部会活動 炉物理部会

炉物理研究の歩みと役割

臨界実験が果たした意味とこれから

炉物理部会の前身は、本学会の最初の研究連絡会として設置された炉物理連絡会であり、本部会が取り扱う炉物理研究では、各年代の原子力開発の動向あるいは事故などに対応した研究が進められてきた。原子力導入期には、核データの整備が不十分で、計算精度も十分でなかったことで、臨界実験が不可欠であり、核計算手法の改良を図ることが極めて重要な炉物理的課題であった。本稿では、臨界実験が果たした役割、および国際的交流の場としての OECD/NEA と「炉物理研究」特別専門委員会の活動を振り返るとともに、今後の取組みと課題を提示する。

I. 炉物理部会の歩み

我が国における原子炉の歴史を振り返ると、昭和32(1957)年8月27日に、日本で最初の原子炉 JRR-1 に原子の火が灯り、それ以降、1960年代に次のようなダイナミックな展開があった。

- ・1962年8月23日 軽水臨界実験装置(TCA)の臨界
- ・1963年10月26日 動力試験炉 JPDR の初発電
- ・1964年6月25日 京大研究用原子炉(KUR)の初臨界
- ・1967年4月29日 高速炉臨界実験装置(FCA)の臨界

また、7 国立大学にも未臨界実験装置が設置され、炉物理研究が精力的に進められた。

1959年に創立された日本原子力学会のなかに、1961年に炉物理関係の最初の研究委員会として「臨界実験」専門委員会(主査:武田栄一先生)が設置されている。炉物理連絡会は1967年9月25日に日本原子力学会の最初の研究連絡会として設置され、1993年12月の研究部会制への移行に伴い、炉物理部会となり現在に至っている。

炉物理連絡会の発足は炉物理研究者から非常に期待され、初期から活動的であった。1968年4月に発刊された「炉物理の研究」や1969年から開始された「炉物理夏の学校(1985年より夏期セミナーに名称変更)」のテーマから炉物理研究のトピックスを原子力開発における主な出来事と併せて以下に概観したい。

「炉物理の研究」第1号の巻頭言で武田栄一先生は、「炉物理の研究にたずさわるものは原子力研究の方向を決めたり、フィロソフィーを作り出してゆく仕事は自分たちの責任だというくらいの自覚をもってもらいたい」と述

べられている。炉物理研究に原子力開発をリードする役割があることを、今後も自覚して行かなければならない。

1970年代は、1977年に高速実験炉「常陽」が臨界になるなど、高速炉の炉物理が大きなテーマであった。一方、1979年に TMI 事故が発生し、「炉心事故解析」も重要な課題と認識されるようになった。

原子力学会の「トリウムサイクル調査」研究専門委員会の報告書が1980年に発刊されるなど、1980年代になると、トリウムサイクル、プルトニウムの軽水炉利用も議論されるようになった。一方、1986年のチェルノブイリ事故を踏まえ、「受動的安全炉・固有安全炉」の議論が活発化した。

1990年代は、オメガ計画などマイナーアクチニドの「分離・変換技術」がトピックスとなり、「加速器駆動システム(ADS)」の議論も開始された。一方、1994年に高速増殖原型炉「もんじゅ」の臨界達成と1995年のナトリウム漏えい事故があり、FBR 開発に大きな成果と痛手となった。

1999年に JCO 臨界事故が発生し、その反省を踏まえて、「臨界安全研究」の重要性がより認識されるようになった。また、2000年代になると、世界的な「原子力リネッサンス」の動きと我が国の次世代軽水炉開発もあり、「軽水炉高度化・炉心管理」などのトピックスが増加して、現在に至っている。

以上のように、炉物理研究は、原子力開発の根幹を担っており、各年代の原子力開発の動向あるいは事故などに対応した研究を進めてきている。

原子力導入期の炉物理の課題(松浦先生の寄稿)、OECD/NEA などを通じた世界との交流活動と「炉物理研究」特別専門委員会の活動(JAEA・森氏の寄稿)を振り返り、将来の取組みと課題をまとめてみたい。

Steps and Role of Reactor Physics Research—Meaning and the Future of Critical Experiments: Technical Divisions of Reactor Physics

(2008年 11月18日 受理)

Ⅱ. 原子力導入期の炉物理—臨界実験が果たした意味

原子力研究・開発・利用の歴史においてもっとも画期的な仕事のひとつは、1942年12月のCP-1(シカゴパイプ1号)での持続的核分裂連鎖反応の実現とその制御可能性の確認である。これが世界最初の臨界実験であり、この実験によって炉物理理論が初めて実験的に確認され、原子炉が現実的に構築可能な施設となし得ることが確認された。すなわち、核燃料を含む中性子増倍特性をもつ体系の材料バックリングと幾何学バックリングが一致した場合に、その体系内に中性子を媒介とした核分裂の連鎖反応が、外部からの中性子を供給することなく持続的に実現することが確認されたのである。これは、ある材料構成の原子炉の実現可能性を臨界実験によって確認できることを明らかにした。別の見方をすれば、原子炉理論による計算値を臨界実験結果により端的に検証できることを意味している。

臨界実験の際立った特徴は、中性子と原子核の反応という極めて微視的な現象の集合として生じる臨界という巨視的状态を、ボルツマン方程式を介して記述される波動方程式の解として実現できることを示していることである。いわば、微視的視点と巨視的視点を結合していることである。

また、CP-1実験のもう一つの重要な点は、臨界状態への近接を「逆増倍法」という非常に安全な実験方法で実施したことである。臨界状態の形状が即発臨界を引き起こす増倍係数の等価値(約 $0.7 \times 10^{-2} \Delta k/k$)よりずっと精度よく推定できないときに、もし最初から予想臨界形状を組み立てて実験したとしたら、それは恐ろしく不確実で危険な実験となる。現在は精度のよい核データの整備も進み、理論計算値の精度も高くなっているが、もし全く新しい形式の原子炉を臨界にするときは、やはり「逆増倍法」を使用する必要があると考えられる。

幸運なことに、当初から臨界実験における実験精度を $10^{-4} \Delta k/k$ 程度とするのはそれほど困難ではなかった。一方、核データの精度も計算技術も十分でない1950～1960年代では、理論計算の精度を $10^{-2} \Delta k/k$ 以上にするのはほとんど不可能であった。このような事情で、当初は原子炉の構想ごとに臨界実験装置が設置された。

初期の炉物理の指導理論は、原子炉体系の中性子生成、吸収、漏洩のバランスを書き下すボルツマン方程式をエネルギー1群の拡散方程式に形式化し、さらに1次元2階の波動関数に変形し、その固有値として臨界条件を定めるというものであった。

この形式化の過程では、原子炉体系は核燃料、減速材およびその他の構成材よりなる増倍特性を持つ均質体系として取り扱われる。

実体系は均質でも非均質でもあり得るが、実用原子炉

として工学的に利用する上では、燃料体と冷却材、減速材が分離された非均質体系が優れている。

当初、無限体系の増倍係数評価の手法として4因子公式が考案され、採用された。この手法は、実際の非均質体系を均質体系に近似的に転換する優れた方法である。

現在では、構想される原子炉に必要な核データを必要な精度で入手することがほぼ可能であり、また計算技術の進歩により原子炉方程式を必要な精度で解くことができるので、ある構成・構造の原子炉の実現可能性を評価するのに、臨界実験は必須ではない。しかし、実際に新型炉の設計検証のためには、予測への高い精度が要求されるので、現在でも臨界実験は不可欠と考えられる。

原子炉物理学研究の初期段階では、核データの整備が不十分であり、計算精度も十分でなかったので、ある原子炉構想の実現性を確認するには臨界実験が不可欠であった。このために、前述のごとく新しい原子炉が構想されるごとに、その実証性確認のための臨界実験装置が設置された。

「Atoms For Peace」宣言以後、開催された第1回、第2回のジュネーブ会議(原子力平和利用国際会議)には、多種多様な原子炉の構想が提案され、それらの実証のための臨界実験装置が建設された。これらを用いた実験が初期の原子炉物理学発展の機関車であったといえる。

わが国においても、1950年代後半、1960年代にいくつかの動力用原子炉の開発が構想され、それらの炉物理の理解および核設計検証のため臨界実験装置が設置され、臨界実験が行われた。

最も基数が多いのは軽水型臨界実験装置(TCA, OCF, NCA, MCA)であるが、このほか軽水冷却・重水減速型炉用実験装置(DCA)、半均質臨界実験装置(SHE、後に高温ガス炉用臨界実験装置VHTRCに改造)、水均質臨界実験装置(AHCA)、高速増殖炉用臨界実験装置(FCA)がある。これらの臨界実験装置は、動力炉概念の成立性確認のほか炉の核特性確認、核特性改良実験等に活用された。

動力炉開発用ではなく、他の特別の用途を目的にした臨界実験装置も設置された。これらには、材料試験炉の安全で効果的な運用に必要な情報を得るために設置された材料試験炉用臨界実験装置(JMTRC)や、時期は少し後になるが、核燃料サイクル施設の核的安全情報を得るための臨界実験装置(STACY, TRACY)がある。これらの施設もその用途を通じて、炉物理の発展に寄与している。

特に、STACYとTRACYで得られていた炉物理的知見により、JCO臨界事故を終焉させることができ、その後の事故原因、事故現象解明に大きく貢献した。

世界的にも独特な炉物理実験施設は京都大学原子炉実験所に設置された教育・研究用臨界実験装置(KUCA)であろう。これは3種の炉心が選択的に使用できる多用途

臨界実験装置である。

原子炉物理学にいくぶんでも手を染めた研究者、技術者にとって、理論分野でも実験分野でも、初めての臨界近接実験というのは冷徹な物理現象の確認とは別の、何か特別な感慨を覚えるものである。

原子炉からすれば、それはいわば原子炉誕生のプロセスである。多くの関係者が今か未だかと見守る中、逆増倍係数がだんだんゼロに収斂を見せると、人々の緊張が高まる。予定通りに近接が進み、最後に、原子炉当直長が「原子炉は〇時〇分に臨界に達しました」と告げると人々の緊張は一気に緩み、拍手が制御室に巻き起こる。

一方、なかなか予定したようには逆増倍係数のゼロ近接が進まない、「どうしたことだ。何かミスがあったのではないか」と関係者間の雰囲気には懸念が広まる。よほどのひどい見通し違いがない限り、いずれは臨界に達するのだが、燃料装荷ステップが増すにつれ心配が高まってくる。

これは原子炉の幾何学的バックリングのいたずらで、臨界に近い体系では、臨界固有値(実効増倍係数)に1%の見積もり違いがあると、燃料装荷量には約10%の違いが生じることのためである。すなわち、普通は臨界近くの形状でバックリングに1%の差を周辺燃料の増減でもたらそうとすると、燃料の増減は10%ほどになる。そして、原子炉の体系(構成と構造)が全く新しいときは、相当に進んだ計算法によっても固有値に0.5%ぐらいの見積もり違いはしばしば起こるのだ。数値の1%はそれほど大きいとは感じないが、実物の燃料に10%の差が出るとそれは非常に大きく感じる。根っこは同値のことなのだが。

初めての体系について固有値を計算して臨界体系を推定した研究者にとっては、最善を尽くして計算に自信を持っていたとしても、上記の不確定さは免れない。初臨界近接は気のもめる実験であるに違いなかったであろう。

原子力開発の黎明期では、臨界条件の増倍係数推定値に1%どころか2~3%、時として4~5%の見積もり違いが生じて不思議がないようなものであった。

そこで、初臨界近接時にはしばしば内々に、臨界燃料量のトトカルチョ(totocalcio)が行われた。筆者が参画した初めての初臨界実験はSHEの初臨界(1961年春)であった。当時は計算機の能力も核データの整備状況も現在とはまさに雲泥の差があり、実験主任の先輩研究員が「この計算値ひとつに60万円(当時の大卒初任給は1万円程度)を要したのだ」と威張られても、とてもそれを信用できなかった。臨界燃料量は±20%ぐらいの誤差でおおよそのくらいという程度のものであった。先輩研究員や米国ANLから招聘していた研究アドバイザーはいろいろな理由づけをし、補正済み推定値を求めて賭けられた。筆者は、「どうせその程度の曖昧さがあるなら」と、妻の誕生日にちなんで臨界燃料棒本数を329本と賭け

た。挙句は330本が臨界実験値となった。筆者にとって初めての本格的な炉物理実験はトトカルチョの勝利から始まったのである。これは臨界実験によって核計算値を確認し、核計算手法の改良を図ることが極めて重要な炉物理的課題であったことを示す典型的なエピソードである。

Ⅲ. OECD/NEA の活動と「炉物理研究」特別専門委員会

炉物理研究における世界との交流は、1965年にOECD/ENEA(欧州原子力機関、72年にNEA(原子力機関)に改称)EACRP(欧米炉物理委員会)第6回会合において、我が国の活動を報告したときに始まる。当時、我が国では多くの機関で臨界実験装置や未臨界実験装置が建設されるようになり、61年には原子力学会に「臨界実験」専門委員会、63年に「炉物理実験」専門委員会、65年に「炉解析」専門委員会が設置され、研究開発に関する討議とともに、ENEACRPへの活動報告を取りまとめていた。炉解析専門委員会が終了した67年には、国際的な対応を行う恒久的な組織が必要とされて、原子力学会と旧日本原子力研究所(原研)の両方の委員会として、「炉物理研究」特別専門委員会が設置された。「炉物理研究」特別専門委員会は当初、熱中性子炉、高速炉および遮へいの3専門部会を設置したが、その後、熱中性子炉と高速炉を統合した原子炉システム、遮へい、新たな核融合炉物理専門部会による活動を98年まで継続した。そして、委員会活動にも具体的な成果が求められるようになった99年からは、炉物理部会と連携して、2年間の期限を設けて特定の課題について必要な活動を行うワーキングパーティ(WP)活動に移行した。「加速器駆動炉の炉物理WP」、「軽水炉次世代燃料の炉物理WP」、「新型炉概念WP」、「共用炉物理コードの構築WP」、「加速器駆動核変換システムWP」、「炉物理実験データの保存WP」が設置されて精力的な活動が展開され、その成果は原研のレポートとして公開されている。「炉物理研究」特別専門委員会は2005年の日本原子力研究開発機構の発足に伴い廃止されたが、NEAの炉物理積分データ保存に関するプロジェクト(IRPhEP)のための「炉物理実験データの保存WP」は、現在もシグマ委員会の下で活動を続けている。

一方、NEACRPは当初、高速炉の研究開発に重点を置いていたが、開発計画の遅延が明確になったため、軽水炉の高度化、高温ガス炉、分離核変換、核融合炉物理など、多様な対象を取り扱うようになった。我が国からは、トピックスとして高転換軽水炉、分離核変換(当時は消滅処理と呼んだ)、高温ガス炉などを提案するとともに、ベンチマーク活動でも稠密格子燃焼計算、核融合炉ブランケットのトリチウム生成率測定、3-D輸送計算などで主導的役割を果たした。91年には、NEACRP、

NEANDC(核データ委員会)およびこれらの実働部隊である NEA データバンク委員会によって構成されていた NEA の科学プログラムの再編成が行われ、それまでの炉物理・核データのみでなく他の分野の比重を高めることとし、NEANSC(原子力科学委員会)が設置された。NEANSC は政策決定の場であり、NEACRP 等で行われていた専門的なタスクは、WP などをして 3 年以内の期限で実施することとされた。その後の NEANSC の活動も炉物理に関係するものが多く、WPPR(プルトニウムリサイクルに関する WP)、WPPT(分離変換に関する WP)などを経て、現在、WPRS(原子炉システム科学)、WPNC(臨界安全)、WPEC(核データ評価国際協力)、WPFC(燃料サイクル科学)が活動している。

OECD/NEA は持続可能なエネルギー開発への寄与を目的に種々の活動を進めており、特に NSC は基盤技術開発の重要な国際的拠点となっている。NEA を通して得られた主要国の情報は、我が国における研究の進展に極めて有用であったし、専門家会合の開催やベンチマークテストの実施も我が国の炉物理研究に大きな刺激を与えた。近年、我が国においては、原子力関連予算が削減され、研究者・技術者の減少とともに試験・研究施設の高齢化が進んでいる。その一方で、基礎・基盤研究の重要性が謳われ、その方策が模索されている。このような状況において、OECD/NEA による国際協力は各原子力先進国の情報や動向を知る上で重要な場であり、我が国の原子力基礎・基盤研究の効率的な継承・発展にとって極めて貴重である。

IV. 将来の取組みと課題

原子力導入期の炉物理においては、臨界実験が不可欠であったが、現在では核データの精度が向上し、また計算技術の進歩により原子炉方程式を必要な精度で解くことができるので、ある構成・構造の原子炉の実現可能性の評価に関しては、臨界実験は必須ではなくなっている。しかし、新型炉や新型燃料を実際に使用するための実証性の確認に関しては、臨界実験の必要性は高い。そこで OECD/NEA の活動のなかでも炉物理積分データ保存に関するプロジェクト(IRPhEP)が進められている。

一方、原子炉の炉心設計・炉心特性の予測に関する要求精度も高くなり、臨界実験などの役割も変わってきている。J-PARC 核変換実験設備については、原子力学会「2008年春の年会」の炉物理部会企画セッション「J-PARC 核変換実験施設の現状と展望」¹⁾で議論を行うとともに、核変換実験施設や新たな炉物理実験施設について議論するため、本年度から原子力学会内に「アクチニド・マネジメントに関する炉物理実験設備」研究専門委員会が、炉物理部会に「次世代炉物理実験施設活用方策」

検討会が設置された。

また、炉物理部会では、今後の炉物理研究、開発、協力関係、教育、炉物理部会運営などを自由に議論するため、「炉物理の将来展望に関する討論会」²⁾を2008年6月30日に開催した。

産学から30名程度の参加があり、炉物理研究の今後の取組みと課題を議論し、以下のような課題を抽出した。

- ・将来の原子力開発における幅広い炉型概念の研究の必要性と進め方の議論
- ・持続性、安全性、廃棄物、核拡散の問題解決への炉物理の革新的なアイデアの活用
- ・炉物理研究・教育における「教養」レベルのシンプルな炉物理教育体系の構築、「炉心管理担当者」レベルの適切な教科書作成や社会人のための再教育システムの構築
- ・産学の関係を築く観点から、現場にある研究ニーズの掘り起こし方法の検討
- ・アクチニド・マネジメントのための新たな炉物理実験施設に向けた幅広い議論
- ・臨界試験などの試験データの実機炉心設計・安全評価への活用手法の高度化
- ・核データ評価などにも活用できる燃焼計算向けの「きれいな」実験データの必要性
- ・次世代軽水炉開発における 5 wt%超燃料の臨界試験と臨界安全評価手法の高度化、およびこれに向けた議論
- ・発電プラントデータを産学で共同に利用できる体制作り

炉物理部会では、このような議論を継続しつつ、上記の課題の解決に向けた努力、関係者の連携強化も重要な活動の一つとしたい。

原子力学会50周年に当たり、武田栄一先生の「炉物理の研究にたずさわるものは原子力研究の方向を決めたり、フィロソフィーを作り出してゆく仕事は自分たちの責任だというくらいの自覚をもってもらいたい」との心構えを忘れず活動を行っていききたい。

(執筆担当：電中研・松村哲夫、
原安協・松浦祥次郎、森 貴正)

— 参 考 資 料 —

- 1) 炉物理部会企画セッション「J-PARC 核変換実験施設の現状と展望」・議事録
(http://typhoon.jaea.go.jp/rpd/meetings/aesj_2008_s_jparc.html)
- 2) 炉物理の将来展望に関する討論会・議事録
(http://typhoon.jaea.go.jp/rpd/meetings/future_rpd.html)