

# 高エネルギー光子・電子・中性子・陽子に対する線量換算係数

核燃料サイクル開発機構  
企画部

坂本 幸夫

## 1. はじめに

国際放射線防護委員会 (ICRP) 1990年勧告 (ICRP Publication60)<sup>1)</sup> において、従来の線質係数に代わる放射線荷重係数が導入されるとともに、人体臓器・組織の放射線に対する感受性を表す組織荷重係数の値が見直され、被ばく線量として実効線量及び各臓器・組織に対する等価線量が定義された。この勧告に沿った光子、電子及び中性子に対する実効線量への線量換算係数は、ICRP Publication74<sup>2)</sup> で公表されているが、そのエネルギー範囲は限られており、加速器施設で生じる高エネルギー放射線に対する実効線量への線量換算係数は未整備である。今後原研が開発する高エネルギーの加速器施設の設計に役立つため、HERMESコードシステム<sup>3)</sup> を基にした高エネルギー放射線の被ばく線量評価システムを整備するとともに、10GeVまでの光子、中性子及び陽子並びに100GeVまでの電子に対する実効線量への線量換算係数を評価した。さらに、高エネルギー放射線に対する放射線荷重係数とQ-L関係の整合性を検討するため、ICRP Publication60のQ-L関係に基づいた線質係数を用いる実効線量当量を評価した。本報告では、高エネルギー放射線の被ばく線量評価法、光子・電子・中性子・陽子の線量換算係数の結果<sup>4)</sup> について述べる。

## 2. 線量換算係数の現状

ICRP1990年勧告が放射線障害防止法等に導入される以前は、放射線取り扱い施設、原子力施設及び加速器施設の遮へい計算には、実用量であるICRP Publication51<sup>5)</sup> の周辺線量当量に対する線量換算係数データが用いられてきた。線量当量Hは、吸収線量Dに線質係数Qを乗じたものである。

$$H = QD \quad (1)式$$

線質係数は、基準となる $\gamma$ 線の吸収線量による生物学的効果に対して、ある特定の放射線の同じ吸収線量による生物学的効果の相対的な効果を参考に放射線防護のために決められた係数であり、荷電粒子の水中における線エネルギー付与 (LET) と関係付けられている。

エネルギー10MeV以下の光子及び20MeV以下の中性子に対しては、密度 $1.0\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ のICRU4元素軟組織等価物質からなる直径30cmの球 (ICRU球ファントムと呼ばれている) の主軸に平行なビームが入射した際的主軸上1cm深さ位置での周辺線量当量が評価線量とされ、その線量換算係数として放射線障害防止法の告示別表においてICRP Publication51のデータが示された。これは、人体が放射線を全身に均等に照射を受けた場合に、次式で示された防護量である実効線量当量 $H_E$ に比べて、周辺線量当量が合理的に過大側に評価することから実用量として採用されている。

$$H_E = \sum_T w_T \sum_R \hat{H}_{T,R} = \sum_T w_T \sum_R \hat{Q}_{T,R} D_{T,R} \quad (2)式$$

ここで、 $w_T$ は臓器・組織Tに対する組織荷重係数、 $\hat{H}_{T,R}$ は荷電粒子Rによる臓器・組織Tの平均線量当量である。また、 $D_{T,R}$ は荷電粒子Rによる臓器・組織Tの平均吸収線量であり、 $\hat{Q}_{T,R}$ は臓器・組織T内での平均した線質係数である。

一方、高エネルギー放射線の遮へい計算では、ICRU 4 元素軟組織等価物質の厚さ30cmの半無限平板ファントムに平行ビームとして放射線が入射した場合の線量当量の深度分布から最大線量当量を与える線量換算係数が通常用いられ、ICRP Publication51では、10MeV～20GeVの光子、0.1MeV～20GeVの電子、2MeV～100GeVの中性子及び60MeV～100GeVの陽子に対して最大線量当量を与える線量換算係数が掲載されている。この結果、多くの遮へい計算では、高エネルギー領域では半無限平板ファントムにおける最大線量当量を採用し、低エネルギー領域ではICRU球ファントムでの周辺線量当量への線量換算係数を採用していた。

従来の線量当量の評価で用いていた線質係数は、元々大まかな指標にすぎないものであるが、見かけ上精密なものとししばしば間違っ て解釈されていた。そこで、ICRP1990年勧告では、これらの解釈を排除するために、新たに放射線荷重係数が導入された。これを用いた臓器・組織の等価線量H並びに実効線量Eが次式のように定義された。

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \quad (3)式$$

ここで、 $w_T$ は臓器・組織Tに対する組織荷重係数、 $H_T$ は荷電粒子Rによる臓器・組織Tの等価線量である。また、 $w_R$ はICRP Publication60で新たに示された放射線荷重係数であり、 $D_{T,R}$ は荷電粒子Rによる臓器・組織Tの平均吸収線量である。放射線荷重係数の値は、

低線量における確率的影響の誘発に関するその放射線の生物効果比の値を代表するようにICRPで選ばれた。また、この際、臓器・組織に対する組織荷重係数も見直され、対象とする臓器・組織の種類が7種類から13種類に増加されるとともに、その値も一部変更された。また、放射線荷重係数は、人体に入射する放射線の種類とエネルギーに対して一義的に与えられており、光子、電子及びミュオン、中性子(5群のエネルギー別)、反跳陽子以外のエネルギーが2MeVを超える陽子、 $\alpha$ 粒子、核分裂片、重原子核に対して数値が示されている。

一方、ICRP1990年勧告以降でも測定で用いられる周辺線量当量の評価では線質係数を利用するが、線質係数とLETとの関係が見直された。新しいQ-L関係を用いて計算すれば、ICRUの実用量は実効線量を過小評価することはなさそうである、ということを示唆している。

ICRP Publication60の考え方に沿った低エネルギー放射線に対する実効線量への線量換算係数が多くの機関において計算され、その評価値が1996年にICRP Publication74及びICRU Report57として公刊された。その中で、0.01MeV～10MeVの光子及び1meV～180MeVの中性子の各照射条件について、並びに0.1MeV～10MeVの電子のAP照射条件についての線量換算係数が示されている。しかし、高エネルギーの光子、中性子及び電子に対する線量換算係数は示されておらず、さらに陽子に対するデータも全く示されていない。そこで、高エネルギー放射線に対するICRP Publication60の考え方に沿った新しい線量換算係数の整備・評価作業に1991年着手した。対象とする放射線は、遮へい体において透過力が大きい中性子及び光子、並びに加速器における加速粒子としての電子及び陽子である。評価する線量は、新しく導入され

た放射線荷重係数を用いる実効線量及びICRP Publication60のQ-L関係式に基づく実効線量当量である。さらに、半無限平板ファントムによる線量当量及びICRU球ファントムによる周辺線量当量も一部評価した。遮へい設計計算における評価線量は今後実効線量となるが、高エネルギー放射線に対する放射線荷重係数はよく検討されていない。本研究では、高エネルギーの中性子及び陽子に関して身体全体で平均化した線質係数を導出して、高エネルギーの中性子及び陽子の放射線荷重係数との比較検討を行った。

ICRP Publication60の発刊以降では、イタリアのIstituto Nazionale di Fisica Nucleare (以下、「INFN」と略す。)グループがFLUKAコードシステムと修正されたADAMファントムを用いて、最大100GeVまでの光子・電子、10TeVまでの中性子・陽子についての実効線量等を精力的に評価している<sup>9)</sup>。このため、本研究による計算結果の妥当性を検討する一手段としてINFNグループとの計算値の系統的な比較を行った。

### 3. 計算方法

放射線を取り扱う施設の放射線防護では、ICRPが定義する防護量とICRUが定義する実用量の2種類の量が用いられる。防護量は、人体中に特定された線量であり、直接には測定できないが、照射条件が規定できれば放射線の人体内での挙動を計算することにより評価できる。放射線防護の観点で関心があるのは、人体内の臓器・組織の1点における吸収線量ではなく、臓器・組織にわたって平均化し、放射線の線質について荷重した吸収線量である。そこで、ICRP Publication60では、臓器または組織Tの等価線量 $H_T$ 、身体全体での被ばくの指標としての実効線量Eを(3)式で定義している。

人体臓器・組織の等価線量あるいは平均線

量当量を計算するためには、詳細放射線輸送計算コードに人体の各臓器・組織の形状を数式で導入することが必要である。本研究では、Cristyによって作成されたMIRD-5型の成人男性ファントムに対して、原研山口による①眼・水晶体のモデルの追加、②顔面の骨格の追加、及び③楕円球に単純化した甲状腺形状の改良したものを用いた。さらに、本研究では食道の追加と胃のモデルの変更、両性具有ファントムに関する変更を行った。図1に人体形状ファントムを示す。

ICRP等では人体形状ファントムに対して、広い単一方向又は面平行ビームによる全身照射を仮定した前方-後方(AP)照射条件、後方-前方(PA)照射条件、側方(LAT)照射条件、回転(ROT)照射条件及び等方(ISO)照射条件の5種類の照射条件を規定している。AP照射、PA照射及びLAT照射は、線源の位置に対して向きが固定された人体への照射を近似し、ROT照射は広く広がった面線源からの照射又は単一線源場の中でランダムに動く人への照射を近似する。また、ISO照射は放射性ガスのような線源中の身体への照射を近似できる。

高エネルギー放射線が人体組織に入射すると、多様な核反応により多種類の二次粒子が発生し、しかもその飛程は臓器・組織の大きさに比べて大きくなることがある。このため、高エネルギー放射線の線量換算係数を評価するためには、中性子や陽子入射ではハドロンカスケードと媒質中での輸送、光子・電子では電磁カスケードを取り扱うことのできる計算コードが必要である。そこで、本研究では高エネルギー放射線による被ばく線量評価にドイツのユーリッヒ研究所(Forschungszentrum Julich)で開発された、放射線の輸送及び相互作用のシミュレーションを行うために種々の物理過程に対応するいくつかの3次元モンテカルロ計算コードから構成されるHERMES (High Energy Radiation Monte

Carlo Elaborate System) コードシステムを改良したものをを用いた。その構成を図2に示すように、ハドロン及び高エネルギー中性子に対してはHETC-3 STEPコード、低エネルギー中性子及び二次光子に対してはMORSE-CG/KFAコード、光子・電子に対してはEGS4コードが主として機能する。

#### 4. 光子に対する線量換算係数

EGS4コードを用いて、1 MeV～10 GeVの単位光子フルエンス当たりの実効線量をAP、PA、2種類のLAT、ROT、ISOの照射条件について計算を行った。図3にAP照射条件での実効線量への換算係数を示す。ICRP Publication74の記載値とは3 MeVまでは良く一致するが、二次電子の輸送を考慮した今回の5 MeV及び10 MeVの結果は3～14%小さく、EGS4コードによる二次電子の輸送を無視した場合の10 GeV光子の実効線量換算係数は2桁以上大きな評価となる(図4参照)。このため、高エネルギー光子の合理的な線量評価では、二次電子の輸送を考慮しなければならない。また、FLUKAコードによるFerrari及びPelliccioni等の計算結果と比較すると、AP照射条件を除き統計誤差内で一致した。AP照射条件での差違は、男女同体の人体形状ファントムにおける乳房形状に起因するものである。FLUKAコードは、電子照射による中性子発生に関する実験データ等との検証を行い電子加速器の遮へい計算コードとして使われている。一方、EGS4コードも各種のベンチマーク実験解析を行い、加速器実験機器、施設、医療被ばく評価に使われている。このように、信頼性が確認されている両計算コードによる計算結果が一致し、低エネルギー光子に対するICRP Publication74記載値との一致度からみて、今回の計算結果は妥当なものである。

また、ICRU球ファントムを用いて光子周辺線量当量を計算し、光子実効線量との比較

を行った結果、主軸上1 cm深さでの周辺線量当量 $H^*(10)$ は5 MeV以上で実効線量を下回るとともに、20 cm深さでの周辺線量当量は、高エネルギーでの実効線量を包含するが、10 MeV以下の低エネルギー光子に対しては実効線量を下回ることが分かった。このように、10 GeVまでの広いエネルギー範囲で、実効線量を安全側に包含するICRU球ファントムでの同一深さでの周辺線量当量は存在しない。また、140 MeVまでの光子入射に対して、光核反応の影響を半無限平板ファントムで調べた結果、電磁カスケード反応による吸収線量に対する光核反応による吸収線量の寄与は、30 MeVの光子入射時に0.7%であるが、線量当量の寄与は約5%となる。

#### 5. 電子に対する線量換算係数

EGS4コードを用いて、1 MeV～100 GeV単位フルエンス当たりの電子の実効線量を光子と同様に6種類の照射条件について計算を行った。AP照射条件での実効線量への換算係数を図5に示す。ICRP Publication74、Schultz、Ferrari及びPelliccioni等のデータと比較すると、10 MeV以下の電子エネルギーでは、AP照射条件で本計算結果と他のデータとの差は20%以下であり、電子エネルギーの減少とともに両者の差が増大するが、これは乳房モデル等の人体形状ファントムの違いと考えられる。一方、20 MeV～100 GeVのエネルギー領域ではAP照射条件におけるFerrari及びPelliccioni等によるFLUKAコードの結果との差は6%以下であり、他の照射条件でも優位な差はなかった。このように、低エネルギー電子に対する実効線量に関するICRP Publication74記載値等との一致度からみて、低エネルギー電子に対する今回の計算手法は妥当なものと判断できる。また、高エネルギー電子に対する計算手法の妥当性に関しては、今回計算に用いたEGS4コード及びFLUKAコードはそれぞれ加速器放射線場における広

いエネルギー範囲の電子・光子の実験解析に使われ、その精度が確かめられている。したがって、両者の計算コードで独自に計算した結果がほぼ一致していたことから、高エネルギー電子に対する今回の計算結果は光子の場合と同様に妥当なものと判断できる。

また、電子入射に対するICRP Publication 60のQ-L関係に基づく実効線量当量を評価したところ、100MeV以下の電子入射に対しては光核反応で生じる中性子及び荷電粒子の寄与が小さいため、実効線量当量が実効線量とほぼ同じ値を示す一方、1 GeVを超えるエネルギー領域では実効線量当量が光核反応により生ずる中性子等の影響により実効線量より最大で約6%大きいことが示された。

さらに、AP照射条件での吸収線量に対する光核反応の寄与の最大値は約0.6%であり、他の照射条件に対しても吸収線量への光核反応寄与の最大値は約0.9%である。一方、実効線量当量に対する光核反応の寄与は、AP照射条件において約2.5%以下であり、他の照射条件では約3.8%以下である。ICRU軟組織の30cm厚さの半無限平板ファントムにおける光子入射での光核反応の寄与が吸収線量に対して約0.7%、線量当量に対して約5%あったのに比べて、電子入射では光核反応の寄与が僅かながら小さい。これは光子入射での光子束スペクトルにくらべて、電子入射で生成される光子束スペクトルのエネルギー分布が低エネルギー側にシフトしているためと考えられる。

## 6. 中性子に対する線量換算係数

HETC-3STEPコード及びMORSE-CG/KFAコードを用いて、20MeV～10GeVの単位中性子フルエンス当たりの実効線量をAP、PA及びISOの照射条件について評価した。図6にAP照射条件での実効線量への換算係数を、実効線量当量への換算係数とともに示す。20MeV～180MeV以下の低エネルギー領域については、Nabelssi等のLAHETコードによ

る計算結果及びICRP Publication74の値と良く一致していた。また、熱中性子から10TeVの広範囲のエネルギーに関するFerrariとPelliccioni等のFLUKAコードによる計算結果と比較すると、1 GeV～2 GeV付近で計算コードの核反応モデルの違いにより今回の計算結果が50%程度大きくなっているが、その他のエネルギー領域では良く一致していた。実効線量に対する粒子の寄与を解析したところ、水素の弾性散乱の反跳等で生じる陽子の寄与が60%～80%あり、15MeV以下の低エネルギー中性子に起因する寄与が入射エネルギー100MeV以下で20%以下であることが分かった。さらに、中性子エネルギーの増大とともに、核子・核子散乱の非弾性散乱で生成するパイオンの寄与が増大し、10GeVの入射エネルギーでは重イオンの寄与と同程度の20%となっていることが分かった。

また、中性子入射に対するICRP Publication60のQ-L関係に基づく実効線量当量を評価したところ、中性子エネルギーが20MeVでは実効線量と実効線量当量はほぼ一致しているが、エネルギーが高くなるにつれて実効線量が実効線量当量を上回るようになり、10GeVでは約1.8倍程度となることが分かった。図7に、高エネルギー中性子の全身平均線質係数、ICRU球1cm深さでの平均線質係数及び放射線荷重係数のエネルギー依存性を示す。実効線量とICRP Publication60のQ-L関係に基づく実効線量当量との差異を小さくするために、高エネルギー中性子に対する放射線荷重係数を提案した。

## 7. 陽子に対する線量換算係数

HETC-3STEPコード及びMORSE-CG/KFAコードを用いて、20MeV～10GeVの単位陽子フルエンス当たりの実効線量をAP、PA及びISOの照射条件について計算を行った。図8にAP照射条件での実効線量への換算係数を、実効線量当量への換算係数とともに示す。

FLUKAコードによる計算結果と比較すると、100MeV以下の陽子入射では乳房モデル及び皮膚の厚さの違いにより本計算結果の方が大きくなっていたが、50MeV以上の陽子入射では両者は良く一致していた。実効線量に対するエネルギー沈着を引き起こす粒子別の寄与を解析したところ、100MeV以下のエネルギー領域では入射陽子を含む陽子の寄与がほぼ100%であり、重イオンの寄与が100MeV程度から、パイオンの寄与が500MeV程度から現れ、10GeV陽子入射時にはそれぞれ10%程度まで増加する。

また、陽子入射に対するICRP Publication 60のQ-L関係に基づく実効線量当量を評価した。実効線量とICRP Publication60のQ-L関係に基づく実効線量当量は、本来比較すべき防護量ではないが、高エネルギー陽子に対する放射線荷重係数を議論する上で比較を行った。陽子エネルギーが20MeVでは、実効線量はICRP Publication60のQ-L関係に基づく実効線量当量の2.0~2.5倍となり、100MeV付近で最大4倍となる。図9に、高エネルギー陽子の全身平均線質係数、ICRU球1cm深さでの平均線質係数及び放射線荷重係数のエネルギー依存性を示す。実効線量とICRP Publication60のQ-L関係に基づく実効線量当量との整合をとるために、高エネルギー陽子に対する放射線荷重係数の改定値を提案した。

## 8. まとめ

今後の加速器施設の建設・利用、宇宙空間及び高々度飛行に伴い、高エネルギー放射線に被ばくする機会が増大する。そこで、遮へい設計及び被ばく評価で必要となる高エネルギー放射線に対する線量換算係数を評価するため、人体形状ファントムを組み込んだ被ばく線量評価コードシステムを整備するとともに、計算に用いる荷電粒子のICRP Publication60のQ-L関係に基づいた線質係数、中

性子・光子のカーマ係数及び線質係数で重み付けした中性子カーマ係数のデータベースを整備した。そして、下記の放射線に対して線量換算係数を評価した。

- 1) 1 MeV~10GeV光子に対する実効線量及び周辺線量当量
- 2) 1 MeV~100GeV電子に対する実効線量及び実効線量当量
- 3) 20MeV~10GeV中性子に対する実効線量及びICRP Publication60のQ-L関係に基づいた実効線量当量
- 4) 20MeV~10GeV陽子に対する実効線量及びICRP Publication60のQ-L関係に基づいた実効線量当量

今回の線量換算係数のうち、低エネルギー領域の光子・電子及び中性子のデータはICRP Publication74のデータと良く一致しており、また、高エネルギー領域の光子・電子・中性子及び陽子のデータはFLUKAコードによる計算結果と一部のエネルギー領域を除いて良く一致している。独立した計算コード及び人体形状ファントムを用いてほぼ同一の線量換算係数が得られたことから、本計算結果には信頼性があるものと判断でき、今後の加速器施設しゃへい設計計算及び宇宙放射線の被ばく評価に供することができる。

1 GeV以上の中性子及び陽子の実効線量への換算係数にはFLUKAコードによる計算結果と差違が見られたが、これは核反応モデルによる断面積データの違いと考えられる。中性子と陽子エネルギーを100GeVまで線量換算係数を拡張するためには、ハドロンカスケードの核反応モデルを見直す必要があることが分かった。

また、光子・電子の被ばく計算における二次電子の輸送問題及び光核反応の影響について考察できた。さらに、中性子及び陽子に関しては、実効線量とともにICRP Publication 60のQ-L関係に基づいた実効換算係数を評価し、実効線量が実効線量当量を大きく上回る

ことを見だし、高エネルギー中性子及び陽子に対する放射線荷重係数の改定値を提案した。

Code", *Radiat. Prot. Dosim.*, Vol. 88, 279 (2000).

#### 参考文献

- 1) International Commission on Radiological Protection, "Recommendations of the International Commissions on Radiological Protection, Publication 60", *Annals of the ICRP*, 21 (1-3), (Oxford: Pergamon Press) (1990).
- 2) International Commission on Radiological Protection, "Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation: ICRP Publication 74", *Annals of the ICRP* 26(3/4) (Oxford: Elsevier Science) (1996).
- 3) Cloth, P., Filges, D., Neef, R.D., Sterzenbach, G., Reul, C., Armstrong, T.W., Colborn, B.L., Anders, B. and Brueckmann, H., "HERMES - A Monte Carlo Program System for Beam-Materials Interaction Studies", *JUL-2203, NEA-1265/02* (1988).
- 4) 坂本幸夫、佐藤理、津田修一、義澤宣明、岩井敏、田中俊一、山口恭弘、「光エネルギー光子・電子・中性子・陽子に対する線量換算係数」、*JAERI 1345* (2003).
- 5) International Commission on Radiological Protection, "Data for Use in Protection Against External Radiation: ICRP Publication 51", *Annals of the ICRP*, 17, No.2/3, (Oxford: Pergamon Press) (1987).
- 6) Pelliccioni, M., "Overview of Fluence-to-Effective Dose and Fluence-to-Ambient Dose Equivalent Conversion Coefficients for High Energy Radiation Calculated Using the FLUKA

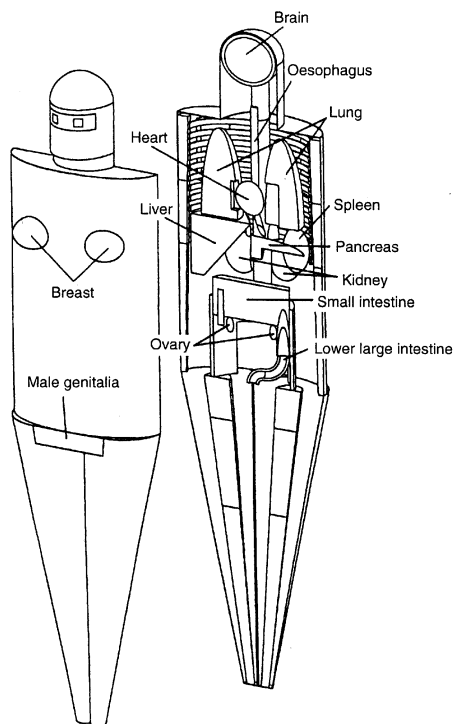


図1 人体形状ファントム

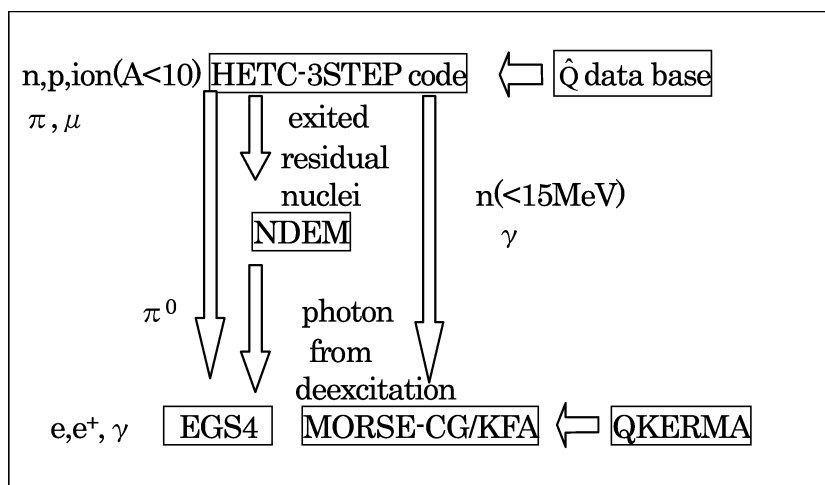


図2 HERMESコードシステム



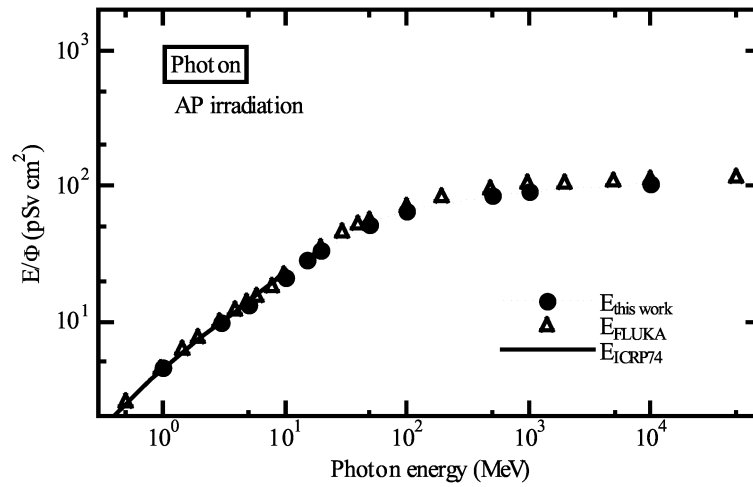


図3 高エネルギー光子の実効線量への換算係数 (AP照射条件)

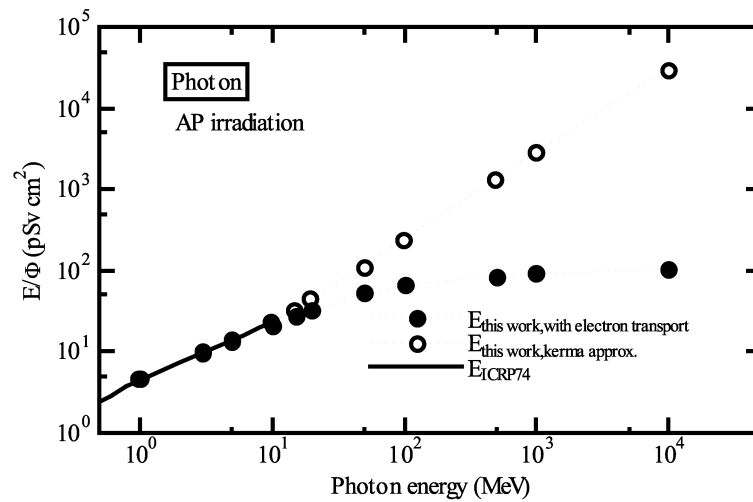


図4 高エネルギー光子の実効線量に対する電子輸送の影響 (AP走者条件)

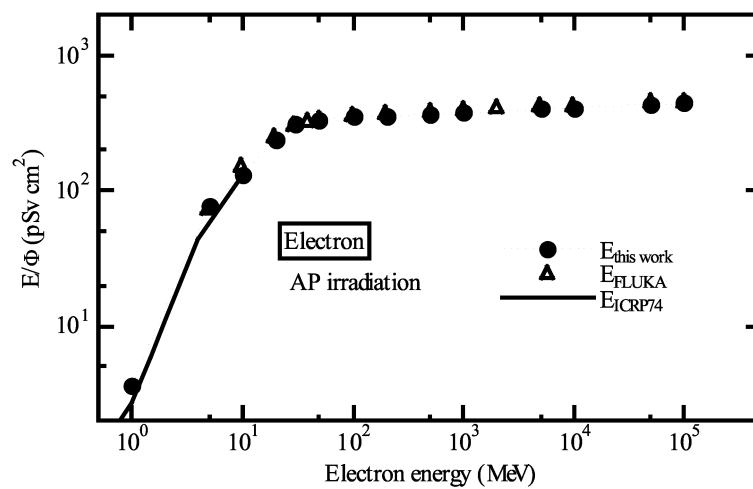


図5 高エネルギー電子の実効線量への換算係数 (AP照射条件)

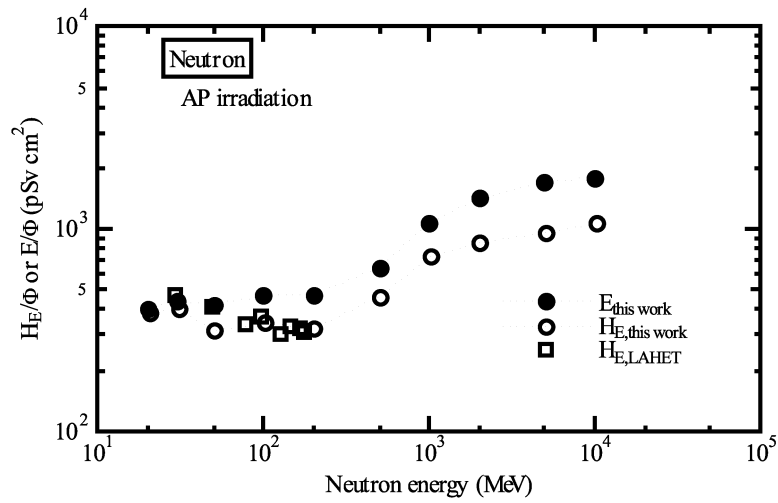


図6 高エネルギー中性子の実効線量 (E) 及び実効線量当量 (H<sub>E</sub>) への換算係数 (AP照射条件)

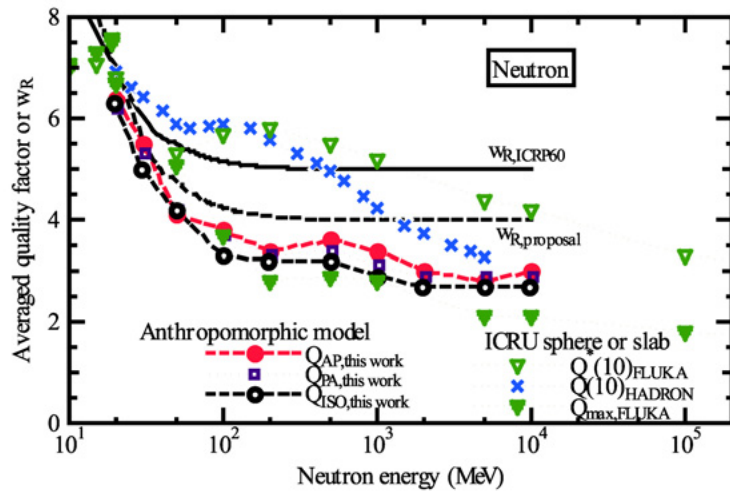


図7 高エネルギー中性子の全身平均線質係数 (Q<sub>AP</sub>, Q<sub>PA</sub>, Q<sub>ISO</sub>)、ICRU球1cm深さでの平均線質係数及び放射線荷重係数

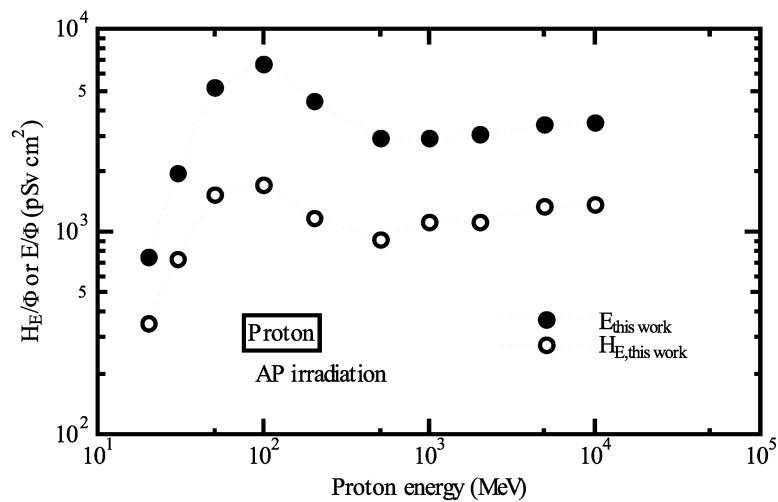


図8 高エネルギー陽子の実効線量 (E) 及び実効線量当量 (H<sub>E</sub>) への換算係数 (AP照射条件)

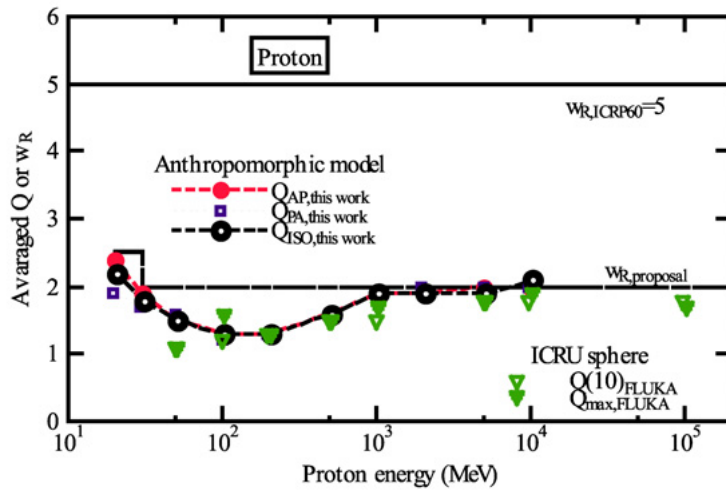


図9 高エネルギー陽子の全身平均線質係数 ( $Q_{AP}$ ,  $Q_{PA}$ ,  $Q_{ISO}$ )、ICRU球1cm深さ及び最大線量深さ ( $Q(10)$ ,  $Q_{max}$ ) での平均線質係数及び放射線荷重係数