



Title	スパレーション中性子源ターゲットの中性子特性
Author(s)	鬼柳, 善明; Kiyanagi, Yoshiaki
Citation	北海道大學工學部研究報告, 151, 91-99
Issue Date	1990-07-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42237
Type	departmental bulletin paper
File Information	151_91-100.pdf



スパレーション中性子源ターゲットの中性子特性

鬼柳 善明

(平成 2 年 3 月 30 日受理)

Neutronics of a Target for a Spallation Neutron Source

Yoshiaki KIYANAGI

(Received March 30, 1990)

Abstract

Neutronic properties of a target for the spallation neutron source are studied to obtain the highest low energy neutron intensity. Proton energy up to 2 GeV is effective for the production of the low energy neutrons. W and Au have the best neutronic characteristics in the non-fissile materials while U has the better one because of its fission contribution. The best target size and moderator position are also found.

1. はじめに

中性子散乱は凝集体における原子・分子の運動および構造について有用な情報を与える。これまで、中性子散乱実験は主に原子炉で行なわれてきた。しかし、原子炉設計における熱除去の限界などから 1970 年代以降現在まで大幅な強度増は行なわれていない。中性子はエックス線などと比べると強度が弱く、より効率の良い研究および新しい分野への応用を考えた場合、強中性子源を作ることが望まれる。そのために、超高中性子束原子炉の建設も計画されているが、炉心設計にまだ解決しなければならない多くの問題が残されている。最近では原子炉に代わるものとして、高エネルギー陽子のスパレーション反応を利用するスパレーション中性子源が作られてきている。核破砕 (スパレーション) 反応では、単位発熱当りの発生中性子数が他の方法より非常に多いからである。日本の高エネルギー物理学研究所の KENS は、中性子散乱実験に供せられた最初のものである。既に 10 年近くの実績があり、陽子エネルギーは 0.5 GeV と最近作られたものと比較すると低いのが、今尚強度増の為の改良が続けられている。その後、アメリカのアルゴンヌ国立研究所に、同じ陽子エネルギーのスパレーション中性子源 IPNS が作られた。これは、KENS より電流値が大きいために中性子強度も強くなっている。最近になって、イギリスの ISIS やアメリカのロスアラモスの LANSCE など 0.8 GeV 陽子を用いた超強力スパレーション中性子源が建設され、既に稼働を始めている。この様な状況を踏まえて、日本においても更に強力なスパレーション中性子源を建設する計画が、大型ハドロン計画の中の一つとして進められている。

これまで建設されてきたスパレーション中性子源では、0.8 GeV が最大の陽子エネルギーであった。これは、1 GeV 程度までは発生中性子数がエネルギーに比例するために、コストパ

フォーマンズの観点から最適だと考えられているからである。しかし、発生中性子数は陽子エネルギーを増加することによって増えるため、このことだけを考えれば、更に陽子エネルギーを上げることによって、より強い中性子源が建設できると考えられる。現に、LANSCEは高エネルギー化の計画をもっている。このような観点から、熱中性子強度を最大にするための最大有効陽子エネルギーを知り、その条件における最適ターゲット材料、サイズ、形状などについて検討することは重要である。

ここでは、陽子エネルギーの問題や最適ターゲットの設計について、数値計算によって検討する。

2. 最大有効陽子エネルギー⁽¹⁾

スパレーション反応による中性子の発生量は陽子エネルギーと共に増大するが、エネルギーが高くなるに従って他の核反応過程が増えるために飽和傾向を示す。また、ターゲット中での中性子の発生領域が広がる。これらの影響によって、熱中性子の発生に関しては、有効な陽子エネルギーの上限があると考えられる。これを最大有効陽子エネルギーとする。この陽子エネルギーを求めるために、核分裂性物質であるウランといくつかの非核分裂性物質について陽子エネルギーと発生中性子数の関係を調べた。核分裂による寄与が含まれるウランが最も強度が強いことは既に知られているが、ウランは核燃料物質であるために取扱が非常に大変であり、設置・維持・管理も容易ではない。そのため、非ウランターゲットについても検討する必要がある。ターゲット材料としては、原子番号が大きく、かつ原子数密度が高いものが望ましい。そのような条件を満たすものとして、金、タングステン、タンタル、鉛を選んだ。それらの原子番号、原子数密度を表1に示す。この中では鉛が最も原子数密度が低くなっている。この他にもビスマスなどが考えられるが、原子数密度が更に低くなるため、ターゲット物質としては不適である。ターゲット物質の形状、大きさは発生中性子数を左右する重要な因子であるが、ここでは形を円柱形とし、長さ32 cm、半径5 cmとして計算した。原子数密度が低い物質にとっては、小さ目となっているが、ターゲットを大きくすることは、後に議論するように、減速材とターゲットのカップリングを悪くし、結果として低エネルギー中性子の発生量を減少させるので、望ましいことではない。この大きさは、後に示すように殆ど最適サイズとなっている。但し、陽子ビームサイズは半径2.35 cmとした。計算は核子輸送計算コードNMTC/JAERIを用いて行った⁽²⁾。

表1 ターゲット材料の数密度

物質	原子番号	数密度 (10^{24})
^{238}U	92	0.04732
Pb	82	0.03296
Au	79	0.05902
W	74	0.06254
Ta	73	0.05525

図1にターゲット中で15 MeV以下になった中性子数と陽子エネルギーの関係を示す。核分裂による中性子発生寄与があるウランが最も強度が強くなっているのは当然のことであるが、次に強度が強い金、タングステンとの強度比が陽子エネルギーと共に小さくなっているのが特徴的である。タンタルは金、タングステンよりは強度は落ちるが、鉛よりは優れている。この中では、鉛が最も強度が弱い。これは鉛の原子数密度が低いためであり、もっと大きなターゲットを用いれば他の物質と同程度の強度は得られるものと考えられる。ここでは、陽子エネルギーを3 GeVまで計算したが、このエネルギーでも発生中性子数は増加傾向を示している。この傾向は、ウラン、金、タングステンとも同じである。ここまでの結果によって、ターゲット材料としては、ウラン以外では金、タングステンが優れていること、また発生中性子数は3 GeVでもまだ飽

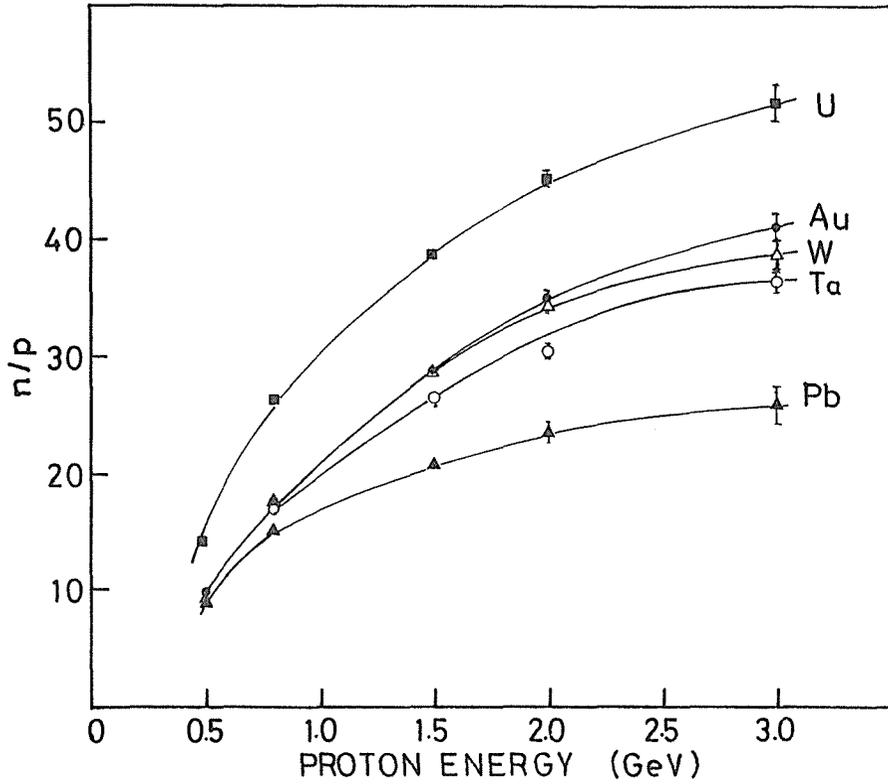


図1 陽子エネルギーによる発生中性子強度の変化

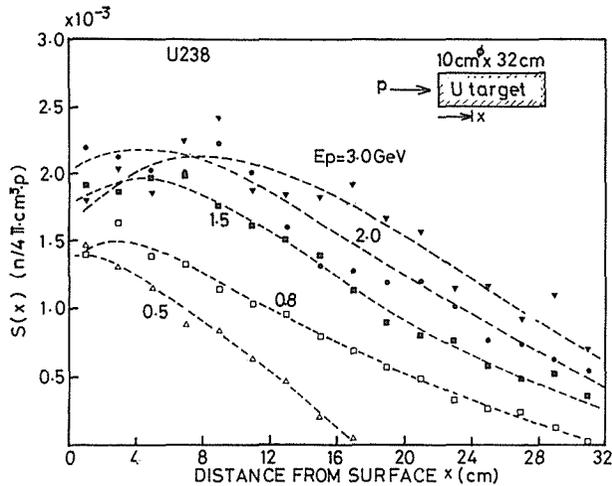


図2 ウランターゲット軸方向の発生中性子分布

和しないことが明らかとなった。ウランターゲット軸方向での中性子分布を図2に示す。陽子エネルギーが2 GeV位までは、空間分布が広がるが、同時にピーク強度も増加している。3 GeVでは2 GeVと比較して、ピーク強度は余り変化しておらず、全体の強度の増加はターゲットの奥まで中性子が発生していることによっている。このような軸方向分布であるので、ターゲットの上下

に二個ずつの減速材を設置するような体系では、ターゲットの後ろの方で発生する中性子は有効に利用されない。従って、発生中性子程には減速材から放出される低エネルギー中性子は増加しないことが考えられる。その点を明らかにするために、図3に示すような減速材集合体について、減速材から放出される約1 eV以下の中性子強度を計算した。減速材は軽水で、断面が10 cm×10 cm、厚さが5 cmである。それを、5 cm 離して2個配置してある。その周りを B₄C デカップラー

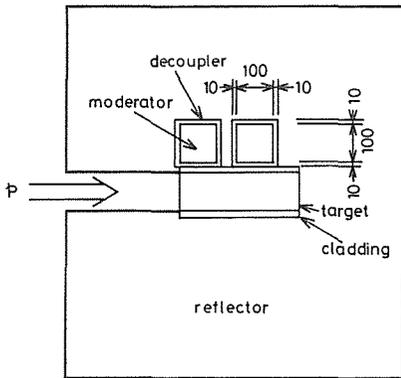


図3 減速材集合体の計算モデル

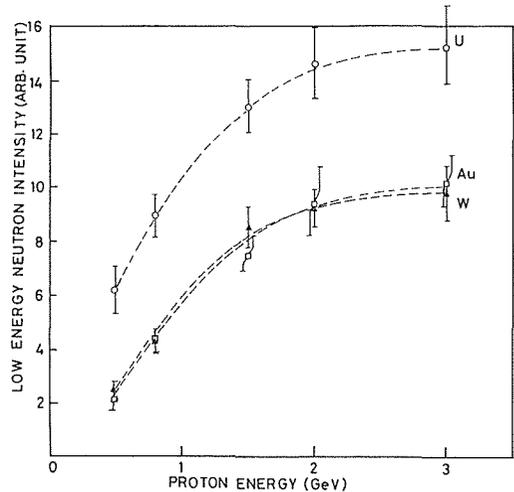


図4 陽子エネルギーと低エネルギー中性子強度

で囲み、更に全体を、Be 反射体で覆ってある。実際の体系では、下部にも減速材をおき、減速材の向きも傾けることが考えられるが、ここでは基本的な特性を明らかにすることを目的としているため、このような簡略化した体系を用いた。計算はモンテカルロ中性子輸送コード MORSE-DD を用いて行なった⁽³⁾。図4に計算結果を示す。ターゲット材料としては、ウラン、金、タングステンを取り上げた。この結果でも、金とタングステンでは殆ど同じ強度となっている。ウランでは核分裂による中性子の発生があるため、非ウランターゲットとの強度差は広がっているが、陽子エネルギーが大きくなるにしたがって強度差が小さくなるという傾向は変わっていない。陽子エネルギーによる低エネルギー中性子強度の変化を見てみると、2 GeV より高エネルギーでは強度が殆ど増加していないのが分かる。ターゲット上における減速材の位置によってこの強度は多少変化するが、その変動は少なく2 GeV から3 GeV ではせいぜい10%程度の強度増があるだけである。これらのことから、ターゲット材料としては、非ウランターゲットではタングステン、金が最も優れた材料であり、その強度はウランと比較して、1 GeV で約56%、2 GeV で約64%となっている。実際上の問題として、価格を考えればタングステンを使用の方が現実的であろう。また、最大有効陽子エネルギーは2 GeV で、それ以上に陽子エネルギーを増大していても低エネルギー中性子の発生には殆ど寄与しない。従って、陽子エネルギーを2 GeV とし、ウランターゲットを用いることによって最も強いスパレーション中性子源が建設できる。ウランの使用が非常に困難であれば、次善の策としてタングステントargetを用いることが考えられ、この場合には強度は約64%となる。

3. ターゲット設計

スパレーション中性子源のターゲット材料としては、ウランやタングステンが優れていることが明かとなったが、次にそれらの材料の最適サイズについて検討する。

ターゲット長さについて最初に調べる。図5に半径5 cmのウラン及びタングステンターゲットについて、長さと発生中性子(sub15MeV)の関係を示す。陽子エネルギーが高くなるにしたがって、飽和強度となるターゲットの長さが長くなっている。その長さは、0.5 GeVで約10 cm, 0.8

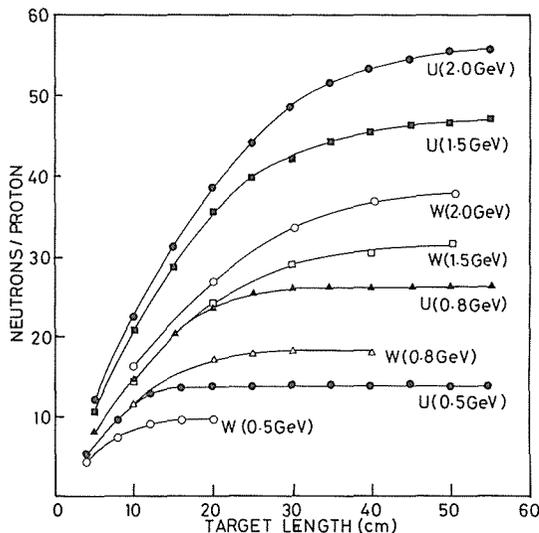


図5 ターゲット長さで発生中性子強度

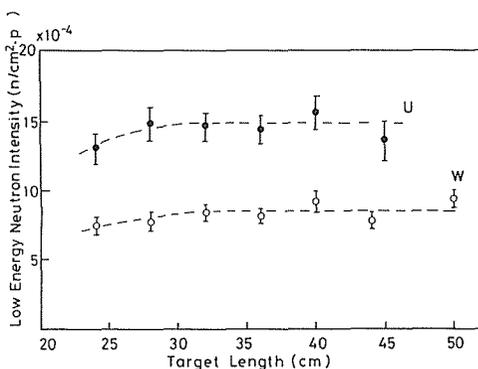


図6 ターゲット長さで低エネルギー中性子強度

GeVで約30 cm, 2 GeVで約50 cmとなっている。今、最大有効陽子エネルギーは2 GeVであるので、このエネルギーについて、低エネルギー中性子の発生に対して有効な長さを検討してみる。図6に減速材から放出される低エネルギー中性子の強度とターゲット長さの関係を示す。計算体系は図3に示したものと同一である。2 GeVでも約1 eV以下の中性子の発生に関しては、ターゲットの長さは約32 cmで十分であることが分かる。それは、ウランでもタングステンでも同じであった。0.8 GeVでは約30 cmでsub15MeV中性子の発生強度が飽和しているため、0.8 GeV以上の陽子エネルギーを用いる場合には、ターゲットの長さは32 cm以上にする必要が無いことを示している。

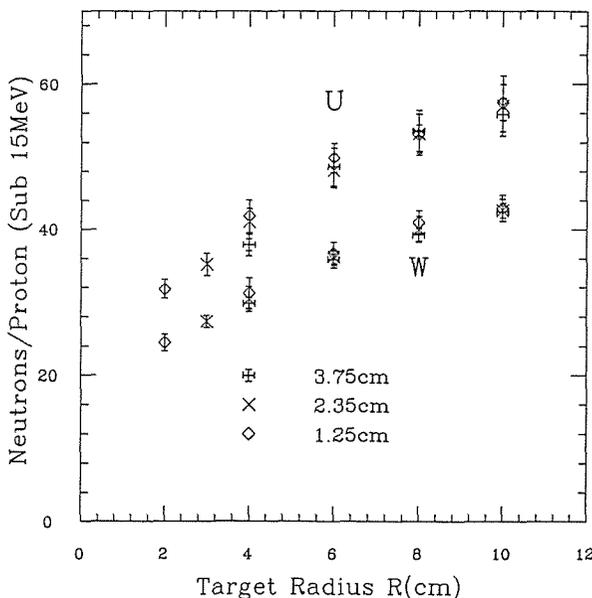


図7 ターゲット半径による発生中性子強度の変化

次にターゲット半径について検討する。ターゲット半径とsub15MeV中性子の発生強度の関係を図7に示す。陽子ビームサイズも半径1.25 cm, 2.35 cm, 3.75 cmの3種類について計算した。ターゲットの長さは32 cmである。陽子エネルギーは2 GeVである。ウラン, タングステンい

れの場合もターゲット半径が 10 cm でもまだ強度が増加傾向を示している。また、陽子ビームサイズについては、半径が小さいビームの方がターゲット半径が小さいところで強度が強くなっているが、それほど大きな違いは見られなかった。従って、sub15MeV 中性子の発生だけの観点からは、ターゲット半径は 10 cm 以上である方が強度は強い。ターゲットの側面から放出される中性子強度を図 8 に示す。この場合には、ターゲットが大きくなると強度が減少しており、ウランで約 8 cm、タングステンで約 7 cm の所でピークとなっている。ウランの方がピークとなる半径が大きいのには、核分裂による中性子の発生があるためと考えられる。陽子ビームサイズについては殆ど影響は見られなかった。最後に、減速材から放出される低エネルギー中性子強度を、図 3 に示した体系について計算した。結果を図 9 に示す。陽子ビームサイズが小さい方が、強度が少し強く、また強度が最大となる半径が小さくなっている。ピーク強度となる半径は陽子ビームサイズに応じて 3 ~ 5 cm となっている。

ターゲット中で発生する sub15MeV 中性子強度は、ターゲット半径が 10 cm でも増加傾向にあった。しかし、最適半径は 5 cm 以下だったので、減速材・ターゲット距離をこれ

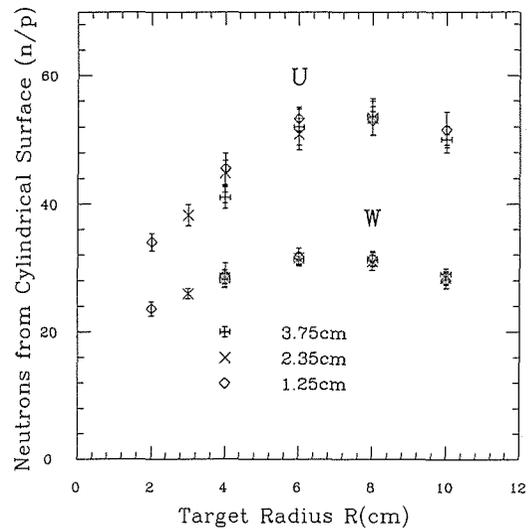


図 8 円筒面から放出される中性子強度の半径による変化

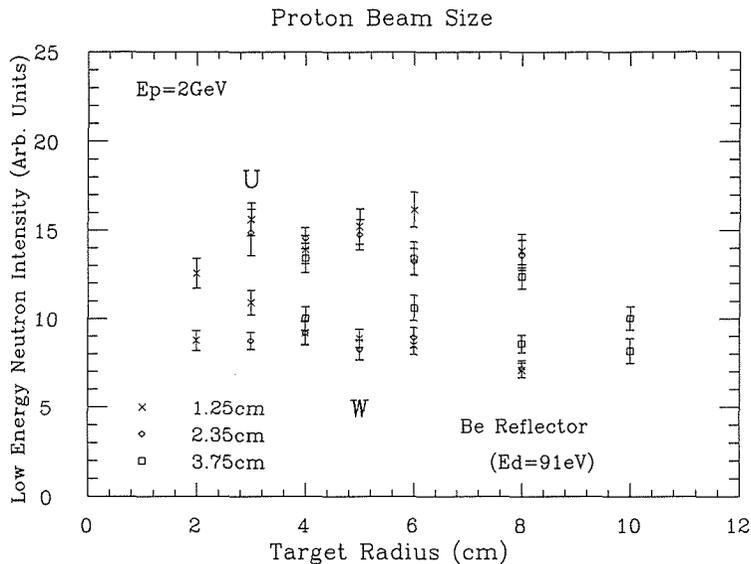


図 9 ターゲット半径と低エネルギー中性子強度

以上に離すことは出来ない。そこで、ターゲットを直方体形にして横幅を広くして、発生中性子強度増を図ることが考えられる。ターゲットの高さを 10 cm、長さを 32 cm としターゲット幅を変化させた時の sub15MeV 中性子の強度変化を図 10 に示す。幅が 10 cm から 25 cm まで増えると、ウラン、タングステン共に強度は約 12% 増加する。次に減速材から放出される低エネルギー

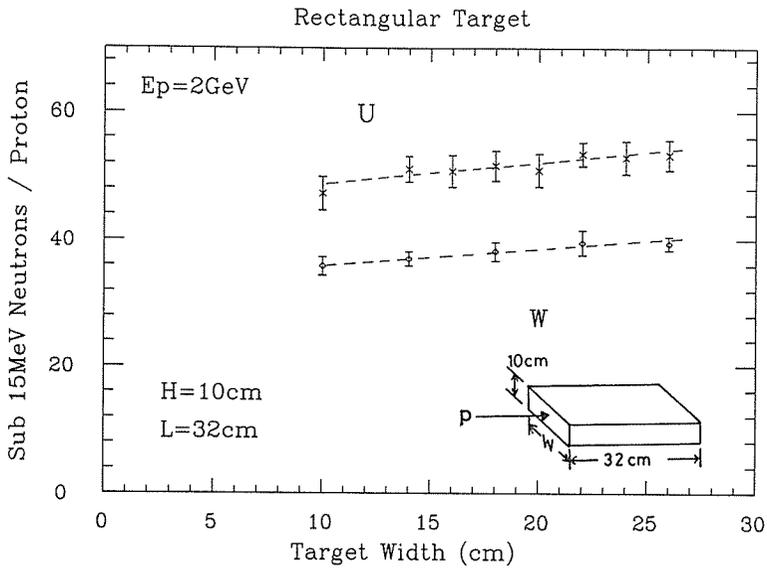


図10 ターゲット幅による発生中性子強度の変化

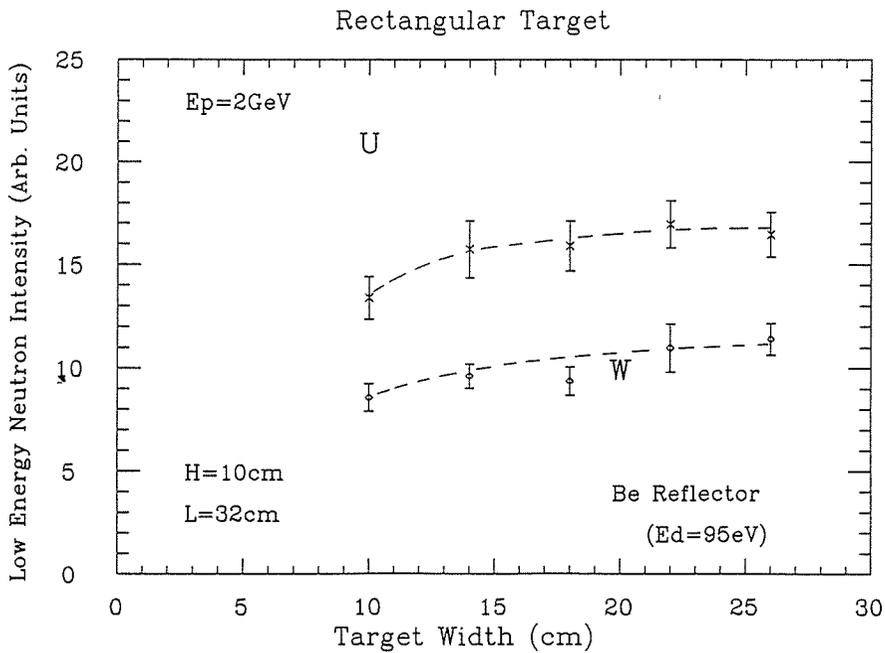


図11 ターゲット幅による低エネルギー中性子強度の変化
(デカップリングエネルギー 95eV)

中性子強度を示す。図 11 は Be 反射体を用い、デカップリングエネルギーを 95 eV とした時の結果である。ウラン、タングステンともに約 27%強度が増加している。ところが、デカップリングエネルギーを 20 eV と下げた場合には、図 12 に示すようにタングステンでは強度が増えなかった。これは、ウランでは核分裂による中性子の寄与があるが、タングステンでは広がった分が、

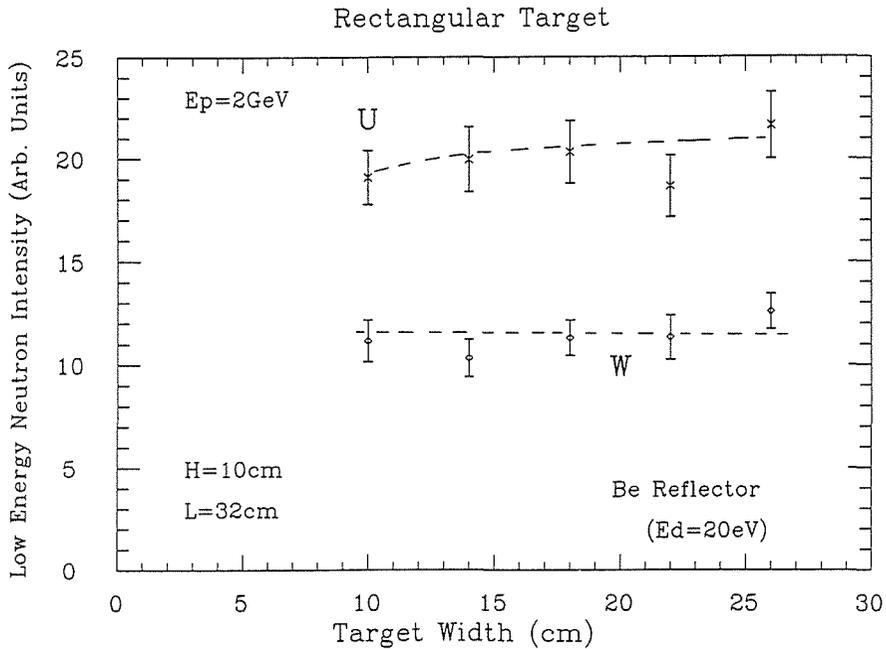


図12 ターゲット幅による低エネルギー中性子強度の変化
(デカップリングエネルギー 20eV)

主に反射体として機能するために、このようになると考えられる。実際、タングステンとベリリウムではデカップリングエネルギーが高い所では、タングステンの方が良い反射体となっているが、低い所では余り差が無くなっている。また、反射体としての性能が良い鉄を使用した場合は、デカップリングエネルギーが高いときでも、タングステントargetでは強度が変化しなかった。従って、タングステントargetでは直方体型のターゲットを用いても効果がなく、ウランの場合には強度増に対して寄与することが分かった。

4. 減速材配置

発生中性子の空間分布がエネルギーで変化するため、ターゲット上で減速材をどの位置に置くかは、もう一つの重要な因子である。これは陽子エネルギーで変化する問題であるので、0.8 GeVと2 GeVで計算を行って、最適位置の変化の程度も見た。計算体形はこれまでのものと同じであるが、ここで定義する減速材の位置は図13挿入図に示すように、ターゲットの陽子入射面と第1減速材左側面までの距離で表す。減速材間の距離dは5 cmである。図13に第一減速材と第二減速材それぞれの強度とその和を合わせて示してある。0.8 GeVの場合も2 GeVの場合も、第一、第二減速材の強度がほぼ等しくなる所で和の強度は最大となっている。その位置は、0.8 GeVで-4 cm、2 GeVで0 cmとなっている。

5. ま と め

スパレーション中性子源では、これまで陽子エネルギーは1 GeV程度であったが、陽子一個あたりの発生低エネルギー中性子の強度を大きくするという観点からは、エネルギーを2 GeVまで上げることが有効である。しかし、それ以上に上げて強度は余り増えないので、2 GeVが最大有効陽子エネルギーである。ターゲット材料としては、2 GeVでもウランが最も良く、非ウラ

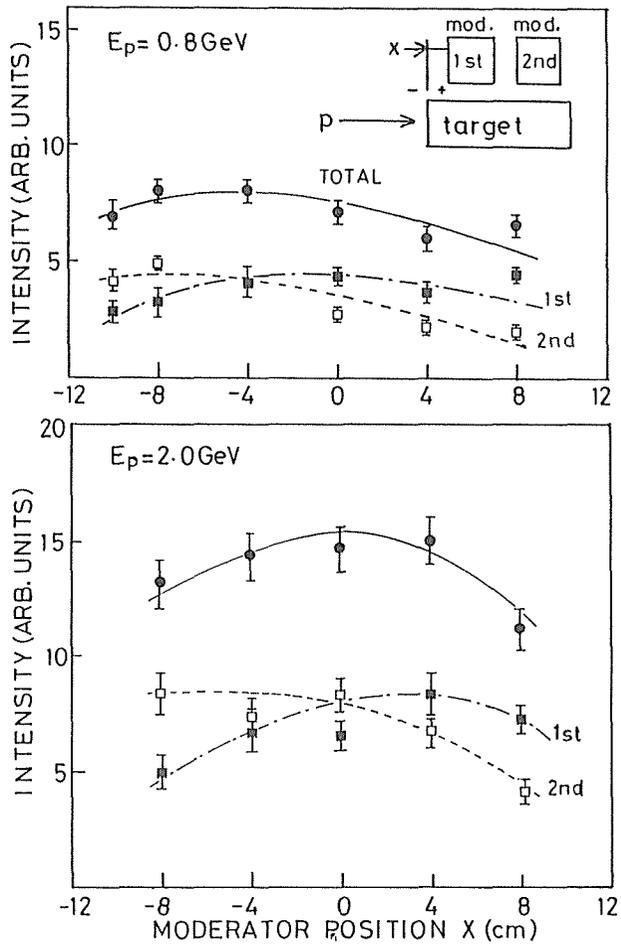


図13 減速材位置による低エネルギー中性子強度の変化

ン物質としてはタングステンと金が優れた中性子特性を示した。2 GeV 陽子では円柱形ターゲットの最適サイズは半径が約 5 cm で長さが 32 cm である。形状を直方体にした場合、ウランでは強度が増えたが、タングステントargetでは殆ど変化しなかった。また、ターゲット上での減速材の最適位置については、0.8 GeV の時と比較すると数 cm ターゲットの奥側へずれた。

以上の結果から、スパレーション中性子源の設計において必要となる基本的な事項について明かとなった。今後、具体的な体系について設計を行なうときには、これらのデータを基に、より実際に近い減速材集合体モデルに対して、詳細な計算を進めれば良い。

引用文献

- (1) 鬼柳善明, 渡辺昇, 新井正敏, 北海道大学工学部研究報告 第139号, 61 (1988).
- (2) Y. Nakahara and T. Tsutsui, JAERI-M 82-198 (1982).
- (3) N. Nakagawa and T. Mori, JAERI-M 84-126 (1984).