

## INSTALLATION OF VACUUM SYSTEM AT J-PARC MAIN RING AND 3-50 BEAM TRANSPORT

Masahiko Uota<sup>1</sup>, Yoichiro Hori, Tomio Kubo, Yoshihiro Sato, Masayuki Shimamoto, Yoshio Saito

KEK

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 305-0801

### Abstract

Vacuum system of J-PARC Main Ring and 3-50 Beam Transport Lines are now being installed. Some vacuum sections in the main ring are tested by the roughing pump system and the result shows the vacuum performance is good enough.

### J-PARC主リング及び3-50BT系の真空系立ち上げ

#### 1. はじめに

大強度陽子加速器計画J-PARCの加速器群はリニアック・3GeVシンクロトロン (Rapid Cycle Synchrotron, RCS)・50GeVシンクロトロン (Main Ring, MR) から成り、現在リニアックがビームコミッション、RCS、MRは機器の搬入及び試験・立ち上げの段階である。

このうちMRの真空系は、RCSの3GeV取り出しライン途中にあるパルスベンド磁石からMRまでの228mのビーム輸送路である3-50BT、周長1567.5mのMR、各取り出しライン入口、ビームダンプ・アポートラインで構成されている。2005年の電磁石の設置と同時にトンネル内へ設置が始まり、2006年秋に一部の区間で粗排気装置により試験排気を開始し、現在は再アラインメントのため接続を切ったり別の区画で接続したりと、真空系としては一進一退を続けている。2007年の冬には殆ど全ての機器が接続され真空になる予定である。

本稿ではMR真空系の構成、レイアウトデザイン、陽子加速器の真空として採用・考案された真空フランジの規格、ビームダクト形状、製造及び設置の現状について解説する。

#### 2. 真空系のデザイン

##### 2.1 数量

与えられた軌道計算を元に真空系のデザインを行った。まず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、電磁石が修理等でビームラインから個別に出し入れされることを考慮し1台の電磁石につき1本とした。MRのリング部分では、SUS316L製で、偏向電磁石用で96本 (1種類の形状)、四極電磁石用で216本 (磁極部断面だけで9種類)、六極電磁石用で72本 (1種類)、さらに遅い取りだし用共鳴補正六極電磁石用に本校執筆時点で8本 (通常六極用と同形) が必要となった。Beam

Position Monitorダクト200台は殆どの四極電磁石の上流に置かれ、その周囲を補正偏向電磁石が覆っている。また、磁石と磁石との間のドリフトスペースを繋ぐものとしては約150本 (モニタダクトを除く) 必要となり、長さ・形状とも多岐にわたることとなった。3-50BTでは軽量・低アウトガス・低残留放射能・溶接の容易な純Ti製とし、また種類の多すぎるMRの反省を生かし、偏向電磁石以外のダクト断面は円形で3種類に単純化し、総計で140本程度となった (モニタダクトを除く)。

また、ビームダクト同士を繋ぐものとしてベローズが使われるが、MRでは、Ti製の成形ベローズのみ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。3-50BTでは可能な限りフランジを減らすこととし、Ti製ビームダクトに成形ベローズを合体させることでベローズ単体のダクトは33台まで減らせた。

真空排気は、ビームラインからT字形に分岐したポンプポートを一定間隔で配置させ、そこから粗排気装置としてはテンポラリにターボ分子ポンプとスクロールポンプ及びコンパクトロンゲージを用い、本排気装置として耐放射線性・メンテナンスの点で優れたイオンポンプ及びイオンゲージを用いる。粗排気装置は本排気装置が駆動した後リングから待避させるので耐放射線性は不要である。当初のデザインでは、ビームダクト表面からのガス放出率を $1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 、平均到達圧を $10^{-6} \text{ Pa}$ 台前半としていたので、ポンプポートは約16m間隔 (MR) で総計約100個、500L/sの排気速度を持つものを配置し30年以上は交換しない予定であった。諸般の事情によりポンプ数が半減し約33m間隔となり、残り半分のポンプポートは将来計画用となった。

ARC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

<sup>1</sup> E-mail: [masahiko.uota@kek.jp](mailto:masahiko.uota@kek.jp)

なった。ポンプポートも含め周回軌道上のベローズの殆どは、周回ビームがベローズを直接見ないように櫛状のフィンガーコンタクトで隠されている。

パイプ形状以外の、真空内にキッカー、セプタム電磁石が置かれるタイプの真空チェンバーは入出射部に10台程度ずつ置かれ全体の長さから見れば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、リング全体の圧力を悪化させるのに多大な貢献をしている。

## 2.2 ビームダクト内径及び断面形状

まずビームダクトの標準的な内径を決定した。その値がドリフトスペースのパイプ径、フランジ部の開口径、(可能ならば)磁石内ダクトに採用された。各場所におけるx, y方向それぞれのアクセプタンスを $216[\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}]$  (3-50BT上流)、120 (3-50BTコリメータの下流)、81 (MR) とし、COD等を考慮した軌道のエンベロープ(断面はx, y独立と考え四角形と仮定する)が触れない最小の円を元に決定した(表1)。

場所	アクセプタンス	内径(mm)
3-50BT上流	$216 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$	230, 200
3-50BT下流	120	164, 200
MR	81	130, 134, 165, 200, etc

表1. ビームダクトの主な内径

しかしMRの電磁石内を貫通するビームダクトに関しては、標準サイズの内径 $\phi 130\text{mm}$ (肉厚は2mmの場合外径 $134\text{mm}$ となる)では電磁石側の形状・電力について実現に困難を伴うものであったため、ダクトの方で磁極部のみを小さくしたり、磁極形状やビームの包絡線形状に合わせて変形させた様々な異径ダクトが作られた。

全長6399mm 3.75度偏向電磁石ダクトは、電磁石のギャップ長106mmに対し100mmの内法高さ・131mmの水平幅を持つレーストラック形状をロール成形にて作り出した。磁極を出た部分でフランジ部の開口径130mmの円形までの滑らかな形状変換部を持つ。

四極電磁石は最終的に130, 140, 150mmの3種類のボア径、磁極長の差から11ファミリーが存在することとなり、ビームダクトはそれ以上の種類となってしまった。製造コスト、真空表面の性質その他の観点から円形パイプが望ましいので、各ボア径に収まる最大の円形パイプとして $\phi 124, 134, 142$ の3種を採用した。ところが軌道パラメータの変更により一部で軌道断面の対角線がダクトを超える部分が生じたため、そのような磁石のみは円形パイプの上下左右を引張って伸ばした形状、すなわち角を丸めた菱形形状 $\diamond$ とし、 $\diamond 124, 134$ の2種が存在することとなった。さらに、製造コストを下げるため標準径の $\phi 130$ で済む場所はそのようにし、また入射部・出射部は周回ビーム以外に入出射ビームが周回軌道からずれた場所を通過することから特殊な花形形状を採用した。以上の経過を辿ったことで、断面だけで9種類にもものぼるものとなった。これに長さ、フランジ部の形状の数種類を組み合わせるため、最終的な種類

名称	フランジ径	ボルト数	最大締結トルク*) [Nm]	コマ数	最大パイプ外径
200SP450	450	4	70	12	424
200SP370	370	3	60	9	344
200SP290	290	3	45	9	267
200SP240	240	3	45	8	218
200SP195	195	2	30	6	171
200SP180	180	2	25	6	157
200SP160	160	2	25	6	138
200SP130	130	1	20	4	109

表2. J-PARCで使用中の独自規格アルミクランプチェーン。NW50以下はISO-KF用を使用。\*) 通常6割で締結。

は数知れない。

## 2.3 締結の規格(通常用)

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 $\phi 4.9-5.1\text{mm}$ 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把手の付いたものを採用した。フランジは $\phi 50\text{mm}$ 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、150度テーパフランジとした。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 $\phi 450, 370, 290, 240, 180, 130$ を系列化したが、上述のMRでの標準パイプ寸法 $\phi 130$ に対応するものが真空シールの位置の条件から無く、そのためのフランジ径 $\phi 160$ と、さらにそれより大きい入出射部に必要な $\phi 195$ を追加し、8種類の寸法となった。

締結は、軽量、非磁性、着脱容易な少締結ボルト数及び低トルクのAl合金製のクランプチェーンを用いることとした(表2)。

図1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

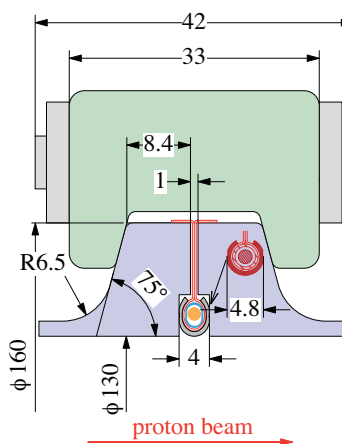


図1. フランジ $\phi 160$ 、開口 $\phi 130$ の標準的なフランジ、クランプチェーン、メタルシールの断面模式図。

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φ160, 195, 240(special)フランジで、入出射部以外の真空内壁は1mm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φ160用が最多で約1340枚、入出射部で使われるφ195, 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。ただし、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、ボルト数の多いナイフエッジ型メタルシールフランジを使っている所も数カ所程度存在する。

## 2.4 フランジ部の特殊規格

通常の規格は人間の手で締結を行うことが前提であるが、コリメータ及び入出射のビームロスが多い高放射線環境下では、ベローズ伸縮及びフランジの締結・脱離のために遠方から操作可能な構造を取ることになった。すなわち遠方から伸縮可能なリモートベローズ機構、及びリモートクランプ機構、フランジの調芯機構である。詳細は省略する。

## 2.5 機器レイアウトデザインの詳細

web上で常時更新している<sup>2</sup>。

# 3. 真空系の製造及び設置

## 3.1 製造時期

MRのSUS316L製ビームダクト、Ti製ベローズダクトの製造は2002年度からの約3年間でアーク部と直線部の一部について行われ、その後、初期デザインからの変更等により生じた隙間や直線部の残った部分、ダンプリン、アポートライン、残りのベローズ等が順次製造された。3-50BTは2002年度に殆どが製造された。2007年現在も、配置変更や新機器導入及びレイアウトの微少変更に伴って生じた隙間を埋める製造が進行中で、また、入出射部の大型の真空チェンバーでは各種調整が進行中である。

## 3.2 表面処理

MRのSUS316L製ビームダクトは、規格管からの引き抜き成形または製管・ロール成形による断面成形後にフランジ部を溶接し、その後に内面を電解研磨し、230°C24時間の真空ベーキングによる脱ガスを

行った。長尺パイプの内面を、作業時に発生する水素ガスによるブロッキングを阻止しつつ電解研磨し、十分に洗浄する手法の確立に相当の時間を要した。出射ラインの大型のダクトについては、電解複合研磨のみを行い、ベーキングは行っていない。Ti製ベローズダクトは、油圧成形ベローズのみ化学研磨を行い、組み立て・溶接後に150°C24時間の真空ベーキングを行った。3-50BTのTiダクトは製管後に酸化処理を含む200°C24時間のベーキングを同時に行った。ビームダクトはベーキング後に乾燥窒素を充填・フッ素系ゴムシールにより封止した。表面の性質に関しては他講演を見よ。入出射部の大型のチェンバー類も電解研磨及びベーキングをチェンバーだけで行い、内蔵物を入れた後に可能な限りの温度で熱処理により脱ガスを行う予定である。

## 3.3 設置及び試験排気

MRの電磁石内ビームダクトは、磁場測定の終わった電磁石を半割りし入れこまれ、2005年の電磁石のトンネル内への設置により事実上の設置開始となり、2006年度末までに全ての電磁石(及び電磁石用ダクト)が設置された。3-50BTのダクトはトンネル内で2006年から設置を開始し現在はMRへの入射部以外は殆ど設置済みである。MRの繋ぎのダクト等は順次設置・接続中である。

MR電磁石の設置は加速器トンネルが一周繋がる前から始まっており、トンネルそのものが工事の進捗に伴い周辺環境の変化等により変動し十分なアライメントが行えないため、2006年に設置した部分だけで仮の電磁石アライメントが行われた。その領域のうち、120度アーク部の中心付近のGVを終端とする45度152.4mの連続する領域2カ所について、全ての真空ダクト・ベローズ類を接続し、各領域でそれぞれ2カ所から300L/sのTMPにて2006年9月から連続粗排気試験を半年行い、ポンプ直上で $3 \times 10^{-7}$ Pa、ポンプ間中央で数十倍と設計通り十分に低い圧力に到達することが確認できた。本排気装置の500-600L/sのIPは各領域にそれぞれ当初9台のところ5台ずつ配置されているが、現在電源棟からの配線が未だのため連続試験は出来ていない。駆動すればさらに圧力分散が抑えられることが予想できる。

# 4. おわりに

MR及び3-50BTの真空系は、作業の迅速性の観点から特徴的なテーパフランジ・クランプチェーン・金属シールの規格を採用し、大部分の長さは厳密に内面を表面処理され製造された。現在我々真空グループは小区画ごとの接続とリークテスト、排気試験を徐々にかつ精力的に行っており、長さにして99%の区画は今年の冬には全て真空になっていることが期待できる。

<sup>2</sup> <http://www-accps.kek.jp/~uota/works/jparc/50GeV/50GeVPlanView/>