1 解説

中性子フィルタビームとその応用

(京都大学原子炉実験所) 藤田 薫 顕,

(東京工業大学原子炉工学研究所) 山室 信 弘

ウィンドウフィルタを用い、連続的なエネルギー分布の中性子源から、共鳴エネルギー領域において単色のクリーンな中性子ビームを得る方法と、こうして得られた中性子の種々の分野への応用例について紹介する。

I. はじめに

原子炉の実験孔から得られる中性子や強力な加速器によって得られる中性子は普通、連続的なエネルギースペクトルをもっている。この中性子の単色化には種種の方法が用いられているが、本稿では、共鳴フィルタによって中速領域の単色ビームを得る装置とこれの応用例について紹介する。共鳴フィルタとは、いわゆる複合核弾性散乱とポテンシャル散乱の干渉によって、共鳴エネルギーの近傍で全断面積の値がきわめて小さくなる物質で作られたフィルタを指して、このフィルタを透過させることにより単色ビームを得ようとするものである。

このような装置が世界で最初に用いられたのは、おそらく、1968年に、Idaho Falls の MTR で Sc を用い、エネルギー 2 keV のビームを 800 eV の幅で得たものであろう⁽¹⁾。現在では、米国⁽²⁻⁴⁾のほか、ドイツ⁽⁵⁾、インド⁽⁶⁾、ソビエト^(7,8)、日本⁽⁹⁾など多くの原子炉に設けられていて、フィルタの種類も Sc のほかに、U, Fe, Si, O なども使用されるようになった。ビームのエネルギーをみると、Uからは186 eV, Feからは24 keV, Siからは55と144 keV, Oからは2.35 MeV のビームが得られている。

フィルタビームの特徴は、

- (1) 速中性子と γ 線の混入が少ないクリーンなビームが得られること
- (2) ほかに適当な中性子源の少ないエネルギー領域に適当な共鳴フィルタが見られること
- (3) エネルギー分解能はよくないが(～10%)それだけ強度が強く、利用法によっては好都合であること

- (4) 装置が単純で安定であること

などである。利用については種々の可能性があるが、目下、中性子断面積の測定、中性子捕獲 γ 線スペクト

ロスコピー、中性子検出器の開発と較正などの分野において用いられている。

次章より、フィルタ物質の断面積、個々のフィルタ物質、原子炉を用いたフィルタ設備、加速器を用いたフィルタ設備、フィルタビームの応用例について紹介していく。

II. 中性子断面積の極小とフィルタ物質

フィルタ物質としてどのような物質を用いることができるかを検討するには、BNL-325などの全断面積の図表を調べてみればおおよそのことはわかる。しかしながら、断面積が顕著な極小を示すには物理的に明確な理由があり、個々のフィルタの具体例や他のフィルタの可能性を考える場合に、この理由についてあらかじめ理解しておくのが有益である。

共鳴領域では、散乱と捕獲が主たる反応である。そのうち干渉効果は散乱に関して生ずるもので、散乱断面積の形は、第1図に示すようなものになり、Breit-

第1図 複合核弾性散乱とポテンシャル散乱の干渉

Filtered Neutron Beam and Its Application, Yoshiaki FUJITA, Nobuhiro YAMAMURO.

(1980年 12月26日 受理)

Wigner の 1 準位公式によってよく記述される。比較的低いエネルギーなので s 波が支配的で、かつ簡単のためフィルタ物質の基底状態の核スピンはゼロ、捕獲はないと考えよう。すると散乱断面積は、

$$\sigma_s(E) = \frac{\pi}{k^2} \left| 2 \sin(ka) \exp(ika) + \frac{\Gamma_n}{(E - E_R)^2 + i\Gamma_n/2} \right|^2 \quad (1)$$

ここで E : 入射中性子エネルギー

k : 入射中性子の波数

a : 散乱ポテンシャル半径

E_R : 共鳴エネルギー

Γ_n : 中性子幅

となる。(1)式右辺の絶対値記号内の第1項がポテンシャル散乱に対する散乱振幅、第2項が複合核散乱に対する散乱振幅であり、絶対値の2乗をとれば、それぞれポテンシャル散乱と複合核散乱に対する断面積、さらに両者の干渉項が導かれる。

さて、干渉によりどの程度断面積が小さくなるのかを考えてみよう。極端な場合として、ゼロになるかどうかであるが、簡単な計算をすれば、次の(2)式を満たすエネルギー E_m で散乱断面積はゼロとなることがわかる。

$$\tan(ka) = \frac{\Gamma_n/2}{E_R - E_m} \quad (2)$$

ここで、 k, Γ_n ともに E_m の関数であるが、(2)式の性質を調べることによって、通常は第1図のように共鳴の低エネルギー側で散乱断面積がゼロになることがわかる。極端な場合として、 $ka \sim \pi/2$, $E_R \sim E_m$ の場合に(2)式が満足されると、共鳴エネルギーにおいて断面積がゼロということになる。酸素の 2.35 MeV の共鳴は、この極端な例にあっている。

さて、以上の検討から、核スピンがゼロ、すなわち偶々核の物質はフィルタとしての可能性が高いことがわかった。しかしながら、実際問題としては、このような理想的な場合は起り難い。なぜなら、

- (1) 捕獲断面積がある。
- (2) p 波, d 波などが、それぞれ独自の散乱断面積をもっている。
- (3) 核スピン I がゼロでない場合がある。この時は、特定の共鳴では全角運動量が規定されてしまいうので、 s 波だけを考えても、核スピンと中性子のスピンが平行・反平行いずれかについてしか、前述のような断面積極小をもたらす干渉を考えることができない。すなわち、複合核散乱はポテンシャル散乱の一部とだけしか望むよ

うな干渉をしないことになる。

- (4) 単一なアイトソープ構成でない場合が多い。などがある。

このような理由で、断面積が完全にゼロとなることはないが、断面積の平均的な値と極小値の比が大きいものはフィルタとして用いられる。この比は10程度以上はほしい。(3)の理由に関し、平行・反平行の2種の共鳴のエネルギーが接近した場合はどうなるであろうか。この場合の例については第II-4節で述べることにする。以下、現在使用されている各フィルタについて、中性子エネルギーの高いものから説明する。

1. 酸素

偶々核である ^{16}O が 99.758% を占め、第2図に示すように、2.35 MeV の共鳴エネルギー上に干渉による極小が生じている。適当な化合物がなく、具体的な使用にあたっては液体酸素を用いなければならず、取扱いが容易ではない。しかし、原子炉から 2.35 MeV の単色中性子を取り出せることは興味深く、米国ミズーリ大炉にて用いられている¹⁰⁾。

第2図 酸素の中性子全断面積

2. シリコン

^{28}Si が 92.23%, ^{29}Si が 4.67%, ^{30}Si が 3.10% よりなり、 ^{28}Si の「ウィンドウ」(断面積の極小付近で中性子が透過することからこのようにいう)が 146 と 55 keV にある。フィルタの設計に用いるウィンドウ近傍の断面積の値について、BNL-325 や ENDF/B-IV の値は必ずしも満足すべきものではないと思われる。京大炉ライナックを用いて測定した例⁽¹¹⁾を第3図に示す。材料の入手については、半導体製品の素材でもあり、比較的容易である。

3. 鉄

この場合も、偶々核である ^{56}Fe が 91.8% と多くを占め、残りは ^{54}Fe , ^{57}Fe , ^{58}Fe である。約 24 keV に最もよく利用されるウィンドウがあり、第4図に示されて

第3図 Siの146 keV ウィンドウ近傍
の中性子全断面積

いるように、種々の測定がほぼ一致した断面積値を与えている⁽¹²⁾。フィルタとする材料の選択にあたっては、99.9%以上の純度のものを用いれば十分と考えられるが、一般構造物用のFeを用いると、不純物としてのMnがビームの透過に若干の影響を及ぼすことがある⁽¹³⁾。Feフィルタで特に興味のあることは、 ^{56}Fe だけをアイソトープ分離していると、ウィンドウの

第4図 Feの24.3 keV ウィンドウ近傍
の中性子全断面積

断面積が第5図に示されるようにきわめて小さくなり⁽¹⁴⁾、フィルタビームを減ずることなく十分厚いフィルタを用い、速中性子や γ 線の混入を極力避けることができることである。この例は、単一のアイソトープからなる物質を用いることにより、種々のフィルタが考えられることを示唆している。ただ、単一のアイソトープを用いようとすればきわめて多額の費用を要することになる。 ^{56}Fe は実際に用いられているが、これはメスパワー効果の実験のために ^{57}Fe を分離した際に得られた副産物としての ^{56}Fe であるということで、幸運な話である⁽¹⁴⁾。

第5図 ^{56}Fe の24.3 keV ウィンドウ近傍
の中性子全断面積

4. スカンジウム

2 keV 近傍の断面積を第6図に示す⁽¹⁵⁾。 ^{46}Sc が100%であるが、前述のように $I=7/2$ でゼロでない場合に顕著なウィンドウの生ずる例である。s波の2種の共鳴が近接し、2種のウィンドウが重なって1つのウィンドウをつくっている。2 keV ウィンドウ近傍の断面積測定値については、種々異なる値が発表されているので、フィルタの製作にあたっては十分にこれに留意しなければならない。最小値について、第6図では 0.71 ± 0.03 b であるが、さらに最近の例では 0.27 ± 0.07 b という報告⁽¹⁶⁾があり、京大炉ライナックを用いた著者らの測定では 0.25 ± 0.05 b 程度の結果が得られている。測定としては単純なはずの全断面積の測定結果がこのように異なることについて、この場合は試料中の不純物が関係しているのではないかと推定される。

第6図 Sc の中性子全断面積

5. ウラン

^{235}U には多くのウィンドウがあり、186 eV のものが比較的顕著なため用いられる。他のウィンドウの中性を除くため特別な配慮を必要とするが、この配慮は既に述べたフィルタについても、多かれ少なかれ必要なことで、次章で触れることにする。

Ⅲ. 原子炉を用いたフィルタ設備

フィルタは、目当てとするウィンドウ以外にも、他のエネルギーのウィンドウをもつのが普通である。このため、単色な中性子を得ようとすると、不要なウィンドウからの中性子を除くのに第2フィルタが必要となる。第2フィルタの中性子全断面積は、主フィルタの目当てとするエネルギーでは小さくて、不要なウィンドウでは大きくなければならない。このほか、高速中性子、ブラッグ切断エネルギー以下の中性子、 γ 線などに対する透過率が大きいと、それぞれ S, B, Pbなどをさらに追加することになる。

フィルタは、原則的に不要な中性子を散乱により取り除く。したがって、フィルタをあまり中性子源の近くに置くと、まだ中性子は十分コリメートされていないため散乱によって不要な中性子が混入するし、逆に中性子の検出器の近くに設けると、フィルタで散乱した中性子がバックグラウンドを増加させることになる。このため、中性子源と検出器の中間位置に設けることが望ましい。原子炉のビーム孔に設ける場合の代表的な配置を第7図に示す。普通は(a)のような配置になるが、不要な中性子や γ 線を効果的に減ずるため、(b)または(c)のような配置をとることもある。もちろん、中性子収量は(a)が多い。

フィルタの長さ(細長いものになるので厚さよりも長さといった方がよい)は、次のような諸点を考慮し

RC: 炉心 F: フィルタ A: 補助フィルタ
SC: 散乱体 D: 検出器または試料

第7図 原子炉実験孔におけるフィルタの配置

て決められる。例えば、長くすると、①高速中性子や γ 線の混入が減り、よりクリーンなビームとなり、②ビームのエネルギー幅が狭くなるが、③目当てとする中性子の収量が減り、④フィルタ材を多く必要とする、ことになる。実際に設置する場合には、ビームの使用目的にも関連して、これらの諸点に対する重みが場合場合によって異なってくる。種々の実例をみても、長さは画一的なものではないようである。

ここで、実例に対する諸元を紹介しておこう。中性子収量、高速中性子と γ 線の混入量、フィルタの種類と長さなどである。実例の多くを載せるのには誌面を要するので、代表的なものを第1表に紹介する。個々の例については、既出の文献(2)~(9)、また包括的な調査報告⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾を参照されたい。第1表の例からみて、10 MW 級の炉から、種々のビームに対し、 $10^5 \sim 10^6 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 程度の中性子束が得られることがわかる。さらに、重いフィルタは数 10 cm の長さ、軽いフィルタは 1~2 m の長さを要し、また γ 線減弱用鉛などの必要なこと、補助フィルタは数 cm 程度のものであることもわかる。

さて、実際の使用に先立って、不要な中性子の混入がどの程度のものであるかを、実験的に確かめておく必要がある。不要な中性子の量だけでなく、できれば、目当てとするビームのスペクトルをも測定したい。keV 中性子のエネルギー測定は特に難しい測定とされているが、水素ガスカウンタを用いて測定される場合が多い。というより、中性子検出技術の開発をしながらビームの質を定めている、という方が当を得ている

第1表 原子炉に設けられたフィルタ設備の典型的な特性例

中性子エネルギー (keV)	主フィルタ物質とその長さ (cm)	補助フィルタ物質とその長さ (cm)	中性子ビームの直径 (cm)	中性子強度 (n/s)	中性子束 (n/cm ² ・s)	高エネルギー中性子の混入割合	γ 線量率 (mR/h)
0.186	U: 43.2	Se: 0.23 Mn: 0.90 Ge: 0.32	2.7	1.9×10^6	3.3×10^5	0.32	7.5
2.0	Sc: 84.8	⁶⁰ Ni: 5.0 ⁵⁴ Fe: 1.0 Co: 2.0	1.27	—	4.7×10^4	0.15	15
24	Fe: 58.4	Al: 20.3 S: 5.1 Pb: 5.1	3.8	5.3×10^6	4.6×10^5	<0.01	15
144	Si: 211	—	3.8	1.1×10^7	1×10^6	0.01	1,200
2,350	O(液体): 183	Bi: 8.0	—	4.9×10^5	8.5×10^4	0.02	<25

この表は、10 MW 出力、高濃縮U軽水冷却、Be および黒鉛反射のミズーリ大炉の例である。

かも知れない。熱中性子の混入に対しては、放射化法やBF₃カウンタなどが使用できる。また、実験中のバックグラウンドの見積りのため、目的のエネルギーの中性子だけを散乱する散乱体をビーム中に入れて測定を行い、目的以外中性子の影響を測定する、いわゆるディファレンス法を用いる場合もある。

実際に装置を設ける場合には、フィルタの放射化や放射線発熱の問題が生じるし、原子炉の運転中にフィルタの種類を交換し、ビームのエネルギーを変えられるようにする工夫なども必要となる。これらに対しては、中性子源側の強さにより、種々異なる程度の対処が必要となってくる。

Ⅳ. 加速器を用いたフィルタビーム

加速器による中性子源の多くはパルス化されていて、飛行時間法による測定には好都合である。平均中性子発生量としては原子炉に劣りながら、種々の中性子実験にとって加速器が有用なのは、中性子の発生がパルス化されていることによる面が多い。中性子エネルギーが飛行時間弁別されているのに、さらにフィルタにより単色化するのは一見不必要に思える。しかしながら、次に説明していくように、使用方法によっては、ビームの無駄をしてでも単色化する積極的理由がある。使用例は原子炉ほどには多くはないが、京大炉、RPI⁽¹⁹⁾、ORNL⁽²⁰⁾などの電子線型加速器にみられる。

パルス状中性子を飛行時間弁別して実験を行うと、一度の測定によって多くのエネルギー点でのデータが得られる。この場合、正しい飛行経路を経ずに正しくない時間に検出器に到達する中性子は、いわゆるバックグラウンドと呼ばれ、この多少が実験データの信頼度を左右する場合が多い。フィルタにより不要な中性

子を取り除くと、このバックグラウンドを非常に少なくすることができ、さらに飛行時間弁別によってバックグラウンドの量を精度よく測定することができる。エネルギー点としてはウィンドウに相当する点だけになるが、データの信頼度を向上させることができる。このことに、わざわざフィルタを用いる積極的理由がある。具体的な利用例については次章で述べる。

フィルタビーム技術上、パルス化されている中性子源の場合には、定常源である原子炉の場合に比べて都合のよい面が多い。まず、不要なウィンドウからの中性子は、目当ての中性子とは異なる時間に検出器に到達するので、原則として第2フィルタを必要としないことである。もちろん、不要な中性子の混入度合いをみるのはきわめて易しい。次に、中性子のエネルギー幅は加速器のパルス幅で決まるのではなく、フィルタの長さで決まり、加速器をほぼ全出力運転できることである。さらに、電子線型加速器からのγフラッシュによる影響をフィルタで抑えられることも実験遂行上大変好都合であることなどがある。

第8図に、京大炉ライナックの水冷Taターゲットと5 cm厚ポリエチレン減速材よりなる中性子源からのエネルギースペクトルと、各種フィルタの主ウィンドウから得られる中性子の量とを比較してある。第2表には、ある中性子源に対して、飛行管の先端でどの程度のフィルタビームが得られるかの例として、同じく京大炉ライナックの全断面積測定用22 mTOF系についての値を示す。

Ⅴ. フィルタビームの応用例

フィルタビームの応用例をすべて紹介することはできないので、ここでは、性質の異なるものを例示して

第8図 京大炉ライナックターゲット系からの中性子エネルギースペクトルと各種フィルタを用いた際に得られるフィルタビーム

第2表 京大炉ライナックにおける22 m TOF スペクトロメータ諸元

ライナック運転条件	
エネルギー	30 MeV
ピーク電流	0.6 A
ビーム幅	0.6 μ s
繰り返し数	166 pps
中性子発生量	1×10^{12} n/s
ターゲット	
水冷 Ta ターゲット	$\sim 5 \text{ cm} \phi \times 3 \text{ cm}$
ポリエチレン減速材	$20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$
飛行管系	
長さ	22 m
ターゲット側コリメータ径	10 cm
検出器側コリメータ径	10 cm
中間位置コリメータ径	5 cm
γ フラッシュ遮蔽	$5 \text{ cm} \phi \times 20 \text{ cm}$ Pb
フィルタ挿入位置	ターゲットより 1 m, 10 m
検出器位置における中性子量	
30 cm Fe フィルタの場合	380 n/s (24 keV)
75 cm Si フィルタの場合	160 n/s (55 keV)
	1,350 n/s (147 keV)

いく方針で紹介してみる。

1. 中性子断面積の高精度測定

中性子断面積を広いエネルギー範囲にわたって測定することは大切であるが、これと同じく、少数のエネルギー点ながら信頼性の高い測定を行うことも重要である。まず、第9図を注目されたい。これは、京大炉ライナックの全断面測定系におけるFeフィルタを用いた場合の中性子飛行時間スペクトルである。試料は挿入されてなく、NaIシンチレータで計数された。Cの部分の約24 keVのフィルタビームであり、左右のA・Bがバックグラウンドと見なされるものである。なぜなら、A・B部ではFeの断面積が大きく、これら

第9図 22 m TOF系におけるFeフィルタビームの飛行時間スペクトル

のエネルギーの中性子は検出器に入らないはずなのに計数されるからである。CとAまたはBの比が大きく、バックグラウンド量の少ないこと、AとBを内挿することによってC部から容易にバックグラウンドを差し引けること、本番測定と同じ測定で同時にバックグラウンドが測定されていること、これらすべてのことは断面積測定の精度向上にとってきわめて好都合である。試料をビーム中に挿入しても同じ話となり、24 keV中性子に対し全断面積を0.1~0.3%程度の精度で測定することが容易となる。この例は、 $\text{H}^{(21)}$ のほかC $^{(22)}$ 、O $^{(22)}$ 、Be $^{(22)}$ の断面積の高精度測定にみられる。述べるのが遅れたが、フィルタビームを用いる測定ではエネルギー分解能を重視しないので、ビームのエネルギー幅中で全断面積がほぼ一定であるか、または統計的に十分な変動をしてその平均値が意味をもつ必要がある。Hなどは前者の例にあたり、後者の例としてThについての測定 $^{(23)}$ がある。後者の場合をさらに考えてみると、試料が厚くなると自己遮蔽効果が現れ、さらに試料の温度を変化させるとドップラー効果の影響が現れてくる。このとき、全断面積を精度よく測定すると、分子結合状態によりドップラー効果が微妙に変化するのが測定される。米国ミズーリ大の原子炉で

Fe, Si フィルタを用いて $\text{Sn}^{(24)}$, $\text{U}^{(23)}$, $\text{U}_3\text{O}_8^{(25)}$ に対するドップラー効果が測定された。相変化や溶解がどのようにドップラー効果に影響するかを知る参考として, Sn の測定例を第10図に示す。U金属と酸化物の違いについては原論文を参照されたい。

全断面積測定のほかに, ^{235}U , ^{239}Pu に対する核分裂断面積が, 2, 24, 55, 144 keV のビームを用いてソビエトの Obninsk 炉で⁽²⁶⁾, また $^4\text{He}(n, p)$ と $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 断面積の比が熱中性子と 2 keV のビームを用いて米国 NBS 炉⁽²⁷⁾で測定された。また, 144 keV ビームにより ^{238}U の非弾性散乱断面積がミズーリ大炉で測定されている⁽²⁸⁾。この実験で弾性散乱と非弾性散乱の分離は水素ガスカウンタを用いて行われた。第11図に結果を紹介する。

捕獲断面積の測定では, 京大炉ライナックで, 親物質や核分裂生成核, 核融合炉材料に対する測定⁽¹³⁾が Fe フィルタを用いて行われ, keV 領域における連続ビームによる測定⁽²⁹⁾をこれにより規格化している。また RPI-Linac では, Fe フィルタにより数種のビームを得て ^{238}U に対する測定がなされた⁽¹⁹⁾。

keV 領域での捕獲断面積は, 工学的なもののほか, 宇宙における元素合成過程の研究に関連している。Fe 近くまでの元素は, より軽い核の融合により生じたが, これより重い核は次々と中性子を捕獲することにより生まれたとされ, 精度よい捕獲断面積の測定によって宇宙の年代が推定できる。この目的のため, インドの Bhabha 炉では, Fe フィルタビームにより $A=51\sim 187$ の19核種について, 放射化法により放射化断面積が測定された。フィルタビームが放射化実験

に耐える強度をもつことを示す例である。

2. 捕獲γ線スペクトロスコピー

熱中性子捕獲γ線スペクトルのデータは多く蓄積されている。このデータは, 核の崩壊形式の決定など核物理の研究上, また遮蔽の計算など工学的見地から重要なものである。熱中性子に対するデータが多いのは, 熱中性子が多量に得やすいこと, 試料の捕獲断面積が熱中性子領域で大きく測定が容易であったこと, などによると思われる。

ところで, 熱中性子捕獲は, 一般に s 波の2種の捕獲の混合されたものである。これに対し, 特定の共鳴での測定を行えばこの混合が解けてスピン・パリティとして純粋な状態からの崩壊が決定できる。さらに多くの共鳴に対して測定を行えば, 初期状態に対して統計的平均を行なったγ線スペクトルが得られる。Sciによる2 keV ビームは主として s 波の捕獲を起し, Feによる24 keV のビームは p 波の成分が含まれていて⁽³¹⁾, いずれも統計的平均を行なったスペクトルを測定するのに適している。

捕獲γ線スペクトルの測定では, いわゆるパイルア

ップのため瞬間的に強い中性子源を用いたり、検出効率をあまり大きくするのは望ましくない。この意味からも、また平均的強度からみても、原子炉によるビームが加速器によるものに比べて勝っている。第12図に、熱中性子、Sc ビーム、Fe ビームによる捕獲 γ 線スペクトルの例を示す。

第12図 入射中性子エネルギーの違いによる Mn に対する捕獲 γ 線スペクトルの違い

3. 中性子検出器の開発と校正

keV 領域は、適当な中性子源の少ない領域であるし、中性子エネルギー測定の大変な領域でもある。フィルタビームが、このエネルギー領域での格好の校正線源であることは説明するまでもなかろう。特に、減速材を付けて時間応答の遅い検出器は、飛行時間法を用いた校正に適していないので、原子炉からのフィルタビームが極めて有用である。フィルタ設備の技術報告である文献(1)~(9)は、多かれ少なかれスペクトル測定技術の報告を含んでいる。

4. その他の応用

前記3種の応用分野では、フィルタビームが既に有用に用いられている。その他いくつかの分野での応用が考えられているが⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾、著者らの専門分野外でもあるし、今後利用の可能性が追求されるべき状態にあるとも考えられるので、これらは列挙するだけに止めたい。

(1) 医学・生物学的应用, (2) 中性子ラジオグラフィー, (3) 放射線損傷

Ⅶ. おわりに

以上、フィルタビーム装置の技術的な面と、これの代表的な応用例について紹介してきた。

現在用いられているフィルタは U, Sc, Fe, Si, O であるが、Ne を用いれば 420 keV のビームが得られるし、Zn, Fe, Ni の単一アイトソープを用いることができれば、30 eV から 2.3 MeV の間で 20 エネルギー点のビームが可能であると考えられている⁽¹⁹⁾。

応用については、既に有用性が認められた分野もあれば、これからの分野もある。いずれにせよ、他の中性子源が少ないエネルギー領域であるので、フィルタビームの有用性は確保されているだろう。フィルタ装置は既に世界各国の原子炉に備えられ、種々の分野で利用されているが、わが国における例は現在のところきわめて少ない。著者らは、加速器におけるフィルタビームについてのみ、その応用の経験をもつが、あえてこのような解説を試みたのも、いまからでも国内の原子炉および加速器に備えて応用し、さらに応用分野を拡げていく価値があると考えためである。

終りに、第1表については、ミズーリ大学 Brugger 博士より最新の情報が寄せられました。ここに謝意を表します。

—参考文献—

- (1) SIMPSON, O.D., MILLER, L.G.: *Nucl. Instrum. Methods*, **61**, 245 (1968).
- (2) TSANG, F.Y., BRUGGER, R.M.: *ibid.*, **134**, 441 (1976).
- (3) GREENWOOD, R.C., CHRIEN, R.E.: *ibid.*, **138**, 125 (1976).
- (4) SCHWARZ, R.B.: *Proc. Int. Specialists Symp. on Neutron Standards and Applications held at the National Bureau of Standards*, p. 493 (1977).
- (5) ALBERTS, W.G.: *Nucl. Instrum. Methods*, **155**, 307 (1978).
- (6) CONDAIAH, E., et al.: *ibid.*, **111**, 337 (1973).
- (7) BRODER, D.L., et al.: *Yadern. Fiz.*, **13**, 3 (1971).
- (8) KUZIN, E.N., et al.: *Atom. Energ.*, **35** [6], 391 (1973).
- (9) 中沢正治, 他: 弥生共同利用成果報告書, UTNL-R-0062, 31 (1977).
- (10) ROBERT, A.K., BRUGGER, R.M.: *Nucl. Instrum. Methods*, **166**, 339 (1979).
- (11) 北田章二: 近畿大学原子炉工学卒業論文, (1978).
- (12) KOBAYASHI, K., et al.: *Ann. Energy*, **4** [9], 449 (1977).
- (13) YAMAMURO, N., et al.: *J. Nucl. Sci. Technol.*, **15** [9], 637 (1978).
- (14) LIU, H.I., et al.: *Nucl. Sci. Eng.*, **70**, 150 (1979).

- (15) LIOU, H.I., *et al.*: *ibid.*, 67, 326 (1978).
 (16) BAZBUDEY, V.F., *et al.*: *Proc. Conf. on Nucl. Cross Sections for Technol.*, Knoxville, GD9 (1979).
 (17) MILL, A.J., HARVEY, J.R.: Reactor- and accelerator-based filtered beams, Central Electricity Generating Board, Berkeley Nuclear Laboratories, RD/B/N4776, (1980).
 (18) BLOCK, R.C., BRUGGER, R.M.: Filtered beams, "Neutron Physics and Nuclear Data in Science and Technology", Chap. V, To be published.
 (19) QUAN, B.L.: The measurements of the $^{238}\text{U}(n, \gamma)$ cross section with an Fe-filtered neutron beams, Master Thesis at RPI, (1976).
 (20) HARVEY, J.A.: keV neutron total cross section measurements at ORELA, *Proc. ANS Topical Meeting on New Developments in Reactor Physics and Shielding Calculating*, CONF-720901, (1972).
 (21) FUJITA, Y., *et al.*: *Nucl. Phys.*, A 258, 1 (1976).
 (22) BLOCK, R.C., *et al.*: *J. Nucl. Sci. Technol.*, 12[1], 1 (1975).
 (23) KOBAYASHI, K., *et al.*: *Nucl. Sci. Eng.*, 65, 374 (1978).
 (24) TSANG, F.Y., BRUGGER, R.: *ibid.*, 74, 34 (1980).
 (25) *idem*: *ibid.*, 72, 52 (1979).
 (26) ZHURAVLEV, K.D., *et al.*: *Atom. Energ.*, 42[1], 56 (1977).
 (27) BOWMAN, C.D., *et al.*: 文献(10), AC6.
 (28) TSANG, F.Y., BRUGGER, R.: *Nucl. Sci. Eng.*, 65, 70 (1978).
 (29) YAMAMURO, N., *et al.*: *J. Nucl. Sci. Technol.*, 17 [8], 582 (1980).
 (30) ANAND, R.P., *et al.*: *NOUVE CIMENTO*, 50A, [2], 247 (1979).
 (31) STELTS, M.L.: 文献(10), IA3.

日本人技術者のために作られたQA/QCの指針

ASME**品質保証マニュアル**

● ASME関連業務がスムーズに推進できる解説書

発売中

本書の用途 ▶

- ASME規格に基づく設計、製造、検査の計画
- QA/QC体制の設定・維持
- ASME工事の営業・受注活動
- 他規格適用工事の参考に
- 新入社員および管理者の教育・訓練
- ASMEスタンプ（原子力・非原子力）の取得、維持、更新
- ASME QSCの取得、維持、更新

著者 石川島検査サービス(株) 熊谷伸一
 体裁 A4判 550シート バインダー装丁
 定価 79,000円

■ 詳しい資料をご請求ください。
 TEL. 03(365)1660代

〒160 東京都新宿区百人町1-22-27 太陽ビル

アイピーシー