

JRR-3将来計画

日本原子力研究開発機構・原子力科学研究所・物質科学研究センター

日本原子力研究開発機構・原子力科学研究所・研究基盤技術部

東京大学物性研究所

2026年3月12日初版

2026年4月17日第2版

目次

1. はじめに	3
2. JRR-3の活用により期待される科学技術の未来像	5
2.1 量子ビーム計測技術の進展及び原子炉中性子科学のポテンシャル.....	5
2.2 JRR-3における現状及び課題	6
2.3 重点課題	8
2.3.1 複合物質の構造・ダイナミクスの解明による新機能性材料の創出	8
2.3.2 スピン構造・ダイナミクスの制御による量子機能の創生	10
2.3.3 がん治療高度化を通じた国民生活環境の向上	11
2.3.4 成果最大化に向けた運営改革.....	12
2.3.5 人材育成及び基盤技術開発・継承.....	12
3. 重点課題解決への施策提案.....	14
3.1 SANS装置の新設及びNSE分光器の高度化による材料科学における国際競争力の強化.....	14
3.1.1 重点課題解決に向けたSANS装置及びNSE分光器高度化の必要性.....	14
3.1.2 小角散乱装置群の現状及び将来計画	16
3.1.3 新たなSANS装置の高度化計画	18
3.1.4 SANS-U(東大物性研)の高度化計画	19
3.1.5 SANS-J(JAEA)の高度化計画	20
3.1.6 中性子スピンエコー(NSE)分光器.....	22
3.1.7 本将来計画がもたらす研究基盤の発展と将来展望:.....	25
3.2 極限環境下での超高効率な中性子回折・非弾性散乱の実現による革新的量子物質研究	25
3.2.1 極限環境中性子回折装置の新設と偏極中性子技術の高度化によるスピン構造研究.....	26
3.2.2 強磁場及び多軸中性子非弾性散乱の組合せによる極限環境非弾性散乱の実現と量子物質スピンダイナミクスの研究	29
3.2.3 本計画の実現により期待される成果と将来展望	32
3.3 JRR-3を活用した中性子医療技術基盤の構築	33
3.3.1 医療用RI研究技術基盤の確立	33
3.3.2 中性子を利用した最新のがん治療の高度化	36
3.4 JRR-3成果最大化へ向けた運営改革テストベンチ:共同運営特区構想	39
3.5 中性子散乱に関する分野の人材育成課題及び提案	41
3.5.1 人材育成における現状及び課題	41
3.5.2 JRR-3 の機動力を生かした人材育成の可能性	41
4. 原子炉本体の高度化検討	43
4.1 20 MWを維持した高中性子フラックス化	43
4.2 炉室ビーム取り出し断面積拡大	44

4.3 BH及びガイド管増設	45
4.4 炉室冷中性子源	46
4.5 冷中性子100倍計画.....	47
4.6 9Cガイド管増設.....	49
4.7 JRR-3とJ-PARC MLF間の試料輸送.....	50

1. はじめに

日本原子力研究開発機構(以下、「JAEA」という)・原子力科学研究所の所有する研究用原子炉JRR-3(以下、「JRR-3」という)は熱出力20 MWの高性能汎用研究炉として1990年の臨界以降多方面の研究に用いられ、物質科学、材料科学、生命科学や文化財科学など幅広い分野の発展に大きく貢献してきた。多くの学術的成果や人材育成などを通じて、JRR-3は我が国の科学に広く貢献する基盤的な定常中性子源実験施設としての地位を確立してきた。2011年3月11日の東日本大震災とその後の東京電力福島第一原子力発電所事故により我が国の原子力施設はほぼ運転を停止することとなり、JRR-3も2010年の計画停止以降長期にわたって停止することを余儀なくされた。停止期間中には震災以降に改定された耐震基準への適応等の工事が行われ、2021年に10年ぶりの運転再開を果たした。その後は、安全文化の再構築、運転体制の強化、共同利用制度の見直しを進めながら、国内研究炉としての役割を着実に取り戻している。運転再開から約5年を経た現在、JRR-3は「震災前の復元」を超え、「次の時代を見据えた研究炉の将来構築」へと歩みを進める時期を迎えている。

JRR-3の停止からこれまでの期間に中性子科学を取り巻く環境は大きく変化している。放射光やクライオ電子顕微鏡などの種々の量子ビーム計測技術が進展し、中性子計測の将来計画を考えるにあたってそれらに対する独自性や相補性の観点が重要となっている。我が国に建設された大強度陽子加速器施設に設置されたパルス中性子源を有する物質・生命科学実験施設(以下、「J-PA RC MLF」という)が設計出力を達成し大きな成果を挙げている中、定常中性子源及びパルス中性子源の相補性・冗長性の観点も重要である。JRR-3が停止していた10年の間に世界の定常中性子源実験施設では種々の技術開発が進んでおり、世界の動向を見据えたうえでのビーム利用装置の改廃・高度化の実現はJRR-3を再び競争力のある定常中性子源実験施設と変貌させるために必須であろう。さらに、学术界や産業界の構造変化への対応も怠ってはならない。界面・表面などを本質的に有する複合材料や反応状態中の構造・ダイナミクス解析の重要性が増していること、また電子のスピン自由度のデバイス利用への期待が高まっている。学术界や産業界からの要望にスピーディーに対応すること、さらに中性子科学の側から新しい計測を提案することの必要性はますます高まっている。また、近年の計算科学・機械学習の発展は計測技術の存在意義を本質的に変化させる可能性を有しており、将来構想の構築にはこのような観点も欠かせない。

JRR-3の成果最大化を考えるうえでは、ハードウェアの高度化に加えて、定常中性子源実験施設における運営の高効率化や人材育成に関しても検討の必要がある。これまでJRR-3の中性子計測に関しては、JAEAにおいては物質科学センターがJRR-3に設置された12台のビーム利用装置を用いて独自研究及び供用利用を強力に推進してきた。東京大学物性研究所(以下、「東大物性研」という)は、東北大学金属材料研究所(以下、「東北大金研」という)及び東北大学多元物質科学研究所(以下、「東北大多元研」という)、京都大学複合原子力科学研究所(以下、「京大複合研」という)、茨城大学などとともにJRR-3の全国大学共同利用を運営し、12台のビーム利用装置を使って学術的成果創出と大学生・大学院生の教育を通じた人材育成を行ってきた。近年では量子科学技術研究開発機構(以下、「量研機構」という)もビーム利用装置の運営に加わっている。このように多彩な機関が関わることはJRR-3の多面的な活用という世界にも類を見ない特徴となっており、基礎学術研究・人材育成から産業利用まで広く成果を挙げてきた根幹となっている。特に、大学共同利用の枠組みで全国の大学がビーム利用装置の運営に関わることができる制度は世界に類を見ない我が国独自のものであり、海外の定常中性子源実験施設と比較して少ない予算・人員規模での成果創出につながってきた。他方、複数の機関の参画による業務の冗長性や定常中性子源実

験施設全体計画の不在・遅延などが課題となっており、これまでの特徴を生かした運営形態の改革も重要な観点である。

現在我が国では高速増殖原型炉「もんじゅ」(福井県敦賀市)跡地に建設予定の新試験研究炉計画が開始されている。また、J-PARC MLFにも第2ターゲットステーション(以下、「TS2」という)計画が存在する。このような状況の中、JRR-3を舞台として、研究者・技術職員・学生・事務職員・地域に根差した関連企業等の多様な担い手が主体的に関わりながら中性子科学を推進し、知見・技術・経験を共有・継承していく研究教育の場を維持・発展させることが強く望まれている。これにより、新試験研究炉やJ-PARC MLFのTS2計画という次世代中性子実験施設の成功につながるものと期待される。

これまでJRR-3は産業界、大学、公的機関、学術ユーザーコミュニティのハブとして有効に機能してきており、我が国の中性子科学全体の基盤を支える立場にあった。今後もこれを堅持したうえで、さらなる研究成果の最大化を目指したビーム利用装置の高度化、線源高度化及び関係組織が有機的に連携した運営体制の構築が必要である。本将来計画においては、上述種々の観点を考慮のうえ、今後5年間(中期)におけるJRR-3において重点研究課題の選定とそれらを達成するための具体的な施策及び定常中性子源自体の高度化の検討を行った。また運営形態や人材育成に関する問題点の分析及び改善方法も提案したい。一方で、重点研究課題以外の研究課題の分析・提案及び現有の個々のビーム利用装置の将来計画に関しては、中期5年間以降の長期将来計画策定への参考事項という観点から付録として付ける。

中性子ビーム利用は研究者のみならず、広く社会・経済に資するものである。本将来計画の策定にあたっては、日本成長戦略会議の設定した『戦略17分野』等の重点戦略分野への貢献を強く意識した。本将来計画の達成により、マテリアル・GX、量子物質・量子技術や創薬・先進医療などの分野において基礎研究から産業応用までを支える中性子科学に関する研究基盤の強化が達成される。これにより、学術的卓越性の追求と同時に、産業競争力の強化及び国民生活の向上に直結する成果創出が大いに期待される。本将来計画の着実な達成により、今後JRR-3が日本の中性子科学の屋台骨を支え、次世代を担う研究者・技術者が安心して最先端科学技術研究・開発に挑戦できる研究基盤となることを切望している。

2. JRR-3の活用により期待される科学技術の未来像

2.1 量子ビーム計測技術の進展及び原子炉中性子科学のポテンシャル

量子ビーム計測技術の近年の進化は目を見張るものがある。放射光や自由電子レーザー、さらには最近のクライオ電子顕微鏡等の進展により、化学反応の実時間計測や単分子の原子レベルでの構造解析などこれまでは得られなかった情報が得られるようになってきている。このような他手法に比較して、中性子散乱は極めてユニークな独自性を有している。具体的には、水素等の軽元素の精密位置及び動的挙動の直接観測が可能、電子スピン(磁気モーメント)構造及びその運動の観測が可能、水素・重水素 n の散乱断面積の違いによるコントラスト変調が可能、高い透過性を利用したバルク深部の非破壊測定などが可能である。これらの独自性は他手法との相補性につながる。例えば、X線との組み合わせでは電子及び原子核位置情報や水素位置情報の補間、磁気構造及び電荷構造の決定の相補性が、電子顕微鏡法との組み合わせでは、局所構造及び平均構造(ナノスケール及び原子スケール)の相補情報が得られる。また中性子の回折・小角散乱及び電子・光学顕微鏡法の組合せからは原子スケールからマクロスケールまでのマルチスケール測定が可能になるが、これらは高分子や電池材料などの研究に極めて重要である。一方で、近年目覚ましく発展を進めるAIを含めたコンピューターサイエンスは、多くの異なる実験手法から得られた巨大データセットからの物性・材料機能予測を可能にするであろう。これまで、量子ビーム計測技術においては、各々の計測法の役割分担に基づく利用が重視されてきたが、生成AI・データ駆動型解析がより進展した将来には、一つの量子ビーム利用により得た理解が、補完的推定を含めても十分な確度を有するかを改めて問う必要がある。複数の量子ビーム計測技術による観測は、生成AIの学習バイアスを補正し、科学的知見の信頼性を担保するうえで重要性を増しており、中でもユニークな情報を与える中性子計測はモデル構築への重要な鍵となると予想される。従って、中性子の優位性をさらに発展させること及び他の量子ビーム計測技術との相補性を確立することは、21世紀の科学技術及び社会の発展に不可欠な量子ビームエコシステムの構築に欠かせない要素であることは間違いない。

中性子計測に関する分野に限っても、最近の15年間で国内外の情勢に大きな変化がみられている。国内ではJ-PARC MLFが本格稼働し、世界最高水準のパルス中性子源として成果を挙げている。かつて国内で本格的な中性子散乱に関する実験を担えるのは事実上JRR-3のみであったが、現在は研究者が課題に応じて「パルス中性子源」と「定常中性子源」を選択できる環境が整った。これら二種類の中性子源に対しては、得られる中性子ビームの時間構造の有無に応じて異なる原理に基づく中性子装置群が開発・建設されている。パルス中性子源J-PARC MLFにおいては、中性子の時間構造を極限まで活用する装置開発が行われており、広い波数空間を一挙に測定する中性子回折手法や広いエネルギー・波数空間を一挙に測定する中性子非弾性散乱手法等に優位性がある。一方で、JRR-3に代表される定常中性子源においては、強い時間平均中性子フラックスが得られること、低いエネルギー(長波長)の中性子強度が高いこと、さらに多くの場合中性子を単色化して使用するため中性子スピン偏極が容易、精密なデータ取得が可能等の数々の優位性がある。JRR-3が有するこのようなポテンシャルをさらに発展させることはJ-PARC MLFとの相補性を明確にし、さらには他の量子ビーム計測技術と合わせ量子ビームエコシステムを完成させるため極めて重要である。また、多くの他の手法が大型実験施設のみならず比較的小規模な実験室でも可能であることに対して、物質・材料科学に供される中性子計測には大型実験施設が必要である。従って冗長性の観点からもJRR-3を高度化のうえ、安定に運転することは国内の学術研究や産業利用の継続性の観点から重要である。ここでいう冗長性は、単なる中性子実験施設・ビーム利用装置

の重複ではなく、2.2.4や3.4などで具体化されるように、課題特性に応じて適切な中性子実験施設・ビーム利用装置へ接続し、研究機会の継続性を担保する運営上の仕組みをも含む概念として捉えるべきである。

中性子計測に関する分野の世界の状況を見ると、Laboratoire Léon Brillouin (LLB・仏) 及び Helmholtz Zentrum Berlin (HZB・独) の研究用原子炉が運転終了し、Heinz Meier-Leibnitz Zentrum (MLZ・独) の FRM-II 原子炉や National Institute of Standards and Technology (米) (以下、「NIST」という) の NBR 原子炉が複数年に渡る停止を余儀なくされる等、多少の不運はあるが、Oak Ridge National Laboratory (米) (以下、「ORNL」という) の Spallation Neutron Source (以下、「SNS」という) や我が国の J-PARC MLF が安定して稼働しており、近い将来スウェーデンで建設中の European Spallation Source (ESS) も運用を開始する予定である等、中性子計測に関する需要の更なる増加が如実に見て取れる状況である。特にアジア圏では中国が学術研究の各分野で大きく躍進し、中性子科学に関する分野においても、二つの定常中性子源実験施設 China Advanced Research Reactor (CARR・北京)、China Mianyang Research Reactor (CMRR・綿陽) やパルス中性子源実験施設 China Spallation Neutron Source (CSNS・東莞) を擁するなどその存在感が非常に大きくなっている。これらの中国国内の中性子実験施設の利用のみならず、世界の多くの中性子実験施設において中国からのユーザー数の増加がみられる等、中性子科学に関する分野における覇権の地理的変化に注視する必要がある。我が国の基礎学術力や産業競争力の維持と更なる強化のためにも、国内の定常中性子源・パルス中性子源の協調的かつ飛躍的な進展の必要性は明らかである。定常中性子源・パルス中性子源の協調的発展の観点からは、両者を一つの研究所内に有する ORNL (米) が一つの参考例になる可能性がある。ORNL (米) では、パルス中性子源である SNS 及び定常中性子源である HFIR を併存させ、それぞれの特徴を最大限に活かす運用モデルで運用しており、J-PARC MLF 及び JRR-3 の関係を考えるうえで示唆に富む。

中性子科学の未来を考えるうえで非常に重要な問題に人材育成及び技術継承がある。我が国のみならず多くの先進国において少子高齢化等の進行により若者人材の科学技術分野離れが指摘されているが、中性子分野も例外ではなく優秀な人材の確保が年々難しくなっている。このような状況を看過することは将来の中性子実験施設の建設に大きな問題となることは明白であり、長期的視点から我が国の学術的及び産業競争力の減少につながることは間違いない。

上述の、種々の量子ビーム計測技術の中での中性子計測の立ち位置、J-PARC MLF との相補性・冗長性、世界の中性子科学の覇権変化の中での定常中性子源における中性子科学、さらには人材育成及び次世代中性子実験施設の建設の観点から、本将来計画では、次の5年間(中期)に以下の重点課題を解決することを提案する。以下では、重点課題の概要を記し、課題解決に向けた施策(技術的实施事項)は3章に記す。重点課題以外の研究分野分析や個々のビーム利用装置の将来計画に関しては付録に記す。

2.2 JRR-3における現状及び課題

JRR-3の現状をみると、2021年の運転再開後、JAEA・物質科学研究センター、量研機構、東大物性研、東北大金研及び多元研、京大複合研、茨城大学などが連携して28台のビーム利用装置を運用し、産官学からの広いユーザーを受け入れ、着実に成果を挙げている。一方、10年間の停止期間中は耐震対策が中心で、大規模な定常中性子源実験施設の高度化は進められなかった。この間、世界の中性子実験施設では、大型投資も伴う中性子実験施設・ビーム利用装置の高度化が継続しており、性能面で見劣りする部分があるのは否めない。加えて、停止期間中に本格稼働し

たJ-PARC MLFの影響で、JRR-3に対する利用ニーズも確実に変わってきているが、運転再開後の5年間は、その変化への対応が十分とは言えない状況にある。

この状況を抜本的に改善するためには、JRR-3が今後取り組むべき課題を明確にする必要がある。その際、JRR-3及びJ-PARC MLFの双方で利用ニーズが高止まりしている領域は、重点的に取り組むべき研究分野を示す有力な指針となる。これはアクティブな研究領域であるだけでなく、潜在的な中性子ユーザーが一定数存在することを示唆しているためである。この領域の強化は、成果創出及び中性子散乱の活性化に直結することが期待できる。

まずJRR-3についてみると、小角散乱装置群(SANS-U(東大物性研)、SANS-J(JAEA))は競争率が2倍を超えることも多く、慢性的なマシンタイム不足となっている。パルス中性子源と比べて低波数領域に強みをもつ定常中性子源の小角散乱装置群は、大学から産業界まで幅広いユーザーの利用ニーズを集めている。一方で、1グループが年間に確保出来る実験日数は数日に限られ、成果創出という観点に加え、学生や民間企業ユーザーの持続的な利用を期待することも厳しい状況にある。加えて、構造から繋がるダイナミクスの測定領域でも高度化が進んでおらず、世界的な水準と比べて見劣りする状況にある。一方で、J-PARC MLFの状況をみると、特殊環境微小単結晶中性子構造解析装置SENJU(以下、「SENJU」という)及び冷中性子ディスクチョッパ型分光器AMATERAS(以下、「AMATERAS」という)は、競争率が3倍を超えることが多く厳しい状況にある。これは、主に量子物性分野からの利用ニーズによるもので、研究課題として新たな発見が続いていることに加え、J-PARC MLFのパルス中性子白色ビームにより広い波数及びエネルギー空間のカバーが可能となることで、JRR-3の長期停止前と比べて研究スタイルそのものが大きく変化していることを反映している。JRR-3では、依然として1つの検出器によるポイント測定が大半を占めており、パルス中性子ビーム利用装置の高い利用ニーズを満たす相補的な立ち位置となるには、厳しい状況にある。加えて、これらの測定に不可欠な極低温・マグネットといった試料環境機器は、寒剤である液体ヘリウムの地政学的要因による供給不安定性から運転が非常に難しくなっており、液体ヘリウムを使用しない試料環境機器整備が強く望まれているが、多くのビーム利用装置において液体ヘリウムフリー試料環境機器の整備が進んでいない。

JRR-3の中性子利用においては、JAEA・物質科学センター、量研機構及び東大物性研を中心とする大学群がおおよそ半数ずつのビーム利用装置を設置し、独自研究・施設供用並びに共同利用を強力に推進してきた。このように多彩な機関が加わることで、基礎学術研究・人材育成から産業利用まで広く成果を挙げてきた。一方で、先端科学技術は経済安全保障及び産業競争力の核であり、海外との熾烈な研究開発競争を勝ち抜き、我が国の中性子科学を更に発展させるという観点からは、JRR-3全体としての意思決定の必要性がある。JRR-3の更なる成果最大化に向けては、現状の特色を失うことのない形で、より強固な組織間連携を模索する必要がある。

JRR-3の利用という点では、照射による医療用放射性同位元素(RI)(以下、「医療用RI」という)製造やホウ素中性子捕捉療(以下、「BNCT」という)法を含む中性子がん治療のための要素技術開発も欠かすことはできない。現在、超高齢社会の我が国において、副作用の少ないがん治療として放射線や医療用RIを用いた先端医療技術の重要性が増している。一方で、医療に特化した原子力関連技術の基盤が国内に存在しないことから、医療用RI製造の海外依存度の高まりや中性子がん治療時の核反応(治療効果)のモニタリング技術の開発遅延が生じている。これらの問題を解決するためには、基盤となるJRR-3の照射設備や医療用RIの取扱設備の老朽化対策及び機能拡張、中性子がん治療の要素技術開発に向けた専用実験ポートの整備拡張が不可欠である。さらに、国内外の民間企業、大学、公的機関との連携体制を構築することで研究開発を加速し、核医学研究の普及と発展及び中性子がん治療の品質向上を早急に進める必要がある。

京都大学研究用原子炉(以下、「KUR」という)が2026年4月に運転終了となることに伴い、福井県敦賀市の新試験研究炉建設に向けた技術開発及び人材育成の場として、JRR-3の活用が推進されている。新試験研究炉建設に向けて京大複合研が主導して各種タスクフォースが活動を開始しているが、中性子ビームを利用したタスクフォース活動の主戦場を国内唯一の定常中性子源となるJRR-3が担うことは自然である。照射分野においても放射化分析等に関連する実験装置開発を目的としたタスクフォースの設置が進められている。また、放射化分析については、他の照射利用に先駆け、2026年度より分析装置の移設や人材交流を進めることで、KURとの協力体制の構築を開始している。今後も、KURとの協力体制の強化を進め、JRR-3において照射ニーズの受け入れ及び技術継承を担っていく方針である。

また、これらの重点領域における研究を進めていくうえで、それを推進する人材の視点を欠かすことは出来ない。JRR-3の長期停止により、中性子散乱計測を主とする研究室はテーマの変更を余儀なくされ、学生時代に中性子散乱をビーム利用装置から学ぶ環境が閉ざされた。これは現状40代前半及びそれ以下の中堅・若手中性子散乱に関する研究者の減少に如実に現れている。さらにJ-PARC MLFの建設に際し、多くの研究者が東海村に集結したことの裏返しとして、大学における中性子研究室が減少し、中性子人材供給の道が大幅に縮小したことにも強い影響を受けている。これは多くの中性子研究者が集うJAEAが学位を授与出来ないことにも一因がある。今後、J-PARC MLFをはじめ、TS2(J-PARC)や新試験研究炉まで含めた我が国の中性子科学を推進していくうえで、人材育成は避けては通れない大きな課題であると言える。

これらの状況を踏まえて、次節にて重点領域として取り組むべき課題を詳述する。

2.3 重点課題

我が国の重要な研究開発拠点の一つとして、喫緊の学術的課題や社会課題に取り組むことはJRR-3に課せられた使命である。前節で記した定常中性子源による計測技術の優位性をさらに進化させることで、基礎学術的な課題解決はもとよりエネルギーや医療といった社会的に重要な課題に大きな貢献ができる。本将来計画では、以下に挙げる具体的重点研究課題の解決を通して学术界や産業界へと貢献することで我が国の科学技術力の強化及びそれに基づく経済安全保障に貢献する。

2.3.1 複合物質の構造・ダイナミクスの解明による新機能性材料の創出

身の回りの物質(特に有機材料)は分子が集合した階層構造を有しており、この階層構造が熱的に揺らぐことで機能を発現している(図2-1)。例えば、金属材料、無機材料と並ぶ三大材料である高分子材料は、ひも状の高分子鎖が集まってマクロな材料を形成している。高分子の発見に対して1953年にノーベル化学賞が授与された後、高分子材料はゴム、繊維やプラスチックなど、我々の生活に欠かせない材料となっているが、その特徴の一つはしなやかな力学特性である。高分子材料特有のしなやかな力学応答は、高分子鎖が形態を変えながら熱的に揺らぐダイナミクス(セグメントダイナミクス、レプテーションモード)から生み出されており、この高分子鎖の形態観察は中性子小角散乱(以下、「SANS」という)、高分子鎖のダイナミクス観察は中性子スピンエコー(以下、「NSE」という)によって実現した。このような高分子材料の物性発現メカニズム解明を含む研究に対して1991年にノーベル物理学賞が授与されている。

近年は、分子間相互作用を制御することで精緻に分子を組み上げた超分子材料が注目を集めている。代表的な例としては、幾何学的に連結した超分子複合体(ロタキサン、カテナンなど)を用いた分子マシンの開発に対して2016年にノーベル化学賞(図2-1(d))、金属イオン及び有機配位子

が組みあがった多孔材料である有機金属構造体(MOF)の開発に対して2025年にノーベル化学賞が授与されている。超分子材料開発の歴史は比較的浅く、その機能解明は今後さらなる発展が期待される研究領域である。超分子材料の機能は、精緻に組まれた分子集合構造の揺らぎに起因している。SANS・NSEによる先端構造ゆらぎ計測は、超分子材料の機能発現メカニズム解明及び次世代材料開発において必須であり、分子マシン、ドラッグデリバリーシステム、人工細胞、分離膜、燃料電池、触媒など広範な次世代材料開発に資するものである。

合成有機材料のみならず、タンパク質等の生体分子の機能解明においても構造ゆらぎ計測は重要である。例えば、複数のドメインから構成されるマルチドメインタンパク質の機能は、ドメイン間の協同的な熱運動と密接に関係しており(図2-1(e))、タンパク質の機能解明には、SANSによる構造観察、NSEによるダイナミクス計測が重要な役割を果たしている。タンパク質のドメインダイナミクスを解き明かすことは、抗体医薬品等の創薬においても重要視されており、海外ではPfizer(米)、Astra Zeneca(英)やAmgen Inc.(米)などのいわゆるビッグファーマからスタートアップまで、多様な製薬企業が中性子を用いたナノ構造解析に取り組み始めている。

全く異なる分野の材料研究である磁性材料においても、古くは磁気バブルメモリに始まり、現在精力的に研究されているトポロジカルスピントクスチャー等、時空間階層構造の理解がその学理構築及び機能創製に欠かせない。

このような構造揺らぎに着目した機能性材料開発の重要性は、文部科学省・2025度戦略目標「ゆらぎの制御・活用による革新的マテリアルの創出」においても強調されている。本重点課題においては、SANS装置及びNSE装置を新設・高度化し、ハイスループットかつ実材料動作環境での時空間階層構造計測を可能にすることで、新機能性材料の創製及び性能向上を目指す。水素位置や運動、さらにはスピンの向きや運動を直接決定できる中性子散乱は機能性材料研究においてAIや他の量子ビーム計測技術では得られない情報をもたらすため、相補的に活用することで機能性材料研究を飛躍的に進展させる。二次電池電解質性能の飛躍的向上やタイヤゴム性能向上による燃費向上などを通じたエネルギー問題への貢献、創薬を通じた医療への貢献、さらには新しい磁気記憶原理の創出による情報化社会への貢献等、その波及効果は枚挙に暇がない。

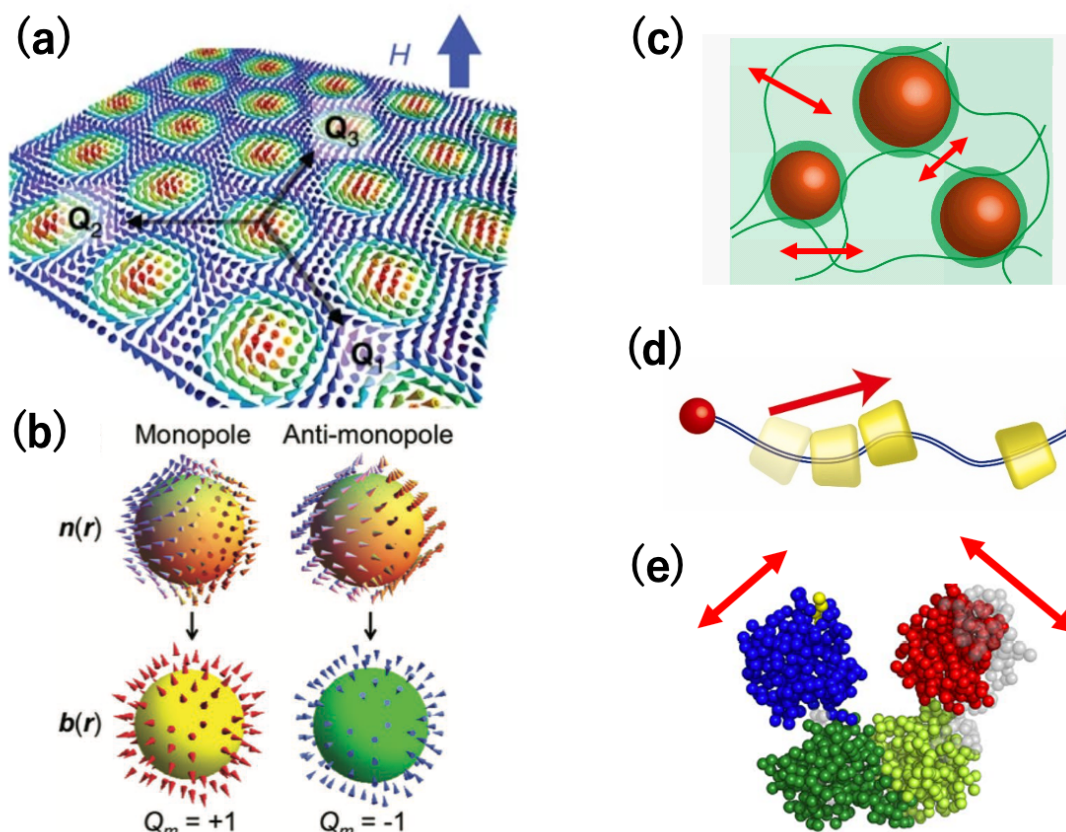


図2-1 機能性物質材料に現れる様々な複合構造の例。(a)磁気スキルミオン格子[図は Y. Nii *et al.*, Nat. Commun. **6**, 8539 (2015). より引用]、(b)スピンヘッジホッグ・反ヘッジホッグ格子[図は N. K anazawa *et al.*, Adv. Mater. **29**, 1603227 (2017)より引用]、(c)高分子複合材料、(d)トポロジカル超分子、(e)マルチドメインタンパク質[図は、M. Shimizu *et al.*, Scientific Reports, **12**, 9970 (2022)より引用]

2.3.2 スピン構造・ダイナミクスの制御による量子機能の創生

クライオ電子顕微鏡(2017年ノーベル賞)等の新技術の勃興等により、生体高分子の構造解析研究は急速に進展しており、現在 Protein Data Base(PDB)に約24万構造が登録されるまでに成長している。このような巨大なデータベースの構築がAI(AlphaFold)による構造予測という衝撃をもたらしたことは記憶に新しく(2024年ノーベル賞)、近未来の創薬応用等への期待が大きい。翻って、近年磁性研究において、磁気構造起源トポロジカル電子構造や交代磁性体など、新しい量子機能を有する磁性体が続々と発見されている。他方、このような発見の基本となる磁性体中のスピンの配列(磁気構造)に関しては、現在世界で最も大きなデータベースでも2500弱程度しか登録されていない。この分野は、今後さらに多数の磁気構造が得られることで新しい量子機能が続々と発見されると予想される、いわゆるブルーオーシャンであり、高スループットの磁気構造解析を実現することが強く望まれる。

一方で、多数のスピンの協力的な運動はマグノン、スピノンやマヨラナフェルミオンなどの量子的な粒子(準粒子)を形成する。原子の運動も原子振動の量子フォノンを形成するが、近年角運動量

を持つフォノンが提案される等、著しい進展を見せている。これらは基礎学術的に大きな興味を持たれているだけでなく、情報保存や伝達の媒体として未来の省エネルギー情報デバイスへの応用が大きく期待されている。また、超伝導(1913年、1972年、1987年ノーベル賞)、量子ホール効果(1985年、1998年ノーベル賞)やハルデーン状態(2016年ノーベル賞)などの巨視的な量子状態は時にトポロジカルな性質を獲得し、基礎学術的興味だけでなく、産業界を非連続的に革新させる鍵となる技術として大きく期待される。準粒子の運動や巨視的な量子状態の解明及びその機能創生にはスピン運動のさらなる高精度測定、特に実デバイスに必要な外場制御下でのスピン運動測定が求められている。

本重点課題においては物質中のスピンと直接相互作用する磁場環境を有する中性子回折装置及び中性子非弾性散乱装置を新設・高度化する。さらに中性子スピン偏極技術を組み合わせる。これらにより量子物質研究を飛躍的に進展させる。新しい磁気構造起源新奇量子物性や新準粒子の発見などの基礎学術的な成果が期待されるだけでなく、それらのスピントロニクス応用から省エネルギー情報通信技術への貢献等が予想される。

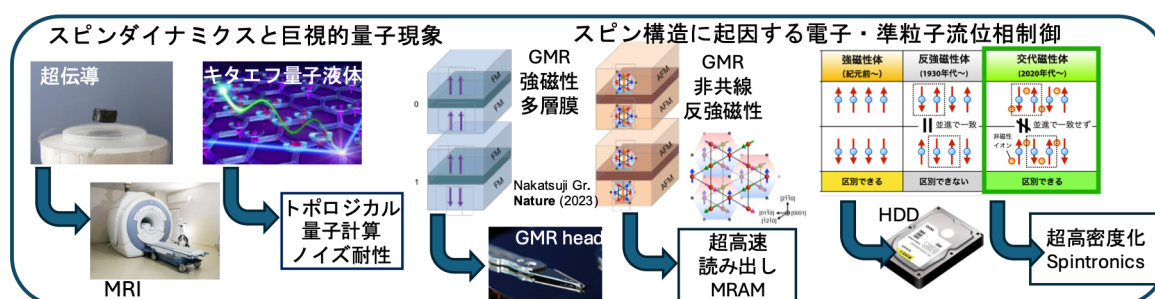


図2-2 様々な量子現象とそれを用いた機能創製の可能性。

[画像は以下より引用<https://www.ornl.gov/news/neutrons-zero-elusive-magnetic-majorana-fermion>、Chen et al., *Nature* **613**, 490–495 (2023) <https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2024-12-13-002>]

2.3.3 がん治療高度化を通じた国民生活環境の向上

超高齢化が進む我が国において、がんは国民の2人に1人が生涯で一度は罹患する国民病となっている。がんの治療法としては外科(手術)療法、化学療法、放射線治療が三大療法とされるが、近年のがん治療では放射線や医療用RIを用いた先端医療技術が不可欠となっており、多大な治療実績を上げている。故に、これらを支える原子力関連技術は、国家として維持・高度化すべき重要な技術である。中性子や医療用RIを用いた治療法は化学療法と比較して副作用が圧倒的に少なく、今後最も必要とされる治療法の一つである。

このように国民の生活に直結する事項であるにもかかわらず、医療用RIのほとんどは海外施設に依存している。そこで、本重点課題では、濃縮同位体ターゲットの回収(リカバリー)技術の開発、分離・精製工程へのオートメーション技術の導入、施設のオープン化により創薬研究ユーザーへの支援体制を行うことにより医療用RI研究技術基盤を確立する。

また、中性子照射によるがん治療に関しては治療に必要な薬剤開発の速度が遅く、治療時の核反応の観測もできない現状がある。特に薬剤がどの程度腫瘍に蓄積されたか、さらにはその薬剤

がどのように代謝されるかを確認することが極めて重要である。そこで、薬剤の代謝を即発ガンマ（ γ ）線イメージングにより直接観測可能にする。これらはがん治療という国民生活に直結する課題であり、その波及効果は極めて大きい。

2.3.4 成果最大化に向けた運営改革

JRR-3においては、JAEA・物質科学センターが全ビーム利用装置数の約半数（12台）のビーム利用装置を設置し、独自研究と施設供用を強力に推進してきた。近年では量研機構も複数台のビーム利用装置を所有し独自利用を推進している。一方で、残りの約半数（12台）は東大物性研を中心に東北大金研及び多元研、京大複合研、茨城大学などとともに共同利用の枠組みの中で主に学術研究や大学生・大学院生の教育を通じた人材育成に供されてきた。このように多彩な機関が加わることで、基礎学術研究・人材育成から産業利用まで広く成果を挙げてきたことは前述の通りである。特に共同利用拠点の枠組みにより全国の大学研究者がビーム利用装置の運営に関わるという制度は古くは高エネルギー加速器研究機構（以下、「KEK」という）中性子実験施設（KENS）でも取り入れられていた枠組みであり、比較的小さな予算・人員規模で世界的な成果を挙げてきたという実績がある。

一方で、先端科学技術は経済安全保障及び産業競争力の核であり、海外との熾烈な研究開発競争を勝ち抜き、我が国の中性子科学を更に発展させるという観点からは、多数の研究機関が独立に（もしくは弱く連携し）、施設運営に関わることが障害となることも否めない。最も大きな問題は施設運営に関する意思決定者の不在であり、大きな変化を伴う高度化・改革が難しくなっている。これは同時に学術的な知の深化（基礎研究）及び産業的な実用化・社会実装（応用研究・スタートアップ）の成果創出に対する責任の不在でもある。今後ますます重要になる我が国の学術的及び産業競争力の強化に向けて、意思決定及び責任の不在は深刻な問題であろう。さらに、多数の機関の併存が、例えば共通機器の重複整備や使用修了機材の他機関再利用を妨げるなどの弊害もある。これは、今後さらに高効率に成果を上げざるを得なくなる我が国の財政状況を鑑みるに、早急に改善の必要がある点である。また、実験課題審査や採択、成果報告やその広報など、各組織がバラバラに行っている現状は、そこにかかるコスト・効率性の観点からも、またユーザーさらには広く国民への効率的な情報伝達という観点からも問題が多い。安全業務や放射線管理業務に関しても組織を超えた連携が必要な課題である。

このような現状を鑑みるに、JRR-3の現在の成功をもたらした最も大きな特徴、すなわち多数の機関それぞれの特色を生かした研究活動推進をさらに発展させるとともに、意思決定及び責任の明確化、ビーム利用装置・機器整備の効率的実施、施設運営に付随する各種業務の統一と効率化を導入する必要がある。これは一朝一夕にできることではないものの、その方策を模索することは今すぐに開始することができる。

2.3.5 人材育成及び基盤技術開発・継承

人材育成及び基盤技術開発・継承は我が国のみならず世界の中性子科学において喫緊の課題である。これまで述べた重点課題を解決するためにも、さらには次世代中性子実験施設の建設及び成果創出を成功させるためにも、中性子科学を世界的にリードする人材の育成は欠かせない。また現在は世界的にも優位性を有する我が国の量子ビーム計測技術であるが、この優位性を持続・発展させるためにはさらなる基盤技術開発の継続的実施及び技術継承が欠かせない。国内の状況としては、これまで大学を基盤として幾多の中性子科学に関する人材を輩出してきたKURが運転終了となることで、人材育成の観点からもJRR-3の重要性が増している。他方、今後少子高齢化がますます進行する我が国においては、人材育成、基盤技術開発・継承の両方に対してAIやロボ

ットなどの高度利用による自動化や知識集積の推進、さらにはそれらを前提とした中性子実験施設・ビーム利用装置・制度設計などの抜本的な発想転換の必要がある。

本将来計画においては、大学、産業界や国立研究所などが集結するJRR-3の特徴を最大限に生かし、ユーザーコミュニティと中性子実験施設の協力、AIやロボットなどを前提としたに新しい人材育成、基盤技術開発・継承のスキームを構築する。

3. 重点課題解決への施策提案

本章では、2章で列举された重点課題の解決に向けた具体的な中性子実験施設・ビーム利用装置の高度化及び運営方法の改善に関する今後5年程度の将来計画を述べる。なお、原子炉や中性子輸送などに関する将来計画に関しては、規制等の関係から今後5年程度と年限を切った計画策定は困難であるが、ビーム利用装置や運営の高度化を考える上で重要なファクターであるため、第4章にまとめる。

3.1 SANS装置の新設及びNSE分光器の高度化による材料科学における国際競争力の強化

本将来計画で選定した重点課題の一つ「複合物質の構造・ダイナミクスの解明による新機能性材料の創出」の解決にはSANS・NSEによる物質材料のナノスケール時空間階層構造の解明が必要である。本節では、産官学の機能性材料開発に必要な構造ゆらぎ計測を実現するために、JRR-3の小角散乱装置群及びNSE分光器の高度化計画を示す。

3.1.1 重点課題解決に向けたSANS装置及びNSE分光器高度化の必要性

我が国は、研究炉を基盤とする中性子散乱の黎明期から本分野に参画し、特に高分子科学及び構造生物学の分野において、定常中性子源実験施設とユーザーが緊密に連携する体制のもと国際的に高い評価を確立してきた。その中心的役割を担ってきたのがJRR-3である。改造炉として運転再開した1990年代以降、安定した高品質ビームを活用した精密構造解析が体系的に展開され、我が国独自の研究基盤が築かれてきた。世界の主要な高性能SANS装置及びゆらぎの計測を担うNSE分光器の多くは、定常中性子源実験施設に整備されている。その背景には、SANS装置における集光光学系を用いたマイクロメートルスケールまでの精密構造測定や、NSE分光器によるサブマイクロ秒におよぶ時間域の揺らぎの計測において、時間的に安定した中性子ビームが有利であるという事情がある。定常中性子源は、時間構造を持たない連続ビームを安定に供給できるため、これら高度計測との整合性が高い。JRR-3には、SANS-U（東大物性研）及びSANS-J（JAEA）という2台の小角散乱装置群、iNSE（東大物性研）というNSE分光器が設置され、SANS・NSEによる構造ゆらぎ計測が推進されてきた。

SANS装置及びNSE分光器の周辺技術として、コントラスト変調法の開発においても、日本は先端的な技術開発を行ってきた。X線散乱等、他の計測手法と比較した場合、中性子散乱計測の大きな特徴は、試料中の軽水素を重水素に置換する等の方法でコントラストを変調し、多成分材料の構造・ゆらぎを成分毎に分離して観察できる点にある（-1）？。世の中に存在する材料・物質は、ほとんどが多成分から構成されており、コントラスト変調中性子散乱計測は学術的な知の深化（基礎研究）及び産業的な実用化・社会実装（応用研究・スタートアップ）の両側面において極めて有用である。近年、東大物性研のグループは、コントラスト変調中性子計測において、成分構造情報を高精度で決定するためのコントラスト最適化を行う数理手法を世界に先駆けて開発し、コントラスト変調中性子計測の計測効率を著しく向上させることに成功している（図3-1）。また、コントラストを変調させるための重水素化技術としては、京大複合研のグループがタンパク質の重水素化技術開発を進めており、特に複数ドメインが連結したタンパク質の重水素化技術等で国際的な優位性を有している（図3-2）。さらに、国立研究開発法人日本医療研究開発機構の生命科学・創薬研究支援基盤事

業(AMED-BINDS)を通じて、タンパク質中性子溶液散乱法による構造・ダイナミクスの研究支援を主導しており、今後の更なる発展が大きく期待される。また、重水素化以外のコントラスト変調技術として、SANS-J(JAEA)グループは、軽水素の散乱特性がスピン方向に強く依存する性質を活用したスピンコントラスト変調(SCV)法の開発において、最先端の技術を有している(3.1.3節に詳述)。

しかしながら、東日本大震災以降の長期停止期間により、JRR-3ではビーム利用装置の高度化における継続的推進は困難となり、国際的な研究環境の進展と比較して性能面での差が拡大したことは否めない。一方で、運転再開後は利用が急速に回復し、SANS装置においては震災前を上回る利用申込みが寄せられている。この高い需要に応えるためにも、SANS装置及びNSE分光器に最新の中性子分光技術を導入し、国際水準の計測基盤として再構築することが急務である。それは、基礎科学の深化のみならず、材料・エネルギー・医療・バイオ分野における産業競争力の強化にも直結する。

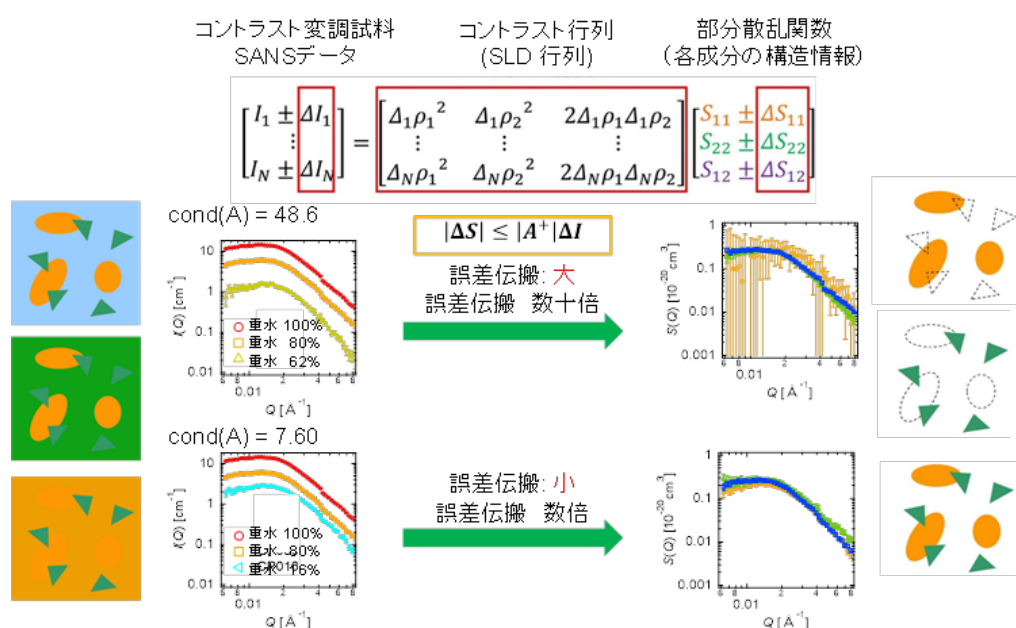


図3-1 コントラスト変調中性子散乱計測におけるコントラスト最適化数値手法。



図3-2 タンパク質の重水素化技術。

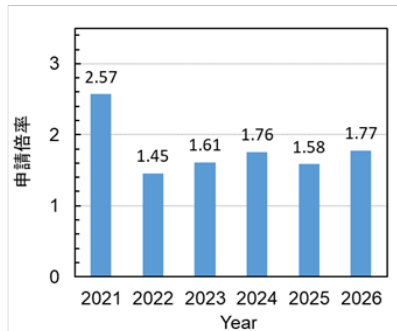
3.1.2 小角散乱装置群の現状及び将来計画

JRR-3の小角散乱装置群が最優先で解決すべき課題は、慢性的なマシンタイム不足の解消及び測定スループットの抜本的向上である。図3-3に、2021年から2026年におけるSANS-U（東大物性研）及びSANS-J（JAEA）の課題申請倍率の推移を示す。両装置とも申請倍率は例年2倍前後で推移しており、需要が供給を恒常的に上回る状況が継続している。

この結果、学術利用においては1つの研究室あたり年間2～3日程度、成果占有利用においては、1つの民間企業あたり年間1日程度にとどまり、研究の深化や体系的展開に必要な利用時間を確保できていない。こうした制約は、学術分野においては学生・若手研究者がSANS実験を通じて経験を蓄積する機会の減少を招き、将来のユーザー基盤の縮小につながりかねない。また産業界においては、SANS装置利用からの撤退や、海外中性子実験施設への研究拠点移転といった動きを誘発し、国内研究基盤の空洞化を引き起こす要因となっている。

この状況を打開するため、現在2025年度補正予算及び産業界からの資金提供による新たなSANS装置の建設を進めており、2028年度からは既存のSANS-U（東大物性研）、SANS-J（JAEA）に加えた、3台の体制で小角散乱装置群の供用体制を確立する予定である（図3-4）。この3台体制により、従来のマシンタイム不足やユーザー離れの問題を解決するばかりではなく、マシンタイム不足に起因する認知度の低さ、参入障壁の高さや即応性の低さなどを克服して、新たなユーザーを開拓することができるようになる。本計画では、この3台体制を最大限に活用し、単なるビーム利用装置数の増加にとどまらない、運用高度化・自動化・機能分担の最適化による戦略的供用体制を構築する。その具体的行動計画を以下に示す。

SANS-U



SANS-J

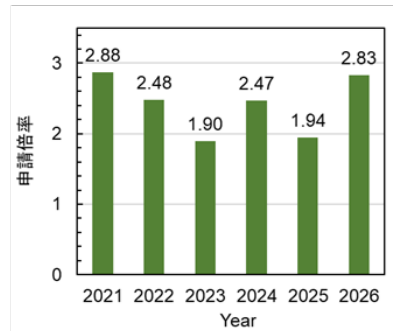


図3-3 SANS-U(東大物性研:左)とSANS-J(JAEA:右)の申請倍率の推移。

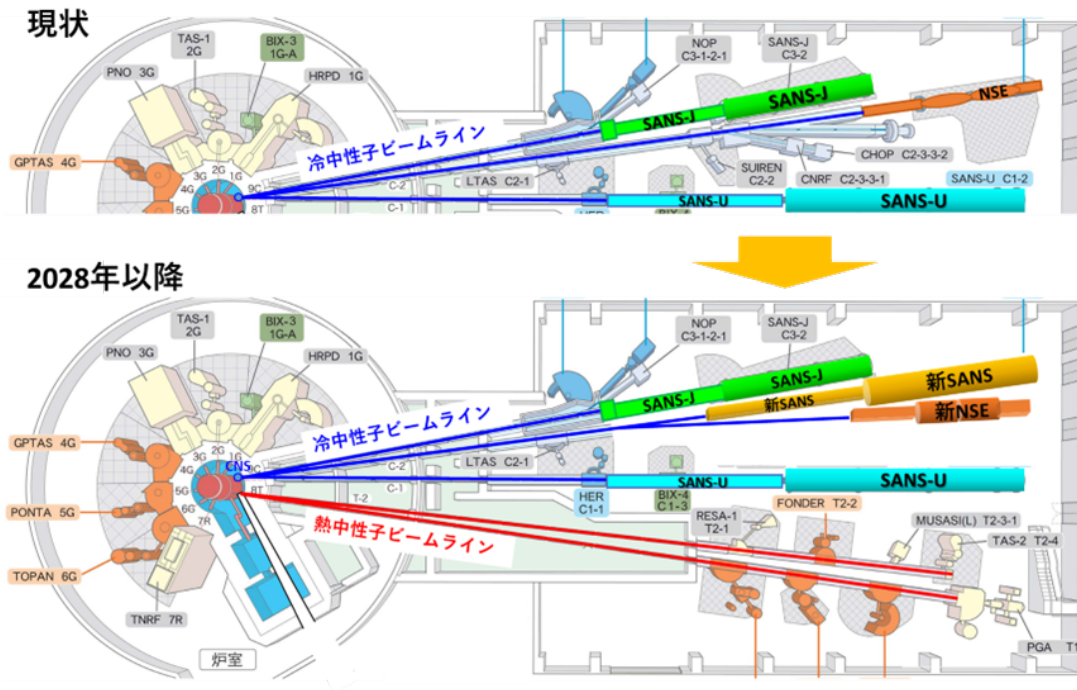


図3-4 JRR-3ビームホールにおけるSANS-U(東大物性研)、SANS-J(JAEA)、新たなSANS装置並びに新たなNSE分光器の配置。3本の冷中性子ビームライン末端は全てSANS装置及びNSE分光器となる。

3.1.3 新たなSANS装置の高度化計画

新たなSANS装置は産業界の要望に応じて設計されたハイスループット型小角中性子散乱計測装置である。産業界のユーザーの多くは、SANS測定の前に、大型放射光施設(SPring-8)等の放射光でX線小角散乱(以下、「SAXS」という)を行い、両者の結果を相補的に比較する。SAXSでは一日のマシントimeで数百試料の測定が可能であるのに対し、SANS-U(東大物性研)やSANS-J(JAEA)を用いた従来のSANSでは20試料程度が限界であった。そのため、数百試料とはいかなくとも、少なくとも100試料程度を測定できることが強く期待されている。

そこで、SANS-U(東大物性研)やSANS-J(JAEA)では1試料に対して光学条件や検出器レイアウトを変更しながら複数回の散乱測定を行う必要があったのに対し、新たなSANS装置では、散乱信号の検出を互いに妨げないように配置された高角・中角・小角・超小角検出器を用いることで、広い散乱角範囲の信号を一度に測定する(図3-5)。また、SANS-U(東大物性研)やSANS-J(JAEA)に比べて2~3倍の断面積を有する大型真空容器内に5倍の総検出面積を持つ大型検出器を配置することで、測定スループットを飛躍的に向上させる。さらに、スループットの向上に合わせてロボットアーム型サンプルチェンジャーを導入し、連続測定可能な試料数を現在の12試料から100試料程度へと引き上げる。以上が2028年供用運転開始までの実施項目である。

運転が安定すると見込まれる2029年度以降は、実環境下(オペランド)での時分割SANSを本格的に展開する。試料環境機器を充実させ、温度・圧力・湿度制御に加え、電池材料等の動作環境を再現しながら、ナノメートルからマイクロメートルスケールにわたる構造変化を連続的に追跡する研究を推進したい。

図3-6は、以前にSANS-J(JAEA)を用いて測定された3次元高分子フォトニック結晶の形成過程である。(a)に示すように、アクリル鎖末端からポリスチレン鎖が成長すると、ある鎖長でアクリル相とポリスチレン相にミクロ相分離が生じ、その後の成長に伴って構造形態や周期長が変化する。これに伴い構造色も時々刻々と変化する。光反射率測定(b)では周期構造の存在は確認できるものの、SANS(c)では周期長の変化に加えて、層状構造から棒状構造、さらに球状構造へと変化する過程を直接捉えることができる。特に球状構造の形成は、反射光波長が入射角に依存しない3次元フォトニック結晶の実現において極めて重要である。

この研究は時分割SANSの優れた先行例であるが、その後SANS-U(東大物性研)やSANS-J(JAEA)で同様の時分割測定に成功した例は極めて限られている。その主因は、広い散乱ベクトル領域を測定するためにレイアウト変更が必要であり、その間に構造変化が進行してしまう点にある。図3-6(c)の実験では、各レイアウトを固定したまま重合反応を3回繰り返し、得られたデータを重ね合わせることで全体像を再構築している。本研究では再現性が得られたが、試料セルのわずかな温度差で重合速度が変化すれば、結果の整合性は容易に失われる。この制約が、オペランド時分割SANSの実現を阻んできた。

これに対し新たなSANS装置では、高角・中角・小角・超小角検出器を同時配置することにより、単一レイアウトでナノメートルからマイクロメートルスケールを一括測定できる。さらに大型検出器による高効率化により、時間刻み幅を狭めても十分な統計精度を確保できる。これにより、反応や相転移、材料動作中のナノ構造変化を真の意味で連続的に追跡するオペランド時分割SANSが可能となる。

産業利用を主目的として設計されたハイスループット性能は、多数試料の迅速測定のみならず、実環境下での動的構造解析という新たな研究展開をも支える基盤となる。新たなSANS装置は、産業応用と基礎科学を橋渡しするビーム利用装置として、ナノ構造ダイナミクス研究を飛躍的に発展させることが期待される。

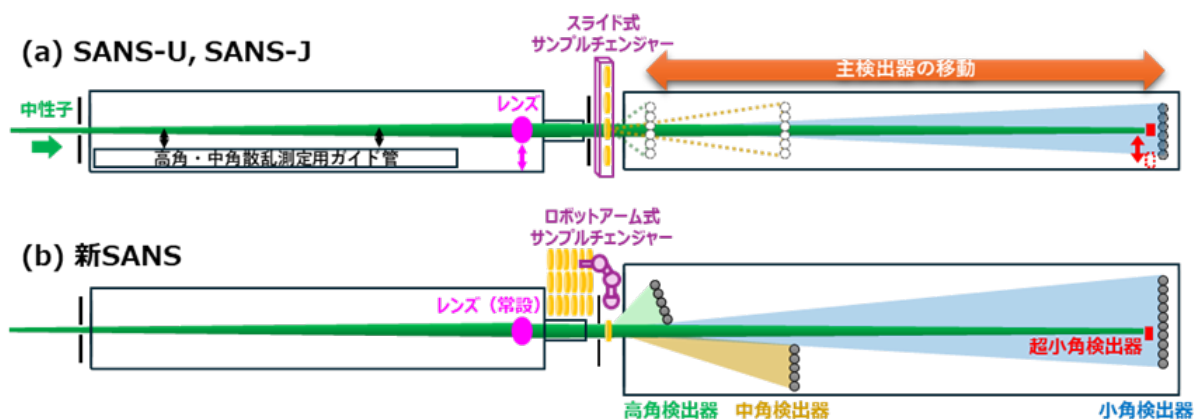


図3-5 既存のSANS-U(東大物性研)、SANS-J(JAEA)と新たなSANS装置における光学機器、検出器レイアウトの違い。

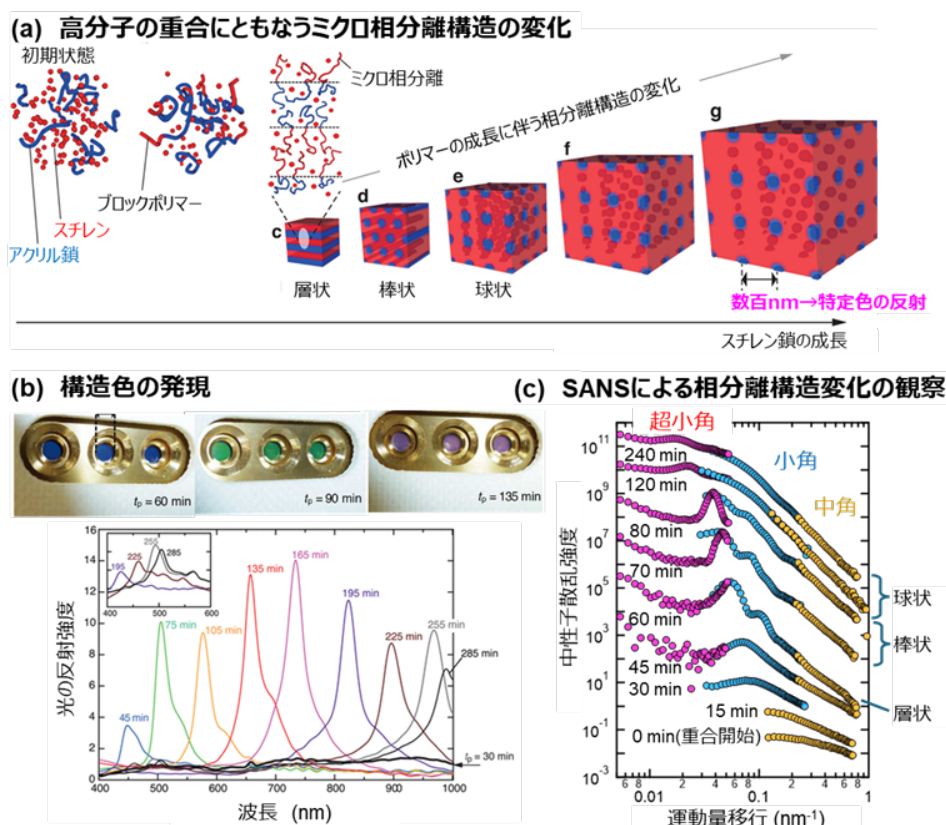


図3-6 SANS-J(JAEA)による重合誘起マイクロ相分離を用いた高分子フォトニック結晶成長過程の観測。図は、R. Motokawa et al., Macromol., 49, 6041 (2016)より引用。一部改変。

3.1.4 SANS-U(東大物性研)の高度化計画

SANS-U(東大物性研)は、高角・中角測定に合わせてコリメーター内のガイド管の最適な配置が可能であること、また試料まわりの空気によるバックグラウンドの発生を極力抑えた設計である点

を活かして、タンパク質溶液や高分子ゲル材料など、比較的シグナルの弱いソフトマター試料を高精度で計測できる点に特徴がある。また、高圧セル(～400 MPa)、高温セル(～300℃)、引張試験機(～延伸倍率×10)やサイズ排除クロマトグラフィー(SEC)を組み込んだ分子量分画システムなど、ソフトマター試料群に適した様々な特殊試料環境も整備している(図3-7)。

今後の高度化計画としては、中性子検出器の高性能化、図3-1に示したような新規数理手法に基づく自動測定・解析プログラムの高度化や試料環境機器の拡充などを進める。これにより測定効率を向上させるとともに、材料の実使用環境下におけるオペランド計測を実現する。

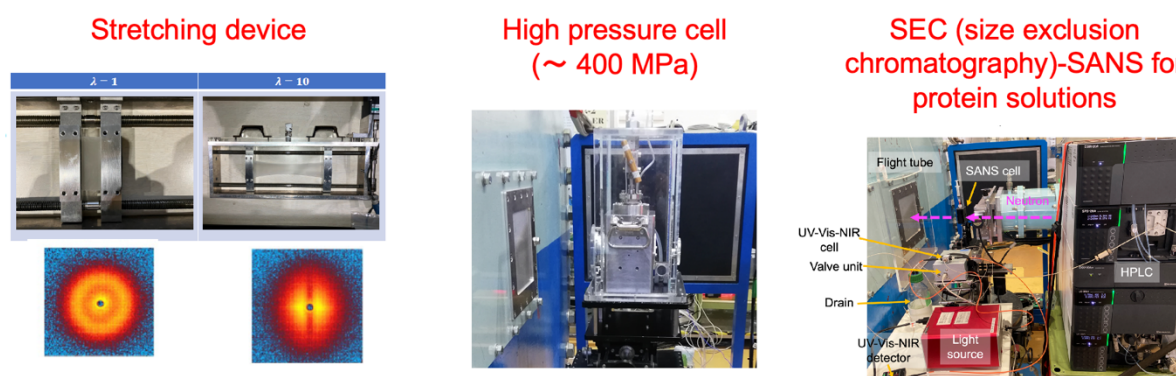


図3-7 SANS-U(東大物性研)の試料環境機器群(a)延伸装置、(b)高圧セル、(c)サイズ排除クロマトグラフィー(SEC) [図は、K. Morishima et al., J. Appl. Crystallogr., 58, 595 (2025)より引用]。

3.1.5 SANS-J(JAEA)の高度化計画

SANS-J(JAEA)は、ソフトマターに加えて金属材料や磁性材料など、幅広い物質群の構造解析に対応した汎用小角中性子散乱装置である。広い試料スペースを備えており、超電導マグネットをはじめとする大型試料環境機器を設置することが可能である。さらに、偏極中性子を用いた磁気散乱測定にも対応しており、ナノスケール構造と磁気構造を同時に解析できる点に特徴がある。また、SANS-J(JAEA)の高い拡張性を活かし、供用利用枠の間の限られたマシンタイムを利用して、既存の光学レイアウトを設置したまま新しい光学デバイスの実用試験を進めることもできる。実際に、新たなSANS装置でも採用される超小角散乱検出器や、高強度中性子偏極用集光デバイスは、このような試験を通じて導入している。

2028年の新たなSANS装置の供用開始以降、SANS-J(JAEA)ではスピンコントラスト変調(以下、「SCV」という)法の本格展開を目指す(図3-8)。前述のように、ソフトマターの構造研究において、SANSを使う最大のメリットはコントラスト変調である。そこで、我々は重水素化技術の高度化と並行して、中性子の軽水素に対する散乱能が互いのスピン方向に強く依存する性質を利用し、水素核偏極度に応じて変化する複数の偏極中性子散乱から複合材料における成分ごとの構造とそれらの絡み合い状態を決定するSCV法の開発を広く展開する。

SCV法には動的核偏極による極低温強磁場下での高水素核偏極が必要であり、現在実施可能な中性子実験施設はJRR-3及びJ-PARC MLFのほか、PSI(瑞)、ORNL(米)に限られる。我々は2007年に中性子計測用動的核スピン偏極装置(図3-9(a))を開発してSCV-SANSを実現したが、近年の液体ヘリウム供給不安によりJRR-3での継続が困難となった。この問題を解決するために、現在無冷媒型動的核偏極装置(図3-9(b))を開発中である。ユーザビリティに優れる無冷媒型装置が完

成すれば、SANSそのもののハードルが大きく下がり、一般ユーザーが手軽にSCV-SANSを行えるようになると考えている。

また、長期的には検出器の大型化を進める。SANS-J(JAEA)の主検出器の検出面積は、新たなSANS装置のみならず他国のSANS装置に比べても非常に小さい。その結果、散乱中性子の検出効率の低下を招くばかりか、図3-6(c)に示すように細切れになった散乱曲線をつなぎ合わせるうえで不整合が生じ、構造決定精度の低下を招いてしまっている。そこで、真空容器の大口径化と合わせて大型検出器導入し、測定効率と構造決定精度の向上を目指す。

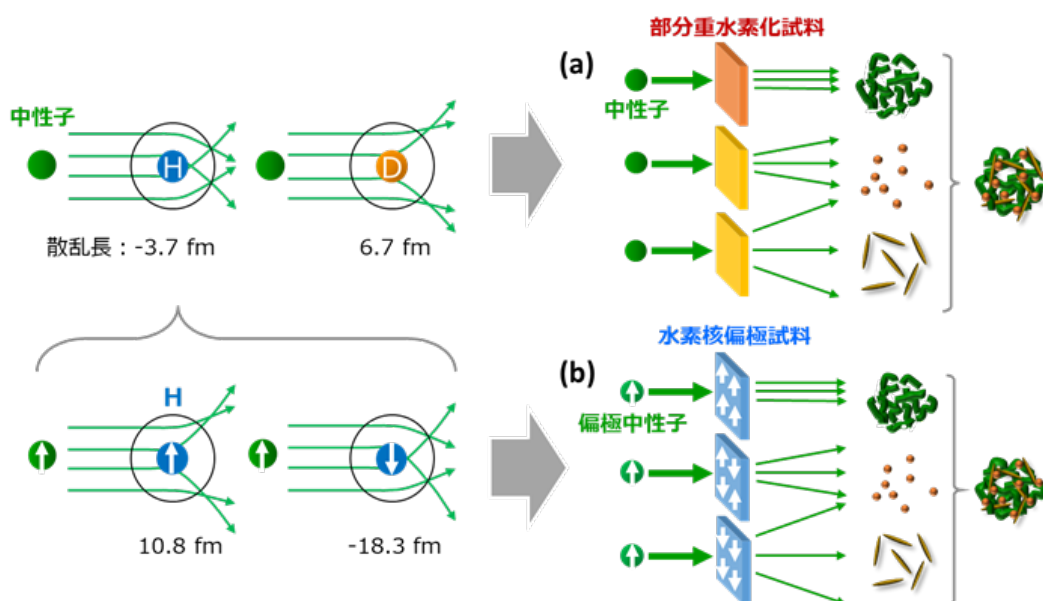


図3-8 (a)重水素コントラスト変調と(b)スピンコントラスト変調(SCV)による複合材料の構造解析。

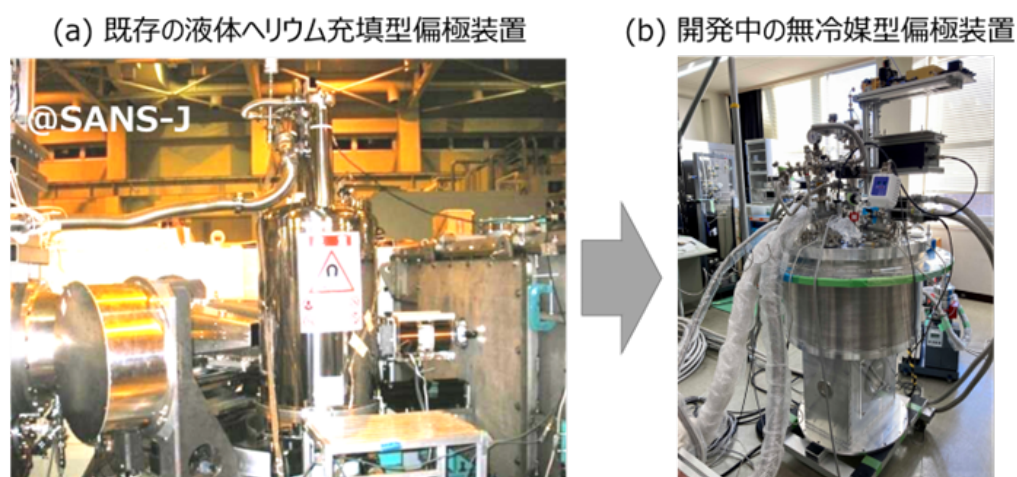


図3-9: (a)既存の液体ヘリウム充填型と(b)開発中の無冷媒型中性子計測用動的核偏極装置。

3.1.6 中性子スピネコー(NSE)分光器

SANSで観察される階層構造の熱ゆらぎを計測するビーム利用装置として、JRR-3のビームホールにNSE分光器iNSE(東大物性研)が稼働している(図3-4上)。iNSE(東大物性研)は、ナノスケールの構造が示す数百ピコ秒から数十ナノ秒程度の熱揺らぎを計測できるビーム利用装置であり、10ナノ秒以上のナノ構造揺らぎを計測できる国内唯一のビーム利用装置である。iNSE(東大物性研)では、高分子材料、自己組織化材料や食品など、様々な材料のナノ構造揺らぎに用いられており、2026年度課題公募では、申請日数ベースで競争倍率は1.8倍に達した(民間企業2社からの産学連携課題を含む)。

現在iNSE(東大物性研)が設置されているC2ラインエンドには、新たなSANS装置が建設される計画であるため、図3-4下に示したように、新たに建設予定であるC2分岐部にiNSE(東大物性研)を移設するとともに、iNSE(東大物性研)の高度化を行う計画である。以下、iNSE(東大物性研)の高度化計画を2つに分けて説明する。

3.1.6.1 iNSE(東大物性研)の高度化1:実使用環境における構造ゆらぎ計測の高精度化・自動化

産官学の機能性材料開発におけるiNSE(東大物性研)の活用を促進するために、実試料環境・マルチモーダル解析の実現、計測の高効率化・高精度化・自動化を進める。まず、機能性材料開発に資するNSEを実現するには、材料が実際に使用されている環境での揺らぎ計測が必要である。そこで、各種機能性材料の使用環境(温調、力学場、電場や調湿など)を再現するための試料環境機器を導入する。また、NSEデータから、構造揺らぎの詳細を類推するにあたって、SANS等による構造データ、他の分光法等による化学分析データと統合したマルチモーダル解析を行う基盤整備を行う。

また、NSEは、SANSに比べて、1試料にかかる測定時間が長くなる傾向にあるため、研究成果の最大化を図るうえで、測定効率の向上は重要な課題である。そこで、新しい磁場補正デバイスを導入することで、NSEの高効率化・高精度化を目指す。

さらに、NSE分光器は、数多くのデバイスから成っており(図3-10)、それらを適切に操作することは、民間企業や大学の材料研究者などの一般ユーザーにとっては困難であるため、自動計測システムの構築が必要である。そこで、装置の状態をリアルタイムで監視するための各種モニターを導入したうえで、NSE分光器を構成するデバイス群を一元的に管理する自動制御システムを構築し、測定経験の浅い一般ユーザーでも安全かつ簡便にNSEを実施できる環境を整える。現在のC2ラインエンドからC2ライン分岐に各パーツを移設する際に、自動計測システムに統合可能な形で改修を加える。

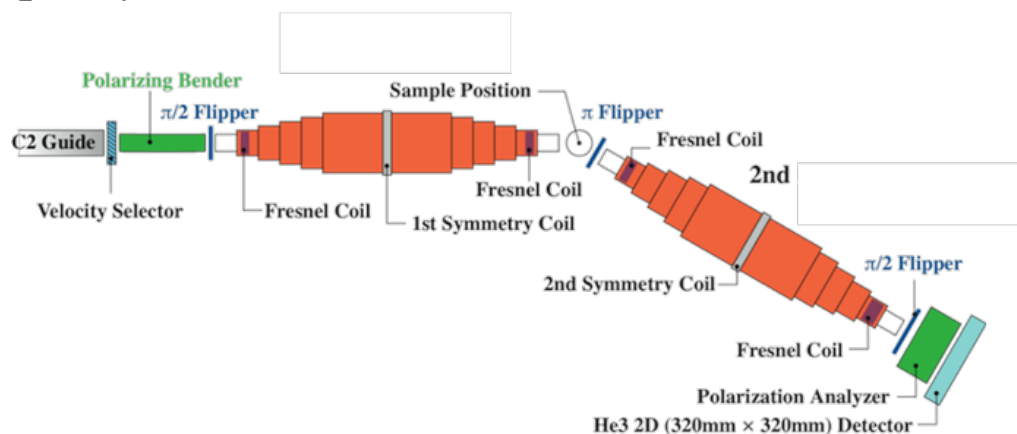


図3-10 iNSE(東大物性研)の装置構成。

3.1.6.2 iNSE(東大物性研)の高度化2: メインコイル更新による遅いゆらぎ計測の実現

iNSE(東大物性研)と海外のNSE装置を比較すると、エネルギー分解能(計測できる最長緩和時間)を決めるメインコイルの磁場強度で後れを取っている。JRR-3が東日本大震災で停止している間に、ILL(仏)、FRM-II(独)、SNS(米)及びNIST(米)では、メインコイルの高磁場化(磁場積分 1.0 T・m程度)が進められ、観察可能な最長緩和時間はサブマイクロ秒にまで及んでいる。それに対して、iNSE(東大物性研)のメインコイルは東日本大震災以前と同じ常伝導コイルが使われており、磁場積分は0.22 T・m、観察可能な最長緩和時間は数十ナノ秒程度である。今後、2.3.1節で述べたような超分子材料等の分子間相互作用が強く働く系のダイナミクスを対象にするには、より遅い運動を観察できることが重要になるため、メインコイルの高磁場化が必要である。

そこで、iNSE(東大物性研)のメインコイルを超電導コイルにすることで、磁場積分を世界最高水準である1.0 T・m程度まで増強し、数百ナノ秒程度のスローダイナミクスを観察可能とすることを計画している。海外中性子実験施設で導入されたNSE用超電導コイルは全てドイツメーカーが製造しているが、日本ではKEK等が大型超電導コイルの制作に実績があるため、iNSE(東大物性研)では国内グループで超電導コイルの設計・制作を行う計画である。図3-11に超電導コイルの設置計画図を示す。超電導コイルの製造には、線材の調達に1年、超電導コイルの組み上げ及び周辺機器・計測システムの整備に2年、合計3年の期間を要する。

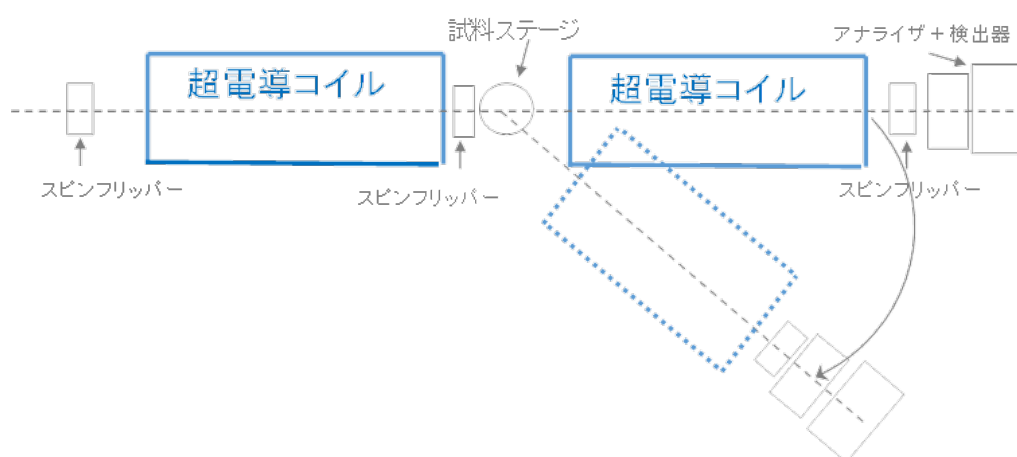


図3-11 超電導コイルの設置計画図。

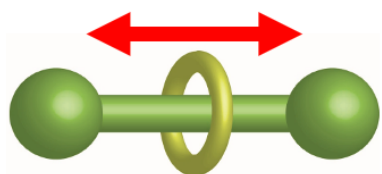
3.1.6.3 高度化したiNSE(東大物性研)を用いた研究計画

高度化1及び2を実現すると、iNSE(東大物性研)において様々な試料環境下において数百ナノ秒にまで及ぶ遅いゆらぎ計測が可能となり、学術研究・産業利用の両面において成果創出が期待される。2.3.1節で述べたように、近年は、分子間相互作用を制御することで精緻に分子を組み上げた超分子材料が注目を集めており、分子マシン(2016年ノーベル化学賞)や有機金属構造体(2025年ノーベル化学賞)などが代表例として挙げられる(図3-12)。超分子材料の機能は、精緻に組み込まれた分子集合構造の揺らぎに起因している。超分子複合体の熱揺らぎは、強い分子間相互作用によって遅くなるため、現在のiNSE(東大物性研)ではダイナミクスの全容を明らかにすることは困難であるが、超電導コイル化したiNSE(東大物性研)を用いれば観察対象は飛躍的に拡大する。高度化したiNSEにおいて、次世代の高分子複合材料、電池材料、触媒材料、分子モーターやドラッグデリ

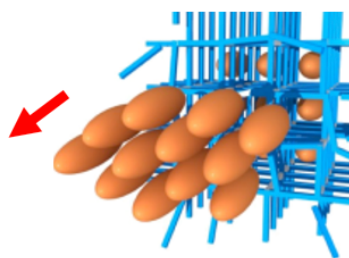
バリーシステムなどの実用環境下における揺らぎ計測を推進することは、日本の材料科学及び化学産業の発展につながるものである。

生命科学に目を向けると、構造生物学の観点では、X線結晶構造解析やクライオ電子顕微鏡(単粒子解析)の進展に加え、深層学習を利用したAlphaFold2等のAI構造予測の実用化により、生体高分子の原子レベル構造は(精密な水素原子位置情報を必須としない限り)必ずしも中性子を用いずとも得られる時代が到来しつつある。こうした状況で、現在とくに重要性が増しているのが、(i)生体高分子の動き=ダイナミクス、(ii)複数分子の相互作用下で現れる複合体・中間体構造、(iii)実際の生命機能の場である「混雑環境(高濃度溶液)」における構造・ダイナミクス解析である。これらは、図3-13中の赤枠で囲った時空間領域に相当し、まさに、高度化したSANS装置及びNSE分光器によって初めて、あるいは最も本質的に観測可能となる領域である。今回の高度化計画によって、多くの生命科学研究者が当該時空間領域の構造・ダイナミクス情報を取得できる環境が整備されると期待される。

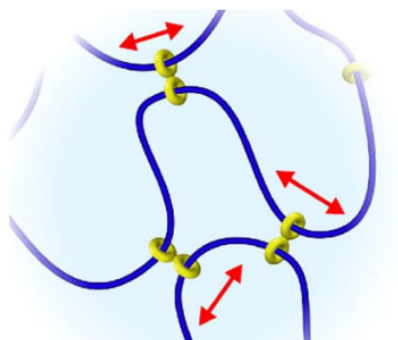
(a) 分子マシン
(2016年 ノーベル化学賞)



(b) 有機金属構造体
(2025年 ノーベル化学賞)



(c) 超分子架橋材料



(d) ドラッグデリバリー

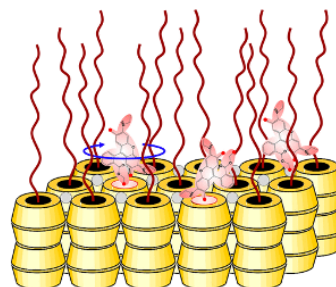


図3-12 超分子材料の例。(a)分子マシン、(b) 有機金属構造体 [図は Y. Ikezoe et al., Nature Materials, 11, 1081 (2012)より引用](c) 超分子架橋材料 [図は、K. Ito, Polym. J., 39, 489 (2007)より引用]、(d) ドラッグデリバリーシステム [図は、S. Uenuma et al., ACS Macro Lett., 10, 237 (2021)より引用]

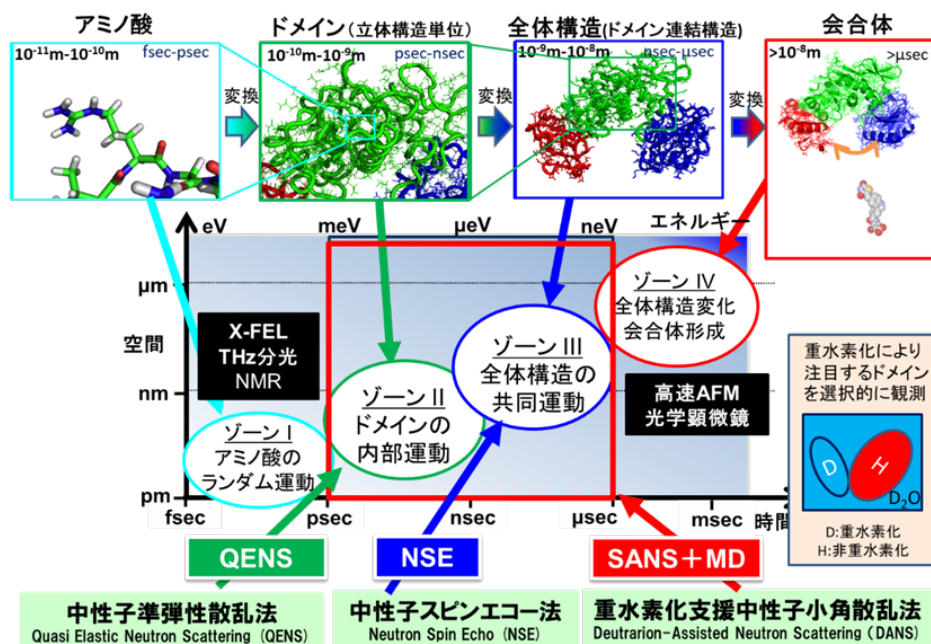


図3-13 中性子を用いた生体分子の構造揺らぎ計測。

3.1.7 本将来計画がもたらす研究基盤の発展と将来展望：

小角散乱装置群及びNSE分光器の高度化により、ナノメートルからマイクロメートルの空間サイズにわたる構造と、その構造ゆらぎを統合的に計測する研究が大きく加速される。その結果、超分子材料、ソフトマター、エネルギー材料や生体分子系などの多様な分野において、機能発現メカニズムの理解が飛躍的に進展し、我が国の材料科学及び生命科学における国際競争力の向上に寄与することが見込まれる。さらに、小角散乱装置群の拡充及び計測技術の高度化は、これまで慢性的に不足していたマシンタイムを戦略的に確保することを可能にする。こうした整備によって、我が国として重点的に推進する研究領域に対して安定的なマシンタイム及び研究リソースを提供できる基盤が形成され、学術的課題及び社会的ニーズの双方に応える研究環境が実現する。このような研究環境の整備を通じて、JRR-3は、学術界及び産業界、日本と世界を結ぶ「研究開発ハブ」としての役割を一層強化し、新たなイノベーション創出の起点となることが期待される。

また、本将来計画によるビーム利用装置の建設や高度化の過程で蓄積される知見は次世代へと継承され、将来の中性子装置建設を担う人材の育成にも直結する。すなわち、JRR-3でつくられる研究・技術基盤は、人材と知の循環を生み出しながら、将来の新試験研究炉やTS2計画(J-PARC)へと発展的につながるもので、我が国の中性子科学の持続的発展を支える礎となる。

3.2 極限環境下での超高効率な中性子回折・非弾性散乱の実現による革新的量子物質研究

2.3.2節で述べた通り、量子技術は今後の我が国の産業競争力を左右する極めて重要な課題である。電子スピンを直接観測可能な中性子計測がその真価を発揮する研究対象でもある。スピンの静的な配列、すなわちスピン構造研究には中性子回折が、また、スピンの協力的な運動、すなわちスピンダイナミクス研究には中性子非弾性散乱が使用される。JRR-3においては、中性子

回折及び中性子非弾性散乱の両方が実施可能である汎用型の三軸分光器が9台設置され、これまで、量子物質のスピン構造、スピンドYNAMICS研究に供されてきた。三軸分光器は中性子散乱の黎明期から存在する比較的枯れた技術であり、回折、非弾性散乱、粉末、単結晶と非常にフレキシブルな計測が可能ではあるものの、それぞれの計測に対して最適化されているとは言い難い。今後、中性子計測が量子物質研究に貢献し続けるためには、中性子回折及び中性子非弾性散乱のそれぞれに特化した超高効率な専用計測装置の建設が不可欠である。また、量子物質研究の推進で世界と互角に戦うためにはスピンを制御する外場としての磁場環境の整備が欠かせない。本将来計画では、現在9台設置されている三軸分光器の再編を視野に入れて、超高効率な中性子回折装置及び超高効率な中性子非弾性散乱装置の建設・高度化と極限環境(強磁場)の整備を行う。

3.2.1 極限環境中性子回折装置の新設と偏極中性子技術の高度化によるスピン構造研究

前章で述べた量子物質研究において、その取り掛かりとなる磁場や低温など単結晶中性子回折装置に対する利用ニーズは国内外問わずとても高い。これは各種の物性を担うスピン構造が複雑化していることに起因し、広範な逆空間へのアクセスとともに、偏極中性子を用いた核・磁気分離や、精密なスピン方向の決定、カイラリティの検出が求められている。この高い需要は、特に近年の単結晶回折装置の競争率が3倍を超える状況として現れている。代表的なものとしては、ISIS(英)に設置されたWISH、SNS(米)に設置されたCORELLI、HFIR(米)のWAND²がある。国内ではJ-PARC MLFのBL18に設置されたSENJUがこれに該当し、3倍を超える状況がかなりの頻度で生じている。SENJUにおける高競争率の状況は、タイムリーな課題への対応を困難にしていることに加え、国内の潜在的なユーザーの取りこぼしとなっている点は看過出来ない。安定してマシンタイムを確保出来ない状態は、大学の研究室として学生の割り当てを躊躇う状況にも繋がっており、小角散乱装置群と同じく早急に改善すべきである。

JRR-3のビーム利用装置群をみると、固体物理分野では三軸分光器が9台と豊富で、偏極中性子については実施可能である。一方で単結晶回折装置は単結晶中性子四軸回折装置FONDER(東北大金研)の1台に限られ、明らかに不足している状況にある。FONDER(東北大金研)は精密構造解析を得意とする反面、四軸回折計として試料を回転させる必要があることから、量子物質研究で求められる強磁場や極低温といった分野での利用は限られてきた。三軸分光器は、これら特殊試料環境での測定が可能である。一方で、観測出来る空間は水平散乱面に限られるうえ、逆空間1点ずつの測定となるため、広範な逆空間のカバーには非効率である。利用ニーズの高い極限環境下での広範な逆空間を網羅する単結晶回折を、現在は三軸分光器で補っている状況にある。仮に、JRR-3で広範な逆空間のカバーが可能になれば、シームレスな偏極中性子回折装置との連携により、当該分野において強力な研究環境が整うことになる。

広い逆空間をカバーする点で、WISHやSENJUなど、パルス中性子源における飛行時間法を用いたラウエ回折装置が威力を発揮する一方で、定常中性子源のビーム利用装置でも単色を活かした精度の高い測定が発展してきている。近年の定常中性子源における単結晶回折装置の動向を表Xにまとめた。大きな流れとしては、(1) 2次元検出器の導入、(2) 試料環境機器の拡張、(3) 高強度化、とまとめられる。(1)の2次元検出器の導入により、特殊な試料環境下での3次元逆空間測定が可能となる。初期に行われたZEBRA@PSI(瑞)やDEMAND@HFIR(米)における小型2次元検出器の導入の段階でも、従来の三軸分光器による探索と比べてその効果は顕著で、両装置は現在でも有効

に活用され成果をあげている。次の段階として、湾曲大型2次元検出器の導入による広い視野の獲得により、その有効性は劇的に高まる。例として、JAEAも運営に携わるHFIR(米)の高角中性子回折装置WAND²では、検出器更新前まで競争率の低い状態が続いていたが、湾曲大型2次元³He検出器の導入により劇的に競争率が増加し、現在も高い人気を誇るビーム利用装置となっている。

湾曲大型2次元検出器の利用ニーズは高まる一方で、それを製作する技術には大きな課題がある。WAND²で導入された検出器は、20年以上前にBNL(米)で開発されたものの再利用で、市販品として購入は出来ない。そのため、欧州ではPSI(瑞)及びFRM-II(独)で同種の検出器を共同で開発した他、ごく最近ILL(仏)でも同様な開発が行われ、高強度粉末・単結晶回折計XtreamD回折装置に導入されている。

	水平窓	垂直窓	検出器	since	注記
ZEBRA(PSI)	14°+	14°+	2D- ³ He	2016	リフター
DMC(PSI)	132°	14°	2D- ³ He	-	湾曲, 冷中性子
DEMAND(HFIR)	16°	48°	シンチレーター	2013 2019	
WAND² (HFIR)	120°	15°	2D- ³ He	2018	湾曲、リフター
XtremeD (ILL)	130°	24°	2D- ³ He	2023	湾曲
本計画	115°	60°	シンチレーター	2026?	gap有

表3-1 世界の定常中性子源に設置された単結晶回折装置

検出器にならんで重要な要素は、極低温及び強磁場といった量子物質研究に必要な不可欠な試料環境である。これまで研究の中心であった三軸分光器では、水平面しか測定出来ないため、既存のマグネットの開口角も狭いものが大半である。これでは大型2次元検出器を導入しても、その視野はマグネットにより遮られてしまう。加えて、既存のマグネットの大半は、液体ヘリウムを寒剤として用いるものが多く、液体ヘリウムの高騰が進む現状では実験実施が困難である。この点、JRR-3の運転再開に合わせてJAEAが導入した、寒剤不要のマグネット、冷凍機群は、その高い利便性が実証されている。2次元検出器の導入と合わせて、新たに広い開口角をもつマグネットや極低温冷凍機を導入することで、JRR-3での研究環境の改善が期待できる。

また偏極技術についてもさらなる開発が望まれる。現状、三軸分光器を用いて偏極中性子回折を行うことは可能であるが、三軸分光器ではアクセス空間等に制約がある。2次元検出器、極低温及び強磁場の試料環境機器と相性のよい偏極技術は、世界をリードするうえでも必要不可欠な技術である。現在、J-PARC MLFで開発が進む³Heフィルターでは、これまでにない反転比100に近い高偏極率が可能となってきた。合わせて、より広い散乱角をカバーした偏極解析についても道が拓けてきている。

以上の利用ニーズ、現状を踏まえ、2次元検出器を備えた超高効率な極限環境単結晶回折装置をJRR-3に導入し、量子物性の発現する極低温及び強磁場における広い逆空間の網羅を可能にする。この実現に向けて、以下のステップで行う。

(1) シンチレーション型2次元検出器を用いた試験運用

既に開発済みの2次元検出器を用いてテストを開始する。シンチレーション型2次元検出器を、試料近く500 mm程度の距離に設置することで、一つの検出器で水平面 $\sim 30^\circ$ 、垂直方向 45° 程度カバーすることが可能である。これを3台配置することで、広い逆空間の走査を実現する。ここでは水平散乱角 $\sim 100^\circ$ 、垂直方向で $45^\circ(+30^\circ, -15^\circ)$ のアクセスを可能にすることを目標とする。ビームポートは、ビームホールT2-3を使用する。

試料環境については、既存のJAEAの有する無冷媒型冷凍機、マグネットを使用する。磁場環境では垂直 $\pm 5^\circ$ に限られるが、10 T, 0.3 Kまでの測定が可能になる。

(2) 装置に最適化した試料環境機器の整備

検出器の広い散乱範囲を活かすため、広い開口角をもつマグネットを導入する。目標として、世界トップクラスの垂直 45° の開口角をもつ寒剤不要のマグネットの開発を目指す。これにより強磁場下で発現する特異な量子状態を確実に捉えることが可能になる。また次項の偏極中性子下での利用も想定し、漏洩磁場の最適化も行う。

強磁場については、国内主要機関の連携によるコラボラトリー等、世界的にみても日本が強みをもつ分野である。こちらとの連携も視野に検討を進める。まず2026年度より検討を開始し、2027年度以降の導入を目指す。

(3) 専用偏極環境の整備

偏極技術も数多くの進展がみられ、単結晶回折装置にも応用が進んでいる。入射側では、従来のホイスラー結晶に加え、非偏極との切り替えが容易なスーパーミラーベンダーや、短波長での利用や高偏極率が実現可能な ^3He フィルターが導入されている。散乱側については、高い散乱角をカバーする ^3He フィルターセルの開発が進んでいる。一方、 ^3He フィルターについては、外部磁場に弱いという問題が知られているが、磁場を作るマグネットと一体して開発することで、諸問題を解決する方法も生み出されている。検出器及び試料環境機器に最適化した偏極環境の開発を進める。

(4) 湾曲大型2次元検出器の検討

さらに装置性能を高めていく上で、湾曲大型2次元検出器の導入は必要不可欠である。一方、現状では容易に入手出来る見通しはたっていない。既存のシンチレーション型2次元検出器による開発を進めることと並行して、大型検出器に関する検討を始める。国内では韓国原子力研究所(KAERI)と共同で開発した大型湾曲中性子位置敏感型検出器がおおよそ完成し、コミッショニングを始めているが、 ^3He を使う検出器であることから、今後の検出器増産に関しては十分に検討する必要がある。検出器は国内での内製が理想であるが、リソースとして困難な場合には、海外中性子実験施設と協力しての導入も合わせて検討する。

(5) JRR-3ビーム利用装置群の最適配置を踏まえた移設

当面の開発はT2-3で行うが、回折装置及び試料環境機器は移設可能である。上で検討する湾曲大型2次元検出器の開発も含め、ビーム利用装置の最適化を進める。さらにこの開発期間中に

三軸分光器を含めたJRR-3ビーム利用装置群のバランスに関する検討を進め、当該装置についても最適位置への移設を検討する。候補としては、短波長かつ大強度が得られる炉室移設が考えられる。

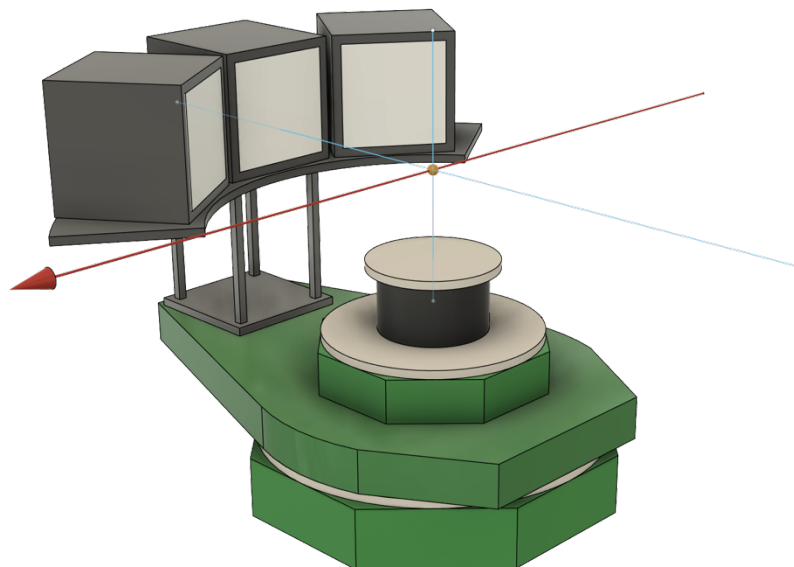


図3-14 シンチレーション型2次元検出器を用いた試験回折装置の概念図

3.2.2 強磁場及び多軸中性子非弾性散乱の組合せによる極限環境非弾性散乱の実現と量子物質スピンドYNAMIXの研究

量子物質研究では、電子・スピン・格子といった自由度が強く結びつき、物質中に多様な集団励起が現れる。代表例として、スピンの集団運動であるマグノンや格子振動であるフォノンがあり、これらは物質機能を担う「流れ」の実体である。例えば、次世代情報技術に関する分野では、電荷の流れに伴う発熱が電子デバイスの性能向上の大きな制約となっている。この課題を克服する手段として、電子のスピン自由度を利用するスピントロニクスや、スピン波を情報担体として利用するマグノニクスが注目されている。特に近年は、従来の強磁性体に加え、漏れ磁場が小さく高速動作が期待される反強磁性体や交替磁性体が次世代材料として注目されている。これらの材料の機能を理解するためには、スピン波の速度、寿命や安定性などの動的特性を原子スケールで直接観測する必要がある。

このような量子励起のエネルギーは多くの場合数十meV以下であり、原子スケールの波数とmeVスケールのエネルギーを同時に測定できる中性子非弾性散乱は、その解明に最も適した手法である。中性子非弾性散乱では、励起の波数-エネルギー関係(分散関係)を直接測定できるため、マグノンやフォノンの伝播速度、相互作用やトポロジーなどを定量的に決定することができる。例えば、超伝導体では、超伝導ギャップ形成に伴う磁気励起が中性子非弾性散乱によって観測され、超伝導機構の理解に重要な役割を果たしてきた。また量子スピン系やスピン液体研究においても、励起スペクトルの精密測定は量子相の判別に不可欠である。このように「物質中を伝播する波」の分散

関係を測定することは、量子物質研究の最も基本的かつ普遍的なアプローチであり、そのための高効率な中性子非弾性散乱装置の整備は中性子実験施設の中核機能である。

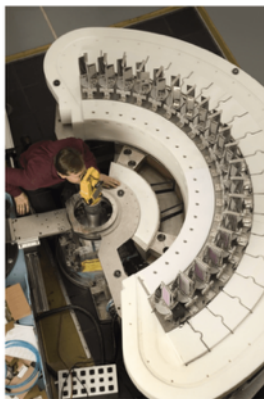
このように極めて重要な中性子非弾性散乱測定であるが、特に数meVエネルギー領域の測定を高効率に行うことができる装置は、冷中性子チョッパ分光器(CNCS)@SNS(米)、我が国のAMATERAS@J-PARC MLF、マルチチョッパ型冷中性子分光器(LET)@ISIS(英)など極めて限られている。高エネルギー分解能への高い利用ニーズ及び高効率なビーム利用装置の数の制限から、それらの装置のマシントイム獲得競争率は非常に高い。例として、CNCS@SNS(米)では5倍近い競争率となることが一般的で、AMATERAS@J-PARC MLFでも4倍にせまる競争率に達しており、利用ニーズを満たすことが出来ていないことは明らかである。この状況は本来量子物質研究に非常に有用である中性子非弾性散乱の活用に障壁となっているだけでなく、安定なマシントイム確保の困難さから非弾性散乱に関する分野の研究者離れ、学生教育の不在等を引き起こす等、非常に深刻な状況となっている。

大型検出器を備える高性能チョッパ分光器の利用ニーズに対し、1つの検出器しかもたない通常の三軸分光器ではその性能は明らかに不足している。そこで、現状を打開するため定常中性子源における超高効率な中性子非弾性散乱の研究開発が世界的に進んでいる。図3-15にそれらの例としてMACS分光器@NIST(米)、CAMEA分光器@PSI(瑞)、JRR-3冷中性子多重三軸分光器HODACA(東大物性研)(以下、「HODACA」という)を記す。中でも、近年我々がJRR-3にフラッグシップ分光器として建設したHODACA(東大物性研)は、Inverted Rowland Inelastic Spectrometer(IRIS)という全く新しい原理に基づいて設計されており、非常に低いバックグラウンドと同時に従来の70倍程度の高効率な測定が特徴となっている。この装置は定常中性子源における新たな高効率な中性子非弾性散乱として世界から注目を集めている。

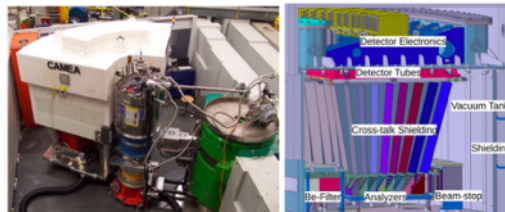
HODACA(東大物性研)が世界をリードしていくためには、まだ不足している要素がある。その一つは、回折とならび極低温・強磁場といった極限試料環境である。HODACA(東大物性研)が対象とする低エネルギー励起は、強磁場・温度とおなじエネルギースケールをもつことから、量子物質の多くの重要な現象が外場により制御することが可能である。磁場印加によりスピン波分裂や量子相転移が誘起されることが知られており、量子物質研究には欠かせない要素である。世界的には、例えばSNS(米)では14 T磁場下での中性子非弾性散乱が可能になっている点等の量子物質研究に最適化された試料環境機器が整備されており、そこから数多くの成果が生まれている。翻って我が国では、例えば、J-PARC MLFにおいても中性子非弾性散乱と組み合わせることのできる磁場は4.0 T程度であり、量子物質研究における世界的な競争力に翳りをもたらしている。同じくJRR-3においても現在利用出来る磁場環境導入が限られているのが問題となっており、ここに世界最先端の磁場環境を整えることで、高効率化したHODACA(東大物性研)において世界水準の量子物質研究が可能になる。

合わせて、JRR-3の中性子フラックスは、他の実験施設と比べて現状では劣っている。C1-1では、スーパーミラー化もされていないため、その差は大きい。スーパーミラー化や後述の冷中性子源の高度化による強度増加も必須要素の一つである。加えて、量子磁性体における特徴的な励起を明らかにするうえでは、偏極中性子への拡張が不可欠である。現状のJRR-3の冷中性子分光器において、定常中性子源が得意とする偏極中性子が利用出来ない事実は、早急に改善すべき点の一つである。これら高強度化、極限試料環境、偏極中性子を導入することで、HODACA(東大物性研)がAMATERASや他の冷中性子分光器と相補的となり、世界水準の量子物質研究が可能になると考える。

MACS (NIST)



CAMEA (PSI)



HODACA (JRR-3)

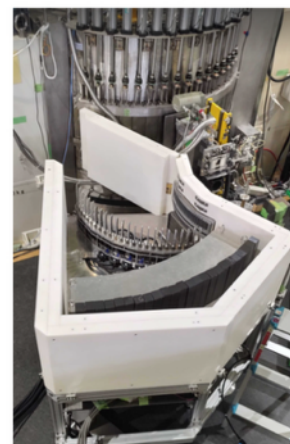


図3-15 定常中性子源における次世代型非弾性分光器 MACS(NIST), CAMEA(PSI, SINQ), HODACA (JRR-3)。

[図は以下より引用]

MACS : <https://sites.krieger.jhu.edu/idg/instrumentation/neutron-scattering/macs-2/>

CAMEA : <https://www.psi.ch/en/sinq/comea/description>

HODACA : <https://sites.google.com/view/hodaca/>]

以上の利用ニーズを踏まえ、15 T級超伝導磁石と希釈冷凍機をC11ビームポートに設置されたHODACA(東大物性研)に導入し、量子物質の素励起を極低温・高磁場環境で測定できる実験基盤を構築する。本装置の実現に向けて、以下のステップで整備を進める。

(1) 中性子ガイド管のスーパーミラー化によるフラックス強度の増大

現在のC1ラインではニッケル全反射導管による中性子輸送が行われているが、特に10 meV以上のエネルギー領域では中性子フラックス強度が十分ではない。このため、超伝導磁石等の大型試料環境機器を用いた中性子非弾性散乱では中性子減衰の影響が大きく、統計精度が不足し実験実施が困難な状況にある。そこで本将来計画では、中性子導管を $m=3$ スーパーミラー導管へ更新し、広い冷中性子エネルギー領域において中性子フラックス強度を大幅に増大させる。これにより、強磁場試料環境下でも十分な統計精度で中性子非弾性散乱スペクトルを取得できる実験条件を整備する。

(2) 20 T級高温超伝導磁石及び希釈冷凍機導入による極低温・強磁場中性子非弾性散乱の実施
量子物質における磁場誘起相転移やトポロジカル励起を観測するため、HODACA(東大物性研)に中性子散乱計測用の高温超伝導磁石を導入する。本将来計画では、日本独自の技術である無冷媒高温超伝導磁石を用いて、世界最高水準となる20 Tの定常磁場環境を整備する。さらに希釈冷凍機と組み合わせることで数十mKの極低温環境と強磁場環境を同時に実現し、量子スピン系やトポロジカル磁性体における磁場誘起量子相転移や励起スペクトルの変化を中性子非弾性散乱によって直接測定することを可能にする。超伝導磁石の詳細設計については、東北大金研及び東大物性研の強磁場グループと連携して検討を進める。

(3) 専用偏極環境の整備

磁気励起及び格子振動を明確に区別し、量子磁性体のスピンドYNAMICSを詳細に解明するためには、偏極中性子非弾性散乱が不可欠である。JRR-3やJ-PARC MLFではこれまでに、ホイスラー結晶モノクロメータ、V字型スーパーミラー偏極子や ^3He ガスフィルターなどの中性子偏極技術が開発されてきた。本将来計画では、これらの技術を活用して、C11ビームポートに専用の偏極中性子計測環境を整備し、HODACA(東大物性研)と組み合わせて偏極非弾性散乱実験を可能にする。偏極中性子を用いることで、磁気散乱と格子散乱を明確に分離だけでなく、磁気モーメントの振動方向やスピン歳差運動の回転方向(カイラリティ)といった、通常の非偏極実験では得られない情報を取得することができる。これにより、カイラルマグノン分裂やトポロジカルスピン励起などの量子ダイナミクスを高精度に測定することが可能となる。専用偏極環境の整備により、JRR-3においても偏極中性子非弾性散乱を安定的に実施できる体制を構築し、量子物質研究における中性子散乱計測の機能を大きく拡張する。

(4) 次世代多重型分光器HODACA²の開発

現在C11ビームポートに設置されている HODACA(東大物性研)は、24個のアナライザ結晶と24本の ^3He チューブ検出器を組み合わせることで、約 48° の散乱角範囲を同時に測定できる多重型三軸分光器であり、従来の三軸分光器と比較して高い測定効率を実現している。一方、近年の量子物質研究では、励起スペクトルをより広い波数空間で高効率に測定することが求められており、さらに多くのアナライザ及び検出器を組み合わせた多重測定の高高度化が重要な課題となっている。そこで本計画では、次世代多重型分光器HODACA2の概念設計を進める。具体的には、アナライザ数の増加及び位置敏感型検出器の導入により、現在よりも広い散乱角範囲を同時に測定できる高効率分光器の実現を目指す。これにより、励起分散の広い領域を一度の測定で取得することが可能となり、特に極低温や強磁場など測定条件が制限される実験において、測定効率を大幅に向上させることが期待される。本研究では、新試験研究炉や海外中性子実験施設と連携しながら、次世代多重型分光器の光学設計及び検出系の開発を進める。これにより、将来の中性子実験施設における高効率な中性子非弾性散乱装置の基盤技術を確立することを目指す。

3.2.3 本計画の実現により期待される成果と将来展望

高効率な中性子回折装置の実現は、非常に競争率の高いSENJU@J-PARC MLFの競争緩和と、これによる我が国の学術的競争力の強化に大きく貢献する。さらに、高いスループットで磁気構造解析が行われることで、新しい量子現象を発現するスピン構造探索が劇的に進展するものと期待される。また、磁場や偏極技術の組み合わせにより、これまでにない制度でのスピン構造解析が可能になり、SENJUとの相補性、さらにはX線共鳴磁気散乱や核磁気共鳴などの他手法との高度な相補利用に道が開かれる。このような複合量子ビーム計測技術及びデータ駆動・AI解析を組み合わせることで、生命科学分野で実現されるような磁気構造予想や新規量子物性予想が可能になると大きく期待される。

他方、極限磁場環境を有する高効率な中性子非弾性散乱実験の実現により、磁場誘起量子相転移、磁場中での量子エンタングルメント定量評価、ディラック点でのトポロジカルマグノンギャップの磁場依存性評価等の量子物質の本質に迫る基礎学術研究の遂行が可能になるだけでなく、マグノンや熱、さらには格子振動の流れを方向選択的に制御する新しい物理原理の解明や、それを利用した熱流の方向制御や熱ダイオードなど新しいエネルギー制御原理につながると期待される。

スピン構造及びそれに起因する新規スピン量子機能は表裏一体である。したがって、量子物質研究を推進するためには、高効率な中性子非弾性散乱装置と強磁場環境を統合した実験基盤を整備することが不可欠である。本将来計画では、磁場制御下での高効率な中性子回折及び高効率な中性子非弾性散乱をこれまでにない水準で密に組み合わせた、国際競争力を有する量子物質開発研究基盤を提供する。これにより、トポロジカルスピン構造やトポロジカルスピン励起など電子スピン集団の秩序及びコヒーレンスを積極的に利用した新しい量子機能性材料の開拓が期待される。新しい量子機能を発現する量子物質開発は量子技術開発の最上流であり、量子計算・量子計測等の実現に非連続的な発展をもたらす可能性を有する。国内の量子マテリアル研究拠点等と密な関係を構築し、その中で最上流の量子物質開発を推進することで量子技術の非連続発展に貢献する。

3.3 JRR-3を活用した中性子医療技術基盤の構築

超高齢化が進む我が国において、がんは国民の2人に1人が生涯で一度は罹患する国民病となっている。がんの治療法としては外科(手術)療法、化学療法、放射線治療が三大療法とされるが、近年のがん治療では放射線や医療用RIを用いた先端医療技術が不可欠となっており、多大な治療実績を上げている。故に、これらを支える原子力関連技術は、国家として維持・高度化すべき重要な技術である。中性子や医療用RIを用いた治療法は化学療法と比較して副作用が圧倒的に少なく、今後最も必要とされる治療法の一つと言えるが、課題も山積している。医療用RIのほとんどは海外施設に依存しており、中性子を用いた治療法は薬剤開発の速度が遅く、治療時の核反応の観測もできない。

こうした状況は、医療に特化した原子力関連技術のハブが国内に存在しないことが原因の一つとして挙げられる。加えて、我が国の試験研究炉を基盤とした原子力技術は東京電力福島第一原子力発電所事故以降、JRR-4及びJMTR(材料試験炉)の廃炉が決定し、KURも間もなく運転終了するという危機的状況にある。これを放置すれば、医療技術における国際的競争力を失うだけでなく、医療安全保障上の重大問題が発生する可能性すらある。そこで本将来計画では、稼働を再開した国内唯一の研究用原子炉であるJRR-3を中性子医療技術のコアとして最大限活用できる体制の構築を目指す。

本将来計画では、医療用RIを大学・公的機関に供給するための基盤技術の開発及び中性子がん治療の高度化に関する研究開発を二本柱として行う。これらの研究開発を推進するため、JRR-3を中性子医療技術拠点として再定義し、民間企業、大学、公的機関、医療機関がJRR-3を核とした連携体制を構築する。

3.3.1 医療用RI研究技術基盤の確立

医療用RIには様々な種類があり、がんの診断から治療に至るまで幅広く利用されている。RIの種類によって様々な特性と製造方法があるが、主に加速器で製造されるものと原子炉で製造されるものに大別できる。我が国で利用されている医療用RIのうち、国内で製造される量は非常に少なく、ほとんどを他国に依存している状態である。JRR-3にはRI製造棟が附設されており、RIの製造及び研究を行っているが、国内需要を満たすほどの供給量はない。そこで、JRR-3のRI製造能力強化に向けた環境の整備を行う。具体的には以下の3つを行う。

- ① 濃縮同位体ターゲットの回収(リカバリー)技術の開

- ② 分離・精製工程へのオートメーション技術の導入
- ③ 施設のオープン化による創薬研究ユーザーの支援体制の構築

これらの項目について以下概説する。

① 濃縮同位体のターゲットリカバリー技術は、一度中性子を照射した照射済みターゲットから目的核種を取り出した後、廃液を再度固体化して再び中性子を照射するサイクルを構築することにより、きわめて高価な照射ターゲットの再利用を可能とし、製造効率を飛躍的に高める技術である。具体的なサイクルを図3-16に示す。

今後の研究開発の方向性として、最新の医療用RI(ルテチウム-177)及び次世代RI(テルビウム-161)の製造方法の検証を推進する。これらの核種は切除できない微小な癌や、広範囲に転移したがんに対しての治療効果が期待できるRIミサイル療法への利用が期待できる核種であり、JRR-3での製造にも適している。ルテチウム-177はベータ(β)線放出核種であり、既に治療実績もある核種である。

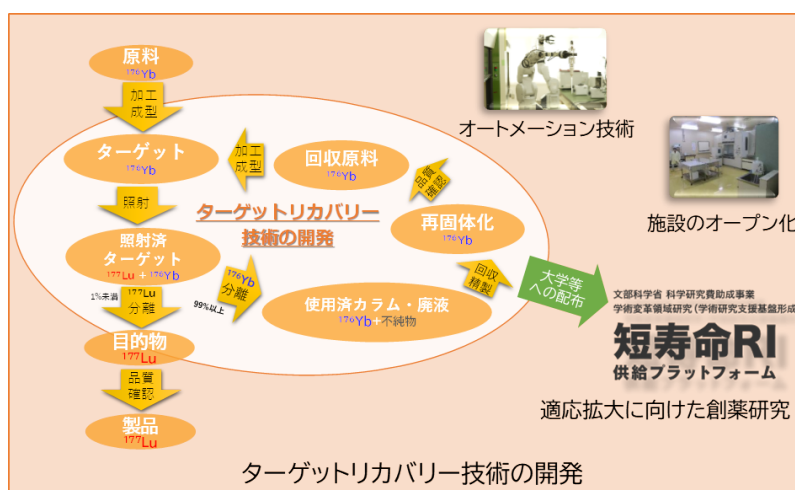


図3-16 RI製造のターゲットリカバリー技術

一方で、テルビウム-161は次世代RIとして効果が期待されている核種であり、最近研究が進められるようになった。テルビウム-161はベータ(β)線だけでなくオージェ電子による超短距離放射線も放出する特徴を持っており、前臨床試験でも優れた効果が確認されている。

ルテチウム-177製造におけるターゲットリカバリーでは、原料となるイッテルビウム176を原子炉で照射して生成されたルテチウム-177を分離した後、使用済みカラム・廃液からイッテルビウム176を回収して再固体化する。これを再利用して再照射する。このサイクルを効率的に回すことで、製造効率を大幅に高めることが可能となるため、今後研究炉におけるRI製造に不可欠の技術となる。

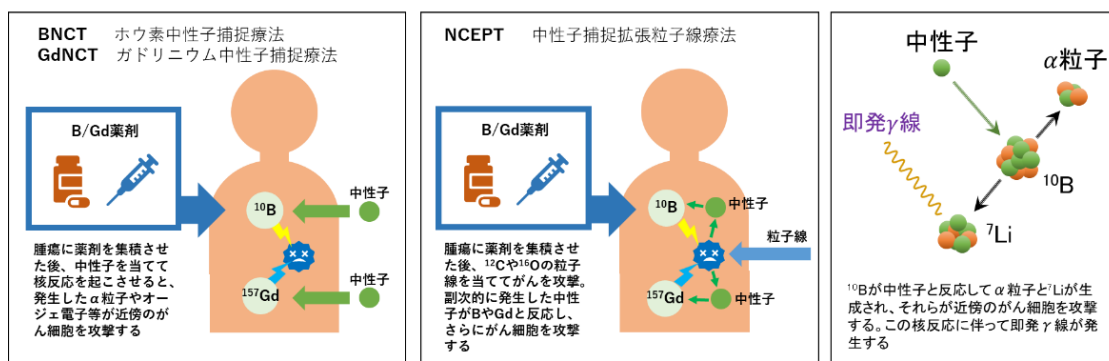
JRR-3中性子医療技術拠点構想



図3-18 JRR-3中性子医療技術拠点構想

3.3.2 中性子を利用した最新のがん治療の高度化

中性子を用いたがん治療法には、BNCT、ガドリニウム中性子捕捉療法（以下、「GdNCT」という）、中性子捕捉拡張粒子療法（以下、「NCEPT」という）がある（図3-19）。BNCTでは、ホウ素を含んだ薬剤を体内に投与して薬剤を腫瘍に集積させた後、中性子線を照射することでがん細胞だけを選択的に攻撃する。ホウ素10は中性子捕獲断面積が大きい（3,840 b）ため、中性子はほとんどホウ素10とだけ反応することになる。ホウ素10が中性子と核反応を起こすと、アルファ（ α ）線とリチウム7が生成され、それらが近傍のがん細胞を攻撃することで治療効果を発揮する。一方で、GdNCTではガドリニウム薬剤を用いる。中性子捕獲断面積が極めて大きいガドリニウム157（254,000 b）を用いることで中性子を効率的に反応させ、核反応によって発生した即発ガンマ（ γ ）線やオージェ電子によってがん細胞を攻撃する。



BNCTとGdNCTは主に東アジアを中心に、NCEPTは主にオーストラリアで研究が行われている。

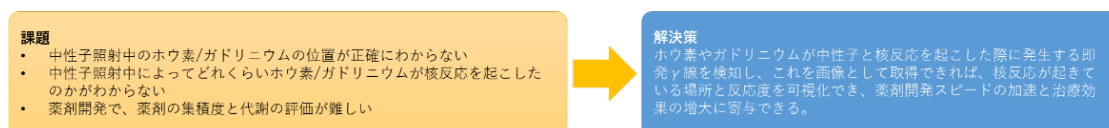


図3-19 中性子を利用したがん治療法

NCEPTはANSTO(豪)で研究が行われている最新の治療法で、ホウ素/ガドリニウムを含む薬剤を投与した後、炭素12及び酸素16といった重粒子線をターゲットに照射する。その結果、粒子線による直接的ダメージだけでなく、そこから発生した二次中性子がホウ素10及びガドリニウム157と核反応を起こすことで、追加のダメージをがん細胞に与えることができるため、高い治療効果が期待されている。

これらの中性子利用がん治療法においては、薬剤がどの程度腫瘍に蓄積されたのかを確認することが極めて重要であり、その確認のためにフッ素18(陽電子放出核種)を用いたPET検査が事前に行われているが、中性子を当てる実際の治療時には血液中のホウ素濃度の確認だけで、薬剤の蓄積状況を直接可視化できるわけではない。これは治療効果の定量的評価や中性子照射の最適化において大きな課題となっている。また治療に使用されるホウ素/ガドリニウム薬剤の開発においても、薬剤の代謝を直接観測する手段がないことも課題視されている。フッ素18で標識された薬剤と実際に使用される薬剤では化学形が厳密には異なるうえ、ホウ素10及びフッ素18を含む薬剤が体内で代謝されてホウ素10及びフッ素18が分離する可能性は低いものの、それは実験的に検証しなければならない。そして何より、フッ素18を含まない薬剤の代謝及び集積度は観測する手段がない。この問題はホウ素10及びガドリニウム157を直接観測する手段があれば解決される。そこで、本計画ではホウ素10及びガドリニウム157を直接観測する手段として、それらが中性子と核反応を起こす際に放出する即発ガンマ(γ)線を可視化する技術を開発する。即発ガンマ(γ)線のエネルギーは核種ごとに固有であり、特定のエネルギーの即発ガンマ(γ)線だけを分離して観測できれば、ホウ素10及びガドリニウム157を直接観測できることになる。しかし、即発ガンマ(γ)線の測定によく用いられているゲルマニウム(Ge)半導体検出器では空間分解能が全くないため、元素マッピングを実現するためには中性子ビームを細く絞る必要がある。しかし、中性子捕捉療法では腫瘍周囲に広いビームを照射するため、この方法は不適格である。そこで、X線天文学分野で開発されてきたカドミウム・テルル(CdTe)検出器を即発ガンマ(γ)線に応用する。

これまでに行ったCdTeダブルストリップ検出器を用いた即発ガンマ(γ)線イメージングの結果を図3-20に示す。この実験ではユーロピウム151、ジスプロシウム164と同時にホウ素10の測定を行

った。その結果、ホウ素10の即発ガンマ(γ)線(478 keV)のみの情報を切り出して画像化することに成功した。

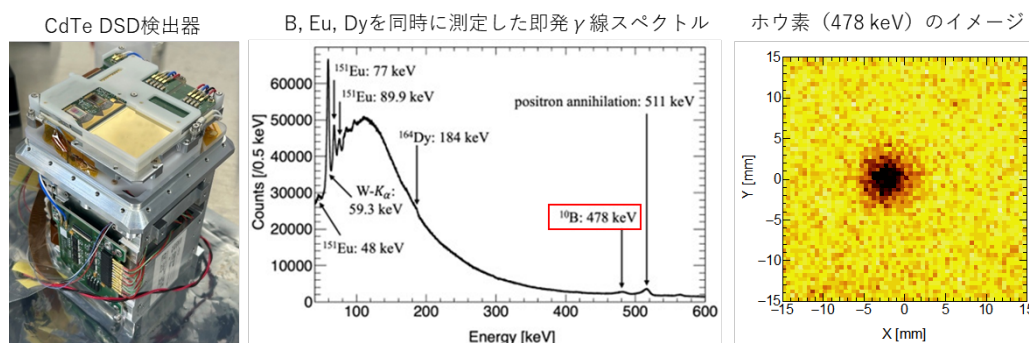


図3-20 CdTe検出器による即発ガンマ(γ)線イメージング

この実験ではピンホールコリメータを検出器の前面に設置することで即発ガンマ(γ)線の入射方向を成形し、画像として取得した。この実験後には多孔平行コリメータを使用した実験も行い、感度の大幅な向上にも成功した。またGdNCTへの応用を目的としたガドリニウム157のイメージング実験も成功させた。しかしながら、多くの課題も浮き彫りとなった。BNCTへの社会実装を実現するためにはまだ多くの開発要素が残されており、それらを解決しなければ十分な検出感度や精度を実現できないことがわかってきた。まず、BNCTの照射条件に最適化させたCdTe検出器の開発が必須である。現在使用している検出器ではホウ素10の即発ガンマ(γ)線(478 keV)に対する検出器効率がわずか10%しかなく、2 mmの結晶厚では明らかに厚みが不足している。また検出器の読み出し速度が不足しており、中性子フラックスの大きい加速器によるBNCTでの利用が困難である。また検出器自体に中性子捕獲断面積の大きいCdが多量に含まれているため、中性子の遮蔽が非常に重要であることもわかってきた。また実際上の大きな問題として、CdTe検出器を用いた実験を行う実験ポートが整備されていないことが挙げられる。現在、CdTe検出器を用いた実験は即発ガンマ(γ)線分析(以下、「PGA」という)装置を間借りする形で行っているが、PGA装置上部の屋根、遮蔽体やテフロン製のサンプルボックスなどを全て取り外す必要があり、実験終了後にはそれら全てを元に戻す必要がある。そのため実験の遂行にはクレーン作業を含む多大な労力が必要となる上、実験スケジュールにも大きな制約が伴う。

これらの課題を解決するために、まずCdTe半導体の厚さを2 mmから5 mmに拡大する。次に、読み出し速度を高速化するためCdTeダブルストリップ検出器ではなくピクセル検出器を開発する。これにより検出効率が2-3倍、読み出し速度が10倍に高速化される。また検出器に当たる中性子を減少させる為にフッ化リチウムのタイルで検出器全体を覆うハウジングを開発する。

検出器システムの開発を円滑に進めるため、PGA装置下流に新たな実験ポート(PGI: Prompt Gamma-ray Imaging、以下「PGI」という)を建設する。これによりPGA装置及びPGI実験ポートが共存可能となり、実験スケジュールの柔軟性が大きく向上するだけでなく、一度組み上げた検出器システムを常設にすることで測定条件を保持し、定量的な評価ができるようになる。

図3-21に示すように、このイメージングシステムでは回転ステージを使用することでCT測定が実現可能になるため、ホウ素10及びガドリニウム157の3次元元素イメージングが可能となる。



図3-21 PGI実験ポート設置予定位置と即発ガンマ(γ)線イメージングシステム

中性子がん治療の技術開発においても、図3-18に示すように国内外の民間企業、大学、公的機関、医療機関の連携体制を構築することで研究開発を大幅に加速する。JRR-3でのみ実現可能な実環境下での検証及びデータの蓄積を通じて、医療技術の信頼性を支える科学的根拠を創出すると共に、中性子がん治療を新たなステージに押し上げる。

3.4 JRR-3成果最大化へ向けた運営改革テストベンチ：共同運営特区構想

2.3.4節で記した通り、JRR-3の運営改革は重要な課題であるが、他方、全面的な制度変更は現在得られている成果をも減少させる可能性がある。そこで、本将来計画では、今後5年間程度の期間、JAEA・物質科学研究センターと大学(開始時点では東京大学物性研究所附属中性子科学研究施設)が共同で装置を運営し、共通の重点課題の解決を目指す共同運営特区を設定する。共同運営特区の課題設定としては、世界的に「量子技術」が経済安全保障及び産業競争力の核心と位置づけられている現状を考え、「スピン構造・ダイナミクスの制御による量子機能の創生」(2.3.2節)を核に設定する。この分野においては、東大物性研が国内の大学や国立研究所の研究者と共に世界を先導する成果を創出してきており、JAEA・物質科学研究センターの先進的極限環境中性子計測と協働することで、革新的な量子技術に繋がる可能性が高い。(研究内容や装置整備計画に関しては3.2節に記載する。)

この量子物質研究共同運営特区計画は将来のJRR-3運営の形態構築に向けたテストベンチと位置付ける。参加機関としては、JAEA・物質科学センターと東大物性研を中心に、大学共同利用や施設供用制度(JAEA)でビーム利用装置の運営や研究成果創出に成果をあげてきた関連研究グ

ループの参加を募り、我が国の研究特区を形成する。具体的には、JRR-3内にビーム利用装置を設置・運用する東北大金研及び多元研、京大複合研、量研機構や茨城大学などの諸機関が参加し、研究特区のビーム利用装置の共同運用のみならず、中性子実験施設全体の最適化を推進することが重要である。研究特区の効果的な運営には、例えば、JAEAと東大物性研の取り決めに基づく『中性子ビーム利用推進委員会』を基盤とし、上記関係諸機関の代表者が参画する広範な協議体へと発展及び拡充させることが有効である。この新たな連携枠組みの構築にあたっては、文部科学省の行政的支援を仰ぎつつ、設置組織の壁を越えた資源配分と成果最大化のためのマネジメント体制を確立する。ここでは、これまでJRR-3における効率的な研究推進の障壁になってきた種々の制限を緩和することで、より効率的な研究環境を確立する。具体的には、(1)参加機関の研究者がクロスアポイントメント制度等を活用することで実際に拠点に所属し、拠点構成員として制限のない活動を可能にする、(2)用途制限のある研究費で購入された機器について、研究資源の有効活用を図る観点から、所有機関を超えた利用を可能とする制度を導入する、(3)高度な実験機器の開発に大きな制限になる単年度の予算会計を緩和し、2-3年単位のプロジェクト型の実施形態を可能にする、(4)研究特区の運営に関わる予算の組織を超えた執行を可能にする、(5)東海地区の中性子実験施設全体でのビーム利用装置の利用を可能にする、(6)研究特区のビーム利用装置の課題申請から共通の課題申請・審査システムを構築する等である。

研究特区制度に関しては、その進展度合いに従い、量子物質研究装置群以外の装置？の組み込みも進める。そのうえで、5年程度で制度自体の評価を行い、その結果に応じてテーマの再検討やJRR-3全体への適用の可否を検討する。このようなテスト期間を経た運営改革により、JRR-3の有する特色を失うことなく世界的な競争力を有する研究施設へと変貌させる。

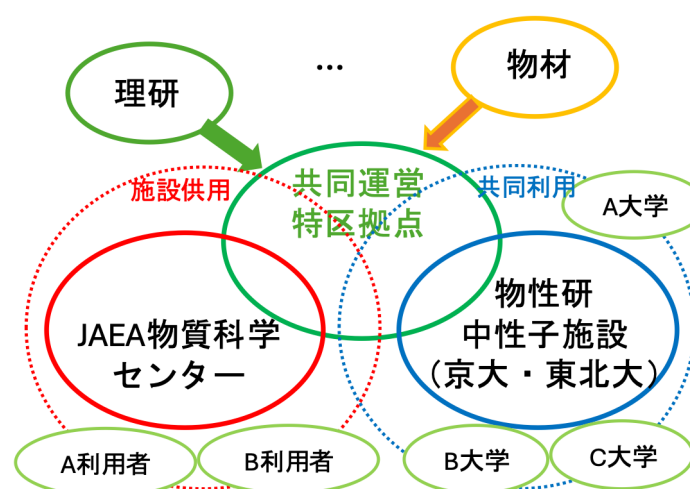


図3-22 共同運営の概念図

なお、前述の新たなSANS装置の建設において民間資金を導入する試みは、社会的ニーズが顕在化している分野において極めて有効なモデルとなり得る。一方で、10年から30年後の製品化を見据えた先行的な基礎研究や計測技術開発に対して、産業界が直接的な投資を行うことは、現時点の経済合理性に照らして困難である。しかし、こうした長期的視点に立つ学術基盤の維持・発展こそが、将来の我が国の産業競争力を規定する源泉となる。したがって、すべてのビーム利用装置に一律に民間資金導入を求めるのではなく、国家戦略上の重要性に鑑み、例えば、研究特区制度

で想定している量子物質研究装置で展開されるサイエンス等の長期的重要課題には公的資金による安定的支援を継続することが、中長期的な国益の確保に資するものとする。

3.5 中性子散乱に関する分野の人材育成課題及び提案

3.5.1 人材育成における現状及び課題

中性子散乱は、我が国が国際的な優位性を有する研究分野の一つである。東北大学からKEK、さらにJ-PARC MLFへと連なるパルス中性子研究の系譜に加え、定常中性子源であるJRR-3とパルス中性子源であるJ-PARC MLFが併存していることは、日本の研究基盤の大きな特徴である。さらに、新試験研究炉やTS-2計画(J-PARC)といった将来計画を視野に入れると、中性子実験施設整備と並行して、研究基盤を支える人材を計画的に育成・確保することが不可欠である。

中性子散乱に関する分野で育成すべき人材は、大別して二つの層から成る。第一は、中性子散乱に関する測定技術、解析、装置開発を担い、大学や研究機関において次世代を担う人材育成に貢献する専門人材である。この層については、1施設当たり100-300人規模の研究者層が必要であり、2施設全体では年間20名程度の博士号取得者を継続的に確保する必要がある。第二は、中性子を活用して学術的な知の深化(基礎研究)及び産業的な実用化・社会実装(応用研究・スタートアップ)の成果を創出する利用人材である。現在、2施設で約50装置が稼働し、各装置20件の研究課題を想定すると年間約1000課題が実施されている。これに対応するユーザー層は1000人規模と見込まれ、研究者の生涯活動期間を30年とすれば、利用人材についても年間30名程度を継続的に育成する必要がある。

一方で、中性子研究の高度化と施設の大型化に伴い、教育の場はむしろ縮小している。その背景には、中性子実験施設における実験の高度化と短期間化により、教育マシンタイムの確保が困難となっていることがある。加えて、若手研究者や学生が失敗を含む試行錯誤を通じて主体的に学ぶ機会が、制度的に十分確保されていない。現在、中性子専門の研究室は、北海道大学で1研究室、東北大金研及び多元研で2研究室、東大物性研で5研究室、京大複合研で4研究室、これに茨城大学やお茶の水女子大学などを加える程度にとどまっており、大学側の教育・再生産機能は決して厚いとはいえない。また、研究室は教員の転出・退職にともない消滅する可能性が絶えずある。大学を基盤として幾多の中性子人材を輩出してきたKURが運転終了となることも、この分野の人材育成に大きな影響を与えるものと考えられる。この状況は、中性子計測装置に関する技術継承の停滞、次期中性子実験施設の建設能力の低下、さらには国内中性子ユーザー層の縮小につながり得るものであり、早急に対応すべき課題である。

人材育成には、10年先を見据えた継続的取組が不可欠である。また、中性子をone of probes として利用する人材にとどまらず、コミュニティの発展に主体的に貢献し得る人材を育てる必要がある。したがって、本分野における課題は、人数の確保にとどまらず、専門人材と利用人材の双方について、継続的な供給と成長の経路を再構築することにある。

3.5.2 JRR-3 の機動力を生かした人材育成の可能性

上記の課題に対し、JRR-3は人材育成拠点として大きな可能性を有している。J-PARC MLFが先端かつ高性能な研究施設として高度な測定環境を提供する一方、JRR-3は定常中性子源として、教育目的の利用枠設定や段階的訓練を組み込みやすい柔軟性を有する。すなわち、学生や若手研究者が中性子計測の基礎を学び、自ら課題を立案し、測定、解析、考察までを経験する場

として位置付けることで、実験室レベルでの基礎教育からJRR-3での実践的訓練、さらにJ-PARC MLFでの高度研究へとつながる成長経路を具体化することができる。

専門人材の育成に関しては、研究型大学に寄附講座・連携講座等を時限付きで設置し、大学と中性子実験施設が一体となって教育を担う体制を構築することが有効である。あわせて、JRR-3で教育連携用マシンタイムを準備し、例えば東大物性研と茨城大学の連携のように、大学と中性子実験施設が共同で学生・若手研究者を育成する枠組みを具体化できる。また、中性子実験施設の建設時に大学人材が関与できる施策や、大学側に明確なインセンティブを与える仕組みも必要である。例えば、建設時の給与のクロスアポイントメント化により、大学が予備教員を雇用できるようにすることは、中性子実験施設の整備と大学の教育基盤維持とを両立させる現実的方策となり得る。

利用人材の育成においても、JRR-3の機動力を活かすことができる。企業人材の長期派遣やクロスアポイントメント制度を通じて、産業利用を担う実践的人材を育成するとともに、間接経費による持続的な中性子実験施設の運営へ接続することが期待される。加えて、JRR-3は、新規研究室の参入、中性子研究室の立ち上げ、サテライト拠点の形成、さらには民間企業、大学、中性子実験施設の人材交流を通じたキャリアアップを促進する場となり得る。これは、中性子研究室・研究者の人材流動プラットフォーム形成に資するものであり、分野全体の裾野拡大と人材循環の促進を可能にする。さらに、人材育成は技術開発及び事業化との接続においても重要である。日本には独自の中性子技術が多く存在する一方、事業化には十分結び付いていない。民間企業、大学、中性子実験施設が協働して技術を磨き上げる場としてJRR-3を活用できれば、人材育成、装置高度化、産業展開を一体的に進める好循環が期待できる。

このように人材育成の場としてJRR-3の重要性が高いことから、施設利用料金の受益者負担を検討するに際しては、人材育成が数十年の-spanを要する国家的投資であることを十分に考慮すべきである。現状、各種外部資金制度において中性子ビームの利用料金を直接的に支出可能な費目は限定的であり、次世代を担う人材育成の場である大学等の学術機関に対し、現状の制度枠組みのまま高額な負担を課すことは、教育研究機能の著しい停滞を招く恐れがある。受益者負担の適正化に向けた議論においては、中性子ビーム利用に関する競争的資金の枠組みや支払いの仕組みなど幅広い制度の設計・活用に関して、文部科学省と連携しながら検討を進める必要がある。既存の全国共同利用や施設供用制度(JAEA)が果たしてきた広範な人材育成と多様な研究成果の創出実績を損なうことのないよう、慎重に制度設計に関する議論を継続する。

以上より、JRR-3は単なる研究利用施設ではなく、我が国の中性子散乱に関する分野を支える人材育成拠点としても不可欠である。教育連携用マシンタイム、大学との連携講座、企業人材交流や人材流動プラットフォームなどを組み合わせた持続的な人材育成体系を構築するため、JRR-3の機動力を最大限に活用するとともに、その機能の高度化を図ることを提案する。

4. 原子炉本体の高度化検討

これまでに記載した将来計画等は、JRR-3本体設備の高度化計画とも深く関わるものである。本章では、JRR-3の高度化に関して、許認可申請を伴う開発も含めて検討した結果を記載する。本章で詳述する原子炉本体の高度化計画は、その技術的難易度や事業規模を踏まえると、完了までに相応の期間を要する長期的展望に基づくものである。一部の計画を除き工事に伴う原子炉の長期間停止による研究開発への影響や技術的な成立性などについて今後十分な検討が必要である。しかしながら、我が国の量子ビーム利用基盤におけるJRR-3の代替不能な重要性に鑑みれば、将来の安定運用とさらなる機能強化を見据えた具体的な技術検討に、現時点から着手することは極めて重要である。

4.1 20 MWを維持した高中性子フラックス化

(炉心臨界体系の小型化)中性子ビームを利用する研究者がより高フラックスな実験環境を望むことは自然なことである。しかしながら、定常中性子源は原子炉であるが故に性能上、許認可上の制約を受けてしまう。これらの制約がない場合、中性子はウラン235の核分裂によって発生するため、単純に核分裂数を増やす(熱出力を増加する)ことで中性子量を増やしフラックスを上げることができる。ここでは原子炉の許可出力を変更せずによりフラックスを増やす方法を検討する。これは、熱出力を変更する場合、既設の冷却設備では冷却能力が不足することとなり、原子炉冷却システムの大規模な改造を要するためである。1個のウラン235は核分裂時に2～3個の中性子を放出する。このうち1個の中性子が別のウラン235に吸収され次の核分裂を引き起こす状態が臨界であり、ウラン235に吸収されなかった中性子は他の核種に吸収される若しくは臨界している体系の外に漏れ出てくる。JRR-3では、この漏れ出た中性子をビームとして取出し実験に利用している。つまり熱出力(核分裂数)が同じでも、臨界体系の外に漏れ出る中性子の量を増やすことができればフラックスを上げることができる。なお、許可出力は変更することはないが、以下に記載する検討内容は炉心の改造を伴うため、その点においては許認可を伴うこととなる。また、内容は定性的な説明のみであり、定量的な評価は今後必要に応じて実施していくこととなる。

臨界体系の体積を小さくする、形状を複雑化し表面積を増やすなどによって中性子の漏れ量を大きくすることができるため、炉心の臨界体系を小さくすることを考える。現在、JRR-3の炉心には26体の標準燃料要素を配置しているが、初期炉心(全燃料が未照射)時の臨界近接において14体で臨界する結果が得られている。よって出力増加に伴う核分裂生成物による負の反応度添加や冷却材のフィードバック反応度を加味して18体(5×5配置炉心)で20 MW運転が安全に成立するか、フラックスの増加が見込めるかを今後検証していく(図4-1)。

(燃料組成の変更)前述の出力の変更及び燃料の変更を伴わない炉心の小型化は、出力密度の増加となるため燃料の安全性の観点等からその成立性に疑問符が付く。ここで海外に目を向けるとFRM II(独)やNIST(米)などの高濃縮燃料を用いた炉においては、原子炉の性能を大きく変えることなく低濃縮化する手法として高いウラン密度を達成できるU-Mo燃料の採用が検討されている。JRR-3においてウラン・モリブデン(U-Mo)燃料を採用した場合、濃縮度約20%のままウラン密度を現行の約4.8 g/ccから高密度化することができ、簡単に熱出力を変えずに炉心の小型化を図ることができる(図4-1)。よって今後、海外原子炉の検討状況の調査及びU-Mo燃料炉心の検討を進めていく。

JRR-3炉心改造案

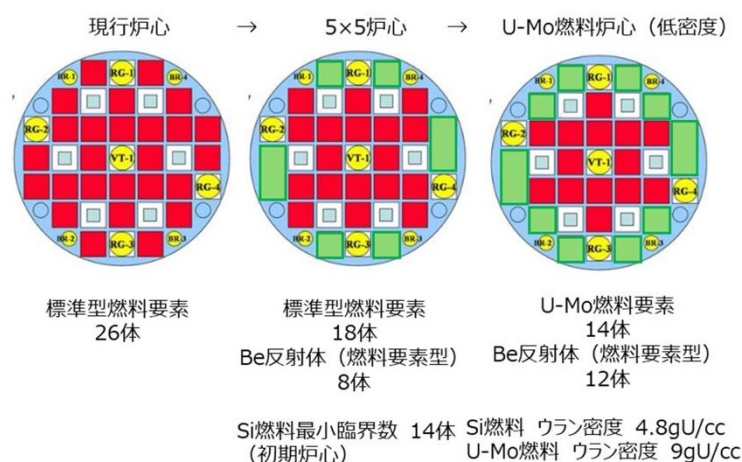


図4-1 JRR-3の熱出力20 MWを維持する条件で高中性子フラックス化するための炉心改造案。炉心臨界体系の小型化及び燃料組成の変更を想定。

4.2 炉室ビーム取り出し断面積拡大

JRR-3の実験試料位置におけるビームフラックスは建設当時においては世界に比するものであったが、各国においてビーム実験用研究炉が建設、運用開始された現在においては陳腐化しつつある。ここでは原子炉炉心の性能を変えことなくこれを改善する方法として、ビーム取出し孔の拡大を検討する。

原子炉プール廻りの実験装置より上流側には、原子炉プールコンクリート躯体内に回転プラグ（ビームシャッタ）と固定プラグが、それより上流側原子炉プール内にはビームチューブ接続管が、更にその上流に炉心の接続方向を覗くように重水タンク内にビームチューブが配置されている。回転ビームシャッタ及び固定プラグはステンレス製の管内を重コンクリートで満たし、高さ89 mm×幅44 mm（最小値）の開口を設けているものであり、開口内は各実験装置の特性に応じたスリットコリメータが挿入されている（図4-2）。ビームチューブ接続管及びビームチューブはアルミニウム合金製の中空構造であり、内部はヘリウムガスで満たされている。

ビームチューブ先端は、概ね重水タンク内の熱中性子フラックスがピークとなる位置と重なる。よってビームチューブの断面積を大きくとり、その断面積のまま実験装置まで中性子を導くことができればビームフラックスの改善が見込める。現在設置されている1Gから6Gのビームチューブはその外形が高さ124 mm×幅74 mmの角管である。ビームチューブを取り付けるために重水タンクに設けられた孔は直径220 mmであることから、設備の取り合いを考慮しても外径200 mm程度の丸管まで拡張ができるであろう。その下流においても固定プラグ位置におけるライニングスリーブが直径205 mmであるため、概ね直径200 mm程度で中性子を導くことができる。このときの管の内径を190 mm程度だとすると現在の窓（前述の最小値）と比較してビーム断面積が6.5倍程度になるため、これらをうまく集光し実験に用いること

ができれば試料位置においてビームフラックスの大幅なゲインを見込むことができる。なお、この改造を実施する場合、炉心構造物、回転ビームシャッタや固定プラグなどがどの程度放射化しているかによって作業員の被ばく影響を考慮する必要がある。加えて、ビームチューブが重水のバウンダリを形成しており、重水内は多量のトリチウムを内包していることから重水のバウンダリを新たに形成したうえで更新作業を実施しなければならないため、作業実現性も含めて今後検討が必要である。

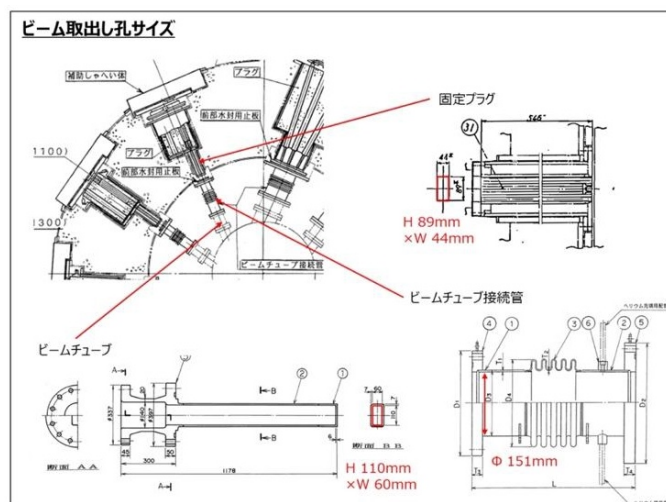


図4-2 JRR-3炉室のビーム取り出しサイズ(断面積)拡大のための検討用図面。炉心から下流に向かって、ビームチューブ～ビームチューブ接続管～固定プラグ～回転プラグ、という構造。

4.3 BH及びガイド管増設

研究トレンドや利用ニーズの変化から実験利用棟内の分光器については廃止や移設がいくつか行われているが、実験利用棟床面積や中性子導管の断面積の制約などから、新規に実験利用棟内に分光器を設置するのはより一層の工夫が必要となっている。これの解決策として新たな実験利用棟の増設を検討する(図4-3)。

原子炉建屋内や周辺建屋の配置からビーム取出し孔の候補として4Gがあげられる。現在4Gから6Gに大学所有の3台の三軸分光器が並んでいるが、利用目的や用途などの視点でこれらの整理を進めることで、新たな実験利用棟へのビーム取出し孔を確保することも出来得ると考える。新たに設けるビームラインを熱中性子とするか冷中性子とするかは見極めが必要であるが、熱中性子の場合は設備の構成等がより簡便となるため、ここでは冷中性子を対象として検討を進める。

現在のJRR-3の冷中性子源は原子炉プール内の炉心近傍に位置することから原子炉施設の一部に位置付けられており、原子炉等規制法の要求事項を満足するよう設計されている。加えて設置時の建家配置等の制約から冷中性子源を冷却するための圧縮機が実験利用棟を隔てた位置に設置されており、低温ヘリウム流路管が長い大型圧縮機を採用せざるを得ない。新規ビームラインにおいては、4Gビーム取出し孔の下流に冷中性子源装置を配置することで原子炉施設とは切り離し、高圧ガス設備として申請することで設計の自由度を確保する。これにより自由形状の大型減速材容器が設計可能となることから、新規ビームラインの減速材には液体水素に比べ中性子

吸収断面積の小さい液体重水素を採用することができる。また、冷却のためのヘリウム圧縮機も原子炉建家近傍に設置することで低温ヘリウムの輸送ロスを減らす設計とする。液体重水素を用いた新規冷中性子源はJRR-3、J-PARC MLFいずれにも設置されていないことから、設計、高圧ガス保安法に基づく手続き、製作試験、実規模試験で5年程度を要すると見込んでいる。

次に原子炉建家に関しては、現在設けられている中性子導管室と同様であることから遮蔽と耐震性のみを考えればよい。新規実験利用棟はビームホールのほか、ユーザーからの要望が多い実験準備室の配置や実験機器等の保管スペースを備えたものであることが望ましい。この新規実験利用棟は、原子炉の附属施設としての管理区域建家のみであることから耐震性のみを考慮すれば十分である。これらは新規規制基準対応時の経験から設計に2年、許可及び工事認可に2年、建設工事に2年程度を要すると見込んでいる。

この改造案については、原子炉施設の配置等から検討したのみであり、原子炉プールの外側に冷中性子源を設置した場合、導管下流で実験利用に十分な中性子線束が見込めるかの観点で今後検討を要する。

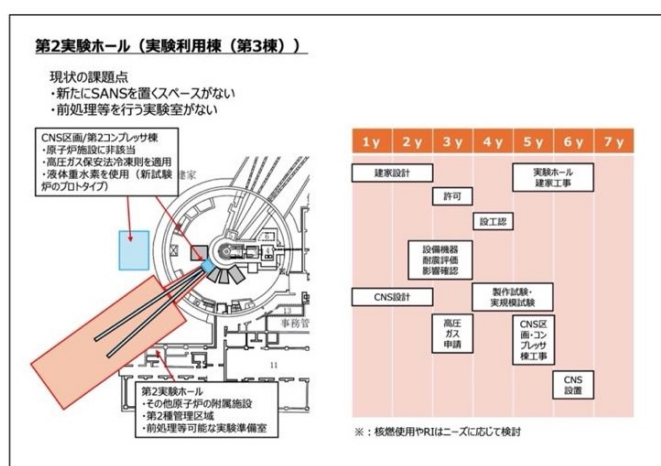


図4-3 JRR-3ビームホール及びガイド管増設案

4.4 炉室冷中性子源

東大物性研によってビームホールに設置された高エネルギー分解能三軸分光器HERIは、JRR-3の運転再開後、複数のアナライザと検出器を配置したHODACAとして改造され、多数の成果を創出している。NIST(米)でも同様の分光器として原子炉建屋内にMACSが設置されているが、MACSの特徴の一つはMACS専用の冷中性子源が設けられていることである。ここではMACSを参考に、原子炉建家内に冷中性子源の設置を検討する。

原子炉プール内や原子炉プールコンクリート躯体内に新たに冷中性子源を設置することはスペースやアクセス性の観点から困難であるが、原子炉プールコンクリート躯体に設けられたビーム取出し孔直下であれば、液体重水素を用いたシステムを開発する必要はあるが、前述のとおり比較的容易に設置できると考える。

4.5 冷中性子100倍計画

独立行政法人日本原子力研究開発機構の中期目標を達成するための計画(中期計画:2005年度～2010年度)において、JRR-3は冷中性子ビーム強度の10倍化を目指し、高性能冷中性子源減速材容器の開発及び中性子導管のスーパーミラー化を進めた。しかしながら、高性能冷中性子源減速材容器はその特殊形状ゆえに、設計計算において内圧に対する塑性変形を抑えることができず計画を断念した。一方、スーパーミラー化に関してはC3導管及びC2導管の上流部の交換を実施し、当該導管から冷中性子を取り出している分光器においては従前のNiミラーと比較し5倍強と飛躍的なビーム強度の増加を達成することができたが、C1導管及びC2導管下流部については未実施である(図4-4)

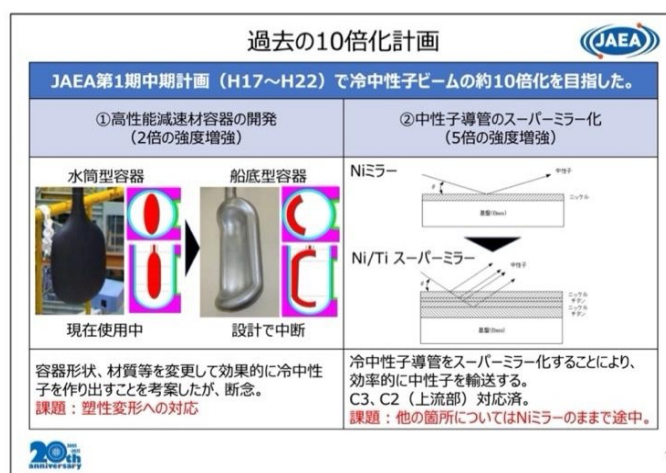


図4-4 過去に検討された減速材容器及び中性子導管高度化(一部実施済み)計画

高性能冷中性子源減速材容器に関しては2023年度に設計を再開し、その設計結果を基に2025年9月に原子力規制庁へ設計及び工事の計画の認可申請を行い、現在原子力規制庁の審査を受けている最中である。当該認可取得後、高性能冷中性子源減速材容器の製作に取り掛かり、2029年度の施設供用運転からの使用開始を目指している。高性能冷中性子源減速材容器では1.6倍程度のビーム強度増加を見込んでおり、前述のスーパーミラー化と併せて計画以前の10倍弱のビーム強度となる。また、C1導管のスーパーミラー化についてもJAEA・物質科学研究センター、東大物性研及び量研機構の3者間で計画が進められている(図4-5)。

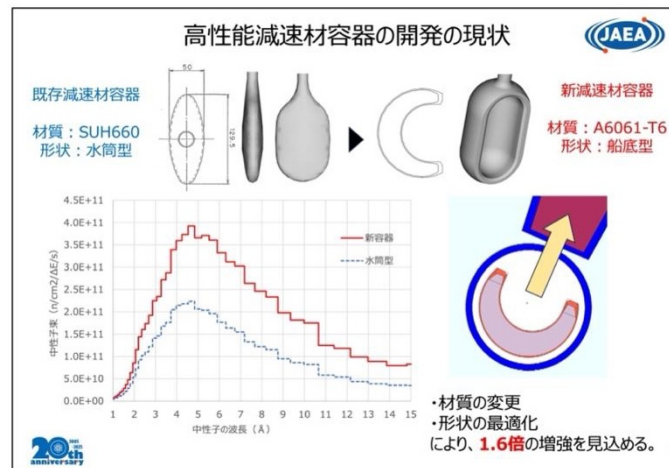


図4-5 現在進行中の高性能減速材容器開発

JRR-3においては、冷中性子源の減速材として液体水素(Liq. H₂)を用いているが、OPAL(豪)やNIST(米)などにおいては液体重水素を用いたものが設置され始めている。液体重水素は液体水素に比べ吸収断面積が小さく(水素:約30 barn、重水素:約5 barn)、減速材での中性子の吸収を抑えることができる。一方で散乱断面積は水素の方が大きい(水素:約80 barn、重水素:約7 barn)ことから、液体水素の方が冷却能力は高くなる。また、重水素を採用した場合、中性子照射による放射化によりトリチウムが生成される点も注意が必要である。以上をまとめると液体水素を採用した場合、コンパクトな容積で効率よく冷中性子を生成でき、重水素を採用した場合は、ビームの吸収を少なくすることができる一方で大きな容積とトリチウムの管理が必要になってくる。

前述の事情を勘案してもビーム強度の増加分に大きな魅力があることから諸外国において重水素の採用が進められているわけであるが、JRR-3においては既存の減速材容器設置場所のスペースが狭く、容積の大きな減速材容器を設置することができないため、重水素を採用しても十分な減速能力を見込むことができない。他の減速材容器設置場所としては、MACS@NIST(米)に取り付けられた冷中性子源を参考に重水タンクに水平に取り付けられた9Cビームチューブを改造する方法が候補と成り得る。9C用に重水タンクに設けられた孔の直径は400 mm、ビームチューブの長さも650 mm程度あるため、直径300 mm程度であれば球状の減速材容器を配置することは可能であり、重水素を用いることができる。重水素化することで3倍程度増加したという結果もあり、減速材容器の大型化と同時に中性子導管の大型化(高さ、幅とも2倍)することで、10倍計画以前のビーム強度の約100倍(高性能減速材容器を採用した場合のビーム強度を液体水素の最大値と仮定)となる(図4-6)。

この改造案についても、既に述べたとおりビームチューブが重水のバウンダリを形成しており、重水内は多量のトリチウムを内包していることから重水のバウンダリを新たに形成したうえで更新作業を実施しなければならないため、作業実現性も含めて今後検討が必要である。加えて重水素冷却系設備の取り回し等についても検討が必要である。

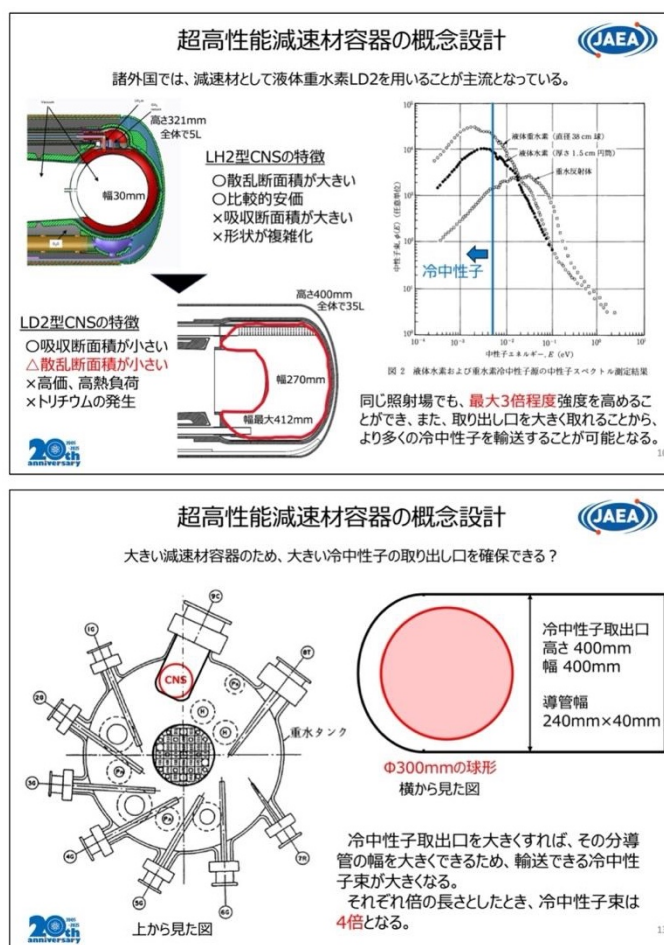


図4-6 冷中中性子100倍化を目指した超高性能減速材容器の概念図

4.6 9Cガイド管増設

2021年の供用運転再開以降のビーム実験の利用動向を見ると、9Cラインに設置された実験装置とりわけ中性子小角散乱装置群(SANS-J(JAEA)、SANS-U(東大物性研))の人氣が産学問問わず大きく、多数の成果を創出している。その他にも東大物性研のHODACA分光器等も利用の増加傾向は見られ、J-PARCが1MW運転に移行した状況下でも定常中性子源より生成される冷中中性子を利用した実験は依然として大きな利用ニーズがあることが分かる。ここでは原子炉施設の増設等を行わずに冷中中性子計測ポートを増設するために、ガイド管を増やすことを検討する。

9Cのビーム取出し点にある遮蔽プラグは直径620 mmであり、そこに幅74 mm、高さ184 mmの開口が5.5° 間隔で設けられている。これに対し、C1ライン、C3ラインはそのまま3.67° 間隔で4本並べた場合、導管室やビームホール内の幾何学的配置からの成立性や空間線量などにどのような影響があるかを今後検討していく(図4-7)。

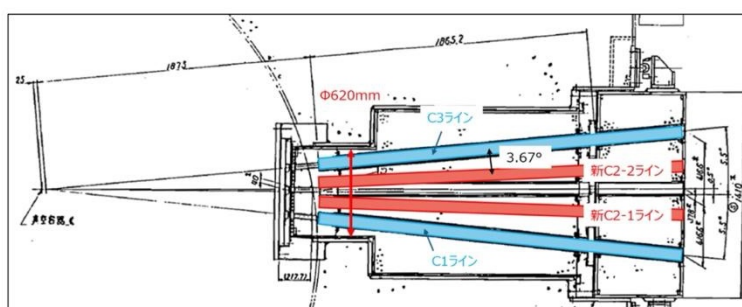


図4-7 9Cガイド管を現在の2本から3本に増設する場合の概念図

4.7 JRR-3とJ-PARC MLF間の試料輸送

JRR-3の性能向上のための開発とは異なるが、ここでは実験者の利便性の確保及びJ-PARC MLFとの相補利用促進のため、JRR-3とJ-PARC MLF間の実験試料の移動について検討する。

本件を検討するにあたり重要な点はJRR-3及びJ-PARC MLFともに中性子線を試料に対して当てて実験していることであり、中性子線が照射された試料は放射化し、核壊変による放射線を発生するようになる。なお、JRR-3は核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律(原子炉等規制法)による原子炉設置者、核燃料物質使用者及び放射性同位元素等の規制に関する法律(RI等規制法)によるRI使用者の3重規制を受けており、J-PARC MLFはRI等規制法によるRI使用者と許可区分が異なる点、また原子力科学研究所敷地内ではあるが、RI使用者としては異なる使用者となっている点に注意が必要である。また、JRR-3及びJ-PARC MLFともに実験に用いる試料は数g程度あれば十分であることにも注意したい。

それぞれの中性子実験施設で実験に供された試料をRIとして受け入れ、再度実験に用いようとする、試料中に含まれるRI核種が各中性子実験施設において許可された数量内であることを確認する必要があるが、JRR-3においてはRIの許可核種はアンチモン124、アメリカシウム241-ベリリウム9と極めて限られていることに加えて、許可を受けているRIの使用場所は原子炉建家とその他一部建家のみであり、実験利用棟内はRIの使用場所としての許可を有していない。JRR-3及びJ-PARC MLFともに年間約20,000(人・日)程度のユーザーが訪れ多数の実験が実施される中性子実験施設であり、中性子ビーム実験には研究目的に応じて無機物、有機物問わず様々な試料が用いられることから、これらの核種を網羅するよう許可を取得し、実験の都度許可数量未満であることを確認することが合理的ではないことは明らかである。

JRR-3で実験に供され放射化した試料は、原子炉等規制法で明確に定義されていないが、JRR-3内で廃棄しようした場合を考えると原子炉等規制法上の放射性廃棄物として扱うべきと考えられる。他方、J-PARC MLFで実験に供され放射化した試料は、RI等規制法第1条から放射性汚染物に該当する。

JRR-3のビーム利用装置は、専ら原子炉で発生した中性子を原子炉容器(原子炉プール)外に取出し中性子ビーム利用を行うためのものであり、それらは原子炉とは隔離されて設置されていることから原子炉の安全性に何ら影響を及ぼすことはないため、JRR-3のビーム利用装置は原子炉施設に位置付けられてはいない。このことからJRR-3で実験に供された試料もJ-PARC MLFで実験に供された試料も本質的には違いは生じない。よってこれらの試料を同等に扱うことに安全上の問題は生じない。

以上のことから、JRR-3で実験に供された試料をJ-PARC MLF内においてはRI等規制法上の「放射性汚染物」として扱い、J-PARC MLFで実験に供された試料をJ-PARC MLF内において原子炉等規制法上の「放射性廃棄物」として扱うことは問題がないと考える。

ここでRI等規制第32条の2(廃棄に係る特例)に着目すると「RI使用者が原子炉等規制法の廃棄事業者へ廃棄を委託したRI又は放射性汚染物は原子炉等規制法上の核燃料物質によって汚染したものとみなす(要約)。」と規定されている。よって前述のRI使用許可取得やその後の手続き上の手間をなくし、JRR-3とJ-PARC MLF間の相補利用を促進するために、当該特例にJRR-3とJ-PARC MLF間で互いに「核燃料物質によって汚染されたもの」と「放射性汚染物」とを読み替える規定を設けてもらうよう働きかけを行うのが最善策と考える。