高周波入力結合器のアップグレード

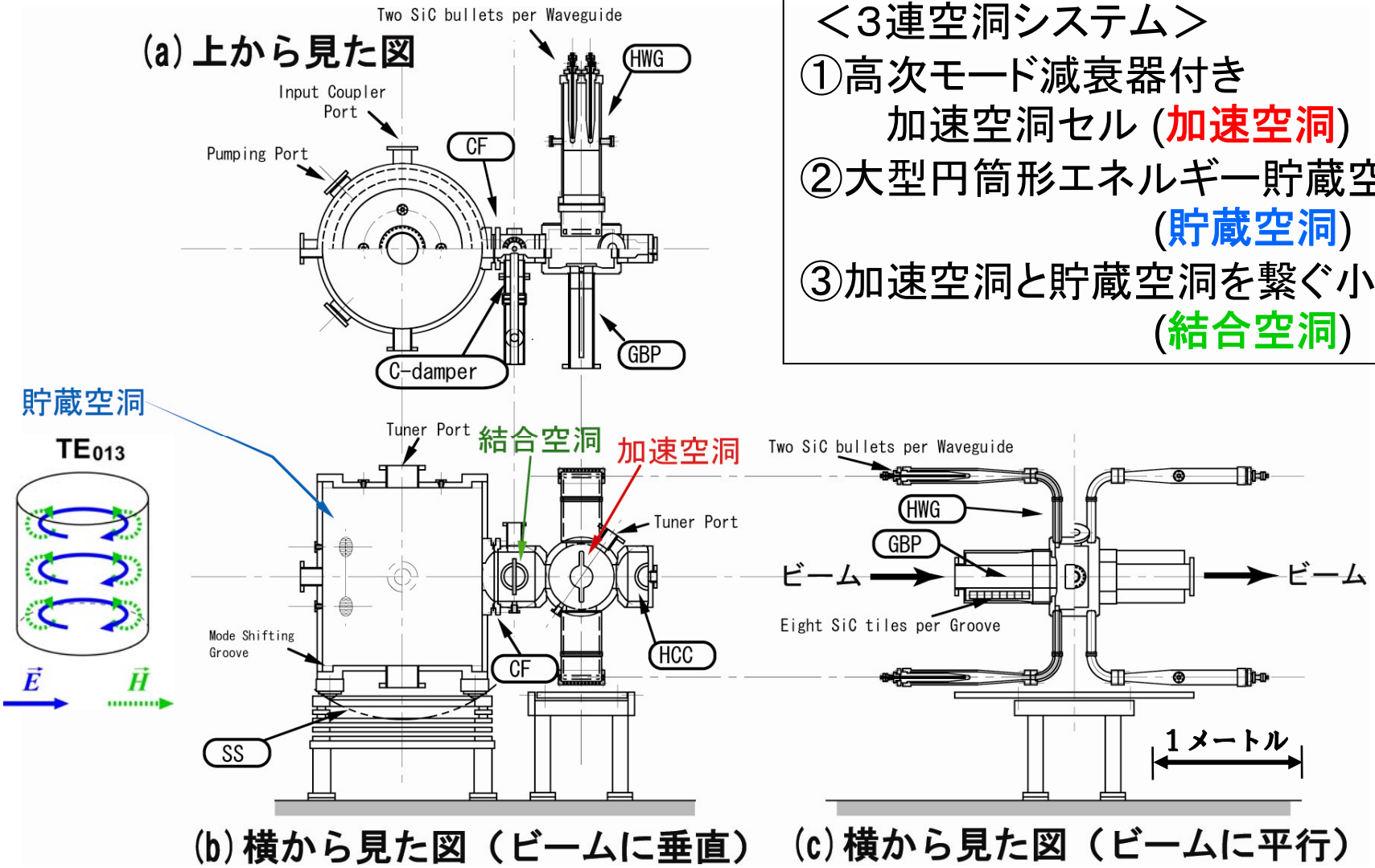
～SuperKEKBへ向けて～

阿部 哲郎

2008.08.28

常伝導高周波加速空洞「ARES」

Accelerator Resonantly-coupled with Energy Storage



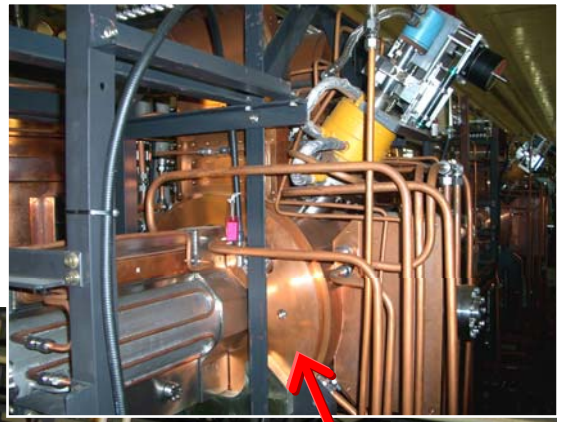
＜3連空洞システム＞

①高次モード減衰器付き
　加速空洞セル (加速空洞)

②大型円筒形エネルギー貯蔵空洞
　(貯蔵空洞)

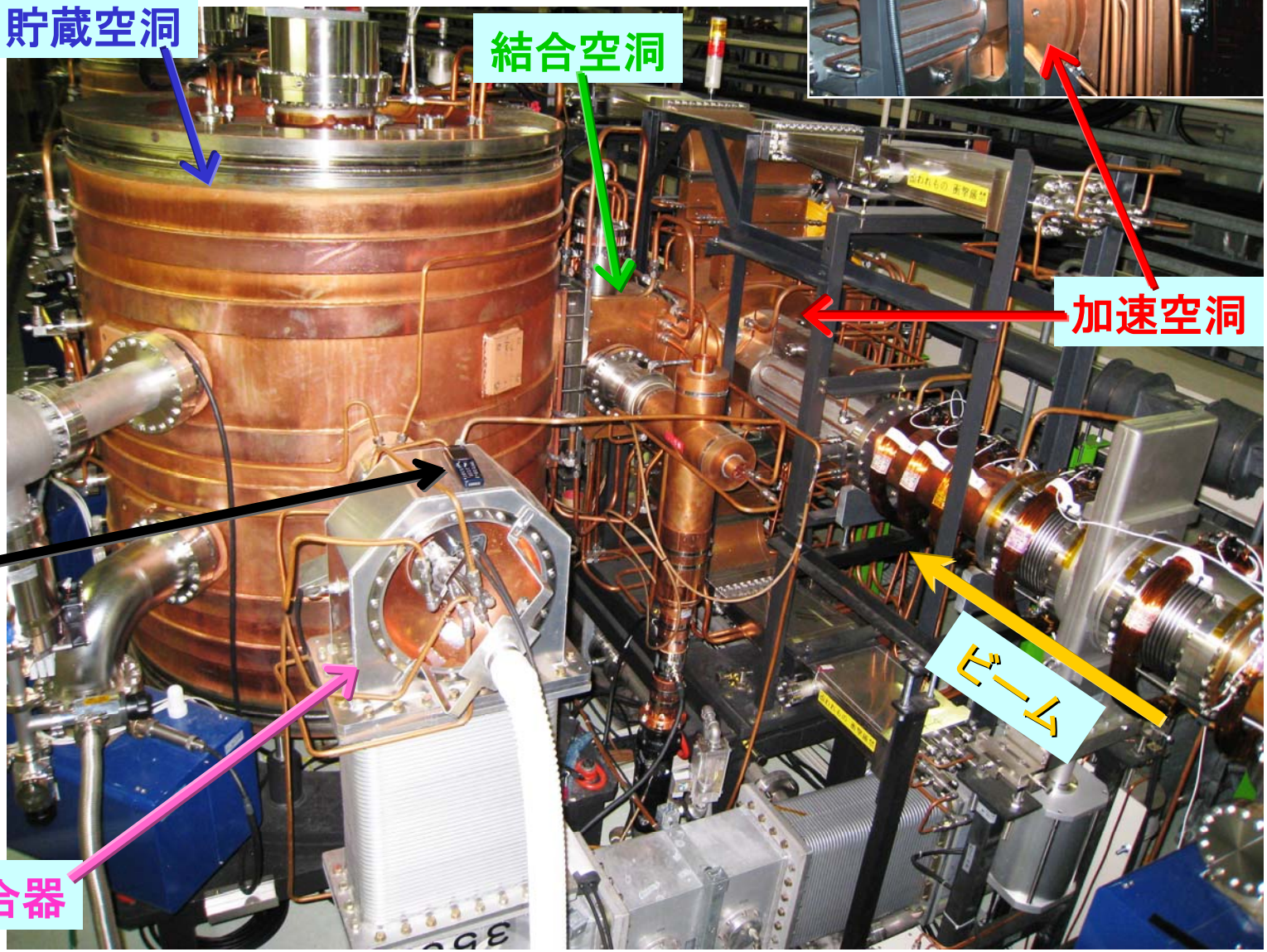
③加速空洞と貯蔵空洞を繋ぐ小型空洞
　(結合空洞)

KEKBトンネル内に設置した ARES空洞一式

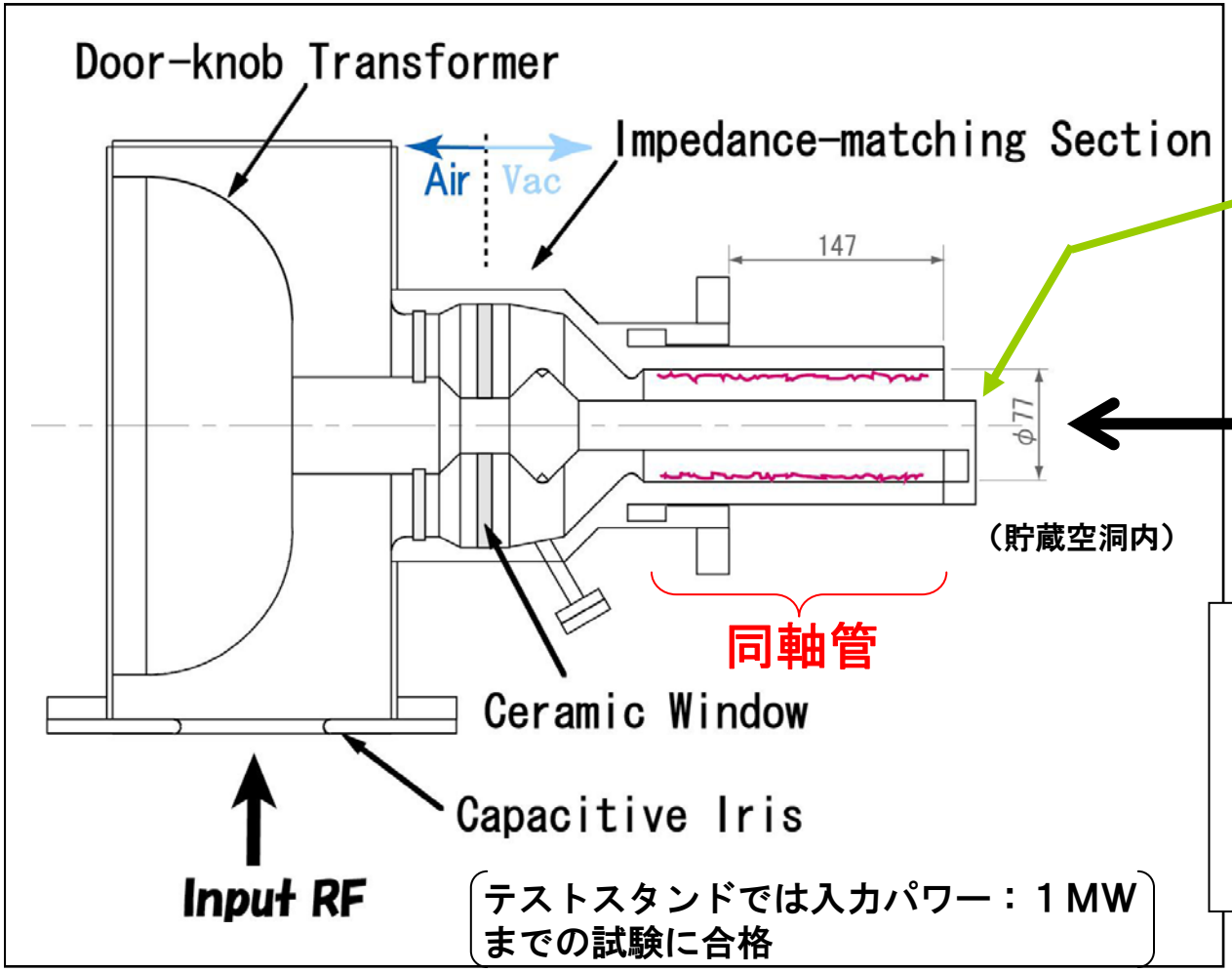


デザイン・パラメータ

Vc	0.5MV
Ra/Q0	15 Ω
Q_0	11×10^5
Pin	400kW
Pc	150kW
Us/Ua	9



ARES空洞用
高周波入力結合器



カップリング・ループ

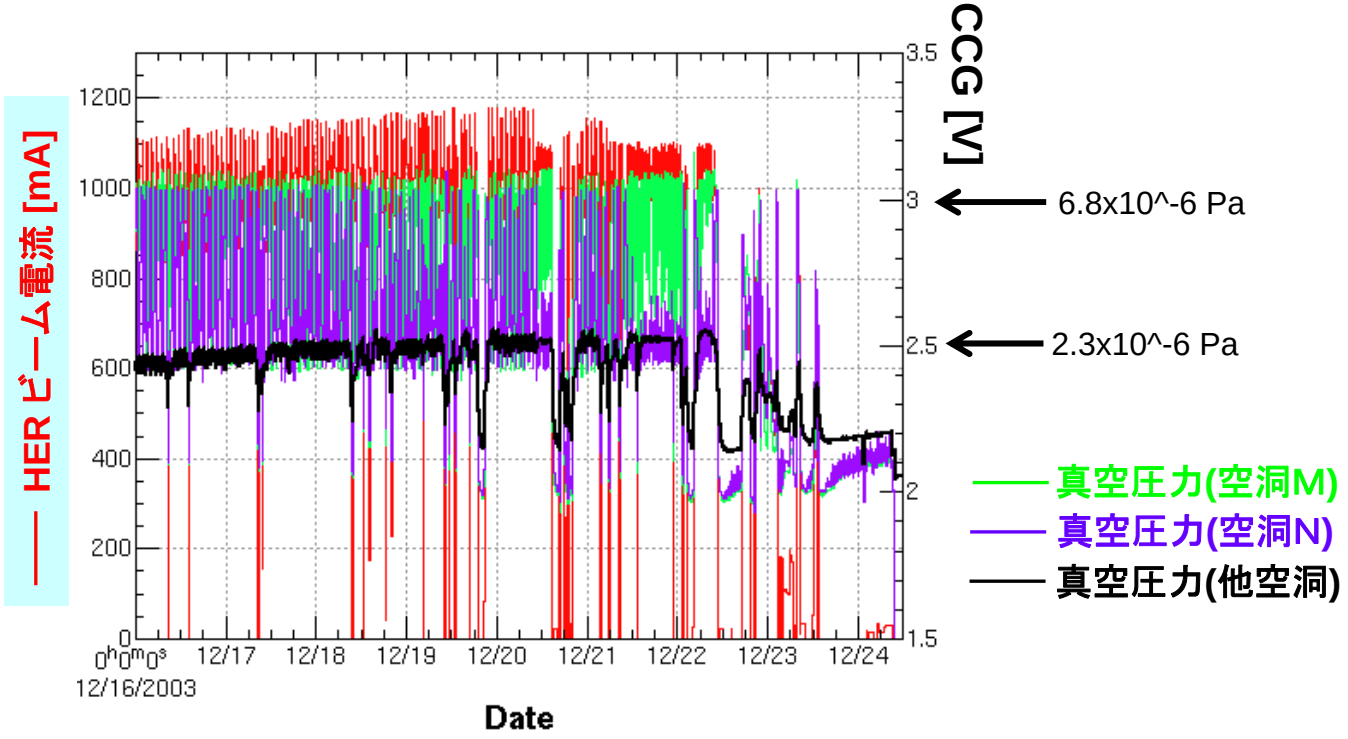
マルチパクタ放電の写真

同軸管内マルチパクタ放電

- 高周波に同期した放電。
- 通常の同軸管では不可避。
- 通常はエージングで
  コンディショニングされる。

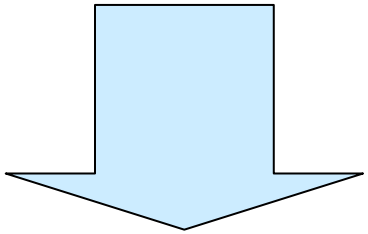
KEKB運転期間中に於ける
同軸管内マルチパクタ問題の発生
(2003年秋)

- KEKB運転中、使用していた32台のARES空洞の内の2台（HER用）で真空圧力が上昇（他の空洞の3倍くらい）
- 入力パワーand/or空洞電圧を変えても改善なし
- 明確な入力パワー依存性あり
- 同軸管内で激しい放電
- コンディショニングされる傾向なし



対処

- 同軸管、及び、カップラーポートの手入れ（2003年冬）
- 入力結合器、及び、真空ポンプの交換（2004年夏）



最も問題のあった空洞（空洞M）に関しては全く改善せず

空洞内にマルチパクタを引き起こすソースがある？！

選択肢

I. 運転は出来るので、そのまま使い続ける

→ 時間、費用、努力はかからない

→ 大きな事故につながる恐れあり

II. ARES空洞一式を交換

→ 多くの時間、費用を要する

→ また同じことが起こらない保証はない

→ 科学的には得られるものはない

III. 空洞交換せず、これを研究対象とする

→ 費用は（あまり）かからないが、時間と努力を要する

→ 解が見つかる保証はない

→ 科学的収穫の可能性

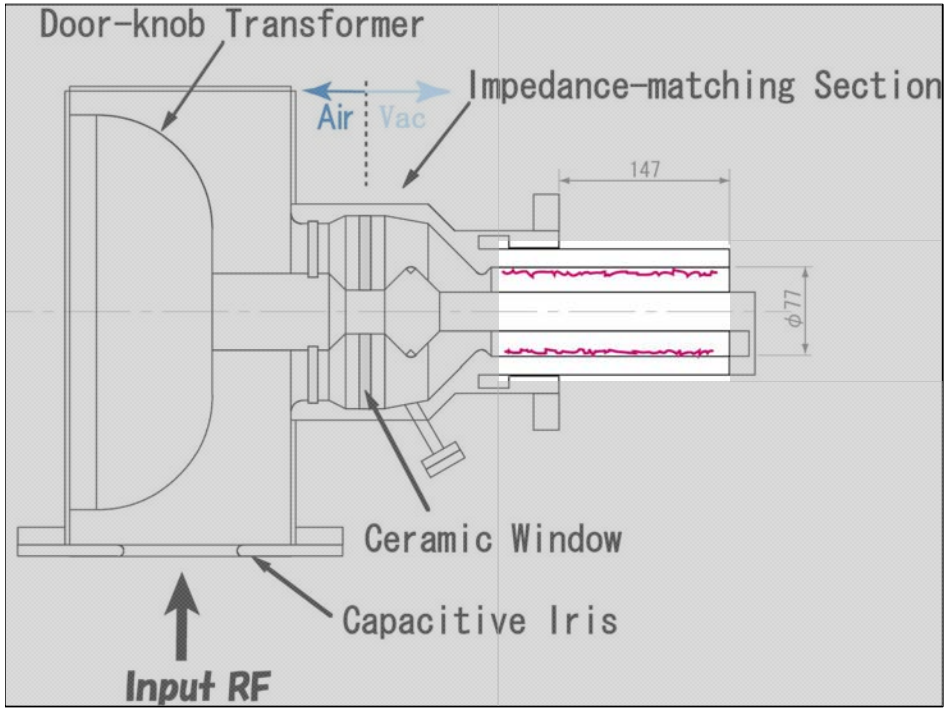
選択

I. 運転は出来るので、そのまま使い続ける
- → 時間、費用、努力はかからない
- → 大きな事故につながる恐れあり

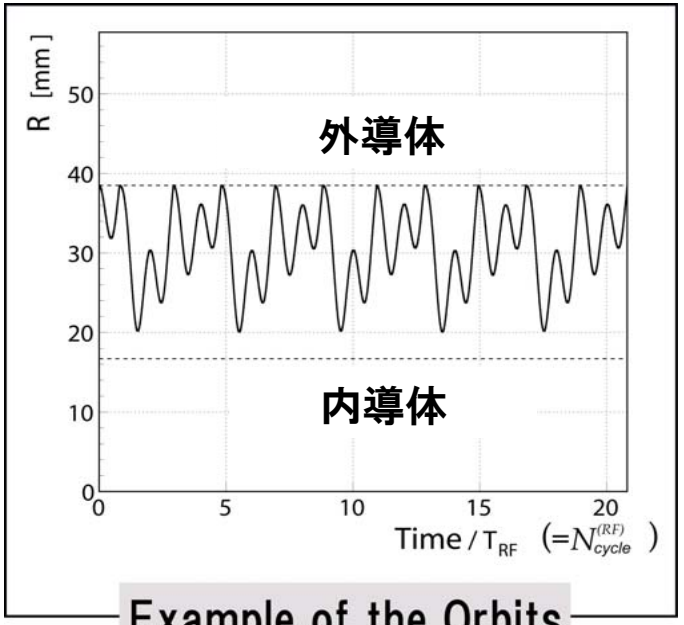
II. ARES空洞一式を交換
- → 多くの時間、費用を要する
- → また同じことが起こらない保証はない
- → 科学的には得られるものはない

→ III. 空洞交換せず、これを研究対象とする
- → 費用は（あまり）かからないが、時間と努力を要する
- → 解が見つかる保証はない
- → 科学的収穫の可能性
- → 空洞Mを「究極」のテストスタンドとして利用出来る

同軸管内マルチパクタ シミュレーションの開発



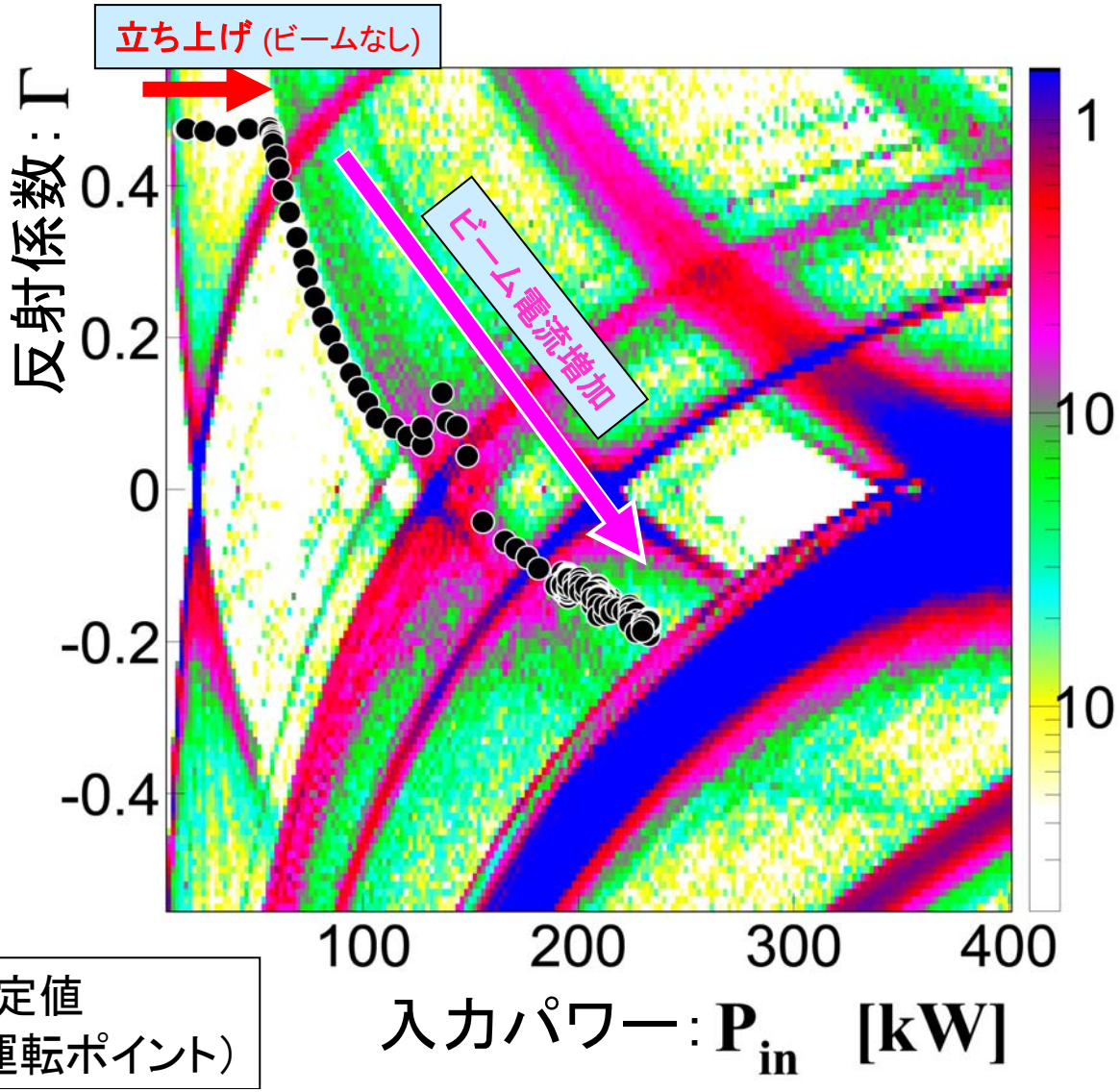
- マルチパクタ電子の運動方程式を Runge-Kutta法で解く
- コンディショニングされた無酸素銅の2次電子放出係数
- 電子が導体に衝突する回数を数え、それをマルチパクタの強度と定義



Example of the Orbits

マルチパクタ地図

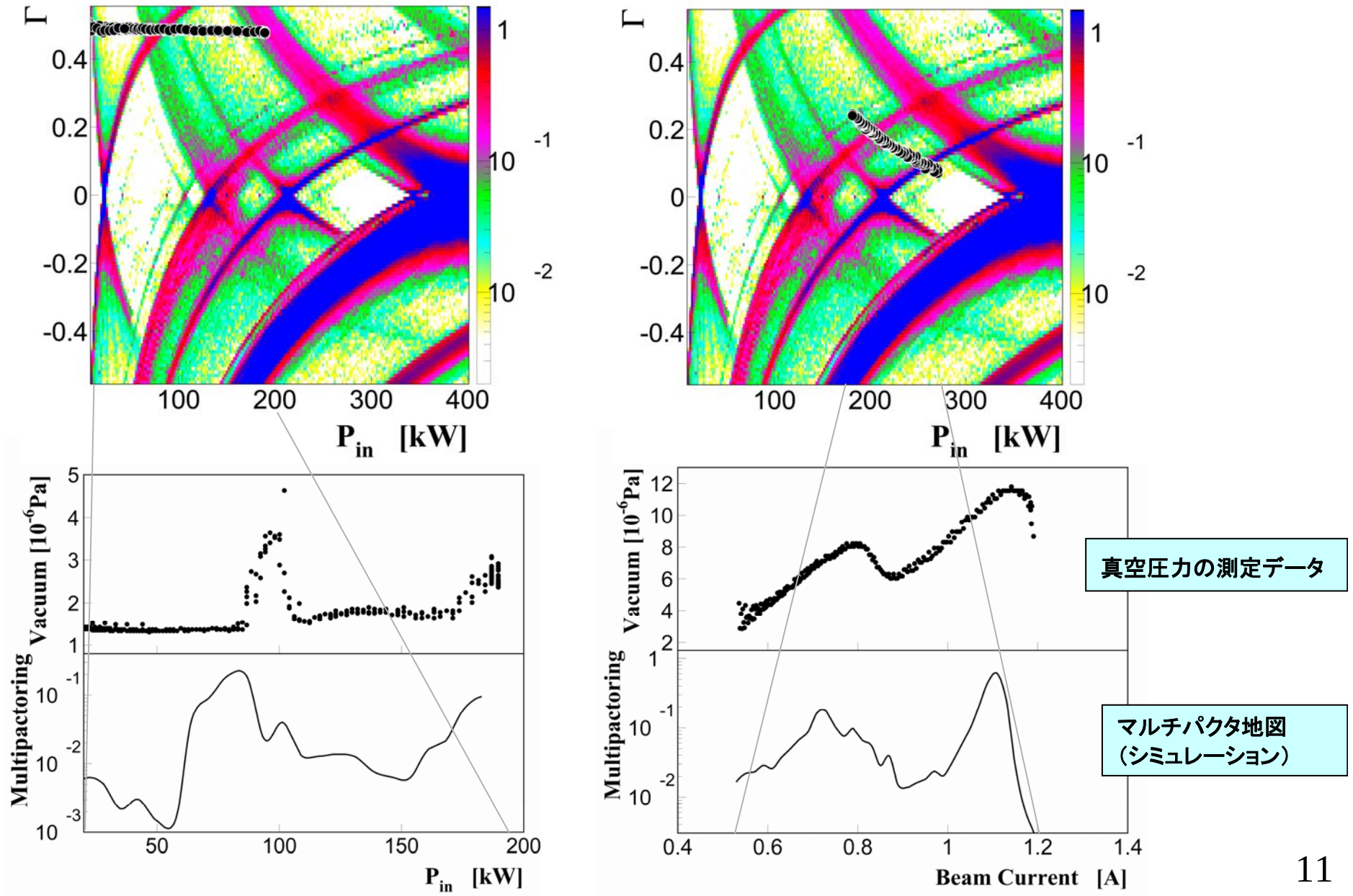
*(T. Abe et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **9**, 062002 (2006))*

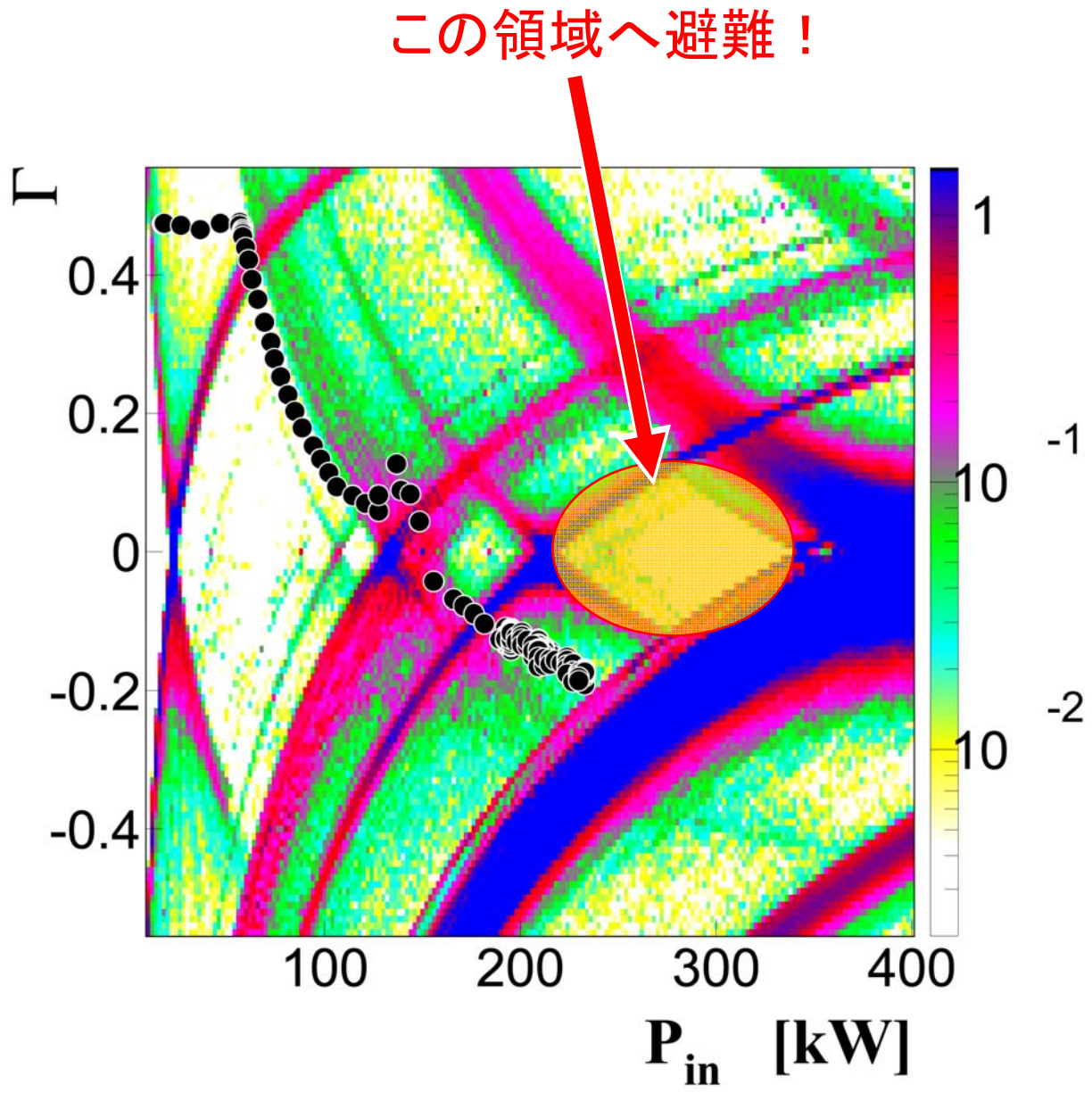


地図上の１点
⇔
入力結合器内電磁場

測定データをよく再現する！

● 測定値



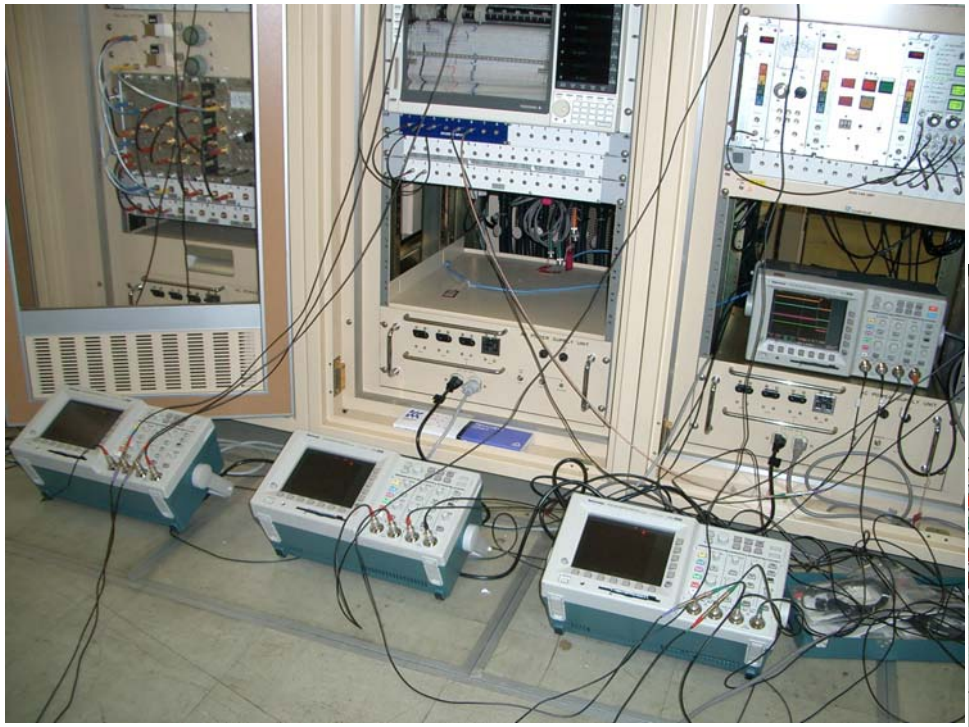


(Vc=0.54MV)

マシン・スタディ

右の条件を満たす新しい運転領域を

- *良い真空度*
- *放電なし*
- *トリップなし*



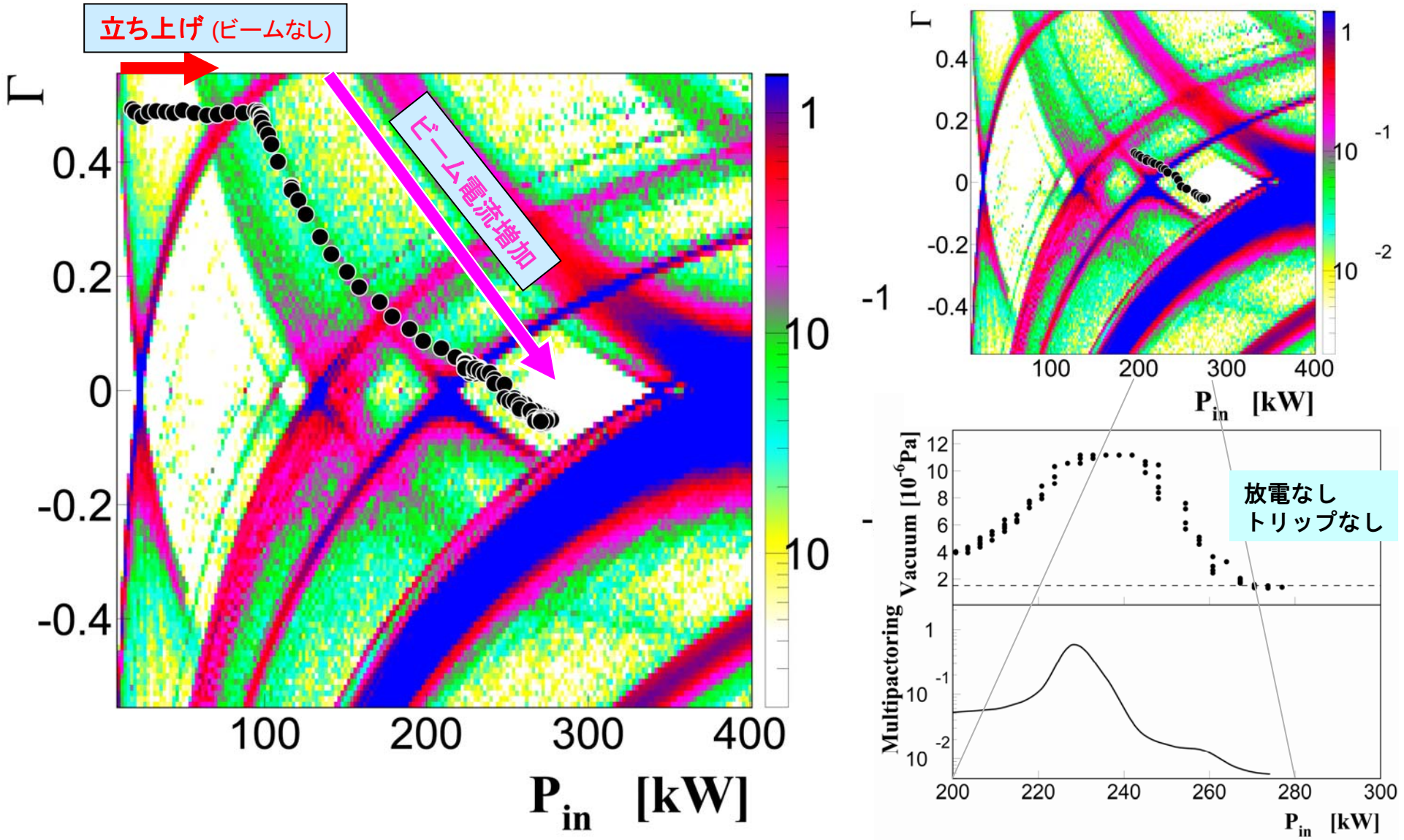
（RF制御系）

マルチパクタ地図を基に探索

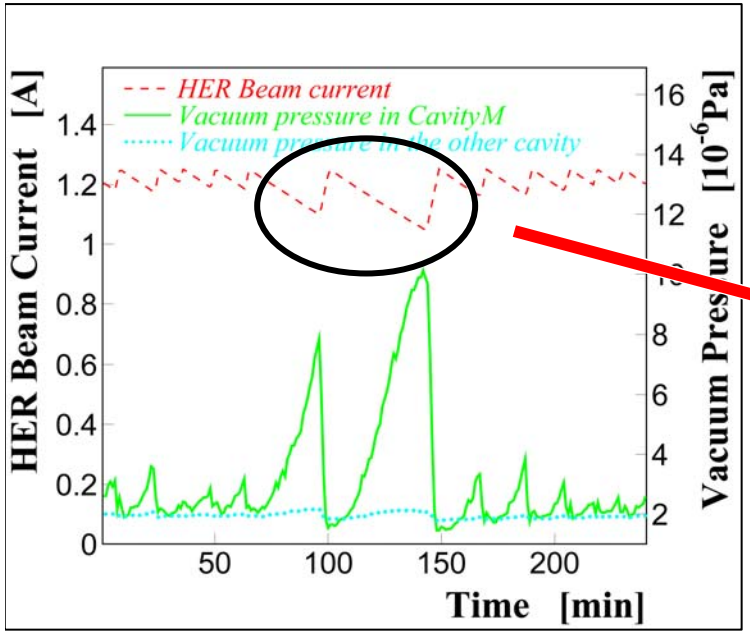
（クライストロン制御系）

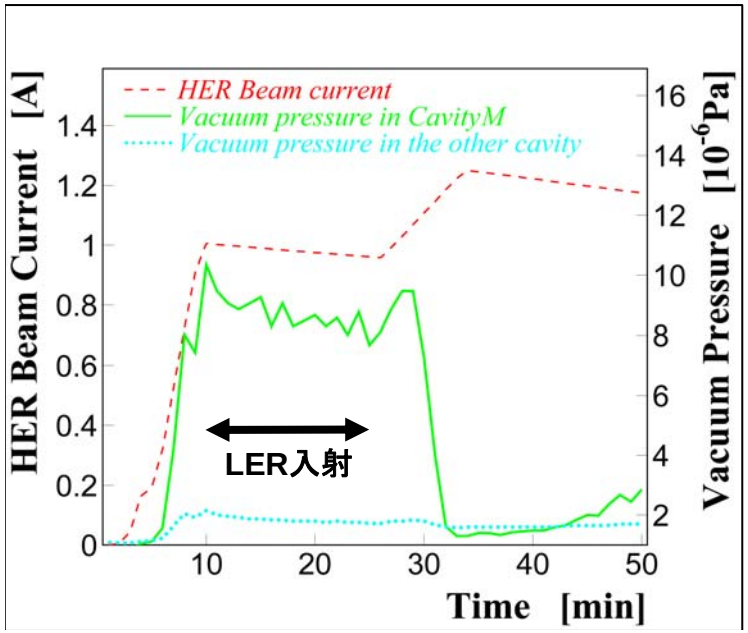
新しい運転ルートと領域

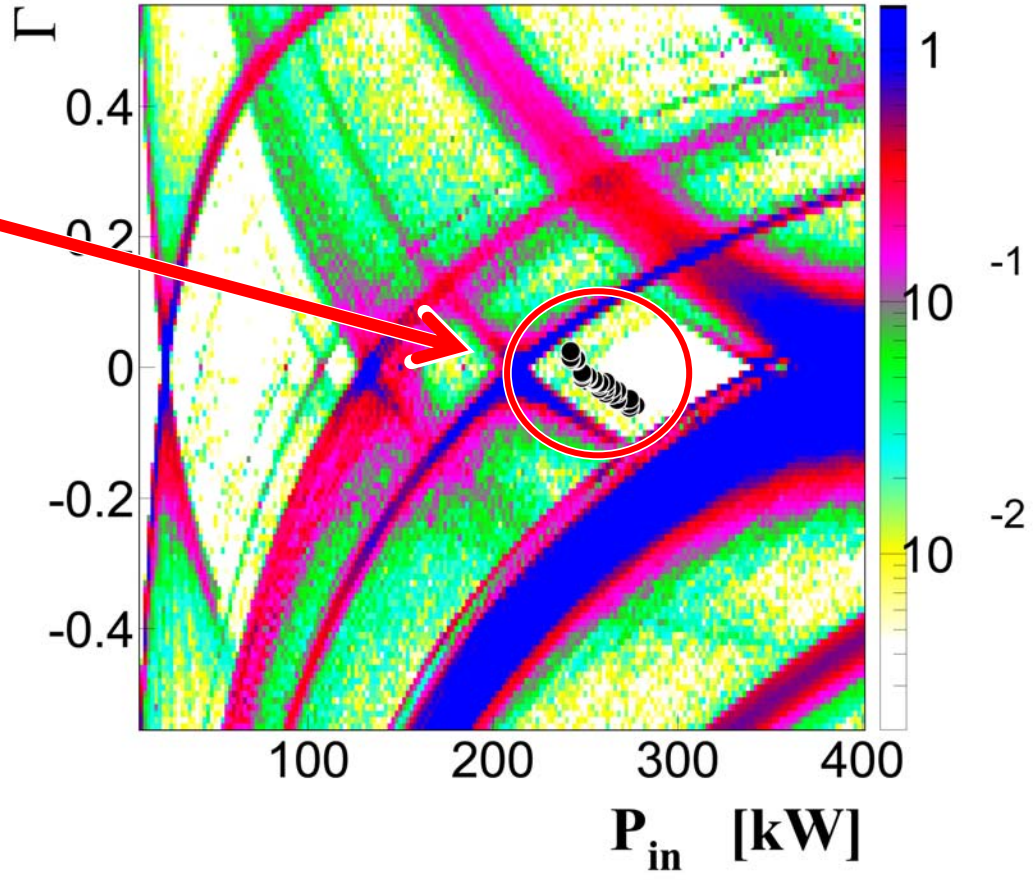
(Vc: 0.54MV→0.68MV)



しかし、、、

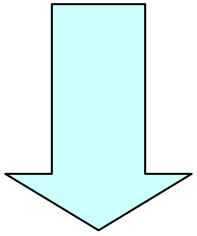






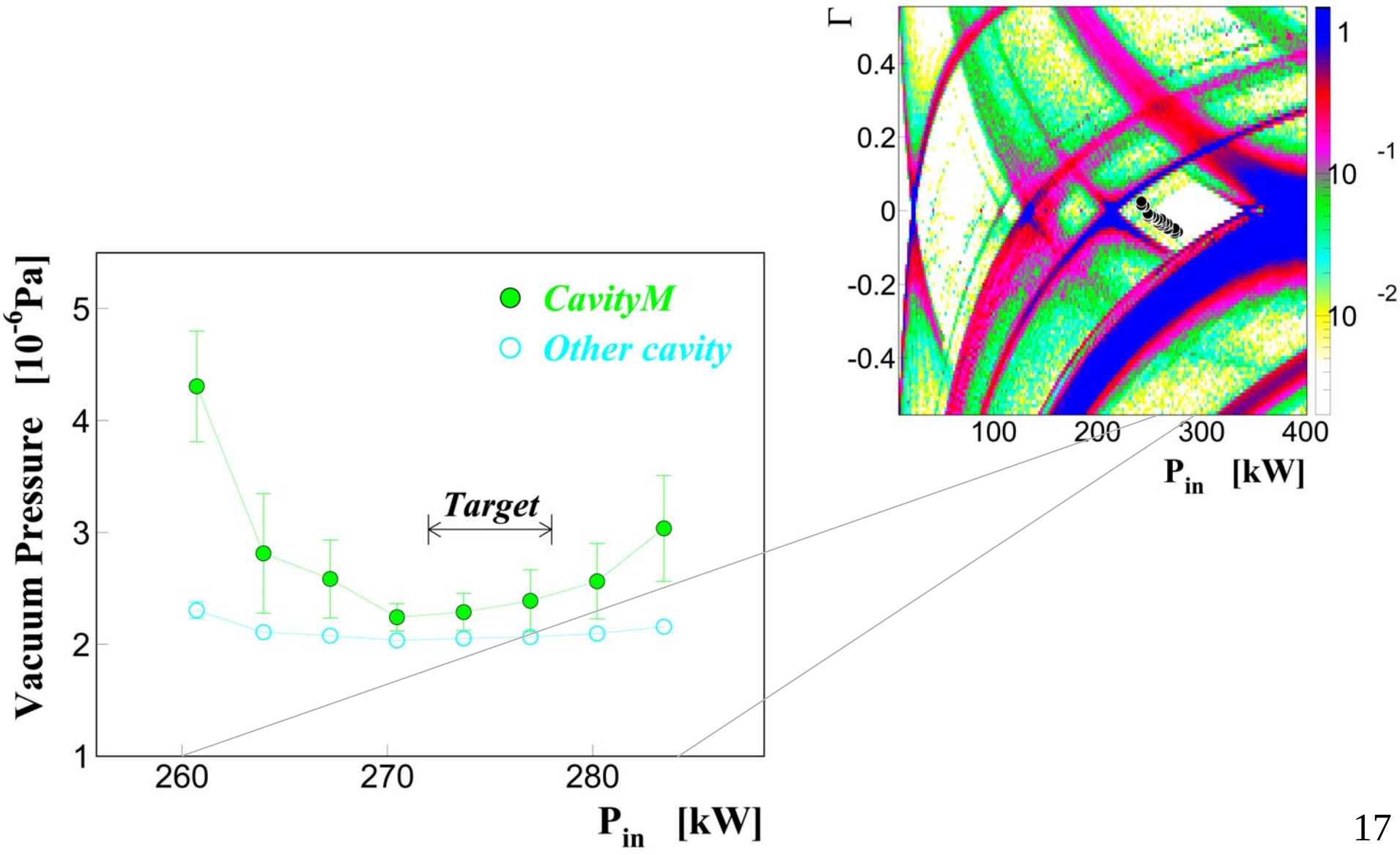
HERのビーム電流
空洞M内の真空圧力
他空洞内の真空圧力

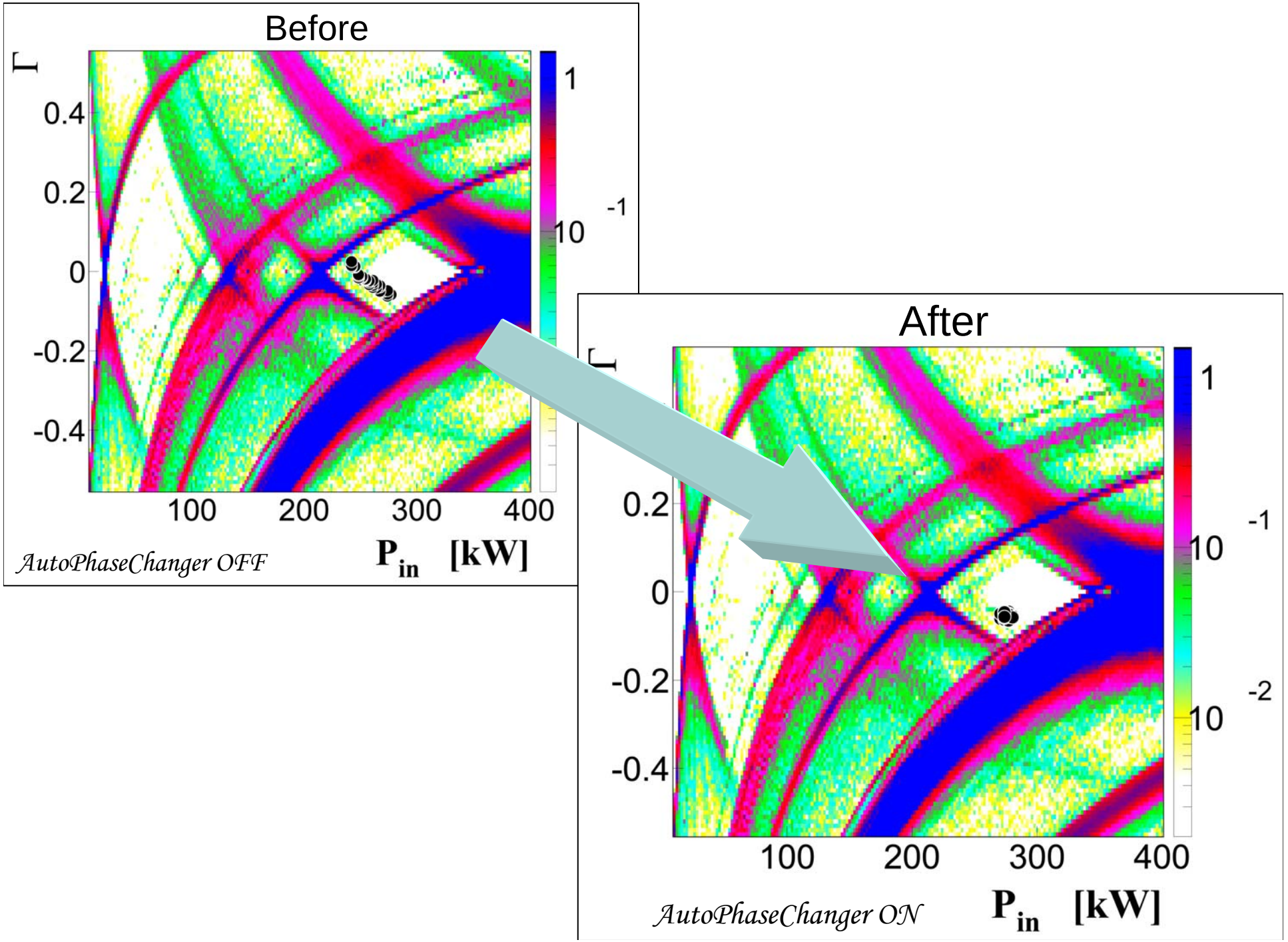
「マルチパクタ問題の起こる空洞は少数」



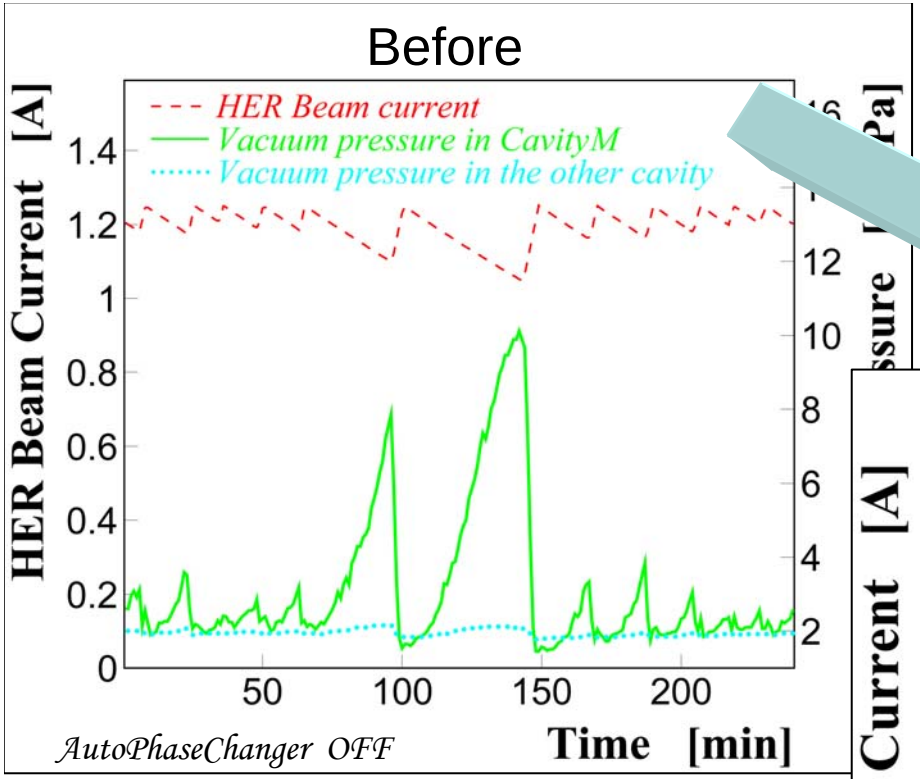
空洞位相を調整(i.e.ビーム負荷の調整)して、運転ポイントが安全領域に留まるよう、空洞への入力パワーを自動的にフィードバックする

フィードバックのターゲット領域の決定

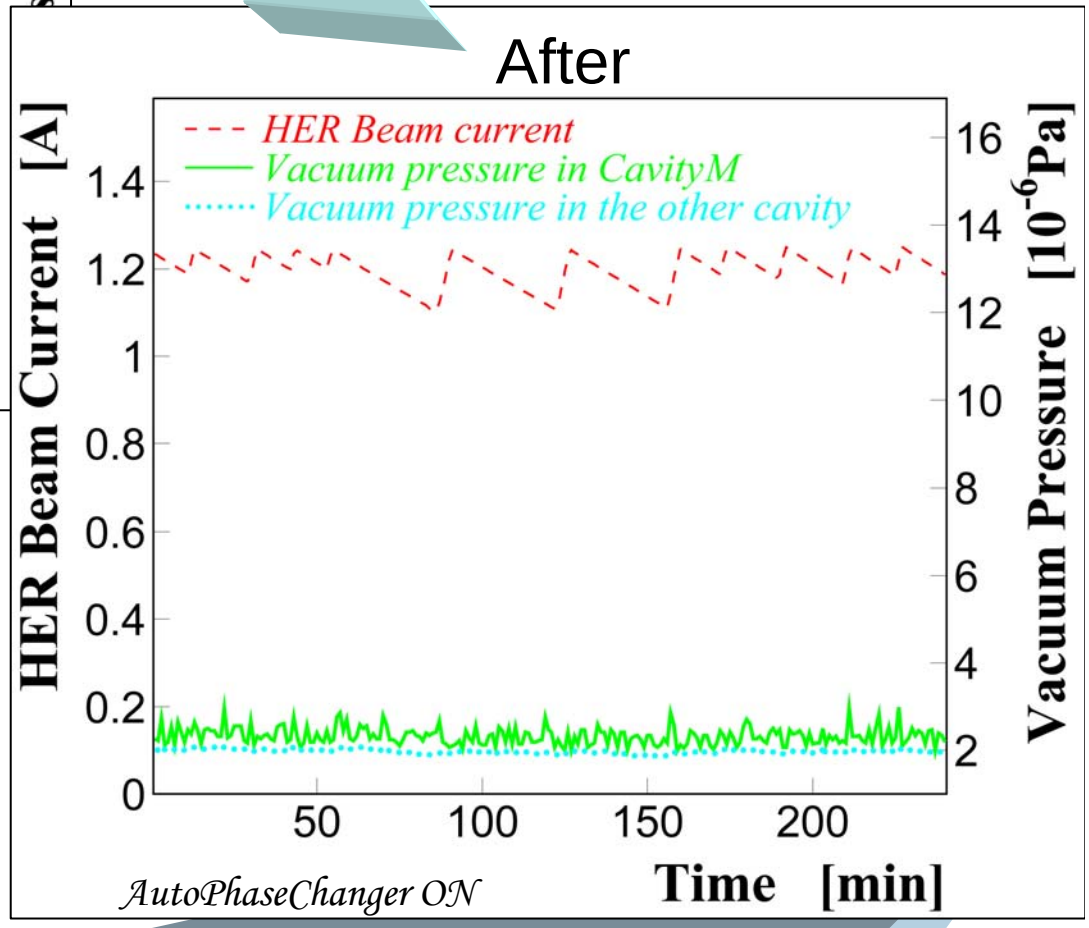



Before
Γ
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
100
200
300
400
1
10
-1
AutoPhaseChanger OFF
P in [kW]
After
Γ
0.2
0
-0.2
-0.4
100
200
300
400
1
10
-1
10
-2
AutoPhaseChanger ON
P in [kW]

Before



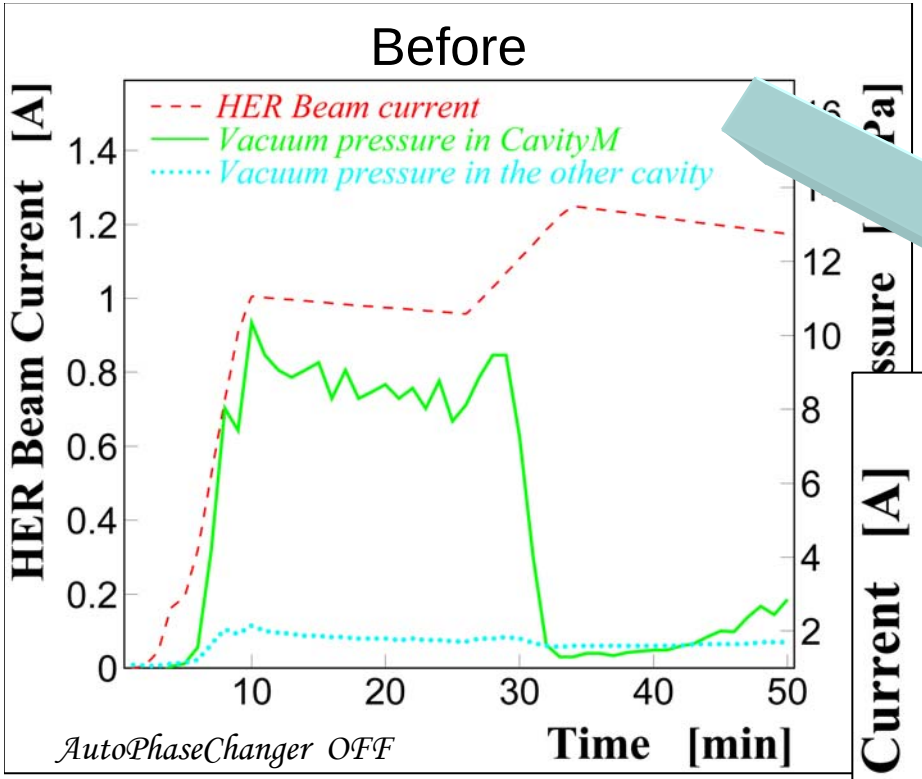
After



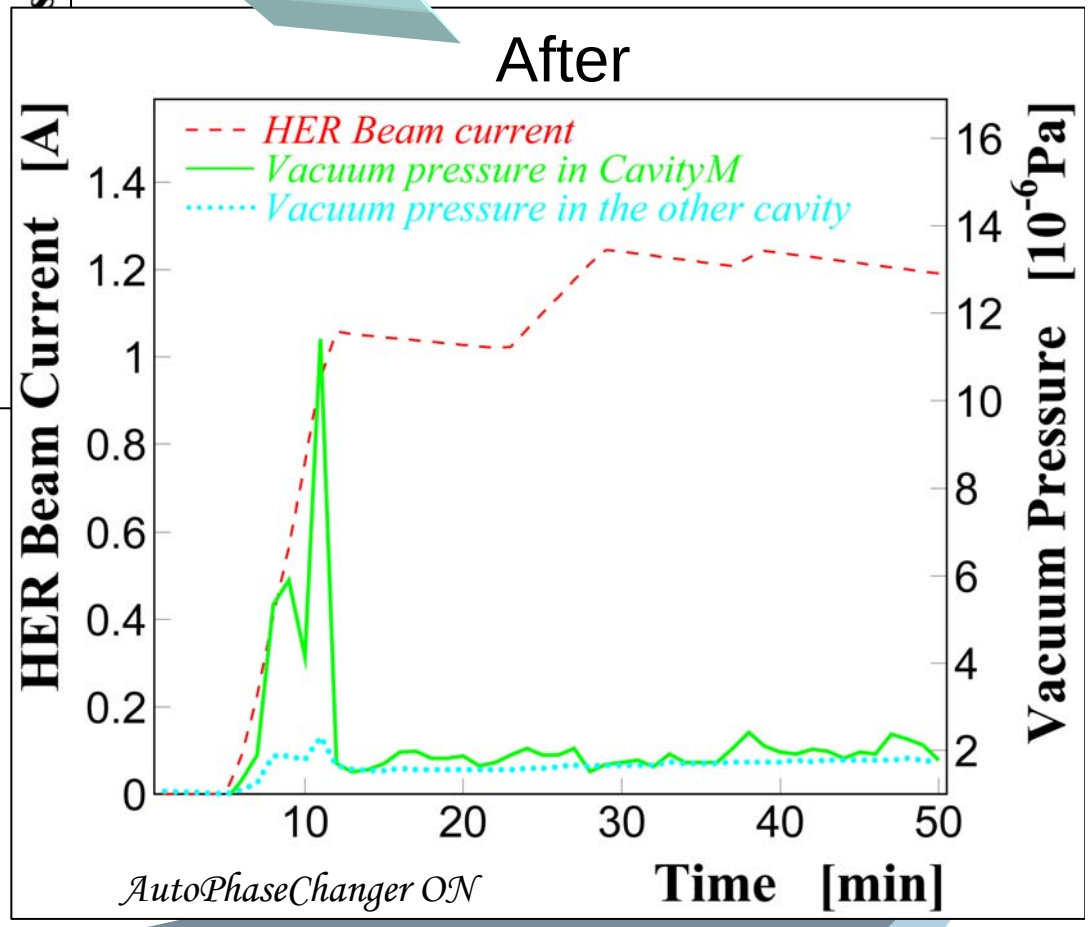
HERのビーム電流
空洞M内の真空圧力
他空洞内の真空圧力

ビーム電流依存性が消えた！

Before



After



HERのビーム電流
空洞M内の真空圧力
他空洞内の真空圧力

マルチパクタ・バンドの素早い通過！

Ⅲ. 空洞交換せず、これを研究対象とする

→費用は（あまり）かからないが、時間と努力を要する

→解が見つかる保証はない

半年で解を見つける

→科学的収穫の可能性

マルチパクタ地図、及び、その運転への応用

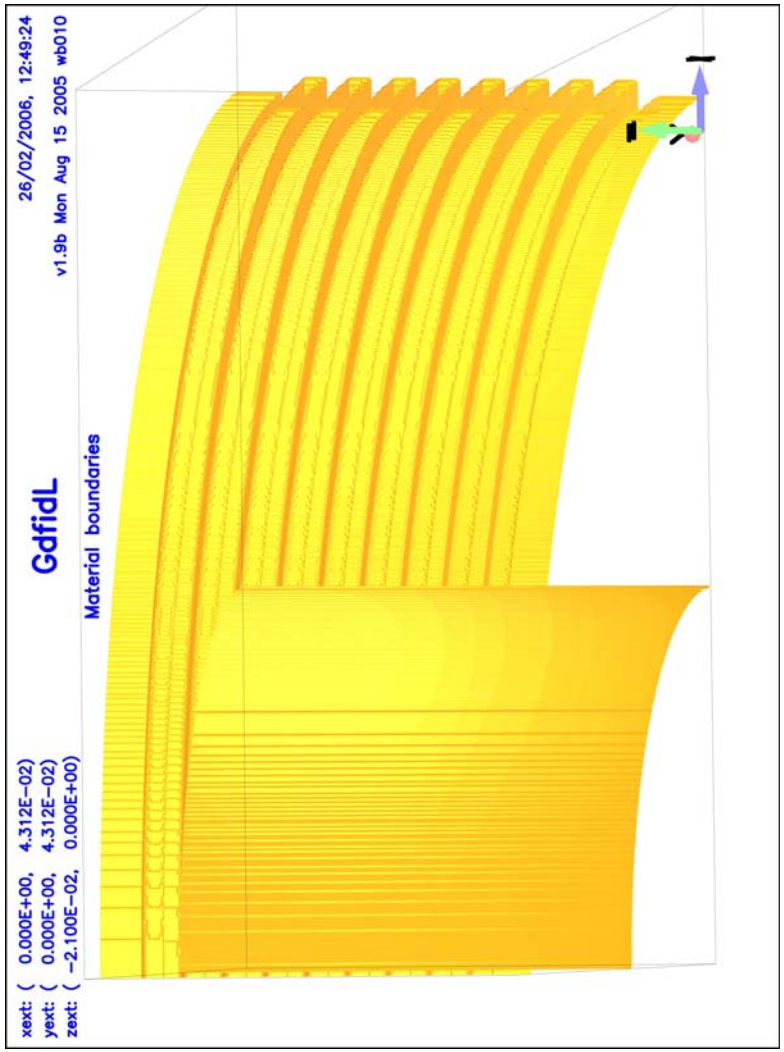
→この空洞を「究極」のテストスタンドとして使える

空洞Mに取り付けてもマルチパクタ問題の起こらない

入力結合器を開発する

微細溝構造によるマルチパクタの抑制

～マルチパクタの完全克服に向けて～



以下をクリアする必要：

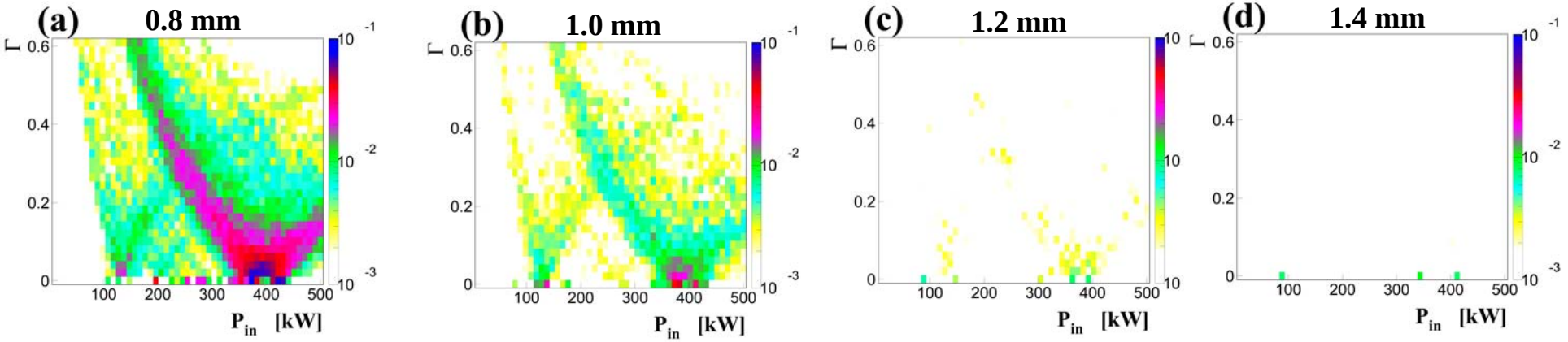
- ➢最小限の変更 → 微細溝構造
- ➢放電を起こさないムーズな表面
- ➢真空度の悪化を起こさない

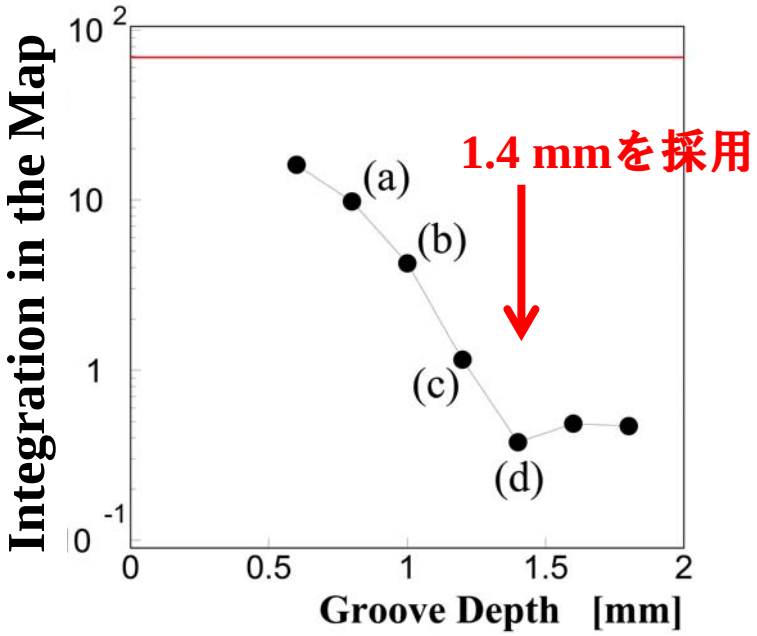
シミュレーション、及び、測定データから、
マルチパクタは外導体に於ける
一面性であることがわかっている

Fixed
•溝の幅: 1.0 mm
•溝のピッチ: 2.0 mm

マルチパクタ抑制効果

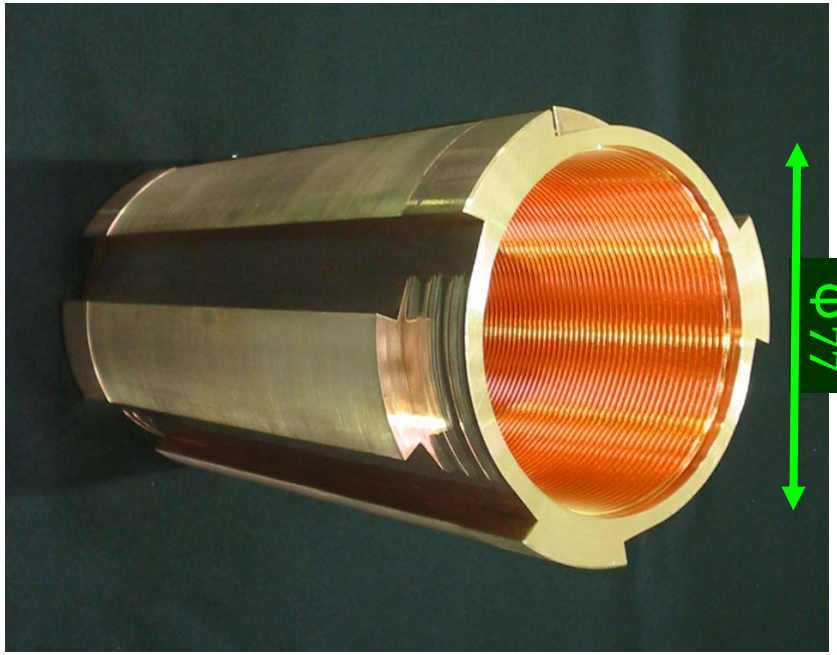
溝をより深く

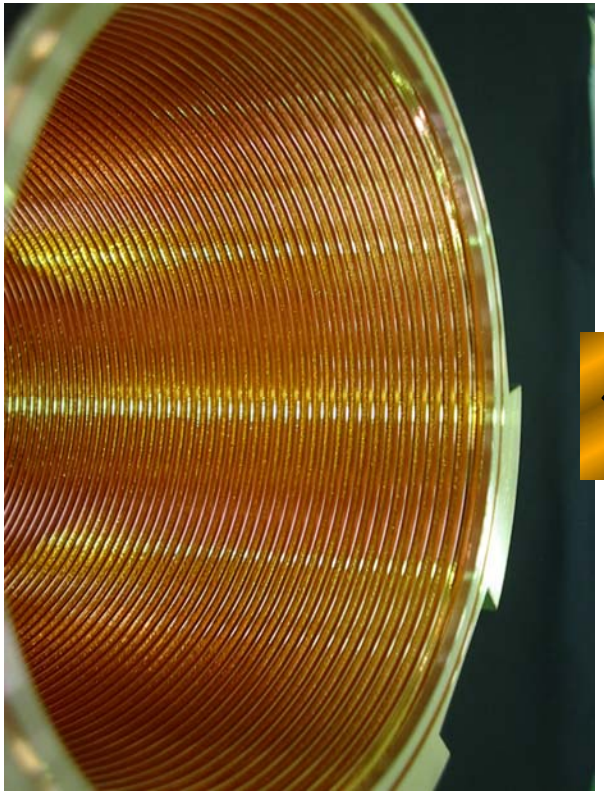




Fixed
- 溝の幅: 1.0 mm
- 溝のピッチ: 2.0 mm

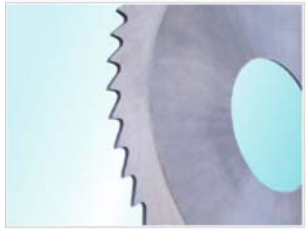
溝付き実機第1号



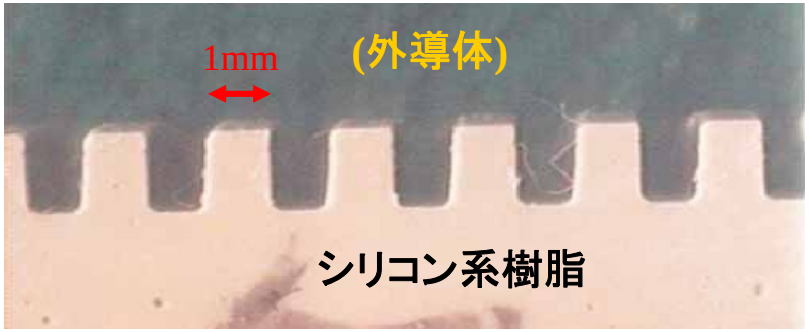


溝加工後、
電解研磨.

メタルソー



レプリカ



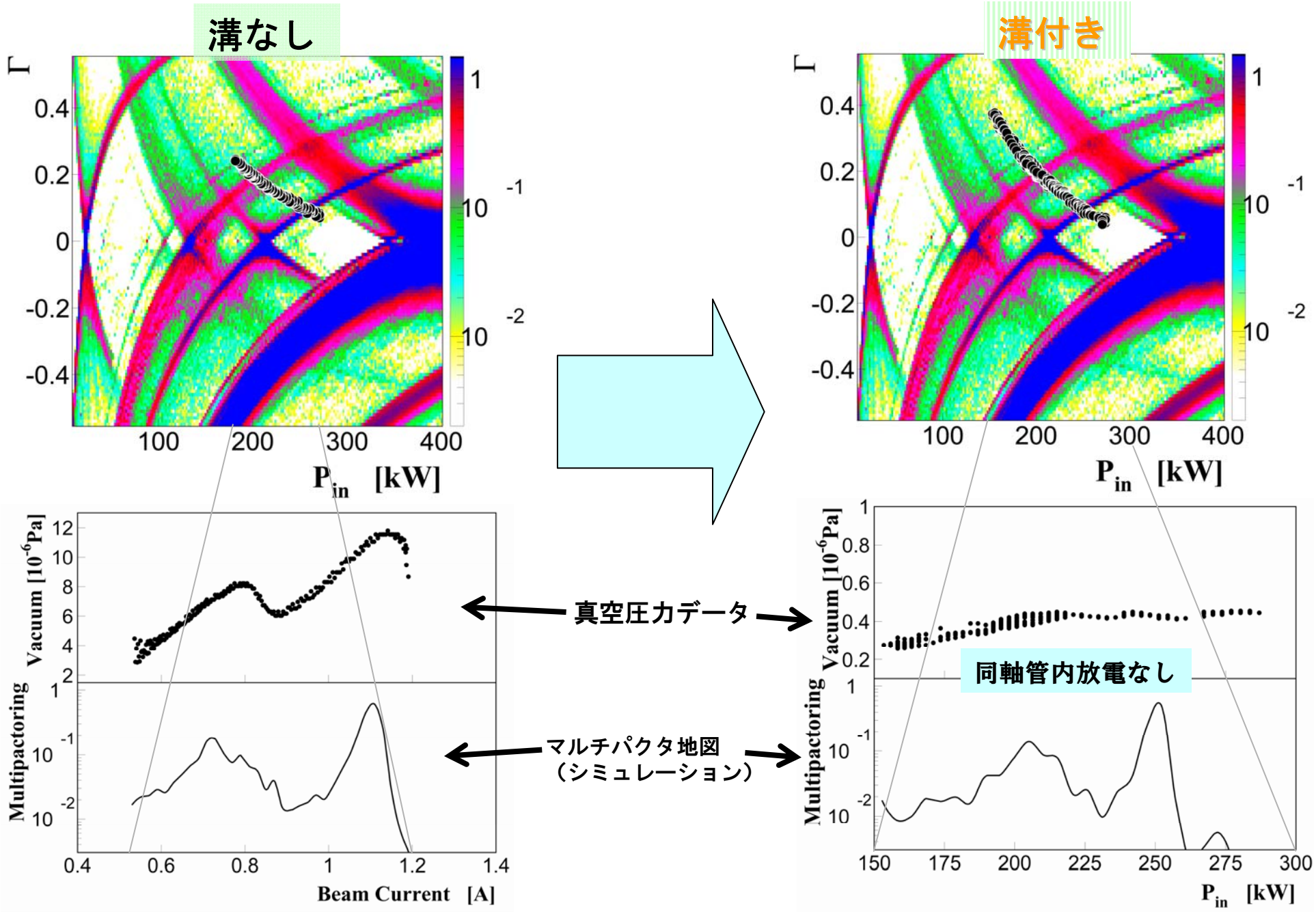
微細溝付き入力結合器の性能試験
@テストスタンド

- ４台の実機すべて、８００kWまで:
  - 同軸管内放電無し
  - 真空度の悪化なし

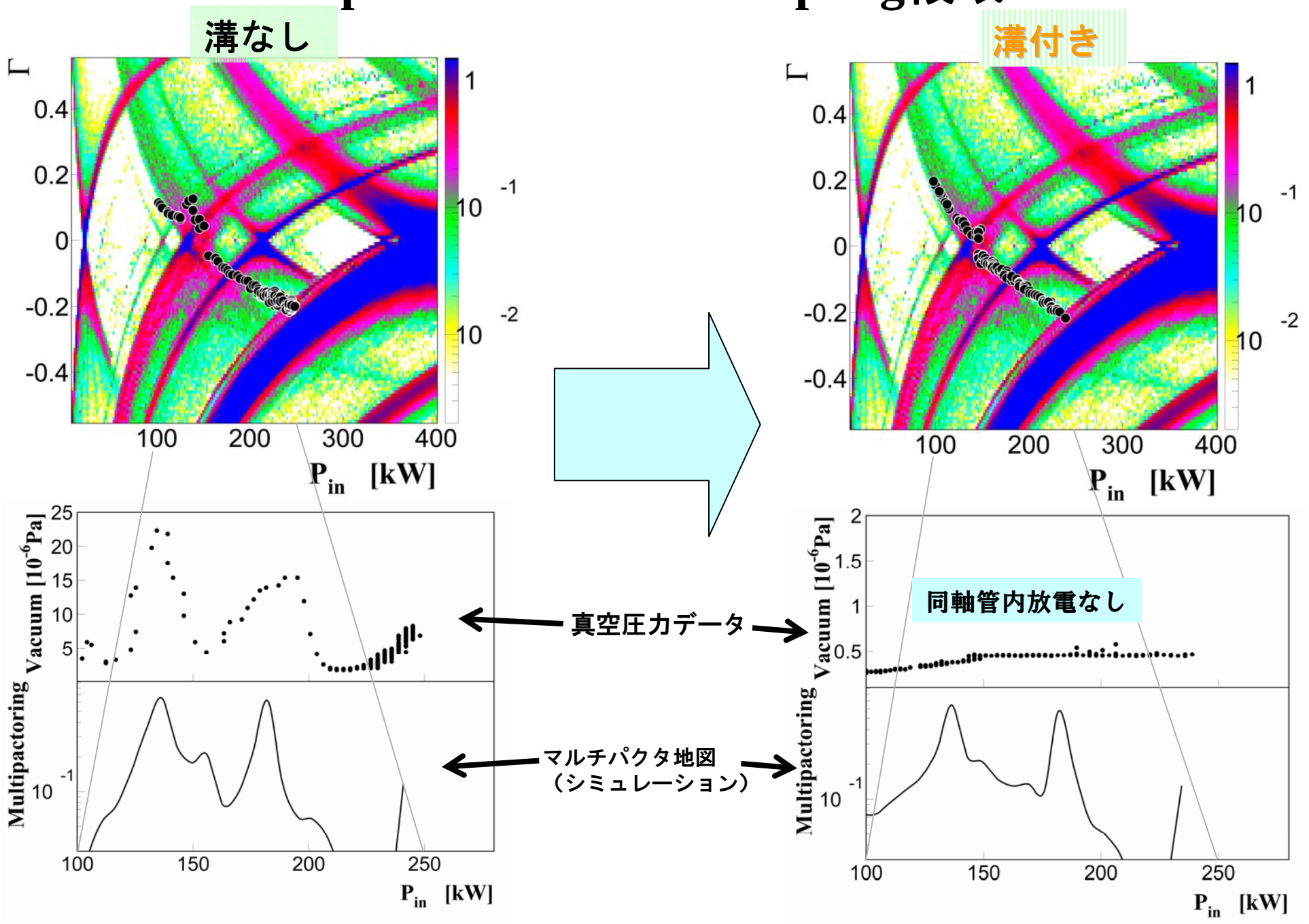
微細溝付き入力結合器の性能
@KEKB運転

- ２台の実機を、空洞M他へインストール
  - ビームなしでのエージング時 → OK
  - ビームありでの検証…

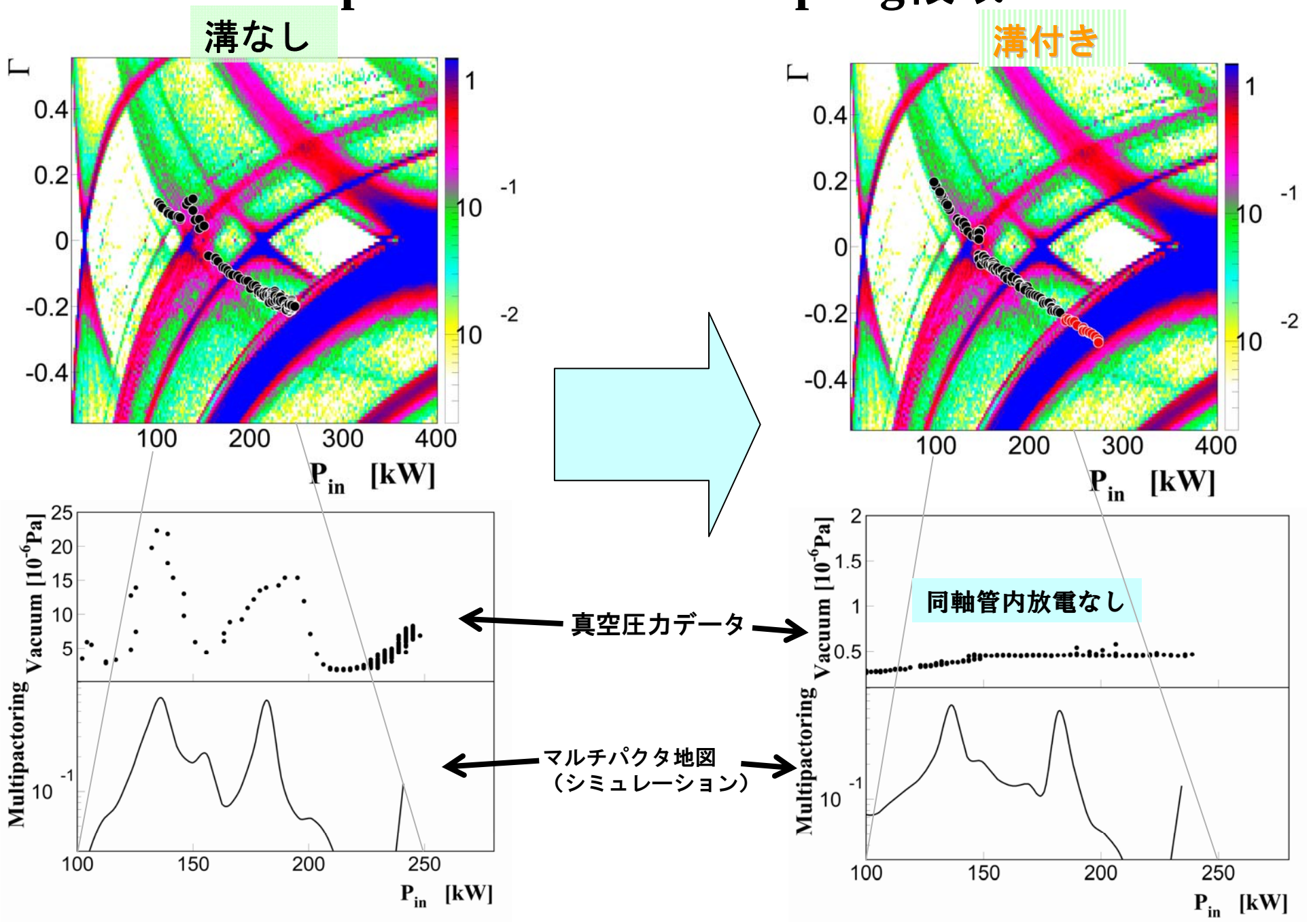
Over-coupling領域



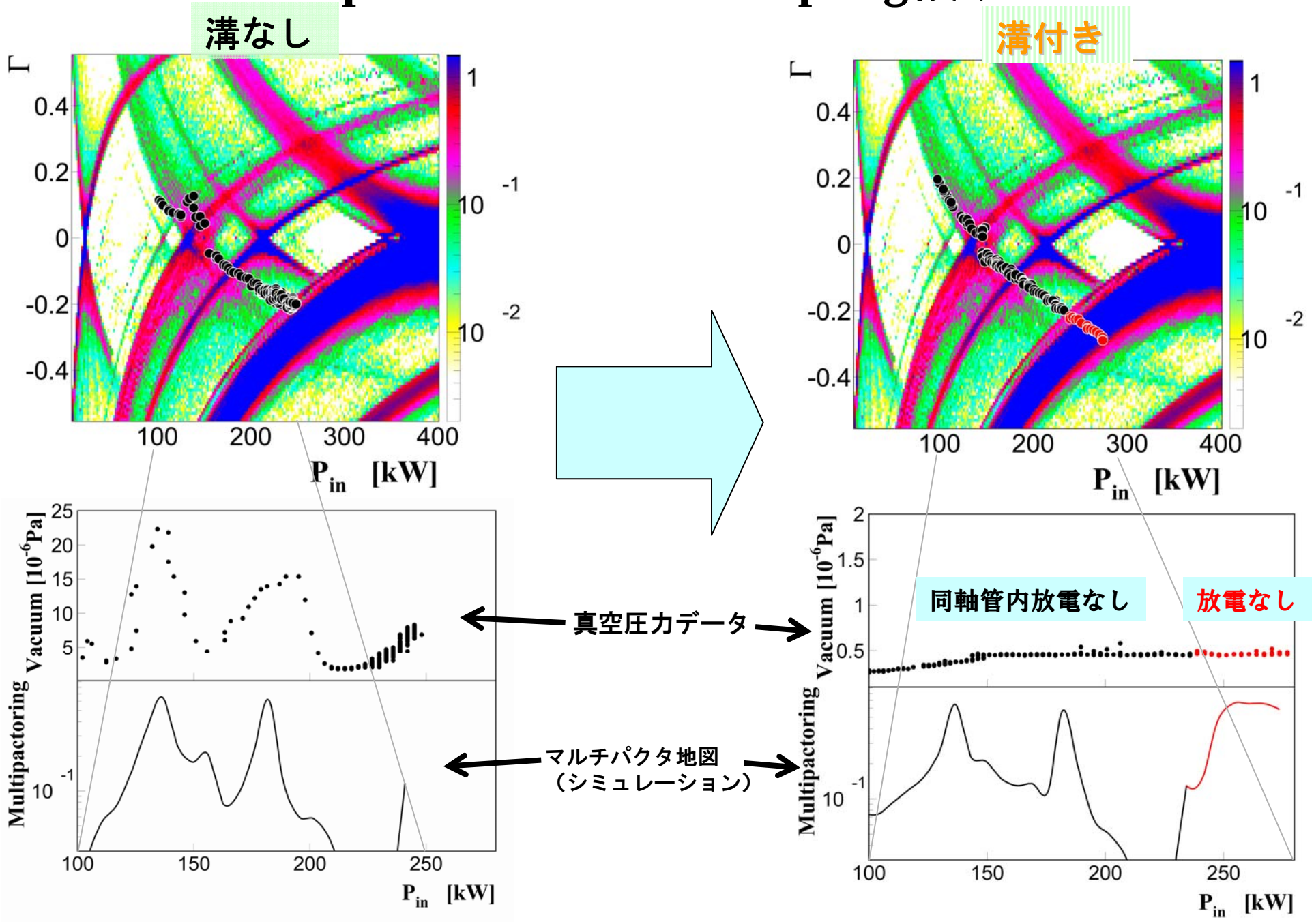
Optimum～Under-coupling領域



Optimum～Under-coupling領域



Optimum～Under-coupling領域



これまでのまとめ

- 空洞Mを舞台にしたマルチパクタ問題の克服
  - →マルチパクタ地図の考案
  - →パワー・フィードバックによるマルチパクタの一時回避法の確立
  - →微細溝付き入力結合器の開発と実証

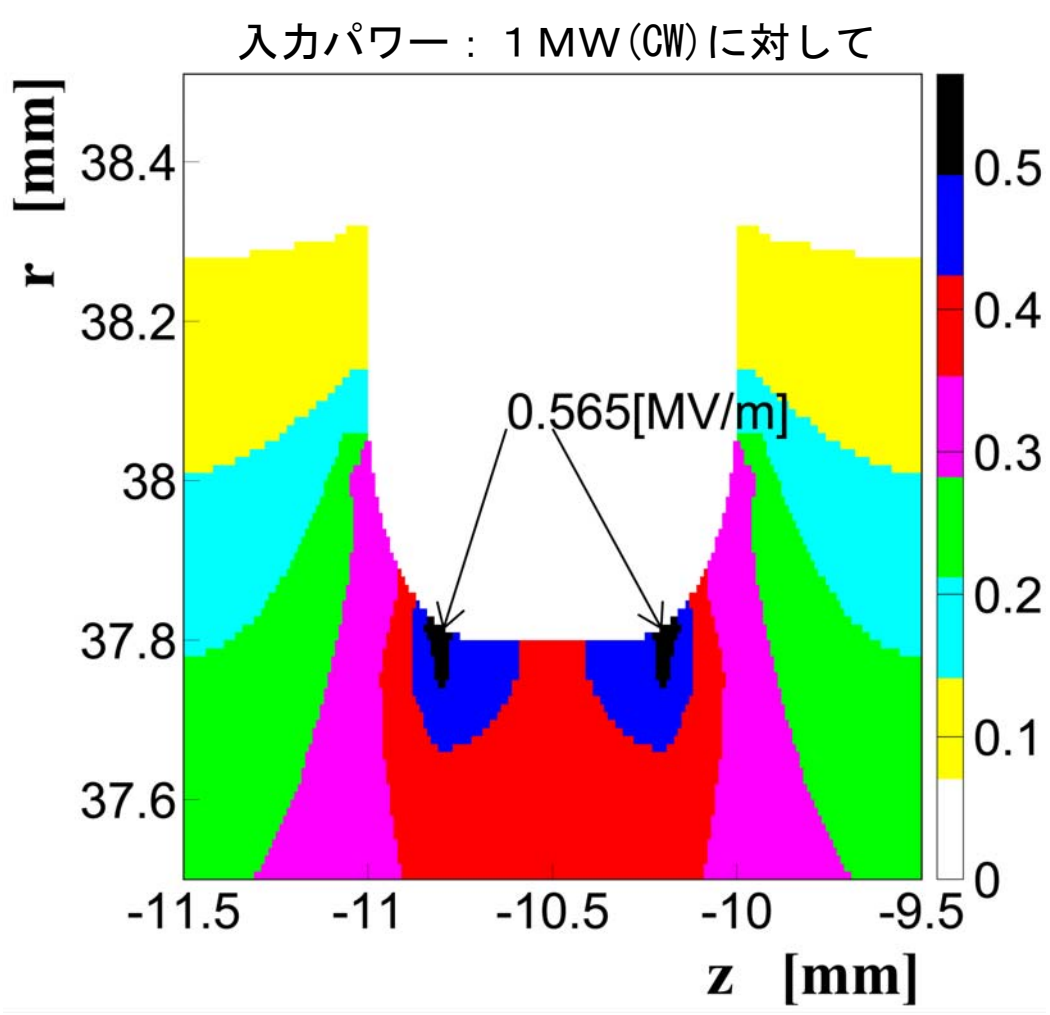
これから

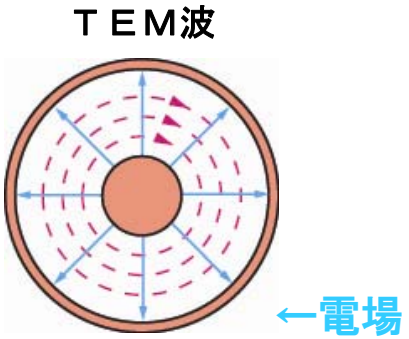
- SuperKEKBに向けて
  - ・製作する入力結合器は溝付き
  - ・現存する溝無し入力結合器を有効利用
  - ・マルチパクタ放電が起きたら、フィードバックで一時回避。その後、メンテナンス時等に溝付きに交換。

終

Backup Slides

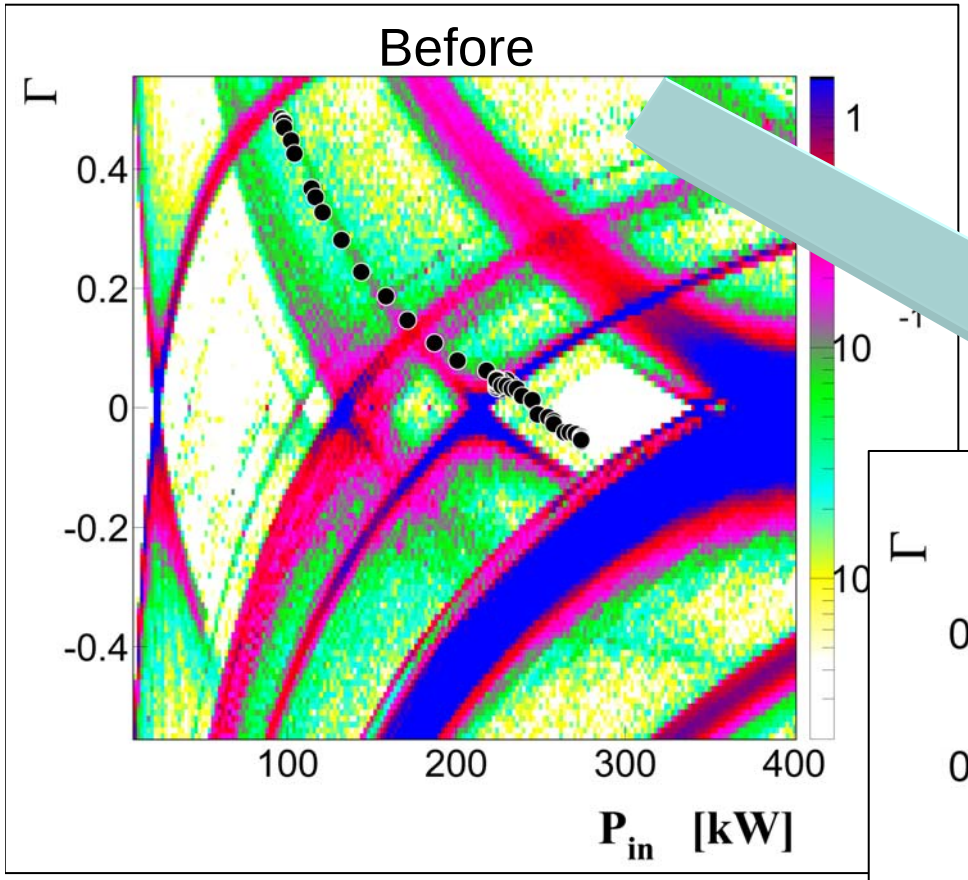
溝先端に於ける電場強度

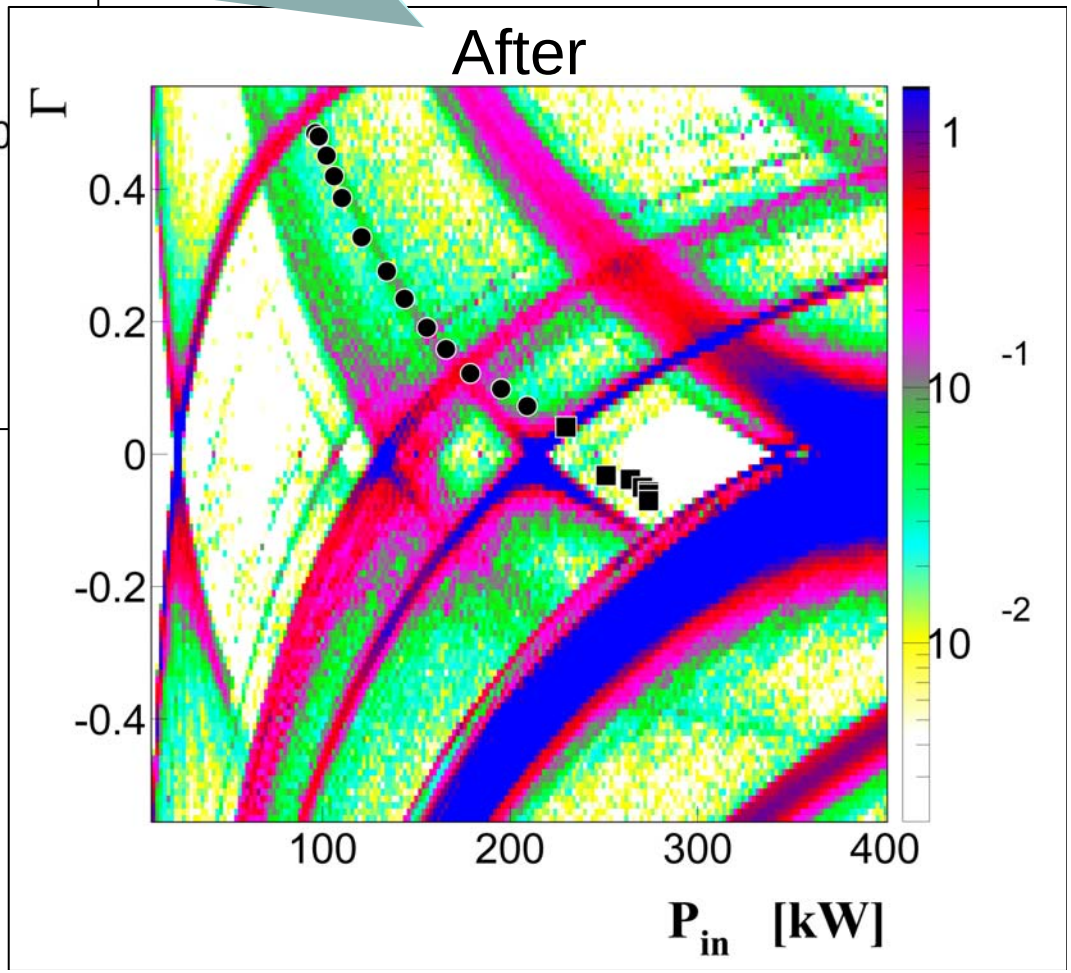




ピーク値：0.565[MV/m]は、
同軸管の内導体表面に於ける
電場のピーク値：0.717[MV/m]
より低い。

**→溝先端辺りで十分平滑
ならば、問題なし。**





測定点は30秒おき

●フィードバックOFF
■フィードバックON

Before

希硫酸

After

ARES空洞に関する
主なアップグレードR＆D項目

Ⅰ）より大きなDetuningに対するUs/Ua比の変更(9→15)
→シミュレーション研究完了
→要素試験は必要なし

Us：貯蔵空洞内エネルギー
Ua：加速空洞内エネルギー

Ⅱ）貯蔵空洞への新しい銅めっきの適用
→要素試験完了
→プロトタイプ製作完了

Ⅲ）高次モード減衰器のアップグレード
→要素試験とデザイン（2008年度）
→新型HOM減衰器付き加速空洞のプロトタイプ製作（2009～2010年度）

Ⅳ）高周波入力結合器の同軸管内マルチパクタ放電の克服
→…