

超冷中性子リバンチャーの改良 II

IMPROVEMENT OF THE ULTRACOLD NEUTRONS REBUNCER II

今城想平^{#A)}, 岩下芳久^{B)}, 不破康裕^{B)}, 北原龍之介^{B)}, 北口雅暁^{C)}, 清水裕彦^{C)}, 三島賢二^{D)}, 猪野隆^{E)}

Sohei Imajo^{#, A)}, Yoshihisa Iwashita^{B)}, Yasuhiro Fuwa^{B)}, Ryunosuke Kitahara^{B)}, Masaaki Kitaguchi^{C)},

Hirohiko M. Shimizu^{C)}, Kenji Mishima^{D)}, Takashi Ino^{E)}

^{A)} Department of Physics, Kyoto University

^{B)} Institute of Chemical Research, Kyoto University

^{C)} Department of Physics, Nagoya University

^{D)} International Center for Elementary Particle Physics, University of Tokyo

^{E)} High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

We describe the development of the UCN rebuncher and the detailed specifications of the second rebuncher. It could sweep the RF frequencies from 7 MHz to 35 MHz and realize the almost ideal sweeping motion. The power reflection was lower than 10 percents in all frequencies. However, its mechanical strength was slightly poor for long-term operation. At present the rebuncher was modified more firmly and we are searching for better impedance matching connection again.

1. 超冷中性子リバンチャー

中性子が内部電荷の偏りなどにより電気双極子能率 (Electric Dipole Moment -EDM) を持てば、時間反転操作に対して EDM はその向きを変えないが中性子のスピンの向きは反転するため中性子は時間反転対称性を直接破る存在となる。また素粒子標準模型の CP 対称性の破れは中性子 EDM を $10^{-30} \sim 10^{-32}$ [e·cm] 程度と予想するのに対し、標準模型を超える新しい物理理論では標準理論の予想値から現在の上限値 2.9×10^{-26} [e·cm]^[1] まで EDM の存在が許されており、EDM の有限値の探索は新しい物理の妥当性を検証し制限をかける意味も持つ。そのような動機のもとにこれまで数十年にわたって中性子 EDM の探索が続けられている。

中性子 EDM の測定は一方に偏極した中性子のスピンを静磁場中で古典的に 90° 倒して歳差運動させ、高電圧を一定時間印加したのちスピンをさらに 90° 倒して最終的なスピンの向きを測定するスピン干渉実験である。EDM が存在すれば高電圧印加によって中性子のスピンの向きが余分に回転するため 90° 回転しても偏極状態に戻りきらず、スピン固有状態間の統計量のわずかな変化が観測される。この変化は 10^{-26} [e·cm] の EDM の測定において $\pm 2 \times 10^5$ V/cm の電圧を 170 秒印加しても 1/1000 の計数変化の測定を要するほど小さい^[2]。また 10^{-27} [e·cm] の EDM の測定においては系統誤差の低減のために 10^{-12} T の静磁場の不均一さも許されないほどの精密が必要とされる。したがって、統計誤差低減のための大きな中性子統計量と系統誤差低減のための小さ

な実験容器という要求を同時に達成しなければならない。

そこで $10^{-27} \sim 10^{-28}$ [e·cm] の EDM の測定を目指す次世代の EDM 測定計画では、核破砕中性子源によって発生した高密度の中性子を通常の中性子減速材および超流動ヘリウム等を用いたコンバーターによって運動エネルギーが 200 neV 程度の超冷中性子 (UltraCold Neutron - UCN) にまで一気に減速し、実験容器に導き貯蔵して実験を行う計画案が通例となっている。我々 NOP (Neutron Optics and Physics) グループも J-PARC Linac のビームを用いて 3000 UCN/cm³ 以上の UCN を生成する核破砕中性子源を 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^[3]。

J-PARC Linac のパルスビームは RCS の 1 MW 運転時にはピークパワーとして 20 MW に達し、幅 500 μ s の陽子パルスによって非常に高密度のパルス UCN が生成される。しかし約 12 m のガイド管による輸送中に UCN はその速度分布に従って輸送方向の位相空間分布が細長く引き伸ばされ、空間密度が大きく落ちてしまう。その解決策として UCN に適度な加速ないし減速をかけて位相空間分布を輸送途中で反転させ、実験容器において始点と同様の位相空間分布に戻す。このような時間集束を行い瞬間強度の大きなパルス源の利点を十分に生かすために我々は中性子加速器「超冷中性子リバンチャー」を開発した。

UCN リバンチャーの中性子加速原理は Fig. 1. に示すように中性子の磁気モーメント μ が磁場 \mathbf{B} 中で得るポテンシャルエネルギー $-\mu \cdot \mathbf{B}$ を利用したものである。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タイミングで静磁場強度に合致する共鳴周波数の RF 磁場をかけ、中

[#] imajo2286@scphys.kyoto-u.ac.jp

中性子のスピンを反転させ、磁場通過前後の運動エネルギー収支を制御する。ポテンシャルエネルギーは 1 T の磁場に対して約 60 neV であり、従って 1 T あたり最大で 120 neV の運動エネルギー変化を生じさせることが可能である^{[4][5]}。

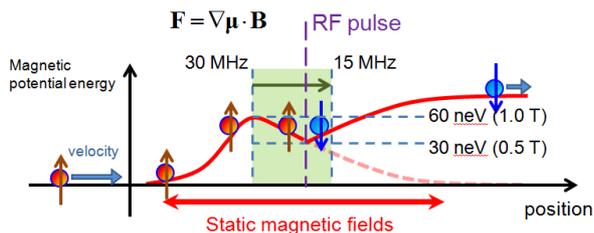


Figure 1: The mechanism of neutron acceleration.

共鳴周波数は静磁場強度に比例し、1 T あたり約 30 MHz となる。リバンチャーにはパルス幅の短い UCN が高速側から連続的に入射してくるため、共鳴周波数を連続的にスイープさせて時間集束を達成する。我々は J-PARC EDM 実験に向けて 6 MHz ~ 30 MHz の周波数スイープを目指している。

スイープを実現するためにリバンチャーの RF 共振器は Fig. 2. 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、共鳴条件に合致した RF パワーを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 はインピーダンス整合に用いる。

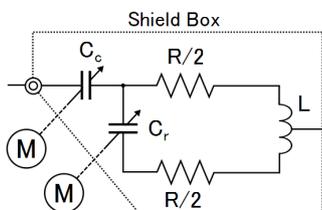


Figure 2: The circuit inside RF cavity.

スピン反転には AFP-NMR 法を用いた。この手法は静磁場の大きさを B_0 、回転磁場の大きさを B_1 、中性子の磁気回転比を γ 、UCN の速度を v 、UCN の輸送方向を x とすると断熱パラメータ k が以下の条件を満たす時に成立する^[6]。

$$k = \frac{\gamma B_1^2}{dB_0/dt} = \frac{\gamma B_1^2}{v dB_0/dx} \gg 1 \quad (1)$$

ここで $k \geq 1.4$ であればスピン反転率は 90 % 以上となる。我々が使用する電磁石は異方性中間磁極の効果で 1 T から 0.2 T まで 25 cm にわたってほぼ一様な磁場勾配を実現している^{[7][8]}。したがって、この電磁石のもとでは必要な B_1 の大きさは 5 m/s の UCN に対して 1.1 mT 以上となる。

原理実証機である 1 号機を用いた原理実証実験は 2011 年 11 月にフランスの ILL で行われ、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^[9]。しかしながらスイープ可能な周波数は 17.5 MHz ~ 28.6 MHz と狭かった。また

モーターの加速不足により UCN に適切なタイミングで減速をかけられず、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_r 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。

そこで、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リバンチャー 2 号機の開発を進めている。2 号機は 1 号機に使用したバリコンよりも容量の大きなバリコンを C_r に最大 6 個、 C_c に最大 2 個搭載できる設計になっており、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設計となっている。本装置の周波数特性をネットワークアナライザによってモニターし、回路の修正やモーター制御の見積もり等を進めている。

2. リバンチャー2号機の現状

C_r 6 個では RF 周波数が 28.7 MHz までしか上昇せず、4 個では配置の関係でバリコンの連動をとることが困難となるため、搭載するバリコン数を C_r 3 個、 C_c 1 個に決定した。 C_c および C_r は容量幅 19 pF ~ 406 pF のバリコンを比誘電率 2.7 の耐圧オイルに浸した状態で使用しているが、 C_c の容量が大きすぎたため C_c の直前に小容量コンデンサを直列に接続して合成容量を小さくし、インピーダンス整合を行った。コンデンサは 10 pF ~ 100 pF までのものを複数用意し、必要容量に応じて交換した。その結果、リバンチャー 2 号機が発振可能な RF 周波数は 7.1 MHz ~ 34.9 MHz となり、周波数変化幅は 4.9 倍となった。1 cm² の一巻きコイル状のプローブを RF コイル中央に挿入し、プローブに生じる誘導起電力から 3 kW 電力印加時の磁場出力を見積もったところ、発振周波数全域にわたって 2.1 mT 以上の RF 磁場発振を行える見通しとなった (Fig. 3.)。断熱パラメータは $k > 5.0$ となり、全周波数にわたってスピン反転率 95 % 以上を達成しうることがわかった。

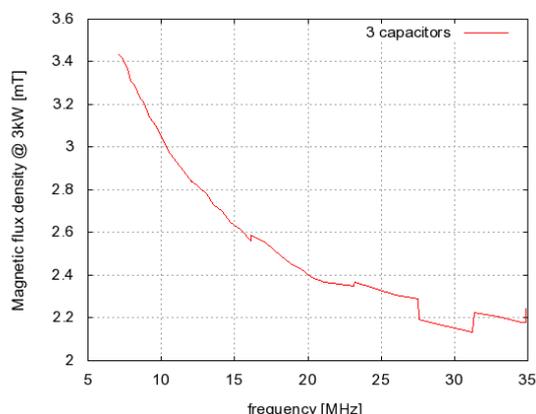


Figure 3: The RF field strength at 3 kW applied.

合成容量から見積もった C_c の必要容量は 8 pF ~ 200 pF となったが、最低容量が 10 pF 以下かつ容量変化幅が 20 倍以上にわたるバリコンの作成は困難であった。そこで Fig. 4. のように C_c から RF コイルへ向かう給電ケーブルを RF コイルの内側に接続し、ケーブルのインダクタンスを利用してインピーダンス整合を行った。その結果、周波数全体にわたって VSWR は 1.2 以下となり、電力反射を 10 % 程度以下に小さく抑え込むことに成功した。

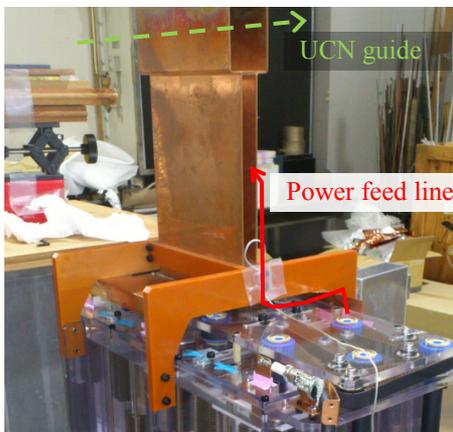


Figure 4: The connection of the power feed line.

周波数のスイープ速度はバリコン C_r のうちの 1 つに 2 MHz 程度の高周波電圧をかけ、モーター回転によるバリコンの容量変化に伴った電圧降下量の時間変化をオシロスコープで記録し、解析することで求めた。解析ではバリコンの容量がローター極板の回転角度に直線比例すると仮定して、別途測定した等速回転時の電圧降下の時間変化を用いることでスイープ速度を計算した。結果として Fig. 5. の黒線のように 8 MHz 以上において目標となる赤色のスイープ曲線から ± 5 ms 程度の範囲内におさまるような周波数スイープが実現できることがわかった。

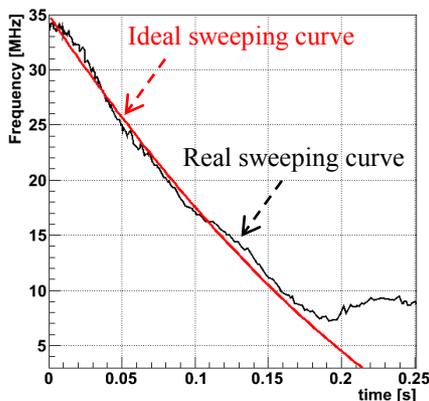


Figure 5: The real and ideal RF sweeping curve.

リバンチャー 2 号機は現在、Fig. 6. に示すように内部機構をよりコンパクトにまとめた設計に改修されている。バリコンの加速回転試験においてバリコンの連動をとるベルトの留め具に大きな負荷がか

り長期運転に耐えられないことが判明したため、改修機ではローター極板を真鍮の 1/3 ほど軽量の銅メッキアルミに変更した。またベルトの固定具もより強靱な固定方法に変更した。バリコンの配置は 4 個のバリコンを一行に配置し、RF コイル下部の極板幅も改修前の半分に削減した。

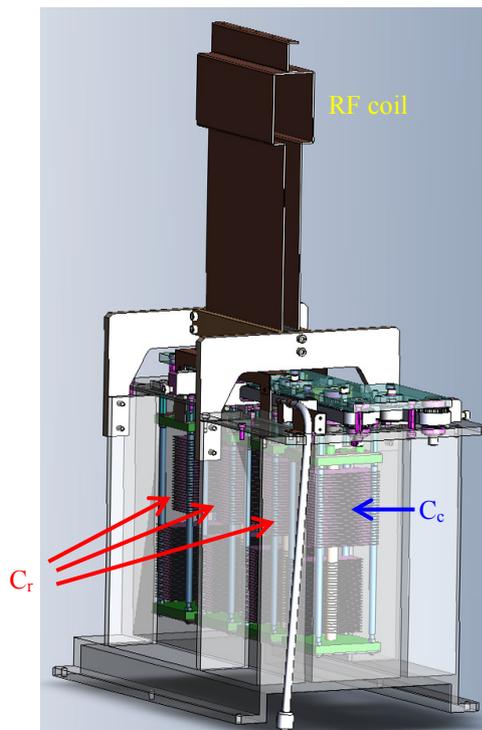


Figure 6: The modified second rebuncher.

改修の結果、回路の囲む面積が小さくなったため回路のインダクタンスが減少し、発振可能な RF 周波数は 8.3 MHz ~ 35.6 MHz と改修前より全体的に 1 MHz 程度高くなった。また、回路中の磁場分布が変化したことでインピーダンス整合条件も大きく変わり、改修前と同様の接続方法ではインピーダンスが整合する周波数幅が改修前の半分以下となっている。

現在はより広い周波数幅でインピーダンス整合するパワーケーブルの接続方法を、接続条件を変えて測定を繰り返し模索中である。

3. 今後の展望

最初の目標として 10 MHz ~ 30 MHz において VSWR が 2 以下(反射電力 30% 以下)となることを目標に、可能な限り広範囲で反射電力が小さくなるような給電ケーブルの接続方法を見つける。接続方法が決定したら目標の RF スイープを実現するようなバリコン C_r , C_c の同時加速回転制御を確立し、その後に実際に電力の印加試験と RF 磁場測定を行う。さらに RF コイルの上下幅を最終機と同じ 12 cm に広げたコイルを新たに作成し、このコイルについても同様にインピーダンス整合の模索、回転制御の確立および電力印加試験を行う。

改修機による UCN 集束テストは 11 月以降に J-PARC MLF BL05 において行う予定である。BL05 での UCN 輸送試験は 2014 年 3 月に成功しており、あとは RF 共振器の完成を待つのみとなっている。

4. 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, http://j-parc.jp/jhf-np/pac_1001/pdf/KEK_J-PARC-PAC2009-11.pdf
- [4] B. Alfeld, G. Badurek, and H. Rauch, Z. Physik B **41**, 231 (1981).
- [5] H. Weinfurter, et. al., Z.Physik B **72**, 195 (1988).
- [6] S. V. Grigoriv, et. al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A **384**, 451-456 (1997).
- [7] Y. Arimoto, et. al., Physica Procedia **17**, 20-29 (2011).
- [8] Y. Arimoto, et. al., IEEE Trans. Appl. Supercond. **22** 4500704.
- [9] Y. Arimoto, et. al., Phys. Rev. A **86**, 023843 (2012).