

DEVELOPMENT OF ANISOTROPIC-INTER-POLE MAGNET FOR TIME FOCUSING OF ULTRA-COLD NEUTRONS

Yasushi Arimoto^{*A)}, Yoshihisa Iwashita^{B)}, Masaaki Kitaguchi^{C)}, Tamaki Yoshioka^{D)}, Sohei Imajo^{E)}, Kenji Mishima^{A)}, Hirohiko M. Shimizu^{A)},

^{A)}IMSS, High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)}Institute for Chemical Research, Kyoto University
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-011

^{C)}Kyoto University Research Reactor Institute
2, Asashiro-Nishi, Kumatori, Osaka 590-0494, Japan

^{D)}Graduate School of Science, Kyushu University
6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, 812-8581, Japan.

^{E)}Graduate School of Science, Kyoto University
Kitashirakawa, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan

Abstract

Experiment is proposed to measure neutron electric dipole moment (nEDM) with pulsed ultra cold neutron (UCN) at J-PARC. In this experiment, one of key element is a rebuncher and it is used to focus UCN bunches in longitudinal direction at a UCN storage bottle. The rebuncher is consist of a UCN-guide tube, an rf coil, and a longitudinal gradient magnet. The gradient magnet was designed and constructed; it has a specific feature such that it equips anisotropic inter-poles for the first time. Here, a design of the magnet and measured field profile are presented.

超冷中性子時間収束のための異方性中間磁極を用いた電磁石の開発

1. はじめに

現在達成されている中性子の電気双極子能率 (nEDM) の上限値は ILL において行なわれた測定で、 $d(n) < 2.9 \times 10^{-26} e \cdot \text{cm}$ である [1]。素粒子の標準模型で予言される nEDM の大きさはこの測定値の 6 桁下であり、この精度を越える測定はほぼ不可能である。一方、標準模型を越えるモデル (超対称性理論等) ではより大きな値、 $10^{-26} \sim 10^{-28} e \cdot \text{cm}$ を予言している。したがって、中性子電気双極子能率の探索によって標準理論を越えるモデルに対し制約が与えられることとなる。

nEDM は通常、超冷中性子 (UCN) を静磁場中に設置された容器に蓄積して、印加電場を反転しそのラーマ歳差周波数の変化より測定する。最近、Spallation Neutron Source より生成された UCN を用いた高精度 nEDM 実験が世界で計画または提案されている [2]。J-PARC においても Linac から生成されたパルス UCN を用いて ILL で達成された上限を 1 桁高める実験が提案されている [3]。他の計画と比較して、J-PARC での nEDM 実験の特徴の 1 つは UCN の輸送にリバンチャーを用いる点である。これは UCN 輸送中に Time of Flight によりバンチ長が伸びてしまい縦方向の空間密度が減少してしまう。これを避けるために途中で縦方向の位相空間回転を行ない生成時のバンチ長を回復するものである (図 1)[4, 5]。別の見方をすれば、バンチ中心を原点とした時間軸で見るとバンチの時間軸方向の像が蓄積容器の位置で結像されたことになる (時間収束)。

この UCN リバンチャーでは磁気ポテンシャルを利用

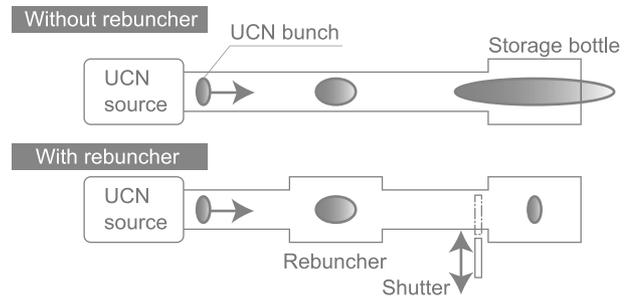


図 1: UCN 輸送系概略図

して加減速を行なう。通常、磁気ポテンシャルを生成する磁石の入口-出口での速度の総変化量はゼロとなるが磁場通過中にスピンドリップを行なうことで加減速することが可能となる。スピンドリップには高速断熱通過核磁気共鳴法 [6] を利用し、スピンドリップの共鳴周波数を位置の関数とするための電磁石には勾配が設けられる。ここで回転磁場の周波数を UCN バンチに同期して掃引させることで、バンチ内の特定の位置にある UCN のみスピンドリップさせることが可能である。このように、リバンチャーは UCN を輸送する中性子ガイド管、スピンをフリップする周波数可変 RF コイル、勾配電磁石 (B_0 電磁石) から構成される (図 2)。UCN リバンチャーは他にもいくつか提案されて実証されているが、このタイプの UCN リバンチャーの原理は実証されていない。今回このリバンチャー原理を実証するための装置を製作した。実証機は本実験で用いられるもの (実

* yasushi.arimoto_at_kek.jp

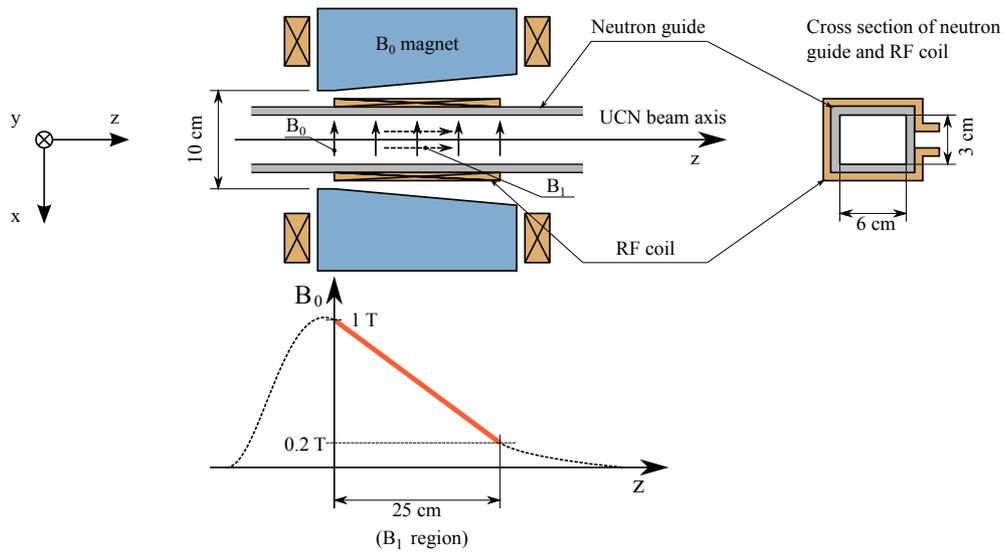


図 2: リバンチャーシステム概略図

機)に比べてガイド管の断面積は小さく、スピンドリッ
プ部は1箇所(実機では2箇所)となっている(図3)。こ

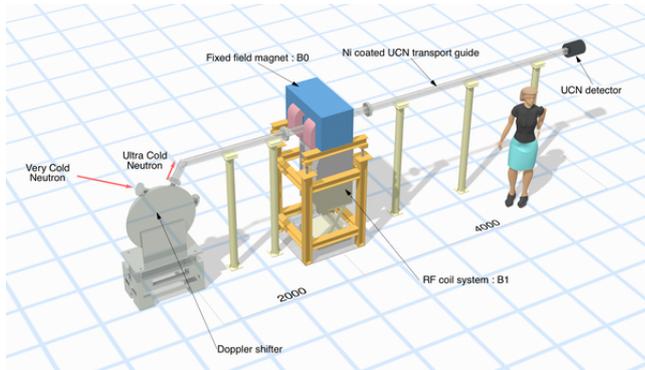


図 3: リバンチャー原理実証機レイアウト

こでは、リバンチャー原理実証機のための B_0 電磁石に
ついて述べる。

2. B_0 電磁石設計・製作

B_0 電磁石に要求される仕様を以下に示す [5]。

1. ビーム軸 (z 軸) 方向の距離に対して線形に変化
 - (a) $B_0(z) = b_1 z + b_2$
 - (b) 0.25 cm の間で 1T から 0.2T に変化
 - (c) 磁場勾配: $dB_0/dz \sim 0.35$ T/m
2. ギャップ間距離: 10 cm
3. ビーム領域: 6 cm x 3 cm
4. 精度 ($\delta B/B$): $< 10\%$

仕様から見られる特徴は磁場勾配が大きいことと磁場勾
配がビーム軸方向に対して設けられていることである。

また電磁石構造上の大きな特徴は異方性中間磁極を採
用したことである。これによりフリンジ磁場形状を一定
にすることで電磁石をコンパクトにし、また2次元設
計による磁極形状と3次元設計による磁極形状の一致
を良く出来る [7, 8]。異方性中間磁極は岩下によって考案
され、これまでに3次元磁場設計はなされているが [9]、
実際に製作されたことはなく、今回が世界初となる。

設計された電磁石の3次元モデルを図4に示す。磁
場設計はOpera3D/TOSCAを用いて行なわれた。設計の
詳細については [5] を参照のこと。

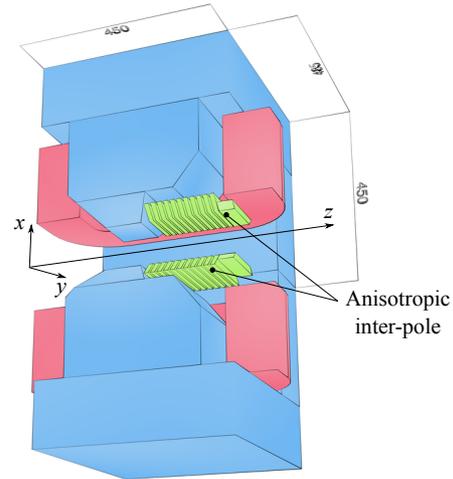


図 4: UCN リバンチャー実証試験用 B_0 電磁石

製作された電磁石を図5に示す。電磁石の加工、組
立はタカノ技研によって行なわれた。鉄心の材質として
構造材であるSS400を用いた。これは必要とされる磁
場精度が厳しくないこと、納期が短縮出来る等の理由
のためである。コイルはホロコンを使用せずにターン
層に銅板を挟み込んでその銅板を水冷する間接冷却方



図 5: 製作された B_0 電磁石

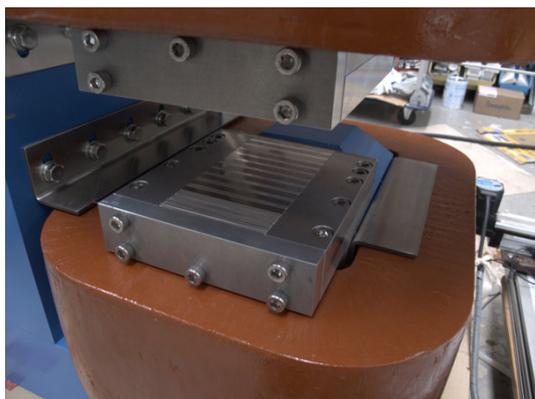


図 6: B_0 電磁石に実装された異方性中間磁極

式を用いた。コイル巻数は 529 ターンで、電流/電圧は 91 A/96 V である。

図 6 は実装された異方性中間磁極の写真である。鉄 (SS400) の鋼板を非磁性体のアルミで積層し、これらをアルミの枠で固定した構造となっている。主磁極と中間磁極の間には、スペーサーとして隙間の形状に合わせたアルミが取り付けられている。

3. 測定磁場

磁場測定はホール素子を用いて行なわれた。測定結果を図 7 に示す。左図は z 軸に沿ってプロットした B_x 分布である。赤白抜き丸が測定値、黒丸が TOSCA による計算値を示す。右図は左図のスケールを拡大したものである。計算値と測定値のずれは 1% 程度であり良く一致していることが分かる。

4. まとめ

UCN リバンチャー原理実証のための B_0 電磁石が設計・製作された。この B_0 電磁石は異方性中間磁極を備えた世界初の電磁石である。測定結果と計算値のずれは 1% 程度であり仕様を十分満足している。これを用いたリバンチャー原理実証試験はフランスの Institut Laue-Langevin において 2011 年 8 月～10 月に行なわれる予定である。

5. 謝辞

これらの開発は KEK, 文科省「量子ビーム基盤技術開発プログラム」の援助のもとで行なわれた。

参考文献

- [1] C. A. Baker, D. D. Doyle, P. Geltenbort, K. Green, M. G. D. van der Grinten, P. G. Harris, P. Iaydjiev, S. N. Ivanov, D. J. R. May, J. M. Pendlebury, J. D. Richardson, D. Shiers, K. F. Smith, Improved experimental limit on the electric dipole moment of the neutron, *Phys. Rev. Lett.* 97 (13) (2006) 131801. doi:10.1103/PhysRevLett.97.131801.
- [2] D. Dubbers, M. G. Schmidt, The neutron and its role in cosmology and particle physics, arXiv:1105.3694v1.
- [3] Y. Arimoto, K. Asahi, H. Fujioka, H. Funahashi, M. Hino, T. Ino, H. Iwase, Y. Iwashita, Y. Kamiya, T. Kawai, N. Kimura, M. Kitaguchi, Y. Kiyonagi, S. Komamiya, K. Mishima, S. Muto, T. Ogitsu, K. Sakai, T. Shima, H. M. Shimizu, K. Taketani, M. Utsuro, S. Yamashita, A. Yoshimi, T. Yoshioka, Measurement of neutron electric dipole moment, proposal for the 9th KEK J-PARC PAC (Jan 2010).
- [4] H. Shimizu, Y. Iwashita, M. Kitaguchi, K. Mishima, T. Yoshioka, A transport optics for pulsed ultracold neutron sources, *Nucl. Instrum. Meth. A* 634 (2011) 525–527. doi:10.1016/j.nima.2010.06.210.
- [5] Y. Arimoto, *et. al.*, Longitudinal-gradient magnet for time focusing of ultra-cold neutrons, *Phys. Proc.* To be published.
- [6] A. Abragam, *The Principles of Nuclear Magnetism*, Oxford University Press, 1961.
- [7] Y. Iwashita, Y. Arimoto, A. Sato, Gradient field generation in a uniform gapped magnet, in: *Proceedings of the 9th European Particle Accelerator Conference (EPAC'04)*, Lucerne, Switzerland, 2004, p. 1705.
- [8] Y. Iwashita, A. Sato, Y. Arimoto, Magnetic field distribution control with anisotropic inter-pole magnetic field, *IEEE Trans. on Appl. Sup.* 16 (2) (2006) 1286–1289. doi:10.1109/TASC.2005.864300.
- [9] Y. Arimoto, Magnet design for PRISM-FFAG using anisotropic interpole, *Nuclear Physics B Proc. Suppl.* 149 (2005) 277–279.

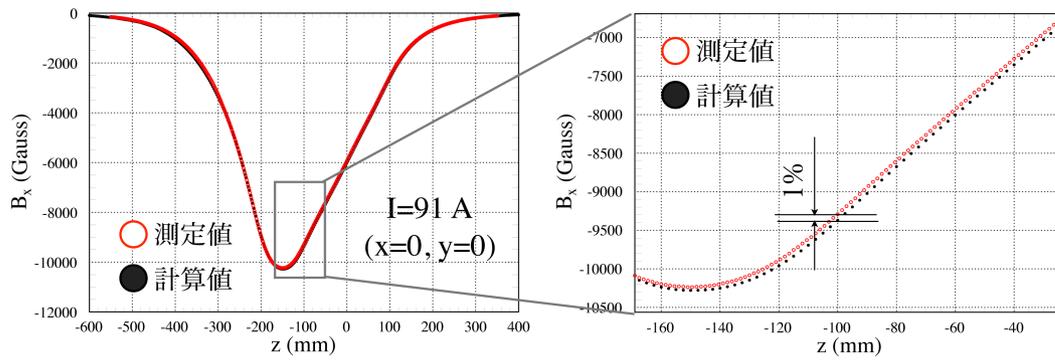


図7: 左図: z 軸に沿ってプロットした B_x 分布。赤白抜き丸が測定値、黒丸が計算値。右図: 左図のスケールを拡大したもの。