

JAERI-Tech
2001-042



JP0150724



高エネルギー陽子加速器施設の遮へい設計計算
のための線量換算係数

2001年6月

坂本 幸夫・山口 恭弘

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

本レポートは、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、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

高エネルギー陽子加速器施設の遮へい設計計算のための線量換算係数

日本原子力研究所東海研究所保健物理部

坂本 幸夫・山口 恭弘

(2001年4月26日受理)

国際放射線防護委員会 (ICRP) 1990 年勧告 (ICRP Publication 60) の放射線障害防止法等の国内制度への取り入れにより、遮へい壁等の設計の際に評価すべき量が、従来の1センチメートル線量当量から実効線量に変更された。加速器施設の遮へい計算に用いる線量換算係数として、20MeV 以下の中性子に対して ICRP Publication 74 に基づく前方 (AP) 照射条件の値が放射線障害防止法等の告示別表に示されているが、20MeV 以上の中性子に対する値は示されていない。そこで、20MeV 以上の中性子に対する線量換算係数の現状を調査するとともに、陽子加速器施設の遮へい体後方の典型的な中性子スペクトルを用いて線量率を試算し、幾つかの線量換算係数を用いた場合の実効線量率等を調べた。この検討結果を基に、陽子加速器施設の遮へい設計計算用の線量換算係数として、20MeV 以上の中性子に対しては HERMES コードシステムによる AP 照射条件での実効線量への換算係数を推奨し、熱エネルギーから 2GeV までの中性子 77 群構造の線量換算係数を作成した。

Dose Conversion Coefficients in the Shielding Design Calculation
for High Energy Proton Accelerator Facilities

Yukio SAKAMOTO and Yasuhiro YAMAGUCHI

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

(Received April 26, 2001)

Dose quantity in the shielding design calculation was changed from the 1 cm depth dose equivalent to effective dose on the occasion of the introduction of the International Commission on Radiological Protection (ICRP) 1990 Recommendations (ICRP Publication 60) into domestic laws. As dose conversion coefficients in the shielding design calculation for accelerator facilities, the values for front irradiation (AP irradiation geometry) of neutrons below 20 MeV based on the ICRP Publication 74 are listed in the accompanying table of the domestic laws, but the values for neutrons above 20 MeV are not shown in the accompanying table. The status of dose conversion coefficients for neutrons above 20 MeV was surveyed and the effective dose rates behind the concrete shield of proton accelerator facilities were obtained by using typical neutron spectra and various dose conversion coefficients. As a result of consideration, the effective dose conversion coefficients for front irradiation of neutrons above 20 MeV evaluated by using HERMES code system was recommended for high energy neutrons in the shielding design calculation of proton accelerator facilities and 77 energy group averaged dose conversion coefficients was produced from thermal energy to 2 GeV.

Keywords: Dose Conversion Coefficients, Neutron, Proton Accelerator Facility, Effective Dose, AP Irradiation Geometry, HERMES Code System

目 次

1. まえがき	1
2. 遮へい設計計算で評価すべき線量	2
2. 1 従来法令等における外部被ばくに係る線量	2
2. 2 ICRP 1990年勧告の法令等取り入れにおいて遮へい計算に関する変更	2
3. 線量換算係数データの現状	3
3. 1 従来の線量換算係数データ	3
3. 2 高エネルギー放射線に対する新しい線量換算係数データ	5
4. 陽子加速器施設の遮へい体背面での中性子線量率の試算	6
4. 1 遮へい体背面での中性子スペクトル	6
4. 2 群平均の線量換算係数の算出	6
4. 3 ICRP Publication 51の線量換算係数による中性子線量率	6
4. 4 ICRP Publication 74の線量換算係数による中性子線量率	7
4. 5 HERMESコードシステムによる線量換算係数に基づく中性子線量率	7
4. 6 FLUKAコードシステムによる線量換算係数に基づく中性子線量率	7
4. 7 考 察	7
4. 7. 1 中性子の線量当量率に対するエネルギー領域毎の線量当量率の寄与	7
4. 7. 2 各中性子エネルギー群の線量率の比較	7
4. 7. 3 線量率全体の比較	8
4. 7. 4 γ 線の線量率	9
5. 推奨する線量換算係数データ	10
6. まとめ	11
謝 辞	11
参考文献	12

Contents

1. Introduction	1
2. Dose Quantity in the Shielding Design Calculations	2
2. 1 Doses for External Dosimetry under the Former Laws	2
2. 2 Changes in Shielding Calculation Related to the Introduction of ICRP 1990 Recommendations	2
3. Status of Dose Conversion Coefficients	3
3. 1 Former Data of Dose Conversion Coefficients	3
3. 2 New Data of Dose Conversion Coefficients for High Energy Radiations	5
4. Trial of Neutron Dose Rates behind the Shields of Proton Accelerator Facility	6
4. 1 Neutron Spectra behind the Shields	6
4. 2 Calculation of Energy Group Averaged Dose Conversion Coefficients	6
4. 3 Neutron Dose Rates by Using Dose Conversion Coefficients Based on ICRP Publication 51	6
4. 4 Neutron Dose Rates by Using Dose Conversion Coefficients Based on ICRP Publication 74	7
4. 5 Neutron Dose Rates by Using Dose Conversion Coefficients Obtained by HERMES Code System	7
4. 6 Neutron Dose Rates by Using Dose Conversion Coefficients Obtained by FLUKA Code System	7
4. 7 Consideration	7
4. 7. 1 Contribution of Neutrons with Each Energy to Dose Equivalent Rates	7
4. 7. 2 Comparison of Dose Rates of Each Energy Neutrons	7
4. 7. 3 Comparison of Neutron Total Dose Rates	8
4. 7. 4 Gamma-ray Dose Rates	9
5. Recommended Dose Conversion Coefficients	10
6. Summary	11
Acknowledgements	11
References	12

1. まえがき

原子力施設等の遮へい設計においては、詳細遮へい計算コードで求めた施設内外の中性子・光子のスペクトルにそれぞれの線量換算係数を乗じて線量率を求めている。また、高エネルギー放射線の遮へい計算においてもエネルギー多群の決定論的な輸送計算法やモンテカルロ計算法により施設内外の中性子・光子のスペクトルを計算し、線量換算係数を乗ずることにより線量率を計算できる。陽子・イオン加速器においては、粒子ビームが衝突された原子核の前平衡過程からのカスケード放出による中性子及び励起状態からの蒸発放出による中性子が遮へいの対象となるため¹⁾、中性子に対する線量換算係数が必要になる。また、加速エネルギーが GeV 領域の陽子・イオン加速器ではパイオン及び μ 粒子の発生が無視できなくなり¹⁾、これらから派生する γ 線の影響を評価する必要があるが、これらの γ 線のエネルギーは原子力施設の遮へい計算で対象としている γ 線のエネルギーと同程度であり、 γ 線に対する線量換算係数は特に高エネルギー γ 線用である必要はない。

エネルギーが 20MeV 以下の中性子に対する遮へい計算では、従来 1 センチメートル線量当量が評価対象となっていた。しかし、国際放射線防護委員会 (ICRP) の 1990 年勧告²⁾の「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律 (以下、放射線障害防止法と略す)」をはじめとする放射線防護関係法令への取り入れに伴い、遮へい計算において、今後実効線量を評価することになった。一方、20MeV 以上の高エネルギー中性子に対しては、評価すべき線量が法令等では定められておらず、ICRP のレポート等に掲載されている線量換算係数を用いて、各評価者が線量率を評価することになった。

本報告書は、高エネルギー陽子加速器施設の遮へい設計計算及び被ばく評価計算に用いる高エネルギー放射線に対する線量換算係数データをまとめたものである。2章では、遮へい設計計算で評価すべき線量として、従来法令等における外部被ばくに係る線量、ICRP 1990 年勧告の国内法令等への取り入れにおける遮へい計算に関係する変更を述べる。3章では、線量換算係数データの現状として、従来の線量換算係数及び高エネルギー放射線に対する新しい線量換算係数を述べる。4章では、陽子加速器施設遮へい体背面での中性子線量の試算として、遮へい体背面での中性子スペクトル、群平均の線量換算係数の算出法、ICRP Publication 51³⁾の換算係数に基づく評価、ICRP Publication 74⁴⁾の換算係数に基づく評価、HERMES コードシステム^{5,6)}を用いて計算した換算係数に基づく評価、FLUKA コードシステム^{7,8)}による換算係数に基づく評価を述べるとともに、これらの評価結果を考察する。5章では、今後の高エネルギー陽子加速器施設の遮へい設計計算等で使用する中性子に対する線量換算係数について、本解析結果に基づく熱エネルギーから 2GeV までの推奨データについて述べる。

2. 遮へい設計計算で評価すべき線量

加速器施設を含め放射線を取り扱う施設の遮へい設計計算では、遮へい体外側の評価点において計算する量を明確にしておくことが重要である。ICRP の 1990 年勧告では、放射線防護に用いる幾つかの量に変更された。また、この勧告の放射線障害防止法等の国内制度への取り入れにおいても、放射線を取り扱う施設の遮へい設計計算に関して重要な変更がなされた。本章では、遮へい設計計算に関係するこれらの変更及びこれに基づいて評価された線量換算係数についてまとめる。

2. 1 従来法令等における外部被ばくに係る線量

放射線防護基準を定める量として放射線業務従事者等の線量限度は、組織線量当量及び実効線量当量で規定されていた。また、放射線の使用施設等に係る基準（例えば管理区域基準、遮へい物に係る限度）及び運搬に係る基準には、1センチメートル線量当量が用いられていた。

放射線の測定に係る量として、場所の線量当量（率）の測定及び放射線業務従事者等の外部被ばく線量の測定には、1センチメートル線量当量、3ミリメートル線量当量及び70マイクロメートル線量当量が用いられていた。3ミリメートル線量当量は目の水晶体を対象とした線量であり、70マイクロメートル線量当量は皮膚を対象とした線量である。3ミリメートル線量当量及び70マイクロメートル線量当量の評価が必要となるのは γ 線のエネルギーが10keV以下の場合であり、一般の放射線取り扱い施設では1センチメートル線量当量を評価することで対応してきた。

2. 2 ICRP 1990年勧告の法令等取り入れにおいて遮へい計算に関係する変更

放射線審議会が平成10年6月にまとめた「ICRP 1990年勧告の国内制度等への取り入れについて」（意見具申）⁹⁾では、放射線防護基準を定める量としてICRP 1990年勧告で新たに定義された「等価線量」及び「実効線量」を用いることが適当であるとした。これにより、管理区域に係る基準線量、遮へい物に係る限度等、使用施設等に係る基準を定める量は、実効線量に変更されることになった。

上記放射線審議会の意見具申を受け、同審議会の「外部被ばく及び内部被ばくの評価法に係る技術指針」に関する基本部会での検討の結果¹⁰⁾、放射線施設の遮へい計算で評価対象とする量は実効線量と決められた。しかし、実効線量は放射線の種類やエネルギーは勿論のこと、人体への入射条件にも大きく依存する量である。このため、ICRP Publication 74 及び ICRU Report 57¹¹⁾には、何種類かの典型的な入射条件に対する線量換算係数が掲載されている。一般の放射線取り扱い施設及び原子力施設で管理対象となるエネルギーの放射線では、前方入射条件（以下APと記す）の実効線量が最も大きな値であるため、他に適切な入射条件が設定可能な場合を除き、遮へい計算では前方（AP）照射条件における実効線量を評価対象とすることになった。しかし、光子が10MeV以下、中性子については20MeV以下の線量換算係数データが示されているが、これ以上のエネルギーについては明記されていない。なお、放射線障害防止法等の改正法令がこれらの審議を受けて平成12年10月23日に公布され、平成13年4月1日から施行された。

3. 線量換算係数データの現状

10MeV 以下の光子及び 20MeV 以下の中性子に対する遮へい設計計算等に用いるべき線量換算係数は、放射線障害防止法等の告示別表で与えられている。しかしながら、10MeV を超える光子及び 20MeV を超える中性子に対する線量換算係数については告示等には明記されておらず、線量評価者の裁量となっている。そこで本章では、陽子加速器施設の主たる遮へい対象となる中性子に関して、原子力施設及び加速器施設の遮へい設計計算で使用している従来の線量換算係数データを述べるとともに、日本及びイタリアで評価された高エネルギー放射線に対する新しい線量換算係数データを述べる。表 3. 1 に、ICRP Publication 51(1987)及び ICRP Publication 74(1996)に掲載されている光子、中性子及び陽子に対する線量換算係数データを示すとともに、日本及びイタリアにおける高エネルギー放射線に対する線量換算係数の整備状況を示す。

3. 1 従来の線量換算係数データ

放射線取り扱い施設及び原子力施設の従来の遮へい設計計算では、10MeV 以下の光子及び 20MeV 以下の中性子に対して ICRP Publication 51 に基づく 1センチメートル線量当量率を評価していた。1センチメートル線量当量は、人体を直径 30cm の球に近似し、主軸に平行なビームが入射した際の主軸上 1cm 深さ位置での線量当量である。この時の球 (ICRU 球) の密度は 1.00gcm^{-3} であり、元素の組成は水素 (10.1 重量%)、炭素 (11.1 重量%)、窒素 (2.6 重量%) 及び酸素 (76.2 重量%) である¹²⁾。1センチメートル線量当量は、人体の各臓器の線量当量に各臓器の放射線リスクを考慮した係数 (組織荷重係数) を乗じて加算して得られた実効線量当量を合理的に過大側に評価することから実用量 (Operational Quantity) として採用されている。

線量当量は、吸収線量に線質係数 (Q) を乗じて荷重補正したものである。線質係数は、基準となる γ 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。ICRP Publication 51 で採用されている Q-L 関係では、LET が $175\text{keV}/\mu\text{m}$ 以上において Q は 20 であるが、ICRP Publication 60 で提案された Q-L 関係では、LET が $100\text{keV}/\mu\text{m}$ において Q は最大の 30 となり、LET がそれ以上になると Q は減少傾向を示す。これは、中性子に対する生物学的効果比 (RBE) が従来考えていたよりも大きいことを示すデータが見つけられていることを反映している¹³⁾。

ICRP Publication 51 では、10MeV 以上の光子及び 20MeV 以上の中性子に対しては、厚さ 30cm の横方向が無限長さの平板形状 (平板ファントム) における 1cm 深さでの線量当量及び線量当量が最大となる深さでの線量当量を示している。このため、ICRP Publication 51 の線量換算係数データでは、低エネルギーと高エネルギーでファントム形状が異なる。図 3. 1 に、ICRP Publication 51 における中性子に対する線量換算係数データのエネルギー依存性を示す。中子のエネルギーが高くなると、線量当量が最大となる深さが 1cm より大きくなり、1センチメートル線量当量は過小評価となる。そこで、中性子エネルギーが高い時には最大線量当量を採用した方が安全側の評価となるので、低エネルギー領域では ICRU 球での 1センチメートル線量当量への

線量換算係数を、高エネルギー領域では平板ファントムでの最大線量当量への線量換算係数を用いて、高エネルギー中性子の各遮へい体における線量当量の減衰率が 400MeV までの断面積データ HIL086R¹⁴⁾ と 1次元 Sn 計算コード ANINSN-JR¹⁵⁾を用いて計算されている¹⁶⁾。また、経済協力開発機構/原子力機関 (OECD/NEA) 核科学委員会 (NSC) の加速器遮へい専門家会合における高エネルギー中性子減弱距離の計算コード間の比較においても、低エネルギー領域と高エネルギー領域の線量換算係数を組み合わせて使用している¹⁷⁾。

ICRP1990 年勧告 (ICRP Publication 60) が放射線障害防止法等へ取り入れられ、改正法令が平成 13 年 4 月から実施された。この改正法令では、先に述べたように遮へい設計での評価線量率が 1 センチメートル線量当量率から実効線量率に変更になった。実効線量は、人体各組織・臓器の等価線量 (吸収線量に放射線荷重係数を乗じたもの) を各組織・臓器の放射線リスクを表す組織荷重係数で重み付けして合計したものである。実効線量評価のための線量換算係数は、ICRP Publication 74 に掲載されており、図 3. 2 に中性子に対する実効線量換算係数のエネルギー依存性を示す。実効線量への線量換算係数は、人体が照射される次の照射ジオメトリーに対して与えられている。

前方-後方照射ジオメトリー (AP) : 身体の長軸と直角の方向から、放射線が身体の前面から入射する照射ジオメトリー。

後方-前方照射ジオメトリー (PA) : 身体の長軸と直角の方向から、放射線が身体の背面から入射する照射ジオメトリー。

側方照射ジオメトリー (LAT) : 身体の長軸と直角の方向において、放射線が身体のいずれかの側面に入射する照射ジオメトリー。さらに方向を特定する必要がある場合には、身体の右側面から照射される RLAT、身体の左側面から照射される LLAT がある。

回転照射ジオメトリー (ROT) : 身体の長軸に直角な方向から放射線の平行ビームに身体が照射される放射線場の中で、長軸の周りに一様な速度で人体を回転させるジオメトリー。

等方照射ジオメトリー (ISO) : 単位立体角当たりの粒子フルエンスが方向に依存しない様な放射線場における照射ジオメトリー。

ICRP Publication 74 では、0.01~10MeV の光子及び 1meV~180MeV の中性子について実効線量への換算係数を示している。先に述べたように、改正法令の審議において、0.01~10MeV の光子及び 1meV~20MeV の中性子に対しては AP 条件での実効線量への換算係数を用いることになり、放射線障害防止法等の告示別表にその数値が示されている。これ以上のエネルギーの放射線に対しては、特に 20~180MeV の中性子に対しては ICRP Publication 74 に数値が示されているにも関わらず特に規定していない。

組織の等価線量及び実効線量の評価には、放射線荷重係数 (w_R) が用いられている。従来、高 LET 放射線成分の被ばくに起因するより高い損害の発生確率を表現するために、吸収線量を修正するための線質係数 (Q) が使われており、線エネルギー付与 (LET) との関係が与えられていた。しかし、ICRP での議論の結果、放射線生物学の情報が不確かなため Q - L 関係に含まれる詳

しさと精密さは正しいとはされない²⁾とされた²⁾。そして、ICRPは Q の代わりに、生物学的情報、いろいろな被ばく状況及び周辺線量当量の慣例的計算結果の検討に基づいて、放射線荷重係数が導入された²⁾。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・ μ 粒子、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、 α 粒子・核分裂片・重原子核に対して数値が示されている。

実効線量の評価では、ICRP1985年のパリ声明による中性子の線質係数を2倍にするとの勧告は既に放射線荷重係数に考慮されており、算出された実効線量を更に2倍する必要はない。

3. 2 高エネルギー放射線に対する新しい線量換算係数データ

ICRP Publication 51には、平板ファントムを用いた高エネルギー放射線に対する1センチメートル線量当量及び最大線量当量への線量換算係数が掲載されているが、1990年のICRP Publication 60において $Q-L$ 関係が変更され、放射線荷重係数の概念が新たに導入された。そこで、HERMESコードシステムを用いて、高エネルギー放射線に対する実用量と被ばく量の関係が解析されるとともに、新しい $Q-L$ 関係及び放射線荷重係数を用いた線量換算係数の評価が開始された^{18,19)}。20MeV~10GeVの中性子について、線質係数を用いた実効線量当量及び放射線荷重係数を用いた実効線量への単位フルエンス当たりの換算係数を評価している²⁰⁻²⁴⁾。図3.3にHERMESコードシステムによる中性子に対する線量換算係数のエネルギー依存性を示す。照射ジオメトリーは、AP、PA及びISOの3種類である。線質係数は、ICRP Publication 60で与えられた $Q-L$ 関係を用いた。実効線量当量を実効吸収線量(各臓器の吸収線量を組織荷重係数で重み付けして平均化した吸収線量)で除して得られたものを中性子に対する平均線質係数と定義し、放射線荷重係数との比較を行い、20MeV以上の高エネルギー中性子に対する放射線荷重係数5の値が平均線質係数に比べて30%以上大きいことが指摘された^{23,24)}。

一方、イタリアのINFN & EURATOM-ENEAのグループがFLUKAコードシステムを用いて高エネルギーの電子、K中間子、 μ 粒子、中性子、光子、パイオン、陽電子及び陽子の線量換算係数を整備している²⁵⁾。図3.4にFLUKAコードシステムによる中性子に対する線量換算係数のエネルギー依存性を示す。0.025eV~10TeVの中性子に関する実効線量²⁶⁾、1センチメートル線量当量及び最大線量当量²⁷⁾への線量換算係数が評価されている。実効線量評価の照射ジオメトリーは、AP、PA、LAT及びISOの4種類である。また、最大線量当量は、ICRU球での線量当量分布において線量当量が最大となる深さ位置での線量当量である。1センチメートル線量当量及び最大線量当量の評価では、中性子に対する平均線質係数も評価している²⁷⁾。

この他、LAHETコードシステム²⁸⁾により180MeVまでの中性子に対する実効線量、1センチメートル線量当量及び深さ依存の線量当量への換算係数が評価されている^{29,30,31)}。また、HADRONコード^{32,33)}により、5GeVまでの中性子に対するICRU球での1センチメートル線量当量が評価されている³⁴⁾。これらの、高エネルギー中性子に対する線量換算係数は、ICRP Publication 74のデータ評価の基礎となっている。さらに、100MeVまでの中性子に対する断面積データ³⁵⁾を用いたMCNPコード³⁶⁾により、100MeVまでの中性子に対する実効線量への線量換算係数が評価されている³⁷⁾。

4. 陽子加速器施設の遮へい体背面での中性子線量率の試算

陽子加速器施設においては、加速された陽子ビームはビームラインに限られているので、陽子ビームそのものが放射線被ばく上問題になることはほとんどない。陽子加速器施設で被ばく評価の対象となるのは陽子ビームがターゲット及び加速器構造材等に照射された際に発生する中性子である。ターゲットからは陽子ビームの照射により γ 線が発生するが、中性子に比べて γ 線は遮へい体内で容易に減衰される。また、遮へい体内を中性子が透過する際には二次 γ 線が発生するが、これらの γ 線のエネルギーはほとんどの場合 10MeV 以下に限られ、 γ 線の線量率は中性子による線量率の 20%以下と云われている。そこで、鉄のターゲットに 0.6、1 及び 15GeV の陽子が照射された時に発生する中性子の、遮へい体背後の 1m³直方体の土壤中における平均スペクトルを基に、各種の線量換算係数を用いて中性子線量率を試算した。

4. 1 遮へい体背面での中性子スペクトル³⁸⁾

加速器施設の平均的な陽子加速エネルギーとして、0.6、1 及び 15 GeV の陽子が円筒型の鉄ターゲットに照射し、発生した中性子による普通コンクリートの遮へい体外側の 1m³直方体の土壤中における平均的な中性子スペクトルを線量率の試算に用いた。その中性子スペクトルの計算モデルを図 4. 1 に、中性子のレサジー当たりのスペクトルを図 4. 2 に示す。鉄ターゲットの長さ及び半径は、0.6GeV 及び 1GeV の陽子エネルギーについては実効飛程の 0.31m 及び 1.23m であり、15GeV の陽子エネルギーについては二次粒子を考慮して実行飛程 1.23m より大きな 2.0m である。また、加速器室の半径及びコンクリート遮へい体の厚さは、1.3m/2.1m (0.6GeV 陽子)、1.3m/2.0m (1GeV 陽子) 及び 2.0m/1.2m (15GeV 陽子) である。エネルギーが 20MeV 以上の中性子束については、高エネルギー粒子輸送モンテカルロ計算コード NMTC/JAM^{39,40)}で計算し、20MeV 以下の中性子束については MCNP-4A で計算したものである³⁸⁾。

4. 2 群平均の線量換算係数の算出

前節の中性子スペクトルは、連続エネルギーのモンテカルロ計算コードで算出されているが、その結果は 77 群のエネルギー群にまとめられている。したがって、線量を算出するためにはエネルギー点に対する線量換算データではなく、エネルギー群平均の線量換算係数データが必要になる。そこで、中性子エネルギーが 0.4eV 以下の低エネルギー領域では中性子束がマックスウエル分布であるとし、それ以上のエネルギー領域では 1/E 分布であるとして、群平均の線量換算係数データを算出した。

4. 3 ICRP Publication 51 の線量換算係数による中性子線量率

ICRP Publication 51 の線量換算係数として、20MeV 以下の中性子に対しては ICRU 球モデルの 1 センチメートル線量当量への換算係数を使用し、20MeV 以上の中性子に対しては平板ファントムモデルの最大線量当量への換算係数を使用した。計算で得られた線量当量率を 2 倍しても基準線量当量率を下回るようにとの科学技術庁放射線安全課の課長通達に従えば、ここで得られた線量

当量率は2倍しなければならない。得られた中性子線量当量を表4.1にエネルギー領域毎に示す。エネルギー領域は、19.6MeV以下、19.6~100MeV、100~180MeV、180MeV以上である。各エネルギー領域の線量当量寄与を%表示で示す。

4.4 ICRP Publication 74の線量換算係数による中性子線量率

ICRP Publication 74の線量換算係数として、19.6MeV以下の中性子に対してはAP照射条件での実効線量への換算係数を使用し、19.6~180MeVの中性子に対してはAP、PA、RLAT及びROTの各照射条件に対する実効線量への換算係数を使用した。得られた中性子の実効線量率(E)を表4.2にエネルギー領域毎に示す。エネルギー領域は、19.6MeV以下、19.6~100MeV、100~180MeVの3領域である。また、各エネルギー領域の実効線量率のICRP Publication 51の線量換算係数による線量当量率との比率も同表に示す。

4.5 HERMESコードシステムによる線量換算係数に基づく中性子線量率

19.6MeV以上の中性子に対しては、HERMESコードシステムによるAP、PA及びISOの各照射条件に対する実効線量及び実効線量当量への換算係数を使用した。得られた中性子の実効線量率(E)及び実効線量当量率(H_E)を表4.3にエネルギー領域毎に示す。エネルギー領域は、19.6~100MeV、100~180MeV及び180MeV以上の3領域である。また、各エネルギー領域の線量率のICRP Publication 51の線量換算係数による線量当量率との比率も同表に示す。

4.6 FLUKAコードシステムによる線量換算係数に基づく中性子線量率

19.6MeV以上の中性子に対してはFLUKAコードによるAP、PA、LAT及びISOの各照射条件に対する実効線量への換算係数を使用した。得られた中性子の実効線量率(E)を表4.4にエネルギー領域毎に示す。エネルギー領域は、19.6~100MeV、100~180MeV及び180MeV以上の3領域である。また、各エネルギー領域の実効線量率のICRP Publication 51の線量換算係数による線量当量率との比率も同表に示す。

4.7 考 察

4.7.1 中性子の線量当量率に対するエネルギー領域毎の線量当量率の寄与

ICRP Publication 51による線量換算係数を用いた場合の中性子の線量当量率に対するエネルギー領域毎の線量当量率の寄与を図4.3に示す。陽子エネルギーが高くなると、180MeV以上の中性子による線量当量率の寄与が増加するが、15GeVの陽子エネルギーの場合でも約10%である。他のエネルギー領域における線量当量率の寄与は、陽子エネルギーにあまり依存しない。今回の中性子スペクトルでは100MeV以下の中性子による線量当量率は、中性子線量当量率の約70%を占める。

4.7.2 各中性子エネルギー群の線量率の比較

幾つかの異なる線量換算係数によるエネルギー群毎の中性子線量率とICRP Publication 51の線量換算係数によるエネルギー群毎の線量当量率との比を図4.4に示す。

19.6MeV以下の中性子に対しては、ICRP Publication 74の線量換算係数によるAP照射条件の実効線量率は、ICRP Publication 51の線量換算係数による1センチメートル線量当量率の1.01～1.03倍であり、ほとんど差がない。

19.6～100MeVの中性子線量率の比較では、ICRP Publication 74の線量換算係数、HERMESコードシステム及びFLUKAコードシステムによる線量換算係数を用いたAP照射条件の実効線量率は、ICRP Publication 51の線量換算係数による最大線量当量率より数%小さい程度である。20MeV以下の中性子では実効線量が最大となる照射条件はAP照射条件であるが、20MeV以上の中性子では必ずしもAP照射条件が最大の実効線量を与えるとは限らない。ICRP Publication 74の換算係数を用いると、PA照射条件の実効線量率がAP照射条件の実効線量率に対して約2%大きい。HERMESコードシステムによる線量換算係数を用いるとAP照射条件とPA照射条件の実効線量率の差はほとんどなく、FLAKAコードシステムによる線量換算係数を用いるとAP照射条件の実効線量率の方がPA照射条件の実効線量率に比べて僅かに大きい。また、参考までにHERMESコードシステムによる換算係数を用いて得られたAP照射条件の実効線量当量率は、AP照射条件の実効線量率の約0.8倍である。

100～180MeVの中性子線量の比較では、HERMESコードシステム及びFLUKAコードシステムによる線量換算係数を用いたAP照射条件の実効線量率は、ICRP Publication 51の線量換算係数による最大線量当量率とほぼ同じであるのに対して、ICRP Publication 74の線量換算係数によるAP照射条件の実効線量率は、ICRP Publication 51の線量換算係数による最大線量当量率の約0.9倍である。また、このエネルギー領域ではPA照射条件での実効線量率が3つの線量換算係数とも最大となっており、その増加分はICRP Publication 74の線量換算係数、HERMESコードシステム及びFLUKAコードシステムによる線量換算係数を用いた場合、それぞれ15%、10%及び3%である。さらに、HERMESコードシステムによる線量換算係数で得られたAP照射条件の実効線量当量率は、AP照射条件の実効線量率の約0.8倍であり、19.6MeV～100MeVでの傾向とほぼ同じである。

180MeV以上の中性子線量率の比較では、HERMESコードシステム及びFLUKAコードシステムによる線量換算係数を用いたAP照射条件の実効線量率は、ICRP Publication 51の線量換算係数による最大線量当量率の0.91～0.94倍である。また、HERMESコードシステムによる線量換算係数ではPA照射条件の実効線量率が最大となっており、AP照射条件の実効線量率の1.17～1.18倍となっている。一方、FLAKAコードシステムによる線量換算係数では、LAT照射条件及びISO照射条件の実効線量率が最大となっており、AP照射条件の実効線量率の1.20～1.21倍である。さらに、HERMESコードによる線量換算係数を用いて得られたAP照射条件の実効線量当量率は、AP照射条件の実効線量率の約0.7倍である。

4. 7. 3 線量率全体の比較

中性子エネルギー全体で比較すると、ICRP Publication 51の線量換算係数による実効線量当量率、HERMESコードシステム及びFLUKAコードシステムによる線量換算係数に基づくAP照射条件での実効線量率と大差ない。中子のエネルギーが高くなると、実効線量率が最大となる照射条件は、AP照射条件からPA照射条件、さらにISO及びLAT照射条件と変化するが、本試計算に使用した中性子スペクトルでは高エネルギー中子の線量率への寄与が小さいため、実効線量率

全体で見ると AP 照射条件と実効線量率が最大となる照射条件との実効線量率の差は数%以下である。

ICRP Publication 51 の線量換算係数による線量当量率の評価では、線量当量率を 2 倍しても基準線量当量率を下回るようにとの科学技術庁放射線安全課の課長通達に従うと、得られた線量当量率を 2 倍する必要がある。しかし、ICRP Publication 60 の放射線荷重係数に基づく実効線量率の評価では、実効線量率を 2 倍する必要はない。この結果、HERMES コードシステム及び FLUKA コードシステムによる線量換算係数に基づく実効線量率は、ICRP Publication 51 の線量換算係数を用いた線量当量率の半分の値となる。

4. 7. 4 γ 線の線量率

陽子加速器施設の遮へい設計計算では、中性子の線量率評価と同様に γ 線による線量率評価が重要になる。 γ 線は、加速された陽子ビームが衝突する原子核から発生する一次 γ 線及び中性子が遮へい体を透過する際に発生する二次 γ 線に分類されるが、遮へい体の厚さが大きくなると一次 γ 線の寄与に比べて二次 γ 線の寄与は大きくなる。何れの γ 線のエネルギーもほとんどの場合 10MeV 以下であり、 γ 線の全体の線量率も中性子による線量率の 20%以下と云われている。従って、陽子加速器施設の遮へい設計計算では、二次 γ 線のスペクトル強度を評価する必要があるが、それに乗ずる光子に対する線量換算係数については一般の原子力施設の遮へい設計で用いている光子に対する線量換算係数が良いと考えられる。

5. 推奨する線量換算係数データ

4章で述べた検討を踏まえ、陽子加速器施設での遮へい設計に用いる中性子及び γ 線に対する線量換算係数として次のデータを推奨する。

- (1) 20MeV 以下の中性子に対する線量換算係数は、放射線障害防止法等の告示別表にも線量換算係数が示されていることから、ICRP Publication 74 に基づく AP 照射条件における実効線量への換算係数とする。
- (2) 20MeV 以上の中性子に対する線量換算係数は、照射条件として 20MeV 以下の中性子との整合をとるため AP 照射条件の線量換算係数とする。中性子のエネルギーが高くなると AP 照射条件が必ずしも実効線量の最大値を与えず、実効線量が最大となる照射条件は中性子エネルギー及び線量換算係数の評価コードにより異なる。しかし、今回の試算に用いた遮へい体後方の中性子スペクトルでは 100MeV 以上の中性子による線量寄与が 30% 以下であり、AP 照射条件の実効線量と実効線量が最大となる照射条件での実効線量との差は数% 以下と考えられる。また、HERMES コードシステム及び FLUKA コードシステムによる線量換算係数の違いの影響は僅かである。このことから、線量換算係数評価の計算モデル、計算コード及び断面積データ等の情報が確認できること、実効線量当量に対するデータも算出し放射線荷重係数の検討を行っていることから、HERMES コードシステムによる AP 照射条件における実効線量への換算係数を推奨する。
- (3) 表 5. 1 に熱エネルギーから 2GeV までの 77 群エネルギー構造に対応した中性子の AP 実効線量への換算係数を示す。この値は、低エネルギー領域において中性子分布としてマックスウェル分布、それ以外の領域においては $1/E$ 分布を重みとした群平均の値である。なお、19.6MeV から 55.0MeV までの値は、ICRP Publication 74 による線量換算係数と HERMES コードシステムに基づく線量換算係数が円滑につながるように、両者の値を重み付けして算出したものである。
- (4) 遮へい体内を中性子が透過する際二次 γ 線を発生するが、そのエネルギーはほぼ 10MeV 以下である。そこで、二次 γ 線に対する線量換算係数としては、放射線障害防止法等の告示別表にも線量換算係数が示されていることから、10MeV 以下の光子については ICRP Publication 74 による AP 照射条件における実効線量への換算係数とする。10MeV 以上の光子については、HERMES コードシステムによる AP 照射条件における実効線量への換算係数を推奨する。

6. まとめ

国際放射線防護委員会 (ICRP) 1990 年勧告 (ICRP Publication 60) の放射線障害防止法等の国内制度への取り入れにより、遮へい壁等の設計の際に評価すべき量が、従来の 1 センチメートル線量当量から実効線量に変更された。加速器施設の遮へい計算においては、20MeV 以下の中性子に対して、一般の原子力施設の中性子遮へい計算と同様に放射線障害防止法等の告示別表に示されている ICRP Publication 74 に基づく前方 (AP) 照射条件での実効線量への換算係数を用いることができる。しかしながら、20MeV 以上の中性子に対する線量換算係数は告示別表では示されていない。

そこで、20MeV 以上の中性子に対する線量換算係数の現状を調査した。ICRP Publication 74 では、20~180MeV のエネルギー領域において幾つかの照射条件に対する実効線量への換算係数を示しているが、180MeV 以上の中性子に対する換算係数は示していない。180MeV 以上の中性子に対する線量換算係数としては、HERMES コードシステムによる実効線量及び実効線量当量への換算係数、FLUKA コードシステムによる実効線量及び 1 センチメートル線量当量への換算係数があった。

陽子加速器施設において 0.6、1 及び 15GeV の陽子が円筒型の鉄ターゲットに照射し、発生した中性子による普通コンクリート遮へい体外側土壤中の平均的な中性子スペクトルに幾つかの線量換算係数を乗じて中性子線量率を試算した。従来の加速器遮へい設計計算で用いていた ICRP Publication 51 に示されている線量当量への換算係数によると、今回の中性子スペクトルにおける 100MeV 以下の中性子による線量当量率は、中性子の全線量当量率の約 70% を占めた。各エネルギー毎に新しい線量換算係数による線量率と ICRP Publication 51 の線量換算による線量当量率を比較すると、HERMES コードシステム及び FLUKA コードシステムによる AP 照射条件での線量換算係数に基づく実効線量率は、ICRP Publication 51 の線量換算係数による線量当量率と 10% 以内で一致していた。実効線量が最大となる照射条件は、中性子エネルギーや線量換算係数を評価した計算コードにより異なるが、AP 照射条件との実効線量の差は最大でも 21% である。100MeV 以上の中性子による線量寄与が 30% 以下であることを考慮すると、AP 照射条件の実効線量への線量換算係数を用いても、それ程の非安全側の評価とはならない。

これらの結果を踏まえ、低エネルギーから高エネルギーまで統一した AP 照射条件の実効線量への線量換算係数を用いることにし、20MeV 以上の中性子に対しては計算モデル、計算コード及び断面積データの情報が身近に確認できることから HERMES コードシステムによる線量換算係数を推奨した。そして、熱エネルギーから 2GeV までの 77 群構造に対応する線量換算係数を評価した。

謝 辞

遮へい体後方の中性子による線量率試算において、中性子スペクトルデータをご提供頂きご議論いただいた中性子科学研究センター施設安全グループの中島宏氏及び笹本宣雄氏に感謝致します。また、線量換算係数のまとめ方についてご助言頂いた高エネルギー加速器研究機構放射線科学センターの平山英夫氏及び柴田徳思氏にも感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 中村尚司, “放射線物理と加速器安全の工学”, 地人書館, p.231 (1995).
- 2) International Commission on Radiological Protection, “1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 60”, Ann. ICRP 21(1-3) (Oxford: Pergamon) (1991).
- 3) International Commission on Radiological Protection, “Data for Use in Protection Against External Radiation: ICRP Publication 51”, Ann. ICRP 17, No.2/3 (1987).
- 4) International Commission on Radiological Protection, “Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation: ICRP Publication 74”, Ann. ICRP 26(3/4) (Oxford: Elsevier Science) (1996).
- 5) NEA Data Bank Program, NEA-1265: HERMES-KFA (1997).
- 6) Cloth, P et al., “HERMES, A Monte Carlo Program System for Beam-Materials Interactions Studies”, JUL-2203 (1988).
- 7) RSICC Computer Code Collection, CCC-207, “FLUKA-TRANKA: Three-Dimensional High-Energy Extranuclear Hadron Cascade Monte Carlo System for Cylindrical Backstop Geometries”, Radiation Safety Information Computational Center, Oak Ridge National Laboratory.
- 8) Ranft, J. and Routti, J. T., “FLUKA and MAGKA, Monte Carlo Programs for Calculating Nucleon-Meson Cascades in Cylindrical Geometries”, CERN LABII-RA/71-4 (1971).
- 9) 放射線審議会, “ICRP 1990年勧告 (Pub.60) の国内制度等への取り入れについて (意見具申)”, (平成10年6月) .
- 10) 放射線審議会基本部会, “外部被ばく及び内部被ばくの評価に係る技術指針”, (平成11年4月).
- 11) International Commission on Radiation Units and Measurements, “Conversion Coefficients for use in Radiological Protection Against External Radiation: ICRU REPORT 57”, (Bethesda, MD: ICRU Publications) (1998).
- 12) National Council on Radiation Protection and Measurements, “Protection against Neutron Radiation”, Report 38, National Council on Radiation Protection and Measurements, Washington, D.C. (1971).
- 13) International Commission on Radiological Protection, “Statement from the 1985 Paris Meeting of the International Commission on Radiological Protection”, Radiation Protection Dosimetry, Vol.11, No.2, p.134-135 (1985).
- 14) Kotegawa, H., Nakane, Y., Hasegawa, A. and Tanaka, S., “Neutron-Photon Multigroup Cross Sections for Neutron Energies Up to 400 MeV: HILO86R- Revision of HILO86 Library”, JAERI-M 93-020 (1993).
- 15) Koyama, K., et al., “ANISN-JR, A One-Dimensional Discrete Ordinates Code for Neutron and Gamma-Ray Transport Calculations”, JAERI-M 6954 (1977).
- 16) Kotegawa, H., Tanaka, S., Sakamoto, Y., Nakane, Y. and Nakashima, H., “Attenuation Data of Point

- Isotropic Neutron Sources up to 400 MeV in Water, Ordinary Concrete and Iron”, JAERI-Data/Code 94-003 (1994).
- 17) Hirayama, H. and Attenuation Length Sub-Working Group, “Intercomparison of Medium-Energy Neutron Attenuation in Iron and Concrete”, Proceedings of the Fourth Specialists Meeting on Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities”, Knoxville, Tennessee, USA, 17-18 September 1998, p.143-154 (1999).
 - 18) 佐藤理、上原丘、義沢宣明、岩井敏、田中俊一、「高エネルギー放射線の線量当量換算係数の評価 (I) -評価コードシステムと基礎データの整備-」、JAERI-M 92-126 (1992).
 - 19) 佐藤理、降旗志おり、上原丘、義沢宣明、岩井敏、田中俊一、坂本幸夫、「高エネルギー放射線の線量当量換算係数の評価 (II) -高エネルギー荷電粒子の Q 評価方法の開発及び高エネルギー光子の線量当量換算係数評価-」、JAERI-M 93-147 (1993).
 - 20) Iwai, S., Uehara, T., Sato, O., Yoshizawa, N., Furihata, S., Takagi, S., Tanaka, S. and Sakamoto, Y., “Evaluation of Fluence to Dose Equivalent Conversion Coefficients for High Energy Neutrons -Calculation of Effective Dose Equivalent and Effective Dose”, Proc. 2nd Specialists’ Meeting on Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities (SATIF-2), p.233, CERN, Geneva, 12-13 October 1995.
 - 21) Iwai, S., Uehara, T., Sato, O., Yoshizawa, N., Furihata, S., Takagi, S., Tanaka, S. and Sakamoto, Y., “Overview of Fluence to Dose Equivalent Conversion Coefficients for High-Energy Radiations -Calculational Methods and Results of Effective Dose Equivalent and Effective Dose per Unit Particle Fluence”, Proc. 3rd Specialists’ Meeting on Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities (SATIF-3), p.299, Sendai, 12-13 May 1997.
 - 22) Iwai, S., Uehara, T., Sato, O., Yoshizawa, N., Furihata, S., Takagi, S., Tanaka, S. and Sakamoto, Y., “Overview of Fluence to Dose Equivalent Conversion Coefficients for High-Energy Radiations -Calculational Methods and Results of Two Kinds of Effective Doses per Unit Particle Fluence”, Proc. 4th Specialists’ Meeting on Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities (SATIF-4), p.193, Knoxville, 17-18 September 1998.
 - 23) Yoshizawa, N., Sato, O., Takagi, S., Furihata, S., Iwai, S., Uehara, T., Tanaka, S. and Sakamoto, Y., “External Radiation Conversion Coefficients using Radiation Weighting Factor and Quality Factor for Neutron and Proton from 20 MeV to 10 GeV”, J. Nucl. Sci. Technol., 35, 928 (1998).
 - 24) Yoshizawa, N., Sato, O., Takagi, S., Furihata, Funabiki, J., S., Iwai, S., Uehara, T., Tanaka, S. and Sakamoto, Y., “Fluence to Dose Conversion Coefficients for High-Energy Neutron, Proton and Alpha Particles”, J. Nucl. Sci. Technol., Supplement 1, 865 (2000).
 - 25) Pelliccioni, M., “Protection Quantities and Conversion Coefficients for Use in Radiation Protection”, J. Nucl. Sci. Technol., Supplement 1, 850 (2000).
 - 26) Ferrari, A., Pelliccioni, M. and Pillon, M., “Fluence to Effective Dose Conversion Coefficients for Neutrons up to 10 TeV”, Radiat. Prot. Dos., Vol. 71, No.3, 165 (1997).
 - 27) Ferrari, A. and Pelliccioni, M., “Conversion Data and Effective Quality Factors for High-Energy

- Neutrons”, *Radiat. Prot. Dos.*, Vol. 76, 215 (1998).
- 28) Prael, R.E. and Lichtenstein, H., “User Guide to LCS: The LAHET Code System”, Report No. LA-UR-89-3014, Radiation Transport Group, Los Alamos National Laboratory, New Mexico (1989).
 - 29) Nabelssi, B.K. and Hertel, N.E., “Ambient Dose Equivalents, Effective Dose Equivalents and Effective Doses for Neutrons from 10 to 20 MeV”, *Radiat. Prot. Dos.*, 48, 153 (1993).
 - 30) Nabelssi, B.K. and Hertel, N.E., “Effective Dose Equivalent and Effective Dose for Neutrons from 30 to 180 MeV”, *Radiat. Prot. Dos.*, 48, 227 (1993).
 - 31) Nabelssi, B.K. and Hertel, N.E., “Ambient Dose Equivalent, Deep Dose Equivalent Index and ICRU Sphere Depth-Dose Calculations For Neutrons from 30 to 180 MeV”, *Radiat. Prot. Dos.*, 51, 169 (1994).
 - 32) Golovachik, V.T., Kustrarjov, V.N., Savitskaya, E.N. and Sannikov, A.V., “Absorbed Dose and Dose Equivalent Depth Distributions for Protons with Energies from 2 to 600 MeV”, *Radiat. Prot. Dosim.*, 28, 189 (1989).
 - 33) Savitskaya, E.N. and Sannikov, A.V., “High Energy Neutrons and Proton Kerma Factors for Different Elements”, *Radiat. Prot. Dosim.*, 60, 135 (1995).
 - 34) Sannikov, A.V. and Savitskaya, E.N., “Ambient Dose Equivalent Conversion Factors for High Energy Neutrons on the ICRP-60 Recommendations”, *Radia. Prot. Dosim.*, 70, 383 (1997).
 - 35) Yong, P.G., “Transport Data Libraries for Incident Proton and Neutron Energies to 100 MeV”, Report No. LA-11753, Radiation Transport Group, Los Alamos National Laboratory, New Mexico (1990).
 - 36) Briesmeister, J.F. (Ed), “MCNP- A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4A”, Report No. LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory, New Mexico (1993).
 - 37) Mares, V., Leuthold, G. and Schraube, H., “Organ Doses and Dose Equivalents for Neutrons above 20 MeV”, *Radiat. Prot. Dos.*, 70, 391 (1997).
 - 38) 中島宏、私信 (2000).
 - 39) Niita, K., Nara, Y., Takada, H., Nakashima, H., Chiba, S. and Ikeda, Y., “Analysis of the Proton-Induced Reactions at 150 MeV – 24 GeV by High Energy Nuclear Reaction Code”, JAERI-Tech-99-065 (1999).
 - 40) Niita, K., “High Energy Nuclear Reaction Code JAM”, Proceedings of the 1999 Symposium on Nuclear Data, JAERI-Conf-2000-005, 98 (2000).
 - 41) Sato, O., Iwai, S., Tanaka, S., Uehara, T., Sakamoto, Y., Yoshizawa, N. and Furihata, S., “Calculations of Equivalent Dose and Effective Dose Conversion Coefficients for Photons from 1 MeV to 10 GeV”, *Radiat. Prot. Dos.*, 62, 119 (1995).
 - 42) Sato, O., Yoshizawa, N., Takagi, S., Iwai, S., Uehara, T., Sakamoto, Y., Yamaguchi, Y. and Tanaka, S., “Calculations of Effective Dose and Ambient Dose Equivalent Conversion Coefficients for High Energy Photons”, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 36, 977 (1999).
 - 43) Ferrari, A., Pelliccioni, M. and Pillon, M., “Fluence to Effective Dose and Effective Dose Equivalent Conversion Coefficients for Photons from 50 keV to 10 GeV”, *Radiat. Prot. Dos.*, Vol. 67, 245 (1996).

- 44) Ferrari, A., Pelliccioni, M. and Pillon, M., "Fluence to Effective Dose Conversion Coefficients for Protons from 5 MeV to 10 TeV", *Radiat. Prot. Dos.*, Vol. 71, 85 (1997).

表 3. 1 高エネルギー放射線に対する線量換算係数データの現状

放射線の種類	ICRP Publication 51 ³⁾	ICRP Publication 74 ⁴⁾	最近の研究
光子	<p><u>人体形状モデル</u> 0.01~10MeV 実効線量当量 AP、PA、LAT、ROT、ISO</p> <p><u>ICRU 球モデル</u> 0.01~10MeV 1センチメートル線量当量 <u>平板モデル(30cm厚)</u> 10MeV~20GeV 最大線量当量 1センチメートル線量当量</p>	<p><u>人体形状モデル</u> 0.01~10MeV 実効線量 AP、PA、RLAT、LLAT、ROT、ISO</p> <p><u>ICRU 球モデル</u> <u>平板モデル</u> 周辺線量当量 方向性線量当量</p>	<p><u>日本グループ^{41, 42)}</u> <u>人体形状モデル</u> 10MeV~10GeV 実効線量 AP、PA、LLAT、RLAT、ROT、ISO</p> <p><u>ICRU 球モデル</u> 深部線量当量</p> <p><u>イタリア LNF グループ⁴³⁾</u> <u>人体形状モデル</u> 5MeV~100GeV 実効線量 AP、PA、LAT、ISO</p> <p><u>ICRU 球モデル</u> 0.01MeV~10GeV 最大線量当量 1センチメートル線量当量</p>
中性子	<p><u>人体形状モデル</u> 0.025eV~14MeV 実効線量当量 AP、PA、LAT、ROT</p> <p><u>ICRU 球モデル</u> 0.025eV~20MeV 1センチメートル線量当量 <u>平板モデル(30cm厚)</u> 2MeV~100GeV 最大線量当量 1センチメートル線量当量</p>	<p><u>人体形状モデル</u> 1meV~180MeV 実効線量 AP、PA、LLAT、RLAT、ROT、ISO</p> <p><u>ICRU 球・ICRU スラブ</u> 1meV~201MeV 周辺線量当量 方向性線量当量</p>	<p><u>日本グループ^{23, 24)}</u> <u>人体形状モデル</u> 20MeV~10GeV(n及びp) 実効線量・実効線量当量 AP、PA、ISO W_Rの推奨値</p> <p><u>イタリア LNF グループ^{26, 44)}</u> <u>人体形状モデル</u> 0.025eV~10TeV(n) 5MeV~10TeV(p) 実効線量 AP、PA、LAT、ISO</p> <p><u>ICRU 球モデル</u> 0.025eV~10TeV(n) 50MeV~10TeV(p) 最大線量当量 1センチメートル線量当量 平均線質係数</p>
陽子	<p><u>平板モデル(30cm厚)</u> 60MeV~100GeV 最大線量当量 1センチメートル線量当量</p>		

表4. 1 ICRP Publication 51の線量換算係数による中性子線量率

(単位: $\mu\text{Sv h}^{-1}$ per proton s^{-1})

ICRP 51	エネルギー領域	陽子エネルギー					
		0.6 GeV		1 GeV		15 GeV	
	180MeV 以上	$\times 10^{-10}$ (3.10 \pm 0.10)	5%*	$\times 10^{-10}$ (7.85 \pm 0.24)	8%	$\times 10^{-8}$ (3.00 \pm 0.09)	10%
	100-180MeV	$\times 10^{-9}$ (1.29 \pm 0.02)	19%	$\times 10^{-9}$ (2.05 \pm 0.04)	20%	$\times 10^{-8}$ (5.39 \pm 0.11)	19%
	19.6-100MeV	$\times 10^{-9}$ (2.66 \pm 0.02)	39%	$\times 10^{-9}$ (3.81 \pm 0.04)	38%	$\times 10^{-7}$ (1.03 \pm 0.01)	36%
	19.6MeV 以下	$\times 10^{-9}$ (2.53 \pm 0.07)	37%	$\times 10^{-9}$ (3.46 \pm 0.01)	34%	$\times 10^{-7}$ (1.01 \pm 0.03)	35%
	合計	$\times 10^{-9}$ (6.79 \pm 0.07)	100%	$\times 10^{-8}$ (1.01 \pm 0.01)	100%	$\times 10^{-7}$ (2.88 \pm 0.04)	100%

*全中性子線量率に対する百分率

表4. 2 ICRP Publication 74の線量換算係数による中性子線量率

(単位: $\mu\text{Sv h}^{-1}$ per proton s^{-1})

	エネルギー領域	陽子エネルギー					
		0.6 GeV		1 GeV		15 GeV	
ICRP 51	100-180MeV	$\times 10^{-9}$ (1.29 \pm 0.02)	1.00	$\times 10^{-9}$ (2.05 \pm 0.04)	1.00	$\times 10^{-8}$ (5.39 \pm 0.11)	1.00
	19.6-100MeV	$\times 10^{-9}$ (2.66 \pm 0.02)	1.00	$\times 10^{-9}$ (3.81 \pm 0.04)	1.00	$\times 10^{-7}$ (1.03 \pm 0.01)	1.00
	19.6MeV 以下	$\times 10^{-9}$ (2.53 \pm 0.07)	1.00	$\times 10^{-9}$ (3.46 \pm 0.01)	1.00	$\times 10^{-7}$ (1.01 \pm 0.03)	1.00
E(AP)	100-180MeV	$\times 10^{-9}$ (1.16 \pm 0.02)	0.90	$\times 10^{-9}$ (1.84 \pm 0.03)	0.90	$\times 10^{-8}$ (4.85 \pm 0.10)	0.90
	19.6-100MeV	$\times 10^{-9}$ (2.62 \pm 0.02)	0.98	$\times 10^{-9}$ (3.75 \pm 0.04)	0.98	$\times 10^{-7}$ (1.01 \pm 0.01)	0.98
	19.6MeV 以下	$\times 10^{-9}$ (2.56 \pm 0.07)	1.01	$\times 10^{-9}$ (3.57 \pm 0.01)	1.03	$\times 10^{-7}$ (1.04 \pm 0.03)	1.03
E(PA)	100-180MeV	$\times 10^{-9}$ (1.33 \pm 0.02)	1.15	$\times 10^{-9}$ (2.12 \pm 0.04)	1.03	$\times 10^{-8}$ (5.59 \pm 0.11)	1.04
	19.6-100MeV	$\times 10^{-9}$ (2.68 \pm 0.02)	1.02	$\times 10^{-9}$ (3.83 \pm 0.04)	1.01	$\times 10^{-7}$ (1.03 \pm 0.01)	1.00
E(RLAT)	100-180MeV	$\times 10^{-9}$ (1.27 \pm 0.02)	0.98	$\times 10^{-9}$ (2.02 \pm 0.03)	0.99	$\times 10^{-8}$ (5.32 \pm 0.11)	0.99
	19.6-100MeV	$\times 10^{-9}$ (2.19 \pm 0.02)	0.82	$\times 10^{-9}$ (3.13 \pm 0.03)	0.82	$\times 10^{-8}$ (8.42 \pm 0.10)	0.82
E(ROT)	100-180MeV	$\times 10^{-9}$ (1.26 \pm 0.02)	0.98	$\times 10^{-9}$ (2.00 \pm 0.03)	0.98	$\times 10^{-8}$ (5.27 \pm 0.11)	0.98
	19.6-100MeV	$\times 10^{-9}$ (2.45 \pm 0.02)	0.92	$\times 10^{-9}$ (3.50 \pm 0.03)	0.92	$\times 10^{-8}$ (9.42 \pm 0.10)	0.91

表 4. 3 HERMES コードシステムによる線量換算係数に基づく中性子線量率

(単位: $\mu\text{Sv h}^{-1}$ per proton s^{-1})

	エネルギー領域	陽子エネルギー					
		0.6 GeV		1 GeV		15 GeV	
ICRP 51	180MeV 以上	$\times 10^{-10}$ (3.10 \pm 0.10)	1.00	$\times 10^{-10}$ (7.85 \pm 0.24)	1.00	$\times 10^{-8}$ (3.00 \pm 0.09)	1.00
	100-180MeV	$\times 10^{-9}$ (1.29 \pm 0.02)	1.00	$\times 10^{-9}$ (2.05 \pm 0.04)	1.00	$\times 10^{-8}$ (5.39 \pm 0.11)	1.00
	19.6-100MeV	$\times 10^{-9}$ (2.66 \pm 0.02)	1.00	$\times 10^{-9}$ (3.81 \pm 0.04)	1.00	$\times 10^{-7}$ (1.03 \pm 0.01)	1.00
E(AP)	180MeV 以上	$\times 10^{-10}$ (2.90 \pm 0.10)	0.94	$\times 10^{-10}$ (7.32 \pm 0.22)	0.93	$\times 10^{-8}$ (2.78 \pm 0.08)	0.93
	100-180MeV	$\times 10^{-9}$ (1.26 \pm 0.02)	0.98	$\times 10^{-9}$ (2.00 \pm 0.03)	0.98	$\times 10^{-8}$ (5.27 \pm 0.11)	0.98
	19.6-100MeV	$\times 10^{-9}$ (2.61 \pm 0.02)	0.98	$\times 10^{-9}$ (3.74 \pm 0.04)	0.98	$\times 10^{-7}$ (1.01 \pm 0.01)	0.98
E(PA)	180MeV 以上	$\times 10^{-10}$ (3.40 \pm 0.11)	1.10	$\times 10^{-10}$ (8.62 \pm 0.26)	1.10	$\times 10^{-8}$ (3.28 \pm 0.10)	1.09
	100-180MeV	$\times 10^{-9}$ (1.39 \pm 0.02)	1.08	$\times 10^{-9}$ (2.21 \pm 0.04)	1.08	$\times 10^{-8}$ (5.82 \pm 0.12)	1.08
	19.6-100MeV	$\times 10^{-9}$ (2.60 \pm 0.02)	0.98	$\times 10^{-9}$ (3.72 \pm 0.04)	0.98	$\times 10^{-7}$ (1.00 \pm 0.01)	0.97
E(ISO)	180MeV 以上	$\times 10^{-10}$ (3.30 \pm 0.11)	1.06	$\times 10^{-10}$ (8.40 \pm 0.26)	1.07	$\times 10^{-8}$ (3.22 \pm 0.10)	1.07
	100-180MeV	$\times 10^{-9}$ (1.29 \pm 0.02)	1.00	$\times 10^{-9}$ (2.06 \pm 0.04)	1.00	$\times 10^{-8}$ (5.42 \pm 0.11)	1.01
	19.6-100MeV	$\times 10^{-9}$ (2.30 \pm 0.02)	0.86	$\times 10^{-9}$ (3.29 \pm 0.03)	0.86	$\times 10^{-8}$ (8.83 \pm 0.10)	0.86
H _E (AP)	180MeV 以上	$\times 10^{-10}$ (1.99 \pm 0.07)	0.64	$\times 10^{-10}$ (5.05 \pm 0.15)	0.64	$\times 10^{-8}$ (1.93 \pm 0.06)	0.64
	100-180MeV	$\times 10^{-10}$ (8.94 \pm 0.13)	0.69	$\times 10^{-9}$ (1.42 \pm 0.02)	0.69	$\times 10^{-8}$ (3.73 \pm 0.07)	0.69
	19.6-100MeV	$\times 10^{-9}$ (2.06 \pm 0.02)	0.77	$\times 10^{-9}$ (2.95 \pm 0.03)	0.77	$\times 10^{-8}$ (7.93 \pm 0.09)	0.77
H _E (PA)	180MeV 以上	$\times 10^{-10}$ (2.23 \pm 0.07)	0.72	$\times 10^{-10}$ (5.65 \pm 0.17)	0.72	$\times 10^{-8}$ (2.15 \pm 0.07)	0.72
	100-180MeV	$\times 10^{-10}$ (9.53 \pm 0.14)	0.74	$\times 10^{-9}$ (1.52 \pm 0.03)	0.74	$\times 10^{-8}$ (3.98 \pm 0.08)	0.74
	19.6-100MeV	$\times 10^{-9}$ (2.01 \pm 0.02)	0.76	$\times 10^{-9}$ (2.88 \pm 0.03)	0.76	$\times 10^{-8}$ (7.73 \pm 0.09)	0.75
H _E (ISO)	180MeV 以上	$\times 10^{-10}$ (2.09 \pm 0.07)	0.67	$\times 10^{-10}$ (5.34 \pm 0.16)	0.68	$\times 10^{-8}$ (2.05 \pm 0.06)	0.68
	100-180MeV	$\times 10^{-10}$ (8.01 \pm 0.12)	0.62	$\times 10^{-9}$ (1.27 \pm 0.02)	0.62	$\times 10^{-8}$ (3.36 \pm 0.07)	0.62
	19.6-100MeV	$\times 10^{-9}$ (1.69 \pm 0.01)	0.64	$\times 10^{-9}$ (2.41 \pm 0.02)	0.63	$\times 10^{-8}$ (6.50 \pm 0.07)	0.63

表4. 4 FLUKA コードシステムによる線量換算係数に基づく中性子線量率

(単位: $\mu\text{Sv h}^{-1}$ per proton s^{-1})

	エネルギー領域	陽子エネルギー					
		0.6 GeV		1 GeV		15 GeV	
ICRP 51	180MeV 以上	$\times 10^{-10}$ (3.10 \pm 0.10)	1.00	$\times 10^{-10}$ (7.85 \pm 0.24)	1.00	$\times 10^{-8}$ (3.00 \pm 0.09)	1.00
	100-180MeV	$\times 10^{-9}$ (1.29 \pm 0.02)	1.00	$\times 10^{-9}$ (2.05 \pm 0.04)	1.00	$\times 10^{-8}$ (5.39 \pm 0.11)	1.00
	19.6-100MeV	$\times 10^{-9}$ (2.66 \pm 0.02)	1.00	$\times 10^{-9}$ (3.81 \pm 0.04)	1.00	$\times 10^{-7}$ (1.03 \pm 0.01)	1.00
E(AP)	180MeV 以上	$\times 10^{-10}$ (2.86 \pm 0.09)	0.92	$\times 10^{-10}$ (7.17 \pm 0.22)	0.91	$\times 10^{-8}$ (2.69 \pm 0.08)	0.90
	100-180MeV	$\times 10^{-9}$ (1.29 \pm 0.02)	1.00	$\times 10^{-9}$ (2.05 \pm 0.04)	1.00	$\times 10^{-8}$ (5.38 \pm 0.11)	1.00
	19.6-100MeV	$\times 10^{-9}$ (2.55 \pm 0.02)	0.96	$\times 10^{-9}$ (3.65 \pm 0.04)	0.96	$\times 10^{-8}$ (9.81 \pm 0.11)	0.95
E(PA)	180MeV 以上	$\times 10^{-10}$ (3.21 \pm 0.11)	1.04	$\times 10^{-10}$ (8.12 \pm 0.25)	1.03	$\times 10^{-8}$ (3.08 \pm 0.09)	1.03
	100-180MeV	$\times 10^{-9}$ (1.33 \pm 0.02)	1.03	$\times 10^{-9}$ (2.11 \pm 0.04)	1.03	$\times 10^{-8}$ (5.54 \pm 0.11)	1.03
	19.6-100MeV	$\times 10^{-9}$ (2.53 \pm 0.02)	0.95	$\times 10^{-9}$ (3.62 \pm 0.03)	0.95	$\times 10^{-8}$ (9.72 \pm 0.11)	0.94
E(LAT)	180MeV 以上	$\times 10^{-10}$ (3.42 \pm 0.11)	1.10	$\times 10^{-10}$ (8.62 \pm 0.26)	1.10	$\times 10^{-8}$ (3.24 \pm 0.10)	1.08
	100-180MeV	$\times 10^{-9}$ (1.22 \pm 0.02)	0.95	$\times 10^{-9}$ (1.94 \pm 0.03)	0.95	$\times 10^{-8}$ (5.12 \pm 0.10)	0.95
	19.6-100MeV	$\times 10^{-9}$ (2.09 \pm 0.02)	0.79	$\times 10^{-9}$ (3.00 \pm 0.03)	0.79	$\times 10^{-8}$ (8.05 \pm 0.09)	0.78
E(ISO)	180MeV 以上	$\times 10^{-10}$ (3.42 \pm 0.11)	1.10	$\times 10^{-10}$ (8.64 \pm 0.26)	1.10	$\times 10^{-8}$ (3.26 \pm 0.10)	1.09
	100-180MeV	$\times 10^{-9}$ (1.22 \pm 0.02)	0.95	$\times 10^{-9}$ (1.94 \pm 0.03)	0.95	$\times 10^{-8}$ (5.13 \pm 0.10)	0.95
	19.6-100MeV	$\times 10^{-9}$ (2.12 \pm 0.02)	0.80	$\times 10^{-9}$ (3.03 \pm 0.03)	0.80	$\times 10^{-8}$ (8.15 \pm 0.09)	0.79

表 5. 1 中性子実効線量評価のための線量換算係数の推奨値

	E_L (MeV)	E_U (MeV)	$E(AP)/\Phi$ ($\mu\text{Sv h}^{-1}$ per $\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)		
			ICRP 74	HERMES	Recommended
1	1,000	2,000		4.519	4.519
2	900	1,000		3.737	3.737
3	800	900		3.464	3.464
4	750	800		3.226	3.226
5	700	750		3.053	3.053
6	650	700		2.876	2.876
7	600	650		2.701	2.701
8	550	600		2.534	2.534
9	500	550		2.384	2.384
10	450	500		2.256	2.256
11	400	450		2.136	2.136
12	375	400		2.050	2.050
13	350	375		1.993	1.993
14	325	350		1.939	1.939
15	300	325		1.886	1.886
16	275	300		1.837	1.837
17	250	275		1.792	1.792
18	225	250		1.753	1.753
19	200	225		1.722	1.722
20	180	200		1.703	1.703
21	160	180	1.594	1.697	1.697
22	140	160	1.577	1.698	1.698
23	120	140	1.559	1.701	1.701
24	110	120	1.549	1.701	1.701
25	100	110	1.546	1.694	1.694
26	90.0	100	1.543	1.679	1.679
27	80.0	90.0	1.543	1.653	1.653
28	70.0	80.0	1.545	1.619	1.619
29	65.0	70.0	1.549	1.590	1.590
30	60.0	65.0	1.553	1.570	1.570
31	55.0	60.0	1.559	1.550	1.550
32	50.0	55.0	1.568	1.533	1.537
33	45.0	50.0	1.580	1.524	1.535
34	40.0	45.0	1.594	1.534	1.552
35	35.0	40.0	1.612	1.558	1.580
36	30.0	35.0	1.635	1.579	1.607
37	27.5	30.0	1.657	1.575	1.624
38	25.0	27.5	1.675	1.557	1.640
39	22.5	25.0	1.694	1.526	1.660
40	19.6	22.5	1.718	1.474	1.694

表5. 1 中性子実効線量評価のための線量換算係数の推奨値 (続き)

	E_L (MeV)	E_U (MeV)	$E(AP)/\Phi$ ($\mu\text{Sv h}^{-1}\text{ per n cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$)		
			ICRP 74	HERMES	Recommended
41	17.5	19.6	1.744		1.744
42	14.9	17.5	1.767		1.767
43	13.5	14.9	1.784		1.784
44	12.2	13.5	1.792		1.792
45	10.0	12.2	1.798		1.798
46	8.19	10.0	1.789		1.789
47	6.70	8.19	1.770		1.770
48	5.49	6.70	1.741		1.741
49	4.49	5.49	1.704		1.704
50	3.68	4.49	1.622		1.622
51	3.01	3.68	1.591		1.591
52	2.46	3.01	1.554		1.554
53	2.02	2.46	1.430		1.430
54	1.65	2.02	1.335		1.335
55	1.35	1.65	1.234		1.234
56	1.11	1.35	1.127		1.127
57	0.907	1.11	1.017		1.017
58	0.743	0.907	0.9137		0.9137
59	0.498	0.743	0.7658		0.7658
60	0.334	0.498	0.5937		0.5937
61	0.224	0.334	0.4492		0.4492
62	0.150	0.224	0.3357		0.3357
63	8.65E-2	0.150	0.2380		0.2380
64	3.18E-2	8.65E-2	0.1453		0.1453
65	1.50E-2	3.18E-2	0.08997		0.08997
66	7.10E-3	1.50E-2	0.06703		0.06703
67	3.35E-3	7.10E-3	0.05654		0.05654
68	1.58E-3	3.35E-3	0.05233		0.05233
69	4.54E-4	1.58E-3	0.05115		0.05115
70	1.01E-4	4.54E-4	0.05181		0.05181
71	2.26E-5	1.01E-4	0.05335		0.05335
72	1.07E-5	2.26E-5	0.05441		0.05441
73	5.04E-6	1.07E-5	0.05423		0.05423
74	2.38E-6	5.04E-6	0.05344		0.05344
75	1.12E-6	2.38E-6	0.05154		0.05154
76	4.14E-7	1.12E-6	0.04769		0.04769
77	1.00E-10	4.14E-7	0.03024		0.03024

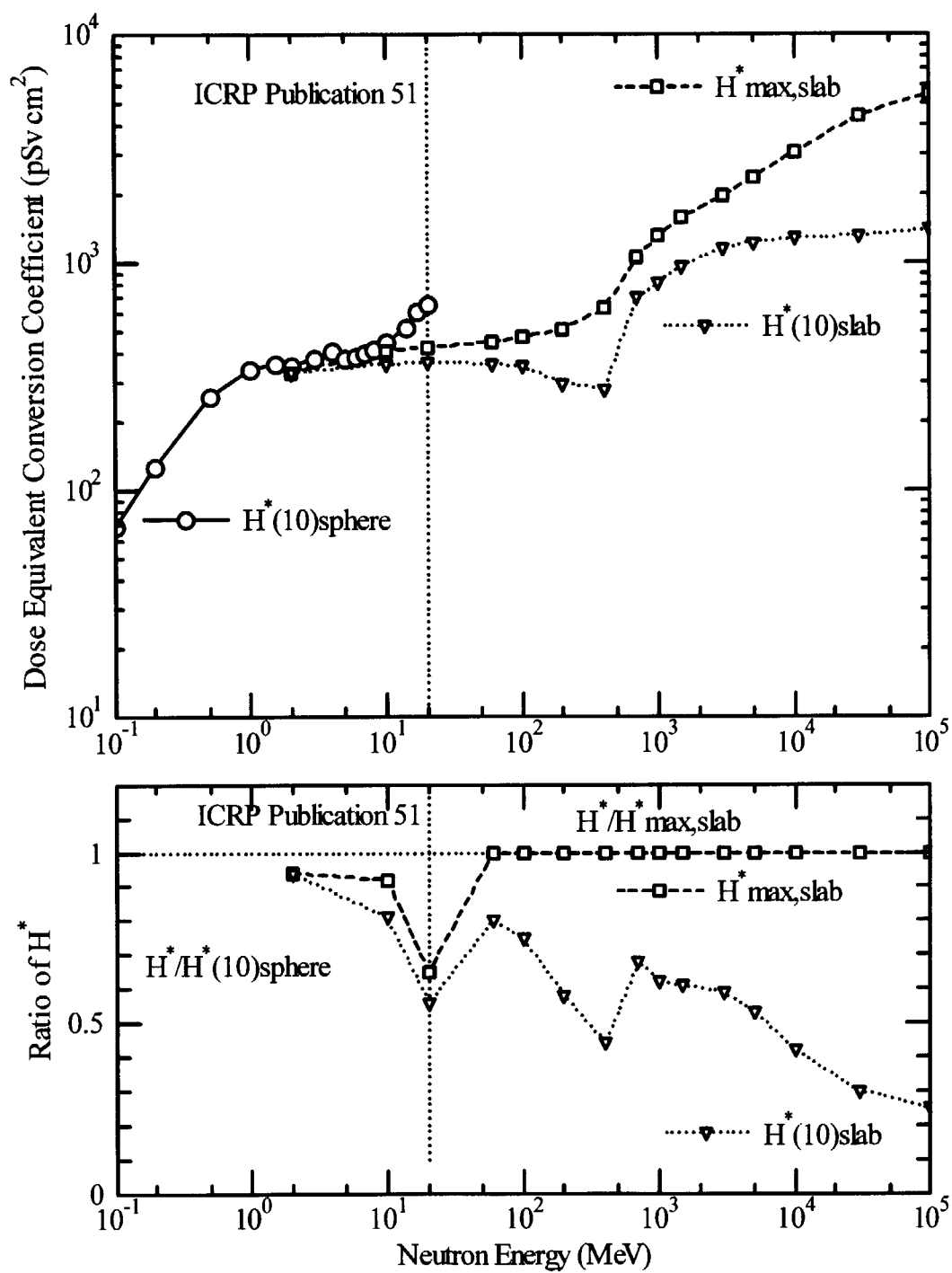


図 3. 1 ICRP Publication 51 に示された中性子に対する線量換算係数のエネルギー依存性

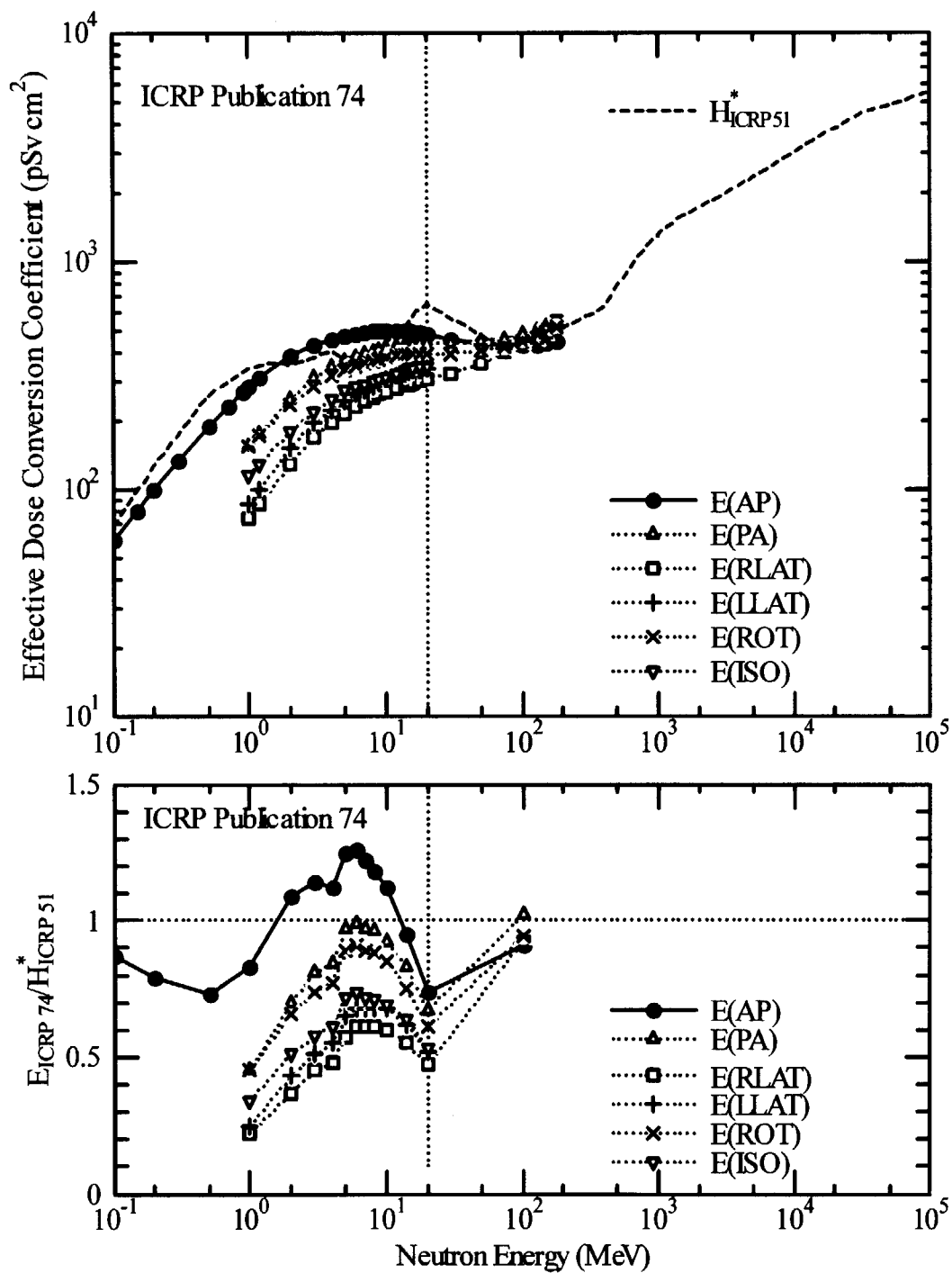


図3. 2 ICRP Publication 74 における示された中性子に対する線量換算係数のエネルギー依存性

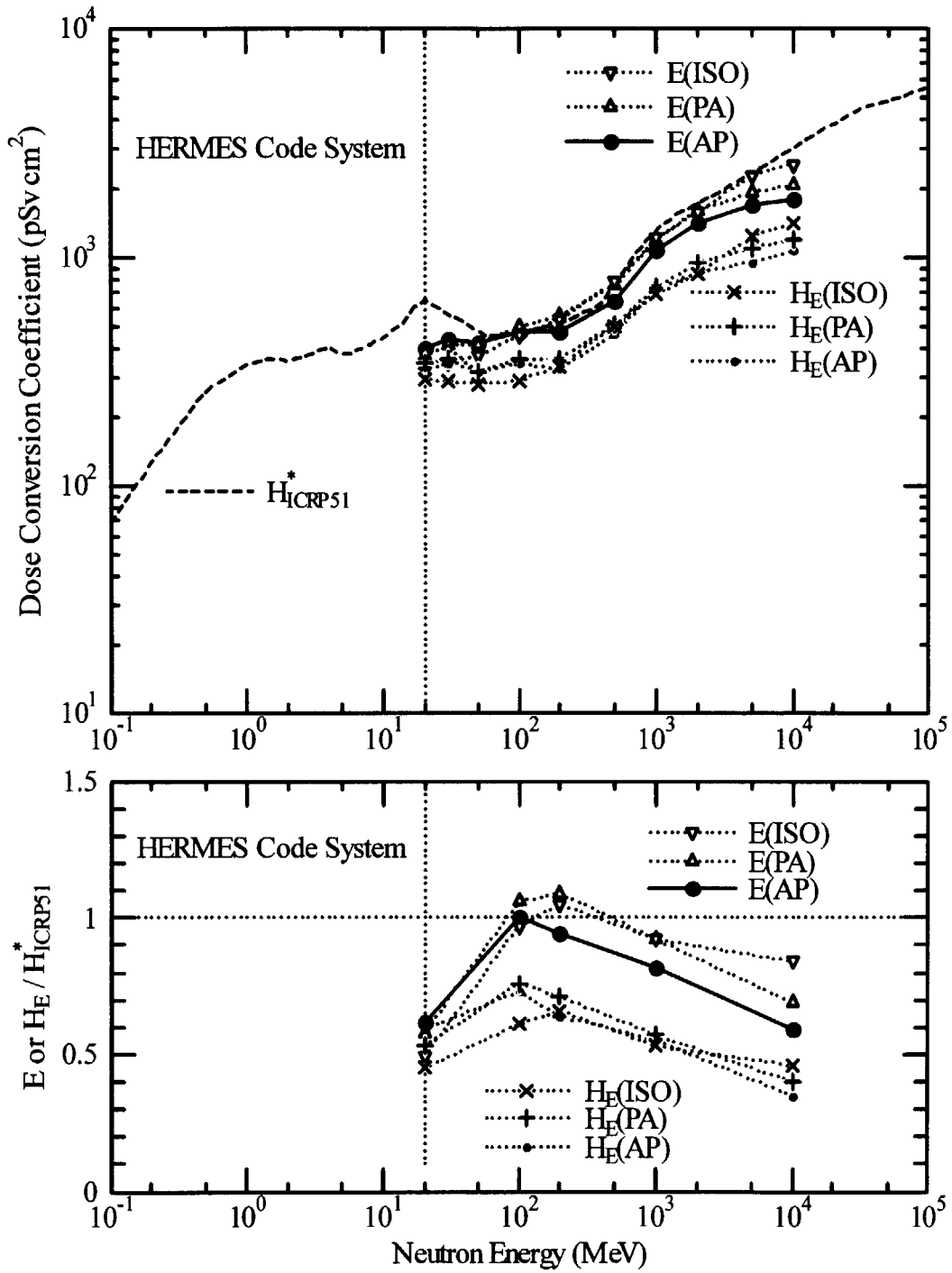


図 3. 3 HERMES コードシステムによる中性子に対する線量換算係数のエネルギー依存性

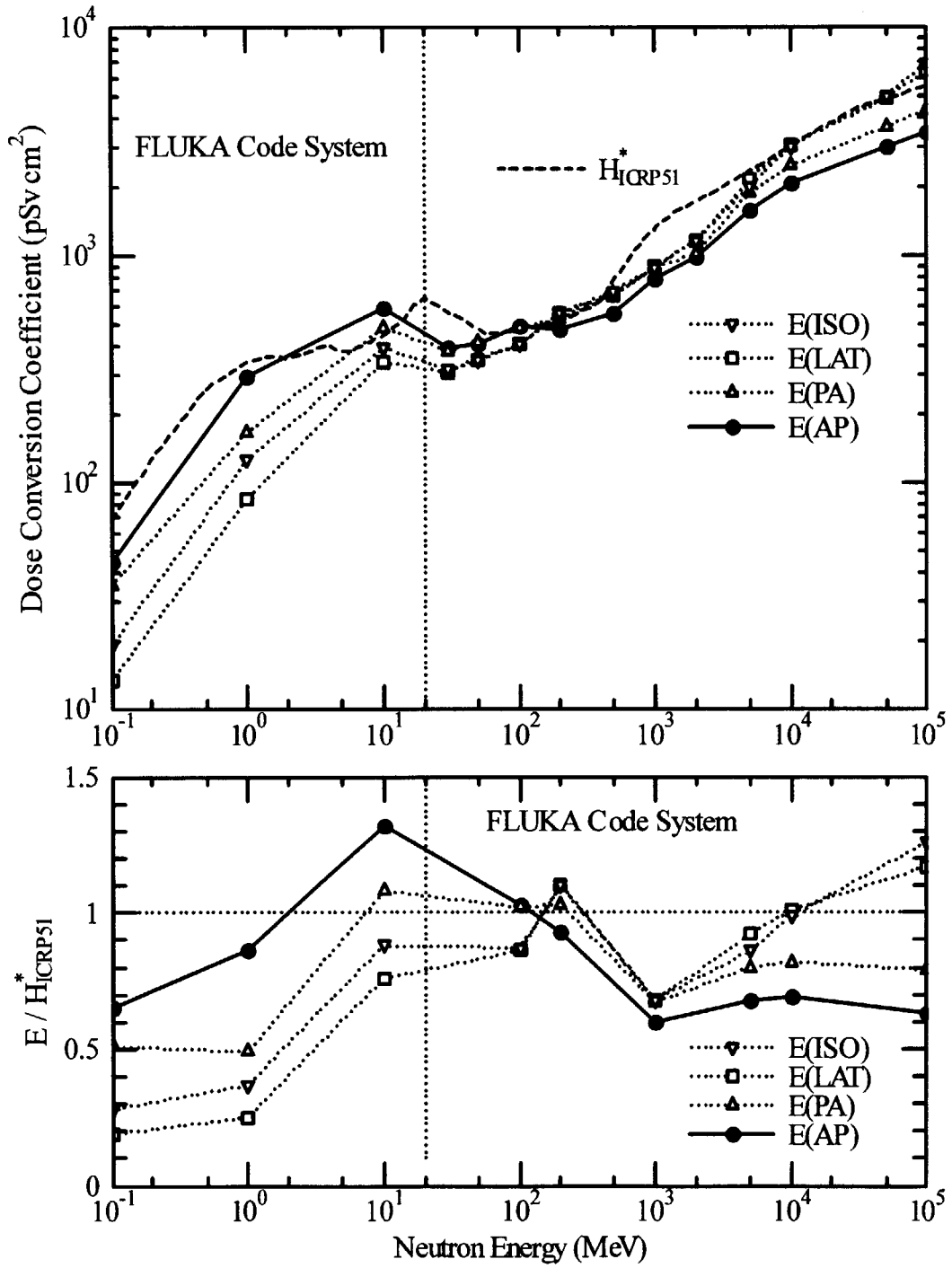


図 3. 4 FLUKA コードシステムによる中性子に対する線量換算係数のエネルギー依存性

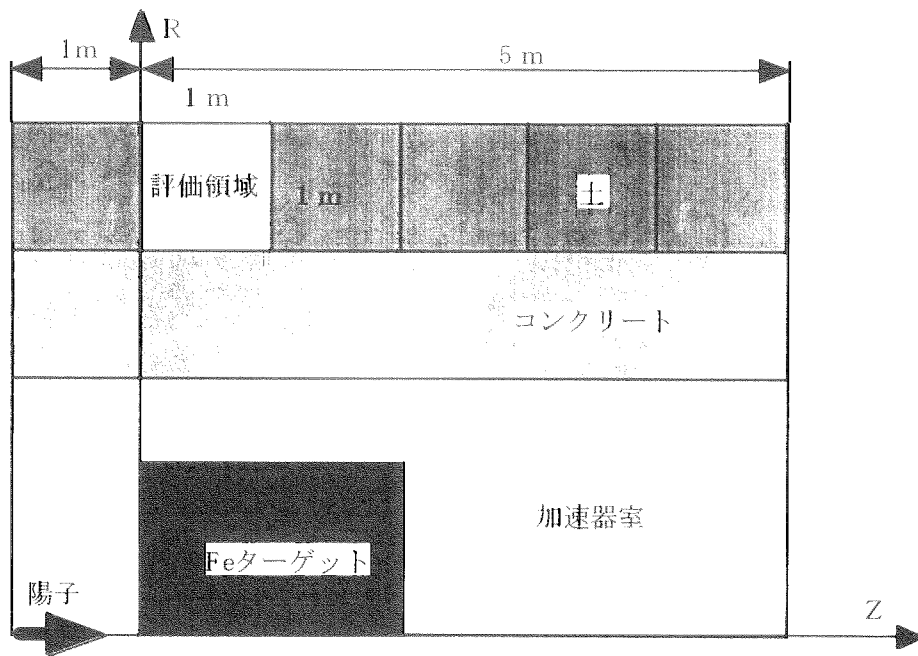


図4. 1 遮へい体背面での中性子スペクトル評価のための計算モデル³⁸⁾

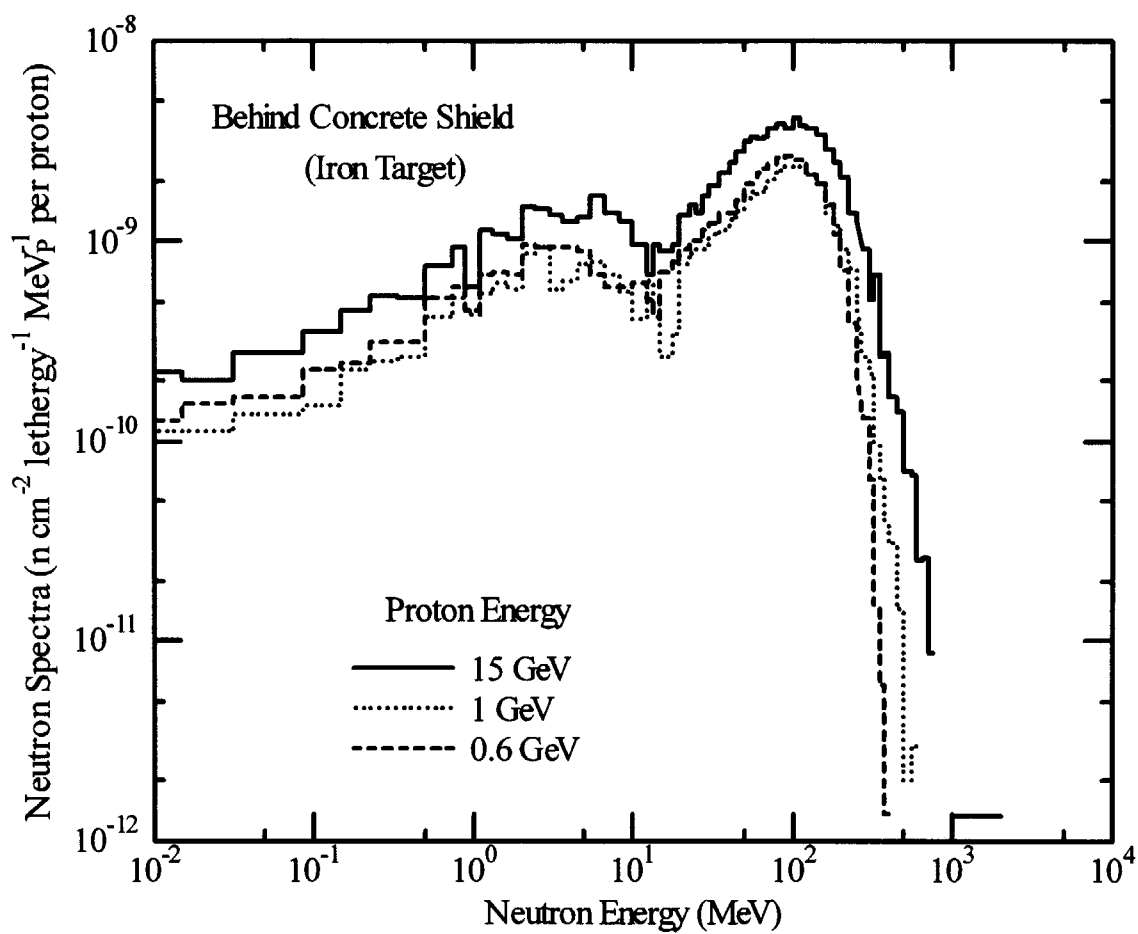


図4. 2 遮へい体背面における中性子のレサジー当たりのスペクトル

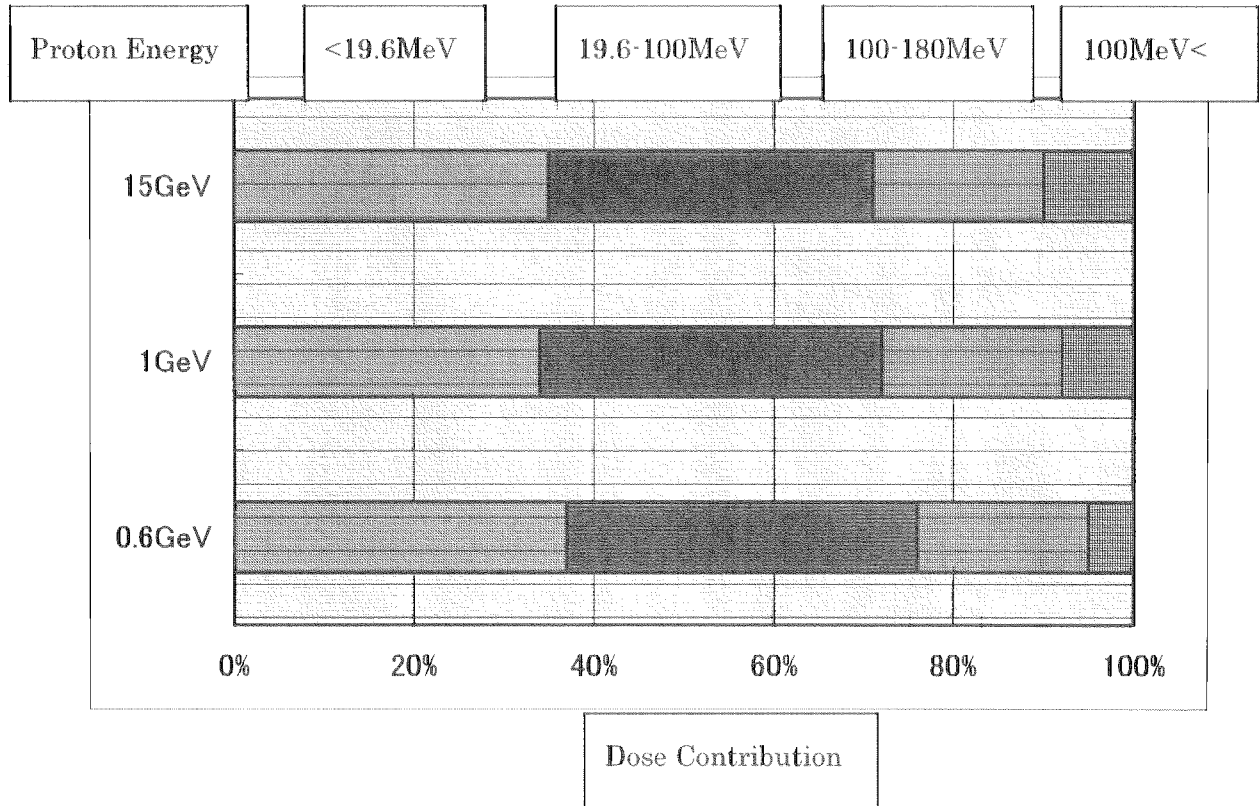


図4. 3 中性子線量当量率に対するエネルギー領域別中性子の寄与

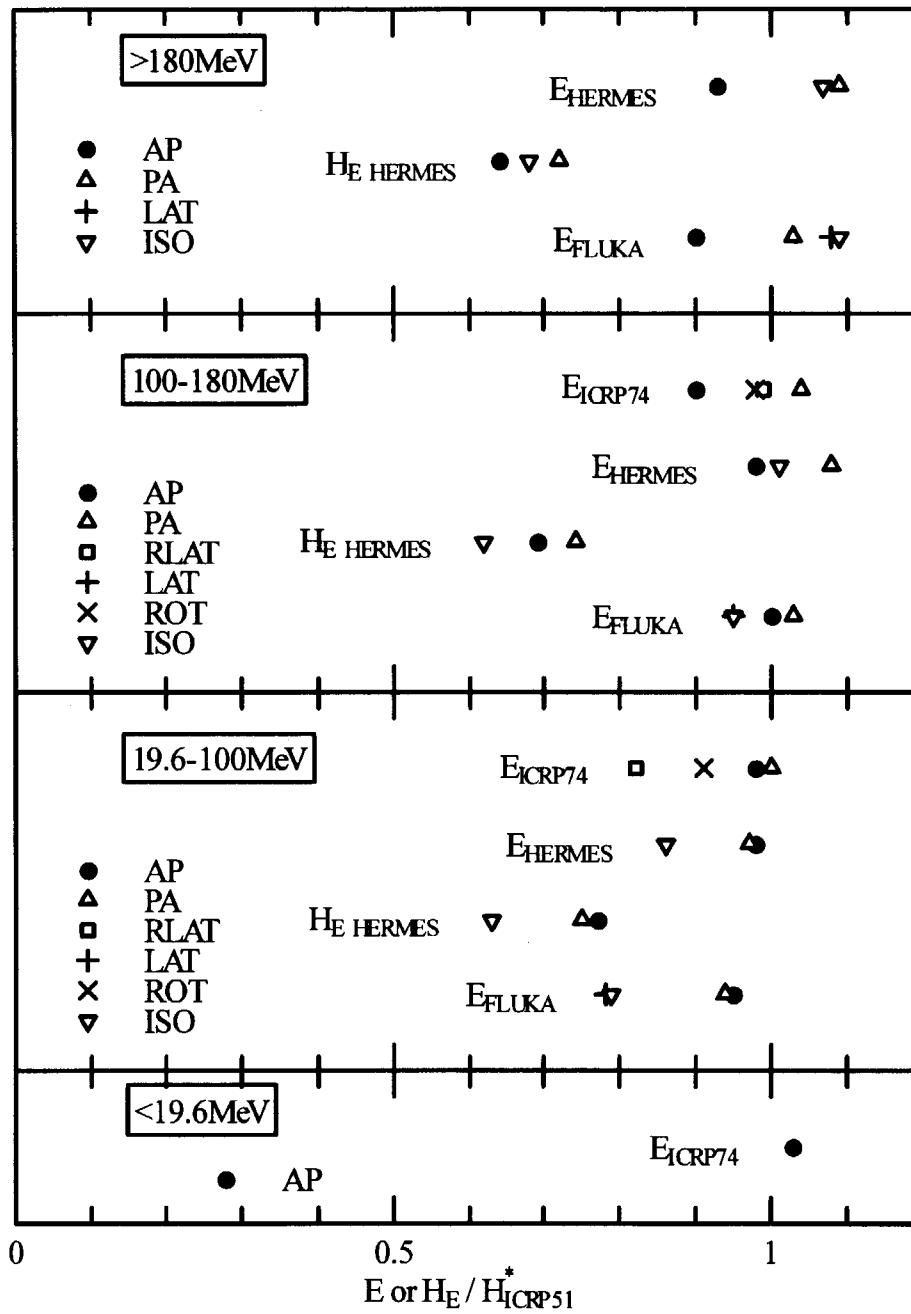


図4. 4 エネルギー領域毎の異なる線量換算係数による中性子線量率と ICRP Publication 51 の線量換算係数による中性子線量当量率との比率

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局 1985年刊行による。ただし、1 eV および 1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC関係理事会指令ではbar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))
動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)
= 4.184 J (熱化学)
= 4.1855 J (15 °C)
= 4.1868 J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS (仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

高エネルギー陽子加速器施設の選へい設計計算のための線量換算係数