

平成20年度科学技術試験研究委託事業  
「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)

## 委託業務成果報告書

平成21年5月  
国立大学法人東北大学

本報告書は、文部科学省の平成20年度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20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

## 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20年度（報告年度）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

$^3\text{He}$ 偏極フィルターを利用する偏極中性子散乱実験では、中性子ビーム集光により試料位置でのビームの輝度を十分に高めるとともに、ガイド磁場により偏極中性子を効率良く輸送することが重要である。そのため、JRR-3における集光型モノクロメーターと高エネルギー用モノクロメーター及びガイド磁場コイルの整備とその性能評価に着手する。

また、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 $^3\text{He}$ 偏極フィルター用特殊ガラスセルの高品質化が重要である。そこで、その高品質化を目指して $^3\text{He}$ 偏極フィルター用特殊ガラスセルの作成に着手する。

そして、これらの整備を利用して、JRR-3での単色定常中性子ビームを用いた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。

### 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

$^3\text{He}$ 偏極フィルターを利用する偏極中性子散乱実験では、中性子ビーム集光により試料位置でのビームの輝度を十分に高めることが重要である。そのため、JRR-3における集光型モノクロメーターと高エネルギー用モノクロメーター及びガイド磁場コイルの整備とその性能評価に着手し、(1)Geモノクロ結晶調整、(2)Cuモノクロ結晶製作と評

価、(3)Si湾曲アナライザー結晶評価を行った。

(1)Geモノクロ結晶調整には高温高压下での熱処理工程が必要で、高性能モノクロメータとしての反射率及びビーム発散角を出せるよう熱処理の最適条件を探った(図1)。結果、再現性良く、高反射率・適度なビーム発散角を示すGeモノクロ結晶を得ることに成功した(図2)。

(2)東北大学金属材料研究所が長年培ってきた高品質単結晶育成技術を基に、Cuモノクロ用大型単結晶を育成した(図3)。更に、結晶面に沿った切り出し(図4)、低温高压下でのモザイク導入、中性子ビームによる評価を行い、Cuモノクロ製作の準備をほぼ完了した。

(3)これまで東北大学金属材料研究所で独自に製作を進めてきたSi湾曲結晶が中性子アナライザーとして利用可能かどうか、反射率とモザイク幅の観点から評価を行った。結果、中性子アナライザーとして十分な性能があることを確認した。

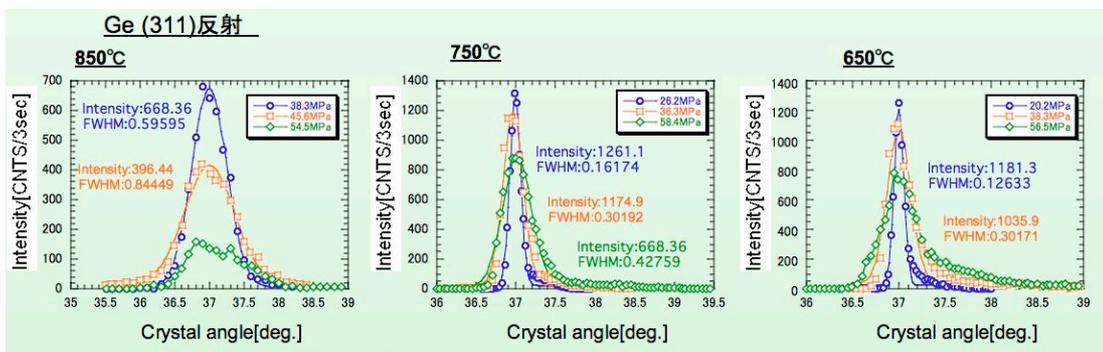


図1. Ge(311)反射ロックカーブの圧力-温度依存性.

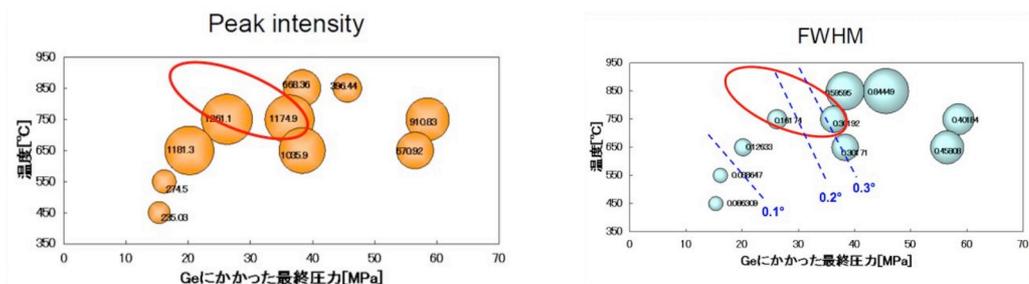


図2. Ge(311)反射強度と半値全幅の温度-圧力依存性.

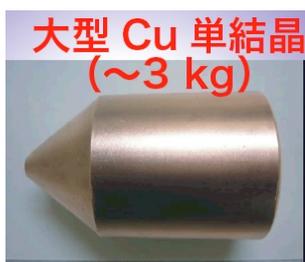


図3. 金研で育成した大型 Cu 単結晶.

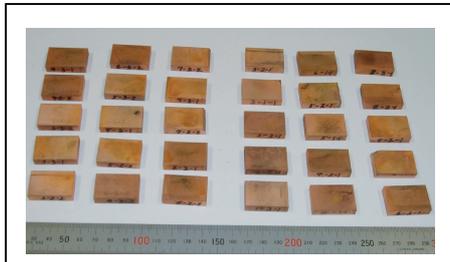


図4. 結晶面に沿って切り出した Cu 単結晶モノクロピース.

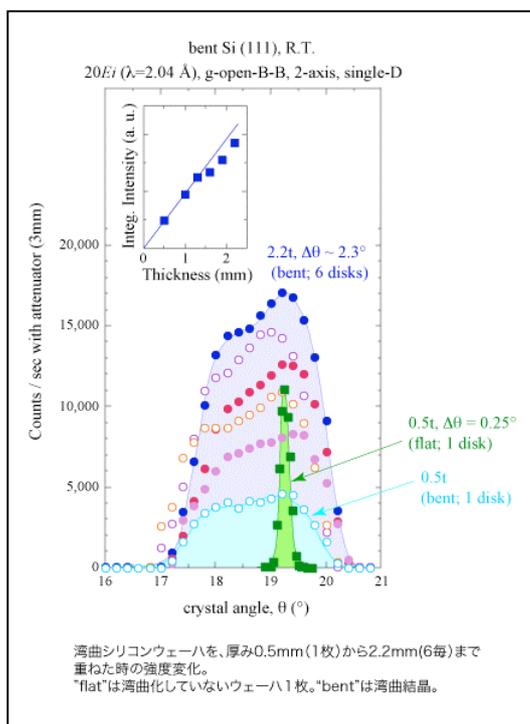


図5. Si ウェーハ湾曲結晶を重ねた時の、ピークプロファイル. 挿入図は、積分強度の厚み依存性.

(b) 偏極中性子散乱実験システムの検討と導入の準備

(1) 偏極スピフィルターによる偏極熱中性子散乱・回折実験の実施を目指し、心臓部である  $^3\text{He}$  偏極フィルター用の高品質ガラス容器（以下「偏極セル」）の作成を行い、十分な性能の容器の作成に成功した（図6）。通常、偏極セルは石英ガラスを用いることが多い。石英ガラスは整形が容易という利点がある反面、分子径の小さいヘリウムガスが漏れるため長期的な使用に耐えないという欠陥があった。そこで本計画では、ヘリウムガス保持力の高い GE180 ガラス材を使用し、偏極セルの長期的な使用を可能にした。この材質の難点は作業温度範囲が狭いため工作が非常に困難なことで、これまでは実験に必要なセルを整形することができなかった。そこで本計画において、KEK グル

ープと東北大学グループが連携し、東北大学において GE180 のガラス工作技術を確立した。現在ではセルの安定供給が可能となり、本計画で偏極セルを必要とする各グループに東北大学からセルを供給できるようになった。偏極セルの安定供給の確立は、計画の第 1 歩として重要な進展である。

(2) 東北大学で作成したセルを用いて、東北大学金属材料研究所が JRR3 に所有する中性子実験装置 AKANE・HERMES での単色定常中性子ビームでの環境整備を進め、偏極中性子散乱実験システムの性能評価の手法を検討した上で、環境条件の評価のために実際にビームを用いて偏極ビーム生成を行った。測定は三軸型中性子分光器 AKANE を用いた(図 7)。AKANE は汎用の分光器で自由度が高いためデバイス装着が容易で、本研究のような開発要素が多い実験に最適の装置である。図 8 は AKANE に偏極セルを搭載し、ビーム実験を行っている写真である。テストでは、東北大学セルを用いて He を偏極させ、約 20% の He 偏極度をえた。この偏極セルに断面積 4mm\*4mm のビームを通すことで、中性子を偏極できることを確認した。さらに、強度の時間変化を追跡することで、偏極度の時間依存性の測定を行った。この結果、AKANE での偏極度ダンプの時定数はおよそ 100~150 時間のオーダーであることがわかった(図 9)。AKANE 周辺には極端な漏えい磁場が無く、ソレノイドコイル(図 10)の磁気シールドでも 3~5 日程度の物性実験に耐えうる環境にあることを確認した。一方で、ソレノイドコイルに流していた電流(~1.5A)を切った瞬間に観測された中性子透過率の急速な低下は、偏極セル中の  $^3\text{He}$  偏極率が磁場の空間・時間的な乱れに非常に敏感であることを如実に示している。実際の物性実験ではよりサイズの大きいビーム(20mm\*20mm)を使用する機会が多く、現在は、偏極セルと磁気シールドの大型化を念頭におきつつ、個々のエレメントの更なる性能向上を目指している。

(3) 上述のように現状の AKANE では深刻な漏えい磁場の影響はないものの、長時間安定してスピン偏極中性子を創出するには高均一度の磁場分布が必要である。安定磁場作成と維持のために、テストではソレノイドコイルと磁気シールドを用い、偏極セル周辺で磁場の乱れをおさえている(図 8, 図 10)。このソレノイドコイルの磁場安定性を向上させるため、シミュレーションソフトを用いた磁場計算により、AKANE・HERMES へ導入するための基本設計指針を策定した。これと平行し、中性子偏極実験に最低限必要な部品(スピンプリッパー(図 11)用制御電源と中性子ビームモニター)をあらかじめ購入し、フリッパー開発に着手した。図 11 と同形の横磁場型フリッパーとドラブキン型フリッパーの 2 種類のタイプのフリッパーを考え、検討中である。

(4)技術補佐員を雇用することで中性子実験用機器製作の土台作りを進め、実験システム製作をスムーズに行える体制を構築した。これによ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。

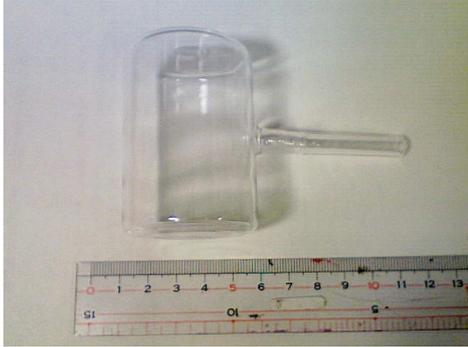


図6 東北大学で作成した偏極実験用ガラスセル。ヘリウムガス保持力の高いGE180 ガラス材を使用している。この材質は工作が非常に困難で、今のところ国内では東北大学しか大型セルの作成に成功していない。



図7 東北大学金属材料研究所所有の三軸型分光器 AKANE。自由度が高く、偏極技術開発に最適の装置である。

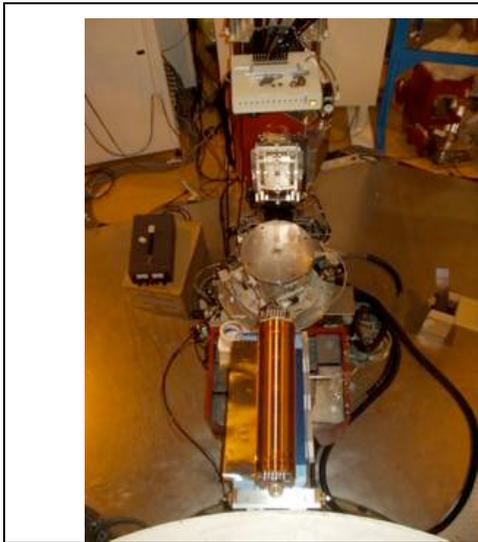


図8 AKANE でのビームテスト風景。手前から前方に向かって中性子ビームが進んでいる、手前のソレノイドコイル中に偏極セルが設置されており、セル通過時に中性子スピンの方向に偏極される。

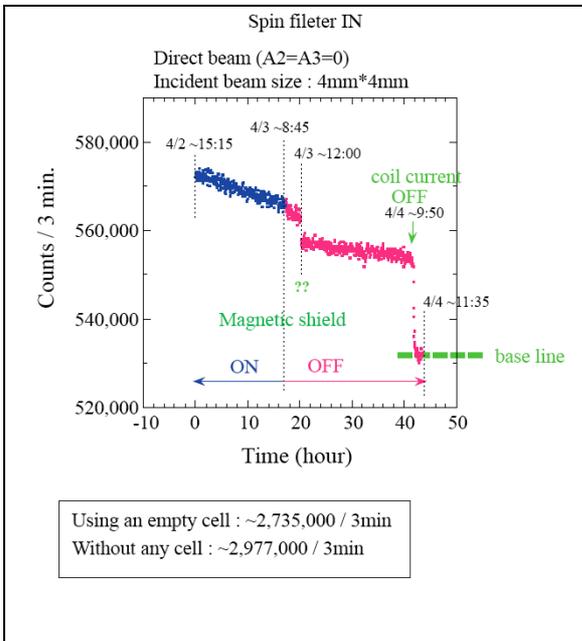


図9 テスト実験によって測定した偏極ビーム強度の時間変化。これは偏極度が時間とともに低下していることに対応し、強度が低下していく。ここから得られた偏極度のダンピングの時定数は約 100~150 時間である。

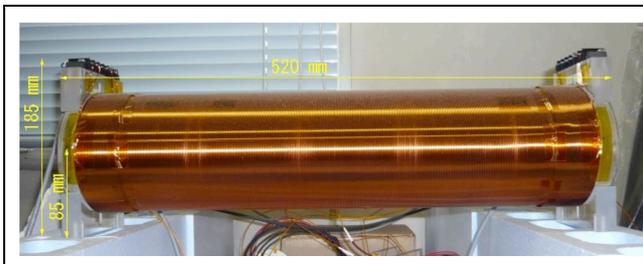


図10 実験に用いたものと同形のソレノイドコイル。磁場の均質性を保証する重要デバイスである。



図 1 1 現在、原子炉で利用されている横磁場型スピントリッパー。スピン偏極した中性子の偏極ベクトルの向きをコントロールするデバイスである。このタイプのトリッパーを含め、トリッパーの開発を検討している。

## 2.3 成果の外部への発表

### 学 会 等 発 表 実 績

委託業務題 「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)  
 目：  
 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
JRR-3 装置群でのモノクロメータ高度化への金研の取り組み ポスター	平賀晴弘、山口泰男、三宅悠子、大山研司、山田和芳、宍戸統悦、戸澤慎一郎、松浦直人、佐藤卓、廣田和馬、目時直人、松田雅昌	日本中性子学会 第8回年回	2008年 12月	国内
中性子散乱用 Ge モノクロメータ結晶の高度化 ポスター	三宅悠子、平賀晴弘、山口泰男、大山研司、山田和芳	日本理学会第6 4回年次大会	2009年 3月	国内
Recent Activities of IMR Neutron Group for Neutron-Monochromator Renovation in JRR- ポスター	H. Hiraka, Y. Miyake, Y. Yamaguchi, K. Ohoyama, K. Yamada	2009 WPI-AIMR Annual Workshop	2009年 3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
Conversion method of powder inelastic scattering data for one-dimensional systems	K. Tomiyasu,1,a□ M. Fujita,2 A. I. Kolesnikov,3 R. I. Bewley,4 M. J. Bull,4 and S. M. Bennington4	APPLIED PHYSICS LETTERS 94, 092502 (2009)	2009年 3月	国外
垂直ブリッジマン法による中性子単色化用 Cu 単結晶の作製および評価	戸澤慎一郎、宍戸統悦、山田和芳、山口泰男	Technical Research Report of Technical Service Center in IMR	2009年 3月	国内

特許状況

業務コード	実施年度	発明の名称	発明者	出願登録区分	出願番号(出願日)	出願区分	出願国	登録番号(登録日)	メモ
	20	半導体湾曲結晶ウェハーを用いた中性子線モノクロメータ及びアナライザー	平賀晴弘、山田和芳、藤原航三、中嶋一雄	出願	特願 2009-066185 (平成 21 年 3 月 18 日)		国内		

## 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
(1) 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  大山 研司 平賀 晴弘 藤田 全基 山口 泰男 村上 直樹 堀金 和正  佐藤 豊人 富安 啓輔
(2) 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 藤田 全基 山口 泰男 村上 直樹 堀金 和正  佐藤 豊人 富安 啓輔