



Title	冷減速材における冷中性子パルスの減衰
Author(s)	秋本, 正; Akimoto, Tadashi; 小川, 雄一 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 72, 125-131
Issue Date	1974-09-14
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41227
Type	departmental bulletin paper
File Information	72_125-132.pdf



冷減速材における冷中性子パルスの減衰

秋本 正* 小川雄一* 齋藤 隆**

(昭和49年3月29日受理)

Decay of Slow Neutron Pulses in Cold Moderators

Tadashi AKIMOTO* Yuichi OGAWA* Takashi SAITO**

(Received March 29, 1974)

Abstract

The decay constants of neutrons in methane, ethane and light water at various low temperatures were obtained by experimentation and calculation. A simple method for estimating the cooling limited temperature of neutrons using the decay constant was set forth. The investigation showed that solid methane is a favorable moderating material for a pulsed cold neutron source, judging from the decay constant and the cooling limited temperature of neutrons.

1. 緒 言

冷中性子は、中性子散乱法による固体や液体の分子運動や中性子物理の研究に広く利用されてきている。このような研究にはしばしば多量の冷中性子が必要とされる。一般に原子炉のなかの冷中性子数は、原子炉内の中性子束分布が減速材の温度でのマックスウェル分布をしているので、少ない。冷中性子成分を増大させる最も有用な方法は、冷減速材内で中性子を熱化、冷化することである。このような冷減速材としては、中性子吸収が小さく、散乱断面積が大きい、水素やメタンのような含水素物質が有用と考えられる。

一般に中性子散乱法のような場合にはパルス状冷中性子が利用される。このようなパルス状冷中性子源として直線型加速器(LINAC)と冷減速材の組み合わせが有用と考えられるが、この場合は冷中性子強度のみならず、冷中性子パルスの時間特性も重要となる。LINACをパルス状中性子源とした冷減速材内の中性子スペクトルの研究はWhittemore¹⁾や井上ら²⁾などによってなされている。またコッククロフト加速器を中性子源とした冷中性子パルスの減衰は住田ら³⁾により測定されている。

本研究では、メタン、エタン、軽水の3減速材について種々の温度での冷中性子パルスの減衰の測定より求めた減衰定数を報告する。また、減速材温度依存の減衰定数を利用した、中性子温度の簡単な推定法を示す。このようにして得られた、中性子を中性子飛行時間実験などに利用する際のエネルギー分解能を支配する量である冷中性子パルス幅の目安となる減衰定数と、冷中性子強度の指標である中性子温度より、パルス状冷中性子源の冷減速材としての有用性の検討をする。

* 原子工学科原子炉工学講座

** 株式会社日立製作所

2. 冷中性子の冷化限界温度の推定

一般に中性子温度は減速材温度の低下とともに減少するが、冷化限界温度の存在が井上⁴⁾により指摘されている。この冷化限界温度は冷中性強度の一指標であり、冷減速材の有用性の尺度となる。一般に中性子温度はエネルギースペクトルから直接的に求められるが、ここでは減速材温度依存の減衰定数から冷化限界温度の簡単な推定法を示す。

減衰定数を入とすれば

$$\lambda = \overline{v \Sigma_a(v)} + v D_0 B^2 - C B^4 \quad (1)$$

となる。ここで右辺第1項 $\overline{v \Sigma_a(v)}$ は中性子速度 v と減速材の吸収断面積 $\Sigma_a(v)$ の積の平均値であり、 D_0 は拡散定数、 C は拡散冷却係数、 B^2 は減速材体系のバックリングである。減速材温度を T_m 、中性子温度を T_n とし、中性子束をマックスウェル分布に近似すれば、拡散係数 D_0 はつぎのようになる。

$$v D_0 = \frac{\int_0^\infty v D(E, T_m) \frac{E}{T_n^2} e^{-\frac{E}{T_n}} dE}{\int_0^\infty \frac{E}{T_n^2} e^{-\frac{E}{T_n}} dE} \quad (2)$$

吸収断面積が小さく、等方散乱を行うような減速材の場合には $D(E, T_m)$ は近似的に

$$D(E, T_m) \doteq \frac{1}{3 \Sigma_s(E, T_m)} \quad (3)$$

となる。ここで散乱断面積 $\Sigma_s(E, T_m)$ が変数分離可能で、低エネルギー領域において $1/v$ 法則に従うものとすれば、 $\Sigma_s(E, T_m)$ は

$$\Sigma_s(E, T_m) = \frac{v_0}{v} \Sigma_0 \left(1 + \sum_{i=1}^h h_i T_m^i \right) \quad (4)$$

となる。ここで v_0 、 Σ_0 は基準となる任意のエネルギー E_0 に対応するものであり、 h_i は定数である。

中性子温度 T_n はバックリング B^2 が小さければ、(1)~(4) 式より

$$T_n = \frac{3v_0 \Sigma_0 \left(1 + \sum_{i=1}^h h_i T_m^i \right)}{2a} \cdot \frac{\lambda(T_m) - \overline{v \Sigma_a(v)}}{B^2} \quad (5)$$

となる。ここで $v^2 = aE$ である。量 $\overline{v \Sigma_a(v)}$ は、含水素物質においては $\Sigma_a(v)$ が $1/v$ 法則にしたがい、したがって $\overline{v \Sigma_a(v)}$ はほぼ一定であり容易に求められる。また Σ_0 は低エネルギー領域においては主に弾性散乱により支配され、水素の束縛散乱断面積⁴⁾ より得られる。

減速材温度 T_m が 0°K の時(4)式は

$$\Sigma_s(E, 0) = \frac{v_0}{v} \Sigma_0 \quad (6)$$

となる。 $T_m=0$ の時の T_n を冷化限界温度とすれば、(6)式を(5)式に代入し

$$T_n = \frac{3v_0 \Sigma_0}{2a} \cdot \frac{\lambda_0 - \overline{v \Sigma_a(v)}}{B^2} \quad (7)$$

となる。ここで λ_0 は $T_m=0$ の時の減衰定数である。測定が積分測定であり、(7)式を求める際に前述のような仮定をおこなっているので、高精度とは言えないが、冷化限界温度は容易に求まり、実用的な一推定法であると考えられる。

3. 実験装置

メタン、エタン、軽水の3減速材について中性子パルスの減衰の測定を、LINACをパルス状中性子源とし、小型冷凍機付き冷減速材チャンバーを用いて行った。Fig. 1に実験装置と測定系の概略図を示す。冷減速材チャンバーは直径20 cm、高さ20 cmの円筒形であり、ここで減速、冷化された中性子が裸のBF₃計数管*で検出され、時間分析装置により分析される。減速材チャンバーと鉛ターゲットの間の鉛ブロックは、ガンマーバーストによる検出器の不感時間を減少させるためのもので、中性子強度をさほど減少させないようとの兼合いから、約10 cmの厚さとした。これにより不感時間は10 μsec程度に出来た。またこの鉛の遮蔽体の配置による中性子パルスの幅や形に対する影響は、本実験のような積分測定では、ほとんど無視できる。また冷減速材チャンバーやBF₃検出器はバックグラウンドの影響を小さくするため、Cd板やB₄Cで遮蔽してある。

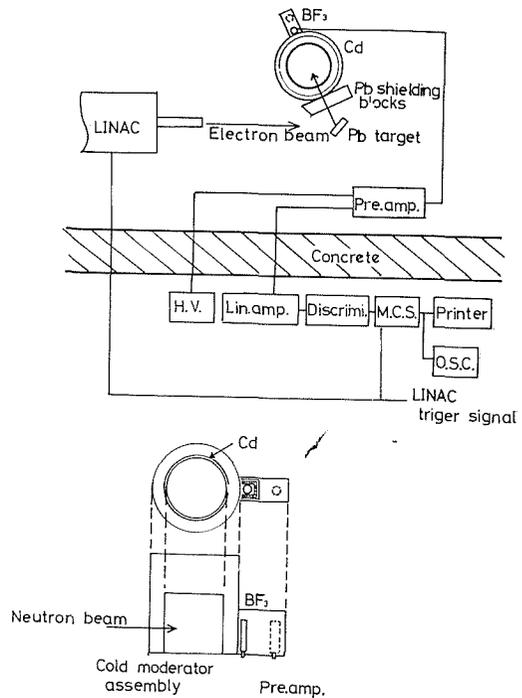


Fig. 1. Experimental arrangement

Fig. 1に示されるように、冷減速材アセンブリとチャンバーの外壁との間には約5 cmの真空層がある。これにより検出器は減速材アセンブリに密着できず、アセンブリと検出器間の中性子の飛行時間は中性子エネルギーに依存する(以後TOF効果と称する)ので、測定結果は体系での真の冷中性子パルスの減衰を示すわけではない。それでアセンブリから異なった距離数点での中性子パルスの減衰の測定から外挿法(付録参照)により、TOF効果を除き、真の減衰定数を求めた。

4. 実験結果と考察

メタン、エタン、軽水の3減速材についてそれぞれ沸点(軽水においては常温)から約14°Kまで10数点にわたり中性子パルスの減衰の測定を行った。また各温度点についてTOF効果の補正のため冷減速材アセンブリから6, 10, 14 cmの3点の測定を行った。1点の測定に要する時間は数分で、その間の減速材の温度変化は最大でも±1°Kであった。また時間分析器の1チャンネルあたりの計数値はピークのチャンネルで数万、有意な最小のチャンネルで数百であり、統計誤差は十分小さくした。

4.1 メタン

Fig. 2に代表的な3温度における中性子パルスの減衰の様態を示す。ピークのチャンネルの移動から低温度における冷中性子成分の増加が推定される。Fig. 3にTOF効果が減衰定数に与える影響を示す。これよりTOF効果は減速材温度 T_m が低くなる程大きくなることわかる。これは低温になるほど、平均の中性子速度が小さくなり冷中性子成分が増すことや漸近的なスペ

* 東京原子力産業研究所 K.K. 製 EB 215-2, 内径 14.5 mm, 有効長 70 mm, ガス圧 200 mmHg

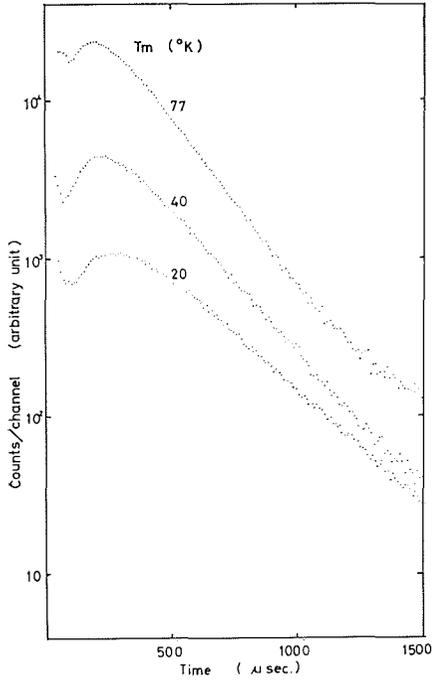


Fig. 2. Decay of neutron density in CH_4 moderator assembly

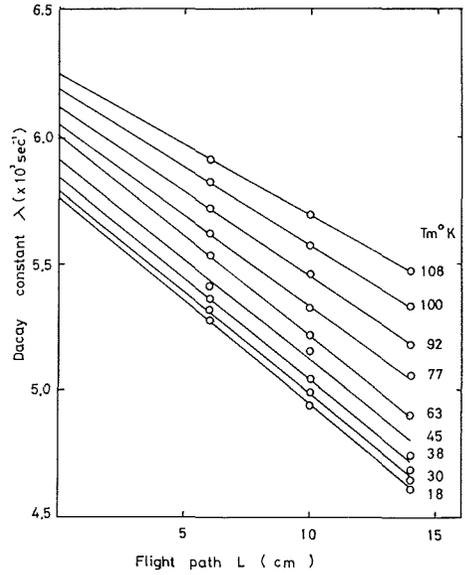


Fig. 3. Effect of TOF on decay constants

クトルになるまでの時間が大きくなることによると考えられる。この図より線形外挿により求めた体系での真の減衰定数を Fig. 4 に示す。(7) 式より冷化限界温度を求めると 16°K と得られた。この値は定常スペクトル測定より求めた井上ら^{2),5)}の結果とほぼ一致する。

4.2 エタン

エタンは、一般にエチル基の分子回転が高いエネルギーを有することから、あまり良い冷減

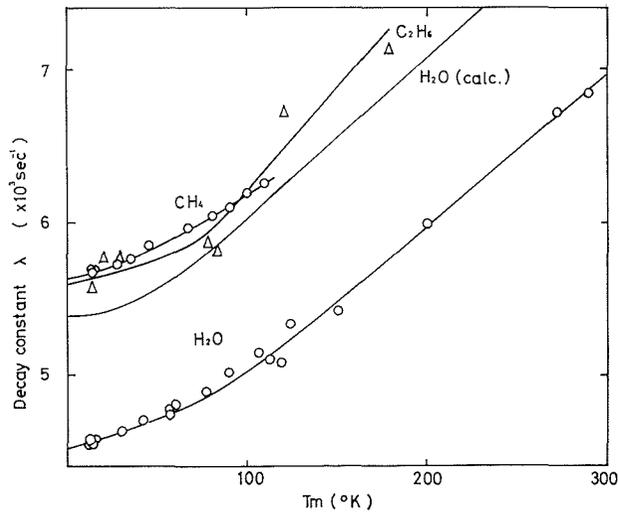


Fig. 4. Experimental and calculational results of decay constant in CH_4 , C_2H_6 and H_2O ($B^2=0.095 \text{ cm}^2$)

速材ではないと思われるが、得られた結果を Fig. 4 に示す。散乱断面積が定かでないので、冷化限界温度は求められていない。

4.3 軽水

Fig. 4 に体系から 6 cm の点での減衰定数を示す。常温より約 50°K までは減衰定数は減速材温度に比例して線形に減少する。これは第 2 章の (1) 式の第 2 項の v の変化が減衰定数 λ に顕著にあらわれるものと考えられる。また 50°K 以下では飽和の傾向がみられるが、これは (1) 式の第 2 項が第 1 項にくらべてかなり小さくなり、その変化による影響はあらわにはみえなくなることによると考えられる。

Fig. 5 に time-step 法を修正した計算法⁶⁾により求めた中性子の時間依存スペクトルを示す。これより判断すると 0°K から 50°K 位まではほぼ同一の形状のスペクトルとなり、それ以上の温度においては徐々に、漸近スペクトルになるまでの時間、そのエネルギーの値などを変化していく。すなわち 0°K ~ 50°K では同じ散乱機構が働いていると考えられる。この結果は、Reichardt⁷⁾ や Tewari and Kothri⁸⁾ のものとは時間が少し経過したあたりからよく一致する。また時間の早い部分の議論は一般にあまりなされていないが、大友ら⁶⁾の結果とよく一致する。計算により得られた減衰定数を Fig. 4 に示す。TOF 効果を考慮し計算すれば実験値とよく一致する。冷化限界温度は (7) 式より 49°K と得られた。この結果は井上ら^{4),5)}の結果とほぼ一致する。

5. 結 言

本研究で得られた時間特性ならびに中性子強度の情報である減衰定数と冷化限界温度から判断すれば、LINAC を中性子源としたパルス状冷中性子源の減速材としてはメタンが最も有用と考えられる。

軽水の場合、実験結果と計算結果は比較的良好に一致しているが、これは計算に使用した散乱断面積などのデータの信頼性が高いものであることを示している。メタンなどにおいてもより信頼性の高いデータが要求される。

本研究においては減衰定数と冷化限界温度のみから冷減速材としての有用性を評価しているが、しかしこの実験のような積分測定からは散乱機構などの情報は直接には得られない。それゆえどのような媒質がより有用な冷減速材となりうるかというようなことは、詳細には、本研究のみならず、他のデータ、たとえば、定常スペクトル、時間依存のエネルギースペクトル、冷中性子利得、冷中性子平均放出時間などから総合的に判断しなければならないであろう。

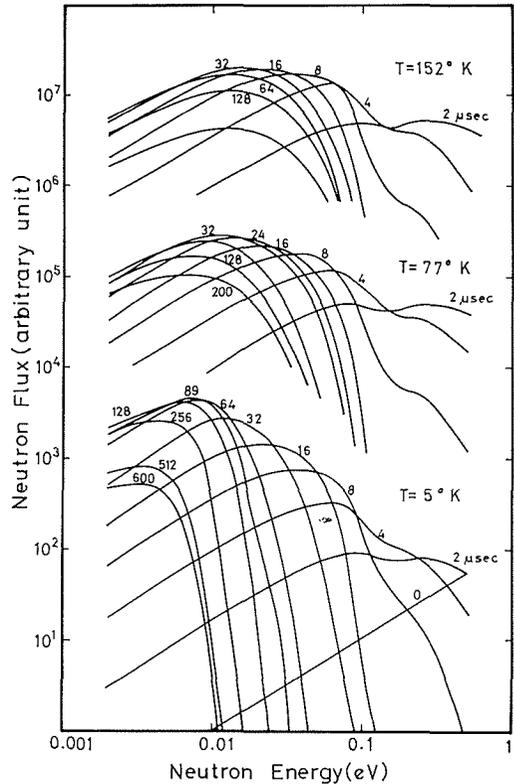


Fig. 5. Time dependent neutron spectra

謝 辞

本研究を進めるにあたり、終始格別の御指導、御配慮をたまわりました井上和彦教授に深く感謝の意を表わします。また実験を進めるにあたり種々御協力くださいました大友詔雄氏ならびに放射線源工学講座の諸氏に厚く感謝いたします。終わりに本論文作成にあたり種々御助言くださいました松本高明助教授に感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- 1) Whittemore, W. L.: Nucl. Sci. Eng., 18 (1964), p. 182.
- 2) Inoue, K. *et al.*: J. Nucl. Sci. Technol. 9 (1972), 6, p. 374.
- 3) 住田健二, 他: 日本原子力学会年会要旨集, 昭和41年, B51.
住田健二, 他: 日本原子力学会炉物理炉工学分科会予稿集, A20.
- 4) Inoue, K.: J. Nucl. Sci. Technol. 7 (1970), 11, p. 580.
- 5) 井上和彦, 大友詔雄, 岩佐浩克: 北海道大学工学部研究報告, 第70号, 昭和49年2月, p. 49.
- 6) 大友詔雄, 井上和彦: 北海道大学工学部研究報告, 第64号, 昭和47年3月, p. 63.
- 7) Reichardt, W.: Proc. Symp. Neutron Thermalization and Reactor Spectra, SM 96/15 (1967).
- 8) Tewari, S. P. and Kothari, L. S.: Nucl. Sci. Eng. 39 (1970), p. 193.

付 録

I. TOF 効果の補正

減速材体系外での中性子パルスの減衰の測定より、体系での減衰定数を得るためには、厳密には体系での時間依存のエネルギースペクトルを求め、検出点までの中性子の飛行時間を考慮して、検出点での中性子束を求めることにより得られる。ここでは体系での中性子束がある温度でのマックスウェル分布をしており、時間とともに指数減衰するという仮定で TOF 効果の評価をし、測定値の補正を行う。

中性子速度を v とし、時刻 t での体系の中性子束を $\phi(v, t)$ 、検出点での中性子束を $\phi_d(v, t)$ 、体系から検出器までの距離を l 、減衰定数を λ とすれば、

$$\phi_d(v, t) = \varepsilon \phi\left(v, t - \frac{l}{v}\right) = \varepsilon \phi(v, 0) e^{-\lambda\left(t - \frac{l}{v}\right)} \quad (\text{A } 1)$$

である。ここで ε は検出器方向へ中性子が飛行する確率である。検出器が $1/v$ 特性を示すものであれば、測定値は中性子密度を示す。それぞれ中性子密度を $N(v, t)$ 、 $N_d(v, t)$ とすれば、

$$N_d(t) = \int_0^{\infty} N_d(v, t) dv = \varepsilon \int_{\frac{l}{t}}^{\infty} N(v, 0) e^{-\lambda\left(t - \frac{l}{v}\right)} dv \quad (\text{A } 2)$$

となる。

$N(t)$ がマックスウェル分布をしていると仮定すれば、(A2)式は

$$N_d(t) = \varepsilon N_0 \frac{4}{\pi^{1/2} (2kT_n/m)^{3/2}} e^{-\lambda t} \int_{\frac{l}{t}}^{\infty} v^2 \exp\left(-\frac{m}{2kT_n} v^2 + \frac{\lambda l}{v}\right) dv \quad (\text{A } 3)$$

となる。ここで N_0 は $t=0$ の時の中性子密度、 k はボルツマン定数、 m は中性子の質量、 T_n は中性子温度である。

検出点においても中性子密度は近似的に指数減衰するものとし、その減衰定数を λ' 、(A3)式の積分項を $F(t)$ とすれば、 λ と λ' の関係は、

$$\lambda' = \lambda - \frac{\frac{d}{dt} F(t)}{F(t)} \quad (\text{A } 4)$$

となる。ここで第2項はつぎのようになる。

$$\frac{\frac{d}{dt} F(t)}{F(t)} = \frac{l^3 t^{-4} \exp\left(-\frac{m}{2kT_n} \frac{l^2}{t^2} + \lambda t\right)}{\int_{\frac{l}{t}}^{\infty} v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT_n} + \frac{\lambda l}{v}\right) dv} \quad (\text{A } 5)$$

ところで一般には中性子温度 T_n は求められていない。それゆえ減速材温度などを利用して、 T_n および l の関数としての補正曲線を求めておき、異なった数点での測定値をプロットし、よりよく適合した曲線により補正を行えばよい。またその時の T_n が体系の中性子温度となる。ところで t を十分大きくとれば、 $N(t)$ は少なくとも近似的にはマクスウェル分布になり、実験値と照合して適当な大きさの t の値を利用すれば比較的よい補正となる。

しかし、測定点が体系の近傍の数点であれば、その数点の測定値の線形外挿より近似的に TOF 効果を求めても、それほど誤差は生じないと考えられる。