

JRR-3 将来計画検討委員会（固体物理分野）
検討結果報告書

2018年7月30日

目次

1. はじめに
2. 本委員会での検討範囲
3. 固体物理学および中性子科学状況分析と中性子利用固体物理研究の近未来
4. JRR-3 固体物理分野分光器の現状分析
5. JRR-3 固体物理分野分光器再配置の可能性
6. 再稼働後の中性子利用制度と成果創出
7. 本委員会における分析および提案の総括

1. はじめに

日本原子力研究開発機構原子力科学研究所の所有する研究用原子炉 JRR-3 は熱出力 20MW の高性能汎用研究炉として 1990 年の臨界以降数々の研究に用いられて来た。特に、JRR-3 から得られる中性子ビームを用いた中性子科学研究は本研究炉の中核的利用法であり、JRR-3 は我が国の中性子科学を支える基本的インフラストラクチャー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福島原子力発電所事故により我が国の原子力施設は軒並み運転を停止することとなったが、JRR-3 もその例に漏れず 2010 年の計画停止以降運転再開がなされないままに現在に至っている。一方で、国の新規制基準への対応により商用原子炉の運転再開が聞こえる中、JRR-3 についても 2018 年 1 月に日本原子力研究開発機構から運転再開ロードマップが示されるなど、運転再開に向けた機運が急速に高まってきた。

JRR-3 は臨界以降約 20 年間の安定的ビーム利用期間においては、保有するビーム利用装置（分光器）の大きな設置変更等は行われてこなかった。しかしながらそれは JRR-3 の分光器群が目指すサイエンスに最適化されていたことを示すものではなく、むしろ、予算・マンパワー・運営組織等の制限に起因するものと分析される。なかでも固体物理分野に使用される分光器セレクションに極めて偏りが見られることは当初から問題になっており、21 世紀も 20 年を数えようとしている現在、世界の他施設に比較し JRR-3 の提供する研究機会が大きく見劣ることは言を俟たない。

本 JRR-3 将来計画委員会（固体物理分野）は日本原子力研究開発機構と東京大学が合同で所掌する JRR-3 中性子ビーム利用推進委員会の下部ワーキンググループとして設置された。その目的は JRR-3 分光器の再配置・最適化とそのために必要な目指すべきサイエンス（もしくは今後の中性子科学の潮流）の分析にある。JRR-3 における分光器最適化問題を解決する目的には、これまでも何度か研究会や委員会が開催され複数の報告が出されている。しかしながら、JRR-3 運転中に行われた種々の検討に関しては運転時の様々な制約に陽に暗に影響を受けていることを否定できない。本委員会の使命の一つは JRR-3 停止中をチャンスと捉え、運営組織等の様々な制約超えた装置再配置検討を行うことにある。一方、上述の通り JRR-3 の運転再開が見えてきたこの時点においては、運転再開後に可及的速やかに最適化が進むよう現実的な再配置案を示すことも重要な使命と考えられた。

中性子科学のような大型施設を必要とする研究分野において、建設が比較的高額となるであろう分光器の再配置や最適化を考える際には、近未来に主流となるサイエンス課題の正確な分析・選定が極めて重要である。本委員会では、中性子研究者以外の委員の参加を得て近未来のサイエンスの潮流分析を行なった。その後、中

性子散乱法の適用可能性や分光器開発への指針検討等を行う二段構成とした。このように、サイエンスの観点を明確にした上での分光器最適化検討を行うことも本委員会の使命であると考えられた。

JRR-3 停止以前と現在では我が国の中性子科学環境は大きく変化している。すなわち、大強度陽子加速器を用いた核破砕中性子源 J-PARC MLF が世界第 1 級施設として稼働を始めている。本委員会の使命が上述のように JRR-3 運転再開後可及的速やかに行われるべき事項に注力することにあつたため、委員会においては J-PARC MLF 分光器との住み分け問題を特に主題としておくことはしなかった。しかしながら、住み分け問題は常に各委員の念頭に置かれていたことは明白であり、事実本報告も住み分け問題を十分に考慮したものになっていると考える。

2. 本委員会での検討範囲

本委員会の最終的な目標は再稼働後の JRR-3 における固体物理分野の成果創出に関する方策の検討とその提案である。この目標を達成するために、JRR-3 再稼働後に注力すべきサイエンス課題の選定、およびそのサイエンスを実施するための分光器の再配置・最適化を検討した。このような目標設定に付随して、本委員会でのサイエンス議論並びに装置再配置・最適化議論における時間範囲、対象装置範囲は以下のようにまとめられる。

検討の時間的範囲：

本委員会での議論の対象とする時間的範囲としては JRR-3 再稼働後から 5 年後程度までの近未来と設定し、その期間におけるサイエンス像およびそのサイエンスに必要な分光器群の再配置・最適化を議論した。

検討対象装置範囲：

本委員会の検討対象とする分光器は主たる測定対象が固体物理系の試料である分光器（ならびに回折計）とした。具体的には以下の合計 12 台の装置を検討の対象とした。（カッコ内は所有機関）

HRPD (JAEA)

TAS-1 (JAEA)

GPTAS (ISSP)

PONTA (ISSP)

TOPAN (TOHOKU)

HQR (ISSP)

AKANE (TOHOKU)

HERMES (TOHOKU)

FONDER (ISSP)

TAS-2 (JAEA)

LTAS (JAEA)

HER (ISSP)

3. 固体物理学および中性子科学状況分析と中性子利用固体物理研究の近未来

3-1. 固体物理分野の研究動向に関する統計分析

近未来の固体物理学の潮流を推し量るに現在の状況の分析は有用であろう。我が国の固体物理分野の現在の状況を示すであろう指標の一つとして大型科研費採択課題のキーワードが考えられる。また、固体物理分野研究者の主たる所属先である日本物理学会のシンポジウム主題も同様な指標として考えられるであろう。そこで、これらから現在の我が国の固体物理分野の主要なキーワードを抽出することを試みた。続いて、キーワードが指し示す研究テーマの年次動向に関してデータベース (Web of Science) を用いた論文数分析を行った。それらの結果を以下に示す。

3-1-1. 大型科研費採択課題のキーワード分析

表に大型科研費採択課題(2015-2017)のキーワードとその出現頻度を示す。細目として物性 I および物性 II に分類される採択課題のみを選択した。キーワードとしては主なもののみをリストした。表よりわかる通り複数出現キーワードとしては強相関電子系や超伝導等があげられ、これらが現在の固体物理学の主要な課題であることがわかる。一方で、カイラリティ、スピントクスチャー、トポロジカル物質、スピン軌道相互作用、マヨラナフェルミオン等の概念も見られ、これらが日本における現代の固体物理学の潮流を示している可能性がある。これらのキーワードについては後に Web of Science を用いて状況をより詳しく分析する。

	キーワード	出現回数
基盤研究(S)	強相関電子系	3
	ウラン系化合物	1
	カイラリティ	1
	スカーミオン	1
	スピントクスチャー	1
	スピン三重項超伝導	1
	トポロジカル物質	1
	フラストレーション	1
	モット半金属	1
	モット絶縁体	1
	低温物性	1
	分子性固体	1
	反磁性	1
	多重相超伝導	1
	強相関系	1
	有機導体	1
	核磁気共鳴	1
	物性実験	1
	物質設計	1
	界面表面	1
基盤研究(A)	超伝導	5
	強相関電子系	4
	物性実験	4
	スピン軌道相互作用	3
	光誘起相転移	3
	高温超伝導	3
	トポロジ	2
	光電子分光	2
	原子層物質	2
	反強磁性	2
	物性理論	2
	超高速現象	2
	遷移金属酸化物	2
	BCS-BECクロスオーバー	1
	Dresselhausスピン軌道相互作用	1
	III-V族半導体	1
	Majorana fermions	1
	Rashbaスピン軌道相互作用	1
	もつれ合い光子対	1
	イオン注入を伴う物質	1

表 3.1: 2015 年-2017 年の期間に開始した大型科研費のキーワード出現回数。主要なキーワードのみ記している。https://kaken.nii.ac.jp 調べ。

3-1-2. 日本物理学会シンポジウム主題分析

表に過去3回の日本物理学会にて開催されたシンポジウムの主題を示す。固体物理分野に関連すると考えられるものを選択し示した。この表からも超伝導や強相間電子系といった大きな枠組みにおいて、トポロジーやスピン軌道相互作用等に注目が集まる現状が予想される。また、非平衡系や非周期系といったこれまで固体物理の本流ではあまり扱われてこなかった内容、さらには表面界面やナノ構造といった構造起因の特異物性（バルクでは見られない物性）に注目が集まっている現状も想像できる。一方、光、特に放射光主題のいくつかのシンポジウムも見られ、量子ビームの中でも放射光を用いた研究に勢力があることが想像できる。

2018年 年会 東理大	キタエフスピン液体とマヨラナ粒子:理論と実験を両輪とした最近の発展と展望 Control of Strongly Correlated Electron Systems with DC Current 非平衡系におけるゆらぎと構造 高次元と高対称が共創する物質科学の革新 トポロジカル物質科学の新展開 不均一な揺らぎとその周辺の物理:~ Nishikawa Line から第二臨界点まで ~ シンクロトロン光電子分光が拓く物性研究の新展開 表面・界面における反転対称性の破れとスピン軌道相互作用 光渦の拓く物理学の新展開 超伝導体における新奇な対称性の破れ 非周期系物質の構造・物性研究の進化と深化 一異分野融合による材料開発への応用一 インフォマティクスを活用した材料科学の新展開
2017年 秋季大会 岩手大学	超伝導スピントロニクスと展望 放射光を用いた磁性研究の30年 -磁気円二色性の新たな展開- 反転対称性の破れと超高速非線形ダイナミクスの新展開 超伝導物質および超流動ヘリウム研究の切り開く トポロジカル物理の最前線 有機強誘電体の開発と諸物性 理論による表面・界面・ナノ構造の微視的構造と物性の予測:現状と展望 光物性との連成による新分野創成 量子ビームによる軽元素の動的挙動観察の最前線 遷移金属カルコゲナイド2次元結晶の新展開 Haldane 現象とその展開 ソフトマターの構造形成とその制御
2017年 年会 阪大	バンド縮退を持つ電子正孔系の新しい金属絶縁体転移 ダイヤモンド型量子スピン鎖の物理とその発展 新しい単元素二次元層状物質の創製とその物性 放射光を用いた顕微分光によるナノスケール電子状態観察の新展開 テンソルネットワーク法とその可能性 最近の研究で明らかになった重い電子化合物のエキゾチックな超伝導状態 フォノン物理学のフロンティア: 格子振動解析から超音波応用研究まで 電子・水素・イオンの動的複合相関を考慮した物質生命科学 原子層関連物質における2次元超伝導現象 分子性固体を用いた熱電変換の最前線 銅酸化物超伝導体の電荷秩序と擬ギャップ- 最近の進展と展望 -

表 3.2: 過去三回の日本物理学会におけるシンポジウム主題のリスト。

3-1-3. Web of Science を用いた分野・キーワード別論文数分析

これら、我が国における固体物理分野の現状分析から得られたキーワードに関連する研究の世界的動向を定量的に分析するため、Web of Science を用いた論文数分析を行った。なお、分析は複数の日時に行われたため、数には多少の不一致が生じている。

まず、本節の分析の母集団として選択したカテゴリー Physics Condensed Matter (phys cond mat) に属する論文に関する過去20年の論文数推移を調べた。図 3.1 にその結果を示す。図よりわかる通り論文数は順調に上昇しており、固体物理分野が健全に成長している分野であることがわかる。

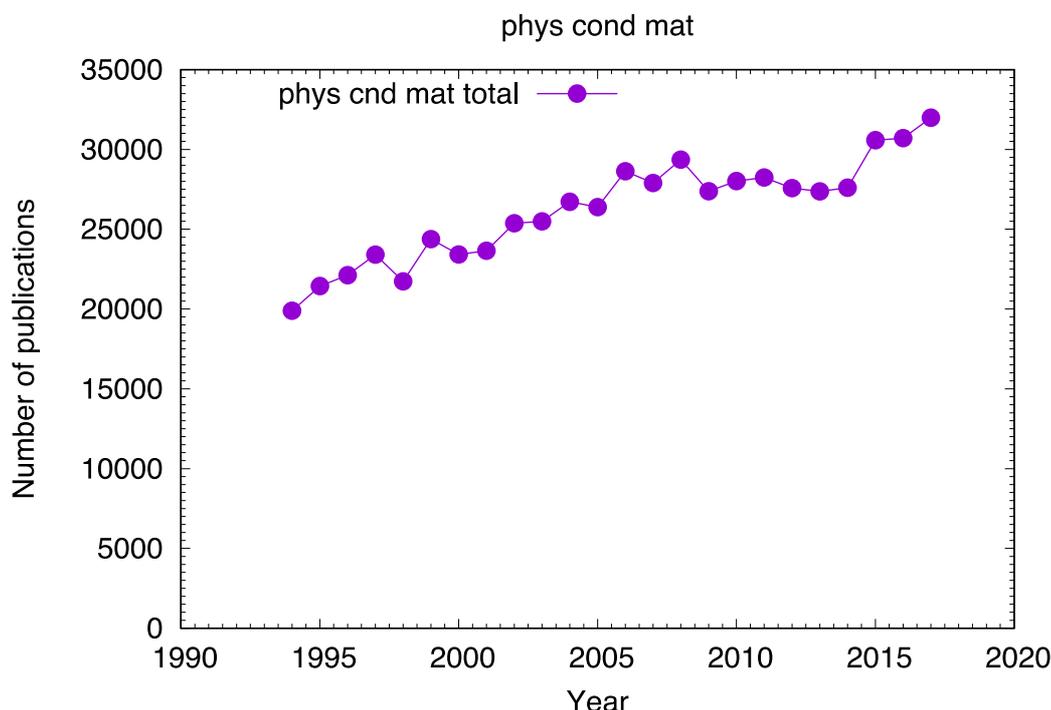


図 3.1: カテゴリー”Physics Condensed Matter” の総論文数の年次推移。
Web of science で検索。

固体物理分野における研究動向をより詳しく分析するため、以下でキーワード別に論文数の年次推移を調べた。キーワードとしては日本物理学会シンポジウム主題および大型科研費キーワードリストから主要なものを抽出した。図 3.2 に比較的大枠を決めるキーワードを用いた検索結果を示す。図よりわかる通り、”magneti*” (磁性) や ”superconduct*” (超伝導) は穏やかな変化を示しており、特に超伝導に関しては過去 25 年間を通しておおよそフラットに推移している。この結果はこれらの概念が枠組みとして機能しておりその総数はおおよそ変化がないことを意味しているであろう。論文数の絶対量もさることながらその変化率の大きなキーワードに”surface” (表面) がある。1994 年時と比較すると論文数として倍近くまで増えており、固体物理学の中心的課題が表面に移行している可能性を示唆している。(”Physics Condensed Matter”に分類される論文が年間 30000 程度であることを考えると、驚くべきことにその約 1/3 が surface をキーワードとして含んでいることになる。) また、”topolog*” (トポロジー) をキーワードに含む論文も 2010 年頃以降劇的な増加を示しており、超伝導や界面に迫る勢いである。このような分析結果は 1., 2. で示された日本における現状と定性的な一致を示していると考えられる。

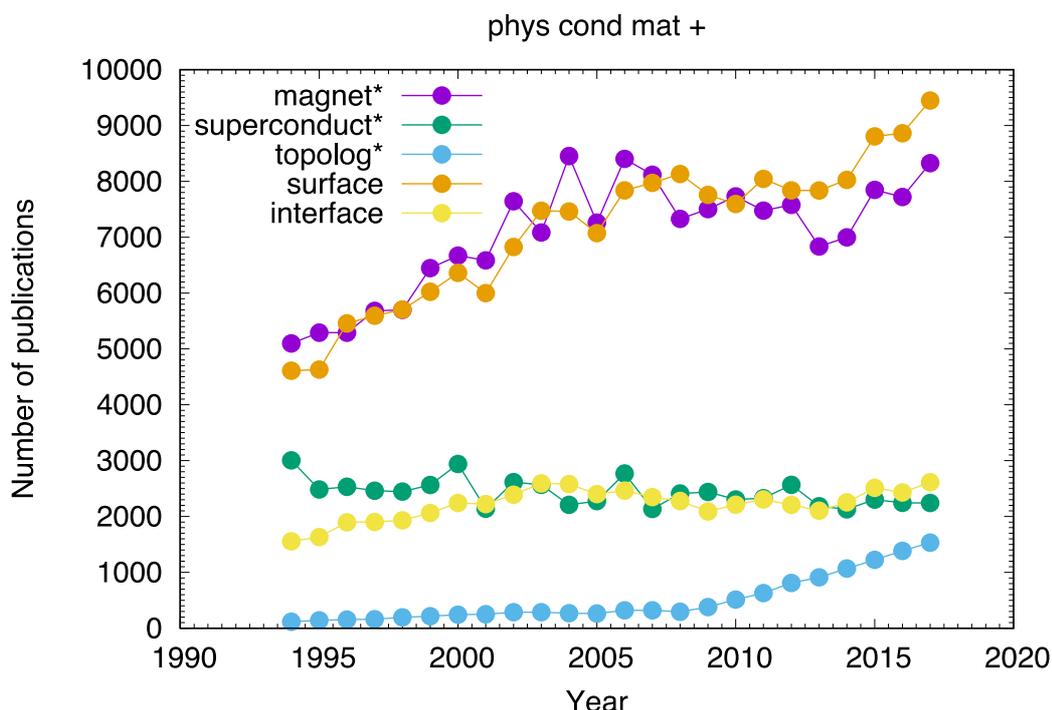


図 3.2: Physics Condensed Matter カテゴリーにおけるそれぞれのキーワードでの検索結果論文数の年次推移。Web of science で検索。

次にもう少し細かな研究テーマに対応するであろうキーワードでの論文数分析結果を図 3.3 に示す。キーワードとしては”chiral*” (カイラリティ), “skyrmion” (スカームيون), “frustrate*” (フラストレーション), “spin-orbit*” (スピン軌道相互作用), “spintron*” (スピントロニクス), “multiferro*” (マルチフェロイックス), “majorana” (マヨラナ) 等を選択した。これらは 1., 2. の分析から示唆されたものである。図より明らかなように、1., 2. の分析で現れたキーワードはどれも論文数上昇傾向を示していることがわかる。中でも、スピントロニクス、マルチフェロイックス、マヨラナ、スカームيونはそれぞれ 2000 年、2005 年、2010 年、2012 年を境に急激な増加に転じており、これらの概念が最近出現した急上昇概念であることが見て取れる。

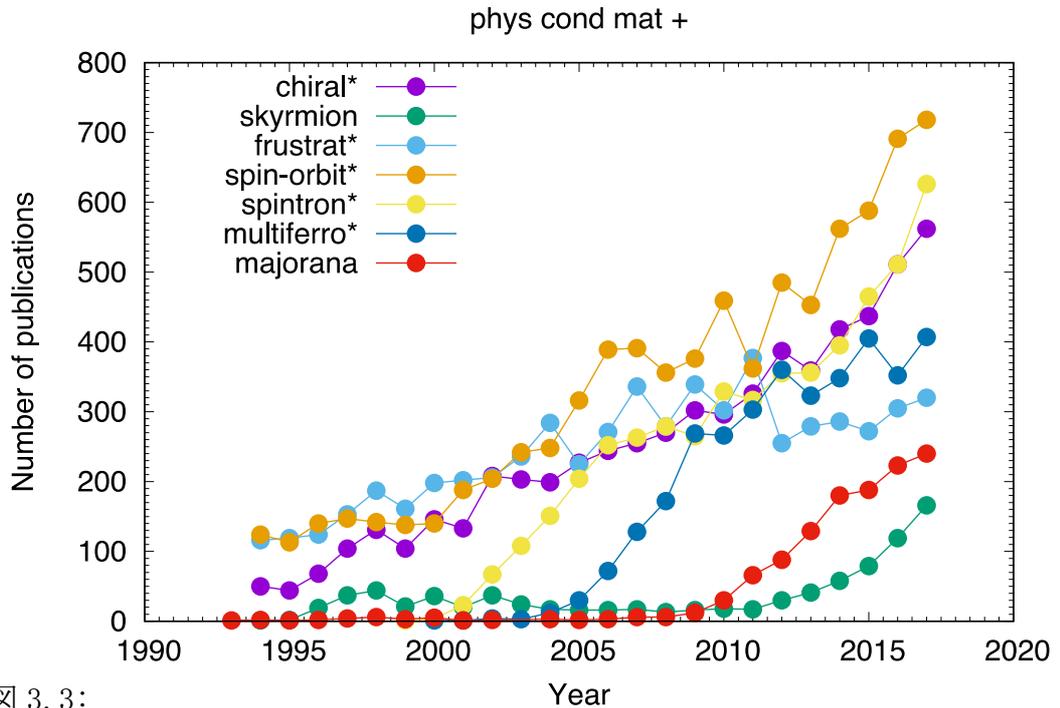


図 3.3: Physics Condensed Matter カテゴリーにおけるそれぞれのキーワードでの検索結果論文数の年次推移。Web of science で検索。

図 3.4 には別の観点からのキーワード分析結果を示す。キーワードとしては”texture” (テクスチャー)、“domain” (ドメイン)、“magnetic structure” (磁気構造)、“electronic structure” (電子構造)、“nonequilib*” (非平衡) を選択した。テクスチャー、ドメインは比較的大きなスケールの物性現象であり、固体物理学の興味の対象の空間スケール変化を表すであろう。電子構造、磁気構造は興味の対象が電子運動かスピンかを大まかに表すものと期待される。非平衡現象が固体物理分野でどのように興味をもたれてきたかも分析の対象とした。図よりわかる通り磁気構造以外のほぼ全てのキーワードについて関連する論文数はおおよそ増加を示している。

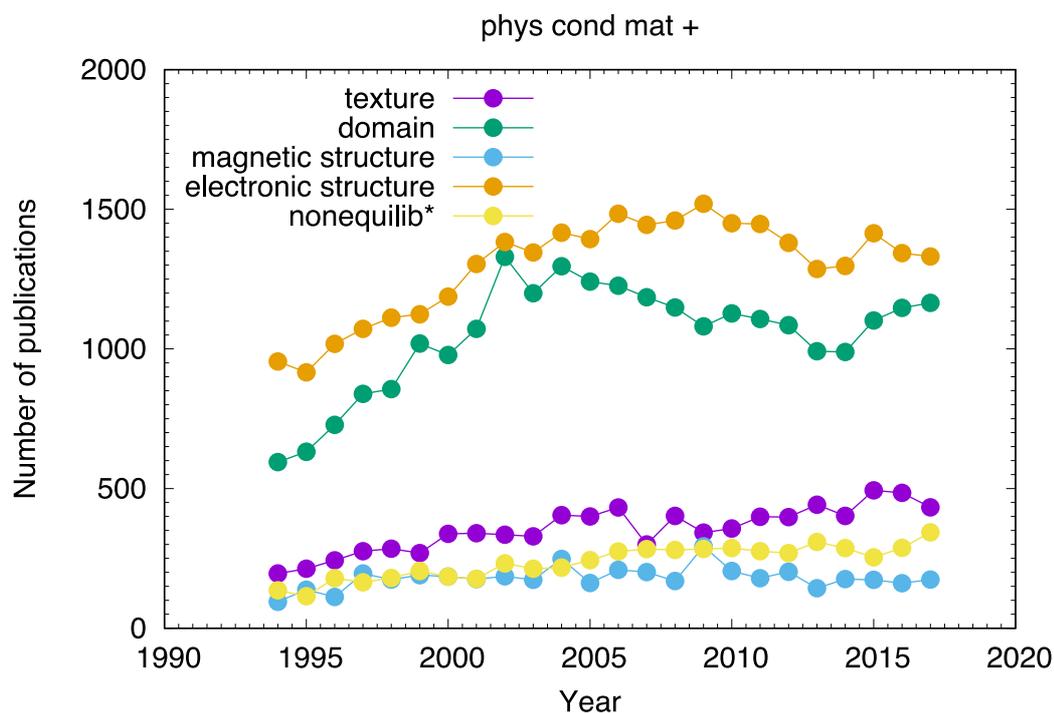


図 3.4: Physics Condensed Matter カテゴリーにおけるそれぞれのキーワードでの検索結果論文数の年次推移。Web of science で検索。

3-2. 我が国の中性子科学の状況に関する統計分析

近未来の JRR-3 における固体物理研究を考えるにあたり、現在の世界並びに我が国における中性子科学の現状を分析することは有用であろう。この観点から、同様に Web of Science を用いた中性子科学の動向統計分析を行った。

図 3.5 に 1900 年から 2018 年の間に出版された中性子散乱関連の国別論文数を示す。キーワードとしては”neutron scattering” or “neutron diffraction” を用いたため、低エネルギー（物性）中性子散乱とは限らない可能性もあるが、中性子散乱研究動向に関するおおよその傾向は得られるものと考え。図よりわかる通り、我が国は中性子散乱論文数においては世界 5 位に位置しており、世界の中性子コミュニティーで一定の位置を占めていることがわかる。

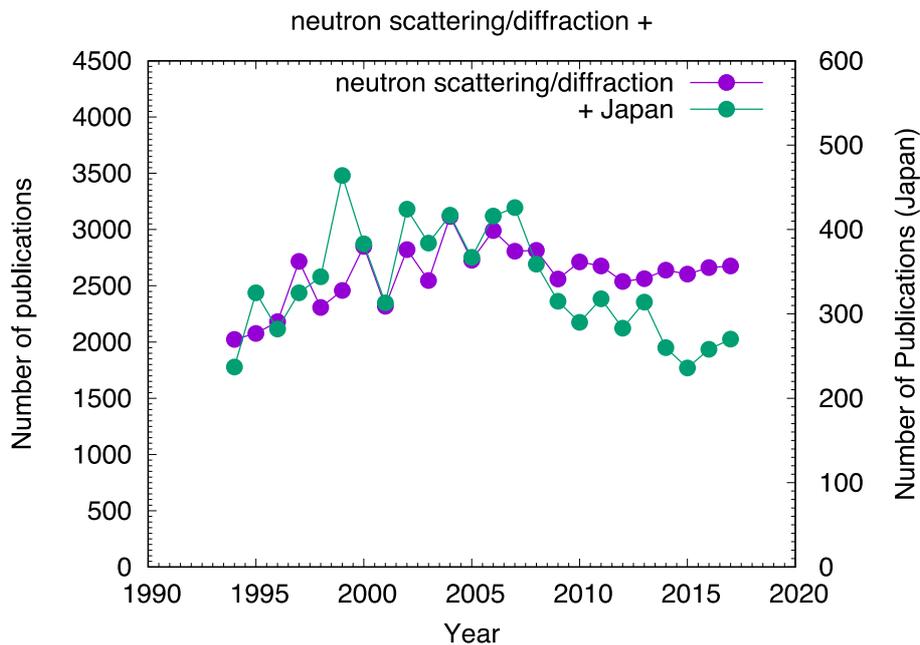


図 3. 6: "Neutron scattering" or "neutron diffraction" をキーワードで検索した場合の総論文数とそのうち日本からの論文数の年次推移。Web of science で検索。

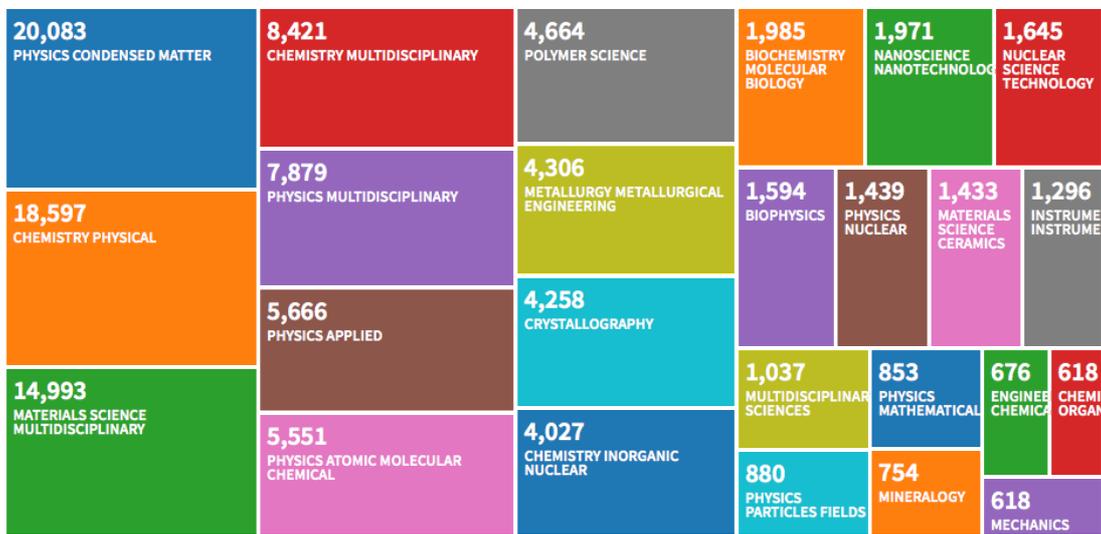


図 3. 7: "Neutron scattering" をキーワードで検索した場合の分野別論文数。1990-2018の期間を対象としてWeb of science で検索。

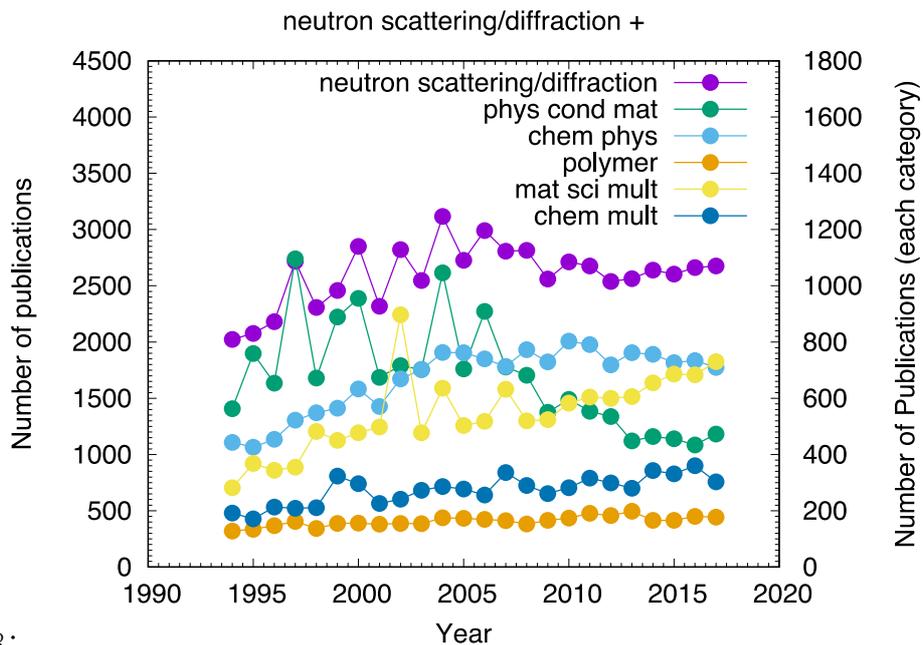


図 3.8: "Neutron scattering" or "neutron diffraction" をキーワードで検索した場合の総論文数とカテゴリー別論文数の年次推移。対象を全世界として Web of science で検索。

この固体物理分野の地位低下が世界的なものかを調べるため、中性子散乱関連論文のうち固体物理カテゴリーに属するものの国別論文数年次推移を調べたものを図 3.9 に示す。米国、フランス、ドイツと主要 3 か国も軒並み固体物理論文数を減らしており、この傾向が日本に局在したものではないことがわかる。ただし、日本の場合中性子散乱関連の総論文数（図 3.6）も減少していることが影響してか、他の 3 カ国に比べ減少率はかなり大きように見える。注目すべきは中国の論文数の推移であり、2017 年においては日本とほぼ同数の論文数まで上昇している。今後アジア地域における中性子散乱研究（固体物理分野）の勢力図が変わることはほぼ間違いないと予想される。

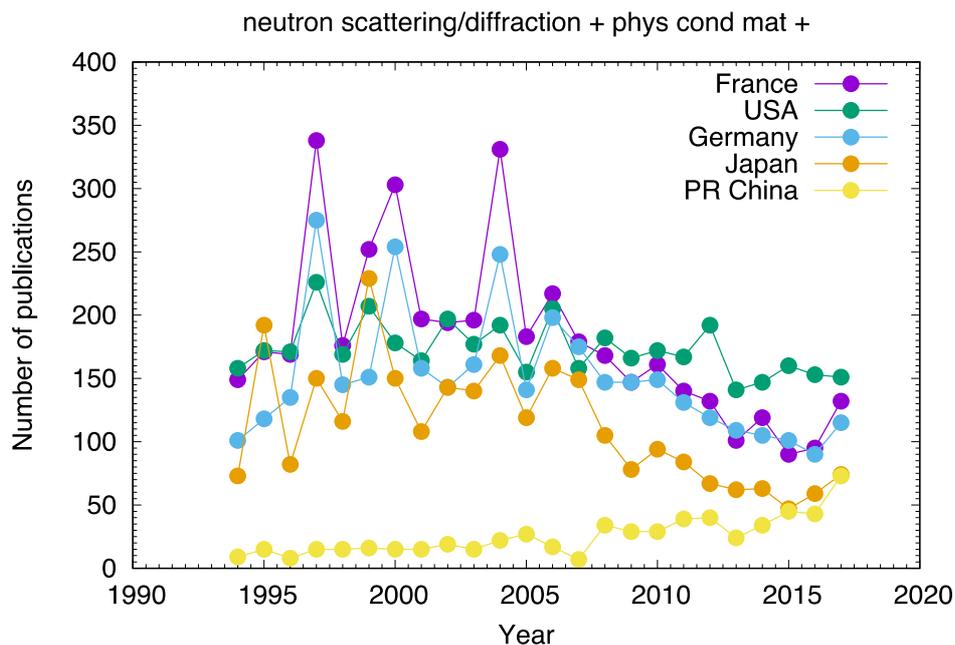


図 3.9: "Neutron scattering" or "neutron diffraction" をキーワードとし、研究分野を "Physics Condensed Matter" と制限して検索した場合の国別論文数の年次推移。Web of science で検索。

3-3. 統計的分析結果に関する検討

上記分析において注目すべき結果は、中性子科学における固体物理分野論文数の世界的な減少傾向、および我が国における中性子科学関連論文数の漸減傾向（特に固体物理分野の明白な減少傾向）であろう。以下にこれらの要因を分析してみる。中性子科学における固体物理分野の世界的論文数の低下は、固体物理分野全体の論文数が低下を示していないことを考えあわせると、固体物理分野の研究センターが中性子散乱の適用の難しい研究課題へと移行していることが考えられる。中性子散乱（固体物理分野）の論文数の減少は 2000 年頃からの現象であるが、時をほぼ同じくして、界面分野の論文増加が見られていることは興味深い。また、トポロジーやスピントロニクス等の比較的中性子散乱を利用しにくい研究分野の勃興も固体物理分野における中性子散乱手法の地位低下を招いていると考えられる。一方、カイラリティ、スカーミオン、スピン軌道相互作用、マルチフェロイックス等の中性子散乱が本質的な役割を果たすことのできる研究分野の中にも大きな進展を遂げているものがあり、これらの分野に対する中性子散乱手法の最適化と、他の（これまで中性子散乱の適用が難しいと想定されてきた）分野への適用拡大の両方が必要であると分析される。

全世界として中性子散乱研究の総論文数に大きな増減がない中で、我が国の中性子散乱論文数に漸減傾向が示唆されることには注意が必要であろう。（なお、漸減傾

向は長期間観測の後に結論すべきことであり、現時点ではあくまで確定的ではない。) 2005年以降わが国に生じた大きな変化を考えると、2010年のJRR-3停止(と引き続き起こった2011年の東日本大震災による長期停止)による中性子研究の停滞が原因の可能性もある。この時期J-PARC MLFが稼働を開始したが、震災およびいくつかの事故による運転停止等で近年までJRR-3の不在を埋めるだけの成果創出を果たしていなかった可能性がある。J-PARC MLFは近年順調な稼働を始めており、また、その出力も近未来には計画出力まで増強されると想定される。今後のわが国の中性子科学論文数の推移を注意深く見積もることは重要であろう。現時点では、JRR-3の運転停止はわが国の中性子科学に暗い影を落としており、特に固体物理分野には大きな影響を与えていると分析される。

3-4. 固体物理分野の新潮流と中性子散乱

統計的分析から示唆されるようにわが国の近未来の中性子科学固体物理分野の発展を考える際には、a)中性子が本質的な役割を果たすことが想定される分野の選定、ならびにb)中性子の適用範囲を広げるべく努力すべき分野、の2つの観点を考える必要がある。以下では、それぞれについて委員会での検討結果を記す。

3-4-1. 現状で中性子が本質的な役割を果たすことが想定される分野

統計的分析により近年注目を集めていると考えられている分野のうち、中性子散乱がすでに本質的な役割を果たすことができると考えられている分野としては、カイラリティ、スカーミオン、スピン軌道相互作用、マルチフェロイックス等が挙げられる。これらはキーワードとしては個別のものであるがその実は極めて深く関連しあっている。例えばスカラースピнкаイラリティが異常ホール効果を引き起こすことはすでに中性子磁気構造解析とバルク測定により理解が進んでいる[Taguchi *et al.*, *Science* 291, 2573 (2001)]。ベクトルスピнкаイラティは強誘電性の起源として働きマルチフェロイック物質の基礎的原理と考えられている[Kimura *et al.*, *Nature* 426, 55 (2003)]。最近では、さらに進んで、拡張(電気、磁気)多極子やトロイダル多極子の概念へと発展しており[Suzuki *et al.*, *Phys. Rev. B* 95, 094406 (2017)]、それらの対称性を持つ秩序変数と結合する輸送現象異常等が考えられている。Mn₃Snに見られる異常ホール効果はその例と考えられている[Nakatsuji *et al.*, *Nature* 527, 212 (2015)]。拡張多極子とは磁性体中の磁気構造をクラスターを単位として対称性分類することにより生じる多極子成分であり、磁気構造の情報が本質的に重要な役割を果たす。従って、拡張多極子に起因する異常物性解明という研究課題に関して中性子磁気構造解析の果たすべき役割は極めて大きい。特に、カイラリティ等の観点からは偏極中性子を積極的に用いた磁気構造解析が望まれる。

磁気スカーミオンはトポロジカルホール効果の逆効果として電流と結合することが知られている。トロイダルモーメントも電流等の輸送現象に結合し、電流下でのトロイダルモーメントの誘起が提案されている。このような磁気構造と輸送との結合はスピントロニクス観点からも大きな興味を保たれ、かつ電流下で中性子散乱を行うことにより本質的な情報が得られる可能性がある。

また、磁気スカーミオンに代表されるスピントクスチャーの研究に関しては、その空間スケールの大きさから、中性子小角散乱法の利用が盛んである。すなわち、固体物理分野で中性子小角散乱法の重要度は益々高まっていると言える。スピントクスチャーのカイラリティも極めて注目を集めるトピックであり、この等の観点からは偏極小角散乱が今後ますます重要になるであろう。

スピン軌道相互作用は近年の固体物理学においてはその重要性を益々増していると分析される。この相互作用はトポロジカルな電子状態とも深く関連しているが、これは後に言及する。磁性体中ではスピン軌道相互作用は反転対称性の欠如と組み合わせることにより反対称相互作用（ジャロシンスキー・守谷相互作用）を生じさせるが、この相互作用はカイラル磁気構造、スカーミオン磁気構造等を安定化させる。これらの磁気構造中の磁気励起の測定も中性子散乱研究が活躍できる近未来研究課題であると考えられる。中でも、カイラル磁気構造やスカーミオン磁気構造中のマグノン素励起には非相反性（伝搬が進行方向依存性を示す性質）が想定されており、現時点では主にマイクロ波の非相反伝搬として観測されている[Iguchi *et al.*, *Phys. Rev. B* 92, 184419 (2015)]。このような非相反マグノンはマグノンスピン流を用いたスピントロニクス応用の観点からも興味を持たれており、中性子散乱では低エネルギーの非弾性散乱（特に小角領域の非弾性散乱）の極めて良い研究対象と考えられる[Gitgeatpong *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 119, 047201 (2017)]。近未来の中性子散乱研究課題として意義深ものである。

ディラックコーンを持つ電子系にスピン軌道相互作用が導入されることによりトポロジカル絶縁相が生じたように、磁性体中においてもスピン軌道相互作用起源の反対称相互作用によりトポロジカルに非自明な素励起を形成する可能性がある。このような素励起は近年報告が始まっており、例えば、直交ダイマー系 $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ におけるトポロジカルトリブロンバンドや強磁性籠目格子物質におけるトポロジカルマグノンバンドの観測等が挙げられる[McClarty *et al.*, *Nature Phys.* 13, 736 (2017), Chisnell *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 115, 147201 (2015)]。このような磁性体中の素励起に対するトポロジーも近未来の中性子散乱研究課題として挙げられるであろう。このような研究にも低エネルギーの非弾性散乱が重要になる。

スピン軌道相互作用は4dや5d電子系でも本質的な役割を果たす。このような系ではスピン軌道相互作用を通してスピン励起と軌道励起の複合励起が生じる可能性

があり、実際に共鳴非弾性 X 線散乱で観測されている[Kim *et al.*, Phys. Rev. Lett. 108, 177003 (2012)]. このような励起を偏極中性子を用いて詳細に研究することも近未来の中性子研究の課題の一つであろう。

超伝導分野においても未解決の問題は数多くあるが、なかでも、スピン励起における擬ギャップの問題は超伝導機構解明の決定打となる可能性があり速やかな解決が望まれている。興味深い提案として酸素 8 面体上に生じる循環電流起源の磁気モーメントの可能性が考えられている。偏極中性子を用いた磁気モーメント検出が強く望まれる。また、古くから知られている割には有効に活用されているように見えない中性子実験法の一つに偏極中性子を用いた Q 依存帯磁率の直接観測による超伝導ギャップ構造識別法がある。この方法を用いると 1 重項・3 重項超伝導の識別が可能になるだけでなく、擬ギャップ相の起源解明にも使用できる可能性があり、近未来の中性子散乱による実験実施が望まれる。また、超伝導分野において究極の課題である室温超伝導実現に対しても中性子の役割を考える必要がある。

強相関電子系における超伝導等の種々の異常物性相の近辺には量子臨界点が存在することが多く知られている。逆の見方をすれば量子臨界点は新奇物性の宝庫とも言えるであろう。量子スピン系においても、例えば圧力印加によりシングレット基底状態を破壊した際にヒッグスモードが出現する等の提案があり、これらの中性子散乱による直接観測も最近報告が始まった[Hong *et al.*, Nature Phys. 13, 638 (2017)]. このように、量子臨界点近傍における種々の物性解明は近年の固体物理学の主要な課題であり、圧力や磁場等の試料環境を整備することで中性子散乱が本質的役割を果たすことのできる研究課題であると考えられる。今後のさらなる発展には、磁場や圧力をより自由にかつ大きく変化させる必要がある。

3-4-2. 中性子の適用範囲を広げるべく努力すべき分野

反強磁性体は長く応用分野で積極的に使用されることがなかったが、マクロスコピックな磁化を持たないため高周波スイッチングが期待できるなどその潜在能力は高い。反強磁性体を磁気記憶等の素子として考える場合に最も大きな問題はそのドメイン識別である。近年光の二次高調波測定や光磁気効果での反強磁性ドメイン識別の実験的報告が相次ぎ、この問題が克服されつつある。反強磁性ドメインを中性子散乱手法により観測する検討、特に顕微鏡的に実空間での観測を検討することは今後の磁気物理学分野に大きな貢献をする可能性のある研究課題であろう。

ドメイン観測に関してはマルチフェロイック物質の観点からも大きな興味もたれ、ドメイン境界エンジニアリングという新しい分野が始まろうとしている。この点からも中性子顕微鏡等によるドメインの実空間観測は検討を要する。

統計分析にも表れていたように固体物理学の潮流は表面や界面に移行しているよ

うに考えられる。例えば界面におけるスカーミオン磁気構造形成が起因と考えられるトポロジカルホール効果が報告されている。このような表面・界面の磁気構造の解析に中性子反射率を積極的に使用するなど、この方向の中性子散乱の適用を進めていくことは今後の中性子固体物理分野の研究発展に重要であろう。

非平衡状態の物性解明に対する中性子散乱利用の可能性も検討されるべきである。最近、光照射下で超伝導が誘起される可能性が理論的に示された[Ido *et al.*, *Sci. Adv.* e1700718 (2017)]。これは非平衡状態を利用した超伝導相安定化であり、新しい超伝導相形成法として興味深い。また、例えば強い AC 外場中に非平衡定常状態として形成されるフロッケ状態等も注目を集めている。強いレーザー照射下での中性子散乱を実現することによりこのような非平衡状態に迫ることができれば興味深い。

ワイル半金属等の逆格子空間中にモノポール構造を持つ物質群はそれらの示す異常物性により大きな興味を引いている。中性子散乱においては強磁性磁気揺らぎの詳細な測定からトポロジカルホール効果との関連を解明した先駆的な仕事が存在するが[Itoh *et al.*, *Nature Commun.* 7:11788 (2016)]、スピン軌道相互作用によりギャップが開いた場合に生じる隠れた特異点等に起因する磁気揺らぎの観測等、この分野で中性子散乱が果たすことのできる役割は大きく残っていると想像される。

最後に、近年発展がめざましいデータ科学と中性子散乱の関連についてもより深い検討が必要であろう。固体物理学を題材として考えた場合、結晶構造に関してはデータベースとして完備されている一方で、磁気構造に関しては極めて限られた数のデータが収録されているだけの状況である。上述の通り磁性体において新奇物性をもたらす新概念の多くが磁気構造に立脚しており、磁気構造に関するデータベースを完備することで機械学習による機能物質探索を可能にすることは中性子散乱の可能性を大きく広げるであろう。

3-5. 分析総括

中性子散乱の世界的研究アクティビティは論文数で見るとほぼ平衡に達している一方で、中性子散乱分野における固体物理学アクティビティは世界的に見て減少傾向にある。固体物理分野の研究動向調査から示唆される要因としては、バルク固体物性から表面物性等へ、さらには、トポロジーやテクスチャー等への固体物理分野の研究対象の変化が考えられる。

我が国の中性子散乱アクティビティは漸減の様相を示唆しており、特に固体物理関連に関しては減少傾向がはっきり見える。世界的な研究動向の変化に加え JRR-3 の長期停止がこの結果に関連があると示唆される。

固体物理学における大枠としての研究課題が長く強相関電子系や超伝導である一方で、近年注目を集める固体物理トピックスとしては、カイラリティ、スカーミオン、スピン軌道相互作用、マルチフェロイックス、表面、マヨラナ等が挙げられる。これらのトピックスに関して、現状の中性子散乱技術で研究可能なもの、および中性子適用範囲の拡大が必要なものに分け分析を行った。

近未来にすぐに可能な課題として前者に分類されるトピックスに対しては、磁気構造解析、偏極解析、低エネルギー非弾性散乱、小角低エネルギー非弾性散乱、(偏極)小角散乱、高磁場、高圧、電流下等のキーワードが浮かび上がってきた。これらの分光器・試料環境を(現状性能が劣る場合は高度化した上で)有効利用することでJRR-3再稼働後可及的速やかに注目度の高い研究成果を挙げることができると分析する。分光器の再配置・最適化にはこのようなキーワードを考慮に入れることが重要であろう。

一方、中性子適用範囲を広げるべく努力する必要がある課題としては、表面・界面物性に対応する反射率の積極利用、実空間観察(顕微鏡)の開発、非平衡に達する程度の強い場(例えば光場)中での中性子散乱手法の開発、データ科学との融合等があげられた。これらの中には実際の技術開発を伴うため近未来に実施できる課題ではないと考えられるものもあるが、反射率やデータ科学との融合等、研究の動向次第ですぐにでも始められる課題もあると分析される。

4. 固体物理分野分光器の現状分析

本章では JRR-3 に設置され固体物理分野に主に使用されている分光器の種類・台数・性能等を世界の他の原子炉中性子施設の分光器群と対比することで、JRR-3 の分光器群の現状を明らかにする。

4-1. JRR-3 に設置された固体物理分野分光器の現状分析

JRR-3 は 1990 年 3 月に臨界に達して以来、これまで我が国の中性子コミュニティーに良質な中性子ビームを提供してきた。一方で、固体物理分野で主に使用される分光器に関しては幾度かの高度化は経ているもののおおよそ初期配置のまま今日に至っていると言える。本章では JRR-3 固体物理関係分光器の現状を分析し世界の最先端原子炉中性子施設におけるそれらと比較する。

JRR-3 に現在設置されている固体物理分野に主に供されている分光器とその特徴を表 4.1 に示す。加えて、それらの分類別台数を表 4.2 に示す。これらの表よりわかる通り、JRR-3 における固体物理研究に主に供されてきた分光器は三軸型分光器である。特に熱中性子 3 軸型分光器の数が 7 台と圧倒的に多いことが特徴である。それぞれの現状を以下に簡単にまとめる。

1. HRPD(1G)

64 本の 0 次元中性子検出器を平面配置したコンベンショナルな高分解能粉末回折計である。

2. TAS-1(2G)

非偏極、および偏極中性子ビームの両方が使用可能な高強度な熱中性子 3 軸型分光器である。大きな特徴としてクライオパッドを用いた 3 次元ポラリメトリーが可能になっている。

3. GPTAS(4G)

非偏極に特化した大強度 3 軸型分光器である。入射モノクロメータおよび散乱側アナライザー共にダブルフォーカス機構を導入することで JRR-3 に設置された熱中性子 3 軸型分光器中最高の測定効率が実現されている。

4. PONTA(5G)

非偏極、および偏極中性子ビームの両方が使用可能な高強度熱中性子 3 軸型分光器である。スーパーミラー偏極子の導入により比較的 low エネルギー領域において高強度な偏極ビームを得ることができる。

5. TOPAN(6G)

非偏極、および偏極中性子ビームの両方が使用可能な熱中性子 3 軸型分光器である。モノクロメータをダブルモノクロメータ配置とすることでバックグラウ

ンドを抑え、かつ入射エネルギー範囲を大きく取ることを可能にしている。

6. HQR(T1-1)

入射エネルギー固定の熱中性子 3 軸型分光器である。主に弾性散乱実験に利用されることが多い。入射側にスーパーミラー偏極子を導入することで偏極実験が可能になる。

7. AKANE(T1-2)

入射エネルギー固定の熱中性子 3 軸型分光器である。熱中性子ガイド管の全高(20cm)分を縦集光することで炉室内分光器（縦集光）の 1/3 程度のフラックスを確保している。

8. HERMES(T1-3)

コリメータをソーラコリメータとしないことで中分解能ながら高効率を実現した粉末回折計である。検出器は 0 次元ではあるが 150 本有していることにより高効率に貢献している。

9. FONDER(T2-2)

熱中性子ガイド管に取り付けられた 4 軸回折計である。特徴としては近年湾曲 2 次元位置敏感型検出器が導入されており、回折強度の収集が極めて高効率になっている。

10. TAS-2(T2-4)

熱中性子ガイドエンドに設置された 3 軸型分光器である。ガイドエンドに設置されているため、炉室内分光器同様自由にエネルギーが選択できる。また、ガイドホールに設置されているため比較的バックグラウンドが低い。実験条件に関する制限も少なく、各種の極限環境実験（高磁場、高圧、極低温等）に用いられている。

11. HER(C1-1)

冷中性子 3 軸型分光器である。入射中性子側に回転グラフィイトフィルターが設置されており、高調波成分の少ないクリーンな中性子を用いた実験が可能になっている。アナライザーはダブルフォーカス型となっており、高効率に低エネルギー励起が測定可能である。

12. LTAS(C2-1)

冷中性子 3 軸型分光器である。RITA 型のマルチブレードアナライザーに位置敏感型検出器を組み合わせることによって、 $Q, h\omega$ 空間中の有限な領域の同時測定が可能になっている。種々の極限試料環境が使用可能になっていることも特徴である。

所有機関	装置名	分類	特徴
JAEA	HRPD(1G)	粉末回折計	高分解能
	TAS-1(2G)	熱中性子3軸型分光器	偏極（ポラリメトリー）、高エネルギー非弾性散乱
	TAS-2(T2-4)	熱中性子3軸型分光器	極限環境
	LTAS(C2-1)	冷中性子3軸型分光器	冷中性子、RITA型アナライザー
物性研究所	GPTAS(4G)	熱中性子3軸型分光器	非偏極大強度
	PONTA(5G)	熱中性子3軸型分光器	偏極（1次元）
	HQR(T1-1)	熱中性子3軸型分光器	入射中性子波長固定
	FONDER(T2-2)	4軸回折計	二次元検出器
	HER(C1-1)	冷中性子3軸型分光器	冷中性子、集光アナライザー
東北大学	TOPAN(6G)	熱中性子3軸型分光器	偏極（1次元）、ダブルモノクロメータ
	AKANE(T1-2)	熱中性子3軸型分光器	非偏極、入射中性子波長固定
	HERMES(T1-3)	粉末回折計	中分解能、高効率

表 4.1: 今回検討対象とした JRR-3 固体物理関係分光器

装置分類	台数	内訳		
		JAEA	物性研究所	東北大学
粉末回折計	2	1	0	1
熱中性子3軸型分光器	7	2	3	2
冷中性子3軸型分光器	2	1	1	0
4軸回折計	1	0	1	0

表 4.2: JRR-3 固体物理関連分光器の装置分類別台数

4-2. 世界の現状と JRR-3 固体物理分野分光器群

世界的には JRR-3 臨界以降にもいくつかの原子炉中性子施設が稼働を始めている。また、既存の大型原子炉中性子施設においても、ILL ミレニアムプロジェクトに代表されるように、不断の努力を持って装置更新に努めている。ここでは、世界の最先端施設の現状を分析し世界の中での JRR-3 の置かれた状況を明らかにする。以下では、JRR-3 臨界以降に稼働を始めた ANSTO（豪州） および FRM-II（ドイツ）の現状、並びに近年装置更新を精力的に行っている ILL（フランス）および NIST（米国）の現状を簡単にまとめる。

4-2-1. Institute Laue Langevin（フランス）

2000年に始まるミレニアムプロジェクトで6台の新しい分光器と8台の大規模アップグレードが行われた。さらに現在は第二フェイズプログラムを進行中であり、2030年に向けた次期計画も策定されているなど着実に進歩を遂げている。固体物理関連の装置を表 4.3 にまとめその特徴を以下に記す。

粉末回折計：4台の粉末回折計を擁し、分解能や強度等で住み分けが図られている。そのほとんどに何らかの位置敏感型検出器が用いられており、極めて高効率な

回折パターン取得が可能になっている。

単結晶回折計：7台もの単結晶回折計を擁しホットソースを用いた短波長回折から偏極中性子を用いた磁気構造解析まで極めて多彩な能力を有している。特にラウエ法での迅速結晶方位決定など、他の実験に有用な基礎的な実験装置が存在するなど施設全体としての効率化が図られていることがわかる。

3軸型分光器：熱中性子4台、冷中性子2台、合計6台の3軸型分光器を擁している。中でも、冷中性子分光器 **ThALES** や熱中性子分光器 **IN8** はサンプル位置で 10^8 n/cm²/s を優に超えるフラックスを実現している。また、偏極中性子の積極活用（ポラリメトリー）や中性子共鳴スピンエコーとの組み合わせなども注目される。

ToF 分光器：ILL では ToF 分光器が固体物理分野で使用されることも多いためこれらもリストした。興味深い分光器として **BRISP** 小角非弾性散乱がある。今後固体物理分野においてもスピントクスチャー等の大きな空間スケールの揺らぎが問題になることが考えられるが、このような分野での中性子散乱の可能性を広げるものと考えられる。磁気散漫散乱測定専用 **D7** という偏極 ToF 分光器を持つことも特徴である。また、**IN4, IN5, IN6** という3台のチョッパー型非弾性散乱装置を有することも特徴的である。

高分解能分光器：空間スケールの大きな揺らぎは対応して時間スケールが長くなる。したがってエネルギー分解能が極めて重要となる。この目的に背面反射(エネルギー空間)とスピンエコー（時間空間）の2種の分光法を取り揃えている。特に **IN16B** は **GaAs** 結晶を用いて **75 neV** 分解能を実現、一方、現在建設中の **WASP** スピンエコー装置では高い散乱角までのスピンエコー測定を可能にするなど、これまでの背面反射法・スピンエコー法に存在した制限を取り払う試みがなされている。

装置名	分類	特徴
D1B	粉末回折計	2軸回折計、磁気構造
D2B	粉末回折計	高分解能、結晶構造、磁気構造
D20	粉末回折計	大強度、分解能可変
D4	粉末回折計	非周期物質、液体
CYCLOPS	単結晶回折計	ラウエ法（高速結晶構造、磁気構造解析）
D3	単結晶回折計	ホットソース、偏極中性子、磁気フォームファクター解析
D9	単結晶回折計	ホットソース、非偏極中性子、結晶構造解析、磁気構造解析
D10	単結晶回折計	エリア検出器、オプションとして3軸型アナライザー
D19	単結晶回折計	熱中性子、2次元位置敏感型検出器
D23	単結晶回折計	偏極、磁気構造、散乱面外リフティング検出器
ORIENTEXPRESS	単結晶回折計	ラウエ法、高速試料方位決定
IN1-LAGRANGE	3軸型分光器	ホットソース、高エネルギー、コンベンショナル(IN1)/大立体角グラファイトアナライザ(LAGRANGE)
ThALES	3軸型分光器	大強度冷中性子3軸型分光器 (2.5x10 ⁸ n/cm ² /s)、15T マグネット、velocity selector
IN3	3軸型分光器	コンベンショナル熱中性子3軸型分光器
IN8	3軸型分光器	大強度熱中性子3軸型分光器(6.5x10 ⁹ n/cm ² /s)、炉室設置
IN12	3軸型分光器	コンベンショナル冷中性子3軸型分光器
IN20	3軸型分光器	熱中性子3軸型分光器、偏極パラメトリー
IN22	3軸型分光器	熱中性子3軸型分光器、中性子共鳴スピネコー
BRISP	ToF非弾性	非弾性小角散乱
D7	ToF非弾性	散漫散乱測定、偏極中性子、主に弾性散乱測定に使用される
IN4	ToF非弾性	大強度ToF非弾性散乱
IN5	ToF非弾性	ディスクチョッパー型
IN6-Sharp	ToF非弾性	冷中性子、タイムフォーカス型
IN11	高分解能	冷中性子スピネコー
IN13	高分解能	熱中性子背面反射(8μeV)
IN15	高分解能	スピネコー、ToFオプション、フォーカシングオプション
IN16B	高分解能	冷中性子背面反射(75neV with GaAs)
WASP	高分解能	スピネコー、高Q、高強度（建設中、IN11を置換予定）

表 4.3: ILL における固体物理に使用されていると考えられる分光器群。上表および本文中の数値等は <https://www.ill.eu> 調べ。

4-2-2. FRM-II（ドイツ）

2004年に臨界に達したFRM-IIは大学を含む複数の機関が運営する中性子施設としてJRR-3と共通点を多く持つ施設である。FRM-IIに設置された固体物理関係の中性子分光器を表4.4にまとめ、以下にその特徴を記す。

粉末および単結晶回折計：FRM-IIの特徴はその先進的な装置設計にある。粉末および単結晶回折計にもその先進性は現れており、例えばPOWTEXのようなToF原理による先進的な回折計、さらにアンビルセル据え付け型の高圧回折計SPHiR等がある。またホットソース、偏極中性子が積極的に使用されていることも特徴であり、結晶構造解析に重点が置かれていることがよく分かる。

3軸型分光器：3軸型分光器に関してもPANDA/PUMAという大強度冷中性子／熱中性子分光器を擁する上に、MIRAという3軸、2軸(PSD)切り替え型偏極中性子分光器も存在する。MIRAは小角散乱ですら可能であり、事実初期の磁気スカーミオン研究の多くはこの分光器の小角散乱モードが使用されている。3軸分光器として偏極専用機およびスピネコー専用機がそれぞれ1台ずつあることも特徴である。

ToF分光器：ILL同様ToF分光器も固体物理研究に頻繁に使用されている。ILL同

様磁気散漫散乱分光器 DNS が設置されている。また偏極 ToF 分光器 TOPAS も設置されており、偏極の利用が極めて一般的であることが理解できる。

高分解能：エネルギー空間で高分解能を目指す方向としては背面反射型分光器が、時間空間目的には2台のスピネコー装置が設置されていることも ILL と同様である。

装置名	分類	特徴
SPODI	粉末回折計	高分解能
SAPHIR	高圧回折計	高圧専用（建設中）
RESI	単結晶回折計	熱中性子4軸回折計（2軸可能）
POWTEX	ToF回折計	粉末回折、テクスチャー測定（斬新な設計）
HEIDI	単結晶回折計	ホットソース、結晶構造解析
POLI	単結晶回折計	ホットソース、偏極中性子、結晶構造解析、磁気構造解析、ポラリメトリー
MIRA	単結晶回折計/3軸分光器	冷中性子3軸型分光器、PSD回折オプション、スピネコー、ポラリメトリー、小角散乱
KOMPASS	3軸型分光器	冷中性子3軸型分光器、偏極中性子（建設中）
PANDA	3軸型分光器	冷中性子3軸型分光器
PUMA	3軸型分光器	熱中性子3軸型分光器
TRISP	3軸型分光器	熱中性子3軸スピネコー分光器
DNS	ToF分光器	散漫散乱測定、偏極中性子
TOFTOF	ToF分光器	冷中性子ToF分光器
TOPAS	ToF分光器	熱中性子ToF分光器、偏極中性子（建設中）
SPHERES	高分解能	背面反射型分光器(0.6μeV)
RESEDA	高分解能	共鳴スピネコー
J-NSE	高分解能	スピネコー

表 4.4: FRM-II における固体物理に使用されていると考えられる分光器群。
上表および本文中の数値等は <https://mlz-garching.de> 調べ。

4-2-3. ACNS(ANSTO) (オーストラリア)

続いてアジアオセアニア地域の中性子散乱研究の拠点としての地位を固めつつある ANSTO に設置された固体物理系分光器群を表 4.5 にまとめ、その特徴を以下に記す。

粉末および単結晶回折計：高分解能および大強度粉末回折計として ECHIDNA および WOMBAT の2台を擁する。両者位置敏感型検出器を有しており高効率に粉末回折強度の取得が可能である。ECHIDNA がその高分解能性を活かして結晶構造解析並びに磁気構造解析に広く用いられていることに対して、WONBAT はその大強度性から 10mg の試料、30μs の時間分割測定等、挑戦的な研究が可能になっている。単結晶回折計としては、ラウエ法のための整備となっており、4軸回折計がないことは豪州における限られた単結晶構造解析要望の表れかもしれない。一方で、迅速な試料方位測定用のラウエ装置が別に用意されているなど、施設全体の効率化を考えた装置配置になっている。

3軸型分光器：3軸型分光器としては熱中性子、冷中性子それぞれ一台ずつの配備であり、数自体はそれほど多くないものの、それぞれ試料位置フラックスとして 2×10^8 n/cm²/s、 2.4×10^8 n/cm²/s（想定値）が得られるとされており、欧州の最先端施

設にも勝るとも劣らない最新鋭 3 軸型分光器と言える。

ToF 並びに高分解能 : ToF 分光器としては偏極中性子非弾性散乱が可能な PELICAN 分光器を、高分解能分光器としては背面反射型 EMU を設置しており、低エネルギー領域の励起モード測定に使用されている。なおスピンエコー装置は設置されていない。

装置名	分類	特徴
ECHIDNA	粉末回折計	高分解能
WOMBAT	粉末回折計	高強度
KOALA	単結晶回折計	ラウエ法
JOEY	単結晶回折計	ラウエ法、結晶方位迅速決定
TAIPAN	3軸型分光器	熱中性子3軸型分光器
SIKA	3軸型分光器	冷中性子3軸型分光器
PELICAN	ToF分光器	冷中性子ToF分光器、偏極中性子
EMU	高分解能	背面反射型分光器(1 μ eV)

表 4.5: ACNS (ANSTO) における固体物理に使用されていると考えられる分光器群。上表および本文中の数値等は <http://www.ansto.gov.au> 調べ。

4-2-4. NCFR(NIST) (米国)

最後に北米最大規模の原子炉中性子施設である NIST の固体物理系分光器群を表 4.6 に、さらにその特徴を以下に記す。

粉末回折計 : NIST には粉末回折計として BT1 一台のみが設置されており、単結晶回折計は設置されていない。これは米国における構造解析需要の低さを示していると考えられる。BT1 自体もその設計は古くゼロ次元検出器 32 本による測定という極めて効率の低い回折計である。一方でこの回折計からの論文出版数はほぼ 40 本/年程度を推移しており、世界の中でも最も生産性の高い回折計の一台であることは特筆すべきであろう。

3 軸分光器とフィルターアナライザー分光器 : 熱中性子、冷中性子のそれぞれに対して 1 台および 2 台の 3 軸型分光器が設置されている。このなかで冷中性子分光器 SPINS は設計が古く (おおよそ JRR-3 冷中性子分光器と同世代の設計)、現在は共同利用には供されていない。熱中性子分光器 BT7 および冷中性子分光器 MACS は近年に設置された分光器であり、それぞれ、 $1.8 \times 10^8 \text{n/cm}^2/\text{s}$ 、 $5 \times 10^8 \text{n/cm}^2/\text{s}$ という高い試料位置フラックスを実現している。また、設計は古いものの、フィルターアナライザー分光器がまだ現役で稼働していることも本施設の特徴であろう。

ToF 分光器および高分解能 : ToF 分光器としてはディスクチョッパー型分光器を配置している。このタイプの分光器のパイオニア的存在であり、設置以降極めて多くの成果をあげてきた分光器ではあるが、検出器がゼロ次元であること等現在の観点からは設計が古いと言える。一方、高分解能分光器としてはエネルギー空間でのス

ペクトル測定を行う背面反射型分光器と時間空間での時間相関関数を測定するスピ
ンエコー分光器の両方を擁しており、欧州 ILL/FRM-II と同様の分光器整備哲学を感
じることができる。

装置名	分類	特徴
BT1	粉末回折計	高分解能
BT7	3軸型分光器	大強度熱中性子3軸型分光器
BT9MACS	3軸型分光器	大強度冷中性子マルチアクシス分光器
SPINS	3軸型分光器	冷中性子3軸分光器
BT4	フィルターアナライザー	フィルターアナライザー分光器(Bi-Graphite+Be)
DCS	ToF分光器	ディスクチョッパー型分光器
HFBS	高分解能	背面反射分光器(1 μ eV)
SpinEcho	高分解能	中性子スピネコー

表 4.6: NCNR(NIST) における固体物理に使用されていると考えられる分光器群。上表および本文中の数値等は <https://www.nist.gov/ncnr> 調べ。

4-3. JRR-3 分光器群の他施設との比較

JRR-3 分光器群の特徴および他施設との比較を数値化するため、分類別分光器数の全分光器数に対する割合を表 4.7 に示す。これより最初にわかることは（大方の予想通り）JRR-3 においては熱中性子 3 軸型分光器が圧倒的に多いことである。この結果、欧州の 2 施設に比較して、粉末回折計や単結晶回折計といった構造解析・磁気構造解析に関する能力に大きな見劣りが見られる。また、背面反射型分光器がないことも見て取れる。冷中性子 3 軸分光器数に関しては施設規模から見て適当な数であると判断される。

分光器分類	JRR-3 (全29台中の割合)	ILL (全43台中の割合)	FRM-II (全35台中の割合)	ANSTO (全14台中の割合)	NIST (全22台中の割合)
粉末回折計	2 (7%)	4 (9%)	3 (9%)	2 (14%)	1 (5%)
単結晶回折計	1 (3%)	7 (16%)	3 (9%)	2 (14%)	0 (0%)
熱中性子3軸型分光器	7 (24%)	5 (12%)	2 (6%)	1 (7%)	2 (9%)
冷中性子3軸型分光器	2 (7%)	2 (5%)	3 (9%)	1 (7%)	2 (9%)
ToF分光器	1 (3%)	5 (12%)	2 (6%)	1 (7%)	1 (5%)
高分解能 (背面反射)	0 (0%)	2 (5%)	1 (3%)	1 (7%)	1 (5%)
高分解能 (スピネコー)	1 (3%)	3 (7%)	2 (6%)	0 (0%)	1 (5%)
上記分光器総数	14 (48%)	28 (65%)	16 (46%)	8 (57%)	8 (36%)

JRR-3ガイドホール設置分光器数はポート数で数えた。（ポートをシェアしている分光器までは数えない。）スピネコーにはINSEのみを数えた。他施設に関しては分光器総数はどこまで数えるかに依存するため多少の誤差があることをあらかじめ断る。FRM-IIにおいては分類が簡単でない分光器が多いが、これは独断で分類した。NISTのフィルタースペクトロメータは熱中性子3軸に分類した。

表 4.7: 分光器分類別にみた分光器数の各施設間での比較。

また、今回数を調べた分光器群の全分光器に対する割合を調べると各施設おおよそ 50%程度となる。今回調べた分光器群には ToF 分光器、スピネコー分光器、背面反射分光器等、固体物理関係課題よりもむしろ他の課題の方が多いと予想される

分光器も含まれているためこの割合が各施設の固体物理比率を表すものではないが、NIST の 36% は格段に低く、固体物理はすでに中心的課題でないことをうかがわせる。

また分光器分類ごとに JRR-3 分光器と世界の対応する分光器の現状を比較すると以下のようにまとめられるであろう。

粉末回折計：NIST を除く各施設においては、フラッグシップ粉末回折計は全て位置敏感型検出器を有しており、mg 単位の微小なサンプルからの回折、時分割測定等が可能になっている。これに対して JRR-3 粉末回折計はゼロ次元検出器であり、明らかに測定効率に見劣りが見られる。

単結晶回折計：欧州 2 施設におけるフラッグシップ単結晶回折計はエリアディテクターを擁しその高効率化が図られている。またホットソースを利用することで短波長での回折実験を可能にしているが、これも結晶構造解析には極めて有利である。偏極中性子の利用が進んでいることも特徴である。これらに対して JRR-3 においても湾曲 2D 検出器の導入がなされており、この点においては世界の最先端にいとと言える。しかしながら JRR-3 回折計は熱中性子ガイドポートにありフラックスが比較的低くかつ短波長が使用できないこと、偏極中性子の利用が進んでいないこと等に改善の余地がある。

熱中性子 3 軸分光器：世界の趨勢は $10^8 \text{n/cm}^2/\text{s}$ の試料位置フラックスであり、試料位置フラックスとして一桁から二桁低い JRR-3 3 軸分光器は大きく見劣りする。 10^8 レベルのフラックス実現には原子炉ビーム取り出しプラグ部を含めた装置の高度化が必要になるため簡単ではないが、選択的に投資することに可及的速やかに世界のフラックスレベルに少なくとも一台は到達すべきであろう。偏極中性子に関してはポラリメトリー実験が TAS-1 にて実現しており、世界のレベルから大きく離されているということはないと判断される。一方で、世界的に 3 軸分光器に導入が進んでいるスピネコー（特に共鳴スピネコー）オプションが、現時点の JRR-3 では存在しない。3 軸スピネコー法でパイオニア的役割を果たした JRR-3 にこのオプションが存在しないのは誠に残念であり、検討の価値がある。

冷中性子 3 軸分光器：世界の趨勢は $10^8 \text{n/cm}^2/\text{s}$ の試料位置フラックスであり、世界的に見れば $10^6 \text{n/cm}^2/\text{s}$ 台フラックスの分光器（例えば NIST/SPINS）はすでに共同利用からは外されている。JRR-3 における冷中性子分光器は NIST/SPINS にも劣るフラックスと考えられるため、熱中性子分光器にも増してそのフラックスを増強することは急務と判断される。また、偏極、ポラリメトリー等の導入が進んでいないことも指摘されるべきであろう。

ToF 分光器・高分解能：ToF 分光器・高分解能分光器はこれまで JRR-3 においては固体物理に使用されることが少なく、本委員会の対象分光器とはしなかった。一方

で、世界の各施設の分析からはこれら ToF 分光器・高分解能分光器が固体物理分野にも多く利用されている実態が明らかになった。また、スピネコー装置に関しては世界的には増加の傾向が明らかにみられ、特に 3 軸分光器と組み合わせることで固体物理に利用されるケースが増加している。一方で、スピネコー法には技術的困難さが伴うためか ANSTO にはまだ建設されておらず、現状では JRR-3 の iNSE スピネコー装置がアジアオセアニア地域唯一の装置であることは特筆すべきであろう。長い時間スケール・長い空間スケールへとその中心課題が移行している固体物理分野にとって、スピネコー法は今後ますます重要になると予想する。J-PARC MLF との住み分け議論もあり本報告書ではこれ以上は立ち入らないが、今後の固体物理研究の潮流に遅れをとらないためにも将来的には原子炉における高分解能・新スピネコー法の固体物理利用を検討すべきであることを付記しておきたい。

5. JRR-3 固体物理分野分光器再配置の可能性

本報告書第3章では現在の固体物理学研究の主要テーマを統計的観点、並びに委員の主観的観点から分析した。また、中性子科学研究の世界的動向および我が国における動向の統計的分析も行った。これらの分析から浮かび上がってきた事実は、これまで中性子科学が得意としてきたバルク物質中の逆格子空間から、これまで中性子科学が多くは使われてこなかった表面界面や実空間、さらには長い空間スケール等にシフトしている現状である。この結果中性子散乱を用いた固体物理研究論文数は全世界的に減少傾向にある。秩序変数は中性子と相性の良い双極子秩序変数からより高次の秩序変数へ、さらにはカイラリティやトロイダルといった新しい秩序変数へとその興味の対象を広げており、秩序相を特徴付ける対称性もこれまでの逆格子空間中に局在した対称性からトポロジーなどのより抽象的なものへと変容している。一方で、局所的な構造対称性の破れや（実空間・逆空間を問わず）位相欠陥的なスピン構造等は中性子散乱が大きく活躍できる分野であり、実際マルチフェロイック、拡張多極子起因異常ホール効果、スカーミオン等の分野では中性子研究の重要性は増していると分析される。このような中性子の得意分野に関して対応する分光器群をますます強化すること、さらに、表面界面等の新しい分野研究に必要な中性子散乱技術を開発することを今後の方針と考えることができる。

一方、第4章では、JRR-3の固体物理分光器群の現状をまとめ、それを世界の代表的な原子炉中性子施設のそれらと比較した。この結果、JRR-3においては熱中性子3軸型分光器が7台と極めて多い、逆にToF・高分解能等の今後ますます重要性を増すであろう分光器がない（もしくは弱い）、構造解析（含む磁気構造解析）に利用されるべき回折計が世界的なレベルで整備されていない、冷中性子3軸分光器に関してはフラックスが世界の趨勢に2桁程度差をつけられており、対等に戦えるレベルではない、偏極中性子の利用が極めて限られており例えば（本来ならばそれほど大きな困難さが伴わないはずの）回折計や冷中性子分光器で偏極が利用できない、等の種々の問題点が明らかとなった。

本検討委員会の検討範囲である再稼働後5年という時間スケールでは上述の全ての問題点を解決することは到底不可能である。また熱中性子分光器が多いからそれを減らすことを例え考えたとしても、それらが撤去されたのちに新しい分光器を建設する予算的措置がすぐには取られるとは考えにくい。このような観点から、本委員会では検討対象となった12台の分光器に対して、2)今後の人的・予算的投資の観点から優先度評価を行うこととした。すなわち、高い優先度の分光器に対しては優先的に人的・予算的投資がされるべきであり、高くない優先度の分光器に関しては共同利用に供する日数を減らす等を考えることで、より優先度が高い分光器に資源を

割り振るという提案である。加えて、本優先度評価は将来新分光器の設置や分光器再配置が現実化した際の設置候補（再配置候補）ポートの選定という意味も持っている。優先度評価に関してはそれぞれの分光器が持つ特徴を鑑み、第2章で検討した近未来の固体物理研究への必要性の観点から行った。一方で、現有の分光器の高度化だけでは世界の最先端施設との格差を縮めることが難しいことは第3章の分析から明らかである。そこで、これらの優先順づけに加えて2)可及的速やかに建設することが必要と考えられる2台の分光器提案を行うこととした。

5-1. 分光器優先順位

分光器優先度評価は熱中性子3軸分光器、冷中性子3軸分光器、粉末回折計、単結晶回折計のカテゴリーで行った。結果を表5.1に示す。なお、本検討においては組織別の分光器数等は考慮していない。従って、近い将来ユーザーが原子力機構・大学の垣根を越えて分光器を使用できる状況が成立することを仮定している。（この仮定が成立するまでの期間に関しては6章で議論する。）また、ここで優先度Bがすぐに運転停止とすることを意味していないことは繰り返し強調しておきたい。
NIST/BT1 粉末回折計の例からも明らかのように、分光器の性能とそこから得られる（論文数としての）科学的成果には大きな関連はない。従って、人的・予算的に許される限り、また新しい分光器ニーズが生じポートを開ける必要が生じない限り、これらの分光器も運転されるべきである。

装置名	優先度（時間的・組織的制限を考慮に入れない場合）	理由・今後の方向性の提案
HRPD(1G)	B	大きな技術的革新がない限り粉末回折には原理的にパルス中性子が有利である。一方で、原子炉粉末回折系には解析が容易、磁気構造解析に向いている、極限環境実験が容易等の利点があることも確かである。また、粉末回折に関しては中性子強度や測定効率だけでは科学的成果が測れないという事実もある。このような考察から粉末回折計としては当面HERMESに優先度を与えることが考えられる。
TAS-1(2G)	A	偏極（ポラリメトリー）は原子炉中性子の大きな利点の一つであり、近未来の固体物理学研究への利用も大きいと予想される。偏極測定に特化した偏極フラッグシップ分光器として優先的に整備されることが望ましい。
TAS-2(T2-4)	B	非偏極中性子分光器としては炉室内にフラッグシップ分光器を優先的に整備するのが望ましい。一方でガイドホールには極限試料環境等に大きな自由度があることも確かである。この方向に有効に活用されることが望ましい。
LTAS(C2-1) HER(C1-1)	A A	冷中性子分光器がカバーするエネルギー範囲は今後の固体物理学分野においてますます重要性を増すと予想され、世界的に見てもこの領域での大フラックス分光器の整備が進んでいる。ただし、パルス中性子源における冷中性子分光器と相補的になるためには劇的な大フラックス化、もしくは高度な偏極測定の導入が必要になる。この両者をLTAS/HERで分担するのが望ましい。これまでのアクティビティからLTASに高度偏極機能を、HERにマルチアナライザー化による大フラックス高効率化を考えるのが妥当。大フラックス高効率化には現有分光器改造ではなく新分光器建設とあたるのが妥当と判断する。
GPTAS(4G) PONTA(5G) TOPAN(6G)	どれか一台A その他B	熱中性子3軸分光器の世界のフラックスレベルは 10^8 n/cm ² /sであり、JRR-3に設置された3軸分光器に関しても、少なくとも一台はこのレベルに達するのが望ましい。これは炉室内に設置された分光器しかもモノクロメータ交換が比較的容易な分光器の高度化を想定するのが現実的である。TAS-1を偏極に特化するとすると、可能性として残るのはGPTAS、PONTA、TOPANとなる。これまでの経緯からGPTASを非偏極大強度と高度化することが考えられるが、新提案回折計の設置ポート状況次第では4Gを回折計ポートとし、PONTAやTOPANを大強度化することも考えられる。ビーム孔からのフラックス強度や大強度化の容易さなどの技術的な検討ののちポートを選択することが望ましい。なお他の2台はそれぞれの現行の優位性を考慮しながら有効活用するのが望ましい。
HQR(T1-1)	B	入射中性子固定という自由度の低さから3軸分光器としての優先度は炉室内3軸分光器に譲る。偏極中性子を利用した弾性散乱実験を中心に活用を図ることが考えられる。教育の観点からも重要であることを付記する。
FONDER(T2-2)	A	世界的な研究動向分析からも単結晶回折計の必要性は明らかである。特にすでに湾曲2D検出器が導入されており、再稼働後すぐに成果が得られる分光器の一つと考えられる。一方で、その重要性を鑑みるに可及的速やかに世界的なフラックス、波長自由度を持たせるべきであり、このためにはポートを変更した抜本的な装置更新が必要と考える。そこで、新回折計を新分光器提案の一つとした。
AKANE(T1-2)	B	入射中性子固定という自由度の低さ、ガイドホール設置という強度の低さから3軸分光器としての優先度は炉室内3軸分光器に譲る。
HERMES(T1-3)	A	大きな技術的革新がない限り粉末回折には原理的にパルス中性子が有利である。一方で、原子炉粉末回折系には解析が容易、磁気構造解析に向いている、極限環境実験が容易等の利点があることも確かである。また、粉末回折に関しては中性子強度や測定効率だけでは科学的成果が測れないという事実もある。これまでの実績、並びに極限環境との親和性から本回折計をJRR-3の粉末回折計として集中整備することで再稼働後できるだけ早急に成果を上げること考えるべきである。中長期的に見た場合ポート変更や位置敏感型検出器への更新などで世界レベルの粉末回折計にアップグレードすることが望ましい。

表 5.1: 本委員会での装置優先度議論の結果。なお、本表には時間的・組織的制限は考慮に入れていない。時間発展を考慮に入れた優先度に関しては次章を参照のこと。

5-2. 新分光器提案

固体物理学の最近の動向の分析から近未来の中性子散乱に重要であろうと考えられる分光回折技術のうち、JRR-3の現状として世界のレベルに大きく遅れを取っているものは粉末・単結晶に対する高効率回折計（特に磁気構造解析）と低エネルギー励起を高効率に測定するための大フラックス冷中性子分光器であろう。前者としては、パルス中性子源における回折計の優位性を考えると極限環境、特に極低温、高圧等と組み合わせて使用できることが望ましい。高効率を達成するため二次元検出器を備え、なおかつ、極限環境実験時には χ クレードルを取り外し2軸テーブルを乗せるなど自由度をもたせた設計の大フラックス中性子回折計を提案する。なお本大フラックス回折計は同時に粉末回折にも利用できるであろうが、粉末・単結晶のどちらに最適化するかはより専門的な議論が必要になる。大フラックスと短波長選択への自由度を持たせるために本装置は炉室内のポートに設置することが望ましい。本装置は現在ガイドホールに設置されている4軸回折計FONDERの発展的な装置となるだろう。

一方、後者（大フラックス冷中性子分光器）としては、NIST/MACS や ILL/ThALES 等に対抗できるだけの高フラックス冷中性子分光器の設置が望まれる。MACS, ThALES とともにコールドソースおよびガイド管輸送を最適化することで極めて大きな試料位置フラックスを実現している。JRR-3 のコールドソースでどの程度のフラックスを得ることができるかは本委員会の検討範囲を超えるが、2次分光器側に関してはマルチアナライザーによる複数波数および複数エネルギー同時測定を実現することにより世界レベルの高効率冷中性子非弾性散乱測定を実現することが望ましい。

これらの分光器は我が国のもう一つの大型中性子施設 J-PARC MLF の分光器群と相補的に使用できるべく設計される必要があることを付記する。このため、回折計に関しては、磁気構造解析にも十分対応できる設計を、冷中性子分光器に関しては限られた $Q, \hbar\omega$ 空間での高効率測定も可能にした設計を考えるべきであろう。また、原子炉中性子分光器の優位性である極限試料環境、すなわち高磁場や高圧等に十分対応した設計とすることが望ましい。

6. 再稼働後の中性子利用制度と成果創出

これまで固体物理分野における研究動向分析、並びに世界の中性子施設の分光器整備動向分析を通して、JRR-3 固体物理分光器群のあるべき姿に関するハードウェア的な分析を行ってきた。一方で、本委員会ではハードウェアの整備のみならず、JRR-3 再稼働後の固体物理系分光器の運用制度も早急な成果創出に重要であると考ええる。

JRR-3 再稼働が予定される 2020 年には J-PARC MLF が安定稼働しているであろう。ここ数年の日本中性子科学会の会員数にほとんど変化がないことからわかる通り、中性子散乱研究者の数は大きくは変化していない。このことは JRR-3 再稼働後に安定的に原子炉中性子に関わることのできるマンパワーは停止前に比較して大きく減少していると考えられるべきであることを意味する。また固体物理系の研究者数に関しては、第 3 章の分析から示された我が国の固体物理系中性子散乱論文数の激減を鑑みるに、より大きく減少しているものと予想され、またこれは現実に日本の多くの大学から固体物理系中性子散乱研究室が消えていることから実感される。一方、第 3 章の分析からは固体物理学における主要な研究テーマに近年変化が生じていることも明らかとなった。すなわち、中性子散乱による固体物理研究のさらなる発展には、これまでも増して新しい研究テーマへの対応を迫られることになる。また第 4 章の JRR-3 固体物理分光器群分析からは、これら新研究テーマへ対応するためにはかなりの高度化が必要という結果が得られた。別の観点として、近年の科学技術研究分野での研究課題の選択と集中による大型研究予算の集中配分とそれに対応した成果の早期創出要求の高まりにも注意を払う必要があるであろう。

これらを総合すると再稼働後の JRR-3 では、「少ない人数」で「新しい研究テーマに時宜を得た対応」をし、「必要な装置開発・分光器建設」も行い、「大型予算の要求するスピーディーな成果創出」にも対応しなければならない。このように JRR-3 固体物理中性子研究を取り巻く環境が大きく変化していることは明らかであり、この変化に対応しこれまでも増して大きな成果をあげるには、現状に即した（課題制度・運用制度の両者を含む）中性子利用制度への改善が必要であることは論を俟たない。本委員会において制度の詳細に立ち入ることはしないが、本委員会として現状に即した中性子利用制度の検討とその実施を強く提案したい。その際には以下の観点を取り入れられることが望ましい。

6-1. 分光器分類別優先度設定と施設の垣根を超えた分光器運用

これまで、主に技術的な要因から現存の分光器に対して分類別優先度を議論した。一方で、JRR-3 再稼働後の運用に対しても全く同様の優先度を適用できると考

える。すなわち、優先度の高い分光器を関連する研究者で共同で運用し、優先度の低いとされる分光器は共同利用に供する比率を下げる、もしくは、サポートなしで使用できるユーザーの使用を想定する等である。このような分光器はその需要に応じて運転停止期間を許すことも方策の一つであろう。

このような優先度を考慮した装置運営の実現において最も重要な点は、装置所有機関の垣根を超えた（装置分類別）装置グループの形成とその装置グループによる優先装置運営の実現であろう。例えば、偏極中性子非弾性散乱分類における優先分光器である TAS-1 を原子力機構スタッフのみならず、物性研・東北大の関連する研究者も参加して運営するなど、施設の垣根を超えた運営が望ましい。大学・原子力機構ではそもそも共同利用・共用に考え方の違いがあり、同時に利用料金の問題もある。また、事故が起きた際の責任の所在の問題もある。このため一体運営には高い障壁があるが、JRR-3 の成果創出を考えた場合施設の垣根を超えた運営は避けては通れない課題であろう。

一方で、JRR-3 再稼働直後の現実を考えた場合、上のように大学・原子力機構をまたいだ装置運営は確かに困難かもしれない。まずは大学装置内でこのような共同運営の基盤を作ることが現実的、かつ必須である。この場合、例えば偏極非弾性のマンパワーを PONTA に集中投資するなどの優先順位付けが考えられる。再稼働直後における具体的な方策としては装置グループの組織を超えた再編を提案する。物性研では最近装置担当者制度を作成し大学間の垣根を超えて装置担当者グループを形成することが容易になっている。このような制度をさらに発展させることで効率的かつ無理なく優先分光器の安定的運営を行うことを提案する。

このような観点から JRR-3 再稼働直後、並びに数年後の 2 ケースについて装置分類別優先度を表 6.1 にまとめた。本表は前章表 5.1 に時間発展を考慮に入れたものとなっている。

分類	装置	優先度（再起動直後）	優先度（JAEA・大学制度統一後）	備考
粉末回折計	HERMES(T1-3) HRPD(1G)	A B	A B	粉末回折計に関しては早急に位置敏感型検出器を導入し世界レベルに追いつく必要がある。企業利用・プロジェクト利用など多角的な利用制度を導入することを提案する。
単結晶回折計	FONDER(T2-2)	A	A（新回折計）	短波長・大フラックス中性子の利用の観点からしかるべき時期に新回折計として炉室内に設置されることが望ましい。
偏極熱中性子3軸分光器	TAS-1(2G) PONTA(5G) TOPAN(6G)	A A B	A B B	偏極機能は当面はJAEA・大学1台ずつに注力し、制度が整えばそのうち一台を高度偏極解析目的に最優先に整備するのが良いであろう。一方で、一次元偏極に関してはJRR-3全ての分光器回折計で使用できるように整備するのが望ましい。
非偏極熱中性子3軸分光器	GPTAS(4G) PONTA(5G) TOPAN(6G) HQR(T1-1) AKANE(T1-2) TAS-2(T2-4)	A B B B B A	GPTAS, PONTA, TOPANの内1台A、その他B B B B	当面はJAEA・大学で一台ずつに注力し、しかるべき時期に炉室内に世界レベルフラックスの装置を整備すべきである。これは高度化で対応できるが、どのポートを使うかは今後のポートの空き状況いかんである。
冷中性子3軸分光器	LTAS(C2-1) HER(C1-1)	A A	A（偏極特化） A（新分光器）	冷中性子分光器に関しては一台は偏極機能に、もう一台は大フラックス高効率へと特化すべき。偏極機能は現有装置の高度化で対応可能と考えるが、大フラックス高効率化には新分光器の建設が必要。

表 6.1: 本委員会での装置優先度議論の結果。時間発展を考慮に入れた優先度。

6-2. 外部機関・大型予算獲得グループとの連携（プロジェクト研究）および産業利用

上の議論では現在の限られたマンパワーでの運営を前提にした。一方で、健全な考え方として JRR-3 再稼働にあたりこれまで JRR-3 固体物理分光器運営に関わってこなかった機関・グループの参画を求めることが考えられる。JRR-3 停止期間である過去 10 年の間に国内では特に独立行政法人（研究所）を中心に中性子（量子ビーム）グループの形成が見られた。例えば物質・材料研究機構や理化学研究所である。これらの機関と連携をとり JRR-3 固体物理分光器の有効な利用を考えることは喫緊の課題であると言える。

また、現在我が国の研究費制度においては大型予算がグループに配分されることが多い。このような大型予算グループにおいては強く科学的成果が求められていることもあり、中性子ビームを（課題審査時期を待たず）タイムリーに使用したいという希望がある。このような大型予算グループと連携し、科研費等の研究費審査を課題審査と読み替えることで短い待ち時間で実験が可能な分光器（ビームタイム）を設定することも有用であろう。特に粉末回折などの比較的ニーズの高い中性子利用法に対してこのような制度を設定することは、JRR-3 固体物理分野の研究活性化のみならず、広く我が国の固体物理コミュニティに貢献する方策であると考え

る。この場合、優先枠課題として相応の装置使用料を徴収することも考えられる。

これら外部機関・大型予算獲得グループとの連携をプロジェクト研究もしくは長期課題として JRR-3 における中性子利用制度に取り入れることを提案したい。

JRR-3 においてはこれまで大学・原子力機構の垣根があり大学側の分光器においては産業利用に関して積極的には推進されてこなかった。一方で、大学・原子力機構の垣根を超えた分光器運営を考える上では大学側でも一定の産業利用を受け付ける必要性が生じるであろう。大学側での産業利用に関してもなんらかの形の優先枠を設定できる制度を導入することを提案する。同時に装置利用料金を徴収することで大学分光器運営の予算的基盤強化に資することも考慮に入れるべきであろう。

6-3. 試料環境運用

本委員会での議論で極めて重要視された事項に試料環境がある。一般的に言って原子炉中性子に設置された分光器においては（パルス中性子分光器に比較して）試料環境に自由度が高い。従って、特殊試料環境実験は原子炉中性子分光器の優位性の一つである。JRR-3 においてもこの点は強く認識されてきており、これまでも高圧開発等に大きな成果を上げてきた。一方で、再稼働後の JRR-3 の早急な成果創出を考えた場合に、試料環境実験装置に関しては次のような問題点が考えられる。

- a. 希釈冷凍機、超伝導マグネット等に予備機がない（少ない）
- b. 試料環境装置の運用が大きくユーザーに任されておりサポートが弱い
- c. 原子力機構・大学間で試料環境装置の相互運用ができない

上記項目のうち a., b. は予算措置を伴うため早急な対応は現実的には難しい可能性があるが、c. に関しては施設の垣根を超えた分光器運用を考える際に試料環境の相互運用も目指すことが望ましい。また既存の試料環境装置にとどまらず、複合特殊環境やこれまでにない新規特殊環境（高強度光場、高電流等）の技術開発等を原子力機構・大学の共同で行うことも考えられるべきであろう。

6-4. 教育利用

中性子コミュニティー育成、特に固体物理分野における若手育成が喫緊の課題であることは委員の合意することである。JRR-3 に設置された分光器は J-PARC MLF に設置されたパルス中性子分光器に比較して、一般的に原理が理解しやすく、学生や若い研究者が中性子散乱を理解する格好の分光器であると言える。なかでも、3 軸分光器はその原理が極めて単純かつ目視で理解できるものであり、中性子散乱教育目的にも大きな力を発揮すると考えられる。現在 HERMES 回折計に設置が進んでいる HERMES-E はまさしくこの目的である。本委員会の議論で、技術面やサイエンス面から優先度が低いとされた分光器に対しても、教育目的には高い優先度と考

えられる分光器は存在するであろう。（例えば HQR, AKANE 等は教育目的には最適と考えられる。）委員会では時間の制約上この方向の深い議論は行われなかったが、今後の中性子コミュニティーの育成と健全な成長に対しては最も重要な観点であることをここに記したい。具体的には、中性子利用制度として例えば人材育成課題（可能性としては長期課題等も考えられる）を導入することを提案したい。

7. 本委員会における分析および提案の総括

本委員会では JRR-3 の再稼働を 2020 年に見据え、再稼働直後から 5 年程度(2020-2025)の期間における成果創出のための方策を議論した。この目的に、再稼働後 5 年間程度の間を見据えた中性子散乱による固体物理分野の中心的テーマ分析を行った。また同時に JRR-3 の現状を理解するため JRR-3 における固体物理系分光器の現状分析と、世界の主要施設におけるそれらとの比較を行った。それらの分析から、再稼働後 5 年程度の期間の成果創出に有効であろうと考えられる固体物理系中性子散乱分光器最適化・再配置を分析した。

第 3 章で行われた統計分析では、固体物理分野の主要研究テーマが空間的には表面・界面等、秩序変数的には高次多極子・カイラリティ等、現象整理の概念としてはトポロジー等の従来中性子が多くは使われてこなかった分野に移行していることを示唆した。このような変化に対応して世界的に見ても固体物理分野における中性子散乱の相対的地位低下が見られる。一方で、本委員会においては近年新たに注目され始めた研究テーマの中にも、例えばカイラリティ、スカーミオン、スピン軌道相互作用、マルチフェロイックス、拡張多極子などのように、中性子がすぐに大きな成果をもたらすことができると分析される研究テーマが存在することが議論された。また超伝導、量子臨界現象等にもすぐに成果につながる課題があることが議論された。これらに必要な中性子散乱法としては、磁気構造解析、偏極解析、低エネルギー（小角）非弾性散乱、（偏極）小角散乱等が考えられた。加えて極限試料環境（高圧、高磁場等）の重要性が認識された。また、現在中性子が広く使用されているとは言えない研究テーマに関しても中性子反射率、スピンエコー等による応用分野拡大が検討事項とされた。光照射下等の非平衡状態での実験や磁気構造データベースとデータ科学の組み合わせの重要性なども指摘された。

第 4 章では JRR-3 固体物理系分光器の現状を世界の主要施設のそれと比較した。その結果、JRR-3 固体物理系分光器が熱中性子 3 軸分光器に偏っており、他施設と比較して多彩な研究機会の提供という意味では見劣りがする現実が明らかとなった。また、それぞれの分光器に関してもかなりの高度化が必要であることが分析された。

第 5 章では第 3 章、第 4 章の分析に基づいて、再稼働後 5 年程度の期間になされるべき再配置・高度化を議論した。まずサイエンスおよび他施設との比較の観点から現状の分光器の優先度付けを行った（表 5.1）。高度化に関しては世界の各施設にキャッチアップするため、粉末回折計においては検出器の高度化(0 次元から位置敏感型へ)、単結晶回折計においては高フラックス化と短波長利用、熱中性子 3 軸分光器に関しては偏極特化装置と高フラックス装置の 2 台特化（優先度設定）、冷中性子

3 軸分光器に関しては偏極特化装置と大フラックスマルチアナライザー装置への役割分担と先鋭化が提案された。この中で回折装置と大フラックス冷中性子装置はそのニーズが大きくかつ現状の装置そのままで高度化では対応が難しい。新装置建設を考えることが望ましい。また、原子炉中性子源の有利性を活かし、全ての装置で1次元偏極機能を持つこと、および極限試料環境に対応することが望ましい。

第6章では再稼働後の運用体制について議論した。再稼働後のマンパワーの減少を鑑み、各分光器分類に一台程度の優先分光器を設定し、この分光器への優先的人的・予算的資源配置を提案した。なお、現状では原子力機構・大学間に制度上の差異が大きく存在するため、現実的な案として再稼働直後（制度上の壁が存在する場合）の提案、および数年後（制度上の壁が取り払われた場合）の提案を両者表6.1に示した。委員会としては制度上の壁が取り払われ原子力機構・大学で分光器の共同運営を可能にするべきであると提案する。

また、外部機関・大型予算獲得グループとの連携および企業利用に関しても議論を行った。優先利用枠を設定し外部機関・大型予算獲得グループの一定量の優先的ビームタイム利用を認めることが提案された。企業利用に関してもこれまで大学側ではあまり考えられてこなかったが、中性子利用の拡大・原子力機構制度とのコンシステンシー等を考えた場合考慮の必要があるとされた。

極限試料環境の利用は偏極中性子利用と並んで原子炉中性子分光器の優位性の一つである。再稼働後のJRR-3の早急な成果創出を考えた場合、試料環境装置群をより充実させることもさることながら、施設の垣根を超えた試料環境の相互運用も目指すことが望ましいと提案された。

今後の中性子コミュニティーの健全な発展を考えた場合、教育目的の分光器利用は重要な観点である。本委員会ではこの観点の議論は時間的な制約から深くはなされなかったが、JRR-3装置群の教育的観点での重要性は明らかであり、委員会としては今後のさらなる検討を望む。

委員会名簿

委員長

佐藤卓 東北大学多元物質科学研究所 教授

委員（あいうえお順）

有田亮太郎 理化学研究所創発物性科学研究センター チームリーダー
東京大学大学院工学系研究科 教授 (2018/04 から)

木村剛 大阪大学大学院基礎工学研究科 教授 (2017/03 まで)
東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授(2017/04 から)

藤田全基 東北大学金属材料研究所 中性子物質材料研究センター
センター長・教授

益田隆嗣 東京大学物性研究所 准教授

脇本秀一 日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究センター 研究主幹

委員会記録

第1回会合

日時：2017年3月19日 12:00-13:30

場所：大阪大学豊中キャンパス基礎工学研究科 D 棟 D412-414

第2回会合

日時：2018年5月29日 13:00-16:00

場所：東京大学柏キャンパス物性研究所 6階第3会議室

第3回会合

日時：2018年6月7日 9:30-12:00

場所：日本原子力開発機構 東京事務所 富国生命ビル 20階会議室