

連載講座



中性子イメージング技術の基礎と応用 (基礎編第6回)

中性子イメージング用ビームの生成[†]

小林久夫

立教大学名誉教授

238-0023 神奈川県横須賀市森崎4-9-27 (自宅)

Key Words : neutron, neutron imaging, beam source, moderator, reflector, γ -ray filter, diaphragm, flight tube, energy modulation filter, beam shutter, irradiation field, shielding room, beam catcher, neutron radiography

1. はじめに

イメージングで使用する中性子線は通常ビーム状で、被写体に照射、透過させる。そのビームを形成するのに、拡散 (divergent) 型, 収束 (convergent) 型, 平行 (parallel) 型が用いられるが, 通常は拡散型が広く用いられている。

2. 中性子ビームの生成

2.1 中性子源

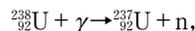
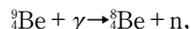
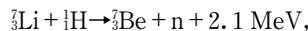
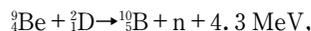
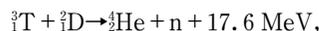
通常, ラジオグラフィに使用する中性子生成のための核反応は, 原子炉による



などである。理由は, 最も高い中性子フルエンス率が得られるからである。強度は, 発生地点で 10^{10} から 10^{15} $\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, 端末では 10^5 から 10^8 $\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ である。難点は可搬性の無い点である。ビームの不安定性は少ないが, 比較的運転性はよい。ハンドブックなど^{1), 2)}, 過去に行われた中性子ラジオグラフィ世界会議等^{3) - 10)}

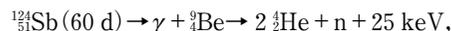
の報告書も参考にしていきたい。

加速器による中性子源としては, 核反応による標的より2次放射線として放射される中性子を利用する。代表的な反応は,



等である。加速器の小型化などで, 可搬性のもので変更も可能になりつつある。中性子源の強度は, 原子炉と比較して若干低く, 通常 10^7 から 10^{10} $\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ が得られる*¹。多少運転は複雑であり, 出力の安定性を得ることが困難なものもある。

ラジオアイソトープによる中性子源としては, α 線や γ 線を, Be に照射, 中性子を発生させる方式である。例えば



[†]Fundamentals and Applications of Neutron Imaging (Fundamentals Part 6).

Neutron Beams for Neutron Imaging.

Hisao KOBAYASHI: Professor Emeritus at Rikkyo University, 4-9-27, Morisaki, Yokosuka-shi, Kanagawa Pref. 238-0023, Japan (Residence).

*¹加速器の場合, 単位時間の生成中性子数で表現するが, ここでは中性子フルエンス率の単位を使用する。以下同。

等がある。小型で、可搬性が良く、運転も容易であり、安定性もよい。また、自発性核分裂物質も用いられる。難点は、核種によっては寿命が短く、高出力は期待できない点である。通常 10^5 から 10^9 $\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ がせいぜいである。

中性子源で生成された中性子は、減速材、反射材からダイヤフラムや中性子導管などを経て、照射野に導かれるので、実際使用する照射場所における中性子フルエンス率は、発生源の中性子フルエンス率から $1/10^2$ から $1/10^6$ にまで減衰されてしまう。

生成した中性子は高速中性子に属する。目的に応じて、減速し、熱外中性子 (ETN: epithermal neutron), 熱中性子 (TN: thermal neutron), あるいは熱下中性子 (STN: sub-thermal neutron) 等に減速することになる。あるいは冷中性子ボトルから中性子導管を用いて、冷中性子 (CN: cold neutron) ビームにする場合もある。

2・2 減速

特殊な炉は別として、原子炉の場合、高速中性子は熱中性子領域にまで減速する。中性子イメージングでは、その熱中性子線をそのまま、更に中性子ボトルで減速して CN, あるいは水や Be, C などの軽元素を含まない物質で減速させて ETN*2 として利用する。中性子イメージングにおいて、TN が通常用いられるのは、物質波としての波長がちょうど物質を構成する原子間距離に近いために (基礎編第 1, 2 回参照), X 線と同等な透過散乱特性を有するということが主な理由である。

炉心の構造については、他の書物等に委ねざるを得ないが、例えば、燃料要素が炉体の中心に有るもの、中心を円環状に囲んでいるもの等様々である。ビームは、後者などは、炉の中心から、中心軸方向に垂直方向に取り出すことになるが、通常は炉心を直接、あるいは減速材を

望む場所から、多くは水平方向に取り出す。

炉心の周りを囲む減速材は、重水、軽水あるいは黒鉛である。TRIGA 炉のように燃料要素に水素化ジルコニウムなど特殊な減速材を均質に混入して用いる場合もある。減速材の周りには、Be, 黒鉛, 軽水等の反射体が配置される。これらの存在とその温度などが近傍のスペクトルに影響する。減速材あるいは反射体のどの部分よりビームを取り出すかにもよるが、減速された中性子スペクトルには原子核分裂した際に放出された高速中性子のスペクトルが重なる。

加速器においても、生成されるエネルギーそのものを用いるのでなければ、同様な減速、反射材により熱化する。

中性子イメージングに用いられるビームは、この減速材や反射体付近、あるいは炉心部より取り出す。大まかに炉心を直接望む場合は、「ダイレクトビーム」、減速材を望む場合は「タンゼンシャルビーム」と呼んでいる。当然ダイレクトビームは、フィッシュンスペクトルを多く含み、高速中性子イメージングなどに使用される。またタンゼンシャルビームは、通常の熱中性子イメージング等に使用される。

熱中性子ビームは、減速材の原子、分子の温度と平衡になった状態を言うが、減速材原子の化学結合の影響や結晶構造の影響が現れ、またその媒質中の吸収やその形状などにより厳密なマクスウェル分布とはなり得ない。しかし、中性子イメージングの分野では、その差はほとんど考慮する必要はなく、減速材の大きさが十分大きければ、その温度で決まるマクスウェル分布になっていると考えて良い。

熱中性子ビームは、この減速材を望む部分から、ダイヤフラムを介して取り出すが、その部分の中性子フルエンス率は均一なものと考えておく。もちろん、そのようなことはなく多かれ少なかれ不均質性は避けられず、そのため画像取得面では、その不均質性は反映される。ここでは、近似的には均質であると仮定し、このダ

*2 高温度物質で ETN を生成させる方法は原理的には可能であるが、安全性や技術面から困難である。

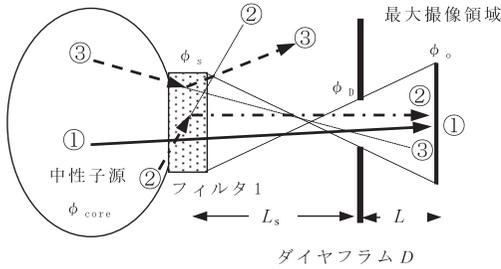


図1 中性子源、フィルタ、ダイヤフラム、最大撮像領域の関係と中性子の飛跡(寸法は線源ダイヤフラム間を強調して描かれている)。

①透過直達, ②本来撮像領域には入らない中性子が散乱により撮像領域に到達, ③本来撮像領域に入るべき中性子が散乱により領域外へ散逸(註, 寸法の大小関係を無視している。例えば実際は $L_s \ll L$)

ダイヤフラムを介して減速材を望む部分を、中性子源と名付け直す。

2.3 フィルタ1

多くの中性子ビームは、 γ 線の影響を軽減するために、減速材とダイヤフラムの間、あるいはダイヤフラムと撮像面間に、フィルタを設置する人が多い(図1)。また、減速材が軽水や重水などの液体の場合は、当然反射体容器壁が介在するが、この影響は少ないので無視する。

ここに置かれるフィルタ1は、 γ 線の影響を軽減するために挿入され、Bi等が用いられる。また、混在する高速中性子線を減速あるいは遮蔽する目的で黒鉛を用いる場合もある。この場所に置かれるフィルタは、 γ 線の遮蔽には有効であるものの、中性子線に関しては単純な減衰の効果はあるが、エネルギースペクトルが大きく変化することはない。図1に示すように、このフィルタによりダイヤフラムの外側に散乱される成分(図1③)があると同時に、幾何学的には無関係な中性子線(図1②)が散乱により、ダイヤフラムに向かうものがあり、散乱喪失と散乱によってビームに混入してくる際の減速効果が相殺するからである。結果として、主として γ 線のみが有効に遮蔽されるという特徴が

ある。ここに置かれるフィルタは、周辺からの放射線による発熱を押さえるために、冷却系を有しているものが多い。

後述するように、フィルタはダイヤフラムの後方、撮像面との中間点に置かれるフィルタ2(後述)とは、性格が全く異なる。ただし、このフィルタの位置に関しても、中性子の反射体から離して、ダイヤフラムの直前あるいは直後に置かれる場合も多い。この場合、フィルタ1の役割はやや曖昧になるが、この議論は後にフィルタ2の部分で詳述する。現在のところ、フィルタ1と2を、陽に識別して議論しているのは本講座以外は見当たらないので、あえて強調しておく。

2.4 ダイヤフラム

中性子源あるいはフィルタから発した中性子線は、ダイヤフラム(開口部, aperture, あるいは、単にコリメータと呼ぶこともある)を介して照射野に導かれる。ダイヤフラムの設計は多様であり、個々の照射設備で全て異なると言っても良い。ここでは、その設計上の基本的な考え方について述べる。

2.4.1 位置

通常、ダイヤフラムは中性子源あるいはフィルタから有る距離 L_s に設置される(図2)。ただし、中性子源は平面ではなく次元的な構造になっているので、この L_s は多少の曖昧さを有している。

2.4.2 形状・寸法

長方形や正方形のものもあるが、通常は円形である。円形でない場合、撮像面上において幾何学的不鮮明度の方位依存が存在する。ここでは、中性子源面、ダイヤフラム、撮像面の形状は全て円形であると想定する。各々の直径を各々 D_s 、 D 、 D_0 として、理想的な中性子ビームの設計条件を考えてみる(図1, 2参照)。

中性子源の面寸法 D_s は、ダイヤフラムがこのフィルタから離れて置かれる場合には、全ての有効撮像面 D_0 内からダイヤフラム D を通し

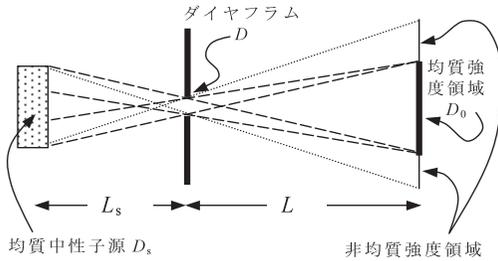


図2 領域 D_0 の均質領域を得るための領域 D_s の均質中性子源とダイヤフラム寸法 D の関係 ($L_s \ll L$)

て見て、常に中性子源 D_s の範囲内を直視できる大きさである。この三者の寸法関係は、中性子源、ダイヤフラム間距離を L_s 、ダイヤフラム、撮像面間距離を L とすると、撮像面で均質な中性子フルエンス率が得られる中性子源面の大きさは、

$$D_s \geq D + (D + D_0) (L_s/L) \quad (1)$$

となる。

2.4.3 材質

中性子源の方向性を持たない中性子はダイヤフラムを介して絞り込まれ照射面に送られる。ダイヤフラム材は当然、中性子に対して不透明な物質を使用する。例えばCd, Gd, B₁C, これとInの組み合わせ、ポリエチレンにCdをライニングしたもの、Gd入り樹脂、LiFタイル、場合によっては水である。

通常、ビームには高速中性子成分や γ 線成分が混在するので、ダイヤフラムの前後には、これらも同時に遮蔽できるものを付加する。例えば、高速中性子成分の遮蔽にはポリエチレンにCd等をライニングしたもの、 γ 線のためにはPb等を使用する。

ダイヤフラムが炉心などの中性子源に近い場合には、発熱を抑えるための冷却構造を有するものもある。

2.4.4 その他

ダイヤフラムの寸法 D は固定せざるを得ない。しかし、中性子強度と幾何学的不鮮明度は互いに相反するので、撮像系によって、中性子

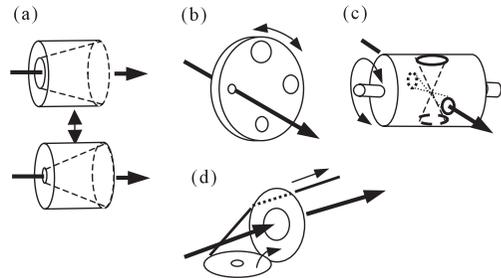


図3 可変コリメータ

- (a)ユニットの交換, (b)回転円盤方式,
(c)ロータリー方式, (d)重ね合わせ方式

強度あるいは解像度を選択できると、それだけその施設の利便性が増す。現に、ダイヤフラムの寸法 D を変更できるコリメータが、幾つか提案され、使用されている(図3)。低出力のTRIGA炉の場合、容易にコリメータをユニットごとに変更できるが(図3(a))、スペースが有れば、多孔の円盤を回転するもの(図3(b))もある。またビーム軸に直角に2個程度異なった開口部を配し、これを回転させるもの(図3(c))もある。またGd入りのラバーを紐で操作して変更する(図3(d))簡便なものもある。あるいは、 D は変更せず、照射管の長さを変更するものもある。いずれにしても、 L/D を変更できるという施設は、その利用範囲を拡大する。

2.5 飛行管

ダイヤフラムからいきなりビームを空間に、あるいはかなり大きく内寸数m程の照射室内に放射する施設もあるが、通常は、照射設備付近までは、遮蔽体に埋め込まれた飛行管あるいは照射管を設置する。 L/D を選択できるように、飛行管を二分して中間に撮像系を設置できるものも報告されている。

飛行管が長い場合は、空気による減衰を軽減するために内部にHe等を充填するか、真空にする場合が多い。飛行管を設置する場合には、その内側には散乱線除去用の遮蔽リングを各所に配置する(図4(a))。空間的な余裕が無い場

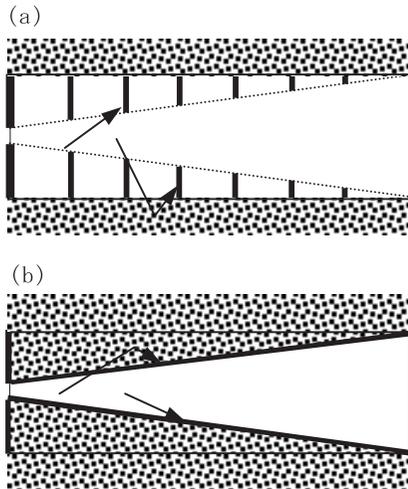


図4 飛行管内散乱防止の概念図
(a)散乱防止用遮蔽リング方式、及び(b)ライニング方式

合には、内面を散乱防止用にCd板のような中性子吸収物質でライニングする(図4(b))。

2.6 フィルタ2

従来、フィルタの役割は γ 線の軽減にあり、中性子エネルギー選別のために挿入する例は少なかった。エネルギー選別にフィルタを使用する例は、主にWhittemore, W. L.ら^{11),12)}によって論じられた。フィルタによるエネルギー選別は、フィルタ温度を調整して、マクスウェル分布を調整する方法か、物質の干渉性散乱に基づくBraggカットオフを利用して低エネルギー側にシフトする方法によって行われる。ここでは後者について述べる。干渉性散乱については、基礎編第1回を参照いただきたい。

干渉性散乱に基づく方法の一つは、単結晶物質を用い、Braggカットオフ以下のエネルギーの非干渉性散乱中性子ビームを選択的に透過させる方法(図5)である。基礎編第1回に述べられているように、物質を冷却することでよりフィルタ効果が得られる。干渉性散乱線成分を効果的に散乱排除すればよいので、多結晶物質を用いても同様な効果が得られるが、様々な結晶軸の方向により、Braggカットオフは不

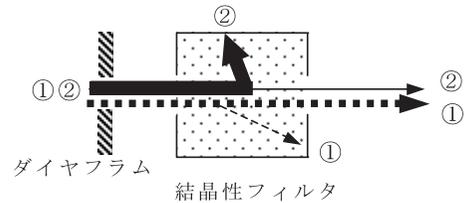


図5 ビームのフィルタ効果
①低エネルギー成分、②Braggカットオフ以上の高エネルギー成分

鮮明になる。干渉性散乱を用いる方法は、コリメートされないビームを用いると干渉性散乱の混入割合が増大するので、線源の近くにおいてはフィルタ効果が減弱する。

オランダのHFR (High Flux Reactor) の中性子ラジオグラフィ施設 (HFR-HB8)¹³⁾は、ビーム飛行管のほぼ中央部に、スウィングバック方式で交換できる2種類のフィルタ設備を有している。一つは、純粋な熱中性子ビーム取得を意図して、単結晶Siと50Kに冷却した単結晶Biフィルタが設置されている。また、熱下(sub-thermal)中性子ビーム用に50Kに冷却した多結晶Biと単結晶Biフィルタを使用している。共にBiは γ 線の軽減のために用いている。この例は、フィルタを冷却することと、飛行管の中間に置くことによって、熱下中性子とは言いながら、実効エネルギー 3.2 ± 0.5 meVと、良い冷中性子ビームを得ている¹⁴⁾。その証拠は、この施設の L/D , L , D の測定の詳細検討からも得られている¹⁵⁾。つまり、本来のダイヤフラムから直達した成分(全体の67.7%)と、明らかにフィルタ地点で散乱され、そこが新しい中性子発生源になっている成分(32.3%)が観測されている。ただし、純粋な熱中性子として設計されているこのビームの実効エネルギーは 13.0 ± 0.4 meVを示しているから、熱下中性子のように、このビームも熱中性子ビームの高エネルギー側の排除が干渉性散乱によって起こっていると考えられる。

以上、フィルタは設置位置によって異なった振る舞いを示すので、ここで図6に纏めておく。

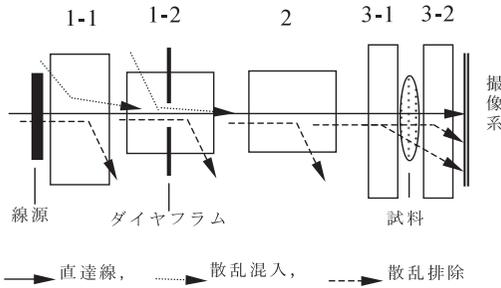


図6 フィルタの設置位置とその効果

フィルタが線源に接触あるいは近傍（図6の1-1）に置いた配置と中間に置いた配置（図6の2）については、既に論じた。通常、炉特性への影響や後ほど設計に参加する等、この種のフィルタは図6の1-2のダイヤフラムと共にその前後に設置されたものが多い。この場合、フィルタ1の γ 線遮蔽を念頭に置いて設計されている。しかし、その後の測定によると、位置1-2のフィルタでも位置2と同様中性子のエネルギー選択にも明らかに関与している。

場合によっては、撮像系近傍に置かれる場合もある。位置3-2に置かれた場合は、主として γ 線の遮蔽、熱中中性子イメージングにおける熱中中性子成分の選択的除去などに用いられる。位置3-1は、3-2と同様、フィルタから生成される γ 線を分散させその影響を低減する意味で置かれる。しかし、このフィルタを数十cm離して設置すると、フィルタ2の役割を十分果たすことが実験的に確認されている。

2.7 ビームシャッター

現在使用されているビームシャッターは、大きく分けて2種類ある。よく使われているのはスライド方式である。この扉は、ポリエチレンなどで高速中性子を減速、CdやLiF タイルなどで熱中中性子を捕捉、加えてPb等で γ 線を除去する。最近では、中性子フルエンス率の高いビームが利用されるようになり、秒程度、あるいはそれ以下の照射時間が要求されるようになると、遅い動作のビームシャッター（高速中性子

と γ 線の遮蔽）と、遮蔽効果は悪いが軽量で速く動作する熱中中性子の遮蔽シャッターを組み合わせる、などしている。速いシャッターには、カメラのフォーカルプレーンシャッターのような構造を持っているものもある。弱いビームを用いている場合は、例えば飛行管内を水で満たすような方式もある。

2.8 撮像装置

撮像系については、以降の講座で論じられるので、詳しくは述べない。基本は、真空カセットあるいはカメラやミラー等の撮像系を台上に設置する。この架台は可動式とし、上下、左右、前後、また回転するようにしている場合もある。

2.9 ビームキャッチャー

照射室の終端部に直達するビームを補足、吸収するものが主流であるが、遮蔽の能力を軽減する目的と、 L/D の変更を容易にできるように、ビーム方向に前後に可動する方式のビームキャッチャーを設置する例もある。キャッチャーのみを設置し、炉室全体を遮蔽室ととらえ、人の出入りを制限するものもある。散乱線を低減するためには有効と思われるが、多くの実験と競合するような多目的な施設では困難であろう。

2.10 照射室及び遮蔽室

照射室の観点から、この空間は広い程良いが、遮蔽体の巨大化につながる。結局は室内の空間が上下左右1mから2~3mが良いところであろう。ヘリコプターのローターの検査のためには、少なくとも左右10mの空間は必要となるが、そのような空間がとれるところは例えばハンガリーのKFKI Atomic Research Instituteの最近の照射施設¹⁶⁾がある。この設備は、遮蔽壁の一部にローターを通してスライドできる空間を付けている。またフランス、サクレイのORPHEE炉(14 MW)に設置された、冷中性子ビーム照射施設¹⁷⁾の空間なども水平方向にかなり広い空間を有している。

2・11 他の中性子ビームの形成

平行ビームに関しては、1965年 Berger, H. の教科書¹⁸⁾に、記述がある。この方式は、例えば長いハニカム状のもので多数の細いビームの束により形成されるが、当然のことながら被写体以上の面積の中性子源が必要である。また、ハニカム構造自身の像が重なることは避けられない。

収束型のビームを形成したという例は、中性子捕捉療法に使われるビームを利用する場合に見られる。また、ホドスコープ (hodoscope) はこの例にあたるかもしれない。と言うより、どちらかと言えばピンホールカメラに相当する。米国アイダホ国立研究所の TREAT hodoscope の例がそれであろう。長さ1mあまりの核分裂ピンの燃焼中の、ピンの歪み、変形などの動態を経時的に観測するためにこの技術を使っている¹⁹⁾。核燃料ピンから発した高速中性子をピンホールで収束し、炉の外に置かれた2次元の測定系で画像化する方式である。

3. 強度と線質

中性子ビーム照射設備を設計する場合、基本となる因子は、第一にどのような線質とするか、第二に中性子フルエンス率ほどの程度に設計するか、第三にビームの幾何学的因子ほどの程度に設置するかである。

基礎編第4回で述べたように、第二と第三の因子は互いに相反する関係にある。いま中性子源に原子炉を想定するとコアの中性子フルエンス率 ϕ_{core} と撮像面付近の中性子フルエンス率 ϕ_o は、あらかじめ計算、あるいは測定できる例が多いので、その前提に立って議論を進めていく。図7において、中性子源の中性子フルエンス率を ϕ_s 、ダイヤフラム面の中性子フルエンス率を ϕ_d 、幾何学的因子を L/D あるいは同じことであるが $(L+L_s)/D_s$ とすると、撮像面での中性子フルエンス率 ϕ_o は、

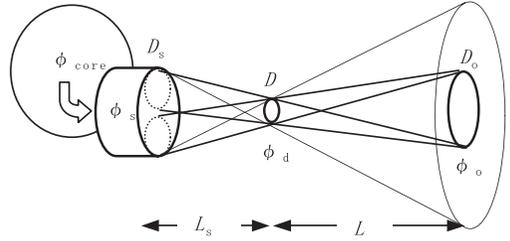


図7 基本的な中性子ビームの幾何学的因子と中性子強度の関係

$$\begin{aligned} \phi_o &= \phi_d / (4L/D)^2 \\ &\equiv \phi_s / [4(L+L_s)/D_s]^2 \end{aligned} \tag{2}$$

で表される。この式は面積 $\pi(D/2)^2$ のダイヤフラム面にある点線源 ϕ_d から、距離 L 離れた撮像面に到達する中性子フルエンス率を計算することで、容易に求められる。しかし、 ϕ_d はわからないのが普通である。いま、コアを発したビーム ϕ_{core} が中性子源 ϕ_s に到達するまでに係数 k で減衰するものとする、中性子フルエンス率 ϕ_o は (2) の代わりに、

$$\phi_o = k \cdot \phi_{core} / [4(L+L_s)/D_s]^2 \tag{3}$$

で表される²⁰⁾。もちろん $L_s \ll L$ 、であれば $\phi_d \equiv \phi_s$ であるから (3) は、

$$\phi_o \approx k \cdot \phi_{core} / (4L/D)^2 \tag{4}$$

と近似される。減速材、反射体付近の中性子フルエンス率は設計時に計算され、あるいは計測されている場合は多いので、未知数とした k はわかる場合がある。

フィルタが存在する場合には、これによる減衰が付加される。また、(2)~(4)は、中性子ビーム発生源の ϕ_s が均一であること、(1)の条件が成立しているものとしている。更に、飛行管内面からの散乱線成分が無視できるものとしている。散乱線成分が無視できない場合は、経験則から(2)の分母に近似的に $(L/D)^3$ の成分が付加される¹⁾。筆者も、TRIGA 炉のタンク内に設置された初期の内面をライニングしていな

い Al 製ビーム飛行管を用いた場合 $(L/D)^3$ の成分、すなわち ϕ_0 が (L/D) の 3 乗に逆比例することを確認している。飛行管内の散乱線が無視できない特殊な場合は別として、(4) によれば、 ϕ_0 は基本的には幾何学的因子 (L/D) の 2 乗に反比例する。

3・1 熱中性子ビーム

高速中性子を減速して、熱中性子ビームを得ている。

3・2 冷中性子ビーム

熱中性子ビーム飛行管内に、冷却した Be 等を挿入することによって、冷中性子ビームが得られる。減速材を冷却して得られる本格的な冷中性子ビームと区別して、熱下中性子ビームと呼ぶ場合もある。更に、Pb, Bi 等は、従来 γ 線の軽減に用いると考えられていたが、冷却していなくとも、このフィルタをビームの中間に置くことによって、熱下中性子ビームが得られることがわかってきている²¹⁾。この方式は、2・6 で述べたように、相対的に Bragg カットオフ以上のエネルギー成分を減衰させる方法なので、この部分が完全に無くなっているわけではないことは、記憶に留めておこう。

減速材の中に中性子ボトルを設置、この内部に液体水素、重水素、He 等を満たすことでその温度のマクスウェル分布の中性子ビームを発生させ、そこから中性子導管を用いて実験系まで取り出す方法がある。このビームは主に散乱実験などに用いられている。中性子イメージングでも、このビームを用いた画像取得を行っている。この方式は、中性子導管を用いているため、その断面寸法に近い矩形の切り口を持つビームとなることが特徴である。したがって、このビームを用いる場合は、撮像系を 2 次元的にスキャンして、大きな画像とするなどの工夫が必要である。中性子イメージング専用に使われている中性子導管として、例えば 2・10 節で述べた ORPHEE の導管 G4 に設置されてい

るのは、幅 2.5 cm、高さ 15 cm¹⁷⁾ であり、最も幅広いものといえよう。このビームの中性子フルエンス率は $9 \times 10^8 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、平均エネルギーは 3 meV である。

中性子導管を使用する際の利点は、高エネルギー中性子及び γ 線の混入が少ない純粹の冷中性子ビームが得られることにある。逆に問題点は、何も工夫しなければ、

- (1) 中性子イメージングとしては L/D が比較的低いこと、
- (2) 導管の構造から縦横の L/D 値が異なること、
- (3) ビーム面内の中性子フルエンス率が場所によって異なること、
- (4) エネルギー分布が場所によって異なること、等である。なお、熱中性子ビームを取り出す目的の導管もあり、 γ 線バックグラウンドを極端に嫌う捕獲 γ 線測定などに用いられているが、中性子イメージングにも利用可能である。しかし、これを利用したという報告はない。

3・3 極冷中性子ビーム

中性子導管から導出した中性子を回転ローターを利用し運動量を低減させて、速度を落とすしていく方法が用いられる。導管同様、このビームの面積は限られているので、スキャンなどの方法は必要である。現在、実験的にイメージを取得する研究は続けられているが、中性子イメージング専用のビームはない。

3・4 熱外中性子ビーム

減速材を高温度にしてマクスウェル温度を上げ熱外に持っていくという方法は、原理的には考えられる。しかし、このエネルギー領域のイメージングは、熱中性子ビームの高エネルギー領域を使い、特定のエネルギーに有感の検出系を、必要なら、熱中性子成分を遮蔽してイメージ取得をはかるのが普通である。

多くは、Cd, Dy, Au 等の共鳴エネルギーを利用してイメージの取得を行う。中性子イメー

ジングの領域で熱外という場合、多くは1 eVから数 eVを指すことが多いが、Fe/Al/S フィルタによる24.5 keVの中性子ビームを使用する例²²⁾など、数十 keV程度の共鳴を使う場合もある。

3.5 高速中性子ビーム

ビームの多くはフィッシュンスペクトルを用いる場合であるが、加速器起源のビームの場合のように単色のものも利用される。目安は1 MeV程度であるが、中性子イメージングの領域では100 keV以上をひっくるめて、高速中性子イメージングと称している。このエネルギー領域の検出は適当な核変換がないので、水素含有物質で水素の反跳現象を利用し、これを固体飛翔検出器などに飛跡を刻ませるか、発光型の検出器を用いて画像化している。

4. 照射装置の性能

前章までに、性能を決める幾つかの因子について述べてきた。それら因子は、新たに照射設備を設計する際の指針になるであろう。因子を決定する方法の詳細は、本講座応用編の第11回の規格化に関連して取り上げるので、ここでは簡単な説明に留める。

4.1 中性子フルエンス率

熱中性子ビームのフルエンス率は、金箔法が主流である。金箔の厚さによる自己吸収の補正等が十分なされていれば、信頼性のある方法である。

他のエネルギー領域の測定には異なった核種の各々共鳴ピークで行うのが普通である。

4.2 L/D と L 値

L/D の測定治具としては、ASTM Standard E803 Method²³⁾がある。細いCdのワイヤの像の本影が消滅する距離 l とワイヤ径との間で L/D を測定する。この方法は、系統的な誤差を生む可能性がある。他に、数種の測定法が発表

されており、その中で上の方法に加えてGreim法とKobayashi法がある²⁾。Greim法はマッチ箱より少し大きい程度で、測定精度は参考値程度になると考えられる。Kobayashi法は L/D に加え、画像拡大に関連する因子 L 値も1%程度の高精度で測定できることが特徴である。

4.3 線質

従来、中性子イメージングの分野では、連続スペクトルのビームを用いていること、TOF (time-of-flight: 飛行時間) 法を用いることが困難なことなどから、減速材で減速したビームを熱中性子ビーム、中性子導管のビームを冷中性子ビーム、弥生炉のように高速中性子炉で発生するビームを高速中性子ビームとして、スペクトルの微妙な相違はあまり問題にすることはなかった。これは、簡便な中性子スペクトルの計測法がTOFの他に無かったことにもよる。

最近、中性子イメージングに定量性が重視されるようになってきているが、それに伴って連続冷・熱中性子ビームに対して、物質の透過特性の相違から、そのビームのエネルギー情報を実効エネルギーと称して取得する治具が開発された²⁴⁾。この方法は、実用上同じ中性子ビームでも、各施設の間で異なった値を与え、特に熱中性子ビームと信じられていた、フィルタを有するビームは、熱中性子ビームからはかなり低エネルギー側にシフトしていることが明らかにされている²¹⁾。

4.4 散乱線と γ 線

ビーム中に、最初から混在する成分と、被写体及び周辺の遮蔽体などの構造物から発生する成分がある。ビーム中に混在する両成分は、共に中性子源起因のものと、ダイヤフラムや飛行管などのビームパス周辺で発生したものがある。 γ 線成分はフィルタ1などで低減しているビームもある。その中で中性子導管は曲線状の導管を用いるのが普通であるが、これにより発生源から直進する γ 線や高エネルギー散乱線成分

の大部分が除去される。

周辺の遮蔽体などの構造物から発生する成分は、散乱線を軽減する物質でその構造物の表面を覆うか、可能な限り被写体から離す構造にする必要があるが、いずれにしても限度があり、中性子導管を除いては、結局は(10~20)%前後の散乱線成分は避けられない。

被写体にビームが照射されると、それ自身から散乱された成分や捕獲 γ 線が生成されるが、この信号が画像に重なることになる。この成分は、被写体ごとに異なるのは当然であり、避けることもできない。この成分は被写体の端部で大きな効果を与え、画像の周辺部分に画像濃度上の歪みをもたらす。

この散乱線成分は、画像に影響を与える γ 線と共に、低減できればそれに越したことはないが、これが問題になる場合は、評価、補正すればよい。その評価法は幾つか提案されているが、その中で画像の数か所に被写体の中性子源側に中性子に不透過の物質を置き、これを写し込むことによってその本影部分に観測される信号を、 γ 線成分を引くくめて散乱線成分とする方法がある²⁵⁾。この方法は、かなり信頼性の高い方法であるが、その影の部分の情報を取得できないと言う欠点がある。ただし、この問題は、静止画像を撮る場合には、不透過物質の位置を変えて像を複数回撮像することで補完解消できる。

他に、撮像面近くにグリッド状の中性子透過物質を置く方法も古くから提案されているが、やはりグリッド部分の情報を失うという欠点、グリッドの厚さと有効径の比以内の散乱線成分は除去できない欠点がある。逆にその比を大きくすると、撮像できる面積がダイヤモンドの大きさしかとれない欠点が出てしまう。

いずれにしても、決定的な手法はなく、この散乱線成分の定量は画像処理にとって、悩ましい問題となっている。特に、中性子断層撮影を行う場合のように、広いダイナミックレンジが要求される場合、散乱線の評価の可否によって

は主要な限界を与えることになる。

5. 終わりに

中性子ビームの発生源から、撮像されるまでのビーム形成に関係する部分と、問題点などを述べてきた。本講座では、最も多用されている、熱中性子ビーム、それも原子炉を中性子源とするビームを念頭に置いて論じた。もちろん、加速器起源のビーム、高速中性子ビームなども使用されている。これらのビームでも、参考になる部分が多いはずである。これから新たに中性子ビームを形成しようとする際にも、参考になろう。

文 献

- 1) Domanus, J. C. et al. eds., Neutron Radiography Handbook, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht (1981)
- 2) Domanus, J. C. ed., Practical Neutron Radiography, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht (1992)
- 3) Barton, J. P. and Der Hardt, P. V. eds., Neutron Radiography [(1)], D. Reidel Publ. Co., Dordrecht (1982)
- 4) Barton, J. P., Farny, G., Person, J.-L., and Röttger, H. eds., Neutron Radiography [(2)], D. Reidel Publ. Co., Dordrecht (1987)
- 5) Fujine, S., Kanda, K., Matsumoto, G. and Barton, J. P. eds., Neutron Radiography (3), Kluwer Acad. Publ., Dordrecht (1990)
- 6) Barton, J. P. ed., Neutron Radiography (4), Gordon and Breach Sci. Publ., Yverdon (1994)
- 7) Fischer, C. O., Stade, J. and Bock, W. eds., Neutron Radiography (5), DGZfp (1997)
- 8) Fujine, S., Kobayashi, H. and Kanda, K. eds., Neutron Radiography (6), (Gordon and Breach Sci. Publ., Amsterdam (2001); collected papers were published by *Nondestr. Test. Eval.*, **16**, (2-6) (2001)
- 9) Chirco, P. and Rosa, R. eds., Neutron Radiography (7), ENEA, Rome, (2002); collected a few papers were published by *IEEE Trans Nucl. Sci.*, **52**, (1) Feb. (2005)
- 10) Kobayashi, H. and Mochiki, K. eds., Neutron Radiography System Design and Characterization, ITMNR-2, *Nucl. Instrum. Methods*, **A377**, (1) (1996)

- 11) Wittemore, W. L. and Berger, H., in ref. 3) pp. 23-33
 - 12) Wittemore, W. L. and Nir-El, Y., in ref. 5) pp. 145-157
 - 13) Markgraf, J. F. W., Leeftang, H. P., Otterdijk, K. H. V., in ref. 5) pp. 121-130
 - 14) Kobayashi, H., in ref. 9), pp. 21-31
 - 15) Kobayashi, H., Leeftang, H. P., Markgraf, J. F. W., Proc. 6th European Conf. on Non Destructive Testing, (Nice, 1994) 805-809
 - 16) Balasco, M., Balasco, Zs., Balogh, E., Tanacs, A., Katona, E. and Kuba, A., in ref. 9) pp. 637-650
 - 17) Rant, J., Gabel, D., Bayon, G., Yanagie, Y., Kobayashi, H. and Lehmann, E., in ref. 8) pp.303-309
 - 18) Berger, H., Neutron Radiography : Methods, Capabilities and Applicationz, Elsevier Publ. Co. Amsterdam (1965) ; Photocopy Edition : industrial Quality, Inc. Gaithersburg (1995)
 - 19) DeVolpi, A., in ref. 3) pp. 661-669
 - 20) Kobayashi, H., *Nondestr. Test. Eval.*, **16**, 121-129 (2001)
 - 21) Kobayashi, H., in ref. 9) 21-31 (2002)
 - 22) Beynon, T. D. and Constantine, G., in ref. 5) pp.671-676
 - 23) 例えば Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.03 (1992, 但し改訂版が毎年発行されている)
 - 24) Kobayashi, H. and Kiyanagi, Y., in ref. 10) 52-57 (1996)
 - 25) Kobayashi, H., and Satoh, M., *Nondestr. Test. Eval.*, **16**, 131-139 (2001)
-