[64] 原子炉反応度測定の実状

金子義彦*, 中野正文*, 松浦祥次郎*

(1977年 3月31日 受理)

Present Art of Reactivity Determination

By Yoshihiko KANEKO*, Masafumi NAKANO* and Shōjirō MATSUURA*

Experimental techniques for reactivity determination of a reactor have been one of the long standing subjects in reactor physics. Recently, such a requirement was proposed by the reactor designers and operators that the values of reactivity should be measured more accurately. This is because importance is emphasized for the role of reactivity to the performance of reactor safety, economics and operability.

Motivated by the requirement, some remarkable progresses are being made for the improvement of the experimental techniques. Then, the present review summarizes the research activities on this subject, identifies several reactor physics problems to be overcome, and makes mention of the future targets.

KEYWORDS: review, reactor safety, research programs, reactivity, performance, economics, reactor kinetics, reactor operation

I. ま え が き

原子炉の設計や運転に携わっている人々にとって、反応度の問題は馴染みが深い。また大学の講義などにおいても、原子炉の説明の冒頭に反応度という言葉が紹介され、核分裂連鎖反応を映像的に学ぶことになっているようである。古い手垢のついたテーマで地味な性格をもっており、これまでさして脚光を浴びたこともないが、炉物理の基礎としてはやはり中心にあるに違いなかった。ところが、ここ数年、この反応度というテーマが議論の対象として盛んにとりあげられるようになってきた。反応度の問題は昨年本学会の「炉中性子工学」研究専門委員会为主要テーマの一つとして選定されたし、やはり「昭51秋の分科会」(炉物理・炉工学)では指定テーマにとりあげられた。また、国際的にも NEA が昨年4月、制御棒の反応度測定技術に関して専門家会議を招集している**。

反応度についての議論はつきないが、まず、定義そのものに問題点があって一つの混乱の要因をつくってきたし、負に大きくなると反応度の測定法があまり確かでなくなる。とくに、出来上がった動力炉については、構造的、時間的制約が多く、運転上ぜひ必要な停

止余裕などの反応度以外はあまり綿密に測定できない。そこで、いきおい臨界実験装置における主要実験項目になっているのが実情のようである。本稿は、「昭51秋の分科会」における指定テーマの発表の内容をできるだけ反映しつつ、反応度に関する研究成果を筋道を通してまとめてほしいという編集委員会の要請に従ってまとめたものである。まず、第Ⅱ章では、反応度測定に関する要請について述べ、第Ⅲ章では、国内における反応度測定活動の現況についてアンケートを中心にまとめた。第Ⅳ章では、反応度の定義と反応度測定に関する問題点とその発生の経路をやや詳しく述べた。第Ⅴ章では、国内における反応度測定精度の向上への努力の現況について触れた。最後に第Ⅵ章では、今後予想される要請と目標精度について述べ、反応度測定に関する研究開発の目標について展望した。

II. 反応度測定への要請

動力炉では長期にわたる燃焼能力と運転性能を確保するため、炉心は大きな余剰反応度を有している。例

* 日本原子力研究所(Japan At. Energy Res. Inst.)

** この専門家会議の内容については、本号 p.404 (談話室) にて報告。

えば軽水炉では、燃焼用反応度(7~15%*)、常温と運転温度間の反応度差(2~5%)、核分裂生成物の負効果の補償用反応度(4~6%)および運転操作反応度(1%)等が初期の常温炉心に与えられる。これらの余剰反応度を確実に制御して炉の安全性を確保するため、①スタックロッド停止余裕($k_{\text{eff}} \leq 0.99$)、②制御棒逸出時付加反応度($\Delta k \leq 0.036$)、③燃料要素反応度価値(臨界炉心に1要素を付加してもその反応度が燃料溶融を起さぬこと)、④制御棒駆動速度(連続引抜きをしても炉心に損傷を与えぬこと)、⑤ボイド反応度係数(負であること)、⑥温度係数(運転温度で負であること)等の基準を炉心が満たしていることが要求される。炉の型式により要求量は異なるが基本的な考え方はほぼ同じである。

制御すべき反応度量が20~30%とかなり大きくなるため、多くの場合、この制御は可燃性毒物と制御棒の組合せによってなされている。これら制御要素の反応度価値をどれくらい正確に評価できるかは炉操作の安全性と経済性に大きな影響を与える。

燃料要素が規則的な配列で構成され、他に強い吸収体を含まない体系に対しては、現在の核設計手法は、その反応度を0.5~1%の不確かさの範囲で評価できるようになっている。測定の精度は、臨界近傍ではこれより2~3桁高い。一方、制御用の強い吸収体を含む場合には、炉全体の制御要素の反応度価値評価の不確かさが、計算でも測定でも1~4%に及ぶことがあり、いわば炉全体の反応度評価の不確かさの主要部分が制御要素に対する評価の不確かさに起因しているといえる。

近来、BWRやPWRの商用炉は大型化しつつあり、一方、FBR、ATR、多目的高温ガス炉、KUR-II、弥生炉、NSRR等多種の炉が計画、建設、運転の段階にある。これらの反応度価値評価に対する要求は事情に応じて異なっているが、いずれもその精度向上は、それぞれの炉の目的の完遂と安全性の確保のために大きな寄与をなすものとして期待されている。

Ⅲ. 反応度測定の実況

1. 臨界実験装置、研究炉

現在、国内では7基の臨界実験装置、11基の研究炉が運転中であるが、おのおのの施設においてはなんらかの目的をもって制御棒効果等の反応度価値の測定が行われている。既述の「昭51秋の分科会」指定テーマ「大きい反応度価値の測定」の会場では、現況について12件の発表があった。また当日夜には、同じ題目を議題とした「炉中性子工学」研究専門委員会が開催され

て、約30名の専門家の参加があった。分科会へ応募のあった各施設には予めアンケート用紙が送付されていて、質問事項である○測定の目的、対象と要求精度、○測定方法と原理、○適用性、○反応度の範囲と精度、○時間と労力、○改良の可能性、等について代表者が回答し、熱心な討議がなされた。ほぼ現状の把握と問題点、今後の改良の方向がうかがえたので、アンケートへの回答を第1表にまとめたが、討論の結果も併せて要約すると、

(1) 臨界実験装置では、おおむね新型炉の炉心設計上の要請から、制御棒の価値やボイド係数の測定が行われている。これらの実験は反応度計算手法の実証に資することを主目的としている。最近では、反応度の大きさが1~50\$程度までに拡大されるとともに、精度も5%くらいが要求されるようになって、従来の実験方法では間に合わなくなり、その改良が試みられている。

(2) 研究炉では、従来、炉停止余裕が楽に確保されるように余裕をもって制御棒の本数や反応度価値が設計段階で評価されてきたので、反応度についてあまり精度の高い測定は不要であった。しかし、最近建設されたNSRRおよび弥生炉では、パルス運転のため瞬時的には1~5\$の正の反応度が加わるので、このパルス制御棒等の反応度価値の測定が重要課題となった。その理由は、①原子力安全局による使用前検査において、これらの反応度価値が原子炉設置許可申請書の記載範囲にあることを実験的に証明しなくてはならないこと。②その後の利用運転のために、反応度とパルス出力の関係を明確にしておくことが必要になったことである。

NSRR炉では、制御棒落下法において、制御棒が落下した後の遅発中性子モードの時間的減衰には空間依存性が少ないことに着目して、減衰曲線の形状が臨界からの負の反応度挿入量と1対1に対応することを利用するという現場向きの実際的なアプローチで要請精度を実現した。

(3) 実験方法としては本質的に新しい方法の提案はされていない。従来方法を改良する努力がここ数年顕著であって、実験精度の向上が実現されつつある。未臨界における実験方法が主であって、臨界実験装置ではパルス中性子実験法、制御棒落下法および中性子源増倍法が多く使用されているが、研究炉では制御棒落下法が主となっている。中性子相関法を初め炉雑音

* 反応度の単位は% $\Delta k/k$ とする。

第1表 「大きな反応度値の測定

質 問	施設 (KUCA)	京都大学臨界集合 体実験装置 (SHE)	半均質臨界実験装置 (TCA)	軽水臨界実験装置 (FCA)	高速臨界実験装置
測定対象と要求精度	○制御棒, 水位, ボイド等 ○要求されている精度はどのくらいか。 ○炉設計, 運転のための実験か, 測定法の開発か。	制御棒, 水位, ボイド, 中心架台(A, B 架台) 現在は HFR の設計データをとるのに使われているが, 設計サイドと要求精度を協議している。 高中性子束炉の炉設計および運転のため(一部測定法の開発も開始)	制御棒の反応度の測定 約50\$ 以内で5%以内 高温ガス炉の炉設計, 測定法開発 (炉心領域内での多点観測法)	制御板, 十字型制御棒分布 可燃性毒物, ボイド 設計者からの明確な要求はない。一般的に大きい反応度値について±5~10% Pu 利用 軽水動力炉の炉設計および運転上の必要から行なった。また測定法開発のためにも行なった。	B ₄ C 模擬制御棒反応度値 ±2~3% 「常陽」および「文珠」の炉設計のため信頼できる測定値を供給するため。測定法の研究
測定方法と原理	○どんな方法によったか。 ○特徴は	ベリオド法, 比較法, パルス法, 落下法(積分法), Feynman-α 法, 中性子源増倍法 1. Feynman-α 法を系統的にまとめようとしている。 2. ベリオド法と落下法がよい一致をしている。 3. 中心架台の反応度をパルス法と落下法で比較検討	パルス中性子法) ~50\$ 中性子源増倍法) 制御棒落下法) 極性相関法) 多点観測による空間積分法 測定点数16~40点	1. 水位法(ベリオド法の加算) 2. パルス中性子法 3. ロッド・ドロップ法 1. 水位法: 積分値の大きさに制限(<12~13\$)がある吸収体が軸方向に均一 2. パルス中性子法: 精度は水位法より悪いが実用的積分値の大きさを制限なし 3. ロッド・ドロップ法: さらに精度は悪いが簡便である。	SM 法: ²⁴⁰ Pu からの分布中性子源, 多数個の検出器, 重みつき平均値 $\approx \rho_d \left(\frac{k-1}{k} \right)$ SJ 法: 加速器(コッククロフト)による中性子源 PNS 法: 面積法による解析 IKRD 法: 未臨界-未臨界のロッド・ドロップ 上記各方法による結果の相互比較
適用性	○動力炉で使えるか。	不 明	中性子源増倍法, 制御棒落下法が可能, 加速器 持ち込み可ならばパルス中性子法も可能, 空間積分法も部分的に可能	ロッド・ドロップ法が使用できる。停止中パルス中性子源を圧力容器内に持ち込めれば, パルス中性子法を利用できる。水位法は使用できない。	SM 法および IKRD 法は使用可能
反応度の範囲と精度	○何%Δk/k あるいは何\$まで, どのくらいの精度で測定されていると考えられるか。	ベリオド法 1 回の測定で $1.5 \times 10^{-3} \Delta k/k \pm 1 \times 10^{-3} \Delta k/k$ 他は不明	各測定法について, 約35\$まで5%以内の精度で測定できた。	1. 水位法: 12~13\$以下±2.5% 2. パルス中性子法: 15\$±5% 3. ロッド・ドロップ法: 15\$±20% 精度と正確度は区別して考える必要がある。	-ρ _{max} ~8%Δk/k (14\$) 測定精度 ~±5%
時間と労力	○実験時間は ○生データから反応度を算出する過程は簡単か。 ○計算機による核計算は必要か。	方法によるが約1日 計算機(ミニコン)処理が通常 L, β などの計算	PNS 法~4 hr/case SM 法~2 hr/case RD 法~5 hr/case 複雑 共役関数の数値計算が必要	1. 水位法: 30min 2. パルス中性子法: 60min 3. ロッド・ドロップ法: 30min 簡単 ロッド・ドロップ法は予め付加反応度と中性子束の時間変化の関係を求めておく	SM 法: ~30min その他の方法: ~1hr SM 法はオンライン, その他は磁気テープ使用のオンライン 動特性パラメータの計算, 修正法の補正係数の計算
改良の可能性	○今後どう改良されると見込まれるか。	ベリオド法以外は確立していない。今後各手法の確立に伴い精度および相互比較が可能となる。	1) Hard Ware の改良 測定点の縮小 2) 検出器の位置に対して反応度の補正量が正確に求められる方法を考えていく。	水位法, パルス中性子法は余り改良の余地がない。 ロッド・ドロップ法については目下検討中。 static な方法と kinetic な方法のつなぎが必要。	IKRD 法: ロッド・ドロップの高速化により測定精度をあげる。 オンライン化 修正法の補正係数計算方法を簡単化(変分法等)

の現状」に関するアンケート

NAIG 臨界実験装置 (NCA)	重水臨界実験装置 (DCA)	東大高速中性子源炉 (弥生) Japan Linac Booster (計画)	東大高速中性子源炉 (弥生)	安全性実証炉 (NSRR)	立教大炉
制御棒中の ¹⁰ B減損と 反応度値減少の関係 $d\rho/\rho$ 値は0.1くらい で1~2%くらいの精 度が必要 軽水動力炉の炉設計デ ータを得るのが目的	冷却材ボイド反応度 「ふげん」等の重水減速 沸騰軽水冷却炉の炉設 計のための実験	回転反射体方式による反 応度投入、もしくは減速 材の高速炉心への投入に よる。 $\pm 2 \sim 3\%$ 計画中の JLB の概念設 計で、パルス出力制御系 のためどの程度の測定が 可能かを検討すべく。	「弥生」での Pulse operation 時の印加 即発反応度量 数%以内 炉の使用前検査として 運転ならびに実験を行 いつつある。	制御棒(rod drop)法が 精度が良ければ有効 数%以下 運転上設置に係る規制 遵守確認のため	制御棒(regulating rod $\pm 0.5\phi$ ($\sim \pm 4 \times 10^{-5} dk/k$)) shim rod 数% safety rod 数% 運転のため
臨界水位法と炉周期法 β_L は文献により異な るが $d\rho/\rho$ としている ためほとんど関係ない。 $A(C+\delta)^3$ の A の 制御棒の有無、 B^2 依存 に留意した。 小さな反応度測定に通 ず。	パルス中性子法 1. 即発中性子減衰定数 から β 反応度の導出 は Simmons-King 法による。 2. 生成時間の補正は計 算値を用いて行う。	高速対数増幅の出力を微 分して κ で割り、炉ペリ オドを求める方式および 上記出力と演算回路によ って直接反応度を算出す る。 高速応答により時間的に 変化している反応度の推 定が可能となる。	出力パルス部の positive instantaneous α value を測 定し、反応度に換算す る。 パルス発生方式上、 $\alpha(t)$ は instantaneous profile であり、 stable α としては測 定されない。	落下法(従来法改良) 検出器の配置場所に依 存しない測定法	positive period (regulating rod) ロッド・ドロップ法 (regulating shim safety) 特になし。
使えない。	原理的には使用でき ると思う。	CA、研究炉での各種実 験の他、FBRでのRIA 事故発生時の記録用モニ タとしても利用できる。	通常運転時への適用性 としては一般性はない。	使える(検出器配置場 所により従来法の値が 変わる場合は有効)	わからない。
5\$ くらいまでは β_L に 伴う誤差を除き 2~3 %で求まる。 5\$ 以上になると炉心 が変わる。 (fuel 増加等)	U単領域炉心 -10\$ (-7% dk/k) ま で2%の精度 Pu-U2 領域炉心 -20\$ (-12% dk/k) まで10%の精度	所要範囲は約+1\$, だ だし swing としては+1 ~-4\$ なのでこれを目 標としているが、現在は 約1\$ まで $\pm 5\%$ くらいの 精度で測定できているは ず。	現状までの実績として は 29\$ の prompt super critical state が実現している。	数\$ 以上数\$ 程度まで 数%以下	positive period 法 ~ $\pm 1\phi$ ロッド・ドロップ法 校正係数による 補正後 ~ $\pm 5\phi$
A53のテーマで炉心変 更を除き 3~4 日 単純、ただし A の変化 範囲を確認して使用 一応不要	約 5 hr 簡単 生成時間補正に使用す る β_{eff} 、即発中性子寿 命等の値を求めるため 必要	反応度変化と同時に 不要 簡単 不要	パルス反応度炉心内滞 在時間 420 μsec 内で $\alpha(t)$ 計測は行われる。 簡単 必要なし。	従来と変わらず短時間 1つの生データから数 多くの読み取りをし、 平均する。 -4\$ と減衰曲線を予 め求めておいてデータ と比較	1回データを出すまで 約 15 min 簡単 必要としない。
特になし。	なし	目下検出器の応答速度の 測定を進めているので、 この面での精度向上が考 えられる。回路的には より安定で使いやすいもの に改善したい。	ミニコンによるオンラ イン処理等、測定デー タの後処理の強化を計 画している。	反応度計等の改良に反 映させる。 WIGLE その他空間 動特性を調べ本方法の 精度等の改良を図る。	ロッド・ドロップ法 カウンタ位置ごとの 校正定数をきめ、計算 と比較して対応をつけ る。 ベリオド法 特になし

を利用する方法はあまり普及していない。また、臨界点において既知反応度と未知反応度のバランスをとる置換法も一部では良く使用されているが、大きな反応度への利用は少ない。

2. 動力炉

わが国での商用動力炉の運転は1965年末の東海1号炉(コールドホール型)に始まり、敦賀炉(BWR)、美浜1号炉(PWR)がこれに続いた。その後、BWR5基、PWR5基が追加されている。これらの動力炉における炉心反応度評価および制御要素反応度評価の方法に関しては、それぞれの第1号炉のスタートアップ・テストの報告として、本誌の「特集」あるいは「資料」にすでに紹介されている^{(1)~(4)}。その後、解析上の改良・調整が次々と得られた実測値に基づいて加えられているが、理論的にも実験的にも炉物理的手法上の根本的な変更はない。

炉心余剰反応度と制御棒価値の評価は、PWRでは減速材中のボロン濃度とその反応度係数に基づいてなされており、一方BWRと黒鉛炉とでは、臨界制御棒位置、出力分布測定値、炉心内各領域の核定数を組み合わせた反応度精算によってなされている。直接的に反応度が測定されるわけではないが、評価の相対誤差は数%程度と推定され、安全上の基準は充分な精度と余裕をもって満足されているものと判断されている。

IV. 反応度の定義と測定上の問題点

1. 反応度の定義

増倍係数という概念は、原子炉における中性子増倍の尺度として広く使用されている。Fermiの名著である「原子核物理学」の中性子物理学の章を読むと、生物の増殖過程との類似からか、再生因子(reproduction factor)という言葉が同義語として初期にはあったようである⁽⁵⁾。もし、生物の世代が一定の長さに定まっているのであれば、この再生因子は一つの個体の死と同時に新しく生ずる個体の数として明確に定義される。しかし、実際の現象はもっと複雑なのだから、再生因子は単純には定まらない。中性子の生成・消失過程でも世代の長さにはバラツキがある。そこで世代ごとの生成消失比というよりも、

$$\text{増倍係数} = \frac{\text{単位時間に生成する平均中性子数}}{\text{単位時間に消失する平均中性子数}} \quad (1)$$

として定義するのが妥当であるという考え方にその後まとまったようである⁽⁶⁾。要点は、(1)式の定義は、中性子の密度が時間的に変動している状態に根ざして

増倍係数を定義している。現在では(1)式を基本的な概念の基盤として、精密な増倍係数の定義が定着している。定義には2通りある。時間的に変動する実在中性子束に関して生成消失比を評価する場合、一括して動的増倍係数(dynamic multiplication factor)と呼ばれていて、動的な測定法によって測定される反応度はこの範疇に属する。もう一つは、静的増倍係数(static multiplication factor)と呼ばれる定義である。この定義も(1)式を出発点としているけれども、核分裂当りの中性子生成量を操作して仮想的に臨界状態を出現させた場合の本当は実在しない定常的な中性子束について生成消失比を評価していることに注意しなければならない。その意味で、定義上無理はあるけれども、数値計算技術上は静的増倍係数の方が扱いやすいので、通常計算値はこの定義によるものが多い。静的増倍係数は動的増倍係数と数値的に一致し得るものなのか問題である。また、動的増倍係数は炉周期などの時間固有値の測定から求められることが多いので、両者の関係について次節で述べる。

2. 増倍係数と時間固有値との関係

原子炉の中性子束の時間的挙動を支配する中性子輸送方程式はよく知られているように⁽⁷⁾,

$$\frac{\partial N(\mathbf{r}, v, t)}{\partial t} = \{[P] - [D]\} N(\mathbf{r}, v, t) + S(\mathbf{r}, v) \quad (2)$$

と書ける*。ここで、 N は中性子密度 N と遅発中性子先行核の密度 $C_i (i=1 \sim i_{\max})$ からなる中性子密度ベクトルである。また、 $[P]$ と $[D]$ は生成と消失オペレータで行列で表示され、 $S(\mathbf{r}, v)$ は中性子源である。

この方程式の解は、次の時間固有方程式の動的固有中性子密度 N_q の重畳として表現すると物理的な解釈に都合がよい。

$$\{[P] - [D]\} N_{\mu q}(\mathbf{r}, v) = w_{\mu q} N_{\mu q}(\mathbf{r}, v) \quad (3)$$

添字 μ は空間に関する調和関数を示していて、 $\mu=0$ は空間的に基本モードである。一方、 q は動的なモードを示していて、 $\mu=0$ の場合でも $i_{\max}+1$ 個のモードが存在している。 w_{0q} が小さい順に並べた場合 ($w_{01} < w_{02} < \dots < w_{0(i_{\max}+1)}$)、 $q=1$ の動的モードは即発中性子モードといい、その他を遅発中性子モードと呼んでいるが、なかでも $q=i_{\max}+1$ のモードは時間固有値が最大であるため、最終的にはこのモードが原子炉全

* (2)式のシンボリックな表現における行列 $[P]$ 、 $[D]$ の内容については文献(7)にまとめてある。
(2)~(12)式内の記号についても同文献を参照することが便利である。

体で支配的になるので、パースティングモードと名付けられている。このパースティングモードは中性子スペクトルおよび空間分布に関して、その他の遅発中性子モードとの相異は小さいが、即発中性子モードとはかなり様子がちがっている。即発中性子モードでは v を中性子速度として w_{01}/v が負の吸収項として作用するので、もともと中性子吸収の少ない反射体中で中性子束が盛り上がる傾向が強い。この動的なモード間の中性子束の空間分布のへだたりのことを動的歪曲といっている。これは熱中性子炉では顕著であるが、高速炉ではさして問題にならない。

時間 $t=0$ における中性子および先行核密度 $N(r, v, t=0)$ が与えられれば、その後の変化は、動的固有関数の重畳として次式で表現されることがわかっている⁷⁾。

$$N(r, v, t) = \sum_{q=1}^{i_{\max}+1} \sum_{\mu=0}^{\infty} (N_{\mu q}^+(r, v) N(r, v, t=0)) \cdot N_{\mu q}(r, v) e^{w_{\mu q} t} \quad (4)$$

ここで、 $N_{\mu q}^+(r, v)$ は(3)式の共役関数ベクトルであり、 $(\quad)$ は空間・エネルギー積分を示す内積である。

さて、動的増倍係数は(1)式の基本的な考え方に沿って次式で定義される。

$$\text{動的増倍係数 } k_{W\mu q} = \frac{(W, [P]N_{\mu q})}{(W, [D]N_{\mu q})} \quad (5)$$

ここで、 $W=(W, W_1, W_2, \dots, W_{i_{\max}})$ は中性子および先行核に対する重率である。

したがって、動的増倍係数の定義にはモード (μ, q) の選択、重率 W の選択、さらには空間・エネルギー積分の範囲に関する自由度が存在している。

一方、静的増倍係数 k_s は定常的な中性子輸送方程式の固有値として次式で与えられる。

$$\left\{ \frac{1}{k_s} [P] - [D] \right\} N_s(r, v) = 0 \quad (6)$$

ここで、 $N_s(r, v)$ は静的中性子密度ベクトルである。(6)式では、核分裂による中性子生成数が仮想的に k_s 分の1に変化すれば原子炉が臨界になることが示されていて、もちろん実在しない状態を記述している。(6)式を(1)式流に変形すると、

$$\text{静的増倍係数 } k_s = \frac{([P]N_s(r, v))}{([D]N_s(r, v))} \quad (7)$$

となり、やはり k_s は消失に対する生成の割合を示すことがわかる。

測定量と計算量を比較する都合上、動的増倍係数にまつわる自由度を適当に選べば、動的増倍係数と静的増倍係数に一致させることができないかという願望も当然でてくる。事実それは可能であって、重率に(6)式

の共役関数ベクトル N_s^+ を、積分範囲を反射体を含めて全炉心領域を、かつエネルギー積分領域を $[0, \infty)$ に選定すると、生成・消失中性子数を評価する動的固有中性子密度 $N_{\mu q}$ は、空間的に基本モード $(\mu=0)$ でさえあれば、動的モード q の選択によらず、両方の定義は数値的に一致する⁷⁾。そこで、以後の議論では、単に増倍係数ということにする。

$$k_{W0q}(\text{動的増倍係数}) = k_s(\text{静的増倍係数}) \\ = k(\text{増倍係数}) \quad (8)$$

(ただし、 $W=N_s^+$ 、積分範囲は空間について

炉心全域、エネルギーについて $[0, \infty)$)

増倍係数 k と時間固有値 w_{0q} の2つの物理量は、一般化された逆時間方程式によって結び付けられている。すなわち、(3)式の両辺に重み N_s^+ を作用させて内積をとって整理すると、

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \Lambda_q w_{0q} + \sum_{i=1}^{i_{\max}+1} \frac{w_{0q} \beta_{i \text{ort}q}}{\lambda_i + w_{0q}} \\ \rho &= \frac{k-1}{k} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここに、 $\beta_{i \text{ort}q}$ と λ_i は i 番目の遅発中性子の実効分率と減衰定数であり、 Λ_q は中性子生成時間で次式で与えられる。

$$\beta_{i \text{ort}q} = \gamma_i \beta_i \quad (10)$$

$$\gamma_i = \frac{(c_i^+(r), P \cdot N_q(r, v))}{(N_s^+(r, v), [P]N_q(r, v))} \quad (11)$$

$$\Lambda_q = \frac{(N_s^+(r, v), N_q)}{(N_s^+(r, v), [P]N_q(r, v))} \quad (12)$$

となり、パラメータは厳密にいうと形式的には動的モード q に依存することになる。

最後に、未臨界度の表示になぜ増倍係数 k を使うことが多いかという問題に触れよう。増倍係数 k の代替として即発中性子モードの減衰定数 α 、つまり $-w_{01}$ を未臨界度の尺度として使う提案もあった⁸⁾。 k については、反応度が負で大きいときには測定精度が乏しいという大きな問題点が以前から指摘されていた。これに対して、 α の方は測定精度がはるかに良いこと、(3)式の時間固有方程式の固有値の一つであるという物理的意味も明確であることが提案の論拠である。少なくとも計算値と実験値の比較が容易であるという点では α の方に歩がある。一方、数値計算の立場からいうと、未臨界度が大きくなり α が大きくなると、負の吸収項 $-\alpha/v$ が作用して中性子スペクトルの軟化が激しくなるので、熱中性子群定数の修正が必要になり労力を要する。また、反射体やブランケットが厚い場合、未臨界度が大きくなると α には飽和傾向が出てく

る。さらに、原子炉の制御系の設計では、制御棒価値や燃料の燃焼効果などを含めて一応反応度ですでに統一されており、さして不都合ではない。結局、 α と k を相補的に使っていくのが現実的な路線であろう。

3. 測定方法の問題点

(1) 炉物理的問題点

正の反応度に対してはもっぱら炉周期法が適用されているが、従来は1回の測定が数10秒以下に限られていたのとくに問題はなかった。最近では「弥生」とNSRRにおいて、即発臨界の出力カーブから正の反応度を推定する試行がなされている。「弥生」では、ブランケット・遮蔽体からの反射中性子が実効的に遅発中性子のように作用するのが原因しているのか、置換法による反応度値と系統的な食い違いが生じている。NSRRでは、パルス出力の放出に伴い炉心部の温度が上昇して反応度に負のフィードバックがかかるので、この効果の考慮が必要になる。

負の反応度効果に対して未臨界における実験方法について共通して問題になっている事由は、測定結果が実験方法と検出器位置の両方に依存していて、しかもその度合は反応度が大きくなるほど強いことである。この事情は(4)式を使って実験方法の解析を行うと理解しうる⁹⁾。これまでは、1点炉モデルによって測定原理が導かれていて、第2表(後出)の原理式がもっぱら使用されてきた。ところが、実際の測定量にはかなり多くの空間分布を異にする動的固有中性子密度とそれらの高調波に起因するものが混入している。測定精度の改善にはこの動的歪曲と高調波の問題を解決することが一番中心的課題となっている。

反応度の正負にかかわらず、置換法も有効な反応度測定方法である。とくに測定手段について制約のある動力炉や大型研究炉に適している。この方法の特徴は制御棒、燃料棒、水位、冷却材圧力、可燃性毒物濃度等が反応度的に校正し合う点にあるが、未知のこれから測ろうとする反応度の投入によって基準とする既知の反応度値が変ってしまう場合があるから、吟味が必要である。

(2) 核データに関する問題点

(9)式の逆時間方程式には、 β_{eff} , λ_i および A_i というパラメータが入っているため、当然これらの誤差は反応度の精度に影響してくる。実験では、炉周期法に限らずどんな方法でも β_{eff} を単位として反応度の測定が行われるのに、主要な核分裂性物質について β には約5%の誤差が入っているといわれる。遅発中性子に関する核データは Keepin 著の “Physics of

Nuclear Reactor” によくまとめられているが¹⁰⁾、最新の評価済みデータは ENDF/B-IV に収録されている。Keepin 以後の改良点は「本誌」の総説⁽¹¹⁾にまとめられているが、主なものは、① β_i は入射中性子エネルギーにあまり依存しないとされていたが、実際は数 MeV から急激に減少すること、② ^{238}U の β は従来の値よりかなり大きいことが挙げられる。

次に(11)式の γ_i の誤差であるが、U と Pu では β_i の値が大幅に違うので、両者の炉心内における核分裂の割合が重率とともに正確に把握される必要がある。高速炉では ^{238}U や ^{240}Pu も核分裂するのでデータの範囲が広がる。また、重水減速沸騰軽水冷却炉や重水を減速材とする高中性子束研究炉では、燃料による硬い γ 線に対する遮蔽効果により、光中性子の発生が減少することを考慮しなければならない⁽¹²⁾。また、反応度が数10\$にも達しても γ_i は臨界の場合と同じであるかの吟味が必要であろう。最後に、逆時間方程式の構成そのものに対する問題がある。高速炉では、遅発中性子先行核の中性子放出過程をより厳密に考慮して逆時間方程式を修正する試行がなされている⁽¹³⁾。同様に、小型の炉心ではブランケット・遮蔽体からの中性子の反射をどう組み入れるかも課題となっている。

V. 反応度測定法改善への努力

大きな負の反応度効果の測定精度向上という要請に対処するため、従来の各種測定方法の問題点が検討され、測定対象となる炉型に応じて、測定方法あるいは測定データ解析方法の改良や反応度変化の起るメカニズムの解明へ努力が払われている。本章では、これらの問題に関連して国内で最近臨界実験装置を用いて行われている2, 3の研究を紹介する。

1. 空間積分法

未臨界体系の反応度を1点炉モデルに基づいて測定する場合、実験方法や検出器位置によって測定結果がしばしば異なる。この問題を解決し、体系の状態に固有な反応度を求める方法として空間積分法による各測定法の改良が提案され⁹⁾⁽¹⁴⁾、平均質臨界実験装置 SHE を用いた実験によりその有効性が示された⁽¹⁵⁾。

空間積分法では、体系の $\nu\Sigma_f$ に等しい反応断面積を持つ中性子検出器を用いて測定した応答の空間分布を、体系の静的な核分裂中性子のインポートランス((6)式の共役関数ベクトル N_s^+ の第1成分である静的共役密度と核分裂スペクトルとの積のエネルギー積分)を重みとして、体系全体にわたって積分する。この積分操作により、測定データに含まれる空間的な高調波

成分や動的歪曲による効果が消去される。その結果、第2表にまとめたように、従来の1点炉モデルの場合と相似な評価式を使って反応度を正確に求めることができる。

第2表 空間積分法による反応度評価式

測定方法	1 点 炉	空間積分法 ⁽⁴⁾
パルス中性子法 ⁽¹⁾ (面積法)	$\frac{\rho}{\beta_{eff}} = -\frac{A_p(r)}{A_d(r)}$	$\frac{\rho}{\beta_{eff}} = -\frac{\bar{A}_p}{\bar{A}_d}$
中性子源増倍法 ⁽²⁾	$\rho = -\frac{S}{A_t(r)}$	$\rho = -\frac{\bar{S}}{\bar{A}_t}$
制御棒落下法 ⁽³⁾ (中性子源引抜法)	$\frac{\rho}{\beta_{eff}} = -\frac{A_c(r)}{\lambda A_r(r)}$	$\frac{\rho}{\beta_{eff}} = -\frac{\bar{A}_c}{\lambda \bar{A}_r}$

注(1) $A_p(r)$ と $A_d(r)$ はパルス中性子投入後、即発中性子モードおよび遅発中性子モードで減衰する核分裂中性子数の曲線下の面積

(2) $A_t(r)$ は炉心における核分裂中性子数、 $S(r, v)$ は中性子源の強度であり、 $S = \int_0^\infty S(r, v) dv$

(3) $A_c(r)$ と $A_r(r)$ は制御棒落下前の核分裂中性子生成率と落下後の核分裂中性子数

(4) 空間積分法の欄の各量の上に付した一は、 $\int_0^\infty N_s^+(r, v) f_s(v) dv$ を重みとする空間積分量を示す。
ここに、 $N_s^+(r, v)$: 静的共役関数
 $f_s(v)$: 核分裂スペクトル

この方法を黒鉛減速20%濃縮U平均質体系(SHE-T1炉心、 $C/^{235}\text{U}=6624$, $C/^{232}\text{Th}=2560$, $\beta_{eff}=0.0067$)における多数本制御棒反応度効果の測定に適用した結果を第3表に示す。各点の反応度観測値は、第1図に示すように測定位置に強く依存するが、空間積分を行うと各測定法間の系統的な相違はほとんど消失し、約-35\$までは相違が5%以内である。

高速炉系では、検出器の中性子検出効率が低いため大型検出器を必要とし、炉心内に多数の検出器を設置

第3表 多数本の制御棒の挿入された SHE-T1 炉心の負の反応度の空間積分法による測定結果

実験用制御棒の配置	測定値 (-\$)					
	パルス中性子法			空間積分中性子源増倍法	空間積分制御棒落下法	燃料棒置換法
	Sim-mons-King 法	修正 Sim-mons-King 法	空間積分面積法			
0C (なし)	0.65	0.86	0.80	—	—	0.81 ±0.02
1C (中心に1本挿入)	11.6	17.6	17.8	16.4	—	—
2C (2本挿入)	18.8	34.0	35.7	33.5	—	—
3C (3本挿入)	22.7	47.8	50.1	41.0	—	—
6S (安全棒6本挿入)	14.0	—	13.8	14.3	12.9	—

† 1\$ = 0.67% $\Delta k/k$

© 実験用制御棒挿入位置

中性子検出器は集合体密着面から40cm離れた面上および、さらに40cm離れた面上に置かれた。()内の数値は後者の場合を示す。また、この炉心の反応度-52.1\$は以上の16個所において観測された中性子検出器の応答から空間積分法によって定められた。

第1図 SHE-T1 炉心におけるパルス中性子法(面積法)による負の反応度測定結果の検出器位置による依存性の百分率表示

する空間を確保することがむずかしい。この困難を避けるため高調波の影響を検出器の実効的な中性子検出効率等の変化としてとらえ、1点での反応度観測値を空間高調波の影響に対して修正することによって反応度を正確に求める方法が導かれた⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。高速炉臨界実験装置 FCA を用いた高速原型炉級の模擬実験体系で B_4C 吸収体の挿入による約-17\$(-10% $\Delta k/k$)までの反応度をブランケット内の数点で測定した結果、この修正法を用いることにより反応度測定値の空間依存性や測定法間の相違は消え、各測定値は5%以内で一致することが確認された⁽¹⁶⁾⁽¹⁸⁾。

以上のように、臨界実験装置の場合には、大きな負の反応度に関しても精度良い測定が期待できるようになった。これらの改良法は、いずれも測定データの処理に静的共役密度等の計算を必要とする。したがって、実験値の信頼性を損うことなく、いかに計算を簡単化しうかが今後これらの方法の適用範囲を広げてゆく場合の鍵になると思われる。

2. Inverse Kinetics Rod Drop 法

Inverse Kinetics Rod Drop (IKRD)法は、ある一つの未臨界状態から他の未臨界状態へ反応度がステップ状に変化したときの中性子計数率の変化から系の反応度を求めようとするものである。(2)式について中性子エネルギーや空間について積分を行なって得られる1点炉の動特性方程式

$$\left. \begin{aligned} \dot{N} &= \frac{\rho - \beta_{\text{eff}}}{\Lambda} N + \sum_i \lambda_i C_i + S \\ \dot{C}_i &= \frac{\beta_{i\text{eff}}}{\Lambda} N - \lambda_i C_i \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

において、中性子密度 $N(t)$ の時間変化を測定しておけば、制御棒落下後は体系の反応度が一定であるから、最小2乗法により反応度 ρ (および中性子源強度 S) が決定できる。

高速原型炉の模擬実験体系 FCA VII-1 集合体において IKRD 法による反応度測定が行われ、測定可能な未臨界度の大きさや反応度観測値の検出器位置依存性が検討された⁽¹⁹⁾。実験体系の断面図を第2図に示す。

T1, D1 : Inner core zone

T2, D2, D2* : Outer core zone

第2図 FCA VII-1/90B-10D 集合体断面図

外部中性子源としてPu燃料領域(T1, T2およびD2)の自発核分裂中性子を利用し、制御棒の落下は炉心中心O点で行われた。中性子検出器は、ブランケット部(Det. I, II および III, 炉心中心から各検出器までの距離72cm)と炉心から約6m離れた体系外(Det. VI)とに設置された。

各検出器による反応度観測値を中性子源増倍法の結果と比較して第4表に示す。NOBはB₄C吸収棒のない体系での中心制御棒落下、1BOおよび1BIはB点にB₄C吸収棒が入った状態で中心制御棒の落下ないしは引抜きを行なった結果である。測定可能な未臨界度の深さは制御棒落下前の反応度に強く依存するが、中性子源増倍法に比べて体系内にあるB₄C吸収棒や外部中性子源との位置関係が弱く、検出器位置による反応度観測値の変化は小さい。1BOや1BIでは測定誤差が大きい、各検出器の測定値のバラツキが大きくないことから、測定装置の改良により-5\$程度まで

第4表 IKRD法と中性子源増倍法による反応度観測値

体 系	検出器	反応度観測値 (-\$^{†††})	
		IKRD 法	中性子源増倍法
NOB (-0.5\$) [†]	I	2.73±0.07	2.81±0.01
	II	2.67±0.05	2.58±0.01
	III	2.80±0.04	2.92±0.06
	IV	2.70±0.05	2.65±0.01
1BO (-1.8\$) [†]	I	3.91±0.80	3.94±0.01
	II	3.86±0.58	3.64±0.01
	III	4.05±0.29	5.92±0.12
	IV	4.12±0.58	3.92±0.01
1BI (-4\$) ^{††}	I	1.82±0.30	1.78±0.01
	II	1.89±0.18	1.77±0.01

† 制御棒落下前の体系の反応度, †† 制御棒引抜き前の体系の反応度, ††† 1\$=0.56% dk/k

は数%の誤差で測定できると考えられている。

IKRD法は各原子炉に特有の装置を用いて実験が行え、しかも臨界になり得ないような体系でも反応度が測定できる。本方法は未臨界度の比較的小さい体系の反応度測定や、中性子源増倍法における基準体系の反応度校正に有望な方法と考えられ、測定精度や限界などをさらに検討する必要があると思われる。

3. 固有関数の歪みの解析

軽水臨界実験装置 TCA では、第3図に示すような吸収体入りの単純な1次元体系を用いて、軽水格子系における局所的吸収体の挿入による反応度変化の機構が調べられている⁽²⁰⁾。熱中性子炉系では、吸収体の挿入により熱中性子が選択的に吸収されるため、熱中性子束分布は吸収体のごく近傍で急激に歪むが、熱外中性子束は吸収体挿入前の基本モード分布から大きくは変化しないという考えが一般的であった。しかし、一連の実験から、①熱中性子束のみならず熱外中性子

第3図 軽水格子1次元実験体系

束の歪みも吸収体の近傍に止まらず、ゆるやかに炉心全体に及ぶこと、②吸収体が局所的に挿入されても炉内のスペクトルは吸収体の近傍、数cmを除いて変化せず、その結果 k_{∞} , M^2 , l 等の格子定数は実効的にほとんど変化しないこと、が明らかになった。

スペクトル変化を伴わない場合の反応度効果は洩れの変化によって起り、中性子束が波動方程式 $\nabla^2 \phi + B^2 \phi = 0$ に従うときはバックリングの変化として取り扱える。この場合、吸収板挿入による x 方向のバックリング変化を反応度に換算する関係式は、水位法の場合と同様に

$$\rho(\%) = -\frac{M^2}{\beta_{\text{eff}} k_{\infty}} (\mu^2_{x0} - \mu^2_x) \quad (14)$$

で与えられる。ここに、 μ^2_{x0} は吸収板のない臨界体系の x 方向のバックリングである。

種々の吸収板を挿入した体系における出力分布の測定から x 方向のバックリングを求め、(14)式を用いて、第5表に示す反応度を得た。この値はパルス実験の即発中性子減衰定数 α から Simmons-King 法により求めた反応度と良く一致している。

第5表 固有関数の歪み解析とパルス中性子法による反応度測定結果

吸 収 体†	固有関数の歪み		パルス中性子法 $-\rho(\%)^{**}$
	$\Delta\mu_x/\mu_{x0}$	$-\rho(\%)^{**}$	
C0	0	0	0
C1	0.145	3.7	3.3
C3	0.240	6.4	6.5
C5	0.370	10.4	9.4
J0	0.195	5.1	6.2
J3	0.360	10.1	10.4
J6	0.510	15.3	16.2

† C型はCd, J型はBの吸収体, 形状は同じであるが, CdやBの濃度が異なっている。

** $1\% = 0.360\% \Delta k/k$

以上のことから、軽水格子系では -15% 程度の反応度値をもつ局所的吸収体を挿入しても k_{∞} や l などの格子定数はほとんど変化せず、吸収体の反応度値はバックリングの変化による洩れの増大として取り扱えることが判明した。このことから、 UO_2 燃料の代わりに PuO_2 - UO_2 燃料を用いる場合など、格子の違いによる制御棒反応度値の相異に関する議論が簡単化できると考えられ、現在この問題が追究されている。

Ⅶ. む す び

反応度の測定に関してはすでにいくつもの手法が提案されてきている。それらはほとんどが1点炉近似動

特性モデルに基礎を置いている。しかし、例えば吸収の強い制御棒のように体系を大きく乱すものの反応度値を直接的に測定しようとする場合には、1点炉モデルの適用性に原理的にも測定手法上にも困難が生じる。他にも同様な問題がしばしば生じて来た。この困難を直接的に解決する一つの方向は、測定手法かあるいはその原理とするモデルを多点化ないし空間化することにある。

このような見通しのもとに各種の臨界実験装置を用いて実験的努力が重ねられた。この結果、1点炉モデルに基づく反応度測定値の意味が明確にされるとともに、大きい負反応度の直接的測定がかなり良い精度でなされるようになって来た。今後は、臨界実験で得られた知見を、実用炉や新型炉にどのように適用するかに関心の展開があらう。

実用炉での反応度評価は、臨界実験装置での方向とは異なった考え方がとられてきている。すなわち、オペレータとしての主な関心は、前述の安全基準が十分な余裕をもって満足されることを確認することと、運転状態の炉に対する反応度精算に矛盾がないことを確認することにある。後者は、炉内の種々の反応度成分 Δk_i の推定値の総和が十分にゼロに近いことで確かめられ、これによっておのおの Δk_i の推定値の妥当性も保証されようと考えられている。これまでのところ、おのおの Δk_i の精度は強い関心の対象にはなっていないし、また実用炉の通常の計装では確認が不可能である。しかし、今後、燃焼と運転の最適化への要求が強まるにつれて、おのおの Δk_i 評価の精度向上への要求も強くなることが予想される。

新型炉では、これまでの実用炉の実績と臨界実験での成果をどのように採り入れて行くかが重要であろう。弥生やNSRRのようなパルス炉の出現により大きい正の反応度の測定が研究対象の範囲に入ってきた。このための速い計測器の開発に力が注がれ、すでに大きな進展が示されている。この面でも、今後の新しい進展が期待される。

なお、第1表作成に当っては、本会「炉中性子工学」研究専門委員会の反応度測定に関するアンケートを参考にしました。ご協力いただいた方々に御礼申し上げます。

— 参 考 文 献 —

- (1) 武田充司: 本誌, 8[11], 584~591 (1966).
- (2) 武田充司, 加賀山正: 同 上, 11[4], 222~229 (1969).
- (3) 今井隆吉, 他: 同 上, 12[6], 331~344 (1970).

- (4) 藤井哲博, 他: 同上, 13[3], 147~159 (1971).
 (5) FERMI, E.: "原子核物理学" (小林稔訳), (1959), 吉岡書店.
 (6) WEINBERG, A.M., WIGNER, E.P.: "The Physical Theory of Neutron Chain Reactors", (1958), Univ. of Chicago Press.
 (7) GOZANI, T.: *Nukleonik*, 5[2], 55~62 (1962).
 (8) KANEKO, Y., SUMITA, K.: *J. Nucl. Sci. Technol.*, 4[8], 400~407 (1967).
 (9) KANEKO, Y.: *ibid.*, 12[7], 402~412 (1975).
 (10) KEEPIN, G.R.: "Physics of Nuclear Kinetics", (1965), Addison-Wesely Publ. Co., Inc.
 (11) 竹腰英子, 黒井英雄, 五十嵐信一: 本誌, 14[7], 340~356 (1972).
 (12) KANEKO, Y.: *J. Nucl. Sci. Technol.*, 8[1], 34~40 (1971).
 (13) ONEGA, R.J.: *Nucl. Sci. Eng.*, 43, 345~348 (1971).
 (14) KOSALY, G., FISHER, A.: *J. Nucl. Energy*, 26, 17~26 (1971).
 (15) KANEKO, Y., et al.: Measurement of multiple control rods reactivity worths in semi-homogeneous critical assembly, Specialist Meeting on Control Rod Measurement Technique, Cadarache, April, (1976).
 (16) MIZOO, N., et al.: Reactivity measurement on far-subcritical fast systems, 同上.
 (17) ACKERMANN, Jr. N.J.: *Nucl. Safety*, 12, 538~590 (1971).
 (18) 溝尾宣辰, 他: 私 信, (1976).
 (19) 溝尾宣辰, 中野正文: 本会昭51分科会予稿集(I), A47, (1976).
 (20) 須崎武則, 他: 同上, A54.

○第13回熱測定討論会○

主催 日本熱測定学会, 共催 本会, 他
 と き 12月1日(木)~3日(土)
 ところ 全ラ連会館5階ホール(東京都文京区湯島3-6-1)
 主 題 1. 熱測定および温度測定 2. 熱分析
 申込締切 8月31日(水), 要旨締切 9月30日(金)
 題名, 氏名(連名の場合は発表者に○印), 勤務先, 連絡先を明記し, 約200字のアブストラクト(研究の目的と結果の概要)を添えて申し込む。講演時間は討論5分を含めて1件(A)20分, (B)15分とするので, 申込みの際に A, B の区別を明記する。(討論主題に合致しないときはお断りすることがある。)所定の原稿用紙で約3,000字(図表を含む)の要旨を送付する。
 申込先 (〒113) 東京都文京区湯島1-5-31 第1金森ビル内
 日本熱測定学会 (Tel. 03-815-3988)

☆第20回自動制御連合講演会☆

主催 計測自動制御学会, 他 協賛 本会, 他
 会 期 12月5日(月)~7日(水)
 会 場 国立教育会館
 (〒100 東京都千代田区霞ヶ関3-2-3。Tel. 03-580-1251)
 申込方法 所定の申込書・講演原稿に 講演申込金2,500円(参加費, 別刷代金)を添えて同時に下記宛へ申し込む。
 (本年より申込方法が変更)
 予稿は2頁で図・表・写真を含めて和文で2,800字以内。
 講演内容 既発表のものでも差支えないがなるべく最近の研究で学術的なものが望ましい。
 講演時間 討論とも約15分
 申込・原稿締切 8月31日(水) 必着
 問合せ・送付先 (〒105) 東京都港区芝罘平町39
 森ビル琴平アネックス内
 計測自動制御学会 (Tel. 03-502-1917)

☆溶 融 塩 増 殖 炉☆

—MSBR 研究の進歩と開発への展望—

「溶融塩増殖炉」研究専門委員会成果報告書

6月下旬発行予定 申込み受付中(限定出版)

◇B5判 タイポオフセット印刷, 約300ページ 予価 3,000円(会員特価 2,000円)・送料別◇
 (内容の詳細は前号 p. 353 を参照願います)