

偏極イオン源の現状 (震災復旧 3)

Current status of the Polarized Ion Source (Earthquake disaster restoration 3)

大和良広*・森口哲朗・田岸義宏

Y.Yamato*, T.Moriguchi and Y.Tagishi

筑波大学 研究基盤総合センター 応用加速器部門 (UTTAC, University of Tsukuba).

* Correspondence to: Yoshihiro YAMATO; E-mail: yamato@tac.tsukuba.ac.jp

はじめに

筑波大学の偏極イオン源(PIS)も2011.3.11の東日本大震災により甚大な被害を受けた。第27回タンデム加速器研究会では、PIS 被害詳細、新設のための物品準備、9階イオン源室の片付け、偏極イオン源棟の計画・建設、9階から新棟へのイオン源移設までを報告した^[1]。第28回タンデム加速器研究会では、復旧作業とトラブル事例を報告した^[2]。本稿では、その後のビームテスト、問題解決、高速スピンステイトコントローラ(FASSICS)の開発、新制御系開発について報告する。

2017.5.16現在、陽子ビームの場合PIS末端のファラデーカップ(FC-PIS)でのクエンチング法で80%、12MeVに加速後の核反応によるHeポラリメータで50%程度の偏極度を観測している。本来、クエンチング法の偏極度とHeポラリメータでの偏極度はほぼ一致するはずであるが、現在のところ減偏極の原因がわかっていない。新制御系は、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。

1. 偏極ビーム調査と改善

無偏極のHビームはすぐに数 μA 出て、偏極ビームのオフラインテストをはじめた。しかし、本来の磁場より下の方にブロードなピーク(図1左)が観測され本来のピークが見つからなかった。偏極重陽子(\vec{d})の3本のピーク(565,575,585G 図1右側中央)はすぐに見つかったが、電流値の磁場換算で偏極陽子(\vec{p})のピーク磁場(540,605G)に設定しても2本のピーク $\vec{p}(+1/2)$, $\vec{p}(-1/2)$ は見えなかった。その後、Deflector, Cavity 静電場, Cavity-RF(高周波電場)のパラメータを試行錯誤の末、FC-PISでのクエンチング法による \vec{p} ビームの偏極度が80%以上になるまでになった。ところが、12MeVに加速後Heポラリメータ ${}^4\text{He}(\vec{p},\vec{p}){}^4\text{He}$ で計測すると偏極が確認できず、移設時及び組立時にスピンフィルター(SF)のどこかを損傷したかもしれない恐れから以下のような様々な原因調査と改善を行った。

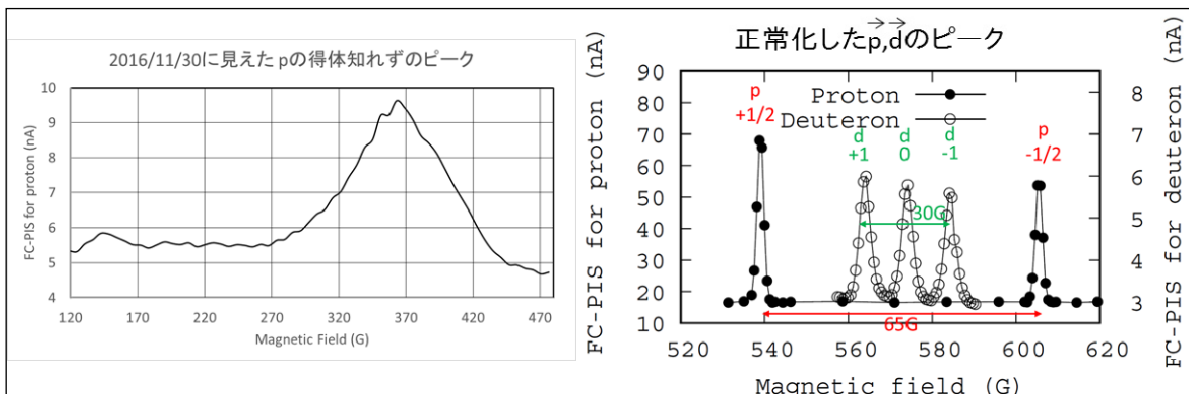


図1 ビームテスト中に観測した波形

1.1 RF 調整ねじで改善の試み

RF キャビティー内に先端がクレオンの先の様な棒状アンテナが出し入れできる仕組みになっており、1 回転で共振周波数を約 150kHz 調整できるはずの調整トリマーが SF 外部に付いているが、ネジが非常に固く回転が困難であった。図 2 の様に棒で力をかけられるように治具を作成するなどの工夫をして±10 回転程度動かしてみたが、RF 出力の飽和状態に変化はなかった。



図 2 RF 調整トリマーで最適な共振ポイントにする試み

1.2 スピンフィルターソレノイドコイルの磁場計測

図 1 右端のピーク \vec{p} (-1/2)が見えないのはコイルの不具合で必要な磁場が出ていないのではないかと疑いから、既に $1e-8$ torr 台の高真空に達していた SF の真空を破り、Ar セルを上方にずらして(図 3)軸方向磁場の健全性をチェックした。計測は、テスラメータ Group3 DTM-151 のセンサーをアキシシャルホルダーに取り付け 50cm スケールと接続して出し入れし行った(図 4)。その結果、磁場と電流との間には良い直線性があり、偏極生成にとって必要な磁場がかかることが確認できた。



図 3 Ar セルをずらして計測

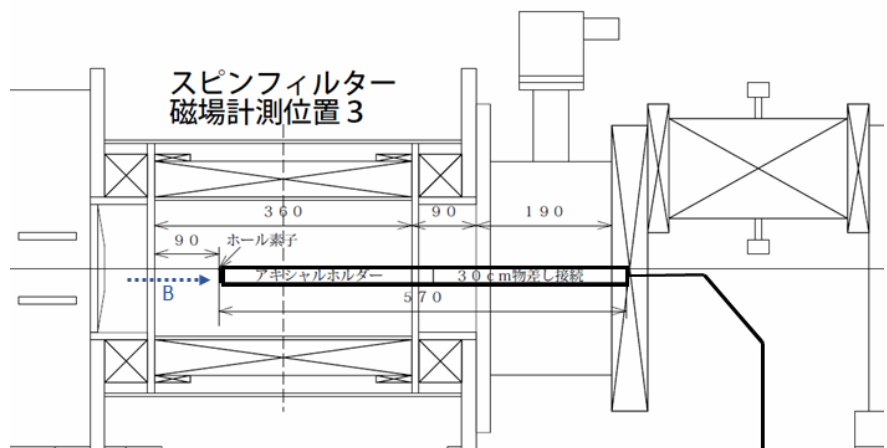


図 4 SF 内部へホール素子を入れた位置の例

1.3 核スピンフィルター共振周波数調査

はじめに日本高周波(株)ご協力の下、供給源の RF 電源の周波数をスペクトラムアナライザ(アンリツ MS2721B)を用いてチェックした。発振周波数 1610 MHz 電力 22.21 dBm (166.3 mW) で正常に動作している事が確認できた。次にネットワークアナライザ(Agilent 8753ET)を用いて RF キャビティー(空洞)本体の共振周波数を確認した。

測定の 25 時間前にソレノイドコイルに 540G 相当の通電をし、温度が安定した状態で共振周波数を測定した所、525 kHz 下にずれている(図 5 の左側ピーク)事が観測された。このためフィードバックされる RF が減衰して出力が飽和する事がわかった。測定後、コイルの通電を OFF にし 2 時間放置(空洞が冷却された状態を想定)して再び計測した所、図 5 の右側ピークのように本来の共振周波数 1,610 MHz に近いところまで戻っている。理想の共振点で使用するにはもう少し温度を下げる必要がある。この結果により伝送ロスの軽減が必要で RF キャビティの冷却不足が問題であることがわかった。

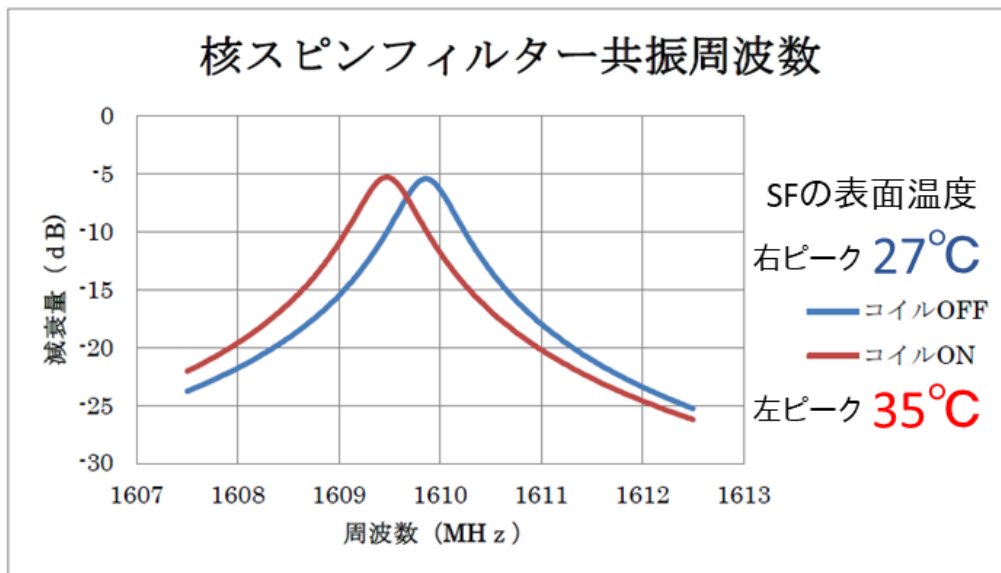


図 5 SF 内 RF キャビティ共振周波数の測定結果

2 伝送ロスの軽減と冷却不足の改善

RF ケーブルを BNC 3m×2 本から N コネクタ超低損失ケーブル(LMR-400)2m×2 本に交換して伝送ロスを半減させた。

RF キャビティの冷却は、

- 1.空調設定温度を最低の 20°C にし、ルーバーをコイルに向ける
- 2.冷却液(バーレルシリコンフルード)の温度を下げる(18°C)
- 3.大型ファン(工場扇)×2 で SF を外側から冷却

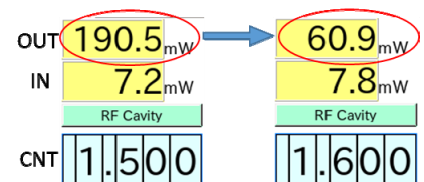


図 6 冷却前後の RF 出力の変化

を行った結果、図 6 の様に RF 電源の出力を 1/3 に出来、クエンチせずに共鳴させることが出来た。

安定した SF 冷却環境にするため温度制御精度の高いインバータタイプ純水チラーで強冷する準備を進めている。

3 高速スピンステイトコントローラ(FASSICS)

SF/Ar コイルの磁場を高速に反転させたり、クエンチングするための装置で震災以前に使用していた装置は古くパラレルファイバーをやめたり機能追加をするために新しく製作した。p 偏極モードと d 偏極モードが選択でき、モードごとに磁場の高速切り換えの仕組みやクエンチの方法も違うため論理回路が複雑化するので書き換え可能なプログラマブルロジックデバイス(PLD)を使用した。また、前段加速高電圧架台(最大 150 kV)側への光ファイバーケーブルの本数を減らすため多重光伝送モジュールを用いた。図 7 に概要説明図を示す。

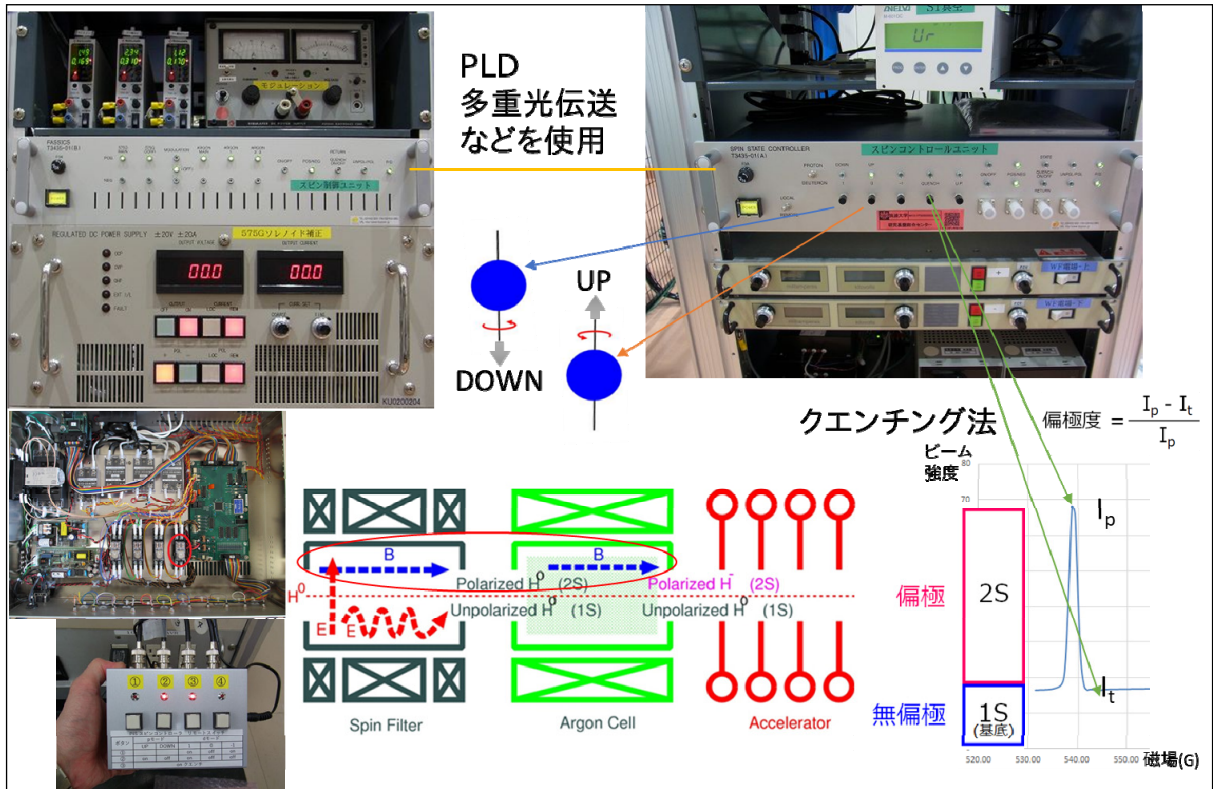


図7 高速スピンステイトコントローラ(FASSICS)概要

4 PIS 制御システムの開発

大量な電源装置や真空計などの計測・制御をなるべく安価にネットワークで好きな場所から監視・操作でき、開発・修正が楽なものを考えている時に加速器学会での KEK 小田切氏の発表^[3]により横河電機(株) Linux 対応 RTOS CPU モジュール F3RP61 と EPICS(Experimental Physics and Industrial Control System)^[4]を知った。F3RP61, EPICS, CSS(Control System Studio)^[5] の三者セットで希望が叶った。図8に PIS 制御系ハードウェア写真を示す。



図8 筑波大 PIS で使用している制御系ハードウェア

EPICS で装置群をデータベースファイルとして作成し、実際の装置との IO(入出力部)を司るプログラムとして動いており、ネットワークから何台でも同時接続可能である。CSS を用いてユーザーがコントロールする端末でのオペレーターインタフェース(OPI)を作成し、ビームコントロールをしながら適宜修正、改良が簡単にできる。図 9 に開発した制御画面の 2017 年 5 月 15 日 p 偏極ビーム実験準備時のスクリーンショットを示す。コントロールの分解能の増減も簡単にでき、データブラウザ(図 9 下部グラフ)によるトレンドグラフは PIS の状態をひと目で把握できて大変重宝している。

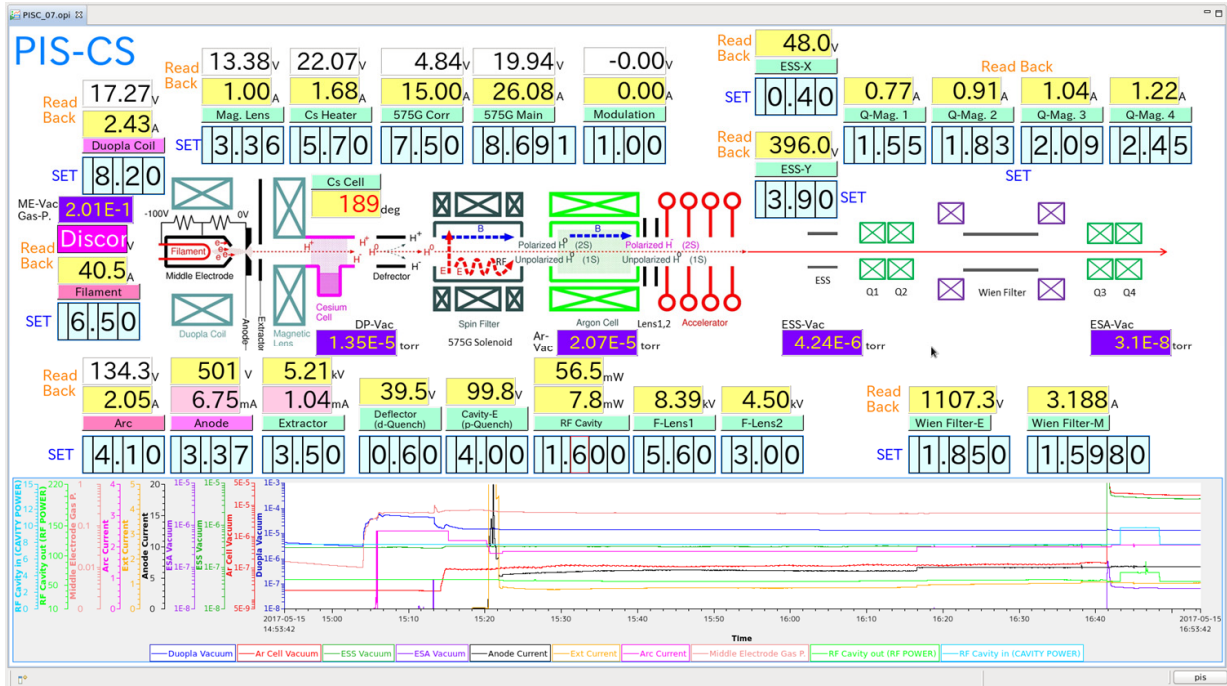


図 9 開発した制御画面(PISC_07.opi)

また、PIS 立ち上げ時にデュオプラズマトロンのアークプラズマを立てて、フィラメント、DP コイル、アノード電極、引き出し電極のパラメータを手動で水素ガス圧調整しながら俊敏に操作するための現場操作タブレット用に作成した OPI を図 10 に示す。プラズマの立ち上がりや電極の放電が起きたり大電流が流れてしまったりの大きく速い動きを監視しやすくするためアナログメータを用いた。このような GUI も CSS の部品を貼り付けて EPICS の IO と関連付けるだけで済むので非常に簡単である。

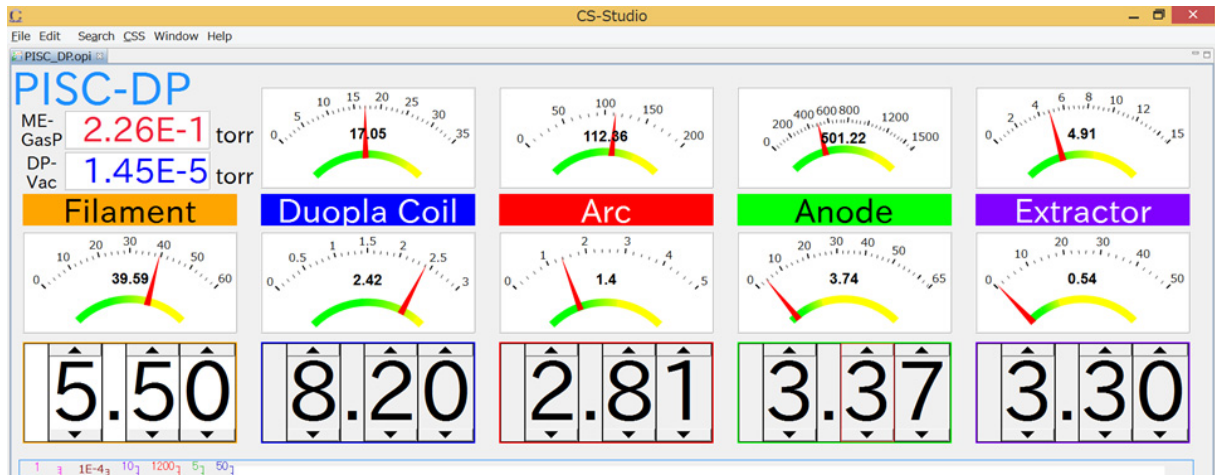


図 10 開発した PIS の最初の立ち上げ時に必要な操作用の画面 (PISC_DP.opi)

まとめ

心配していたスピンフィルターの損傷等は結果的にはなかったようで、RF キャビティの適切な温度コントロールが出来ていなかったのが \vec{p} の 2 本の共鳴ピークが見えなかった原因であり、He ポラリメータで偏極が確認できなかった原因であった。偏極は確認できたが、現在の所、末端での偏極度は 50% 程度である。減偏極の原因はまだわかっていないので引き続き、改善に向けて進めていく。

制御システムは、F3RP61, EPICS, CSS の三者セットで「なるべく安価」「ネットワークで好きな場所から監視・操作」「開発・修正が楽」などの希望が叶った。横河電機(株)の F3RP61 は使い勝手が良く安定動作する。EPICS 開発^[4]、CSS 開発^[5]、デバイスドライバサポート開発^[6]などの先人のご努力の恩恵と Epics Users メーリングリスト^[7]のメンバー支援による開発の負担軽減が多であった。

3.11 により壊滅的な被害を受けた PIS を復活させることができた。新しい建屋に移設し、少ない予算で新しい技術も取り入れつつ実働できるようになった。

PIS 震災復旧シリーズの報告は本稿を持って最終とします。この場をお借りしてご協力くださった全ての方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] 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.;
- [2] 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.;
- [3] J. Odagiri, et al., “EPICS ON F3RP61 FOR SUPERKEKB ACCELERATOR CONTROL”, Proceedings of PASJ'14, Aomori, Japan, 9-11 Aug, 2014.;
- http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SAP1/SAP100.pdf
- [4] EPICS - Experimental Physics and Industrial Control System
<http://www.aps.anl.gov/epics/>
- [5] Control System Studio (CSS) at KEK - Seminars and Tutorials
<http://www-linac.kek.jp/cont/epics/css/>
<http://www-linac.kek.jp/cont/css/>
<http://cerldev.kek.jp/trac/EpicsUsersJP/wiki/css/css/getStringArray>
- [6] Device and Driver Support for F3RP61
<http://www-linac.kek.jp/cont/epics/f3rp61/>
- [7] Epics Users JP
<http://cerldev.kek.jp/trac/EpicsUsersJP>
- [8] 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.;

Keywords: 偏極イオン源; 偏極度; RF Cavity; EPICS; 筑波大学オリジナル