

<特集2>

炉物理研究との出会い！

編集小委員会 / 原電情報システム株式会社

根岸 孝行

私は、そもそも炉物理を詳しく理解していないのではないか。技術士等の資格を持っているため、ある程度の基礎知識があることは証明できている（本人だけの意見？）とは思っている。しかし、専門家となると次元が違ふと感じる。そんな私が、なぜ炉物理部会の編集小委員をやっているのだらうと考えた結果、辿り着いた先が「出会い」という言葉であった。普段、「出会い」というと、恩師・友人・同僚・奥さん等、人との出会いのことを連想しがちであるが、研究・仕事・会社・大学、そして炉物理部会運営委員等と繋がるきっかけも「出会い」であることに気付き、今回の特集を企画した次第である。

しかし、「出会い」という言葉を思いついたのは良いが、誰を対象に？で悩み始め。。。自分だったら、誰から、どのような言葉を聞きたいかと自問自答した結果、単純に諸先輩方とするよりは、身近に感じられ目標にしたい方々にしようと思い、目に留まった「第42回（平成21年度）日本原子力学会賞」や「第3回（平成21年度）日本原子力学会炉物理部会賞」の受賞者に焦点を当てることにした。

投稿して頂いたメッセージは、通常の論文と違い、それぞれの方の人生の一部を垣間見せて頂いたものになっている。本特集を読み、読者の方々が、人生を振り返る機会や良い出会いと巡り合うチャンスになれば幸いと思う。また、まだまだ若者には負けてられない、自分もチャンスを逃さない等、炉物理関係者の活性化になればと考えている。

今回の特集にご協力いただいた方々には改めて御礼を申し上げたい。執筆者の方々を以下に示す。

「第42回（平成21年度）日本原子力学会賞」又は  
「第3回（平成21年度）日本原子力学会炉物理部会賞」受賞者

儀宝 明德	四国電力（株）
佐野 忠史	京都大学原子炉実験所
竹澤 宏樹	三菱重工業（株）
辻 雅司	北海道大学
山本 章夫	名古屋大学
山本 徹	（独）原子力安全基盤機構

（50音順、敬称略）

炉物理との出会い  
～ 解析コードで学んだ炉物理 ～

四国電力(株)原子力本部  
原子燃料部燃料設備グループ  
儀宝 明德

1. 炉物理研究との出会い

残念ながら得意とはいえないのですが、私は炉物理研究が大好きです。得意でもないのに炉物理とコード開発・改良を私が“楽しい!”と思うに至るには、契機となる経験が2つありました。1つは大阪大学在学中に行った研究、もう1つは四国電力(株)入社後に行った研究です。

2. 初めての炉物理研究

大阪大学では中性子流結合衝突確率法 (CCCP 法) に基づいた輸送計算コード MICA を用い、境界表面の中性子流の離散化が解析結果に与える影響について研究しました。題目のとおり内容もたいへんシンプルな研究です。しかし、このシンプルさが私を炉物理に“少し”入りやすくさせてくれたと思います。私にとって初めての炉物理研究であり、炉物理や解析手法を十分理解していなかった私が、炉物理に関する知識や考え方を身につけるきっかけとなりました。またコードの開発に必要な技術力や忍耐力を鍛え、発想と実践の繰り返しの重要性を学ぶこととなりました。当初私は別の研究テーマを希望していましたが、竹田敏一先生は「そのテーマは君には難しいから、MICA コードをやって」とご指導下さりました。今思えば、私が炉物理に馴染めるようレベルにあったものをご選定下さったのだと思います。いきなり難解な研究をしていれば挫折していたでしょう。

さて、この研究テーマがピックアップされた経緯ですが、当時、境界表面の  $180^\circ$  の方位角を2分割した場合と3分割した場合で無限増倍率の結果が1%程度変化し、方位角分割数依存性が非常に大きい結果が得られていたためです。私に与えられたミッションは境界表面の位置と方位角分割数を増やすとどうなるのか調査することと、解析結果の変動の要因を調査することでした。位置・角度の分割数依存性を見るには分割数を増やしてまとめるだけなので、当時の計算機で、それぞれの分割数を最大8まで変化させた結果は容易に得られました。無限増倍率の解析結果は、方位角が6分割以上ではやや安定した結果となったのですが、偶数の場合に大きく、奇数の場合に小さくなる傾向があり、6分割以下ではその変動もたいへん大きくなっていました。いざ原因究明となると、炉物理と解析手法を十分理解していなかった当時の私にとっては、長い困難の始まりでした。

「炉物理を何も知らんやろう」と言われても仕方のない状況であったことが分かっていますが、原因調査の初期段階においては、無限格子体系での解析なので境界表面の中性子流の出入りは無限増倍率の計算上はキャンセルされ関係ないと思い、各領域の中性子スペクトルの差ばかりに注目して要因を予測していました。当時炉物理を少しでも分かっていたら、中性子流の角度分布を調べていたでしょうが、その発想はありませんでした。結果としてかなり遠回りして研究を進めたことになりましたが、私の当時の勉強不足は反

省しても、遠回りをしたことは私にとって幸運であったと確信しています。

中性子スペクトルを眺め、先輩方との相談を通して悩み続けた結果、90°方向の方位角分割がない場合に、燃料位置との関係から中性子流がうまく取り扱えないと予測される境界位置があることに気がきました。この時点でもまだ、中性子流の角度分布を見ることを考え付きませんでした。私がとった方法は、解析結果に与える影響が大きい境界位置と方位角分割位置を調べるためのコード改良を行うことと、コードそのものがどのように機能しているか確認することを目的に、MICA コード、そして、教科書や巽雅洋氏(原子燃料工業株)の開発時のメモを読むことでした。根気の要る作業でしたが、幸いだったのは、MICA コードが大変読みやすかったこととメモの存在であり、巽雅洋氏にはたいへん感謝しております。

この結果、MICA コードが採用している理論と数値解析手法を理解することができ、中性子流を任意の方位角分割で解析する改良もスムーズに行え、影響の大きい方位角分割位置が予測通りであったことを示すことができました。この後、やっと中性子流の角度分布を見れば分かるということに気がきました。しかし、方位角 8 分割程度では中性子流の角度分布を見るには中途半端であること、計算時間も長かったことから、所要メモリの削減と計算速度の向上を目的として、数ヶ月かけて MICA コードの再構築を行いました。この時には、既に MICA コードを読み理解していたせいか、苦しみではなく、楽しんでいる自分がいること、またメモリの削減と計算速度の向上が目に見えて分かり、改良することに対してなんとも言えない快感を得ている自分がいることに気がきました。改良の結果、解析結果への影響が大きい境界位置の 90°方向で中性子流の分布が大きく変化していることが分かり、その原因も当初の予測どおりであったことも判明し、このテーマの研究が終わりました。

この研究では、成果が得られたことよりも、その過程で得られたものが非常に大きかったと思います。また、計算速度向上の努力をしていた際に加速法と並列計算に興味を持ち、後に、日本原子力学会の日韓交流として、竹田先生のご紹介で、KAIST(Korea Advanced Institute of Science and Technology)の Cho 先生の下、MICA コードを使用して加速法と並列計算を実践することができたことも良い経験でした。

### 3 . SHIKOKU コードの開発

炉物理研究のもう 1 つの契機は、四国電力株で行った SHIKOKU コードの開発です。これはそれまで私なりに苦労して得た研究での経験を元に、自由な発想でとりくむことができ、楽しい!と心から感じ、また、情報収集の重要性を実感した研究でした。

コード開発を始める前、入社後 3 年程は発電所での原子燃料と炉心の管理業務に携わり、その間は私が大好きになった炉物理の解析とは無縁のところにはいましたが、実炉の炉物理試験や、日々の日常炉心管理に直接係ることがたいへん良い経験ができました。その後、取替炉心設計とコード開発を担当している部署に異動になり、このとき初めて四国電力の炉心管理コードシステム (SENTAS) の詳細を知ることになったのですが、その精度だけでなく、その歴史、先輩方のなされた創意工夫、「誰よりも一歩先を目指す」という意

思の強さに驚きました。

この部署に異動して1年後、私の心底楽しい経験となった SHIKOKU コードの開発が始まりました。開発を始めた主たる目的は、1970年代に開発され、至近の改良から10年程経過していた SENTAS を炉物理手法と計算機能力の向上に合わせて斬新な改良を行うこと、先輩方の負けん気と技術力を後輩である私の世代へ継承することでした。私の生まれた頃に入社した方々と年齢のギャップはあっても、同じ思いをもって議論やアイデアの出し合い、情報収集に取り組むことができ、これまでにない楽しさを感じました。式の導出からプロトタイプ作成、計算速度向上のため加速法の採用や計算手順の合理化等、様々な試行錯誤まで。しかも、給料をもらいながらできるなんて。この開発では、学生時代に経験した遠回りを十分活かすことができ、私が当初予想していたよりもスムーズに開発することができました。開発中には、炉物理夏季セミナーや学会、論文、インターネット、炉物理の仲間の方々と情報交換で得たものをいろいろ試し、SHIKOKU コードの速度をかなり向上することができました。SHIKOKU コードの速度向上、解析精度向上に関しては、山本章夫先生、巽雅洋氏、そして(株)原子力エンジニアリングの方々からたくさんの助言を頂き、議論できたことがたいへん良い経験であり、学会や会議に積極的に参加しているいろいろな方々と情報交換することの重要性を知りました。

#### 4. おわりに

長々と私が炉物理を楽しんでいるに至った経緯を述べさせていただきましたが、これからもっともっと楽しいと思えるよう、炉物理研究を続けてゆきたいと思っています。始めにも述べましたとおり、私は炉物理があまり得意ではないので、得に計算機・ソフトウェア技術の発達に合わせて、より詳細かつシンプルな炉物理モデルで、より実用的な時間で解析できるコードの開発を目標に、積極的に情報収集と技術導入を行い、大先輩が過去になされた創意工夫も取り入れながら、炉物理の仲間の方々と切磋琢磨してゆきたいと思えます。

炉物理研究との出会い  
～ 佐野忠史の場合～

京都大学原子炉実験所 佐野忠史

t-sano@rri.kyoto-u.ac.jp

昨年暮れに炉物理部会編集委員殿より、「炉物理研究との出会い！！」をテーマに原稿の執筆依頼を頂きました。そこで、私自身の場合を振り返ってみると、「炉物理研究との出会い」は近畿大学の卒業研究がそれであったと思います。しかし、近畿大学原子炉工学科に入学していなければ、当然炉物理にも出会えなかったことでしょうし、現在の職に就くことも確実に無かったことです。すると、受験先を選択した高校時代まで遡ってしまいます。私、現在自称 18 才ですが、高校 3 年生頃(本当の 18 才)の進路希望調査には、イ.自衛隊(陸上または海上) 口.外国航路の船乗り(しかも貨物船) 八.考古学、二.原子力(漠然と)と記述し、あまりにも方向がバラバラの進路希望であるために、進路指導の先生を混乱させてしまった記憶があります。さて、何故この中で原子力を選択したのか? 残念ながら忘れてしまいました……。但し、2 年生の物理の授業で原子炉と原子爆弾の話があり、それが理由の一つだと思います。最初は父に反対されましたが、熱く拳で語り合い納得してもらいました(納得してからはとても応援して頂きました)。

さて近畿大学入学後、3 回生での専門科目「原子力工学」が私の人生を大きく変えました。この科目は大澤孝明先生が担当され、炉物理が中心の講義でした。それまでは、麻雀や自転車旅行ばかりしていましたが(お父さん、お母さん、先生方すみませんでした) とにかく面白く、この講義だけは一番前で毎週一度も欠かさず受講しました。その頃から大学院への進学を意識し始めたと思います。幸いなことに 4 回生の卒業研究では大澤研究室に配属となり、卒業研究に提示して頂いたテーマの中で私が選択したのが、「沸騰水型軽水炉の出力振動解析」でした。このテーマの担当教員が我が師匠、橋本憲吾先生でした。とにかく熱心に 1 対 1 でご指導いただきました。私の友人も橋本先生にご指導いただき、よほど馬が合ったのか、10 月頃からは 3 人でほぼ毎週、必ず 1 度は呑みに行きましたねえ。もちろん、呑むばかりではなく研究もしっかり行いました。この卒業研究を通して、炉物理研究の面白さを実感し、将来は炉物理に関する職に就きたいと思うようになりました。ところが、当時の近畿大学には炉物理を研究できる大学院が設置されておりませんでした。そこで、進学先に選んだのは大阪大学大学院工学研究科原子力工学専攻の竹田敏一先生の研究室でした。当時、大澤研究室から竹田研究室へ進学された先輩もいらっしゃったので、大阪大学大学院を受験しました。

ここからが、波瀾万丈の竹田研究室時代です。竹田先生には、炉物理の奥深さ、研究に対する姿勢等、公私にわたってご指導頂きました。とにかく、並々ならぬ情熱でご指導頂きました。今の職場では、「本当に佐野は原子炉が好きやね」と言われます。おそらくは、

竹田先生の情熱を受け継いでしまったのかもしれませんが。博士後期課程時代は順風満帆ではなく、途中で挫折して、数年間逃亡したこともあります。この間、竹田先生を始め、様々な方たちにご心配、ご迷惑をお掛けしたにも関わらず、復活後は温かく迎え入れて頂きました。私と致しましては、復活後は皆様のご恩に報いるべく精進すると決意致しました。今となっては、この挫折も良い経験となったと思っております。ARMS という漫画に、『人の歩みを止めるのは「絶望」ではなく「諦め」、人の歩を進めるのは「希望」ではなく「意志』』という台詞がありますが、正に私にとって正鵠を射ていたこととなります。

その後、どうにか博士論文をまとめ上げました。博士論文の内容は、一般化バイアス因子法の開発であり、感度係数を使用します。ご存じのように感度係数は積分核特性の変化量に対する実効断面積の変化量と定義されていますが、実効断面積が変化すれば当然中性子スペクトルや空間分布も変化いたします。この感度係数を使用して断面積誤差に起因する不確かさを評価しますので、ある意味、この不確かさの中に炉心の情報がつまっていると表現できます。このことが私にとって非常に興味深く、「なんと面白い!!」と感じました。後述しますが、この博士論文が今の仕事に非常に役立ちました。

さて、博士論文執筆中は研究室で寝泊まりしておりましたが、その夢枕にまで竹田先生がお出ましになり、「君！まだ計算できないの!!」と叱咤激励を頂きました。「また佐野さんが寝ながら謝っていた」とか「何かに取り憑かれていた」と、当時修士の学生で現在関西の会社に勤めておられる某 H 氏は、焼き肉を食べに行くたびに語ります。閑話休題。

そして、現在の職に至ります。こうして振り返ると「炉物理研究との出会い」は、研究との出会いよりも、私の恩師との出会いが如何に大切であったかを改めて感じ入っております。また、この「炉物理研究との出会い」を執筆するにあたり、「これからの炉物理研究の中心となる若い方や学生の方が、現在活躍している先輩方の経験を聞くことで、研究との出会いやチャンスが大切であることを認識し、幅広い視野を持つ必要性を認識して頂きたい(原文のまま)」とのことですが、私が学生時代に特に心がけたことは積極的に学会発表を行い、積極的に手を挙げて質問する事でした。もちろん懇親会への参加もです。先生が「発表しなさい」と仰るので発表するのではなく、自分から「発表したいのですがよろしいでしょうか？」と積極的に提案することが大切だと思います。すると、大学には面白い学生がいると名前を覚えて頂けると思います。これがチャンスに繋がります。私は、チャンスが無いというのは、「チャンスに気付かない」か、「自ら動いてチャンスを作っていない」だけと思っております。もちろん、情熱を持って研究に励むことは言うまでもありません。また、炉物理以外も積極的に勉強することがチャンスを作ることに繋がると考えております。

ここで、「炉物理との出会い!!」が如何に現在の仕事に繋がっているかを記します。ご存じのように、KUR 低濃縮ウラン燃料炉心は平成 22 年 4 月 15 日 16:55 に初臨界を達成致しました。この炉心は全ての燃料が新燃料であり、新燃料のみを用いた臨界試験は日本の研究炉としては数十年に一度です。この臨界試験ですが、中島健先生より臨界近接の計画

を完全に任せて頂きました。もちろん、KUR スタッフのご協力にも感謝しております。この初臨界での過剰反応度の C/E 値はバイアス因子法で 1.06、一般化バイアス因子法で 1.04 でした。臨界制御棒位置も数 mm の差で合っていました。もちろん計算値は予測計算値であり事前に計算してありました。一般化バイアス因子法は私の博士論文のメインテーマです。実機の初臨界で自身の論文の成果を使用できるなど、「炉物理研究との出会い！！」が無ければ考えられない幸運でした。

さて、当日ですが、私の計算で臨界となるか否かが決まるのです。早朝からお宮さんにお参りし、朝風呂で体を清め、赤飯と鯛の尾頭付きを頂き、しかも、背広を新調して初臨界に臨みました。手に汗握りながら逆増倍率をプロットし、上述のように平成 22 年 4 月 15 日 16:55 に初臨界を見届けました。その晩のお祝い会でのお酒は格別でした！！



KURLEU 初臨界炉心

KURLEU 炉心初臨界達成！！

前列右より 2 番目が著者

以上、纏まりのない、しかもテーマである「炉物理研究との出会い！！」以外のお話もたくさんありましたが、周りの人にご協力をいただき「自らチャンスを作る」または、「チャンスが生まれる状況を作る」ことが大切だと思います。

最後に「炉物理研究との出会い！！」とは、研究自体との出会いと人との出会いだと思えます。私の場合ですと、研究では感度解析や不確かさ評価、人では必ず竹田敏一先生、橋本憲吾先生、大澤孝明先生、中島健先生のお名前を挙げます。

追記 予定は全くありませんが私の結婚式（何時のことやら・・・）では必ず先生方をご招待申し上げますのでよろしくお願い申し上げます。

炉物理研究との出会い  
～偶然の出会いからでもチャンスは広がる～

竹澤 宏樹<sup>1</sup>

三菱重工業(株) 原子力事業本部 原子力技術部 EU-APWR 推進グループ

私の炉物理研究との出会いは、大学院時代の学位研究です。研究課題は、低濃縮ウランを用いても原子炉励起レーザーシステムが成立する可能性があることを核設計の観点から数値計算によって示すことでした。院進学前の学部生の頃は素粒子論や原子核物理を極めることを目指していましたが、当時の私には有り余るほどに難解であったため、学部3年に進学した頃には院進学と同時に専攻を変えることを決意していました。学部3・4年の頃は新たな専門を見つけるために情報科学系から電気・電子や熱流体等の工学系の授業まで幅広く出席し視野を広げる努力を心がけました。

新たな専攻として当時考えた候補は、航空宇宙工学・ロボット工学・情報工学と原子核工学でした。先の3つの専攻は人気があり、大学院入試競争が厳しいと予想できたためすぐに諦めました。一方、原子力は物理学科に所属していた私には放射線物理や核物理で馴染みがありましたし、当時の原子力の認知度は現在ほど高くなかったため私のような新参者でも比較的簡単に進学できそうだという感覚がありました。ただし、せっかく新たな専門分野を学ぶのだから、研究テーマはありふれたメインストリームのものではなく、発展途上で自分のような若手であっても自力で最先端を開拓できるチャンスのあるテーマを選ぼうと決めていました。

ちょうどそのような時期に、偶然にも私の院時代の指導教員が私の大学で毎週一回、原子炉工学を講義しに来ており、詳しく話を聞いてみると原子炉励起レーザーなるアイデアをテーマにしていることを知りました。これは、ウラン235等の核分裂性物質をガス状のレーザー媒質の励起源として利用し、核エネルギーをレーザー光へ直接変換する概念です。70年代から80年代後半にかけて米国と旧ソ連で研究され、米国では競争力あるアプリケーションを提案できなかったことから研究が打ち切りになっていました。初めて聞く話でしたし、アプリケーションすら決まっていなかったことが逆に、当時の私にとってはチャンスであったため、迷わずこのアイデアに飛び付き、原子炉励起レーザーを研究するために原子核工学を新たな専攻とすることを決めました。

大学院に入学し実際に研究を始めてみると、よく知られていないテーマであるだけに、数

---

<sup>1</sup> hi roki\_takezawa@mhi.co.jp



多くの困難に直面しました。例えば私の学位研究では円柱状の金属ウランの周りを金属ウランとポチエチレン減速材で構成される熱炉体系が取り囲む体系における動特性を解析対象としていましたが、このようないわゆる結合炉体系では空間依存性が重要となります。ところが、汎用的に結合体系の空間依存動特性解析を行える解析コードはありませんでしたので、独自に開発する必要がありました。これが私の炉物理研究の始まりです。この研究を始めた理由は原子炉励起レーザーのシステムとしての側面に興味を持っていたからですが、必要に迫られていつの間にか炉物理の研究をしていたという訳です。研究が自分の思い通りにいかないのは至極当然ですが、研究の全体像や位置づけ、方向性・目的を常に明確にしておくことが一つ一つの困難を解決し前進していくために大事であると思います。

コード開発を通じてモンテカルロ法とは初めて出会いましたが、これを機にモンテカルロ法の単純さとそれゆえの課題に興味を持つに至り、モンテカルロ法の知見を広げるための米国留学の機会にも恵まれました。また、研究が進むにつれて原子炉励起レーザーシステムへの興味もますます膨らみ、70・80年代に米国でこの分野を開拓した研究者の一人であるProf. Miley(U. of Illinois)と交渉し、2週間ほど先生と一緒に議論する機会を自分でセッティングしたりもしました。何事も機会は自分で作り上げるものであると思いますので、自ら積極的に行動することを忘れないで頂ければと思います。

現在は大学を無事に卒業し、エネルギー安全保障や低炭素電源の観点から原子力発電が世界的に見直されているなか、プラントメーカーのエンジニアとしてプラント輸出プロジェクトに参画しています。炉物理研究とは全く関係ありませんが、卒業と同時にまた新たな物事に挑戦し、自分をさらに成長させようと思ったことが今の仕事を選んだ大きな理由です。

学部生や院生などこれから研究を本格的に始める方々を想定して自分の経験を思いつくままに文章にしてみました。今後どのようなテーマに挑戦するにせよ、「自分の研究テーマは炉物理だ」などと限定することなく、またどんなに小さくてもオリジナリティに徹底的にこだわって研究を楽しんでもらえたら幸いです。

## 炉物理研究との出会い

### ～ 思わぬ展開から ～

北海道大学 原子炉工学研究室

辻 雅 司

原子炉物理の最初の出会いは北海道大学原子工学科の3年目の講義でした。当初は、原子力をやるからには原子炉物理をものにしないでと高い意気込みで張り切ったのですが、講義が進むにつれて昼なお暗い深いジャングルに迷い込んだような失踪感を感じるようになり、何とか単位をいただいたようなあり様でした。4年目に原子炉工学講座に配属され、与えられた卒業研究テーマは電子線形加速器の導波管内の電子軌道の計算であり、原子炉物理とは直接関係ない分野でありました。が、その当時の北大原子工学科は創設から間もない時期でもあり(私は3期生)で、教員陣も若く、また先輩たちも意気盛んで、後輩にあれやこれやと指導したが、**「原子炉の理論(グラストン&エドランド共著、伏見康治先生、大塚益比古先生訳)を読破したのか? え～! 読んでない。話にならん!」**とばかりに私たち後輩を責め立てるものですから、たまりません。小学校に入学して以来、教科書というものを最初から最後まで読んだ最初の経験でした。修士課程修了後、北大原子工学科原子炉工学講座の助手として採用されましたが、当時研究室の教授でありました小川雄一先生から、これはなんとも心もとないと思われたので、**「Nuclear Reactor Analysis (A.F. Henry 著、The MIT Press 出版)」**を教科書に、原子炉物理を一年間にわたって直々に教えていただきました。以上が私の受けた原子炉物理の初等教育であり、それ以後目覚ましく進捗があったわけではありません。

約35年前に教員として採用され、研究のまねごとを始めたわけですが、当初の専門は現代制御理論による原子炉の制御の分野であり、その以後はBWRの安定性解析や安定性診断と制御分野を中心に研究を行ってきており、炉物理研究に直接的にたずさわってきたわけではありませんでした。原子炉の制御研究では、お医者さんが患者さんを診断するには体の仕組みの知識がなければならないというような感じで、原子炉物理の知見を利用してきました。このようなわけで、原子炉物理を遠巻きにうろちょろしている間に、ひょんなきっかけで炉物理部会の皆さんの仲間に加わり、多少の毛色の違いにもかかわらずおおらかに快く受け入れていただき、炉物理夏の学校、炉物理部会運営委員、はたまた炉物理部門の編集委員とお手伝いができるまで、自分自身思わぬ展開に驚いている次第です。私と炉物理研究との距離がグンと近くなったきっかけは、1998年に三菱重工業から島津洋一郎先生(現在は福井大学)が教授として赴任されてきたことにあります。テレビドラマ**「踊る大捜査線」**で織田裕二が扮する刑事が、**「事件は現場で起こっている!」**と叫ぶ有名なシーンがありますが、まさに**「問題は現場で起こっている!」**で、先生の赴任によって現場の問題を生みの形で知ることができました。2010年には、**「実機プラントにおけるドブラー係数測定法の開発」**の研究に対して、島津先生、原子燃料工業(NFI)の山崎正俊氏、私の3名へ、日

本原子力学会より技術賞を授与いただきましたが、この研究も現場の声から生まれたものでした。

2003年初秋に、NFIの花山育志氏と山崎氏が、共同研究打ち合わせのために島津先生を訪れたことから、この研究が始まります。NFI側から、PWRの零出力炉物理検査の効率化のため、炉物理検査中に実施している等温度反応度係数(ITC)測定実験を省いて、減速材温度反応度係数(MTC)を直接測定できないであろうかとの提案でした。従来のITC測定実験では、核加熱無しで冷却材を昇温・降温させてITCを測定し、核設計コードから評価したドップラー係数を差し引くことでMTCを求めるものとなっています。NFIの提案の趣旨は、零出力炉物理検査の所定の実験のために炉出力変更操作を行います。この過渡炉出力信号中に含まれる減速材温度反応フィードバックに係る信号を抽出し、これによりMTCを測定できないかというものでした。というのは、この共同研究のお話があった時期に、私はBWRのLPRMの炉雑音信号から安定性に係わる信号を主成分分析法(PCI)で抽出し、減幅比を算出する研究をしていたこともあって、この手法をMTC測定に適用できないかと考えてのことでした。しかし、信号分離の基本前提は信号中に含まれる信号間の独立性です。このような観点から過渡炉出力信号からMTCのみに係わる信号を抽出することは困難であることをお話ししました。しかし、同時に提案されている問題は、私の専門の制御分野の動特性同定問題に相当すること気がつき、動特性同定法適用によるMTC測定の提案をしました。動特性同定とは、入出力の時系列応答が測定などで既知であるが、入出力間の時間挙動を記述するシステムの数学モデルの一部の数学構造や、あるいは数学モデルのパラメータの一部が未知であるもので、この未知な部分を入出力間の応答関係が再現できるように推定していくものです。

こんな経緯で研究は始まり、その当時4年目の学生であった青木憲志君(現在NFIに所属)に卒業研究として研究を開始してもらいました。研究では、動特性同定が比較的簡単に行える周波数領域の手法を用いることにし、同定のための動特性モデルの導出、MTC測定のための適切な過渡出力条件の設定、動特性モデルに含まれるパラメータの誤差に対するMTC推定値への影響(誤差感度解析)を行いました。この研究の結論としては、MTC測定は可能であるが、動特性モデルに含まれるパラメータの誤差が、推定されるMTCへの誤差として大きく拡大してしまうため、現実には適用が難しいことが分かりました。これは、零出力炉物理検査時のMTCの値が小さく、過渡炉出力変化の反応度フィードバックにおいてはドップラー反応度が支配的であるため、ドップラー反応度フィードバックに係るパラメータの誤差がMTCの推定に大きな誤差をもたらすためです。一方、研究の当初の目的はITC測定実験を省いてMTCを測定するものでしたが、ITC測定実験を実施してITCを測定し、動特性同定法を過渡炉出力データに適用するならば、ドップラー係数を測定でき、しかも誤差感度も小さく抑えられることも分かりました。このことを研究成果発表会でお話したところ、意外な反応がありました。従来のITC測定実験では核設計コードから

ドップラー係数を評価して MTC を求めていましたが、これは軽水炉燃料に対してこれまでの長年の経験と実績によりドップラー係数を精度良く評価できていることが背景にありました。しかし、今後 MOX 燃料や高燃焼度燃料のような新燃料が導入されることでもあり、核設計コードの検証にもドップラー係数を直接測定できるのはたいへん有意義であるので、ぜひこの方向で研究を進めていきたいと思いますということになりました。

開発した動特性同定法によるドップラー係数測定法を実機データに適用するため、零出力炉物理検査時の過渡炉出力データを採取させてもらうよう、NFI の花山氏、山崎氏、大岡靖典氏の 3 氏による電力会社との粘り強い交渉が行われ、電力会社の特段の厚意もあり、データが採取できることになりました。零出力炉物理検査では、制御棒反応度価値などを反応度フィードバックが効かない低出力領域で測定しますが、この実験を行う前に、制御棒を引き抜いて反応度を加え、炉出力を一定炉周期で上昇させ、反応度フィードバックが効き始める出力領域を決定する実験が行われます。この実験は上限値確認試験と呼ばれていますが、測定対象をこのときの過渡炉出力応答とすることにしました。ドップラー係数を測定するためには、ドップラー反応度フィードバックが十分に観測されるまで出力を上昇させることが望ましいのですが、上限値確認実験では反応度フィードバック効果が確認された時点で炉出力低下操作が行われてしまい、ドップラー係数の測定にはなほ不利な条件です。また、採取できるデータは零出力炉物理検査で用いている標準計装系の出力のみで、出力領域の炉外中性子検出器応答と冷却材平均温度のみでした。炉心入口温度や出口温度もデータとして測定できると動特性同定がもっと容易になるのに……。でも、せっかくの実機データ採取の絶好の機会を見逃すわけにはいきません。

最初のデータの採取は 2005 年 9 月に行われ、NFI がデータ採取を、北大側がデータ解析を行うことになりました。しかし、残念なことに測定データには約 100 秒周期のノイズが大きく混入しており、上限値確認実験での炉出力上昇に伴って冷却材平均温度の僅かな温度上昇も観測できるのですが、ノイズのため正確な特定ができませんでした(ん～残念!)。今回は、ノイズ対策も万全に 2007 年 1 月に実測が行われました。今度は、測定は NFI チームの周到な準備が実って大成功でした。バトンは解析を担当する北大側に渡されたのですが、これからも山あり谷ありで一直線の怒涛のゴールインとはいきませんでした。測定したデータを解析したところ、零出力から出力が上限値に達するまで 200 倍ほど増加しますが、その間に電流計のレンジ切りかえが 2 回ほど行われ、この間しばらく信号の乱れがあるためこの部分はデータとして使用できず、間欠的なデータとなることが分かりました。このため、これまでは動特性同定には周波数領域の手法を用いてきましたが、時間領域の手法に変更する必要性がありました。上限値確認実験では炉出力と冷却材平均温度がそれぞれの最大値に達する時間に 50 秒ほどの大きなずれが観測され、これを動特性モデルで再現するためには、これまで使用してきた動特性モデルを大きく変更する必要性がありました。さらに、我々の提案したドップラー係数測定法は ITC 測定実験と上限値確認実験を組み合

わせるものですが、それぞれの実験での燃料棒温度分布に差異が生じています。すなわち ITC 測定実験では核加熱によらないで冷却材温度を準静的に変化させるため、燃料棒温度は冷却材温度分布と同様に炉内一様分布となります。一方、上限値確認実験では核加熱が行われますので、燃料棒温度に分布が現れます。すなわち、ITC 測定実験と上限値確認実験での（炉心平均化された）ドップラー係数には、この燃料棒温度分布の差異による違いが生じ、2つの実験結果からドップラー係数を測定するためには、補正係数を導入する必要があります。以上のような考慮のもとに 5つの工程からなるドップラー係数測定法を提案しました。詳しくは論文をご覧ください(J. Nucl. Sci. & Technol, 46[5] (2009), pp.413)。本手法は、特別な実験の導入や専用の新たな計測系を使用することなく、零出力炉物理検査のルーチン実験である上限値確認実験を標準計装系で計測するだけでよい点が自慢となっています。当初は厳しい実験条件を恨んだものですが、何が幸いするか分かりませんね。本手法は生まれたばかりで、本当の評価を得るためには多数の実際の適用を通しての実証が必要であり、その過程で改善すべき所も明らかになるものと考えています。今回の研究で、私の原子炉制御の知識と経験が、島津先生や NFI の研究者の皆さんの原子炉物理への深い造詣と現場のニーズへの研ぎ澄まされた肌感覚とが融合された結果として、炉物理研究になんらかの貢献ができたならば、共同研究の醍醐味でもあり、研究者としてこれに優る喜びはありません。

炉物理研究との出会い  
～それは偶然の賜物だった～

名古屋大学 山本章夫

大学に入学したとき、将来、大学で核分裂炉の理論を教えるようになるとは、夢にも考えていなかったことは確かである。なぜここまで「変節」するに至ったのか、振り返ってみることにしよう。

1982年、大学への進学にあたって、私は核融合の研究を目指していた。核融合関係の仕事に従事されていた方の意見なども伺った上で、自宅から近く、核融合研究の一つのメッカであった京都大学の原子核工学科に進んだ。当時は、1979年のTMI事故などをはじめとして、原子力に対する反対運動が高まっていた頃であり、高校生だった私にとって、核分裂炉を目指したくなるような情報に接することがなかったことを考えると、ある意味、核融合は当然の選択だったといえる。同級生についても、積極的に核分裂炉の研究を希望している者は少数派(というか、ほとんどいなかった?)ではなかったかと記憶している。

1, 2年生の時は、京大生の良き(?)伝統にならい、あまり授業に出席しなかった。そのため、出席不足で単位が認定されないことに潜在的な恐怖を抱いており、卒業から20年以上たった今でも、たまに、出席不足が原因で単位をとれなかった夢を見ることがある。3年で専門の授業が始まり、核分裂炉に関する様々な講義を受けたはずであるが、残念なことに(真摯に反省すべきことに)炉物理の講義の記憶がほとんどない(K.K先生、申し訳ありません)。一方、核融合を目指すつもりであったため、電磁流体力学などについては、比較的覚えている(とても難しかったことを)。

さて、3年生を終了した時点で、研究室配属が行われる。現在はどのようなシステムになっているか分からないが、当時は、学生同士の話し合いにより、研究グループへの配属を決めていた。希望の多い研究グループについては、学生間の交渉が行われた。逆に学生が行かない研究グループもあり、数年間にわたり学生が配属されていなかったため、「幻」と呼ばれていた研究グループもあったと記憶している。この研究室配属において、当然ながら筆者は核融合(プラズマ、当時Cpグループと呼ばれていた)を希望したのであるが、前述したような状況から、Cpは希望が多く、(中略)、結局のところ、筆者は、Crグループに行くことになった。Crのrは、reactorを示しており、要するに原子炉物理をやっている研究グループである。CpもCrも同じCグループであり、研究という立場から考えると、p(プラズマ)とr(リアクター)も大差ない、というようなことを当時プラズマの研究をされていた先生から聞いた記憶がある。今にして思えば、これはCpグループへの学生の集中を緩和するための説得だったのであろう。このように、偶然(というか、成り行きで)炉物理の世界に足を踏み入れることになったわけがあるが、それでもまだ、大学院では核融合に関する研究をやろうと考えていたような記憶がある。

今振り返ると、この研究室配属は、筆者のその後のキャリアを大きく左右するものであったことは間違いない。仮に当時  $C_p$ (プラズマ)グループに配属されていたら、今頃カダラッシュにいたかもしれないし、土岐の核融合研で研究していたかもしれない。少なくとも、大学で炉物理の研究・教育をすることがなかったのは確実である。こう考えると、キャリアの大枠は、些細なことで決まることもあるのだと感慨すら覚える。

さて、炉物理の研究室に配属になり、球面調和関数法の大家であられ、また、800 ページ余の教科書「原子炉物理」を後年執筆された K.K 先生に師事することになった。炉物理研究グループに配属されたのは、筆者一人であった。最初にいわゆる研究室(学生部屋)に案内されたとき、机が埃をかぶっていたのが印象的であった。たしか、 $C_r$  グループは、前年度、学生の配属が 0 であり、大学院生が一人いたものの、姿を消していたようだ。

K.K 先生から卒業研究テーマとして、「球面調和関数法を用いた輸送計算の加速法についての研究はどうかね」とご示唆いただいたが、それをガン無視し、当時、より難易度が高そうに思えた二次元  $R-Z$  座標系における球面調和関数法による輸送計算コードの開発に(勝手に)取り組んだ。これが、著者の炉物理キャリアの第一歩となった。ちなみに、加速法については、次の年に配属されてきた N.H 氏(現 NFI)がこの研究を着実に遂行し、すばらしい成果を出されたことを付記しておく。

卒業研究には、大学院入試が終わった 9 月頃から取り組んだと記憶している。球面調和関数法による輸送計算は、 $X-Y$  座標系でも面倒であるが、 $R-Z$  座標系ではさらに面倒で、いわゆる general order の中性子束モーメントに対する二階の偏微分方程式は、これを書き下すだけで A4 1 ページ分になり、Mathematica のような数式処理ソフトが使えなかった当時、導出した式が間違っていないか、確認するだけでも大変だった。

コードの作成は、研究室の先輩が残された  $X-Y$  座標系のコードの構造を参考にしつつおこなった。当時は、大型計算機を使って全てのことを行う必要があり、また、「フルスクリーンエディタ」、つまり、現在で言うところのエディタの原始的なものがようやく使えるようになったばかりで、しかも、「フルスクリーンエディタ」を使うためには、大型計算機センターまで出向く必要があったが、その端末は、いつも混雑していた。そこで、大型計算機センターでなく、比較的利用者が少なかった情報教育センターの大型計算機を用いてコードの作成に取り組んだ。

上記のように、計算機を巡る環境が現在と全く異なっていたので、コードの開発にあたっては、まず、「Fortran 用のプログラムシート」にコードを手書きし、紙の上である程度コードができてから、大型計算機の端末を用いてこれを入力し、デバッグするという手順を踏むことになった。現在から見ると、実に非効率な開発スタイルであるが、それでもなんとかかんとか、12 月頃にはコードも完成し、卒論も(勝手に)書き上げた。年が明けてからは大学にはほとんど行かず、炉主任の試験勉強をしていたような記憶がある。ちなみに、前述したように、3 年生まではあまり炉物理の勉強をしていなかったはずであるが、大学院入試および原子炉主任技術者の試験勉強で、ラマーシュを一通り「自主勉強」した。

大学院は、「大型計算機を自由に使えるよ」という言葉にだまされ(?)、京大炉の KUCA において、K.K 先生(現エネルギー政策研究所所長)と S.S 先生(現原子力安全委員)に師事することとなった。KUCA においては、当時注目を集めていた高転換軽水炉に関する研究を行うことになったが、具体的な研究テーマについては、「自学自習」の校風に基づき、自分で探し当てることとなった。その結果、主として決定論的な解析手法について、臨界集合体に特有の現象(異なった物質板の共鳴干渉、非等方性の取り扱いなど)を含めて検討することになった。大学院においては炉物理のより広い側面を勉強することができ、炉物理の知識の幅を広げることができたと思う。ここに至って、実世界に存在する原子炉という複雑なシステムの振る舞いを予測することが可能であり、また、自らその理論体系に改良を行うことにより、その予測能力を高めることができる原子炉物理のおもしろさに目覚めたといえる。後年、民間企業でより複雑な動力炉の炉心設計に携わるようになって、この思いはますます強まった。大学入学当時に核融合の研究を目指していたことも忘れ、就職に際しては、もはや核融合は選択肢には入っていなかった。京大炉の生活は、K.K 先生のお話を朝早くまで拝聴させていただいたことや、S.S 先生、K.M 先生(現 INSS 所長)、当時博士課程だった T.M 氏(現京大炉教授)と一緒に夜な夜なコーヒーを飲んでいろいろな議論をしたことを含め、良き思い出である。

さて、そろそろヨタ話を締めくくろう。

炉物理は、非常に広範な学問体系なので、全分野をある程度カバーするだけでも、かなりの時間を要すると思われる。筆者の場合、学部の学生を対象として教える炉物理の全ての分野を、ある程度、まんべんなく理解したと思えるようになったのは、2003 年に大学で炉物理の講義を始めてからであり、おおざっぱに言って約 20 年を要している。ただ、それでも「昔の人が知っていて我々が知らないこと」、つまり「ロストテクノロジー」が非常に多くあると感じている。炉物理という基盤分野において、いわゆる「知の領域を拡大する」という営みとともに、きちんと知識伝承を行っていくことは、大学にいる人間としての務めであるとの感を深くしているところである。

一方で、原子炉物理の本質の一つは、「原子炉の中で起きている物理現象を体系的に記述すること」なのであり、実は、それ自体、さほど複雑なものではない。現在の原子炉物理は、「原子炉内の物理を記述するための理論」と、「計算精度を落とさずに計算時間を短縮するための近似」とが混在している。炉物理を教育する者は、これらをきちんと区別して、学ぶ者の目的に応じて教えることが肝要であると思われる。また、原子炉物理をこれから勉強しようという方は、まずは原子炉内で実際に起こっている現象が、どのように理論に置き換えられているか、を常に意識しつつ勉強することが有用であろう。また、できるだけ簡単な例題や問題を自ら解くことも重要である。「人間は、経験したことしか真に理解できない」のだから。



炉物理研究との出会い  
～現場で学ぶ炉物理～

山本 徹<sup>1</sup>

大学の炉物理研究室の隣の研究室に学び現在に至っている私にとって、このタイトルは？と思い、また、編集委員から「先輩方の経験を聞くことで、研究との出会いやチャンスが大切である・・・」と連絡いただいて、先は長いと思っているのに、先輩と呼ばれて振り返って何か書くのか？と自問自答しましたが、とにかく振り返ることにしました。サブタイトルは「現場で学ぶ炉物理」？

大学の工学部原子核工学科の学部に進み研究室を選ぶ際に、核物理研究にあこがれていた私は、理学部において核物理研究をされていた研究スタッフで構成された研究室（核計測計装講座）に進みました。卒論として線形加速器による放射光を利用した  $^{232}\text{Th}(\alpha, p)^{231}\text{Ac}$  -崩壊  $^{231}\text{Th}$  核変換による  $^{231}\text{Th}$  の励起準位の研究に携わりました。加速器、核変換、溶媒抽出による核種分離、Ge(Li)検出器によるガンマ線計測、励起順位の組み立て、論文の物理学会（地域学会）への発表、中性子核変換理論の勉強などかなり盛り沢山の分野について指導していただき大変刺激的であったと思います。

修士課程に進むと、研究室の先輩が原子核の質量公式と遅発中性子先行核の存在分布の研究をされていたこと、その時代に核分裂の統計理論に関する研究が発表されたことに刺激されて、自分なりに核変換理論から統計理論の式を構築し、質量収率、核分裂中性子数及び核分裂片の運動エネルギーの核分裂片質量数への依存性の測定データを再現する半経験的なモデルの研究を行いました。この成果については、米国ワシントンにおいて開催された国際会議と日本原子力学会誌英文誌に発表することをご指導いただきました。

この理論の研究と並行して、当時国際的に盛んになっていた低エネルギー中性子による  $[n, x]$ （ここでは  $x$  は、非弾性散乱中性子、陽子など）の中性子断面積の測定実験の研究を開始しており、米国での国際会議への出張の際に、この実験を実施している米国の研究所を訪問し施設を見学するなど直接教えていただきました。BNL（別の用事で訪問）、ORNL、LANL、GA の研究所(サンディエゴ)まで米国を東海岸から西海岸までバスにより移動しました。この現地調査の知見を生かして学科に新設されたダイナミトロンを利用して deutron（重水素の原子核）を加速し(d,t)、(d,d)反応により発生させる中性子をアルミニウムや銅などの金属ターゲットに照射し、同時に発生するガンマ線を自ら製作した（核計測計装講座らしくご指導いただいた）容量の大きい Ge(Li)検出器により測定しました。限られた加速器の利用時間の中で、測定はほとんど徹夜作業でした。この実験は優秀な後

<sup>1</sup>独立行政法人 原子力安全基盤機構

輩によって受け継がれました。

当時核分裂生成物 (FP) の崩壊熱の測定や総和計算の研究が盛んであったことから、核分裂の統計理論に基づく経験的モデルと FP の崩壊熱の総和計算を組み合わせた研究を行いました。核分裂の統計理論の半経験的モデルは、二つの核分裂片が分離した直後の状態 scission point において、2 つの核分裂片の間隙 (scission point distance) を経験的パラメータとして重い核分裂片の質量数により変化するとし、質量収率の測定値がある核分裂 ( $^{235}\text{U}$ 、 $^{239}\text{Pu}$  の熱中性子核分裂や、 $^{252}\text{Cf}$  自発核分裂など) の質量収率を再現するように scission point distance を決めて、核分裂収率が測定されていない核分裂核種については、既存の scission point distance のデータセットの内挿から scission point distance 決めるといふものです。これにより、測定データがない核種の核分裂についても、核分裂片の質量収率、電荷分布 (同じ質量数を持ち、異なる陽子数を持つ核種の分布) を推定することが可能となりました。FP の崩壊熱の総和計算は、FP の詳細なベータ崩壊チェーンの計算を行い、線と線に分けて、それぞれにより放出される全エネルギーの時間依存 (核分裂の瞬間からの時間) を計算するものです。この計算を実施するためには、核分裂により生成する全て (理想的には) の核種の半減期、崩壊当たりの線と線の全エネルギーが必要であり、Table of Isotope からこのデータを調査しました。しかしながら、短半減期の核種については、線と線の測定データが少なく、測定があっても限られた範囲のデータであり、崩壊当たりのエネルギーとして採用するには不十分な核種が沢山ありました。そこで、崩壊様式がよく知られた核種についてベータ崩壊の Q 値と線又は線の全エネルギーの相関を調べ、経験的な比を導出しました。これを使用することが、崩壊熱の時間依存の測定データを再現するためのキーポイントとなりました。これを学位論文として何とか認めていただきました。

大学での研究を卒業して、BWR 原子力発電所の建設を行うプラント・燃料メーカーに就職しましたが、何をやりたいかと聞かれて、発電所の中心である炉心の設計をやりたいと回答し、炉心設計課に配属されました。当時、日本はまさに原子力ブーム期であり、就職したメーカーは国内の 6 機のプラントの建設を手掛けていました。米国からの輸入技術ということで、英語で書かれた BWR 炉心設計に係る解説書を勉強しました。最初指導していただいた仕事は、動力炉核燃料開発の再処理施設において再処理した初期の型式の BWR ウラン使用済み燃料の核種組成測定データの解析であり、電力会社からデータを提供されて、メーカーの集合体計算コードにより計算した結果と比較するものでした。横軸に燃焼度、縦軸に組成密度を対数目盛りでプロットし、測定データと比較した図を作成し、電力会社に対してよく合っていると説明したものでした。モンテカルロ計算コードも導入された頃で、マニュアルを勉強して使用済み燃料プールの集合体格子計算に適用した計算を行いました。この時代、ABWR の日米共同開発の最盛期であり、米国のプラントメーカーに国内メーカーの技術者が多数派遣されていましたが、BWR の制御棒として Hf を吸収

材として使用する長寿命制御棒の開発を同時に開始している頃であり、これに寄与すべく米国のプラントメーカーに派遣されて、Hf の中性子吸収による発熱の評価のための基礎的データとして、Hf 同位体核種の中性子捕獲反応によるガンマ線のエネルギー分布の編集を行いました。測定データが十分でないガンマ線のエネルギー領域については、核反応理論により補う研究を行いました。この長期の米国滞在は大変ユニークな経験でした。

炉心設計課での次の業務は、炉心の運転管理の業務であり、燃料を提供している 500MWe 級の BWR の取替炉心の燃料配置設計、運転期間中の制御棒パターン変更計画の電力会社への提案と、制御棒パターン変更の立会いを行いました。368 体の燃料を装荷する炉心の燃料の配置は、基本的に 1/4 対称としているので、92 体の配置設計を行います。その際、炉停止余裕や熱的余裕の観点から制御棒を囲む 4 体の燃料の組み合わせ意識しながら行います。また、経済性をよくする必要もあり、いろいろとノウハウがある設計技術です。炉心の運転管理の業務のひとつは、制御棒パターンの変更のための出力レベルの設定です。当時の燃料は、ある一定の燃料棒線出力密度より高い条件で、制御棒を引き抜き燃料棒の出力を急激に変化させると破損する可能性があったので、制御棒パターンの変更（引き抜き）を行う場合、原子炉の出力を下げました。この作業は、BWR 炉心シミュレータを駆使して行いましたが、出力レベルの変更の際のトランジェントの解析には苦勞をさせられました。現在では当たり前になっている Xe の反応度の時間変化を追従する機能がなく、平衡ゼノンと固定ゼノンの計算から低出力での燃料棒出力を推定しました。燃料を壊してはならないので、発電所の制御室において制御棒パターンの変更に立ち会うのはかなりのプレッシャーでした。

次の業務は一連の高燃焼度燃料の開発と設計であり、燃料集合体の高さ方向の濃縮度やガドリニア濃度、燃料集合体中の燃料棒の配置、炉心内での燃料集合体の配置の工夫による炉心の反応度の向上（運転制限値に対する余裕を確保しつつ）の技術の開発は、大変エキサイティングなもので、日本人ならではの繊細な技がこの分野の技術の向上をもたらしました。米国と国内のメーカーとの共同開発により行われ、私はその中に身をおき、すごい先輩や仲間に刺激されながら進んだものです。取替燃料の開発に加えて、初装荷炉心の開発にも大きな進歩がありました。それまでは初装荷燃料は取替燃料に比べ濃縮度が低く、取出し燃焼度が低くなっていましたが、この燃焼度を高め取替燃料並みにすることが目標であり、初装荷燃料の濃縮度を高めるとともに、濃縮度の異なる集合体から初装荷炉心を構成する工夫がありました。初装荷燃料の濃縮度を高めた結果、初装荷炉心を運転後、燃料取替え無しで（燃料配置換えは行わない）第 2 サイクルの運転が可能な初装荷炉心の開発が行われていました。

プラントメーカーに入社した当初から、プルサーマルの研究開発が行われており、いよいよ国内のプラントに取替燃料として装荷するプロジェクトに加わりました。このプロジェ

クトは海外で使用済み燃料を再処理して出てくるプルトニウムを海外の加工施設で MOX 燃料集合体に成型加工し、海上輸送、既設プラントに取替燃料の一部として装荷するものです。この頃、フランスの原子力関係の教育機関が海外の関係者のために核燃料サイクルのセミナーを開催しており、これに参加させてもらいました。ウランの採掘、転換、濃縮、再転換、燃料成型加工、発電所での燃焼、再処理、高レベル廃棄物の貯蔵、MOX の成型加工等、燃料サイクルの先進国であるフランス国内の施設の現地視察をハイライトにしたもので具体的なイメージをつかむために大変有意義でした。10 年遅れた BWR プラントにおける MOX 燃料の実際の利用が国内で始まり喜んでます。燃焼を開始した MOX 燃料は、D 格子燃料で、制御棒を装荷する側の燃料チャンネル間の水ギャップが、その反対側より狭くなっている型式の燃料であり、この非対称のため燃料棒の濃縮度の種類が (MOX 燃料では富化度の種類) 多くなる特徴がありました。MOX 燃料の富化度の種類を多くし、ガドリニア燃料棒以外、全て MOX 燃料とする設計も考えられましたが、富化度の種類を多くすると MOX 燃料の成型加工のコスト高くなるので、制御棒が入る側の燃料棒 3 本をウラン燃料とする設計としています。

その後、プラントメーカーを離れ国の委託事業を実施する財団法人に移り、軽水炉 MOX 炉心についての将来型概念の調査事業として、PWR と BWR の高減速全 MOX 炉心の開発に参加しました。この時期、将来型の MOX 炉心概念として、一方で高転換炉がありましたので、従来格子より水対燃料比を大きくし Pu を効率よく燃焼する概念は、高転換型と反対の概念であり、ユニークなものでした。OECD/NEA のワーキングパーティ (WPPR<sup>2</sup>) の報告書<sup>3</sup>の一部にも、その成果を書いています。

この将来型 MOX 炉心概念に関する臨界試験を、委託事業の一部としてフランス原子力庁 (CEA) との共同研究としてフランスのカダラッシュ研究所の臨界試験装置 (EOLE) を利用して実施することとなり、その試験の開始時期に日本側からの直接参加者として、1 から 2 ヶ月程度の駐在の形で、述べ半年程度同研究所に滞在しました。この試験は、軽水減速炉の全 MOX 炉心の臨界試験であり海外でも前例のない試験となりました。基礎的な一様格子炉心から PWR 及び BWR の模擬炉心まで含む系統的な 7 種類 (大きくすると) の炉心の試験からなります。MOX 燃料はウラン燃料と異なり放射線を出すので、被爆とともに発熱の問題があり、炉心タンクの燃料格子板に燃料棒を装荷したり取出したりする試験担当員は大変でした。炉心タンクに水を入れない状態で、炉心中の空気の温度は 70 度程度になっていました。炉心中の燃料棒の相対出力を測定するため、炉心を臨界にし 30W 程度で 10 分程度燃焼させ停止し、冷却させた後燃料棒を炉心から引き抜き、隣接する測定室に運び高純度 Ge 検出器でガンマ線を測定する作業 (冷却時間を変えて 3 回繰り返す) については、当初には試験担当者が自ら燃料棒を測定台に設置する作業を行っていましたが、その後機

<sup>2</sup> Working Party on the Physics of Plutonium Fuels and Innovative Fuel Cycles

<sup>3</sup> Plutonium Management in the Medium Term (OECD 2003)

械による自動化がなされました。この試験には、国内プラント・燃料メーカーから技術者が派遣され、最初は3ヶ月、後には1年程度の参加を行い、MOX燃料の炉物理試験を現場で学ぶ機会になりました。また、試験データを電力会社とプラント・燃料メーカーが使用できるようにフランス側との協定に配慮されました。時を同じくして、国内ではMOX燃料を炉心に全数装荷するABWRの安全審査を開始しようとしている時期であり、核設計コードの検証に使用されるデータとして注目されることとなりました。委託事業での試験データの解析には、日本原子力研究開発機構において開発され公開されているSRACとMVPコード、核データライブラリとしてJENDL-3.2その後-3.3など最新のライブラリを使用して実施しました。この解析業務を通して、炉物理解析手法について多くのことを学びました。

その後、財団法人から現在の独立行政法人に移ることになり、財団法人時代の委託事業を引き継ぐこととなりました。臨界試験装置では、通常未燃焼の試験燃料を装荷するものですが、国際共同研究として実施されたREBUS計画(平成18年に試験終了)では、炉心の一部にヨーロッパの商用炉において燃焼したMOX又はウラン燃料から加工して組み立てた燃焼後試験バンドルを装荷する特殊な臨界試験であり、新燃料の試験バンドルを装荷した炉心の臨界試験水位と比較することにより燃焼反応度を直接測定する前例のないユニークな試験であり、5種類の炉心の臨界試験を行いました。この試験のキーワードは「燃焼」であり、軽水炉での燃料の燃焼の解析手法の検証に役立つ試験データ(燃焼燃料の核種組成測定値、臨界試験での臨界水位、水位反応度、核分裂率分布、中性子束分布など)が提供されています。この試験データは、燃焼解析を含むもので、前記の炉物理試験と同様のコードとライブラリを利用して実施しました。この試験の解析について、日本原子力学会の英文誌に投稿し、平成21年度の日本原子力学会賞に推薦していただき、「技術賞」(研究名「燃焼後MOX燃料の炉物理試験」)を共著者の方々とともに受賞しました。

こうやって振り返ってみると、身をおいた先々で多くの先輩方や同胞に恵まれ、刺激されて進んできたなと思います。楽しみ(つらさでもあり)は、初めて出会うさまざまな(炉)物理的現象や計算結果を前にして、なぜだろう?とその背後にあるphysicsを考えること、これが原点かなと思います。最後に、ここまで辛抱して読んでいただいた方々に感謝します。