

平成22年度科学技術試験研究委託事業

成果報告書

「中性子ビーム利用高度化技術の開発」
(中性子偏極・光学技術の開発に関する研究)

平成23年5月
大学共同利用機関法人
高エネルギー加速器研究機構

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、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究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」（中性子偏極・光学技術の開発に関する研究）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は共同で業務を行う。

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構では、中性子偏極・光学技術の開発に関する研究を実施する。ここでは、ビームのスピン自由度の制御技術を実用レベルで普及することにより、中性子ビーム利用効率の向上を実現するとともに、新たな計測手法の開拓に資する。

2. 平成22年度（報告年度）の実施内容

2. 1 実施計画

① 中性子偏極・光学技術の開発に関する研究

^3He 偏極フィルターの高度化を進めるため、高強度レーザー光学系を整備し、その最適化方法の研究を行う。また、偏極率測定システムおよび一様磁場試験システムを試作し、偏極緩和時間の測定及び最適化を検討する。

2. 2 実施内容（成果）

本年度は、中性子偏極用の核偏極ヘリウム3フィルターの高度化を目指したオンビーム方式小型 ^3He 偏極装置の実現とその最適化を中心に、高周波電磁場のシミュレーション計算方法の構築、新方式NMRシステムの開発、ルビジウム偏極率測定法の研究を行った。また、ヘリウム3偏極フィルターを用いた中性子散乱実験や中性子散乱実験の最適化検討を進めた。

オンビーム方式小型 ^3He 偏極装置の開発では、従来は不可能と考えられていた金属製オープンを用いたAFP-NMR（早い断熱通過型の核磁気共鳴）装置を実現することに成功した。これは、AFP-NMRで使用する高周波磁場は金属と干渉するため、金属製のオープン内ではAFP-NMRに必要な一様高周波磁場を実現するのが非常に困難であったが、FDTD（finite-difference time-domain）法と呼ばれるコンピュータ・シミュレーション計算を用い詳細な高周波磁場解析を行った結果、AFP-NMR装置の実現に至ったものである。

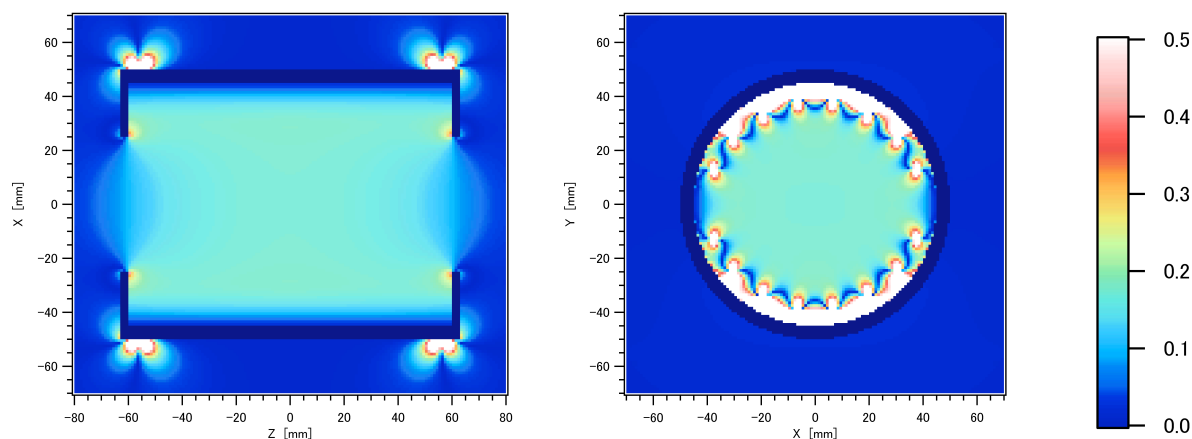


図1 NMR高周波磁場のシミュレーション計算。容器中心付近での高周波磁場の一様性は5%以内に収まっている。右のスケールは、高周波磁場の磁束密度をガウスであらわしたものの。

図1は、FDTD法で計算した円筒形オーブン内の高周波磁場強度分布を2次元断面で表示したもので（左図は円筒軸の垂直断面、右図は円筒軸に沿った断面）、いずれもオーブン中心付近ではほぼ一様な強さの高周波磁場が実現されているのが分かる。

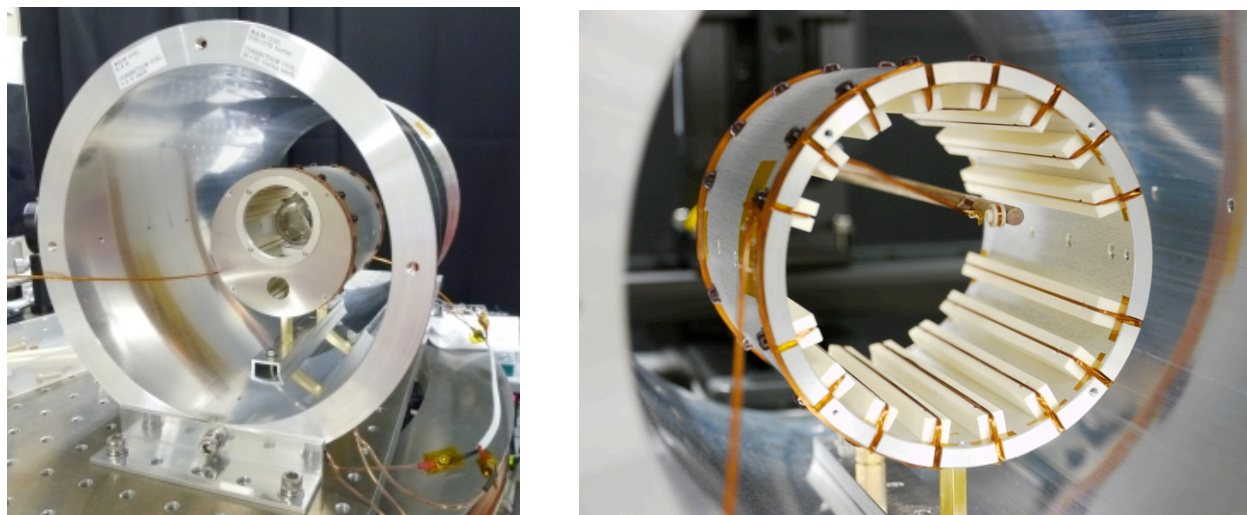


写真1 試作した ^3He 偏極率測定システム（左）と3次元高周波磁場測定システム（右）。右の写真では、センサー・プローブとして直径5ミリのサーチ・コイルを用い、NMRの高周波磁場を計測した。

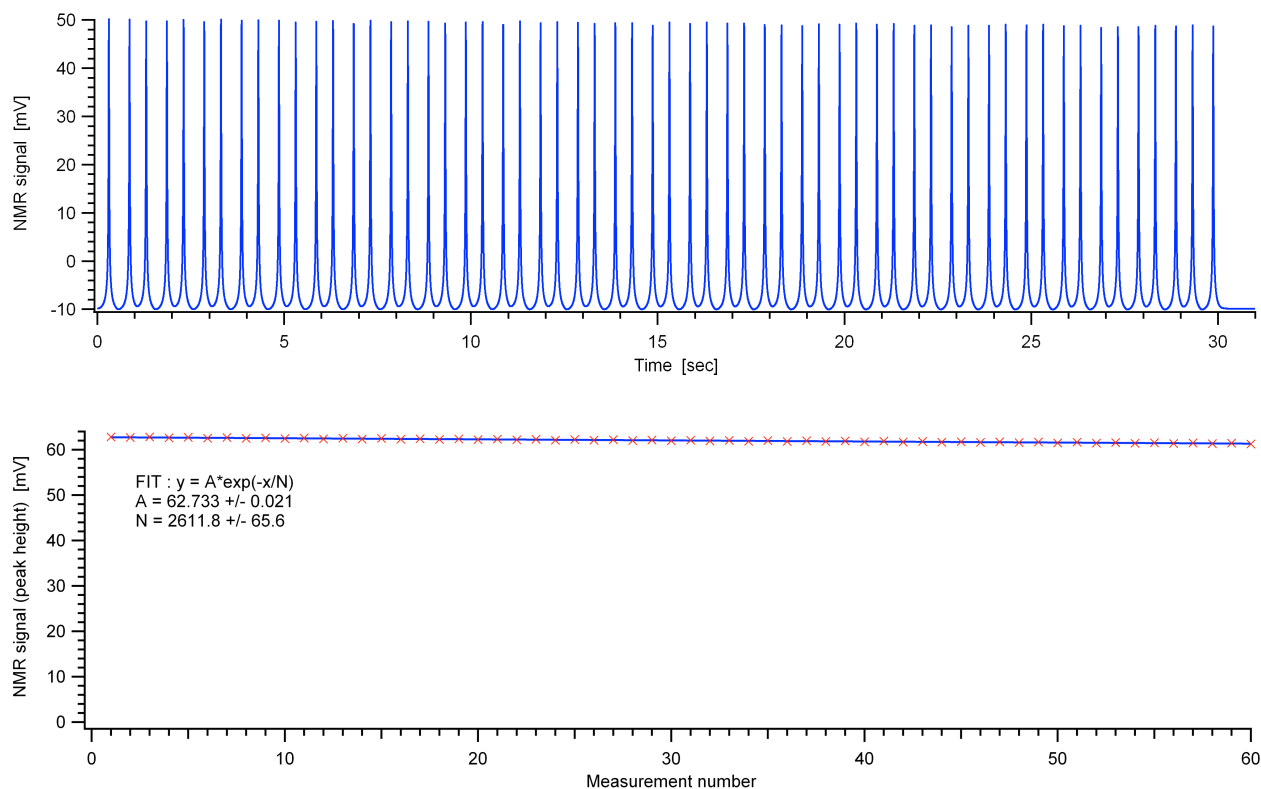


図2 60回連続してNMR測定を行い、NMR測定による偏極緩和を調べた。上の図は、NMR測定による、 ^3He 偏極のピーク（60本）で、下の図はピーク高を測定回数に対してプロットしたもの。測定の結果から、一回あたりの偏極緩和はわずか 3.8×10^{-4} であることが得られた。

これら詳細な磁場設計により偏極緩和時間の最適化を図り試作したオンビーム方式の小型 ^3He NMR装置を写真1に示した。NMRにより偏極緩和の測定を行ったところ、NMR測定による偏極緩和は十分に小さいことが確認できた(図2)。また、これを用いビームラインで ^3He 偏極実験を行うため、二枚レンズにより収差を抑えた新しい高強度レーザー光学系を開発(図3)、設置して、2011年1月にJ-PARC中性子実験施設で中性子ビーム・テストを行い、中性子ビームを用いた測定でも設計通りの性能が確認された。

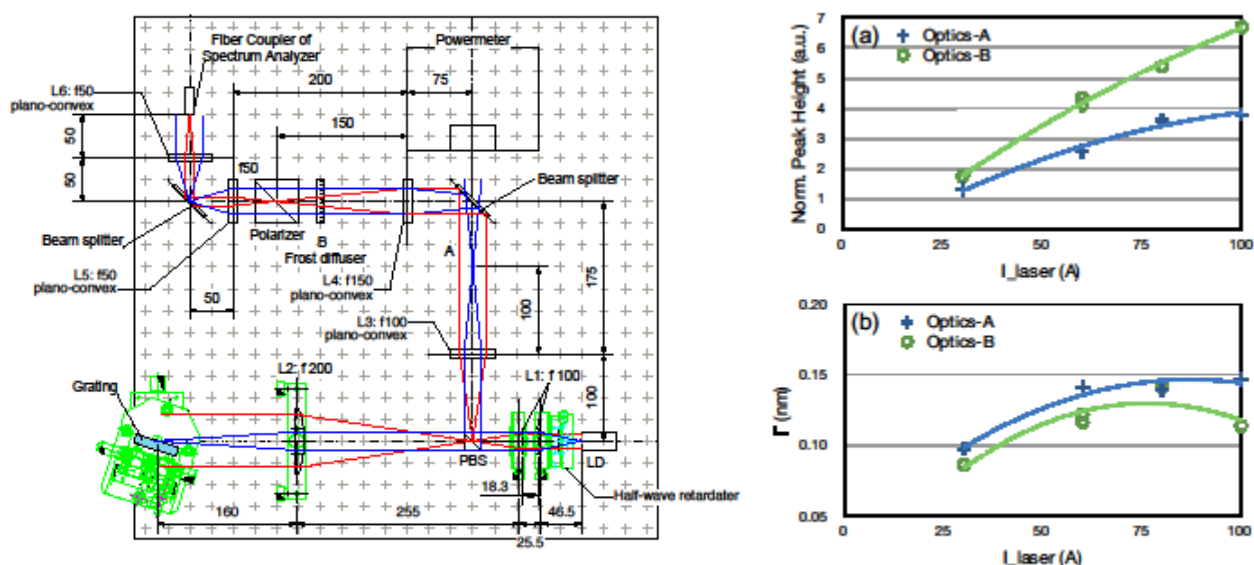


図3 高強度レーザー光学系の光学設計図(左)とこれによる光学性能(右)。狭帯域化外部共振器にダブル・レンズを使用し、レンズ収差を抑えた高効率レーザー・システムを実現した。右の図で、上はピーク・レーザーパワー、下はレーザー・プロファイルを半導体レーザーに流す電流値に対してプロットしたものである。“Optics-A”は従来型のシングル・レンズ光学系、“Optics-B”が新しく開発したダブル・レンズ光学系で、いずれの様子からもダブル・レンズ光学系で優れた特性が得られていることが明らかである。

ヘリウム3偏極フィルターは、透過中性子ビームの偏極率(または散乱中性子の偏極解析能)と透過率に排他的性能を持つ(図4)。中性子透過率を犠牲にすれば透過中性子の偏極率を高めることができ、逆に透過中性子の偏極率を犠牲にすれば透過中性子強度を大きくすることができる。これにより中性子偏極率と透過率の取り合いに自由度が生じるが、一般的な中性子散乱実験では最適な取り合いがあるはずで、これについての定量的な検討が可能である。本年度の段階では、実際の中性子散乱実験を単純なモデルで一般化し、測定物理量の統計精度が中性子偏極率あるいは透過率の変化に対してどのように変わるかを解析計算により求める手法で最適化の検討を開始した。図5に、単純なモデルによる干渉性散乱と非干渉性散乱の弁別に対する新たな指標を求めた結果を示す。図に見る例のように、従来の指標figure of meritと中性子散乱実験での指標(偏極効率)は一致せず、新たな指標を検討することはスピフィルター利用実験の効率化において重要となってくる。この最適化の検討については、翌年度も研究を継続する予定である。

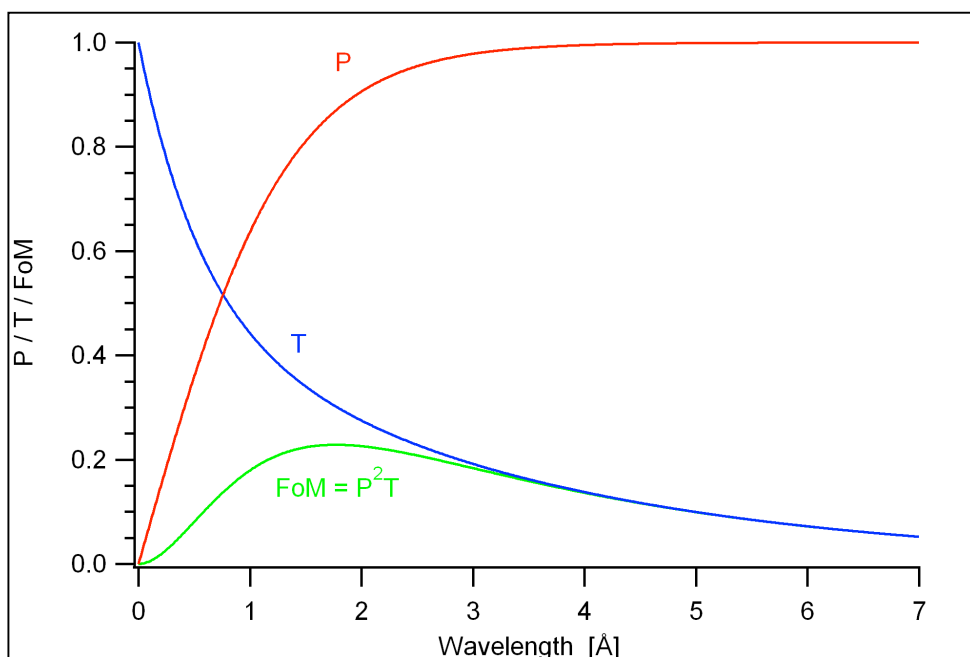


図4 3He偏極スピフィルターによる偏極中性子のトレードオフ。図でPは透過中性子の偏極率、Tは中性子透過率、FoMは偏極効率（figure of merit）である。図に見るように中性子透過率が高い場合、中性子偏極率は低く、その反対に、中性子の偏極率が高い時、透過率は下がってしまう。従来は、その偏極効率を、統計学的誤差論からfigure of meritであらわしていたが、一般の偏極中性子散乱の場合、このfigure of meritは適用できないことが明らかとなっている。

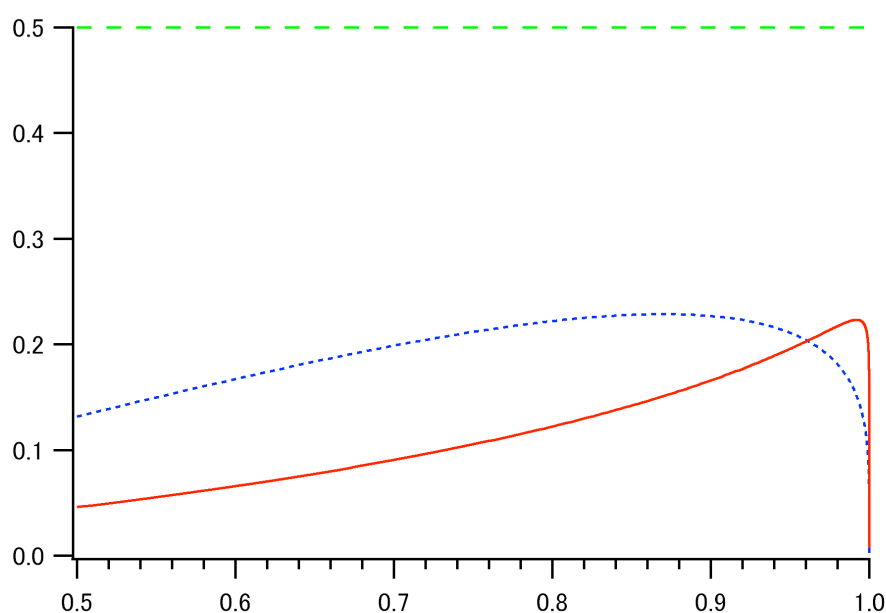


図5 スピフィルターに対して散乱実験まで含めた偏極効率の指標を、干渉性散乱と非干渉性散乱との弁別に対して計算した結果。縦軸が、指標figure of meritで、横軸は中性子偏極率。図の実線は、干渉性散乱と非干渉性散乱との弁別における指標で、点線は従来のfigure of merit。縦軸で0.5にある直線は理想的なスピフィルター（スピン平行な中性子に対する透過率が100%、反平行な中性子に対する透過率が0%）での指標。従来のfigure of meritは、中性子偏極率で約0.85付近で最大値を持つが、干渉性散乱と非干渉性散乱との弁別における指標では、0.99付近で指標が最大となっている。このように、一般的な偏極中性子散乱実験では、従来の指標figure of meritは意味をなさない。

2. 3 成果の外部への発表

別紙様式第21の通り。

2. 4 活動（運営委員会等の活動等）

なし。

2. 5 実施体制

別表1に記載

別表1 平成22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・光学技術の開発に関する研究	物質構造科学研究所 中性 子科学研究系 同上 同上 同上 同上 同上 同上 同上 同上 同上	◎清水 裕彦 猪野 隆 有本 靖 山田 悟史 瀬戸 秀紀 伊藤 晋一 大友 季哉 横尾 哲也 武藤 豪 佐藤 節夫

注1. ◎：課題代表者、○：サブテーマ代表者

注2. 本業務に携わっている方は、全て記入。

様式第 2 1

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」(中性子偏極・光学技術の開発に関する研究)

機 関 名： 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

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
Development of polarized Helium-3 neutron-spin-filter based on spin-exchange optical pumping in Japan、ポスター	有本靖、猪野隆、清水裕彦、他	The 8th international workshop on Polarised Neutrons in Condensed Matter Investigations, Delft, the Netherlands	2010 年 7 月 5-8 日	国外
Measurement of the neutron beam polarization for the BL05/NOP beamline at MLF/JPARC、ポスター	猪野隆、有本靖、清水裕彦、他	The 8th international workshop on Polarised Neutrons in Condensed Matter Investigations, Delft, the Netherlands	2010 年 7 月 5-8 日	国外
Development of External Cavity Optics for Optical Pumping Diode Laser、口頭	有本靖、猪野隆、清水裕彦、他	JCNS Workshop on Modern Trends in Production and Applications of Polarized 3He, Ismaning, Germany	2010 年 7 月 11-13 日	国外
偏極 3He 中性子スピンフィルターの開発、口頭	有本靖、猪野隆、清水裕彦、他	日本物理学会、阪府大	2010 年 9 月 24 日	国内
J-PARC/MLF/BL05 の偏極中性子ビーム 3He 偏極フィルターによる中性子ビーム偏極率の測定、口頭	猪野隆、有本靖、清水裕彦、他	日本物理学会、阪府大	2010 年 9 月 24 日	国内
3He 中性子スピンフィルターによる偏極中性子散乱実験の最適化を考える	猪野隆、有本靖、清水裕彦、他	日本物理学会、新潟大	2010 年 3 月 25 日	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
External cavity design of high-power diode laser for polarized helium-3 neutron spin filters based on spin-exchange optical pumping	有本靖、猪野隆、清水裕彦、他	Physica B, in press doi:10.1016/j.physb.2010.11.089	2010 年 12 月	国外
Measurement of the neutron beam polarization of BL05/NOP beamline at J-PARC	猪野隆、有本靖、清水裕彦、他	Physica B, in press doi:10.1016/j.physb.2011.01.009	2011 年 1 月	国外
A Plan for Neutron Radiography Facility using a Compact Accelerator at RIKEN	Jungmyoung Ju, Kenji Mishima, Yutaka Yamagata, Hideyuki Sunaga, Katsuya Hirota, Yasuhisa Iwashita, Hirohiko M. Shimizu, Yoshiaki Kiyonagi, Akitake Makinouchi	Proceedings of the 19th meeting on the International Collaboration on Advanced Neutron Sources	2010 年	国外
Satellite Pulsed Tiny Neutron Source at Kyoto University, Sakyo	Y. Iwashita, T. Nagae, T. Tanimori, H. Fujioka and H. M. Shimizu	Nuclear Instruments and Methods for Physics Researches	2011 年 6 月 1 日	国外
Development of polarized Helium-3 neutron-spin-filter based on spin-exchange optical pumping in Japan	有本靖、猪野隆、清水裕彦、他	Proceedings of the 19th meeting on the International Collaboration on Advanced Neutron Sources	2010 年	国外