

JAERI-M
93-147

高エネルギー放射線の線量当量換算係数
基礎データの整備 (II)
—高エネルギー荷電粒子の \bar{Q} 評価方法の
開発および高エネルギー光子の
線量当量換算係数評価—

1993年7月

佐藤 理*・降籬志おり*・上原 丘**・義澤 宣明*
岩井 敏**・田中 俊一・坂本 幸夫

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。
入手の問合わせは、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、お申しこしてください。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）で複写による実費頒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, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1993

編集兼発行	日本原子力研究所
印刷	日立高速印刷株式会社

高エネルギー放射線の線量当量換算係数基礎データの整備 (II)

—高エネルギー荷電粒子の \bar{Q} 評価方法の開発および

高エネルギー光子の線量当量換算係数評価—

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

佐藤 理*・降旗志おり*・上原 丘**・義澤 宣明*

岩井 敏**・田中 俊一・坂本 幸夫

(1993年7月1日受理)

本研究では、はじめに10GeVまでの中性子と光子の線量当量換算係数（フルエンス-実効線量）を評価するために必要な計算コードシステムと必要な基礎データの調査検討を行った。その結果、HERMES (High Energy Radiation Monte Carlo Elaborate System) コードシステムに荷電粒子の実効的な線質係数を組み込むことにより、実効線量を評価可能であることがわかった。次に、中性子の線量当量換算係数評価のための基礎データとして必要な人体構成元素の荷電粒子について、実効的な線質係数の算定法の評価方法の確立を行った。なお、HERMESコードシステム中のEGS-4コードを用いて実効線量とICRU球中の主軸上の線量当量の評価を行い、高エネルギー光子に対するICRU球ファントムの有効性の検討を行った。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根2-4

* (株)三菱総合研究所

** 三菱原子力工業(株)

Evaluation of Fluence to Dose Equivalent Conversion Factors
for High Energy Radiations (II)
- Establishment of the evaluation of the \bar{Q} values for
High Energy Charged Particles and Evaluation of the Dose
Equivalent Conversion Factors for High Energy Photons -

Osamu SATO^{*} Shiori FURIHATA^{*}, Takashi UEHARA^{**}
Nobuaki YOSHIKAWA^{*}, Satoshi IWAI^{**}, Shun-ichi TANAKA
and Yukio SAKAMOTO

Department of Reactor Engineering
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 1, 1993)

Computer code system and basic data have been investigated for evaluating fluence to dose equivalent conversion factors for photons and neutrons up to 10 GeV. The present work suggested that the conversion factors would be obtained by incorporating effective quality factors of charged particles into the HERMES (High Energy Radiation Monte Carlo Elaborate System) code system. The evaluation method of the effective values of the quality factors for charged particles of human body elements were established on the basis of the Q-L relationships specified in the ICRP Publication 60 ; These effective quality factors for charged particles are essential to the calculation of the dose equivalent conversion factors for neutrons. Effective dose and dose equivalents on the principal axis of the ICRU sphere were also calculated by use of the EGS4 code in the HERMES code system. The availability of dose equivalents in the ICRU sphere were discussed on the comparison with dose equivalents for high energy photons.

* Mitsubishi Research Institute, Inc.

** Mitsubishi Atomic Power Industries, Inc.

Keywords : Dose Equivalent Conversion Factor, High Energy Radiations,
Effective Quality Factor, HERMES, ICRP-60, ICRU Sphere

目 次

1. はじめに	1
2. ICRP60を考慮した線量評価システム	2
3. 高エネルギー放射線に対する実効線量の評価方法	8
4. 荷電粒子のエネルギーと L_{∞} および \bar{Q} との関係	12
4.1 阻止能と L_{∞} の関係	12
4.2 L_{∞} 値の比較	13
4.3 実効的な線質係数 \bar{Q} への影響	22
4.4 \bar{Q} 計算に使用するコード	24
5. 高エネルギー荷電粒子の \bar{Q} 評価	31
6. 人体数学ファントム	36
7. 吸収線量及び等価線量評価用モンテカルロコード	42
7.1 HERMESコードシステム	42
7.2 HETCとEGS-4を用いた沈着エネルギーの評価	42
7.3 HETCおよびEGS-4を用いた吸収線量および等価線量の評価	47
7.4 低エネルギー(15MeV以下)中性子の等価線量の評価	48
8. 高エネルギー光子の実効線量およびICRU球中の最大線量当量の評価	52
8.1 10MeV~10GeVの面平行ビーム入射光子に対する ICRU球中の主軸上の線量当量	52
8.2 10MeV~10GeVの面平行ビーム入射光子に対する実効線量	61
8.3 実効線量とICRU球中の各線量当量との比較	69
9. まとめ	75
謝 辞	75
参考文献	76
付 録 放射線生物学データと線質係数の導出	81

Contents

1. Introduction	1
2. Rearrangement of Dose Evaluation System in Full Consideration of ICRP Publication-60	2
3. Evaluation Technique of Effective Dose for High Energy Radiations	8
4. Relation Among Energy, L_{∞} and \bar{Q} for Charged Particles	12
4.1 Relation of Stopping Power to L_{∞}	12
4.2 Comparisons of the L_{∞} Values Calculated by Various Methods	13
4.3 Reflection to the Effective Values of the Quality Factor, \bar{Q}	22
4.4 Evaluation of the Computer Codes in order to Calculate the \bar{Q} values	24
5. Evaluation of \bar{Q} for High Energy Charged Particles	31
6. Mathematical Human Body Phantom	36
7. Monte Carlo Codes for Evaluating Absorbed Dose and Equivalent Dose ..	42
7.1 HERMES Code System	42
7.2 Evaluation of Deposition Energy with the HETC and the EGS4 Codes	42
7.3 Evaluation of Absorbed Dose and Equivalent Dose with the HETC and the EGS4 Codes	47
7.4 Evaluation of Equivalent Dose for Low Energy Neutrons below 15 MeV	48
8. Evaluation of Effective Doses and the Maximum Dose Equivalents in the ICRU Sphere for High Energy Photons	52
8.1 Maximum Dose Equivalent on the Principal Axis for Photons of Energies from 10 MeV to 10 GeV Incident in a Plane Parallel Beam on the ICRU Sphere	52
8.2 Effective Dose for Photons of Energies from 10 MeV to 10 GeV Incident in a Plane Parallel Beam on the ICRU Sphere	61
8.3 Comparisons of Effective Dose and Dose Equivalents on the Principal Axis in the ICRU Sphere	69
9. Summary	75
Acknowledgement	75
References	76
Appendix Derivation of Quality Factor $Q(L)$ from Radiobiological Data ...	81

1. はじめに

大型加速器施設の増加および宇宙空間の利用に伴い、高エネルギー放射線による被ばく評価が重要となりつつある。ICRP 51¹⁾ (ICRP Publication 51) によれば、光子の単位フルエンスあたりの実効線量当量の換算係数は 10^{-2} ~10MeVの範囲で与えられ、中性子に対しては 2.5×10^{-8} ~14MeVの範囲で与えられている。しかし、これらの範囲の上限エネルギーを超える換算係数は示されておらず、現状では高エネルギー放射線の精密な被ばく評価方法は十分に確立されているとは言い難い。本研究では、国際放射線防護委員会の考え方およびデータに従って、高エネルギー放射線の被ばく線量および換算係数(単位フルエンスと実効線量)を評価する方法を確立するための基礎的検討と、それに基づいた高エネルギー光子に対する換算係数の評価を行った。

第2章では新勧告であるICRP 60²⁾で新たに示された線量評価に関する概念も含めて国際放射線防護委員会が提唱してきた線量評価システムのレビューを行った。第3章ではICRP 60の考え方を取り入れて、高エネルギー放射線に対する実効線量(従来の実効線量当量)の評価方法の考え方の概要について記述した。第4章では、高エネルギー荷電粒子のエネルギーと水中の L_{∞} (非限定線エネルギー付与)および(線質係数)との関係を明らかにして、高エネルギー放射線の \bar{Q} (実効的な線質係数)の評価を示した。この方法に基づき、人体構成元素の代表的な荷電粒子の \bar{Q} を評価した結果を第5章に示した。 \bar{Q} は各組織または器官の吸収線量とともに等価線量(組織又は器官の線量当量の平均値)を求めるのに必要な係数である。各組織(又は器官)の等価線量を求めるためには、人体の各器官の位置および形状を表現する人体数学ファントムが必要となる。本報告書では、第6章にICRP 60の考え方に基づいてMIRD-5型人体数学ファントムに行った修正方法を示した。第7章には吸収線量および等価線量を評価するのに使用する計算コードシステムHERMES³⁾とそれを用いた吸収線量および等価線量の評価法を述べた。HERMESでは特に15MeV以下の中性子の挙動はMORSE-CG⁴⁾で取扱う。しかし、MORSE-CGでは中性子フラックスを求めることができるが、吸収線量およびそれに基づいて等価線量を求めるためにはカーマ係数が必要となる。ここでは、15MeV以下の中性子による等価線量を評価する方法についても詳細に調べた。第8章ではEGS-4コード⁵⁾を用いて、高エネルギー光子の実効線量およびICRU球中の主軸上の線量当量の評価を行い、高エネルギー光子に対するICRU球ファントムの有効性を検討した。但し、EGS-4はHERMESコードシステム中で光子の挙動を扱うコードである。

2. ICRP 60 を考慮した線量評価システム

ICRP 26⁶⁾によれば、線量当量 H は組織の一点における値として

$$H = D Q N \text{ ----- (2.1)}$$

で定義されている。ここで D は吸収線量、 Q は線質係数、 N は国際放射線防護委員会が規定したその他すべての修正係数の積（通常は 1 が用いられる）である。線質係数 Q は、吸収エネルギーの微視的分布が損害に及ぼす効果を斟酌するための量であり、問題とする点における水中の L_{∞} （非限定線エネルギー付与）の関数として定義されている。 L_{∞} に関してスペクトル分布を持った放射線に対して、線量当量は修正係数を $N = 1$ として

$$H = \int_0^{\infty} D(L) Q(L) dL \text{ ----- (2.2)}$$

となる。ただし、ここで L は L_{∞} を表す。式(2.2)は次のように変形できる。

$$\begin{aligned} H &= \int_0^{\infty} D(L) Q(L) dL = \int_0^{\infty} D(L) dL \cdot \frac{\int_0^{\infty} D(L) Q(L) dL}{\int_0^{\infty} D(L) dL} \\ &= D \cdot \frac{\int_0^{\infty} D(L) Q(L) dL}{\int_0^{\infty} D(L) dL} \text{ ----- (2.3)} \end{aligned}$$

式(2.3)の第 2 項すなわち $\frac{\int_0^{\infty} D(L) Q(L) dL}{\int_0^{\infty} D(L) dL}$ は ICRU 19⁷⁾によれば、実効的な線質係数 \bar{Q} と定義されている。

すなわち、

$$H = D \cdot \bar{Q} \text{ ----- (2.4)}$$

と表記される。

Q および \bar{Q} は線量効果関係の比例性の関係から、式(2.1)~(2.4)は一点のみで成立するだけでなく、器官全体および組織全体にわたる平均値として拡張できる。（ Q は放射線の

被ばくにより生ずる有害な影響、とくに晩発性の確率的影響と結びつく放射線防護上に用いる量である。)

そのために、組織および器官全体にわたる平均値として組織の線量当量が定義できるし、各組織又は器官の平均線量当量に確率的リスクの割合を表すための荷重係数をかけて合計することによって式(2.5)のように実効線量当量 H_E が定義される。

$$H_E = \sum_T W_T \cdot H_T \quad \text{-----} \quad (2.5)$$

ただし、 H_T は組織又は器官の平均線量当量、 W_T は確率的リスクの割合を表すための荷重係数である。

以上が ICRP 26 およびストックホルム会議⁸⁾の声明で定義された放射線防護に関する量の定義であり、ICRP 51¹⁾の単位フルエンスあたりの線量当量の換算係数は、すべてこの定義に基づいて算定されている。しかし、ICRP 60が1991年に出版され、放射線防護に関する量の定義に変化があった。ここでは、ICRP 60に基づき高エネルギー放射線の線量当量換算係数評価のためにはどのような量を評価する必要があるかということについて考察する。

ICRP 60によれば、以下の新しい定義が行われた。

- (1) \bar{Q} のかわりに生物学的情報に関する考察、及びいろいろな被ばくの状況、並びに周辺線量当量の慣例的計算の結果の検討に基づいて、放射線荷重係数 W_R が定義された。放射線荷重係数の値をTable 2.1に示す。放射線荷重係数 W_R の明確な定義は示されていないが、式(2.6)の計算により W_R の近似値を得ることができると書かれている。

$$\bar{Q} = \frac{1}{D} \int_0^{\infty} Q(L) \cdot D(L) dL \quad \text{-----} \quad (2.6)$$

ここで、 $D(L) dL$ は ICRU 球の深さ10mmで $L \infty$ が L と $L + dL$ の間の吸収線量であり、 $Q(L)$ はその位置における $L \infty$ に対する線質係数である。このときの照射条件は明示されていない。

W_R が周辺線量当量 $H^*(d)$ の定義と関連があるとみなせば、照射条件としては ICRU 球の主軸に対する平行入射ビームを考慮するのが適当である。

Table 2.1 Radiation weighting factor⁽¹⁾

放射線の種類とエネルギー範囲 ⁽²⁾	放射線荷重係数 W_R
光子, すべてのエネルギー	1
電子と μ 中間子, すべてのエネルギー ⁽³⁾	1
中性子, エネルギー < 10keV	5
10-100keV	10
> 100keV-2MeV	20
> 2MeV-20MeV	10
> 20MeV	5
反跳陽子以外の陽子, エネルギー > 2MeV	5
α 粒子, 核分裂片, 重原子核	20

(1) すべての値は身体に入射する放射線、または体内線源についてはその線源から放出された放射線に関するものである。

(2) 他の放射線に対する値の選択については、ICRP60の付録Aに論議されている。

(3) DNAに結合した原子核から放出されるオージェ電子を除く。
(ICRP60の本文26項目参照)

(2) Qと L_∞ との関係が変更された。変更の前後の値を比較のためFig. 2.1に示し、変更後の値を関数形でTable 2.2に示す。この変更は中速エネルギー中性子の従来より高い RBE_M 値⁹⁾の反映と、100keV/ μm 以上の重イオンによる生物学的効果の減少を反映している。⁽²⁾

(Q-L ∞ 曲線設定の経緯については付録を参照)

Table 2.2 Q-L relationships specified in ICRP 60

限定されない線エネルギー付与, 水中のL (keV μm^{-1})	Q(L) ⁽¹⁾
> 10	1
> 10-100	0.32L-2.2
> 100	300/ \sqrt{L}

(1) Lの単位はkeV μm^{-1}

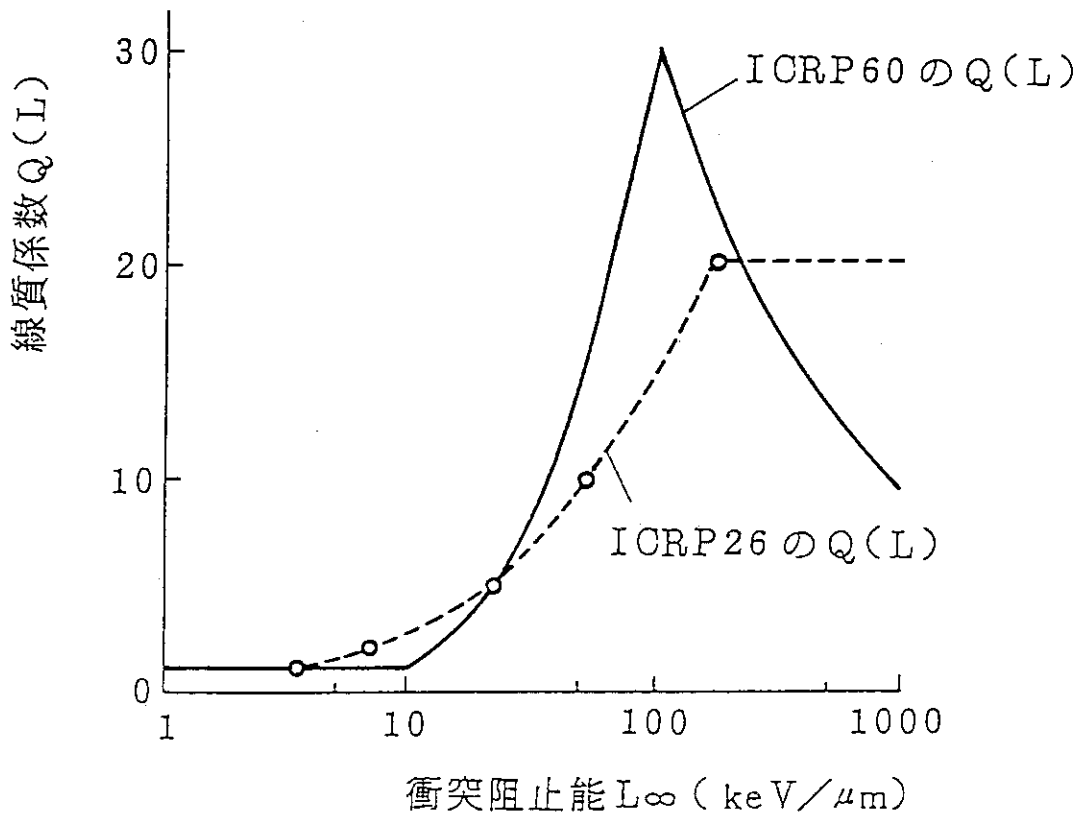


Fig. 2.1 Q-L relationships specified in ICRP 60 and ICRP 26

- (3) ICRP 26では1点における線量当量が定義され、それが器官又は組織全体に拡張されて使用されていたが、ICRP 60では組織又は器官の平均吸収線量に放射線荷重係数をかけた量を定義し、等価線量 (equivalent dose) と名付けた。すなわち、

$$H_{T,R} = W_R \cdot D_{T,R} \quad \text{-----} \quad (2.7)$$

ここで $D_{T,R}$ は放射線Rによる組織Tの平均吸収線量、 W_R は放射線荷重係数である。放射線の種類とエネルギーが多種類にわたる場合は、

$$H_T = \sum_R W_R \cdot D_{T,R} \quad \text{-----} \quad (2.8)$$

となる。

- (4) ICRP 26で定義された確率的リスクの割合を表わす荷重係数は、ICRP 60では値が変更され、組織荷重係数と呼ばれるようになった。この組織荷重係数 W_T と等価線量 (equivalent dose) の積和が実効線量Eである。

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T \quad \text{-----} \quad (2.9)$$

これは、従来の実効線量当量 H_E に相当する量である。Table 2.3にICRP 26とICRP 60の W_T 値を示す。

Table 2.3 Tissue weighting factors in ICRP 26 and ICRP 60

組織又は器官	ICRP 26	ICRP 60
生殖腺	0.25	0.20
赤色脊髄	0.12	0.12
大腸（下部）	—	0.12
肺	0.12	0.12
胃	—	0.12
膀胱	—	0.05
乳房	0.15	0.05
肝臓	—	0.05
食道	—	0.05
甲状腺	0.03	0.05
皮膚	—	0.01
骨表面	0.03	0.01
残りの組織	0.03 *	0.05 **

* 最大5個の組織（又は器官）に割り振る。1つあたり0.06
 ** 残りの組織としては、副腎・脳・小腸・腎臓・筋肉・脾臓・大腸上部・脾臓・胸腺および子宮の10の器官の合計である。
 例外として、上記1つの器官が表中の12の器官又は組織より高い線量を受けた場合には、その器官に0.025の荷重係数を割り振り、それを除く他の残りの器官の平均に0.025を適用する。

ICRP 26の線量の考え方に基づいてICRP 51が作られ、光子、 μ 中間子、中性子、陽子および電子についてのフルエンスと線量当量の換算係数が評価された。しかし、ICRP 51では通常の放射線防護で問題となる光子については10MeV、中性子については14MeVまでを対象としている。そのため、10GeVまでの放射線の換算係数をICRP 60の考え方をを用いて評価するためには、以下の事項を検討しなければならない。

- (1) 高エネルギー放射線の等価線量を評価するのに、ICRP 60で定義された W_R をそのまま用いるのが適切かどうか。
- (2) ICRU球に面平行入射する放射線の入射軸上の深さ10mmの点の線量当量を高エネルギー放射線の場合も実効線量に代わる実用量として用いるべきか。

まず(1)の問題について検討する。ICRP60で用いられている W_R 、すなわち放射線荷重係数は、明確な定義は示されていないが、ICRU球中の深さ10mmにおける \bar{Q} を計算することにより、 W_R の近似値が得られるとされている。すなわち、

$$W_R \doteq \bar{Q} = \frac{1}{D} \int_0^{\infty} Q(L) \cdot D(L) dL \quad (\text{ICRU球の深さ10mmの位置}) \quad \text{-----} \quad (2.10)$$

W_R は照射条件は示されていないが、ICRU球中の深さ1cmの点で定義されている。ICRU39¹⁰⁾で定義された場のモニタリング量としての周辺線量当量 $H^*(d)$ は $d=10\text{mm}$ が推奨されている。なお、 $H^*(10)$ は通常の放射線防護で対象となるエネルギー範囲($\sim 15\text{MeV}$ まで)のほとんどの照射条件において、実効線量当量(実効線量)を大体上回る。¹¹⁾

従って、 W_R は $H^*(10)$ を評価するために設定された \bar{Q} に相当する値と考えられる。しかし、10GeVまでの高エネルギー放射線を対象とする場合、必ずしも $H^*(10)$ が実効線量を上回るという保証はない。従って10GeVまでの高エネルギー放射線を対象とする場合、ICRP60の W_R 、すなわちICRU球中の深さ10mmにおける \bar{Q} を別の位置における線量当量評価に用いるのは適切ではなく、むしろ対象とする点又は体積に対する \bar{Q} を用いる方が適切である。

次に項目(2)の問題点、すなわちICRU球の深さ10mmの点の線量当量を高エネルギー放射線の場合も実効線量にかわる実用量として用いるべきかどうかということについて検討する。この量を周辺線量当量 $H^*(10)$ に相当するものとみなせば、ICRP51によれば通常の放射線防護の対象となる15MeV程度までの放射線に対しては、 $H^*(10)$ がすべての照射条件において実効線量をほぼ上回る。しかし、10GeV程度までの高エネルギーの放射線に対しては、最大となる線量当量はより深い点で生ずる可能性が考えられるため、 $H^*(10)$ が実効線量を下回るおそれもある。従ってこのような高エネルギー放射線に対しては、実効線量そのものを評価し、周辺線量当量 $H^*(10)$ が実用量として適当かどうかを判断する必要がある。この検討については第8章で行う。

3. 高エネルギー放射線に対する実効線量の評価方法

以下 I C R P 60 の用語の定義に従って、組織又は器官の平均線量当量を等価線量 (equivalent dose) H_T 、 H_T と組織荷重係数との積和を実効線量 (effective dose) E と表記する。

組織又は器官 T の等価線量 H_T は、式 (2.2) に示した定義と同様、

$$H_T = \int_0^{\infty} D(L) \cdot Q(L) dL \quad \text{-----} \quad (3.1)$$

となる。ただし、 $D(L)$ 、 $Q(L)$ は対象となる組織又は器官中 (組織又は器官の元素組成と密度は均一と仮定する。) での L (すなわち L_{∞}) の水中における分布である。(実際にはこの組織又は器官中に存在する放射線が水中に存在した場合の L_{∞} の分布である。) 式 (3.1) は次のように変形できる。

$$H_T = \int_0^{\infty} D(L) dL \cdot \frac{\int_0^{\infty} D(L) Q(L) dL}{\int_0^{\infty} D(L) dL} = \bar{D} \cdot \bar{Q} \quad \text{-----} \quad (3.2)$$

但し、 $\int_0^{\infty} D(L) dL$ は対象となる組織又は器官の吸収線量、 \bar{Q} は対象となる組織又は器官中の実効的線質係数であり、式 (3.3) で表わされる。

$$\bar{Q} = \frac{1}{\bar{D}} \int_0^{\infty} D(L) \cdot Q(L) dL \quad \text{-----} \quad (3.3)$$

たとえば、質量 m の組織 T に入射したエネルギー E_0 の陽子が連続エネルギー損失のみでエネルギーを失い、0 になったとする。そうすると組織 T の吸収エネルギー $D = E_0$ であり、

$$\bar{Q} = \frac{1}{\left(\frac{E_0}{m}\right)} \int_0^{\infty} Q(L) \cdot D(L) dL \quad \text{-----} \quad (3.4)$$

となる。そして $D(L) dL$ は L が L から $L + dL$ 間の吸収エネルギーであるため、陽子のエネルギーを E で表わせば、この場合、陽子の損失エネルギーが吸収エネルギーに相等するから、損失エネルギーを組織の質量 m で割ったもの、すなわち dE/m は吸収エネルギー $D(L) dL$ に相等する。したがって、

$$\bar{Q} = \frac{1}{\left(\frac{E_0}{m}\right)} \int_0^{\infty} Q(L) \frac{dE}{dL \cdot m} \cdot dL \quad \text{-----} \quad (3.5)$$

となる。 $\frac{dE}{dL \cdot m}$ は対象組織 T の単位体積に対する単位 L ∞ 当りの吸収エネルギーであり、次元解析をすると、

$$\frac{dE}{dL \cdot m} = \Delta E / \left[\frac{\Delta E \cdot m}{\Delta X} \right] = \frac{\Delta X}{m} \quad \text{-----} \quad (3.6)$$

したがって、 $\frac{dE}{dL \cdot m}$ は L ∞ が L から L + dL のときの組織 T の単位質量に相等する体積あたりの陽子の飛程（実際は平均飛程）ということになる。

陽子の水中における L ∞ と平均飛程の関係を模式的に図示すると、Fig. 3.1 のようになる。式(3.4)をこの陽子の減速の問題に適用すれば、陽子エネルギーが E₀ から 0 まで減速するときに組織 T 内に分布する L ∞ について式(3.4)又は(3.5)を積分するということである。（積分面積は Fig. 3.1 における 2 つの斜線部分の合計である。）すなわち、

$$\begin{aligned} \bar{Q} &= \frac{1}{\left(\frac{E_0}{m}\right)} \int_0^{E_0} Q(L) \cdot D(L) \cdot dL \\ &= \frac{1}{\left(\frac{E_0}{m}\right)} \int_0^{E_0} Q(L) \frac{dE}{dL \cdot m} \cdot dL \\ &= \frac{1}{E_0} \int_0^{E_0} Q(E) dE \quad \text{-----} \quad (3.7) \end{aligned}$$

となる。ここで Q は L の関数から陽子のエネルギー E の関数に変更される。このためには陽子の水中での L ∞ がエネルギーに関する関数として一意的に表現される必要がある。

すなわち、

$$L = f(E) \quad \text{-----} \quad (3.8)$$

の関係が成立し、E に対して 1 個の L が必ず存在する必要がある。この関係は陽子に対しては文献 11 に表で記載されており、電子、陽電子に対しては ICRU 37¹²⁾ に表で示されている。なお、陽子以上の質量を持つ荷電粒子に対しては STOPPING コード¹³⁾ または SPAR コー

ド¹⁴⁾を用いて計算できる。詳細を第4章に示す。

なお、 π^{\pm} 中間子および μ^{\pm} 中間子に関しては、陽子データを補正して用いる。これらの詳細も第4章に示す。式(3.7)を用いれば、初期エネルギーが E_0 の荷電粒子の \bar{Q} が計算できる。その荷電粒子が組織T内で全エネルギー E_0 を連続エネルギー損失により失えば、組織Tの等価線量は式(3.9)すなわち

$$H_T = \bar{Q} \cdot D = \bar{Q}(E_0) \cdot E_0 / m \quad \text{----- (3.9)}$$

(但し m は組織 T の質量)

で計算できる。

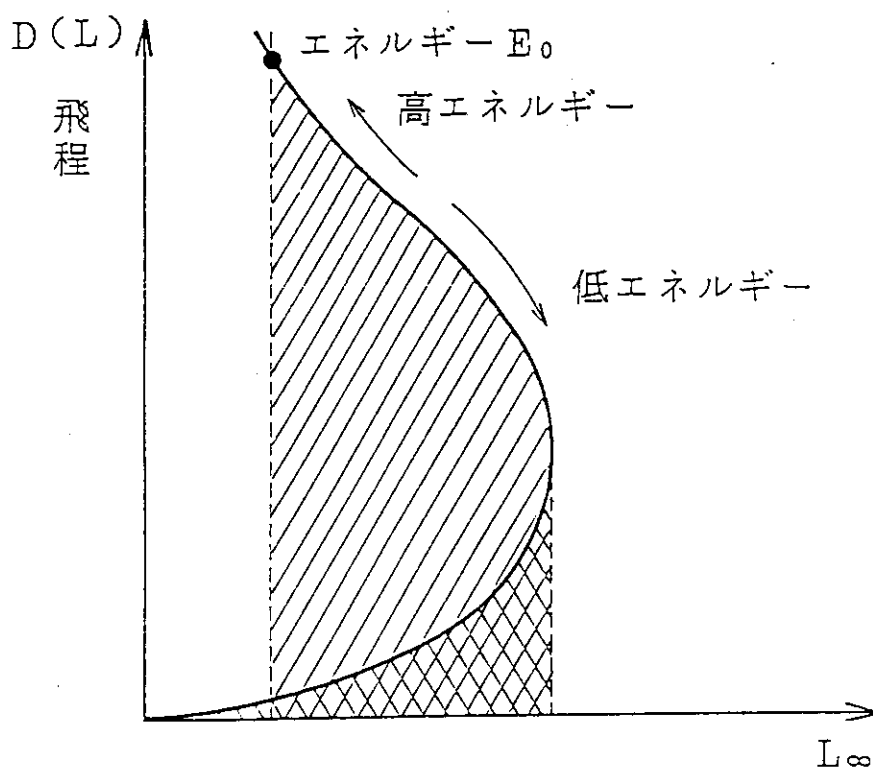


Fig. 3.1 Schematic relationships between L_{∞} and mean range of proton in water

荷電粒子が組織 T に入射して、種々の核反応又は制動放射などを生ずる場合は、次のように計算すればよい。すなわち荷電粒子がエネルギー E_0 で入射して、散乱や核反応等で不連続にエネルギーが変化したり吸収されたりする直前のエネルギー E_1 とすれば、このときまでの組織 T の等価線量は、

$$H_T = Q(E_0) \cdot E_0/m - Q(E_1) \cdot E_1/m \quad \text{-----} \quad (3.10)$$

で表わされる。従って組織 T 内における全荷電粒子による組織 T への等価線量（連続エネルギー損失により組織 T に与えられる等価線量）の合計値を求めれば、入射した荷電粒子により生ずる組織 T の等価線量が評価できる。

このようにして求めた組織又は器官の等価線量に ICRP60 で定義された組織荷重係数をかけて合計することにより、式(3.11)を用いて実効線量 E が求まる。

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T \quad \text{-----} \quad (3.11)$$

非荷電電離性粒子（たとえば中性子、光子）が入射した場合、組織内で散乱し又は核反応を起こして二次荷電粒子を発生させ、その荷電粒子によって組織 T に与えられるエネルギーとそのときの \bar{Q} を計算し、荷電粒子入射で行ったのと同様の計算を行えばよい。

4. 荷電粒子のエネルギーと L_∞ および \bar{Q} との関係

4.1 阻止能と L_∞ の関係

荷電粒子に対する物質の全線阻止能 (linear total stopping power) S は、線衝突阻止能 (linear collision stopping power) $S_{col}(=S_e)$ と線放射阻止能 (linear radiation stopping power) S_{rad} 、および原子核の反跳作用すなわち線核反跳阻止能 (linear nuclear recoil stopping power) S_{nucl} の合計である¹⁵⁾。但し、この中には原子核と核反応等の不弾性散乱 (non-elastic scattering) は含んでいない。

$$S = S_e + S_{rad} + S_{nucl} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

ICRU16¹⁶⁾, 33¹⁷⁾ および ICRP51 の定義によれば、

$$S_e = L_\infty \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

である。

ところで ICRP60 によれば、線質係数 Q は荷電粒子に対する水中の L_∞ の関数として、Fig.2.1 および Table 2.2 に示す値で表される。 S_e は、荷電粒子が原子・分子を励起またはイオン化して失うエネルギーを対象とした衝突阻止能である。原子核との相互作用によるエネルギー損失 S_{nucl} は L_∞ に含まれないことが重要である。

入射粒子が電子または陽電子のとき、水中の S_e の値は入射エネルギー 0.01 MeV ~ 1000 MeV について ICRU37¹²⁾ に示されている。電子は Møller 散乱により入射エネルギーの 1/2 のエネルギーを持つ電子を散乱する可能性があり、陽電子は Bhabha 散乱により入射エネルギーと等しいエネルギーの電子を散乱する可能性がある¹⁸⁾。これらの散乱で発生した電子のエネルギーは高いことがあるため、入射粒子の飛程近傍から離れてしまう δ 線となる可能性がある。このことは Rossi の線エネルギー付与¹⁹⁾ の定義、すなわち

- (a) 入射粒子の飛程の近傍にエネルギーを沈着すること。
- (b) 入射粒子の不連続な (discrete) エネルギー損失は含まないこと。

と矛盾する。すなわち、Rossi の定義に従えば、エネルギーの高い δ 線の発生は線質係数を評価するときの線エネルギー付与に含めるべきでないということになるが、このことは L_∞ と矛盾する。 δ 線によるエネルギー損失を考慮しなければ S_e は ICRU37 の値よりも小さくなる。しかし、ICRU37 の S_e を用いても、Fig. 2.1 より電子及び陽電子の線質係数 Q は 1.0 である。従ってエネルギーが 0.01 ~ 1000 MeV までの電子及び陽電子の Q は、1.0 として取り扱って良い。

しかし、入射粒子が陽子など L_∞ が 100keV/ μ m を越える荷電粒子の場合には、線質係数 Q または実効的な線質係数 \bar{Q} を決定する上で、荷電粒子の水中での衝突阻止能 L_∞ の精度良い評価が必

要となる。

そのために第4章では、以下の項目について検討する。

- (1) 現在入手可能なコード及びデータによる L_{∞} 値の比較。
- (2) 各コードおよびデータによる L_{∞} の \bar{Q} に与える影響について検討。
- (3) \bar{Q} 計算の際に使用するコードの検討。

4.2 L_{∞} 値の比較

4.2.1 比較するコード及びデータ

本研究では、荷電粒子の衝突阻止能に関して、以下のデータ及び3つの計算コードについて比較を行なった。

- (1) Janni のデータ¹¹⁾
- (2) RSTAN コード²⁰⁾
- (3) STOPPING コード¹³⁾
- (4) SPAR コード¹⁴⁾

上記コードを選択した理由として、コード（データ）としての汎用性（エネルギー領域・ターゲット元素の種類等）が高いこと、入手が容易であること、比較的良く知られているものであることを挙げる。

Janni のデータは、“Atomic and Nuclear Data Tables 27” に記載されている値である。陽子の 1keV~10GeV の阻止能の値が、92 の単体及び 63 の化合物に対して示されている。

RSTAN コードは、H. Bichsel により作られたもので*、ICRU46 で使用されている。21 種の入射粒子の 0.5MeV/amu 以上での衝突阻止能が、 $Z < 57$ の元素からなる化合物および単体に対して計算できる。他のコードに比べ、自由パラメータが1つのみであることが特徴として挙げられる。

STOPPING コードは J. F. Ziegler, J. P. Biersack, U. Littmark により作成されたものであり、あらゆる単体に対して 100MeV までの阻止能の計算が可能である。

SPAR コードは、T. W. Armstrong 及び K. C. Chandler によって作成されたものである。高エネルギー荷電粒子の輸送過程の計算に広く用いられている HETC コード²¹⁾内において、飛程の計算のためにサブルーチンとして使用されている。

*Bichsel の作成したコードには、RSTAN コードと RSHEV コードの2種類ある。 $Z \geq 57$ の重い元素から成る媒質については RSHEV コードを用いる必要があるが、本作業においては媒質が水に限定されているため、RSTAN コードの比較のみ行なう。

4.2.2 適用範囲

ここでは、計算可能な入射粒子・エネルギー領域・媒質の3点について、各コード及びデータの適用範囲を述べる。

(1) Janni のデータ

- 入射粒子 … 陽子のみ
- エネルギー領域 … $10^{-3} \sim 10^4$ [MeV]
- 媒質 … $1 \leq Z \leq 92$ の各元素に対するテーブル及び63種類の化合物（アセトン・水など）に対するテーブルが掲載されている。

(2) RSTAN コード

- 入射粒子 … 計算可能な入射粒子は以下の21種である。
p, d, t, ^3He , ^4He , ^6Li , ^7Li , ^9Be , ^{10}Be , ^{11}B , ^{12}C , ^{13}C , ^{14}N , ^{15}N , ^{16}O , ^{17}O , μ^\pm , π^\pm , \bar{p}
- エネルギー領域 … 一般に計算精度が $\pm 2\%$ 以内で保証されているエネルギー領域は $0.5 \sim 10^3$ [MeV/amu] である。入射エネルギーが低い場合、誤差が10%を越えることもある。
- 媒質 … 媒質が $Z < 57$ の元素から成る単体・分子・化合物について計算可能である。分子または化合物を構成する元素の種類は9個までである。

(3) STOPPING コード

- 入射粒子 … π^\pm ・ μ^\pm を除く
- エネルギー領域 … $10^{-13} \sim 10^2$ [MeV/amu]
- 媒質 … 単体のみ計算可能である。分子や化合物の計算はできない。但し、単体で得られた結果について Bragg 和則を用いれば、化合物の計算も可能である。

(4) SPAR コード

- 入射粒子 … π 中間子・ μ 粒子・陽子・質量数2以上の重イオン
- エネルギー領域 … $0 \sim 10^6$ [MeV]
- 媒質 … 気体を除く。水素以外の媒質構成元素数は10以内である。

以上の結果を Table 4.1 にまとめる。

4.2.3 衝突阻止能の理論

各コード及びデータの計算方法の詳細を述べる前に、衝突阻止能 S_e の一般的な計算方法について述べる。

(1) Bethe の公式

速度 v ・電荷 ze の入射荷電粒子に対する衝突阻止能 S_e [MeV・cm²/g] は、Bethe の式より以下のように表せる²²⁾。

$$S_e = \frac{0.30708}{\beta^2} z^2 \frac{Z}{A} L \dots\dots\dots (4.3)$$

$$L = L_0(\beta) = \ln \left[\frac{2mc^2\beta^2}{1-\beta^2} \right] - \beta^2 - \ln I - \frac{C(\beta)}{Z} - \frac{\delta}{2} \dots\dots\dots (4.4)$$

- L : 媒質電子 1 個あたりの衝突数
- $\beta = v/c = \{(E/Mc^2 + 1)^2 - 1\}^{1/2} / (E/Mc^2 + 1)$
- A : 媒質元素の質量数
- Z : 媒質元素の原子番号
- m : 電子の静止質量
- c : 光速

式 (4.4) の第 1 項・第 2 項は入射荷電粒子と電子との相対論的な相互作用の第 1 次 Born 近似による記述である。第 1 項・第 2 項は $\beta \rightarrow 0$ で発散するため、Bethe の式は低エネルギーでは使えない。第 3 項以降は Born 近似に対する補正項を表す。 I が束縛電子のイオン化ポテンシャル、 $C(\beta)$ は電子が束縛されていることによる殻補正、 δ は密度効果である。

(2) Lindhard の式

入射粒子のエネルギーが低い場合、電子との相互作用を非相対論的に取り扱うことができる。この時衝突阻止能 S_e は、Lindhard の式²³⁾より

$$S_e = k\sqrt{E} \dots\dots\dots (4.5)$$

と表せる。ここで、 k は、定数である。

(3) Bragg 和則

軌道電子の束縛エネルギーは、入射粒子との相互作用に比べ十分小さいため、化合物・分子等に対する S_e は、その各構成元素の S_e の和で表すことができる。これを Bragg 和則という²⁴⁾。 S_e を 1 分子あたりの衝突阻止能とすると、 L_∞ は Bragg 和則を用いて、

$$L_{\infty} = S_{H_2O}^e = S_{H_2}^e + \frac{1}{2}S_{O_2}^e \dots\dots\dots (4.6)$$

と表せる。

4.2.4 各コード及びデータの計算方法

ここでは、各コード及びデータの計算方法の詳細について述べる。また、以下に述べる各コードの計算方法を、入射粒子のエネルギーごとに比較したものを Fig. 4.1 に示す。

(1) Janni のデータ

陽子に対する 1keV~10GeV の阻止能の値が示されている。記載されているデータは核反跳阻止能を含む値であり、それぞれの寄与は分離されていない。

衝突阻止能は以下の3つのエネルギー領域に分けて計算されている。

(a) $E \geq 1MeV$

Bethe の式 (4.4) に、第2次 Born 近似による項の一部を付け加えた以下の式を用いる。

$$S = \frac{0.30708}{\beta^2} z^2 \frac{Z}{A} \left\{ \ln \left[\frac{2mc^2\beta^2}{1-\beta^2} \right] - \beta^2 - \ln I - \frac{\bar{C}}{Z} - \frac{\delta}{2} + \frac{\pi\alpha z\beta}{2} \right\} \dots\dots (4.7)$$

密度効果 δ には、Steinheimer の式²⁵⁾を用いている。

イオン化ポテンシャル I 及び 殻補正 C で、実験値に対する補正を行なっている。

(b) $20 \text{ keV} \leq E \leq 1 \text{ MeV}$

実験値に、5 次の球関数による最小2乗法を用いて合わせている。

(c) $1\text{keV} \leq E \leq 20\text{keV}$

次式で表される Lindhard の式を用いている。

$$S \propto E^{\alpha} \dots\dots\dots (4.8)$$

ここで、 α は、

$$\alpha = \begin{cases} \frac{0.5(E_{20} - E) + \alpha_{20}(E - E_5)}{E_{20} - E_5} & \text{for } 5\text{keV} \leq E \leq 20\text{keV} \\ 0.5 & \text{for } 1\text{keV} \leq E < 5\text{keV} \end{cases} \dots (4.9)$$

$$E_{20} = 20\text{keV}, \quad E_5 = 5\text{keV}$$

α_{20} は、境界条件により決まる α の20keVでの値である。

(2) RSTAN コード

Bethe の式のみを基に計算する。そのため、計算可能なエネルギー領域の下限が約 1 MeV/amu と、他のものに比べて高くなっている。式 (4.4) で表される Bethe の衝突阻止

能 $L_0(\beta)$ に、低エネルギー領域での補正として後述する Barkas 効果 L_1 および Bloch の項 L_2 を式 (4.4) に加えた以下の式を用いている²²⁾。

$$L \equiv L_0(\beta) + zL_1(\beta) + L_2(\beta) \quad \dots\dots\dots (4.10)$$

また、化合物に対しては Bragg 和則を用いない。、 A, Z, I をそれぞれ化合物の全質量数, 全電荷数, 化合物のイオン化ポテンシャルとして計算する。以下で、RSTAN コード内で用いられている各補正項及びパラメータについて述べる。

Barkas 効果・Bloch 項²⁶⁾

Barkas 効果 L_1 は、第2次 Born 近似より求められる $(z/\beta)^3$ の補正項である。 $x = 18787\beta^2/Z$ を用いて以下のように表せる。

$$L_1 = \frac{F(b/x^{1/2})}{Z^{1/2}x^{3/2}} \quad \dots\dots\dots (4.11)$$

F は、文献 27 のテーブル化された値を用いる。 b は、自由パラメータである。 H_2 分子に対しては $b = 0.6$ 、他の媒質に対しては $b = 1.8$ とするのが、もっとも実験値を良く再現する²²⁾。なお、式中で用いられているパラメータは、 b のみである。

$(z/\beta)^4$ 以上の高次の補正を表すのが Bloch 項である。 L_2 は、 $y = z\alpha/\beta$ (α : 微細構造定数) を用いて、以下のように表すことができる。

$$L_2(y) = -y^2 \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j(j^2 + y^2)} \quad \dots\dots\dots (4.12)$$

上式から、 L_2 が常に負であることがわかる。 $y^2 < 1$ の場合は 0.4 % の範囲内で以下の様に近似することができる。

$$L_2(y) \approx -y^2 [1.20206 - y^2(1.042 - 0.8549y^2 + 0.343y^4)] \quad \dots\dots\dots (4.13)$$

コード内では、 L_2 として式 (4.13) を用いている。

イオン化エネルギー I 束縛電子の平均励起エネルギー I には直接実験値を代入する。実験値がない場合は、Bragg 和則により求める。その場合 $\ln I$ は、

$$\ln I = \frac{\sum_i n_i Z_i \ln I_i}{\sum_i n_i Z_i} \quad \dots\dots\dots (4.14)$$

となる。ここで、 n_i は標的要素 i の一分子当たりの個数、 Z_i は i の原子番号、 I_i は i のイオン化ポテンシャルである。但し上式で求めた I の値には実験値との誤差が 20 % 程度生じるため、注意が必要である。

殻補正 殻補正 C には Walske^{28,29)}のものを用いる。

電荷減少 入射重イオンの有効電荷は、速度が遅くなるにつれ ze からずれる。これは、電子との相互作用により重イオンが媒質電子を剥ぎとり、中性化するためである。この電荷減少 (Charge Reduction) の効果を、原子番号が2以上の重イオンに対してとり入れる。

有効電荷を z^*e とし、 z^* と z との比を

$$\frac{z^*}{z} = 1 - \exp(-1.316x + 0.1112x^2 - 0.0650x^3) \dots\dots\dots(4.15)$$

とする³⁰⁾。ここで、 $x = 100\beta/z^{2/3}$ である。上式は $x > 0.27$ の場合に有効である。

(3) STOPPING コード

Lindhard の公式に基づき、実験的な補正を行なっている。ここで用いられている Lindhard の公式は、温度 0°K のプラズマ中の自由電子と入射イオンとの非相対論的な相互作用を記述したもので、その衝突阻止能は以下のように表せる。

$$S_e = \int I(v, \rho) (z^*(v))^2 \rho dV \dots\dots\dots(4.16)$$

I : 相互作用関数

z^* : 入射イオンの有効電荷数

ρ : 電子の密度

式 (4.16) による S_e の値と実験値との誤差は、約 10~20 % である³²⁾。Ziegler らは、式 (4.16) をもとに実験値に合うようなフィッティング関数を求め、コード内ではそれを使用している。入射粒子が水素・He イオン・原子番号3以上の重イオンの場合について、計算方法の詳細を以下に示す。

(a) 水素イオンの場合

(i) $E \geq 25\text{keV}/\text{amu}$ … 直接フィッティング関数を用いる。

(ii) $E \leq 25\text{keV}/\text{amu}$ … 媒質元素の原子番号 $Z \leq 6$ で $S_H^e \propto v^{0.9}$, $Z > 6$ で $S_H^e \propto \sqrt{v}$

(b) He イオンの場合

(i) $E \geq 1\text{keV}/\text{amu}$ … $S_{He}^e = z_{He}^2 \gamma_{He}^2 S_H^e$

(ii) $E \leq 1\text{keV}/\text{amu}$ … $S_{He}^e \propto v$

ここで、 S_H^e は水素イオンに対する衝突阻止能である。 γ は有効比電荷で、 z^* と z の比を表す実験的なフィッティング関数である。He に対しては、 S_H と S_{He} の実験値を用いて γ_{He} を以下の関数で表す。

$$\gamma_{He} = 1 - \exp \left[- \sum_{i=0}^5 a_i (\ln E)^i \right] \dots\dots\dots (4.17)$$

係数 $a_0 \sim a_5$ はそれぞれ、0.2865, 0.1266, -0.01429, 0.002042, -0.01135, 0.001475 である。

なお Ziegler らは、He イオンに対して実験値からのフィッティング関数を直接的に求めている^{8,1)}。式 (4.17) 等を用いずに、直接その評価式を使用することも可能である。STOPPING コード内では標的が固体か気体かの区別をしないが、文献 31では気体・固体それぞれに対し評価式の係数が用意されている。

(c) 原子番号 3 以上の重イオンの場合

(i) $E \leq v_F/z^{2/3} \dots S_{HI}^e \propto v^\alpha$

(ii) $E \geq v_F/z^{2/3} \dots S_{HI}^e = z_{HI}^2 \gamma_{HI}^2 S_H^e$

v_F は、電子のフェルミ速度を表す。 α は入射重イオン及び標的要素に依存する。入射粒子の原子番号 $z \leq 19$ の場合または標的の原子番号 $Z = 6, 14, 32$ の場合は $\alpha = 0.75$ で、それ以外では $\alpha = 1$ である。 γ_{HI} には、Brand-Kitagawa 理論^{33,34)}を用いる。

(4) SPAR コード

SPAR コードは陽子・質量数 2 以上の重イオン・ π 中間子・ μ 粒子について計算することができる。以下では、陽子の場合とその他の粒子の場合に分けて計算方法を示す。

(a) 陽子の場合入射粒子の速度 β により、以下に示す 3 つの範囲に分けて計算する。

(i) $\beta > 0.07z^{2/3}$

$\beta = 0.07z^{2/3}$ は、陽子の場合約 2.3MeV である。ここでは、Bethe の式 (4.3)・(4.4) を用いて計算する。すなわち、

$$S = \frac{0.30708}{\beta^2} z^2 \frac{Z}{A} \left\{ \ln \left[\frac{2mc^2\beta^2}{1-\beta^2} \right] - \beta^2 - \ln I - \frac{\bar{C}}{Z} - \frac{\delta}{2} \right\} \dots\dots (4.18)$$

である。イオン化ポテンシャル I は、Bragg 和則を用い、式 (4.14) より求める。密度効果には、Sternheimer の式²⁵⁾の近似を用いる。その表式は、

$$\delta = \ln \frac{\alpha n \eta^2}{I^2} - 1 \dots\dots\dots (4.19)$$

ここで、 h は、プランク定数である。 α, η は、

$$\alpha = \frac{h^2 c^2 e^2}{\pi m c^2} \dots\dots\dots (4.20)$$

$$\eta^2 = \frac{E}{Mc^2} \left(\frac{E}{Mc^2} + 2 \right) \dots\dots\dots (4.21)$$

である。上式において $\bar{\delta}$ が負になる場合、 $\bar{\delta} = 0$ とする。

殻補正には以下の式を用いる。

- $E > 8\text{MeV}$ の場合 … Barkas および Berger の式^{3,5)}を用いる。
- $E \leq 8\text{MeV}$ の場合 … 以下に示す Lindhard と Sharff の方法^{3,6)}を用いる。

$$\overline{\left(\frac{C}{Z}\right)} = \ln \left[\frac{2mc^2\beta^2}{I} \right] - L(x) \quad \dots\dots\dots (4.22)$$

$x = (137)^2\beta^2/\bar{Z}$ である。殻補正を上式のように定義し、 $L(x)$ で実験値からの補正を行なう。 $L(x)$ は、ICRU16 の水中の陽子の阻止能の値¹⁶⁾に合わせた $L_1(x)$ と、ICRU16 のアルミニウム中の陽子の阻止能の値¹⁶⁾に合わせた $L_2(x)$ を使い、 $\bar{Z} \leq 3.33$ の場合には L_1 を、 $\bar{Z} \geq 13$ の場合には L_2 を用いる。 $3.33 < \bar{Z} < 13$ の場合には、 Z で L_1 と L_2 を補間する。

(ii) $0.0046z^{1/3} < \beta \leq 0.07z^{2/3}$

$\beta = 0.0046z^{1/3}$ は、陽子の場合約 10^{-2}MeV である。ここでは式(4.18)に電荷減少の効果を加味する。すなわち、式(4.18)における陽子の電荷数 z を実効電荷数 z^* に置き換え、 z^* には、Barkas の実験的な関係式^{3,7)}

$$z^* = z \left[1 - \exp \left(-125\beta z^{-2/3} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (4.23)$$

を用いる。

(iii) $0 \leq \beta \leq 0.0046z^{1/3}$

Lindhard の式

$$S = k\sqrt{E} \quad \dots\dots\dots (4.24)$$

を用いる。 k は境界条件で決める。

(b) その他の粒子

陽子以外の粒子の衝突阻止能は、陽子の衝突阻止能 S_p^e を質量および実効電荷で補正することにより求める。すなわち、

$$S_i^e(E, z_i, m_i) = \frac{z_i^*}{z_p^*} S_p^e(E, m_p/m_i) \quad \dots\dots\dots (4.25)$$

である。ここで、 z_i は入射粒子の電荷数、 m_i はその質量、 z_p^* 及び z_i^* は式(4.23)で表される実効電荷である。

4.2.5 計算結果

ここでは、各コード及びデータによる陽子・ α 粒子・酸素の水中での衝突阻止能 L_{∞} の計算結果について比較する。

(1) 陽子について

L_{∞} の計算を RSTAN コード・STOPPING コード・SPAR コードを用いて行なった。各コードによる計算結果および Janni のデータ及び Reynolds^{3,8)}らの実験値を Fig.4.2 に示す。Reynolds らの実験は水蒸気に対するものである。SPAR コードでは、ICRU16 の水中の陽子の阻止能に合うようにパラメータ調整を行なっているため、その計算値は ICRU16 の記載値と一致する。

数百 keV 以下のエネルギー領域においてコードによる差が大きくなっている。1MeV 以上の高エネルギー領域においては、各コードによる差は 10 % 程度以内である。

Fig.4.3 に Janni のデータを基準として規格化した L_{∞} の値を示す。実線は Janni のデータの誤差範囲を表す。RSTAN コードは、Janni の値と誤差の範囲内で一致する。STOPPING コードは、全体的に Janni とのずれが大きい。SPAR コード (ICRU16) は、数 MeV 以上の高エネルギー領域において、Janni および RSTAN コードと近い値をとる。また、 10^{-1} MeV 以下の低エネルギー領域では、誤差の範囲内で Janni のデータと一致し、Reynolds らの実験値の誤差の範囲内でもある。

(2) α 粒子について

RSTAN コード・SPAR コード・STOPPING コード及び Ziegler の評価式を用いて行なった計算結果を Thwaites^{9,9)}, Matteson ら^{4,10)}の実験値と合わせて Fig.4.4 に示す。Thwaites の実験は液体の水に対するもので、Matteson らの実験は氷に対するものである。また、Ziegler の評価式では、各標的要素に対して気体・固体の係数が与えられているが、ここでは固体に対する係数を用いた。

数 MeV 以下の低エネルギー領域において、各コードによる差が生じている。特に数百 keV 以下では、陽子の場合より各コードによる差が大きい。

Fig.4.5,4.6 に実験値と計算値の比を示す。Fig.4.5 では、Thwaites の実験値を用いて計算値を規格化し、Fig.4.6 では Matteson らの実験値を用いて規格化している。

10^{-1} ~10 MeV では、STOPPING コードが最も実験値に近いことがわかる。SPAR コードは、1MeV 程度以上では実験値とのずれが 5 % 未満であるが、それ以下のエネルギー領域では、実験値とのずれが大きい。Ziegler の評価式は、実験値に対して 10 % 程度低い値をと

る。より多くの実験値から直接フィッティング関数を求めている Ziegler の評価式が、他のコードに比べ実験値と 10 % もずれるのは、固体の H₂O に対する衝突阻止能の評価が実験値から直接行なわれたものではないためである。

(3) 酸素について

STOPPING コード・SPAR コード・RSTAN コードによる酸素の L_{∞} を Fig.4.7 に示す。数十 MeV 以上の高エネルギー領域では、どのコードによる値もほとんど一致する。1GeV 以上で、STOPPING コードによる値が、他より若干小さくなっている。一方数十 MeV 以下ではコードによる差が大きく、100keV 以下では 2 倍近くになっている。しかし、これらを実験データは今のところない。

4.3 実効的な線質係数 \bar{Q} への影響

ここでは、各コードによる L_{∞} の相違が、線質係数 \bar{Q} にどのような影響を与えるかを検討する。

4.3.1 線質係数の定義

ICRP60 による線質係数 Q の定義は以下である。

$$Q(L_{\infty}) = \begin{cases} 1, & \text{for } L_{\infty} < 100 \quad [\text{MeV/cm}] \\ 0.032L_{\infty} - 0.22, & \text{for } 100 \leq L_{\infty} \leq 1000 \quad [\text{MeV/cm}] \\ 300/\sqrt{L_{\infty}/10}, & \text{for } L_{\infty} > 1000 \quad [\text{MeV/cm}] \end{cases} \dots (4.26)$$

入射エネルギー E_0 に対する実効的な線質係数 \bar{Q} は、

$$\bar{Q} = \frac{1}{E_0} \int_0^{E_0} Q(L) \frac{dE}{dL} dL \dots (4.27)$$

である。

4.3.2 \bar{Q} 計算のためのコードの条件

\bar{Q} 計算に際しては、以下の入射粒子・エネルギー範囲・媒質での衝突阻止能の値が必要である。

(1) 入射粒子

- (a) μ^{\pm}, π^{\pm}
- (b) 陽子
- (c) 質量数 2 以上の重イオン

(2) エネルギー範囲

- (a) μ^\pm, π^\pm : 0 ~ 2.5 GeV
- (b) 陽子 : 0 ~ 20 GeV
- (c) 重イオン : 0 ~ 1.0 GeV,

(3) 媒質 : 水

Janni のデータは、1keV 以下の値がないこと・データに核反跳阻止能が含まれていることから、 \bar{Q} 計算には用いることができない。また、RSTAN コードは 0.5MeV/amu 以下の低エネルギー領域の計算ができないこと・入射重イオンの数が限られていることから、やはり、 \bar{Q} 計算には適さない。そこで、以下では SPAR コードと STOPPING コードの比較を行なう。

4.3.3 線質係数への影響の検討

各コードによる L_∞ 値を用いて式 (4.27) から求めた \bar{Q} を、Fig.4.8 (陽子) , Fig.4.9 (α 粒子) , Fig.4.10 (酸素) に示す。

(1) 陽子について

SPAR コード及び STOPPING コードによる \bar{Q} の値を Fig.4.8 に示す。2つのコードによる L_∞ のずれが、全エネルギー範囲で \bar{Q} に影響している。特に \bar{Q} のピーク (約 0.1MeV) での値の差は、25 % 程度もある。

(2) α 粒子について

SPAR コード・STOPPING コード・Ziegler の評価式による \bar{Q} の値を Fig.4.9 に示す。SPAR コードと STOPPING コードによる \bar{Q} の低エネルギーでのピーク位置 (約 0.1MeV) に大きなずれがある。

(3) 酸素について

SPAR コード及び STOPPING コードによる \bar{Q} の値を、Fig.4.10 に示す。2つのコードによる \bar{Q} の低エネルギー側のピーク位置 (10keV 近傍) が、ずれている。数十 MeV 以上の高エネルギー領域での各コードによる微小な違いは、 \bar{Q} にほとんど反映しない。

以上のことから、2つのコードにおける L_∞ のずれが、低エネルギーの \bar{Q} について特に大きな影響を与えることが分かる。一方入射エネルギーが 10^{-4} MeV のオーダー以下の場合、 L_∞ の差が \bar{Q} に反映していない。これは、式 (4.26) より、 L_∞ が 100[MeV/cm] 以下の場合、 Q は L に関係なく 1 となるためである。

4.4 \bar{Q} 計算に使用するコード

以上の検討結果から、 \bar{Q} 計算の際に用いるコードを以下のように決める。

- (1) 陽子… SPAR コードの値 (ICRU16) を用いる。

SPAR コードによる ICRU16 の値は、1keV から 10GeV のエネルギー領域において、ほぼ Janni のデータの誤差範囲内にあり、また、実験値の誤差内にも含まれている。ICRU46 で用いられている RSTAN コードの値とも近い。

一方 STOPPING コードによる値は、Janni のデータ及び実験値とのずれが大きい。よって、陽子の場合 STOPPING コードよりは ICRU16 の値の方がふさわしいと云える。その理由は

- (2) その他の重イオン… 10MeV/amu 以上で SPAR コード、それ以下で STOPPING コードを用いる。

比較できる実験値があるのは α 粒子のみである。そこで、 α 粒子に対する検討結果を他の重イオンに対しても適用することとした。

α 粒子に対する L_∞ では、数 MeV 以下の低エネルギーにおいて STOPPING コードによる値が一番実験値に近い。これは、STOPPING コード内の計算式が、SPAR よりも多くの実験値に基づいているためである。一方、STOPPING コードの用いた Lindhard の式は、低エネルギーでの相互作用を記述する式であるため、高エネルギー領域では Bethe の式に基づいた SPAR コードの値の方がふさわしい。コードの切替をするエネルギーを 10MeV/amu としたのは、 α 粒子・酸素において 2 つのコードの L_∞ が比較的近い値をとり、2 者の \bar{Q} の差が小さいためである。

- (3) μ, π … 陽子の L_∞ の質量補正を行なう。具体的な方法を以下に示す。

入射粒子が π 中間子・ μ 粒子の場合、式 (4.28) (4.29) を用いて計算する。⁴¹⁾

$$S_\pi^e(E) = S_p^e(E \cdot m_p/m_\pi) \dots\dots\dots(4.28)$$

$$S_\mu^e(E) = S_p^e(E \cdot m_p/m_\mu) \dots\dots\dots(4.29)$$

ここで、 m_p, m_π, m_μ はそれぞれ陽子、 π 中間子、 μ 粒子の静止質量、 S_p^e, S_π^e, S_μ^e はその衝突阻止能である。

計算に用いる静止質量の値はそれぞれ

m_p	= 938.272	[MeV]
m_π	= 139.568	[MeV]
m_μ	= 105.65839	[MeV]

である。

Table 4.1 Comparison of codes and data

	Janni (data)	RSTAN code	STOPPING code	SPAR code
Particle	p	$\pi^{\pm}, \mu^{\pm}, p, \bar{p}, d, t, {}^3\text{He}, {}^4\text{He}, {}^5\text{Li}, {}^6\text{Li}, {}^9\text{Be}, {}^{10}\text{Be}, {}^{11}\text{B}, {}^{12}\text{C}, {}^{13}\text{C}, {}^{14}\text{N}, {}^{15}\text{N}, {}^{16}\text{O}, {}^{17}\text{O}$	Except π, μ	π^{\pm}, μ^{\pm}, p Heavy Ions ($A \geq 2$)
Energy Range [MeV/amu]	$10^{-3} \sim 10^4$	$0.5 \sim 10^3$	$10^{-13} \sim 10^2$	$0 \sim 10^6$
Target	Elements $1 \leq Z \leq 92$ 63 Compounds	Elements and Compounds $1 \leq Z < 57$	Except Gases	any elemental solids
Bragg rule	use	not use	usc	possible to use

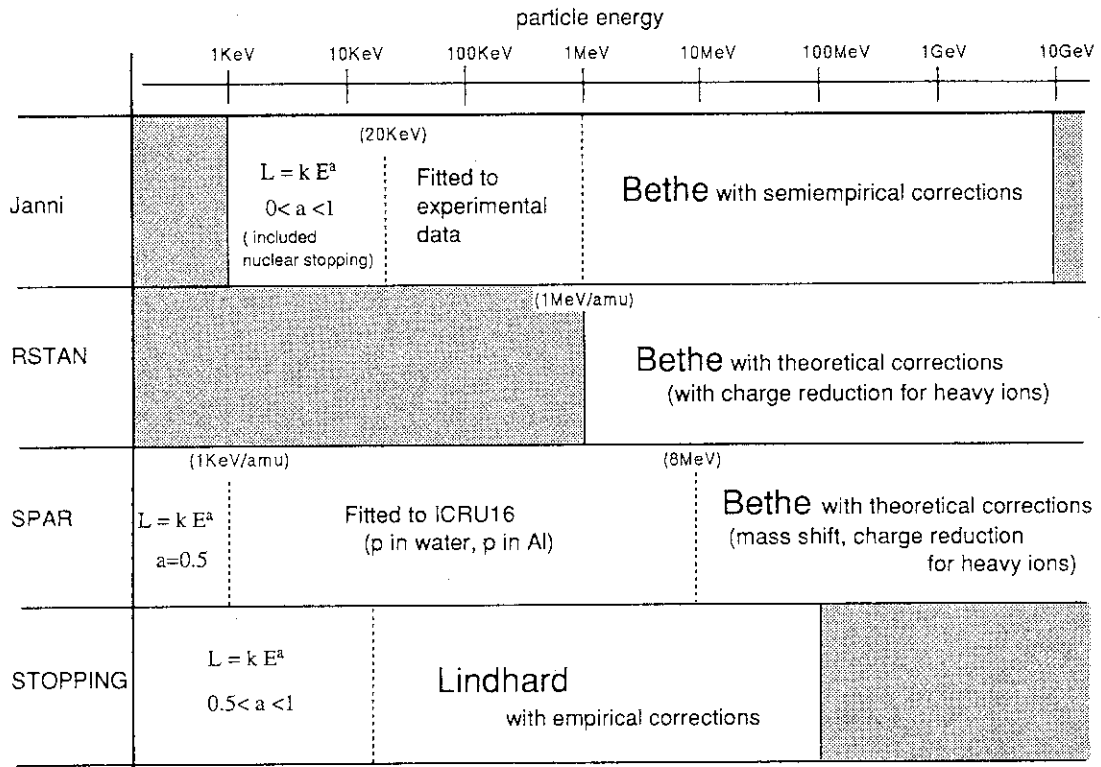


Fig. 4.1 Comparison of stopping power calculation methods with codes and data. The gray region represents out of the energy of calculation.

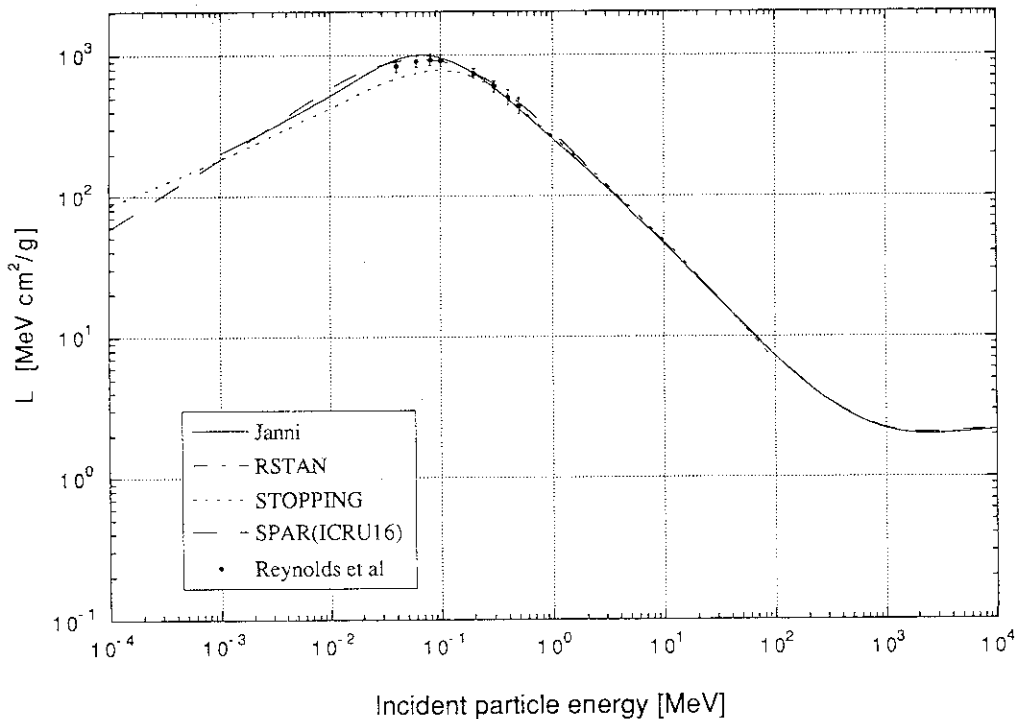


Fig. 4.2 Collision stopping power of proton in water. Lines are calculated by Janni, RSTAN code, STOPPING code and SPAR code. The data of SPAR represent the value of ICRU16. The dots with error bar represent the experimental results of water vapor measured by Reynolds et al.

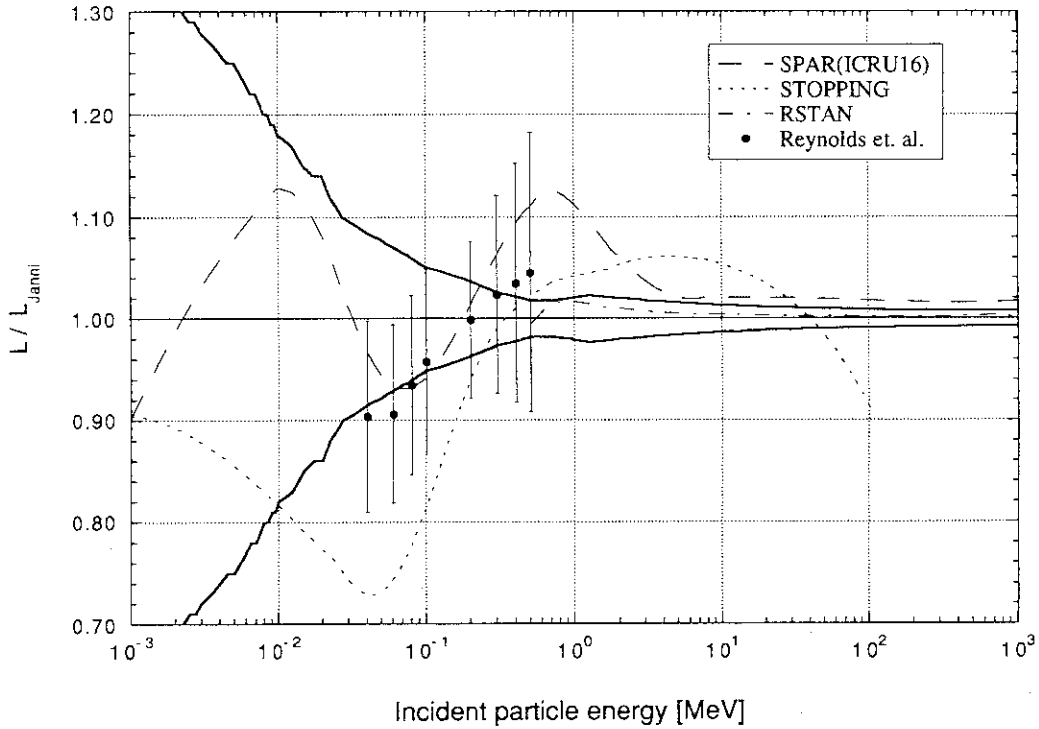


Fig. 4.3 Collision stopping power normalized by the data of Janni. Solid lines represent errors of Janni. The dots represent the experimental results of water vapor measured by Reynolds et al.

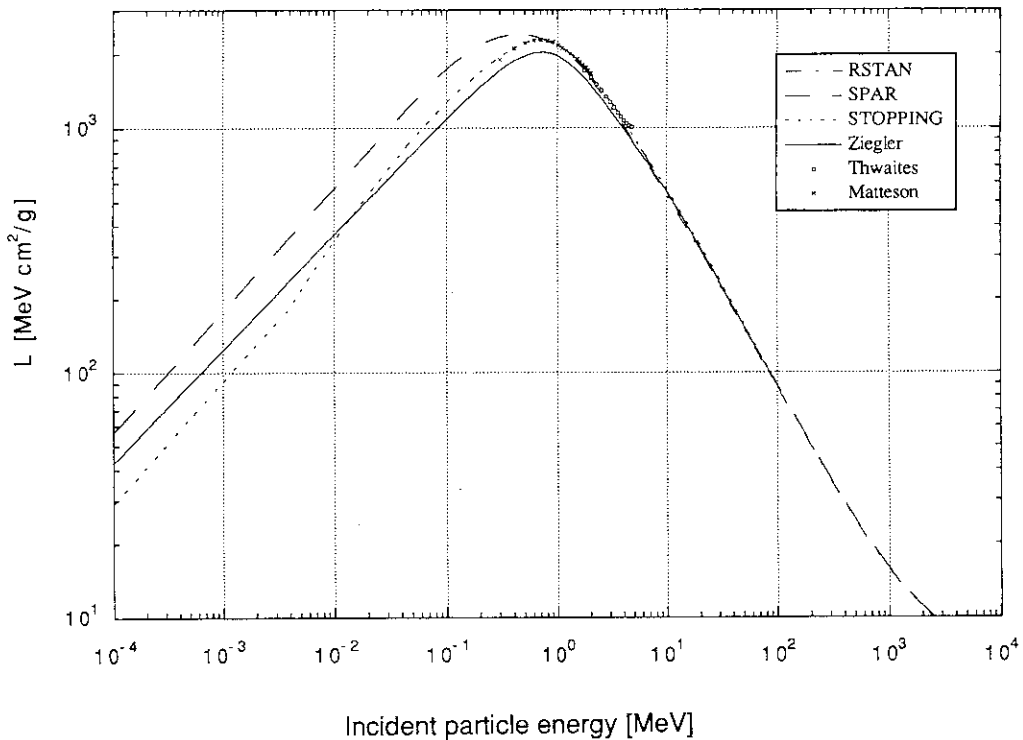


Fig. 4.4 Collision stopping power of alpha particle in water. Solid line is calculated by means of ref. 14. Other lines are computed by RSTAN, STOPPING and SPAR code. \square is the experimental results of liquid water measured by Thwaites. \times is those of ice measured by Matteson et al.

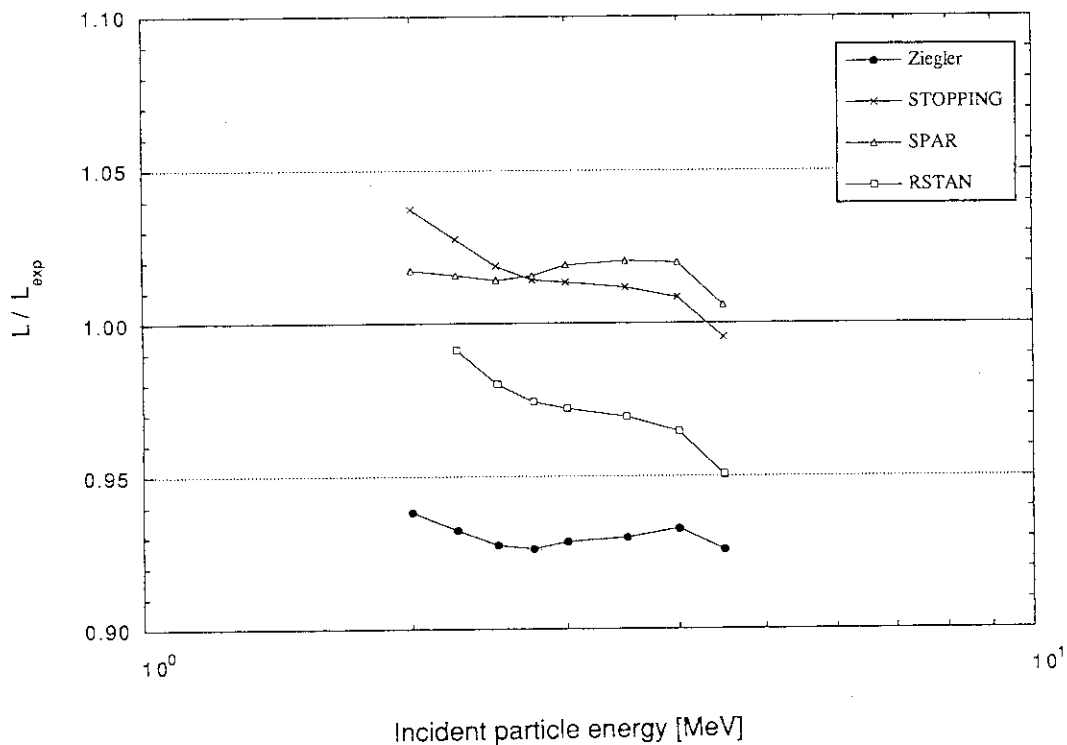


Fig. 4.5 The ratio of experimental to calculated collision stopping power. The experimental values are given by Thwaites.

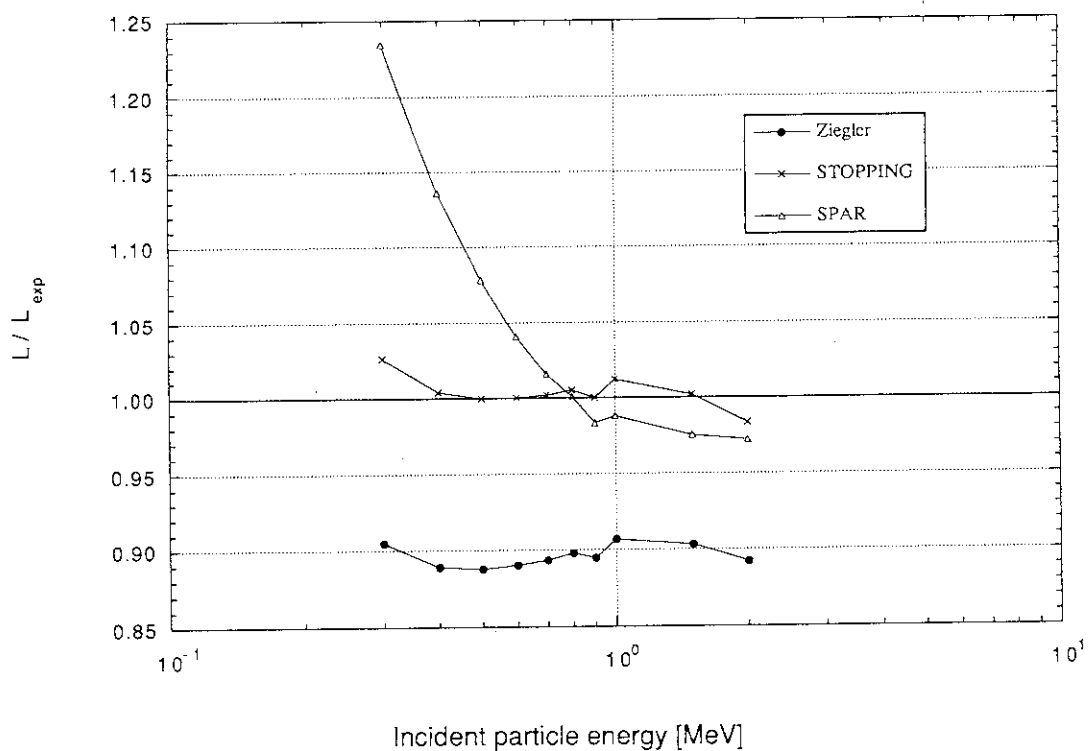


Fig. 4.6 The ratio of experimental to calculated collision stopping power. The experimental values are given by Matteson et al.

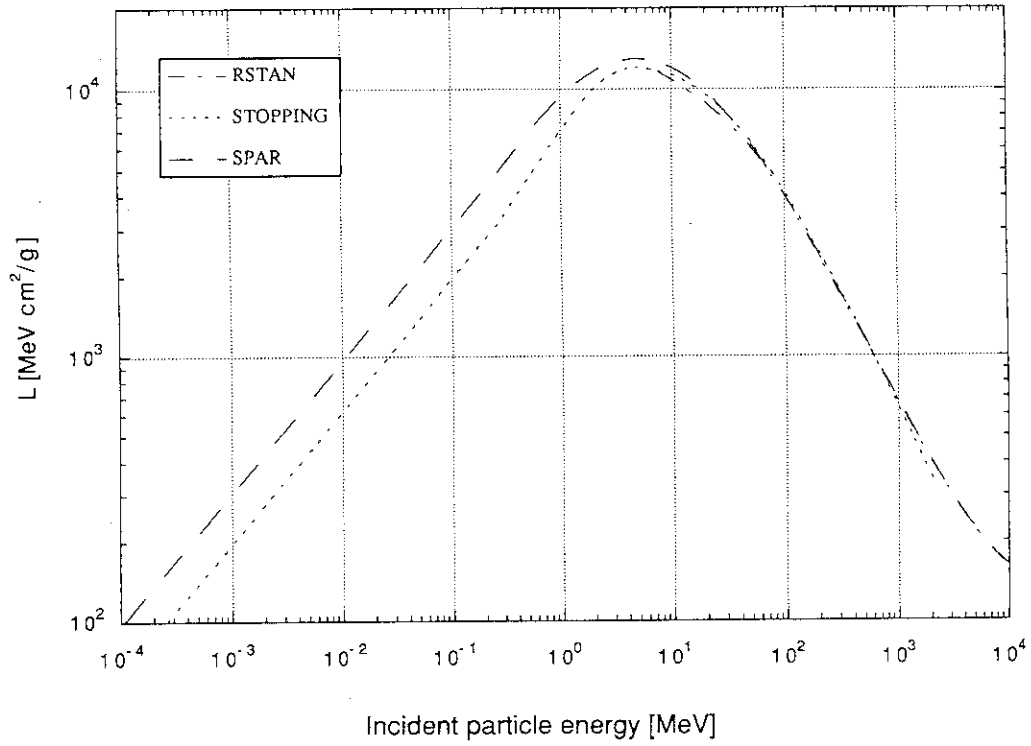


Fig. 4.7 Collision stopping power of oxygen in water calculated by RSTAN, STOPPING and SPAR code.

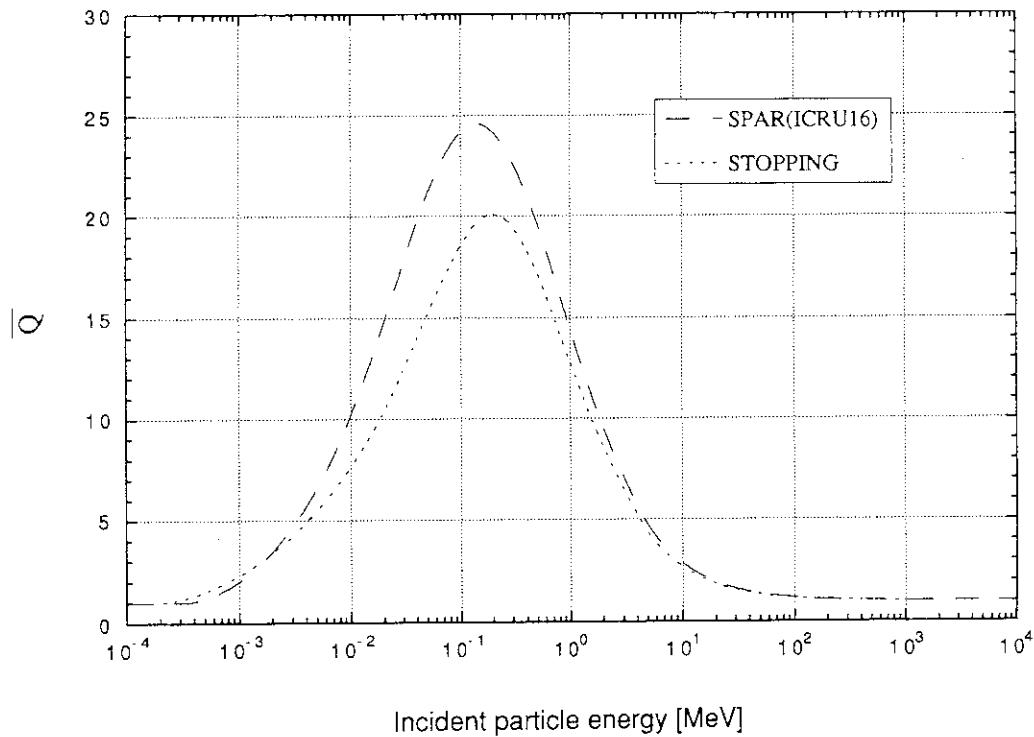


Fig. 4.8 Effective quality factor of proton calculated by using SPAR and STOPPING code.

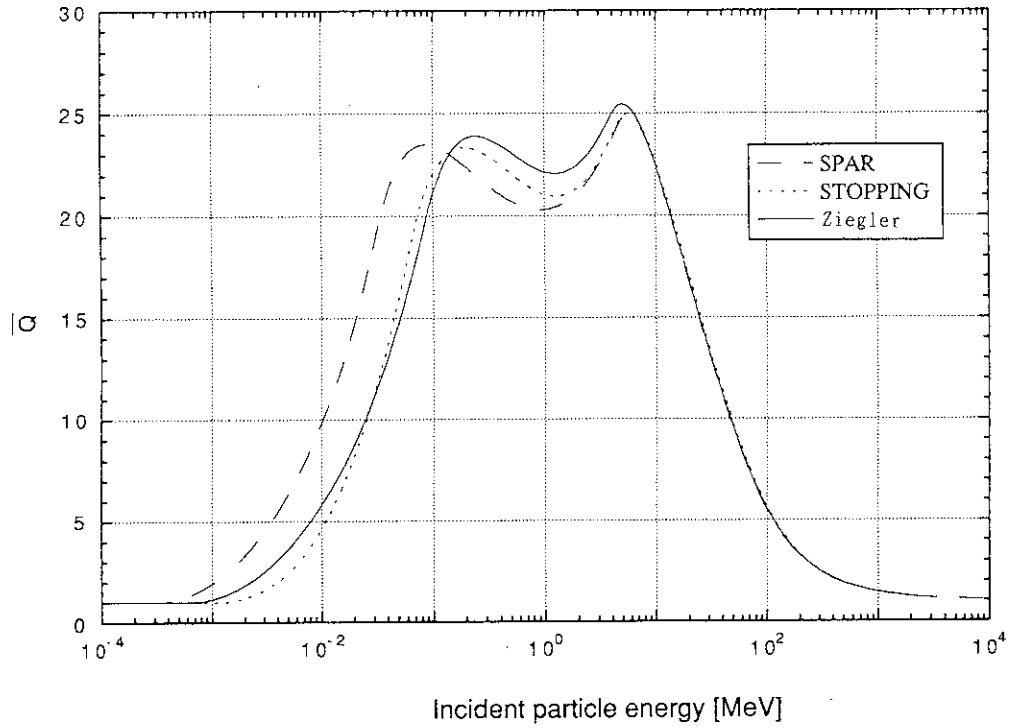


Fig. 4.9 Effective quality factor of alpha particle calculated by using SPAR, STOPPING and the method by Ziegler (ref. 31).

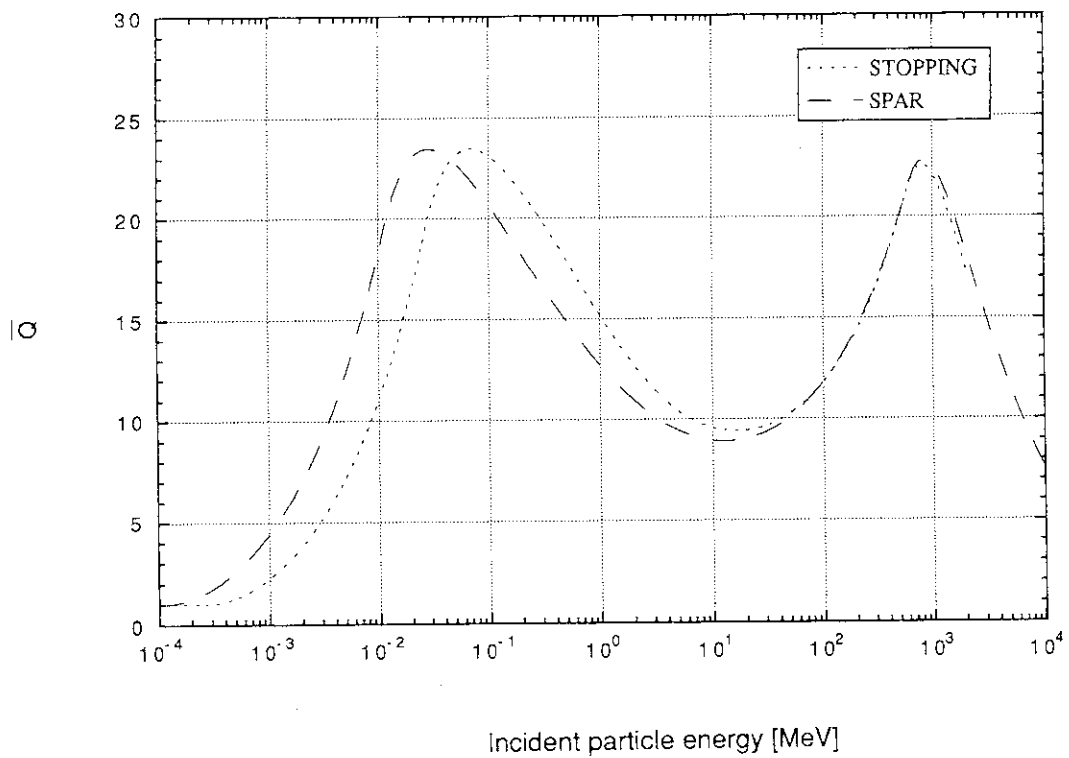


Fig. 4.10 Effective quality factor of oxygen calculated by using SPAR and STOPPING code.

5. 高エネルギー荷電粒子の \bar{Q} 評価

第5章では、第4章の考え方に基づいて算定評価した水中における衝突阻止能、線質係数 Q および、それらから導かれた実効的な線質係数 \bar{Q} を示す。

第4章で検討した水中における荷電粒子の衝突阻止能の計算方法を簡単にまとめると以下のとおりである。

- (1) 陽子、 π 中間子、 μ 中間子の衝突阻止能はSPARコード¹⁴⁾を用いて計算する。
- (2) その他の荷電粒子については、低エネルギー部分(10MeV/amu以下)をSTOPPINGコード¹³⁾、高エネルギー部分(10MeV/amu以上)をSPARコードを用いて計算する。

上記の方法に基づいて計算した6種類の荷電粒子すなわち陽子(H-1)、 π 中間子、 ^4He 、 ^{12}C 、 ^{16}O 、 ^{56}Fe の水中の質量阻止能を各荷電粒子のエネルギーの関数としてFig. 5.1に示す。

Fig. 5.2にはTable 2.2の $Q-L$ 関係式を用いて算出した上記6種類の荷電粒子の線質係数 Q を示す。但し、Table 2.2の $Q-L$ 関係式はICRP60に示された式そのものであるが、衝突阻止能の値が $L = 100\text{keV}/\mu\text{m}$ のときに不連続の値となる。その理由は $L = 100\text{keV}/\mu\text{m}$ 以下を示す $0.32L - 2.2$ の値と $L = 100\text{keV}$ 以上を示す $300/\sqrt{L}$ の値が $L = 100\text{keV}/\mu\text{m}$ の点でわずかに不連続になるためである。計算上、両者の式が交わる点は $L = 100.426$ であるため、両者の式の分岐点を $L = 100.426\text{keV}/\mu\text{m}$ として $Q-L$ 関係式を作成した。このために Q の値が不連続になることを防ぐことができる。

次に式(3.7)に基づいて算定した実効的な線質係数 \bar{Q} をFig. 5.3に示した。この場合、エネルギーの下限値が0であるため、きわめて小さい E に対する L の値が必要となるが、通常それらは精度よく算出できない。したがって計算上、式(5.1)のような工夫を行った。

$$\begin{aligned} \bar{Q}(E_0) &= \frac{1}{E_0} \int_0^{E_0} Q(L(E)) dE = \frac{1}{E_0} \left\{ \int_0^{E_1} Q(L(E)) dE + \int_{E_1}^{E_0} Q(L(E)) dE \right\} \\ &= \frac{1}{E_0} \left\{ E_1 + \int_{E_1}^{E_0} Q(L(E)) dE \right\} \dots\dots\dots (5.1) \end{aligned}$$

ここでは、きわめて小さいエネルギー E_1 以下ならば L は常に $10\text{keV}/\mu\text{m}$ 以下であり、そのために $Q = 1.0$ であると仮定し、0 から E_1 までの積分と E_1 から E_0 までの積分の2段階に分けた計算を式(5.1)のように行った。

以上のような方法で代表的な人体構成核種その核破碎で生ずる可能性のある186核種および π 、 μ の荷電した中間子についてすべて \bar{Q} を算定評価した。これらの核種をTable 5.1に示す。なお、計算を行うのに用いたエネルギー点をTable 5.2に示す。10GeV~15MeVまではほぼ0.1の等レサジーでエネルギー点を作成し、15MeV以下はD L C-37群^{4,2)}構造の中点を採用した。

Table 5.1 List of nuclides of which \bar{Q} were estimated

Atomic Number	Elemental Symbol	Mass number A										Number of nuclides									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10										
1	H	1	2	3																	3
2	He	3	4	5	6																4
3	Li	6	7	8																	3
4	Be	7	8	9	10	11															5
5	B	8	9	10	11	12															5
6	C	10	11	12	13	14															5
7	N	13	14	15	16	17															5
8	O	14	15	16	17	18	19	20													7
9	F	17	18	19	20	21	22														6
10	Ne	18	19	20	21	22	23	24													7
11	Na	21	22	23	24	25															5
12	Mg	23	24	25	26	27	28														6
13	Al	24	25	26	27	28	29	30													7
14	Si	26	27	28	29	30	31	32													7
15	P	29	30	31	32	33	34	35													7
16	S	30	31	32	33	34	35	36	37	38											9
17	Cl	33	34	35	36	37	38	39	40												8
18	Ar	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44										10
19	K	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47									11
20	Ca	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50									11
21	Sc	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51										10
22	Ti	44	45	46	47	48	49	50	51	52											9
23	V	47	48	49	50	51	52	53	54												8
24	Cr	48	49	50	51	52	53	54	55	56											9
25	Mn	50	51	52	53	54	55	56	57	58											9
26	Fe	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61										10
-	π^\pm	-																			
-	μ^\pm	-																			
											Total	186									

Table 5.2 Energy points at which \bar{Q} were calculated

No.	ENERGY (MeV)	No.	ENERGY (MeV)	No.	ENERGY (MeV)	No.	ENERGY (MeV)
1	1.0445E+04	51	7.0378E+01	101	4.7418E-01	151	1.5657E-05
2	9.4510E+03	52	6.3680E+01	102	4.2906E-01	152	1.2194E-05
3	8.5516E+03	53	5.7620E+01	103	3.8823E-01	153	9.4962E-06
4	7.7378E+03	54	5.2137E+01	104	3.5128E-01	154	7.3957E-06
5	7.0015E+03	55	4.7176E+01	105	3.1785E-01	155	5.7598E-06
6	6.3352E+03	56	4.2686E+01	106	2.8761E-01	156	4.4857E-06
7	5.7323E+03	57	3.8624E+01	107	2.6024E-01	157	3.4935E-06
8	5.1868E+03	58	3.4949E+01	108	2.3548E-01	158	2.7207E-06
9	4.6932E+03	59	3.1623E+01	109	2.1307E-01	159	2.1184E-06
10	4.2466E+03	60	2.8613E+01	110	1.9279E-01	160	1.6497E-06
11	3.8425E+03	61	2.5890E+01	111	1.7395E-01	161	1.2852E-06
12	3.4768E+03	62	2.3427E+01	112	1.5735E-01	162	1.0009E-06
13	3.1460E+03	63	2.1197E+01	113	1.4283E-01	163	7.7951E-07
14	2.8466E+03	64	1.9180E+01	114	1.2923E-01	164	6.0708E-07
15	2.5757E+03	65	1.7355E+01	115	1.1693E-01	165	4.7280E-07
16	2.3306E+03	66	1.5703E+01	116	9.8804E-02	166	2.0705E-07
17	2.1088E+03	67	1.4209E+01	117	7.6949E-02		
18	1.9081E+03	68	1.2857E+01	118	5.9928E-02		
19	1.7265E+03	69	1.1633E+01	119	4.6672E-02		
20	1.5622E+03	70	1.0526E+01	120	3.6348E-02		
21	1.4136E+03	71	9.5242E+00	121	2.8308E-02		
22	1.2791E+03	72	8.6179E+00	122	2.2047E-02		
23	1.1573E+03	73	7.7978E+00	123	1.7170E-02		
24	1.0472E+03	74	7.0557E+00	124	1.3372E-02		
25	9.4755E+02	75	6.3843E+00	125	1.0414E-02		
26	8.5738E+02	76	5.7767E+00	126	8.1103E-03		
27	7.7579E+02	77	5.2270E+00	127	6.3164E-03		
28	7.0196E+02	78	4.7296E+00	128	4.9192E-03		
29	6.3516E+02	79	4.2795E+00	129	3.8310E-03		
30	5.7472E+02	80	3.8723E+00	130	2.9836E-03		
31	5.2002E+02	81	3.5038E+00	131	2.3237E-03		
32	4.7054E+02	82	3.1703E+00	132	1.8097E-03		
33	4.2576E+02	83	2.8686E+00	133	1.4094E-03		
34	3.8524E+02	84	2.5957E+00	134	1.0976E-03		
35	3.4858E+02	85	2.3487E+00	135	8.5482E-04		
36	3.1541E+02	86	2.1252E+00	136	6.6574E-04		
37	2.8540E+02	87	1.9229E+00	137	5.1848E-04		
38	2.5824E+02	88	1.7399E+00	138	4.0379E-04		
39	2.3366E+02	89	1.5744E+00	139	3.1448E-04		
40	2.1143E+02	90	1.4246E+00	140	2.4491E-04		
41	1.9131E+02	91	1.2890E+00	141	1.9074E-04		
42	1.7310E+02	92	1.1663E+00	142	1.4855E-04		
43	1.5663E+02	93	1.0553E+00	143	1.1569E-04		
44	1.4172E+02	94	9.5489E-01	144	9.0097E-05		
45	1.2824E+02	95	8.6402E-01	145	7.0168E-05		
46	1.1603E+02	96	7.8180E-01	146	5.4647E-05		
47	1.0499E+02	97	7.0740E-01	147	4.2559E-05		
48	9.5000E+01	98	6.4008E-01	148	3.3145E-05		
49	8.5959E+01	99	5.7917E-01	149	2.5813E-05		
50	7.7779E+01	100	5.2405E-01	150	2.0104E-05		

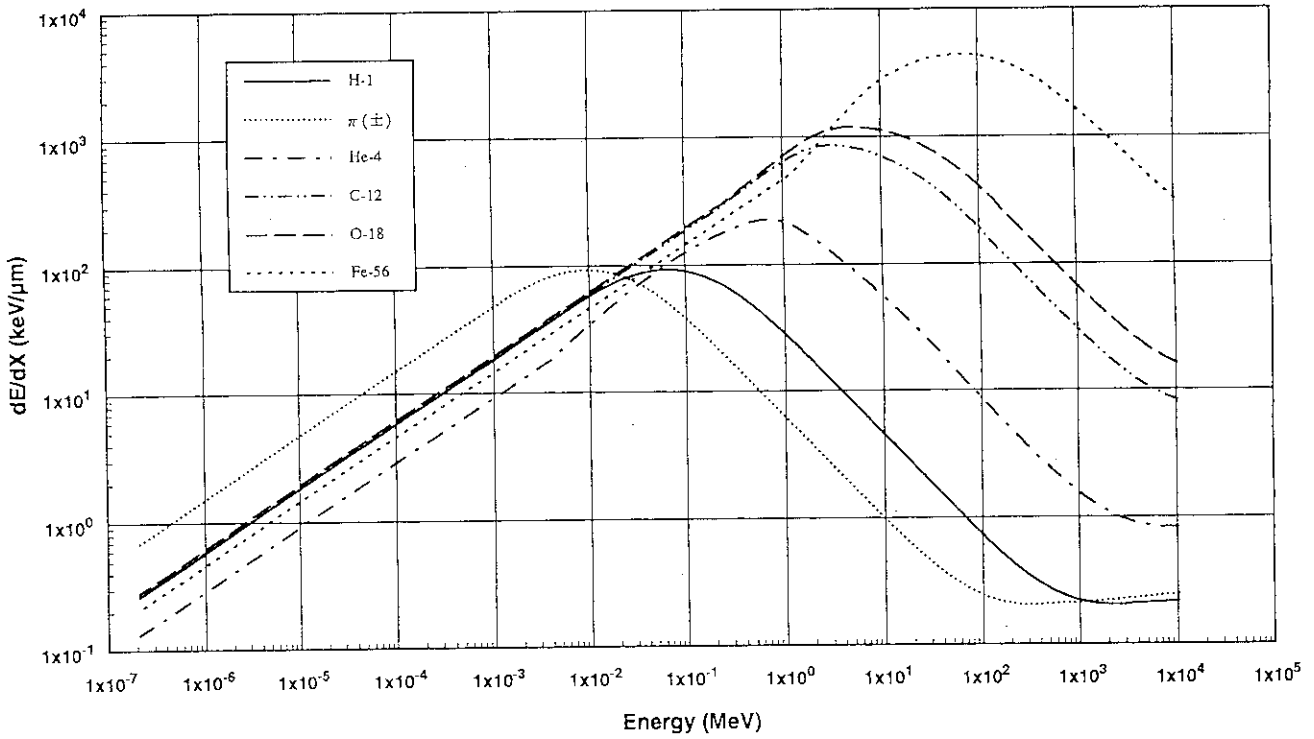


Fig. 5.1 Collision stopping powers for charged particles in water

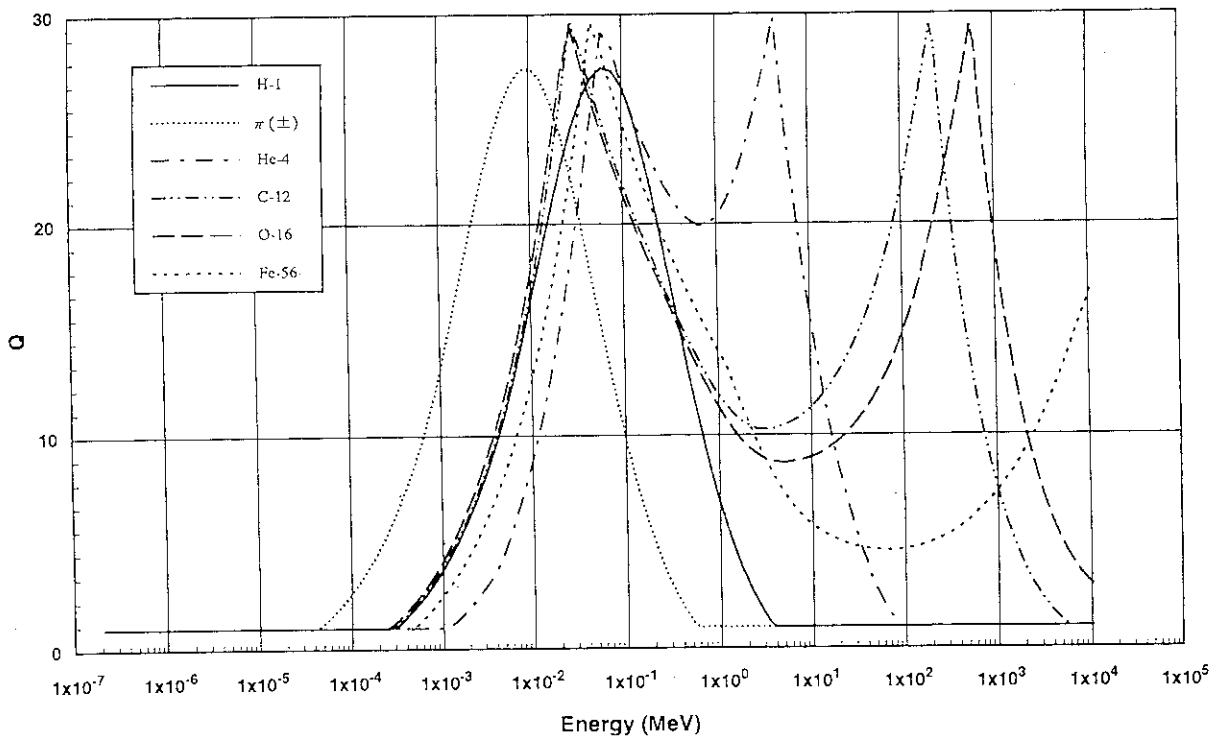


Fig. 5.2 Quality factors for ions and pions

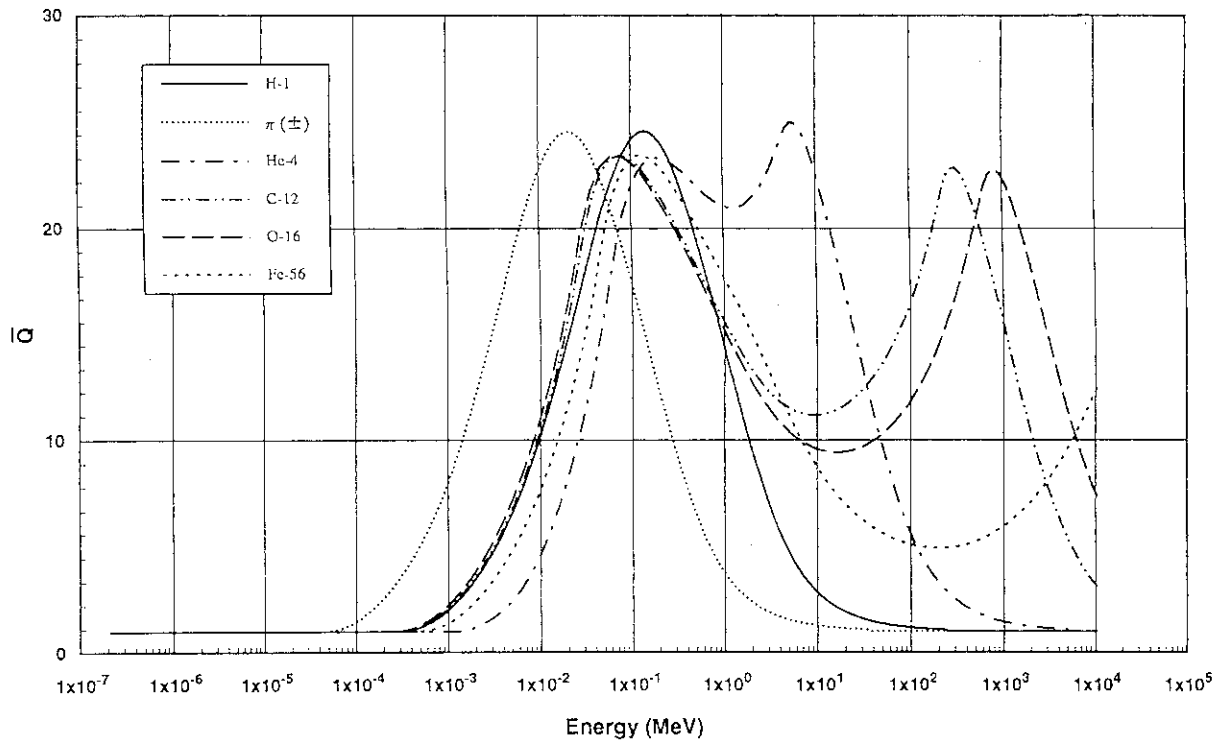


Fig. 5.3 Effective quality factors for ions and pions

6. 人体数学ファントム

等価線量（組織線量当量）を計算するためには、人体の各組織（器官）の形状を数式で表示することが必要である。本研究ではMIRD-5ファントム⁴³⁾に基づいて山口ら⁴⁴⁾によって作成された人体数学ファントムにLewisらの論文⁴⁵⁾に基づいて、次の2点すなわち食道モデルの追加と胃モデルの修正を行った。

(1) 食道モデルの追加

食道モデルは胸部および腹部に分けられ、以下の不等式群で表わされる。

(i) 胸部

$$\begin{aligned} x^2 + (y - 1.7)^2 &\leq (0.7)^2 \\ \text{かつ } x^2 + (y - 1.7)^2 &\geq (0.3)^2 \\ \text{但し } 44 \leq z &\leq 70 \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \text{-----} \\ \text{-----} \end{array} \right\} \quad (6.1)$$

$$x^2 + (y - 1.7)^2 < (0.3)^2 \quad \text{-----} \quad (6.2)$$

の領域はボイドである。

(ii) 腹部

$$\begin{aligned} Z &= 0.7980x - 0.5686(y - 1.7) - 0.1995(z - 44) \\ Y &= 0.5803x - 0.8144(y - 1.7) \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \text{-----} \\ \text{-----} \end{array} \right\} \quad (6.3)$$

$$\begin{aligned} Z &= 0.1625x - 0.1158(y - 1.7) + 0.9799(z - 44) \\ Y^2 + Z^2 &< (0.7)^2 \\ \text{但し } 0 < X &< 10 \end{aligned} \quad (6.4)$$

(2) 胃モデルの修正

胃モデルは回転楕円体で表わされ、MIRD-5ファントムは胃モデルの主軸がz軸と平行であるが、Lewisはこれを解剖学的知見に基づき以下のように回転させた。

$$\left[\frac{X}{4} \right]^2 + \left[\frac{y+4}{3} \right]^2 + \left[\frac{Z}{8} \right]^2 < 1 \quad (6.5)$$

$$\text{但し、 } X = 0.866(x - 4) - 0.5(z - 36) \quad (6.6)$$

$$Z = 0.5(x - 4) + 0.866(z - 36)$$

人体数学ファントムの元素組成をTable 6.1に示す。ここではMIRD-5ファントム⁴³⁾、Cristyファントム⁴⁶⁾及び放医研で使用しているファントム⁴⁷⁾の3種類の人体数学ファントム元素を比較した。

MIRD-5とChristyのファントムは、人体を3つの組成すなわち軟組織、肺組織、骨組織（無機質骨と骨髄、骨表面組織の混合物）から成るが、放医研で使用しているファントムは軟組織か甲状腺が分離している。そして、3種類の間では各組織とも密度および元素組成比が微妙に異なっている。

Table 6.1からわかるように、人体の大半を占める軟組織の密度を比較するとCristyファントムは他の2つより少し高密度であり1.0を超えている。この原因としては隣接する器官による領域の重複（二重定義）を避けるため、密度を上げることにより各器官の大きさを小さくしたと考えることができる。（Cristyファントムのみは成人だけでなく、15歳児、10歳児、5歳児、1歳児、新生児のファントムがある。）

Cristyファントムは本来、内部被ばく線量評価用の目的を主とするために開発、改良されてきたことを考慮して、ここでは換算係数評価の対象としては、MIRD-5ファントムの値を採用する。

Table 6.1 Elemental Compositions of tissues in the three kinds of human body phantoms (1)

Soft tissue (単位×10²⁴ atoms/cm³)

	MIRD-5	ORNL/TM-8381 V1	放医研 (甲状腺を除く)
H	6.172-2 *	1.08-1	1.042-1
C	1.139-2	1.96-2	1.916-2
N	9.927-4	1.85-3	1.670-3
O	2.348-2	4.13-2	3.325-2
F	—	—	—
Na	3.361-5	5.07-5	5.655-5
Mg	3.668-6	5.6-6	6.170-6
Si	—	1.1-5	—
P	4.606-5	4.50-5	7.749-5
S	4.077-5	6.62-5	6.860-5
Cl	2.347-5	3.90-5	3.949-5
K	3.192-5	5.53-5	5.371-5
Ca	—	6.2-6	—
Fe	6.704-7	9.-7	1.128-6
Zn	2.908-7	5.-7	4.894-7
Rb	3.963-8	1.-7	6.669-8
Sr	2.306-9	—	3.880-9
Zr	5.212-8	1.-7	8.770-8
Pb	4.589-10	—	7.722-10

密度 : $\rho = 0.9869$ $\rho = 1.04$ $\rho = 0.9001$

* 6.172-2 = 6.172×10^{-2}

Table 6.1 Elemental Compositions of tissues in the three kinds of human body phantoms (2)

Skeletal tissue		(単位×10 ²⁴ atoms/cm ³)	
	MIRD-5	ORNL/TM-8381 V1	放医研
H	6.178-2	1.02-1	1.052-1
C	1.678-2	2.97-2	2.848-2
N	2.433-3	3.05-3	4.147-3
O	2.684-2	4.19-2	4.550-2
F	—	1.8-5	—
Na	1.231-4	1.99-4	2.088-4
Mg	4.001-5	6.45-5	6.787-5
Si	—	1.-6	—
P	1.981-3	2.30-3	3.358-3
S	4.687-5	7.55-5	7.951-5
Cl	3.491-5	5.65-5	5.924-5
K	3.392-5	5.48-5	5.754-5
Ca	2.186-3	3.56-3	3.718-3
Fe	1.267-6	2.-6	2.149-6
Zn	6.490-7	1.-6	1.101-6
Rb	—	3.-7	—
Sr	3.229-7	5.-7	5.478-7
Zr	—	—	—
Pb	4.694-8	7.-8	7.963-8

密度 : $\rho = 1.4682$ $\rho = 1.4$ $\rho = 1.5007$

Table 6.1 Elemental Compositions of tissues in the three kinds of human body phantoms (3)

Lung tissue		(単位 atoms/cm ³)	
	MIRD-5	ORNL/TM-8381 V1	放医研
H	1.804-2	2.98-2	1.296-1
C	1.485-3	2.52-3	2.498-2
N	3.561-4	6.06-4	5.996-4
O	8.487-3	1.40-2	1.425-2
F	—	—	—
Na	1.472-5	2.37-5	2.479-5
Mg	5.423-7	9.-7	9.132-7
Si	—	6.-7	—
P	4.658-6	8.-6	7.846-6
S	1.278-5	2.08-5	2.152-5
Cl	1.357-5	2.22-5	2.285-5
K	9.112-6	1.47-5	1.535-5
Ca	3.112-7	7.-7	5.240-7
Fe	1.180-6	2.-6	1.987-6
Zn	2.997-8	5.-8	5.047-8
Rb	7.708-9	3.-8	1.299-8
Sr	1.199-10	—	2.020-10
Zr	—	—	—
Pb	3.525-10	—	5.936-10

密度 : $\rho = 0.2958$ $\rho = 0.296$ $\rho = 0.3001$

Table 6.1 Elemental Compositions of tissues in the three kinds of human body phantoms (4)

Tyroid		(単位 atoms/cm ³)	
	MIRD-5	ORNL/TM-8381 V1	放医研
H	—	—	1.042-1
C	—	—	1.915-2
N	—	—	1.670-3
O	—	—	3.950-2
F	—	—	—
Na	—	—	5.655-5
Mg	—	—	6.170-6
Si	—	—	—
P	—	—	7.749-5
S	—	—	6.860-5
Cl	—	—	3.949-5
K	—	—	5.371-5
Ca	—	—	—
Fe	—	—	1.128-6
Zn	—	—	4.894-7
Rb	—	—	6.669-8
Sr	—	—	3.880-9
Zr	—	—	8.770-8
Pb	—	—	7.722-10
I	—	—	1.340-11

密度 :

 $\rho = 1.0001$

7. 吸収線量及び等価線量評価用モンテカルロコード

7.1 HERMESコードシステム

7.1.1 HERMESコードシステムの概要

HERMES (High Energy Radiation Monte Carlo Elaborate System) コードシステムは、放射線の輸送および相互作用のシミュレーションを行うために様々な物理過程に対応するいくつかの3次元モンテカルロコードから構成されるコードシステムである。HERMESコードシステムの構成をFig 7.1に示す。

HERMESコードシステムでは、高エネルギー（数GeV）から熱エネルギー（eV以下）にわたる広いエネルギー範囲の粒子の挙動を解析することができる。HERMESコードシステムでは、以下の粒子を入射粒子として取り扱うことができる。

$p, n, \pi^+, \pi^-, \mu^+, \mu^-, e^+, e^-, \text{photon, low-mass heavy ions}(A \leq 20)$

7.1.2 HERMESコードシステムでの放射線の扱い

入射する放射線のHERMESコードシステム中での取扱を以下に示す。

放射線	エネルギー範囲	モンテカルロコード
陽子(p)	$\leq 20\text{GeV}$	HETC-KFA2 ²¹⁾
中性子(n)	$\leq 20\text{GeV}$	HETC-KFA2
	$\leq 15\text{MeV}$	MORSE-CG
π ± 中間子	$\leq 2.5\text{GeV}$	HETC-KFA2
μ ± 中間子	$\leq 2.5\text{GeV}$	HETC-KFA2
重イオン($A \leq 20$)	1.0GeV	HETC-KFA2
光子(photon)	数10keV～数TeV	EGS-4 ⁵⁾
電子(e^-), 陽電子(e^+)	数keV～数TeV	EGS-4

7.2 HETCとEGS-4を用いた沈着エネルギーの評価

ここでは7.2.1でHETC-KFA2コードを用いた陽子、中間子、重イオン($A \leq 20$)の沈着エネルギーの評価方法を示し、7.2.2でEGS-4を用いた光子および電子、陽電子の沈着エネルギーの評価方法を示す。これらの計算コードは沈着エネルギー (deposition energy) を評価する機能があるため、この機能を用いることにより吸収線量を評価することが可能である。

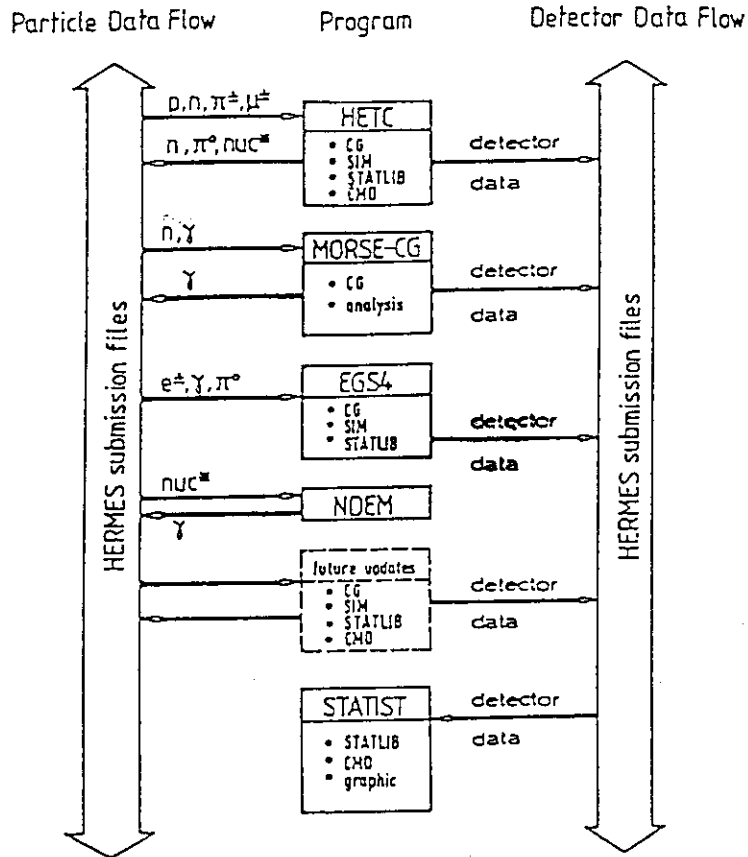


Fig. 7.1 Organization of the HERMES code system.

7.2.1 HETC-KFA2でのエネルギー沈着の評価方法

HETC-KFA2には、ターゲットとなる体系の指定された領域ごとに、荷重粒子による沈着エネルギーを算出する機能がある。エネルギーが体系に沈着される過程として、以下の2種類が考慮されている。

- (1) 核反応が起こった時点でのエネルギー沈着
- (2) 核外輸送中のエネルギー沈着

7.2.1.1 核反応が起こった時点でのエネルギー沈着

核反応が起こった時点でのエネルギー沈着では、蒸発反応により発生する荷電粒子や反跳核の運動エネルギーの反応が起こった場所に沈着する。

(1) 重イオン（反跳核を含む）

重イオン及び反跳核の飛程は無視しうるほど小さいと考えられる。従って、蒸発過程で生成されるd, t, He-3, α 及び反跳核のエネルギーは全て反応が起こった位置に沈着される。

重イオンによる沈着エネルギーは次式で表せる。

$$E_{d_{prt}} = E_{prt} \cdot W T_{prt} \quad \text{-----} \quad (7.1)$$

ここで、

prt : 粒子の種類 (d, t, He-3, α , 反跳核)

$E_{d_{prt}}(\text{MeV})$: 粒子prtの沈着エネルギー

$E_{prt}(\text{MeV})$: 粒子prtの運動エネルギー

$W T_{prt}$: 粒子prtの重み

である。

(2) カットオフエネルギー以下の粒子

核反応により粒子のエネルギーがカットオフエネルギー以下になった場合および生成される粒子のエネルギーがカットオフ以下の場合、沈着エネルギーは以下のようなになる。

$$\cdot \text{陽子} : E_{dP} = E_p \cdot W T_p \quad \text{-----} \quad (7.2)$$

$$\cdot \text{中性子} : E_{dn} = E_n \cdot W T_n \quad \text{-----} \quad (7.3)$$

但し、中性子の沈着エネルギーは、全沈着エネルギーには加えない。

$$\cdot \pi^- \text{中間子} : E d \pi^- = (E \pi^- - 1.0) \cdot W T \pi^- \text{-----} (7.4)$$

ここで、1.0(MeV)は結合エネルギー

$$\cdot \pi^+ \text{中間子} : E d \pi^+ = E \pi^+ \cdot W T \pi^+ \text{-----} (7.5)$$

$$\cdot \mu^+ \text{中間子} : E d \mu^+ = \frac{E \mu^+ + 106.0}{106.0} \cdot 33.328 \cdot W T \mu^+ \text{-----} (7.6)$$

$$\cdot \mu^- \text{中間子} : E d \mu^- = \left[\frac{E \mu^- + 106.0}{106.0} \cdot 33.328 - 0.511 \right] \cdot W T \mu^- \text{----} (7.7)$$

7.2.1.2 核外輸送中のエネルギー沈着

(1) 電離エネルギー損失

荷電粒子の核外輸送中には、媒質中での電離エネルギー損失を沈着エネルギーとする。沈着エネルギーは次式で表される。

$$E d_{prt} = (E_1 - E_2) \cdot W T_{prt} \text{-----} (7.8)$$

ここで、

prt : 陽子, π^\pm 中間子, μ^\pm 中間子

E_1 (MeV): 飛行開始時の粒子prtのエネルギー

E_2 (MeV): 飛行終了時の粒子prtのエネルギー

$W T_{prt}$: 粒子prtの重み

である。

(2) 弾性散乱

HETC-KFA2では、陽子と中性子の弾性散乱を考慮することができる。弾性散乱による反跳核のエネルギーは、散乱が起こった位置に沈着される。ただし、標的が水素原子の場合には、カスケード、蒸発模型は使われずアイソバーモデルが用いられている。

7.2.1.3 吸収線量評価上の問題点

HETC-KFA2で計算されるエネルギー沈着を吸収線量評価に適用する場合以下の点が問題となる。

高エネルギーの非荷電粒子により軽い核が反跳された場合、反跳核の運動エネルギーは反応が起こった位置に沈着されてしまい、その後の過程は追跡されない。

7.2.2 EGS-4のエネルギー沈着計算方法

HERMESシステムでは、以下の粒子のエネルギー沈着は電磁カスケードコード EGS-4⁵⁾で計算する。

- (1) 電子
- (2) 陽電子
- (3) 光子
- (4) π^0 中間子

このうち、 π^0 中間子は即座に電子および陽電子に崩壊するものとしてEGS-4では取扱う。また、光子については、コンプトン散乱、電子対生成および光電効果により生成される電子・陽電子の輸送を追うことにより、エネルギー沈着を計算する。従って、EGS-4で計算されるエネルギー沈着量は、電子または陽電子によるものである。ここでは、EGS-4の電子・陽電子のエネルギー沈着計算方法について述べる。

EGS-4で考慮する電子・陽電子と物質の相互作用は以下の通りである。

- (1) 制動放射
- (2) Møller ($e^- e^-$) 散乱
- (3) Bhabha ($e^- e^+$) 散乱
- (4) 原子核との多重散乱

(1)~(3)の反応で生じたカットオフエネルギー以上の粒子（制動放射の場合はX線、Møller散乱の場合は δ 線）は、独立の粒子としてその輸送過程がシュミレートされるカットオフエネルギー以下の粒子については、入射粒子の連続的なエネルギー損失として、BergerとSeltzerにより提唱された“restricted stopping power”⁴⁸⁾の考え方により取り扱われる。電子または陽電子の輸送の途中での多数の原子核との弾性衝突による散乱（多重散乱）は、電子のエネルギー損失に与える影響は小さいが、粒子の進行方向の変化に大きな影響を与えるため、Moliereの多重散乱近似を用いて取り扱われる。

EGS-4コード中でのエネルギー沈着は、以下の2通りの方法で計算される。

- (1) カットオフエネルギー以上の電子および陽電子のエネルギー沈着

カットオフエネルギー以上のエネルギーをもつ電子および陽電子の媒質中でのエネルギー沈着は、Restricted stopping powerの考え方で扱われる。この考え方は

カットオフエネルギー以下の δ 線及び制動放射線については、もとの粒子による物質中の原子の励起およびイオン化によるエネルギー損失と同様に、もとの粒子のエネルギー損失に含めて媒質中にエネルギー沈着するという考え方である。

エネルギー損失の式はBethe-Bloch⁴⁹⁻⁵¹⁾の式に基づいている。

(2) カットオフエネルギー以下の電子、陽電子、光子の取扱い

これらの粒子は、カットオフエネルギー以下になった時点で媒質中にエネルギー沈着する。

7.3 HETCおよびEGS-4を用いた吸収線量および等価線量の評価

7.2でHETCとEGS-4を用いて指定された領域に沈着したエネルギーを評価する方法を示した。組織Tへの沈着エネルギー ε をその組織の質量mで割れば、式(7.9)に示す通り吸収線量Dが求まる。

$$D = \varepsilon / m \text{ ----- (7.9)}$$

なお、等価線量の評価方法については以下の方法を用いる。

(1) 電子、陽電子の場合

実効的な線質係数 \bar{Q} が常に1なので、吸収線量をそのまま等価線量として用いる。

(2) π^\pm 中間子、 μ^\pm 中間子、陽子および重イオンの場合

(a) 核外輸送中でのエネルギー沈着によるもの

$$H_T = \{ \bar{Q}_{prt}(E_1) \cdot E_1 - \bar{Q}_{prt}(E_2) \cdot E_2 \} \cdot W_{prt} / m \text{ ----- (7.10)}$$

ここで、

prt : 陽子, π^\pm 中間子, μ^\pm 中間子

E_1 (MeV): 飛行開始時の粒子prtのエネルギー

E_2 (MeV): 飛行終了時の粒子prtのエネルギー

$\bar{Q}_{prt}(E)$: エネルギーEの粒子prtの実効的な線質係数

m : 組織Tの質量

対象とする組織Tに粒子prtが飛び込んだとき、又は核反応および核との弾性散乱で組織T中で粒子prtが発生したときを飛行開始時として、その粒子が次の核反応、核との弾性散乱または組織Tから抜け出したときを飛行終了時として式(7.10)を用いて入射および発生する粒子prtについてすべて合計する。

(a) 核反応、核との弾性散乱およびエネルギーカットオフによるもの

式(7.1)~(7.7)等で評価される沈着エネルギーを ε とすると、式(7.11)に従って計算する。

$$H_T = \bar{Q}_{prt}(E) \cdot \varepsilon / m \quad \text{-----} \quad (7.11)$$

ここで、

$\bar{Q}_{prt}(E)$: エネルギーEの荷電粒子prtの実効的な線質係数

ε : 沈着エネルギー

m : 組織Tの質量

この場合はすべて粒子prtは媒質中を飛行せず、発生したその場所でエネルギーをすべて沈着する。核との弾性散乱の場合は、散乱された核を反跳核として扱い、その場にエネルギーを沈着するとして取扱う。

従って、対象とする組織T中での荷電粒子に関する式(7.9), (7.10)および(7.11)の合計値が等価線量となる。なお、中性子および光子のような非荷電粒子が入射した場合は、それらが媒体中の原子核または電子と作用して荷電粒子を発生してから、上記の方法でそれらを追跡して等価線量を評価する。

7.4 低エネルギー（15MeV以下）中性子の等価線量の評価

HERMESコードシステム³⁾では、中性子と人体の組織との相互作用の評価は、エネルギーの高い領域（ここでは15MeV以上）はHETCコードを用いて行うが、中性子核反応データライブラリーが整備されている15MeV以下は、MORSE-CGを用いて行う。⁴⁾ 通常、15MeV以下では人体組織と中性子の相互作用は荷電粒子また光子を放出する吸収反応か、又は弾性もしくは非弾性散乱であり、核破砕のような反応は生じない。このエネルギー領域ではHERMESコードシステム中のMORSE-CGを用いて式(7.12)に示す方法で組織Tの等価線量 H_T を評価できる。

$$H_T = \sum_i \bar{Q}(E_i) \cdot K_T(E_i) \cdot \phi_T(E_i) \quad \text{-----} \quad (7.12)$$

$\bar{Q}(E_i)$: 中性子の実効的な線質係数

$K_T(E_i)$: 組織Tのカーマ係数

$\phi_T(E_i)$: 組織Tの平均中性子フルエンス

E_i : 中性子エネルギー（iはエネルギー群番号を示す。）

ここでカーマ係数 $K_T(E_i)$ は、各反応 r に対して発生する荷重粒子 j による平均カーマ（ある物質の体積要素内で間接電離粒子によって自由にされた荷電粒子 j の初期エネルギーの平均値）であるから、式(7.12)の $\bar{Q}(E_i) \cdot K_T(E_i)$ は以下のようになる。

$$\bar{Q}(E_i) \cdot K_T(E_i) = \sum_r \sum_j \bar{Q}(\bar{E}_{rj}) \cdot K_{Trj}(E_i) \quad \text{-----} \quad (7.13)$$

ここで $K_{Trj}(E_i)$ は、組織 T にエネルギー E_i の中性子が入射したとき生じる核反応 r により発生する荷電粒子 j による平均カーマ、 $\bar{Q}(\bar{E}_{rj})$ はそのとき発生した荷電粒子 j の平均エネルギー \bar{E}_{rj} に対する実効的な線質係数である。 $\bar{Q}(\bar{E}_{rj})$ の評価には ICRP 60 の $Q-L$ 曲線の関係と式(3.7)を用い、 $K_{Trj}(E_i)$ の評価には文献52の KERMA ライブラリーに従って求めることができるが、計算の複雑さを避けるために $\bar{Q}(\bar{E}_{rj})$ の係数で重み付けを行った QKERMA ライブラリーを作成した。QKERMA ライブラリーは式(7.13)の量を表す。QKERMA ライブラリー作成において、15MeV 以下の中性子の群構造は DLC-37 ライブラリー⁴²⁾ に従い、 (n, γ) 反応を取扱うのに必要となる γ 線群構造は、DLC-41 ライブラリー (VITAMIN-C)⁵³⁾ に従うものとする。両者の群構造を Table 7.1 と 7.2 に示す。なお、式(7.1)の $\phi_T(E_i)$ の計算には Volume flux detector を用いる。

以上の方法により、組織の位置における \bar{Q} を用いて 15MeV 以下の中性子による等価線量が評価できる。そして、この方法は HETC に適用した \bar{Q} と同首尾一環性があり、放射線荷重係数 W_R を用いる方法よりも合理的である。

Table 7.1 Neutron group structure of DLC-37

Group	Energy Range (eV)		Group	Energy Range (eV)	
1	1.4918E 07*	1.3499E 07	51	8.6517E 04	6.7380E 04
2	1.3499E 07	1.2214E 07	52	6.7380E 04	5.2475E 04
3	1.2214E 07	1.1052E 07	53	5.2475E 04	4.0868E 04
4	1.1052E 07	1.0000E 07	54	4.0868E 04	3.1828E 04
5	1.0000E 07	9.0484E 06	55	3.1828E 04	2.4788E 04
6	9.0484E 06	8.1873E 06	56	2.4788E 04	1.9305E 04
7	8.1873E 06	7.4082E 06	57	1.9305E 04	1.5034E 04
8	7.4082E 06	6.7032E 06	58	1.5034E 04	1.1709E 04
9	6.7032E 06	6.0653E 06	59	1.1709E 04	9.1188E 03
10	6.0653E 06	5.4881E 06	60	9.1188E 03	7.1018E 03
11	5.4881E 06	4.9659E 06	61	7.1018E 03	5.5309E 03
12	4.9659E 06	4.4933E 06	62	5.5309E 03	4.3074E 03
13	4.4933E 06	4.0657E 06	63	4.3074E 03	3.3546E 03
14	4.0657E 06	3.6788E 06	64	3.3546E 03	2.6126E 03
15	3.6788E 06	3.3287E 06	65	2.6126E 03	2.0347E 03
16	3.3287E 06	3.0119E 06	66	2.0347E 03	1.5846E 03
17	3.0119E 06	2.7253E 06	67	1.5846E 03	1.2341E 03
18	2.7253E 06	2.4660E 06	68	1.2341E 03	9.6112E 02
19	2.4660E 06	2.2313E 06	69	9.6112E 02	7.4852E 02
20	2.2313E 06	2.0190E 06	70	7.4852E 02	5.8295E 02
21	2.0190E 06	1.8268E 06	71	5.8295E 02	4.5400E 02
22	1.8268E 06	1.6530E 06	72	4.5400E 02	3.5358E 02
23	1.6530E 06	1.4957E 06	73	3.5358E 02	2.7537E 02
24	1.4957E 06	1.3534E 06	74	2.7537E 02	2.1445E 02
25	1.3534E 06	1.2246E 06	75	2.1445E 02	1.6702E 02
26	1.2246E 06	1.1080E 06	76	1.6702E 02	1.3007E 02
27	1.1080E 06	1.0026E 06	77	1.3007E 02	1.0130E 02
28	1.0026E 06	9.0718E 05	78	1.0130E 02	7.8893E 01
29	9.0718E 05	8.2085E 05	79	7.8893E 01	6.1442E 01
30	8.2085E 05	7.4274E 05	80	6.1442E 01	4.7851E 01
31	7.4274E 05	6.7206E 05	81	4.7851E 01	3.7267E 01
32	6.7206E 05	6.0810E 05	82	3.7267E 01	2.923E 01
33	6.0810E 05	5.5023E 05	83	2.923E 01	2.2603E 01
34	5.5023E 05	4.9787E 05	84	2.2603E 01	1.7604E 01
35	4.9787E 05	4.5049E 05	85	1.7604E 01	1.3710E 01
36	4.5049E 05	4.0762E 05	86	1.3710E 01	1.0677E 01
37	4.0762E 05	3.6883E 05	87	1.0677E 01	8.3153E 00
38	3.6883E 05	3.3373E 05	88	8.3153E 00	6.4760E 00
39	3.3373E 05	3.0197E 05	89	6.4760E 00	5.0435E 00
40	3.0197E 05	2.7324E 05	90	5.0435E 00	3.9279E 00
41	2.7324E 05	2.4724E 05	91	3.9279E 00	3.0590E 00
42	2.4724E 05	2.2371E 05	92	3.0590E 00	2.3824E 00
43	2.2371E 05	2.0242E 05	93	2.3824E 00	1.8554E 00
44	2.0242E 05	1.8316E 05	94	1.8554E 00	1.4450E 00
45	1.8316E 05	1.6573E 05	95	1.4450E 00	1.1254E 00
46	1.6473E 05	1.4996E 05	96	1.1254E 00	8.7644E 00
47	1.4996E 05	1.3569E 05	97	8.7644E 00	6.8257E 01
48	1.3569E 05	1.2277E 05	98	6.8257E 01	5.3159E 01
49	1.2277E 05	1.1109E 05	99	5.3159E 01	4.1400E 01
50	1.1109E 05	8.6517E 04	100	4.1400E 01	1.0000E 04

* 1.4918E 07 = 1.4918 × 10⁷

Table 7.2 Gamma group structure of DLC-41

Group	Energy range (eV)	
1	1.4000E+07	1.2000E+07
2	1.2000E+07	1.0000E+07
3	1.0000E+07	8.0000E+06
4	8.0000E+06	7.5000E+06
5	7.5000E+06	7.0000E+06
6	7.0000E+06	6.5000E+06
7	6.5000E+06	6.0000E+06
8	6.0000E+06	5.5000E+06
9	5.5000E+06	5.0000E+06
10	5.0000E+06	4.5000E+06
11	4.5000E+06	4.0000E+06
12	4.0000E+06	3.5000E+06
13	3.5000E+06	3.0000E+06
14	3.0000E+06	2.5000E+06
15	2.5000E+06	2.0000E+06
16	2.0000E+06	1.6600E+06
17	1.6600E+06	1.5000E+06
18	1.5000E+06	1.3300E+06
19	1.3300E+06	1.0000E+06
20	1.0000E+06	8.0000E+05
21	8.0000E+05	7.0000E+05
22	7.0000E+05	6.0000E+05
23	6.0000E+05	5.1200E+05
24	5.1200E+05	5.1000E+05
25	5.1000E+05	4.5000E+05
26	4.5000E+05	4.0000E+05
27	4.0000E+05	3.0000E+05
28	3.0000E+05	2.0000E+05
29	2.0000E+05	1.5000E+05
30	1.5000E+05	1.0000E+05
31	1.0000E+05	7.5000E+04
32	7.5000E+04	6.0000E+04
33	6.0000E+04	4.5000E+04
34	4.5000E+04	3.0000E+04
35	3.0000E+04	2.0000E+04
36	2.0000E+04	1.0000E+04

8. 高エネルギー光子の実効線量およびICRU球中の最大線量当量の評価

この章では10MeV~10GeVの面平行ビームとして入射する光子のICRU球中の主軸上の各点における線量当量と人体ファントムの実効線量を算定した。10MeV以下の光子に対しては、ICRU球主軸上の入射面から1cmの点の線量当量（1cm線量当量）が実効線量当量を少し上回る値として放射線防護上重要な位置が与えられている。ここでは10MeV~10GeVの光子に対しても同様の関係が成立するかどうかについての評価を行い、ICRU球の有効性を検討した。

8.1 10MeV~10GeVの面平行ビーム入射光子に対するICRU球中の主軸上の線量当量

10MeV~10GeVのエネルギーとして代表的な8点、すなわち10, 15, 20, 50, 100, 500 MeV, 1GeV, 10GeVの光子がICRU球⁵⁴⁾の主軸に平行な単一の面平行ビームとして入射したときの主軸上の29点の線量当量をEGS-4コードを用いて計算した。主軸上の29点とは入射方向からの主軸上1, 2, … 29cmまでの深さの各点である。計算方法はFig. 8.1に示すように、真空中にICRU球を設定し、主軸上の深さ1, 2, … 29cmの各点を中心とする半径0.4cmの小球領域を設置した。そして、主軸に平行な単一面平行ビームで光子を入射させて発生する2次電子と光子の挙動解析を行い、小球領域中の沈着エネルギーを算定した。光子および電子のカットオフエネルギーはそれぞれ0.1MeVおよび0.5MeVとした（運動エネルギー0.5MeVの電子の飛程は水中で約0.2cm¹²⁾）。

この小球中の沈着エネルギーから算定した線量当量を主軸上の各点における線量当量とした。その結果をFig. 8.1~8.9に図示し、数値をTable 8.1に示した。なお、Fig. 8.2には、Method 2の方法、すなわち主軸上深さ1cmの点を含む薄い球殻の一部に相等する領域をICRU球中に設定し（Fig. 8.2参照）、EGS-4コードを用いてその領域のエネルギー沈着量を求めて、それに基づいて算定評価した1cm線量当量の値を付記した。Method 2の方法で求めた1cm線量当量は $5.33 \times 10^{-12} \text{Sv}/(\text{photons}/\text{cm}^2)$ であり、半径0.4cmの小球を設定して求めた1cm線量当量と2cm線量当量（主軸上深さ2cmの点におけるICRU球中の線量当量）の間の中間の値である。このことは次の理由による。

- (1) 沈着エネルギーを求めるには有限な体積を設定しなければならないが、このことは厳密な意味での1cm線量当量を算定できない。
- (2) ICRU球主軸上の深さ1cmの点前後で2次電子によるエネルギー沈着量の勾配が大きく変化していれば、エネルギー沈着量の評価値は、エネルギー沈着量評価に用いられた領域の形状に依存する。

以上の問題点を小さくするためには、深さ1cmの点のまわりにきわめて微少な領域を設定すればよいが、微少にすればする程計算値のモンテカルロ統計誤差が大きくなるために評価値の信頼度は小さくなる。従って、1cm線量当量を正確に求めることは難しいが、 $1 \times 10^{-11} \text{Sv}/(\text{photon}/\text{cm}^2)$ 以下の値になることは確実である。しかし、ICRP 51によればこの点の線量当量は $2.52 \times 10^{-11} \text{Sv}/(\text{photon}/\text{cm}^2)$ である。ICRP 51の値は文献55および56の結果を引用したものである。Fig. 8.2にICRP 51の値と今回の計算で行った2種類のモデルで求めた計算値を示すが、ICRP 51はこれらの計算値より1ケタ高い値を示す。この原因は文献55および56では、ICRU球のまわりには空気層があり、入射光子は空気層で多量の2次電子を生成し、ICRU球表面で2次電子平衡が成立しているとの仮定に基づいて計算しているためである。たしかに、入射光子のエネルギーが数100keV以下ならば、実際の被曝条件下でICRU球表面で電子平衡が成立していると仮定してもさしつかえない。しかし、光子エネルギーが高くなれば、十分な電子平衡を成立させるためには、かなりの空気層が必要となる。なお、エネルギーが100MeVを超え、ICRU球前の空気層で多量の電子シャワーが発生すると、空気層の厚さによりICRU球中の線量当量が異なる。したがって、高エネルギー光子の入射に対しては、ICRU球の前に空気層の存在を仮定すると、かえって問題が複雑になる。そのため真空中にICRU球が存在するという仮定に基づいて解析評価を行う方が適切である。

真空中にICRU球が存在するという仮定に基づいて、EGS-4コードを用いて解析評価を行った結果はFig. 8.1~8.9に示したとおりであるが、この結果から50MeV以下の光子を照射した場合は、ある程度の深さまで線量当量は増大するが、その後は少しずつ減少し始めることがわかる。しかし、100MeV以上ではICRU球の最後部の線量当量が最大となっていることがわかる。このことは、光子エネルギーが100MeVを超えるとICRU球中で電子シャワーが増大するため、後方部の線量当量が大きくなるためである。

Table 8.1 Dose Equivalents in ICRU sphere irradiated by 10 MeV-10 GeV parallel photon beam

Unit(Sv/(10^{12} photon/cm 2))

深さ	入射エネルギー - 10MeV	入射エネルギー - 15MeV	入射エネルギー - 20MeV	入射エネルギー - 50MeV
1cm	1.79E+00 ±23.99%	1.63E+00 ±32.82%	1.39E+00 ±38.30%	1.93E+00 ±29.56%
2cm	1.19E+01 ±13.28%	9.79E+00 ±17.73%	1.06E+01 ±15.60%	1.03E+01 ±15.54%
3cm	1.78E+01 ±9.80%	1.63E+01 ±12.56%	1.77E+01 ±12.55%	2.08E+01 ±11.39%
4cm	2.60E+01 ±8.94%	1.92E+01 ±11.24%	2.40E+01 ±10.36%	3.24E+01 ±9.23%
5cm	2.74E+01 ±8.85%	2.61E+01 ±9.44%	2.79E+01 ±9.31%	3.76E+01 ±8.79%
6cm	2.29E+01 ±9.48%	3.00E+01 ±9.37%	3.17E+01 ±8.42%	4.66E+01 ±7.30%
7cm	2.18E+01 ±9.11%	3.40E+01 ±8.37%	3.65E+01 ±8.05%	5.04E+01 ±6.76%
8cm	2.51E+01 ±8.77%	3.56E+01 ±8.46%	3.84E+01 ±7.87%	5.36E+01 ±6.39%
9cm	2.32E+01 ±9.05%	2.90E+01 ±8.99%	4.24E+01 ±7.75%	6.04E+01 ±5.98%
10cm	2.37E+01 ±8.83%	2.81E+01 ±8.86%	4.37E+01 ±7.44%	7.15E+01 ±5.62%
11cm	2.65E+01 ±8.68%	2.91E+01 ±8.83%	3.67E+01 ±8.25%	7.10E+01 ±5.47%
12cm	1.91E+01 ±9.59%	3.36E+01 ±8.32%	3.91E+01 ±7.45%	8.03E+01 ±5.12%
13cm	1.88E+01 ±9.93%	3.28E+01 ±8.47%	3.64E+01 ±8.12%	8.47E+01 ±5.04%
14cm	2.18E+01 ±9.30%	2.95E+01 ±8.81%	3.63E+01 ±8.34%	7.98E+01 ±5.17%
15cm	1.76E+01 ±9.54%	2.68E+01 ±9.19%	4.28E+01 ±7.84%	8.17E+01 ±5.11%
16cm	2.14E+01 ±9.10%	3.04E+01 ±8.55%	4.04E+01 ±7.89%	8.88E+01 ±4.91%
17cm	2.06E+01 ±9.48%	2.69E+01 ±9.29%	3.98E+01 ±7.67%	8.96E+01 ±4.84%
18cm	2.25E+01 ±9.12%	2.77E+01 ±9.01%	3.78E+01 ±7.80%	8.44E+01 ±4.93%
19cm	1.98E+01 ±9.54%	3.03E+01 ±9.04%	3.42E+01 ±8.31%	8.48E+01 ±4.96%
20cm	2.35E+01 ±9.03%	2.93E+01 ±8.82%	3.20E+01 ±8.43%	8.80E+01 ±4.77%
21cm	1.88E+01 ±9.94%	2.80E+01 ±9.08%	3.40E+01 ±8.51%	9.55E+01 ±4.60%
22cm	2.02E+01 ±10.13%	2.70E+01 ±9.79%	3.54E+01 ±8.16%	8.91E+01 ±4.85%
23cm	1.61E+01 ±10.26%	2.11E+01 ±9.91%	3.99E+01 ±8.36%	8.90E+01 ±4.79%
24cm	1.96E+01 ±9.78%	2.45E+01 ±9.36%	3.65E+01 ±8.04%	8.69E+01 ±4.85%
25cm	1.68E+01 ±10.03%	2.58E+01 ±9.07%	3.84E+01 ±7.77%	8.74E+01 ±4.92%
26cm	1.84E+01 ±10.31%	2.37E+01 ±9.57%	3.52E+01 ±8.28%	8.06E+01 ±4.98%
27cm	1.69E+01 ±10.79%	2.81E+01 ±9.35%	3.55E+01 ±8.27%	8.29E+01 ±4.98%
28cm	1.83E+01 ±10.59%	2.53E+01 ±9.48%	3.13E+01 ±8.61%	8.15E+01 ±5.08%
29cm	1.68E+01 ±10.31%	2.87E+01 ±9.31%	3.20E+01 ±8.62%	8.24E+01 ±5.16%
ヒストリー数	5180 × 600 *	4300 × 600	4300 × 600	5180 × 600

* 600 histories/batch × 5180batch

Table 8.1 (continued)

深さ	入射エネルギー - 100MeV	入射エネルギー - 500MeV	入射エネルギー - 1GeV	入射エネルギー - 10GeV
1cm	3.58E+00 ±35.93%	4.88E+00 ±36.91%	5.35E+00 ±22.82%	2.86E+00 ±41.53%
2cm	1.57E+01 ±24.24%	1.93E+01 ±20.85%	1.63E+01 ±18.03%	1.33E+01 ±24.93%
3cm	1.77E+01 ±22.18%	3.22E+01 ±16.85%	2.96E+01 ±12.94%	2.32E+01 ±20.99%
4cm	2.77E+01 ±15.88%	4.70E+01 ±13.59%	4.10E+01 ±11.25%	3.76E+01 ±15.49%
5cm	3.40E+01 ±13.87%	6.44E+01 ±11.70%	5.76E+01 ±10.02%	5.01E+01 ±13.12%
6cm	3.63E+01 ±13.07%	7.66E+01 ±11.12%	7.07E+01 ±8.90%	6.61E+01 ±11.49%
7cm	5.13E+01 ±10.56%	8.43E+01 ±10.29%	7.90E+01 ±8.70%	7.82E+01 ±10.63%
8cm	6.11E+01 ±10.50%	1.00E+02 ±9.40%	9.13E+01 ±7.77%	9.04E+01 ±10.26%
9cm	7.59E+01 ±9.10%	1.06E+02 ±9.09%	1.11E+02 ±6.88%	1.07E+02 ±9.76%
10cm	7.71E+01 ±8.71%	1.07E+02 ±8.78%	1.25E+02 ±6.67%	1.26E+02 ±9.34%
11cm	9.58E+01 ±8.05%	1.16E+02 ±8.06%	1.32E+02 ±6.40%	1.39E+02 ±8.83%
12cm	8.97E+01 ±8.09%	1.31E+02 ±7.91%	1.44E+02 ±6.02%	1.59E+02 ±8.43%
13cm	9.44E+01 ±7.67%	1.39E+02 ±7.33%	1.37E+02 ±6.19%	1.85E+02 ±7.95%
14cm	9.62E+01 ±7.37%	1.53E+02 ±6.98%	1.59E+02 ±5.78%	1.98E+02 ±7.74%
15cm	1.18E+02 ±7.04%	1.68E+02 ±6.75%	1.75E+02 ±5.43%	2.02E+02 ±7.55%
16cm	1.25E+02 ±6.77%	1.78E+02 ±6.41%	1.70E+02 ±5.47%	2.25E+02 ±7.01%
17cm	1.22E+02 ±6.82%	1.87E+02 ±6.20%	1.91E+02 ±5.06%	2.38E+02 ±7.14%
18cm	1.18E+02 ±6.86%	2.00E+02 ±6.04%	2.09E+02 ±4.90%	2.65E+02 ±6.63%
19cm	1.32E+02 ±6.41%	2.07E+02 ±5.76%	2.22E+02 ±4.87%	2.84E+02 ±6.53%
20cm	1.27E+02 ±6.32%	2.31E+02 ±5.43%	2.34E+02 ±4.93%	2.96E+02 ±6.25%
21cm	1.34E+02 ±6.31%	2.21E+02 ±5.38%	2.36E+02 ±4.70%	3.23E+02 ±6.16%
22cm	1.35E+02 ±6.26%	2.30E+02 ±5.36%	2.59E+02 ±4.36%	3.55E+02 ±5.96%
23cm	1.49E+02 ±6.04%	2.44E+02 ±5.22%	2.77E+02 ±4.22%	3.72E+02 ±5.77%
24cm	1.42E+02 ±6.38%	2.47E+02 ±5.17%	3.00E+02 ±4.20%	4.07E+02 ±5.75%
25cm	1.47E+02 ±6.02%	2.70E+02 ±5.00%	3.07E+02 ±3.98%	4.32E+02 ±5.57%
26cm	1.56E+02 ±6.11%	2.73E+02 ±4.83%	2.96E+02 ±3.97%	4.57E+02 ±5.46%
27cm	1.54E+02 ±5.96%	2.87E+02 ±4.93%	3.03E+02 ±3.97%	4.64E+02 ±5.49%
28cm	1.44E+02 ±6.12%	2.94E+02 ±4.82%	3.12E+02 ±3.79%	5.08E+02 ±5.23%
29cm	1.52E+02 ±5.92%	3.04E+02 ±4.71%	3.51E+02 ±3.57%	5.26E+02 ±4.97%
ヒストリー数	1970 × 600	1970 × 600	3220 × 600	1970 × 600

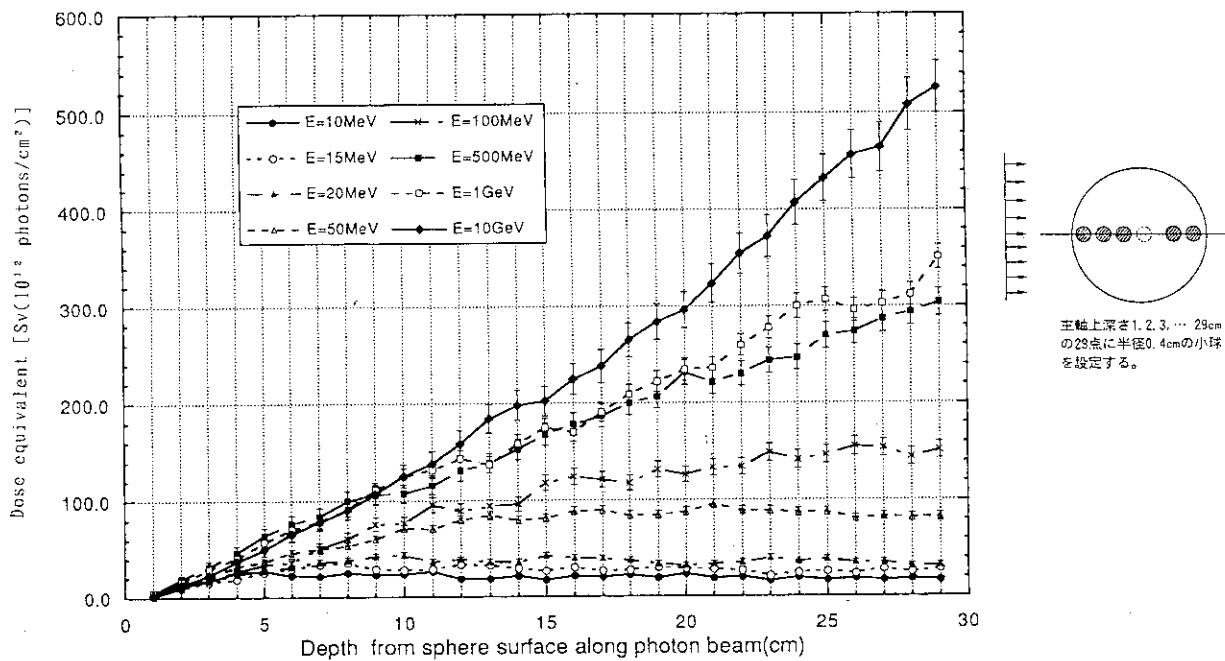


Fig. 8.1 Dose equivalents in ICRU sphere irradiated by 10 MeV-10 GeV parallel photon beam

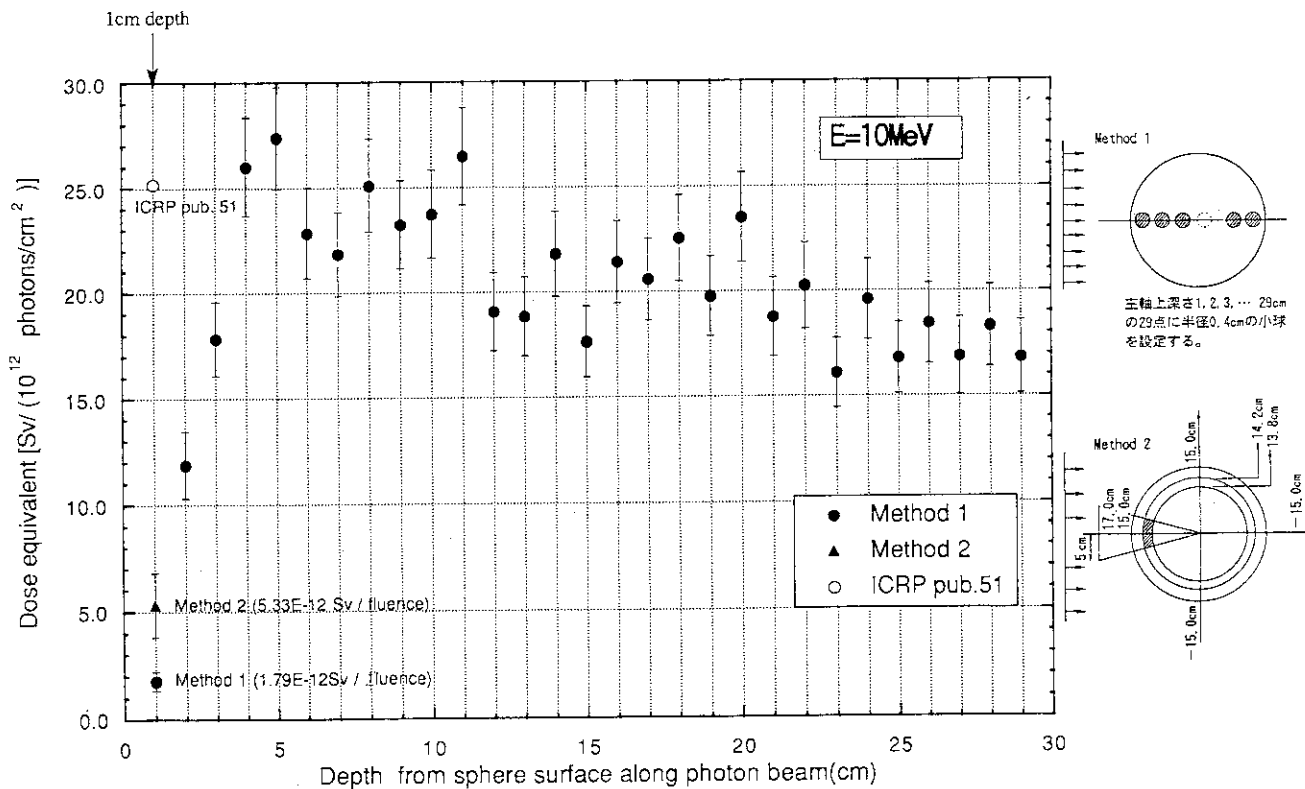


Fig. 8.2 Dose equivalent in ICRU sphere irradiated by 10 MeV parallel photon beam

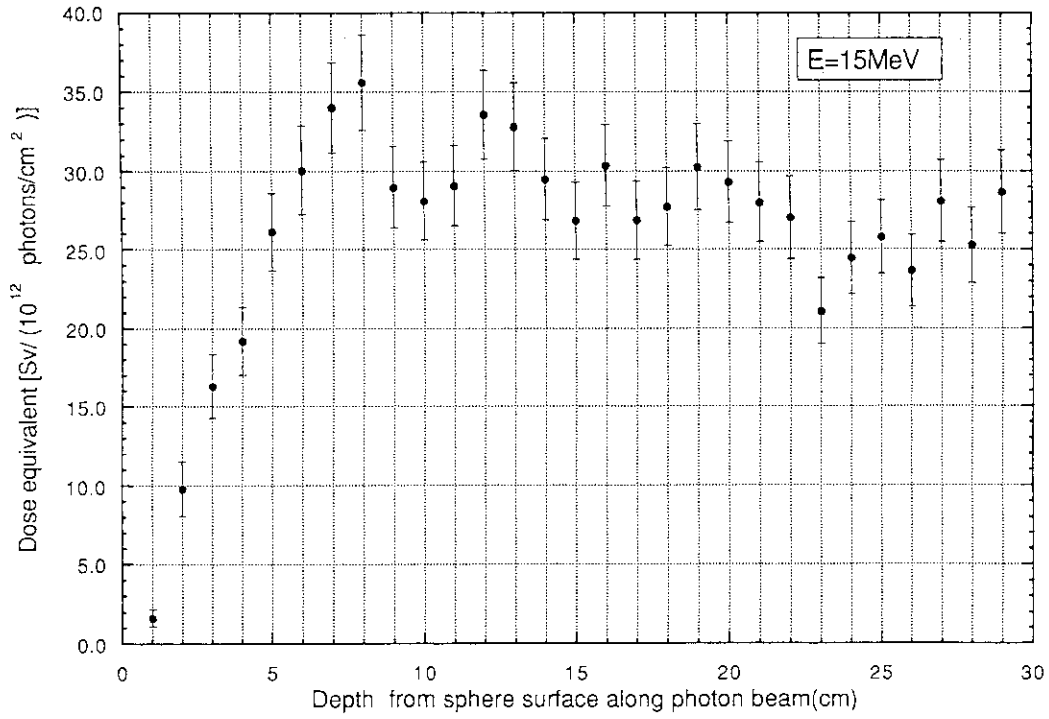


Fig. 8.3 Dose equivalents in ICRU sphere irradiated by 15 MeV parallel photon beam

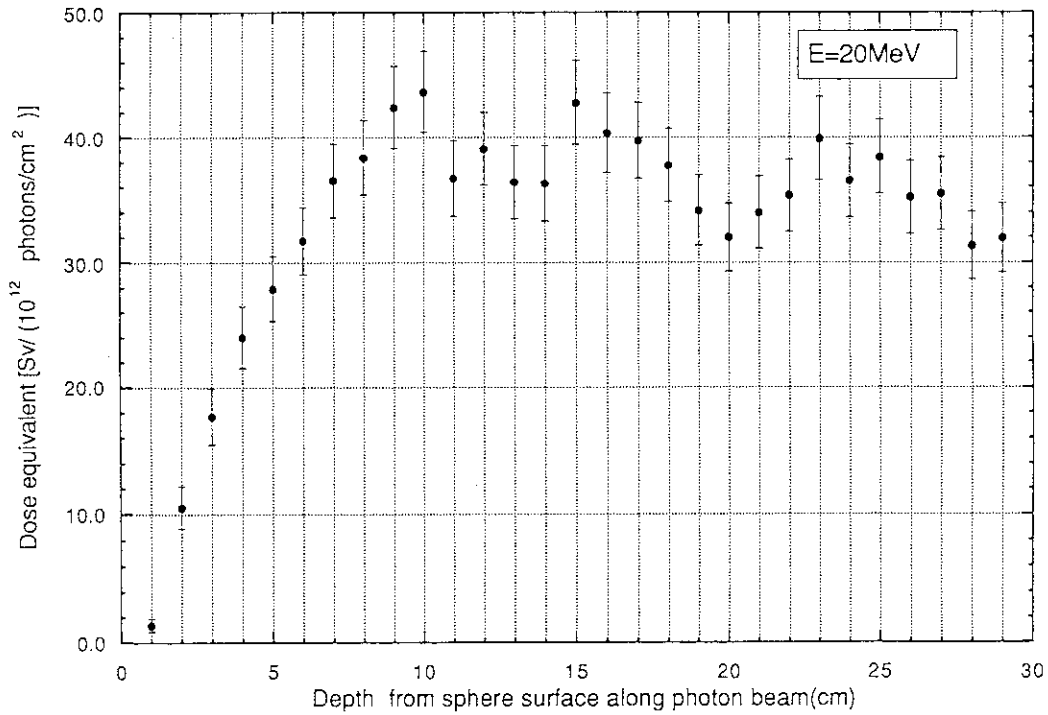


Fig. 8.4 Dose equivalents in ICRU sphere irradiated by 20 MeV parallel photon beam

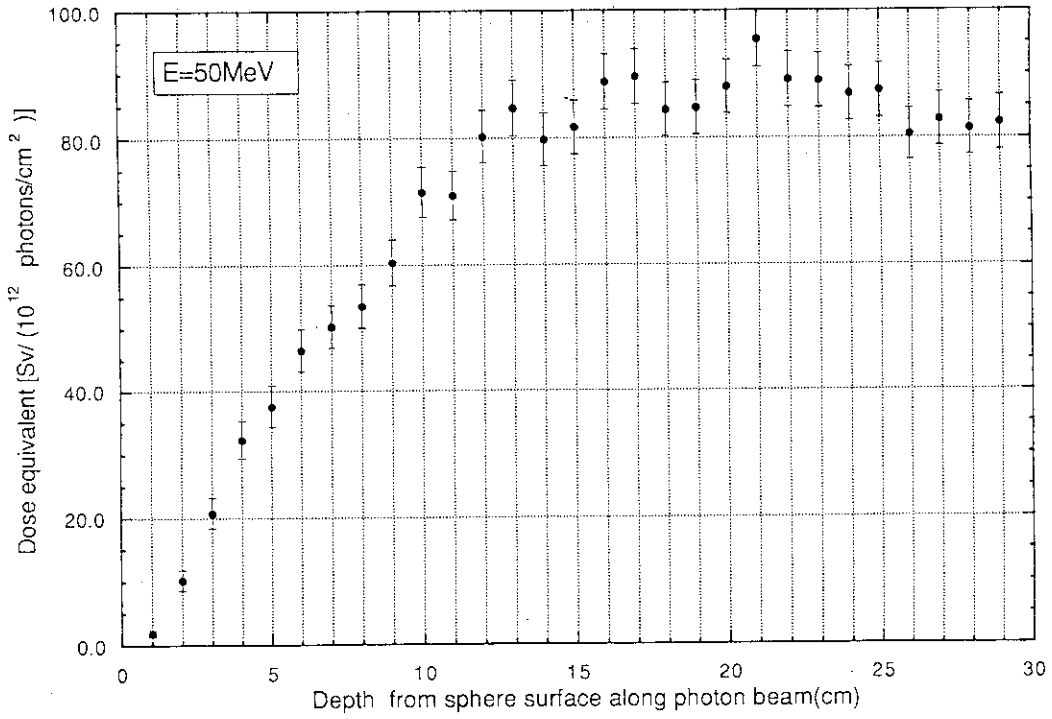


Fig. 8.5 Dose equivalents in ICRU sphere irradiated by 50 MeV parallel photon beam

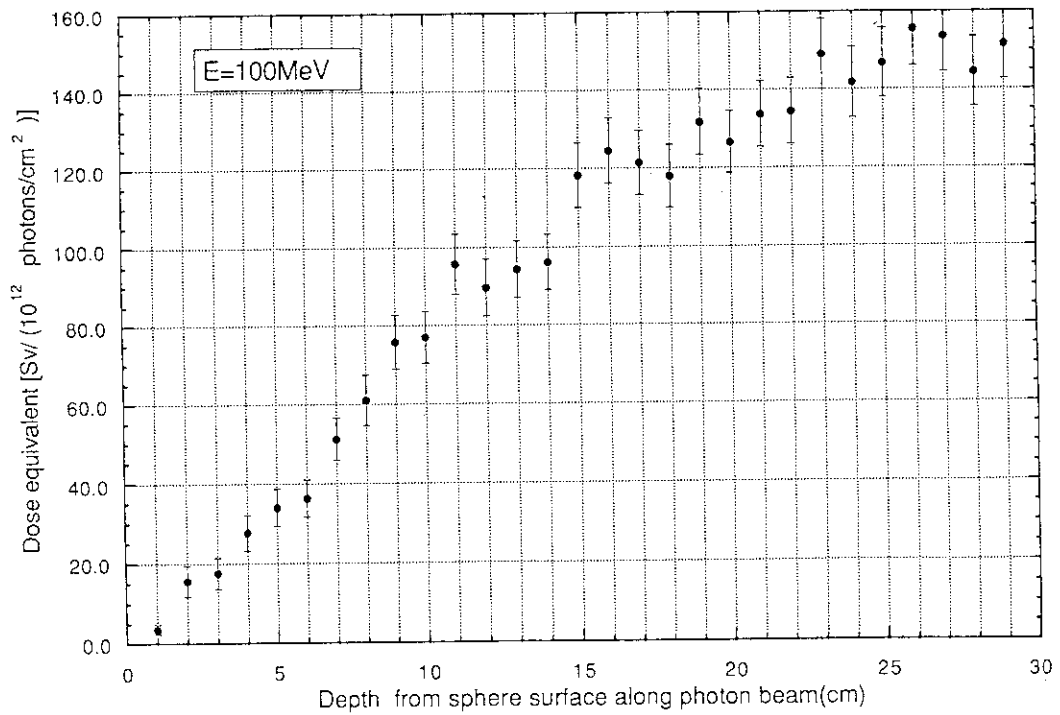


Fig. 8.6 Dose equivalents in ICRU sphere irradiated by 100 MeV parallel photon beam

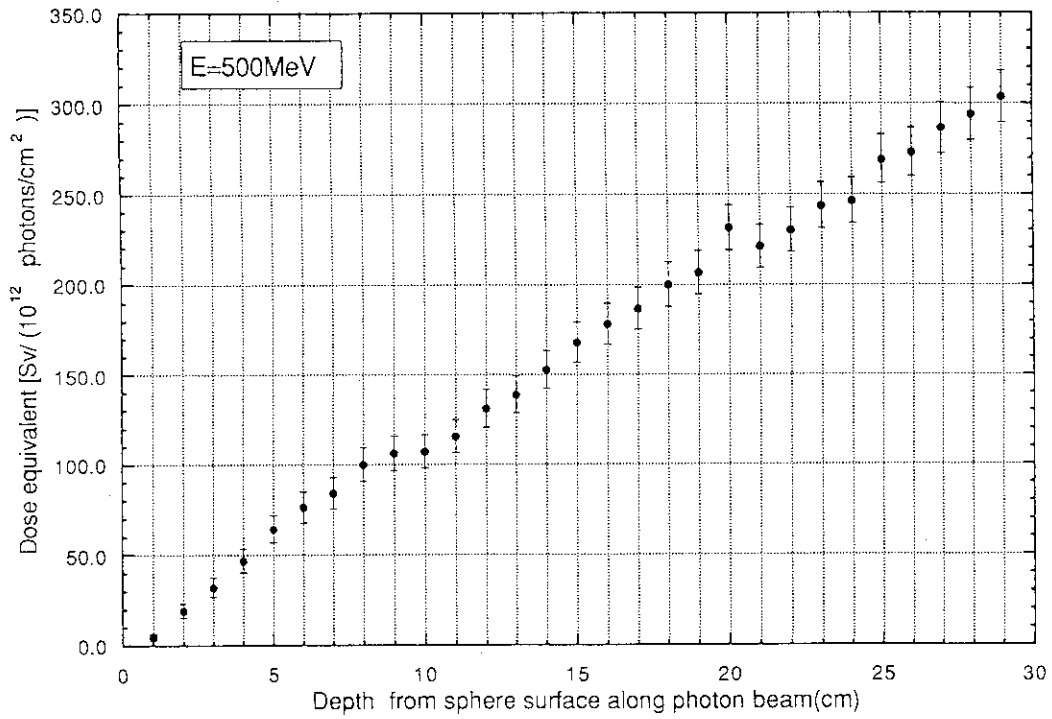


Fig. 8.7 Dose equivalents in ICRU sphere irradiated by 500 MeV parallel photon beam

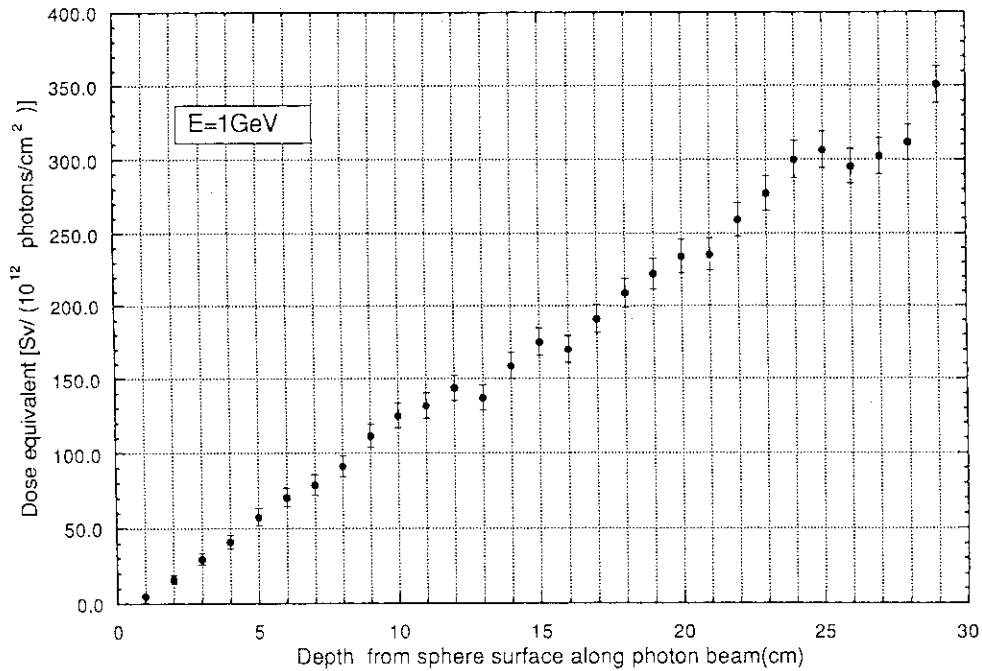


Fig. 8.8 Dose equivalents in ICRU sphere irradiated by 1 GeV parallel photon beam

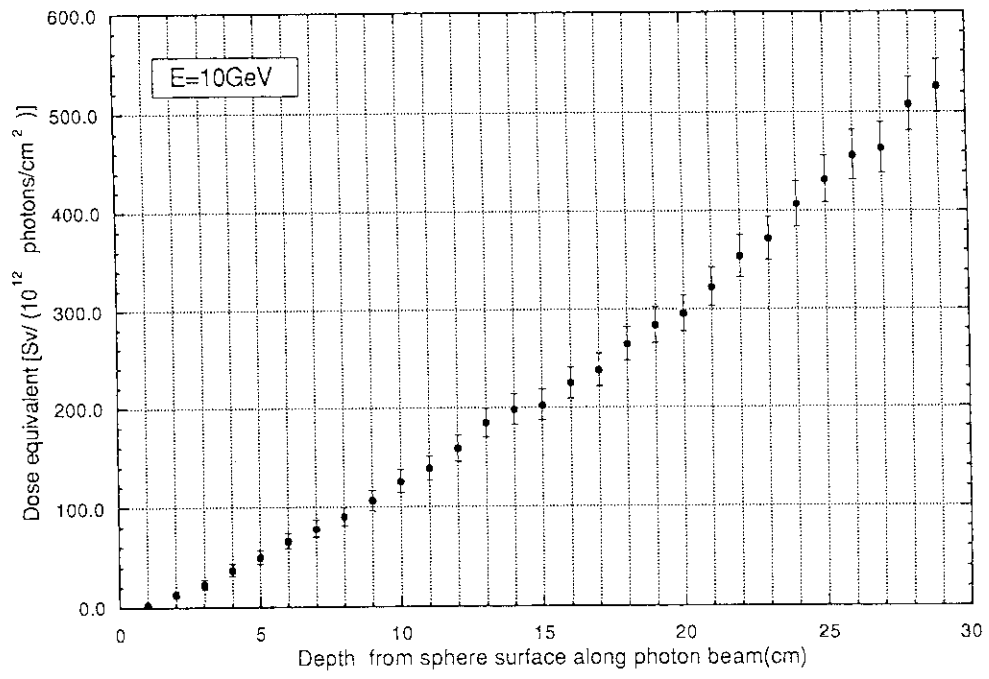


Fig. 8.9 Dose equivalents in ICRU sphere irradiated by 10 GeV parallel photon beam

8.2 10MeV～10GeVの面平行ビーム入射光子に対する実効線量

第6章に示した数学ファントム（成人ファントム）にMIRD-5で規定した媒質（Table 6.2参照）を入れて、AP条件（面平行ビーム前方入射）およびPA条件（面平行ビーム後方入射）で各器官の等価線量および実効線量をTable 8.2および8.3に示した。入射エネルギーはICRU球に入射したのと同様の8種類すなわち10, 15, 20, 50, 100, 500MeV, 1GeVおよび10GeVである。光子、電子のカットオフエネルギーは、ICRU球の場合と同じである。実効線量を評価するのに重要な代表的器官（精巣、卵巣、乳房）およびICRP 60で定義された残りの組織（副腎、脳、小腸壁、腎臓、筋肉、膵臓、脾臓、胸腺および子宮）の等価線量をそれぞれFig. 8.10～8.13に示す。照射条件は真空中に数学ファントム（成人ファントム）を設定して、EGS-4コードを用いて計算を行った。Fig. 8.10～8.13からわかるように精巣、乳房のように前面にある器官はAP条件よりPA条件の方が線量が高く、ファントムの中央にある卵巣およびICRP 60で定義された残りの組織は、AP条件およびPA条件ともほぼ同等の値を示している。このことはICRU球の照射について第8.2節で考察した結果とほぼ一致している。すなわち、AP条件において入射面に近い精巣と乳房は、入射面とは遠くなるPA条件のときに比べて数倍～1ケタ線量が低くなる。このことは人体を表わす数学ファントムにおいても10MeV以上の光子に対しては入射境界では十分に2次電子が発生しておらず、電子平衡が成り立っていないことを表わしている。しかし、ファントムの中央にある器官は丁度ICRU球の中央にあるのと同様にAP、PAどちらの条件で照射してもほぼ同様の値を示す。そのために、10MeV～10GeVの光子エネルギーでは、実効線量はPA条件の方が大きい値を示す。今回、EGS-4で計算した結果の妥当性を検討するために、10MeVの光子について計算結果のあるICRP 51の値との比較を行った。AP条件およびPA条件それぞれについて結果をTable 8.4および8.5に示す。Table 8.4および8.5から次のことがわかる。

- (1) 精巣はAP条件では今回の計算結果はICRP 51の $\frac{1}{5}$ 程度であるが、PA条件では約80%である。ICRP 51は入射面における2次電子平衡を仮定しているため、AP条件では大きな値を示すのは前に考察済みであるが、PA条件においても大きめの値を示すことについては、今回計算したEGS-4を用いる手法とICRP 51が用いた採用した方法⁵⁷⁾との違い、すなわち、今回の方法ではEGS-4コードを

用いて特別な仮定なくエネルギー沈着量をモンテカルロ法で解いているのに対して、ICRP 51で用いる方法ではCHORD近似⁵⁸⁾を用いることが主要因と考えられる。なお、今回の計算におけるモンテカルロ誤差を減少させることよも、より信頼性のある比較評価を行うために重要である。

- (2) 乳房の等価線量も精巣の場合とほぼ同様のことが言える。乳房についても精巣とほぼ同様の原因が考察できる。
- (3) 卵巣の場合、EGS-4コードで求めた等価線量はAPおよびPA条件ともICRP 51の50%前後の値を示す。原因としては、ICRP 51で採用している文献57がCHORD近似を用いていることが考えられるが、比較検討の信頼性を向上させるために、EGS-4コード計算結果のモンテカルロ誤差を減少させることが必要である。
- (4) 赤色骨髄、骨表面は不一致の程度が25%ぐらいであるが、甲状腺、肺、残りの組織では数%以内である。赤色骨髄、骨表面の場合は、ファントムの大半を占めるSoft Tissue (軟組織) 中に存在するため、CHORD近似が大きく効くことが考えられるが、詳細な原因は不明である。
- (5) 実効線量当量 (ICRP 26で定義したEffective dose equivalent) は、AP条件でICRP 51の方が45%、PA条件で20%程度大きい。その原因は生殖腺と乳房の値について、ICRP 51と今回の計算結果に大きな差異があるためである。

Table 8.2 Equilient doses of target organs and effective dose for
pararell incidence of photons (unit:Sv/(photon/cm²))
(AP condition)

入射光子 標的器官	10MeV	15MeV	20MeV	50MeV	100MeV	500MeV	1GeV	10GeV
精 巣	5.808-12(22.4) [†]	1.434-11(35.4)	1.497-11(35.7)	7.558-12(25.1)	1.507-11(40.8)	1.869-11(38.6)	9.404-12(22.3)	3.018-11(50.6)
卵 巣	1.365-11(17.8)	1.733-11(33.5)	1.977-11(33.6)	3.273-11(12.2)	4.843-11(23.6)	4.282-11(24.3)	4.562-11(12.4)	8.926-11(33.1)
赤色骨髄	1.862-11(0.77)	2.807-11(1.9)	3.357-11(1.9)	5.830-11(0.87)	8.167-11(1.6)	1.151-10(1.6)	1.149-10(0.80)	1.545-10(1.5)
大腸下部壁	2.316-11(2.6)	3.232-11(7.5)	3.304-11(7.9)	5.163-11(2.3)	7.101-11(6.6)	8.195-11(6.6)	8.287-11(2.2)	1.186-10(6.1)
肺	2.746-11(2.6)	3.254-11(7.8)	3.581-11(8.1)	5.235-11(2.5)	6.510-11(7.6)	7.539-11(7.5)	7.687-11(2.4)	8.489-11(7.3)
胃 壁	1.106-11(3.7)	1.278-11(11.4)	1.521-11(12.0)	1.729-11(3.8)	2.850-11(10.5)	2.814-11(11.7)	2.700-11(3.4)	3.836-11(10.3)
ぼうこう壁	2.108-11(4.0)	2.652-11(11.5)	3.289-11(11.2)	3.709-11(4.1)	4.569-11(11.6)	5.787-11(11.1)	5.242-11(3.8)	6.753-11(11.2)
乳 房	5.982-13(17.4)	3.183-12(24.4)	2.991-12(27.3)	6.179-13(19.0)	5.111-12(22.8)	4.967-12(22.6)	8.471-13(18.2)	4.638-12(25.5)
肝 臓	2.233-11(1.3)	3.069-11(3.9)	3.276-11(4.4)	4.623-11(1.5)	6.001-11(4.8)	8.031-11(4.6)	7.881-11(1.5)	9.095-11(4.5)
食 道	1.730-11(4.8)	1.919-11(13.8)	3.302-11(12.6)	5.297-11(3.2)	8.278-11(8.9)	1.002-10(8.6)	9.246-11(2.9)	1.259-10(8.8)
甲 状 腺	1.778-11(19.1)	2.458-11(28.1)	1.955-11(34.1)	2.612-11(28.8)	2.998-11(33.0)	4.503-11(24.3)	3.048-11(26.9)	4.112-11(24.7)
皮 膚	1.033-11(0.56)	1.406-11(16.4)	1.784-11(1.6)	3.212-11(0.54)	4.580-11(10.2)	6.648-11(0.99)	6.797-11(0.43)	8.617-11(0.96)
骨表面	1.947-11(19.2)	2.889-11(28.7)	3.400-11(26.7)	5.277-11(12.6)	7.405-11(16.5)	1.012-10(13.8)	9.789-11(9.7)	1.312-10(11.8)
副 腎	2.321-11(16.3)	2.914-11(50.4)	3.235-11(43.5)	8.155-11(9.3)	1.138-10(25.5)	1.864-10(22.8)	1.744-10(8.2)	1.857-10(29.0)
脳	2.265-11(3.0)	3.091-11(4.9)	3.784-11(5.1)	6.637-11(5.3)	8.184-11(5.3)	1.183-10(5.1)	1.188-10(5.2)	1.421-11(5.1)
小腸壁	2.353-11(1.5)	3.211-11(4.4)	3.559-11(4.7)	5.765-11(1.5)	8.148-11(4.4)	9.003-11(4.4)	9.574-11(1.4)	1.134-10(4.3)
腎 臓	2.075-11(5.1)	2.950-11(14.9)	3.814-11(13.4)	8.237-11(3.2)	1.149-10(9.2)	1.673-10(8.8)	1.818-10(2.8)	2.289-10(8.7)
筋 肉	1.893-11(0.34)	2.568-11(0.80)	3.093-11(0.86)	4.814-11(0.37)	6.829-11(0.89)	8.999-11(0.87)	8.923-11(0.36)	1.130-10(0.87)
脾 臓	2.257-11(3.4)	3.677-11(8.8)	4.093-11(9.5)	7.319-11(2.5)	9.928-11(7.6)	1.314-10(7.3)	1.304-10(2.3)	1.667-10(6.9)
脾 臓	2.405-11(4.6)	2.198-11(14.8)	4.390-11(11.3)	6.286-11(3.4)	9.016-11(9.4)	1.206-10(8.9)	1.035-10(3.2)	1.412-10(8.9)
胸 腺	1.272-11(9.2)	3.172-11(23.2)	2.563-11(24.5)	1.278-11(11.5)	3.521-11(24.7)	3.031-10(26.3)	2.272-11(9.5)	2.425-11(28.9)
子 宮	2.165-11(5.9)	3.386-11(16.8)	3.484-11(17.7)	5.593-11(5.8)	8.438-11(16.1)	6.507-11(19.2)	9.473-11(5.7)	1.144-10(18.3)
大腸下部壁	2.326-11(2.4)	2.830-11(0.71)	3.468-11(7.0)	4.978-11(2.3)	7.305-11(6.5)	7.079-11(6.9)	7.533-11(2.2)	9.370-11(6.6)
残りの組織*	1.916-11(0.28)	2.601-11(0.77)	3.130-11(0.83)	4.909-11(0.39)	6.932-11(0.85)	9.121-11(0.83)	9.072-11(0.38)	1.112-10(0.84)
実効線量*	1.758-11(3.1)	2.309-11(5.7)	2.621-11(5.7)	3.955-11(2.3)	5.497-11(4.7)	6.529-11(3.8)	6.426-11(2.0)	8.965-11(6.8)

* 残りの組織(Remainder)の等価線量および全身の実効線量の評価方法はICRP 60に従う。

† 5.808-12=5.808×10⁻¹² (22.4)=誤差22.4%

Table 8.3 Equilent doses of target organs and effective dose for
pararell incidence of photons (unit:Sv/(photon/cm²))
(PA condition)

入射光子 エネルギー 標的器官	10MeV	15MeV	20MeV	50MeV	100MeV	500MeV	1GeV	10GeV
精 巢	1.940-11(13.5) [†]	3.327-11(11.9)	3.779-11(22.8)	7.922-11(8.3)	1.093-10(13.1)	1.328-10(17.0)	1.592-10(7.8)	1.847-10(18.4)
卵 巢	1.090-11(19.0)	1.490-11(17.8)	2.336-11(30.3)	2.976-11(12.5)	4.141-11(19.6)	6.559-11(25.0)	5.598-11(11.2)	7.662-11(26.3)
赤色骨髄	1.844-11(1.0)	2.688-11(0.64)	3.289-11(1.6)	4.345-11(0.70)	6.477-11(1.0)	8.650-11(1.4)	7.981-11(10.3)	1.070-10(1.4)
大腸下部壁	2.052-11(2.8)	3.041-11(2.5)	3.210-11(6.1)	5.691-11(2.2)	9.253-11(3.1)	1.131-10(4.6)	1.222-10(1.8)	1.231-10(4.8)
肺	2.708-11(2.6)	3.069-11(2.7)	3.630-11(6.5)	4.557-11(2.7)	5.191-11(4.6)	6.719-11(6.2)	6.619-11(2.6)	7.149-11(6.2)
胃 壁	1.071-11(3.6)	1.363-11(3.6)	1.961-11(7.9)	3.682-11(2.5)	5.183-11(4.0)	7.409-11(5.7)	7.553-11(2.3)	9.141-11(5.9)
ぼうこう壁	2.357-11(3.8)	2.929-11(3.9)	3.967-11(8.7)	7.901-11(2.6)	1.066-10(4.1)	1.526-10(5.8)	1.542-10(2.4)	2.119-10(5.8)
乳 房	8.192-12(6.6)	1.153-11(6.1)	1.735-11(13.0)	2.650-11(4.4)	3.764-11(6.8)	5.015-11(8.7)	4.829-11(3.9)	6.045-11(8.8)
肝 臓	2.221-11(1.2)	3.077-11(1.3)	3.747-11(3.2)	6.388-11(1.3)	8.995-11(2.1)	1.196-10(3.0)	1.194-10(1.2)	1.466-10(2.9)
食 道	2.039-11(4.6)	2.707-11(4.2)	3.916-11(8.3)	5.422-11(3.1)	8.943-11(4.6)	1.118-10(6.6)	9.629-11(2.8)	1.461-10(6.5)
甲 状 腺	2.164-11(7.9)	2.499-11(7.8)	3.810-11(16.0)	8.763-11(4.6)	1.258-10(7.2)	1.893-10(9.3)	2.695-10(10.9)	3.018-10(9.1)
皮 膚	1.045-11(0.91)	1.410-11(0.55)	1.744-11(1.3)	3.172-11(0.53)	4.511-10(0.62)	6.701-11(0.80)	6.900-11(0.46)	8.652-11(0.79)
骨表面	1.921-11(19.4)	2.787-11(16.5)	3.382-11(24.1)	4.307-11(15.5)	6.442-11(15.6)	8.319-11(14.8)	7.527-11(12.6)	1.012-10(14.1)
副 腎	2.085-11(16.6)	2.835-11(15.1)	5.291-11(30.9)	3.330-11(16.2)	5.073-11(22.8)	6.336-11(32.8)	4.817-11(14.7)	7.969-11(30.9)
脳	2.476-11(4.6)	3.030-11(5.0)	3.771-11(5.2)	6.197-11(5.4)	8.308-11(2.9)	1.071-10(4.2)	1.280-10(5.2)	1.400-10(4.1)
小腸壁	2.269-11(1.5)	3.121-11(1.5)	4.259-11(3.4)	7.021-11(1.3)	9.255-11(2.2)	1.274-10(3.1)	1.281-10(1.3)	1.504-10(3.2)
腎 臓	1.934-11(5.5)	2.258-11(5.6)	2.576-11(13.4)	2.338-11(6.2)	3.216-11(9.7)	4.395-11(12.6)	3.408-11(5.6)	4.263-11(12.6)
筋 肉	1.912-11(0.32)	2.565-11(0.27)	3.149-11(0.68)	4.793-11(0.36)	6.728-11(0.52)	9.253-11(0.69)	8.970-11(0.36)	1.135-10(0.69)
脾 臓	2.282-11(3.4)	2.940-11(3.4)	3.440-11(8.3)	3.917-11(3.5)	4.871-11(5.7)	5.659-11(8.0)	5.746-11(3.2)	7.072-11(7.5)
脾 臓	2.356-11(4.4)	2.976-11(4.3)	4.052-11(9.1)	7.041-11(3.2)	9.496-11(5.1)	1.164-10(7.3)	1.175-10(3.0)	1.421-10(7.4)
胸 腺	1.841-11(8.1)	2.695-11(7.2)	2.961-11(17.8)	8.300-11(4.3)	1.266-10(6.3)	1.981-10(8.7)	2.445-10(3.3)	2.984-10(8.8)
子 宮	2.270-11(5.8)	3.368-11(5.5)	2.784-11(15.1)	7.062-11(5.0)	9.332-11(8.5)	1.095-10(12.6)	1.437-10(4.9)	1.670-10(12.1)
大腸下部壁	2.347-11(2.4)	3.074-11(2.3)	4.313-11(5.3)	7.422-11(1.8)	9.800-11(2.9)	1.447-10(4.0)	1.449-10(1.7)	1.705-10(4.3)
残りの組織*	1.938-11(0.33)	2.591-11(0.30)	3.191-11(0.65)	4.874-11(0.38)	6.814-11(0.50)	9.350-11(0.66)	9.140-11(0.38)	1.148-10(0.66)
実効線量*	1.916-11(2.9)	2.675-11(3.0)	3.276-11(5.6)	5.652-11(2.4)	8.015-11(3.7)	1.480-10(4.5)	1.135-10(2.6)	1.351-10(5.2)

* 残りの組織(Remainder)の等価線量および全身の実効線量の評価方法はICRP 60に従う。

† 1.940-11=1.940×10⁻¹¹ (13.5)=誤差13.5%

Table 8.4 Comparison of dose equivalents of target organs and effective dose equivalent in ICRP51 with those in this work (AP condition)

(単位 Sv/(Photon \cdot cm 2))

	ICRP51 (男性)	ICRP51 (女性)	今回の計算
精 巢	2.74-11 **		5.808-12 *** (22.4%)
卵 巢		2.35-11	1.365-11 (17.8%)
赤色骨髄	2.19-11	2.19-11	1.947-11 (19.2%)
肺	2.43-11	2.29-11	2.746-11 (2.6%)
甲 状 腺	2.77-11	2.77-11	1.778-11 (19.1%)
骨 表 面	2.29-11	2.29-11	1.947-11 (19.2%)
残りの組織	2.52-11	2.52-11	2.286-11 (1.5%)
乳 房		2.55-11	5.982-13 (17.4%)
実効線量当量 *	2.47-11		1.715-11 **** (3.0%)

* ICRP26で定義したEffective dose equivalentであって、ICRP60のEffective doseではない。

** 2.74-11 = 2.74×10^{-11}

*** ()内はモンテカルロ誤差

**** 生殖腺としてICRP51は精巣を採用しているため、ここでも精巣の値を採用。

Table 8.5 Comparison of dose equivalents of target organs and effective dose equivalent in ICRP51 with those in this work (AP condition)

(単位 Sv/(Photon \cdot cm 2))

	ICRP51 (男性)	ICRP51 (女性)	今回の計算
精 巢	2.37-11 **		1.940-11 *** (13.5%)
卵 巢		2.43-11	1.090-11 (19.3%)
赤色骨髄	2.26-11	2.15-11	1.844-11 (1.0%)
肺	2.43-11	2.52-11	2.708-11 (2.6%)
甲 状 腺	2.06-11	2.06-11	2.164-11 (7.9%)
骨 表 面	2.40-11	2.40-11	1.921-11 (19.4%)
残りの組織	2.56-11	2.56-11	2.436-11 (1.2%)
乳 房		2.24-11	8.192-12 (6.6%)
実効線量当量 *	2.42-11		1.986-11 **** (2.9%)

* ICRP26で定義したEffective dose equivalentであって、ICRP60のEffective doseではない。

** 2.37-11 = 2.37×10^{-11}

*** ()内はモンテカルロ誤差

**** 生殖腺としてICRP51は卵巣を採用しているため、ここでも卵巣の値を採用。

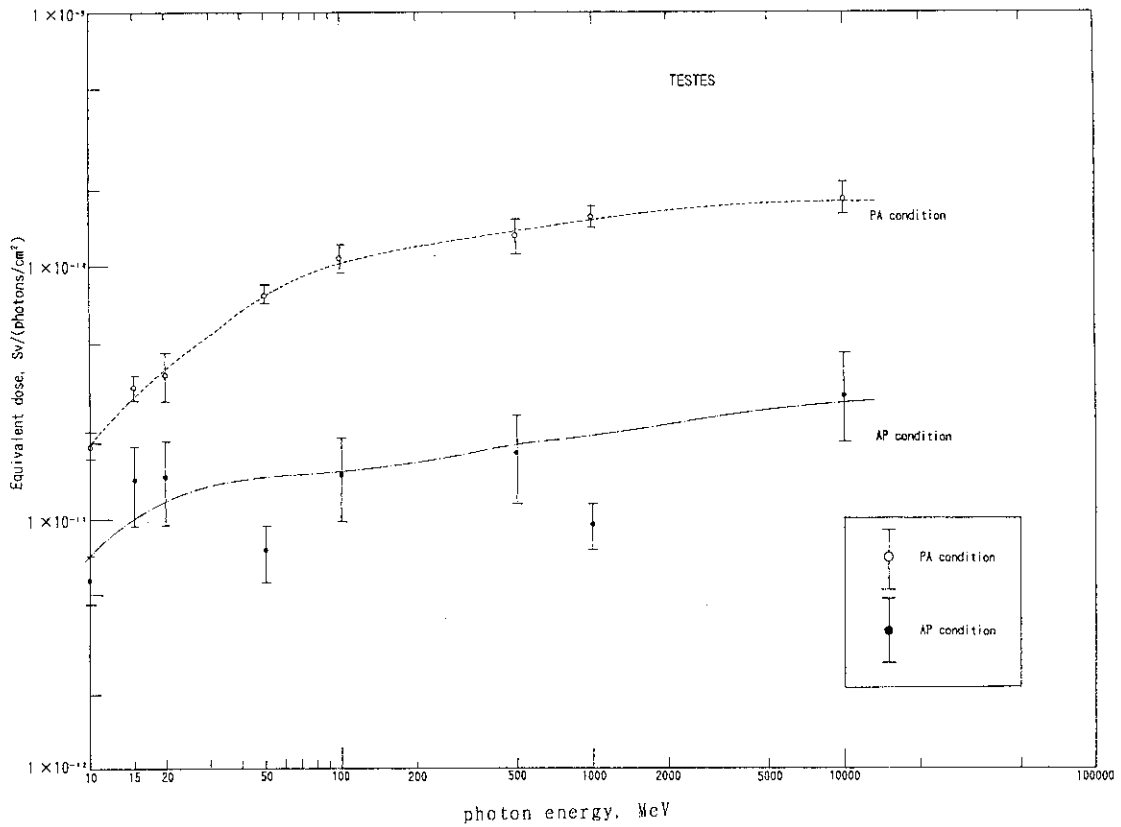


Fig. 8.10 Dose equivalents of testes irradiated by 10 MeV-10 GeV parallel photon beam

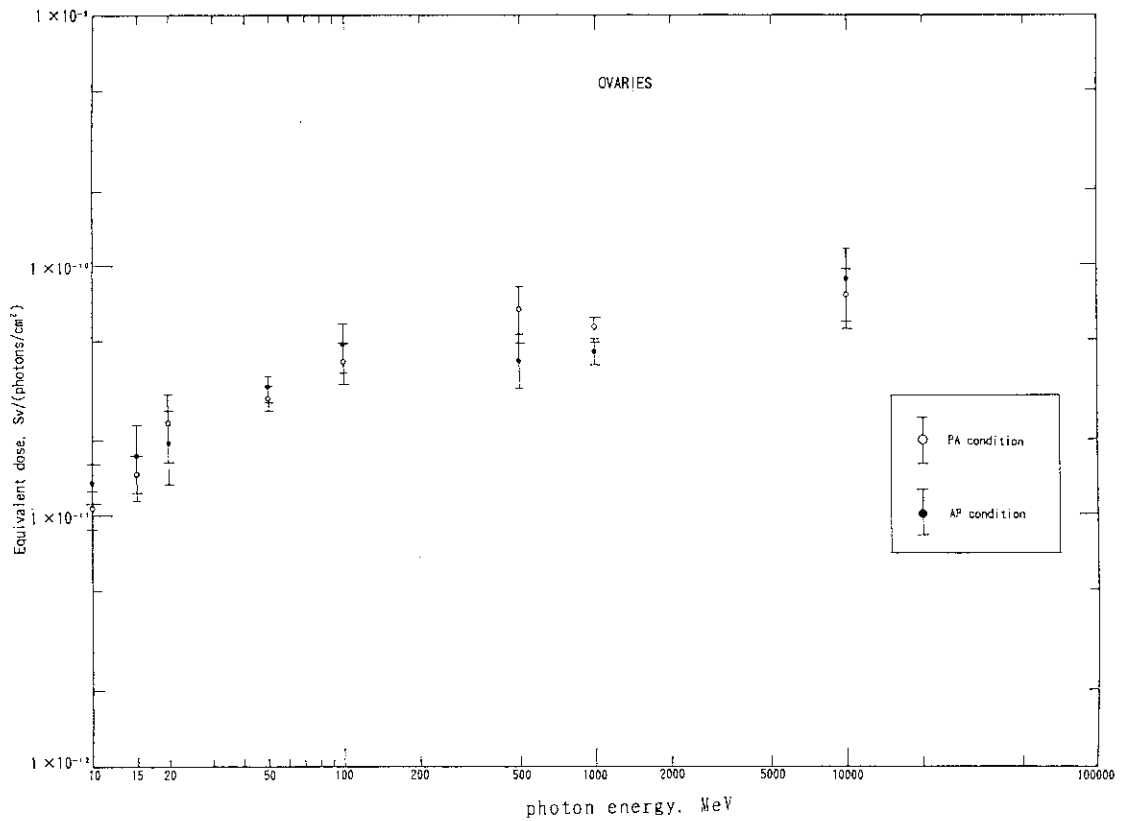


Fig. 8.11 Dose equivalents of ovaries irradiated by 10 MeV-10 GeV parallel photon beam

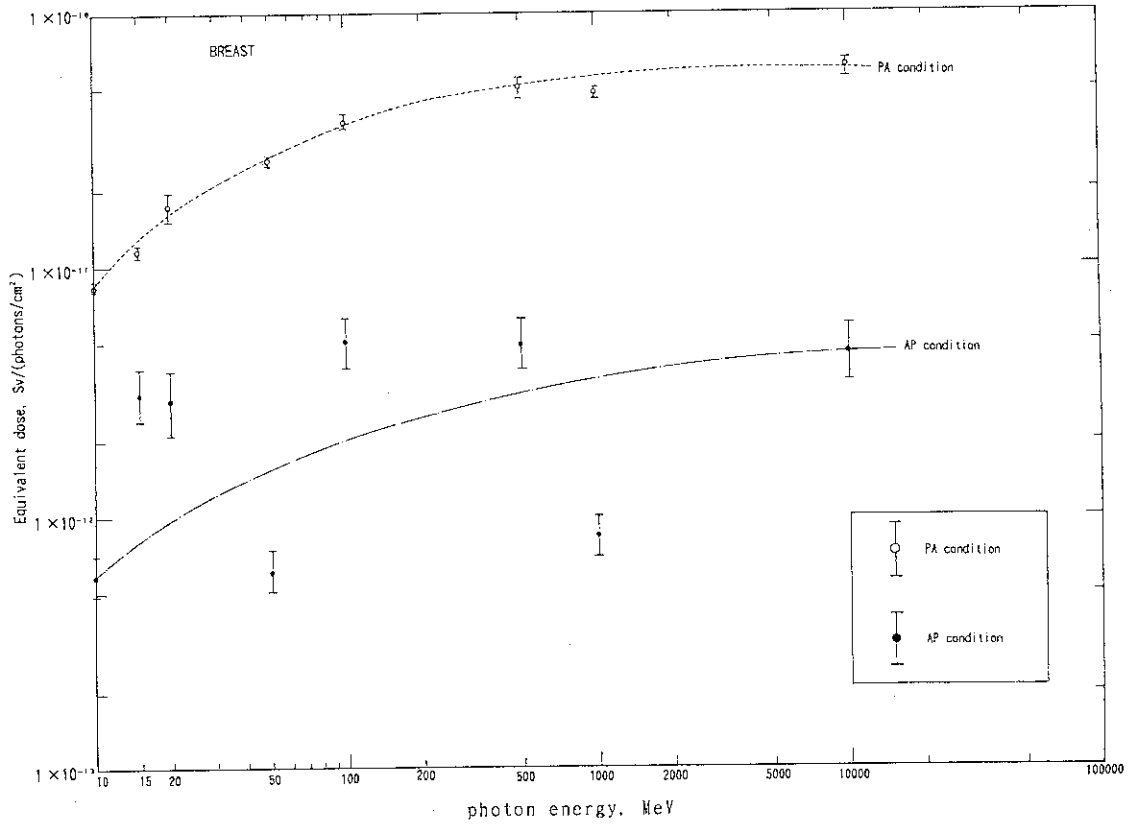


Fig. 8.12 Dose equivalents of breasts irradiated by 10 MeV-10 GeV parallel photon beam

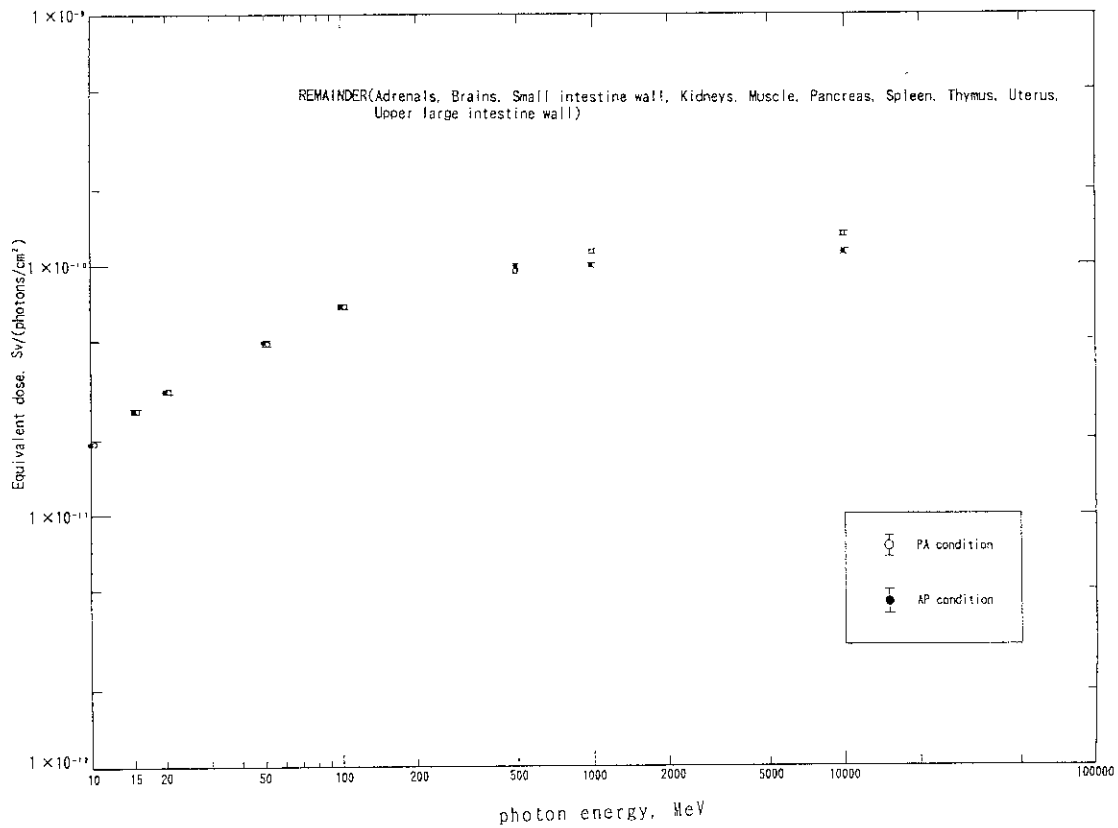


Fig. 8.13 Dose equivalents of remainder irradiated by 10 MeV-10 GeV parallel photon beam

8.3 実効線量とICRU球中の各線量当量との比較

10MeV~10GeVのAPおよびPA条件の実効線量とICRU球主軸上の各点における線量当量の比較を行った。その結果をFig. 8.14~8.21に示す。これらの図を1つにまとめた図、すなわち横軸に入射光子のエネルギーをとり、縦軸にAPおよびPA条件の実効線量、ICRU球主軸上の最大線量当量、ICRU主軸上深さ1cmの点の線量当量(1cm線量当量)、および厚さ30cmの半無限大平板ファントム中の最大線量当量⁵⁹⁾を比較した結果をFig. 8.22に示す。Fig. 8.22から以下のことがわかる。

- (1) 実効線量は1cm線量当量より1ケタ以上大きい。
- (2) 実効線量はICRU球主軸上の最大線量当量より最大4倍程度小さい。
- (3) ICRU球主軸上の最大線量当量は、厚さ30cmの半無限大平板中の最大線量当量に比べると、50MeV以下では前者の方がやや大きく、50MeV以上では後者の方がやや大きい。

以上より、10MeV~10GeVの単一方向平行入射ビーム光子に対して、1cm線量当量は実効線量の代用量とはならず、むしろICRU球中の主軸上の最大線量当量の方が十分な裕度をもった実用量とみなすことができる。(但し、以上の議論はすべてファントムを真空中に置いた場合である。その理由は、ファントムを空気中に設定することにより生ずる高エネルギー光子と空気厚との相互作用を考慮した複雑さを避けるためである。)

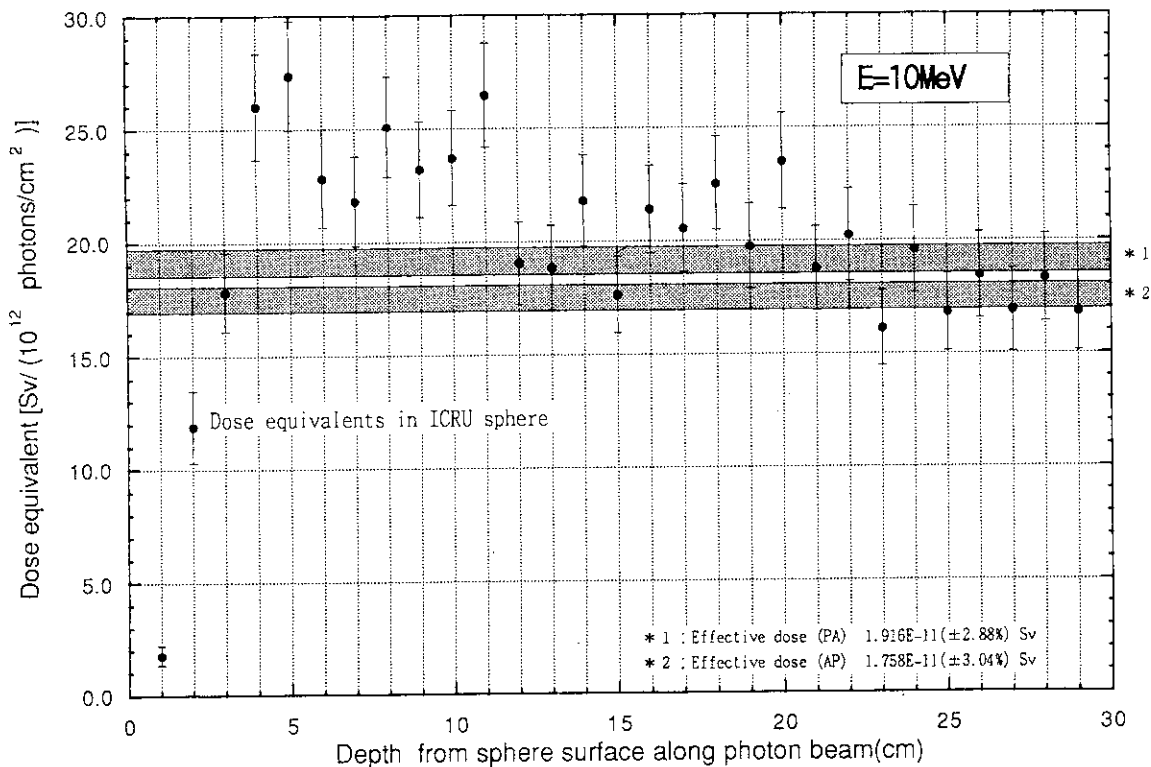


Fig. 8.14 Comparison of effective dose with dose equivalents in ICRU sphere irradiated by 10 MeV parallel photon beam

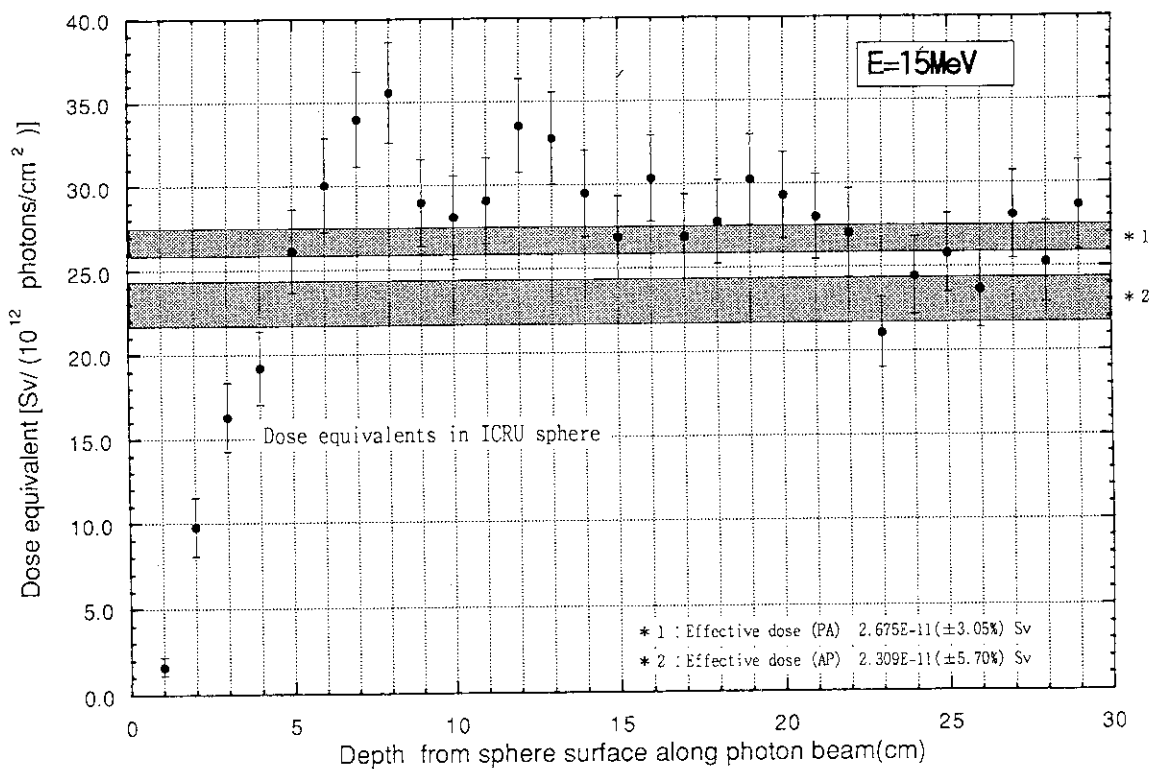


Fig. 8.15 Comparison of effective dose with dose equivalents in ICRU sphere irradiated by 15 MeV parallel photon beam

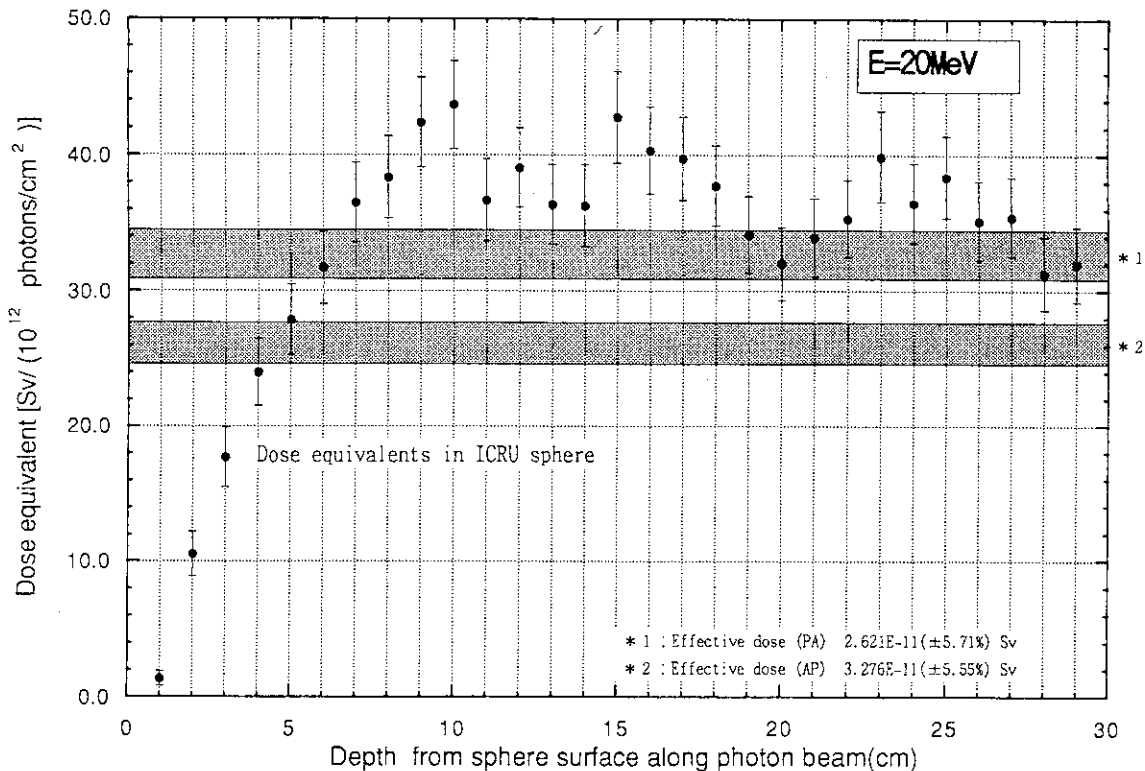


Fig. 8.16 Comparison of effective dose with dose equivalents in ICRU sphere irradiated by 20 MeV parallel photon beam

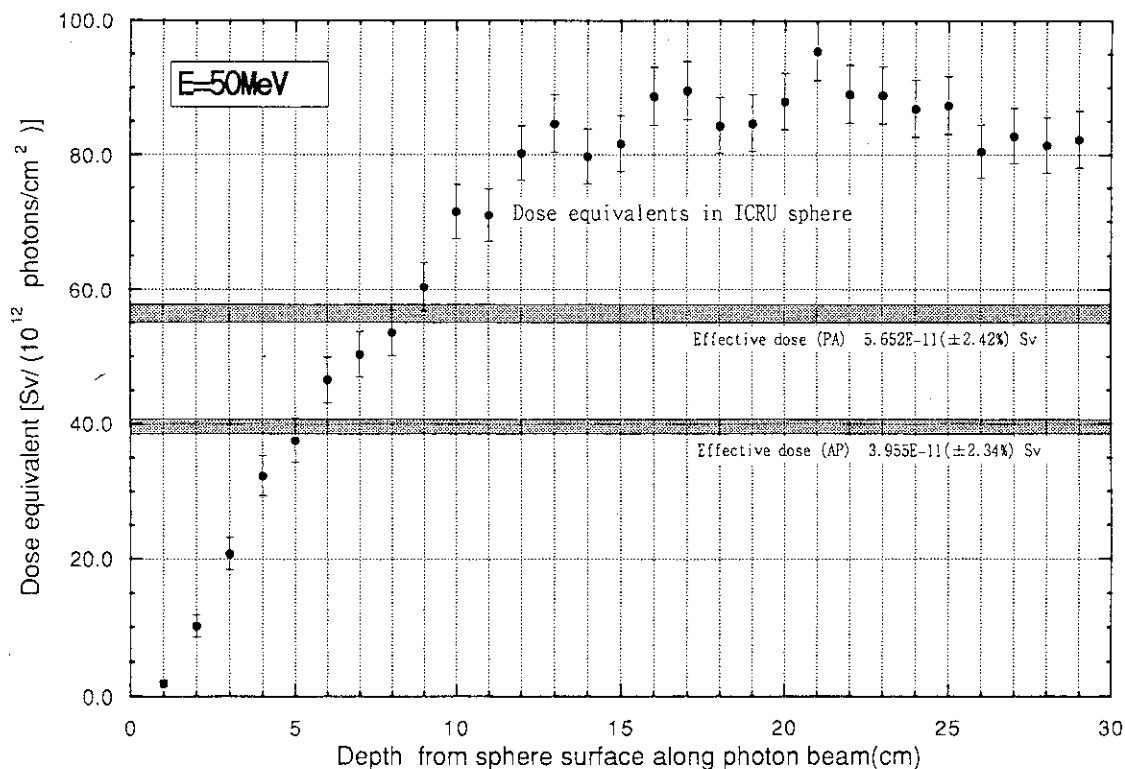


Fig. 8.17 Comparison of effective dose with dose equivalents in ICRU sphere irradiated by 50 MeV parallel photon beam

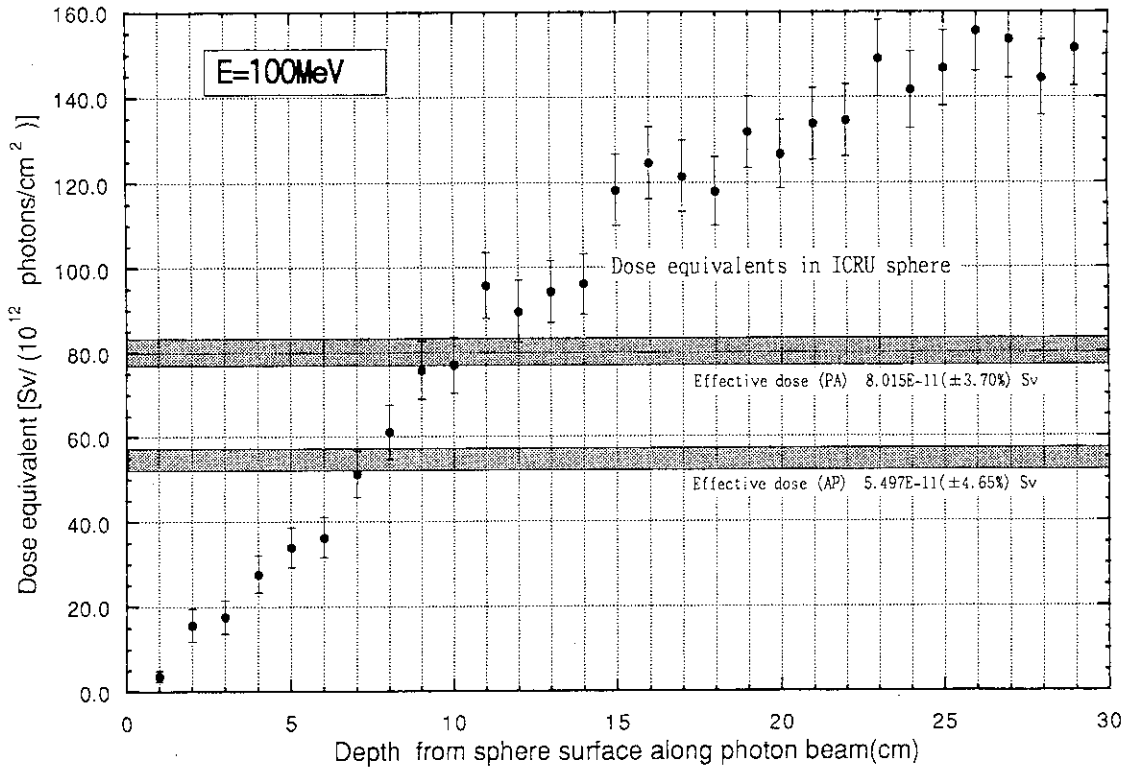


Fig. 8.18 Comparison of effective dose with dose equivalents in ICRU sphere irradiated by 100 MeV parallel photon beam

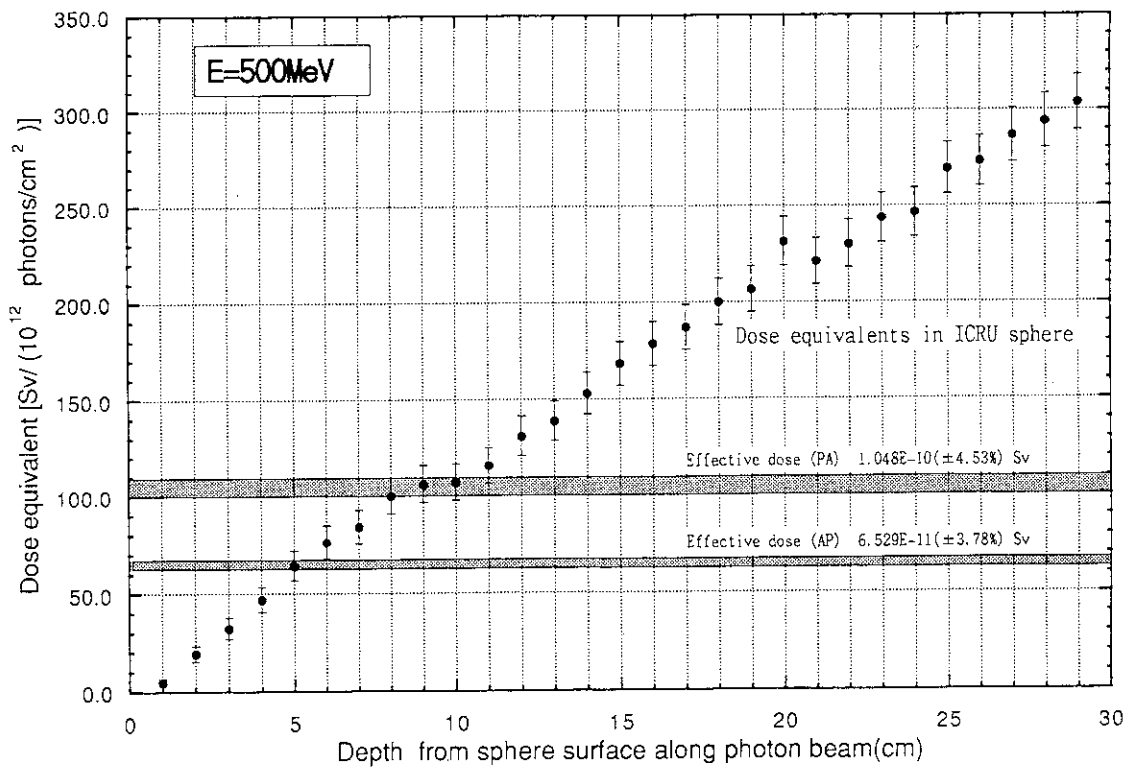


Fig. 8.19 Comparison of effective dose with dose equivalents in ICRU sphere irradiated by 500 MeV parallel photon beam

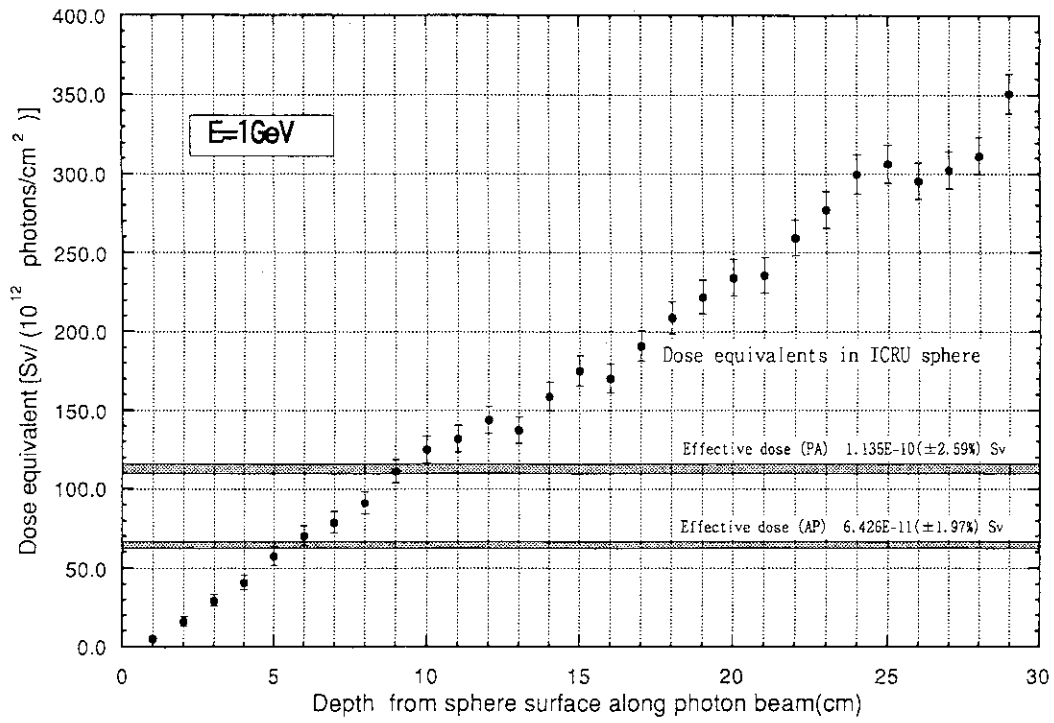


Fig. 8.20 Comparison of effective dose with dose equivalents in ICRU sphere irradiated by 1 GeV parallel photon beam

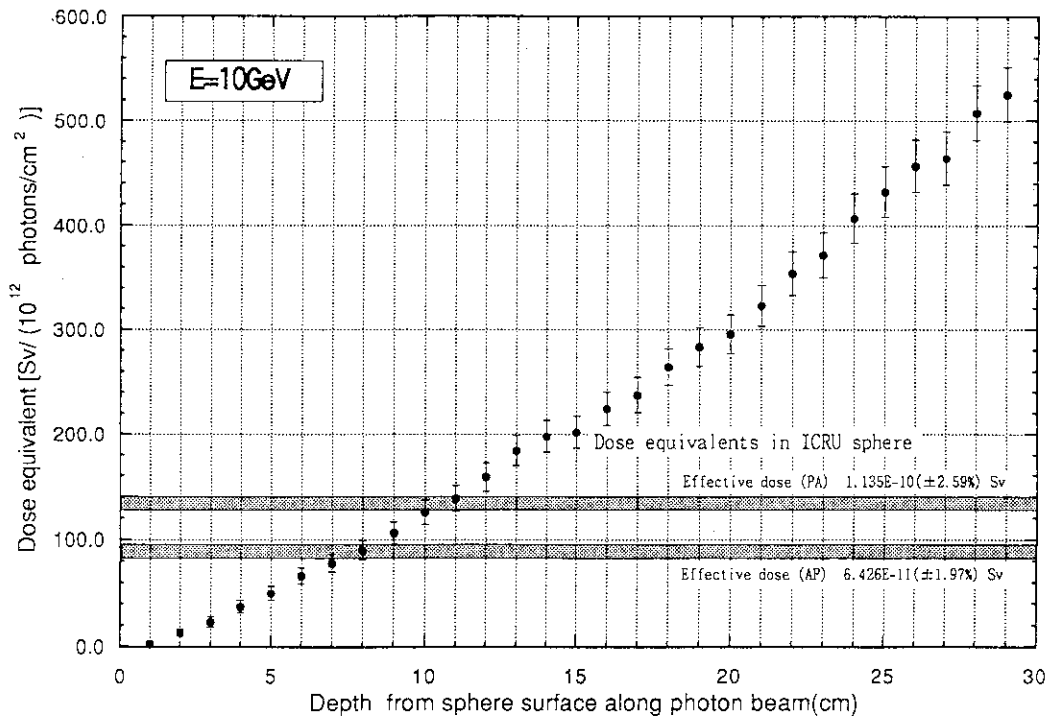


Fig. 8.21 Comparison of effective dose with dose equivalents in ICRU sphere irradiated by 10 GeV parallel photon beam

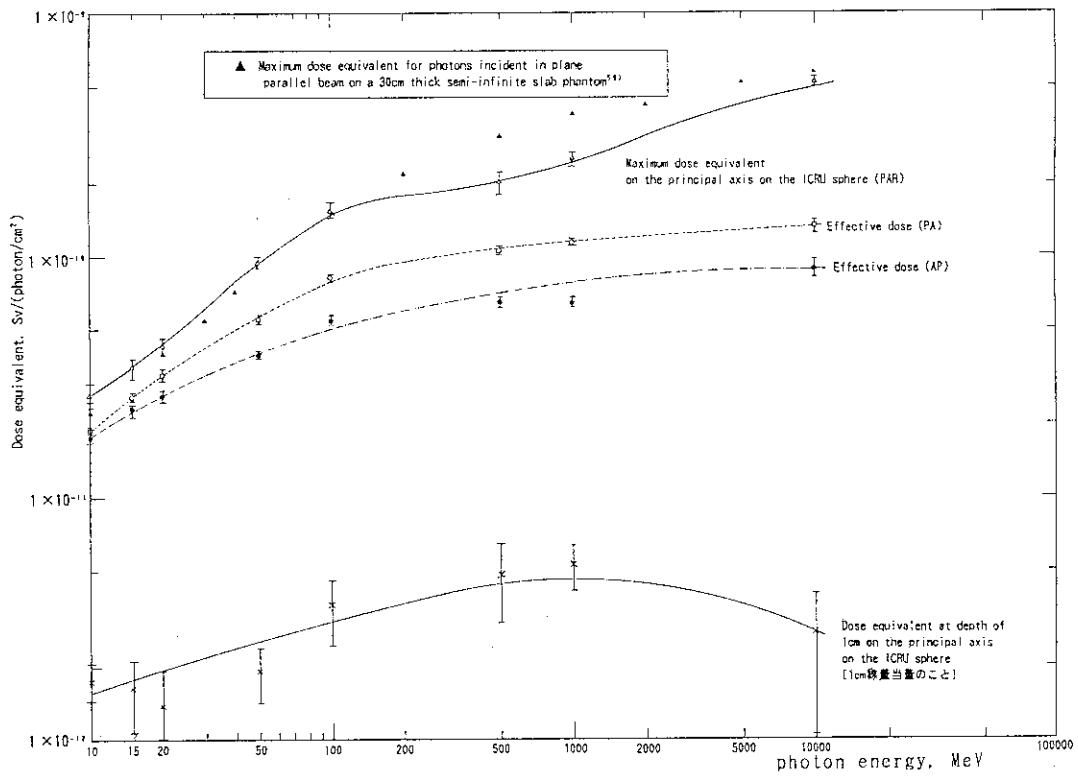


Fig. 8.22 Comparison of effective doses with dose equivalents in ICRU sphere or semi-infinite slab phantom of 30 cm-thickness irradiated by 10 MeV-10 GeV parallel photon beam

9. ま と め

本研究では、高エネルギー放射線が人体に入射したときの線量当量換算係数（フルエンス-実効線量）を評価するために必要なコードシステムと基礎データの調査を行い、計算コードの整備を行った。それを用いて高エネルギー光子（10MeV～10GeV）に対する実効線量およびICRU球主軸上の線量当量の評価を行った。具体的に行ったことは以下のとおりである。

- (1) 高エネルギーから低エネルギーまでの放射線の挙動を取り扱うことができる計算コードシステムHERMESに実効的な線質係数 \bar{Q} を組み込むことにより、人体の各組織の等価線量と実効線量を評価する方法を検討した。この方法を用いることにより、評価が可能であることがわかった。
- (2) 中性子の実効線量当量評価のために、人体内で中性子入射により発生する各荷電粒子の \bar{Q} を算出した。 \bar{Q} の算出にはICRP60の定義に従い、本研究で検討した最新のデータベースを用いた。
- (3) HERMESコードシステム中の高エネルギーの中性子、陽子、中間子、重イオン等を扱うHETCコードには、ICRP60に従って算定した \bar{Q} を組み込む方法を検討した。なお、高エネルギーから低エネルギーまでの電子、陽電子について取扱うEGS-4コードは、これらの荷電粒子の \bar{Q} が全エネルギーにわたって1であるため、吸収線量をそのまま等価線量として扱う。
- (4) 15MeV以下の中性子の挙動を扱うMORSE-CGでは、カーマ係数に荷電粒子の線質係数を入れて等価線量を評価する方法を検討した。
- (5) EGS-4コードを用いて高エネルギー光子（10MeV～10GeV）の単方向平行ビーム入射に対する実効線量とICRU球中の主軸上の線量当量を評価した。その結果、高エネルギー光子（10MeV～10GeV）に対しては1cm線量当量は実効線量の代用量とはならずICRU球中主軸上の最大線量当量が十分な実用量となることがわかった。

謝 辞

人体数学ファントムモデルの作成に際し、基本モデルを提供して頂いた山口恭弘氏に感謝致します。

9. ま と め

本研究では、高エネルギー放射線が人体に入射したときの線量当量換算係数（フルエンス-実効線量）を評価するために必要なコードシステムと基礎データの調査を行い、計算コードの整備を行った。それを用いて高エネルギー光子（10MeV～10GeV）に対する実効線量およびICRU球主軸上の線量当量の評価を行った。具体的に行ったことは以下のとおりである。

- (1) 高エネルギーから低エネルギーまでの放射線の挙動を取り扱うことができる計算コードシステムHERMESに実効的な線質係数 \bar{Q} を組み込むことにより、人体の各組織の等価線量と実効線量を評価する方法を検討した。この方法を用いることにより、評価が可能であることがわかった。
- (2) 中性子の実効線量当量評価のために、人体内で中性子入射により発生する各荷電粒子の \bar{Q} を算出した。 \bar{Q} の算出にはICRP60の定義に従い、本研究で検討した最新のデータベースを用いた。
- (3) HERMESコードシステム中の高エネルギーの中性子、陽子、中間子、重イオン等を扱うHETCコードには、ICRP60に従って算定した \bar{Q} を組み込む方法を検討した。なお、高エネルギーから低エネルギーまでの電子、陽電子について取扱うEGS-4コードは、これらの荷電粒子の \bar{Q} が全エネルギーにわたって1であるため、吸収線量をそのまま等価線量として扱う。
- (4) 15MeV以下の中性子の挙動を扱うMORSE-CGでは、カーマ係数に荷電粒子の線質係数を入れて等価線量を評価する方法を検討した。
- (5) EGS-4コードを用いて高エネルギー光子（10MeV～10GeV）の単方向平行ビーム入射に対する実効線量とICRU球中の主軸上の線量当量を評価した。その結果、高エネルギー光子（10MeV～10GeV）に対しては1cm線量当量は実効線量の代用量とはならずICRU球中主軸上の最大線量当量が十分な実用量となることがわかった。

謝 辞

人体数学ファントムモデルの作成に際し、基本モデルを提供して頂いた山口恭弘氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) ICRP Publication 51. Data for Use in Protection Against External Radiation. Annals of the ICRP 17(2/3)(1987).
- 2) ICRP Publication 60. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP 21(1-3) (1991).
- 3) P.Cloth, D.Filges, R.D.Neef, G.Sterzenbach, Ch Reul, T.W.Armstrong, B.L.Colborn, B.Anders, and H.Bruckmann, HERMES A Monte Carlo Program System for Beam-Materials Interaction Studies, Jü1-2203 May(1988)
- 4) M.B.Emmett, THE MORSE MONTE CARLO RADIATION TRANSPORT CODE SYSTEM, ORNL-4972(1975)
- 5) W.R.Nelson, H.Hirayama, and W.O.Rogers : THE EGS-4 CODE SYSTEM, SLAC-265(1985)
- 6) ICRP Publication 26. Recommendations of the ICRP, Annals of the ICRP 1(3) (1977).Reprinted (with additions)in 1987. Superseded by ICRP Publication 60.
- 7) ICRU Report 19. Radiation Quantities and Units (International Commission on Radiation Units and Measurements, Washington, D. C., 1971).
- 8) Statement from the 1978 Stockholm Meeting of the ICRP. Annals of ICRP 2(1)(1978).
- 9) Report of the RBE Committee of the International Commission on Radiological Protection and on Radiological Units and Measurements. Health Phys. 9 (1963)357-384
- 10)ICRU Report 39. Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Source(1985).
- 11)J.F.Janni, PROTON RANGE-ENERGY TABLES. 1keV-10GeV Part.1 For 63 Compounts, ATOMIC DATA AND NUCLEAR DATA TABLES 27(1982)147-339

- 12) ICRU Report 37. Stopping Powers for Electrons and Positrons(1984).
- 13) J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark, THE STOPPING AND RANGE OF IONS IN SOLIDS, Volume 1 of the Stopping and Ranges of Ions in Matter, Pergamon Press(1985)
- 14) T. W. Armstrong and K. C. Chandler, "SPAR. a FORTRAN program for computing stopping powers and ranges for muons, charged pions, protons, and heavy ions". ORNL-4869(1973)
- 15) NCRP Report 108. Conceptual Basis for Calculations of Absorbed Dose Distributions(1991).
- 16) ICRU Report 16. Linear Energy Transfer(1970).
- 17) ICRU Report 33. Radiation Quantities and Units(1980).
- 18) 田島英三、白戸鈔二：放射線と物質との相互作用。山崎文男 編集：実験物理学講座 放射線（共立山出版株式会社 1973）
- 19) H. H. Rossi : "MICROSCOPIC ENERGY DISTRIBUTION IN IRRADIATED MATTER", RADIATION DOSIMETRY Second Edition Vol.1(edittd by F.H. Attix and W. C. Roesch)(Academic Press 1968).
- 20) H. Bichsel, private communication(1992)
- 21) P. Cloth, D. Filges, G. Sterzenbach, T.W. Armstrong and B.L. Colborn, "The KFA-Version of the High-Energy Transport Code HETC and the Generalized Evaluation Code SIMPLE," RSIC Computer Code Collection, CCC-496(1983).
- 22) H. Bichsel and L. E. Porter, Stopping power of protons and alpha particles in H₂, He, N₂, O₂, CH₄, and air, Phys. Rev. A25(1982)2499
- 23) J. Lindhard, M. Scharff, and H. E. Schiott, "Range Concepts and Heavy Ion Ranges, "Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk. 33, No. 14(1963).
- 24) E. Kamaratos, Developments regarding the Bragg rule for stopping power

- and critical examination of its application to water, Nucl. Instr. and Meth. 205(1983)337
- 25) R. M. Sternheimer, The Density Effect for the Ionization Loss in Various Materials, Phys. Rev. 88(1952)851
- 26) H. Bichsel, Barkas effect and effective charge in the theory of stopping power, Phys. Rev. A41(1990)3642
- 27) J. C. Ashley, R. H. Ritchie, and W. Brandt, Phys. Rev. B5(1972)2393
- 28) M. C. Walske, Phys. Rev. 88(1952)1283
- 29) M. C. Walske, Phys. Rev. 101(1956)940
- 30) H. Bichsel, American Institute of Physics Handbook, 3rd Edition, MacGraw Hill, New York(1972)8-142
- 31) J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark, THE STOPPING AND RANGES OF IONS IN MATTER VOLUME 4, Pergamon Press, (1985)
- 32) G. J. Iafrate and J. F. Ziegler, Jour. Appl. Phys. 50(1979)5579
- 33) W. Brandt and M. Kitagawa, Phys. Rev. B25(1982)122
- 34) S. Kreussler, C. Varelas and W. Brandt, Phys. Rev. B23(1981)82
- 35) W. H. Barkas and M. J. Barger, "Tables of Energy Losses and Ranges of Heavy Charged Particles" NASA SP-3013(1964)
- 36) J. Lindhard and M. Scharff, Dan. Mat. Fys. Medd. 27(1953)
- 37) W. H. Barkas, "Nuclear Research Emulsion" Vol. 1, Academic Press, New York, (1963) 372
- 38) H. K. Reynolds, D. N. F. Dumbar, W. A. Wenzel and W. Whaling, Phys. Rev. 92(1953)742

- 39) D. I. Thwaites, stopping cross-sections of liquid water and water vapour for alpha particles within the energy region 0.3 to 5.5 MeV, Phys. Med. Biol. 26(1981)71
- 40) S. Matteson, D. Powers and E. K. L. Chau, Physical-state effect in the stopping cross section of H₂O ice and vapor for 0.3-2.0-MeV α particles, Phys. Rev. A15(1976)856.
- 41) T. W. Armstrong and K. C. Chandler, ANALYSIS SUBROUTINES FOR NUCLEON-MESON TRANSPORT CODE NMTC, ORNL-4736(1971)
- 42) 100-21 γ Cross Section Library for EPR Calculations, ORNL/TM-5249 (1976)
- 43) W. S. Snyder, M. R. Ford, and G. G. Warner : Estimates of specific absorbed fractions for photon sources uniformly distributed in various organs of heterogeneous phantom. NM/MIRD Pamphlet No. 5(revised) J. Nucl. Med. 19. Supplement :5-67(1978).
- 44) Y. Yamaguchi, DEEP Code to Calculate Dose Equivalents in Human Phantom for External Phantom Exposure by Monte Carlo, JAERI-M 90-235(1990).
- 45) C. A. Lewis and R. E. Ellis, Additions to the Snyder Mathematical Phantom, Phys. Med. Biol. Vol. 24 No. 5 pp1019-1024(1979)
- 46) M. Cristy and K. F. Eckerman : Specific Absorbed Fractions of Energy at Various Ages from Internal Photon Sources ORNL/TM-8381/V1-V7(1987).
- 47) 本郷昭三 (放射線医学総合研究所 環境衛生部) 私信(1991).
- 48) M. J. Berger and S. M. Seltzer, "Tables of Energy Losses and Ranges of Electrons and Positrons", National Aeronautics and Space Administration Report Number NASA-SP-3012(1964); also National Academy of Sciences, National Research Council Publication 1133(1964, Second Printing 1967).
- 49) H. A. Bethe, "Theory of Passage of Swift Corpuscular Rays Through Matter", Ann. Physik 5(1930)325.

- 50) H. A. Bethe, "Scattering of Electrons", *Z. für Physik* 76(1932)293.
- 51) F. Bloch, "Stopping Power of Atoms with Several Electrons", *Z. für Physik* 81(1933)363.
- 52) 真木 紘一、川崎 弘光、小迫 和明、関 泰 : 核発熱定数 K E R M A ライブラリーの作成 - 核融合郡定数セット F U S I O N - J 3 用核発熱ライブラリー、J A E R I - M 91-073(1991)
- 53) R. W. Roussln, C. R. Welsbin, J. E. White, N. M. Greene, R. Q. Wright, and J. B. Wright, "VITAMIN-C: The CTR Processed Multigroup Cross-Section Library for Neutronics Studies," ORNL/RSIC-37(ENDF-296)(1980).
- 54) Radiation Quantities and Units, Report 33, International Commission on Radiation Units and Measurements, Washington, D. C. (1980)
- 55) G. Williams, W. P. Swanson, P. Kragh, and G. Drexler, Calculation and Analysis of Photon Dose Equivalent Distributions in the ICRU Sphere, GSF Bericht S-958(1983)
- 56) P. J. Dimbylow and T. M. Francis, The Calculation of Dose Equivalent Quantities in the ICRU Sphere for Photon Energies from 0.01 to 10 MeV, *Radiation Prot. Dosi.* 9(1984)49-53
- 57) G. Williams, M. Zankel, H. Eckerl, and G. Drexler, The Calculation of Dose from External Exposure Using Reference Human Phantoms and Monte Carlo Methods, Part II, Organ Doses from Occupational Exposures, GSF Bericht S-1079(1985)
- 58) T. D. Jones, CHORD operators for cell survival models and insult assesment to active bone marrow, *Radiat. Res.* 71(1977)269-283
- 59) D. W. O. Roger, Fluence to dose equivalent conversion factors calculated with EGS3 for electron from 100keV to 20GeV and photons from 11keV to 20GeV, *Health Phys.* 46(1984)891-914

付録 放射線生物学データと線質係数の導出

1. RBE値と線質係数

- 放射線防護の実務面で使用する線質係数 Q 又は実効的線質係数 \bar{Q} を決めるために必要となる放射線生物学のデータはRBE（生物効果比）である。より正確に言えば、すべての低LET放射線を含むように定義されている“基準放射線”に対する、対象となる放射線の“適切なエンドポイント”を考慮に入れた確率的影響のRBE_M値^{*1}に関連して、 Q 又は \bar{Q} は決められる。¹⁾ 大量の放射線を被ばくしたときに発生する急性効果を含む確定的影響に関するRBEの最大値、すなわちRBE_Mは、放射線防護の対象となる低線量の範囲では常にRBE_Mより小さいため、^{1, 2)} Q 又は \bar{Q} を決めるのにRBE_Mを用いることは安全サイドの考え方である。大線量においても確定的影響のRBEは Q より小さいと評価されている。³⁾

*1 確率的影響に対するRBEの最大値

- Q 又は \bar{Q} を決めるときに用いられるRBE_Mを決める際に以下の項目を考慮することが大切である。
- (I) 基準放射線として使用する低LET放射線が、ガンマ線、X線、電子線のどれを使うかによりRBE_Mは異なる。^{1, 4, 5, 6)} なお、基準放射線として何を使うべきかは特に決められていない。
- (II) RBEには線量および線量率依存性がある。線量域は通常数10mGy以下を使い、線量率は対象となる高LET放射線および基準放射線となる低LET放射線ともに低線量率を使用する。
- (III) ICRP Publication 60の $Q-L$ 関係式をすべての放射線に適用し、各器官（又は組織）の位置の \bar{Q} を用いる方が首尾一貫性がある。
- (IV) RBE_Mはエンドポイントとして固体の発ガン、寿命短縮を採るか、細胞の形質転換、染色体異常、突然変異、細胞死を用いるかによりさまざまに異なるのみならず、細胞の種類、動物の種類および同じ動物ども系統、年齢、性で異なる。^{5, 6)} 放射線防護の観点から考えるべきエンドポイントは、発ガン、遺伝的影響、および白内障である。白内障は確定的影響であるため、発ガンおよび遺伝的影響のような確率的影響よりRBEの最大値は小さいと考えられる。従って、発ガンおよび遺伝的影響に関連がある染色体異常を、エンドポイントとして用いる場合がある。^{5, 6)}

(V) 動物実験からヒト固体へのRBE_M値の外挿法および細胞実験からヒト固体へのRBE_M値の外挿法については確定された方法がない。RBE_Mは比(相対値)であるという理由で動物実験又は細胞実験の値を直接用いる場合もある。

○ 核分裂中性子低線量率ガンマ線のRBE_M値については多くのデータがある。ICRUレポート40⁵⁾およびSinclair⁷⁾によりTable A.1に示す値が示されている。

Table A.1 RBE_M for fission (or optimum energy^{a)})neutron vs. gamma rays for stochastic endpoints

腫瘍誘発	約 3—約200 ^{b)}
寿命短縮(腫瘍による)	15—45
形質転換	35—70
細胞遺伝学的研究	40—50
哺乳動物における遺伝学的エンドポイント	10—45

a) “最適エネルギー”とは生物学的に最も有効なエネルギーのことである。

b) これらの値はのちに15—約80に変えられた。⁶⁾

なお、NCRPからも核分裂中性子対ガンマ線のRBE_M値が示された。⁶⁾ その値をTable A.2に示す。

Table A.2 Summary of estimated RBE_M values for fission neutron vs. gamma rays⁶⁾

エンドポイント	値の範囲 ^{a)}
培養したヒトリンパ球の細胞遺伝学的エンドポイント	34—53
形質転換	3—80 ^{b)}
哺乳動物における遺伝学的エンドポイント	5—70 ^{c)}
植物の遺伝学的エンドポイント	2—100
マウスの寿命短縮	10—46
腫瘍誘発	16—59

a) NCRP104レポート⁶⁾の第2—8章に示したデータを包絡する値

b) この80という値は1組の実験のみから得られた値

c) 70という値は、マウスの遺伝子座の突然変異から得られたものであるが、1つのRBE_M値からの値ではない。

ICRP Publication 60では、マウスにおける種々の腫瘍エンドポイントについて得られた⁶⁰Coガンマ線に対するRBE_Mが8-50の範囲、マウスにおける肺および乳腺の腫瘍については19-70、マウスの寿命短縮（主として腫瘍が原因）については15-45であることから、核分裂中性子のRBE_Mとして30-50を提案している。

このように核分裂中性子のガンマ線に対する発ガンをエンドポイントとするRBE_M値は、各レポートはTable A.3のようにまとめている。これらの値は膨大な動物実験データおよび培養細胞データに基づいて評価されたものである。

Table A.3 Summary of RBE_M values of tumor induction for fission neutron vs. gamma rays estimated in each report

レポート	RBE _M 値の範囲
ICRU レポート40	2-100以上 ^{a)}
NCRP レポート104	16-59
ICRP Publication 60	30-50

a) この表現はBEIR-Vレポート⁸⁾より引用

米国のBEIR委員会では、原爆被曝生存者のデータから核分裂中性子（原爆中性子）のRBEは20という値を推奨している。そして、この値は主に動物実験データから導かれた各レポートのRBE_M値の範囲とも矛盾しない。

- 荷電粒子の1つであるアルファ粒子の発ガン又は染色体異常形成については、BEIR-IV⁹⁾およびNCRPレポート104⁶⁾で考察されており、低LET基準放射線に対してRBE_Mが15~20であることを示している。陽子および重荷電粒子に対する放射線治療のRBE評価に関する実験は数多く行われているが、放射線防護に関連するエンドポイントを対象とする実験データは多くない。^{3, 5)} ICRUレポート40では、最大30くらいのRBE値を報告している。
- Zaiderら¹⁰⁾はヒトのリンパ球の二動原染色体異常をエンドポイントとした値の解析を行い、Linear energy(d=1μm)を横軸にとり、たて軸に生物学的効果に相当するSpecific Quality Function (SQF)という値を誤差付きで評価した。その結果をFig. A.1に示す。その結果に250kVpのX線の値で規格化した値を出した (Fig. A.2に示す)。

この解析に使用した放射線は、以下の10種類、すなわち

- (I) 15MeVの電子線
- (II) ^{60}Co のガンマ線
- (III) 250kVpのX線
- (IV) 14.7MeVの中性子
- (V) サイクロトロンで発生させた中性子
- (VI) ^{252}Cf 中性子
- (VII) 核分裂中性子 ($\bar{E} = 0.9\text{Mev}$)
- (VIII) 核分裂中性子 ($\bar{E} = 0.7\text{Mev}$)
- (IX) ^{239}Pu からのアルファ粒子
- (X) ^{242}Cm からのアルファ粒子

である。すなわち、解析に用いられた高LET放射線は7種類中の5種類が中性子、残りがアルファ粒子であることが解る。

ICRUは次の3つの理由から、Zaiderらが示したFig. A. 2の関数を線質係数Qを定めるときの重要な参考データとした。⁶⁾

- (I) 染色体異常は遺伝的影響と大きく関係し、発ガンとも十分関係を持つと考えられる。
- (II) 1つのグループで幅広い線質について解析したデータである。
- (III) 現時点においてヒトに対する高LET放射線の最良のデータである。

なお、このZaiderらのデータはTable A. 3などに示された核分裂中性子のRBE_M値の知見および重イオンのRBE_Mに関するデータなどと共にICRP Publication 60で定義されたQ-L曲線(本文, Table 2.2およびFig. 2.1参照)の基本データになったと考えられる。

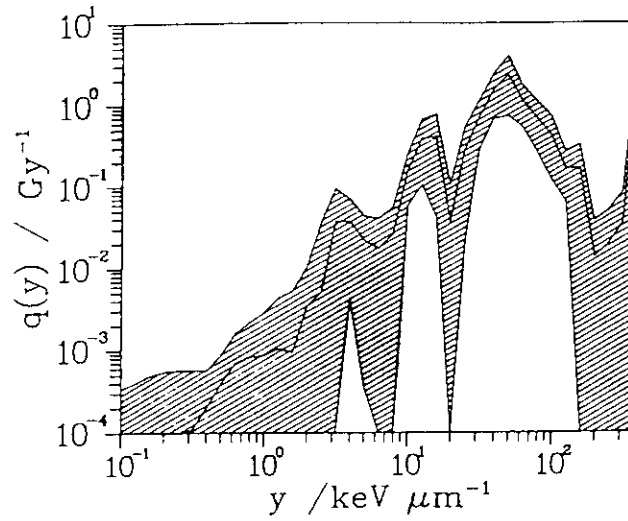


Fig.A.1 A SQF value, $q(y)$, of the yield of dicentric chromosome aberrations in human lymphocytes

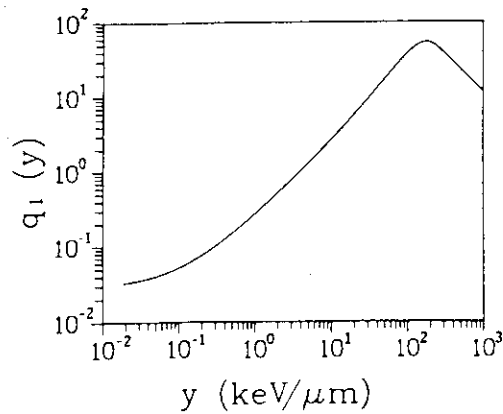


Fig A.2 A SQF value $q_1(y)$ of the yield of dicentric chromosome aberrations in human lymphocytes (After undergoing smoothing and normalizing to the date for 250kVp of X ray)

2. まとめと考察

○ 以上の調査から、線質係数の決定にはヒトのリンパ球の染色体異常に重要な役割を果たしていることがわかった。⁵⁾ なお、ICRP Publication 60のQ-L曲線の決定、とくに $L = 100\text{keV}/\mu\text{m}$ 付近のピーク形成 (Fig. 1参照) には核分裂中性子によるデータが大切な役割を果たしている。核分裂中性子による動物実験および培養細胞の発ガンに関連するRBEのデータはかなり蓄積されており、ICRUレポート40、NCRPレポート104、ICRP Publication 60に集大成されている。なお、ヒト固体の核分裂中性子に対する発ガンのRBEはBEIR-Vレポートで原爆被曝生存者のデータに基づいて提示されている。

○ 陽子、アルファ粒子、重イオンの発ガンに関連するRBEのデータは、核分裂中性子のデータに比べると少ない。(陽子、重イオンを放射線治療に関するRBEのデータはあるが、放射線防護に用いる線質係数の決定には使えない。)

ICRP Publication 60では $L > 100\text{keV}$ で重イオンのデータが反映されているため、Qの値が減少しているが、¹⁾ 重イオンによるオーバーキル効果であると考えられている。^{3, 11)}

○ ICRP Publication 60では、Zaiderらのヒトリンパ球の染色体異常のデータを大幅に採用したICRUレポート40と核分裂中性子を中心とする RBE_M のデータからQ-L曲線を決めたと考えられる。同じLETでも生物学的効果(哺乳類培養細胞の不活性および突然変異)は、荷重粒子の種類により異なるというデータがScholzら、¹³⁾ Coxら、^{14, 15)}、Blakeyら^{11, 16)}およびKieferら¹⁷⁾により報告されている。従って、核分裂中性子を主体として決められたと考えられるICRP Publication 60のQ-L曲線を陽子および重イオン等を対象とする放射線被ばくに、そのまま適用するのは問題がある。陽子および重イオンのQ-L曲線の導出を検討し、それに基づく \bar{Q} 値を決めることが正しい線量評価のために必要である。

○ 数Gyの線量を被ばくする場合は、確定的影響に関連したRBEについて考慮する必要がある。¹²⁾ しかし、ICRP Publication 58²⁾によれば、確定的影響のRBEの最大値である RBE_M は、確定的影響のRBEの最大値である RBE_M に基づいて定

められた Q 又は \bar{Q} より小さな値である。なお、高LET放射線の確定的影響に対するRBEは線量率の減少に伴って増加するが¹²⁾、 Q の値を修正する必要は認められていない。¹⁸⁾ したがって、 Q 又は \bar{Q} を使えば安全サイドの評価であると考えられる。

引用文献

- 1) ICRP Publication 60. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Annals of the ICRP 21 (1-3) (1991).
- 2) ICRP Publication 58. RBE for Deterministic Effects. Annals of the ICRP 20(4) (1989)
- 3) NCRP Report No.98, Guidance on Radiation Protection Received in Space Activities(National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD), 1989
- 4) V.P. Band, C.B. Meinhold, and H.H. Rossi. Low dose RBE and Q for X-ray compared to gamma ray radiations. Health Phys. 34, 433, (1978)
- 5) ICRU Report 40. The Quality Factor in Radiation Protection (International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD, 1986)
- 6) NCRP Report 104 The Relative Biological Effectiveness of Radiations of Different Quality (Recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD, 1990)
- 7) W.K.Sinclair. Experimental RBE values of high-LET radiations at low doses and the implications for quality factor assignment Radiat. Prot. Dosim. 13 ,319 (1985)
- 8) BEIR- V, Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation(Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations, National Research Council, 1990. Washington D.C. National Academy Press.)
- 9) BEIR- IV, Health Risks of Radon and Other Internally Deposited Alpha-Emitters(Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations, National Research Council, 1988 Washington D.C. National Academy Press.)

- 10) M. Zaider and D.J. Brenner, On the Microdosimetric Definition of Quality Factors, *Radiat. Res.* 103, 302 (1985)
- 11) E. A. Blakely, F. Q. H. Nago, S. B. Curtis, and C. A. Tobias, Heavy-ion radiobiology : Cellular studies, *Adv. Radiat. Biol.* 11, 295, (1984)
- 12) United Nations. Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly, with Annexes, United Nations, New York, 1982.
- 13) M. Scholz and G. Kraft, A Parameter-Free Track Structure Model for Heavy Ion Action Cross Sections, A-11 Fourth Workshop on Heavy Charged Particles in Biology and Medicine, Book of Abstract, GSI-91-29 Report (1991)
- 14) R. Cox and W. K. Masson, Mutation and inactivation of cultured mammalian cells exposed to beams of accelerated heavy ions. III. Human diploid fibroblasts, *Intl. J. Radiat. Biol.* 36, 149. (1979)
- 15) R. Cox, J. Thacker and D. T. Goodhead, Inactivation and mutation of cultured mammalian cells by aluminium characteristic ultrasoft x-rays. II. Dose-responses of Chinese hamster and human diploid cells to aluminium x-rays and radiations of different LET, *Intl. J. Radiat. Biol.* 31, 561. (1977)
- 16) E. A. Blakely, Cell inactivation by heavy charged Particles *Radiat. Environ. Biophys.* 31, 181 (1992)
- 17) J. Kiefer, T. Kranert, E. Schneider, and U. Stoll, Radiation Risk in Space: Implication of IN VITRO Heavy Ion Mutation Experiments, p504-508, *RADIATION RESEARCH, A Twentieth-Century Perspective Vol II* :Congress Proceeding Academic Press, Inc (1992)
- 18) ICRP Publication 41. Nonstochastic Effects of Ionizing Radiation. *Annals of the ICRP* 14(3) (1984)