

高周波入力結合器におけるマルチパクタリングの研究

阿部哲郎、影山達也、坂井 浩、竹内保直

高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

大強度加速器においては長時間安定した運転のことが重要である。本研究では、安定運転の妨げの要因となりうる高周波入力結合器内のマルチパクタリングの問題に関して、大電力試験、及び、数値シミュレーションによる考察を行っている。その現状と結果について報告する。

1 はじめに

KEKB 加速器の常伝導加速空洞 (ARES) [1] においては、図 1 に示されている over- and under-cut 型のインピーダンス整合部を持つ高周波入力結合器 (以下、結合器) を使用している [2]。この結合器は 1997 年に行ったテストスタンドでの実験で入力電力 1MW まで可能であることが実証された [2]。そのテストスタンドでは 2 つの結合器を向かい合わせて繋ぎ、一方から高周波を入力し他方をダミーロードに接続した。

現在までのところ ARES 空洞 30 台で運転に使用している結合器には特に大きな問題はなく、安定した働きを示している。しかし、ある特定の入力電力に対して同軸部 (WX77D) 内外導体間にマルチパクタリングに因ると推測される放電現象をしばしば起こす結合器が見つかった。今後の B ファクトリーの輝度増強に向けて、結合器のさらなる試験・改良が必要とされる。

今回、実際の運転状況に近い形でのテストスタンドを立ち上げ、データ取得を開始した。

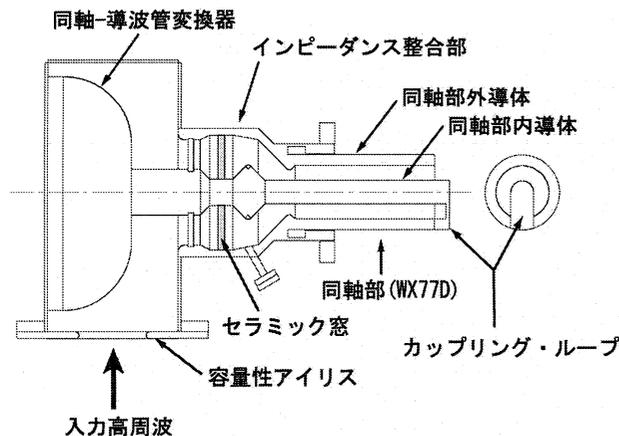


図 1 ARES 入力結合器。

2 大電力試験のセットアップ

大電力試験テストスタンドのセットアップを図 2 に示す。試験する結合器は TE013 モード・エネルギー貯蔵空洞 (以下、貯蔵空洞) に通常の運転時と同様に取り付ける。この時の結合度は 3、反射係数の大きさは 0.5 である。結合空洞への接続口には $\pi/2$ モード終端器 (図 3) を取り付け、そこで電氣的にショートした状態で高周波フィールドを終端する。また、結合器の同軸部を貯蔵空洞内部から観察するために、CCD カメラを結合器と反対側にあるビューポートに取り付けた。テストスタンドのこの状態は、結合空洞と加速空洞が $\pi/2$ モード終端器に置き換わっていることを除けば、実際の運転と同じ状況になっている。このセットアップでは $\pi/2$ モード終端器を使用していることにより、加速空洞内の放電現象等による影響を取り除くことができるという利点がある。

入力電力は貯蔵空洞内の真空度がある値 (約 2.5×10^{-5} Pa) 以下であることを課してコンピュータプログラムで自動的に上昇させた。

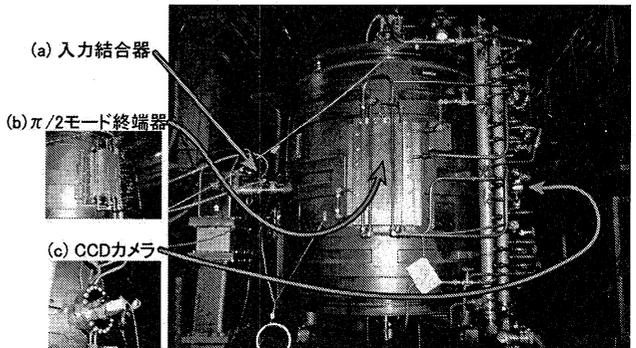


図 2 大電力試験テストスタンドのセットアップ。エネルギー貯蔵空洞 (中央円柱) に、(a) 入力結合器、(b) $\pi/2$ モード終端器、(c) CCD カメラを取り付けた。

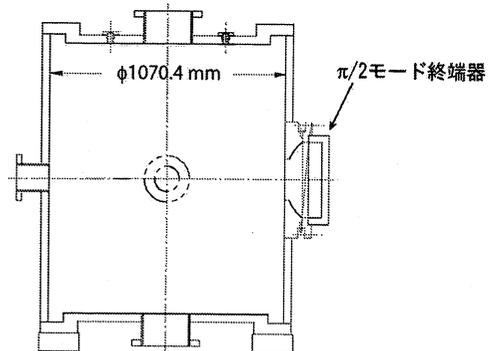


図 3 $\pi/2$ モード終端器の断面図。

3 試験結果

試験1個目の結合器に関する入力電力の履歴を図4に示す。全運転時間約92時間で500kWまで到達した。途中、180kW 辺りで他の電力領域よりしばしば結合器同軸部内外導体間に放電をCCDカメラで観測した。また、放電に伴い真空度も悪化した。この放電が起きた時には同軸部外導体を冷やしている冷却水(出)の温度が顕著な上昇を示した。200kW を越えると同軸部の放電は殆ど起こらなくなり、入力電力をスムーズに上げることができた。

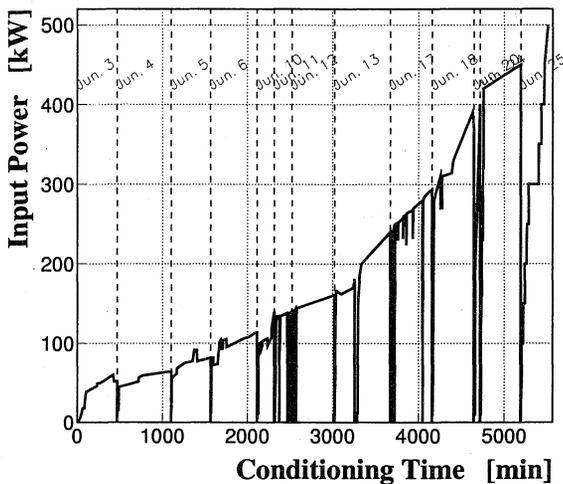


図4 入力電力の履歴。

試験2個目の結合器では、180kW 付近でより顕著な放電が起きた。CCDカメラで撮影したその放電の映像例を図5に載せる。この放電の時も同軸部外導体の冷却水の温度が大きく上昇した。その温度上昇を入力電力の関数として測定した結果を図6に示す。この測定を行った時の流量は毎分8ℓであったので、最も大きな温度差:8℃は4.5kWに相当する。同軸部内導体の冷却水にも温度上昇が見られたが、外導体の場合の半分程度であった。図6に見られるピークは、155kWと200kWの間のパターンエージングI(1周期:90秒、全648分間)、及び、引き続き行った200kWと237kWの間のパターンエージングII(1周期:90秒、全647分間)によって完全に消えた。これに伴い同軸部の放電も殆ど起こらなくなり、真空度が悪化することもなくなった。

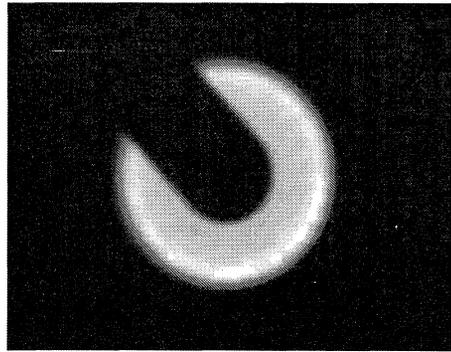


図5 CCDカメラで撮影した入力結合器同軸部内外導体間の放電の様子。カップリング・ループが約10時の方向にあるため、そこでの放電は見えない。

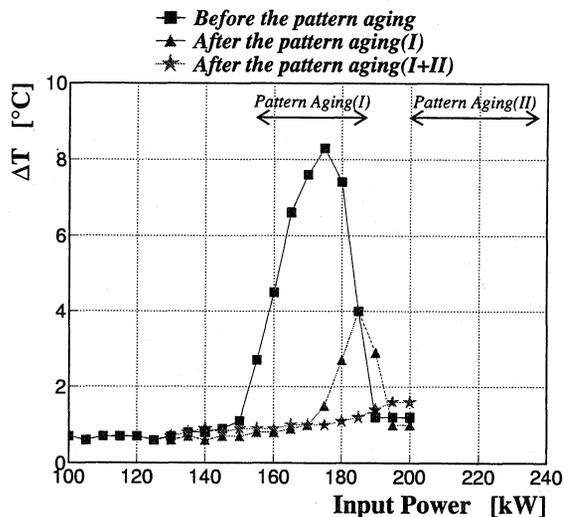


図6 入力結合器同軸部外導体の冷却水の温度上昇。縦軸(ΔT)は入出時の温度の差を表す。矢印はパターンエージングした電力領域を示す。

4 考察

以上の測定結果を理解するために、結合器同軸部におけるマルチパクタリングの数値シミュレーションを行った。今回は電子の運動を動径方向の1次元に限り、TEM波内での運動方程式をRunge-Kutta法で数値的に解いた。マルチパクタリングに関するシミュレーション・パラメータについては、コンディショニングされた金属に対する典型的な値を用いた[3]。電子が内導体または外導体に衝突する時の2次電子放出係数が1よりも大きければ引き続き2次電子の運動を追い、1よりも小さければ追跡を終了する。そして、電子の内導体または外導体への衝突回数を数える。計算された電子の軌道の例を図7に載せる。

このシミュレーションにより得られたマルチパクタリング領域を図8に示す。ここでは電子の内導体または外導体への衝突回数が1000回以上になる場合のみを考えている。マルチパクタリングは殆ど200kW以下にあることがわかる。

ここでマルチパクタリングの次数を以下の式で定義する。

$$\eta = \frac{N_{cycl}^{(f)}}{N_{col}^{(in)} + N_{col}^{(out)}} \quad (4.1)$$

$N_{cycl}^{(f)}$ は入力高周波のサイクル数、 $N_{col}^{(in)}$ は電子が内導体に、 $N_{col}^{(out)}$ は外導体に衝突した回数である。180kW 辺りの広い範囲にわたって低次のマルチパクタリング領域が存在することがわかる。図 8にはは示されていないが、このシミュレーションで出て来たマルチパクタリングは殆ど外導体に関する一面性であった。

5 結論

入力結合器を貯蔵空洞単体に接続し、実際の運転を模擬する形のテストスタンドを新たに立ち上げた。今回の大電力試験では以下の3つの特徴を観測した。

- 1 入力電力180kW 辺りで結合器同軸部内外導体間に放電がしばしば起った。また、それに同期して真空度が悪化した。
- 2 入力電力180kW 辺りの放電に伴って同軸部の冷却水の温度が大きく上昇した。この時、入熱に関して内導体と外導体の間で大きな非対称性があった。
- 3 入力電力200kW を越えると放電や真空度の悪化が少なくなり、スムーズに入力電力を上げることができた。

結合器同軸部でのマルチパクタリングを模擬するシミュレーションを行った。その結果、上記の特徴が定性的にはあるが再現されることを確認した。

今回の研究では、コンディショニングのメカニズムやマルチパクタリングの次数等に関して定量的な結論を導き出すまでには至らなかった。今後、テストスタンド及びシミュレーションの改善を行い、マルチパクタリング問題の無い結合器の開発を目指す。

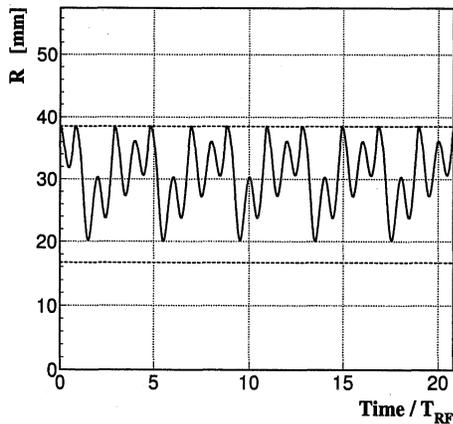


図 7 シミュレーションによる電子の軌道の例 (入力電力: 180kW、初期位相: 90°)。横軸は電子が内外導体間に出て来た時から測った時間を入力高周波の周期 ($T_{RF} = 1/508\text{MHz}$) で割ったもの。縦軸は動径方向距離。破線は外導体表面 (上) と内導体表面 (下) の位置を表す。

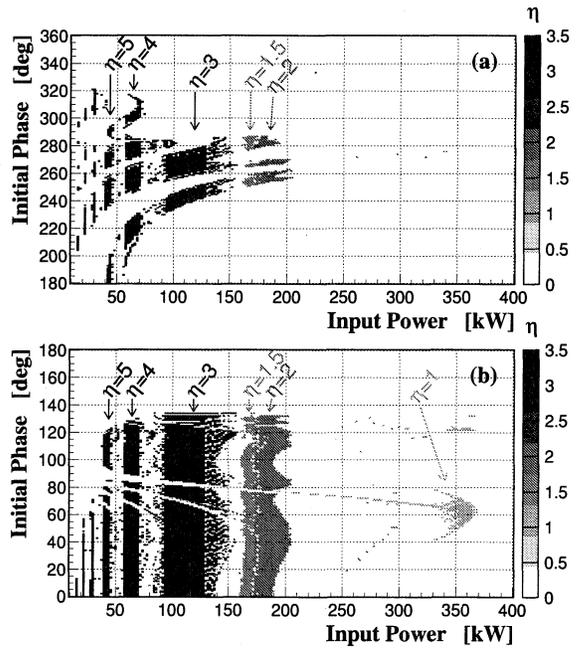


図 8 シミュレーションによる同軸部内外導体間マルチパクタリング領域。最初の1次電子が、(a)内導体、(b)外導体から出る場合。横軸は入力電力、縦軸は最初の1次電子が導体から放出された時の電磁場の位相を表す。 η は式(4.1)で定義される。

参考文献

- [1] T. Kageyama *et al.*, "The ARES Cavity for KEKB", Prepared for International Workshop on Performance in Improvement of Electron-Positron Collider Particle Factories (e^+e^- Factories 99), Tsukuba, Japan, 21-24 Sep 1999.
- [2] F. Naito *et al.*, "The Input Coupler for the KEKB ARES Cavity", Talk given at 1st Asian Particle Accelerator Conference (APAC 98), Tsukuba, Japan, 23-27 Mar 1998; KEK Preprint 98-44, May 1998.
- [3] 来島裕子、「超伝導空洞用大電力入力カプラに関する研究」、学位論文 (総合研究大学院大学)、平成13年度。