1 解説

最近の結合炉動特性研究

(名古屋大学)仁 科 浩二郎, (京都大学)森 島 信 弘,

(大阪大学)山 田 澄, (京都大学原子炉実験所)代 谷 誠 治

この分野は1960年代に入って本格的活動が始まり、それを反映して1967年には、米国 Texas A & M大学で専門家会議(同大学とANSの共催)が開かれた。その後も地味ながら定常的活動が続いて来たが、最近わが国では再び多くの研究者の関心と努力が集まっている。その活動の変遷をみると、1960年代の大型炉導入期から、1970年代の大型炉運転経験蓄積期へという発電炉上の推移にほぼ対応している。すなわち、初期の結合炉モデルによって動特性上の各種結論を導いたのが1960年代前半の主流とすれば、最近はこのモデルに現れる諸定数の理論的予想、雑音法による解析、安定・制御理論発展の適用などが盛んである。これらの発展は、大型炉中性子束の時間変動、燃焼などを、現在よりも物理的見通しに基づいて予想、解釈する可能性を整えつつある。

I. ま え が き

2個以上の炉心が離れて存在し、おのおの単独では臨界となり得ないが^{*}、全体が臨界体系として機能する場合、この体系を結合炉と呼ぶ。これら複数炉心は、①実際に減速材中に点在する場合⁽¹⁾⁽²⁾と、②大型原子炉を燃料を含む複数個の領域に分割して、おのおのを上述の意味の炉心とみなす場合⁽³⁾⁻⁽⁵⁾とがある。②の見方は、小型炉で使いなれた1点炉近似解析を大型発電炉に用いようとする自然な拡張の方向であろう。①の解析も②の方向に類推が効くとすれば、結合炉といっても決して特殊な形態の炉に限られた問題ではなく、広い応用をもつテーマのはずである。

このような結合炉の動特性解析は、古くはAvery⁽⁶⁾, Baldwin⁽⁷⁾の多点炉方程式の提唱にさかのぼり、「結合炉専門家会議」も1967年に米国 Texas A & M大学で同大学とANSの共催により開かれた⁽⁸⁾。その発表者にはわが国の若林二郎、星野 力、川合敏雄、駒田正興、大塚益比古、斎藤慶一らの名前も見える。実に多様な角度からの考察が発表され、このProceeding⁽⁹⁾は現在でも種々の概念を出発点から探る上で貴重である。

この会議を除くと、この分野は特に流行というほどの集中的活動はない反面、根強く定常的活動が続いて来た⁽¹⁾⁽⁹⁾⁻⁽²⁰⁾。初期のパイル・オッシュレータ法による周波数応答決定⁽²⁾と対照的に、最近はパルス法⁽¹⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁸⁾⁽²⁰⁾、雑音法⁽⁹⁾⁻⁽¹⁵⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁹⁾の適用が目立つ。文献⁽²¹⁾には雑音法についての詳しい文献リストがある。

さてわが国では、最近当分野の研究に2つの流れがある。第1は、京都大学原子炉実験所2号炉(KUR-2)計画が2炉心配置を想定していることを契機として、同実験所臨界集合体(KUCA)および同集合体専門研究会の周辺で行われている活動である。すなわち上記

KUR-2計画は、高い熱中性子束を広い空間領域にわたって得ようという意図から、軽水減速、軽水冷却の炉心2個を、反射体としての重水中に距離を置いて配置するという方針を採用している。そこでこれを模擬する動特性実験として、KUCAの3架台の1つに2分割炉心が組まれ、京大原子炉実験所職員と協力大学^{**}によって測定が行われ、設計への参考データを提供している。

一方理論面での活動では、KUR-2設計に直接には従事しない所外の上記専門研究会委員が、基礎の立場からARGONAUT炉など他所の結合炉までを対象に含め、各自の研究分野に合った解析法でこの問題に取り組んでいる。また、KUR-2の暫定的仕様を用いての制御・安定性上の試算もなされた。以上の成果は、過去3年間の本学会「炉中性子工学」研究専門委員会、および前述のKUCA専研において発表、討議された。

第2の流れは、KUCAの活動とは独立に、最近の制御理論および最適理論から結合炉の一般論を展開したものである。ちょうど第1の流れと時を同じくして、「炉中性子工学」研究専門委および「本誌」または本会「欧文誌」に発表された。

本稿では、これら活動のレビューを行いつつ最近の動向を海外も含めて解説する。著者ら4人は上記第1の流れに属するため、そちらの活動の考察が中心とならざるを得ないが、それ以外についても誌面の許す限

Recent Researches in Coupled-Core Kinetics, Kojiro NISHINA, Nobuhiro MORISHIMA, Sumasu YAMADA, Seiji SHIROYA.

(1978年10月11日受理)

^{*} 単独で臨界になり得る系を扱うこともあるが、ここではこのように規定しよう。

^{**} 阪大、名大、京大、東海大、武蔵工大、東北大、東工大、九大、北大、東大、立教大など。

り考察したい。この分野では前述の1967年の会議以来、活動メンバーがほとんど入れ替っている。本稿を機会にこれらいくつかの流れの間に意見交流が起り、思いもかけぬ盲点が除かれ、互いの現状認識がより広く、深くなるよう願うものである。

II. 動特性方程式導出上の発展

簡単に過去のレビューを行なったのち最近の活動に言及しよう。Avery⁽⁶⁾は次の形の方程式を提唱した。

$$l_{in}(dS_{in}/dt) = k_{1n}(1-\beta)(S_{n1}+S_{n2}) - S_{in} + k_{1n}\sum_i \lambda_i C_{ni}, \quad (n=1, 2) \quad (1)$$

ここで、 S_{mn} は炉心 n に生じた中性子からの寄与により炉心 m に生じた次世代の核分裂中性子総数である。この寄与の強さを k_{mn} という結合係数で示し、またこの寄与過程の所要時間(平均寿命)を l_{mn} とする。 C_{ni} は炉心 n の中の第 i 群遅発中性子総数である。

一方 Baldwin⁽⁷⁾は中性子束を基盤として式をたて、

$$DP^2\phi_1 - \sum_{a1}\phi_1 + (1-\beta)k_1\sum_{a1}\phi_1 + \sum_i \lambda_i C_{1i} + \varepsilon_1\bar{\phi}_2(t-\tau) = (1/v)(\partial\phi_1/\partial t) \quad (2)$$

とした。結合の項は左辺第5項で、遅れ時間 τ , 結合係数 ε_1 , 炉心2の平均中性子束 $\bar{\phi}_2$ を用いている。以上いずれも炉心が2個ある場合の、炉心1の量についての式である。炉心2についても同様の式が書かれる。

これらの論文は、厳密な導出よりも物理的思考に基づいており、(1),(2)式の仮説によって得られる結論を示したと見るべきだろう。以後この性格の論文が多い。

これに対して駒田⁽²²⁾は、(1)式を基礎方程式から導出することを試み、その近似の妥当性と限界を示した。また川合⁽²³⁾は、反応度を基盤に結合を表現し、そこに現れる結合係数 A_{1-1} , A_{1-2} がそれぞれ片側炉心1, 2の臨界未満度にほかならず、しかも各炉心体積にわたる ϕ^2 の積分 R_1, R_2 によって $A_{1-j} = R_1\Delta/(R_1+R_2)$ と与えられるとした。 Δ は全体系の第1高調波に対する臨界未満度である。文献(6),(7)以後に現れたほとんどの論文では、結合係数、平均寿命が「炉の建設後に実験と理論が合うように adjust して決めるべき量」という性格を持っているが、以上の3論文、特に文献(2),(23)は近似ながらこれらのパラメータの導出および計算法を与えている点注目すべきである。

以下述べる最近の2方法の特徴は、まさにこの点を別の方法でさらに進めた点にある。すなわち、これらパラメータの炉物理量による表現、物理的意味がさらに具体性をもって与えられた。そこで大型炉を結合炉

として記述するにはどんな量で特質づけるべきかが明らかになって来た。

1. 減速材領域応答関数法による導出⁽²⁴⁾

2炉心が減速材領域を間にはさんで相対し、両端に反射体領域を具えている第1図の問題を考えよう。方法としては、炉心部と減速材領域で異なるものを採り、前者ではほとんど変数分離に近い扱いをする。すなわち、領域1, 2に入出入りする中性子部分流 j^* が、各炉心内のインポートランス総量 $P_1(x)$, $P_2(x)$ に比例して変動するとする。

領域1, 2は炉心、領域3は中央減速材領域、領域4, 5は反射体

第1図 1次元5領域結合炉系

一方減速材領域3, 4, 5については、1側面から入射したパルス流に対する反射と透過の応答関数 $G_{ir}(t)$ ($i=3, 4, 5$), $G_{is}(t)$ を求め、これと上述の j^* を領域境界で結びつける。結果として $P_1(x)$, $P_2(x)$ の従う方程式が導出され、伝達関数 $\delta\bar{P}_1(s)/\delta\bar{\rho}_1(s)$ などが求まる ($\delta\bar{\rho}_1(x)$ は炉心1に対する反応度入力)。

以上のような簡便なモデルにもかかわらず、いままですら実験との一致はかなり良く、加えて各種パラメータの性格を以下のように与えることができた。まず片側炉心1の反応度 ρ_1 は、全体系の反応度 ρ_0 をもとに $\rho_1 = \rho_0 - \delta_1$ (領域1からのインポートランス流出) と表わせる。 δ_1 は $\bar{G}_{3r}(i\omega)$, $\bar{G}_{4r}(i\omega)$ を含むので、 ρ_1 も周波数 ω に依存する。全体系が臨界($\rho_0=0$)のときは δ_1 が炉心1の臨界未満度を表わすが、これは低周波数では、周波数依存の結合係数 $T(\omega)$ に近似的に等しく、既述の川合⁽²³⁾の結合係数に関する主張*はこの意味で正しい。この $T(\omega)$ は $\bar{G}_{3r}(i\omega)$ に比例し、低周波数では定数としてよい。以上の各近似は、ARGONAUT 炉では少なくとも数 Hz までは妥当である。さらに、各炉心固有の平均寿命 l_1, l_2 の表現も得られ、インポートランスによって解釈がつけられた。

応答関数の概念自体は以前から存在する⁽²³⁾⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾。上述の方法の特徴は、応答関数法を5領域すべてに適用することを意識的に避けて、変動が伝播という形を

* 類似の主張が文献(7)にもある。

とる減速材領域のみで採用し、記述方式を従来の2点炉方程式と融合させた点である。

このモデルの限界は、2点炉方式の記述が高周波数で不適なことである。しかし、結合係数、臨界未満度を定数としていたモデルに比べれば適用限界は広げられた。そして一方、2点炉モデルの限界周波数は、中性子波的考察で推測することができる⁽²⁴⁾。

2. 領域間応答関数法による導出

この方法は雑音解析に伴って発展した。雑音に限らず用いることができるが、このような経緯のため、次章に詳しく述べる。(仁科浩二郎)

Ⅲ. 炉雑音法に関する発展

1. 最近の動向

前述のように、過去約10年間の研究活動には中性子雑音の利用とその理論解析が目立つ。これは、UTR-10⁽¹¹⁾およびARK⁽¹⁰⁾での2検出器相関法による相互相関パワー・スペクトル密度(CPSD)の測定結果が大きな刺激となっている。すなわち、CPSD実数部を折点周波数よりもかなり高い周波数領域まで測定した結果、周波数の増加とともにその符号が正から負に転じるふるまい(sink frequency behavior, 以後 SFB)が観測された。特にARKではtwo-slab coreとring coreの2種類の炉心配置について実験した結果、前者の配置ではSFBが観測されたのに対して、後者では振幅の単調な減少のみが記録された。最近では、FMRB炉での観測例がある⁽¹⁷⁾⁽¹⁹⁾。また、KUCAでは単一炉心と2分割炉心について燃料領域内に2検出器を置いてCPSD測定が行われ、2分割炉心での結果にはSFBの一部が観測されている⁽²⁷⁾。

ところで、ARKでの実験結果が発表されて以来現在まで、理論解析面からの検討は大別すると次の2つの方法で進められている。1つはARKを2群1次元モデルで近似し、CPSDの2点観測による空間依存性を空間モード展開法を利用して表現し数値解析したもの⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁵⁾⁽²⁸⁾で、2つの観測点の位置と距離あるいは結合領域に用いる減速材の種類を変えた場合のCPSDへの感度に注目している。その結果、SFBは非常にsensitiveであると報告されているが、同時に空間高次モードの評価の難しさも示している。

もう1つはノード法による解析⁽¹¹⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾で、SFBを結合係数あるいは結合による平均遅れ時間の決定に利用することを目的としている。その内容は、炉心部分と反射体部分での中性子密度のゆらぎが従う方程式をそれぞれ1点炉近似で表わし、この動特性方程式を

利用してCPSDの関数形を求め、実験結果とのfittingから結合係数等の値を決めようとするものである。この方法によれば、結合効果を具体的に表現して解析できるという利点もあるが、反面、結合による遅れ時間が取りうる値の分布はあらかじめなんらかの方法で決めておく必要がある。また、SFBがすべて結合効果に起因するという保証はまだ得られていない。

なお、結合係数等を実験的に決定しようとする試みはパルス中性子法によっても行われている。中性子束の時間的減衰を測定する場合⁽¹⁸⁾⁽³⁰⁾と、2つの炉心間のパルス伝播を観測する場合⁽¹⁴⁾⁽¹⁶⁾⁽²⁰⁾⁽³¹⁾とがある。実験結果の解析は、炉心部分での中性子密度の時間変化を2点炉モデルで近似して行なっている⁽¹⁶⁾⁽¹⁸⁾⁽²⁰⁾⁽³⁰⁾。また、パルス法以外にも相関関数の測定⁽¹⁴⁾や伝達関数の測定⁽³²⁾が利用されている。

2. 領域間応答関数法による解析⁽³³⁾⁽³⁴⁾

上述のように、実験結果の解析にはしばしばノード法の考え方による結合炉モデル(例えば2炉心の場合2点炉近似)が利用されている^{(11)(16)~(20)(29)(30)}が、そのモデルの妥当性と適用性については必ずしも明らかではない。最近こうした問題が理論的に研究され、より一般的で厳密な解析モデルを導く方法が提案された⁽³³⁾⁽³⁴⁾。以下にその主な手順を略記する。

(1) 結合炉を空間的に小領域に分割し、各領域での平均中性子密度の時間発展を(多群)拡散理論から導出した(多群)多点炉方程式で記述する。ここで、領域の分け方は必要とする精度や炉心構成等によって異なるが、簡単には燃料と反射体の各部分をそれぞれ1領域とみなす場合が考えられる。多点炉方程式の導出は具体的には次の手続による。拡散方程式を各領域で体積積分し、領域内での生成、消滅を示す項と領域表面での中性子流を表わす項とを求める。この中性子流は、拡散方程式とフィックの法則の利用により、各領域での各時刻における中性子生成に対する領域表面中性子流の時間応答として表現する。なお、この中性子生成は核分裂反応と外部中性子源によるものとし、したがって、応答関数は吸収による消滅項のみを持った拡散方程式の解より求められる。このような方法をとると、領域間の中性子密度の結合は、高速中性子や熱中性子が減速・拡散に伴って空間的に移動するためであることを明確な形で表現できる。

(2) 結合炉動特性方程式(2炉心の場合は2点炉方程式)の導出は、多点炉方程式において、①炉心(燃料部分)での少領域の総数だけある変数(平均中性子密度)を炉心ごとに1変数に集約し、次に②反射体部分

でのすべての変数を消去するという、2種類の操作によって行う。なお、多群解析の場合は、各群の中性子密度にある重み(例えば検出器のエネルギー特性)を掛けて、すべての群について加え合わせる操作も行う。

(3) 反射体中で観測された実験結果を解析する場合には、次の操作によって得られる方程式を利用する。多点炉方程式において、上記①の操作を行なって結合効果を定義し、次に③観測量に対応した変数のみを残し、その他のすべての変数を消去する。こうして求められた方程式は、結合効果等の動特性上の情報が観測量に抽出されて伝達してゆく過程を記述している。なお、操作①～③は状態変数の集約法として公式化されている⁽³⁴⁾。

ところで、結合効果の表現は上記の内容だけでは限らない。拡散流を求める際に、例えば外部中性子源のみを生成源とし、核分裂反応と吸収を伴って拡散するとしてもよい。あるいは多群解析の場合、散乱によるある群への遷移をその群における生成源とするか(上記①の取扱い)、拡散に含めて考えるかは任意性がある。(1)の方法をとる理由は主に数値解析を行う時の容易さにある。例えば、多群解析で結合係数を求める場合、すべての群で decouple した拡散方程式を解くことになる。

結合炉動特性方程式において、結合効果は領域相互間の中性子密度の結合として通常表現されている。この結合の意味は次のように理解される。ある領域での核分裂反応によって生成された高速中性子が、減速拡

散に伴う空間的移動により、他の領域に到達して吸収されることによる効果である。すなわち、核分裂中性子源に起因している。ところで、外部中性子源からの(高速)中性子生成に対しても同様な効果が考えられるはずであるが、通常は、外部中性子源の存在している領域内ですべて吸収されるものとしている。上述の方法で動特性方程式を導出すると、各領域からの外部中性子源の寄与は、中性子密度の結合と同一の時間遅れを持って生じることがわかる。

最後に、ARK における黒鉛反射体中での炉雑音観測結果⁽¹⁰⁾と、上記手順(3)の利用による理論解析の結果とを比較して第2図に示す。CPSD $P_{12}(\omega)$ の計算は、燃料領域での炉雑音スペクトル密度 $P_0(\omega)$ を1点炉近似で表わし、図中に示してあるような燃料領域の形状と観測点位置を考慮して行われた。(森島信弘)

IV. 制御、安定理論上での発展と活動

結合炉の安定性と制御の研究の発展は当然制御理論の発達に依存している。これは結合炉が実際に観測不可能な遅発中性子、温度や出力によるフィードバック、Xeの毒作用、炉心結合の時間遅れ、さらに炉全体としての積分特性など、制御理論研究者が新しい理論を適用するのに興味深い特性を持っていることと、大型原子炉を多点結合炉として扱うことにより安定性の解析や制御系の設計が非常にやりやすくなることなどであろう。1967年までの研究についてはRajuら⁽³⁵⁾によるレビューがあり、本章ではその後の研究に注目して結合炉の安定性、制御、最適化について、その発展と活動を簡単に述べる。

1. 線形系としての結合炉の安定性

この方面の研究では1968年以後、須田および山田らの報告がある。須田⁽³⁾は n 個の領域からなる原子炉の線形動特性方程式を行列のクロネッカ積を用いて表わし、この系の安定性、可制御性、可観測性に対する必要充分条件を非常に簡明な定理の形で与えている。またシステムに付随する固有ベクトルにより作られる相似変換行列を用いて、 $7n$ 次のシステムを独立した n 個の7次システムに分離することにより、結合炉動特性の考察が容易になることも示している。山田⁽³⁶⁾は現在計画が進行中の KUR-2(既述)を対象として、中性子密度、遅発中性子6群、重水光遅発中性子1群、燃料温度、冷却水および重水温度に対する動特性方程式を立て、2入力・2出力系の問題を2つの1入力・1出力系の問題に変換して、2つの温度(重水、冷却水)フィードバックを持つ結合炉の安定性を解析している。Xe

第2図 ARK で測定された結合炉中性子雑音スペクトル密度⁽¹⁰⁾と理論解析結果(森島)との比較例

毒作用のない場合、冷却水温度反応度係数(ϵ_w)が負で冷却水および重水流量(Q_w, Q_R)がある値以上であり、不等式

$$\epsilon_w/Q_w + \alpha \epsilon_R/Q_R < 0 \quad (\alpha: \text{定数}) \quad (3)$$

が成り立てば、重水温度反応度係数(ϵ_R)が正でも炉は安定である。Xe 毒作用は炉を不安定化する働きがある。また、各炉心に互いに独立な同じ制御系を付加した系に対しても同じ解析手法を用いて、制御系が線形・非線形を問わず古典制御理論で結合炉の安定解析ができることを示している。このほか動力炉の出力分布制御系の安定解析について文献^{37), 38)}がある。

2. 非線形系としての結合炉の安定性

非線形系の安定性を論ずる方法として、記述関数(DF), Lyapunov, Popov, 関数解析などの方法がある。結合炉に関数解析の方法を用いた報告が見当たらないのは、結合炉動特性方程式中に状態変数同士または入力と状態変数との積の形で現れる非線形性を関数解析的に上手に取り扱う方法がないからであろう。一方、DF法は単一入力・単一出力系内に存在可能な振動解を推測する近似解法で、DF法の結合炉への適用は結合炉および制御系が対称性を有し、それが等価な単一入力・単一出力系に帰着可能な場合に限られている^{(40)~(41)}。Lyapunov および Popov の方法は一般に厳密に非線形系の安定問題を論ずるもので、系が安定であるために非線形要素が満たすべき条件や、系の平衡点近傍の漸近安定な状態変数空間領域などを与える。Lyapunovの方法で得られる結果は Lyapunov 関数の選び方に依存するため、結合炉への適用にあたってより良い結果を得る工夫をそれぞれ行なっている^{(42)~(47)}。例えば Gageら⁽⁴²⁾は、問題を Lur'e 形の問題および Aizermanの推測の問題に置き換えてより広い安定領域を得、Goryachenko⁽⁴³⁾, Noldus⁽⁴⁴⁾は時間遅れを持つ系に汎関数を Lyapunov 関数として用いることにより、Taylor 展開による近似解⁽⁴⁵⁾に比べて広い安定領域を求めている。非線形系の安定解析を周波数領域で行う Popov の方法は Raju ら⁽⁴⁷⁾により、結合炉の非線形制御要素の解析に用いられている。このほか厳密に振動解を求める Tsytkin Locus 法を結合炉のリレー制御系に用いた報告⁽⁴⁸⁾もある。

3. 結合炉の制御

入出力の数が等しい多入力・多出力の制御系において、入力 u_i が制御しようとする出力 y_i にのみ影響を及ぼすように状態フィードバックを施すことを状態フィードバックによる系の非干渉化という。一定の条件の下で非干渉化された系の入出力マトリクス伝達関数

はゼロでない要素からなる対角行列となり、 m 入力 m 出力系は m 個の互いに独立な 1 入力・1 出力系に分離される。そして m 個のサブシステムがそれぞれ望ましい応答をするようにフィードバックゲインを決定するのが状態変数フィードバックによる非干渉制御の設計である。この考え方は 1968 年頃までに Falb, Wolowich⁽⁴⁹⁾ と Gilbert⁽⁵⁰⁾ により確立され結合炉の制御に応用された^{(51)~(56)}。理論の応用にあたり、状態フィードバック非干渉制御はすべての状態変数の情報が必要であるため、観測不可能な状態変数を推測するオブザーバの導入⁽⁵⁴⁾や、出力変数のみによる非干渉制御の試み⁽⁵⁵⁾、そして状態フィードバックでは補償不可能なシステム伝達関数のゼロ点の補償に直列補償器の導入^{(53) (55)}などの工夫が加えられている。また、フィードバックゲイン決定に最適制御理論を用いたもの⁽⁵⁴⁾や、model matching⁽⁵⁷⁾の考え方で非干渉制御を試みた報告⁽⁵⁸⁾もある。

辻ら⁽⁵⁸⁾は、多くの積分要素よりなる動的補償器からの出力と結合炉の出力とのフィードバックによる非干渉制御の方法を提案し、オブザーバを用いる方法との比較検討を行なっている。

さらに辻ら⁽⁵⁸⁾は、非線形系の非干渉制御理論と非線形系のオブザーバの理論とを用いて、結合炉の出力変更、大きな外乱に対する出力調整問題に適用可能な非線形非干渉制御系の設計問題を検討している。

実際に非干渉制御を行なった例としてハルデン炉の報告⁽⁵⁹⁾があり、古くは Schweizer⁽⁶⁰⁾が ARGONAUT 炉に対して非干渉制御系の設計を行なった例もある。制御系の研究としてこのほかに、円筒対称炉心を持つ動力炉の出力分布制御をモード制御の立場から検討した Owens の研究^{(61)~(63)}があり、その中で制御系や検出器の故障に対して安定な制御系の設計の研究を行なっている。

4. 結合炉の最適制御

大型原子炉を分布定数系として、出力分布の最適化や Xe 振動に関する最適化を扱った研究は数多く報告されているが、結合炉に関する最適制御の報告は著者の知る限りでは文献(64)~(66)のみである。いずれも一定時間内に出力変更を行う際、ある 2 次形の評価関数を最小とする反応度を求める問題を扱っている。この問題に直接最適制御理論を用いて解を得ることは非常に困難であるため、それぞれ独自の逐次近似解法を用いて最適解を求める方法を提案している。大堀ら⁽⁶⁶⁾は動特性方程式と評価関数を差分化して問題を非線形の静的最適化問題に変換し、これを線形計画法を反復

して用いて解き最適解を得ている。いろいろな初期値と最終値の組合せに対してこの近似解法の実行可能性を調べた結果、出力変更前後の出力比の変化が大きいほど制御が困難か不可能となり、たとえ可能でも評価関数の値は大きくなる。(山田 澄)

V. KUCA における動特性実験

第1章に述べたように KUCA では、KUR-2 の設計を一つの契機として、2分割炉心の動特性実験が1976年初頭より⁽²⁷⁾開始された。結合炉の動特性実験に関する報告は過去にもいくつかある^{(1)(2)(10)(11)(18)~(20)(22)(67)(68)}が、KUCA では炉心の組替えによって炉心形状をかなり自由に変え得るという利点があるため、いままでは実現困難であった結合炉に関する系統的な実験を行うことができる。いままでに全国の多くの大学の協力を得て行われた動特性実験のうち主なものを述べると、軽水反射体付き軽水減速型2分割矩形炉心に対する炉雑音解析実験(a)と周波数応答実験(b)、重水反射体付き軽水減速型2分割円筒炉心に対するファイマン α 実験(c)と周波数応答実験(d)とがある。

炉雑音解析実験(a)では、炉心間距離を変え、両炉心の各中央部に置いた検出器を用いて CPSD を測定し

た。約100 Hz 以上の周波数領域では、炉心間距離の変化に応じて CPSD の振舞いに顕著な相違が現れること、それ以下の周波数領域では互いにほとんど差異がないことが確かめられた⁽²⁷⁾。

ファイマン α 実験(c)では、対称および非対称分割炉心を組み、両炉心の各中央部に設置した検出器を用いて β_{osc}/l の値が測定されて比較された⁽⁶⁹⁾⁽⁷⁰⁾。

周波数応答実験(b),(d)では、重水反射体付き炉心の場合(d)は阪大と京大炉側、軽水反射体付き炉心の場合(b)は名大と京大炉側の共同研究が行われている。前者は、2号炉との関連性をより重視して空間依存動特性の測定に重点が置かれ、検出器を種々の場所に配置して測定が行われた⁽⁷¹⁾。後者は、より基礎的な結合炉方程式の系統的な検証を目指し、検出器を両炉心の中央部に置いて炉心間距離を変えて測定が行われた⁽⁷²⁾。両実験ともいまだ実験、解析の途中であるが、両者の代表的な測定結果を実験配置とともに第3,4図に示す。

両実験に用いられたパイルオシレータは、Cd 板を短冊状に各4枚ずつ等間隔に円周上に貼った円筒形の回転子および固定子からなっている。トリガ信号は回転子駆動用直流モータの上部に取り付けた光学式シャフトエンコーダを用いて出し、これと Multichannel

実験配置図中の数字は燃料板枚数を示す。

第3図 重水反射体付き軽水減速型分割円筒炉心の周波数応答の測定例⁽⁷¹⁾

実験配置図中の数字は燃料板枚数を示す。

第4図 軽水反射体付き軽水減速型2分割矩形炉心の周波数応答の測定例⁽⁷²⁾

Scaler とを組み合わせ出力の反復加算計数を行い、白色雑音成分を抑えている。

第3, 4図より以下のことがわかる。数10 Hz 以下の周波数領域では、検出器位置や炉心間距離によらず2つの炉心に置かれた検出器出力間の位相差はなく、利得差は一定となる。この利得差は2分割炉心の結合と密接な関係があり、結合が弱いほど大きくなる。しかし、それ以上の周波数領域では、各炉心または各位置での周波数応答に顕著な相違が現れる。

軽水反射体付き実験(b)では、測定結果から結合係数、中性子生成時間および遅れ時間を求め、減速材領域応答関数法によって計算した値との比較がなされ、同計算法の有用性が確かめられた⁽⁷²⁾。(代谷誠治)

IV. む す び

以上、著者ら周辺の活動を中心に、この分野のレビューを行なった。誌面の関係から、モード法による解析の発展^{(10) (11) (13) (28)}、結合炉モデルによるXe振動の解析⁽⁴⁾、結合炉パルス実験の固有値^{(1) (18) (73)}などについて詳しく述べることはできないのは残念である。

本文中には、著者らの不勉強に起因する独断もあるうかと思うが、ご批判を願いたい。この記事は4名の原稿を仁科がとりまとめる方式をとり、表現形式の統

一、誌面の節約のため各部分に多少修正を行なった。各著者の方々の最初の意向からは少し異なった内容になったかもしれない。その点ご了解を願いたい。

(仁科浩二郎)

— 参 考 文 献 —

- (1) FARINELLI, U., PACILIO, N.: *Nucl. Sci. Eng.*, **36**, 39 (1969).
- (2) KAWAI, T.: *J. Nucl. Sci. Technol.*, **2**[7], 245 (1965).
- (3) SUDA, N.: *Trans. Amer. Nucl. Soc.*, **15**, 287 (1972).
- (4) ONEGA, R.J., KISNER, R.A.: *Ann. Nucl. Energy*, **5**, 13 (1978).
- (5) 大堀隆文, 加地郁夫: 原子力誌, **20**[6], 433 (1978).
- (6) AVERY, R.: *Proc. IAEA 2nd Geneva Conf.*, Vol. 12, 182 (1958).
- (7) BALDWIN, G.C.: *Nucl. Sci. Eng.*, **6**, 320 (1959).
- (8) CHEZEM, C.G., KÖHLER, W.H. (Eds): *Proc. Nat. Topical Meeting on Coupled Reactor Kinetics*, (1967), Texas A & M Univ. Press.
- (9) DANOFSKY, R.A.: *Proc. Noise Analysis Nucl. Systems Symp. TID-7679*, p. 229 (1964).
- (10) SEIFRITZ, W., ALBRECHT, R.W.: *Nukleonik*, **11**, 149 (1968).
- (11) HENDRICKSON, R.A., MURPHY, G.: *Nucl. Sci. Eng.*, **31**, 215 (1968).
- (12) DANOFSKY, R.A.: *ibid.*, **36**, 28 (1969).
- (13) NAGY, M.E., DANOFSKY, R.A.: *ibid.*, **42**, 419 (1970).
- (14) RYDIN, R.A., et al.: *ibid.*, **46**, 179 (1971).
- (15) EBERT, D.D., et al.: *ibid.*, **55**, 368; 380 (1974).

- (10) THAYER, G.R., et al.: *Nucl. Technol.*, 25, 56 (1975).
 (17) VIEHL, E.: *Nucl. Sci. Eng.*, 56, 422 (1975).
 (18) DIFILIPPO, F.C., WALDMAN, R.M.: *ibid.*, 61, 60 (1976).
 (19) GENOUD, J.P.: *Ann. Nucl. Energy*, 4, 435 (1977).
 (20) TAI, A.S., SCHNEEBERGER, J.P.: *ibid.*, 4, 443 (1977).
 (21) TÜRKCAN, E., DRAGT, J.B.: *ibid.*, 2, 217 (1975).
 (22) KOMATA, M.: *Nucl. Sci. Eng.*, 38, 193 (1969).
 (23) KAWAI, T.: *J. Nucl. Sci. Technol.*, 2[8], 285 (1965).
 (24) SHINKAWA, M., et al.: *Nucl. Sci. Eng.*, 67, 19 (1978).
 (25) SHIMIZU, A.: "Application of Invariant Embedding to Reactor Physics", (1972), Academic Press.
 (26) KAWAI, T.: 前出(8), p. 167.
 (27) TAKEUCHI, H., et al.: *Annu. Rep. Res. Reactor Inst. Kyoto Univ.*, 11, 1 (1978).
 (28) BETANCOURT, J.M., DANOFKY, R.A.: *Nucl. Sci. Eng.*, 38, 77 (1969).
 (29) ALBRECHT, R.W., SEIFRITZ, W.: *Nukleonik*, 11, 143 (1968).
 (30) McDONNELL, F.R.N., HARRIS, M.J.: *J. Nucl. Energy*, 26, 113; 129 (1972).
 (31) LEONIDOU, D.J.: *Atomkernenergie*, 19, 11 (1972).
 (32) JEFFERS, D.E., HUMPHREYS, E.: *Nukleonik*, 12, 284 (1969).
 (33) 中岡庄一, 森島信弘: 原子力学会昭51分科会予稿集(I), B3, (1976).
 (34) 森島信弘: 原子力学会昭52年会要旨集(I), B29, (1977); 昭53年会要旨集(I), B68, (1978).
 (35) RAJU, S.G., et al.: *Nucl. Safety*, 9, 125 (1968).
 (36) 山田 澄, 他: 原子力学会昭52分科会予稿集(I), F45, (1977).
 (37) FILIPCHUK, E.V., et al.: *Sov. Atom. Energy*, 35, 995 (1973).
 (38) SELIVERSTOV, B.N., et al.: *ibid.*, 39, 976 (1975).
 (39) SCHWEIZER, V.G.: *Atomkernenergie*, 6, 242 (1973).
 (40) RAJU, G.V.S., et al.: *IEEE Trans.*, NS-17, 534 (1970).
 (41) TSOURI, N., et al.: *ibid.*, NS-20, 94 (1973).
 (42) GAGE, S.J., et al.: "Neutron Dynamics and Control", *AEC Symp. Series*, No. 7, Tucson, Ariz, p. 45~76 (1966).
 (43) GORYACHENKO, V.D.: *At. Energ.*, 23, 548 (1967).
 (44) NOLDUS, E.: *J. Eng. Math.*, 6, 31 (1972).
 (45) MURRAY, H.S., et al.: *J. Nucl. Energy*, A/B, 20, 729 (1966).
 (46) AKHTARZAD, Y., et al.: *IEEE Trans.*, AC-18, 180 (1973).
 (47) RAJU, G.V.S., et al.: *ibid.*, NS-18, 388 (1971).
 (48) TSOURI, N., et al.: *ibid.*, NS-20, 649 (1973).
 (49) FALB, P.L., et al.: *ibid.*, AC-12, 651 (1967).
 (50) GILBERT, F.G.: *SIAM J. Contr.*, 7, 50 (1969).
 (51) SILVINSKY, C.R., et al.: *Nucl. Sci. Eng.*, 37, 163 (1969).
 (52) RAJU, G.V.S., et al.: *IEEE Trans.*, NS-17, 541 (1970).
 (53) SILVINSKY, C.R., et al.: *Nucl. Sci. Eng.*, 38, 125 (1970).
 (54) RAJU, G.V.S., et al.: *IEEE Trans.*, NS-20, 668 (1973).
 (55) TZAFESTAS, S., et al.: *Nucl. Sci. Eng.*, 62, 574 (1977).
 (56) 辻 雅司, 他: 北大工学研究報告, 78号, p. 107 (1976).
 (57) WOLOWICH, W.A.: *SIAM J. Contr.*, 10, 512 (1972).
 (58) TSUJI, M., et al.: *J. Nucl. Sci. Technol.*, 14[12], 859 (1977).
 (59) ROGGENBAUER, H., et al.: *HPR-122*, (1970).
 (60) SCHWEIZER, V.G.: *Regelungstechnik*, 9, 364 (1961).
 (61) OWENS, D.H.: *AEW-R 723*, 724 (1971).
 (62) *idem*: *Proc. Inst. Elect. Eng.*, 120, 119 (1973).
 (63) *idem*: *ibid.*, 120, 801 (1973).
 (64) REDDY, P.B., et al.: *IEEE Trans.*, AC-20, 766 (1975).
 (65) TSOURI, N., et al.: *ibid.*, NS-22, 702 (1975).
 (66) 大堀隆文, 他: 原子力誌, 19[7], 487 (1977).
 (67) BOYTON, R.A., UHRIG, R.E.: *Nucl. Sci. Eng.*, 18, 220 (1964).
 (68) KAWAI, T.: *J. Nucl. Sci. Technol.*, 2[6], 217 (1965).
 (69) 小林圭二, 代谷誠治, 他: 京大炉第11回学術講演会講演要旨集, p. 29~36 (1977).
 (70) 寺川和良: 原子力学会昭52分科会予稿集(I), D45, (1977).
 (71) 松田茂彦, 他: 原子力学会昭53分科会予稿集(I), C30, (1978).
 (72) 田中数馬: 2分割型炉心の動特性パラメータ測定, 名大・工・原子核修士論文, (1978).
 (73) 古橋 晃: KUCA 専研資料(1977. 2.); KUCA 協力メモ(1977. 5.).

遮蔽設計基準等に関する 現状調査報告

(「遮蔽工学」研究専門委編)

—1977年6月刊—

B 5 判タイプオフセット印刷, 102 p. (1977. 6.)

定価3,000円(会員特価2,000円)・送費210円

(内容の詳細は本誌, Vol. 19, No. 4, p. 267(1977)を参照)

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」研究専門委編)

—1977年6月刊—

B 5 判タイプオフセット印刷, 308 p. (1977. 6.)

定価3,000円(会員特価2,000円)・送費250円

(内容の詳細は本誌 Vol. 19, No. 5, p. 353(1977)を参照)