総 説

〔2〕 臨界未満の系における原子炉物理実験

大山 彰*, 安 成 弘*

Reactor Physics Experiments Using Subcritical Systems

By A. ŌYAMA and S. AN

This paper is a review on reactor physics experiments using subcritical systems. Experimental facilities and techniques are described, and the correlations of theory and experiments are discussed. Some of the interesting pulsed neutron experiments utilizing subcritical systems are also discussed.

I. 序 論

原子炉開発計画において、原子炉物理研究の目的は原子炉設計のための基礎資料を提供することである。これらの資料を理論計算のみで解決できないことは論をまたない。したがって、経験的または半経験的にデータを求めることが必要となる。このための実験方法として、減速材集合体実験、臨界未満系の実験、臨界実験、ゼロ出力実験等が存在する。

臨界未満系の実験の中には、安全系を必要としない臨界から相当へだたった系で行なわれる場合と、臨界に相当近く臨界実験に準ずる安全系を必要とする場合とがある。行なわれ得る実験も違ったものとなる。また臨界未満系の実験では、系自身のみで連鎖反応を維持し得ないから、中性子源を用いる必要がある。中性子源としては定常中性子源とパルス中性子源とがあり、前者を用いる場合はいわば静的な状態の測定であるに対し、後者を用いる場合は過渡的な状態の測定である。パルス中性子実験は最近ますますその重要性が認められ、臨界未満の系において種々興味ある実験をなし得る可能性がある。本論に入る前にこれら臨界未満系による実験の特徴について述べて見よう。

1. 定常中性子源を用いる実験

(1) 臨界から相当隔たった系での実験

普通容積にして臨界の5～30%程度の臨界から相当離れた系で行なわれるが、場合によっては臨界の体積の70%位の容積においても行なわれる。この系では後述するように系内の中性子束分布が指数関数の形となるから、この系による実験を「指数実験」と呼び、指数実験を目的とする装置を「指数関数炉」ともいう。この実験の特徴とするところは、

(a) 実験操作が安全かつ容易である。

(b) 燃料や減速材のインベントリが小でよい。

(c) 計装装置が簡単である。

(d) 遮蔽をほとんど必要としない。

であるが、欠点としては、実験精度が落ちる場合があり、得られる知識にも限度がある。しかし強い中性子源を使用できる場合には、かなりの範囲の実験を行ない得る。この種の実験においても初期装荷に当っては、場合により計装および安全系のある装置を用いる必要がある。

(2) 臨界に近い系での実験

指数実験の場合よりさらに臨界に近づけて行なう実験である。そのための装置は勿論、臨界装置に準ずる計装、安全系を必要とする。たとえば、Merlinの臨界未満装置の場合には、通常の操作条件は実効倍率約0.998、増倍係数約500である。この装置によると、制御棒の反応度効果、臨界質量、温度係数等の測定を行なうことができる。

2. パルス中性子源を用いる実験

パルス法は、研究対象とする媒質中へ投入された中性子のバースト後の中性子密度の過渡的变化を観測するものである。したがって実験装置も強力なパルス中性子源、時間解析器、高分解能の中性子検出器等を必要とする。測定する量も後述するように、従来の方法によるものと異なり D や $\sum_{ik} V_{ik}$ 等を測定する。

II. 定常中性子源を用いる実験

1. 実験装置

指数実験装置としては、燃料と減速材との組み合わせにより種々のものが考えられるが、その一例として、Fig. 1に示したものはArgonne国立研究所における

* 東京大学 工学部原子力工学教室 (Nucl. Engng. Lab., Faculty of Engng., Univ. of Tokyo)

Fig. 1 The dimensions of the graphite exponential assembly

黒鉛天然ウラン指数炉である。

燃料は天然ウランで総重量1,418.4 kgであり、直径1", 長さ8"のスラグ8個を厚さ0.04"のアルミ管中に入れて燃料要素を構成する。燃料要素の総数は90個である。減速材の黒鉛棒の形状、大きさは $3^{13}/16" \times 3^{13}/16" \times 65^{5}/8"$ であり、総重量(プラグを含)9,810 kgであり、中心に燃料棒または黒鉛プラグを入れるための直径 $1^{3}/4"$ の貫通孔があり、燃料と減速材の体積比を変えることができる。図中のスロットは、箔支持器挿入用のものであり、垂直方向の $1/8"$ 直径のアルミニウム管はBF₃またはシンチレーションカウンター挿入用のものである。格子の上部と側面は、アルミニウム被覆のカドミウム板で覆われている。この効用は漏洩する熱中性子を吸収すること、境界条件を計算に適するようにすること、および系外からの中性子による摂動を防ぐことである。この格子の体積は裸の臨界炉の場合の6~8%である。

ペDESTALは2'の高さに積まれた黒鉛棒からなり、その下部に中性子源が置かれる。ペDESTALは中性子源から放出される中性子の熱中性子化および中性子束分布の高次モードを除去する役を果たしている。ペDESTALの側面はアルミニウム被覆のカドミウム板で包まれ、さらにその周囲は鉛の煉瓦およびコンクリートの層でかこまれている。

中性子源としては、5CのSb—Be中性子源が用いられる。

臨界に近い系での実験用の実験装置の例としては、すでに述べた Merlin の臨界未満装置があり、臨界実験装置に準ずる計装や安全系が施されている。その構造、設備の詳細については、文献(1),(2)を見られた

い。

臨界未満系の実験においては、上例のように適当な中性子源を用い、系内の中性子束分布、中性子検出用箔*または中性子検出用カウンターを系内に挿入して、箔の活性化または直接にカウンターの計数から測定することによって種々の実験を行なう。

実験は炉心設計上のパラメーター、たとえば燃料対減速材の体積比、燃料棒の形状、寸法、濃縮度等を変えて行なわれる。

使用される中性子源は普通 Table 1 に示すようなものであって、その強さは通常 $10^7 \sim 10^8$ n/sec 程度である。Pu—Be 中性子源はγ-線が弱いので、他の中性子源に比し取扱いに便利であるが、一方 Pu の漏洩による危険性もある。Po—Be 中性子源もγ-線は弱い、Poの半減期が短いことが欠点である。また中性子発生器を用いる場合もある。強い中性子源を必要とする場合には原子炉の熱中性子柱が用いられる。

Table 1

Source	Reaction	Yield (n/sec/c)
Ra—Be	(α, n)	$1.0 \sim 1.5 \times 10^7$
Po—Be	(α, n)	$\sim 2.5 \times 10^6$
Pu—Be	(α, n)	$\sim 2.2 \times 10^6$
Sb—Be	(γ, n)	$\sim 1.9 \times 10^5$

中性子源からの高速中性子の熱中性子化および中性子束分布の高次モードの除去のためには、Fig. 1 のように黒鉛等の減速材のペDESTALが用いられる。中性

* ワイヤーやピンを用いた例もある。

子束分布の高次モードを消すために、5個の中性子源を中心に1個、円周上に4個配置した例⁽³⁾がある。また特殊の工夫をした中性子源の機構の例⁽⁴⁾もある。

測定用箔としては、実験の種類によって異なった種類および大きさのものが用いられるが、普通インジウム、金、銀、ディスプロジウム、マンガン、アルミニウム、ウラン等がある。これらの箔の中性子照射後の放射能は、端窓型GMカウンターやシンチレーションカウンター等で測定する。

中性子束分布測定用カウンターとしては、通常小型BF₃カウンター、小型フィッシュンチェンバー等が用いられる。しかし実効長の長いBF₃カウンターを用い、中性子束分布の高次モードの影響を消している場合⁽⁵⁾がある。

2. 実験の種類および方法

臨界未満の系においては、炉心設計上のパラメータを変えて実験が行なわれるが、その典型的な例としては、A.E.R.E. や BNL で行なわれた一連の実験がある。したがって以下述べる実験もこれらのパラメータをいろいろ変えて行なわれる。

(1) 炉内中性子束分布の測定

炉内の軸方向およびこれと垂直な方向の中性子束分布を測定することによって、裸の炉心の場合には材料弯曲および外挿距離、反射体付炉心の場合には材料弯曲および反射材による節約を求めることができる。また制御棒の挿入、反射体の付加または取換えによる中性子束分布の変化を測定することにより、制御棒や反射体の影響を論ずることもできる。

中性子束分布測定のためには普通インジウム箔* やマンガン箔が用いられ、これらはアルミニウムまたはルーサイト等の箔支持器を用いて系内に挿入される。しかし BNL におけるように、切断した燃料棒の断面に挿入して行なう例もある。フィッシュンチェンバー

や小型BF₃カウンター**も用いられる。また、これらの箔やカウンターはカドミウムで覆われた状態で使用される。カウンターによる測定は箔による場合に比し、時間的には速やかであり操作も簡単であるが、得られる実験結果の精度は悪い。Fig. 2 は BNL における軽水、低濃縮ウラン格子の指数実験に際しての、半径方向中性子束分布の測定結果である。

材料弯曲の測定は、指数実験における主目的の実験の1つであるから、円柱形反射体付炉心の場合を例にとって、中性子束分布の測定結果から材料弯曲および反射材による節約を求める方法を記述して見よう。求め方としては以下述べるように2つの方法がある。

a. 軸方向中性子束分布および半径方向中性子束分布の測定から求める方法

B^2 (材料弯曲), B_r^2 (半径方向の弯曲), L (衰弱距離)の間には次の関係がある。

$$B^2 = B_r^2 - L^2 \quad (1)$$

L^2 は軸方向の中性子束分布の測定から求めることができる。すなわち、炉心底部より Z cm 上部の点における相対的中性子束は次式で表わされるから**、 L^{-1} は最小二乗法と繰返し法により求められる。

$$\phi = C \sinh [L^{-1} (Z_0 - Z)] \quad (2)$$

ただし、 Z_0 は炉心上部の外挿点の高さ

B_r は反射壁と炉心部との境界面からある距離をへだたった内部においては、半径方向の相対的中性子束分布は $CJ_0(B_r \cdot r)$ の形となるから、最小二乗法によって求めることができる。

L と B_r がきまれば(1)式から材料弯曲を求めることができる。また B_r と λ (反射体による節約)の間には次の関係があるから、 λ を決定することができる。

$$B_r = \frac{2.4048}{R + \lambda} \quad (3)$$

ただし、 R は炉心部の半径

Fig. 2 Radial relative flux

* 実験に使用されたインジウム箔は次のようなものである。

1cm × 1cm, 95~100mg (NAA 指数関数炉, 天然ウラン重水), $1\frac{1}{8}$ " φ, 0.5g (Argonne 黒鉛指数関数炉), $\frac{3}{8}$ " × $\frac{3}{8}$ " × 0.05" (Oak Ridge 指数関数炉, 重水金属ウラン), 0.220" φ, 0.05" 厚または 0.01" 厚 (BNL 指数関数炉, 軽水金属ウラン)

** $\frac{5}{8}$ " φ × $1\frac{3}{4}$ " (Hanford Atomic Products Operation, 軽水, 金属ウラン, 指数関数炉)

** 中性子束分布の高次モードが減衰して、基本モードに比してほとんど無視できる領域での測定結果が解析される。

6. 軸方向中性子束分布のみの測定から求める方法

装荷半径 R を変えて衰弱距離 L を測定する。ところで B, λ, L, R の間には次の関係があるから、 λ を R にかかわらず一定と考えると、最小二乗法により B^2 と λ を求めることができる。

$$L = \left[\left(\frac{2.4048}{R + \lambda} \right)^2 - B^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

この方法では、 λ についての仮定を検討する必要がある。Fig. 3 に BNL で行なわれた実験結果を示す。また上述の実験は温度を変えて行なわれ、彎曲の温度係数が測定される。

Fig. 3 Clean lattice buckling

(2) 格子セル内の熱中性子束分布の測定

熱中性子利用率の測定のため、格子セル内での熱中性子束分布が測定される。

Fig. 4 Foil positions for 2:1 lattice

BNL では熱中性子に対するディスプロジウムの特性を用いて、50%酸化ディスプロジウム ($DY_2 O_3$) とポリエチレンとの混合物で $1/16$ 寸 ϕ , 0.010 寸 厚の小さな箔を Fig. 4 のように並べて照射し、熱中性子束分布を求めている減速材中では、箔は $1/32$ 寸 厚のルーサイト板上に支持されている。Fig. 5 はその実験結果を示している。

Fig. 5 Intracell flux plot

A.E.R.E. では、裸と 0.030 寸のカドミウムで覆ったマンガニワイヤーを用いている。

熱中性子利用率はその定義式から算出される。その際、カドミウム切断エネルギー以下の熱外中性子束の取扱い、熱外中性子束領域での断面積 $1/V$ のテイルの取扱いが問題となる。

(3) U^{238} の核分裂と U^{235} の核分裂との比

この測定の結果から、高速中性子の核分裂効果 ϵ を決定できる。実験法はいわゆる “Fission catcher techniques” と称されるものであり、Fig. 6 のようにアルミニウムとウラン箔とのサンドウィッチを作

って照射する。アルミニウム内における核分裂生成物の飛程は約 0.0004 寸であるから、1 枚のアルミニウム箔は十分隣接するウランからの核分裂生成物を捕獲する

Fig. 6 Catcher foil arrangement in measuring F

ニウム箔1, 6, 7, 12の核分裂生成物の放射能は燃料棒中での核分裂密度に比例し, 3, 4の箔の場合は, 劣化ウラン箔の核分裂密度に比例する。9, 10の箔の放射能はバックグラウンドを与える。おのおののアルミニウム箔の放射能を端窓型β線カウンターで測定する等の手続きにより, U^{238} の核分裂対 U^{235} の核分裂を求め

(4) カドミウム比の測定

実験結果を理論的に解析しようとする場合、熱中性子領域の反応率と、それ以外の中性子領域の反応率との関係を求めて置く必要がある。このために普通次のようなカドミウム比が測定される。

- Pu^{239} の生成率のカドミウム比
- 金箔のカドミウム比
- U^{235} の核分裂のカドミウム比
- フィッション・チェンバーにより核分裂性物質の反応率のカドミウム比

Pu^{239} の生成のカドミウム比はたとえばFig. 7⁽⁶⁾のように、カドミウムで覆った箔と裸の箔との照射による活性化をはかることにより求めている。この値は共鳴を逃れる確率の算出に用いられる。

Fig. 7 Fuel rod assemblies of bare and Cd-covered foils

金箔の場合もほぼ同様の装置で実験を行ない, Au^{198} のβ放射能を測定する。この値から中性子束中の熱中性子束と熱外中性子束との比が求められる。

U^{235} の核分裂のカドミウム比は上述の方法を組合わせて測定する。

(5) 臨界質量の決定

臨界に近い系での実験において燃料装荷量と中性子検出器の計数率の逆数の関係から、臨界質量を決定する。

(6) 制御棒の効果の測定

炉心の制御棒を種々の状態で挿入して臨界質量を決定し、燃料の量と反応度との関係を求め、制御棒の反

応度効果を決定する。あるいは、制御棒挿入前後における軸方向の弯曲の変化を測定し、その変化から半径方向の弯曲の変化を出し、制御棒の反応度効果を求める。

(7) 炉心の二領域装荷による実験

炉心内部を2領域に分ち、周辺部にすでに材料弯曲の知られている標準格子を装荷し、中心部にその材料弯曲を求めようとする格子を装荷し、全体の炉心の実効的な弯曲⁽⁷⁾あるいは臨界質量⁽⁶⁾を決定し、その結果を二組二領域理論や、一組摂動論⁽⁷⁾を用いて解析して中心部の格子の弯曲を求める。

以上のほかにも、中性子温度決定のための実験等が行なわれる。また均質系の臨界未満装置においては、均質炉特有の技術開発に関係ある原子炉物理実験として、流量と反応度の関係、流量変化と中性子束レベルの変化の関係等の実験⁽⁸⁾が行なわれる例もある。

これらの実験において注意されるべき点または補正として考えられるものをいくつかあげて見よう。

- 末端補正 (材料弯曲の測定の場合)
- 高次モードの中性子束の影響およびそれに対する補正
- バックグラウンドに対する補正
- カウンターの不感時間に対する補正
- 箔や箔支持器による振動の効果およびそれに対する補正
- 場所による中性子束の変動に対する補正
- 原子炉の熱中性子柱を中性子源とする場合原子炉出力の変動に対するモニターの必要性
- 中性子源の崩壊時間の速い場合、それに対する補正
- 箔の相互間校正
- カウンターの相互間校正
- 照射終了から計数を開始するまでの時間経過に対する補正

このほかにも、それぞれの実験で種々注意すべき点があるであろう。

実験の精度は、使用できる中性子源の強さ、炉心構造自体の製作精度、実験の種類等により左右され一様ではないが、たとえば弯曲の測定の場合、BNLやA. E. R. E.で行なわれた実験では数%以下の精度である。

3. 実験結果の解釈

前節で述べられたような実験の直接の結果から、われわれにとって有用な知識を引き出すためには、実験結果を理論的に解釈したり、理論と実験との相関性を

確立することが必要となる。そのためには、われわれはまず炉内の中性子反応過程を近似する理論的モデルとして、いかなるモデルを用いるかを定め、それに従って理論式を立て、実験結果からたとえば四因子のようなパラメーターを導出する式を求め、その算出を行ったり、理論計算と実験結果とを併用してパラメーターを求めたり、あるいは純粋な理論計算と実験結果とを比較して理論値の補正項を決定したり、その妥当性を検討したりすることになる。このような過程の好例として、BNLやA.E.R.E.で行なわれた例を述べて見よう。

(1) BNLにおける例⁽⁴⁾

四因子公式による実験結果の解釈が行なわれた。まず上述の実験結果から四因子公式のパラメーターを算出する式を求めねばならない。この式はのために使用される理論のいかににより違ったものとなるが、BNLでは、 ε や ρ に対する式は三組理論の取扱いによって求め、転換率に対しては2つの異った式を導出しており、 U^{235} の熱外中性子領域の核分裂の ρ 、 ε への影響を三組理論を用いて論じている。特に M^2 (移動面積)の値*の導出においては、理論と実験との相関性の好例を見ることができる。すなわち、測定値がいかに理論の任意性に依存しているか、また結果のどの部分がこれらの不確定さに無関係であるかということを示すに役立っている。したがって以下少し詳細に述べてみよう。臨界方程式は一般に次のように書くことができる。

$$k_{\infty} = F(B^2) \quad (5)$$

$F(B^2)$ は弯曲 B^2 の関数であって、洩れない確率の逆数を示すものである。いま、 f, η, B^2 の3つの量が同時に変化するような実験を考えると、 ρ および ε は不変であるから、 $F(B^2)/f\eta$ は不変である。ところで $F(B^2)$ の中には M^2 (またはその一部)が含まれているから、 $F(B^2)/f\eta$ が最小の変化を示すように M^2 (またはその一部)の値を定めてやればよいことになる。

方法としては、

- (1) ホウ酸溶液を減速材中に添加し、 B^2, f を測定する。 η は不変である。
- (2) 体積比が同じで、濃縮度の異った燃料からなる格子は、 B^2, f および η の値のみを異にする。したがって減速材対燃料体積比を一定に保ち、濃縮度のみを変えて、 B^2, f を測定する。 η は計算により求める。

熱中性子拡散距離は f を用い、アルミニウムの被覆と空気ボイドに対する補正をして求める。Table 2にある7つの臨界方程式を用いて M^2 を求めている。求められた M^2 の値は臨界方程式のいかににより異っている。統計的解析の結果は三組理論および年齢ならびに年齢拡散理論の方が、一組または二組理論より少しすぐれていることが示されているが、その差は決して顕著ではない。

Table 2

One-group	$k_{\infty} = 1 + M^2 B^2$
Two-group	$k_{\infty} = (1 + L_s^2 B^2)(1 + L_f^2 B^2)$
Three-group	$k_{\infty} = (1 + L_s^2 B^2)(1 + 5B^2)(1 + L_2^2 B^2)$
	$k_{\infty} = (1 + L_s^2 B^2)(1 + 7.5B^2)(1 + L_2^2 B^2)$
	$k_{\infty} = (1 + L_s^2 B^2)(1 + 10B^2)(1 + L_2^2 B^2)$
Age	$k_{\infty} = \exp(M^2 B^2)$
Age-diffusion	$k_{\infty} = (1 + L_s^2 B^2) \exp(\tau B^2)$

しかしそれらから k_{∞} を求めると、用いた臨界方程式の型により大きく変化していることはなく、また特定の型による k_{∞} の値が、他の型によるものより明らかに大きいまたは小さいという傾向も示していない。このことは臨界方程式のいかににかかわらず、 M^2 とその M^2 の導出に用いた式とを用いれば、洩れない確率が一応正確に求められることを示している。

(2) A.E.R.E.における例⁽⁹⁾

二組理論を用いて実験結果を解析しており、実験と理論の相関性から、熱外中性子の組から熱中性子の組への遷移断面積**および熱外中性子の漏洩、 U^{238} の共鳴吸収断面積 (self-shieldingの効果を含む)等を求めている。いまBNLとは異種の例として共鳴吸収断面積 Σ_{r8} の導出について述べて見よう。

二組理論を用いて次の形の式を導くことができる。

$$C = \frac{V_u}{V_c} \Sigma_{r8} + \frac{\bar{v}_e}{3v_0} (\alpha^2 \lambda_{ce} + \beta^2 \lambda_{re}) \quad (6)$$

C は実験および核的データから決定できる項をまとめたものである。

V_c 格子セル全体の体積

V_u 燃料の体積

$\bar{v}_e$ 平均熱外中性子速度

v_0 2,200 m/sec

* 格子炉心の場合には M^2 の非等方性が問題となるが、BNLでの軽水、低濃縮ウラン格子のような場合にはほとんど問題とならない。

** Transfer cross section

α^2 軸方向の弯曲

β^2 半径方向の弯曲

λ_{zs} 軸方向の輸送平均自由行程

λ_{rs} 半径方向の輸送平均自由行程

上述の式中で決定されないで残るものは Σ_{r0} および $\tilde{v}_0$ である。 Σ_{r0} および $\tilde{v}_0/v_0$ は、弯曲の測定結果を用い、(6)式から求めることができる。したがって、ミクロ共鳴吸収断面積 σ_{r0} を異なった直径の燃料棒に対して決定できる。ところで σ_{r0} は一般に次の形に表わされる。

$$\sigma_{r0} = A + B \cdot S/M \quad (7)$$

ただし、 S は燃料棒の表面積

M は燃料棒の質量

この A , B の常数は、 σ_{r0} を S/M の関数としてグラフを書くことにより求めることができる。Fig. 8 は黒鉛減速格子の場合の結果を示すものである。

Fig. 8 Resonance absorption in graphite-moderated lattices

実験結果の解釈に当たっては、最後にその妥当性を検証してみる必要がある。そのためには、たとえば別に独立に行なわれた測定結果と現在の結果とを比較して論ずるとか、現在の解析法自体の中で一貫性が維持されているかどうかを確かめることが必要となる。実験結果の解釈にはある程度の任意性があるが、解釈自体の中で一貫性が失われないことが重要である。

Ⅱ. パルス中性子源を用いる実験

従来の方法とならんで、パルス中性子源を用いて行なう実験が最近ますます原子炉物理研究や原子炉開発

のための重要な技術となりつつあることは既に述べたとおりである。

非増倍系におけるパルス中性子法による実験は既に広く行なわれ、文献も多数見られるが、増倍系に対する本実験法による研究には未だ広い分野が残されていると考えられる。パルス中性子法は以下述べるように、制御棒や減速材の反応度効果、中性子寿命等を臨界から相当へだたった系においても測定でき、従来の方法とは異なった量を測定することからいっても、パルス中性子法と従来の方法とを併用することによって、臨界未満の系においても種々興味ある実験を行ない得る可能性がある。それゆえ以下少しパルス中性子法について述べることにする。

1. 実験装置

パルス中性子法は、研究対象とする媒質中へ投入された中性子のバースト後の中性子密度の過渡的变化を観測することである。

したがってこのために必要な実験装置としては、強力なパルス中性子源(Cockcroft-Walton型加速器, Van de Graff 型加速器, 中性子発生器, 線型加速器等の加速器を用い、加速された重水素核を三重水素核または重水素核に当て中性子を発生させる) 中性子検出器(BF₃ カウンター, シンチレーションカウンター), 時間解析器を必要とする。これらの装置の具備すべき条件¹⁰⁾としては次のことが考えられる。

パルス中性子源

○減速に関する実験

パルス幅 $< 10 \mu\text{sec}$

中性子生成率 $\leq 10^9 n/\text{burst}$

○拡散に関する実験

パルス幅 $< 300 \mu\text{sec}$

中性子生成率 $\leq 10^9 n/\text{burst}$

○反応度測定

パルス幅 $< 300 \mu\text{sec}$

中性子生成率 $\leq 10^9 n/\text{burst}$

○パルス回数は 10pps 以上が望まれる。

時間解析器

○チャンネル幅 $1 \text{ sec} \sim 0.1 \mu\text{sec}$

○チャンネル数 一応 50 チャンネルで十分である⁽¹¹⁾。

それ以上あっても効果は少ない。Antonov らのように 2 チャンネルで行なっている例もある。

目的とする実験の種類, パルスの諸条件, 時間解析器および中性子検出器の性能はたがいに密接に関係しあ

* 以下述べる実験以外の可能性ある実験項目については、文献(10)に記述されている。

っている。このことについては、たとえば文献¹⁰⁾に詳細に述べられている。

2. 理論および実験*

(1) 中性子拡散

中性子のバースト後、減速時間に比べて十分永い時間の経過後は、基本モード以外の中性子束は速やかに減衰する。(このことが成立するような系の大きさを選ぶことはパルス中性子法における要点の1つである。)この時間領域の中性子の時間的変化の状態を解析することによって、拡散についての研究を行なうことができる。実際の中性子バースト後の中性子密度の時間的変化は Fig. 9 のようになる。

Fig. 9 Time behavior of thermal flux

対象とする時間領域の間での熱中性子の減衰の状態は、拡散理論の取扱いにより次式で表わされる¹⁰⁾。

$$\phi = \phi_0 e^{-\alpha_0 t} \quad (8)$$

$$\alpha_0 = \Sigma_a v_{th} + DB^2 - v_{th} \Sigma_f \bar{P}(B^2) - 1 - \alpha \quad (9)$$

$$D = D_0 - CB^2 \quad (10)$$

Σ_a 媒質中の減速材のマクロ吸収断面積

Σ_f 媒質のマクロ熱中性子核分裂断面積

v_f 平均即発中性子数

α 分裂性物質の熱中性子捕獲と核分裂との比

$\bar{P}(B^2)$ フーリエ変換された減速核、これは系内で核分裂中性子が熱中性子化される確率である。

C 拡散冷却の効果を示す係数である。

B^2 形状彎曲

D_0 無限媒質中での拡散係数

実験方法としては、系の大きさを変えて実験を行ない、種々の B^2 に対して α_0 を測定する。一方計算により $\bar{P}(B^2)$ を求め、 α_0 の実験値と(9)式より $\Sigma_a v_{th}$ 、 D_0

および k を求めることができる*。 B^2 と α_0 の関係および(9)式の各項の物理的意味は Fig. 10 に示すとおりである。

Fig. 10 Schematic diagram of α_0 vs. B^2 for a typical fuel-moderator system, showing contributions from the individual terms in Eq. (9)

Kloverstrom⁽¹²⁾ はほとんど均質型と考えられる、裸の黒鉛濃縮ウラン(93.16% 濃縮)系に対して実験を行

Fig. 11 Detector counts vs. time for graphite moderated

* 実験結果から、 v_{th} 等の核的常数を仮定することにより、 $\bar{P}(B^2)$ を求めることもでき、理論式の計算結果と比較することも可能である。

なっている。Fig. 11 は検出器の計数と時間との関係を示している。黒鉛対 U^{235} の原子数の比率が 2355 の場合の形状弯曲と減衰係数 α_0 との関係を図 12 に示す。Fig. 12 で曲線の弯曲は、一部の原因としてより小さい系では、中性子の平衡スペクトルがより低くなることに原因している。

Fig. 12 Variation of prompt neutron decay constant with buckling; C/ U^{235} =2355 (unreflected systems)

(2) 反応度測定

次のようにして反応度を -15% 程度までの臨界未満の状態でも単位で測定できる。

いま即発中性子の実効増倍率を k_p 、即発中性子寿命を l_0 とすると、中性子束の減衰係数 α は、

$$\alpha = \frac{k_p - 1}{l_0} \quad (11)$$

となり、上式を変形すると、

$$\alpha = \frac{k_p - 1}{l_0} = \frac{k_{eff}\beta_e}{l_0} \left(\frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}\beta_e} - 1 \right) \approx \frac{\beta_e^*}{l_0} (\$ - 1) \quad (12)$$

となる。ただし $\$$ は反応度をドル単位であらわしたものである。

それゆえ、 β_e と l_0 の比が求められておれば、反応度をドル単位で決定できる**。

Simmons と King は KAPL Flexible Plastic Reactor No. 4 により、パルス中性子法による反応度測定の実験を行なっている⁽¹³⁾。

(3) 減速過程の研究

中性子バースト後の減速過程の研究は、減速時間が短いので、シンチレーションカウンタと $m\mu\text{sec}$ の時間解析器を必要とする。

熱中性子および熱外中性子の密度は、中性子バースト後、減速時間の関係からピークを生ずる。したがってこの中性子密度の立ち上がりの状態を詳細に測定することにより減速の特性を知ることができる。またガ

Fig. 13 A schematic view of the experimental arrangement

ロンやカドミウムの吸収物質を透過してくる中性子を時間の関数として測定し理論と比較することもある。

(4) 断続中性子源**による実験

Sjöstrand が行なった方法⁽¹⁴⁾について記して見よ

Fig. 14 A curve obtained with the reactor subcritical by about 1%

* β_e は実効的な遅発中性子生成率

** 系が臨界にできれば $\alpha = \beta_e/l_0$ から、 β_e と l_0 の比が求められる。

** Modulated Neutron Source

う。スエーデンの重水炉の臨界未満状態で行なった実験で、Fig. 13のように重水素イオンをZr-Tターゲットに当てることにより約 14MeV の中性子を生成し、イオン源を断続するすることによる断続中性子源を用いている。またBF₃ カウンターと40チャンネルの時間解析器を用いている。反復時間は0.5または1秒、中性子パルスの長さはその半分である。測定を始める前に、10分間中性子発生器を運転し、定常状態*に達してから測定を始める。中性子束の時間的变化の状態はFig. 14のようになる。面積A₁とA₂はそれぞれ即発中性子および遅発中性子からの寄与によるものであり、A₁とA₂の比から反応度が決定できる**。Sjöstrandはこの方法により重水の高さの反応度効果、制御棒の反応度効果を求めている。しかしこの方法は一般に精度の点で満足すべきものでない。

3. パルス中性子実験において注意すべき点

(1) 中性子束分布のモードの純粋性

増倍系においては、非増倍系の場合より中性子束分布の基本モードがはるかに高くなるから、系の大きさに対する上限に、モードに関する純粋性は非増倍系の場合ほど影響を及ぼさない。しかるに一方、自発核分裂、遅発中性子および光中性子による障害は、系が臨界に近づくに従って大きくなるので、このことがモードの純粋性よりも、系の大きさに対する上限をさだめることになる。また一方、系の大きさの下限に対しても、測定されるべき中性子の数が減少すること、および拡散理論の適用に困難を生ずることのため、おのずから限度がある。

モードの純粋性を得るためには、中性子源や中性子検出用カウンターの置き場所に工夫を必要とする。また大型のカウンターを用いることにより、高次モードからの寄与を消し得る場合もある。

モードの純粋性を検査する方法としては、

- (a) 系内の数個所で測定した α_0 の値が一致するかどうか確かめる。
- (b) 系内の1点で測定された中性子束の減衰曲線を解析してみる。

等の方法があるが、しかしある場合には、むしろ高次モードの解析自体が研究対象となる場合がある。

(2) 系内に中性子検出器等の実験用具を入れる場合には、それらによる振動をできるだけ小さくするよう注意しなければならない。

(3) 体系が有限であるため、拡散係数Dに補正を加えねばならぬ。

(4) 計数落しの最大値 $\Delta\dot{C}/\dot{C}_0$ は次の式で与えら

れる⁽¹⁰⁾。

$$\Delta\dot{C}/\dot{C}_0 = \frac{YGE\delta}{\tau} \quad (13)$$

Y: 非増倍系に対するパルスごとの中性子発生数または増倍系に対するパルスごとの増倍された中性子発生数

G: 中性子検出器に入ってくる中性子の割合を表わす形状因子

E: 中性子検出器の感度(効率)

δ : 時間解析器の系の分解時間

$\tau: \alpha_0^{-1}$

したがって、計数落しに対する補正をある程度以下にしようとする、いろいろの実験条件に対してYの上限が変わってくることになる。たとえば $\tau \approx 10^{-4}$ sec, $GE \approx 10^{-5}$, $\delta \approx 0.2 \mu\text{sec}$ の時に計数落しの最大値を2%以下に保つためには、 $Y \leq 10^6$ となる。

(5) 用いる核常数の不正確さ、特に実効的な遅発中性子生成率の値の評価は、大きな誤差を生ずる原因となる可能性がある。

以上のほかにもカウンターの計数の統計的誤差、バックグラウンドの補正の不正確さ等問題となる事項がある。

4. 従来の方法との比較⁽¹¹⁾

従来の方法と比較してパルス中性子法は種々の特徴を持っているが、それらのいくつかを記してみよう。

- (1) 実験に必要なとする物質の量が少なくすむ場合が多い。
- (2) 従来の方法はパルス法より時間と労力とを必要とする実験である。パルス法は系の大きさを変えて行なわねばならないが、実験はより容易である場合が多い。
- (3) 従来の方法ではLや λ_{th} を測定するのに対し、パルス法では D_0 や $\sum a_i v_{ik}$ を独立に測定することができる。
- (4) パルス法では理論計算の信頼度を検証するため、特殊の系を作って実験することができる。

IV. 結 論

原子炉開発に当っては、燃料、減速材、制御棒等の炉心構成要素の異なった組合わせに対して、炉心の特性を知る必要がある。そのための実験を割合簡単に行な

* 遅発中性子の影響に関して定常状態に達してから、実験を行なうことが必要である。

** $\rho = \frac{1 - k_{eff}}{k_{eff}}$ とすると、 $A_1/A_2 = \rho / \beta$

い得るものとして、臨界未満の系による実験は意味があるのであろう。1958年の Geneva 会議においても、指数実験として、BeO-U 格子についての実験⁽¹⁵⁾、Diphenyl減速材と天然ウランおよび軽濃縮ウラン格子の実験⁽¹⁶⁾、黒鉛減速天然および軽濃縮ウラン燃料クラスターの系についての実験⁽¹⁷⁾、重水、天然金属ウラン、酸化ウラン格子の実験⁽⁷⁾、重水酸化ウランクラスターについての実験⁽⁸⁾等が報告されている。

特に強力な中性子源を使用できる場合、あるいは臨界に近い状態で実験可能の場合には、精度のよい実験を相当広い範囲にわたって行ない得る。またパルス法を併用すれば種々の興味ある実験をなし得る可能性がある。しかし、臨界系の実験と臨界未満系での実験の両者を行なってこそ初めて原子炉物理の実験を完成できることは論をまたない。

最後に臨界未満系の実験装置は、研究用としてのみならず、原子炉工学における教育訓練用としても有意義なものであることを付言しておこう。

なお、本論文では、その範囲を一応熱中性子系の実験に限定した。

本稿を終えるに当たり、有益なご助言をいただいた東大原子炉工学研究室の川島 協氏に謝意を表する。

(1959年 11月 9日 受理)

— 参 考 文 献 —

- (1) K. FIRTH, *et al.*: *Geneva Conf.*, P/1461, (1958).
- (2) 'The Sub-Critical Facility for Merlin', *Nucl. Eng.*, 5 (1958).
- (3) A. T. BIEHL, E. R. COHEN: *NAA-SR-103*, (1951).
- (4) J. MARTELLY, *et al.*: *Geneva Conf.*, P/1193, (1958).
- (5) R. PERRSON, *et al.*: *ibid.*, P/160, (1956).
- (6) H. KOUTS, *et al.*: 'Experimental Studies of Slightly Enriched Uranium, Water Moderated Lattices', *BNL-486*, (1957).
- (7) E. ANDERSON, *et al.*: *Geneva Conf.*, P/575 (1958).
- (8) K. J. de JONG, *et al.*: *ibid.*, P/1827, (1958).
- (9) C. G. CAMPBELL: I. S. GRANT: *ibid.*, P/40, (1958).
- (10) G. R. KEEPIN 'Keepin Pulsed Neutron Techniques', *LAMS-2215*, (1958).
- (11) G. von DARDEL, N. G. SJÖSTRAND: 'Diffusion Measurements with Pulsed Neutron Sources', *Prog. Nucl. Energy*, 2, No.1.
- (12) J. BENGSTON: *Geneva Conf.*, P/1783, (1958).
- (13) B. E. SIMMONS, J. S. KING: 'A Pulsed Neutron Techniques for Reactivity Determination', *Nucl. Sci. Engng.*, 3, (1958).
- (14) N. G. SJÖSTRAND: *Geneva Conf.*, P/789, (1955).
- (15) P. BENOIST, *et al.*: *ibid.*, P/1192, (1958).
- (16) W. W. BROWN, *et al.*: *ibid.*, P/595, (1958).
- (17) R. A. LAUBENSTEIN, *et al.*: *ibid.*, P/594, (1958).
- (18) H. KOUTE: 'Accuracy of Relaxation Length Measurements', *BNL-1957*, (1953).
- (19) P. W. MUMMERY: *Brit. J. Appl. Phys.*, 7, 27 (1956).
- (20) I. B. HOAG: "Nuclear Reactor Experiments", (1958), D van Nostrand.