

HIGH POWER TEST OF LOW DARK CURRENT ACCELERATING STRUCTURE

Tsutomu Taniuchi[#], Takao Asaka, Toshiaki Kobayashi, Shinsuke Suzuki, Hideki Dewa, Hiromitsu Tomizawa, Hirofumi Hanaki, Akihiko Mizuno, Kenichi Yanagida
 Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8)
 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

Abstract

To achieve a lower impurity in single-bunch operation of the SPring-8, lower dark currents from injector linac are desired. We are developing a new accelerating structure to reduce dark currents emitted from cavity surface. Applied improvements are an ellipsoidal shape of iris cross-section and a single-feed waveguide coupler. A high power test for this accelerating structure was performed. The maximum field gradient was achieved up to 27.6MV/m and dark current intensity and energy spectrum were measured.

低暗電流加速管の大電力試験

1. はじめに

SPring-8 蓄積リングの単バンチ運転で要求されるバンチ不純度は 10^{-10} 程度と極めて小さいためブースター・シンクロトロンにおける RF ノックアウトによりこれを実現しているが、線型加速器からシンクロトロンに入射される暗電流もできる限り小さくしておく必要がある。線型加速器の主な暗電流発生源の一つに加速管内における電界放出があり、加速管を大気開放した後に著しい。そこで、現在の加速管よりも電界放出電流が少ない加速管の開発を目指し研究を行っている。加速管内の暗電流発生源としては、ディスク部アイリス付近の表面電界集中領域やカプラー部の表面電流集中領域であると考えられている。そこで、このような電界あるいは電流集中を低減するような構造を有する加速管を製作し^[1]、暗電流を評価するための大電力試験を行った。

2. 低暗電流加速管

今回大電力試験を行った低暗電流加速管は、次のような特徴を持つ。

2.1 シングルフィード導波管カプラー

加速管と導波管の結合部であるカプラーセル（第1セル）は RF ブレークダウンの頻度が高い場所であり、暗電流の大きな発生源であると考えられている。従来の加速管に広く採用されているカプラー構造は、導波管端面と空洞円筒面に結合孔を設ける構造の磁界結合型カプラーで、この結合孔を迂回する表面電流集中によるパルスヒーティングが RF ブレークダウンおよび暗電流発生の原因となる。そこで、結合孔周囲の電流集中が起きない電界結合型導波管カプラーを採用した。ビーム軸付近のフィールド対称性を良くする観点からは、対向する導波管から加速管へ RF を供給するダブルフィードカプラーが望ましいが、今回は構造がより単純かつ 3dB 方向

性結合器が不要となるシングルフィードカプラーとした（図1）。

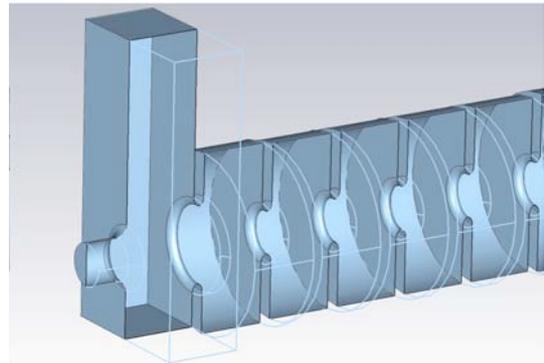


図1：シングルフィード導波管カプラー

2.2 ディスク部アイリス断面の楕円化

ディスク部アイリス付近は電界集中により表面電界強度が最も高くなる場所である。電界放出電流は電界強度に対して急峻な依存性を持つ事から、この電界集中を低減する事が暗電流を抑制する上で重要である。本加速管ではアイリス断面形状を、表面電界が最も小さくなるような扁平率を持つ楕円とした。これにより最大表面電界強度は、現在 SPring-8 線型加速器で使用されている 3m 加速管の 87%に低減されている。

表1：低暗電流加速管のパラメータ

Frequency	2856 MHz
Phase shift / cell	$2\pi/3$ constant impedance
Coupler type	Single-feed waveguide coupler
(Position of endplate)	(38 mm from center axis)
Iris diameter (2a)	20 mm
Coupler iris diameter	36.4 mm

[#] ihcuinat@spring8.or.jp

Disk thickness	5 mm
Iris shape (cross section) (Major / minor radius)	Ellipse (4.0 mm / 2.5 mm)
Group velocity v_g/c	0.01
Total length	1050 mm
Number of cells	24 (22 regular + 2 coupler)
Filling time	302 ns
Operation temperature	30 °C

3. 大電力試験

3.1 試験装置

大電力試験を実施するため、低暗電流加速管をRF電子銃試験装置内に設置した。RF源は80MWクライストロン(Toshiba E3712)で、真空導波管切替器^[2]によりRF伝送先をRF電子銃または低暗電流加速管へ切り替え可能となっている。

暗電流測定系として、加速管上流部にファラデーカップ、下流部にエネルギー分析用電磁石(偏向角10度)とファラデーカップを設置した。真空排気は排気速度45L/sのスパッタイオンポンプ1台と100L/sのNEGポンプ1台で行い、到達圧力は 1×10^{-6} Pa以下であった。



図2: 大電力試験セットアップ

3.2 RFコンディショニング

コンディショニング時のRFパルス幅は当初700nsとし、クライストロン最大出力に達した後2μsに広げた。パルス繰り返しは10ppsである。

コンディショニング開始から320時間(1.1×10^7 shots)で最大出力に到達した。そのときの加速電界強度は最上流部(第1セル)で27.6MV/mと見積もられる。その後、パルス幅2μsにてトータル648時間(2.3×10^7 shots)のコンディショニングを行った。

3.3 上流側暗電流

コンディショニングの各段階で、上流部ファラデーカップにて測定した暗電流量の加速電界強度依存性を図3に示す。19MV/m以上の領域では電界強度に対して指数関数的に暗電流が増えており、コンディショニングが進むにつれて全体的に減少する。これは通常の加速管で観測される暗電流の傾向と一

致しているが、19MV/m以下の領域では、コンディショニングの進行とともに16MV/m付近にピークが現れ、このピーク付近の電流量は、19MV/m以上の領域と比較してコンディショニング効果(暗電流の減少割合)が小さい。このピークに関しては、シミュレーションによる考察を行っている(後述)。

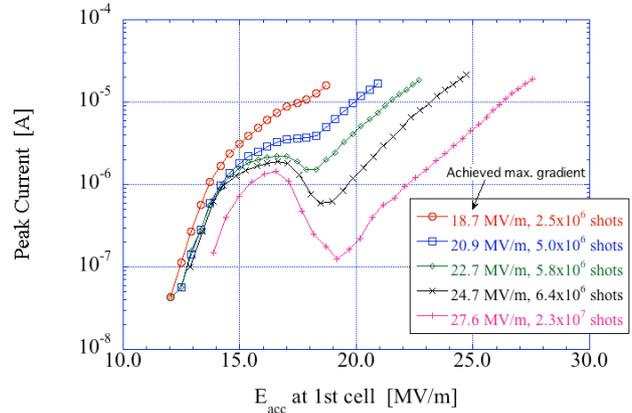


図3: 上流側暗電流 (E_{acc} :加速電界強度)

図3のデータについてFowler-Nordheim(F-N)プロットしたものが図4である。19MV/m以上のデータ点についてのフィッティングで得られた β 値(field enhancement factor)を図中に示しており、コンディショニングとともに β 値が減少しているのが分かる。なお、表面電界強度 E_{surf} は加速電界強度 E_{acc} の2倍である。

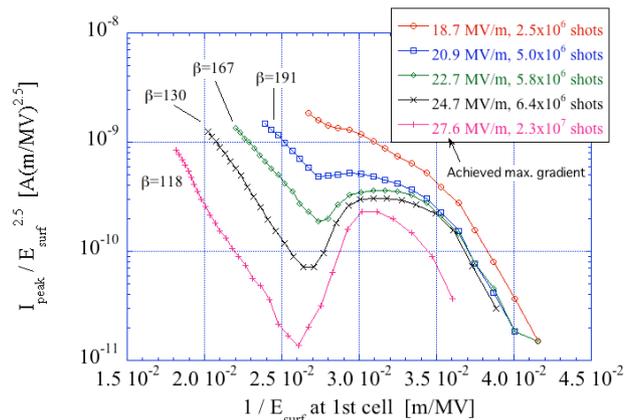


図4: 上流側暗電流F-Nプロット

3.4 下流側暗電流エネルギースペクトル

加速管下流に設置したエネルギー分析用電磁石及びファラデーカップにより測定された暗電流スペクトルを図5に示す。この図から分かるように、予想される加速電界強度から得られる最大加速エネルギーの約2分の1のエネルギーにピークを持つ分布となっており、加速電界強度を変えてもこの分布形状はほとんど変わらない。ただし、エネルギー分解

能が大きいためこのデータからは微細な分布構造があるかどうかは分からない。また、上流側に見られたような 16MV/m 付近のピークは下流側では観測されなかった。

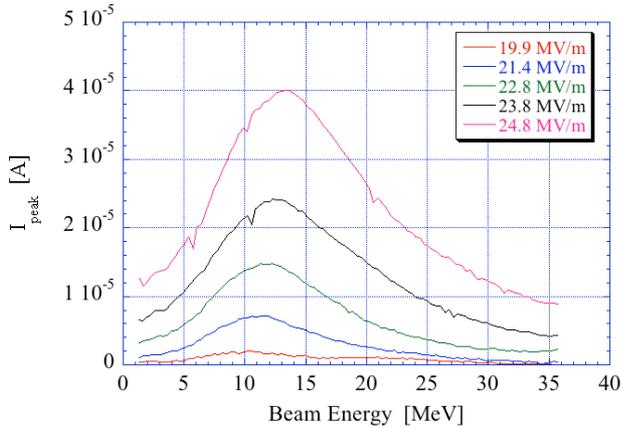


図 5：下流側暗電流エネルギースペクトル（電界強度は平均加速電界）

コンディショニング最終時点の下流側暗電流についての F-N プロットが図 6 である。フィッティングで得られた β 値は 122 であり、上流側の β 値 118 に近い値となっている。

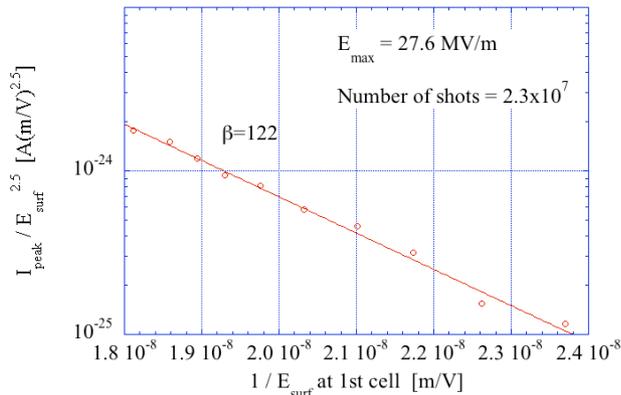


図 6：下流側暗電流 F-N プロット

4. 考察とまとめ

4.1 暗電流量

本加速管の暗電流量を評価するには現行 3m 加速管の暗電流量との比較が必要であるが、これについては未測定であるため、現段階では確定的な議論はできない。しかしながら加速管の暗電流量に関しては、KEK 入射器用 2m 加速管についての詳細な研究^[3]が報告されているので、ここではこれを参照したい。

KEK 入射器用 2m 加速管では 3 種類の加速管について暗電流測定を行っている。本加速管と似たようなコンディショニング条件時の暗電流量は、1)レギュラータイプ (6.2×10^7 shots、到達電界強度

23MV/m、上流：13.2 μ A、 $\beta=130$ 、下流：17.5 μ A、 $\beta=120$)、2)カプラー形状改良 (2.5×10^7 shots、25MV/m、上流：1.5 μ A、 $\beta=90$ 、下流 8.6 μ A、 $\beta=100$)、3)超純水高圧洗浄 (2.0×10^7 shots、25MV/m、上流：0.8 μ A、 $\beta=130$ 、下流 2.2 μ A、 $\beta=150$) となっている。コンディショニング条件やファラデーカップ位置などが違うため、本加速管の測定結果を直接比較することはできないが、ショット数、暗電流量、 β 値など概ね近い値であると考えられる。現段階で RF ブレークダウンの頻度は小さいため、投入 RF パワーを増やしてコンディショニングを進める事でさらに暗電流量が低減されることが期待できる。しかしながら本研究で使用した RF 源ではこれ以上 RF パワーを上げたコンディショニングはできないため、今後は化学エッチングによる表面処理^[4]の暗電流低減効果を調べる予定である。

4.1 上流側で観測された暗電流ピークについて

図 3 に示したように、上流側のファラデーカップで測定される暗電流量には、加速電界強度 16~17MV/m をピークとする増大が見られる。また、この部分は 18~19MV/m 以上の領域に比べてコンディショニング効果が小さいことが分かる。この暗電流増大がどのようなメカニズムで起きているか調べるため、上流部アイリス先端付近から発生した電子についてシミュレーションコードによるトラッキングを行った。

図 7 はカップリングアイリス（導波管-カップラーセル間）先端を上流側、下流側に分けて、それぞれの表面から電子を発生させた時に、上流ファラデーカップに到達した電子数を加速電界強度に対してプロットしたものである。

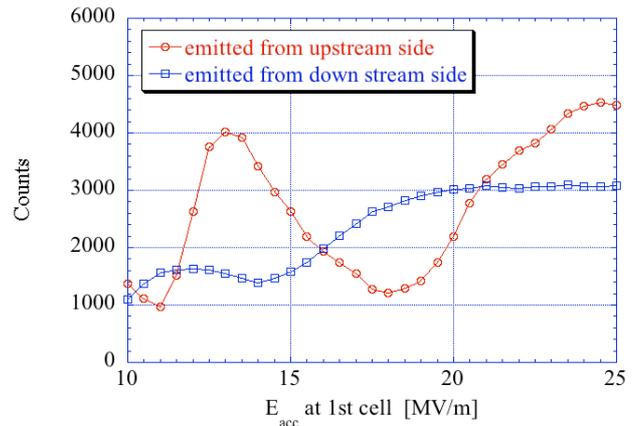


図 7：カップリングアイリス表面から放出されファラデーカップへ到達する電子数

ここで注目したいのは、アイリス上流側で 14MV/m 付近を中心として到達電子数が増加する領域があり、18MV/m 付近に極小を持っていることである。そこで、到達電子数が多い 14MV/m の場合と到達電子数が少ない 18MV/m で電子軌道にどのような違いがあるか見るため、それぞれの場合についてファラデーカップへの入射角をヒストグラムにした

ものが図8で、18MV/m に比べ 14MV/m の場合はファラデーカップにフォーカスされており、到達電子数が多い事が分かる。

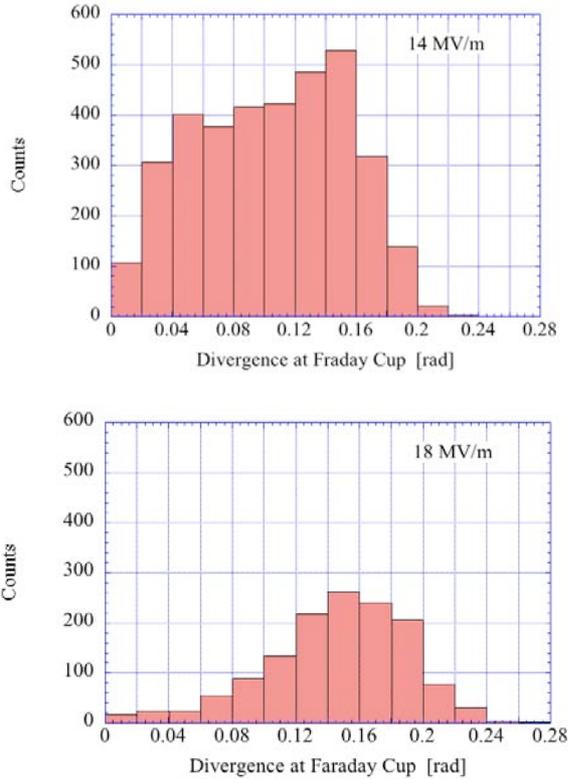


図 8 : カプリングアイリスから放出された電子のファラデーカップ入射角分布

ファラデーカップに入射される電子軌道の例を図9に示す。アイリスから放出された電子は、導波管内の電磁場で加速および収束されてファラデーカップに到達している。またシミュレーションによれば到達電子のエネルギーは小さく、20keV 以下である。

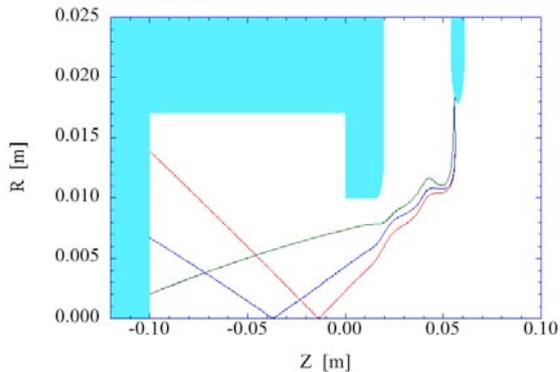


図 9 : 上流側ファラデーカップ到達電子の軌道例

本シミュレーションでは、カップリングアイリス上流側半分と下流側半分から放出される電子数が同じであるという仮定をしている。実際は電界強度やコンディショニング状態によって暗電流量が大きく異なってくるが、現段階でそれを定量的に議論する

ことは難しい。測定結果から、低加速電界領域に現れる暗電流ピークは高電界側に比べてコンディショニング効果が小さいことが分かるが、図10に示すようにカップリングアイリス上流側の電界強度が下流側に比べて小さいことに起因していると考えられる。

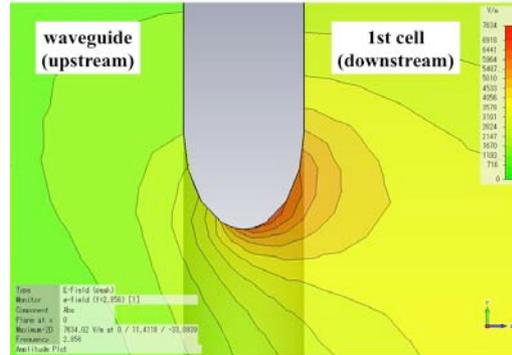


図 10 : カプリングアイリス付近の最大電界強度分布

以上のように、上流側で観測された暗電流ピークはカップリングアイリス上流側から放出された暗電流が導波管電磁場によりファラデーカップにフォーカスされるためである事がシミュレーションにより示唆された。加速管出力カプラーでも同様のことが起きているはずであるが、このような暗電流のエネルギーが 20keV 以下と小さいため下流側ファラデーカップでは観測されず、実用上の問題はないと考えられる。

4.2 まとめ

暗電流低減を目的として開発した加速管について大電力試験を行い、暗電流測定を行った。現段階では暗電流量の大小を評価することは難しいが、今後は 3m 加速管の暗電流測定や化学エッチングなどの表面処理による暗電流低減効果を調べるとともに、引き続きシミュレーションによる検証を行っていく予定である。

参考文献

- [1] T. Taniuchi, et al., "Development of Low Dark Current Accelerating Structure at SPring-8 Linac", Proc. of 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tokai, 2009, p1087.
- [2] T. Taniuchi et al., "High Power Test of S-band Vacuum Waveguide Switch", Proc. of 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tosu, 2005, p299.
- [3] Y. Igarashi, "Study on Linac Accelerating Structures for High-Gradient Acceleration", KEK Report 2003-9, January 2004.
- [4] H. Tomizawa et al., "Development of a High-Pressure Chemical Etching Method as a Surface Treatment for High-Field Accelerating Structures Made of Copper", XXIV Linear Accelerator Conference (LINAC08), Victoria, British Columbia, Canada, 889 (2008).