研究論文

サイクロトロン・ビーム輸送室における中性子および γ 線の
空間線量分布の個人被曝測定器による測定山寺 亮^{*1}, 藤田 稔^{*2}, 泉 雄一^{*3}(1986年11月25日受理)
(1987年3月11日再受理)Measurements of Dose Distribution of Neutrons and γ -rays in the Beam
Transportation Room of a Cyclotron Building with Personnel MonitorsAkira YAMADERA,^{*1} Minoru FUJITA^{*2} and Yuuichi IZUMI^{*3}

The distribution of dose equivalents of neutrons and γ -rays emitted by the collisions of 35-MeV protons or 25-MeV deuterons with the copper of an analyser magnet, a chopper or a slit in the beam transportation room of the cyclotron building of Tohoku University were obtained by measurement with personnel monitors such as film badges, TLDs and CR-39 plastic track detectors. The CR-39 detectors were able to determine fast neutron doses without receiving disturbance of γ -rays. As for γ -rays, the readings with the film-badges were higher than those with the TLDs as much as about 20 to 30 percent. This might be due to the over response of the film badges for higher energy γ -rays (more than 1.25 MeV). The doses of neutrons and γ -rays were greatly reduced by the stairs leading to the underground floor. The thermal neutrons showed almost the same values in the room except for the stairs.

KEY WORDS : dose distribution, cyclotron, neutron, γ -ray, proton deuteron, film badge, TLD, CR-39, personnel monitor

I 緒 言

サイクロトロンでは、陽子、重陽子などの荷電粒子を

加速し、目的とする標的へのビーム輸送が行われる。このさい、陽子、重陽子がビームコースの途中にあるアナライザーマグネット、スリット、チョッパーなどの構造物（材質：銅、鉄など）と衝突して、(p, n) (d, n) 反応等を引き起こし、中性子が発生する。また同時に即発 γ 線も発生する。サイクロトロンの施設の設計に当たっては、放射線防護の観点から、これらの発生した中性子と γ 線とを減弱させ、管理区域の境界あるいは施設の境界における線量率が法令で定められた基準に適合するようにしなければならない。発生する中性子のエネルギーは熱中性子から高速中性子まで広い範囲に及ぶが、とくに高エネルギーの中性子の遮蔽・散乱等による線量の減弱については、十分なデータが蓄積されていない現状である。

^{*1} 東北大学サイクロトロン・RI センター放射線管理研究部；宮城県仙台市荒巻字青葉（〒980）
Cyclotron and Radioisotope Center, Tohoku University; Aramaki azaoaba, Sendai-shi, Miyagi-ken.

^{*2} 千代田保安用品(株)；茨城県東茨城郡大洗町成田町3681（〒311-13）
Chiyoda Safety Appliance Co., Ltd.; 3681 Naritacho, Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken.

^{*3} 日本環境調査研究所(株)；宮城県仙台市二日町17-22（〒980）
Japan Environmental Research Co., Ltd.; 17-22 Futukamachi, Sendai-shi, Miyagi-ken.

Table 1 Exposure conditions.

Particle accelerated	Proton	Deuteron
Energy	35 MeV	25 MeV
Electric current		
cyclotron	10~15 μ A	10~15 μ A
after ANA 3*	$(10\sim 15) \times \frac{1}{10}$	$(10\sim 15) \times \frac{1}{10}$
after S ₂ chopper*	$(10\sim 15) \times \frac{1}{10} \times \frac{1}{16}$	$(10\sim 15) \times \frac{1}{10} \times \frac{1}{14}$
Exposure time	3 min	5 min**

* See Fig. 1.

** Except for measuring points 12 and 13, where exposure time was 33 hr.

われわれは、東北大学サイクロترونラジオアイソトープセンターのサイクロトロンのビーム輸送室（電磁石室という）内に発生する中性子および γ 線の空間線量率分布を測定したので、ここに報告する。この部屋は、サイクロترونで加速したビームを各実験室（第2～第5ターゲット室）に振り分け、輸送する部屋であり、各実験条件に合わせてビーム強度の調整が行われている。したがって、速中性子および即発 γ 線の発生量が最も高い部屋となっている。

線量率の測定には電離箱やレムカウンターが広く用いられるが、サイクロترونのようにビーム強度がつねに変動する施設の線量分布測定には不向きであるので、ここでは室内の空間線量率分布を同時に手軽に測定できる検出器として、個人被曝測定器であるフィルムバッジ、熱ルミネッセンス線量計、固体飛跡検出器である CR-39^{1,2)} を使用した。とくに、CR-39 は中性子線と γ 線の混在場においても、 γ 線の妨害を受けないで速中性子線を選択的に測定できる利点をもっている。

II 実 験

1. 中性子および γ 線の発生

中性子および γ 線の発生量は、陽子または重陽子のエネルギーと電流値に依存する。電磁石室内の 51 コースに輸送された陽子と重陽子のエネルギー (MeV) と電流値 (推定値) を Table 1 に示す。51 コースには、Fig. 1 に示すように、アナライザーマグネットやスリット、チョッパー等があり、これらにビームが当たるとその中に含まれる鉄や銅等と反応して、中性子と γ 線とを発生する。ビームが、どの部分でどの程度失われたかについては、正確な測定手段をもたないが、同表の数値がほぼ妥

当な値といわれている。これによれば、アナライザーマグネット-3 でビームの 9/10 が失われ、さらに、S2 チョッパーでは残りの 15/16 (または 13/14) が失われていることになる。検出器を電磁石室内の所定の位置にセットした後、陽子または重陽子の輸送が開始されたが、検出器はビーム輸送開始までの時間内に残留放射性核種 (^{65}Zn が最も多い) から γ 線照射を受けている。しかし、その量は測定値の 10% 以下と推定される。

2. 使用検出器

i) フィルムバッジ：千代田保安用品(株)広範囲用フィルムバッジ (D 型) を使用した。このフィルムバッジのフィルタ (プラスチック, Sn+Pb, Cd+Pb) の下のフィルム濃度から γ 線, β 線および熱中性子線の線量を弁別測定した。なお、本論文において γ 線とは、80 keV 以上の X 線および γ 線を示す。線量評価は千代田保安用品(株)に依頼した。同社によれば、線量評価はフィルムバッジを JIS Z 4511⁸⁾ に基づく一次基準測定器 (ラドコン) で値付けした ^{60}Co で照射して校正し、JIS Z 4509⁹⁾ による方法で線量判定を行っている。

ii) 熱ルミネッセンス線量計 (TLD)： γ 線量測定にはナショナル社製 UD-200 S ($\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$) を使用した。また γ 線と熱中性子の弁別測定用には同社製の UD-136 N ($\text{CaSO}_4 : \text{Tm} + {}^6\text{LiF}$) と UD-137 N ($\text{CaSO}_4 : \text{Tm} + {}^7\text{LiF}$) の組合せを使用した。線量の評価は、ナショナル社製のリーダー (UD-502 B) により行った。 γ 線の校正は、線源として国家標準により校正した一次基準測定器 (ラドコン) で値付けした ^{60}Co を用い、JIS Z 4511 の方法で照射して校正したものであるが、熱中性子の線量はマニュアルに従い、UD-137 N と UD-136 N の読みの差を 25 で除して得られた値である。

Fig. 1 Arrangement of magnets, beam stoppers, slits, choppers, etc. in the electromagnet room. Protons and deuterons were transported in the upper beam course (51 course). ANA: analyzer magnet, SL(H.V.): slit (horizontal, vertical), SW: switching magnet, BS: beam stopper, S-mag: steering magnet, Q-mag: quadrupole magnet, AL: alumina monitor, PM: profile monitor, arrows ($\rightarrow$) show the direction of beams.

iii) CR-39: 千代田保安用品(株)のニュービットバッジ (CR-39) を使用した。線量評価は国家標準により、中性子放出率を校正された $^{241}\text{Am-Be}$ によって、CR-39 を 50cm の距離において行った。線源と壁との距離は約 6m あり、壁からの中性子散乱は無視した。CR-39 は速中性子用の NTA フィルムと異なり、相当量の γ 線の存在下でも、速中性子の線量が測定でき、0.17 MeV から 14 MeV までの中性子線量当量に対し、ほぼ一定の感度を有する²⁾。しかし、このエネルギー範囲外の中性子はほとんど検出できない。CR-39 の感度測定は国家標準により中性子放出率を校正された $^{241}\text{Am-Be}$ で、50cm の距離において行われ、線量当量もその中性子のエネルギースペクトルが $^{241}\text{Am-Be}$ のそれと等しいものとして、算出されている。このことを忘れてはならない。

測定器の精度は ^{60}Co を 30cm の距離で 200 mR 照射して、フィルムバッジでは平均値から最大で 6% のばらつきがあった。また、TLD はばらつきが 10% 以上の素子は測定から除外した。

3. 測定場所

中性子、 γ 線の発生箇所を推定し、壁、天井による散乱階段による減弱等を知るため、Fig. 2 a, b に示す場所に検出器を配置した。フィルムバッジ、熱ルミネッセンス線量計および CR-39 は一つの薄いビニール袋に互いに重ならないように収容し、床上 1m の位置にスタンド

で吊下げた。ただし、天井、壁および扉については、これらの表面に直接、検出器の入った上記の袋をビニールテープで固定した。

III 結 果

電磁石室内の中性子および γ 線の線量は、輸送される陽子または重陽子のエネルギー、電流の大きさおよび照射時間によって当然異なる。陽子については、本実験では 3 回の測定を行ったが、陽子 35 MeV による結果の一例を Fig. 2, 3, 4 に示す。照射時間が異なったため 3 回の測定の間で線量値は異なったが、場所の相対値はほぼ等しかった。重陽子については 1 回のみの測定であり、その結果を Fig. 3, 4, 5 に示す。Fig. 2, 5 に示すように、 γ 線の線量当量の測定値は、フィルムバッジと TLD との間で相違が見られた。熱中性子の線量はフィルムバッジと TLD で相違は見られなかった (Fig. 3 参照)。Table 1 によれば中性子の発生は、アナライザーマグネット 3 付近で最も多いことが予想されるが、Fig. 4 に示した CR-39 によって測定された速中性子の線量当量値から推定すると、速中性子の発生方向は測定点 3, 4 方向よりもむしろ S2 チョッパーあるいはスリットの方へ発生しているようである。 γ 線と速中性子線の線量当量は階段によって大きく減少し、放射線防護上、階段は緊急の場合の避難場所としてもきわめて有用

Fig. 2(a)

Fig. 2(b)

Fig. 2 Arrangement of detectors and γ -ray doses in mrem in the electromagnetic room (a : plane figure, b : cross sectional view) with 35 MeV protons. Circles (●) show the points measured and arrows (→) attached to the circles the directions of the detectors. Detectors were set at 1 m high except for Nos. 5 and 6. Figures from the upper line to the lower show those obtained with film badges, TLDs (UD-200 S) and TLDs (UD-137 N), respectively. — : not measured.

である。熱中性子線量当量は、場所による差が速中性子ほど小さくなく、階段を除いてほぼ等しい値を示している。また、**Fig. 4** に示した測定点 12 と 13 の結果から

推定すると、直角方向と鉄扉 (10 mm 厚) による速中性子線量当量の減弱は著しい。なお、 β 線および 80 keV 以下の γ 線、X 線はフィルムバッジによる測定では、い

Fig.3(a)

Fig.3(b)

Fig. 3 Thermal neutron doses in mrem with 35 MeV protons and 25 MeV deuterons. The upper line figures show the data with film-badges, and lower those with TLDs. Figures in parentheses show those on deuterons. — : not measured.

ずれの測定点においても検出されなかった(検出限界 10 ミリレム)。

IV 考 察

使用した CR-39 はエネルギー 0.17~14 MeV の中性子に対し、ほぼ一様の感度をもつが、上記の範囲の外のエネルギーの中性子はほとんど検出できない。そのため、中性子の線量当量の評価では陽子が衝突するアナ

イザーマグネット、チョッパー、およびスリットの鉄や銅から生ずる中性子のエネルギースペクトルが問題となる。

中村らの研究³⁾によれば、30 MeV の陽子を銅ターゲットに照射して発生する中性子のエネルギースペクトルは、いずれの放出角度についても、1.7 MeV 近傍にピークを有し、かなりシャープな分布をしている。本実験の陽子のエネルギーは 35 MeV であるため、発生する中性

Fig. 4(a)

Fig. 4(b)

Fig. 4 Fast neutron doses in mrem with CR-39. Figures outside and in parentheses show the data obtained with 35 MeV protons and 25 MeV deuterons, respectively, datum in the bracket was obtained with a rem counter. — : not measured.

子のエネルギースペクトルは 30 MeV の場合のスペクトルとは若干の相違はあるとしても、著しい相違はないものと思われる。一方、泰らのデータによれば、33 MeV の重陽子照射によって Cu が発生する中性子スペクトルは重陽子入射に対し放出する角度によって著しい差違が見られる⁴⁾。0° 方向では 12 MeV 付近にピークをもち、比較的なだらかな分布を示すが、45° より大きい角度では 2 MeV 付近にピークがあるかなりシャープな分布となっている。したがって、現場の各地点に直達する中性

子のスペクトルは場所ごとに異なっていると考えられる。これらの中性子は電磁石室内で散乱、吸収を繰り返し、しだいにエネルギーを失い最後には熱中性子となる。

使用した CR-39 による線量当量測定は 0.17~14 MeV 領域の中性子を対象としている。したがって、正確な中性子の線量当量を評価するためには、室内の中性子スペクトルを測定することにより、0.17 MeV 以下あるいは 14 MeV 以上の中性子の全線量当量への寄与を知る必要

Fig.5(a)

Fig.5(b)

Fig. 5 Gamma-ray doses in mrem with 25 MeV deuterons. Figures from the upper line to the lower show those with film badges, TLDs (UD-200 S), TLDs (UD-137 N) respectively. — : not measured.

がある。

γ 線の線量当量の評価において、フィルムバッジの読みが、TLDのそれより20~30%程度上まわる場合が多い。この原因については、フィルムバッジのエネルギー依存性と方向依存性があげられる。

1) エネルギー依存性 使用したフィルムバッジ(千代田広範囲用D型)では、Sn+Pbフィルタの下フィルム濃度から、 ^{60}Co の γ 線(平均1.25 MeV)を基準に線量が評価されたが、 γ 線のエネルギーが高くなるにつ

れて、相対感度が上昇する⁵⁾。たとえば、 ^{60}Co の γ 線を1とすると、3.3 MeVで約1.7倍、5~10 MeVで約2倍となる。各測定点における、 γ 線の1.25 MeV以上の線量の全 γ 線量に対する割合については、今回とくに測定はしなかったが、陽子、重陽子がCuに衝突して発生する γ 線には、かなり高エネルギーの成分が含まれている^{4,6)}。このため、フィルムバッジにより測定値が、エネルギー依存性の少ないTLDのそれよりも大となる可能性がある。この問題を避けるためには、エネルギー依

存性の少ない高エネルギー用のフィルムバッジを使用すべきであった。

2) 方向依存性 各測定点には、散乱により多くの方向から γ 線が入射しているはずである。フィルムバッジでは、基準とする正面からの照射に対し、斜め後方からの照射では、約2割相対感度が上昇しており、また横方向からの照射を除き、多くの照射方向でも相対感度が上昇している⁷⁾。このため、現場での γ 線の入射方向は不明であるが、入射方向によっては、フィルムバッジでは測定値がいくらか大きくなる可能性がある。

本研究のデータの解析に関し、千代田保安用品(株) 松本 進 大洗研究所長には、種々の示唆をいただきました。ここに深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) エッチピット線量計の開発状況について、千代田保安用品フィルムバッジニュース, No. 119, p. 15 (1985).
- 2) 寿藤紀道, 磯部吟子, 大口裕之; CR-39 を用いた高速中性子モニタの開発, 日本保健物理学会第21回研究発表会要旨集, p. 11 (1986).
- 3) T. NAKAMURA, M. FUJII and K. SHIN; Neu-

tron production from thick targets of carbon, iron, copper, and lead by 30- and 52-MeV protons, *Nucl. Sci. Eng.*, **83**, 444 (1983).

- 4) K. SHIN, K. HIBI, M. FUJII, Y. UWAMINO and T. NAKAMURA; Neutron and photon production from thick targets bombarded by 30-MeV p, 33-MeV d, 65 MeV ^3He , and 65-MeV α ions: Experiment and comparison with cascade Monte Carlo calculations, *Phys. Rev., C*, **29**, 1307 (1984).
- 5) 日本保安用品協会; 放射線被ばく登録管理を目的とした被ばく線量当量評価に関する試験研究, 昭和 50 年度原子力平和利用研究委託成果報告書 (1975).
- 6) T. NAKAMURA, M. YOSHIDA and K. SHIN; Spectral measurements of neutrons and photons from thick targets of C, Fe, Cu and Pb by 52 MeV protons, *Nucl. Instrum. Methods*, **151**, 493 (1978).
- 7) 福田光造; 私信.
- 8) 照射線量測定器の校正方法, JIS Z 4511.
- 9) γ 線及び硬X線フィルムバッジの取扱方法, JIS Z 4509.