加速器遮蔽研究の諸問題

(東京大学原子核研究所) 中村 尚司,

(高エネルギー物理学研究所) 平山 英夫, 伴 秀一

最近の加速器の広範な利用と大型化に伴い、加速器遮蔽が重要な問題になりつつある。加速器を電子加速器と陽子加速器とに分け、さらに加速エネルギーにより分類して、加速器遮蔽研究における次の4つの課題、(1)断面積データ、(2)中性子・ γ 線生成、(3)遮蔽、(4)残留放射能について、おのおのの研究の現状をサーベイし、問題点を指摘して解説する。今後の研究に対する指針となることを期待している。

I. はじめに

近年、加速器の広範な利用が急速に増大し、加速エネルギーやビーム強度の増加も著しい。それに伴い加速器から発生する放射線の量が増え、環境放射線量の規制の強化とも相まって遮蔽が建設コストの大きな部分を占めることから、加速器遮蔽に関する研究が重要な位置を占めつつある。これまで遮蔽といえば原子炉を対象とするものがほとんどであり、わが国においては加速器遮蔽に関する研究はほとんど行われていなかった。今後大型加速器の建設計画が相次いでいる状況に鑑み、加速器遮蔽研究の現状と問題点に関してサーベイを行なった。著者らの知り得た範囲内の不十分なサーベイであるが、今後の研究の指針になれば幸甚である。なお、より詳しい情報を必要とされる読者のためにはいくつかの本が出版されている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。

II. 遮蔽研究から見た加速器の分類

加速器遮蔽研究の対象という観点から見ると、加速器は大きく2つに分類される。

1. 電子加速器

電磁カスケードにより放出される制動放射線と、光核反応により放出される光中性子とが遮蔽研究の対象となる。さらに、光核反応の機構が γ 線エネルギーによって大きく異なっていることから、対象となる放射線は次の3つのエネルギー範囲に分けられる⁽⁵⁾。

- (1) 15 MeV 以下：制動放射線のみ
- (2) 15～150 MeV：制動放射線のほかに巨大共鳴の(γ , Xn)反応による光中性子
- (3) 150 MeV 以上：制動放射線のほかに(γ , π)反応に伴う光中性子。0°方向においては μ メソンが放出される。

2. 陽子加速器(d, t, α , 重イオンを含む)

ハドロンカスケードにより放出される中性子が主な遮蔽研究の対象となる。この場合も中性子放出機構の違いから、次の3つのエネルギー範囲に分けられる⁽¹⁾。

- (1) 15 MeV 以下：核反応による中性子放出が行われ、中性子生成および反応の断面積データがよく整備されている。
- (2) 15～100 MeV：核反応による中性子放出が行われ、断面積データが非常に少ないので核内カスケード・蒸発モデルに基づく計算値を利用する。しかし、このエネルギー領域では核構造の影響を受けるので、このモデルの精度はあまり良くない。
- (3) 100 MeV 以上：ハドロンによる核外カスケードが起り、また π メソンが放出される。400 MeVを超えると π カスケードの寄与が無視できなくなる。このエネルギー領域では核内カスケード・蒸発モデルがよく成り立つ。

電子・陽子加速器とも15 MeV以下のエネルギーについては、中性子生成・反応断面積がよく整備されており、遮蔽研究もよくなされているのでここでは取り上げないことにする。一方中性子遮蔽という観点に立つと、15 MeV以上の加速器は次の3つに分類するのが便利である。

- (1) 低エネルギー：15～100 MeV
- (2) 中間エネルギー：100 MeV～1 GeV
- (3) 高エネルギー：1 GeV 以上

このように100 MeV以上をさらに2つに分けたのは、第1図に示すように中性子の非弾性散乱断面積が150

Several Problems in Accelerator Shielding Study,
Takashi NAKAMURA, Hideo HIRAYAMA, Shuichi
BAN. (1980年 1月28日 受理)

MeV 近辺で最小となり以後一定であることによる。
この一定値は幾何学的断面積に等しい。すなわち

$$\sigma_{inel} = \pi r_0^2 A^{2/3} \quad (1)$$

ここで, r_0 : 核半径で 1.3×10^{-13} cm, A : 質量数
加速エネルギーが 1 GeV 以上になると, この 150 MeV
以上の透過力の大きい中性子が遮蔽体透過中性子の主
成分を占めるようになり, 遮蔽設計計算の取扱い方が
それ以下のエネルギーの場合とやや違ってくる。

第1図 0~1.4 GeV のエネルギーの関数として中性子の非弾性散乱断面積⁽¹⁾

加速器遮蔽研究における課題は, 次の5つに分類される。

- (1) 断面積データ (Thin Target Problem): 基礎データ
- (2) 中性子・ γ 線生成 (Thick Target Problem): 遮蔽の線源
- (3) 遮蔽 (Shielding Problem): スカイシャインの線源
- (4) スカイシャイン (Skyshine Problem): 環境放射線
- (5) 残留放射線 (Induced Radioactivity Problem): 作業者の個人被曝

このうちスカイシャインに関しては, すでに「本誌」に解説がなされている⁽⁶⁾ので, その他の4つについて以下に研究の現状と問題点をまとめた。

Ⅲ. 断面積データ (Thin Target Problem)

これは遮蔽研究を行う上での基礎データであるが, 15 MeV 以上では特に中性子のデータは少なく, その精度評価もなされていない。したがって加速器遮蔽研究を始めるには, まず断面積データの整備が不可欠であり, この点断面積データが整備されている原子炉・核融合炉の遮蔽研究と違うところである。

1. 制動放射線

電子による制動放射線生成断面積については, 種類の近似に基づいて導かれた多くの理論式が Koch-Motz⁽⁶⁾により集大成されている。またスペクトルの測定値もいくつかあり理論値とよく一致している⁽⁷⁾。現在のところ制動放射線生成断面積は, 多少の問題を残しつつも誤差20%以内の精度を持っていることが検証されている⁽⁶⁾。

2. 光中性子

(γ, n) , (γ, np) , $(\gamma, 2n)$ など中性子を発生する光核反応の断面積が必要である。NBS の Photoneuclear Data Center で光核反応に関する文献を収集している⁽⁸⁾し, 著者らもいくらか収集した⁽⁹⁾。断面積データとしては Berman が陽電子消滅からの単色 γ 線を用いた実験値をまとめている⁽¹⁰⁾が, これは評価がなされていないし, またこの実験値は p と n の区別がなされていない。つまり (γ, pn) と $(\gamma, 2n)$ の区別がなされていないため, そのまま使うには問題がある⁽¹¹⁾。光核反応の断面積には系統的な誤差があるという指摘があり⁽¹²⁾, NBS では断面積の評価の仕事を行なっている⁽¹³⁾が, 現在までのところそのデータは核種に限られており, 精度評価という点でもまだ全く不十分な状態であろう。

3. ハドロンによる中性子生成

ハドロンによる核反応を取り扱うものとして, 核内カスケード・蒸発モデルに基づくモンテカルロ計算コード MECC-7⁽¹⁴⁾が有名である。これは入射粒子が p , n , π でそのエネルギーが 3 GeV 以下のものを対象として, 非弾性散乱断面積, 生成核子のエネルギー・スペクトル, 残留核の励起エネルギーや質量数分布等を求めるものである。これをさらに核子当り 50 MeV 以上のエネルギーの重イオン核反応にまで拡張した HIC-1 コードがある⁽¹⁵⁾。このコードによる計算値は, 15~18 MeV の陽子による実験値⁽¹⁶⁾と比較され, コードの一部修正の結果, 角度について積分した中性子生成微分断面積は, 計算値と実験値がよく一致することが示された⁽¹⁷⁾。しかし角度分布に関しては, 45 MeV 陽子による中性子スペクトルの実験値との比較の結果, 前方方

向では計算値は過大評価, 大角度の後方では過小評価であることが示されている⁽¹⁸⁾。

d, ^3He , α の入射に対しては MECC コードは使えないが, Gabriel らが α 入射を扱えるように改良した MECC コード⁽¹⁹⁾および HIC-1 コードの両方を用いて α 入射による生成陽子スペクトルの実験値と比較した結果⁽²⁰⁾を第2図に示す。改良型 MECC 計算(Old Calculation)は前方で過大評価, HIC 計算(New Calculation)は後方で過小評価になることがわかる。 ^{12}C が ^{56}Fe に入射した時の生成陽子・中性子スペクトルがこの HIC-1 コードで計算されている⁽²¹⁾。

第2図 205 MeV の α 線が ^{27}Al に入射した時に $0^\circ \sim 65^\circ$ および $100^\circ \sim 180^\circ$ の角度区間について平均した放出される陽子のエネルギースペクトル⁽²⁰⁾

Alsmiller らは MECC コードによる計算結果を解析式にフィットして, 25~400 MeV の非弾性散乱断面積および陽子・中性子スペクトルを与えている⁽²²⁾。これは非常に便利な式でよく使われているが, MECC-3 コードという古い Version に基づいていて, 軽核で 100 MeV 以下ではかなりの過大評価となる⁽²³⁾。

数 GeV 以上の領域では, 前方($\theta < 20^\circ$)での測定値があり⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾, これらの値から Ranft は半経験式を求めモンテカルロコードを作成している⁽²⁶⁾。この計算値は放射化検出器を用いた大角度での積分 2 次粒子束の測定値と一致している⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾。

一方, 核破砕反応に関しては, 多くの実験値に基づく経験式が報告されている⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾。

4. 中性子核反応

15 MeV を超えると評価済み断面積データセットはないし, 測定値も単色中性子が得難いこともあって急に少なくなる。最近 10~40 MeV の中性子断面積に関するシンポジウム⁽³¹⁾が開かれ, この方面への関心が高まってきている。現在のところ利用できる断面積データとしては Wilson によるもの⁽³²⁾, ORNL-RSIC の DLC-58 データライブラリー⁽³³⁾があり, 後者は 60 MeV までの中性子断面積を, 弾性散乱については光学モデルに基づく計算, 非弾性散乱については MECC-7 コードに基づく計算, 15 MeV 以下については ENDF/B-IV から求めたものである。

なお, エネルギーが高くなると陽子と中性子の挙動の差がなくなるので, 陽子のデータが利用できる。

5. ハドロンによる γ 線生成

Zobel ら⁽³⁴⁾の 16~160 MeV の陽子-核衝突による生成 γ 線スペクトルの測定値を, Shima ら⁽³⁵⁾が MECC コードを用いて解析している。このコードは残留核の励起レベルを与えるだけなので, γ 線生成計算用に改良しているが, 実験と計算の一致はよくない。

IV. 中性子・ γ 線生成 (Thick Target Problem)

これはその中で入射ビームのエネルギーが大きく失われる場合で, Thin Target の重ね合せになる。これは遮蔽の場合の線源になるので, そのエネルギー・角度分布の絶対値が精度よく求められる必要がある。

1. 制動放射線

電磁カスケードの計算コードとしては, モンテカルロ法に基づく汎用コード ETRAN⁽³⁶⁾, EGS⁽³⁷⁾が有名であり, 素らもより簡単なモンテカルロコード TAURUS⁽³⁸⁾を開発している。また, Thick Target を Thin Target に分割して制動放射線生成を解析的に求める近似的方法もいくつか報告されている^{(39)~(41)}。各種の検出器を用いたスペクトルの測定値が報告されており^{(42)~(46)}, これらの測定値はモンテカルロおよび解析的計算値とよく一致している。

著者らは (γ, n) 反応を利用した放射化検出器により,

50 MeV 以下の制動放射線スペクトルを求める、精度はやや落ちるが非常に簡便な方法を開発した⁽⁴⁷⁾⁽⁴⁸⁾。

2. 光中性子

光中性子を電子入射から一貫して計算するコードは著者らの知る範囲では存在しない。したがって、まず制動放射線のターゲット内分布を上記計算コード等により求め、それに (γ, n) 等の中性子生成光核反応断面積をかけて光中性子の線源分布を求め、高エネルギーではさらにその光中性子によるハドロンカスケードを計算する必要がある。この方法による計算例は Swanson によりサーベイされている⁽⁹⁾。

実験値としては、TOF(飛行時間法)を用いたスペクトル測定値^{(49)~(51)}、放射化検出器を用いた角度分布の測定値⁽⁴⁹⁾⁽⁵²⁾があり、これも Swanson がまとめている⁽⁹⁾。光中性子のスペクトルは蒸発(マクスウェル型)+直接放出であり、3~4 MeV 以下ではマクスウェル型になる。この蒸発スペクトルは核分裂スペクトルによく似ているので、光中性子は核分裂中性子の模擬としてよく使われている。また、光中性子の全生成量(Total Yield)の測定値⁽⁵³⁾によると、それは電子エネルギー、ターゲットの厚さ、原子番号とともに増加している。

3. 核反応中性子

計算は、ハドロンによる核外カスケードを考慮するかしないかで、次の2つに大別できる。

(1) 低・中エネルギー

正確には~100 MeV 以下、近似的には~400 MeV 以下の時は核外カスケードが無視できる。その場合はターゲットを Thin Target に分割し、そのおのこの部分には、例えば Alsmiller らの解析式(ORNL-4046)⁽²²⁾を用いて、入射ビームのエネルギー損失等を考慮して重ね合わせる方法が簡単である^{(54)~(56)}。

(2) 中・高エネルギー

核外カスケードを考慮したモンテカルロ計算コードとして、Ranft の FLUKA コード⁽⁵⁷⁾と、それを改良した CASIM コード⁽⁵⁸⁾および ORNL で開発された MECC コードを内蔵する NMTC コード(3 GeV 以下)⁽⁵⁹⁾と、それをより高いエネルギーに拡張した HETC コード⁽⁶⁰⁾とがよく使われており、ほかに Barashenkov らの計算もある⁽⁶¹⁾。

中性子スペクトル・角度分布に関する実験値として、低エネルギー領域では、最近の中性子治療の進展に伴って不可欠となった中性子スペクトルを、陽子^{(62)~(63)}、重陽子^{(63)~(65)}、 ^3He ⁽⁶⁶⁾入射の場合に TOF 法を用いて測定した報告がある。東大核研では陽子 52 MeV による生成中性子スペクトルを波形弁別法を用いた有機シ

ンチレータにより測定している⁽⁵⁵⁾。また、放射化検出器による角度分布の測定値(陽子 50 MeV)もある⁽⁵⁴⁾。この2つの結果⁽⁵⁴⁾⁽⁵⁵⁾は、ORNL-4046⁽²²⁾に基づく計算値と比べられているが、小角度では計算値は2~3倍の過大評価となり、前述したようにこの ORNL-4046 には問題があることが積分評価された。第3図に、中村ら⁽⁵⁵⁾によるカーボンターゲットの場合の結果を1例として示す。中間エネルギーでは、TOF法や Proton Recoil Spectrometer を用いた陽子ビームによる生成核子のスペクトル測定が行われ^{(67)~(70)}、これらは NMTC による計算値とよく合っており、このエネルギー領域では Thick Target に対する NMTC コードの精度は検証されているものと考えられる。LBL では、900 MeV α 線による2次中性子スペクトルの測定が放射化検出器等により行われ、Thin Target に分割する近似解析計算と比較された⁽⁷¹⁾。GeV 領域では実験値はほとんど見当たらないが、HETC コード⁽⁶⁰⁾は3.5 GeV 以上で核データの外挿を行なっているため、そこでの2次粒子発生を正しく再現していない。

第3図 52 MeV 陽子が炭素ターゲットに入射した時に、0°, 15°, 30°, 45°, 75° 方向に放出される中性子のエネルギースペクトルの実験値と計算値⁽⁵⁵⁾

Routti は核破砕反応を利用した放射化検出器により、数100 MeVくらいまでの中性子スペクトルを求める簡便な方法を開発し⁽⁷²⁾、よく使用されている。

Patterson-Thomas の著書⁽¹⁾に陽子、重陽子、 α 粒子による全中性子生成量がまとめられており、これを第4図に示す。中性子生成量は加速粒子のエネルギーにおおよそ比例して増加しており、また陽子の場合はターゲットの原子量とともに中性子生成量が増えているが、重陽子や α 粒子の場合その増え方はそれほど顕著でない。重イオンによる中性子生成量に関しては、実験値⁽¹⁾および HIC-1 計算に基づく推定値⁽⁷³⁾から、中性子生成量はターゲットの原子量とともに増えるが、Cu から Pb までのターゲットに対しほぼ一定であること、また中性子生成量はイオンエネルギーとともに増加するが、核子当たりエネルギーが同じであればイオンの原子量にはほとんど依存しないことが推論される。最近、数 GeV の陽子による核破砕反応を利用した強力中性子源が、損傷・消滅処理・加速器増殖炉等への応用から注目され、中性子ターゲット生成量の研究が各国で進められ、NMTC コード⁽⁵⁹⁾を用いた解析が行われている⁽⁷⁴⁾。

4. 核反応 γ 線

東大核研では、52 MeV の陽子による2次 γ 線スペクトルの測定が行われた⁽⁵⁵⁾。また、計算はまだ全くなされていないと思う。

V. 遮蔽 (Shielding Problem)

現実の加速器施設における遮蔽問題としては、ビームダンプ、建物遮蔽、ダクトおよびトンネルからのストリーミングなど複雑多岐にわたっている。ここではこれら具体的問題のための基礎データとなるジオメトリの簡単な遮蔽研究に限定した。これは大きく2つに分類される。

(1) ビームダンプ：1次加速粒子が入射して2次粒子(中性子・ γ 線が主)を発生し、それが吸収・散乱を受けつつ体系を透過する。これは Thick Target 問題をさらに厚くして2次粒子の減速過程を含めたものと考えことができ、第Ⅳ章に述べた計算コードがほぼそのまま適用できる。入射粒子はほとんどの場合0°方向から体系へ入射する。

第4図 種々の加速粒子とターゲットの組合せに対し入射粒子のエネルギーに対する中性子生成量の変化⁽¹⁾

(2) 側壁遮蔽：ターゲットまたはビームダンプから発生した中性子・ γ 線を線源として、遮蔽体に入射した後の減衰・透過を扱うもので、天井・側壁等建物遮蔽はこれに当る。したがって多くの場合、入射ビームに対して約90°方向にターゲットから放出される2次放射線が線源となるため、その生成量の絶対値の精度よいデータが必要である。

1. 制動放射線

側壁遮蔽問題に当る制動放射線の遮蔽体による減衰の研究は多くの人によりなされており、Swanson の著書⁽³⁾にまとめられている。減衰曲線は $e^{-\mu t}$ (t : 厚さ) に従い、減衰係数 μ が得られる。この μ の値は制動放射線のエネルギーの増加とともに減少し、30 MeV 近辺で一定値に近づき、その値はコンプトンミニマムの線吸収係数 μ_{min} にほぼ等しいことが見出されている⁽⁷⁵⁾。

ビームダンプ問題に当る電子入射による制動放射線束の体系内分布については、著者らによる22 MeV 電子を用いた実験⁽⁷⁶⁾⁽⁷⁷⁾ およびモンテカルロ計算⁽⁷⁸⁾がある。実験と計算はよく一致しており、計算値は簡単な解析式にフィットされている⁽⁷⁸⁾。

2. 中性子

(1) 低エネルギー

この領域における遮蔽実験は意外にも少ない。Ta

に80 MeV α 線をあてて発生した中性子の鉄・コンクリート中での減衰とスペクトルを放射化検出器で測定したもの⁽⁷⁹⁾, 50 MeVの重陽子をBeにあてて発生した中性子の鉄中での減衰を求めたもの⁽⁸⁰⁾, および東大核研での52 MeV陽子をCにあてて発生した中性子・

7線の水, 鉄, グラファイト, コンクリート中での減衰とスペクトルを有機シンチレータで測定したもの⁽⁸¹⁾⁽⁸²⁾などがある。これらの実験結果はいずれも指数減衰 $e^{-x/\lambda}$ を示しており, それから得られた減弱距離 λ が第1表に示されている。

第1表 種々の加速エネルギーをもった粒子から放出される中性子に対する減弱距離の比較 (g/cm²)

加速粒子	52 MeV p	80 MeV α	400 MeV e	14.6 GeV/c 26.4 GeV/c p	30 GeV p	12 GeV p	10 GeV p
参考文献	(81) (実験値)	(79) (実験値)	(83) (計算値)	(83) (実験値)	(95) (実験値)	(96) (実験値)	(98) (実験値)
測定量	中性子束 ≥ 2 MeV	中性子束 ≥ 20 MeV	熱中性子束	線量	中性子束 ≥ 20 MeV	中性子束 ≥ 20 MeV	中性子束 ≥ 50 MeV
パラフィン	—	—	—	—	—	133	—
水	32	23	—	—	—	—	—
黒鉛	32	33	—	—	—	—	—
土	—	—	—	104	117	108	—
コンクリート	49	42	29, 32	105	—	—	—
重コンクリート	—	—	—	—	—	163	173
鉄	72	85	92	139	—	188	142

一方計算はdiscrete ordinate S_n 計算(ANISN, DOT)⁽⁴⁾や, 多群モンテカルロ計算(MORSE)⁽⁴⁾により行えるが, 問題は断面積であり, 現在使用可能なデータはDLC-58⁽³³⁾ および ORNL-4046⁽²²⁾ (ただし弾性散乱は含まれていない)しかない。400 MeVの電子をCuにあてて発生する中性子⁽⁸³⁾および50~400 MeVの単色中性子⁽⁸⁴⁾に対する遮蔽計算がANISNコードを用いて行われ, λ の値が求められている。(第1表参照)

この減弱距離 λ は除去断面積 Σ_{rem} の逆数であり, Σ_{rem} は次のように表わすことができる。

$$\Sigma_{rem}(E) = a(E)\Sigma_{el}(E) + \Sigma_{tnet}(E) \quad (2)$$

150 MeV 以上では, $a(E)=0$ という近似値が与えられ

ている⁽¹⁾ ので $\Sigma_{rem}(E) \approx \Sigma_{tnet}(E)$ となり, (1)式から

$$\lambda = \frac{1}{\Sigma_{rem}} \approx \frac{1}{\Sigma_{tnet}} = \frac{1}{N_0 \pi r_0^2} A^{1/3} \equiv \lambda_{tnet} \quad (\text{g/cm}^2) \quad (3)$$

となり, 質量数とともに単調増加することがいえる。コンクリートの中性子エネルギーによる λ の変化は, 第5図に示されているように, エネルギーとともに増加し, 150 MeV 以上で一定になっている。

(2) 中・高エネルギー

a. ビームダンプの実験

放射化検出器や原子核乾板を主に用いて, 減弱距離, ビルドアップ率, Build-up Distance 等を求める実験が行われている。CERN では10, 19.2 GeV/cの陽子による鉄中での粒子束分布の測定が行われ⁽⁸⁵⁾⁽⁸⁶⁾, BNLでは28 GeV陽子による土砂遮蔽体中での実験⁽⁸⁷⁾, LBLでは6 GeV陽子によるコンクリートの実験⁽⁸⁸⁾ がそれぞれ行われている。1965年までの実験はThomasによってまとめられており⁽¹⁾, 土, コンクリート, 鉄の減弱距離が比較されているが, 実験値の間の一致はよくない。

中間エネルギーでは, 500 MeV陽子による鉄中での粒子束分布が高エネルギー物理学で測定されてい

第5図 コンクリートに対する中性子の減弱距離の実験値と計算値との比較⁽¹⁾

る⁽⁸⁹⁾。また中性子の broad beam 入射による遮蔽実験が、170~660 MeV のエネルギーに対して Dubna で行われ^{(90)~(92)}、鉄・コンクリートの減弱距離とビルドアップ率とが求められている。減弱距離は第5図に示したように、エネルギーとともに増加するが、上記エネルギー範囲で

$$\lambda = (0.9 \sim 1.4) \lambda_{inel} \quad (4)$$

の関係が得られている。多重層の場合のスペクトルの

変化も測定されているが、20 MeV 以上ではほとんど変化していない。

b. 側壁遮蔽の実験

最も大規模な実験は14.6, 26.4 GeV/c の陽子を用いた CERN での実験⁽⁹³⁾であり、第6図にその配置図を示す。内部ターゲットでのビーム損失分布、2次粒子の角度分布、土の減弱距離が測定されたが、このλ値 117 g/cm² は最も信頼度が高いとされている。

第6図 実験エリアにおけるリングトンネルと土遮蔽体の断面図⁽⁹³⁾

この実験値は Moyer のモデル⁽¹⁾に基づく簡単な近似式によって解析され⁽⁹⁴⁾、両者はよく一致していた。同様の実験は BNL でも30 GeV の陽子を用いて行われ、土の減弱距離を求めている⁽⁹⁵⁾。高エネルギー物理学研では12 GeV の陽子の外部ターゲットの真上の側壁遮蔽で中性子束の測定を行い、鉄・コンクリート・パラフィンのλを求めている⁽⁹⁶⁾。このλ値は

$$\lambda = 1.4 \lambda_{inel} \quad (5)$$

と近似でき、この結果は(3)式とは違っている。外部ターゲットでの同様な実験としてはかに RHEL⁽⁹⁷⁾ と ANL⁽⁹⁸⁾ のものがある。以上の実験により得られた各種物質に対するλの値は第1表にまとめられているが、互いにまだかなりの食違が見られる。また中性子スペクトルに関する情報は非常に粗っぽいものしか得られていない。

c. 遮蔽計算

現在最も精密な計算法としては、NMTC, HETC コードを用いて15 MeV 以上の中性子遮蔽計算を行い、その結果を入力として15 MeV 以下では MORSE コードで計算する方法がある。また Ranft の TRANKA モンテカルロコード^{(99)~(100)}も高エネルギー領域でよく使われているが、エネルギーカットオフが50 MeV と高いのが欠点である。

低および中間エネルギーでは ORNL-4046 等の断面積データを用いて、ANISN, DOT, MORSE 等のコードによる計算が可能である。

もっと簡単な遮蔽設計計算法としては、Moyer のモデル⁽¹⁾と O'Brien らのモデル⁽¹⁰¹⁾が有名でよく使われている。前者は150 MeV 以上の透過力の強い中性子の方に注目した方法で、後者は P_3 近似の1次元輸送方程式を解いたものであるが、ともに1 GeV 以上の高エネルギー領域でのみ使用できるもので、1 GeV 以

下の中間エネルギー領域での簡単な遮蔽設計計算法はまだ存在しない。

Ⅶ. 残留放射能

残留放射能は放射線作業従事者の個人被曝に最も大きく寄与するため、加速エネルギー、ビーム強度の増大に伴って大きな問題となってきた。しかし、原子炉と異なり生成核種が多種類であること、ビーム損失の状態が変化することから、残留放射能の定量的研究は非常に難しい。これまでの研究は大きく2つに分類できる。

その1つは、構造体近くでの線量率の測定およびその減衰曲線から主要核種を調べる研究である⁽¹⁾。また、これに関連して加速器室周辺のコンクリート中の²⁴Na生成の問題が主として計算によって検討されている⁽¹⁾。最近、高エネルギー物理学研でpure Ge検出器により加速器室内の γ 線スペクトルの測定を行なって個々の核種からの線量への寄与を調べ、残留放射能研究にスペクトル測定が重要であることを示した⁽¹⁰³⁾。

もう1つは、物質による残留放射能の違いを調べるという研究である⁽¹⁰³⁾⁽¹⁰⁴⁾。種々の物質に加速ビームを当てて残留放射能による線量とその減衰を測定し、加速器構造物として残留放射能の問題が少ない材質を調べている。600 MeVの陽子による残留放射能の実験値⁽¹⁰³⁾は、第7図にNMTCコードに基づく計算値と比較されているが、物質による減衰傾向はよく一致しているが、絶対値の点で問題がある。

加速器の残留放射能の研究としてBarbierの本⁽¹⁰⁵⁾があるが、その中で使用されている高エネルギー核反応断面積は近似式を用いており、絶対値の評価という点で問題があり、実験結果との比較による再検討が必要である。

Ⅶ. おわりに

以上、加速器遮蔽研究の現状と問題点を概観してきたが、遮蔽実験研究がまだ非常に少なく系統的に行われていないし、計算コードにも精度の点で問題がある上に、その基礎となる断面積データそのものが非常に不十分で、しかも評価されたデータファイルもないと

第7図 うすい供試体を600 MeVの陽子で3h照射した時の残留放射能減衰曲線の計算と実験⁽¹⁰³⁾

いう状態であり、もちろん確立された遮蔽設計計算法もほとんどない。しかし、このことは逆に、この分野に進もうとする研究者にとっては、数多くの未開拓のテーマが残されている魅力ある分野であり、1980年度から本会内にスタートする「速中性子遮蔽」研究専門委員会においても、そのテーマの一つに加速器遮蔽を取り上げることになっている。本稿が、今後この研究分野に対する人々の関心をさらに増大させ、“Useful Piece for Peaceful Use”となることを期待している。

—参考文献—

- (1) PATTERSON, H.W., THOMAS, R.H.: “Accelerator Health Physics”, (1973), Academic Press.
- (2) Scientific Committee 22 of NCRP: “Radiation Protection Design Guidelines for 0.1-100 MeV Particle Accelerator Facilities”, NCRP Rep. No. 51, (1977).
- (3) SWANSON, W.P.: “Radiological Safety Aspects of the Operation of Electron Linear Accelerators”, (1979), IAEA.
- (4) NELSON, W.R., JENKINS, T.M. (Ed.): “Computer Techniques in Radiation Transport and Dosimetry”, (1980), Plenum Publ. Corp.
- (5) 関口 晃編: 原子力誌, 20(6), 391 (1978).
- (6) KOCH, H.W., MOTZ, J.W.: Rev. Mod. Phys., 31, 920 (1959).
- (7) 平山英夫: 京都大学工学博士学位論文, (1976).
- (8) 例えば, FULLER, E.G., et al.: Photuclear reaction

- data, 1973, *NBS SP-380*, (1973).
- (9) 中村尚司, 平山英夫: 原子力誌, **14**(12), 668 (1972).
- (10) BERMAN, B.L.: *UCRL-74622*, (1973).
- (11) HIRAYAMA, H., NAKAMURA, T.: *Nucl. Instrum. Methods*, **147**, 563 (1977).
- (12) TOMIMASU, T., SUGIYAMA, S.: Nuclear cross sections and technology, *NBS SP-425*, Vol. I, II, p. 83 (1975).
- (13) FULLER, E.G.: Private communication in 1974, to be presented in Atlas of Evaluated Photonuclear Reaction Data, NBS.
- (14) Radiation Shielding Information Center of ORNL: *Documentation for CCC-156/MECC-7 Code Package*, (1973).
- (15) SANTORO, R.T., et al.: *ORNL-TM-4791*, (1975).
- (16) VERBINSKI, V.V., BURRUS, W.R.: *Phys. Rev.*, **177**, 1671 (1969).
- (17) ALSMILLER, R.G., Jr., HERMANN, O.W.: *Nucl. Sci. Eng.*, **40**, 254 (1970).
- (18) GALONSKY, A., et al.: *Phys. Rev.*, **C**, **14**, 748 (1976).
- (19) GABRIEL, T.A., et al.: *Nucl. Sci. Eng.*, **44**, 104 (1971).
- (20) GABRIEL, T.A., et al.: *ibid.*, **53**, 323 (1974).
- (21) BERTINI, H.W., et al.: *Phys. Rev.*, **C**, **14**, 590 (1976).
- (22) ALSMILLER, R.G., Jr., et al.: *ORNL-4046*, (1967).
- (23) BERTINI, H.W., et al.: *ORNL-TM-4638*, (1974).
- (24) DEKKERS, D., et al.: *Phys. Rev.*, **137**, B962 (1965).
- (25) ALLABY, J.V., et al.: *CERN 70-12*, (1970).
- (26) RANFT, J.: *Particle Accel.*, **3**, 129 (1972).
- (27) LEVINE, G.S., et al.: *ibid.*, **3**, 91 (1972).
- (28) ROUTTI, J.T.: *Nucl. Sci. Eng.*, **55**, 41 (1974).
- (29) RUDSTAM, G.: *Z. Naturforsch.*, **21a**, 1027 (1966).
- (30) SILBERBERG, R., TSAO, C.H.: *Astrophys. J.*, Suppl. Ser. No. 220(I), **25**, 315; No. 220(II), **25**, 335 (1972).
- (31) BHAT, M.R., PEARLSTEIN, S. (Ed.): Symposium on Neutron Cross-Sections from 10 to 40 MeV, *BNL-NCS-50681*, (1977).
- (32) WILSON, W.B.: *LA-7159-T*, (1978).
- (33) ALSMILLER, R.G., Jr., BARISH, J.: *ORNL-TM-6486*, (1978).
- (34) ZOBEL, W., et al.: *Nucl. Sci. Eng.*, **32**, 392 (1968).
- (35) SHIMA, Y., ALSMILLER, R.G., Jr.: *ibid.*, **41**, 47 (1970).
- (36) BERGER, M.J., SELTZER, S.M.: *NBS Rep.* 9836, 9837, (1968).
- (37) FORD, R.L., NELSON, W.R.: *SLAC-210*, (1978).
- (38) SHIN, K., et al.: *Nucl. Instrum. Methods*, **151**, 271 (1978).
- (39) SCOTT, W.W.: *NASA-SP-169*, p. 339 (1968).
- (40) FERDINANDE, H.: *Nucl. Instrum. Methods*, **91**, 135 (1971).
- (41) NAKAMURA, T., et al.: *J. Appl. Phys.*, **43**, 5189 (1972).
- (42) JUPITER, C.P., et al.: *NASA SP-169*, p. 249 (1968).
- (43) DANCE, W.E., et al.: *J. Appl. Phys.*, **39**, 2881 (1968).
- (44) O'DELL, A.A., Jr., et al.: *Nucl. Instrum. Methods*, **61**, 340 (1968).
- (45) SANDIFER, C.W., TAHERZADEH, M.: *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-15**, 336 (1968).
- (46) RESTER, D.H., et al.: *J. Appl. Phys.*, **41**, 2682 (1970).
- (47) HIRAYAMA, H., NAKAMURA, T.: *Nucl. Sci. Eng.*, **50**, 248 (1973).
- (48) NAKAMURA, T., HIRAYAMA, H.: *ibid.*, **59**, 237 (1976).
- (49) GAYTHER, D.B., GOODE, P.D.: *J. Nucl. Energy*, **21**, 733 (1967).
- (50) KAUSHAL, N.N., et al.: *ibid.*, **25**, 91 (1971).
- (51) Von EYSS, H.J., LÜHRS, G.: *Z. Phys.*, **262**, 393 (1973).
- (52) ALLUM, F.R., et al.: *Nucl. Phys.*, **53**, 545 (1964).
- (53) BARBER, W.C., GEORGE, W.D.: *Phys. Rev.*, **116**, 1551 (1959).
- (54) FASSO, A., HÖFERT, M.: *Nucl. Instrum. Methods*, **133**, 213 (1976).
- (55) NAKAMURA, T., et al.: *ibid.*, **151**, 493 (1978).
- (56) CHRISTENSON, D., et al.: *ibid.*, **160**, 499 (1979).
- (57) RANFT, J., ROUTTI, J.T.: *Comput. Phys. Commun.*, **7**, 327 (1974).
- (58) Van GINNEKEN, A.: *FNAL FN-250*, (1972); *FNAL FN-272*, (1975).
- (59) Radiation Shielding Information Center of ORNL: *Documentation for CCC-161/NMTC Code Packages*, (1976).
- (60) CHANDLER, K.C., ARMSTRONG, T.W.: *ORNL-4744*, (1972).
- (61) BARASHENKOV, V.S., et al.: *Dubna Preprint P2-5719*, (1971).
- (62) JOHNSEN, S.W.: *Med. Phys.*, **4**, 255 (1977).
- (63) HEINTZ, P.H., et al.: *ibid.*, **4**, 250 (1977).
- (64) MEULDERS, J.P., et al.: *Phys. Med. Biol.*, **20**, 235 (1975).
- (65) LEFEVRE, H.W., et al.: *Nucl. Sci. Eng.*, **70**, 60 (1979).
- (66) ZATOLOKIN, B.V., et al.: *Int. J. Appl. Radiat. Isotop.*, **28**, 459 (1977).
- (67) GOODELL, W.F., et al.: *Phys. Rev.*, **89**, 724 (1953).
- (68) WACHTER, J.W., et al.: *ibid.*, **161**, 971 (1967).
- (69) WACHTER, J.W., et al.: *Phys. Rev.*, **C**, **6**, 1496 (1972).
- (70) MADEY, R., WATERMAN, F.M.: *ibid.*, **8**, 2412 (1973).
- (71) SMITH, A.R., et al.: *LBL-6721, UC-48*, (1978).
- (72) ROUTTI, J.T.: *Physica Scripta*, **10**, 107 (1974).
- (73) NAKAMURA, T.: "NUMATRON", Study Group of Numatron, Inst. Nucl. Study, Univ. of Tokyo, p. 321 (1977).
- (74) 中原康明: *JAERI-memo* 8214, (1979).
- (75) TOMIMASU, T., et al.: To be published in *Nucl. Instrum. Methods*.
- (76) HIRAYAMA, H., NAKAMURA, T.: *Nucl. Instrum. Methods*, **133**, 355 (1976).
- (77) NAKAMURA, T., et al.: *J. Nucl. Sci. Technol.*, **14** [1], 31 (1977).
- (78) NAKAMURA, T., et al.: *Nucl. Instrum. Methods*, **151**, 277 (1978).
- (79) WADMAN II, W.W.: *Nucl. Sci. Eng.*, **35**, 220 (1969).
- (80) MEULDERS, J.P., et al.: *Nucl. Instrum. Methods*, **126**, 81 (1975).
- (81) SHIN, K., et al.: *Bull. Inst. Chem. Res., Kyoto Univ.*, **57**, 102 (1979).
- (82) SHIN, K., et al.: *Nucl. Sci. Eng.*, **71**, 294 (1979).
- (83) ALSMILLER, R.G., Jr., BARISH, J.: *Particle Accel.*, **5**, 155 (1973).
- (84) ALSMILLER, R.G., Jr., et al.: *Nucl. Instrum. Methods*, **72**, 213 (1969).

- (85) GEIBEL, J., *et al.*: *ibid.*, **32**, 45 (1965).
 (86) CHILDER, R.L., *et al.*: *ibid.*, **32**, 53 (1965).
 (87) BENNETT, G.W., *et al.*: *Particle Accel.*, **4**, 229 (1973).
 (88) SMITH, A.R., *et al.*: *UCRL-11331*, (1964).
 (89) ARAKITA, Y., *et al.*: *Nucl. Instrum. Methods*, **164**, 255 (1979).
 (90) ZAITSEV, L.N., *et al.*: *At. Energ.*, **12**, 525 (1962).
 (91) ZAITSEV, L.N., *et al.*: *ibid.*, **21**, 56 (1966).
 (92) SYCHEV, B.S., *et al.*: *ibid.*, **20**, 323 (1966).
 (93) GILBERT, W.S., *et al.*: *UCRL-17941*, (1968).
 (94) ROUNTI, J.T., THOMAS, R.H.: *Nucl. Instrum. Methods*, **76**, 157 (1969).
 (95) CASEY, W.R., *et al.*: *ibid.*, **55**, 253 (1967).
 (96) BAN, S., *et al.*: *Nucl. Instrum. Methods*, To be published.
 (97) SHAW, K.B., STEVENSON, G.R.: *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-16**, 570 (1969).
 (98) HOWE, H.J., Jr., *et al.*: *ANL-7273*, (1966).
 (99) RANFT, J., ROUNTI, J.T.: *CERN Lab. IL-RA/72-4*, (1972).
 (100) RANFT, J.: *Nucl. Instrum. Methods*, **48**, 133, 261 (1967).
 (101) O'BRIEN, K., McLAUGHLIN, J.E.: *ibid.*, **60**, 129 (1968); *HASL-203*, (1968).
 (102) HIRAYAMA, H., *et al.*: *Nucl. Instrum. Methods*, To be published.
 (103) FULMER, C.B., *et al.*: *IEEE Trans., Nucl. Sci.*, **NS-12**, 673 (1965).
 (104) TOTH, K.S., *et al.*: *Nucl. Instrum. Methods*, **42**, 128 (1966).
 (105) BARBIER, M.: "Induced Radioactivity", (1969), John Wiley and Sons.

名古屋大学プラズマ研究所附属
核融合研究企画情報センター
教官(1名)公募

1. 公募人員 助手1名
 2. 専門分野 情報検索サービス業務を主とし、数値情報のデータベース化等の開発にも協力してもらう
 3. 提出書類 ①履歴書、研究歴または実務歴、②発表論文リストまたは現在の仕事についての説明書、③他薦の場合は推薦書、④本人について意見を述べ得る人の所属・氏名、⑤赴任可能時期
 4. 応募締切 昭和55年6月14日
- 書類提出・問合せ先 (〒464)名古屋市中区不老町
名古屋大学プラズマ研究所所長 垣花秀武
(封筒に「応募書類在中」と明記し書留で郵送のこと。)
内容に関する問合せ先は、プラズマ研究所 核融合研究企画情報センター 市川行和(Tel. 052-781-5111, 内線6980)

秋田大学鉱山学部生産機械工学科
教授(2名)公募

1. 熱流工学(燃焼工学, 熱機関学)
 - (1) 授業科目 内燃機工学, 蒸気工学, 空調工学等
 - (2) 職 種 教授1名(50歳以上を希望する)
 - (3) 採用予定 昭和55年10月1日以降
 - (4) 公募締切 昭和55年5月末日
2. 機械製作学(鍛造, 鍛造, 塑性力学, 塑性加工学)
 - (1) 授業科目 工作法, 塑性工学

- (2) 職 種 教授1名(50歳以上を希望する)
 - (3) 採用予定 昭和56年4月1日以降
 - (4) 公募締切 昭和55年9月末日
- 応募資格 博士の学位を有する者
提出書類 ①履歴書(写真添付)、②業績リスト(論文, 著書, 講演, 特許等)、③加入学会名, 活動状況(受賞等)、④論文別刷、⑤健康診断書。
応募資格と提出書類は2講座共通。
連絡先 (〒010)秋田市手形学園町1番1号
秋田大学鉱山学部生産機械工学科
学科主任 藤田春彦
(Tel. 0188-33-5261, 内線731)
(学科の現状)当生産機械工学科は既設の機械工学科(4講座)に加え、昭和52年度に開設されたもので、機構設計学・熱流工学・機械製作学の3講座が設置され、55年度には生産機械学講座が設置され完成される。入学定員は40名である。

G. E. 原子力事業部日本支社

人 材 募 集

- 職 種 炉心解析エンジニア(勤務地 東京)
資 格 原子力工学または関連学部卒
以上の学歴を有し、核設計, 解析における電算機使用経験者で英語堪能な方。
希望者は下記へ英和履歴書送付か、電話して下さい。
連絡先 (〒106)東京都港区六本木6丁目2-31(東日ビル16階)
ゼネラル・エレクトリック・テクニカル・サービス 社
原子力事業部日本支社 総務部(Tel. 03-405-2714)