

次世代研究用原子炉検討特別委員会

中間報告

—J-PARC/MLFと共存するJRR-3の役割と重要性—

1. はじめに
2. JRR-3 と J-PARC 両方があることで生まれる戦略的意義
 - 2.1 未知の信号の発見とその詳細の追跡
 - 2.2 長期的視点での研究戦略と高い機動力での研究推進の両立
 - 2.3 先端装置での研究と、次世代測定技術開発の両立
 - 2.4 中性子実験の絶対的ビーム時間不足の解消
3. 今後定常炉が重要となる分野
 - 3.1 中性子ビーム実験
 - 3.1.1 超小角散乱、小角散乱
 - 3.1.2 分析・イメージング
 - 3.1.3 非弾性散乱及び偏極
 - 3.1.4 核データ
 - 3.2 中性子ビーム実験以外の利用
 - 3.2.1 NTD シリコンの生産
 - (1) 技術的観点
 - (2) 生産量について
 - (3) 流通と市場について
 - (4) 価格について
 - 3.2.2 RI 製造

4. 産業利用の視点からの分析

4.1 中性子産業利用の市場規模

4.2 中性子を利用する産業分野と定常中性子源の重要性

5. 人材育成と教育

5.1 人材育成と教育の意義

5.2 人材育成と教育それぞれの実際

5.3 定常中性子源（原子炉）での人材育成と教育の特徴

5.4 今後の教育・人材育成と他の大型施設との関連

6. 第1部まとめ

次世代研究用原子炉検討特別委員会メンバー

鬼柳 善明（北大工）：委員長

岩佐 和晃（東北大理）

上坂 充（東大、原子力関係）

大山 研司（東北大金研）

加倉井和久（JAEA）

川端 祐司（KUR）

佐藤 卓（物性研）

柴山 充弘（物性研）

清水 裕彦（物構研）

林 眞琴（茨城県）

目時 直人（JAEA）

オブザーバー 海老原 充（首都大学），小泉 智（JAEA），原田 秀郎（JAEA），
吉澤 英樹（物性研），脇本 秀一（JAEA）

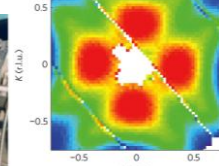
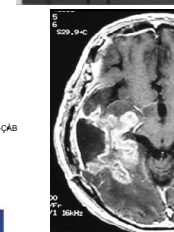
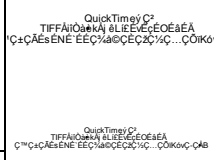
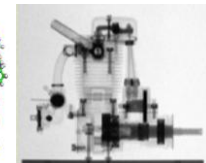
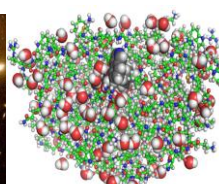
1. はじめに

人類の継続的発展に必要な中性子科学の将来あるべき姿を、小型から大型中性子源施設までを見据えた次期研究用原子炉の在り方を明らかにすることが本委員会の最終目的である。本報告書は、そのベースとなる、中性子科学の社会への貢献、JRR-3 がこれまで果たした役割と、J-PARC と共存する JRR-3 の意義について検討し、第 1 部としてまとめたものである。

人類は自然を探究して様々な現象を発見し、その原理を解明して積極的に利用することで繁栄してきた。中性子科学は科学技術の発展に大きな貢献をしてきた(表 1)。物質や空間の起源と成り立ちを研究する素核・宇宙論から、多様で複雑な物質を研究対象とする物質科学に至るまで、自然科学は広い空間及び時間(エネルギー)スケールを取り扱う。中性子は、①量子力学的波動性、②物質透過力と原子核変換能力、及び③長寿命中性素粒子、という特長を併せ持つことから、自然科学全般にわたり極めて重要かつ多くの情報をもたらす。近年その産業利用も急激に増加している。「中性子科学」—中性子が関わる研究分野全体—の重要分野である物質科学は、多様な物質の構造や運動、そして励起状態を明らかにし、物性の中に潜む物理機構を解明し、有用な性質の応用を目指す。例えば高温超伝導の機構解明や鉄より強いプラスチックの開発に役立っている。中性子照射による原子核反応と放射化は、元素・同位体分析や放射性同位元素の生産、半導体シリコンのドーピングに役立ち、またある種の癌治

表 1 中性子科学の学術分野、テーマ、及び対象

学術分野	テーマ	対象
原子力 基礎物理	核化学, 核データ, 素核, 宇宙	重力, 素粒子, 宇宙, 原子核,
物質科学	構造, 電子物性, 磁性, 強相関, 超伝導, 化学, 表面	固体, 液体, 非晶質, ソフトマター, 高分子, 溶液, 液体, 反応
工学	材料, 機械, 建築,	鉄鋼金属, 光学材料, 磁性体, 超伝導, 薄膜, エネルギー関連, 触媒, 繊維, 石油化学製品, 自動車, 航空宇宙, 船舶, 鉄道, 構造物, 複合材料, 新素材
生物, 農学 生体物質	構造生物学, 生体機能, 植物, 分析	タンパク質, 遺伝子, 生理活性物質, 食品, 植物, 農林水産資源
医学, 薬学	放射線治療	癌, 脳腫瘍, 医薬品,
その他	考古学, 地球科学, 天文, 環境, 芸術	隕石, 岩石, 微量有害物質, 歴史的遺物, 絵画, 彫刻



療に極めて有効である。強い透過性を示す中性子による透過撮像は X 線では観察できない機械、建築物、生物などの内部構造や物質・磁場・温度分布を可視化し、高速の動画撮影まで可能である。中性子寿命や電気双極子能率など中性子の性質を解明することで新物理の構築に役立つ。またこれら最先端の研究に必要な高度な中性子利用技術の開発も重要な研究テーマである。

中性子科学の推進には大強度の中性子源が必要で、現在まで人類が持つ最強の中性子源＝「原子炉」を用いた研究が盛んに行われている。一方近年極めて強いピーク強度のパルス中性子源が建設されている。我が国では中規模研究炉 JRR-3 が 1990 年臨界に達し、最近世界最高ピーク強度のパルス中性子源 J-PARC/MLF が稼動し、いずれも茨城県東海村に存在している。中性子科学は今後大いに発展が期待されている。定常でもパルスでも中性子と物質の相互作用は同じで、JRR-3 と J-PARC/MLF では時間平均中性子強度に顕著な違いはないが、それぞれの特徴を生かした利用方法によって得られる情報が異なる。これらの大型施設は多額の予算が必要なため、将来の中性子科学の有用性と拠点施設の必要性に関して十分議論を行い、分かりやすく説明する義務がある。

JRR-3 の長期安定運転がもたらした中性子科学の発展は目覚ましく、高エ研の KENS 及び京大原子炉 KUR とあわせて国内の中性子利用研究のコミュニティの拡大と発展に大いに寄与した。JRR-3 は臨界後 20 年を経て高経年化対策や、J-PARC/MLF の稼動と小型研究炉の停止など状況の変化の中、国際競争力を維持するためにグレードアップの必要性が高まっている。これまでも大学や JAEA で装置の高度化に関する検討が行われており、一部は実現している。

最近、日本原子力学会特別専門委員会がまとめた報告書は、我が国における研究炉の利用分野は (1)エネルギー利用、(2)産業利用と学術利用、(3)人材育成であり、多様化する「中性子ビーム利用」と「照射利用」の両者について、関係各分野及びコミュニティの意見を踏まえてそのニーズを明確にする必要性を指摘し、将来必要な研究炉の提言を行った。また、日本学術会議の研究用原子炉のあり方検討小委員会では、研究炉の現状と利用の意義、科学技術政策上の位置づけを議論し、研究炉利用における課題と対策を提言している。共通的・基盤的なインフラである研究炉の利用ニーズについては将来的にも適切に対応する必要がある、学術・科学技術研究、原子力研究開発、産業利用、それぞれの観点から、総合的かつより定量的な検討の必要があるとしている。

このような状況を踏まえ、日本中性子科学会は次世代研究用原子炉特別委

員会を設置し、定常中性子源 JRR-3 におけるサイエンスと装置、次世代研究用原子炉の在り方について検討を行った。その結果、以下の結論を得るに至った。

- (1) 定常中性子が不可欠な研究分野（小角、分析イメージング、非弾性及び偏極、核データ測定）が存在し、定常中性子源は将来も必要である。
- (2) パルスと定常両方の存在によって研究効率が著しく改善される場合が多く、それぞれの特徴を理解して両者を使うスタイルが今後国際的に主流となる。ビーム時間の絶対的不足を補うため複数の施設が必要である。
- (3) 定常中性子が不可欠な研究分野において産業利用が非常に活発に実施され、爆発的に発展している。すなわち定常とパルス両方が必須である。
- (4) JRR-3 では共同利用を中核に最先端の研究を行う場で人材育成が図られ、中性子利用の発展のため J-PARC とともにこの体制が継続すべきである。

以下、検討項目順に説明する。

2. JRR-3 と J-PARC 両方があることで生まれる戦略的意義

JRR-3 と J-PARC はともに世界レベルの中性子施設であると同時に、異なる研究視点と特色をもっている。それぞれに独自性をもつ JRR-3 と J-PARC/MLF が同時に存在していることは、いわば中性子科学分野において我が国が複数の目を持ったことに等しく、我が国の科学の地平が大きく広がっていくと期待できる。さらに、両施設それぞれの特色を生かした異なる切り口の実験をひとつの研究に集約して推進することで、JRR-3 だけ、あるいは J-PARC/MLF だけでは得られない先鋭的な研究を進めることができる。両施設が生み出す国際的競争力は、両施設が徒歩圏内に隣接して存在しているという環境によりいっそう際立ってくる。以下では、現在の日本が JRR-3 と J-PARC/MLF を同時にもつことで得られる国際的競争力について議論する。

2.1 未知の信号の発見とその詳細の追跡

学理の探求は、新現象の検出または新概念の確立と、それに続く精密化及び体系化の組み合わせで進展する。具体例として、高温超伝導体の研究を振り返る。高温超伝導の本質解明としてスピン・格子励起の役割が重要であるとい

う認識がもたれているが、それは広い Q - ω 空間での測定により超伝導体特有の特異な磁気励起が発見されたことから始まり、その後の系統的で緻密な実験研究により明らかになった。この経緯を仮に現状の施設に当てはめると、新発見段階では、広い探索領域にわたって見落としが少ないパルス中性子源(J-PARC)装置群が、強力なツールとして活躍するであろう。その後、精密化及び体系化段階では、その新発見を様々な研究視点から徹底的に調べることが要求されることとなり、定常中性子源(JRR-3)の存在が大きな意味をもってくる。それは、研究者それぞれの着眼点に応じて重要なポイントを選択し、目的に最適なスキャン方法を見いだして集中して観測する上で、定常中性子源装置(原子炉三軸分光器)が優れた能力をもっているからである。

一方、新物質研究で国際競争に打ち勝つためには、逆の流れが求められる。新物質研究では、結晶構造、磁気構造解析やダイナミクス測定を迅速に行い、荒削りでもその全体像を世界に先んじて把握する必要がある。パルス中性子源装置の多くは、分光実験だけ、回折実験だけという具合に、特定の目的に最適化されている。これに対して定常中性子源装置は、広い領域の測定効率是最適化された分光器に比べて劣るが、測定手法の切替や組合せを迅速に行なう機動性という特長を持っており、この特長が新物質研究の場では極めて重要になる。弾性および非弾性の両方を設定を変えことなく測定できる原子炉三軸分光器は、その好例である。定常中性子源を用いて研究方針を確立し、最適のパルス中性子源装置を用いるという連携によって、国際的競争力の維持が可能になる。

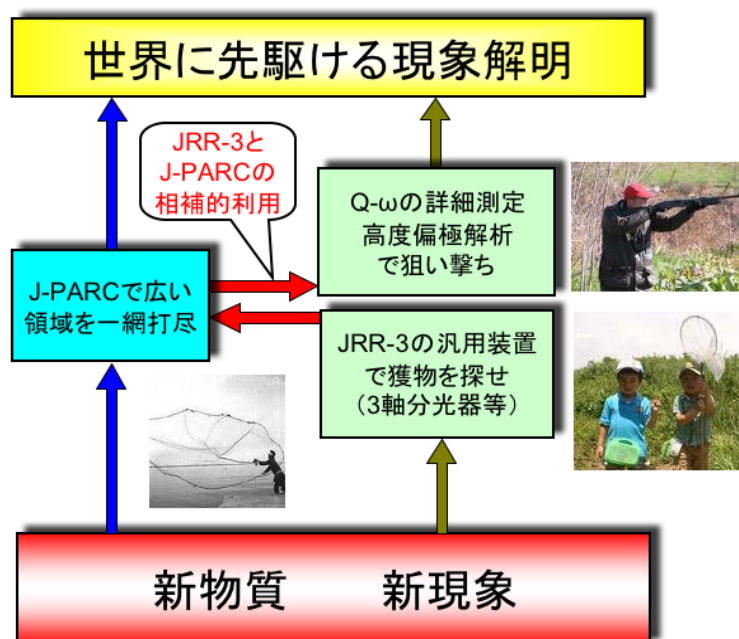


図1 JRR-3 と J-PARC
による相乗効果

定常中性子源とパルス中性子源の両方を状況に応じて生かせば、様々な局面で瞬発力の高い研究推進が可能になり、国際的な研究競争において優位に立てる。特に定常とパルス両施設が戦略的に運営され、片方での発見をすばやく他方の施設での実験に展開できるような統一的な研究推進を実現することで、日本は、新現象の発見力とその徹底分析力の両方を背景に、学術水準と国際競争力を維持できる。

2.2 長期的視点での研究戦略と高い機動力での研究推進の両立

世界的な研究競争のなかで日本が勝ち抜いていくには、二つの視点が重要である。すなわち、長期的視点にたった戦略的な研究の推進と、激変する世界の科学の動向にすばやく対応した機動力あふれる研究の二つであり、どちらも欠かすことができない。中性子が大型施設を必要とする以上、戦略的、長期的視野をもった研究と施設、装置運営が必要なのは当然であり、中性子科学全体の長期的戦略について日本中性子科学会において具体的な議論が始まっている。個別の装置建設に関しても、比較的多額の費用がかかる J-PARC/MLF では、長期的な視点にもとづき J-PARC/MLF 全体での集中的な議論が行われる。一方、我が国には JRR-3 があることから、瞬発力、機動力の高い研究推進も同時に可能である。なぜなら原子炉施設では、新規装置の建設が資金、建設規模、建設の自由度の点で容易なためである。しかも、ガイドホール装置であれば研究終了後の撤去も比較的容易である。したがって、新たな視点での実験に必要な装置を緊急で設置することは、原子炉ならば十分可能である。実際、JRR-3 ガイドホールでは中性子導管を巧妙に分岐し、物性科学用の複数の新装置を設置することに成功している。

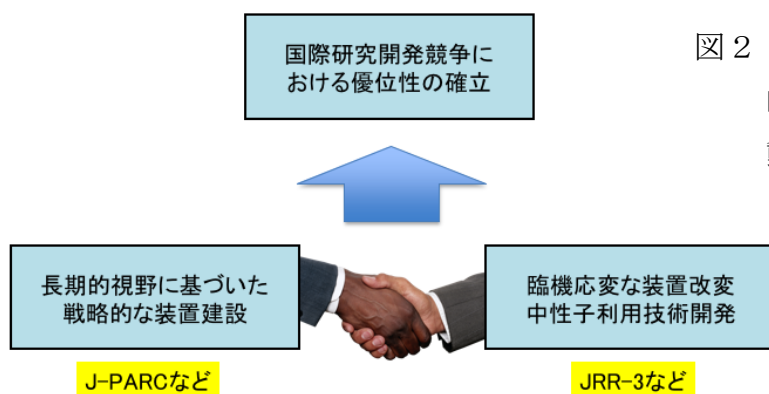


図2 JRR-3 と J-PARC の長期的視点での研究戦略と機動的な研究推進の両立。

すなわち、JRR-3 と J-PARC/MLF 両方の存在により、日本は長期的視点での研究戦略推進と高い機動力での研究推進の両立が可能となる。これは日本がもつ物作りの圧倒的な実力と融合して、国際的研究競争において重要なアドバンテージとなる。

2.3 先端装置での研究と、次世代測定技術開発の両立

未来のサイエンスのためには、常に新しい画期的な実験技術の開発が必要である。中性子の要素開発は原子炉の単色ビームからスタートし、白色中性子での動作またはパルス用に動的に駆動させる技術開発が、定常中性子からパルス中性子へと発展する経過をたどる。原子炉装置はその軽量性、ポート増設と装置の設置と撤去の容易さから、中性子実験技術開発に対して即応性が高い。デバイスや要素技術開発の場合、主力装置の横や後ろに補助装置を設置すれば、主力装置の利用を妨げない。実際、JRR-3 ガイドホール T1-3 ポートにおいて、技術開発用の小型補助装置の建設が現在進行中である。このように、原子炉とパルス両方を持つことは、日本が科学と産業において長期的に世界トップの地位を守る上で重要なアドバンテージで、非常に大きなメリットである。

このような体制は基礎物理学の研究にとっても極めて重要である。中性子は微弱な相互作用に対する高い感度を持ち、現在の物理学の基礎となっている標準理論を超える新たな物理を研究する上で、欠かせないツールである。その代表例は電気双極子能率であり、中性子寿命や短距離重力の研究など、他のツールでは研究が困難な高精度測定を可能とする。しかし、高精度測定では大量の低速中性子の運動を精密に制御する必要がある。瞬間的に高輝度が得られる

パルス中性子源は最高精度を達成するための手段になるのだが、一方でパルスの時間構造に対応した精密制御を保証する追加技術が必要となる。また新手法の原理実証研究は、試行実験を繰り返す必要があり、信頼度の高い長期安定性を持つ原子炉中性子源による新技術開発及びその性能研究は欠かせない。

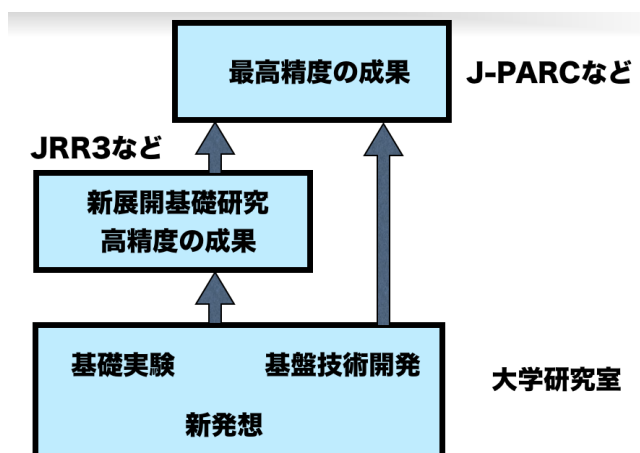


図3 先端研究を支える次世代測定技術開発

以上のように、JRR-3 と J-PARC/MLF を両方もち我が国では、世界トップの研究と同時に、次世代の研究を生み出す新技術を同時進行で着々と進めることができる。これは日本が科学と産業において長期的にも世界トップの地位を守る上で重要なアドバンテージであり、JRR-3 と J-PARC/MLF の両方をもつ非常に大きなメリットである。

2.4 中性子実験の絶対的ビーム時間不足の解消

定常炉(JRR-3)とJ-PARC/MLFが両方必要と主張する最も単純な理由は、中性子の装置とビームタイムの絶対的な不足である。我が国では論文一編の出版に数年を要する場合が少なくなく、多くの研究者が複数の海外施設の同時利用を余儀なくされている。J-PARC/MLF が 200kW で稼動し、多数の供用実験が開始された現状でさえ、JRR-3 の課題申請は全体的に増加傾向で、その競争率は平均 1.5 倍、装置によっては 3 倍に近い。この背景に (i) 研究対象(物質及び分野)の多様性と(ii)装置ビームタイムの不足と利用者の拡大がある。

材料科学では機能性材料それぞれの構造や機能とメカニズムが重要であり、例えば電池材料では様々な候補物質の探索、構造決定や動作環境におけるその場観察が行われている。タンパクなど生体関連物質の基本構造は X 線を用いて膨大な数の物質について研究されているが、プロトン位置も含めた全構造を決定すべき物質は数限りなく存在する。固体物理学は物質固有の性質よりもむしろ一般的な新概念の構築を目指す。例えば高温超伝導体の発見は、膨大な数の化合物の研究蓄積によって達成された。高温超伝導体は 4 種類以上の元素からなるペロブスカイト構造を伴う銅酸化物であり、一定の不純物を混ぜた場合にのみ超伝導が生じる。構造のバリエーションや不純物量による電子数のコントロールが高温超伝導体の理解に重要であり、膨大な研究が必要であった。

研究分野も多彩で、例えば元素分析は、岩石や隕石の分析に応用する地学・天文学、産地同定等に応用する農学、有害元素による公害問題にとりくむ環境、医学や原子力分野からの利用がある。イメージングも同様に、機械、建築、材料、生物、考古学、芸術分野と、国内に一台しか存在しない装置が多くの分野の研究者によって利用されている。各分野に割り当てられたビーム時間は年間 1 ～2 週間と非常に限られ、健全な発展が困難な状況が継続している。

先進国では幅広い利用分野が開拓されていて、多数の利用者に対応できるように複数の施設が運転されている。例えばドイツはベルリン炉 (BENSC)、

ミュンヘン炉（FRM-II）に加え、ラウエ・ランジュバン研究所（ILL）に参画している。アメリカでは大型施設だけでオークリッジ研究所の高フラックス炉（HFIR）、国立標準研究所（NIST）の研究炉、パルス中性子として SNS 及びロスアラモス研究所にも中性子源（LANCE）が存在する。常に国内のどこかで中性子を利用できる状況が激しい国際競争を勝ち抜くため必要である。

3. 今後定常炉が重要となる分野

3.1 中性子ビーム実験

定常中性子源の特性から考えて、以下の測定手法とこれらを用いたサイエンスの分野において定常中性子源が今後重要さを増す。

- (1) 超小角散乱、小角散乱
- (2) 分析・イメージング
- (3) 非弾性散乱、特に偏極と低エネルギー励起
- (4) 核データ測定

3.1.1 超小角散乱、小角散乱

中性子小角散乱は、試料の前方方向に飛び出す散乱を、低角度で計測する分光法の総称であり、対象となる空間スケールはメゾスケールである。この手法では鉄鋼材料に代表されるアロイ系における組成揺らぎや、構造欠陥の評価が可能である。溶液中のタンパク質の立体構造や超伝導体における磁束格子などの秩序構造の評価にも優れる。また身近に接する液晶、ゲル、コロイドなども高分子をはじめとするソフトマターが取りうる特異な物質形態であるが、これらも小角散乱の研究対象である。これらは現代の衣食住生活と密接に関わり、その機能にはメゾスケールにおける構造と運動が大きく関与している。

以下、ソフトマターを念頭に記述する。ソフトマターの機能を考えるときソフトマターを構成する分子の集合構造、特に階層構造の理解と制御が重要である。例えばポリエチレンの分子配向を制御して高配向繊維をつくることで、軽く、しかも鉄よりも強い引っぱり強度を示す材料を実現することができる。この場合、結晶化を伴う分子集合体の形成メカニズムを解明する際にも中性子小角散乱による構造解析の結果が決定的な情報となった。このように小角散乱を用いることで、今後も基礎研究と産業利用の両面から発展し、新たな高機能

性材料が生み出されていくことであろう。

中性子小角散乱は運動量遷移（または波数）として $q=0.01 \text{ \AA}^{-1}$ の近傍を計測する。この値は利用可能な入射中性子の最長波長 (λ_{\max}) と、検出可能な最小散乱角 ($2\theta_{\min}$) の組み合わせから決まる。 $q < 10^{-3} \text{ \AA}^{-1}$ の超小角散乱領域では、最長波長の時間平均中性子束で測定効率が決まり、単色中性子を利用する定常炉が有効である。一方、小角から中角 ($q \geq 0.01 \text{ \AA}^{-1}$) にかけては広い波長帯に対して TOF（飛行時間）法を用いるパルス中性子源の利用が有効である。

中角・高角の領域では水素由来の非干渉性散乱が干渉性散乱に拮抗する。パルス中性子源の小角散乱装置は、非干渉性散乱の懸念が少ないハードマターのマルチスケール計測に威力を発揮する。他方、ソフトマターに対しては偏極解析法によって非干渉性散乱を定量的に評価し除去する事が有効である。

ソフトマター材料や生体関連物質などの物質群は、種類の異なる様々な分子の集合体として機能を発揮する場合が多い（多成分分子集合体）。その構造解析ではコントラスト変調法を用いて各成分に由来する部分散乱関数を分離する事が有効である。従来の重水素置換法に加えて、動的核スピン偏極法を利用したコントラスト変調法は今後の発展すべき課題である。このような先端的な試みは単色中性子を前提とする定常炉 JRR-3 において展開するのが有利である。また種類の異なる分光法を複合して同時計測する課題も遮蔽体が簡便な JRR-3 において展開するのが容易である。例として中性子小角散乱装置と MIEZE 型スピンエコー法を組み合わせた高エネルギー分解型中性子小角散乱装置や、小角散乱とラジオグラフィーを組み合わせた同時計測装置がある。JRR-3 における先行例を J-PARC/MLF に波及させ、研究の多様性に応える。

このような考察のもとで JRR-3 と J-PARC/MLF において、表 2 に示す中性子小角散乱装置（一部高角まで測定可能）が設置された。それぞれの測定範囲や役割分担は表 2 及び図 4 に示すとおりである。両施設を相補的に利用した物質研究は大きな飛躍が期待される。

3.1.2 分析・イメージング

中性子を用いる元素分析法である中性子放射化分析法には、中性子ビームを利用する方法と、例えば原子炉内で中性子を照射して行う方法がある。前者では即発 γ 線を利用するのに対して、後者では中性子捕獲核種が壊変する際に放出する γ 線（壊変 γ 線）を利用する。現在、研究用原子炉が中性子放射化分析法で用いられるほとんど唯一の中性子源と言って良い状況である。

表2 我が国における中性子小角散乱装置

施設	名称	英語表記	測定波数 (\AA^{-1})	備考
JRR-3	汎用型中性子小角散乱装置	SANS-U	$2 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-1}$	物質レンズ
	集光型中性子超小角散乱装置	SANS-J-II	$2 \times 10^{-4} \sim 1$	物質レンズ, 偏極
	二結晶ボンゼ・ハート型極小角散乱装置	PNO	$2 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-4}$	
	小型集束型中性子小角散乱装置	Mf-SANS	$7 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-1}$	
J-PARC/	大強度型中性子小中角散乱装置	TAIKAN	$5 \times 10^{-4} \sim 20$	磁場集光, 偏極
MLF	高強度全散乱装置	NOVA	$1 \times 10^{-2} \sim 100$	
	茨城県材料構造解析装置	iMATERIA	$1 \times 10^{-2} \sim 70$	

Instruments which can measure small-angle scattering

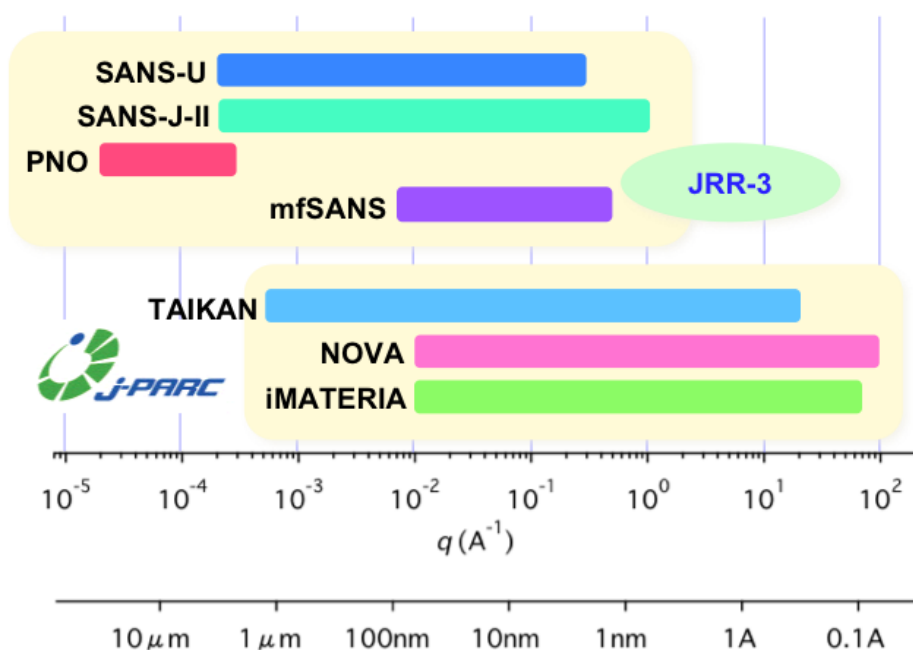


図4 我が国における中性子小角散乱装置とその測定波数領域

即発 γ 線分析では JRR-3 のような高フラックスの定常中性子源が有利であるが、中性子放射化分析では、分析対象の元素組成の不均一性を考慮した結果、好ましいフラックスの大小が決まるため、高、中、あるいは低フラックス ($10^{12} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 程度かそれ以下) の照射場を準備する必要がある。東大原子力専攻を窓口とした共同利用が主たる利用先で、平成 23 年度は約 150 件の実験課題が予定されていた。

即発 γ 線分析を含めた放射化分析一般の利用は、分析対象試料及び分析実施機関の両面で非常に多岐にわたる。その理由は、これらの手法によって分析対象試料を破壊することなく、多元素を一度の操作で定量出来るという利点に求められる。原子核の励起に用いる中性子、また、励起後の壊変に伴うシグナルとして発生する γ 線は、ともに物質中での透過能が高く、表面分析にとどまらず全試料分析が出来ることが大きな特徴である。即発 γ 線分析を利用すると、例えば考古学的試料の様なものでも破壊せずに分析でき、また、照射後の残留する誘導放射能レベルが低いので、分析後に試料に対する制約が生じない。

J-PARC/MLF のようなパルス中性子源を用いた中性子放射化分析に対しては現時点では積極的な評価をするためのデータがなく、分析法としての評価は出来ない。研究用原子炉を利用する従来の放射化分析手法を用いる場合、即発 γ 線分析はパルス中性子を用いても可能であるが、壊変 γ 線を用いる方法をそのまま J-PARC/MLF で行う事は期待出来ないであろう。今後、共鳴吸収にあわせた中性子エネルギーを用いて分析感度を特異的に高くするなど、パルス中性子の特徴を生かした分析法の開発、実用化が期待されている。

中性子イメージングは、X 線では透過できない厚い金属などでできた大型機器、また、X 線では感度が極めて小さい水素を含んだものの透過撮像ができるユニークな方法として有用な情報を提供してきた。これまでも、気液二相流研究や植物内水分挙動研究のような基礎研究に利用されるばかりでなく、燃料電池内水分挙動、エンジン内オイル・燃料挙動観察等の産業利用にも活用されてきている。さらに、建築分野や宇宙開発にも利用が進みつつあり、社会生活に関連したさまざまな分野での貢献が広がっている。

中性子源としては、これまで原子炉や加速器をベースにした定常中性子源が使われてきた。定常中性子源でのイメージングでは、透過強度に基づく濃淡で画像を取得し、内部構造を調べるために用いられる。そのためには、中性子フラックスが安定であることが必要である。高中性子束定常中性子源は、空間高精細度撮像に非常に有利であると共に、毎秒数百コマを撮像する動画撮影が可能である。特に動画は、数十Hzでの繰り返しを行うパルス中性子源では原理的に撮像が不可能である。一方、中小型原子炉や小型加速器中性子源は、比較的容易にアクセスでき、オンデマンドで測定できるというメリットを生かして、新しい分野の測定や高精細測定が必要でない産業利用などの分野で広く利用されている。

最近、パルス中性子を用いたエネルギー分析型のイメージングが開発され、これまでとは異なった物理量などのイメージングができるようになってきており、新しい展開が進んでいる。この手法では中性子断面積のエネルギー依存性を詳細に解析して、結晶組織構造、歪、元素、温度、磁場などの情報を空間依存で画像化できる手法であり、従来の定常中性子源のイメージングとは一線を画しており、今後さらに応用分野が拡大していくと思われる。

以上のように、定常中性子源による内部観測やパルス中性子による物理情報などのイメージングはそれぞれの特徴を生かして、基礎的な研究から産業応用まで広い分野でその威力を発揮していくと考えられる。

3.1.3 非弾性散乱及び偏極

物質科学では、巨視的な数の原子の集合体が、巨視的であるが故に示す普遍的な基本原理とその階層性を探求する。さらに物質の巨視的な性質の解明は、その実用材料としての応用への道を開く。物質の性質の解明には、物質が使用される温度領域、即ち室温程度のエネルギー状態の理解が欠かせない。物性研究に供される種々の量子ビームの中で、液体・固体中の典型的な原子間隔と同程度の波長をもち、かつ室温程度のエネルギーを同時にもつものは中性子線だけである。さらに、中性子散乱は軽元素（水素等）や磁気モーメント（スピン）への感度が高い。このため、他の手法では困難な物質中の軽元素や磁気モーメントの室温程度のエネルギーを持つ運動を詳細に調べる事が可能である。これらの特徴こそ、中性子非弾性散乱が物質科学研究に必要不可欠とされる理由である。現代の物質科学の主要な問題の一つに、高温超伝導等に代表される巨視的量子現象がある。その解明には、中性子非弾性散乱がもたらす低エネルギー励起（素励起）スペクトルの理解が必須であり、中性子非弾性散乱が重要な役割を果たしている。磁性体中の磁気モーメント間の相互作用の解明や、固体中のプロトン運動の観測等も、中性子非弾性散乱の最も得意とする分野である。それらは基礎的な物質科学として興味深いだけでなく、例えば磁気記憶媒体の性能向上や、高い伝導度を持つ固体電解質の開発を通じて高性能な燃料電池の実用化に寄与する可能性がある。

さて、中性子非弾性散乱では位置・時間で与えられる実空間中の情報ではなく、そのフーリエ変換である運動量（波数ベクトル）・エネルギー空間（位相空間）での情報が得られる。従って、実空間情報を直接得る為には広い位相空間中の散乱強度（動的構造因子）が必要となる。この目的にはパルス中性子源におけ

るTOF法が効率的である。特に非干渉性散乱や低次元系、粉末、液体・非晶質等、スペクトルを運動量に対して積分したデータを得る場合には顕著に測定効率が良くなる。しかし、一般的な3次元結晶試料に対しては運動量に対する積分を行う事ができない。さらに、結晶固体の持つ並進対称性から低エネルギー有効ハミルトニアンの良い量子数は多くの場合運動量であり、運動量空間の特定の領域の詳細な情報を得る事が現象解明の鍵となる場合が多くあり、そのような研究対象には特定の運動量・エネルギーを大強度で測定できる三軸型分光器による定常中性子源非弾性散乱法が適切である。例えば、原子振動（フォノン）の特定ブランチの測定による電子-格子相互作用の理解や、磁場中のスピン波の不安定化の解明、量子臨界点近傍の臨界現象の解明といった興味深い研究課題に対しては、それらが運動量・エネルギーで良く定義される1点の周りの現象である為、本質的に定常中性子源非弾性散乱分光が必須となる。

続いて、偏極中性子利用について述べる。偏極中性子は散乱断面積から磁気成分や、磁気散乱と核散乱の干渉性散乱成分だけを選別することができる唯一無二の手法である。磁気形状因子の精密測定や、磁気構造決定などに威力を発揮し、最近では物質科学の中心課題の一つであるマルチフェロイック物質の研究に非常に効果的に使用されている。原理的には圧倒的な優位性を持つ偏極中性子散乱法であるが、非弾性散乱については弱い信号強度とそれに起因するビームタイム不足により徹底的な活用がされていない。今後、偏極中性子散乱に使用できるビームタイムが増加すれば、磁気励起を格子励起から区別する実験や、水素を多く含む物質から干渉性散乱成分を区別する実験が可能となり、さらに、非弾性領域での磁気-核散乱干渉項やスピンの非対角相関などの新しい物理量の観測が期待され、物質科学の研究推進に大きく貢献するであろう。偏極中性子の効率的な発生方法は単色（および低エネルギー）中性子に関しては確立されている。従って、定常中性子非弾性分光は偏極実験の容易性の観点からも優位と言える。

ソフトマターや生体の機能は、物質固有のダイナミクスに大きく支配されている。このダイナミクスの特徴は、空間的構造における階層性と同様に、時間的階層を有することであり、遅い時間の緩和現象の理解が機能解明に有効である。溶液中の高分子の重心拡散運動を追跡するためには、1マイクロ秒程度の観測時間が望ましい。このような要求に対して中性子スピンエコー法は非常に有効である。メザイ型スピンエコー法（フーリエ時間は λ^3 に比例）は、高い積分磁場強度と長い中性子波長を組み合わせ、遅い緩和現象を観察できる比類のない手法であ

る。是非とも国内施設に配備されるべき分光器である。定常中性子源でのスピネコー法は、ほぼ単色の入射ビームを利用する意味で技術的に簡便であり、本手法の実際的な利用という意味でも近未来の定常中性子源の意義は大きい。

3.1.4 核データ

宇宙における元素起源の解明や革新的原子力システムを開発するために、放射性核種に対する中性子核反応断面積のニーズが近年高まっている。研究炉では、 $10^{13} \sim 10^{15}$ [n/cm²/sec]という高い中性子束の照射が可能であることから、放射化法を適用することにより、半減期が短い核種の中性子核反応断面積が測定可能となる。これは、加速器中性子源に比較して、はるかに高い中性子束であり、ユニークな研究ツールを与える。

高いフラックスの原子炉中性子照射では、中性子捕獲反応で生成した核種が、照射中にさらに中性子を捕獲する反応も起こる。これが2重中性子捕獲反応である。この反応を利用すると、照射用サンプルとして準備することがきわめて困難な核種であっても、照射中に生成させることにより、その中性子捕獲断面積を導出することが可能となる。

極めて高い中性子束照射が可能な場合、3重中性子捕獲反応も利用可能となるケースが増え、原子炉中性子照射では測定可能となる核種の領域が大幅に拡張できる。さらに最近進展がめざましい加速器質量分析や多重ガンマ線分析法等の高感度分析技術を組み合わせることで、高精度測定が期待される。

核データの測定においては、半減期の違いにより、核種によって最適な照射時間が異なるため、照射場としては短時間の照射が可能な気送管照射装置や数十～数百日に及ぶ長期照射が可能な照射場を整備することも重要である。また、熱中性子断面積と共鳴積分値を分離して測定するためには、Cd または Gd 箔中でのサンプル照射が可能であることが望ましい。硬さの異なる2つの中性子場を利用する手法も有効である。高い中性子束を有する定常中性子源は、放射化法と組み合わせることにより、極めて強力な装置となる。

中性子科学の基盤データとなる中性子断面積が、核種によっては測定データ間に非常に大きなバラツキの存在することが近年指摘され、欧州のセルン研究所、米国ロスアラモス研究所などで核破砕パルス中性子源を用いた専用の核データ測定ビームラインによって研究されている。我が国でも J-PARC/MLF の中性子核反応測定装置 ANNRI による研究が開始された。

パルス中性子を用いた TOF 法により、中性子断面積のエネルギー依存性が極めて広いエネルギー範囲に渡り測定可能となる。低エネルギー領域における $1/v$ 則からのずれや、中性子共鳴情報も測定することが可能である。これらの中性子断面積微分データは、原子炉を用いた放射化法を適用して、熱中性子断面積や共鳴積分値を導出するために、必須の基礎データとなる。一方、原子炉の放射化法による測定は、絶対値測定の精度が高く、中性子断面積微分データの規格化に有効である。また、原子炉からの中性子導管を用いた即発ガンマ線分光法による測定は絶対値測定に適した強力な測定手法である。

以上 3.1.1~3.1.4 に述べた分野は、強い時間平均中性子束といった中性子源としての JRR-3 の特徴を生かした利用分野であり、分光法の特徴まで加味すると JRR-3 と J-PARC/MLF の相補性は図 5 のようにまとめることができる。

JRR-3とJ-PARC/MLF装置の棲分け/相補性

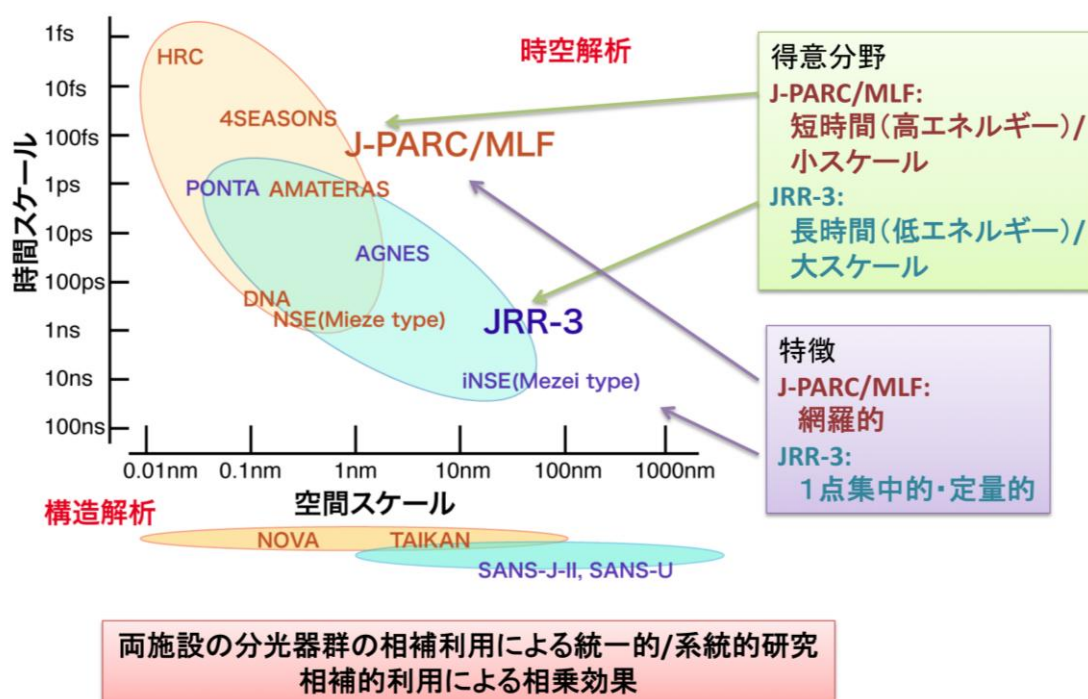


図 5 JRR-3 と J-PARC/MLF の相補性

3.2 中性子ビーム実験以外の利用

JRR-3 ではビーム実験以外の重要な利用が継続すると考えられる。

3.2.1 NTD シリコンの生産

(1) 技術的観点

中性子核変換ドーピングシリコン (NTD-Si) については、主に国内の継続的需要に応える必要があり、今後も JRR-3 の主要な利用目的の一つである。現在 6 インチのインゴットまで照射可能で、軸方向の均一性を増すため、中性子束強度の勾配が直線に近い位置で照射し、照射後一度炉心から取り出し、上下を反転させて二度目の照射を行うことによって軸方向の均一性を上げている。この取り出し反転作業のために線量が下がるまで冷却時間が必要である。

生産性の向上と作業効率化を図る目的で、連続照射の検討や自動化、線量が下がるまでの保管場所の確保などを検討したが、後述する費用その他の問題で実現していない。現在は、反転作業なしで軸方向の均一性を増す方法として、照射ホルダーと呼ばれる照射容器に中性子フィルター機能をもたせて中性子束を平坦化することを試みている。

JRR-3 で生産された NTD-Si は、品質保証の観点から半導体メーカーからの評価が高い。低価格と生産量の増加、安定的な生産が確保されるならば、十分な国際競争力を持つ。

(2) 生産量について

現在年間の生産量は約 4.5t (国際的シェア約 3%) は、作業員の増員や深夜勤務による連続照射によって、5 割程度の増産が可能である。先述したフィルターの設置によって照射時間は長くなるが、生産量増加には有利である。また、自動化や保管場所の確保、キャスクの改造等を行えば、結果的に現在の 2 倍程度 (~9t) までは生産量を増加させることができると予想されている。

また、既存の照射孔一基を Si 製造に振り向けると、さらに約 2.7t の増産が可能となる。この場合新たに照射キャスク等の設置が必要 (数億円規模) となる。さらに増産するには世界的に主流となりつつある 8 インチサイズのインゴットの照射が必須であるため重水タンクの交換が必要である。さらに自動冷却設備を整えれば、生産量を韓国の HANARO 炉(15ton)以上にすることは可能である。ただし、そのためには 100 億円の単位の必要経費が見積もられている。

(3) 流通と市場について

照射 Si 生産事業は放射線利用振興協会が実施しており、放振協から半導体

メーカー、そしてデバイスメーカーという流通経路をとっている。エンドユーザとしては、大電力用には電機メーカ（新幹線、電力プラント用）など、また EV、HV 車用として自動車メーカーがある。前者は耐圧 2000V 以上のため、均質性の高い照射 Si が用いられる。ただし現在は SiC 等を用いたデバイスの研究開発が進行中である。後者については耐圧 2000V 以下で均質性の要求は前者ほど厳しくなく、ガスドーピングも視野に入れた検討を開始している。

（４）価格について

シリコン照射料金は 7970 円/時間と設定され、照射価格は実際の照射時間によって計算し、照射体積の換算は現実の状況に合わせるように細かく計算して、価格が著しく国際競争力を失わないように努力をしている。生産量が倍になった程度では新規に必要な設備投資の償却は困難である。連続照射の実施に設備投資は不要だが、作業員増員と深夜勤務について考慮する必要があり、必ずしも価格の低下に直接結びつかないことが検討の結果明らかになっている。

3.2.2 RI 製造

JRR-3 では工業用の ^{192}Ir 及び ^{60}Co 、医療用に ^{192}Ir 及び ^{198}Au を生産しており、全て株式会社千代田テクノルによるものである。工業用 ^{192}Ir と医療用 ^{198}Au については、国内需要の 100%を生産しているが、工業用 ^{60}Co と医療用 ^{192}Ir は、採算性の問題で比放射能の小さなものが少量生産されている。

非破壊検査用の工業用 ^{192}Ir については、年間約 1000 個（平成 22 年製造実績約 600,000,000MBq）の需要が安定して存在する。医療用 ^{192}Ir 線源は放射線治療がラルスにシフトしているため需要は縮小傾向にある。医療用 ^{198}Au 線源は年間約 2000 個（平成 22 年製造実績約 2,000,000MBq）供給している。需要も供給も現在のところ安定していて今後もこの状況が継続すると予想される。工業用 ^{192}Ir は以前 JMTR で生産されていたが、JMTR 停止に伴って JRR-3 で生産されてきた。JMTR 再稼働後は JMTR で製造することが考えられる。

ラルス線源として用いられる RI (Ir) はより線量が高い必要があり、JRR-3 における製造は困難で、長い照射時間（2-3 サイクル）が必要となる。また、世界的に注視されている $^{99\text{m}}\text{Tc}$ について、JRR-3 での製造を検討している。現在世界で $^{99\text{m}}\text{Tc}$ は高濃縮燃料を用いた(n,f)法によって製造されているが、核不拡散防止条約、廃棄物の処分問題等から日本で当該方法を用いることは困難である。

そこで、低濃縮燃料でも製造できる(n, γ)法の検討を実施している。本方法による製造では、現在供給されているものより比放射能が低いという点とともに、Mo 吸着剤がまだ開発されておらず、技術的課題がある。

4. 産業利用の視点からの分析

4.1 中性子産業利用の市場規模

中性子の産業利用については今後大きな市場規模が予想されている。図6はJ-PARCセンターからの委託によって三菱総研が2003年に調査した結果である。J-PARC/MLFが1MWのフルパワーで本格的な運転を開始して10年後には、GDPの約10%に相当する52兆円の市場規模に相当する製品に貢献するものと予測している。J-PARC/MLFの供用が2008年に開始されて3年しか経過していないが、産業界からの課題申請は全体の約40%を占めている。JRR-3でも産業界が利用可能なJAEAが設置した装置の約15%を産業界が利用している。中性子産業利用は潜在的な需要がまだ多く存在し、産業向き装置を設置することでさらに利用が増加することが期待される。産業利用を推進する上でも、定常及びパルス中性子源の特徴を考慮し、それぞれの中性子源に設置された装置の利点を生かして最大限の成果を得る基本的戦略の重要性は同じである。

中性子の応用分野と市場規模



(J-PARCセンターからの委託による三菱総研の調査結果)

市場規模:52兆円=GDPの約10%

図6 中性子の産業利用による市場規模 (J-PARC/MLFが1MWの本格運転を開始して10年後の予測)

4.2 中性子を利用する産業分野と定常中性子源の重要性

表3に中性子を利用する産業分野とその適用対象、直近の重点課題、そして測定方法をまとめた。表中下線を引いた箇所は定常中性子源が重要な測定方法（小角、分析・イメージング、偏極）が利用される開発項目及び製品であり、中性子利用を行う全ての産業分野において定常中性子源が重要である。

表4は、今後定常中性子源が重要となる測定方法を用いる産業分野の適用対象をまとめたものである。磁性材料の開発において、現段階では偏極技術は多く利用されているとは言えない状況にあるが、もっと利用されるべき測定手法であり、今後普及していくことが予想される。また、イメージングに関しては、現段階では機械など構造物の動作時の高速度撮影や高分解能撮影が産業利用の中心テーマであり、定常中性子源に設置された装置の需要が高い。

残留応力解析は産業界にとって非常に重要な測定手法であり、表3に示すように、多くの産業分野で利用されている。残留応力測定については、J-PARC/MLFではTOF法による測定のため、複数の回折面を同時に測定して応力を平

表3 中性子の産業利用適用対象と直近の重点課題、研究開発に利用される測定方法。下線は定常中性子源が重要である適用対象及び直近の重点課題

産業分野	適用対象	直近の重点課題	測定方法
電機・電器	<u>MRAM</u> , <u>光磁気ディスク</u> , <u>磁気記録ヘッド</u> , <u>液晶</u>	稀少元素レス高性能磁石 Liイオン電池材料	粉末回折, <u>偏極回折</u> , 反射率計
化学・繊維	<u>高分子触媒</u> , <u>機能性プラスチック</u> , <u>ゴム</u> , <u>半導体素材</u> , <u>高張力繊維</u>	<u>ディスプレイ用機能性薄膜</u>	<u>小角散乱</u> , 粉末回折, 反射率計, <u>ドーピング</u>
鉄鋼・金属	燃料電池用水素貯蔵用容器, <u>Ti-Al合金</u> , <u>磁石</u>	<u>超高張力鋼</u> , <u>燃料電池用水素貯蔵材料</u>	<u>小角散乱</u> , <u>偏極回折</u> , 残留応力, 集合組織
自動車 自動車部品	<u>エンジン</u> , <u>燃料電池</u> , 自動車部品	Liイオン電池材料	<u>イメージング</u> , <u>小角散乱</u> , 粉末回折, 残留応力, 集合組織
重工・機械	<u>発電プラント</u> , <u>建設機械</u> , <u>一般機械</u>	構造物の残留応力	<u>イメージング</u> , 残留応力, 集合組織
電力・ガス	発電プラント, <u>燃料電池</u>	構造物の残留応力	<u>イメージング</u> , <u>小角散乱</u> , 粉末回折, 残留応力, 集合組織
建設・土木	<u>コンクリート構造</u> , <u>橋梁</u> , <u>建築物一般</u>	<u>コンクリートの耐腐食性</u>	<u>イメージング</u> ,
製薬・食品 化粧品	薬品, <u>機能性食品</u>	<u>機能性化粧品</u>	<u>小角散乱</u> , 粉末回折, 単結晶構造解析

均化できるなど、JRR-3 より効率が 10 倍以上よくなると期待される。ただし、試料のセッティング（0.1mm 以上の要求精度）にある程度の時間を要することを考慮すると、さらに桁違いの効率は必要なく、J-PARC/MLF は十分実用的である。一方、JRR-3 に設置された残留応力測定装置は、空間分解能を必要とする小型部品の内部応力の測定に向いている。また、実験のしやすさや試験環境がよいため、JRR-3 は新しい測定技術や装置の開発に適している。

集合組織については、J-PARC/MLF の粉末構造解析装置を利用すれば TOF 法により多数の回折面を同時に測定できること、ならびに、非常に多数の検出器を試料の周りに配置しているため数分で測定可能で、原子炉中性子源と比較すると圧倒的に優位である。パルス中性子源において集合組織の測定技術が確立された場合には、鉄鋼メーカーから 1 日数十個というメールインサービスのような利用も期待される。

原子炉中性子源の装置には原理的な良さがあるが、産業利用を本格的に行うために測定効率の向上が必要であり、試料位置の入射中性子密度を $10^5 \text{ n/cm}^2\text{s}$ 以上にする必要がある。そのため薄い Si 膜を重ねて曲げた収束性の高いモノクロメータや、縦方向収束ラジアルコリメータの改良が必要である。検出器についても検出効率の高い、大面積の 2 次元検出器の開発が望まれる。

粉末、単結晶構造解析についても、測定及び解析手法が確立したならば、広い波数領域を効率よく測定できるパルス中性子源が圧倒的に有利である。逆に、特定の狭い観測領域に狙いを定めた測定や、装置や回折計のセッティングを試行錯誤によって変え、s/n 比をあげる限界に近い測定などでは、装置が簡単で単色中性子を用いる原子炉中性子源が有利である。

表 4 今後定常中性子源が重要となる測定方法を用いる産業分野の適用対象

定常中性子源が重要な測定手法	適用対象
小角散乱	高分子触媒, 機能性プラスチック, ゴム, 高張力繊維, ディスプレイ用機能性薄膜, 超高張力鋼, 燃料電池, 機能性食品, 機能性化粧品, ゲル
分析・イメージング	エンジン, 燃料電池, 発電プラント, 建設機械, 一般機械, コンクリート構造, 橋梁, 建築物一般
偏極回折	*MRAM, 光磁気ディスク, 磁気記録ヘッド, 磁石

*MRAM: Magnetoresistive Random Access Memory の略

5 人材育成と教育

5.1 人材育成と教育の意義

日本の社会は新しい科学の創出や技術開発によって築かれている。それらを進展させる資源としての人材、社会の継続した発展をリードする力強い人材を育て続けることが今後ますます重要になる。上述の基礎的学術分野や産業活動での中性子の利用は、欧米と比肩するアジアの一翼としての日本でも培われてきた。将来においても、広い意味での物質科学（素粒子・原子核物理学から材料科学まで）へ中性子が継続的に寄与することが期待でき、科学技術によって発展する社会の基盤としての役割を担うであろう。JRR-3 と稼働し始めた J-PARC/MLF も含めた中性子施設の充実とそれらの利用者の拡大は、中性子科学が今後我が国においてますます重要となることを明確に示しており、次世代を担う人材育成が喫緊の課題である。定常中性子源とパルス中性子源は互いに異なる特性を持っており、広い意味での物質科学を相補的に支えている。定常中性子源に精通した人材を欠くようなことがあれば、その相補性が不完全となり、得られる成果は大きく限定される。人材が欠如した場合の深刻さは、海外の定常中性子源を利用する機会が残されたとしても、それを機動力をもって使いこなし、改良を加え、新手法を開拓することによって先駆的な新発見を導く能力自体の欠如につながるという点にある。その結果、日本の研究能力は世界最先端水準を維持できなくなることが危惧される。定常中性子源による人材育成については研究環境の欠如を避けるためにも、定常中性子源そのものの機能を維持発展させる必要がある。実際に、以下で述べる中性子科学（特に原子炉でのビーム利用）および原子炉科学での人材育成と教育の実践はこれまで効果的に機能してきており、その場を失うことになれば中性子利用活動が社会的な使命を果たすことに多大な困難が生じるものである。

5.2 人材育成と教育それぞれの実際

人材育成や教育における目的と対象は多岐にわたる。科学の素養として物質の構造を明らかにする原理と手法を理系学生に授ける大学教育（主として学部、修士課程）、その中で専門的な技術として中性子を使いこなす研究者となる人材を育てる大学院教育（主として博士課程）、さらには産業での応用・開発を目指して利用分野の拡大につながる人材育成を考えることができよう。

大学は学部による専門教育と大学院における最先端の研究を通した実践教育

を行う場であり、教育と研究は不可分の関係にある。中性子科学コミュニティーにとって中核的存在である中性子源施設と大学のタイアップは中性子科学および人材教育を進める軸と見なすことができる。共同利用制度（東京大学を中心とする大学共同利用と JAEA による施設供用）では、大学が独自には所有できない大型中性子源施設に自ら実験装置を設置して研究と教育を並行することができる。特に JRR-3 における共同利用は国際的にユニークな研究用原子炉の活用制度であり、研究と教育両面で非常に高い成果をあげてきた。装置を設置して共同利用を運営する研究室、中性子を主要な研究プローブとして研究テーマや実験試料を提供するヘビーユーザー、理論的解析を行い研究の方向性を予見する研究者、そして中性子技術の開発に至るまで、幅広い人材育成にこの共同利用体制は不可欠である。実際、全国にまたがる大学の理学系・工学系・医学系・薬学系・農学系等の学部・研究科が様々な共同利用のチャンネルを通して、原子炉を利用した研究を通して学部生・大学院生の教育を実践している。東京大学物性研究所を中核組織として物性研究にウエイトを置く JRR-3 の大学共同利用に加えて、JAEA と東京大学原子力専攻が協力して運営する元素分析・イメージング・残留応力解析・照射利用の各分野での研究と教育も非常に有効に機能している。また JAEA や KUR の研究炉で発展してきたホウ素中性子捕捉療法（BNCT）による医療分野の利用も、近隣にある筑波大学などの医学系との共同利用体制が基盤となってきた。共同利用を補完する制度として、JAEA の特別研究生制度や、連携重点制度などが運用され、JRR-3 への人的交流を支える仕組みが整っていることも特徴と言える。J-PARC/MLF においても先端研究を推進しながら、また大学共同利用機関である KEK でも素粒子科学や放射光科学などを包含する体制として、教育環境は形成されている。JRR-3 においては歴史的に早い段階から中性子科学に特化しつつ、多くの外部機関との連携に基づく共同利用体制を継続してきたことが大きな特徴かつ実績であり、今後の中性子科学の発展においてもその枠組みを発展的に活用すべきであると言える。

産業界に向けた仕組みとしては、放射線利用振興協会が実施母体として文部科学省が推進するトライアルユース制度、JAEA 産学連携推進部が窓口である施設供用制度がある。前者では、企業関係者に中性子の産業利用・技術開発における有用性を体験することで理解させるため、利用法を教育し、実験を経験する機会を設けている。後者で研究開発に積極的な中性子利用に発展させることにより、実用性の高い産業利用の促進に大きな役割を担っている。

上記のいわゆるビーム利用に加えて、原子炉そのものの工学的研究開発をはじめとして、エネルギー技術に関する原子炉の人材育成も忘れてはならない。文部科学省国際原子力人材育成イニシアティブ・機関横断的な人材育成事業（平成 22 - 24 年度）にて、東京大学原子力専攻を中心に全国の原子力系学部・大学院・高専の参画のもと「大学連携型核安全セキュリティ・グローバルプロフェッショナルコース」が実施されている。そこでは、茨城大学・JAEA・東大による JRR-3 を用いた中性子計測・残留応力測定・安全・セキュリティのバイリンガル実験実習が組み込まれている。原子力安全・セキュリティの教育も全国の大学・院の日本人学生・留学生に対して実施されている。

また、日本中性子科学会、中性子産業利用推進協議会、JAEA 人材育成センターが連携して中性子利用実験基礎講座を開催し、講義と主に JRR-3 での実習を行っている。学生から企業に所属する方まで対象は広く、それぞれのレベルに合った教育・人材育成を推進する基盤として、より系統的な教育内容をそろえることが検討されつつある。KEK では中性子科学を含む教育活動として大学学部生を対象を絞ったサマーチャレンジを実施している。今後、日本中性子科学会として、これらの活動を有機的に行う体制を構築することも必要になる。

以上で述べた人材育成・教育の現状の特徴として、ひとつの原子炉という現場を非常に多角的に利用する研究・技術開発とともに人材育成活動のために余すことなく適用していることを指摘したい。さらにその活動が継続的に実施されることをひとつの機能としてきた原子炉施設を失うことになれば、技術立国としての基盤を揺るがしかねないと考えられる。

5.3 定常中性子源（原子炉）での人材育成と教育の特徴

中性子科学分野へ飛び込んでくる次世代の若手を増やすためには、大学での教育カリキュラムへの新たなアプローチが求められるであろう。現時点では個人的なつながりのもとで行われている集中講義を学会が束ねる形で組織化し、定期的に主要大学への講師派遣をアレンジすることが検討できると思われる。施設と大学のさらなる連携強化（人的交流）も有効な手だてであり、大学の教員だけでなく施設研究者が大学の教育現場を訪れる方法も考えられる。カリキュラムの充実を図るために施設と大学の共同講座を設立することによって、定常的に中性子科学分野を専攻する学生を確保するような教育拠点の拡充も不可能ではない。JRR-3 の利用では比較的に多くの中性子科学の研究・開発分野を

包含しており、豊富な教育内容を提供できるスタッフをそろえられるであろう。つまり教育的活動の基盤としての JRR-3 の特徴は、散乱・元素分析・イメージング・残留応力解析・照射利用などの多岐にわたる分野と長年にわたって確立してきた共同利用体制である。このような仕組みは次世代研究用原子炉にも適用でき、将来にわたる教育活動の基盤と位置づけられよう。

次に、現場の視点で教育・人材育成を述べたい。例えば、研究用原子炉での単色ビームを用いた分光測定装置は、中性子が散乱する原理的な過程をより端的に適用したと見なされ、そこでの実験は教育的と言える。さらに定常中性子ビーム利用の特徴のひとつは、多様な測定方法のフレキシブルな使い分けが容易であることである。低コストかつ時限的にコンパクトな装置の設置、さらにはビーム孔の下流での分岐によりビームラインを拡充することも比較的容易である。そうした環境で達成できる新しい測定技術の開発研究として、偏極中性子散乱の応用やスピンエコー法の発展を例にあげられる。すなわち原子炉中性子施設では、中性子ビームを制御するためのデバイスの製作とシステム化を現場で実践しやすい面があり、技術開発と中性子の散乱原理の教育を兼ねることができる。また、教育を主目的とする装置の設置が東北大を中心に計画されており、利用者の裾野を広げ、支援体制を支える人材の育成を実践することは、原子炉定常中性子源の特徴を生かした利用の一端である。

中性子科学の専門家として研究者を育てる観点について述べる。中性子散乱における幾何学的条件、スピン状態、および中性子エネルギー遷移などを目的に沿ってチューニングすることにより、測定効率や感度が格段に向上し、新たな現象が発見される。研究者養成では、実験手法の鉄則を習得しながら経験を積むための試行錯誤が何よりも重要である。このような機会は、単なる実習では得られない高い教育効果をもたらす。そこでは教育的配慮から追試や失敗も許容し、施設稼働の効率を考慮しただけでは割り当てにくいビーム時間を必要とする。継続性のある中性子科学の社会への寄与に対する投資として、このような側面を持つ教育の意義を理解しなければならない。産業利用における人材育成としてのトライアルユースにも似た側面があると思われる。

中性子科学に加えて、JRR-3 で展開されている原子力安全・セキュリティの教育も合わせて強化・継続されなければならない。原子炉物理・設計・安全の実践的教育は JAEA の臨界実験装置を改造して重点的に実施されることが検討されている。また次世代軽水炉の燃料・材料研究の人材育成は JMTR 再開後

向こう 10 年推進されることがあげられ、組織的な取り組みが推進されている。

これらの様々な分野での原子炉利用に対する人材育成・教育活動を継続的に研究開発活動と並行させているからこそ、研究用原子炉利用による社会の発展への寄与が担保されている。したがってこの体制をその時代に対応するよう改善させて組み込んだ次世代研究用原子炉の運用が強く望まれる。

5.4 今後の教育・人材育成と他の大型施設との関連

現代科学では高度に分化と階層化が進んでおり、科学技術動向の全体を俯瞰してその中での中性子利用の位置を見極める人材、ビーム制御や測定デバイスなど専門分野に精通する人材、個々の物質科学テーマを追究する人材など、役割分担が求められる。中性子利用に関わる部門を組織立て、それをベースとして研究推進支援と次世代の養成を並行する施設のあり方も模索されるべきで、中性子利用のアクティビティをキープする基礎になると思われる。JRR-3 では装置を保有する大学など外部グループも含めてこれまで教育に実績を積み重ねてきたが、J-PARC/MLF においてもこうした人材育成・教育の機能を持たせることは検討に値する。定常炉とパルス双方の中性子施設を駆使する人材の輩出が中性子科学の社会への寄与であるならば、両施設が協力して人材育成に務めることが理想である。双方の施設が各々の特質を発揮して具体的な人材育成システムの構築を考慮し、それぞれの役割についての議論・検討は J-PARC/MLF の装置群が完成し、定常的な利用が推進される段階で見極められてくると思われる。これが一段階ステップアップした人材育成・教育として想起される。この観点での検討には、前述の原子力安全・セキュリティに関する人材育成・教育が原子炉で実施されるべき対象であることも合わせて考慮する必要がある。つまり、次世代研究炉で中性子科学・原子力安全・セキュリティの分野における教育と人材育成を結集することがひとつの展望となるであろう。

国内での中性子ビーム利用には、量子ビームプラットホームのもとで放射光やミュオンなどと横断的に活用することによる効果も期待されている。例えば、放射光実験装置と原子炉中性子実験装置の中には、共通の測定原理に基づきつつ、それぞれの特徴を生かした測定ができるものがある。世界でも希有の環境である量子ビーム施設群全体を見渡す広い視界を持つ人材を育成することで、現象を多角的にとらえた研究者の輩出が可能になり、物質科学での諸問題を解明するブレークスルーを生み出す力となろう。

上記のような細分化した科学と多様なプローブを提供する大型施設の相乗効果に対応できるきめ細かい人材育成・教育システムを、現在の共同利用と施設供用に基づく体制を原点として発展的に構築することを検討し、効果的な人材育成の場として次世代原子炉が利用できることを期待する。

6 第1部まとめ

次世代研究用原子炉の在り方を議論するためのベースとなる、中性子科学の果たす役割、また中性子源としての定常中性子源 JRR-3 とパルス中性子源 J-PARC が併存していることの重要性について議論を行なってきた。各章での議論の内容は下記のようにまとめることができる。

第1章では、中性子科学が科学・技術にこれまでどのように貢献したか、次期研究炉に関する国内の検討の状況など本検討委員会における検討の背景について概観している。さらに、J-PARC ができた後の JRR-3 の必要性について述べ、以下の章における詳細記述につなげている。第2章では、JRR-3 と J-PARC の両方があることの重要性を研究戦略、利用ビーム時間などの観点から議論を行っており、両中性子源が存在することが必要であると結論づけている。第3章では、定常炉で今後行うべき実験を明らかにするために、パルス中性子源を利用したものと比較しながら、それぞれの実験の特徴を明らかにしている。検討はビーム実験として超小角・小角、分析・イメージング、非弾性散乱、核データについて、ビーム実験以外として、NTD シリコンや RI 製造の重要性についても言及している。第4章では、産業応用の視点からの検討も行っている。産業応用分野での中性子の貢献、また、原子炉中性子源が向いている測定などを整理した。第5章では、人材育成について広い視点から検討し、大学と研究機関の連携、それに伴う大型施設の利用を通しての人材育成の有用性、原子炉を利用した人材育成の特長を明らかにしている。

これらの議論を通じて、最終的に第1章の最後に書いた結論が得られた。最後のまとめとしてそれを再掲する。

- (1) 定常中性子が不可欠な研究分野（小角、分析イメージング、非弾性及び偏極、核データ測定）が存在し、定常中性子源は将来も必要である。
- (2) パルスと定常両方の存在によって研究効率が著しく改善される場合が多

く、それぞれの特徴を理解して両者を使うスタイルが今後国際的に主流となる。ビーム時間の絶対的不足を補うため複数の施設が必要である。

(3) 定常中性子が不可欠な研究分野において産業利用が非常に活発に実施され、爆発的に発展している。すなわち定常とパルス両方が必須である。

(4) JRR-3 では共同利用を中核に最先端の研究を行う場で人材育成が図られ、中性子利用の発展のため J-PARC とともにこの体制が継続すべきである。

この結論をベースとして、小型・中型施設をも含めた議論を行い、次世代研究用原子炉の在り方を広い視点から検討していく予定である。