

次世代研究用原子炉検討特別委員会報告書

—次世代研究用原子炉の建設に向けて—

平成 24 年 12 月

日本中性子科学会

次世代研究用原子炉検討特別委員会

目次

概要と提言

はじめに

第1章 中性子科学の今後の科学・技術における重要性

第2章 中性子科学の今後の産業利用における重要性

第3章 世界の研究用中性子源の将来

第4章 研究炉の重要性

第5章 人材育成における研究炉の役割

第6章 次世代研究用原子炉施設の概要と研究体制について

第7章 まとめ

文献

委員名簿

図表

図表1 理学・工学分野における科学・夢ロードマップにおける中性子の役割

図表2 産業における中性子の適用対象と適用技術

図表3 20年後の世界の中性子拠点研究施設

図表4 JRR-3とJ-PARCの相補性

図表5 JRR-3の高経年化対策及び高度化と次世代研究炉の概念と建設スケジュール

図表6 将来の中性子利用体制

概要と提言

持続可能な社会の構築のために地球規模の問題を解決する上で、多様な物性・生命現象を原子レベルで観測または制御可能にする量子ビーム利用にも大きな期待がかけられている。その中で中性子科学は将来においても重要な学術領域である。近年、世界最高性能を誇る J-PARC パルス中性子源の利用研究が開始されたことは目覚ましい進歩であるが、国際レベルで中性子科学を牽引してきた JRR-3 は改造後 20 年が過ぎ、その高経年化対策と高機能化のための改良に加え、パルス中性子源との共存を念頭においた将来計画を策定し優先的に実施すべき時期にきている。この認識のもとで、日本中性子学会の次世代研究炉検討特別委員会は、中性子利用、特に中性子ビーム利用実験の観点から、今後の研究炉の必要性について検討を行った。

研究炉から発生される中性子ビームは安定かつ定常的であり、時間平均強度が強い。主に単色ビームと角度分散法を用いる測定法によって、高い自由度と信頼性が実現される。パルス中性子源の装置では広い空間・エネルギー領域を高い分解能によって効率よく測定できるのに対し、研究炉の装置は比較的狭い領域を詳細に測定することに長けている。これらの特徴は、特に小角散乱、分析・イメージング、非弾性散乱と偏極、核データ測定において有利であり、さらに研究炉は、RI 製造や照射、Si ドーピング、ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)によるがん治療などの用途にも利用されている。定常とパルス両中性子源施設の戦略的運営によって、世界に先んじて研究対象の全体像を把握し、新現象の発見力と徹底分析力を具備することによって、学術水準と国際競争力を維持することができる。

中性子科学の活性化のためには、臨界後 20 年を経過した JRR-3 の高経年化対策を継続的に実施し、J-PARC との共存を念頭に実験装置の更新や冷中性子源の高度化を優先的に実施することが望まれる。そして J-PARC や小型・中規模中性子源と有機的に連携し、相補的な利用を行うべきである。また、中性子科学の将来的な発展のためには、JRR-3 の運転停止が予想される 2030 年頃の稼動を前提とした次世代研究用原子炉の建設計画を早急に策定すべきである。10¹⁴ n/cm²s 台後半の中性子束と利便性の高いスペクトルを実現し、炉室とガイドホールに高性能の装置群を設置した、総合的で自由度が大きな研究環境を実現し、RI 生産や照射など他分野にも利用可能な研究炉の建設を目指すべきである。また、国の方針として一元的に運営され、大学や産業界も主体的に関わる運営体制が必須である。

これまで JRR-3 における大学共同利用・トライアルユース・施設供用など多面的な制度により、学生教育や企業利用促進が支えられ、長期的な人材育成を進めながら科学技術の成果に結びつける体制が保たれてきた。中性子を用いた研究開発及び産業利用において、このノウハウを将来にわたって活用する効果は非常に大きい。我が国における研究炉とパルス中性子源の共存は、国内外の若い人材を惹き付け、研究開発現場の最前線での人材育成と国際貢献の舞台となることが期待される。

以上を踏まえ、中性子科学の発展のためには、次の事柄を推進することが必要であると結論づける。

- 1) 中性子科学の将来的な発展のためには、パルス中性子源である J-PARC や小型・中規模中性子源と有機的に連携し、研究炉中性子源の相補的な利用を行うべきである。
- 2) 臨界後 20 年を経過した JRR-3 の高経年化対策を継続的に実施し、J-PARC との共存を念頭に実験装置の更新や冷中性子源及び中性子ガイドの高度化を実施する。
- 3) JRR-3 の運転停止が予想される 2030 年頃までに次世代研究炉を建設する。大強度のビームと利便性の高いスペクトル、そして高性能の装置群による総合的で自由度の大きな研究環境を実現し、RI 生産や照射など他分野にも利用可能な研究炉の建設を目指す。

はじめに

中性子科学は基礎科学の発展に大いに貢献し、産業利用においても人類の繁栄と豊かさの実現に重要な役割を果たしてきた。今後、持続可能な社会の構築に向けて、エネルギーや環境など地球規模の問題を解決し、科学技術イノベーションを戦略的に推進する上で、中性子科学は極めて重要な学術領域である。新成長戦略[1]、日本再生戦略[2]、第4期科学技術基本計画[3]等にも述べられているように、グリーンイノベーション・ライフイノベーション等の分野において、中性子科学は極めて重要な学術領域である。我が国の国際競争力を高めると同時に、国際的な枠組みによる科学と技術の進展が重要であるが、巨額の予算を伴う大型施設の建設には様々な観点からの長期的展望が必須である。一方で、あらゆる情報を国民に発信し、成果を社会に還元する努力を怠ってはならない。

国際的視点から眺めても、科学・技術の進歩に貢献する重要性から中性子施設が設置されており、大型施設の建設計画も存在し、主要な国や EU 等の地域では定常中性子源である研究用原子炉（研究炉）と加速器を用いたパルス中性子源が並立して整備されている。それぞれの特徴を生かした相乗効果によってより大きな成果が創出されている。我が国では JRR-3 が国際レベルの研究炉として 20 年以上中性子科学を牽引してきた。一方で、J-PARC が世界最強のパルス中性子源として 2008 年から稼動し、高性能の測定装置を用いた研究が開始されたことは目覚ましい進歩である。

日本中性子科学会の次世代研究用原子炉検討特別委員会は、J-PARC と共存する JRR-3 の必要性を報告した[4]。JRR-3 は改造後 20 年が過ぎ、高経年化対策に加え、定常中性子の特性を生かした将来計画を策定し、実施すべき時期にきている [5,6]。2030 年以降に予想される JRR-3 の運転停止後においても、中性子科学の重要性と内外の研究施設の状況から、将来も引き続き我が国に高性能の研究炉が必要で、その建設計画を早急に策定する必要がある。研究炉の必要性と将来に関しては、原子力学会において震災以前に検討され[7]、最近、日本学術会議でも研究炉の必要性を提言するための検討が行われている[8]。本報告書は主に中性子ビーム利用実験の観点から研究炉の必要性について検討した結果を述べる。

1. 中性子科学の今後の科学・技術・産業分野における重要性

中性子は、その有益な性質によって、物理・科学・生物といった基礎科学から、工学・薬学・医学・考古学、さらにエネルギー・環境・情報など複合分野まで広範に利用される重要な量子粒子である。中性子の強い透過力は、研究対象を内部深くまで測定することを可能とし、また中性子は軽元素に対する感度が高く、同位体の識別能力を持つ。また中性子の磁気モーメントが物質と磁気相互作用をするために、中性子は物質の磁性研究に必須である。中性子の波長及びエネルギーは物質の構造と動的な性質を明らかにする上で最適であり、様々な現象の機能発現機構の解明に役立つ。精密な構造解析や、理論と実験データの比較が容易なために信頼性の高い情報が得られることもその重要な特徴である。こう

いった有用性により中性子は新材料、新薬の開発などの産業利用も行われている。また、中性子の性質そのものの研究による基礎物理の展開もある。

2009年にJ-PARC利用者協議会は[9]、産業分野における今後の中性子の重要性を指摘し、その中長期的な中性子科学の主要テーマは物性物理、生物、ソフトマター、水素などの分野を挙げている。また、中性子科学の発展のためにはJ-PARCとJRR-3との連携が必要であると報告している。20年後のサイエンスの予測は非常に困難であるが、日本学術会議第三部は理学・工学分野における科学・夢ロードマップを2011年に発表している[10]。そのロードマップにある提言84テーマのうち、図表1に示した50件に中性子に関わると予想され、将来にわたる中性子の重要性が理解できる。今後の新しいサイエンスの発展に伴って、新たな展開を遂げる可能性もある。将来中性子が重要な研究手法となる分野について以下に記述する。

(1) 生命科学

中性子は、難病や癌撲滅のための創薬、タンパク質や酵素など生体関連物質、生体融合材料の研究に用いられる。生体膜構造とその制御、生体反応を模倣した機能性物質と階層性の構築、外場応答と運動、人工光合成、究極的には生命の解明に中性子は重要な役割を担う。イメージング、放射化分析、同位体による研究、RI生産に研究炉は必須である。

(2) 環境分野

安全安心で持続可能な社会やゼロカーボン都市の実現、並びに、再生可能エネルギーの創出などが必要とされている。水素の挙動解明、革新的電池用構成材料の開発、元素戦略プロジェクトにおける稀少元素フリーの新機能性材料の開発等に中性子が大きく関わる。

(3) 物性物理・基礎物理・地球物理

磁気モノポール、ディラック電子やスカーミオン等の新奇量子現象の解明と新デバイス／センサー開発、三次元スピン解析を用いた量子情報技術開発、スピントロニクス、そして超伝導社会実現の為の研究が行われる。中性子寿命や電気能率、重力相互作用の測定は、ビッグバン宇宙の初期元素合成過程や素粒子間の重力の解明、物質と時空を統一した究極理論へ繋がる。地殻-マントル鉱物の構造や水素の役割を直接観測することで地球の内部構造やそのダイナミクスの理解につながる。

(4) 化学・材料・高分子

中性子散乱により、ナノ構造体、分子性物質、高分子・超分子の諸物性が明らかにされ、刺激応答性や自己修復性の獲得が期待される。また、次世代磁石、新高温超伝導体の合成と構造決定、完全固体照明やディスプレイ、センサーなどに適用される無機・有機物質の開発や、次世代高効率照明の実現のために必要な情報が得られる。触媒、ゾル／ゲル、イオン伝導体、液晶、液体や超臨界状態の構造と動的機能、あるいは炭素系材料や金属系材料、超高強度材料、超耐環境材料、エネルギー材料の構造機能性に関する研究にも中性子が利用される。

(5)工学分野、中性子イメージング

集合組織と残留応力測定は中性子が有力な非破壊測定手法であり、あらゆる機械部品、溶接部や鋼板などの構造部材や加工品と加工法の開発に応用される。中性子イメージングによってエンジンやタービンなど機械や燃料電池の動作、建築物内部（鉄筋の腐食や水の侵入）を非破壊的に観察できる。偏極ビーム利用による磁場分布の測定によって導体内部の電流分布を可視化することもできる。彫刻・絵画や遺跡埋蔵物の考古学的研究、生きている生物の内部構造や水・物質などの内部移動などに中性子イメージングは応用できる。

2. 中性子科学の今後の産業利用における重要性[11]

中性子の産業利用は、J-PARC が 1MW で本格的な運転の開始後の 10 年で、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されている[11]。J-PARC の供用開始後、すでに産業界からの課題申請は全体の約 35%を占め、しかも成果専有での利用が採択課題の約 40%を占めるほどになっている。JRR-3 でも産業界が利用可能な JAEA 装置全体のマシンタイムの約 15%を産業界が利用している。従って中性子の有用性が産業界にも十分、認知されていると言えるが、潜在的な需要はまだ多く存在し、産業界向けの装置を整備することでさらに利用の拡大が期待される。中性子を利用する産業分野は広く、電器・電機から、化学、鉄鋼、自動車、機械、電力・ガス、建設・土木、製薬、食品まで、ありとあらゆる製品分野への適用が期待されている（図表 2）。利用する測定技術においても、粉末構造解析、単結晶構造解析、偏極回折、小角散乱、非弾性散乱、反射率、残留応力、集合組織、成分分析、イメージングなど、ほぼ全ての測定技術が利用されている。また、電力省エネルギーに必須であるパワー半導体デバイス製造のためのドーピング技術や、医療用アイソトープ製造技術も重要である。当面の重要課題は、Li イオン電池材料や Nd・Dy レス磁石材料の開発、ならびに、マイルインサービスが可能な集合組織の測定システムの開発である。将来的には、1,700MPa 級超高強度鋼や燃料電池用材料、機能性高分子、難病治療薬など世界をリードする先端機能性材料の開発が期待される。

3. 世界の研究用中性子源の将来

中性子研究施設の将来にわたる確保のため、1990 年代に出された OECD の提言[12]に基づき、世界各国はここ 20 年間中性子源の改造、増強、新規建設を推進してきた。その対応と現状についてはいろいろな報告書に記載されている[7,12,13]。ここでは JRR-3 が運転を停止する予定の 2030 年頃の予測を図表 3 に示す。JRR-3 と前後して建設された $10^{14}\text{n/cm}^2\text{s}$ 台前半の中性子強度を有する研究炉の多くが運転停止すると見込まれる。日本、米国、欧州の世界三極には、大強度加速器中性子源である J-PARC、SNS、ESS が稼働する。このうち、米国では SNS において長パルスの第 2 ターゲット施設が建設中であり、SNS に隣接して研究炉 HFIR ($2.5 \times 10^{15}\text{n/cm}^2\text{s}$) が存在する。HFIR は 2007 年に改修され、今後数十年間中性子ビームを用いた研究と RI 生産に利用される。欧州では 5MW の長パルス

中性子源 ESS が、世界最高性能の原子炉中性子研究施設 ILL の HFR (58MW) の時間平均中性子強度とほぼ同等の強度を達成する予定である[13]。ESS は長パルスの採用により建設コストを下げ、パルスの利点を享受できる一方、一部の波長領域で J-PARC を凌駕するという評価も存在する[14]。ILL は 2025 年までの運転は確定しているがその後は未定である[15]。一方で、ドイツの FRM-II ($8 \times 10^{14} \text{n/cm}^2 \text{s}$ 、2003 年稼働開始) は運転継続が予想され、さらに英国 ISIS では 0.2MW 短パルス中性子源により、高い効率の測定が可能である。アジア地区では韓国 (HANARO 炉)、オーストラリア (OPAL 炉)、そして中国の躍進がめざましく、中国は 2010 年稼働の研究炉 CARR ($8 \times 10^{14} \text{n/cm}^2 \text{s}$) と 120kW (最終的には 500kW) のパルス中性子源の両方を所有する。このように主要国やヨーロッパ連合では原子炉とパルス中性子源が将来的に共存していくと思われる。さらに、研究炉はアイソトープ製造や照射などにも利用され、その複合利用による効果も有益である。

欧米では小型原子炉と加速器による多数の中小型中性子源が設置、新設されている。これらの施設はその中性子強度は低いものの、大学や企業などで萌芽的研究の推進、予備実験の目的で日常的に利用され、中性子の有用性の理解と普及、分野の拡大に役立っている。従って将来にわたり研究拠点としての大型施設とともに利用が継続されると考えられる。国際協力は今後も重要であり、その促進を図っていくべきである。そのためにも、日本として研究炉とパルス中性子源を備え、高い研究能力を保っていくことは、国際協力の視点のみならず、学術と産業の国際競争の観点からも極めて重要である。また、我が国に中性子利用施設が 1 施設しかないとすれば、長期の施設トラブルが発生すれば研究が停止するという大きなリスクを抱えることになる。

4. 研究炉の重要性[4]

研究炉の特徴は、安定かつ定常的な強い時間平均中性子束、主に単色ビームと角度分散を用いる簡便性と高い自由度及び信頼性にあり、JRR-3 は多くの成果を上げてきた[5]。J-PARC の装置群は特定の目的 (分光・回折) に最適化されているが、研究炉は構造と励起など測定手法の切り替えや組合せが機動性に富んでいる。これは、先端的研究における新しい測定法の開発の端緒を見出すことに研究炉が極めて有用であることを意味する。定常炉とパルス中性子源という両施設の戦略的運営によって、研究対象の全体像を世界に先んじて把握し、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が可能となる。それによって、新現象の発見力と徹底分析力を背景に、学術水準と国際競争力が維持できる。

中性子の要素技術開発は、単色から白色、そしてパルスへ発展する。研究炉の装置は軽量性、ポート増設や装置新設と撤去の容易さから即応性が高い。研究対象 (物質及び分野) の広がりと利用者の拡大によって、装置とビームタイムは絶対的に不足しており、常に国内のどこかで中性子を利用できる態勢が国際競争を勝ち抜くため必要である。パルス中性子源と研究炉の相補性を図表 4 に示す。以下に今後研究炉が重要となる分野を記述する[4]。

(1) 小角散乱

$q < 10^{-3} \text{ \AA}^{-1}$ の領域では、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研究炉が有利である。動的核スピン偏極によるコントラスト変調法も、単色中性子を利用する研究炉が有利で、イメージングやスピンエコー法との同時計測も容易である。また、パルス中性子の白色中性子はソフトマターの小角散乱で常に問題となる非干渉性散乱補正が非常に困難であるため、散乱関数の定量的解析においては単色中性子線を利用する研究炉中性子が好ましい。

(2) 分析・イメージング

現在、研究炉が中性子放射化分析法に用いられる唯一の中性子源と言って良い状況にある。即発 γ 線分析はパルス中性子源でも可能であるが、壊変 γ 線を用いる方法をそのまま J-PARC で行う事は期待出来ないであろう。中性子束が高い研究炉では、高細精のイメージング撮像において有利であると共に、毎秒数百コマを撮像する高速動画撮影が可能である。

(3) 非弾性散乱 (偏極中性子の高度利用と低エネルギー励起)

位相空間の広い領域にはパルス中性子が効率的である。しかし三次元結晶などの領域の情報が問題解決に重要で、三軸型分光器による実験法が適切な場合がある。特に、原子炉装置の場合、偏極子、スピン方向制御での技術的容易さから、特定の Q - w 位置ではパルス源装置よりも精密な偏極度解析実験が可能である。偏極中性子の高度利用によって、磁気と格子励起の区別や、水素原子を含む物質からの干渉及び非干渉性散乱の分離、さらにはスピンの三次元解析が可能であり、磁気-核散乱干渉項やスピンの非対角相関など新しい物理量を観測できる。

ソフトマターや生体の機能は固有のダイナミクスに支配され、メザイ型スピンエコー法を用いると、高い積分磁場強度と長い中性子波長の組み合わせによって、 $1 \mu\text{s}$ 程度の遅い緩和現象を観察できる。定常中性子源におけるスピンエコー分光器は技術的に確立している。

(4) 核データ測定

研究炉の高い中性子束により、短寿命核種の中性子核反応断面積が測定可能となる。生成核種が中性子を捕獲する 2 重 (さらに 3 重) 中性子捕獲反応によって、測定可能な核種の領域が大幅に拡張できる。研究炉での測定は絶対値の精度が高いため、パルス中性子を用いた TOF 法との併用により、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のデータの規格化に有効である

(5) ビーム実験以外の利用

JRR-3 では、省電力に有効な半導体パワーデバイス用に NTD シリコンが生産され (Si ドーピング)、また工業用及び医療用の放射性同位元素の製造 (RI 製造) が行われている。放射性同位元素の生産は現状では海外の原子炉に依存しているところがあり、将来的に安定して需要を満たすためには国内生産を増加させる事が望まれる。ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) によるがん治療研究などの用途もビーム以外の利用として重要であり、今後より多くの需要が見込まれる。

5. 人材育成における研究炉の役割

新しい科学の創出や技術開発を進展させ、社会の継続的な発展をリードする力強い人材を育てる拠点として中性子利用分野を位置づけることができる。研究炉はその基盤インフラとして、次の科学技術を担う世代（特にいっそうの重点化が進む大学院学生）の基礎的知識と技術レベルの向上、専門的研究者の育成、原子力安全・セキュリティの教育などに将来的にも活用されるべきである。

研究炉とパルス中性子源の両立により、物質科学研究を相乗的に支えることができる。もし研究炉に精通した人材を欠き、パルス中性子源との人材還流がなくなるならば、その相乗効果が発揮できず、中性子科学を使いこなして先駆的な新発見を導く能力を欠く事態になりかねない。これまで JRR-3 における大学共同利用・トライアルユース・施設供用など多面的な制度により学生教育や企業利用促進が支えられ、長期的な人材育成を進めながら科学技術の成果に結びつける体制が保たれてきた。たとえば、東京大学物性研究所が行っている中性子散乱全国共同利用では、のべ 6000 人規模の大学・国立研究所を中心とした研究者・学生が年間約 300 件におよぶ研究を実施し、毎年 100 件に及ぶ研究論文を発表している。このノウハウを将来にわたって活用する効果は絶大である。そのためにも研究炉の機能を維持発展させる必要がある。我が国におけるパルス中性子源と研究炉の共存は、国内外の若い人々を惹き付け、研究開発の最前線での人材育成と、教育における国際貢献の舞台となることが期待できる。中性子科学を牽引してきた研究炉での人材育成・教育の先導的な役割は、原子炉の安定的運転と将来必ず起こる廃炉処理を勘案しても、今後ますます重要になる。

6. 次世代研究炉の概要と研究体制について

測定法と分野の多様性により研究炉とパルス中性子源の併用が重要であることは既に述べたとおりであり、それが可能なエリアは国際的にも限られている。第4章に記述された研究炉の有用性も含めて考慮すると、研究炉は将来に亘り必要な施設であると結論され、J-PARC を有する我が国が、中性子強度が高く、実験上の自由度も大きい次世代研究炉を計画立案することは妥当である。現時点でこの役割を担う JRR-3 は国民の貴重な財産であり、その有効活用の継続のための高経年化対策と、パルス中性子源との共存を念頭に装置の更新と高性能化を優先的に実施すべきである。ヨーロッパは、既存の 0.2MW の短パルス中性子源 ISIS の他に、MW クラスの長パルス中性子源 ESS を建設しようとしているが、長パルス中性子源の実際の性能については未知数である。その動向については今後も注視すべきであるが、日本ではすでに MW クラスの短パルス中性子源 J-PARC が存在しており、今後 30 年近く稼働する予定である。また、第2ターゲットステーションの検討も行われている[16]。従って、定常中性子源 JRR-3 の後継を考えておく必要がある。

研究炉では速中性子遮蔽の容易さから、炉心に近接してビーム強度の強い装置が建設可能である。今後、ILL を越える強度の中性子源は期待できないが、炉心構造の工夫により 10^{14} n/cm²s 台後半の中性子束を実現し、中性子輸送、集光、検出などの技術ブレークスルーを起こすことで、試料位置の入射ビーム強度及び散乱シグナル強度に関して S/N も含めて世界最高レベルをめざすことができる。熱外・熱・冷・極冷中性子源等により利便性の高いスペクトルを実現し、炉室とガイドホールを有する総合的で実験上の自由度が大きな研究施設が分野全体の活性化のために必要である。原子力学会が実施したアンケート[7]にも同じ意見が寄せられている。次世代の研究炉は、原子炉工学や線源、分光器の専門家、解析、ソフトウェアの専門家、並びに物質科学の実験研究者と理論家を内包し、外部の大学や研究機関に支援者集団を有し、その協力による活発な研究開発によって施設を発展させることが重要である。そのためには国の方針として、中性子施設が一元的に運営される必要がある。人材育成及び高度な研究開発と産業利用の観点から、大学と産業界が主体的に関与できるチャンネルを作り、施設全体として発展する運営が必要である。建設に要する期間を見越し、2030年頃完成予定のスケジュールで設計・建設に着手すべきである（図表5）。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は、次世代の試験研究炉の必要性を検討している[8]。そこでは、将来、国内に研究炉がなくなる事態を危惧し、（今後のエネルギー政策に依存するが）照射や RI 生産、ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)によるがん治療等、中性子ビーム実験以外のニーズに応えるためにも研究炉の必要性を訴えている。

研究炉の建設と利用にあたっては、その安全性を担保する必要がある。日本中性子科学会は原子炉施設の安全性についてその詳細を議論できる立場にはないが、以下に専門機関による現状把握を示す。研究炉は、多重の安全システムがあることは勿論であるが、発電用原子炉と比較してその構造と規模の違いから、非常に安全な施設であると国際的に認知されている。そのため研究炉は、中性子散乱実験や医療照射、産業用及び医療用 RI 生産などの目的で、世界中で活発に利用されていることが IAEA（国際原子力機構）によっても報告されている[17]。これは福島原発事故後に脱原発に向けて政策転換をしたドイツが、研究炉については利用継続を宣言している事からも理解できる。日本原子力研究開発機構が所有する JRR-3 では、福島原発事故を踏まえた電源機能等喪失時における炉心等の健全性評価において、低温で大気圧の大量の冷却水を備えた開放型プールに設置された炉心構造のために、自然冷却のみで施設の健全性が長期間にわたり十分維持される事が報告されている[18]。これは類似の規模や構造を有する研究炉に関する国際的知見と一致する[17]。また、東日本大震災において観測された地震動の最大加速度は設計時の想定を上回っていたが、地震の影響を評価した結果に基づき、必要に応じて補修等を行い、施設の健全性を確認し、原子力規制委員会に報告書が提出されている[19]。原子力規制委員会は、防災指針の改訂や、発電炉の新たな安全基準の策定を行っており、それに準じた新たな規制が今後研究炉にも適用される[20]。使用済み燃料処理に関する課題があることも事実であるが、中性子科

学を推進する日本中性子科学会は、安全性が確保される限りにおいて、研究炉は学術研究を発展させ、豊かな国民生活を実現する上で不可欠な施設であると認識している。

最後に、小型中性子源と中規模施設（強度は弱い共同利用等が運営される規模）の役割に言及する。小型中性子源は、その即応性、適応性の高さが特徴であり、強度は低いものの、萌芽的研究の推進、予備実験、大学や企業での日常的な利用による中性子の有用性の理解と普及、分野の拡大に役立つ。産業界からもその実現を強く要望されている[9]。将来的には、野外での活用も可能となり、新たな利用分野の拡大へつながることが期待される。KURに代表される中規模施設には、以下に示す2つの観点がある[21]。

- 1) 中規模施設では、遮蔽が容易で中性子発生源廻りの発熱が少ないことから、実験配置の自由度が高く配置変更が容易である。低中性子束による実験精度の低下は避けられないものの、大型施設では実施困難な条件による実験が可能となる。
- 2) 中型や小型の施設を大型施設と相補的なものとするため、新規研究分野の開拓や学生等の教育目的、そして予備実験に利用可能である。

中性子フロンティアの開拓と分野の拡大、人材育成の面で、小型・中規模施設の役割は大きく、思わぬイノベーション発掘もありうる。ただし、中性子強度や装置性能が一定のレベルに達して初めてブレイクスルーが実現できる場合が少なくなく、その意味では大型施設の運営を一部弾力的に実施し、新規ユーザー獲得や分野の拡大、人材育成を積極的に進める努力を行うべきである。将来の中性子利用形態を図表6に示す。

7. まとめ

持続可能な社会構築のために中性子科学は有益であり、研究炉とパルス中性子源を相補的かつ戦略的に用いることで、科学・技術の発展に大きく貢献する。中性子科学を将来的に発展させるためには、臨界後20年を経過したJRR-3の高経年化対策を継続的に実施し、J-PARCとの共存を念頭に実験装置の更新や冷中性子源を高度化することが望まれる。また、パルス中性子源であるJ-PARCや小型・中規模中性子源と有機的に連携し、相補的な利用を行うべきである。そのためには、JRR-3の運転停止が予想される2030年頃までに次世代中性子源の建設が必要である。大強度の中性子ビームと種々の実験が可能なスペクトル、そして高性能の装置群による総合的で自由度の大きな研究環境を実現し、医療用RI生産やシリコンドーピング、ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)によるがん治療研究などといった他分野にも利用可能な研究炉の建設を目指すべきである。今後、国際・国内情勢の変化を見極め、また原子炉やパルス中性子源における技術的な進展も勘案しながら、経費にも配慮し、日本における次世代研究用原子炉についての議論を継続していくことが肝要であろう。

最後に、次世代研究用原子炉について真剣に議論していただいた方、また本報告書について有益な提案・意見を頂いたすべての方に感謝する。

文献

- [1] 「新成長戦略」、平成 22 年 6 月閣議決定
- [2] 「日本再生戦略」、平成 24 年 7 月閣議決定
- [3] 「第 4 期科学技術基本計画、平成 23 年 8 月閣議決定
- [4] 次世代研究用原子炉検討特別委員会中間報告、日本中性子科学会次世代研究用原子炉検討特別委員会、2011 年 8 月
- [5] 東京大学物性研究所附属中性子科学研究施設ロードマップ
- [6] 日本原子力研究開発機構 JRR-3・J-PARC 中性子実験装置整備計画検討作業グループ「JRR-3 と J-PARC/MLF における中性子実験装置の役割分担と連携及び JRR-3 の中性子実験装置に関する将来計画」、2008 年 6 月
- [7] 将来必要になる共同利用研究施設について、日本原子力学会、将来必要になる共同利用に供する研究施設検討特別専門委員会、2010 年 9 月
- [8] 日本学術会議基礎医学委員会・総合工学委員会合同、放射線・放射能の利用に伴う課題検討分科会、研究用原子炉のあり方検討小委員会
- [9] J-PARC 利用者協議会報告、「J-PARC における研究の展望」、2009 年
- [10] 理学・工学分野における科学・夢ロードマップ、日本学術会議第 3 部報、2011 年 8 月
- [11] サイエンスフロンティア 21 構想 平成 13 年度報告書、茨城県、平成 14 年 3 月、p.42
- [12] OECD Megascience Forum: Neutron Beams and Synchrotron Radiation Sources (1994) (ISBN 92-64-14249-5), D. Richter, T. Springer, ESF/OECD Technical Report (1998) “A twenty years forward look at neutron scattering facilities in the OECD countries and Russia”, OECD MEGASCIENCE FORUM, “Report of the NEUTRON SOURCES WORKING GROUP” (1998), http://rencurel2006.essworks-hop.org/documents/reports/OECD_1998.pdf
- [13] “Report from the ILL Associates’ Working Group on Neutrons in Europe for 2025”
- [14] “The 5 MW LP ESS; best price-performance”, February 2008,
<http://www.ess-europe.org/uploads/3Sep09Keyfeaturesof5MWLPESS-facility.pdf>
- [15] “Taking ILL further into the Millennium” edited by A. Harrison,
http://www.ill2020-vision.eu/Taking_ILL_further_into_the_millennium.pdf
- [16] J-PARC 物質・生命科学実験施設将来計画検討タスク報告書、2010 年 11 月
- [17] Research Reactors: Purpose and Future, IAEA, 2010, http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/Technical_Areas/RRS/documents/RR_Purpose_and_Future_BODY.pdf, International Conference on Research Reactors: Safe Management and Effective Utilization, IAEA, 2011. 日本中性子科学会誌「波紋」22 巻 (2012) p.93.
- [18] 「平成 23 年福島第一・第二原子力発電所事故を踏まえた電源機構喪失時における炉心等の健全性評価について (報告)」日本原子力研究開発機構、2011 年 4 月
- [19] JRR-3 原子炉施設の健全性確認に関する報告書、日本原子力研究開発機構、2011 年 11 月
- [20] 原子力規制委員会ホームページ、<http://www.nsr.go.jp/>
- [21] 大学における研究用原子炉の在り方について、文部省学術審議会特定研究領域推進分科会原子力部会、平成 12 年 11 月、複合原子力科学研究推進小委員会活動報告書 KURRI-KR-161 (平成 22 年度)、KURRI-KR-172 (平成 23 年度)、京都大学原子炉実験所「将来計画」短期研究会報告書 KURRI-KR-173

委員リスト

委員長 鬼柳 善明（北大工）

委員

岩佐 和晃（東北大理）

上坂 充（東大工）

大山 研司（東北大金研）

加倉井和久（原子力機構）

川端 祐司（京大原子炉）

佐藤 卓（東大物性研）

柴山 充弘（東大物性研）

清水 裕彦（高エ物構研）

林 眞琴（茨城県）

目時 直人（原子力機構）

オブザーバー

海老原 充（首都大学）

小泉 智（原子力機構）

原田 秀郎（原子力機構）

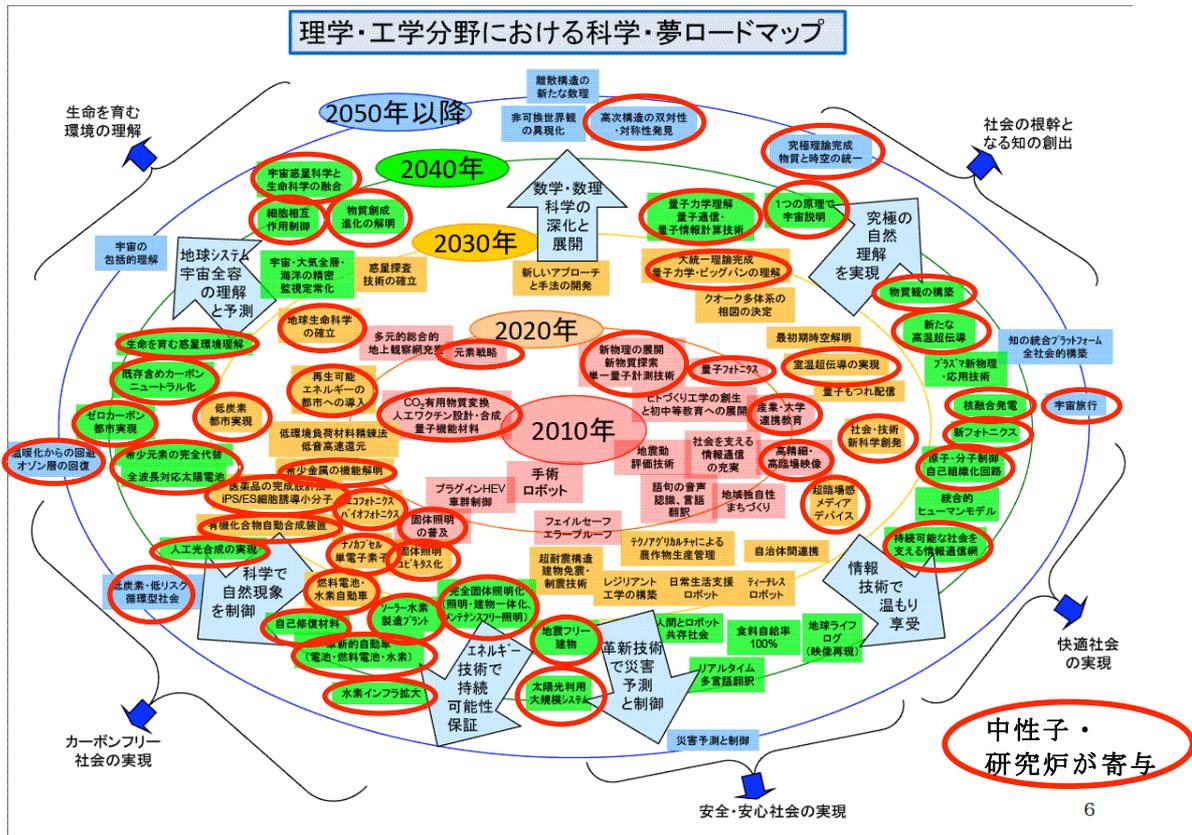
丸尾 毅（原子力機構）

山田 和芳（東北大金研）

吉澤 英樹（東大物性研）

脇本 秀一（原子力機構）

第1回会合	平成23年	1月13日（月）	13:30~16:30
第2回会合	平成23年	2月7日（月）	10:00~12:00
第3回会合	平成23年	4月6日（水）	10:00~12:30
第4回会合	平成23年	4月28日（木）	10:00~12:30
第5回会合	平成23年	5月12日（木）	13:00~17:00
第6回会合	平成23年	5月23日（月）	13:00~17:00
第7回会合	平成23年	7月11日（月）	15:00~17:00
第8回会合	平成23年	10月12日（水）	10:00~12:00
第9回会合	平成23年	12月16日（金）	10:00~12:30
第10回会合	平成24年	1月30日（月）	13:30~16:00
第11回会合	平成24年	5月28日（月）	10:30~13:00
第12回会合	平成24年	10月24日（水）	10:00~13:00



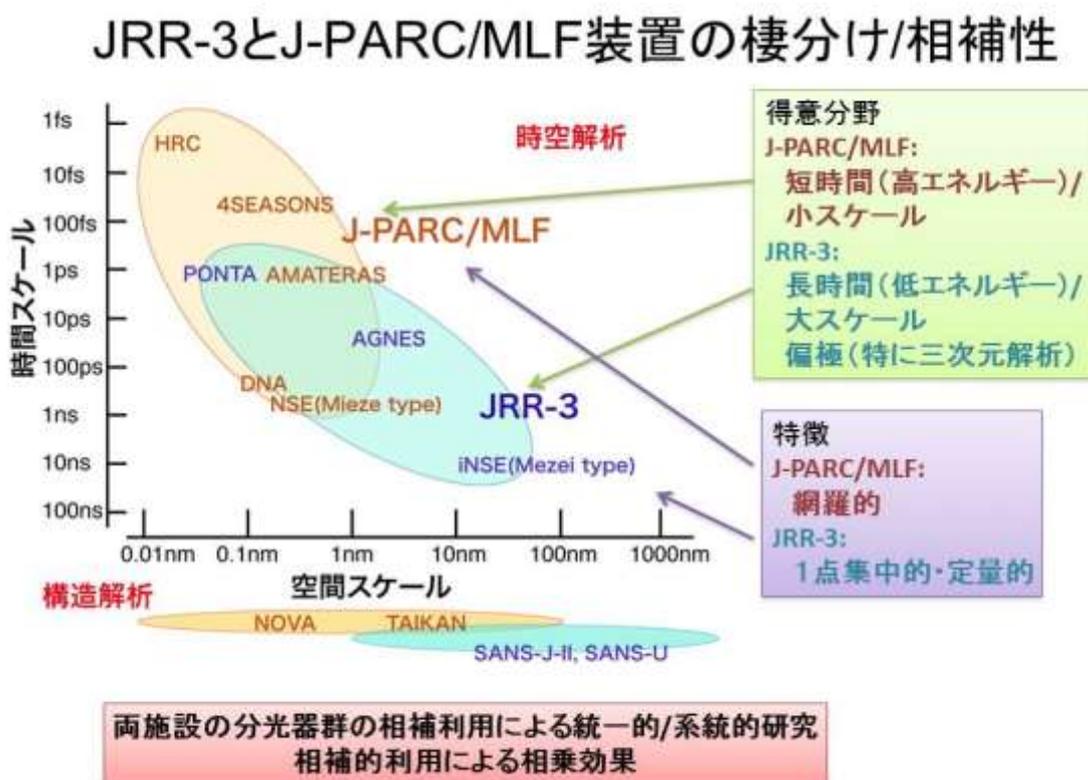
図表1 理学・工学分野における科学・夢ロードマップにおける中性子の役割

産業分野	適用対象	適用技術
電機・電器	MRAM, 光磁気ディスク 磁気記録ヘッド, 液晶	粉末回折, 偏極回折 反射率計
化学・繊維	ディスプレイ用機能性薄膜, 高分子 触媒, 機能性プラスチック ゴム, 半導体素材, 高張力繊維	反射率計, 小角散乱 粉末回折, ドーピング
鉄鋼・金属	超高張力鋼, 燃料電池用水素貯 蔵容器, Ti・Al合金, 磁石	小角散乱, 偏極回折 残留応力, 集合組織
自動車・部 品	エンジン, 燃料電池, 自動車部品	残留応力, 集合組織 粉末回折
重工・機械	発電プラント, 建設機械	残留応力, 集合組織
電力・ガス	発電プラント, 燃料電池	残留応力, 集合組織 粉末回折
建設・土木	コンクリート構造, 橋梁	ラジオグラフィ
製薬・食品 化粧品	薬品, 機能性食品, 機能性化粧 品	単結晶構造解析 粉末回折

図表2 産業における中性子の適用対象と適用技術



図表3 20年後の世界の中性子拠点研究施設



図表4 JRR-3 と J-PARC の相補性

約20年後にJRR-3は運転停止。多機能・大出力の新型炉建設

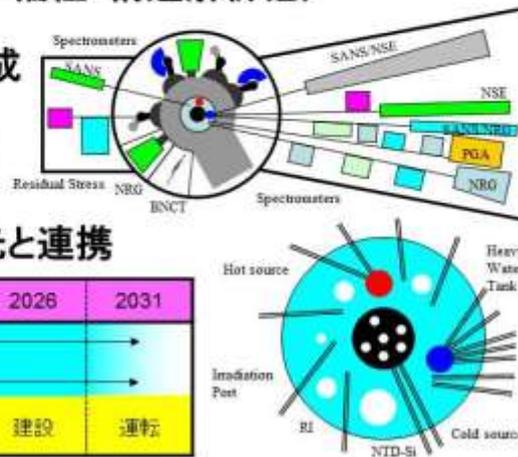
1. 中性子束密度 炉心: $10^{14}n/cm^2s$ 後半, ガイド: $10^9n/cm^2s$ 台
2. 炉室・ガイドホールに十分な数のビームポートと空間を確保
3. 種々の実験が可能なスペクトル(熱外・熱・冷・極冷中性子...)
4. 機能・用途

- (1) 中性子散乱(小角・非弾性・偏極・構造解析他)
- (2) 放射化分析・イメージング
- (3) 原子炉工学実験と人材育成
- (4) RI製造 & Siドーピング
- (5) BNCT基礎研究及び治療

5. スタッフの充実

6. J-PARC, 小型線源, 放射光と連携

スケジュール	2012	2016	2021	2026	2031
JRR-3	経年化対策 装置高度化 利用研究				
次世代研究用原子炉		概念設計	詳細設計	建設	運転



図表5 JRR-3の高経年化対策及び高度化と次世代研究炉の概念と建設スケジュール

世界に先駆けた発見と現象の解明



図表6 将来の中性子利用体制