

## 中性子散乱実験のための中性子源

北大工 鬼柳善明

### I. はじめに

中性子散乱実験は液体や固体の原子スケールでの運動や構造を調べるために用いられる。中性子の測定は光学的方法を追うような形で発展してきたが、特に、磁性体の磁気構造の研究や最近の生体分子、高分子の構造解析などは中性子の持つ次のような特長により、独自の成果を上げている<sup>(1)</sup>。

- 1) 中性子は熱中性子において波長は約1.8Åであり、物質内での原子間距離と同じ程度である。一方、光では波長をこの程度とすればエネルギーが数keVとなってしまう、物質内での原子の運動エネルギーに比べて極端に大きくなってしまふ。そのため、光学的手法では物質内での空間情報とエネルギー情報を同時に見にくい、中性子では同時に見れるという長所がある。
- 2) 中性子は磁気モーメントを持っているので、物質中の原子との磁気相互作用によって、磁気構造を調べる事ができる。これは、光学的方法では出来ない。
- 3) 中性子は光学的方法では見にくい軽元素を見ることができる。特に軽水素に対する散乱断面積が非常に大きいため選択的に軽水素だけを観測することができる。また、重水素を用いれば物質内での水素原子の位置を決定することができる。

ビーム実験用の中性子源の実効的熱中性子強度は、図1に示す様な変遷を示している<sup>(2)</sup>。

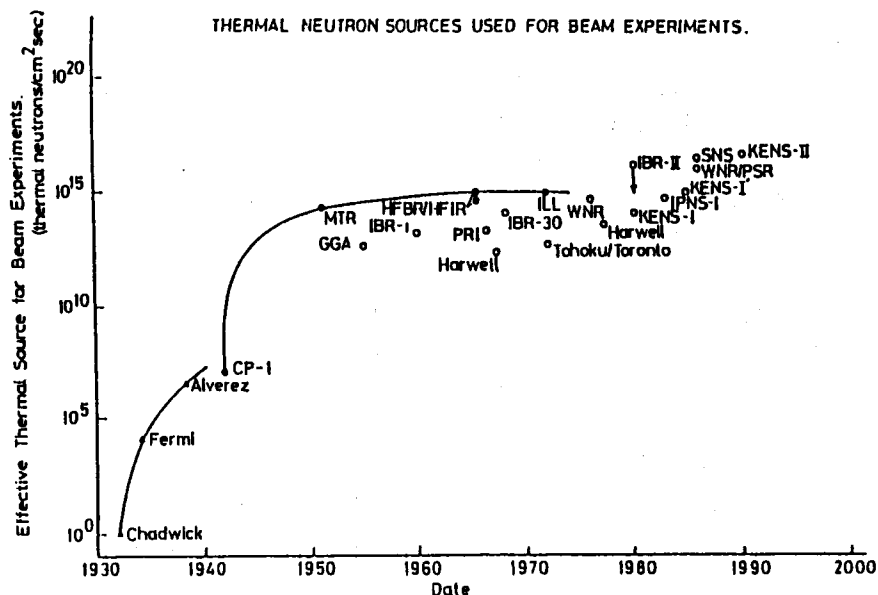


図1 実効中性子強度の変遷

現在、最も強い中性子源は原子炉で、1970年代初めにフランスのILLに作られた高中性子束炉である。技術上の困難さから、その後これ以上の強度の原子炉は作られていない。加速器による中性子源は1960年代から1970年代にかけて最初電子線型加速器を用いて作られた。イギリスのHarwell研究所や東北大学の核理研などで散乱実験が行われ、加速器中性子源の有用性が確立された。その後高エネルギー物理で用いられる陽子シンクロトロンによって核破砕（スポレーション）反応による強中性子源が作られて来ている。スポレーション中性子源は原子炉を越える実効熱中性子強度を達成できるものとして期待されている。

ここでは、スポレーション中性子源の特徴、現状、構造、将来計画などについて述べる。

## II. スポレーション中性子源の特徴

中性子を大量に発生させる方法としては、先に述べたように原子炉、電子線型加速器、陽子シンクロトロンを用いる方法などがある。それらの他、核融合反応なども今後は強中性子源として考えられるであろう。表1に各種中性子発生法の特徴を示す<sup>(3)(4)</sup>。ここで示した数字は、使用するターゲットの種類あるいは加速粒子のエネルギーなどによって若干変化するが、単位発熱当たりの中性子発生数が最も多いのがスポレーション反応であることに変わりはない。表よりわかるように単位発熱当たりの中性子数は、スポレーション反応では核分

表1 各種中性子発生法の特徴

発生法	中性子数／プロセス	中性子数／発熱(MW)	エネルギー
光核反応 (電子リニアック)	0.01／電子	$4 \times 10^{15}$	蒸発スペクトル ～ 1MeV
核分裂 (原子炉)	2-3／fission	$2.5 \times 10^{16}$	核分裂スペクトル
D-T核融合反応 (コッククロフト)	1／fusion	$2.4 \times 10^{15}$	14MeV単色
スポレーション反応 (陽子シンクロトロン)	30／spallation	$1.6 \times 10^{17}$	90%は蒸発スペクトル 残りは入射陽子エネルギーまで分布

裂の約七倍、光核反応の四十倍にもなる。また、発生中性子の殆どが蒸発スペクトルを形成するため、光核反応の時と同様の減速材集合体を用いて熱中性子を得る事ができる。パルス運転であるため平均熱中性子束は原子炉と比較すればかなり弱くなるという欠点がある。しかし、中性子散乱実験について言えば、パルス線源のピーク強度が散乱実験での測定強度に比例すると言われており、平均中性子束はあまり問題とならない。また、加速器中性子源は熱外中性子の強度が原子炉より強いと言う特徴をもつ(図6参照)。冷中性子散乱実験については、当初原子炉の方が有利であると考えられていたが、KENSでの経験によってスポレーション中性子源でも有用であることが証明された。原子炉と加速器中性子源の総合的な比較では、可成りの研究が同等に行えるとともに相補的な面も強く、両者が共存できると考えら

れている。そのため、同じ中性子強度を得るための熱除去の問題が、他の方法と比べて非常に容易となるスポレーション中性子源が超強中性子源として期待されている。

### III. スポレーション中性子源の現状

スポレーション中性子源の有用性は既に1970年代から言われており、アメリカのANLなどにおいて予備実験的なことが行われていた<sup>(5)</sup>。しかし、中性子散乱実験用としての本格的なものは、1980年に作られた日本の高エネルギー物理学研究所の中性子源(KENS)が初めてである。その後、アメリカ、イギリスなどで次々とスポレーション中性子源が作られてきた。それらを表2に示す<sup>(3)</sup>。

表2 世界のスポレーション中性子源

施設名 (国名)	加速器			最大熱中性子束 ( $n/cm^2 \cdot s$ )	設置年
	エネルギー (MeV)	平均電流 ( $\mu A$ )	繰返し (pps)		
KENS (日本)	500	2	20	$\sim 1 \times 10^{14}$	1980 ~
IPNS (米)	500	12	30	$\sim 4 \times 10^{14}$	1981 ~
LANSCE (米)	800	100	24	$\sim 4.4 \times 10^{15}$	1986 ~
ISIS (英)	800	200	50	$\sim 1 \times 10^{16}$	1986 ~

何れも既存の加速器を用いて作られており、陽子の加速エネルギーは500MeVと800MeVの二種類となっている。中性子源としての最適エネルギーについては後に述べるように検討の余地がある。このエネルギー範囲では、発生中性子数はエネルギーに比例するため800MeVは500MeVの1.6倍の強度となる。現在、世界で最も強いスポレーション中性子源はイギリスのISISであり、現在の所はまだフルパワーで運転されていないが、KENSの約百倍の強度を目指している。アメリカのLANSCEもISISに次ぐ強度を持ったもので、現在建設中である。これらの他、スイスのSINQが現在計画されている。

### IV. 日本のスポレーション中性子源

高エネルギー研のKENSを例にして実際の中性子源の構造を見てみる<sup>(6)</sup>。陽子を受けて中性子を発生する物質としては、タングステンやウランが用いられる。発生量はウランのほうがタングステンの倍になる。しかし、核燃料物質であるウランは取り扱い、維持管理が非常に大変であるため、KENSでは当初タングステンを用いて経験を積み、最近になってウランに取り替えている。500MeV陽子のウラン内の飛程はあまり長くないので、ターゲットの長さは12cmとなっている。断面は3.0cm $\times$ 5.7cmである。その上下に減速材を配置する。その様子を図2に示す。ここでは上に20K固体メタン冷減速材を配し、下に室温のポリエチレン熱減速材を配している。減速材の大きさの程度は断面が10cm $\times$ 10cm、厚さが5cm位である。これら全体を

図2 KENS中性子源における減速材配置

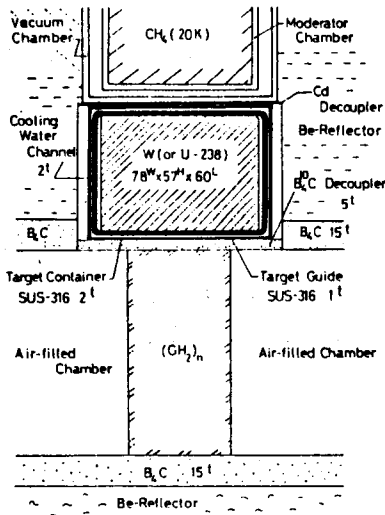


図3 ベリリウム反射体

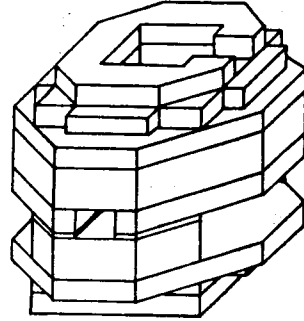


図3に示すベリリウム反射体の中に納めている。500MeVでは陽子の飛程が短いため、減速材は上下一個ずつしか置けないが、800MeVでは上下二個以上の減速材を置く。その例を図4に示す。(a)はISISのもので、(b)はLANSCEで検討中のものである<sup>(7)、(8)</sup>。ISISでは上に二個の室温の軽水熱減速材を、下に液体水素 cold moderator と液体メタン cooled moderator を配置している。室温減速材もボイズニングを行って、それぞれの実験の用途にあったパルス特性・強度を得ている。LANSCEでは分割型のターゲットを用いてビーム中の高エネルギー中性子成分の減少を図ろうとしている。さらに、反射体についても最適化を行い、今まではベ

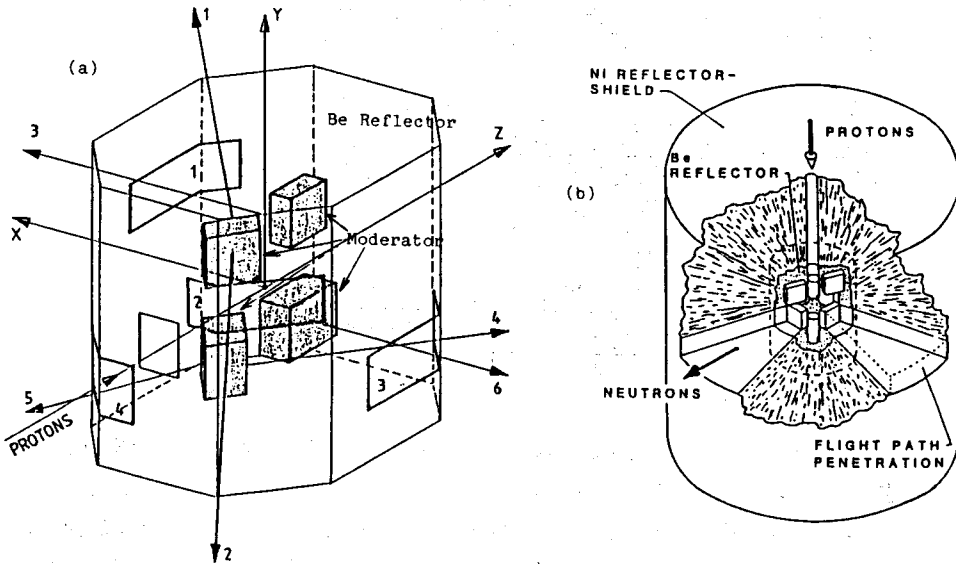
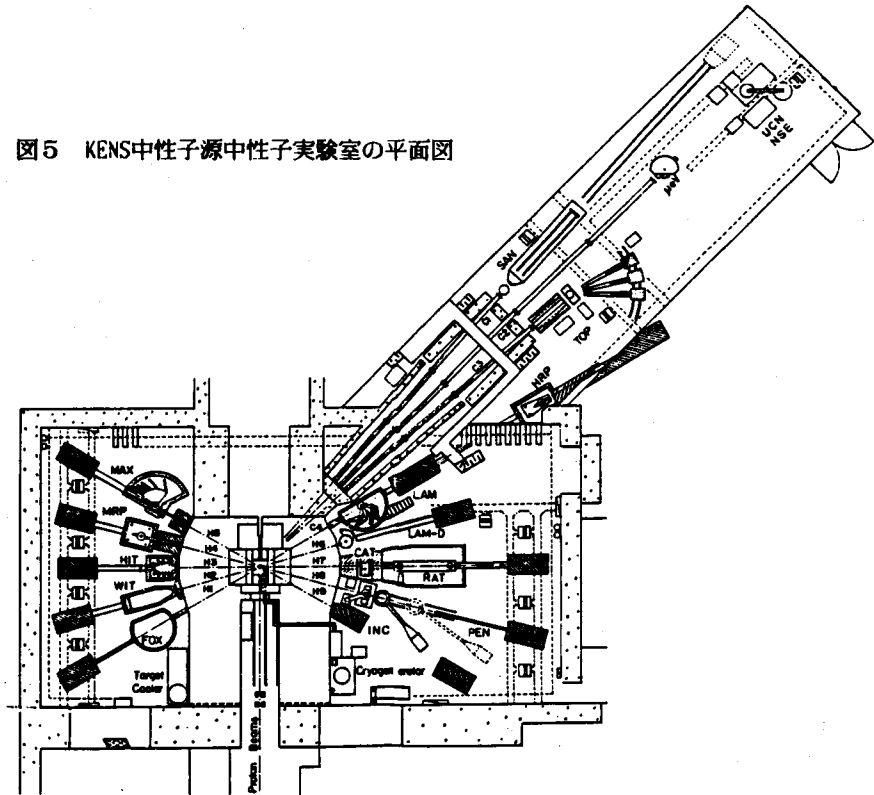


図4 強中性子源での減速材配置の例

リリウムだけが使われてきたが、ニッケルを組み合わせることによって強度が増加することを示している<sup>(8)</sup>。このように、減速材の配置の仕方や反射体材料などについてもまだ検討しつくされておらず、今後更に炉物理的に検討して行く必要がある。図5にKENSの平面図を示す。上述した減速材集合体を中心にして放射状に中性子が取り出され、いろいろな中性子散乱装置で利用されているのが分かる。減速材集合体のまわりの生体遮蔽は、鉄、コンクリートで構成されており、厚さは4mである。スポレーション中性子源では高エネルギー中性子（ $\sim 10\text{MeV}$ 以上）が核分裂中性子源より多い。この中性子はスポレーション中性子源で生体遮蔽が厚くなる原因となっている。高エネルギー中性子に対する遮蔽計算は、現在のところまだ原子炉での計算のように厳密にはできないので、簡単な計算と既存の施設での経験をもとにスケール因子を用いて、実際の設計を行っている状況である。今後、この領域での核データの整備、輸送計算の進歩を期待したい。

図5 KENS中性子源中性子実験室の平面図



国内のスポレーション中性子源の計画は、大型ハドロン計画の一部としてのKENS-IIと京都大学の中間子科学総合研究センターの二つがある。両者ともISISに匹敵するような強度を目指している。何れも当初は陽子エネルギーを800MeVとしていたが、その後それぞれの事情によって変化してきている。図6に現在のKENS(KENS-I)の中性子束とKENS-IIで期待される中性子束をILLのものと比較して示す。日本の計画は、何れも加速器が中性子発生だけには用いら

れない。従って、加速エネルギーをいくらにするかは、他のグループとのかねあい決められることになる。その場合、中性子発生の立場に立ったとき、実際どの程度の陽子エネルギーが良いのかということを知っておく必要がある。KENS-II計画に関連して最適な陽子エネルギー、特にその上限値に対する検討を行って見たので、簡単にそのことについて述べる。陽子エネルギーが増加すると図7に示す様に、約1 GeVまではエネルギーに比例して中性子の発

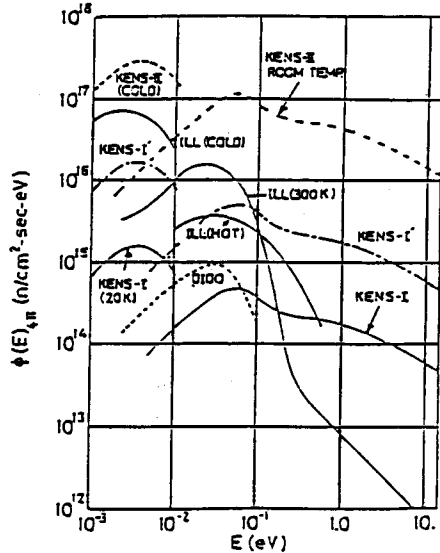


図6 KENS-I, KENS-IIの中性子エネルギースペクトル

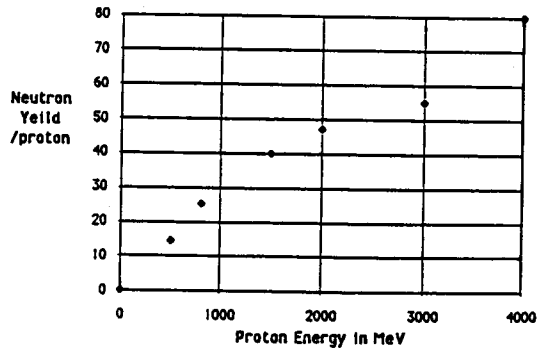


図7 陽子エネルギーと中性子強度

生量も増加していくが、それ以上では飽和傾向を示す。その時、ウランターゲット内軸方向（陽子の入射方向）での中性子の分布は図8の様になる。エネルギーが大きくなると空間的に広く中性子が分布するようになるため、上下二個ずつの減速材ではターゲットの端の中性子が有効に利用出来なくなる恐れがある。図9にウランターゲットからの漏洩中性子のエネルギースペクトルを示す。陽子エネルギーは800MeVと3GeVである。ピークエネルギーは入射

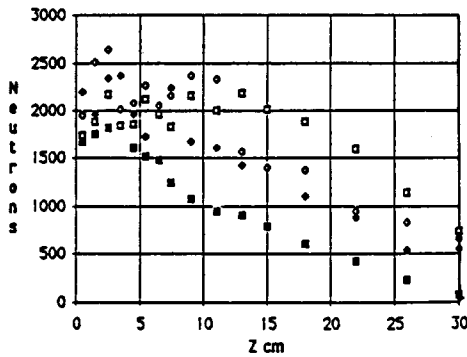


図8 発生中性子の空間分布

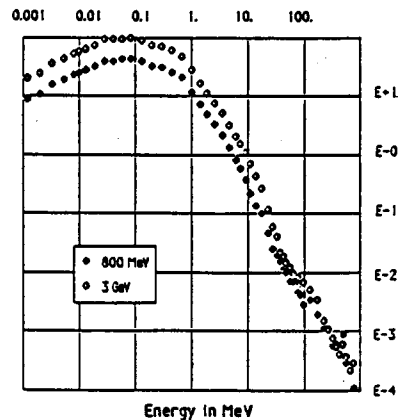


図9 ターゲットからの漏洩中性子スペクトル

陽子エネルギーに関係なく一定であるが、20MeV付近の強度の増加の程度が他のエネルギーの所より大きくなっている。この様な高エネルギー中性子は減速材とうまく相互作用しないため熱中性子に対する寄与は小さく、逆に生体遮蔽を厚くしなければならないというデメリットをもたらす。以上のような事から中性子源としては、陽子エネルギーは2GeV程度以下が望ましいと考えられる。

#### V. おわりに

スポレーション中性子源は、実用に供されてからまだ数年しか経っていない新しい中性子源である。今後、加速器の進歩に伴って更に強力な中性子源が作られようとしているが、中性子減速材集合体関係の最適化などについてはまだ十分研究されておらず、炉物理的な課題が残されている。KENS-IIの様な強中性子源においては、これは重要な問題であり、今後十分に検討される必要がある。さらに、ターゲットおよびその周囲での残留放射能の強さについても検討する必要があるが、この評価ができるようなデータおよびコードの整備が望まれる。

原子力と関係が深い中性子の応用が、これまでは物性研究などの基礎的なものに主に使われてきたが、強中性子源ができて工学も含めた広い分野にその応用範囲が広がって行くことが期待される。

#### 引用文献

- (1) 石川義和：「加速器とその応用」（日本物理学会編）、丸善 1981年。
- (2) 石川義和：Proc. of The Meeting on BSF Future Prospect-II, KEK, Tsukuba, 11-12 March, 1983.
- (3) 渡辺昇：原子力工業、第32巻、第3号(1986) p20.
- (4) 塚田甲子男：「加速器とその応用」（日本物理学会編）、丸善 1981年。
- (5) J.M.Carpenter: Nucl. Instrum. Methods, 145,91(1977).
- (6) Y.Ishikawa et al.: Proc. of ICANS-IV, 20-24 October 1980.
- (7) F.Atchison: RL-81-006(1981).
- (8) G.J.Russel et al.: Proc. of ICANS-VII, 8-12 July 1985.