我が国の中性子結晶学の発展 —世界結晶年 IYCr2014 に寄せて—

藤井 保彦, 神山 崇*

(総合科学研究機構 東海事業センター, 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所*)

Evolution of Neutron Crystallography in Japan - For the International Year of Crystallography IYCr2014 -

Yasuhiko Fujii and Takashi Kamiyama*

Research Center for Neutron Science and Technology, CROSS
and Institute of Materials Structure Science, KEK*

1. はじめに

国際連合では、特に開発途上国を念頭に置いた国際的な科学技術や文化の振興を目的として、特定の1年間を世界〇〇年 (International Year of 〇〇) と総会で決議し、傘下のユネスコを中心として活動を行っている。各国における〇〇を振興することを目的とするが、さらに高度な〇〇推進ではなく、〇〇を広く世界中の一般市民に知ってもらう活動を行い、〇〇の重要性を理解してもらうことに主眼を置いている。これまで2005年が世界物理年、2008年が世界化学年、・・・であったが、本年2014年は、結晶学の父ラウエのノーベル賞受賞後100年目に当たることから世界結晶年 (International Year of Crystallography; 略称 IYCr2014) と宣言された。結晶学の国際的組織である国際結晶学連合 IUCr (International Union of Crystallography) が活動の中心となり、各国/地域の結晶学会が深く関与している。我が国では IUCr の窓口である日本学術会議と日本結晶学会が連携して各種のイベントを行いつつあるが、結晶学に深い関係を持つ中性子回折・散乱、X線 (放射光) 回折・散乱、電子線回折・電子顕微鏡などの関連団体も、それぞれの分野で IYCr2014 に賛同した活動を行っている。

日本中性子科学会でも IYCr2014 の目的に賛同して、いくつかの企画を立てている。そのうちのひとつが学会誌「波紋」の中性子結晶学特集号の発行であり、夏〜秋に会員のみならず、会員以外の人達・団体・機関などにお届けする予定である。本記事はその前触れとして、我が国の中性子結晶学の発展を概観するものである。なお、学会誌「波紋」の今年の第4号 (11月号) から表紙に IUCr がデザインした IYCr2014 のロゴを印刷してあることにお気づきのことと思う。

1932年にチャドウィックによって発見された中性子が結晶によって回折される現象はすぐに観測されたが、同じ粒子である電子線回折がすでに知られていたため、当時それほど驚きを持たれなかったのかも知れない。実際に有用な中性子回折手段として定着するには安定した中性子源としての研究用原子炉 (研究炉) の出現を待たなければならなかった (1944年)。しかし、我が国での原子力研究は第2次世界大戦の影響により欧米に比べて15年程度遅れてスタートしたため、中性子結晶学に役立つ中性子源としての研究炉はようやく1960年に実現した。それ以降の我が国における中性子源の発展は、原子炉だけでなく、我が国がパイオニアとして主導した加速器を利用した中性子源が加わり、今や世界を牽引している。図1にそれら中性子源の発展を示し、これに沿って中性子結晶学の発展を紹介する。

なお、日本結晶学会が IYCr2014 を記念して鋭意編集集中の「日本の結晶学 (続編) 第一部」[1] に、藤井、神山、新井が中性子結晶学の記事を執筆しているが、本誌はそれらの情報をもとにしているので、より詳しくは同書を参照されたい。また、本記事中に出てくる研究者名は、OBの方々を中心とし、現役の方々の氏名は控えさせていただいていることを最初にお断りしておきたい。近い将来我が国の中性子科学の歴史的発展を振り返るときには、詳しく記録されるものと期待している。

KUR (Kyoto University Reactor) は、京都大学原子炉実験所(大阪府熊取町)が1965年に建設した大学所有としては今なお突出した5MWの研究炉であり、我が国初の冷中性子源を備えてユニークな活動を行った(一部現在も稼働中)。汎用的な中性子回折装置の他、独自のアイディアに基づく装置を備え、最盛期には8台が稼働していた。誘電体の相転移の研究(渋谷巖, 岩田豊ら), 磁気構造解析(阿知波紀郎ら), 極冷中性子発生とそれを利用した基礎物理研究(宇津呂雄彦ら)やスパミラーなどの先駆的な中性子光学デバイス開発(海老沢徹ら)に特徴があった。この原子炉は高濃縮ウラン燃料を使用していたが、2006年から4年間かけて低濃縮ウラン燃料に切り換え、以来1~5MW運転を続けている。先進的な光学デバイスやイメージングの開発研究等が精力的に行われており、比較的弱い強度の中性子源を挑戦的な開発研究にうまく生かしている。また、人材育成のための施設としても有効利用されている他、J-PARC, JRR-3, SPring-8等との相補的利用施設としての役割分担を志向している。

ここで我が国の原子炉中性子利用に大きなインパクトを与えた日米協力事業について触れておく。1980年代に入ると日米科学技術協力事業「中性子散乱」が文部省・科学技術庁と米国エネルギー省の間で始まり、我が国の研究炉の数十倍の中性子束を誇るブルックヘブン、オークリッジ両国立研究所のそれぞれHFBR(60MW), HFIR(85MW)両研究炉を利用する機会に恵まれ、我が国の中性子散乱研究は質的・量的に大きく飛躍した。この国際事業では、研究成果の創出のみならず人材育

成にも大きく貢献し(白根元, 星埜禎男, 國富信彦, 山田安定ら), 今なお継続中である。

初期に導入される研究炉は一般的に中性子散乱に代表されるビーム実験の他に、アイソトープ製造や材料照射も行える多目的なものが多い。しかし、各々の分野の研究が高度化すると専用の研究炉建設の要望が高まるのが世の常である。前述の米国の高束中性子炉HFBR, HFIRは1960年代終わりから稼働し、引き続いて欧州では1970年代に世界最高性能のHFR研究炉(58MW)がILL(仏)に建設された。このような欧米の勢いに圧倒された我が国の研究者から新型炉建設の声が高まった。KUR-II号炉の建設計画も持ち上がったが、地元の了解が得られず断念した苦い経験もある。一方、この声に応じて原研がJRR-3を改造することを決断し、1985から5年かけて建設(改造)した。

改造JRR-3は、出力は2倍の20MW, 本格的な冷中性子源を備え、その冷中性子利用のためにガイドホールを新設し、設置可能な装置台数も炉室と合わせて約30台と飛躍的に拡大し、1990年に稼働を開始した。関係者は、これにより世界のトップに肩を並べたと高揚した気分を味わった。図2は最近の中性子散乱装置の設置状況を示しているが、原子力機構JAEA(旧原研)が18台、大学側が13台(物性研9, 東北大理1, 東北大金研2, 京大原子炉1台), 連携重点プロジェクトが1台を保有している。この中には、大学からの概算要求で整備した装置の他に、科研費などの大型外部資金(野田幸男, 清水裕彦)を獲得して建設されたものもある。

図3 改造JRR-3の利用実績(人・日)を原子力機構JAEAと大学別に示す。1990年に運転を開始してから利用者は急増し、その後はほぼ安定した定常状態に達していたが、東日本大震災(2011.3.11)以来全面的に利用が停止し、ユーザーが大打撃を蒙っている様子が見て取れる。(資料提供: 松江氏@JAEA研究炉加速器管理部)

改造 JRR-3 の最大の特徴は、冷中性子の利用が可能になったため高分子の形状や金属集合組織の情報を得るための小角散乱装置、さらにスローダイナミクスを観測できるスピンエコー（好村滋洋・武田隆義ら）を含む非弾性散乱装置が整備されたことであった。これによりそれまで外国の施設に頼っていたソフトマター研究が盛んになり、中でも高分子分野が盛り上がり（山岡仁史、橋本竹治、梶慶輔、野田一郎ら）、現在では申請課題の 1/4 を占めるに至っている。改造後に新たに設置された装置については、各機関並々ならぬ工夫を凝らして建設したが、原研では産業利用も視点にいった残留応力測定装置（森井幸生・皆川宣明）、独自に開発した世界初の中性子イメージングプレートを利用した生体高分子構造解析用カメラ（新村信雄）を設置した。一方、汎用の三軸型分光器は、日本のお家芸でもある磁性体・強相関電子系研究に最適なツールとして、炉室内に 3 台、ガイドホールに 4 台が設置された（山田安定、遠藤康夫、飯泉仁、舩橋達ら）。ちょうど 1986 年に銅酸化物高温超伝導体が発見された時 JRR-3 は改造中であったため、我が国で作製された良質の試料を用いた実験は前述の日米協力プログラムを通して実施された。もちろん JRR-3 が 1990 年に再稼働しても高温超伝導ブームはますます高まっていたが、他にも我が国で開発されたマルチフェロイック物質における磁性・誘電性の研究、我が国で発見された無機物質初のスピンパイエルス物質 CuGeO_3 の格子・スピン系の研究（西正和ら）、また低次元磁性体や量子スピン系の研究のため、偏極中性子の偏極を 3 次元的に制御・解析できるクライオパッドと呼ばれる分光器（加倉井ら）が開発された。

このような画期的なハード面の整備に並行して利用制度のソフト面では、全国共同利用の拠点としての物性研に附属中性子散乱研究施設が新設され（1993 年）、翌年には山田科学振興財団の土地寄付により東海村内に職員のオフィスとユーザーの共同利用宿舎が完成した。これは「施設職員・ユーザー一体となって実験現場で研究する環境整備（ホームタウン）」という星埜禎男（物性研）の 30 年来の夢が実現したものである。一方原研においては、2000 年の J-PARC プロジェクトのスタートが契機となり、2004 年に中性子利用研究センターが創設された。現 J-PARC センターの一部や先端基礎研究センター等の他部署からのスタッフが集まり、JRR-3 の定常中性子と来るべき J-PARC/MLF のパルス中性子の相補的利用を目指したものであった。その後 J-PARC は独立したセンターとなったが、2005 年の原研とサイクル機構の統合を機会に、中性子利用研究センターは発展的に解消し、新生した原子力機構（JAEA）の量子ビーム応用研究部門の一部となり東海地区での中性子利用研究の一翼を担っている。

この改造 JRR-3 の利用がいかによりユーザーから待ち望まれていたかを如実に表したデータを図 3 に

示す。これは上述の JAEA（旧原研時代から）と大学別の装置利用者数の実績を人・日の単位で表したものである。1990 年以前のデータは区別せずに書かれているが、両方で 1,000 人日程度であったものが、開始から 5~6 年で 16,000 人日まで急増している。そして 2010 年には 20,000 人日を超える最大利用者数を記録したが、2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災により JRR-3 は運転を停止した。その後 JAEA は全力を挙げて被害箇所の修復を終えているが、3 年経過した今も停止したままであり、2013 年 12 月に原子力規制庁が制定した研究炉の安全基準による審査を待っているところである。図 3 に示す実施した課題の利用者に対して、実際には約 1.5 倍の申請があることから、JRR-3 に対するユーザーの利用希望がいかにより高いか、逆に国際的な競争の真ただ中にいるユーザーが JRR-3 の運転停止によりいかによりダメージを受けているかを理解することができる。1 日も早い運転再開を強く望むものである。

3. 加速器利用中性子結晶学

加速器を利用した中性子散乱は比較的新しい手法である。研究用原子炉を用いた中性子源の強度が頭打ちする中で、短期間の間に、第一世代型の施設（北大、東北大核理研など）から第二世代型（KENS, IPNS, LANSCE）、第三世代型（ISIS）を経て第四世代（SNS, J-PARC）に入り、今ではいくつかの分野で原子炉を用いた中性子散乱を凌駕するまでに成長している。そこに至るには諸先輩方の長い努力の積み重ねがあり、世界結晶年を機会に振り返ってみたい。

パルス中性子を用いた物質研究は、Buras ら[3]が原子核物理分野で用いられていた飛行時間法（TOF 法）を、Al や Pb の粉末試料から中性子回折パターン取得に用いたのが最初である。パルス中性子源としては、当初、定常炉の中性子線をフェルミ型チョッパーによりパルス化した中性子を用いたが、その後、ロシア（旧ソ連）Dubna のパルス炉 IBR のパルス中性子を用いた[4]。IBR は高速中性子パルスを繰り返し発生させる小型のパルス炉（平均出力 1kW）である。Buras らの研究に触発され複数の研究が登場した。電子リニアックを使ったパルス中性子源では後述する核理研と同時期に、Moore ら[5]がニューヨークの Rensselaer 工科大の LINAC を用いて NiO の粉末回折を行ったが、Rensselaer 工科大のグループの研究が続くことはなかった。

パルス中性子のデータが出始めると、従来の方法と比較して長所・短所が議論されると共に、複数のパルス中性子源計画が登場した。例えば、0.5 MW のパルス炉計画（欧州原子力共同体 EURATOM の SORA 計画、1964 年頃、イタリア）や 0.5 MW Linac Booster 計画（電子リニアック＋核分裂増倍装置、日本）等がある。SORA 計画等、調査費もついて相当議論されたものもあったが、IBR-2 以外はどれも実現には至らなかった。当時

は定常炉を用いた中性子散乱が確立されつつあり、ILL の世界最大の原子炉 HFR (58MW, 1972 年) が建設される直前であったが、それに比べて技術的な課題が多く、定常炉データに匹敵する線源にはならない、と判断されたためである。定常炉を用いた中性子散乱が ILL や BNL (米国ブルックヘブン国立研究所) 等を中心に発展していく中でパルス中性子源を続けることが容易ではなかったと推測する。したがって、定常炉を用いた研究が学術的成果をあげていく中、パルス中性子の様々な技術開発を先導し陽子加速器を用いたパルス中性子源 (核破砕型中性子源) に繋げ、膨大な量のデータの蓄積を通じてパルス中性子の将来に道を拓いたことは、核理研とそこに集まった研究者たちの大きな功績である。以下、まず、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の中性子科学研究施設 (KENS) がスタートするまでの核理研を中心とした開発研究について触れる。

日本では 1960 年代はじめより石川義和らを中心にパルス中性子源の重要性が認識され、積極的にいろいろなアクションが取られてきた。木村一治は電子リニアックを用いた (γ , n) 反応によるパルス中性子の発生と散乱研究を計画し、1967 年に核理研で 300MeV の電子リニアックを稼働させ、渡辺昇、富吉昇一らと、Pb をターゲット、水をモデレータとして熱中性子を発生させ 1967 年末に最初の実験を行った [6] (50 Hz, 中性子発生数: 約 4×10^{12} 個/秒)。

Cu 単結晶のブラッグ反射の測定を皮切りに、Fe, Al, Cu の多結晶回折実験、磁気回折実験を行った [6]。続けて、自称デバイシェラーカメラ (粉末回折装置) を製作して、金属多結晶や Fe_3O_4 , $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, MnP 等の粉末試料の粉末回折パターンを得て、強度や測定時間、分解能等について詳細な検討を行った [6, 7]。この装置 (図 4) は散乱角 90° と 30° 方向に、デバイコーンに沿って各 8 組の BF_3 検出器を備えており、その形状から後に J. Carpenter から“木村スプートニク”と呼ばれた [1, 7]。木村スプートニクを調べてみると、現代でも通じる設計思想がすでに反映されている点に驚かされる。一方、炉物理と称して減速材の熱化過程を調べる実験を精力的に行い、その結果を他の回折法と比較して議論している点でも敬意を禁じ得ない。この研究は後に TOF 法のプロファイル関数として世界的に知られた池田-カーペンターの式に繋がった。

1970 年代に入ると、手法開発に加えて物質科学研究の比重が増す。東北大内部のみならず外部にも共同利用に供され、利用者の要求に応えるために第二実験室に 9 本の専用ビーム孔 (うち 1 本は垂直方向) が設けられ (図 5)、単結晶回折装置、デバイシェラーカメラ、全散乱装置、準弾性散乱装置、チョッパー型分光器、フィルター型分光器、結晶アナライザー分光器等が設置された。これらのうち、回折装置を用いた初期の研究にはシリコン単結晶の禁制反射の観測 (新村信雄ら)、Cu-Mn

図 4 “木村スプートニク”と言われた世界で初めての本格的パルス中性子粉末回折計。

系の短範囲規則散漫散乱の観測 (山口貞衛・平林真ら), TiNi のマルテンサイト変態の構造研究 (松本実・本間敏夫ら), Mn_3Si , FeSb , MnGaGe の結晶・磁気構造等 (富吉昇一・渡辺浩ら) がある。1975 年にはパルス中性子の発生と同期して電場を変化させ、 NaNO_2 の NO_2 基の分極反転に伴うブラッグ反射強度の時間変化を数ミリ秒の時間分解能で捉えようとした意欲的な研究が行われた (新村信雄ら)。この手法はパルス中性子を用いた最初の実時間測定 の例として国内外のレビューや本で紹介された。その後、液晶の電界印加効果、液体金属の過冷却状態からの凝固過程の観測等に応用されている。

図 5 1977 年頃の核理研第 2 実験室の配置。

TOF 法は広い Q 領域で多数のブラッグ反射を一挙に測定できるので粉末回折に適している。さらに、加速器駆動パルス中性子源と組み合わせることで強い短波長中性子が得られるので、(Q , E) 空間の E 積分経路の問題を除けば全散乱測定に適している。(Q , E) 空間の E 積分経路の静的近似の観点から、散乱飛行長 $\ll$ 全飛行長の設計が考え出され、24 本の ^3He 検出器を持つ全散乱装置が作られ、液体等の静的局所構造解析に威力を発揮した。Ga, Rb 金属の液体構造, Br_2 , D_2O , CCl_3 等の分子の形状や大きさ、硝酸塩等の熔融塩のイオン間距離, PdSi, NiGe 等、様々な非晶質合金の構造研究が行われた (鈴木謙而・三沢正勝ら)。

核理研の弱いビームでは非弾性散乱は困難であったが、1969 年にはすでに逆フィルター法による

非弾性散乱の測定が開始され、 NH_4Cl の分子回転のスペクトルが得られたことで、手法によっては非弾性散乱が可能であることが示された。逆フィルター法を用いた研究としては TaH_x , VH_x 等の水素の局在モードの研究が知られている。逆フィルター法はエネルギー分解能が悪く、それを改善するためにクリスタル・アナライザー法が開発され、KENS の分光器 CAT に繋がった。一方、1969 年にはフェルミ型チョッパー (3000rpm) を製作し、チョッパー型分光器による非弾性散乱実験が行われたが、成果は得られなかった。チョッパー型分光器は KENS を経て J-PARC で花開くことになる。

前述の大型パルス炉計画や電子リニアックを用いた Fission Booster 計画 (加速器駆動未臨界高速パルス炉) 等が頓挫する中で、陽子シンクロトロンからのビームを利用して核破砕 (スポレーション) 中性子源を作る計画がアルゴンヌ国立研の J. Carpenter らにより模索され、1974 年 ZING-P (200MeV), 1977 年 ZING-P' (500MeV), 1982 IPNS (800MeV) が実現した。日本では 1972 年頃、渡辺昇や石川義和らが ZING-P 計画に触発されて、高エネルギー物理学分野で計画されていた KEK 陽子シンクロトロンの ブースターシンクロトロンを利用した核破砕中性子源を検討し KEK に提案した。定常炉計画との競合の中で厳しい局面もあったが、交渉の末、核破砕中性子源は KEK のプロジェクトとして予算が認められ、KEK、東北大理学部、金研等のメンバーが建設や機器開発を分

図 6 1998 年頃の KENS 実験室の配置。

担した。熱中性子源としては室温のポリエチレン、冷中性子源は北大で実績のある固体メタンが採用された。3 年の建設期間を経て 1980 年 6 月 18 日に世界最初の本格的利用施設 KENS が初ビームを発生させた。KENS は 20 Hz, 500 MeV で運転され、最高出力 6mA, 3 kW であった。

KENS には熱中性子ビームライン 9 本、冷中性子ビームライン 4 本が設置され、最初の 5 台として、小角散乱装置 SAN, 全散乱装置 HIT, 偏極冷中性子散乱装置 TOP, 集束ミラー逆転配置型分光器 LAM, マルチ結晶アナライザー分光器 MAX が建設され、続いて偏極熱外中性子分光器 PEN, 単結晶回折装置 FOX, 粉末回折装置 HRP, MRP 等が建設・運用された。

図 7 (左) J-PARC/MLF の中性子実験装置レイアウト, 陽子ビームラインで分割された第 1 実験ホール (上) と第 2 実験ホール (下)。右の写真は、対応する現在の装置設置状況 (2014 年 1 月)。

SAN は世界最初のパルス中性子小角散乱装置であったが、後に、広い Q 領域が利用できるというパルスの特徴を活用した中性子小角／広角回折装置 SWAN ($Q \approx 0.006 - 20 \text{ \AA}^{-1}$) が建設された。これは KENS が最初に打ち出した考え方で、原子構造～ナノ構造までの幅広いスケール構造を持つ材料研究に威力を発揮するため、現在ではパルス中性子の小角散乱装置や粉末回折装置の多くで採用されている。SAN では合金の相分離過程、スピンガラス転移、パーキンソン病に関連のある UCH-L1 蛋白質の構造変化 (内藤幸雄ら)、ヘモグロビン蛋白質の階層構造、種々のカーボン材電極への Li の侵入等の研究が行われた。一方、HIT 及び後継機である HIT-II は、液体や非晶体、ナノ結晶分野の静的構造研究で数多くの成果を上げ、KENS でもっとも成功した装置のひとつである。SWAN と HIT で培われたノウハウが J-PARC の全散乱装置 NOVA の設計に引き継がれている。ここに現在の J-PARC/MLF 施設のプロアレイアウトを紹介しておく (図 7)。

日本の粉末中性子回折は、木村スプートニック (最高分解能 $\Delta d/d = 1.4\%$) 以降進展がなく、高分解能化に移った世界の趨勢と比べて大きく遅れていた。そこで、アルゴンヌ国立研の 2 台の粉末回折装置 SEPD, GPPD 並の分解能 (最高分解能 $\Delta d/d = 0.3\%$) を持つ HRP を設計し (渡辺昇・浅野肇)、1984 年に設置・運用した。HRP は小さな検出器 12 本を持つだけの簡単な装置であったが、1987 年 3 月に起きた高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ の構造決定レースでは、西川哲治 KEK 所長 (当時) の決断で加速器を臨時運転し構造解明を成功させた。その後の高温超伝導フィーバーで多くの酸化物超伝導体の室温構造決定に貢献したため、パルス中性子粉末回折の名を揚げることに繋がった。一方、強度的には世界トップとの差は 50 倍に達していたため、分解能を落とさずに検出器立体角を増大させる方策として世界初の位置敏感型検出器を敷き詰めた高分解能粉末回折装置 Vega を開発し、超伝導フィーバーが一段落した 1993 年に HRP と入れ替えた。さらに飛行距離を 40m に延ばし分解能をさらに向上させたのが文部省 COE プロジェクトとして採択された Sirius である。この装置は一次元位置敏感型検出器を敷き詰めた 3m^2 の巨大な検出器バンクと世界ではじめて 30m にも及ぶスーパーミラーガイド管を採用し世界第 2 位の分解能を実現し、アルゴンヌ国立研の Jorgensen から "state-of-art powder diffractometer" と呼ばれた。Sirius は J-PARC に設置された材料構造解析装置 iMARERIA、超高分解能回折装置 SuperHRPD のプロトタイプとなった。Vega や Sirius では、酸化物超伝導体や強相関物質に加え、マルチフェロイック物質、リチウムイオン電池材料、水素貯蔵材料等と対象を広げ、その場引張り応力下での残留応力測定やパリ・エジンバラセルを用いた 10GPa での高圧回折実験等も実施した。J-PARC ではそれぞれ蓄電池研究用の特殊環境回折装置 SPICA、工学

回折装置 TAKUMI や高圧下回折装置 PLANET に発展している。

KENS では新しい非弾性散乱装置が開発され物質科学に貢献した。LAM 型分光器は井上和彦 (北大) が開発した集束ミラーを用いた逆転配置型分光器が元になっており、エネルギー領域に応じて LAM-D (数 10meV)、LAM-40 (数 meV)、LAM-80 (数 μeV) 等が次々と建設、運用された (井上和彦・鬼柳善明ら)。LAM-D ではアモルファス氷等の振動状態スペクトルの測定や結晶場励起の測定、LAM-40 ではアモルファスの低エネルギー励起や吸着表面における分子運動等、LAM-80 では γ -ピコリンのトンネル励起の測定等が知られている (池田宏信ら)。LAM-D と LAM-40 がカバーする分野は J-PARC のチョッパー分光器 (HRC, 四季, AMATERAS) に引き継がれたが、LAM-80 は J-PARC の DNA に発展している。一方、原子核の共鳴吸収を利用する検出器を用いて数 eV～数 10 eV の高エネルギー分光を行う RAT により中性子コンプトン散乱法の開発が行なわれた (池田進)。

チョッパー型分光器は、広い運動量・エネルギー空間において非弾性散乱測定を一挙に行えるという特長を持つ。KENS は日英協力事業の下で、当時世界最大の核破砕中性子源 ISIS (英国) にチョッパー型分光器 MARI を建設し、大学共同利用として利用者に提供し、大きな成果を上げた。又、INC を開発し、結晶場励起、磁気励起等で成果を上げた。これら培われた技術と利用研究を背景に J-PARC での成果創出に期待が集まっている。

熱外中性子散乱は、原子炉に比べて熱外中性子の強度が強い加速器駆動パルス中性子源で有利だが、遮蔽や分解能の確保などで様々な困難がある。Gd や Sm 等の吸収が大きい物質の構造や共鳴散乱等が可能であり、核理研で $\text{Gd}_{0.85}\text{Th}_{0.15}$ 等、KENS の EXCED で GdB_6 等の測定が行われた。共鳴散乱を利用した新しい可能性の開発は J-PARC に持ち越されている。その他、反射率計 ARISA、偏極中性子反射率計 PORE、微量核種の定量等を行う DOG が開発・利用された。25T でのパルス磁場下での回折や磁氣的フラクタルの励起の研究等も実施された。

前述のように、施設外からのボトムアップ提案が KENS 成立の契機であり当初の KENS のスタッフが 4 名と少なかった (現在 15 名) ため、石川義和らは、所属大学や研究機関の壁を打ち破って KENS グループを構成し、装置建設や機器開発を協力・分担するとともに、KENS グループを中心とした半内部主導型の共同利用体制の構築を目指した。これを具体化したのが A1, A2, B1, B2 型共同利用である。これにより、多くの装置の開発や建設、維持、高度化、及び利用者支援に大学等の研究者が参加する KENS システムが生み出され、2006 年には約 200 件/年の大学共同利用研究課題を実施した。KENS は 2008 年 5 月の J-PARC の初ビームを前に、2008 年 3 月、28 年に及ぶ運転を停止した。

KENS の建設直後から様々な次期中性子源計画が登場したが、J-PARC に繋がった計画が JHF (大型ハドロン計画) である。JHF は、陽子加速器を機軸にした 4 つのアレナ (施設)、N アレナ (中性子科学研究)、K アレナ (原子核・素粒子研究)、M アレナ (ミュオン科学研究)、E アレナ (短寿命核研究) からなる学際的プロジェクトである。一方、旧日本原子力研究所 (現 JAEA) から中性子科学研究センター構想が提唱され、2 つの将来計画が並立、厳しい不況の中、中性子研究者の夢が一時遠ざかったかのように見えたこともあった。しかし、両計画の統合が 1998 年初頭頃から水面下で検討されはじめ、同年 2 つの計画統合が決断された (統合計画と呼ばれた)。平成 13 年度からはじまった省庁再編の象徴として、大強度陽子加速器の建設を合同で推進しはじめ、旧原研と高エネ機構は計画推進体制の下に中性子グループを組織し、その下に中性子分光器検討班を組織した。

中性子グループ分光器検討班は 2 組織の外部のパワーユーザも加わって何度か予備検討案を明らかにしてきたが、2000 年 10 月 5-6 日には 160 名を超える関係者が一同に会して深夜まで検討会を開催、各分科会で提案された 45 台の分光器を図面上に配置する作業が行われた。この検討会は J-PARC 中性子実験装置のスタートとなった日として記憶されている[9]。分光器検討班は J-PARC の成立と共に物質・生命科学実験施設 (MLF) の分光器サブグループとして再組織化された。

高エネ機構と旧原研では、当初実験装置が予算化されておらず、分光器検討班がリストアップした装置の中から 10 台をプロジェクト装置として位置づけ、両組織が協力・分担して建設を促進した。又、真剣な外部資金獲得努力の結果、8 台の装置が建設された。中性子実験装置建設の許認可は、これまですべて委員会 (現在は中性子実験装置部会) への装置提案と審議により行われている。一方、中性子科学会では、どのような装置をどういうスケジュールで建設すべきかについて特別委員会で議論を行い、グランドデザインを策定したが、現実の建設は、ほぼそれに基づいて行われてきている。一方、茨城県は J-PARC を核として、つくばと並ぶ新たな科学技術拠点の形成を目指すため、2001 年度に「サイエンスフロンティア 21 構想」を策定し、具体策として、産業利用を主目的とする 2 台の「茨城県中性子ビーム実験装置」(iMATERIA, iBIX) を建設し運用を行っている。

MLF は 2008 年 5 月 30 日、最初の 3GeV 陽子パルスビームを水銀ターゲットで受け、発生した中性子を中性子源特性試験装置 (BL10) で計測することに成功した。最初中性子ビーム発生時、5 台の実験装置が稼働していたが、その後急ピッチに実験装置整備が進み、現在では 23 ビームポート中、19 ビームポートで実験装置が稼働している。

目標ビームパワーは 1 MW であり、KENS の 300 倍、核理研の数万倍に達する。さらに、3 種の特徴ある減速材、ビーム輸送系、実験装置や検出器

に至るまで、様々な技術開発や工夫が随所に取り込まれているが、紙面の都合で紹介できない。実験課題公募・審査やその実績などについては、web ページ (<http://j-parc.jp/MatLife/ja/index.html>) 参照していただきたい。

4. 中性子ユーザーコミュニティ

前述の加速器を用いたパルス中性子施設は、我が国の誇る世界初の技術の集積であるが、1970 年代の初めから中性子ユーザーの関心を集めた。そして 1980 年代になると原子炉と加速器を用いるユーザーの声を結集して施設側に伝えるための仕組みの必要性が指摘され始めた。物理学会の年次大会や春季あるいは秋季大会 (現在の呼称) のたびに中性子インフォーマルミーティングが開かれた。教授クラスの大部に交じって助手クラスの若手が意見を述べて議論し、その後の懇親会への参加は楽しみの一つでもあった。一時、「中性子利用は原子炉か、加速器か？」という二者択一的議論が起こった時、石川義和 (東北大理) による “Every neutron is a good neutron !” という名言は広く世界に知られている。

1985 年から始まった JRR-3 の改造を機に、このインフォーマルミーティングに集う中堅若手らが自発的に全国的な枠組みでの活動を開始した。すなわち、中性子の専門家から初心者に至る人たちが飢えていた情報を提供する媒体として、まず情報誌「波紋 Neutron Network News」をボランティアで発行し始めた (1991 年 1 月)。黄色を背景に、吉田町子 (山田安定紹介) の毛筆による題字の下に、黒の切り絵を配した表紙のインパクトは強烈であった (図 8)。この切り絵は、当時筑波大学大学院在学中の中井祐輔によるもので、毎号異なったデザインはそれだけで読者の楽しみを誘った。そしてその 2 年後の 1992 年 12 月には、コミュニティの学術発表・討論の場としての「第 1 回中性子シンポジウム」が開催された。そして、半年の準備を経て 1993 年 4 月に全国ユーザーと施設側が結集した組織として「中性子研究連絡会」が設立された。この中性子研究連絡会は約 8 年続き、ほぼ学会と同じような活動を展開したが、まだ同好会の域を出ておらず、新しい会員の参入 (特に産業界から) を躊躇させる面もあった。

そのような折に、現在の J-PARC 建設計画の本格的な議論が始まり、プロジェクトが公式にスタートするのと同期して、広い分野の中性子ユーザーの声を組織的に結集すべく、正式な学会「日本中性子科学会」が設立された (2001 年 4 月)。機関誌もデザインを一新したが「波紋」の名称を引き継ぎ年 4 回の季刊として発行を続けており、2014 年で 24 巻目となる。また、成果報告・情報交流の場である年会も 14 回目に達し年々盛況を呈しており、最近では施設側の協力を得て中性子産業利用促進のための産業利用ブースを設けて産業界からの相談窓口としているほか、広く中性子利用を国民にアピールすべく市民公開講演会も開

いている。2013 年末で 610 名の会員を擁しているが、潜在的にはその 2～3 倍の会員がいてもよいと思われる。原子炉にしる、加速器にしる、施設建設のみならず運営にも多額の費用（国民の税金）を要するので、学会ならびに施設側の積極的なアウトリーチ活動は欠かせない

図 8 中性子研究連絡会時代の情報誌「波紋」。右の表紙が現在の日本中性子科学会のロゴとして採用されている。

参考文献

- [1]日本の結晶学（続編）（日本結晶学会編集，2014 年発行予定）。
- [2]日本の結晶学—その歴史的展望—（日本結晶学会編集発行，1988 年 1 月）。
- [3]B. Buras, J. Leciejewicz: Nukleonika 8, 75-7 (1963).
- [4]B. Buras, J. Leciejewicz, W. Nitc, I. Sosnowska, J. Sosnowski, F. Shapiro: Nukleonika 9, 523-37 (1964).
- [5] M. J. Moore and J. S. Kasper, J. H. Menzel : Nature 219, 848-849 (1968).
- [6]木村一治，菅原真澄，小山田正幸，窪田建雄，富吉昇一，渡辺昇，武田征一：核理研研究報告 Vol. 1 No. 1, 55 (1968).
- [7] M. Kimura, M. Sugawara, M. Oyamada, Y. Yamada, S. Tomiyoshi, T. Suzuki, N. Watanabe, S. Takeda, Nuclear Instrum. Methods, 71, 102-110 (1969).
- [8]石川義和，渡辺昇：日本物理学会誌 28 巻，461 (1973).
- [9]J-PARC 分光器検討（JAEA 東中科プリント 13-2）