

## J-PARC MR チタン静電セプタム

### TITANIUM ELECTROSTATIC SEPTA IN J-PARC MR

新垣良次<sup>#, A)</sup>, 木村琢郎<sup>A)</sup>, 小松雄哉<sup>A)</sup>, 松村秋彦<sup>B)</sup>, 武藤亮太郎<sup>A)</sup>, 村杉茂<sup>A)</sup>,  
岡村勝也<sup>A)</sup>, 白壁義久<sup>A)</sup>, 富澤正人<sup>A)</sup>, 柳岡栄一<sup>A)</sup>  
Yoshitsugu Arakaki<sup>#, A)</sup>, Takuro Kimura<sup>A)</sup>, Yusuke Komatsu<sup>A)</sup>, Akihiko Matsumura<sup>B)</sup>  
Ryotaro Muto<sup>A)</sup>, Shigeru Murasugi<sup>A)</sup>, Katsuya Okamura<sup>A)</sup>, Yoshihisa Shirakabe<sup>A)</sup>  
Masahito Tomizawa<sup>A)</sup>, Eiichi Yanaoka<sup>A)</sup>

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

<sup>B)</sup> Nippon Advanced Technology Co.,Ltd

#### Abstract

Slow extraction is used for providing the high intensity proton beam to Hadron experimental hall. In slow extraction process, the beam loss is inevitable in electrostatic septum (ESS), radio activation is a problem for maintenance. In order to reduce the radio activation of ESS, we have developed titanium electrostatic septum. The alignment of the septum ribbon were measured by laser focus displacement meter. The effective thickness of the ribbon was estimated to be 60-70  $\mu$  m. Test of Titanium ESS2 started after installation of titanium ESS1, the current leakage occurred even in low voltage ( $\sim$ 30 kV). After exchanging the electrode which grain boundary is uniform and small, we could obtain stable performance.

#### 1. はじめに

J-PARC MR において3次共鳴を用いた遅い取り出しによってハドロン実験施設に大高度の陽子ビームを供給している。また、位相空間上の角度の一様性を保持するためにバンパ電磁石による動的ビームの軌道調整によって高い取り出し効率を実現している[1]。一方静電セプタムやセプタム磁石ではセプタムの位置の回転や平行移動によってビームロスが最小になるような調整を行っている。静電セプタムはビームが当たるのを避けられないため、装置の放射化が問題となる。ビームが当たらないようにするため可能な限り薄くて丈夫なリボンタイプの物を使用している。2013年より静電セプタムの放射化低減の為にステンレスに比べてより残留放射能の少ないチタン製静電セプタムの開発を開始した。ビームから見たセプタムの実効厚を評価するため、レーザ変位計を用いてセプタムリボンのアライメントの測定を行った。2007年の測定[2]と同等の結果が得られた。チタンESS1号機は2017年にさまざまな改良を施した後MRへインストールした。その後順調に運転を続けている。チタンESS2号機は真空特性の向上のためチャンバー内壁の全面研磨と200°Cベークを実施した後、1号機と同様な高電圧試験を行って電極とヨークだけの基本構成では良い結果であった。しかし、チタンESS1号機と同様なバッフルやRFシールドなどを追加した後の試験では途中電流が流れ出した。その後の試験で電流が流れた箇所が電極であることが判明した。鍛造の仕方を変えて結晶粒界の小さい電極を製作し、高圧試験を行い良い結果が得られた。

#### 2. リボンのアライメント測定

2013年にKEK つくばキャンパスのミュオン第2実験棟クリーンブースの中にアライメント測定用ステージが

設置されその中でチタン製ヨークに張られたタングステンリボンのアライメントを測定した。主なスペックをTable 1に示す。

Table 1: Septum Ribbon

材質	W (74%) Re (26%) 合金
引っ張り強さ	4.2 kg
張力	1 kg
断面	0.03 mm x 1 mm
ピッチ	3 mm
表面処理	電解研磨



Figure 1: Measurement of ribbon alignment.

セプタムのアライメントの測定はビームロスと直結しているため重要な項目である。特にリボンの場合それ自体にひねりが生じていると厚みが増えビームが当たる確立が増える。ほとんどの場合アニーリングでひねりは取れているが40  $\mu$ m程度ひねりが見えている場合がある。それを除去して、張替えを行っている。アライメント測定の設定アップをFig. 1に示す。C型ヨークに3 mmピッチの間

<sup>#</sup> arakaki@post.kek.jp

隔で W-Re リボンが 496 本張っている。ヨークの材質は純チタン2種で機械加工を行った後サンチタン処理をしている。当たり面の精度は  $10\ \mu\text{m}$  である。測定されたアライメントエラーを Fig. 2 に示す。測定ステージのエラーは  $1\ \mu\text{m}/1\ \text{m}$  のストレートエッジ基準器で校正した。実効厚は1号機が  $28+30=58\ \mu\text{m}$ 、2号機が  $43+30=73\ \mu\text{m}$  となる。チタン ESS1号機は 2017 年に MR ヘインストールされ、現在まで取り出し効率 99.5%を保持している。残留線量については  $10\ \text{mSv/h}$ (On contact)以下である。[3]

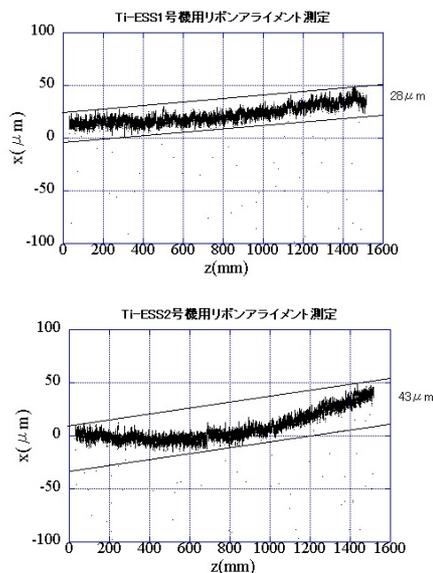


Figure 2: Alignment error.

### 3. チタン ESS 高電圧試験

#### 3.1 電源フェンス内の改良

リボンのアライメントを測定後、ヨークをチタンチャンバーに組み込み、チタン電極、チタンフィードスルーを組み込んだ後、高電圧の印加試験が行われた。高圧試験

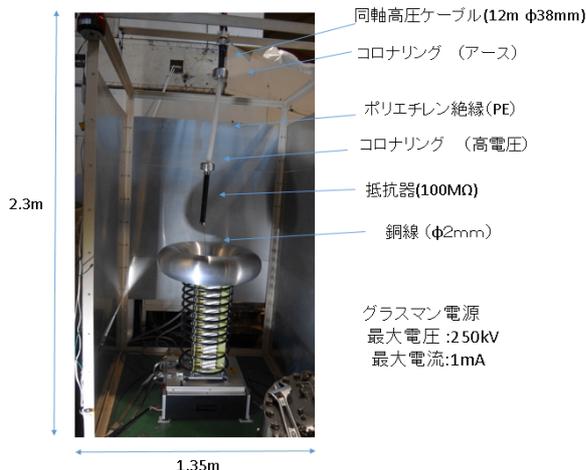


Figure 3: Air insulation in power supply.

に使用された電源のセットアップを Fig. 3 に示す。グラスマン電源の上部と高圧ケーブルの間には  $100\ \text{M}\Omega$  の抵抗器を取り付け放電の際のエネルギーを吸収する。当初、このセットアップではコロナリングと電源上部が細長い銅線で接続されていた。この場合、電気力線が内側に入り込み細い電線の表面で電場集中が起こることが起こるため、その周りの空気がイオン化され電流がフェンス壁へとながれることになる。太い形状のまま電源に近づけてから接続すると良いことがわかった。太い抵抗器をつけることで、電場集中の防止と放電対策を兼ねることが出来た。この改良で長い間実機の静電セパタムの電流が  $\sim 80\ \text{kV}$  で漏れ始めていた現象[4]が解決に至った。電場計算の結果を Fig. 4 に示す。金属が空気に触れているところは絶縁耐力  $3\ \text{MV/m}$  以下となっている。

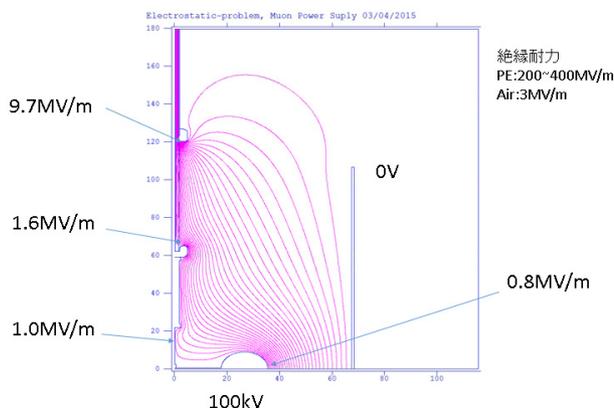


Figure 4: Field distribution.

#### 3.2 チタン ESS2号機の高電圧試験

2017 年チタン ESS1号機をインストールした後、チタン ESS2号機の基本構成(電極+ヨーク)での高圧試験は  $110\ \text{kV}/25\ \text{mm}$  達成し良好な結果であった。しかし、チタン1号機と同様な対策を施した後は途中電流が流れ出しその原因調査が始まった。チタン 1号機の構成を Fig. 5

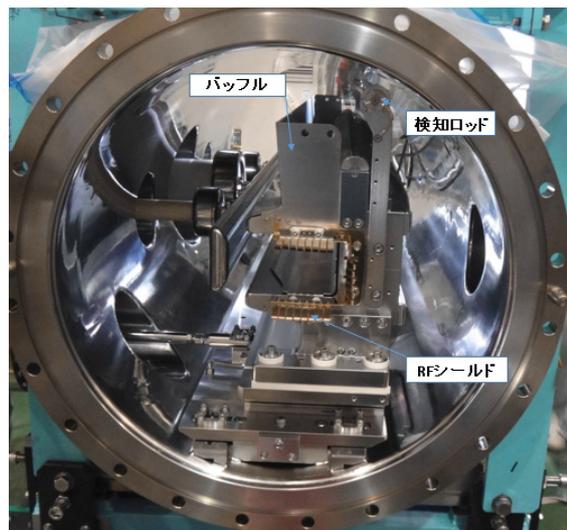


Figure 5: Titanium ESS2.

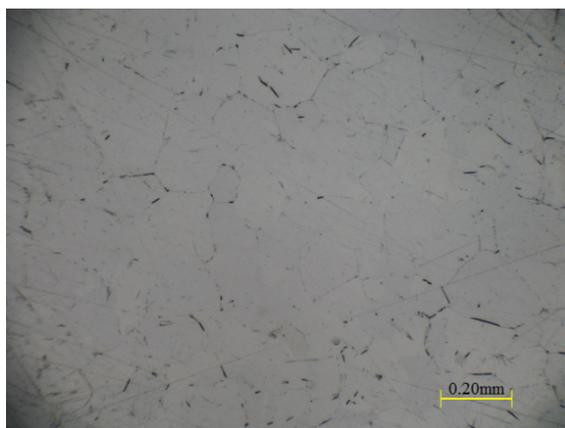
に示す。RF シールド、バップルを1つずつはずしてその都度、高電圧を印加して電流が流れるかを調べた結果、最初の基本構成でも流れた。微小電流計で電極からヨークに向かって流れる電流を測った所電源を流れる電流の 8 割が流れていることがわかった。この電極(2号機電極)は 140 kV/25 mm 達成した実績のある電極であるが、一度高電圧に達しても、窒素を充填して大気にさらすとその次の高圧試験で途中から電流が流れる不安定な現象が何度か起こっている。見た目も結晶粒界が大きく目立つ。鍛造方法を変えて結晶粒界が目立たない電極のモデルを製作した。

### 3.3 電極の観察

デジタル顕微鏡 (MS200) で電極の表面の観察を行った。2号機用電極と A 電極(モデル)の表面の写真を Fig. 6 に示す。



2号機電極(実機)



A 電極(モデル)

Figure 6: The surface of titanium electrode.

2号機電極を見ると結晶粒界が細長いものから丸い物と多様である。薄黒く 4  $\mu\text{m}$ ~6  $\mu\text{m}$  程度のピットが見えてくる。これはバフ研磨処理をした時にバフ粉が落ちた跡だと考えられる。一方、A 電極に関しては結晶粒界の粒径は 0.1 mm~0.2 mm 程度、比較的丸まって一様に見え、ピットも少ない。表面の状態によっては化学研磨の過程で 7 nm 程度の酸化皮膜が表面に形成される際、均等につかない可能性がある。

### 3.4 チタン ESS2号機高圧試験の結果

実機サイズの電極を製作し、2号機電極と入れ替えてバップル、RFシールドを組み込んだ後高電圧試験を行った。Figure 7 にその結果を示す。前日の高圧試験で 109.57 kV まで上げているので一等最初の立ち上げスピードは通常 (10 V/0.2 s) の2倍のスピードで上げている。エージング開始電圧は 109.453 kV なのでわずか 0.1 kV 程度しか下がっていない。110 kV 達成した後 1 kV 下げ 3時間程度安定度を見た。電流、真空、X 線ともに安定である。

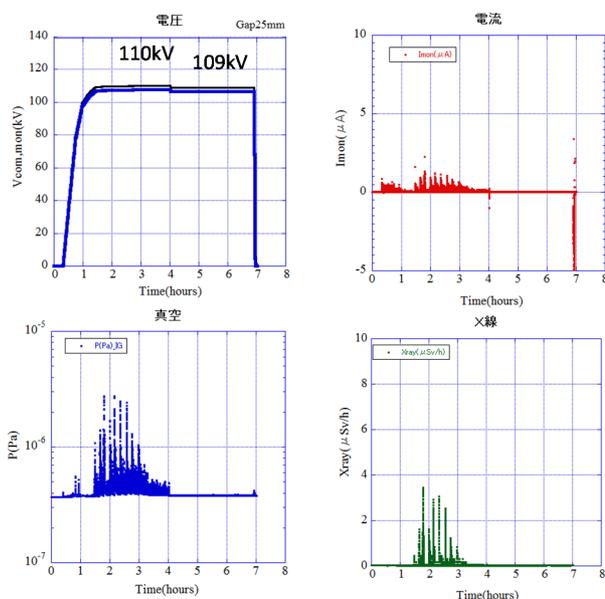


Figure 7: High voltage test in Titanium ESS2.

### 謝辞

フェンス内コロナリングの製作や残留線量の測定ツールを製作していただいた KEK 工作センターの東氏、阿部氏、大久保氏、井上氏に感謝いたします。LINAC 棟での試験場を提供していただいた LINAC の方々に感謝します。精密機械のインストール、製作を行っていただいたマイテック社の山田氏他スタッフ一同に感謝いたします。

### 参考文献

- [1] Tomizawa *et al.*, "Slow extraction from J-PARC mainring using a dynamic bump", Nucl.Instr.Meth.A, vol. 902,pp.51-61,2018,doi:10.1016/j.nima.2018.06.004.
- [2] Y. Arakaki *et al.*, "Electrostatic Septum for 50GeV Proton Synchrotron in J-PARC", in Proc. IPAC'10, Kyoto, Japan,May 2010.
- [3] R. Muto *et al.*, "Current Status of slow extraction from J-PARC Main Ring", in Proc. IPAC'19, Melbourne Australia,May 2019.
- [4] Y. Arakaki *et al.*, "Present Status of electrostatic septa in J-PARC MR", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Japan, Aug. 8-11, 2012, pp. 1-2.