

## 非均質連鎖反応系の中性子輸送理論

関 谷 全\*

原子炉の出力の増大と共に炉設計の精度の向上が強く要求されるのは当然であるが、特に従来、均質化近似により全体的に中性子バランスを論じることですまして了う傾向があったのに対し、炉の安定性・安全性の向上を目指す解析では、むしろ局所的な温度の上昇に伴う中性子の共鳴吸収の変化や、ポイド発生に伴う密度変化による出力変動、またそれをおさえるための制御用吸収棒の挿入による中性子束のきわどい変化等非均質効果を算定することが炉物理に重要課題として残されている。さらにそれら長期ならびに短期の時間的変動を解析的に把握することも炉の動特性を向上させる上で重要である。

炉の中の燃焼過程を算定するために炉材料、特に燃料・減速材・吸収材の複雑な配置をこまかい領域に分けて、中性子の輸送方程式又は拡散近似式を差分法で解くという方法は当然のことながら多くの人により試みられ、高速計算機の発達と共にその例は次第に増しつつある。しかしメッシュ割数の制限から理想的な3次元計算をやりとげるには今なお莫大な計算時間と費用を要し、収斂の加速に有効な方法を見出さない限り実用的に満足すべきものではない。それは燃焼につれて断面積が長期的変動を行うので、それを小刻みに計算しては、その結果を用い次の段階のパラメータを決定する方法が取られるため、そのくり返し回数がおびただしいものになることによる。その上中性子が分裂・減速・拡散という広いエネルギー範囲を渡り歩くが、それを連続的に扱うことが一般に困難なため、エネルギーを $n$ 領域に分ける多群拡散法がよく用いられるが、精度を増すために $n$ を大

きくとする程計算時間が増すことになる。

又群毎に、空間領域毎に、拡散方程式を解いてそれらを隣同志の中性子束、流れ密度でつないでゆくという在来の方法では、中性子の異方的流れを記述するためにその方位についての球面調和関数展開の項数を増すにつれて計算式の複雑化はまぬがれない。そこで微分型の方程式の代りに積分型方程式を採用し、1つの領域から出発した中性子が他の1つの領域までやってきてはじめて衝突をする確率をパラメータとして、すべての領域対に対しあらかじめ求めておいて、中性子が次々と細胞をわたり歩く確率過程として扱う衝突確率法が考えられる。しかしこれは対を考えるため沢山のパラメータを準備しなければならないのと、各領域中で中性子束を一定にとる近似を用いることから精度を上げようとすると計算量の急増は免れない。

この点をカバーするために最近特に重視されてきたのは応答行列法である。これは細胞をさらに平均自由行程の数倍程度の領域に分割し、各領域の表面の1つを通し毎秒内向きに1コ入射された中性子がその領域中の媒質核との衝突によって、各表面から平均いくつつ外向き流れとして出て来るかをマトリックス表現し次に隣の領域へ中性子が移動する過程を、各表面の流れの内向き、外向き成分の組合わさった連立方程式として記述する方法である。これは各領域中で適当な回数衝突がくり返される位の大きさが必要なため分割数が比較的小さくてすみ且離れた領域について考える必要がないのでパラメータの数が少い割に精度を上げることができる。但しこの場合には具体的な格子配置に応じた、領域割の工夫がないと各面で面に垂直な成分以外の平行成分も取り入れざるを得なくなってそれだけ計算量を増してしまうことになる。

\* 関谷 全 (Tamotsu SEKIYA), 大阪大学, 工学部, 原子力工学, 教授, 理学博士, 原子炉物理理論

何れにしても以上の数学的な方法は3次元計算になれば計算量が相当大きくなるため、1次元問題については中性子輸送理論から厳密解に近いものが得られることを利用して1つの方向については厳密に解き、残りの2次元計算に上のようなテクニックを用いる事が炉計算の問題解決に有効な方法であると考えられる。

参考のために現実に大型の計算システム JOSHUA にて使われたエネルギー群数と空間分割数の相関図を第1図に示す。

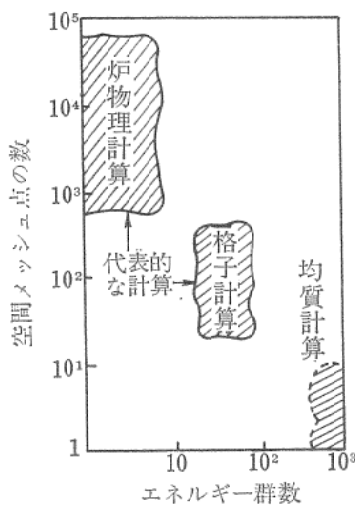


図1 空間・エネルギー分割の相関

以上の数学的方法が臨界計算に対し最も有望な方法であるのに対し、臨界状態に対し加えられた攪乱等による時間的変動の解析、即ち最初に強調した炉の安定性・安全性の向上のための解析に役立たせるには、もっと物理的見地からアプローチする方法が有効と考える。数学的境界値問題に直して解く方法では、物質の現実の表面から少し外側に平均輸送自由行程に比例した小さな外挿距離だけ取ってそこではじめて中性子束が0になるという簡単化を行うが、2種の媒質が接する内境界面でそれをどうするか、特にエネルギーが異ると平均自由行程の大きさが異なるものをどうするか等、体系が小型化し炉のエネルギー分布の巾が大きくなる程近似に問題を生じる。有限厚さの媒質中に空孔配置やボイドのような統計的非均質が含まれている場合でさえ方向毎に中性子の自由行程の分布をサンプリングしておくそれをを用いて種々の炉定数

を能率法を用いて決定することができる。そのさい非均質のための不連続性は分布関数に連続的に柔らげられた形で入るので発散的な困難を数値計算の上で避けることになる。これは断面積のエネルギーについての急激な変動に対しても同様有効な取扱いとなる。これらの能率計画から得られる量が直ちに実測される場合用いた核データ自身の信頼度のチェックにもなる。水の中の非均質即ち空孔附近では高エネルギーで酸素核が後方散乱の強い領域を持つため一度空孔を横切った中性子が再びそれを横切る確率が多くなり自由行程の相関が増すこと等も起る。

格子系への解析的アプローチのうち有力なもの1つに source-sink 法がある。これは燃料塊(格子点)の1つから出た中性子が減速材や燃料塊中で減速・拡散した結果さいごはどこかの燃料塊に吸収されて、そこで分裂により新中性子をいくつか放出するという過程を閉じた形の線形代数方程式にしたもので最初ソビエトの Feinberg が少数本の燃料棒からなる系につき計算したので小さな系についてしか適用出来ないかのように誤解され勝ちであるが、端で中性子束が0であるという境界条件の代わりに、中性子の流れが0であるという条件に置きかえると7本×7本、8本×8本位のゾーンのくり返しからなる現実の動力炉の計算に用いることもできる。時間変動を燃料の他に吸収材の燃焼まで入れて計算する方法も我々のグループで解決して居り、燃料・吸収材のバランスにより出力の時間変動を平坦化、安定化するのに用いることができる。ただこの方法では格子のピッチに比して棒の半径が小さいと云う仮定が含まれているので、太い棒に対し近くのもの同志の干渉効果を上述の自由行程の統計分布の方法を用いて算定することが今後の研究方向の一つと考える。このような長期的燃焼過程の他に加えられた外部攪乱(熱的、流体的、又は力学的振動等)に対する中性子束の歪みを解析するには摂動法を用いることが有効な方法の1つである。但し多群計算をしようとする self-adjoint でない演算子を取扱わなければならない点は量子力学と異なる。