成果報告書

「中性子ビーム利用高度化技術の開発」

平成23年5月

独立行政法人 日本原子力研究開発機構

様式第 20

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、独立行政法人日本 原子力研究開発機構が実施した平成22年度「中 性子ビーム利用高度化技術の開発」の成果を取り まとめたものです。 委託業務の題目「中性子ビーム利用高度化技術の開発」

実施機関:独立行政法人日本原子力研究開発機構

1. 委託業務の目的

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ミクロ領域の階層的な磁性、軽 元素、構造歪み、ダイナミッ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。

独立行政法人日本原子力研究開発機構では、中性子偏極・集光・イメージングシス テムの開発と応用に関する研究を実施する。

2.1 実施計画

①中性子偏極・集光・イメージングシステムの開発と応用に関する研究

³He偏極フィルター、磁気集光光学素子、反射光学素子を利用する高精度な中性子 ビーム実験システムの開発研究を行う。昨年度に引き続き、JRR-3及びJ-PARCにおい て、³He偏極フィルターの開発と性能評価、磁気集光光学システムプロトタイプの構 築及び偏極・集光性能評価、湾曲集光ミラーの製作及び集光性能評価を行うとともに、 得られた成果を開発へフィードバックする。また、高精度なイメージング試験を行う ために、J-PARCビームラインの実験環境の高度化を図り、種々のパルス中性子イメー ジング試験をJ-PARCで行う。そして、パルス中性子イメージングに有望な検出器の評 価およびデータ処理技術開発を行う。さらに、開発したデバイスおよび測定技術を用 いた応用に関する試験研究に着手する。

②プロジェクトの総合的推進

プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、運営会議や技術 検討会の開催など、参画各機関の連携・調整にあたる。特に、プロジェクト全体の 進捗状況を確認しつつ計画の合理化を検討し、必要に応じて調査或いは外部有識者 を招聘して意見を聞くなど、プロジェクトの推進に資する。プロジェクトで得られ た成果については、積極的に公表し、今後の展開に資する。

2.2 実施内容(成果)

① 中性子偏極・集光・イメージングシステムの開発と応用に関する研究

i)中性子偏極用³He フィルターの開発

平成22年度はこれまで開発研究のための基盤整備を進めてきた J-PARC 中性子ビ ームライン BL10 に、レーザーを用いた³He 核スピンの偏極システムを設置し、中 性子偏極性能の評価試験を行った(図 1)。このシステムでは³He ガスを納めた容器 にレーザー光を照射することで光ポンピング法により³He ガスの核スピン偏極を行いながら、同時にその³He ガスに中性子ビームを通すことで偏極中性子を得ることが出来る。常時、光ポンピングを継続しているため、時間的に安定に³He 核スピンの偏極度を保つことが可能である。

実験の結果、実用機として世界最高レベルの³He 核スピン偏極度 P_{3He} =73%を達成し、波長帯域 0.05~0.65nm の偏極パルス中性子ビームの発生に成功した(図 2(a))。 実験データの解析より、本システムの中性子偏極性能は、波長 0.15nm において中 性子偏極度 90%、中性子透過度 30%と実用に十分な性能を有することが確認できた (図 2(b))。



(a) 中性子ビームライン BL10 のセットアップ
(b) ³He 核スピン偏極システム
図1 ³He 核スピン偏極システムと実験時のセットアップの様子



(a)³He ガスの偏極度

(b) 中性子偏極性能

図2³He ガスの核スピン偏極度とシステムの中性子偏極性能

ii)中性子集光・整形デバイスの開発

日本原子力研究開発機構では、イオンビームスパッタ法により高い全反射臨界角と 高い反射率を示し、さらに散漫散乱を抑制した高性能中性子スーパーミラー成膜法と 数値制御加工による高精度表面創成を組み合わせることにより大型で高い効率を持 つ集光スーパーミラーの開発を行っている。

平成22年度には、押しつけ方式による集光スーパーミラーを開発した。これは数値

制御加工法により楕円形状を創成したアルミ機材表面に対して、厚み1mm程度の薄い フロートガラスに成膜したm=4のNiC/Tiスーパーミラーを押し付け、貼り付けること で、楕円形状スーパーミラーを実現するものである。この方式は大型で高精度に加工 できるアルミ機材に対し、複数枚のスーパーミラーを貼り付けることが可能であり、 1mを超える大型ミラーを開発できる可能性がある。今回は長さ400mm、焦点間距離 2560 mm の1次元楕円型集光ミラーを開発し、JRR-3のCHOPポートにおいてパルス中 性子ビームの集光試験を行った。結果、焦点サイズ 0.64mm、ピークゲイン6を達成 した(図3)。また、波長3.5Å以上の白色中性子がほぼスーパーミラーの反射率に等し い効率で集光できていることが確認された。加えて、集光ミラーによる散漫散乱の影 響は確認できず、高いS/N比を示していた。この結果を受け、さらに大型集光ミラー 開発として、長さ 800mm の押し付け式集光ミラーの開発に着手した。

また、磁気集光光学素子の開発に於いては、H21年度までの研究成果に基づいて、 J-PARCのパルス中性子小中角散乱装置に導入するためのパルス中性子偏極集光磁気 光学システムの実機の設計を行い、その製作のための実設計を行った。



図3:(左)1次元集光を行ったビームの集光焦点位置における形状.(中)非集光ビームの集光焦点 位置における形状.(右)集光ビームと非集光ビームの集光方向に対する強度分布。左図,中図か ら縦軸=0の位置での強度を切り出したもの.集光ビーム幅は0.64mm.

iii)中性子イメージングシステムの開発

a) ロータリーコリメータ改良による画像の高精細化

J-PARC/MLF の特性試験装置(BL10)では、パルス中性子イメージング実験に適し た実験環境の整備を行ってきた。平成20、21年度にわたりロータリーコリメータ(図 4)を導入し、ビームライン中間付近でビームを絞ることにより(これはピンホール カメラのピンホールを小さくすることに相当する)、イメージング画像の空間分解能 を向上させることに成功した。



図4 特性試験装置全体図とロータリーコリメータ本体写真.

	X1 ·		~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	
種類	寸法 [mm]	コリメータ比 (L/D)	面積 [mm ²]	備考
開放	100.0×100.0	140	10,000	
大	31.6×31.6	190	1,000	
中	17.8×17.8	337	300	廃止
小	10.0×10.0	600	100	
極小	3.2×3.2	1,875	10	導入

表1 ロータリーコリメータの種類

平成 21 年度には表1に示すコリメータの種類で開放・大・中・小を利用可能とし た。この時点では、コリメータ比(L/D)は 600 が最大で、これはビームが 600mm 進 むと 1mm 広がることを意味する。原子炉も含めた既存の中性子イメージング実験装置 の中で L/D=600 は比較的高い値であり、BL10 では高い解像度によるイメージング実 験が可能となったことを意味する。平成 22 年度はさらに高い L/D を目指し、コリメ ータ "中"を廃止し、コリメータ "極小"を導入することによって、L/D を最大 1,875 まで選択可能とした。図5 はコリメータ寸法変化時の、検出器(イメージングプレー ト IP)から 100mm 上流に設置した被写体(腕時計)の透過画像である。コリメータ "極小"は"小"と比べ、格段に解像度が向上していることが分かる。L/D=1,875 で はビームが 100mm 進むと約 50 µ m 広がるが、これは概ね検出器(IP)の読み取りピッ チに相当し、この高空間分解能によって初めて時計の微細ねじ山(thread)の構造が 可視化可能となった。一般に、L/D を高くすると S/N 比が悪化して画像のコントラス トが低下する傾向があるが、コリメータ材料と寸法の適切な選択により、コリメータ "極小"画像のコントラストを"小"画像と比べて遜色ない程度に保つことができ た。



開放 (L/D=140)

小 (L/D=600)

極小(L/D=1,875)



拡大画像 小 (L/D=600)

極小 (L/D=1,875)

図5 ロータリーコリメータ開放 (L/D=140)、小 (L/D=600)、極小 (L/D=1,875) 時 の腕時計の透過画像の比較. 試料 (腕時計) - 検出器間距離は 100mm.

b) カメラシステム用光学系の整備とインジケーターの撮影

パルス中性子を用いたイメージング実験において、中性子の透過像を高空間分解能 で撮影するための計測系として、高画素数の撮像素子を有するビデオカメラを用いた システムは非常に有効である。しかしながら、従来のカメラシステムでは撮影できる 視野範囲が固定であったため、観察対象物の大きさを変える際にはレンズ交換とそれ に伴う焦点合わせが必要であり、実験を行う上での効率に大きな問題があった。そこ で、中間レンズを利用した専用の光学系によって焦点合わせが不要となる撮影システムを構築し、任意の視野範囲で撮影できるシステムを構築した。この撮影システムの性能を評価するため、図6に示す分解能評価用インジケーター(Sensitivity Indicator, SI)の透過中性子像を、同システムを用いて撮影した。得られた結果を図7に示す。撮影条件は、1秒当たりの撮影枚数1000 frame/sec、画素当たりのサイズは80 μ mである。1中性子パルス当たりの露光時間は1 msecとなるが、この画像を1119パルス分積算した後、中性子透過率に換算した結果である。各画像から中性子のエネルギー毎における透過率が判り、また空間分解能としても100 μ m程度あることが確認できた。



図 6 分解能評価用インジケーター (Sensitivity Indicator, SI) 寸法単位:mm.



図7 SIインジケータの撮影結果

c) 偏極中性子を利用した空間磁場イメージング

平成22年度は、新しいパルス中性子イメージング試験の一環として、パルス中性 子の偏極度解析を用いた定量的な磁場イメージング法の原理実証試験を行った。この 手法は、中性子スピンが磁場環境の下でラーモア歳差運動をすることを利用して物質 内部や空間中の磁場を検出するものであり、位置情報と共に中性子のスピン状態の変 化を偏極度の変化として調べることで、磁場強度の空間分布を可視化する。

実験は、J-PARC の BL10 において実施し、観測対象としては内径 5mm のソレノイド コイルを選択して、その内部に発生した磁場の可視化を行った。その結果、コイル位 置での偏極度の変化が観測され、磁場強度の空間分布を画像として得られることが示 された(図8)。さらに、パルス中性子の飛行時間分析法を利用して、試料透過後の 偏極度変化量の中性子波長依存性を取得し、偏極度が波長に対して振動する振舞いを 得た(図9)。この結果を解析することにより、コイル内部の磁場強度が印加電流値 1A の時に 2.2mT と見積もられ、コイルの設計値とよく一致した。また、磁場方向を 評価した結果、ソレノイドコイル内部の磁場は中性子スピンの量子化軸から 47.1° 傾いていることがわかった。このように、偏極パルス中性子を活用することによって、 磁場の空間分布を可視化できるだけでなく、磁場強度の定量化が可能にあることを実 験的に示すことに成功した。





図8 ソレノイドコイルの磁気イメージング結果(左)と使用したソレノイドコイル (右)



②プロジェクトの総合的推進

プロジェクト全体の密な連携と円滑な運営、及びプロジェクト全体の進捗状況を 確認しつつ計画の合理化を図るため、全参画機関による全体運営会議を開催した。 また、偏極中性子の利用技術に関する議論および情報収集と発信を目的として、国 際ワークショップ"Workshop on Novel Material Science using Polarized Neutron" を東北大学と共催した。その他、偏極中性子国際会議(PNCMI2010)および³He 偏 極子国際ワークショップ"Workshop Modern Trends in Production and Application of Polarized ³He"に出席し、中性子光学技術に関する国際的情報収集及び発信を 行った。

3 成果の外部への発表

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
3He中性子スピンフィルターのガラスセルの 研究(会議等における論文発表)	坂口佳史、他	Polarized Neutron in Condensed Matter Investigations 2010	2010年7月	国外
中性子小角散乱装置SANS-J-IIにおける3He 中性子スピンフィルターの応用(ロ頭発 表)	坂口佳史、他	Julich Centre for Neutron Science(JCNS) Workshop Modern Trends in Production and Application of Polarized 3He	2010年7月	国外
3He中性子スピンフィルターのガラスセルの 構造(ロ頭発表)	坂口佳史、他	Julich Centre for Neutron Science(JCNS) Workshop Modern Trends in Production and Application of Polarized 3He	2010年7月	国外
Yをドープした双極子スピンアイス Ho2_xYxTi207における新奇な磁気相関(会 議等における論文発表)	チャン・リージャン、他	8th International Workshop on Polarised Neutrions in Condensed Matter Investigations(PNCMI2010)	2010年7月	国外
偏極中性子用3He核偏極スピンフィルターの 日台共同開発プロジェクト(ロ頭発表)	チャン・リージャン、他	Julich Centre for Neutron Science(JCNS) Workshop Modern Trends in Production and Application of Polarized 3He	2010年7月	国外
中性子小角散乱装置SANS-J-IIIにおける偏極 3He中性子スピンフィルターを用いた偏極中 性子散乱実験(口頭発表)	坂口佳史、他	日本物理学会2010年秋季大会(物性)	2010年9月	国内
偏極3He中性子スピンフィルターのガラスセ ルの開発II(ロ頭発表)	坂口佳史、他	日本物理学会2011年秋季大会(物性)	2010年9月	国内
偏極3He中性子スピンフィルターのガラスセ ルの開発状況(口頭発表)	坂口佳史、他	日本中性子科学学会第10回年会	2010年12月	国内
中性子小角散乱装置SANS-J-IIにおける3He 中性子スピンフィルターを用いた偏極解析 (ロ頭発表)	坂口佳史、他	日本中性子科学学会第11回年会	2010年12月	国内
日本におけるOn Beam方式3He中性子スピン フィルターの開発と試験	吉良弘、他	Polarized Neutron in Condensed Matter Investigations 2010	2010年7月	国外
日本におけるIn-situ方式3He中性子スピン フィルターの開発	吉良弘、他	Julich Center for Neutron Science (JCNS) Workshop Modern Trends in Production and Application of Polarized 3He	2010年7月	国外
On Beam SEOP方式偏極3He中性子スピンフィ ルターの開発(ロ頭発表)	吉良弘、他	日本物理学会2010年秋季大会(物性)	2010年9月	国内
オンビーム Spin-exchange optical pumping型3He偏極フィルターシステムの開 発(口頭発表)	吉良弘、他	日本中性子科学会第10回年会	2010年12月	国内

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
Research on glass cells for 3He neutron spin filters	Yoshifumi Sakaguchi, etc.	Physica B		国外
Observations of the novel magnetic correlations in the Y doping dipolar spin ice Ho2_xYxTi2O7	Chang Lieh Jeng, etc.	Physica B	2010年12月	国外
Development and test of SEOP neutron spin filter in Japan	Hiroshi Kira, etc.	Physica B	2010年12月	国外

2.4 活動(運営委員会等の活動等)

平成22年度、以下の活動を行った。

(会議名、開催場所、時期)

- 1) 第四回プロジェクト運営会議、システム計算科学センター(上野)、平成22年4月15日
- 2) 国際ワークショップ"Workshop on Novel Material Science using Polarized Neutron" (共

催)、東北大学金属材料研究所、平成23年1月6日~8日

3) 第五回プロジェクト運営会議、JAEA 東京事務所(東京)、平成23年1月24日

2.5 実施体制

平成22年度の実施体制を別表1に示す。

業務項目	担当機関等	研究担当者
① 中性子偏極・集光・イメージングシステムの開発と応用	量子ビーム応用研究部門	◎○加倉井和久
に関する研究	量子ビーム応用研究部門 量子ビーム	武田 全康
	多重自由度相関研究グループ	
	同上	長壁 豊隆
	同上	脇本 秀一
	同上	遠藤 康夫
	同上	坂口 佳史
	同上	Lieh-Jeng Chang
	量子ビーム応用研究部門 中性子イメ	松林 政仁
	ージング・分析研究グループ	
	同上	酒井 卓郎
	同上	安田 良
	同上	飯倉 寛
	J-PARC センター 物質・生命科学ディ	新井 正敏
	ビジョン	
	J-PARC センター 物質・生命科学ディ	相澤 一也
	ビジョン 中性子利用セクション	
	同上	鈴木 淳市
	同上	奥 隆之
	同上	高田 慎一
	同上	篠原 武尚
	同上	吉良 弘
	J-PARC センター 物質・生命科学ディ	曽山 和彦
	ビジョン 基盤セクション	
	同上	山崎 大
	同上	丸山 龍治
	同上	林田 洋寿
	J-PARC センター 物質・生命科学ディ	前川 藤夫
	ビジョン 中性子源セクション	
	同上	酒井 健二
	同上	及川 健一
	同上	原田 正英
	同上	甲斐 哲也
	同上	大井 元貴
	原子力基礎工学研究部門 原子力セ	呉田 昌俊
	ンシング研究ブループ	
	同上	瀬川 真理子
② プロジェクトの総合的推進	量子ビーム応用研究部門	◎○加倉井和久

別表1 平成22年度に於ける実施体制