

# KEKB入射器用 S バンド 2 m 加速管の高電界試験

五十嵐 康仁<sup>1,A)</sup>、山口 誠哉<sup>B)</sup>、大越 隆夫<sup>B)</sup>、柿原 和久<sup>B)</sup>、東 保男<sup>B)</sup>、大沢 哲<sup>B)</sup>、榎本 收志<sup>B)</sup>  
富沢 宏光<sup>C)</sup>、谷内 努<sup>C)</sup>、花木 博文<sup>C)</sup>

A) 総合研究大学院大学 加速器科学専攻 (SOKENDAI)

B) 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

〒305-0801 茨城県つくば市大徳1-1

C) (財) 高輝度光科学研究センター 放射光研究所 加速器部門 (SPring-8)

〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都1-1-1

## 概要

KEKB入射器用S バンド 2 m 加速管の高電界試験を行った。高電界試験は3種類の加速管について、エージング時間と加速電界強度、放電頻度、電界増倍係数および加速管の上流、下流側で観測される暗電流の総電荷量の関係を詳細に調べた。特に超純水高圧洗浄を行った加速管は他の加速管に比べて半分以下のエージング時間で45 MV/mに到達することができた。また電界放出電子による暗電流の運動量スペクトルのシミュレーションと試験結果の比較を行った結果も報告する。

## 1. 加速管の高電界試験

### 1.1 試験加速管

KEKB入射器用Sバンド2m加速管は54空洞と入出力カップラから成る準定電界型である(2 $\pi$ /3モード, 2856MHz)。本加速管は電鍍法によって空洞を一体化している。入出力カップラ空洞には径方向の電磁場分布非対称性補正用の三日月型窪みがある[1]。高電界試験は3種類の加速管について行った。Type(1)：KEKB入射器で使用されている標準タイプの加速管。Type(2)：入出力カップラ空洞の三日月型窪みを無くしたタイプ。電磁場分布は非対称のまま。Type(3)：超純水高圧洗浄を行った加速管で構造はType(1)と同じ。超純水高圧洗浄(HPR)技術は空洞内面を超純水で洗浄し、電界放出の原因の一つで

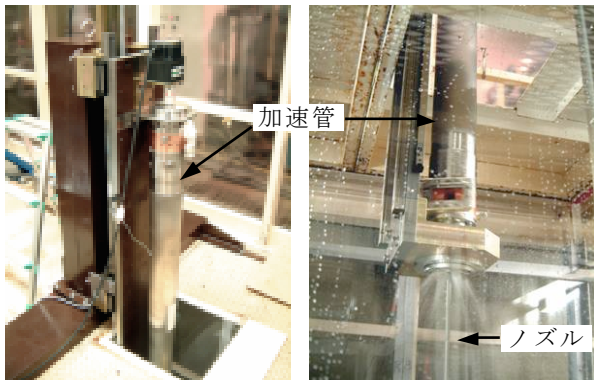


図 1: 2m加速管の超純水高圧洗浄。

ある塵などの汚染物を取り除く方法である。この技術を2m加速管に適用した(図1)[2]。予備試験の結果、HPRによってサンプルディスク上の不純物の数が1/10以下に減少することが確認されている[1]。

### 1.2 試験結果

RFパルスの繰り返しは50 pps、パルス幅は4  $\mu$ secに固定した。はじめはSLEDを離調して徐々にRF電力を上げ、その後、SLEDを同調した。試験中は常にクライストロンへのRF反射量(VSWR)と加速管等の真空圧力を計測しインターロックに用いた。電界放出電子による暗電流の全電荷量は加速管の上下流に設置したファラデーカップで、その運動量スペクトルは45° 偏向磁石、スリットおよびファラデーカップを用いて測定した。

表1に試験結果を、ショット数と平均加速電界強度  $E$  及び電界増倍係数  $\beta$  との関係を図2, 3に示す( $\beta$ はType(3)のみ示す)。試験の結果、3種類の加速管とも40 MV/m以上の平均加速電界強度を得ることが出来た。特に、超純水高圧洗浄を行った加速管は他の加速管に比べて半分以下の時間で45 MV/mに到達し、放電回数、暗電流値とも1/3以下という結果であった。試験設備の制限によってこの値以上の試験を行うことは出来なかったが、45 MV/m以上の加速電界強度も十分に可能であると思われる。また、 $\beta$ はエージングが進むにつれて指数関数的に減少していることがわかる。もし、 $\beta = \beta_0 \exp(-t/\tau)$  ( $\tau$ : 時定数)であると仮定すると半減期  $T_{1/2} = (\ln 2) \tau$  はType(1),(2),(3) (下流側のみ)でそれぞれ784, 1677, 341時間となりType(3)は他に比べて半分以下の時間となる。

表1: 3種類の加速管の試験結果。

| Type | Time [hours] | Shot [ $10^7$ ] | Maximum average field [MV/m] | Peak dark current [ $\mu$ A] |      | $\beta$ |      |
|------|--------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|------|---------|------|
|      |              |                 |                              | up                           | down | up      | down |
| (1)  | 572          | 10.3            | 40*                          | 569                          | 631  | 52      | 53   |
| (2)  | 811          | 14.6            | 45                           | 722                          | 1130 | 54      | 55   |
| (3)  | 356          | 6.4             | 45                           | 295                          | 224  | 68      | 53   |

\*: 日程的な理由により制限された。

<sup>1</sup> E-mail: yasuhito.igarashi@kek.jp

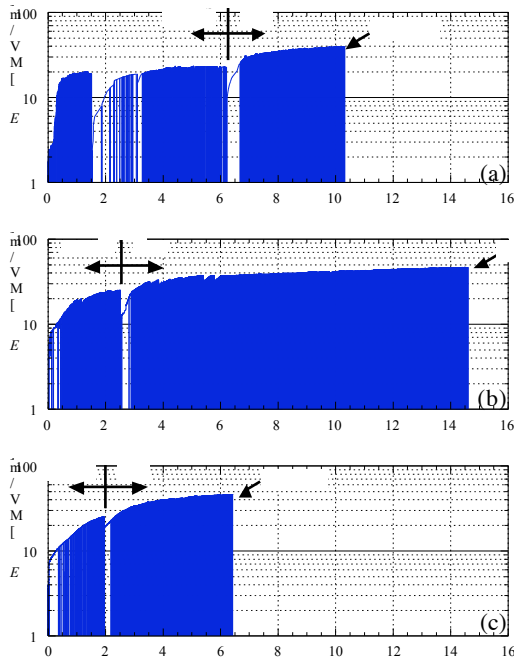


図2：平均加速電界強度  $E$  vs. ショット数。  
(a) Type(1), (b) Type(2), (c) Type(3).

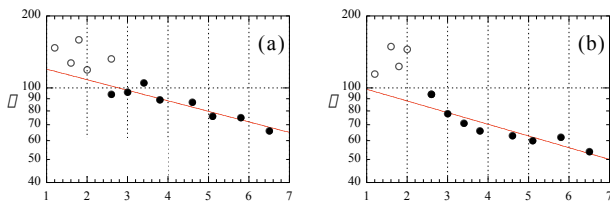


図3：電界増倍係数  $\Gamma$  vs. ショット数  
(a)上流側, (b)下流側 (Type(3)のみ示す).

Type(3)の試験時に、4重極型質量分析器(QMS)を組み込んで残留ガスの分圧を測定した。加速管内で放電が起きたときに発生した脱ガスの質量スペクトルの一例( $E = 45$  MV/m)を図4に示す。実線が定常状態、点線が放電時のスペクトルを表し、全圧はそれぞれ約 $2 \times 10^{-6}$  Pa, 約 $1 \times 10^{-5}$  Paであった。放電時には2 ( $H_2$ )と28 ( $CO, N_2$ など)が最も上昇し、次いで44 ( $CO_2$ )と $C_kH_l$  (炭化水素)が上昇している。これらは放電による電子衝撃で吸着水分子が解離し、汚染分子のCと結合して $H_2$ ,  $CO$ ,  $C_kH_l$  等として脱離していくためと考えられる。一方、18 ( $H_2O$ ), 17 ( $HO$ )は放電時にほとんど変化していない。また、放電発生時の発光を観測してその分光特性の解析を行った結果、Cu I, Cu II, C I, H $\square$ , O Iのラインが確認され、QMSの測定データと一致した[3]。

高電界試験後に加速管の位相特性を測定した。試験後の加速管には目視できた範囲では放電痕のようなものは無く位相変化を伴うようなダメージは無いと思われるが確認のために行った。Type(1)についてはすでに加速器運転で使用されているため他の2本の加速管について測定を行った。非共振摂動理論に基づくビード摂動法によって各空洞での電場の位

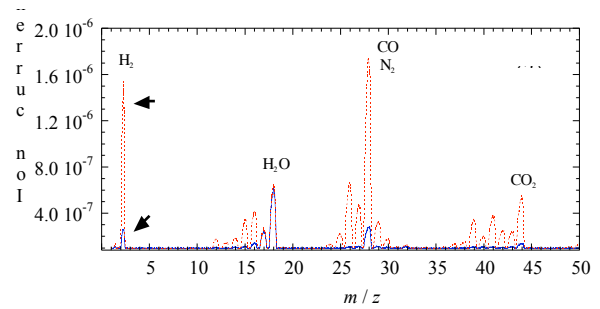


図4：定常時と放電時の残留ガス質量スペクトル。

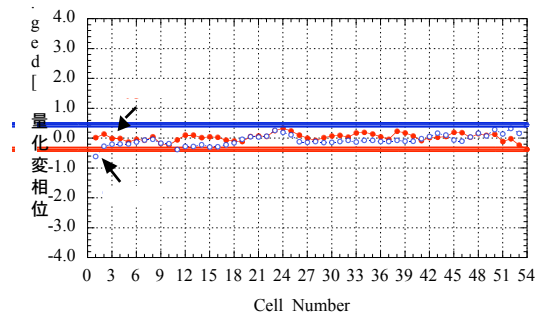


図5：高電界試験前後における各空洞の位相変化量  
(入出力カップラー空洞は除く)。

相を求め、高電界試験前後での比較を行った結果を図5に示す。ほとんど位相の変化は見られなかった。

### 1.3 加速電界強度と放電頻度との関係

各加速管の試験の最後に、入力RF電力の値を下げながら放電が起こる頻度を調べた。図6にType(2)の結果を示す。図の上側の●点はエージングを行っている時の放電頻度を表し、1時間当たりの放電回数が10回前後となっているのは、放電回数がこの頻度に収まるようにエージングを進めているためである。1度エージングが済んだ電界強度では放電頻度が大きく下がるのがわかる。また、Type(2)とType(3)では、最大平均加速電界強度45 MV/mまでに到達する時間が約810時間と約350時間で2倍以上異なっているにもかかわらず、45 MV/m到達後に入力RF電力の値を下げながら測定した平均加速電界強度と放電頻度との関係が同じ傾向となった。このことは、加速管の放電頻度はエージングを行った時間数よりも加速管に投入した最大RF電力値が大きく影響することを示していると考えられる。

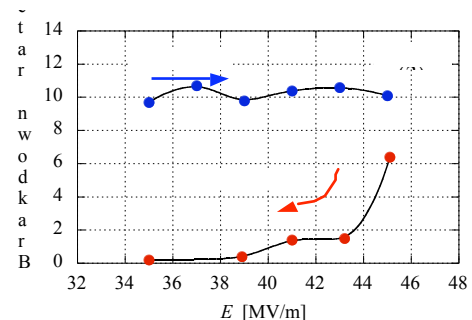


図6：平均加速電界強度と放電が起こる頻度の関係。

## 2. 暗電流の運動量スペクトル

電界放出電子による暗電流の運動量スペクトルのシミュレーションを行い、高電界試験結果との比較を行った。計算には電子軌道、エネルギースペクトル計算用のコードを用いた[4]。加速管下流側で測定したType(3)の試験結果と計算の比較を図7に示す。約20 MeV/c以下で計算(破線)は左上がりだが試験結果(点線)は下がっている。この計算では最下流に到達した全ての電子によって運動量を求めているためにビームホール、スリット等でトラップされる影響が含まれていない。その為、最下流に到達した電子の位相空間分布を計算し、運動量と位置(半径方向) $x$ 、傾き $x'$ との関係を図8に示す。半径方向への広がりほぼディスク孔径内( $a = 11.875$  mm)に収まっているが、約20 MeV/c以下では傾きが大きいことわかる。そこでスリットまでの距離、スリット幅を考慮して最下流に到達した電子の中で、 $x < a$  [mm]、 $x' < 17$  [mrad]の範囲にある電子で求めた運動量を図7(実線)に示す。その結果、低エネルギー側の分布が計算と試験結果でほぼ同じ傾向となる。又、下流側3空洞での暗電流の軌道(図9)からも下流側で計測される暗電流は方向の揃った電子であることがわかる。一方、高エネルギー側の分布は計算と比べて試験結果が下がっている。計算ではディスク孔径が一定である加速管を計算しているが、実際の加速管はディスク孔径が段々と小さくなっている。その為、上流側で放出された電子ほど途中のディスクでトラップされる確率が高くなり、最下流まで到達する高エネルギー側の電子の数が少なくなると考えら

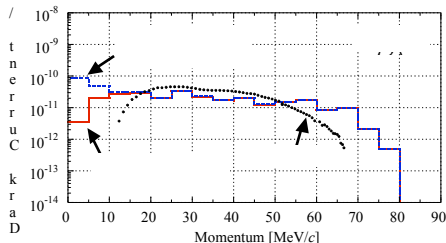


図7：加速管下流側での運動量スペクトルの試験結果とシミュレーションの比較 ( $E = 42$  MV/m)。

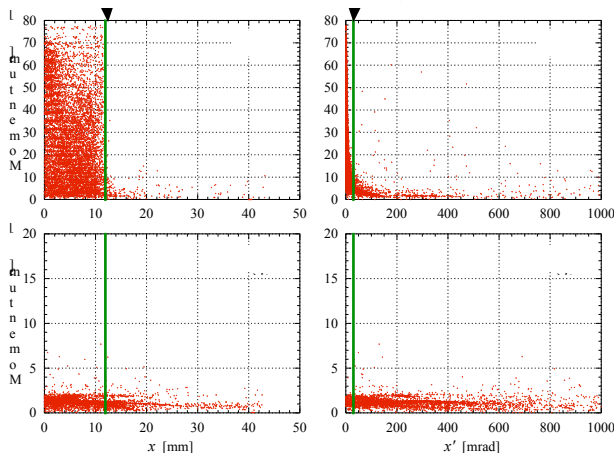


図8：加速管の最下流、最上流に到達した電子の運動量と位置 $x$ 、傾き $x'$ との関係。

れる。同様に、加速管の最上流に到達した電子の位相空間分布を計算した(図8)。運動量は約6 MeV/c以下であり、下流側と比べて半径方向への広がり、傾きとも大きい。又、それは上流側3空洞での暗電流の軌道(図9)からもわかる。Type (3)の試験結果と計算の比較を図10に示す。スペクトル分布は低エネルギー側のみであり傾向は試験結果とほぼ一致している。従って、最上流に到達する多くの電子は上流側の数空洞から放出していることになり、上流側の電界増倍係数 $\beta$ は加速管上流側の数空洞の状態を表すと考えられる。それに対して下流側の $\beta$ は約20~40空洞付近の状態を表していることになる。

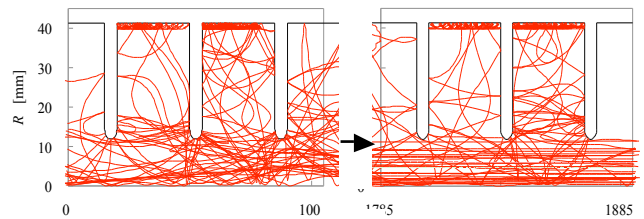


図9：加速管上下流側3空洞での暗電流の軌道例。

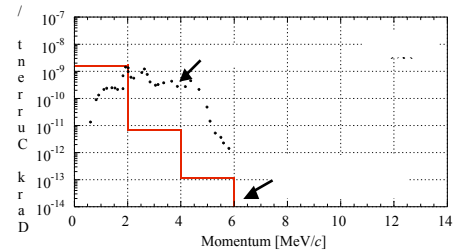


図10：加速管上流側での運動量スペクトルの試験結果とシミュレーションの比較 ( $E = 42.5$  MV/m)。

## 3. まとめ

3種類の加速管について高電界試験を行った結果、3種類の加速管とも40MV/m以上の平均加速電界強度が得られた。特に超純水高圧洗浄を行った加速管は他に比べて半分以下の時間で45MV/mに到達し、放電回数、暗電流値とも1/3以下という結果であった。電界増倍係数 $\beta$ はエージングが進むにつれて指数関数的に減少し、また加速管の放電頻度はエージングを行った時間数よりも投入した最大RF電力値が大きく影響することがわかった。電界放出電子による暗電流の運動量スペクトルのシミュレーションを行った結果、測定結果のスペクトル形状を再現した。

## 参考文献

- [1] Y. Igarashi, et al., "High-gradient Tests on an *S*-band Accelerating Structure", Proc. of the LINAC'02, TH403.
- [2] Y. Igarashi, et al., "High-Gradient Tests on *S*-band 2m-long Accelerating Structures for KEKB injector linac", Proc. of the PAC'03, RPAB050.
- [3] H. Tomizawa, et al., "Atomically spectroscopic approach for diagnostics of rf breakdown in accelerating rf structures", Proc. of the 8th European Vacuum Congress, 2003.
- [4] S. Yamaguchi, "Simulation Studies on High-Gradient Experiments", LAL/RT 92-18, 1992.