

MAGNETIC LENS FOR PULSED VERY COLD NEUTRON BEAM FOR VCN-SANS

Masako Yamada^{A)}, Yoshihisa Iwashita^{A)}, Masahiro Ichikawa^{A)}, Takanori Sugimoto^{A)}, Hiromu Tongu^{A)}, Hiroshi Fujisawa^{A)}, Ichiro Kazama^{A)}, Hirohiko M. Shimizu^{B)}, Norifumi L. Yamada^{B)}, Takashi Ino^{B)}, Kenji Mishima^{B)}, Kaoru Taketani^{B)}, Tamaki Yoshioka^{B)}, Suguru Muto^{B)}, Takayuki Oku^{C)}, Jun-ichi Suzuki^{C)}, Katsuya Hirota^{D)}, Shane Kennedy^{E)}, Peter Geltenbort^{F)}, Bruno Guerald^{F)}, Giuliana Manzin^{F)}, Ken Andersen^{F)}

^{A)}Kyoto ICR, Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011

^{B)}KEK, 1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{C)}JAEA, 2-4, Shirane, Shirakata, Tokai, Ibaraki, 319-1195

^{D)}RIKEN, 2-1, Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198

^{E)}Bragg Institute, ANSTO, New Illawarra Road, Lucas Heights, NSW, 2234, Australia

^{F)}ILL, 6 Rue Jules Horowitz, BP 156, 38042 GRENOBLE Cédex 9

Abstract

We are developing a magnetic lens for focusing of pulsed neutron beams. In order to modulate the magnetic field in the bore, it is composed of two co-axial nested sextupole magnet rings, where the inner ring is fixed and outer ring can be rotated continuously (rot-PMSx). Synchronizing the phase of the modulation with that of a pulsed neutron beam suppresses the effect of the chromatic aberration. We fabricated a prototype of the rot-PMSx; the bore radius is 15mm, magnet length is 66mm, and sextupole magnetic field gradient is $5.88 \times 10^4 \text{T/m}^2$.

We have carried out the experiment to demonstrate the performance of the rot-PMSx at PF2 beam line in ILL (Institut Laue-Langevin, France) using VCN (Very Cold Neutrons). We observed the beam size can be kept constant for the finite band of wavelength (30~48Å) in the specific range of location.

VCN-SANSのためのパルス極冷中性子集束用磁気レンズの開発

1. 序

近年、ハドロンの加速器を利用してSNS、ISIS、J-PARCと大型の核破砕型中性子源が数多く建設されている。この様な現状を受け、今後主流となるであろうパルス中性子ビームにToF (Time of Flight)法を適応した実験に対応した磁気レンズである、二重リング回転式強度変調型永久六極磁石 (rotating Permanent Magnet Sextupol 以下rot-PMSx)の開発を行っている¹⁾。

従来、減速体からの中性子は発散角及びエネルギー拡がり非常に大きく、大部分の中性子を切り捨てて有効なビームを得ていた。このrot-PMSxを使うとより多くの中性子を集中させることでビーム密度が向上する。サンプル上にビームを集束することで、中性子散乱はより小さなサンプルに適応可能となり、特に大きなサンプルを作ることが難しい生物物理の分野で効果が大きい。また空間分解能の向上によりスキヤニングも可能となる。基礎物理実験においても強度の増強は統計精度の向上につながり多くの実験が実現可能となる。すでに述べたようにJ-PARCのようなパルス中性子ビームに対してはToF(飛行時間)法を適応可能なのでビームを単色化する必要がなく、全ビームを無駄なく利用できる。以上のような効果により中性子ビームはより強力なプローブとなると考えている。

これまでにボア径15mm、磁石長66mm、磁場変調

周期25Hzのプロトタイプの製作及び改良を行った。rot-PMSxの色収差の影響を抑えた集束性能を実証するため、2008年6月に第一段階として磁場強度半固定で、2009年6月から8月に磁場強度を連続的に変調しパルスVCN集束実験を行った。

2. 色収差の影響を抑えた集束

磁気レンズの中性子集束力の源は中性子の磁気モーメントと6極磁場成分の相互作用である²⁻⁴⁾。磁場の6極成分を、磁場勾配の大きさを表す正の定数 G' を用いて

$$|B| = G'/2(x^2 + y^2) \quad (1)$$

と表す。局所磁場の変化率が断熱スピン輸送条件を満たしている時、6極磁石の中心軸に対して平行に入射された中性子ビームのうちスピンの磁場に平行な成分は焦点に集束され、反平行なものは発散される²⁻³⁾(図1参照)。ド・ブロイ波長 λ の中性子は、 Z_m を磁石長として、焦点距離は

$$Z_f = Z_m + \frac{h}{\omega m_n \lambda} \cot\left(\frac{\omega m_n \lambda}{h} Z_m\right) \quad (3)$$

で表される。ここで $a = |m_n/m_n| = 5.77 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ T}^{-1}$ 、 $\omega^2 = G'a$ 、 m_n は中性子の磁気モーメント、 m_n は中性子の質量、 h はプランク定数である。(3)式から分かるように、焦点距離は中性子の波長に依存する。パ

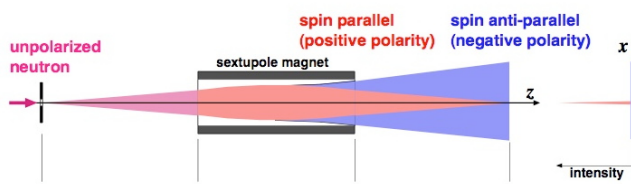


図1. 磁気レンズによる中性子ビームの集束と発散
 ルス中性子にTOF法を組み合わせた実験では中性子の波長(運動量)は単色でないため、一定距離飛行させた場所では中性子の波長は時間 t とともに変化する。これに磁場強度を同期させて

$$G' \propto \lambda^{-2} \propto t^{-2} \quad (5)$$

$$\left(\text{ド・ブロイ波長: } \lambda = \frac{h}{mv} \propto t \right) \quad (6)$$

と変調すれば、変化する波長に対して焦点距離を一定に保つことができる^[2-4](図2参照)。

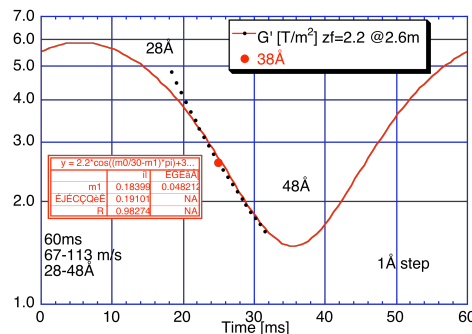


図2. 各波長に対する集束力と磁場強度変調の同期

3. rot-PMSxの製作

ボア半径(内輪内径)15mm、外輪外径80mm、磁石全長66mm、磁場変調周期をJ-PARCにおけるパルス中性子の繰り返し周期に合わせた25Hzでrot-PMSxを製作した^[1]。より大きい磁束密度を得るため、永久磁石をExtended-Halbach型に配置し、磁極にはパーメンジュールを用いた^[5]。内輪を固定したまま外輪を連続的に回転させることで正弦関数的な変調を得る二重リング回転式磁場変調構造を導入した。外輪の回転はゴムベルトを介したモーターの動力による。

3.1 ボア内部の磁場分布測定

内輪に関して2回改良を行ったが、現行機のボア内部の磁場分布測定結果を表1に示す。磁石の長手方向中央の磁極表面では1.65 Tと強い磁場が得られている。

表1. (左) 固定角と磁場、磁場勾配

angle[deg]	磁場B[T]	磁場勾配 G' [T/m ²]
0	1.65	5.88×10 ⁴
10	1.50	5.33×10 ⁴
30	0.89	3.15×10 ⁴
60	0.41	1.48×10 ⁴

4. パルスVCN集束実験(磁場強度半固定)

ILL(Institut Laue-Langevin, France)のPF2 ビームラインにおいてrot-PMSxのVCNビーム集束実験を、第一段階として磁場強度半固定で行った^[1]。パルス化されたVCNビームを偏極スーパーミラーで磁場に平行なスピンを持つ中性子のみを選択し、φ1mmのピンホールでコリメートされた中性子のイメージを焦点距離Z_f=540mm、倍率3倍の光学系で検出器上に集光した。外輪の回転角を変えながら固定し、各磁場強度で焦点が合っている波長と磁場測定の結果から計算される波長とを比較するとエラーバーの範囲で一致していた(表2参照)。ただし、ビームスポットサイズは各ToFでの重心からの距離の標準偏差で評価し、各ToFに対応する波長を式(6)より計算した(図3参照)。これらの測定結果より、焦点を結ぶ波長の磁場強度依存性がおよそ設計通りであることが実証された。

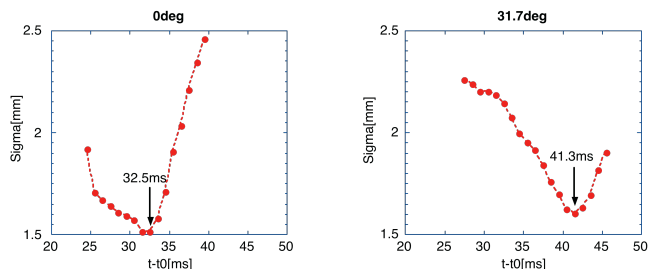


図3. 各強度でのビームスポットサイズの波長依存性

表2.測定値と計算値の比較

回転角 [deg]	磁場勾配 [10 ⁴ T/m ²]	波長(計算値) [Å]	波長(測定値) [Å]
0	5.88	38	37±3
31.7	3.15	49	47±3
60	1.48	75	not observed

5. パルスVCN集束実験(磁場強度変調)

次にrot-PMSxを連続的に回転させ、磁場強度変調の位相とビームのパルスを同期させたときのビームスポットサイズの波長依存性を測定した。

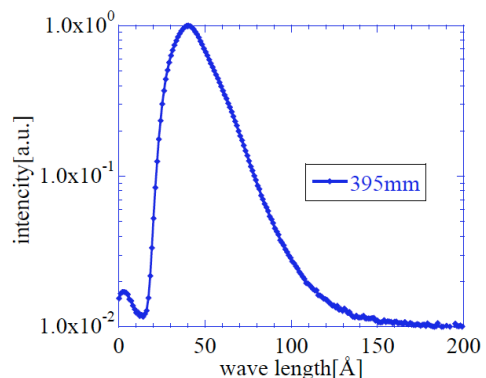


図4. VCNビームラインのビームプロファイル

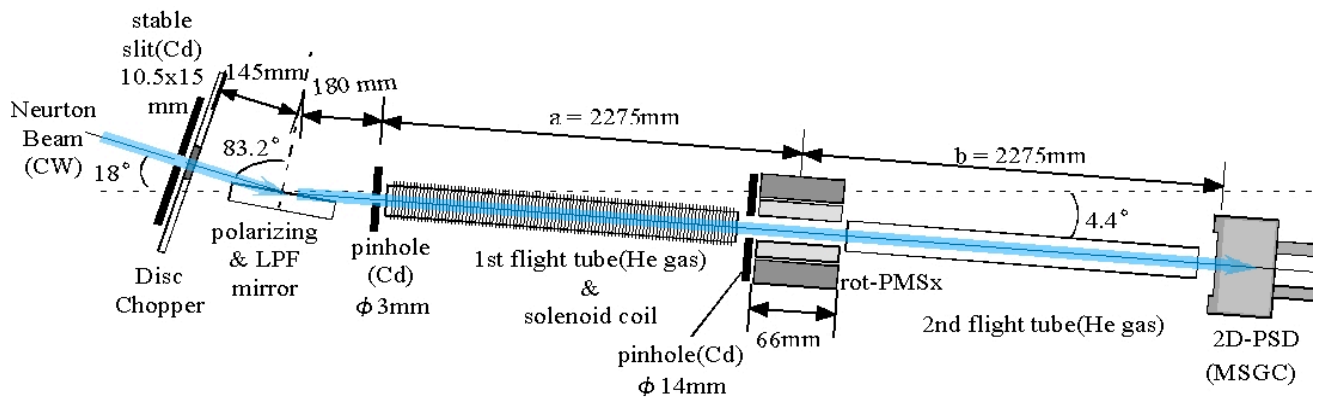


図5. パルスVCN集束実験(磁場強度変調)のセットアップ

ILL-PF2ビームラインのVCNビームプロファイルを図4に示す。ピークは40Åにあり、ピークに対して1/10までの強度を持つ波長範囲はおよそ20~80Åである。今回の実験ではピーク中心の±10Åのバンド幅にある中性子に対して色収差の影響を抑えた集束を観測することを目的とした。この実験のセットアップを図5に示す。ビームパルス周期及び磁場変調の周期を60msとしてディスクチョッパーでVCNビームをパルス化し、偏極ミラーによって偏極する。その後φ3mmのピンホールおよびrot-PMSxに取り付けたφ14mmピンホールでビームを決定し、焦点距離Zf=540mm、倍率1倍で検出器上でビームサイズを観測した。ただし、偏極ミラーは短波長側のフィル

ターとしての機能も兼ねている。長波長側のフィルターは入っていないが、検出器位置でのビームプロファイルの測定からToFが60ms以上の長波長側中性子が次のフレームで短波長側と分離できなくなるいわゆるフレームオーバーラップがないことを確認している。また、偏極が失われないように偏極ミラーとrot-PMSx間には50G以上のガイド磁場を設けた。

ビームスポットサイズは2次元ガウシアンフィットにより評価した。本セットアップではビームと磁場変調の位相の遅れの絶対値を知ることが難しかったため、位相の遅れを変えながら測定を行い、最適値を求めた。図6はいずれも測定されたX方向、Y方向のビームサイズとそのときのガウシアンピークハイトの波長依存性をプロットしたものである。色収差の影響を抑えた集束の対象とした30-48Åのバンド幅に注目すると、位相の遅れを15msとしたときはビームサイズが一定に保たれ、半周期変えて45msとしたとき(強度変化が逆向きになるが、一点でのみ合う)のビームサイズが大きく変化していることと比較してもその効果が見てとれる。このことから15ms付近でのより詳細なスキャンの結果14msを最適値と決定した。

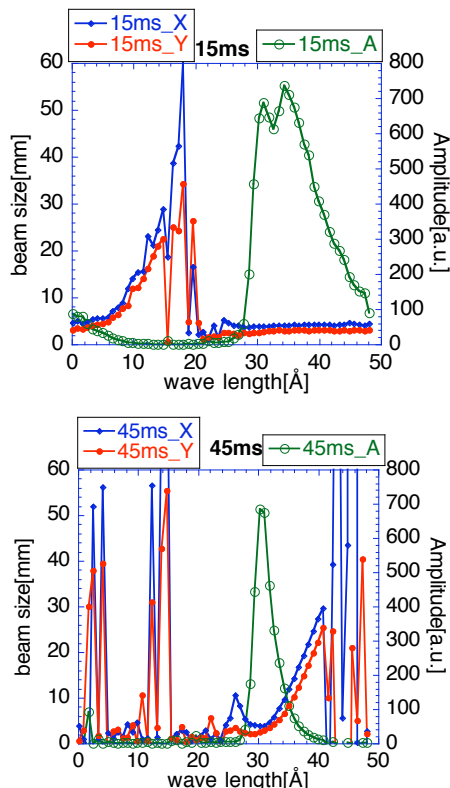


図6. 位相の遅れを変えて測定した時のビームスポットサイズの波長依存性

6. 今後の展望

rot-PMSxの回転には大きなトルクがかかるがより安定した回転のためトルクを抑える改良を行い、ハウジング部分の機械的強度の増強を行う。また2009年8月~9月にかけて、同セットアップで実際にいくつかのサンプルを用いて中性子小角散乱デモンストレーション実験を行い、その実用的な効果の高さを実証する予定である。

参考文献

- [1] M. Yamada, et al., Proceedings of the 33th LAM in Japan, URL:http://www.pasj.jp/web_publish/pasj5_lam33/content_s/PDF/TP/TP113.pdf.
- [2] H.M. Shimizu, et al., Physica B 241-243 (1998) 172.
- [3] H.M. Shimizu, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 430 (1999) 423.
- [4] J. Suzuki, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 529 (2004) 120
- [5] Y. Iwashita, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 586 (2008) 73