

炉物理研究の思い出と今後の期待

大阪大学名誉教授、福井大学客員教授

竹田敏一

1. はじめに

私が炉物理の勉強を始めたのは大阪大学の学部 3 年生のときであった。大阪大学工学部の原子力工学科に入り原子力基礎である原子炉物理、放射線計測、原子力工学等の授業を受けた。原子炉物理では当時原子力工学科第 5 講座の関谷教授から数学の基礎を教わった。級数展開である。円筒体系の一群理論では中性子束分布はベッセル関数で表される。ベッセル関数を含め全ての関数は級数展開で表されることを学んだ。非常に興味深い授業であった。この授業は私のその後の研究方針を決定した。中性子の保存則に表れる $\text{div } \Phi$ の物理的意味が分かったことがその一例である。

この当時、炉物理とは何かを知りたいと思い、吹田の阪大工学部図書館で炉物理関係の洋書を読んだ。“Two Group Theory”という本だったと思う。初めて洋書で勉強した。今では多群で拡散方程式、輸送方程式を解くのは当たり前であるが当時是一群理論が当たり前であったので、2 群理論を理解したのは、非常に得意げであった。学部での勉強は非等方拡散係数で有名な Benoist の理論をフランス語で書かれた Benoist の博士論文を関谷先生と勉強した。フランス語を第二外国語として選択していなかったため、まずはフランス語の勉強から教えていただいた。Benoist の理論を拡張し、非等方散乱を含めた衝突確率を修士、博士過程で開発し、博士論文にした。

大学卒業後は日立製作所原子力研究所で実際の設計にも用いる手法、計算コードに関する研究開発に携わった。高速炉「もんじゅ」の解析のための 3 次元体系計算法の開発、重水減速・軽水冷却高転換炉「ふげん」の集合体内の P u 富化度の最適化研究等を行った。これらの研究で認識したことは、実効断面積が要ということである。大学時代には実効断面積は与えられるものと考えていたが、この実効断面積を断面積の共鳴を考えて求めなければならないと初めて分かった。約 5 年間の日立での研究経験は炉物理を知るうえで非常にありがたかった。

日立での研究生生活の後、大阪大学に助教授として戻った。大学で基礎的な研究を発展しようと考えていたが、まず計算コードが何ひとつなかった。そこで、当時の修士課程の学生であった佐治さん、山岡さん、村上さん、綾さん等と一緒に軽水炉集合体計算コード WIMS、高速炉炉心計算コード TWOTRAN、温度雑音、ダイナミックコントロールの勉強を始めた。彼らの猛烈な頑張りにより新たな計算コードの開発もした。応答行列法による集合体計算コード RESPLA、3 次元輸送計算コード TRITAC を作成し、温度揺らぎ計算方法、最適制

御棒駆動方式の研究開発に着手した。基礎的な計算コードを作成したので、多くの学会発表、論文作成もできた。これらの研究の継続により、炉物理ソフトウェア開発にはかなり貢献したと思っている。最近は多くの大学で日本原子力研究開発機構が開発した計算コードを使用するケースが多い。これは日本原子力研究開発機構の計算コードは信頼性があるためである。信頼ある計算コードの開発には10年以上の期間が必要となり、なかなか数年の期間では開発しにくい。このため、大学で開発された新たなノウハウを計算コード開発まで発展することは難しくなっていると考えられる。しかし、独自の新たな方式を導出し、ソフトウェア開発に貢献するのも大学の役目だと思うので、今後の新たな手法開発、ソフトウェア開発に対する大学の貢献が増えるような原子力研究の仕組みづくりができることを期待したい。

2. 炉物理の今後に対する期待

炉物理に対する今後の期待は原子力開発にとって不可欠となっている安全性向上と放射性廃棄物処理の進展である。安全性向上、放射性廃棄物処理の研究は従来の狭い意味での炉物理分野だけでは進められない。熱流動、原子力燃料、構造力学等の分野の知識を活用して新たな研究分野を開拓していただきたい。

2. 1 安全性向上の研究

これからの国内外の新設炉として安全性を向上した大型の軽水炉、中小型の固有安全性を備えた革新炉が期待されている。このような優れた安全性を持つ原子炉の条件を炉物理的に検討し、炉心設計に使用することは非常に有益である。定常運転時、過渡状態時だけでなく重大事故時においても炉心健全性が維持されるにはどのような条件が必要であるかを炉物理・熱水力・核燃料・構造力学の総合的立場から検討することが望ましい。重大事故として制御棒飛び出し事故、冷却材喪失事故、ヒートシンク喪失事故等があるがこれらの事故が生じても事故が収拾するにはどのような対策が必要となるのかを炉物理的に検討し、設計にフィードバックする。さらに、固有安全性を担保するためにはドップラー効果、冷却材温度係数、炉心膨張反応度等はどのように定めればよいのかを検討するのは非常に興味深い。これらの検討例として1989年に発表された参考文献(1)のWade, Fujitaの論文がある。この論文では高速炉を対象としてLOF, LOHS, TOPのATWSが発生した場合でも炉心健全性を維持すフィードバック反応度に対する条件が反応度バランスの観点から導かれている。高速炉では炉心膨張反応度が重要な役割を持つ。径方向膨張メカニズムに対し燃料集合体間を維持する2か所のパッド、グリッド支持板、パッドを拘束するリングが影響し、limited free bowといわれる炉心膨張状態が発生する。この詳細は2020年のアルゴンヌ国立研究所のレポート(参考文献(2))に示されているが、構造力学が反応度フィードバックの詳細解析に重要な役割を果たしていることが分かる。Wade, Fujitaの論文をこれらの最

近の研究開発を踏まえて拡張することも重要である。また、別の観点から炉心健全性に対する条件を導くことも検討したらどうか。たとえば、温度に対する漸近状態を考慮して反応度フィードバックを検討する方法もある。この方法は2021年に *Annals of Nuclear Energy* に発表された参考文献(3)に記載されている。

これらの論文を参考にして新たな固有安全性を有する条件を導出し、今後の国内外で建設される新設炉の安全性担保を確かめるための研究開発が進められることを期待したい。さらに、この知見を基に新たな原子炉の設計に貢献することが望まれる。

2. 2 放射性廃棄物処理に関する研究

高レベル放射性廃棄物は深地層で管理されることとされているが、放射性廃棄物の減量することも放射性廃棄物処理にとって有意義なことである。このため、加速器あるいは原子炉(とくに高速炉)を用いた核分裂生成物およびマイナーアクチニド核種の核変換による消滅に基づき、放射性廃棄物の減容を図ることは有意義である。原子炉による核変換を図るには中性子スペクトルが硬いことが有効である。高エネルギー中性子によるマイナーアクチニド核種の核分裂反応が期待でき、さらにPuの核分裂当たりの発生中性子数が多くなるためである。今までの核変換に関する研究成果をまとめ、どのような原子炉、加速器が核変換に適当なのかを最新の核データを用いて比較検討することが望まれる。これは計算に用いたマイナーアクチニド核種の捕獲反応、核分裂反応の断面積に対しては核データ間の違いが大きいため、最新の核データを用いた核変換計算の必要があるためである。JENDL-5等を用い、それ以前の核データによる結果と比較することは興味深い。さらにこれらの最新の核データを用いたベストエスティメート法による核変換結果の不確かさの評価も必要である。断面積不確かさに基づく核変換結果の不確かさ評価には断面積の共分散データがしばしば用いられている。参考文献(4),(5)に説明したように、この共分散データは種々の実験データ、理論データの共分散を示すものであり、不確かさ評価には適していない。不確かさ評価には従来の共分散データを修正する必要がある。ウラン燃料の臨界実験の実効増倍率の不確かさ評価にはENDF/B-VIIの共分散はグローバルに見た場合、約1/16に減少する必要があることが示された。このように不確かさ評価用の共分散データを開発することは非常に重要となる。この不確かさ評価用の共分散データを開発するための手法の研究、およびどのような実験データを使用すればよいかの検討が必要となる。必要な実験の提案、国際的協力の提案も興味深い。

また、不確かさ評価用の共分散データは断面積の調整(アジャストメント)にも用いられる。この新たな共分散データを用いた断面積調整結果が従来の共分散データを用いた断面積調整結果とどのような違いがあるかを調べるのも興味深い。さらに、核分裂生成物、マイナーアクチニド核種を燃料に含んだ高速炉はスペクトルが硬くなり、一般的にドブラー効果が小さくなり、ナトリウムボイド反応度が大きくなるので、炉心安全性が維持されているかを慎重に検討する必要がある。

2. 3 AI技術の炉物理研究への応用

最近のAI技術の発展は目覚ましいものがある。とくにChatGPTはどこまで開発が進むのかが予想できないくらい進展が著しい。この技術の発展を炉物理研究にプラスになるように適用する必要がある。AI技術は大きく発展するであろうが基礎学問の研究は依然として必要であることを学生、若手研究者に理解してもらおう努力が必要になる。

3. おわりに

前節では今後炉物理分野で開発が望まれる研究項目について述べたが、原子力に携わっている炉物理関係従事者として重要なことは自分の自慢できる得意分野を持つことである。それは数学、輸送計算法、断面積測定、AI技術、放射線測定、何でもよい。それを骨格として熱水力、燃料、構造力学等の分野を含めたテリトリーに拡張すればよい。一つの得意分野をもとに周辺技術、知識を勉強し、それを実学につなげていく努力を実践することが重要であると信じる。不断の努力をしていけば、世界に通じる成果になると思う。日本の炉物理界を世界に誇れるようにしていただきたく思っています。そのように炉物理界を発展しないと日本の炉物理も消滅するのでは危惧しています。

参考文献

- (1) D.C.Wade, E.K.Fujita, "Trends Versus Reactor Size of Passive Reactivity Shutdown and Control Performance", Nuclear Science and Engineering, 103, 182-195 (1989).
- (2) N. Wozniak, E. R. Shemon, J. J. Grudzinski, "Review of Tools for Modeling Core Radial Expansion in Liquid Metal-Cooled Fast Reactors", ANL/NSE-20/41, (2020).
- (3) T.Takeda, K. Fujimura, S.Fuchita, S. Takeda, "Estimation of Reactivity Feedback and Determination of Safety Criteria of Inherent-Safety Fast Reactors in Unprotected Transients Based on the Asymptotic Approximation", Annals of Nuclear Energy, 164, 108597 (2021).
- (4) T. Takeda, S. Takeda, H. Koike, T. Kitada, D. Sato, "An Estimation of Cross-Section Covariance Data Suitable for Predicting Neutronics Parameters Uncertainty", Annals of Nuclear Energy, 145, 107534 (2020).
- (5) T. Takeda "Revisitation of the Studies on Covariance Data and Adjustment Analysis: A Tribute to M. Salvatores for his Great Works and Remaining Future Tasks", Annals of Nuclear Energy, 151, 107895 (2021).