

## Development of Modulating Permanent Magnet Sextupole Lens

Masako Yamada<sup>A)</sup>, Yoshihisa Iwashita<sup>A)</sup>, Masahiro Ichikawa<sup>A)</sup>, Takanori Sugimoto<sup>A)</sup>, Hiromu Tongu<sup>A)</sup>, Hiroshi Fujisawa<sup>A)</sup>, Hirohiko M. Shimizu<sup>B)</sup>, Takashi Ino<sup>B)</sup>, Kenji Mishima<sup>B)</sup>, Kaoru Taketani<sup>B)</sup>, Tamaki Yoshioka<sup>B)</sup>, Suguru Muto<sup>B)</sup>, Takahiro Morishima<sup>B)</sup>, Takayuki Oku<sup>C)</sup>, Jun-ichi Suzuki<sup>C)</sup>, Takenao Shinohara<sup>C)</sup>, Kenji Sakai<sup>C)</sup>, Hiromi Sato<sup>D)</sup>, Katsuya Hirota<sup>D)</sup>, Yoshie Otake<sup>D)</sup>, Yoshichika Seki<sup>E)</sup>, Shinsuke Kawasaki<sup>F)</sup>, Sachio Komamiya<sup>F)</sup>, Yoshio Kamiya<sup>G)</sup>, Hidetoshi Otono<sup>G)</sup>, Satoru Yamashita<sup>G)</sup>, Peter Geltenbort<sup>H)</sup>  
<sup>A)</sup> Kyoto ICR, Uji, Kyoto, <sup>B)</sup> KEK, Tsukuba, Ibaraki, <sup>C)</sup> JAEA, Tokai, Ibaraki, <sup>D)</sup> RIKEN, Wako, Saitama, <sup>E)</sup> Kyoto University, Kyoto, <sup>F)</sup> University of Tokyo, Tokyo, <sup>G)</sup> ICEPP, Tokyo, <sup>H)</sup> ILL, Grenoble, France

### Abstract

We are developing a modulating permanent magnet sextupole lens (PMSx) that can focus pulsed cold neutrons with the chromatic aberration suppressed. The sextupole magnet's configuration is the Extended Halbach type that generate stronger magnetic field than normal Halbach type. In order to adjust the magnetic field, the magnetic lens is composed of two co-axial nested sextupole rings, where the inner one is fixed and the outer one can be rotated. Synchronizing the phase of the modulation with that of pulsed neutron beam suppresses the chromatic aberration.

We have fabricated a half scale PMSx as a prototype and studied the strength of the magnetic field, the torque, and the rise of temperature during its operation. We modified the inner ring and the temperature rise was suppressed to about half of the former model by making the poles as a laminated structure. We are considering further improvement in the temperature rise and the system of rotating the outer ring with a torque canceller for the development of full scale PMSx.

In addition we have carried out some measurement of focusing of polarized very cold neutrons (VCN) at ILL (Institute of Laue Langevin, France) and confirmed that the PMSx can focus the VCN.

## 強度変調型永久六極磁石の開発

### 1. 序

中性子は物質の内部構造およびダイナミクスを探る強力なプローブとして、凝縮系物理学、生物物理学、高分子化学などの物質科学の分野において中性子散乱法のプローブとして広く活用されている。なかでも極冷中性子(Very Cold Neutron, VCN)、超冷中性子(Ultra Cold Neutron, UCN)といった低速中性子は核物理学や、素粒子およびその基本相互作用を探ることができるプローブとしても有用である。しかしながら中性子ビームの強度の低さなどのために手近な手法とはなっていないのが現状である。

一方、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]。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。サンプル上に集束することで、中性子散乱はより小さなサンプルに適応可能になり、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より多くの実験が実現可能となる。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)法を使うことでさらに利用効率を上げることができる。

そこで我々はパルス冷中性子集束を目指して、強度変調型永久六極磁石(Permanent magnet sextupole, 以下PMSx)の開発を行っている。

### 2. 色収差を抑えた中性子ビームの集束

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六極磁場成分の相互作用である[7-9]。磁場の六極成分は、磁場勾配の大きさを表す正の定数 $G'$ を用いると

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

と表される。このような磁場中では中性子は偏向され、磁場に平行なスピンを持ったz軸方向に走る中性子ビームは(2)式の運動方程式に従って軸の周りで単振動を行う。ただしこの式が成り立つのは、磁場の方向を軸とした中性子のLarmor歳差運動の角振動数が中性子の重心系からみた磁場の方向の変化率に比べて十分大きく、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追従する場合で[7-8]、単振動となるのはスピンが磁場に平行な中性子に限られ、反平行なものは発散される。

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

この六極磁場の長さが適当であれば磁場領域を出た後、中性子はある一点に集束する。ここで $a = |m_p/m_n| = 5.77 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ T}^{-1}$ 、 $\omega^2 = G'a$ 、 $m_p$ は中性子の磁気モーメント、 $m_n$ は中性子の質量である。六極磁石の中心軸に対して平行に入射されたド・ブロイ波長

$\lambda$  の中性子は、 $Z_m$  を磁石長として、焦点距離

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

で集束される。ここで  $h$  はプランク定数である。 $\lambda$  が十分小さければ(3)式は

$$Z_f = \frac{2}{3} Z_m + \frac{1}{Z_m G' \alpha} \left(\frac{h}{m_n \lambda}\right)^2 \quad (4)$$

と近似される。(4)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(図1参照)。パルス中性子にTOF法を組み合わせた実験では中性子の波長(運動量)が単色でない。一定距離飛行させた場所では中性子の波長は時間  $t$  とともに変化するのでこれに磁場強度を同期させて

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

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

と変調すれば、変化する波長に対しても焦点距離を一定に保つことができる[7-9]。

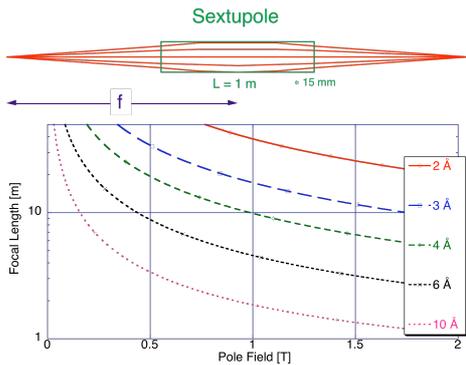


図1. 6極磁石による中性子の集束と色収差

### 3. 永久6極磁石の変調

永久磁石を用いて6極磁石を構成すれば電磁石、超伝導磁石に比べコンパクトでシンプルに強力な磁場を得ることができる。我々が開発しているPMSxは永久磁石からなる6極磁石を図2のように同軸2重リング状に分割し、内輪を固定したまま外輪を回転させることで磁場強度が3回対称なsinusoidalに連続的に変調される構造となっている。

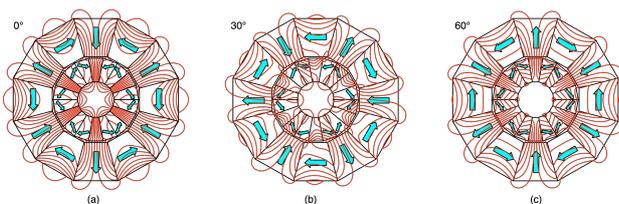


図2. 同軸2重リング構造の6極磁石. 赤い曲線が磁束を表し、各磁石の磁化容易軸の方向を矢印で表す. 矢印のないピースは軟磁性体を用いた磁極. (a) 磁場強度が最も強い外輪の配置. このときの外輪の内輪に対する位相を $0^\circ$  とする. (b)  $30^\circ$  回転させた状態. (c)  $60^\circ$  回転させると磁場強度が最も弱くなる.

### 4. ハーフスケールモデルの製作

強度変調型永久6極磁石のプロトタイプとして、ハーフスケールモデルを、ボア半径(内輪内径)15mm、外輪外径80mm、磁石全長66mm、外輪回転周期を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で製作した。図2のように磁石はExtended-Halbach型で内輪は磁石12ピース、磁極6ピースから成り、外輪は12ピースの磁石から成る。より大きな磁場を発生させるため、磁極には軟磁性体材料のPermendurを用いている[10]。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。

#### 4.1 ボア内部の磁場分布測定

内輪に関して、2回改良を行っているが、現行機のボア内部の磁場分布測定結果を図3に示す。磁石の長手方向中央の磁極表面では1.7 Tと強い磁場が得られている。

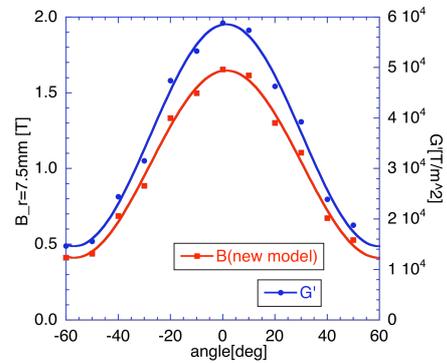


図3. 現行機の磁極表面での磁場Bと磁場勾配G'

#### 4.2 運転時の内輪における温度上昇

25Hzで連続運転を行ったところ、磁極での発熱により一時間ほどでボア内面が $60^\circ\text{C}$ の平衡温度に達した。発熱の主な原因の一つである磁極内部に流れるEddy-currentを減らすため、磁極に用いているPermendurを1層t2.5mmの積層構造にする改良を施したところ温度上昇は約半分に抑えられた(図4参照)。またもう一つの主な原因である磁極のヒステリシロスに対して同形状で焼鈍済、未焼鈍のPermendurについてB-Hカーブの測定を行った。焼鈍済みの試料のヒステリシロス損失が小さくなったことから焼鈍による効果も期待できる(図5参照)。

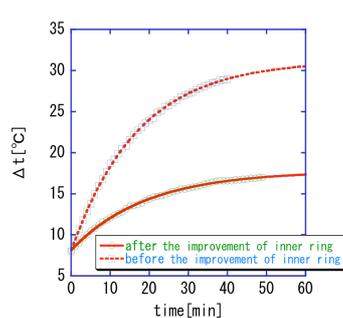


図4. 温度上昇の改良前後での比較

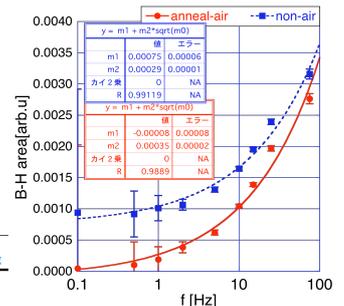


図5. ヒステリシロス面積の焼鈍前後での比較

## 5. VCN集束実験

ILL(Institute of Laue Langevin, France)のPF 2 ビームラインにおいて我々が開発しているPMSxのVCNビーム集束実験を行った。実験のセットアップを図6に示す。開口率4%のチョッパーを出たVCNは偏極スーパーミラーで平行スピンのみがビームラインへ反射され、 $\phi$  1mmのスリットを通過する。その後、ガイド磁場中を飛行した中性子は距離 $a=720$ mmの位置に置かれたPMSxに入射し集束を受ける。外輪を $0^\circ, 10^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ で固定しそれぞれの強度に対して測定を行った。ディテクターにはシンチレータと抵抗分割型フォトマルを組み合わせた2次元測定器(位置分解能:約1mm)を用いた。ディテクターはPMSxの中心から $b=2140$ mm下流に置かれ、このとき $Z_f=540$ mmである。

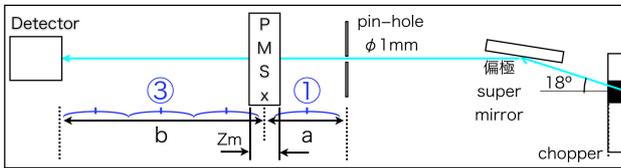


図6. VCN集束実験のセットアップ

angle[deg]	磁場B[T]	磁場勾配 $G'$ [ $T/m^2$ ]
0	1.7	$5.88 \times 10^4$
10	1.5	$5.33 \times 10^4$
30	0.89	$3.15 \times 10^4$
60	0.41	$1.47 \times 10^4$

表1. (左) 固定角と磁場、磁場勾配

中性子のTOFはチョッパー円板の開口部横につけた磁石とピックアップコイルからの信号をスタートトリガーとして測定している。測定結果を図7、表2に示す。ある点に集束される波長が磁場強度によって変化することが確認できた。(3)式の計算値ともよい一致がみられた。

angle[deg]	$\lambda$ [Å](実測値)	$\lambda$ [Å](計算値)
0	37	38
30	50	51

表2. 測定結果と(3)式の計算値の比較

## 6. 今後の展望

これまでハーフスケールモデルについて部分的な改良を行ってきたが、これに基づいてフルスケールモデルの製作を行う予定である。発熱対策としては、磁極一層の厚さを薄くし( $\sim 0.5$ mm)、かつ磁極の焼鈍処理を行う。また外輪を回転させるため大きなトルクが必要であるが、この対策として、駆動軸を通して出し入れされるエネルギーを平滑化し、トルクを抑える機構を導入する予定である。

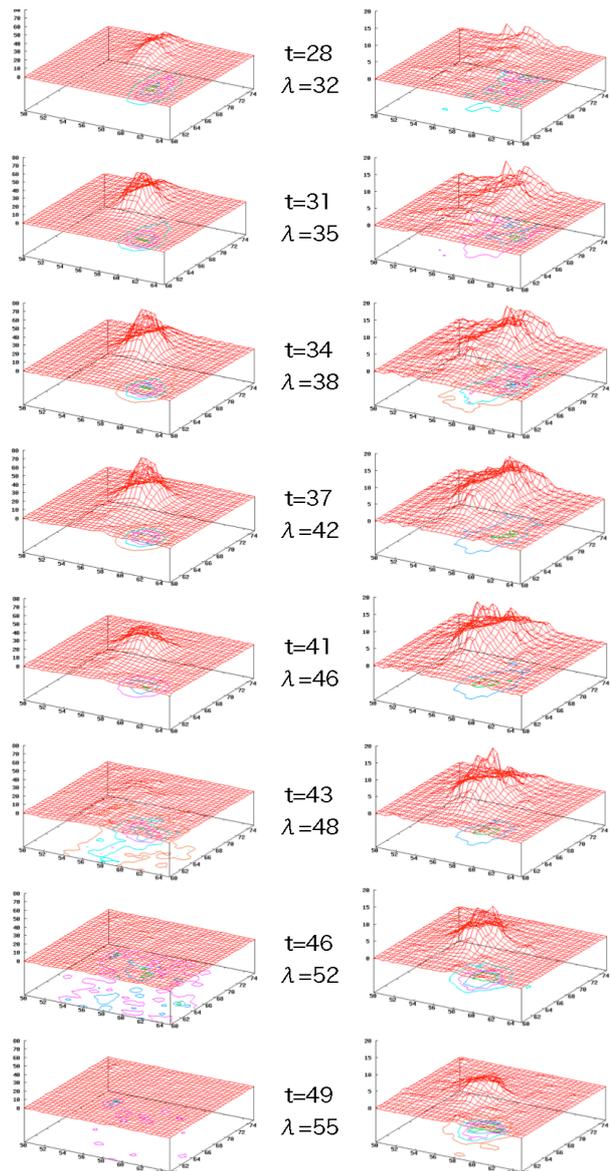


図7. (左)固定角 $0^\circ$ での集束の様子  
(右)固定角 $30^\circ$ での集束の様子

## 参考文献

- [1] P.S. Farago, Nucl. Instr. and Meth. 30 (1964) 271.
- [2] H.M. Brash et al., Proc. Roy. Soc. Edingburgh A 68 (part. 2) (1969) 158.
- [3] G.I. Terekhov, Pis'ma Zh. Tekh. Fiz. 3 (1977) 1275 [Sov. Tech. Phys. Lett. 3 (1977) 526].
- [4] J.H. Coupland, R.V. Stovold, Sixth International Conference on Magnet Technology, Bratislava, Czechoslovakia, 29 Aug. }2 Sep. 1977, p. 558.
- [5] W.G. Williams, Polarized Neutrons, Clearendon Press, Oxford, 1988.
- [6] Z.J. Yang, D.J.W. Geldart, R.A. Dunlap, Phil. Mag. B 68 (1993) 713.
- [7] H.M. Shimizu, et al., Physica B 241-243 (1998) 172.
- [8] H.M. Shimizu, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 430 (1999) 423.
- [9] J. Suzuki, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 529 (2004) 120
- [10] Y. Iwashita, et al, Nucl. Instr. and Meth. A 586 (2008) 73