

炉物理の成功と数値実験

(日本原子力研究所) 内藤 倣孝

1. 炉物理の成功

ここで云う「炉物理の成功」とは、核データとボルツマン方程式を用いて実際のプラントを設計することに成功したことを意味する。プラントとは、主として、原子力プラントを指す。原子力プラントの設計では、核設計以外に熱や流動に関する設計も必要である。しかし、ここでは話を単純にするために、核設計に話を限定する。ここで述べたいことは、核データと云う割合基礎的な量とボルツマン方程式と云う基本的な法則を用いて現実のプラントの設計を可能にしたと言う歴史的成功についてである。基本的な法則を用いて設計を進めて成功している例としては電磁気に係わるものや光学機器がある。これらの例では、電磁方程式を解いているが内蔵する物質の誘電率等の物性値は別途求めておかなければならない。いま一つの例として、造船や航空機の流動設計がある。この場合には、ナビア・ストークス方程式の近似式を用いる場合が多い。以上示した3つの設計例、核設計、電磁気設計および流動設計は3者3様の特徴を示している。ここで着目したいのは、どのレベルの方程式または法則を用いているのか、またそれを解くためにどのレベルの定数を使用するかと云うことである。自然界を支配する法則が幾つあり基本となる宇宙定数が幾つあるかは未だ結論のでていない問題であるが、実際の物の設計においてどのレベルの法則を選択すべきかと言うことは重要な問題である。例えば、ロケットの弾道計算に量子力学を適用することは無意味でニュートン力学の法則を用いればよい。適用する法則のレベルに応じて使用する定数が変わってくる。用いる法則が基本的であればあるほど使用する定数も普遍的になり、適用範囲も拡大される。ただし、解を得ることが段々と困難になってくる場合が多い。この解を得る技術は日々進歩しており、その技術の進展を考慮して適用する法則を選択する必要がある。近似式を用いると言うことは、微視的特性に関しては予め把握しておき、大局的特性だけを示す法則を用いることを意味する。微視的特性と大局的特性をどこで区分けするかと云うことが、手法の成功・失敗の鍵をにぎることになる。

以上の観点に立って炉物理の手法を見直すと、ボルツマン方程式と核断面積の組合せの方式を採用したということはノイマンやフェルミといった先達の先見の明の賜であったことが分かる。今日計算機の進歩が著しく、ほとんどの炉物理の計算はボルツマン方程式を連続モンテカルロ法で解くことにより可能になってきている。この成功のものは、原子核の断面積を境にして微視的特性と大局的特性の区分けをしたことに起因していると考えられる。ボルツマン方程式を解くために、モンテカルロ法では中性子の軌跡を追

跡するが、中性子と核との相互作用を量子力学を解きながら追跡するのではなく、断面積を用いる。中性子が核の中のどの素粒子とどんな反応を起こすかと云うことはボルツマン方程式を解く際には問題としない。これは、核物理の問題で炉物理の問題ではない。この区分けが物理現象として妥当であり且つ解析法にもうまく適用されたことが成功の鍵であったと考える。

私が炉物理が成功であったと強調する理由は、最近の流体力学の数値解法の進歩に対する人々の関心の強さに対抗するためである。航空工学において近年「数値風洞」なる言葉がしばしば使用されている。ナビア・ストークス方程式の数値解を求めることにより流動特性が把握できるので「風洞実験」が不要になった、または、なるであろうと云う考え方である。この場合でも種々のレベルの近似式が目的に応じて選択されることになるが、ナビア・ストークス方程式を解く際の微視的特性と大局的特性の区分けは、現時点では乱流の表現式の形式で行われているが、明確でない。細かい渦の発生が何に起因し流動にどのように影響するかなどは今後の課題である。分子の振動や境界面の粗さが流動にどのように作用するか今後研究が進むものとする。一方炉物理においては、炉物理特性を数値計算で求める技術が確立しており「数値風洞」に相当する「数値実験」が可能になってきている。炉物理の研究に従事してきたものは、流体力学よりかなり先んじて「数値実験」技術を開発していることを高らかに表明する必要がある。

2. 数値実験システムの要件

「数値実験」とは計算機を用いて種々の条件のもとで対象とする系の現象を定量的に求めることを云う。種々の条件の変化に対応した系の変化は、従来は実験により求めてきた。しかし、近年計算機の進歩により、ある条件が整えば、計算により求めることができるようになってきている。ここで、「数値シミュレーション」と言う言葉を用いずに「数値実験」なる言葉を用いた理由は、「数値シミュレーション」は既知の事象を模擬するという意味が強いと考えたからである。「数値実験」では未知の事象を推定することに重点を置いている。このことを可能にするためには、計算に使用する基礎式と定数は信頼度の高い普遍性のあるものでなければならない。ある特定の条件の下で特定の量に関して正しい答えをあたえるものでは、新しい条件下での答えの正当性を保証することは困難である。また、近似の度合の小さい式を用いることが望ましい。前章でも述べたように、近似するとは、多くの場合、微視的特性を予め把握して簡単な表現方式にし、大局的特性に組み込むことを意味する。この簡単な表現方式の適用範囲を把握するためには多くの研究を必要とする。また、対象としている系がその適用範囲にあるかどうかを判定することは必ずしも容易ではない。例えば、原子炉の中性子分布を計算で求める場合に、多くの場合、炉心をセルに分割してセルの中での中性子分布を予め求めて

セルの中を均質な領域として表現し直してから全炉心の中性子分布の計算を行う。セルの計算を行う場合にはセルの境界条件を与える必要がある。多くの場合、完全反射条件がセル境界条件として与えられるが、今対象とする新しい炉心にたいしてこの条件設定が妥当であるかどうかは別途判断しなければならない。今まで計算コードに対する多くの精度評価作業がなされてきた。これらの作業は、多くの場合、実験結果と計算結果を比較することにより行われた。両者の差異の理由が数値計算式にあるのか、対象のモデル化にあるのか、使用した定数にあるのかが明確にできなかった場合が多かった。これらの理由が不明確なままで、新しい炉心の解析をした結果を評価することは困難である。この例からも分かるように、「数値実験」に耐える計算システムとしては、近似の度合いが小さく、微視的または局所的特性と大局的特性の区分けの明確なものが望ましい。この意味で、ボルツマン方程式を連続モンテカルロ法で解く方法は有力な「数値実験システム」の候補である。この方法では、予め核データをエネルギー縮約して群定数を求めておく必要もなく、また、幾何形状も精度よく表現できる。誤差の入る可能性としては、モンテカルロ法特有の統計計算に起因するものと核データに起因するものとの2種類に分類される。大切なことは、誤差の起因が明確であることである。計算機の発達によりこの方式の「数値実験システム」が可能な段階に達しつつある。ここでは、炉物理に係わる数値実験システムを念頭に置いているので「炉物理数値実験システム」とよぶこととし、それを連続モンテカルロ法と核データを用いて構築することを考える。このために必要なことは、計算結果の信頼性および誤差の評価である。評価作業としては、①乱数の選定および追跡粒子数の影響等統計計算に関するもの、②核データの精度の影響の2つである。これらの評価は、基本的には、独立におこなわれる。炉物理量の誤差評価において特に重要なのは核データの誤差の伝ばんである。自分の必要とする量（例えば臨界量）に核データの誤差がどのように影響するかを把握することが重要である。このためには、誤差付核データ・ファイルが必要である。ENDF/B5およびB6には誤差付核データがあるがJENDLにはないと聞いている。シグマ委員会で共分散評価WGが発足すると聞いているのでその成果を期待する。モンテカルロ法では核データの誤差も統計計算の中で同時に考慮できる。誤差付核データを用いてモンテカルロ法でボルツマン方程式を解き、誤差範囲のはっきりした結果を得ることがこのシステムの将来の姿であると考えている。

3. 今後の課題

連続モンテカルロ・コードと核データを用いて「炉物理数値実験システム」を構築するためには解決しなければならない多くの問題がある。そもそもこのようなシステムが現実に検討されるようになったのは計算機が発達したためである。連続モンテカルロ・

コードを用いて実規模の炉心計算が可能になり始めたのは極最近のことである。約10年前に筆者らは多群モンテカルロ・コードを用いて臨界計算に着手した。当時、臨界計算は、多くの場合、差分法による拡散コードを用いて行われていた。しかし、数年にして世界中で臨界計算をモンテカルロ法により行うようになった。この結果、臨界計算の誤差の範囲がある程度推測できるようになった。最近では、放射線遮蔽の計算を連続モンテカルロ・コードを用いて試みている。将来この方法が有望であると考えられるのは、並列計算機の急速な開発が期待でき、モンテカルロ法が並列計算機に非常に適した手法であることによる。近い将来、単位時間に現在の1000倍の計算量を実行することが可能になると考えられる。このような展望に立って、システムを着実に構築していくことが炉物理のこれからの歩む一つの道であり、先人の成果を生かす方法であるとする。

このシステムを構築するためには、先に述べたように、計算誤差の評価を系統的に行う必要がある。今までの誤差評価は何のために行っていたのか必ずしも明確でない。新しい体系の計算をした場合に、その計算誤差を過去の誤差評価の結果から推定することもできない。この「炉物理数値実験システム」が構築されると、炉物理計算結果は誤差棒付で表現できる。この方法の妥当性を検証するためには必ずしも大規模な実験は不要で、核燃料の入手が困難な時期に小さな実験室で行われた指数実験等の実験が計算技術の進歩によりまた見直されるようになると思われる。マイナー・アクチニドの中性子反応率の精度評価も小さなサンプルと線源を用いた実験でかなりの程度把握できるものとする。即ち、精度を検証するための実験方法も変わってくるものと考えられる。この誤差推定技術の進歩により、臨界実験をすることなしに臨界量をかなりの精度で推定できるようになる。現在の炉物理技術をさらに発展させて「炉物理数値実験システム」を完成し、他の分野の手本になろう。

この雑文は、シグマ委員会の運営委員会終了後の酒の席でしゃべっていたことを中川庸雄氏に「おもしろそうだから書いてみたら」と言われて書いたものである。タイトルからして少々変わっているが、文章そのものも思いつく単語を並べた酔っぱらいのおしゃべりの感がある。しかし、云いたいことは云ったつもりであるので読まれた方には私の気持ちは理解していただけるのではないかと思う。十分に吟味し証拠を上げながら書くとは多分この10倍近い文章を用意しなければならないと思われる。とりあえず、これを書き初めとして、皆様からいろいろな批判やご意見をいただき少しずつ修正してまとめた資料にして行きたいと考えている。ご意見をお聞かせ下さい。