

炉物理の研究

(第 42 号)

1993年 3 月

巻頭言 時代の転換点で 関本 博 1

〈特別テーマ〉 フェルミの臨界から50年を記念して	3
1. 炉物理とともに	
—先輩方から—	4
(武田榮一、西原 宏、安 成弘、弘田実弥、関谷 全、古橋 晃)	
—歴代委員長から—	20
(平川直弘、仁科浩二郎、金子義彦、神田幸則、藤田薫顕)	
2. 炉物理：出会いと抱負	
—若手研究者から—	30
(神野郁夫、三澤 毅、小原 徹、宇根崎博信、橋本憲吾)	
3. 大学の研究炉のあゆみ	40
(京大炉、立教大炉、武蔵工業大炉、弥生炉)	

〈トピックス〉

大学連合とフランス・CEAの協力研究 神田啓治, 代谷誠治 59

〈国際会議報告〉

1. 核データ評価方法論に関する国際シンポジウム 菊池康之, 深堀智生 61
 2. 第3回常温核融合国際会議 中沢正治 66

〈1992年秋の大会「核データ・炉物理」特別会合講演要旨〉

1. 原研における消滅処理研究の進展 吉田弘幸, 西田雄彦 69
 2. 我が国における崩壊熱基準 木村逸郎 74
 3. FP核データ専門家会議と評価国際会議 吉田 正 79

〈委員会報告〉

1. 炉物理研究委員会

- (1)原子炉システム専門部会 土橋敬一郎 82
- (2)遮蔽専門部会 坂本幸夫, 田中俊一 83
- (3)核融合炉専門部会 前川 洋 84
- (4)原子力コード研究委員会 秋本正幸 85

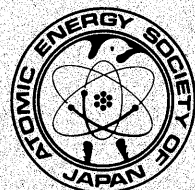
2. 「臨界安全」特別専門委員会 平川直弘 86
 3. 「放射線挙動」研究専門委員会 中村尚司 87
 4. 「消滅処理」研究専門委員会 向山武彦 88

☆インフォメーション 90

☆事務局だより, 編集後記 92

☆平成4年度会計報告 94

☆会員名簿 (221名) 95



(社)日本原子力学会

炉物理連絡会

巻 頭 言

時代の転換点で

東京工業大学原子炉工学研究所 関本 博

個人、日本、世界といったマルチ・フェイズで大きな質的变化が今まさに起こりつつあるように感ぜられます。今号ではフェルミの臨界から半世紀ということで特別テーマが組まれています(なお炉物理連絡会ができてからだと四半世紀ということになります)。半世紀もたつと原子力開発にも何か大きな質的变化が出てきたとしてもおかしくはないでしょう。

日本の原子核(力)工学草創期の代表的炉物理教科書の著者であるエドランド先生が昨年東工大に来られ、色々昔話を聞く機会を得ました(講演もしていただきましたが、その内容は連絡会誌及び学会誌に載せております)。先生は原子炉で億万長者になり、アメリカン・ドリームを体現してやろうとしておられたふしがあります。少なくともこれから原子力の発展が先生の思いどおりになってくれば、先生の子供達は大金持ちになれるのだそうです。

マンハッタン計画の中心となったロスアラモス研究所で炉物理実験をしている老研究者と話したことがあります。ノーベル賞授賞者といっしょに働きたかったのだが、来たときにはこれらの人達は自由を求めて研究所を去っていった後だったと残念そうに話してくれました。

閑話休題。マスコミでは原子力についてありとあらゆる問題を取り上げ議論しています。我々もこれではならじと色々勉強させられることが多いこの頃です。それにしても原子力問題はますます複雑になっていくようです。このような時こそ、本質をはっきりさせ問題を単純にする必要があります。私は本質は次の2つのことだと考えています。

- (1) 原子力は人類にとって唯一の半永久的に使用できる高密度エネルギーである。
- (2) 安全性と放射性廃棄物処分と核拡散防止が世の中に受け入れられれば、原子力そのものも受け入れられる。

これらのことはすべて核に関することであり、炉物理連絡会員の得意とする筈のことです。一時期炉物理は死んだといったことが言われたことがありますが、そのような考えと現在の原子力問題の混乱とはどこかで結びついているような気がしてなりません。炉物理が好きな我々は今後何をするのがよいか、この転換点で基本に立ち戻りじっくり考えてみようではありませんか。

〈特別テーマ〉

— フェルミの臨界から50年を記念して —

昨年フェルミによる核分裂連鎖反応の実現から50周年の節目をむかえ、原子力学会でもさまざまな企画がもたれました。本誌でも、日本における炉物理研究のあゆみを振り返り今後を展望する機会とすべく、特集記事を計画いたしました。我が国の炉物理研究、教育の先達の方々、歴代炉物理連絡会委員長の方々、及び若手の諸氏にそれぞれ「炉物理とともに」、「炉物理：出合と抱負」と題して炉物理研究の草創期のエピソード、炉物理への提言や抱負などの寄稿をお願い致しました。また、「研究炉のあゆみ」として大学の研究炉の歴史や現状について報告をお願い致しました。多くの方々から示唆に富んだご意見をお寄せいただくことができましたので、以下にご紹介致します。御多忙中のところご協力頂きましたことにこの場を借りて感謝申し上げます。

1. 炉物理とともに

— 先輩方から —

東京工業大学 名誉教授	武田 榮一	3
中部大学総合工学研究所	西原 宏	5
原子力システム研究懇話会	安 成弘	7
三菱原子力工業 (株)	弘田 実弥	10
吉備国際大	関谷 全	13
核物質管理センタ	古橋 晃	15

— 歴代委員長から —

東北大学 工学部	平川 直弘	19
名古屋大学 工学部	仁科 浩二郎	21
日本原子力研究所	金子 義彦	24
九州大学 総合理工研究科	神田 幸則	25
京都大学 原子炉実験所	藤田 薫頭	27

2. 炉物理：出合と抱負

— 若手研究者から —

京都大学 工学部	神野 郁夫	29
名古屋大学 工学部	三澤 毅	31
東京工業大学 原子炉工学研究所	小原 徹	33
京都大学 原子炉実験所	宇根崎博信	35
近畿大学 原子力研究所	橋本 憲吾	37

3. 研究炉のあゆみ

京都大学原子炉実験所・臨界集合体	代谷 誠治	藤田 薫頭	39
立教大学原子力研究所・研究炉		原沢 進	44
武蔵工業大学原子力研究所・研究炉		相沢 乙彦	50
東京大学・高速中性子源炉「弥生」		岡 芳明	53

わが国で炉物理が生まれたころの思い出

東京工業大学 名誉教授

武田 榮一

今年シカゴ・パイルで核分裂反応を連鎖的に進めることに成功して50年になるわけであるが、それを記念した特集で なにか原稿を書けということで、書庫や物置を調べて 昔の資料を探してみたところ 昭和14年ごろに書いた「核分裂」という表題の大学ノート2冊を見付けることができた。このノートの頁をめくってみると一度にその当時のことが甦ってくるのであった。

しかし、原稿を書く段になって 原稿執筆の依頼書を読み返してみると、「炉物理とともに」という題で 炉物理研究のエピソードなどを書くことが期待されていることを知り、ちょっと当惑してしまった。というのは私は過渡的にはその任務を果す必要はあったが、けっして良い研究者でも教育者でもなく、そのうえ管理的な仕事に追われて不勉強であったからである。さらに退職したあとはほとんど特別な勉強をすることもなく20年を過ごしてしまい、いまさら現役の方々にお役にたつようなことはとても書けそうにないからである。

振り返って考えてみると、昭和28年ごろまでに 私たち一般人の手に入った原子力関係の資料は非常に少なく、 スミス・リポートとして知られた H. D. Smyth の "Atomic Energy for Military Purposes", W. E. Stephens の "Nuclear Fission & Atomic Energy" それに UNESCO の出していたパンフレットや "Time" などアメリカの週刊誌の特集ぐらいではなかったと思われる。それが 28年末の アイゼンハワー米大統領の "Atom for Peace" の提案と それに続く国連主催の原子力平和利用についての第1回ジュネーブ会議の開催によって、その後 全く怒濤のような大量の資料に出会うこととなった。それまで非公開になっていた 米国AEC資料のうちかなりのものがほとんど同時に公開されたのであった。

このような情況に重なって昭和29年3月の我が国初の原子力予算の成立があり、その予算を使つての原子炉設計の基礎研究がその年末ごろから始まったが、そのころ使える計算器はたかだかマーチャントの電動計算機くらいのものであった。計算機といえば、第1回ジュネーブ会議のさい 英国 ハーウェルの研究所で見せてもらった電子計算機は一部トランジスター化されてはいたが小型真空管を沢山使ったもので、その故障で長時間の運転ができないことがこぼされていた。

そのころ電力中研におられた高橋 実さんの呼び掛けで 大量の原子力資料を手分けして翻訳することとなった。私はそのなかで 多くの産業界の若手技術者とともに「物理グループ」を作つて物理関係資料の翻訳を行なつたのであった。

その次の段階は 東海村に原子力研究所が作られ そこでまず2~3の原子炉が作られるとともに、各種の基礎研究が行なわれていったことで、その中に「炉物理」も

当然含まれたのであった。私は昭和34年春から非常勤で原研の主任研究員を勤めることとなったが、初めに研究室長を任されたのは東海研の原子炉開発部の「原子炉開発試験室長」であった。それが翌年には名称だけが原子炉物理部の「原子炉物理第2研究室長」に変わったのであった。ずいぶん乱暴な話だと思うが、いまその変更の経緯について特別な記憶がない。

ともかく、そのころ Reactor Physics あるいは Physics of Nuclear Reactors という本がやたらと出版され、いま手もとにも7~8冊が残されている。そのころが、いま考えて狭い意味での炉物理の一つのピークであったように思われる。35~6年ごろのことであったと思うが、炉物理は実験と理論計算とどちらが主体になって進められるべきかといった議論が繰り返されたように思う。そのころは計算機の記憶容量も小さかったため、即座に軍配を挙げかねたが、その後、計算機の性能向上には著しいものがあつたように記憶している。

そのうちに、原研で研究隣組といった感じの「炉物理談話会」が36年ごろから作られ、その翌年から会誌も年1~2回発行されることとなった。この場合の炉物理は大変、間口が広く、その当時の原研のほとんど総ての物理的分野を含むものようであった。

私の理解したところでは、狭義の炉物理はワインバーグさんが1958年に包括的な "Physical Theory of Neutron Chain Reactors" を刊行したころ、おおよその範囲がきまり、それに関連した理論および実験で多くの改良が加えられ、特に電算機の活用と進歩で、その形態がかなり変化したように思われる。このことは1966年発行の D. Jakeman の著書、1973年の P. F. Zweifel の本、1975年の J. J. Duderstadt の本と次第にその傾向が顕著に見られると思う。

さて、わが国の原子力開発はそのスタート以来約40年を経過し、総発電電力量の30%を賄うまでに発展してきたことは大変大きな成果であったと考える。原子力発電は今後も相当長期に亘って続くものと考えられるし、今後軽水炉から高速炉などへの変貌も予想される上、場合によってはトリウムサイクルの研究をする必要もあるかと思われるので、狭義の炉物理の範囲でもまだまだ続けられるものとする。

だいぶ前のものであるが、ある財界人から聞いた話では「一つの会社で百年続いた例はない」ということであつた。私はその真偽を確かめたわけではないが、長い年月のあいだには、その内容も変わり、それにつれて名称も変わって行くものようである。炉物理連絡会は結成以来25年を迎えるわけで、大変お目出度い次第であるが、もっと適当した名称があるならば変わっても不思議ではないと思う次第である。

1月7日 記

炉物理随想

中部大学総合工学研究所 西原 宏

我々の年代の者の炉物理は、大塚益比古氏の翻訳・解説による「グラストン・エドランド著：原子炉の理論」に始まる。この本は、豊富な内容が分かりやすく書かれていて、名著の名訳である。伊藤博氏はかつて、この本について、「原子炉の理論がこんなに分かり易いものだ」と誤解させる」と言ったことがある。

黒鉛炉より軽水炉が一般的になると、4因子公式の修正が試みられ、また、計算機が科学計算に使われるようになって、少数組の拡散コードが普及した。実験によく合う結果（例えば臨界質量）が得られる少数組の拡散炉定数の求め方には、一種の秘伝のようなものが感じられた。熊取の原子炉の初期臨界質量は、少数組の拡散計算による予測値がよく合った。

少数組の拡散定数を几帳面に導こうとすると、(少なくとも私がまだ若かったころには)大変厄介な手続きと、多数の計算コードと、膨大な核データと、長い計算時間が必要であった。炉心部では中性子のエネルギーによって激しく変化する断面積データと微細な空間的構造のなかで、中性子のエネルギー・スペクトルと空間分布・角度分布とを精密に計算して実効的な断面積を求めねばならない。これは炉物理における中心的な研究分野となり、多くの優れた研究が行われた。研究が進むにつれ、計算コードはモジュール化され、データライブラリを含む全体がシステム化された。炉物理実験の解析には、この全体がシステムとして呼び出されるようになった。何がどうなっているのか、分からないままに結果が出て来ることになった(分かって居る人もいるのだろう)。

これは一種の仮想現実として若い研究者に作用する。計算の結果が、動かし難い事実のように思われてくる。そして、この傾向は、プラズマシミュレーションに没頭する若者において一層顕著であるように思う。

基礎研究という立場からすれば、モデルを単純化してゆくことが大切である。このことは、有名な Alder transition の例を見れば(原論文を読めば)よく分かるであろう。

炉物理解析においては、「モデルを精密化して行くと、実験結果に段々よく合致するようになるか」というと、必ずしもそうでないことが経験されて居た。そしてまた、中性子反応の断面積の測定が進むにつれて、それを用いた計算結果がだんだん積分実験の結果とよく合致するようになるか、という必ずしもそうでないこともあったように思う。どうしても測定出来ないエネルギー領域もある。そこで、実効断面積を積分実験に合うように adjust することが提案され、物議をかもした。炉物理定数を adjust するという着想は、背景に一種の不可知論が感じら

れて興味深い。モデルを精密化して結果を improve しようという方向と、あるところでモデルを思い切って簡単化して、物理化学上の真理を発見しようとする方向とは、どこかで両立するものなのであろうか。

炉物理計算の総決算は、燃料サイクルの予測であろう。ここでも「モデルを精密化して予測の精度を上げよう」という努力と、「ある程度の信頼を獲得している self-consistent な炉定数を用いて、出来るだけ簡単な計算で、考え得る限りのシナリオのなかから優れたものを見付けようとする」努力とがあったが、後者に属する研究の最近の動向はどうなっているのだろうか。

炉物理計算を実地の役にたてることへの目標の一つは、炉心管理のための予測計算ではないか。この種の計算は時間の掛かることを嫌うので、思い切った実験公式が活用されていた。今はどうなっているのだろうか。実験公式であるから「何故か？」と言う問いには答えられないことがある。そういう計算法は程度が悪いという感じも否めない。しかし、オームの法則も経験則ではないか。オームの法則を用いたマシン設計法は程度が悪いといえるだろうか。

1960年代の前半、大田正男氏と協力して高速増殖炉の特性を、16組定数を使って調べることにかまけていた。その後、大田氏が九州大学に移られた関係もあって、私は木村逸郎氏らのグループに加わって、熊取の LINAC による中性子スペクトルの測定と実験解析に傾斜した。大田氏が京都におられたころから、共鳴反応の自己遮蔽を考慮した25組の炉定数が出版された。この定数は、引用されている核データの文献等が殆ど総てロシヤのものであることと、およそどのような体系の解析にも、実験とよく合う結果をもたらすという2点で、まことに印象的であった。最近の伝聞によれば、ロシヤの原子力関係者の間では、「ロシヤは先進国であって、後進国日本の技術支援をうけるなどもってのほかである」との気概があるとのことであるが、むべなるかなと思う。蛇足ではあるが、私が高速増殖炉の特性解析に興味を失って行ったのは、「段々精密な計算が行われるようになり、2次元モデルでない論文にならない」ということになってきたのが原因であったように思う。所詮私は「ある程度の信頼を獲得している self-consistent な炉定数を用いて、出来るだけ簡単な計算で」という域を出ることが出来なかったのだろう。

京都大学での最後の数年は、高転換中速中性子炉に関心を持った。熱中性子炉と高速中性子炉の狭間にあって、燃料転換比の1に近い、中速中性子軽水炉の炉物理は、かのエドランドが重要性を指摘されたもので、私の炉物理はグラストン・エドランドに始まってエドランドに終わったのである。

このところ、大学における原子力研究の環境が良くないことを気にする向きもあると聞いているが、今から40年前に原子力研究の始まったころには、殆ど未知の新分野であったことを思い、初心に帰って未知の新分野に進む気概がほしいと思う。自分の領域を常に広げる気持ちをもって欲しい。筑波大学の星野力氏を見習いたい。

炉物理とともに

原子力システム研究懇話会
安 成弘

今、私の手元に、昭和31年に作成された原子力発電資料調査会の報告書や、昭和33年の原子動力研究会（日本原子力産業会議）の資料がある。昭和31年は、原子力委員会、日本原子力産業会議、日本原子力研究所等が発足した年で、昭和30年末の原子力3法の成立を受けて、わが国の原子力研究開発が正式にスタートした年です。勿論、そのころ、大学にまだ原子力工学科はなく、東海大学の応用物理学科に原子力工学コースが開設されました。

したがって、私は、上記の調査会や研究会に関係していたお蔭で、大学の研究室では得られない知識を得る事が出来、また、多くの原子力関係の人々とも親しくなり、大変に良い勉強になりました。それらの会のメンバーの中には、炉物理関係の専門家もたくさん居られました。

当時の私は、まだ実際の原子炉を見た事はなく、研究室でグラストン-エドランドの著書や、諸外国の文献を読んで得た貧弱な知識で、加圧水型発電炉の炉心設計や研究用原子炉アルゴノートの設計の研究を行って、原子力研究総合発表会等で発表していた事を思い出しますと、冷や汗の出る感がします。

日本原子力学会が創立されたのは、昭和34年でした。また、同学会に最初に設置された炉物理関係の研究委員会は臨界実験研究委員会（昭和36年に設置された。主査-武田栄一先生。昭和38年に炉物理実験研究委員会となった）であり、その後まもなく、シグマ研究委員会（主査-百田光雄先生）も設置された。私は、両研究委員会の幹事をつとめました。同学会に昭和42年、最初に設置された連絡会は、炉物理研究委員会でありました。このように、日本原子力学会の初期においては、炉物理関係者は、非常に、活動的であったと言えます。

原子力の研究・開発は、計算機の発達とともに進歩してきたと言っても過言ではない。私が使用した計算機について忘れ得ない思い出がある。最初、大学で使用していたものは、手回しのタイガ計算機であり、つづいて、モンローやフリーデンの電動計算機であった。電動計算機の便利さに感動したのも忘れ得ない。まもなく、東大では、TACと呼ばれた真空管を使った大型計算機が動き始め、熱中性子利用率のモンテカルロ計算を、TACを用いて行った。TACの機能を最大限に利用したのが原因であったかどうか不明だが、TACが不調になり、途中で計算を断念せざるを得なくなった。日本原子力学会に発表の研究であったので、たいへん困ったが、実状を説明したところ、皆、同情してくださった。

この計算は、その後、我国に導入されたIBM650を用いて、完成された。大型計算機の発達の、炉物理研究のみならず原子力研究開発への貢献は、まこ

とに、大なるものがあつたと言えます。

原子力の研究開発には、大型実験装置が不可欠である。炉物理に関しては、多くの大学の原子力(核)工学科で、臨界未満実験装置が建設された。私も、京大での臨界未満実験装置の建設や、それを使用する実験に参加した。京大の場合、加速器と併用してパルス実験を行う事を、ひとつの特色としていた。しかし、臨界未満実験装置で行い得る研究には限度があり、臨界実験装置や原子炉が必要とされる事は、論ずるまでもない。当時、京大では、この種の実験装置はなかったので、日本原子力研究所のお世話になった。私どもの研究室でロッシ α 実験を行う事を計画した。ロッシ α 実験は、当時、日本原子力研究所から招へいされていた、米国アルゴンヌ研究所のDr. Katoの講義で教わったものである。

(Dr. Katoは、週に一度京大で炉物理関係の特別講義を行っていた。)ロッシ α 実験法は理解しにくいものであつたが、理解が深まるにつれ、大変興味深いものである事が分かった。日本原子力研究所にお願いして、JRR-1でロッシ α 実験を行う事が出来ました。

以上は、私が30年以上前、炉物理関係の仕事に関わっていた頃の回顧で、失敗や困難もあつたが、なつかしい思い出です。さて、現在、炉物理研究の第一線を退いている私から、炉物理関係者に御助言等申しあげる事は不可能ですから、私の感じている事を若干述べることにします。

現在、原子力を取り巻く内外の情勢はきびしいものがある。しかし、このことは我々に今までの原子力利用のあり方についての省察をもたらすとともに、将来のあり方について色々と考察させるための、良い契機となっていると思う。例えば、従来行われてきた原子力研究開発は、どちらかと言えば欧米でのオリジナルな発想の追従であり、パッチワーク方式であつたと思われる。

現在の原子力の対面する諸問題をブレイクスルーするためには、この様な方式ではなく、原子力利用システムの有する本質に立ち帰って、その特質を生かし、人類社会に真に有用な利用システムのレジームを開発し、確立してゆく事が必要であると思います。そして、既に、その様な動きが顕在化してきている事は、私がここで述べるまでもありません。

かつて、核分裂連鎖反応の実証等、原子力開発の初期に、エンリコフェルミ等、核物理学者、炉物理学者が活躍したように、上述のような原子力利用のレジームの開発においては、炉物理関係者の役割が大いに期待されていると思います。

ただ、ここで私は、炉物理という言葉の狭い意味に解釈しない方がよいと思います。具体的に言えば、原子炉の設計、原子炉の運転、制御、原子炉の安全性、燃料照射挙動、核燃料サイクル、放射性廃棄物、等に関連して、広範囲な取り組みをする方がよいと思います。また、炉物理の中心的役割を果たすものは、中性子である事を考えると、炉物理と中性子工学の関連は深い。しかし、名称とか専

門分野にこだわるのは、余り意義が無いと思います。

私は、原子力技術とは、原子核レベルのミクロな知識を基礎にして、マクロな我々の生活に有用なものを創出する技術だと思っています。世界における原子力研究開発は既に半世紀を経過していますが、原子力の利用はまだ限られた範囲でしか行われていません。原子力がより広範囲に、より高度に、かつ長期に、利用されるようになってこそ、原子力時代が到来したと言えるでしょう。そして、そのような原子力時代をめざして原子力の研究開発が行われなければなりません。しかも、我国は今や原子力技術の先進国として、グローバルな視点から、原子力開発、利用に対する貢献が求められています。炉物理関係者の広い視野のもとでの御活躍を期待します。

炉物理とともに

三菱原子力工業(株) 弘田実弥

炉物理の研究を始めて40年近くになる。その歳月を振り返ってみよう。

核設計研究の開始

通産省の原子力平和利用研究費によって日本学術振興会に設置された原子炉設計の基礎研究委員会(杉本朝雄委員長(故人))に参加して、研究炉の核設計計算を開始したのは、三菱電機(株)の研究所に居た1954年であった。各種の型式の研究炉について初歩的な設計計算の後、熱出力10MWの天然U-重水型⁽¹⁾にしぼられた。それは、当時、わが国の原子力開発計画で決定された国産1号炉がこの熱出力の炉型式のためであった。

1956年6月、特殊法人日本原子力研究所(原研)が発足するに及び、設計研究を行った多くの方々とともに原研に移り、私は原子炉開発部動力炉班に所属した。その10月末から11月にかけて、訪英原子力調査団(石川一郎団長(故人))の一員として、コールドホール型原子力発電所の導入に関する調査を行った。動力炉班では、軽水炉の核設計に関する調査・研究⁽²⁾も熱心に行われた。軽水炉では燃料棒の間隔が狭く、4因子公式の計算は重水炉や黒鉛炉に比べると困難であった。

水性均質炉の臨界実験

原研が設立された頃、原子力委員会において『発電用原子炉開発のための長期計画』の立案が行われ、長期目標の1つとして、増殖炉の開発が強く要望されていた。この要望に応えるため、熱中性子増殖炉としては最も増殖率が高いと期待された水性均質炉が取り上げられ、原子炉開発部原子炉開発試験室にて水性均質臨界実験装置(AHCF)の建設が開始されたのは1959年であった。その頃、私は米国オークリッジ国立研究所(ORNL)の水性均質試験炉(HTR)に1年半にわたって留学し、炉心溶液の化学的な不安定性に起因する出力小変動を炉雑音解析法により研究した。

AHCFは1961年6月に重水反射体の系で初回臨界を達成した。その後、ThO₂スラリーブランケット実験を実施し、1KgThO₂/ℓD₂Oまでのスラリー濃度に対する炉心燃料の臨界濃度を求めた。これら一連の臨界実験結果の解析⁽³⁾も行われたが、ORNLにて水性均質炉の技術的問題点が明らかになったこと及びわが国においてもFBR研究開発の気運が高まったことにより、1967年3月に装置の運転を停止した。

炉物理研究(特別専門)委員会の発足

わが国でも多くの機関で臨界及び臨界未満実験装置が建設されるようになり、1961年、原子力学会に臨界実験専門委員会(主査:武田栄一東工大教授(当時))が設置された。1963年には、実験法及び実験結果の解析についての研究・討論を行うことを目的として、炉物理実験研究専門委員会(武田栄一主査)が設置され、2年間にわたって活動が行われた。次いで、炉解析研究専門委員会が設置され、私が主査を勤めることとなった。

炉物理研究におけるわが国と世界との交流が始まったのは、次節に述べるように、丁度、その頃からであった。炉解析研究専門委員会が1967年3月に終了したので、国際的な対応を行う恒久的な組織が必要であった。このため、原子力学会と原研との共同の炉物理研究(特別専門)委員会が7月に設置され、私が委員長となった。委員会の下には、当初、熱中性子炉、高速炉及び遮蔽の3専門部会を置いたが、その後、熱中性子炉と高速炉専門部会を統合し、新たに核融合炉専門部会を加えた3専門部会により活動を行っている。

欧米炉物理委員会への加入

欧米炉物理委員会(EACRP)は、OECDの欧州原子力機関(ENEA)が欧米核データ委員会(EANDC)の姉妹委員会として1962年に組織したものである。OECDへのわが国の加入が実現したので、1965年10月のEACRP第6回会合に私がオブザーバーとして参加することとなった。過去4年間の研究活動を報告することが要請されたので、炉解析研究専門委員会が中心となりその取りまとめを行った。ENEAは同年11月の運営委員会でEACRPでのわが国の議席を承認した。その後、ENEAにわが国が全加盟したことに伴い、ENEAは原子力機関(NEA)に、EACRPはNEACRPと改称され、わが国の議席数も1つ増え、動力炉・核燃料開発事業団(動燃)の方が指名された。

私が委員を勤めた期間について、わが国における炉物理研究の進歩を委員会との関連において総括している⁽⁴⁾。委員会会合における主要議題は長い期間にわたって高速炉物理に関連したトピックスが占めた。会合により得られた主要国の情報はわが国における研究の進展に極めて有用であった。また、遮蔽など専門家会合の開催及びベンチマークテストの実施もわが国の炉物理研究に大きな刺激を与えるものであった。

高速炉臨界実験

高速炉臨界実験装置(FCA)の建設予算は1961年から要求されていたが、FBR研究開発計画が1963年に策定され、その一環として建設が認可された。FCAが20%濃縮Uの燃料によって初回臨界を達成したのは1967年4月29日(昭和天皇誕生日)であった。ブランケットの厚さを変えた集合体や炉心に黒鉛を加えた集合体での実験も行われた。これら一連の小型炉心の臨界量は、ANL-635セットを使用した輸送計算によって良く再現できることが明らかにされた⁽⁵⁾。

その後、FCAでは動燃からの受託研究として、『常陽』模擬実験、『もんじゅ』部分模擬実験など多くの臨界実験とその解析が行われた。思い出に残る実験に軸非均質炉心の実験がある⁽⁶⁾。軸非均質炉心の実験としては世界でこれが最初であった。私がFCAにたずさわった15年間について、得られた数々の成果を概括するとともに、実験と計算間に見いだされた不一致をその後の研究のために指摘している⁽⁷⁾。

アクチノイドの変換に関する研究

1975年のNEACRP第18回会合にて、アクチノイド及び核分裂生成物の変換が議題に取り上げられ、1978年の第21回会合まで活発な討論が続いた。利用できる核データが正確か否かが疑問であったが、積分データにより系統的に修正された群定数セットを用いれば、

十分な評価が可能になるであろうという意見が大半であった。このようなアクチノイドの生成と燃焼に関するNEACRPの見解を、議長の要請によってとりまとめを行った⁽⁸⁾。

原研を退職して三菱原子力工業(株)へ1984年に移り、1990年以降、原研における陽子加速器によるTRU消滅処理技術開発に参加し、ターゲット系の概略検討を行っている。

医療用原子炉の調査・研究

1988年7月以来、神戸大学、京都大学、三菱重工業(株)などとの協力の下に、医療用原子炉の調査・研究を行ってきた。これは硼素中性子捕捉療法(BNCT)専用原子炉の主要な設計仕様を設定することを目的としている。BNCTによる臨床治療はわが国だけで実施されており、研究炉からの熱中性子が使用されている。熱中性子束は生体内で急速に減衰するので、深部がんの治療に熱外中性子が有望と期待されている。炉心から中性子を取り出すための照射孔の性能評価には、 $n-\gamma$ 結合Sn輸送計算が行われている。

熱外中性子を取り出すためには、熱中性子の場合に比べて高速中性子の混入が多くなるので、これがどの程度に抑えられるかが重要である。熱出力2MW以下の自然循環型軽水炉によって、治療に必要な照射時間が30分程度、高速中性子及び照射孔からの γ 線による線量が2Gy及び1Gy以下という設計目標を達成できる見通しが得られた^(9,10)。

おわりに

原子力開発利用長期計画の改定にあたり、Pu問題がキーポイントであるが、Puをめぐる世界の情勢が変わっても、資源小国のわが国にとってFBRの重要性は決して変わらないと考えている。また、TRU消滅処理技術を確認する意義がわが国にとっては極めて大きいと考えている。今や、わが国は原子力開発におけるトップランナーであり、わが国あるいは世界の将来にとって何が重要且つ本質的問題であるかを見極め、それに取り組む必要がある。その際、炉物理研究者の果たすべき役割は大きいと考えている次第である。

参考文献

- (1) 長沼辰二郎他：10MW天然U重水炉の設計計算、原子炉設計の基礎研究、103(1956)。
- (2) 弘田実弥他：軽水減速型原子炉の核的設計、JAERI 4004(1962)。
- (3) Hirota, J., et al. : J. Nucl. Sci. Technol., 2, 132(1965)。
- (4) 弘田実弥：わが国の炉物理研究における進歩のNEA炉物理委員会関連活動のレビューによる総括、JAERI 1292(1984)。
- (5) Hirota, J., et al. : J. Nucl. Sci. Technol., 6, 35(1969)。
- (6) Hirota, J., et al. : Nucl. Sci. Eng., 87, 252(1984)。
- (7) 弘田実弥：FCAにおける高速炉臨界実験とその解析、JAERI 1289(1984)。
- (8) Hirota, J. and Mitani, H. : Ann. Nucl. Energy, 7, 439(1980)。
- (9) Sasaki, M., et al. : Design Study of a Med. Reactor for BNCT, 10-5, Int. Spec. Meeting on Poten. of Small Nucl. Reactor, Oct. 23-25, 1991, TIT, Tokyo, Japan.
- (10) Sasaki, M., et al. : Design Study of a Med. Reactor for Boron Neutron Capture Therapy, 3A-5, 3rd Asian Sympo. on Res. Reactors, Nov. 11-14, 1991, Hitachi, Japan.

炉物理とともに

吉備国際大 関谷 全

炉物理学と言う学問がそれ自体独立して存在するのか、物理学の一つの応用として存在するのかと言う議論は別として、原子炉の理論的基礎付けは物理学者によってなされたことは事実であろう。中性子輸送現象を取り扱う分野としての炉物理は、その後、理論的には応用数学の微積分方程式を解く問題として、解が連続固有値の処理にあたり、超関数によって始めて正確に取り扱おうとする事の面白さから応用数学者の間でも重要な意味を持つに至った。筆者が1964年 NPY炉物理計画のポーランドザコパネ会議に参加した時、主催者の一人であるケース教授は彼の厳密解がパルス実験の在来の解析法にどのような変更を要求するのかとの実験家の質問に対して、自分にとって、その解が実験とどう関係するかは何の関心もないと言った割り切った答であった。昔、ヘビサイドの時代に、物理ないしは工学の問題解決の必要に迫られて発案された演算子法が、数学者に依って発散性のゆえに非難された際ヘビサイドは「消化機構が解明していないからといって御馳走を食べない者がいるか」という言葉を残した事は歴史的には有名なことであるが、そのヘビサイド演算子が戦後フランスのローラン・シュワルツによって発案された超関数の形に論理付けられたことから、物理学は常に自然界の中からその摂理を汲みだして、それを正確に表現するための新しい論理体系を築くよう数学者に足場を提供してきたとも言える。

それと同じザコパネ会議で当時英国ウィンフリス研究所の副所長であったマッメリー氏は、原子力研究の時代的変遷に話が及んだ時、初期は物理屋の時代、その次がエンジニア時代、今はフレッシュマン時代と皆を笑わせた。更に、彼に続いて英国から出席した仲間のプール氏がパルス実験の話を始めに当たり「私はフェルミ時代(エージ)の話から始めます」と言ってもっと皆を笑わすと言ったユーモアとゆとりあるものであったが、それ以後、工学的問題が具体化されるに連れて、厳密解の取扱は1次元問題以外で殆ど使われず数学者には興味を残したが、次第に数値解の精度を競う2、3次元近似解法が圧倒的に重要とになった。しかし、式のままで考える訓練も依然として必要であろう。例えば、熱中性子炉では誘導核分裂による中性子源の項を含む輸送方程式が定常解を持つための条件としての臨界条件が4因子公式で表現されるが、高速炉の場合に4因子に代わるものはどう取ればよいのかと言った質問がよく起こるが、熱中性子炉では高速核分裂段階、それに続く減速段階、共鳴吸収段階、熱中性子の燃料による吸収段階が、それぞれ確率的独立事象としてシリーズに連なることから、4個の相対確率の積の形に得られたのであって、高速炉のように並列に起こる過程では単なる積の形に表現できない事に考え至る時、現象の物理的考察から取組まなければならない。また、減速材流れの中での中性子スペクトルを測定して流速依存のずれを見いだして感心しているのを見たことがあるが、統計力学で良く知られているように第一原理、即ち、エネルギー保存則、運動量保存則、粒子数保存則だ

けから変分原理によって決められるマックスウェル分布には自然に定常流速だけのシフトが入ることから実験しないでも済む事である等・・・。

当時の大学における原子力工学関係の講座の充実については、例えば大阪大学では、既に4講座(原子力工学、燃料・材料、機器・制御、化学工学)があって、概算要求によって更に2つ増やそうとしていた。但し、その一つは吹田教授の発案で放射線防御工学という講座名にして或る生物科学者を候補にしていたが文部省でそれを炉物理に変えるよう指導があって現在の第5講座が発足した。NPYプロジェクト始めIAEAの炉物理に関する会合等がそのきっかけになったのである。そのプロジェクトは1964年、66年、70年と最初の会でマツメリー氏の言った通り実用化の方向に向かっていった事は、原子力学会誌の温故知新40に筆者がのべた通りである。炉物理研究を始める際の文献としては、伏見・大塚訳のグラトン・エドランドの本がバイブル的役割を果たしていたが、物理数学面で理論を目指す者に取りつき易くしてくれた本に、スネードンのフーリエ変換の教科書があった。それは、フーリエ・ラプラス変換の基本から始まって、応用例として振動論、弾性論、熱伝導、流体力学、核崩壊等の数学的扱いを1章ずつ配分したもので、その第6章が「物質中における中性子の減速」となっていた。丁度60頁の内容が、グラストンの教科書を越えて前進する原動力となった。今になって考えると、新しい分野には少々難しい問題でも、そのように手近で誘い込むような纏まった文献が取りつく島となる。ダビソン「中性子輸送理論」が更に読み次がれるべき原典となったが、その内容の数式的豊富さの割に物理的な内容が読み取りにくい嫌いがあった。300頁以上の大冊にグラフがたった2箇所といった事がそれを如実に物語っている。それでも、原子炉をめざす以上、会社就職を目指す者でも、伏見研究室では大学院生にそれが必読の様に思われていた。また当時、ラプラス変換を使おうとすれば、デッチがエッセンで開催された応用数学力学会、制御数学部会の講習会の講義録を基にして編纂した教科書「実用ラプラス変換」が、実際問題に適用する際、過ちや誤解を起ししがちな落とし穴に道路標識の警告マークをつけた気の聞いた本で不連続関数を扱い易くした。以後、数学教育は長年月の間に色々工夫された筈であるが、現在、物にしている学生の割合が少いのには危惧を持つのは筆者だけであろうか。

時代が巡って物理的な考え方が今再び原子力の開発に必要なようになってきたと感じている。高速炉計画の世界的な遅れは、むしろその為の時間が与えられたと取るべきであろう。その際、中性子物理といった在来の炉物理範疇だけに捕らわれず、原子炉に関連して起こるすべての物理現象を対象としそれらを総合して炉の開発につなぐことがこれからの炉物理に課せられた使命であると思っている。将来テーマについては、挙げるスペースが限られているので我々が最近纏めた原子力学会発行の「高転換軽水炉の研究と展望」を一読されることを薦める。海外では、原子力推進の自信を失って環境問題、核融合等に食いつなぐ場を求める傾向のある中で、我が国だけは推進の姿勢は変えず、再び世界的に必要性が高まる時のためにも技術の地道なレベルアップに努めるべき時と考える。その為にも、数学、物理、工学の代表的な教科書に、原子炉問題を例として入れるべく努めたいものである。

私の炉物理研究とその挫折

古橋 晃

東京工業大学の関本教授名で「炉物理とともに」という題で参考になるような文を書くようにとの依頼を受けました。私は、炉物理とともに人生を歩みたかったのに歩めなかった人間であり、1977年以後殆んど寄与する所もなかったので、適役ではなく、無理に書くとは恨み節のようになって人に迷惑をかける恐れもあるので躊躇したのですが、東工大の名と本誌刊行の時期に特別の感慨を憶えたので、標記の題に変えて敢えて書くことに致しました。従って個人の履歴書のようなものとなり、大所・高所からの論説にならないことを御寛容下さい。

1993年3月は私にとって格別の月になる筈でした。つまりこの月末に、まさに東工大の炉物理関係の講座の教官として定年退官するというのが私の夢でした。少くともその可能性を大いに持って20数年前の約5年間を大岡山の武田研究室の助手として精勤していたのです。それが運命の狂いから東大、動燃、核管センターと遍歴して、炉物理との縁も稀薄なまゝ、その月を迎えることになってしまったのです。

私は1955年東大・理・物理の卒で、56年に新設の意気に燃えていた原研に入り、JRR-1の初臨界を含む原子力の黎明期を身を以て体験しました。やっと落ち着きが出て周囲を見廻せるようになった58年頃私は原子炉物理部に居て、水均質増殖炉の臨界集合体実験をしながらワインベルグの新著などを読んでいました。原子炉物理部…懐しい名前です。炉物理が当時は独立の部であり得たのです。この部に居た当時の人達は新しい学問に興奮を覚え、各自それぞれにジャンルを築こうと模索していました。私も実験から入り、やがて理論との接点に興味を感じ、中性子スペクトルの研究を中心に没頭して行きました。実験と理論との接点を探るとというのが私の炉物理の原点であり、今でもそのような論文を評価します。炉物理に理解があった杉本朝雄理事の計らいで、私を主幹事として「炉物理談話会報」No.0～No.7(1962.3～1966.1)を印刷することが出来、私の第1モニュメントになりました。今読み返して若き俊英の集った当時の息吹きに胸が痛くなるような感懐を憶えます。私達は、それ以前に書いた「第2回ジュネーブ会議総合報告原子炉篇」でも読み取れるように、少くとも当時は大学の原子力科に先行した…若くして学会の中央に居るのだという自負がありました。原子力学会が炉物理単独の分科会を他に魁けて化学図書館で開いていた頃の話です。今から見ると牧歌的な、古き良き時代でした。

炉物理という語には種々の論評があることは承知していますが、ここでは触れません。ただ私達が目指したかったのは、大塚益比古氏が定義したような「物質中における中性子集団の挙動に関する物理学」といったものでした。例えば流体力学とか電子挙動理論のような、それから工学や技術が育つにしても、それは結果であり、基礎学問そのものに真理探究の価値を認めたかったし、今もそう願っています。しかしこの考えは原子力を実利を産む技術としてのみ見たがる人達には、容易には、いや遂に理解されなかったようです。

そしてそういう考えの人の方が社会的な力を持っていたのですから辛い道でした。私は炉物理と炉工学を合同分科会として開くことにも当初は反対でしたし、又「炉物理と炉工学をつなぐもの」とかいう題の下でパネルを開き、暗に実用学以外は評価しまいとするような企画も快く思いませんでした。

原研に長く居るうちに次々と大学の原子力科が開設され、私達が望んでいた原研と大学の統合的なポストグラデュエートのアカデミーこそ出来ませんでした。何人かの原研の同志が大学に移って行きました。私も一時原研と兼任だった武田栄一教授のお計らいで1964年に東工大に移らせて頂きました。当時原研は原子炉物理部がなくなり、学者の役員・幹部が減り、研究よりも開発・管理の強化へ向っていたので、仕掛り中の学位論文の取りまとめも難しくなっていたのです(その後原研は又変わったことと思いますが)。東工大では予定通り1年半で論文を書き上げ、同時に院生達を鼓舞して当時の炉物理の学会口頭発表の1割を1講座で占めてやれといった努力迄してみました。私が研究内容迄タッチした当時の院生の多くは私との共著論文(ショートノートが多いですが)を残している筈です。この頃第2モニュメントとなったものに幹事として盡力した「炉中性子研究専門委員会報告」No.1~No.21(1967.6~1969.3)があります。これに残された気鋭の46篇の研究も又、このまま歴史の彼方に消え去らせるには余りにも惜しいものを感じます。

私はもう忘れかけていますが、中性子集団の挙動の学問ということで最も古く興味の対象となったのは、やはり中性子の増倍ということで、反応度、インポートランス、核的動特性といった領域だったようです。次いでグラストンの本などが中性子スペクトルについて十分でないとの反省から、中性子の減速・熱化、またこれと混然一体となって、物質分子の熱運動と中性子の相互作用の分野で、物性物理的問題や、物理数学的問題が研究され、実験面ではパルス中性子や中性子波伝播などが盛行しました。次に再び中性子の増倍の、今後は微視的過程が注目され、中性子相関・炉雑音に研究対象が広がって行きました。これらについて多数のメモや論文の原稿が乱れ飛んだ日々が懐しく思い出されます。又、常に古くて新しい問題として共鳴吸収とか、反射体や結合炉の問題があり、熱化問題も又、冷中性子の研究へと発展しました。私もこれらのテーマのいくつかに、ささやかな寄与はしたつもりです。

私は実用の学も勿論重視しますし、後述のようにプロジェクトには人一倍力を貸して来たつもりです。しかし応用は広く深い基礎学・一般論の中から自然に滲み出て来る余裕で作りに上げるのが望ましく、原子力学は歴史なお浅く、一見無駄に見えるような基礎をまだ固めるべき時期であると今でも思っています。従って基礎と応用は分業が望ましく、もし同一人がやるにしても態度と価値観を切換えて行い、評価もそれぞれに所を得させるようにしてやるべきと考えます。そして一般的に言えば炉物理屋をマンパワーとして使わず自由に研究させておいて、その中から生まれてくる科学技術史観を尊重し、オピニオンリーダーとして使う位の肚が識者にほしいと思っています。これが私の炉物理、炉工学区別論の大意ですが、経済・政治と深く絡んでしまった原子力界にはその余裕はなかったようです。

さて気が重いです、私の挫折について記しておきます。これも参考・助言のためです、迷惑を感じられる方も、もはや時効とみて許して下さい。何分私も退官年令に達したのですから。先きに東工大に移籍して程無く学位論文を書き上げたと記しましたが、これは書き上げただけで、審査は2年以上も棚晒しで進まなかったのです。テーマは熱化に係るものだったのですが、一部の教授が異を唱え、無理に推すと落とされかねない状況になってしまいました。真相は今も分からないのですが、上記したような炉物理についての価値観の相違に加えて、原研出身の私の自負に対する反感があったようです。どこそこを直せ、ここは不十分かなとか具体的に言ってくれば打つ手もあるのですが、そのような噛み合った話にはならず年月が流れるだけでした。そして学位が助教授昇進の一つの条件とみられていましたので、そちらも頓挫してしまっただけです。原子炉設計理論という講座の新設があり、武田教授もそれをあてにして私を取敢えず助手として採用なさったようですが思うように行きません。(当時の私の日記に残されている拙歌「思いきや三とせの秋を虚ろなる心にしみて過ぐすこの身を」何分給料も社会的な力も原研当時より下っていたのです。)

自分がタッチしている院生の方が先きに学位を取得して行くのを見るのは複雑な気持ちでした。思い余って1968年になって母校東大に相談しました。論文原稿はレベルに達していると認められ、冷却期間を兼ねての上積み・修正指示が与えられました。こう具体化してもらえれば対処出来ます。結局1年たらずで学位を戴くことが出来ました。またこの過程で弥生炉プロジェクト助教授へ転進の示唆を頂きました。もっとも私はまだ東工大に未練がありました。落ち着いて炉物理の研究をするにはその方が向いているように思えたからです。しかし学位を他大学に委ねたということは反対派教授を一層硬化させてしまいました。そして一時は非公式ながら新設講座の備品の相談迄受けていた上述のポジションは「適任者無し。空席とする。」という決定で空しくなりました。私は学令に達した息子を抱え、見切り発車で始めた住宅ローンに喘ぐ妻を見ては、その実家への責任上も転進を計らざるを得なくなりました。こうして私は東大に救われて1969年夏そちらに移籍しました。その直後、炉物理夏の学校の初回が開かれたのは印象深いものがありました。

東大は、しかし出身学部が違うので将来は必ずしも保証されていませんでした。私は弥生プロジェクトを成功させれば、その功績を評価してくれるのではないかと考えて精一杯の努力をし、割りに短期間で完成に導きました。しかしそれは皮肉にも私の存在理由の早期の喪失を招き、自分の考えが甘かったことを知らされました。二・三の獵官を試みましたがはかばかしくなく、最後に万年助教授を覚悟して原研共同利用担当教官になるのなら残留可能ということになりましたが、あろうことか最終段階で事務方にミスがあり、過定員になるので発令出来ないという結果になり、どこ迄もツイていませんでした。1777年に至り結局大学人を諦めざるを得なくなり、動燃への移籍を秘めたまま、その直前に京大炉の依頼に応じてトリウム炉の話をする日が来ました。私は最終講義(それは本来なら今頃やる所でした)のつもりで話したことを思い出します。

それ以後は、予想されたこととは言え、炉物理研究をするような時間はありませんでした。

た。私は結局、JRR-1、水均質CA、国産動力炉(ATR)、弥生、FBRなど多くのプロジェクトにタッチしました。又、KUCAの設計・始動にも若干の寄与をし、熔融塩炉を中心とするトリウム炉にも終始シンパとして過したつもりです。これからみても私が決して実用を軽んじた人間でなかったことは分ってもらえると思います。要は姿勢を切換えて二本立てで行うということにしたのです。しかし虻蜂とらずになったかもしれません。炉物理の研究が途切れ途切れになってしまったのが、研究者としての私に今一つの力強さを感じさせない理由の一つでしょう。プロジェクトや官製の会議に煩わされている研究が出来ないと言って遠地に赴任した人が居ましたが、研究者としてはそうあるべきだったかもしれません。お前の限界だよと言われればそれまでですが、例えば東工大で悩んでいた時に炉雑音の国際会議がありました。私は若干のアイデアもあったのですが動く環境ではありませんでした。この時、論文は通してやる、後ろ向きのことにはもう心配せず、大学と日本のためにトライしてみよと言ってくれるだけの度量が反対者にあったなら、大分違っていたのではないかと思います。

私の炉物理の論文は、例えば熱化の離散固有値とフォノンスペクトルの関係とか、中性子計数の三次モーメントの構造とか、Rossi- α 法のトリガー条件と計数の関係とか、地味なものが多く、研究発表自身もてはやされたことは稀です。しかしそれは私の哲学上差支えないことでした。一方若干手前味噌ですが、レビュー発表はうまい方ではなかったでしょうか。その種のものに、放射化箔の話、Pu利用の話、Th炉の話、燃料サイクルのシステム分析の話、中性子相関の話などが挙げられましょう。古いことですが、大塚益比古氏の「炉物理研究10年の歩み」の執筆に協力したこともあります。動燃での定年近くに、動燃における炉物理研究活動のレビューを国際発表させてくれた(Marseilles, 1990)のは、そうした資質を見抜き、且つ私の挫折経緯をうすうす知っていた上司が、最後に花を持たせて下さったものと思い、感謝しています。

さて紙面が盡きましたが、私の第3モニュメントは炉物理連絡会そのものです。当初の育成にかなり盡力したつもりですし、炉物理夏の学校も最初一巡する迄は殆んど皆勤でした。その間1972年には東大在勤時に主幹事も勤めています。こうした繰り事位しかもう書けなくなってしまいました。会報・ニュース共毎号楽しみに読んでいます。核管センターからは学会にもセミナーにも出張扱いで出することは困難ですが、プログラムなどで、私の考える正当派炉物理の孤塁を守る方々が健在であることを知り、嬉しく思っています。特に名大、京大、京大炉などの研究に共感する所が多く、就中プロジェクトフリーの研究施設として貴重なKUCAは今後も大切にしてもらいたいと考えています。又、私大炉の活躍も望んでおります。あと個人的には委員会に出没してちょっかいを出したり、時にはまだ臨時の査読委員をやったりすることもありますので御警戒下さい。雑文を読み終わって頂き有難うございました。どこか参考になる個所があれば幸いです。(1993年1月記。)

炉物理と私

東北大学 平川 直弘

N. S. E. に Cohngold が Duderstadt と Hamilton の教科書の書評を書いているがその中で凡そ次のように述べている。「出勤した初めての日、Office を貰い、なにをしようかと考えていると J. Chernick が入ってきた。彼は 1 冊の本を持ってきてこれを読めといった。その本は Edlund と Glasstone の The Elements of Nuclear Reactor Theory であった。2 週間後に読み終って本を返しに行くと彼は "You are a Nuclear Engineer" といった。1950 年代の教育はこのようなものであった」。私の場合も同様で 1958 年に東京電力に入社して原子力発電課に配属になり初めにしたことは伏見・大塚両先生の訳された「原子炉の理論」を読むことであった。もっともその年の秋 ANL の Dr. Y. Kato が来日し、東大で原子炉物理の講義をしたのを聴講に行くことができ、高速炉というより ZPR-3 で行なわれていた臨界実験に深く感心し、「このような仕事ができたらいいな」という願望を持ったが、後にこれが叶えられたのは全く幸運であったと思わずには居られない。

当時は原子力の黎明期であり、電力会社は各機関と研究会を持っていた。その関係で当時の日本原子力事業（現東芝）の人々とは Weinberg & Wigner の輪講をしていたし、日立とは東京電力の NEAC2200 という計算機を使って BWR の核熱結合の事故解析コードを作るというプロジェクトに携わった。今考えると、当時の計算機の性能ではこれは無謀なことで、数値計算の知識など殆ど皆無であったから、1 つ 1 つのプログラムができて、それをつなげて走らせようとする不安定となって発散してしまい、その原因が分からずに途方にくれた記憶がある（実はこの途中で私は原研に出向したためこの最終的な結末がどうなったのかは知らない）。また当時の電気試験所の森田敏夫氏とは燃焼計算コードの開発をしていたが、これも私が担当していた。今我々の研究室では少し違った観点から燃焼コードの開発に取り組んでいるが、この文を書くにあたって、私にとっての炉物理とは臨界実験と炉心事故解析それに燃焼解析で全てで、その進歩は計算機が早くなった分だけではないか、と反省させられている。

1960 年に原研に高速炉のグループができ臨界実験装置を作るということで能沢正雄氏（当時阪大で私が 4 年生のとき東大原子核研究所に実験の手伝いに行っていたときに知合った）から誘いがあり、前述のように臨界実験に憧れていたので、1 も 2 もなく原研に行くことに決め、大分周囲の方々を煩わせたが 1960 年 8 月から原研原子炉物理第 2 研究室で高速炉臨界実験装置（今の FCA）の計画やそれに関連した実験、設計、安全解析等に従事した。特に私が担当したのは、安全解析の中でも HCDA (Hypothetical Core Disruptive Accident) を含む過渡事象の解析で、これが私のその後の仕事の方向に大きく影響することとなった。当時 HCDA に関しては、ANL で Okrent らの作った AX-1 というコードを苦米地顯氏が持帰っており、これを整備するだけで済んだが、反応度挿入事故の解析は Brittan の論文をもとに新たに計算コードを作らねばならなかった。実はこれが Collocation 法という一般的手法の特殊の場合だということを知ったが、当時は計算コードができたということで満足していた。

この一連の仕事は 1965~67 年に米国 APDA（世界初の商業用高速炉を目指していた E. Fermi 炉の技術サポートをするための会社）に派遣されたときに大いに役立ち、APDA の

OBでconsultantをしていたR.B.Nicholsonらのadviceを受けながら開発したHCDA解析用のMARSコードをANLがSASコードシステムに採用したために、多少は他人に知られるようになり、またそのときMARSに用いた手法の一部がその後のVENUSコードにも生かされているのは大変に嬉しい。

FCAは1967年4月29日に初臨界となり、私はそれには間に合わなかったが、帰国後臨界実験に携わるかたわらPu燃料の使用のための安全解析を行なった。(この安全解析は米国にいた時からその積りでZPPRの安全解析書も勉強していたのだが、時間の関係もあって、FCAのPu炉心の安全解析のときに仮想事故をZPPRの仮定に変更しておかなかったため、未だにFCA管理機関の人々に迷惑をかけているようである)

FCAのPu炉心の初臨界(常陽モックアップ)後、東北大学に移ったが、FCAとの関係はその後も続いており、まずFCAで果せなかったFCA実験に使用する平行平板型核分裂計数管の開発を行なった。これはその後優秀な共同研究者の助力を得て、東北大学のダイナミトロン加速器を用いたアクチニド元素の高速中性子核分裂断面積の測定へと発展した。またFCAで勉強した臨界実験の技術はKUCAを用いた実験に活かすことができた、と思っている。また何人かの大学院生がFCAで実験に参加し、その中にその後メーカー等で高速炉の開発に携わっている者も多い。

もう一つ原研以来たすさわってきたのは高速炉の炉心事故解析コードの開発である。これはFCAの事故解析の延長線上の仕事でもあるが、その後事故解析コードそのものはアメリカでSASシリーズやSIMMER等の大学の手には余るコードが開発され、事故解析そのものというより高速炉事故解析における空間依存動特性の取扱いを主に研究した。これは何人かの大学院生のお陰で色々な方法の長所短所を確かめることができた。

今後若い人々に勧めたいのは、まず炉心事故解析の勉強をすることである。事故解析により炉物理計算のみならず広く熱計算、機械的な破損機構の勉強ができるし、原子炉動特性方程式はそのstiffness故に数値解析上も面白い問題を有する。そして、これが、原子力の安全性に最も深く関わった技術である、という意味で最も重要だと思うからである。以前は、炉物理の研究者は多かれ少なかれこの問題に関与する機会があった。たとえば、原研時代の末期に斎藤慶一氏が手掛けていた高速炉事故解析用の計算コードの開発を引継ぐこととなった。ただし彼のformulationはとても当時の計算機に対応するものではなかった。私はこれを思いきって簡単にして何とか形をつけようとしたが、私が東北大に移り結局未完に終わってしまった。後で斎藤氏がこれは21世紀の計算機用のコードだ、と云うのを聞いたが、最近の計算機の進歩をみると、それもあながち夢でなくなってきたような気がする。その意味では彼の先見性に脱帽するばかりである。

「臨界実験とは核断面積をチェックするための道具である」というのが私と一緒にAPDAに派遣されていた故山本正昭氏の主張であった。そして私もそれに賛成である。ただし高速炉では初めから中心反応度価値とか、核分裂比とかいう個々の同位体の断面積に直接関係する量が測定されていたが、熱中性子炉ではこれまでは臨界量のような全くインテグラルな量に頼ってきたように思う。しかし今後は個々の同位体の断面積に直接関係する量の測定と解析が必須になると思われる。我が国の臨界実験装置においては、まだそういう実験に対する準備があまり十分でないような気がするが、この点熱中性子炉臨界実験の関係者に是非奮起を要望したい。

炉物理とともに

名古屋大学工学部 仁科浩二郎

昭和36年(1961年)春、原研「炉物理」第1研究室に配属されて、私は初めて「炉物理」という言葉に遭遇した。室長は野沢豊吉先生。それまで一企業の事務機械化に従事し、IBM-650の運転・プログラムに習熟していた私は、比較的スムーズに仕事のスタートを切った。事務の機械化に比べれば、科学計算のお手伝いをするのは楽しい。米国との協定で日本が入手していた原子力コードの一つ、速中性子スペクトル計算用「MUFT-3」が当時動かない原因は、そのソースプログラム IBMカードの或る欄に打たれた余分なパンチであることに間もなく気づいた。コードの内容は未理解のままながら、これでささやかな初仕事に成功した。このコードは大村達郎氏(NAIG)の助言により、当時のJMTR設計班、故斎藤慶一氏(原研)、福光良雄氏(住友)によって盛んに使われた。

その後、計算関連業務は新設の計算センター室として行う事となった。いずれにしろ、計算機の運転・プログラミングの上で、サービス(奉仕)的業務が多かった。私は、上記の企業における経験から、このような研究所でもサービス役が必要だろうと予想していたので、心理的抵抗はなかった。しかしずっとあと昭和44年以降、名古屋大学で働いて、依然として研究者コミュニティーの中でサービスの業務の意義が理解されにくく、従って担当者が誇りを持つのは難しいことを改めて感じた。これは一般に個別の研究室を超えた共同利用組織、例えば図書館、原子炉などに対しても言える事だろう。我が国全般の現状は別として、とにかくこの種施設を提供する側と、利用する側の双方が、日常の利用業務に加えて当該施設研究者・技術者の研究実績促進について真剣に考えることが、質の高いサービスを可能にすると思う。

それはとにかく、筆者はその頃、盛んに使われていたGE製PROD-IIコードによる拡散方程式解法ないし固有値計算が、連鎖反応の流れとどう関連するのかよく理解して居なかった。また拡散方程式をWANDA(WH社製)コード方式の2点階差方程式で表してからあとのプログラム化には、鈴木友雄さんという、有能なプログラマーに殆どお願いした。しかし特に前者については何とか理解したいと考え、色々関係者(柿原幸二先生ほか)にお願いし、原子炉研修所のクラスに潜り込ませて戴いて原子炉の講義を受けた。其の際、訓練の一つとしてJRR-1の制御ボタンを押す機会を与えられた事には、心から感謝している。

その後1963年7月から米国へ渡り、ノースカロライナ州立大学(NC State U)修士コースへteaching assistant(TA)の形で入学、新任のVerghese先生から、Glasstone & Edlundの教科書による講義を受けた。ここで初めて炉物理が整理されて頭の中へ入った。このNC State Uでの毎日はやたらに忙しく、友達の雑談に仲間入りをして居る暇も無かった。週末は原子炉物理実験のレポート書きに費やし、weekdaysは助手として2年生の実験授業を週4回行い、その提出レポート(80人/週)の採点に追われる。その上、履修した炉物理講義では、有名なR.L. Murray先生がご自分の講義を「当大学内で一番難しい」と自負しておられ、山のような宿題をだす(帰日後、名古屋大学で学生にこのような宿題を与え、解法に

よる達成感を実感させようと試みたが、結局講義に関する制度的な限界と、日本人学生の集団行動mentalityの為に無理であった)。

その頃、共に学んだ優秀なclassmates、明るく親切な同僚のTAたち(米、パキスタン)を忘れることが出来ない。実験レポートの採点に疲れると、彼らと夜の12時、1時にでもハンバーガーを食べに行く。雑談はいつも、どこの店が安くてうまいかという内容。彼らには、筆者の家が火災で焼けた時、大変世話になった。「Kojiro、結婚早々苦労だな。俺達が近くに居て力になるから心配するな」と言ってくれた、Ron Christman、George Lans Blackshaw、George Brooks、Nick Kuehn は今どこに居るのだろう。そのほか、我々が提出した Murray先生宿題レポートを採点していた、尊敬すべき指導者 Tom Hirons。また来日経験があり、ROTC(予備将校)でもあったLee Nunnはその後、ベトナムで地雷を踏んで片足を無くしたと聞いた。その奥さんKathyは、Tomの奥さんと共に大学院生夫人のグループ活動を行い、そのPresidentをして居た。考えてみると、2年後に移動した先のミシガン大学では、このような密接な友達は作れなかった。ミシガンでは幸い奨学金を常に貰うことが出来て、働く必要がなくなった為でもある。

さて、修士論文課題には、このNC State Uの研究炉出力上昇の準備として、ボイド係数測定を行った。相い隣る燃料板の狭い間隙にボイド箱を挿入して反応度効果を決定する実験はしんどく、金曜になると親しくなった原子炉運転員から「Kojiro、今日は金曜だ。早く打ち切ろう。」と言われるのに閉口した。彼らの多くは、潜水艦原子炉の運転経験者であった。つまり米国の原子炉技術者の養成には軍での訓練が一役買って居る。この事情は見落としがちだが、留意しておく必要がある。

次に移った先のミシガン大学では学期初めのオリエンテーションで、学科のKerr 主任教授が「君達の学年になると、もう何をしろと我々が言うことは出来ない。指導して下さる先生の所へはなるべく多く行きなさい。先生達も寂しがっているかもしれないから。」と言われた。NC Stateと全く違う原理で物事が動いて居ると感じ、驚いた。この学科には、Akcasu先生やOsborn先生などが居られ、中性子輸送理論や炉の動特性は勿論のこと、量子物理や確率過程、さらにプラズマ物理、プラズマの揺らぎまで何でもござれで、予備知識なしで履修しても最後には先端の論文が読めるように、やさしく、丁寧でしかも深い講義をして下さる。私はこれこそ理想の講義と感激し、将来このような講義をしようと決心した。しかし数年後日本でこれをトライしてみたところ、間もなく私の力では不可能と悟った。当時の同級生、Kenneth Shultis(Kansas U 教授)も私と同様、Akcasuスタイルの講義に感激し、自分で試みたという。間もなく不可能と解ったと、その後日本で逢ったとき述懐している。「我々はAkcasuの講義の偉大さが解ってなかった。我々は彼に甘えていた(spoilされた)」と意見が一致した。

ノースカロライナを離れる時、「Kojiro、北部のヤンキーがお前をいじめたら、俺がやっつけに行くからな」と原子炉事務担当 Worth Bowman が冗談ともとれぬ表情で言ってくれたのだが、ミシガンでの勉学は順調に進んだ。折しもベトナム戦争はたけなわで、も

と兵隊で韓国・日本に滞在した経験のある学生と、私が原子炉建屋のなかで口論し、J. Carpenter助教授を当惑させた事もあった。キャンパス全体でも論議が盛んで、産業界との共同研究を行っている大学工学関係建物の前に、爆発物が置かれた事もあった。

博士論文は、エネルギー依存を含めた中性子波理論となった。このためには、複素減衰定数を定める分散関係を数値的に解き、それを基に振動中性子束の4成分を計算するのだが、大変な計算量となり、費用がかかった。Akcasu先生は、「Kojiroは計算機麻薬患者になった」と思ったらしい。日本を出るときは、米国では原子力コードの基礎となる理論を理解し、コードを使いこなして炉を設計したいと思って居たが、両大学での論文はこの意図を外れることとなった。それはそれで良いのだが、現在日本への途上国留学生が類似の悩みを持つのを見聞して、思いは複雑である。当時はちょうどDartmouth大学でBASIC言語が開発された直後であり、教室がFord株式会社から無料で使わせて貰っていたTSS端末は、このOSで動いていた。しかしこの中性子波の計算量はとてもこなせず、ミシガン大学のtime-sharingシステム(MTS)のbatch処理で用を済ませた。

さてPhDを取り、名古屋大学の講師に赴任した訳だが、それ以後の話は紙面が足りないので簡単にする。まず、原子力のどういう研究を行うかについて、阪大の住田先生、NAIGの深井佑造さん、日立の川合敏雄さんの話など伺い、随分考えた。が結局、講義の項目と研究分野が近い方が効率的と考えると、炉物理を離れられず、熱化理論とパルス実験から始めた。そのうちKUCAが動き始めて米国でも出来なかった実験ができ、その解析に熱中することとなった。

だが一方、マンハッタン計画の当時にほぼ出来上がり、戦後少なくとも1960年代まで米国でお目にかかった炉設計に関する物理的枠組みは、現在日本では絶版のWeinberg & Wignerの教科書でその一端を知るのみである。それで良いのかが気にな。計算機に頼った実験解釈が現在炉物理では主流だが、それだけに逆にこの種の物理的な教科書が要らないのだろうか。それに加えて随伴関数の意味とそのモンテカルロ法による計算、衝突確率法、 S_n 法とQuadrature setの作り方、高橋亮人先生のI関数の方法など、どなたかまとめて教科書にお書きにならないだろうか。

1969年帰国した時、日本の大学の職員も学生も、米国のそれに比べれば時間、義務、経済の点で（住宅を除き）実に恵まれていると感じた。しかし当人達はそれと正反対で、実に恵まれないと感じて居られたようであった。結局幸福感とは周りとの比較で決める相対的実感だから仕方ないのかなと考え直した。また、米国で私は食うために働き、最初の頃は実に辛かったが、一旦仕事ならびに学業で信用を得ると、着実に世界が開け、またその信用で何かと有利になる。日本では何でも平等に順番待ちとなるのだが、毎日の努力がどう反映するのかが、大変あいまいで、大変長い期間にわたる平均値で評価がきまり、個々の努力、成果に対して評価されたと言う実感がなく、手ごたえがない。愚直で平凡な私には当時の米国の方が分かりやすく、働きやすいと感じたのをおぼえている。

現在私には、原子力に関するPA促進と途上国への啓蒙が最も強い関心事である（以上）。

炉物理と共に — 第5回技術予測調査 —

日本原子力研究所

金子義彦

科学技術庁の科学技術政策研究所(坂内富士男 所長)は、第5回の技術予測調査を進めていましたが、このほど結果がまとまり公刊されました。御存知の方も多いと思いますが、この調査は1971年より5年ごとに実施されてきております。多数の(約1100)科学技術の研究開発項目について、それぞれが実現される時期について、やや広い意味で関係者の意識を問答形式で尋ねデルファイ法によって集計したものであります。また、調査は、実現される時期のほか、その項目の重要度や確信度も含めてまとめられています。例えば、「核融合発電炉が開発される」という項目には、98%の人が重要度〔大〕とし、実現時期は2020年以降と判断し、その確信度は43%の人が〔大〕としています。今回の調査について、通読してみても、面白かったのは、「有人宇宙船の火星着陸とその帰還が行われる」という項目の動向であった。この項目は、第3回の調査のときから現れたもので、そのときは、僅か2%の人が重要としたにとどまっていたのですが、第4回で上向きに転じ、今回第5回では27%の人が重要度〔大〕としています。私が原子力の宇宙開発への応用に興味を抱いたのは、ソ連の原子力衛星コスモス954号のカナダへの墜落事故が契機で1978年のことで、この技術予測でいうと第3回の調査直前ということになります。きっかけはともかく自分で興味をもった課題にのめりこんでいくうちに、少しずつ問題にしている世界が見えて来ると同時に、興味をもつ人の輪もいつしか広がって来るのは少なからず愉快的なことです。炉物理の研究の世界でも、そう経験はたくさんはないのですが、とにかく自分は興味があるということで、やっていくうちに、系統的な解明ができ、かつ多くの研究者の集まりの中に、自分自身を発見するようになるのは大変楽しいことでもあります。炉物理の意味を広めにとりますと、まだまだ沢山のこれはというテーマに遭遇することになると思っております。さて、ここで話を第5回の技術予測にもどしますと、「有人宇宙船の火星着陸とその帰還が行われる」に対する答として実現時期の中央値は2018年になっておりこの値は最初に登場した第3回の調査からあまり動いていません。技術的に難度の高い項目は、調査の回数を重ねる度に、逃げ水のように離れていくことが多いのに、あまりそうならないのは実現したら面白いという願望が引きとめているのかも知れません。ひよっとすると、本当の実現時期もそんなところから決まってくることもあるかも知れない。というのが、年頭に当たっての私の所感です。

以上

炉物理とともに

九州大学 総合理工学研究科

神田 幸則

この標題で、私が本誌に寄稿することは面映ゆい気がします。というのは、私自身は直接に炉物理の研究をしたことはないからです。本誌を読まれる方々は、先刻ご承知のことです。本来、核データ屋です。しかし、核データも当然広い意味での炉物理に含まれる、というよりは、炉物理とは離れ難い隣人であるとの理解です。したがって、「炉物理とともに」と言っても、その中にある「ともに」ではなく、その隣にあって離れる訳には行かない「ともに」でありますから、本質は素人談義です。そんな立場で、気楽に書くことにいたします。

「炉物理」に関する私の考えは、既に本誌に、1990年[1]と1992年[2]の2回書いております。つい最近のことですから、今回の内容がそれと大きく変わったものになる可能性はありませんので、正直の所書き進めるのに極めた難渋いたします。そこで、上のような宣言をして、一步はずれたポジションをとってみたいと思ったのです。

今から30年以上前の頃、炉物理にどんなイメージを持ったかを思い出してみました。原子炉の最も基本は核分裂であるということと、「炉物理」の教科書に書いてあることとのギャップが気になったのが、強い印象として残っております。その内容は、本誌に前に書いた「炉物理の微と巨」[1]の論旨そのものであったのですが、当時これを仲々認識出来なかったことが、炉物理の勉強がはかどらなかった理由だったのです。微視的現象である核分裂に拘っていても、原子炉全体の巨視的現象の理解には到達しません。この両者のギャップを飛び越したのが、フェルミであったと思います。彼の天才的才能の成果であろうと思います。本原稿の依頼の文にも、昨年は「フェルミによる核分裂連鎖反応の実現から50周年の節目に当たりますので、日本における炉物理研究の歩みを振り返り今後を展望する」とありました。彼のそれまでの実験の蓄積が、この発想の基礎にあることは当然です。しかし、現在では当然の概念としてわれわれの頭に入っている原子炉の体系を描いた上で、それを新しい物理体系に仕立てあげるには、相当な物理的思考能力がなければ不可能ではなかったかと思えます。こうして出来上がったのが、炉物理であろうと思います。勿論、此処で象徴的にフェルミの名を使っていますが、彼一人の力のみが炉物理を開拓するのに貢献したとは言いませんが、新しい分野の創始には、この様な飛躍した発想をする天才が必要であるし、そのような人が居ないと始まりがないように思います。

新しい分野が始まり、原子炉の実用化が進行し、炉物理の精密化が進んできた過程で、炉物理の発展に大きな影響を及ぼした環境条件として、計算機の発達と核データ測定があります。この二つの条件は、炉物理の理論体系を決定した大きな要因になっていると思えます。炉物理の発展と、計算機的能力向上は並行しております。計算機

無しに炉物理を論ずることは不可能でしょう。逆に、計算機無しに発達したとしたら、今の理論体系とは別の形になったのではないか。また、核データの供給がなかったならば、やはり、理論体系は今にはならなかつたらうと思います。理由は、いずれも、基本方程式の近似化を強く要求しないからです。では、どんな形になったかを論じるのも面白いことであろうかと思いますが、それはゲームみたいなもので、それによって有意義な結果を期待できるかどうかは予測できません。考えてみる価値はあると思っております。此処で言いたいのは、計算機と核データに依存した結果、炉物理は物理特有の予言能力を十分に持ちえない方向に進んでしまったのではないか、との疑問です。核データと、炉体系の条件の入力、それに計算プログラムを計算機に入れて答を出す。計算機は、その条件でしか答を出してくれません。条件を変えて、計算を繰り返す。それを総合して判断をする。炉物理は何をしたかを問えば、計算機プログラムに全ては含まれる。こんな言い方をしたら、大変な反論を受けることを承知しながらの素人談義ですから、黙って先まで読んでほしい。

上に述べたことを前提として、炉物理は時代を先取りした一つの方法論を確立したと、大いに自負すべきだろうといたい。物理の予言能力は、大きな前提があつて、初めて可能になるのであつて、常に発揮されるものではない。与えられた環境が、物理条件として純粹であればあるほど、高い能力を発揮するのであつて、われわれが住んでいる物理的世界はそんなではなく、解かなければならない問題は、常に複合条件を伴つてでてくる。簡単に言つてしまえば、工学的世界である。一方、測定能力は向上しているので、何れの問題にも、核データのような微視的観点のデータが得易い。とすれば、炉物理が発達させた方法論は、応用可能ではないか。計算機の発達はまだ期待できそうであるから、更に、この方向は有望である。

やはり、本誌に書いた前回の拙論と同様な論旨になつてしまいましたが、一つの学問分野が、半世紀続いたことは、完成度も高いし、その蓄積されノウハウも豊富なはずであるし、人材も多いのだから、他の分野への貢献も視点にいれた展望も持つべきだろうとの思いがあります。

参考文献

- 1 神田 幸則、「炉物理の微と巨」、炉物理の研究、第39号 (1990年4月)
- 2 神田 幸則、「炉”物理”考」、同上誌 第41号 6頁 (1992年3月)

炉物理とともに

京大炉 藤田 薫頭

大阪大学三年生の時に、吹田徳雄先生の原子核工学概論を聴講したのが、その後に中性子と付き合うことになるきっかけであった。既に三十数年が経過している。その講義は核分裂や連鎖反応への入門的な講義であったが、記憶に残っていることは少ないものの、ただ「君達は中性子のことを勉強するように」とおっしゃっていたのを未だに記憶している。私は電気工学科の学生であったので、エネルギーには少しく興味をもっていたであろうが、電荷のない中性子に対してはパチンコの玉を小さくしていっただけの極めて単純な描像しか持ち合わせていなかった筈なのに、それにひかれたのは吹田先生の魔術にかかったのかも知れない。

こうして、学部と修士課程の卒業論文は吹田研究室でご指導をうけることになった。卒業研究の時間のほとんどは、コッククロフト・ワルトン型のDT中性子源の調整、真空管回路直流電源や真空管2進法スケーラの製作などに費やしたが、卒業論文提出期限が近づいて、少しは中性子を発生させることに成功し、いわゆるパルス中性子実験により、軽水-アルミニウム非均質系の拡散定数、有機減速材の拡散定数の温度変化、などを測定して卒論とした。私の「炉物理とともに」は、ここから始まったことになる。

卒業後は、今日まで京都大学原子炉実験所に勤めてきた。その間、研究炉・臨界集合体・電子線型加速器などを建設・運転・安全管理し、これらを用いた実験的な研究を担当する部門に属していたため、炉物理の研究に携わるのには恵まれた環境にあったはずである。私は、研究面では電子線型加速器に密着してきた。

その電子線型加速器を設置したのは1964年である。予算要求段階ではDT中性子源を考えての中性子発生装置であったが、当時、電子線型加速器が強力なパルス状中性子源として注目されるようになったため、実験所の柴田俊一教授が何とか電子線型加速器用の予算をねん出するよう努力されていたのを薄々記憶している。先生は、炉物理の研究を中性子集団の微分的エネルギースペクトルを測定して発展させたいと考えておられた。当時は、炉物理は少数群と四因子公式で考えられていたが、大概の炉物理の研究者は、興味のある炉物理的現象を十分把握するために、中性子の微分的エネルギースペクトルの測定に関心を示していた。電子線型加速器に中性子飛行管を設置し、BF₃カウンターと時間分析器を準備して、飛行時間法により軽水体系からの漏洩中性子のエネルギースペクトルを測定した。この測定で、ブラウン管にマックスウェル分布と1/Eスペクトルの時間分布が見るみるうちに現れて、いたく感動したことを思い出す。このこともあって、現在も京都大学工学研究科原子核工学専攻の学生実験の中にこの実験を入れてある。軽水体系にほう酸を溶解さ

せていくとスペクトルの硬化が一目瞭然で、スペクトル形成の理解に適していると考えられるからである。

その後、同電子線型加速器は共同利用に供され、全国の大学から多くの先生方に来所頂いてご指導を受けながら、炉物理実験に利用されてきた。1960年代から1970年代の加速器使用記録をみると、極めて多種の実験が試みられていて、興味深い。そのなかで、系統的に進められた研究は、パルス中性子実験に関連した時間依存中性子スペクトルの測定、高速炉構造材の群定数・輸送計算の研究のための高速中性子スペクトルの測定、原子炉工学の観点からの中性子断面積の測定などであった。

この間に、電子計算機による解析・計算技術が格段に進歩した。解析・計算と実験との間のバランスをとることは難しいが、経験的には適切なバランス感覚のある研究者が成功しているように思われる。私自身は、電子計算機の利用が苦手である。必要に応じては、名付ける程でない程度の拡散コードやモンテカルロコードを自作して使用しており、計算機が嫌いではないのだが、有名な大型コードを敬遠してきたことを反省している。今は、研究炉の管理において大型コードの使用が不可欠だが、同じ職場にバランスのとれた人たちが育っていて、彼らに助けられている。

「炉物理とともに」歩んできたことを思い出して、取り留めもなく記してきたが、今後「炉物理とともに」如何に歩むのか、ひとことだけ触れたい。

炉物理研究者の関心は、核エネルギーの利用という目標のもとにおいて、時の流れと共により広い領域に向けられてきた。利用形態は多様であろうから当然である。ただ、そこで、中性子はなお重要な役割を担うことと思われる。私は、研究炉等の中性子源を守り、発展させるべき職場にいる。その職務のために、炉物理研究の成果を大いに利用させて頂きたいし、その結果のひとつとして、これからの炉物理の研究者に解析・計算と実験のバランスのとれた研究環境をお返しすることが出来ればと祈念している。敢えて株を守ることになる。

わて，炉物理，苦手でんねん

京大・工 神野 郁夫

わて，一応，原子核工学教室の大学院，出てま。せやけど，炉物理の単位，取ってまへんねん。教科書のラ****，持ってます。どうも，頭に入りまへんでした。講義に出へんかったせいかも知らんけど。

修士の時は，早よから熊取，行ってました。フィッション勉強しよ思うて，ガサガサ実験してました。修士一回生の前期は，そら単位揃えなあかんし，ぼちぼち講義にも出てましたんやけど，あんまり誉められたもんやなかった。あん頃は，そない講義出へんでも，結構単位揃うたし，試験一発単位貰う事もできた。せやから知識の範囲狭い事，今となってちーと後悔は，しとる。

後期にはそれこそ日曜の午後に熊取行って，土曜の午後に京都に戻る生活やった。あれこれ実験してばたばたとったけど，結構おもろかったで。ゼミもフィッションとかクロスセクションとかやから，たまに原子炉関係の論文の話聞くととき炉物理やなあ，思うくらいやった。

実験でなあ，フィッションフラグメントのエネルギーなんぞ測ると胸踊るで。重フラグメントと軽フラグメントとの山二つ見えるし，きれいやな思うわ。そんで，おなじフラグメント測るにしたかて，シンチレータ使うときとシリコン検出器使うときとレスポンス違いよるし。いっこいっこのフラグメントがどないしてシグナル出すか思うとわくわくするわ。わてが自分でこさえたシリコン検出器で測ったのも，感動もんやったなあ。そら，分解能とかORTECよかあかんで。そらORTECのは高いしな。そんでも感動もんやった。

実験に使うてた薄いシンチレータのレスポンスどないか考えて，パラメータいっただけで他の連中の実験結果きれいに説明できて，得意になってた。修論書くの楽しんでたで。

そうこうするうち，ドクター年限も終わってしもた。日本原子力研究所に就職しましてん。わき目で炉物理の論文書く人たち，見てたんやけど，計算と実験と何パーセントで合わんならんとしんどそうやな，思うてた。わて，傾向さえ合えばいい，ゆうのが好きやねん。そんなこんなでどうも細かい議論までせんならんようで，わて，ついにいっこも炉物理の論文書かなんだ。炉物理やってはる人，ようけいはるし，大まかな性格してるわてがせんかて，まあええんちゃう。

結局，原研には5年半しかおらんかった。いろいろ仕事もしたし，書類も書いた。炉物理の論文だけは書かへんかった。そのかわり，他の論文は，六つか七つくらい書いたんちゃうか。タンデム加速器使わしてもろて実験もした。予測通り実験結果出たときは，嬉しかったで。

それから，原子核工学の助手になって現在に至る，言うことや。

ゼミで炉物理の論文やる時、学生の手前、炉物理知ってるふりせなあかんのには、苦勞するで。学生も、夏前には、この先生炉物理知らんと気づくようやけど。せやけど、門前の小僧言うことで、わてかて4回生くらいの知識はあるんちゃうやろか。まあ、自慢できへんけどね。しかも、4回生は院入試の勉強して力つけるし。わて、院入試の問題よう解かんもんね。

え、今後の抱負？せやねえ、学生さんがおもろてしよないわ、ゆうてくれるような研究考えなあかん思うとる。できれば原子核の建物の中で大体の実験して、最後にどっかに放射線使わせてもらいに出かける、ちゅうスタイルにしたいわ。なんちゅうても、学生さんが勢いないと見てる方もおもしろないもんな。せやけど、学生に勢いつけるもやる気なくさすんも教師やて、まあ自戒ってほどたいそなことやないけど、思うてるんや。

今度うちとこで学会あるけど、皆さん来ておくんなはれ。まだあんまり実験装置言えるものおいてないけど、ぼちぼち揃えますわ。

炉物理：出会いと抱負

名古屋大学 三澤 毅

上記のような大きなタイトルを頂いてしまいましたが、まだまだ炉物理が判っていない私としましては、何を書いてよいやら……。

とりあえず、「炉物理」との出会いのようなものを書き並べてみたいと思います。

炉物理との出会い (その1)

学部2回生のとき、授業の教科書として「ラマーシュ著、原子炉の初等理論(上)」を買ったとき。

初めて買った専門の教科書であったため何となく嬉しくなり、「原子炉の理論」という初めて接する夢のような言葉にちょっとドキドキした。しかしそれ以上に、1冊4200円という金額は下宿生にとって、かなりきつかった。

炉物理との出会い (その2)

学部4回生のとき、卒論のために大型計算機を使って中性子束分布を計算するFORTRANのプログラムを作ろうとしたとき。

プログラムを作ることに熱中すると、頭の中では数字とFORTRANの文法だけが駆け巡り、「原子炉の理論」はどこへやら消えてしまったが、大型計算機を本格的に使うことは初めてであったため、それなりに面白い毎日であった。

それ以後、既存の計算コードを使う機会が増え、大型計算機を通しての「炉物理」と接するようになり、大型計算機無しでは「炉物理」は成り立たないのではないかと思った。

炉物理との出会い (その3)

修士のとき、臨界集合体を使って実験する機会に恵まれ、「炉物理」の実験を見たり行ったりするようになったとき。

理論として聞いたことが、実際に体験できることは非常に面白い。特に、始めの頃はすべての実験に心踊らされ、今でも目新しい実験結果が得られたときの喜びは大きい。しかし、実際には「炉物理」実験でそのようなことは稀であり、予め計算等で予想され

ていた結果が得られることが多く、結果を見て驚いたり、不思議に思ったりすることは少なくなってきたような気がする。

改めて「炉物理」という言葉を眺めて

自分から「専門は炉物理です」と言えるようになるまでにはまだまだ勉強不足ですが、それでも他人から「専門は何ですか？」と聞かれたら、仕方がなくそのように答えることが多いと思います。原子力関係以外の人からは「難しい物理をやっているのですね」と言われて、炉物理を、素粒子や宇宙論のような理論物理的な研究の仲間であると受け取られてしまうことが多くあります。(学科の名前が原子核工学科であることも一因でしょうか)。原子炉の心臓部の研究なのだから「原子炉工学」でも良さそうなのに、なぜか「原子炉工学」といえば原子炉のシステム全体の研究を指すことが多く、やはり核分裂しているところの研究は「物理」のようです。これは、核分裂やその連鎖反応などの研究が物理学出身の諸先輩方によって進められたことによって、今日の「炉物理」研究の基盤が作り上げられたことと関係があるのでしょうか。当時「炉物理」は「物理」の中で、多分、花形の研究分野であったのではないかと推察します。もしそうであるとすると、「物理」の苦手な私は、いつまで経っても本当の「炉物理」と出合えないのかもしれないかもしれません。

「炉物理」の終わり？

「炉物理はもう研究することが無い」という言葉を耳にすることがあります。これに対して、「まだまだ計算値と合わない実験データは沢山ある」と強く反論してみたり、「物理」という言葉の入った研究分野では理論が完成されればそれで終わってしまうことも有り得るが、「炉物理」は「核分裂工学」といった研究であり、工学では研究の終わりは来ないと思うので、「炉物理」は終わることはない、などと勝手な三段論法を使って自分の都合の良いほうに考えています。しかしそれ以上に、原子炉の安全性、TRUなどの「核分裂による原子炉で生じている物理現象を利用した工学」での問題が解決しないことには、原子力工学すべての研究がいつか危うくなることは明らかであり、当然「炉物理」も研究されなくなる日が来るのかも知れません。

そのようにならないことを祈りつつ、「炉物理」の難しい理論のことは頭の片隅に追いやって、大型計算機の端末で数字とにらめっこをして「炉物理」と出合っています。

炉物理：出会いと抱負

東京工業大学原子炉工学研究所
小原 徹

私の炉物理との出会いは、炉物理という研究分野を意識したものと言うよりは原子力という分野を意識したものといっていると思います。

学部の学生時代は、理学部の物理学科におり卒業研究は宇宙物理の研究室でした。この研究室の先生は私の卒業した年で停年退官されることになっていたのに、大学院進学の際にはまた別の研究室を選んで進学するつもりでしたが、当時はそもそも研究者を指向する気持ちはなく、理学研究の社会から完全に離れたやや閉塞的な感じに少し不満を感じていたため、大学院はもう少し社会との関連性を持った分野をやろうと考え原子核工学専攻に進学することにしました。原子力固有の社会的な問題に対し専門的な研究がどのように関係しているかを知りたいと思ったからです。当時東工大の原子炉研で物理系出身の学生に合いそうな研究室としては加速器を中心に実験を行う研究室（複数）と原子炉（炉物理）を対象とする研究室（ひとつ）がありましたが、そのころは原子力のことについては何も知らなかったため、原子力＝原子炉という単純な図式で炉物理の研究室に入ったというわけです。

その後、企業に入り炉物理から離れた仕事をした時期もありましたが結局大学の炉物理の研究室に戻ってきてしまいました。大学を離れているあいだ原子力という仕事の裾の広さを垣間みる機会があったわけですが、「やっぱり原子力の基本は炉物理かな」という単純な思いこみがどこかにあったのかも知れません。

このように、私と炉物理との出会いはいきあたりばったりの結果のようなもので、このような文章にするのも甚だお恥ずかしい限りなのですが、私の現在の炉物理という分野に対する考え方は、このようないきさつに影響されている面があるかも知れません。

私が炉物理の研究について考える機会があるときには、社会とどのような関係をもっているかということ意識することが多くあります。例えば、社会の中で原子力はどのようにあるのがよいのだろうかとか、また原子力の中の炉物理研究はどのような位置づけになっているのだろうかといったことをよく考えます。現在の原子力研究は社会からどのような問題の解決を期待されているのか、また原子力利用によって今後どのような利便を社会に提供することが出来るかということがいつも頭の片隅にあるような気がします。

現在の原子力利用が抱える問題点については多くの議論があると思いますが、私は、放射性廃棄物（使用済み燃料の取扱を含む）の処理、安全性の維持、兵器

転用の防止の三つが、原子力利用に際して社会から解決を期待されている大きな問題ではないかと思っています。現在の限定された原子力エネルギー利用をより有効なものとするためには、これらの問題についてどのように対処するかが重要な課題であると思います。またこれらの問題の解決に目処がたてば原子力の利用は今後も社会に受け入れられていくのではないかと思います。現在すでに炉物理分野での研究がこれら問題解決のため行われているのは良く知られている通りです。放射性廃棄物の処理(再処理)については消滅処理等の研究が行われ、安全性については固有安全炉等の新型炉の研究が行われています。しかし、消滅処理の実現にはいままで得られていなかった多くの知見を新たに得る必要があるとされ、さらにこの研究では物質分離を行うプロセスとの技術的協調の必要性が高いと思われませんが、炉物理屋と分離屋さんの双方の意志疎通はスムーズにいかないことがあるかもしれません。新型炉開発もある意味では従来切り捨てられてきた効果を強調して炉の安全性を確保するという考え方が多いので、熱その他の現象の正確な評価が重要になると思います。さらに、核兵器の拡散の防止については現在は国際機関による政治的な活動により行われていますが将来技術的な解決方法が要求されるようになるかも知れません。

また、現在の原子力利用の形態にとどまらず原子力が新しい利便を社会にもたらす可能性を探る研究も重要であると思います。この場合には、従来の炉物理の分野のみならず新しい分野に踏み込んだ仕事が必要になるのではないかと思います。

炉物理研究は終わったというようなことを耳にしたこともありますが、まだ取り組むべき仕事は数多くあると思います。それは、先人が作り上げてきたものから見るとやや異質な仕事であることもあるかも知れないのですが、実際に社会から解決が期待されている問題やあるいは開発を期待されている技術があるならば、たとえそれがいままでのものにくらべ異質な仕事であっても、躊躇することなく取り組んでいきたいと私は考えています。

炉物理：出合と抱負

京都大学原子炉実験所 宇根崎 博信

今回「炉物理：出合と抱負」と題して本稿の執筆依頼を受けた次第であるが、今までの様々な出合と、その時に得たものを振り返えることにさせて頂きたい。

漠然と「原子炉」への憧れを覚えたのは、高校の物理の授業で原子核の構造を習ったときだったと記憶している。大変明確な論理で、原子核や原子核反応が説明できることにいたく感動し、「ガモフ全集」などを買い込んで読んでいくうちに、何故か「原子核反応」から「原子力」へと興味の対象が移り、大阪大学原子力工学科の門を叩いた訳である。

入学し、原子力工学の包括する科学分野の幅広さに触れ、些か戸惑いを感じながらも授業を受けていた。学部3年の専門授業に関谷全先生（現吉備国際大学）の原子炉物理があった。特殊関数の扱いから始まり、想像力をかき立てる様な、実にダイナミックな講義（中性子の飛ぶ「音」や衝突の「音」が聞こえてくる！）に触れ、これまたいたく感動し、「原子炉物理」という学問への興味が沸き起こったのが思い出深い。

当時は 8 ビット PC が流布し始めた頃で（なんと時代の流れは早いものか）、コンピュータ・アレルギーであった私に、学部実験の一環として行われた、拡散方程式の有限差分法による数値計算の実習は大きな転機であった。それまで全くつながりを考えてもいなかった「炉物理」と「計算機」の強力なリンクが臍気ながらも見え始めた気がした。

「高速炉の実験解析や炉心核設計はうちでしか出来ませんよ」という竹田敏一先生の言葉に引かれて、第5講座（当時の「関谷研」）の高速炉グループに配属が叶ったのが今から9年前である。本格的な(?)炉物理との出合はこのときであった。

研究室に配属されて、学部での「原子炉物理」と、研究室の「原子炉物理」とのイメージのギャップがまず驚きであった。実に具体的であり、直接的である。教科書の理論と、実物の「もの」としての原子炉が初めてつながる実感がした。

当時は ANL-West の ZPPR を用いた JUPITER 実験が日米協力研究計画の下に実施されていた頃である。阪大でもかなり広範囲に実験解析を行っており、私は特に格子計算手法の研究に携わっていた。JUPITER 実験解析を通じて、大学以外にも、随分多くの研究者・技術者の方々より様々なことを教わった。計算機から吐き出される「数字」の奥に何を見出せば良いのか、何を見出さねばならないのか・・・、大学からは少し縁遠いような、いわば「現場」に近い立場での原子炉の核設計の思想に触れることが出来たのは、貴重な経験であった。

縁あって京都大学原子炉実験所にお世話になることになったのが4年前である。それまでほとんど実験とは無縁であった私にとって、実際の「もの」(KUCA, KUR)との触れあいは実に面白く感じられた。以前と同じ計算を行っていても、受けるイメージが随分と異なって来たのが実感である。共同利用で来所される諸先生方から受ける刺激も大きい。

このようにして見ると、これまでの私の炉物理との関係は、「イメージ」が先行し、様々な出合によってその「イメージ」を具体的な「もの」として捕らえる機会が与えられて来たという繰り返しのようである。そして、これらの出合のたびに新しい感動と興味が湧いてきて、次の出合を求めて進んできたようである。様々な人との出合、考え方との出合、論文との出合などが自分の研究のヒントとなり、そしてその結果として新しい発見が得られたときの喜びが、自分自身の原動力となっていると感じる。

これからは、出合を求めていくばかりではなく、出合を与える立場になっていかねばならないと思う。他人から見ても魅力のある研究、考え方を創造して行くよう心がけて行きたいと思う。

学生時代からの様々な出合を振り返って見ると、実に多くの先輩方から様々なことを学んで来たことに改めて気づく。我々が、果たして我々が受けてきた以上のことが出来るかどうか、自信がないのが正直なところである。まだまだ努力不足であると自戒せざるを得ない。具体的に「こういうテーマをこうこうして行きたい」という以前に、抱負は「とにかく頑張らねばなりません」の一言である。「イメージ」と「もの」とのリンクを大切に、基礎と応用のいずれをも軽んじること無く、双方にバランスのとれた研究活動を心がけて行かねばならぬと改めて感じた次第である。

炉物理：出合と抱負

——— 原子炉物理の美しさと楽しさ ———

近畿大学原子力研究所 橋本憲吾

私が炉物理に初めて出会ったのは、名古屋大学での「原子炉物理学・同演習」であった。テキスト（ラマーシュ：原子炉の初等理論）の解説、式の導出、トピックの紹介等に加え、学生には毎回小テストと演習問題のレポートが課せられた。しかも、毎回1章のペースで進行し、予習が義務付けられていた。当時、学生の間では最も”きつい”講義と見なされていた。このペースに懸命に追いついて行った我々学生もよくがんばったが、大学の教員となった現在振り返ってみると、担当されていた仁科先生の教育に対する情熱に頭が下がる思いである。私は、毎回最前列に陣取り必死で勉強したにもかかわらず、試験の成績は悲惨なものだった。負けず嫌いとはそ曲りな性格も手伝って、この敗北が仁科先生の下で炉物理を勉強する直接の動機となった。

更に決定的な動機となったのは、ラマーシュのテキストの訳者あとがきに見付けた仁科先生の「学問の持つ美しさと楽しさ」という言葉である。この言葉は、現在の私にとって、動機以上の大きな支え・研究生活の糧となっている。原子炉という何か特殊な研究対象と見られがちであるが、その中で起る物理現象もまた自然現象である。宇宙・気象のような大自然から小川のせせらぎ・煙草の煙のような小自然にいたるまで自然は美しい。原子炉のような人間が作った装置の中にも美しい自然が存在するはずである。原子炉の中の自然を科学的手法で観察することにより、自然の秩序立った美の一端を楽しく味わう。炉物理屋にも、こういう楽しみや余裕が必要ではないかと思う。このような楽しい作業が、原子炉の安全性・性能向上に寄与すれば研究者として幸せの極みなのだが、かくあるよう精進したいと考えています。ただし、炉物理・炉工学上問題となる現象に対しても、不用意に「美しい」、「面白い」を連発してしまう癖はどうかせねばと思っております。御容赦下さい。

最近、学生との議論で厄介な現象を自然現象のアナロジーを使って説明すると、予想以上に飲込みが早い上に、感激してくれることが分りました。例えば、原子炉の出力振動・不安定性と炉の大きさとの関係を説明するのに、「小さいバケツの水面を叩いても振動はすぐ減衰してしまう。大きな浴槽の水面を叩くと振動はなかなか減衰しない。しかも浴槽の中心に比べ端の方を叩くと大きく振動する。原子炉も同じなのです。帰って試して下さい。」と命じたところ、翌日彼は「驚きました！その通りになりました。湯を勢いよく出しながら湯面を叩くと振動がどんどん強くなってきたので怖くなりました。」と目を輝かせながら言ってきました。流体力学を勉強した者には当り前の現象なのですが、彼にとっては自宅の浴槽を通して原子

炉が身近に理解できるようになったようです。その後、流体力学・振動論を再勉強したいと言っておりました。厳密には少し危ない例えかもしれませんが、炉物理を物理の勉強のための一つの教材・入口にできればと考えています。我々が理科の実験で味わった感激を、「物理＝演習」の学生達に知ってもらって、物理嫌いを少しでも解消したいと思っています。自然の美しさの味わい方を知って貰いたいのです。私学の教員としてのささやかな野望です。

私は、20代の5年間をメーカ・原研で過ごさせて頂きました。主に、原子炉熱工学・構造工学関係の研究開発に従事致しました。炉物理とは全く縁が切れてしまったと思っていましたが、当時熱流動・構造物の理論・実験解析に使っていたモード解析・フーリエ解析法を使って現在の炉物理の仕事をしているわけですので、対象が流体・構造物から中性子に変わっただけかも知れません。民間・原研・大学と様々な研究環境を経験できたという以上に、原子炉内の物理現象を広く深く勉強でき、貴重な経験をさせて頂きました。御陰で、炉物理が「中性子が作る特異な自然」から、「身近な現象と共通の美と秩序を持つ自然」に思えてきました。漸く、原子炉の中に、中性子・流体・構造物等が織り成す自然が見え始めてきたような気がします。中沢先生（東大）の「中性子がはっきり見える」心境に至るには、まだまだ修養が足りません。精進いたします。今後、原子炉の中の自然の美しさを、正しく怖がりながら楽しんでゆきたいと思えます。

仁科先生の「美しさと楽しさ」、中沢先生の「中性子が見える心境」に加えて、竹田先生（阪大）の「実際の動力炉に役立つ基礎研究」を欲張りにも同時に追及していきたいと考えております。また、社会に開かれた大学人の一員として、社会に通用する言葉・考え方が備わるよう努力していく所存です。

「京都大学原子炉実験所原子炉・臨界集合体」のあゆみ

京都大学原子炉実験所
代谷誠治、藤田薫顕

京都大学原子炉実験所は、原子炉による実験及びこれに関連する研究を行うことを目的としており、1963年に国立学校設置法第4条第2項に定める共同利用研究所として発足した。当実験所には、1964年に初臨界を達成した京都大学研究用原子炉(KUR)と、1974年に初臨界を達成した京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)がある。以下に、それぞれの建設の経緯、施設の概要、それらの歩みについて簡単に述べることにする。

1. 京都大学研究用原子炉(KUR)

1-1. 建設の経緯

研究用原子炉の設置が京都大学において計画されたのは1955年である。1956年11月、原子力委員会において、大学における基礎研究及び教育のための原子炉の設置については、さし当り関西方面に1基を設置し、大学連合等により運営を行うなどのことが決定された。この方針の具体的措置について、文部省は京都大学はじめ関係大学並びに科学技術庁、日本学術会議関係者と協議の結果、京都大学に研究用原子炉設置準備委員会を設け、原子炉設置に関する計画、原子炉の型式、原子炉設置場所の選定、管理運営の方法等を検討立案することになった。京都大学においては1956年11月末に第1回研究用原子炉設置準備委員会(委員長:湯川秀樹教授[当時])を開催し、検討を開始した。これに引続き、京都・大阪両大学及び関西の専門家約150名が専門委員に委嘱された。原子炉設置場所の選定については幾多の紆余曲折があり、宇治市、高槻市、交野町、四条畷町と転々として容易に決定を見るに至らなかった。高槻市以後の候補地の選定については、大阪府が候補地の斡旋を続け、1960年4月に大阪府会代表、産業界代表、民主団体協議会代表、大阪府吏員、関係大学代表等19名をもって組織する大学研究用原子炉設置協議会が発足した。そして、大阪府下において候補地を選定することになり、大阪府下20数地区について科学的に比較検討した結果1960年12月、大阪府泉南郡熊取町朝代地区が最適地として選定されるに至った。

一方、大学側においては1958年9月に京都・大阪両大学の他、関西諸大学並びに学術会議より推薦された委員で構成された、関西研究用原子炉建設委員会(委員長:藤本武助教授[当時])を組織し、原子炉並びに関連施設に関する技術的計画を推進するなどの努力がなされた。1960年12月、京都大学工学研究所に研究用原子炉建設本部(本部長:藤本武助教授[当時])を置き、工学研究所所属の教官等、京都・大阪両大学の教官が建設本部員に委嘱された。1961年9月、京都大学から原子炉設置承認申請書が原子力局に提出された。さらに1962年4月、関西研究用原子炉の建設に伴う業務を統一的に処理するため、京都大学研究用原子炉建設本部(本部長:木村毅一教授[当時]、副本部長:丹羽義次教授[当時])が改組され、原子炉及びその関連施設・設備等につ

いての建設計画の策定、建設工事の設計、施工監督及び検査、その他の原子炉設置に伴う技術的、事務的業務を処理することになり、多数の教官が建設本部員として発令されて、原子炉建設を推進することになった。1962年2月、原子力委員会原子炉安全審査部会で京都大学から申請された原子炉設置計画の安全性が認められ、研究用原子炉の設置が1962年3月に承認された。そして、1963年4月に木村毅一教授〔当時〕が初代所長に就任した。

原子炉実験所の施設建設工事は1961年12月初めに起工式を挙げて以来、建設本部を中心として3年計画で進められ、敷地94,988坪の地域に1962年3月に事務棟、中央観測所、倉庫、浄水運転室、中央変電所等、1963年3月に原子炉棟、工作棟、下水処理運転室等、1964年3月に研究棟、トレーサー棟、放射性廃棄物処理棟及びボイラー室、研究員宿泊所、中性子発生装置(LINAC)室、生物別棟ガラス室、放射線野外監視所等が竣工した。原子炉の建設工事も順調に進捗し、1964年6月25日17時55分、燃料挿入21本目で待望の初臨界を達成し、8月17日16時17分には1MWの定格出力に到達した。かくして1964年12月に原子炉性能検査並びに原子炉施設検査合格の承認がなされた。また、1964年12月から各種の研究会が開催され、1965年1月から全国大学研究者の共同利用が開始された。その後、1968年7月16日に定格出力が5MWに上昇され、今日に至っている。

1-2. KUR の概要

KURはスイミングプールタンク型で、炉心は93%濃縮U-A1合金にAl被覆を施したMTR型燃料要素と黒鉛反射体とからなり、軽水を減速・冷却材とした平均熱中性子束 3.2×10^{13} n/cm²・sの原子炉である。原子炉の制御は、B入りSUS製の粗調整棒4本と微調整棒1本で行われる。原子炉本体は、直径2m、深さ8m、厚さ1.0cmのAl製タンクにイオン交換水を張り、その底部に炉心が設けられている。炉心で発生した熱はタンク水を強制循環することにより取り出し、熱交換器により二次冷却水に移して冷却塔から大気中に放散される。原子炉建家は、直径28m、高さ25mの円筒型で、コンクリート壁と溶接鉄板により気密が保たれ、送排風機で常時減圧されていて、予期しない場所からの空気の漏出がないようにしてある。事故時には吸気・排気口が機械的に封鎖され、同時に水を用いて空気の出入りダクトを密閉する。この場合、建家内の空気は非常用の各種フィルタを通して清浄にされ、スタックから排出される。

原子炉に附属する実験設備には、4本の実験孔(B-1, 2, 3, 4)、4本の照射孔(E-1, 2, 3, 4)、重水熱中性子設備(D₂O)、黒鉛熱中性子設備(TC)、3系統の圧気輸送管(Pn-1, 2, 3)、水圧輸送管(Hyd)、傾斜照射孔(SL)、2つの貫通孔(T-1, 2)及び炉心内長期照射設備がある。B-1にはスローチョッパ(現在、フィルタードビーム設備に改造中)、B-2には中性子回折装置(TAS)、B-3には4サークル型中性子回折装置(4CND)、B-4にはスーパーミラー中性子導管、E-3にはニッケルミラー中性子導管、E-4には低温照射装置、TCには冷中性子源(CNS)及び圧気輸送管(TC-Pn)、T-1にはオンライン同位体分離装置(ISOL)及び高速オンライン圧気輸送管(Online Pn)が設置されている。なお、現在、SLについては、精密制御照射設備への改造が検討されている。

1-3. KUR のあゆみ

前述の如く、KUR は初臨界の 4 年後に定格出力が 1 MW から 5 MW に増強され、また、日本で最初に中性子導管や冷中性子源等を設置するなど、研究設備の充実に向けて努力が行われてきた。KUR は、1988 年から 1989 年にかけて約 1 年間、熱交換器からの二次冷却水漏洩と重水タンクからの重水漏洩の補修のために停止したことを除き、現在に至るまで順調に稼働し続けている。米国 GA 社の指導を受けて 1991 年度に行われた炉心タンク健全性調査の結果は、極めて良好であった。なお、現在、KUR に装荷されている燃料の内 2 体は、20 % の低濃縮ウラン燃料となっており、世界的な試験・研究炉用ウラン燃料の濃縮度低減化の動きに合わせた準備がなされている。ちなみに、1992 年 12 月迄の KUR の延べ運転時間は 51,132 時間、積算出力は 9,128 MWd となっている。

KUR は初臨界以後、原子力工学のみならず物理学、化学、生物学、工学、農学、医学から考古学に至るまでの広範な研究に利用され、数々の成果を挙げてきた。これらの成果は、京都大学原子炉実験所データベース KURRIP に収録されている。今後は、従来の研究成果に基づき、KUR を利用した 5 つの特微的研究領域 (① 極冷中性子・超冷中性子の生成と利用に関する研究、② 制御照射場による諸材料・試料などの特性研究、③ 短寿命 RI の分離と高度利用、④ 超ウラン元素の核的特性に関する実験的研究、⑤ 粒子線高度医療を目的とする生物・医学的研究) を主軸とする研究を行う予定である。

2. 京都大学臨界集合体実験装置 (KUCA)

2-1. 建設の経緯

KUCA は、原子炉の核特性に関する基礎研究、開発研究及び教育訓練を行うことを目的として建設された、全国大学の共同利用研究施設である。当初、その具体的な使用目的としては、① 高中性子束炉の基礎研究、② 中速中性子炉の基礎研究、③ トリウム増殖炉の基礎研究、④ 未臨界実験装置の延長としての研究、⑤ 原子力専攻学生等の教育訓練等が掲げられていた。KUCA は、A、B、C の 3 基の臨界集合体と 1 基の付設加速器で構成されている。

1965 年頃、炉物理・炉工学を専攻する研究者の間に、大学共同利用を目的とする臨界実験装置を設置しようとする気運が盛り上がり、日本学術会議の原子力将来計画第 3 次案にもそのことが盛り込まれるに至った。このような動きを背景に、1966 年 4 月、京都大学原子炉実験所に臨界集合体研究専門委員会 (主査: 吹田徳雄教授 [当時]) が設置され、全国の炉物理・炉工学関係者の英知を結集して、臨界実験装置の建設に向けての具体的な作業が開始された。当時、既に日本原子力研究所 (原研) 等には数基の臨界集合体が設置されていたが、これらは総て特定の原子炉開発のために設けられたものであり、学術的な基礎研究を徹底して行うには、新たに大学共同利用の装置が必要と考えられた。臨界集合体研究専門委員会では、各大学、原研及び原子力関連メーカーに属する研究者に対するアンケート調査をもとに概念設計を行い、基本方針を作成して 1967 年 3 月には臨界集合体仕様の第 1 次原案をまとめるに至った。その後、この第 1 次原案をもとに研究専門委員会や建設グループ等で詳細な検討が行われ、建設計画が煮詰め

られた。

KUCA の建設は、京都大学原子炉実験所が 1972 年 5 月に臨界実験装置増設の原子炉設置変更承認申請書を国に提出し、同年 8 月 24 日付で承認された後、開始された。そして、約 2 年の建設期間を経て、1974 年 8 月 6 日に C 架台で初臨界を達成し、同年 11 月 16 日に B 架台、12 月 3 日に A 架台と相次いで初臨界を達成した。ここで、初臨界を含む特性試験が、京都大学原子炉実験所臨界装置部員の他に、全国大学の研究者の協力を得て進められたことは特筆に値する。協力を頂いた方々は、北大の小川雄一教授、東北大の平川直弘教授、東大の古橋晃助教授（現核管センター）、中沢正治教授、岡芳明教授、東工大の海老塚佳衛助教授（故人）、相沢乙彦助手（現武工大教授）、東海大の中土井昭三教授、阪元重康教授、武工大の野崎徹也助教授、堀内則量助教授、名大の仁科浩二郎教授、松本元一教授（現藤田保健衛生大教授）、京大の西原宏教授（現名誉教授）、阪大の住田健二教授、高橋亮人教授、近大の三木良太教授、神船大の矢野淑郎教授、中島雅教授、九大の神田幸則教授等を初め約 100 名にも及んでいた。

初臨界以後、KUCA に関して 4 件の原子炉設置変更承認申請書が国に提出され、承認された。即ち、① 1975 年 6 月に重水反射体の追加が、② 1977 年 4 月に高濃縮ウラン湾曲型燃料体の製作が、③ 1980 年 8 月に中濃縮ウラン湾曲型燃料体の製作が、④ 1984 年 2 月に高濃縮・中濃縮ウラン混合炉心の構成が承認された。KUCA における炉物理研究の遂行に当たり、上記の臨界集合体研究専門委員会を引き継いで 1969 年 4 月に発足した臨界集合体専門研究会（主査：西原宏教授〔当時〕）が建設当時より十年余り果たした役割には特筆すべきものがある。即ち、臨界集合体専門研究会では、終始一貫して新しい臨界実験の計画、その実施の状況、実験結果等の緻密な検討を行ってきた。これが、現在の KUCA における実験研究の礎となっている。

2-2. KUCA の概要

KUCA は、世界的にも希有な、大学が所有する複数架台方式の臨界集合体実験装置である。12 角形の建家中央部にある炉室は 4 つに仕切られ、それぞれに 2 基の固体減速架台 (A、B) と 1 基の軽水減速架台 (C)、1 基のパルス中性子発生用の加速器が格納されている。各架台は、炉心及び制御棒駆動装置を支える二段式の支持構造を持っており、炉心は第一段に構成され、制御棒駆動装置は第二段に固定される。ここで特徴的なことは、複数架台を同時に運転することが絶対にならないよう、制御棒駆動装置は各架台に共通な 1 基しかなく、これの設置された架台のみが運転できるようになっている点である。これに関連して、核計装系並びに起動用の中性子源は、各々各架台に共通の 1 組しかない。このため、複数架台で同時に臨界となるようなことは起こらない。ちなみに、この制御棒駆動装置は炉室中央に支柱を持つ天井旋回クレーンによって目的の架台に移動できる。また、各架台を仕切る隔壁と炉室中央部にある回転式の可動遮蔽扉によって、運転中の架台から放出される放射線は十分に遮蔽されるので、燃料操作を伴わない限り、通常運転時に非運転架台では次の実験準備ができるようになっている。

A、B 架台は、ほぼ同じ構造の固体減速架台である。炉心は格子板上に燃料角板を装填した「鞘」を立てて構成される。炉心格子の中央部は独立に動くようになっており、制

御棒とは独立した系統の後備停止装置の役割を果たす。炉心を構成する Al 製の鞘は、断面約 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ の角筒で、その中にエポキシ樹脂塗装を施した 93 % 濃縮 U-Al 合金の角板と種々の厚さの黒鉛、ポリエチレン等の減速材角板を重ねて詰め、有効長約 1.5 m である。また、研究用として炉心の一部に天然 U、Th、Be 等の金属角板も使用することができる。C 架台は、軽水減速炉心用で、直径と深さがそれぞれ約 2 m の Al 製炉心タンクの中に格子板を設け、燃料集合体や反射体をはめ込んで炉心を構成する。格子板は 2 分割炉心の実験用に水平に二分割できるようになっている。臨界近接は、水位及び制御棒を調整することによって行うことができる。緊急停止の場合には、緊急水位下降用の弁を開いて炉心タンク水をダンプタンクに落とす。これは制御棒とは独立した後備停止装置である。燃料板の形状は平板型と湾曲型の二種類で、93 % あるいは 45 % の濃縮 U-Al 合金を Al 被覆したもので、一枚ずつ挿入・取り出しができ、その間隔も変えることができる。パルス中性子発生装置は、加速電圧 300 kV の絶縁変圧器型重陽子加速器で、T ターゲットを用いて 14 MeV の中性子を発生させることができる。臨界集合体と組み合わせて設置されているものとしては、世界で最も強力なものの一つである。

2-3. KUCA のあゆみ

KUCA では初臨界到達後、C 架台では KUR 2 号炉の計画があったことから、① 高中性子束炉に関する研究が精力的に行われ、② 試験・研究炉のウラン燃料濃縮度低減化研究へと進んで行った。これらの研究については、原子炉実験所が中心となった所外協力の形態をとって進められ、世界で初めて二分割炉心を含む軽水減速・重水反射体付炉心及び 45 % の中濃縮ウラン燃料炉心実験を行うなどの成果を挙げた。C 架台では、最近、③ 複数燃料体系の臨界安全に関する研究や未臨界度モニターの開発に関する研究、及び、④ 実効遅発中性子分率の測定実験が主として行われている。以上の研究では、炉心中の $H/^{235}\text{U}$ 比や二分割炉心の炉心間距離を系統的に変化させて実験が行われている。

A、B 架台では、① 一貫してトリウム燃料原子炉に関する研究が行われ、最近では、② 未臨界度測定法の開発や不均一燃料分布体系の臨界安全性に関する研究、③ 次世代型軽水炉の有力な候補の一つである高転換軽水炉に関連した稠密格子炉心に関する研究、④ 炉心スペクトル測定手法の開発、⑤ 実効遅発中性子分率の測定実験等が行われている。これらの研究においては、炉心の燃料対減速材体積比 (V_m/V_f 比) や炉心平均のウラン濃縮度を系統的に変化させて実験が行われており、臨界安全研究や稠密格子炉心研究については国際的にも高い評価を受けている。1992 年度より、KUCA 実験に参加する大学連合とフランス CEA との間で、研究協力協定に基づく協力研究が開始される運びとなった。

また、これらの実験解析を通じて核データや核計算コードの評価研究が進められると同時に、臨界実験データベースも開発されて実験データが集積されている。

この他、一部の学部学生を含む大学院生実験も全国の 10 大学 (北大、東北大、東工大、武工大、東海大、名大、京大、阪大、神船大、九大) の大学院生実験が C 架台を利用して行われている。これまでに単位を取得した院生・学生の総数は 1,152 人に達しており、原子力専攻学生・院生の教育面でも貢献を続けている。

立教大学原子力研究所・研究炉のあゆみ

立教大学原子力研究炉 原沢 進

1、立教炉はアメリカ聖公会から寄付された研究装置である。— ポラード博士のこと

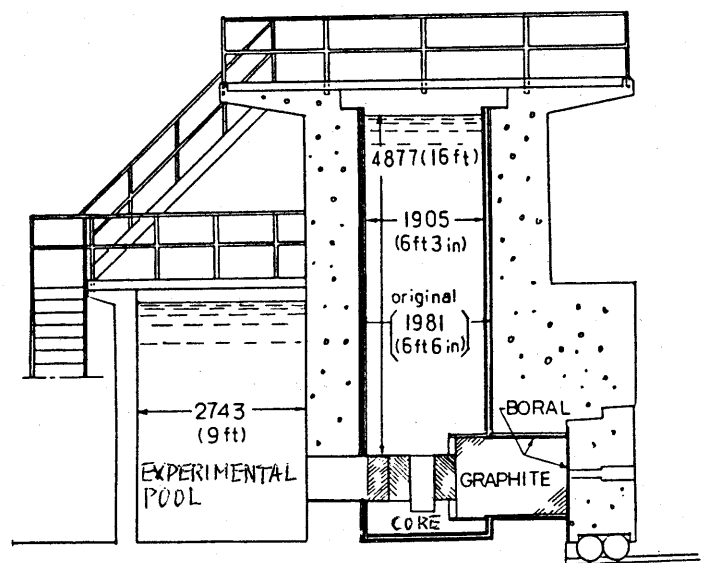
立教炉はアメリカ聖公会信徒からの寄付により設置されたものである。きっかけは、1955 (昭和30) 年6月、アメリカ聖公会の定例会議でワシントン大聖堂のチャールス・マーティン師から提出された「国連の活動に協力して、極東における聖公会の施設の一つに原子炉を供与しよう」という提案であった。ついで5ヵ月後の同年11月、総会で原子力平和利用委員会副議長に任命されたウイリアム・ポラード博士が米国政府の「Atoms for Peace」の仕事の一環として来日された際に、築地の聖路加病院と立教大学を訪問して、研究炉は立教大学に贈るのが適当であるとの報告をされた。ポラード博士は、第2次世界戦争中は、オークリッジで原爆製造のマンハッタン計画に参加していた。広島に次いで長崎に原爆が投下された日の夜彼は教会で一晩中、何故科学の成果が多くの人を殺す結果となったかを神に問い続け、科学と宗教を両立させることを決意して神学の勉強を始めることを決意した。やがて司祭の資格をとり、オークリッジ核科学研究所長と聖公会オークリッジ地区の司祭を両立するようになったという経歴を持った方である¹⁾。博士は1989年のクリスマスに亡くなられた。立教大学にとって忘れることの出来ない人である。また、科学・技術と宗教との調和を志す全ての人にとってよい先達と思われる。博士の訃報に接して、日本原研から立教に移って間もない1960年にオークリッジ核科学研究所を訪門しポラード博士にお会いする機会をえた時のことが蘇った。その穏やかな人柄は忘れることが出来ない。

1957年4月に立教大学は原子力研究所を設立し、アメリカ聖公会は1958年10月のマイアミでの総会でポラード博士の報告に基づいて立教大学に原子炉を寄贈するための募金を決議した。炉型は最初swimming pool 型なども候補に上がったが、博士の助言もあってTRIGA型に決まった。敷地は元の武山海兵団の跡地、約50,405m²(約1万6千坪)を横須賀市などの努力で払下げてもらい、1959年2月16日付けで原子炉施設設置許可申請を提出した。

2、建設経過—原子炉の設計変更

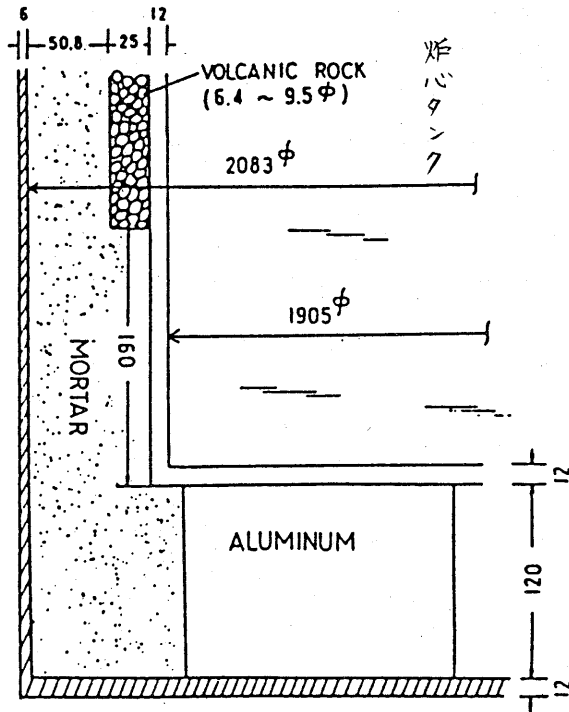
立教炉は完成を数カ月に控えて、イタリア・ローマに建設された立教炉と同型の鉄製原子炉のタンクと熱中性子柱との間のエポキシ樹脂による接続部からの水漏れが発見されたため、急遽設計変更を余儀なくされ完成が半年以上延びた。

1961年7月1日に鉄製の炉心タンクの内側にアルミ製のタンクを入れ、アルミ製の熱中性子柱の容器やビーム・ポートを溶接するように変更の認可申請をし、同年8月15日の認可後に変更工事にはいった。したがって、立教炉の炉心

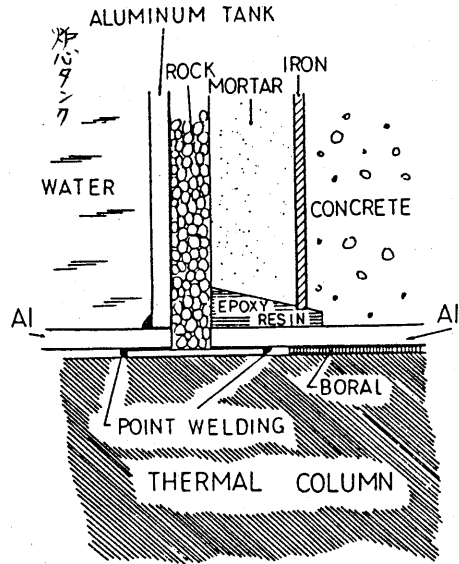


第1図 立教炉立面図

タンクは二重構造になり、内径は最初の設計(1981mmφ)より7.3cmほど小さくなり、1908mmφとなった。第1図に原子炉の立面図を示す。

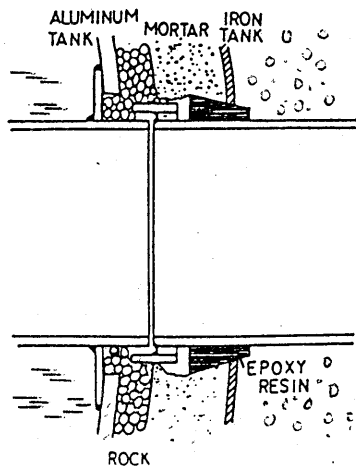


a) アルミニウム・タンク 底部縦断面



b) サーマル・コラムとAlタンク 接続部縦断面

第2図 アルミニウム製炉心タンクとサーマル・コラム およびビーム・ポートの接続縦断面図



c) ビーム・ポートとAlタンク 接続部縦断面図

第2図には炉心タンクの底面付近の縦断面図、炉心タンクとサーマル・コラムとの接続図および炉心タンクとビームポートとの接続図を示す。

3、運転経過と燃料消費

炉内の中性子束およびγ線分布

立教炉には5種類の照射場所がある。照射場所の中性子束などの強度は第1表に示す。

第1表 照射場の中性子束とγ線強度

照射孔	熱中性子束 n/cm ² sec	速中性子束 n/cm ² sec	カドミ比	γ線量率 kGy/hr	備考
中央実験孔	3.7 x 10 ¹²	2.0 x 10 ¹²	~ 3	300kGy/hr	気送管
F孔 上	1.7 x 10 ¹²	6.0 x 10 ¹¹	3.2	140kGy/hr	
中	1.4 x 10 ¹²	4.8 x 10 ¹¹	3.4	—	
下	0.9 x 10 ¹²	0.8 x 10 ¹¹	—	—	
回転試料棚下	5.5 x 10 ¹¹	4.7 x 10 ¹⁰	3.5	120kGy/hr	
上	2.8 x 10 ¹¹	2.5 x 10 ¹⁰	"	"	
54φ照射孔	~ 10 ¹¹	—	>10	—	
サーマルコラム(110cm)	3.5 x 10 ¹⁰	10 ⁸	30	220 Gy/hr	
(50cm)	4.0 x 10 ⁹		350		
(110cm)	6.6 x 10 ⁸		6000		

なお、ビームポート出口の熱中性子束は 10^6 n/cm²sec 程度である。

第3図に原子炉のサーマルコラムを通る断面内の熱中性子束分布を示す。

光中性子中性子源²⁾

原子炉臨界後低出力の実験において、半減期が10日以上「遅発中性子」の存在を確認した。この中性子の原因を調べたところ、¹⁴⁰La の γ 線による軽水中の重水素からの光中性子であることを突き止めた。以後この中性子源は原子炉の起動に利用されている。第4図に光中性子の減衰特性を示す。

計測制御系の改造^{3) 4) 5)}

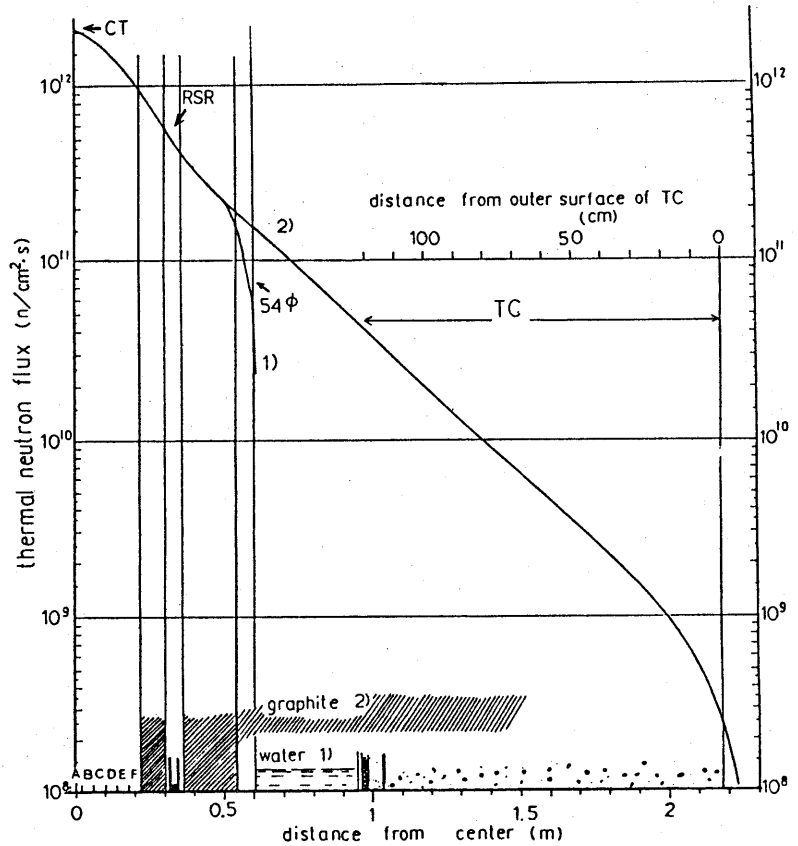
1982 (昭和57) 年11月に、真空管や古い型の回路部品や素子などが補充困難になったので、国産部品を使用して入手し易いようにすることと無接点リレーを採用して故障率を下げることなどを配慮しながら計測制御系の改造を行った。この時、同時に自動制御系の改良も行った。また、デジタル信号を出力する回路も組み込んだ。

中性子ラジオグラフィ装置⁶⁾

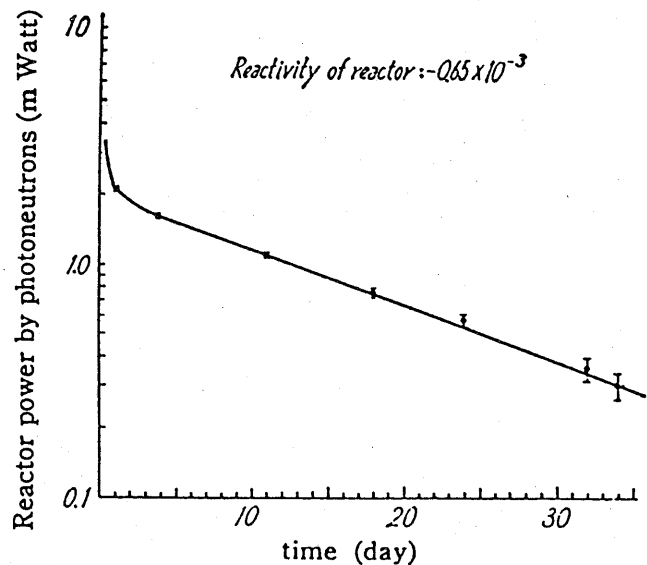
1985 (昭和60) 年に、先ず中性子ビームを炉の上部に導き中性子ラジオグラフィの実験を行い、予想以上に鮮明な画像が得られたので、水平実験孔に遮蔽体を設置して中性子ラジオグラフィの研究を開始した。

燃料消費と過剰反応度の変化⁷⁾

立教炉32年間の累積出力の経過を第5図に示す。この間のトリガ型燃料棒の追加歴は第2表のようである。第5図に累積出力の変化、また、第6図に累積出力と過剰反応度との関係を示す。



第3図 熱中性子束分布

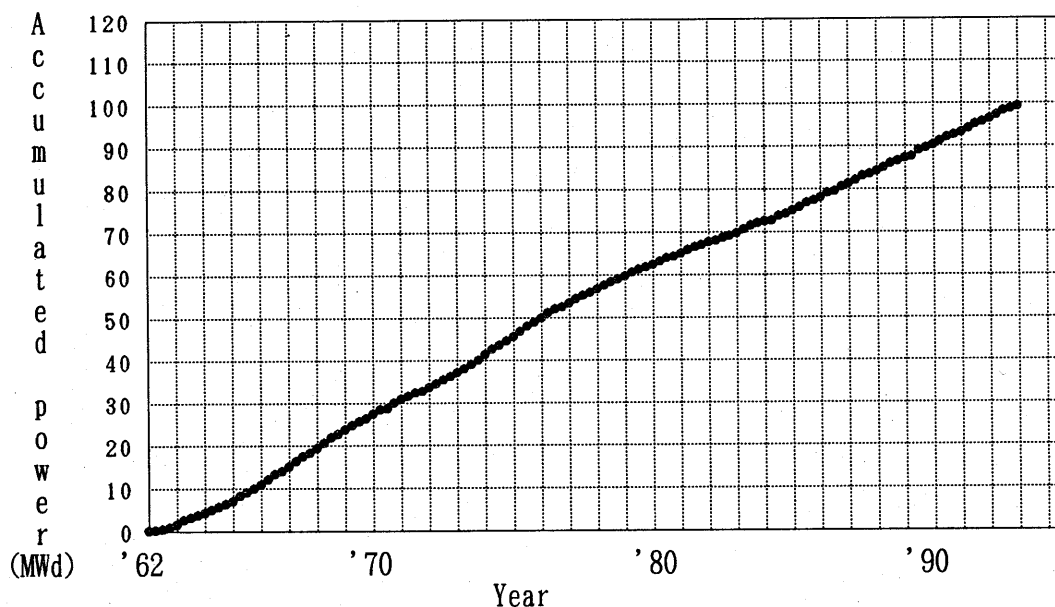


Reactor power by photoneutron at reactor reactivity -0.65×10^{-4} .

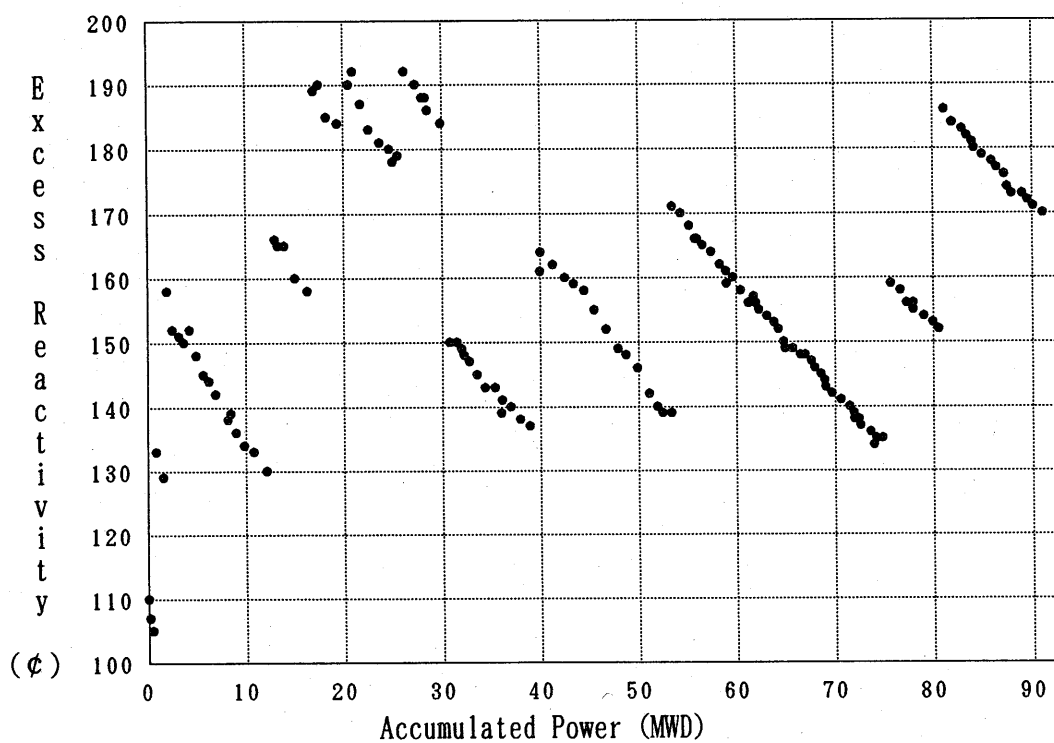
第4図 炉心の光中性子減衰特性

第2図 立教炉におけるトリガ型燃料棒の追加歴

Year	Month	Accumulated power kWh	MWD	Number of Fuel rod	²³⁵ U g
1961	Dec.	0	0.0	60	2,167.04
1962	Sept.	21,556	0.9	61	2,201.61
1963	Feb.	54,335	2.3	62	2,229.37
1966	Apr.	298,619	12.4	63	2,263.53
1967	Mar.	390,947	16.3	64	2,299.09
1975	July	1,157,403	48.2	65	2,334.85
1977	Mar.	1,304,679	54.4	66	2,370.71
1985	Jan.	1,805,859	75.2	67	2,407.77
1990	March	2,186,676	80.6	68	2,444.71



第5図 累積出力



第6図 30年間の運転における過剰反応度の変化

4、共同利用^{8), 9)}

1974(昭和49)年から立教炉共同利用が開始された。その数年前から日本学術会議原子力特別委員会から出された『私大炉の有効利用』の勧告や文部省の学術審議会の議を受けて、国立大学を窓口として始められたのである。立教大学はこの日本学術会議原子力特別委員会将来計画検討小委員会での討議に参加していた。以後の実績を第3表に示す。

第3表 立教大学原子炉利用共同研究件数の変化

	Neutron Activation Analysis						Hot Atom	Nucl. Phys.	Irr. Effe. (Dama- ge)	Fis- sion tra- ck	Neu- tron Rad- iogr	Oth- ers
	General	Geo- phys.	Bio- logy	Environ. science	Archae- ology	Appl. Indus.						
1974	4	5	12	5		4	8	1	4		1	1
75	5	6	12	4			7	2	4		1	1
76	2	7	13	6	4		6	2	2	5		1
77	2	7	11	9	3		6	1	1	5		1
78	2	8	15	6	3	1	7	1	4	5		
79	2	11	12	5	4	3	4	1	3	4		2
80	3	9	11	3	3	3	3	1	2	2		
81	4	8	7	8	4	2	3	1	1	4		1
82	3	7	12	4	3	1	2	1	1	3		2
83	1	12	12	4	2	1	1	1	1	5		
84	1	9	11	5	3	3	2	2	1	7		
85		8	15	4	2	4	3	1		4	1	
86		6	16	6	2	3	4	1		5	2	
87		8	16	4	3	2	4	1		4	1	
88		8	15	5	3	1	2	1		5	5	
89		8	14	7	4	1	2	1		7	6	
90		10	15	5	2	2	3	1		8	6	
91		13	13	4	2	2	2	3	3	6	5	

5、アジア地域研究炉シンポジウム^{10), 11), 12), 13), 14), 15)}

1986年11月には、われわれは立教炉臨界25周年を記念して、アジアの11か国の研究員が参加して『第1回アジア地域研究炉シンポジウム』を主催した。そこには、韓国、中国、フィリピン、ヴェトナム、タイ、マレーシア、インドネシア、ヴァングラディッシュ、インド、パキスタン、日本の11ヶ国の研究者が参加した。その時、ポラード博士らアメリカ聖公会原子炉関係者から下に示すメッセージを頂いた。そのメッセージから我々は、アメリカ聖公会信徒たちの思いとわれわれの努力が四半世紀の時間とアメリカと日本との空間を越えて宇宙で共鳴し合っている、と言う感銘を受けた。

「 CONGRATULATORY MESSAGE TO THE FIRST ASIAN SYMPOSIUM ON RESEARCH REACTORS

Congratulations and Greetings to my friends at Rikkyo University on the occasion of this first symposium on research reactors in Asia. What a most appropriate way to celebrate the twenty-fifth anniversary of criticality in your TRIGA Mark II research reactor ! And what a flowering of the original intention for the gift of the reactor to Rikkyo by the American Episcopal Church which was, as stated in the resolution authorizing the gift, " to achieve a sharing of the potential and realized blessing of atomic energy with those people of the Far East who have known of its blessing and much of its course. " 」

なお、第2回シンポジウムは立教大学原子力研究所も支援して昨年1989年5月ジャカルタ(インドネシア)で行われ、第3回は1991年11月に日本原研が主催して日立市で開かれた。第4回は1993年以降に日本以外の場所で開催することが予定されている。

参考文献 (定期刊行物^{16), 17), 18)} を含む)

- 1) ダニエル・ラング著(森永晴彦訳); 「鉛の服を着た男」
- 2) 原沢 進 ; "立教大学原子炉における光中性子について",
応用物理 第33巻 第9号 664-666, 1964
- 3) 原沢 進 ; "立教炉の計測制御装置更新について",
KURRITR-234, 「原子炉の安全性向上のための計算機利用」
短期研究会報告書 121-127, 1982
- 4) S. Harasawa and K. Kawaguchi; "Automatic Control System of Rikkyo Reactor",
Proc. 1st Asian Symposium on Research Reactors 247-252, 1987
- 5) S. Harasawa; "Digital Automatic Control System for TRIGA Reactor
TOC-21 (10th European TRIGA Users Conference), 2-27 - -45, 1988
- 6) H. Kobayashi; "Neutron Radiography Research in Rikkyo Reactor" Proceedings
of 1st Asian Symposium on Research Reactors", 360-370, 1986
- 7) S. Harasawa; "Change of Reactivity on Rikkyo Reactor"
TOC-22 (11th European TRIGA Users Conference), 2-9 - -16, 1990
- 8) S. Harasawa and S. An ; "The Role of Research Reactor in the Research
and Development on Nuclear Energy"
Proc. 2nd Asian Symposium on Research Reactors, 1989
- 9) 立教大学原子炉利用共同研究成果報告書 昭和49年度~平成3年度
- 10) 原沢 進 ; "第1回アジア地域研究炉シンポジウムを主催することになって"
Isotope News 11月号 (No. 389), 1986
- 11) 原沢 進 ; "「第1回アジア地域研究炉シンポジウム」の報告"
Isotope News 2月号 (No. 392), 27 - 28 1987
- 12) 原沢 進 ; "第1回「アジア地域研究炉」シンポジウム"
日本原子力学会誌 Vol. 29, No. 4, 299-300 1987
- 13) Proceedings of first Asian Symposium on Research Reactors, 1986
- 14) Proceedings of Second Asian Symposium on Research Reactors, I, II 1989
- 15) Proceedings of Third Asian Symposium on Research Reactors, 1991
- 16) 原子炉利用実績報告 立教大学原子力研究所 I ~ XXV
- 17) 立教大学原子力研究所学術報告書, IAERU レポート
- 18) 立教大学原子力研究所講演会論文集 第1回~第8回(IAERUレポートとして刊行)

「武蔵工業大学原子力研究所・研究炉」の あゆみ

武蔵工大炉 相沢 乙彦

1. 沿革

武蔵工業大学に研究用原子炉を設置しようという計画は、1958年1月、当時の五島慶太理事長によって立てられ、同年7月東急取締役会で決定された。その後、9月に五島育英会を含む東急14社で東急原子力グループ（委員長故五島昇東急社長）が結成されて、研究用原子炉トリガⅡ型の輸入が決定された。

武蔵工業大学内に、八木秀次学長を委員長として原子力グループが発足したのが、1959年2月で、同年6月25日付で、内閣総理大臣宛に原子炉設置許可申請書が提出され、同年10月7日付で許可が得られた。その後、同年12月に起工式が行われ、1960年4月に武蔵工業大学原子力研究所が開所され、当時の五島育英会総長八木秀次氏が所長に就任された。同年12月より、基礎工事が開始され、1961年3月に原子炉建屋の枠組み工事を開始、RⅠ実験室が完成したのが、1962年4月で同年6月に全施設が完成した。

また、原子炉は米国のゼネラル・アトミック社より購入され、据え付けが完了したのが、1963年1月で、1月30日に原子炉が初臨界に達した。

その後、約10年間（1963年から1973年）は、主に原子炉の特性測定から始められ、運転訓練、RⅠ製造等に利用されてきたが、1974年医療用原子炉への改造計画が立てられ、1975年3月には、医療用照射室が完成した。その後、1976年9月からは、東京工業大学原子炉工学研究所を窓口として、文部省予算にて全国国公立大学の共同利用施設として利用されるようになり、1977年3月には最初の原子炉治療が行われた。同年8月には、原子炉室内に開頭手術のための治療室が完成し、本格的に治療研究が開始され、1989年12月までに、悪性脳腫瘍の治療照射99回、メラノーマ（皮膚腫瘍）の治療照射を9回、合計108回の治療が行われた。医療照射以外では、1974年に放射化分析トータルシステムが完成したのをはじめに、1977年には水平実験孔の一つに中性子飛行時間分析装置が設置され、エネルギー依存の中性子全断面積の測定を開始した。また、1980年には、フィルタービーム実験装置、1981年には、繰り返し型高速気送管実験装置、1983年には、中性子ラジオグラフィ実験装置という具合に各種の実験装置が、主に共同利用研究設備として整備された。その間、1981年4月より、本学に大学院原子力工学専攻修士課程が設置され、大学院教育が開始された。

更に、1984年には、今後のより安全な原子炉の運転を確保するために、ステンレス被覆の新燃料80本が購入され、1985年7月に、これまで使用してきたアルミニウム被覆の燃料棒をすべて新燃料に交換した。ところが、1989年12月照射室内で漏水が発生し、その後原子炉を停止し、原因調査をおこない、現在復旧方法を検討している。

2. これまでの主な利用について

(1) 医療照射の紹介

この治療法は、「ホウ素中性子捕捉療法」と云われる通り、脳腫瘍治療の場合、まず照射前日にホウ素を含む薬を頸動脈に注射する。すると、ホウ素化合物が腫瘍部に選択的に集積する。そこで、約12時間後に腫瘍部のホウ素濃度が飽和値に達した頃に中性子を照射すると、 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)$ 反応による α 線が腫瘍細胞を崩壊するので、正常細胞にダメージを与えないで腫瘍細胞だけを選択的に崩壊出来るというのがその原理である。

この治療法は、1953年に米国で脳腫瘍に対して初めて試みられ、その後1968年に帝京大学の畠中教授によって日本に紹介され実施されている治療法で、通常のコバルト療法と比較して、はるかに治癒率が高いことが証明されている。しかしながら、この治療には医師団の負担も大きく、また原子炉側のスタッフの負担も大きい大変な治療である。医師団は、朝7時頃救急車で患者と共に到着し、8時頃までに治療室内を手術の出来る状態に整え、8時から主治医によって開頭手術が始められ、12時頃までかかって照射のための準備が整えられる。患者を照射室内に設置し、原子炉の起動が行われるのが午後1時頃となる。夕方5時乃至6時まで原子炉照射が行われ、夜7時から10時頃まで照射後の手術が行われる。その後、後片付けなどして救急車が研究所を出ていくのが、通常夜の11時頃となる。こういう治療をこれまで99回ほどやってきたわけで、長引いた場合、真夜中の2時とか3時に終了したことも何度かあった。すなわち一人の患者に十数名の原子炉側のスタッフが、朝早くから真夜中までかかる大変な治療であるが、畠中教授をはじめとする医師団の負担は更に大変であるのは容易に推察することが出来る。

(2) 全国国公立大学共同利用研究の紹介

1976年にスタートして以来、平均年間300人・日を超える多くの研究者が来所し、原子炉を用いて色々な研究を行ってきた。前述の医療照射もこの共同利用研究の一環として行われているが、それ以外に生物照射も数多く行われている。生物照射は、もちろん医療照射のための基礎データを得るのが目的であるが、これまでが体重80kg以上もあるブタの照射から、犬はもちろん、マウスまで数多くの照射が行われた後、神戸大学の三嶋豊教授によって皮膚腫瘍である悪性黒色腫（メラノーマ）の治療研究が1987年に初めて人に対して試みられ、素晴らしい治癒効果を証明した。また、一般照射では、色々な試料の照射研究、特に微量元素の分析に対して幅広く応用されている。言い換えると原子力関係のみならず、医学・生物学・物理学・化学をはじめ、考古学に至るまで多くの研究分野で利用されてきた。

(3) 依頼分析サービスの紹介

1974年に放射化分析トータルシステムを完成させたことは既に述べたが、これを用いて依頼分析サービスを行ってきた。半導体中の微量元素の分析をはじめ、各種試料の多元素分析試みられているが、その中の一つに頭髪中の微量元素の分析も依頼されたこともあり、犯罪捜査等にも協力してきた。

(4) 教育・人材養成のあゆみ

以上述べたように、研究用原子炉は、原子力関係の技術者養成のためにのみ存在しているのではないことは明らかであるが、本学においても1981年より大学院原子力工学専攻修士課程が設置され、人材養成の一端を担っている。これまで修士課程修了生52名のうち、約80%が原子力関係の仕事に携わっている。また、最近では近隣アジアからの留学生が増えて、現在は3人在学しており、来年は5名になる予定である。

3. 現状と将来

(1) 原子炉停止のいきさつ

1989年12月21日、原子炉の運転停止後に照射室内の点検を行った際、熱中性子取り出し孔下部の台上に小さな水たまりを発見した。その後、運転を停止して水の回収を続けながら、原子炉タンク水位との相関等を調査の上、科学技術庁に報告し、漏水箇所の特定と原因究明に着手した。その調査の結果、原子炉照射室からの水漏れは、原子炉タンク表面において生じたピンホールによるものと特定された。

一方、原因調査がある程度進んだ段階で、新たに少量の水たまりを発見した。その原因についても詳細な調査を行ったところ、これは原子炉タンクに隣接した燃料貯蔵プールの壁面のコーティング劣化部分より漏洩したものであることが判明した。更に、この水が原子炉タンクのピンホールの発生原因の一つであると判断された。

(2) 現状

燃料貯蔵プールは、今後注水プールとしては使用せず、新たに炉室内に燃料貯蔵施設を設置する計画で、現在その設置に向けて科学技術庁とヒアリングを進めている。原子炉タンクについては、今後の利用方法を考慮しながら、偏芯炉心 (Eccentric Core) などの概念設計を進めている段階である。

(3) 将来の展望

さて、本学の原子炉が修復されれば、これまで通り、①医療用原子炉としての利用、②全国国公立大学の共同利用研究用原子炉としての利用、③放射化分析による依頼分析への利用、④運転訓練等の教育用原子炉としての利用は勿論のこと、今後更に、⑤近隣の高校生や一般住民を対象として公開講座ならびに実習、⑥近隣の病院と協力して、短寿命RIによる医療診断技術の開発研究、⑦産業界との協力研究の推進など、積極的利用を考えている。

しかしながら、原子炉を安全に運転管理していくためには、少なからぬ経費がかかり、将来はいずれ閉鎖することになるので、今回の水漏れを機会に閉鎖に取り掛かるべきだという考えもある。最終的には、「適者生存の法則 (The law of the survival of the fittest)」に従って、復旧されると信じているが、「適者生存の法則」とは、「らしくある」という法則である。従って、「一私学の原子炉」は「一私学の原子炉らしくある」時のみ、生存が可能となる。

東京大学原子力工学研究施設 高速中性子源炉「弥生」

高速中性子源炉「弥生」は、茨城県東海村にある東京大学工学部附属原子力工学研究施設の最初の大型装置として、昭和42年より建設され、昭和46年4月に初臨界になった。すでに初臨界より20年以上を経たが、そのユニークな特徴を生かして、活発に利用されている。原子力工学研究施設は、

- (1) 本郷地区では不可能な大型実験設備を用いる研究
- (2) 大学院生のための高度な教育研究
- (3) 日本原子力研究所等との研究協力、を行うことを目的として設置され、現在では「弥生」の他に35 MeV電子線形加速器(ライナック)、核融合炉ブランケット設計基礎実験装置、重照射研究設備(原子力研究総合センター所属)の大型実験設備が稼動している。「弥生」とライナックは全国大学共同利用にブランケットは東大工学部内の共同利用に重照射研究設備は東大内の共同利用に供されている。

「弥生」の特徴

「弥生」はわが国最初の高速炉であり、核分裂で作られる高速中性子を減速せずを利用して、種々の特徴ある研究を行うことができる。このような炉を高速中性子源炉と呼ぶが、東京大学の研究用原子炉としてこれが選ばれた理由は、

- (1) 日本で建設されていない新型炉、
- (2) 日本の原子力研究開発の方向に沿った原子炉であること、すなわち国家プロジェクトの高速増殖炉開発に貢献できる炉、
- (3) 大学でも運転管理できる適切な規模の原子炉であることであつた。

高速中性子源炉は、世界には四基しか存在しない。米国(INEL)のASFRは、高速臨界集合体ZPPRの付属炉として検出器の校正に、フランス(CEA)のHARMONIEは高速炉の遮蔽実験や計測器の開発に、イタリア(ENEA)のTAPIROは遮蔽実験と生物(マウス)の照射と、いずれも比較的狭い目的に使われていた。これに対し「弥生」は後述するように、はるかに多種類の研究に用いることができ、汎用高速中性子源炉と呼ばれている。外国の高速中性子源炉が単目的に近いため現在はあまり稼動していないと思われるのに対し、「弥生」は多くの実験孔やコラムを有するため、現在も多種類の研究に活発に用いられており、建設に当たられた安、古橋、若林先生らの先見の明に敬意を表したい。なお大学で高速炉を所有しているのは世界中で東京大学のみである。

「弥生」の炉心燃料は、直径約12cmの円柱状の金属ウランであり、その外側を約10cm厚の劣化金属ウランブランケットがとり囲んでおり、さらにこの燃料集合体が、約55cm角の鉛製の反射体の中に収納されている。その前後に鉛と重コンクリート製の遮蔽体があり、さらに制御棒駆動機構も付属して全体として0.5m×0.6m×7.3mの炉心集合体と呼ばれるものを構成している。この炉心集合体は移動用通路枠の上に乗って最大15mも水平移動でき、この間の六か所の運転位置に止めて原子炉運転を行うことができる。図-1に原子炉建屋の立断面図

を示すが、運転位置は重コンクリート遮蔽体内に二か所 (A・B運転位置) 中速中性子柱内に三か所 (C^- , C, C^+ 運転位置)、遮蔽体のない位置に一か所 (D運転位置) あり、実験目的に応じて使い分けることができる。中速中性子柱は130トンの鉛の八角柱で鉛による中性子の散乱を利用して研究炉としては珍しい中速の中性子束が効率よく得られるように設計されている。なお、中速中性子柱内とD位置で運転が行われる場合は原子炉建屋の2m厚のコンクリート壁が遮蔽の役割を果たしている。また、中速中性子柱内にターゲットを置いて、隣接する建屋から35 MeV電子ライナックのビームを導いて中性子を発生させ、それを原子炉建屋壁を貫通する中性子飛行管 (T. O. F. P.) に導いて測定を行うこともできる。

「弥生」には炉心燃料を貫通しているグローリー孔を始めとして、小型の炉としては異例の約50本に及ぶ各種の実験孔を有し、照射実験やビーム実験を行うことができる。これらの構造上の特徴以外に「弥生」で発生する高速中性子は、ガンマ線の混入が熱中性子炉に比べて極めて少なく、この高速中性子を利用して、他の熱中性子炉では行えないユニークな研究が行える。

「弥生」を利用した研究

「弥生」は東京大学の原子力関係の教官と大学院生の研究に用いられるのみならず、全国大学共同利用装置として利用されている。なお共同利用は装置とその運営上の特徴から原子力工学研究施設教官との共同研究として行われている。以下に主な研究を紹介する。

1. 高速中性子遮蔽の研究

HARMONIEはフランスの高速増殖炉開発において、遮蔽設計を行うための中心的な装置であったが、「弥生」でも高速中性子遮蔽に関する多くの研究が行われた。研究テーマの数は現在までに十種類にのぼっている。まず、日本の高速増殖炉開発のために、「常陽」中性子源モックアップ実験や高速原型炉下部構造遮蔽模擬実験が行われた。前者は、「常陽」の黒鉛ベDESTALを透過して、中性子が起動用検出器に十分な計数をもたらすかどうかの評価のためであり、後者は、「もんじゅ」炉心支持板の中性子損傷を防ぐために燃料集合体下部に設ける遮蔽ブロック設計の参考とするための実験であった。さらに、鉄とナトリウムを供試体に用いた高速中性子透過に関するベンチマーク実験や、キャビティ、ダクト、スリットによる高速中性子ストリーミング (漏洩) に関する実験、劣化ウランや天然ウランの高速中性子透過実験が、高速炉遮蔽のための基礎研究として行われている。また「弥生」を線源として、炉室直上に高速中性子を放出し、中性子スカイシャイン (大気散乱) に関する実験も行われ、貴重な実験データとなっている。さらに原子力船「むつ」の遮蔽改修に関係して、蛇紋岩コンクリートの中性子透過実験やアルベド法の適用性確認のための実験が行われている。これらの研究においては、いずれも単に実験結果を得るだけでなく、中性子輸送計算法などの解析手法の開発と精度評価がお合わせて行われており、その成果は遮蔽研究のみならず、中性子がエネルギーを減じながら一方向に流れるという共通の物理現象である核融合炉ブランケットの中性子挙動などの研究にも役立っている。

2. 標準中性子場の開発と利用

「弥生」には炉心燃料を貫通するグローリー孔をはじめ中速中性子柱など、高速中性子や中速中性子の典型的なスペクトル場が存在する。その特性を測定により明らかにして、検出器の校正や照射などの際の標準となる中性子場とする研究が行われた。測定には各種の検出器が使われたが、それらのなかでも、放射化箔の反応率よりスペクトルを求める手法の開発は有名である。最近も「もんじゅ」のフルエンスモニターの校正照射が、動燃の依頼により行われた。

3. 高速パルス炉としての運転

「弥生」は本格的なパルス中性子炉として設計されてはいないが、その可能性の検討のため、出力をパルス状に急上昇させる運転が行われた。即発臨界を超える反応度を炉心に印加し、出力を瞬間的に1000 MW (定常出力2 KWの50万倍) に到達させることに成功した。パルス出力の半値幅は高速炉であるため100マイクロ秒と極めて短い。高速パルス炉に関する種々の経験が得られるとともに、「弥生」の制御性能と安全性についても、実証的理解が深められた。なお、このパルス運転を利用して、動燃の再処理工場の臨界警報装置用検出器の作動確認実験も行われた。

4. 高速中性子核分裂崩壊熱の研究

崩壊熱は原子炉停止後の主な発熱源であり、安全上重要である。高速中性子の核分裂生成物崩壊熱は熱中性子のそれに比べて測定例も少なく、精度も悪かった。これについて「弥生」で一連の精度のよい測定を行った。その結果は改良した理論計算により、日本の核データセンターが作成した崩壊生成物データファイルの検証に用いられ、その精度向上のために役立った。

5. 医療用照射の基礎研究と生物照射

ホウ素化合物を脳腫瘍などの腫瘍細胞に選択的にとり込ませ、これに中性子を照射すると、中性子捕獲反応の結果出るアルファ粒子の飛程が細胞の大きさと同程度であるため、腫瘍細胞を選択的に破壊することができる。これをホウ素中性子捕捉療法と呼び、正常細胞まで破壊してしまう他の放射線療法に比べて原理的に優れているといわれている。人体に対するカーマ係数は30 eV付近で最小となるので、熱中性子よりも熱外中性子を照射すると、中性子による線量を低く抑えかつ透過距離も大きく治療可能範囲が拡大する。「弥生」を用いて多量の熱外中性子を作る研究が行われた。残念ながら「弥生」の出力が2 KWと小さいため実用になる照射場は得られなかったが、設計研究の結果5 MWの原子炉なら熱外中性子治療が可能となることがわかった。この研究の結果「弥生」に作られた照射場は、犬やマウスを用いた基礎研究や各種エネルギーの中性子の照射効果を調べるための血液の照射などに用いられている。

6. 核融合炉ブランケット材料よりのトリチウム回収に関する研究

酸化リチウムなどのトリチウム増殖材料より、どのようにトリチウムが回収されるかは、核融合炉の燃料サイクルの確立のため重要であり、「弥生」を用いて先駆的研究が行われている。「弥生」の炉心への接近性のよさを生かして、中性子照射によって生まれるトリチウムの放出挙動と回収のメカニズムが詳しく調べられてい

る。

7. 高温水の高速中性子照射効果

原子炉冷却水の放射線分解による生成物の高温での発生しきい値を知ることは、原子炉水化学といわれて現在問題になっている配管への放射能蓄積の低減化や応力腐食割れの防止のために重要である。ガンマ線の混入の少ない純粋な高速中性子照射効果を明らかにできる弥生の実験データは貴重であり研究が続けられている。

8. 各種材料の高速中性子照射効果

各種の有機材料、半導体、金属、イオン結晶などの中性子照射効果に関する研究が行われている。たとえば、高分子材料では、ガンマ線に比して分子の架橋や切断の生じるしきいエネルギーなどが異なる。放射線科学反応の基礎研究のみならず、耐放射線性物質や化学線量計の開発といった応用分野についても研究が行われている。

9. 高速中性子ラジオグラフィ

高速中性子ラジオグラフィは他の放射線非破壊検査と比較して、厚い物質の検査が可能で、また重元素と軽元素より構成される複合材料に対しても有効な検査方法である。しかし熱中性子ラジオグラフィに比して開発研究が大変遅れており、「弥生」を用いて高分解画像を得るための研究が進められている。

10. 新放射線計測法の開発

放射線位置検出器を用いた多次元計測法や光ファイバー、レーザー等を用いた新しい放射線計測法の開発が弥生を用いて行われている。

「弥生」は臨界実験装置ではないので、いわゆる炉心物理の研究はできないが、高速中性子を利用した多種多様の研究が行える。平成4年度のテーマ(略称)を挙げると、機能性材料照射、半導体の照射効果、非金属材料照射、ハイブリッド燃料、照射損傷基礎過程、核融合材料中性子照射、高速中性子ラジオグラフィ、ニュートロニクス、高速中性子ラジオグラフィ応用、フィッシュントラック年代測定、弥生特性測定、高温水照射、照射下トリチウム回収実験、中性子の生物照射効果となっている。

「弥生」の共同利用研究にはこれらのオンパイル研究と呼ばれるもの以外に、「弥生」を直接利用しないオフパイル研究と、弥生研究会と呼ばれる種々の研究トピックスに関する1~2日間の研究会がある。前者の例としては、数値計算法の開発や新型炉の設計研究などがある。

「弥生」の研究のもう一つの特徴は、原子力工学研究施設の有する他の大型実験装置である電子線形加速器(世界で一番短い電子パルスを発生できる)や重照射研究設備、さらに核融合炉ブランケット設計基礎実験棟にある中性子発生装置、トリチウム実験装置などとの有機的連携のもとに、広く研究が進められていることである。また、計算機による数値解析法の開発も実験と併せて進められている。

なお東海村では共同利用者のための宿泊施設の運営も行っており、東大のみならず日本原子力研究所等を訪問する全国の大学の教官、大学院生、学生にもよく利用されているのは、財政面などで問題をかかえているにもかかわらず喜ばしいことであると考えている。

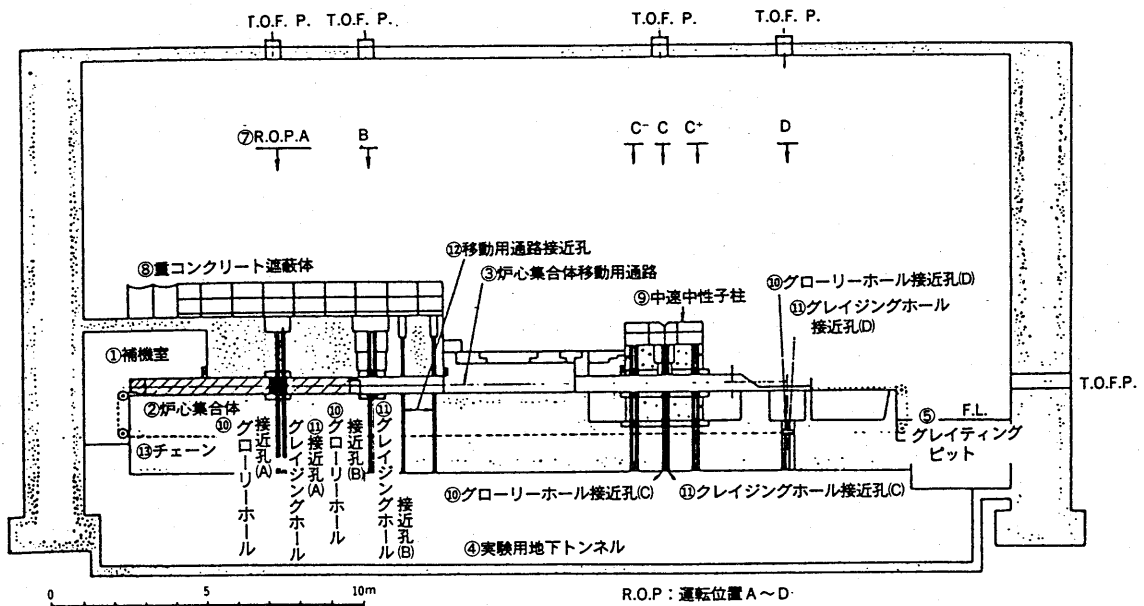
大学院生と学生の教育

後継者の育成は原子力利用の進展にとって極めて重要である。この21年間に原子力工学研究施設で研究を行った東大の大学院生と学部学生(卒論生)の数は、原子力工学研究施設に所属したもので、約150名にのぼる。東大の原子力工学科の講座所属の学生や大学院生も含めると、250~300名が卒業論文、修士論文、博士論文のための研究を行ったことになる。また、東大原子力工学科の原子炉実習も昭和47年以来行っており、延べ約750人が実習している。最近は外国人留学生も一緒に受講している。東大以外では、「弥生」の共同利用実験に各大学の大学院生が参加している。さらに、東北大学と北大の学生が見学に東海村を訪れる機会を利用して一日だけではあるが、原子炉の運転を経験してもらうことも行っている。

まとめ

「弥生」は純粋な高速中性子を利用でき、しかも観測装置を照射場に近接して設置できるという、世界に例を見ない特徴を有している。「弥生」は出力は小さいが、よく制御された照射設備と近年発展しつつある高性能の観測設備を設置することで、高速中性子を利用する研究の新しい展開を図りたいと考えており、皆様のより一層の支援をお願いする次第である。(岡芳明記)

図-1 「弥生」原子炉室断面図



<トピックス>

「大学連合とフランス・CEAの協力研究」

京都大学原子炉実験所
神田啓治、代谷誠治

今年から、京都大学臨界集合体 (KUCA) 実験に参加する大学連合とフランスの原子力庁 (CEA) との間で、次世代炉、特に高転換軽水炉 (HCLWR) の炉物理に関する協力研究が開始される運びとなった。

下準備は数年前に遡るが、具体的な動きは3年前の1990年4月に関西原子力懇談会 (関原懇) の「次世代炉研究に係わる調査」委員会 (次世代炉調査委) の海外調査団 (西原宏教授 (中部大・総合工研 [当時]、団長)、竹田敏一助教授 (阪大・工)、代谷誠治助教授 (京大炉)、土橋敬一郎室長 (原研・原子炉システム研)、大久保忠明課長 (関電・原子力企画部 [当時]、同行者) がフランスを訪問したときに始まる。この調査団の目的は、HCLWRの研究を精力的に進めていたフランスのCEA、FRAMATOME、EdFを訪問して、研究の現状を調査するとともに、マルセーユで開催されたPHYSOR 90炉物理国際会議に出席して、世界のHCLWR研究の状況を把握することにあつた。PHYSOR 90国際会議の直前にCEAとパリの本部で会合を持ち、研究の現状を調査すると同時に、日本におけるHCLWR研究の一例として、大学連合で進めていたKUCA実験及び解析についての情報を提供した。そして、PHYSOR 90国際会議の途中で持ったM. Salvatores部長 [当時] やJ. Mondot氏等の主だった研究者との会合の席上、CEA側より口頭で協力研究の申し出があつた。

その後、1990年6月28日付でL. Costa氏とM. Salvatores氏から次世代炉調査委宛てに手紙が届き、① 共鳴自己遮蔽の取扱いや六角格子の輸送計算法等の開発、② 重要な設計パラメータの不確定性評価、③ 実験技術等の項目について協力研究を行いたい旨の正式の申し入れがあつた。以後、関原懇の次世代炉調査委では、これへの対応について検討し、協力研究を実現する方向で種々の活動を行ってきた。そして、10月に竹田敏一助教授、1991年3月に神田啓治助教授 (京大炉) がそれぞれ所用でフランスを訪れた際、パリのCEA本部でM. Salvatores氏等と交渉を行った。これらの交渉の過程でCEAは協力研究を行う相手の組織がpermanentなものであることを条件としていることが明らかとなった。関原懇の次世代炉調査委は、permanentな組織ではなく、研究の実効を挙げる上で大学連合が何等かの形で直接CEAと協力研究を行うことが望ましいと考えられたので、この方向で検討が進められた。

一方、1991年5月に京都大学原子炉実験所の「次世代型原子炉の核特性に関する専門研究会」 (次世代炉専研) が開催され、KUCA実験に参加する大学関係研究者が一堂に会して、CEAとの協力研究についての相談を行った。その結果、協力研究を実現することに対する基本的な合意が得られ、CEAと協定を結ぶpermanentな組織としては京都大学原子炉実験所臨界実験装置共同利用委員会 (CA共同利用委) が望ましいとの結論に達した。その後、CA共同利用委で協力研究についての検討が継続して行われてきた。

この間、CEAのJ. Bouchard局長から神田啓治助教授に宛てて7月の初めにファック

スが届き、フランス国内の事情で協力研究協定を結ぶことは困難であると通告してきた。それにもかかわらず、関原懇の次世代炉調査委は、10月にフランス及びドイツに海外調査団(神田啓治助教授(団長)、三島嘉一郎助教授(京大炉)、宇根崎博信助手(京大炉))を派遣し、CEA本部において会合を持ち、協力研究に関してCEAと大学連合の情報交換から始めようという内容の西原英晃所長(京大炉)からJ. Bouchard局長に宛てた手紙を手渡し、研究者レベルの"low key"な協定を締結したいと伝えて基本的な合意を得た。これにはフランス大使館協力が大きい。また、1992年2月には海外調査団(竹田敏一助教授(団長)、代谷誠治助教授、宇根崎博信助手)をフランスに再度派遣して、Cadarache原子力研究センターにおいて会合を持ち、協力研究のテーマについて協議し、次の4つのテーマを選定した。それぞれのテーマには、以下に示すようにpriorityがつけられている。

Priority 1 : HCLWR のボイド反応度係数計算法、

Priority 2 : 共鳴の重なりがある場合の自己遮蔽効果の計算法、

Priority 3 : NEACRP ベンチマーク問題の UO_2 と MOX の subassembly がある場合の pin-power 分布の計算、

Priority 4 : LWR の減速材温度係数の実験と計算。

なお、このように研究協力協定が実現する目処が立ったのを契機として、次世代炉調査委の西原宏委員長が辞意を表明され、1992年度より次世代炉調査委の委員長は西原英晃所長に引き継がれることとなった。

1992年には、CA共同利用委においてCEAとの協力研究協定締結の際の日本側の窓口として、大学共同利用機関である京都大学原子炉実験所が大学連合を代表する機関として協力研究の協定書を締結することがふさわしいという結論に達した。そこで、神田啓治助教授が2度渡仏し、フランス大使館の協力を得て、協定書の条文について最終的な詰め作業が行われた。この間、次世代炉専研を開き、大学関係者の了解を得た。国内関係省庁及び京大本部の了解が得られたので、1993年早々にも京都大学原子炉実験所とCEAの双方が研究協力の協定書にサインを行い、名実ともに協力研究がスタートする予定である。そして、1993年1月には初の日仏セミナーを開催し、前出の共同研究テーマについて双方の結果を持ち寄って議論を行うこととなった。また、この機会に次世代炉専研を開催し、次世代におけるプルトニウムの利用について日仏の情報を交換することになった。さらに、次年度は第2回目の日仏セミナーがフランスで開催される予定となっている。

本研究協力は、フランスの準政府機関であるCEAと日本の大学連合という、ある意味で不釣り合いな組織が協定書を取り交わして研究を進めるというものであり、ある種の制約がつきまとうことになる。大学連合に属する機関の間では、本研究協力に関する情報を自由に交換することに何等問題はないが、知的所有権、情報公開等で相手側の同意を得なければならない。何れにしても、初めての経験なので、今後解決すべきことも多々生じると思うが、次世代炉の開発に熱心なフランスとの協力研究が行えるようになった意義は極めて大きいものと確信している。これによって次世代炉開発研究に関する貴重な情報を大学連合が入手できることとなるので、今後の大学における次世代炉研究が飛躍的に発展するものと期待される。

〈国際会議報告 1.〉

核データ評価方法論に関する国際シンポジウム

Symposium on Nuclear Data Evaluation Methodology

1991年10月12~16日 (ブルックヘブン国立研究所)

日本原子力研究所 菊池 康之

深堀 智生

この国際シンポジウムはブルックヘブン国立研究所 (BNL) の国立核データセンター (NNDC) 及び United States Cross Section Evaluation Working Group (CSEWG) の主催により OECD Nuclear Energy Agency (OECD/NEA) 及び国際原子力機関 (IAEA) の後援で開催された核データ評価法に関する会議で、1980年の第1回に引き続いて2回目となる。19カ国、3国際機関 (IAEA, OECD/NEA, EURATOM) から99名の専門家の参加があった。主な参加国及び参加者の内訳は、米国41名、日本10名、フランス8名、ロシア及びドイツ各6名、オーストリア4名であった。国別の参加者数を第1表に発表件数とあわせて示す。発表論文数は11のセッションに渡り73件で、全てが口頭発表であった。パラレル・セッションは設けておらず、一つの会場で順次発表が行われた。

発表に先立って、主催者代表のDunford (BNL) の開会の辞及びSchmidt (前IAEA, Nuclear Data Section長) による過去50年間以上の核データ評価の歴史に関するキーノートアドレスが行われた。続いて、各セッションの発表が行われたが、以下これらの概略を記す。

1. Influence of Integral Data

積分データを評価に反映させる方法として招待講演4件、公募講演4件が行われた。招待講演では、Fort (Cadarache) はJEF-2の検証のためのベンチマークテストとそれに基づく群定数の調整結果が、核データのフィードバック情報として有益であるとした。McKnight (ANL) はENDF/B-VIのベンチマークの概略を説明したが、予算不足でB/VIはほとんど検証なしに公開されているとのことである。前川 (原研) はFNSやOKTAVIANの積分データでJENDL-3の核融合中性子工学への適用性テストを行ったことを報告した。Tellier (Saclay) は多数の熱中性子炉のデータ解析をJEF-2へフィードバックさせたことを報告した。公募講演では、菊池 (原研) が遮蔽ベンチマーク解析から遮蔽材の全断面積情報を核データにフィードバックさせ、それを受けての核データを修正する方法を発表した。

全体の印象としては、ベンチマークテストのみでなく炉定数の修正結果を核データ側にフィードバックさせ、核データ側もそれを真剣に受けとめる姿勢になってきている（特にJEFにおいて）ように思われた。核データとユーザーとの密接な関係が築かれて望ましい傾向であると思われた。

2. Evaluation Intercomparison

このセッションでは、評価の国際比較のための作図ツール作成について Hetrick (ORNL) が報告し、JENDL-3、ENDF/B-VI及びJEF-2の二重微分断面積評価値の相互比較を深堀（原研）が行った。これらの発表により、多くのデータの国際比較がよりよい評価済核データファイルの質的向上に重要であるとの共通の認識が得られたように思われる。

3. Analysis of Experimental Data

本セッションでは招待講演5件、公募講演2件の発表が行われた。先ず、Peelle (ORNL) により核データ間の相違点の解決法について報告があり、Smith (ANL) により微分断面積データの測定・解析・評価に於ける中性子エネルギースケールの定量化に対する提案がなされた。その後、Poenitz (ANL) がENDF/B-VIの標準断面積データベースについて報告し、続いて ^{238}U の捕獲及び非弾性散乱断面積、 ^{239}Pu の核分裂断面積、熱中性子領域のアクチノイドデータ及び核分裂中性子増倍率データの評価についてそれぞれ神田（九大）、Fort (Cadarache)、Tellier (Saclay) 及びZucker (BNL) が報告した。

4. Data Fitting Methods

招待講演5件、公募講演4件がこのセッションで報告された。Froehner (KF K, Karlsruhe) の現代のフィッティングや評価の原理についての報告に続いて、千葉（原研）及びWagschal (Hebrew大) により最小自乗法に於けるPeelleのパズルに対する解答が提案された。核データ評価だけでなく広く一般に使用されている最小自乗法の使用法に関して投げかけられた大きな問題点に対する解答がこれで得られた。アクチノイドデータに関して Weaver (Birmingham大) や Mannhart (PTB, Braunschweig) からそれぞれ遅発中性子データ及び中性子スペクトルのフィッティング方法のついて提案があり、崩壊及び核構造データに関して Winkler (IRK, Vienna)、Tagesen (IRK, Vienna) 及びChukreev (Kurchatov) が報告を行った。その他Audi (CSNSM, Orsay) が最新の質量表の作成についてその導出法及びデータに関する報告を行った。

5. Resonance Region

このセッションの招待講演4件は、Larson (ORNL)、Hale (LANL) 及びHwang (ANL) によるR行列理論を応用した3件の発表とAdler-Adlerの公式を用いた Lukyanov (Sofia大) の報告であった。その他、Zhao (CND C, Beijing) のBayesの定理を応用した平均準位間隔の推定、Ribon (Saclay) の共鳴

領域の ENDF-6 フォーマット及び取扱いに対する改良の必要性、Janeva (I N R, Sofia) の非分離共鳴領域に於ける断面積のモデリングに関する3件の公募講演が行われた。

6. Nuclear Models and Their Input Parameters

このセッションはシンポジウム中最大のセッションで、招待講演7件、公募講演5件が報告された。Delaroche (Bruyeres-le-Chatel) 及びYoung (L A N L) により coupled-channel による計算法についての報告があった。Gardner 夫妻 (L L N L) は Uhl の S T A P R E を光核反応断面積が計算できるように改良したコード S T A P L U S を用いた計算法について報告を行った。このコードは角運動量保存を考慮し、連続及び離散準位を含めた計算ができる。Kopecky (E C N, Petten) は中性子捕獲 γ 線の実験値に合わせることができ γ 線エネルギーと共に変化する共鳴巾を使用した新しい強度関数を提案した。Oblozinsky (S A S, Bratislava) は中高エネルギー中性子入射反応で発生する前平衡状態からの γ 線を多重放出まで含めて計算する方法を提案した。統計的多段階反応モデルの核データ評価への応用に関する報告として Chadwick (L A N L) 及び Koning (E C N, Petten) の発表があった。この2件の報告は次節の Kalka (Dresden 工科大) とあわせて中高エネルギー領域の核データ評価の新しい展開を与えるものであると思われる。その他、Liu (Wuhan 大) の現象論的中性子光学ポテンシャル、Fu (O R N L) の粒子放出に関する平衡及び前平衡モデル、Madland (L A N L) の核分裂中性子放出モデル、Ignatyuk (I P P E, Obninsk) の単位密度モデルの実際、Zhang (C N D C, Beijing) の多段階反応の半古典的理論、Maslov (R P C P I, Minsk) の断面積計算のための核分裂モデルの報告があった。

7. Medium Energy Data

このセッションでは招待講演が8件行われた。Pearlstein (B N L) が10 GeV までの核データ評価法を紹介したのに引き続いて、多段階反応理論を用いた論文の発表が、Young (L A N L)、Shubin (I P P E, Obninsk)、Kalka (Dresden 工科大) 等によって行われた。また、モンテカルロ法を用いた核内カスケードモデル計算について、Prael (L A N L)、Filges (K F A, Julich)、石橋 (九大) 等が報告した。その他、Townsend (N A S A, Langley) から銀河宇宙線の遮蔽計算用の重イオン断面積のモデリング法についての発表があった。これらの発表は、現在の中高エネルギー領域の核データ評価の流れの主流を占める方法論であると思われる。

8. Charged Particle and Photonuclear Data

このセッションでは招待講演が5件行われた。この内荷電粒子に関する発表は、Zvenigorodskii (I E P, Arzamas) の熱核反応に於ける核物理定数決定法、Resler 及び Zhuang による L L N L や C N D C に於ける荷電粒子データ評価法の3

件であり、光核反応に関するものはVarlamov (Moscow大) の計算ツールの開発、岸田 (CRC 総研) による Σ 委員会に於ける光核反応データ評価法の紹介の2件であった。

9. Computer Aided Evaluation

計算機を用いた核データ評価のための基礎データベース及び評価システムの開発が深堀 (原研)、Reffo (ENEA, Bologna)、Resler (LLNL) から報告された。このセッションの報告は今後の核データ評価の省力化に大きく寄与すると思われる。

10. Decay Data Evaluation

このセッションでは ENDF/B-VI 及び JEF-2 に於ける崩壊データの評価法に関する2件の招待講演が行われた。

11. Covariance Data Generation

本セッションでは招待講演8件、公募講演2件が報告された。最初に Vonach (IRK, Vienna) が、前週に ORNL で行われた共分散専門家会議の内容を含む一般的なレビューを行った。次いで Bastian (CBNM, Geel) が、多数の実験データの共分散を、Cholesky分解を用いて少数個のパラメータの相関の形で報告することを提案した。次に Peelle (ORNL) が、標準データの評価に関わる共分散データの導出方法の問題点、解決方法について講演を行った。長年の実績に裏打ちされた迫力のある講演であった。Tagesen (IRK, Vienna) は、IRK と ORNL で行われている共分散評価手法の比較を行った。これは神田 (九大) による、理論計算のパラメータから導出する方法と対比されるべきものである。最後に、Sartori (NEA/DB) が、評価済み共分散データの次元を縮約および拡張する手法についての議論を行った。

最後に Schmidt による簡単なまとめ及び Dunford (BNL) の閉会の辞をもって5日間の会議を終了した。

従来の核データ評価手法の延長である「データのあてはめに関する手法」及び「核物理理論モデルとそのパラメータ」に関するセッションや、評価済核データの有用性及び信頼性に関する「積分データの利用」及び「共分散データの作成」については発表件数も多く、大きな関心が寄せられている印象を受けた。また、新しい分野への展開として、今後整備が要求されている「中間エネルギー領域の核データ評価」及び「計算機を用いた核データ評価」に関しても今後の課題という意味で多くの研究者の興味を引いていたようである。

本シンポジウムに、ここ数年の会議では見られなかった欧米の若い研究者が数名参加していた。欧米の核データ評価研究に対する姿勢がほんの僅かではあるが変化してきているようである。彼らの研究分野は主に核物理の理論的な進展を核

データ評価に応用するというもので、この変化の原因は様々な分野で応用が期待される中高エネルギー核データの需要のためであると推察される。我国でも中高エネルギー核データの整備に関する研究が始まっており、これに関連して諸外国からも日本の大きな寄与が期待されているとの印象を受けた。

第1表 国別の参加者数及び発表件数

参加国	参加者数	発表件数
米 国	41	25
日 本	10	9
フランス	8	10
ロシア	6	5
ドイツ	6	5
オーストリア	4	4
中 国	2	3
オランダ	2	2
英 国	2	1
ブルガリア	2	1
イスラエル	2	1
ベラルーシ	1	1
イタリア	1	1
スロバキア	1	1
スイス	1	1
ベルギー	1	1
スウェーデン	1	0
韓 国	1	0
台 湾	1	0
ブラジル	1	0
国際機関	5	2
計	99	73

〈国際会議報告 2.〉

第3回常温核融合国際会議(ICCFC3、NAGOYA)印象記

中沢 正治(東大・工)

I. はじめに

1992年10月21日～25日に名古屋国際会議センターで、標記コンファレンスが開催された。日本原子力学会秋の大会に引き続いて開催されたので、御存知の方も多いかと思います。この現象の経緯については、既にいろいろ紹介記事がありますので割愛いたしますが、私自身は「重水のPd電極電気分解により中性子の発生が観測された」という報告には、自分の専門に近いこともあり、当初より強い関心を持っておりました。逆に、そのメカニズムとか熱発生の有無等については立ち入った関心は少なく、この報告もかなり偏ったものになるかと思いますが、本紙幹事役の馬場護先生の強いご依頼で書いてみることにいたしました。なお、私自身は会議開催以前の段階では、「中性子発生」について「何人かの信頼する実験屋さんが中性子を観測しているけれど、自分でやってみると観測されないし、再現性に乏しいようなので現段階では判断保留、このサンプルは必ず発生するというものがあれば再トライしよう」と日和見状態、判断保留状況にありました。また、この国際会議の第1回(UHTA)、第2回(ISPRA)には出席していないし、今回の4日間の会合にも初日と3日目と半分しか出席しておりませんので、パネル討論会の様子など不明の部分もあり、レビューとしてはかなり不十分なものであることをあらかじめお断りいたします。なお、会合出席者は約350名で、国内と国外の比率は約2:1でした。

II. Excess heatについて

初日は、実行委員長の池上英雄教授(核融合科学研究所)の挨拶で会合は開始され、重水-Pd電極の電気分解における過剰発熱(Excess heat)現象についての口頭発表から始った。米国のScientific Research Inst.のMike McKUBRE、ロスアラモスのTom CLATOR、IMRA-Japanの国松氏、東京農工大の小山教授らの話によると、Pd電極中にD/Pd=0.8~0.86の比率で重水が吸蔵されると入力エネルギーに対し、出力エネルギーのExcess heatは1~4%(McKUBRE)、20%(CLATOR)、35%(国松)、2.4%(小山)とのことであった。小山先生によると「電解セル全体を密閉し、温度を一定に保つようにしたClosed cell実験でないと信用できないし、それでも再現性がない。だから、SRI、IMRA-Japanと自分のところの3つは信用してもらってよい」とのことでした。なお、このとき入出力エネルギーの差は、密閉セル内の温度を一定に保つためのヒーターへの電流変化で測定し、他のパラメータは変えないとのことなので、発熱効果は僅かながらあるのかもしれないとの印象を受けました。

しかしながら、発熱の割合自身はかなりばらついており、(D/Pd比によって発熱量が変化しているという人もいますが)、台湾のCH.IENは8~100倍の発熱があり、トリチウムも測定したと言っておりますし、インドBARCのグループでは軽水でも発熱があった、トリチウム、中性子も測定したという話がありましたので混乱させられました。小山先生言うところの「信用できるClosed cell型電解実験」では、「放射線は測定していない」か「検出しなかった」との報告があり、この日の口頭発表を聞いている限りにおいては発熱現象と中性子発生の相関性を示す「信用できるデータ」はなかったという印象

を受けました。

Ⅲ. 核反応生成物の測定

2日目はパネル討論で、主として阪大の高橋先生の方式による発熱および中性子発生現象を中心に議論され、追試実験の成功例や不成功例が議論されたと間接的に伺いましたが、詳細はよく分かりません。

3日目は核反応生成物の測定で、最初ブリガムヤング大(BYU)のSteve Johnsが、核反応に伴う放射線としては荷電粒子がPd中で吸収された時に放出される特性X線(21KeV)を測定するのが良いとしてそれを作ったとか、地下の低バックグラウンド場で実験進行中と言った後で、例のカミオカンデの実験ではセメントを混入したセルで中性子発生があったという表現で報告しました。

次にNTTの山口氏が特製の試料について質量分析法でHe生成を再現性よく測定し、発熱とも相関がありトリチウムも出たと自信のある口調で報告しました。荷電粒子も4.5~6MeVのアルファ線と3MeVの陽子が少ないけれど観測されたとのことでした。山口氏の説明によると $D + D \rightarrow He + \text{photon/phonon}$ のプロセスで発熱とHeが出たと言うことでした。質問の時に「ガラスを使っているとそこからHeが出る」との指摘がありましたが、「使っていない」との回答でした。

その他、阪大の飯田、高橋先生がAl薄膜カバー付きのTi-Dターゲットに240KeV dビームを入射させると普通のp、 3He 、Tイオン発生以外に8MeVものアルファ線が放出されている。これはdのTiターゲット中への蓄積に伴うCold Fusionによるものと報告した。これは原子力学会でも報告されたので御存知の人も多いと思います。また笠木先生(東北大)は、やはりコッククロフト加速器で加速した150KeVビームをTi-Dターゲットにあてると、ターゲット中にHe-3ガスが予想以上に生成しているという現象を報告しました。この時、 $d + d \rightarrow n + T \dots \textcircled{1}$ 、 $d + d \rightarrow p + He-3 \dots \textcircled{2}$ の反応が普通1:1で起こるが、なんらかの理由で $\textcircled{2}$ の反応が増え、このことはCold Fusionと関係があるのではないかとするものである。この阪大と東北大の実験は、普通のコッククロフト型中性子発生装置での実験なのでぜひ国内でも追試されることが期待されよう。

このセッションの最後は、CERNのD.R.O.MORRISON博士によるCold Fusion実験のReviewであった。ddの複合核はその生成過程によらずn+tと $p + He-3$ に1:1に崩壊し、 $He + \text{phonon/photon}$ の分岐率は 10^{-6} であり、これはミュオン触媒核融合の実験でdがほとんど零エネルギーで反応してもそうであると確認されていることを強調した後、1989~1992年の727編の関連論文をレビューし、まず論文数が昨年より激減している(72編/1989、128編/1990、48編/1991、8編/1992)、全体では肯定86編、不明136編、否定34編であるが、1992年で見ると肯定1編、不明6編、否定1編である。なお、ここで不明というのはCold Fusionの証拠を見出し得ず起こったとしてもこれだけと上限値を与えている論文である。その他、多くの実験結果の不明点、矛盾点を科学者らしい厳格な論調で話した。

当日の午後のポスターセッションでは、相変わらず中国、ソ連、日本の一部などから中性

子を観測したという例が報告されたが、一方ではイタリアのフラスカッティのGran-Sasso地下実験では中性子は測定されなかったとの話であり、以前にあればどこかで出ていた中性子検出の報告例がやはり減少しているとの印象であった。

IV) 筆者の個人的印象

- (1) 重水のPd電極による電気分解の際に、何か発熱現象というものがあるのかも知れない。
- (2) 普通のdd核融合反応($n+T$ または $p+He-3$ 発生)のみにより、この発熱現象を定量的に説明している報告はなく、むしろ説明できないとする報告が多い。(実際には、観測される発熱量を普通のdd反応で説明しようとすると、今より10の12乗倍も中性子が発生しなければならない。)
- (3) 少なくとも今回中性子発生が完全に実証されたという例はなく、全体として中性子を観測したという実験データ例は減少している。特に今まで中性子を観測したという研究機関においては、その発生量が減っているか出なくなったという方向に向っている。イタリアGran-Sassoの地下実験、日本のカミオカンデの地下実験など高精度低バックグラウンド場での測定結果はいずれも中性子発生がなかったとしている点が印象的である。
- (4) 今回、特に議論されなかったが、Cold Fusion実験の開始者の1人であるS. Jonesの中性子発生実験が、カミオカンデでの約2000時間もの測定で再現されなかったことは、少なくともS. Jonesの最初の報告(この国際会議の原点になっている論文)の再現確率が極めて低いことを意味する。
- (5) 発熱現象を核融合反応で説明するためには、中性子の発生しない次の反応、 $d+d \rightarrow p+He-3$ や $d+d \rightarrow He+Phonon/Photon+24MeV$ が、 $d+d \rightarrow n+T$ 反応に比べ、PdやTi固体中では、より多く起こっている必要がある。NTTの山口氏、東北大の笠木先生、阪大の飯田、高橋先生の実験データがその方向を示唆しているように見える。この点については追試の必要性があると考えられるが、もしこのようなことがあるとすれば原子核外の物性的構造が原子核内現象に影響を与え得ると言う点で大変な現象の発見であることになる。(このような例は、メスバウワー効果、NEETなどのようにないわけではないが、大変希有な現象である。)
- (6) 以上、全体として「発熱現象はあるかもしれないが、中性子発生は極めて少ない」という傾向になっているので、筆者の専門領域(中性子計測)から離れつつあるという印象であった。
- (7) なお、今回の会合では中央大の深井先生やCERNのMORRISON博士の講演がCold Fusionに否定的な話になると、「そんなことは分っている」というような野次が出たり、講演中に退出するなどエキセントリックな対応があり、大変残念なことであった。
- (8) 次回は、1994年にハワイで開催される予定と報告された。

(1992年12月30日記)

日本原子力学会・1992年秋の大会 〈「核データ・炉物理」特別会合講演要旨 1.〉

原研における消滅処理研究の進展

(日本原子力研究所) 吉田 弘幸
西田 雄彦

1. はじめに

1988年にわが国の通称オメガ計画が発足して4年が経過した。この間、TRU等の長寿命核種の消滅処理に関する研究への関心は、世界的に高まり続けて衰えることがない。原研においては、TRU分離も含めた高レベル廃棄物(HLW)の溶液化学的4群群分離法の研究とTRU等の長寿命核種を効率的且つ効果的に消滅処理を図るTRU専焼高速炉と大強度陽子加速器による消滅処理システムの研究を進めてきた。研究開発の進展速度は速いとは言えないが、研究基盤は着実に整備されつつある。ここでは、原子炉を利用した消滅処理と加速器を利用した消滅処理について、原研での研究を中心にその概要を紹介する。

2. 群分離・消滅処理研究の考え方

燃焼度が33000MWD/T、冷却期間3年を経た軽水炉燃料からのHLWに含まれる核種を半減期で整理すると、核分裂生成物の85%以上がUより長い半減期を持つ準安定核種と安定核種であり、半減期が1万年以上の長寿命核種と呼ばれるものは、 ^{99}Tc 、 ^{129}I 、 ^{135}Cs 等全体の6%強である。したがって、これらの長寿命核種と半減期が20年~200万年に亘って分布するTRU、加えて半減期が30年程度の ^{90}Sr と ^{137}Cs をHLWから分離し、適切に消滅処理可能であれば、残りの放射エネルギーは半減期が10年以下の核種となり、放射能は短期間で減衰する。一足跳びに実現することが無理であっても、このようなことを可能にする群分離・消滅処理技術の研究開発に挑戦したいものである。

3. 原子炉を利用した消滅処理研究

3.1 原研におけるTRU専焼炉の研究

専焼炉の紹介に入る前に、原研の群分離技術の研究について簡単に触れる。原研は、独自のTRU抽出剤を開発し、実験室規模ではあるが、既に長寿命核種のTRUとTc、発熱性核種のSrとCsを極めて高い回収率で分離できることを実証してきた。原研の消滅処理の研究では、この高度の群分離研究の成果を最大限の活かすことから、意欲的な技術の研究開発を目指すこととなった。

TRU専焼炉については、しきい核分裂反応を最大限に利用し、炉を臨界にするとともにその反応によってTRUの消滅を図るユニークな考え方に基づくTRU専焼高速炉の研究を行なっている。これまでに、Na冷却型とHe冷却型について検討を進め、TRU消滅効率が高く、且つ熱的裕度が大きく、正のボイド係数等の安全性問題の緩和、高温工学試験炉(HTR)の開発成果の活用等の観点から、後者のHe冷却窒化物粒子燃料専焼高速炉をレファレンスとして、更に検討を深めることとした。この炉の現概念では、窒化物被覆粒子燃料の最高温度を融点の1/3以下とするコールドフューエル・コンセプト

に基づく熱的裕度の大きな燃料設計となっており、また、中性子減速能の小さいHeを冷却材として使用しているために炉心平均中性子エネルギーが750 KeV、中性子束が $8 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ といずれも高い。そのため、1000 MWt熱出力規模で、1年間に300 kgのTRUを核分裂によって消滅できる能力を有しているが、前述の設計裕度を考慮すると、更に性能向上が期待できる。

また、軽水炉の高度化の一環として、軽水炉を利用して効果的なTRUの消滅処理を図る可能性について検討を進め、1000 MWe電気出力規模で、1年間に140 kgのTRUを消滅し(Np等が中性子捕獲反応によってPuに変換した量も含まれている)、且つ適正な負のボイド係数を持つTRU専焼軽水炉の概念を構築した。この炉は、Pu富化度が9 wt%のMOXを燃料とし、水対燃料体積比が現行軽水炉と比べておよそ1.5倍である。

3.2 高速炉を利用したTRU消滅処理の研究

TRUの消滅処理に利用する原子炉として、軽水炉と比べて、TRU装荷による炉特性への影響が小さいこと、高次TRUを創らないこと等の理由から、高速炉を対象とすることが多い。その高速炉としては、多くの開発実績を有するMOX燃料を用いたLMFBRと金属燃料を用いたLMRがある。前者については、動燃事業団及びフランスを中心とするCEC諸国、後者については、電中研及び米国のANL、がそれぞれ検討を進めている。2つの高速炉での燃料に対するTRU装荷比は、ほぼ同程度(～5%)であり、1000 MW電気出力規模で、1年間に消滅できるTRUはTRU専焼軽水炉と同程度である。

3.3 TRUの核データの現状と精度検証のための積分実験

わが国のTRU消滅処理に関連した原子炉核特性の研究には、共通してわが国の核データライブラリー(JENDL-2または-3)が用いられる。TRU専焼高速炉の場合では、燃料中のNp, Am, Cmの比率が60%以上、Puが30%程度であり、TRUの大きな生成源であるUを一切使用しない。このため、この炉の核特性検討には、信頼性の高い核データを使用する必要がある。最近、TRUの核データの要求精度をまとめるに当たって、原研核データセンターの中川氏が専焼高速炉の中性子スペクトル場を対象としてJENDL-3の精度評価を行なった結果によると、 ^{237}Np 、 ^{241}Am 、 ^{243}Am 、 ^{244}Cm の核分裂及び中性子捕獲断面積については、更に精度向上を必要とするものの精度の現状はかなりよいものである。

核データの精度検証のためには、原子炉による照射実験、パルス炉及び臨界実験装置による炉物理実験、等が代表的な積分実験である。過去にも、TRUに関する多くの積分実験が行なわれ、現在も、ドイツのKNK-2とPHENIXを用いた本格的なTRUの照射実験が行なわれ、近く動燃事業団では、常陽によるTRU照射実験を計画していると聞いている。原研では、FCAを用いて、系統的に中性子スペクトルが異なる中性子場を構築し、TRUの反応率比と反応度値を測定し、既存の核分裂断面積と中性子捕獲断面積の評価と修正を行なった。最近では、米国ORNLとの共同研究の一環として、PFRで照射したTRU試料約30種を原研に搬入して、核データ検証を目的とした試料分析を開始している。また、ロシアからの要請を受けて、高速炉(BOR-60、BN-350、-

600), 高速臨界実験装置(BSF-1, -2)等の施設を利用した炉物理実験を含む協力研究を積極的に進めるべく話し合いを行っている。

4. 陽子加速器を利用した消滅処理研究

近年, 加速器技術の急速な進歩により, その大電流化の見通しが立つに至ったため, 原研では, 大強度陽子加速器を用いたTRU消滅処理の研究を進めている。

4. 1. 核破砕反応過程の研究

加速器消滅処理の研究では, 核破砕反応に関するデータの精度が重要な因子となるが, この反応のおこる数GeV~百数十MeVのエネルギー領域での核データが十分に存在しない。このため, 核反応計算モデルの改良など核破砕過程解析コードの高度化, 高エネルギー陽子による核破砕実験および核データの整備など基盤研究の推進が必要である。

4. 1. 1 高エネルギー粒子核反応・輸送コードの開発

加速器消滅処理システムの設計研究を行うには, 数GeV~数十MeVの高エネルギー領域での核反応過程を扱うコードと数十MeV以下の中性子輸送過程を扱うコードの接続が必要である。原研では, 加速器消滅処理解析用として, 核破砕反応・核子中間子輸送過程シミュレーションコードNMTC/JAERIと中性子輸送コードMORSE-DDおよびTWOTRAN2を結合させたコードシステムを作成して使用している。NMTCやHETCなど核破砕過程解析コードは, まだ改善すべき点も多い段階にあり, 幾つかの外国研究所で改良版が出された。原研でも, 前平衡過程の組み込みや高エネルギー核分裂の評価など計算モデルの改良を行った。

4. 1. 2 核破砕実験

原研では, 高エネルギー物理学研究所(KEK)の500MeV陽子シンクロトロンを用いた消滅処理基礎実験を実施している。核破砕積分実験としては, アクチナイドに類似した鉛体系に陽子ビームを入射させて, 体系内に分布させた鉄, ニッケル, 金などの放射化検出体の γ 線を測定した。鉄サンプルの γ 線スペクトル解析で, 核破砕反応生成物である ^{43}K などが確認された。また, しきい値反応の反応率空間分布測定から鉛体系中の高速中性子分布を求めた。この場合, 陽子ビームの入射軸近くで測定値と計算値の間に, ストリーミングの影響と考えられる不一致が認められた。

4. 2. 加速器消滅処理システムの設計研究

原研では, 大強度リニアックの陽子ビームをTRU燃料(合金型, 熔融塩型)で構成される未臨界高速炉心に投入するハイブリッド型消滅処理システムの概念検討を進めている。ここで, 消滅処理システム検討の前提条件として次の項目を採用した。

- (1)年間約260 kgのTRUを消滅処理できる能力を持つ。
- (2)消滅処理専用システムとするが, 加速器所用電力以上の発電能力を有する。
- (3)加速器の陽子ビームは, 1.5 GeV, 数十mAとする。

なお, この加速器消滅処理システムは, 陽子ビーム制御の未臨界体系でよいことから, 原子炉による消滅処理に比べて, 安全性や設計上で有利な点が多い。

4. 2. 1 TRU合金燃料型消滅処理システム

消滅処理システムは、ステンレススチールの反射体で包まれた未臨界炉心部分および中心に位置するターゲット部分から構成されており、いずれもナトリウム冷却である。炉心部分は、3. 1で述べた専焼炉と類似した炉心を採用している。合金燃料は、(1) 硬い中性子スペクトルが得られるので、TRUを効率的に消滅処理できる、(2) 高温冶金法により再処理がコンパクトにできるなどの理由から用いられた。Npは、Am、Cmと相互に溶け合い難いため、2種類の燃料(Np-15Pu-30Zr, AmCm-35Pu-10Y)を採用している。1.5 GeVの陽子ビームは、上方のビーム窓を通して、タングステン製ターゲットに入射し核破砕中性子を発生して炉心を駆動する。タングステンは、ターゲット周辺に出力ピーキングを抑えるために使われているが、さらに、炉心中央で核反応が最大になるように密度調整された。このシステムは、実効増倍係数0.89、ビーム電流約39 mAの時、250 kg/年のTRUが処理でき、また、熱出力は820 MWtで加速器所要電力の倍以上の電力が得られる。ビーム窓の損傷は、ビーム径を広げることにより緩和され、1年以上の連続使用が可能である。ODS燃料被覆材の照射特性評価から、燃料体は1800日位使用可能との見通しが得られた。

4. 2. 2 TRU溶融塩燃料型消滅処理システム

炉心反応槽は、中央に溶融塩を満した空間の周りに内部反射体が設けられ、その外側にはコンパクト型熱交換器が配置される一体型になっており、TRU装荷量を少なくすることができる。陽子ビームは、炉心上部のビーム窓を通して鉛直方向に入射する。TRU溶融塩は、燃料と陽子ビームが入射するターゲット部分を兼ねているため、シンプルな構造になっている。3価のTRUの溶解度がフッ化物溶融塩より大きいと推定される塩化物溶融塩を採用し、現時点では $64\text{NaCl}-31\text{MgCl}_2-5\text{PuCl}_3$ を最適組成の塩とした。また、NaClはフッ化物塩のLiFや BeF_2 よりも、中性子スペクトルを硬くするので好都合である。予備的な核的検討によれば、実効増倍係数が0.92の場合、1.5 GeVの陽子ビーム電流25 mAで年に約250 kgのTRUを消滅処理できるとともに、800 MWtの熱出力を発生し加速器所要電力を充分自給できる。流動体の溶融塩燃料を用いるため、TRU添加や核分裂生成物除去のオンライン処理を含めた消滅処理システムを検討している。

4. 3 大強度陽子加速器の開発

実用規模の加速器消滅処理プラントには、 ~ 1 GeV、数10 mA \sim 数100mAの大強度線形陽子加速器が必要となる。原研では、加速器消滅処理システム開発に必要な種々の工学的試験を行うために、1.5 GeV、 ~ 10 mAの工学試験用加速器(ETA)の開発・建設を提案している。ETAはイオン源、高周波4重極リニアック(RFQ)、ドリフトチューブリニアック(DTL)、高 β 加速空洞、大電力RF源等によって構成される。この出力規模は、現存する陽子加速器に比べて10倍倍以上であるため、かなりの技術開発が必要である。特に、低エネルギー陽子ビームの質を向上することが重要で、第1段階として技術開発用加速器(BTA: ~ 10 MeV, 10 mA)を開発し低エネルギー加速部要素技術を確認する。これまでに、高輝度、大電流イオン源の試作及び試験を実施するとともに、各種の加速器設計コードの整備を行った。また、RFQ及びDTLについて、電磁場計算、ビーム軌道計算および熱・構造計算を行うとともに、試作機を設計・製作した。

4. 4. 海外における研究開発の状況

近年、核廃棄物の地層処分サイト決定の難航、我が国のオメガ計画の策定、加速器技術の急速な進展などによって、加速器消滅処理の研究は諸外国においても活発化しつつある。

ロスアラモス研究所が提案している加速器消滅処理システムは、原研が提案している高速炉心型と異なり、核破碎熱中性子源型を基本としたもので、ATW概念と呼ばれる。陽子ビームと熔融鉛などターゲットとの反応から発生する核破碎中性子を重水で減速し高い熱中性子束 ($\sim 10^{16}$ n/cm²·sec) を発生させ、重水ブランケット内を還流するTRU等を消滅処理させる方式である。このシステムは、TRUの水溶液あるいはスラリーを用いるのでTRUの濃度は希薄であり、装荷量を少なくできる利点がある。実効増倍係数は0.2程度のため、消滅処理量を稼ぐにはかなりの規模の加速器(0.8~1.2 GeV, 140 mA)が必要とされる。エネルギーバランスも期待出来ず、250 MWe程度の加速器用電力を供給しなければならない。高中性子束によるターゲット容器材料の照射損傷も問題となる。短期的には、軍用廃棄物(主に長寿命FP)を消滅処理する専焼システムを目標としており、年にTRU 20 kgとFP 70 kgが消滅処理される。将来は、発電、核燃料生産および消滅処理を並行して行う加速器総合プラントを目指してしている。

最近、ブルックヘブン研究所は、1.6 GeV, 104 mAの陽子ビームをTRUと¹²⁹Iで構成される未臨界格子(k \sim 0.9)に照射し、それぞれ約1トン、約300 kgを消滅すると共に、約1.5トンのPuの生産、約1300 MWeの発電を行う加速器システムを提案している。

5. おわりに

原子力利用については、種々の議論があるが、現実的には今後とも基幹的なエネルギー源としてますます重要な役割を担っていくことになるだろう。21世紀を視野にいれた原子力発電では、安全性および経済性の両面から群分離・消滅処理を含んだ核燃料サイクルの構築が必要となる。消滅処理研究は、核廃棄物処理に新たな選択肢を提供する技術開発である。現在、原研では、専焼炉を含めた原子炉による消滅処理および加速器消滅処理システムの概念検討や基盤研究が着実に進められ、目標の70~80%を達成できる見通しが得られているが、さらに消滅率の向上や工学的成立性の検討が必要である。また、TRU研究や大強度線形加速器の開発など解決すべき問題も多く、かなりの人材、予算、歳月と開発努力を必要とする。国内外の研究機関の協力を得て消滅処理技術を先端技術として開発していくことが、現在のような原子力利用の転換期に新たな展望を開くとともに、世界の原子力技術の発展に貢献すると考えられる。

〈「核データ・炉物理」特別会合講演要旨 2.〉

我が国における崩壊熱基準

京大工学部原子核工学科 木村 逸郎

1. 緒言

このたび、原子力学会「原子炉崩壊熱基準」の推奨値（学会推奨値）にその誤差の3倍を加えたものが、原子力安全委員会の「軽水型動力炉の非常用炉心冷却系の性能評価指針」いわゆるECCS性能評価指針の崩壊熱熱源データに加えられた。この推奨値は、学会の原子炉崩壊熱基準研究専門委員会（主査名大加藤敏郎教授）が取りまとめたものであり⁽¹⁾、信頼性の高いデータとして世界的にも注目されている。

原子炉施設の安全設計と安全評価の上で、崩壊熱データは極めて重要なものの一つである。すなわち、通常停止時と異常停止時の1次系熱除去と余熱除去ならびに非常用炉心冷却（ECCS作動）時の炉心冷却、格納容器冷却と余熱除去などの主熱源として重要である。さらに使用済燃料の貯蔵、輸送から再処理を通じて崩壊熱は重要であり、高レベル放射性廃棄物管理の上でも崩壊熱データは欠かせない。

私は崩壊熱の専門家でないが、上記指針の改訂作業の一端を担ったので、今春の学会年会「炉物理核データ」合同会合でその報告を仰せつかり、さらにまたここに報告執筆を依頼されたので簡単に紹介する。

2. 崩壊熱データの現状

原子炉停止後、非常に短い時間内はなお核分裂が継続するが、やがて次の三つが主となってくる⁽¹⁾。

- (1) 核分裂生成物（FP）の崩壊によって放出されるエネルギー。これには一部FPの中性子捕獲生成物の崩壊も含む。
- (2) 核燃料核種の中性子反応で生成されたアクチノイド核種の崩壊によって放出されるエネルギー。
- (3) 原子炉構造材などの中性子反応で生成された放射性核種の崩壊によって放出されるエネルギー。

原子炉停止直後から約10年までは、とくに(1)が重要である。ただし、停止後数十日間では、(2)のうちU-239とNp-239を考慮する必要がある。また、冷却期間が数十年以上で、崩壊熱の主成分は(2)となる。通常の原子炉では、(3)は数%以下しかないが、核融合炉では(3)が主である。

崩壊熱の実験データについて概観すると表1のようになる⁽²⁾。測定法として、カロリメータによる直接測定とβ線やγ線などの放射線測定の二つがあるが、一般にカロリメータの結果の方が放射線測定法より数%大きい、その原因は未だよく分からないらしい。この中で、東大炉YAYOIで測定されたAkizama（秋山）らのデ

ータは、世界で最も信頼されているものの一つであり、我が国の誇りともいえる。

表1 代表的な崩壊熱測定⁽²⁾

研究者	対象核種	方法
L o t t	U-235, Pu-239	カロリメータ
F r i e s e n h a h n	U-235, Pu-239	放射線測定
Y a r n e l l	U-233, -235, Pu-239	カロリメータ
D i c k e n s	U-235, Pu-239, -241	放射線測定
B a u m u n g	U-235	カロリメータ
A k i y a m a	Th-232, U-233, -235 U-238, Pu-239	放射線測定
J o h a n s o n	U-235, -238, Pu-239	放射線測定

*いずれも共同研究だが連名は省略

一方、崩壊熱の計算について見よう。このためには、FPの核分裂収率、中性子断面積および崩壊データが必要である。核分裂収率データは、シグマ特別・研究委員会によって収集と評価が進められ、立派なJNDCデータ完成している⁽³⁾。一方、FP核種の崩壊熱データについても、同委員会の関係者が長年取り組んで、苦労された結果、早稲田大学の山田勝美教授らが発表されているβ崩壊の大局的理論の導入により、信頼できるデータを得るに至ったといわれている⁽²⁾。すなわち、これによって、多数の未測定核種の崩壊データを推定し、すべてのFPの積分値としての崩壊熱計算が可能になり、実験値との一致が著しく改善された。

3. 崩壊熱の基準値

これまでに出示されてきた主な崩壊熱の表示として、まず第一に、W a y - W i g n e rの式(1948)がある。これは時間の0.2乗や1.2乗の項を含む手計算向きのもので、原子力熟年組はおなじみであろう。次に、同じく古典的なものとしてP e r k i n s - K i n gの式(1958)がある。しかし実際に原子炉の安全審査でよく用いられてきたのは、ANS 5.1(1973)とその改訂版(1979)である。前者はその源にS h u r eの式(1961と1972)があり、その名でもよく知られ、安全審査に用いられていることもある。米国General Electric社も独自に崩壊熱を評価している。これは測定データを回帰分析してフィッティング式とし、データが存在しないところは上記S h u r eの式を使っている。また、三菱原子力工業(MAPI)(株)でも、ANS 5.1をもとに崩壊熱の表式を示している。燃料サイクル関係では、ORIGENコードが崩壊熱評価に頻繁に使われてい

るが、原子炉の安全評価にこれを用いた例もある。結果的には、ORIGENを用いても、JNDCのものとよく一致する⁽¹⁾。

ここで原子力学会「原子炉崩壊熱基準」すなわち学会推奨値をあらためて紹介しておく。これは計算値であり、以下のような内容を含んでいる

- (1) U-235, Pu-239, U-238, Pu-240, Pu-241, U-233とTh-232に対し、表形式で示す。
- (2) β 線成分と γ 線成分を別々に示す。
- (3) 照射は、瞬間、1年および無限時間。
- (4) 冷却時間は、0~ 10^{13} 秒。
- (5) U-235, Pu-239およびU-238については誤差評価をしている。
- (6) FP核種の中性子捕獲効果を評価。
- (7) アクチノイド核種として、U-239としてNp-239の崩壊熱を示す。
- (8) 瞬時照射の結果を33項の指数関数近似。

4. 崩壊熱の基準

ECCS性能評価指針の崩壊熱熱源データとして、従来次の三つが採用されていた。

- (1) ANS 5.1の与える値に1.2を乗じたもの。
- (2) ANSI/ANS 5.1 (1979)に基づいてMAP I社の作成した崩壊熱曲線。
- (3) GE社の与える値に、その標準偏差の3倍を加えたもの。

さて、今回これに、下記の項目が加えられた。「崩壊熱の推奨値とその使用法」に与える推奨値(学会推奨値)に同データブックに与える誤差の3倍を加えたもの。

このように、学会推奨値に 3σ を加えることについて、多くの議論を費やし、見方によってはやや保守的すぎる値を取ることになった。しかし、原子炉の安全評価のための指針というものの性格上こうするのが当然ともいえる。実際に、学会推奨値とそれに 3σ を加えたものを実験値と比較してみよう。まずU-235を瞬時照射した結果を図1に示す。学会推奨値は、東大およびORNLの実験値とよく合い、 3σ を加えると全時間領域で十分に余裕がある。それに対し、Pu-239の瞬時照射の結果は図2のようになり、学会推奨値は数百秒まで東大とORNLの実験値とよく合うが、それ以後数十秒までは実験値は推奨値を越え、むしろそれに 3σ を加えた値に近い。従って、この領域では 3σ を加えることが必要である。実際には瞬時照射というようなことはなく、より長い時間で積分された崩壊熱を取扱うので安全上余裕がある。とはいうものの、Pu-239のこのエネルギー領域には問題が残っていると見える。この不一致の原因は γ 線成分によるらしく、同様の傾向はU-235でさえ見受けられる。

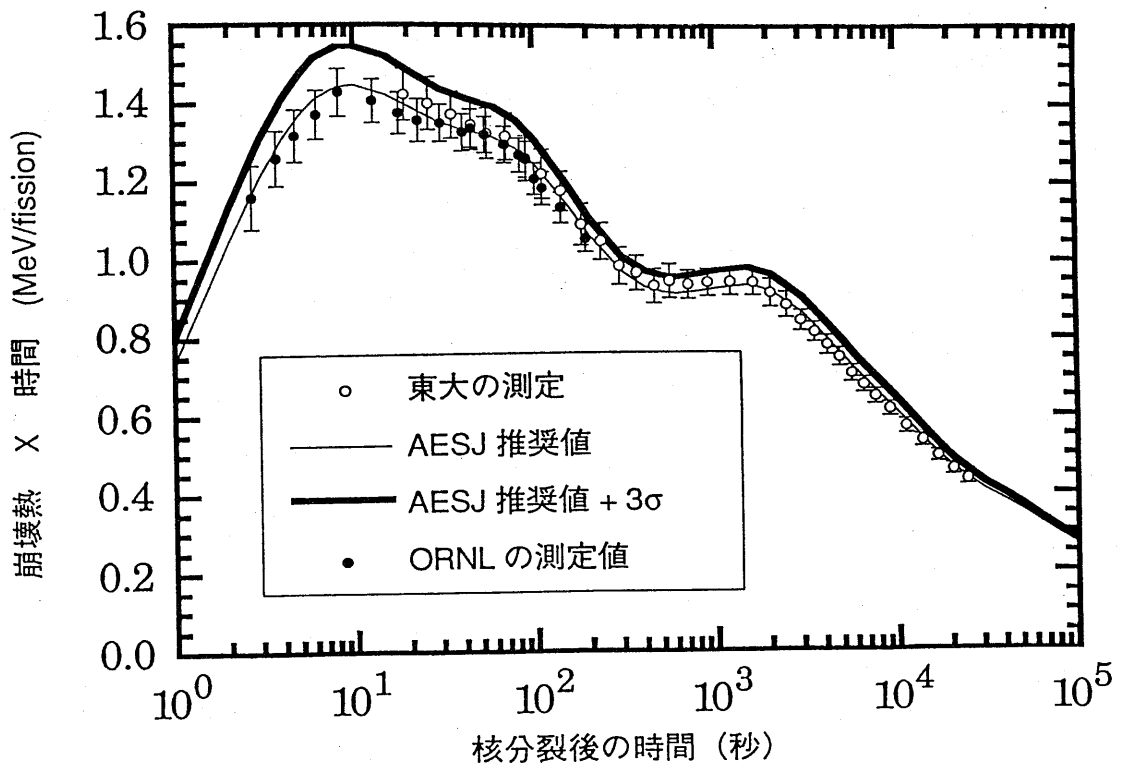


図1 測定との比較 (1)、U-235 瞬時照射 ($\beta + \gamma$)

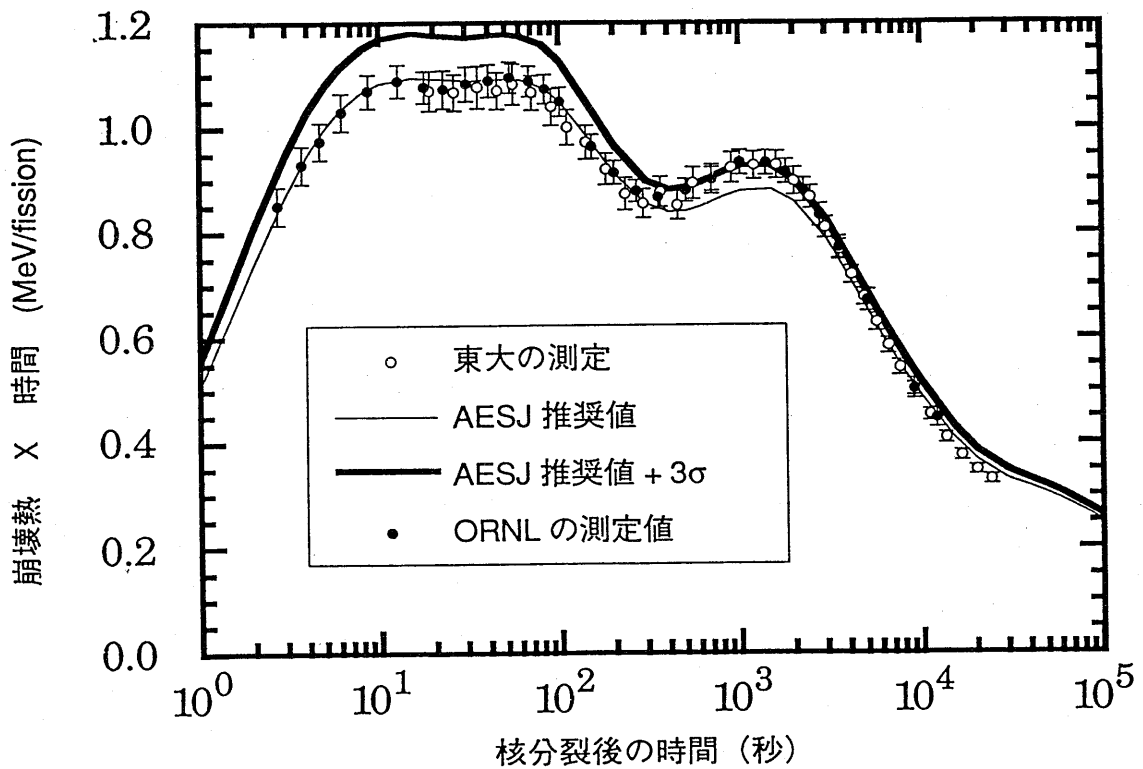


図2 測定との比較 (2)、Pu-235 瞬時照射 ($\beta + \gamma$)

5. 崩壊熱に関する今後の問題

- (1) 実験値間の不一致の原因究明。
- (2) 瞬時照射後 10^3 秒前後で、学会推奨値が実験値より小さいことがある。これは γ 線成分で著しい。またPu-239で顕著である。これらの原因を調べること。
- (3) Pu-241などのデータ向上が必要である。またトリウムサイクル関連核種U-233, Th-232のデータも整備すべきである。さらに超プルトニウム核種の崩壊熱データも順次整えておくことが必要である。こうして、多くの核種の崩壊熱データが整うにつれて、データ間の相関についても調べておくといよい。
- (4) 有限時間照射後の β 線や γ 線のスペクトルが与えられること。これは研究炉の照射設備や冷中性子源の設計あるいは医療炉の設計上重要である。

6. 結 言

今般、崩壊熱に関する学会推奨値がECCS性能評価指針に採用された。このことは、関係者が崩壊熱の基準化に長年真剣に取り組み、熱心に研究し、立派な成果をおさめたことによるが、これを支える我が国の実験データと理論的研究があったことも特記すべきであろう。

この推奨値は、崩壊熱のみならず核分裂生成物の持つ多くの諸量を全体的に示すもので、遅発中性子データとも関連があり、核分裂現象の後半、すなわちscissionの後の全体像を示すものとして核分裂物理の上でも意義深い。さらに将来、この推奨値が世界各国で基準や指針として取り上げられることが望まれる。

今回のことは、原子力学会の研究成果が原子炉の安全審査の指針に生かされた好例であり、今後炉物理研究の成果が基準化され、我が国の各種指針などにどんどん取り入れられていくことが望まれる。炉物理連絡会としても、そのような努力をしては如何か。

本稿をまとめるにあたり、文献(1)を大いに参考にさせて頂いた。また、多くの点で(株)東芝原子力技術研究所の吉田正氏のご教示によるところが大きい。

参考文献

- (1) 「原子炉崩壊熱基準」研究専門委員会：「原子炉崩壊熱とその推奨値」日本原子力学会(1989)および同委員会：「崩壊熱の推奨値とその使用法」(上記別冊)(1990)
- (2) 加藤敏郎、田坂完二、吉田正：「崩壊熱研究とデータ標準化の動向」、原子力学会誌、印刷中。
- (3) K. Tasaka, et al., "JNDC Nuclear Data Library of Fission Product-Second Version", JAERI 1320 (1990).

〈「核データ・炉物理」特別会合講演要旨 3.〉

F P核データ専門家会議と評価国際協力第4回会合

(株) 東芝 : 吉田 正

はじめに

核データの評価活動は、もともと、核分裂炉の核計算に必要な定数を炉物理側に提供する目的ではじまった。炉定数は、高々10MeV程度までの、炉心構成物質の評価済み中性子断面積データがあれば作成することができる。しかし、軽水炉の高度利用、新型炉の開発、再処理や使用済み燃料の安全性、さらには融合炉開発と、核計算関連技術の守備範囲が拡大するにしたがい、さらには高いエネルギーまで、さらに高精度で、中性子ばかりでなく陽子反応や光反応も、と核データの評価への要求も広がってきた。

いっぽう、原子力が各国の最先端の国家プロジェクトの中核として位置づけられ、財政的にも強力なバックアップを得ていたころに比べると、核データの測定・評価に投入されるマンパワーが大きく減少していることは否めない。ことに、かつて精力的だった分、退潮傾向は米国において顕著である。必ずしも減少しないデータニーズと減少するマンパワー、この落差を埋めるべく、このところ核データ評価における国際協力が広範に(日-米-欧、米-中、日-米など)行われている。その動きの一つの中心にあるのが、1989年からNEA核データ委員会(NEADNC)と炉物理委員会(NEACRP)のもとで開始され、その後両委員会の後継として発足したNEA核科学委員会(NEANSC)のもとで進められている核データ評価国際協力である。今回、その第4回会合が始めて日本で開催された。これはNEANSC主催のF P核データ専門家会議に併せて開催されたものである。

F P核データ専門家会議

NEADNC(当時)主催の核分裂生成物(F P)の核データに関する専門家会議は、1973年のBologna(伊)、1977年のPetten(オランダ)、1979年のBologna、1981年のBrookhaven(米)、1983年のStudsvik(スウェーデン)、1984年の東海、と場所および主要テーマを変えながら続けられてきた。今回は中性子断面積と核分裂収率を主テーマに1992年5月25日から27日の三日間、原研東海で原研核データセンターのスポンサーシップで開催された。

中性子断面積に関しては、各人がそれぞれの国で個々の測定や評価に注力するフェーズを終え、個々の成果がJENDL-3、ENDF/F-VI、JEF-2という日、米、欧の総合的な評価済み核データライブラリーに集約され、さらに、残された問題の最終的な詰めにさしかかっていた時期に、今回の会議が開かれたことになる。そのため、日、米、欧とも、それぞれ相手の実状、評価の完成度と残された問題等を、最終的に認識しあえるまたとない機会となった。現状の評価がそれなりの完成度を示し、一方、評価のベースになる断面積測定活動がほぼ収束しつつある現状から考えて、近い将来、各国の評価済み核データライブラリーに納められたF P断面積データが大幅に改訂されることがあろうとは考えにくい。その意味から、3大ライブラリー(JENDL-3、ENDF/F-VI、JEF-2)はみな、さあこれからどしどし使ってみてください、というスタンスであると言ってよいだろう。会議では東芝の川合氏が断面積評価のレビューを行ったが、3大ライブラリーの収納データの内容、評価手法、ライブラリー間および測定との比較が詳細に紹介された。既に述

べたように、JENDL-3、ENDF/F-VI、JEF-2とも、ほぼ最終型に近いものができあがっている。収納核種数は170から190ほどで、核分裂炉の中性子吸収効果を問題にするかぎり、まずこれで十分である。捕獲断面積だけでなく、非弾性散乱やしきい反応など、従来あまり目の行き届かなかったところまで、丁寧に評価されているのがわかる。

核分裂収率データのレビューはMainz大学のO. Denschlagが行った。この講演と2日目のロスアラモスのT. R. Englandの講演を併せると、わが国には組織だった評価活動がなく、データを貰うだけだったこの分野の動向がほぼ把握できる。ENDF/B-VIを例にとると、Th-227からFm-256に至る60核分裂セット（同一核でも入射中性子エネルギーが違えば別セットとなる）の膨大なデータファイルである。これを凌駕するものはそうそう簡単に現れないだろう。

核データ評価国際協力第4回会合

核データ評価国際協力ワーキンググループ第4回会合は5月28日と29日、上記のF P核データ専門家会議に引き続き開催された。発足したばかりのNEA核科学委員会(NEANSC)のもと、日-米-欧を中心に進められている核データ評価国際協力の企画調整を行うもので、昨年5月オランダのPettenで開かれた第3回会合に続くものである。この会合の日本からのメンバーは、原研核データセンターの菊池室長、同じく原研の長谷川明氏、九大の神田教授、それに筆者の4名である。実際の評価国際協力は、問題ごとにサブグループ（以下SG）をつくり、それぞれの専門家がこれに加わるかたちで行われている。やや羅列的であるが、活動の一端をお伝えする意味で、各SGのテーマとこれまでの作業経過を簡単にまとめて次ページにAppendixとして付す。

今回の会合では従来の枠組みであるNEANDC・NEACRPの監督下から新たにNEANSCの監督下に移行するにあたり、非OECD諸国の参加問題を含め、かなり大幅な実施協定の変更が行われた。これにともない、ワーキンググループはワーキングパーティーと改称されるが、これまでのアクティビティーはそのまま新しい体制に継承される。

おわりに

今回の二つの会議に出席しての印象は、核データ評価に関わる国際協力が順調に機能しはじめた、ということにつける。核データの測定値は各国共有の財産であるが、一度測定値が公開されると、個々の評価者がデータの問題点に気づいても、それが測定者にフィードバックされることはなかなか無かった。あったとしても、同じ国、同じ研究所の中での閉じたフィードバックであったろう。しかし、評価国際協力の枠組みが出来てくると、公の場でこのようなフィードバックが可能となる。実際、上記サブワーキンググループでの各国入り交じっての作業の中からデータの問題点が見えて来ると、測定者も過去の原データを真剣に見直し、それが本当に必要な場合には既に公開した測定値を訂正してくる、ということも実際にあった。（見直しで引っかかってくるのは規格化値である場合が多い）。このような、過去のデータの再評価は新たな測定値の出現と同じくらい意味のあることである。

Appendix : 核データ評価国際協力サブグループのテーマと活動状況概要

SG1 : Cr-52, Fe-56, Ni-58 の相互比較

Ni-58(n, α)断面積、Ni-58(n, n')のスペクトルについて、評価値間の差の原因を明らかにした。今後、比較の結果あきらかになった差の大きいデータについてのまとめを行い、同時にDDXデータについての比較を行う。

SG2 : Fe-56の共分散データの作成

Wien大学や、Oak Ridgeの簡便法による導出と、九大によるモデル・パラメータによる導出が試みられている。それぞれ違った結果を与えると考えられる。どの方法が良いのか指針を与える必要がある。今後、現在考えられている三つの方法についてのまとめを行うと共に、実際への応用を考える。

SG3 : アクチニドの熱領域データ

U-235の η 値をエネルギーの関数として見たとき、勾配がないと主張される根拠となっていたHarwellのデータが、再検討の結果、勾配のあるGeelのデータに近付いて、勾配があるとの結論で問題の解決はついたようである。

SG4 : U-238捕獲、非弾性散乱断面積

長い懸案だった共鳴領域の捕獲断面積の問題は解決された旨、九大神田教授より報告があった。非弾性の全断面積についての評価値間の差はそれほど大きくないが、部分断面積ではかなりある。1年以内に最終報告を出す。

SG5 : Pu-239 1-100keV核分裂断面積

Westonのデータについては、規格化に基づく4%程の誤差が考えられることから(Oak Ridgeの再実験の結果)、問題はほぼ解決した。

SG6 : 遅発中性子ベンチマーク

核物理側及び炉物理側からのアプローチをしている。U-238の ν_{eff} についてはデータの不確定性が大きい第一優先。ついでPu-239について、BirminghamとDubnaで測定が開始される予定。炉物理側の β_{eff} の積分実験もCadaracheで始まった。

SG7 : 標準群定数

JEFでは、群定数作成コードNJOYのユーザー会議を2回開催して使用するバージョンを決定し、それに基づきライブラリーの作成を行った。NJOYに関してはまだまだ問題が多い。JENDL側としては、VITAMINタイプのJSSTDLライブラリーを公開したので、目的は達成した。

SG8 : Minor Actinide Data (Np-237, Am-241)

主要2核種のグラフ上での比較を終了、今後積分テストに入っていく。従ってコーディネーターを中川氏から高野氏へ交代する事も考えられる。引き続いてAm-243について、各評価の比較を行う予定で、その後、Cmについても実施する予定。

SG9 : 将来炉にたいするハイプライオリティー データニーズ

現在日本(菊池氏)からと、Deruytterからのdosimetryデータについての報告が届いている。今後米国等のデータを取り入れて、サマリーを作る。

SG10 : FP核種の非弾性散乱断面積

非弾性散乱及び吸収断面積についての現状をまとめた。詳細群スペクトルによる積分テストをCadaracheのデータを用いて行う。

SG11 : Cr-52, Fe-56, Ni-58の共鳴断面積の比較

Cr全断面積についてはファイル間で大きな差がある。その他の核種についてはこの今後手をつける。

<委員会報告 1.>

炉物理研究特別委員会

(1)原子炉システム専門部会の活動

部会長(原研) 土橋敬一郎

この部会は年3回会合を持つスケジュールで活動を進めている。活動の中心はホットな情報の交換である。平成4年度はNEACRPがNEANSCへ他の分野も含めて吸収されたため、例年かなりの時間を割いていたNEACRPへの提出論文の検討、先進諸国の炉物理活動の報告が会合の議事内容から消え、その分国内の情報交換の密度が濃くなった。

第1回会合(通算35回)では(1)竹田委員(阪大)からマルチバンド法による共鳴断面積の取扱いの現状と将来の展望についての紹介、(2)代谷専門委員(京大炉)からここ数年大学連合のKUCAでの臨界実験の懸案となっている金(線・箔)の放射化実験解析について、問題となっている反応率の再評価、菓子折構造からくるストリーミング効果等を中心に紹介があった。(3)地紙氏(四電)から炉心の高度化へ向けて最近改良された四国電力の炉心管理コードの紹介があった。

第2回会合では(1)『決定論的3次元輸送計算法の進展』というトピックスで、竹田委員(阪大)による決定論的手法のレビューとSn法による解法・小林専門委員(京大)から有限フーリエ変換を用いたPn法による解法、藤村氏(原研)から二重有限要素法による解法の紹介があった。後者の2件は前年竹田委員を中心に行われたNEACRPベンチマーク計算に適用して解を比較検討された。次に(2)『FBRにおけるボイド係数低減化』というトピックスのもと、先づ関本委員(東工大)により、ボイドが反応度に影響を与える物理的メカニズムの解説とともに、FR'91および東工大における超長寿命炉心を例に、ボイド係数を負の側に変化させる設計として8つの方法が紹介された。さらに、ボイド係数のみに着目した設計は原子炉の安全性を向上させるものの、方法の多くは中性子経済を悪化させ、高速炉の増殖性を損う方向のものであり注意を要するとの指摘があった。数々のコメントが述べられたが、ボイド係数は全体の反応度の一部であり安全性は系全体で評価すべきであるとの意見が多かった。また予測精度の向上の重要性が述べられた。

第3回会合は年度末に予定しているが、議題として小林専門委員(京大)より将来の炉物理解析コードシステムの構築が提案されている。実は前年度第3回会合(通算34回)で『次世代の原子炉解析コードシステムのありかた』をトピックスとして、アーキテクチャ、用途、マンマシンインターフェース、新手法の取込み等が提案されている。そこで分野は異なるが、数年前から着手された汎用3次元流体解析システム α -FLOWというプロジェクトが終了している。このシステムのアーキテクチャや開発体制は参考となると思われるので、この紹介を手始めに小林提案を検討してみたい。もう一つのトピックスとして、国内外で実験が行われている β_{eff} の測定をとりあげ、測定原理のレビュー、諸実験の紹介を予定している。

またNEANSCで行われるワーキングパーティ、タスクフォース、ベンチマーク等関連する会合の情報は欠かさず報告したい。

(2) 遮蔽専門部会の活動

(原研) 坂本幸夫、田中俊一

遮蔽専門部会の部会長を原研の鈴木友雄氏から田中俊一に引継ぎ、専門委員31名、オブザーバー10名の構成で加速器の遮蔽問題を中心に活動を行っている。

NEANSC (NEA核科学委員会) で採択している遮蔽関係のプロジェクトは、遮蔽ベンチマークのデータベース、輸送容器の遮蔽評価、及び加速器ターゲット・照射施設の遮蔽である。加速器の遮蔽問題は日本が提案したプロジェクトであり、1994年5月1、2日にパリで専門家会議を開催すべく準備を進めている。この会議では、各国の加速器の現状及び遮蔽評価のレビューを行うとともに、ベンチマーク問題を選定して遮蔽計算コードの国際比較を行う予定である。これに対応するため本専門部会に加速器遮蔽WGを作り、下記の活動を行っている。

(1) 加速器遮蔽ベンチマーク問題の作成

国内外における高エネルギー加速器の遮蔽実験を調査し、下記の問題を作成した。

① 加速器のSource Termの評価に関する問題

数MeV～数GeVまでの軽イオン、重イオンによる厚いターゲットからの中性子の発生に関しては、256MeV陽子入射の実験及び710MeV α 粒子入射の実験を採用した。

約30MeV以上の電子線で発生する光核反応による厚いターゲットからの中性子の発生に関しては、150～270MeV電子の鉛ターゲット入射の実験を採用した。

② 放射線のPenetrationに関する問題

約200MeV以下のハドロン透過に関しては、東大原子核研究所のFMサイクロトロンで行われた52MeV陽子を黒鉛ターゲットに当てて発生した二次中性子及び γ 線の遮蔽物質透過実験を採用した。

数GeVまでのハドロン透過に関しては、高エネルギー物理学研究所で行われた500MeV陽子の鉄ビームダンプ実験及び鉄・コンクリート遮蔽実験を採用した。

(2) データ等の整備

上記のベンチマーク問題を解析するために必要なデータの整備・検討を行った。

① 放射化断面積及び検出器レスポンスに関するデータ

電子の制動放射線による鉛での中性子発生に関するデータ、放射線強度測定に用いている放射化反応の断面積データ及び検出器のレスポンスデータを整備した。

② 高エネルギー放射線に対する線量当量換算係数データ

③ 高エネルギー放射線に対する群定数ライブラリー

中性子エネルギーが400MeVまでの群定数ライブラリーの現状 (DLC-87/HILO、DLC-119/HILO86) を調査するとともに、HILO86の低エネルギー領域をJENDL-3を基礎として自己遮蔽因子を考慮したデータに差し替えたライブラリーHILO86Rの整備を進めた。

(3) 核融合炉専門部会の活動

(原研) 前川 洋

本部会は現在、委員22名、オブザーバー11名から構成されている。昭和54年度の部会発足以来年約3回のペースで会議が開催されており、既に38回を数えている。56年からの原研FNS及び阪大OKTAVIANの両強力D-T中性子源の運用開始とあいまって、原研、大学、産業界との情報交換の場として、核融合炉開発研究に大いに役立ってきた。平成2年度からは、ベンチマーク問題集作成のためのワーキンググループが作られ活動している。

JENDL-3の公開にともない、その積分評価がシグマ特別専門委員会との協力により実施された。核融合炉の核設計では中性子だけではなく γ 線の計算も必要である。そのため、標準断面積セットとして、中性子125群、 γ 線40群のものと、モンテカルロコードMCNP用のものが準備された。これらを用いたJENDL-3の積分評価のまとめとして、1985年に続いて1990年に第2回核融合核データ専門家会議が開催された。JENDL-3にはまだまだ問題点を含むものの、核融合炉の核設計に十分利用可能である利用可能であるとゆうのが会議のまとめであった。会議での指摘を踏まえてデータの手直しが進行中であり、平成5年3月にはJENDL-3.2が公開予定である。また、同会議で強く要望された2重微分断面積 (File-6) を含むJENDL-Fusionファイルも同時に公開される予定である。これら2つのファイルが公開され次第、断面積セットを準備して再度積分評価を実施する予定である。

1991年からNEACRPはNEA-NSCの中に統合された。このNEA-NSCの活動の一環として、トリチウム生成率 (TPR) 測定技術の国際比較を原研がホスト機関となり、7カ国から9機関が参加して実施された。参加機関のTPR測定値の間で10%以上の差があり、目標の5%以下を大きく上まわった。この差の主な原因は参加機関の技術と経験に依存していると考えられる。極微量のトリチウムを照射済サンプルから取り出す過程とトリチウム量の値づけに問題があると予想される。最終報告書がまとめられ、JAERI-Mレポートとして印刷中である。

1992年7月日本、アメリカ、ロシア、ECの4極で国際熱核融合実験炉の工学設計活動 (ITER/EDA) が調印され、核融合炉開発研究に新たな段階をむかえた。ITER/EDAの中性子工学に関連したR&Dでは遮蔽性能、超電導電磁石での核発熱、誘導放射能、絶縁材や計測機器の放射線損傷が重要な研究課題である。また、1993年1月にはIEAの下で、核融合炉工学についての国際協力が調印される予定である。サブタスクの1つに「中性子工学」があり、本部会が受け入れ母体とみなされている。10年余の間、日本が中性子工学の分野で世界をリードしてきた。今後、国際協力を推進する上で本部会の活動、果たす役割が大いに期待されている。

(4) 原子力コード研究委員会の現状

原研情報システムセンター

秋元 正幸

原子力コード研究委員会は、原研の研究委員会として、昭和38年に設置され、また、昭和41年度から一時期、日本原子力学会に設置された原子力コード特別専門委員会と一体となって、必要度の高い原子力コードの開発・整備を実施すると共に、国内における原子力コード・センターとして国内外の関連機関との間で、原子力コードの収集及び配布を行ってきた。この間、原子力コードの開発整備については、国内外の情勢の変化に対応しつつ、必要に応じて専門部会の改廃等を行い、多数の有用な原子力コードを開発整備、蓄積を図ってきた。

原子力コードの情報交換に関する業務は、本委員会の運営方針を受けて原研情報システムセンターが当たるが、昭和56年8月の(財)原子力データセンター(NEDAC)の設立以来、国内機関への原子力コード配布、OECD/NEAデータバンクからの原子力コードの入手等の業務はNEDACを通じて行っている。また、昭和62年の改正著作権法の施行に伴い、原研開発の原子力コードの管理・運用が整備されつつあり、原研開発の一部の原子力コードは有償で提供することになる予定である。

さて、本委員会の現在の活動は、原子力の開発利用の重点課題の移行あるいは情報処理技術の進展を反映して、次の3専門部によって活動を行っている。

- (1) 原子力コード評価専門部会は、核燃料施設の安全評価のために使用される計算コードの開発状況に関する調査及び利用経験に関する情報交換を行い、関連コードの整備及び性能評価を進める。
- (2) 軽水炉安全解析コード高精度化専門部会は、既存の熱水力相関式の予測能力を調査すると共に、高度化を図るべき現象の研究上の優先度を検討し、相関式の評価・改良計画提案する。
- (3) 原子力コード利用ネットワーク専門部会は、原研と大学等研究機関の研究交流を目的としたコンピュータ・ネットワークの有り方について検討する。即ち、原子力コード等の利用に伴うコンピュータ相互利用におけるネットワーク利用技術、体制整備等に関する検討及び情報交換を行う。

このほか、毎年特定テーマを設け、原研の炉物理研究委員会と共催で「原子力におけるソフトウェア開発」研究会を開催している。因みに今年度のテーマは、次世代の原子炉システム及び再処理施設の安全評価用ソフトの最先端であった。以上、本委員会の活動概況を述べた。1992年は、エンリコ・フェルミによる世界最初の原子炉CP-1の実験成功から半世紀に当たる。次の半世紀に向けて、新たな課題に挑戦するための原子力用ソフトウェア技術開発に、本委員会の一層の活用が望まれる。

〈委員会報告 2.〉

臨界安全特別専門委員会第7回会合報告

東北大学 平川 直弘

標記委員会は1992年9月21日、日本原子力研究所東海研究所においてPATNAM(Packaging and Transportation of Radioactive Materials)に参加のため来日した6人の米国人専門家の参加を得て開催された。今回の会合の主目的は、これまで日本ではBurnup Creditや使用済み核燃料物質輸送用Caskの問題があまり取上げられることがなかったが、今後これらの問題が重要になるという認識を臨界安全分野の研究者に持ってもらうということであり、併せてこの分野に関係して我が国で行なわれている研究について米国人参加者に紹介することであった。そのため質疑応答を含め全て英語で行なわれた。

会議の前半は米国側の発表で、先ずUSDOEのMr.LakeがOverview of USDOE Waste Management Programと題して、米国エネルギー省のOCRWM(Office of Civilian Radioactive Waste Management)の役割、MRS(Monitored Retrieval Storage)と輸送用Caskの開発計画について述べた。次いでMr.Teer(E.R.Johnson Associates)がDOE Cask Development Programという題で道路輸送用と鉄道輸送用の具体的なCaskの開発について説明した。3番目にDr.Sanders(SNL)がBurnup Credit Issues in Transportation and Storageという題する講演を行なった。彼は先ず初期濃縮度、燃焼度、冷却時間を含めたBurnup Creditを与える式を示し、次に上記以外のパラメータ、例えば照射履歴、照射中の軸方向の出力分布の影響等について述べた。そして米国の7つのPWR燃料集合体の反応度の差は燃料輸送基準の燃料に対し $0.5\% \Delta k/k$ 以下であったこと、照射履歴の影響の小さいこと、冷却時間とともに k_{∞} が減少するので設計基準として5年間の冷却をとることなどを説明した。さらに実際に長期間停止していた原子炉の再起動時の臨界データ等からMonte Carlo計算の妥当性を評価した結果、Cask設計にBurnup CreditをとることでefficientなCask設計ができること等を述べた。最後にDr.Whitesides(ORNL)がCriticality Code Verification and OECD/NEA Burnup Credit Benchmark と題して、1975年以来OECD/NEAのWorking groupで行なわれてきた臨界安全問題の計算手法に関するBenchmark計算の国際比較について述べた。その中でも最近のものは、固体の核燃料物質が溶液で囲まれているという問題である。そして現在はBurnup Credit ないし核分裂生成物の蓄積の問題に取り組んでいるという説明があった。

後半は日本側の発表で、まず小林、奥野、須崎(原研)からCriticality Safety Handbook and Experimental Program for Burnup Creditという題で、主に原研で開発された燃焼計算コードと、PWRの燃料集合体を対象として行なわれた指数実験についての説明があった。次いでDevelopment of Burnup Monitorという題で、丹沢(東芝)が再処理施設における燃焼度計測装置の開発と試験について述べた。最後に平川(東北大)がAnalysis of PIE(Post Irradiation Data) by an Improved Burnup Calculation Code と題して東北大で開発した燃焼計算コードSWATの説明とアクチニド核種についてこれを原研化学部で行なわれた照射後試験データと比較した結果を述べた。なお予定では古橋(核管センター)よりSome Topics of 33rd Annual Meeting of INMMという講演が行なわれる予定であったが、予定時間を超過したため中止された。短い時間に多くの内容を盛り込んだため十分な討議は行なえなかったが、当初の目的は達せられたと考える。なお本委員会の活動はこれをもって終了した。

〈委員会報告 3.〉

放射線挙動研究専門委員会

主査 東北大学サイクロトロン・ラジオ
アイソトープセンター 中村尚司

本委員会は1988年度から4年間続いた「放射線挙動工学」研究専門委員会の継続として1992年度から活動が開始された。現在主査の他に、幹事4名（山野直樹（住友原子力），坂本幸夫（原研），辻政俊（TEC），伴秀一（高工研）），委員35名、常時参加者7名計47名の大人数のメンバーから成っている。

前委員会において、従来の原子炉を中心とする放射線遮蔽の研究から、近年工業や医療への利用が著しい、放射光施設を対象とした低エネルギー領域の放射線挙動や加速器施設を対象とした高エネルギー領域の放射線挙動へと問題を拡大して、活動の方向を転換して研究を進めてきた。具体的には広範な放射線利用分野の専門家の講演を聞き、委員会の中に加速器遮蔽ワーキンググループと中性子遮蔽ハンドブック作成ワーキンググループを設けて活動を行ってきた。その成果として、加速器遮蔽文献集 H. Hirayama et al., "Annotated References of Shielding Experiment and Calculation of High Energy Particles", KEK Report 90-18, December 1990. が既出版され、また今春には中性子遮蔽設計ハンドブックが刊行される予定である。

これまでの活動により放射線挙動を取り扱う「工学」としての研究領域を拡げる意味での成果をあげることができたが、本委員会においては単に「工学」としての取り組み方だけではなくて、宇宙開発に伴う宇宙線の挙動の解明、核医学や放射線治療における人体内の放射線挙動、オメガ計画や材料損傷研究のための大強度加速器開発における核反応データなど、より基礎的な観点からさらにこの境界領域の研究を進めることを目指している。

1992年には γ 線ビルドアップ係数の現状、宇宙放射線場と半導体素子の損傷、中性子の工業利用、線量当量の測定法について専門家の講演を聞いた。またワーキンググループの活動として、引き続き加速器遮蔽ワーキンググループが加速器遮蔽ベンチマーク問題集をまとめており、今春には出版される予定である。この他に今年から新たなワーキンググループが設立され、活動が開始されることになっている。

本委員会の他の学会の委員会にない大きな特徴として、夏期セミナーの開催があげられる。第1回の夏期セミナーは1991年7月25日～27日に遮蔽計算法の話を中心に箱根で開催され、第2回の夏期セミナーは1992年7月16日～18日にドシメトリヤや核データの話を中心にやはり箱根で開催され、ともに40名弱の参加があり、2年連続の参加者もあった。今年も第3回夏期セミナーが計画されている。

〈委員会報告 4.〉

「消滅処理」研究専門委員会

原研・向山武彦

本委員会は、1991年6月以来、10回の会合を行った。
その主要議題は以下の通りである。

1. 会員数 41名 (委員27名、常時参加者14名) (主催 安成弘東名誉教授)
2. 会員内訳 大学 14名、原研・動燃・電中研・放医研・核管セ 11名、
電力 5名、メーカー・エンジニアリング会社 9名、その他 2名
3. 委員会議題 (技術的なもののみ)
 - 1) 第1回 1991年6月11日 原研本部会議室
 - ・委員会設立主旨 (安主査)、・オメガ計画の経緯と現状 (向山幹事)
 - 2) 第2回 1991年8月6日 霞山会館
 - ・消滅処理研究の現状 (その1) 動燃 (若林幹事)、電中研 (井上幹事)
 - 3) 第3回 1991年10月1日 航空会館
 - ・消滅処理研究の現状 (その2) 原研 (向山幹事、西田委員)、東北大 (平川委員)
 - 4) 第4回 1991年12月6日 原研本部会議室
 - ・消滅処理研究の現状 (その3) 東工大 (関本委員)、東芝 (飯田委員)、
日立 (川島委員)
 - ・会議報告: IAEA群分離・消滅処理諮問グループ会議 (向山幹事)、
ANS冬季大会 (若林幹事)
 - 5) 第5回 1992年3月6日 東工大原子炉研究所会議室
 - ・消滅処理研究の現状 (その4) 九大 (石橋委員)、京大 (木村委員)
 - ・核物理屋からみた核消滅 (理研・郷農靖之氏)
 - ・会議報告: 動燃主催「核変換研究会」 (小無委員)
 - 6) 第6回 1992年5月12日 商工会館
 - ・消滅処理研究の現状 (その5) 東工大 (北本幹事)、三菱原子力 (柴山委員)
 - ・海外の動向 群分離・消滅処理に関する米国National Research Council
シンポジウム (動燃・河田東海夫氏)
OECD/NEA加速器消滅処理ワークショップ (西田委員)
 - 7) 第7回 1992年7月7日 電中研 (大手町) 会議室
 - ・燃料サイクルバックエンドについての2、3考察 (産創研・高島洋一氏)
 - ・群分離技術開発 (その1) 湿式群分離 (森田委員)
 - ・海外事情: ロシアにおける高レベル廃棄物管理の現状 (井上幹事)
 - 8) 第8回 1992年9月8日 三菱原子力本社会議室
 - ・群分離技術開発 (その2) 乾式群分離技術開発の現状 (井上幹事)
 - ・データベースの現状 (その1) TRU燃料挙動予測とデータベースの現状
(小川委員)
 - ・ロシアの群分離・消滅処理関連研究所見聞記 (原研・田島保英氏)

- 9) 第9回 1992年10月29日 日立本社会議室
- ・群分離技術開発(その3) 湿式群分離技術開発の現状(動燃・小川正基氏)
 - ・データベースの現状(その2) 消滅処理のための核データ(原研・菊池康之氏)
 - ・IAEA「高速炉の消滅処理利用」専門家会議報告(若林幹事)
- 10) 第10回 1993年1月27日 東芝会議室
- ・軽水炉による消滅処理とマイナーアクチノイド核種の積分データベンチマーク計算(原研・高野秀機氏)
 - ・国際会議報告 ANP'92における Actinide Burner 関係発表(若林幹事)、
OECD/NEA群分離・消滅処理第2回情報交換会議(井上幹事)
4. 今後の予定
平成5、6年度も委員会は延長

以上

<インフォメーション>

International Conference and Technology Exhibition on Future Nuclear Systems: Emerging Fuel Cycles and Waste Disposal Options

- GLOBAL '93 -

主催：米国原子力学会

共催：日本、ヨーロッパ、カナダ、
ロシア原子力学会、EPRI他

日時：1993年

9月12日(日)～17日(金)

内容：

Papers are solicited on topics related to future chemical processing-based nuclear waste management, disposal technologies and systems designed to minimize the volume and toxicity of wastes

トピックス

NUCLEAR SYSTEMS:

Total nuclear system requirements
Nuclear system evaluation criteria
Impact of advanced partitioning on disposal options
Technical and institutional anti-proliferation options
Safe guard and detection technologies
Advanced fuel cycle systems

ADVANCED CHEMICAL SEPARATIONS:

Actinide and fission product chemical separations
Reprocessing of transmutation target materials
Recycle of chemical reagents
Target and fuel fabrication performance
Fabrication, waste minimization and recycle

WASTE TRANSMUTATION:

Plutonium recycle
Waste transmutation in power reactors

Waste transmutation in special purpose devices

High power accelerator technologies

Safety of transmutation systems

Nuclear data

Properties and science of actinides and fission products

WASTE TREATMENT AND DISPOSAL:

Conversion of chemical partition to final waste forms

Characteristics and behavior of final waste forms

Beneficial use of selected partition
Reprocessing, offguard collection, treatment

Decontamination and packaging of contaminated metal

Management and disposal of processing wastes

Low level waste minimization, treatment, packaging

Characteristics, behavior of secondary waste forms

Low level waste disposal options

Intermediate waste disposal options

Disposal options for selected partitions

Disposal options for partitioned high level waste

SPECIAL INTEREST TOPICS:

Futuristic nuclear power concepts

Weapon materials disposition

Public attitude on reprocessing

Uranium resource projections

"Special features will include invited papers on national energy strategies, as

well as a roundtable discussion on long-term survival of nuclear power amidst proliferation concerns”

HONARY CHAIRMAN:

W. Hafele,
Zentralinstitut Kernforschung

GENERAL CO-CHAIRMAN:

A. E. Walter, T. W. Woods,
Westinghouse Hanford Company

PROGRAM CO-CHAIRMAN:

J. A. Rawlins,
Westinghouse Hanford Company
M. Salvatores,
Commissariat a L'Energie Atomique
T. Mukaiyama, JAERI

サマリー締切: 1992年12月末
論文締切: 1993年5月15日
連絡先: 学会事務局 又は、
向山 (原研) Fax: 0292-82-5325

7th International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems - ICENS '93 -

1993年9月20日 (月) ~ 24日 (金)

千葉市幕張メッセ国際会議場

主催: 日本原子力研究所

共催: 動力炉核燃料開発事業団、
理化学研究所、核燃料科学研究所、
大阪大学レーザー核融合研究センター

後援: 化学技術庁他国内6機関、
米国原子力学会他国外4機関

The main objective of the conference is to discuss, on a broad international base, the state of various advanced and non-conventional concepts for nuclear energy production. The program will be comprised of invited papers as well as submitted contributions in oral and poster sessions.

トピクス

- (1) 核融合によるエネルギー生産と利用
- (2) 核分裂による革新的なエネルギー生産と利用

- (3) エネルギーシステムのための加速器の利用
- (4) 革新的なエネルギー貯蔵と変換
- (5) その他の革新的なシステム
- (6) 一般的な話題

参加手続き

セカンドアナウンス発送

1993年2月 1日

アブストラクト締切

1993年4月19日

本論文提出

1993年9月20日

問い合わせ先

ICENES事務局

日本原子力研究所東海研究所
原子炉工学部 事務室

TEL: 0292-82-5305, 5306

FAX: 0292-82-6122

<事務局だより>

1992年 夏期セミナー 収支報告 最終確定

収 入				支 出			
	数	単価	計		数	単価	計
参加費			160000	講師謝礼	11	5000	55000
				講師旅費	4	25000	100000
				講師旅費	1	5000	5000
テキスト代	40	1000	40000				
広告料	8	30000	239349				
宿泊費			33000	印刷費用			157075
食費			264000	宿泊費			20950
				食費			181940
				会場運営			145494
				写真代			8842
				雑費			38944
懇親会費			132500	懇親会費			135377
遠足			102500	遠足			108400
補助			100000				
繰り越し			65620				
利子			150				
総計			1137119	総計			957022
来年度繰越			-	来年度繰			180097

☆次期 (平成5年度) の幹事機関は名古屋大学にお願いすることになりました。

☆平成4年度炉物理連絡会運営委員

委員長	関本博 (東工大・原子炉研)
副委員長	高橋亮人 (阪大・工・原子力)
企画委員	馬場護 (東北大・工・原子核)
	松山成男 (東北大・工・原子核)
編集委員	神野郁夫 (京大・工・原子核)
	岩崎智彦 (東北大・工・原子核)
総務委員	井口哲夫 (東大・工・原子力)
	小原徹 (東工大・工・原子核)

<<編集後記>>

今回は、フェルミの臨界から50年ということで、炉物理とともに歩まれた先輩方と、これからの将来を担う若手研究者に、炉物理研究の創世期のエピソード、炉物理への提言や抱負などの寄稿をお願い致しました。多くの方々の御協力を頂き御覧のような多彩な内容を盛り込むことが出来ました。御多忙中、原稿を引き受けてくださった方々に厚く御礼申し上げます。

(松山成男 記)

「炉物理連絡会」平成4年度中間収支報告

平成4年4月1日～5年2月28日

(単位: 円)

収 入		備 考
前年度繰越金	2,623,734	(含 古橋基金 1,849,642円)
会 費	205,500	
「夏期セミナー誌」残部売上	22,840	第22回 2,000円×1冊 第23回 1,000円×5冊 第24回 2,000円×7冊 送料1,840円(21,000円は古橋基金へ)
第24回夏期セミナー残金	180,097	
合 計	3,032,171	

支 出		備 考
会 議 費	18,025	第50回会員総会
通 信 費	28,292	「ニュース」発送費
「ニュース」印刷費	8,655	No.17 250部
雑 印 刷 費	7,792	「セミナー申込書」, 他
第24回夏期セミナー補助金	165,620	(含 前年度セミナー残金 65,620円)
”	69,000	古橋基金より
会 員 事 務 管 理 費	48,090	オフコンリース料, 消耗品
合 計	345,474	

残高 2,686,697円 (含 古橋基金 1,801,642円)

「炉物理連絡会」会員名簿 (機関別)

○印は新入会員 会報No.41以降
(計 221名 平成5年3月10日現在)

梶山 一典
武田 栄一
野村 孜

北海道大学 (5名)
秋本 正
鬼柳 善明
辻 雅司
成田 正邦
松本 高明

北海道自動車短期
大学 (1名)
小澤 保知

弘前大学 (1名)
葛西 峯夫

東北大学 (7名)
岩崎 智彦
北村 正晴
須山 賢也
辻本 和文
馬場 護
平川 直弘
○松山 成男

埼玉工業大学
(1名)

関口 晃

東京大学 (5名)
井口 哲夫
岡 芳明
小佐古 敏荘
近藤 駿介
中沢 正治

東京工業大学
(6名)

井頭 政之
小原 徹
北沢 日出男
清水 彰直
関本 博
山 岬裕之

東海大学 (5名)
清瀬 量平
阪元 重康

砂子 克彦
永瀬 慎一郎
中土井 昭三

武蔵工業大学 (3名)
相沢 乙彦
松本 哲男
向井 徹

立教大学 (1名)
林 脩平

早稲田大学 (1名)
並木 美喜雄

第一工業大学 (1名)
佐久間 雄平

名古屋大学 (9名)

○逢坂 正彦
伊藤 只行
加藤 敏郎
○曾野 浩樹
仁科 浩二郎
○伏木 勝己
三澤 毅
山根 義宏
吉岡 博貴

中部大学 (1名)
西原 宏

岐阜大学 (1名)
岸田 邦治

京都大学 (6名)

○神野 郁夫
木村 逸郎
○木村 純
小林 啓祐
桜井 良憲
森島 信弘

京都大学原子炉
実験所 (17名)

石岡 邦江
市原 千博
宇津呂 雄彦
宇根崎 博信
海老沢 徹

神田 啓治
小林 捷平
小林 圭二
古林 徹
代谷 誠治
茶谷 浩
中込 良広
西原 英晃
長谷 博友
林 正俊
藤田 薫
米田 憲

大阪大学 (4名)

住田 健二
高橋 亮人
竹田 敏一
錦織 毅夫

近畿大学 (7名)

大沢 孝明
小川 喜弘
柴田 俊一
辻 良夫
橋本 憲吾
堀部 治
三木 良太

舞鶴工業高等専門
学校 (1名)
若林 二郎

大阪国際女子短期
大学 (1名)
堀江 淳之助

神戸商船大学 (1名)
中島 雅

吉備国際大学 (1名)
関谷 全

九州大学 (4名)

石橋 健二
神田 幸則
工藤 和彦
中島 秀紀

東和大学 (1名)
片瀬 彬

九州帝京短期大学
(1名)
大田 正男

日本原子力研究所
(48名)

秋濃 藤義
朝岡 卓見
○安藤 真樹
飯島 進雄
石黒 幸雄
伊勢 武治
板垣 正文
伊藤 大一郎
大井川 宏之
大杉 俊隆
大部 誠
岡嶋 成晃
金子 義彦
○川原井 照男
菊池 康之
久語 輝彦
黒沢 一男
五藤 博
後藤 頼男
小林 岩夫
小近 藤育
桜井 淳一
新藤 隆夫
杉 暉夫
関野 秀機
高田 中俊
土橋 敬一郎
○外池 幸太郎
○長尾 美春
中川 正幸
中島 健宏
中島 宏勝
中野 正文
中原 康明
平岡 徹
藤村 統一郎
前川 洋
松浦 祥次郎
水本 元治
向山 武彦
○明午 伸一郎
村田 勲

森 貴正
山田 毅
山根 剛
吉田 弘幸

動燃事業団 (6名)

飯島 一敬
○長沖 吉弘
○中村 詔司
望月 恵一
山本 敏久
若林 利男

原子力委員会 (1名)
大山 彰

原子力安全技術センター
(1名)

天野 文雄

船舶技術研究所 (2名)

伊従 功
○小田野 直光

電子技術総合研究所
(1名)

工藤 勝久

電力中央研究所 (2名)

松村 哲夫
○横尾 健

原子力発電技術機構
(2名)

駒田 正興
芳賀 暢

エネルギー総合工
学研究所 (2名)

大塚 益比古
松井 一秋

核物質管理センター
(1名)

古橋 晃

原子力データセンター
(2名)

飯島 勉
能沢 正雄

高エネルギー物理学 研究所 (1名) 山口 誠哉	東京電力 (3名) 市村 鋭一 ○高木 直行 巻上 毅司	清水建設 (1名) 大石 晃嗣	ナサック (1名) 梅田 健太郎	フジタ (1名) 石川 敏夫
原子力システム研究 懇話会 (1名) 安 成弘	石川島播磨重工業 (1名) 倉重 哲雄	情報数理研究所 (1名) 磯野 彬	日産自動車 (1名) 小机 わかえ	富士電機 (2名) 中村 久 安野 武彦
高輝度光科学研究 センター (1名) 中村 知夫	川崎重工業 (1名) 田中 義久	住友原子力工業 (1名) 松延 廣幸	日本原燃 (1名) 須田 憲司	三菱原子力工業 (6名) 大谷 晋司 ○菅 太郎 駒野 康男 千田 康英 田原 義寿 弘田 実弥
特許庁 (1名) ○居島 一仁	原子燃料工業 (1名) ○伊藤 卓也	CRC総合研究所 (1名) 角谷 浩享	日本総合研究所 (1名) 桂木 学	三菱電機 (2名) 後藤 豊一 路次 安憲
電源開発 (1名) 木下 豊	原子力エンジニアリング (2名) 川本 忠男 ○杉田 裕	東芝 (10名) 青木 克忠 猪野 正典 植田 精 小林 康弘 小林 裕司 野本 昭二 深井 佑造 松村 和彦 水田 宏 門田 一雄	日立エンジニアリング (1名) 山口 正男	日立製作所 (6名) 大西 忠博 三田 敏男 瑞慶覧 篤 丸山 博見 三木 一克 ○山中 章広
日本原子力発電 (3名) 白方 敬章 武田 充司 立松 篤	高速炉エンジニアリング (1名) 亀井 孝信			ANL (1名) 丁 政晴
中部電力 (2名) 金井 英次 村田 尚之	エプシロン総合研究所 (1名) 間庭 正樹			

「炉物理連絡会」会員総会のお知らせ

来る「1993年春の年会」の折、次の通り第51回会員総会を開催いたします。
多数のご参加をお願いします。

日時： 3月28日(日) 12:00~13:00

場所： 「1993年春の年会」A会場 (於：京都大学工学部)

※昼食の用意をいたします。

炉物理連絡会の概要

(1968年4月)

(1989年10月 第44回総会一部改定)

1. **趣旨** 原子力研究の最近の進歩は誠に目ざましいものがあり、本学会の責任もますます大きくなってきた。また、とくに原子力研究においては、諸外国との交流がきわめて重要なものとなってきた。このような情勢に対処するためには、まず、国内における研究者間の十分な情報交換や連絡・調整が大切である。この点については、従来わが国の原子力研究体制の進展があまり急であったため、必ずしも適当な現状にあるとはいえない。かねて炉物理関係研究者の間において、約2年前より4回にわたる“炉物理研究国内体制のインフォーマルミーティング”を初め、いろいろの機会をとらえて、意見の交換が重ねられた結果、本学会内に常置的な組織を設け、その活動を通じてこれらの問題を解決して行くべきであるという方針により、この連絡会が設置された。

2. **事業** 国内における炉物理研究者間の相互連絡、調整の役割りを果たすため、年間約1回連絡会報として、『炉物理の研究』(B5判オフセット印刷)を編集刊行する。『炉物理の研究』はオリジナルペーパーの前段階としての報告・発表、検出器・試験装置など研究に関する情報交換、研究を進める上で必要な各種の意見発表および討論等を活発に行うためのもので、さらに、関連するニ

ュースをも含ませ、また諸外国からのインフォメーションも伝わるように努める。(別途に(季刊)『炉物理連絡会ニュース』を年間2回発行)また、春秋に総会を開催し、「炉物理夏期セミナー」なども計画して、学会行事として実施する。

3. **対象** 対象とする専門分野の範囲は、つぎのとおり。

- ① 原子力の基礎としての核物理
- ② “ ” 中性子物理
- ③ 原子炉理論
- ④ “ ” 実験
- ⑤ “ ” 核計算 (Burnup Physics を含む)
- ⑥ “ ” 動特性
- ⑦ “ ” 遮蔽
- ⑧ 関連する計測
- ⑨ その他の関連分野

(たとえば、エネルギー変換の基礎反応)

4. **運営** 委員長1名・副委員長1名・委員若干名により組織される運営委員会が行う。

(任期1年)

5. **連絡会員** 本連絡会に加入する本会会員は、氏名・専門分野・所属・連絡先を明記して書面で事務局へ申込み、連絡会費を前金で納付する。なお、前金切れと同時に失格する。