

# 成果報告書

「中性子ビーム利用高度化技術の開発」  
(中性子ビーム集光システムおよび偏極中性子散乱実験システムの  
評価と応用に関する研究)

平成22年5月

国立大学法人東北大学

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業による委託業務として、国立大学法人東北大学が実施した平成21年度「中性子ビーム利用高度化技術の開発」（中性子ビーム集光システムおよび偏極中性子散乱実験システムの評価と応用に関する研究）の成果を取りまとめたものです。

## 1. 委託業務の目的

「中性子ビーム利用高度化技術の開発」

(中性子ビーム集光システムおよび偏極中性子散乱実験システムの評価と応用に関する研究)

中性子偏極・集光・検出及びイメージングなどの中性子ビーム基盤技術研究を発展させ、その基盤技術をJ-PARC及びJRR-3の中性子科学研究施設の高角散乱、小角散乱、イメージングの実験装置に導入し、中性子ビームの高品質化、高輝度化、高精度化を実現することで、これまで出来なかったナノ領域からマイクロ領域の階層的な磁性、軽元素、構造歪み、ダイナミクスなどの高精度の中性子計測を可能にすることを目的とする。

このため、独立行政法人日本原子力研究開発機構、国立大学法人北海道大学、国立大学法人東北大学、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構、国立大学法人東京大学、国立大学法人京都大学と共同で業務を行う。

国立大学法人東北大学では、中性子ビーム集光システムおよび偏極中性子散乱実験システムの評価と応用に関する研究を実施する。

## 2. 平成21年度の実施内容

### 2.1 実施計画

#### ①中性子ビーム集光システムおよび偏極中性子散乱実験システムの評価と応用に関する研究

高性能の偏極中性子散乱実験システムの構築には、その心臓部である<sup>3</sup>He偏極フィルターの磁気シールドを始めとする磁場環境の精度が重要である。そこで、磁場シールドコイル、ガイド磁場、スピンプリッパーの計算・設計を行い、それぞれの実機作成に着手する。また、これらのデバイスをJRR-3での単色定常中性子ビームに導入した場合の、偏極中性子散乱実験システムの性能評価の手法を検討する。その検討結果をもとに、ビーム実験準備に着手する。

### 2.2 実施内容（成果）

#### ①中性子ビーム集光システムおよび偏極中性子散乱実験システムの評価と応用に関する研究

##### (a) 中性子ビーム集光システムの製作と評価

<sup>3</sup>He偏極フィルターを利用する偏極中性子散乱実験では、中性子ビームを集光させ試料位置でビーム輝度を十分に高めることが重要である。昨年度に引き続き、本研究では、(1)Ge平板結晶モノクロメータ、(2)Cu平板結晶モノクロメータ、(3)Si湾曲結晶アナライザーの3項目を進めた。

- (1) これまでに得られたGe結晶の高温高压の最適条件に基づき、モザイク幅 $0.3^\circ$ ・ピーク反射率40%のGe結晶素子を多数準備し、縦集光可変Geモノクロメータを組上げた(図1)。それを中性子分光器AKANEのモノクロメータ位置にセットし、そこからの反射ビームを評価した。試料位置においては、従来の空間輝度を保ったまま、空間サイズを約1.5倍拡張することに成功した。高さ3cm以上の試料を用いることで本ビ

ームを有効活用でき、試料からの散乱強度が60%増大することを確認した（図2）。また、二波長化オプション機能により、入射中性子の波長を2.0Åから1.3Åへ容易に切り替えることができ、第2波長モードにおいて設計通りの強度が得られることを実証した。これにより波数・エネルギー空間の調査領域が格段に広がり（図3）、AKANEで展開する物性研究を幅広くすることができた。



図1、縦集光可変Geモノクロメータ。

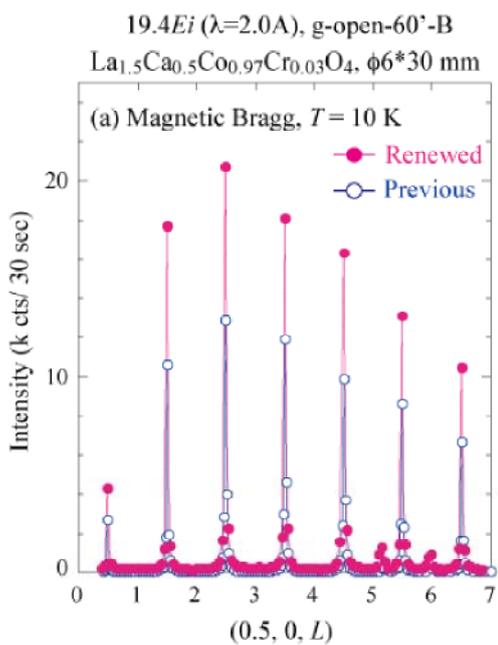


図2、モノクロメータ更新前後での散乱強度の変化。

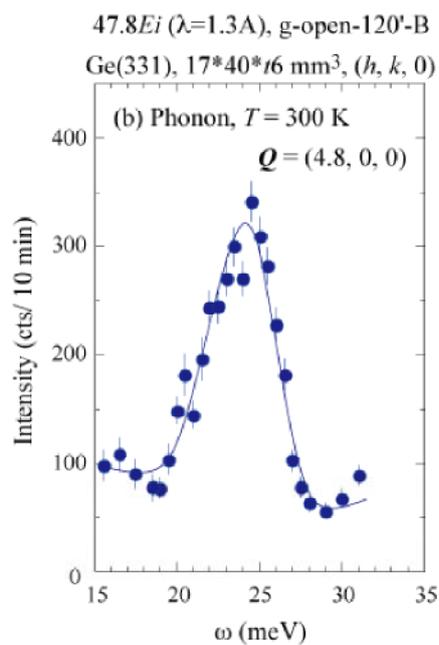


図3、第2波長を使って得られる高エネルギーフォノン励起。

(2) 金研の高品質単結晶育成技術を駆使し、Cu大型単結晶を育成した。結晶面に沿った切り出し、低温高圧下でのモザイク導入、中性子ビームによる評価を行い、縦集光可変型Cuモノクロメータを組上げた。(図4)



図4、縦集光可変Cuモノクロメータ。

(3) 金研が独自に開発を進めてきたSi及びGe湾曲結晶の反射率とモザイク幅を、単色中性子回折実験で調査した。設計通りの湾曲化が実現していること(図5)、ウェーハ結晶の重ね合わせで効率的に反射強度を増幅できること(図6)を確認した。

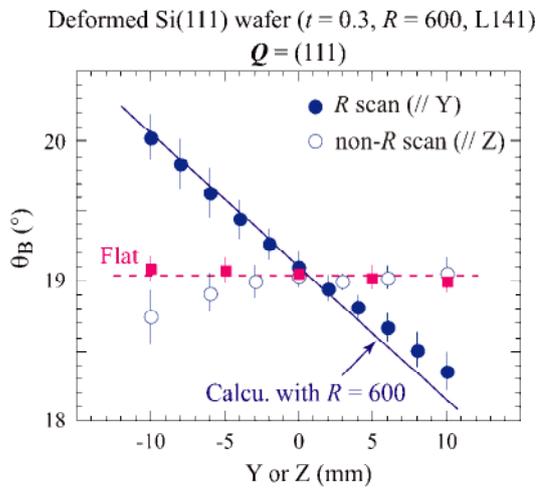


図5、円筒状結晶におけるブラッグ反射角の空間依存性。

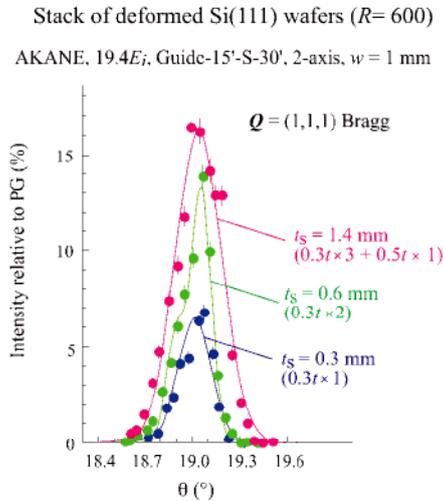


図6、湾曲結晶重ね合わせによる反射強度上昇。

(b) 偏極中性子散乱実験システムの検討と導入の準備

(1) 磁場シールドコイル、ガイド磁場、スピントリッパーの計算・設計

偏極実験の性能を決定するのは磁場の制御であり、とくに磁気シールド、スピントリッパー、ガイド磁場の信頼性が高いことが求められる。そこで平成21年度には、スピントリッパーを中心に、性能評価と実機の作成を行った。まず、スピントリッパーの性能評価のため、磁場分布のシミュレーション計算を行った。トリッパーとしてはドラブキン型を採用した。これは、ドラブキン型が白色中性子に対応可能であること、ビーム中にデバイスを入れないタイプなので、強度の減衰とバックグラウンドの増大を避けられるメリットがあるからである。ただし、ドラブキン型は多くの場合、波長が数Å以上の冷中性子に用いられることが多いので、物性実験に必要な熱中性子（2Å以下）で動作するかどうかの評価が必要であった。シミュレーションはSuperFishという磁場分布計算プログラムを用いた。図7が、典型的なパラメータで計算したトリッパー内部の磁場分布である。中心部分での横磁場が十分小さく、かつ縦磁場が連続につながっていることが確認できた。さまざまな条件でのシミュレーションの結果から、熱中性子でも十分に稼働するトリッパーを設計可能であること、また、全長を30cm程度と非常にコンパクトにできることが確認できた。

以上の計算での評価をもとに、平成21年度にドラブキン型トリッパーの実機の作成をおこなった。同時に、ガイド磁場、スピントリッパー用磁気シールドの作成も行った。図8は、作成したドラブキン型トリッパーとガイド磁場の写真で、実際に中性子分光器に設置している。これらの磁場デバイスの性能評価のため、磁場分布の実測を行った。このため高性能の磁場測定が可能なガウスメータ（GM5307）を購入した。これは磁場を三次元的に測定できるガウスメータである。実測の結果、スピントリッパーおよびガイド磁場周辺の磁場分布がシミュレーション結果とよく一致することが確認できた。このことから、作成したデバイスは実際の実験に使用可能と判断した。また、平成21年度では、単色中性子での標準的トリッパーであるメザイ型トリッパーも平行して作成した。

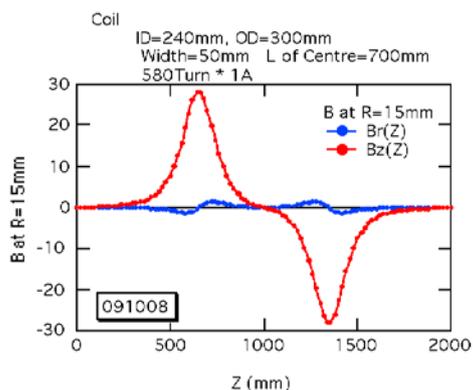


図7 ドラブキン型フリッパーでの磁場分布計算結果

赤がビーム方向、青がビームに垂直方向の磁場である。このようなシミュレーション評価をさまざまな条件でおこなった結果、熱中性子でも稼働するドラブキン型フリッパーが設計可能であることがわかった。

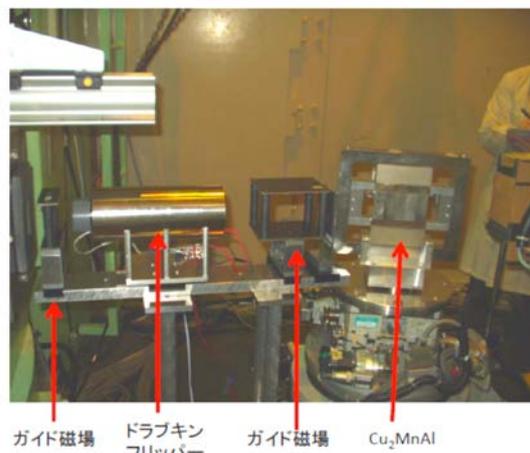


図8 ドラブキン型フリッパー、ガイド磁場の実機写真

実際に、中性子分光器に設置して性能テストをおこなった。磁場デバイスは、平成21年度に本計画で設計、作成したものである。ビームを用いた実験で、想定通りの性能がでていることが確認できた。

## (2) 偏極ビーム生成と中性子ビームによるデバイスの評価

以上のように、磁場デバイスの実機の作成が順調に進んだため、平成21年度中に、実際のビームを使った実験装置の評価に進むことができた。測定装置は金研所有の **HERMES** である。**HERMES** としては初めての偏極実験となる。この実験のために、平成21年度には、中性子実験用の電磁石および電磁石励磁用のバイポーラー電源の購入をはじめ、必要な機器を購入した。偏極子としては、スピフィルターを用いた。このシステムにより偏極ビームが生成できることは平成20年度の **AKANE** での実験で確認済みである。今回の実験では、**KEK** で偏極したスピフィルターを **HERMES** まで移送し、実験を行った。図9は、**HERMES** での偏極実験の様子で、スピフィルター用磁気シールド、ドラブキン型フリッパー、ガイド磁場、電磁石を配置している。ただし、この実験は本計画で電磁石を購入する以前に実施したため、この写真での電磁石は、原研所有のものを一時的に借用したものである。この実験で、電磁石があればシステムが稼働することを確認できたので、本計画専用の機器として電磁石を購入した。図10が平成21年度に本計画で購入した電磁石である。



図9 HERMES での偏極粉末回折実験の様子

画面左壁から中性子がとりだされ、スピ  
ンフィルターとフリッパー通過後に、電  
磁石（赤）中心の試料で散乱され、扇型  
シールド内の検出器で検出される。磁場  
デバイスは今年度に本計画で設計、作成  
したものである。実験は本計画で電磁石  
を購入する以前に実施したため、写真中  
の電磁石は原研から借用したものであ  
る。

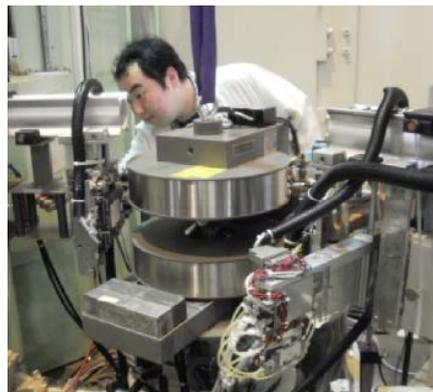


図10 平成21年度に本計画で  
購入した偏極実験用電磁石  
0.8T までの磁場を発生でき、現  
在では冷凍機実験も可能であ  
る。

図11は図9の実験で測定した強磁性体  $\text{Cu}_2\text{MnAl}$  のブラッグ反射で、スピ  
ンフリッパーにより偏極の向きを  $\text{Cu}_2\text{MnAl}$  の磁場に平行にした場合と反平行にした場合とを示  
している。この両者に明らかに差があるが、これはビームは確かに偏極していることの  
証拠である。このことから、HERMES に導入した一連の偏極システムが確かに偏極ビ  
ームを生成できることが確かめられた。ただし、この実験では、偏極率の悪化がおきて  
おり実効的な偏極率は16%程度であった。これは、3つの可能性が考えられる。まず  
第1に、もともと  $^3\text{He}$  スピンフィルターの偏極率が低かった可能性がある。このとき  
の実験では、 $^3\text{He}$  フィルターの偏極率を事前に測定できないまま実験に入っており、偏  
極度の保証がなかった。第2の可能性として、磁場デバイス、とくにスピ  
ンフリッパーの不調が考えられる。第3に、磁場のつながりが不完全で、ビーム輸送の途中で、偏  
極率が失われてしまった可能性が考えられる。しかしながら、偏極率が低い場合であって  
も、ある程度の結果を出すことができることもこの実験で確認できた。 $\text{Cu}_2\text{MnAl}$  に続

き、この実験で強磁性体ニッケルの粉末での回折実験を行った。図 12 は、ニッケルの 111 反射の偏極測定結果で、偏極方向を磁化と平行にした場合と反平行にした場合で、シグナルは小さいけれども有意な差がみられる。このときの実効的な偏極率は 10% を切っているが、この結果は 10% 以下での偏極率でも Ni の強磁性成分を観測できていることを意味している。すなわち、国内で初めて  $^3\text{He}$  スピンフィルターでの偏極回折実験に成功したことになる。偏極率は低いものの、これは大きな一歩であった。もし十分な偏極率が得られていれば、非常に明瞭な差が観測されていたはずで、実効的な偏極度をあげることができれば、今回のシステムで本格的な物性実験が可能であることが確認された。

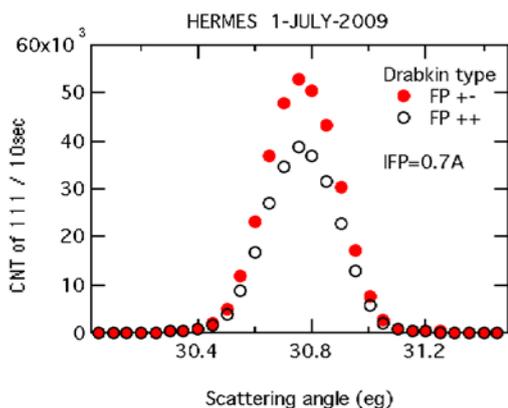


図 11 HERMES にスピンフィルターシステムと磁場デバイスを設置し測定した強磁性体  $\text{Cu}_2\text{MnAl}$  での偏極回折測定結果

$\text{Cu}_2\text{MnAl}$  にかけた磁場に平行な偏極ビーム（赤）と反平行な偏極ビーム（白）とで強度に差がでており、これはビームが確かに偏極していることの証拠である。

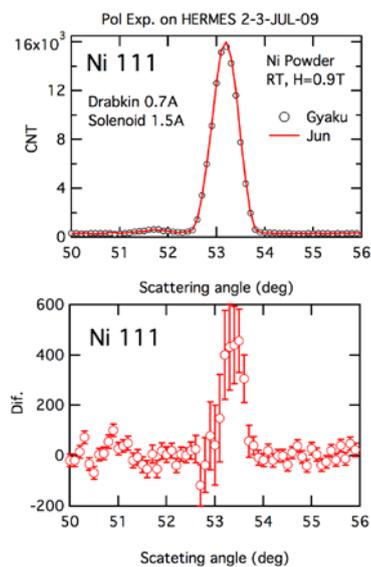


図 12 HERMES で測定したニッケル粉末の 111 反射

上が測定データで磁化方向と平行、反平行のデータを重ね書きしている。下図は両者の差をとったもので、シグナルは小さいものの、有意の差があることがわかる。これは、ニッケルの強磁性成分を観測したことにほかならず、日本初めての  $^3\text{He}$  スピンフィルターを用いた偏極回折実験のデータである。

### (3) デバイスの改良

上述の HERMES 実験で、平成 21 年度の主な目的は達成されたが、しかし、偏極度悪化の原因を解明する必要があり、デバイス性能の再評価をおこなった。磁場分布測定を再度おこない、HERMES 実験の結果を踏まえて設計パラメーターの再検討をした結果、より高性能のドラブキンフリップパーが作成できることが確認でき、平成 21 年度内に 2 号機の作成を行った。この 2 号機は、平成 22 年度にビームを使って性能評価をおこない、性能が確認できれば、平成 22 年度には本格的な物性実験を開始する予定である。

(4)平成 20 年度に引き続き技術補佐員を雇用することで、中性子実験システム製作をスムーズに行える体制ができあがった。当人の熟練もあり、作業の分担化が進み、効率良く実験準備が進行するようになった。

成果の外部への発表

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目： 「中性子ビーム利用高度化技術の開発」(中性子ビーム集光システムおよび偏極中性子散乱実験システムの評価と応用に関する研究)

機 関 東北大学  
名：

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
Fe-doping effects on magnetism in hole-type superconductors of (Bi,Pb) <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> CuO <sub>6</sub> (ポスター)	H. Hiraka, S. Wakimoto, M. Takeda, K. Kakurai, D. Matsumura, Y. Nishihata, J. Mizuki, K. Yamada	International Conference on Magnetism (ICM 2009) Karlsruhe, Germany	2009年7月	国外
Hot pressing of Ge crystals toward a reflection-plane-selective neutron monochromator (ポスター)	Y. Miyake, H. Hiraka, Y. Yamaguchi, K. Ohoyama, K. Yamada	International Conference on Magnetism (ICM 2009) Karlsruhe, Germany	2009年7月	国外
Renovation of Neutron Monochromator Crystals at IMR (ポスター)	H. Hiraka	The 10th Korea-Japan Meeting on Neutron Science, Sendai, Japan	2010年1月	国内
<sup>3</sup> He フィルター法による偏極中性子の物性研究へ	堤健之, 大山研司, 平賀晴弘, 山口泰男, 猪野隆, 奥隆之, 坂	日本物理学会第65回年次	2010年3月	国内

の応用 (口頭)	口佳史,吉良 弘 ,有本靖 ,武田全康 , 鈴木淳市,岩佐和晃,山田 和芳,加倉井和久	大会		
中性子散乱用 Ge モノクロメータ結晶の高度化 III (ポスター)	平賀晴弘,三宅悠子,山口 泰男,大山研司,鬼柳亮 嗣,木村宏之,野田幸男,山田和芳	日本物理学会第 65 回年次大会	2010 年 3 月	国内
偏極 $^3\text{He}$ 中性子スピンプイルターの $^3\text{He}$ ガス偏極度評価手段の開発 (ポスター)	吉良弘,坂口佳史,奥隆之, 鈴木淳市,中村充孝,新井正 敏,遠藤康夫,加倉井和久, 有本靖,猪野隆,清水裕 彦,神山崇,佐藤博隆, 佐藤孝一 ,加美山隆,鬼 柳善明,堤健之,大山研司,平賀晴弘,山田和芳	日本物理学会第 65 回年次大会	2010 年 3 月	国内
偏極 $^3\text{He}$ 中性子スピンプイルターのガラスセルの開発 (ポスター)	坂口佳史,吉良弘,奥隆之, 鈴木淳市,中村充孝,新井正 敏,遠藤康夫,加倉井和久, 武田全康,脇本秀一,山崎 大,小泉智,有本靖,猪野 隆,清水裕彦,神山崇, 大山研司,平賀晴弘,堤 健之,山田和芳	日本物理学会第 65 回年次大会	2010 年 3 月	国内
高分解能チョッパー分光器の建設 (ポスター)	伊藤晋一,横尾哲也,佐藤 卓,矢野真一郎,佐藤節 夫,鈴木純一,上野健治,桑 原慶太郎,岩佐和晃,加 美山隆 E,山室修,大山研 司,大友季哉,遠藤康夫, 秋光純,黒田眞司,佐藤和則,那須奎一郎,岩野 薫,大原泰明,吉澤英樹,川村義久,浅見俊夫 ,杉浦良介	日本物理学会第 65 回年次大会	2010 年 3 月	国内
チョッパー型中性子分光器「四季」の現状 (ポス	梶本亮一,中村充孝,横尾哲也,稲村泰弘,水野文夫,中 島	日本物理学会第 65 回年次	2010 年 3 月	国内

ター)	健次,高橋伸明,河村聖子,丸山龍治,曾山和彦,柴田薫,鈴谷賢太郎,中谷健,佐藤節夫,伊藤幸弘,岩橋孝明,神原理,田中浩道,吉田登,相澤一也,新井正敏,脇本秀一,社本真一,藤田全基,平賀晴弘,大山研司,山田和芳	大会		
3He スピンフィルター法を用いた偏極中性子散乱装置の開発 (ポスター)	大山研司,平賀晴弘,堤健之,猪野隆 A,奥隆之 B,吉良弘 B,坂口佳史 B,有本靖 A,武田全康 B,鈴木淳市 B,山田和芳,加倉井和久	日本物理学会 2009年秋季大会、熊本	2009年 9月	国内
中性子散乱用 Ge モノクロメータ結晶の高度化 II (ポスター)	三宅悠子,平賀晴弘,山口泰男,大山研司,山田和芳	日本物理学会 2009年秋季大会、熊本	2009年 9月	国内
偏極 3He 中性子スピフィルターの開発 その 1 (ポスター)	有本靖,猪野隆,清水裕彦,神山崇,吉良弘,坂口佳史,奥隆之,鈴木淳市,中村充孝,新井正敏,遠藤康夫,加倉井和久,大山研司,平賀晴弘,山田和芳	日本物理学会 2009年秋季大会、熊本	2009年 9月	国内
偏極 3He 中性子スピフィルターの開発 その 2 (ポスター)	吉良弘,坂口佳史,奥隆之,鈴木淳市,中村充孝,新井正敏,遠藤康夫,加倉井和久,有本靖,猪野隆,清水裕彦,神山崇,大山研司,平賀晴弘,山田和芳	日本物理学会 2009年秋季大会、熊本	2009年 9月	国内
偏極 3He 中性子スピフィルターの開発 その 3 (ポスター)	坂口佳史,吉良弘,奥隆之,鈴木淳市,中村充孝,新井正敏,遠藤康夫,加倉井和久,有本靖,猪野隆,清水裕彦,神山崇,	日本物理学会 2009年秋季大会、熊本	2009年 9月	国内

	大山研司, 平賀晴弘, 山田和芳			
--	------------------	--	--	--

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌 等名)	発表した 時期	国 内・外 の別
Incommensurate spin correlations induced by magnetic Fe ions substituted into overdoped $\text{Bi}_{1.75}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_{1.90}\text{CuO}_{6+z}$	H. Hiraka	Physical Review B	2010年4月	国外

## 2.4 活動（運営委員会等の活動等）

なし。

## 2.5 研究実施体制

研究項目	担当機関等	研究担当者
① 中性子ビーム集光システムおよび偏極中性子散乱実験システムの評価と応用に関する研究	東北大学 原子分子材料科学 高等研究機構	◎○山田 和芳
(a) 中性子ビーム集光システムの製作と評価	東北大学 原子分子材料科学 高等研究機構 東北大学 金属材料研究所 〃 〃 〃 〃 東北大学 原子分子材料科学 高等研究機構 〃 東北大学大学院 理学研究科	◎○山田 和芳  平賀 晴弘 大山 研司 山口 泰男 村上 直樹 藤田 全基 堀金 和正  佐藤 豊人 富安 啓輔
(b) 偏極中性子散乱実験システムの検討と導入の準備	東北大学 原子分子材料科学 高等研究機構 東北大学 金属材料研究所 〃 〃 〃 〃 東北大学 原子分子材料科学 高等研究機構 〃 東北大学大学院 理学研究科	◎○山田 和芳  大山 研司 平賀 晴弘 山口 泰男 村上 直樹 藤田 全基 堀金 和正  佐藤 豊人 富安 啓輔