

原子力規制委員会原子力規制庁 殿

平成 28 年度放射線発生装置の
基準根拠の整理事業
成果報告書

平成 29 年 3 月

(一財)高度情報科学技術研究機構

目 次

第1章 仕 様	1
1.1 調達件名	1
1.2 目的	1
1.3 実施内容	1
1.4 履行期限	3
1.5 成果物の提出	3
1.6 著作権の扱い	4
1.7 情報セキュリティ	4
1.8 その他	4
第2章 成果報告	5
2.1 電子計算コード PHITS による数値解析	5
2.1.1 計算コード	5
2.1.2 標的の設定	5
2.1.3 標的の材質	8
2.1.4 標的のサイズ	8
2.1.5 線量換算係数	9
2.1.6 中性子と光子の寄与	12
2.2 数値計算結果の整理と評価	13
2.2.1 実効線量率の計算結果	13
2.2.2 ビーム出力毎の実効線量率	14
2.2.3 評価基準	15
2.3 DVD の内容	17

目 次

図 1	10^{12} 個/s (=0.16 μ A) の陽子ビームが厚い標的に入射したときの、 0° および 90° 方向の 1m の位置での線量当量率	2
図 2	1kW の電子ビームが厚い標的に入射したときの、 0° および 90° 方向の 1m の位置での吸収線量率	3
図 3	標的と実効線量率を求める領域	6
図 4	陽子 500MeV を半径 5cm、長さ 23.5cm (レンジは 21.4cm である) に入射した場合の周辺の実効線量率の分布	6
図 5	電子 100MeV を半径 5cm、長さ 20cm に入射した場合の周辺の実効線量率の分布	7
図 6	10^{12} pps の陽子が標的に入射した場合の 1m での領域での実効線量率	8
図 7	陽子入射の場合、円柱の長さが 20cm 固定と、レンジの 1.1 倍の場合の比較	9
図 8	中性子の実効線量換算係数(AP)、PHITS 内蔵、ICRP116、ICRP116(Red Born Marrow) の比較	10
図 9	光子実効線量換算係数(AP)、PHITS 内蔵、ICRP116、ICRP116(Red Born Marrow) の比較	10
図 10	陽子、電子入射の 1m での実効線量率、線量換算係数の違いの比較。	11
図 11	陽子入射、1m での実効線量率、中性子と光子の寄与	12
図 12	陽子、電子、炭素、それぞれのビームの入射エネルギー毎の 90° 方向、1m の場所での実効線量率 $f(E)$ (Sv/h)	13
図 13	陽子、電子、炭素、ビーム出力を一定にし、1%のビームロスを仮定した時の実効線量率 $F_{AkW}(E)$ (Sv/h)	15

表 目 次

表 1	陽子、電子入射の 1m での実効線量率、線量換算係数の違いの比較。	1 1
表 2	陽子、電子入射の 1m での実効線量率、赤色骨髄吸収線量率の比較 (pGy/h)。	1 2
表 3	陽子、電子、炭素、それぞれのビームの入射エネルギー毎の 90° 方向、1m の場所での 実効線量率 (Sv/h)	1 3
表 4	$F_{AkW}(E)$ の関数フィットのパラメータ値	1 5

第1章 仕様

1.1 調達件名

平成 28 年度放射線発生装置の基準根拠の整理事業

1.2 目的

原子力規制委員会では、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」という。）に基づき、放射性同位元素等に関する規制を行っている。

平成 28 年 4 月に IAEA がとりまとめた IRRS 報告書では、放射性同位元素等の規制に関し、IAEA の安全基準に整合するよう改善すべき事項として、放射線源による緊急事態が発生した場合の対応について指摘がなされた。これを踏まえ、原子力規制委員会は、平成 28 年 5 月に「放射性同位元素使用施設等の規制に関する検討チーム」を設置し、Graded Approach に基づく放射性同位元素使用施設等の危険時の措置の充実強化をはじめとする諸課題を議論し、規制を再構築するための検討を行うこととした。

現行の放射線障害防止法では、危険時の措置として事故発生後の対応については要求しているが、IAEA の安全要件が求めている事前対策については、具体的な規制要求はしていない。従って、IAEA の安全要件 GS-R-2 と整合し、我が国の危険時の措置を強化するためには、我が国においても、事前対策を含めた必要な規制要求を放射線障害防止法令の中に整備することが必要な状況となっている。

検討チームで検討を進める中で、事前対策を要求する対象となる事業者を選定する基準を示す必要が出てきた。重篤な確定的影響を生じ得る施設を対象とするという考え方の下、放射線発生装置については、外部からの利用者が多く、利用の形態が多岐にわたる共同利用に供されている研究用の大規模加速器施設のみを対象とすることとし、フランスの基本原子力施設（INB）の基準の例¹を参考に、エネルギー及び強度（電力値）で基準を設け、具体的な基準を検討することとなった。本事業では、この基準を策定するための合理的な基準の根拠を整理することを目的とする。

1.3 実施内容

（1）電子計算コード PHITS による数値解析

参考にならない、陽子線、電子線、その他の重粒子線について、ビームエネルギーの関数として、モンテカルロ計算コード PHITS により、1%のビームロスを仮定して、周辺線量当量率を計算し数値化する。また、これをグラフに描画する。ただし、詳細については原子力規制庁担当官と協議すること。

¹ フランスでの基本原子力施設（INB）となる基準：粒子加速器の、0.5kW 以上のものであって、 $A \leq 4$ では $E > 300\text{MeV}$ 、 $A > 4$ では $E > 75\text{MeV}/A$ のもの。電子加速器の、1kW 以上のものであって、 $E > 50\text{MeV}$ のもの（ここで、 E は入射エネルギー、 A は核子数）。Décret n°2007-830 du 11 mai 2007 relatif à la nomenclature des installations nucléaires de base, Article 3 に規定。

(2) 数値計算結果の整理と評価

得られた計算結果を用いて、数値計算の条件をビームエネルギーと周辺線量当量率と対応がつくように整理した上で、妥当性の評価を行い、報告書としてまとめる。

(参考：ビームエネルギーと、厚い標的の周囲での線量当量率の関係)

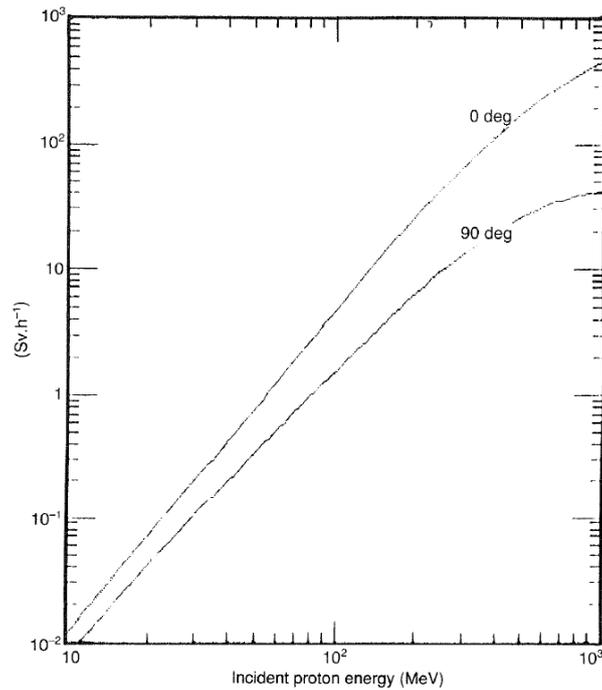


Figure 2.15. Source term for shielding calculations expressed as dose rate at 1 m and 0 and 90 deg for a beam of 10^{12} protons per second incident on a thick target.

図 1 10^{12} 個/s (=0.16 μ A) の陽子ビームが厚い標的に入射したときの、 0° および 90° 方向の 1m の位置での線量当量率

A. H. Sullivan, "A guide to radiation and radioactivity levels near high energy particle accelerators", Nuclear Technology Publishing, Kent, England (1992).
http://mbrugger.web.cern.ch/mbrugger/Data_files/sullivan_guide_to_rad.pdf

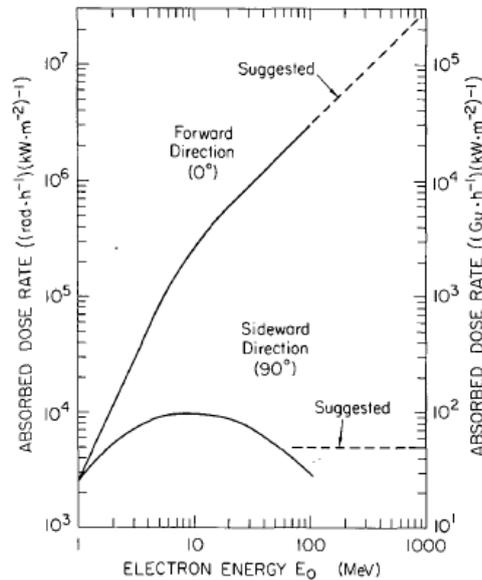


FIG.17. Thick-target bremsstrahlung from a high-Z target. Absorbed dose rate at 1 metre per unit incident electron beam power (kW) as a function of incident electron energy E_0 . The dashed line at 0° represents a reasonable extrapolation of the measured values. The dose rates measured in the sideward direction (smoothed for this figure) depend strongly on target and detector geometry and vary by more than a factor of two. The dashed line at 90° represents the more penetrating radiation component to be considered in room shielding. (See Footnote 9 for references to original sources.)

図 2 1kW の電子ビームが厚い標的に入射したときの、 0° および 90° 方向の 1m の位置での吸収線量率

W. P. Swanson, "Radiological Safety Aspect of the Operation of Electron Linear Accelerators", IAEA, Technical Report Series No.188, (1979).

http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/trs188_web.pdf

1.4 履行期限

平成 29 年 3 月 31 日

1.5 成果物の提出

- ・ 報告書：紙媒体 5 部
- ・ 報告書・数値計算の入出力、描画グラフ等の関連ファイル一式：DVD-ROM 5 部

(提出場所)

原子力規制委員会 原子力規制庁長官官房放射線防護グループ
放射線対策・保障措置課放射線規制室

1.6 著作権の扱い

- (1) 成果物に関する著作権、著作隣接権、商標権、商品化権、意匠権及び所有権（以下「著作権等」という。）は、原子力規制委員会原子力規制庁が保有するものとする。
- (2) 成果物に含まれる請負者又は第三者が権利を有する著作物等（以下「既存著作物」という。）の著作権等は、個々の著作者等に帰属するものとする。
- (3) 納入される成果物に既存著作物等が含まれる場合には、請負者が当該既存著作物の使用に必要な費用の負担及び使用許諾契約等に係る一切の手続を行うものとする。
- (4) 本業務の遂行に当たって、第三者が権利を有する著作権、知的財産権等を有する場合は、請負者の責任において、その権利の使用に必要な費用の負担及び使用許諾契約等に係る一切の手続きを行うこと。

1.7 情報セキュリティ

請負者は、「環境省情報セキュリティポリシー」を遵守し、情報セキュリティを確保するものとする。特に、以下の点に留意すること。なお、「環境省情報セキュリティポリシー」は以下のURLにおいて公開している。

<http://www.env.go.jp/other/gyosei-johoka/sec-policy/full.pdf>

- (1) 請負者は、原子力規制庁から要機密情報を提供された場合には、当該情報の機密性の格付けに応じて適切に取り扱うための措置を講ずること。
- (2) 請負者は、環境省情報セキュリティポリシーに準拠した情報セキュリティ対策の履行が不十分と見なされるとき又は請負者において請負業務に係る情報セキュリティ事故が発生したときは、必要に応じて原子力規制庁の行う情報セキュリティ対策に関する監査を受け入れること。
- (3) 請負者は、原子力規制庁から提供された要機密情報が業務終了等により不要になった場合には、確実に返却し又は廃棄すること。

1.8 その他

請負者は、本仕様書に疑義が生じたとき、本仕様書により難い事由が生じたとき、あるいは本仕様書に記載のない細部事項については、担当官と速やかに協議し、その指示に従うこと。

第2章 成果報告

2.1 電子計算コード PHITS による数値解析

ここでは、参考にならない、陽子線、電子線、その他の重粒子線について、ビームエネルギーの関数として、モンテカルロ計算コード PHITS により、1%のビームロスを仮定して、1mの位置での実効線量率²を計算し数値化する。また、これをグラフに描画する。

2.1.1 計算コード

3次元モンテカルロ計算には PHITS コード³を用いる。PHITS は高度情報科学技術研究機構 (RIST)、日本原子力研究開発機構 (JAEA)、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) が協力して開発しており、高エネルギー重イオン反応、高エネルギーの陽子、中性子輸送、低エネルギーの中性子輸送について、加速器施設でのベンチマーク⁴、また粒子線治療施設でのベンチマーク⁵がなされ、信頼性が検証されている。

PHITS を用いた遮蔽計算では、炭素入射反応、陽子入射反応、電子および光子入射反応については、PHITS 標準の核反応モデル、即ち、JQMD(炭素)、INCL4.6(陽子)、EGS5(電子、光子)、また 20MeV 以上の中性子入射反応については INCL4.6 を用いた。20MeV 以下の中性子反応については、PHITS に附属して配布されている JENDL4.0 ベースの核データを用いて計算した。

実効線量率は中性子束及び光子束に線量換算係数を乗じて求める。線量換算係数は ICRP1990 年勧告に基づき JAEA で評価された値(AP)で PHITS に内蔵されているものを用いた。

2.1.2 標的の設定

ビームライン近傍において実効線量率を評価するために、ビームが衝突する標的を次のように定めた。まず、形状は円柱形としその材質は鉄、その半径と長さを以下のように決めた。

- 1) 陽子入射、半径 5cm、入射エネルギーのレンジの 1.1 倍の長さ
- 2) 炭素入射、半径 5cm、入射エネルギーのレンジの 1.1 倍の長さ
- 3) 電子入射、半径 5cm、20cm の長さ

² 検討の結果、周辺線量当量 $H^*(10)$ ではなく、実効線量 $H_E(AP)$ を用いることとした。

³ T. Sato, K. Niita, N. Matsuda, S. Hashimoto, Y. Iwamoto, S. Noda, T. Ogawa, H. Iwase, H. Nakashima, T. Fukahori, K. Okumura, T. Kai, S. Chiba, T. Furuta and L. Sihver, "Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52", J. Nucl. Sci. Technol. 50:9, pp.913-923 (2013)

⁴ 松田規宏、岩本洋介、原田正英、勅使河原誠、明午伸一郎、前川藤夫、小栗朋美、中野秀生、中尾徳晶、中根佳弘、中島宏、"Analyses of benchmark problems for the shielding design of high intensity proton accelerator facilities", JAEA-Technology 2008-30 (2008)

⁵ Daiki Satoh, Yoshikazu Maeda, Yuji Tameshige, Hiroshi Nakashima, Tokushi Shibata, Akira Endo, Shuichi Tsuda, Makoto Sasaki, Motokazu Maekawa, Yasuhiro Shimizu, Masaharu Yamazaki, Tadashi Katayose and Koji Niita, "Shielding study at the Fukui Prefectural Hospital Proton Therapy Center", J. Nucl. Sci. Technol. 49, p1097 (2012)

これらの円柱の標的の中心にペンシルビームを入射させ、中心から 1m の半径の円周上、標的の先端から 1m の長さの領域の平均の実効線量率を求めた。この形状と陽子 500MeV、電子 100MeV を入射した場合の実効線量率の分布を次の図で示す。

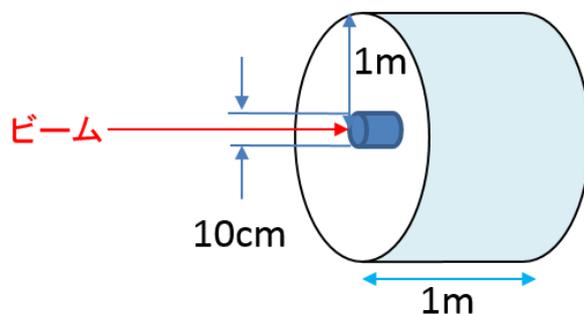


図 3 標的と実効線量率を求める領域

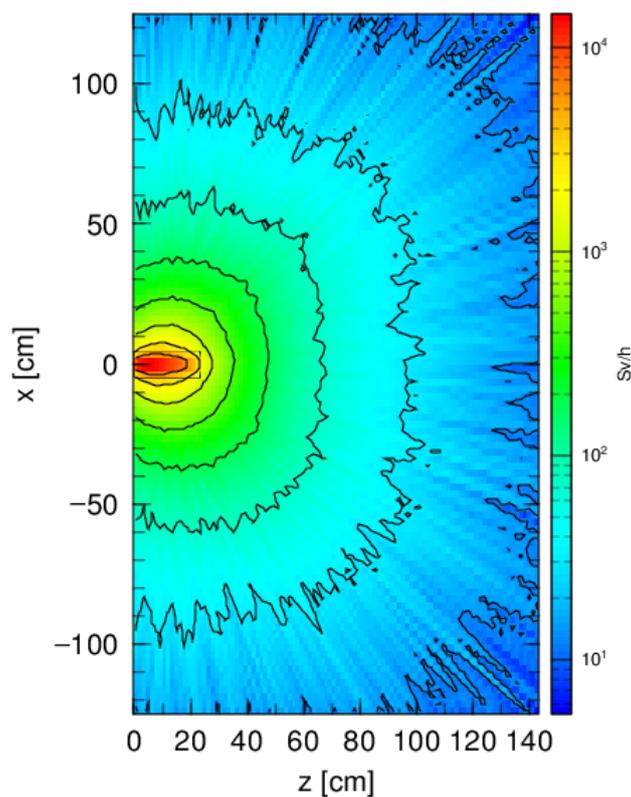


図 4 陽子 500MeV を半径 5cm、長さ 23.5cm（レンジは 21.4cm である）に入射した場合の周辺の実効線量率の分布

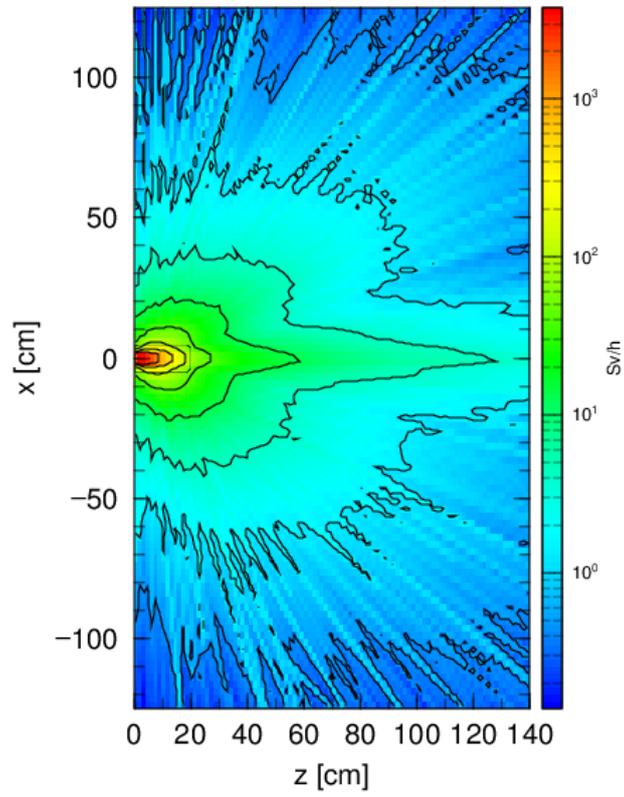


図 5 電子 100MeV を半径 5cm、長さ 20cm に入射した場合の周辺の実効線量率の分布

2.1.3 標的の材質

まず、標的の材質であるが、陽子入射の場合、Pb、Fe、Al についてその依存性を調査した。次の図は、 10^{12} pps の陽子が標的に入射した場合の周辺 1m の領域での実効線量率を入射エネルギーの関数として表示したものである。

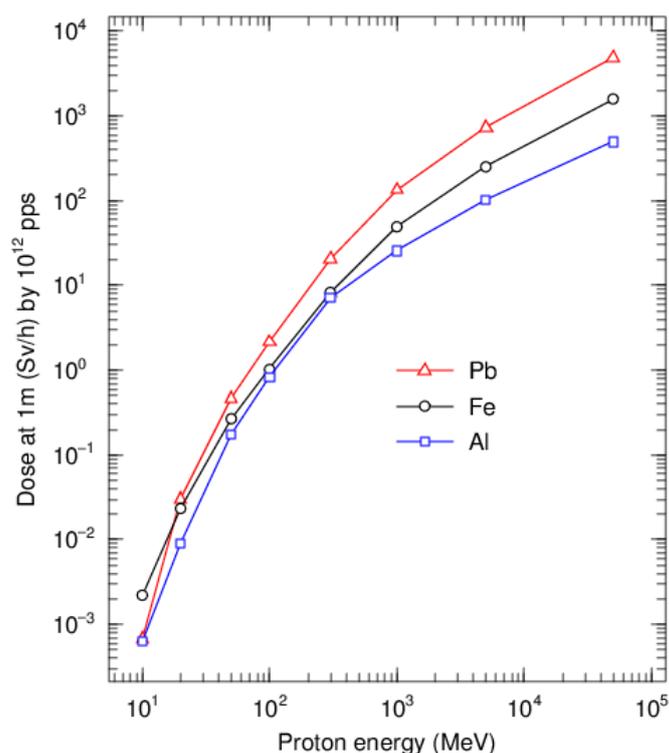


図 6 10^{12} pps の陽子が標的に入射した場合の 1m での領域での実効線量率

この図から、標的の違いによる線量への寄与は最大で 1 桁程度の違いがあるが、ビームライン周辺での現実的な標的として、Fe を考慮することとした。

2.1.4 標的のサイズ

円柱の半径については、ビームはペンシルビームを仮定しているため、一律に半径は 5cm とした。これは、これ以上半径を大きくすると自己遮蔽効果が大きくなるためである。次に円柱の長さは、電子の場合は、高いエネルギーまでの 1m の位置での線量は円柱の長さに大きく依存しないので、20cm とした。陽子、炭素ビームの場合は、入射エネルギーが高くなり、入射ビームのレンジが円柱の長さより大きくなると、周辺線量がより長い円柱の標的の場合に比べて小さくなるので、円柱の長さを入射エネルギーで決まるレンジの 1.1 倍とした。

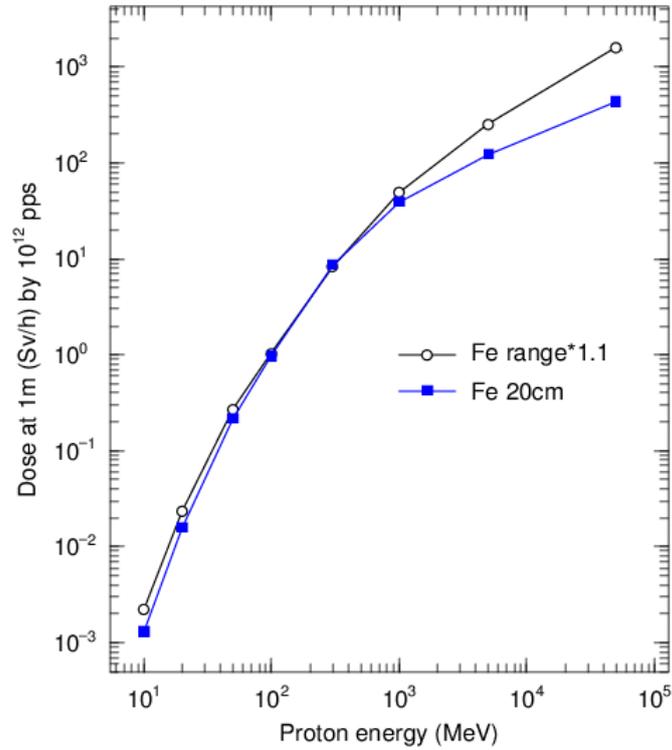


図 7 陽子入射の場合、円柱の長さが 20cm 固定と、レンジの 1.1 倍の場合の比較

この図で、陽子エネルギーが 500MeV でレンジが 21.4cm なので、これ以上のエネルギーでは、長さを 20cm に固定した場合、長さをレンジの 1.1 倍にした場合に比較して過小評価する。

2.1.5 線量換算係数

線量換算係数は、ICRP1990 年勧告に基づき JAEA で評価された値 (AP) で PHITS に内蔵されているものを用いた。現在は、ICRP2007 年勧告に基づく値が、ICRP publication 116 として出されているので、その値の結果と比較した。また、同時に ICRP116 に基づく赤色骨髄吸収線量率への換算係数も参考として比較した。

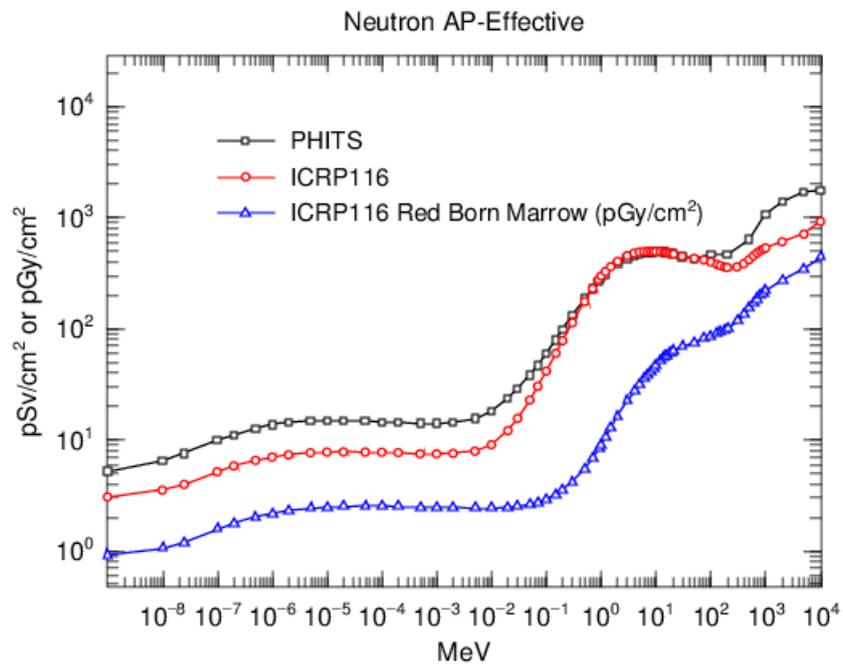


図 8 中性子の実効線量換算係数(AP)、PHITS 内蔵、ICRP116、ICRP116(Red Born Marrow)の比較

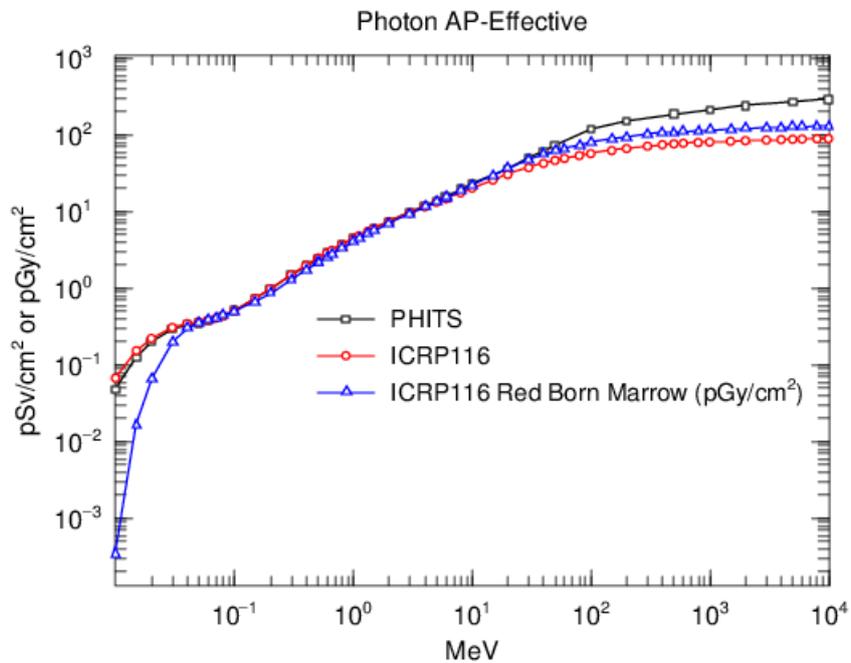


図 9 光子実効線量換算係数(AP)、PHITS 内蔵、ICRP116、ICRP116(Red Born Marrow)の比較

これらの線量換算係数を用いて、陽子、電子の場合の 1m での実効線量率を計算し比較した。

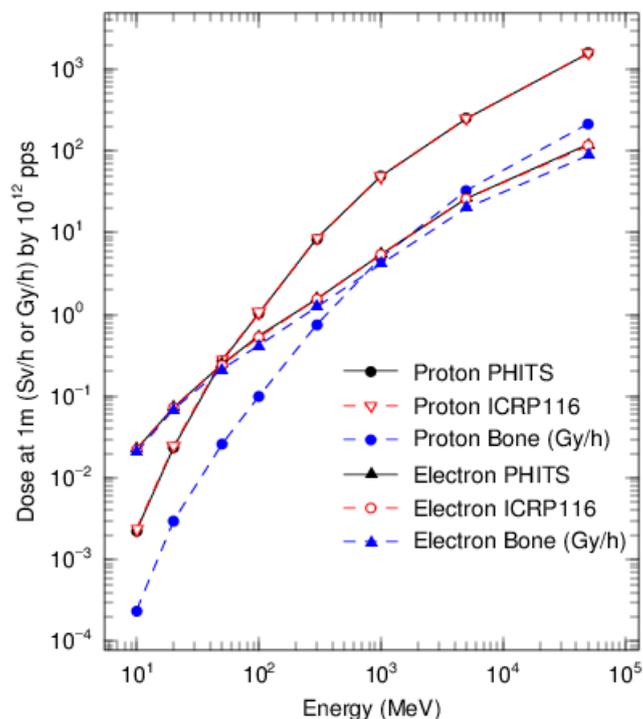


図 10 陽子、電子入射の 1m での実効線量率、線量換算係数の違いの比較。

上の図の数値を以下の表にまとめる。

表 1 陽子、電子入射の 1m での実効線量率、線量換算係数の違いの比較。

energy	proton PHITS	proton ICRP116	electron PHITS	electron ICRP116
10	2.23E-03	2.32E-03	2.237E-02	2.221E-02
20	2.35E-02	2.44E-02	7.343E-02	7.209E-02
50	0.2694	0.2771	0.2448	0.2397
100	1.029	1.052	0.5369	0.5288
300	8.355	8.581	1.57	1.543
1000	49.63	48.39	5.535	5.436
5000	253.2	248.9	26.6	26.1
50000	1600	1570	118.7	117.2

表 2 陽子、電子入射の1mでの実効線量率、赤色骨髄吸収線量率の比較(pGy/h)。

energy	proton Bone	electron Bone
10	2.34E-04	2.06E-02
20	2.96E-03	6.79E-02
50	2.60E-02	0.2093
100	9.94E-02	0.4136
300	7.46E-01	1.227
1000	4.906	4.152
5000	32.74	20.3
50000	213.9	89.79

これらの表より、PHITS内蔵とICRP116の線量換算係数による実効線量率の差は、陽子で平均2.7%、電子で平均1.6%であった。

2.1.6 中性子と光子の寄与

陽子入射の場合、線量に対する中性子と光子の寄与の割合を調べた。下の図に示すように、線量への寄与はほとんどが中性子で、光子の寄与は平均で4.3%であった。電子入射の場合は、ほとんどが電磁的反応であるため、線量への寄与はほとんどが光子である。

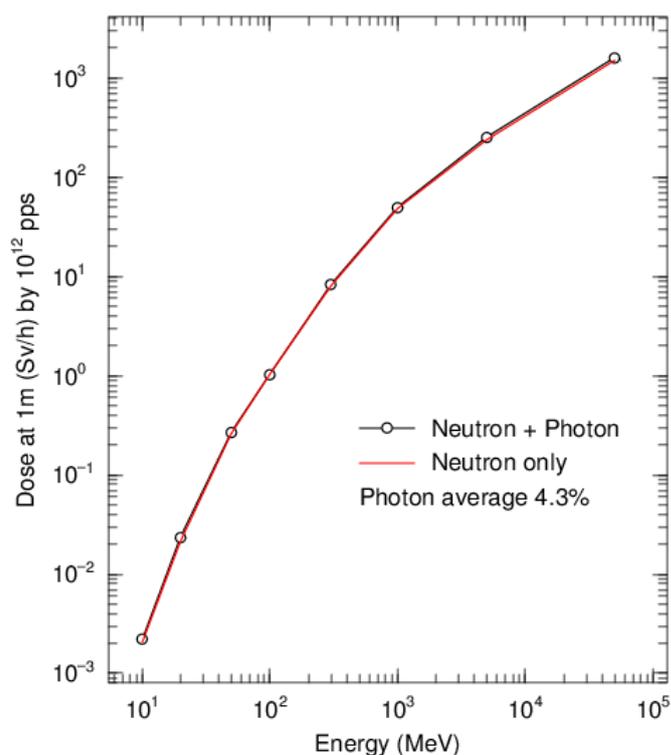


図 11 陽子入射、1mでの実効線量率、中性子と光子の寄与

2.2 数値計算結果の整理と評価

2.2.1 実効線量率の計算結果

前節の標的の材質、サイズの条件を用いて、陽子、電子、炭素、それぞれのビームの入射エネルギー毎の 90° 方向、1m の場所での実効線量率(Sv/h)を計算した。

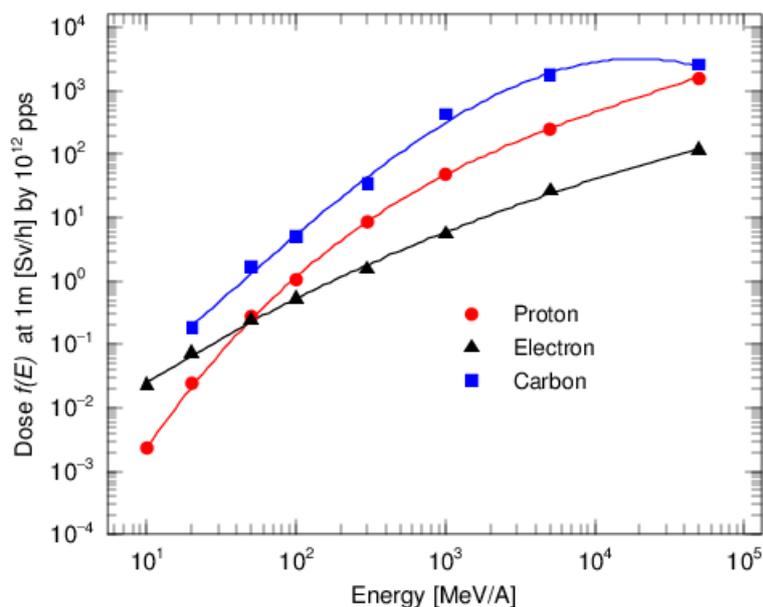


図 12 陽子、電子、炭素、それぞれのビームの入射エネルギー毎の 90° 方向、1m の場所での実効線量率 $f(E)$ (Sv/h)

この図で、各ポイントは計算結果であり、実線は次の節で述べる関数フィットである。

表 3 陽子、電子、炭素、それぞれのビームの入射エネルギー毎の 90° 方向、1m の場所での実効線量率(Sv/h)

MeV/A	Sv/h		
	proton	electron	carbon
energy			
10	0.00223	0.02237	0
20	0.0235	0.07343	0.1837
50	0.2694	0.2448	1.6304
100	1.029	0.5369	5.06
300	8.355	1.570	33.54
1000	49.630	5.535	430.95
5000	253.200	26.600	1772.70
50000	1600.000	118.700	2570.20

これらの結果を、既存のデータと比較する。前章で参考として引用したフランスのデータにおいては、300MeV の陽子と、核子あたり 100MeV/A の炭素を、それぞれの標的に照射した時の中性子の

発生率が同程度であることを、現行の重粒子 ($A > 4$) の基準の根拠にしていた。陽子または重粒子ビームの場合、線量に寄与するのはほとんどが中性子のため、このシミュレーションでもその傾向が再現できている。

2.2.2 ビーム出力毎の実効線量率

次に、 10^{12} pps の炭素ビーム (核子あたりエネルギー $E[\text{MeV}/A]$) の粒子流 I [$\text{p}\mu\text{A}$]⁶ は、 $10^{12} [1/\text{s}] \times 1.6 \times 10^{-19} [\text{C}] = 1.6 \times 10^{-7} [\text{pA}] = 0.16 [\text{p}\mu\text{A}]$ である。

このとき、1m での実効線量率を $f(E)$ と表すと、粒子流 $I[\text{p}\mu\text{A}]$ のときの 1m での実効線量率は、

$$f(E) \times \frac{I[\text{p}\mu\text{A}]}{0.16[\text{p}\mu\text{A}]} [\text{Sv/h}]$$

1%ビームロスを仮定したときの 1m での実効線量率は、

$$F(E) = f(E) \times \frac{I[\text{p}\mu\text{A}]}{0.16[\text{p}\mu\text{A}]} \times 0.01 = f(E) \times I \times 0.0624 [\text{Sv/h}]$$

である。 $P=A[\text{kW}]$ のときは、 $I[\text{p}\mu\text{A}] = A \times 1000 [\text{W}] / (E[\text{MeV}/A] \times A) = 1000 [\text{W}] / E[\text{MeV}/A]$ となるので、

$$F_{\text{AkW}}(E) = f(E) \times \frac{1000}{0.16 \times E} \times 0.01 [\text{Sv/h}] = \frac{f(E) \times 62.4}{E} [\text{Sv/h}]$$

となる。この変換をしたものを次の図に示す。また、計算結果を次の関数型でフィットしたものを示す。

$$F_{\text{AkW}}(E) = \exp\{a + b \times \log E + c \times (\log E)^2 + d \times (\log E)^3\} [\text{Sv/h}]$$

⁶ $\text{p}\mu\text{A}$ (パーティクルマイクロアンペア) は、イオンビーム (粒子流) の強度を表す単位である。粒子流 $I[\text{p}\mu\text{A}]$ は、電気の電流 $I_e [\mu\text{A}]$ のとき、これを陽子数 Z で割ることにより得られる。すなわち、 $I = I_e / Z$ である。

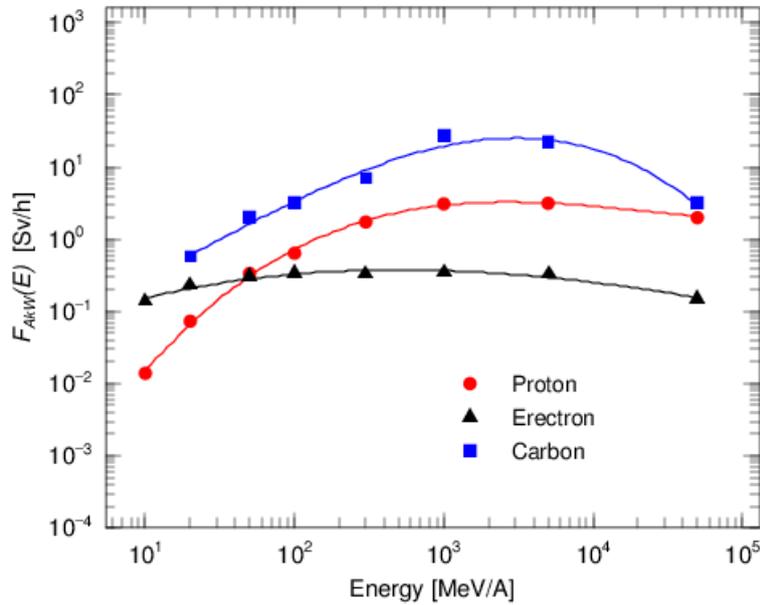


図 13 陽子、電子、炭素、ビーム出力を一定にし、1%のビームロスを仮定した時の実効線量率 $F_{AkW}(E)$ (Sv/h)

表 4 $F_{AkW}(E)$ の関数フィットのパラメータ値

	proton	electron	carbon
a	-11.6	-3.42	-3.18
b	4.12	0.862	0.569
c	-0.428	-0.0875	0.157
d	0.0141	0.00195	-0.016

2.2.3 評価基準

一般に、核子あたりビームエネルギー E [MeV/A]、出力 P [W] の場合、 I [μ A] = $\frac{P[W]}{E[MeV/A] \times A}$

より、1%ビームロスを仮定したときの 1m での実効線量率は、

$$F(E, P) = \frac{f(E) \times P[W] \times 0.0624}{E[MeV/A] \times A} [\text{Sv/h}] = \frac{P[W] \times F_{AkW}(E)}{1000 \times A}$$

したがって、判断する式は、ビームエネルギー E [MeV/A]、出力 P [W] に対して

$$F(E, P) = \frac{P}{1000 \times A} \times \exp\{a + b \times \log E + c \times (\log E)^2 + d \times (\log E)^3\} > 1 [\text{Sv/h}]$$

P - E 平面では、

$$P > 1000 \times A \exp[-\{a + b \times \log E + c \times (\log E)^2 + d \times (\log E)^3\}]$$

となる。 $A=1$ としたときに、陽子または電子の場合にあたる。

この式を基に、加速器施設で、1Sv/h となるビームエネルギーとビーム出力を評価するための基準を作ることができる。

2.3 DVD の内容

添付の DVD には、以下のホルダー構造でデータが格納されている。

/doc : 報告書

/work : 計算の入出力

| --proton-test : 標的の材質(Pb,Fe,Al)、大きさの依存性

| --proton : 標的 Fe、10MeV から 50000MeV までの計算

| --electron : 標的 Fe、10MeV から 50000MeV までの計算

| --carbon : 標的 Fe、10MeV/A から 50000MeV/A までの計算

/figure : 報告書に含まれる図

/ppt : 中間報告に用いた PPT ファイル