

氏 名	石 川 敏 夫
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 5 年 5 月 12 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 57 年 3 月 名古屋大学大学院工学研究科原子核工学専攻 前期課程修了
学 位 論 文 題 目	数 10 MeV 陽子加速器施設に於ける中性子遮蔽設計計算法 の実験的評価に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 中村 尚司 東北大学教授 平川 直弘 東北大学教授 北村 正晴 東北大学助教授 馬場 護

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

加速器は近年、研究用から産業用へと利用分野が広がりその設置数が増加している。その大部分は加速エネルギー100MeV以下であり、特に医療分野においては数10MeV程度の陽子・イオン加速器を利用して放射性医薬品の製造を行う施設が増加している。

加速器施設では中性子、ガンマ線等の放射線が発生するため、施設の建設に当たっては放射線に対する遮蔽設計が必要である。その遮蔽計算に使用される放射線の伝搬に関するデータの内、エネルギー15MeV以上の中性子に関しては評価済みの断面積データセットはなく、現在利用できる断面積データセットはDLC-87程度である。DLC-87の15MeV以下の中性子に関するデータは十分実証されているが、15MeV以上に関しては実験データが不十分のためその精度はよく調べられていない。

このように、評価済みの断面積データセットがないため、加速器施設の遮蔽設計では設計式を用いた遮蔽計算が一般的に行われる。遮蔽体透過に関する設計式では、Moyerモデルに基づいて線量当量の減衰を計算するものが良く用いられ、その中で線量当量が $1/e$ に減衰する遮蔽体厚さ λ が重要なパラメータになる。しかし、この λ に関する実験データも不十分である。

迷路漏洩中性子に関する設計式では多くの式が提案されているが、それらの相互比較はされておらず、実験値もエネルギースペクトルを測定したものが少ない。

スカイシャインに関しては、中村・林により精度の良い設計式が提案されている。

遮蔽設計においては、機器、構造物材、空気及び水中に生成される誘導放射能の評価も欠かせない。空气中に生成される ^{41}Ar の評価には室内の熱中性子束の値が必要である。それを計算する式も提案されているが、その精度は実験的に評価されていない。

本研究では、35MeV及び25MeV陽子を用いて準単色中性子を生成し、鉄及びコンクリート遮蔽体透過中性子を数10MeVから0.4 eVまで測定してベンチマーク実験データを提供し、さらにDL C-87を用いた計算との比較及び λ の評価を行った。次に迷路を漏洩する中性子のスペクトルを熱中性子まで測定し、設計式の検証を行った。最後にコンクリート室内で多重散乱によって減速した熱中性子の測定を行い、設計式を検証した。

第2章 実験に使用した検出器とその応答関数

数10MeVから熱エネルギーに至る中性子エネルギースペクトルと線量当量を測定するために、本研究では5種類の検出器を使用した。有機液体シンチレーションカウンタ（NE-213）では、数10MeVから1MeV付近までのスペクトルを測定した。これはガンマ線スペクトルも測定できる。その応答関数にはモンテカルロコードによって計算されたものを用い、FERDOUコードによりアンフォールディングしてスペクトルを求めた。

反跳陽子比例計数管では、他の検出器では測定するのが困難な約2 MeVから約100keVまでのスペクトルを測定した。その応答関数は計算されたものを用い、アンフォールディングにはFERDORコードを用いた。

球形多減速材付スペクトロメータ（ボナーボール）では、数10MeV から熱エネルギーまでの広範囲のスペクトルを測定した。これは検出効率は高いがエネルギー分解能が悪いという欠点があり、アンフォールディングには初期推定スペクトルも必要である。この応答関数の計算結果をFig. 1に示す。アンフォールディングにはSAND-IIコードを使用した。

放射化検出器では、しきい検出器と熱中性子検出器により各々約1MeV以上の中性子と熱中性子を測定した。これらの応答関数は放射化断面積であり、しきい検出器からは初期推定スペクトルを与えてSAND-IIコードでアンフォールディングすることにより中性子スペクトルが求められ、熱中性子検出器からはカドミウム差法により熱中性子フルエンスが求められる。

線量当量検出器では、その応答関数を中性子束一線量当量換算係数のエネルギー特性に相対的に合うようにすることにより、線量当量が直接測定できるようになっている。

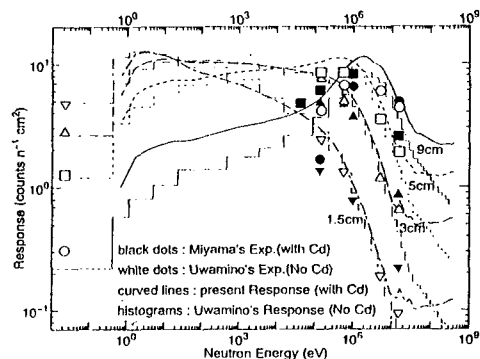


Fig. 1 ボナーボールの応答関数

第3章 準単色中性子の鉄およびコンクリート透過実験

これまでの15MeV以上の中性子に関する遮蔽体透過実験は、ターゲット生成中性子スペクトルが連続スペクトルであり、且つ測定中性子エネルギー範囲が数MeV以上、というものしか存在しなかった。

本実験では、 $p\text{-Li}$ 反応から生成する準単色中性子を遮蔽体に入射させ、NE-213、反跳陽子比例計数管、及びボナーボールで数10MeVから0.4eVまでの広い範囲の遮蔽体透過中性子スペクトルを、はじめて測定した。陽子はサイクロトロンで35MeVと25MeVに加速し、遮蔽体は鉄とコンクリートの試験体を用いた。

鉄遮蔽体を透過した中性子の測定スペクトルをFig.2に示す。33MeVには ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応生成単色中性子ピークが、1MeV付近には広いピークが見られる。この広いピークは、それより高エネルギーの中性子が鉄との非弾性散乱により1MeV付近に減速するが、1MeV以下では鉄との弾性散乱のため減速幅が非常に僅かとなり且つその前方性が強くなるため、現れていると考えられる。これは、ベンチマーク実験データとして非常に有用である。

Fig.2にはモンテカルロコードMORSE-CGと断面積ライブラリーDLC-87で計算したスペクトルも示した。計算したスペクトルは数MeV以下で過小評価しているが、これはDLC-87において15MeV以上の中性子の弾性外散乱による前方散乱成分が過小評価されているためと考えられる。遮蔽体厚さに対する線量当量の減衰をFig.3に示す。これから線量当量減弱距離 λ が求められ、貴重なデータを与えた。ガンマ線のコンクリート中での減衰は中性子より緩やかであり、大きな厚みではその線量当量への寄与も無視できないことが明らかになった。

第4章 中性子の迷路漏洩実験

加速器施設内の迷路を漏洩する中性子の減衰を計算する設計式の検証のために、以下のような実験を行った。サイクロトロンで35MeVに加速した陽子を銅製のビームストッパーに衝突させて中性子を発生させ、サイクロトロン室に連結した迷路で、ボナーボールにより数10MeVから熱エネルギーまでの中性子スペクトルを、中性子線量当量計により線量当量を測定した。

測定された中性子スペクトルをFig.4に、線量当量の迷路長さに対する減衰をFig.5に示す。線量

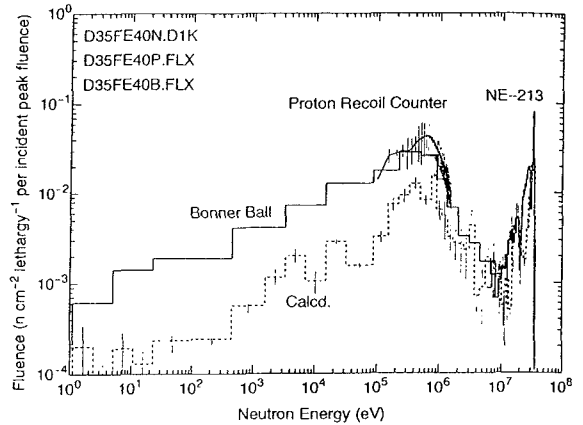


Fig. 2 鉄透過中性子スペクトル

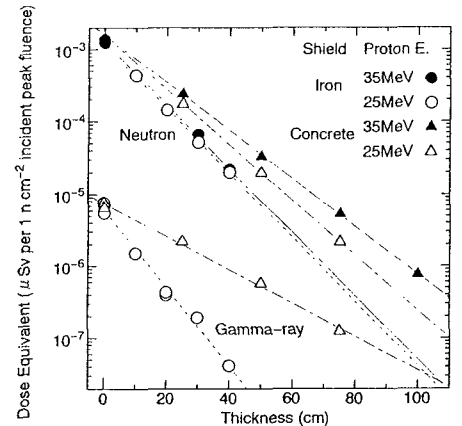


Fig. 3 遮蔽厚に対する線量当量の減衰

当量は迷路の入口から出口までの15m余りの間に6桁も減衰しており、その間の各位置において熱中性子までのスペクトルを測定することができた。また迷路出口において全線量当量に対する熱中性子の寄与は62%であった。

図には、モンテカルロコードMORSE-CG、設計式のうち秦の式、Goebelの式及び中村・上蓑の式による計算結果も示す。秦の式は、絶対値を過大評価するが、エネルギースペクトルを計算できその形状は実験値に近い。線量当量の減衰ではGoebelの式が最も良く実験値と一致した。中性子発生室内の分布においては、中村・上蓑の式は実験値と良く一致している。

以上の結果より、中性子発生室においては中村・上蓑の式を、迷路ではGoebelの式を使用することにより、精度の良い迷路の遮蔽設計ができることが明らかになった。

第5章 室内多重散乱により熱化した中性子の測定

加速器により生成した高エネルギー中性子は、周囲のコンクリートとの多重散乱により減速し、熱中性子として室内に反射する。熱中性子は $^{40}\text{Ar}(n, \gamma)$ 反応により、室内空气中に誘導放射能 ^{41}Ar を生成し、作業員及び換気を通じて施設外の公衆にガンマ線被曝をもたらす。この室内の熱中性子束 ϕ_{th} はPatterson等により、生成中性子数 Q と室内表面積 S を用いて、 $\phi_{th} = c \cdot Q / S$ ($\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)と表された。ここで c は係数であり、Patterson等は1.25の値を与えている。しかし、この式の精度はこれまで実験的に評価されていない。

本研究では、上式の精度を評価するために実験を行った。サイクロトロン施設では、30MeV陽子を銅製のビームストッパーに衝突させて中性子を生成し、熱中性子を金箔を用いたカドミウム差法により測定した。ダイナミトロン施設では、 $d-T, d-D, p-T$ 反応によりそれぞれ平均エネルギー14.1, 3.35, 0.52MeVの準単色中性子を発生させ、 ^3He 検出器を用いたカドミウム

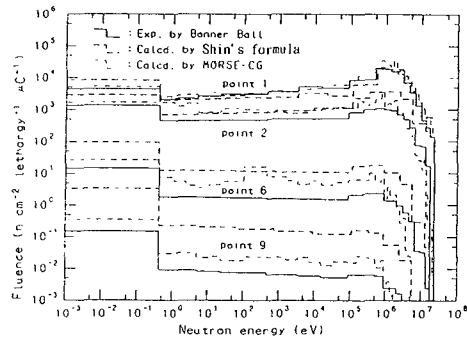


Fig. 4 中性子スペクトル

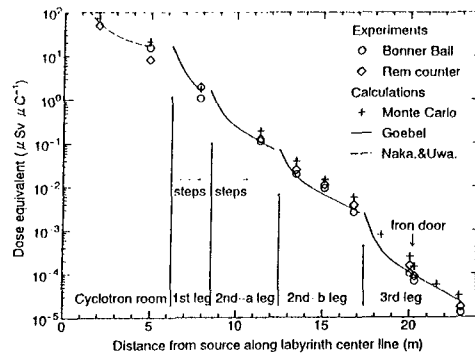


Fig. 5 迷路長さに対する線量当量の減衰

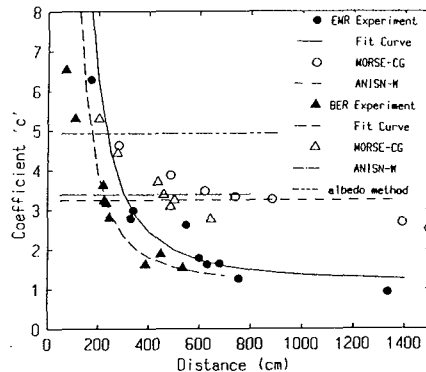


Fig. 6 距離に対する c の値

差法により熱中性子を測定した。その結果のうち、線源からの距離に対する係数 c の値をFig.6に、線源中性子エネルギーに対する係数 c の値をFig.7に示す。

c は部屋の大きさや形状には依存しないが、線源からの距離や線源エネルギーによって大きく変化することがわかった。輸送計算との比較検討の結果、線源エネルギー400 MeVから1keVの間で室内空間での平均値として、 c の値を4とすることが妥当であるとの結論に達した。

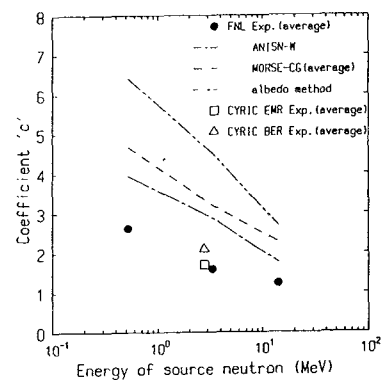


Fig. 7 線源エネルギーに対する c の値

第6章 まとめ

以上、本研究により、数10MeV陽子加速器施設の遮蔽設計に於いて不十分であったデータのうち15MeV以上の準単色中性子を線源とした鉄とコンクリート遮蔽体透過ベンチマーク実験データを初めて求めた。また、精度が十分に評価されていなかった遮蔽設計式のうち、中性子迷路漏洩設計式の精度を、実験と計算により明らかにし、最も精度の良い設計式を推薦した。さらに、室内多重散乱によって熱化した中性子に関する設計式の精度を初めて実験と計算により検討し、その係数を修正した。

審査結果の要旨

数10MeV陽子加速器施設は近年核医学利用を中心に急速に増加しており、大強度陽子ビームを使用するため、それに伴って放出される中性子、ガンマ線に対する遮蔽設計が重要になっている。しかし、15MeV以上の高エネルギー中性子に関しては、断面積データが不十分なため遮蔽設計計算の精度評価がほとんどなされていない。

本論文は、東北大学サイクロトロン加速器を用いて、遮蔽設計上特に重要な高エネルギー中性子の遮蔽体透過、迷路からの漏洩、室内熱中性子分布の3点について、線源条件の明確なベンチマーク実験を行い、設計計算式の精度を実験的に検証したもので全編6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景を述べている。

第2章では、実験に使用した5種類の中性子検出器の特性と応答関数について述べている。数10MeVから熱エネルギーに至る、10桁近い広エネルギー領域の中性子エネルギースペクトルと線量当量を測定するために、この5種類の検出器の応答関数を計算により求め、それらと組合せてスペクトル解析を行う手法を述べている。

第3章では、サイクロトロンで ${}^7\text{Li}(p, n)$ 反応により発生させた22MeV、33MeV 準単色中性子の、鉄及びコンクリート遮蔽体透過実験について述べている。入射中性子の遮蔽体透過による、中性子及び2次ガンマ線のエネルギースペクトルの変化と、線束及び線量当量の減衰を鉄及びコンクリートの厚さの関数として求めている。これらの実験データを精度よく得るために、データの発散を防ぐ様々な解析上の工夫を行っている。さらに、現在15MeV以上で唯一存在する断面積データを用いてモンテカルロ計算を行った結果と比較し、この断面積データの精度評価を行い、その問題点を指摘している。この実験は、線源条件が明確な、15MeV以上の単色中性子物質透過に関する世界で初めてのベンチマーク実験であり、これにより与えられた線量当量減弱距離は、加速器施設の遮蔽壁の設計に直ちに利用できる重要な量である。

第4章では、33MeV準単色中性子の迷路漏洩実験について述べている。サイクロトロン本体室とそれに連結する2回屈曲した3つの脚からなる迷路を漏洩する中性子を、球形多減速材付スペクトロメータにより測定し、数10MeVから熱エネルギーまでの中性子スペクトルと線量当量を求めている。この実験値とモンテカルロ法による計算値に基づき、現在広く使用されている4種類の設計式を比較・検討している。その結果、中性子発生室においては中村・上叢の式が、迷路においてはGoebelの式が、最もよい結果を与えることを明らかにし、この両式を結び付ける設計式を提案している。

第5章では、サイクロトロン及びダイナミトロンの2つの加速器施設のコンクリート室内で、多重散乱により熱化した中性子の分布を、放射化検出器及び ${}^3\text{He}$ カウンターで測定している。この実験値に基づき、広く使用されていながら、その精度評価がこれまでほとんどなされていなかったPattersonらの設計式の精度を評価し、この式で使用していたパラメータの値を修正している。この結果、熱中性子によって室内空気中に生成する誘導放射能 ${}^{41}\text{Ar}$ の評価を精度よく行うことが可能となった。

第6章は総括である。

以上、要するに、本論文は従来設計計算法の精度評価がほとんどなされていなかった、高エネルギー中性子の物質透過、迷路漏洩、室内熱中性子分布について実験的評価を行い、数10MeV陽子加速器施設において最適な設計計算式や設計パラメータを与えたもので、原子核工学、加速器工学の発展に寄与するところが少なくない。よって本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。