

J-PARC 主リング真空ダクトの一部チタン置換と運転への影響

VACUUM DUCTS MODIFICATION TO SHAPE AND MATERIAL IN J-PARC MR

魚田雅彦[#], 堀洋一郎
Masahiko Uota[#], Yoichiro Hori
KEK and J-PARC

Abstract

The vacuum duct of J-PARC MR is mainly stainless-steel. In FY 2012, very localized, spotted beam loss occurred in the arc section of lower reach of collimators and dispersion maximal point in all arc section under 200kW beam run. Since an unexpected activation in the arc section make maintenance difficult in future, we redesign the aperture of vacuum ducts to widen and flatten in the arc and collimator area. The material of beam ducts were chosen Titanium. The new beam ducts are installed from autumn in 2013 to January in 2014, and used to the machine from May 2014. The result is reported.

1. はじめに

J-PARC MR における、メンテナンス性を考慮したビームロスおよび機器の放射化の制御は、当初の設計ではコリメータ部に局在させ、他の場所、特にアーク部では基本的にロスが 0.5W/m と低く抑える計画でトンネルの躯体や大きさが決められている。

MR では運転開始から、トータルのロスを 1kW 以下に低く押さえたままビーム強度を徐々に上げる様々な調整を行い、震災後の 2012 年度には 200kW 超の定常的なビーム運転が可能となった。 200kW 付近で連続運転中のビームロスモニタ(BLM)の典型的な強度分布を Fig. 1 に、また四極電磁石ビームダクトで人がメンテナンス時に接近する、接続フランジ近傍のダクト表面の運転停止 1 日後の残留放射能の分布を Fig. 2 に示す^[1]。残留放射能は殆どの場所で BLM のロスの分布通りで、主に入射部(Inj.)コリメータ部に集中しているが、Fig. 2 で浮上してきた問題点は、トンネルの壁が比較的薄く、ロスが低く抑えられるべきアーク部に、局所的な高い残留放射能を帯びるダクトが出てくるようになったことであった。その特徴は以下のようなものである。

- ArcA(1st Arc)の前半部分付近の数百 m にわたる Q 電磁石は、所々で突出した残留放射能をもつ Q ダクトが点在し、強度は上流から下流に向かって decay している。1 台の Q ダクトについては上流側が高いものが多い。
- アーク部の 24 箇所のミッシングバンドにある 2 つの Q 電磁石 QFX の一部のみ、出口フランジ付近のリング内周側のみが局所的に高い放射能を持つ。

将来のさらなるビーム強度増強のためには、この予想外の場所でのロスによる放射化が障害となることは明らかであるため、このロスの起源および対策を取る必要が生じた。

そこで真空ビームダクトのアーチャーを 2013 年の夏に見直し、一部のダクトの交換を夏から冬の間

に行って 2014 年 3 月からの利用運転に適用し現在に至っている。その状況を報告する。

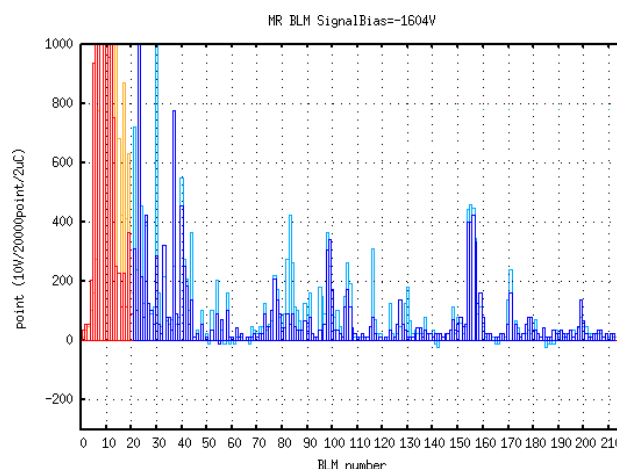


Figure 1: Typical beam loss distribution in MR at about 200 and 230 kW FX user-run.

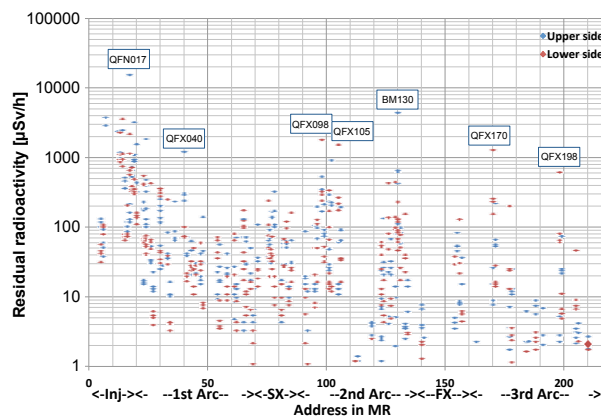


Figure 2: On-contact residual radioactivity of the Quadrupole and Bending beam ducts (except for collimators 'untouchable' area).

[#] masahiko.uota@kek.jp

2. 真空ダクトのアーチャー

2.1 初期の設計思想

J-PARC MR は 3 つの 120°アーク部(長さ 406.8 m) と 3 つの直線部(長さ 106.1 m)で構成されている。偏向及び四極電磁石の配置の対称性は、全体で 3 回の回転対称、アーク部のみでは 1 モジュール 7.5 度 50.8 m の 24 回対称、直線部のみでは鏡像対称であり、アーク部 1 モジュールは鏡像対称である。対称性は QDX と呼ばれる 27 台の電磁石の中央を対称の境界としており、1 モジュールは $\frac{1}{2}$ QDX-QFN-QDN-QFX-QFX-QDN-QFN- $\frac{1}{2}$ QDX という並びである。

初期のビームダクト設計思想として、アーク部のアーチャーは、フランジ部でフランジ径 160 mm 開口径 130 mm の円、ドリフトスペースで内径 130 mm の円管を基本サイズとした。ボア径 130 mm の四極電磁石内は、磁極に接触しないよう 1 mm の隙間を開ける必要があるため円形で 124 mm とした(Fig. 3a)。さらに標準的なチューン(22.40, 20.80)に対して、 $54\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ のエミッタンスに 1.5 倍の $81\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ のビームアクセプタンスを水平、垂直方向に同時に確保するために、ビームの断面形状を長方形と仮定し、その対角線長が 124 mm を超える Q ダクトに対しては、円から対称性を低くし角の丸い(R40)ダイヤ型(45°回転した正方形◇)とした(Fig. 3b)。後者は水平、垂直中心軸上は 142.2 mm の広いアーチャーを持っている。フランジは開口径 130 mm であるので、124○および 124◇はともに磁極の外でテーパ構造で滑らかに 130○へ繋いでいる。

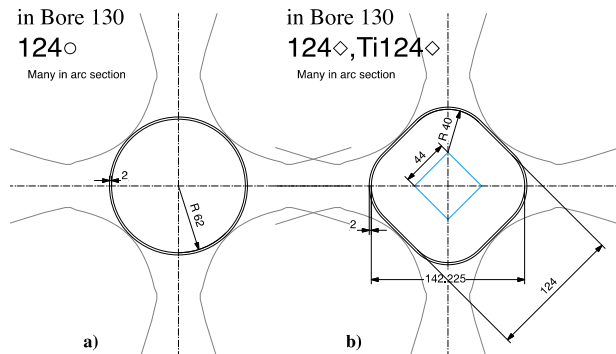


Figure 3: Cross-sections of Q-ducts in arc section.

Table 1: Vacuum Duct Cross-Section Type in 1-arc(--2013). ◇ Is 45° Tilted 124 mm-Side Square with Rounded (R40) Corner, ○ Is Circle in Diameter 124 mm

	$\frac{1}{2}$ QDX	QFN	QDN	QFX	QFX	QDN	QFN	$\frac{1}{2}$ QDX
→	◇	○	○	○	○	○	◇	◇
	◇	○	○	◇	◇	○	○	◇
	◇	◇	○	◇	◇	○	○	◇
	◇	◇	○	○	○	○	○	◇
	◇	○	○	◇	◇	○	◇	◇
	◇	◇	○	◇	◇	○	○	◇
	◇	◇	○	○	○	○	○	◇
	◇	◇	○	○	○	○	○	◇
	◇	◇	○	○	○	○	○	◇
	◇	◇	○	○	○	○	○	◇

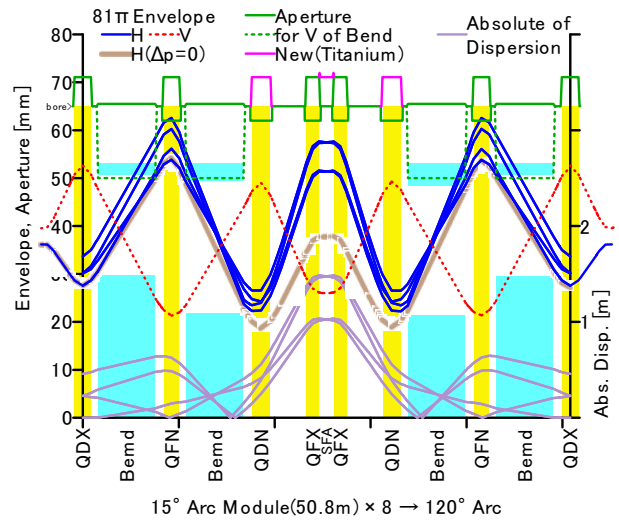


Figure 4: Beam envelope, dispersion function and aperture of vacuum ducts (both --2013 and 2013--) in 1 module of the arc.

対称性の低い角丸正方形ダクトは磁場への高次の影響があるので極力少なくすべきという考えから、対角線アクセプタンスアーチャーが確保できないものだけを選び最小限にとどめた結果、Q 電磁石内ダクトの断面は 1 アーク 120°内で表 1 に示すように Twiss Parameter に沿った複雑な組み合わせとなった。

Fig. 4 は、デフォルトの tune(h,v)=(22.40, 20.75)での Twiss parameters[]から計算される、Arc 部のビーム包絡線および真空ダクトの簡略化したアーチャーである(縦 500 倍スケール)。見やすくするため 1 モジュール 50.8 m ごとに原点に戻し重ね書きした。包絡線は $\epsilon=54\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ の 1.5 倍の $81\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ のアクセプタンス、運動量の揺らぎ $\Delta p=0.67\%$ 、設置誤差など COD によるずれ 1mm を仮定している。ディスパージョンの影響をあらわにするため、ディスパージョン関数 η の絶対値および $\Delta p=0$ の場合の水平包絡線もプロットした。垂直包絡線が全モジュールで共通であるのに対し水平包絡線が 4 本見えるのは η が 0 度~60 度で非対称だからである(60 度~120 度は 60 度を軸とする鏡像対称)。ダクトの半径アーチャーは、前述の通り Q 電磁石の内部では 62 mm(○)または 71.1 mm(◇)の 2 通りで、さらに偏向電磁石内は実線の H 方向は 65.5 mm、点線の垂直方向は 50 mm、また残りの六極電磁石用ダクト、モニタ類、ゲートバルブ、ドリフトスペース等真空ダクトは 65 mm、それぞれをテーパ構造で滑らかにつないでいる(一部簡略化)。表 1 にあった QFN, QFX の 2 つの断面形状は、それぞれ包絡線の大きい 4 本と小さい 4 本に対応して選択されていたのである。

2.2 残留放射能との関係

Fig. 4 から、 Δp がゼロに近ければ、ダクトのアーチャーは確保できている。一方、Fig. 1 のロス分布および Fig. 2 など実際の残留放射能測定値を見直すと、アーク部で残留放射能が局所的に集中しているのは、

- 124mm○ダクトで、フランジ部で 130 mm から 124 mm へテーパーが付けられアパーチャが狭くなっている入口部分
- 124mm◇ダクトで、磁極部の 142.2 mm からフランジ部 130mm の円に形状変換しアパーチャが狭くなっている出口部分
- コリメータを抜ける(=取りこぼし)か、アーク部 QDX 前後の偏向電磁石の垂直方向が極めて狭い場所でダクトをかすって運動量が低くなった粒子が下流の偏向電磁石で過度に曲げられディスペーション極大部でかつ内周側に衝突するということがわかった。

3. 断面形状の見直しとチタン化

3.1 断面の見直し

コリメータでの取りこぼしや偏向電磁石の垂直方

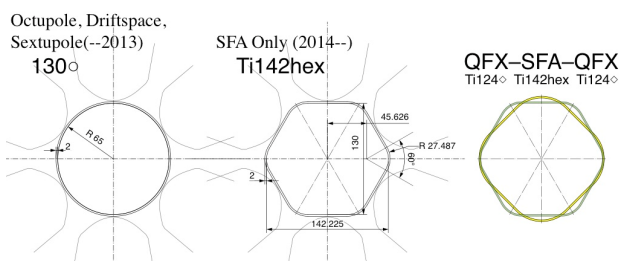


Figure 5: Cross-section of Sextupole beam-ducts.

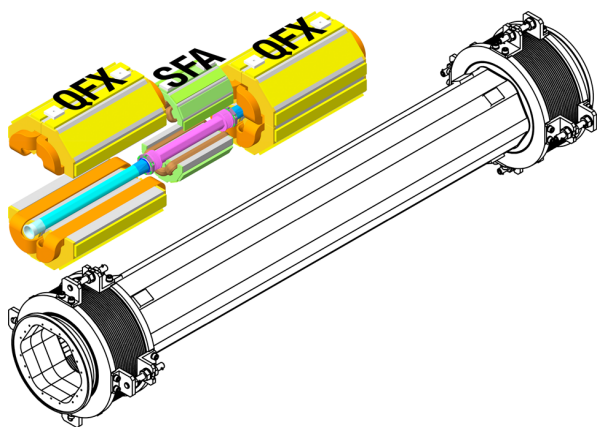


Figure 6: The both side of SFA have bellows with hexagonal aperture with RF shield.

向の狭さは不可避であり、水平方向にアパーチャが絞られる場所で、コリメータ下流側や全周で生じる運動量のずれた粒子によりロスが集中して発生いたことがわかったので、以下の方針で一部のダクトの形状を変更・交換することとした。

- コリメータ取りこぼしに対しては、Arc A の前半部 0~60°までの Q ダクトは全てを 124◇とし、130→124 mm へ絞るテーパーを無くす。
- 運動量のずれた粒子がロスするディスペーション極大部にある QFX-SFA(六極)-QFX については、全ての QFX を 124◇とする。その上で、
- ボア径 136 mm の六極電磁石内の SFA ダクトアパーチャは内径 130 mm の円であったが、水平断面が 124◇と同じアパーチャ 142.2 mm を持ち、垂直方向には 130 mm の、角の丸い六角形へ変更する(Fig. 5)。さらに、両側の QFX との繋ぎに使用していた独立ベローズダクトを六極ダクトと一体化し、円形ベローズ部の内部で六極ダクトと同じ断面形状で RF シールド構造を設ける(Fig. 6, ただしシールドは六角形の直線の辺のみ)。
- SFA の上流側 QFX の出口及び下流側 QFX の入口のフランジ部の開口形状を、SFA 断面と同じ角の丸い六角形とする。これで QFX-SFA-QFX の並びの水平断面が完全に平坦となる(Fig. 5 の右端)。垂直断面には絞られるテーパー構造が残るが、ロスはここでは発生していないので影響は無視できる。
- ダクトの材質を、放射化生成核が短寿命でステンレスより残留放射能の少ないチタンとする。
- 直線部 A のコリメータ部から下流の Q ダクトのアパーチャをφ130 以上とし、材質をチタンとする。

変更後のアーク部のアパーチャリストを Table 2 に示す。

3.2 交換作業

リング内の作業範囲は Fig. 7 に示すように全周に及んだ(2015 年夏交換予定の直線部 A 下流部 3 台を含む)。チタン製真空ダクトは、製作時の表面処理として 150°C 24 時間以上の真空ベーキングを実施し、2013 年秋までに 102 台を製作した。2013 年 11 月~2014 年 1 月にトンネル現場での交換インストール作業を行った。Q ダクトの殆どは、上流側は BPM に

Table 2: New Duct Aperture List Mainly in Arc-A. Red Letter Means New Titanium Chamber. The Number Is Exchanged Duct Address

%QDX	QFN	QDN	QFX	QFX	QDN	QFN	%QDX
→ ◇→◇016	○→◇017	○→◇018	○→◇019, 091, 163	○→◇020, 092, 164	○→◇021	◇→◇022	◇→◇023
◇→◇023	○→◇024	○→◇025	◇→◇026, 098, 170	◇→◇027, 099, 171	○→◇028	◇→◇029	◇→◇030
◇→◇030	◇→◇031	○→◇032	◇→◇033, 105, 177	◇→◇034, 106, 178	○→◇035	○→◇036	◇→◇037
◇→◇037	◇→◇038	○→◇039	○→◇040, 112, 184	○→◇041, 113, 185	○→◇042	○→◇043	◇→◇044
◇→◇044	○045	○046	○→◇047, 119, 191	○→◇048, 120, 192	○049	◇050	◇051
◇051	○052	○053	◇→◇054, 126, 198	◇→◇055, 127, 199	○056	◇057	◇058
◇058	◇059	○060	◇→◇061, 133, 205	◇→◇062, 134, 206	○063	○064	◇065
◇065	◇066	○067	○→◇068, 140, 212	○→◇069, 141, 213	○070	○071	◇072 →

直結しているが下流側はベローズダクト(長さ 140 mm)またはベローズ付きポンポートであるので、ベローズを除去するか縮めることで若干の隙間を作り、電磁石を現場で上半身のみ吊り上げ半割し、旧ダクトを抜き、新ダクトと交換する手順であった。作業は最速で6台/日の速度で行われた。

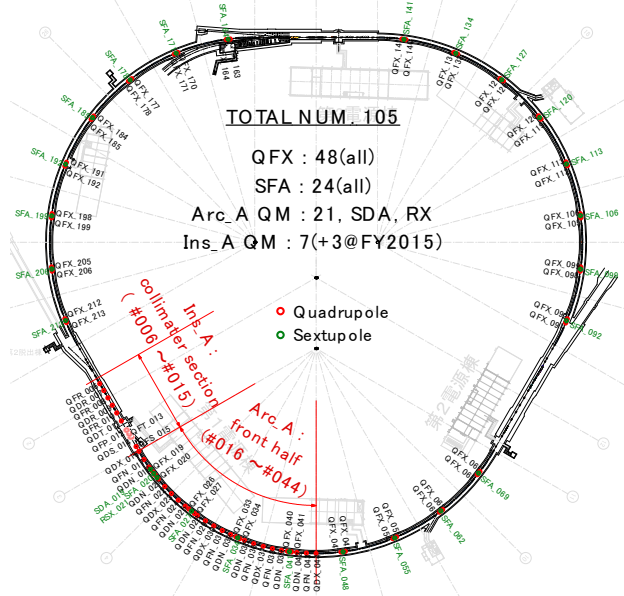


Figure 7: The work scope in MR.

4. ビーム運転の結果および考察

4.1 真空の圧力履歴

2014年3月から大強度運転が再開された。アーク部のディスパージョン極大部でポンプ直上の B-A ゲージで測定している真空の圧力の 2011 年 11 月～2015 年 8 月の履歴および取り出しビーム強度を Fig. 8 に示す。左端の比較的高い圧力からの排気は、3 月の震災により発生したリークにより、1 ヶ月程度大気が数 Pa 程度直接流入したことによる。アーク部のポンプの配置間隔は、2013 年夏まで 34, 34, 17, 17 m (2 モジュールあたり)の繰り返しで、IG#021 の方が IG#028 より高めに推移しているのは、前者の上下流が 34 m、後者の上下流が 17 m 間隔にあたるためである。2013 年秋にアーク部全周で一度窒素パージからの大気開放を行いイオンポンプを 24 台増強し、1 モジュールあたり 3 台ずつで約 17m 間隔に配置できたので、2014 年からは両者ほとんど等しくなっている。

上下流のポンプ間隔が変わっておらず排気速度が変わっていない IG#028 で、大気からの排気曲線を特にビーム運転の行われていない瞬間の静的圧力について見てみると、今回の一部チタン化により、到達圧は若干下がっていることがわかる。これはステンレスよりチタンの方が内壁表面からの気体放出速度が小さいこととよく対応している。一方、ビーム運転時の圧力上昇はビーム強度とその強度での運転時間に依存しており近似的には周回粒子による電流

の積分に反比例していると思われる^[2]が、300kW 超の FX および 30kW 超の SX 運転時それぞれで気体放出量の異なる枯れが進行しているのが見えている。運転モードによって気体放出のメカニズムが異なることが示唆されており、今後データの蓄積によって解明が期待される。

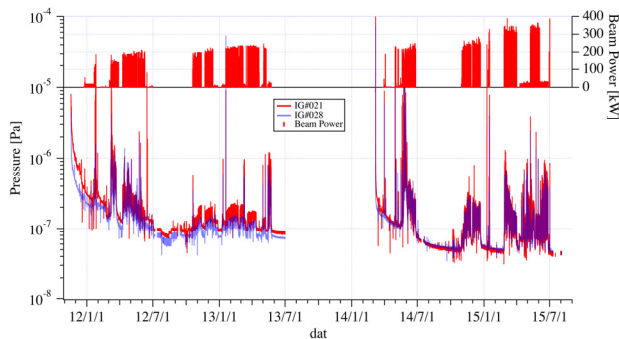


Figure 8: Typical vacuum pressure trend in Arc A and the MR beam power from Nov. 2011 to Aug. 2015.

4.2 ビームロスおよび残留放射能分布

2015 年春の 330kW 連続運転時の典型的なビームロス分布を Fig. 9 に示す。アーク部のロスは Arc A 上流側に集中しており、これまで同様ディスパージョン極大部の QFX が多く、それに前後の bend の V 方向が狭い QDX が続く。ただし周回ビーム強度は 2012 年度までの 1.5 倍であり、同様なロスであること自体は今回のアパーチャ見直しにより「通りが良くなった」ことの結果である。

Table 2 に示したように、Arc A でもまだ狭い 124 〇断面が残っており、コリメータ下流で最初に狭い場所が QFN045、その下流で focusing Q で狭いのは QFN052, QFN064, QFN071 である。運転停止直後の残留放射能サーベイで、以前は観測されなかった局所的に高い放射能が QFN045, QFN052 に出現するようになったのは、包絡線ギリギリを進行する粒子がアパーチャの最初に狭くなる場所でロスしていると

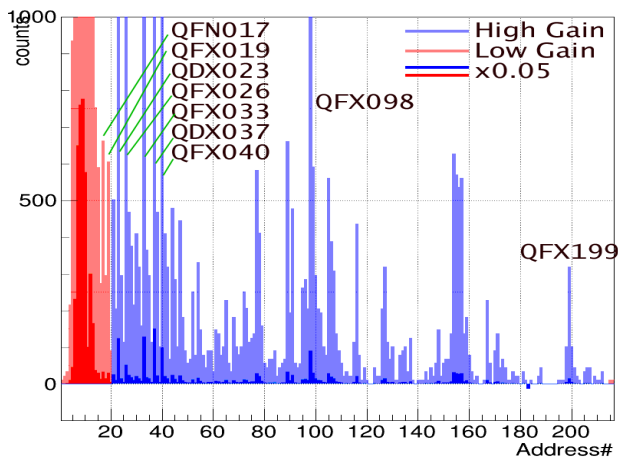


Figure 9: Typical beam loss signal distribution in MR of 330 kW user-run.

PASJ2015 THP118

解釈することが可能である。しかし、運転中のロス分布では目立ったロスは観測されておらず、この謎についての取り組みが行われている^[3]。

なお、今回形状が同じで材質をチタンに変えたため余っている元 QFN022, 029, 031, 038 の 4 本の 124◇は、詳細を省略していたが実はフランジ部開口部のサイズに 2 通りあって、上記の狭い QFN と置き換えることが可能なものとして元 QFN022 と元 QFN038 を再使用可能である。

5. おわりに

アーク部でアパーチャが狭い場所に集中するロスについては、全ての 124○を捨て 124◇にアパーチャを広げれば良いということがわかった。Arc 部全周では 124○ダクトがまだ 60 本残っており、さらなる大強度化のためにはこれを全部置き換えるのがてっとり早い。その結果必然的に、今度は狭い場所として遅い取り出し、速い取り出し、入射部等の直線部で狭い場所がクローズアップされるだろう。最終的には、一周回してコリメータに当てればゴールとなるモグラ叩きを実行することで鬼ごっこは終了するだろう。

参考文献

- [1] K. Satou, Y. Sato, M. Uota, M. Shirakata, M. Yoshii, Proc. PASJ10, Nagoya, Japan 2013, SAP084, p.688.
- [2] Y. Sato et. al, Proc. PASJ12, WEP031, 2015.
- [3] M. Uota, H. Hori, Y. Saito, Journal of the Vacuum Society of Japan 57(3), 111-114, 2014.
- [4] T. Toyama, H. Kuboki, Y. Sato, M. Uota, M. Shirakata and B. Y. Rendon, Proc. PASJ12, WEP092, 2015.