

電子線型加速器冷中性子源

北大

井上 和彦

1. はじめに

加速器パルス中性子源が中性子散乱研究用に活用される趨勢になってきたが、これにはいくつかの理由がある。まず、現在の研究用原子炉の原子炉工学的な制約による中性子束の限界を乗り越えるためであり、これがパルス強中性子源開発の主要動機である。次に、最近では $10^{14} \sim 10^{15} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ 熱中性子束研究炉を有する場合でも、高濃縮燃料入手の制約の恐れから、この種の制約に対するリスクの分散の意味で、加速器の利用が考え始められている。第三に、強中性子源を手元で使用できない研究機関において、安価な経費で従来程度の強度の中性子ビームを用いて散乱実験を行う方法として、加速器中性子源が考えられる。最後に、加速器では必然的にパルス中性子源となり、従来の定常ビームを使用した場合とは異なった新しい測定方法を用いることができ、種々の特色を出す可能性がある。

ヨーロッパの研究用原子炉には冷中性子源が設置されており、冷中性子強度を数倍ないし数10倍増大させて、極めて有用な装置として活用されている。もちろん、パルス中性子源でも冷中性子源は望ましいものであり、現在各国の加速器中性子源計画においても、冷中性子源の設置を計画している。原子炉に設置されている冷中性子源では、大きな冷凍機容量と厳重な安全対策設計が必要である。これに対して、加速器パルス冷中性子源では、冷凍機容量ははるかに小さなもので済み、また安全対策も相対的にかなり簡単になる。加速器パルス冷中性子源は原子炉に比した時に、はるかに安価に同程度の強度のピーク冷中性子ビームを得ることができる。

わが国では、原子炉には冷中性子源がまだ設置されていないので、加速器を速中性子源として用いたパルス冷中性子源を開発することにした。まず問題となっていたのは、使用する加速器が小容量であることであり、さらに開発に時間をかけて達成できた冷中性子ビーム強度が研究に役立つであろうかということであった。汎用の装置を組んだのでは極めて難しい問題であるが、使用目的をある程度限定するならば、実現の可能性は大きくなる。以上の動機と方針に従って、北海道大学加速器パルス冷中性子源の研究開発と設置を行い改良を経て所期の目標以上の性能に達した。北大パルス冷中性子源は加速器のものとして

初めての装置であり、散乱実験用の実用装置として長時間の常用運転を行っている唯一の装置であり、すでに数千時間の使用を行っている。信頼性が高く操作が極めて簡単であり自動制御は不必要であり、起動と停止の電源開閉操作以外には運転中に操作・調整を行う必要はまったく無い。

2. 要求性能

冷中性子源の用途と使える速中性子源を考慮して、要求性能を次のように設定した。

- (1) 冷中性子散乱実験用として、第1線級原子炉において得られる冷中性子ビームに相当する実効ビーム強度が得られること。
- (2) 中性子散乱実験用パルス線源として、パルス特性が適切であること。
- (3) 安定性と信頼性および安全性が高く、運転中に調整操作を必要としないこと。
- (4) 35 MeV 平均ビーム出力 1 kW で運転する電子線型加速器を使用すること。

まず、(1)項の条件を充足するためには、熱中性子束が $1 \sim 2 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ 以上の研究炉に相当するビームピーク強度が必要である。ところが、従来の経験では(4)項の加速器容量では速中性子発生量が 10^{12} n/s であり、含酸素減速材を使っても放出面上で約 $2 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ 程度の熱中性子束しか得られない。この大きな開きを埋める方策を工夫することが必要である。

(2)項に関しては、用法を明確にしなければならないが、一般に(1)のビーム強度条件と相反する関係にあり、両立させるための工夫が必要である。

(3)項に関しては、加速器自体の安定性と信頼性にまず依存するところが大きい。加速器は元々そのように設計しており、充分要求に応える性能であった。したがって、問題は加速器以外の他の部分の設計いかんにかかっている。

3. 設計理念

発生速中性子総量が約 10^{12} n/s と限られており、汎用のパルス冷中性子源のためには、この発生量は明らかに過少である。そこで、用途をある程度制限してこの困難を解決することを考えた。エネルギーが数 meV の冷中性子の主要な用途の1つは準弾性散乱である。この手法の色々な研究分野への応用は今後益々広がろうとしている。この目的のためには、少なくとも $1 \sim 2 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ 以上の熱中性子束炉が必要とされている。したがって、我々の初期条件では、最も効率が良い含酸素減速材による従来の方法を用いても、減速材放出面上のビーム強度はおおよそ数百分の一しかない。しかし、加速器中性子源と原子炉の使用条

件の差異を考えると、そこに工夫の余地が明らかに存在している。準弾性散乱においては散乱角に対する精度の要求が比較的緩やかであるから、この点と加速器中中性子源の特性とを適切に組み合わせて、実効ビーム強度の増大を図ることができる。

限られた速中中性子発生量から、できるだけ多くの有効冷中中性子を取り出すためには、まず減速材がターゲットを見込む立体角をできるだけ大きくしなければならない。減速材内にターゲットを置けば最大立体角となるが、冷中中性子源ではターゲットを冷減速材の外にどうしても置かなければならない。また、冷減速材の形状もデューワー容器を考えると、直方体状に限られる。

次に、中性子放出面を大きくするためには、冷減速材の形状は直方体が適している。その厚さに関しては、パルス幅の多少の広がりや問題としない場合には、これまでの含水素減速材に関する研究から約5cmがオプティマムであることが知られている。残りの辺の長さに関しては問題がある。辺の長さを大きくした時に、放出面の中心近傍のみビーム強度が大きく、周辺で著しく強度が小さいのでは何にもならない。少なくとも25cm x 25cm程度までは、中心ビーム強度はほぼ一定で、また面上の分布も余弦分布に近い。このことは、この大きさの範囲では面積が大きいほど有利であることを意味している。これに対して原子炉では、ビーム放出面をむやみに大きくすることは困難である。通常、原子炉ではこの大きさを約10cm²として評価を行う。加速器では放出面積に原理的制約はないから、必要に応じて大きくとることができる。ただし、ビーム・コリメーションの制限が厳しい場合には、むやみに大きくできないが、幸い準弾性散乱では前述の様にこの制限は極めて緩い。

さらに、冷減速材に入射しないで飛び去る中性子と、冷減速材に入射しても冷中中性子になる前に漏洩する中性子をできるだけ捕えて利用する方法として、速中中性子反射体がある。この目的にとって、ベリリウムが最も優れていることは明らかであるが、ベリリウムは極めて高価であるので、黒鉛を使うことにした。

冷減速材からパルス状に放出される冷中中性子のエネルギー・スペクトルおよび時間スペクトルは熱中中性子の場合と著しく違った分布特性を有している。さらに、パルス線源では、定常線源で通常用いられている直接配置と異なった、いわゆる逆転配置を容易に採用することができる。これらの特性を活用して、感度増大や分解能の向上あるいは直接配置分光器では行い難い測定方法を採用する等、色々工夫の余地がある。

予備実験の結果と冷凍機の使用経験から、メタンを冷減速材として採用した。メタンの冷中中性子利得は、含水素減速材の中で最も高いものであり、常温でガス状であることは取

り扱いの点から好都合である。反面、空気と混合して爆発する危険性があり、安全性に厳重な配慮が必要である。装置の複雑化によって安全性を保証しなければならないならば、メタンの採用は考え直さねばならない。当然ながら、複雑化はフェイル・セーフにとって好ましくない。逆に、簡単な装置で機能を充足し、かつ安全性が確実に保証されるならばこれは最も望ましい。この方針に沿って設計を行い、運転時の弁の操作を一切なくした。その結果、単純化が性能を何ら損うことなく、装置の無駄な部分を除くことになり、フェイル・セーフを保証することになった。

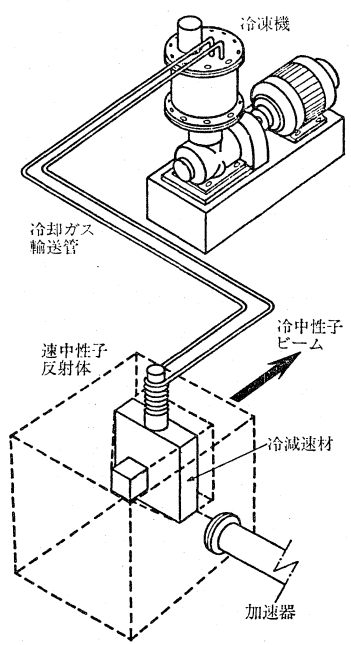


図 1

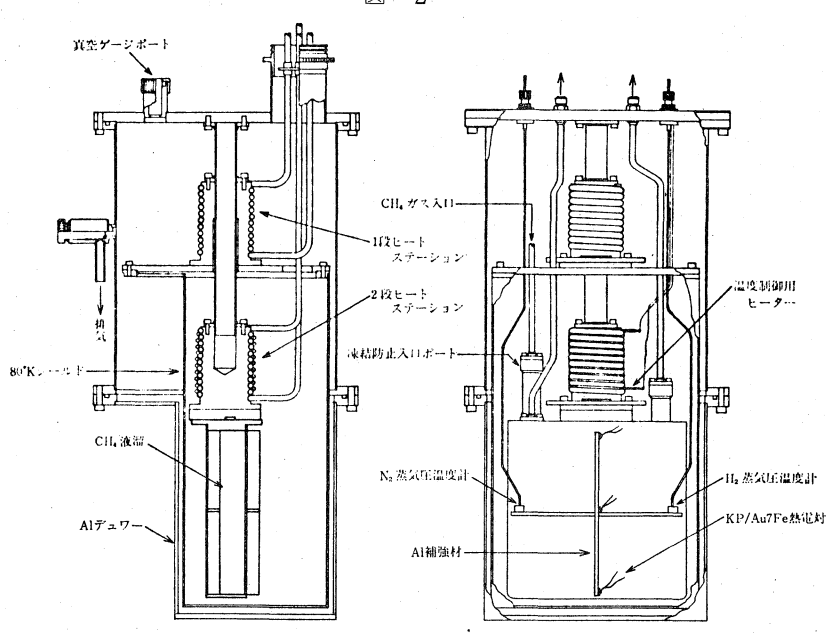
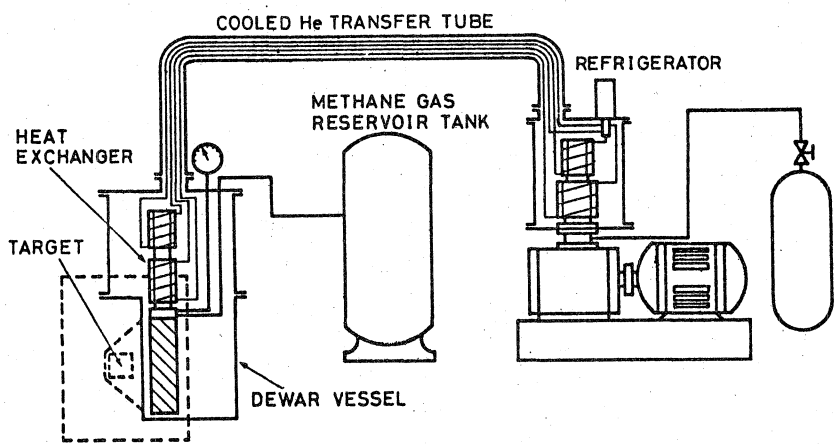


図 3



4. 構造

電子線型加速器、冷減速材チェンバー、熱交換器、速中性子反射体および冷凍機の組み合わせ構成を図1に示す。メタンガスはリザーバタンクから供給される。図2は冷減速材チェンバーの内部構造を示す。これらのフロー図を図3に示すが、前述のように運転時に操作する弁は一切無く、極めて簡単である。

5. 性能

冷中性子の飛行時間スペクトルおよび冷減速材よりの放出冷中性子ビームの時間・エネルギー特性を、図4と図5に示す。この特性は準弾性散乱実験に特に有用である。

冷減速材放出面上における冷中性子ビームピーク強度は 4.5×10^{10} n/cm²/sであり、熱中性子換算では 2.1×10^{11} n/cm²/sに相当する。しかし、前述の様に、散乱実験のための試料位置では 10^{14} n/cm²/s級研究炉のもつに充分匹敵し得るビーム強度を有している。

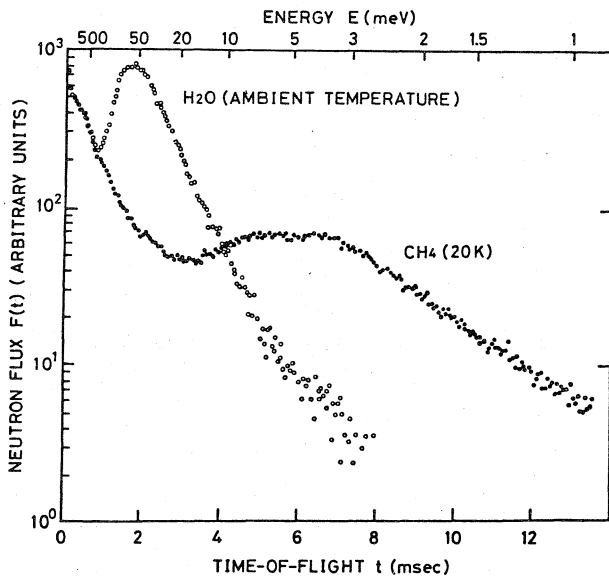


図 4

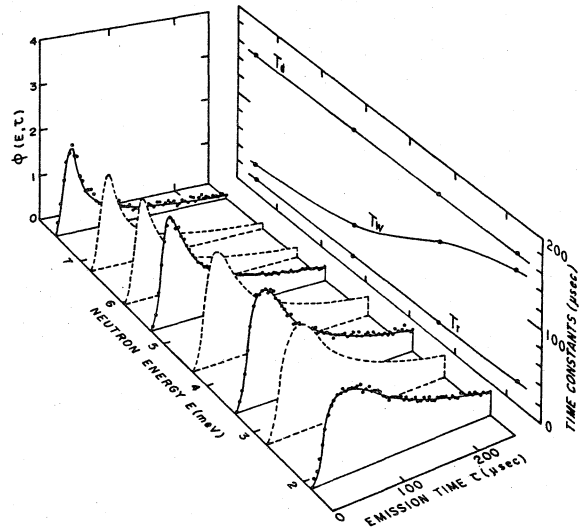


図 5

6. 準弾性散乱実験への利用

単色の低エネルギー中性子が、液体や個体内の原子や分子によって散乱される際に、原子や分子が揺動運動を行っているとき、弾性散乱スペクトルは幅がないシャープなラインではなく、幅が広がった準弾性散乱ピークとなる。そのピークプロフィールには、揺動運動の情報が暗号化されて反映している。これを解読すれば、原子や分子の運動の時間・空間的な情報を得ることができる。準弾性散乱は液体、高分子、プラスチック結晶、金属内水素拡散、吸着、ゲル等の研究の他に、化学反応の時間変化、非平衡系、工学的な応用等多くの研究への応用がある。準弾性散乱で調べることができる原子・分子の揺動は 10^{-12} ~ 10^{-9} 秒の特性時間を持っている。この特性時間の揺動運動は、熱攪乱によって誘起されているものであるから、関与する原子・分子の束縛力は小さく、熱エネルギー程度かそれ以下である。したがって、準弾性散乱は弱い分子間力が関与する現象の研究手法として有用である。

準弾性散乱の応用には、1~5 meVの冷中性子が適している。エネルギー変化を高精度で測る目的のためだけならば、場合によってはもっと小さなエネルギーの中中性子を使った方が容易である。ところが、準弾性散乱の応用では、運動量変換量の範囲をできるだけ広くとることが要請される。このために、むやみに中性子のエネルギーを小さくするわけにはいかない。入射エネルギーと散乱後のエネルギーは大差がなく、散乱角の変化範囲はおおよそ20~150度である。そして、望ましい波数ベクトルの変化範囲は0.1~3 Å⁻¹程度である。これが、準弾性散乱測定に冷中性子が必要な理由である。

準弾性散乱ピーク・

プロフィールには散乱体系の情報が豊富に含まれている。しかし、これの解析は簡単ではなく、今後何らかの進展が必要である。

装置の面では、スペクトル・プロフィールを歪ませることなく測れるように、測定原理あるいはデータ処理に工夫が必要である。パルス冷中性子源はこの目的にとって極めて好都合な特性を有している。加速器冷中性子源と大面積アナライザーミラーを逆転配置で使って飛行時間因子に起因する歪みを除いた北大中性子準弾性散乱分光器(LANDAM)の装置概念

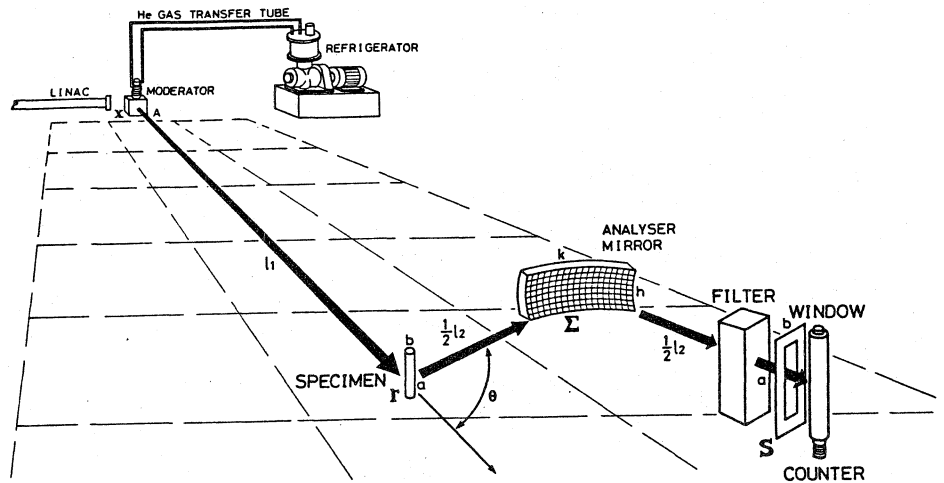


図 6

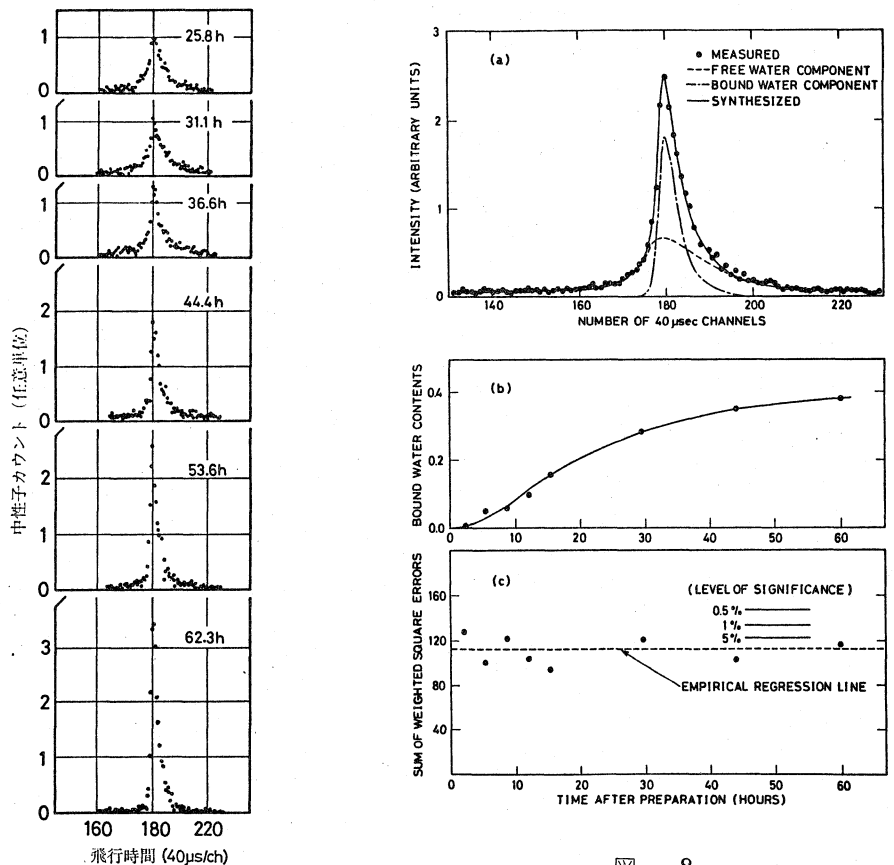


図 8

図5、図6に示す。

分子の弱い結合状態における結合の強弱、化学反応の時間変化、工学的非破壊検査に関する測定例として、図7と8に、セメントペーストの硬化過程の測定結果を示す。図7はセメントペースト混練後のスペクトルの時間変化の生データを示す。図8(a)は、統計データ解析の計算例であり、図8(b)は、結合水の時間変化の様子である。図8(c)は、統計データ解析における仮説検定の結果を示す。

7. おわりに

北大加速器パルス冷中中性子源は、小容量電子線型加速器を使用しているにもかかわらず、準弾性散乱実験用として試料位置において熱中中性子束 10^{14} n/cm²/s 級原子炉に同等かそれ以上の冷中中性子を発生することができる。信頼性と安全性が高く、原子炉に比べて安価で、高能率の有用な装置である。これを利用した準弾性散乱分光器は有用な特長を持っている。

この技術は、大型加速器強中中性子源のパルス冷中中性子源製作にとっても大いに役立つ。高エネルギー研のKENS（シンクロトン加速器，陽子，スパレーション中性子源）が本年6月より動き出したが、KENSの冷中中性子源は北大冷中中性子源と同型であり、7月に最高出力運転を行って、大型加速器強中中性子源でもこの型式が有効な冷中中性子源であることが実証された。