

中間エネルギー領域の陽子加速における 放射線遮蔽

(高エネルギー物理学研究所) 伴 秀一

1. はじめに

大型の陽子加速器では、ビームライン前方にビームストップ（通例は鉄など）が置かれ、側方にはコンクリートと盛土から成る側壁が置かれる。ビームストップが終端に数点あるだけなのに対し、側壁は全体に及ぶ。このため側面の遮蔽がより重要である。

加速された陽子が物質内にはいると核内カスケード・蒸発を次々に起こし、加速管・遮蔽体等の中でハドロンカスケードがおこる。100 MeV 以上では中性子の非弾性散乱断面積はほぼ一定で、その減衰は単一の指数関数で近似できる。低エネルギー中性子はこの 100 MeV 以上の中性子によって生成され、光子は主に低エネルギー中性子によって生成されるが、どちらもより速やかに減衰する。このためある程度の厚さの物質を透過した後では、透過力の強い約 100 MeV 以上の中性子が全体の減衰の振舞いを決定する。1 GeV 以上の高エネルギー加速器の側壁では、遮蔽体内の減衰率は陽子エネルギーや角度に依らず一定と考えられており、この考えに基づき実測値を整理した「Moyer モデル」^{1,2,3)} が遮蔽設計に用いられている。

ここでとりあげる加速エネルギー 100~1000 MeV の中間エネルギー領域の陽子加速器の場合は、100 MeV 以上の中性子の発生が少なく、一群的な減衰モデルが使えない。二次中性子の減衰は、入射陽子エネルギーや角度によって変わるため現象が複雑で、設計にも「Moyer モデル」のような統一的な手法はない。ここではいくつかの中性子測定法と簡易な設計法を紹介する。

2. 中性子の測定法

陽子加速器遮蔽からの漏洩放射線については、幾つかの研究がある⁴⁾。中性子は熱中性子エネルギーから 100 MeV 以上まで幅広いエネルギー分布を持つが、普通コンクリートの側壁遮蔽がある場合は 0.1~15 MeV の中性子による線量当量が全体の約 50% を占める⁴⁾。これは蒸発中性子が多いためである。この測定には減速材付きの熱中性子検出器が用いられる。減速材は通例ポリエチレンで、検出器は BF₃ 比例計数管または ³He 計数管が多い。また「レムカウンタ」とよばれる感度曲線が線量当量応答に近い型の検出器も用いられている。

パルス状の中性子が発生する場合は、パルスの瞬間の中性子束が高く、比例計数管では不感時間による数え落しが多くなる。減速材付き検出器は中性子が入射してから計数されるまでに減速・熱化・拡散に時間を要し、中性子パルスの時間幅が引き延ばされたのと同様の効果があるため、パルス場に適している。しかし「レムカウンタ」は減速材内部に吸収材を含むため拡散時間が短く、他よりもパルス場に弱い。加速器での減速材付き検出器の数え落しの補正法も幾つかあるが、特に強いパルス場では減速材に TLD やインジウム箔など積分型の検出器を入れて用いられている。

減速材付き検出器は、20 MeV 以上の中性子に対しては感度が落ちる。これを補正するため $^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$ 反応を利用する放射化検出器が用いられている。この反応の実効しきいエネルギーを 20 MeV とし断面積は一定で 22 mb として、20 MeV 以上の中性子束を評価することが、古くから行われている。この断面積の値にも問題があるが、線量当量を評価する場合に更に大きな誤差を含む。 ^{11}C を利用して求めた 20 MeV 以上の中性子束を線量当量に変換する際には多くの問題点があるが、 $1.0 \mu\text{Sv h}^{-1} \text{ per } 1 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の値が多く用いられている^{4,5)}。

$^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$ 反応を高感度で測定するために、プラスチック・シンチレータが古くから用いられている。照射したシンチレータを素早く光電子増倍管にマウントしてシンチレータ中に生成した ^{11}C (半減期 20.4 分) からの β^+ を直接計測する。図 1 に 5" ϕ $\times$ 5" のシンチレータを用いて高工研で測定された波高分布の例を示す。 $1 \sim 10 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の低レベルまで測定可能である。このとき空気中に生成する ^{13}N は β^+ 放出核であり非常に付着しやすいので、シンチレータに付着していないか注意を要する。

他に高いしきいエネルギーをもつ反応で測定に利用されているのは $^{27}\text{Al}(n,\text{Spal.})^{18}\text{F}$ 、 $^{27}\text{Al}(n,\text{Spal.})^{22}\text{Na}$ 、 $^{12}\text{C}(n,\text{Spal.})^7\text{Be}$ など (実効しきいエネルギーは各々 50、30、40 MeV) や銅のスプレーション反応があるが、核データの精度は良くなく、感度の点では $^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$ 反応におよばない。

3. 簡易な遮蔽設計法

加速器の体系は、ターゲット部とそれを囲む遮蔽の部分に分けて考えられる。ターゲット部となるのは、加速管・ビームストップなど入射陽子の飛程ぐらいの厚さの部分である。この部分からの二次中性子の発生量に関しては、多くのデータがあり、核内カスケード・蒸発モデルに関しても、最近も多くの研究がある。

これに較べて遮蔽部での二次中性子の透過については、普通コンクリート遮蔽に関するデータが少しあるだけで、いくつかの実験値^{6,7)}、核内カスケード・蒸発モデルによるモンテカルロ・コード HETC⁸⁾ による計算値、Sn 輸送計算コード ANISN と 400 MeV までの中性子群定数セット DLC-87⁹⁾ による計算値、O'Brien による計算値¹⁰⁾ などである。高工

研で測られた 500 MeV 陽子の鉄製ビームストップを囲むコンクリートに対する中性子減弱距離と放出角度との関係を図2に示す。このように角度によっても減弱距離が変わってしまうのが中間エネルギー領域の特徴である。

これらのデータをまとめて簡易な遮蔽設計式にしたものが、いくつかある。Tesch¹¹⁾ は 30~1000 MeV の領域で銅・鉄ターゲットの側面にコンクリートがある場合の線量当量を O'Brien、Alsmiller⁷⁾、Braid¹²⁾ の計算値、高工研の実験値⁹⁾ を基にまとめている。Braid¹²⁾ は 同じく 50 ~ 400 MeV で Alsmiller、O'Brien のデータを用いている。Hagan¹³⁾ は 150~250 MeV で HETC、ANISN、DLC-87 を用いて計算して、ターゲット物質が鉄の場合と水の場合で線量当量に差が無いことを示している。

中間エネルギー領域の加速器では、加速エネルギーが一定でもより大強度になり遮蔽の厚さが増すと、遮蔽が薄い場合の設計式を単純に外挿しては、線量当量を過小評価する可能性がある。このため実規模に近い施設の線量当量の実測値と較べるのが良いが、適当な実測値が無い場合は、HETC などの計算結果に安全ファクターを加えて、遮蔽設計がされている。

参考文献

- 1) G.R. Stevenson, Liu Kuei-Lin and R.H. Thomas, Health Phys., 43, 13 (1982)
- 2) S. Ban and H. Hirayama, KEK Internal 80-9 (1980)
- 3) J.B. McCaslin, W.P. Swanson and R.H. Thomas, Nucl. Instr. Meth., A256, 418 (1987)
- 4) J. Baarli and A.H. Sullivan, Health Phys., 11, 353 (1965)
- 5) G.R. Stevenson, Health Phys., 47, 837 (1984)
- 6) S. Ban, H. Hirayama and K. Katoh, Nucl. Instr. Meth., 184, 409 (1981)
- 7) R.G. Alsmiller Jr., R.T. Santoro and J. Barish, Part. Accel., 7, 1 (1975)
- 8) RSIC Computer Code Collection, CCC-496, RSIC, ORNL (1983)
- 9) RSIC Data Library Collection, DLC-87, RSIC, ORNL (1981)
- 10) K. O'Brien, HASL-203, USAEC Health and Safety Lab. (1968)
- 11) K. Tesch, Radiat. Prot. Dosim., 11, 165 (1985)
- 12) T.H. Braid et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-18, No.3, 821 (1971)
- 13) W.K. Hagan et al., Nucl. Sci. Eng., 98, 272 (1988)

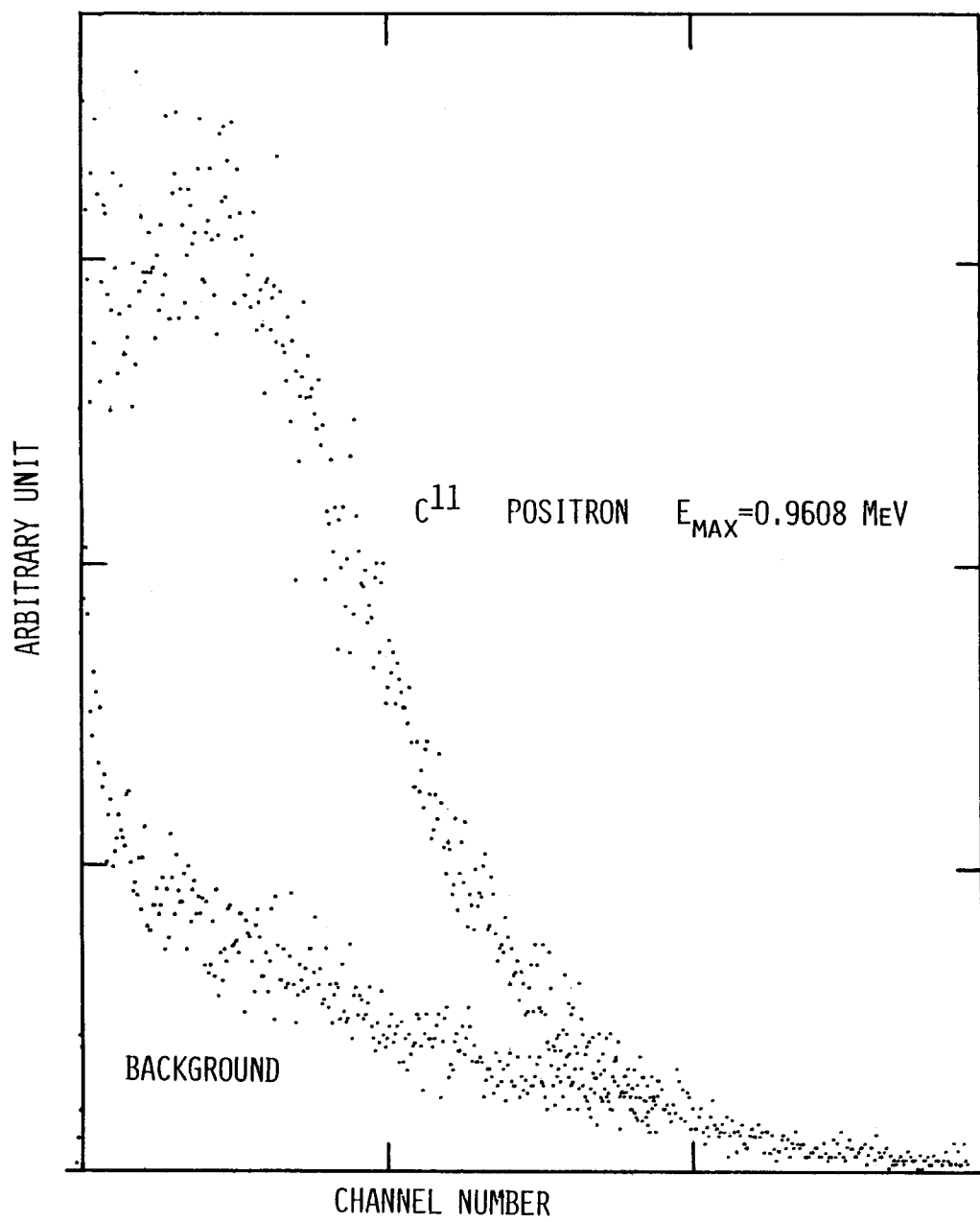


図1 5"φ×5"のプラスチック・シンチレータ中に¹²C(n, 2n)¹¹C反応で生成した¹¹Cからのβ⁺による波高分布の例。バックグラウンドを同時に示す。

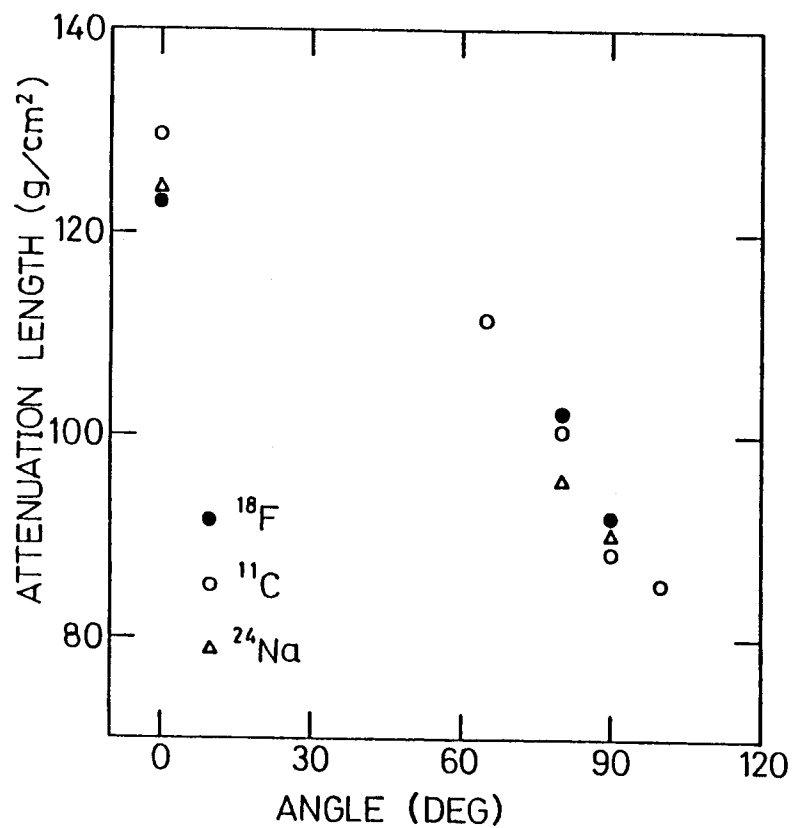


図2 高エ研で測られた 500 MeV 陽子の鉄製ビームストップを囲むコンクリートに対する二次中性子減弱距離と放出角度との関係。放射化検出器 ($^{27}\text{Al}(\text{n}, \text{Spal.})^{18}\text{F}$, $^{12}\text{C}(\text{n}, 2\text{n})^{11}\text{C}$, $^{27}\text{Al}(\text{n}, \alpha)^{24}\text{Na}$) による中性子束の測定結果から得られたもの。