons.

Keywords: Specific Absorbed Fraction, Internal Dose Assessment, Voxel Phantom, Average Adult Japanese Male, Body Size, Organ Mass

目　次

1　序論.....1
2　計算方法.....3
2.1　ファントム.....3
2.2　コードシステム及び計算条件.....5
2.3　SAF の計算方法.....5
2.3.1　線源領域の選定.....5
2.3.2　線源発生確率の計算.....7
2.3.3　標的臓器の選定.....11
2.3.4　タリーの設定及び沈着エネルギーの評価.....12
2.3.5　沈着エネルギーから SAF への変換.....15
2.3.6　微細構造領域における電子 SAF.....15
2.4　計算方法の妥当性確認.....16
3　結果.....17
3.1　妥当性確認の結果.....17
3.1.1　ファントム組込み手法及び線源設定方法.....17
3.1.2　ファントム組込み手法の JM-103 への適用.....20
3.2　SAF データファイル.....23
4　考察.....26
4.1　自己吸収 SAF.....26
4.2　自己吸収以外の SAF.....29
5　結論.....32
謝辞.....32
参考文献.....33
付録 A　JM-103 の各種データ.....37
付録 B　JM-103 の SAF の線源領域及び標的臓器一覧.....45
付録 C　線源発生確率の計算結果.....49
付録 D　ヒストリー数の設定基準.....59

Contents

1 Introduction....1
2 Calculation methods....3
2.1 Phantom....3
2.2 Code system and calculation conditions....5
2.3 Calculation methods of SAFs....5
2.3.1 Selection of source regions....5
2.3.2 Calculation of source probabilities....7
2.3.3 Selection of target organs....11
2.3.4 Setting of tallies and evaluation of deposited energies....12
2.3.5 Converting deposited energies to SAFs....15
2.3.6 Electron SAFs in microstructure regions....15
2.4 Validation of calculation methods....16
3 Results....17
3.1 Results of validation....17
3.1.1 Methods of incorporating phantoms and setting source regions....17
3.1.2 Application of the method of incorporating phantoms to JM-103....20
3.2 Data files of SAFs....23
4 Discussion....26
4.1 SAFs for self-absorption....26
4.2 SAFs except for self-absorption....29
5 Conclusions....32
Acknowledgements....32
References....33
Appendix A Various data of JM-103....37
Appendix B Source regions and target organs of the SAFs of JM-103....45
Appendix C Calculation results of source probabilities....49
Appendix D Standard for setting the number of histories....59

図リスト

Fig. 2-1 JM-103 の比吸収割合の計算に使用した赤色骨髄、骨内膜及び硬骨に対する
質量エネルギー吸収係数....13
Fig. 2-2 二つの方法で計算した JM-103 の皮質骨表面から赤色骨髄への光子の
沈着エネルギー....14
Fig. 2-3 二つの方法で計算した JM-103 の皮質骨表面から骨内膜への光子の
沈着エネルギー....14
Fig. 3-1 RCP-AM の肝臓から結腸への光子比吸収割合....18
Fig. 3-2 RCP-AM の肝臓から肺への光子比吸収割合....18
Fig. 3-3 RCP-AM の甲状腺から結腸への光子比吸収割合....19
Fig. 3-4 RCP-AM の甲状腺から肺への光子比吸収割合....19
Fig. 3-5 JM-103 の肝臓から結腸への光子比吸収割合....21
Fig. 3-6 JM-103 の肝臓から肺への光子比吸収割合....21
Fig. 3-7 JM-103 の甲状腺から結腸への光子比吸収割合....22
Fig. 3-8 JM-103 の甲状腺から肺への光子比吸収割合....22
Fig. 3-9 添付 CD-ROM に収録された SAF データのディレクトリ構造....24
Fig. 4-1 JM-103 と RCP-AM 間の肝臓における電子の自己吸収に対する
比吸収割合の比較....27
Fig. 4-2 JM-103 と RCP-AM 間の甲状腺における電子の自己吸収に対する
比吸収割合の比較....28
Fig. 4-3 JM-103 と RCP-AM 間の肺における光子の自己吸収に対する
比吸収割合の比較....28
Fig. 4-4 JM-103 と RCP-AM 間の膵臓から胃壁への光子比吸収割合の比較....30
Fig. 4-5 JM-103 と RCP-AM 間の全身組織から腎臓への
電子比吸収割合の比較....30
Fig. 4-6 JM-103 と RCP-AM 間の全身組織から赤色骨髄への
光子比吸収割合の比較....31

表リスト

Table 2-1 JM-103 及び RCP-AM の特徴....4
Table 2-2 JM-103 及び RCP-AM の組織・臓器質量の比較並びに成人日本人男性の平均値....4
Table 2-3 JM-103 の比吸収割合の計算における線源領域とその略称....6
Table 2-4 JM-103 及び RCP-AM の解剖学的部位毎の皮質骨及び梁骨の質量及び質量分率....9
Table 2-5 頭蓋骨の 7 種類の材質に対する皮質骨と梁骨の割当て....10
Table 2-6 JM-103 の比吸収割合の計算における標的臓器とその略称....11
Table 3-1 比吸収割合データファイルの記録様式....25
Table A-1 JM-103 の臓器及び材質 ID 一覧....39
Table A-2 JM-103 の材質、元素組成比及び密度一覧....41
Table A-3 JM-103 の骨の材質毎の硬骨と骨髄の質量分率....42
Table A-4 JM-103 の赤色骨髄の質量....43
Table A-5 JM-103 の骨内膜の質量....44
Table B-1 JM-103 の比吸収割合の計算における線源領域と対応する臓器 ID 一覧....46
Table B-2 JM-103 の比吸収割合の計算における標的臓器と対応する臓器 ID 一覧....48
Table C-1 JM-103 の皮質骨線源に対する線源発生確率....50
Table C-2 JM-103 の梁骨線源に対する線源発生確率....51
Table C-3 JM-103 の赤色骨髄線源に対する線源発生確率....52
Table C-4 JM-103 の血液線源に対する線源発生確率....53
Table C-5 JM-103 の全身組織線源に対する線源発生確率....55
Table C-6 JM-103 の軟組織線源に対する線源発生確率....57
Table D-1 DCAL による放射性核種の摂取に対する線量係数の計算で使用される
データ及びモデル....59

List of Figures

Fig. 2-1 Mass energy-absorption coefficients for red bone marrow, endosteum and hard bone used for calculating specific absorbed fractions of JM-103.....13
Fig. 2-2 Deposited energies of photons from cortical bone surface to red bone marrow of JM-103 calculated by two methods.....14
Fig. 2-3 Deposited energies of photons from cortical bone surface to endosteum of JM-103 calculated by two methods.....14
Fig. 3-1 Specific absorbed fractions of RCP-AM for photons from liver to colon.....18
Fig. 3-2 Specific absorbed fractions of RCP-AM for photons from liver to lungs.....18
Fig. 3-3 Specific absorbed fractions of RCP-AM for photons from thyroid to colon.....19
Fig. 3-4 Specific absorbed fractions of RCP-AM for photons from thyroid to lungs.....19
Fig. 3-5 Specific absorbed fractions of JM-103 for photons from liver to colon.....21
Fig. 3-6 Specific absorbed fractions of JM-103 for photons from liver to lungs.....21
Fig. 3-7 Specific absorbed fractions of JM-103 for photons from thyroid to colon.....22
Fig. 3-8 Specific absorbed fractions of JM-103 for photons from thyroid to lungs.....22
Fig. 3-9 Directory structure of the SAF data contained in the attached CD-ROM.....24
Fig. 4-1 Comparison of specific absorbed fractions for electrons for self-absorption in liver between JM-103 and RCP-AM.....27
Fig. 4-2 Comparison of specific absorbed fractions for electrons for self-absorption in thyroid between JM-103 and RCP-AM.....28
Fig. 4-3 Comparison of specific absorbed fractions for photons for self-absorption in lungs between JM-103 and RCP-AM.....28
Fig. 4-4 Comparison of specific absorbed fractions for photons from pancreas to stomach wall between JM-103 and RCP-AM.....30
Fig. 4-5 Comparison of specific absorbed fractions for electrons from total body tissues to kidneys between JM-103 and RCP-AM.....30
Fig. 4-6 Comparison of specific absorbed fractions for photons from total body tissues to red bone marrow between JM-103 and RCP-AM.....31

List of Tables

Table 2-1 Characteristics of JM-103 and RCP-AM....4
Table 2-2 Comparison of masses of some organs and tissues between JM-103 and RCP-AM, and the average masses of adult Japanese male....4
Table 2-3 Source regions selected for calculation of specific absorbed fractions of JM-103 and their acronyms....6
Table 2-4 Masses and mass fractions of cortical and trabecular bone in each anatomical region of JM-103 and RCP-AM....9
Table 2-5 Allocation of cortical and trabecular bone to seven materials in cranium of JM-103....10
Table 2-6 Target organs selected for calculation of specific absorbed fractions of JM-103 and their acronyms....11
Table 3-1 Structure of records for data files of specific absorbed fraction of JM-103....25
Table A-1 List of organs and material IDs of JM-103....39
Table A-2 List of materials, their elemental compositions and densities of JM-103....41
Table A-3 Densities and mass fractions of hard bone and bone marrow of bone materials in JM-103....42
Table A-4 Mass of red bone marrow in JM-103....43
Table A-5 Mass of endosteum in JM-103....44
Table B-1 List of source regions selected for calculation of specific absorbed fractions of JM-103 and their organ ID numbers....46
Table B-2 List of target organs selected for calculation of specific absorbed fractions of JM-103 and their organ ID numbers....48
Table C-1 Source probability of cortical bone source of JM-103....50
Table C-2 Source probability of trabecular bone source of JM-103....51
Table C-3 Source probability of red bone marrow source of JM-103....52
Table C-4 Source probability of blood source of JM-103....53
Table C-5 Source probability of total body tissues source of JM-103....55
Table C-6 Source probability of soft tissues source of JM-103....57
Table D-1 Data and models used for calculation of dose coefficients for intakes of radionuclides in DCAL software....59

1　序論

国際放射線防護委員会（ICRP: International Commission on Radiological Protection）は、1990 年勧告[1)]において放射線防護のための指標として実効線量、等価線量等の防護量を定義し、2007 年勧告[2)]においても引き続き採用している。これらの防護量を用いて、放射線被ばくによる組織反応を回避し、確率的影響を容認できるレベル以下に制限するための線量限度が定められている。

放射性核種の体内への取込みに対する組織・臓器の平均吸収線量（以下、「臓器線量」と呼ぶ。）は、体内放射能分布と比吸収割合（SAF: Specific Absorbed Fraction）を組み合わせて算出される。体内放射能分布は、体内に取り込まれた放射性核種の挙動を表す体内動態モデルと、放射性核種の物理学的半減期データから計算される。SAF とは、線源となる組織・臓器及びその内容物（以下、「線源領域」と呼ぶ。）から放出された放射線のエネルギーのうち、標的となる組織・臓器（以下、「標的臓器」と呼ぶ。）に付与される割合（吸収割合、AF: Absorbed Fraction）を標的臓器の質量で除したものであり、人体の組織・臓器の形状・質量・材質を数値的に模擬したファントムを用いて計算される。

放射性核種は、その元素の種類や化学形に応じて、体内の種々の組織・臓器に分布する。そのため、任意の放射性核種について臓器線量を評価するためには、放射性核種が分布する線源領域と線量評価の対象となる標的臓器の組合せに対する網羅的な SAF データのセットが必要となる。このような SAF データの例として、米国オークリッジ国立研究所（ORNL: Oak Ridge National Laboratory）により MIRD（committee on Medical Internal Radiation Dose）型ファントム[3)]を用いて計算された光子 SAF[3, 4)]がある。この SAF データは、ICRP Publication 30[5)]及び 66[6)]に示された電子、α粒子等の非透過放射線に対する吸収割合データとともに、1990 年勧告に対応した線量係数[*1]の評価に利用された[7, 8)]。また、2007 年勧告において採用されることとなった成人男女の標準ファントム[9)]（RCP-AM: Reference Computational Phantom-Adult Male、RCP-AF: Reference Computational Phantom-Adult Female）を用いて評価された SAF データも、既にいくつか報告されている[10-12)]。ORNL の MIRD 型ファントムは ICRP Publication 23[13)]、RCP-AM 及び RCP-AF は ICRP Publication 89[14)]の標準人データに基づき構築されたファントムであり、いずれも標準的なコーカソイドの体格及び臓器質量（以下、これらをまとめて「身体的特性」と呼ぶ。）を備えている。SAF データは、その算出に使用するファントムの体格、組織・臓器の質量等に依存するため、これらのファントムにより評価された SAF、及びこれらの SAF に基づき評価された臓器線量は、コーカソイドの身体的特性が反映されたものとなる。

一般的に、成人日本人は、成人コーカソイドに比べ小柄であり、臓器質量も異なる[14, 15)]。このような解剖学的な特性の違いは SAF、ひいては臓器線量にも差を生じさせる可能性がある。そのため、両者の解剖学的な特性の違いに起因した内部被ばく線量評価上の差を予め定量的に評価し、把握することは、放射線防護の信頼性向上の観点から極めて重要である。

これまでに、成人日本人男性のファントムとして Otoko[16)]、Taro[17)]及び JM[18)]が、成人日本人女性のファントムとして Onago[19)]、Hanako[17)]及び JF[20)]が開発されている。これらのファントムは、ある個人

[*1] 線量係数とは、放射性核種を 1 Bq 摂取したときの等価線量又は実効線量である。

のコンピュータ断層撮影（CT: Computed Tomography）又は核磁気共鳴画像法（MRI: Magnetic Resonance Imaging）による医用断層画像データに基づいて、当該個人の組織・臓器の構造を正確に再現するように構築されているため、日本人の代表的な身体的特性を有していない。そこで、日本人の代表的な身体的特性を反映した線量評価での利用を目的として、成人日本人の平均的な身体的特性を有する、JM-103（男性）及び JF-103（女性）の 2 体のファントムが開発された[21]。JM-103 及び JF-103 は、身長及び体重が成人日本人の平均値[15]にほぼ一致し、骨以外の臓器質量は同平均値の±10%以内となるよう調整されていることから、JM-103 及び JF-103 を用いて評価された SAF は、成人日本人男女の平均的な身体的特性を反映したデータといえる[22]。著者らは、これらのファントムを用い、光子、電子、α粒子及び中性子に対する SAF を網羅的に評価し、成人日本人の平均的な身体的特性を反映した標準データセットとして整備することを計画している。

本報告書は、JM-103 の光子及び電子 SAF の計算方法を示すとともに、計算した SAF を添付の CD-ROM に収録して提供するものである。本データを用いることにより、α壊変核種、自発核分裂核種及びこれらを壊変系列に含む核種、並びに希ガス等のサブマージョン核種を除くすべての放射性核種の体内への取込みに対し、平均的な成人日本人男性の身体的特性を考慮した臓器線量を評価することが可能となった[23]。さらに、計算した JM-103 の SAF を、同じ条件で計算した RCP-AM の SAF と比較することにより、成人における日本人とコーカソイド間の身体的特性の違いが SAF に及ぼす影響について検討した結果も示す。

2　計算方法

2.1　ファントム

JM-103 及び RCP-AM の体格及びファントム構成に関する特徴を、Table 2-1 に示す。JM-103 の身長（171 cm）及び体重（65 kg）は、成人日本人男性の平均値[15]である 170 cm 及び 64 kg とほぼ一致しており、コーカソイドの標準値[14]と一致させた RCP-AM に比べ、いずれもやや小さい。ファントムを構成する微小な直方体であるボクセル（Voxel: volume pixel）のサイズは、垂直方向、水平方向ともに JM-103 の方が小さく、身体や臓器の形状がより精緻にモデル化されている。

JM-103 と RCP-AM について、代表的な組織・臓器の質量（以下、「臓器質量」と呼ぶ。）の比較、及び RCP-AM を基準とした両ファントムの臓器質量の差を、Table 2-2 に示す。また、成人日本人男性の臓器質量の平均値と、この値に対する JM-103 及び RCP-AM の臓器質量の比も併せて示す。Table 2-1 に示すように、JM-103 の身長は RCP-AM に対して 3%小さいのに対し、JM-103 の全身組織[*2]（total body tissues）の質量は RCP-AM に対し 11.4%小さい。この全身組織の質量の差は、主に脂肪組織の質量の差に由来している。なお、脂肪組織の質量の差は、日本人に比べコーカソイドの食生活における脂肪の摂取量が多いことが原因と考えられ、その結果としてコーカソイドの BMI（Body Mass Index）は、日本人と比較して高い傾向にある[24]。また、いずれのファントムも、体表面に位置する一列のボクセル層を表皮及び真皮からなる皮膚として定義している[9, 21]。成人男性における皮膚の平均的な厚さは約 1.6 mm[9]であるのに対し、JM-103 のボクセルの水平方向のサイズは 0.98 mm であるため、JM-103 の皮膚の質量は日本人平均値である 2.4 kg に対し 9%小さい。一方、RCP-AM のボクセルの水平方向のサイズは 2.137 mm であるため、RCP-AM の皮膚の質量はコーカソイドの標準値である 3.3 kg に対し 13%大きくなっている。そのため、両ファントム間の皮膚の質量の差は、他の組織・臓器と比較して大きく、41%となった。

結腸、膀胱及び肝臓の質量は、JM-103 の方が 10%以上小さい。一方、睾丸、脳及び骨組織については、JM-103 の方がやや質量が大きい。このような臓器質量の傾向は、骨組織を除き、日本人平均値[15]とコーカソイドの標準値[14]の大小関係をそのまま反映しており、人種間の特徴の違いを示しているといえる。骨組織については、JM-103 と RCP-AM における骨組織のモデル化手法の違いが原因である。RCP-AM の骨組織は、剖検に基づく質量データに一致するようにモデル化されている[9, 14]。これに対し、JM-103 の骨組織は、日本人の平均身長と体重にほぼ等しいボランティアの CT 画像データから、密度情報に基づき、画像処理により直接モデル化されているため、骨組織に付随する結合組織と骨組織周辺の軟組織が明確に区別されていない[21]。その結果、JM-103 の骨組織の方が RCP-AM に比べて、体格の割に少し重くなっている。

[*2] 全身組織とは、体全体から消化管内容物、胆嚢内容物及び膀胱内容物を除いたもの[9]である。

Table 2-1 Characteristics of JM-103[21] and RCP-AM[9]

Phantom name	JM-103	RCP-AM
Height (cm)	171	176
Weight (kg)	65	73
Number of tissue voxels	67,340,831	1,946,375
Voxel vertical height (mm)	1.0	8.0
Voxel horizontal length (mm)	0.98	2.137
Voxel volume (mm^3)	0.9604	36.54
Number of columns	491	254
Number of rows	267	127
Number of slices	1835	222
Organ segmentation	Applicable to w_T of the ICRP 2007 Recommendations[2]	

Table 2-2 Comparison of masses of some organs and tissues between JM-103[21] and RCP-AM[9], and the average masses of adult Japanese male[15]

Organ, tissue and content	Mass (kg)*		Difference† (%)	Average mass of adult Japanese male (kg)
	JM-103	RCP-AM		
Colon	0.326 (0.99)	0.370 (1.12)	−12.0	0.330
Lungs	1.215 (1.01)	1.208 (1.01)	0.6	1.200
Stomach	0.141 (1.01)	0.150 (1.07)	−6.1	0.140
Breasts	0.023 (1.05)	0.025 (1.14)	−8.9	0.022
Testes	0.036 (0.99)	0.035 (0.95)	4.2	0.037
Urinary bladder	0.039 (0.98)	0.050 (1.25)	−22.3	0.040
Oesophagus	0.036 (0.90)	0.040 (1.00)	−9.0	0.040
Liver	1.462 (0.91)	1.800 (1.13)	−18.8	1.600
Thyroid	0.020 (1.05)	0.020 (1.05)	0.8	0.019
Brain	1.529 (1.04)	1.450 (0.99)	5.5	1.470
Salivary glands	0.086 (1.05)	0.085 (1.04)	1.3	0.082
Skin	2.189 (0.91)	3.728 (1.55)	−41.3	2.400
Adipose tissue	14.192 (1.02)	20.473 (1.47)	−30.7	13.900
Bone tissues	11.082 (1.31)	10.305 (1.22)	7.5	8.445
Total body tissues‡	64.028 (−)	71.837 (−)	−11.4	−

* Values in parenthesis are ratios of masse of JM-103 or RCP-AM to average mass of Japanese adult male.

† The values of this column indicate the difference in masses between JM-103 and RCP-AM on the basis of the mass of RCP-AM.

‡ Total body tissues means whole body minus contents of alimentary tract, gall bladder and urinary bladder.

2.2 コードシステム及び計算条件

線源領域から放出された放射線が標的臓器に付与するエネルギー(以下、「沈着エネルギー」と呼ぶ。)を評価するための放射線輸送計算コードとして、放射性核種の摂取に対する臓器線量評価において考慮すべき粒子を全て輸送できる MCNPX 2.6.0[25]を採用した。MCNPX 2.6.0 に JM-103 を組み込み、光子及び電子の断面積ライブラリとしてそれぞれ mcplib04[26]及び el03[27]を用いて、光子及び電子の輸送計算を実施した。光子の輸送においては、物質との相互作用により生成する二次電子も輸送した。カットオフエネルギーは、光子、電子ともに 1 keV とした。二次粒子や制動放射の生成等に係るパラメータは、MCNPX 2.6.0 の規定値[25]とした。計算したエネルギー範囲及びエネルギー点の数は、ICRP Publication 110[9]及び Zankl らの SAF[10]を参考に、光子、電子ともに 10 keV から 10 MeV までの 25 点[*3]とした。

ヒストリー数は、SAF の大きさと臓器線量への寄与の関係を考慮し、計算した SAF が 5×10^{-5} kg^{-1} 以上の時に、その相対標準誤差が 5%以下となるよう設定した。これに対し、SAF が 5×10^{-5} kg^{-1} 未満の場合は臓器線量への寄与が小さいため、相対標準誤差については考慮しなかった。なお、ヒストリー数の設定にあたり SAF の基準を 5×10^{-5} kg^{-1} とした根拠は、付録 D において示す。

2.3 SAF の計算方法

2.3.1 線源領域の選定

SAF は、体内に取り込まれた放射性核種が分布する線源領域と、線量評価の対象となる標的臓器の組合せについて計算される。このうち、輸送計算における線源領域の選定は、放射性核種の体内分布を評価するためのモデル[5, 6, 28-38]を調査して行った。Table 2-3 に、選定した 67 の線源領域とその略称を示す。また、ファントムデータとして、各線源領域の指定に使用した臓器 ID を付録 B に示す。

[*3] 0.01、0.015、0.02、0.03、0.04、0.05、0.06、0.08、0.1、0.15、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.8、1、1.5、2、3、4、5、6、8、10 MeV の 25 点。

Table 2-3 Source regions selected for calculation of specific absorbed fractions of JM-103 and their acronyms

Source region	Acronym
Oral cavity	O-cavity
Oral mucosa	O-mucosa
Teeth surface	Teeth-S
Teeth volume	Teeth-V
Oesophagus fast	Oesophag-f
Oesophagus slow	Oesophag-s
Oesophagus wall	Oesophagus
Stomach content	St-cont
Stomach wall	St-wall
Small intestine content	SI-cont
Small intestine wall	SI-wall
Small intestine villi	SI-villi
Right colon content	RC-cont
Right colon wall	RC-wall
Left colon content	LC-cont
Left colon wall	LC-wall
Recto-sigmoid colon content	RSig-cont
Recto-sigmoid colon wall	RSig-wall
Surface of anterior nasal passages	ET1-sur
Surface of posterior nasal passages + pharynx (ET2)	ET2-sur
Bound ET2 region	ET2-bnd
Sequestered ET2 region	ET2-seq
Lymphatic nodes in extrathoracic region	LN-ET
Bronchi	Bronchi
Bronchi fast	Bronchi-f
Bronchi slow	Bronchi-s
Bronchi bound	Bronchi-b
Bronchi sequestered	Bronchi-q
Bronchioles	Bronchiole
Bronchioles fast	Brchiole-f
Bronchioles slow	Brchiole-s
Bronchioles bound	Brchiole-b
Bronchioles sequestered	Brchiole-q
Alveolar interstitium	AI
Lymphatic nodes in thoracic region	LN-Th

Source region	Acronym
Adrenals	Adrenals
Blood	Blood
Cortical bone surface	C-bone-S
Cortical bone volume	C-bone-V
Trabecular bone surface	T-bone-S
Trabecular bone volume	T-bone-V
Red bone marrow	R-marrow
Brain	Brain
Breast	Breast
Cartilage	Cartilage
Gall bladder content	GB-cont
Gall bladder wall	GB-wall
Heart content	Ht-cont
Heart wall	Ht-wall
Kidneys	Kidneys
Liver	Liver
Lungs	Lungs
Lymphatic nodes	Lymph
Muscle	Muscle
Pancreas	Pancreas
Prostate	Prostate
Salivary glands	S-glands
Skin	Skin
Spleen	Spleen
Testes	Testes
Thymus	Thymus
Thyroid	Thyroid
Urinary bladder content	UB-cont
Urinary bladder wall	UB-wall
Adipose tissue	Adipose
Total body tissues (whole body minus contents of alimentary tract, gall bladder and urinary bladder)	T-body
Soft tissues (T-body minus mineral bone)	S-tissue

2.3.2 線源発生確率の計算

光子及び電子の線源は、Zankl ら [10]、Patni ら [11]等と同様に、線源の質量に応じて分配した。本研究では、臓器 ID を基に線源領域を構成するボクセルの座標を指定し、MCNPX 2.6.0 の Source Probability カード [25]を使用して座標毎に線源発生確率を設定することにより、各ボクセルにおいて発生させる光子又は電子の数の割合を指定した。なお、線源発生確率は、総和が 1 となるよう規格化した。線源領域を構成する、臓器 ID が i のボクセルに対する線源発生確率 SP_i は、次式により計算した。

$$\mathrm{SP}_i = \frac{m_i}{m_{\mathrm{Total}}} \frac{1}{n_i} \tag{2-1}$$

ここで、m_i (g) は臓器 ID が i のボクセルに含まれる線源の質量、m_{Total} (g)は線源の総質量、n_i は臓器 ID が i のボクセルの数である。m_i 及び m_{Total} は、次式により計算した。

$$m_i = \rho_i V n_i w_i \tag{2-2}$$

$$\begin{aligned} m_{\mathrm{Total}} &= \sum_{j=1}^{N_{\mathrm{ID}}} m_j \\ &= V \sum_{j=1}^{N_{\mathrm{ID}}} \rho_j n_j w_j \end{aligned} \tag{2-3}$$

ここで、ρ_i (g cm^{-3})は臓器 ID が i のボクセルの密度、V (cm^3)はボクセル 1 個の体積で 9.604×10^{-4} cm^3、w_i (g g^{-1})は臓器 ID が i のボクセルにおける線源の質量分率、N_{ID} は線源領域の指定に用いる臓器 ID の数である。以下に、線源領域毎に、具体的な線源発生確率の計算方法を示す。なお、単一材質以外の線源に対する線源発生確率の計算結果は、付録 C にまとめた。

(1) 単一材質線源

線源領域が単一の臓器 ID により指定される場合（例：肝臓、甲状腺等）、又は線源が単一材質で構成され、かつ線源の質量分率がすべて共通の場合（例：肺、脂肪組織等）は、式(2-2)及び式(2-3)における ρ_i 及び w_i が i に依らず一定の値となり、式(2-1)は次式のようになる。

$$\mathrm{SP}_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^{N_{\mathrm{ID}}} n_j} \tag{2-4}$$

ここで、$\sum_{j=1}^{N_{\mathrm{ID}}} n_j$ は線源領域となる臓器 ID を持つボクセルの総数である。そこで、単一材質線源に対する線源発生確率は、線源領域となるボクセルの総数の逆数とした。

(2) 皮質骨及び梁骨線源

内部被ばく線量評価に用いられる体内動態モデルでは、骨組織内で放射性核種が分布する領域とし

て、皮質骨及び梁骨の表面と体積を区別している[5, 28-34, 37, 38]。一方、RCP-AM を用いた SAF 評価では、体積線源で計算した SAF を表面線源に対しても適用する[9]。また、JM-103 の骨組織は、20 個の解剖学的部位（以下、「部位」と呼ぶ。）がそれぞれ 7 種類の硬骨・骨髄混合物に区分されている。つまり、140 種類の臓器 ID が骨組織を構成するボクセルに割り当てられているが、表面と体積は区分されていない[21]（Table A-1 参照）。そこで、本研究においても、表面線源と体積線源を区別せず、体積線源で計算した SAF を表面線源に対して適用した。

線源発生確率を計算するためには、臓器 ID 毎の皮質骨及び梁骨の質量が必要となる。まず、7 種類の硬骨・骨髄混合物の密度、及び硬骨と骨髄の質量分率（Table A-3 参照）を基に、部位毎の硬骨の質量を求めた。続いて、硬骨を皮質骨と梁骨に区分した。硬骨に対する皮質骨と梁骨の質量分率は部位により異なるが、日本人に対するデータが存在しないため、RCP-AM と同様とした。ただし、RCP-AM においては舌骨（Os hyoideum）が区分されていないため、JM-103 の舌骨における皮質骨及び梁骨の質量分率は、RCP-AM の全硬骨における皮質骨及び梁骨の総質量の比とした。Table 2-4 に、RCP-AM における部位毎の皮質骨と梁骨の質量及び質量分率、並びに JM-103 における部位毎の皮質骨と梁骨の質量の計算結果を示す。この計算結果を基に、各部位について 7 種類の材質毎に皮質骨及び梁骨を分配した。皮質骨は梁骨に比べ組織が密であり、比重が大きいことから、大きな密度を有する材質番号が付与されているボクセルから順に割り当てた。例として、頭蓋（Cranium）における皮質骨と梁骨の割当てを、Table 2-5 に示す。以上の方法により算出した 140 種類の臓器 ID 毎の皮質骨及び梁骨の質量を基に、式(2-1)により線源発生確率を計算した。

Table 2-4 Masses and mass fractions of cortical and trabecular bone in each anatomical region of JM-103 and RCP-AM

Anatomical region	Mass in RCP-AM (g)		Mass fraction		Mass in JM-103 (g)	
	Cortical bone	Trabecular bone	Cortical bone	Trabecular bone	Cortical bone	Trabecular bone
Cranium	562.85	224.18	0.715	0.285	773.75	308.18
Mandible	76.12	50.03	0.603	0.397	79.78	52.43
Cervical vertebra	102.92	9.34	0.917	0.083	134.04	12.17
Thoracic vertebra	286.58	69.75	0.804	0.196	315.20	76.72
Lumbar vertebra	186.19	99.38	0.652	0.348	221.87	118.42
Sacrum	109.23	10.41	0.913	0.087	128.02	12.20
Clavicles	47.78	25.63	0.651	0.349	51.98	27.88
Scapulae	221.13	108.60	0.671	0.329	142.93	70.20
Sternum	9.89	5.24	0.654	0.346	39.27	20.79
Ribs	365.16	254.31	0.589	0.411	324.62	226.08
Os coxae	398.62	264.30	0.601	0.399	388.35	257.49
Humeri upper	135.26	114.61	0.541	0.459	104.49	88.54
Humeri lower	128.03	23.89	0.843	0.157	177.92	33.20
Forearm	270.80	72.76	0.788	0.212	205.28	55.16
Wrist, hand	179.74	55.84	0.763	0.237	115.22	35.79
Femora upper	261.68	195.90	0.572	0.428	287.62	215.32
Femora lower	294.09	175.43	0.626	0.374	377.37	225.11
Tibiae, fibulae, patellae	531.35	291.75	0.646	0.354	669.00	367.33
Ankle, foot	232.56	203.11	0.534	0.466	299.74	261.79
Os hyoideum	−	−	0.661*	0.339*	1.79	0.92

* Os hyoideum is not segmented in RCP-AM. These values are the ratio of the total mass of cortical and trabecular bone to the total mass of hard bone of RCP-AM.

Table 2-5 Allocation of cortical and trabecular bone to seven materials in cranium of JM-103

Material ID	Density (g cm^{-3})	Total mass (g)		Mass (g)		
		Cortical bone	Trabecular bone	Hard bone	Cortical bone	Trabecular bone
m11	1.155	773.75	308.18	13.54	0.00	13.54
m12	1.254			22.42	0.00	22.42
m13	1.318			72.11	0.00	72.11
m14	1.388			125.84	0.00	125.84
m15	1.494			141.72	67.45	74.27
m16	1.641			285.87	285.87	0.00
m17	1.765			420.43	420.43	0.00

(3) 赤色骨髄線源

骨組織を構成するボクセルに割り当てられた臓器 ID 毎の赤色骨髄の質量分率データ [21]を用いて、臓器 ID 毎の赤色骨髄の質量を計算した。付録 A に、JM-103 の臓器 ID 毎の赤色骨髄の質量データを示す。この赤色骨髄の質量を用いて、式(2-1)により線源発生確率を計算し、線源を設定した。

(4) 血液線源

血液は、心臓、大動脈及び大静脈の各内容物だけでなく、全身の各組織・臓器にある割合で含まれる。しかし、成人日本人に対する組織・臓器毎の血液含有率を網羅的に示したデータは存在しない。そこで、心臓、大動脈及び大静脈の各内容物は w_i を 1 とし、全身の各組織・臓器については RCP-AM の組織別血液質量分率データ [9]を基に w_i を与え、式(2-1)から式(2-3)により線源発生確率を計算し、線源を設定した。

(5) 全身組織線源

ICRP は、消化管、胆嚢及び膀胱の各内容物を除いたすべての組織・臓器を全身組織として定義している [9]。本研究でも、この定義に従った。すべての臓器 ID に対して w_i を 1 とし、式(2-1)から式(2-3)により、全身組織線源に対する線源発生確率を計算した。

(6) 軟組織線源

ICRP は、全身組織から硬骨を除いた組織を、軟組織として定義している [9]。したがって、骨組織のうち骨髄は軟組織である [9]。本研究でも、この定義に従った。臓器 ID が 120 から 316 である骨組織については、骨髄の質量分率（Table A-3 参照）を w_i とし、その他の組織については w_i を 1 として式(2-1)から式(2-3)より線源発生確率を計算した。

2.3.3 標的臓器の選定

2007 年勧告で組織加重係数が適用される組織・臓器を中心に、標的臓器を選定した。なお、2007 年勧告に対応した線量評価において、結腸の等価線量は右結腸、左結腸及び直腸・S 状結腸の各等価線量の質量加重平均とされているため[36]、結腸の各部位を個別に標的臓器とした SAF も評価した。また、肺の等価線量は気管支領域、細気管支領域及び肺胞・間質領域の、胸郭外領域の等価線量は前鼻道及び後鼻道の各等価線量に、各領域・組織の放射線感受性を考慮した係数を乗じて総和することにより算出する方法が採用される見込みである[36]。そこで、各領域を個別に標的臓器として SAF を計算した。なお、気管支領域の基底細胞及び分泌細胞、並びに細気管支領域の分泌細胞及び肺胞・間質領域は、約 1 mm 角のボクセルで構築された JM-103 では区別できないため、それぞれ共通のボクセルを標的臓器とした。SAF を評価した 41 の標的臓器を、略称とともに Table 2-6 に示す。

Table 2-6 Target organs selected for calculation of specific absorbed fractions of JM-103 and their acronyms

Target organ	Acronym	Target organ	Acronym
Red bone marrow	R-marrow	Pancreas	Pancreas
Colon wall	Colon	Prostate	Prostate
Lungs	Lungs	Small intestine wall	SI-wall
Stomach wall	St-wall	Spleen	Spleen
Breast	Breast	Thymus	Thymus
Testes	Testes	Right colon wall	RC-wall
Urinary bladder wall	UB-wall	Left colon wall	LC-wall
Oesophagus	Oesophagus	Recto-sigmoid colon wall	RSig-wall
Liver	Liver	Basal cells of bronchi	Bronchi-bas
Thyroid	Thyroid	Secretory cells of bronchi	Bronchi-sec
Endosteum	Endost-BS	Secretory cells of bronchioles	Brchiol-sec
Brain	Brain	Alveolar interstitium	AI
Salivary glands	S-glands	Basal cells of anterior nasal passages	ET1-bas
Skin	Skin	Basal cells of posterior nasal passages + pharynx	ET2-bas
Adrenals	Adrenals		
Extrathoracic region	ET	Lymphatic nodes in thoracic region	LN-Th
Gall bladder wall	GB-wall	Lymphatic nodes in extrathoracic region	LN-ET
Heart wall	Ht-wall		
Kidneys	Kidneys	Lenses of eye	Eye-lens
Lymphatic nodes	Lymph	Tongue	Tongue
Muscle	Muscle	Adipose tissue	Adipose
Oral mucosa	O-mucosa		

2.3.4 タリーの設定及び沈着エネルギーの評価

本研究では、標的臓器に沈着したエネルギーを評価するにあたり、指定した臓器 ID を持つボクセルで平均化された質量当たりの沈着エネルギー(DEPM: Deposited Energy Per Mass)を出力する F6 タリー[25]を用いた。タリーの設定に使用した臓器 ID は、付録 B に示す。

ただし、JM-103 の骨は硬骨と骨髄の混合物であるため、赤色骨髄と骨内膜については、沈着エネルギーを直接評価することはできない。そこで、電子を輸送する場合の赤色骨髄及び骨内膜への沈着エネルギーは、混合物に対する沈着エネルギーに赤色骨髄及び骨内膜の質量分率を乗じる方法[39]（以下、「質量分配法」と呼ぶ。）を採用した。具体的には、140 の臓器 ID 毎に F6 タリーを設定して混合物に対する DEPM を評価し、次式のように臓器 ID 毎の赤色骨髄及び骨内膜質量を乗じて総和することにより、赤色骨髄及び骨内膜への沈着エネルギーE_{dep} (MeV)を計算した。

$$E_{\mathrm{dep}} = \sum_{i=1}^{140} \mathrm{DEPM}_i \, m_i \tag{2-5}$$

ここで、DEPM_i (MeV g^{-1})は臓器 ID が i のボクセルに対する DEPM（輸送計算により評価された量）、m_i (g)は臓器 ID が i のボクセルに含まれる赤色骨髄又は骨内膜の質量である。なお、成人日本人に対する部位毎の骨内膜質量データは報告されていない。そこで、JM-103 の骨内膜質量は、RCP-AM の骨内膜質量データ[9]から全骨組織に占める骨内膜の質量分率、及び骨内膜の部位別存在比を算出し、これらを JM-103 に適用して算出した。JM-103 の骨内膜質量の詳細な計算方法及び計算結果は、付録 A に示す。

光子を輸送する場合の赤色骨髄及び骨内膜への沈着エネルギーの計算としては、電子と同様に質量分配法を利用する方法と、混合物中の光子フルエンスと質量エネルギー吸収係数（μ_{en}/ρ）を用いて計算する方法[3]（以下、「吸収係数法」と呼ぶ。）がある。ただし、数 100 keV 以下のエネルギーの光子に対しては、硬骨に比べ軟組織（赤色骨髄、骨内膜）の反応断面積が小さいため、質量分配法は、赤色骨髄及び骨内膜への E_{dep} を過大評価する[39]。これに対し、吸収係数法は、光子のエネルギーが数 MeV 以上の場合は荷電粒子平衡が成り立たず、赤色骨髄及び骨内膜への E_{dep} を過大評価する[40]。そこで、JM-103 を用いて、これら二つの方法による皮質骨表面から赤色骨髄及び骨内膜への光子の E_{dep} の計算結果を比較し、本研究で採用する計算方法を決定することとした。吸収係数法で使用する JM-103 の赤色骨髄及び骨内膜に対するμ_{en}/ρは、Hubbell らによる元素毎の質量エネルギー吸収係数データ[41]から導出した。ここで、赤色骨髄の元素組成比は、黄色骨髄と同じであると仮定し、硬骨と骨髄の混合物の材質データ[21]から算出した。また、骨内膜の元素組成比は、軟組織と同じであると仮定した。Fig. 2-1 に、導出した JM-103 の赤色骨髄、骨内膜及び硬骨に対するμ_{en}/ρを示す。硬骨と赤色骨髄、硬骨と骨内膜のμ_{en}/ρの違いは、いずれも約 30 keV で最大となり、それぞれ約 10 倍及び 7 倍となった。

二つの方法で皮質骨表面から赤色骨髄への E_{dep} を計算し、比較した結果を Fig. 2-2 に示す。100 keV 以下のエネルギーについては、質量分配法で計算した E_{dep} は吸収係数法による値の 2 倍から 7 倍となった。これは、Fig. 2-1 に示すように、100 keV 以下のエネルギーにおける硬骨と赤色骨髄のμ_{en}/ρの大きな差が原因である。また、エネルギーが 1 MeV 以上の場合は、荷電粒子平衡が成立しないため、吸

収係数法による E_{dep} は質量分配法の値に比べて 3.9%から 19%大きくなった。一方、500 keV から 800 keV のエネルギー範囲では、両者の E_{dep} の違いは 1.4%以内とよく一致した。Fig. 2-3 に示す皮質骨表面から骨内膜への E_{dep} についても、皮質骨表面から赤色骨髄への E_{dep} と同様の傾向であった。すなわち、100 keV 以下のエネルギーに対しては、質量分配法による骨内膜の E_{dep} は吸収係数法による値の 2 倍から 6 倍であり、1 MeV 以上のエネルギーにおいては、吸収係数法による骨内膜の E_{dep} は質量分配法の値に比べて 7.8%から 50%大きくなった。

以上の検討結果から、本研究では、1 MeV 未満の光子については吸収係数法で、1 MeV 以上の光子については質量分配法を用いて赤色骨髄及び骨内膜への E_{dep} を評価することとした。なお、吸収係数法により E_{dep} を計算する場合は、140 の臓器 ID 毎に F4 タリー[25]を設定して光子フルエンスを取得し、次の計算式により赤色骨髄及び骨内膜の E_{dep} を求めた。

$$E_{\mathrm{dep}} = \sum_{i=1}^{140} m_i \int_0^{E_{\mathrm{p}}} \Phi_i(E) \frac{\mu_{\mathrm{en}}(E)}{\rho} E \, \mathrm{d}E \tag{2-6}$$

ここで、E_{p} (MeV)は発生させた光子のエネルギー、$\Phi_i(E)$ (m^{-2})はエネルギーE (MeV)の光子のフルエンス、$\mu_{\mathrm{en}}(E)/\rho$ ($\mathrm{m}^2\ \mathrm{kg}^{-1}$)は赤色骨髄及び骨内膜に対する質量エネルギー吸収係数のエネルギー関数である。発生させる光子のエネルギーが 1 MeV 以上のときは、電子と同様に式(2-5)により E_{dep} を計算した。

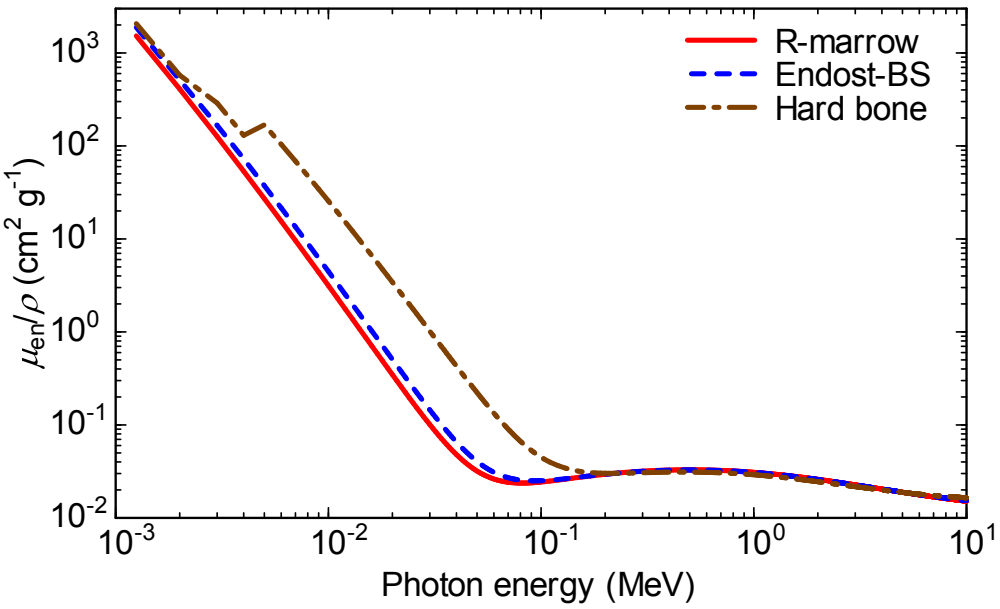

Fig. 2-1 Mass energy-absorption coefficients (μ_{en}/ρ) for red bone marrow (R-marrow), endosteum (Endost-BS) and hard bone used for calculating specific absorbed fractions of JM-103

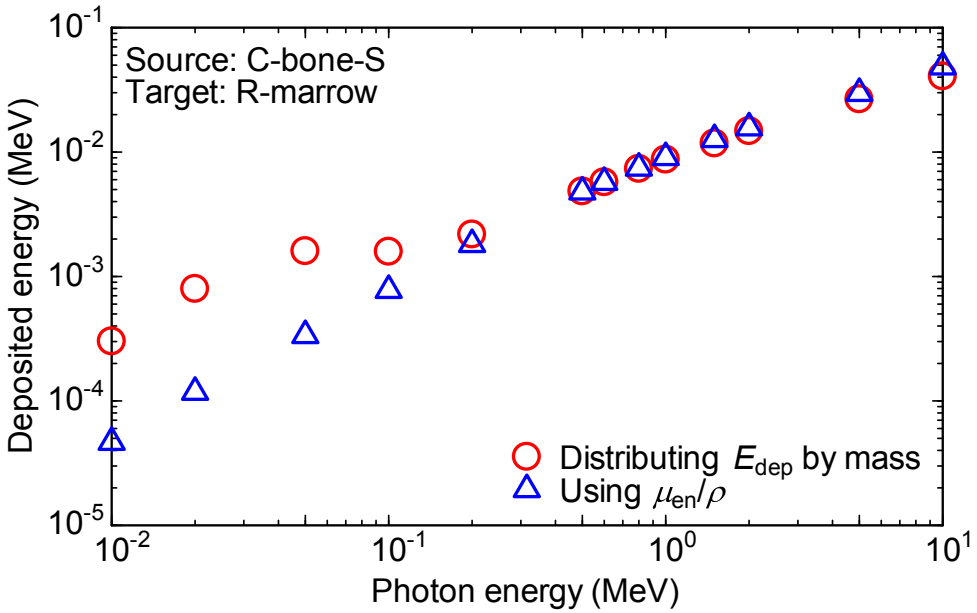

Fig. 2-2 Deposited energies of photons from cortical bone surface (C-bone-S) to red bone marrow (R-marrow) of JM-103 calculated by two methods

Open circles indicate the results calculated by distributing deposited energy in a mixture of bone tissues (E_{dep}) by mass, and open triangles indicate the results calculated using mass energy-absorption coefficients (μ_{en}/ρ).

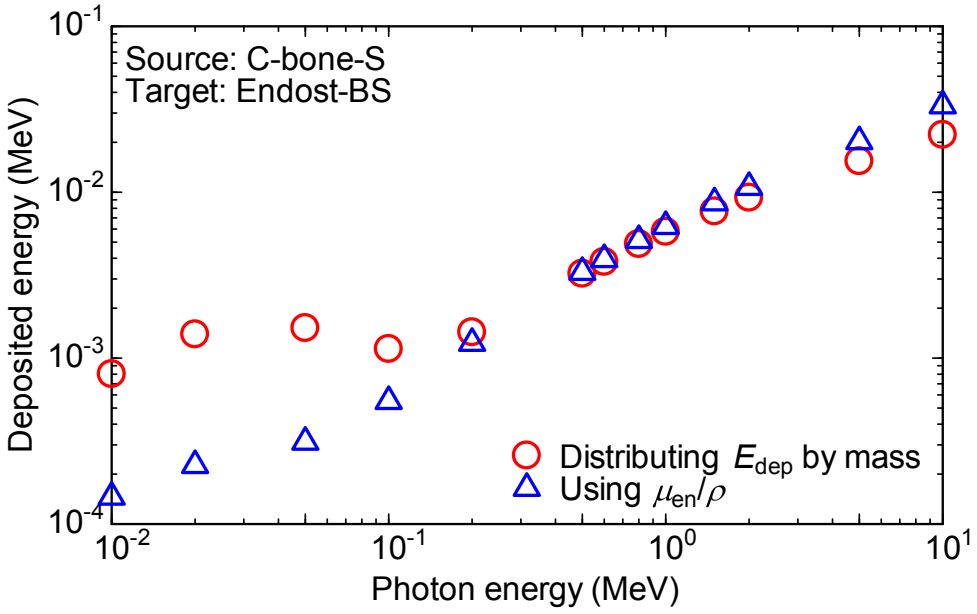

Fig. 2-3 Deposited energies of photons from cortical bone surface (C-bone-S) to endosteum (Endost-BS) of JM-103 calculated by two methods

Open circles indicate the results obtained by distributing deposited energy in a mixture of bone tissues (E_{dep}) by mass, and open triangles indicate the results obtained using mass energy-absorption coefficients (μ_{en}/ρ).

2.3.5 沈着エネルギーから SAF への変換

SAF は、線源領域から放出された放射線のエネルギーのうち標的臓器に吸収された割合（吸収割合）を標的臓器の質量で除したものであり、単位は kg^{-1} である。赤色骨髄及び骨内膜以外の標的臓器に対する SAF (kg^{-1})は、輸送計算により評価した DEPM (MeV g^{-1})から次のように計算した。

$$\mathrm{SAF(T \leftarrow S)} = \frac{\mathrm{DEPM_T}}{E_{\mathrm{rad}}} \times 1000 \tag{2-7}$$

ここで、SAF(T←S) (kg^{-1})は線源領域 S から標的臓器 T への比吸収割合、$DEPM_T$ (MeV g^{-1})は T の質量あたりの E_{dep}、E_{rad} (MeV)は発生させた光子又は電子のエネルギーである。赤色骨髄及び骨内膜への SAF は、式(2-5)又は式(2-6)で得た E_{dep}、及び式(2-3)で得た m_{Total} を用いて次のように計算した。

$$\mathrm{SAF(T \leftarrow S)} = \frac{E_{\mathrm{dep}}}{E_{\mathrm{rad}}} \frac{1}{m_{\mathrm{Total}}} \tag{2-8}$$

2.3.6 微細構造領域における電子 SAF

ヒト呼吸気道モデル [6]（HRTM : Human Respiratory Tract Model）では、呼吸気道領域における電子 SAF は、がんリスクを考慮すべき基底細胞の核を標的とし、厚さが数μm から数 10 μm の層状の幾何学モデルを用いて計算される。また、ヒト消化管モデル [35]（HATM: Human Alimentary Tract Model）では、消化管内容物から壁への電子 SAF は、消化管壁表面から数 100 μm の深さにある幹細胞を標的とした幾何学モデルを用いて計算される。さらに、骨領域については、マイクロ CT 画像に基づく 30 μm の解像度を持つ緻密な骨ファントムを用いて計算された電子 SAF が Hough ら [42]により報告されており、今後 ICRP が整備する 2007 年勧告に基づく線量係数の計算において採用される見込みである [36]。

JM-103 ファントムの解像度は約 1 mm であり、上記のような微細な構造はモデル化されていないため、細胞核や幹細胞を標的とした SAF は評価できない。一方、HRTM は、全ての人種に適用できるような幾何学モデルとして開発されている [6]。また、HATM の SAF を計算するためのモデルも、HRTM と同様に幾何学的モデルである [35]。骨の微細構造 [43]については、人種間で大きな違いはないと考えられる。そのため、日本人の体格・臓器質量特性を考慮した内部被ばく線量評価においても、これらの微細構造領域における電子 SAF として、HRTM、HATM 及び Hough らのデータを適用することが妥当であると考えられる。

以上の検討から、呼吸気道領域、消化管領域及び骨領域内の電子 SAF については、日本人の身体的特性を考慮した評価は不要と判断した。

2.4 計算方法の妥当性確認

JM-103 を用いて計算した SAF の信頼性を保証するため、ファントムの輸送計算コードへの組込み手法及び線源設定方法の妥当性を確認した。

まず、RCP-AM を MCNPX 2.6.0 に組み込んで光子 SAF を評価し、同じコードで評価された Ocampo らの報告値[12]と比較することにより、ボクセルファントムの MCNPX 2.6.0 への組込み手法及び線源設定方法に対する妥当性確認を行った。

さらに、本研究で MCNPX 2.6.0 により評価した JM-103 の SAF を、電磁カスケードモンテカルロコード EGS4[44]に、そのユーザーコードである UCSAF[45, 46]を組み合わせて計算した結果[21]と比較した。これにより、RCP-AM の約 30 倍の解像度を持つ JM-103 に対する、本組込み手法の適用性を確認した。

3 結果

3.1 妥当性確認の結果

3.1.1 ファントム組込み手法及び線源設定方法

肝臓及び甲状腺を線源領域、結腸及び肺を標的臓器とした 4 種の線源-標的組合せについて、本研究により得られた SAF と Ocampo らによる RCP-AM の SAF[12)]を比較した結果を、Fig. 3-1 から Fig. 3-4 に示す。肝臓は遷移元素を中心に多くの核種が集積し、甲状腺はヨウ素が集積するため、線源領域に選定した。また、結腸及び肺は、2007 年勧告において最大の組織加重係数（0.12）が適用される組織・臓器から選定した。以下、線源領域及び標的臓器の組合せを特定した SAF は、Table 2-3 及び Table 2-6 に示した略称を用いて SAF(Colon←Liver)の様に記す。また、本研究における計算結果と Ocampo らの SAF の差 d_{SAF} (%)は、次式のように定義した。

$$d_{\mathrm{SAF}} = \left(\mathrm{SAF}_{\mathrm{this_work}} / \mathrm{SAF}_{\mathrm{reference}} - 1\right) \times 100 \tag{3-1}$$

ここで、$\mathrm{SAF}_{\mathrm{this_work}}$ (kg^{-1})は本研究における SAF の計算結果、$\mathrm{SAF}_{\mathrm{reference}}$ (kg^{-1})は参照した SAF の値である。

Fig. 3-1 及び Fig. 3-2 にそれぞれ示す SAF(Colon←Liver)及び SAF(Lungs←Liver)については、すべてのエネルギーにおいて d_{SAF} は数%の範囲であり、よく一致した。これに対し、Fig. 3-3 に示す SAF(Colon←Thyroid)では、50 keV 以上における d_{SAF} は−2.6%から 0.8%の範囲であったが、30 keV における d_{SAF} は−17%であった。著者らと Ocampo らが使用した輸送計算コードは MCNPX 2.6.0 で共通であるが、本研究ではカーマ近似及び分散低減法を使用していないのに対し、Ocampo らはカーマ近似を使用し、線源領域と標的臓器が離れている場合は分散低減法も使用している[12)]。エネルギーが 30 keV の場合は、標的臓器と周辺臓器において荷電粒子平衡が成立していると考えられるため、SAF の差はカーマ近似の有無によるものではないと推察される。これに対し、分散低減法の利用は、設定するパラメータにより計算結果に影響を及ぼす可能性がある[47)]。したがって、本研究の計算結果と Ocampo らの報告値との差は、分散低減法の適用の有無が原因と考えられる。なお、Fig. 3-4 に示す SAF(Lungs←Thyroid)では、10 keV における d_{SAF} は 15%と大きかった。これは、SAF(Colon←Thyroid)の 30 keV の場合と同様に、Ocampo らが分散低減法を使用したことにより差が大きくなったものと考えられる。ただし、15 keV 以上における d_{SAF} は−0.2%から 1.8%以内であり、両者はよく一致した。

以上のように、甲状腺を線源として低エネルギー光子を放出した条件では、分散低減法の使用の有無の違いにより、本研究の計算結果と Ocampo らの報告値に差が確認されたが、50 keV 以上の光子についてはほぼ一致することが確認された。そのため、本研究における MCNPX 2.6.0 でのファントムの組込み手法及び線源設定方法は、いずれも妥当であると考えられる。

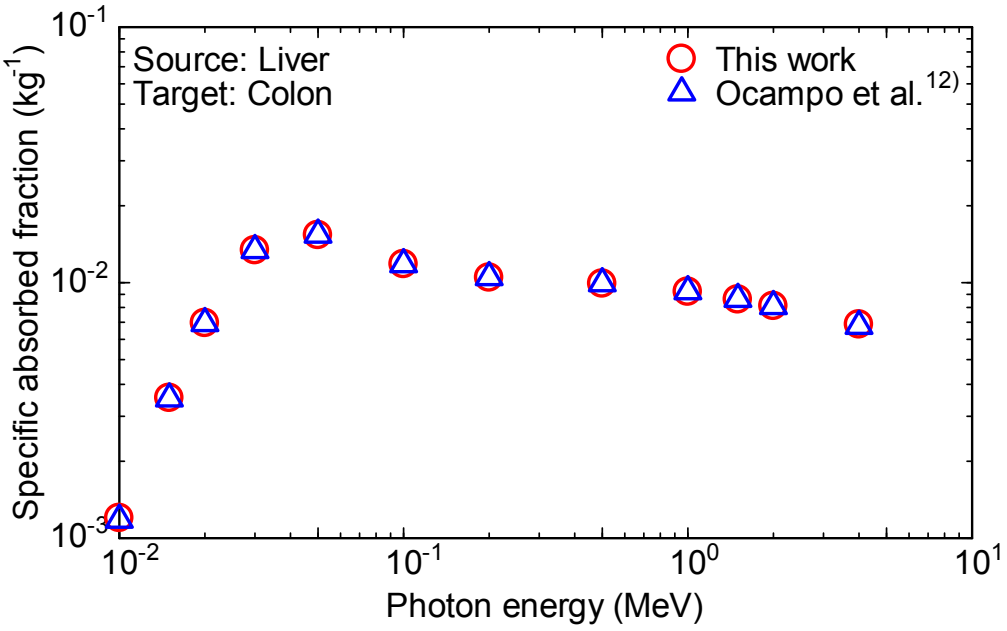

Fig. 3-1 Specific absorbed fractions (SAFs) of RCP-AM for photons from liver to colon

Open circles indicate the SAFs calculated in this work, and open triangles indicate the SAFs reported by Ocampo et al.[12)]

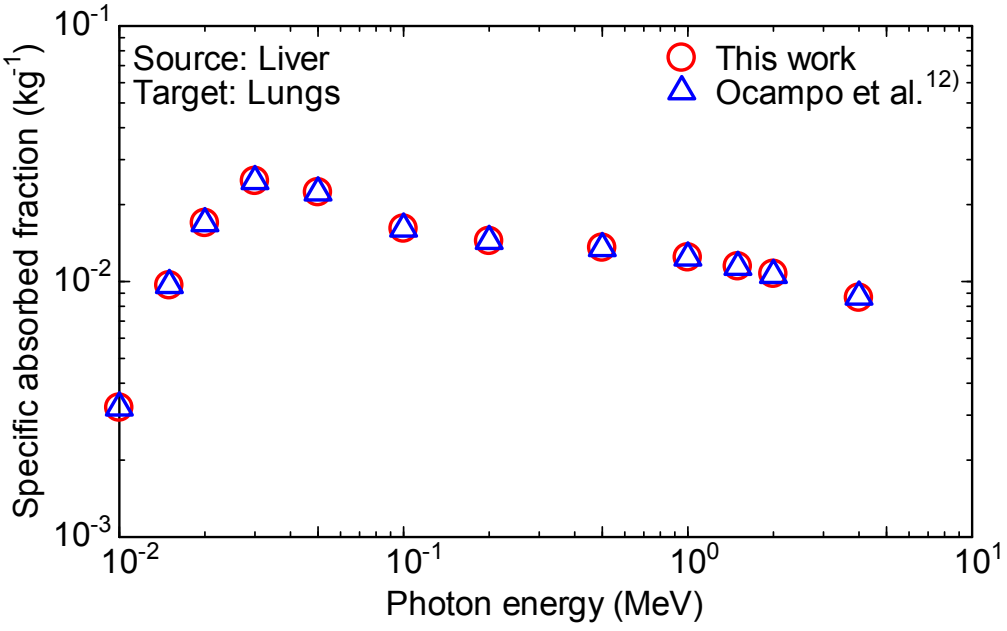

Fig. 3-2 Specific absorbed fractions (SAFs) of RCP-AM for photons from liver to lungs

Open circles indicate the SAFs calculated in this work, and open triangles indicate the SAFs reported by Ocampo et al.[12)]

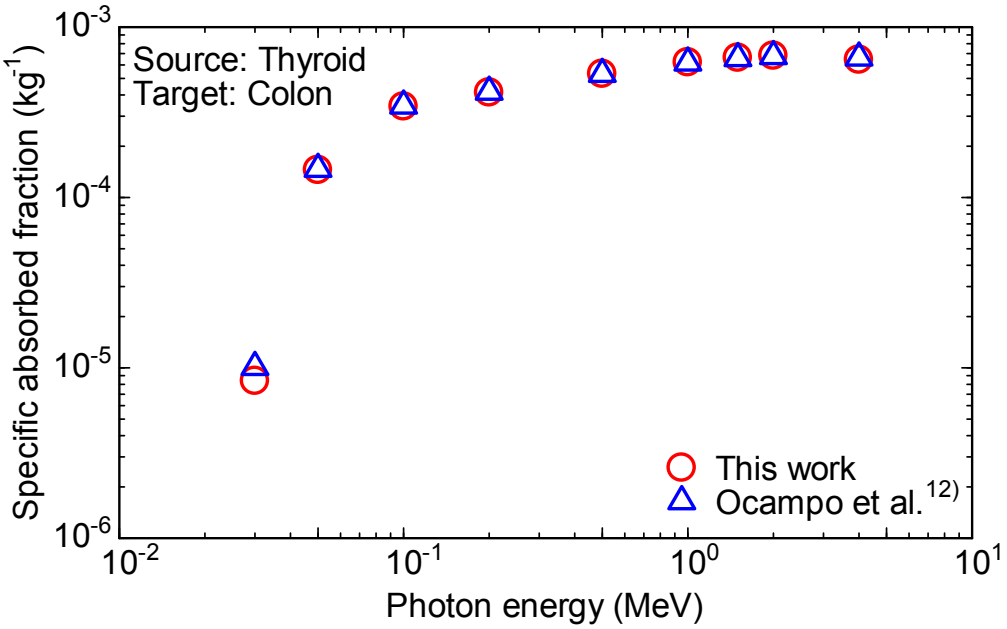

Fig. 3-3 Specific absorbed fractions (SAFs) of RCP-AM for photons from thyroid to colon

Open circles indicate the SAFs calculated in this work, and open triangles indicate the SAFs reported by Ocampo et al.[12)]

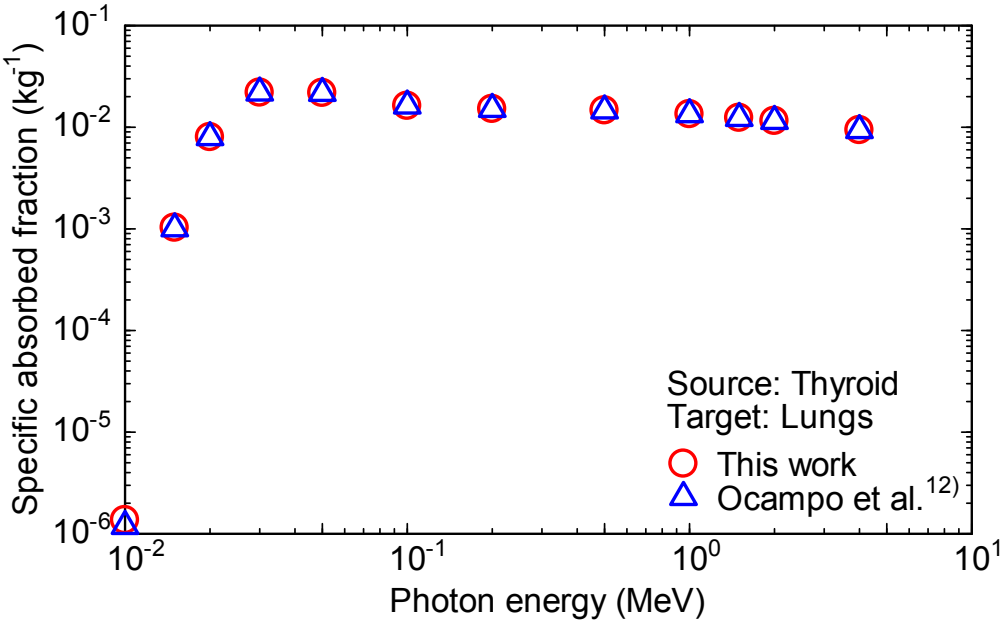

Fig. 3-4 Specific absorbed fractions (SAFs) of RCP-AM for photons from thyroid to lungs

Open circles indicate the SAFs calculated in this work, and open triangles indicate the SAFs reported by Ocampo et al.[12)]

3.1.2 ファントム組込み手法の JM-103 への適用

Fig. 3-5 から Fig. 3-8 に、MCNPX 2.6.0 を用いた本研究における JM-103 の SAF の計算結果と、UCSAF を組み合わせた EGS4 により計算された SAF の比較を示す。線源領域と標的臓器の組合せは、3.1.1 項と同様に、線源領域は肝臓及び甲状腺、標的臓器は結腸及び肺とした。

Fig. 3-5 に示した SAF(Colon←Liver)については、すべてのエネルギーにおいて d_{SAF} は−0.4%から 0.5%の範囲内であった。また、Fig. 3-6 に示した SAF(Lungs←Liver)については、d_{SAF} は−1.7%から−0.9%の範囲内であった。これらの SAF については、本研究における計算結果と、UCSAF を組み合わせた EGS4 による計算結果は、すべてのエネルギーおいてよく一致した。Fig. 3-7 に示した SAF(Colon←Thyroid)では、30 keV から 1 MeV については d_{SAF} は−1.2%から 7.6%の範囲であり、線源と標的がやや離れた組合せについても、両者の計算結果はよく一致しているといえる。Fig. 3-8 に示した SAF(Lungs←Thyroid)については、すべてのエネルギーについて d_{SAF} は−0.2%から 2.8%の範囲内となり、両者の計算結果はよく一致した。

以上の検討から、高解像度の JM-103 の MCNPX 2.6.0 への組込みについても、RCP-AM と同じ手法が問題なく適用できることを確認した。

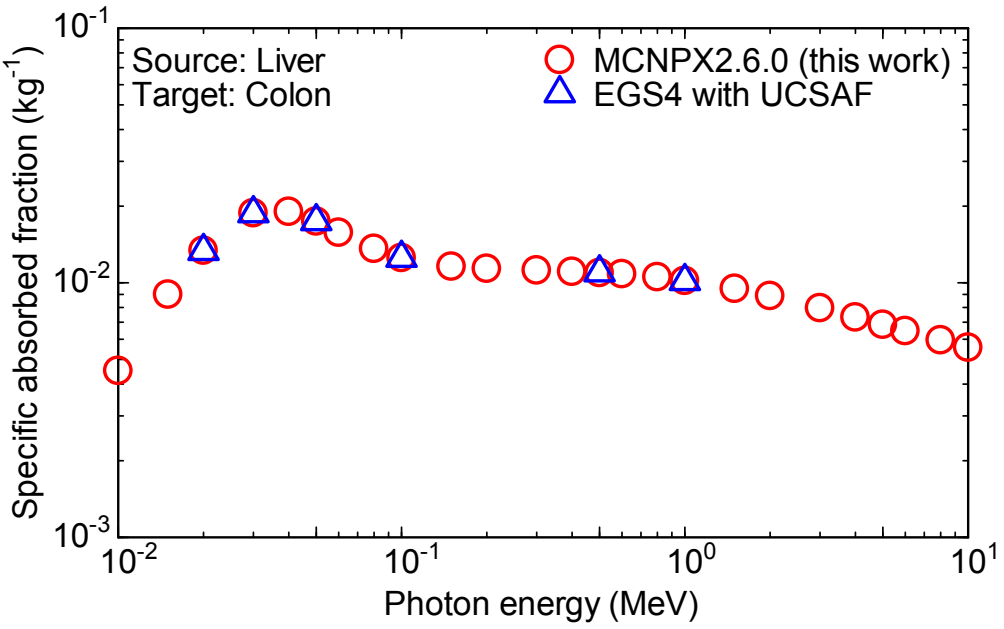

Fig. 3-5 Specific absorbed fractions (SAFs) of JM-103 for photons from liver to colon

Open circles indicate the SAFs calculated using MCNPX 2.6.0, and open triangles indicate the SAFs calculated using EGS4 with UCSAF.

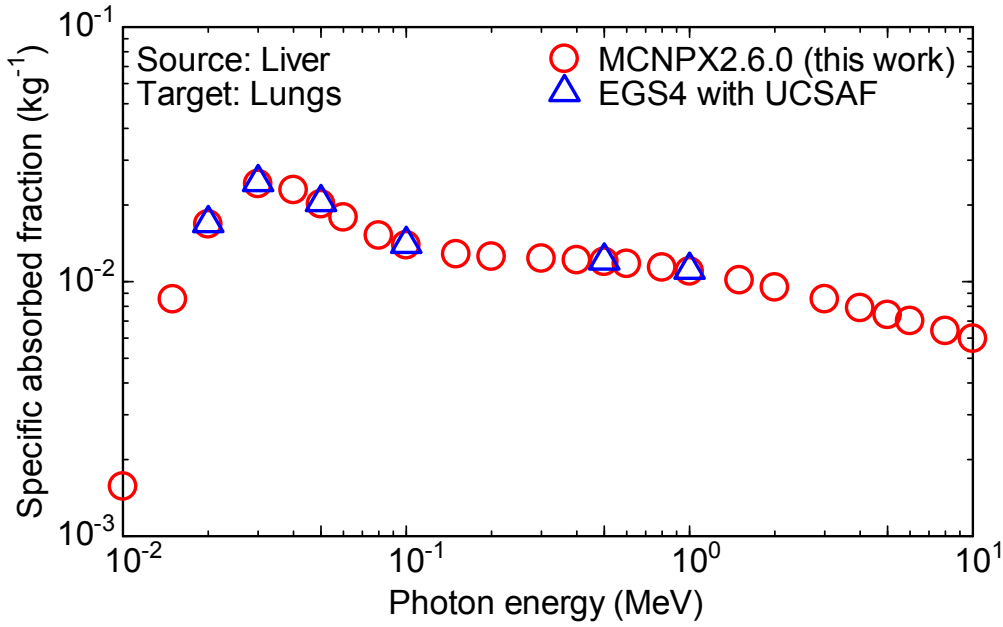

Fig. 3-6 Specific absorbed fractions (SAFs) of JM-103 for photons from liver to lungs

Open circles indicate the SAFs calculated using MCNPX 2.6.0, and open triangles indicate the SAFs calculated using EGS4 with UCSAF.

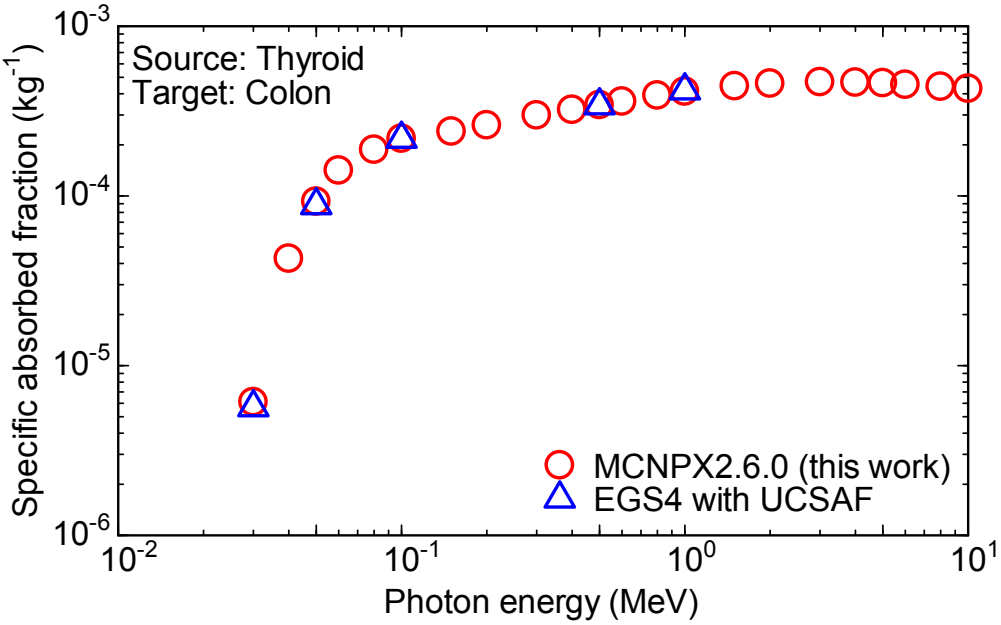

Fig. 3-7 Specific absorbed fractions (SAFs) of JM-103 for photons from thyroid to colon

Open circles indicate the SAFs calculated using MCNPX 2.6.0, and open triangles indicate the SAFs calculated using EGS4 with UCSAF.

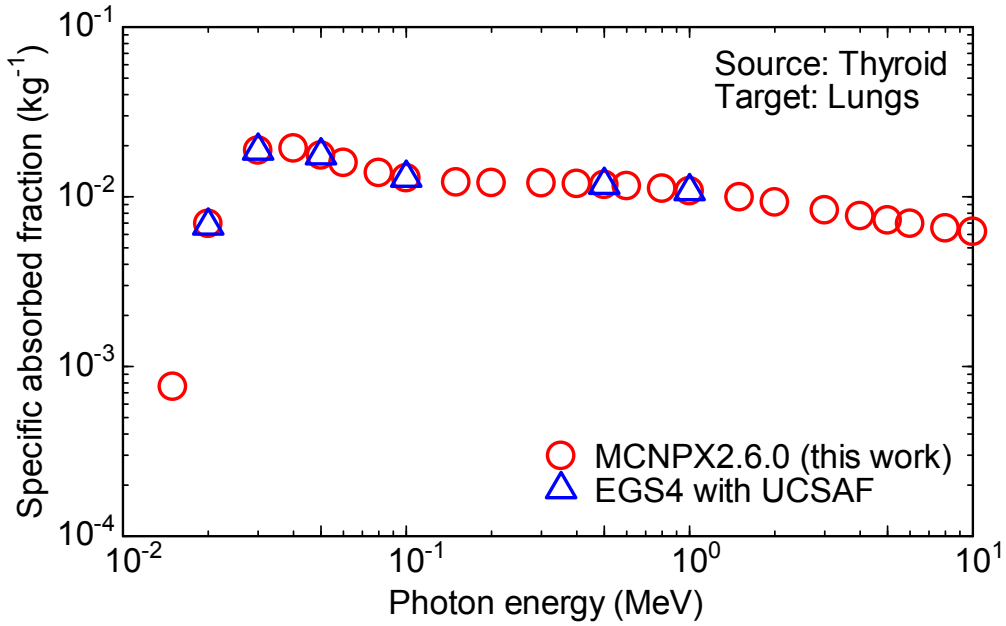

Fig. 3-8 Specific absorbed fractions (SAFs) of JM-103 for photons from thyroid to lungs

Open circles indicate the SAFs calculated using MCNPX 2.6.0, and open triangles indicate the SAFs calculated using EGS4 with UCSAF.

3.2 SAF データファイル

本研究では、67 の線源領域及び 41 の標的臓器の組合せについて、10 keV から 10 MeV までの 25 種類のエネルギーの光子及び電子に対する JM-103 の SAF を計算した。すべての計算結果は、光子及び電子それぞれについて線源領域毎に電子ファイルとしてまとめ、付属の CD-ROM に収録した。CD-ROM 内のディレクトリ構造を、Fig. 3-9 に示す。本研究における計算結果は、Table 3-1 に示す様式によりテキストファイルに記述し、光子及び電子の SAF データを「JM-103_pSAFs」及び「JM-103_eSAFs」の各ディレクトリに格納した。光子及び電子 SAF データファイル名は、Table 2-3 に示した線源領域名の略称を用い、それぞれ「[線源領域名略称]_JM-103.psaf」及び「[線源領域名略称]_JM-103.esaf」とした。ただし、2.3.6 項で述べたように、呼吸気道領域、消化管領域及び骨領域における電子 SAF については、JM-103 を用いた評価を行わなかった。したがって、「JM-103_eSAFs」ディレクトリに格納したデータのうち、線源領域-標的臓器の組合せが上記の 3 つの領域に該当する場合は、「n.a.」(not applicable)とした。

なお、HRTM に基づく電子 SAF は、ICRP Publication 66[6]の Table H.2 に示された AF データ及び同 Table 5 に示された標的質量を用いて算出できる。また、HATM に基づく電子 SAF は、ICRP Publication 100[35]の Table F.1 に示された AF データ及び同 Table 7.8 に示された標的質量を用いて算出できる。

Directory		Files			
CD-ROM		ReadMe_English.txt	ReadMe_Japanese.txt		
	JM-103_pSAFs	Adipose_JM-103.psaf	Adrenals_JM-103.psaf	Al_JM-103.psaf	Blood_JM-103.psaf
		Brain_JM-103.psaf	Brchiole-b_JM-103.psaf	Brchiole-f_JM-103.psaf	Brchiole-q_JM-103.psaf
		Brchiole-s_JM-103.psaf	Breast_JM-103.psaf	Bronchi-b_JM-103.psaf	Bronchi-f_JM-103.psaf
		Bronchi-q_JM-103.psaf	Bronchi-s_JM-103.psaf	Bronchiole_JM-103.psaf	Bronchi_JM-103.psaf
		C-bone-S_JM-103.psaf	C-bone-V_JM-103.psaf	Cartilage_JM-103.psaf	ET1-sur_JM-103.psaf
		ET2-bnd_JM-103.psaf	ET2-seq_JM-103.psaf	ET2-sur_JM-103.psaf	GB-cont_JM-103.psaf
		GB-wall_JM-103.psaf	Ht-cont_JM-103.psaf	Ht-wall_JM-103.psaf	Kidneys_JM-103.psaf
		LC-cont_JM-103.psaf	LC-wall_JM-103.psaf	Liver_JM-103.psaf	LN-ET_JM-103.psaf
		LN-Th_JM-103.psaf	Lungs_JM-103.psaf	Lymph_JM-103.psaf	Muscle_JM-103.psaf
		O-cavity_JM-103.psaf	O-mucosa_JM-103.psaf	Oesophag-f_JM-103.psaf	Oesophag-s_JM-103.psaf
		Oesophagus_JM-103.psaf	Pancreas_JM-103.psaf	Prostate_JM-103.psaf	R-marrow_JM-103.psaf
		RC-cont_JM-103.psaf	RC-wall_JM-103.psaf	RSig-cont_JM-103.psaf	RSig-wall_JM-103.psaf
		S-glands_JM-103.psaf	S-tissue_JM-103.psaf	SI-cont_JM-103.psaf	SI-villi_JM-103.psaf
		SI-wall_JM-103.psaf	Skin_JM-103.psaf	Spleen_JM-103.psaf	St-cont_JM-103.psaf
		St-wall_JM-103.psaf	T-body_JM-103.psaf	T-bone-S_JM-103.psaf	T-bone-V_JM-103.psaf
		Teeth-S_JM-103.psaf	Teeth-V_JM-103.psaf	Testes_JM-103.psaf	Thymus_JM-103.psaf
		Thyroid_JM-103.psaf	UB-cont_JM-103.psaf	UB-wall_JM-103.psaf	
	JM-103_eSAFs	Adipose_JM-103.eSAF	Adrenals_JM-103.eSAF	Al_JM-103.eSAF	Blood_JM-103.eSAF
		Brain_JM-103.eSAF	Brchiole-b_JM-103.eSAF	Brchiole-f_JM-103.eSAF	Brchiole-q_JM-103.eSAF
		Brchiole-s_JM-103.eSAF	Breast_JM-103.eSAF	Bronchi-b_JM-103.eSAF	Bronchi-f_JM-103.eSAF
		Bronchi-q_JM-103.eSAF	Bronchi-s_JM-103.eSAF	Bronchiole_JM-103.eSAF	Bronchi_JM-103.eSAF
		C-bone-S_JM-103.eSAF	C-bone-V_JM-103.eSAF	Cartilage_JM-103.eSAF	ET1-sur_JM-103.eSAF
		ET2-bnd_JM-103.eSAF	ET2-seq_JM-103.eSAF	ET2-sur_JM-103.eSAF	GB-cont_JM-103.eSAF
		GB-wall_JM-103.eSAF	Ht-cont_JM-103.eSAF	Ht-wall_JM-103.eSAF	Kidneys_JM-103.eSAF
		LC-cont_JM-103.eSAF	LC-wall_JM-103.eSAF	Liver_JM-103.eSAF	LN-ET_JM-103.eSAF
		LN-Th_JM-103.eSAF	Lungs_JM-103.eSAF	Lymph_JM-103.eSAF	Muscle_JM-103.eSAF
		O-cavity_JM-103.eSAF	O-mucosa_JM-103.eSAF	Oesophag-f_JM-103.eSAF	Oesophag-s_JM-103.eSAF
		Oesophagus_JM-103.eSAF	Pancreas_JM-103.eSAF	Prostate_JM-103.eSAF	R-marrow_JM-103.eSAF
		RC-cont_JM-103.eSAF	RC-wall_JM-103.eSAF	RSig-cont_JM-103.eSAF	RSig-wall_JM-103.eSAF
		S-glands_JM-103.eSAF	S-tissue_JM-103.eSAF	SI-cont_JM-103.eSAF	SI-villi_JM-103.eSAF
		SI-wall_JM-103.eSAF	Skin_JM-103.eSAF	Spleen_JM-103.eSAF	St-cont_JM-103.eSAF
		St-wall_JM-103.eSAF	T-body_JM-103.eSAF	T-bone-S_JM-103.eSAF	T-bone-V_JM-103.eSAF
		Teeth-S_JM-103.eSAF	Teeth-V_JM-103.eSAF	Testes_JM-103.eSAF	Thymus_JM-103.eSAF
		Thyroid_JM-103.eSAF	UB-cont_JM-103.eSAF	UB-wall_JM-103.eSAF	

Fig. 3-9 Directory structure of the SAF data contained in the attached CD-ROM

Table 3-1 Structure of records for data files of specific absorbed fraction (SAF) of JM-103

Field	Format*	Description
Header 1 (1st line)		
Table title		Table title containing the name of source region
Header 2 (2nd line)		
Target	A12	Header of the 1st column
Source	A10	Header of the 2nd column
The next block of two fields is repeated for energy *i*, *i* = 1 to 25.		
Energy-*i*	E11.0	Photon or electron energy *i* (MeV)
Fractional standard error (fse)†	A6	Header of the column
Data records (lines from 3rd to 43rd)		
Target organ	A12	Name of target organ
Source organ	A10	Name of source region
The next block of two fields is repeated for energy *i*, *i* = 1 to 25.		
SAF-*i*	E11.0	SAF for energy-*i* (kg^{-1})
fse-*i*	E6.0	Fractional standard error of SAF for energy-*i*

* The format is expressed in Fortran notational system; “A” and “E” mean character string field and real numeric field, respectively.

† Fractional standard error means a quotient of a standard error of SAF divided by the SAF.

4 考察

JM-103 を用いて計算した SAF と、RCP-AM の SAF を比較し、日本人とコーカソイドにおける体格や臓器質量の違いが SAF に及ぼす影響を調べた。ここで、コードや断面積ライブラリ、輸送条件の違いによる SAF の差を排除するため、第 2 章で示した方法で RCP-AM の SAF を計算し、比較対象とした。なお、本章で示す JM-103 の光子・電子 SAF、及び RCP-AM の光子 SAF のうち、10 keV から 5 MeV までの 15 点[*4] については、Manabe らにおいて計算されるとともに、線量係数の評価に使用されたものである [23]。

本章では、JM-103 で計算した SAF を SAF_{this_work}、RCP-AM に対する SAF を $SAF_{reference}$ として式(3-1)と同様に算出した両者の差を d_{SAF} (%)とする。

4.1 自己吸収 SAF

JM-103 と RCP-AM 間で質量の違いが大きい肝臓、質量がほぼ同じ甲状腺及び肺について、線源領域と標的臓器が同じである場合の SAF（以下、「自己吸収 SAF」と呼ぶ）を比較し、その差について解析した。

Fig. 4-1 に、肝臓における電子の自己吸収 SAF を示す。10 keV における d_{SAF} は 23%であり、エネルギーが高くなるとともに d_{SAF} は減少し、10 MeV では 17%となった。軟組織における 10 keV の電子の飛程は極めて短く、ほぼすべてのエネルギーが線源領域に付与される。そのため、10 keV の電子の自己吸収 SAF の差は、肝臓の質量の逆数（JM-103: 0.684 kg^{-1}、RCP-AM: 0.556 kg^{-1}）の差（23%）にほぼ等しくなった。エネルギーが 500 keV を超えると JM-103、RCP-AM ともに SAF が減少し始め、5 MeV ではその差が 19%となることは、Manabe らによりすでに報告されている [23]。本研究における 10 MeV までの比較により、5 MeV 以上のエネルギーにおいても SAF は減少し続けて、10 MeV においても JM-103 と RCP-AM の SAF の大小関係は同じであることが確認された。以上のように、自己吸収 SAF は当該臓器の質量に大きく依存する [45, 48] ことが、本研究においても確認された。

甲状腺における電子の自己吸収 SAF を比較した結果を、Fig. 4-2 に示す。10 keV から 800 keV までの d_{SAF} は±1%以内となり、SAF はほぼ同じとなった。1 MeV よりエネルギーが高くなるにつれ d_{SAF} は大きくなったが、10 MeV においても 7.5%であり、両者の SAF には大きな差は無かった。このように、質量がほぼ等しい場合は、SAF の差も小さいことが確認された。

Fig. 4-3 に、肺における光子の自己吸収 SAF を比較した結果を示す。10 keV における d_{SAF} は−1%であり、JM-103 と RCP-AM の SAF はよく一致していた。Table 2-2 に示すように、JM-103 と RCP-AM の肺の質量はほぼ等しいため、平均自由行程が数 mm 程度である 10 keV における d_{SAF} は−1%であった。しかし、エネルギーの増加とともに SAF の違いが大きくなり、10 MeV における d_{SAF} は−37%となった。この JM-103 と RCP-AM の SAF の差は、両ファントム間における左右の肺の位置関係の違いが原因と考えられる。JM-103 と RCP-AM における右肺と左肺の重心間距離は、それぞれ 147 mm、139 mm

[*4] 0.01、0.015、0.02、0.03、0.05、0.1、0.15、0.2、0.3、0.5、1、1.5、2、3、5 MeV の 15 点。

であることから、RCP-AM の方が、左右の肺が互いにより近い位置関係にある。コーカソイドは日本人に比べ脂肪組織の量が多く、脂肪組織により胸腔部位が圧縮されていると推察され、各ファントムはこのような身体的特性を反映している。そのため、発生させた光子のエネルギーが高い場合は、右肺又は左肺から放出された光子がもう一方の肺に届きやすくなり、RCP-AM の SAF の方が高くなったと考えられる。

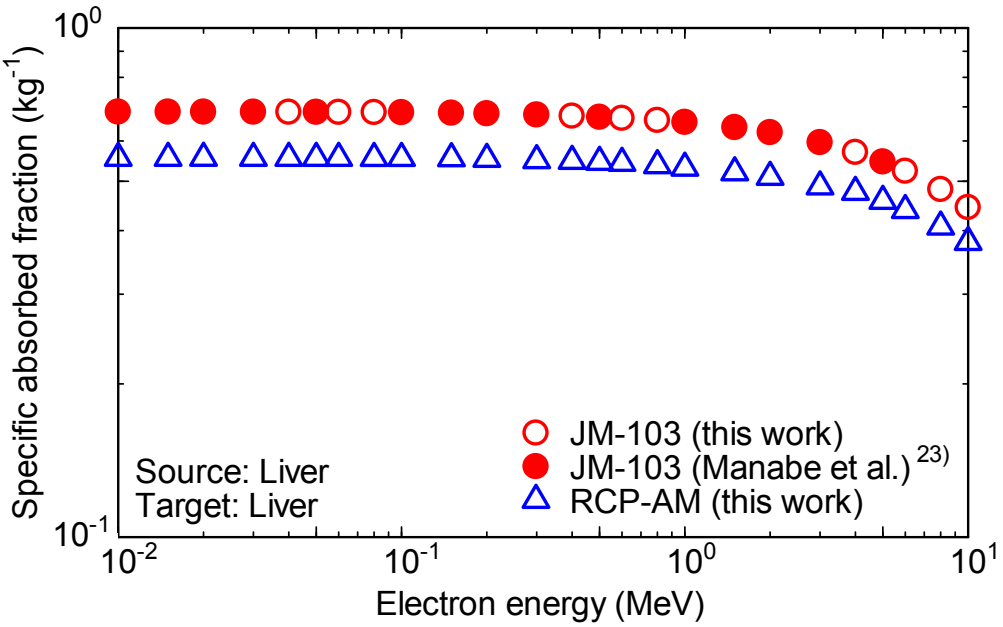

Fig. 4-1 Comparison of specific absorbed fractions (SAFs) for electrons for self-absorption in liver between JM-103 and RCP-AM

Open circles, and open triangles indicate the SAFs of JM-103, and RCP-AM, respectively, calculated in this study. Closed circles indicate the SAFs of JM-103 in Manabe et al.[23)]

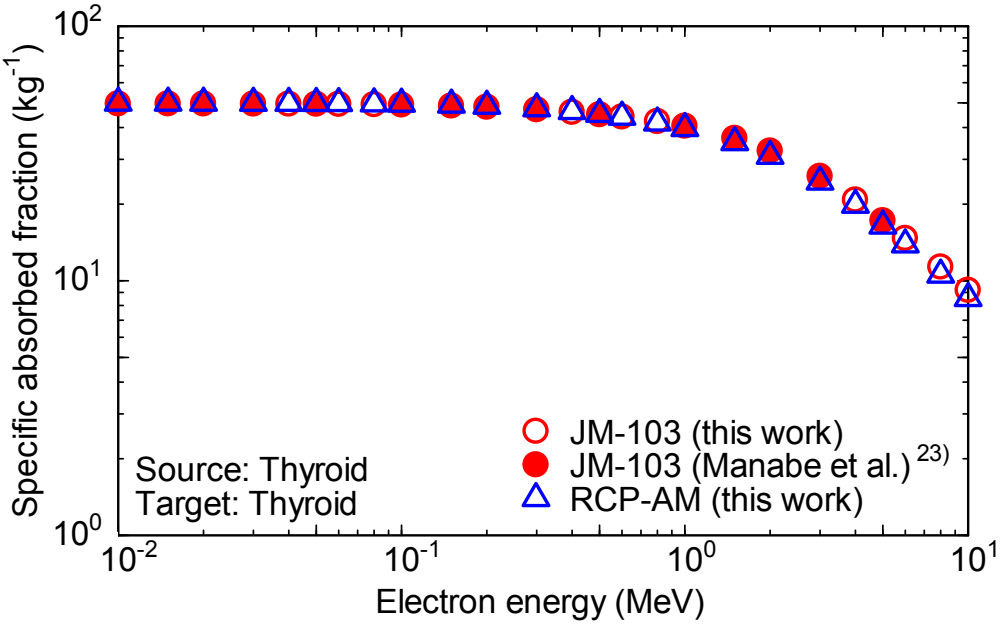

Fig. 4-2 Comparison of specific absorbed fractions (SAFs) for electrons for self-absorption in thyroid between JM-103 and RCP-AM

Open circles, and open triangles indicate the SAFs of JM-103, and RCP-AM, respectively, calculated in this study. Closed circles indicate the SAFs of JM-103 in Manabe et al.[23)]

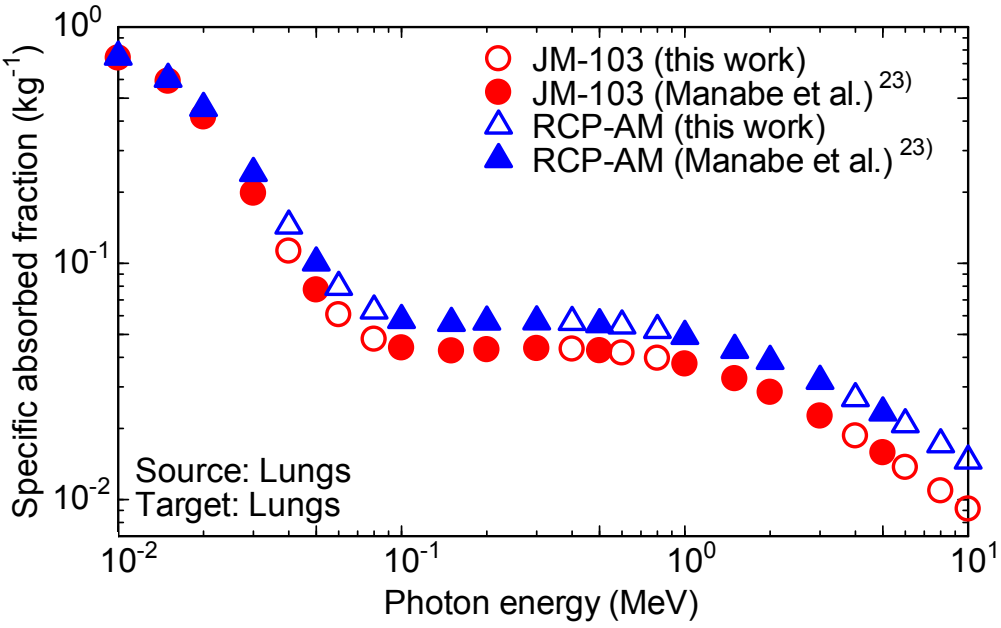

Fig. 4-3 Comparison of specific absorbed fractions (SAFs) for photons for self-absorption in lungs between JM-103 and RCP-AM

Open circles, and open triangles indicate the SAFs of JM-103, and RCP-AM, respectively, calculated in this study. Closed circles, and closed triangles indicate the SAFs of JM-103, and RCP-AM, respectively, in Manabe et al.[23)]

4.2 自己吸収以外の SAF

自己吸収以外の SAF は、標的臓器の質量に加え、線源領域と標的臓器の位置関係にも依存するため、多くの線源領域-標的臓器の組合せの SAF について、JM-103 と RCP-AM に差が見られた。ここでは、日本人とコーカソイドの身体的特性の違いが SAF に影響を及ぼした例として、光子の SAF(St-wall←Pancreas)及び電子の SAF(Kidneys←T-body)の比較を示す。また、光子の SAF (R-marrow←T-body)を比較することにより、JM-103 と RCP-AM の骨組織のモデル化手法の違いが SAF に及ぼす影響について解析した。

Fig. 4-4 に、光子の SAF(St-wall←Pancreas)を比較した結果を示す。d_{SAF} は、10 keV において最大の 230%、100 keV で最小の 40%、200 keV 以上のエネルギーにおいては 41%から 49%の範囲内となった。この SAF の差は、JM-103 及び RCP-AM における膵臓と胃壁の重心間距離がそれぞれ 31 mm 及び 73 mm であることから、線源領域と標的臓器間の距離の違いが主な原因であると考えられる。この臓器重心間距離の違いは、JM-103 の基である日本人に比べて RCP-AM の基であるコーカソイドは内臓脂肪が多く、腹部の水平方向の広がりがより大きくなることに起因していると考えられる。

Fig. 4-5 に、電子の SAF(Kidneys←T-body)を比較した結果を示す。JM-103 及び RCP-AM の SAF は、ともに 3 MeV 程度までほぼ一定で、4 MeV から 10 MeV にかけて少しずつ減少するという傾向を示した。d_{SAF} については、すべてのエネルギー領域において 12%から 13%の範囲内でほぼ一定となった。Zankl らは、全身組織からある標的臓器に対する電子 SAF について、線源がその質量に応じて分布しており、かつ標的臓器とその周辺領域間におけるエネルギー授受の平衡が保たれている場合は、全身組織の質量の逆数にほぼ等しくなることを明らかにしている [10]。JM-103 及び RCP-AM の 3 MeV までの SAF は、それぞれ $1.56 \times 10^{-2}\,kg^{-1}$ から $1.58 \times 10^{-2}\,kg^{-1}$、$1.38 \times 10^{-2}\,kg^{-1}$ から $1.40 \times 10^{-2}\,kg^{-1}$ の範囲であった。これらの値は、Table 2-2 に示す JM-103 及び RCP-AM の全身組織質量（それぞれ 64.0 kg、71.8 kg）の逆数（それぞれ $1.56 \times 10^{-2}\,kg^{-1}$、$1.39 \times 10^{-2}\,kg^{-1}$）とほぼ一致している。以上のことから、電子の SAF(Kidneys←T-body)に見られた差は、Zankl らにより報告されているように、主に全身組織質量の違いにより生じたと考えられる。

光子に対する SAF(R-marrow←T-body)を、Fig. 4-6 に示す。ここで示す RCP-AM の SAF は、Manabe ら [23]と同様に、線量応答関数（DRF: Dose Response Function）データ [49]を用いて計算したものである。50 keV 以下では SAF の差が大きく、10 keV における d_{SAF} は−51%となった。これは、JM-103 と RCP-AM とで骨組織のモデル化手法が異なることに起因する、沈着エネルギーの計算方法の違いが主な原因である。DRF を用いた評価では、赤色骨髄に隣接する薄い梁骨と光子の相互作用により生成した二次電子の赤色骨髄までの輸送が考慮される [50]。これに対し、本研究における質量エネルギー吸収係数を用いた計算方法はこの現象が考慮されないため、50 keV 以下のエネルギー領域では SAF に差が見られた。

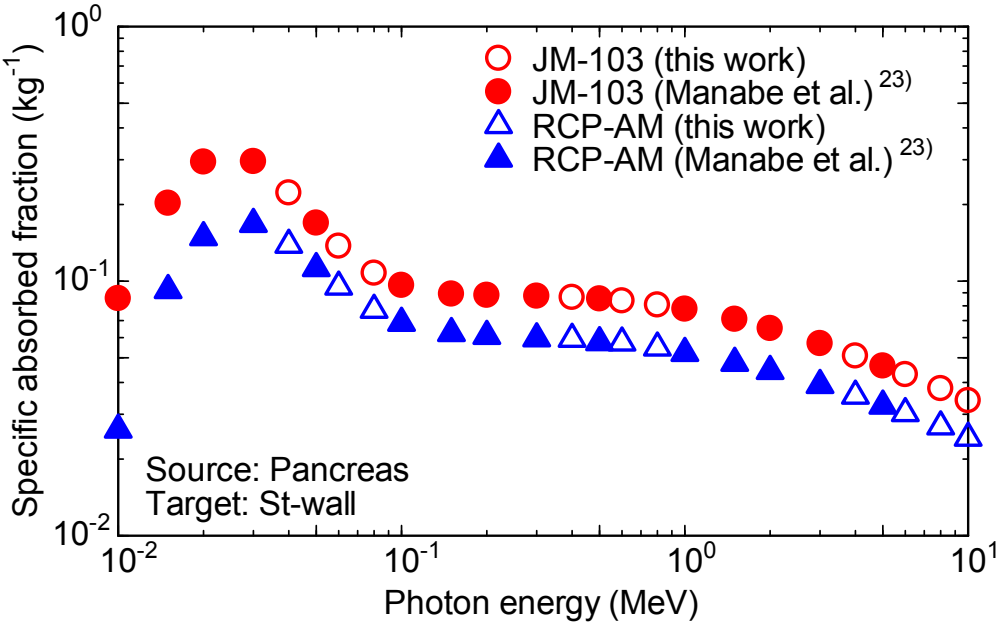

Fig. 4-4 Comparison of specific absorbed fractions (SAFs) for photons from pancreas to stomach wall (St-wall) between JM-103 and RCP-AM

Open circles, and open triangles indicate the SAFs of JM-103, and RCP-AM, respectively, calculated in this study. Closed circles, and closed triangles indicate the SAFs of JM-103, and RCP-AM, respectively, in Manabe et al.[23)]

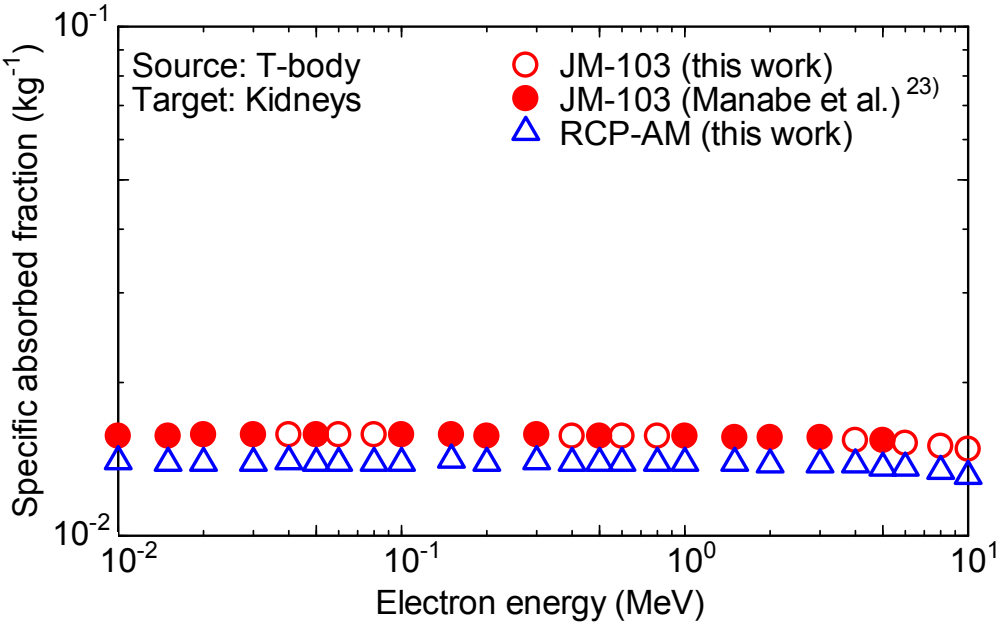

Fig. 4-5 Comparison of specific absorbed fractions (SAFs) for electrons from total body tissues (T-body) to kidneys between JM-103 and RCP-AM

Open circles, and open triangles indicate the SAFs of JM-103, and RCP-AM, respectively, calculated in this study. Closed circles indicate the SAFs of JM-103 in Manabe et al.[23)]

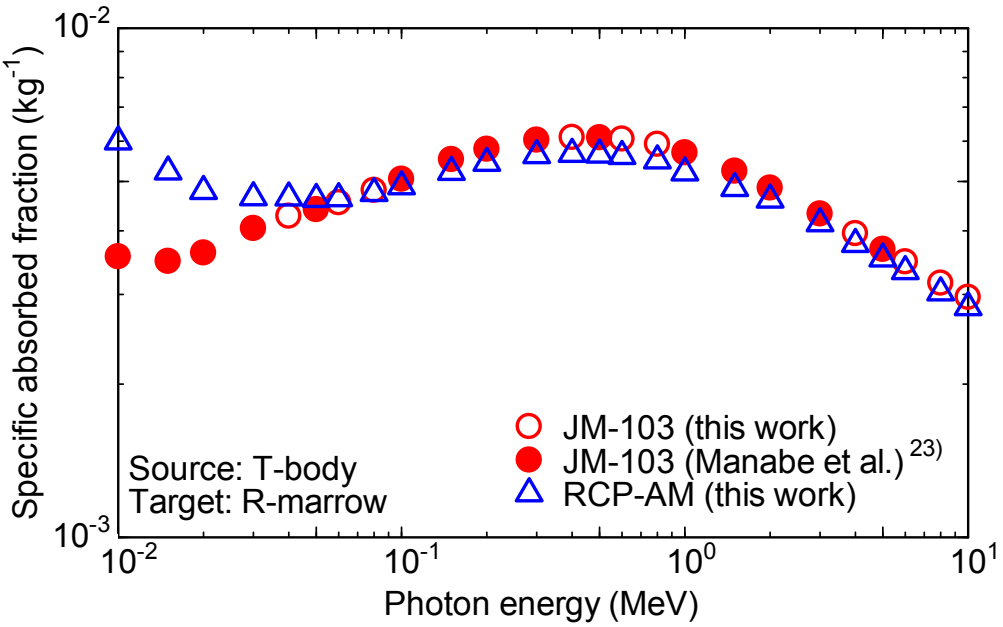

Fig. 4-6 Comparison of specific absorbed fractions for photons (SAFs) from total body tissues (T-body) to red bone marrow (R-marrow) between JM-103 and RCP-AM

Open circles, and open triangles indicate the SAFs of JM-103, and RCP-AM, respectively, calculated in this study. Closed circles indicate the SAFs of JM-103 in Manabe et al.[23)]

5　結論

成人日本人男性の平均的な体格や臓器質量を再現したファントム JM-103 を MCNPX 2.6.0 に組み込み、光子及び電子に対する SAF を評価した。SAF の評価は、67 の線源領域と 41 の標的臓器の組合せについて、10 keV から 10 MeV の光子及び電子に対して行った。これらの計算した SAF は電子ファイルとしてまとめ、本報告書に添付の CD-ROM に収録した。この SAF データを利用することにより、α壊変核種、自発核分裂核種及びこれらを壊変系列に含む核種、並びに希ガス等のサブマージョン核種を除くすべての放射性核種の体内への取込みについて、成人日本人男性の平均的な体格や臓器質量特性を反映した臓器線量の計算が可能となった。

JM-103 を用いて計算した SAF を、ICRP 成人男性標準ファントム RCP-AM の SAF と比較し、両ファントム間の体格や臓器質量等の違いが SAF に及ぼす影響を解析した。自己吸収 SAF は当該臓器の質量に依存するため、両ファントムにおける質量がほぼ等しい甲状腺では SAF にほとんど差が見られなかったのに対し、肝臓については、両ファントムの肝臓の質量の逆数に応じて SAF に差が生じた。また、全身組織が線源領域である場合の電子 SAF は、全身組織の質量の逆数に対応する差が見られた。このように、両人種間の体格や臓器質量特性の違いが、SAF に影響を及ぼすことが示された。

両人種間の大きな違いとして、脂肪組織量の差が挙げられる。腹部の内臓脂肪量に応じて膵臓と胃壁の重心間距離に差が生じ、RCP-AM に比べ重心間距離が短い JM-103 の SAF が大きくなった。このように、組織・臓器間の位置関係の違いも SAF に影響を及ぼすことが示された。

以上の結果から、本研究で整備した一連の SAF データは、成人日本人男性と成人コーカソイド男性の身体的特性の違いが線量に及ぼす影響を評価するための基礎データとなり、ICRP 2007 年勧告に基づく線量係数を国内法令に取入れる際の検討に貢献する。また、放射線事故や放射性医薬品の投与等のような内部被ばく線量の評価について、成人日本人の平均的な身体的特性を考慮した臓器線量評価にも有用であると結論できる。

謝辞

輸送計算に関し、種々の技術的助言を頂いた放射線防護研究グループ 佐藤大樹研究副主幹に深く感謝致します。

参考文献

1) International Commission on Radiological Protection: “1990 Recommendations of International Commission on Radiological Protection”, ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21 (1-3) (1991).
2) International Commission on Radiological Protection: “The 2007 Recommendations of International Commission on Radiological Protection”, ICRP Publication 103, Ann. ICRP 37 (2-4) (2007).
3) M. Cristy and K.F. Eckerman: “Specific absorbed fractions of energy at various ages from internal photon sources”, ORNL/TM-8381/V1-7 (1987).
4) M. Cristy and K.F. Eckerman: “SEECAL: program to calculate age-dependent specific effective energies”, ORNL/TM-12351 (1993).
5) International Commission on Radiological Protection: “Limits for intakes of radionuclides by workers”, ICRP Publication 30 part 1, Ann. ICRP 2 (3-4) (1979).
6) International Commission on Radiological Protection: “Human respiratory tract model for radiological protection”, ICRP Publication 66, Ann. ICRP 24 (1-3) (1994).
7) International Commission on Radiological Protection: “Dose coefficients for intakes of radionuclides by worker”, ICRP Publication 68, Ann. ICRP 24 (4) (1994).
8) International Commission on Radiological Protection: “Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: part 5. Compilation of ingestion and inhalation coefficients”, ICRP Publication 72, Ann. ICRP 26 (1) (1995).
9) International Commission on Radiological Protection: “Adult reference computational phantoms”, ICRP Publication 110, Ann. ICRP 39 (2) (2009).
10) M. Zankl, H. Schlattl, N. Petoussi-Henss and C. Hoeschen: “Electron specific absorbed fractions for the adult male and female ICRP/ICRU reference computational phantoms”, Phys. Med. Biol. 57, pp. 4501-4526 (2012).
11) H.K. Patni, D.K. Akar, M.Y. Nadar, V.P. Ghare, D.D. Rao and P.K. Sarkar: “Estimation of specific absorbed fractions for selected organs due to photons emitted by activity deposited in the human respiratory tract using ICRP/ICRU male voxel phantom in FLUKA”, Radiat. Prot. Dosim. 153, pp. 32-46 (2012).
12) J.C. Ocampo, J.A. Puerta and J. Morales: “Evaluation of specific absorbed fractions from internal photon sources in the ICRP reference male phantom”, Radiat. Prot. Dosim. 157, pp. 133-141 (2013).
13) International Commission on Radiological Protection: “Report on the task group on reference man”, ICRP Publication 23 (1975).
14) International Commission on Radiological Protection: “Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection reference values”, ICRP Publication 89, Ann. ICRP 32 (3-4) (2002).
15) G. Tanaka and H. Kawamura: “Anatomical and physiological characteristics for Asian reference man. Male and female of different ages”, NIRS-M-115 (1996).
16) K. Saito, A. Wittmann, S. Koga, Y. Ida, T. Kamei, J. Funabiki and M. Zankl: “Construction of a computed

tomographic phantom for a Japanese male adult and dose calculation system", Radiat. Environ. Biophys. 40, pp. 69-76 (2001).

17) T. Nagaoka, S. Watanabe, K. Sakurai, E. Kunieda, S. Watanabe, M. Taki and Y. Yamanaka: "Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese adult males and females of average height and weight, and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry", Phys. Med. Biol. 49, pp. 1-15 (2004).
18) K. Sato, H. Noguchi, Y. Emoto, S. Koga and K. Saito: "Japanese adult male voxel phantom constructed on the basis of CT images", Radiat. Prot. Dosim. 123, pp. 337-344 (2007).
19) K. Saito, S. Koga, Y. Ida, T. Kamei and J. Funabiki: "Construction of a voxel phantom based on CT data for a Japanese female adult and its use for calculation of organ doses from external electrons", Jpn. J. Health Phys. 43, pp. 122-130 (2008).
20) K. Sato, H. Noguchi, Y. Emoto, S. Koga and K. Saito: "Development of a Japanese adult female voxel phantom", J. Nucl. Sci. Tech. 46, pp. 907-913 (2009).
21) K. Sato, F. Takahashi, D. Satoh and A. Endo: "Construction of average adult Japanese voxel phantoms for dose assessment", JAEA-Data/Code 2011-013 (2011).
22) 佐藤薫, 真辺健太郎, 遠藤章: "平均的成人日本人ボクセルファントムの光子比吸収割合評価への適用", Radioisotopes 61, pp. 315-320 (2012).
23) K. Manabe, K. Sato and A. Endo: "Comparison of internal doses calculated using the specific absorbed fractions of the average adult Japanese male phantom with those of the reference computational phantom-adult male of ICRP Publication 110", Phys. Med. Biol. 59, pp. 1255-1270 (2014).
24) B.F. Zhou, J. Stamler, B. Dennis, A. Moag-Stahlberg, N. Okuda, C. Robertson, L. Zhao, Q. Chan and P. Elliott: "Nutrient intakes of middle-aged men and women in China, Japan, United Kingdom, and United States in the late 1990s: The INTERMAP Study", J. Hum. Hypertens. 17, pp. 623-630 (2003).
25) D.B. Pelowitz: "MCNPX user's manual version 2.6.0", LA-CP-07-1473 (2008).
26) M.C. White: "Photoatomic data library MCPLIB04: a new photoatomic library based on data from ENDF/B-VI release 8", Los Alamos National Laboratory internal memorandum X-5: MCW-02-111 (2002).
27) K.J. Adams: "Electron upgrade for MCNP4B", Los Alamos National Laboratory internal memorandum: X-5-RN(U)-00-14 (2000).
28) International Commission on Radiological Protection: "Limits for intakes of radionuclides by workers", ICRP Publication 30 part 2, Ann. ICRP 4 (3-4) (1980).
29) International Commission on Radiological Protection: "Limits for intakes of radionuclides by workers", ICRP Publication 30 part 3, Ann. ICRP 6 (2-3) (1981).
30) International Commission on Radiological Protection: "Limits for intakes of radionuclides by workers: an addendum", ICRP Publication 30 part 4, Ann. ICRP 19 (4) (1988).
31) International Commission on Radiological Protection: "Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: part 1", ICRP Publication 56, Ann. ICRP 20 (2) (1990).
32) International Commission on Radiological Protection: "Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: part 2. Ingestion dose coefficients", ICRP Publication 67, Ann. ICRP 23 (3-4)

(1992).

33) International Commission on Radiological Protection: “Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: part 3. Ingestion dose coefficients”, ICRP Publication 69, Ann. ICRP 25 (1) (1995).

34) International Commission on Radiological Protection: “Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: part 4. Inhalation dose coefficients”, ICRP Publication 71, Ann. ICRP 25 (3-4) (1995).

35) International Commission on Radiological Protection: “Human alimentary tract model for radiological protection”, ICRP Publication 100, Ann. ICRP 36 (1-2) (2006).

36) International Commission on Radiological Protection: “Occupational intakes of radionuclides part 1 (draft)”, ICRP ref 4828-2081-0510, available from <http://www.icrp.org/docs/Occupational_Intakes_P1_for_consultation.pdf> (accessed on 2013/9/20) (2012).

37) International Commission on Radiological Protection: “Occupational intakes of radionuclides part 2 (draft)”, ICRP ref 4838-2850-7665, available from <http://www.icrp.org/docs/Occupational_Intakes_P2_for_consultation.pdf> (accessed on 2013/9/20) (2012).

38) International Commission on Radiological Protection: “Occupational intakes of radionuclides part 3 (draft)”, ICRP ref 4838-4528-4881, available from <http://www.icrp.org/docs/Occupational_Intakes_P3_for_consultation.pdf> (accessed on 2013/9/20) (2012).

39) W.S. Snyder, M.R. Ford and G.G. Warner: “Estimates of specific absorbed fractions for photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom”, MIRD pamphlet No. 5 revised (1978).

40) C. Lee, C. Lee, A.P. Shah and W.E. Bolch: “An assessment of bone marrow and bone endosteum dosimetry methods for photon sources”, Phys. Med. Biol. 51, pp. 5391-5407 (2006).

41) J.H. Hubbell and S.M. Seltzer: “Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV for elements Z = 1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest”, NISTIR5632 (1995).

42) M. Hough, P. Johnson, D. Rajon, D. Jokisch, C. Lee and W. Bolch: “An image-based skeletal dosimetry model for the ICRP reference adult male—internal electron sources”, Phys. Med. Biol. 56, pp. 2309-2346 (2011).

43) International Commission on Radiological Protection: “Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: the skeleton”, ICRP Publication 70, Ann. ICRP 25 (2) (1995).

44) W.R. Nelson, H. Hirayama and D.W.O. Rogers: “The EGS4 code system”, SLAC-265 (1985).

45) S. Kinase, M. Zankl, J. Kuwabara, K. Sato, H. Noguchi, J. Funabiki and K. Saito: “Evaluation of specific absorbed fraction in voxel phantoms using Monte Carlo calculation”, Radiat. Prot. Dosim. 105, pp. 557-563 (2003).

46) K. Saito, K. Sato, S. Kinase, H. Noguchi, J. Funabiki, S. Takagi, O. Sato, Y. Emoto and S. Koga: “Dose calculation using Japanese voxel phantoms for diverse exposures”, Proceedings of Monte Carlo 2005 Topical Meeting: The Monte Carlo Method: Versatility Unbounded in a Dynamic Computing World (2005).

47) J.K. Shultis and R.E. Faw: “An MCNP primer”, Kansas State University Libraries, available from <http://www.mne.ksu.edu/~jks/MCNPprmr.pdf> (accessed on 2013/10/9) (2011).

48) M. Zankl, N. Petoussi-Henss, U. Fill and D. Regulla: “The application of voxel phantoms to the internal dosimetry of radionuclides”, Radiat. Prot. Dosim. 105, pp. 539-548 (2003).

49) International Commission on Radiological Protection: “Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures”, ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40 (2-5) (2010).

50) P.B. Johnson, A.A. Bahadori, K.F. Eckerman, C. Lee and W.E. Bolch: “Response functions for computing absorbed dose to skeletal tissues from photon irradiation—an update”, Phys. Med. Biol. 56, pp. 2347-2365 (2011).

付録 A　JM-103 の各種データ

付録 A では、平均的成人日本人男性ファントム JM-103[A1)]に関するデータを示す。Table A-1 には、JM-103 の臓器区分を臓器 ID 及び材質 ID とともに示す。Table A-2 は、材質 ID 毎に元素質量組成比及び密度を示す。Table A-3 は、骨組織を構成する 7 種類の材質について、硬骨と骨髄の質量比を示す。Table A-4 は、JM-103 のファントムデータ[A1)]から算出した臓器 ID 毎の赤色骨髄の質量を示す。Table A-5 は、JM-103 の臓器 ID 毎の骨内膜の質量 $m_{i\mathrm{BS_JM}}$ (g)を示す。なお、日本人に対する骨内膜質量データは存在しないため、$m_{i\mathrm{BS_JM}}$ は、ICRP Publication 110 の Table 4.2 に示された RCP-AM の部位毎の骨内膜質量及び骨内膜の総質量データ[A2)]を用いて、式(A-1)から式(A-5)により算出した。

$$w_{\mathrm{BS}} = \frac{m_{\mathrm{totBS_AM}}}{m_{\mathrm{skel_AM}}} \tag{A-1}$$

$$w_{\mathrm{regBS}} = \frac{m_{\mathrm{regBS_AM}}}{m_{\mathrm{totBS_AM}}} \tag{A-2}$$

$$m_{\mathrm{totBS_JM}} = m_{\mathrm{skel_JM}}\ w_{\mathrm{BS}} \tag{A-3}$$

$$m_{\mathrm{regBS_JM}} = \begin{cases} m_{\mathrm{totBS_JM}}\ w_{\mathrm{regBS}}\ \dfrac{m_{\mathrm{skel_JM}} - m_{\mathrm{hyoidSkel}}}{m_{\mathrm{skel_JM}}} & \left(\mathrm{reg} \neq \mathrm{os\ hyoideum}\right) \\ m_{\mathrm{totBS_JM}}\ \dfrac{m_{\mathrm{hyoidSkel_JM}}}{m_{\mathrm{skel_JM}}} & \left(\mathrm{reg} = \mathrm{os\ hyoideum}\right) \end{cases} \tag{A-4}$$

$$m_{i\mathrm{BS_JM}} = m_{\mathrm{regBS_JM}}\ \frac{m_{i\mathrm{HB_JM}}}{m_{\mathrm{regHB_JM}}} \tag{A-5}$$

ここで、w_{BS} (g g^{-1})は RCP-AM における全ての骨組織の総質量 $m_{\mathrm{skel_AM}}$ (g)に占める骨内膜の総質量 $m_{\mathrm{totBS_AM}}$ (g)の質量分率、w_{regBS} (g g^{-1})は $m_{\mathrm{totBS_AM}}$ に占める当該部位の骨内膜の質量 $m_{\mathrm{regBS_AM}}$ (g)の質量分率、$m_{\mathrm{totBS_JM}}$ (g)は JM-103 における骨内膜の総質量、$m_{\mathrm{skel_JM}}$ (g)は JM-103 における全ての骨組織の総質量、$m_{\mathrm{regBS_JM}}$ (g)は JM-103 の当該部位の骨内膜の質量、$m_{\mathrm{hyoidSkel}}$ (g)は JM-103 の舌骨（Os hyoideum）における全ての骨組織の質量、$m_{i\mathrm{BS_JM}}$ (g)は JM-103 の臓器 ID が i のボクセルの硬骨の質量、$m_{\mathrm{regHB_JM}}$ (g)は JM-103 の当該部位における硬骨の質量である。なお、骨の微細構造[A3)]は、人種間で大きな違いがないと考えられるため、RCP-AM の骨内膜質量データを用いて式(A-1)及び式(A-2)により算出した w_{BS} 及び w_{regBS} を、JM-103 にも適用した。また、RCP-AM では舌骨が区分されていないため、式(A-4)のように、舌骨における $m_{\mathrm{regBS_JM}}$ は、$m_{\mathrm{totBS_JM}}$ を全ての骨組織の質量で分配した。

参考文献

A1) K. Sato, F. Takahashi, D. Satoh and A. Endo: “Construction of average adult Japanese voxel phantoms for dose assessment”, JAEA-Data/Code 2011-013 (2011).

A2) International Commission on Radiological Protection: “Adult reference computational phantoms”, ICRP Publication 110, Ann. ICRP 39 (2) (2009).

A3) International Commission on Radiological Protection: “Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: the skeleton”, ICRP Publication 70, Ann. ICRP 25 (2) (1995).

Table A-1 List of organs and material IDs of JM-103[A1)]

Organ ID	Organ, tissue, content	Material ID	Organ ID	Organ, tissue, content	Material ID
2	Adipose_head	m34	90	Stomach wall	m49
4	Adipose_trunk	m34	91	Stomach content	m81
6	Adipose_left_arm	m34	92	Teeth	m37
8	Adipose_right_arm	m34	94	Testes	m52
10	Adipose_left_leg	m34	95	Prostate	m54
12	Adipose_right_leg	m34	96	Thymus	m31
14	Adrenals	m31	98	Thyroid	m50
16	Bladder wall	m41	100	Trachea	m31
17	Bladder content	m31	102	Right colon wall	m49
18	Brain	m42	103	Right colon content	m82
19	Meninges	m31	104	Left colon wall	m49
20	Breast (left + right)	m34	105	Left colon content	m82
21	Parotid	m31	106	Sigmoid colon wall	m49
22	Submaxillary	m31	107	Sigmoid colon content	m82
23	Sublingual	m31	110	Lymphatic nodes_extrathoracic	m53
24	Air in nose or air duct	m99	111	Lymphatic nodes_thoracic	m53
25	Oral mucosa	m32	112	Lymphatic nodes_head	m53
26	Tongue	m32	113	Lymphatic nodes_trunk	m53
27	Extrathoracic regions	m31	114	Lymphatic nodes_arms	m53
28	Bronchi	m31	115	Lymphatic nodes_legs	m53
30	Eye	m43	120	Cranium_01	m11
32	Eye lens	m43	121	Cranium_02	m12
33	Vena Cava	m44	122	Cranium_03	m13
34	Heart wall	m44	123	Cranium_04	m14
35	Aorta	m44	124	Cranium_05	m15
36	Kidney_left	m45	125	Cranium_06	m16
38	Kidney_right	m45	126	Cranium_07	m17
40	Liver	m46	130	Mandible_01	m11
42	Lung_left	m36	131	Mandible_02	m12
43	Pleura_left	m31	132	Mandible_03	m13
44	Lung_right	m36	133	Mandible_04	m14
45	Pleura_right	m31	134	Mandible_05	m15
46	Muscle_head	m32	135	Mandible_06	m16
48	Muscle_trunk	m32	136	Mandible_07	m17
50	Muscle_left_arm	m32	140	Cervical vertebra_01	m11
52	Muscle_right_arm	m32	141	Cervical vertebra_02	m12
54	Muscle_left_leg	m32	142	Cervical vertebra_03	m13
56	Muscle_right_leg	m32	143	Cervical vertebra_04	m14
58	Oesophagus	m31	144	Cervical vertebra_05	m15
60	Gall bladder wall	m31	145	Cervical vertebra_06	m16
61	Gall bladder content	m31	146	Cervical vertebra_07	m17
62	Pancreas	m47	150	Thoracic vertebra_01	m11
63	Vena Cava content	m51	151	Thoracic vertebra_02	m12
64	Heart content	m51	152	Thoracic vertebra_03	m13
65	Aorta content	m51	153	Thoracic vertebra_04	m14
66	Small intestine wall	m49	154	Thoracic vertebra_05	m15
67	Small intestine content	m31	155	Thoracic vertebra_06	m16
72	Skin_head	m33	156	Thoracic vertebra_07	m17
74	Skin_trunk	m33	160	Lumbar vertebra_01	m11
76	Skin_left_arm	m33	161	Lumbar vertebra_02	m12
78	Skin_right_arm	m33	162	Lumbar vertebra_03	m13
80	Skin_left_leg	m33	163	Lumbar vertebra_04	m14
82	Skin_right_leg	m33	164	Lumbar vertebra_05	m15
88	Spleen	m48	165	Lumbar vertebra_06	m16

Table A-1 List of organs and material IDs of JM-103[A1)] (Continued)

Organ ID	Organ, tissue, content	Material ID
166	Lumbar vertebra_07	m17
170	Sacrum_01	m11
171	Sacrum_02	m12
172	Sacrum_03	m13
173	Sacrum_04	m14
174	Sacrum_05	m15
175	Sacrum_06	m16
176	Sacrum_07	m17
180	Clavicles_01	m11
181	Clavicles_02	m12
182	Clavicles_03	m13
183	Clavicles_04	m14
184	Clavicles_05	m15
185	Clavicles_06	m16
186	Clavicles_07	m17
190	Scapulae_01	m11
191	Scapulae_02	m12
192	Scapulae_03	m13
193	Scapulae_04	m14
194	Scapulae_05	m15
195	Scapulae_06	m16
196	Scapulae_07	m17
200	Sternum_01	m11
201	Sternum_02	m12
202	Sternum_03	m13
203	Sternum_04	m14
204	Sternum_05	m15
205	Sternum_06	m16
206	Sternum_07	m17
210	Ribs_01	m11
211	Ribs_02	m12
212	Ribs_03	m13
213	Ribs_04	m14
214	Ribs_05	m15
215	Ribs_06	m16
216	Ribs_07	m17
220	Os coxae_01	m11
221	Os coxae_02	m12
222	Os coxae_03	m13
223	Os coxae_04	m14
224	Os coxae_05	m15
225	Os coxae_06	m16
226	Os coxae_07	m17
230	Humeri_upper_01	m11
231	Humeri_upper_02	m12
232	Humeri_upper_03	m13
233	Humeri_upper_04	m14
234	Humeri_upper_05	m15
235	Humeri_upper_06	m16
236	Humeri_upper_07	m17
240	Humeri_lower_01	m11
241	Humeri_lower_02	m12
242	Humeri_lower_03	m13
243	Humeri_lower_04	m14
244	Humeri_lower_05	m15
245	Humeri_lower_06	m16
246	Humeri_lower_07	m17
250	Forearm_01	m11
251	Forearm_02	m12
252	Forearm_03	m13
253	Forearm_04	m14
254	Forearm_05	m15
255	Forearm_06	m16
256	Forearm_07	m17
260	Wrist-hand_01	m11
261	Wrist-hand_02	m12
262	Wrist-hand_03	m13
263	Wrist-hand_04	m14
264	Wrist-hand_05	m15
265	Wrist-hand_06	m16
266	Wrist-hand_07	m17
270	Femora_upper_01	m11
271	Femora_upper_02	m12
272	Femora_upper_03	m13
273	Femora_upper_04	m14
274	Femora_upper_05	m15
275	Femora_upper_06	m16
276	Femora_upper_07	m17
280	Femora_lower_01	m11
281	Femora_lower_02	m12
282	Femora_lower_03	m13
283	Femora_lower_04	m14
284	Femora_lower_05	m15
285	Femora_lower_06	m16
286	Femora_lower_07	m17
290	Tibiae-fibulae-patellae_01	m11
291	Tibiae-fibulae-patellae_02	m12
292	Tibiae-fibulae-patellae_03	m13
293	Tibiae-fibulae-patellae_04	m14
294	Tibiae-fibulae-patellae_05	m15
295	Tibiae-fibulae-patellae_06	m16
296	Tibiae-fibulae-patellae_07	m17
300	Ankle-foot_01	m11
301	Ankle-foot_02	m12
302	Ankle-foot_03	m13
303	Ankle-foot_04	m14
304	Ankle-foot_05	m15
305	Ankle-foot_06	m16
306	Ankle-foot_07	m17
310	Os hyoideum_01	m11
311	Os hyoideum_02	m12
312	Os hyoideum_03	m13
313	Os hyoideum_04	m14
314	Os hyoideum_05	m15
315	Os hyoideum_06	m16
316	Os hyoideum_07	m17

Table A-2 List of materials, their elemental compositions (percentage by mass) and densities of JM-103[A1)]

Material ID	Material	H	C	N	O	Na	Mg	P	S	Cl	K	Ca	Fe	I	Ar	Density (g cm^{-3})
m11	Bone01	9.0	41.0	2.8	37.4	0.1	0.1	3.2	0.1			6.3	0.001			1.155
m12	Bone02	8.1	34.9	3.1	39.1	0.1	0.1	4.9	0.2			9.7	0.001			1.254
m13	Bone03	7.5	31.5	3.3	40.0	0.1	0.1	5.8	0.2			11.5				1.318
m14	Bone04	6.9	28.1	3.5	40.9	0.1	0.1	6.7	0.2			13.4				1.388
m15	Bone05	6.2	23.5	3.7	42.1	0.05	0.2	8.0	0.2			16.0				1.494
m16	Bone06	5.3	18.2	4.0	43.6	0.02	0.2	9.5	0.3			18.9				1.641
m17	Bone07	4.7	14.4	4.2	44.6		0.2	10.5	0.3			21.0				1.765
m31	Bulk soft tissues	10.5	25.6	2.7	60.2	0.1		0.2	0.3	0.2	0.2					1.03
m32	Muscle	10.2	14.3	3.4	71.0	0.1		0.2	0.3	0.1	0.4					1.05
m33	Skin	10.0	20.4	4.2	64.5	0.2		0.1	0.2	0.3	0.1					1.09
m34	Adipose tissue	11.4	59.8	0.7	27.8	0.1			0.1	0.1						0.95
m35	Breast	11.4	59.8	0.7	27.8	0.1			0.1	0.1						0.95
m36	Lungs	10.3	10.5	3.1	74.9	0.2		0.2	0.3	0.3	0.2					0.26
m37	Teeth	2.2	9.5	2.9	42.1		0.7	13.7				28.9				2.75
m41	Urinary bladder wall	10.5	9.6	2.6	76.1	0.2		0.2	0.2	0.3	0.3					1.04
m42	Brain	10.7	14.5	2.2	71.2	0.2		0.4	0.2	0.3	0.3					1.04
m43	Eyes	9.6	19.5	5.7	64.6	0.1		0.1	0.3	0.1						1.07
m44	Heart wall	10.4	13.9	2.9	71.8	0.1		0.2	0.2	0.2	0.3					1.05
m45	Kidneys	10.3	13.2	3.0	72.4	0.2		0.2	0.2	0.2	0.2	0.1				1.05
m46	Liver	10.3	18.6	2.8	67.1	0.2		0.2	0.3	0.2	0.3					1.05
m47	Pancreas	10.6	16.9	2.2	69.4	0.2		0.2	0.1	0.2	0.2					1.04
m48	Spleen	10.3	11.3	3.2	74.1	0.1		0.3	0.2	0.2	0.3					1.06
m49	Gastrointestinal tract wall	10.6	11.5	2.2	75.1	0.1		0.1	0.1	0.2	0.1					1.03
m50	Thyroid	10.4	11.9	2.4	74.5	0.2		0.1	0.1	0.2	0.1			0.1		1.05
m51	Blood (heart content)	10.2	11.0	3.3	74.5	0.1		0.1	0.2	0.3	0.2		0.1			1.06
m52	Testes	10.6	9.9	2.0	76.6	0.2		0.1	0.2	0.2	0.2					1.04
m53	Lymphatic nodes	10.8	4.2	1.1	83.1	0.3			0.1	0.4						1.03
m54	Prostate	10.4	23.1	2.8	62.7	0.1		0.2	0.3	0.2	0.2					1.03
m81	Stomach content	10.5	25.6	2.7	60.2	0.1		0.2	0.3	0.2	0.2					0.679
m82	Colon content	10.5	25.6	2.7	60.2	0.1		0.2	0.3	0.2	0.2					0.721
m99	Air		0.0	75.5	23.2										1.3	0.001204

Table A-3 Densities and mass fractions of hard bone and bone marrow of bone materials in JM-103[A1)]

Material ID	Material	Density (g cm^{-3})	Mass fraction	
			Hard bone	Bone marrow
m11	Bone01	1.155	0.30	0.70
m12	Bone02	1.254	0.46	0.54
m13	Bone03	1.318	0.55	0.45
m14	Bone04	1.388	0.64	0.36
m15	Bone05	1.494	0.76	0.24
m16	Bone06	1.641	0.90	0.10
m17	Bone07	1.765	1.00	0.00

Table A-4 Mass of red bone marrow in JM-103

Organ ID	Mass (g)	Organ ID	Mass (g)	Organ ID	Mass (g)
120	1.093E+01	190	5.101E−01	260	0.000E+00
121	9.113E+00	191	4.857E+00	261	0.000E+00
122	2.032E+01	192	1.149E+01	262	0.000E+00
123	2.438E+01	193	1.028E+01	263	0.000E+00
124	1.548E+01	194	5.011E+00	264	0.000E+00
125	1.112E+01	195	1.801E+00	265	0.000E+00
126	0.000E+00	196	0.000E+00	266	0.000E+00
130	6.800E−01	200	7.042E+00	270	2.803E+01
131	1.549E+00	201	1.260E+01	271	2.025E+01
132	2.603E+00	202	7.863E+00	272	1.661E+01
133	2.226E+00	203	5.819E+00	273	1.261E+01
134	1.310E+00	204	2.540E+00	274	4.412E+00
135	7.941E−01	205	4.883E−01	275	2.236E+00
136	0.000E+00	206	0.000E+00	276	0.000E+00
140	4.183E−01	210	1.571E+01	280	0.000E+00
141	2.885E+00	211	7.658E+01	281	0.000E+00
142	1.366E+01	212	4.652E+01	282	0.000E+00
143	1.682E+01	213	3.159E+01	283	0.000E+00
144	8.504E+00	214	1.269E+01	284	0.000E+00
145	2.965E+00	215	3.636E+00	285	0.000E+00
146	0.000E+00	216	0.000E+00	286	0.000E+00
150	1.126E+01	220	4.328E+01	290	0.000E+00
151	5.363E+01	221	7.210E+01	291	0.000E+00
152	6.512E+01	222	4.628E+01	292	0.000E+00
153	4.125E+01	223	3.395E+01	293	0.000E+00
154	1.255E+01	224	1.709E+01	294	0.000E+00
155	3.563E+00	225	8.075E+00	295	0.000E+00
156	0.000E+00	226	0.000E+00	296	0.000E+00
160	1.475E+01	230	1.146E+01	300	0.000E+00
161	6.612E+01	231	6.283E+00	301	0.000E+00
162	3.179E+01	232	5.756E+00	302	0.000E+00
163	2.005E+01	233	3.220E+00	303	0.000E+00
164	7.521E+00	234	1.216E+00	304	0.000E+00
165	2.793E+00	235	6.476E−01	305	0.000E+00
166	0.000E+00	236	0.000E+00	306	0.000E+00
170	3.679E+01	240	0.000E+00	310	2.496E−04
171	3.433E+01	241	0.000E+00	311	3.750E−03
172	2.273E+01	242	0.000E+00	312	1.278E−01
173	1.438E+01	243	0.000E+00	313	1.194E−01
174	5.193E+00	244	0.000E+00	314	8.198E−02
175	1.664E+00	245	0.000E+00	315	2.426E−02
176	0.000E+00	246	0.000E+00	316	0.000E+00
180	9.879E−01	250	0.000E+00	Total	1.192E+03
181	1.980E+00	251	0.000E+00		
182	2.562E+00	252	0.000E+00		
183	2.100E+00	253	0.000E+00		
184	1.170E+00	254	0.000E+00		
185	7.174E−01	255	0.000E+00		
186	0.000E+00	256	0.000E+00		

Table A-5 Mass of endosteum in JM-103*

Organ ID	Mass (g)	Organ ID	Mass (g)	Organ ID	Mass (g)
120	1.116E+00	190	3.071E−02	260	2.214E−01
121	1.848E+00	191	5.812E−01	261	4.458E−01
122	5.943E+00	192	1.979E+00	262	1.893E+00
123	1.037E+01	193	2.566E+00	263	4.004E+00
124	1.168E+01	194	2.229E+00	264	3.099E+00
125	2.356E+01	195	2.276E+00	265	2.686E+00
126	3.465E+01	196	8.154E−01	266	1.014E+00
130	1.675E−02	200	3.838E−01	270	2.993E+00
131	7.581E−02	201	1.365E+00	271	4.290E+00
132	1.838E−01	202	1.220E+00	272	5.048E+00
133	2.281E−01	203	1.316E+00	273	5.576E+00
134	2.404E−01	204	1.022E+00	274	3.462E+00
135	4.129E−01	205	5.588E−01	275	4.976E+00
136	9.807E−01	206	1.527E−02	276	2.091E+01
140	2.018E−02	210	8.238E−01	280	3.461E+00
141	2.762E−01	211	7.961E+00	281	6.657E+00
142	1.880E+00	212	6.950E+00	282	7.720E+00
143	3.366E+00	213	6.880E+00	283	7.010E+00
144	3.037E+00	214	4.895E+00	284	4.074E+00
145	2.992E+00	215	4.028E+00	285	4.321E+00
146	7.243E−01	216	3.233E−01	286	1.861E+01
150	4.950E−01	220	2.956E+00	290	6.183E+00
151	4.690E+00	221	9.788E+00	291	1.428E+01
152	8.163E+00	222	9.040E+00	292	1.179E+01
153	7.508E+00	223	9.635E+00	293	1.000E+01
154	4.070E+00	224	8.616E+00	294	7.778E+00
155	3.269E+00	225	1.152E+01	295	1.162E+01
156	5.666E−01	226	3.723E+00	296	3.714E+01
160	8.092E−01	230	1.045E+00	300	1.217E+00
161	7.213E+00	231	1.138E+00	301	5.868E+00
162	4.982E+00	232	1.490E+00	302	6.799E+00
163	4.557E+00	233	1.218E+00	303	9.886E+00
164	3.045E+00	234	8.190E−01	304	9.910E+00
165	3.243E+00	235	1.240E+00	305	8.569E+00
166	1.169E+00	236	3.315E+00	306	2.871E+00
170	2.591E+00	240	3.447E−01	310	2.480E−05
171	4.807E+00	241	8.940E−01	311	7.431E−04
172	4.567E+00	242	1.360E+00	312	3.637E−02
173	4.203E+00	243	1.666E+00	313	4.908E−02
174	2.707E+00	244	1.365E+00	314	6.029E−02
175	2.451E+00	245	1.993E+00	315	5.084E−02
176	6.989E−01	246	4.673E+00	316	4.800E−03
180	4.701E−02	250	6.143E−01	Total	5.823E+02
181	1.870E−01	251	1.273E+00		
182	3.493E−01	252	1.726E+00		
183	4.164E−01	253	2.360E+00		
184	4.132E−01	254	2.104E+00		
185	7.203E−01	255	3.732E+00		
186	5.398E−01	256	5.726E+00		

* The mass and distribution of endosteum in each anatomical region were calculated in reference to the data of RCP-AM[A2)].

付録 B　JM-103 の SAF の線源領域及び標的臓器一覧

付録 B では、本研究で整備した SAF データの線源領域及び標的臓器の一覧を示す。

線源領域については、線源の設定に使用した臓器 ID とともに Table B-1 に示す。Table B-2 には、SAF を評価した標的臓器について、タリーの設定に使用した臓器 ID とともに示す。

Table B-1 List of source regions selected for calculation of specific absorbed fractions of JM-103 and their organ ID numbers

Source region	Acronym	Organ ID
Oral cavity	O-cavity	25
Oral mucosa	O-mucosa	25
Teeth surface	Teeth-S	92
Teeth volume	Teeth-V	92
Oesophagus fast	Oesophag-f	58
Oesophagus slow	Oesophag-s	58
Oesophagus wall	Oesophagus	58
Stomach content	St-cont	91
Stomach wall	St-wall	90
Small intestine content	SI-cont	67
Small intestine wall	SI-wall	66
Small intestine villi	SI-villi	66
Right colon content	RC-cont	103
Right colon wall	RC-wall	102
Left colon content	LC-cont	105
Left colon wall	LC-wall	104
Recto-sigmoid colon content	RSig-cont	107
Recto-sigmoid colon wall	RSig-wall	106
Surface of anterior nasal passages	ET1-sur	27
Surface of posterior nasal passages + pharynx (ET2)	ET2-sur	27
Bound ET2 region	ET2-bnd	27
Sequestered ET2 region	ET2-seq	27
Lymphatic nodes in extrathoracic region	LN-ET	110
Bronchi	Bronchi	28
Bronchi fast	Bronchi-f	28
Bronchi slow	Bronchi-s	28
Bronchi bound	Bronchi-b	28
Bronchi sequestered	Bronchi-q	28
Bronchioles	Bronchiole	42, 44
Bronchioles fast	Brchiole-f	42, 44
Bronchioles slow	Brchiole-s	42, 44
Bronchioles bound	Brchiole-b	42, 44
Bronchioles sequestered	Brchiole-q	42, 44
Alveolar interstitium	AI	42, 44
Lymphatic nodes in thoracic region	LN-Th	111
Lungs	Lungs	42, 44
Adrenals	Adrenals	14
Blood	Blood	*
Cortical bone surface	C-bone-S	†
Cortical bone volume	C-bone-V	†
Trabecular bone surface	T-bone-S	‡
Trabecular bone volume	T-bone-V	‡
Red bone marrow	R-marrow	§
Brain	Brain	18
Breast	Breast	20
Cartilage	Cartilage	¶
Gall bladder content	GB-cont	61
Gall bladder wall	GB-wall	60
Heart content	Ht-cont	64
Heart wall	Ht-wall	34
Kidneys	Kidneys	36, 38

Table B-1 List of source regions selected for calculation of specific absorbed fractions of JM-103 and their organ ID numbers (Continued)

Source region	Acronym	Organ ID
Liver	Liver	40
Lymphatic nodes	Lymph	110-115
Muscle	Muscle	46, 48, 50, 52, 54, 56
Pancreas	Pancreas	62
Prostate	Prostate	95
Salivary glands	S-glands	21-23
Skin	Skin	72, 74, 76, 78, 80, 82
Spleen	Spleen	88
Testes	Testes	94
Thymus	Thymus	96
Thyroid	Thyroid	98
Urinary bladder content	UB-cont	17
Urinary bladder wall	UB-wall	16
Adipose tissue	Adipose	2, 4, 6, 8, 10, 12
Total body tissues (whole body minus contents of alimentary tract, gall bladder and urinary bladder)	T-body	**
Soft tissues (T-body minus mineral bone)	S-tissue	††

* Blood: 63-65, plus blood fraction of 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18-23, 25-28, 30, 32-36, 38, 40, 42-46, 48, 50, 52, 54, 56, 58, 60-62, 66, 72, 74, 76, 78, 80, 82, 88, 90, 94-96, 98, 100, 102, 104, 106, 120-126, 130-136, 140-146, 150-156, 160-166, 170-176, 180-186, 190-196, 200-206, 210-216, 220-226, 230-236, 240-246, 250-256, 260-266, 270-276, 280-286, 290-296, 300-306, 310-316.

† C-bone-S and -V: 126, 136, 146, 156, 166, 176, 186, 196, 206, 216, 226, 236, 246, 256, 266, 276, 286, 296, 306, 316, plus cortical bone fraction of 124-125, 135, 142-145, 152-155, 162-165, 170-175, 183-185, 193-195, 202-205, 212-215, 223-225, 233-235, 242-245, 253-255, 263-265, 274-275, 283-285, 293-295, 303-305, 313-315.

‡ T-bone-S and -V: trabecular bone fraction of 120-124, 130-135, 140-142, 150-152, 160-162, 170, 180-183, 190-193, 200-202, 210-212, 220-223, 230-233, 240-242, 250-253, 260-263, 270-274, 280-283, 290-293, 300-303, 310-313.

§ R-marrow: red marrow fraction of 120-125, 130-135, 140-145, 150-155, 160-165, 170-175, 180-185, 190-195, 200-205, 210-215, 220-225, 230-235, 270-275, 310-315.

¶ Cartilage: 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200, 210, 220, 230, 240, 250, 260, 270, 280, 290, 300, 310.

** T-body: 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18-23, 25-28, 30, 32-36, 38, 40, 42-46, 48, 50, 52, 54, 56, 58, 60, 62-66, 72, 74, 76, 78, 80, 82, 88, 90, 92, 94-96, 98, 100, 102, 104, 106, 110-115, 120-126, 130-136, 140-146, 150-156, 160-166, 170-176, 180-186, 190-196, 200-206, 210-216, 220-226, 230-236, 240-246, 250-256, 260-266, 270-276, 280-286, 290-296, 300-306, 310-316.

†† S-tissue: 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18-23, 25-28, 30, 32-36, 38, 40, 42-46, 48, 50, 52, 54, 56, 58, 60, 62-66, 72, 74, 76, 78, 80, 82, 88, 90, 92, 94-96, 98, 100, 102, 104, 106, 110-115, plus marrow fraction of 120-125, 130-135, 140-145, 150-155, 160-165, 170-175, 180-185, 190-195, 200-205, 210-215, 220-225, 230-235, 240-245, 250-255, 260-265, 270-275, 280-285, 290-295, 300-305, 310-315.

Table B-2 List of target organs selected for calculation of specific absorbed fractions of JM-103 and their organ ID numbers

Target organs	Acronym	Organ ID
Red bone marrow	R-marrow	*
Colon wall	Colon	102, 104, 106
Lungs	Lungs	42, 44
Stomach wall	St-wall	90
Breast	Breast	20
Testes	Testes	94
Urinary bladder wall	UB-wall	16
Oesophagus	Oesophagus	58
Liver	Liver	40
Thyroid	Thyroid	98
Endosteum	Endost-BS	†
Brain	Brain	18
Salivary glands	S-glands	21-23
Skin	Skin	72, 74, 76, 78, 80, 82
Adrenals	Adrenals	14
Extrathoracic region	ET	27
Gall bladder wall	GB-wall	60
Heart wall	Ht-wall	34
Kidneys	Kidneys	36, 38
Lymphatic nodes	Lymph	110-115
Muscle	Muscle	46, 48, 50, 52, 54, 56
Oral mucosa	O-mucosa	25
Pancreas	Pancreas	62
Prostate	Prostate	95
Small intestine wall	SI-wall	66
Spleen	Spleen	88
Thymus	Thymus	96
Right colon wall	RC-wall	102
Left colon wall	LC-wall	104
Recto-sigmoid colon wall	RSig-wall	106
Basal cells of bronchi	Bronchi-bas	28
Secretory cells of bronchi	Bronchi-sec	28
Secretory cells of bronchioles	Brchiol-sec	42, 44
Alveolar interstitium	AI	42, 44
Basal cells of anterior nasal passages	ET1-bas	27
Basal cells of posterior nasal passages + pharynx	ET2-bas	27
Lymphatic nodes in thoracic region	LN-Th	111
Lymphatic nodes in extrathoracic region	LN-ET	110
Lenses of eye	Eye-lens	32
Tongue	Tongue	26
Adipose tissue	Adipose	2, 4, 6, 8, 10, 12

* R-marrow: 120-125, 130-135, 140-145, 150-155, 160-165, 170-175, 180-185, 190-195, 200-205, 210-215, 220-225, 230-235, 270-275, 310-315.

† Endost-BS: 120-126, 130-136, 140-146, 150-156, 160-166, 170-176, 180-186, 190-196, 200-206, 210-216, 220-226, 230-236, 240-246, 250-256, 260-266, 270-276, 280-286, 290-296, 300-306, 310-316.

付録 C　線源発生確率の計算結果

付録 C では、JM-103 を用いた輸送計算における線源の設定に必要となる線源発生確率の計算結果を示す。

Table C-1 から C-6 に、皮質骨、梁骨、赤色骨髄、血液、全身組織及び軟組織を線源とする際の線源発生確率をそれぞれ示す。

Table C-1 Source probability of cortical bone source of JM-103

Organ ID	Number of voxel	Mass (g)	Source probability
124	129961	6.745E+01	1.073E−07
125	201541	2.859E+02	2.932E−07
126	248025	4.204E+02	3.504E−07
135	17996	1.914E+01	2.198E−07
136	35771	6.064E+01	3.504E−07
142	32114	1.372E+01	8.828E−08
143	46918	4.003E+01	1.763E−07
144	33112	3.611E+01	2.254E−07
145	25084	3.558E+01	2.932E−07
146	5081	8.613E+00	3.504E−07
152	159776	1.052E+02	1.361E−07
153	119927	1.023E+02	1.763E−07
154	50853	5.545E+01	2.254E−07
155	31401	4.454E+01	2.932E−07
156	4555	7.721E+00	3.504E−07
162	97335	5.846E+01	1.241E−07
163	72658	6.199E+01	1.763E−07
164	37982	4.142E+01	2.254E−07
165	31096	4.411E+01	2.932E−07
166	9380	1.590E+01	3.504E−07
170	49575	4.296E+00	1.791E−08
171	55241	3.060E+01	1.145E−07
172	41766	2.908E+01	1.439E−07
173	31361	2.676E+01	1.763E−07
174	15805	1.723E+01	2.254E−07
175	11000	1.560E+01	2.932E−07
176	2625	4.450E+00	3.504E−07
183	14584	1.987E+00	2.816E−08
184	11322	1.235E+01	2.254E−07
185	15174	2.152E+01	2.932E−07
186	9514	1.613E+01	3.504E−07
193	61188	3.471E+01	1.163E−07
194	41572	4.533E+01	2.254E−07
195	32643	4.630E+01	2.932E−07
196	9785	1.659E+01	3.504E−07
202	17902	9.527E+00	1.100E−07
203	15758	1.344E+01	1.763E−07
204	9568	1.043E+01	2.254E−07
205	4024	5.708E+00	2.932E−07
206	92	1.559E−01	3.504E−07
212	172540	4.589E+01	5.497E−08
213	139383	1.189E+02	1.763E−07
214	77593	8.461E+01	2.254E−07
215	49082	6.962E+01	2.932E−07
216	3296	5.587E+00	3.504E−07
223	131952	1.096E+02	1.717E−07
224	92309	1.007E+02	2.254E−07
225	94887	1.346E+02	2.932E−07
226	25660	4.350E+01	3.504E−07
233	26843	3.437E+00	2.646E−08
234	14124	1.540E+01	2.254E−07
235	16437	2.331E+01	2.932E−07
236	36776	6.234E+01	3.504E−07
242	33540	1.142E+01	7.036E−08
243	33521	2.860E+01	1.763E−07
244	21499	2.344E+01	2.254E−07
245	24128	3.422E+01	2.932E−07
246	47333	8.023E+01	3.504E−07
253	41079	3.356E+01	1.688E−07
254	28652	3.124E+01	2.254E−07
255	39078	5.543E+01	2.932E−07
256	50173	8.505E+01	3.504E−07
263	53036	3.839E+01	1.496E−07
264	32117	3.502E+01	2.254E−07
265	21401	3.036E+01	2.932E−07
266	6762	1.146E+01	3.504E−07
274	33792	1.211E+01	7.405E−08
275	37338	5.296E+01	2.932E−07
276	131293	2.226E+02	3.504E−07
283	95466	6.359E+01	1.377E−07
284	43403	4.733E+01	2.254E−07
285	35392	5.020E+01	2.932E−07
286	127576	2.163E+02	3.504E−07
293	122994	7.595E+01	1.276E−07
294	74823	8.159E+01	2.254E−07
295	85942	1.219E+02	2.932E−07
296	229811	3.896E+02	3.504E−07
303	144213	3.403E+01	4.877E−08
304	113104	1.233E+02	2.254E−07
305	75181	1.066E+02	2.932E−07
306	21082	3.574E+01	3.504E−07
313	772	2.379E−01	6.369E−08
314	742	8.091E−01	2.254E−07
315	481	6.823E−01	2.932E−07
316	38	6.441E−02	3.504E−07

Table C-2 Source probability of trabecular bone source of JM-103

Organ ID	Number of voxel	Mass (g)	Source probability
120	40698	1.354E+01	1.350E−07
121	40464	2.242E+01	2.247E−07
122	103574	7.211E+01	2.823E−07
123	147502	1.258E+02	3.460E−07
124	129961	7.427E+01	2.318E−07
130	3112	1.036E+00	1.350E−07
131	8461	4.687E+00	2.247E−07
132	16319	1.136E+01	2.824E−07
133	16532	1.410E+01	3.460E−07
134	13628	1.486E+01	4.423E−07
135	17996	6.385E+00	1.439E−07
140	721	2.399E−01	1.350E−07
141	5929	3.285E+00	2.247E−07
142	32114	8.641E+00	1.091E−07
150	20270	6.745E+00	1.350E−07
151	115363	6.391E+01	2.247E−07
152	159776	6.061E+00	1.538E−08
160	33073	1.101E+01	1.350E−07
161	177095	9.811E+01	2.247E−07
162	97335	9.309E+00	3.879E−08
170	49575	1.220E+01	9.982E−08
180	4221	1.405E+00	1.350E−07
181	10084	5.587E+00	2.247E−07
182	14990	1.044E+01	2.823E−07
183	14584	1.046E+01	2.908E−07
190	1877	6.246E−01	1.350E−07
191	21338	1.182E+01	2.247E−07
192	57831	4.026E+01	2.823E−07
193	61188	1.749E+01	1.159E−07
200	11778	3.919E+00	1.350E−07
201	25158	1.394E+01	2.247E−07
202	17902	2.936E+00	6.651E−08
210	42788	1.424E+01	1.350E−07
211	248387	1.376E+02	2.247E−07
212	172540	7.423E+01	1.745E−07
220	103770	3.453E+01	1.350E−07
221	206436	1.144E+02	2.247E−07
222	151711	1.056E+02	2.823E−07
223	131952	2.971E+00	9.131E−09
230	59055	1.965E+01	1.350E−07
231	38646	2.141E+01	2.247E−07
232	40241	2.802E+01	2.823E−07
233	26843	1.946E+01	2.941E−07
240	17786	5.919E+00	1.350E−07
241	27708	1.535E+01	2.247E−07
242	33540	1.193E+01	1.443E−07
250	27419	9.124E+00	1.350E−07
251	34124	1.890E+01	2.247E−07
252	36829	2.564E+01	2.823E−07
253	41079	1.489E+00	1.470E−08
260	7518	2.502E+00	1.350E−07
261	9093	5.037E+00	2.247E−07
262	30727	2.139E+01	2.823E−07
263	53036	6.863E+00	5.248E−08
270	95708	3.185E+01	1.350E−07
271	82419	4.566E+01	2.247E−07
272	77174	5.373E+01	2.823E−07
273	69558	5.934E+01	3.460E−07
274	33792	2.474E+01	2.970E−07
280	120844	4.021E+01	1.350E−07
281	139605	7.734E+01	2.247E−07
282	128836	8.969E+01	2.823E−07
283	95466	1.786E+01	7.586E−08
290	194914	6.486E+01	1.350E−07
291	270322	1.498E+02	2.247E−07
292	177718	1.237E+02	2.823E−07
293	122994	2.898E+01	9.557E−08
300	45503	1.514E+01	1.350E−07
301	131814	7.302E+01	2.247E−07
302	121539	8.461E+01	2.823E−07
303	144213	8.900E+01	2.503E−07
310	1	3.328E−04	1.350E−07
311	18	9.972E−03	2.247E−07
312	701	4.880E−01	2.823E−07
313	772	4.207E−01	2.210E−07

Table C-3 Source probability of red bone marrow source of JM-103

Organ ID	Number of voxel	Mass (g)	Source probability	Organ ID	Number of voxel	Mass (g)	Source probability
120	40698	1.091E+01	2.250E−07	190	1877	5.103E−01	2.281E−07
121	40464	9.089E+00	1.885E−07	191	21338	4.859E+00	1.911E−07
122	103574	2.038E+01	1.651E−07	192	57831	1.153E+01	1.674E−07
123	147502	2.445E+01	1.391E−07	193	61188	1.028E+01	1.410E−07
124	129961	1.546E+01	9.981E−08	194	41572	5.012E+00	1.012E−07
125	201541	1.097E+01	4.568E−08	195	32643	1.801E+00	4.630E−08
130	3112	6.824E−01	1.840E−07	200	11778	7.050E+00	5.023E−07
131	8461	1.554E+00	1.541E−07	201	25158	1.261E+01	4.207E−07
132	16319	2.625E+00	1.350E−07	202	17902	7.861E+00	3.685E−07
133	16532	2.241E+00	1.137E−07	203	15758	5.830E+00	3.104E−07
134	13628	1.325E+00	8.161E−08	204	9568	2.540E+00	2.228E−07
135	17996	8.010E−01	3.735E−08	205	4024	4.889E−01	1.020E−07
140	721	4.189E−01	4.876E−07	210	42788	1.573E+01	3.084E−07
141	5929	2.885E+00	4.084E−07	211	248387	7.646E+01	2.583E−07
142	32114	1.369E+01	3.577E−07	212	172540	4.652E+01	2.263E−07
143	46918	1.685E+01	3.013E−07	213	139383	3.166E+01	1.906E−07
144	33112	8.532E+00	2.162E−07	214	77593	1.265E+01	1.368E−07
145	25084	2.958E+00	9.896E−08	215	49082	3.662E+00	6.260E−08
150	20270	1.126E+01	4.661E−07	220	103770	4.323E+01	3.496E−07
151	115363	5.367E+01	3.904E−07	221	206436	7.203E+01	2.928E−07
152	159776	6.511E+01	3.420E−07	222	151711	4.636E+01	2.565E−07
153	119927	4.117E+01	2.881E−07	223	131952	3.397E+01	2.161E−07
154	50853	1.253E+01	2.067E−07	224	92309	1.705E+01	1.550E−07
155	31401	3.540E+00	9.461E−08	225	94887	8.023E+00	7.096E−08
160	33073	1.475E+01	3.744E−07	230	59055	1.149E+01	1.633E−07
161	177095	6.617E+01	3.136E−07	231	38646	6.298E+00	1.368E−07
162	97335	3.185E+01	2.746E−07	232	40241	5.744E+00	1.198E−07
163	72658	2.003E+01	2.314E−07	233	26843	3.228E+00	1.009E−07
164	37982	7.515E+00	1.660E−07	234	14124	1.219E+00	7.241E−08
165	31096	2.816E+00	7.598E−08	235	16437	6.491E−01	3.314E−08
170	49575	3.679E+01	6.228E−07	270	95708	2.805E+01	2.460E−07
171	55241	3.434E+01	5.216E−07	271	82419	2.023E+01	2.060E−07
172	41766	2.274E+01	4.569E−07	272	77174	1.659E+01	1.804E−07
173	31361	1.438E+01	3.849E−07	273	69558	1.260E+01	1.520E−07
174	15805	5.202E+00	2.762E−07	274	33792	4.393E+00	1.091E−07
175	11000	1.657E+00	1.264E−07	275	37338	2.221E+00	4.992E−08
180	4221	9.878E−01	1.964E−07	310	1	2.193E−04	1.840E−07
181	10084	1.977E+00	1.645E−07	311	18	3.306E−03	1.541E−07
182	14990	2.573E+00	1.441E−07	312	701	1.128E−01	1.350E−07
183	14584	2.109E+00	1.214E−07	313	772	1.046E−01	1.137E−07
184	11322	1.175E+00	8.709E−08	314	742	7.216E−02	8.161E−08
185	15174	7.207E−01	3.986E−08	315	481	2.141E−02	3.735E−08

Table C-4 Source probability of blood source of JM-103

Organ ID	Number of voxel	Mass (g)	Source probability	Organ ID	Number of voxel	Mass (g)	Source probability
2	644957	9.926E+00	4.513E−09	95	11402	1.676E+00	4.311E−08
4	10163659	1.564E+02	4.513E−09	96	31382	4.560E+00	4.260E−08
6	607302	9.347E+00	4.513E−09	98	19981	2.934E+00	4.305E−08
8	606238	9.330E+00	4.513E−09	100	8964	1.507E+00	4.931E−08
10	1802683	2.774E+01	4.513E−09	102	138693	4.005E+01	8.467E−08
12	1729725	2.662E+01	4.513E−09	104	129341	3.713E+01	8.417E−08
14	14775	3.098E+00	6.147E−08	106	61177	1.773E+01	8.499E−08
16	38916	7.519E−01	5.665E−09	110	9891	1.318E−01	3.907E−09
18	1530778	6.161E+01	1.180E−08	111	9276	1.236E−01	3.907E−09
19	159216	2.121E+00	3.907E−09	112	4554	6.067E−02	3.907E−09
20	24935	1.558E+00	1.832E−08	113	171024	2.279E+00	3.907E−09
21	51582	7.487E+00	4.256E−08	114	13216	1.761E−01	3.907E−09
22	25037	3.634E+00	4.256E−08	115	18437	2.456E−01	3.907E−09
23	10412	1.511E+00	4.256E−08	120	40698	2.135E+00	1.538E−08
25	9915	2.295E−01	6.786E−09	121	40464	1.889E+00	1.369E−08
26	61283	1.455E+00	6.960E−09	122	103574	4.454E+00	1.261E−08
27	43006	6.264E+00	4.271E−08	123	147502	5.737E+00	1.140E−08
28	9128	1.338E+00	4.299E−08	124	129961	4.249E+00	9.585E−09
32	369	5.633E−02	4.476E−08	125	201541	4.868E+00	7.083E−09
33	32482	7.714E−01	6.963E−09	126	248025	4.204E+00	4.970E−09
34	385389	9.152E+00	6.963E−09	130	3112	1.633E−01	1.539E−08
35	102572	2.436E+00	6.963E−09	131	8461	3.952E−01	1.370E−08
36	161004	5.130E+01	9.343E−08	132	16319	7.021E−01	1.262E−08
38	169408	5.406E+01	9.356E−08	133	16532	6.433E−01	1.141E−08
40	1449372	3.969E+02	8.029E−08	134	13628	4.457E−01	9.590E−09
42	2340189	2.553E+02	3.199E−08	135	17996	4.348E−01	7.085E−09
43	317481	4.230E+00	3.907E−09	136	35771	6.064E−01	4.970E−09
44	2526712	2.651E+02	3.076E−08	140	721	6.207E−02	2.524E−08
45	318800	4.627E+01	4.256E−08	141	5929	4.438E−01	2.195E−08
46	1508892	3.591E+01	6.979E−09	142	32114	2.173E+00	1.984E−08
48	13398804	3.189E+02	6.979E−09	143	46918	2.800E+00	1.750E−08
50	1021408	2.431E+01	6.979E−09	144	33112	1.576E+00	1.396E−08
52	1083724	2.579E+01	6.979E−09	145	25084	7.772E−01	9.085E−09
54	5406697	1.287E+02	6.979E−09	146	5081	8.613E−02	4.970E−09
56	5543746	1.319E+02	6.979E−09	150	20270	1.747E+00	2.526E−08
58	36790	9.262E+00	7.382E−08	151	115363	8.643E+00	2.197E−08
60	8211	1.205E+00	4.302E−08	152	159776	1.082E+01	1.986E−08
62	136457	2.871E+01	6.168E−08	153	119927	7.163E+00	1.751E−08
63	32779	3.337E+01	2.985E−07	154	50853	2.423E+00	1.397E−08
64	355810	3.622E+02	2.985E−07	155	31401	9.733E−01	9.089E−09
65	143186	1.458E+02	2.985E−07	156	4555	7.721E−02	4.970E−09
66	562653	1.589E+02	8.282E−08	160	33073	2.848E+00	2.525E−08
72	180442	8.380E+00	1.362E−08	161	177095	1.326E+01	2.196E−08
74	777503	3.611E+01	1.362E−08	162	97335	6.589E+00	1.985E−08
76	166573	7.736E+00	1.362E−08	163	72658	4.337E+00	1.750E−08
78	168714	7.836E+00	1.362E−08	164	37982	1.809E+00	1.396E−08
80	401142	1.863E+01	1.362E−08	165	31096	9.636E−01	9.086E−09
82	396322	1.841E+01	1.362E−08	166	9380	1.590E−01	4.970E−09
88	136957	6.386E+01	1.367E−07	170	49575	4.270E+00	2.526E−08
90	142425	3.630E+01	7.473E−08	171	55241	4.137E+00	2.196E−08
94	36491	2.030E+00	1.631E−08	172	41766	2.828E+00	1.985E−08

Table C-4 Source probability of blood source of JM-103 (Continued)

Organ ID	Number of voxel	Mass (g)	Source probability	Organ ID	Number of voxel	Mass (g)	Source probability
173	31361	1.873E+00	1.751E−08	245	24128	3.803E−01	4.621E−09
174	15805	7.528E−01	1.397E−08	246	47333	8.023E−01	4.970E−09
175	11000	3.409E−01	9.087E−09	250	27419	3.041E−01	3.253E−09
176	2625	4.450E−02	4.970E−09	251	34124	4.110E−01	3.531E−09
180	4221	1.986E−01	1.379E−08	252	36829	4.662E−01	3.712E−09
181	10084	4.251E−01	1.236E−08	253	41079	5.476E−01	3.909E−09
182	14990	5.851E−01	1.144E−08	254	28652	4.111E−01	4.207E−09
183	14584	5.184E−01	1.042E−08	255	39078	6.159E−01	4.621E−09
184	11322	3.430E−01	8.882E−09	256	50173	8.505E−01	4.970E−09
185	15174	3.499E−01	6.761E−09	260	7518	8.339E−02	3.253E−09
186	9514	1.613E−01	4.970E−09	261	9093	1.095E−01	3.531E−09
190	1877	9.828E−02	1.535E−08	262	30727	3.890E−01	3.712E−09
191	21338	9.945E−01	1.367E−08	263	53036	7.070E−01	3.909E−09
192	57831	2.483E+00	1.259E−08	264	32117	4.608E−01	4.207E−09
193	61188	2.376E+00	1.139E−08	265	21401	3.373E−01	4.621E−09
194	41572	1.357E+00	9.574E−09	266	6762	1.146E−01	4.970E−09
195	32643	7.879E−01	7.077E−09	270	95708	3.685E+00	1.129E−08
196	9785	1.659E−01	4.970E−09	271	82419	2.885E+00	1.026E−08
200	11778	1.014E+00	2.524E−08	272	77174	2.529E+00	9.607E−09
201	25158	1.883E+00	2.195E−08	273	69558	2.105E+00	8.875E−09
202	17902	1.211E+00	1.984E−08	274	33792	8.956E−01	7.771E−09
203	15758	9.403E−01	1.750E−08	275	37338	7.962E−01	6.252E−09
204	9568	4.555E−01	1.396E−08	276	131293	2.226E+00	4.970E−09
205	4024	1.247E−01	9.084E−09	280	120844	1.340E+00	3.253E−09
206	92	1.559E−03	4.970E−09	281	139605	1.681E+00	3.531E−09
210	42788	3.685E+00	2.525E−08	282	128836	1.631E+00	3.712E−09
211	248387	1.860E+01	2.195E−08	283	95466	1.273E+00	3.909E−09
212	172540	1.168E+01	1.985E−08	284	43403	6.228E−01	4.207E−09
213	139383	8.320E+00	1.750E−08	285	35392	5.578E−01	4.621E−09
214	77593	3.695E+00	1.396E−08	286	127576	2.163E+00	4.970E−09
215	49082	1.521E+00	9.086E−09	290	194914	2.162E+00	3.253E−09
216	3296	5.587E−02	4.970E−09	291	270322	3.256E+00	3.531E−09
220	103770	6.541E+00	1.848E−08	292	177718	2.250E+00	3.712E−09
221	206436	1.147E+01	1.629E−08	293	122994	1.640E+00	3.909E−09
222	151711	7.701E+00	1.488E−08	294	74823	1.074E+00	4.207E−09
223	131952	5.995E+00	1.332E−08	295	85942	1.354E+00	4.621E−09
224	92309	3.451E+00	1.096E−08	296	229811	3.896E+00	4.970E−09
225	94887	2.496E+00	7.712E−09	300	45503	5.047E−01	3.253E−09
226	25660	4.350E−01	4.970E−09	301	131814	1.587E+00	3.531E−09
230	59055	2.278E+00	1.131E−08	302	121539	1.538E+00	3.712E−09
231	38646	1.355E+00	1.028E−08	303	144213	1.922E+00	3.909E−09
232	40241	1.321E+00	9.623E−09	304	113104	1.623E+00	4.207E−09
233	26843	8.137E−01	8.889E−09	305	75181	1.185E+00	4.621E−09
234	14124	3.748E−01	7.781E−09	306	21082	3.574E−01	4.970E−09
235	16437	3.507E−01	6.257E−09	310	1	4.494E−05	1.318E−08
236	36776	6.234E−01	4.970E−09	311	18	7.271E−04	1.184E−08
240	17786	1.973E−01	3.253E−09	312	701	2.628E−02	1.099E−08
241	27708	3.337E−01	3.531E−09	313	772	2.644E−02	1.004E−08
242	33540	4.246E−01	3.712E−09	314	742	2.178E−02	8.609E−09
243	33521	4.469E−01	3.909E−09	315	481	1.089E−02	6.636E−09
244	21499	3.085E−01	4.207E−09	316	38	6.441E−04	4.970E−09

Table C-5 Source probability of total body tissues source of JM-103

Organ ID	Number of voxel	Mass (g)	Source probability	Organ ID	Number of voxel	Mass (g)	Source probability
2	644957	5.884E+02	1.425E−08	94	36491	3.645E+01	1.560E−08
4	10163659	9.273E+03	1.425E−08	95	11402	1.128E+01	1.545E−08
6	607302	5.541E+02	1.425E−08	96	31382	3.104E+01	1.545E−08
8	606238	5.531E+02	1.425E−08	98	19981	2.015E+01	1.575E−08
10	1802683	1.645E+03	1.425E−08	100	8964	8.867E+00	1.545E−08
12	1729725	1.578E+03	1.425E−08	102	138693	1.372E+02	1.545E−08
14	14775	1.462E+01	1.545E−08	104	129341	1.279E+02	1.545E−08
16	38916	3.887E+01	1.560E−08	106	61177	6.052E+01	1.545E−08
18	1530778	1.529E+03	1.560E−08	110	9891	9.784E+00	1.545E−08
19	159216	1.575E+02	1.545E−08	111	9276	9.176E+00	1.545E−08
20	24935	2.275E+01	1.425E−08	112	4554	4.505E+00	1.545E−08
21	51582	5.103E+01	1.545E−08	113	171024	1.692E+02	1.545E−08
22	25037	2.477E+01	1.545E−08	114	13216	1.307E+01	1.545E−08
23	10412	1.030E+01	1.545E−08	115	18437	1.824E+01	1.545E−08
25	9915	9.998E+00	1.575E−08	120	40698	4.514E+01	1.732E−08
26	61283	6.180E+01	1.575E−08	121	40464	4.873E+01	1.881E−08
27	43006	4.254E+01	1.545E−08	122	103574	1.311E+02	1.977E−08
28	9128	9.030E+00	1.545E−08	123	147502	1.966E+02	2.082E−08
30	13421	1.379E+01	1.605E−08	124	129961	1.865E+02	2.241E−08
32	369	3.792E−01	1.605E−08	125	201541	3.176E+02	2.461E−08
33	32482	3.276E+01	1.575E−08	126	248025	4.204E+02	2.647E−08
34	385389	3.886E+02	1.575E−08	130	3112	3.452E+00	1.732E−08
35	102572	1.034E+02	1.575E−08	131	8461	1.019E+01	1.881E−08
36	161004	1.624E+02	1.575E−08	132	16319	2.066E+01	1.977E−08
38	169408	1.708E+02	1.575E−08	133	16532	2.204E+01	2.082E−08
40	1449372	1.462E+03	1.575E−08	134	13628	1.955E+01	2.241E−08
42	2340189	5.844E+02	3.900E−09	135	17996	2.836E+01	2.461E−08
43	317481	3.141E+02	1.545E−08	136	35771	6.064E+01	2.647E−08
44	2526712	6.309E+02	3.900E−09	140	721	7.998E−01	1.732E−08
45	318800	3.154E+02	1.545E−08	141	5929	7.141E+00	1.881E−08
46	1508892	1.522E+03	1.575E−08	142	32114	4.065E+01	1.977E−08
48	13398804	1.351E+04	1.575E−08	143	46918	6.254E+01	2.082E−08
50	1021408	1.030E+03	1.575E−08	144	33112	4.751E+01	2.241E−08
52	1083724	1.093E+03	1.575E−08	145	25084	3.953E+01	2.461E−08
54	5406697	5.452E+03	1.575E−08	146	5081	8.613E+00	2.647E−08
56	5543746	5.590E+03	1.575E−08	150	20270	2.248E+01	1.732E−08
58	36790	3.639E+01	1.545E−08	151	115363	1.389E+02	1.881E−08
60	8211	8.122E+00	1.545E−08	152	159776	2.022E+02	1.977E−08
62	136457	1.363E+02	1.560E−08	153	119927	1.599E+02	2.082E−08
63	32779	3.337E+01	1.590E−08	154	50853	7.297E+01	2.241E−08
64	355810	3.622E+02	1.590E−08	155	31401	4.949E+01	2.461E−08
65	143186	1.458E+02	1.590E−08	156	4555	7.721E+00	2.647E−08
66	562653	5.566E+02	1.545E−08	160	33073	3.669E+01	1.732E−08
72	180442	1.889E+02	1.635E−08	161	177095	2.133E+02	1.881E−08
74	777503	8.139E+02	1.635E−08	162	97335	1.232E+02	1.977E−08
76	166573	1.744E+02	1.635E−08	163	72658	9.686E+01	2.082E−08
78	168714	1.766E+02	1.635E−08	164	37982	5.450E+01	2.241E−08
80	401142	4.199E+02	1.635E−08	165	31096	4.901E+01	2.461E−08
82	396322	4.149E+02	1.635E−08	166	9380	1.590E+01	2.647E−08
88	136957	1.394E+02	1.590E−08	170	49575	5.499E+01	1.732E−08
90	142425	1.409E+02	1.545E−08	171	55241	6.653E+01	1.881E−08
92	22943	6.059E+01	4.125E−08	172	41766	5.287E+01	1.977E−08

Table C-5 Source probability of total body tissues source of JM-103 (Continued)

Organ ID	Number of voxel	Mass (g)	Source probability	Organ ID	Number of voxel	Mass (g)	Source probability
173	31361	4.181E+01	2.082E−08	245	24128	3.803E+01	2.461E−08
174	15805	2.268E+01	2.241E−08	246	47333	8.023E+01	2.647E−08
175	11000	1.734E+01	2.461E−08	250	27419	3.041E+01	1.732E−08
176	2625	4.450E+00	2.647E−08	251	34124	4.110E+01	1.881E−08
180	4221	4.682E+00	1.732E−08	252	36829	4.662E+01	1.977E−08
181	10084	1.214E+01	1.881E−08	253	41079	5.476E+01	2.082E−08
182	14990	1.897E+01	1.977E−08	254	28652	4.111E+01	2.241E−08
183	14584	1.944E+01	2.082E−08	255	39078	6.159E+01	2.461E−08
184	11322	1.625E+01	2.241E−08	256	50173	8.505E+01	2.647E−08
185	15174	2.391E+01	2.461E−08	260	7518	8.339E+00	1.732E−08
186	9514	1.613E+01	2.647E−08	261	9093	1.095E+01	1.881E−08
190	1877	2.082E+00	1.732E−08	262	30727	3.889E+01	1.977E−08
191	21338	2.570E+01	1.881E−08	263	53036	7.070E+01	2.082E−08
192	57831	7.320E+01	1.977E−08	264	32117	4.608E+01	2.241E−08
193	61188	8.157E+01	2.082E−08	265	21401	3.373E+01	2.461E−08
194	41572	5.965E+01	2.241E−08	266	6762	1.146E+01	2.647E−08
195	32643	5.145E+01	2.461E−08	270	95708	1.062E+02	1.732E−08
196	9785	1.659E+01	2.647E−08	271	82419	9.926E+01	1.881E−08
200	11778	1.306E+01	1.732E−08	272	77174	9.769E+01	1.977E−08
201	25158	3.030E+01	1.881E−08	273	69558	9.272E+01	2.082E−08
202	17902	2.266E+01	1.977E−08	274	33792	4.849E+01	2.241E−08
203	15758	2.101E+01	2.082E−08	275	37338	5.885E+01	2.461E−08
204	9568	1.373E+01	2.241E−08	276	131293	2.226E+02	2.647E−08
205	4024	6.342E+00	2.461E−08	280	120844	1.340E+02	1.732E−08
206	92	1.559E−01	2.647E−08	281	139605	1.681E+02	1.881E−08
210	42788	4.746E+01	1.732E−08	282	128836	1.631E+02	1.977E−08
211	248387	2.991E+02	1.881E−08	283	95466	1.273E+02	2.082E−08
212	172540	2.184E+02	1.977E−08	284	43403	6.228E+01	2.241E−08
213	139383	1.858E+02	2.082E−08	285	35392	5.578E+01	2.461E−08
214	77593	1.113E+02	2.241E−08	286	127576	2.163E+02	2.647E−08
215	49082	7.735E+01	2.461E−08	290	194914	2.162E+02	1.732E−08
216	3296	5.587E+00	2.647E−08	291	270322	3.256E+02	1.881E−08
220	103770	1.151E+02	1.732E−08	292	177718	2.250E+02	1.977E−08
221	206436	2.486E+02	1.881E−08	293	122994	1.640E+02	2.082E−08
222	151711	1.920E+02	1.977E−08	294	74823	1.074E+02	2.241E−08
223	131952	1.759E+02	2.082E−08	295	85942	1.354E+02	2.461E−08
224	92309	1.324E+02	2.241E−08	296	229811	3.896E+02	2.647E−08
225	94887	1.495E+02	2.461E−08	300	45503	5.047E+01	1.732E−08
226	25660	4.350E+01	2.647E−08	301	131814	1.587E+02	1.881E−08
230	59055	6.551E+01	1.732E−08	302	121539	1.538E+02	1.977E−08
231	38646	4.654E+01	1.881E−08	303	144213	1.922E+02	2.082E−08
232	40241	5.094E+01	1.977E−08	304	113104	1.623E+02	2.241E−08
233	26843	3.578E+01	2.082E−08	305	75181	1.185E+02	2.461E−08
234	14124	2.027E+01	2.241E−08	306	21082	3.574E+01	2.647E−08
235	16437	2.590E+01	2.461E−08	310	1	1.109E−03	1.732E−08
236	36776	6.234E+01	2.647E−08	311	18	2.168E−02	1.881E−08
240	17786	1.973E+01	1.732E−08	312	701	8.873E−01	1.977E−08
241	27708	3.337E+01	1.881E−08	313	772	1.029E+00	2.082E−08
242	33540	4.246E+01	1.977E−08	314	742	1.065E+00	2.241E−08
243	33521	4.468E+01	2.082E−08	315	481	7.581E−01	2.461E−08
244	21499	3.085E+01	2.241E−08	316	38	6.441E−02	2.647E−08

Table C-6 Source probability of soft tissues source of JM-103

Organ ID	Number of voxel	Mass (g)	Source probability	Organ ID	Number of voxel	Mass (g)	Source probability
2	644957	5.884E+02	1.625E−08	82	396322	4.149E+02	1.864E−08
4	10163659	9.273E+03	1.625E−08	88	136957	1.394E+02	1.813E−08
6	607302	5.541E+02	1.625E−08	90	142425	1.409E+02	1.762E−08
8	606238	5.531E+02	1.625E−08	94	36491	3.645E+01	1.779E−08
10	1802683	1.645E+03	1.625E−08	95	11402	1.128E+01	1.762E−08
12	1729725	1.578E+03	1.625E−08	96	31382	3.104E+01	1.762E−08
14	14775	1.462E+01	1.762E−08	98	19981	2.015E+01	1.796E−08
16	38916	3.887E+01	1.779E−08	100	8964	8.868E+00	1.762E−08
18	1530778	1.529E+03	1.779E−08	102	138693	1.372E+02	1.762E−08
19	159216	1.575E+02	1.762E−08	104	129341	1.279E+02	1.762E−08
20	24935	2.275E+01	1.625E−08	106	61177	6.052E+01	1.762E−08
21	51582	5.103E+01	1.762E−08	110	9891	9.785E+00	1.762E−08
22	25037	2.477E+01	1.762E−08	111	9276	9.176E+00	1.762E−08
23	10412	1.030E+01	1.762E−08	112	4554	4.505E+00	1.762E−08
25	9915	9.999E+00	1.796E−08	113	171024	1.692E+02	1.762E−08
26	61283	6.180E+01	1.796E−08	114	13216	1.307E+01	1.762E−08
27	43006	4.254E+01	1.762E−08	115	18437	1.824E+01	1.762E−08
28	9128	9.030E+00	1.762E−08	120	40698	3.160E+01	1.383E−08
30	13421	1.379E+01	1.830E−08	121	40464	2.632E+01	1.158E−08
32	369	3.792E−01	1.830E−08	122	103574	5.899E+01	1.014E−08
33	32482	3.276E+01	1.796E−08	123	147502	7.079E+01	8.546E−09
34	385389	3.886E+02	1.796E−08	124	129961	4.475E+01	6.132E−09
35	102572	1.034E+02	1.796E−08	125	201541	3.176E+01	2.807E−09
36	161004	1.624E+02	1.796E−08	130	3112	2.416E+00	1.383E−08
38	169408	1.708E+02	1.796E−08	131	8461	5.503E+00	1.158E−08
40	1449372	1.462E+03	1.796E−08	132	16319	9.295E+00	1.014E−08
42	2340189	5.844E+02	4.447E−09	133	16532	7.934E+00	8.546E−09
43	317481	3.141E+02	1.762E−08	134	13628	4.693E+00	6.132E−09
44	2526712	6.309E+02	4.447E−09	135	17996	2.836E+00	2.807E−09
45	318800	3.154E+02	1.762E−08	140	721	5.598E−01	1.383E−08
46	1508892	1.522E+03	1.796E−08	141	5929	3.856E+00	1.158E−08
48	13398804	1.351E+04	1.796E−08	142	32114	1.829E+01	1.014E−08
50	1021408	1.030E+03	1.796E−08	143	46918	2.252E+01	8.546E−09
52	1083724	1.093E+03	1.796E−08	144	33112	1.140E+01	6.132E−09
54	5406697	5.452E+03	1.796E−08	145	25084	3.953E+00	2.807E−09
56	5543746	5.591E+03	1.796E−08	150	20270	1.574E+01	1.383E−08
58	36790	3.639E+01	1.762E−08	151	115363	7.503E+01	1.158E−08
60	8211	8.123E+00	1.762E−08	152	159776	9.101E+01	1.014E−08
62	136457	1.363E+02	1.779E−08	153	119927	5.755E+01	8.546E−09
63	32779	3.337E+01	1.813E−08	154	50853	1.751E+01	6.132E−09
66	562653	5.566E+02	1.762E−08	155	31401	4.949E+00	2.807E−09
72	180442	1.889E+02	1.864E−08	160	33073	2.568E+01	1.383E−08
74	777503	8.139E+02	1.864E−08	161	177095	1.152E+02	1.158E−08
76	166573	1.744E+02	1.864E−08	162	97335	5.544E+01	1.014E−08
78	168714	1.766E+02	1.864E−08	163	72658	3.487E+01	8.546E−09
80	401142	4.199E+02	1.864E−08	164	37982	1.308E+01	6.132E−09

Table C-6 Source probability of soft tissues source of JM-103 (Continued)

Organ ID	Number of voxel	Mass (g)	Source probability
165	31096	4.901E+00	2.807E−09
170	49575	3.849E+01	1.383E−08
171	55241	3.593E+01	1.158E−08
172	41766	2.379E+01	1.014E−08
173	31361	1.505E+01	8.546E−09
174	15805	5.443E+00	6.132E−09
175	11000	1.734E+00	2.807E−09
180	4221	3.277E+00	1.383E−08
181	10084	6.558E+00	1.158E−08
182	14990	8.538E+00	1.014E−08
183	14584	6.999E+00	8.546E−09
184	11322	3.899E+00	6.132E−09
185	15174	2.391E+00	2.807E−09
190	1877	1.457E+00	1.383E−08
191	21338	1.388E+01	1.158E−08
192	57831	3.294E+01	1.014E−08
193	61188	2.936E+01	8.546E−09
194	41572	1.432E+01	6.132E−09
195	32643	5.145E+00	2.807E−09
200	11778	9.145E+00	1.383E−08
201	25158	1.636E+01	1.158E−08
202	17902	1.020E+01	1.014E−08
203	15758	7.562E+00	8.546E−09
204	9568	3.295E+00	6.132E−09
205	4024	6.342E−01	2.807E−09
210	42788	3.322E+01	1.383E−08
211	248387	1.615E+02	1.158E−08
212	172540	9.828E+01	1.014E−08
213	139383	6.689E+01	8.546E−09
214	77593	2.672E+01	6.132E−09
215	49082	7.735E+00	2.807E−09
220	103770	8.057E+01	1.383E−08
221	206436	1.343E+02	1.158E−08
222	151711	8.641E+01	1.014E−08
223	131952	6.332E+01	8.546E−09
224	92309	3.179E+01	6.132E−09
225	94887	1.495E+01	2.807E−09
230	59055	4.585E+01	1.383E−08
231	38646	2.513E+01	1.158E−08
232	40241	2.292E+01	1.014E−08
233	26843	1.288E+01	8.546E−09
234	14124	4.864E+00	6.132E−09
235	16437	2.590E+00	2.807E−09
240	17786	1.381E+01	1.383E−08
241	27708	1.802E+01	1.158E−08
242	33540	1.910E+01	1.014E−08
243	33521	1.609E+01	8.546E−09
244	21499	7.403E+00	6.132E−09
245	24128	3.803E+00	2.807E−09
250	27419	2.129E+01	1.383E−08
251	34124	2.219E+01	1.158E−08
252	36829	2.098E+01	1.014E−08
253	41079	1.971E+01	8.546E−09
254	28652	9.867E+00	6.132E−09
255	39078	6.159E+00	2.807E−09
260	7518	5.837E+00	1.383E−08
261	9093	5.914E+00	1.158E−08
262	30727	1.750E+01	1.014E−08
263	53036	2.545E+01	8.546E−09
264	32117	1.106E+01	6.132E−09
265	21401	3.373E+00	2.807E−09
270	95708	7.431E+01	1.383E−08
271	82419	5.360E+01	1.158E−08
272	77174	4.396E+01	1.014E−08
273	69558	3.338E+01	8.546E−09
274	33792	1.164E+01	6.132E−09
275	37338	5.885E+00	2.807E−09
280	120844	9.383E+01	1.383E−08
281	139605	9.079E+01	1.158E−08
282	128836	7.338E+01	1.014E−08
283	95466	4.581E+01	8.546E−09
284	43403	1.495E+01	6.132E−09
285	35392	5.578E+00	2.807E−09
290	194914	1.513E+02	1.383E−08
291	270322	1.758E+02	1.158E−08
292	177718	1.012E+02	1.014E−08
293	122994	5.902E+01	8.546E−09
294	74823	2.577E+01	6.132E−09
295	85942	1.354E+01	2.807E−09
300	45503	3.533E+01	1.383E−08
301	131814	8.572E+01	1.158E−08
302	121539	6.923E+01	1.014E−08
303	144213	6.921E+01	8.546E−09
304	113104	3.895E+01	6.132E−09
305	75181	1.185E+01	2.807E−09
310	1	7.765E−04	1.383E−08
311	18	1.171E−02	1.158E−08
312	701	3.993E−01	1.014E−08
313	772	3.705E−01	8.546E−09
314	742	2.555E−01	6.132E−09
315	481	7.581E−02	2.807E−09

付録 D　ヒストリー数の設定基準

輸送計算のヒストリー数を多くすれば計算結果の相対標準誤差が小さくなるが、計算時間は長くなる。そこで、効率的に SAF データを整備するため、SAF について基準値を設け、その基準値より SAF が大きいときは相対標準誤差が 5%以下となるよう、ヒストリー数を設定することとした。基準値は、SAF の大きさと線量係数の関係を検討し、基準値以下の SAF の相対標準誤差が大きくても線量係数への寄与が十分小さくなる値に決定した。

SAF の基準値の検討には、米国オークリッジ国立研究所が開発した DCAL（Dose and risk CALculation software）[D1)]を用いた。DCAL は、ICRP 1990 年勧告[D2)]に対応した放射性核種の摂取に対する線量係数を計算できる。DCAL で使用されるデータ及びモデルの一覧を、Table D-1 に示す。DCAL で使用される SAF のうち、全身の各組織に対する光子 SAF[D3-4)]、呼吸気道領域における電子及びα粒子に対する SAF[D5)]がエネルギーの関数となっている。DCAL は、使用するデータを自由に編集できる。そこで、まず光子以外の SAF を 0 として線量係数を計算した。次に、光子 SAF に対するカットオフ値（その値未満を 0 とする境界値）を 10^{-3}、10^{-4}、10^{-5} kg^{-1} として線量係数を計算し、カットオフ値を設定していない線量係数と比較することにより、カットオフ値以下の SAF の線量係数への寄与割合を調べた。なお、線量係数の比較は、ICRP Publication 38[D6)]に収録された 838 核種のうち希ガス等のサブマージョン核種を除いた 733 核種について、化学形に依存する血液への吸収割合[D7)]の違いを考慮して経口摂取 757 ケース、吸入摂取 2303 ケースについて行った。その結果、カットオフ値が 10^{-3}、10^{-4}、10^{-5} kg^{-1} の場合の線量係数は、カットオフ値を設定していない線量係数に対し、それぞれ最大で 13%、0.10%、0.03%小さくなることが分かった。つまり、10^{-3}、10^{-4}、10^{-5} kg^{-1} 未満の SAF が線量係数に寄与する割合は、それぞれ最大で 13%、0.10%、0.03%であった。以上の検討から、ヒストリー数の設定基準は 10^{-4} kg^{-1} で十分と考えられるが、余裕を考慮して 5×10^{-5} kg^{-1} とした。

Table D-1 Data and models used for calculation of dose coefficients for intakes of radionuclides in DCAL software[D1)]

Data, model	Reference
Radiation weighting factors and tissue weighting factors	ICRP Publication 60[D2)]
Radionuclide decay data	ICRP Publication 38[D6)]
Biokinetic models	
Respiratory tract region	ICRP Publication 66[D5)]
Alimentary tract region	ICRP Publication 30[D8)]
Systemic models	ICRP Publication 30, 56, 67, 69, 71[D8-15)]
Specific absorbed fractions	
Whole body region	ORNL/TM-8381/V1-7, ORNL/TM-12351[D3-4)]
Respiratory tract region	ICRP Publication 66[D5)]
Alimentary tract region	ICRP Publication 30[D8)]
Bone region	ICRP Publication 30[D8)]

参考文献

D1) K.F. Eckerman, R.W. Leggett, M. Cristy, C.B. Nelson, J.C. Ryman, A.L. Sjoreen and R.C. Ward: “User’s guide to the DCAL system”, ORNL/TM-2001/190 (2006).

D2) International Commission on Radiological Protection: “1990 Recommendations of International Commission on Radiological Protection”, ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21 (1-3) (1991).

D3) M. Cristy and K.F. Eckerman: “Specific absorbed fractions of energy at various ages from internal photon sources”, ORNL/TM-8381/V1-7 (1987).

D4) M. Cristy and K.F. Eckerman: “SEECAL: program to calculate age-dependent specific effective energies”, ORNL/TM-12351 (1993).

D5) International Commission on Radiological Protection: “Human respiratory tract model for radiological protection”, ICRP Publication 66, Ann. ICRP 24 (1-3) (1994).

D6) International Commission on Radiological Protection: “Radionuclide transformations: energy and intensity of emissions”, ICRP Publication 38, Ann. ICRP 11-13 (1983).

D7) International Commission on Radiological Protection: “Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers”, ICRP Publication 68, Ann. ICRP 24 (4) (1994).

D8) International Commission on Radiological Protection: “Limits for intakes of radionuclides by workers”, ICRP Publication 30 part 1, Ann. ICRP 2 (3-4) (1979).

D9) International Commission on Radiological Protection: “Limits for intakes of radionuclides by workers”, ICRP Publication 30 part 2, Ann. ICRP 4 (3-4) (1980).

D10) International Commission on Radiological Protection: “Limits for intakes of radionuclides by workers”, ICRP Publication 30 part 3, Ann. ICRP 6 (2-3) (1981).

D11) International Commission on Radiological Protection: “Limits for intakes of radionuclides by workers: an addendum”, ICRP Publication 30 part 4, Ann. ICRP 19 (4) (1988).

D12) International Commission on Radiological Protection: “Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: part 1”, ICRP Publication 56, Ann. ICRP 20 (2) (1990).

D13) International Commission on Radiological Protection: “Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: part 2. Ingestion dose coefficients”, ICRP Publication 67, Ann. ICRP 23 (3-4) (1992).

D14) International Commission on Radiological Protection: “Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: part 3. Ingestion dose coefficients”, ICRP Publication 69, Ann. ICRP 25 (1) (1995).

D15) International Commission on Radiological Protection: “Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: part 4. Inhalation dose coefficients”, ICRP Publication 71, Ann. ICRP 25 (3-4) (1995).

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 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立法メートル	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	キログラム毎立法メートル	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} sA
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m^{-2} sA
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m^{-2} sA
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} sA
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	接頭語	記号	乗数	接頭語	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=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm^2=10^4m^2
リットル	L, l	1L=1l=1dm^3=10^3cm^3=$10^{-3}m^3$
トン	t	1t=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	1eV=1.602 176 53(14)×10^{-19}J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10^{-27}kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=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=100kPa=10^5Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=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}=$10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	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(c)	Oe	1 Oe≙ (10^3/4π)A m^{-1}

(c) 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=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
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	1cal=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年改訂）