

J-PARC 主リングの真空系

1. はじめに

1.1. 基本中のキ

「真空度」と言う物理量は無い。電気伝導度のようなニュアンスであろうか。嘆かわしい事に、未だに周りで口頭のみならず paper で使っている人がいる、そういう場合は、優しく指摘してやってほしい。真空、というのは気体の圧力が低い(空間の分子密度が小さい)状態を言うので、物理量は「圧力」ですよ、と。単位はSI単位系でPa(パスカル)を用いる。CGS単位系のmbar(ミリ-バール=100 Pa)は欧米で(パスカルさんの故郷フランスでさえ)未だに好んで使われている。また、少し前までよく使われていたTorr(トル=133 Pa)をつい使ってしまう人はおおむね45歳以上である。間違いない。そして、圧力の低い真空を「高い」真空、「高真空(High Vacuum)」、「超高真空(Ultra High Vacuum, UHV)」、「極高真空(Extra High Vacuum)」、圧力の高い真空を逆に「低真空」と表現することがあるが、これは最早、高みを目指したんだと割り切るしかない。さらに、圧力上昇が起こる事を「悪化する」と慣用的に表現してしまいがちだが、良い・悪いという主観的表現は科学文献では使うべきではない。

1.2. J-PARC の真空系

1.2.1. 全体

今年のOHOのテーマはJ-PARCで大電流云々ということで、真空関連で大電流化に伴う現象などを扱うことが期待されているようである。大強度陽子加速器J-PARCは181MeVリニアック・3GeVシンクロトロン(Rapid Cycle Synchrotron, RCS)・主リングシンクロトロン(Main Ring, MR)で構成され、さらにそれぞれのビームを利用する施設が点在している(図1)。これほど巨大な装置では、部署毎に人も各種事情も異なっており、設計思想から実際のモノにいたるまで同じ状況と言う事は少ない。そこで、本講では、最終段加速器であるMRのリングの真空系に関してのみを対象とする。J-PARC加速器の真空というテーマは2001年のOHOで2コマの講義があり、その時の真空一般の基礎とJ-PARCのRCS加速器の真空については丁寧なテキストがwebで公開されているのでそちらを参照いただきたい^[1]。他にも真空一般については同様にOHOの過去テキストに非常に良いものも多く、是非参考にしていただきたい^[2]。

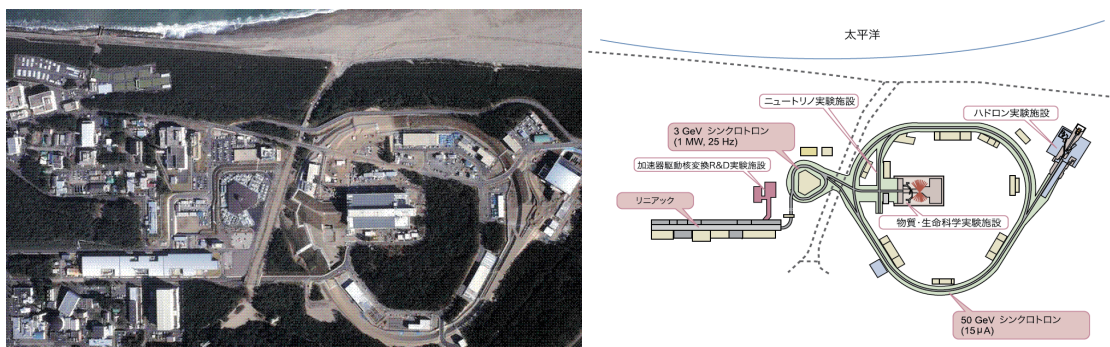


図1 J-PARC 航空写真とレイアウト。http://j-parc.jp/Acc/ja/layout.html より。

1.2.2. MR 真空系

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 シンクロトロン、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 (2011 年夏に撤去予定)、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 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、直線部にはそれぞれ

- A : 入射、コリメータ、入射ビームダンプ
- B : 遅い取り出し (ハドロンビームラインへの出射)
- C : RF 加速空洞、速い取り出し (ニュートリノビームライン及びアポートダンプライン)

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。

真空系はトンネル建設の途中で 2005 年に一部の工区が完成すると同時に電磁石とともにトンネル内に設置を始め、2006 年から完成した一部の区間で GV で区切った数百 m の区間で排気が開始され、1 年半程のすったもんだ (トンネルの床から海水が湧いたり、床が沈んでアラインメントをやり直したため半ば完成していた真空ダクトを殆ど繋ぎ直したり) の末に 2008 年 5 月の非加速ファーストビーム直前に一続きの真空系として一応の完成をみた後、2008 年 12 月末の最初の加速取り出し成功のやはり直前に出射機器をインストールして完成し、以来長期シャットダウンのたびに機器の設置、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。最近ではビーム強度の上昇により、ビームが回るだけで内壁はビームからの影響を受けるようになってきている。大忙しである。

MR の加速器としての性能は、繰り返し周期 3.52s (速い取り出し用) または 6s (遅い取り出し用) で、9 バケツ中 6 バンチで周回し、周回ビームの粒子数は今年 7 月までの値で 1 周期あたり 76×10^{12} 個 (particles(protons) per pulse, ppp という単位を使う) である。

2. MR に要求される真空

2.1. 残留ガス分子による散乱→高真空程度

加速器は真空装置である。粒子を加速する装置一般的には、加速粒子は残留ガス分子と相互作用し軌道から逸れたり失われたりするため、ビームの寿命を延ばす、あるいはビーム集団の損失を減らす 1 つの方法として、分子との衝突確率を下げるのが要求される。それには単純に残留ガスの密度を下げる、すなわちより高い真空にすれば良い。

ところが、加速エネルギーが 10GeV オーダーで、かつ加速粒子が電子より遥かに重い陽子の場合、要求される圧力は実はそんなに低くない。この領域での陽子の平均寿命 (ビーム電流が $1/e$ に下がる時間) τ は、クーロン散乱の多重散乱により軌道の振幅がビームダクト半径 a を超えてダクト内壁に衝突 (透過) するまでで規定され、残留ガスが窒素分子で圧力 p の場合

$$\tau = 113 \frac{a^2 \beta^3 \gamma^2}{\lambda^2 p}$$

のように書ける (λ : ベータトロン振動の波長 $/2\pi$ 、 β は光速比、 γ はローレンツ因子)^[3]。例えば半径 65mm の円形ダクトの場合で、J-PARC MR の入射エネルギー 3GeV のまま加速されずに周回した場合でも、 10^{-4} Pa あれば寿命は 6 秒である。この圧力は真空としては高真空と言われるショボい領域で、ちょっとポンプに金をかければ下手をうって適当に作っても容易に達成する数字である。

2.2. 部品の寿命と高放射線環境化での保守→超高真空

一方、高エネルギー陽子加速器の場合は、別の観点から超高真空が要求される。それは、機器の長寿命化すなわちメンテナンスフリーという観点である。究極的には施設の立ち上げから閉鎖まで1回も寿命を全うした機器の交換が無い、完全なメンテナンスフリーが理想である。というのも、加速器でビームを回す(運転する)と必ず僅かながらビームの一部がビーム軌道を逸れ真空ダクトや磁石、壁、床などあらゆるものを貫通し衝突する。その結果それらは放射性同位体に変わり(放射化し)、残留放射能を有することになる。放射線環境化での保守頻度はなるべく少ない方が良く、それには機器や施設全て(真空系のみならず、電磁石、冷却配管、トンネルの壁、その他あらゆるもの)の寿命を長くする必要がある。

真空系機器では、有限の寿命が存在する代表的なものはポンプである。我々のMRの真空系ではイオンポンプを使っているが、これはスパッタリングターゲット素子のTiが尽きれば排気性能は無くなりそこで寿命となる。商用のイオンポンプの素子のライフタイムはカタログなどを見ると 10^{-4} Paで5万時間(5.7年)とある^[4]。我々はさらに安全ファクタを10倍取って実用上 10^{-5} Paで5年と考え、その上で、このままでは例えばポンプ100台あればその全てを5年に1度交換することになり長大なメンテナンス時間が必要になってしまい実現不可能なので、さらに1台あたりの寿命を10倍延ばすために圧力を10分の1にするのである。結局、平均してポンプの圧力が 10^{-6} Paを維持できれば、平均して100台中10台を5年に1回交換するだけで済むことになる。この程度の頻度なら短時間のメンテナンス時間で対応可能であろう。実際には圧力に分布があるが、 10^{-7} Paの場所は完全にメンテナンスフリーであり、 10^{-5} Paの場所は10年以内に1回の交換が必要である。

要するに、目標とする圧力は 1×10^{-6} Paである。

2.3. 排気の迅速化

メンテナンスフリーを目標にしても、結局のところ装置は故障し、それ以外に性能向上のために改造を施されることは日常茶飯事である。とは言え、長い連続運転を使命とする加速器においては、ビーム運転を止め、装置に手を加える時間は短ければ短いほど下流(ビームを利用するヒトビト)からの(精神的)圧力は低い。真空の場合、窒素パージ・大気曝露・中身の作業・大気からの粗排気・リークテスト・本排気、という一連の流れで短縮できない時間は、粗排気及びビームを回しても良い領域に到達するまでの本排気の時間である。高真空まで持っていく時間は、ポンプの能力を無尽蔵に上げる事のできない実用的に限定された排気系である限り、その排気系が担う場所のガス放出量でのみ決まる。ということはガス放出量の少ない素材・構成でなければならず、そうすることはつまり、最初からやはり超高真空に対応した真空系を構築することに等しい。

2.4. 圧力分布とガス放出速度の規定

シンクロトロン加速器は非常に細長いドーナツ状の形をしている。排気装置は、場所的な制約から磁石と磁石の隙間などに点在して設置されることが多い。磁石内のビームダクトにポンプを合体させ実効的なポンプ間距離をゼロにし圧力分布を一様化することがあるが、J-PARC MRでは圧力分布の一様化には特に興味が無かったので単純に、磁石と磁石の隙間にポンプを置いた。

一般に、多数のポンプがビームダクトパイプによって数珠繋ぎ状に配置されている場合、圧力分布は放物線分布を描き、パイプの単位長さ当たり表面積 a 、パイプ1mのコンダクタンス c 、ガス放出速度 q 、ポンプ間距離 l 、排気速度 S のとき、ポンプ直上での最小値 p_0 、ポンプ-ポンプ間中央での最大値 p_{max} 、圧力の平均 p_{ave} はそれぞれ

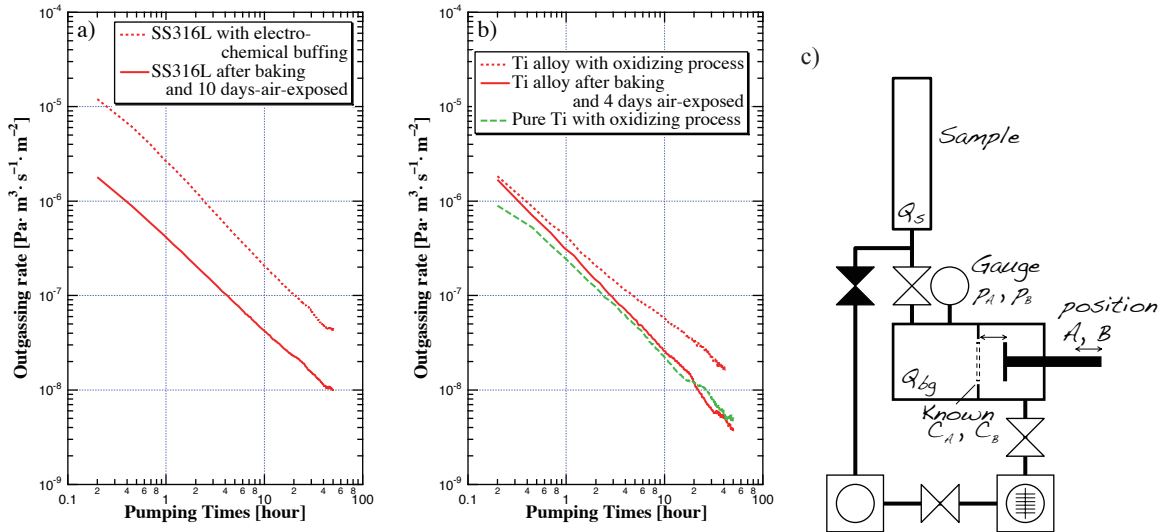


図 2 (a) ステンレスを電解複合研磨または電解研磨 + ベーキング処理 (b) 酸化 (ベーキング) 処理したチタン及びチタン合金についてコンダクタンス変調法で測定したガス放出速度。(c) コンダクタンス変調法による測定の模式図。Sample 有り無しで 2 回測定し Q_{bg} の影響を引き取り Q_s のみを得る。

$$p_0 = \frac{qal}{S}$$

$$p_{\max} = p_0 \left(1 + \frac{Sl}{8c} \right)$$

$$p_{\text{ave}} = p_0 \left(1 + \frac{Sl}{12c} \right)$$

と書ける^[5]。例えばポンプの排気速度 0.5m³/s、直径 130mm の円管ダクトのコンダクタンス 0.26 m³·m/s でポンプ間距離が 34m の時、p₀ が 10⁻⁶Pa より小さくなるには、ガス放出速度は 3×10⁻⁸ Pa·m³/s/m² より小さくなければならない。

このガス放出速度の値は、後述する「ちゃん」と作った金属パイプであれば容易に達成できる。図 2 は「ちゃん」と作った、すなわち種々の表面処理を行った Ti、Ti 合金、ステンレス 316L の長さ 1m の試験パイプについてコンダクタンス変調法 (図の c) によりガス放出速度を測定したもの^[6]で、Ti 系は概ね 1 日で、またステンレスもその倍程度の時間で 10⁻⁸ Pa·m³/s/m² を切っており十分である。図 3 は MR リングで実際に使われているビームダクトについてトンネル内に測定装置を持ち込んで同様に測定したものである^[7]が、一部を除き 2 日程度で 10⁻⁸ Pa·m³/s/m² を切る程度まで小さくなっており、十分な表面処理がなされたことを示している。例外的に高いものは、電磁鋼板という特殊なコーティングを施した合金の薄板を数千枚、総表面積数百 m² にも及ぶものを真空内に積層させて置いた電磁石チェンバーで、これは真空的には何の処置も施しておらず圧力が高くいつまでも下がらないどうしようもない厄介者である。

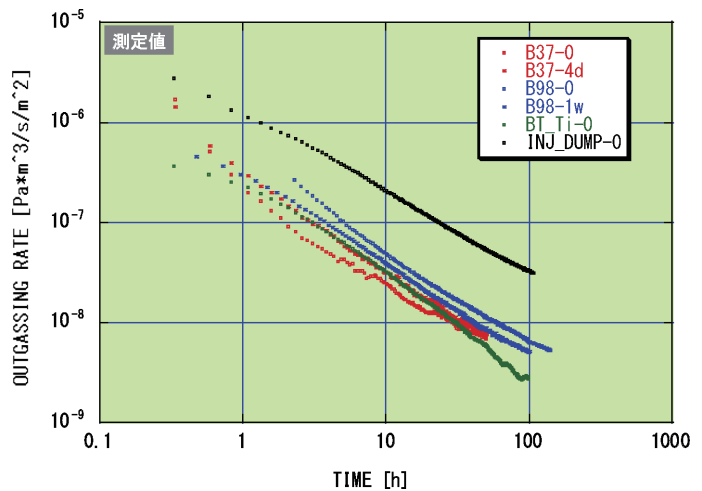


図 3 実際のリングのダクトについて測定したガス放出速度

2.5. 材料と表面処理

ガス放出速度をできるだけ小さくするには、金属やセラミックなどでガス放出量の少ない材質のみを使用し、その上で

- ・ ミクロな意味での表面積を小さくする
- ・ 金属表面に化学的に安定な酸化膜を形成させ、吸着量を減らすとともにバルクからの主に水素の放出を抑制する

などが効果的である。それには、内壁を電解研磨や化学研磨と呼ばれる手法で研磨し平滑化させた上で、熱処理を加えるのがコストパフォーマンスが良い。MR ではステンレス製ビームパイプについては電解研磨を行った上で210°C 24時間のベーキングを行った。Ti製ベローズについては一部は化学研磨を行い、150°C 24時間のベーキングを行っている。

電解研磨は強酸性水溶液中で電気分解により金属表面の電界集中した凸部から選択的に溶かすことで平滑化を行うもので、我々の場合、硫酸とリン酸の混合水溶液中で研磨したいパイプ内面を陽極とし、電場が均一になるようパイプの中心を通る細長い陰極銅棒を置いた上で数百—1kA 程度の直流を数分間流すことで10 μ m 厚を研磨した。実際の様子は例えば図4などである。細かい泡は陰極表面で発生する水素で、この泡が研磨すべき表面に付着し、研磨を阻害しアバタ状になってしまうのをいかに防止するかが工夫のしどころであった。

なお、放射線発生装置でもある陽子加速器の真空系で使う事のできる材質は真空内のみならず大気側の部材についてもかなり限定される。絶縁材としてテフロンは分解して絶縁性能が失われるので一切使えない。特性の良く知られたアルミナセラミックが推奨される。ポリアミドやエンジニアリングプラスチックなどで耐放射線性を持つもの(耐熱性を持つものは多くある程度の耐放射線性を有する)は使用可能である。塩化ビニール(ケーブルの被覆、粘着テープ、ビニール袋など)は、放射線で分解し金属に対して腐食性を有する塩素系のガスが発生するので安易に使ってはならない。尤も、トンネル内は延焼防止のため及び環境に配慮して難燃性ノンハロゲンケーブルしか使えないことになっている。

3. 真空系のデザイン

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周長の97.6%相当の1530m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ハコものの「真空チェンバー」になっている。まずはビームダクトから決めていく。

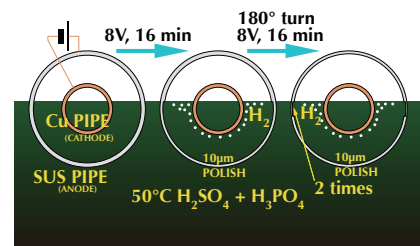


図4 電解研磨模式図及び実際の様子(テストダクト時)。

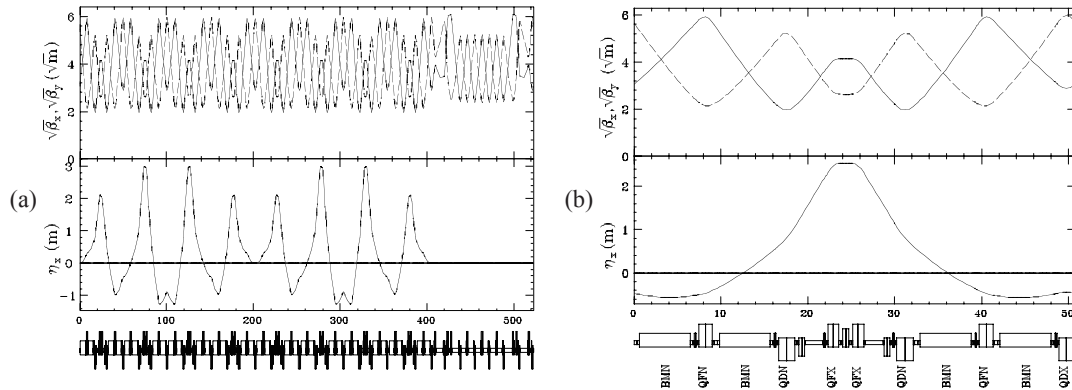


図5 (a) 1 superperiod のラティス関数。上は $\sqrt{\beta_x}$ 及び $\sqrt{\beta_y}$ 、下は分散関数 η_x (η_y はゼロ)。(b) アーク部の15°モジュールの拡大。引用した図は多少古いですが、おおまかには現在もこのような形である。

3.1. 軌道

まず、真空設計には磁石の形と配置を知らねば始まらない。最初に磁石の配置、性能を元にビーム光学の軌道計算(例えば図5)がなされた^[8]。図の(a)はリングの1/3に相当する522.5m分のsuperperiodの β 関数の $\sqrt{\quad}$ と運動量分散関数で、全周ではこれが3回繰り返される3回の回転対称性を持つ。図の最初の406.4mはリングの120°分の弧を形成する通称「アーク部」で、残る116.1mが通称「直線部」である。アーク部はさらに50.8mで15°に相当する弧を単位とする“モジュール”(図の(b))が8回繰り返される磁石配置の対称性があるが、分散関数は必ずしも同一ではない。モジュールは3つのFODOセル(より正確には $\frac{1}{2}$ DBFBDSOFSFOSDBFB $\frac{1}{2}$ Dセル)で構成され、曲げ角3.75°の偏向電磁石が4台、収束のための四極電磁石が4種類7台(中心のFが2分割され六極が挿入されている)、補正のための六極電磁石が3台、ほぼ鏡像対称になるように配置してある。一方、直線部は鏡像対称なFODOラティス(正確には $\frac{1}{2}$ DOFODOFOFODOFO DOFODOFODOFOFODOFO $\frac{1}{2}$ D)で、四極電磁石が16台で構成されている。直線部の分散関数はゼロである。結局、合計すると

- 3.75°偏向電磁石：96台
- 四極電磁石：216台
- 六極電磁石：72台

が基本的な電磁石である。さらに、

- ステアリング電磁石(ビーム軌道補正用の小さい二極電磁石)：約200台
- 遅い取り出し用電磁石：11台

が加わる。

3.2. 磁石形状と真空ダクト断面形状

MRの入射エネルギーでの周回中のエミッタンスはハローを削り取るコリメータにより horizontal vertical 共 54π -mm-mrad に絞られている。そこで、その1.5倍の 81π -mm-mrad をアクセプタンス(受け入れ可能な位相空間面積)とした。Twiss Parameterが決まったので、ビーム軌道の包絡線は β 関数とエミッタンス ϵ 、運動量分散関数 η と実際の最大の運動量のずれ幅 $\Delta p/p$ 及び閉軌道誤差(COD) δ によって

$$\sqrt{\epsilon_{x,y}\beta_{x,y}} + \left| \eta_{x,y} \right| \frac{\Delta p}{p} + \delta_{x,y}$$

と記述できる。例えば $\Delta p/p$ が0.67%、CODが1mmの時 81π のビームアクセプタンスの包絡線は図6のように

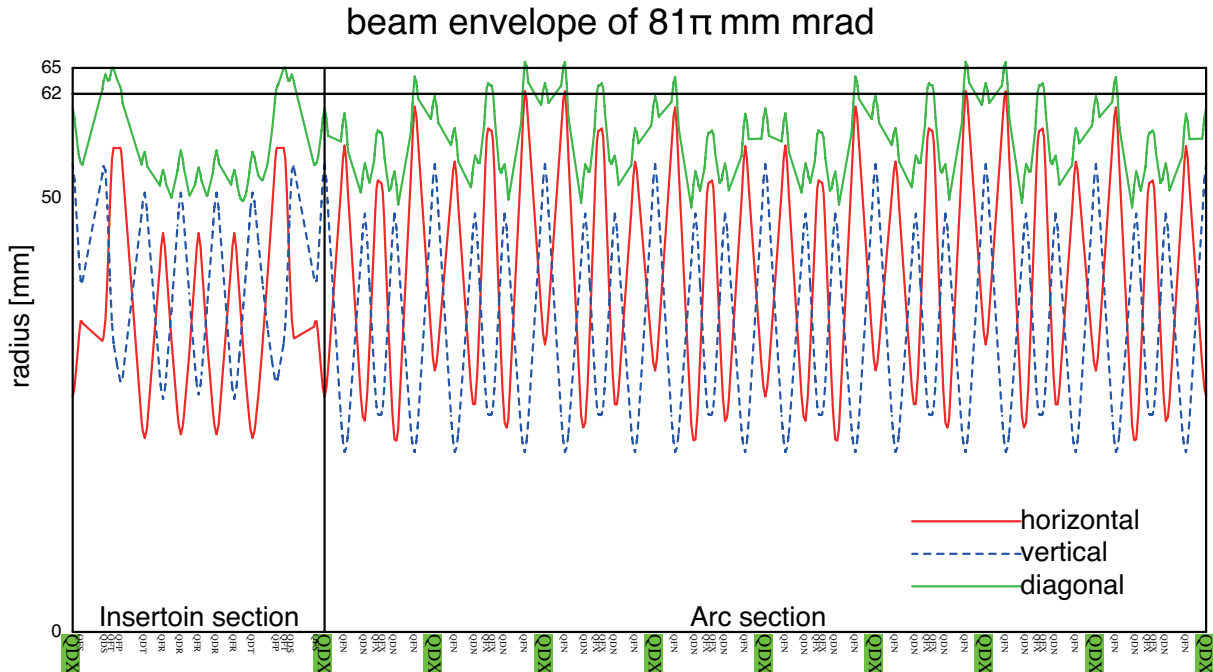


図 6 運動量のずれ 0.67%、COD が 1mm の時の 1 superperiod のアクセプタンスの包絡線関数。diagonal とは、x、y 方向がそれぞれ完全に独立だった場合にビームの実空間断面が四角形となるその角までの距離/ (x^2+y^2) 。

なり、リング各部でこの包絡線が作る四角形の断面より大きい断面をもつパイプを用意することにした。磁石配置は対称なアーク部も、 η の非対称性により包絡線は対称性が低くなっており、それに形状を合わせたビームダクトも非常に多岐にわたることとなった。

ビームダクトの断面形状を図 7 に示す。(a) の偏向電磁石は磁極間ギャップ 106mm で 1 種類であるが、四極電磁石はボア径が (b)130mm、(c)140mm、(d)150mm の 3 通り存在する。130mm のものは全てのアーク部と直線部の一部で用いられる。設計初期は 130mm しか存在しなかったが、入射・出射でビームロスを減らすために磁極径が大きくなっていき、真空ダクトの断面はさらに負けじと磁極の曲線に沿って膨らませる設計を行っていった。ベースサイズの 130mm ボア径に対しても (b) に示すように真空ダクトは 2 通りの断面形状があり、上下左右にわずかでも膨らまそうとした苦労を見ていただきたい。

電磁石内を貫通するビームダクト (両端にフランジを持つパイプ) は、個別の電磁石が修理等でビームラインを出し入れすることを考慮し 1 台の電磁石につき 1 本としたので、上記の台数はそのまま当該磁石用真空ダクトの台数にもなっている。板厚が 2mm しかないダクトが多いのは、薄くする事で電気抵抗を上げ変動磁場による渦電流を小さくするためである。しかし対称性の低い異径ダクトでは、厚みを増してあるが大気圧による変形が最大 1mm 程度あり、アクセプタンスを小さくする要因となっており諸刃の剣と言える。さらに、磁石と磁石の間

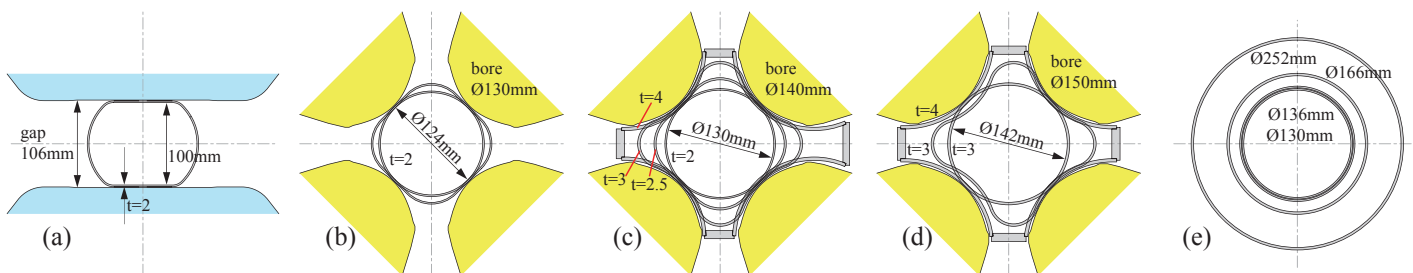


図 7 各種磁石とビームダクト断面。(a) 偏向電磁石、(b) 四極電磁石 (ボア径 130mm)、(c) 同 (ボア径 140mm)、(d) 同 (ボア径 150mm)、(e) ドリフト領域ビームダクト。ダクト側の数字は内径。t は板厚。

間のドリフトスペースを繋ぐための単純な内径 ϕ 130—166mm(ごく一部だけ ϕ 252)の円管ダクトが約150本程度用意された。ステアリング電磁石の中に置かれる真空ダクトはビーム位置検出モニタ(Beam Position Monitor, BPM)とした。ここまでの全てのダクト材質は磁場の一様性への影響を可能な限り抑えるため比透磁率をできるだけ1より大きくさせないためにステンレス316Lで作られた。さらに遅い取り出し用電磁石のうち一部は磁場の高速応答のために渦電流が発生しないセラミックダクトとした。

3.3. ベローズ

ビームダクト同士を繋ぐものとして伸縮自在のひだ状のベローズが使われる。これは、

- 巨大な装置では温度や振動などが原因でビームダクトに変形が生じようとするので、その動きを吸収する、
- 長大な真空ダクトなので、製造時に努力しても長さの誤差が $\pm 1 \sim 3$ mm程度はざらに出る。その誤差の吸収、
- 磁石をビームラインから挿抜する時に、ベローズダクトを縮めることでフランジ面間に隙間を取る事ができ作業が容易となる、

などのためである。MRでは、Ti製の成形ベローズだけのベローズダクトを各ビームダクトの隙間に挿入した。そのため標準的な大きさのもので350台にもなり、最終的には総数で500台以上のベローズダクトが使われることとなった。ビームから真空内壁までの距離は一樣であるべきなので、ベローズを隠し、ベローズが動いても金属的接触が保たれるようフィンガーコンタクト構造を内蔵させた。

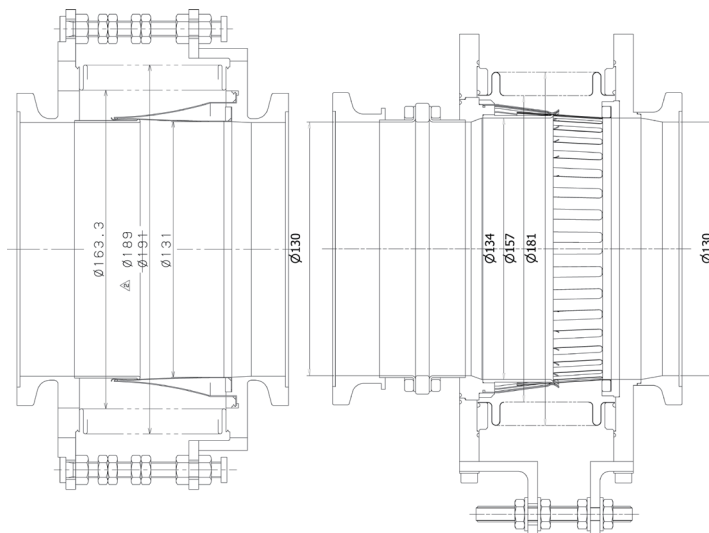


図8 ベローズダクトで最も数の多いもの(左のモデルで300個、右のモデルで50個程度)。ビームから見た段差は最大で2mm。

3.4. 排気系のデザイン

MRでは、排気のためのポンプは排気速度 $0.5 \sim 0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ のイオンポンプ(IP)のみとした。イオンポンプは排出しない吸着型のポンプで前述のような有限の寿命が存在するが、稼働部が無く、耐放射線性・メンテナンスフリーの観点からは大変優れているからである。ビームライン上の磁石間の隙間にT字管(ポンプポートと言う)を配し、ポンプはラインから直角に離れた位置に置く。アーク部では、1モジュール 15° 50.8mにポンプポートを平均間隔17mで3カ所設けた(図9)。ビーム強度が低いうちは不用意に寿命を縮ませる事も無いので倍の34m間隔でポンプを接続した。直線部は、アーク部と同程度の間隔でポンプポートを設けた上で、入出射機器(キッカー電磁石、セプタム電磁石)の各チェンバーに直接ポンプを接続した。長さとしては全長の2%程度であるが、表面積、アウトガス量においては圧倒的であり、局所的に圧力が1~2ケタ高い。図10に全体のポンプ配置を示しておく。pdf版テキストを1600%位拡大すれば細部が見えるだろう。アーク部のポンプポートは電磁石同士の隙間という限定的な空間に配置せざるを得ないため、それ自身がT字の全ての枝にベローズを持つ複雑なものとなった。図11に示す。ビームライン側のベローズは一般のベローズチェンバ同様、フィンガーコンタクトによ

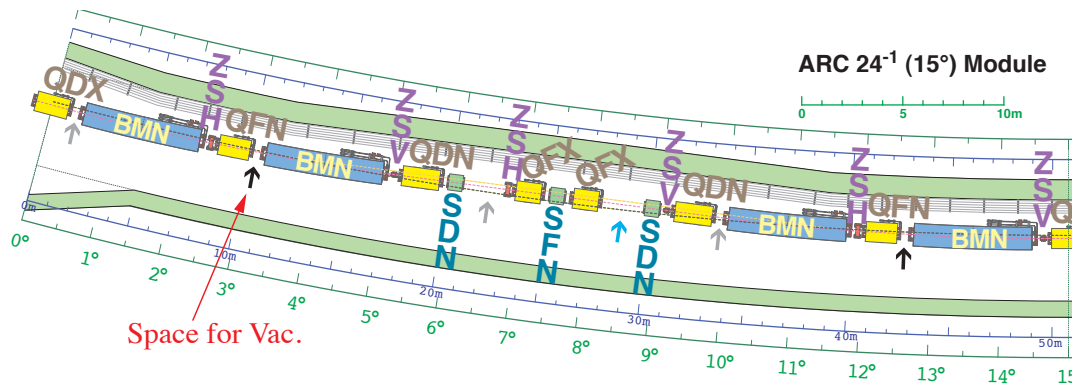


図 9 アーク部 1 モジュールの真空中で使える 6 カ所の隙間を ↑ で示した。このうち黒と青 (3 カ所) にポンプポートを、青にはさらにゲージを配した。

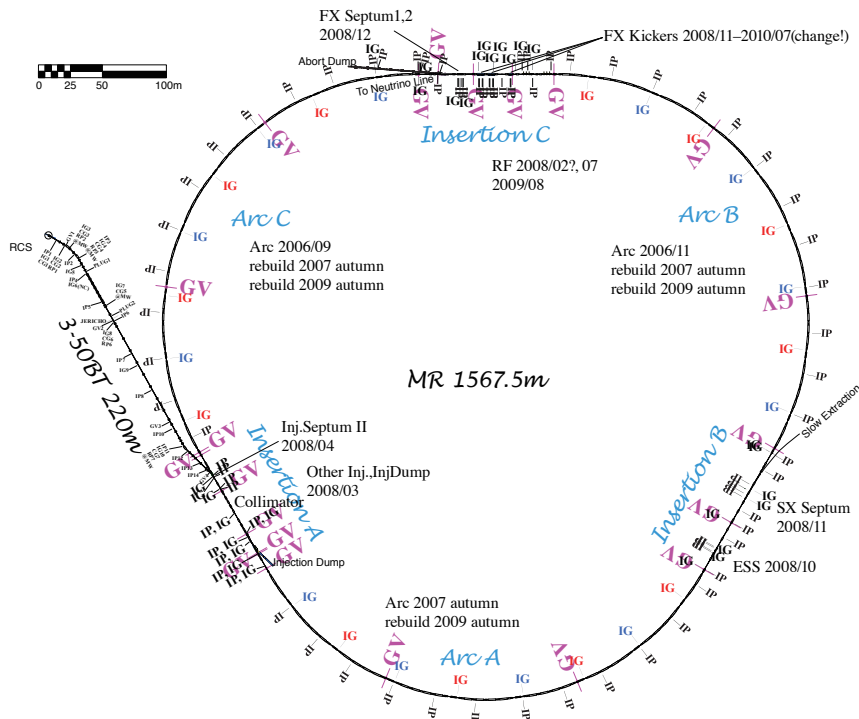


図 10 リング全体の全てのポンプ配置図 (2010 年 7 月まで)。細部は印刷には出ないので pdf 参照。

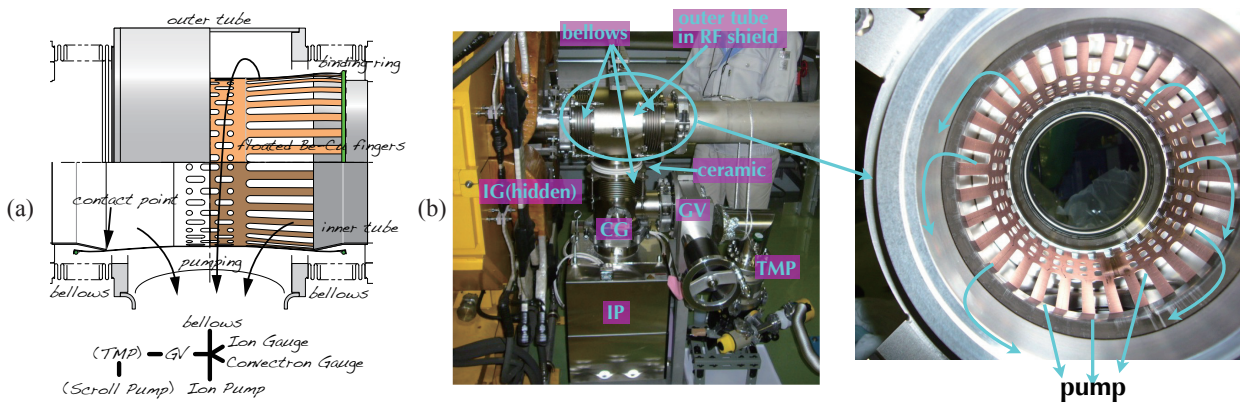


図 11 (a) アーク部ポンプポート模式図、(b) 実機の様子。

り壁を滑らかに繋いでいる。GV はリングを区域分けするゲートバルブである。

3.5. 排気のシナリオ

本排気が IP としても、IP の連続稼動可能領域は 10^{-3} Pa 以下で、寿命を考慮すればなるべく超高真空領域でのみ使いたいところであるから、最初に大気から 10^{-4} Pa 未満まで粗排気を行わねばならない。それには、粗排気を行う期間は どうせメンテナンス期間で人の出入りが可能であるから、人の手でターボ分子ポンプ (TMP) 及びスクロールポンプから構成される粗排気装置セットを、ポンプポートの粗排気用ポートにあらかじめ設置しておいた手動のゲートバルブに接続し排気するのである。装置セットは IP 安定駆動後ゲートバルブを閉じてフランジを外してリングから待避させることにすれば、セットに耐放射線性は不要で市販の安価なものを使える。そこで、全てのポンプポートには粗排気を行うための枝管を用意し、要所要所にゲートバルブをあらかじめ設けて粗排気ができる場所を設けた (図 10 の TMP/Scroll で記された部分)。

3.6. 締結の規格 (通常用)

超高真空領域の真空装置でよく使われている、多数のボルトで締める Conflat® フランジ規格は、放射線環境化で作業時間の短縮化を至上命題とする陽子加速器では不向きである。代わりに J-PARC MR で採用したのは、以下のような特殊なものである。

真空シールには、必要な圧縮線荷重が 140N/mm と低く、かつ圧縮の戻りが 0.2mm あっても超高真空が保持できる、トラス径 ϕ 4.9—5.1mm の Al 製ヘリコフレックスデルタ® シールで、操作性の高い取り扱いの容易な金属製のカラー (把手) の付いたものを採用した (図 12)。このシールは Al トラスの中央に設けられた 0.4mm 程度の突起 (デルタ) が潰れると同時に内側のスプリングが潰れ反力でシールをフランジシール面に押し付けて安定なシールを作り出す。カラーは大気圧によるシールの吸い込み防止のみならず、シール部に触れないハンドリング、フランジに嵌めた時のシール押さえ、さらに両側からのフランジの中心出しの役目をも担っている。

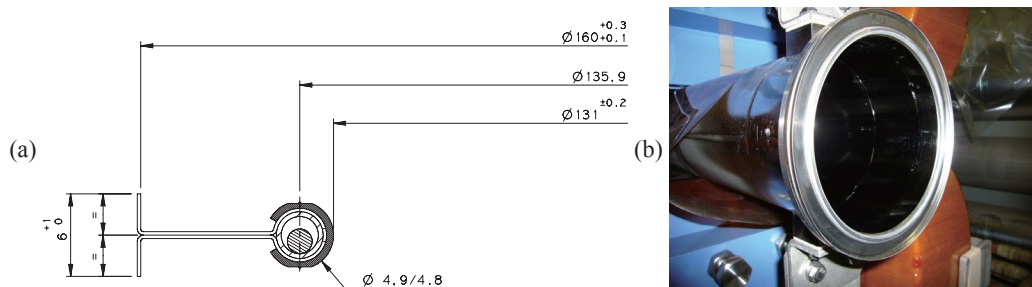


図 12 フランジ径 160 用ヘリコフレックスデルタシール。(a) 断面図、(b) 実際にフランジに嵌めた様子。

そのフランジは ϕ 50mm までしか定義されていない ISO-KF 規格のテーパフランジをスケールアップした、テーパ角が 150 度のテーパフランジを独自に定義した。フランジの寸法は ISO のパイプ寸法を基本として、フランジ外径で ϕ 450, 370, 290, 240, 180, 130 を系列化した。断面形状で最も数の多いボア径 130mm の磁石内ダクトとドリフトスペースの内径 130mm パイプのフランジとして径 180mm にしてしまうと、シール部がビームパイプ壁から大きく凹んだ位置にあってビームから見て大きな段差が生じてしまい都合が悪かったので、開口部内径 130mm、フランジ径 160mm を規格化し、さらにより大きいビームサイズになる入出射部に必要な ϕ 195 (開口径 165) を追加し、8 種類の寸法で規格化したシリーズとなった。

テーパフランジの締結には、軽量、非磁性、着脱が短時間で済む少ない締結ボルト数の Al 合金製のクランプチェーン (図 13) を用いることとした。必要なボルト数が Conflat の 10 分の 1 であるから、締結に必要な時間もそれだけ短縮できている。ただしアルミニウム合金の耐熱温度が 70°C と低く、ベーキング等の熱処理には

使えないという短所もある。

図 14 に示した MR の標準開口径 $\phi 130$ のフランジ部の模式図でわかるように、金属シールのトーラスの内側がフランジの開口径に一致し、周回ビームから見た真空内壁の段差を極力無くす方針に沿うことができた。このように金属シールが開口部に一致するのは $\phi 160, 195, 240$ (special) フランジで、入出射部以外の真空内壁は 2mm 以上の段差が一切無いものとなった。フランジの数量としては、MR では $\phi 160$ 用が最多で約 1340 枚、入出射部で使われる $\phi 195, 240, 290, 370, 450$ がそれぞれ 80, 15, 残りは 5 枚ずつ程度で、3-50BT では 240, 290 がそれぞれ 140, 24 枚で、総計で約 1610 個のフランジ・シール・クランプが使われている(ビームラインのみ、かつ予定含む)。

なお、ビームラインから枝分かれしたポンプポート、ゲートバルブ、イオンポンプ、さらにゲージ類に至るまで、現場で着脱する可能性のあるフランジ全ては、加速器トンネルでの作業における最重要ポイントとして上げられる迅速性の観点から、上記テーパフランジ+クランプチェーン+ヘリコフレックスデルタシールの規格を用いている。それ以外の、加速器のトンネル内で我々が開けることは絶対に無いことが保証されているフランジについては、Conflat フランジを使っている所も数カ所程度存在する。

3.7. 締結のためのさらに特殊な構造 - 遠隔(遠方)操作

通常のフランジ締結規格は人間の手での作業が前提であるが、コリメータ部及び入出射部のビームロスの多い高放射線環境場にあるフランジについては、フランジを分離するためのベローズ伸縮及びクランプの開放と締結、締結時のフランジの調芯の作業を、放射能が下がる遠方から操作可能な構造を開発し試験的に導入した。詳細は省略する。

3.8. 圧力の測定

粗排気の大気圧から 10^{-2} Pa までの領域はコンベクトロンゲージというピラニーゲージの一種で測定するが、大気からのスクロールポンプ排気の途中でフランジ締め忘れなどでダダ漏れ状態であったり、あるいは TMP を起動するタイミングを知るためだけに使われており正確性は全く不要である。一方、本排気領域の圧力は B-A ゲージ(Bayard-Alpert イオンゲージ、IG)で行う。地上に 3 つしか無い電源棟に設置されたゲージコントローラからリングの最遠部までは 400m 以上あり、市販のコントローラでそのような長尺に引き回す事まで考えられたものは存在しないので、ケーブルの電圧降下を考慮したものを特注した。アーク部は 15° モジュールの中央の missing bend 部のポンプポートに、フィンガーコンタクトの外側でビームが直接見ない位置で測定している(図 11(b))。直線部の各チェンバーではビームが直視する位置にあることが多い。

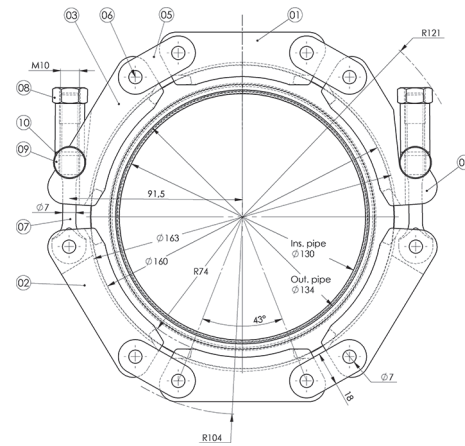


図 13 クランプチェーン(フランジ径 160 用)。このパイプ径 130mm で Conflat フランジ 203 を用いると締結ボルトは 10 倍の 20 個である。

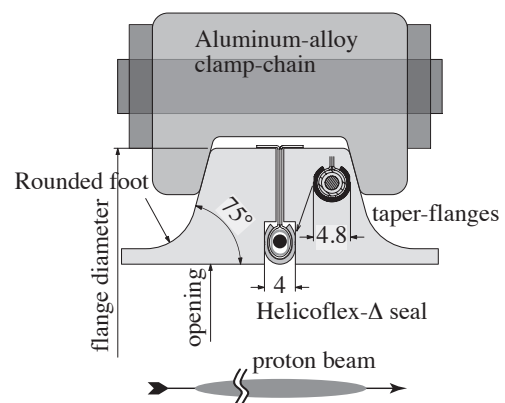


図 14 2フランジ結合時のシールを含む位置関係

3.9. チェンバー類の実態

入射射部には、以下に列挙する文字通りハコものの真空チェンバーで in-vacuum に磁石が置かれたものと、 out-vacuum に磁石があるものの2種類のチェンバーが存在する。out-vacuum なものは他のノーマルな真空ダクトと同様の特性であるので特に問題にはなっておらず、主に in-vacuum 磁石のあるチェンバーは概ね圧力が高い。それらの圧力履歴を図 15 に示す。

3.9.1. 入射セプタムIIチェンバー

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 にもなりアーク部ビームダクトの単位長さ当たりの表面積 0.4m² と比較して3ケタ大きい。電気絶縁用にセラミック板ばかりか真空中で使用してはならないポリイミドフィルムとポリイミドテープが、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。真空的には最悪の部類に入る。

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 10⁻³Pa 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 10⁻⁵Pa 台に下がり、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での粗排気ポートから QMS によるガス分析を行い、主成分は H₂O であることを確認した。2010年夏に改造のため大気解放したので、振り出しに戻ったと思われる。

3.9.2. 入射キッカー、出射キッカーチェンバー

磁極のフェライトブロックは総面積 10m² 程度である。フェライトのみで空気中 400℃以上で焼き、チェンバー単体でベーキングし、一部は組み込んでから全体を 80℃程度でバークした。リングインストール後の圧力は 10⁻⁴Pa 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。改造のため2010年夏に大気曝露したが、復帰は速いであろう。速い取り出しキッカーチェンバーは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 10⁻⁶Pa 台まで下がってビーム試験に臨む事ができ、その後も順調に圧力が下がり 10⁻⁷Pa 台に突入した。2010年夏に次世代機に交代するため役割を終えた。その次世代機の真空特性は初代とほとんど変わらないと予想されている。

3.9.3. 速い取り出し低・中磁場セプタムチェンバー (FXSep1,2)

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ビーム路 1m あたり 190m² 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バー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バーで、排気開始は2008年12月末のビーム加速試験のわずか4日前だったため、10⁻⁴Pa 台後半という高い圧力の下での試験となり、途中で IP

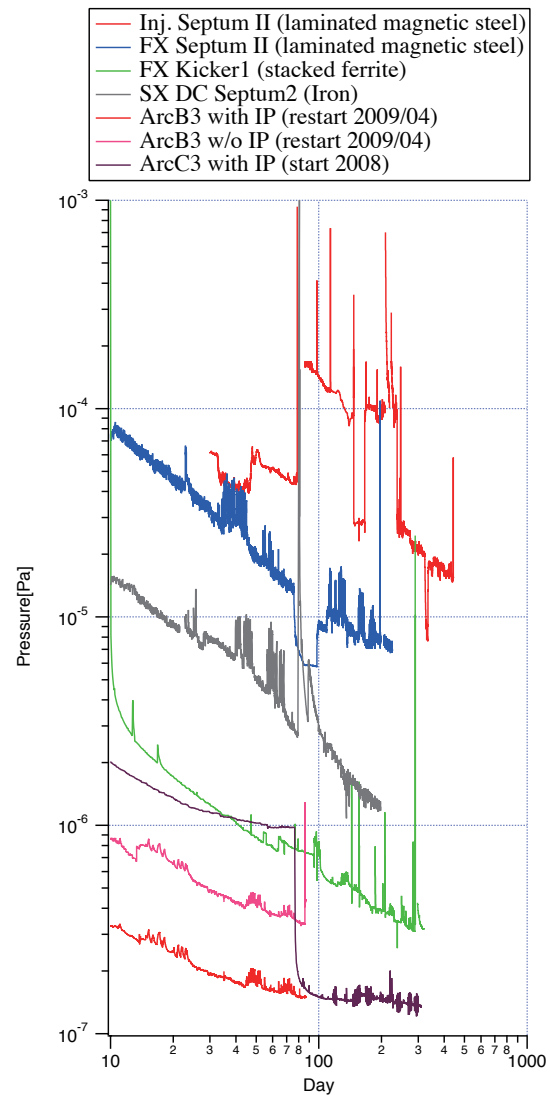


図 15 各種チェンバーの長期間の圧力変化

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、最高圧力の冠は入射セプタム II へ譲った。インストール直前のベーキング時のガス分析によると主成分は H₂O である。2010 年夏以降も現役続行である。

3.9.4. 遅い取り出し電磁石チェンバー (ESS1,2, SMS1,2)

静電セプタム (ESS)、磁極が純鉄の DC セプタム (SMS) 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 2008 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 2009 年 1 月の遅い取り出し試験時には 10⁻⁶Pa 後半まで改善しており、その後も順調に下がった。その後、速い取り出しの運転モード時に大強度のビームが周回すると後述する圧力上昇現象を生じるようになった。

4. MR 圧力の履歴に現れた大強度ビームの跡

図 16 に、2010 年夏までの全周の圧力分布の時間変化を示す。200% 位に拡大すれば見えるだろう。アーク部は図に模式的に示したように IP に対し IG の数が 2/3 であるため、放物線分布の山と谷を 2 つおきに測定してサンプリングが粗くなっていることは注意を要する (実際の山と谷は倍の密度)。さてこの全周圧力分布は、運転開始 2008 年 5 月から 2009 年 11 月までと、2009 年 12 月から 2010 年 7 月までとで様相が異なっている。

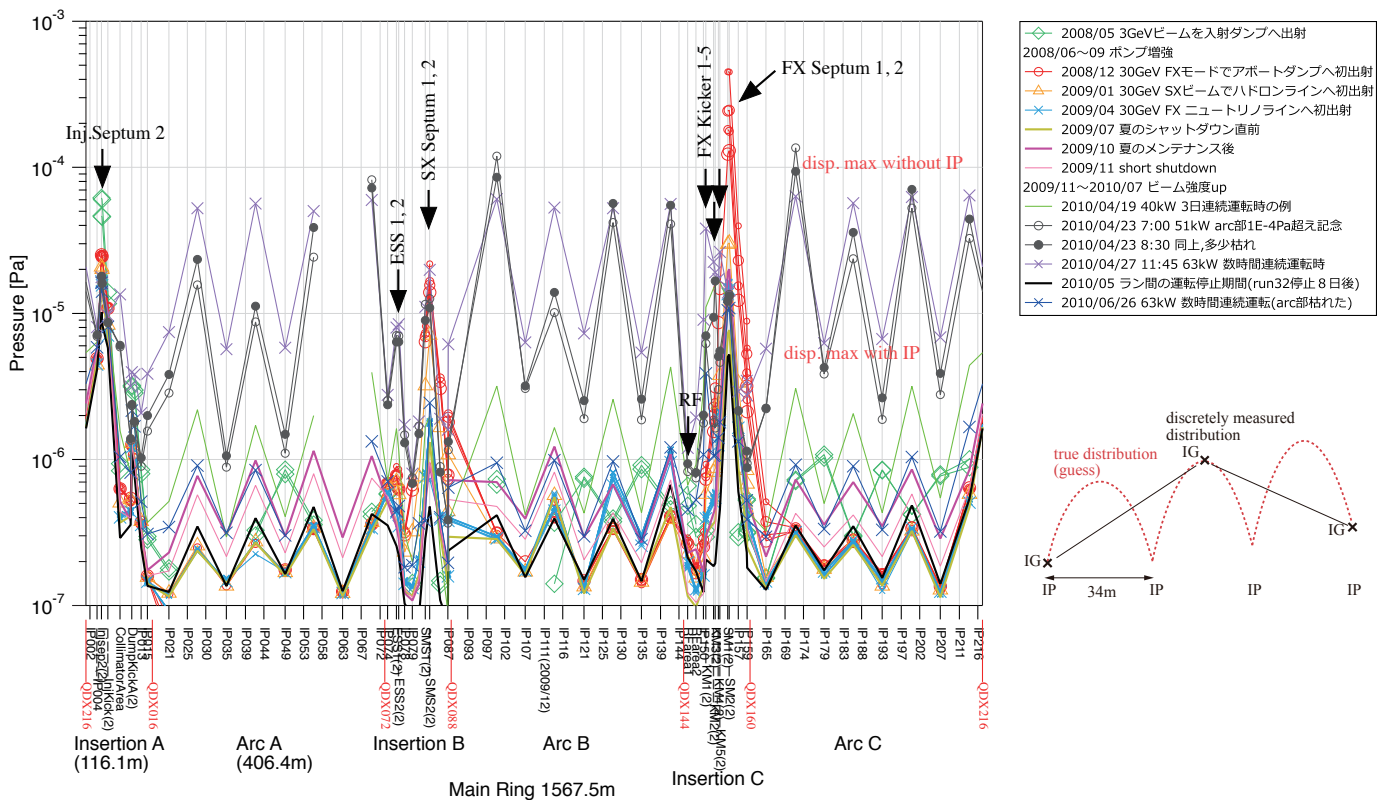


図 16 MR 全周圧力分布の 2008 年 5 月から 2010 年 6 月末までの履歴。印刷に出ない部分は pdf 参照。

4.1. 2008 年 5 月—2009 年 11 月 (ビーム強度 1Tppp 未満)

アーク部で 2008 年 5 月の最初のビーム試験時の分布の一部が他と高低のパターンが異なるのは、IP 電源の調達が遅れ、その時点で稼働していた IP は歯抜け状態で半分程度だった (ポンプ間距離 70m) ためである。その後 IP 電源が調達でき、2009 年 7 月まではポンプ間距離 34m で IP を駆動し続け、アーク部の到達圧力は 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。その年の夏にアーク部を全て大気解放し 6 極電磁石への改造が施された関係で、メンテナンス後の 10 月に一旦圧力が高くなり、11 月には再び 7 月に近いとこ

ろまで下がっている。直線部のチェンバーについては前章で解説したが、アーク部に比べ突出している事や、入射のセプタム 2 以外は枯れが進んでいることがよくわかる。

アーク部の最低圧力と最高圧力の比が 2—3 という点に着目しよう。前述した通り、圧力比は一様なガス放出速度の時 $1+(SI/8c)$ であるから、それがこのような数字になるには公称 0.5 ないし $0.6\text{m}^3/\text{s}$ ポンプの実効排気速度が $0.1\text{m}^3/\text{s}$ 程度まで下がっていることを示唆している。実際、ポンプメーカーのカタログや出荷記録によればイオンポンプの排気速度は 10^{-8}Pa 台で半減しているの、この推測は正しいと思われる。また、グラフからポンプ直上における圧力の最小値をざっくり $1.5 \times 10^{-7}\text{Pa}$ 程度として、この値を排気速度が $0.1\text{m}^3/\text{s}$ に下がっているポンプを用いて直径 130mm 、長さ 34m 分のパイプを排気して実現するには、そこら一体のガス放出速度が $1 \times 10^{-9}\text{Pa m}^3/\text{s}/\text{m}^2$ まで下がっている必要がある。設置時に大気に曝され、設置後にベーキングせずにここまで低い放出ガス速度へ到達したことは、驚異的と言える。また、ベーキングに代わる別の表面清浄化プロセスが存在した可能性も示唆している。それは、周回ビームによる表面の清浄化である。

4.2. 2009 年 12 月～ 2010 年 7 月 (ビーム強度～ 76Tppp)

図の 2010 年 4 月などで、アーク部で異常に高い圧力分布となっている。これは、ビームの周回に伴う圧力上昇現象が顕著に発生した時間を抜き出したもので、2009 年 11 月に加速後のビーム強度が 1 バンチあたり 2Tppp 程度に上がった時に、速い取り出しキッカー (FX KM1—5) チェンバと遅い取り出しの静電セプタム (SX ESS1, 2)、及び遅い取り出し DC セプタム (SX SMS1, 2) でまず発生した。例えば 11/22~23 の KM3 と ESS2 での様子を図 17 (a) に示す。圧力はどちらも 3 ケタ以上上昇している。圧力が 10^{-3}Pa に近づいた時には、図の (b) に示すようにビームロスモニタにも加速時間 1.9s の後半に行くに従って増えていく信号が観測されている。この信号が真のビームのロスによるものか別の何か (散乱された荷電粒子、さらにそれが励起した n 次粒子等を見ている可能性もある) かはまだ解明されていないが、チェンバの圧力に比例していることは確認されている^[9]。

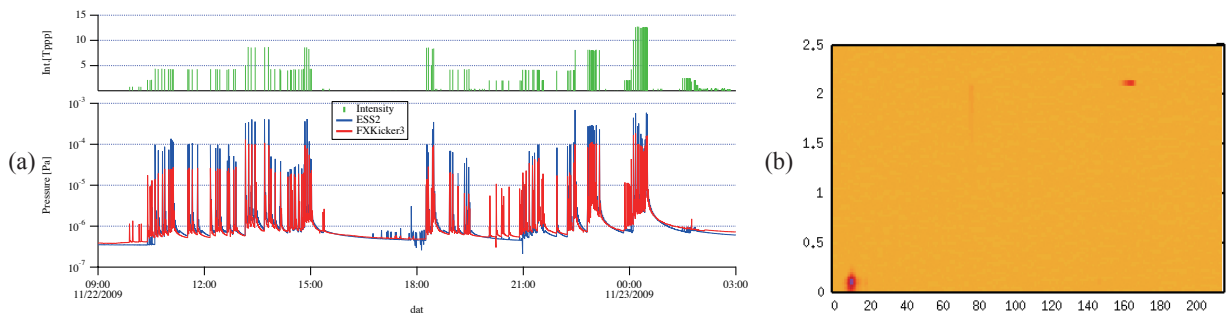


図 17 (a) FXキッカーとSX ESSチェンバの圧力上昇の例。(b) ESSのロスモニタ(#077)で加速中に増加していく信号。

圧力上昇のメカニズムはまだ確認されていないが、2次電子放出に伴う電子雲形成によるものという考え方がある。これは大強度粒子加速器特有の古くから知られた現象で、陽子加速器の場合、残留ガスとの衝突による

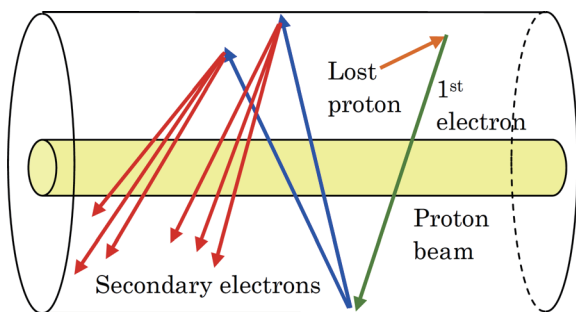


図 18 電子雲形成メカニズムの例。^[10]

イオン化で生じた電子やビームロスした陽子が壁や ESS のフォイルなどを叩いて生じた電子が、ビーム電場で加速され陽子集団をすり抜けて反対側の壁に一次電子として飛び込み、次に飛び出す二次電子の数の方が多いた時に周回陽子ビームの周囲に形成される電子の雲が、ビーム集団に影響を及ぼす事象として研究されている。圧力上昇は電子雲形成の原因にも結果にもなっていると思われ、今年の夏以降に電子雲を観測するモ

ニターをリングに仕込んで現象を解明する手がかりを得ようと準備を行っている最中である。

4.3. ビームによる scrubbing

圧力上昇は、ビームを 3.52s または 6s で連続運転すると半日程度で1ケタ程度改善する。これは周回ビームにより、真空内壁の圧力上昇を引き起こす何か（例えば電子雲形成を促進する高い二次電子放出係数）がこれまた何らかの機構で改善されていく現象で、これを大雑把なイメージでビームが表面を削っている、scrub していると言う。その一例として、FX キッカー 5 台の圧力上昇が 6s 周期の連続取り出し運転で半日程度で1ケタ改善している様子を図 19 に示す。

2009 年 11 月以降、MR では各種ビーム運転のパラメータを最適化する試験を敢行し、ビームロスを増やさないようにしながら徐々にビーム強度を上昇させていた。ビーム強度が上がるたびに、このような圧力上昇現象が起こっては連続運転で scrub され治まる、という繰り返しであった。それをまとめたのが図 20 で、8 ヶ月の間にビーム強度が上がり、一方機器の圧力上昇は巧みに抑制されている様子が見て取れる。図 16 のアーク部の異常な圧力の高い分布（例えば初めて 63kW で連続運転した 4/27）は図 20 の 2010 年 4 月の ARC の上昇時のものであるが、その後同じ強度でもそれほど圧力が上昇しないで済むようになった（6/26）のも scrubbing 効果による表面改善の結果である。

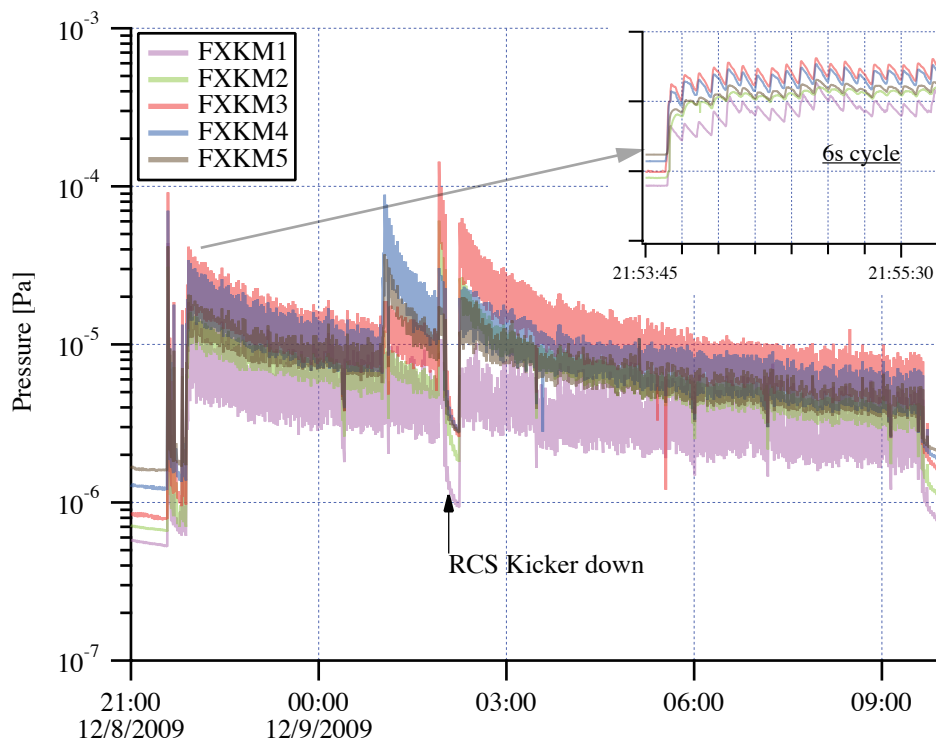


図 19 scrubbing 例。細かく見ると6秒周期で圧力が変動しつつ、長い目で見ると平均の圧力は指数関数ではなくむしろ τ^{-1} に比例して下がっているように見える。

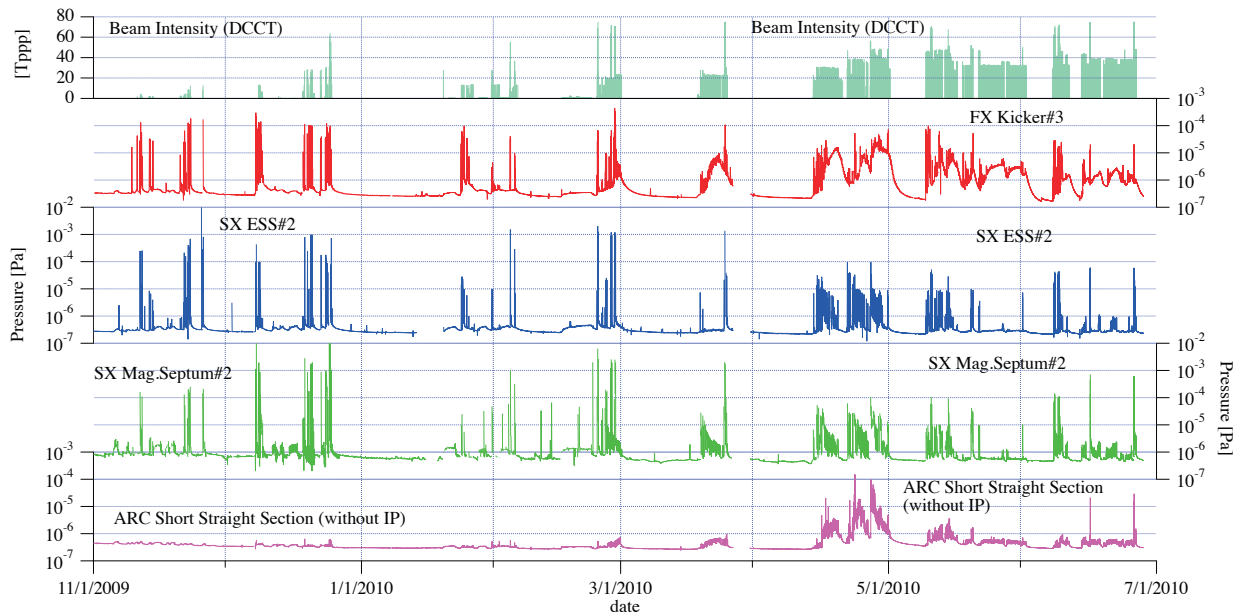


図 20 2009 年 11 月から 2010 年 7 月までの 8 ヶ月間の、ビーム強度といくつかの真空機器の圧力のトレンド。ビーム強度は DCCT で測定した 1 周期当たりの粒子数で単位は $Tppp=10^{12}$ 個 /pulse。

5. まとめ

大強度陽子加速器 J-PARC の主リングシンクロトロンについて解説した。加速器、中でも陽子加速器では超高真空を作り維持する事に対し、主に放射線性というタームで様々な制約があり最優先で対応せねばならず、非常に特殊な構成となっていることがわかりいただけたであろうか。今年の OHO 全体のテーマが大電流ビームを作る、ということだったので、現在 MR の真空で直面している大電流化に伴って顕在化してきた未解明の話題も含めてみた。状況は常に進行中で目が離せない。

参考文献

- [1] <http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt3.html> の 2001 年の 13 及び 14 のテキストへのリンク。
- [2] 例えば、[1] と同じページの 2009 年の 5 の金澤氏によるもの。
- [3] W. Hardt, A few simple expressions for checking vacuum requirements in a proton synchrotron, CERN-ISR-300-GS-68-11. (1968).
- [4] 例えば Varian Inc. のカタログ。
- [5] JHF Project Office, JHF accelerator design study report, KEK Report 97-16 (1998), Chap. 2.6.
- [6] ACCELERATOR TECHNICAL DESIGN REPORT FOR J-PARC, KEK Report 2002-13 (2003), p528.
- [7] 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).
- [8] ACCELERATOR TECHNICAL DESIGN REPORT FOR J-PARC, KEK Report 2002-13 (2003), Chapter.2.3.2.
- [9] M. Uota et al., "J-PARC MR の大強度ビームによる圧力上昇とビームロス", 第 7 回日本加速器学会年, WEPS126 (2010).
- [10] 陳栄浩, "2. 大強度陽子ビームの不安定性", OHO'05, p2-49, fig.47 (2005) を引用。