

高速実験炉「常陽」性能試験報告書

低出力炉雑音試験(N T -62)

1980年5月

動力炉・核燃料開発事業団

高速実験炉「常陽」性能試験報告書

低出力炉雑音試験 (NT-62)

三田 敏男**，牧戸 正紀***，池上 哲雄****
 佐野 健一*，山口幸四郎****，桐島 幹泰*
 山本 寿**

要 旨

高速実験炉「常陽」の動特性試験の一環として炉雑音試験を行った。本報告は、炉雑音試験のうち低出力試験期間に行った試験結果をまとめたものである。本試験では、炉心中心位置に2本のHe³検出器（電流モード）を挿入し、この2つの出力信号の炉雑音解析をした。炉雑音解析手法として、バンドパスフィルタ法と極性相関法を適用し、原子炉の動特性パラメータを求めた。

主な試験結果は、以下の通りである。

(1) 即発中性子減衰定数 (β/ℓ) の測定

両解析法による測定値同志は良く一致し、 $\beta/\ell = 1.73 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ が得られた。また計算値 $1.77 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ とも良い一致を示した。

(2) 未臨界度の測定

バンドパスフィルタ法では、適応可能範囲は1%程度までであったが、極性相関法では6%程度まで測定できた。この範囲で、他の測定法による結果と±10%以内で一致した。高速炉における極性相関法の有効性が確認できた。

(3) 炉出力絶対値測定

炉雑音法による炉出力絶対値は、核出力校正による値と±10%以内で一致した。

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター
 システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
 Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor
 and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-
 Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
 Corporation)

* 大洗工学センター，高速実験炉部，技術課

** " " " (現在，日立製作所，エネルギー研究所)

*** " " " (現在，三菱電機，中央研究所)

**** " " " (現在，三菱重工)

***** " " " (現在，高速増殖炉開発本部)

"JOYO" Start-Up Test Report

Measurements of Low Power Reactor Noise (NT-62)

Toshio Sanda**, Masanori Makido***,
Tetsuo Ikegami****, Kenichi Sano*,
Koshiro Yamaguchi****, Mikiyasu Tsunashima*
and Hishashi Yamamoto**

Abstract

As a part of the dynamics tests in the experimental fast reactor "JOYO", reactor noise measurements were carried out.

This report describes the experimental results performed during the low power test.

In the experiment, two He^3 neutron detectors were inserted in the core and two kinds of zero-power reactor noise techniques, i. e., the band-pass filter method and porality correlation method, were applied to determine reactor kinetic parameters.

Major results are as follows.

(1) Measurements of prompt-neutron decay constant (β/ℓ)

The agreement between measured results obtained by both techniques was in good. The measured value ($1.73 \times 10^4 \text{s}^{-1}$) agreed well too with the calculated value ($1.77 \times 10^4 \text{s}^{-1}$).

(2) Measurements of subcriticality

Though the band-pass filter technique could not be applied

* Reactor Technology Section, Experimental Fast Reactor Division, O-arai Engineering Center, PNC.

** Energy Research Laboratory, Hitachi Ltd. in present

*** Central Research Laboratory, Mitsubishi Electric Corp. in present

**** Mitsubishi Heavy Industry in present

***** FBR Development Project in present

beyond of the subcriticality of one dollar, the porality correlation technique could be applied in the range from zero to six dollars. In this range, the results obtained by the techniques agreed with those by other methods within 10%. The effectiveness of the porality correlation technique in FBR was confirmed.

(3) Measurements of absolute power level

The absolute power level obtained by the reactor noise method agreed with that by the nuclear power calibration tests within 10%.

目 次

| | |
|------------------------|----|
| 1. 緒 言 | 1 |
| 2. 系統設備の概要 | 3 |
| 2.1 炉心特性(設計値) | 3 |
| 2.2 炉 心 構 成 | 3 |
| 2.3 中性子計装設備 | 4 |
| 3. 試験の方法 | 5 |
| 3.1 試験準備 | 5 |
| 3.2 測定の方法 | 5 |
| 3.3 解析の方法 | 6 |
| 4. 試験結果 | 9 |
| 4.1 β/ℓ の測定結果 | 9 |
| 4.2 未臨界度の測定結果 | 9 |
| 4.3 炉出力絶対値測定結果 | 9 |
| 5. 検 討 | 11 |
| 6. 結 言 | 13 |
| 7. 謝 辞 | 14 |
| 8. 参 考 文 献 | 15 |
| 9. 付 録 | 16 |
| 9.1 試験装置の概要 | 16 |
| 9.2 零出力炉雑音解析 | 16 |

1. 緒 言

高速実験炉「常陽」の性能試験において、動特性試験の一環として炉雑音試験を行った。本報告は、炉雑音試験のうち低出力試験期間に行った試験結果をまとめたものである。

低出力炉において、炉雑音解析法は即発中性子減衰定数 (β/ℓ)、未臨界度、炉出力絶対値等の動特性パラメータ測定のため用いられている。¹⁾²⁾³⁾ 炉雑音解析法のうち、パワースペクトル密度測定がもっともよく使われている技術であり、「常陽」にも適用したので、以下に概略説明をする。

原子炉雑音の測定には中性子検出器が使われるが、この中性子検出器電流出力のパワースペクトル密度 $\phi_{xx}(\omega)$ は次式で表わされる。⁴⁾

$$\phi_{xx}(\omega) = 2W_x F [\bar{q}^2 + gW_x D(\bar{q})^2 |G(\omega)|^2] \quad (1.1)$$

ここで、

W_x : 検出効率 (counts/fission)

F : 核分裂率 (fissions/s)

$D = \frac{\bar{\nu}^2 - \bar{\nu}}{(\bar{\nu})^2}$ (Diven factor)

ν : 1回の核分裂で生じる中性子数

g : 幾何学的構造因子 (G factor)

$G(\omega)$: 原子炉伝達関数

(1.1) 式の第1項は、検出過程での成分で、いわゆる検出器雑音であり、第2項は核分裂の分岐過程に基づく成分である。この第2項より、原子炉伝達関数が求まり、各種動特性パラメータが測定できる。第1項は、2本の検出器を用いることにより除去可能である。この手法は、2検出器法と呼ばれるが、2本の検出器 (x, y) の相互パワースペクトル密度 $\phi_{xy}(\omega)$ は次式で表わされる。

$$\phi_{xy}(\omega) = 2gFW_x W_y D(\bar{q})^2 |G(\omega)|^2 \quad (1.2)$$

この手法を適用すれば、特に高周波側での測定精度が向上する。³⁾ これらのパワースペクトル密度の測定法に関しては、アナログ的にバンドパスによる方法 (バンドパスフィルタ法) とデジタル的にフーリエ変換を行う方法がある。

上記の炉雑音解析手法は、特に軽水炉を対象に適用されてきたが、最近この方法の高速炉への適用も行なわれるようになった。高速炉の場合、軽水炉に比べて中性子寿命が2~3桁短かいので、本解析に必要な周波数領域は軽水炉に比べて2~3桁広がる。このため測定系は10 KHz以上まで平坦な周波数特性を持たねばならない。これに対して、Seifrizによって提案された周

波数領域の極性相関法⁵⁾は、測定系の周波数特性にあまり影響されないで、高速炉における炉雑音解析に用いられるようになった。この手法は、バイナリー極性変換器（入力信号がその平均値を越えたか越えないかにより+1, -1の信号に変換する変換器）を用いて、論理演算によりコヒーレンス関数を求めて、それから動特性パラメータを求める方法である。なお、コヒーレンス関数CF(ω)は、次式で定義される。

$$CF(\omega) = \frac{\phi_{xy}(\omega)}{[\phi_{xx}(\omega) \cdot \phi_{yy}(\omega)]^{1/2}} \quad (1.3)$$

ここで、

$\phi_{xx}(\omega), \phi_{yy}(\omega)$: 信号 x, y のそれぞれの自己パワースペクトル密度

ϕ_{xy} : 信号 x と y の相互パワースペクトル密度

これらの炉雑音解析法の詳細については付録で述べる。

本試験では、「常陽」に炉雑音測定手法を適用し、動特性パラメータを求めることを目的とした。このため、炉心中心の燃料集合体をステンレス・スチール製の検出器受入集合体に置き換え、この検出器受入集合体に炉心上部より2本のHe³検出器（電流モード）を挿入した。この2つの出力信号をバンドパスフィルタ法および極性相関法で解析し、原子炉の即発中性子減衰定数(β/ℓ)、未臨界度および炉出力絶対値を求めて、両解析法による測定結果を比較検討した。

2. 系統設備の概要

2.1 炉心特性（設計値）

1) 核特性

○ 炉心中性子束（50 MW時最大） 1.9×10^{15} nv

○ 動特性パラメータ

| | 制御棒引抜時 | 制御棒6本挿入時 |
|-------------------------------------------|------------------------|------------------------|
| 即発中性子寿命 ℓ_p (sec) | 2.804×10^{-7} | 1.936×10^{-7} |
| 遅発中性子割合 β_{eff} | 5.007×10^{-3} | 4.963×10^{-3} |
| β_{eff}/ℓ_p (sec ⁻¹) | 1.79×10^4 | 2.56×10^4 |

○ 制御棒特性

| | |
|-------------|----------------------------|
| 制御棒反応度値（1本） | 1.4% $\Delta k/k$ 以上 |
| 反応度付加率 | 0.015% $\Delta k/k/sec$ 以下 |
| 全制御棒反応度 | 8.4% $\Delta k/k$ 以上 |

2) 熱特性（最大出力時）

| | |
|------------------|----------------|
| ○ 原子炉熱出力 | 50 MW |
| ○ 出力密度（最大） | 374 KW/ ℓ |
| ○ 1次冷却材流量 | 2200 t/h |
| ○ 冷却材温度 原子炉入口/出口 | 370/435°C |

2.2 炉心構成

炉心は、313体の炉心燃料要素により構成される。炉心部の構成をFig. 2.1に示すが、70本の炉心燃料集合体と6本の制御棒から成り、その囲りをブランケット燃料集合体で囲まれている。

炉心燃料集合体は、正六角形状で91本の燃料要素から成り、その配列ピッチは7.6mmである。各燃料要素は、炉心中央部の直径5.4mm、全長600mmのウラン・プルトニウム酸化物ペレットと、その上下の400mmの劣化ウラン酸化物ペレット（軸方向ブランケット）から構成されている。炉心部のウラン濃縮度は23w/oで、PuO₂/(PuO₂+UO₂)は17.7w/oである。

制御棒は、2本の調整棒と4本の安全棒から成り、各制御棒は91w/o ¹⁰B濃縮のB₄Cペレットで構成されている。

中性子源は、アンチモンベリリウム型であり、低出力試験時には、中性子源引抜装置によりアンチモンを600mm上方に引抜き中性子源の強度を約 $\frac{1}{20}$ に減じることができる。

2.3 中性子計装設備

中性子計装設備は、起動系、中間出力系、線形出力系の3系統から成り、安全確保のためにそれぞれ2または3の計測系で構成されている。起動系、中間出力系の検出器は核分裂計数管で、線形出力系の検出器は γ 線補償型電離箱である。Fig. 2.2に各検出器の配置を示す。低出力試験時には、特設の計装設備としてchA, chB, chC位置に、それぞれB-10検出器, BF₃検出器, B-10検出器を設置している。さらに、chDとして制御棒予備孔を利用して、炉心上部位置に小型の核分裂計数管を設置している。

中性子計装使用範囲として、起動系は約0.02Wから5KW、中間出力系は約500Wから100MW、線形出力系は約1MWから125MWの間の出力測定ができる様に設計されている。

3. 試験の方法

3.1 試験準備

本試験に先立ち、炉心中心の燃料集合体を燃料交換機により、ステンレス・スチール製の検出器受入集合体に置き換え、この検出器受入集合体内に回転プラグ上方より2本のHe³検出器を軸方向に上下並べて挿入した。2本の検出器の中心間距離は約180mmである。

このHe³検出器は、Reuter-Stokes社製のRS-P4-SK-779型であり、外径25.4mm ϕ 、全長305mmで、内部に304cmHgのHe³ガスが封入されており、約15mのMIケーブルが接続されている。

次に、2本のHe³検出器の中性子検出効率をできるだけ等しくするため、原子炉を下記の運転条件で運転して、2本の検出器電流値が等しくなるように中性子検出器駆動装置により検出器位置を移動調整した。

- | | |
|-------------|--------|
| (1) 原子炉出力 | 約3.5KW |
| (2) 1次系流量 | 約20% |
| (3) 1次冷却材温度 | 約180°C |

この状態で、原子炉を停止して2本の検出器のリーク電流を測定した。印加した電圧は360Vである。その結果、リーク電流は上部検出器で 3.8×10^{-8} A、下部検出器で 1.65×10^{-7} Aであった。

試験装置の詳細については付録で説明する。

3.2 測定の方法

本試験では、原子炉冷却材温度を検出器の耐熱性(200°C以下)を考慮して180°Cとし、1次系冷却材流量は検出器の機械的振動を減ずるため、定格流量の20%とした。中性子源に関しては、原子炉臨界時の測定では、中性子源の影響を減ずるために、中性子源引抜装置によりアンチモンを引抜くことにより、中性子源強度を減じた状態で測定した。

各試験時の原子炉状態は以下の通りである。

- | | |
|------------------------------|--------------|
| (1) β/ℓ および炉出力絶対値測定 | |
| (a) 安全棒(4本) | 全引抜 |
| (b) 調整棒 Na 1 | 全引抜 |
| (c) 調整棒 Na 2 | 約340mm(臨界調整) |
| (d) 炉出力 | 約10W~約15KW |
| (2) 未臨界度測定 | |
| (a) 安全棒 | 全引抜 |

- (b) 調整棒 No 1, No 2 同位置 (470 mm ~ 0 mm)
- (c) 未臨界度 0 ~ 約 6 \$

上記のごとく、原子炉を種々の炉出力状態および未臨界状態に保ち、2本のHe³検出器の信号の交流成分を増幅後、データレコーダに記録した。

データレコーダ (TEAC R-410型) のテープスピードは、30 IPSとし、その記録方式と記録時間は、β/ℓ および炉出力絶対値測定時にはFM記録方式で約10分間、未臨界度測定時にはDRモードで約20分間記録した。なお、テープスピード30 IPSにおける周波数特性は、FM方式でDC ~ 10 KHz ^{+0.5}/₋₁ dB, DR方式で200 Hz ~ 100 KHz ± 3 dBである。

この検出器は、電流モードで使用するため、高圧電源として、DC+360 Vを印加したが、両チャンネル間の独立性を保つために高圧電源として乾電池を使用した。炉出力絶対値の測定時には、ピコアンメータ (KEITHLEY MODEL 410A) で検出器に流れる電流の定常成分を測定した。Fig. 3.1に測定系のブロックダイアグラムを示す。

なお、未臨界度測定時には、特設の計装設備 chA (B¹⁰ 検出器) と chB (BF₃ 検出器) を用いて、中性子源増倍法によっても未臨界度を測定した。

3.3 解析の方法

データレコーダに記録した信号を再生し、バンドパスフィルタ法により相互パワースペクトル密度を、極性相関法によりコヒーレンス関数を求めた。Fig. 3.2はバンドパスフィルタ法の測定解析系のブロックダイアグラムを、Fig. 3.3は極性相関法のブロックダイアグラムを示す。

(1) バンドパスフィルタ法

Fig. 3.2に示す通り、データレコーダに記録した2本の検出器の信号を、バンドパスフィルタの中心周波数を変えて乗算器により、積を求める。その積の積分値を積分器により求めると、次式により相互パワースペクトル密度 ϕ_{xy}(ω₁) が求まる。

$$\phi_{xy}(\omega_1) = \frac{V_0}{K \cdot T \cdot (\Delta\omega_1)} \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで、

- V₀ : 積分器の出力電圧
- T : 積分時間 (本解析では、100秒)
- Δω₁ : バンドパスフィルタの帯域幅
- K : 本測定解析系で使用した増幅器、バンドパスフィルタ、乗算器と積分器のゲインで定まる定数である。

上記で求めた相互パワースペクトルを使用して、下記の関係式より動特性パラメータを求めた。詳細については付録で説明する。

(a) β/ℓの測定

臨界体系においては、相互パワースペクトル密度 ϕ_{xy}(ω) は次式で与えられる。

$$\phi_{xy}(\omega) = \frac{A}{1 + \omega^2 \left(\frac{\ell}{\beta}\right)^2} \dots\dots\dots (3.2)$$

つまり、相互パワースペクトル密度の折点周波数 ω_c が β/ℓ となる。

(b) 未臨界度の測定

未臨界体系においては、相互パワースペクトル密度 ϕ_{xy}(ω) は次式で与えられる。

$$\phi_{xy}(\omega) = \frac{A}{1 + \omega^2 \left(\frac{\ell}{\beta - \rho}\right)^2} \dots\dots\dots (3.3)$$

つまり、上記の臨界時の相互パワースペクトル密度の折点周波数 ω_c と未臨界時の折点周波数 ω_{*} からドル単位の未臨界反応度は $\left(\frac{\omega_c}{\omega_*} - 1\right)$ で求められる。

(c) 炉出力絶対値の測定

原子炉伝達関数は、その折点周波数に比べて十分小さい領域では一定値 $\left(|G(j\omega)|^2 = \frac{1}{\beta^2}\right)$ となり、原子炉出力 P (W) と上記の周波数領域の相互パワースペクトル密度 ϕ₀(ω) は次の関係式が成り立つ。

$$P = \frac{2g}{M \cdot \beta^2} \cdot \frac{\bar{v}^2 - \bar{v}}{(\bar{v})^2} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{\phi_0(\omega)} \dots\dots\dots (3.4)$$

ここで、

- ϕ₀(ω) : 炉出力 P において、原子炉伝達関数が一定となる周波数領域における相互パワースペクトル密度 (本解析では 315 Hz ~ 630 Hz)
- ν : 1回の核分裂で生じる中性子数
- M : 炉出力 1 W において、単位時間当りに炉内で発生する核分裂数
- g : 炉心の幾何学的構造因子
- β : 遅発中性子割合
- I₁, I₂ : 各々の検出器の出力電流

(2) 極性相関法

Fig. 3.3に示す通り、データレコーダに記録した信号を、バンドパスフィルタの中心周波数を変えて極性相関器に入力する。極性相関器は、極性変換器、論理回路、パルス発生器 (100 KHz) から成る。極性変換器では、入力信号がその平均値を越えたか越えないかにより +1, -1 の信号に変換する。論理回路では、二つの極性変換器の出力が同符号のときには +1 を、逆に異符号ときは -1 の信号が発生する。この出力とパルス発生器からの

パルス信号との論理積をとり、カウンタ I, II の入力とする。カウンタ I のカウント数 (逆極性となる時間内のパルス数) を N_1 , カウンタ II のカウント数 (同極性となる時間内のカウント数) を N_2 とすると、コヒーレンス関数 $CF(\omega)$ は次式で与えられる。

$$CF(\omega) = \sin \frac{\pi}{2} \left(\frac{N_2 - N_1}{N_2 + N_1} \right) \dots\dots\dots (3.5)$$

上記で求めたコヒーレンス関数を使用して、下記の関係式より動特性パラメータを求めた。解析時間は 100 sec である。詳細については付録で説明する。

(a) β/l の測定

臨界時におけるコヒーレンス関数の折点周波数 ω_c と低周波数領域における値 $CF^*(\omega)$ より次式により β/l を求める。

$$\beta/l = \omega_c \{1 - CF^*(\omega)\}^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (3.6)$$

(b) 未臨界度の測定

ドル単位の未臨界度 ρ は次式で与えられる。

$$\rho = 1 - \left\{ \frac{CF^*(\omega)}{CF(\omega)} \cdot \frac{1 - CF^*(\omega)}{1 - CF^*(\omega)} \right\}^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (3.7)$$

ここで、

$CF(\omega)$: 未臨界時のコヒーレンス関数の低周波領域の値

(c) 炉出力絶対値の測定

原子炉出力 $P(W)$ と臨界時のコヒーレンス関数の低周波領域における値 $CF^*(\omega)$ は次の関係式が成り立つ

$$P = \frac{g}{M \cdot \beta^2} \cdot \frac{1}{Rq} \cdot \frac{\bar{\nu}^2 - \bar{\nu}}{(\bar{\nu})^2} \cdot \frac{1 - CF^*(\omega)}{CF^*(\omega)} \cdot \frac{I_1 + I_2}{2} \dots\dots\dots (3.8)$$

ここで、

R : ベンネットファクタ $\left(\frac{\bar{q}^2}{(Q)^2} \right)$

\bar{q} : 1 回の検出当り発生するイオン電荷

4. 試験結果

4.1 β/l の測定結果

バンドパスフィルタ法および極性相関法による炉出力 300, 500, 700W での測定結果を、Fig 4.1, Fig 4.2, Table 4.1 に示す。両方法による結果はよく一致し、 $\beta/l = 1.74 \times 10^4 S^{-1}$ である。

本体系における動特性パラメータを、2次元 RZ6 群拡散計算 (NNS-5 set) で求めたが、その結果を 70 本標準炉心における結果と共に Table 4.2 に示す。試験時には制御棒は全引抜状態に近い (安全棒 4 本と調整棒 1 本は全引抜、調整棒 1 本 (No 2) は 343.9mm) ので、制御棒全引抜時の値 $1.77 \times 10^4 S^{-1}$ と比較すると、本測定値は計算値とよく一致していると言える。

4.2 未臨界度の測定結果

Table 4.3 は、測定時の調整棒位置と各種測定法による未臨界度の測定結果を示す。各種測定法による結果は、6 $\$$ 程度の未臨界度まで 10% 以内で一致しているが、バンドパスフィルタ法による結果は特に未臨界度が深くなると、測定系の周波数特性の影響を受けて、小さな値を与える。Table 4.4 は各未臨界体系における炉雑音解析法で求めたコヒーレンス関数の折点周波数と低周波領域での値と相互パワースペクトル密度の折点周波数を示す。Fig 4.3, Fig 4.4 にコヒーレンス関数と相互パワースペクトル密度の測定結果を示す。

4.3 炉出力絶対値測定結果

Table 4.5 は、各測定ケースにおける起動系 ch1 の計数率と 2 本の H_2^3 検出器電流値 (リーク電流を差引いた値) を示す。なお、本表において、予備系 chD は炉心上部位置 (制御棒予備孔) に設置した小型の核分裂計数管であり、起動系 ch1 は 10^4 cps 以上では検出系の不感時間の影響を受け、炉出力との直線性がなくなるので、 H_2^3 検出器電流値と炉出力の直線性チェックのために用いた。これらをプロットしたものを Fig 4.5 に示す。なお、起動系 ch1 の計数率と炉出力は、核出力校正試験により次の関数式が得られている。

$$P_N = 0.1823 C_1^{0.9763} \dots\dots\dots (4.1)$$

ここで、

P_N : 核出力 (W)

C_1 : 起動系 ch1 の計数率 (cps)

Fig 4.5 から判るように、2 本の H_2^3 検出器電流は本測定時の出力範囲内では、炉出力と直

線性があり、H₂検出器は本出力範囲内で炉雑音測定に良好な特性を示すと言える。

Table 4.6, Fig 4.6 は、核出力校正で求めた炉出力と炉雑音法による炉出力を示すが、両方法とも±10%以内で一致している。

なお、炉雑音法で使用した定数値は以下の通りである。

$$\frac{\overline{v^2} - \bar{v}^2}{(\bar{v})^2} = 0.8$$

$$\left. \begin{aligned} \beta &= 0.005 \\ M &= 3.1 \times 10^{10} \text{ (W}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}) \\ g &= 1.15 \\ R &= 1.2 \\ \bar{q} &= 3.8 \times 10^{-15} \text{ (A} \cdot \text{S)}^6 \\ CF^c(0) &= 0.53 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.2)$$

5. 検 討

今回の測定において、4チャンネルデータレコーダ記録時に、2本の検出器の信号を、チャンネル1と2またはチャンネル3と4に収録した。測定後判明したが、チャンネル間の時間遅れが大きく解析結果に影響を与えた。テープスピード30 IPSでは、チャンネル1と2で12.6 μs、チャンネル3と4で11.4 μsの遅れ時間があった。例えば、12 μsの時間遅れをもつ2つのチャンネルに一定波高のサイン波を入力して、その相互パワースペクトル密度を求めると、14 KHzで3 dB 減衰する。このため、遅れ時間の少ない別のデータレコーダ (FM方式, 60 IPS) にデータを転送し、再びもとのデータレコーダに、入力チャンネルを入れ換えて転送した。(FM方式, 30 IPS) このため、S/N比, 周波数特性はやや悪化している。

(1) β/ℓ の測定

バンドパスフィルタ法と極性相関法の結果はよく一致した。これは、今回の測定解析系ではすべて10 KHzまではほぼ平坦な周波数特性を有しているため、データの転送による悪影響は、本測定にはなかったと言える。

(2) 未臨界度測定

バンドパスフィルタ法による結果では、測定解析系の周波数特性の影響 (特にデータレコーダ) のため、1 \$以下の未臨界度は小さ目となっている。これに対して、極性相関法では、6 \$程度の未臨界度まで、他の測定結果と±10%以内で一致している。今回はデータを転送したこと、およびDRモードで記録したことによりS/N比が悪いので、本手法によりさらに深い未臨界度の測定も可能であると予想される。

Fig 4.4 に示す通り、種々の未臨界体系におけるコヒーレンス関数は、高周波側ですべて一致する傾向がある。これを定量的に評価する。

付録9.1の(9.15), (9.16)式より, ω_x = ω_y = ωとすると、コヒーレンス関数は、次式で表わされる。

$$CF(\omega) = \frac{(\frac{\beta}{\ell})^2 Q_0}{\omega^2 + (\frac{\beta - \rho}{\ell})^2 + (\frac{\beta}{\ell})^2 Q_0} = \frac{\frac{\beta^2}{\ell^2} Q_0 / \left\{ (\frac{\beta - \rho}{\ell})^2 + \frac{\beta^2}{\ell^2} Q_0 \right\}}{1 + \left[\omega \sqrt{(\frac{\beta - \rho}{\ell})^2 + \frac{\beta^2}{\ell^2} Q_0} \right]^2} \dots\dots\dots (5.1)$$

上式で、高周波側では分母の1は無視でき、(5.1)式は次式で近似できる。

$$CF(\omega) \approx \frac{\frac{\beta^2}{\ell^2} \cdot Q_0}{\omega^2} \dots\dots\dots (5.2)$$

上式は、未臨界度 ρ に関係しない値となる。

なお、(5.1)式より、未臨界度 ρ の体系でのコヒーレンス関数 $CF(\omega)$ の折点周波数 ω_ρ は次式で与えられる。

$$\omega_\rho = \sqrt{\left(\frac{\beta-\rho}{\ell}\right)^2 + \frac{\beta^2}{\ell^2} Q_0} \dots\dots\dots (5.3)$$

低周波側でのコヒーレンス関数(未臨界度 ρ) $CF(0)$ は(5.1)式より次式で表わされる。

$$CF(0) = \frac{\frac{\beta^2}{\ell^2} Q_0}{\left(\frac{\beta-\rho}{\ell}\right)^2 + \frac{\beta^2}{\ell^2} Q_0} \dots\dots\dots (5.4)$$

(5.3)と(5.4)式より

$$\omega_\rho = \frac{\frac{\beta}{\ell} \left(1 - \frac{\rho}{\beta}\right)}{\sqrt{1 - CF(0)}} \dots\dots\dots (5.5)$$

(5.5)式に、測定値を代入して、本測定結果の妥当性をチェックした。Table 4.4にその値を示すが、直接コヒーレンス関数から測定した折点周波数と±5%以内で一致している。

(3) 炉出力絶対値測定

従来のバンドパスフィルタ法による炉出力は、核出力較正值に対してばらつきが大きい、極性相関法による値はそのばらつきが小さい。これは、バンドパスフィルタ法では、炉出力は2本の検出器の直流電流値の積と相互パワースペクトル密度の比率によりきまるためである。つまり、直流電流値と炉出力とは比例関係がよく成立つので、相互パワースペクトル密度の解析精度が悪いと思われる。特に、今回の測定では、積分器の精度に問題があった。これに対して、極性相関法では、炉出力を直接、直流電流値に比例する量として定義されているのでそのばらつきは小さくなる。

付録 9.2 (9.2.3)式から検出器効率 W は次式で与えられる。

$$W = \frac{R \beta^2}{g} \cdot \frac{(\bar{\nu})^2}{\nu(\nu-1)} \cdot \frac{CF^c(0)}{1 - CF^c(0)} \dots\dots\dots (5.6)$$

測定値を代入すると、 $W = 3.68 \times 10^{-5}$ counts/fissionとなる。

6. 結 言

以上の炉雑音法による動特性パラメータの試験結果をまとめると以下の通りである。

(1) β/ℓ の測定

バンドパスフィルタ法と極性相関法による β/ℓ の測定値同志は、よく一致し、 $1.73 \times 10^4 \text{ S}^{-1}$ である。2次元 R-Z 6 群拡散計算による値は、制御棒全引抜時では $1.77 \times 10^4 \text{ S}^{-1}$ であり、測定値とよく一致した。

(2) 未臨界度の測定

バンドパスフィルタ法による未臨界度の測定では、適用可能範囲はせいぜい 1\$ までであるが、極性相関法による測定では、6\$ 程度まで精度よく求めることができた。つまり、他の測定法(ペリオド法、中性子源増倍法)による結果と±10%以内で一致した。高速炉の炉雑音法による未臨界度の測定に、極性相関法が有効であることが実証できた。

(3) 炉出力絶対値測定

炉雑音法による炉出力絶対値は、核出力較正による値と±10%以内で一致した。従来のバンドパスフィルタ法による炉出力は、核出力較正による値に対して、ばらつきが大きい、極性相関法による値は、ばらつきが少なく、炉出力の測定に関しても有効な手法であることが実証できた。

7. 謝 辞

本試験の実施あたり、御協力戴いた東京芝浦電気株式会社とNAIG研の諸氏特に、角田十三男氏に厚く感謝の意を表します。

8. 参 考 文 献

- 1) C.E. Cohn : Determination of Reactor Kinetic Parameters by Pile Noise Analysis, Nucl. Sci. Eng., 5, 331-335 (1959)
- 2) S. Yamada : Reactor Noise Analysis of Swimming Pool Type Reactor, J. Nucl. Sci. Technol., 1, 130-136 (1964)
- 3) T. Nomura : Improvement in S/N Ratio of Reactor Noise Analysis using Two-Detector Correlation Method, J. Nucl. Sci. Technol., 2, 76-77 (1965)
- 4) W. Seifritz and D. Stegemann : Reactor Noise Analysis, Atomic Energy Review, 9, 129-176 (1971)
- 5) W. Seifritz : The Polarity Correlation of Reactor Noise in the Frequency Domain, Nucl. Appl. Technol., 7, 513-522 (1969)
- 6) D.P. Roux and A.R. Buhl : Effect of Gamma Radiation on LMFBR Subcriticality Measurements Using Noise Analysis, Nucl. Technol., 12, 138 (1971)
- 7) 齊藤慶一 : 炉雑音の理論(I), JAERI 1178 (1970)

9. 付 録

9.1 試験装置の概要

本試験に使用した試験装置は、中性子検出器駆動装置、検出器受入集合体および低出力炉雑音測定解析装置である。

中性子検出器駆動装置は、2本のH³検出器を炉心中心位置にあらかじめ装荷した検出器受入集合体に炉上部ピット蓋、回転プラグを貫通した案内管を介して挿入する装置である。

検出器案内管は、内部に検出器を収納し、アルゴンガスをパージさせる構造となっており、炉内一次系とのバウンダリーを構成する。外側案内管は、検出器案内管を検出器受入集合体に挿入する際のガイドとなるものである。本装置は、本来駆動装置により検出器を上下駆動できる構造となっているが、本試験の場合には、検出器を炉心中心位置となる様に調整するとその位置に固定して使用する。

検出器受入集合体は、外形が通常の燃料集合体とほぼ同じであるが、ステンレス・スチール製のラッパ管の肉厚が厚く、内部に検出器案内管が挿入できる構造であり、燃料要素を内蔵しない。本試験時には、燃料交換機により、炉心中心に装荷された。Fig 9.1に本試験装置の全体図を示す。

なお、低出力炉雑音測定解析装置については、本文中でブロックダイアグラムにより説明しており、その原理については次節で説明する。

9.2 零出力炉雑音解析^{4), 7)}

雑音解析法による即発中性子減衰定数(β/ℓ)、未臨界度および炉出力絶対値の測定は多くの軽水炉で行われて来たが、最近この方法の高速炉への適用も行われるようになった。

零出力炉雑音解析の立場から軽水炉と高速炉とを比較すると、前者は後者に比べ中性子寿命が2~3桁程大きいことを除けば両者の相違はない。

零出力炉雑音解析の原理について以下に述べる。

原子炉内に起っている中性子の核分裂、吸収、散乱などの反応はすべて統計的に変動しているが、これらの変動は反応度の統計的変動を白色にしている。すなわち、反応度雑音のパワー・スペクトル密度φ_ρは次式で表わされる。

$$\phi_{\rho} = \frac{2\ell}{N} \cdot \frac{\bar{\nu}^2 - \bar{\nu}}{\bar{\nu}} \dots\dots\dots (9.1)$$

ここで、

ℓ：中性子寿命， N：中性子の総数， ν：1回の核分裂で生じる中性子数

原子炉雑音スペクトルすなわち、中性子の雑音スペクトルφ_N(ω)は近似的に(8.1)式と原子炉伝達関数G(jω)の2乗の積であるので

$$\phi_N(\omega) = \frac{2\ell}{N} \cdot \frac{\bar{\nu}^2 - \bar{\nu}}{\bar{\nu}} \cdot |G(j\omega)|^2 \dots\dots\dots (9.2)$$

ここで、

$$G(j\omega) = \frac{1}{j\omega \left\{ \frac{\ell}{\beta} + \sum_{i=1}^N \frac{\beta_i/\beta}{j\omega + \lambda_i} \right\} - \frac{\rho_0}{\beta}} \dots\dots\dots (9.3)$$

なお、ρ₀は未臨界度である。(臨界時ρ₀=0)

さて、実際に原子炉の雑音の測定には、中性子検出器を使用するが、この場合には、検出器の出力信号には原子炉雑音だけでなく、いわゆる検出器雑音が含まれる。

中性子検出器の出力に発生するパワー・スペクトル密度φ_D(ω)は次式で与えられる。

$$\phi_D(\omega) = 2wF \left[\bar{q}^2 + g \cdot w \cdot (\bar{q})^2 \cdot \frac{\bar{\nu}^2 - \bar{\nu}}{(\bar{\nu})^2} \cdot |G(j\omega)|^2 \right] \dots\dots\dots (9.4)$$

ここで

g：炉心の幾何学的構造因子(G factor)

F：単位時間当りの核分裂数の期待値

w：検出器効率(counts/fission)

ν：1回の核分裂で生じる中性子数

q：検出器内で1個の中性子反応により生ずる電荷

G(jω)：原子炉伝達関数

なお、2つの検出器出力のゆらぎについての相互パワー・スペクトル密度φ_{DD}(ω)は、(9.4)式の定数項がなくなり、次式で与えられる。

$$\phi_{DD}(\omega) = 2gFw_1w_2 \cdot \frac{\bar{\nu}^2 - \bar{\nu}}{(\bar{\nu})^2} \cdot (\bar{q})^2 \cdot |G(j\omega)|^2 \dots\dots\dots (9.5)$$

(9.4)、(9.5)式で与えられるパワースペクトル密度からβ/ℓ、未臨界度及び炉出力絶対値を求めるにはバンドパスフィルタ法と極性相関法がある。

次にこれらについて述べる。

9.2.1 バンドパスフィルタ法

零出力原子炉伝達関数 $G(j\omega)$ は次式で与えられる。

$$G(j\omega) = \frac{1}{j\omega\beta \left\{ \frac{\ell}{\beta-\rho} + \sum_{i=1}^N \frac{\beta_i/\beta}{j\omega + \lambda_i} \right\}} \quad (9.6)$$

ここで、 ρ は%単位の未臨界度である。ここで、 $\lambda \ll \omega$ の場合には次のように近似できる。

$$G(j\omega) = \frac{1}{\beta \left(\frac{j\omega\ell}{\beta-\rho} + 1 \right)} \quad (9.7)$$

これを(9.5)に代入すると、

$$\Phi_{DD}(\omega) = A \cdot \frac{1}{\omega^2 + \left(\frac{\beta-\rho}{\ell} \right)^2} \quad (9.8)$$

となり、 $\Phi_{DD}(\omega)$ は $\left(\frac{\beta-\rho}{\ell} \right)$ で定まる折点を持つ

従って、 $\Phi_{DD}(\omega)$ より、臨界時 ($\rho=0$) の折点角周波数 (ω_0) から $\omega_0 = \beta/\ell$ が、また、未臨界時には、ドル単位で表わされた未臨界度 $\rho_g (< 0)$ が折点角周波数 ω を用いて、 $\rho_g = \left(\frac{\omega}{\omega_0} - 1 \right)$ から求められる。

次に炉出力絶対値を求めるための関係式を導出する。2本の中性子検出器の出力電流の期待値 \bar{I}_x, \bar{I}_y は次式で与えられる。

$$\bar{I}_1 = w_x F \bar{q} \quad (9.9)$$

$$\bar{I}_2 = w_y F \bar{q} \quad (9.10)$$

(9.5), (9.9), (9.10) 式から次式が求まる。

$$\frac{\Phi_{DD}(\omega)}{\bar{I}_x \cdot \bar{I}_y} = \frac{2g}{F} \cdot \frac{\nu(\nu-1)}{(\nu)^2} |G(j\omega)|^2 \quad (9.11)$$

ワット単位で表わされる炉出力 P と F の間には、次の関係式がある。

$$F = 3.1 \times 10^{10} P \quad (9.12)$$

一方、零出力炉伝達関数のゲインは、周波数領域 $\lambda \ll \omega \ll \beta/\ell$ では、ほぼ平坦になり、次のように表わされる。

$$|G(j\omega)|^2 = \frac{1}{\beta^2} \quad (9.13)$$

(9.11), (9.12), (9.13) 式から次の関係式が得られる。

$$P = \frac{2g}{3.1 \times 10^{10} \beta^2} \cdot \frac{\nu(\nu-1)}{(\nu)^2} \cdot \frac{\bar{I}_x \cdot \bar{I}_y}{\Phi_{DD}(\omega)} \quad (9.14)$$

9.2.2 極性相関法

高速炉においては β/ℓ は 10^4 sec^{-1} 程度になり、測定系の周波数特性が問題となる。極性相関法は、測定系の周波数特性の影響を受けにくくする方法で、バンドパスフィルタ法との相違はバンドパス・フィルタの後にバイナリーの極性変換を置き、その出力を論理回路で論理演算させ、パルス発生器からのパルス信号との論理積をとる。極性変換器では、入力信号がその平均値を越えたか越えないかにより +1, -1 の信号に変換し、論理回路では二つの極性変換器の出力が同符号の時には +1 を、また逆に異符号の時には -1 の信号を発生する。

さて、二つの入力が共にガウス性信号であり、また二つの検出系の周波数特性が同じであれば、論理積の出力平均値 $\langle C_{\omega}(t) \rangle$ からコヒーレンス関数 $CF(\omega) = \text{Sin} \frac{\pi}{2} \langle C_{\omega}(t) \rangle$ で得られ $CF(\omega)$ は次式で与えられる。(9.4), (9.5) 式を代入)

$$CF(\omega) = \frac{\Phi_{xy}(\omega)}{[\Phi_{xx}(\omega) \cdot \Phi_{yy}(\omega)]^{1/2}} = \left\{ \frac{Q_x(\omega) \cdot Q_y(\omega)}{[1+Q_x(\omega)][1+Q_y(\omega)]} \right\}^{1/2} \quad (9.15)$$

ここで、 $\Phi_{xx}(\omega), \Phi_{yy}(\omega)$ は各々 ω における検出器 x および y の相互相関関数で $Q_x(\omega), Q_y(\omega)$ は以下のとおりである。

$$Q_n = \frac{Q_{on}^c}{(1-\rho/\beta)^2 + (\frac{\ell}{\beta})^2}, \quad Q_{on}^c = \frac{gD}{R\beta^2} w_n \quad (9.16)$$

$$D = \frac{\nu(\nu-1)}{(\nu)^2}, \quad R = \frac{q^2}{(q)^2}$$

(n=x or y)

ここで、臨界状態における低周波数 ($\omega \ll \beta/\ell$) コヒーレンス関数を $CF^c(0)$ とし、コヒーレンス関数の折点周波数を ω_0 とし、 $w_x = w_y$ とすると、 β/ℓ は次式で与えられる。

$$\beta/\ell = \omega_c \{ 1 - CF^c(\omega) \}^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (9.17)$$

また、未臨界度 ρ_S (ドル単位) は、以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} \rho_S &= \rho/\beta \\ &= 1 - \left\{ CF^c(\omega) \cdot \frac{(1+k)CF^c(\omega) + [(1-k)^2 \cdot CF^c(\omega)^2 + 4k]^{\frac{1}{2}}}{2k(1-CF^c(\omega)^2)} \right. \\ &\quad \left. \times \frac{[(1-k)^2 CF^c(\omega)^2 + 4k]^{\frac{1}{2}} - (1+k)CF^c(\omega)}{2CF^c(\omega)} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (9.18) \end{aligned}$$

ここで、 $k = \frac{1-x}{y}$ であり、 $CF^c(\omega)$ 、 $CF(\omega)$ は各々臨界時ならびに未臨界時の低周波におけるコヒーレンス関数である。k = 1 の場合には、(9.18)式は次式ごとく簡単になる。

$$\rho_S = 1 - \left(\frac{1-CF(\omega)}{CF(\omega)} \cdot \frac{CF^c(\omega)}{1-CF^c(\omega)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (9.18)$$

次に炉出力絶対値を求めるための関係式を導出する。

コヒーレンス関数 $CF(\omega)$ は、臨界状態で2つの検出器の検出効率等しい ($w_x = w_y = w$) 場合には、(9.15)、(9.16)式より、次式で与えられる。

$$CF^c(\omega) = \frac{Q_0}{1 + Q_0 + (\omega/\beta/\ell)^2} \quad \dots\dots\dots (9.20)$$

ここで、

$$Q_0 = \frac{g}{R\beta^2} \cdot \frac{\nu(\nu-1)}{(\bar{\nu})^2} w \quad \dots\dots\dots (9.21)$$

周波数領域 $\lambda \ll \omega_p \ll \beta/\ell$ の臨界時のコヒーレンス関数の値 $CF^c(\omega)$ は次式で与えられる。

$$CF^c(\omega) = \frac{Q_0}{1 + Q_0} \quad \dots\dots\dots (9.22)$$

(9.21)、(9.22) から検出器効率 w は次のようになる。

$$w = \frac{R\beta^2}{g} \cdot \frac{(\bar{\nu})^2}{\nu(\nu-1)} \cdot \frac{CF^c(\omega)}{1-CF^c(\omega)} \quad \dots\dots\dots (9.23)$$

上式を(9.9)、(9.10)に代入すると、($w = \frac{w_x + w_y}{2}$ とする)

$$\bar{I} = \frac{\bar{I}_x + \bar{I}_y}{2} = \frac{R\beta^2 F}{g} \bar{q} \cdot \frac{(\bar{\nu})^2}{\nu(\nu-1)} \cdot \frac{CF^c(\omega)}{1-CF^c(\omega)} \quad \dots\dots\dots (9.24)$$

(9.12)式に代入すると、

$$P = \frac{g}{3.1 \times 10^{10} \cdot \beta^2 \cdot R \cdot \bar{q}} \cdot \frac{\nu(\nu-1)}{(\bar{\nu})} \cdot \frac{1-CF^c(\omega)}{CF^c(\omega)} \cdot \frac{\bar{I}_x + \bar{I}_y}{2} \quad \dots\dots\dots (9.25)$$

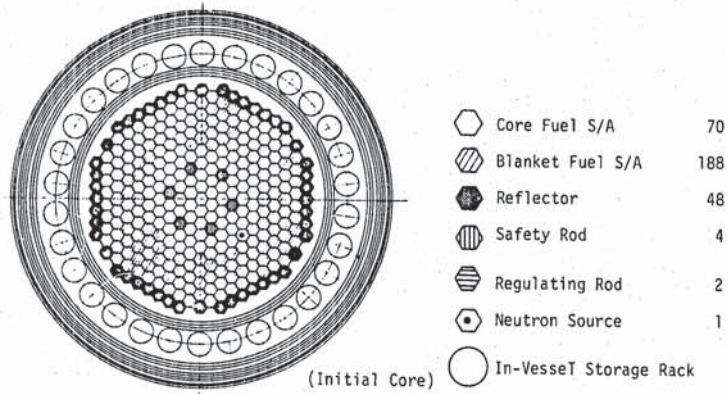


Fig. 2.1 Core Arrangement

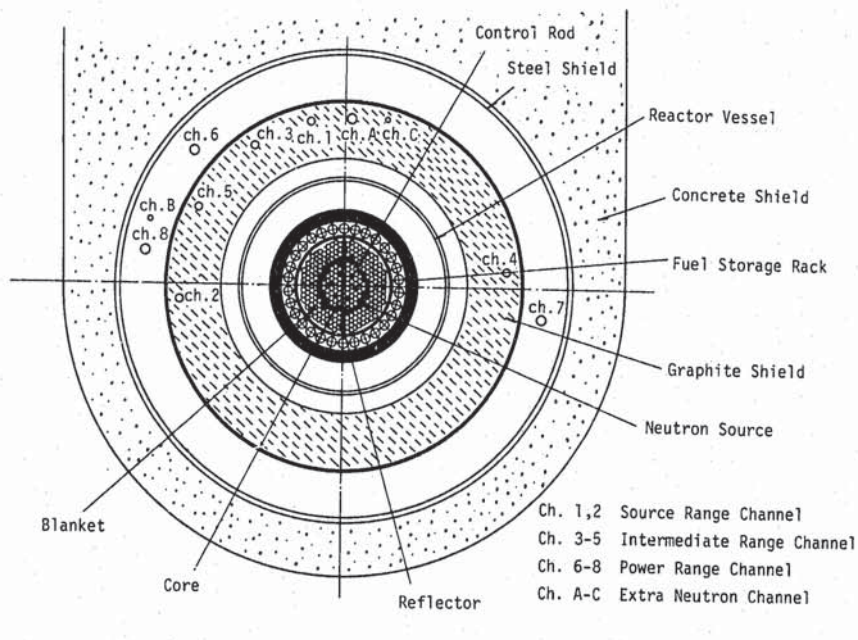


Fig. 2.2 Neutron Counter Locations

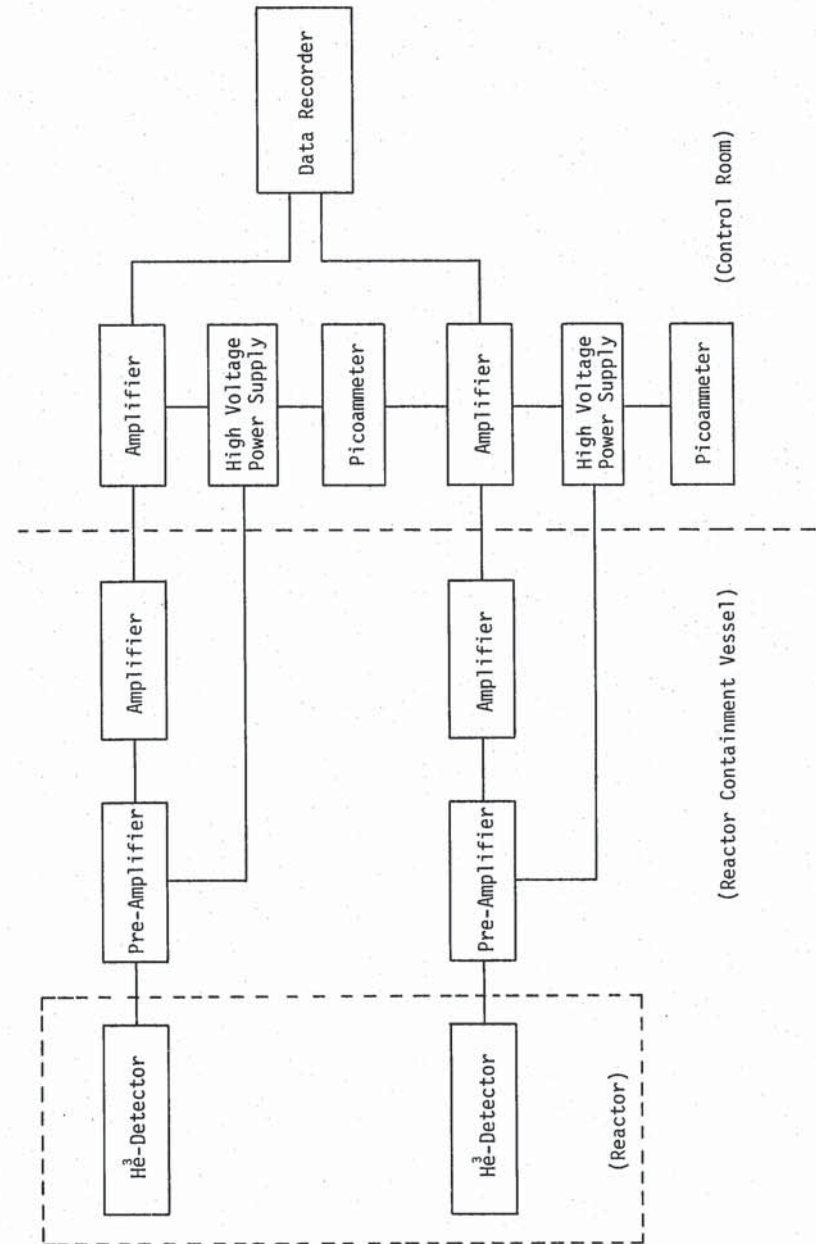


Fig. 3.1 Block Diagram of Data Acquisition System

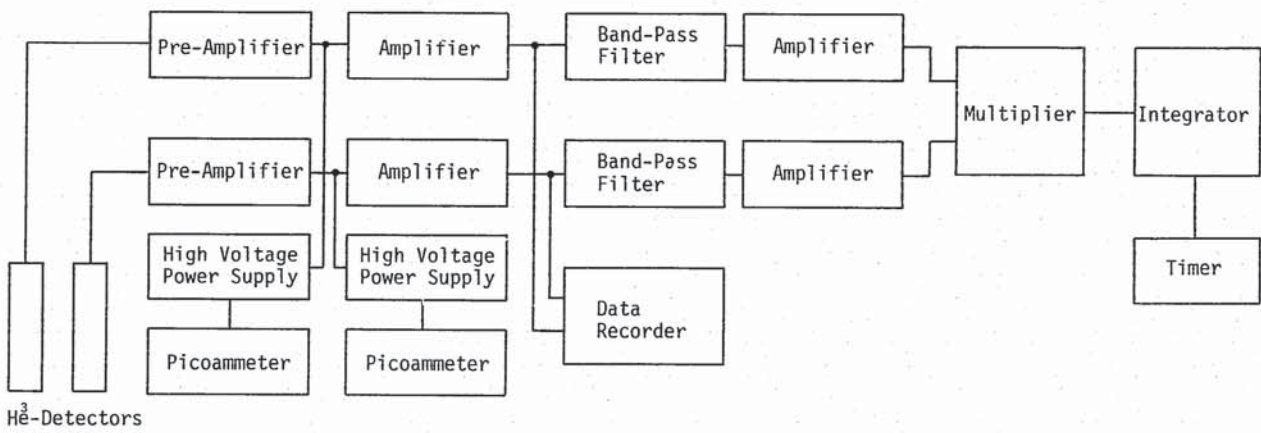


Fig. 3.2 Block Diagram of Band-Pass Filter Method

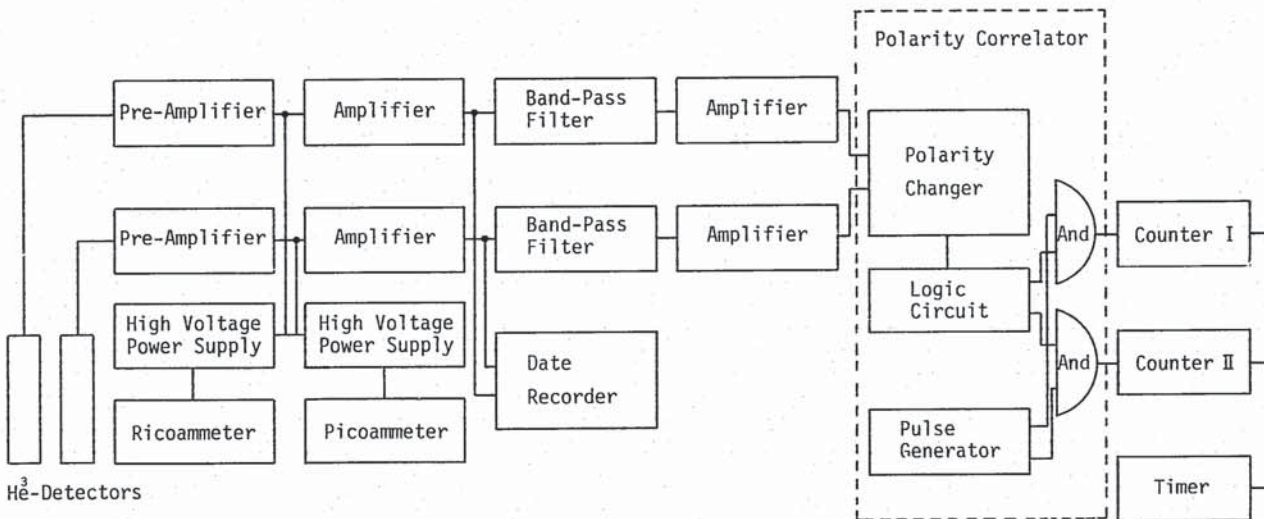


Fig. 3.3 Block Diagram of Polarity Correction Method

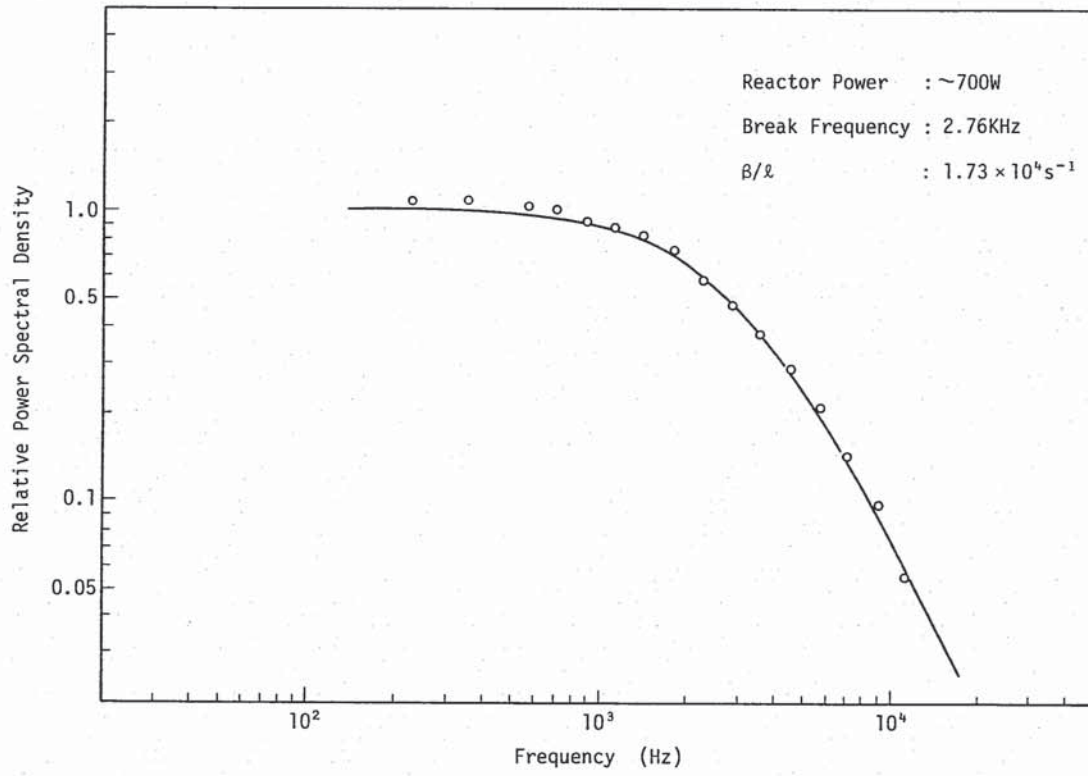


Fig. 4.1 Cross Power Spectral Density Obtained by Band-Pass Filter Method for β/l Measurement

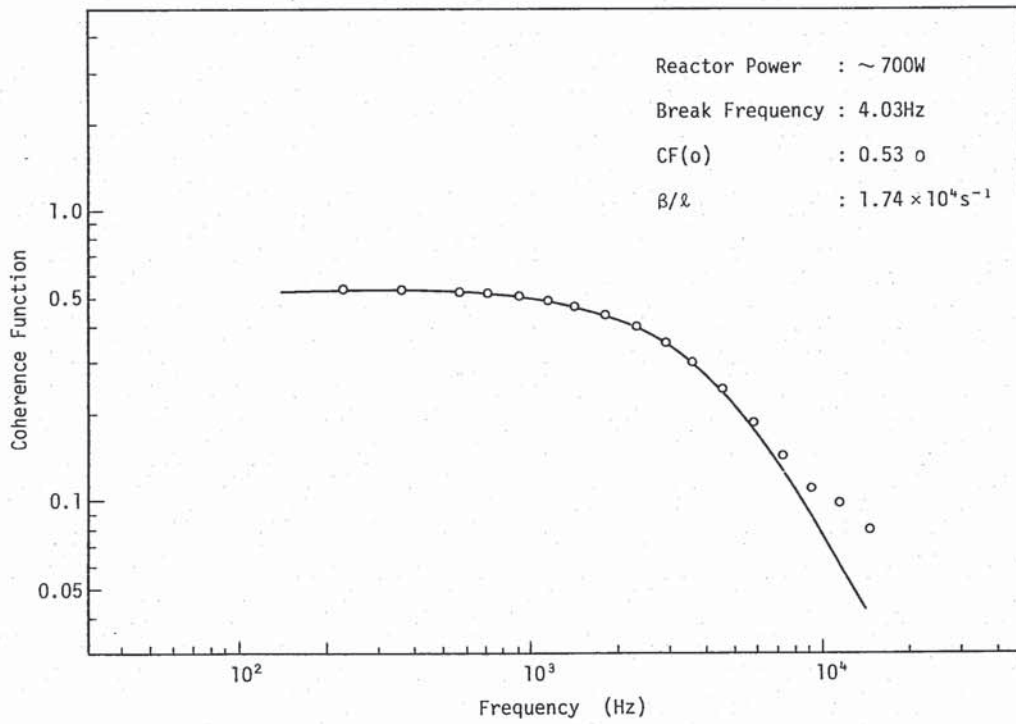


Fig. 4.2 Coherence Function Obtained by Porality Correlation Method for β/l Measurement

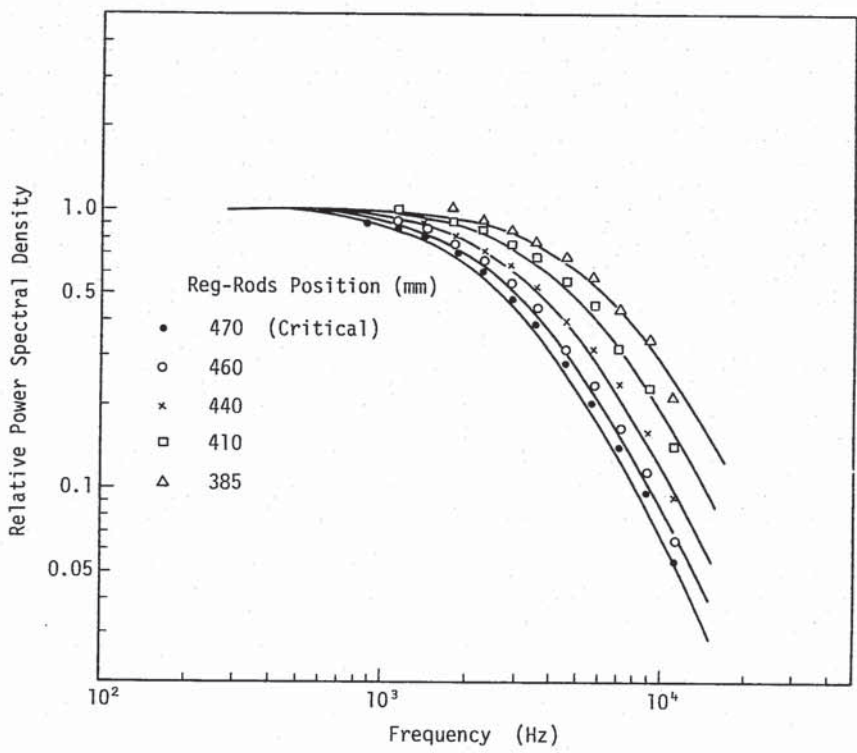


Fig. 4.3 Cross Power Spectral Densities Obtained by Band-Pass Filter Method for Subcriticality Measurement

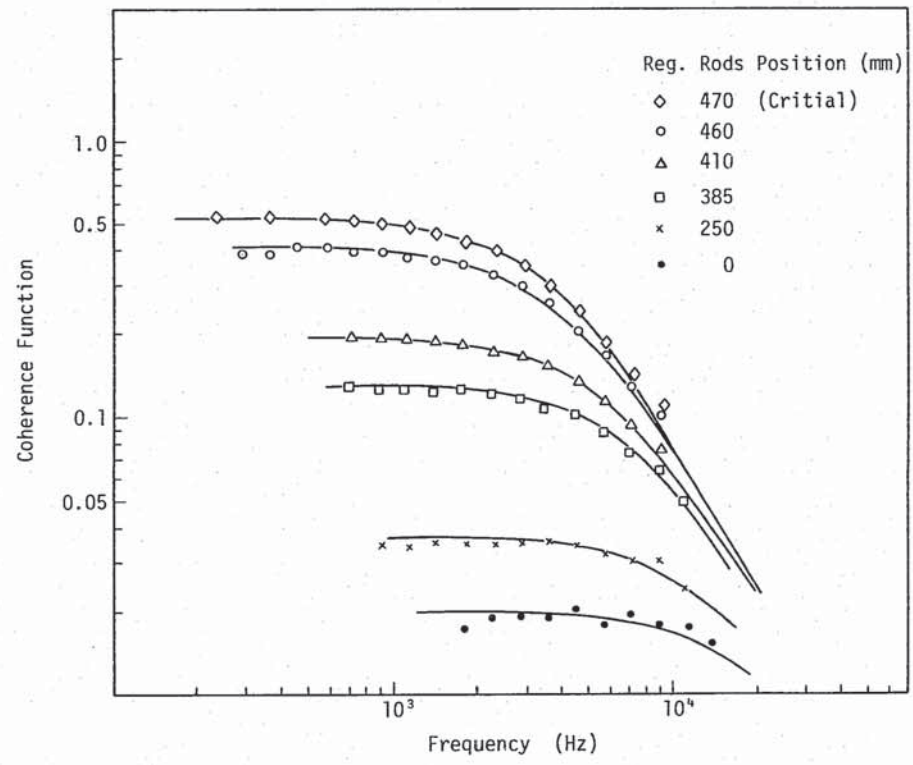


Fig. 4.4 Coherence Functions obtained by Porality Correlation Method for Subcriticality Measurement

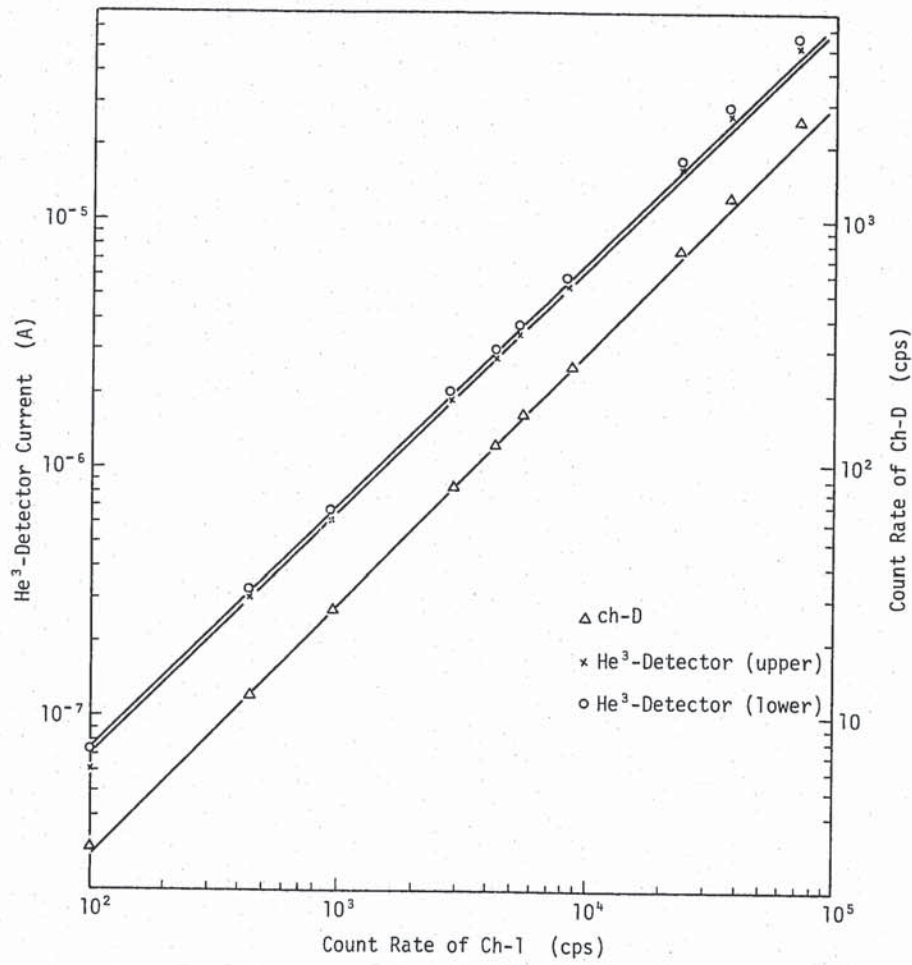


Fig. 4.5 Linearity Check of Count Rates by Detectors Used in Experiments

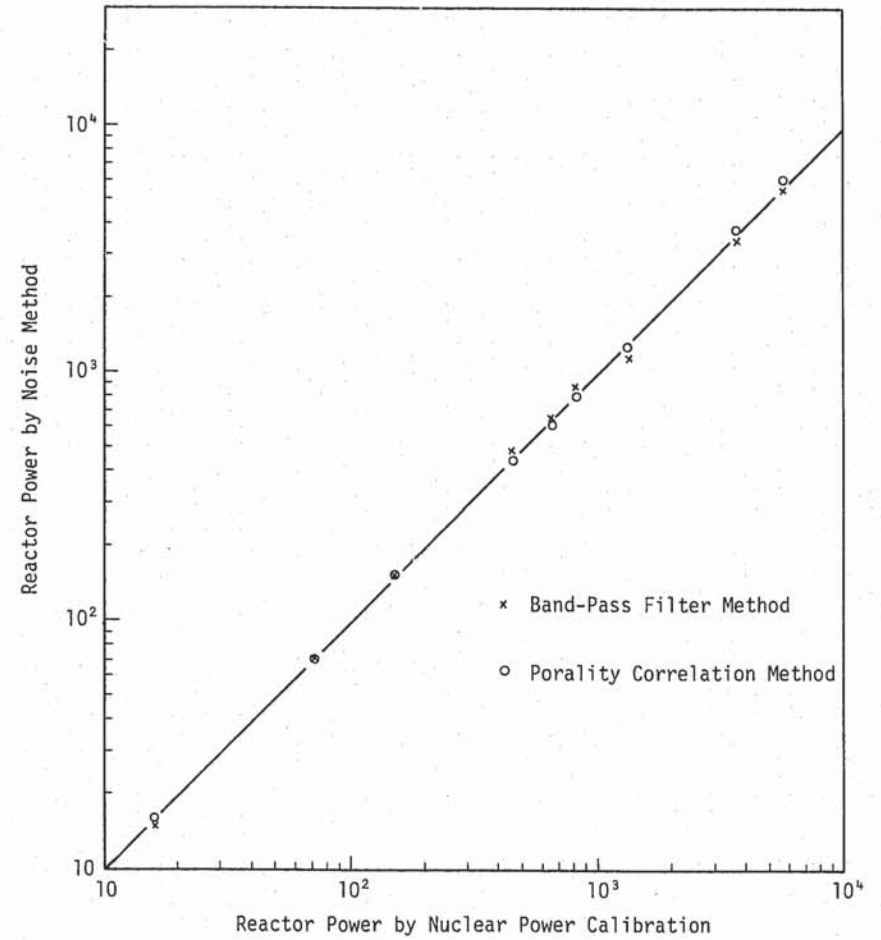


Fig. 4.6 Measurement of Reactor Power by Noise Method

Table 4.1 Results of β/λ Measurement by Band-Pass Filter Method and Porality Correlation Method

| Reactor Power (W) | Power Spectral Density | | Coherence Function | | |
|-------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------|---------|------------------------------|
| | Break Frequency (KHz) | β/λ (s^{-1}) | Break Frequency (KHz) | CF(o) * | β/λ (s^{-1}) |
| ~300 | 2.76 | 1.73×10^4 | 4.05 | 0.525 | 1.75×10^4 |
| ~500 | 2.76 | 1.73×10^4 | 4.05 | 0.530 | 1.74×10^4 |
| ~700 | 2.76 | 1.73×10^4 | 4.03 | 0.530 | 1.74×10^4 |

* CF(o) : Plateau Value of coherence function at low frequencies

Table 4.2 Kinetic Parameters Calculated by 2 Dimensional R-Z 6-groups Diffusion Model

| | | Standard Core (70 fuels) | Measured Core (69 fuels) | |
|--------------------------------------|--------|--------------------------|--------------------------|------------------------|
| Control Rod Condition | R/R(2) | Full Withdrawal | Full Withdrawal | Full Insertion |
| | S/R(4) | Full Withdrawal | Full Withdrawal | Full Withdrawal |
| k_{eff} | | 1.0139 | 1.0006 | 0.9275 |
| λ_p (s) | | 2.728×10^{-7} | 2.817×10^{-7} | 2.339×10^{-7} |
| β_{eff} | | 4.980×10^{-3} | 4.983×10^{-3} | 4.964×10^{-3} |
| β_{eff}/λ_p (s^{-1}) | | 1.83×10^4 | 1.77×10^4 | 2.12×10^4 |

Table 4.3 Results of Subcriticality Measurement

| Case No. | Reg. Rods Position (mm) | | Subcritical Reactivity (β) | | | | |
|----------|-------------------------|-------|------------------------------------|----------|----------------------------------------------|----------|-------|
| | No. 1 | No. 2 | Neutron Multiplication Method | | Band Pass Filter Porality Correlation Method | | |
| | | | ch A | ch B | Method | Method | |
| | | | | | | | |
| 1 | 470.0 | 470.0 | Critical | Critical | Critical | Critical | -0.26 |
| 2 | 460.0 | 459.8 | -0.20 | -0.20 | -0.16 | -0.26 | -0.60 |
| 3 | 440.0 | 440.0 | -0.52 | -0.52 | -0.41 | -0.60 | -1.16 |
| 4 | 410.0 | 410.0 | -1.04 | -1.04 | -0.85 | -1.16 | -1.75 |
| 5 | 385.0 | 385.0 | -1.49 | -1.49 | -1.39 | -1.75 | -2.24 |
| 6 | 360.0 | 360.0 | -1.96 | -1.95 | - | -2.24 | -3.49 |
| 7 | 300.0 | 300.0 | -3.13 | -3.10 | - | -3.49 | -4.38 |
| 8 | 250.0 | 250.0 | -3.98 | -4.02 | - | -4.38 | -6.43 |
| 9 | 0.0 | 0.0 | -6.40 | -6.52 | - | -6.43 | - |

* Used rod calibration curves obtained by positive period method

Table 4.4 Characteristics of Cross Power Spectral Density and Coherence Function at Subcritical Condition

| Case No. | Break Frequency of Cross Power Spectral Density (KHz) | Coherence Function | | | |
|----------|-------------------------------------------------------|-----------------------|---------|-------------------------------|--------------------------------------------|
| | | Break Frequency (KHz) | CF(o) † | Subcritical Reactivity ρ (\$) | $\frac{W_c (1-\rho)}{\sqrt{1-CF(o)}}^{++}$ |
| 1 | 2.76 | 4.0 | 0.530 | Critical | 4.03 |
| 2 | 3.2 | 4.6 | 0.415 | -0.26 | 4.55 |
| 3 | 3.9 | 5.3 | 0.305 | -0.60 | 5.48 |
| 4 | 5.1 | 6.5 | 0.195 | -1.16 | 6.64 |
| 5 | 6.6 | 8.4 | 0.130 | -1.75 | 8.14 |
| 6 | — | 9.4 | 0.097 | -2.24 | 9.41 |
| 7 | — | 12.8 | 0.053 | -3.49 | 12.6 |
| 8 | — | 15.0 | 0.038 | -4.38 | 15.1 |
| 9 | — | 23.0 | 0.020 | -6.43 | 20.7 |

† Plateau Value of Coherence Function at Low Frequencies

++ W_c : 2.76 KHz

Table 4.5 Measured Results of Count Rates by Detectors Used in Experiments

| Case No. | ch-1 Count Rate C_1 (cps) | ch-D Count Rate C_D (cps) | Reactor Power by Nuclear Power Calibration Curve P_A (w) | ³ He-Detector Current | | $\frac{C_D}{I_1+I_2}$ |
|----------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------|-----------------------|
| | | | | (Upper) I_1 (μA) | (Lower) I_2 (μA) | |
| 1 | 97.8 | 3.1 | 16.0 | 0.062 | 0.072 | 23.1 |
| 2 | 449 | 12.2 | 70.8 | 0.302 | 0.315 | 19.8 |
| 3 | 966 | 27.4 | 150 | 0.653 | 0.670 | 20.7 |
| 4 | 2980 | 84.1 | 449 | 1.89 | 1.97 | 21.8 |
| 5 | 4440 | 123 | 663 | 2.71 | 2.80 | 22.3 |
| 6 | 5660 | 160 | 826 | 3.46 | 3.59 | 22.7 |
| 7 | 8880 | 250 | 1310 | 5.41 | 5.74 | 22.4 |
| 8 | 25700 | 737 | 3680 | 15.6 | 16.8 | 22.7 |
| 9 | 39800 | 1170 | 5650 | 25.1 | 27.1 | 22.4 |
| 10 | 75800 | 2400 | 10600 | 49.5 | 51.8 | 23.7 |

Table 4.6 Measured Results of Reactor Power by Noise Method

| Case No. | Reactor Power (W) | | | PB/PA | PC/PA |
|----------|---------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------|-------|
| | by Nuclear Power Calibration Curve PA | by Band-Pass Filter Method PB | by Porality Correlation Method PC | | |
| 1 | 16.0 | 15.2 | 15.5 | 0.95 | 0.97 |
| 2 | 70.8 | 70.1 | 71.3 | 0.99 | 1.00 |
| 3 | 150 | 155.1 | 153 | 1.04 | 1.02 |
| 4 | 449 | 483 | 446 | 1.08 | 0.99 |
| 5 | 663 | 648 | 637 | 0.98 | 0.96 |
| 6 | 826 | 895 | 815 | 1.08 | 0.99 |
| 7 | 1310 | 1140 | 1290 | 0.87 | 0.99 |
| 8 | 3680 | 3390 | 3750 | 0.92 | 1.02 |
| 9 | 5650 | 5470 | 6040 | 0.97 | 1.07 |
| 10 | 10600 | 15200 | 11700 | 1.44 | 1.10 |

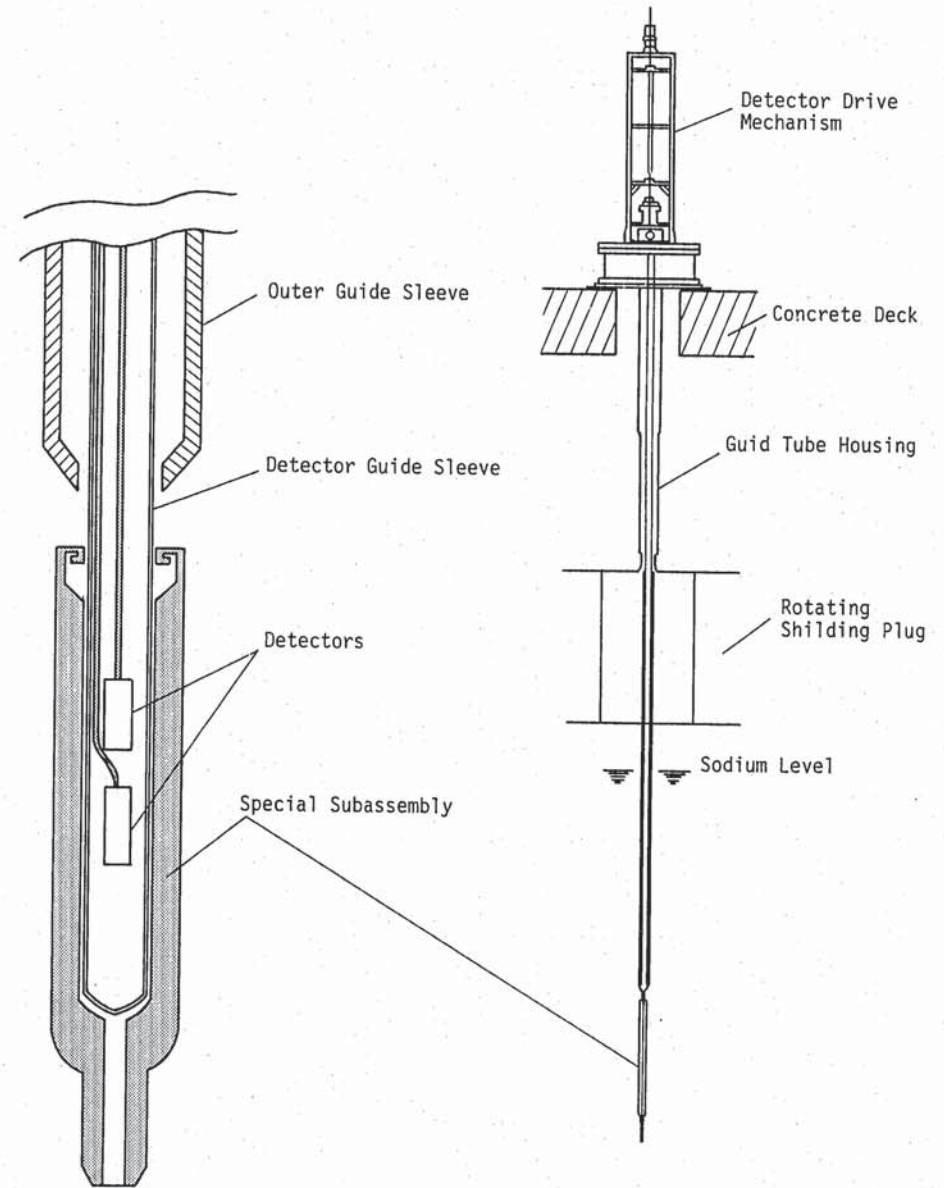


Fig. 9.1 Experimental Equipments