

DLCコーディングされたビーム エキサイターの開発

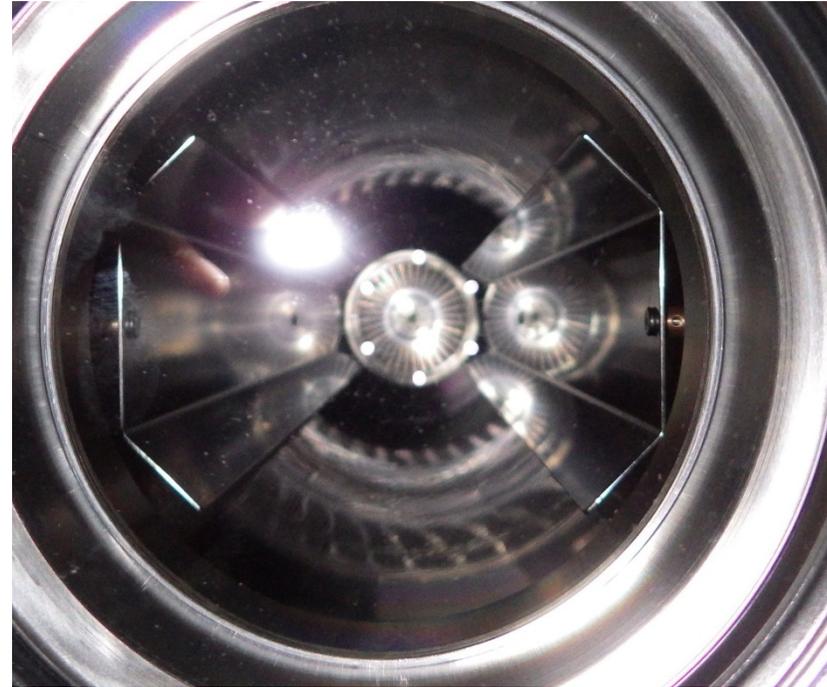
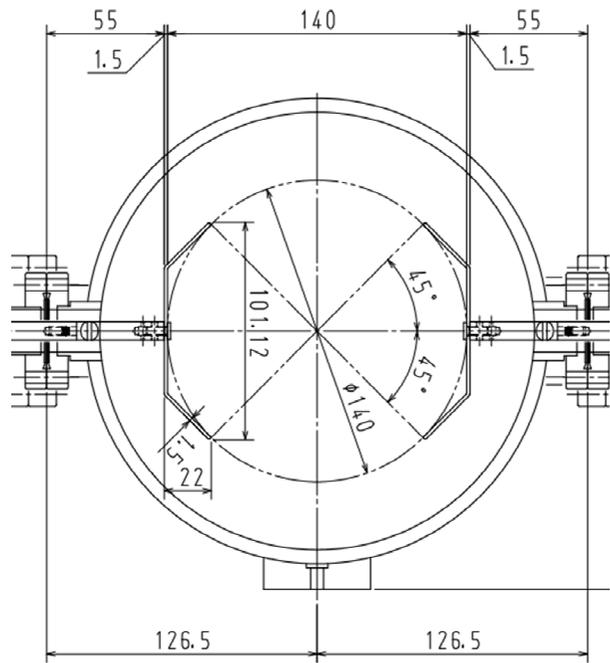
岡田雅之 外山毅

KEK J-PARC

本日の発表内容

- MR ビームエキサイターについて
- マルチパクタリングとは
- コーティングの選定
- 全DLCコートエキサイターの作成と導入
- 運転後コーティング評価

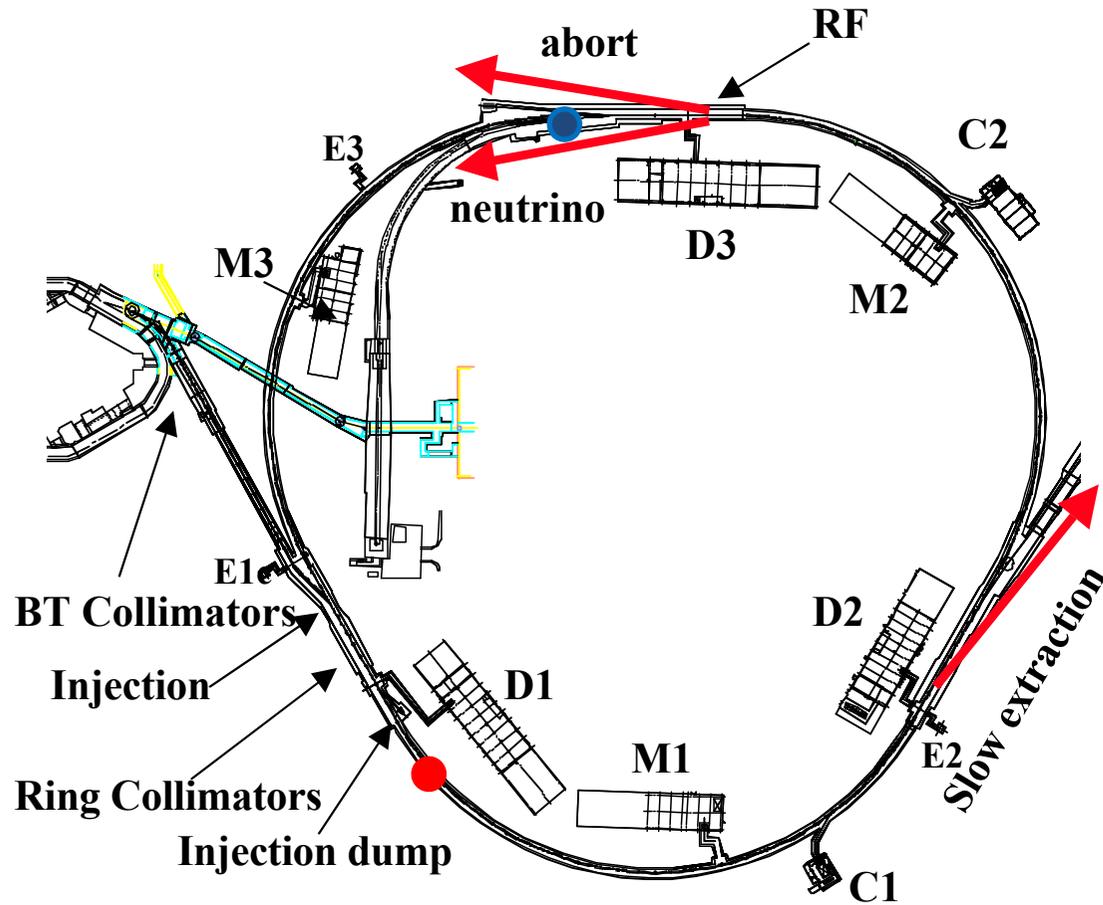
ビームエキサイターについて



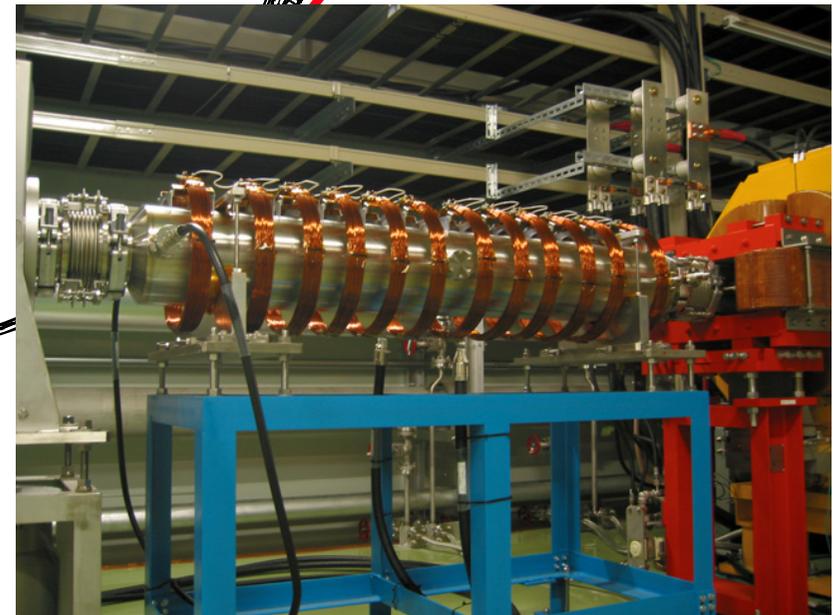
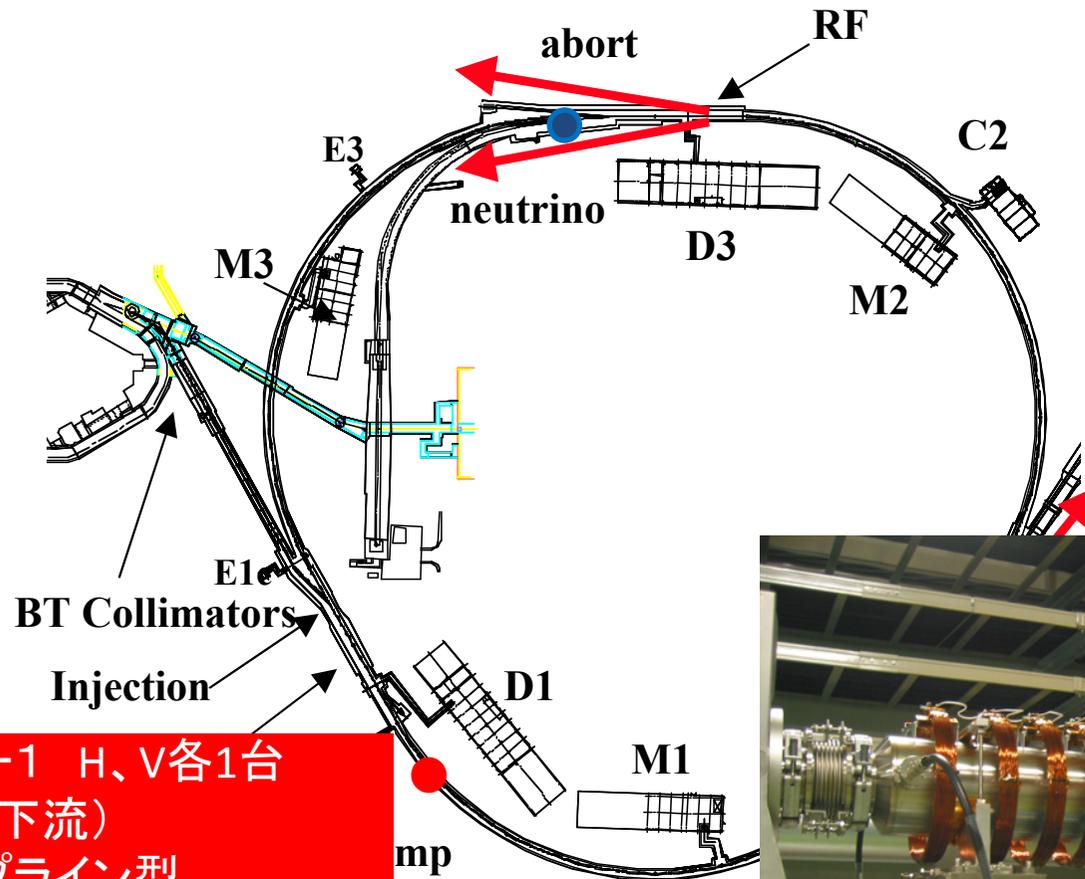
・ストリップライン型キッカー

ビームに同期させて、対向電極に逆位相の進行波を通すことによりtransvers方向のキックを与える。

MR エキサイター



MR エキサイター

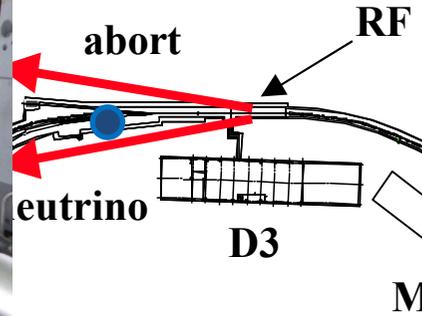
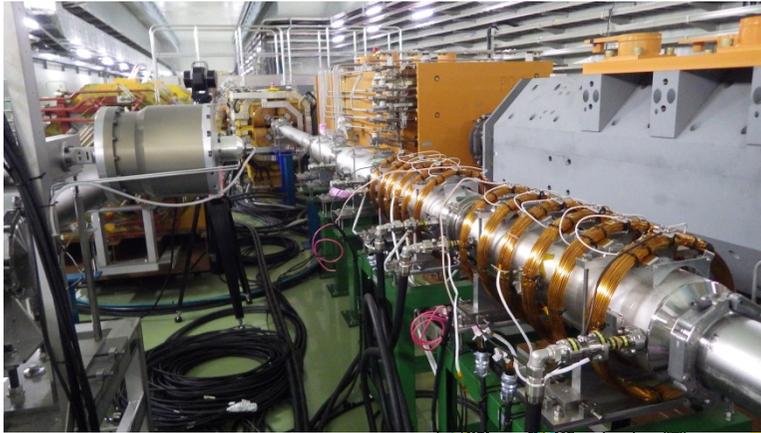


エキサイター1 H、V各1台
#15(入射部下流)

- ストリップライン型
- 電極長 1500mm
- 電極間隔 140mm
- 電源 1kW/電極

主な用途 BxB FB、Tune測定

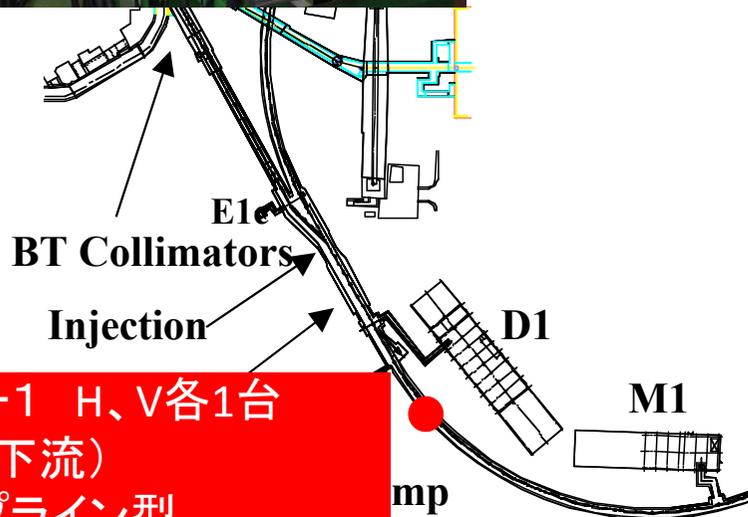
MR エキサイター



エキサイター2 H3台、V1台
#159 (FX取り出し下流)

- ストリップライン型
- 電極長 770mm
- 電極間隔 140mm
- 電源 3kW/電極

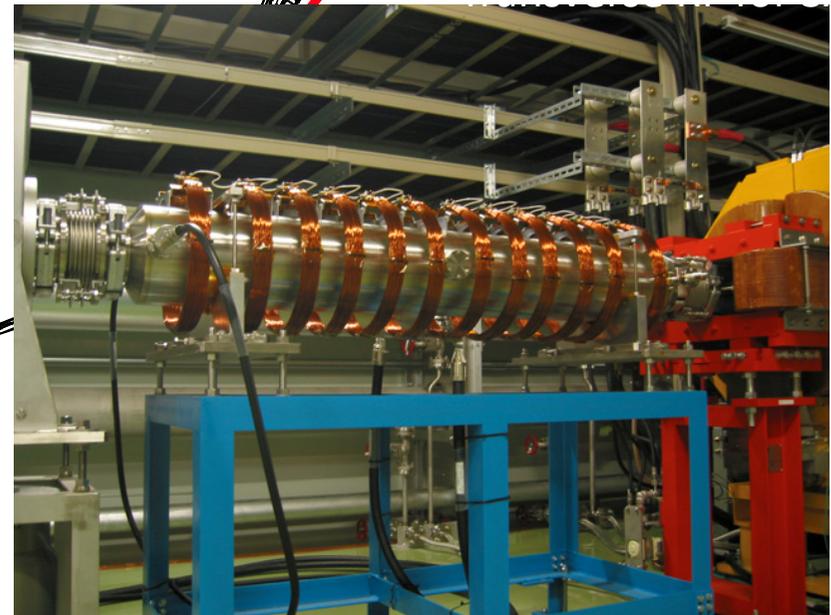
主な用途 BxB FB, Intra Bunch
FB,



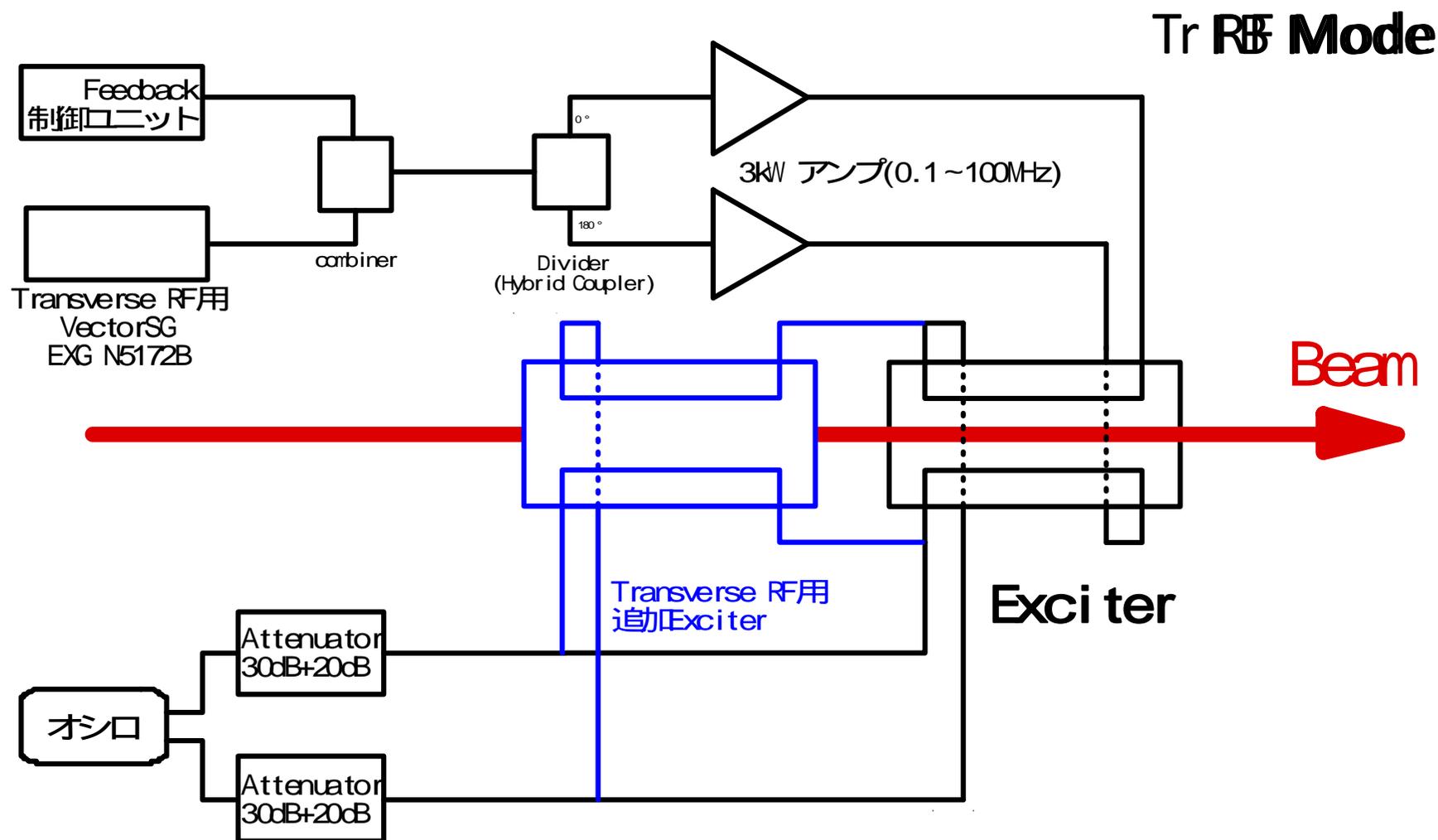
エキサイター1 H、V各1台
#15 (入射部下流)

- ストリップライン型
- 電極長 1500mm
- 電極間隔 140mm
- 電源 1kW/電極

主な用途 BxB FB、Tune測定



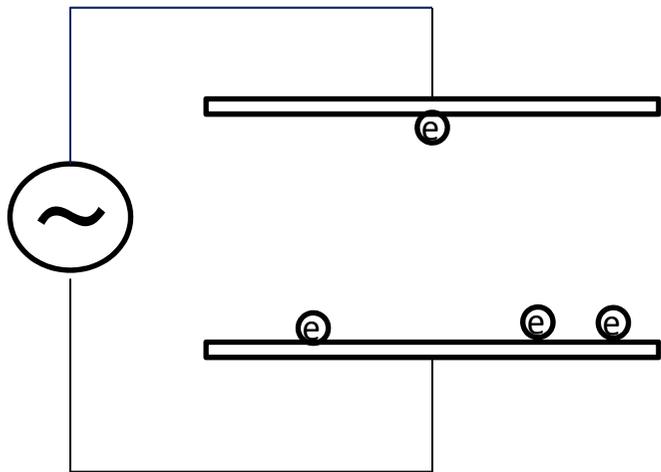
エキサイター2構成



問題点: Tr RF Modeで運転する際、マルチパクタリングが発生して真空が悪化しフルパワーでの運転が出来ない

マルチパクタリング

- 平行電極の間にRF電場を印加した場合、電子がRFに同期して電極間を行き交う現象。



加速された電子が、電極表面に衝突すると、そこから2次電子が発生する。

衝突した電子(1次電子)の数より2次電子の数が多い場合、電子数は指数的に増大する。

→ 真空悪化、放電を引き起こす可能性がある。

マルチパクタリングの条件

平行平板電極に高周波電圧を印加した場合のマルチパクタリングの条件を考える。

電子の運動方程式

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{eV_0}{md} \sin(\omega t + \phi)$$

d : 電極間距離, e : 素電荷, m : 電子の質量

$\dot{x}(0) = 0, x(0) = 0$ の条件でこの式を解くと、

$$x(t) = -\frac{eV_0}{\omega^2 md} [\sin(\omega t + \phi) - \sin(\phi)] + \frac{eV_0 \cos(\phi)}{\omega md} t$$

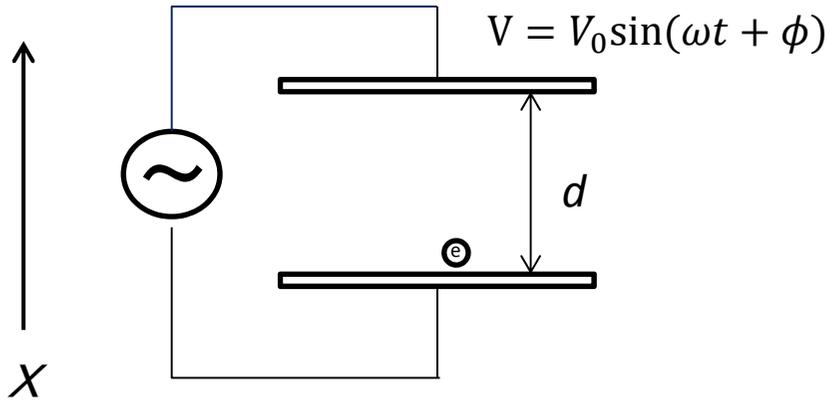
マルチパクタリングが起こる為には、 $t = (2n + 1) \frac{\pi}{\omega}$ の時に $x = d$ である必要があるので、

$$d = \frac{eV_0}{\omega^2 md} [2 \sin(\phi) + (2n + 1)\pi \cos(\phi)]$$

($n = 0, \pi/2 \leq \phi < \pi$)

$n=0$ の場合、

$$0.267 \leq \frac{eV_0}{\omega^2 md^2} \leq 0.5$$



マルチパクタリング対策

1. マルチパクタリングのRF条件をずらす。
2. 発生する2次電子の数を減らす。

対策1 コイルを巻く（従来）

- ビームと平行な磁場を発生させてマルチパクターリングの条件を変える。

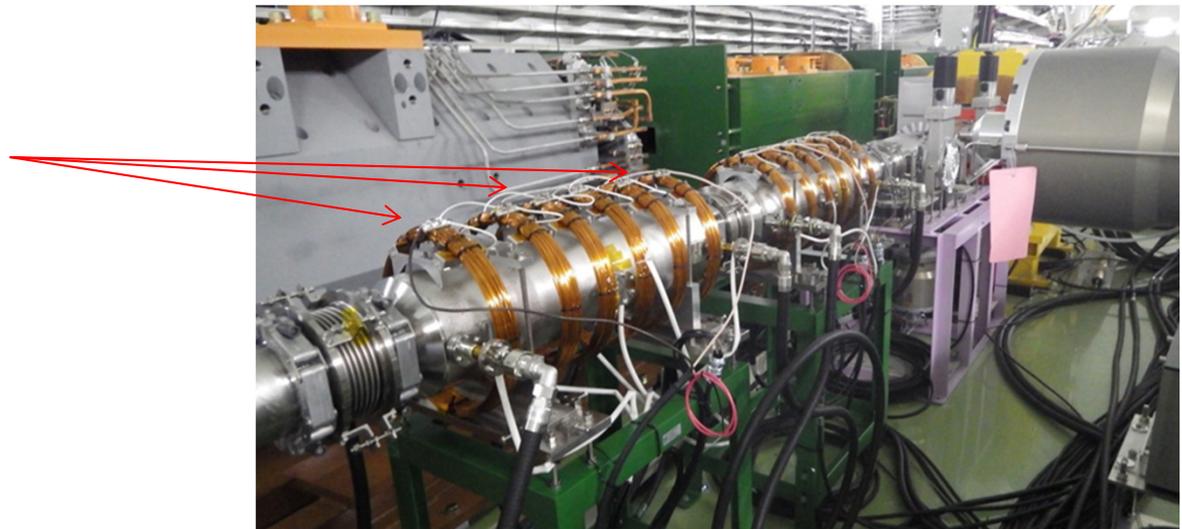
$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{eV_0}{md} \sin(\omega t + \phi) + \frac{e}{m} B_z \frac{dy}{dt}$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -\frac{e}{m} B_z \frac{dx}{dt}$$

<エキサイター2の場合>

100ターン/セット × 6セット
電流 4A

$B_z = \text{約}30\text{G}$



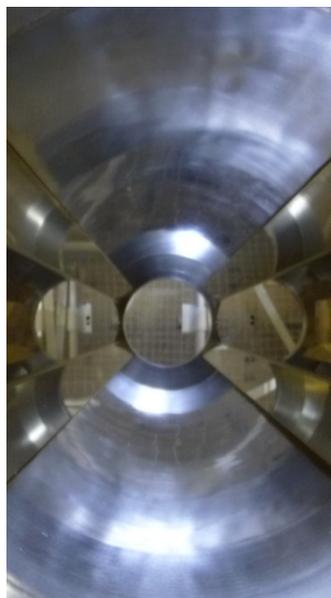
運転中コイルの電源を維持しなくてはならないので、
トラブルの要因となりうる。

対策2 二次電子放出を抑制

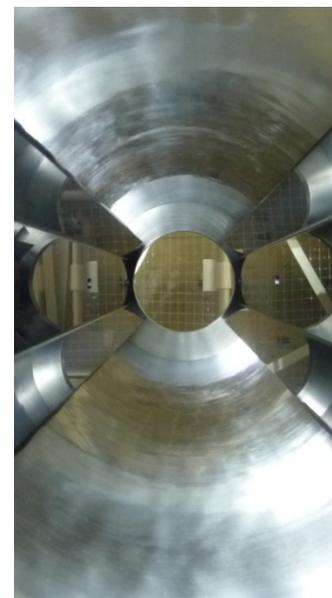
- マルチパクタリングが発生しても、それが継続しないようにする。
電極を二次電子放出の少ない素材でコーティング。



SUS316(EP)
(電解研磨のみ)



TiN
(窒化チタン)

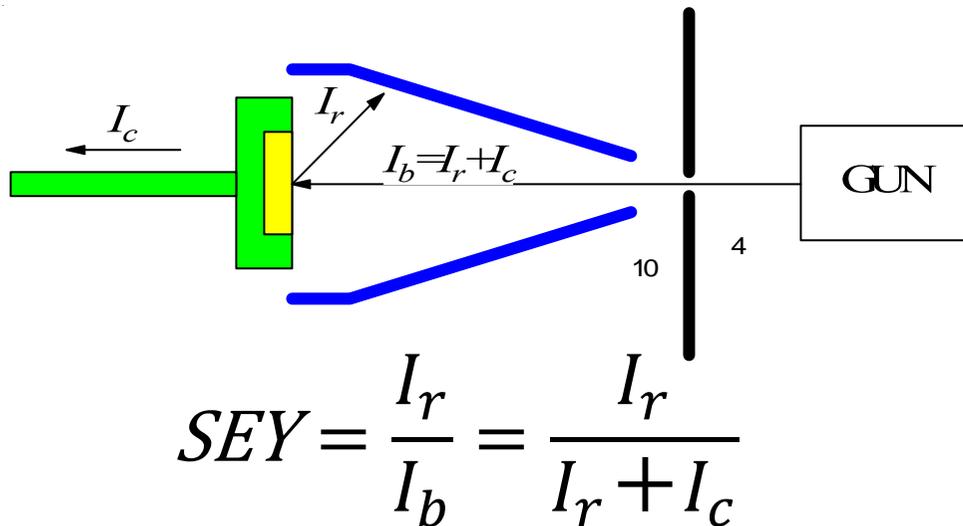


DLC
(ダイヤモンドライクカーボン)

ステンレスの素材に対して、3種類の処理をした電極を作成し、二次電子放出率とマルチパクタリングの様子を比較した。

二次電子放出率(SEY)

- 試料に電子が1つ衝突した時、いくつかの電子が放出されるのかを表す割合。



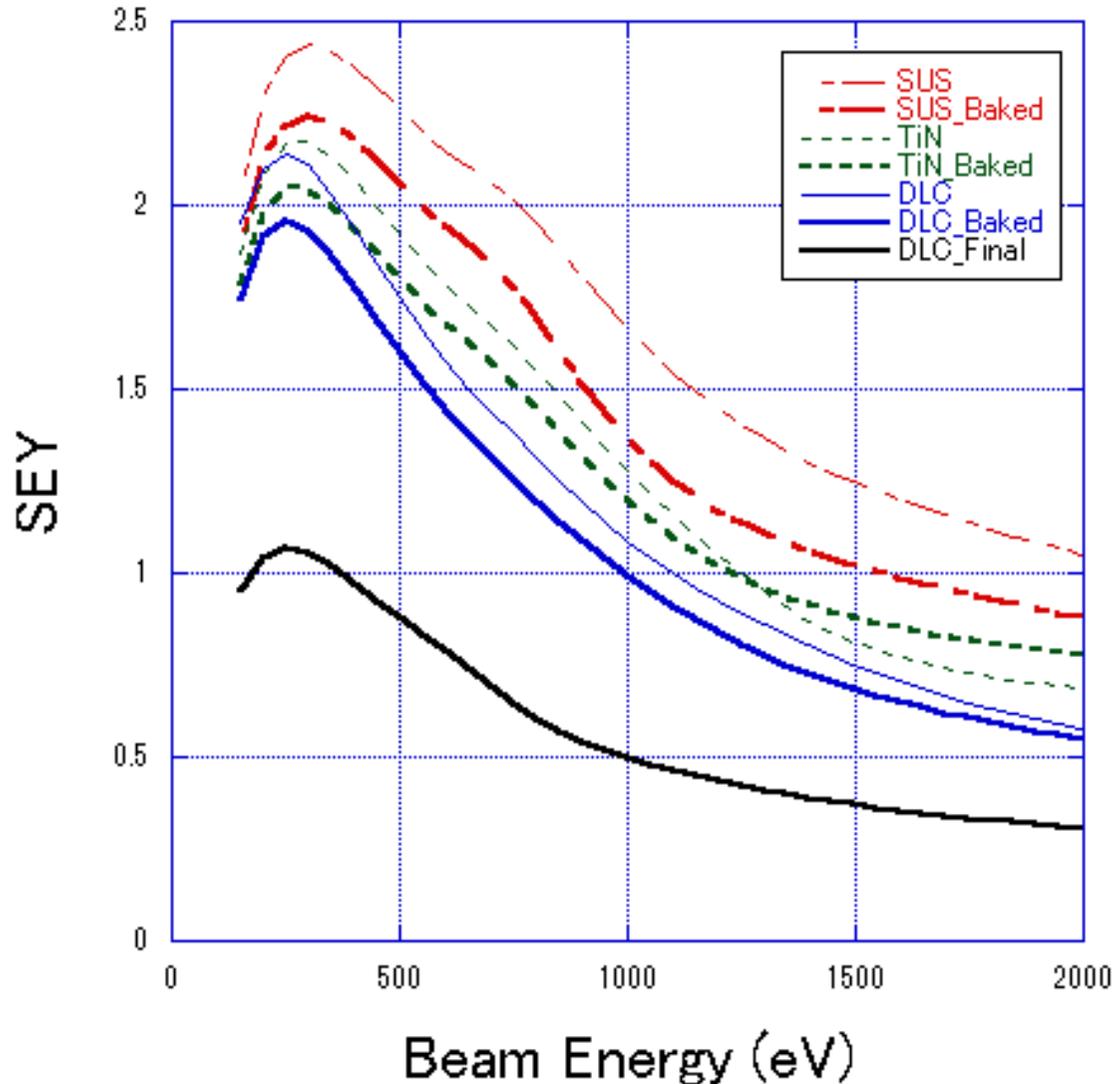
試料に電子ビームを当てて、その二次電子とコレクタ電流から求める。



SEYの測定は、久松さんの測定用ベンチをお借りして行いました。ありがとうございました。

マルチパクタリングが持続しない為にはSEY<1が一つの目安

SEYの測定

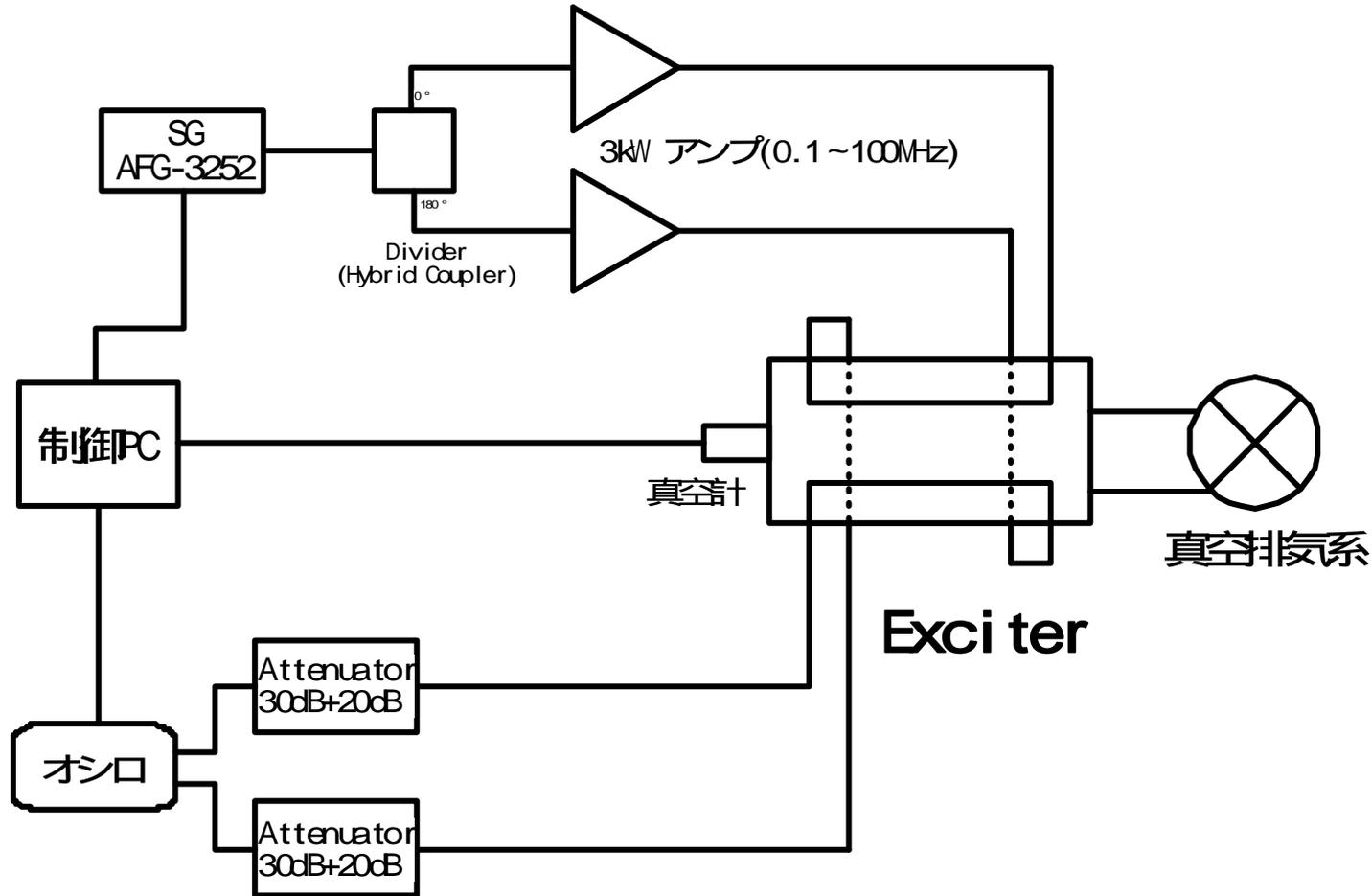


各試料に対して、取付直後と、150 24時間のベーキング後にSEYの測定を行った。

いずれの試料も300eV付近にピークがあり、ベーキングによりSEYが減少する事が分かる。また、DLCが一番良好であった。

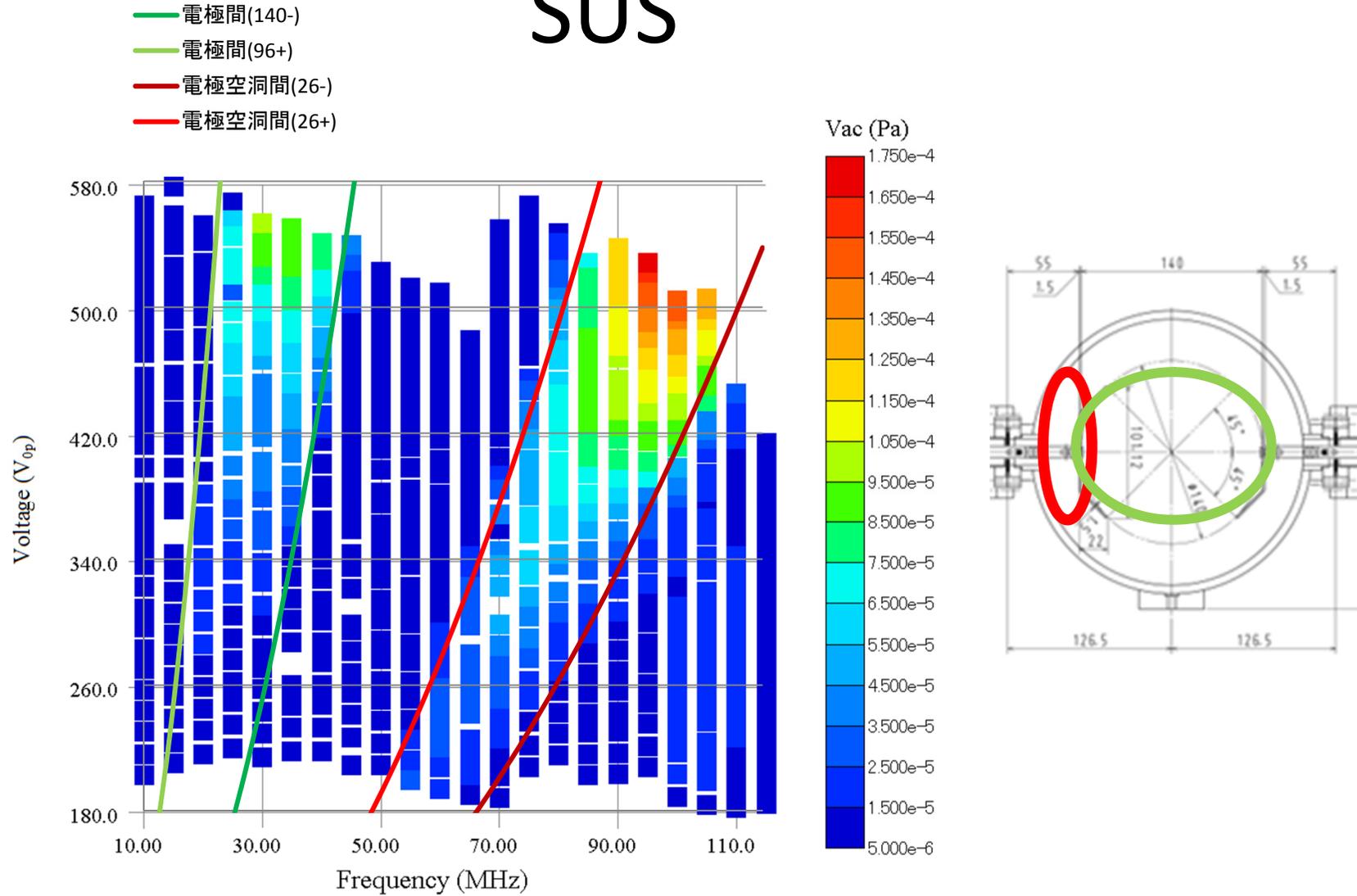
電子ビームによるエージングをする事でSEYをさらに減少させることが出来たが、全域で1を割るまでには至らなかった。

マルチパクタリングテスト

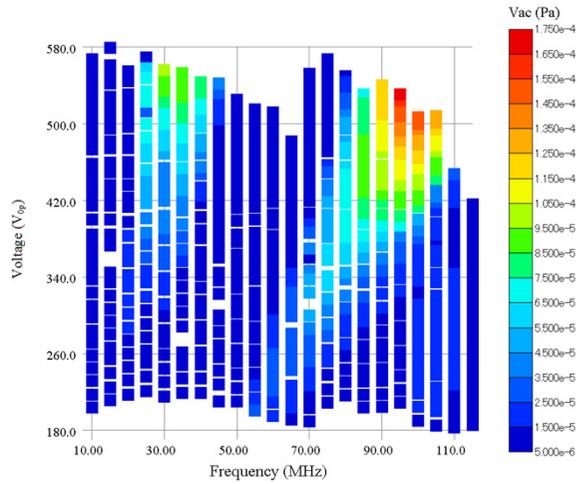


実機を用いてRFの周波数・電圧を変えながら、マルチパクタリングによる真空の変化を測定した。

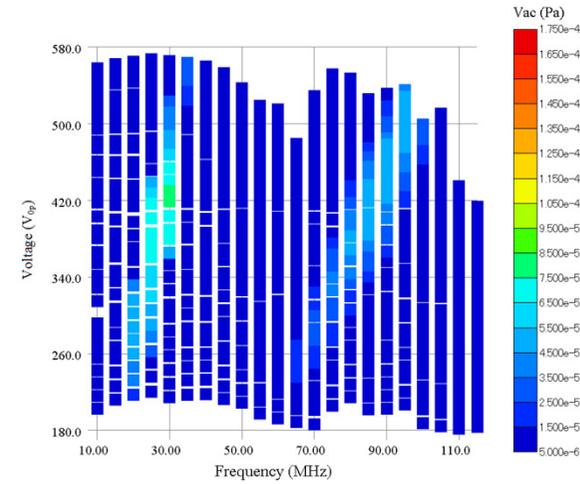
SUS



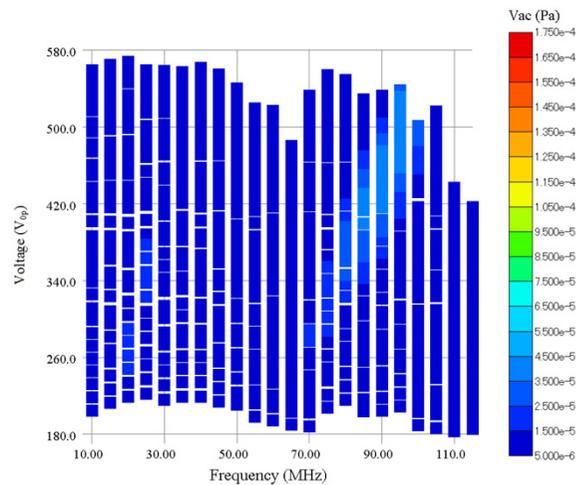
- 電極間、電極-チェンバー間でマルチパクタリングによる真空の悪化が確認される。



SUS



TiN

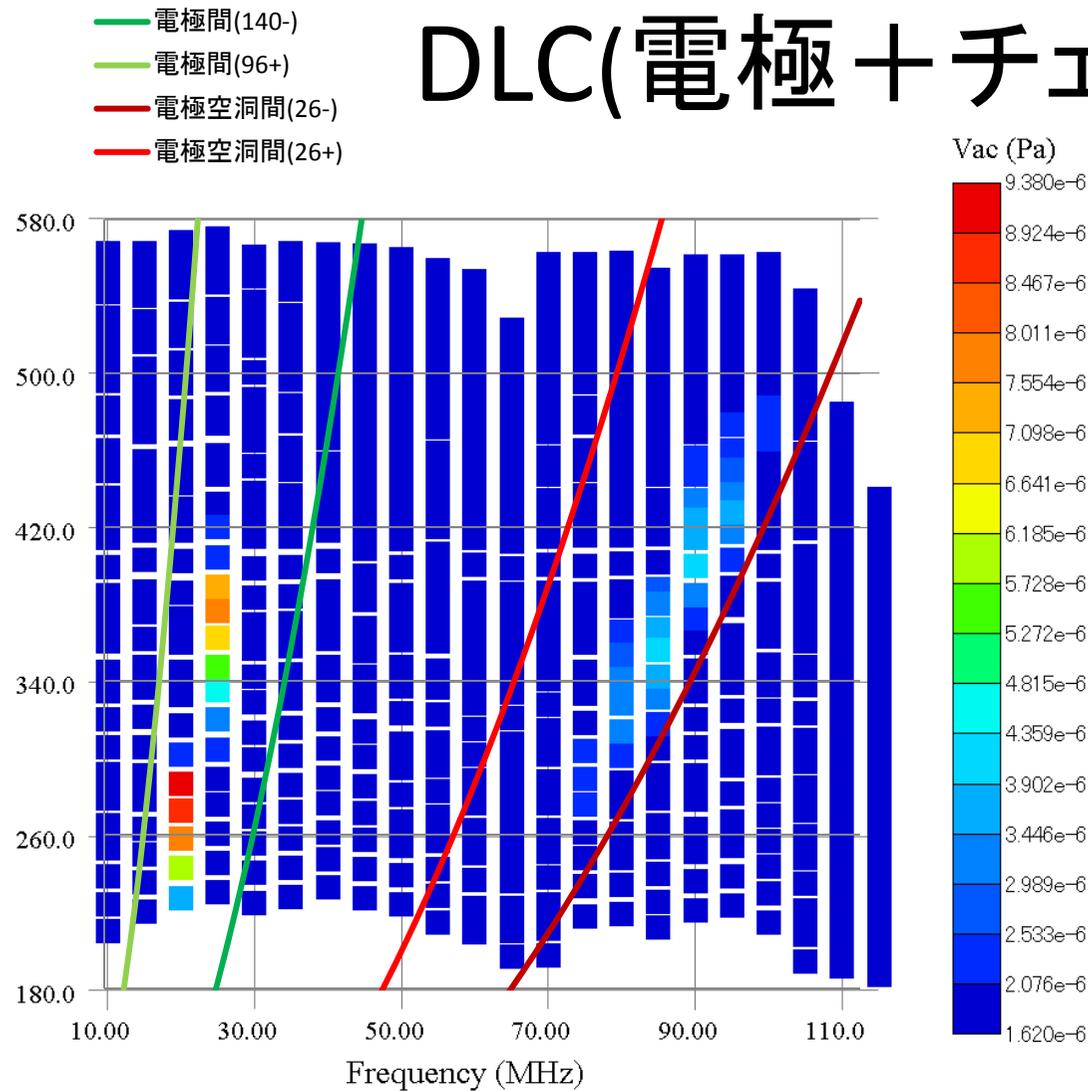


DLC

- DLCが一番よかったが、それでも電極-チェンバー(SUS)間が残ってる。

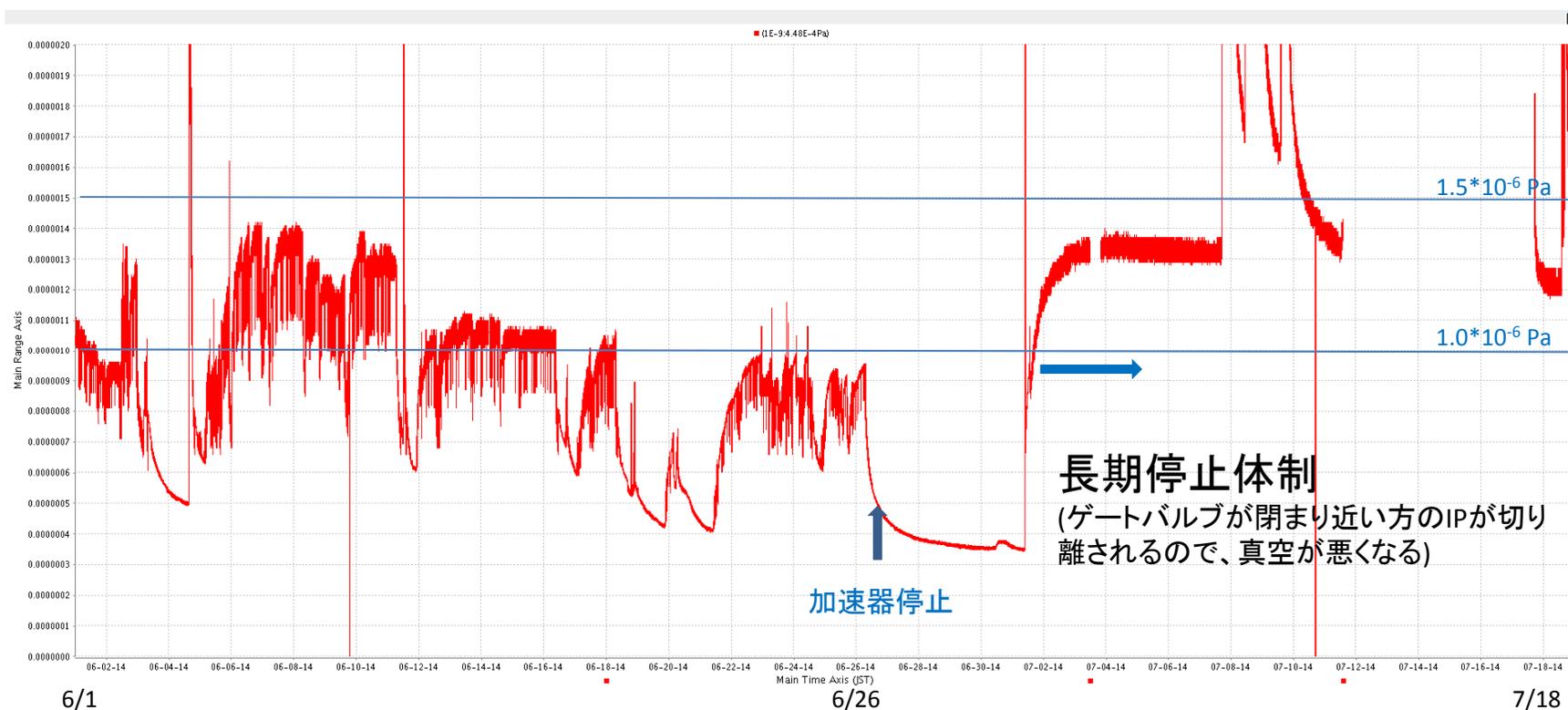
チェンバー内壁もコーティングする事にした。

DLC(電極+チェンバー)



- 真空の悪化はほとんどない。
様に見えるが拡大するとマルチパクタリングによる構造が残っているのが分かる。
とはいえ、 1×10^{-5} Pa以下でありリングに設置する事にした。

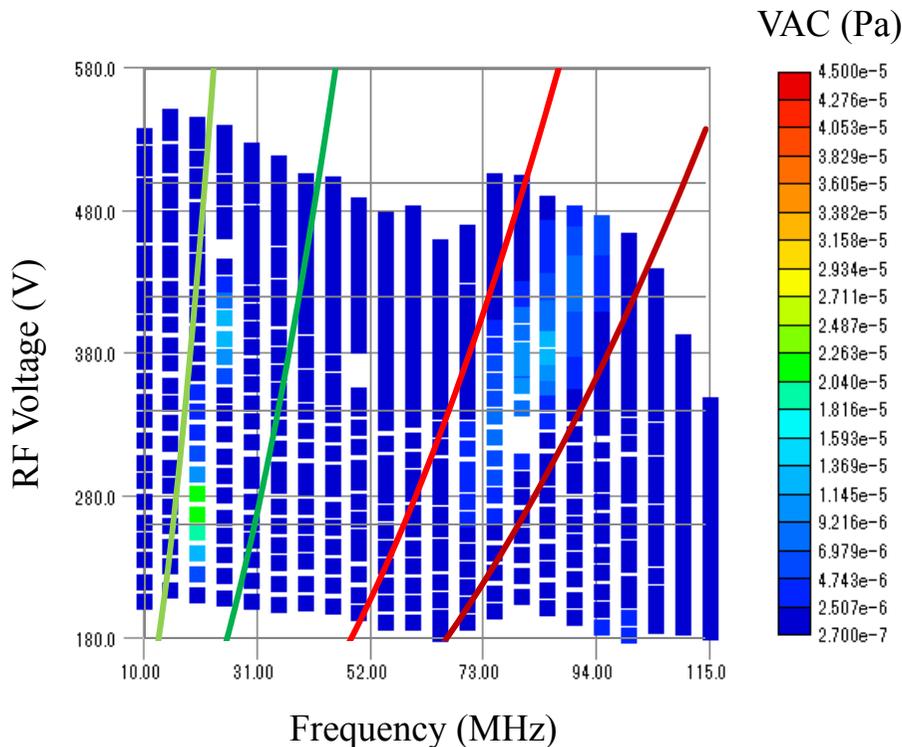
加速器運転中の真空



加速器の運転中、エキサイターはフィードバックシステムの一部として運用。直近のイオンゲージで監視した

真空は常用に問題の無いレベルだった。

コーティングに対するビームの影響

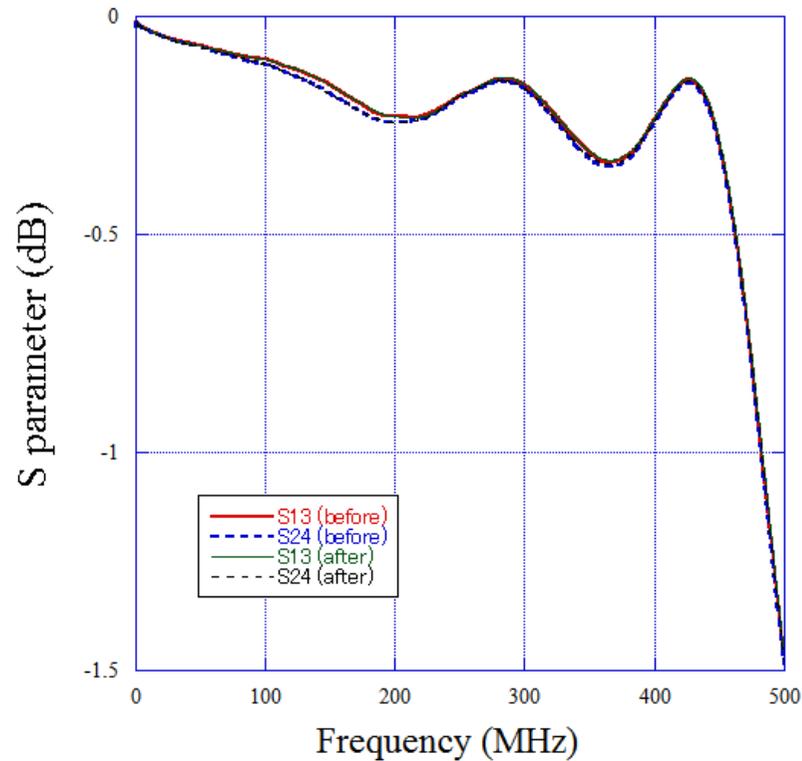


運転終了後、コーティングに対するビームの影響を調べる為、マルチパクタリングテストを行った。

但し、ゲージやポンプの位置がテストベンチと異なる為、単純には比較できない。

傾向としては同じであり、特に問題は生じてないと考えている、

電極のRF透過率



ネットワークアナライザーで測定したSパラメーターについても比較したが、

運転の前後で違いはほとんどなかった。

まとめ

- MRエキサイターでは増設にあたり、電極をDLCコーティングする事でマルチパクタリングを抑制する事にした。しかし、電極だけでは不十分であったので電極及びチェンバーの内壁もDLCでコーティングした物を作成した。
- テストベンチでの測定ではマルチパクタリングが発生しても真空は 1×10^{-5} Pa以下であり、実用上問題の無いと判断。実際にリングに設置しフィードバックシステムの一部として運用している。
- 運転終了後、ビームに晒された影響を調べるためマルチパクタリングテスト等をしたが問題は無いようだった。この測定は今後も続ける予定。