

JAERI - M
94-057

複雑な幾何形状によって表現された体系における
MCNP コードの適用性に関する検討
— 人体模型に基づく実効線量当量の算出 —

1994年3月

樋口 健二・山口 勇吉

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 株原子力資料サービス

複雑な幾何形状によって表現された体系における MCNP コードの適用性に関する検討
— 人体模型に基づく実効線量当量の算出 —

日本原子力研究所東海研究所情報システムセンター

樋口 健二・山口 勇吉⁺

(1994年2月18日受理)

本報告書は、人間動作シミュレーションの研究 (HASP : Human Acts Simulation Program) の一環として開発を進めている被曝線量評価システムの開発における、粒子輸送計算用モンテカルロ・コード MCNP の複雑形状に対する適用性の検討について述べたものである。

人間動作シミュレーションの研究は、原子力施設において巡回・点検作業を行う知能ロボットに関する基盤技術の開発を目的としており、現在、JRR-3 施設を動作空間とする人間型知能ロボットを対象に各要素技術の開発を進めている。このうち、被曝線量計算の研究においては、高線量下で動作する人間型ロボットの設計基準を与えるため、ロボット軀体に対する放射線損傷度の評価手法を確立することを研究目的としている。

現在、評価手法として、即ち、ロボット軀体のような複雑な体系に対する放射線輸送問題を解く手法として、モンテカルロ法の適用を検討している。今回、手法確立のため、連続エネルギー粒子輸送モンテカルロ・コード MCNP を用いて、人体模型を用いた実効線量当量の算出を行った。この計算体系は、ロボット軀体同様、極めて複雑な幾何形状であり、かつ、放射線防護の分野で実効線量当量算出の基盤となっているため、計算結果の検討が容易である。算出した実効線量当量を ICRP 刊行物 51 に示されている値と比較し、妥当性を評価した。

本報告書においては、今回検討した MCNP コードの複雑形状への適用性の検討結果に加え、線量当量算出に用いた手法と計算結果、複雑体系を記述するために新たに開発した粒子輸送モンテカルロ・コード用可視化システムについても記述している。

Investigation of the Applicability of MCNP Code to
Complicated Geometries
- Dose Evaluation Using Anthropomorphic Phantom by MCNP Code -

Kenji HIGUCHI and Yukichi YAMAGUCHI⁺

Computing and Information Systems Center
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 18, 1994)

Applicability of MCNP code, which is a general purpose Monte Carlo code for particle transport problems, to complicated geometries, has been investigated as a study in Human Acts Simulation Program(HASP), in which basic studies for intelligent robot for patrol and inspection of nuclear facilities are being performed.

In HASP, basic software systems simulating the behavior of intelligent robot of human shape working in Japan Research Reactor No.3 are being developed. The aim of Dose Evaluation system in HASP is to establish the methodology to evaluate irradiation damage of the LSI/VLSI circuits embedded within a robot body and to give design criteria of intelligent robot.

Monte Carlo method is used to solve particle transport problem in a complicated geometry such as robot body. Preliminary evaluation to establish the methodology has been conducted using continuous energy Monte Carlo code, MCNP with the anthropomorphic phantom. The phantom has the same degree of geometric complexity as robot body and is widely used for the calculation of the effective dose equivalent for radiological protection. It allowed us to verify the validity of the methodology by comparison of calculation results with the data in ICRP Pub. 51.

⁺ Department of Reactor Safety Research

In this report, the method used in the calculation of effective dose equivalent, visualization system supporting visualization of input data for complicated geometry and the results in the evaluation of validity of the method by the comparison of the calculated results with the data in the ICRP publication are described.

Keywords: Dose Evaluation, MCNP Code, Monte Carlo, Particle Transport, Human Phantom

目 次

1.はじめに	1
2.被曝線量計算に関する研究の現状と手法選択に関する検討	3
2.1 被曝線量評価研究の現状	3
2.2 計算手法選択に関する検討結果	6
3.計算コード及び計算モデル	8
3.1 計算コード MCNP の改良	8
3.2 計算モデル	9
4.モンテカルロ・コード用可視化システム VSMC コード	13
4.1 画像生成アルゴリズム	13
4.2 出力画像	13
5.計算システムと被曝線量計算結果	15
5.1 計算システムとその性能	15
5.2 算出された線量当量と ICRP 刊行物-51との比較	15
6.複雑体系への MCNP コードの適用性とその問題点	16
6.1 複雑体系への MCNP コードの適用性	16
6.2 複雑体系における粒子輸送計算上の問題点	16
7.おわりに	18
謝 辞	19
付録 A 人体模型を表現する形状データの説明	40
付録 B 計算に使用した MCNP コードの入力データ	55
付録 C 被曝計算に使用した MCNP コードの機能	63

Contents

1. Introduction	1
2. Present Status in Dose Evaluation and Investigation of Calculation Methods	3
2.1 Present Status in Dose Evaluation	3
2.2 Results in the Investigation of Calculation Methods	6
3. Calculation Code and Model	8
3.1 Improvement of MCNP Code	8
3.2 Calculation Model	9
4. Visualization System for Monte Carlo Simulation : VSMC Code	13
4.1 Rendering Algorithm	13
4.2 Output Image	13
5. Calculation System and Results of Dose Equivalent	15
5.1 Performance of Calculation System	15
5.2 Calculation Results and Comparison of Dose Equivalent with ICRP Data	15
6. Applicability and Problem of MCNP Code in Complicated Geometries	16
6.1 Applicability of MCNP Code to Complicated Geometries	16
6.2 Problem of MCNP Code in Complicated Geometries	16
7. Conclusion	18
Acknowledgment	19
Appendix A Description of Geometric Data of Human Phantom	40
Appendix B Input Data of MCNP Code Prepared for the Calculation ...	55
Appendix C Description of the Functions of MCNP Code Employed in the Calculation	63

1. はじめに

日本原子力研究所・情報システムセンターは、「人間動作シミュレーション技術の研究」と名付けた研究プロジェクト H A S P (Human Acts Simulation Program) を昭和 62 年度より 10 年計画で開始した。本プロジェクトは、原子力施設において巡回・点検を行う知能ロボット設計のための基盤的要素技術を開発し、これを原子力分野の研究者・技術者へ提供することを目的としている。

上記目的を達成するため、本プロジェクトにおいては、原子力施設において巡回・点検を行う人間型知能ロボットのシミュレーション・システムを開発中である。また、このシミュレーション・システムを用いて、各要素技術を効率的に開発し、開発したシステムの有効性あるいは原子力施設への適応性を評価することが可能である。現在、原子力施設巡回・点検作業を行う知能ロボット設計に必要な要素技術開発として、以下の研究を行っている。

- (1) 命令理解・行動計画の研究
- (2) 環境設定・映像化技術の研究
- (3) 視覚認識技術の研究
- (4) ロボット動作の研究
- (5) ロボット・ハードウェアの研究
- (6) 被曝線量計算の研究

また、これら諸技術を統合するための技術基盤となる計算機技術開発として、超高速モンテカルロ装置の開発を進めている。

上記、諸技術のうち、被曝線量計算の研究は、原子力施設、即ち、高放射線下において巡回・点検作業を行うロボット軸体に搭載される L S I 回路等の電子関連機器の放射線損傷の度合いを評価する手法を確立し、人間型ロボットの設計に関わる設計基準を定めることを目的としている。

上記放射線損傷度の評価においては、放射線輸送計算に基づくロボット軸体内部における線量の算出、さらには巡回・点検作業時に予想される放射線場の特定が必要となる。

前者については、通常、工学計算として行われる遮蔽計算と比較し、極めて複雑な体系における放射線輸送問題を解くことから、その技術的基盤を確立することが肝要と考えられる。また、後者については、巡回・点検作業の行われる作業環境の線源分布等を規定する作業対象施設の形状等のモデル化手法について検討することが必要である。

複雑な体系における放射線輸送問題に関する研究現状を見ると、外部放射線、あるいは内部放射線被曝について被曝線量限度策定のために行われている人体模型（ヒューマン・ファントム）を用いた被曝線量算出手法が注目される。現在、我々が進めている研究プロジェクトにおいて検討の対象としている知能ロボットの形状を人間型としている点からも、この手法は興味深いものがある。

一方、放射線の輸送計算については、遮蔽計算を中心に長期にわたる経験が蓄積されており、この種の経験は、モンテカルロ法による種々の汎用コードとして利用可能である。しかしながら、前述したように、放射線輸送計算のための汎用モンテカルロ・コードは、人体模型のよ

うな複雑体系に対する問題については、一般の遮蔽計算と比較し、十分な技術的経験が蓄積されていない。

こうした観点から、本研究では、人体模型における人体臓器に対する被曝線量の算出をテストベットに複雑体系における汎用計算プログラムの適用可能性を検討した。検討においては、汎用モンテカルロ・コードとして連続エネルギー粒子輸送モンテカルロ・コードMCNPを、人体模型としては、Cristyにより提案されたモデルを用い、外部放射線被曝の算出を行なった。

また、手法の妥当性を評価するため、算出値を国際放射線防護委員会による刊行物－51に示されている値と比較検討した。

本報告書では、まず、検討対象とする汎用モンテカルロ計算プログラム選択のために実施した人体模型に基づく被曝線量評価手法の調査結果について記述する。続いて、この現状調査を通じて選択したMCNPコードの複雑体系への適用に関わり、必要とした同コードの改良及び検討対象とした人体模型の概要について述べる。さらに、検討に当たって必要となり、本研究を通じて開発したモンテカルロ・コード入力データ可視化システムVSMCについて、手法及び機能を紹介した後、開発したシステムにより算出した外部放射線被曝線量とICRP刊行物－51との比較検討結果について述べる。

2. 被曝線量計算に関する研究の現状と手法選択に関する検討

2. 1. 被曝線量評価研究の現状

国際放射線防護委員会が線量限度の基礎を人体を構成する各臓器への線量とその重み付けからなる実効線量等量に置くことを勧告して以来、人体模型を用いた各臓器への被曝線量の算出が精力的に実施・検討されてきている。この分野で進められている研究現状を把握するため、文献調査を中心に、研究現状の調査を実施した。

この分野で行われている研究は、

- ① 人体、およびその臓器形状のモデル化手法の検討
- ② 線量算出の基礎となるカーマ因子計算モデルの提案

などが集中して行われているよう見受けられる。しかしながら、本研究の目的が、複雑な幾何形状を有する体系に対する放射線輸送計算手法の開発、及びその高速化にあることから、今回の調査にあたっては、計算機技術的な観点からもその検討をおこなった。

人体模型を用いたモンテカルロ法による放射線輸送シミュレーションは、1970年代初期より、事故時あるいは放射線治療における、外部もしくは内部被曝線量の評価のために行われている。現在、外部被曝線量の評価に用いられている人体模型のほとんどが、1976年にORNLのSnyderらによって開発されたモデルを原型とし、その後、かずかずの改良を施されたモデルである。この分野の研究が開始された初期においてモンテカルロ・シミュレーションに用いられた計算プログラムの殆どは、被曝線量の算出のみを目的とした専用プログラムであったが、最近は、汎用のモンテカルロ計算プログラムの活用も増えている。使用されている計算モデルあるいは評価手法がこの分野の研究において特徴的と考えられた4つの研究事例を以下に紹介する。また、それらの特徴及び本研究における応用可能性について述べる。

(1) Computer Tomography(CT)からの形状データを使用した外部被曝線量評価

GSFのZanklらは、人体に対する実効線量当量を算出ためのより正確な人体模型を文献1)において、提案している。本手法は人体の各臓器を二次面図や三次元基本立体の論理演算で表現するといったモデリングではなく、Computer Tomography(CT)から得られた形状データそのまま入力データとし、外部被曝線量を算出しようとするものである。本手法を用いることにより、人体の各臓器の形状、及びその相対的体位置について、モデリング時に行われる主観的判断を取り除くことが可能であり、客観的な人体モデルを使用するという利点がある。この手法によって人体は、すべて同じ寸法の直方体(Volume Element:VOXEL)の積み重ねとして表現される。

この手法を用いることにより、各臓器の形状についての改善はもとより、骨と骨髓の正確な比率に基づく被曝線量計算が可能である。即ち、 ^{60}Co による γ 線照射に対する線量を計算する際、骨を構成するカルシウムから出る二次電子の影響を考慮した正確な線量評価が可能である。

このVOXELを用いる手法を計算手法の側面から検討すると、二つの利点を指摘することができる（これらの利点については、原論文では特別な検討は行われてはいない）。即ち、以下に

述べるようすに、通常被曝計算に使用される二次曲面の論理演算によって表現されたモデルと比較した場合、①ベクトル計算機による計算時間の短縮が可能である、という点、②計算結果の可視化が容易である、という点及び③入力データの作成が容易である、という点である。

① 形状表現として、同一寸法の直方体のみが使用されていることから、計算時間を大幅に短縮する可能性がある。

放射線輸送問題におけるモンテカルロ計算においては、粒子の飛程と物体を構成するさまざまな幾何形状との交差テストに多大な計算コストが費やされる。一方、同一寸法の直方体の集合体については、交差テストにおいて解を求め易いことから、相当な計算時間短縮が期待できる。さらに、取り扱う幾何形状が全て直方体であることから、ベクトル処理による高速化も容易になるものと考えられる。

② 入力データや計算結果を可視化する場合、画像生成のためのボリュームレンダリング手法が適用可能である。

ボリュームレンダリングとは、直方体の集合として記述された三次元物体または、直方体セル内部において定義された物理量を可視化する手法である。可視化においては、スキャンライン、レイトレーシング、ラディオシティ法等の一般的な画像生成アルゴリズムを使用する。

③ 入力データの作成が容易である。

Computer Tomography を用いた臓器データ取得の方法を用いると、画像入力装置から読み込まれる断層映像をそのまま三次元画像生成時の入力データとすることが可能なため、モデル作成時に必要となる労力を大幅に削減することが可能である。

(2) 汎用モンテカルロ計算コードを用いた外部被曝線量評価

① M O R S E - C G コードによる被曝線量計算システム

山口は、汎用モンテカルロ計算コードM O R S E - C G による光子被曝に対する線量算出システムを開発している²⁾。このシステムにおいては、M I R D - 5 と呼ばれる人体模型を使用している。M O R S E - C G コードにおける改良点は、取り扱える幾何形状を3種類（円環体、楕円体及び楕円錐）増やしたこと及び図形出力機能を整備したことである。M I R D - 5 における改良点は、顔骨、甲状腺、心臓、肺及び副腎の形状を改良したこと及び目を追加したことである。山口は、これらの計算プログラムと計算モデルをシステム化した。この結果、さまざまな条件下での外部被曝計算が可能となった。このシステムにおいて、ユーザが選択可能な計算条件は、以下の通り。

- a. 人体モデルの性別（両性、男性、女性）
- b. 乳房の高さ（両性または女性の場合）
- c. 線量計の配置（線量計は、軟組織と同じ物質で構成されており、形状は直方体に固定）
- d. 計算に使用した人体模型の鳥瞰図（線画）の出力

山口は、このシステムによる計算結果とICRP Pub. 51に記載された計算結果との比較を行い、システムの性能評価を行った。

山口は、その後、さらにシステムの改良を行い、人体模型の腕及び脚の各部の角度を指定できる機能を追加することにより、直立状態の人体模型だけでなく、姿勢の変化した人体模型を扱えるようにした。

原子力施設において巡回・点検を行うロボット軸体の各部に対して放射線損傷度を正確に

評価するためには、ロボットの歩行動作に伴う姿勢変化を考慮する必要がある。この点において、山口の研究は、今後可動型ロボット・モデルによる放射線損傷度評価システムを開発する際重要である。また、次節で述べるように、HASPにおける環境データと論理的に同等な形状データの取扱いが可能なMORSE コードは、JRR-3施設等の実規模環境における放射線輸送問題に対しても有効である。

② MCNPコードとMIRD-Vを使った実効線量当量の算出

PNL のTannerは、計算コードMCNPと人体模型MIRD-Vを使って実効線量当量を算出し、各臓器に対して定義された4種類の荷重係数による結果の比較を行った。文献3で述べられている内容は、以下のとおり。

MCNPコードとMIRD-Vを使って実効線量当量を算出した。実効線量当量は、線源のエネルギーと形状、人体模型の性別及び残存組織対象臓器の選別法に強く依存することがわかった。MIRD-Vは男性を近似したモデルなので、これを縮小して女性モデルとした。計算は、10keV ~ 10MeVのエネルギー範囲に対して行われた。線源の形状は、前方、後方及び側面からの平行ビームそして等方性の点線源である。ある線源に対する臓器の線量を求めた後、残存組織についての次の4ケースについて実効線量当量を求めた。

- (a) 線量の最も高い5つの臓器または組織
- (b) 胴体を除いた線量の最も高い5つの臓器または組織
- (c) 心臓と胸腺を除いた線量の最も高い5つの臓器または組織
- (d) 予め定めた5つの臓器または組織（胃、小腸、大腸上部、大腸下部、胴体）

この比較で最も大きな違いを示したものは、(a) と(d) の比較である。前方照射の場合、すべてのエネルギーにわたって、10%程度の違いであったが、後方照射、500keV の場合約2倍の違いを示した。これは、副腎、睾丸や脾臓等の胴体後部に位置し、胃腸管よりも高い線量を受ける臓器によって引き起こされる。

平均された組織荷重係数の代わりに性別に定められた組織荷重係数によって求めたそれぞれの実効線量当量は、顕著な違いを示した。最も大きな違いを示したケースは、男性、前方照射、50keV ~ 100keV のエネルギーを用いた場合であり、平均された組織荷重係数を用いて求めた値は、男性用の組織荷重係数を用いて求めた値の対して2倍高い値を示した。

以上が文献4の内容である。ほぼ同じ内容の計算を行った筆者らの経験によれば、この文献で述べられた計算には、かなりの計算機資源が要求された、と予想される。このモンテカルロ計算におけるヒストリー数、使用計算機及び消費した計算時間に興味があるが、この文献には示されていない。

(3) CHORD法による線量当量の算出

GSF のWittmannらは、多大の計算時間を要するモンテカルロ法ではなく、CHORD法により、各臓器に対する線量当量を求め、その結果を比較した⁴⁾。文献3で述べられている内容は、以下のとおり。

均一な物質によって構成された球や円筒に対する線量分布から人体に対する実効線量当量や各臓器に対する線量当量を近似的に求めるCHORD法とモンテカルロ法による計算値の比較を行った。CHORD法による結果は、一般的に放射線の出口側、特に頭や首において高い値を示す。中性子線の場合、球に対する線量分布は、円筒に対するそれよりも高い値を

示すが、二次的に発生する γ 線の線量分布がかなり低い値を示すため、実効線量当量は、ほぼ同じ値を示す。CHORD法による実効線量当量とICRU 39に記載された実効線量当量との比較を行ったが、これは最大5倍の違いを示している。これは、実効線量当量を算出する際に使われる放射線防護上の操作的な量の違いによる。また、100keV以上のCHORD法による結果は、それほど大きな過大評価とも思われないが、10keV以下のエネルギーにおいては、あまりにも高い値を示した。そこで、MIRDモデルを使ったモンテカルロ法による計算結果とICRU 39との比較を行ったが、さらに大きな違いを示した。つまり、CHORD法による結果は十分妥当な値を示している。

この論文において、Wittmannらは、CHORD法によって求めた1eV～13.5MeVのエネルギーにおける人体に対する実効線量当量やいくつかの臓器に対する線量当量を示している。

CHORD法は、決定論的に近似値としての線量当量を算出するもので、ロボット軀体に対する放射線損傷度の評価を近似計算により高速に行う際にも有効と思われる。

2. 2. 計算手法選択に関する検討結果

前節において、人体模型を用いた被曝線量評価手法の現状について、3種類の手法について、4つの報告を中心検討した。ここで述べたように、各手法には、それぞれ長短所が見られる。本節において、ロボット軀体に対する放射線損傷の把握という本研究の目的及び上記検討結果に基づき、「複雑形状への適応性の検討」対象とする汎用計算プログラムの選択を行う。

第1章において述べたように、本研究における被曝線量評価にあたっては、ロボット軀体内における放射線の輸送計算手法の検討に加えて、ロボットが巡回・点検作業を行う作業環境に於ける放射線場の特定が必要になる。この放射線場を特定するには、放射線の発生源である作業環境周辺の放射能分布を知ることが必要になるが、言うまでもなく、この分布は作業環境の施設あるいは機器の形状に依存する。

現在、HASPにおいては、原研所有の研究用原子炉JRR-3施設について建屋、一次冷却系配管、熱交換器等の主要機器等を対象に「施設形状データベース」の開発を進めている。この形状データベースでは、形状表現においてCSG(Constructive Solid Geometry)手法を採用している。この手法は、物体の形状を3次元の基本立体の集合演算で表現するもので、放射線場の評価・予測を行うために一般に使用されている粒子輸送用モンテカルロ計算コードにおいて採用されている形状表現と論理的に等価である。この形状表現の特徴を考慮すると、ロボット軀体内的放射線輸送の評価に際しても、この粒子輸送用モンテカルロ計算コードを採用することにより、放射線場の特定並びにロボット軀体内的放射線輸送計算を一貫した手法で行うことが可能であり、これは、システム構築の観点から重要である。

以上の点を考慮しながら、前節で見たさまざまの手法に対する本研究における応用可能性の検討結果を以下に述べる。

Computer Tomographyからの形状データを用いた手法は、計算機技術的な観点から見て、処理の高速化、結果の可視化及び入力データの作成が容易である、という利点を持つが、① 実規模環境を想定したロボット軀体に対する放射線損傷度の算出を行う際、前述の「施設形状データ」をそのまま入力データとして取り込めない、② 「施設形状データ」の空間的スケールとロボット軀体内部を表現する際に考慮すべきスケールとの間に大きな違いがあるため、同一寸法の直方体セルによって体系を記述した場合、冗長な部分を持つ環境モデルによって計算を

行うか、ロボット軀体に対して近似の度合いが大きな計算を行うかという、望ましくない選択が生じる、という欠点がある。

一方、CHORD法は、簡易計算法を提供する手法であり、しかも、前提として、放射線損傷に対する感度等について十分なモデリングをする必要があることから、なんらかの詳細な計算手法を用いた評価を行った後に使用すべき手法と考えられる。

以上の点を考慮し、本研究では、「施設形状データ」をそのまま入力データとして取り込むことが可能で、信頼性の高い、汎用モンテカルロ・コードを用いた手法を選択した。さらに汎用モンテカルロ・コードについては、MCNPコードを選択した。上記の文献調査において取り上げられた二つの汎用モンテカルロ・コードのどちらについても長短のあるところであるが、筆者らの経験によれば、次の理由から、本研究においてはMCNPコードの採用が望ましい。即ち、同コードは、

- ① 放射線のエネルギーの取扱いが連続である
 - ② 種々の放射線輸送問題を解くための機能が組み込まれている
 - ③ 中性子および光子のいずれに対しても反応断面積の整備が進んでいる
- などの利点を持ち、さらに、長期にわたって改良を重ねられた計算コードであり、放射線輸送問題に対する完成度が高い。以上の理由から、同コードを対象に複雑形状に対する適応性の検討を進めることとした。

参考文献

- 1) M. Zankl et al, : The construction of computer tomographic phantoms and their application in radiology and radiation protection, Radiation Environ Biophysics, Vol. 27(1988)
- 2) Y. YAMAGUCHI : DEEP CODE TO CALCULATE DOSE EQUIVALENTS IN HUMAN PHANTOM FOR EXTERNAL PHOTON EXPOSURE BY MONTE CARLO METHOD, JAERI-M 90-235(1991)
- 3) J. E. Tanner, : The Effect of Gender and Remainder on Effective Dose Equivalent, Trans. Am. Nucl. Soc. CONF-881011—, Vol. 57, pp. 217-218(1988)
- 4) A. Wittmann et al, : ORGAN DOSES AND EFFECTIVE DOSE EQUIVALENT, Radiation Protection Dosimetry Vol.12, No.2, pp.101-106(1985)

3. 計算コード及び計算モデル

1章で述べたように、本研究の目的は、ロボット軀体に対する放射線損傷度の評価システムの構築にある。また、2章で述べたように、システムにおいて使用される計算コードとして、汎用モンテカルロ・コードMCNP¹⁾を選択した。本報告書は、同コードの複雑形状への適応性を検討するために行った人体に対する線量評価について言及している。以下に、複雑形状へ適用するために行った同コードの改良及び適応性検討のために行った被曝線量計算のモデルについて述べる。

3. 1 計算コードMCNPの改良

計算に用いたMCNPコードは、①エネルギーの取り扱いが連続である、②種々の放射線輸送問題を解くための機能が組み込まれている、③種々の断面積データが用意されている等の特長を持つ。また、本コードは、米国のロスアラ莫斯国立研究所で開発され、長期にわたって改良を重ねられたプログラムで、放射線輸送問題に対する完成度が高い。

今回行った人体に対する被曝線量計算は、計算体系の形状が非常に複雑なために、また被曝線量の算出を効率良く行うために、汎用に開発されたMCNPコードのいくつかの機能を拡張して使用する必要があった。これらのMCNPコードに対する改良は、以下の3点である。(1)

形状表現用配列の領域拡張

MCNPコードにおいては、自由二次曲面の論理演算で三次元領域を表現するが、計算モデルを表現する際に使用される三次元領域や二次曲面の数及び一つの三次元領域を表現する際に使用される二次曲面の数に対する制限、つまり、形状表現における制限がある。体系を表現するために使用できる領域（セルと呼ばれる）は、150セル以内であり、また、各セルは100 word以内のデータで表現されなければならない。一方、さまざまな臓器や骨によって構成される人体の形状は複雑であり、今回計算に使用した人体模型を、このMCNPコードにおける制限下で記述することが不可能であった。そこで、形状表現用配列を拡張し、計算に使用した。この拡張作業では、サブルーチンCHECKS及び動的割付による配列格納用コモンE PH COM及びコモンIMXDCSを書き換えた。その結果、使用可能なセル数及び各セルを記述する際のword数に関する制限は、現在使用しているMCNPコードにおいては無い。

(2) 円環体に対する交差点計算部分の変更

今回計算に使用した人体模型Cristy Phantomでは、円環体を形状表現において使用しているが、モンテカルロ計算における四次曲面の取扱いは、四次方程式の解を求める、という点において難しい。これは、四次方程式は、丸め誤差のために計算機上で解くことは難解である、という事実に起因する。MCNPコードにおいては、その計算目的によって、四次方程式に対して二つの解法が用意されている。粒子追跡ではなく、各領域の体積／面積計算においては、計算速度はさほど重要でないために、反復計算によって解を求める手法がとられる。この手法においては、四次方程式のすべての零点を同時に求めるために、Ferrariの解法を改良したVietaの公式にNewton-Raphson法を適用している。この手法は、極めて正確な解が求まる一方、多大の計算時間を要するという欠点がある。粒子追跡を行う際は、解法の速度を重要視し、この手法

とは異なる単精度手法が用いられている。

MCNPコードによって輸送問題を解いている際に用いられている単精度の四次方程式の解法は、CashwellとEverett のものである。四次方程式の根が近接せずに簡単に分離された場合、Newton-Raphson法は、極めて迅速に収束する。しかし、この手法にとって重要なことは、もし、根が重根であるか非常に近接していた場合、それらの根は放り出されてしまう、という点である。これは、粒子の飛程が円環体の接線であることに対応し、この場合、粒子はその円環体となるべく交点を持たない、という仮定が良い近似であるが、良い仮定とならない事例は実問題においてしばしば見受けられ、この場合、粒子はlost粒子となる。

このように、MCNPコードは、粒子の軌跡と円環体との交点を計算する際、CashwellとEverett の解法にNewton-Raphson法を用いている。通常の計算では、1～2回の反復計算で解が求まるために、10回以上の反復計算は予想していない。今回行った計算では、10回以上の反復計算により粒子の軌跡と円環体との交点が見つからなかったケースが生じた。これは、Newton-Raphson法が失敗する次の2ケースが生じたためである。

① N回目の反復計算によって求められた X_N 、N+1回目の反復計算によって求められた X_{N+1} 及びN+2回目の反復計算によって求められた X_{N+2} の関係が、 $X_N = X_{N+2}$ となってしまったため、反復計算によって真の解に収束するべき点列が、 $X_N \rightarrow X_{N+1} \rightarrow X_N$ となってしまった。

② 反復計算時に、極値をとる点（微係数が0となる点）が計算対象となってしまったために、次の候補点が見つからない。

計算に使用したMCNPコードにおいては、CashwellとEverett の解法に対するNewton-Raphson法が失敗した場合の上記2ケースの場合、Ferrari の解法を改良したVieta の公式にNewton-Raphson法を適用する処理プログラムが用意されているにもかかわらず、その処理を行わずに、エラー発生としてプログラムが止まってしまっていた。この理由は不明であるが、今回は、円環体に対する交差点計算部分を書き換え、CashwellとEverett の解法により解が見つからなかった場合、Ferrari-Vieta の解法を適用するよう処理を変更し、計算を続行した。

(3) 出力プログラムの作成

後述するように、人体全体に対する実効線量当量を算出する際、臓器、骨等を表現している各領域に対して算出された線量当量に組織荷重係数を乗じて、総和を求める必要がある。今回行った計算では、MCNPコードによって計算された組織毎の線量当量を、従来のプリント出力ではなくファイル出力し、計算終了後、人体全体に対する実効線量当量を別プログラムで算出している。このために書き換えたサブルーチンは、SUMMARY、TALLYP、作成したサブルーチンは、TALLYHである。

3. 2 計算モデル

(1) 人体模型Cristy Phantom

今回行った人体に対する線量計算においては、人体模型として、米国のオークリッジ国立研究所で開発されたCristy Phantom²⁾を用いた。Cristy Phantomは、二次曲面の論理演算で各臓器が表現されている。骨髓は、骨と一緒に混じり合っていると仮定した。骨中の赤色骨髓と黄色骨髓の重量比をTable 3.1に示す。現在、人体模型を使った線量算出手法において、その形状が議論されている臓器は、心臓、目、食道等である。心臓の形状については、ORNLのCr

istyらによって、より現実モデルに近い複雑なものが提案されている。目及び食道については、1977年のICRP勧告³⁾において、対象臓器としての指定があり、その後、いくつかの提案があった。しかし、今回の計算においては、いずれの臓器も定義されていない。

二次曲面の論理演算で表現された数学モデルを、MCNPコード用の入力パラメータによって表現するために、変換プログラムを作成した。この変換プログラムは、Cristy Phantomを表現する文献2)におけるパラメータを入力データとし、MCNPコードの表現形式で、形状データを出力する機能を持つ。作成した形状データの確認には、後述するモンテカルロ・コード用可視化システムを用いた。計算に使用した人体模型Cristy Phantomの各臓器に対する数学モデルとこれに対応するMCNPコード用形状データについて、その説明を付録Aに示す。

(2) 実効線量当量算出に用いた係数及び条件

単一の入射エネルギーE₀の線源を用いた場合の人体に対する実効線量当量H_E(E₀)は次の式で算出される。

$$H_E(E_0) = \sum_T w_T \times \left\{ \sum_i k_T^\gamma(E_i) \times \Phi_T^\gamma(E_i) \times Q_T^\gamma(E_i) + \sum_j k_T^n(E_j) \times \Phi_T^n(E_j) \times Q_T^n(E_j) \right\} / \Phi_0$$

ここで、E₀は線源のエネルギー、w_TはT番目の臓器または骨に対する組織荷重係数、E_iはi番目の粒子(γ線)の衝突時のエネルギー、E_jはj番目の粒子(中性子)の衝突時のエネルギー、Q_T^γ及びQ_TⁿはそれぞれT番目の組織に対するγ線及び中性子の線質係数、Φ_T^γ及びΦ_TⁿはそれぞれT番目の組織に対するγ線及び中性子の粒子フルエンス、Φ₀は入射粒子束、k_T^γ及びk_Tⁿはそれぞれγ線及び中性子の組織Tに対するカーマ係数である。

①組織荷重係数

組織荷重係数は、人体全体に対する実効線量当量を計算する際に用いられる係数である。この組織荷重係数について、ICRP勧告では、「違った臓器に対する放射線被曝による死亡危険性を画一的に評価するための量」と定義している。組織荷重係数は、全身が均等に放射線被曝した時、その被曝によるある組織の全身に及ぼす確率的影響の比を表現している。ICRP Pub. 26³⁾において勧告された実効線量当量限度は、年間50 mSvである。Table 3.2 に計算に使用した組織荷重係数を示す。

②カーマ係数

γ線や中性子などの間接電離放射線と物質との相互作用によって生じた荷電粒子の初期運動エネルギーの合計をカーマ(kerma)と言い、線量計算においては、吸収線量(absorbed dose)の良い近似を与える。カーマ係数は、物質中における放射線のフルエンスをカーマに換算するための換算係数で、単位はGy cm²である。中性子に対するカーマ係数は、人体の軟組織に対して定義されたカーマ係数を文献5)より参照した。使用したカーマ係数をFig. 3.1に示す。γ線に対するカーマ値は、カーマ係数等によるカーマ当量への変換を行わずに、単に吸収エネルギーを用いた。

③線質係数

線質係数は、放射線の線質(種類やエネルギー)によって異なる生物に対する影響を考慮す

る係数である。荷電粒子が水中を通過する際に失う単位距離あたりのエネルギー、つまり線エネルギー付与(LET) の関数として決められる。カーマ係数と同様、粒子のエネルギーの関数である。しかし、 γ 線の線質係数は、エネルギーの値にかかわらず1とした。中性子に対する線質係数は、カーマ因子と同様、文献5)より参照した。この値は、文献5)における勧告において2倍に引き上げられたが、ここでは、それ以前の値を使用している。使用した線質係数をFig. 3.2に示す。

④ 実効線量当量算出において選択した臓器

- ・生殖系の組織として、卵巣及び睾丸の中から、最も線量当量の高い組織を1つ選び、これを生殖系の組織の線量当量とした。
- ・remainder として、線量当量の高い順に5つの臓器を選び、これらの線量当量をremainder の線量当量とした。

⑤ 放射線場に関する条件

線源は、単一エネルギーの平行ビームである。粒子束内で割ることにより、線源の強度に依存しない量、つまり、粒子束あたりの線量当量を計算した。なお、人体を取り囲む空気の濃度は、標準状態(零度、1気圧)の乾燥空気の 10^{-5} 倍とした。

(3) MCNPコード用入力データ

MCNPコードには、放射線輸送問題において使用されるさまざまなTally が用意されている。指定された面における中性子束を算出するもの、指定された領域における吸収エネルギーを算出するもの等である。今回の計算においては、 γ 線被曝問題に対して、F16 Tally を、中性子線被曝問題に対して、F4 Tally 及びF16 Tally を使用した。F16 Tally は、指定された領域における単位質量あたりの吸収エネルギーを求めるための γ 線用のTally であり、F4 Tally は、指定された領域における平均粒子束を求めるための中性子線用のTally である。いずれもヒストリーあたり、つまり粒子束あたりの値である。これらの計算値は、MCNPコード拡張作業について前述したように、ファイル出力される。また既に述べたように、 γ 線の場合、線質係数は、エネルギーの値にかかわらず1である。このため、MCNPコードによって出力されるrad 単位の吸収線量をrem 単位の線量当量に単位変換すれば良い。中性子線による被曝計算を行う場合使用したMCNPコードの機能については、以下のとおりである。

- ・各臓器の吸収線量を計算するために、カーマ係数を用いて、中性子束をカーマに変換した。MCNPコードには、粒子束-カーマ間の変換を行う機能が準備されている。この変換機能を使用するために、入力データにおいて、DF_n カード及びDE_n カードを用いた。これらのカードの特徴は、F2やF4カードによって定義された通常のTally を変更するために、粒子束-カーマ間の修正係数のように点列で表現された関数をエネルギーの関数として入力できる点である。MCNPコードにおいては、これらのデータを内挿する際、対数補間、線形補間のどちらも使用可能であるが、MCNPコード・マニアルに付録しているANSI/ANS形式の修正係数については、二つのカード共に対数補間が適当である、と記されている。DE_n カードによって定義されるエネルギー点は、F_n カードに対するE_n カードによって定義されるTally 用のエネルギー点である必要はない。粒子のエネルギーがこれらのカードによって定義された範囲を越えた時は、最も高いエネルギーまたはもっとも低いエネルギーが使用される。
- ・中性子と物質との相互作用(核反応)によって生じた γ 線からの線量寄与を評価する必要があるために、中性子線用のTally だけではなく、プログラムにおいて中性子と共に追跡される

γ 線用のTally を用いた。

使用した入力データを付録Bに、MCNPコードの機能及びそれらを使用するための入力データの説明を付録Cに示す。

参考文献

- 1) Judith, F. : MCNP-A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport Version 3A, LA-7396-M, Rev.2 Manual, 1986
- 2) Cristy, M. : Specific Absorbed Fractions of Energy at Various Ages from Internal Photon Sources, ORNL-TM-8381, 1987
- 3) Recommendation of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 26
- 4) Data for Use in Protection Against External Radiation, ICRP Publication 51
- 5) Burger, G., et al., : Effective Dose Equivalent and it's Relationship to Operational Quantities for neutrons, European Seminar on Radiation Protection Quantities for External Exposures, PTB Braunschweig, Oct. 13-15, 1980

4. モンテカルロ・コード用可視化システム VSMC コード

人体模型のような複雑な体系を記述する形状データを作成する際の支援ツールとして、可視化システム、VSMC(Visualization System for Monte Carlo program)コードを開発した。三次元画像を生成するこのシステムにより、(1)複雑な形状を持つ各組織（臓器、骨）に対して作成した形状データの確認、(2)各組織間の幾何学的関係、つまり、微小な距離によって隔てられた二次曲面間の位置関係の認識が可能である。三次元画像による可視化を行った理由は、複雑な幾何形状を三次元の基本立体または曲面の集合演算によって表現する際、机上の計算で結果を確認することが難しいことである。従来、モンテカルロ・コードの入力データの確認は、そのコードに備えつけのプログラムによって、断面図を線画表示することでなされてきたが、断面の決め方や表示された線の判別が難しく、複雑な三次元幾何形状に対する表示機能が不十分である。今回作成したVSMCコードは、(1) 光線追跡法により、立体感のある（つまり色の濃淡の変化がある）三次元画像を生成する、(2) MCNPコードやMORSE コードに代表される汎用モンテカルロ・コードの入力データをそのまま画像表示用の入力データとすることが可能である、という特長を持つ。

4. 1 画像生成アルゴリズム

VSMCコードにおいては、光線追跡法（レイ・トレーシング・アルゴリズム）によって三次元画像を生成する。光線追跡法は、光源からの光が、物体表面において反射し、人間の目に到達するまでをシミュレーションすることによって、三次元画像を得るアルゴリズムである。三次元画像を得るために仮想的に置かれるスクリーンとシミュレーションの概念図をFig. 4.1 に示す。光線追跡法は、(1) 処理プログラムが簡単である、(2) 鮮明な三次元画像を得ることが可能である、(3) 光の透過を扱うことが可能である、(4) 三次元物体の表現方法が汎用モンテカルロ・コードにおけるそれと同等であるため汎用モンテカルロ・コードの入力データをそのまま画像表示用の入力データとすることができます、という特長を持つ。画像生成時に、多くの計算時間を要するという点が欠点であるが、これはベクトル計算機または並列計算機によって高速化が可能である。光線追跡法の原理は、人間の目に情景が映る過程を模擬することにより、画像を生成することであり、これに拠るプログラムにおいては以下のようないシミュレーションが行われている。

- (1) 光源から出た光線を追跡し、体系中のどの物体と衝突するかを決定する。
- (2) 拡散／鏡面反射及び屈折現象によって方向を変えた光線をさらに追跡する。
- (3) 体系中に置かれたスクリーン上の各画素を通過し目に到達する光線の強度及びRGB値を決定する。

4. 2 出力画像

VSMCコードによって出力された人体模型の三次元画像を Fig. 4.2 に示す。出力される画像の解像度は、横 512×縦384、RGB の輝度は、それぞれ 0～255 諧調である。アルゴリズムの詳しい説明、プログラムにおける処理の説明及び使用方法については、文献 1) を参照さ

れたい。現在、以下の手順に従って可視化が行われている。

- (1) 「MCNPコードの入力データ」を入力データとして、高速モンテカルロ装置上で画像ファイルを生成する。
- (2) 生成された画像ファイルをイーサ・ネットを経由して、ワークステーションに転送する。
- (3) ワークステーションのディスク上にあるファイルをカラー・モニターに表示する。

Fig. 4.3 に、上記手順による一連の画像生成過程におけるデータの流れと使用したハードウェアを示す。

画像生成時間は、入力データで定義されている各三次元領域を表現するために使用されている二次曲面の枚数に比例する。Fig. 4.2 に示した人体模型は、延べ（複数の領域で使用されている同一の二次曲面を重複して数えると）200枚程度の二次曲面を形状表現に使用しており、画像生成には、高速モンテカルロ装置（1プロセッサ）を使用した場合、約1分のCPU時間をする。VSMCコードにおいては、より鮮明な画像を得るために一つのスクリーンを複数枚の画像に分割すること（例えば、横を2分割、縦を3分割のように）が可能である。ただし、この場合の計算時間は、分割された画像の枚数に比例して、さらに増大する。

参考文献

- 1) 横口 他、：モンテカルロ・コード用可視化システムVSMCコード、JAERI-M,
in preparation

5. 計算システムと被曝線量計算結果

5. 1 計算システムとその性能

(1) 使用した計算機資源

計算には、高速モンテカルロ装置を使用した。モンテカルロ計算装置は、粒子輸送問題を扱うモンテカルロ・コードを高速化するために開発された専用計算機である。その特徴は、①4台のベクトル処理装置によるベクトル・並列計算が可能、②モンテカルロ・パイプラインと呼ばれる特殊パイプラインによって、モンテカルロ計算特有の条件分岐文を高速に処理する、等である。使用した計算機資源及び計算体系をTable 5.1 に示す。C P U 時間は、(2)において述べる計算体系において、 γ 線の外部被曝計算の場合、約2分/ケース、中性子線の外部被曝計算の場合、約8分/ケースである。計算において使用した記憶領域は、約400MBである。

(2) 計算体系

今回、 γ 線と中性子線の外部被曝問題について行った計算体系は以下のとおりである。

① γ 線に対する外部被曝問題

モンテカルロ計算時のヒストリー数：100万

線源のエネルギー：10keV から 10MeV の単一エネルギーについて15ケース

線源の形状：前方または後方からの平行ビーム（2ケース）

② 中性子線に対する外部被曝問題

モンテカルロ計算時のヒストリー数：100万

線源のエネルギー：1ev から 10MeV の単一エネルギーについて11ケース

線源の形状：前方または後方からの平行ビーム（2ケース）

5. 2 算出された線量当量と I C R P 刊行物 - 5.1 との比較

(1) 計算結果

Table 5.2 に、各ケース (γ 線/中性子線、前方/後方照射) における各臓器に対する線量当量及び人体に対する実効線量当量を示す。各臓器あるいは人体に対する実効線量当量の算出における係数及び条件については、既に3章に示した。

(2) I C R P データとの比較

Fig. 5.1～5.3 に、計算結果と I C R P データとの比較を示す。それぞれ、 γ 線の前方照射及び後方照射(Fig. 5.1)、中性子線の前方照射(Fig. 5.2)及び中性子線の後方照射(Fig. 5.3)による外部被曝に対する計算結果の比較である。数値比較によれば、入射エネルギーの高い部分での差異は少なく、低い部分での差異が大きい。入射エネルギーの低い部分（実効線量当量の低い部分）での差異を評価するために、縦軸を対数目盛りにした。 γ 線による外部被曝計算においては、I C R P データと計算結果が良く一致している。中性子線の場合、低いエネルギーにおいて、計算結果が I C R P データより高めの傾向を示している。

以上の考察より、本手法による実効線量当量の算出結果は妥当であると思われる。

6. 複雑体系への MCNP コードの適用性とその問題点

6. 1 複雑体系への MCNP コードの適用性

本報告書で用いられている「複雑な体系」という言葉は、単に領域数の多い体系、という意味だけではなく、多種多様な二次あるいは四次曲面の組み合わせによって各 3 次元領域が表現されていることを意味する。これは、今後耐放射線性の評価を行う予定であるロボット軀体についても同様である。机上の手計算によって各領域の形状あるいは包含関係を確認することが不可能な、この種の問題においては、計算コードが入力されたデータに対し、妥当な結果を出力する機能を有するか否かという点と同様、入力データを作成するための MMI (Man Machine Interface) が整備されているか否かという点が重要である。

今回、ロボット軀体に対する耐放射線性の評価を行う手法を開発するため、極めて複雑な体系を持ち、かつ計算結果の妥当性評価が可能な問題として、人体に対する実効線量当量の算出を行い、MCNP コードの複雑体系への適用性を評価した。この結果、システム構築において、次節に述べる問題点を解消するための可視化ツールの作成及びコードの機能拡張を行い、汎用のモンテカルロ・コード MCNP を使った複雑体系における粒子輸送問題に対する手法を確立したと考える。

6. 2 複雑体系における粒子輸送計算上の問題点

極めて複雑な体系における粒子輸送問題に対する MCNP コードの適用性を評価するため、今回、人体模型を用いた実効線量当量計算を行ったが、ここで、明らかになった問題点は、以下のとおり。

(1) MCNP コード用入力データの作成

前述したように、MCNP コード用入力データを作成する際、ORNL の出版物に記載された人体模型の数学モデルを、MCNP コードの入力データとして変換した。MCNP コードでは、3 次元平面または曲面の論理演算によって、3 次元領域を表現する。各平面または曲面は、三元二次式の各項に対する係数を入力することにより定義される。これは、文献1)における式表現と若干異なる。簡単な例ではあるが、 $A(X-Y)^2$ と表現された二次式は、これを展開し、 $AX^2 + AY^2 + 2AXY$ とする必要がある。係数の表現が複雑な式を約100 度展開したが、この中には、記号による単純化を行ったにもかかわらず、式の展開がページ数にして 4 ページにもわたるものもあった。使用する計算コードの表現に合わせた曲面の係数の再定義は、単純な作業ではあるが、多くの時間を要する。この種の問題に対するシステム構築上の問題点と思われる。

(2) 作成した形状データの確認

MCNP コードにおいては、粒子追跡中、論理的に矛盾した領域（幽霊領域）に粒子が迷い込んだ場合、エラーとして処理される。このような領域は、データ作成時のエラーだけでなく、数値計算における丸め誤差によっても生じる。このため、微妙に接近した三次元空間における二つの二次曲面に関する交差部分の有無の判断は難しい。人体の骨や臓器を表現する三

次元領域を記述する形状データ作成においては、徐々に新しい領域を定義していったが、幽霊領域に粒子が迷い込んだ(Lost particle) というMCNPコードからのメッセージ出力があった場合、その原因となっている領域を構成する二次曲面の関係がわからず、入力データの修正作業において多くの時間を費やした。上記問題点と同様、この種の問題に対するシステム構築上の問題点と思われ、これが、モンテカルロ・コード用可視化システムを開発したきっかけとなっている。

(3) MCNPコードの機能拡張

前述したように、人体模型を定義するMCNPコード用形状データの作成においては、計算結果を確認しながら徐々に新しい臓器を追加し、コードを実行するという作業手順を繰り返していたが、ある時コードが、異常終了した。これは、人体模型の複雑さがコード設計時に予想された体系の複雑さを越えてしまったことが、原因である。つまり、あまりにも複雑な体系を記述したために、予め上限が定められている形状データ格納用配列の容量が不足してしまった。この問題を解決するために、形状データ格納用領域の拡張を行ったが、この作業は、コード実行用の入力変数を変更することと異なり、大量の変数を定義・参照している原子力コードのコモン領域の変更であり、コードの解析作業を必要としたため、変更ステップ数が少ないにも関わらず、比較的多くの時間を費やした。

参考文献

- 1) Cristy, M. : Specific Absorbed Fractions of Energy at Various Ages from Internal Photon Sources, ORNL-TM-8381, 1987

7. おわりに

今回、放射線輸送連続エネルギー・モンテカルロ・コードMCNPの複雑体系に対する適用性を評価するため、機能拡張された同コードを用いて人体に対する線量計算を行い、有効性を確認した。本手法を、ロボット設計のための要素技術として応用するための今後の課題は以下のとおりである。

(1) ロボット設計への応用可能性

前述したように、HASPにおいては、知能ロボット設計の際、ロボットに搭載された回路に対する放射線損傷度の評価が必要である。これには、今回行った人体に対する外部被曝計算において確立された複雑形状に対する放射線輸送問題における手法を応用する予定である。この際、人体を構成する組織に対する線量当量評価手法に替わって、ロボットに搭載されたLSI回路に対する放射線損傷度評価手法の開発が必要である。また、ロボット軸体に対する放射線損傷度を評価する際、人体に対する実効線量当量に対応する値を算出する必要がある。人体に対する実効線量当量は、被曝によるガンの死亡率を考慮し、人体を構成する各臓器に対して求めた線量当量と荷重係数を用いて算出されるが、ロボットに搭載された回路に対する荷重係数の決定方法については、今後の研究課題である。

(2) 動的な被曝線量評価手法の開発

HASPにおいては、巡回点検等の作業に対するリスクを評価するために、原子力施設内を移動中の知能ロボットに対する動的な放射線損傷度の評価を目標としている。動的なモンテカルロ・シミュレーションは、Table 7.1 に示すように、多大の計算時間を要することが予想されるが、計算時間については、ベクトルあるいは並列処理といった高速モンテカルロ装置向けの高速化により、短縮を試みる予定である。処理の高速化の他、実施設を想定した環境における動的なモンテカルロ・シミュレーションに必要となる手法は、以下のとおりである。

- i) 姿勢の変化による被曝線量の変化を考慮するために、直立状態のモデルのみではなく、各関節の角度変化が可能なモデルを開発する必要がある。その理由は、人体の場合、脚の位置が変化した時、脚による遮蔽状況が変化し、生殖器官への線量当量が変化することが予想される、という例をとっても明らかである。
- ii) ある移動作業に対する被曝線量を評価するために、時間依存のモンテカルロ計算が必要となる。現在は、無限時間の被曝を想定し、ここで算出された値を、入射フラックスあたりの値として比較を行っている。被曝時間を考慮した時間依存のモンテカルロ計算においては、実際の原子力施設における放射線被曝を意識した放射線場の決め方が問題となる。ここにおいては、現在構築中のJRR-3 施設に関する形状データベースが利用可能である。

(3) VSMCコード拡張作業

今回、作成した入力データを確認するために開発したVSMCコードについては、今後、以下の機能拡張及び改良を予定している。

① 出力データの可視化

入力データのみならず、算出された臓器毎の線量値の程度を色の変化で示す可視化機能を追加する予定である。この機能により、計算結果の把握が容易となる。

② 高速化

現在、高速モンテカルロ装置上で作成された光線追跡法による三次元画像をワークステーションに転送後、カラーディスプレイに表示しているが、計算時間を短縮する必要がある。このため、モンテカルロ計算装置の並列処理機能によって高速化することを検討している。光線追跡法による画像生成アルゴリズムは、高い並列性を持つため良好な結果が期待できる。

謝 辞

原研・保健物理部の山口恭弘氏には、外部被曝計算に関する専門家の立場から、技術的に貴重な助言を頂いた。高速モンテカルロ装置を用いたモンテカルロ・シミュレーションにおいては、(財)原子力データセンターの長谷川幸弘氏の助力があった。両氏に、深く感謝します。また、研究を進めるに当たり、適切な助言と指導を頂きました情報システムセンター室長秋元正幸氏、国際協力室長浅井清氏に深く感謝します。

② 高速化

現在、高速モンテカルロ装置上で作成された光線追跡法による三次元画像をワークステーションに転送後、カラーディスプレイに表示しているが、計算時間を短縮する必要がある。このため、モンテカルロ計算装置の並列処理機能によって高速化することを検討している。光線追跡法による画像生成アルゴリズムは、高い並列性を持つため良好な結果が期待できる。

謝 辞

原研・保健物理部の山口恭弘氏には、外部被曝計算に関する専門家の立場から、技術的に貴重な助言を頂いた。高速モンテカルロ装置を用いたモンテカルロ・シミュレーションにおいては、（財）原子力データセンターの長谷川幸弘氏の助力があった。両氏に、深く感謝します。また、研究を進めるに当たり、適切な助言と指導を頂きました情報システムセンター室長秋元正幸氏、国際協力室長浅井清氏に深く感謝します。

Table 3.1 Distribution of active marrow in adult phantom.

SKELETAL REGION DEFINED IN PHANTOM	DISTRIBUTION OF ACTIVE MARROW IN ADULT PHANTOM
SKULL	8.3 %
SPINE	29.9 %
RIBS	19.2 %
SCAPLAE	2.9 %
ARM BONES(UPPER PORTION)	2.3 %
CLAVICLES	0.8 %
LEG BONES(UPPER PORTION)	3.4 %
PELVIS	33.3 %
TOTAL AMOUNT OF ACTIVE BONE MARROW	1120 g

Table 3.2 The values of weighting factor recommended by the ICRP.

Tissue	weighting factor
Gonads	0.25
Breast	0.15
Red bone marrow	0.12
Lung	0.12
Thyroid	0.03
Bone surfaces	0.03
Remainder	0.30

Table 5.1 Computational resource and calculational parameter
in the irradiation problem.

計算モデル	人体模型：曲面数 200、領域数 110
線源	単一エネルギー、エネルギー範囲10 KeV～ 10 MeVまで、15群（光子被曝） 1 eV～ 10 MeVまで、11群（中性子被曝） 形状：平行ビーム（前方照射及び後方照射の2ケース）
サンプリング数	100 万ヒストリー
計算時間	・光子被曝計算： 2分／群×15群×2ケース = 60分 ・中性子被曝計算： 8分／群×11群×2ケース = 176分
使用計算機	モンテカルロ計算装置

Table 5.2 Dose equivalent for each tissue calculated by MCNP code.

(1) γ 線被曝

皮膚

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.010 MEV	0.160714E-11	0.164789E-11
0.020 MEV	0.637677E-12	0.650986E-12
0.040 MEV	0.255680E-12	0.259298E-12
0.060 MEV	0.233062E-12	0.231805E-12
0.080 MEV	0.264782E-12	0.267016E-12
0.100 MEV	0.323653E-12	0.323962E-12
0.200 MEV	0.678275E-12	0.691006E-12
0.300 MEV	0.107802E-11	0.108929E-11
0.400 MEV	0.145920E-11	0.146655E-11
1.000 MEV	0.343592E-11	0.345936E-11
2.000 MEV	0.592303E-11	0.594562E-11
3.000 MEV	0.786515E-11	0.793011E-11
4.000 MEV	0.959934E-11	0.966768E-11
5.000 MEV	0.112623E-10	0.111451E-10
10.000 MEV	0.188188E-10	0.189537E-10

膀胱

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.010 MEV	0.0	0.0
0.020 MEV	0.986926E-13	0.958581E-13
0.040 MEV	0.525985E-12	0.257701E-12
0.060 MEV	0.585660E-12	0.232630E-12
0.080 MEV	0.563268E-12	0.303660E-12
0.100 MEV	0.643584E-12	0.720086E-12
0.200 MEV	0.133254E-11	0.938578E-12
0.300 MEV	0.181244E-11	0.133880E-11
0.400 MEV	0.229675E-11	0.330314E-11
1.000 MEV	0.480423E-11	0.597546E-11
2.000 MEV	0.806396E-11	0.814262E-11
3.000 MEV	0.113847E-10	0.101040E-10
4.000 MEV	0.161765E-10	0.146588E-10
5.000 MEV	0.144733E-10	0.214399E-10
10.000 MEV	0.257826E-10	

頭部

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.010 MEV	0.127643E-13	0.128191E-13
0.020 MEV	0.492324E-13	0.592226E-13
0.040 MEV	0.525115E-13	0.609437E-13
0.060 MEV	0.561838E-13	0.680469E-13
0.080 MEV	0.747491E-13	0.824894E-13
0.100 MEV	0.973319E-13	0.100941E-12
0.200 MEV	0.195390E-12	0.216418E-12
0.300 MEV	0.329076E-12	0.343540E-12
0.400 MEV	0.447230E-12	0.467501E-12
1.000 MEV	0.108041E-11	0.110870E-11
2.000 MEV	0.190985E-11	0.195855E-11
3.000 MEV	0.254869E-11	0.263010E-11
4.000 MEV	0.291301E-11	0.322741E-11
5.000 MEV	0.368951E-11	0.352328E-11
10.000 MEV	0.618661E-11	0.633711E-11

胃

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.010 MEV	0.0	0.0
0.020 MEV	0.984259E-13	0.991712E-13
0.040 MEV	0.369866E-12	0.228461E-12
0.060 MEV	0.442478E-12	0.252584E-12
0.080 MEV	0.500793E-12	0.345149E-12
0.100 MEV	0.588393E-12	0.726407E-12
0.200 MEV	0.141215E-11	0.113668E-11
0.300 MEV	0.174845E-11	0.144766E-11
0.400 MEV	0.221100E-11	0.396165E-11
1.000 MEV	0.491981E-11	0.687056E-11
2.000 MEV	0.792347E-11	0.902499E-11
3.000 MEV	0.103766E-10	0.111995E-10
4.000 MEV	0.121225E-10	0.120205E-10
5.000 MEV	0.148876E-10	0.225953E-10
10.000 MEV	0.250412E-10	

小腸

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.010 MEV	0.0	0.0
0.020 MEV	0.229935E-13	0.220439E-14
0.040 MEV	0.211412E-12	0.963401E-13
0.060 MEV	0.287242E-12	0.222109E-12
0.080 MEV	0.416709E-12	0.322830E-12
0.100 MEV	0.522312E-12	0.393535E-12
0.200 MEV	0.101936E-11	0.784134E-12
0.300 MEV	0.144037E-11	0.121334E-11
0.400 MEV	0.194347E-11	0.169614E-11
1.000 MEV	0.416095E-11	0.401496E-11
2.000 MEV	0.718653E-11	0.688204E-11
3.000 MEV	0.969586E-11	0.924494E-11
4.000 MEV	0.115675E-10	0.114219E-10
5.000 MEV	0.135575E-10	0.136420E-10
10.000 MEV	0.229789E-10	0.223758E-10

大腸下部

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.010 MEV	0.0	0.0
0.020 MEV	0.781573E-14	0.257102E-14
0.040 MEV	0.143370E-12	0.109191E-12
0.060 MEV	0.256524E-12	0.266906E-12
0.080 MEV	0.342173E-12	0.296794E-12
0.100 MEV	0.407536E-12	0.359704E-12
0.200 MEV	0.830701E-12	0.691001E-12
0.300 MEV	0.121956E-11	0.114012E-11
0.400 MEV	0.159348E-11	0.152636E-11
1.000 MEV	0.332527E-11	0.367844E-11
2.000 MEV	0.574791E-11	0.632932E-11
3.000 MEV	0.828643E-11	0.852505E-11
4.000 MEV	0.108945E-10	0.103335E-10
5.000 MEV	0.112581E-10	0.130785E-10
10.000 MEV	0.190258E-10	0.199416E-10

大腸上部

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.010 MEV	0.0	0.0
0.020 MEV	0.436059E-13	0.439586E-15
0.040 MEV	0.331120E-12	0.107642E-12
0.060 MEV	0.389825E-12	0.266649E-12
0.080 MEV	0.514849E-12	0.296730E-12
0.100 MEV	0.527128E-12	0.359351E-12
0.200 MEV	0.108725E-11	0.787003E-12
0.300 MEV	0.159910E-11	0.116061E-11
0.400 MEV	0.226738E-11	0.157177E-11
1.000 MEV	0.485165E-11	0.373162E-11
2.000 MEV	0.839070E-11	0.658671E-11
3.000 MEV	0.112457E-10	0.890346E-11
4.000 MEV	0.133376E-10	0.109501E-10
5.000 MEV	0.153573E-10	0.143146E-10
10.000 MEV	0.250738E-10	0.218606E-10

副腎

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.010 MEV	0.0	0.0
0.020 MEV	0.0	0.0
0.040 MEV	0.0	0.848263E-13
0.060 MEV	0.597033E-13	0.131136E-12
0.080 MEV	0.680962E-13	0.302719E-12
0.100 MEV	0.760629E-13	0.333070E-12
0.200 MEV	0.253104E-12	0.769677E-12
0.300 MEV	0.353427E-12	0.987086E-12
0.400 MEV	0.623683E-12	0.134312E-11
1.000 MEV	0.144775E-11	0.316751E-11
2.000 MEV	0.230600E-11	0.462684E-11
3.000 MEV	0.307783E-11	0.624815E-11
4.000 MEV	0.270353E-11	0.768772E-11
5.000 MEV	0.461078E-11	0.854256E-11
10.000 MEV	0.737628E-11	0.140326E-10

脳

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.010 MEV	0.0	0.0
0.020 MEV	0.349536E-14	0.349536E-14
0.040 MEV	0.169160E-12	0.166067E-12
0.060 MEV	0.184665E-12	0.243732E-12
0.080 MEV	0.228731E-12	0.242654E-12
0.100 MEV	0.308463E-12	0.294289E-12
0.200 MEV	0.718049E-12	0.644042E-12
0.300 MEV	0.111819E-11	0.103866E-11
0.400 MEV	0.147544E-11	0.147887E-11
1.000 MEV	0.359934E-11	0.375494E-11
2.000 MEV	0.619632E-11	0.641174E-11
3.000 MEV	0.930462E-11	0.855253E-11
4.000 MEV	0.114133E-10	0.105459E-10
5.000 MEV	0.126600E-10	0.132698E-10
10.000 MEV	0.228134E-10	0.216241E-10

肝臓

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.010 MEV	0.0	0.0
0.020 MEV	0.564893E-13	0.178411E-13
0.040 MEV	0.345312E-12	0.192452E-12
0.060 MEV	0.392725E-12	0.303496E-12
0.080 MEV	0.447508E-12	0.319105E-12
0.100 MEV	0.552444E-12	0.399411E-12
0.200 MEV	0.103622E-11	0.863691E-12
0.300 MEV	0.165784E-11	0.118614E-11
0.400 MEV	0.213489E-11	0.163883E-11
1.000 MEV	0.473240E-11	0.403491E-11
2.000 MEV	0.795799E-11	0.681360E-11
3.000 MEV	0.102755E-10	0.906353E-11
4.000 MEV	0.124247E-10	0.112576E-10
5.000 MEV	0.150624E-10	0.139938E-10
10.000 MEV	0.252890E-10	0.221632E-10

腎臓

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.010 MEV	0.0	0.0
0.020 MEV	0.0	0.212269E-12
0.040 MEV	0.561637E-13	0.456706E-12
0.060 MEV	0.156954E-12	0.470238E-12
0.080 MEV	0.175767E-12	0.564717E-12
0.100 MEV	0.229706E-12	0.670933E-12
0.200 MEV	0.648063E-12	0.133984E-11
0.300 MEV	0.939091E-12	0.188681E-11
0.400 MEV	0.122534E-11	0.249327E-11
1.000 MEV	0.341563E-11	0.528240E-11
2.000 MEV	0.632292E-11	0.865135E-11
3.000 MEV	0.869881E-11	0.113088E-10
4.000 MEV	0.104474E-10	0.136186E-10
5.000 MEV	0.126765E-10	0.157206E-10
10.000 MEV	0.210475E-10	0.262406E-10

肺

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.010 MEV	0.0	0.0
0.020 MEV	0.389716E-13	0.679835E-13
0.040 MEV	0.291570E-12	0.342206E-12
0.060 MEV	0.357718E-12	0.364923E-12
0.080 MEV	0.388033E-12	0.436182E-12
0.100 MEV	0.448100E-12	0.519101E-12
0.200 MEV	0.952833E-12	0.100370E-11
0.300 MEV	0.139819E-11	0.155865E-11
0.400 MEV	0.188008E-11	0.205616E-11
1.000 MEV	0.442315E-11	0.470610E-11
2.000 MEV	0.751306E-11	0.803518E-11
3.000 MEV	0.954721E-11	0.106543E-10
4.000 MEV	0.118865E-10	0.129106E-10
5.000 MEV	0.143483E-10	0.144939E-10
10.000 MEV	0.233950E-10	0.249760E-10

卵巢

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.010 MEV	0.0	0.0
0.020 MEV	0.0	0.0
0.040 MEV	0.453800E-12	0.731061E-13
0.060 MEV	0.395396E-12	0.258287E-12
0.080 MEV	0.431329E-12	0.376329E-12
0.100 MEV	0.379029E-12	0.401100E-12
0.200 MEV	0.127249E-11	0.599116E-12
0.300 MEV	0.145742E-11	0.143886E-11
0.400 MEV	0.197004E-11	0.179968E-11
1.000 MEV	0.544156E-11	0.469001E-11
2.000 MEV	0.798345E-11	0.776275E-11
3.000 MEV	0.114805E-10	0.105815E-10
4.000 MEV	0.118470E-10	0.126089E-10
5.000 MEV	0.151248E-10	0.136402E-10
10.000 MEV	0.236679E-10	0.238433E-10

睾丸

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.010 MEV	0.604042E-12	0.0
0.020 MEV	0.772037E-12	0.352687E-14
0.040 MEV	0.527887E-12	0.547351E-13
0.060 MEV	0.451824E-12	0.202887E-12
0.080 MEV	0.483084E-12	0.164837E-12
0.100 MEV	0.679397E-12	0.197285E-12
0.200 MEV	0.108791E-11	0.610780E-12
0.300 MEV	0.187790E-11	0.917307E-12
0.400 MEV	0.221611E-11	0.130692E-11
1.000 MEV	0.432852E-11	0.416492E-11
2.000 MEV	0.727252E-11	0.652838E-11
3.000 MEV	0.109818E-10	0.902559E-11
4.000 MEV	0.103905E-10	0.100859E-10
5.000 MEV	0.132300E-10	0.134519E-10
10.000 MEV	0.242435E-10	0.186372E-10

脾臓

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.010 MEV	0.0	0.0
0.020 MEV	0.367312E-14	0.0
0.040 MEV	0.153307E-12	0.239520E-12
0.060 MEV	0.305052E-12	0.284411E-12
0.080 MEV	0.350265E-12	0.368892E-12
0.100 MEV	0.445234E-12	0.462261E-12
0.200 MEV	0.951073E-12	0.846663E-12
0.300 MEV	0.145111E-11	0.143578E-11
0.400 MEV	0.185330E-11	0.187109E-11
1.000 MEV	0.428688E-11	0.454507E-11
2.000 MEV	0.705559E-11	0.731973E-11
3.000 MEV	0.839240E-11	0.986886E-11
4.000 MEV	0.104402E-10	0.119544E-10
5.000 MEV	0.130843E-10	0.125541E-10
10.000 MEV	0.212576E-10	0.232189E-10

胸腺

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.010 MEV	0.0	0.0
0.020 MEV	0.937672E-13	0.0
0.040 MEV	0.500427E-12	0.0
0.060 MEV	0.514170E-12	0.511805E-13
0.080 MEV	0.535088E-12	0.203258E-12
0.100 MEV	0.538072E-12	0.160702E-12
0.200 MEV	0.906323E-12	0.321640E-12
0.300 MEV	0.147395E-11	0.682220E-12
0.400 MEV	0.188707E-11	0.753207E-12
1.000 MEV	0.456111E-11	0.214243E-11
2.000 MEV	0.795316E-11	0.516027E-11
3.000 MEV	0.873907E-11	0.769587E-11
4.000 MEV	0.851780E-11	0.880544E-11
5.000 MEV	0.137548E-10	0.749444E-11
10.000 MEV	0.190610E-10	0.181708E-10

子宮

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.010 MEV	0.0	0.0
0.020 MEV	0.405206E-14	0.0
0.040 MEV	0.219170E-12	0.915546E-13
0.060 MEV	0.248881E-12	0.154456E-12
0.080 MEV	0.369371E-12	0.257570E-12
0.100 MEV	0.450550E-12	0.318706E-12
0.200 MEV	0.781815E-12	0.778916E-12
0.300 MEV	0.120625E-11	0.112935E-11
0.400 MEV	0.165311E-11	0.145137E-11
1.000 MEV	0.378451E-11	0.362003E-11
2.000 MEV	0.627109E-11	0.623849E-11
3.000 MEV	0.604948E-11	0.844403E-11
4.000 MEV	0.750455E-11	0.102609E-10
5.000 MEV	0.117321E-10	0.101877E-10
10.000 MEV	0.157736E-10	0.198275E-10

甲状腺

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.010 MEV	0.0	0.0
0.020 MEV	0.158227E-13	0.0
0.040 MEV	0.135785E-12	0.0
0.060 MEV	0.158402E-12	0.680373E-13
0.080 MEV	0.188917E-12	0.470292E-13
0.100 MEV	0.535491E-12	0.779288E-13
0.200 MEV	0.377351E-12	0.180413E-12
0.300 MEV	0.818836E-12	0.376210E-12
0.400 MEV	0.104499E-11	0.643317E-12
1.000 MEV	0.206056E-11	0.121684E-11
2.000 MEV	0.380598E-11	0.291134E-11
3.000 MEV	0.484415E-11	0.398072E-11
4.000 MEV	0.503442E-11	0.513662E-11
5.000 MEV	0.714139E-11	0.574726E-11
10.000 MEV	0.107095E-10	0.969203E-11

乳房

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.010 MEV	0.146080E-12	0.0
0.020 MEV	0.765143E-12	0.504695E-15
0.040 MEV	0.555851E-12	0.111230E-12
0.060 MEV	0.578963E-12	0.126285E-12
0.080 MEV	0.615963E-12	0.173243E-12
0.100 MEV	0.386746E-12	0.239255E-12
0.200 MEV	0.138666E-11	0.608541E-12
0.300 MEV	0.220020E-11	0.977380E-12
0.400 MEV	0.296110E-11	0.146723E-11
1.000 MEV	0.641079E-11	0.418169E-11
2.000 MEV	0.103740E-10	0.767917E-11
3.000 MEV	0.131030E-10	0.110607E-10
4.000 MEV	0.169073E-10	0.135173E-10
5.000 MEV	0.193576E-10	0.157906E-10
10.000 MEV	0.315054E-10	0.270291E-10

残存組織

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.010 MEV	0.539969E-12	0.553568E-12
0.020 MEV	0.278265E-12	0.307493E-12
0.040 MEV	0.465426E-12	0.318508E-12
0.060 MEV	0.514102E-12	0.352715E-12
0.080 MEV	0.537735E-12	0.418813E-12
0.100 MEV	0.594807E-12	0.510868E-12
0.200 MEV	0.127732E-11	0.101673E-11
0.300 MEV	0.173957E-11	0.151197E-11
0.400 MEV	0.225838E-11	0.202017E-11
1.000 MEV	0.485856E-11	0.462079E-11
2.000 MEV	0.813755E-11	0.761770E-11
3.000 MEV	0.110023E-10	0.101408E-10
4.000 MEV	0.139796E-10	0.123316E-10
5.000 MEV	0.151024E-10	0.148980E-10
10.000 MEV	0.253818E-10	0.240183E-10

赤色骨髓

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.010 MEV	0.204751E-14	0.294558E-14
0.020 MEV	0.620204E-13	0.184673E-12
0.040 MEV	0.371286E-12	0.762224E-12
0.060 MEV	0.461586E-12	0.922548E-12
0.080 MEV	0.518719E-12	0.947967E-12
0.100 MEV	0.572485E-12	0.973023E-12
0.200 MEV	0.841586E-12	0.129559E-11
0.300 MEV	0.114853E-11	0.173784E-11
0.400 MEV	0.151639E-11	0.222432E-11
1.000 MEV	0.361064E-11	0.467957E-11
2.000 MEV	0.637245E-11	0.773086E-11
3.000 MEV	0.880565E-11	0.102644E-10
4.000 MEV	0.109632E-10	0.125255E-10
5.000 MEV	0.128389E-10	0.146061E-10
10.000 MEV	0.223987E-10	0.253732E-10

骨組織

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.010 MEV	0.267708E-14	0.419622E-14
0.020 MEV	0.106431E-12	0.151047E-12
0.040 MEV	0.483944E-12	0.620027E-12
0.060 MEV	0.554738E-12	0.674198E-12
0.080 MEV	0.586740E-12	0.703946E-12
0.100 MEV	0.609354E-12	0.725564E-12
0.200 MEV	0.895204E-12	0.103391E-11
0.300 MEV	0.130372E-11	0.144725E-11
0.400 MEV	0.167666E-11	0.186169E-11
1.000 MEV	0.384443E-11	0.415790E-11
2.000 MEV	0.664073E-11	0.701412E-11
3.000 MEV	0.906775E-11	0.938562E-11
4.000 MEV	0.111002E-10	0.115290E-10
5.000 MEV	0.130812E-10	0.136485E-10
10.000 MEV	0.229944E-10	0.236067E-10

実効線量当量

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.010 MEV	0.335239E-12	0.166550E-12
0.020 MEV	0.407046E-12	0.128055E-12
0.040 MEV	0.453111E-12	0.281646E-12
0.060 MEV	0.473741E-12	0.366092E-12
0.080 MEV	0.506565E-12	0.434339E-12
0.100 MEV	0.563118E-12	0.492583E-12
0.200 MEV	0.116282E-11	0.861339E-12
0.300 MEV	0.169066E-11	0.141020E-11
0.400 MEV	0.216493E-11	0.186486E-11
1.000 MEV	0.492078E-11	0.447351E-11
2.000 MEV	0.797288E-11	0.756755E-11
3.000 MEV	0.107559E-10	0.102580E-10
4.000 MEV	0.129177E-10	0.124316E-10
5.000 MEV	0.150847E-10	0.143219E-10
10.000 MEV	0.249075E-10	0.242615E-10

(2) 中性子線被曝

皮膚

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.000001 MEV	0.253955E-11	0.258811E-11
0.001000 MEV	0.186981E-11	0.184216E-11
0.010000 MEV	0.430676E-11	0.434770E-11
0.020000 MEV	0.734554E-11	0.749186E-11
0.050000 MEV	0.173420E-10	0.175901E-10
0.200000 MEV	0.555209E-10	0.565245E-10
0.500000 MEV	0.998435E-10	0.101553E-09
1.000000 MEV	0.162834E-09	0.167110E-09
1.500000 MEV	0.169850E-09	0.171781E-09
2.000000 MEV	0.179117E-09	0.181212E-09
10.000000 MEV	0.292298E-09	0.294115E-09

膀胱

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.000001 MEV	0.729042E-11	0.166122E-11
0.001000 MEV	0.670340E-11	0.221579E-11
0.010000 MEV	0.675738E-11	0.202886E-11
0.020000 MEV	0.699392E-11	0.199936E-11
0.050000 MEV	0.848846E-11	0.197443E-11
0.200000 MEV	0.229963E-10	0.220281E-11
0.500000 MEV	0.644765E-10	0.478157E-11
1.000000 MEV	0.130407E-09	0.826238E-11
1.500000 MEV	0.201081E-09	0.269760E-10
2.000000 MEV	0.255730E-09	0.537739E-10
10.000000 MEV	0.455095E-09	0.250361E-09

頭部

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.000001 MEV	0.832692E-12	0.902158E-12
0.001000 MEV	0.745003E-12	0.745343E-12
0.010000 MEV	0.916140E-12	0.918768E-12
0.020000 MEV	0.113451E-11	0.116342E-11
0.050000 MEV	0.188073E-11	0.204116E-11
0.200000 MEV	0.662105E-11	0.719490E-11
0.500000 MEV	0.156403E-10	0.168453E-10
1.000000 MEV	0.268255E-10	0.288510E-10
1.500000 MEV	0.396037E-10	0.416972E-10
2.000000 MEV	0.458946E-10	0.478015E-10
10.000000 MEV	0.962699E-10	0.979700E-10

胃

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.000001 MEV	0.631084E-11	0.225651E-11
0.001000 MEV	0.710961E-11	0.245417E-11
0.010000 MEV	0.753783E-11	0.246161E-11
0.020000 MEV	0.752369E-11	0.253307E-11
0.050000 MEV	0.900777E-11	0.288400E-11
0.200000 MEV	0.275114E-10	0.409942E-11
0.500000 MEV	0.749437E-10	0.897333E-11
1.000000 MEV	0.119724E-09	0.179413E-10
1.500000 MEV	0.216983E-09	0.464617E-10
2.000000 MEV	0.257487E-09	0.747613E-10
10.000000 MEV	0.462755E-09	0.338433E-09

小腸

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.000001 MEV	0.429028E-11	0.307885E-11
0.001000 MEV	0.512057E-11	0.381736E-11
0.010000 MEV	0.483636E-11	0.343381E-11
0.020000 MEV	0.501639E-11	0.397299E-11
0.050000 MEV	0.549893E-11	0.431833E-11
0.200000 MEV	0.100607E-10	0.630074E-11
0.500000 MEV	0.261915E-10	0.139143E-10
1.000000 MEV	0.511222E-10	0.299716E-10
1.500000 MEV	0.114963E-09	0.793446E-10
2.000000 MEV	0.152910E-09	0.110525E-09
10.000000 MEV	0.385326E-09	0.354708E-09

大腸下部

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.000001 MEV	0.339649E-11	0.302430E-11
0.001000 MEV	0.385875E-11	0.315911E-11
0.010000 MEV	0.397847E-11	0.357888E-11
0.020000 MEV	0.364378E-11	0.356599E-11
0.050000 MEV	0.454241E-11	0.375910E-11
0.200000 MEV	0.747578E-11	0.553187E-11
0.500000 MEV	0.175326E-10	0.145218E-10
1.000000 MEV	0.397061E-10	0.346925E-10
1.500000 MEV	0.942419E-10	0.863717E-10
2.000000 MEV	0.123803E-09	0.125077E-09
10.000000 MEV	0.333420E-09	0.316944E-09

大腸上部

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.000001 MEV	0.515307E-11	0.240704E-11
0.001000 MEV	0.680227E-11	0.314797E-11
0.010000 MEV	0.629840E-11	0.266677E-11
0.020000 MEV	0.655371E-11	0.300351E-11
0.050000 MEV	0.688176E-11	0.297533E-11
0.200000 MEV	0.134434E-10	0.512505E-11
0.500000 MEV	0.409632E-10	0.877615E-11
1.000000 MEV	0.823950E-10	0.165378E-10
1.500000 MEV	0.164232E-09	0.654640E-10
2.000000 MEV	0.201652E-09	0.956402E-10
10.000000 MEV	0.438350E-09	0.337280E-09

副腎

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.000001 MEV	0.742108E-12	0.469825E-11
0.001000 MEV	0.567999E-12	0.453300E-11
0.010000 MEV	0.170379E-11	0.487134E-11
0.020000 MEV	0.995799E-12	0.478408E-11
0.050000 MEV	0.116181E-11	0.568372E-11
0.200000 MEV	0.145338E-11	0.106071E-10
0.500000 MEV	0.252073E-11	0.399042E-10
1.000000 MEV	0.243621E-11	0.879630E-10
1.500000 MEV	0.137716E-10	0.152951E-09
2.000000 MEV	0.371328E-10	0.171572E-09
10.000000 MEV	0.132964E-09	0.257962E-09

脳

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.000001 MEV	0.245633E-11	0.244008E-11
0.001000 MEV	0.218877E-11	0.227005E-11
0.010000 MEV	0.274658E-11	0.249155E-11
0.020000 MEV	0.257896E-11	0.251422E-11
0.050000 MEV	0.341368E-11	0.339996E-11
0.200000 MEV	0.112805E-10	0.110541E-10
0.500000 MEV	0.331341E-10	0.330295E-10
1.000000 MEV	0.654990E-10	0.608663E-10
1.500000 MEV	0.115594E-09	0.115945E-09
2.000000 MEV	0.143454E-09	0.141184E-09
10.000000 MEV	0.313973E-09	0.310586E-09

肝臓

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.000001 MEV	0.560199E-11	0.356282E-11
0.001000 MEV	0.576258E-11	0.389759E-11
0.010000 MEV	0.585131E-11	0.382595E-11
0.020000 MEV	0.605063E-11	0.378670E-11
0.050000 MEV	0.719115E-11	0.450096E-11
0.200000 MEV	0.183481E-10	0.900635E-11
0.500000 MEV	0.544937E-10	0.242254E-10
1.000000 MEV	0.990620E-10	0.500227E-10
1.500000 MEV	0.175082E-09	0.963648E-10
2.000000 MEV	0.216296E-09	0.131422E-09
10.000000 MEV	0.433537E-09	0.344988E-09

腎臓

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.000001 MEV	0.123343E-11	0.105245E-10
0.001000 MEV	0.160515E-11	0.978997E-11
0.010000 MEV	0.154860E-11	0.860563E-11
0.020000 MEV	0.156081E-11	0.909281E-11
0.050000 MEV	0.175788E-11	0.122381E-10
0.200000 MEV	0.224334E-11	0.406684E-10
0.500000 MEV	0.388823E-11	0.112933E-09
1.000000 MEV	0.848024E-11	0.196821E-09
1.500000 MEV	0.267922E-10	0.276434E-09
2.000000 MEV	0.496722E-10	0.308940E-09
10.000000 MEV	0.279033E-09	0.483818E-09

肺

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.000001 MEV	0.389874E-11	0.488324E-11
0.001000 MEV	0.390979E-11	0.500957E-11
0.010000 MEV	0.433647E-11	0.506011E-11
0.020000 MEV	0.433881E-11	0.518207E-11
0.050000 MEV	0.522945E-11	0.690038E-11
0.200000 MEV	0.142572E-10	0.223587E-10
0.500000 MEV	0.404953E-10	0.603505E-10
1.000000 MEV	0.839208E-10	0.110290E-09
1.500000 MEV	0.147437E-09	0.195162E-09
2.000000 MEV	0.185321E-09	0.235064E-09
10.000000 MEV	0.400648E-09	0.434335E-09

卵巣

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.000001 MEV	0.371826E-11	0.478779E-11
0.001000 MEV	0.401437E-11	0.322059E-11
0.010000 MEV	0.455315E-11	0.429705E-11
0.020000 MEV	0.406247E-11	0.510418E-11
0.050000 MEV	0.393868E-11	0.487121E-11
0.200000 MEV	0.683061E-11	0.538480E-11
0.500000 MEV	0.125494E-10	0.118126E-10
1.000000 MEV	0.462233E-10	0.342668E-10
1.500000 MEV	0.130403E-09	0.862327E-10
2.000000 MEV	0.164519E-09	0.825179E-10
10.000000 MEV	0.353352E-09	0.356000E-09

睾丸

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.000001 MEV	0.585412E-11	0.111669E-11
0.001000 MEV	0.756492E-11	0.128441E-11
0.010000 MEV	0.776187E-11	0.115489E-11
0.020000 MEV	0.106818E-10	0.137258E-11
0.050000 MEV	0.261604E-10	0.107498E-11
0.200000 MEV	0.898920E-10	0.295763E-11
0.500000 MEV	0.181179E-09	0.645395E-11
1.000000 MEV	0.312060E-09	0.175379E-10
1.500000 MEV	0.286288E-09	0.407284E-10
2.000000 MEV	0.296477E-09	0.839662E-10
10.000000 MEV	0.409826E-09	0.263504E-09

膀胱

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.000001 MEV	0.390205E-11	0.331755E-11
0.001000 MEV	0.371152E-11	0.424253E-11
0.010000 MEV	0.424780E-11	0.423934E-11
0.020000 MEV	0.525235E-11	0.412245E-11
0.050000 MEV	0.401037E-11	0.522246E-11
0.200000 MEV	0.762741E-11	0.647806E-11
0.500000 MEV	0.142614E-10	0.172020E-10
1.000000 MEV	0.377824E-10	0.317058E-10
1.500000 MEV	0.806558E-10	0.879950E-10
2.000000 MEV	0.126988E-09	0.125258E-09
10.000000 MEV	0.377329E-09	0.415249E-09

胸腺

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.000001 MEV	0.997390E-11	0.148993E-11
0.001000 MEV	0.797906E-11	0.143898E-11
0.010000 MEV	0.729580E-11	0.202277E-11
0.020000 MEV	0.921235E-11	0.115444E-11
0.050000 MEV	0.132207E-10	0.184484E-11
0.200000 MEV	0.499808E-10	0.169616E-11
0.500000 MEV	0.125790E-09	0.293732E-11
1.000000 MEV	0.220245E-09	0.146586E-10
1.500000 MEV	0.296518E-09	0.249046E-10
2.000000 MEV	0.330023E-09	0.456152E-10
10.000000 MEV	0.441496E-09	0.197423E-09

子宮

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.000001 MEV	0.394115E-11	0.227821E-11
0.001000 MEV	0.415438E-11	0.355167E-11
0.010000 MEV	0.309327E-11	0.299978E-11
0.020000 MEV	0.432135E-11	0.272857E-11
0.050000 MEV	0.462492E-11	0.331917E-11
0.200000 MEV	0.800481E-11	0.358104E-11
0.500000 MEV	0.234659E-10	0.733934E-11
1.000000 MEV	0.446041E-10	0.190318E-10
1.500000 MEV	0.877591E-10	0.491159E-10
2.000000 MEV	0.110105E-09	0.937159E-10
10.000000 MEV	0.331949E-09	0.264782E-09

甲状腺

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.000001 MEV	0.314958E-11	0.932904E-12
0.001000 MEV	0.370918E-11	0.579894E-12
0.010000 MEV	0.301982E-11	0.972522E-12
0.020000 MEV	0.379772E-11	0.363519E-12
0.050000 MEV	0.457203E-11	0.132965E-11
0.200000 MEV	0.886462E-11	0.159583E-11
0.500000 MEV	0.313311E-10	0.166050E-11
1.000000 MEV	0.509702E-10	0.472231E-11
1.500000 MEV	0.105791E-09	0.139975E-10
2.000000 MEV	0.145133E-09	0.300231E-10
10.000000 MEV	0.234318E-09	0.110059E-09

乳房

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.000001 MEV	0.755352E-11	0.111338E-11
0.001000 MEV	0.555548E-11	0.131165E-11
0.010000 MEV	0.719139E-11	0.141146E-11
0.020000 MEV	0.954739E-11	0.130385E-11
0.050000 MEV	0.198614E-10	0.124445E-11
0.200000 MEV	0.794894E-10	0.226502E-11
0.500000 MEV	0.181510E-09	0.587107E-11
1.000000 MEV	0.308491E-09	0.181578E-10
1.500000 MEV	0.357489E-09	0.598150E-10
2.000000 MEV	0.378683E-09	0.846368E-10
10.000000 MEV	0.554722E-09	0.333019E-09

残存組織

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.000001 MEV	0.785839E-11	0.626185E-11
0.001000 MEV	0.729698E-11	0.618850E-11
0.010000 MEV	0.719700E-11	0.594156E-11
0.020000 MEV	0.802719E-11	0.712291E-11
0.050000 MEV	0.131902E-10	0.118373E-10
0.200000 MEV	0.443377E-10	0.360823E-10
0.500000 MEV	0.100192E-09	0.847970E-10
1.000000 MEV	0.171162E-09	0.150631E-09
1.500000 MEV	0.238194E-09	0.200389E-09
2.000000 MEV	0.281080E-09	0.220575E-09
10.000000 MEV	0.453115E-09	0.417925E-09

赤色骨髄

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.000001 MEV	0.244404E-11	0.651192E-11
0.001000 MEV	0.265544E-11	0.635031E-11
0.010000 MEV	0.276885E-11	0.659256E-11
0.020000 MEV	0.284518E-11	0.708209E-11
0.050000 MEV	0.372809E-11	0.917788E-11
0.200000 MEV	0.824244E-11	0.281759E-10
0.500000 MEV	0.189751E-10	0.739734E-10
1.000000 MEV	0.380992E-10	0.131421E-09
1.500000 MEV	0.756584E-10	0.205747E-09
2.000000 MEV	0.100197E-09	0.240783E-09
10.000000 MEV	0.309071E-09	0.438585E-09

骨組織

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.000001 MEV	0.331050E-11	0.436710E-11
0.001000 MEV	0.332543E-11	0.429853E-11
0.010000 MEV	0.348521E-11	0.445802E-11
0.020000 MEV	0.381361E-11	0.502196E-11
0.050000 MEV	0.524873E-11	0.683142E-11
0.200000 MEV	0.163855E-10	0.217103E-10
0.500000 MEV	0.440999E-10	0.585603E-10
1.000000 MEV	0.822172E-10	0.106742E-09
1.500000 MEV	0.136575E-09	0.171043E-09
2.000000 MEV	0.166967E-09	0.203507E-09
10.000000 MEV	0.352329E-09	0.386509E-09

実効線量当量

入射エネルギー	前方照射	後方照射
0.000001 MEV	0.590901E-11	0.476892E-11
0.001000 MEV	0.591251E-11	0.436798E-11
0.010000 MEV	0.622607E-11	0.462968E-11
0.020000 MEV	0.760114E-11	0.524176E-11
0.050000 MEV	0.148459E-10	0.712988E-11
0.200000 MEV	0.511551E-10	0.192740E-10
0.500000 MEV	0.111978E-09	0.471984E-10
1.000000 MEV	0.194275E-09	0.888291E-10
1.500000 MEV	0.230696E-09	0.144307E-09
2.000000 MEV	0.258871E-09	0.163967E-09
10.000000 MEV	0.424365E-09	0.383978E-09

Table 7.1 The model in the calculation and the expected computational costs.

計算モデル	人体模型：曲面数 200、領域数 110 JRR-3 施設：曲面数 2万～10万、領域数2000～3000
時間ステップ	10ステップ／秒×10～ 100秒 = 100～1000ステップ
線源	任意に設定されたエネルギー・スペクトルを持った、ある領域（たとえば一次冷却系配管）から一様に放射される光子または中性子に関する被曝計算
サンプリング数	1000万ヒストリー～2000万ヒストリー
計算時間	・光子被曝計算：2500000 分=約4万時間 ・中性子被曝計算：15000000分=25万時間

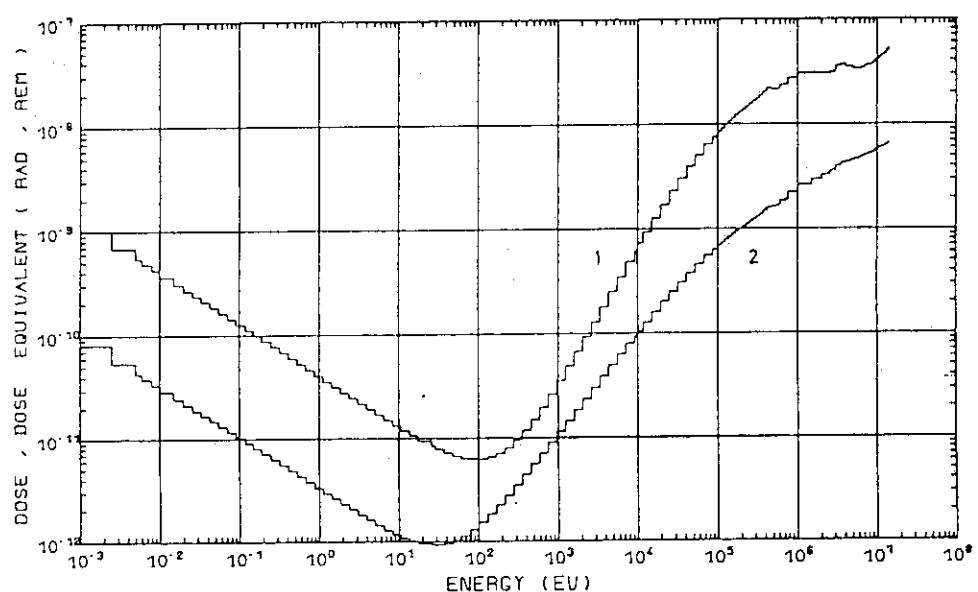


Fig. 3.1 Quality factor-weighted kerma (1) and kerma (2) as functions of neutron energy for soft tissue.

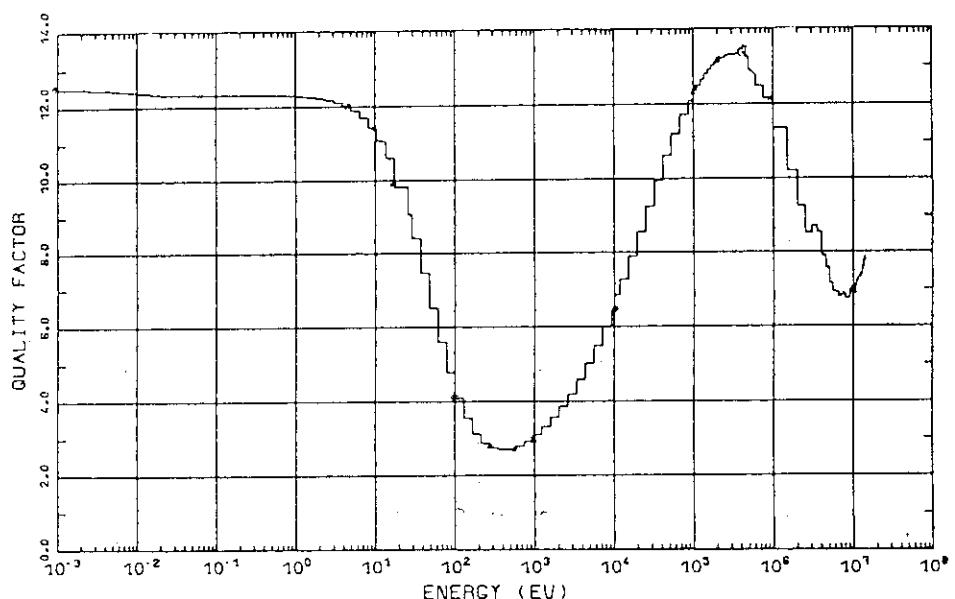


Fig. 3.2 Quality factor for soft tissue as a function of neutron energy considering all charged secondaries, i.e. exclusive photons.

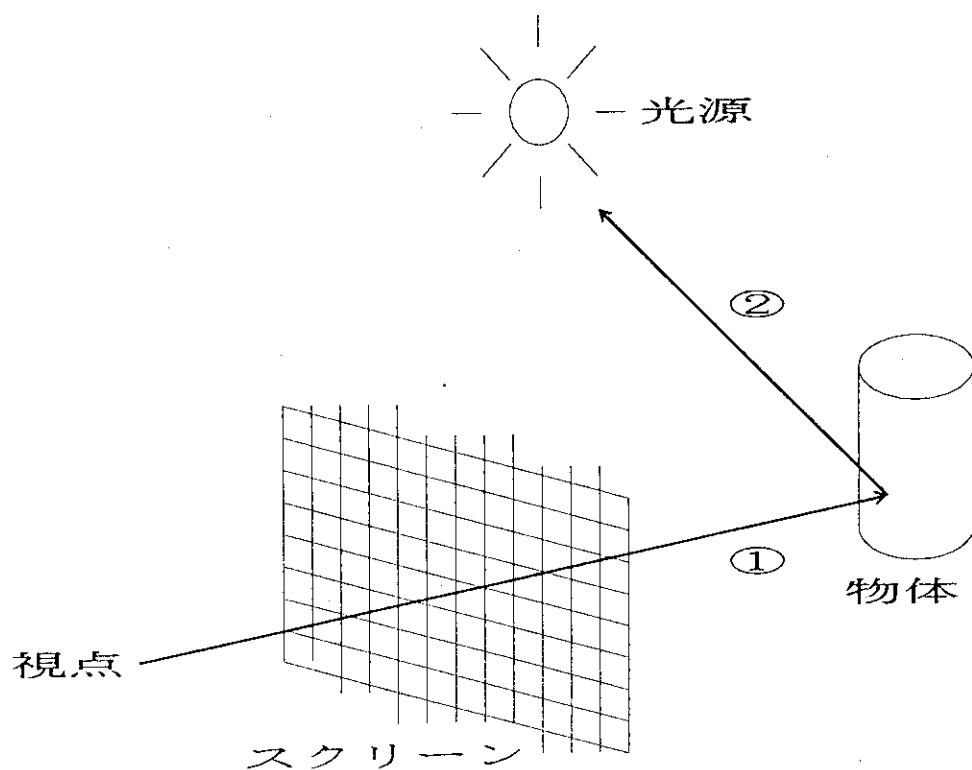


Fig. 4.1 Illustration of ray tracing algorithm.

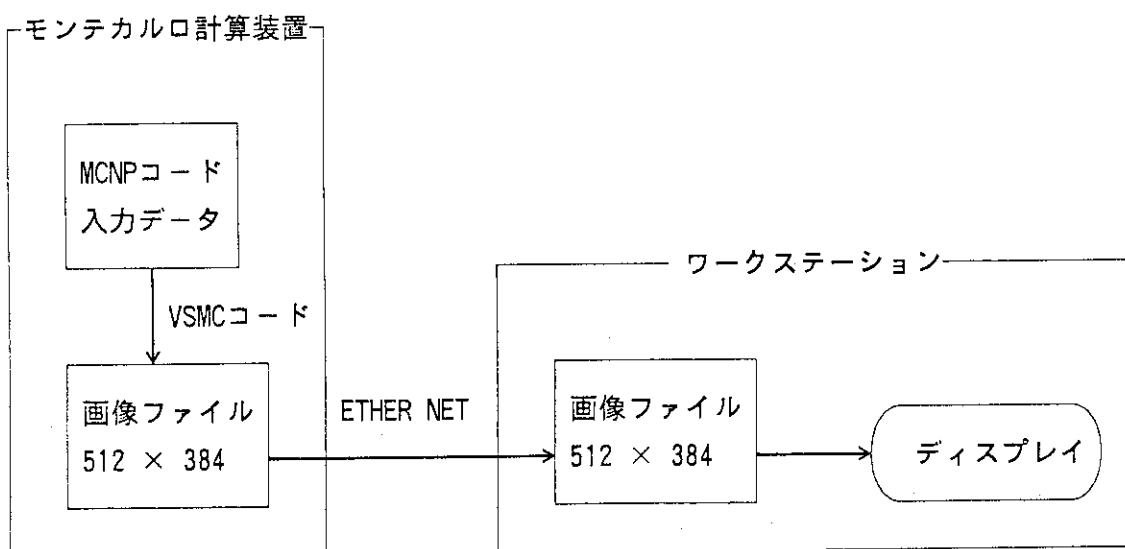


Fig. 4.3 Data flow and hardware system used in the visualization.

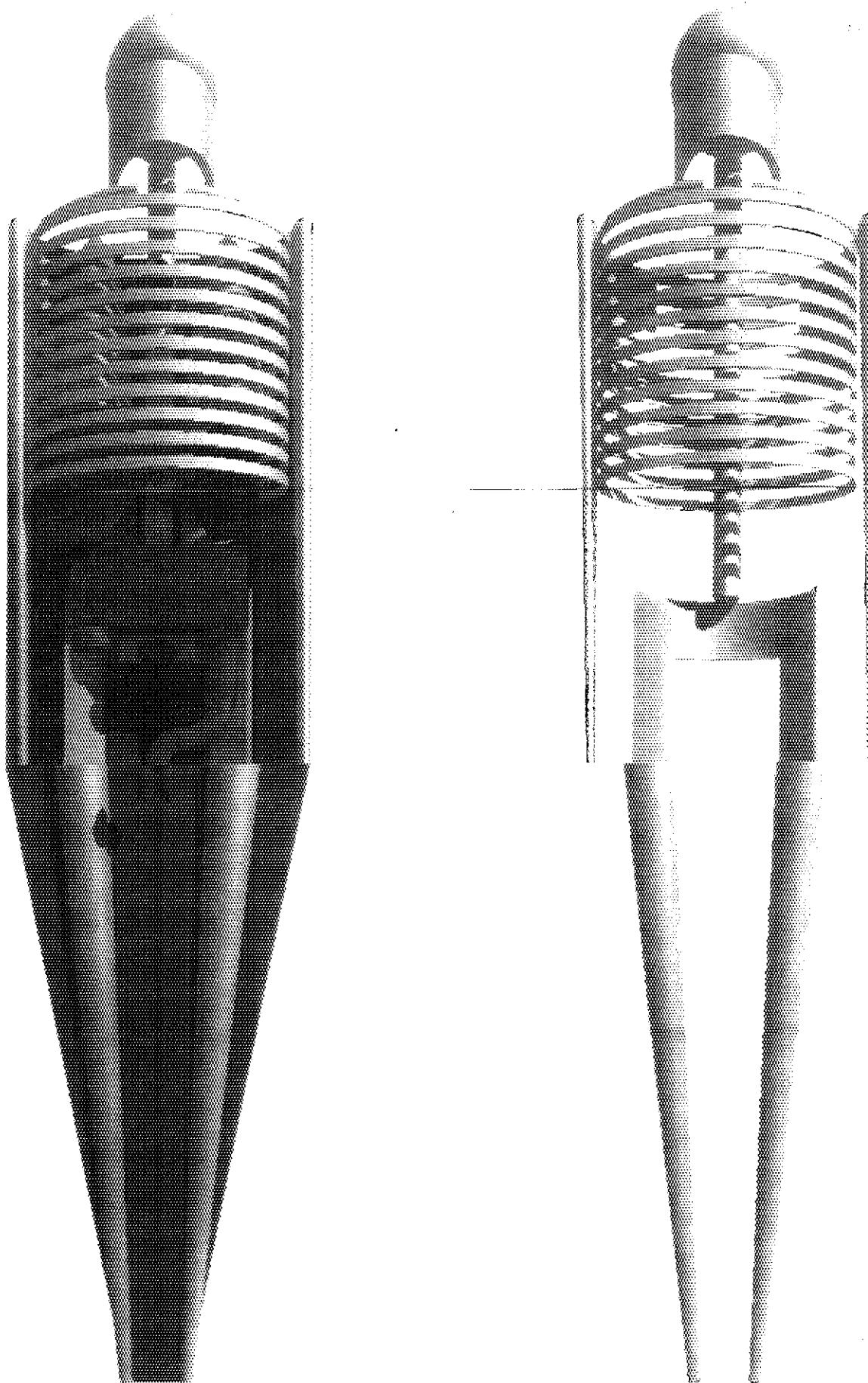


Fig. 4.2 3-D image rendered by VSMC.

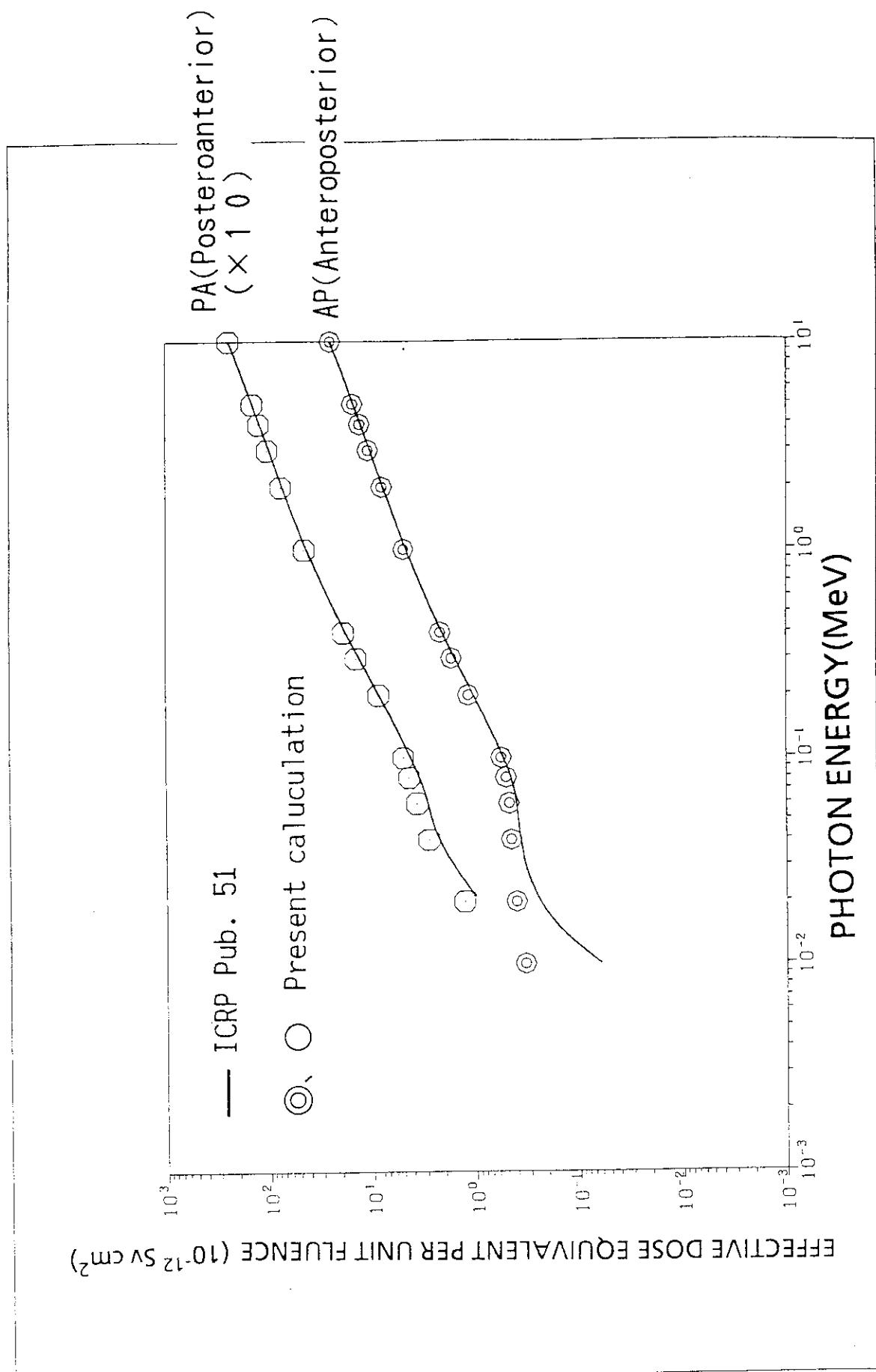


Fig. 5.1 Comparison of calculation results with ICRP data (photon exposure).

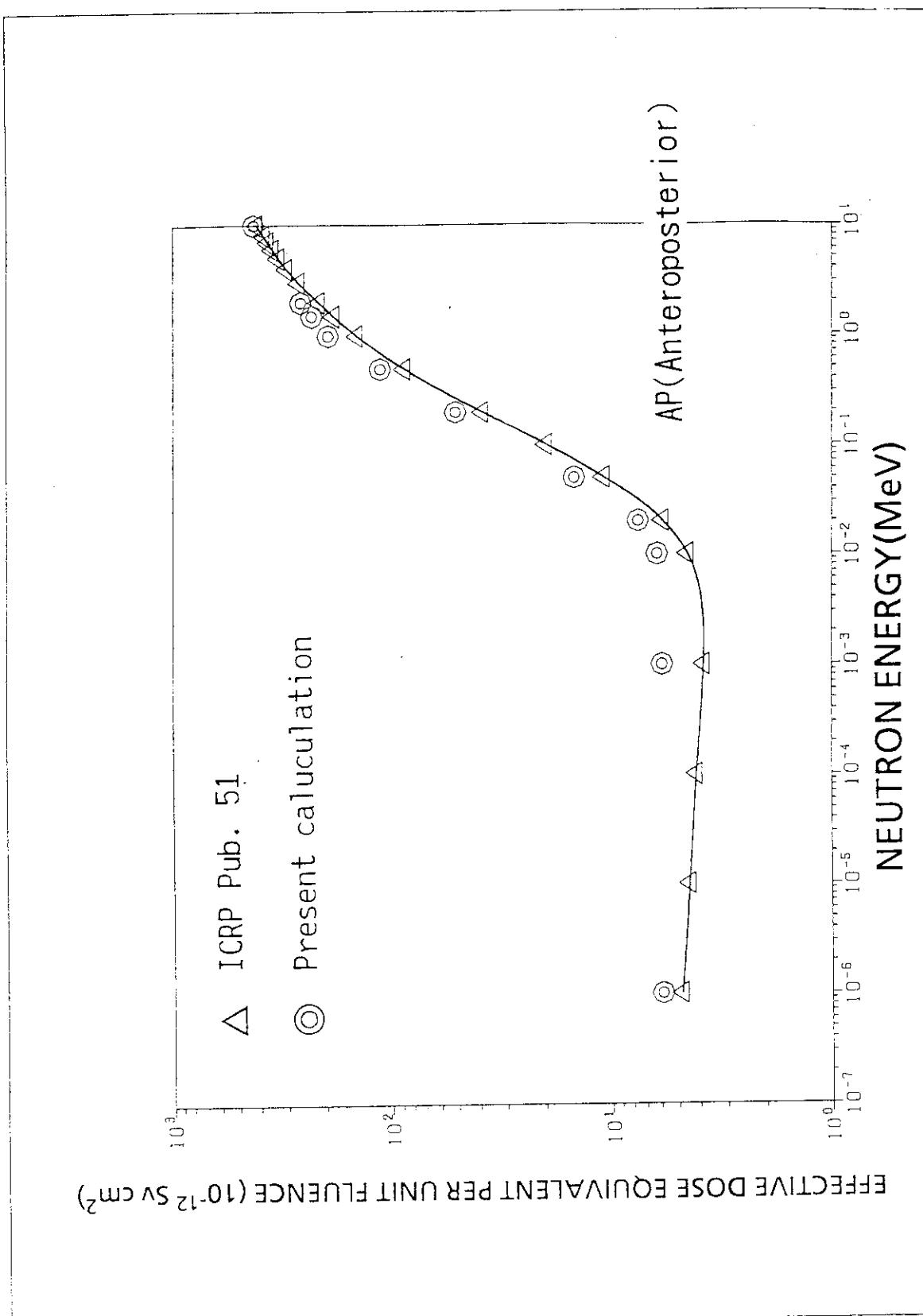


Fig. 5.2 Comparison of calculation results with ICRP data (anteroposterior geometry by neutron exposure).

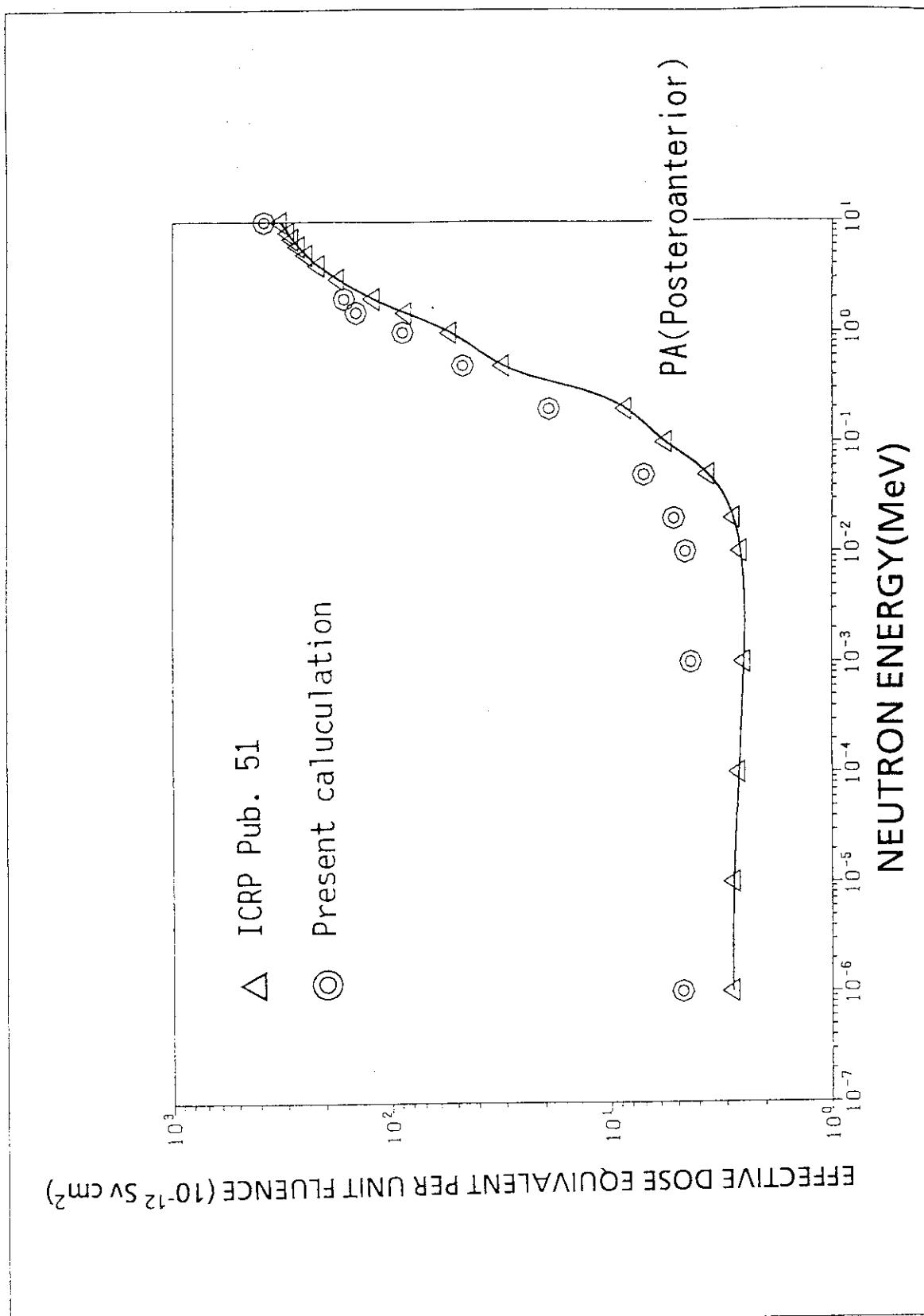


Fig. 5.3 Comparison of calculation results with ICRP data (posteroanterior geometry by neutron exposure).

付録 A 人体模型を表現する形状データの説明

人体模型を記述するMCNPコード用形状データの作成は、Cristy Phantomが説明されている以下の文献（以下、文献1）に基づいて行った。

Snyder, W.S. et al., : A Tabulation of Dose Equivalent Per Microcurie-Day for Source and Target Organs for an Adult for Various Radionuclides, ORNL-5000, 1974

変換の内容を以下に示す。

MCNPコードにおいて、計算体系を構成する3次元領域は、「セル」と呼ばれ、次の形式で表現される。

N M D S₁ S₂ S₃...

ここで、Nは領域番号、Mは物質番号、Dは物質密度、S₁、S₂…は、負号付きの面番号を表す。他のモンテカルロ・コードと違い、MCNPコードでは三次元領域を曲面の組み合わせで表現する。人体モデルの数学的表現と作成した形状データを以下に示す。

(1) 胴 体

文献3)において、胴体は以下のように記述されている。

$$\left(\frac{x}{A_T}\right)^2 + \left(\frac{y}{B_T}\right)^2 \leq 1 \text{ and } 0 \leq z \leq C_T$$

ここで、AT=20., BT=10., CT=70.である。

MCNPコードでは、橢円柱は、special quadratic (SQ) として表現される。1枚のSQと2枚の平面を使って、胴体を以下のように表現した。

1	4	-1.04	-1	2	-3		
1	SQ	0.0025	0.0100	0.0	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	0.0	0.0	0.0		
2	PZ	0.0					
3	PZ	70.0000					

(2) 頭 部

文献3)において、頭部は以下のように記述されている。

$$\left(\frac{x}{A_H}\right)^2 + \left(\frac{y}{B_H}\right)^2 \leq 1 \text{ and } C_T \leq z \leq C_T + C_{H1}$$

or

$$\left(\frac{x}{A_H}\right)^2 + \left(\frac{y}{B_H}\right)^2 + \left(\frac{z - (C_T + C_{H1})}{C_{H2}}\right)^2 \leq 1 \text{ and } z > C_T + C_{H1}$$

ここで、AH=8., BH=10., CH1=16.85, CH2=7.15である。

これらの橢円柱と橢円体をSQとし、さらに2枚の平面を使って、頭部を以下のように表現した。

4	4	-1.04	-5	6			
5	4	-1.04	-4	3	-6		
3	PZ	70.0000					
4	SQ	0.0156	0.0100	0.0	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	0.0	0.0	0.0		
5	SQ	0.0156	0.0100	0.0196	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	0.0	0.0	86.8500		
6	PZ	86.8500					

(3) 脚

文献3)において、脚は以下のように記述されている。

$$x^2 + y^2 \leq +x\left(A_L + \frac{A_T}{C_L}Z\right) \text{ and } -C_L \leq z \leq 0$$

ここで, CL=100., CLX=80. である。

円錐台を general quadratic (GQ) として変換し, さらに 2 枚の平面を使って脚を以下のように表現した。

30	4	-1.04	-7	-2	9		
31	4	-1.04	-8	-2	9		
2	PZ	0.0					
7	GQ	1.0000	1.0000	0.0	0.0	0.0	-0.2000
		-20.0000	0.0	0.0	0.0		
8	GQ	1.0000	1.0000	0.0	0.0	0.0	0.2000
		20.0000	0.0	0.0	0.0		
9	PZ	-80.0000					

(4) 腕 骨

文献 3)において, 腕骨は以下のように記述されている。

$$\left(\frac{(a/(2z_2))(z-z_2)+(x-x_0)}{a} \right)^2 + \left(\frac{y}{b} \right)^2 \leq \left(\frac{2z_2+(z-z_2)}{2z_2} \right)^2$$

and

$$0 \leq z \leq z_2$$

ここで, a=1.4, b=2.7, z₁=69., z₂=18.4 である。

2 枚の GQ と 2 枚の平面を使って, 腕骨を以下のように表現した。

32	5	-1.4	-10	2	-12		
33	5	-1.4	-11	2	-12		
2	PZ	0.0					
10	GQ	0.5102	0.1372	0.0	0.0	0.0	0.0104
		-19.4898	0.0	-0.2050	185.8775		
11	GQ	0.5102	0.1372	0.0	0.0	0.0	0.0104
		18.0612	0.0	0.1760	159.5918		
12	PZ	69.0000					

(5) 骨 盤

文献 3)において, 骨盤は以下のように記述されている。

$$\left(\frac{x}{a_2} \right)^2 + \left(\frac{y-y_{02}}{b_2} \right)^2 \leq 1, \quad \left(\frac{x}{a_1} \right)^2 + \left(\frac{y-y_{01}}{b_1} \right)^2 \geq 1,$$

$$y \geq y_{02}, \quad 0 \leq z \leq z_2 \text{ and } y \leq y_1 \text{ if } z \leq z_1$$

ここで, a₁=11.3, a₂=12., b₁=11.3, b₂=12., y₀₁=-3.8, y₀₂=-3., z₁=14., z₂=22., y₁=5.0 である。

二つの橢円柱をそれぞれ SQ とし, さらに 5 枚の平面を使って, 骨盤を以下のように表現した。

34	5 -1.4	-14	17	2	16	-18	-19
35	5 -1.4	-14	17	-15	16	18	
2	PZ 0.0						
14	SQ 0.0069	0.0069	0.0		0.0	0.0	0.0
	-1.0000	0.0	-3.0000		0.0		
15	PZ 22.0000						
16	PY -3.0000						
17	SQ 0.0078	0.0078	0.0		0.0	0.0	0.0
	-1.0000	0.0	-3.8000		0.0		
18	PZ 14.0000						
19	PY 5.0000						

(6) 脊柱

文献3)において、脊柱は以下のように記述されている。

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b}\right)^2 \leq 1 \text{ and } z_1 \leq z \leq z_4$$

ここで、 $a = 2.$, $b = 2.5$, $z_1 = 22.$, $z_2 = 35.1$, $z_3 = 70.$, $z_4 = 80.54$, $y_0 = 5.5$ である。

1枚のSQと2枚の平面を使って脊柱を以下のように表現した。

36	5 -1.4	-20	15	-21			
15	PZ 22.0000						
20	SQ 0.2500	0.1600	0.0		0.0	0.0	0.0
	-1.0000	0.0	5.5000		0.0		
21	PZ 80.5400						

(7) 頭蓋骨

文献3)において、頭蓋骨は以下のように記述されている。

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{z-(C_T+C_H)}{c}\right)^2 \leq 1$$

and

$$\left(\frac{x}{a+d}\right)^2 + \left(\frac{y}{b+d}\right)^2 + \left(\frac{z-(C_T+C_H)}{c+d}\right)^2 \leq 1$$

ここで、 $a = 6.6$, $b = 8.6$, $c = 5.75$, $d = 0.9$ である。

二つの楕円体をそれぞれSQとした2枚の曲面を使って頭蓋骨を以下のように表現した。

37	5 -1.4	22	-23				
22	SQ 0.0230	0.0135	0.0302	0.0	0.0	0.0	0.0
	-1.0000	0.0	0.0	86.8500			
23	SQ 0.0178	0.0111	0.0226	0.0	0.0	0.0	0.0
	-1.0000	0.0	0.0	86.8500			

(8) 顔 骨

文献3)において、顔骨は以下のように記述されている。

$$\left(\frac{x}{a_1}\right)^2 + \left(\frac{y}{b_1}\right)^2 \leq 1, \quad \left(\frac{x}{a_1-d}\right)^2 + \left(\frac{y}{b_1-d}\right)^2 \geq 1,$$

$$y \leq 0, \quad C_T + z_1 \leq z \leq C_T + z_5$$

and

$$\left(\frac{x}{a_2}\right)^2 + \left(\frac{y}{b_2}\right)^2 + \left(\frac{z - (C_T + C_H)}{c_2}\right)^2 > 1$$

ここで、 $a_1 = 7.$, $b_1 = 9.$, $c_1 = 4.$, $d = 1.4$ である。

二つの橢円体をそれぞれSQとし、さらに3枚の平面を使って、顔の骨を以下のように表現した。

38	5	-1.4		-24	25	26	-27	-13	5
5	SQ	0.0156 -1.0000		0.0100 0.0	0.0196 0.0	0.0 86.8500		0.0 0.0	0.0
13	PY	0.0							
24	SQ	0.0204 -1.0000		0.0123 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0		0.0 0.0	0.0
25	SQ	0.0319 -1.0000		0.0173 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0		0.0 0.0	0.0
26	PZ	74.0000							
27	PZ	84.7300							

(9) 肋

文献3)において、肋は以下のように記述されている。

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 \leq 1, \quad \left(\frac{x}{a-d}\right)^2 + \left(\frac{y}{b-d}\right)^2 \geq 1,$$

$$z_1 \leq z \leq z_2$$

and Integer $((z - z_1)/c)$ is even.

ここで、 $a = 17.$, $b = 9.8$, $c = 1.4$, $d = 0.5$, $z_1 = 35.1$, $z_2 = 67.3$ である。

2枚のSQ(橢円柱)と24枚の平面を使って12本の肋を以下のように表現した。

39	5	-1.4		-28	29	30	-201
40	5	-1.4		-28	29	202	-203
41	5	-1.4		-28	29	204	-205
42	5	-1.4		-28	29	88	-207
43	5	-1.4		-28	29	208	-209
44	5	-1.4		-28	29	210	-211
45	5	-1.4		-28	29	212	-213
46	5	-1.4		-28	29	214	-215
47	5	-1.4		-28	29	216	-217
48	5	-1.4		-28	29	218	-219
49	5	-1.4		-28	29	220	-221
50	5	-1.4		-28	29	222	-31

28	SQ	0.0035	0.0104	0.0	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	0.0	0.0	0.0		
29	SQ	0.0037	0.0116	0.0	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	0.0	0.0	0.0		
30	PZ	35.1000					
31	PZ	67.3000					
88	PZ	43.5000					
201	PZ	36.5					
202	PZ	37.9					
203	PZ	39.3					
204	PZ	40.7					
205	PZ	42.1					
207	PZ	44.9					
208	PZ	46.3					
209	PZ	47.7					
210	PZ	49.1					
211	PZ	50.5					
212	PZ	51.9					
213	PZ	53.3					
214	PZ	54.7					
215	PZ	56.1					
216	PZ	57.5					
217	PZ	58.9					
218	PZ	60.3					
219	PZ	61.7					
220	PZ	63.1					
221	PZ	64.5					
222	PZ	65.9					

(10) 鎖骨

文献3)において、鎖骨は以下のように記述されている。

$$(z - z_1)^2 + (R - \sqrt{x^2 + (y - y_0)^2})^2 \leq r^2,$$

$$\cot\theta_2 \leq \frac{y_0 - y}{|x|} \leq \cot\theta_1 \text{ and } y < 0$$

ここで、 $y_0 = 11.1$, $z_1 = 68.25$, $R = 20.$, $r = 0.7883$, $\cot\theta_1 = 7.0342$, $\cot\theta_2 = 0.89415$ である。

中心軸がZ軸に平行な円環体(TZ)と6枚の平面を使って鎖骨を以下のように表現した。

51	5	-1.4		-32	-13	33	34	-35
52	5	-1.4		-32	-13	-33	36	-37
13	PY	0.0						
32	TZ	0.0	11.1000	68.2500	20.0000	0.7883	0.7883	
33	PX	0.0						
34	P	7.0342	1.0000	0.0	11.1000			
35	P	0.8941	1.0000	0.0	11.1000			
36	P	-7.0342	1.0000	0.0	11.1000			
37	P	-0.8941	1.0000	0.0	11.1000			

(11) 肩甲骨

文献3)において、肩甲骨は以下のように記述されている。

$$\left(\frac{x}{a_2}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 \leq 1, \quad \left(\frac{x}{a_1}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 > 1,$$

$$z_1 \leq z \leq z_2, y > 0 \text{ and } m_1 < \frac{y}{|x|} < m_2$$

ここで, $a_2 = 19.$, $z_1 = 50.9$, $z_2 = 67.3$, $m_1 = 0.25$, $m_2 = 0.8$ である。

二つの楕円柱をそれぞれ特殊二次曲面 (SQ) とし, さらに 7 枚の平面を使って, 肩甲骨を以下のように表現した。

53	5	-1.4	-38	28	40	-31	13	-33	41	-42
54	5	-1.4	-38	28	40	-31	13	33	43	-44
13	PY	0.0								
28	SQ	0.0035	0.0104	0.0		0.0		0.0		0.0
		-1.0000	0.0	0.0		0.0				
31	PZ	67.3000								
38	SQ	0.0028	0.0104	0.0		0.0		0.0		0.0
		-1.0000	0.0	0.0		0.0				
39	SQ	0.0204	0.0104	0.0		0.0		0.0		0.0
		-1.0000	0.0	0.0		0.0				
40	PZ	50.9000								
41	P	0.2500	1.0000	0.0		0.0				
42	P	0.8000	1.0000	0.0		0.0				
43	P	-0.2500	1.0000	0.0		0.0				
44	P	-0.8000	1.0000	0.0		0.0				

(12) 胃

文献 3)において, 胃と胃壁は以下のように記述されている。

wall ;

$$\left(\frac{x-x_0}{a} \right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b} \right)^2 + \left(\frac{z-z_0}{c} \right)^2 \leq 1$$

and

$$\left(\frac{x-x_0}{a-d} \right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b-d} \right)^2 + \left(\frac{z-z_0}{c-d} \right)^2 \geq 1$$

contents ;

$$\left(\frac{x-x_0}{a-d} \right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b-d} \right)^2 + \left(\frac{z-z_0}{c-d} \right)^2 < 1$$

ここで, $a = 4.$, $b = 3.$, $c = 8.$, $d = 0.613$, $x_0 = 8.$, $y_0 = -4.$, $z_0 = 35.$ である。

二つの楕円体をそれぞれ特殊二次面 (SQ) とし, これらの領域を以下のように表現した。

55	4	-1.04	-45	46						
56	4	-1.04	-46							
45	SQ	0.0625	0.1111	0.0156	0.0		0.0		0.0	
		-1.0000	8.0000	-4.0000	35.0000					
46	SQ	0.0872	0.1755	0.0183	0.0		0.0		0.0	
		-1.0000	8.0000	-4.0000	35.0000					

(13) 小腸

文献3)において、小腸は以下のように記述されている。

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b}\right)^2 < 1,$$

$$y_1 \leq y \leq y_2 \text{ and } z_1 \leq z \leq z_2$$

ここで、 $a = 11.3$, $b = 11.3$, $y_0 = -3.8$, $y_1 = -4.86$, $y_2 = 2.2$, $z_1 = 17.$, $z_2 = 27.$ である。

1枚のSQと4枚の平面を使って小腸を以下のように表現した。

57	4	-1.04	-17	47	-48	49	-50	
17	SQ	0.0078 -1.0000	0.0078 0.0	0.0 -3.8000	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	
47	PY	-4.8600						
48	PY	2.2000						
49	PZ	17.0000						
50	PZ	27.0000						

(14) 大腸(上部)

文献3)において、大腸上部は、上昇部分(ascending colon)と横断部分(transverse colon)に分かれ、それぞれの腸壁と腸内部が以下のように記述されている。

(ascending colon)

wall;

$$\left(\frac{x-x_0}{a}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b}\right)^2 \leq 1,$$

$$\left(\frac{x-x_0}{a-d}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b-d}\right)^2 \geq 1, \text{ and } z_1 \leq z \leq z_2$$

contents;

$$\left(\frac{x-x_0}{a-d}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b-d}\right)^2 < 1, \text{ and } z_1 \leq z \leq z_2$$

(transverse colon)

wall;

$$\left(\frac{y-y_{0tc}}{b_{tc}}\right)^2 + \left(\frac{z-z_{0tc}}{c_{tc}}\right)^2 \leq 1,$$

$$\left(\frac{y-y_{0tc}}{b_{tc}-d_{tc}}\right)^2 + \left(\frac{z-z_{0tc}}{c_{tc}-d_{tc}}\right)^2 \geq 1, \text{ and } -x_{1tc} \leq x \leq x_{1tc}$$

contents;

$$\left(\frac{y-y_{0tc}}{b_{tc}-d_{tc}}\right)^2 + \left(\frac{z-z_{0tc}}{c_{tc}-d_{tc}}\right)^2 < 1, \text{ and } -x_{1tc} \leq x \leq x_{1tc}$$

ここで、 $a = 2.5$, $b = 2.5$, $d = 0.7085$, $x_0 = -8.5$, $y_0 = -2.36$, $z_1 = 14.45$, $z_2 = 24.$, $b_{tc} = 2.5$, $c_{tc} = 1.5$, $d_{tc} = 0.527$, $y_{0tc} = -2.36$, $z_{0tc} = 25.5$, $x_{1tc} = 10.5$ である。

4枚のSQと4枚の平面を使って大腸上部を以下のように表現した。

58	4 -1.04	-51	52	53	-54	
59	4 -1.04	-52	53	-54		
60	4 -1.04	-55	56	57	-58	
61	4 -1.04	-56	57	-58		
51	SQ 0.1600	0.1600	0.0	0.0	0.0	0.0
	-1.0000	-8.5000	-2.3600	0.0		
52	SQ 0.3116	0.3116	0.0	0.0	0.0	0.0
	-1.0000	-8.5000	-2.3600	0.0		
53	PZ 14.4500					
54	PZ 24.0000					
55	SQ 0.0	0.1600	0.4444	0.0	0.0	0.0
	-1.0000	0.0	-2.3600	25.5000		
56	SQ 0.0	0.2569	1.0563	0.0	0.0	0.0
	-1.0000	0.0	-2.3600	25.5000		
57	PX -10.5000					
58	PX 10.5000					

(15) 大腸(下部)

文献3)において、大腸下部は、下降部分 (desending colon) と S字形部分 (sigmoid colon) に分かれ、それぞれの腸壁と腸内部が以下のように記述されている。
(descending colon)

wall :

$$\left(\frac{x-x_0}{a}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b}\right)^2 \leq 1,$$

$$\left(\frac{x-x_0}{a-d}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b-d}\right)^2 \geq 1, \text{ and } z_1 \leq z \leq z_2$$

where,

$$x_0 = x_1 + \frac{m_x(z-z_2)}{z_2-z_1} \text{ and } y_0 = \frac{m_y(z_1-z)}{z_2-z_1}$$

content ;

$$\left(\frac{x-x_0}{a-d}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b-d}\right)^2 < 1, \text{ and } z_1 \leq z \leq z_2$$

(sigmoid colon)

wall :

-upper portion-

$$\left(\frac{\sqrt{(x-x_0)^2+(z-z_0)^2}-R_1}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 \leq 1,$$

$$\left(\frac{\sqrt{(x-x_0)^2+(z-z_0)^2}-R_1}{a-d}\right)^2 + \left(\frac{y}{b-d}\right)^2 \geq 1,$$

 $x \geq x_0$ and $z \leq z_0$

-lower portion-

$$\left(\frac{\sqrt{(x-x_0)^2+z^2}-R_2}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 \leq 1,$$

$$\left(\frac{\sqrt{(x-x_0)^2+z^2}-R_2}{a-d} \right)^2 + \left(\frac{y}{b-d} \right)^2 \geq 1,$$

$x \leq x_0$ and $z \geq 0$

content:

-upper portion-

$$\left(\frac{\sqrt{(x-x_0)^2+(z-z_0)^2}-R_1}{a-d} \right)^2 + \left(\frac{y}{b-d} \right)^2 < 1,$$

$x \geq x_0$ and $z \leq z_0$

-lower portion-

$$\left(\frac{\sqrt{(x-x_1)^2+z^2}-R_2}{a-d} \right)^2 + \left(\frac{y}{b-d} \right)^2 < 1,$$

$x \leq x_0$ and $z \geq z_0$

ここで、 $a = 1.88$, $b = 2.13$, $d = 0.54$, $z_1 = 8.72$, $z_2 = 24.$, $x_1 = 9.25$, $m_x = 0.78$, $m_y = 2.5$,

$a_{sc} = 1.57$, $b_{sc} = 1.57$, $d_{sc} = 0.66$, $x_{0sc} = 3.0$, $z_{0sc} = 8.72$, $R_1 = 5.72$, $R_2 = 3$. である。

中心軸が Y 軸に平行な円環体 (TY) 4 枚, 一般二次曲面 (GQ) 2 枚及び 4 枚の平面を使って大腸下部を以下のように表現した。

62	4	-1.04	-59	60	61	-54
63	4	-1.04		-60	61	-54
64	4	-1.04	-62	63	66	-61
65	4	-1.04		-63	66	-61
66	4	-1.04	-64	65	-66	2
67	4	-1.04		-65	-66	2
2	PZ	0.0				
54	PZ	24.0000				
59	GQ	0.2829	0.2204	0.0066	0.0	0.0721
		-4.5410	-0.6289	0.1289	17.6691	-0.0289
60	GQ	0.5569	0.3956	0.0113	0.0	0.1294
		-8.9384	-1.1287	0.2716	35.6698	-0.0569
61	PZ	8.7200				
62	TY	3.0000	0.0	8.7200	5.7200	1.5700
63	TY	3.0000	0.0	8.7200	5.7200	0.9100
64	TY	3.0000	0.0	0.0	3.0000	1.5700
65	TY	3.0000	0.0	0.0	3.0000	0.9100
66	PX	3.0000				

(16) 副腎

文献3)において、副腎は以下のように記述されている。

$$\left(\frac{x_1}{a} \right)^2 + \left(\frac{y_1}{b} \right)^2 + \left(\frac{z_1}{c} \right)^2 \leq 1 \text{ and } z_1 \geq 0$$

where,

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix}$$

for left, sign of x_0 , θ is positive, otherwise negative.

ここで, $a = 1.5$, $b = 0.5$, $c = 5$, $\theta = 0.9086$, $x_0 = 3.5$, $y_0 = 5$, $z_0 = 38$. である。

一般二次曲面 (GQ) と平面を使って, 副腎を以下のように表現した。

68	4	-1.04	-67	180			
67	GQ	2.6524	1.7920	0.0400	3.4499	0.0	0.0
		-35.8163	-29.9950	-3.0400	194.4260		
180	PZ	38.0000					

(17) 腎

文献3)において, 腎は橢円体として以下のように記述されている。

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{z - (C_T + C_H)}{c}\right)^2 \leq 1$$

ここで, $a = 6.6$, $b = 8.6$, $c = 5.75$ である。

橢円体を特殊二次曲面 (SQ) とし, 腎を以下のように表現した。

69	4	-1.04	-68				
68	SQ	0.0229	0.0135	0.0302	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	0.0	0.0	86.8500		

(18) 腎臓

文献3)において, 左右の腎臓は以下のように記述されている。

$$\left(\frac{x \pm x_0}{a}\right)^2 + \left(\frac{y - y_0}{b}\right)^2 + \left(\frac{z - z_0}{c}\right)^2 \leq 1$$

and

$$|x| \geq x_i$$

for the right kidney positive sign, otherwise minus.

ここで, $a = 4.5$, $b = 1.5$, $c = 5.5$, $x_0 = 6$, $y_0 = 6$, $z_0 = 32.5$, $x_1 = 3$. である。

左右の腎臓を表現する橢円体を特殊二次曲面 (SQ) とし, さらに2枚の平面を用いて, 腎臓を以下のように表現した。

70	4	-1.04	-76	66			
71	4	-1.04	-77	-78			
66	PX	3.0000					
76	SQ	0.0494	0.4444	0.0331	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	6.0000	6.0000	32.5000		
77	SQ	0.0494	0.4444	0.0331	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	-6.0000	6.0000	32.5000		
78	PX	-3.0000					

(19) 肝臓

文献3)において、肝臓は以下のように記述されている。

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 \leq 1, \quad \frac{x-k}{x_m} + \frac{y}{y_m} - \frac{z}{z_m} \leq -1$$

and

$$z_1 \leq z \leq z_2$$

ここで、 $a = 16.5$, $b = 8.$, $x_m = 35.$, $y_m = 45.$, $z_m = 43.$, $z_1 = 27.$, $z_2 = 43.$, $k = 0$ である。

楕円体を特殊二次曲面(SQ)とし、さらに3枚の平面を用いて、肝臓を以下のように表現した。

72	4	-1.04	-79	-80	50	-81		
50	PZ	27.0000						
79	SQ	0.0037	0.0156	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	0.0	0.0	0.0			
80	P	0.0286	0.0222	-0.0233	-1.0000			
81	PZ	43.0000						

(20) 肺

文献3)において、肺は以下のように記述されている。

(right lung)

$$\left(\frac{x+x_0}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{z-z_0}{c}\right)^2 \leq 1$$

and

$$z \geq z_0, \text{ if } z_{1R} \leq z \leq z_{2R} \text{ and } y < y_{2R} \text{ then } x \leq x_{1R}$$

(left lung)

Geometry of left lung can be expressed by following change for the inequation of right lung:

$$(x+x_0) \longrightarrow (x-x_0)$$

$$z_{1R}, z_{2R}, y_{2R} \longrightarrow z_{1L}, z_{2L}, y_{2L}$$

$$(x \leq x_{1R}) \longrightarrow (x \geq x_{1L})$$

ここで、 $a = 5.$, $b = 7.5$, $c = 24.$, $x_0 = 8.5$, $z_0 = 43.5$, $z_{1R} = 46.$, $z_{2R} = 54.$, $y_{1R} = 1.5$, $x_{1R} = -5.4$, $y_{1L} = 1.$, $z_{1L} = 55.$, $x_{1L} = 8.$ である。

左右の肺は対象形ではない。特殊二次曲面(SQ)と8枚の平面を用いて、六つの領域として肺を以下のように表現した。

73	6	-0.296	-82	-84	-86	89	-90
74	6	-0.296	-82	88	-89		
75	6	-0.296	-82	86	89	-90	
76	6	-0.296	-82	90			
77	6	-0.296	-83	85	-87	88	-91
78	6	-0.296	-83	87	88	-91	
79	6	-0.296	-83	91			
82	SQ	0.0400	0.0178	0.0017	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	-8.5000	0.0	43.5000		
83	SQ	0.0400	0.0178	0.0017	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	8.5000	0.0	43.5000		
84	PX	-5.4000					
85	PX	8.0000					
86	PY	1.5000					
87	PY	1.0000					
88	PZ	43.5000					
89	PZ	46.0000					
90	PZ	54.0000					
91	PZ	55.0000					

① 卵 巢

文献3)において、左右の卵巣は以下のように記述されている。

$$\left(\frac{x \pm x_0}{a} \right)^2 + \left(\frac{y}{b} \right)^2 + \left(\frac{z - z_0}{c} \right)^2 \leq 1$$

for right ovarie, plus sign is assumed, otherwise negative.

ここで、 $a = 1.$, $b = 0.5$, $c = 2.$, $x_0 = 6.$, $z_0 = 15.$ である。

橢円体を特殊二次曲面 (SQ) として、左右の卵巣を以下のように表現した。

80	4	-1.04	-92				
81	4	-1.04	-93				
92	SQ	1.0000	4.0000	0.2500	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	-6.0000	0.0	15.0000		
93	SQ	1.0000	4.0000	0.2500	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	6.0000	0.0	15.0000		

② 脾 臓

文献3)において、脾臓は以下のように記述されている。

$$\left(\frac{x - x_0}{a} \right)^2 + \left(\frac{y}{b} \right)^2 + \left(\frac{z - z_0}{c} \right)^2 \leq 1, \quad x \geq x_0$$

and

$$z \geq z_0, \quad \text{if } x > x_1$$

ここで、 $a = 16.$, $b = 1.2$, $c = 3.3$, $x_0 = -1$, $z_0 = 37.$, $x_1 = 3.$ である。

橢円体を特殊二次曲面 (SQ) とし、さらに3枚の平面を用いて、脾臓を以下のように表現した。

82	4 -1.04	-94	95 -66				
83	4 -1.04	-94	66 96				
66	PX 3.0000						
94	SQ 0.0039 0.6944 0.0918 0.0 0.0 0.0	-1.0000 -1.0000 0.0 37.0000					
95	PX -1.0000						
96	PZ 37.0000						

23 脾臓

文献3)において、脾臓は以下のように記述されている。

$$\left(\frac{x-x_0}{a}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b}\right)^2 + \left(\frac{z-z_0}{c}\right)^2 \leq 1,$$

ここで、 $a = 3.5$, $b = 2.$, $c = 6.$, $x_0 = 11.$, $y_0 = 3.$, $z_0 = 37.$ である。

楕円体を特殊二次曲面 (SQ) として、脾臓を以下のように表現した。

84	4 -1.04	-97					
97	SQ 0.0816 0.2500 0.0278 0.0 0.0 0.0	-1.0000 11.0000 3.0000 37.0000					

24 墓丸

文献3)において、左右の墓丸は以下のように記述されている。

$$\left(\frac{x \pm a}{a}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b}\right)^2 + \left(\frac{z+c}{c}\right)^2 \leq 1$$

where, plus sign is for right testes and minus for right.

ここで、 $a = 1.3$, $b = 1.5$, $c = 2.3$, $y_0 = -8.$ である。

楕円体を特殊二次曲面 (SQ) として、左右の墓丸を以下のように表現した。

85	4 -1.04	-98					
86	4 -1.04	-99					
98	SQ 0.5917 0.4444 0.1890 0.0 0.0 0.0	-1.0000 1.3000 -8.0000 -2.3000					
99	SQ 0.5917 0.4444 0.1890 0.0 0.0 0.0	-1.0000 -1.3000 -8.0000 -2.3000					

25 胸腺

文献3)において、胸腺は以下のように記述されている。

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b}\right)^2 + \left(\frac{z-z_0}{c}\right)^2 \leq 1$$

ここで、 $a = 1.5$, $b = 0.8$, $c = 4..$, $y_0 = -7.3$, $z_0 = 57.$ である。

楕円体を特殊二次曲面 (SQ) として、胸腺を以下のように表現した。

87	4 -1.04	-100					
100	SQ	0.4444 -1.0000	1.5625 0.0	0.0625 -7.3000	0.0 57.0000	0.0	0.0

26 子宮

文献3)において、子宮は以下のように記述されている。

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b}\right)^2 + \left(\frac{z-z_0}{c}\right)^2 \leq 1,$$

$$y \geq y_1$$

ここで、 $a = 2.5$, $b = 5$, $c = 1.5$, $y_0 = -2$, $z_0 = 14$, $y_1 = -4.5$ である。

楕円体を特殊二次曲面(SQ)とし、さらに平面を用いて、子宮を以下のように表現した。

88	4 -1.04	-164 165					
164	SQ	0.1600 -1.0000	0.0400 0.0	0.4444 -2.0000	0.0 14.0000	0.0	0.0
165	PY	-4.5000					

付録 B 計算に使用したMCNPコード入力データ

計算に使用した入力データの例を以下に示す。

```

C 10000000EV, NEUTRON, HUMAN PHANTOM, SOURCE(PARALLEL,PA)
111 4 -1.04      -1   50  -3 (10:-2:12) (11:-2:12) (-15:20:21)
(-22:23) #13 #14 #15 #16 #17 #18 #30 #37 #40 #41 #42 #44
#158 #159 #160 #161 #162 #163 #164 #165 #166 #167 #168 #169
#47 #48 #49 #52 (55:-57:58).
C 0.0 - 27.0
112 4 -1.04      -1   2  -50 (10:-2:12) (11:-2:12) #7 (-15:20:21)
(17:-47:48:-49:50) (51:-53:54) (55:-57:58) (59:-61:54)
(62:-66:61) (64:66:-2) #45 #46 #93 #104 #105
C SKIN
118 4 -1.04      1 2 -3 -183 #121 #122 #181 #182
C HEAD
130 4 -1.04 (-5 6) (-15:20:21) (-22:23) (24:-25:-26:27:13:-5) 68
131 4 -1.04 (-4 3 -6) (-15:20:21) (-22:23)
(24:-25:-26:27:13:-5) 68
#53 #54 #55 #56 #57 #58 #59 #60 #61 #62 #63 #64 #65 #66 #67
#68 #69 #70 #71 #72 #73 #74 #75 #76 #77 #78 #79 #80 #81 #82
#83 #84 #85 #86 #87 #88 #89 #90 #91 #92
C THYROID
C 53 4 -1.04 -101 102 -103 3 -161
53 4 -1.04 -101 102 33 -103 3 -104 -105
54 4 -1.04 -101 102 -33 -103 3 -104 -106
55 4 -1.04 -101 102 33 -103 104 -107 -108
56 4 -1.04 -101 102 -33 -103 104 -107 -109
57 4 -1.04 -101 102 33 -103 107 -110 -111
58 4 -1.04 -101 102 -33 -103 107 -110 -112
59 4 -1.04 -101 102 33 -103 110 -113 -114
60 4 -1.04 -101 102 -33 -103 110 -113 -115
61 4 -1.04 -101 102 33 -103 113 -116 -117
62 4 -1.04 -101 102 -33 -103 113 -116 -118
63 4 -1.04 -101 102 33 -103 116 -119 -120
64 4 -1.04 -101 102 -33 -103 116 -119 -121
65 4 -1.04 -101 102 33 -103 119 -122 -123
66 4 -1.04 -101 102 -33 -103 119 -122 -124
67 4 -1.04 -101 102 33 -103 122 -125 -126
68 4 -1.04 -101 102 -33 -103 122 -125 -127
69 4 -1.04 -101 102 33 -103 125 -128 -117
70 4 -1.04 -101 102 -33 -103 125 -128 -118
71 4 -1.04 -101 102 33 -103 128 -131 -132
72 4 -1.04 -101 102 -33 -103 128 -131 -133
73 4 -1.04 -101 102 33 -103 131 -134 -135
74 4 -1.04 -101 102 -33 -103 131 -134 -136
75 4 -1.04 -101 102 33 -103 134 -137 -114
76 4 -1.04 -101 102 -33 -103 134 -137 -115
77 4 -1.04 -101 102 33 -103 137 -140 -141
78 4 -1.04 -101 102 -33 -103 137 -140 -142
79 4 -1.04 -101 102 33 -103 140 -143 -144
80 4 -1.04 -101 102 -33 -103 140 -143 -145
81 4 -1.04 -101 102 33 -103 143 -146 -111
82 4 -1.04 -101 102 -33 -103 143 -146 -112
83 4 -1.04 -101 102 33 -103 146 -26 -149
84 4 -1.04 -101 102 -33 -103 146 -26 -150
85 4 -1.04 -101 102 33 -103 26 -151 -152
86 4 -1.04 -101 102 -33 -103 26 -151 -153
87 4 -1.04 -101 102 33 -103 151 -154 -108
88 4 -1.04 -101 102 -33 -103 151 -154 -109
89 4 -1.04 -101 102 33 -103 154 -157 -158
90 4 -1.04 -101 102 -33 -103 154 -157 -159
91 4 -1.04 -101 102 33 -103 157 -160 -161
92 4 -1.04 -101 102 -33 -103 157 -160 -162
C SKIN OF HEAD
152 4 -1.04 (5 6 -185):(4 3 -6 -184) (-15:20:21)
C SKIN OF LEGS
154 4 -1.04      (7   -2    9 -186) #50 #51 (8:2:-9) (194:2:-9)
155 4 -1.04      (8   -2    9 -187) #50 #51 (7:2:-9) (193:2:-9)
#154
C LEGS
3 4 -1.04      (-7   -2    9) (194:2:-9) #50 #51
(64:66:-2)
4 4 -1.04      (-8   -2    9) (193:2:-9) #50 #51
(64:66:-2)

```

C LEG BONES
 156 5 -1.4 -194 -2 230
 (64:66:-2)
 173 5 -1.4 -194 -230 231
 174 5 -1.4 -194 -231 9
 157 5 -1.4 -193 -2 230
 (64:66:-2)
 175 5 -1.4 -193 -230 231
 176 5 -1.4 -193 -231 9
 C ARM CHANGED SUR. 10,11 AND REMOVED SUR. 13.
 5 5 -1.4 -10 232 -12
 177 5 -1.4 -10 233 -232
 178 5 -1.4 -10 2 -233
 6 5 -1.4 -11 232 -12
 179 5 -1.4 -11 233 -232
 180 5 -1.4 -11 2 -233
 C PELVIS
 7 5 -1.4 (-14 17 2 16 -18 -19) : (-14 17 -15 16 18)
 C SPINE
 9 5 -1.4 -20 15 -30
 171 5 -1.4 -20 30 -3
 172 5 -1.4 -20 3 -21
 C SKULL
 10 5 -1.4 22 -23 68
 C FACIAL SKELETON
 11 5 -1.4 -24 25 26 -27 -13 5 68
 C RIB CAGE
 158 5 -1.4 -28 29 30 -201
 159 5 -1.4 -28 29 202 -203
 160 5 -1.4 -28 29 204 -205
 161 5 -1.4 -28 29 88 -207
 162 5 -1.4 -28 29 208 -209
 163 5 -1.4 -28 29 210 -211
 164 5 -1.4 -28 29 212 -213
 165 5 -1.4 -28 29 214 -215
 166 5 -1.4 -28 29 216 -217
 167 5 -1.4 -28 29 218 -219
 168 5 -1.4 -28 29 220 -221
 169 5 -1.4 -28 29 222 -31
 C CLAVICLES
 13 5 -1.4 -32 -13 33 34 -35
 14 5 -1.4 -32 -13 -33 36 -37
 C SCAPLAE CHANGED FROM 39 TO 28
 15 5 -1.4 -38 28 40 -31 13 -33 41 -42
 (-28 : -29 : -30)
 16 5 -1.4 -38 28 40 -31 13 33 43 -44
 (-28 : -29 : -30)
 C BREASTS
 121 4 -1.04 -234 1
 122 4 -1.04 -235 1
 C SKIN OF BREASTS
 181 4 -1.04 -69 1 234
 182 4 -1.04 -70 1 235
 C STOMACH
 17 4 -1.04 -45 46
 18 4 -1.04 -46
 C SMALL INTESTINE
 19 4 -1.04 -17 47 -48 49 -50 45
 (51:-53:54) (55:-57:58) (59:-61:54)
 C UPPER LARGE INTESTINE
 20 4 -1.04 -51 52 53 -54 (55:-57:58)
 21 4 -1.04 -52 53 -54 (55:-57:58)
 22 4 -1.04 -55 56 57 -58 (59:-61:54)
 23 4 -1.04 -56 57 -58 (59:-61:54)
 C LOWER LARGE INTESTINE
 C WALL
 24 4 -1.04 (-59 60 61 -54) : (-62 63 66 -61) : (-64 65 -66 2)
 C CONTENTS
 25 4 -1.04 (-60 61 -54) : (-63 66 -61) : (-65 -66 2)
 C ADRENAL GRANDS
 30 4 -1.04 -67 180
 C BRAIN
 31 4 -1.04 -68
 C KIDNEYS
 37 4 -1.04 -76 66
 C 38 1 -1.04 -77 66
 C 39 1 -1.04 -76 -78
 40 4 -1.04 -77 -78
 C LIVER
 41 4 -1.04 -79 -80 50 -81
 C LUNGS
 42 6 -0.296 (-82 -84 -86 89 -90) : (-82 88 -89) : (-82 86 89 -90) :
 (-82 90)
 44 6 -0.296 (-83 85 -87 88 -91) : (-83 87 88 -91) : (-83 91)

C	OVARIES						
45	4 -1.04	-92					
46	4 -1.04	-93					
C	PANCREAS						
47	4 -1.04	-94	95	-66			
48	4 -1.04	-94	66	96			
C	SPLEEN						
49	4 -1.04	-97					
C	TESTES						
50	4 -1.04	-98					
51	4 -1.04	-99					
C	THYMUS						
52	4 -1.04	-100					
C	UTERUS						
93	4 -1.04	-164	165				
		(59:-61:54)	(62:-66:61)	(64:66:-61)			
C	URINARY BLADDER AND CONTENT						
104	4 -1.04	-177	178				
105	4 -1.04	-178					
C	*** ENVIRONMENT ***						
106	7 -1.293E-8	-188	(183:-2:3)	(185:-6)	(184:-3:6)		
	(186:2:-9)	(187:2:-9)	(193:2:-9)	(194:2:-9)	98 99 #200		
	(-15:20:21)	(69:-183)	(70:-183)	(10:-2:12)	(11:-2:12)		
107	0 -199	188					
C	*** SOURCE ***						
C	200 7 -1.293E-8	-200					
C	200 7 -1.293E-8	-240	-241	242			
C	TRUNK						
1	SQ 0.0025	0.0100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	-1.0000	0.0	0.0	0.0			
2	PZ 0.0						
3	PZ 70.0000						
C	HEAD						
4	SQ 0.0156	0.0100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	-1.0000	0.0	0.0	0.0			
5	SQ 0.0156	0.0100	0.0196	0.0	0.0	0.0	0.0
	-1.0000	0.0	0.0	86.8500			
6	PZ 86.8500						
C	LEGS						
7	GQ 1.0000	1.0000	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.2000
	-20.0000	0.0	0.0	0.0			
8	GQ 1.0000	1.0000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2000
	20.0000	0.0	0.0	0.0			
9	PZ -80.0000						
C	ARM						
10	GQ 0.5102	0.1372	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0104
	-19.4898	0.0	-0.2050	185.8775			
11	GQ 0.5102	0.1372	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0104
	18.0612	0.0	0.1760	159.5918			
12	PZ 69.0000						
232	PZ 51.7500						
233	PZ 34.5000						
13	PY 0.0						
C	PELVIS						
14	SQ 0.0069	0.0069	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	-1.0000	0.0	-3.0000	0.0			
15	PZ 22.0000						
16	PY -3.0000						
17	SQ 0.0078	0.0078	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	-1.0000	0.0	-3.8000	0.0			
18	PZ 14.0000						
19	PY 5.0000						
C	SPINE						
20	SQ 0.2500	0.1600	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	-1.0000	0.0	5.5000	0.0			
21	PZ 80.5400						
C	SKULL						
22	SQ 0.0230	0.0135	0.0302	0.0	0.0	0.0	0.0
	-1.0000	0.0	0.0	86.8500			
23	SQ 0.0178	0.0111	0.0226	0.0	0.0	0.0	0.0
	-1.0000	0.0	0.0	86.8500			
C	FACIAL SKELETON						
24	SQ 0.0204	0.0123	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	-1.0000	0.0	0.0	0.0			
25	SQ 0.0319	0.0173	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	-1.0000	0.0	0.0	0.0			
26	PZ 74.0000						
27	PZ 84.7300						
C	RIB CAGE						
28	SQ 0.0035	0.0104	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	-1.0000	0.0	0.0	0.0			
29	SQ 0.0037	0.0116	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	-1.0000	0.0	0.0	0.0			
30	PZ 35.1000						

C	31	PZ	67.3000				
	CLAVICLES						
	32	TZ	0.0	11.1000	68.2500	20.0000	0.7883
	33	PX	0.0				
	34	P	7.0342	1.0000	0.0	11.1000	
	35	P	0.8941	1.0000	0.0	11.1000	
	36	P	-7.0342	1.0000	0.0	11.1000	
	37	P	-0.8941	1.0000	0.0	11.1000	
C	SCAPLAE						
	38	SQ	0.0028	0.0104	0.0	0.0	0.0
			-1.0000	0.0	0.0	0.0	
	39	SQ	0.0204	0.0104	0.0	0.0	0.0
			-1.0000	0.0	0.0	0.0	
	40	PZ	50.9000				
	41	P	0.2500	1.0000	0.0	0.0	
	42	P	0.8000	1.0000	0.0	0.0	
	43	P	-0.2500	1.0000	0.0	0.0	
	44	P	-0.8000	1.0000	0.0	0.0	
C	STOMACH						
	45	SQ	0.0625	0.1111	0.0156	0.0	0.0
			-1.0000	8.0000	-4.0000	35.0000	
	46	SQ	0.0872	0.1755	0.0183	0.0	0.0
			-1.0000	8.0000	-4.0000	35.0000	
C	SMALL INTESTINE						
	47	PY	-4.8600				
	48	PY	2.2000				
	49	PZ	17.0000				
	50	PZ	27.0000				
C	UPPER	LARGE	INTESTINE				
	51	SQ	0.1600	0.1600	0.0	0.0	0.0
			-1.0000	-8.5000	-2.3600	0.0	
	52	SQ	0.3116	0.3116	0.0	0.0	0.0
			-1.0000	-8.5000	-2.3600	0.0	
	53	PZ	14.4500				
	54	PZ	24.0000				
	55	SQ	0.0	0.1600	0.4444	0.0	0.0
			-1.0000	0.0	-2.3600	25.5000	
	56	SQ	0.0	0.2569	1.0563	0.0	0.0
			-1.0000	0.0	-2.3600	25.5000	
	57	PX	-10.5000				
	58	PX	10.5000				
C	LOWER	LARGE	INTESTINE				
	59	GQ	0.2829	0.2204	0.0066	0.0	0.0721
			-4.5410	-0.6289	0.1289	17.6691	-0.0289
C	SUBTRACT 1.0 FROM 36.6698						
	60	GQ	0.5569	0.3956	0.0113	0.0	0.1294
			-8.9384	-1.1287	0.2716	35.6698	-0.0569
	61	PZ	8.7200				
	62	TY	3.0000	0.0	8.7200	5.7200	1.5700
	63	TY	3.0000	0.0	8.7200	5.7200	0.9100
	64	TY	3.0000	0.0	0.0	3.0000	1.5700
	65	TY	3.0000	0.0	0.0	3.0000	0.9100
	66	PX	3.0000				
C	ADRENAL GRANDS						
	67	GQ	2.6524	1.7920	0.0400	3.4499	0.0
			-35.8163	-29.9950	-3.0400	194.4260	0.0
C	BRAIN	CHANGED	ON 1990.5				
	68	SQ	0.0229	0.0135	0.0302	0.0	0.0
			-1.0000	0.0	0.0	86.8500	0.0
C	BREASTS						
	69	SQ	0.0429	0.0551	0.0607	0.0	0.0
			-1.0000	10.0000	-9.9499	52.0000	
	70	SQ	0.0429	0.0551	0.0607	0.0	0.0
			-1.0000	-10.0000	-9.9499	52.0000	
	234	SQ	0.0466	0.0607	0.0671	0.0	0.0
			-1.0000	10.0000	-9.9499	52.0000	
	235	SQ	0.0466	0.0607	0.0671	0.0	0.0
			-1.0000	-10.0000	-9.9499	52.0000	
C	GAL. BLADDER AND CONTENT						
	71	GQ	1.0000	1.0000	1.0000	0.0001	0.0003
			9.0021	6.3904	-59.9992	925.9734	
	72	GQ	1.0000	1.0000	1.0000	0.0001	0.0003
			9.0021	6.3904	-59.9992	926.4678	
	73	GQ	1.0000	1.0000	1.0000	0.0	0.0003
			9.0021	6.3904	-59.9992	930.4492	
	74	GQ	1.0000	1.0000	1.0000	0.0	0.0003
			9.0021	6.3904	-59.9992	918.4961	
C	KIDNEYS						
	76	SQ	0.0494	0.4444	0.0331	0.0	0.0
			-1.0000	6.0000	6.0000	32.5000	
	77	SQ	0.0494	0.4444	0.0331	0.0	0.0
			-1.0000	-6.0000	6.0000	32.5000	
	78	PX	-3.0000				

C LIVER							
79	SQ	0.0037	0.0156	0.0	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	0.0	0.0	0.0		
80	P	0.0286	0.0222	-0.0233	-1.0000		
81	PZ	43.0000					
C LUNGS							
82	SQ	0.0400	0.0178	0.0017	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	-8.5000	0.0	43.5000		
83	SQ	0.0400	0.0178	0.0017	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	8.5000	0.0	43.5000		
84	PX	-5.4000					
85	PX	8.0000					
86	PY	1.5000					
87	PY	1.0000					
88	PZ	43.5000					
89	PZ	46.0000					
90	PZ	54.0000					
91	PZ	55.0000					
C OVARIES							
92	SQ	1.0000	4.0000	0.2500	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	-6.0000	0.0	15.0000		
93	SQ	1.0000	4.0000	0.2500	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	6.0000	0.0	15.0000		
C PANCREAS							
94	SQ	0.0039	0.6944	0.0918	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	-1.0000	0.0	37.0000		
95	PX	-1.0000					
96	PZ	37.0000					
C SPLEEN							
97	SQ	0.0816	0.2500	0.0278	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	11.0000	3.0000	37.0000		
C TESTES							
98	SQ	0.5917	0.4444	0.1890	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	1.3000	-8.0000	-2.3000		
99	SQ	0.5917	0.4444	0.1890	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	-1.3000	-8.0000	-2.3000		
C THYMUS							
100	SQ	0.4444	1.5625	0.0625	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	0.0	-7.3000	57.0000		
C THYROID							
101	C/Z	0.0	-4.0000	2.2000			
102	C/Z	0.0	-4.0000	1.0000			
103	PY	-4.0000					
104	PZ	70.2500					
105	GQ	-1.0000	-1.0000	0.0	-2.0000	0.0	0.0
		-8.0000	-8.0000	0.0	-16.0000		
106	GQ	-1.0000	-1.0000	0.0	2.0000	0.0	0.0
		8.0000	-8.0000	0.0	-16.0000		
107	PZ	70.5000					
108	GQ	-0.7725	-0.7725	0.0	-2.0000	0.0	0.0
		-8.0000	-6.1804	0.0	-12.3607		
109	GQ	-0.7725	-0.7725	0.0	2.0000	0.0	0.0
		8.0000	-6.1804	0.0	-12.3607		
110	PZ	70.7500					
111	GQ	-0.5588	-0.5588	0.0	-2.0000	0.0	0.0
		-8.0000	-4.4706	0.0	-8.9411		
112	GQ	-0.5588	-0.5588	0.0	2.0000	0.0	0.0
		8.0000	-4.4706	0.0	-8.9411		
113	PZ	71.0000					
114	GQ	-0.3588	-0.3588	0.0	-2.0000	0.0	0.0
		-8.0000	-2.8706	0.0	-5.7411		
115	GQ	-0.3588	-0.3588	0.0	2.0000	0.0	0.0
		8.0000	-2.8706	0.0	-5.7411		
116	PZ	71.2500					
117	GQ	-0.1725	-0.1725	0.0	-2.0000	0.0	0.0
		-8.0000	-1.3804	0.0	-2.7608		
118	GQ	-0.1725	-0.1725	0.0	2.0000	0.0	0.0
		8.0000	-1.3804	0.0	-2.7608		
119	PZ	71.5000					
120	GQ	0.0000	0.0000	0.0	-2.0000	0.0	0.0
		-8.0000	0.0000	0.0	0.0000		
121	GQ	0.0000	0.0000	0.0	2.0000	0.0	0.0
		8.0000	0.0000	0.0	0.0000		
122	PZ	71.7500					
123	GQ	-0.0560	-0.0560	0.0	-2.0000	0.0	0.0
		-8.0000	-0.4479	0.0	-0.8958		
124	GQ	-0.0560	-0.0560	0.0	2.0000	0.0	0.0
		8.0000	-0.4479	0.0	-0.8958		
125	PZ	72.0000					
126	GQ	-0.1135	-0.1135	0.0	-2.0000	0.0	0.0
		-8.0000	-0.9080	0.0	-1.8161		
127	GQ	-0.1135	-0.1135	0.0	2.0000	0.0	0.0
		8.0000	-0.9080	0.0	-1.8161		
128	PZ	72.2500					

129	GQ	-0.1725	-0.1725	0.0	-2.0000	0.0	0.0
		-8.0000	-1.3804	0.0	-2.7608		
130	GQ	-0.1725	-0.1725	0.0	2.0000	0.0	0.0
		8.0000	-1.3804	0.0	-2.7608		
131	PZ	72.5000					
132	GQ	-0.2331	-0.2331	0.0	-2.0000	0.0	0.0
		-8.0000	-1.8649	0.0	-3.7298		
133	GQ	-0.2331	-0.2331	0.0	2.0000	0.0	0.0
		8.0000	-1.8649	0.0	-3.7298		
134	PZ	72.7500					
135	GQ	-0.2952	-0.2952	0.0	-2.0000	0.0	0.0
		-8.0000	-2.3616	0.0	-4.7233		
136	GQ	-0.2952	-0.2952	0.0	2.0000	0.0	0.0
		8.0000	-2.3616	0.0	-4.7233		
137	PZ	73.0000					
138	GQ	-0.3588	-0.3588	0.0	-2.0000	0.0	0.0
		-8.0000	-2.8706	0.0	-5.7411		
139	GQ	-0.3588	-0.3588	0.0	2.0000	0.0	0.0
		8.0000	-2.8706	0.0	-5.7411		
140	PZ	73.2500					
141	GQ	-0.4240	-0.4240	0.0	-2.0000	0.0	0.0
		-8.0000	-3.3917	0.0	-6.7834		
142	GQ	-0.4240	-0.4240	0.0	2.0000	0.0	0.0
		8.0000	-3.3917	0.0	-6.7834		
143	PZ	73.5000					
144	GQ	-0.4906	-0.4906	0.0	-2.0000	0.0	0.0
		-8.0000	-3.9250	0.0	-7.8501		
145	GQ	-0.4906	-0.4906	0.0	2.0000	0.0	0.0
		8.0000	-3.9250	0.0	-7.8501		
146	PZ	73.7500					
147	GQ	-0.5588	-0.5588	0.0	-2.0000	0.0	0.0
		-8.0000	-4.4706	0.0	-8.9411		
148	GQ	-0.5588	-0.5588	0.0	2.0000	0.0	0.0
		8.0000	-4.4706	0.0	-8.9411		
149	GQ	-0.6285	-0.6285	0.0	-2.0000	0.0	0.0
		-8.0000	-5.0283	0.0	-10.0566		
150	GQ	-0.6285	-0.6285	0.0	2.0000	0.0	0.0
		8.0000	-5.0283	0.0	-10.0566		
151	PZ	74.2500					
152	GQ	-0.6998	-0.6998	0.0	-2.0000	0.0	0.0
		-8.0000	-5.5982	0.0	-11.1965		
153	GQ	-0.6998	-0.6998	0.0	2.0000	0.0	0.0
		8.0000	-5.5982	0.0	-11.1965		
154	PZ	74.5000					
155	GQ	-0.7725	-0.7725	0.0	-2.0000	0.0	0.0
		-8.0000	-6.1804	0.0	-12.3607		
156	GQ	-0.7725	-0.7725	0.0	2.0000	0.0	0.0
		8.0000	-6.1804	0.0	-12.3607		
157	PZ	74.7500					
158	GQ	-0.8468	-0.8468	0.0	-2.0000	0.0	0.0
		-8.0000	-6.7747	0.0	-13.5494		
159	GQ	-0.8468	-0.8468	0.0	2.0000	0.0	0.0
		8.0000	-6.7747	0.0	-13.5494		
160	PZ	75.0000					
161	GQ	-0.9227	-0.9227	0.0	-2.0000	0.0	0.0
		-8.0000	-7.3812	0.0	-14.7625		
162	GQ	-0.9227	-0.9227	0.0	2.0000	0.0	0.0
		8.0000	-7.3812	0.0	-14.7625		
C UTERUS							
164	SQ	0.1600	0.0400	0.4444	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	0.0	-2.0000	14.0000		
165	PY	-4.5000					
C URINARY BLADDER AND CONTENT							
177	SQ	0.0407	0.0836	0.0836	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	0.0	-4.5000	8.0000		
178	SQ	0.0452	0.0973	0.0973	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	0.0	-4.5000	8.0000		
C SKIN							
183	SQ	0.0025	0.0096	0.0	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	0.0	0.0	0.0		
184	SQ	0.0149	0.0096	0.0	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	0.0	0.0	0.0		
185	SQ	0.0149	0.0096	0.0185	0.0	0.0	0.0
		-1.0000	0.0	0.0	86.8500		
186	GQ	1.0000	1.0000	0.0	0.0	0.0	-0.2000
		-20.0000	0.0	-0.0400	-4.0400		
187	GQ	1.0000	1.0000	0.0	0.0	0.0	0.2000
		20.0000	0.0	-0.0400	-4.0400		
C *** ENVIRONMENT ***							
179	SO	200.0000					
180	PZ	38.0000					
181	P	0.2687	0.2090	0.9403	26.3310		
182	P	0.2687	0.2090	0.9403	34.3310		
188	SD	1000.0000					

C LEG BONES
 193 GQ 1.0000 1.0000 0.0047 0.0 0.0 0.1504
 20.0000 0.0 1.2845 87.7500
 194 GQ 1.0000 1.0000 0.0047 0.0 0.0 -0.1504
 -20.0000 0.0 1.2845 87.7500
 230 PZ -11.2
 231 PZ -34.4
 C RIB CAGE
 C SURF. 206 IS SURF. 88.
 201 PZ 36.5
 202 PZ 37.9
 203 PZ 39.3
 204 PZ 40.7
 205 PZ 42.1
 207 PZ 44.9
 208 PZ 46.3
 209 PZ 47.7
 210 PZ 49.1
 211 PZ 50.5
 212 PZ 51.9
 213 PZ 53.3
 214 PZ 54.7
 215 PZ 56.1
 216 PZ 57.5
 217 PZ 58.9
 218 PZ 60.3
 219 PZ 61.7
 220 PZ 63.1
 221 PZ 64.5
 222 PZ 65.9
 C
 199 SO 1001.0000
 C *** SOURCE ***
 200 S 0.0 -150.0 0.0 100.0
 240 CX 100.0
 241 PX 110.0
 242 PX 90.0

MODE 1
 IN 1 115R 0 1
 C TRUNK TRUNK S.TRUNK HEAD HEAD THYROID THYROID THYROID THYROID
 C THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID
 C THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID
 C THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID
 C THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID
 C THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID THYROID
 C S.HEAD S.LEGS S.LEGS LEG LEG U.B.LEG M.B.LEG L.B.LEG
 C U.B.LEG M.B.LEG L.B.LEG U.ARM M.ARM L.ARM U.ARM M.ARM
 C L.ARM PELVIS L.SPINE M.SPINE U.SPINE
 C SKULL F.S RIB RIB
 C RIB RIB RIB RIB RIB RIB RIB
 C RIB RIB CLAV. CLAV. SCAPLAE SCAPLAE BREAST BREAST
 C BRE. S. BRE. S. STOMACH STOMACH
 C S.M.INT U.L.INT U.L.INT U.L.INT U.L.INT L.L.INT L.L.INT
 C ADRENAL BRAIN KIDNEY KIDNEY LIVER
 C LUNG LUNG OVARY
 C OVARY PANCREA PANCREA SPLEEN TESTE TEST THYMUS UTERUS
 C BLADDER BLADDER ENV. ENV. SOURCE
 VOL 1.0 1.0 1410.0 5430.0 5430.0 0.5 0.5 0.5
 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5
 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5
 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5
 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5
 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5
 274.0 595.0 595.0 10400.0 10400.0 196.0 406.0 798.0
 196.0 406.0 798.0 119.5 119.5 239.0 119.5 119.5
 239.0 606.0 206.1 548.3 165.6
 56.0 56.0 56.0 56.0 56.0 56.0 56.0
 56.0 56.0 27.4 27.4 101.0 101.0 168.5 168.5
 25.5 25.5
 1060.0 91.2 96.3 121.0 127.0 160.3 137.6
 15.7 1370.0 144.0 144.0 1830.0
 1560.0 1810.0 4.19
 4.19 45.35 45.35 176.0 18.8 18.8 20.1 76.0
 45.7 203.0 4190000000. 1.0 1.0
 C << SOURCE (PARALLEL BEAM) >>
 SRC5 100.0 0.0 0.0 200 J 100.0 -1. 0. 0. 0 0 J
 SI 0 0.999 1.001
 SP 0 0 1
 C << MATERIAL >>
 C SOFT TISSUE
 M4 1001.04 -.10454 6012.10 -.22663 7014.04 -.02490 8016.04 -.63525
 9019.03 -.00000 11023.01 -.00112 12000.02 -.00013 14000.02 -.00030
 15031.01 -.00134 16032.01 -.00204 17000.02 -.00133 19000.01 -.00208

20000.10 -.00024 26000.11 -.00005 40000.02 -.00001 82000.10 -.00000
 C SKELTON
 M5 1001.04 -.07337 6012.10 -.25475 7014.04 -.03057 8016.04 -.47893
 9019.03 -.00025 11023.01 -.00326 12000.02 -.00112 14000.02 -.00002
 15031.01 -.05095 16032.01 -.00173 17000.02 -.00143 19000.01 -.00153
 20000.10 -.10190 26000.11 -.00008 40000.02 -.00000 82000.10 -.00001
 C LUNG
 M6 1001.04 -.10134 6012.10 -.10238 7014.04 -.02866 8016.04 -.75752
 9019.03 -.00000 11023.01 -.00184 12000.02 -.00007 14000.02 -.00006
 15031.01 -.00080 16032.01 -.00225 17000.02 -.00266 19000.01 -.00194
 20000.10 -.00009 26000.11 -.00037 40000.02 -.00002 82000.10 -.00000
 C AIR
 M7 7014.04 -.75000 8016.04 -.25000
 C << TALLY >>
 F6 (118 152 154 155) (130 131) (104 105) 17 19 (20 22)
 24 30 31 (37 40) 41 (42 44) (45 46) (47 48) (50 51) 52 93
 (121 122) (53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70
 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 90 91 92)
 (156 157 173 174 175 176 5 6 7 9 10 11 158 159 160 161 162 163
 164 165 166 167 168 169 13 14 15 16 177 178 179 180) 10 (15 16)
 (13 14) (158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169) 9 171
 172 7 (156 157) (173 175) (174 176) (5 6) (177 179) (178 180) 11
 F16 (118 152 154 155) (130 131) (104 105) 17 19 (20 22)
 24 30 31 (37 40) 41 (42 44) (45 46) (47 48) (50 51) 52 93
 (121 122) (53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70
 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 90 91 92)
 (156 157 173 174 175 176 5 6 7 9 10 11 158 159 160 161 162 163
 164 165 166 167 168 169 13 14 15 16 177 178 179 180) 10 (15 16)
 (13 14) (158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169) 9 171
 172 7 (156 157) (173 175) (174 176) (5 6) (177 179) (178 180) 11
 F4 (118 152 154 155) (130 131) (104 105) 17 19 (20 22)
 24 30 31 (37 40) 41 (42 44) (45 46) (47 48) (50 51) 52 93
 (121 122) (53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70
 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 90 91 92)
 (156 157 173 174 175 176 5 6 7 9 10 11 158 159 160 161 162 163
 164 165 166 167 168 169 13 14 15 16 177 178 179 180) 10 (15 16)
 (13 14) (158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169) 9 171
 172 7 (156 157) (173 175) (174 176) (5 6) (177 179) (178 180) 11
 F14 (118 152 154 155) (130 131) (104 105) 17 19 (20 22)
 24 30 31 (37 40) 41 (42 44) (45 46) (47 48) (50 51) 52 93
 (121 122) (53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70
 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 90 91 92)
 (156 157 173 174 175 176 5 6 7 9 10 11 158 159 160 161 162 163
 164 165 166 167 168 169 13 14 15 16 177 178 179 180) 10 (15 16)
 (13 14) (158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169) 9 171
 172 7 (156 157) (173 175) (174 176) (5 6) (177 179) (178 180) 11
 DE4 1.000E-08 1.000E-07 1.000E-06 1.000E-05 1.000E-04 3.000E-04
 1.000E-03 1.000E-02 1.000E-01 1.000E+00
 DF4 4.000E-10 1.300E-10 4.000E-11 1.300E-11 6.000E-12 1.000E-11
 3.500E-11 7.000E-10 8.000E-09 3.000E-08
 NPS 200000
 TME 20.0
 PRDMP 20000 20000
 PRINT

付録 C 被曝計算に使用したMCNPコードの機能

人体に対する外部被曝計算を行った際使用したMCNPコードの機能及びそれらを使用するための入力データの説明を以下に示す。

(1) MODE Card

MCNPコードでは、中性子輸送問題、中性子・光子輸送問題及び光子輸送問題を取り扱うことができる。このCardを使用して、取り扱う粒子の種類を指定する。以下にMODE Cardの使用方法を示す。

MODE N

N= 0 の時、中性子輸送問題

N= 1 の時、中性子・光子輸送問題

N= 2 の時、光子輸送問題

中性子被曝問題においては、中性子及び中性子と物質の相互作用によって生じた光子を追跡する。この場合、次のようになる。

MODE 1

(2) IP(IN) Card

このCardを使用して、各セルに対するimportanceを与える。中性子輸送問題に対してはIN Cardを、光子輸送問題に対してはIP Cardを使用する。importanceとは、Geometry splittingとRussian rouletteを行う際に使用される値で、その領域の重要度を示す。Geometry splittingとは、より詳細なサンプリングを行う際に粒子を分割して追跡を行う手法であり、Russian rouletteとは、計算時間短縮のためにweightの小さい粒子をそのweightに応じて殺す手法である。以下に、wというweightを持つ粒子が、importanceが I1 である領域1から、importanceが I2 である領域2へ進入した時の処理を示す。

粒子のweight : W

領域1のimportance : I1

領域2のimportance : I2

IF I2/I1 > 1 Geometry splitting を行う。

 IF I2/I1 is integer

 粒子をI2/I1 倍にする。

 ELSE

 I1:I2 の割合で粒子を増やす。

ENDIF

ELSE

 Russian roulette を行い、 $1 - I2/I1$ の確率で粒子をそのweightに応じて殺す。

```
ENDIF
```

```
W = W*I1/I2
```

以下に、使用した入力データの例を示す。

```
IN 1 115R 0 1
```

この例では、セル1～セル116及びセル118のimportanceを1に、セル117のimportanceを0にセットしている。セル1～セル115は、人体を表現する領域、セル116は、人体を包含する希薄な空気を表現する球状のセルであり、セル118は、線源を表現するセルである。セル117は、人体を包含する球(セル116)のさらに外側に位置する球であり、importanceを0にセットすることにより、人体から遠ざかりつつある粒子に対する追跡を終了することで、計算時間の短縮を行っている。

(3) SRCn Card

このCardを使用して、問題における線源を決める。線源の種類とCardの使用方法は以下の通り。

SRC1 等方性の点線源

SRC2 球面上外方向のcosine分布線源

SRC3 球面上内方向のcosine分布線源

SRC4 ある三次元領域での一様分布線源

SRC5 平面

その他、SRC Cardによってユーザーが任意の分布をサブルーチンSOURCE内で定義できる。また、SRC1～SRC5で定義された線源に対し、SDIR Cardを用いてある方向にbiasをかけることが可能である。以下に、SRC1 Cardを使用した例を示す。

```
SRC1 -8.5 -2.36 20. 21 1
```

この例では、線源として、等方性の点線源を使用している。線源位置は(-8.5,-2.36,20.)であり、所属するセルの番号は21(大腸)である。また、source particleのweightはすべて1としている。

今回行った人体に対する外部被曝計算においては、SRC5 Cardを使用して、円盤からの平行線源を定義している。以下にその例を示す。

```
SRC5 100. 0. 0. 200 J 100. -1. 0. 0. 0 0 J
```

この入力カードで定義される線源は、

位置；(100.,0.,0.)、

線源を表現するセルの番号；200、

円盤の半径；100.、

照射方向を示すベクトル；(-1.,0.,0.)である。

(4) SI Card, SP Card

これらのCardを使用して、source particleのエネルギー及びその確率密度関数を与える。例えば、

SI Card a b c / SP Card O M N

の時、区間 $[a, b]$, $[b, c]$ から一様にM:N の割合でsource particle のエネルギーを samplingする。以下に、使用した入力データの例を示す。

SI 0 2.999 3.001

SP 0 0 1

この例では、source particle のエネルギーを一様に3.0 ± 0.001 MeVとしているが、これは 単一エネルギーの線源を使用しているためである。



2.999 3.0 3.001 MeV

(5) Mm Card

このCardを使用して、各媒質の構成物質及びその分布を与える。例えば、

Mm ZAID₁ fraction₁, ····

の時、

ZAID : ZZZAAA.n

ZZZ : 原子番号

AAA : 原子量 (自然元素なら 000)

n : 断面積データ識別番号

fraction : > 0 なら、原子数による比率、

< 0 なら、重量による比率

である。以下に、使用した入力データの例を示す。ここでは、文献 1)に基づいて、Soft tissue(M1), Skelton(M2), Lung(M3)の構成要素を定義した。この時、骨髄はSkelton と一緒に混じり合っていると想定した。

M1	1001.04	-10454	6012.10	-22663	7014.04	-02490	8016.04	-63525
	11023.01	-00112	12000.02	-00013	14000.02	-00030	15131.01	-00134
	16032.01	-00204	17000.02	-00133	19000.01	-00208	20000.10	-00024
	26000.11	-00005	40000.02	-00001				

(6) Fn Card

このCardを使用して、Tally を定義する。Fn Card を使って指定された評価法により、面S上有るいはセルC内の統計量をTally する。MCNPコードにおいて使用できる評価法は以下の通りである。括弧内は光子用のTally である。

F1(F11) 指定された面をよぎったCurrent がTally される。

- F2(F12) 指定された面をよぎったFluxがTallyされる。
- F4(F14) 指定されたセルにおける単位体積あたりのTrack lengthがTallyされる。
- F5(F15) 指定された点におけるFluxがTallyされる。
- F6(F16) 指定されたセルにおけるTrack length estimatorによって評価されたエネルギー蓄積量がTallyされる。
- F7 指定されたセルにおけるTrack length estimatorによって評価されたエネルギー蓄積量がTallyされる。この時、核分裂によって生じたphotonのエネルギーも含める。

以下に、使用した入力データの例を示す。

F16 (7 8) (45 46)

この例では、セル7及び8(腎孟)、セル45及び46(卵巣)におけるphotonのエネルギー蓄積量をTrack length estimatorによって評価している。MCNPコードのTallyによって、出力された値の処理については、本文を参照されたい。

(7) ERGP Card

このCardによって指定されたEMCPF以上のエネルギーを持ったphotonに対してはMCGの簡単な物理的取り扱いが適用される。EMCPF以下のエネルギーを持ったphotonに対してはMCPの詳細な物理的取り扱いが適用される。MCGとMCPについては、以下の通り。

- MCGの簡単な物理的取り扱い

光電子効果(photoelectric effect)、電子対創生(pair production)、コンプトン散乱(compton scattering)等の物理現象のみを取り扱う。したがって、全断面積は、

$$\sigma_{\text{t}} = \sigma_{\text{ee}} + \sigma_{\text{pp}} + \sigma_{\text{c}}$$

となる。

- MCPの詳細な物理的取り扱い

低いエネルギーを持ったphotonと物質との複雑な相互作用を考える。

計算においては、EMCPF=0.1(MeV)とした。

(8) DEn, DFn

このカードの特徴は、例えばflux - 線量間の修正係数のような点列で表現された関数を、エネルギーの関数としてDFnカードを、F2やF5で定義された通常のTallyを変更するためDEnカードを使って入力できる点である。MCNPコードは、EMnカードを使った内挿ではなく、点列間のlog-log内挿を標準的に行う。DEnカードで定義されるエネルギー点は、Fn Tallyに対するEnカードによって定義されるTally用のエネルギー点である必要はない。粒子のエネルギーがこれらのカードによって定義された範囲を超えた場合は、最も高いエネルギーまたは低い

エネルギーが使用される。EMn カードと違い、DEn , DFn カードにおいては、多くの点が使用可能である。しかし、そのresponseは合計値のような数少ないエネルギー-bin にのみTally され得る。この2つのカードにおいて、n = 0 の時、DEn , DFn を持たないが、しかし、それらに関わるすべてのTally に関数は適用される。通常使用されるflux-dose 間の収束係数、空気、水、軟組織に対するカーマやエネルギー吸収係数に対してはlog-log 内挿が適当である。これらの2 つのどちらに対しても最初のエントリが5 カラム以降に置かれた時、LIN またはLOG が要求される特別なタイプの内挿法に対して定義される。したがって、log-log, log-linear等のどんな組み合わせも可能である。以下に使用した入力データを示す。

(9) En

このCardを使用して、Fnで指定されたTally に関するエネルギーのbin を指定する。n = 0 の時、default 値の変更を行う。以下に、使用した入力データの例を示す。

```
E0 .001 .01 .1 1 10
      energy cutoff ~ .001(MeV)
      .001 ~ .01
      .01 ~ .1
      .1 ~ 1
      1 ~ 10
      TOTAL
```

(10) Tn

Fnで指定されたTally に関する時間のbin を指定する。n = 0 の時、default 値の変更を行う。単位は 10^{-8} SEC. (shake と呼ばれる)。

<入力データの例>

```
T16 1.0 10.0 100.0 1000.0 1000000.0
このカードによって定義されるtime binは以下のとおり。
      0.0 ~ 1.0
      1.0 ~ 10.0
      10.0 ~ 100.0
      100.0 ~ 1000.0
      1000.0 ~ 1000000.0
      1000000.0 ~ time cutoff
      TOTAL
```

(11) CUTP T_{cop} E_{cop} WC1 WC2 SWTM

cutoffを行うための時間、エネルギー、weightを指定する。

weight cutoff を行う際の処理は、以下の通り。

粒子の weight : W

importance of source cell ; I_s

当該セルの importance ; I_x

$W < WC2 * RX$ の時、(RX ; $R \times I_s / I_x$, R は一様乱数)

粒子は確率 $W/(WC1 * RX)$ で生き残る。

この時、 $W=WC1 * RX$ とする。

<入力データ>

CUTP 1.0E6 1.0E-2 3J

time cutoff を 1.0E6 shake で行う。

energy cutoff を 1.0E-2 MeV で行う。

WC1,WC2,SWTMは、default 値 -0.5, -0.25, .01 を使用している。