

J-PARC MR におけるエキサイター電極の表面処理による

マルチパクタリングの抑制について

CONTROL OF THE MULTIPACTORING BY THE SURFACE COATING OF THE EXCITER ELECTRODES IN J-PARC MR

岡田 雅之^{#, A)}, 外山 毅^{A)}, Schnase Alexander^{B)}
 Masashi Okada^{#, A)}, Takeshi Toyama^{A)}, Alexander Schnase^{B)}

^{A)} KEK J-PARC Acc.

^{B)} GSI

Abstract

Multiple-purpose Exciters are installed in the 30GeV main ring of J-PARC, and they are used for Bunch by Bunch Feedback, Transverse RF for slow extraction, Tune measurement and Intra-bunch feedback study. Since these Exciters are Strip line Kickers which use the parallel electrodes, a multipactoring is generated depending on the conditions of applied RF. The multipactoring gives damage to an electrode surface, and also causes the electric discharge and the beam loss due to vacuum deterioration. Then, we tried to control the multipactoring by coating of the surface of the electrodes. This time, for three kinds of treatments on the stainless steel electrodes (electrolytic polished, Diamond-Like Carbon (DLC) coated, Titanium Nitride (TiN) coated), the secondary electron yield (SEY) and the pressure rise in the vacuum chamber by multipactoring when the RF is applied were measured.

1. はじめに

J-PARC 30GeV メインリング(MR)には、2 組のエキサイターが設置されており、Bunch by Bunch Feedback や Tune 測定、遅い取出しにおける Transverse RF Exciter 及び Intra-bunch Feedback のスタディに利用されている。

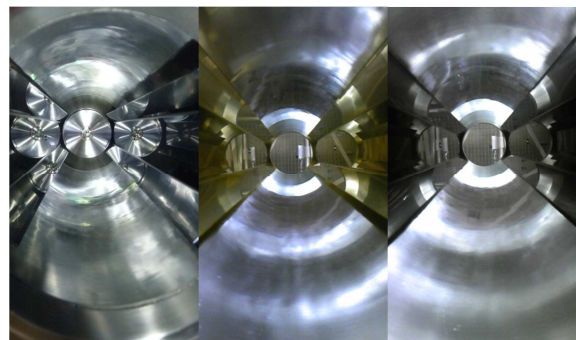
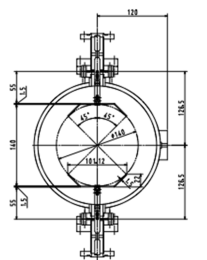
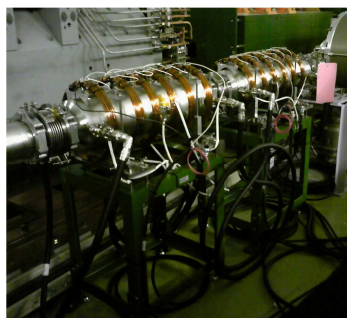
これらのエキサイターはそれぞれ多少の違いはあるものの、2 枚の電極を向かい合わせに配置したストリップラインキッカーで、それぞれの電極に逆位相の電圧を印加する事でビームの軌道を調整する。

この様なエキサイターでは電極の間隔と RF の条件によってはマルチパクタリングという現象が発生する。マルチパクタリングは電極間の電圧が上がらなくなる事の原因や、圧力上昇による放電やビームロスの原因となる為回避する事が望ましい。

その為、現在のエキサイターではチェンバーの外

側にソレノイドコイルを巻き電極間に弱い磁場を乗じさせることで電子の軌道をまげてマルチパクタリングを回避しているが、微少とはいえビームへの影響が無いとは言い切れない事や電源や配線のトラブルリスクを考えると将来的にはソレノイドコイルを無くしたいと考えている。

今回、電極をマルチパクタリングの起きにくい素材でコーティングする事でソレノイドによる磁場無しで運転出来るようにならないかと考え、従来のエキサイターで使用している電界研磨したステンレス(SUS)に加えて、SUS の電極にマルチパクタリングの起きにくいとされる窒化チタン (TiN)・ダイヤモンドライクカーボン(DLC)でコーティングした物を作成し、テストを行う事にした。



a) SUS b) TiN c) DLC

Figure 2: Prepared electrodes

Figure 1: Multiple-purpose exciters for J-PARC MR

[#] masashi.okada@kek.jp

2. マルチパクタリング

エキサイターの様な向かい合った電極に RF 電圧

が印加されている状況において、ビームや放射線の衝突等の要因で電極表面から 1 次電子が放出されたとする。放出された電子は RF 電場により加速され反対側の電極に衝突し、2 次電子を放出する。この時 RF が最初の放出の時と逆位相であれば、2 次電子は再び反対側の電極に向かって加速される。この時、衝突した電子の数より放出された電子数が多いと電子数がネズミ算的に増加する。この様に電子が RF に同期して電極間を増殖しながら行き交う現象をマルチパクタリングもしくは 2 ポイントマルチパクタリングという。

平行平板間の RF 電場によるマルチパクタリングは解析的に解くことが出来て、電極間の距離を d 、電位差を V とすると、電極間にある電子の運動方程式は

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{eV}{md} \sin(\omega t + \phi) \quad (1)$$

で表すことができる。ここで、 m は電子の質量、 ω は RF 周波数、 ϕ は初期位相($0 \leq \phi \leq \pi/2$)である。 $t=0$ の時 $x=0$ 、 $dx/dt=0$ の条件でこの式を解くと時刻 t での電子の位置は

$$x = -\frac{eV}{\omega^2 md} [\sin(\omega t + \phi) - \sin(\phi)] + \frac{eV \cos(\phi)}{\omega md} t \quad (2)$$

となる。

マルチパクタリングの起こる為には、電場が逆位相となる $t=(2n+1)\pi/\omega$ の時に $x=d$ にならないので(2)式は

$$d = -\frac{eV}{\omega^2 md} [2\sin(\phi) + (2n+1)\pi \cos(\phi)] \quad (3)$$

となり、RF の電圧と周波数がこの式を満たす時にマルチパクタリングが発生する。また、この時の電子のエネルギーは

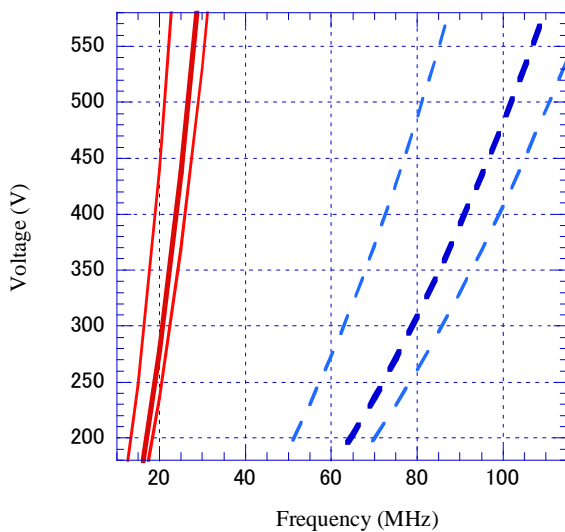


Figure 3: Multipactoring area for exciter
(Solid line: between electrodes,
Dashed line: between electrode and chamber.)

$$E = \frac{2e^2 V^2 \cos^2(\phi)}{\omega^2 m d^2} \quad (4)$$

となる。[1]

エキサイターの電極間隔は 140 mm、電極とチェンバーの間の距離は最短 26mm であるので、 $n=1$ として(3)式でマルチパクタリングの起きる範囲を計算すると図 3 の様になる。細い線の間がマルチパクタリングの発生する領域で、太い線が衝突時の電子のエネルギーが最大になる($\phi=0$)領域である。

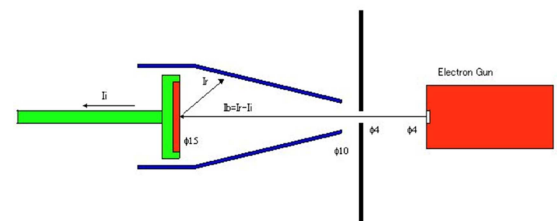
3. 二次電子放出率の測定

3.1 二次電子放出率

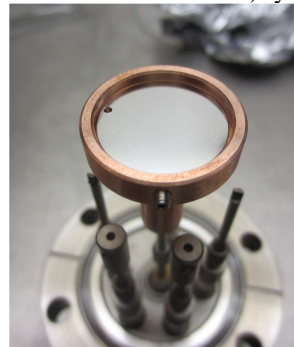
ところで、先の計算では 1 つの電子が電極に衝突した際に放出される 2 次電子の数を 1 つとしているが、実際にいくつの電子が放出されるかは電極の状態や衝突の際の電子のエネルギーで異なる。試料に電子が 1 つ入射した時いくつの電子が放出されるかを二次電子放出率(SEY: Secondary Electron Yield)と言い、反射電流(I_r)/入射電流(I_i)で定義される。実際の測定では下式のように反射電流とサンプルホルダーからのコレクタ電流(I_c)を測定して計算で求める。

$$SEY = \frac{I_r}{I_r - I_c} \quad (5)$$

先に述べたようにマルチパクタリングは向かい合った電極間で電子が行き来する現象であるから、電極間を行き交う電子が無くては発生しない。SEY が 1 より小さい場合、電極間の電子は電極との衝突の度に減少していくのでマルチパクタリングも収束していき、逆に 1 より大きい場合は電子の数はネズミ算式に増加するので現象は継続又は悪化すると



a) System layout



b) DLC sample with holder



c) Cover electrode

Figure 4: SEY measurement system

考えられる。その為、マルチパクタリングを発生させない為には全領域で SEY が 1 以下になる事が一つの目安と考えられる。

マルチパクタリングを発生する条件の内、電極の構造や RF の条件などはその使用目的に関連するので容易に変更は出来ない。したがって、その対策としては、二次電子の放出をいかに抑えるかが重要となる。そこで、電極と同時に作った 3 種類の試料を用いて SEY の測定を行った。

3.2 SEY の測定

SEY の測定は図 4 のシステムで行った。SEY は入射エネルギーによって変わるので、電子銃の引出電圧を変えながら測定を行った。最初に試料ホルダーに取り付けた後、まず 10^{-7} Pa 台まで真空に引いた状態で SEY を測定し、その後チェンバーごと 150°C で 20 時間ベーキングしてから再度測定を行った。これを 3 種類の試料それぞれで測定した結果を図 5 に示す。SEY の値は SUS>TiN>DLC の順で低くなり、ベーキングにより概ね 1 割程度低くなる事が分かる。しかし SEY の値は実機で用いる領域を中心に広い範囲で 1 より大きく上回っている。

次に SEY の最大値が最も低かった DLC の試料に対して長時間電子ビームを照射して scrubbing を行い、SEY が減少するかを測定した。Scrubbing は SEY がピークとなる 250eV の電子ビームの照射を続ける事で行った。その結果を図 6 に示す。横軸は scrubbing で照射した電子の総量で縦軸は SEY の最大値である。SEY の値は概ね log で減り続けているが、残念ながら 1 を割る事はなかった。過去の資料でも DLC での SEY 最大値は $1.0\sim 1.1$ であったので、これ以上の減少は難しいと考えられる。[2]

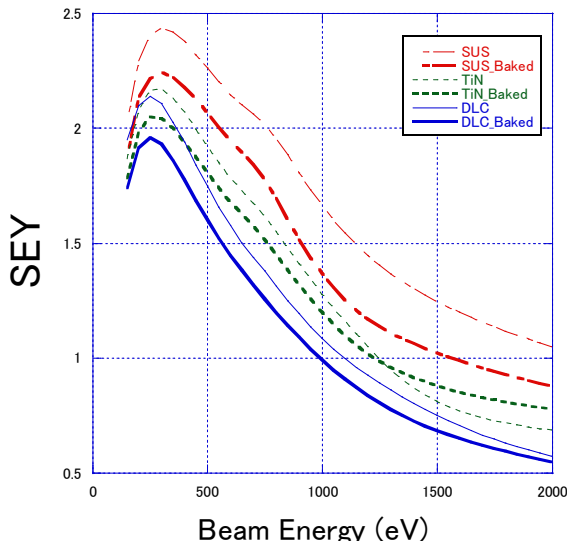


Figure 5: SEY of SUS, TiN, and DLC

4 真空テスト

4.1 テストベンチ

実際のチェンバーに電極取り付けてマルチパクタ

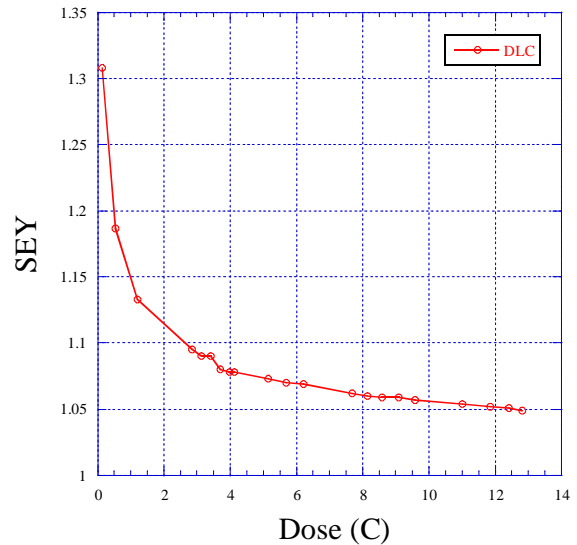


Figure 6: SEY of scrubbed DLC

リングの状況を測定した。直接マルチパクタリングの様子を測定する事は難しいので、それによるチェンバー内圧力の変化を測定しマルチパクタリングの強さの指標とすることにした。測定に使ったセットアップを図 7 に示す。チェンバーにスクロールポンプとターボ分子ポンプからなる真空排気装置を取り付けて、反対側にイオンゲージを取り付けて圧力を測定する様になっている。電極は実際の運用と同様に SG からの出力を 2 分割し片方の位相を反転させて 2 台の 3kW のアンプに入力。増幅した RF は電極を通過して 50Ω 4kW のアッテネータで吸収される。

チェンバーに取り付けた直後の電極は表面に大気分子が結合しているほか様々な物が付着している為放電を起こしやすい。その為測定の前に圧力をチェックしながら 100MHz の RF を徐々に印加してアンプ出力 3kW までエージングを行い、圧力が安定したところで RF の周波数と電圧を変えながら圧力の測定を行った。測定は、RF の周波数と電圧を設定して印加し、圧力が安定したところで 3 秒間の平均をとる形で行った。

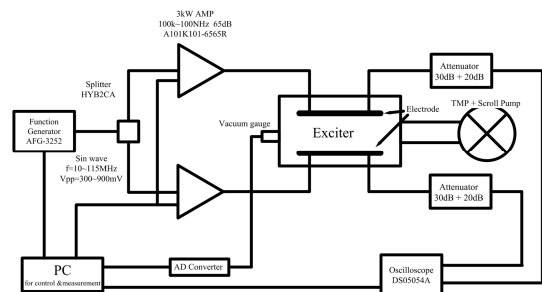


Figure 7: Exciter RF test bench

4.2 測定結果

測定の結果を図 8 に示す。横軸を RF 周波数、縦軸をアンプ出力から計算した電極の電圧として、各

点での圧力を色で示している。測定点が歪なのは電圧の設定を SG 出力値で行った為アンプのゲイン特性によるズレが生じてしまうからである。

チェンバー内の圧力は 10^{-5} Pa 以下の平常値に対して、SUS では最大 1.7×10^{-4} Pa まで上昇したのに対して、

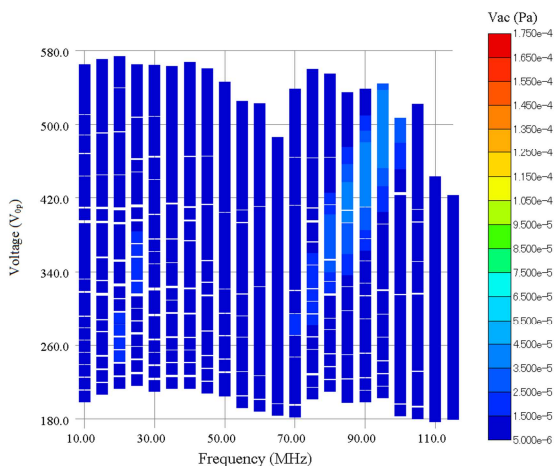
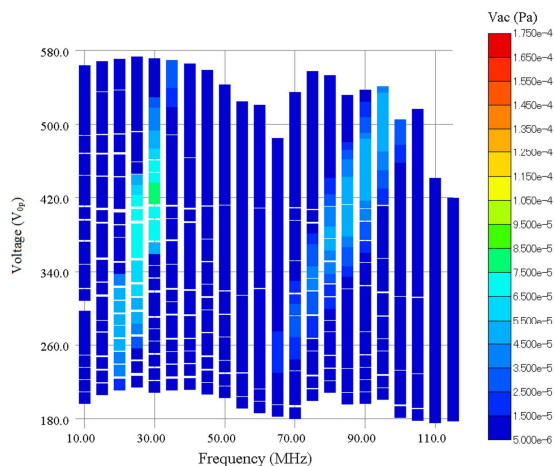
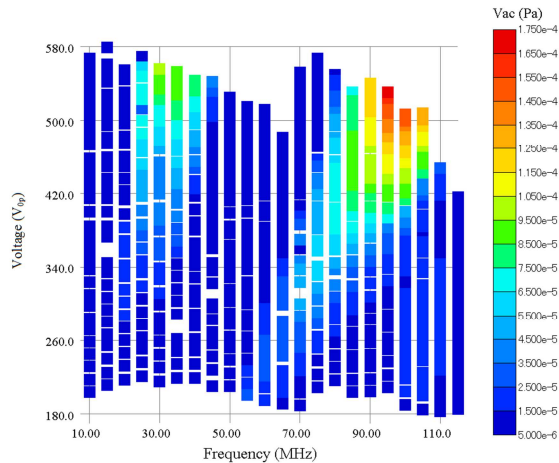


Figure 8: Exciter vacuum measurement (upper: SUS middle: TiN lower: DLC)

TiN は 7.5×10^{-5} Pa, DLC は 4.5×10^{-5} Pa と 1/2, 1/3 程度で収まっている。この結果は SEY と同じ傾向であり、SEY の値がマルチパクタリングに強く関連している事を裏付けていると言える。

圧力が上昇する領域は全ての電極で大きく 2 か所に分かれており、電極の種類によらずほぼ同じ所にある。図 3 のグラフと比較するとそれぞれ(3)式で $n=1$ とした場合の電極間及び電極とチェンバー内面間でのマルチパクタリング領域によく一致していることが分かる。また SEY の測定の結果、DLC の場合衝突時の電子のエネルギーが約 200eV 以上の領域で SEY が 1 を超える事が分かっているので、(4)式で求めた電子のエネルギーと比較するとマルチパクタリングの領域の下限とよく一致する。

測定の結果、DLC コーティングの電極が最も圧力の上昇が少なく、測定範囲での最大圧力 4.5×10^{-5} Pa は MR 運転時のリング内の圧力と同等である。しかし、実際に運用する場合はビームにより 1 次電子の発生量が増えるのでさらなる圧力の上昇が見込まれることからソレノイドコイル無しでの運用は難しいと考えている。

5. まとめ

エキサイターのマルチパクタリングを抑える為、電極のコーティングに着目し SUS, TiN, DLC の 3 種類の電極を作成した、SEY の測定及び実機での圧力測定を行い比較したところ、DLC でコーティングした物が最もよくマルチパクタリングを抑制できることが分かった。しかし、DLC でも SEY の最大値が 1 以下にならず、真空度の測定結果でも完全に無くすることは出来ていない。今後、表面の加工や新たなコーティング素材の検討を進める予定である。

また、今回コーティングをしたのは電極板だけであったが、電極とチェンバー間でのマルチパクタリングも強く観測されたことからチェンバー内面へのコーティングも検討したい。

参考文献

- [1] Y. Kijima, "超伝導空洞用大電力入力カプラに関する研究", Dr. Thesis, School of Mathematical and Physical Science, The Graduate University for Advanced Studies, 2002, <http://id.nii.ac.jp/1013/00000611/>
- [2] M. Nishiwaki, et al., "炭素系材料表面からの 2 次電子放出と表面組成", 真空 Vol. 48 (2005) No. 3 P 118-120, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jvsj/48/3/48_3_118/_pdf

謝辞

本研究を進めるに当たり、エキサイターの製作及びシステムに関しまして多くのコメントを頂きました飛山真理氏、テストベンチの真空装置の貸与・設置並びにビームラインへの設置でご協力頂きました真空グループの堀洋一郎氏・嶋本真幸氏、SEY 測定装置の借用並びに測定方法についてご指導・コメントを頂きました久松広美氏には厚く御礼申し上げます。