



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	北大45MeV電子線型加速器によるパルス状冷中性子源
Author(s)	井上, 和彦; 大友, 詔雄; 岩佐, 浩克
Citation	北海道大學工學部研究報告, 71, 179-185
Issue Date	1974-06-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41208
Type	departmental bulletin paper
File Information	71_179-186.pdf



北大 45 MeV 電子線型加速器による パルス状冷中性子源

井 上 和 彦* 大 友 詔 雄* 岩 佐 浩 克*

(昭和48年10月31日受理)

Pulsed Cold Neutron Source in Hokkaido University LINAC

Kazuhiko INOUE, Norio OTOMO and Hirokatsu IWASA

(Received October 31, 1973)

Abstract

A description is given of the design and operation of the pulsed cold neutron source in Hokkaido University LINAC. The cold moderator is solid methane, which is condensed and cooled by cooled helium gas. For the energy region below 1 meV the cold neutron beam flux is increased by a factor of 40. The high cold neutron intensity obtained is at present utilized for cold neutron time-of-flight experiments. An operational stability and safety of the facilities are recognized during operation of about 150 hours.

1. 序 言

冷中性子は凝集体内の原子・分子の運動の優れた探針として利用される。この種の研究を効果的に行なうためには多量の冷中性子を必要とする。冷中性子の多量の発生には冷減速材を用いなければならないが、原子炉において冷減速材を用いた定常的冷中性子源については、Butterworth等を始めとして、いくつかの試みがすでに行なわれている¹⁻⁶⁾。加速器を速中性子源とするパルス状冷中性子源に関しては、1947年に Sutton⁷⁾ 等がサイクロトロンにおいて液体窒素温度のパラフィンを冷減速材として用いた例があるに過ぎず、その後 McRaynold と Whitmore^{8,9)} および井上等¹⁰⁻¹²⁾ による極低温における含水素冷減速材内の冷中性子スペクトルの研究があるに過ぎない。現在までに原子炉の定常的冷中性子源が一応実用的段階に達しているが、パルス状冷中性子源として実用的なものはまだ作られていなかった。

我々は、これまでの研究成果に基づいて、北大 45 MeV LINAC に組み合わせて使用する実用型のパルス状冷中性子源装置を製作し、所期の性能を得ることができた。本論文では本装置の概要について報告する。第1段階では冷減速材として固体メタンを用いており、長波長中性子に対して40倍の利得を得た。今後、第2段階において若干の変更を行なって利得を100ないし120倍に増加させることを予定している。

現在、すでに含水素分子の冷中性子断面積測定に利用しているが、この大きな利得による S/N 比の改善と統計の向上の効果は極めて顕著である。数 10 MeV 規模の LINAC では、今回製作したパルス状冷中性子源なしでは、この種の測定を効率良く遂行するのは極めて困難であった。本装置は、原子炉と加速器を通じて我が国では初めての冷中性子源である。また、45 MeV LINAC

* 北海道大学工学部原子工学科 放射線源工学講座

とパルス状冷中性子源の組み合わせは、冷中性子断面積測定装置としては、現状では少なくともこれに類似のものはない。この組み合わせの大きな特徴は、パルス源による TOF であるために所定の冷中性子エネルギー領域について同時測定を簡単に行なえることにある。また、長波長領域の中性子収率が多く、時間的に冷中性子が選別されているから、INS において低エネルギー領域の分解能を向上させる研究に利用できる可能性がある。これについては現在検討中である。

2. 中性子物理的考察

2.1 冷減速材アセンブリーの形状

加速器で速中性子を発生させるパルス状冷中性子源では、冷減速材自体が熱中性子エネルギーまでの速中性子の減速材としての働きを兼ねなければならない。別に減速材を置き、これで熱中性子を発生させてから、さらに冷減速材に打ち込む方法は、利得の低下とパルス時間巾の増大の不利があるために、この方法を考慮する余地はない。

冷減速材アセンブリーの形状に関しては、原子炉における冷中性子源ではいろいろな形状が試みられているが¹⁻⁶⁾、加速器では上述のように冷減速材が速中性子の減速材を兼ねることから考えて、あまり多様性は考えられない。点状速中性子源を多量の減速材で取囲めば、減速材内の全低エネルギー中性子を多量に発生させることができるが、中性子ビームを外部へ取り出さねばならないから減速材層の厚さを有限に止めねばならない。軽水などではこの最適の厚さが約 5 cm であることがはやくから明らかにされている¹³⁻¹⁴⁾。

熱中性子源アセンブリーに関しては、Day と Sinclair¹⁴⁾ の詳しい研究があるが、彼等はポリセンを平板状にして用いている。冷減速材アセンブリーでも広い中性子ビーム放出面が要求されるから、同様に平板状を採用すべきである。冷却の問題と γ 線加熱の点を考えると、原型の装置としては放出面の反対側に速中性子源を置いた平板状冷減速材チェンバーが技術的困難も少なく、確実に作動させることができると考えられた。また以後の改善のための適切な情報が得られるであろうと期待された。これらの結論に従って、我々の冷減速材チェンバーの形状と寸法が決定された。

パルス状冷中性子源を用いる TOF 実験では、数 m の飛行路を用いるならば、パルス巾は 100 μ s 程度かそれ以下が望ましい。熱中性子ではアセンブリーからの中性子の漏洩・損失を増してやれば、利得は減少するがとにかくパルス巾を狭くすることができる。しかし、冷中性子では中性子速度が遅いため相対的に漏洩による中性子損失の割合が減少し、アセンブリー寸法の調整によるパルス巾の減少は現実的ではない。200 μ s 以下で百数 10 μ s 程度までを許容するならば、このパルス巾は数 cm の厚さのアセンブリーで実現できる。これについては、後で再び論じる。

2.2 冷中性子利得の定義

冷減速材の優劣を判定する目安の 1 つに冷中性子利得がある。パルス状冷中性子源では原子炉の定常冷中性子源の場合とは違った定義を用いなければならない¹²⁾。パルス状冷中性子源の利得は

$$g(E) = g_{1/B} g_c(E) \quad (1)$$

で定義される。 $g_{1/B}$ は減速中性子の減速の効率に関するもので、1 ないし 10 eV 領域のスペクトルと同寸法の常温軽水アセンブリーよりのスペクトルの大きさの比を表わす。 $g_c(E)$ はこの $1/E$ スペクトルで規格化した場合の冷減速材と常温軽水アセンブリーよりのスペクトルの比である。

$g_{l/H}$ は主に冷減速材内の水素分子密度に左右される。 $g_{l/H}$ を定義するエネルギー領域は比較的高いエネルギー領域であるから、化学結合の影響は小さい。 $g_c(E)$ は冷減速材の特性を端的に反映する。

2.3 冷減速材の選択

これまでの原子炉の冷中性子源では、冷減速材として液体水素が用いられている。原子炉では核加熱がかなりあるから、冷減速材自体を循環させて除熱することが望ましい。またオルソ・パラ遷移による冷中性子断面積の急変と減少を避けるためにも、液体水素を循環する必要がある。循環させるためには液体でなければならないから、当然液体水素は好都合であり、他の含水素化合物は極低温で全て固体であるから明らかに不適当である。

加速器では、 γ 線加熱が少ないから、冷却能力を若干大きくしておけば固体冷減速材を使用することができる。したがって、加速器では冷減速材の選択の範囲は広い。

我々は冷減速材としての適否に関する情報を得るために、種々の含水素物質のなかから、軽水、メタン、エタン、水素を選んで極低温まで冷却して、LINAC を中性子源として冷中性子スペクトルの TOF 測定を行なって、冷中性子利得を調べた¹²⁾。表 1 にこれらの含水素物質の物理定数等を示しておく。図 1 は極低温における冷中性子利得 g_c を示したものである。

この結果から、パルス状冷中性子源のための冷減速材の適切な評価を得ることができた。明らかにメタンが最も優れている。原子炉の冷中性子源では液体水素が使用されているが、パルス状冷中性子源ではメタンを用いた方が有利である。

パルス状冷中性子源の冷減速材としてメタンが優れている理由は、メタン内の水素密度が高いことと、回転、格子振動、分子内振動の固有エネルギーが適度に小さいことなどによる。このうちとく

表 1 冷減速材の物理的性質

冷減速材	液化点 (°K)	固化点 (°K)	水素密度 (Hatom/cm ³)	20°K における 主要な冷却機構
H ₂	20.4	14.0	4.60×10^{22}	併 進
CH ₄	111.8	89.0	6.25×10^{22}	分 子 回 転
C ₂ H ₆	184.4	90.2	5.61×10^{22}	?
H ₂ O	373.3	273.3	6.69×10^{22}	格 子 振 動

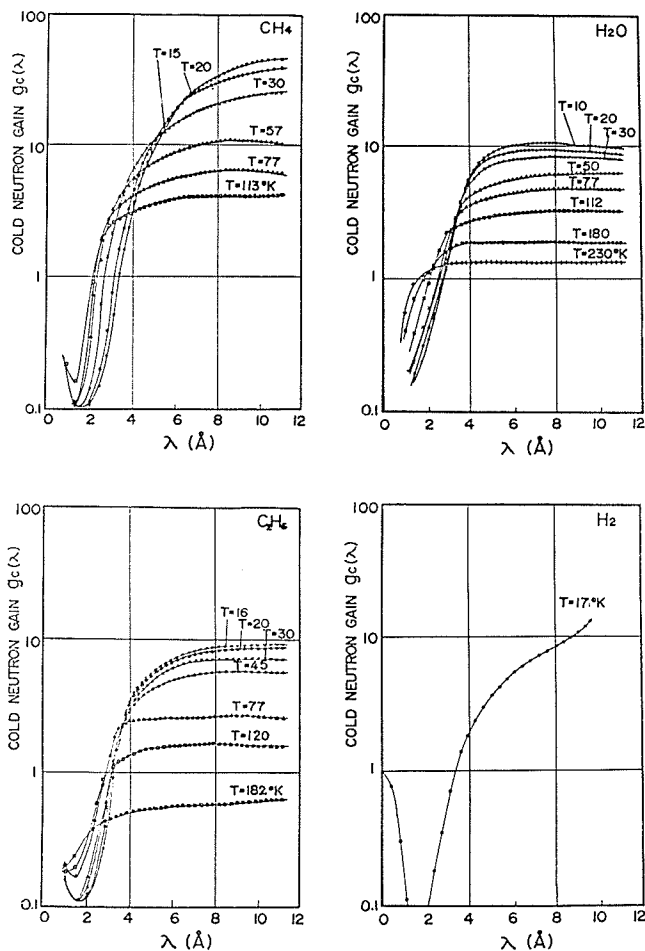


図 1 各種冷減速材の冷中性子利得の測定結果

に、回転定数が 0.0006 eV と極めて小さく、回転に対する束縛も小さく殆んど自由回転に近いことが、結晶であるにもかかわらず固体メタンが良い冷減速材である主要な理由である。

3. パルス状冷中性子源装置

装置の鳥瞰図を図2に示す。冷減速材チェンバーは LINAC のビーム輸送管先端付近に置かれており、冷凍機はコンクリート遮蔽壁を隔てたビーム実験室に置かれ、冷却ヘリウムガス移送管がその間を結んでいる。冷中性子源チェンバーの中性子放出面はビーム実験室に向いており、大口径の中性子遮蔽付きの 5 m 飛行管が設けられている。

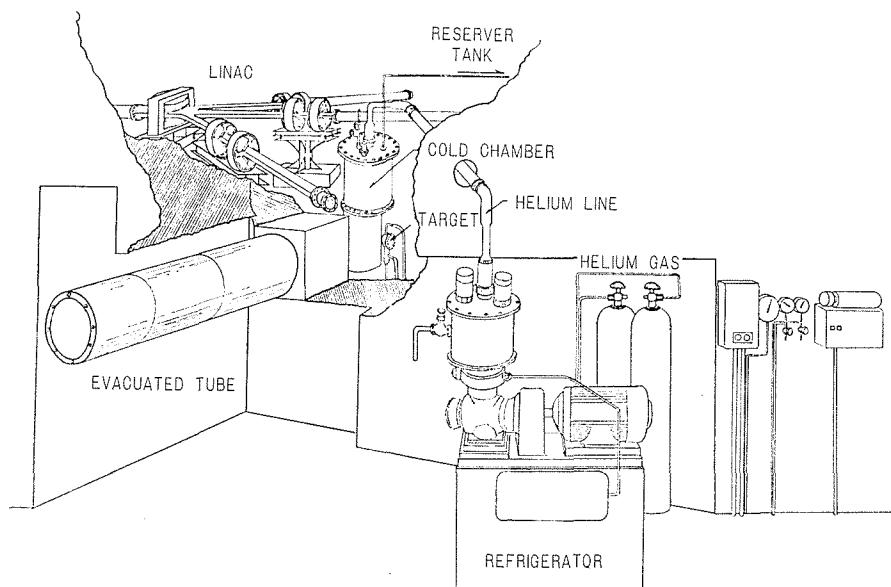


図2 パルス状冷中性子源装置外観

3.1 中性子源

速中性子源は北大 45 MeV LINAC であり、パルス巾 $3 \mu\text{s}$ でピーク電流は 100 mA 以上の性能を有している。現在は未完成で、完成時3本の加速管のうち2本のみが稼動中であり、したがって LINAC 完成時には中性子発生率が現在のほぼ2倍に増加する。

LINAC よりの電子ビームは重金属水冷ターゲットにより速中性子に変換され、冷減速材アセンブリクライオスタットに打ち込まれる。現在はターゲットに鉛を用いているが、近い将来にウランに変更し、中性子発生率をおよそ2倍上昇させる。

3.2 冷凍機

LINAC の場合には γ 線加熱が小さいので、冷凍出力としては原子炉の場合に比べてかなり小出力で間に合う、現在の冷減速材チェンバーにおける冷却出力は 20°K において約 10 W である。これは間もなく改良して、約 20 W に増加させる。

輻射と伝導による熱侵入に対しては 10 W の冷凍出力で、冷減速材は充分 20°K に保持されるが、 γ 線加熱が数 W 程度ある。このために、現在では LINAC 運転時に 0.5 ないし 1°K の温度上昇がある。

冷凍機は PHILIPS 社 PEH-100 型であり、これにヘリウムガス循環ベンチレーターを取りつけ、低温ヘリウムガスにより冷減速材アセンブリを冷却している。冷減速材のメタンは 2 m^3

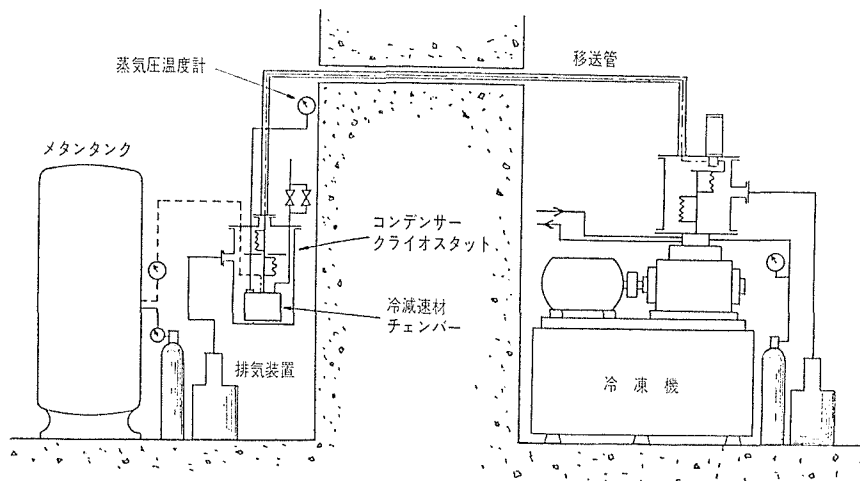


図 3 パルス状冷中性子源フロー図

のリザーバタンクに収納され、タンクはパイプラインで冷減速材チェンバーに直結している。冷減速材チェンバーが冷却されると、メタンはチェンバー内に冷却凝集し、冷凍機の停止時には昇温し、ガス化してリザーバタンクに戻る。冷却・固化装置全体の概要を示すフロー図を図 3 に示す。

3.3 冷減速材アセンブリークライオスタット

冷減速材のコンデンサーチェンバーは矩形のアルミニウム製容器で、容積は約 5 l である。チェンバーの上面に熱交換器が装着されており、これに冷凍機からの冷却ヘリウムガスが循環する。外部におかれたメタンガスリザーバタンクからの配管が上面に直結しており、チェンバー内上面でメタンガスが冷却液化し、さらに冷却して固化する。

温度測定は水素および窒素の蒸気圧温度計と、熱電対によっておこなわれる。冷減速材は通常 19°K ないし 20°K に保たれる。

デュワー容器は速中性子入射側が平面状になっており、コンデンサークライオスタットに中性子変換ターゲットを近接して置くことができる。 γ 線加熱を軽減するためにデュワー容器側面に鉛板が置かれている。

4. 中性子スペクトルと利得

冷減速材アセンブリーの中性子放出面よりの中性子ビームスペクトルの測定結果を図 4 に示す。0.0035 eV 附近のスペクトルの凹凸はチェンバー容器のアルミニウムの断面積の Bragg 切断のためである。図には比較のために同寸法の常温軽水アセンブリーよりの中性子スペクトルが示してある。冷中性子成分が著しく増加し、前章の予測通りに長波長で約 40 倍の利得が得られている。

図 5 に冷中性子利得 g_c を示す。温度の変化に応じて中性子スペクトルが変化する。したがって、長時間測定時には γ 線加熱による冷減速材の温度上昇が起こる。デュワー容器とターゲットの間に遮蔽鉛板を挿入することにより、かなり γ 線加熱を軽減することができるが、中性子強度も若干減少する。

約 3 Å 以下の中性子に対しては、冷減速材温度が 20°K では、利得は 1 よりも小さくなる。

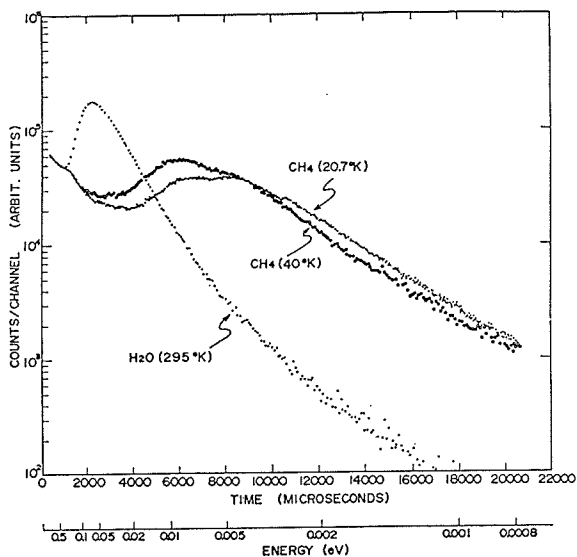


図4 冷中性子ビーム時間スペクトルの測定結果

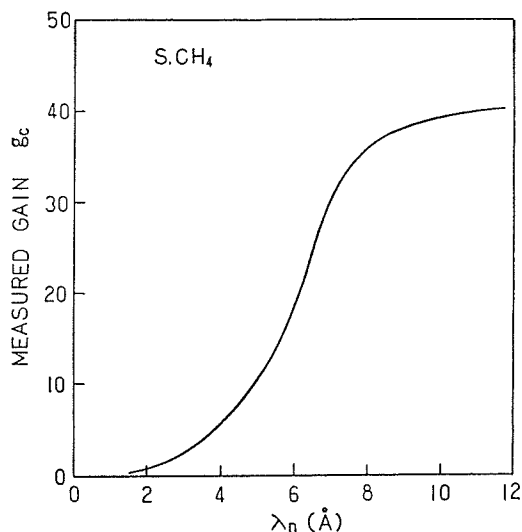


図5 パルス状冷中性子源の冷中性子利得の測定結果

即ち、熱中性子を必要とする場合には冷中性子源は利得の点で、常温軽水アセンブリーに比べて明らかに不利であり、使用すべきでない。2ないし4 Å の中性子を望む場合にはメタンの液化点と固化点の間で使用するのがよい。ただし大きな利得は望みがたい。

5. 冷中性子パルスの時間特性

冷減速材アセンブリーより冷中性子の平均放出時間あるいは冷中性子パルスの時間特性は、TOF 測定の分解能を左右する重要な因子である。パルス状熱中性子源では、これを数 10 μ s の程度の大きさにするために減速材アセンブリーの大きさを小さくしたり、吸収体を添加して、中性子損失率を増すようにしている。したがってかなり熱中性子の収率が低下する。冷中性子で数 m の飛行路を用いるときは、波長によるが 10 ms 程度かそれ以上の飛行時間が多いので、平均放出時間として 200 μ s 以下なら許容できる。勿論、これが短い程分解能が向上するが、もともと少ない冷中性子であるから、利得を低下させたくない。

冷中性子では減速材アセンブリーの大きさを少々変化させても、利得にあまり影響しない。それは、中性子の平均速度が小さくなり、吸収断面積が増し、漏洩の効果が相対的に低下するからである。メタンでは、

$$(\nu \Sigma_a)^{-1} \sim 220 \mu\text{s} \quad (2)$$

であるから、これが熱平衡での低温極限時の減衰時間である。

冷中性子源よりの放出冷中性子ビームの単色パル

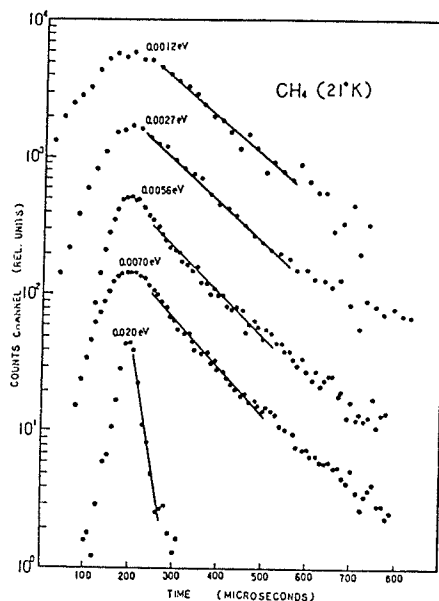


図6 冷中性子ビームの単色パルス時間分布の測定結果

スの時間依存の測定結果を図6に示す。中性子の単色化は、高いエネルギーに対して銅単結晶を、低いエネルギーに対してマイカを使用した。入射ビーム側の角度の開きが 2° 程度あるために、パルスの立ち上がりが鈍化しているが、減衰側は影響を受けないから、パルスの減衰定数をこの結果から求めることができる。入射ビームのコリメータを準備中であり、 $30'$ 程度に絞った測定を計画している。

長波長での減衰時間は約 $180\ \mu\text{s}$ である。上述の $220\ \mu\text{s}$ との差は、メタン温度が 20°K であることと中性子漏洩の効果がまだきいているためであるが、いずれにしてもその差は大きくない。このことは既に述べたようにアセンブリー寸法の変化では減衰時間を大巾には変化しにくいことを示している。極端に小さくすれば、減衰時間はかなり短縮されるであろうが、冷中性子源としては全く実用にならなくなってしまう。また、吸収体を加える方法については、実行が簡単ではないし、せっかく増した冷中性子が減ってしまう。

6. 結 言

上述のように、北大 45 MeV 電子線型加速器パルス状冷中性子源装置は極めて効果的であり、操作も容易で安定にしかも安全に使用できることが実証された。今後は、研究への利用と併行して、性能の向上と、パルス状の冷中性子源であることの特性を生かした INS の測定方法の検討を行なう。

最後に、本装置に関する予備実験の極低温アセンブリーの設計製作を担当された大阪酸素工業株式会社柳井正誼課長、井上邦宏氏、本装置の設計製作をされた同社の為国秀男課長、土田軍三氏および実験とデータ処理に参加した鬼柳善明、林 幸雄、金野秀敏の諸氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Butterworth, H. L., et al.: Phil. Mag. **2**, 917 (1957).
- 2) Van Dingenen, W.: Nucl. Instr. & Meth. **16**, 116 (1962).
- 3) Webb, F. J.: Reactor Sci. & Tech. **17**, 187 (1963).
- 4) Tunkelo, E.: Acta Polytechnica Scandinavica, Physics Including Nucleonics Series no. 38 (Helsinki, 1966).
- 5) Ageron, P. et al.: Cryogenics, Feb., 42 (1969).
- 6) Doose, C., et al.: Cryogenics, April, 107 (1971).
- 7) Sutton, R. B. et al.: Phys. Rev. **72**, 1147 (1947).
- 8) McReynolds, A. W. & W. L. Whittemore: "Inelastic Scattering of Neutrons in Solids and Liquids" IAEA, Vienna, 431 ff (1961).
- 9) Whittemore, W. L.: Nucl. Sci. & Eng. **18**, (1964).
- 10) 井上和彦等: 北大工学部研究報告, 第63号 (1972).
- 11) Inoue, K. et al.: J. Nucl. Sci. & Tech. **9** [6] 374 (1972).
- 12) 井上和彦等: 北大工学部研究報告, 印刷中.
- 13) Asaoka, T.: J. Nucl. Energy, vol. **22**, 99 (1968).
- 14) Day, D. H. & R. N. Scinclair, Nucl. Instr. & Meth. **72**, 237 (1969).