

MODULATING PERMANENT SEXTUPOLE TRIPLE MAGNET LENS

Yasuhiro Fuwa ^{#A)}, Yoshihisa Iwashita^{A)}, Yuji Nasu^{A)}, Hirohiko M. Shimizu^{B)}, Hiromu Tongu^{A)}, Masako Yamada^{A)}

^{A)} Institute for Chemical Research, Kyoto University
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011

^{B)} KEK (High Energy Accelerator Research Organization)
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

We are developing a permanent magnet sextupole lens (PMSx) that can focus pulsed neutron. It is based on the extended Halbach configuration to generate stronger magnetic field. In order to modulate the strength of magnetic field, the magnet is divided into nested rings, where the inner ring is fixed and outer ring can be rotated. Synchronizing the phase of the modulation with time-of-flight of pulsed neutron beam suppresses the chromatic aberration. This device can focus very cold neutron (VCN) with wavelength from 2.7 to 5.5 nm at a focal length of about 1m. In triple-magnet model, the operation performance has been upgraded. A torque canceling system using permanent magnet is installed to reduce the motor load. In addition, a cooling fan for magnetic pole and neutron flight path filled with helium are installed.

3 連強度変調型永久六極磁石

1. はじめに

中性子は物質の内部構造やダイナミクスを探るプローブとして X 線や電子線と相補的な性質を持っているため、中性子散乱は物質科学および生命科学の分野において重要な実験手法となっている。また、超冷中性子(Ultra Cold Neutron, UCN)のような低速中性子は素粒子物理研究にも利用される。しかしそのような有用性があるにもかかわらず、中性子ビームは未だ一般的な研究手法として広く用いられているとは言えない。その理由として中性子ビームの強度の低さやビームの光学的な質の悪さが挙げられる。物質研究に利用される低エネルギー中性子は、原子核反応で発生した高エネルギー中性子を減速した後に取り出される。こうして得られた中性子ビームは減速材表面からほぼ一様に放出されるエミッタンスの大きなものとなる。

近年、中性子光学の発展により中性子ビームの利用効率は大幅に向上している[1-6]。これは大型中性子実験施設における実験時間の短縮による効率の向上をもたらすだけでなく、小型中性子源を用いた中性子ビーム利用の拡大にもつながる可能性がある。

また、中性子制御技術による従来の実験手法の改良も行われている。中性子小角散乱実験において、中性子ビームを検出器上に集束させることで、散乱による遷移運動量 Q が小さい領域の測定が可能となり高分子の集団などより大きな秩序状態の観測が可能となる。また、中性子の飛行長を短くすることも可能となり重力の影響を抑えることができる。

そこで我々は極冷中性子(Very Cold Neutron, VCN)領域のパルス冷中性子ビームを集束させるための永久磁石を用いた中性子磁気レンズの開発を進めている[7]。本稿では波長 2.7 - 5.5nm の VCN を焦点距離

$Z_f \approx 0.5\text{m}$ で集束するために開発した 3 連強度変調型永久六極磁石について解説する。

2. 中性子磁気レンズ

中性子は磁気モーメント μ を持っている。そのため磁場中の中性子は、磁場 \mathbf{B} の方向を軸とした Larmor 歳差運動をする。一方、中性子は磁場中を運動するので、磁場の方向が一定でない場合には、中性子とともに動く座標系から見ると磁場が回転する。この回転周波数が Larmor 歳差運動の周波数に比べて十分小さい場合、中性子スピンの磁場に対する相対的な向きが平行または反平行にほぼ固定されると見なすことができ、中性子の運動方程式は

$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \mp \frac{|\mu|}{m} |\nabla| \mathbf{B} \quad (1)$$

と記述される。ここで m は中性子の質量であり、複号はそれぞれ中性子のスピンの磁場に平行な場合、反平行な場合に対応する。六極磁場はビーム軸方向に z 軸、それに垂直な方向に x 軸、 y 軸をとると、磁場勾配を表す定数 G を用いて

$$|\mathbf{B}| = \frac{G}{2} (x^2 + y^2) \quad (2)$$

と表すことができる。したがって、六極磁場中での中性子の運動方程式は

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \mp \omega^2 x, \frac{d^2 y}{dt^2} = \mp \omega^2 y, \frac{d^2 z}{dt^2} = 0 \quad (3)$$

となる。ここで $\omega^2 = G|\mu/m|$ である。よって磁場に平行にスピン偏極した中性子の x - y 方向の運動は調和振動子として記述でき、六極磁場の長さが適当であれば中性子を一点に集束させることができる(図 1 参照)。

fuwa@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

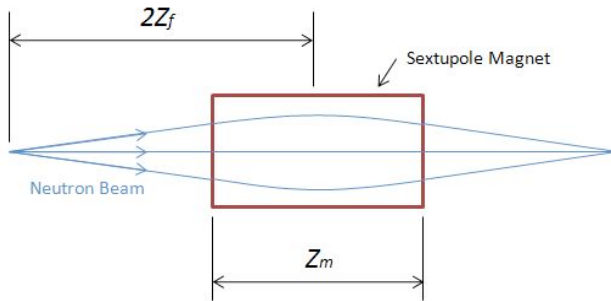


図 1: 六極磁石による中性子の集束

磁石長さが Z_m のとき、波長 λ の中性子の焦点距離は

$$Z_f = Z_m + \frac{h}{\omega m \lambda} \cot\left(\frac{\omega m \lambda}{h} Z_m\right) \quad (4)$$

である。ここで h はプランク定数である。この関係は λ が小さい場合

$$Z_f = \frac{2}{3} Z_m + \frac{1}{Z_m \omega^2} \left(\frac{h}{m \lambda}\right)^2 \quad (5)$$

と近似される。したがって、中性子の波長が TOF と比例関係にあることを用いると

$$G \propto \lambda^{-2} \propto t^{-2} \quad (6)$$

が成立するように磁場強度を変調することで、磁気レンズの色収差を抑えることができる[8-10]。

3. 3連強度変調型永久六極磁石の製作

六極磁場の構成には図 2 のような入れ子状の 2 つの Extended Halbach タイプの永久磁石 (PMSx; Permanent Magnet Sextupole) を用いた。内輪は 12 ピースの磁石と 6 ピースの磁極からなり、外輪は 12 ピースの磁石でできている。磁極にはより大きな磁場を発生させるため、軟磁性体である Permendur を使用している[11]。その内輪を固定した状態で、外輪を回転させることで磁場強度を 3 回対称の sinusoidal に変調することができる。この六極磁石の寸法はボア半径 15mm、磁石長さ 66mm、外輪外径 80mm である。このように永久磁石を用いて磁場を構成することで、超伝導電磁石を用いたパルス電磁石に比べコンパクトな装置で強力な磁場を得ることができる。

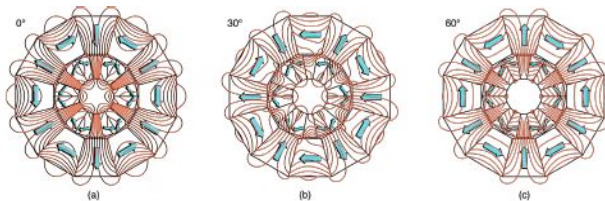


図 2: 入れ子構造の六極磁石. 赤い曲線、水色の矢印はそれぞれ磁束および各磁石の磁化容易軸を表す。矢印のないピースは Permendur を表す。磁場強度が最大なる外輪の位相を 0° とし、(a)-(c) はそれぞれ外輪の位相が $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ の場合である。

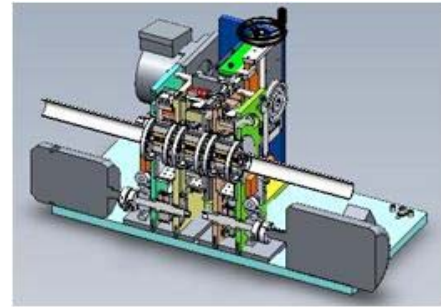


図 3: 3連強度変調型永久六極磁石の断面図

今回製作した 3 連モデルでは、この PMSx を 3 つ作製し、それらをビーム軸上に間隔 22mm で連なるように配置している(図 3 参照)。それぞれの PMSx はゴムベルトを介したモーターの動力により外輪を回転可能であり、PMSx の強度を 3 つ独立に 30Hz で変調可能である。

PMSx 内部の磁場分布の測定をホールプローブにより行った。3 つの PMSx の磁場強度を変えた時の、それぞれの磁場勾配の最大値 G_{max} および最小値 G_{min} の測定結果を表 1 に示す。なお、3 連モデルでは磁石番号が小さい順にビーム上流側からそれぞれの PMSx を配置している。また磁場分布の測定結果の一例として、PMSx.1 のボア内部の x 軸方向、 z 軸方向の磁場分布の測定結果をそれぞれ図 4、5 に示す。ここで z 方向の磁場分布が対称性を崩しているのは、ホールプローブの移動軸と磁石の軸がずれているためであると考えられる。

表 1: PMSx の磁場勾配の変調範囲

磁石番号	G_{max} [T/m ²]	G_{min} [T/m ²]
1	55×10^4	10×10^4
2	55×10^4	8×10^4
3	59×10^4	11×10^4

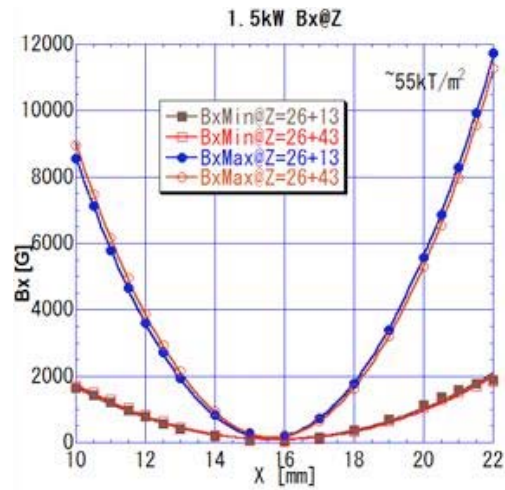


図 4: PMSx.1 のボア内部の x 軸方向の磁場分布

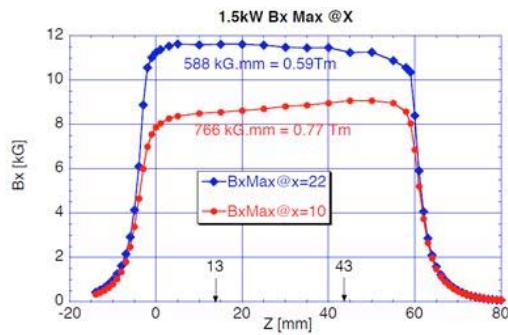


図 5: PMSx.1 のボア内部の z 軸方向の磁場分布

4. 運転性能向上のための改良

3 連モデルの製作にあたり、以前に作製したモデルの運転で生じた問題の解決を図った。

4.1 トルクの軽減

内輪-外輪間の磁場が非常に強力であるため、外輪の回転にはかなり大きなトルクが必要となる。そこで、PMSx の外輪の外側に永久磁石を用いたトルクキャンセラーを導入した。図 6 にトルクキャンセラーの概観を示す。トルクキャンセラーは永久磁石を 3 回対称に配置した 2 つのリングから構成されており、同心円状に配置されている。内輪は固定されているが、外輪は PMSx の外輪の回転と同位相で回転する。その際、トルクキャンセラーの内輪-外輪間に PMSx の内輪-外輪間のトルクに対して逆位相で大きさが同程度のトルクを発生する。したがって、全体としてのトルクを打ち消すことができる。

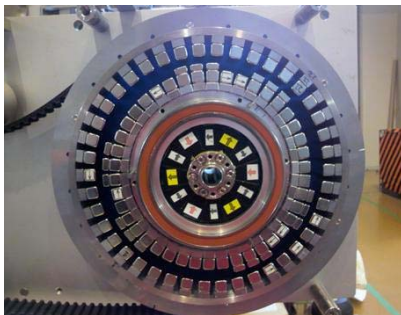


図 6: トルクキャンセラーを取り付けた PMSx

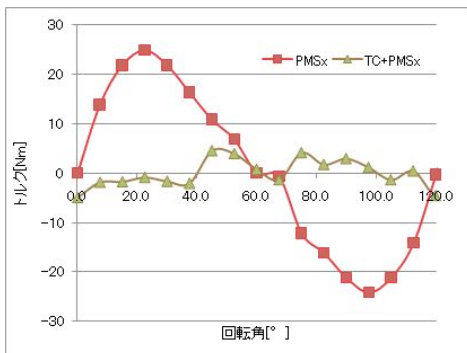


図 7: トルクキャンセラーによるトルクの軽減

図 7 にトルクキャンセラーを取り付ける前後のトルクの測定結果を示す。この機構の導入により、トルクを抑えることができ低速回転時のモーターへの負荷が大幅に軽減された。

4.2 運転時の発熱の対策

以前に作製したモデルでは運転時に磁極で発生する渦電流やヒステリシス損失を原因とする発熱により、磁極温度が 60 度まで上昇した。そこで磁極内の渦電流を減らすため Permendur の厚さを薄くし、積層構造にした。さらにヒステリシス損失を低下させるため Permendur の焼鈍処理を施した。また磁極を強制空冷するため冷却ファンを取り付けた。

4.3 フライトパスへの He の注入

飛行する中性子は軌道上に存在する原子核と相互作用し散乱される。特に水蒸気などに含まれる水素原子は中性子と質量が同程度であり散乱断面積も大きいいため、中性子のフライトパスから水素原子を取り除くことでビームの品質の低下を抑えることができる。そこでフライトパスにヘリウムを注入した。

5. 極冷中性子集束実験

ILL(Institute Laue-Langevin)の PF2 ポートにおいて 3 連モデルを用いた中性子集束実験を行った。この実験における装置の配置を図 8 に示す。中性子ビームのパルス化、偏極にはそれぞれディスクチョッパー及び磁気ミラーを用いた。波長 2.7 - 5.5nm の TOF に変調位相を同期させて集束させた結果、直径 2.0mm のピンホールを通った中性子を集束位置において FWHM=2.4±0.6mm で集束させることができた。

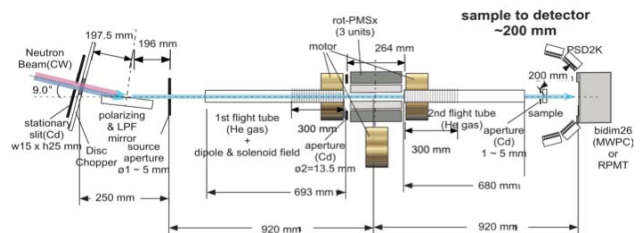


図 8: VCN 集束実験における装置の配置

参考文献

- [1] M. Hino et al., Nucl. Instrum. Methods **A529** (2004) 54.
- [2] K. Ikeda et al., Nucl. Instrum. Methods **A529** (2004) 78.
- [3] T. Adachi et al., Nucl. Instrum. Methods **A529** (2004) 112.
- [4] T. Shinohara et al., Nucl. Instrum. Methods **A529** (2004) 134.
- [5] T. Oku et al., Nucl. Instrum. Methods **A529** (2004) 116.
- [6] J. Suzuki et al., Nucl. Instrum. Methods **A529** (2004) 120.
- [7] M. Yamada et al., Physica **B404** (2009) 2646.
- [8] H.M. Shimizu et al., Physica **B241-243** (1998) 172.
- [9] H.M. Shimizu et al., Nucl. Instrum. Methods **A430** (1999) 423.
- [10] J. Suzuki et al., Nucl. Instrum. Methods **A529** (2004) 120.
- [11] Y. Iwashita et al., Nucl. Instrum. Methods **A586** (2008) 73.