

放射線安全 シールドと計算

1. はじめに

加速器により加速される荷電粒子（ビームとも呼ばれる）は放射線としての性質を持ち、物理の衝突実験、生物や材料の照射試験、放射光の発生、工学、産業、そして医学など様々に利用される。ビームのエネルギーや強度が増大するにつれて、標的から2次的に発生する放射線や生成される放射能の種類や量が飛躍的に増加する。これら放射線や放射能の影響が作業員やユーザ、装置、一般区域それぞれに対して許容限度を超えないよう、加速器施設は設計される必要がある。

近年粒子線をもちいた治療装置の建設が増加傾向にある。医療用加速器は専用設計化が進み、汎用の加速器よりは小型となっているが、基本的な構成は汎用加速器と同じである。小型化や低コストを実現させるためには建屋やシールド（遮へい）の小型化の検討がなされると思われるが、加速器施設の放射線安全にとってはシビアとなる。

医療用加速器施設に対する放射線安全のため、汎用加速器の例を用い、放射線の発生といった基礎的な部分からシールド（遮へい）とその計算までについての簡単な解説を以下に行う。

2. 放射線遮へい設計の概念

加速器施設（放射線発生装置）の安全設計で一番重要なものが放射線遮へい設計である。放射線遮へいの目的は放射線による人体の被ばくや危機の放射化・損傷を防護する事にある。

2.1. 設計基準値の設定

加速器施設の設計を行うにあたり、主に以下の3つが設計基準値となる。

(1) 線量

障害防止法（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）により、管理区域内の人が常時立ち入る場所の線量限度は 1mSv/週 、管理区域内の境界は 1.3mSv/3月 、事業所内の人が居

住する区域および事業所の境界は $250\mu\text{Sv/3月}$ であるが、事業所の境界では ALARA (as low as reasonably achievable) 線量の $50\mu\text{Sv/年}$ を基準値とする場合もある。

(2) 損傷・発熱

構造材、遮へい材の構成物が受ける、放射線束と損傷との関係から決められる。発熱に対しては材料の最高耐熱温度や熱応力が基準となる。

(3) 誘導放射能

装置の保守に従事する人の被ばく線量について障害防止法に定められた線量当量限度を考慮し、空中放射能濃度、水中放射能濃度、表面汚染密度の障害防止法に定められた濃度限度および密度限度を用いる。

2.2. 遮へい評価と遮へい設計

以上の設計基準値を下回るように、以下の項目を評価し、最も薄く安価な遮へいを考える最適設計を行うことが望まれる。

- (1) ビームロスと線源評価
- (2) 遮へい計算
- (3) ダクトストリーミング
- (4) スカイシャイン
- (5) 残留放射能
- (6) 発熱、損傷

3. 加速器からの放射線

加速器で加速された粒子は衝突や制動放射などにより、他の放射線となったり別の原子核を作ったり速度を落としたりして、与えられたエネルギーを分散させながら失っていく。衝突が起きる場所や制動放射を意図的に起こす場所では、2次放射線が多く生成し放射線量が高くなる。主な衝突箇所としては、実験標的、実験で利用されなかったビームを捨てるビームダンプ、またビーム輸送や整形のための加速器の一部構造物などである。これらはビームロス地点と呼ばれる。ビームロス地点は施設毎に複数箇所存在し、ビームロス量に応じて高線量場となる。医療用加速器、特に

粒子線治療の場合は、患者そのものもビームロス地点として評価される。加速器の放射線安全の役割の一つが、ビームロス地点、ならびにそこで発生する放射線の種類や数・エネルギーを把握し、遮へい等の措置を講ずることで一般区域での線量を限度以下まで下げることである。

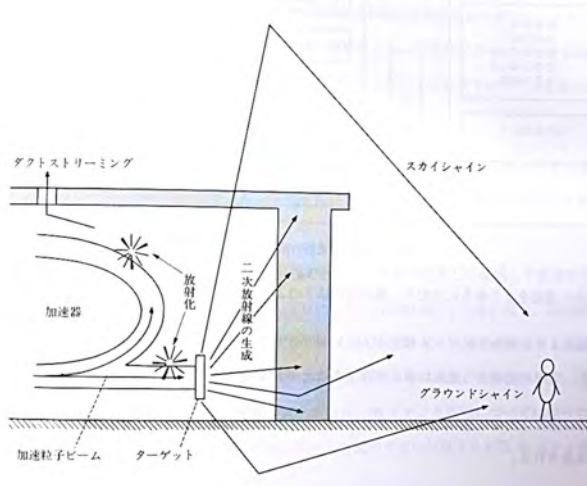


図 1 加速器施設でのビームロスと放射線の発生 [1]より引用

3.1. ビームロスと線源項

加速器で周回するビームは、周回中もしくは別軌道上の衝突点すなわちビームロス地点で2次放射線を生成する。ビーム種としては一般的には電子、陽子、種々の重粒子、医療用ではX線治療で電子、粒子線治療で陽子、炭素がよく使われる。これら1次放射線が作る2次放射線は、透過力の高いものが多くその進行方向も四方八方であり、また行く先々で別の放射線を生成するので、放射線の遮へい計算にとっては線源項として評価がとくに重要である。線源項とはビームロス地点で生成する2次放射線の発生状況、すなわち種類、数、エネルギー、進行方向であり、放射線遮へい計算の入力として使われるものである。

例えば陽子がターゲットと衝突すると原子核から中性子をたたき出したり、複合核を形成したのちに核子や軽い原子核が放出される。これらはすべて2次放射線であるが、それぞれに対して、その運動エネルギーと発生方向をまとめたものが二重微分断面積 *double differential cross section* (薄いターゲット) や二重微分生成量 *thick*

target yield (厚いターゲット) である。二重微分はエネルギーと角度に対してであるが、別の表現では角度別に集計したエネルギースペクトルと言える。図 2は陽子が鉄ターゲットを叩いて生成した中性子の二重微分断面積である。中性子は遮へいで重要な粒子なので、入射粒子・エネルギー・ターゲットの様々な組み合わせで測定や、それらデータを再現するような原子核の衝突モデルの開発が研究対象としてある。

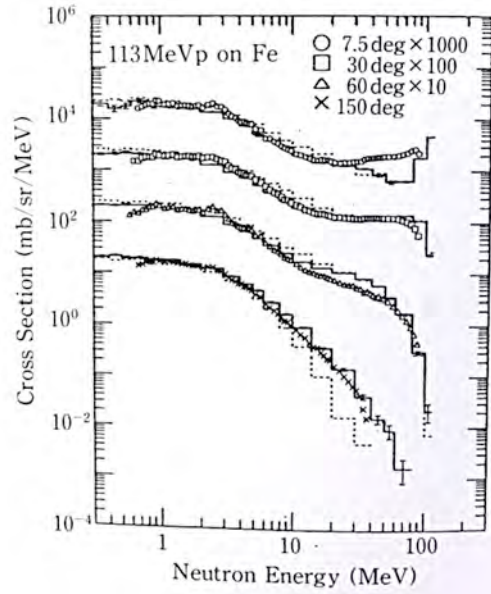


図 2 陽子線による中性子の二重微分断面積 [2]

3.2. カスケード反応 (シャワー)

ビームロスにより生じた2次放射線はさらに加速器の構造物と衝突し新たな放射線の生成を行う。これはカスケード反応またはシャワーとも呼ばれる。



図 3 電磁カスケード ([1]より引用)

電子加速器においては加速された電子がビームロス地点において図 3に示すような電磁カスケードを引き起こす。このシャワーはいずれ収束するが、遮へい評価において重要なのは、透過力が比較的高い制動放射線と中性子である。制動放射線は電子の減速にともない放出される光子であるがそのエネルギー分布は低エネルギーが支配的ではあるが、最大は電子の全運動エネルギーに達する。

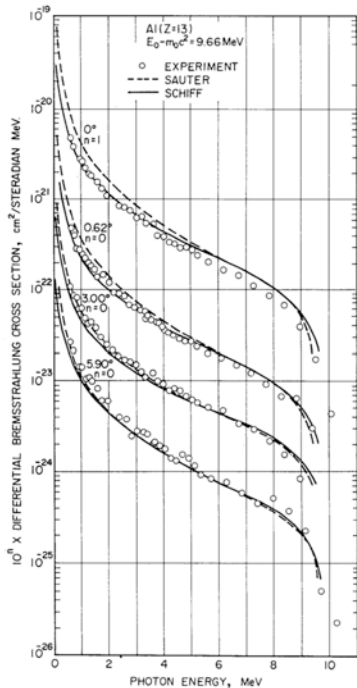


図 4 9.66 MeV 電子の Al による制動放射[4]

制動放射線のエネルギーがおおよそ 10 MeV 程度に達すると光核反応が起こるようになり、中性子が放出される。近年の X 線治療装置は電子の加速電圧が 10MV 以上のものが主流となってきているが、制動放射線が光核反応によって生成する中性子の遮へいや放射化の評価が重要になってきている。

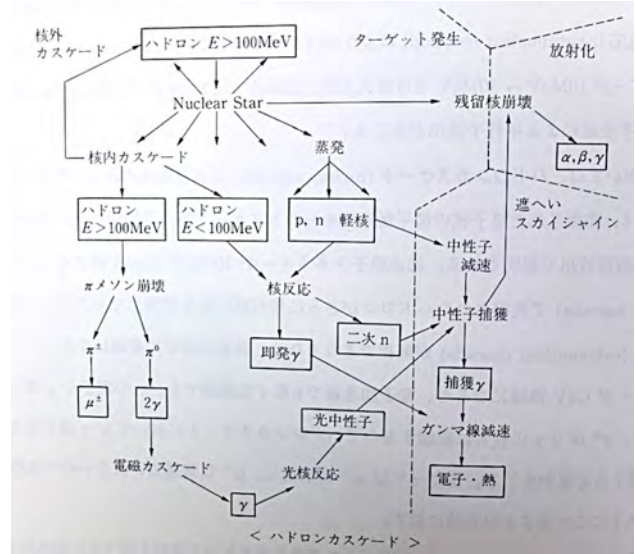


図 5 ハドロンカスケード ([1]より引用)

粒子加速器の場合は図 5に示されるように原子核反応によるハドロンカスケードが引き起こされる。核子や軽い原子核、パイオンやミューオンなどが放出されるが、このうち遮へい評価で重要なものは、医療用加速器においては中性子、次いでガンマ線となるため、後述するが一般的な遮へい計算では主に中性子の生成のみを考えて、その放射線計算を行うが、近年はこれら一連のカスケード反応全てを計算して最終結果に含めるようなモンテカルロ計算も行われている。

3.3. 放射線の物質透過

放射線の相互作用の相手は電子や原子や原子核である。特に中性子は電荷を持たないため原子核と衝突するまで直進できるため、物質の透過力が高い。衝突とは、注目する力の及ぶ範囲に入ること、その範囲の大きさは断面積と呼ばれる。断面積の単位は cm^2 であり幾何学的な大きさと同義である。原子核反応の場合の断面積はほぼ原子核の大きさであるから断面積は小さい。一方荷電粒子は物質中を電子と頻りに相互作用しながら進むため原子核反応とは別に連続的にエネルギーを失い、ついには物質中で止まることもあるが、止まる寸前ほどエネルギーロスが大きいのでいわゆるブラッグピークを作る。中性子の他にミューオンは物質の透過力が高いが、医療用加速器では生成量が少ないため線量の寄与は少ないと考えられる。

3.4. 構造材の放射化

加速器施設において中性子の生成と透過が遮へい評価上重要であるが、さらに中性子は構造材の放射化も引き起こす。中性子のエネルギーが原子核の励起関数（核子等を放出する原子核反応のしきい値）を超えると、核反応が起きて構造材が放射化する。これは陽子や原子核同士の間でも同様である。すなわちビームが直接当たるビームロス地点が放射化する。これは1次放射線によるものなのでビーム周回上にできる。2次放射線も同様で、これは加速器施設全体に及ぶ。さらに中性子は減速して熱化したときに原子核に取り込まれる熱中性子捕獲反応も引き起こし、これでも放射化が起こる。

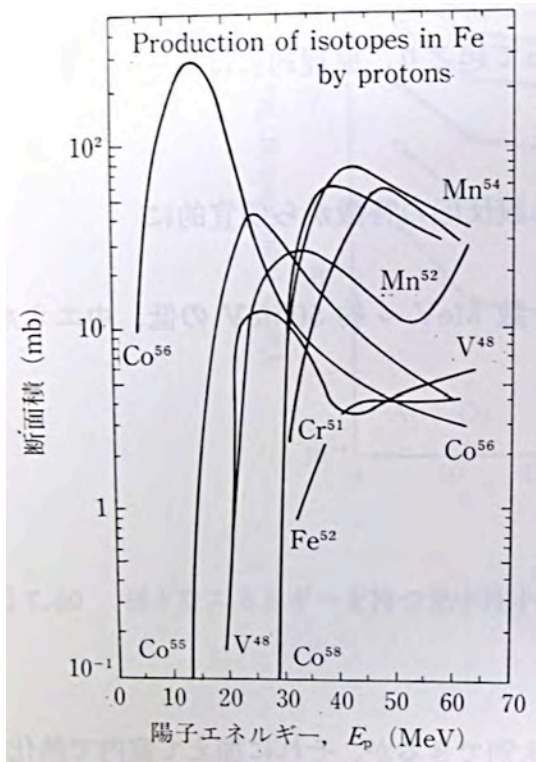


図 6 鉄に陽子を入射したときに出来る放射性同位元素の励起関数（生成量）[1]

加速器の構造材を選定する時にはこの放射化を考慮し、ビームが直接衝突する箇所には放射化しにくい材料を選ぶことも必要な場合がある。

4. 放射線の減衰（透過）

ビームロスで生成した2次放射線は、物質中を透過と散乱を繰り返しエネルギーを失っていく。

4.1. ガンマ線の物質による減衰

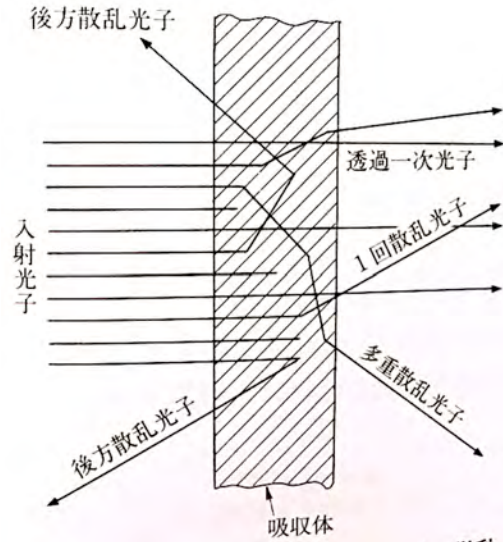


図 7 ガンマ線の物質による減衰 ([1]より引用)

図 7のように、物質にガンマ線が入射した場合を考える。このときガンマ線の挙動は以下の4つに分けられる。

- (1) 透過1次ガンマ線 透過したガンマ線
- (2) 透過散乱ガンマ線 物質中でコンプトン散乱を多数回起こしエネルギーや方向を変えて透過
- (3) 物質に吸収されたガンマ線 光電効果や電子対生成により吸収
- (4) 後方散乱ガンマ線 コンプトン散乱を多数回起こして入射面から再び出てくる

厚い物質では、放射線の透過として(1)だけを考えることがある。これは簡単な減衰の式で評価できる。

$$N = N_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

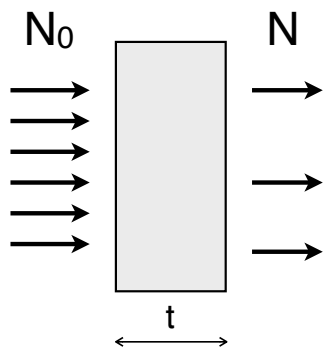


図 8 放射線の透過計算の模式図

ここで μ は減弱距離 (cm^{-1})、またはマクロ全断面積と呼ばれ、物質と放射線の種類とエネルギーによって固有である。 μ の逆数 λ が平均自由行程 (cm) である。

ある材質に入射した放射線は、その物質が厚ければ厚いほど透過しにくくなる。

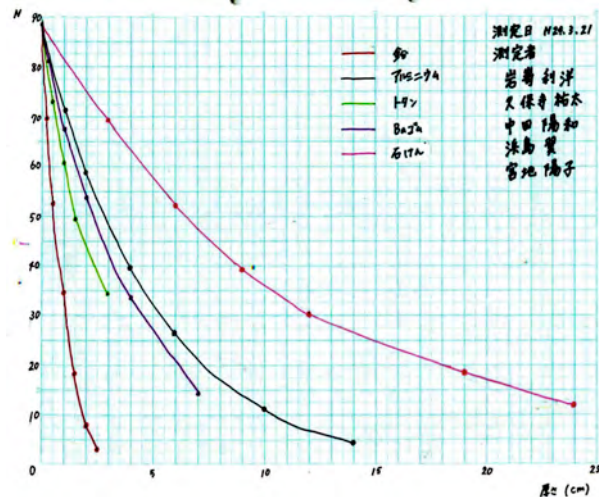


図 9 ガンマ線 (^{137}Cs , 662keV) の物質透過実験

透過の基本式は(1)式であるが、これは事象が単位厚みで一定に減少するというモデルである。厳密には放射線は物質内部で衝突により散乱や消滅と生成を繰り返すため、物質の表面付近では放射線数は減少ではなく増加となる場合があり(ビルドアップ)、特に高エネルギー放射線になると生成項が有意に増加するので、補正を必要とする場合がある。

放射線の透過は減弱距離 μ 、別の言葉でマクロ全断面積 Σ (cm^{-1})、または平均自由行程 λ (cm) で

計算できる。例えば 1MeV のガンマ線の空気における減弱距離 μ は文献[6]より 0.765×10^{-4} (cm^{-1}) であり、平均自由行程はその逆数であるから 130m 程度となる。

また、文献[6]に 600keV のガンマ線のアルミ、鉄、鉛の全減衰係数がそれぞれ 7.77×10^{-2} 、 7.61×10^{-2} 、 1.18×10^{-1} (cm^2/g) とある。これに密度をかければ減弱距離が求まり、 7.77×10^{-2} (cm^2/g) \times 2.7 (g/cm^3) = 0.21 (cm^{-1})、 $7.61 \times 10^{-2} \times 7.86$ = 0.60 (cm^{-1})、 $1.18 \times 10^{-1} \times 11.35$ = 1.3 (cm^{-1}) であり、平均自由行程は 4.8 cm、1.7 cm、0.75 cm である。

また、(1)式で放射線数が 1/10 に減衰するときの厚みを求めるには $N = 0.1N_0$ として解けば $t = \ln 10 \times \lambda = 2.3\lambda$ なので、アルミ 11cm、鉄 4cm、鉛 1.7cm と求まる。

4.2. 中性子の物質による減衰

中性子は原子核との衝突であるので個々の反応はガンマ線とは異なるが、物質の透過の概念は同じで、(1)式で評価できる。中性子のエネルギーが高くなり二次粒子の生成が多くなるとガンマ線同様にビルドアップの項が入る。また、中性子の反応には捕獲ガンマ線や非弾性散乱ガンマ線の放出があるのでこれら 2 次ガンマ線の生成とその遮へい評価も考慮する必要がある。

5. 遮へい材料

放射線を遮へいする材料として、ベータ線、ガンマ線、中性子の三つの場合について説明する。

5.1. β線遮へい

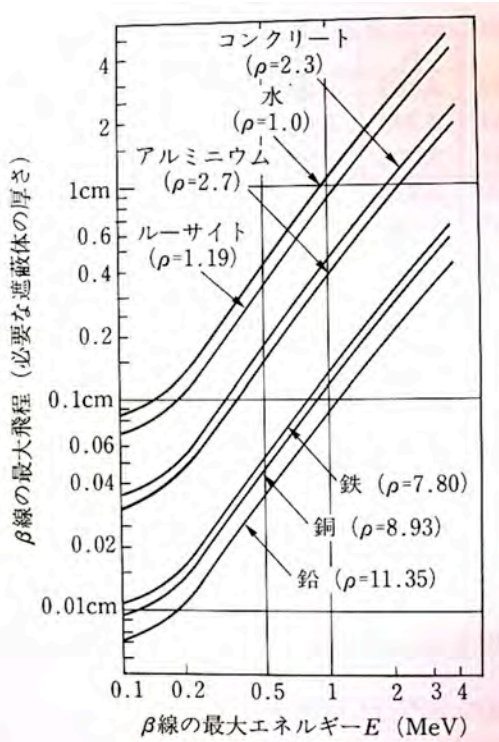


図 10 ベータ線に対する遮へい体の厚さ

ベータ線は図 10に示すように薄い物質で十分に遮へいできる¹。しかしベータ線は物質中で制動放射線を放出する。制動放射線の発生量はベータ線のエネルギーに比例し、物質の原子番号の 2 乗に比例するので、アクリルやプラスチックのような原子番号の小さい物質を使用することが遮へい上望ましい。

5.2. ガンマ線遮へい

ガンマ線をより減衰させるには光電効果、コンプトン散乱、電子対生成の断面積の大きい物質を使うことであるが、それぞれの減弱距離（マクロ断面積）は

$$\mu_{\text{photo}} \propto Z^4 \sim Z^5$$

$$\mu_{\text{compt}} \propto Z$$

¹ 電子の飛程 R は経験的に、 $R=0.542E^{-0.133}$ (g/cm²) (E>0.8MeV), または $R=0.407E^{1.38}$ (0.15<E<0.8 MeV)

$$\mu_{\text{pair}} \propto Z^2$$

という比例関係にあるため、原子番号 Z の大きい物質ほど遮へい材料として優れている。鉛や鉄が遮へい材として一般的に使用される。

5.3. 中性子遮へい

中性子の減衰は原子核との衝突による。エネルギーが低く原子核と弾性散乱しか起こさなときは、その反応は 2 体衝突で計算できるが、相手が水素原子核のとき最も減速される。したがって水、パラフィン、ポリエチレン、コンクリートなどの含水性物質が遮へいに有効である。10MeV を超えるようになると原子核との非弾性散乱がエネルギー損失が大きいので、その断面積が比較的大きい鉄が用いられる。

また、熱中性子に対しては $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 、 $^6\text{Li}(n, \alpha)$ 、 $\text{Cd}(n, \gamma)$ 、 $\text{Gd}(n, \gamma)$ などの中性子吸収・捕獲反応を用いるのがより効果的であり、ポリエチレンなどにこれらを混合（1～2wt%程度）する方法が用いられる。

コンクリート（密度～2.2g/cm³）は最も安価でよく使用される遮へい材である。中性子の遮へいは含水量が重要であり含水量が多い蛇紋岩コンクリートなども用いられている。ガンマ線遮へいを考えて鉄鉱石を含む重コンクリート（密度～3.5g/cm³）が使われる事も多い。

6. 遮へい計算の概要

6.1. 遮へい計算の流れ

遮へい計算は大きく以下の流れで行う。

(A) ビームロス・線源評価

- (1) 運転条件の設定
- (2) ビームロス地点の設定
- (3) 線源評価

↓

(B) 放射線計算

- (1) 遮へい評価と追加遮へいの検討
- (2) ストリーミング
- (3) スカイシャイン

(4) 空気等の放射化

詳細は8章で実例とともに解説するが、ここで遮へい計算法について簡単に述べる。

6.2. 遮へい計算方法

次の三つがあり、それぞれに長所があるため、同じ施設の設計でも使い分けたり複数で評価することが多い。

1. 簡易式

簡易式は後述する汎用コードに比べれば複雑な体系に適用しにくいなどの劣点もあるが、1. 簡便に利用でき、2. ミスが少なく、3. 素早くオーダーエスティメーションが得られるという大きな利点があり、放射線遮へい計算の基本として現在でも有効な評価法である。

2. 専用ソフト

簡易式から成るが、用途を限定する事で精度向上のための補正項（ビルドアップ等）などが追加されている。簡単な数値入力で遮へい計算ができるよう設計されている。

3. 汎用コード

汎用コードとして最近ではモンテカルロコードの利用が一般的となった。モンテカルロコードとは乱数を用いて確率問題を解く手法である。例えば平均自由行程 λ (cm) が分かっているとき、個々の放射線が散乱を起こすまでに物質を透過する距離 l (cm) は一様乱数 r^1 を用いて次のように計算できる。

$$l = -\ln(r) \cdot \lambda \quad (2)$$

乱数を使わずに、すなわちモンテカルロでない方法でこの計算を行うには、(1)式を用いて一定厚み毎の放射線の透過を評価し、図2を階段状に作成し、初段から最終段にかけて個別にすべて計算を行う必要がある。すなわち全事象を計算する。モンテカルロの場合は粒子を一つずつ追跡するため、結果も飛び飛び

に得られるが、試行回数を増やす事で統計が増え、また事象を確率分布にそって選択するため、結果も全事象を計算した場合と同様になる。モンテカルロコードは計算体系や条件をユーザが三次元で自由に組み立てられるので、複雑な体系を計算する時には特に便利である。

6.2.1. 簡易式による遮へい計算の概要

簡易式の基本式は(1)式であるが、最終的に評価する量が線量 H (Sv/h) であるため、線量の減衰の式に形作るのが便利である。すなわち、

$$H = H_0 \cdot e^{-\mu r} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (3)$$

が基本式となる。ここで H_0 は線源項における放射線による線量である。(厳密には、線源点での放射線のエネルギースペクトルは角度により異なるため、ある角度方向をある幅でまとめて θ_n とし、 $H(\theta_n)$, $H_0(\theta_n)$ と表記できる) e が物質中の減衰、 $1/r^2$ が距離による拡散である。

6.2.2. 線量の計算

線量 H とは放射線のエネルギースペクトルのそれぞれ値に、エネルギーに応じた重み付けをした後にすべて足し合わせたものである。重み付け関数を線量換算係数という。放射線の人体への影響は線種とエネルギーによって異なるので、線量換算係数も線種毎にエネルギーの関数となっている。図4に光子の線量換算係数、図5に中性子の線量換算係数の例を示す。

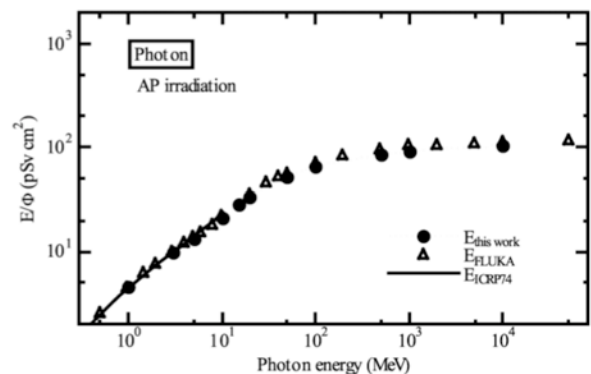


図4 光子の実効線量への換算係数[sakamoto]

¹ 0~1の乱数

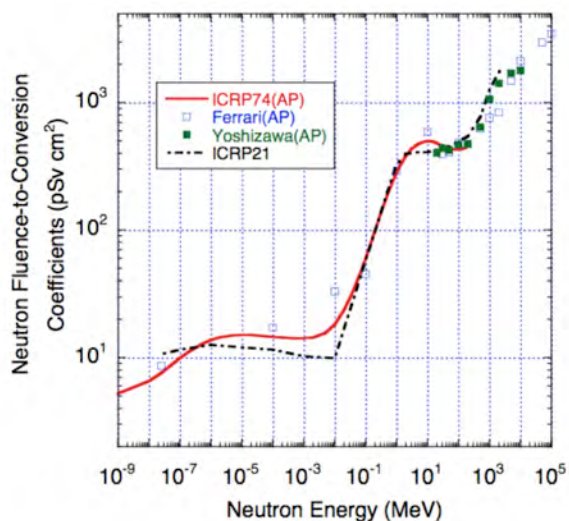


図5 中性子の線量換算係数[hirayama]

エネルギースペクトル Φ (cm^{-2})にこの換算係数を乗じて積分すると線量が得られる。線量の計算例を以下に示す。

セシウム 137 からのガンマ線のエネルギーは 662keV である。662 keV 光子の線量換算係数はおよそ 3.7 pSv/cm² である。自然放射線はセシウムに換算すると 5 (/cm²/sec) 程度である。換算係数を乗ずれば 5×3.7 (pSv/sec) = 18.5 (pSv/sec) = 18.5 x 3600 (pSv/h) = 66600 (pSv/h) = 0.067 (μ Sv/h) となり、確かにバックグラウンド放射線量程度となる。

7. 医療用加速器

加速器の遮へい計算を行う前に、医療用加速器について以下に簡単に紹介する。

7.1. ライナック (X線治療装置)



図 11 ライナック外観 [7]

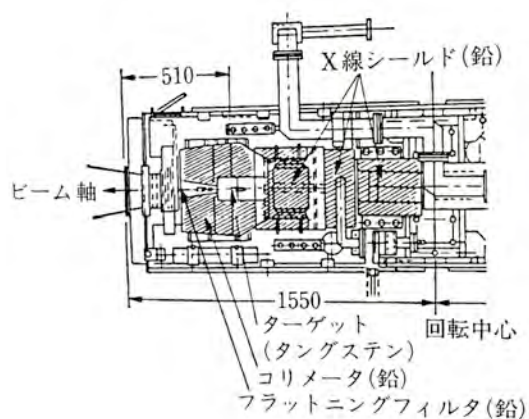


図 12 工業用電子ライナックヘッド部構造 [8]

電子線ライナックは小型でビーム電流も大きく安定度が高いので、工業用の非破壊検査、X線治療、放射線化学など利用範囲が広く、台数の多い加速器である。医療用の電子線ライナックの電子エネルギーは 4~20MeV である。患部に線量を集中させるために回転照射を行うガントリーを備える。加速した電子をタンゲステンなどのターゲットに当てて X線を発生させる。X線はコリメータと平滑化フィルタによって一様な強度の照射野のビームに成形して引き出せる。

7.2. 陽子線治療装置



図 13 陽子線治療装置外観（筑波大学）[9]

図 13は筑波大陽子線医学利用研究センターの陽子線治療装置である。国内発の粒子線治療が筑波大と KEK の間で開発された。加速器は日立製の陽子線シンクロトロンで、比較的小型である。陽子の加速エネルギーは最大 250 MeV で、回転ガントリーと照射室を2つずつ備える。



図 14 回転ガントリー付きの治療ベッド（兵庫県立粒子線医療センター） [10]

7.3. 重粒子線治療装置

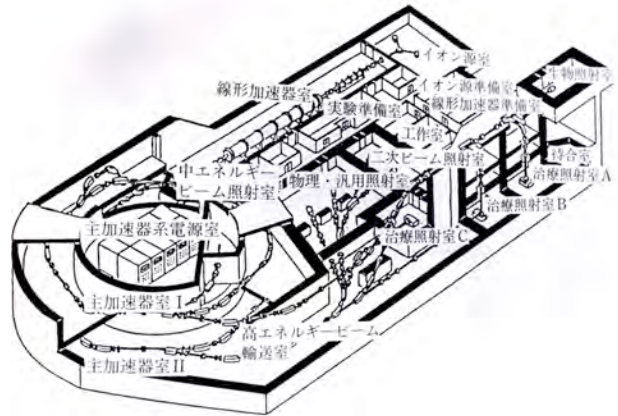


図 15 炭素線治療装置（放射線医学総合研究所） [11]

炭素線治療は LBNL で研究開発がなされその後放医研と GSI で世界に書きがけて臨床が開始された。放医研 HIMAC は医療用加速器としてキセノンまで対応させ、また他の研究実験用の照射室やビームラインも多数あり、余裕をとった設定となっている。GSI は理研のような原子核実験施設の一つのビームラインが治療施設となっている。近年の重粒子医療施設はより専用化され小型化されている。群馬大の重粒子医療加速器は HIMAC を大幅に小型化した設計である。図 16 はドイツマールブルク大学付属病院の炭素線治療施設である。治療室への入り口を入り組んだ迷路とすることで漏洩中性子を減らす事で、遮へい屏のない治療室となっている。

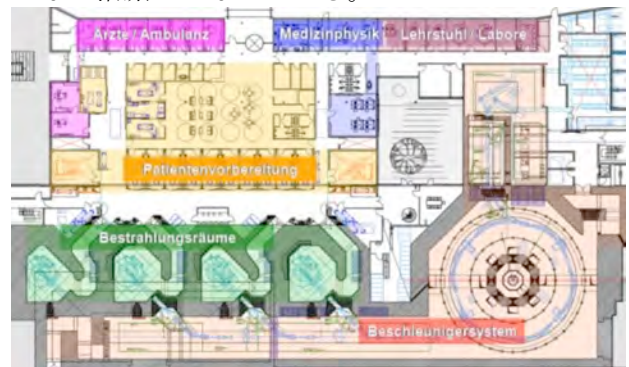


図 16 炭素線治療装置（ドイツ Marburg 付属病院）

7.4. ガントリー

医療用加速器にはガントリーが備えられている施設が多い。多門照射用に使われるが高エネルギー

ギー粒子を曲げるため大型の軌道と電磁石となっている。ガントリー使用時はビームラインの高さや、ビーム進入角度が通常と異なってくるが、放射線の遮へい計算としては他のビームラインと扱いは根本的には同じである。

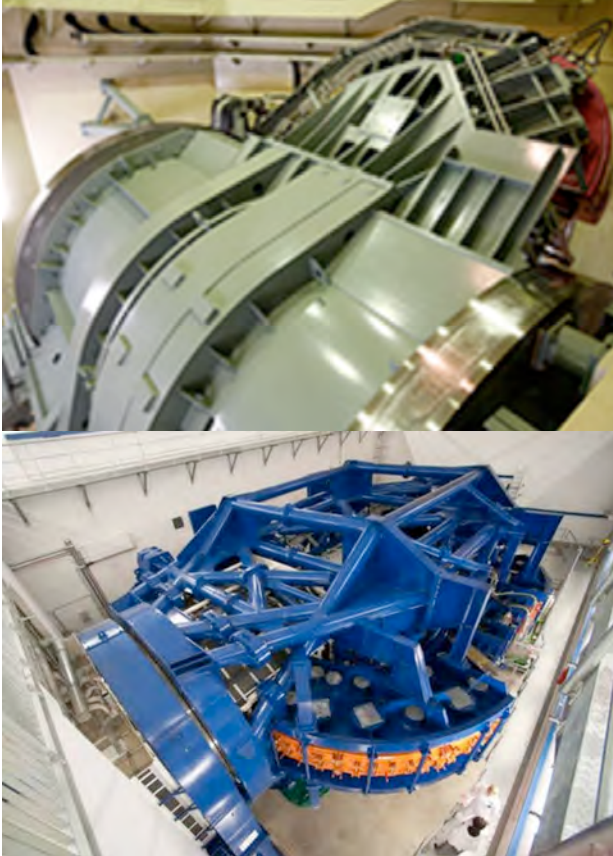


図 17 筑波大陽子線治療装置のガントリーとハイデルベルク大付属病院の炭素線治療装置のガントリー

8. 放射線の遮へい計算

6章の最初で示した遮へい計算におけるいくつかの評価項目について、過去に行われた遮へい計算[13]の場合について紹介と解説を行う。

8.1. ビームロス・線源項の評価

8.1.1. 運転条件

粒子線加速器の場合、遮へい評価上もっとも重要なのが中性子である。粒子線加速器はいくつか異なる粒子を加速できるようになっているが、これらの運転条件のうちもっとも中性子生成が大きい条件を選び出す。

表 1 加速粒子、エネルギーおよび使用出力

加速粒子	最大加速エネルギー (MeV)	最大出力 (kW)	週当たり最大使用出力量 (kW・h/week)
p	90	0.45	54
d	50	1	120
⁴ He	110	2.2	264
¹² C	230	2.3	276

これらビーム種の全てに対して、中性子の生成量を見積もって、中性子生成が一番大きい運転条件を選定する。図 18から図 20に p, ⁴He, ¹²C に対する中性子収量の評価値や測定値を示す。ターゲットとしてはビームロス地点の材料を選定する。ビームダクトであれば鉄や銅となる。評価値がない d に対しては、他の粒子を基準とし次式によりエネルギーと核子の比でスケールリングすることで評価する。⁴He 110 MeV を基準で行うとすると

$$Y_d = \left(\frac{E(\text{MeV}/h)}{27.5} \right)^2 \left(\frac{A}{4} \right) \cdot Y_{\text{He}} \quad (4)$$

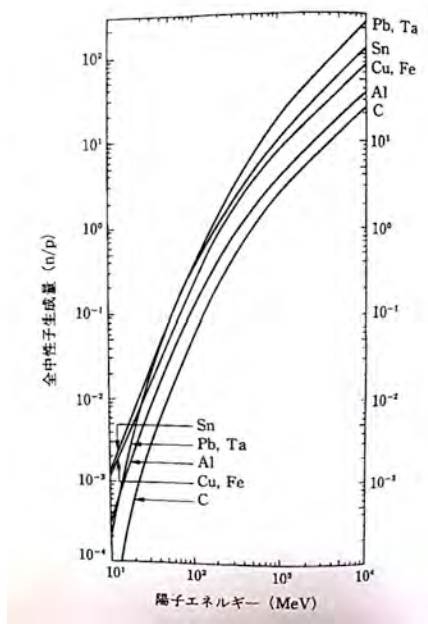


図 18 陽子による厚いターゲットからの中性子収量[14]

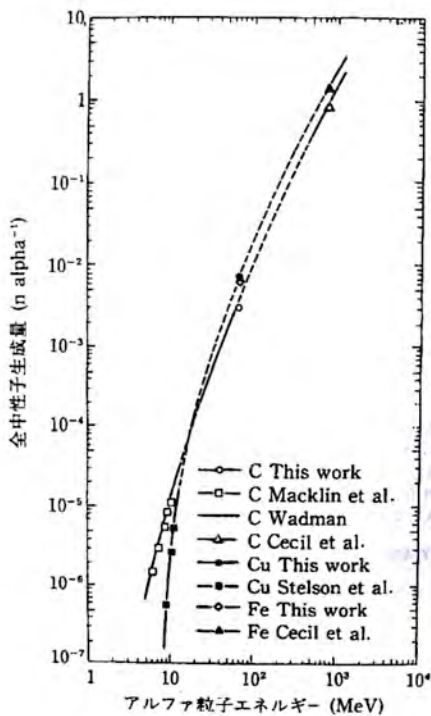


図 19 ^4He 粒子による厚いターゲットからの中性子収量[15]

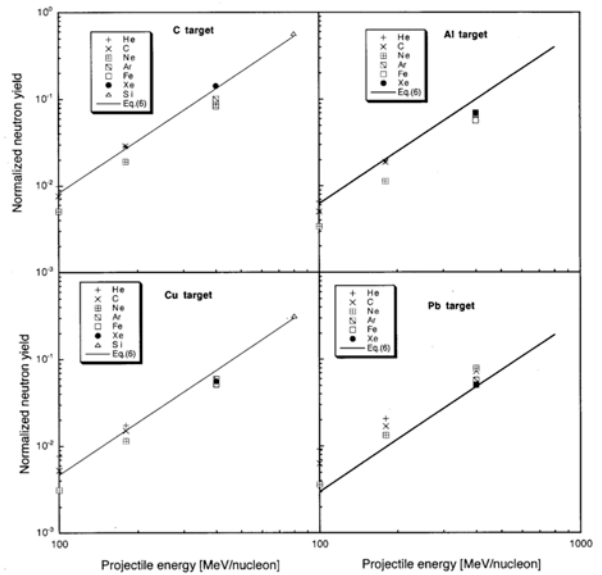


図 20 重粒子による厚いターゲットからの中性子収量[16]

これらにより以下のように中性子収量が求まる。

表 2 中性子収量 (鉄または銅ターゲット)

加速粒子	最大加速エネルギー (MeV)	中性子数 $\times 10^{10}$ (μA)	中性子数 $\times 10^{17}$ (/week)
p	90	110	24
d	50	27	2.9
^4He	110	17	14
^{12}C	230	3.9	1.7

表から、中性子生成量が最も大きい運転条件は p 90 MeV であった。もし他の粒子が p と同じ加速モード、輸送するビームラインが同じであれば、遮へい計算は p 90MeV に対してのみ行い、異なれば中性子生成量の多いものから評価対象に加える。

8.1.2. ビームロス地点の設定

ビームロス地点は設計上考えられる箇所すべてに対してそのビームロス電流量を算出し、ロス量が多い地点から評価する。

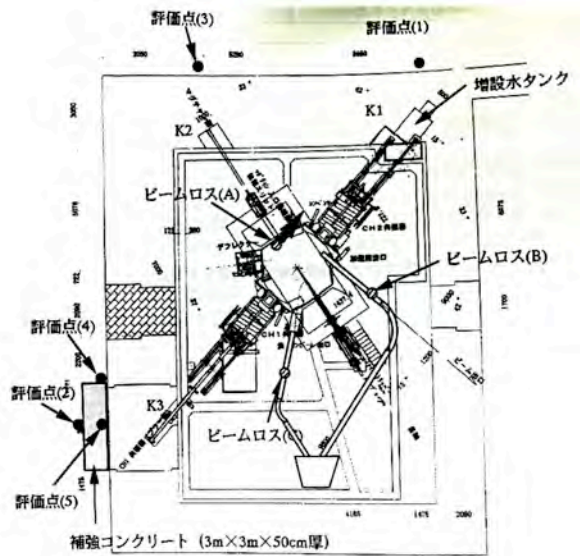


図 21 ビームロス地点の設定

- ビームロスポイントを以下の二カ所に設定した。
- (A) p 90 MeV の引き出し部分となるディフレクターの一部、 $3\mu\text{A}$ のビームロス。
 - (B) ビームライン上のビームストッパー。フルストップを仮定し、 $5\mu\text{A}$ のビームロス。

8.1.3. 線源の評価

ビームロス地点で生成される放射線の二重微分生成量を用意する。測定値があればそれを用いるが、ない場合は計算で補足する。ターゲットによっては測定値が存在せずともそれに近いものがある場合、生成量が安全側であれば、それで代用してもよい。

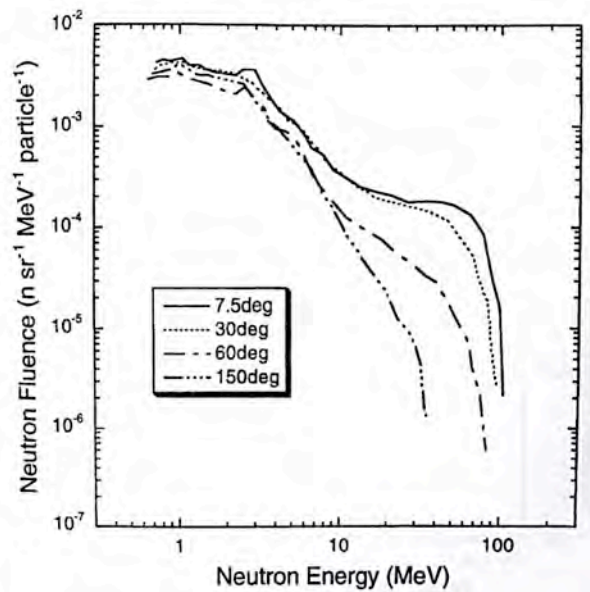


図 22 113MeV 陽子による厚い Fe からの 2 次中性子のエネルギースペクトル

[13]は 113MeV の測定値をスケールリングすることで線源を作った。陽子エネルギー 113 MeV \rightarrow 90 MeV の生成量補正は、図 18 より、 $Y_{90}/Y_{113} = 0.6$ となる。線源は図 22 に 0.6 を乗じたものとなる。

簡易式を用いて遮へい計算を行う場合は線源を線量で準備する必要がある。線量はエネルギースペクトルに線量換算係数を乗じて積分する事で得られる。表 3 と表 4 に中性子と光子の線量換算係数をそれぞれ示す。

表 3 中性子線量換算係数[17]

エネルギー上限 [MeV]	線量当量換算係数 [(Sv/h)/(n/cm ² /sec)]
4.00E+02	2.25E-06
3.75E+02	2.20E-06
3.50E+02	2.15E-06
3.25E+02	2.10E-06
3.00E+02	2.05E-06
2.75E+02	1.99E-06
2.50E+02	1.93E-06
2.25E+02	1.86E-06
2.00E+02	1.82E-06
1.80E+02	1.79E-06
1.60E+02	1.77E-06
1.40E+02	1.74E-06
1.20E+02	1.72E-06
1.10E+02	1.70E-06
1.00E+02	1.68E-06
9.00E+01	1.67E-06
8.00E+01	1.65E-06
7.00E+01	1.64E-06
6.50E+01	1.63E-06
6.00E+01	1.62E-06
5.50E+01	1.61E-06
5.00E+01	1.60E-06
4.50E+01	1.59E-06
4.00E+01	1.58E-06
3.50E+01	1.57E-06
3.00E+01	1.56E-06
2.75E+01	1.55E-06
2.50E+01	1.54E-06
2.25E+01	1.53E-06
2.00E+01	1.52E-06
1.75E+01	2.11E-06
1.49E+01	1.89E-06
1.35E+01	1.80E-06

表 3 (続き)

エネルギー上限 [MeV]	線量当量換算係数 [(Sv/h)/(n/cm ² /sec)]
1.22E+01	1.68E-06
1.00E+01	1.56E-06
8.19E+00	1.47E-06
6.70E+00	1.38E-06
5.49E+00	1.36E-06
4.49E+00	1.46E-06
3.68E+00	1.40E-06
3.01E+00	1.34E-06
2.46E+00	1.29E-06
2.02E+00	1.28E-06
1.65E+00	1.30E-06
1.35E+00	1.26E-06
1.11E+00	1.22E-06
9.07E-01	1.13E-06
7.43E-01	1.00E-06
4.98E-01	7.92E-07
3.34E-01	5.79E-07
2.24E-01	4.21E-07
1.50E-01	2.78E-07
8.65E-02	1.32E-07
3.18E-02	5.72E-08
1.55E-02	3.17E-08
7.10E-03	2.80E-08
3.35E-03	2.51E-08
1.58E-03	2.25E-08
4.54E-04	2.44E-08
1.01E-04	2.78E-08
2.26E-05	3.15E-08
1.07E-05	3.40E-08
5.04E-06	3.63E-08
2.38E-06	3.87E-08
1.12E-06	3.98E-08
4.14E-07	2.88E-08

表 4 光子の線量換算係数

エネルギー上限 [MeV]	線量当量換算係数 [(Sv/h)/(n/cm ² /sec)]
2.00E+01	0.00E+00
1.42E+01	1.12E-07
1.20E+01	9.79E-08
1.00E+01	8.77E-08
8.00E+00	7.85E-08
7.50E+00	7.48E-08
7.00E+00	7.11E-08
6.50E+00	6.74E-08
6.00E+00	6.38E-08
5.50E+00	6.01E-08
5.00E+00	5.60E-08
4.50E+00	5.23E-08
4.00E+00	4.83E-08
3.50E+00	4.41E-08
3.00E+00	3.96E-08
2.50E+00	3.47E-08
2.00E+00	2.93E-08
1.50E+00	2.32E-08
1.00E+00	1.50E-08
4.00E-01	7.54E-09
2.00E-01	3.84E-09
1.00E-01	6.02E-09

図 22の各スペクトルに補正係数 0.6 と線量換算係数を乗じ積分する事で、方向ごとの線量が次のように得られる。

表 5 線量に変換した線源情報

方向	適用角度 (deg.)	線量 (Sv/h/ μ A)
p90MeV7.5	0 - 20	1.46×10^5
p90MeV30	20 - 45	1.18×10^5
p90MeV60	45 - 90	5.81×10^4
p90MeV150	90 - 180	5.13×10^4

8.1.4. 放射線遮への計算

表5を H_0 として式(3)を解くことにより、評価点の線量が求まる。

$$H = H_0 \cdot e^{-\mu t} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (3(\text{再}))$$

式(3)において、 r は線源(x_0, y_0, z_0)から評価点(x, y, z)までの距離、 t は実質の遮へい厚さである。 t は図面から遮へい壁の厚み d を求め、壁に対する入射角度 θ に対して $t = d/\cos \theta$ で求める。(3)式は基本的に遮へい体内のエネルギースペクトルが遮へい中の深度のどこでも変わらない、いわゆるスペクトル平衡の前提の上に成り立つ式である。実際の壁の厚みくらいではスペクトル平衡が成り立つことが多い。減弱距離 μ (cm^{-1})は過去に評価された値で近いものがあればそれを使い、ない場合は他のコードで評価する必要がある。

8.2. 専用ソフトによる遮へい計算(BULK-II)

遮へい計算の専用ソフトとして、陽子・炭素線加速器用の遮へい計算ソフト BULK-II[18]を紹介する。

BULK-II は核子当たり 50 MeV から 400 MeV の陽子と炭素に対する加速器施設の遮へい計算に特化したソフトである。Microsoft の Excel で動作し、

<http://rcwww.kek.jp/research/archives/BULK-II> からダウンロードできる。BULK-II の前身は陽子線加速器の遮へいに特化した BULK-I であり、
<http://rcwww.kek.jp/research/shield/bulk/bulk.html>

からダウンロードできる。

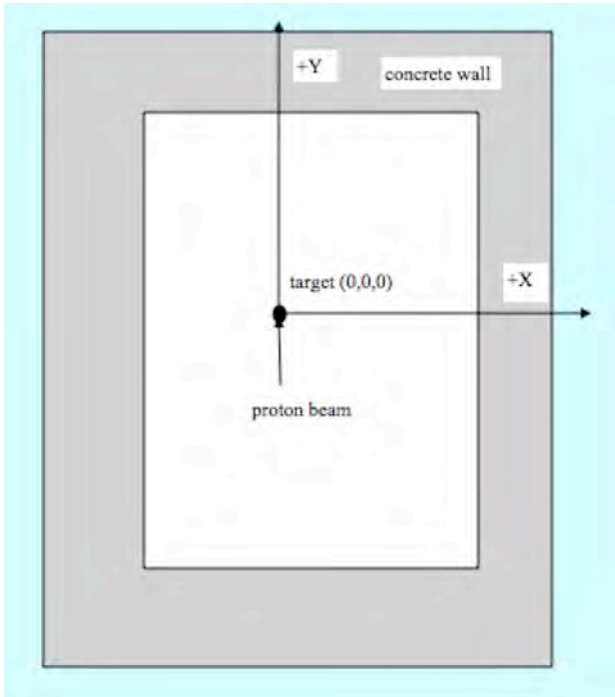


図 23 BULK-II 計算体系

BULK-II の計算体系は部屋の形をしている。任意の(x,y,z)の評価点に対して線量を計算できる。ビームロス地点も任意の(x₀,y₀,z₀)で指定でき、ターゲットは鉄か水を選び、厚さも指定する。部屋の寸法や壁の厚さも変更可能であり、鉄の追加遮へいも好きな場所に設置することが出来る。

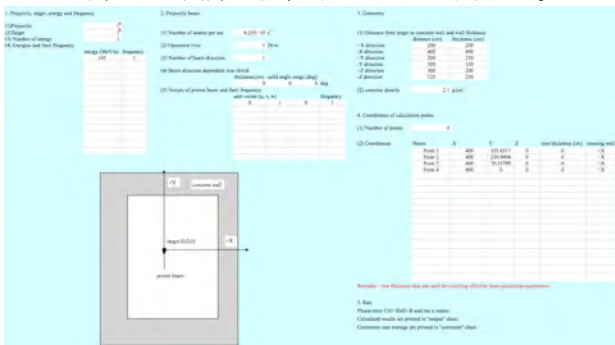


図 24 BULK-II の操作画面

使い方は単純で粒子種を候補から選んだり、体系や評価点の座標を指定したのちにマクロを実行するだけである。壁厚の変更なども容易なので遮へいの最適設計を検討するのも使用できる。

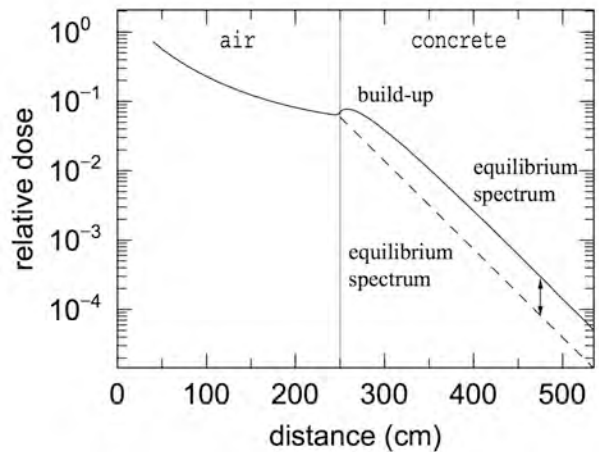


図 25 BULK-II による線量低減の概念

BULK-II の線源項として炭素による厚い鉄および水からの中性子は 0° から 180° までの全方位に対して粒子・重粒子輸送モンテカルロコード PHITS[19]により計算されている。炭素線の核反応からは中性子だけでなく陽子や 4He も多く生成するが、それらも PHITS で計算し、最終的に中性子となる分を見積もって結果に加えるようにしてある。また、生成する高エネルギー中性子の遮へい体内でのビルドアップの影響をモンテカルロコード MCNPX で評価して加えている。[20]

$$H = H_0 \cdot \frac{1}{r^2} \cdot e^{-\frac{t}{\lambda} \{ \alpha - (1 - e^{-\beta t}) (\alpha - 1) \}} \quad (5)$$

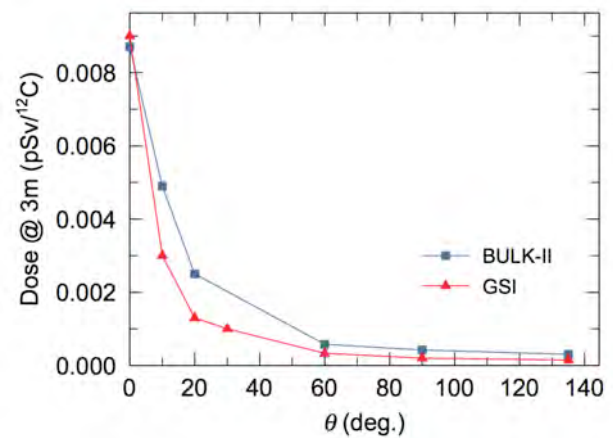


図 26 200MeV/u 炭素による厚い水ターゲットからの中性子線量

BULK-II の線源項を測定値と比較すると、図 26 となる。低い角度においては実験値を過大評価しているが全体として良い一致が得られている。

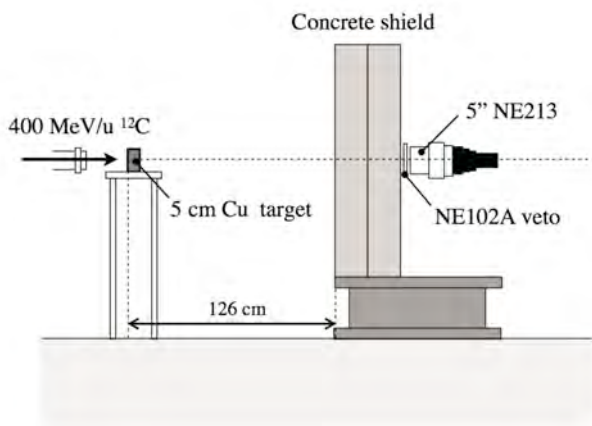


図 27 炭素線を用いた遮へい実験[21]

BULK-II で最終的に得られる中性子線量の評価を測定値と比べる事で行った。図 27は佐々木らが放医研で行った炭素線を用いた遮へい実験である。佐々木らは遮へい背後における中性子のエネルギースペクトルならびに中性子線量を、遮へい体の厚さを変えながら測定した。

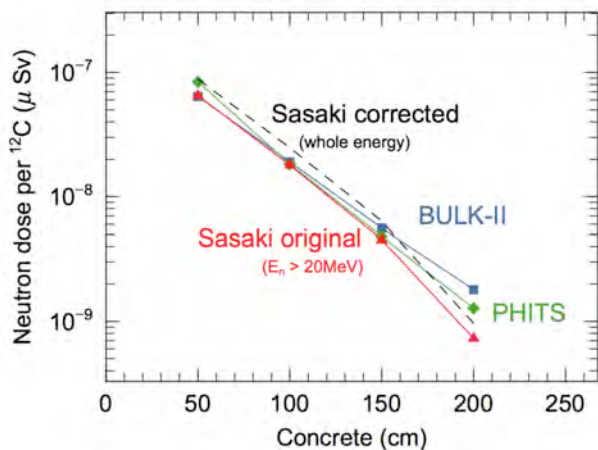


図 28 BULK-II と遮へい実験値との比較

BULK-IIは佐々木らの測定値を30%程度のずれで再現している。またモンテカルロコード PHITS を用いた三次元計算との比較では、BULK-II とほぼ同じ結果が得られており、このような単純な体系であれば BULK-II によってモンテカルロ計算と遜色ない結果が得られる事がわかる。

8.3. 汎用コードによる遮へい計算(PHITS)

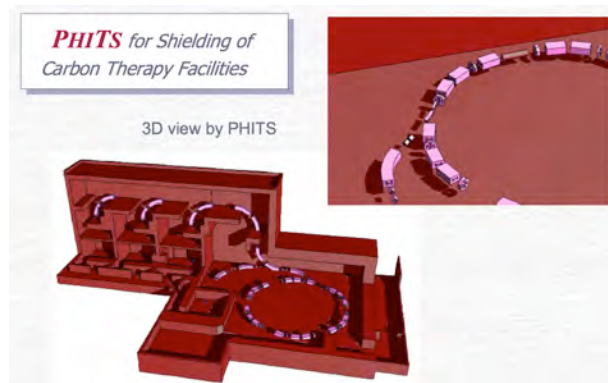
PHITS コードは核子と重粒子の放射線計算を行う汎用のモンテカルロコードで、物理、工学、医療、産業と広い分野で利用されている。PHITS の物理モデルは図 29に示す通りで、数百 GeV までの原子核反応まで取り扱える。

	中性子	その他の核子 (陽子・nなど)	重イオン	μ粒子	電子・陽電子	光子
極	200 GeV		100 GeV/n			100 GeV
↑	核内カスケード模型 JAM 3.5 GeV+ 蒸発模型 GEM		量子分子 動力学模型 JQMD		10 GeV	原子 データ ライブラリ
	核内カスケード模型 Bertini + 蒸発模型 GEM		蒸発模型 GEM		原子 データ ライブラリ	20 MeV 光核反応 GEM
↓	20 MeV		10 MeV/n			
	核データ ライブラリ JENDL-4.0	1 MeV	電離損失 SPAR or ATIMA		1 keV	1 keV
低	10 ⁻⁵ eV					

→ イベントジェネレータモード:

図 29 PHITS の物理モデル

汎用コードは計算体系や条件などを自分で自由に組み立てることができるし、すべての粒子を追跡して結果の集計に反映させる事ができ、特に複雑な体系を扱う時や、エネルギーが高く二次粒子が多く生成するような計算には便利である。特に結果の 2 次元表示などの機能は他の手法にはない。ただし多くのユーザーにとってコードの中身はほぼブラックボックスであるため（ソースは取得できるが、コード量が多い）得られた結果のオーダエスティメーションを行うのが簡単ではない。



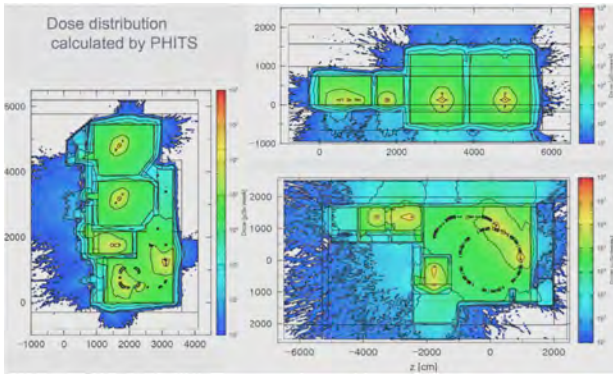


図 30 PHITS で作成した重粒子加速器施設とその計算例（中性子線量分布）

参考文献

- [1] 中村尚司「放射線物理と加速器安全の工学」
[第2版] 地人書館
- [2] M. M. Meier, C. A. Goulding, G. L. Morgan, J. Ullmann, Nucl. Sci. Eng., 104, 339 (1990).
- [3] General Information for Authors, World Scientific Co.
- [4] 船舶技術研究所報告 第24巻 第1号(昭和62年1月)
- [5] スプリングサイエンスキャンプ 2012 於 KEK D 放射線コース 発表資料より
- [6] アイソトープ手帳 11 版 日本アイソトープ協会
- [7] 京都大学医学部附属病院ホームページより
- [8] 放射線安全技術センター「電子加速器の使用に伴う中性子線の遮へい等に関する基礎的調査」(1985)
- [9] 日立ホームページより
- [10] 山陽新聞ホームページより
- [11] 石樽頭吉他「放射線応用技術ハンドブック」朝倉書店(1990)
- [12] Marburg 附属病院ホームページより
- [13] 中村尚司、新型 AVF サイクロトロン(K 値=130)施設の遮へい計算、東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター
- [14] K. Tesch, Radiat. Protec. Dosim., 11, 165 (1968).
- [15] K. Shin, K. Hibi, M. Fujii, Y. Uwamino, T. Nakamura, Phys. Rev., C29, 1307(1984).
- [16] T. Kurosawa et al., Phys., Rev., C62, 044615 (2000)
- [17] ICRP publication, vol. 51, Pergamon, Oxford (1987).
- [18] H. Iwase et al., progress in NULCEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, vol 1, p40-43 (20011)
- [19] K. Niita, et al, "PHITS: Particle and Heavy Ion Transport code System, Version 2.23", JAEA-Data/Code 2010-022 (2010).
- [20] R. Tayama et al., "Development of a Radiation Shielding Tool for Proton Accelerator Facilities (BULK-I)," SATIF7 (2004).
- [21] M. Sasaki E. Kim, T. Nunomiya, T. Nakamura, N. Nakao, T. Shibata, Y. Uwamino, S. Ito, A. Fukumura, "Measurements of High-Energy Neutrons Penetrated Through Concrete Shields Using Self-TOF, NE213, and Activation Detectors" Nucl. Sci. and Engeer., 2, vol. 141, no2, 140 (2002).
- [22] PHITS ホームページより