



JAEA-Technology

2007-030



JP0750194

JAEA-Technology

JRR-3 における中性子反射率計の開発

Development of a Neutron Reflectometer SUIREN at JRR-3

山崎 大 盛合 敦 田村 格良 丸山 龍治
海老澤 徹 武田 全康 曾山 和彦

Dai YAMAZAKI, Atsushi MORIAI, Itaru TAMURA, Ryuji MARUYAMA
Toru EBISAWA, Masayasu TAKEDA and Kazuhiko SOYAMA

量子ビーム応用研究部門
中性子制御・検出系開発研究グループ
Neutron Detectors and Optical Devices R&D Group
Quantum Beam Science Directorate

March 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

JRR-3 における中性子反射率計の開発

日本原子力研究開発機構

量子ビーム応用研究部門 中性子産業利用技術研究ユニット

山崎 大, 盛合 敦, 田村 格良⁺¹, 丸山 龍治^{*}, 海老澤 徹, 武田 全康⁺², 曾山 和彦

(2007 年 1 月 31 日受理)

JRR-3 において新しい中性子反射率計 SUIREN の開発, 建設を行い, 平成 18 年度より施設共用を開始した.

SUIREN (Apparatus for Surface and Interface investigations with Reflection of Neutrons) は, 波長 3.8Å の単色中性子を利用した, 試料垂直配置の反射率計である. 測定対象としては, 形態として固体試料のほか固液界面試料が, 膜構造としてはソフトマテリアル薄膜, 磁性人工格子, 中性子ミラーなどをはじめ, 多様な試料が考えられる. ビーム強度は, 角度分散 $\Delta\theta=0.08$ deg にコリメートしたあと, 試料位置で $2.1 \times 10^4 \sim 2.6 \times 10^4$ カウント/s/cm² 程度である. また, バックグラウンドは 4.5×10^{-3} カウント/s であった. テスト測定の例として, 3 インチ φ のシリコン基板の反射率測定では, 約 27 時間かけて $0 < Q_z < 0.22 \text{ \AA}^{-1}$ の範囲で 10^{-6} までの反射率が測定できる事を実証した. また, 偏極反射率測定モードについても実用化に向け, すでにテスト測定をはじめている. さらに, テスト測定の結果を受けて平成 18 年度秋より非偏極モードについて施設共用を開始し, 合計 26 日間にわたって 4 件の課題を遂行した. 本稿では, 以上の概要および将来計画について述べる.

原子力科学研究所 (駐在) : 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

⁺¹ 研究炉加速器管理部

⁺² 中性子物質科学研究ユニット

※ 博士研究員

Development of a Neutron Reflectometer SUIREN at JRR-3

Dai YAMAZAKI, Atsushi MORIAI, Itaru TAMURA⁺¹, Ryuji MARUYAMA[※],
Toru EBISAWA, Masayasu TAKEDA⁺² and Kazuhiko SOYAMA

Neutron Technology R&D Center
Quantum Beam Science Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 31, 2007)

A new neutron reflectometer "SUIREN" has been developed and started its operation at the research reactor JRR-3 of JAEA in 2006.

SUIREN (Apparatus for Surface and Interface investigations with Reflection of Neutrons) provides monochromatic neutron beam with wavelength of 3.8 Å and vertical sample geometry, which is suitable for studies on interfaces involving solid layers of soft materials, magnetic materials, neutron mirrors and many other things. Collimated neutron intensity is about $2.1\sim 2.6 \times 10^4$ n/s/cm² with $\Delta\theta=0.08$ deg at the sample position. Background is as low as 4.5×10^{-3} n/s when a local beam shutter is closed. A demonstration experiment showed that specular reflectivity of a silicon substrate of 3 inches in diameter can be measured down to 10^{-6} over $0 < Q_z < 0.22$ Å⁻¹ in 27 hours.

This paper describes the beam-line and components of the SUIREN reflectometer, some results of test measurements and future plans.

Keywords: Neutron Reflectometer, Surface, Interface

⁺¹ Department of Research Reactor and Tandem Accelerator

⁺² Neutron Materials Research Center

※ Post-Doctoral Fellow

目次

1. 背景.....	1
1. 1 中性子反射法.....	1
1. 2 国外・国内における中性子反射率計の稼働状況.....	2
2. 中性子反射率計 SUIREN の概要.....	2
2. 1 ビームライン概要.....	2
2. 1. 1 モノクロメータ.....	3
2. 1. 2 フィルター.....	3
2. 1. 3 ビームシャッター.....	3
2. 1. 4 ビームナローワ.....	3
2. 1. 5 スリット.....	4
2. 1. 6 真空フライトチューブ.....	4
2. 1. 7 入射ビームモニター.....	4
2. 1. 8 試料台.....	4
2. 1. 9 検出器アーム.....	4
2. 1. 10 検出器.....	5
2. 1. 11 実験装置床面.....	5
2. 2 偏極オプションの概要.....	5
2. 2. 1 偏極子.....	5
2. 2. 2 試料マグネット.....	6
2. 3 計測制御ソフトウェア.....	6
2. 3. 1 自動制御できる軸の種類.....	6
2. 3. 2 マニュアル移動とモーター・スキャン.....	6
2. 3. 3 $\theta \cdot 2\theta$ スキャン.....	7
2. 3. 4 バッチ処理機能.....	7
2. 3. 5 LTAS との連携機能.....	7
3. 特性測定.....	7
3. 1 ダイレクトビーム強度.....	7
3. 2 バックグラウンド.....	8
3. 3 Si 基板反射率測定.....	8
3. 4 Ni/Ti 多層膜反射率測定.....	9
3. 5 NiC/Ti スーパーミラー非鏡面反射率測定.....	9
3. 6 偏極テスト測定.....	9
4. 施設共用.....	10
5. 今後の課題と将来計画.....	10
6. 結論.....	11

謝辞.....	11
参考文献.....	11

Contents

1. Introduction.....	1
1. 1 Neutron Reflectometry.....	1
1. 2 Reflectometers in Japan and overseas	2
2. Reflectometer SUIREN	2
2. 1 The beam line	2
2. 1. 1 Monochromator crystal	3
2. 1. 2 Filter crystal	3
2. 1. 3 Local beam shutter	3
2. 1. 4 Beam narrower	3
2. 1. 5 Neutron slits	4
2. 1. 6 Evacuated flight tubes.....	4
2. 1. 7 Incident beam monitor	4
2. 1. 8 Sample stage.....	4
2. 1. 9 Detector arm	4
2. 1. 10 Detector	5
2. 1. 11 Floor of SUIREN	5
2. 2 Polarizing option	5
2. 2. 1 Polarizer.....	5
2. 2. 2 Sample Magnet.....	6
2. 3 Software.....	6
2. 3. 1 Controllable axes	6
2. 3. 2 Movements and scans	6
2. 3. 3 $\theta \cdot 2\theta$ scan	7
2. 3. 4 Batch process	7
2. 3. 5 Connection with LTAS.....	7
3. Performance tests.....	7
3. 1 Incident beam intensity	7
3. 2 Back ground.....	8
3. 3 Reflectivity of silicon substrate.....	8
3. 4 Reflectivity of Ni/Ti multilayer	9
3. 5 Off-specular scattering of NiC/Ti supermirror.....	9
3. 6 Polarization tests.....	9
4. Use sharing program	10
5. Future plans.....	10
6. Conclusion	11

Acknowledgments	11
References	11

1. 背景

1. 1 中性子反射法

中性子反射法¹⁾は、物質・薄膜の表面付近の構造を観測する実験手法である。中性子反射率から試料の深さ方向に対する屈折率の分布を同定することができ、装置分解能や試料の種類にもよるが、最表面から数十 μm 以上の深さまで、 nm の精度で表面付近の構造を探ることが出来る。

物質の表面付近や薄膜の表面・界面では、その系の2次元性による効果や界面構造が表面・膜の性質に与える効果により、バルクでは見られない新規な現象・構造が観測されている。研究対象物質として、高分子膜、生体膜、磁性デバイス、半導体・集積回路、中性子ミラーなどの表面・界面構造があり、その構造に関わる現象としても脱濡れ、吸着、摩擦、接着、相転移温度変化など、表面・界面に関わる分野は実に多彩である。

表面・界面を探る手法としては、中性子反射法以外にもX線反射法、原子間力顕微鏡 (AFM)、2次イオン質量分析 (SIMS)、オージェ電子分光法 (AES) など様々に存在する。しかし、最表面だけでなく深くに埋もれた界面までを、非破壊で観測できるのは中性子とX線の反射法のみである。さらに中性子反射法はX線反射法に比較して、以下のような特徴を持っている。

反射率は試料の深さ方向に対する屈折率の分布に依存する。X線の場合、屈折率は試料内の電子密度に依存する。従って、X線反射法で屈折率の変化が良く現れて観測がしやすいのは、原子番号の大きく違う元素をもつ層からなる構造である。それに対し中性子反射法の場合、屈折率は物質の干渉性散乱長密度に依存する。干渉性散乱長は、電子でなく原子核の性質によって決まる物理量である。そして、原子番号が近くても、さらには同じ元素でも核種が違えば、散乱長は全く違って来る。よって、中性子反射法によれば、X線反射法では観測の難しい、原子番号が近いあるいは同じ元素からなる層構造の観測が可能である。

同元素間の散乱長の違いを利用したものとして、水素・重水素置換法がある。中性子は、軽水素 H と重水素 D に対して、正負逆の干渉性散乱長を持つ。

$$b_c(H) = -3.7423 \text{ fm}, \quad b_c(D) = +6.674 \text{ fm}.$$

これにより、生体膜、高分子膜などの有機系の試料では、分子の一部分について H を D に置換するなどの手法により、各部分の散乱長密度にコントラストを付け、構造をより明確に解析することが出来る。また、水層における H_2O と D_2O の比率を調整し、水からの干渉性散乱長密度をゼロにすることなども可能である。

中性子は物質の磁気モーメントと相互作用し、屈折率は中性子スピンおよび物質の磁気モーメントにも依存する。従って、中性子反射法により深さ方向の磁気モーメントの分布を探ることも出来る。これは、磁気記録材料などの開発に不可欠である。

中性子はX線などと比較しても物質への吸収率が小さく、ずっと深いところまで構造を探ることが出来る。また、非破壊測定という点においても、X線でも大強度放射光などでは、試料を焼損してしまうことがあり、厳密には非破壊とはいえない。中性子ではたとえ大強度でもそのようなことは無く、さらに非破壊測定に向いているといえる。

1. 2 国外・国内における中性子反射率計の稼働状況

欧米では、中性子反射率計の需要は非常に高く、主たる中性子実験施設ではすべて複数台の中性子反射率計が稼働している。欧州ではフランスのラウエ・ランジュバン研究所 ILL²⁾ に3台、英国ラザフォード・アップルトン研究所の ISIS³⁾ に2台、ドイツミュンヘン工科大の FRM-II⁴⁾ に3台が設置されている。米国では NIST⁵⁾ に3台、ロスアラモス国立研究所の LANSCE⁶⁾ に2台が稼働中である。他にも中小規模の施設で中性子反射率計が稼働している。さらに新しい大型中性子源である英国の ISIS 第2ターゲットステーション⁷⁾ と米国の SNS⁸⁾ でも、それぞれ3台、2台の中性子反射率計が設置される予定である。

国内に目を転じると、平成18年春までは原子力機構 JRR-3 の中性子反射率計 MINE⁹⁾、高エネルギー加速器研究機構中性子科学研究施設 KENS の偏極中性子反射率計 PORE¹⁰⁾、試料水平型中性子反射率計 ARISA¹¹⁾ あわせて3台の中性子反射率計が稼働しており、本稿で紹介する SUIREN が稼働準備を行っている状況であった。しかし、KENS が平成18年春にシャットダウンしたことにより、国内で稼働中の中性子反射率計は MINE のみとなり、秋に SUIREN が稼働を始めた現在、国内の中性子反射率計は原子炉の単色中性子を利用した SUIREN と MINE の2台のみとなっている。

平成20年に稼働を始める大強度陽子加速器施設 J-PARC の物質・生命科学実験施設 MLF では、現在試料水平型中性子反射率計¹²⁾ の開発が進められており、MLF の稼働開始から数年以内には実験が可能になる予定である。しかし、それまでの数年間、国内の中性子反射率計は SUIREN、MINE の2台で中性子を利用した表面・界面研究を支えていくことになる。

SUIREN と MINE は共に単色中性子による試料垂直配置型反射率計である。SUIREN が高強度かつ低バックグラウンドで、high-Q 側の測定を得意とするのに対し、MINE は波長が長く (8.8 Å)、low-Q 側の測定に強い。ただし、MINE は同じサイトを冷中性子スピン干渉計と共有しており、反射率測定に使えるビームタイムは全体の 3/4 程度である。

2. 中性子反射率計 SUIREN の概要

中性子反射率計 SUIREN は、波長 3.8 Å の単色中性子を利用した中性子反射率計である。したがって、鏡面反射率測定は $\theta \cdot 2\theta$ スキャンによって行われる。試料配置は、現状では垂直型であり、固体試料および固液界面試料を測定することができる。また、試料環境として磁場印加用電磁石を使用し、偏極反射率測定を行うことも可能である。

測定精度と所要時間については、試料サイズによるものの、反射率 10^{-6} 以下までの測定を1日程度で行うことが可能であることを、後に述べる特性試験で実証している。

2. 1 ビームライン概要

中性子反射率計 SUIREN は、JRR-3 ビームホールの C2-2 ポートに設置されている。これは、冷中性子導管 C2 のビームラインにおける2番目の実験ポートであり、冷中性子散乱実験デバイス開発装置 LTAS (C2-1)¹³⁾ の下流、中性子スピンエコー分光器 iNSE、多重即発ガンマ線分析装置 MPGA、冷中性子ラジオグラフィ装置 CHOP、パルス中性子機器開発装置 CNRF など

の上流に当たる。

SUIREN ビームラインの概要は以下のとおりである。(図 1, 図 2 参照)

- (1) C2 ビームラインからモノクロメータでビームを取り出す。
- (2) フィルターで高調波成分を取り除き、単色成分のみを取り出す。
- (3) 2台のスリットでビームをコリメートする。この間、真空フライトチューブで空気散乱による入射強度減少を防ぐ。
- (4) 試料にビームを入射し、反射させる。
- (5) 試料の後ろには真空フライトパス置き、空気散乱によるバックグラウンドを防ぐ。
- (6) 検出器で反射した中性子を検出し、計数する。

以下で、ビームライン上の各コンポーネントについてやや詳細に述べる。

2. 1. 1 モノクロメータ

モノクロメータ (図 3 (a)) には、グラファイト結晶を使用している。結晶のサイズは 100 (H) × 20 (W) × 5 (T) mm³、モザイクネスは 0.5 deg である。これによって、ガイド管によって導かれてきた中性子ビームを 69 度の方向に Bragg 反射させることにより、波長 $\lambda=3.8\text{\AA}$ 、波長分解能 1.3% の中性子を主としたビームが得られる。

2. 1. 2 フィルター

モノクロメータからの反射ビームは、 $\lambda=3.8\text{\AA}$ 以外にも、 $\lambda/2$, $\lambda/3$ などの高調波成分を含んでいる。この高調波成分は、反射率測定データの解析を複雑にするため取り除くことが必要である。SUIREN ではモノクロメータと同仕様のグラファイト結晶を利用し、Bragg 反射によって高調波成分を取り除く (図 3 (b))。

ただしビームは冷中性子源で減速され、さらに中性子導管での反射を経て C2-2 ポートまで運ばれてきたものであり、波長の短い成分ほど含有率は少ない。そこで、このフィルターでは、ビームの反射角を 34.5 度に合わせ、波長 $\lambda/2=1.9\text{\AA}$ の成分を弾き出すように設定した。

2. 1. 3 ビームシャッター

ビームシャッターは遮蔽体出口手前に設置されている。エアシリンダーにより遮蔽ブロックを上昇、落下させるもので、手動スイッチにより開閉する。

2. 1. 4 ビームナロー

実験装置周辺での線量低減、バックグラウンド低減を目的として、スリット以前で予めビームを絞る機構であり、フィルターの後ろに置かれている。材質は、⁶LiF をエポキシ系樹脂で溶いて扉に塗り固めたものである。

モノクロメータ、フィルターの後ろで、ビームサイズはほぼ 20 mm 幅となるが、多くの場合、スリットで 2 mm 以下に絞られる。しかし、スリット材料が B₄C 焼結体であるため、中性子吸収の際に γ 線が放射される。これは実験者の被爆量を増やすだけでなく、測定の際のバックグラウンドにも影響を与える恐れがある。これを少しでも抑えるため、中性子吸収の際のガンマ線量が小さい ⁶Li でビームを数 mm に絞っておくのである。

2. 1. 5 スリット

スリットは、試料へ入射するビームを横方向にコリメートし、角度分散を調節するものである。ビームナロー直後と試料直前に置かれており（図 4）、本稿ではそれぞれを第 1 スリット、第 2 スリットと呼ぶことにする。この 2 つのスリットの構造は基本的に同じである。

SUIREN のスリットには、平面度公差 0.01 mm で加工した B₄C 焼結体を使用している。2 つの B₄C 板を図 5 のように、互いに行き違うように配置し、自動ステージで独立に移動して、開閉を行う。自動ステージの移動精度は 30 μm である。制御ソフトウェア上では、2 枚の B₄C 板それぞれの位置を気にせずに、スリット中心位置、スリット幅を制御することができる。

また、B₄C 板による中性子ビームの反射を抑えるため、B₄C 板の端面にはわずかに傾斜をつけてある。

2. 1. 6 真空フライトチューブ

真空フライトチューブは空気散乱によるビーム強度減少の抑制、バックグラウンドの低減を目的として、第 1、第 2 スリットの間および試料台と検出器の間に置かれる（図 4）。内径は 80mm φ であり、内壁にはガドリニウムを含んだペンキを塗布してある。また、試料台-検出器間のフライトチューブには、上流側窓に幅 6mm の中性子スリットを設置し、試料台付近で空気散乱された中性子が検出器に入るのを抑制する。

2. 1. 7 入射ビームモニター

試料の直前で、入射ビーム強度の変化を較正する（図 4）。SUIREN の上流、C2-1 ポートには 3 軸分光器 LTAS が設置されている。LTAS のモノクロメータは SUIREN の手前でビームを取り出すために、そのモノクロメータの角度によって、SUIREN のビーム強度が変化する。ビームモニターは、この強度変化を較正するために用いる。

モニター検出器には、³He の 0 次元検出器を使用し、入射ビームの下端（試料には当たらない部分）で検出する。多くの測定では、タイマーではなくモニター計数で測定時間の規格化を行っている。

2. 1. 8 試料台

試料台では、試料の垂直軸回転 (θ_s)、2 軸のティルト（水平軸回転）、左右平行移動、上下移動を制御するゴニオステージが設置されている。移動精度は垂直軸回転で 0.004 deg、ティルトで 0.01 deg、左右平行移動、上下移動は 0.01 mm である。

試料台は 500mm φ、耐荷重が 400kg で、大型の試料環境の設置が可能である。ただし試料環境が 100kg を超える場合、耐荷重の関係で、試料台では垂直軸回転以外の制御が出来ない。そのため、重い試料環境を持ち込む場合は、それら自身が各軸の制御機能を併せ持つ必要がある。

2. 1. 9 検出器アーム

検出器アームは試料台の下流に接続されている架台である。この架台上には、真空フライトチューブと検出器が置かれ、下はエアパッドとローラーで支えている。検出する散乱角度を変える際には、この架台ごと検出器を移動させる。この際、エアパッドで架台を浮上させてローラーを動かし、エンコーダで位置を確認しつつ移動する。移動精度は 0.005 deg である。

2. 1. 10 検出器

中性子検出器には、 ^3He の 0 次元検出器を採用している。この検出器は、バックグラウンド計数を減らすために、 B_4C 粉末とエポキシ系樹脂を詰めた縦 375 mm×横 250 mm×奥行 250 mm の遮蔽体内部に納められる (図 6)。この遮蔽体には、中性子を受け入れる縦 100 mm×横 10 mm の窓が開いており、ここにカドミウム製のスリット (検出器スリット) を設置することが出来る。検出器スリットの幅は、交換により 0.25 mm, 0.50 mm, 0.70 mm, 1.0 mm, 2.0 mm, 4.5mm, 6.0mm, 10.0mm から選択できる。

2. 1. 11 実験装置床面

SUIREN では、検出器アームを移動する際にエアパッドによる昇降を行うため、床面は高い水平性と強度を要求される。本装置の床面はエポキシ樹脂で、約 10 m² に亘って施工されており、平面精度は ±100 μm 以内、硬度は 85 となっている。この床面上で検出器アームを円滑に駆動することができる。

2. 2 偏極オプションの概要

反射率計 SUIREN では、偏極中性子反射率測定もできるよう、偏極オプションの開発を行っている。現在、偏極子 (偏極スーパーミラーベンダー) および試料マグネットが利用でき、近い将来には検極子も整備される。これにより、様々な磁性試料測定および非干渉性散乱を除去した低バックグラウンドの反射率測定が可能になる。本節では、偏極子、試料マグネットの概要および偏極反射率のテスト測定実験の結果について述べる。

2. 2. 1 偏極子

SUIREN で使用する偏極子は、偏極スーパーミラーベンダー (以下、偏極ベンダー、図 7) である。偏極ベンダーに中性子を入射させると、3.8 Å 以上の中性子は内部で偏極され、進行方向を 2.388 deg 曲げられて取り出される (図 8)。また、中性子の偏極方向 (up ↑, down ↓) は、偏極ベンダーに印加する磁場の向きによって選択可能である。

偏極ベンダーは、厚み 0.2 mm のボロフロートガラスの両面に偏極スーパーミラーをコートし、厚み 0.9 mm のアルミ製スペーサと交互に挿入してスタックし、全体を 6.0 m の曲率半径で 2.388 deg 曲げたものである。さらにミラーを偏極させるための電磁石が付設されている。

コートしたスーパーミラーは FeCoV/TiNx のレマネント偏極スーパーミラーであり、両面コートのうち曲率内側の面は $m=2.6$ 、曲率外側の面は $m=1.5$ である。ただし、 m は対応するスーパーミラーの全反射臨界角の、ニッケルの全反射臨界角に対する比である。

中性子ベンダーに入射した中性子は、ミラーで反射されないとベンダー出口へ到達できない。ベンダー内ミラーへの凡その最大入射角は特性臨界角 θ^* で与えられるが、これはベンダーの曲率半径 R 、チャンネル幅 d を用いて次の式で書き表せる。

$$\theta^* \cong \sqrt{\frac{2d}{R}} \cong 0.01732 \text{ (rad)} \cong 0.9924 \text{ (deg)}.$$

従って、この角度で全反射される中性子は、高い確率でベンダーを通過することができる。SUIREN の偏極ベンダーは、ミラーとして $m=2.6$ の偏極スーパーミラーを使用していること、

およびニッケルの全反射臨界角 $\theta_c(Ni)$ と波長 λ の関係が

$$\theta_c(Ni) \cong \lambda/10 \text{ (deg)},$$

で与えられることから、上の特性臨界角 θ^* に対応する特性波長 λ^* は

$$\lambda^* \cong 0.9924 \times 10 / 2.6 = 3.817 \text{ (Å)},$$

となる。よって、波長 3.817 Å 以上の中性子は偏極のうえ透過することになる。これは、SUIREN で本来想定している波長 3.8 Å より少々長い。しかし、以下に述べる通り、実際に偏極ベンダーを使用する際には、モノクロメータの反射角度を大きくし、この特性波長よりも長波長の中性子を使用する。

偏極子として用いる偏極ベンダーは、ビームを曲げてしまうため、これを設置する際にはビームラインの修正が必要である。SUIREN では、試料中心位置を動かさずに測定するため、図 9 のようにモノクロメータの角度、検出器の原点 ($2\theta_D=0\text{deg}$ の位置) などが変更される。

この際、モノクロメータによるビーム取り出し角度が本来の 69 deg よりも約 1.2 deg 大きくなるため、使用する中性子波長も変わる。例えば取り出し角度が 70.2 deg のとき、波長は 3.85 Å である。

2. 2. 2 試料マグネット

SUIREN では試料偏極用に試料マグネットが利用できる。試料マグネット (図 10) は、電磁石により 1.1 T までの磁場を試料に印加することができ、磁場の向きは手動で変更可能である。試料設置スペースは高さ方向 50 mm、水平方向 86 mm ϕ である。

2. 3 計測制御ソフトウェア

SUIREN における計測制御は、LabVIEW のプログラムによって行われる。これにより、様々な軸の移動、スキャン、および $\theta \cdot 2\theta$ スキャンを任意の順序で自動的に実行することが出来る。ソフトウェアの制御画面を図 11 に示す。

2. 3. 1 自動制御できる軸の種類

現在自動制御できる軸は、以下の通りである。

- (1) モノクロメータの 5 軸：回転 ω_1M , 平行移動 XM , 平行移動 YM , 回転 ω_2M , ティルト RXM
- (2) 外付けナローの 2 軸：平行移動 (左右) $XN2$, 平行移動 (上下) $YN2$
- (3) 第 1 スリットの 2 軸：スリット幅 $S1w$, スリットの平行移動 $S1x$
- (4) 第 2 スリットの 3 軸：スリット幅 $S2w$, スリットの平行移動 $S2x$, スリットのティルト $S2R$
- (5) 試料台の 3 軸：回転 θ_s , 平行移動 X_s , ティルト RX_s
- (6) 検出器アームの 1 軸：回転 $2\theta_D$ (θ_s と同心)

現時点では、偏極子電磁石、試料マグネット電磁石の自動制御などはできていないが、速やかに整備する予定である。

2. 3. 2 マニュアル移動とモーター・スキャン

現在自動制御できるすべての軸で、目的地を指定した移動と、スキャン測定を行うことが出来る。本測定前のビームライン設定および非鏡面反射測定の際のロッキングスキャン (θ_s スキャン) および検出器スキャン ($2\theta_D$ スキャン) に使用される。

2. 3. 3 $\theta \cdot 2\theta$ スキャン

鏡面反射率測定のための基本的な測定モードである。試料への入射角と検出器の位置（反射角）を同時に変えながら計数を行う。この際、散乱角度が入射角度のちょうど倍になるように制御される。実際の軸の動きは次のようになる。

$$2\theta_D = \theta_S \times 2 .$$

また、オフセットスキャンも行うことができる。これは、 a を定数値として

$$2\theta_D = \theta_S \times 2 + a .$$

となるように、両軸を制御するスキャンである。

2. 3. 4 バッチ処理機能

上記の移動、モーター・スキャン、 $\theta \cdot 2\theta$ スキャンを任意の順序で自動実行するための機能である。事前に処理の内容と順序を入力しておけば、「スリット条件の変更」→「ダイレクトビームの計数」→「バックグラウンドの計数」→「 $\theta \cdot 2\theta$ スキャン」など一連の測定を自動で行うことができる。

2. 3. 5 LTAS との連携機能

既に述べたように、SUIREN の上流、C2-1 ポートには 3 軸分光器 LTAS が設置されており、そのモノクロメータの角度変更により SUIREN のビーム強度が変化する。このビーム強度変化自体はモニター検出器により較正できるが、LTAS のモノクロメータと SUIREN のモノクロメータの取り出す波長バンドが重なった場合、SUIREN での波長分布形状が変化することにより、反射率測定に影響をうけてしまう。そのため、SUIREN の計測制御ソフトウェアでは、LTAS のモノクロメータ角度を監視し、LTAS の波長バンドが被ってきた時に測定を一時停止する機能を持っている。

3. 特性測定

平成 18 年度に、SUIREN の特性測定を行った。内容は、ダイレクトビーム強度測定、バックグラウンド測定、非偏極中性子での反射率テスト測定、偏極のテスト測定である。非偏極での反射率測定には、中性子産業利用技術研究ユニットで開発している中性子ミラーおよびシリコン基板を用いた。以下その測定結果について述べる。

3. 1 ダイレクトビーム強度

スリットでコリメートした後のダイレクトビーム強度を測定した。ただし、この強度は上流 C2-1 ポートの 3 軸分光器 LTAS のモノクロメータ角度に依存して変化するため、一定値とはならない。ちなみにこの測定時にはモノクロメータへの入射角が 37.815 deg に固定されていた。

ビーム強度は、第 1 スリットの横幅を 1 mm あるいは 2 mm に固定し、第 2 スリットの横幅を変えながら測定した。ただし、第 2 スリットでビームを縦 40 mm に絞ってある。また、2 つのスリットの間隔は 1450 mm であった。結果を図 12 に示す。第 2 スリットの幅が第 1 スリット幅を超えない間は、ほぼ強度が第 2 スリット幅に比例していることが分かる。これは、この範囲でビームが充分一様であることを示す。

また、第1スリットと、第2スリットの幅がともに 1 mm のとき、角度分散は 0.08 deg に相当するが、このときの強度は 21300 カウント/s/cm² であった。この強度は LTAS のモノクロメータ角度が 37.08 deg の時の値だが、のちの測定で 33 deg 以下では約 23000 カウント/s/cm²、39.5 deg 以上では 26000 カウント/s/cm² 程度であることが分かっている。ちなみに、33.5 deg ~ 36.0 deg の範囲では LTAS モノクロメータの取り出す波長が SUIREN の波長に被るため、SUIREN の強度は弱くなる。

3. 2 バックグラウンド

SUIREN におけるバックグラウンドは、以下の2通りの条件で観測した。

まず、SUIREN のビームシャッターを閉じ、検出器窓を B₄C ゴム (厚み 12 mm) で覆った状態で測定した。測定は、検出器位置を変えつつ、一点 10000 秒掛けて測定した。結果を図 13 に示す。この結果、ルームバックはほぼその検出器位置に依らず 4.5×10⁻³ カウント/s 程度であった。これが、現状でビームラインを遮蔽した時にバックグラウンドを下げられる下限である。

つぎに、SUIREN のビームシャッターを開け、スリットでビームを絞り、検出器窓には 6 mm のスリットを置いたときのバックグラウンドを測定した。この時、試料位置には何もおいておらず、ダイレクトビームのみが通っている状況であり、検出器はダイレクトビームを検出しない位置でスキャンした。結果を図 14 に示す。

図 14(a)は計数時間でバックグラウンド計数を規格化したものである。これを図 13 と比較すると、ビームシャッターを開けることにより、バックグラウンドが大きくなっており、その計数はスリット条件に依存することが分かる。S₁w=1.0 mm, S₂w=0.5 mm のときはルームバックの 2.7 倍程度、S₁w=2.0 mm, S₂w=1.0 mm のときはルームバックの 3.6 倍程度であった。

図 14(b)はモニター強度 (入射中性子数に相当) でバックグラウンド計数を規格化したものである。これを左図と比較すると、バックグラウンドは殆ど計数時間に依存し、コリメート後の入射中性子数とはあまり関係ないようである。つまり、第1スリット、第2スリットで絞られたあとに空気散乱を受けて検出器に入る成分よりは、第2スリット以前で空気散乱を受けて検出器に至る成分が多いと思われる。

シャッターを開けてビームを出した時は、検出器位置によってバックグラウンド計数が異なっているように見えるが、再現性の確認までは出来ていない。

3. 3 Si 基板反射率測定

SUIREN における反射率テスト測定の一例として、シリコン基板の鏡面反射率を測定した。試料サイズは 3 インチφ である。この際、Q (入射角) を大きくするに従ってスリット幅を広げ、Q 分解能をある程度一定に保ちつつ入射強度を稼ぎながら測定を行った。具体的なコリメーション、測定時間を表 1 に示す。

結果を図 15 に示す。鏡面反射率は 10⁻⁶ 以下まで測定することができた。また、計算とのフィッティングにより、シリコン基板表面に 5Å の酸化層ができていたことが分かった。

今回の測定には合計で 3 2 時間を要したが、測定点を細かく取りすぎており、特に 0.032 < Q_z

$< 0.1 \text{ \AA}^{-1}$ の領域で測定点を減らせば、27時間程度の測定時間でも同等の結果は得られる。

3. 4 Ni/Ti 多層膜反射率測定

図 16 には鏡面反射率測定 of 2 例目として、Ni/Ti 多層膜ミラーの反射率測定結果を示す。原子力機構中性子産業利用技術研究ユニットで開発している高性能中性子ミラー^{14) 15)} の試作品の 1 つであり、周期が 100 \AA で 20 対の Ni/Ti 層から成っている。反射率をみると 5 次の Bragg ピークが見えないものの、6 次ピークまでが 10^{-6} 以上の反射率で観測できている。

サンプルサイズは $30 \times 50 \text{ mm}^2$ であり、測定には 4 次ピークまでに 29 時間、6 次ピーク観測までにはさらに 30 時間を要した (表 2 参照)。

3. 5 NiC/Ti スーパーミラー非鏡面反射率測定

原子力機構中性子産業利用技術研究ユニットで開発中の、NiC/Ti 中性子スーパーミラー ($m=3$)^{14) 15)} について、非鏡面反射率測定を行った。試料サイズは $100 \times 100 \text{ mm}^2$ であり、基板のラフネスは約 3 \AA (r.m.s) である。測定ではロッキングスキャンを行った。

この際、検出器は $2\theta_D = 1.475 \text{ deg}$ の位置に固定し、第 1 スリット 0.5 mm 、第 2 スリット 0.2 mm に、検出器スリットは 0.5 mm に設定した。このスリット設定は、入射角度分散 0.028 deg 、散乱角度分解能 0.026 deg に相当する。

結果を図 17 に示す。中心のピークが鏡面反射 (全反射) 成分で、4 桁ほど下に肩ができてるのが、非鏡面反射成分である。このスーパーミラーは全層合わせて 3 \mu m ほど積み重ねているが、非鏡面反射が非常に弱いことから、各層が非常に綺麗に成膜されていることがわかる。測定時間は 19 時間であった。

3. 6 偏極テスト測定

偏極システムのセットおよび偏極反射率のテスト測定を行った。

まず、偏極子を設置して偏極ビームを取り出し、この偏極率を測定した。測定には、京都大学原子炉実験所で開発された偏極スーパーミラー ($m=5$)¹⁶⁾ を試料として使用した。試料への入射角を 0.80 deg (全反射領域) とし、反射ビームの強度について、スピン反転比を観測した結果、5:1 であった。MINE における偏極反射率測定では、40:1 のスピン反転比が測定されており、これと比較すると、今回の短時間のビームタイムでは、ビームラインの偏極が十分に維持できていなかったと考えられる。今後の偏極ビームラインの最適化が必要である。

つぎに、試料マグネットを試料台上に設置し、テスト試料として、東北大学で成膜された、交換結合膜試料の偏極反射率を測定した。試料サイズは $30 \times 30 \text{ mm}^2$ であり、試料には 2.01 kGauss の磁場を印加した。さらに測定の際は、第 1 スリット幅を 0.5 mm 、第 2 スリット幅を 1.2 mm と設定し、試料を完浴させた状態で反射強度を測定して、試料のビームに対する射影サイズ (実際に試料が受けるビームサイズ) で規格化した。結果を図 18 に示す。入射ビームの偏極の向きにより、反射強度の差が明確に出ていることが分かる。

今回は時間の制約もあってビームラインの最適化が出来ず、入射強度と偏極率の両方で充分な

設定が出来なかった。今後のビームタイムで、早期に高偏極ビームラインを設定・確立する予定である。

4. 施設共用

前節で述べた特性測定により SUIREN による非偏極中性子測定は実用化に至ったとの結論に達し、平成18年度後半より施設共用・トライアルユースを開始した。18年度には合計26日にわたり4件の外部課題が遂行された。実験テーマは以下の通りであるが、詳細については省略する。

- (1) 次世代光記録材料 BiBO 薄膜の深さ方向の組成分布解析
- (2) 中性子反射率による単分子層修飾金電極の構造解析
- (3) 中性子反射率計を用いた電子・情報デバイス用多層膜の構造解析
- (4) 非公開課題

平成19年度以降は、ビームタイムの30%、50日程度を施設共用に配分することを目標としている。

5. 今後の課題と将来計画

これまでの開発により、非偏極の反射率測定が実用可能となり、施設共用を開始した。ただ現時点では、得意とする Q レンジに違いがあるとはいえ、JRR-3 に設置されている反射率計 MINE との違いは小さい。今後は偏極オプションを初めとした整備を進めて MINE との差別化を図るとともに、さらに多様な表面・界面研究に対応させていく必要がある。

まず偏極オプションについて、高度に偏極維持されたビームラインを実現し、さらに偏極解析ミラーによる検極システムを整備する。これにより、中性子スピン反転を含めた反射率測定を可能とし、磁性薄膜の構造解析にさらなる手段を提供する。また、偏極解析法は磁性材料に拘わらず試料からのバックグラウンドとなる非干渉性散乱成分を除去することもでき、測定の S/N 比向上が期待できる。

表面・界面の研究で準備される試料には、2 cm 角など小さいものも多く、現在の SUIREN のビーム強度では対応が難しい。そこで、入射ビームを上下方向に集光する傾斜付きガイド管の導入を検討している。これにより試料への入射強度が倍加し、より低い反射率までの測定が可能になると期待される。

さらに、検出器については現在の0次元 ^3He 検出器に代えて、位置敏感型中性子検出器の導入を検討している。これにより、非鏡面散乱測定の効率を格段に上昇させ、さらにバックグラウンドの低減を図る。

偏極・検極系の整備後は、スピンエコー・オプションの開発を行う予定である。京都大学原子炉実験所との共同研究によって共鳴スピンエコー法^{17) 18) 19)}を基礎としたシステムを開発し、表面・界面の微小な面内構造の観測、さらにダイナミクスの観測まで行うことを目標とする。

6. 結論

JRR-3 ビームホールにおいて開発・建設を行ってきた、中性子反射率計 SUIREN において非偏極の中性子反射率測定が実用化に至り、平成18年度から施設共用を開始した。

施設共用に先立つ特性測定の結果、ビーム強度は、角度分散 $\Delta\theta=0.08$ deg にコリメートしたあと、試料位置で $2.1 \times 10^4 \sim 2.6 \times 10^4$ カウント/s/cm² 程度であった。また、バックグラウンドは 4.5×10^{-3} カウント/s であった。反射率のテスト測定をシリコン基板、Ni/Ti 多層膜について行い、 10^{-6} までの反射率が測定できた。所要時間は、シリコン基板では Q レンジ $0 < Q_z < 0.22 \text{ \AA}^{-1}$ の測定に実質 27 時間、Ni/Ti 多層膜では $0 < Q_z < 0.42 \text{ \AA}^{-1}$ に 60 時間かかっている。さらに、中性子産業利用技術研究ユニットで開発した NiC/Ti スーパーミラーについて、非鏡面散乱のテスト測定を行った。非鏡面散乱成分は全反射成分の 4 桁以下であり、スーパーミラーの界面粗さが非常に小さく抑えられていることが分かった。

現状では、実用化できているのは非偏極反射率測定のみであり、今後は、国内のもう 1 つの中性子反射率計 MINE との差別化を図っていくためにも、さらに多様な測定オプションを実現していく必要がある。まずは偏極反射率測定オプションの実用化と、小型試料対応のための集光用傾斜付き導管の導入を早急に進める。

謝辞

京都大学原子炉実験所の日野正裕氏、北口雅暁氏、林田洋寿氏、京都大学の田崎誠司氏、高エネルギー加速器研究機構の鳥飼直也氏、原子力機構中性子物質科学研究ユニットの加倉井和久氏には、SUIREN の開発、計画、運営に当って様々なご協力・ご助言を頂いた。

有限会社アドバンストマシン工場の皆川宣明氏、鈴木浩二氏には、反射率計 SUIREN の建設及び各種コンポーネントの製作およびメンテナンスについて、大変お世話になった。

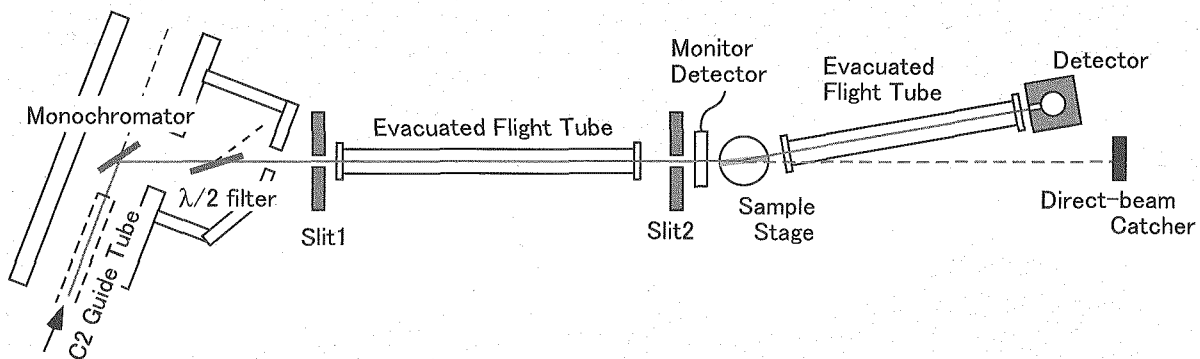
有限会社テクノエーピーの江幡資信氏、渡辺房雄氏には、測定制御系の整備・メンテナンスにおいて大変お世話になった。

また、ここに触れられなかった多くの方々にも、様々なご支援を賜りました。厚く御礼申し上げます。

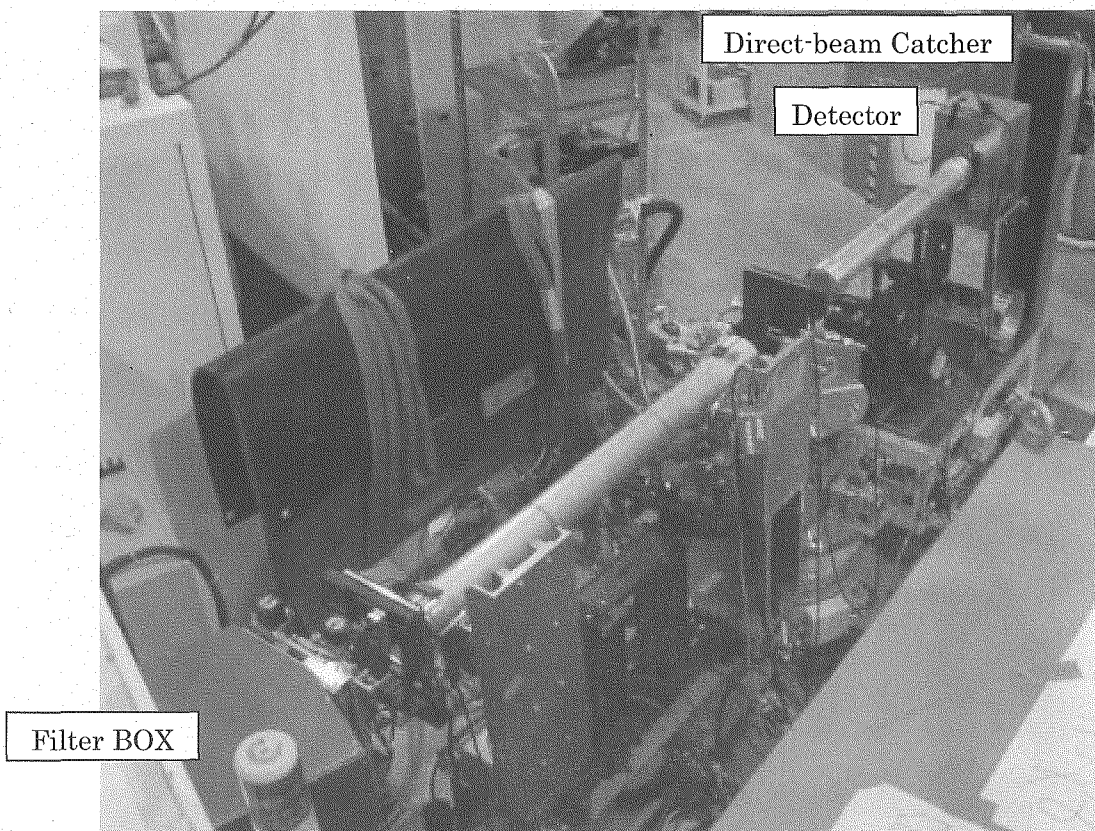
参考文献

- 1) J. Daillant and A. Gibaud (ed.): "X-Ray and Neutron Reflectivity: Principles and Applications" (Lecture Notes in Physics, LNP m58), Springer-Verlag (1999).
- 2) See <<http://www.ill.fr/>>
- 3) See <<http://www.isis.rl.ac.uk/>>
- 4) See <<http://www.frm2.tum.de/>>
- 5) See <<http://ncnr.nist.gov/>>
- 6) See <<http://lansce.lanl.gov/>>
- 7) See <<http://www.ts2.isis.rl.ac.uk/>>
- 8) See <<http://www.sns.gov/>>

- 9) S. Tasaki: "C3-1-2-2 Multilayer Interferometer and Reflectometer for Neutron (MINE)", Activity Report on Neutron Scattering Research, ISSP-NSL,27-28, (2004).
- 10) M. Takeda and Y. Endoh : "A new pulsed polarized neutron reflectometer, PORE, at KENS", Physica B, 267-268, 185-189 (1999).
- 11) N. Torikai, M. Furusaka, H. Matsuoka, Y. Matsushita, M. Shibayama, A. Takahara, M. Takeda, S. Tasaki and H. Yamaoka: "Instrumental design and performance of a new pulsed-neutron reflectometer (ARISA) at KENS for studying free surfaces", Appl. Phys. A., 74 [Suppl.], S264-S266 (2002).
- 12) N. Torikai, H. Matsuoka, K. Soyama, H. Takahashi, M. Takeda, S. Tasaki, D. Yamazaki, T. Ebisawa, T. Sakuma, Y. Kiyonagi, and M. Furusaka: "Design Concepts and Advanced Research Application of the J-PARC Neutron Reflectometer with Horizontal Sample Geometry", Trans. Mater. Res. Soc. Jpn., 28, 47-50 (2003).
- 13) K. Soyama, N. Metoki, N. Minakawa, Y. Morii, N. Torikai and Y. Matsushita : "A Neutron Reflectometer Installed at the Cold Neutron Triple-Axis Spectrometer (LTAS, C2-1) in JRR-3M", J. Phys. Soc. Jpn., 65 Suppl.A, 133-135 (1996).
- 14) R. Maruyama, D. Yamazaki, T. Ebisawa, M. Hino and K. Soyama: "Development of neutron supermirror with large-scale ion beam sputtering instrument", Physica B, 385-386, 1256-1258 (2006).
- 15) R. Maruyama, D. Yamazaki, T. Ebisawa, M. Hino and K. Soyama: "Development of neutron supermirrors with large critical angle", Thin Solid Films, in press.
- 16) M. Hino, H. Hayashida, M. Kitaguchi, Y. Kawabata, M. Takeda, R. Maruyama, T. Ebisawa, N. Torikai, T. Kume and S. Tasaki: "Development of large- m polarizing neutron supermirror fabricated by using ion beam sputtering instrument at KURRI", Physica B, 385-386, 1187-1189 (2006).
- 17) M. Köppe, M. Bleuel, R. Gähler, R. Golub, P. Hank, T. Keller, S. Longeville, U. Rauch and J. Wuttke: "Prospects of resonance spin echo", Physica B, 266, 75-86 (1999).
- 18) J. Major, H. Dosch, G.P. Felcher, K. Habicht, T. Keller, S.G.E. te Velthuis, A. Vorobiev and M. Wahl: "Combining of neutron spin echo and reflectivity: a new technique for probing surface and interface order", Physica B, 336, 8-15 (2003).
- 19) Y. Kawabata, M. Hino, M. Kitaguchi, H. Hayashida, S. Tasaki, T. Ebisawa, D. Yamazaki, R. Maruyama, H. Seto, M. Nagao and T. Kanaya, "Neutron resonance spin echo and MIEZE spectrometer development project in Japan", Physica B, 385-386, 1122-1124 (2006).



☒ 1 Layout of the SUIREN beam line.



☒ 2 View of the SUIREN beam line from the filter box to the detector and direct-beam catcher .

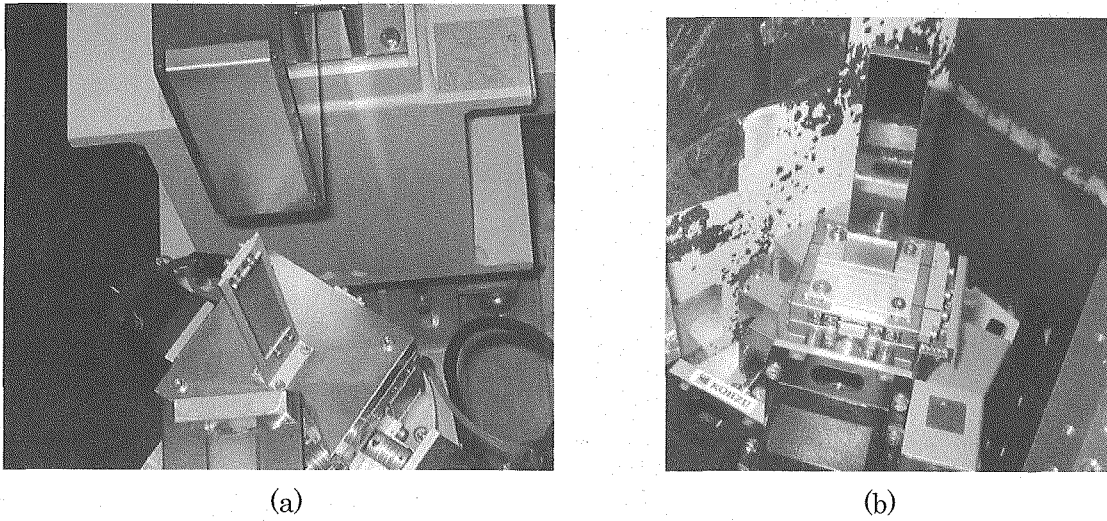


図 3 (a): Graphite monochromator mounted between cold neutron guide tube. (b): 1/2-filter of graphite.

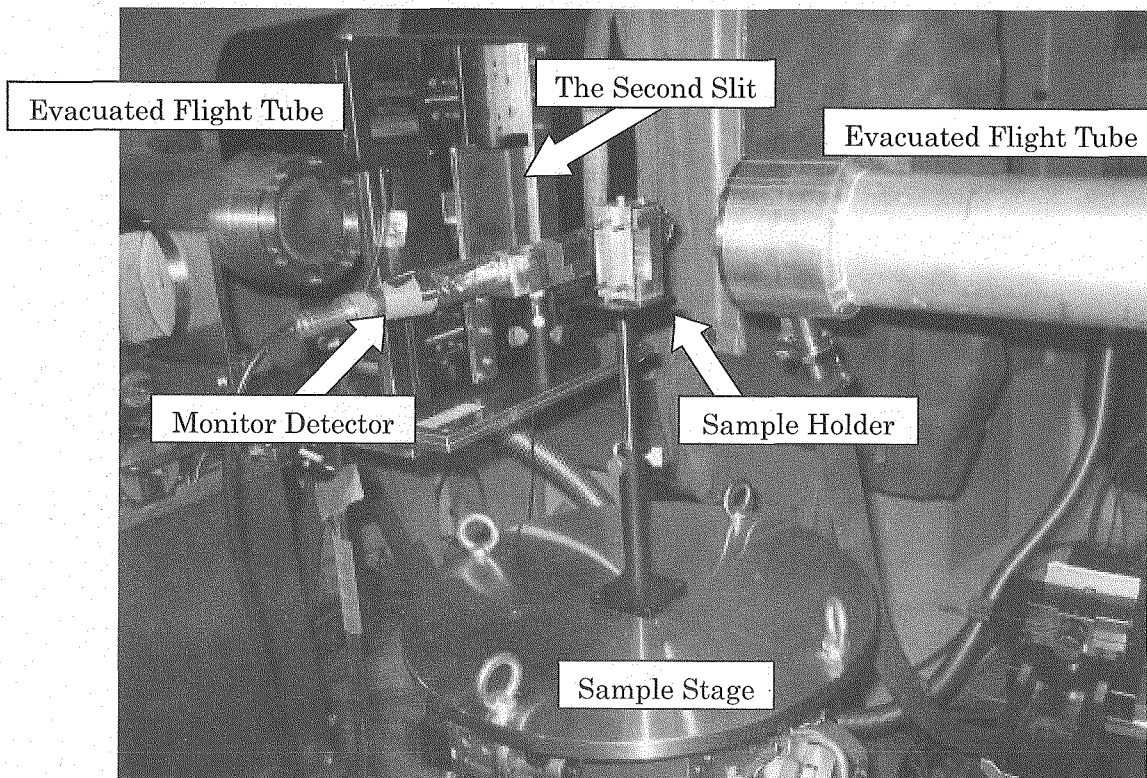


図 4 Beam-line components around the sample stage.

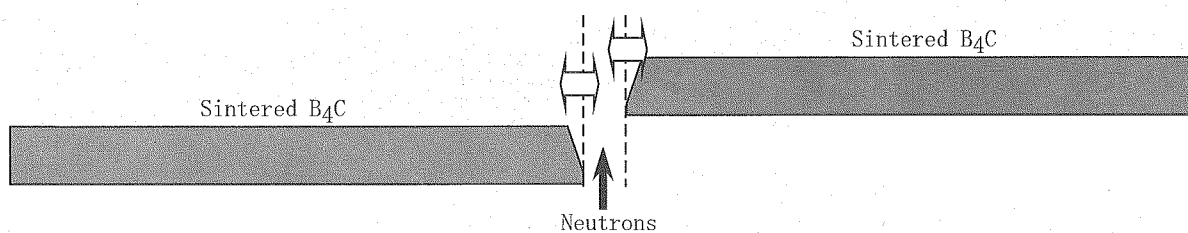


図 5 Structure of the neutron slit.

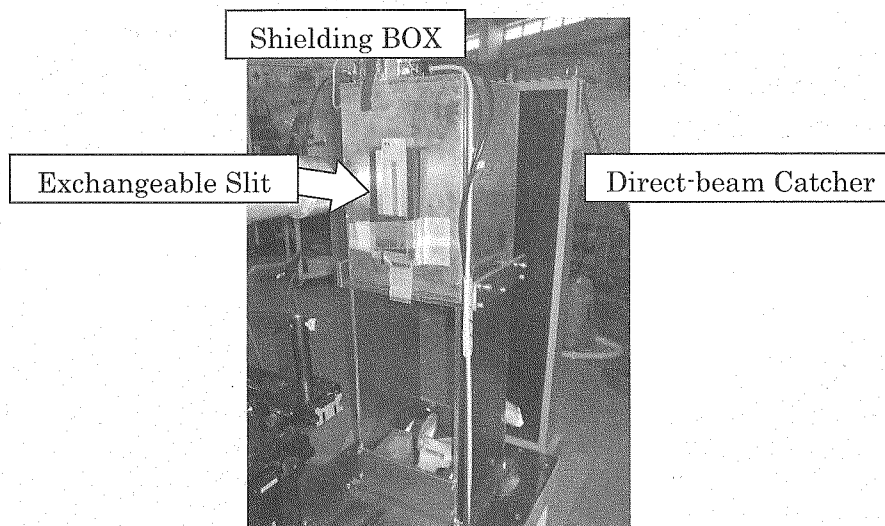


図 6 The neutron detector used at SUREN. A ³He detector is mounted in a shielding box filled with B₄C resin. An exchangeable slit system is placed at the beam window of the shielding box. A direct-beam catcher is placed after the detector.

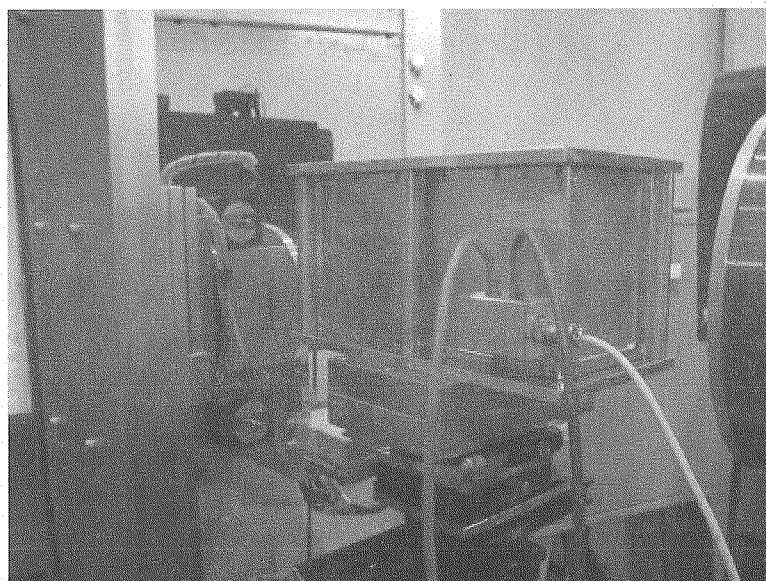


図 7 Polarizing neutron bender with reversible polarizing direction. Characteristic wavelength is 3.82 Å.

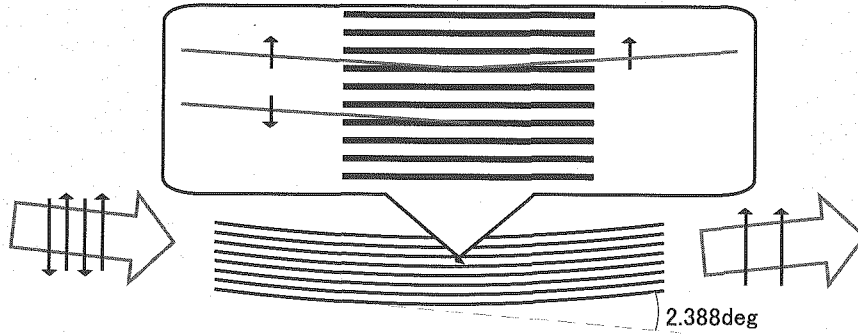


図 8 Polarization of neutrons in the bender. Neutrons with spin “↓” are not reflected and absorbed by the mirror substrates (borofloat glass).

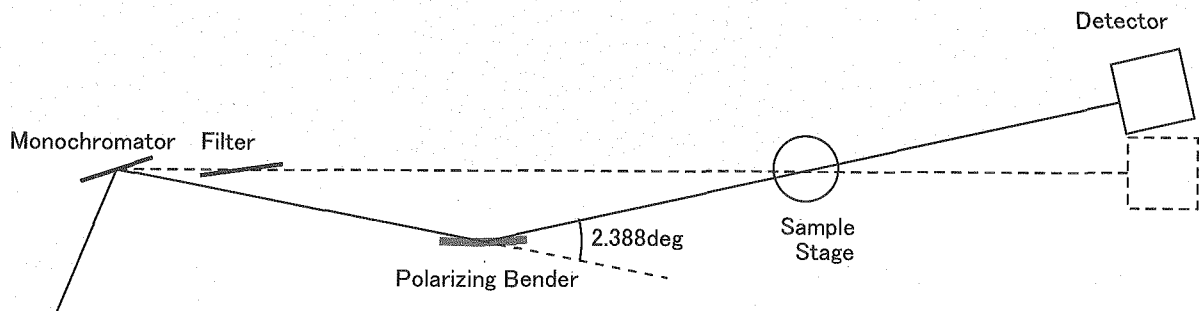
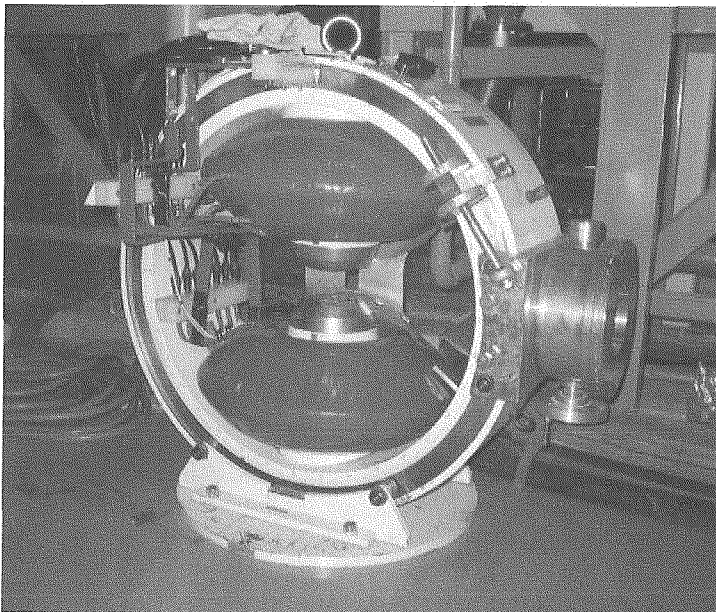
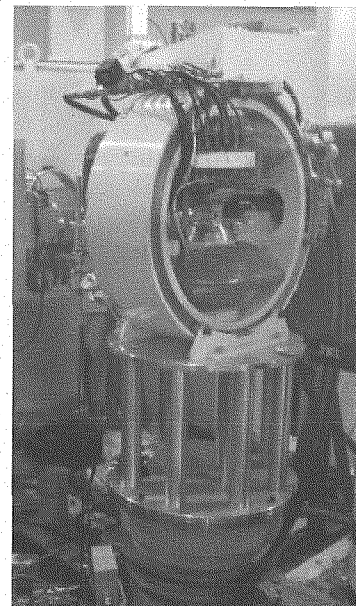


図 9 Layout of the polarized neutron beam line with the polarizing bender. The direct beam line is changed due to the bending.



(a)



(b)

図 10 (a): The sample magnet. (b): The sample magnet mounted on the sample stage.

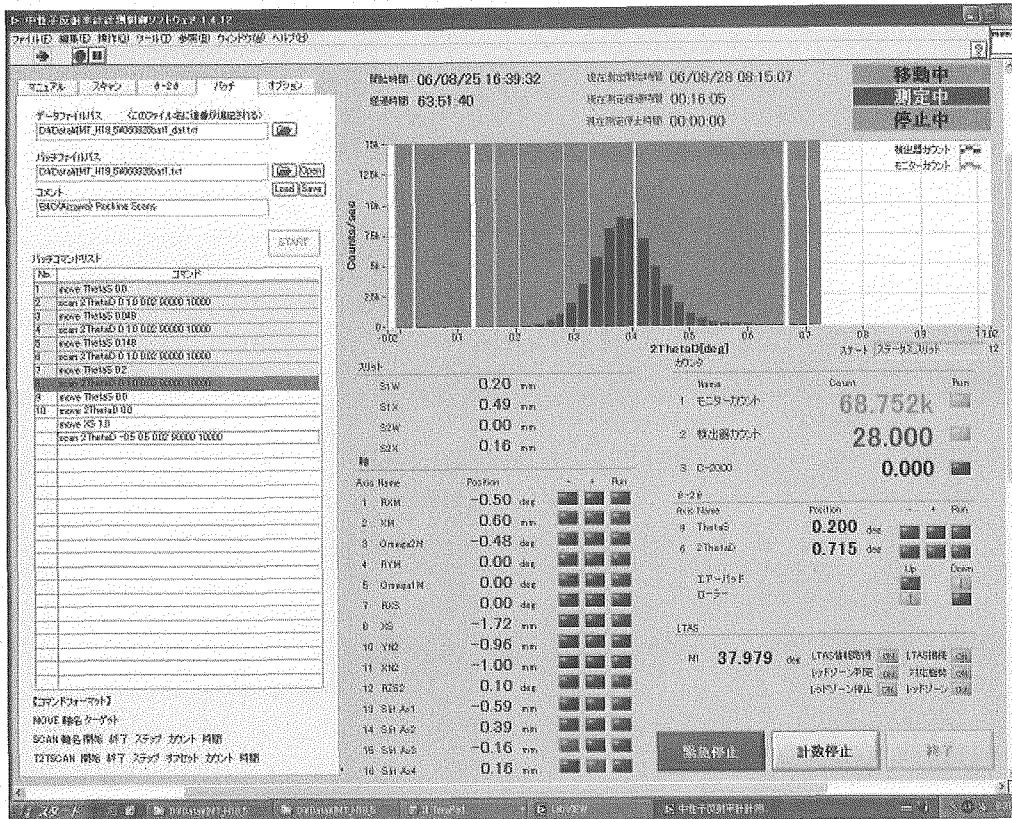


図 11 Screen of the SUIREN control software.

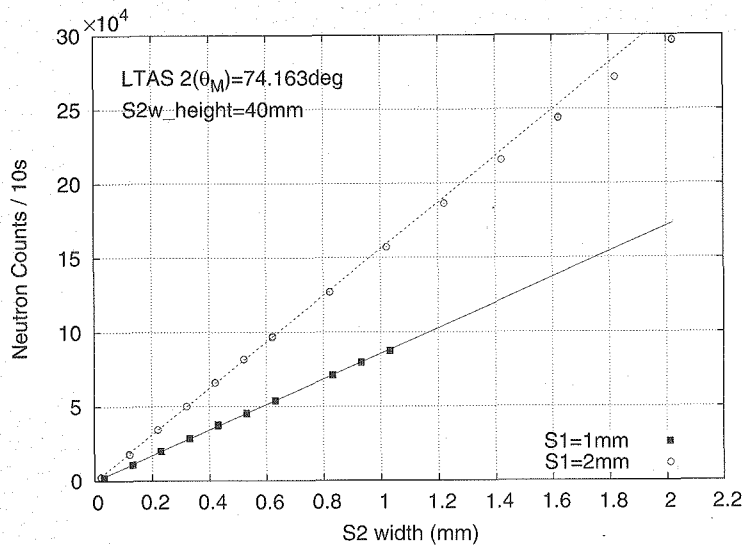
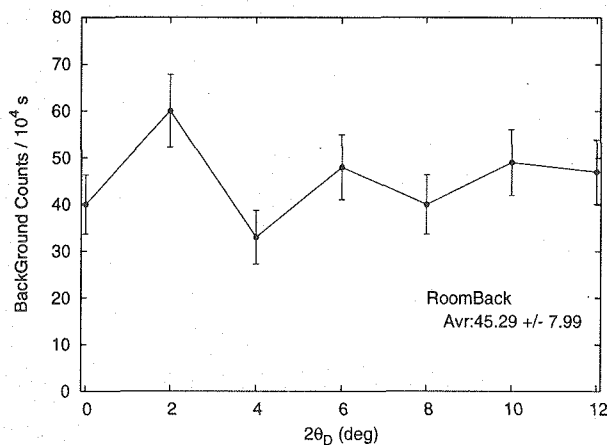
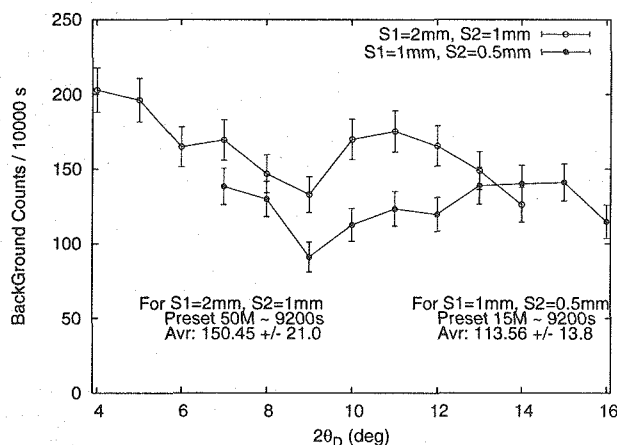


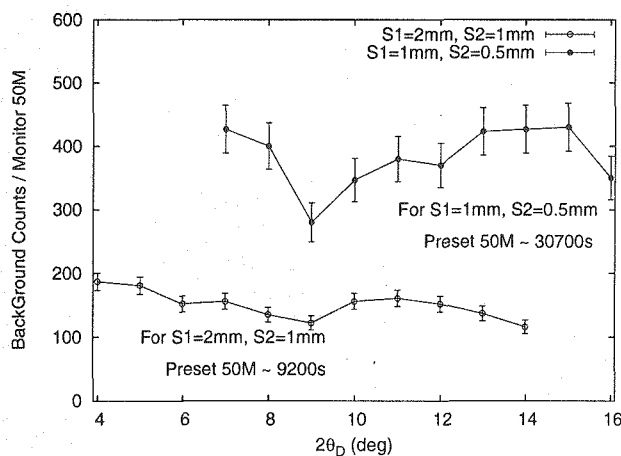
図 12 Collimated neutron intensity as a function of the second-slit width, while the first slit is fixed at 1 mm or 2 mm. Beam height is 40 mm. Distance between the first and second slit is 1450 mm.



⊠ 13 Background as a function of the detector position ($2\theta_D$) measured when both the local beam-shutter and the detector window were closed. Measuring time was 10000 s.

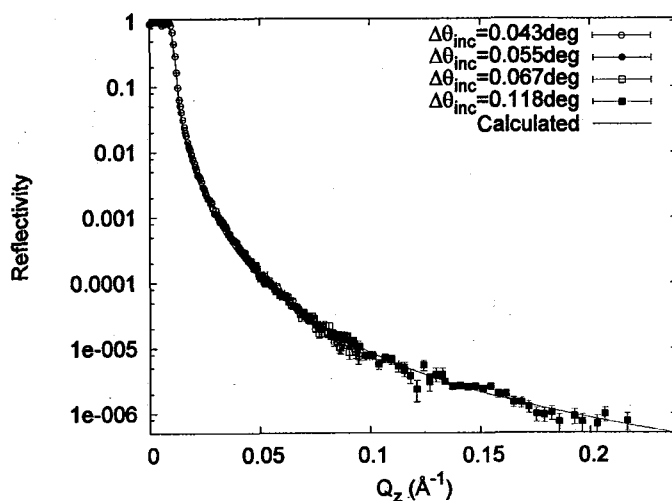


(a)

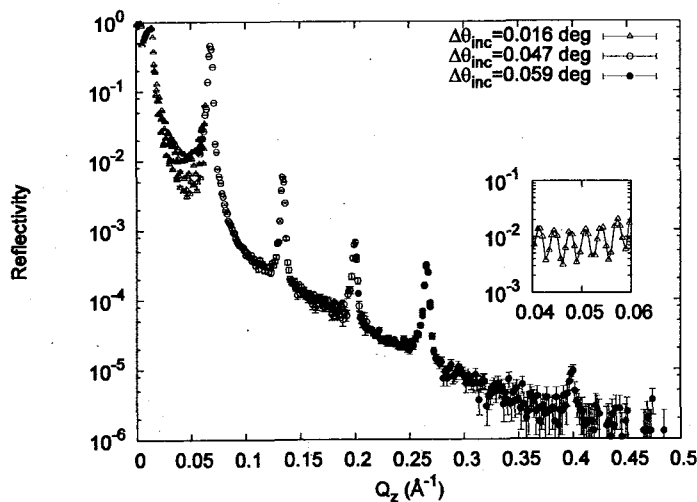


(b)

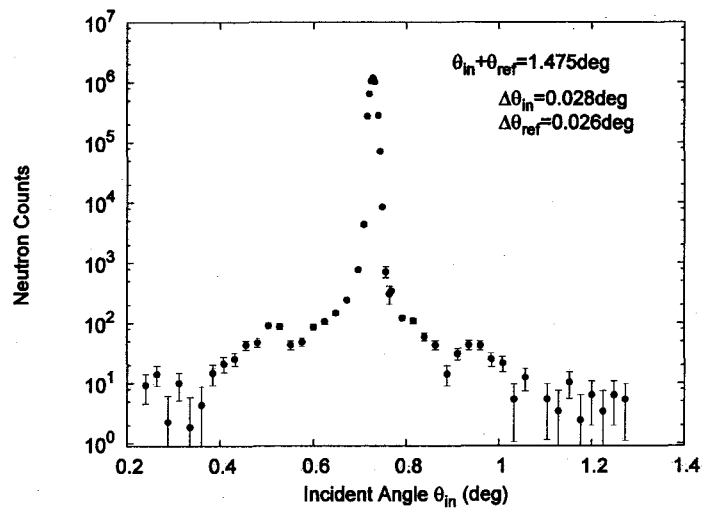
⊠ 14 Background as a function of the detector position ($2\theta_D$) measured when the local beam-shutter was open. (a): Normalized with time (10000s). (b): Normalized with monitor count (5×10^4).



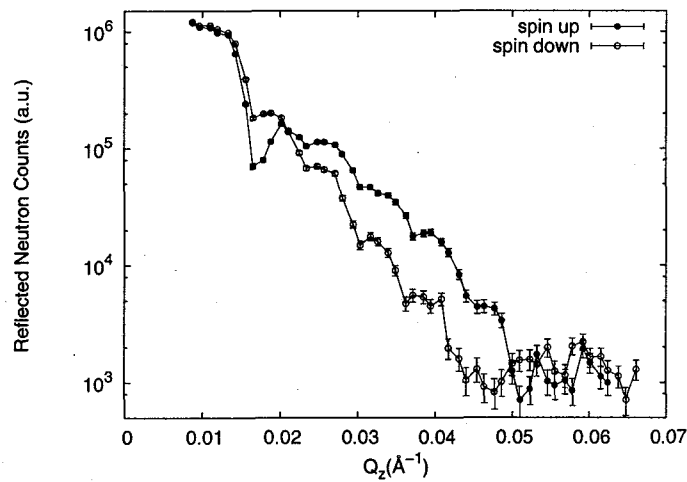
⊠ 15 Neutron reflectivity from a silicon substrate. Sample size is 3 inches in diameter. An oxidized layer of 5 Å is assumed for the “Calculated” curve. Measuring time was 32 hours, but it could have been reduced to 27 hours by reducing measuring points between $0.032 < Q_z < 0.095$.



⊠ 16 Neutron reflectivity of a Ni/Ti multilayer coated in JAEA. Inset shows a magnified view of the reflectivity for $0.04 < Q_z < 0.06$. It took 29 hours to measure up to the 4th peak (0.28\AA^{-1}) and another 30 hours to measure up to the 6th peak.



⊠ 17 Off-specular scattering from a NiC/Ti supermirror ($m=3$) measured with a rocking scan. Measuring time was 19 hours.



⊠ 18 Test measurement of polarized neutron reflection for an exchange-coupled layer.

表 1 Collimations and measuring times for the silicon substrate (図 15).

Q_z range (\AA^{-1})	Collimation (deg)	Number of points	Averaged measuring time for one point (s)	Total measuring time (s)
0.000 ~ 0.032	0.043	55	200	11000
0.032 ~ 0.053	0.055	38	200	7600
0.052 ~ 0.095	0.067	75	500	37500
0.092 ~ 0.115	0.118	15	500	7500
0.115 ~ 0.220	0.118	27	2000	54000

表 2 Collimations and measuring times for the Ni/Ti reflectivity measurement (図 16).

Q_z range (\AA^{-1})	Collimation (deg)	Number of points	Averaged measuring time for one point (s)	Total measuring time (s)
0.000 ~ 0.063	0.016	110	235	25850
0.058 ~ 0.211	0.047	133	268	35644
0.201 ~ 0.273	0.059	42	960	40320
0.262 ~ 0.486	0.059	130	940	122200

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の) 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
	名称	記号		
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m ¹ ・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻² ・kg ¹ ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ¹ ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ¹ ・s ⁻³
電荷, 電流	クーロン	C		s ¹ ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ¹ ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光線束	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
照射 (放射能核種の) 放射能	ベクレル	Bq	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
吸収線量, 質量エネルギー	グレイ	Gy	J/kg	s ⁻¹
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量と区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作る際のいくつかの用例は表4に示されている。
- (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
- (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
- (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を併せて用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		SI 基本単位による表し方
	名称	記号	
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m ⁻¹ ・kg ¹ ・s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ¹ ・s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg ¹ ・s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ¹ ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ¹ ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg ¹ ・s ⁻³
質量熱容量 (比熱容量), 質量エンタロピー	ジュール毎平方メートル	J/K	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量エンタロピー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ¹ ・s ⁻²
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ¹ ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ¹ ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ¹ ・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モルエンタロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s ¹ ・A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg ¹ ・s ⁻³ =m ² ・kg ¹ ・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg ¹ ・s ⁻³ =kg ¹ ・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1 海里=1852m
ノット	ノット	1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バ	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エール	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラレド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	X unit	1 X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=1cSv・m ² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fem	1 fem=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	Torr	1 metric carat=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m