

## 超冷中性子リバンチャーの改良 III

### IMPROVEMENT OF THE ULTRACOLD NEUTRONS REBUNCHER III

今城想平<sup>#A)</sup>, 岩下芳久<sup>B)</sup>, 北口雅暁<sup>C)</sup>, 清水裕彦<sup>C)</sup>, 三島賢二<sup>D)</sup>, 猪野隆<sup>D)</sup>

Sohei Imajo<sup>#,A)</sup>, Yoshihisa Iwashita<sup>B)</sup>, Masaaki Kitaguchi<sup>C)</sup>, Hirohiko M. Shimizu<sup>C)</sup>, Kenji Mishima<sup>D)</sup>, Takashi Ino<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> Department of Physics, Kyoto University

<sup>B)</sup> Institute of Chemical Research, Kyoto University

<sup>C)</sup> Department of Physics, Nagoya University

<sup>D)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

#### Abstract

We describe the detailed specifications of the present second rebuncher. It could sweep the RF frequencies from 7.0 to 29.4 MHz. The power reflection was lower than 10 percents at the higher frequency than 10 MHz. The phase locked loop circuit, which feeds the RF power at the resonance frequency, worked well. The gear parts are firmly fixed enough to endure the extremely rapid rotation.

#### 1. 超冷中性子リバンチャー

中性子が電気双極子能率 (Electric Dipole Moment - EDM) を備えている可能性は 1950 年代より調査されてきた。中性子が EDM を持てば時間反転操作に対して EDM の向きが不変である一方でスピンの向きが反転するため時間反転操作を直接破り、また素粒子標準模型が予言する EDM よりも大きな EDM が得られれば新しい物理理論の証明にもなるためである。現在の中性子 EDM の上限値は  $2.9 \times 10^{-26}$  [e·cm]<sup>[1]</sup> であり、 $10^{-27} \sim 10^{-28}$  [e·cm] の EDM 探索に向けた研究が世界中で進められている。

EDM は粒子のスピンの向きを向いていると予想されており、中性子 EDM 実験では電場に対する中性子の歳差運動に起因したスピン偏極率の変化が測定される。近年の実験では電場を中性子に長時間印加するために物質容器に封入できる運動エネルギー 200 neV 程度の超冷中性子 (UltraCold Neutron - UCN) が用いられている。しかし前述のように中性子 EDM は極めて小さいため、現在の上限値である  $10^{-26}$  [e·cm] の EDM を測定するならば  $\pm 2 \times 10^5$  V/cm の電圧を 170 秒印加しても 1/1000 の偏極率変化の検出が必要となる<sup>[2]</sup>。また例えば  $10^{-12}$  T の静磁場の不均一さが  $10^{-27}$  [e·cm] の EDM と同程度の変化を生じさせるため、系統誤差を極めて小さく抑え込む精巧な実験容器が必要とされる。従って高精度の EDM 実験を行うには小さな実験容器に多数の UCN を詰め込む必要があり、数密度の高い UCN を生み出すことが必要とされる。

数密度の高い UCN を生成する直接的な方法は核破砕中性子源とコンバーターを用いて核破砕ターゲットのごく近くで高密度の UCN を生成することである。この手法は今後の UCN 源のスタンダードとして PSI 等で研究開発が進められており、我々 NOP

(Neutron Optics and Physics) グループも J-PARC Linac のビームを用いた新しい核破砕中性子源を J-PARC リニアック棟周辺に建設し、EDM 実験を行うことを提案している<sup>[3]</sup>。しかし実験容器がバックグラウンド遮蔽のために UCN 源から 10 m 以上離れた地点に設置されるため、J-PARC のようなパルス間隔の長いビームを用いた UCN 源では輸送中に UCN が自身の速度分布に従って拡散し、実験容器に封入される頃には生成直後の数密度の高さが大きく損なわれてしまう。

そこで我々は磁場を用いて輸送中の UCN の速度を制御し、Fig. 1. に示す概念で UCN の輸送方向の位相空間分布を回転させ実験容器地点に再集束させる装置「超冷中性子リバンチャー」を開発した。

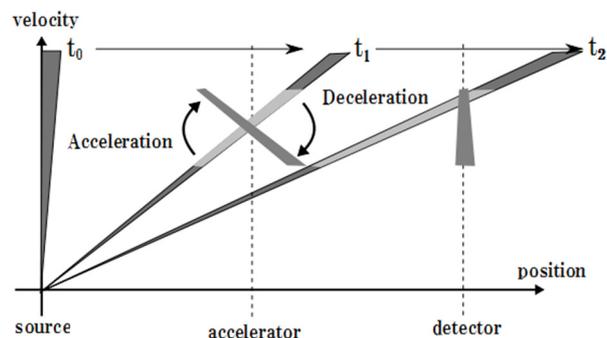


Figure 1: Schematic diagram of UCN focus.

中性子は磁気モーメント  $\mu$  を持つため磁場  $\mathbf{B}$  中でポテンシャルエネルギー  $-\mu \cdot \mathbf{B}$  を得る。従って磁場に突入した中性子は磁場勾配から加速ないし減速を受けるが、その影響は磁場を抜け出る際に打ち消されてしまう。そこで Fig. 2. に示すように静磁場勾配中において中性子がねらったポテンシャルエネルギーを得た瞬間にその静磁場強度に合致する共鳴周波数の RF 磁場をかけ、中性子のスピンを反転させ、

<sup>#</sup> imajo2286@scphys.kyoto-u.ac.jp

磁場通過前後の運動エネルギー収支に有限な差を生じさせる。これがUCNリバンチャーの中性子速度制御原理である。従ってリバンチャーはなだらかな勾配磁場を生み出す大型電磁石と、高周波磁場を発生させるRF共振器から構成される。ポテンシャルエネルギーの大きさは1 Tの磁場に対して約60 neVなので、スピン反転によって1 Tあたり最大で120 neVの運動エネルギー変化が生じる<sup>[4,5]</sup>。

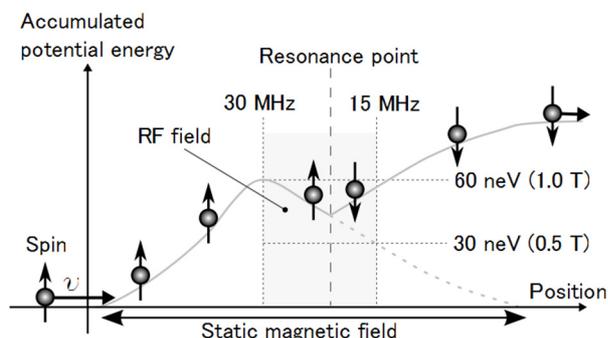


Figure 2: Mechanism of neutron acceleration.

中性子のスピン反転には AFP-NMR 法<sup>[6]</sup>を用いた。通常のスプリッターと異なり AFP-NMR 法は RF 磁場強度と静磁場勾配から決まる中性子の上限速度でのみスピン反転率が制限される。すなわち上限速度以下であればいかなる速度に対しても共鳴周波数を変えることで勾配磁場中のどこでもスピン反転が可能である。またスピン反転は共鳴点の近傍でのみ生じるため、運動エネルギーの制御精度を高く保つことができる。我々は異方性中間磁極の効果で 1 T から 0.2 T まで  $-3.2 \text{ T/m}$  のような磁場勾配を実現する電磁石を開発した<sup>[7,8]</sup>。この磁場勾配のもとで 5 m/s の UCN のスピン反転率を 90% にするためには 1.1 mT の RF 磁場強度が必要である。この場合、量子化軸を回転軸にとった RF 磁場と同じ角速度の回転座標系での有効磁場ベクトルの量子化軸からの傾きを考慮すると、スピン反転は共鳴点の周囲の高々 1 mm 以内で達成されるため磁場勾配から運動エネルギーの制御精度は 0.4 neV 以下となる。

共鳴周波数は静磁場強度に比例し、1 T に対して約 30 MHz となる。J-PARC において UCN 源の建設を想定する場合は UCN リバンチャーには Fig. 1. のように高速の UCN から順に短い時間幅のパルスが連続的に入射してくる。この UCN パルスは位相空間中において時間、位置、速度がほぼ 1 対 1 に対応しているため、あらかじめ焦点時間を決めて計算した周波数時間変化に従って共鳴周波数をスイープさせることで連続的なエネルギー制御とパルスの時間集束を実現する。我々は J-PARC EDM 実験に向けて 6~30 MHz の周波数スイープを目指している。

周波数のスイープ制御を実現するために UCN リバンチャーの RF 共振器は Fig. 3. のようにバリコン  $C_r$  とコイル  $L$  からなる LC 共振回路で構成されている。 $C_r$  の容量をモーターで連続変化させることにより共鳴条件を変化させ、フェイズロック回路を用

いて共鳴周波数を検出・追跡し、検出した周波数信号を RF アンプで増幅して UCN リバンチャーに印加することで周波数スイープを伴った RF 磁場発振を行う。 $C_c$  はカップリングコンデンサであり、これもモーターで制御され連続的なインピーダンス整合を行う。

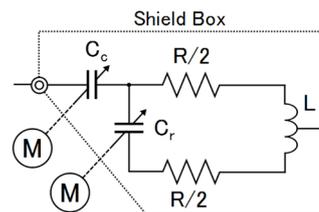


Figure 3: Circuit inside RF cavity.

我々は UCN リバンチャーの原理実証機を開発し、原理実証実験を 2011 年 11 月にフランスの ILL で行い、5 m/s の UCN を減速して 4 m/s の UCN と重ね合わせ 1.4 倍の集束に成功した<sup>[9]</sup>。これは中性子の運動エネルギーを磁場によって動的に制御した初めての事例となった。しかしながらスイープ可能な周波数は 17.5~28.6 MHz であり可変幅が 2 倍にも満たなかった。またモーターの加速力不足により周波数スイープが入射 UCN の到着タイミングと合致せず、正確な減速が行えず集束ピーク幅が入射パルス幅の 10 倍程度となった。さらに  $C_c$  の容量不足や  $C_c$  と  $C_r$  の連動制御のずれによりパワー反射が起こり、十分な RF 磁場発振が行われず 1 kW アンプを用いてもスピン反転率が 50% 程度となった。RF コイルの大きさの最終目標は内寸 12 cm×12 cm であるが、1 号機の RF コイルは内寸 5 cm×8 cm であった。これらの問題点のうち、まず手始めにスイープ可能な周波数幅の拡大とシャープな集束を可能とするモーター制御、100% に近いスピン反転率の実現を目指して我々は以前より UCN リバンチャー 2 号機の開発を進めてきた。

## 2. リバンチャー2号機

UCN リバンチャー 2 号機には 1 号機に使用したバリコンよりも容量が大きく軽量のアルミバリコンを 1 号機と同様  $C_r$  に 3 個、 $C_c$  に 1 個搭載した。また 1 号機より大型のモーターでバリコンを回転させ、3 kW の RF アンプを用いて電力を印加する。

フェイズロック回路は共振器内のピックアップコイルが検出した高周波信号と共振器入口の方向性結合器により取り出した入射波の一部分を位相比較器で比較する。入力周波数が共振周波数に十分近ければ周波数差が位相差として現れる。その位相差信号を N5181A MXG Analog Signal Generator の DC-FM に入力する。N5181A には  $59 \pm 6 \text{ MHz}$  の信号を出力させ、2 通倍して  $118 \pm 12 \text{ MHz}$  の信号を作り、その信号をダウンコンバーターを使うことで  $18 \pm 12 \text{ MHz}$  に変換している。これら全体で負帰還のループを構築しフェイズロックさせることで励振電力の周波数を共振器の共振周波数に追従させるような仕組みと

なっている。このようにして 6~30 MHz の RF 発振を実現する。

このフェイズロック回路は十分よく動作することが確認されたが、1号機と同サイズの RF コイルでは2号機の最大周波数が約 35 MHz となりフェイズロックがスイープ中に外れてしまうことが判明した。そこで Fig. 4. に示すように2号機には最終目標以上の断面積を持つ口径 300 mm×50 mm の大型コイルを取り付け、さらにコイル基部にフェライトコア T200-6 を各 1 個ずつ通した 25 mm×200 mm の銅フォイルの脚を取り付け、インダクタンスを増加させることで最大周波数を 30 MHz 以下へと減少させた。現在2号機が発振できる周波数は 7.0~29.4 MHz となっている。

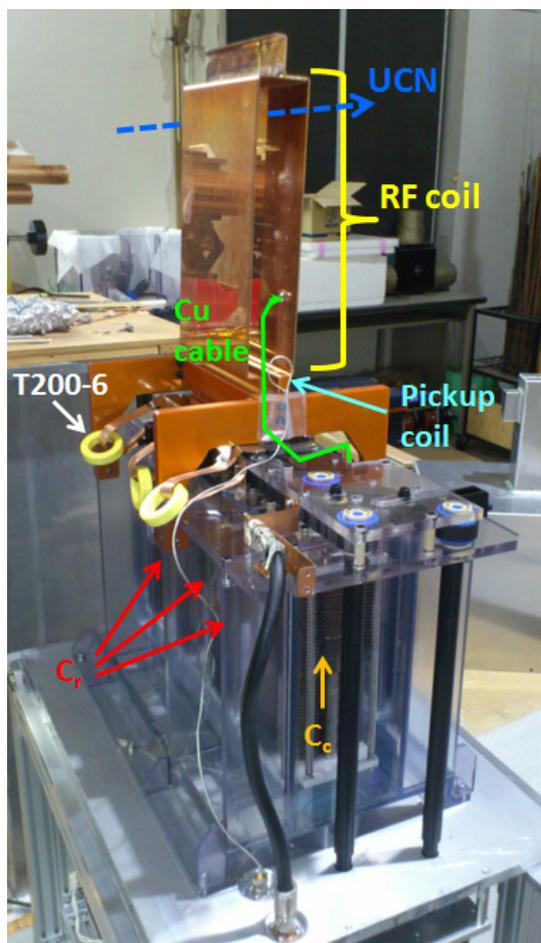


Figure 4: Present second rebuncher.

インピーダンス整合は Fig. 5. に示すようにコイル内部から単芯 2 mm の銅線を用いて給電することで行った。銅線が RF コイル内で作るループを付加的なコイルとして機能させ、 $C_c$  による C マッチに加えて L マッチも行う回路構成となっている。この接続方法での共振周波数に対する VSWR をプロットしたものが Fig. 6. である。この図中において実線は VSWR が最小になるように  $C_c$  の容量を調整した時の結果、破線は  $C_c$  を最大値のまま全く動かさな

かった時の結果である。この結果からリバンチャー 2 号機は 10~29 MHz において  $C_c$  を全く動かさなかったとしても 90% 以上の電力透過が達成できると結論された。カップリングを完全に合わせるには 19 MHz 以上では  $C_c$  の容量が不足しており、また 11 MHz 以下では L マッチの影響が強くて  $C_c$  をどう増減させてもカップリングを完全には合わせられなくなっている。銅線のループサイズやコイルへの接続高さを幾通りも変えて測定を行ったが現状ではこのセッティング以上に広帯域で VSWR を 2 以下に抑え込めるようなセッティングは見つかっていない。

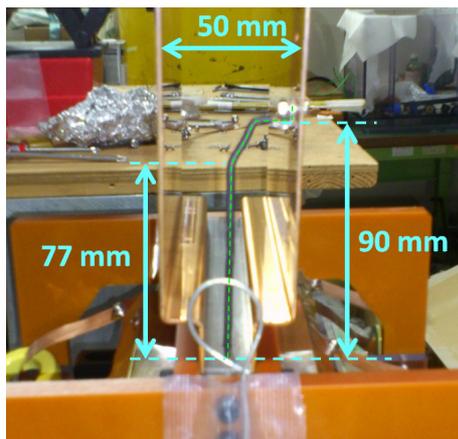


Figure 5: Arrangement of the power feed cable.

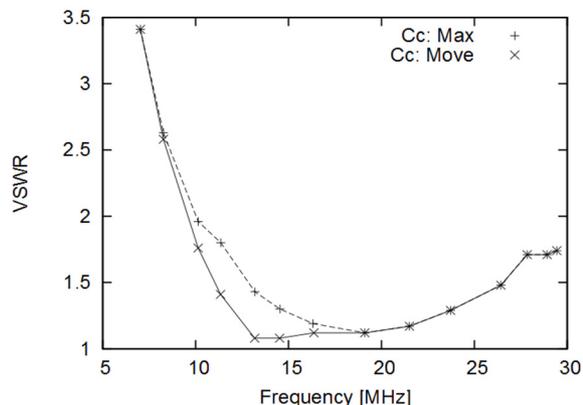


Figure 6: Frequency dependences of VSWR.

モーター制御に関しては、昨年の報告後にモータードライバを交換したためまだ理想的な周波数変化に合わせた加速回転のテストには至っていないが、ほぼ同等の瞬間加速回転を複数回行ってもギアベルトの固定が回転負荷に十分耐えることを確認した。

### 3. 今後の展望

回路のインピーダンスマッチングに関しては現状のセッティングが最良であると推測される。そこで今後は周波数の理想変化に合わせた  $C_r$  の回転の調整と RF コイルの磁場分布測定、3 kW 電力の印加試

験を行っていく。C<sub>c</sub>の回転については VSWR が最小になるような回転制御を試みるが、完全に理想的に回そうとすると瞬間的に回転を前後させるような挙動が必要になってしまうので、C<sub>c</sub>の回転制御が実用的でない場合は停止させたままにすることも考慮する。

RF共振器の開発において残っている問題はすべて共振器の機械的な制御の追求とスペックの確認のみなので、RF共振器は今年度中には完成する見通しである。

我々はこの2号機の性能を J-PARC MLF の BL05 NOP ビームラインで稼働中の中性子ドップラーシフターを用いて評価する予定である。中性子ドップラーシフターで生成されたUCNにスピン反転率90%かつ幅を持たない局所的なスピン反転をかけた場合のシミュレーション結果が Fig. 7. である。簡易計算のため UCN ガイド管の反射率による UCN の損失は考慮していない。RF 周波数変化は UCN を 1.25 s に集束させるようにチューニング用の数値計算によって別途求め、29.4~10 MHz の範囲で 0.11 s の間にほぼ直線的に周波数を減少させる挙動を入力した。10 MHz 以下の周波数ではモーターの必要回転速度が大きく上昇するため、実用性を考慮して 10 MHz 以下の周波数変化はこの計算では省いている。Fig. 7. 中の破線が集束なしの TOF スペクトル、実線が集束有りのスペクトルである。集束有りのスペクトルには 0.82, 0.94, 1.23 s にピークが発生しており、このうち 1.23 s のピークが本来 1.1 s 周辺に到達するはずのアップスピンの入射 UCN パルスを減速によって集束したものである。このピークの集束率は約 6 倍となった。0.82 s のピークは RF 印加時にアップスピンの入射パルスに重なって存在していた本来 0.9 s に到達するはずのダウンスピンの入射パルスが加速されて生じた副次的なピークである。0.94 s のピークは減速および加速による余波が重なったもので、両方のスピンを等量含んでいる。複数の単純化を含んだ計算結果ではあるが、2号機を十分に動作させられればこのような極めて鋭いピークが生じることが期待される。

#### 4. Acknowledgements

This research was partially supported by Ministry of Education, Science, Sports, and Culture Grants-in-Aid for Scientific Research (A) 23244047 and (A) 26247035, and by the JSPS, Grant No. 23360428, and approved by the Neutron Scattering Program Advisory Committee of IMSS, KEK (Proposal No. 2009S03 and 2014S03).

#### 参考文献

- [1] C. A. Baker, et al., Phys. Rev. Lett. 97, 131801 (2006).
- [2] 阿知波紀郎 (2003) 『中性子スピン光学』九州大学出版社 pp.153-159.
- [3] Proposal to J-PARC, [https://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac\\_1001/pdf/KEK\\_J-PARC-PAC2009-10.pdf](https://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac_1001/pdf/KEK_J-PARC-PAC2009-10.pdf)

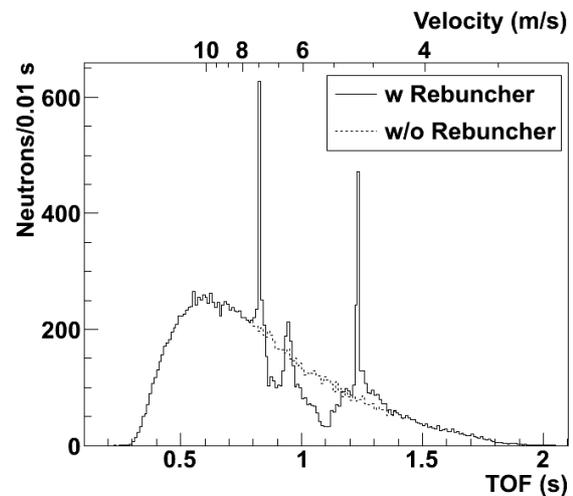


Figure 7: Result of an UCN focusing simulation.

- [4] B. Alfeld, G. Badurek, and H. Rauch, Z. Physik B 41 (1981) 231.
- [5] H. Weinfurter, et. al., Z.Physik B 72 (1988) 195.
- [6] S. V. Grigoriv, et. al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 384 (1997) 451-456.
- [7] Y. Arimoto, et. al., Physica Procedia 17 (2011) 20-29.
- [8] Y. Arimoto, et. al., IEEE Trans. Appl. Supercond 22 (2012) 4500704.
- [9] Y. Arimoto, et. al., Phys. Rev. A 86 (2012) 023843.