

THE PRESENT STATUS OF VACUUM SYSTEM OF J-PARC MAIN RING AND 3-50 BEAM TRANSPORT

Masahiko Uota¹, Yoichiro Hori, Masayuki Shimamoto, Yoshihiro Sato,
Yasuhiro Takeda, Tomio Kubo, Yoshio Saito
KEK
Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract

The vacuum system of J-PARC Main Ring synchrotron and 3-50 beam transport line were successfully developed in April 2008 and still progress synchronously with the accelerator study phases such as the injection, the acceleration, the fast extraction to the abort line, the slow extraction to the hadron laboratory, fast extraction to the neutrino line, and, also the remodeling of coil wiring of sextupole magnets in this summer. In the simple ducts of the arc section, a vacuum pressure is going down to about $2e-7$ Pa so that the pumps are expected to be long life, otherwise, the vacuum chamber of in-vacuum magnets such as the injection or fast-extraction septum magnets with lamination cores keeps high pressure of over $1e-5$ Pa by outgassing from huge surface area. The pumps at that chambers will die in a few years.

J-PARC主リング及び3-50BTの真空系の現状

1. はじめに

大強度陽子加速器J-PARCの最終段加速器である主リングシンクロトロン(MR)の真空系は、RCSからの230mビーム輸送路(3-50BT)、周長1567.5mのMR、4方向の取り出しライン(18m入射シングルバンチビームダンプ、遅い取り出しラインの境界ゲートバルブ(GV)まで、速い取り出しの75mアポートダンプライン、ニュートリノラインの境界GVまで)で構成されている。このうちMRシンクロトロンは3つの120度アーク部A, B, C(ビーム路長はそれぞれ406.4m)と3つの直線部A, B, C(それぞれ116.1m)から構成され、直線部はそれぞれ

- ・A: 入射、コリメータ、入射ビームダンプ
- ・B: 遅い取り出し
- ・C: 加速、速い取り出し(v 及びダンプ)

のための機器が並ぶ。遅い取り出しに係る磁石はアーク部にも配置されている。真空系は2006年から一部区間で排気を開始され、2008年4月には入射ビームダンプまで一続きの真空系として一応の完成をみたが、5月のビーム試験が始まった後現在に至るまで、シャットダウンの度に機器の設置、増強、改造、追加のために真空は破られ再排気を繰り返しており、真空内壁が静かに休まることは一時もない。その現状を圧力の観点から報告する。

2. 真空系の構成

MRを1つの真空系と看做す時、電磁石内の真空ダクト、各種ビームモニタ、さらにRF加速空洞や真空外に置かれた入出射機器まで含めて、ビーム軌道に

沿った1530m(周長の97.6%相当)分は、細長いパイプ状の、いわゆる「ビームダクト」形状である。残る37.5m分のみが、入出射機器で真空内に置かれるもの(入射及び出射キッカー、最終段以外のセプタム)を収納する、巨大な円筒や角型のいわゆる「真空チェンバー」になっている。

2.1 ビームダクト

ビームダクトは、主に直径約130mmの単純な円または類似の断面を持つ管構造^[1]で、ビーム軌道方向の単位長さ当たり表面積は約 $0.4\text{m}^2/\text{m}$ と小さく、材質はステンレス鋼やチタンで真空的な性質がよく理解されており、製造時の表面処理工程を管理し単位面積あたりのガス放出速度を低く抑えることは容易であった^{[2][3]}。一方、真空のコンダクタンスはダクト長に反比例し1mで $0.3\text{m}^3/\text{s}$ 程度であり、空間的制約から数10mごとの磁石と磁石の隙間に排気ポンプを点在させることにより、ビーム軸方向の圧力はポンプポートを節とする放物線分布となり、数倍~10倍程度の圧力分布を生じさせることが予想された^[4]。

2.2 チェンバー

次にチェンバーの真空については、時間応答の速い電磁石の場合、材質にフェライト、電磁鋼板、熔射セラミック、ポリイミドフィルム等、単純な金属や合金に比べアウトガスが桁違いに大きいものを使用されている。さらに数10mm~0.35mm程度の薄板を積層させる構造のために、総表面積が磁石単体で $10\text{m}^2/\text{m}$ (キッカーのフェライト)~ $100-1000\text{m}^2/\text{m}$ (セプタムの電磁鋼板)にも及び、単体でビームダクト数

¹ E-mail: masahiko.uota@kek.jp

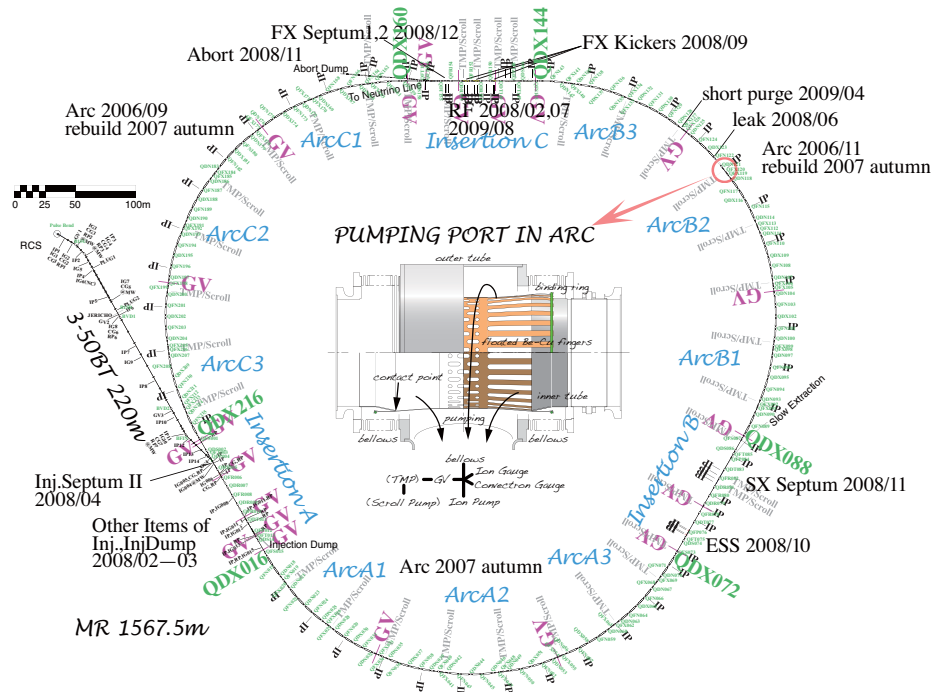


図1. J-PARC MR真空ポンプ配置及び主要機器真空立ち上げ時期。挿入図はアーク部ポンプポート内部。

百㎡分に相当する表面積を有している。そのため真空チェンバーの圧力は容易には下がらず、ポンプの寿命を縮めることが予想された。

3. ビームダクト部の圧力履歴

総延長1220mのアーク部の場合、約17m間隔で設けたT字型のポンプポート72箇所(図1の"IP")に、0.5~0.6m³/sの排気速度を有するスパッタイオンポンプを設置し本排気としている。粗排気は同じポンプポートの2つおきの24箇所別の枝管に設けたゲートバルブ(GV)越しに着脱可能な0.3m³/sのTMPとScrollポンプにて行う(図1の"TMP/Scroll")。圧力の測定は、粗排気用ポートと同じ位置でIon Gaugeにより行う。アーク部はセクターGVで9区画に分割されており、一部未完成のままのトンネルへの電磁石の設置に合わせてGV区画ごとに2006年9月からフランジ接続とTMPによる粗排気を開始し、半年後リングの大部分を接続した段階で、TMP直上で10⁻⁷ Pa台まで下がったが、2007年の夏、トンネルの完成に伴う再測量と電磁石の再アライメントがあり、リング半周分の電磁石内真空ダクトは窒素パージとフランジの解放、最長1ヶ月程度の大気曝露、再接続及び真空の再立ち上げに見舞われた。また、直線部の出射機器の調整が遅れ、直線部BとCの出射機器を殆ど全てダミーのダクトに置き換えた上でようやく最終的にリング1周が全て繋がったのは、ビーム周回に始めて成功した2008年5月の1ヶ月前であった。以来2009年7月までの、ビーム試験の各マイルストーンにおけるイオンゲージ(IG)で測定した全周圧力分布を図2に示す。

IP電源の調達が遅れたため、08年5月の最初のビーム試験時には稼働していたIPは歯抜け状態で半分程度であった(ポンプ間距離70m)。また、08年6月には、ArcB2の1カ所のNW40ポートのクランプチェーンが突如破損し微小リークが発生、Arc Bの広範囲にわたって圧力が最大で0.1Paまで上昇し、IPはリーク箇所に近い側から順次ダウンした。発生がシャットダウン中の日曜日の午前1時だったため月曜の朝発覚するまでの32時間リークし続け、周辺のIPの寿命を相当縮めたと思われる。

リーク箇所の修復の後、IPの電源が調達でき、6月の中旬から09年7月までは34m間隔でIPを駆動し続け、到達圧力はIP直上及び中間点でそれぞれ1.5及び3×10⁻⁷Pa程度である。今夏、アーク部にある全ての六極電磁石のコイル口出し部の改造があるため、再び全てのアーク部は7月に窒素パージされ六極用ダクトは分離され、最長で1ヶ月以上窒素1気圧に曝された後、ビーム試験再開の10月までに真空を回復せねばならなくなった。それに先立つ試験のため4月にはArcB下流側のみを大気曝露している。

4. チェンバー部の圧力履歴

4.1 入射セプタムIIチェンバー(InjSep2)

eddy current型セプタムで厚さ0.35mmの電磁鋼板が4000枚使用されており、総表面積は約1000m²である。コイルの絶縁用に熔射セラミックとポリイミドフィルムが、また周回ビーム側のシールド用にアルミニウムの板が用いられている。チャンバーは2台の0.6m³/sのIPで排気している。

当初は前後のビームダクトを繋がない状態で単独排気を行い 10^{-3} Paより低くなるまで数日を要するような状態で、最初のビーム試験時には 10^{-5} Pa台下がり、1年以上かけてまだ同じ桁に留まっている。2008年夏のシャットダウン中に前後のダクトが繋がったままの状態に粗排気ポートからQMSによるガス分析を行い、主成分は H_2O であることを確認した。

4.2 入射キッカー、出射キッカーチェンバー

磁極のフェライト板は総面積 $10m^2$ 程度である。組み立て時にフェライトのみで空気中 $400^\circ C$ 以上で焼き、チャンパー単体でベークし、組み込んでから全体を $80^\circ C$ 程度でベークした。リングインストール後の圧力は 10^{-4} Pa台からスタートし、入射キッカーは1年で1~2桁程度下がった。速い取り出しキッカーチェンバー5台の分布を見ると明らかなように、最上流のキッカーチェンバーが単体でのガス放出特性を反映しており十分に圧力は低く、下流に行くに従い隣接するセプタムのアウトガスも排気しているため圧力が高くなっている。出射キッカーは2008年12月の加速試験の3ヶ月前にインストールと排気を開始したので、時間的に十分排気が行われ最上流のチェンバーは 10^{-6} Pa台まで下がってビーム試験に臨む事ができた。

4.3 速い取り出し低・中磁場セプタムチェンバー (FXSept1,2)

1台のチェンバーに厚さ0.65mmの1346枚の積層電

磁鋼板コアが4個置かれており総表面積は $190m^2/m$ 程度である。hollow conductorコイルの絶縁に熔射セラミックが使用され、コイルの総延長はチェンパー1台あたり約30mである。リングへのインストールが最も遅れたチェンパーで、排気開始は08年12月末のビーム加速試験のわずか4日前だったため、 10^{-4} Pa後半という高圧力の下での試験となり、途中でIPがダウンしたほどである。しかし半年で1桁以上順調に下がっており、最高圧力の冠はInjSep2へ譲った。インストール直前のベーク時のガス分析によると主成分は H_2O である。

4.4 遅い取り出し電磁石チェンパー

静電セプタム、磁極が純鉄のDCセプタムともに表面積を肥大化する構造は無い。DCセプタムの排気開始は08年11月末だったため12月の速い取り出しビーム試験時は圧力が高かったが、本番である09年1月の遅い取り出し試験時には 10^{-6} Pa後半まで改善しており、その後も順調に下がっている。

5. 考察

5.1 ビームダクト部の圧力分布

図2のArc部の圧力分布は、2008年12月以降でもIGの数がIPの2/3であるため粗いサンプリングになってしまっているが、IPの有無が交互に来るので圧力分布も放物線分布の最大と最小を大体測定できているはずである。直線部の圧力の影響の無いアークの中

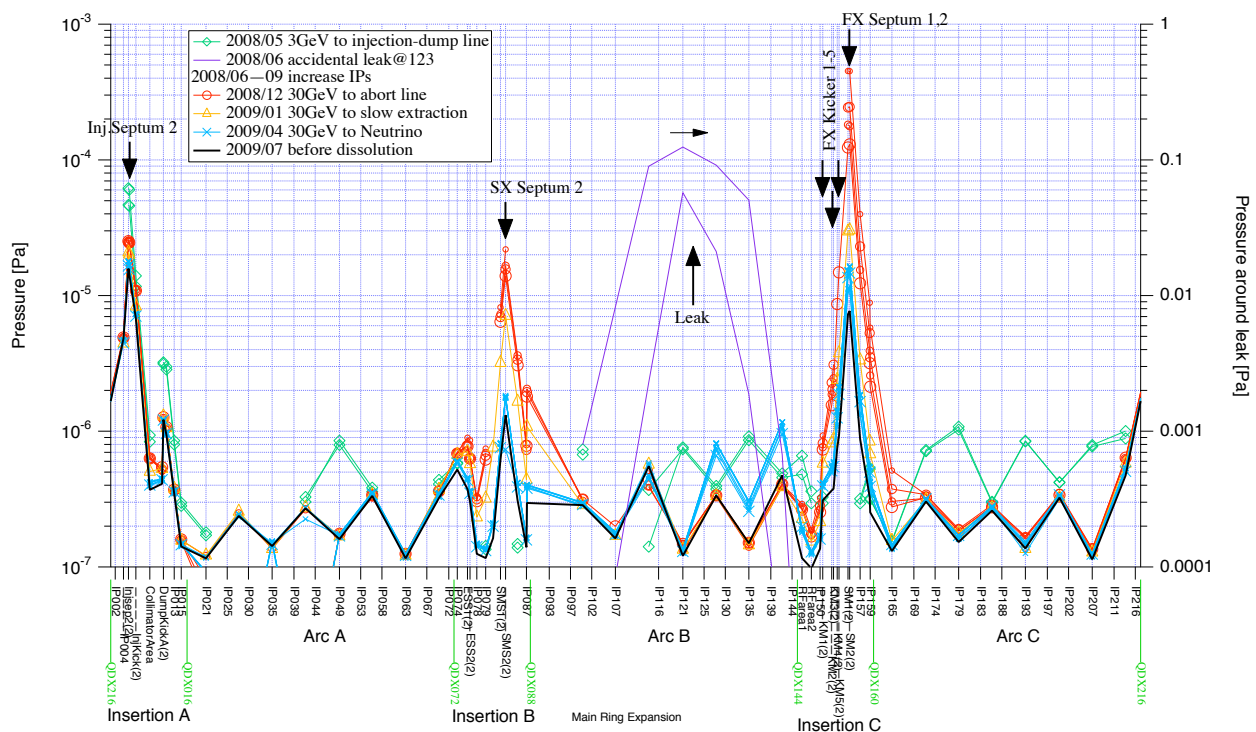


図2. J-PARC MR全周に配したIGによる加速器試験フェーズ毎の圧力分布。横軸のtickはIPの正確な位置を表す。ラベルの(2)はIPの個数2個を表す。IGとIPの位置は必ずしも一致していない。

心付近での圧力比は約2-3程度と読み取れる。この比は単純なモデルでは $1+(S/l/8c)$ と表され (S は排気速度、 l はポンプ間距離34m、 c は1m分のコンダクタンス)、現状のパイプの大きさでのこの値から、実効排気速度は $0.1\text{m}^3/\text{s}$ 程度に低下していることを示唆している。また、ポンプ直上における圧力の最小値は $1.5 \times 10^{-7}\text{Pa}$ 程度と読み取れるが、この値を排気速度が $0.1\text{m}^3/\text{s}$ のポンプを用いて直径130mm、長さ34mのパイプを排気して実現するには、ガス放出速度が $0.1 \times 10^{-8}\text{ Pa m}^3/\text{m}^2$ となっている必要がある。我々が製造時に目標としたのは単体での50時間排気で $1 \times 10^{-8}\text{ Pa m}^3/\text{m}^2$ であり、 10^4 時間程度排気してのさらに一桁低い放出ガス速度は十分合理的である。

5.2 長時間排気による改善

in vacuum電磁石のInjSep2、FXSep2、遅い取り出しセプタム、速い取り出しキッカー1及び比較としてアーク部ビームダクト2カ所の圧力の長時間(1-2年)の排気曲線を図3に示す。InjSep2は2008年の夏のシャットダウン中はIPの延命措置として $0.3\text{ m}^3/\text{s}$ のTMPのみで排気を行っていたので圧力曲線が大きく2段階存在する。InjSep2及びFXSep2の細かい圧力変動は、加速試験時以外では冷却水の水温の 2°C の変動幅に完全に同期したもので、電磁石コイルがhollow conductorであることによく対応している。加速試験時は6sの運転周期に同調して変動する。比較として載せたArcB3は、09年4月に1台の6極電磁石をリングから除去した時の数時間大気曝露からの真空復帰である。同様にArcC3は、07年秋からほぼ連続して真空状態を維持しているが途中でセクターGVを開けて上下流が繋がったり後にIPが増強される等の変化があり明確な排気開始時間は不明となってしまうので、時間原点は増強の時期と仮定している。いずれにせよ排気曲線は明らかに-1より寝てしまっており、この系の到達限界に近いと思われる。

圧力の値そのものは単純に表面積に準じている。また排気曲線は水温の影響が大きくわかりにくい 10^{-6}Pa 以上ではほぼ直線傾向である。InjSep2が 10^{-6}Pa 台に入るにはあと1-2年程度必要であろう。我々の経験則では $1 \times 10^{-5}\text{Pa}$ のIPの寿命は5年程度であるので、真空が良くなる頃に要交換と思われる。

6. まとめ

J-PARC MRの真空系には、ビーム加速試験の各フェーズの直前のシャットダウン中にフェーズで要となる機器をインストールされ、各直線部の狭い範囲で圧力が2-3桁悪い圧力分布となっている。それでも加速陽子に対しては十分に低い残留ガス密度であるので、一連のビーム試験への、圧力分布の影響は現時点のビーム強度では見られない。一方、我々の真空系では放射線環境下のメンテナンスフリーの観点からイオンポンプの寿命が尽きないような低い

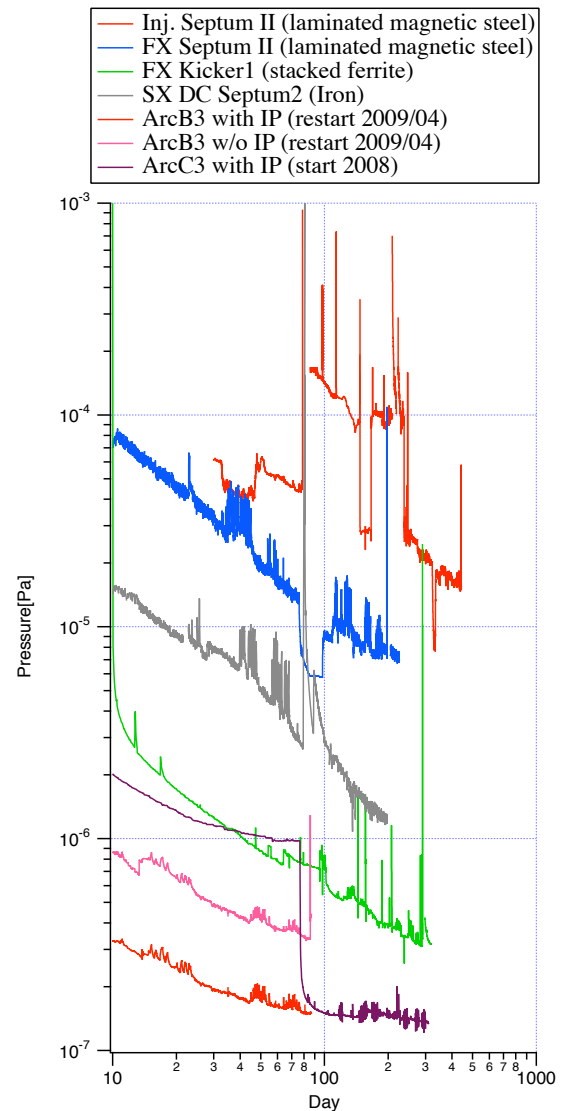


図3. 主要機器の長時間の排気曲線

圧力の実現を目標としており、アーク部等のビームダクト部はほぼ目標を達成できているが、入射セプタムについては残念ながらあと数年でポンプを交換せざるを得ないであろう。

参考文献

- [1] M. Uota et al., "INSTALLATION OF VACUUM SYSTEM AT J-PARC MAIN RING AND 3-50 BEAM TRANSPORT", Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan (2007), pp206-208 (FO25).
- [2] ACCELERATOR TECHNICAL DESIGN REPORT FOR J-PARC, KEK Report 2002-13 (2003), p528.
- [3] Y. Hori et al., "OUTGASSING MEASUREMENTS OF J-PARC MR AND 3-50BT VACUUM DUCTS", Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan (2007), pp814-816 (FP55).
- [4] JHF Project Office, JHF accelerator design study report, KEK Report 97-16 (1998), Chap. 2.6.