

HIMAC加速器本体室内(B2)における 樹脂系中性子遮蔽材の遮蔽性能

奥野功一*・藤澤高志**・高田栄一**・安田仲宏**・野田耕司**・川嶋 元**・小林育夫***

HIMAC 加速器本体室内(B2)に設置されているシートビームプロファイルモニタ(SBPM)の CCD カメラの遮蔽を目的として、同室内における中性子発生源の位置を、加速器リング上に設置した線量計を用いた中性子、X・ γ 線分布測定により推定した。また、SBPM の位置において樹脂系中性子遮蔽材「エポナイト」とパラフィンの遮蔽性能の測定を試みた。その結果、エポナイトの減衰量は熱中性子に対し 1/30、高速中性子に対して 1/25 となった。同様の測定をパラフィンについても実施し、その結果、熱中性子に対し 1/9、高速中性子に対して 1/35 となった。さらに、中性子発生源における中性子スペクトルを、加速粒子が炭素線 400 MeV/u の場合について解析により求めた。

キーワード：中性子，遮蔽，重粒子線加速器

1. 緒言

2004 年に開発した樹脂系中性子遮蔽材「エポナイト」の遮蔽性能は、 ^{252}Cf 中性子源による遮蔽性能実験を行い、熱～中高エネルギーの中性子に対し高い遮蔽性能を持つことが判ったが¹⁾、高エネルギー加速器に対する遮蔽性能は測定されていない。本来であれば加速器施設の物理実験用ビームラインで遮蔽性能実験を行うのが望ましいが、今回、より現場向きの観点に立ち、独立行政法人放射線医学総合研究所にある重粒子線がん治療装置(HIMAC)の加速リング上に設置されているシートビームプロファイルモニタ(SBPM)の CCD カメラの放射線損傷を減らすことを目的として、加速器本体室内における中性子発生源の位置と中性子スペクトルの推定、及びエポナイト等の遮蔽性能の測定を試みた。

2. 加速器本体室内の線量分の測定

HIMAC 加速器本体室内(B2)に存在する線源位置や中性子エネルギースペクトルは、施設建設時に建屋の壁厚を設計するために推定されたが、建設後の調査は実施されておらず SBPM に影響を与える線源位置、中性子エネルギースペクトルは解っていない。これらの情報が判らないと遮蔽設計は出来ないため、初めに線源位置の特定調査を実施した。

調査は HIMAC リング上の Q マグネット、およびビーム入射点とビーム取り出し後の Q マグネットに線量計を取付けて行った。線量計設置位置を図-1に示す。

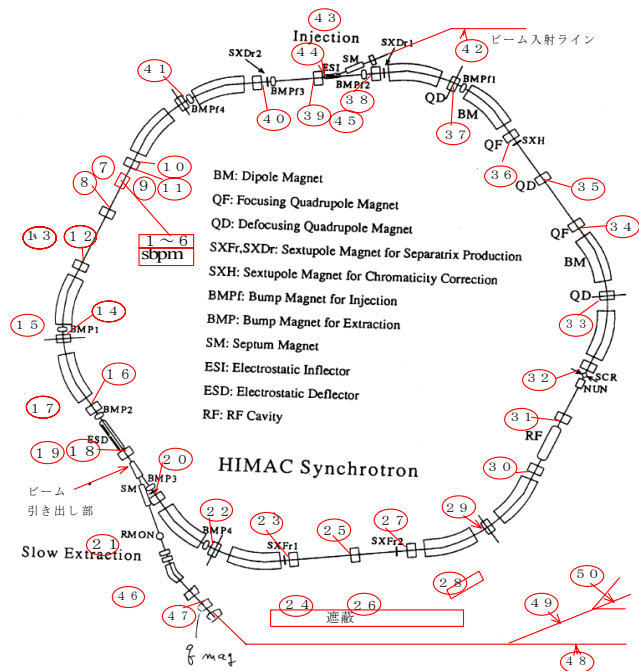


図-1 線量計設置位置(赤丸の数字は設置番号)

SBPM は、図-1 の設置番号 1~6 の位置にある。測定に使用した線量計はルクセルパッチである。ルクセルパッチはガンマ線測定に OSL を使用し、中性子測定には CR-39 にポリエチレンラジエータ、及び窒化ホウ素入りプラスチックを被せ、熱中性子と高速中性子を測定できるようにしたものである。測定エネルギー範囲は、ガンマ線が 5 keV~10 MeV、中性子が熱中性子及び 100 keV~10 MeV であり、また、測定線量範囲はガンマ線が 0.01 mSv~10 Sv、中性子が 0.1 mSv~50 mSv である。図-2 に測定で得られた炭素 400 MeV/u 治療条件にお

* 技術研究所 ** 放射線医学総合研究所 *** 長瀬ランダウア株式会社

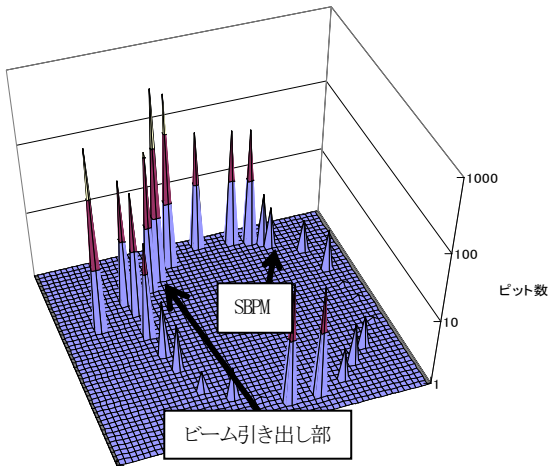


図-2 炭素 400 MeV/u 治療条件における中性子線分布

るリング上の中性子ピット数分布を示す。測定の結果、ビーム引き出し部のビームシャッター近傍に大きな線源（設置番号 47 付近）、また SBPM 下流にも線源があることが判った²⁾。ビームシャッターは厚さ 20 cm のアルミ製で、SBPM まで直線距離で約 33 m あるが、直視することは出来ない。

3. SBPM 近傍における遮蔽効果

前述と同じ線量計を用いて SBPM 近傍におけるエポナイト及びパラフィンの遮へい効果を測定した。試験体の設置状況を図-3 に示す。エポナイト及びパラフィン、床上 1600 mm、ビームダクト中心から 1660 mm の場所に、400×400×400 mm のブロックを組み、ブロック表面の 6 面と中心部、およびビームライン上の SBPM 設置予定場所にルクセルバッチをそれぞれ 2 個づつ計 16 個設置した。測定はパラフィンについては 4 週間、エポナイトについては 6 週間行い、その期間内に測定された OSL による線量、および中性子ピット数を数えた。中性子測定結果を図-4 に、X・γ線測定結果を図-5 に示す。中性子測定結果は人体に対する被曝低減が目的ではないため、線量ではなくピット数で表している。図-4 より、熱中性子・高速中性子とも上流下流方向の差が最も多い。一方、内側外側及び上面下面方向は、高速中性子に対しては差が見られるが、熱中性子に対しては上流下流ほどの差が見られない。また、上流・中心・下流を見ると、高速中性子に対してはパラフィンの方が減衰率は大きく、熱中性子に対してはエポナイトの減衰率が大きい。図-4 より、高速中性子および熱中性子に対する中性子の遮蔽効果を、ビーム進行方向の試験体ブロック中心の線量 / 下流側の線量で表したものを表-1 に示す。表-1 に示すようになる原因は、遮蔽材料に含まれる水素原子数

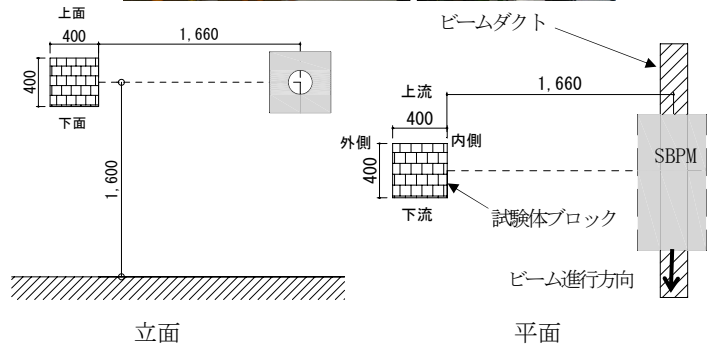


図-3 試験体ブロック設置状況と測定位置

表-1 高速中性子と熱中性子に対する遮蔽効果

	熱中性子	高速中性子
パラフィン	1 / 9	1 / 35
エポナイト	1 / 30	1 / 25

表-2 エポナイトとパラフィンの組成
エポナイトの組成 (wt%)¹⁾

C	H	N	O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
25.5	3.8	1.2	15.8	2.23	0.6	0.3	16.6
MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Li	B ₂ O ₃	密度
0.41	0.029	0.088	0.035	0.016	0.005	30.4	1.74 g/cm ³

表-3 パラフィンの組成 (wt%)³⁾

C	H	密度
85.15	14.85	0.890 g/cm ³

とホウ素原子数に起因すると考えられる。表-2 にパラフィンとエポナイトの組成を示す。表-2 に示す通り、水素原子数はパラフィンの方が多く、一方、エポナイトにはパラフィンには存在しないホウ素が含まれる。

X・γ線に対する測定結果については、今回は CCD カメラの損傷が目的であるため、測定値が 1 cm 線量等量で示されるのは相応しくないと考えら、損傷に係る何かしらのレスポンス換算が必要と考えられるが、現状換算方法が判明していないため 1 cm 線量等量のまま示す。パラフィン、エポナイト双方とも X・γ線の遮蔽を目的

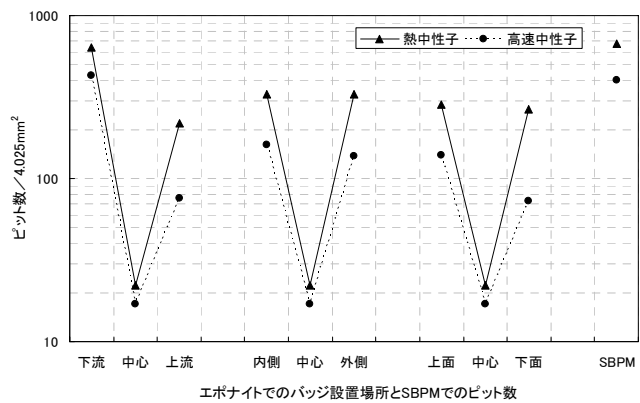
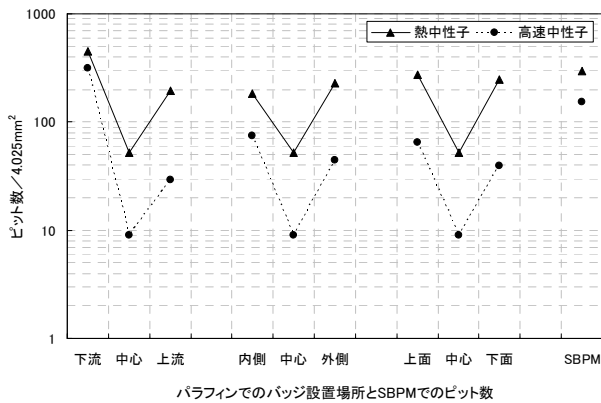


図-4 パラフィン、エポナイトの中性子遮蔽効果

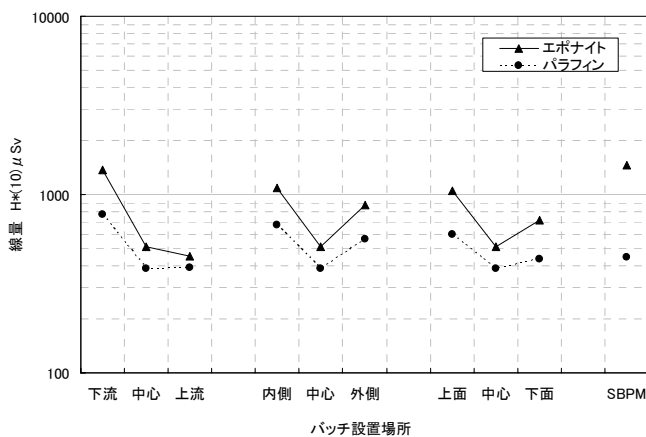


図-5 パラフィン、エポナイトのX・γ線遮蔽効果

として作られた材料ではないため、線量の減衰効果はパラフィンが約 1/2, エポナイトが約 1 / 3 となり、X・γ線に対する遮蔽材料としての性能は低いと考えられる。また、中性子と水素原子等との反応で発生する 2 次γ線の生成量は、水素原子数が少なく、かつホウ素が含まれるエポナイトの方が少ないと考えられることと、X・γ線の遮蔽効果は遮蔽材料の密度に関係するため、エポナイトの遮蔽効果が大きくなっていると考えられる。本来、遮蔽材料の遮蔽効果は中性子と X・γ線のトータルで評価しなければならないが、その評価は今後の課題である。

4. 線源で発生する中性子エネルギーの推定

今回使用した素子で測定できる中性子の最大エネルギーは 10 MeV である。しかし、線源と考えられるビームシャッターから発生する中性子エネルギースペクトルは、入射粒子のエネルギーを考えると、10 MeV 以上の成分も多く含まれることが予想される。前述の通り線源の 1 つであるビームシャッターは 20 cm 厚のアルミ製であり、SBPM との位置関係は後方約 180 度付近に当たる。中村らは、400 MeV/u の炭素を入射した 20 cm 厚のアルミニ

ウムターゲットから生成する中性子の角度分布を測定しているが、測定は 90 度方向までしか行われていない⁴⁾。そこで粒子・重イオン汎用モンテカルロコード PHITS⁵⁾を用いて、炭素 400 MeV/u がビームシャッターに当たった時、175 度方向に生成する粒子の解析を行った。解析では 20 cm 厚のアルミニウムターゲットの 175 度方向にリングディテクタを設置し、リングディテクタで検出された各粒子の生成量とスペクトルを求めた。解析で求めた各粒子の線源粒子当りの生成量を表-3 に示す。表-3 より、中性子の生成と同程度の陽子の生成量があることが判った。

表-3 各粒子の生成量 (weight/source)

陽子	7.23	3重水素	0.233
中性子	6.96	³ He	0.189
α粒子	1.51	光子	0.0613
重水素	0.975		

また、図-6 に、175 度方向に生成された中性子、陽子のスペクトルを示す。

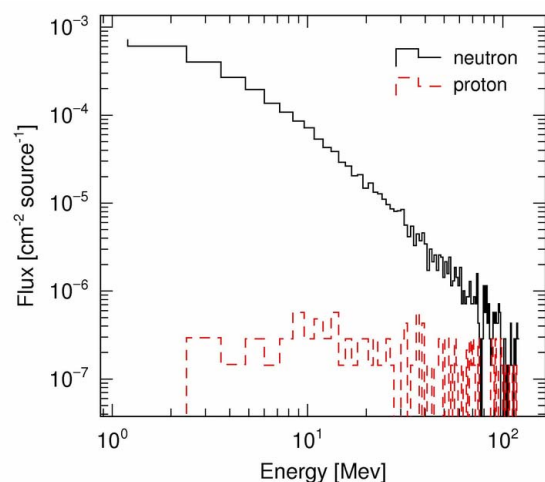


図-6 175 度方向に生成する中性子、陽子のスペクトル

図-6より、ビームシャッターから生成する中性子は100 MeV 付近まで分布していることが判る。遮蔽計算において中性子の線量を求める際に使用する単位フルエンス当りの実効線量換算係数は、原子力学会標準⁶⁾によると、エネルギーが上がるに従い換算係数も上がり、3 MeV~200 MeV にかけてほぼ同じ係数を示している。このエネルギー領域での換算係数は熱中性子より 87 倍程度大きい。よって、人体被曝を対象とするならば 10 MeV 以上の中性子測定が重要になってくるが、CCD カメラを対象とする場合、どのエネルギー領域の中性子が CCD にダメージを与えるか、を把握する必要があると考えられ、今後の課題と考えられる。

5. あとがき

HIMAC 本体室の SBPM がある位置でのエポナイト、パラフィンの遮蔽性能は 10 MeV 以下の中性子に対し、表-2 で示される結果となった。医療用加速器では、ビームシャッターは陽子線、炭素線ともアルミ製であることが多いと思われるが、生成される中性子を正確に把握することは施設建設においても設計の合理化につながると考えられる。また、マグネットでの中性子放出や遮蔽効果もあるため、設計を行うには解析コードを用いた詳細解析も大変有効であると考えられる。しかし、多くの手間と時間がかかるため実務に積極的に使えるとは言えない。そのため簡易的な設計手法の研究開発が望まれると考えられる。

本稿は、放射線医学総合研究所、ハザマ技術研究所、長瀬ランダウア株式会社とで行われた共同研究の成果の一部である。

参 考 文 献

- 1) K. Okuno, *Neutron Shielding Material Based on Colemanite and Epoxy Resin*, Radiation Protection Dosimetry, Vol.115, No.1-4, pp.258-261, (2005)
- 2) 藤澤高志, 高田栄一, 安田仲宏, 野田耕司, 川嶋元, 小林育夫, 奥野功一, CCD カメラの放射線遮へいと HIMAC 室(B2)内の放射線分布, HIMAC-130, (2008)
- 3) 小山謹二, 奥村芳弘, 古田公人, 宮坂駿一, 遮蔽材料の群定数, JAERI-M 6928, (1977)
- 4) T. Nakamura, L Heilbronn, 'Handbook on Secondary Particle Production and Transport by High-Energy Heavy Ion, World Scientific Publishing, (2006)
- 5) H. Iwase, K. Niita and T. Nakamura, Development of General-Purpose Particle and Heavy Ion Transport Monte Carlo Code, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 39, No. 11, pp 1142-1151, (2002).
- 6) 放射線遮へい計算のための線量換算係数, 原子力学会標準, (2004)

Shielding Performance of Neutron Shielding Material Based on Resin in the HIMAC (B2)

Koichi OKUNO, Takashi FUJISAWA, Eiichi TAKADA, Nakahiro YASUDA
Koji NODA, Gen KAWASHIMA and Ikuo KOBAYASHI

Neutron and gamma dose measurement at a CCD camera on the Seat-Beam Profile Monitor (SBPM) in HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) was performed.

Moreover, the measurement of the shielding performance of resin-based shielding material "Eponite" and paraffin was tried at the position of SBPM.

As results, in the case of Eponite, attenuation rate for thermal neutron was 1/30, and that for fast neutron was 1/25. In the case of paraffin, it was 1/35 for fast neutron, and 1/9 for thermal neutron. In addition, the neutron spectrum by carbon of 400 MeV/u was calculated at a beam stopper.