

## 筑波大学タンデム加速器施設における偏極イオン源の現状

### STATUS OF POLARIZED ION SOURCE AT THE UNIVERSITY OF TSUKUBA

大和良広<sup>#,A)</sup>, 森口哲朗<sup>A),B)</sup>, 小沢顕<sup>B)</sup>

Yoshihiro Yamato<sup>#,A)</sup>, Tetsuaki Moriguchi<sup>A),B)</sup>, Akira Ozawa<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup>Advanced Accelerator Section, CRiES (UTTAC), University of Tsukuba

<sup>B)</sup>Faculty of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba

#### Abstract

University of Tsukuba Tandem Accelerator Complex (UTTAC) has a Lamb-shift polarized ion source (PIS) as one of the injectors for the 6MV tandem accelerator. It is capable of delivering polarized protons (polarization ~85%) and polarized deuterons (polarization ~75%) with a maximum beam energy of 12 MeV. PIS was damaged in the Great East Japan Earthquake, but after relocation and restoration, it is still in operation without any problems. It is mainly used in the field of nuclear experiments, especially for nuclear moment measurements of unstable nuclei. In this report, the current status of PIS and some results of nuclear moment measurement will be presented. (Translated with DeepL.com)

#### 1. はじめに

筑波大学タンデム加速器施設 (UTTAC) では 6 MV タンデム加速器への入射器の一つとしてラムシフト型偏極イオン源 (PIS) を所有している。偏極陽子 (~200 nA 偏極度 ~85%) と偏極重陽子 (~90 nA 偏極度 ~75%) の供給が可能であり、これらの最大ビームエネルギーは 12 MeV である。PIS も東日本大震災で被災した (Fig. 1) が移設、復旧を経て、現在も順調に稼働している。主に原子核実験の分野で利用されており、特に、不安定核の核モーメント測定に利用されている。本報告では、PIS の現状を中心に利用成果である核モーメント測定についても一部報告する。

#### 2. PIS の歴史

筑波大学の PIS は 1970 年代に東京教育大学理学部物理教室において田岸 [1] らにより設計、開発され、筑波大学への移転と同時に建設が始められた加速器センターの縦型 12 MV タンデム加速器の入射器の一つとして建屋最上階の 9 階に設置された。核反応におけるスピン依存性相互作用などの原子核実験のために 40 年近く偏極陽子、偏極重陽子、ヘリウムのビームを供給していた。

PIS も 2011 年 3 月 11 日の東日本大震災により甚大な被害を受けたが、国内で唯一のラムシフト型偏極イオン源であること、ユーザーからの継続使用要望があることなどにより新しい 6 MV タンデム加速器でも使用出来るように復旧することになった。しかし、これまで PIS は縦型 12 MV タンデム加速器で利用するため建物最上階の 9 階に設置されていたため、これを横型 6 MV と同じ 1 階に移設する必要があった。PIS の整備・実験準備には数日間を要するため加速器室に同居できない。いくつかの案があったが、最終的に加速器室西側に新しい建物を造り、そこから新しい加速器に入射することとなった。 (Fig. 2)

古い電源装置など故障しかけており不安定であった

多数の装置群をなるべく安価に調達するために仕様を精査し、価格・納期・性能を総合的に判断して慎重に各装置を選定した。ゲートバルブは高価なため半数以上オーバーホールで済ませた。デュオプラズマトロンチャンバー、スピンフィルターチャンバー、ウィーンフィルターなどの主なコンポーネントは再利用し、自分たちで出来る作業はなるべく外注せず、復旧予算を大幅に縮減させることが出来た [2, 3]。

また、新規開発に関しては実験グループがスピン反転を制御室から簡単に操作できるように新たに高速スピンステートコントローラ (FASSICS) を開発した。Figure 3 に示す。制御系は、横河電機 (株) の Linux 対応 RTOS CPU モジュール F3RP61 を用いて EPICS と CSS で開発した [4, 5]。

これらにより、2024 年現在まで長期安定した偏極ビームの供給が可能となっている。



Figure 1: PIS affected by the Great East Japan Earthquake.

# yamato@tac.tsukuba.ac.jp

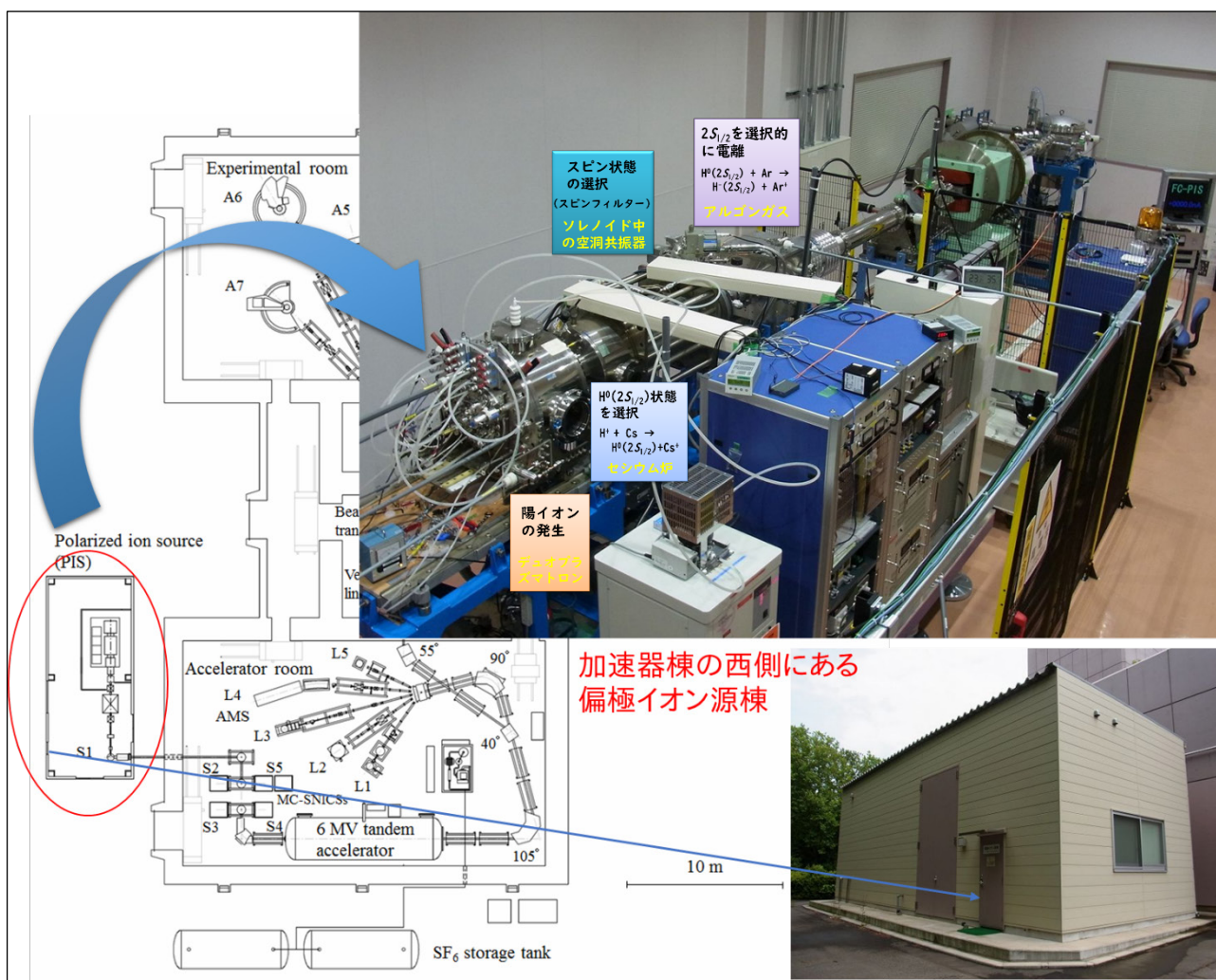


Figure 2: PIS moved from the 9th floor to a new building on the 1st floor.

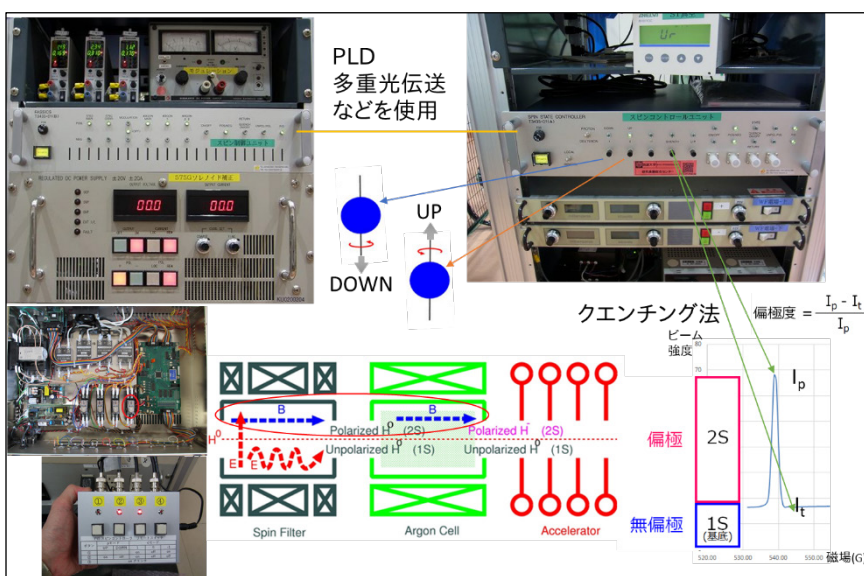


Figure 3: Fast Spin State Interface Control System (FASSICS).

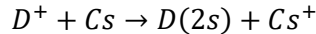
### 3. ラムシフト型偏極イオン源のビーム生成

#### 3.1 プラズイオンの生成(デュオプラズマトロン)

デュオプラズマトロンは、カソードとアノード間の熱陰極アーク放電によって発生するプラズマからイオンを引き出す。プラズマ生成室(中間電極)にイオン化したい物質(水素、重水素 etc.)を適当な圧力(～0.2 torr)で供給し、熱陰極によるアーク放電により電離する。これより生成される一価のプラズイオンの  $H^+$  ビームは 500 eV、 $D^+$  ビームは 1 keV のエネルギーで加速される。

#### 3.2 電荷交換( $Cs$ セル)

デュオプラズマトロンから引き出されたプラズイオン( $H^+$ ,  $D^+$ )ビームは約 190°Cで熱せられた  $Cs$  セルに入射する。入射されたプラズイオンは、蒸気内を通ることによって、例えば  $D^+$  では電荷交換反応



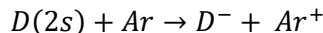
によって、 $2s_{1/2}$  状態の原子が生成される。

#### 3.3 核スピンの偏極(核スピンフィルター)

スピンフィルターはビームに平行な一様磁場(～605 G)と、約 1610 MHz のビームに平行な振動電場と同時にビームに垂直な静電場がかけられるような RF-cavity から成り立っている。電磁場の周波数が 1610 MHz の時には重水素に対して、565 G, 575 G, 585 G でそれぞれ  $\alpha$  ( $m_l = 1$ ),  $\alpha$  ( $m_l = 0$ ),  $\alpha$  ( $m_l = -1$ )状態の透過度が最大になり、水素原子の場合には  $m_l = +1/2$ ,  $m_l = -1/2$  に対して、540 G と 605 G にそれぞれ透過度の共鳴が起こる。Figure 4 に透過度の実測グラフを示す。

#### 3.4 イオン化(アルゴンセル)

核が偏極しているのは  $2S_{1/2}$  状態にある原子であって、その数は基底状態にある原子よりはるかに少ない。そこで出来るだけ  $2S_{1/2}$  状態にある原子だけを選択的にイオン化する必要がある。ここではアルゴンガスをを用いた荷電交換反応



を利用することによって  $2S_{1/2}$  状態の原子を選択的にイオ

ン化している。この反応において、水素原子では入射エネルギーが 500 eV、重水素では 1 keV 付近で大きな選択性がある。Figure 5 に PIS の模式図を示す。

### 4. 核磁気モーメントの研究

PIS を用いた研究例として不安定核の核磁気モーメント測定を紹介する。Figure 6 に示すように、 $\beta$ -NMR 法はスピン偏極した不安定核から放出される $\beta$ 線の数の非対称度を指標とした NMR 法である。PIS からの偏極陽子(偏極重陽子)ビームを Si 等のビームストッパーに照射することで、ストッパー内に偏極した不安定核 ( $^{25}Al$ ,  $^{29}P$  等)が生成され、上下に設置された検出器で $\beta$ 線の数の非対称度(U/D)を測定する。Figure 6 右下は実験結果の一例で、RF 周波数を 4.75~5.25 MHz に設定し、静磁場を変化させた時の U/D を示す。矢印はその静磁場における  $^{25}Al$  と  $^{29}P$  のラーモア周波数が RF 周波数と一致し、核磁気共鳴により U/D が変化したことを示す[6]。Figure 7 は $\beta$ -NMR 法の応用として、回転磁場を用いた核モーメントの符号測定の一例である。二組の RF コイルを直交させ、それぞれのコイルで発生させる RF の振幅を合わせ、位相を $\pm 90$  度ずらすことで、右もしくは左回

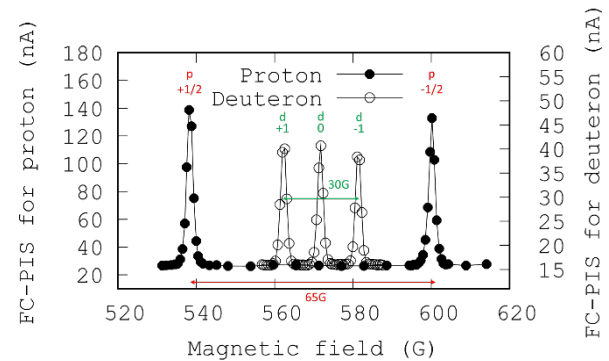


Figure 4: Actual measurement graph of peak value.

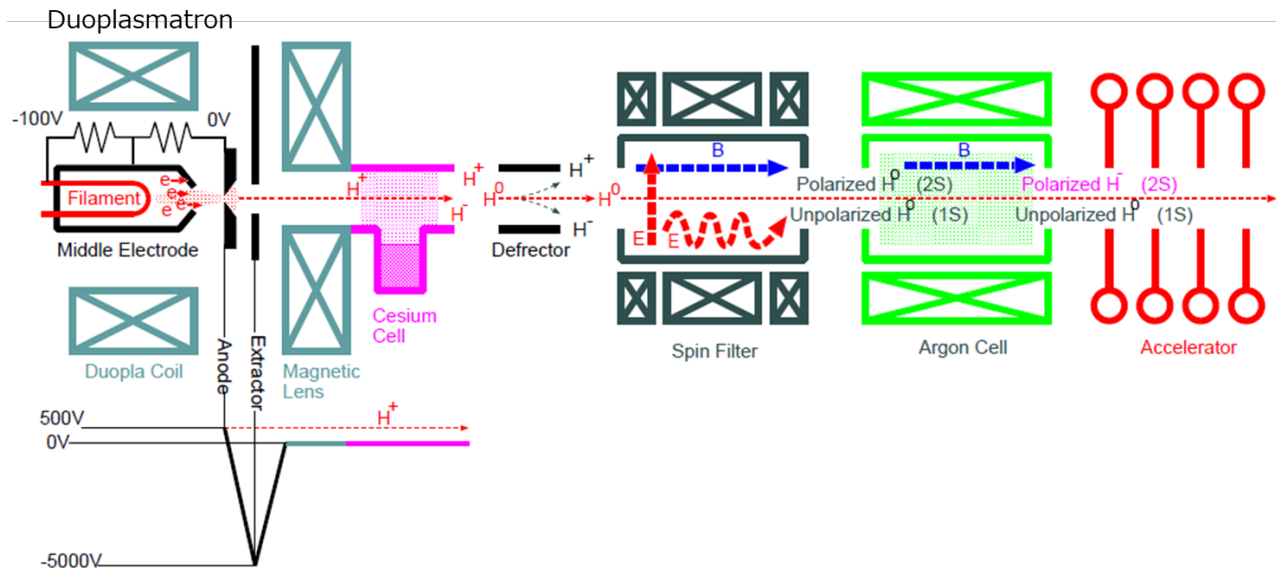


Figure 5: Schematic diagram of PIS.

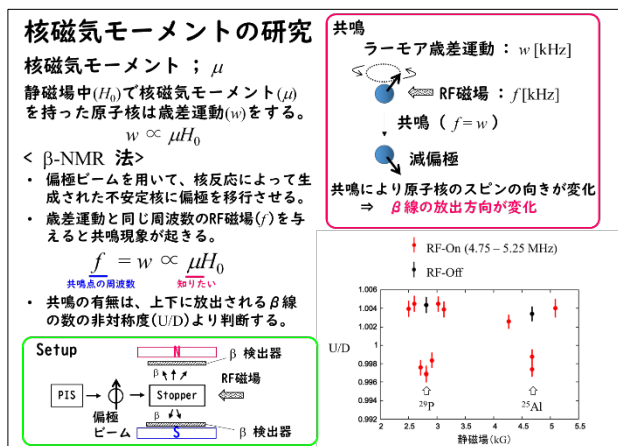


Figure 6: Methods of nuclear moment measurement.

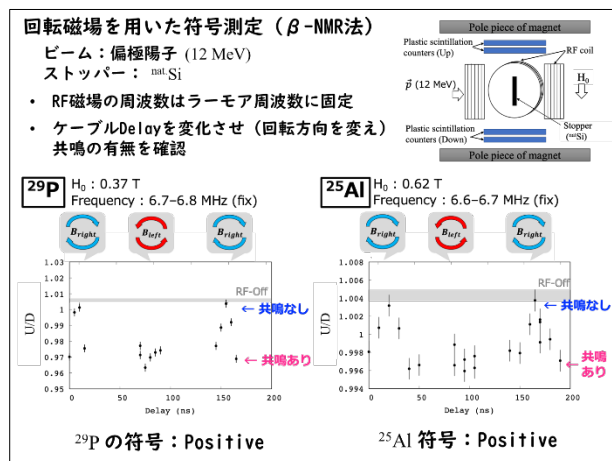


Figure 7: Example of sign measurement results.

転の回転磁場を発生させることができる。位相をずらすために、一方のコイルには Delay ケーブルを使用した。磁場の回転方向による、共鳴の有無から核モーメントの符号を決定できる[7]。

## 5. まとめ

東日本大震災で被災した PIS を復旧させ安定したビーム供給を実現している。PIS からの偏極ビームを用いて不安定核の核磁気モーメント測定を実施しており、 $\beta$ -NMR 法による不安定核  $^{29}\text{P}$  や  $^{25}\text{Al}$  の核磁気モーメントの測定と、回転磁場を用いることでその符号測定に成功した。今後、核磁気モーメント未知核( $^{30}\text{P}$  等)や、符号未知核( $^{23}\text{Mg}$ ,  $^{31}\text{S}$  等)を対象核種として核モーメント測定を進める。

## 参考文献

[1] Y. Tagishi *et al.*, “偏極イオン源”, 日本物理学会誌, 1972 年 27 卷 1 号.

[2] Y. Yamato, *et al.*, “偏極イオン源の移設 (震災復旧1)”, 第 27 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集, Kyoto, Japan, 4-5 Jul, 2014.

[3] Y. Yamato, *et al.*, “偏極イオン源の移設 (震災復旧2)”, 第 28 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集, Sendai, Japan, 3-4 Jul, 2015.

[4] Y. Yamato, *et al.*, “偏極イオン源の移設 (震災復旧3)”, 第 30 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集, Gifu, Japan, 5-7 Jul, 2017.

[5] Y. Yamato, *et al.*, “DEVELOPMENT OF THE POLARIZED ION SOURCE CONTROL SYSTEM USING EPICS AND CSS”, Proceedings of PASJ'17, Hokkaido, Japan, 1-3 Aug, 2017.

[6] T. Moriguchi *et al.*, “Status of Lamb-shift polarized ion source at 6MV tandem accelerator in UTTAC and its application to nuclear physics”, Proceedings of the 24th International Spin Symposium (SPIN2021), JPS Conf. Proc. 37 (2022) 021201. [DOI: 10.7566/JSPSC.37.021201].

[7] T. Moriguchi *et al.*, “筑波大学タンデム加速器施設における偏極イオン源を用いた不安定核の核モーメント測定”, 第 36 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集, Wako, Japan, Jul, 2024.