



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	結合型液体水素冷中性子源の中性子特性
Author(s)	鬼柳, 善明; Kiyanagi, Yoshiaki; 小林, 英樹 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 151, 101-109
Issue Date	1990-07-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42234
Type	departmental bulletin paper
File Information	151_101-110.pdf



結合型液体水素冷中性子源の中性子特性

鬼柳 善明* 小林 英樹** 岩佐 浩克*

(平成 2 年 3 月 30 日受理)

Neutronics of Coupled Liquid Hydrogen Cold Neutron Source

Yoshiaki KIYANAGI, Hideki KOBAYASHI and Hirokatsu IWASA

(Received March 30, 1990)

Abstract

Large enhancement in intensity of cold neutron is obtained by using a coupled liquid hydrogen cold moderator, in which a decoupler is removed between moderator and reflector. The intensity increases further by surrounding the hydrogen moderator with a polyethylen pre-moderator. The intensity of coupled moderator increases by about 5 times that of decoupled one in the cold neutron region. A widening of the pulse width is produced by using the coupling moderator but it is not so large.

This is preferable characteristics for the neutron scattering experiment. It was found that the coupled liquid hydrogen moderator is a promising candidate of the cold neutron moderators for the high intensity spallation neutron source.

1. はじめに

中性子散乱実験は液体や固体中の分子運動や構造を調べるのに用いられる。特に、水素に対する相互作用が強いため、生体分子、高分子、溶液の研究などに有用である。冷中性子は低エネルギー運動や高分子などにおける長周期の構造を調べるのに重要であり、中性子ビーム実験を行う施設の多くに、冷中性子源が設置されており、今後もその重要性が増して行くと考えられている。冷中性子源が実用に供されたのは原子炉が最初で、1972年に建設されたフランスの ILL の高中性子束炉は、現在でも世界最強の冷中性子源である。国内ではやっと最近になって京都大学原子炉実験所に冷中性子源が設置され、また原子力研究所の改 3 号炉にも設置される予定である。研究用原子炉は、炉心の熱除去などの問題から現在まで ILL より強い中性子源が作られていない。

加速器冷中性子源については、北大 45 MeV 電子線型加速器を用いて精力的に研究が行われ、中性子特性に関しては 20 K 固体メタンが最も良いことが明かとなった⁽¹⁾。この経験を基にして、固体メタン冷中性子源は高エネルギー物理学研究所の KENS にも設置され、本格的に中性子散乱実験に供される様になった。これは、スパレーション中性子源に設置された初めての冷中性子

* 原子工学科 放射線源工学講座

** 現在 ㈱東芝府中工場

源で、設置後約 10 年になるが、現在でもなお有効に利用されている。メタンは冷中性子源として優れた中性子特性を持っているが、炭化水素化合物であるために、放射線分解・重合が起き、長時間使用するとバンプと呼ばれる一種のガス放出が発生する。そのため、KENS では一定量の中性子照射毎にメタンの入れ換えを行っている。その間隔は 2～3 日に一度の割合となっている。

スパレーション中性子源は、単位発熱当りの中性子発生数が核分裂に比べて約 10 倍であり、実質的に原子炉に匹敵する強度が得られるものが作れると期待されている。このような事情から、最近では強力中性子源として、スパレーション中性子源が建設されている。現在、最も中性子束が高いスパレーション中性子源は、イギリスのラザフォード・アップルトン研究所の I S I S である。アメリカのロスアラモス研究所にも同規模のものが建設されている。現在、日本でもスパレーション強中性子源の計画が進められており、これが実現すると今の KENS の 100 倍以上の強度の中性子源となり、他の強中性子源と同程度かそれ以上のものとなる。このような、強中性子源では、先に述べた理由により固体メタンを冷中性子源として使うことは困難である。そのため、放射線分解の問題がない液体水素を冷中性子源として使用することが考えられている。しかし、液体水素は水素数密度が固体メタンの約半分であること、また、低エネルギー中性子と有効にエネルギーのやり取りを行う運動モードが無いことなどのため、メタンに比べると冷中性子強度が非常に弱くなる。このことは、中性子散乱実験において大きなデメリットとなる。通常、減速材集合体では減速材と反射体の間にデカップラーとして Cd などの熱中性子吸収体を入れる。これは、熱中性子が減速材・反射体間を行き来して、両者が熱中性子に対してカップリング（結合）しないようにし、反射体によるパルス幅の増大を防ぐためのものである。水素冷中性子源において冷中性子強度を増加させる方法として、このデカップラーを取り外すことが考えられる。これを結合型液体水素減速材と呼ぶ。この方法は、メタンなどの水素数密度が大きなものに対してはあまり効果はなく、パルス幅の増加によって強度が 2 割程度増えるだけである。しかし、液体水素の様に水素数密度が小さいために、速中性子に対する衝突密度が小さく、また減速途中における中性子の漏れが大きくなる場合には効果的な方法と考えられる。

カップリング型水素減速材については、既に G. S. Bauer らが測定を行っているが⁽²⁾、ピークエネルギーが非常に高いことなどについて疑問の点があるほか、パルス幅の測定も準定常状態を模擬するために入射陽子のパルス幅を長くしているなど、条件が現在計画されているものとは大きく異なっている。また、G. J. Russell らが計算によって結合型水素減速材の中性子特性を調べている⁽³⁾。しかし、計算では実験体系を簡略化していること、散乱カーネルの信頼性の問題などがある。従って、結合型液体水素冷中性子源の中性子特性を新たに実験によって調べることが必要である。

本研究では、結合型水素減速材によって強度がどれくらい増えるかを調べ、その時のパルス特性についても明らかにする。

2. 測定体系

測定は北大 45 MeV 電子線型加速器を用いて行った。測定体系を図 1 に示す。上側は強度測定のためである。冷中性子源クライオスタットから ^3He 中性子検出器までの飛行路長は 5.52 m である。途中、飛行管が設置されており、その部分 5 m が真空となっている。飛行管内には Cd で作られた、コリメーターが入れている。これによって水素減速材の幾何学的中心から 1.5 cm 下がった所を中心にして $6.4 \times 6.4 \text{ cm}^2$ の大きさが検出器から見えるようになっている。クライオスタット及びターゲットの周囲は黒鉛反射体で囲んである。その大きさは黒鉛での減速距離の約

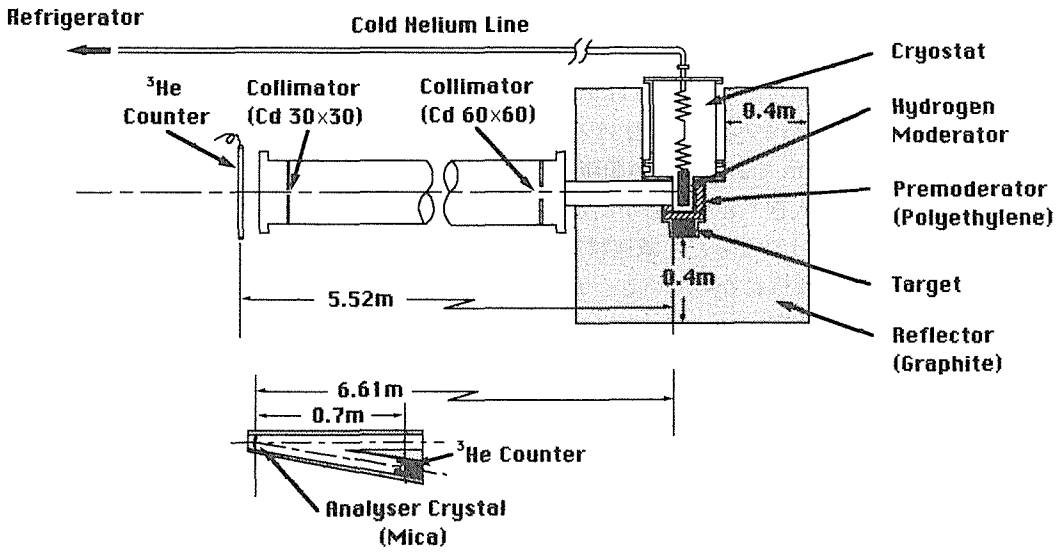


図1 冷中性子源と中性子飛行時間測定体系

2倍を目安として、減速材周囲の方向をとってもその厚さが40 cm以上となるようにした。ただ、中性子ビーム取り出し方向は壁が近くにあるため350 mmしかとれなかった。また、パルス測定の場合には、図1の下部に示す中性子回折装置を検出器の位置において測定を行った。回折結晶にはマイカを用いた。ブラッグ角は85度である。この装置によって最低0.8 meVまでの中性子パルス特性を測定できる。

水素冷中性子源は既に設置されている固体メタン冷中性子源のクライオスタットを改造して製作した。図2にクライオスタットの断面図を示す。クライオスタット上部は円筒型で、下部は直

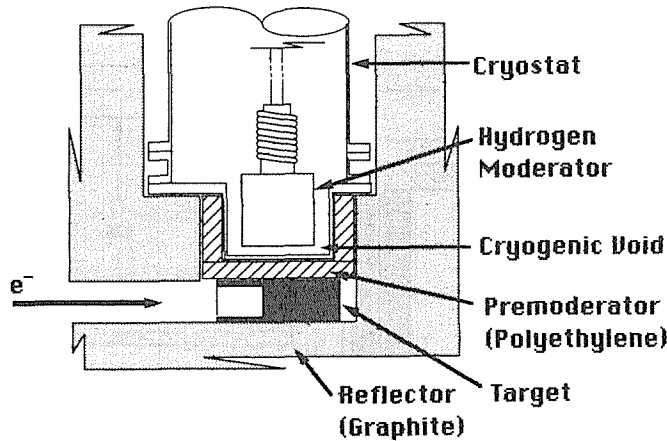


図2 冷中性子源クライオスタット

方体となっている。直方体部分に液体水素容器が取り付けられており、その上部に熱交換器が接触するようになっている。冷却はPEH-100型冷凍器で冷却されたヘリウムガスを循環させ、減速材上部の熱交換器のところでやっている。減速材の大きさは中性子放出面が12 cm×12 cmで、厚さが5 cmである。液体水素容器とクライオスタット外筒の間にアルミ製の熱シールドを入れてある。更に、減速材容器にもアルミ箔を巻いて熱シールドとした。マイラ箱を用いなかったのは、

マイラ中に含まれる水素化合物による中性子の散乱を恐れたためである。ターゲットは鉛で、 $60 \times 60 \times 70 \text{ mm}^3$ の大きさの水冷型にした。その周囲を高さ70 mm、長さが212 mm、幅が112 mmになるように更に鉛で囲ってある。これはターゲットで発生する中性子のスペクトルを軟化させ、スパレーション線源のスペクトルに近づけるためである。クライオスタット下部からターゲット上部までの距離は35 mmである。この間隙はポリエチレンのプレモデレータを入れるためのもので、距離をもう少し大きくとった方が測定上は望ましいのであるが、冷媒ガス輸送管の取り付け高さの関係でこのようになった。減速材近傍は図に示すようにポリエチレンのプレモデレータが取り付けられるようになっている。デカップリング型の場合にはクライオスタット容器の側面、底面にCd板を巻いた。

3. エネルギースペクトル

液体水素冷減速材は水素数密度が小さいため、メタンなどと同じ位の減速材厚さ5 cmでは最大強度にならない。その対策として減速材を厚くすることが考えられるが、それは冷凍器能力の

強化を必要とするので必ずしも望ましい選択ではない。むしろ、水素減速材周囲に効果的な減速材を取り付けて、水素減速材に入射する中性子のエネルギーをある程度低くする方が容易である。そのために、減速材周囲にプレモデレータとしてポリエチレン減速材を取り付ける。強中性子源ではポリエチレンは放射線分解が激しいので使用できず、軽水を使用しなければならないが、ここでは、加工のし易さの点からポリエチレンを選んだ。その部分の拡大図を図3に示す。水素減速材からクライオスタット外筒までの距離は31 mmである。その周りにプレモデレータを取り付ける。ビーム取り出し側はビーム孔部分を除いて厚さ2 cmのポリエチレンをセットした。この部分につ

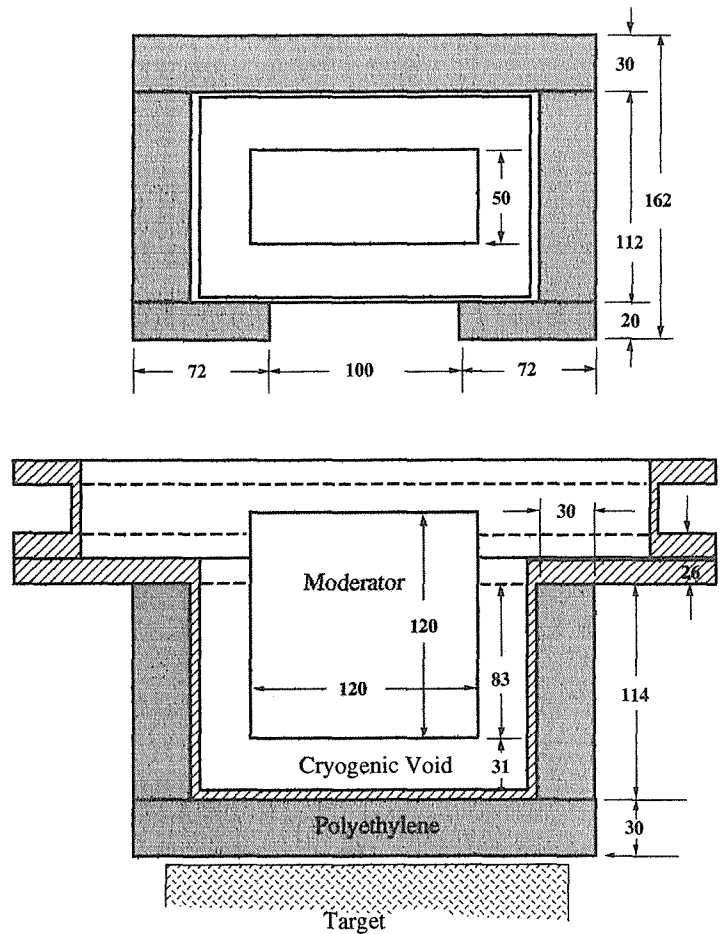


図3 水素減速材及びプレモデレータ

いては厚さの変更を行わなかった。減速材外筒の側面、下面のプレモデレータについては、1, 2, 3 cmの3種の厚さのものがセットできるようにしてある。下面のプレモデレータはクライ

オスタット下面に密着して取り付けられた。従って、ターゲットとプレモデレーターの間に厚さに応じて空間ができる。ポリエチレン減速材の背面へターゲットからの中性子を入射させた場合、熱中性子強度が最大となるのは約 5 cm であることが既に知られている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。従って、今回の実験においてもプレモデレーターの厚さは 5 cm 以下と考えられるが、先に述べた実験体系上の制約のために 3 cm までしか厚さの変更を行えなかった。減速材とターゲットの間に入れたのを底板、減速材側面に取り付けたのを横板と呼ぶ。今回の体系では減速材の下面から 81 mm までしかプレモデレーターで囲めなかった。また、その高さからすぐ上が円筒形の外筒となるため反射体効果も十分でないと考えられる。しかし、減速材の約 2/3 を囲んであるので、この体系による実験でも、カップリング型減速材としたときの強度、パルス特性に対する影響をある程度評価できると考えられる。

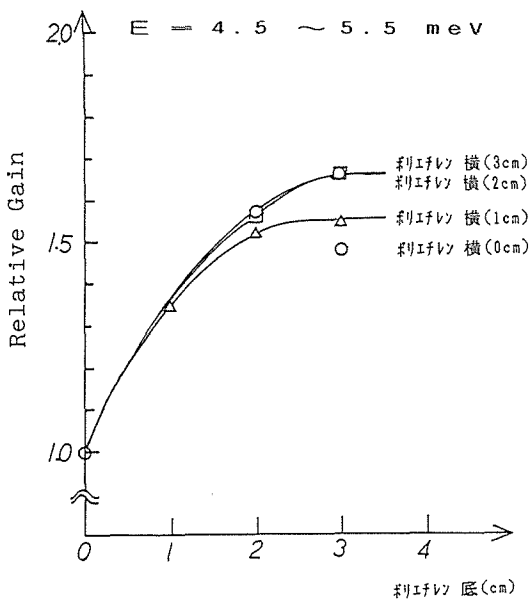


図4 プレモデレーター厚さによる冷中性子強度の変化

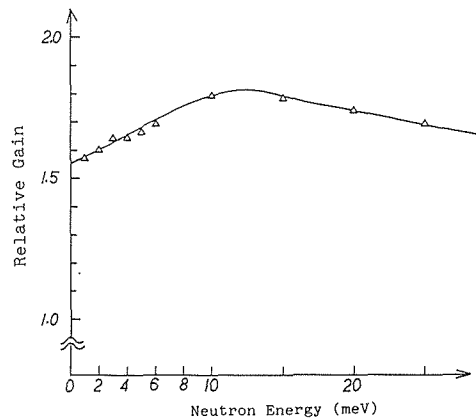


図5 プレモデレータ 3 cm 付きとプレモデレータ無しのときの強度比較

図4にプレモデレーターの厚さによる強度の増加の様子を示す。縦軸はプレモデレーター無しの際の強度を1として規格化してある。この結果では、底板の厚さが2 cm までで強度の増加が大きく、3 cm でほぼ飽和している。また、横板の厚さについては2~3 cm で強度が飽和している。この結果は4.5~5.5 meV のものであるが、冷中性子領域においてはどこでも同様の結果となっている。このエネルギーではプレモデレーターなしに比べて約1.7倍の強度が得られている。強度増の中性子エネルギーによる変化を図5に示す。13 meV 程度の所で約1.8倍で最大となり低エネルギーでも約1.5倍の強度増がある。従って、減速材にポリエチレンのプレモデレーターを取り付けることは、強度を増やす上で重要であることが分かる。

図6にカップリング型減速材およびデカップリング型減速材のエネルギースペクトルを示す。反射体無しの体系についても併せて載せてある。カップリング型減速材については、プレモデレーターが無い場合と厚さ3 cm のプレモデレーターが付きの場合の結果を示してある。いずれのスペクトルも約15 meV の所に液体水素に特徴的な肩が表れている。ピークエネルギーは、デカップルドで約3.7 meV、カップルドで約3.4 meV と多少変化しているが、ピーク付近のスペクトル形

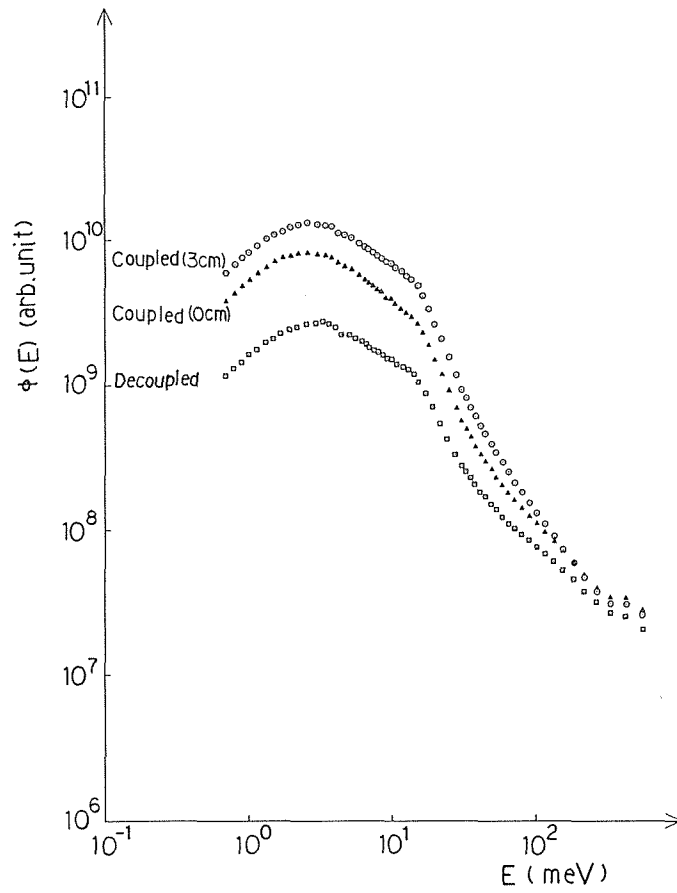


図6 水素冷中性子源からの中性子スペクトル

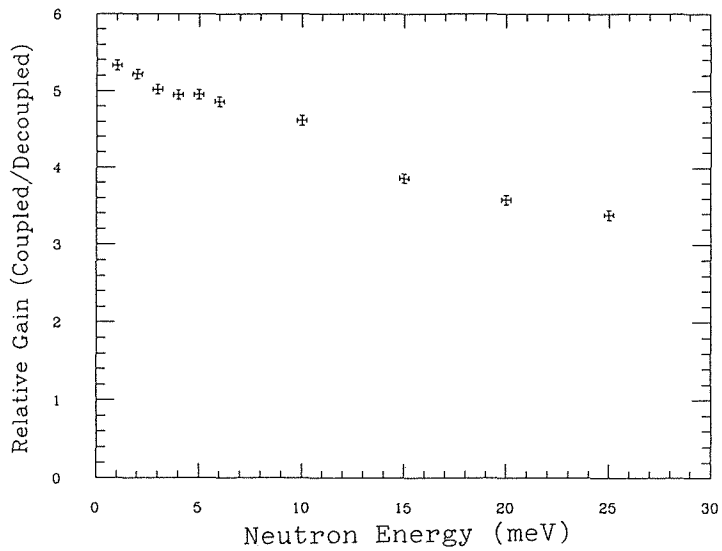


図7 結合型水素冷中性子源による強度増加

は全体として余り変化していないのが分かる。このことから、減速材背面にある反射体やプレモデレーターのところからの熱中性子は直接ビーム孔に抜けて来ていないことを示している。

図7にカップリング型(プレモデレーター3 cm)とデカップリング型の強度比を示す。エネルギーが低くなるに従って強度が増加しており、冷中性子領域では5倍以上の強度増が得られている。このことから、カップリング型の液体水素冷中性子源が、強度を増やすという点に関しては非常に有効であることが明かとなった。

4. パルス特性

カップリング型水素冷中性子源を用いることによって強度が大きく増加するが、それに伴って中性子放出時間分布(パルス特性)が変化していると考えられる。パルス幅の増大は中性子小角散乱の様な実験では殆ど問題とならないが、中性子非弾性散乱実験では分解能に影響を及ぼす重要な因子となる。また、パルスの半値幅ばかりでなく、その立ち上がりが実質的分解能を左右するのでその特性も重要である。

放出時間分布の測定はカップリング型(プレモデレーター3 cm 付き)とデカップリング型水素減速材について行った。カップリング型水素減速材の測定スペクトルを図8に示す。ピーク上の数値は反射次数を表す。5次ピーク(5.1 meV)についてカップリング型とデカップリング型の放出時間分布を重ねたものを図9に示す。両者は相対強度が正しくなるようにプロットしてある。実線はピークの高さが等しくなるようにしてデカップリング型データを拡大したものである。これから、カップリング型水素減速材の強度増加はパルス幅の増大だけでなく、ピーク強度の増加

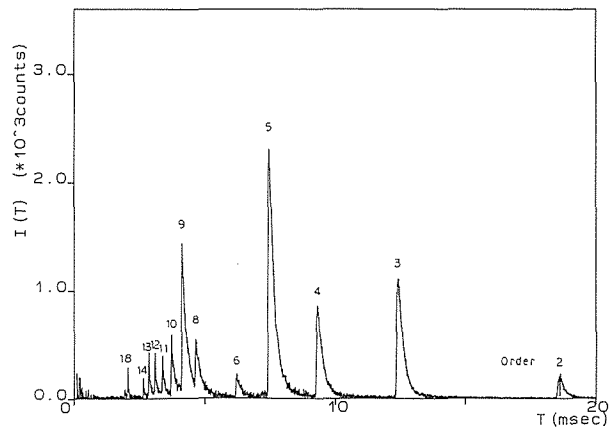


図8 結合型水素中性子源からの放出中性子の時間分布

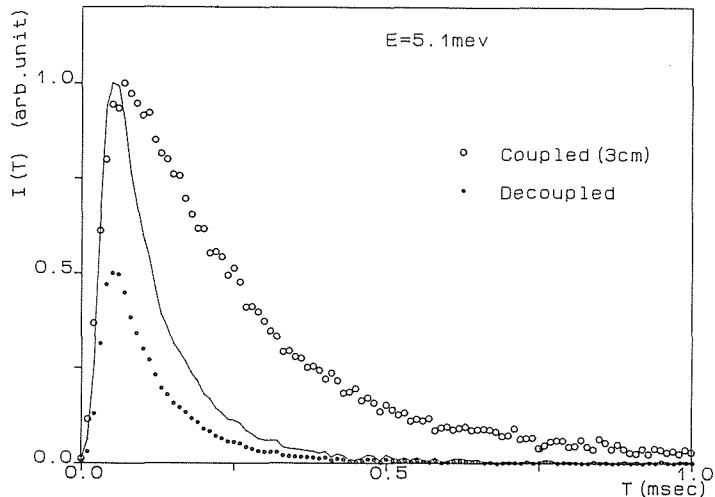


図9 結合型と非結合型におけるパルス特性の比較

の影響も大きいことが分かる。強度増に対する両者の寄与は同程度となっている。図10に半値幅を示す。冷中性子領域において、カップリング型ではデカップリング型の約2倍の半値幅となっている。また、点線で現在のKENSのメタン冷減速材の半値幅を示してあるが⁽⁶⁾、冷中性子領域

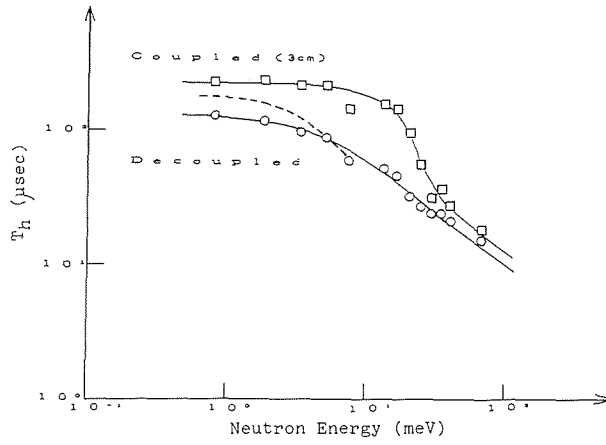


図10 半値幅エネルギーによる変化

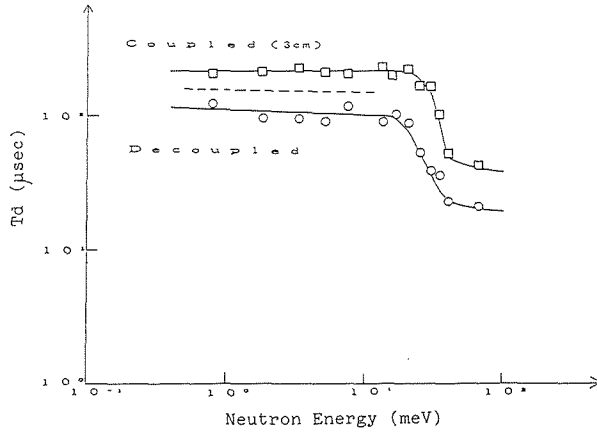


図11 減衰時間のエネルギーによる変化

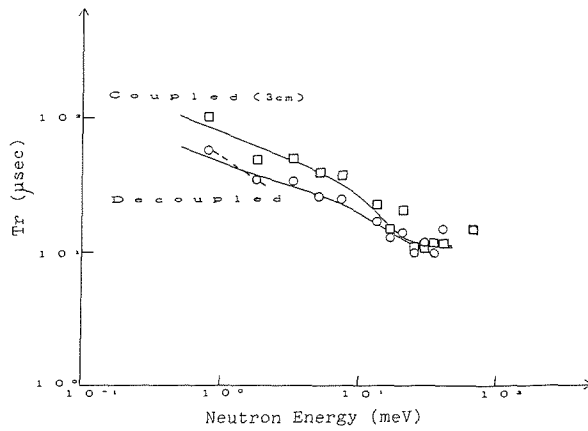


図12 立ち上がり時間のエネルギーによる変化

ではカップリング型とデカップリング型の中間となっており、カップリング型にしたことのパルス幅に対する影響はそれほど大きいものではない。次に、減衰時間を図 11 に示す。これも、半値幅と同様の傾向を示している。最後に立上り時間を図 12 に示す。これは、カップリング型になってもデカップリング型と較べて半値幅程大きく変化していない。このことは中性子非弾性散乱実験において実質的分解能が余り悪くならないことを示唆している。しかし、半値幅が2倍になることは中性子ガイド管の長さも2倍必要であることを意味しており、ガイド管における中性子の減衰また建設コスト増大の問題が課題として残る。

5. ま と め

カップリング型液体水素冷中性子源は、パルス幅の増大を引き起こすが、それ以上に強度が増えることが分かった。この予備実験によってカップリング型の液体水素冷中性子源はこれからの強スパレーション中性子源における冷中性子源として検討に値するものであることが明かとなった。しかし、ここでの実験では、減速材上部に反射体が無いため、カップリングの効果が十分ではない。従って、実際の体系に近いものでより詳細に検討を行う必要がある。また、反射体材料として何が最適であるかも、今後検討しなければならない重要な課題である。

引用文献

- (1) K. Inoue, Y. Kiyonagi and H. Iwasa, Nucl. Instrum. Methods, 192, 129 (1982).
- (2) G. S. Bauer et al., Proc. ICANS-VIII, 344 (1985).
- (3) G. J. Russell et al., Proc. IACANS-IX, 177(1986).
- (4) D. H. Day and R. N. Sinclair, Nucl. Instrum. Methods, 72, 237 (1969).
- (5) Y. Kiyonagi and H. Iwasa, J. Nucl. Sci. and Technol., 19, 352 (1982).
- (6) N. Watanabe, S. Ikeda and Y. Ishikawa, Proc. IACANS-IV, 181 (1981).