

成果報告書

「中性子ビーム利用高度化技術の開発」

平成22年5月

独立行政法人 日本原子力研究開発機構

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 21 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マイ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. 平成21年度（報告年度）の実施内容

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。そのため、JRR-3及びJ-PARCにおける中性子ビーム実験試験システムの整備を昨年度に引き続き行うとともに、 ^3He 偏極フィルターの偏極性能評価、磁気集光光学システムプロトタイプ構築及び偏極・集光性能評価、湾曲集光ミラーの製作及び集光性能評価とそれらの成果の開発へのフィードバックを行う。また、種々のイメージング検出器の評価試験をJ-PARCで行い、パルス中性子イメージングに有望な検出器の選定を目指すとともに、ブラッグエッジイメージング及び共鳴吸収イメージング試験を行い、パルス中性子イメージング法の開発を進める。

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21年度は、JRR-3の中性子ビームラインに、 ^3He 偏極フィルター実験に必要なレーザー使用環境として暗室の整備を行った。そして、この環境を用いて、JRR-3の中性子ビームライン上にレーザーを用いた ^3He 核スピンの偏極システムを構築した（図1）。このシステムでは、 ^3He ガスにレーザーを照射し ^3He 原子の核スピンを偏極しながら、 ^3He ガスに中性子ビームを通して、中性子を偏極させることができる。よって、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。このシステムを用いて ^3He ガスの偏極実験を

行った結果、 $P_{3\text{He}} > 70\%$ という世界最高レベルの ^3He 核スピンの偏極度を達成し、実用レベルの中性子偏極性能を確認することができた（図2）。

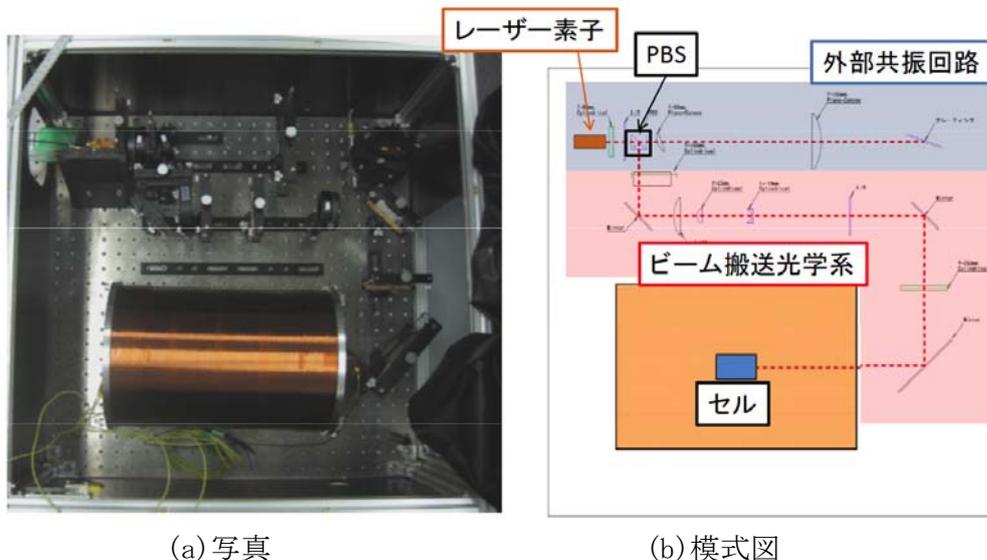


図1 ^3He 核スピン偏極システム

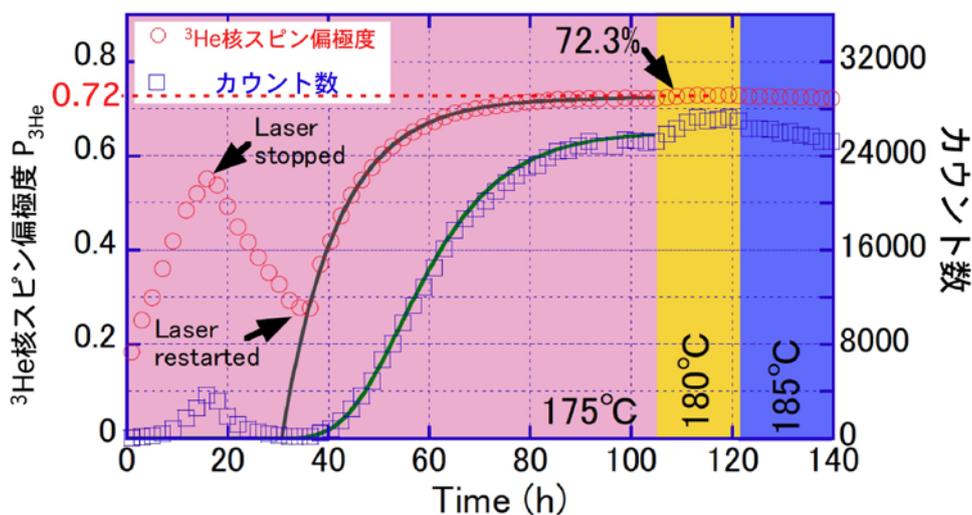


図2 レーザー照射開始からの透過中性子数と ^3He 核スピン偏極度の時間変化

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21年度には、数値制御ローカルウェットエッチング法により楕円形状を創成した長さ100mmの石英基板表面に $m=4$ のNiC/Tiスーパーミラーを成膜することで、焦点間距離 2100 mmの集光ミラーを開発した。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 0.25mm、ゲイン6倍を達成した。また、波長 3.5\AA 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（図3）。

平成21年度には、さらに大型集光ミラー開発として、数値制御加工により楕円面を創成したアルミ製基材に薄板ガラス基板上に成膜した $m=4$ の NiC/Tiスーパーミラーを押付け・貼付けることにより、長さ 400mm の集光ミラーを開発した。この集光特性試験は平成22年度に予定されている。

また、磁気集光素子の開発においては、平成20年度に構築した六極磁石に基づくパルス中性子集光用磁気複合光学系評価システムのパルス中性子集光特性をJRR-3において冷中性子ビームを用いて評価した。集光光学系を透過した中性子ビームの中性子検出器面上のビームサイズの波長依存性を図4に示す。その結果、波長幅約0.2nmのパルス中性子の集光に成功した。

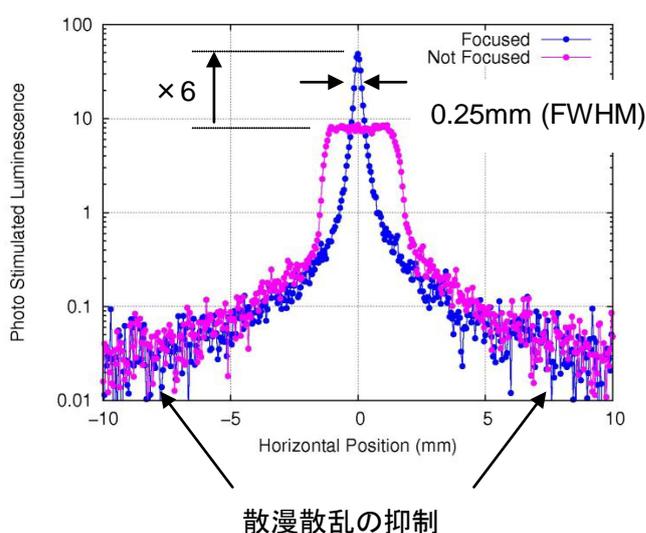


図3 検出器面上のビームプロファイル。集光あり/なし。

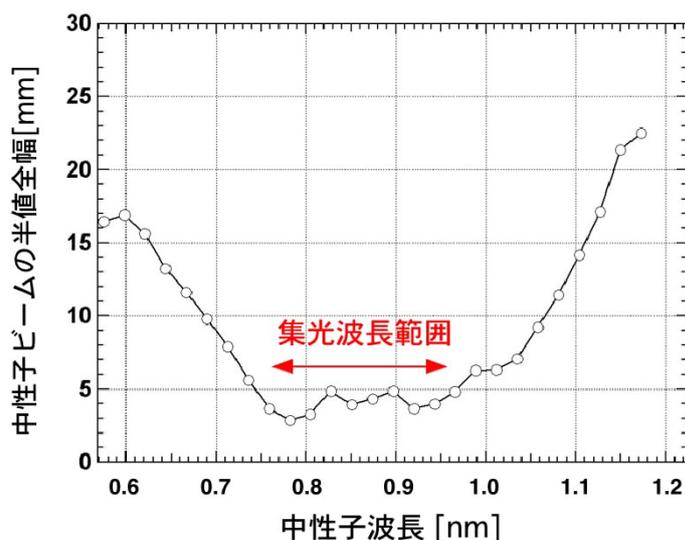


図4 検出器面上における中性子ビームサイズと波長の関係

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の整備完成と性能実証

J-PARC の中性子実験装置の 1 つである特性試験装置 (BL10) では、イメージング実験に適した比較的平行度の良い大面積の中性子ビームを利用できる。しかしながら、より平行度の高いビームを用いて、高解像度 (例えば 0.1mm 以下)、高コントラストの質の高い画像を得るためには、中性子ビームラインに高いエネルギーの中性子や γ 線を遮蔽整形できるコリメータが必要である。そこで特性試験装置ビームラインの出来るだけ上流に、実験目的によりコリメーション寸法を遠隔で変更することができるロータリーコリメータを導入することとし、平成 20 年度にその本体を製作した。平成 21 年度には制御系を製作、J-PARC に据付け、完成させた (図 5)。

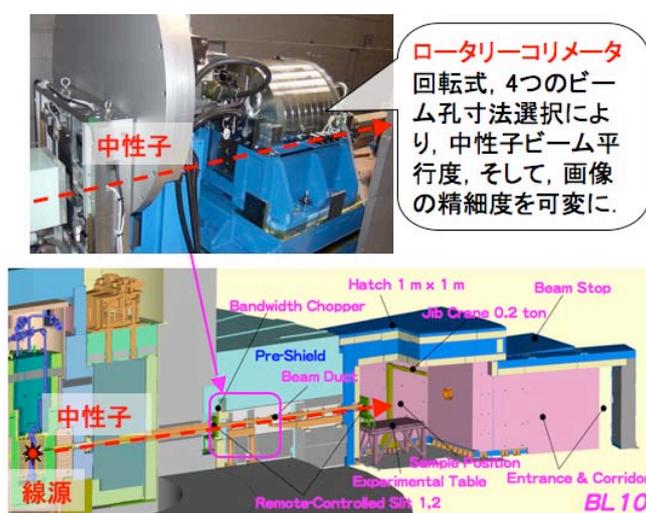


図 5 特性試験装置全体図とロータリーコリメータ本体写真.

中性子ビームコリメーションによる中性子透過画像の解像度向上確認を目的とし、中性子吸収材であるガドリニウムに様々なスリット状の孔を設けた試料を用い、コリメーション条件を変えながら中性子透過画像の撮影を行った。結果を図 6 に示す。ロータリーコリメータにより中性子ビームを 10mm 角に絞ったときの画像 (図 6 右) は、コリメータで絞らないときの画像 (図 6 左) と比べて解像度が格段に高い。本ロータリーコリメータ導入により、J-PARC の中性子実験装置 (BL10) において、中性子イメージング実験環境を格段に向上させることができた。



図6 コリメータの有無による中性子透過画像解像度の比較.

b) 共鳴吸収イメージング

共鳴吸収実験で使用する様々な検出器の性能評価を目的とし、標準試料を作成した(図7)。今後、本試料を用いて性能評価を実施する。



図7 共鳴吸収イメージング実験用の検出器評価のための標準試料. 複数の厚さの金属箔 (In, Ta, Au, Cu, Cu/Mn 合金) が、アルミニウム製ホルダーに収められている。

共鳴吸収イメージングの適用可能性を探るため、様々な試料に対する中性子ビームの透過のしやすさを、パルス中性子発生後の時間の関数として調べた。エネルギーの高い中性子ほど高速で試料に早く到達するため、時間軸は中性子エネルギーに相当する。図8に2種のステンレス鋼 (SUS304 と SUS316) を試料とした場合の結果を示す。パルス中性子発生から 143μ 秒後はモリブデンの共鳴吸収エネルギーに相当するが、SUS304 では中性子がほぼ透過するのに対し、SUS316 では透過しにくい (図では深い凹みとして観測される)。このことから、 143μ 秒後の瞬間だけに限定した画像測定を行えば、2種のステンレス鋼を明確に区別できることが分かる。また 88μ 秒後では、ニッケルの不純物としてステンレス鋼に含まれるコバルトによって中性子の透過率が低下している。このことから、 88μ 秒後の瞬間だけに限定した画像測定を行えば、ステンレス鋼試料のコバルト不純物分布を画像データとして取得することができる。

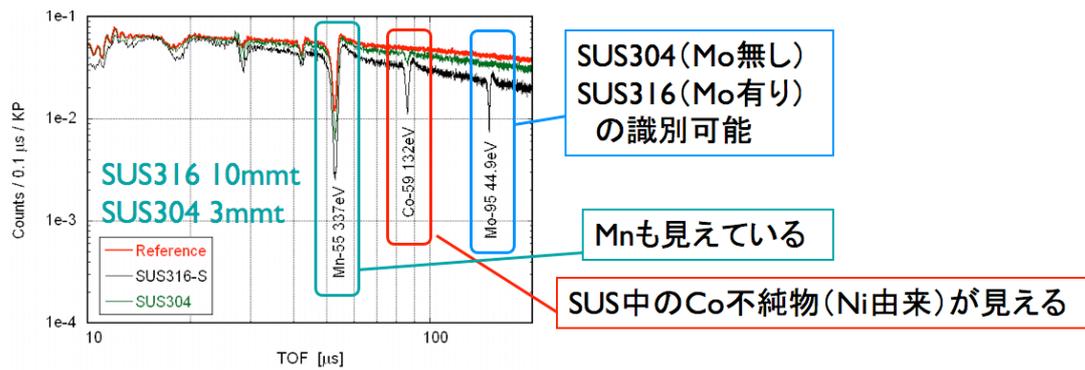


図8 コリメータの有無による中性子透過画像解像度の比較。

c) 光学系の整備と共鳴吸収データの取得

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、ビデオカメラを用いたシステムは非常に有効である。これは、検出部に半導体撮像素子を用いているため、ガス検出器に比べ、遙かに画素サイズを微細化できるためである。また、時間分解能に関しても、C-MOS 素子と大容量のメモリーを内蔵した高速度カメラを利用することで、100 万画素の解像度で7000 フレーム毎秒以上の撮影が可能である。しかしながらカメラシステムを活用するためには、中性子の透過像を可視光に変換し、カメラにまで導く光学系が必要である。そこで、専用の光学系と暗箱の設計・製作を行った。光学系に関しては、カメラ自身の照射損傷を防ぐため、中性子の透過像を2枚のミラーで中性子ビームの光軸から離れた位置に設置したカメラに導く。また、ミラーの間にレンズを設置することで光の伝達の効率を上げ、さらに焦点合わせを容易に調整出来るようにした。暗箱に関しては、光学レールを組み合わせることで、任意のカメラシステムに対応できるようになっている。今後、カメラシステムによるイメージング実験とその特性評価を実施する予定である。

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他、各サブテーマについての技術開発検討会を開いた。また、中性子輸送システムに関する国際ワークショップと中性子光学国際会議(NOP2010)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。

2. 3 成果の外部への発表

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
Pulse neutron imaging experiments in the first year of J - PARC（口頭）	甲斐哲也、他	2nd Workshop on Neutron Wavelength Dependent Imaging (NEUWAVE- 2), UK	2009年6月	国外
NOBORUでの共鳴吸収を利用した材料識別イメージング基礎実験（ポスター）	前川藤夫、他	日本中性子科学会 年会 東海村	2009年12月	国内
NOBORUでの中性子イメージング ～Bragg edgeを利用した水・氷の識別試験～（ポスター）	及川健一、他	日本中性子科学会 年会 東海村	2009年12月	国内
パルス中性子によるイメージング技術開発（1）全体概要（口頭）	前川藤夫、他	日本原子力学会 春の年会 水戸	2010年3月	国内
パルス中性子によるイメージング技術開発（2）検出器の選定と場の評価（口頭）	原田正英、他	日本原子力学会 春の年会 水戸	2010年3月	国内
Imaging experiments on NOBORU at MLF（口頭）	原田正英、他	19h International Collaboration on Advanced Neutron Sources (ICANS XIX), Grindelwald, Switzerland	2010年3月	国外
高精度楕円面上スーパーミラーによる白色中性子集光（口頭発表）	山崎 大、他	日本物理学会秋季大会 熊本大学	2009年9月	国内
Spin selective neutron transmission and shaping by using multiplet magnetic lenses（ポスター）	奥隆之、他	International Workshop on Neutron Optics NOP2010, France	2010年3月	国外

偏極 3He 中性子スピ ンフィルターの開発 その2 (ポスター)	吉良弘、他	日本物理学会 2009 年 秋季大会 熊本大学	2009 年 9 月	国内
偏極 3He スピ ンフィルターの開発とその現状 2 (ポスター)	吉良弘、他	日本中性子科学会 年会 東海村	2009 年 12 月	国内
偏極 3He 中性子スピ ンフィルターの 3He ガス偏極 度評価手段の開発 (口頭)	吉良弘、他	日本物理学会第 65 回 年次大会 岡山大学	2010 年 3 月	国内
Improvements and Polarization Tests of 3He Neutron Spin Filter Based on Spin Exchange Optical Pumping in Japan (ポスター)	吉良弘、他	19h International Collaboration on Advanced Neutron Sources (ICANS XIX), Grindelwald, Switzerland	2010 年 3 月	国外
Improvements and Polarization Tests of On Beam SEOP Neutron Spin Filter In J-PARC. (ポ スター)	吉良弘、他	International Workshop on Neutron Optics NOP2010, France	2010 年 3 月	国外
J-PARC における偏極 3He 中性子スピ ンフィルターの 開発 3 (ポスター)	坂口佳史、 他	MLF シンポジウム 東 海村	2010 年 3 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 (口頭)	坂口佳史、 他	日本物理学会第 65 回 年次大会 岡山大学	2010 年 3 月	国内
Characterization of Glasses for 3He Neutron Spin Filter Cells (ポ スター)	坂口佳史、 他	International Workshop on Neutron Optics NOP2010, France	2010 年 3 月	国外
3He Neutron Spin Filter Project in Japan (ポ スター)	坂口佳史、 他	19h International Collaboration on Advanced Neutron Sources (ICANS XIX), Grindelwald, Switzerland	2010 年 3 月	国外
偏極 3He 中性子スピ ンフィルターの開発とその現 状 3 (ポスター)	坂口佳史、 他	日本中性子科学会 年会 東海村	2009 年 12 月	国内

偏極 3He 中性子スピンプ ィルターの開発 その3	坂口佳史、 他	日本物理学会 2009 年 秋季大会 熊本大学	2009 年 9 月	国内
-------------------------------	------------	----------------------------	------------	----

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
Neutron beam focusing using large-m supermirrors coated on precisely-gured aspheric surfaces	D. Yamazaki, R. Maruyama, K. Soyama, H. Takai, M. Nagano, K. Yamamura	J. Phys. : Conf. Series	2009.11.26 掲載決定済 (未出版)	国外

2. 4 活動（運営委員会等の活動等）

1) 第三回プロジェクト運営会議、JAEA 東京事務所（東京都千代田区）、平成 21 年 11 月 6 日

2. 5 実施体制

別表 1 の通り。

別表1 平成21年度に於ける実施体制

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に関する研究	量子ビーム応用研究部門	◎○加倉井 和久
	量子ビーム応用研究部門 量子ビー	武田 全康
	ム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	松林 政仁
	メージング・分析研究グループ	
	同上	酒井 卓郎
	同上	安田 良
	同上	飯倉 寛
	同上	林田 洋寿
	J-PARC センター 物質・生命科学ディ	新井 正敏
	ビジョン	相澤 一也
	J-PARC センター 物質・生命科学ディ	
	ビジョン 中性子利用セクション	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	
同上	曾山 和彦	
J-PARC センター 物質・生命科学ディ		
ビジョン 中性子基盤セクション	山崎 大	
同上	丸山 龍治	
同上	前川 藤夫	
J-PARC センター 物質・生命科学ディ		
ビジョン 中性子源セクション	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	
同上		
② プロジェクトの総合的推進	量子ビーム応用研究部門 副部門長	◎○加倉井 和久