

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26800137

研究課題名(和文) 偏極HD標的製造期間最適化のための17T用周波数掃引型NMR測定システムの開発

研究課題名(英文) 17 Tesla frequency NMR measurement system for optimization of polarized HD target manufacturing period

研究代表者

太田 岳史 (Takeshi, Ohta)

大阪大学・核物理研究センター・研究員

研究者番号：20727408

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：SPring-8のLEPSビームラインで陽子や中性子の核子構造を探るため、偏極HD標的の開発を行ってきた。これまで製造した標的の偏極度の結果を得るためには3ヶ月を要してきたが、多くの人的リソースと液体ヘリウムを必要とするため試行テストの障害となってきた。3ヶ月の間に偏極度をモニターすることができれば試行テスト期間の短縮が可能になるが技術的に困難であった。

本研究では想定される1/10の低コストで1GHzクラスのNMR測定システムを構築し、製造過程で偏極度成長モニターできるように挑戦した。結果水素の偏極は1日で成長していることがわかり試行テストの期間は3ヶ月からの大幅な短縮が可能になった。

研究成果の概要(英文)：The polarized HD target have been developed to investigate the nucleon structure of proton and neutron in the LEPS beam line of SPring-8. Previously in order to obtain the result of the polarization degree of produced target took three month, this is obstacle for the trial because the trial require a lot of human resource and liquid helium. If the polarization degree is monitored for this three month, it is possible to shorten the period of trial, but it was difficult.

In this research, I have challenged to develop the 1G Hz NMR measurement system with cost of one-tenth what is assumed for monitoring the growth of polarization in the manufacturing process. As a result, it was found that the polarization degree of hydrogen grows in one day, and the trial period is possible to shorten significantly reduce from three months.

研究分野：素粒子・原子核物理

キーワード：NMR 偏極 デジタル処理

### 1. 研究開始当初の背景

SPRING-8 の LEPS ビームラインにて、陽子や中性子内の核子構造を探るために、標的と逆コンプトン  $\gamma$  線の二重偏極実験を計画している。逆コンプトン  $\gamma$  線はすでに偏光可能で偏極標的の完成が待たれている。偏極標的には固体 HD ガスを使い、これまで製造実験を繰り返し Spring-8 への輸送を準備してきた。しかし達成された偏極度は期待されるものの半分程度であり幾度かの試行錯誤がなされてきた。また偏極させるためには3ヶ月を要し、液体ヘリウムを常に供給し続けなければならないことも含めスムーズな試行錯誤を行う上での障害となっていた。

### 2. 研究の目的

偏極 HD 標的を製造し、偏極度の測定を行うのは製造から3ヶ月後である。これまで3ヶ月間は一切偏極の測定を行えず、偏極度の途中経過を見ることができなかった。偏極製造時には磁場を印加する。その磁場の印加には超伝導マグネットを使用し3ヶ月の製造時には17Teslaの状態でも永電流モードで運転される。途中偏極度を測定することは可能であるが、偏極度の経過をモニターするためには3ヶ月の間に何度も測定を行わなければならない。しかし1回の測定で磁場の消失や偏極標的の偏極度の大幅な低下のリスクが非常に大きいので測定は行われなかった。

そこで本研究ではリスク無しに3ヶ月間偏極をモニターできる測定システムの開発とそれを使用する偏極度成長曲線を得ること目的とした。また偏極の成長が3ヶ月の間でいつ最大偏極度に到達しているのかを知るのも狙いであった。偏極成長のようすから改善点の早期発見と、年間に行える偏極実験試行回数増加が期待できる

### 3. 研究の方法

長期の偏極度モニターシステムの具体的な方法は17Tesla磁場印加中で周波数スイープにてNMR測定をすることである。これまで偏極度を得るためには1Teslaでの磁場スイープによるNMR測定を行ってきた。NMR測定には過去本研究者が開発したポータブル型NMRシステムを使用する。このポータブルNMRシステムはFlashADCと信号発生器のモジュールを使用し、デジタル処理によってNMR信号を抽出する。サイズやコスト面において非常に長所があるものである。本研究ではこの従来使用されてきたポータブルNMRシステムの周波数を40MHzから17Teslaの対応した700MHzまで拡張させ、さらにNMR測定法を磁場スイープから周波数スイープに変更する。さらに測定システムはNMR信号のリアルタイム処理、長期間稼働を行えることを目標とする。

次に開発したシステムを用いて実際に偏極が成長する様子をNMR測定により取得する。偏極が飽和するまでの時間の計測と成長の過

程をNMR信号の増加によって追跡する。NMR測定システムの開発では以下の3つのフェーズに分けた。

- (1) 周波数スイープの完成
- (2) NMR周波数の700MHzへの拡張
- (3) 上記2つを組み合わせる長期偏極モニター

### 4. 研究成果

#### ① フェーズ1 (~1年目)

既存の40MHzNMR測定システムではこれまで磁場スイープのみ行ってきた、周波数スイープの方法は試したことはあるが本格的、あるいは実用的レベルまでは達していなかった。第1段階のフェーズではこれ完了させることであった。この開発フェーズでの要点は周波数をスイープしているときの周波数と同期してデータを得ることにあつた。周波数スイープ用にプログラムを作り替え、磁場スイープの場合と遜色なくS/N比を得られるように最適化を行った。図1は周波数スイープでのNMR信号である。

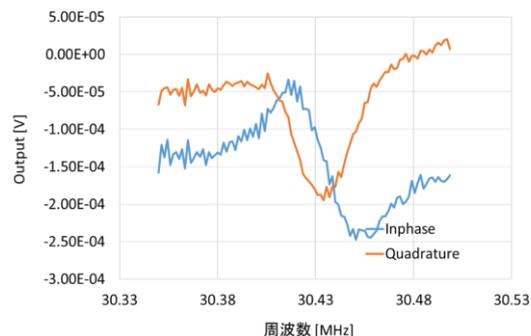


図1 初めて測定した周波数スイープでの水素のNMR信号

このフェーズを進めると同時に次のフェーズの準備を同時に進めた。第2段階のフェーズでは700MHzの周波数を扱うことからNMR測定に組み込まれている素子やコンポーネントを帯域100MHzのものから1GHzのものへと交換するために機器の選定と発注を行った。NMR測定システムのモジュールも以下のものを購入した。

PXIE-5650 信号発信器(1.3GHz)

PXIE-5162 FlashADC (2.5G Sampling/s)

#### ② フェーズ2 (1年目~2.5年目)

コンポーネントや機器の準備を終えたところで、磁場スイープにてNMRの周波数帯を40MHzから700MHzまで100MHzごとに測定をおこなった。しかし高周波になるにつれてノイズが大きくなり500MHz付近から確認できなくなった。本来であれば17Teslaの磁場では1Teslaに比べて17倍に大きくなるはずである。その後調査しアンプが高周波で発振していることがわかった。発振を押さえるため途中に減衰器を挿入し、再度挑戦した。2回目の挑戦では700MHzで水素のNMR信号を確認することができた。そしてそのま

700MHzの周波数スイープに挑戦した。図2は17Teslaでの水素のNMR信号である。鋭いピークに対して左側にいくつかピークが見られるが、水素がばらついて存在し、それぞれわずかに磁場の異なる領域にいるからだと考えられる

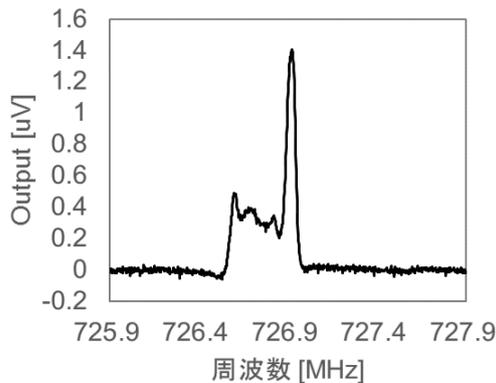


図2 初めて測定した17Teslaでの水素のNMR

### ③ フェーズ3

前段階で完成17Telas用周波数スイープをさらに最適化させ、長期間モニター用のソフトウェアを準備した。このプログラムにより指定時間ごとに周波数スイープはを行い得られた信号からNMR信号の抽出し信号強度を測定する。これら一連の動作を長期にわたって自動実行する。モニターする標的核子は水素(H)、重水素(D)、フッ素(F)、アルミ(Al)である。核子によってスイープを行う周波数が違うが、これもソフトウェアにより自動的に切り替えが行われる。フッ素はHD標的セルに含まれ、アルミはHDを冷却するためのワイヤーである。以下は温度が4.2K、磁場が17Tesla、永久電流モード下で行われた各核子のNMR信号である。周波数はそれぞれ水素(725.9MHz)、重水素(111.4MHz)、フッ素(683MHz)、アルミ(189.5MHz)となる。なおアルミについては4.2KではNMR信号が確認できなかったため1KでのNMR信号を掲載している

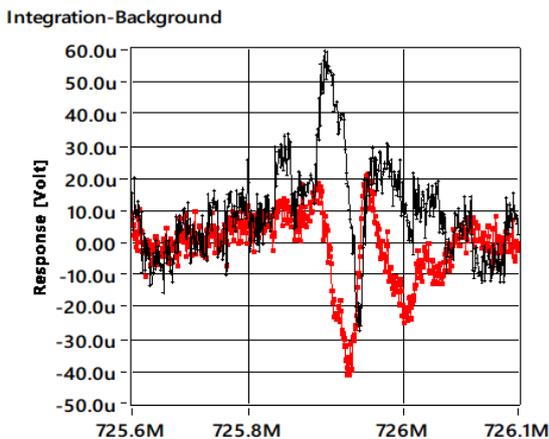


図3 4.2Kでの水素のNMR信号

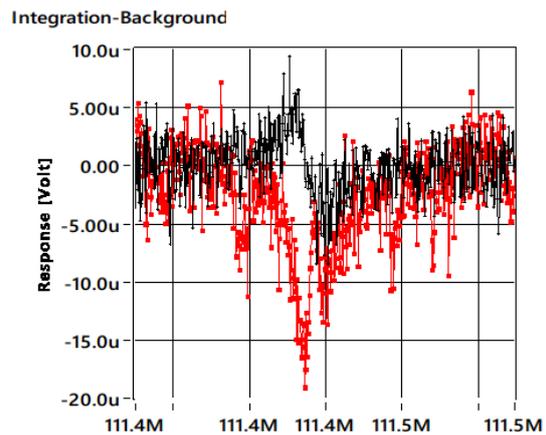


図4 4.2Kでの重水素のNMR信号

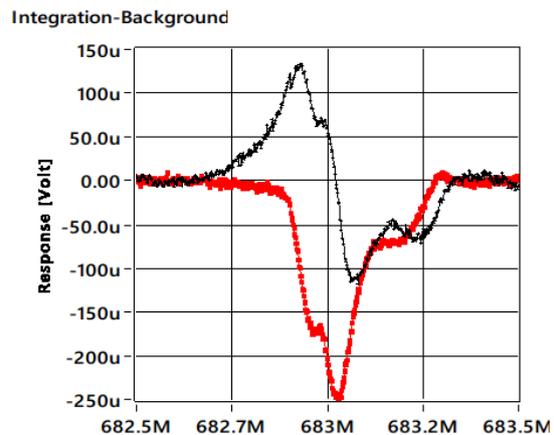


図5 4.2Kでのフッ素のNMR信号

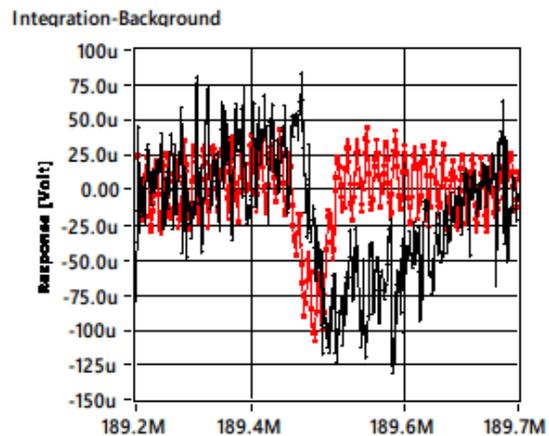


図6 1KでのアルミのNMR信号

本来は水素と重水素のNMR信号を得る目標であったが4核種のNMR信号を得ることができた。

次に希釈冷凍機を4.2Kから1.2K、500mK、30mKへと段階的に冷却していった。各核子のNMR信号強度が成長していることが確認できた。図7は500mKから30mKへ冷却していったときの水素と重水素のNMR信号の強度変化をプロットしたものである。水素と重水素の偏極度が成長していることがわかる。

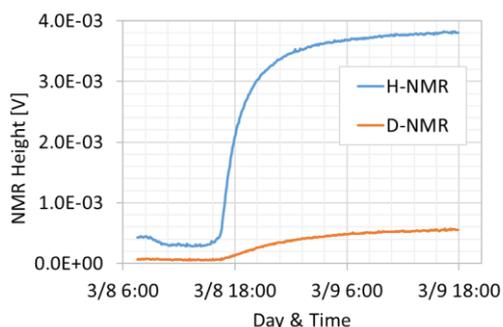


図7 500mK から 30mK に冷却していった過程での NMR 信号 (偏極) 成長の様子

水素の偏極度は開始後 5 時間、重水素は 8 時間で飽和していることがわかった。最終的に偏極度は水素は 38.9%、重水素は 3.19%に到達した。

本研究によってこれまで偏極度が判明するまで 3 ヶ月を要してものが、今後は伝熱やセルの改善の効果を見るためのテストであれば最短 1 日で知ることができる用になり、知見を得る機会が今後多くなると期待できる。人的リソースも液体ヘリウムなどの資源も大幅にカットできる。また偏極成長の途中経過をモニターできることで製造期間中に方針も立てやすくなった。Spring-8 へ偏極標的を輸送する場合は偏極保持時間が長くなるまでこれまでとかわらず 3 ヶ月を必要とするが、試行テストが 3 ヶ月から 1 日まで短縮できたことは偏極 HD 標的の開発の中でブレイクスルーである。図 8 は今回開発した 17Tesla 用ポータブル NMR システムである。この開発したシステムと、本研究の最終結果は論文に投稿する予定である。

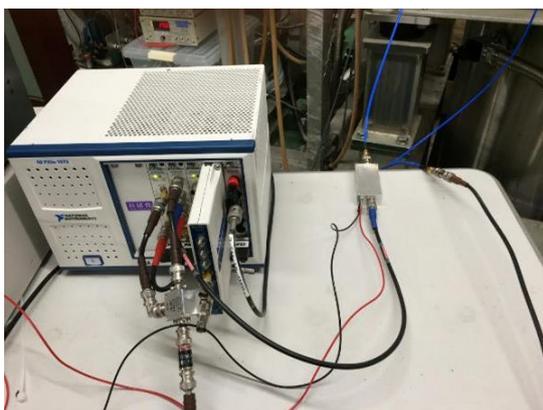


図8 開発した 17Tesla 用ポータブル NMR システム

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① T. Ohta, H. Kohri, M. Tanaka, M. Yosoi and M. Fujiwara  
Development of 17T-NMR system for measurement of polarized HD target  
PoS PSTP2015、2016、pp. 20.  
[http://pos.sissa.it/archive/conferences/243/020/PSTP2015\\_020.pdf](http://pos.sissa.it/archive/conferences/243/020/PSTP2015_020.pdf)

[学会発表] (計 1 件)

- ① T. Ohta  
Development of 17T-NMR system for measurement of polarized HD target  
XVIth International Workshop in Polarized Sources, Targets, and Polarimetry 2015  
2015 年 9 月 14-18、ルール大学ポーフム、ドイツ ポーフム

- ② 太田岳史

「核スピニメージング研究の基礎と医用画像研究への展開」

『電子情報通信学会 医用画像における学際領域研究』特別講演 2、兵庫 イーグレ姫路、2014 年 11 月

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)

なし

- 取得状況 (計 0 件)

なし

[その他]

なし

## 6. 研究組織

- (1)研究代表者

太田 岳史 (Ohta, Takeshi)

大阪大学・核物理研究センター・特別研究員

研究者番号 : 20727408

- (2)研究分担者

なし

- (3)連携研究者

なし