

## 永久磁石による高効率中性子輸送

### HIGH EFFICIENCY NEUTRON TRANSPORT WITH PERMANENT MAGNETS

岩下芳久<sup>#,A)</sup>, 栗山靖敏<sup>B)</sup>, 不破康裕<sup>B)</sup>, 山田雅子<sup>C)</sup>, 広田克也<sup>D)</sup>, 清水裕彦<sup>E)</sup>, 北口雅暁<sup>E)</sup>  
Yoshihisa Iwashita<sup>#,A)</sup>, Yasutoshi Kuriyama<sup>B)</sup>, Yasuhiro Fuwa<sup>B)</sup>, Masako Yamada<sup>C)</sup>, Katsuya Hirota<sup>D)</sup>,  
Hirohiko Shimizu<sup>E)</sup>, Masaaki Kitaguchi<sup>E)</sup>

<sup>A)</sup> RCNP, Osaka University

<sup>B)</sup> JAEA/J-PARC

<sup>C)</sup> KEK/J-PARC

<sup>D)</sup> KEK

<sup>E)</sup> Nagoya University

#### Abstract

Neutron guide tubes are used to transport neutrons efficiently. However, it requires very precise alignment, which is costly and vulnerable to shocks from earthquakes and other incident. It also is very sensitive to the surface condition such as cracks or dusts. We are developing a new type of neutron mirror that takes advantage of the orbit-bending of neutrons in a gradient magnetic field.

#### 1. はじめに

中性子の輸送には、物質表面での極斜入射反射を利用した中性子ガイド管が用いられる。中性子ガイド管に中性子多層膜ミラーを用いることで、広い発散角を持つ中性子ビームを下流に輸送することができる。反射率は1より小さいため、ガイド管の幅を広くすることによって、輸送時の反射回数を減らすことが出来、輸送効率を高く保つことが出来る。既存の中性子源施設である3号炉のレイアウトを Fig. 1 に示す。炉心から実験ホール内の測定装置が置かれている場所まで、数十 m の距離、中性子を輸送する必要がある。

ミラーの場合、設置の角度誤差は反射角に倍の角度誤差となって現れ、また、ミラー間に隙間があると、その分、中性子は失われる。微細ゴミによっても、中性子は散乱/吸収され、失われる (Fig. 2 参照)。そのため、従来型のガイド管では、アライメントを極めて高精度に行い、維持する必要がある。SANS などの多くの実験では、q 分解能の良い測定を達成するために、入射ビームの発散角及び、ビームサイズを十分に小さくする必要がある。ガイド管が多層膜ミラーにより大きな発散角、大面積を持つビームを輸送しても、中性子のほとんどはコリメータによって廃棄される。実際、多くの SANS 測定では、スーパーミラーの  $m=1$  に相当する発散角を持つビームしか使用されていない。高精度なアライメントを維持するには、強剛な建物基礎が必要である。通常、炉心を含む建屋と、実験ホールの基礎は分かれるが、地震の多い我が国では、コスト削減に対する大きな障壁となる。

最近の中性子施設では、1本のガイド管の先端に1台の実験装置が直接設置され、ビームは輸送の途中で分岐しない。このような場合、大きな発散角を許容するガイド管は必要ない。細いガイド管を試料の大きさに合わせて放射状に配置すれば、施設全体がより効率的になる (Fig. 3 参照)。但し、この場合同じ距離を輸送する際の

<sup>#</sup> iwashita.yoshihisa.4x@kyoto-u.jp

反射回数が増えるため、高い反射効率が必要となる。

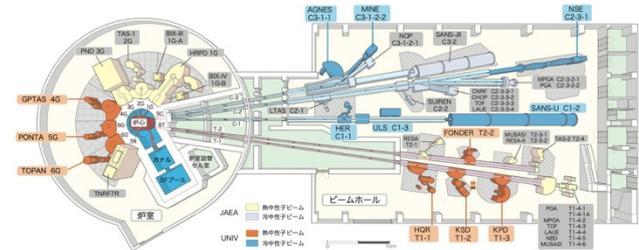


Figure 1: Layout of JRR3.

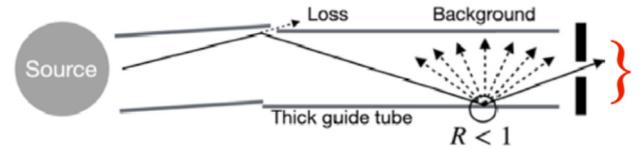


Figure 2: Conventional guide tube with loss and background.

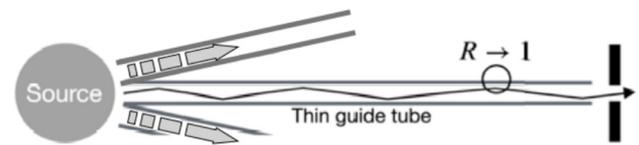


Figure 3: New concept of guide tube for modern neutron facilities.

#### 2. 勾配磁場中の中性子の運動

磁場中の中性子は次の式に従って軌道を曲げる[1]:

$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \pm \left| \frac{\mu_n}{m_n} \right| \cdot \nabla |\mathbf{B}| \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{r}$  と  $t$  は中性子の位置と時間、 $\mu_n$  と  $m_n$  はそれぞれ中性子の磁気双極子モーメントと質量である。 $\nabla |\mathbf{B}|$  は磁

場強度の勾配である。右辺の符号は中性子のスピン(磁気双極子モーメント)の向きに依存し、スピンと磁場が平行なら正、反平行なら負となる。偏極していない中性子が磁場中に入射した場合、量子化により、スピンが平行成分と、反平行成分に分かれる。磁気双極子能率を持っている場合、中性子は一様磁場中では力を受けないが、例えば、勾配が一様な四極磁場では一様な偏向力を受ける(Fig. 4)。6 極磁場になると、磁場強度は二次関数的に変化するため、その微分である磁場勾配は中心からの距離に比例する力を受け、これは集束要素として機能する。実際にこの原理を使って低速中性子ビームによるイメージングなどに成功している[2]。さて多極磁場の次数を上げてゆくと、中央部分の磁場がほぼ無くなり、壁面(周辺部)のみに磁場が存在する分布となる。従って、その磁場強度変化も壁面部で大きくなり、カスプ型磁場分布となる。このような磁場配置はカスプフィールド型イオン源でも使用され、イオンの閉じ込めに使用されている。電荷を持たない中性子の場合、磁場勾配により力を受ける点が、荷電粒子であるイオンと作用機序が異なるが、同様に壁面で反射される点でアナロジーがある。

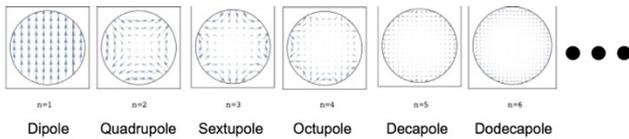


Figure 4: Multipole field.

### 3. 磁気勾配ミラー

上述のように、スピンが保たれていれば壁面で 100% の反射率を持つ鏡として振る舞う(Fig. 5)。これを「磁気勾配ミラー」と呼ぶ。従来のミラーでは、中性子は物質中の擬ポテンシャルによって反射されるため、数波長程度は物質中に侵入するため、物質による吸収や散乱の影響を受け、反射率に限界がある。このミラーでは、中性子は磁場によって磁石手前で徐々に曲げられ、物質表面には接触しない。磁場の境界はあいまい(fuzzy)であるため、材料表面の粗さやガイド管の継ぎ目の隙間の影響を受けにくい。さらに、中性子と材料との相互作用は起こらないので、バックグラウンド事象は発生しない。このことは、超低バックグラウンド実験にとって重要となる。

中性子をより効率的に使うために、細いガイド管を試料の大きさに合わせて放射状に配置する場合、細いガイド管では反射回数が増えるため、反射率をできるだけ高く保つことが重要である。多層膜ミラーの場合、材料表面の状態、例えば表面粗さによって反射率は低下する。また、組立工程における隙間や段差も有効反射率を低下させる。非常に精度の高い設置にはコストがかかり、地震などの衝撃に弱い。そこで、我々は勾配磁場中での中性子の偏向を利用した新しいタイプの中性子ミラーを開発している(Fig. 4)。中性子は磁気双極子能率を持っており、スピンは中性子の磁気能率と対になっている。磁場中ではスピンの方向が量子化され、平行成分と、反平行成分に分かれる。磁場の勾配はスピン平行な中性子に対する反発力を発生させる。反平行中性子は磁石や基板に当たって散乱・吸収されて輸送されない。

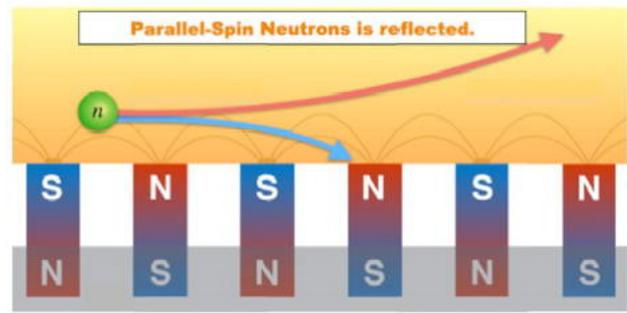


Figure 5: Schematic image of reflected neutron by magnetic repulsive wall. Field gradient produces repulsive force to spin parallel neutrons. Anti-parallel neutron is stopped in magnets or substrate.

### 4. 磁石素板の製作

1 mm × 2 mm × 50 mm の棒磁石を、90 度ずつ異方性軸の向きを回しながら 50 本並べて 50 mm 角の磁石素板を製作した。いわゆる Halbach 配列である。初期角度により、並べ方は 2 種類あり、法線方向から始まるものと、そこから半ステップ、45 度から始めるものを作った。なお、製作の容易性を考えて、磁石は磁性ステンレスの基板の上で接着剤で固定している。Figure 6 に断面での 2 次元磁場計算結果を示す。どちらも磁場勾配はほぼ同等であるが、組立時の容易度は 45 度開始のものの方がお互い吸引する面が交互に現れる。この吸引する 2 個を先に合わせて接着しておいてから、2 mm × 2 mm を並べる方が効率的に組み上がると想定される。また、磁石内の反磁場領域の現れ方も 0 度開始のものに比べて有利となっている。5 cm 角断面のガイド管を構成する場合、40 m 程度の長さにしよと思うと、3200 枚の磁石素板が必要となる。そのため、現在大量生産に向けて製造方法の効率化を製造業者と議論中である。

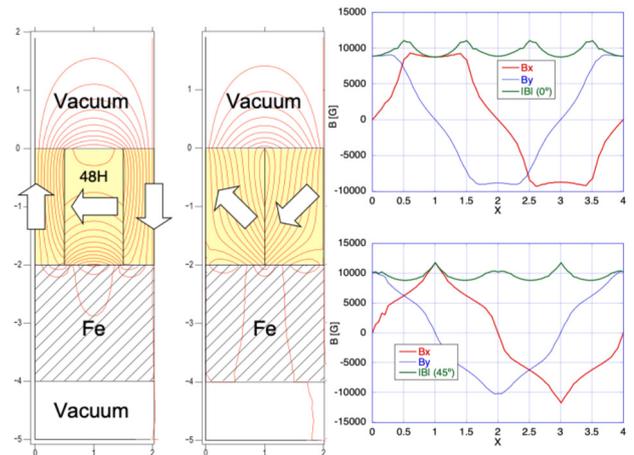


Figure 6: 2-D magnetic field calculation. Left two flux plots are the one with starting angle of 0° and that of 45°. Right two plots are the two components Bx (horizontal component) and By (normal component) just 0.1mm above the magnet assembly surface.

製作した磁石の 3 次元の磁場測定を 3 軸テスラメータ SENIS 3MH3 を使って行った(Fig. 7)。測定プローブ表

面から、感度を持つホール素子自身が 1 mm 奥にあるため、このシステムでは、表面から 1 mm 以上離れた面からしか測れない。予備的磁場分布測定で得られた、1 mm 程度表面から離れた面の、法線方向成分の等高線図を Fig. 8 に示す。また、それをラバーマップにしたものを Fig. 9 に示す。

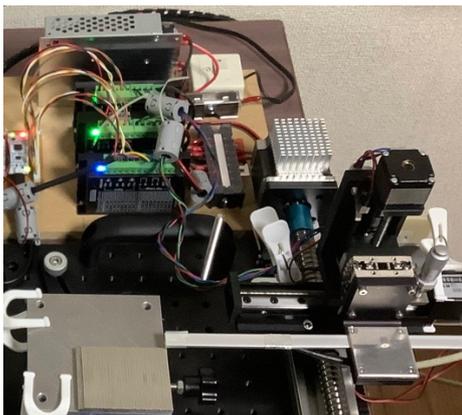


Figure 7: 3D 3-axis magnetic field mapping system.

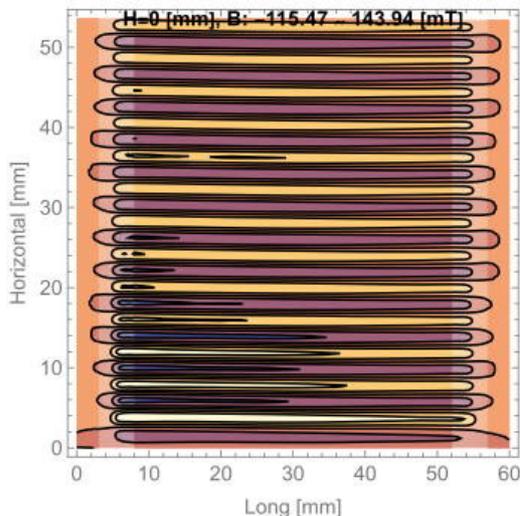


Figure 8: Contour map of normal components of magnetic field.

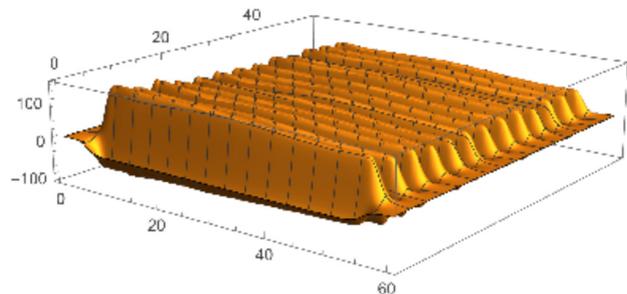


Figure 9: Rubber map of normal components of magnetic field.

## 5. 中性子を使った評価実験

J-PARC/MLF BL16(SOFIA)にて小型のプロトタイプミラーを使った予備実験を行い、中性子ビームが磁場勾配面で曲げられることを確認した。また、反射軌跡の波長依存性を観測することにも成功した。十分コリメートした中性子ビームを極斜入射で磁石素板に入射し、その反射された成分の位置を 2 次元検出器で測定した (Fig. 10 上)。磁場の影響を受ける領域が、表面から 2 mm 程度あり、磁石素板が短いため、十分反射偏向しきる前に磁石領域を離れるため、検出位置が波長に依存する。点は実験結果で灰色の線はシミュレーション (Fig. 10 下)。計算値はオフセットされている。セットアップの不完全さ、磁石の配置と強さに大きな不確かさがあるため、絶対値よりも傾向のみに注目すべきである。次のステップは、ガイドチューブとして組み立てた場合の輸送効率を評価することである。

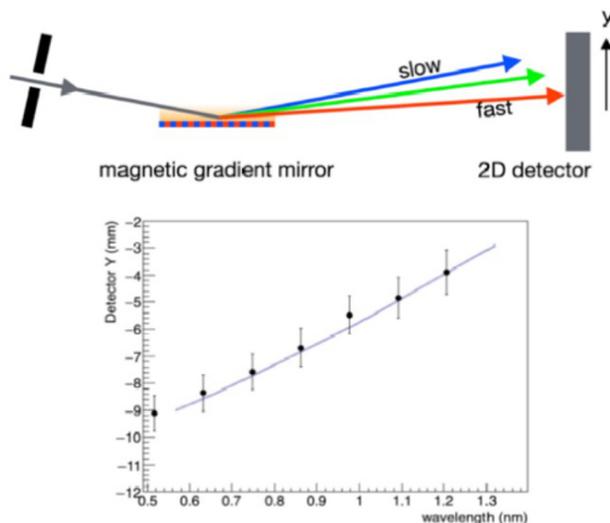


Figure 10: Demonstration of neutron reflection by magnetic gradient mirror. Dots are experimental results. Gray lines are simulations. Calculated values are offset. Due to imperfections in the setup and large uncertainties in the magnet placement and strength, only trends should be focused on rather than absolute values.

## まとめ

新しいタイプの中性子ミラーを開発中である。最初のプロトタイプミラーは BL16 でテストされた。不完全な反射状態を改善し、解析を比較しやすくするため、長い第二のプロトタイプ磁石を準備中で、これを使った次の実験を予定しており、準備を進めている。一方、これを使った長尺中性子ガイド管の設計を検討中である。

## 参考文献

- [1] H. M. Shimizu *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A 430, 423 (1999).
- [2] M. Yamada *et al.*, PTEP 2015, 043G01 (2015).