

<研究室だより>

北海道大学大学院工学研究院 応用量子科学部門  
量子エネルギー工学分野 原子炉工学研究室

千葉 豪

炉物理部会報の「研究室だより」において、当研究室からの報告が最後に行われたのが2000年1月発行の第49号であった。当時の研究室名称は「原子炉システム設計・制御工学分野」というものであった。私自身、修士として在籍していたが、この長い名称は殆ど使われず、旧名「原子炉工学」を略した「炉工」を使うのが一般的であった。その後、研究室の名称は「原子炉工学」に戻って現在に至る。

2000年当時の陣容は、島津洋一郎教授、松本高明助教授、秋本正助手、辻雅司助手の教員4名体制であったが、その後、紆余曲折を経て、2022年1月時点で教員は千葉の1名体制となっている。一方、学生は、博士課程1名、修士課程9名、学部生5名が在籍しており、研究室全体として見ると総員16名という大所帯である。

研究としては、炉物理計算を中心としたテーマを実施しているが、最近は、そこから派生したようなテーマも実施している。以下に、現在、学生が取り組んでいるテーマを簡単に紹介したいと思う。

(核分裂生成物を陽に扱った空間依存動特性モデルを用いた原子炉反応度事故の解析)

従来の遅発中性子先行核6群モデルに替えて、核分裂生成物をそのまま扱った動特性モデル(Explicit Fission Product モデル、EFP モデル)を提唱しており、これまでに空間依存動特性方程式への適用などを行った。このモデルにより、事故時の高揮発性FPの系外への漏洩や、遅発ガンマ線による熱付与などを直接的に扱うことができる。現在は、反応度事故への適用を進めるため、燃料棒の熱伝導計算や均質流モデルに基づく冷却材計算ツールの開発と核計算モジュールとの結合を進めている。

(制御変量法と感度係数を利用した高効率ランダムサンプリング手法の改良)

サンプリング法による炉物理パラメータの不確かさ評価を高効率に行う手法として、制御変量法(CV法)と感度係数を組み合わせたCV-S法というものを開発・提案している。その適用性を向上させるため、複数のモックアップパラメータを組み合わせる方法(拡張バリアス因子法の応用)や、パラメータの無次元化といった検討を行っている。

(軽水炉核計算におけるアクチニド・核分裂生成物の取扱い手法に関する研究)

燃焼計算では、反応度への寄与が大きいFPのみを考慮した簡易チェーンを用いることが一般的であり、簡易チェーンに含まれないFPの寄与は「擬似FP」として考慮する。この

擬似 FP を作成する汎用的なアルゴリズムの開発を行った。複数の擬似核種が崩壊系列を形成するというユニークなモデルである。また、実機軽水炉の燃焼解析のためのマクロ燃焼モデルの高度化に関する研究も進めている。

(可燃性毒物を含む体系の燃焼計算手法の高度化)

ガドリニア燃料を含む軽水炉燃料集合体の燃焼解析のため、PC 法の改良を進めてきた。昨年度に AOWPC 法という手法を完成させ、2GWD/t 程度の燃焼メッシュであっても 100pcm 以内で  $k\text{-inf}$  の予測が可能となることを示した。現在は、PC 法とは異なるアプローチに基づく計算手法の開発を進めている。

(燃焼計算のための低次元化モデルの構築)

燃焼計算では非常に多くの FP の数密度を追跡する必要があるため、これをより簡易的に扱うための低次元モデルの開発を進めている。基本的な考え方は snapshot POD に基づくが、低次元に変換することによって「低次元だが解きにくい」問題になることが分かり、いくつかが克服しなければならない課題があることが明らかになりつつある。

(離散座標法による輻射輸送方程式の数値計算における散乱源の取扱い手法に関する研究)

炉物理分野では、輸送方程式における散乱源の計算は、角度束からモーメントを求め、そこから散乱源のモーメントを計算し、角度依存の散乱源に戻す、という方法が一般的であるが、散乱の非等方性が強い問題（生体内の光の輸送など）においては、入射方向と散乱方向に依存して定義される散乱核を直接用いる方法（我々は DAR 法と呼んでいる）が使われている。また、原子力工学分野では、散乱の非等方性が強い問題に対して、「ガラーキン求積」と呼ばれる方法も提案されている。こういった複数の手法について、包括的・定量的に比較評価する研究を行っている。その過程で、DAR 法と併用される散乱核再規格化法を GLLS により一般化したものを提案し、その性能評価も進めている。

(高速炉に関する研究)

高速炉の炉心燃焼解析のためのコード開発を進めている。このコードは、RZ 円筒座標系に限られてはいるが、任意のエネルギー群数、輸送/SP3/拡散、集合体均質/非均質、擬似 FP/直接 FP チェーンなど豊富な計算オプションを有する。加えて、SP3 摂動計算機能の追加や共鳴計算手法の改良などの高度化も行っている。また、軽水炉から移行する時期の高速炉は軽水炉使用済み燃料からの TRU をドライバ燃料として使用するため、種々の TRU 組成の燃料が想定される。その想定幅が高速炉の炉心・廃棄物特性に及ぼす影響を定量的に評価するとともに、それを簡易的に評価する代理モデルの開発を進めている。

(燃焼感度を利用した研究)

当研究室では燃焼問題のための摂動論に基づいたコードの開発を進めており、現時点では燃料集合体の燃焼特性に関わる感度が計算可能となっている。世界的に見てもこのような機能を有するコードは存在しないため、この機能をフルに活用した検討を進めている。現在は、燃焼中の中性子増倍率の予測精度を高めるために必要な PIE データセットの特定や可燃性毒物入り燃料棒における核種生成量の感度解析などの検討を開始している。

(医療用中性子源に関する研究)

本学の医工学系のグループから、医療用中性子源の設計計算に利用できる決定論コードについて問い合わせがあったため、当研究室で開発しているコードシステム CBZ に改良を加え、医療用中性子源の計算を可能とした。そこで、医療用中性子源の最適化計算に関する検討を我々自身でも行おうと考え、その第一歩として、最適化手法である山登り法への随伴関数の適用による計算の高速化の検討を行っている。

(燃焼度指標に関する研究)

福島第一原子力発電所の廃炉作業に貢献できるテーマとして、複数の異なる燃焼度燃料が混在した体系について、その混在割合を推定する方法を編み出せないか考えている。現在はその第一歩として、燃焼度の指標となりうる核種生成量の網羅的な探索を計算に基づいて行っている。

私は、2011年3月末に原子力機構を退職し、同年4月から北大・原子力安全研究室で1年間、原子力安全を学ばせていただき、その後、2012年4月に原子炉工学研究室に「復帰」した。炉工研究室に戻ってから、いろいろな機関の方々と共同研究・受託研究を実施させていただき、それにより研究の基盤が整ったと言える。まずは、そういった方々に対して、深く感謝申し上げたい。

先日の米国原子力学会の冬の大会に参加する機会があったので、いくつかの発表論文を読み、発表録画を視聴した。また、最近では PHYSOR2022 の論文査読も 10 本強ほど行った。こうしたなかで、炉物理・核データ・炉工学の分野において、海外では着実に研究開発が進んでいる印象を受けた。その一方で自らを振り返ると、日本の原子力学会での発表で満足するような状況がしばらく続いていたように思う。研究が「ガラパゴス化」しないように、世界から取り残されないようにと、気を引き締めているところである。



2018 年度研究室集合写真



2019 年度研究室集合写真



2021 年度研究室集合写真