

研究室だより

東京科学大学 小原 徹

1. はじめに

東京工業大学（現東京科学大学）は教授、助教授がそれぞれ独立した PI であるので、小原研究室は私が助教授となった 2002 年 12 月に始まったことになる。もう 20 年以上もやっているのかと書いていて我ながら驚いてしまう。その間大学組織の変遷が続き、研究室が始まった当時は原子炉工学研究所という部局であったが、その後科学技術創成研究院先導原子力研究所となり、さらに科学技術創成研究院ゼロカーボンエネルギー研究所となった後、2024 年 10 月には東京医科歯科大学との統合により東京科学大学総合研究院ゼロカーボンエネルギー研究所となった。ただその間研究室の場所は変わらず大岡山キャンパスの北 1 号館にあり、研究室の活動も基本的に変わっていない。これまで多くの学生諸君といろいろな研究をやってきたと思う。研究室だよりは本来現在やっている研究活動を紹介するものなのかもしれないが、せっかくの機会なので小原研究室で学生さんとともにやってきた研究を紹介しようと思う。研究室の活動には 2011 年～2023 年に小原研の助教だった西山潤先生（現東京都市大学准教授）に大変尽力していただいた。内容が一部以前日本原子力学会賞学術業績賞をいただいた時の寄稿文と被るのは何卒ご容赦いただきたい。

小原研で取り組んできた研究としては、新型炉概念研究（以前は革新炉研究と名乗っていたが最近なんでも革新炉を名乗る時代なので少し嫌気がさしてここではあえて新型炉）、臨界安全研究、あとこれらの研究遂行にあたり動特性解析手法の研究を行ってきた。これら炉物理の研究は基本的にすべて数値解析で行ってきた。炉物理以外の研究としては、鉛ビスマス合金中に中性子照射で発生するポロニウム研究も行った。これらの研究から思い出しながらいくつか紹介していこうと思う。

2. 新型炉概念研究

2.1 高温ガス炉

高温ガス炉にはペブルベッド型とプリズム型があり、両方の炉型について研究を行った。高温ガス炉の研究自体は 2011 年の福島第一原子力発電所(1F)の事故以前から行っており、当初は構造を簡素にした小型ペブルベッド炉(Peu a Peu 炉)の成立性等の研究を行ってきたが、1 F 事故後は、特に高温ガス炉の持つ固有安全性を意識した研究をするようになった。1F 事故の本質は電源喪失による崩壊熱除去の失敗だったので、小型のペブルベッド炉、小型のプリズム型炉を地中に設置した場合に地殻を最終ヒートシンクとし自然放熱だけで崩壊熱除去ができる条件や、地上に設置した場合に建屋表面からの自然放熱で崩壊熱除去ができる条件などの研究も行った。そのほかにも高温ガス炉の研究課題の一つに冷却材に空気が混入した場合の黒鉛構造材の酸化対策があったので、黒鉛構造材を SiC でコーティン

グした場合の臨界性や燃焼特性への影響などの研究も行った。また複数の大きさの異なる粒子状可燃性毒物を用いることで燃焼中の実効増倍率をほぼ一定とする手法を考案し運転中即発超臨界となる可能性のないプリズム型炉についての研究も行った。

2.2 シリコンドーピング用原子炉

大型のシリコン結晶のドーピングには研究炉の使用が有用であり、また今後パワーデバイスのニーズが高まるはずと思い半導体製造のための中性子ドーピング用原子炉についても研究を行った。国内の研究炉は燃料を国内で製造できずすべて輸入しており海外の燃料製造工場も限られているため安定的な燃料の確保と使用後の処分が常に課題となっていたので、通常の PWR 燃料集合体を用いた研究炉で大型半導体の中性子ドーピングができないか検討した。PWR 燃料集合体は低温大気圧で運転する研究炉の燃料としてはオーバースペックであるが国内の PWR 燃料製造工場で作成した燃料集合体そのまま使えたとメリットが大きいと考えたのである。炉心デザインを工夫すれば案外うまくいき大型シリコン結晶を大量にかつ内部まで均質に照射できる原子炉の設計が十分可能であることが分かった。

2.3 原子炉レーザー研究

現在の原子力でのエネルギー利用は核分裂によって発生した核分裂片の運動エネルギー、中性子線、ガンマ線をすべて物質中で熱に変え、さらにその熱を蒸気機関で運動エネルギーに変えて発電している。これは核分裂エネルギーをもっと別のエネルギーとして利用できないかと考えて始めた研究である。ロシアではこの分野の研究が進んでいることを知り、ロシアの研究機関 IPPE に滞在して原子炉レーザーの研究者と交流をしたりした。ロシアではパルス炉を使ったレーザー発振実験に成功していた。このパルス炉は、濃縮ウラン金属を用いたパルス炉心と、ポリエチレン減速材とレーザー発振管をもつ熱中性子炉が結合している特殊な炉心で、積分型の時間依存中性子輸送方程式を解くことによりレーザー発振管に与えるエネルギーの解析をしていた。この文献を調べて弱結合体系の解析ができる空間依存動特性解析コードを開発して原子炉レーザー発振実験用原子炉の解析を行った。また核分裂片の運動エネルギーからレーザー発振をシミュレートする解析も行った。ある程度のめどは立ったものの実際にパルス炉を用いた実験はできなかったため研究には限界があり、成果としては弱結合のパルス炉の解析手法の確立にとどまった。

2.4 高速炉

新型炉研究として高速炉の研究もしておりこれは現在も学生さんたちと継続して行っている。一般に高速炉はウラン資源の有効利用に効果的である反面、使用済み燃料の再処理を必要とする。再処理はプルトニウム抽出を伴うので、限られた国でしか実施できず（現在は5 大国と日本）世界中の多くの国で利用できる原子炉にはならないという認識があったので以前はあまり関心を持っていなかった。そんな中、東工大名誉教授の関本博先生が東工大在

職中に CANDLE 燃焼炉という概念を考案し、再処理を必要としない高速炉の可能性を定量的かつ正確に示された。小原研では、関本先生が東工大をご卒業後、すべての解析ツールを独自に開発しながら CANDLE 燃焼炉研究に取り組んだ。特にそれまでの CANDLE 燃焼炉研究は平衡燃焼状態の解析に重点が置かれていたので起動炉心の設計を行い、起動からの特性変化についての解析を行った。解析手法は初めは決定論的手法で行っていたがのちにはモンテカルロ法を用いたより詳細な解析に取り組んだ。決定論的手法の解析では拡散計算と燃焼計算に必要な群定数をどのようにして作成すべきかという問題があったが、モンテカルロ法を用いることでこの問題は解決され解析精度を高めることができた。

CANDLE 燃焼炉は、燃焼波の性質として中性子インポートランスが高い領域で核分裂が起るため炉心内のウランの転換や FP による中性子吸収という中性子の損失があっても原子炉が臨界となるという優れた概念の原子炉である。ただ燃焼波が炉心軸方向に移動するので燃料交換は炉心を輪切りにして行う必要があるという問題があった。この問題に対し燃焼波を横方向に移動させると同時に燃料集合体を反対方向に同じ速さで移動させ、かつ中性子インポートランスが高くなる炉心中心に核分裂性核種が最も多い燃料集合体来るように炉心内で燃料集合体を円を書くように移動させたら良いのではと思いついた。学生さんに早速やってみてもらったところ、そんなに簡単にはできる解析ではなかったが、燃焼集合体の移動を続けていると起動炉心の燃料組成に関わらず炉内の核種分布、中性子束分布が変化しない平衡状態となりまた原子炉も臨界となることが分かった。これが現在も続いている回転燃料シャッフリングブリードバーン高速炉(RFBB)研究の始まりとなった。

RFBB は燃料の転換をしつつ同時に FP を炉内に抱えることになるので中性子経済をいかに高くするかが重要なポイントとなる。この観点で、燃料として酸化物、窒化物、金属、冷却材としてナトリウム、鉛、鉛ビスマス、ヘリウムを考え、炉心の中性子経済を比較し、さらに実際に炉心をデザインしてその成立性を検討する研究を行っている。これまでの研究から、酸化物燃料は重金属密度が低く中性子スペクトルが柔らかいため RFBB は成立しないことがわかっている。また冷却材としては、鉛あるいは鉛ビスマスが中性子スペクトルを硬くでき中性子の漏れが小さいのでナトリウム等に比べて小型の炉心が設計できるという知見が得られている。RFBB では燃料被覆管の照射損傷が大きくなるのでそのような状況での被覆管のスエリング特性が問題となるが、重イオンビームで高速炉燃料被覆材料の照射実験を行っているミシガン大学の研究者からの情報などから実現は可能と考えている。また出力が炉心中心に集中し、出力の割に炉心半径の大きい原子炉となるため建設コスト的には不利となる面があるものの、再処理に依存せずに高燃焼度が達成できるためサイクル全体のコスト的には有利であると考えている。

3. 臨界安全研究

3.1 弱結合体系臨界事故解析

先の原子炉レーザー発振用原子炉の動特性解析コードはモンテカルロ法を用いているた

め解析対象に制約がない。そこで燃料溶液が入った複数の燃料タンクの一つで臨界事故が発生した場合に、ほかの燃料タンクの溶液の核分裂挙動がどうなるかといった研究をこのコードを使って行った。複数の燃料タンクが近い距離に存在している場合、それぞれの燃料タンクの核分裂で発生した中性子がほかの燃料タンクで核分裂を引き起こすといった相互作用を考える必要がある。解析してみると初めに臨界事故を起こした燃料タンクから発生した中性子によりほかの燃料タンクでもある時間遅れの後核分裂が発生する様子が現れた。

1F 事故の後炉心溶融を起こした原子炉の廃炉が始まるとこのコードを燃料デブリ取り出し時の臨界事故解析に適用できるのではないかと考えた。そこで燃料デブリ取り出し時の事故解析の研究として、多数の燃料デブリ片が水中に落下した場合に起こる核分裂を解析する研究を行った。この研究を始めたときは燃料デブリの取り出しはまだ先の話でそれほど関心は持たれなかったが、その後燃料デブリの取り出し計画が具体化してくると関心を持たれるようになってきたようである。

3.2 デブリ片水中落下時の臨界解析

多数のデブリ片が水中に落下するような事故が発生した場合に臨界となるかを判断するためには、デブリ片の水中での落下挙動を解析し、刻一刻変化する燃料デブリ片の位置に応じた臨界計算を行う必要がある。この解析を粒子法によるシミュレーションソフトウェアとモンテカルロコード MVP を組み合わせることで実現する研究を行った。粒子法によるデブリ片水中落下シミュレーションの結果が妥当なものであることを確かめるため模擬燃料デブリ片を水中に落下させる実験を行いシミュレーション結果が妥当なことも確認する研究も行った。この研究も実施しているときはさして関心を持たれなかったが燃料デブリ取り出し時の臨界安全の確保の観点から関心を持たれるようになってきたようである。

4. ポロニウム研究

鉛ビスマス共晶合金(LBE)は ADS の冷却材・ターゲットや小型高速炉の冷却材として関心がもたれている。鉛に比べ融点が低いのがメリットであるが同時にビスマスの中性子捕獲により α エミッターである Po-210 を生成するという問題がある。そこで LBE サンプルの中性子照射を JRR-4 で行い、東工大に輸送しホット実験室で照射済みサンプルを加熱溶解させて Po-210 の蒸発挙動や金属材料への付着による汚染、さらにその汚染の除去方法などについての研究を行った。東工大には非密封 RI を扱うことができる実験室はあったものの、Po-210 の使用許可はなかったので、RI 使用変更申請をおこない Po-210 の使用許可を取るところから始めたので実験を始めるまでにずいぶんと時間を要した。LBE で発生するポロニウムの研究はそれまで代替物質のテルルを使った研究は行われていたものの Po-210 を実際に使った実験例は少なくともロシア以外ではなく（おそらく今もなく）当時関心を持たただけでなく、いまだに問い合わせが来ることがある。LBE を照射する際 JRR-4 の BNCT 用の照射室を使うと中性子束が強すぎずまた多くの試料を同時に照射できるので良

かったのだが、1F 事故後 JRR-4 が廃炉になってしまったのでもう国内でこの実験を行うことはできなくなってしまった。

5. 動特性解析手法研究

原子炉レーザーと臨界安全研究で述べた動特性解析コードは、体系が即発超臨界となった場合の各領域間の中性子のやりとりを時間依存で解析するもので、一点炉近似では解析できないような体系での解析が可能である。またモンテカルロ法をベースにしているので扱う体系に制約がないという特徴がある。このコードはマニュアルを整備した上で MIK1.0 コードとして公開している。

6. おわりに

小原研でこれまでやってきた研究と現在取り組んでいる研究について思い出しながら書いた。原稿を振り返ってみると現在やっている RFBB の説明が長くなってしまったようである。小原研に來た学生さんはみな真摯に研究に取り組み、これまでに小原研で 22 名が博士号を、34 名が修士号を、6 名が学士号を取得した。2025 年 4 月からは博士後期課程 1 名、修士課程 3 名、学士課程 1 名、事務支援員 1 名のメンバーに加え、5 カ月間の短期留学でカナダから 1 名、フランスから 1 名の学生も小原研に参加する予定である。小原研もあと 2 年となったが引き続き研究室の学生さんと充実した研究活動をしていきたいと思っている。