

平成27年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書 〔追跡評価用〕

平成27年 5月 1日現在

研究代表者 氏 名	新井 正敏	所属研究機関・ 部局・職 (研究期間終了時)	独立行政法人日本原子力研究開発機構・J-PARC センター・研究主席
研究課題名	4次元空間中性子探査装置の開発と酸化物高温超伝導機構の解明		
課題番号	17001001		
研究組織 (研究期間終了時)	<p>研究代表者 新井 正敏（独立行政法人日本原子力研究開発機構・J-PARC センター・研究主席）</p> <p>研究分担者</p> <p>山田 和芳（東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・教授）</p> <p>社本 真一（独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究主席）</p> <p>横尾 哲也（高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・助教）</p> <p>永崎 洋（独立行政法人日本原子力研究開発機構・産業技術総合研究所エレクトロニクス研究部門・主任研究員）</p>		

【補助金交付額】

年度	直接経費
平成17年度	88,200 千円
平成18年度	230,100 千円
平成19年度	271,900 千円
平成20年度	19,400 千円
平成21年度	22,100 千円
総 計	631,700 千円

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか

特別推進研究によってなされた研究が、どのように発展しているか、次の(1)～(4)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究の概要

(研究期間終了後における研究の実施状況及び研究の発展過程がわかるような具体的内容を記述してください。)

1) 本研究終了間近の状況

本研究は、当初、平成17年度から21年度の5年間の計画で進められたが、研究での中心課題である先進大型中性子実験装置「四季」の開発（装置のほとんどの部分は当グループで設計し、国内の製造メーカーに製作させた。あるいはメーカーと協力して開発を進めた）において、北京オリンピック（平成20年度）の工事に関連した鋼材の高騰により、装置の一部の調達が入札の不調に見舞われ、さらには、中性子を発生するJ-PARCの稼働不安定性による中性子強度不足から、研究計画遂行の遅れが生じ、研究期間を一年間延伸し平成22年度まで進められた。

平成21年末には、J-PARCのパワーが100kW（最終目標の1/10）に達し、J-PARCの目標である1MWを実現した際には「四季」の性能が世界レベルを大きく超えることを確認した。平成22年度になり、中性子源のトラブルに見舞われたが、有用なデータも蓄積されたことから「四季」のお披露目も兼ね、「酸化物高温超伝導機構解明」の研究分野の世界第一級の研究者を一堂に会した研究会を開催し（参加者100名（海外30名程度）、中性子利用による同分野の研究の展開について議論を行い、本研究の総仕上げとした（会議論文集を日本物理学会英文誌から出版）。しかし、研究会の直後に東日本大震災が発生し、本研究の歩みは更に一年間停止することとなった。

2) 共用法装置としての活用開始

一方、平成23年度より、J-PARCの中性子源に対して、「特定先端大型研究施設の共用の促進に関する法律」（共用法と称する）が施行されたが、科研費終了後において引き続き「四季」が支障なく稼働できるよう、「四季」を共用法装置とすることが文部科学省より了承された。これにより、運転経費の確保、運転要員を確保することが実現できた。したがって、地震復興後の平成24年度以降、「四季」は共用法装置としてより多くの国内外の研究者にその利用の門戸を開き、活用がなされている。一方、科研費期間の終了後は、本研究の関係者を中心に、「四季」の設置者実験時間（共用に供する時間以外の利用時間、20%程度）を利用し、当初目標の「酸化物高温超伝導機構解明」も展開されてきた。

3) 四季分光器の斬新な設計概念の実現

「四季」が目標とした性能は、J-PARCの高強度のもと、これまで実現されなかった「複数入射エネルギー」による同時実験の実現により、エネルギー軸を含んだ4次元逆格子空間内の連続領域を自動的に分解能を変えながら余すことなく計測する全く新たな非弾性散乱実験手法の確立にあった。「四季」の高い性能は世界の同分野に大きなインパクトを与え、「複数入射エネルギー法」は瞬間に世界に広まり、同種の装置の性能を格段に引き上げるようになった。この計測法では、実験者が思いもかけない逆格子空間の箇所の新現象を見逃さず捉えることができ、新規発見につながる可能性が格段に高い。このようなことから、国内外の研究者を強く魅了し、今日においては、年間40件もの実施課題（公募し審査後採択）の半数程度が海外の第一線の研究者に利用される状況になった。

4) 中性子非弾性散乱の新たなパラダイムの展開

複数入射エネルギー法に加え、単結晶の測定においては、試料をゆっくり連続的に回し続けることで4次元逆格子空間内の励起状態を余すことなく観測する測定が可能になった。その結果J-PARC稼働の10年前には想像することが難しかった測定手法が実現した。実空間において局所的な現象（相互作用）が重要な、酸化物高温超伝導機構や高性能熱電材料、あるいは、超イオン導電体中のイオンの振る舞い等においては、励起状態は4次元逆格子空間に広く散在することになる。このことがこれまで計測を難しくしてきた原因であるが、今やコヒーレントな分散関係（フォノンやスピン波）だけを計測する時代は終わり、逆格子空間に広く広がった微弱なシグナル全体について扱える状況に来たと言ってもよい。データ量としては一測定で100GBを軽く超えるほどの情報量を扱うこととなるが、これらの膨大なデータを的確に処理する技術や新たな観点からの解析手法の開発（例えば、得られたデータから4次元実時間情報（ $G(r, t)$ ）の導出等）により、理論的には古くから知られていてもこれまで十分な精度で評価することが困難であった物理量を実験的に初めて精度よく扱える状況になってきた。扱う物理量が複雑であることから、当然、計算科学との密な協力関係がこれまで以上に重要な研究の進め方となる。その意味でも、大型施設間の協力（例えば、J-PARC中性子散乱実験技術と京コンピュータの計算科学）がよりコーディネートされた形で成される状況が今後促進されるであろう。

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(2) 論文発表、国際会議等への招待講演における発表など（研究の発展過程でなされた研究成果の発表状況を記述してください。）

本研究の中心課題は、先進大型中性子実験装置「四季」の建設とそれによる酸化物高温超伝導機構の解明であった。申請者は、課題推進当時 J-PARC 物質・生命科学ディビジョン (MLF) の中性子実験装置全般の建設・開発責任者であり、研究の後半には MLF の総責任者であった。したがって、本研究内での役割は「四季」の建設を若手研究者を指導して進めることであった。一方、酸化物高温超伝導機構の解明に関しては、「四季」の建設中は主に東北大学グループが中心となって海外の施設を利用して進めていた。このようなことから、本課題の推進中、推進後においては、申請者の講演や発表論文は装置建設・開発や施設全体についての講演が主なものであったが、その中で「四季」の成果については必ず触れるように努めた。「四季」で実現した技術を中心に（研究期間中の論文 6）、J-PARC/MLF では先行して稼働した米国 SNS を格段に上回る実験装置性能を実現し、世界的に非常に高く評価される結果となった。このようなことから、国際会議の場で、J-PARC/MLF の状況について多くの講演の機会を頂くことができた。（ここには 2012 年以降のもののみを示した。）

- (1) Status Report of the J-PARC MLF (Invited) (国際中性子散乱学会全体会議)
International Conference of Neutron Scattering (ICNS) 2013, Edinburgh, 8-12 July 2013
- (2) New Horizon in Neutron Scattering at the J-PARC MLF (Invited)
International Symposium on Neutron Scattering, Mumbai, India, 14-17 January, 2013
- (3) High Intensity Neutron Scattering and the Materials Science (Invited)
International Conference on Materials Science and Technology, October 13 - 17, 2014, Serpong, Indonesia
- (4) Perspectives of Neutron Scattering in the Future viewing from the experiences of J-PARC (Invited)
“Light and Particle Beams in Materials Science” (LPBMS) 2013, 29-31 August, Tsukuba, Japan

また、国内的にも成果を発信する機会を頂いた。

- (5) 計測ツールとしての J-PARC 中性子 (招待講演)
計測自動制御学会センシング・フォーラム 2012 年 09 月 27 日 日立
- (6) エクサスケールに向けて歩み出す計算物理学シンポジウム (招待講演)
物性実験から計算科学に寄せる期待 (特に中性子散乱の観点から)
日本物理学会年会 2013 年 03 月 広島
- (7) J-PARC における中性子・ミュオンの現状と展望シンポジウム (招待講演)
J-PARC/MLF の完成がもたらす物性物理学の進展と今後の展開
日本物理学会年会 2015 年 3 月 21 日—24 日 早稲田大学

さらに、欧州 17 か国の参加のもと、現在建設が Sweden に進められている欧州核破砕中性子源 (ESS) のアドバイザー委員会委員を務めた。また申請者のみならず、本研究に関わった若手研究者 (梶本) も含め多くのものが ESS に招聘され、技術的なアドバイスを行っている。さらに、中性子分野では国際的に評価の高い実験技術に関わる教科書の執筆依頼もあり、申請者は中性子実験装置の世界的な専門家として評価されるに至った。

Experimental Methods in the Physical Science, Neutron Scattering-Fundamentals (2013), Elsevier Inc.

このように、「四季」の実現を起点とした J-PARC/MLF の実現は世界に日本の技術力の高さを示したと同時にそこに参加した研究者が世界から高い評価を得る結果となった。

一方、2014 年には 40 年近く続く加速器型中性子源国際協力会議 (ICANS) の議長として、250 名 (海外から 150 名の参加) の参加のもと、水戸で同会議を成功させることができ、今後の技術開発国際協力が我が国を中心に展開する土台を形成することができた。

申請者が本研究を通して行えたことは開発研究ではあったが、世界レベルに到達したと自負している。実際、現在、申請者は前職を退職後、ESS の Technical Coordinator (正職員) として採用され、施設・装置全体の設計・建設を調整・指導する専門家として赴任している。今後は、中性子分野の発展のために人材育成も含め世界規模で貢献できることを祈っている。

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）**(3) 研究費の取得状況（研究代表者として取得したもののみ）**

「国家課題対応型研究開発推進事業」光・量子融合連携研究開発プログラム（文科省）
研究課題名：実用製品中の熱、構造、磁気、元素の直接観察による革新エネルギー機器の実現
研究代表
総予算：約4億円
研究期間：平成25年度から平成29年度
注意：平成27年度 海外への異動に伴い、代表者を辞退

(4) 特別推進研究の研究成果を背景に生み出された新たな発見・知見

「四季」の実現は、微弱な信号を計測する中性子非弾性散乱実験技術に新たなページを作ったと言える。これは単に実験精度が上がるとか、効率的に実験が行えるということにとどまらず、取得できるデータがこれまでと次元を異にする質的変化がなされたことを意味している。逆格子空間の広範囲の連続4次元実験データが取得できることになったことから、新たな解析手法により、そこに存在する物理量へのアプローチ自体に大きなパラダイムシフトをもたらすことになったと言ってよい。また、たとえ J-PARC が最高性能に達したとしても本質的に中性子散乱強度は放射光実験で扱う強度に比べ圧倒的に弱い。しかし、中性子散乱であるからこそ行える非弾性散乱実験が、全く無理なく自在に行える状況となり、中性子源の重要性を改めて世界に知らせしめる結果となった。「四季」で培われた技術、測定概念は本特別推進研究の枠にとどまることなく、J-PARC/MLF 中性子源の他の同種の装置に適用されたばかりではなく、世界の第一級中性子源が瞬く間に採用することになり、全世界へ大きな波及効果があった。また、このことは、中性子実験を利用する研究分野にとって、より重要な情報を提供する土台の大きな高性能化がなされたことを意味し、引いては、広い科学分野の発展に大きな貢献をもたらすことになる。本研究は酸化物高温超伝導の機構解明を「四季」の利用研究に掲げていたが、非弾性散乱は物質内の相互作用の本質をとらえ、物質の機能・物性を理解するための根本的な実験手段であることから、超伝導物質に限らず非常に多様な研究分野においても新たな知見をもたらすことになる。本研究の期間中には装置の建設上の困難さ、災害による施設の大きな被害と永らくの停止を強いられ、また、最近には J-PARC 内の他の施設の放射線事故により、更に利用停止があったため、当初計画していた十分な研究成果を得るまでには至らなかった。しかし、ここにきてようやく高いインパクト因子を持つ雑誌等にも論文が掲載されるようになり、更に、共用法の適用により、利用者・利用研究分野の多様性が導入されたことから、必ずや大きな成果が生み出されると期待できる。

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況

特別推進研究の研究成果が他の研究者に活用された状況について、次の(1)、(2)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 学界への貢献の状況（学術研究へのインパクト及び関連領域のその後の動向、関連領域への関わり等）

本研究の成果である中性子実験装置「四季」の開発は中性子実験装置の一つの規範となる装置を開発できたという点でも、それを利用して生まれる研究成果という側面でも学界への貢献は大きい。まず装置開発における技術的側面から述べれば、高効率測定を達成するために四季が導入した大型真空槽と長尺検出器、そして単結晶試料の連続回転によって4次元空間をマッピングする測定手法は、我が国では「四季」が初めて導入した技術であり、J-PARCで「四季」以後に建設された同種の装置はそれに倣うことになった。本研究で開発を進めた中性子偏極技術も本研究期間中の実用化には至らなかったものの、その後もJ-PARC内での開発に受け継がれ、現在建設中の偏極専用装置の開発に貢献している。そしてなにより、「四季」がもたらした最も大きな技術的成果は、中性子非弾性散乱実験において測定効率を飛躍的に増大させる「複数入射エネルギー法」を世界で初めて実用化したことである。この成果を報告した論文は日本物理学会英文誌においてEditors' Choiceに選ばれ、その後文部科学大臣賞も受賞するなど、まず国内で高い評価をいただいたが、海外の施設にも大きな影響を与えた。世界最先端のパルス中性子実験施設である英国のISISや米国のSNSでは元々複数入射エネルギー法を想定して装置が設計されていなかったため、「四季」の成果を承けて複数入射エネルギー法が可能のように装置の改良を始めることになった。そして、現在建設中のヨーロッパのパルス中性子実験施設ESSでは四季を研究した上で、複数入射エネルギー法を当初から取り入れた装置設計を行っている。

「四季」で目指した研究テーマである高温超伝導研究においては、「四季」の開発と平行して他の実験施設も用いて銅酸化物高温超伝導体および鉄系超伝導体の研究を進めていた。その結果、鉄系超伝導体の一種 PrFeAsO_{1-y} の初めての単結晶試料合成の成功、1111系鉄系超伝導体母物質 LaFeAsO における初めての磁気励起スペクトルの観測、銅酸化物高温超伝導におけるフォノン異常の起源解明等、重要な成果が得られ、そのインパクトの大きさは2.(2)に示す引用数の多さにも表れている。「四季」の完成後は「四季」を用いた研究からは、ラインノードを持ちながら高超伝導転移温度が謎であった鉄系超伝導体 $\text{BaFe}_2(\text{As}_{0.65}\text{P}_{0.35})_2$ の超伝導の起源解明に大きく貢献する磁気励起観測の成功、そして、本研究期間の終了後になるが、電子ドーピング銅酸化物高温超伝導体においてホールドーピング型銅酸化物とは異なる磁気励起のドーピング量依存性を明らかにしたこと(K. Ishii et al., Nature Communications 5, 3714 (2014))等の高温超伝導研究分野における重要な成果が生まれている。「四季」で生まれた我が国の中性子による高温超伝導研究の芽は本研究終了後も引きつがれている。「四季」における不特定多数の利用者による利用課題（一般課題）の中で高温超伝導研究は大きな割合を占めるが、それに加えて、特定の研究を重点的に行う「プロジェクト課題」としても銅酸化物高温超伝導体の研究が進められている。そこではスピンとフォノンの結合、二種類の磁気揺らぎの共存、擬ギャップによる磁気揺らぎの変化等を「四季」における非弾性中性子散乱で捉え、超伝導機構との関係を明らかにするべく研究が行われており、今後も同分野にとって重要な成果が生まれることが期待される。

一方、「四季」は元々高温超伝導研究に最適化し高測定効率を目指して設計されたものであるが、その性能は高温超伝導以外の分野でも十二分に威力を発揮するものであり、2011年からは、共用法に基づいて幅広い利用者へ供すべき装置「共用装置」の一台として運用されることとなった。今では高温超伝導体以外にも磁性体、誘電体、熱電材料等幅広い分野の研究がなされており、共用装置の中で最も成果数の多い装置として、J-PARCにおける中性子科学研究の屋台骨を支えている。そしていまや「四季」の性能の高さは国内だけでなく海外でも知られている。そもそも国際公共財であるJ-PARCでは海外からの利用者も多いが、J-PARCの中性子利用者に占める海外ユーザーの割合は約15%であるのに対し、「四季」においては利用申請の4-5割程度を海外からの申請が占めており、特にドイツや中国からは同じ研究グループから繰り返し利用申請が出るほどである。今後も「四季」からはさまざまな分野における研究成果が生み出され続けるであろう。

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況（続き）

(2) 論文引用状況（上位10報程度を記述してください。）

【研究期間中に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	Microwave Penetration Depth and Quasiparticle Conductivity of PrFeAsO _{1-y} Single Crystals: Evidence for Full-Gap Superconductivity, K. Hashimoto, T. Shibauchi, T. Kato, K. Ikada, R. Okazaki, H. Shishido, M. Ishikado, H. Kito, A. Iyo, H. Eisaki, S. Shamoto, and Y. Matsuda, Phys. Rev. Lett. 102 , 017002 (2009) [4 pages]	高い超伝導転移温度を示す PrFeAsO _{1-y} 系の単結晶育成に成功し、共同研究としてマイクロ波の測定からフルギャップを示した。この結果から鉄系超伝導体の対称性は s 波であることが明らかになった。	181
2	Electron-phonon coupling reflecting dynamic charge inhomogeneity in copper oxide superconductors, D. Reznik, L. Pintschovius, M. Ito, S. Iikubo, M. Sato, H. Goka, M. Fujita, K. Yamada, G. D. Gu, and J.M. Tranquada, Nature 440 , 1170-1173 (2006)	銅酸化物高温超伝導体 La _{2-x} (Sr, Ba) _x CuO ₄ の Cu-O ボンド伸縮モードに対応する光学フォノンの異常なソフトニングが、電荷配列の空間的不均一性に起因することを、ホール濃度を広く変化した単結晶に対する中性子散乱実験から明らかにした。	176
3	Direct Observation of a Nonmonotonic d _{x²-y²} -Wave Superconducting Gap in the Electron-Doped High-T _c Superconductor Pr _{0.89} LaCe _{0.11} CuO ₄ , H. Matsui, K. Terashima, T. Sato, T. Takahashi, M. Fujita, and K. Yamada, Phys. Rev. Lett. 95 , 017003 (2005) [4 pages]	電子ドーピング型超伝導体の超伝導ギャップに波数依存性があり、その起源が反強磁性磁気相間であることを角度分解光電子分光実験から明らかにした。	119
4	Energy gaps in the failed high-T _c superconductor La _{1.875} Ba _{0.125} CuO ₄ , R. H. He, K. Tanaka, S. K. Mo, T. Sasagawa, M. Fujita, T. Adachi, N. Mannella, K. Yamada, Y. Koike, Z. Hussain, and Z. X. Shen, Nature Phys. 5 , 119-123 (2009)	超伝導が生じない La _{1.875} Ba _{0.125} CuO ₄ に対して角度分解光電子分光実験を行い、電子系のエネルギーギャップに超伝導に関係するものと直接関係しない二種類が波数空間で共存することを示す結果を得た。磁気励起の起源を解明する上で重要な手がかりを与えた。	57
5	Charge Excitations in the Stripe-Ordered La _{5/3} Sr _{1/3} NiO ₄ and La _{2-x} (Ba, Sr) _x CuO ₄ Superconducting Compounds, S. Wakimoto, H. Kimura, K. Ishii, K. Ikeuchi, T. Adachi, M. Fujita, K. Kakurai, Y. Koike, J. Mizuki, Y. Noda, K. Yamada, A.H. Said, and Y. Shvyd'ko, Phys. Rev. Lett. 102 , 157001 (2009) [4 pages]	電荷秩序を示す銅酸化物およびニッケル酸化物に対して共鳴非弾性 X 線散乱 (RIXS) 実験を行い、電荷秩序の変調に対応する波数位置に共通して RIXS 強度が観測されることを明らかにした。	39
6	First demonstration of novel method for inelastic neutron scattering measurement utilizing multiple incident energies, M. Nakamura, R. Kajimoto, Y. Inamura, F. Mizuno, M. Fujita, T. Yokoo, and M. Arai, J. Phys. Soc. Jpn. 78 , 093002 (2009) [4 pages]	複数入射エネルギー利用による中性子非弾性散乱実験（複数入射エネルギー法）を世界で初めて実現し、従来手法と比較して飛躍的な測定効率向上を達成した。Multi-E _i 法は中性子散乱による物質研究に大きな変革をもたらし、海外の中性子散乱施設においても採用が進んだ。	38
7	Two-dimensional Spin Density Wave State in LaFeAsO, M. Ishikado, R. Kajimoto, S. Shamoto, M. Arai, A. Iyo, K. Miyazawa, P. M. Shirage, H. Kito, H. Eisaki, S-W. Kim, H. Hosono, T. Guidi, R. Bewley, and S. M. Bennington, J. Phys. Soc. Jpn. 78 , 043705 (2009) [4 pages]	鉄系超伝導体の母相 LaAsFeO に対する非弾性散乱測定により 2 次元磁気相関に起因する非対称な磁気励起プロファイルを観測し、それが室温の正方晶相でも生き残ることを明らかにした。このことは、Fe の正方格子面内で第二隣接間相互作用 J_2 が強いことを示唆する。	29
8	Magnetic Dispersion of the Diagonal Incommensurate Phase in Lightly Doped La _{2-x} Sr _x CuO ₄ , M. Matsuda, M. Fujita, S. Wakimoto, J. A. Fernandez-Baca, J. M. Tranquada, and K. Yamada, Phys. Rev. Lett. 101 , 197001 (2008) [4 pages]	希薄ホールドーピング領域の磁気励起を中性子散乱で調べ、低エネルギー領域の励起スペクトルに空間異方性があることを明らかにし、高エネルギーでは等方的に変化することを突き止めた。	29
9	High-energy magnetic excitations from dynamic stripes in La _{1.875} Ba _{0.125} CuO ₄ , Guangyong Xu, J. M. Tranquada, T. G. Perring, G. D. Gu, M. Fujita, and K. Yamada, Phys. Rev. B 76 , 014508 (2007) [8 pages]	スピン・電荷ストライプ秩序を示す La _{1.875} Ba _{0.125} CuO ₄ に対して高エネルギー中性子散乱実験を行い、砂時計型磁気励起スペクトルの温度変化を実験的に示すことができた。	27
10	Impurity effect on the diagonal incommensurate spin correlations in La _{2-x} Sr _x CuO ₄ , M. Matsuda, M. Fujita, and K. Yamada, Phys. Rev. B 73 , 140503(R) (2006) [4 pages]	希釈ドーピング La _{2-x} Sr _x CuO ₄ の静的磁気相間に対する不純物置換効果を調べ、Zn と Ni の場合で格子非整合度に対する不純物濃度依存性に違いがあることを中性子弾性散乱実験で明らかにした。	25

【研究期間終了後に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	Progress in Neutron Scattering Studies of Spin Excitations in High- T_c Cuprates, M. Fujita, H. Hiraka, M. Matsuda, M. Matsuura, J. M. Tranquada, S. Wakimoto, Guangyong Xu, and K. Yamada, J. Phys. Soc. Jpn. 81 , 011007, (2012) [19 pages]	銅酸化物高温超伝導体に対する最新の中性子散乱研究をまとめた論文。特に磁気励起スペクトルの全体像の解説や新しい実験対象物質との比較から、磁気励起の一般性の議論を行った。	46
2	Flux pinning in PrFeAsO _{0.9} and NdFeAsO _{0.9} F _{0.1} superconducting crystals, C. J. van der Beek, G. Rizza, M. Konczykowski, P. Fertey, I. Monnet, Thierry Klein, R. Okazaki, M. Ishikado, H. Kito, A. Iyo, H. Eisaki, S. Shamoto, M. E. Tillman, S. L. Bud'ko, P. C. Canfield, T. Shibauchi, and Y. Matsuda, Phys. Rev. B 81 , 174517 (2010) [11 pages]	局所磁化測定を行うことで、臨界電流密度の揺らぎが、欠陥による磁束の集団ピンニングによることがわかった。このことからドーブされた欠陥密度が臨界電流密度に重要な役割を担うことが分かった。	46
3	Coupling of spin and orbital excitations in the iron-based superconductor FeSe _{0.5} Te _{0.5} , S.-H. Lee, Guangyong Xu, W. Ku, J. S. Wen, C. C. Lee, N. Katayama, Z. J. Xu, S. Ji, Z. W. Lin, G. D. Gu, H.-B. Yang, P. D. Johnson, Z.-H. Pan, T. Valla, M. Fujita, T. J. Sato, S. Chang, K. Yamada, and J. M. Tranquada, Phys. Rev. B 81 , 220502 (2010) [5 pages]	鉄系超伝導体で最も結晶構造が単純な Fe11 系の低エネルギー磁気励起を調べ、波数空間での異方性の存在を明らかにした。またその起源として、軌道秩序の可能性を指摘した。	44
4	Hydrogen in Layered Iron Arsenides: Indirect Electron Doping to Induce Superconductivity, T. Hanna, Y. Muraba, S. Matsuishi, N. Igawa, K. Kodama, S. Shamoto, and H. Hosono, Phys. Rev. B 84 , 024521 (2011) [7 pages]	鉄系超伝導体の高圧合成で水素がフッ素サイトを置換してドーブできることがわかった。この発見により鉄系超伝導体で大きく電子ドーブできることとなった。	38
5	Investigation of the spin-glass regime between the antiferromagnetic and superconducting phases in Fe _{1+y} Se _x Te _{1-x} , N. Katayama, S. Ji, D. Louca, S.-H. Lee, M. Fujita, T. J. Sato, J. S. Wen, Z. J. Xu, G. D. Gu, G. Xu, Z. W. Lin, M. Enoki, S. Chang, K. Yamada, and J. M. Tranquada, J. Phys. Soc. Jpn. 79 , 113702 (2010) [4 pages]	Fe11 系鉄系超伝導体の磁気・超伝導相図について報告した論文で、他の超伝導体と同じく、バルク超伝導の発現は元素置換により反強磁性磁気秩序が消失して現れることを示した。	37
6	Degradation of Superconductivity and Spin Fluctuations by Electron Overdoping in LaFeAsO _{1-x} F _x , S. Wakimoto, K. Kodama, M. Ishikado, M. Matsuda, R. Kajimoto, M. Arai, K. Kakurai, F. Esaka, A. Iyo, H. Kito, H. Eisaki, and S. Shamoto, J. Phys. Soc. Jpn. 79 , 074715 (2010) [4 pages]	LaFeAsO _{1-x} F _x 系粉末試料 $x = 0.06$ および 0.08 の超伝導相 ($T_c > 24$ K) で、母相の SDW 相と同程度の磁気散乱強度が残る一方で、 $x = 0.16$ の $T_c \sim 7$ K のオーバードーブ試料ではその磁気散乱が見えなくなったことから、磁気散乱と高い T_c との相関が明らかになった。	35
7	Imaging Doped Holes in a Cuprate Superconductor with high-resolution Compton scattering, Y. Sakurai, M. Itou, B. Barbiellini, P. E. Mijnders, R. S. Markiewicz, S. Kaprzyk, J.-M. Gillet, S. Wakimoto, M. Fujita, S. Basak, Yung Jui Wang, W. Al-Sawai, H. Lin, A. Bansil, and K. Yamada, Science 332 , 698-702 (2011).	銅酸化物高温超伝導体 La _{2-x} Sr _x CuO ₄ のアンダードーブ及びオーバードーブ組成試料の運動量密度分布を明らかにし、超伝導発現に寄与する電子と、超伝導を破壊する電子の二種類があることをコンプトン散乱実験で示した。	35
8	Inelastic neutron scattering study of the resonance mode in the optimally doped pnictide superconductor LaFeAsO _{0.92} F _{0.08} , S. Shamoto, M. Ishikado, A. D. Christianson, M. D. Lumsden, S. Wakimoto, K. Kodama, A. Iyo, and M. Arai, Phys. Rev. B 82 , 172508 (2010) [4 pages]	鉄系超伝導体の中で転移温度の高い 1111 系で、中性子散乱によりレゾナンスモードを観測し、そのエネルギーが他の鉄系超伝導体で観測されている値とよい相関があることを示した。	21
9	s_{\pm} like spin resonance in iron-based nodal superconductor BaFe ₂ (As _{0.65} P _{0.35}) ₂ using inelastic neutron scattering, M. Ishikado, Y. Nagai, K. Kodama, R. Kajimoto, M. Nakamura, Y. Inamura, S. Wakimoto, H. Nakamura, M. Machida, K. Suzuki, H. Usui, K. Kuroki, A. Iyo, H. Eisaki, M. Arai, and S. Shamoto, Phys. Rev. B 84 , 144517 (2011) [5 pages]	鉄系超伝導体 BaFe ₂ (As _{0.65} P _{0.35}) ₂ の超伝導状態における動的スピン帯磁率の増大 (スピン共鳴) を観測し、他の鉄系超伝導体と比較検討することで、ラインノードは一つのフェルミ面に符号反転する領域を僅かしか作らないように入り、それがこの系が他のノード対称性を持つ超伝導体 (LaFeP ₃ や KFe ₂ As ₂) に比べて高い T_c を有する理由だと分かった。	14
10	The Fermi Chopper Spectrometer 4SEASONS at J-PARC, R. Kajimoto, M. Nakamura, Y. Inamura, F. Mizuno, K. Nakajima, S. Ohira-Kawamura, T. Yokoo, T. Nakatani, R. Maruyama, K. Soyama, K. Shibata, K. Suzuya, S. Sato, K. Aizawa, M. Arai, S. Wakimoto, M. Ishikado, S. Shamoto, M. Fujita, H. Hiraka, K. Ohoyama, K. Yamada, and C.-H. Lee, J. Phys. Soc. Jpn. 80 , SB025 (2011) [6 pages]	J-PARC に新たに建設されたチョッパー型非弾性中性子散乱装置「四季」のデザインおよび性能評価結果を詳述し、最近の実験で得られた測定例を示した。今後同装置を使用する実験者にとっての基本参考文献となる論文である。	13

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報

次の(1)、(2)の項目ごとに、該当する内容について具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究成果の社会への還元状況（社会への還元の程度、内容、実用化の有無は問いません。）

本研究でもっと重要な成果は、中性子実験装置「四季」が実現したことである。そこで実現した新たな概念の実験手法（複数入射エネルギー法）は、中性子非弾性散乱実験に J-PARC の大強度中性子源による強度の増加を大きく超えた質的な性能向上をもたらす結果となった。同技術は J-PARC 内の同種の装置にも採用されたのみならず、世界の第一級の中性子源においても採用されることとなった。更には、現在、建設が進んでいる欧州核破砕型中性子源（ESS、2500 億円の計画）の装置設計に基本設計概念を与えることになった。その結果 J-PARC/MLF が世界的に非常に高く評価され、我が国の科学技術の高さを世界に印象づけることができた。装置の性能向上は、装置を利用する多くの研究分野に質的に高い成果の創出をもたらすことになる。また、同技術の実現により得られることとなった逆格子空間の連続 4 次元空間データを解釈するための新たなデータ解析手法の開発を通じて、それに伴う理論の発展、さらには計算科学との強い連携がもたらされることとなろう。すなわち、大型中性子源施設（J-PARC/MLF）での中性子実験と京コンピュータを用いた計算科学の強い連携が自ずと促進され、インテグレートされた科学の推進がもたらされることが期待される。これこそが国内の研究資源の効率的な利用につながり、投資に見合った成果の創出、関係分野のさらなる発展を促し、引いては社会への大きな還元となって体現することになる。

一方、「四季」の実験成果は、近い将来必ずや銅酸化物高温超伝導機構の解明に大きな貢献がなされると期待できる。いまや、銅酸化物高温超伝導物質は、社会インフラのハイテク・キー・コンポーネントとして採用されつつあり（磁気浮上列車等）、その超伝導機構の解明は自ずとより優れた材料の開発につながる知見であることから、我が国の産業強化、社会のグリーン化、高エネルギー効率社会の実現等、計り知れない貢献をもたらすことであろう。

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報（続き）

(2) 研究計画に関与した若手研究者の成長の状況（助教やポスドク等の研究終了後の動向を記述してください。）

本研究の研究分担者または連携研究員の中には、研究参画時に助教または助教相当の職だった者が7名いた。そのうち当時高エネルギー加速器研究機構の助手だった2名のうち、1名は同機構講師を経て、現在、同機構准教授の職に就いている。中性子散乱による物性研究を推進する傍ら、本研究における「四季」の開発の経験を活かして J-PARC における同種中性子装置開発に携わっている。もう1名は現在、同機構講師として、本研究に引き続き中性子偏極技術の開発を行っている。当時日本原子力研究開発機構の研究員だった2名は、いずれもその後同機構において研究副主幹を経て、現在同機構研究主幹である。「四季」の装置担当者として同装置の高度化・運用にあたる傍ら、同装置を利用した物性研究を行なっている。当時東北大学金属材料研究所の助手だった2名のうち、1名は同大学の准教授を経て、現在同大学教授となっている。本研究に引き続き「四季」を含む中性子、X線、ミュオン実験装置を用いた高温超伝導体等の研究を推進しつつ、後進の指導にもあたっている。もう1名は現在高エネルギー加速器研究機構において特任准教授として物性研究に従事し、特に中性子やミュオンを用いた「元素戦略プロジェクト」では中心的役割を担っている。東北大学原子分子材料科学高等研究機構の助手だった1名は、その後青山学院大学助教を経て、現在岡山大学大学院自然科学研究科の特任准教授として活躍中である。

本研究では日本原子力研究開発機構にて3名、東北大学において1名のポスドクを雇用したが、いずれも現在物性科学分野において常勤職に就いている。日本原子力研究開発機構で雇用した者のうち1名は高度情報科学技術研究機構研究員、日本原子力研究開発機構任期付研究員を経て、現在日本原子力研究開発機構の研究員となっている。特に本研究に引き続き従事している J-PARC の中性子散乱データ解析環境の開発では中心的役割を果たしている。1名はその後 JST のポスドクを経て、現在、J-PARC の利用支援機関である総合科学研究機構において技師の職に就き、中性子実験装置運用のサポートを行う傍ら、物質開発、中性子による物性研究を推進している。もう1名は現在東京大学総合文化研究科において助教として物性研究を推進している。東北大学で雇用した1名については、その後東北大学原子分子材料科学高等研究機構の助手を経て現在東北大学理学部の助教を務めており、J-PARC の装置等を用いた中性子による物性研究を行っている。

さらに、本研究に関与した学生1名は本研究に係わる研究テーマで学位を取得後、九州工業大学工学部材料理工学科ポスドクを経て、現在、東北大学多元物質科学研究所の助教を務めている。

以上述べたように、本研究に関与した若手研究者はいずれも研究終了後順調にキャリアを積み重ね、各研究分野で中心的な役割を果たしており、本研究は若手研究者のキャリアパスにおいても大きな役割を果たしたと言える。