

J-PARC MR の遅い取り出しと静電セプタム

○沼井一憲^{a)}、浅見高史^{a)}、木村琢郎^{a)}、白壁義久^{a)}、富澤正人^{a)}、武藤亮太郎^{a)}、
村杉茂^{a)}、柳岡栄一^{a)}、松村秋彦^{b)}

^{a)} 高エネルギー加速器研究機構、^{b)} 日本アドバンスドテクノロジー

1. はじめに

J-PARC とは大強度陽子加速器施設 (Japan Proton Accelerator Research Complex) の略称であり、陽子加速器を利用して物質・生命や素粒子・原子核の実験をおこなっている研究施設である。J-PARC には陽子を加速する 3 台の大型加速器があり、リニアック、3GeV シンクロトロン(Rapid-Cycling Synchrotron、RCS)、メインリング(MR)によって構成されている。リニアックで生成された負水素イオンは RCS で陽子となり MR へ送り出され、そこからハドロン実験施設とニュートリノ実験施設へと陽子ビームが供給される。タイトルにある遅い取り出しとはメインリングで加速された陽子をハドロン実験施設に向けて供給する手法のことである。静電セプタム(ESS)はその際に使われる機器のうちの一つで、陽子ビームを削り出す重要な役割を果たす。ESS はチェンバーの中に電極とアースリボンが張られたヨークが向かい合って配置されている。電極に電圧を印加することによってリボンとの間に電場を形成し、この電場を利用し陽子ビームを取り出している。今回はこの ESS のリボンアライメント、高電圧試験について報告する。

2. J-PARC 遅い取り出しと利用される機器

J-PARC MR ではニュートリノ実験施設とハドロン実験施設へビームを供給するが、それぞれ異なる手法で行なっている。ニュートリノ実験施設へビーム送り出す際には速い取り出しと呼ばれる手法を使う。陽子が MR を 1 周するのにかかる時間はおよそ $5\mu\text{s}$ であるが、速い取り出しではリングを 1 周する $5\mu\text{s}$ の間に全ての陽子ビームを取り出す。一方、ハドロン実験施設に送り出す際に使われる遅い取り出しでは、リングを 40 万周する約 2 秒の間に少しずつ取り出す。これはよく「大根の桂むき」に例えられる。なぜ、ハドロン実験施設に取り出す際に時間をかけて少しずつ取り出す

なければならないかという理由は実験方法の違いにある。ニュートリノ実験施設では 5 万 t の水が標的でありニュートリノと水が衝突した時のチェレンコフ光を観測する。この衝突する頻度が非常に低いため陽子ビームをできる限り多く出射し衝突が起きる頻度を高めることが重要になっている。ハドロン実験施設では陽子ビームそのものや、実験標的に照射して生成した 2 次粒子ビームを利用して実験を行う。実験では粒子の識別や運動量の測定を行う必要があるが、時間あたりの粒子数が多いと検出器の出力に複数の粒子の情報が重なりやすくなり、測定効率が低下する。そのため効率よく測定ができるような強度が時間的に一様なビームが重要になる。

遅い取り出しで利用される機器はハドロン実験施設へ続く直線部に配置されている^[1]。ここではその機器のうちバンパ電磁石、ESS、セプタム電磁石について簡単に述べる。バンパ電磁石は陽子ビームを磁場によって ESS のセプタム面に寄せる役割がある。ESS は周回ビームから振幅が大きくなった粒子を電極とアースリボンとの間の電場によって分離する。セプタム電磁石は ESS で分離されたビームを磁場で曲げハドロン実験施設へ送る役割がある。

3. 静電セプタムとは

静電セプタムは周回ビームから取り出しのビームを削り出す役割がある。ビームを削り出す際には放射線が発生してしまうため、耐放射線のある無機材料で製作される。チェンバー、電極、ヨークはチタンで作られ、絶縁にはセラミックを使用している。また、ヨークに張られているアースリボンにはレニウム-タングステン合金を使用している。これは 26%レニウムのものを使用しており、その理由はレニウムがタングステンの延展性を高める性質を持つからである。それによって薄く強度のあるリボン形状に整形しやすくしている。アースリボン形状であるのは、ESS のセプタム面には必ず陽子ビーム

の一部が衝突してしまうため、その確率をできる限り低くする目的がある。アースをリボン形状とすることによって、強度を保ったまま薄くすることができる。このアースリボンは 1.5m にわたり 3mm ピッチで約 500 本並んでおり、この位置のばらつきが大きいとビームから見た実効厚が増えてしまう。このばらつきを小さくするためにレーザー変位計によって位置の測定を行い、ずれの大きなリボンについて張り替えを行なっている。

4. ESS リボンアライメント測定

ESS リボンのアライメント測定はクリーンブース内にある定盤にヨークを設置し、レーザー変位計を移動させて行う。測定条件として、ステージはヨークの長手方向に 1 mm/s で動かし、Sampling は 10 ms として測定した。レーザー変位計の焦点距離は $5\text{ mm} \pm 0.3\text{ mm}$ である。この条件は 2013 年の測定と同等である²⁾。2022 年のリボンアライメントの測定結果について図 1 に示す。

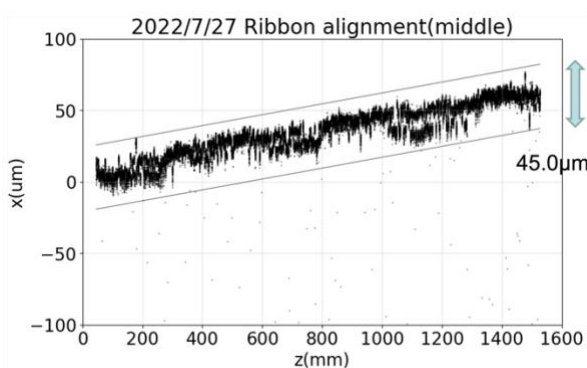


図 1 2022 年のリボンアライメント測定

ここで縦軸 $x(\mu\text{m})$ はレーザー変位計の焦点距離を基準としたリボンの位置、横軸 $z(\text{mm})$ はヨーク長手方向についてのレーザー変位計の位置である。今回の測定の結果、リボンのばらつきは $45.0\ \mu\text{m}$ であった。それに対し 2013 年に製作した ESS では $28\ \mu\text{m}$ であった。2013 年の ESS に対し、2022 年の ESS のリボンアライメントが良くないのは、リボン自身もしくはその張り方が原因と考えられる。また、値のピークも 2 つあることが確認できる。これは特に 1000 から 1200 mm の区間で目立っている。今回製作したリボンは酸化皮膜を除去したものを使用している。そこで、リボン表面の状態とリボンアライメントエラーとの相関を調べた。リボンの表面はレーザー変位計に備え付けられているカメラの映像

を利用した。リボンの表面は (a)縞模様、(b)梨地、(c)暗めの 3 種類に分類した。それぞれの写真を図 2 に示す。

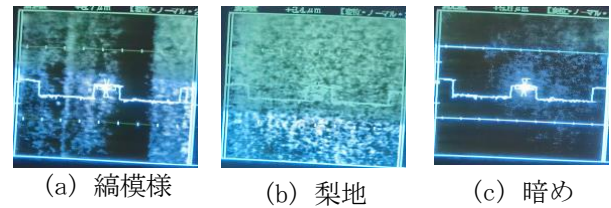


図 2 リボンの表面状態

表面状態ごとに、縦軸をリボンの数、横軸はヨーク面を基準としたリボン表面の位置 (μm) としてヒストグラムをとったものを図 3 に示す

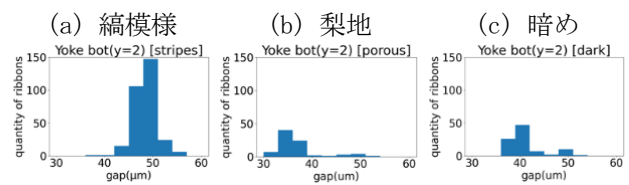


図 3 表面状態別のリボンの本数

縞模様に見えるリボンはヨーク面からの変位が $45 \sim 50\ \mu\text{m}$ に分布している一方、梨地のリボンは $35\ \mu\text{m}$ 付近のものが多かった。これからリボンの表面状態が、リボンアライメントに影響していることが分かった。全数のリボンを張り替えた後、2023 年 4 月に再度ヨークを J-PARC リニアック棟へ輸送し、クリーンブース内でアライメント測定を行った。その結果を図 4 に示す。

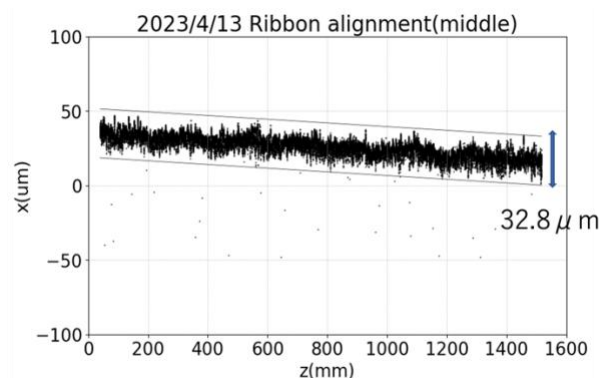


図 4 2023 年のリボンアライメント測定

リボンの位置ばらつきは $32.8\ \mu\text{m}$ と改善されていた。また、2022 年にあった 2 つのピークも見えなくなった。これは酸化して模様が見えるリボンや、反りが大きなリボンを除いたことが大きく貢献していると考えられる。酸化の問題については、密閉保管時に同梱されていたシリカゲルの影響がある

と考へ 2023 年に製作したリボンは、梱包を見直し窒素置換したアルミ防湿袋として乾燥剤は入れないこととした。また、反りについては圧延する際の張力の掛け方が影響しており、圧延時に張力が足りないと反りが出てしまうが、強過ぎると切断してしまう。そのためより強い張力に耐えられるようリボン幅を広く作ることで対策した。また、スプールへの巻き取り時に振れが発生しないように極力斜めに巻かないように注意した。

5. ESS 高電圧試験

リボンアライメント測定の完了後、リニアック棟クリーンブースにてヨークをチェンバーへ組み込み高電圧試験を行った。初めに述べたように ESS は電極とリボンの間の電場によって陽子ビームを削り出している。30GeV の陽子ビームを削り出す電場を発生させるには 104.4kV を印加する必要がある。これに対し、試験ではマージンを持って 110kV 達成を目標としている。110kV の達成のためには、電圧を印加したときに発生する気体分子を真空ポンプで引きながら進める。このように、電圧を印加することで徐々に耐電圧が上昇する現象はコンディショニング効果として知られている。初めに新規製作直後の高電圧試験の結果を図 5 に示す。3つのグラフの縦軸は上から順番に電圧(kV)、電流(μA)、真空(Pa)で横軸は全て時間(hour)である。

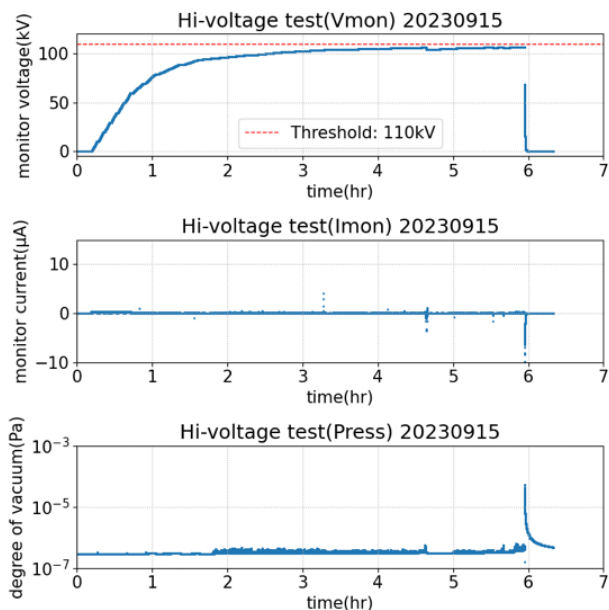


図 5 新規製作直後の高電圧試験

前日に 107.58 kV まで昇圧しているものの、コンディショニングが 96.48 kV から開始している。通常では一日程度ではコンディショニング開始電圧は 0~2 kV ほどしか下がらないがこの結果では 11 kV 下がっている。また、同様に何日か昇圧を試みたが 107.5 kV 付近で放電してしまった。この原因として予想されるのはリボン及び電極である。リボンは還元処理をしたこともあり状態が良いとは言えないからである。もう一つは電極だが、こちらは組み立て前に擦り傷が確認できている。この電極の写真を図 6 に示す。



図 6 傷ついていた電極の写真

これらの問題切り分けのために、まず電極をコンディショニング済みものに交換して試験を行った。交換後の高電圧試験の結果を図 7 に示す。

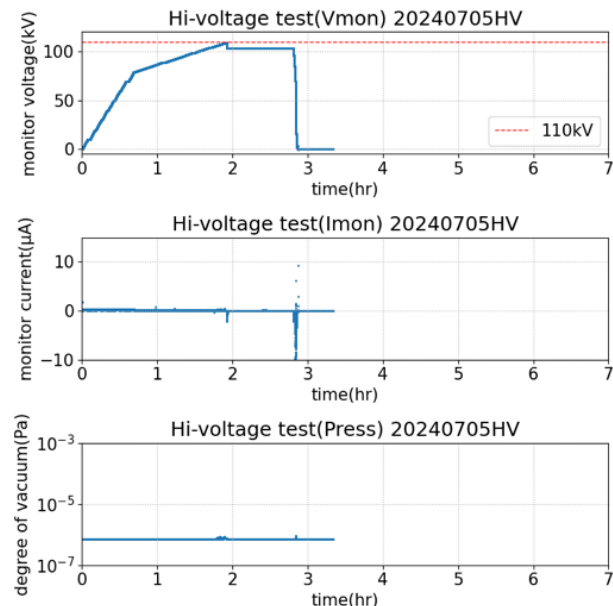


図 7 電極交換後の高電圧試験

前日に 110 kV まで昇圧しており、コンディショニングが開始したのは 108.8 kV であったので前日か

ら 1.2 kV ほどしか下がっていない。この結果によって放電、及びコンディショニング開始電圧が下がってしまう原因は電極にあると考えられる。

6. まとめ

静電セプタムにおいてリボンアライメント精度は、陽子がリボンに衝突する確率に関わるため重要であるが、2022 年に製作した ESS 予備機は現行機よりも 1.6 倍の実効厚となってしまった。リボンの表面状態とリボンの位置の相関を調べたところ酸化被膜が原因であり、張り替えによってばらつきが 27%改善した。ただ、酸化してしまった原因については特定できていないため、今後の課題である。

ESS 予備機の高電圧試験については 107kV 付近で放電が発生してしまい、コンディショニングが進まない問題があった。これは組み立て時に問題ないと考えていた電極のすり傷が原因であり、バフ研磨、サンチタン処理によりこの傷を修復した。その結果 110kV まで大きな放電なく昇圧することができた。

参考文献

- [1] R. Muto *et al.*, “J-PARC メインリングにおける遅い取り出し”, OHO’10 text (2010)
- [2] Y. Arakaki *et al.*, “Titanium electrostatic septa in J-PARC MR”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan July 31 - August 3, 2019, Kyoto, Japan

謝辞

静電セプタム以外にも遅い取り出しの機器製作、作業にご協力いただいているマイテック山田氏をはじめとする同社の皆様、発表練習にご協力いただいた吉本氏、南茂氏に感謝いたします。最後に試験場所をいただいている LINAC の皆様に感謝いたします。