

JAERI - M
94-004

臨 界 集 合 体 T C A を 用 いた
原 子 炉 物 理 の 基 礎 実 験

1994年2月

小原 徹*・中島 健・井頭 政之*
関本 博*・須崎 武則

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 株式会社原子力資料サービス

臨界集合体T C Aを用いた原子炉物理の基礎実験

日本原子力研究所東海研究所燃料サイクル安全工学部

小原 徹*・中島 健・井頭 政之*

関本 博*・須崎 武則

(1994年1月5日受理)

本書は、1993年7月に日本原子力研究所の軽水臨界実験装置T C A (Tank-Type Critical Assembly) を用いて行われた東京工業大学大学院の学生実験のためにかかれたテキストを整理したものである。同実験では、炉物理実験の基本となる①臨界近接実験、②中性子束分布の測定、③出力分布の測定、④燃料棒価値分布の測定、⑤ロッドドロップ法による安全板価値の測定、が行われた。本書には、実験原理、実験手順、結果の解析手法について記載されている。

Basic Experiments of Reactor Physics using the Critical Assembly TCA

Toru OBARA*, Ken NAKAJIMA, Masayuki IGASHIRA*
Hiroshi SEKIMOTO* and Takenori SUZAKI

Department of Fuel Cycle Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 5, 1994)

This report is based on lectures given to graduate students of Tokyo Institute of Technology. It covers educational experiments conducted with the Tank-Type Critical Assembly (TCA) at Japan Atomic Energy Research Institute in July, 1993. During this period, the following basic experiments on reactor physics were performed: ① Critical approach experiment, ② Measurement of neutron flux distribution, ③ Measurement of power distribution, ④ Measurement of fuel rod worth distribution, ⑤ Measurement of safety sheet worth by the rod drop method. The principle of experiments, experimental procedure, and analysis of results are described in this report.

Keywords: Reactor Physics, Critical Assembly, TCA, Educational Experiment, Critical Approach, Neutron Flux Distribution, Power Distribution, Fuel Rod Worth Distribution, Safety Sheet Worth, Rod Drop Method

* Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology

目 次

1. まえがき	1
2. 臨界近接実験	2
3. 中性子束分布の測定	14
4. 出力分布の測定	18
5. 燃料棒価値分布の測定	21
6. ロッドドロップ法による安全板価値の測定	26
参考文献	28
付 録	29

Contents

1. Preface	1
2. Critical Approach Experiment	2
3. Measurement of Neutron Flux Distribution	14
4. Measurement of Power Distribution	18
5. Measurement of Fuel Rod Worth Distribution	21
6. Measurement of Safety Sheet Worth by the Rod Drop Method	26
References	28
Appendix	29

1. ま え が き

東京工業大学大学院理工学研究科・原子核工学専攻では3年前から日本原子力研究所の臨界集合体を用いて学生実験を行ってきた。1990年度と1992年度には高温ガス炉臨界実験装置VHTRCを用い、1991年度の学生実験には高速臨界実験装置FCAを用いて実験を行った。本年度(1993年度)の学生実験では軽水臨界実験装置TCAを用いた炉物理実験を行うこととなり、事前の講義と実験のため本テキストを新たに作成した。

本テキストの作成にあたってはVHTRCで行った学生実験のテキスト「臨界集合体VHTRCを用いた学生実験(東工大:関本,井頭,原研:安田,山根著,平成2年)」をもとに作成した。また,京都大学原子炉実験所で毎年行われる学生実験のテキスト「京都大学臨界集合体大学院実験テキスト(改訂第4版),(京都大学原子炉実験所,昭和59年)」も大幅に参考にした。テキストは原案を東工大小原が作成し,原研中島がコメントをして修正する形で作成した。

実験内容は,東工大小原と原研中島の間で調整を行い決定した。実験内容を決めるにあたっては,シンプルな構造を持つTCAの特徴が十分に教育に反映されること,単に原子炉物理の実験にとどまらず原子炉システム全体への関心と理解が深まるような内容とするように心がけたつもりである。

平成5年7月

東京工業大学原子炉工学研究所	小原 徹, 井頭 政之,
	関本 博
日本原子力研究所燃料サイクル安全工学部	中島 健, 須崎 武則

2. 臨 界 近 接 実 験

2.1 実験の目的

世界最初の原子炉はフェルミの指導のもとでシカゴ大学のスコージ競技場に作られたCP-1 (シカゴ・パイルとも呼ばれる) という原子炉であるとされている。この装置により原子炉の原理が実証されたといえるが、その最も重要な時点は臨界の達成時であり、1942年12月2日のことであった。この原子炉は今日の言い方だと臨界集合体といったほうがよいであろう(出力は2kW)。その後多くの原子炉が建設されたが、今でも建設段階のひとつの山となるのは臨界達成である。この臨界達成ではっきりする原子炉の臨界量は、それまでの原子炉の核設計がどれだけ精度よく行われたかを知る重要な目安となる。

本臨界近接実験はこれらの実験と同様のものであり、炉物理実験の基礎となるものである。臨界は原子炉理論(もしくは原子炉物理)の中心テーマのひとつであり、授業においてもいくつかの臨界量の計算法を学んだはずである。本学生実験では、手計算でできる2群2領域計算により臨界量を計算し、実験量と比較してもらう。計算機が使えるなら多群多領域の拡散計算を行うことにより、臨界量を求めるのを奨める。

2.2 臨界近接実験の概要

2.2.1 臨界近接実験の原理

いま考えている炉心集合体の実効増倍係数を k とする。(k_{eff} と書くことが多いが、ここでは簡単のため k とした。無限増倍率 k_{∞} と混同せぬよう注意すること。) 臨界近接とは $k < 1$ の状態から燃料を次第に増やして $k = 1$ の状態にすることである。

$k < 1$ なる炉心集合体の近くに中性子源を置くと、中性子源から出た中性子は炉心集合体による増倍を受ける。この効果をかなりあらっばいが直観的な方法で評価してみよう。中性子源から発生する中性子数を S とすると、これらの中性子は1回核分裂を経ると(1中性子サイクルを経ると)その個数は Sk に変化する。同様に2回、3回と核分裂を経るたびにその個数は Sk^2 、 Sk^3 と変化していく。炉心集合体中の全中性子数はこれらをすべて足し合わせた数となり、

$$n = \sum_{m=0}^{\infty} Sk^m$$

となる。即ち中性子は

$$\begin{aligned} M &= n/S \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} k^m \\ &= 1/(1-k) \end{aligned} \tag{2-1}$$

だけ増加されたこととなる。

(2-1) 式から k を横軸, $1/M$ を縦軸にグラフを描くと, $(0, 1)$ と $(1, 0)$ を通る傾き 45° の直線になることがわかる。中性子の空間分布を無視して, 中性子源だけが存在し, 燃料が存在しないとき, これからの中性子を測定して得られる単位時間当りの検出数を C_0 とし, 炉心集合体の近くに中性子源を置いた場合の単位時間当りに検出される中性子数を C_i とすると, M は

$$M = C_i / C_0 \quad (2-2)$$

なる具合に求められる。一方 k は燃料装荷量の単純な増加関数であると考えて, 次のような手順で臨界近接実験を行う。

即ち $1/M$ を燃料装荷量の関数としてプロットし, これを外挿することにより臨界量即ち $k = 1$ に対する燃料装荷量を推定する。 $1/M$ はその絶対値が必要なのではなく, この線が横軸と交わる点での燃料装荷量を知りたいだけなので, 厳密な意味での C_0 を知る必要はなく, 適当な燃料装荷時の中性子検出数を C_0 とし解析をしてよい。このために組まれる最初の炉心を基本炉心と呼ぶ。

2.2.2 注意事項

安全に実験を行うため, 基本炉心の燃料装荷量は計算による臨界予測値の $1/2$ 以下とする。充分確信を持って臨界量の予測ができるようになるまでは, 追加する燃料の量は外挿による臨界予測値と現在の全装荷燃料の量の差の $1/2$ 以下にするのが原則である。

検出器によって予測臨界量が異なる。複数の検出器を用い, 合理的な予測臨界値をもとに次回装荷量を決めていくべきである。

中性子のカウントはノイズの3倍以上あるべきだが, あまり大きいと M が大きくなったとき不感時間が大きくなり, 臨界量を正しい値より大きく見積り危険となるので注意しなければならない。

2.3 TCAによる臨界近接実験

2.3.1 実験の手順

実験の手順はおおよそ以下のようになる。([] 内は記録すべき事項等)

- 1) 起動前点検
[チェックシート]
- 2) 炉心構成の確認
[燃料配置, 中性子源, 安全板の位置, 検出器の種類・位置等]
- 3) 運転開始
- 4) 中性子源挿入
- 5) 安全板引き抜き
- 6) 規定の水位まで炉心タンクへ注水
[水位]
- 7) 出力が一定値になるのを待って中性子計数率測定

[各検出器の計数率]

- 8) 運転停止（安全板挿入，炉心タンクから排水，中性子源除去）
[計数値記録の処理，逆増倍率曲線から臨界量の推定]
- 9) 燃料棒追加
[炉心構成]
- 10) 2)～8)を行う
- 11) 9)～10)を臨界量が確実に予測されるまで繰り返し行う。（未臨界）
- 12) 燃料棒追加：臨界量よりも多い燃料が装荷された後
- 13) 2)～5)を行う
- 14) 炉心タンクへ注水，水位調整
- 15) 臨界到達
- 16) 中性子源引き抜き
- 17) 中性子計数率測定，水位微調整により臨界調整
[出力：中性子源を取り去っても出力が一定であることを確認，水位，水温]
- 18) 運転停止（安全板挿入，炉心タンク排水）
- 19) 停止後点検

2.4 レポート

2.4.1 事前レポート

表2.1，2，3，4に与えられたデータを用い，臨界となる炉心の大きさとその際の燃料棒の本数を求めよ。臨界計算の方法は2.5節を参照せよ。そして，臨界の際の，x軸方向（2.5節参照）の高速群の中性子束分布，熱群の中性子束分布，出力分布をそれぞれ求め，グラフに表せ。

また，TCAの核計装設備で使用されている（付録参照）C.I.Cと¹⁰Bカウンターについて簡単に説明せよ。

事前レポートは実験の前の週の金曜日までに提出せよ。

2.4.2 実験レポート

実験の目的，内容，結果，考察をレポートにまとめよ。（レポート提出上の注意参照。）また，以下の問題に答えよ。

〔問題〕

1. $1/M$ と装荷燃料の量とが直線関係にあれば，臨界予測が正確になると考えられるが，一般には直線にならない。その理由を説明せよ。
2. 炉心が規定の水位になる前に臨界となったばあい，臨界量をどのように評価すればよいか。そのためにはどのような物理量が分かればよいか。また，それを得るにはどのような実験をしたらよいか。

2.5 臨界計算

中性子の振舞いは多群拡散方程式で書くのが分かりやすいとおもわれるので、以下の多群拡散方程式から説明を始めることにする。

$$\begin{aligned} & -\nabla \cdot D_g(\mathbf{r}) \nabla \phi_g(\mathbf{r}) + \Sigma_{r,g}(\mathbf{r}) \phi_g(\mathbf{r}) \\ & = \sum_{g' \neq g} \Sigma_{s,g' \rightarrow g}(\mathbf{r}) \phi_{g'}(\mathbf{r}) + \chi_g \sum_{g'} \nu \Sigma_{f,g'}(\mathbf{r}) \phi_{g'}(\mathbf{r}) \end{aligned} \quad (2-3)$$

ここで

$$\begin{aligned} \phi_g(\mathbf{r}) & : g \text{ 群の中性子束} \\ D_g(\mathbf{r}) & : g \text{ 群の拡散係数} \\ \Sigma_{s,g' \rightarrow g}(\mathbf{r}) & : g' \text{ 群からの } g \text{ 群への群移動断面積} \\ \chi_g & : \text{核分裂中性子スペクトル} \\ \nu & : \text{核分裂当りの発生中性子数} \\ \Sigma_{f,g'}(\mathbf{r}) & : \text{核分裂断面積} \\ \Sigma_{r,g}(\mathbf{r}) & : \text{除去断面積；以下のように定義される；} \\ & \Sigma_{r,g}(\mathbf{r}) \equiv \Sigma_{t,g}(\mathbf{r}) - \Sigma_{s,g \rightarrow g}(\mathbf{r}) \end{aligned} \quad (2-4)$$

拡散方程式は近似式であるため境界条件は必ずしも自明ではないが、媒質どうしの境界では $\phi_g(\mathbf{r})$ と $J_g(\mathbf{r})$ の連続性を用い、中心で対称の場合には、そこでの中性子束の傾きが0の条件を用いればよい。真空境界の場合、体系の外側に外挿距離と呼ばれる距離 d だけ離れた位置で $\phi_g(\mathbf{r})$ が0になるという条件

$$\phi_g(R+d) = 0 \quad (2-5)$$

が一般に用いられる。

(2-3) 式で0以外の $\phi_g(\mathbf{r})$ が求められるためには、係数が特別な関係（これが臨界を満足する関係ということになる。）を満たしていなければならない。通常は実効増倍率 k を用いて、次のような固有値問題に変形して取り扱う。

$$\begin{aligned} & -\nabla \cdot D_g(\mathbf{r}) \nabla \phi_g(\mathbf{r}) + \Sigma_{r,g}(\mathbf{r}) \phi_g(\mathbf{r}) \\ & = \sum_{g' \neq g} \Sigma_{s,g' \rightarrow g}(\mathbf{r}) \phi_{g'}(\mathbf{r}) + \frac{\chi_g}{k} \sum_{g'} \nu \Sigma_{f,g'}(\mathbf{r}) \phi_{g'}(\mathbf{r}) \end{aligned} \quad (2-6)$$

これらの多群拡散方程式はコンピュータを用いて解かれるが、熱中性子に対するエネルギー群（熱群）と熱群以外の群をひとまとめにした高速群の2群に分けた解析が行われることも多い。このようにして得られる方程式は2群拡散方程式とよばれている。本実験ではこの2群拡散方程式を用いて解析することにする。2群拡散方程式も色々な形に書かれるが、表2.2のような群定数が得られているので以下のような2領域に対する方程式で解析することにする。

炉心に対して高速群は

$$-\nabla \cdot D_{1,c} \nabla \phi_1(\mathbf{r}) + (\Sigma_{a,1,c} + \Sigma_{1 \rightarrow 2,c}) \phi_1(\mathbf{r}) = \frac{1}{k} (\nu \Sigma_{f,1} \phi_1(\mathbf{r}) + \nu \Sigma_{f,2} \phi_2(\mathbf{r})) \quad (2-7)$$

となり、熱群は

$$-\nabla \cdot D_{2,c} \nabla \phi_2(\mathbf{r}) + \Sigma_{a,2,c} \phi_2(\mathbf{r}) = \Sigma_{1 \rightarrow 2,c} \phi_1(\mathbf{r}) \quad (2-8)$$

となる。炉心での定数であることを示すため添字 c をつけた。 $\Sigma_{a,g,c}$ は g 群でのマクロ吸収断面積である。反射体に対して高速群は

$$-\nabla \cdot D_{1,r} \nabla \phi_1(\mathbf{r}) + (\Sigma_{a,1,r} + \Sigma_{1 \rightarrow 2,r}) \phi_1(\mathbf{r}) = 0 \quad (2-9)$$

となり、熱群は

$$-\nabla \cdot D_{2,r} \nabla \phi_2(\mathbf{r}) + \Sigma_{a,2,r} \phi_2(\mathbf{r}) = \Sigma_{1 \rightarrow 2,r} \phi_1(\mathbf{r}) \quad (2-10)$$

となる。反射体での定数であることを示すため添字 r をつけた。

(2-7) 式～(2-10) 式を簡単に以下の様書き直す。

$$-\nabla^2 \phi_1(\mathbf{r}) + a_{1,c} \phi_1(\mathbf{r}) = b_{1,c} \phi_2(\mathbf{r}) \quad (2-11)$$

$$-\nabla^2 \phi_2(\mathbf{r}) + a_{2,c} \phi_2(\mathbf{r}) = b_{2,c} \phi_1(\mathbf{r}) \quad (2-12)$$

$$-\nabla^2 \phi_1(\mathbf{r}) + a_{1,r} \phi_1(\mathbf{r}) = 0 \quad (2-13)$$

$$-\nabla^2 \phi_2(\mathbf{r}) + a_{2,r} \phi_2(\mathbf{r}) = b_{2,r} \phi_1(\mathbf{r}) \quad (2-14)$$

ここで

$$a_{1,c} = \frac{1}{D_{1,c}} \left(\Sigma_{a,1,c} + \Sigma_{1 \rightarrow 2,c} - \frac{\nu \Sigma_{f,1}}{k} \right) \quad (2-15)$$

$$b_{1,c} = \frac{\nu \Sigma_{f,2}}{k D_{1,c}} \quad (2-16)$$

$$a_{2,c} = \frac{\Sigma_{a,2,c}}{D_{2,c}} \quad (2-17)$$

$$b_{2,c} = \frac{\Sigma_{1 \rightarrow 2,c}}{D_{2,c}} \quad (2-18)$$

$$a_{1,r} = \frac{\Sigma_{a,1,r} + \Sigma_{1 \rightarrow 2,r}}{D_{1,r}} \quad (2-19)$$

$$a_{2,r} = \frac{\Sigma_{a,2,r}}{D_{2,r}} \quad (2-20)$$

$$b_{2,r} = \frac{\Sigma_{1 \rightarrow 2,r}}{D_{2,r}} \quad (2-21)$$

である。

炉心に対する式(2-11)と(2-12)を結合すると、

$$(-\nabla^2 + a_{1,c})(-\nabla^2 + a_{2,c})\phi(r) = b_{1,c}b_{2,c}\phi(r) \quad (2-22)$$

となる。ここで $\phi_1(r)$ も $\phi_2(r)$ も(2-22)式をみたすので、区別せず $\phi(r)$ と書いた。もちろん方程式は同じであるが、解の形は $\phi_1(r)$ と $\phi_2(r)$ で違ってくる。

(2-22)式は更に

$$(\nabla^2 + \mu^2)(\nabla^2 - \lambda^2)\phi(r) = 0 \quad (2-23)$$

のように変換できる。ここで μ^2 及び λ^2 は

$$\mu^2 = \frac{1}{2} \left[-(a_{1,c} + a_{2,c}) + \sqrt{(a_{1,c} + a_{2,c})^2 + 4(b_{1,c}b_{2,c} - a_{1,c}a_{2,c})} \right] \quad (2-24)$$

$$\lambda^2 = \frac{1}{2} \left[(a_{1,c} + a_{2,c}) + \sqrt{(a_{1,c} + a_{2,c})^2 + 4(b_{1,c}b_{2,c} - a_{1,c}a_{2,c})} \right] \quad (2-25)$$

であり、正の定数である。なお μ^2 は近い数の差になっているので、桁落ちを避けるため、 λ^2 をまず計算し、その後

$$\mu^2 = (b_{1,c}b_{2,c} - a_{1,c}a_{2,c})/\lambda^2 \quad (2-26)$$

を使って計算するのがよい。

(2-23)式は次の2式に分解できる。

$$(\nabla^2 + \mu^2)X = 0 \quad (2-27)$$

$$(\nabla^2 - \lambda^2)Y = 0 \quad (2-28)$$

これらの解 X と Y を用いると、(2-23)式の解は X と Y の線形結合で表わすことができる。即ち炉心での高速中性子束 ϕ_1 と熱中性子束 ϕ_2 はそれぞれ次のように表わせる。

$$\phi_1 = AX + BY \quad (2-29)$$

$$\phi_2 = A'X + B'Y \quad (2-30)$$

(2-27)式と(2-28)式の解は各々の炉心の形状に対して表2.3のように求められる。(2-29)式と(2-30)式を(2-12)式に代入し、更に(2-27)式と(2-28)式の関係を使うと、

$$\mu^2 A'X - \lambda^2 B'Y + a_{2,c}(A'X + B'Y) = b_{2,c}(AX + BY)$$

X と Y は独立な関数であることから、これらに係る係数はそれぞれ0にならねばならない。即ち以下の2式が満足されねばならない。

$$\begin{aligned}\mu^2 A' + a_{2,c} A' - b_{2,c} A &= 0 \\ -\lambda^2 B' + a_{2,c} B' - b_{2,c} B &= 0\end{aligned}$$

即ち

$$\frac{A'}{A} = \frac{b_{2,c}}{a_{2,c} + \mu^2} \equiv F_A \quad (2-31)$$

$$\frac{B'}{B} = \frac{b_{2,c}}{a_{2,c} - \lambda^2} \equiv F_B \quad (2-32)$$

F_A 及び F_B を使って(2-30)式を書き直すと

$$\phi_2 = AF_A X + BF_B Y \quad (2-33)$$

反射体に対する式(2-13)の解は簡単に求められる。

$$\phi_1 = CZ_1 \quad (2-34)$$

ここで Z_1 は

$$(\nabla^2 - \kappa^2)Z = 0 \quad (2-35)$$

の解であり、各々の反射体の形状に対して表2.3のように求められる。もちろん Z_1 に対しては

$$\kappa^2 = a_{1,r} \quad (2-36)$$

である。 ϕ_2 は(2-14)式の形から

$$\phi_2 = F_c \phi_1 + EZ_2 \quad (2-37)$$

と置いてやるとよいことがわかる。ここで Z_2 はやはり (2-35)式の解で表2.3で与えられるが、こんどは

$$\kappa^2 = a_{2,r} \quad (2-38)$$

である。(2-37)式を(2-14)式に代入し、更に(2-35)式を使うと、

$$-a_{1,r} F_c \phi_1 + a_{2,r} F_c \phi_1 = b_{2,r} \phi_1$$

即ち

$$F_c = \frac{b_{2,r}}{a_{2,r} - a_{1,r}} \quad (2-39)$$

と F_c が決まる。

解を整理して以下に書いておく。

$$\phi_{1,c} = AX + BY \quad (2-29)$$

$$\phi_{2,c} = AF_A X + BF_B Y \quad (2-33)$$

$$\phi_{1,r} = CZ_1 \quad (2-34)$$

$$\phi_{2,r} = CF_c Z_1 + EZ_2 \quad (2-37)$$

ここで炉心と反射体を添え字 c と r で区別した。

炉心と反射体の境界では中性子束と中性子流は連続でなければならない。即ち境界で次のような式が成り立たねばならない。

$$\phi_{1,c} = \phi_{1,r} \quad (2-40)$$

$$D_{1,c} \phi'_{1,c} = D_{1,r} \phi'_{1,r} \quad (2-41)$$

$$\phi_{2,c} = \phi_{2,r} \quad (2-42)$$

$$D_{2,c} \phi'_{2,c} = D_{2,r} \phi'_{2,r} \quad (2-43)$$

ここで、' はグラディエントを表わす。

(2-29), (2-33), (2-34) 及び (2-37) 式を (2-40) ~ (2-43) 式に代入すると、

$$AX + BY = CZ_1$$

$$AD_{1,c} X' + BD_{1,c} Y' = CD_{1,r} Z_1'$$

$$AF_A X + BF_B Y = CF_c Z_1 + EZ_2$$

$$AD_{2,c} F_A X' + BD_{2,c} F_B Y' = CD_{2,r} F_c Z_1' + ED_{2,r} Z_2'$$

A, B, C, E が未知数になっていることを意識して書き直すと、以下のように書ける。

$$AX + BY - CZ_1 = 0 \quad (2-44)$$

$$AD_{1,c} X' + BD_{1,c} Y' - CD_{1,r} Z_1' = 0 \quad (2-45)$$

$$AF_A X + BF_B Y - CF_c Z_1 - EZ_2 = 0 \quad (2-46)$$

$$AD_{2,c} F_A X' + BD_{2,c} F_B Y' - CD_{2,r} F_c Z_1' - ED_{2,r} Z_2' = 0 \quad (2-47)$$

これらの式で A, B, C, E が 0 以外の解を持つためには、係数からなる行列式が 0 にならなければならない。即ち

$$\begin{vmatrix} X & Y & -Z_1 & 0 \\ D_{1,c} X' & D_{1,c} Y' & -D_{1,r} Z_1' & 0 \\ F_A X & F_B Y & -F_c Z_1 & -Z_2 \\ D_{2,c} F_A X' & D_{2,c} F_B Y' & -D_{2,r} F_c Z_1' & -D_{2,r} Z_2' \end{vmatrix} = 0$$

この行列式 2 群 2 領域の臨界行列式とよばれている。この式は少し変形とすると次のように書ける。

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ D_{1,c}x & D_{1,c}y & D_{1,r}z_1 & 0 \\ F_A & F_B & F_c & 1 \\ D_{2,c}F_Ax & D_{2,c}F_By & D_{2,r}F_cz_1 & D_{2,r}z_2 \end{vmatrix} = 0 \quad (2-48)$$

ここで

$$x = \frac{X'}{X} \quad (2-49)$$

$$y = \frac{Y'}{Y} \quad (2-50)$$

$$z = \frac{Z'}{Z} \quad (2-51)$$

であり、具体的な関数形は表 2.4 に載せてある。(2-48)式を解くことにより臨界量を定めることになるが、これは繰り返し計算になる。収束をよくすることを考え、通常(2-48)式を変形した次のような繰り返し式を使って求められる。

$$x = \frac{[D_{1,c}D_{2,r}(F_c - F_A)y z_2 + (D_{1,r}D_{2,c}F_B - D_{1,c}D_{2,r}F_c)y z_1 + D_{1,r}D_{2,r}(F_A - F_B)z_1 z_2]}{[D_{1,c}D_{2,c}(F_B - F_A)y + (D_{1,r}D_{2,c}F_A - D_{1,c}D_{2,r}F_c)z_1 + D_{1,c}D_{2,r}(F_c - F_B)z_2]} \quad (2-52)$$

本実験においては炉心は直方体で y 軸、z 軸方向（高さ方向）の長さは固定しておいて、臨界となる x 軸方向の炉心の長さを決定する。計算においては y 軸および z 軸方向の拡散項はバックリングを使って近似すればよい。

(2-52)式を満足するように、炉心の x 軸方向の厚さが決められたら、(2-44)~(2-47)式はもはや独立でなく、この内の 3 つの式だけが独立ということになる。(2-44)~(2-46)を使って B/A, C/A, E/A を求めることができる。これらが求められると $\phi_g(\mathbf{r})/A$ も(2-29), (2-33), (2-34)及び(2-37)式を用いて一意に求めることが出来る。A は出力で規格できる。即ち

$$P = \gamma \int [\sum_{f,1} \phi_{1,c}(\mathbf{r}) + \sum_{f,2} \phi_{2,c}(\mathbf{r})] dV \quad (2-53)$$

ここで γ は 1 核分裂当りの発生エネルギーであり、 ^{235}U の場合

$$\begin{aligned} \gamma &= 192.9 \text{ MeV} \\ (1 \text{ MeV} &= 1.6022 \times 10^{-13} \text{ J}) \end{aligned}$$

としてよい。また積分は全炉心領域にわたって行う。本実験では中性子束分布も測定するが相対分布だけしか測定しない。このため中性子束の規格化はあまり意味はない。

余裕があれば、中性子束の軸方向分布についても検討してみるとよい。

表2.1 TCA炉心データ

燃 料	2.6wt%濃縮 UO_2
減 速 材	H_2O
減速材対燃料体積比	1.83
燃料棒格子間隔	1.956×1.956 cm (正方格子)
y方向燃料棒本数	18本(固定)
炉 心 水 位	121.00 cm
y 方 向 外 挿 距 離	13.9 cm
z (高さ) 方向外挿距離	12.2 cm

表2.2 2群定数(TCA1.83U炉心)

領 域	第1群				第2群		
	D_1 (cm)	Σ_{1a} (cm^{-1})	Σ_{12} (cm^{-1})	$\nu \Sigma_{1f}$ (cm^{-1})	D_2 (cm)	Σ_{2a} (cm^{-1})	$\nu \Sigma_{2f}$ (cm^{-1})
炉 心	1.22	0.00871	0.0241	0.00669	0.304	0.0976	0.155
反射体	1.15	0.000515	0.0584	0.0	0.152	0.0188	0.0

表2.3 各種形状に対する関数X, Y, Z

炉心に対して

形状	X	Y
無限大平板	$\cos \mu x$	$\cosh \lambda x$
無限長円柱	$J_0(\mu r)$	$I_0(\lambda r)$
球	$\frac{\sin \mu r}{r}$	$\frac{\sinh \lambda r}{r}$

反射体に対して

形状	Z (反射体厚さ: b)	Z (反射体厚さ: 無限大)
無限大平板	$\sinh \kappa \left(\frac{a}{2} + b - x \right)$	$e^{-\kappa x }$
無限長円柱	$I_0(\kappa r) K_0[\kappa(R+b)] - I_0[\kappa(R+b)] K_0(\kappa r)$	$K_0(\kappa r)$
球	$\frac{\sinh \kappa(R+b-r)}{r}$	$\frac{e^{-\kappa r}}{r}$

表2.4 関数 $x = X'/X$, $y = Y'/Y$, $z = Z'/Z$

原子炉の形状	$x = X'/X$	$y = Y'/Y$
厚さaの無限平板	$-\mu \tan \frac{\mu a}{2}$	$\lambda \tanh \frac{\lambda a}{2}$
半径Rの無限円柱	$-\mu \frac{J_1(\mu R)}{J_0(\mu R)}$	$\lambda \frac{I_1(\lambda R)}{I_0(\lambda R)}$
半径Rの球	$-\mu \left(\frac{1}{\mu R} - \cot \mu R \right)$	$\lambda \left(\coth \lambda R - \frac{1}{\lambda R} \right)$

原子炉の形状	$z = Z'/Z$ (反射体厚さ: b)	$z = Z'/Z$ (反射体厚さ: 無限大)
厚さaの無限平板	$-\kappa \coth \kappa b$	$-\kappa$
半径Rの無限円柱	$\kappa \frac{I_1(\kappa R) K_0[\kappa(R+b)] + I_0[\kappa(R+b)] K_1(\kappa R)}{I_0(\kappa R) K_0[\kappa(R+b)] - I_0[\kappa(R+b)] K_0(\kappa R)}$	$-\kappa \frac{K_1(\kappa R)}{K_0(\kappa R)}$
半径Rの球	$-\kappa \left(\frac{1}{\kappa R} + \coth \kappa b \right)$	$-\kappa \left(\frac{1}{\kappa R} + 1 \right)$

3. 中性子束分布の測定

3.1 実験の目的

原子炉の主要な特性の多くは主として中性子束分布によって決定される。ここでは中性子検出器を用いて中性子束分布を測定する。このような測定法は中性子箔放射化法と呼ばれている。

中性子箔放射化法は、中性子との相互作用で箔物質に生成された放射性同位元素の量を定量することにより、中性子束の大きさを知る方法で、次のような特徴を有している。

長所：

- ① 検出器が小さいので、測定しようとしている中性子場を乱すことが少なく、位置分解能がよい。
- ② 箔の種々の構成物質との核反応を直接知ることができる。
- ③ γ 線の分離が容易である。
- ④ 絶対測定が比較的容易である。
- ⑤ 検出感度が広範囲にわたり、中性子束の強弱に対する処置が簡単である。

短所：

- ① エネルギー分解能があまりよくない。
- ② 照射したときから結果をみるまでに相当時間がかかる。
- ③ データ処理が煩雑である。(特に絶対測定の場合)
- ④ 放射化断面積等の詳しいデータを必要とする。(特に絶対測定の場合)
- ⑤ 較正用標準パイルを必要とする場合がある。

本実験では金を放射化箔として用いる。天然の金は ^{197}Au のみからなり、中性子捕獲により生成される ^{198}Au は半減期 2,698日で、図3.1のような崩壊を行なうが、本実験ではこの崩壊で生じる γ 線を測定することにより ^{198}Au の生成量を測定する。 $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$ 断面積は図3.2に示すように熱中性子に対して $1/v$ 断面積を有しており、ほぼ理想的な熱中性子測定用反応となっている。しかしながら、熱中性子炉においては熱領域の中性子スペクトルはマックスウェル分布を持ち、熱外領域においては $1/E$ 分布となるため、 ^{197}Au は熱外中性子によっても放射化される。この効果を考慮するために通常カドミウム差引法が使用される。Cdは図3.2に示すとおり、0.18eVの大きな吸収の共鳴をもつ。このため、放射化箔を薄いカドミウムカバーでおおって照射すると、放射化箔は熱外中性子のみによって放射化される。ここで、カドミウム比 R_{Cd} を、裸の箔とカドミウムカバーを付けた箔の放射能比(= $C_{\text{bare}}/C_{\text{Cd}}$)で定義すると、熱中性子による放射化量 C_{th} は、

$$C_{\text{th}} = C_{\text{bare}}(1 - 1/R_{\text{Cd}}) \quad (3-1)$$

となる。すなわち、裸の放射化箔での放射化量からカドミウムカバーでおおった放射化箔の放射化量を差し引くことで、熱中性子による放射化量を評価できることになる。この方法で、熱中性

子による放射化量を正確に求めるには、放射化箔の厚さやカドミウムカバーの厚さ等による種々の補正が必要であるがここでは省略することとする。本実験では相対分布の測定のみを行う。

3.2 測定方法

3.2.1 放射化試料

次のような金線を用いる。

材 質 : 金

ワイヤー寸法 : $1.0\phi \times 19.56\text{mm}$ (ワイヤーは放射化後に切断する)

カドミウムカバー寸法 : 内径 1.2mm 外形 2.2mm

(注: これらの値は変更される場合があるので、あらかじめ確かめ記録しておくこと)

3.2.2 試料のセット方法

金線は厚さ 5 mm, 幅 5 cm のアクリル製ホルダーの 5 mm 面 (上: 裸, 下: Cd カバー付き) に設置する。取付高さをほぼ中央とする事で、上下の位置の違いによる中性子束の違いは無視できる。設置の前に金線の汚れをアルコールで拭き取っておく。

分布の測定方向は x 軸方向のみ行い、金線は y 軸の midpoint に沿って設置する。取付位置等の記録を忘れないこと。

3.2.3 放射化量の測定

照射後取りだした金線は、燃料棒格子に合わせて、19.56 mm 間隔で切断し、その質量を天秤で測定する。(測定時間に余裕のある場合は格子間隔の $1/4$ の 4.89mm 間隔で切断し、より詳細な分布を測定する。)

つぎに、 $^{197}\text{Au}(n, \gamma)$ 反応により生成した $^{198}\text{Au}(T_{1/2} = 2.698\text{d})$ による γ 線をウェル型 NaI(Tl) 検出器により測定する。測定は 300 keV 以上の γ 線に対して行う。照射量にもよるが、測定時間は 1 試料 10~20 秒程度である。試料の交換は手作業にて行う。計測系はパーソナルコンピュータにより GP-IB を介して制御でき、試料番号、冷却時間、計数時間、計数のデータが ASCII ファイルとして、フロッピーディスクにセーブされ、プリンタにも出力される。

3.2.4 試料照射時間

15~20W 運転で 10 分間程度照射する。

3.3 実験手順

本実験は出力分布測定の実験と同時に行う。手順は出力分布測定のことを参照のこと。

3.4 データ処理

本実験では中性子束の絶対値は測定しない。中性子束の相対分布のみを測定する。このためデータ処理は極めて楽になっている。以下にいくつかの検討事項を示すが、本実験では裸、Cd カバー付きのそれぞれの測定に対し、③及び④の補正を行った後、試料の重さで割れば、それが中性子束の相対分布になっているとする。

① カドミウムカバーの実効切断エネルギー及び熱中性子透過の効果

カドミウムカバーをつけた場合の実効的な切断エネルギーはカバーの厚さにより変化し、また一般に熱中性子領域のエネルギーの上限より大きいことが多い。また、カドミウムカバーが薄い場合にはカバーを透過して箔を放射化する熱中性子も存在する。しかし、本実験ではこれらの効果に対する補正等を行わない。

② 熱中性子束分布の箔挿入による摂動効果

挿入した箔の大きさが違っていると補正しなければならないが、そうでなければ相対測定なので、補正係数がすべての測定で同じとなると考え無視してよい。

③ ^{198}Au の半減期の補正

放射化量は照射時間を増やせば増加するし、取り出し後の時間を伸ばせば減少する。このため基準となる放射化量を定義してやるのが便利である。そのような量として、無限時間照射を行った場合に箔に誘導される放射能（取り出し時間は0）が用いられる。このような放射能を飽和放射能と呼んでいる。照射時間が有限な場合、照射が矩形（ある一定時間は一定値で、他は0）であれば以下の式によって飽和放射能 C_{∞} を計算できる。

$$C_{\infty} = \frac{\lambda D}{[1 - e^{-\lambda T_t}]e^{-\lambda T_w}[1 - e^{-\lambda T_c}]} \quad (3-2)$$

ここで

T_t : 照射時間

T_w : 照射終了から測定開始までの時間（冷却時間）

T_c : 測定時間

D : 測定時間内の全崩壊数

λ : 崩壊定数

④ γ 線検出に伴う誤差

バックグラウンドの補正、デッドタイム補正を行う必要がある。

3.5 レポート

レポートは後に述べる出力分布測定実験と合わせて1つのレポートとせよ。注意事項等は出力分布測定の項を参照のこと。

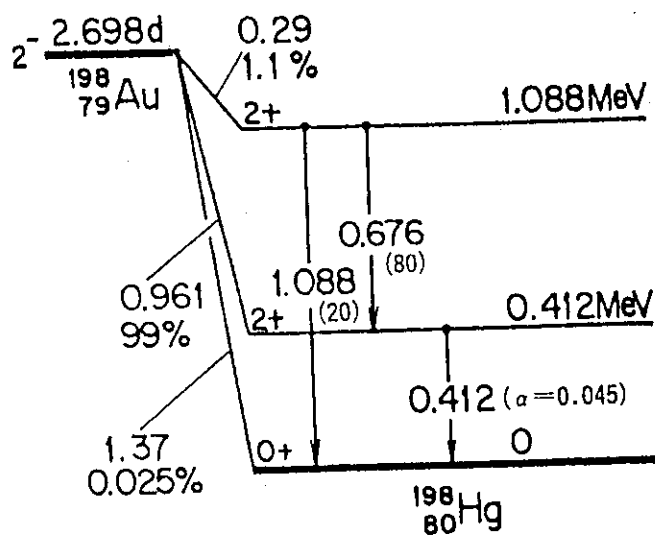


図3.1 ^{198}Au の壊変図¹⁾

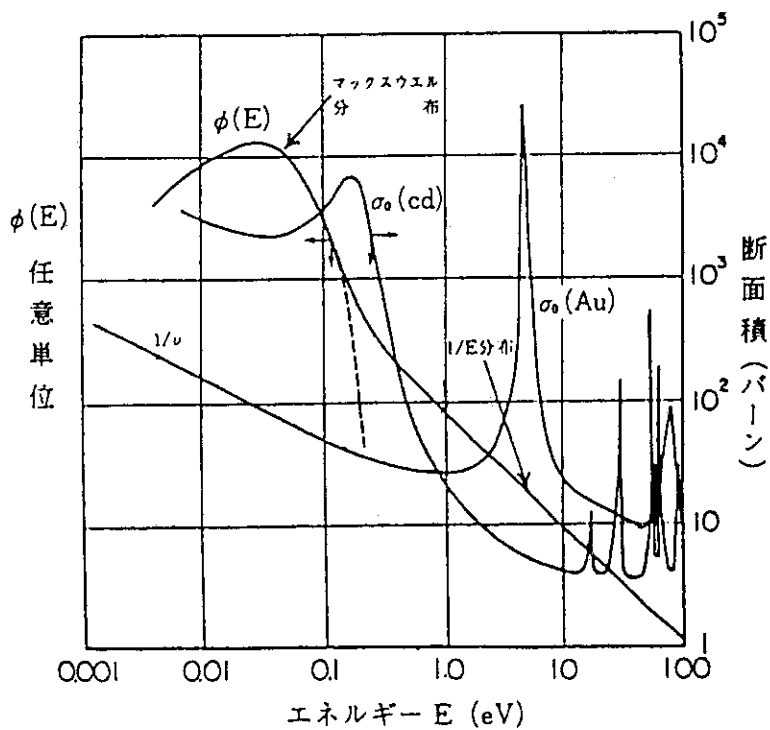


図3.2 AuとCdの吸収断面積のエネルギー変化¹⁾

4. 出力分布の測定

4.1 実験の目的

原子炉内の出力は空間的分布をもっている。この出力の分布は、原子炉の除熱を考える場合の非常に重要な特性である。本実験では先の中性子束分布の測定と同時に、炉心内の出力の相対的な分布の測定を行う。

出力分布測定法としては、

- ① 小型核分裂計数管を炉心内に挿入して測定する方法、
- ② 核分裂箔を炉心内に設置してその反応率分布を測定する方法、
- ③ 燃料の核分裂生成物から放出される γ 線を測定する方法 (γ スキヤニング法)

等がある。①と②の方法の場合、炉心を構成している核物質の各核種について反応率を測定しなければならない。さらに①の場合、核分裂計数管を炉心内に挿入することによって場を乱す可能性がある。これらの欠点を解決し、簡便に炉心内の相対出力分布を測定する方法として、③の方法の開発が進められてきた。本実験では、この γ スキヤニング法を用いて、TCA炉心のx軸方向の相対出力分布（核分裂分布）を測定する。

4.2 測定方法

γ スキヤニング法による出力分布の測定は、炉心内で照射された燃料からの γ 線強度が炉内で照射中に生じた核分裂数に比例するという事実に基づいている。本測定では、照射後の燃料棒から放出される γ 線のうち0.6MeV以上のものを全て計測する。ここで0.6MeV以上の γ 線に着目した理由は、 ^{238}U の中性子捕獲反応で生成される ^{239}Np からの γ 線が0.5MeV以下であることなどによる。

測定は、TCA炉心の燃料棒の高さ約40cmの点についてx軸方向に行う。測定はy軸の midpoint に位置する全ての燃料棒について行う。

γ 線の測定にはNaI(Tl)検出器を使用するが、測定系のブロック図を図4.1に示す。NaI(Tl)検出器は鉛で遮蔽されており、その上部には幅約2cmの鉛スリット（コリメータ）が固定されている。NaI(Tl)検出器からの信号は前置増幅器から線型増幅器に送られ、波形整形された後に波高弁別器に送られる。ここで0.6MeV以上の γ 線が弁別され、スケータで計測される。

4.3 実験手順

本実験は中性子束分布測定の実験と同時に行う。以下にその手順の概略を示す。

- 1) 測定対象となる燃料棒のバックグラウンド計数率を測定する。
- 2) 炉心の構成及び中性子束分布測定用金線の設置を行う。

- 3) TCAを起動し臨界にする。15~20Wで10分間程度照射を行う。
- 4) 炉室内の放射線レベルが下がるまで、30分間程度の冷却時間をおく。
- 5) 燃料棒および金線取り出し。
- 6) 金線を切断。
- 7) 燃料棒及び金線の γ 線測定。
(燃料棒は0.6MeV以上、金線は0.3MeV以上の γ 線を測定する。)
- 8) 金線片の重量測定(7)8は前後しても可)。

測定は3つのグループに分かれて、燃料棒、裸金線、Cdカバー付き金線のそれぞれを担当して行う。ただし、データ処理の結果得られたそれぞれの分布は他のグループに配布すること。レポートでは、他のグループからの結果も含めて各自が考察すること。

4.4 データ処理

照射後の各燃料棒について計測された0.6MeV以上の γ 線の計数率 n に対して、計測系のデッドタイム τ 、照射に先立って計測したバックグラウンド計数率 BG 、および γ 線の照射後時間経過につれて減衰する時間減衰の補正を行って、同一時刻(冷却時間4500sec)の計数率 N に変換する。 N は、

$$N = \left[\frac{n(t)}{1 - n(t)\tau} - BG \right] (A(t)/A(4500))^{-1} \quad (4-1)$$

で与えられる。ここで、 $A(t)/A(4500)$ は冷却時間 t での燃料棒からの γ 線の時間減衰特性で $t = 4500(\text{sec})$ のときに1になるように規格化されており、既に行われた実験から、

$$\begin{aligned} A(t)/A(4500) = & 6.494\exp(-0.001709t) + 3.663\exp(-0.0005711t) \\ & + 1.273\exp(-0.0001276t) \end{aligned} \quad (4-2)$$

と表されることが分かっている。時間減衰の補正にはこの式を使えばよい。

4.5 レポート

4.5.1 事前レポート

NaI(Tl)検出器の動作原理を述べよ。

4.5.2 実験レポート

① 実験条件

炉心名称、放射化試料及び燃料棒の配置、線形出力計の指示、 γ 線測定条件、その他必要な事項。

② 測定結果

生データ、データ処理方法とその結果、相対中性子束分布、出力分布等。

他のグループの測定結果等を引用する場合には、その出所（グループ名、個人名等）を明記すれば、必要な結果のみをコピー等の形で用いてよい。

③ 考 察

事前の臨界計算で求めた中性子束分布、出力分布と実験で得られた分布を比較して考察せよ。両者は一致したか。もし違いがある場合はそれはなぜか。

中性子束、出力はどのような分布を持っているか。互いにどのような関係にあるか。またなぜそのようになるのか。

出力のピークはどこに発生するか。動力炉での除熱を考える場合はどのような分布が望ましいと考えられるか。また、そのためには炉心をどのようにすればよいか。

出力分布の測定でγスキニング法を用いたが、これは原子炉停止後にも燃料がエネルギーを放出していることを意味している。これは原子炉（動力炉）の安全性にどのように関係するか。1979年3月28日ペンシルバニア州スリーマイル原子力発電所2号機で発生した炉心溶融事故について調べ、このこととの関係を議論せよ。

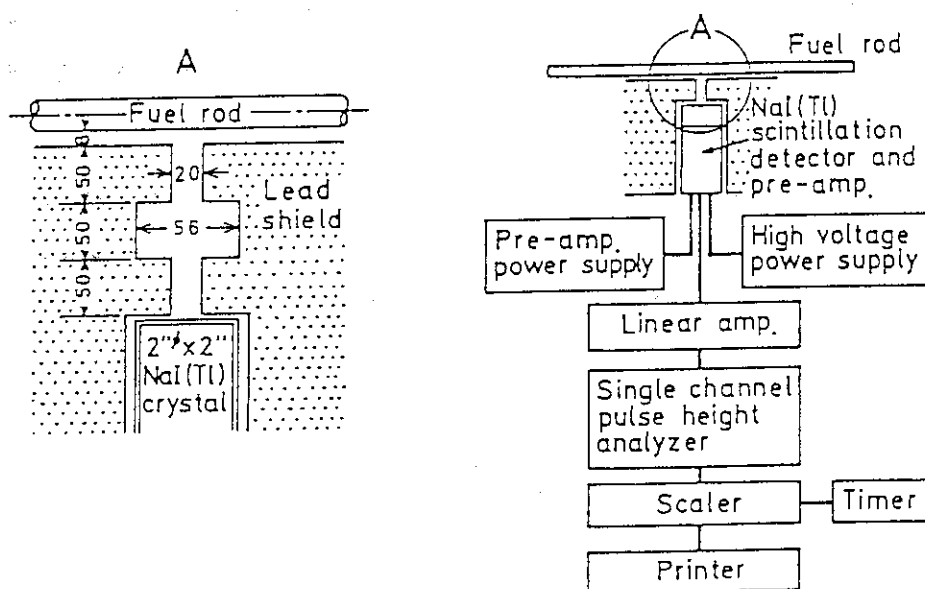


図4.1 測定系のブロック図

5. 燃料棒価値分布の測定

5.1 実験の目的

臨界近接実験では、燃料棒を追加していくにつれ臨界に近づいていく（つまり正の反応度がはいる）ことを経験した。しかしながら、燃料棒の反応度の価値は通常、炉心の位置によって異なり空間的に分布を持っている。すなわち、燃料棒を入れる位置によって生ずる反応度の値が異なる。本実験では各位置で燃料棒を挿入したときと、取り去ったときの反応度変化をペリオド法で測定し、この反応度が空間的にどのような分布を持つかを調べる。ペリオド法は制御棒較正をはじめ、あらゆる反応度測定の基準となる測定法である。

5.2 原理

5.2.1 原子炉動特性方程式

原子炉の動特性方程式は、一点炉近似で、

$$\frac{dn}{dt} = \frac{k(1 - \beta_{\text{eff}}) - 1}{l} n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \quad (5-1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{k\beta_{i\text{eff}}}{l} n - \lambda_i C_i \quad (5-2)$$

となる。ここで、 $n(t)$ は中性子密度、 k は実効増倍係数、 $\beta_{i\text{eff}}$ は第*i*群の実効的な遅発中性子生成率、 $\beta_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^6 \beta_{i\text{eff}}$ 、 l は即発中性子平均寿命、 C_i は第*i*群の遅発中性子先行核濃度、および λ_i はその崩壊定数である。

(5-1)、(5-2)式は定数係数を持つ7つの1階線型連立微分方程式であり、 $t = 0$ までに長時間出力一定に保ったとき、 $t > 0$ に対する解は、

$$n(t) = n(0) \sum_{j=1}^7 \frac{\rho e^{\omega_j t}}{\rho - \omega_j^2 \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_{i\text{eff}}}{(\lambda_i + \omega_j)^2}} \quad (5-3)$$

で与えられる。即ち、 $n(t)$ は

$$n(t) = \sum_{j=1}^7 A_j e^{\omega_j t} \quad (5-4)$$

の形に書ける。ただし、 ω_j は与えられた ρ に対する反応度方程式

$$\rho = \frac{k-1}{k} = \frac{\omega l}{1+\omega l} + \frac{\omega}{1+\omega l} \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_{ieff}}{\omega + \lambda_i} \quad (5-5)$$

の j 番目の根である。(5-5) 式の反応度方程式について ρ と ω との関係プロットすると図 5.1 のようになっている。図から分かるように、正の反応度を与えた場合、正の ω_j は 1 つで他は全て負である。負の反応度を与えた場合、 ω_j は全て負となる。

5.2.2 ペリオド法

臨界状態にある原子炉に正の反応度 ρ を与えると、原子炉の出力はやがて

$$n(t) \sim A_1 e^{\omega_1 t} \quad (5-6)$$

に従って増加するようになる((5-4)式と図 5.1 参照)。この ω_1 の逆数 $T = 1/\omega_1$ のことを、原子炉の安定周期(stable period)あるいは単にペリオドという。 $1/T$ は(5-5) 式の根の 1 つだから、系に与えた反応度 ρ との間に、

$$\rho = \frac{l}{T+l} + \frac{T}{T+l} \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_{ieff}}{1+\lambda_i T} \quad (5-7)$$

の関係がある。

従って、臨界状態の原子炉に(未知の)反応度 ρ を与えた時、そのペリオド T を測定すれば、(l , β_{ieff} , および λ_i が既知ならば)与えた反応度 ρ を知ることができる。

実際の実験で与える反応度の大きさは、測定をやすくするためおよび安全上の考慮から、ペリオドが 100 秒 ~ 200 秒程度になるようにとる。ところで、即発中性子平均寿命 l は、どんな原子炉でも 10^{-3} 秒以下であり、更に軽水減速の場合は 10^{-4} 秒以下である。従って、軽水減速の原子炉で $T > 100$ 秒の条件で測定すると、(5-7)式の右辺の第 1 項は 10^{-6} 以下であり、第 2 項は少なくとも 10^{-3} 程度である。そこで(5-7)式の第 1 項を省略して、

$$\rho = \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_{ieff}}{1+\lambda_i T} \quad (5-8)$$

で計算してもかまわない。

ところで、(5-8) 式の β_{ieff} は実効的な遅発中性子生成率であるが、これは同じ ^{235}U を燃料とする原子炉であっても、その燃料中に含まれている他の核種、炉の大きさや構造、中性子スペクトル等によって異なった値を持ち、通常これを得るには計算に頼らざるを得ない。このため、ある原子炉でペリオド測定をするとき、その時点では未だその炉に固有な β_{ieff} が決定されていないことが多い。我々のデータ処理では、その不確定さは一応おあずけしにして、以下の様にする。いま、遅発中性子生成率 β_i を用いて、

$$\beta_{ieff} = \gamma_i \beta_i \quad (5-9)$$

とおくと、 γ_i は遅発中性子の群番号 i によって異なる。しかしこれを i によらない共通な因子

γ で近似して

$$\beta_{ieff} \approx \gamma \beta_i \quad (5-10)$$

とすれば,

$$\beta_{eff} \equiv \sum_{i=1}^6 \beta_{ieff} \approx \gamma \sum_{i=1}^6 \beta_i = \gamma \beta \quad (5-11)$$

となる。(5-10)式を(5-11)式で辺々割ると、 β_{ieff}/β_{eff} は炉の種類によらない核定数 $a_i = \beta_i/\beta$ で近似できることになる。即ち,

$$\beta_{ieff}/\beta_{eff} = a_i \quad (5-12)$$

である。これを用いて(5-8)式を変形すると,

$$\frac{\rho}{\beta_{eff}} \approx \sum_{i=1}^6 \frac{a_i}{1 + \lambda_i T} \quad (5-13)$$

と書け、ドル単位の反応度 ρ/β_{eff} を、既知の核物理パラメータ a_i および λ_i と測定したペリオド T から求めることができる。表5.1に必要なデータを示した。

5.3 実験手順

測定は、出力分布測定の上 (x軸方向) で炉心領域3点、反射体領域1点について行う。(測定点は時間により調整する。) 炉心領域では臨界の基準炉心から燃料棒を1本取りだした状態にしたときの反応度を測定することで、燃料棒1本を水に置換した場合の反応度変化量を求める。反射体領域では、基準炉心に燃料棒を1本追加した場合の反応度を測定することで、水を燃料棒1本に置換した場合の反応度変化を求め、その正負を逆にした値を燃料棒1本を水に置換した場合の反応度変化量とみなす。

以下に測定の手順を示す。

- 1) 炉心構成の確認 (基準炉心)
- 2) 起動前点検
- 3) TCA起動、水位上昇により臨界とし基準炉心の臨界水位の確認を行う。
- 4) TCA停止
- 5) 反射体領域の場合：燃料棒を1本入れる。
燃料領域の場合：燃料棒を1本取り去る。
- 6) 炉心構成の確認。
- 7) TCA起動、水位上昇により一度臨界にする。
- 8) 基準炉心の臨界水位まで上昇させ、ペリオド法で余剰反応度を測定する。
- 9) 水位上昇後150-200秒のち、あらかじめ決めた線形出力計でダブリングタイム (T_2) を測定する。

測定したダブリングタイムからペリオド T を求める。ダブリングタイムを測定する際、①測定系の線形性が成り立っていること、②炉出力の統計的ゆらぎが測定に影響しないような出力レベルで測定すること、③炉に反応度変化を与えてから炉周期の高次モードの成分（(5-4)式の ω_2 以上の項）が消滅するまで十分の待ち時間を取ること、などに注意しなければならない。

- 10) 測定が終わったら炉を停止する。
- 11) 測定は反射体1点，炉心で3点，外側から中心方向に行う。（時間によって測定点は調節）
〔基準炉心の臨界水位になっても臨界とならない場合は，更に水位を上げ臨界の水位を記録しておき，つぎの基準炉心でのペリオド法により評価する。〕
- 12) 炉心を基準炉心とし，臨界水位の確認をする。先の測定で，基準炉心の臨界水位で臨界とならなかったケースについて，各ケースでの臨界水位まで水位を上昇させペリオド法によって反応度を測定する。
- 13) 実験終了後，停止後点検

5.4 レポート

5.4.1 事前レポート

臨界計算で得られた中性子束分布をもとに，燃料棒を水に置換した場合の反応度変化の分布を予想せよ。体系を，炉心（中心付近），炉心（反射体との境界近く），反射体と分けて考えた場合，反応度はそれぞれどのようになるか予想せよ。そのように予想した理由も示せ。

中性子吸収体である制御棒の代わりに，燃料棒の出し入れによって原子炉の運転を制御する事は可能であろうか。

5.4.2 実験レポート

測定結果をもとに，横軸を炉心中心からの距離，縦軸を燃料棒を水に置換した場合の反応度変化を表すグラフを作成せよ。

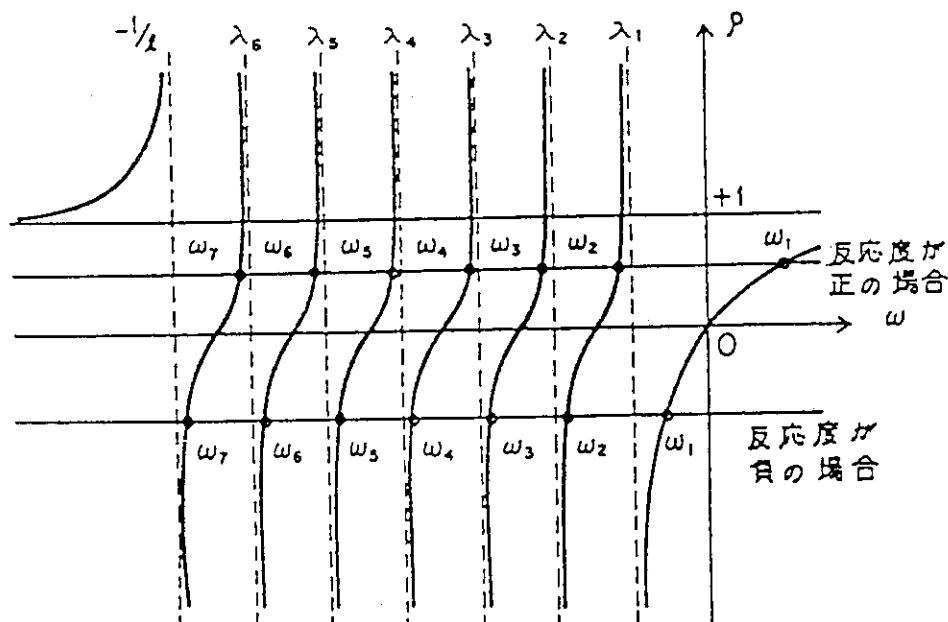
反応度変化の分布は予想と一致したか。もし，異なった場合はその原因を考察せよ。

また，ペリオド法による反応度測定は正のペリオドを求めることで通常行われ，負のペリオドを測定して行うことは殆どない。この理由を考察せよ。

表5.1 TCA1.83U炉心の遅発中性子に関するデータ

Group	Decay constant λ_i (sec)	Relative abundance β_{ieff}/β_{eff}
1	0.0124	0.0310
2	0.0305	0.2096
3	0.111	0.1935
4	0.301	0.3906
5	1.13	0.1290
6	3.00	0.0463

Effective delayed neutron fraction $\beta_{eff} = 0.0075$



(横軸は一樣な割合にとられていない) 与えられた正および負の反応度に対する各根 ($\omega_1 \sim \omega_7$) の位置を示した。

図5.1 反応度方程式の ρ と ω の関係を示す概念図¹⁾

6. ロッドドロップ法による安全板価値の測定

6.1 実験の目的と意義

原子炉は通常、制御棒の移動によって反応度を与える。原子炉を制御するための制御棒の反応度効果を較正しておくことは（つまり、ストロークの大きさに応じた反応度効果を決定しておくことは）、原子炉の反応度効果の基準を定める意義がある。その上、制御棒それ自体について考えてみても、安全上の課題として、制御棒の引き抜きまたは挿入の操作の際に時間とともに原子炉にいかなる率で反応度が印加されるかを知る必要がある。さらに同じく安全上の理由から、設計された原子炉の余剰反応度（制御棒、安全棒を全部抜き取ったとき生ずる反応度）や、運転停止時の停止余裕（制御棒、安全棒をすべて挿入したときに生じる原子炉の負の反応度の絶対値）を知ることは大変重要である。そこで、制御棒の反応度較正は、臨界の炉心を構成した後に最初に行われる大変重要な実験となっている。

さて、制御棒効果の測定法としては、

- ① ペリオド法
- ② 補償法（標準反応度法）
- ③ 未臨界（中性子源）増倍法
- ④ ロッドドロップ法
- ⑤ パルス中性子法

などが用いられる。

TCAには反応度調整用の制御棒がないため、いわゆる制御棒の反応度較正の実験を行うことができない。しかしながら、TCAにはスクラム時及び停止余裕の確保に使用される安全板が存在する。そこで本実験では、大きな負の反応度の測定に用いられるロッドドロップ法により、この安全板の価値の測定を行う。

6.2 ロッドドロップ法の原理

原子炉の制御棒全部が（TCAの場合は安全板全てが）完全に挿入されたときに炉がどの程度臨界未満であるかは、原子炉の停止余裕と呼ばれ、安全上重要な量である。このような臨界未満度の測定はロッドドロップ法によって比較的簡単に行うことができる。この停止余裕はしばしば大きな値をとるが、このような場合にもロッドドロップ法は有効とされている。ロッドドロップ法による停止余裕の測定では、外挿法と呼ばれる方法と積分法と呼ばれる方法があるが、本実験では積分法により測定を行う。

ロッドドロップ法の原理も5.のペリオド法の原理と同じく原子炉動特性方程式にもとづいている。 (5-1)および(5-2)式において $k = 1 - \Delta k$ としてラプラス変換をすれば、

$$n(s) = n_0 \frac{l+k \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_{ieff}}{s+\lambda_i}}{sl+ks \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_{ieff}}{s+\lambda_i} + \Delta k} \quad (6-1)$$

となる。ここで、 n_0 はロッドドロップ前の出力である。ところで

$$\lim_{s \rightarrow 0} n(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \int_0^{\infty} e^{-st} n(t) dt = \int_0^{\infty} n(t) dt \quad (6-2)$$

なので、(6-1)式で $s \rightarrow 0$ の極限をとってこれを(6-2)式と等し

$$\int_0^{\infty} n(t) dt = n_0 \frac{l+k \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_{ieff}}{\lambda_i}}{\Delta k} = n_0 \frac{l+k\beta_{eff} \sum_{i=1}^6 \frac{a_i}{\lambda_i}}{\Delta k} \quad (6-3)$$

となる。ここで、 $a_i = \beta_{ieff}/\beta_{eff}$ である。

l は $\beta_{eff} \sum_{i=1}^6 (a_i/\lambda_i)$ に対して無視できるので、

$$\frac{\Delta k}{k\beta_{eff}} = \frac{n_0 \sum_{i=1}^6 \frac{a_i}{\lambda_i}}{\int_0^{\infty} n(t) dt} \quad (6-4)$$

としてドル単位の反応度が求められる。

6.3 実験手順

本実験は臨界近接実験に引き続いて行う。

炉心を臨界状態に保持した後、安全板を急速挿入して、ロッドドロップ法により安全板の反応度抑制効果を測定する。この際まず、臨界状態における中性子の計数率 n_0 を測定する。そして、安全板落下時から中性子計数がほぼ自然計数値になるまでの中性子計数の積分値 $\int n(t) dt$ を測定する。これらの測定値を用いて反応度を求める。

ただし、TCAでは核計装起動系3ch.のうち2ch.の計数率が3cps以下になると、ダンプ動作(炉心タンクの排水弁が開となる)を行うインターロックがあるため、バックグラウンドレベルまで計測を続けることはできない。そこで、本実験ではダンプ動作開始直前までの計数を行い、この計数値を用いることとする。

計数は、臨界近接実験で分担した各計測系で行う。

6.4 レポート

各グループで分担した計装系での測定から、それぞれ安全板の反応度抑制効果をドル単位と $\Delta k/k$ で求めよ。得られた結果は他のグループに配布し、もし違いがあればそれについて考察せよ。

また、本実験では装置の制約からバックグラウンドまでの計測を行わなかったが、この結果得られた値は過大に評価したことになるか、あるいは過小に評価したことになるか。

参 考 文 献

全般にわたり次の文献を参考とした。

- 1) 「京都大学臨界集合体大学院実験テキスト〔改訂第4版〕」, 京都大学原子炉実験所 (1984).
- 2) 関本, 井頭, 安田, 山根著, 「臨界集合体VHTRCを用いた学生実験」, 東京工業大学・日本原子力研究所 (1990).

TCAを用いた実験及び装置については次の文献を参考とした。

- 3) Hirata, Y., Endo, Y. et al., "TCA Critical Experiments and Characteristic Measurements," *JAERI-Memo* 1122 (1963).
- 4) Tsuruta, H., Kobayashi, I. et al., "Critical Sizes of Light-Water Moderated UO_2 and PuO_2-UO_2 Lattices," *JAERI-1254* (1978).
- 5) 「日本原子力研究所東海研究所原子炉設置許可申請書 別冊6 (TCA 完本)」, 日本原子力研究所 (1991).

6.4 レポート

各グループで分担した計装系での測定から、それぞれ安全板の反応度抑制効果をドル単位と $\Delta k/k$ で求めよ。得られた結果は他のグループに配布し、もし違いがあればそれについて考察せよ。

また、本実験では装置の制約からバックグラウンドまでの計測を行わなかったが、この結果得られた値は過大に評価したことになるか、あるいは過小に評価したことになるか。

参 考 文 献

全般にわたり次の文献を参考とした。

- 1) 「京都大学臨界集合体大学院実験テキスト [改訂第4版]」, 京都大学原子炉実験所 (1984).
- 2) 関本, 井頭, 安田, 山根著, 「臨界集合体VHTRCを用いた学生実験」, 東京工業大学・日本原子力研究所 (1990).

TCAを用いた実験及び装置については次の文献を参考とした。

- 3) Hirata, Y., Endo, Y. et al., "TCA Critical Experiments and Characteristic Measurements," *JAERI-Memo* 1122 (1963).
- 4) Tsuruta, H., Kobayashi, I. et al., "Critical Sizes of Light-Water Moderated UO_2 and PuO_2-UO_2 Lattices," *JAERI-1254* (1978).
- 5) 「日本原子力研究所東海研究所原子炉設置許可申請書 別冊6 (TCA 完本)」, 日本原子力研究所 (1991).

付 録

付録1 学生への注意事項

1.1 必要な手続き

- (1) 学生実習生として受入れられるので必要な以下の書類をまとめて原研に提出。
- ① 学生実習生身上調書
 - ② 研究計画書
 - ③ 健康診断個人票（付添教官はこれだけでよい）
- (2) 宿舍は真砂寮を利用する。寝具は業者からまとめて借りる。
- (3) 留学生は事前に大使館を通して、科学技術庁に申請をする必要がある。
- (4) 旅費、宿泊料の負担は不要。

1.2 持参すべきもの

- (1) 事前レポート
- (2) テキスト
- (3) 筆記用具
- (4) レポート用紙（A4版）
- (5) カルキュレーター
- (6) 作業着または作業しやすい服装
- (7) 着替え
- (8) 洗面用具
- (9) 雨具
- (10) 現金（懇親会費 + α ）
- (11) 印鑑

1.3 レポート

レポートに関する注意事項は各実験項目で示してあるが、共通の事項を以下に示す。

- ① レポート用紙は普通横罫のA4版を用いること。
- ② レポートは各個人毎に作成する。但し、実験法の説明、測定値等、同じになる項目に関しては、グループ内で分担して書き、そのコピーを用いてもよい。
- ③ テーマ毎にレポートを書くこと。但し、中性子束分布、出力分布の測定は1つのレポートとすること。
- ④ 表紙には以下のことを書くこと。
 - 報告者名、研究室、学生番号
 - 実験テーマ、共同実験者名
 - 実験日、実験場所、その他必要な条件

- ⑤ 内容は次のようにまとめること。
1. 目的
 2. 理論（解析に用いる数式）
 3. 実験方法, 手順, 条件
 4. 装置（炉心名称, 機器形式, 回路ブロック図等）
 5. データ
 6. 結果（単位, 有効数字に注意）
 7. 考察
 8. 参考文献, 定数の出典（テキスト以外の場合）
 9. 感想
- ⑥ 提出締切は実験の翌週の金曜日午後5時とする。

付録2 TCAの概要

2. 1 概要

(TCAパンフレットより)

はじめに

^{235}U 等の重い原子の核が中性子を吸収して分裂し、同時にばく大なエネルギーと連鎖反応に必要な新たな中性子を放出する。第3の火と呼ばれるこの核反応を人類が発見して以来、平和利用のための絶えまない努力が重ねられて来た。その中で稔った大きな果実の1つに軽水炉がある。

TCAは、我が国最初の軽水型動力試験炉 JPDR の核特性についてより深く研究することを目的として、昭和37年に原研に設置された臨界実験装置である。以来、軽水減速炉心の基本的な核特性の研究、各種改良炉心に関する実験等を行い、我が国の軽水炉開発に寄与して来た。また、昭和55年頃からは、我が国における核燃料サイクルの成熟を背景として、原子炉以外の燃料取扱施設に関する臨界安全性の研究に着手している。

装 置

TCAは、米国ゼネラルエレクトリック社のバレット研究所に設置されていたVCAをモデルとした、低濃縮燃料軽水格子炉心の炉物理特性を測定するための臨界集合体である。この装置は写真1および第1図に示すように、直径1.8mの炉心タンク内に棒状燃料を直立させて配列し、下部から減速材と反射材の役目をすると軽水(脱塩水)を給水することにより炉心を構成するタイプであり、主たる反応度制御を炉水位の調整によっている(タンク型)。そのため、炉水位測定用に $\pm 0.25\text{ mm}$ の精度のサーボマンメータ式水位計を有するとともに、臨界超過水位を最大過剰反応度相当以下に制限するための各種フロートスイッチおよびオーバーフロー装置を備えている。

水位による反応度制御の特徴を制御棒による場合との比較で示すと次のようである。

(1) 制御能力の不変性

制御能力を規定する水位反応度係数(ある水位における単位の水位変化に伴う反応度)は体系の条件によらずほとんど一定であり、水位のみの関数である。このことは、多様な炉心構成における核的制限値(過剰反応度や反応度付加率)の確保を容易にしているとともに、吸収体や反射体等による水平方向境界条件の変化に伴う反応度を臨界水位差、すなわち垂直方向バックリングの変化から求めるという特徴的な実験手法を可能にしている。

(2) 広い制御範囲

垂直方向の炉心寸法をゼロから臨界状態まで変化させるので、中性子実効増倍係数でいえば、0から1まで制御することができる。したがって、臨界近接手順が簡単になるとともに、未臨界実験における反応度の範囲等を十分広くとれる。

(3) クリーンな炉心構成

制御棒を用いずに反応度制御ができるので、

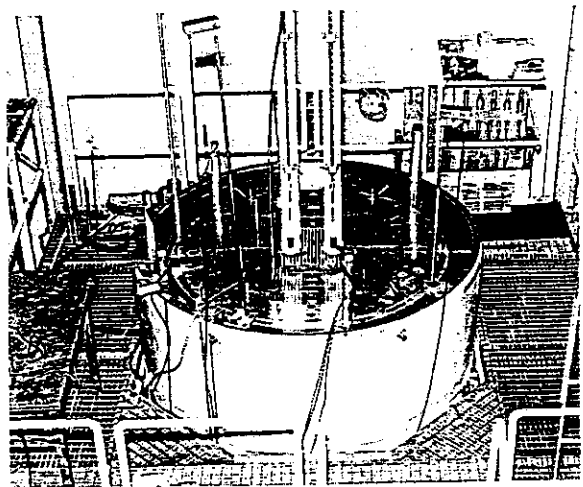
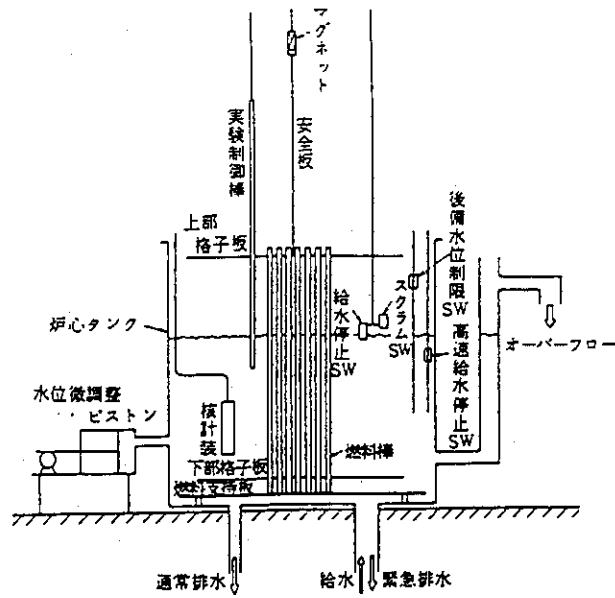


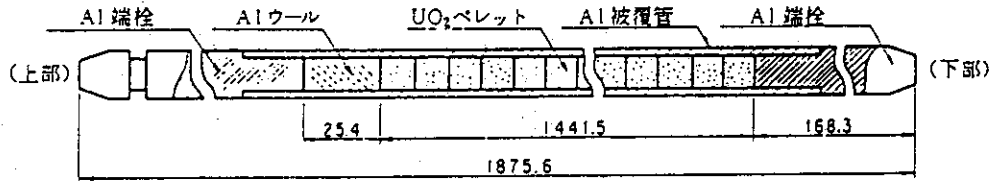
写真1 TCAの概観

3次元的不均一のない炉心が構成できる。したがって、計算値との比較に有用な、体系に乱れないクリーンな炉心に関する実験値が取得できる。

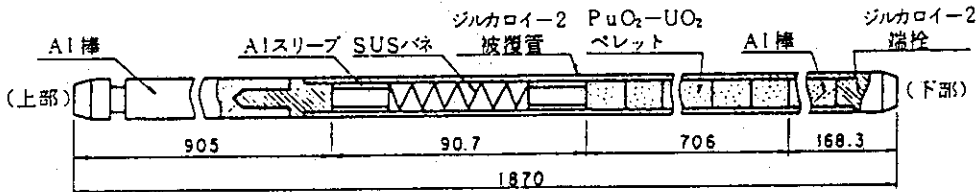
このように、TCAは実験上の柔軟性に富み、かつ安全性の高い装置である。主要な燃料要素の構造を第2図に示す。



第1図 TCA炉心構成の概要



2.6%濃縮ウラン燃料棒



3.0%富化プルトニウム燃料棒

第2図 主要な燃料要素

研究内容

TCAは昭和37年8月23日に初臨界達成以来、平成3年1月1日現在までに9,053回の運転を行っている。この間の実験内容は、第1表に示すように、おおよそ3つの期間に分けて述べる事ができる。

第Ⅰ期(最初の6~7年間)は、我が国最初の軽水臨界実験装置として、各種実験手法の確立を図る一方、JPDRや原子力船「むつ」炉心の核特性確認のための実験データを取得した。

第Ⅱ期(その後の約10年間)は、軽水炉の定着を踏まえ、Puの軽水炉利用および軽水炉の改良に必要な炉物理的知見を得るための実験を、動燃および民間と共同で実施した。

第Ⅲ期(その後、現在まで)は、我が国の核燃料サイクル技術の進展を踏まえ、燃料取扱い

に伴う臨界安全性に関する実験を主に行っている。この分野では、体系の未臨界度や燃料の燃焼度に関する現場測定手法に対する要求が強く、前者について指数実験、中性子ノイズ法等の有効性を明らかにするとともに、後者について、原子炉サイトでの測定と TCA 実験による知見とを総合することにより、FP γ 線スペクトロメトリーの有効性を実証した。また、鉄反射体と板状吸収体の組合せ、燃料の不均一分布、スロッシングによる体系形状の変化等、この分野特有のパラメータによる反応度効果に関する実験的研究も進められている。

これらの TCA 実験において対象とする炉心は、大部分中性子の熱化がよく進んだ体系である。減速材として減速能の大きい軽水を用いるため、低濃縮燃料にもかかわらず、炉心体積は 100 l 近辺と、他の臨界集合体に比べて小さい。また、反応を支配する熱中性子の拡散距離が 1 cm 程度と極めて短いため、炉心内外の異種媒質間の境界において熱中性子束分布が鋭く変化する。したがって、解析計算においては、速中性子の漏洩率と熱中性子の微細分布の評価に特に重点を置く必要がある。

第 1 表 TCA 実験の概要

項目	内容	年 度					
		1962 ~66	67~71	72~77	78~81	82~86	87~
1. JPDR 模擬炉心実験	<ul style="list-style-type: none"> JPDR 炉心核特性の測定 国産軽水炉燃料の照射前炉物理試験 	—					
2. 原子力船「むつ」炉心臨界実験	<ul style="list-style-type: none"> 「むつ」炉心の核特性確認総合試験 	—					
3. Pu の軽水炉利用	<ul style="list-style-type: none"> 小領域 Pu 格子臨界実験 1 領域 Pu 格子臨界実験 		—	—			
4. 軽水炉の改良に関する実験	<ul style="list-style-type: none"> 可燃性毒物燃料実験 改良型 BWR 制御棒実験 燃焼度向上化炉心実験 稠密格子炉心実験 		—	—		—	
5. 燃焼度の非破壊測定 (原子炉サイトでの測定)	<ul style="list-style-type: none"> FP γ 線スペクトロメトリー FP γ 線ドジメトリー カロリメトリー、パッシブ中性子法 			—	—	—	—
6. 臨界安全性実験	<ul style="list-style-type: none"> 未臨界度測定手法の開発 貯蔵・輸送体系パラメータ実験 					—	—

今後の展望

昨今、軽水炉時代の長期化が予想され、核物質の有効利用、固有安全性の向上等の種々の観点から新たな炉心概念が提案されつつある。その設計に用いられる核計算コードの精度を実験値に基づき検証することは今後とも重要である。特に、中性子の共鳴エネルギー領域の反応率、各種反応度係数、燃焼反応度等に関連する精度の高い実験データを蓄積することは今後の重要な課題であると考えられる。

核燃料施設の臨界安全性の分野では、“初めに原子炉ありき”という我が国の特殊事情のため、本格的な研究はこれからであり、多様な体系と多種のパラメータについて臨界、未臨界実験に基づいた臨界条件の整理、体系の変化範囲の中で最も臨界に近い条件を見極める方法の確立等を進める必要がある。

TCA はこのような実験に最も適した装置であり、今後とも原子核エネルギーのより良い利用を目指して実験に基づきつつ研究を進めていきたい。

2.2 主要な制限値

(1) 主要な核的制限値

- a 最大過剰反応度 0.5% $\Delta k/k$ 以下
(ただし、ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料要素を使用する場合は0.4% $\Delta k/k$ 以下とする。)
- b 潜在的な最大過剰反応度 0.5% $\Delta k/k$ 以下
(ただし、ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料要素を使用する場合は0.4% $\Delta k/k$ 以下とする。)
- c 脱落の可能性を考慮すべき
炉心挿入物 (吸収体, ボイド等) 5% $\Delta k/k$ 以下

(2) 主要な熱的制限値

- a 最高熱出力 200W
- b 使用温度 80°C以下

2.3 計測制御系統施設の構造及び設備

(1) 計 装

1) 核計装の種類

核計装系統設備は6チャンネルの中性子監視系よりなる。これらは次の2種の系統にわけられる。各系統の構成を図A-1に示す。

- | | | |
|-------|-----------------------------|--------|
| a 起動系 | 比例計数管-炉周期計付対数計数率計 | 3チャンネル |
| b 運転系 | γ 線補償型電離箱-炉周期計付対数出力計 | 1チャンネル |
| | γ 線補償型電離箱-線型出力計 | 2チャンネル |

2) その他の主要な計装の種類

次の計装を設備する。

- a 炉心タンク水位計
- b 水電導度計
- c 温度計

(2) 安全保護回路

安全保護回路はスクラム, 炉心タンクダンプ, 警報及びインターロック等の機能をはたす。

1) 原子炉停止回路の種類

装置に異常が発生した場合, その条件によりスクラム回路または炉心タンクダンプ回路が作動し, 装置を緊急停止する。この条件及び動作を表A-1に示す。

2) その他の主要な安全保護回路の種類

その他の安全保護回路及び設備としては警報回路, インターロック回路, およびオーバーフロータンクが設けられている。

a 警報回路

下記の場合警報指示灯、ブザーまたはベル等によって警報を発する。

- (a) 短炉周期
- (b) 高中性子束
- (c) 起動時の中性子束指示不充分
- (d) 運転時の中性子束指示不充分
- (e) 炉心タンク高水位
- (f) ダンプタンク高水位
- (g) 炉心タンク高電導度
- (h) ダンプタンク高電導度
- (i) 放射線エリアモニタ高指示
- (j) ダストモニタ高指示
- (k) ダンプタンク水モニタ高指示
- (l) 炉室扉施錠不完全
- (m) 操作空気圧不充分
- (n) 廃水ピット高水位
- (o) 廃水タンク高水位

b インターロック回路

インターロック回路は装置の安全操作を確保するために、各種操作の手順を規制する。

(a) 起動インターロック

次の条件がすべて満足されなければ起動できない。

- i) スクラム条件がすべて解除されていること。
- ii) 制御盤の点検キーが断にされ、運転キーが接にされていること。
- iii) 起動用中性子源が完全に挿入されていること。
- iv) 起動系の中性子束指示が充分であること。
- v) 安全板が完全に引抜かれ、待機状態にあること。

(b) 炉心タンク給水インターロック

i) 高速給水の条件

- ① 炉心タンク内の水位が、高速給水停止スイッチより下の範囲にあること。
- ② 炉心タンク内の水位が、運転水位制限スイッチより下の範囲にあること。

ii) 低速給水の条件

炉心タンク内の水位が、運転水位制限スイッチより下の範囲にあること。

iii) 運転水位制限スイッチの駆動機構の作動条件

炉心タンクへ給水中でないこと。

(c) 反応度附加インターロック

炉心に反応度を附加するに際しては、次の方法のうちの2つ以上のものを同時に用いて行うことはできない。

- i) 給水回路（高速給水または低速給水）

ii) 水位微調整ピストン

iii) 実験制御棒

また、パルス実験にともなうペリオドバイパスがなされている場合は、上のどの方法によっても反応度を附加することはできない。

(3) 制御設備

反応度制御装置は水位制御装置、安全板装置及び実験制御棒駆動装置から構成される。

1) 制御材の個数及び構造

a 水位制御装置

(a) 制御要素：炉心タンク水位。

(b) 個数：該当事項なし。

(c) 構造：該当事項なし。

b 安全装置

(a) 制御材：ボラール板 (B₄C), Cd-Al 合金板。

(b) 個数：上記の各材料についてそれぞれ5枚ずつ保有する。ただし、同時に使用するのは3~5枚である。

(c) 構造：i) ボラール板

B₄C-AlをAl板で被覆した平板

巾 約 254mm 長さ 約 1,800mm

厚さ 約 3.2mm

ii) Cd-Al 合金板

Cd-Al 合金の平板

巾 約 254mm 長さ 約 1,800mm

厚さ 約 2.0mm

c その他

a, bに述べたものの他に、実験制御棒駆動装置を用いることがある。

2) 制御材駆動設備の個数及び構造

a 水位制御装置

(a) 給水系統：給水制御弁、給水ポンプ及び配管類より構成されており、ダンプタンク水を炉心タンクに押し上げて給水する構造となっている。

給水回路には高速給水回路及び低速給水回路があり、給水速度は高速給水弁及び低速給水弁のオリフィス開度によって制御される。

給水弁は空気作動式であって圧縮空気によって駆動される。給水ポンプは電動機によって駆動される。

給水速度は、高速給水が 2.5mm/sec以下、低速給水は反応度附加率が $2 \times 10^{-2} \% \Delta k/k/sec$ 以下になる速度に制限される。

(b) 排水系統：排水弁及び配管類より構成されており、炉心タンク水をダンプタンクへ自由落下で排出する構造となっている。排水回路には、緊急排水回路、通常排水回路及び微調整排水回路があり、それぞれ緊急排水弁、通常排

水弁，微調整排水弁により制御される。

これらの排水弁は，空気作動式であって圧縮空気によって駆動される。スクラム信号が発せられてから燃料有効部上端水位より燃料有効部下端水位まで排水するのに要する時間は，緊急排水回路において約40秒である。

- (c) 水位微調整ピストン：シリンダー及びピストンより構成されており配管は炉心タンク側面に接続されている。ピストンはモータで駆動される。このピストン駆動により，水位を約25mmの範囲において調整することができる。

(d) 水位制御装置

- i) 高速給水制限スイッチ：2素子フロートスイッチ

このスイッチ設定位置より上方では高速給水ができない。

この設定位置は運転中には変更できない。

- ii) 運転水位制御スイッチ：2素子フロートスイッチ

このスイッチの2素子は，互いに約50mmの間隔をもってスイッチ駆動装置にとりつけられる。水位が下方スイッチに到達すると給水が停止され，上方スイッチに到達すると炉はスクラムする。スイッチの設定位置は駆動装置により運転中に変更できる。

- iii) 後備水位制御スイッチ：2素子フロートスイッチ

水位がこのスイッチに到達すると炉はスクラムする。スイッチの設定位置は運転中に変更できない。

- iv) オーバーフロータンク：1式

炉心タンク横に設置され，下部において炉心タンクと連結されている。溢流により炉心タンク水位の上昇を制限する。溢流水位の設定は運転中に変更できない。

b 安全板装置

安全板駆動機構

- (a) 個 数：5 組

- (b) 構 造：安全板駆動機構は，安全板案内及び捲上げ装置より構成されており，安全板は機械装置架台の下に吊り下げられ，捲上げ装置は機械装置架台の上にとりつけられ，モータによって駆動する構造となっている。安全板は捲上げコードの先に取り付けた電磁カップリングによって炉心上方に吊り下げられ，スクラム時には重力によって炉心内に安全板案内に沿って自由落下する。

- (c) 落下時間：約 0.6秒（落下距離約1.5m）

c 実験制御棒装置

実験制御棒駆動機構

- (a) 個 数：1 個

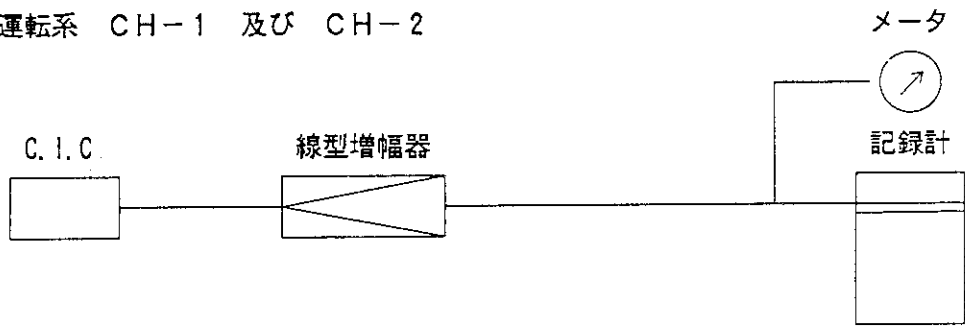
- (b) 構 造：実験制御棒駆動機構は，機械装置架台の上に取り付けられたモータによって上下方向に実験制御棒を駆動する。

- (c) 駆動速度：反応度附加率にして $2 \times 10^{-2} \% \Delta k/k/sec$ 以下
- 3) 反応度制御能力
 - a 水位制御装置
 - (a) 反応度制御効果：完全排水時には炉心の実効増倍係数は無視できる程小さくなる。
 - (b) 反応度附加率：増倍度 0.9以上の近臨界では $2 \times 10^{-2} \% \Delta k/k/sec$ 以下。
 - b 安全板装置
 - (a) 反応度抑制効果：安全板挿入時の実効増倍係数0.99以下。
1枚の最大値 特に制限なし。
 - (b) 反応度附加率：該当事項なし。
 - c 実験制御棒装置
 - (a) 反応度抑制効果：0.4% $\Delta k/k$ /以下。
反応度附加率： $2 \times 10^{-2} \% \Delta k/k/sec$ 以下。
- (4) 非常用制御設備
該当事項なし。
- (5) その他の主要な事項
該当事項なし。

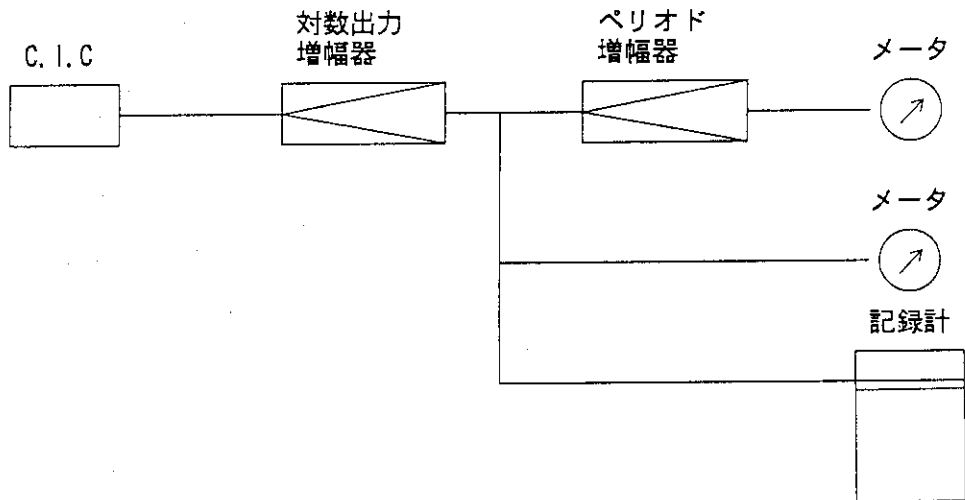
表A-1 停止回路の作動条件

作動条件	停止方法		信号発生装置
	ダンプ	スクラム	
(a) 短炉周期		○	炉周期計 (起動系 2 out of 3, 及び運転系)
(b) 高中性子束		○	出力計 (運転系 1 out of 3)
(c) 炉心タンスク高水位		○	水位制限スイッチ
(d) 炉心扉開放		○	炉室扉スイッチ
(e) 計装電源異常		○	高圧電源監視装置、電源周波数計
(f) 地震		○	地震計
(g) 手動スクラム		○	スクラムボタン (制御卓、炉室)
(h) 安全板引抜き不完全	○		安全板装置
(i) 起動時の起動用中性子源挿入不完全	○		中性子源装置
(j) 起動時の中性子束指示不十分	○		対数計数率計 (起動系 2 out of 3)
(k) 運転時の中性子束指示不十分	○		線型出力計 (運転系 1 out of 2)

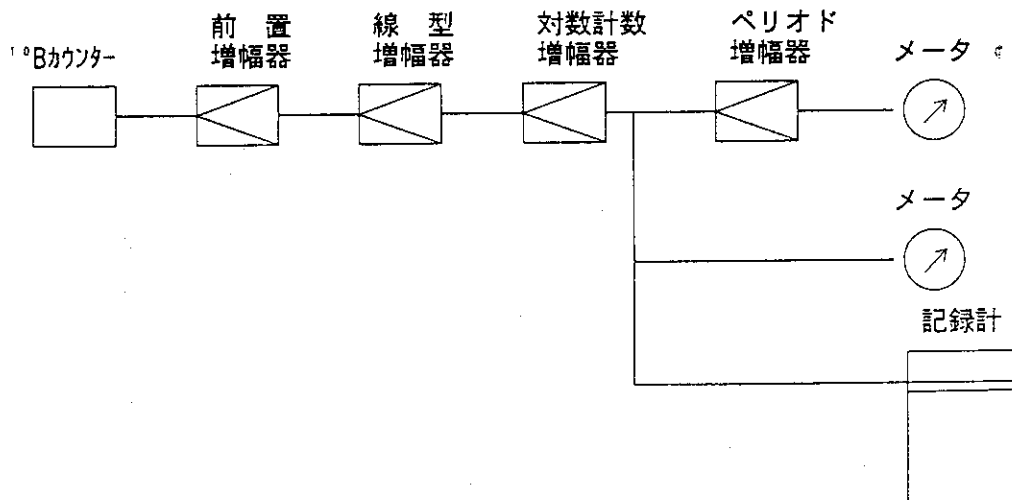
(1) 運転系 CH-1 及び CH-2



(2) 運転系 CH-3



(3) 起動系 CH-4、CH-5 及び CH-6



図A-1 核計装設備の系統構成