

# 医療用リニアック室の遮蔽壁の設計と評価

小迫 和明

(技術研究所)

## Design and Evaluation of Shielding Wall of a Linac Room for the Medical Use

by **Kazuaki Kosako**

### Abstract

The shielding wall of the electron linac room for the medical use forms the boundary of radiation controlled area. The radiation dose outside of the wall shall be lower than the radiation dose limit determined by rule for the general public. The wall is about 1 to 3 m-thickness of concrete and the iron plate is inserted toward to the direction of the useful beam. In this work, the accuracies of two kinds of shielding calculation methods (the empirical formula in the shielding calculation manual and the Monte Carlo calculation code MCNP5) were verified for the shielding wall to the direction of useful beam. The high accuracy in the MCNP5 calculation was found and the accuracy gave the safe evaluation of 1.5 to 3 times. By using the MCNP5 calculations, the effect of additional shielding was evaluated in the complex geometry interfered with the wall and the pillar. To obtain the high performance of shielding wall, the effects of the iron plate with the flange and the multi-layered shielding wall were calculated by MCNP5, and confirmed the effectiveness of the less amount of iron and the wall thickness less than 1 m.

### 概要

医療用電子リニアック室の遮蔽壁は、放射線の管理区域境界となっており、その外側において一般公衆に対する放射線の影響を定められた被ばく線量限度以下にしなければならない。この遮蔽壁は、大体1~3 m厚さのコンクリートであり、利用線錘方向には鉄板が挿入されている。遮蔽上最も重要な利用線錘方向の遮蔽壁に関して2種類の遮蔽計算方法(遮蔽マニュアルの計算式とモンテカルロ計算コードMCNP5)の精度を検証した。MCNP5計算の精度の方が高く、1.5~3倍の安全側の評価となることがわかった。遮蔽壁と柱が干渉する複雑形状における追加遮蔽の効果をMCNP5計算により評価した。今後必要とされる高性能な遮蔽壁を得るために、縁付き鉄板と複合構造を持つ遮蔽壁のMCNP5計算を行い、鉄板量の低減と遮蔽壁の厚さを1 m以下にすることが可能であることを確認した。

### 1.はじめに

現在の日本人の最大死亡原因は、がん(悪性新生物)であり、30%以上を占めている。日本は急速に進む高齢化によってがん罹患者が増大しており、近い将来2人に1人ががんになると予測されている。がんの治療方法は、生活の質(Quality of Life: QOL)に優れた放射線治療が大きく増加する見通しである。そのため、臨床例も多くかつ低価格でコスト優位性もある医療用の電子線形加速器(リニアック: Linac)が最も普及しており、国内で900台以上が稼働している。医療用リニアックは、電子が生成する制動放射光子を利用して放射線治療を行うが、医療分野ではこの光子もX線と

呼ぶ。近年、10 MeVより高い電子エネルギーの医療用リニアックが、がん治療の高度化に伴って増加している。電子エネルギーが10 MeVを超える場合、制動放射光子の光核反応によって中性子や陽子などの粒子が生成する。これらの粒子の中で、特に透過性と生成収率が高い中性子の生成と挙動の解析が、放射線を遮蔽する上で特に重要となる。

写真-1に医療用リニアック室内の様子を示し、図-1に医療用リニアック室の平面図の一例を示す。医療用リニアックを設置する照射室は、がん患者を治療するための専用の部屋であり、中央付近にリニアックの回転ヘッド装置と患者用昇降ベッドが設置されている。照射室は、遮蔽用の迷路構造をした前室を持って



写真-1 医療用リニアックと照射室

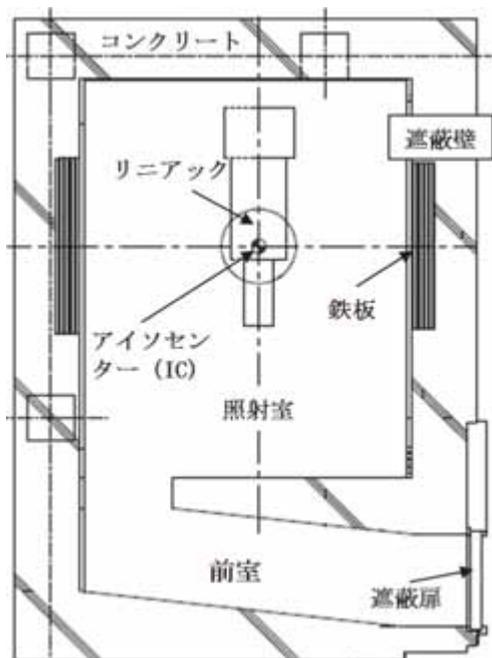


図-1 医療用リニアック室の平面図

いる。前室は、患者搬送用の通路として使用され、外部との出入口には遮蔽扉が設置されている。照射室とその前室は、リニアックから発生する放射線を遮蔽するために、約1mから3m程度の厚いコンクリートの遮蔽壁により周囲が蔽われている。

遮蔽壁の目的は、照射室で発生した放射線が壁から漏洩する量を放射線障害防止法における管理区域境界線量以下にすること、および明確な管理区域境界を形成することにある。放射線障害防止法の管理区域は、外部線量が3月間につき1.3mSvを超える場所と定められている。リニアックは使用中のみ放射線が発生するので、3月間の最大使用時間  $T_{max}$  で放射線障害防止法に基づく施設の使用許可を取得している。したがって、管理区域境界の線量率限度は  $1300/T_{max} \mu\text{Sv/h}$  となるため、遮蔽壁は外側の表面でこの線量限度を十分な裕度を持って下回る遮蔽能が必要である。必要な遮

蔽壁の厚さは、リニアックの電子エネルギー、リニアックから遮蔽壁までの距離、および管理区域設定場所と敷地の条件等によって変化する。

リニアックの回転ヘッドは、患者の放射線治療の焦点位置であるアイソセンター (IsoCenter; IC) を中心に360度回転するため、その回転方向 (利用線錘方向) に光子と電子が集中的に放出される。リニアック室の遮蔽設計では、360度回転する利用線錘方向の遮蔽壁、迷路構造の前室の遮蔽壁と遮蔽扉が重要である。利用線錘方向の遮蔽壁は、入射する光子が最も強いいため特に重要であり、必要に応じて遮蔽壁中に鉄板を挿入して遮蔽能を補強している。この遮蔽壁は、リニアック室のサイズとコストを決定する要因となるため、利用線錘方向の遮蔽壁に関する2種類の遮蔽計算方法 (遮蔽マニュアルの計算式<sup>1)</sup>とモンテカルロ計算コード)の精度を検証する必要がある。また、厚い遮蔽壁を持つリニアック室は、基本的に病院建物の地下や1階に設置されるが、柱や免震構造などによる影響で遮蔽壁の構造に制約を受ける場合がある。そのため、制約条件によっては遮蔽壁に変更や追加遮蔽を施して遮蔽性能を担保しなければならない事例もある。

本報告では、医療用リニアック室の遮蔽壁に適用できる2種類の遮蔽計算方法について説明し、実際の施設で測定した遮蔽壁からの漏洩線量に基づいてこれらの計算方法の精度を評価する。精度と適用性が高いMCNP5<sup>2)</sup>計算により、実施設における遮蔽壁と柱が干渉した複雑構造における追加遮蔽の方法と効果を説明し、最後に今後必要とされる高性能な遮蔽壁の構造を示す。

## 2.遮蔽壁の計算方法

現在、リニアック室の遮蔽壁における放射線遮蔽計算の方法は、放射線施設の遮蔽マニュアル<sup>1)</sup>の計算式による方法と電子・光子輸送計算コードを使用して求める方法の2通りがある。電子・光子輸送計算コードは多数存在するが、電子の制動放射と光中性子の生成を扱うことが可能で、幾何形状を正確に再現できる3次元モンテカルロ放射線輸送計算コードを使用する必要がある。

遮蔽設計の計算法は、必ず安全側の結果を与え、十分な安全裕度を持つ必要があり、計算値が測定値より低くなることは許されない。

### 2.1 放射線施設の遮蔽マニュアルの計算式<sup>1)</sup>

放射線施設の遮蔽マニュアル中には診療用リニアックの遮蔽計算例が示され、利用線錘、漏洩線、迷路散

乱線に分けて計算式が与えられている。これらの式は、線源点で与えられた実効線量を元に遮蔽材による遮蔽効果を取り入れたものであり、その用途は限定されてはいるが、直ちに計算できる簡易式という大きな利点がある。しかし、単純な一次元の平板構造しか扱えず、大きな安全裕度を内包するため、精度の高い計算は行えないという問題点がある。一例として、利用線錘に対する遮蔽壁外側の実効線量率  $E$  ( $\mu\text{Sv/h}$ ) を式 (1) に示す。

$$E = \frac{I_0 \times 10^6}{L^2} \times D_t \times U \times C_{Sv} \quad (1)$$

ここで、 $I_0$  は IC での X 線吸収線量率 ( $\text{Gy/h}$ )、 $10^6$  は  $\text{Gy}$  を  $\mu\text{Gy}$  に換算する係数、 $L$  はターゲットから線量評価点までの距離 ( $\text{m}$ )、 $D_t$  は厚さ  $t$   $\text{cm}$  の遮蔽壁の透過率、 $U$  は方向利用率 (通常は 1.0)、 $C_{Sv}$  は  $\text{Gy}$  を  $\text{Sv}$  に換算する係数 (X 線は 1.0) である。リニアックの放射線強度は  $I_0$  で決まり、一般的には  $360 \text{ Gy/h}$  である。このマニュアルで与えられているコンクリートに関するデータは、密度  $2.1 \text{ g/cm}^3$  に対するものである。

## 2.2 モンテカルロ法による遮蔽計算

光子と電子の輸送計算に加えて制動放射光子と光中性子生成の計算が可能で複雑形状が取り扱える 3 次元モンテカルロ輸送計算コードは、MCNP<sup>2)</sup>、MCNPX<sup>3)</sup>、PHITS<sup>24)</sup> などがある。これらの中から放射線輸送計算分野では世界的な標準コードである MCNP5<sup>2)</sup> を使用して、リニアック室の遮蔽壁の遮蔽計算を行った。MCNP5 計算で使用した断面積データライブラリは、電子・光子カスケード反応の EL3<sup>5)</sup>、光子相互作用の MCPLIB04<sup>5)</sup>、中性子反応の FSXLIB-J40<sup>6)</sup>、および光核反応の LA150<sup>5)</sup> である。

医療用リニアック装置の回転ヘッド部分は、多数の部品から成る複雑形状をしているが、遮蔽壁計算用モデルでは遮蔽材部分やマルチリーフコリメータなどを省略して、金属ターゲットと遮蔽コリメータのみとした。省略した理由は、回転ヘッドからの漏洩線量が利用線錘の  $1/1000$  以下となることが医療法施行規則により定められているため、影響が無視できるからである。金属ターゲットの組成と厚さは、リニアック装置の種類によって異なるが、最も標準的な銅を使用し厚さは  $1.5 \text{ cm}$  とした。ターゲットの周囲を円筒形状の厚いタングステンで覆った遮蔽コリメータは、前方方向に集束した電子と光子の放射線を放出し、側方と後方への漏洩を抑える。前方に集束した放射線は、ターゲットから  $1 \text{ m}$  離れた IC 位置で  $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$  の照射野を形成するように拡がっている。

線源である単一エネルギーの細いペンシルビームの電子は、ターゲット後面の中心位置に入射する。モン

テカルロ計算の線源強度は、ターゲットに入射する電子ビームの電流値で規格化する。この電流値は、リニアックの電子エネルギーによって大きく変わり、さらにリニアックの機種やビームの出力調整によっても変化するため、注意が必要である。

銅、鉄とタングステンの組成は、不純物を含まない純粋組成で、それぞれの密度は  $8.93$ 、 $7.86$  と  $19.1 \text{ g/cm}^3$  を使用した。窒素と酸素のみから成る空気の密度は、 $0.001205 \text{ g/cm}^3$  を使用した。コンクリートは、代表的な普通コンクリートである Type O3<sup>7)</sup> に準拠した元素組成を使用し、密度は放射線施設の遮蔽計算における標準値とされる  $2.1 \text{ g/cm}^3$  を使用した<sup>1)</sup>。コンクリートの組成は、使用する骨材とセメントが自然界のものであるため厳密には同じものが存在しないが、組成はほぼ類似している。遮蔽壁の計算では、そのような組成の差異よりも密度の方が影響度は大きいけれども、コンクリート密度の根拠資料が用意できない場合には、通常密度である  $2.15 \sim 2.35 \text{ g/cm}^3$  ではなく、安全側の評価となる  $2.1 \text{ g/cm}^3$  を使用する。

## 3. 遮蔽計算法による遮蔽壁の計算精度

リニアックの照射室の遮蔽壁は、 $1 \text{ m}$  以上の厚さの普通コンクリート壁である。利用線錘方向の遮蔽壁は、集束された光子が入射するため、通常はコンクリートよりも光子と電子の遮蔽能が高い鉄板を壁中に入れて、壁が厚くなり過ぎないようにする。壁中の鉄板は、図-1 に示した内側が鉄板で外側がコンクリートのような二層構造ではなく、図-2 に示したような鉄板の両側をコンクリートで挟んだ配置が一般的である。しかし、筆者の過去の研究により遮蔽能の高い壁は、内側が鉄板で外側がコンクリートの単純な二層構造であることが判明している<sup>8)</sup>。リニアックの電子エネルギーが  $10 \text{ MeV}$  より高い場合には、主に遮蔽壁の鉄板中で光中性子が発生するので、外側のコンクリート

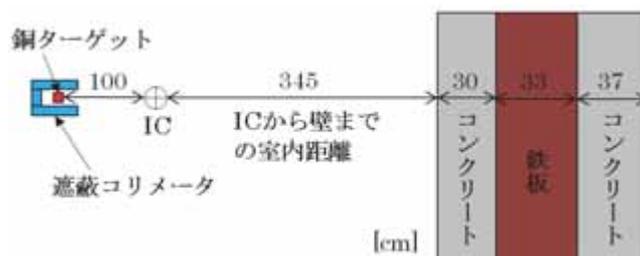


図-2 6 MeV の医療用リニアック室の利用線錘方向の遮蔽壁計算モデル

は生成した中性子を遮蔽するために十分な厚さを持っている必要がある。

このような遮蔽壁に対する遮蔽計算の精度について最初に示し、その次に遮蔽壁と柱が干渉する場合の追加遮蔽の方法と効果を説明する。

### 3.1 遮蔽計算法による遮蔽壁の計算精度の評価

遮蔽計算法による遮蔽壁の計算精度を明確化することは、計算結果が安全側であることと、適切な安全裕度を担保していることを保証するために重要である。そのため、利用線錘方向の遮蔽壁を透過した放射線による漏洩線量率を測定し、その遮蔽計算結果と比較することにより遮蔽計算の精度を検証した。光子の線量率測定器は電離箱サーベイメータ 450P-DE-SI (VICTOREEN 社製)、中性子の測定器は中性子サーベイメータ TPS-451C (アロカ社製) を使用した。測定した線量率の誤差は、30%程度と推定される。

モンテカルロ計算における利用線錘方向の遮蔽壁の計算モデルは、6 MeV リニアックの計算モデルである図-2 に示したように IC の後方 1 m の位置に銅ターゲットとタングステン製の遮蔽コリメータがあり、前方に鉄板を内包する遮蔽壁がある。照射室内と遮蔽壁外側は空気である。前方以外の周囲の壁は、放射線がそこで散乱して前方の遮蔽壁に与える影響が無視できるため、計算モデルの対象から除外した。IC と遮蔽壁の距離および遮蔽壁の構成と厚さは、それぞれの遮蔽壁毎に異なっている。

6 MeV のリニアックにおける図-2 に示した利用線錘中心軸上にある遮蔽壁外側表面の光子漏洩線量率の測定値と計算値を表-1 に示す。計算値は、2 章で述べた遮蔽マニュアル中の X 線の利用線錘に対する計算式とモンテカルロ法の MCNP5 計算の結果の 2 種類を示す。鉄板の厚さが 39 cm の遮蔽壁のケースも併せて示す。この結果から、遮蔽マニュアルの計算値は測定値を 3.3~4.4 倍と大きく過大評価している。MCNP5 計算は、1.3~1.6 倍の過大評価であり、極めて良い一致と言える。

10 MeV のリニアックにおける遮蔽壁外側表面の光子漏洩線量率の測定値と計算値を表-2 と 3 に示す。表中にコンクリートと鉄板の厚さも示す。これらは、A と B 病院のリニアック装置と照射室における結果である。表-2 の結果から、遮蔽マニュアルの計算値は測定値を 1.1~1.9 倍過大評価していることがわかる。MCNP5 計算は 1.3~2.7 倍の過大評価である。表-3 の結果から、遮蔽マニュアルの計算値は測定値を 2.1~2.6 倍過大評価しており、MCNP5 計算は 2.6~3.5 倍の過大評価である。これらの結果から、遮蔽マニュアルと MCNP5 計算は、遮蔽マニュアルの方が測定値

表-1 6 MeV リニアックの利用線錘方向の遮蔽壁からの漏洩線量率の比較

遮蔽材の種類と厚さ [cm]				光子の漏洩線量率 [μSv/h]		
ICから壁までの空気	内側コンクリート	鉄板	外側コンクリート	測定値	計算値 (遮蔽マニュアル)	計算値 (MCNP 計算)
345	30	33	37	22.0	73.0	27.5
220	30	39	31	9.7	42.4	15.5

表-2 10 MeV リニアックの利用線錘方向の遮蔽壁からの漏洩線量率の比較 (A 病院)

遮蔽材の種類と厚さ [cm]				光子の漏洩線量率 [μSv/h]		
ICから壁までの空気	内側コンクリート	鉄板	外側コンクリート	測定値	計算値 (遮蔽マニュアル)	計算値 (MCNP 計算)
515	35	35	110	0.63	1.18	1.69
410	35	37.5	107.5	0.55	1.03	1.48
220.5	0	50	125	0.30	0.32	0.40

表-3 10 MeV リニアックの利用線錘方向の遮蔽壁からの漏洩線量率の比較 (B 病院)

遮蔽材の種類と厚さ [cm]				光子の漏洩線量率 [μSv/h]		
ICから壁までの空気	内側コンクリート	鉄板	外側コンクリート	測定値	計算値 (遮蔽マニュアル)	計算値 (MCNP 計算)
310	0	30	170	0.76	1.56	2.23
219.5	0	45	105	1.52	3.22	3.92
158	10	6.5	125	1820	4718	6342

表-4 18 MeV リニアックの利用線錘方向の遮蔽壁からの漏洩線量率の比較

光子の漏洩線量率 [μSv/h]			中性子の漏洩線量率 [μSv/h]			
測定値	計算値 (遮蔽マニュアル)	計算値 (McGinley の式)	測定値	計算値 (McGinley の式)	計算値 (MCNP 計算)	
98.8	2.4	6.4	117.4	92.0	484.9	277.7

に対する一致は良いが、ほぼ同等な結果を与えることがわかる。但し、表-2 の鉄板が 50 cm とコンクリートが 125 cm の厚さの遮蔽壁では、遮蔽マニュアルの結果が 1.07 倍となっており、安全裕度がない結果であることに注意する必要がある。

18 MeV のリニアックにおける遮蔽壁外側表面の漏洩線量率の測定値と計算値を表-4 に示す。この遮蔽壁は、IC から壁までの距離が 310 cm、内側コンクリートの厚さが 30 cm、鉄板が 62 cm、外側コンクリート

が24 cmである。電子エネルギーが18 MeVであるため、特に遮蔽壁の鉄板中で光中性子生成反応が起こり、発生した中性子が外側コンクリート中で散乱・捕獲され二次γ線を生成する。そのため、漏洩線量は光子と中性子について評価する必要がある。遮蔽マニュアルの計算値は、光子に対してのみ与えられ、その測定値に対する比は0.024であり大幅な過小評価となるので、使用できないことがわかる。遮蔽マニュアルでは高エネルギーX線の利用線錘方向の遮蔽に関して、式(1)とは別に光中性子の影響を考慮した簡易式であるMcGinleyの式<sup>9)・12)</sup>も与えられている。この式による計算値の測定値に対する比は、光子で0.065、中性子で5.3、光子と中性子の合計で2.6となる。光子のみであれば大幅な過小評価であるが、光子と中性子の合計した漏洩線量のみを扱うのであれば、2倍以上の過大評価を与えるので適用可能であると言える。

MCNP5計算の測定値に対する比は、光子で1.2、中性子で3.0、光子と中性子の合計で2.1となる。したがってMCNP5の計算結果は、測定値と良い一致を示しており、高エネルギーリニアックの遮蔽壁計算に適していることがわかる。

これらの利用線錘方向の遮蔽壁の結果から、遮蔽マニュアルの計算値は、10 MeV以下のリニアックの遮蔽壁に適用できる。10 MeVリニアックにおける計算精度は1.9～2.6倍の過大評価で良い一致であるが、6 MeVは3.3～4.4倍となり過大評価が大きい。したがって、10 MeVリニアックに限定して適用するのが最も良いと言える。

MCNP5の計算精度は、6～18 MeVのリニアックで1.5～3倍の過大評価で安定しており、十分な信頼性があることがわかる。筆者の過去の研究に基づき、18～38 MeVの電子エネルギーにおける鉄とコンクリートの遮蔽実験解析からMCNP5の計算精度は30%以内であることが示されており<sup>8)</sup>、医療用リニアックの全てに十分な精度で適用できる。

### 3.2 遮蔽壁と柱が干渉する場合の追加遮蔽

単独のリニアック棟ではなく、大型病院棟内の地下や1階にリニアック室を設置する場合、図-1に示したように遮蔽壁の中に柱を組み入れた構造にする。しかし、他の制約要因により遮蔽壁中の鉄板と干渉する位置に柱を入れなければならない場合があり、そのような例を図-3に示す。遮蔽壁の鉄板の長さL1とL2は同じではなく、柱と干渉したL1が短くなっている。鉄板が短くなった影響で、柱の外側の漏洩線量が高くなる可能性があるため、漏洩線量の評価が必要となる。このような形状は、遮蔽マニュアルの式では計算できず、3次元モンテカルロ計算コードによる評価が必須

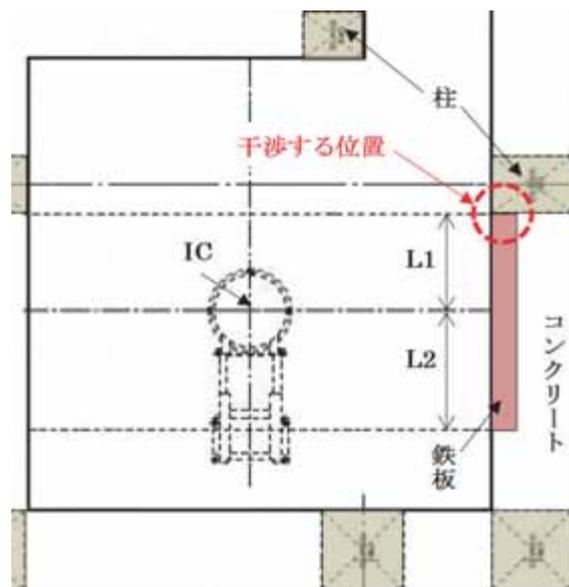


図-3 リニアック遮蔽壁中の鉄板と柱の干渉

となる。10 MeVリニアックの遮蔽壁において、鉄板の厚さが40 cmと外側コンクリートが110 cmの場合に、柱外側位置における3月間線量は、MCNP5計算により2.2 mSvとなった。この値は管理区域境界の線量限度1.3 mSvを超えているため、干渉した柱の室内側に厚さ5 cmと長さ35 cmの追加遮蔽鉄板を取り付ける必要がある。これを取り付けることにより柱外側の3月間線量は0.7 mSvまで下がるので、線量限度を十分な裕度でクリアできる。このような最適な追加遮蔽鉄板のサイズと取り付け位置を決めるためには、これらをパラメータとしたMCNP5によるサーベイ計算が必要となる。

建物が免震構造を持つ場合に、柱と遮蔽壁を切り離して変形や振動のための隙間を設ける必要がある場合がある。図-4に示した例のように、柱の回りの遮蔽壁の一部を切り欠く構造となる。140 cm厚のコンクリート壁が、部分的に125 cm厚と短くなり、15 cm分の遮蔽欠損が生じている。欠損部分に挿入される柱により透過した放射線の大部分は遮蔽されるけれども、5 cmの隙間から漏洩する放射線(図-4中の赤矢印)が存在するため、漏洩線量が高くなる可能性がある。この影響は、利用線錘方向の中心軸からの距離、および欠損部分と隙間のサイズと形状によっても異なる。利用線錘から十分遠く、回転ヘッドからの漏洩線の影響が大きくない場所に生じた欠損ならば問題とならない可能性もあるので、評価が不可欠である。隙間は、発泡ポリスチレン等の変形の障害とならない材料で充填されるが、低密度で遮蔽能も低いため遮蔽計算上は充填材を無視する。このような形状も、遮蔽マニュアルの式では計算できず、3次元モンテカルロ

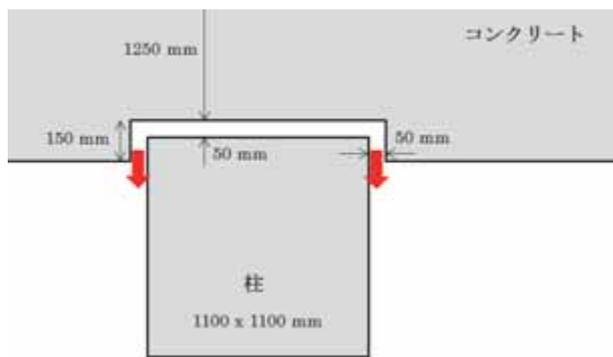


図-4 免震構造のリニアック室の遮蔽壁と柱が干渉した部位の拡大平面図

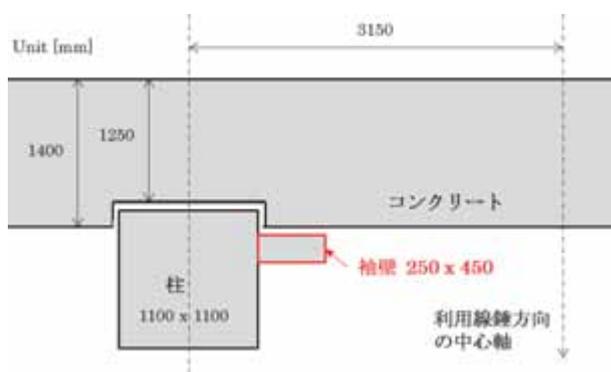


図-5 免震構造のリニアック室の遮蔽壁と柱の干渉部に袖壁を付加した計算モデル

計算コードによる評価が必須となる。10 MeV リニアックの遮蔽壁において、図-4 と 5 の欠損構造でコンクリートの厚さが 140 cm、利用線錘方向の中心軸から柱中心までの距離が 315 cm の場合に、この欠損部における 3 月間線量の最大値は、MCNP5 計算により 2.9 mSv となった。柱と欠損部の右側の隙間から漏洩する 3 月間線量は、2.1 mSv であり管理区域境界の線量限度を超えている。左側の隙間からの漏洩線量は、線量限度以下であった。そのため、図-5 に示したように隙間を覆うため柱の右側へ付加した袖壁により漏洩光子を遮蔽した。厚さ 25 cm と長さ 45 cm のコンクリートの袖壁を柱に付加することにより、袖壁の外側における 3 月間線量の最大値は、0.45 mSv に低下するので、線量限度を十分な裕度でクリアできる。

#### 4.高性能な遮蔽壁の開発

リニアックの遮蔽壁は、1 m 以上の厚さがあり、利用線錘方向には鉄板を入れて遮蔽能を補強している。遮蔽壁を薄くしようとすると鉄板が厚くなる相反関係があり、鉄板はコンクリートよりも高価であるため、

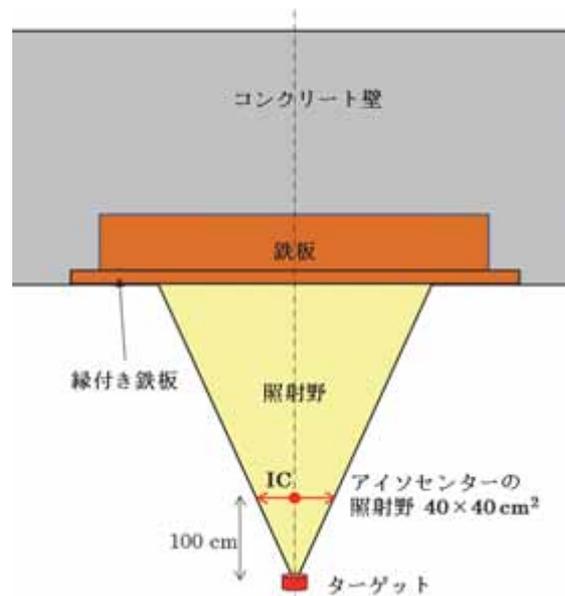


図-6 縁付き遮蔽用鉄板の構造

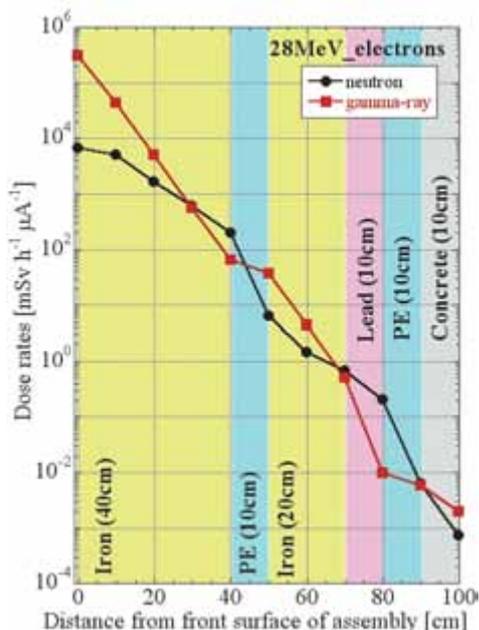
遮蔽壁中の鉄板の厚さと量はコスト的に最適化する必要がある。また、大都市部の病院は非常に限られた敷地に建てられるため、大きな空間を必要とするリニアック室の遮蔽壁を可能な限り薄くすることが必要な場合がある。このような鉄板量の低減と薄い遮蔽壁というニーズに応える遮蔽壁を開発するためのサーベイ計算を MCNP5 で実施し、得られた高性能な遮蔽壁を以下に示す。

##### 4.1 縁付き構造による鉄板量の低減

通常の利用線錘方向の遮蔽壁中の鉄板は、図-1 に示すように長方形の形状で配置される。この鉄板の厚さは、最も漏洩線量が高くなる利用線錘の中心軸上における線量で決められている。しかし、中心軸から外側に向かって遮蔽壁中の透過距離が長くなるので、漏洩線量は低くなってゆく。そのため、鉄板の両端は、遮蔽に必要な厚さよりも厚くなるので、図-6 に示すように照射室内側の鉄板に縁を付けたような構造とすれば、外側の鉄板の量を減らすことが可能となる。さらに詳細な遮蔽設計が実施できれば、鉄板の両端は階段状に最適化することも可能である。このように鉄板量を低減できる遮蔽体中の縁付き鉄板構造が得られた。適切な長さを持つ縁構造は、照射野の広がり度で遮蔽壁に入射する光子が散乱して壁に沿って拡がりながら壁の内部に浸透する効果を抑制することもできる。

##### 4.2 複合構造による薄い遮蔽壁

遮蔽壁の厚さを妥当なコストと施工性を確保した上で 1 m 以下にするのは、容易なことではない。10 MeV



図一七 28 MeV リニアックの利用線錘方向の遮蔽壁の厚さを1 m とする複合構造内部における線量率分布

以下のリニアックでは、遮蔽マニュアルの計算式によって遮蔽壁の鉄板の厚さを60 cm とコンクリートの厚さを40 cm とすれば、十分な裕度を持って漏洩線量を線量限度以下にできる。したがってコストを考えなければ、鉄板の厚さを60 cm 以上にすると遮蔽壁を1 m 以下にできる。

15 MeV 以上の高エネルギーリニアックでは、光中性子の寄与が無視できなくなるため、通常のコクリートと鉄板の組み合わせでは1 m 以下にできない。このリニアックの遮蔽壁に求められる遮蔽能は、壁の内側表面の光子線量を外側で7桁以上低減し、中性子線量も同程度まで低減できるものでなければならない。医療用リニアックで最も高エネルギーである28 MeV でも厚さを1 m 以下にできる複合構造を持つ遮蔽壁を開発するために、コストと施工性の観点から許容できる材料から成る遮蔽壁のMCNP5 計算を行った。その結果、鉄40 cm + ポリエチレン10 cm + 鉄20 cm + 鉛10 cm + ポリエチレン10 cm + コンクリート10 cm の複合構造が最も優れていることがわかった。この構造における28 MeV リニアックによる遮蔽壁内部での中性子と光子の線量率分布を図一七に示す。光子線量率

は8桁低減し、中性子線量率も光子線量率以下に低減できており、必要な遮蔽能を持っていると言える。この複合構造遮蔽壁の性能検証するための実験を実施し、MCNP5 を使用した実験解析により光子と中性子の線量率の計算値は、30%以内の精度で実験値の線量率分布を評価できていることを確認した<sup>13)</sup>。この複合構造は、リニアックのエネルギーが28 MeV よりも低ければ、もっと高い遮蔽能を与えるので、1 m よりも薄くすることも可能である。

## 5.まとめ

がん治療に使用される医療用リニアック室の設計を行う上で最も重要な利用線錘方向の遮蔽壁に関して、2種類の遮蔽計算方法の精度を検証した。遮蔽マニュアルによる計算は、10 MeV 以下のリニアックに対して適用可能であり、その精度は10 MeV で1.9~2.6倍の過大評価、6 MeV で3.3~4.4倍の過大評価である。3次元モンテカルロ計算コードMCNP5 による計算は、全てのエネルギーのリニアックに適用可能であり、その精度は1.5~3倍の過大評価である。したがってMCNP5 計算は、適切な安全裕度を持って漏洩線量を評価できることがわかった。

リニアックの遮蔽壁と柱が干渉する複雑形状における追加遮蔽の方法と効果をMCNP5 計算により評価した。干渉により鉄板の長さが短くなる場合には、柱の室内側に最適なサイズの追加遮蔽鉄板を適切な位置に取り付けることにより、漏洩線量を線量限度以下にできる。免震構造により遮蔽壁と柱に隙間がある場合には、隙間を覆う最適なサイズの袖壁を柱に付加することにより、漏洩線量を線量限度以下にできる。

高性能な遮蔽壁として、縁付き鉄板と複合構造を持つ遮蔽壁の開発をMCNP5 計算により行った。縁付き鉄板は、両端を最適形状にすることにより鉄板量の低減が可能である。複合構造を持つ遮蔽壁は、高エネルギーリニアックであっても厚さを1 m 以下にすることが可能であり、壁を薄くしなければならない場所に使用できる。今後、最適化した縁付き鉄板の現場適用を進める予定である。

<参考文献>

- 1) 原子力安全技術センター編：“放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル 2007”，2007.
- 2) X-5 Monte Carlo Team：“MCNP—A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5”，LA-UR-03-1987, Los Alamos National Laboratory, 2003.
- 3) Pelowitz, D. B. (Ed.)：“MCNPX User’s Manual, Version 2.5.0”，LA-CP-05-0369, Los Alamos National Laboratory, 2005.
- 4) Sato, T., Niita, K., Matsuda, N., Hashimoto, S., Iwamoto, Y., Noda, S., Ogawa, T., Iwase, H., Nakashima, H., Fukahori, T., Okumura, K., Kai, T., Chiba, S., Furuta, T., Sihver, L.：“Particle and heavy ion transport code system PHITS, version 2.52”，J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 50, pp.913-923, 2013.
- 5) RSICC：“Data Libraries for MCNP5”，CCC-710/MCNP, Oak Ridge National Laboratory, 2003.
- 6) Okumura, K.：“Nuclear Data for Prediction of Isotope Generation and Depletion”，Proc. of the 2011 Symposium on Nuclear Data, JAEA-Conf 2012-001, pp.39-44, 2012.
- 7) ANL：“Reactor Physics Constants”，ANL-5800 (2nd Ed.), USAEC, 1963.
- 8) Kosako, K., Oishi, K., Nakamura, T., Sato, K., Kamiyama, T., Kiyonagi, Y.：“Shielding study on iron and concrete assemblies of bremsstrahlung photons and photoneutrons from copper target bombarded by 18, 28 and 38 MeV electrons”，J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 50, pp.1188-1197, 2013.
- 9) McGinley, P. H.：“Photoneutron Production in the Primary Barriers of Medical Accelerator Rooms”，Health Physics, Vol. 62, pp.359-363, 1992.
- 10) McGinley, P. H.：“Photoneutron Fields in Medical Accelerator Rooms with Primary Barriers Constructed of Concrete and Metals”，Health Physics, Vol. 63, pp.698-701, 1992.
- 11) McGinley, P. H.：“Shielding Techniques for Radiation Oncology Facilities”，Medical Physics Publishing, Madison, Wisconsin, 1998.
- 12) “Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-ray Radiotherapy Facilities”，NCRP Report No. 151, National Council on Radiation Protection and Measurements, 2005.
- 13) Kosako, K., Oishi, K., Nakamura, T., Kiyonagi, Y.：“Optimum shielding structure for the wall of medical LINAC facility”，Progress in Nuclear Science and Technology, Vol. 4, pp.276-279, 2014.