

Development of Low Dark Current Accelerating Structure at SPring-8 Linac

Tsutomu Taniuchi¹, Takao Asaka, Toshiaki Kobayashi, Shinsuke Suzuki, Hideki Dewa, Hiromitsu Tomizawa, Hirofumi Hanaki, Tamotsu Magome, Akihiko Mizuno, Kenichi Yanagida
 Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8)
 1-1-1 Kouto, Sayo, 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 surface treatment by a high-pressure chemical etching is also to be applied. In this paper, RF characteristics of a fabricated structure are reported.

SPring-8線型加速器における低暗電流加速管の開発

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。また、加速管表面全体の清浄度も重要である。本研究で開発中の加速管ではこれらの点について対策を施している。

2. 低暗電流加速管の特徴

2.1 電界結合型導波管カプラー

加速管と導波管の結合部であるカプラーセルはRFブレイ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ある。本カプラーでは結合孔のエッジを迂回する表面電流の高密度化に伴うパルスヒーティングがRFブレイクダウンの原因である。これを回避するため、SLACのNantistaら^[1]はモード変換カプラーと呼ばれる構造を提案しXバンド加速管において安定な高電界発生を実現している。これは、RF伝送モードを矩形導波管の TE_{01} モードからビーム軸方向に伝搬する円形導波管の TM_{01} モードに変換し、マッチングセルを介してRFパワーをレギュラーセ

ルにフィードするというもので、マッチングをとるために矩形導波管内にアイリスを設ける必要はあるが、表面電流密度を従来のカプラーよりも大幅に下げることができる。また、矩形導波管のE面をビーム軸上に配置した導波管電界結合型カプラーも提案され、この構造においては導波管内のマッチングアイリスをも不要としている。本開発では量産にも対応できるように、単純な構造で製作調整がし易く、3dB分配器も不要なシングルフィード型導波管カプラー^[2]を採用した。図1に本加速管で採用したシングルフィード型導波管カプラーの形状を示す。

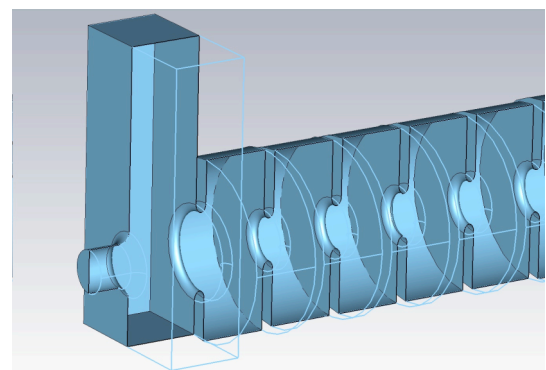


図1：シングルフィード導波管カプラー

2.2 ディスク部アイリス断面形状の楕円化

RF電界における平均電界放出電流 \bar{I}_F と電界強度 E_0 の関係は次式^[3]で表されるので、電界放出電流は電界強度に対して急峻な依存性をもつ。

$$\bar{I}_F = \frac{5.7 \times 10^{-12} \times 10^{4.52\phi^{0.5}} A_e (\beta E_0)^{2.5}}{\phi^{1.75}} \times \exp\left(-\frac{6.53 \times 10^9 \times \phi^{1.5}}{\beta E_0}\right) \quad [A]$$

ここで、 ϕ は仕事関数、 A_e は電流放出面積、 β は電界

¹ E-mail: ihcuinat@spring8.or.jp

増倍係数である。

加速管において表面電界強度が最大となる領域はディスク部のアイリス付近であるため、アイリス付近の最大表面電界強度を下げる事が暗電流の抑制に有効であると考えられる。

SPring-8線型加速器の進行波型3m加速管において表面電界強度が最大となる表面領域は、図2(a)に示すようにアイリス断面R部と直線部の境界付近であるが、アイリス断面形状を現在の真円に近い形状から楕円に変更する事で、図2(b)に示すように電界集中を緩和することができる。

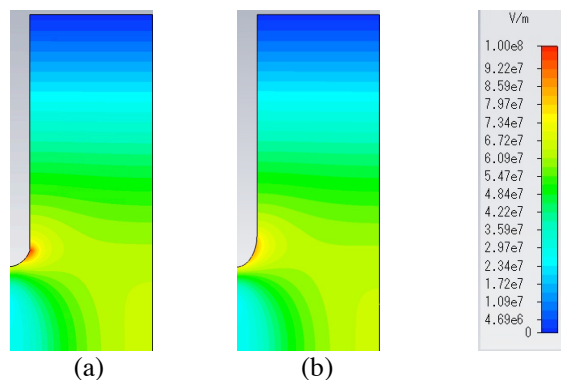


図2：加速管ディスク部表面における電界集中 $2\pi/3$ モード進行波の電界強度分布（全位相での最大電界強度分布）(a)SPring-8線型加速器3m進行波管、(b)低暗電流加速管（楕円：長半径4mm、短半径2.5mm）

楕円長半径(r_a)に対する最大表面電界強度の依存性をCST MICROWAVE STUDIO^{®2}（以下MWS）シミュレーションにより調べた。なおディスク厚は5mmに固定したので、短半径は2.5mmである。

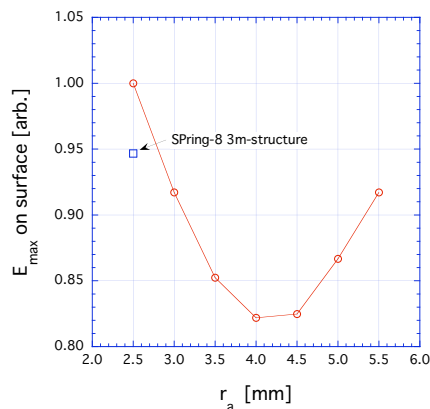


図3：アイリス断面の楕円長半径(r_a)に対する最大表面電界強度

図3に示すように、長半径4~4.5mmで最大表面電

界強度は最小となり、真円の場合の82%、現行3m管の87%に抑えられることが分かる。

一方、アイリス断面形状を楕円としたときのシヤントインピーダンスは図4のようになり、長半径4mmで現行3m管の98.7%である。

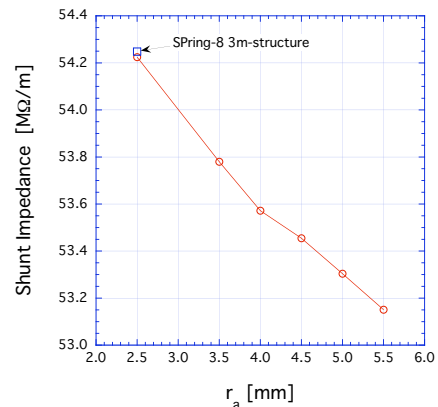


図4：アイリス断面の楕円長半径(r_a)に対するシヤントインピーダンス

以上のデータから判断し、アイリス断面は長半径4mm、短半径2.5mmの楕円形状に決定した。

2.3 化学エッチングによる加速管表面の改質

加速管表面からの電界放出電流量は微小突起、汚れなどの表面状態に大きく依存する。表面を平滑化あるいは清浄化する様々な方法が提案、実現されているが、SPring-8線型加速器では最終ロウ付け後のRF電子銃空洞に対する化学エッチング法を發明^[4]し、最大表面電界190MW/mを達成している^[5]。そこで本加速管についても、最終ロウ付け後に加速管全体に対して加圧化学エッチングを施す予定である。RF電子銃空洞の場合は空洞をエッチング液中で揺らして表面に付いた気泡を取り除くことができたが、加速管の場合は加圧することにより気泡を溶解、消滅させる方法を適用する。この加圧エッチング法の有効性は、カートリッジ式カソードRF電子銃で検証し、確かめられた^[6]。

3. 設計および製作

3.1 RF設計

低暗電流加速管の主なパラメータを表1に示す。RF設計では、まずMWSによるシミュレーションを行い概略寸法を決定した。その後、低電力モデルによる測定を行い、最終寸法を決定した。導波管端面の位置は、導波管内電磁場の中心が加速管中心軸と一致するよう加速管中心軸から38mmとした。また、カプラー部の最適化はMWSによるKuhl法^[7]シミュレーションにより行った。

² <http://www.cst.com/Content/Products/MWS/Overview.aspx>

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
Disk thickness	5 mm
Iris shape (cross section)	Ellipse
(Major / minor radius)	(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

3.2 空洞加工および接合

空洞はCLASS1無酸素銅（日立電線C10100）を超精密旋盤にてダイヤモンドバイト加工した。加工後のアイリス断面楕円形状について原子間力プローブによる形状計測（Panasonic社超高精度三次元測定器UA3P）を行い、寸法精度および面粗度を確認した。楕円部の面粗度は概ね、 $R_a:0.09\mu\text{m}$ 、 $R_y:1.4\mu\text{m}$ 、 $R_z:0.4\mu\text{m}$ であった。加工後の空洞セルは真空ロウ付けにより接合した。図5はロウ付け後の低暗電流加速管である。



図 5 : ロウ付け後の低暗電流加速管

3.3 RF調整および最終特性

ロウ付け後の加速管は、各加速セルに4カ所ずつ設けられたディンプリング穴から押しボルトにて共振周波数(位相)調整を行った。最終調整後のVSWRを図6に、ノードルシフト測定による各セルの位相シフトを図7に示す。

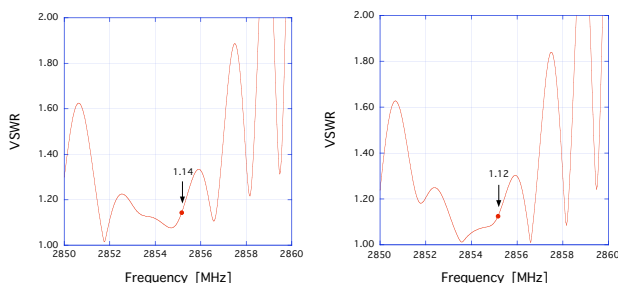


図 6 : VSWR(左 : 入力側、右 : 出力側)

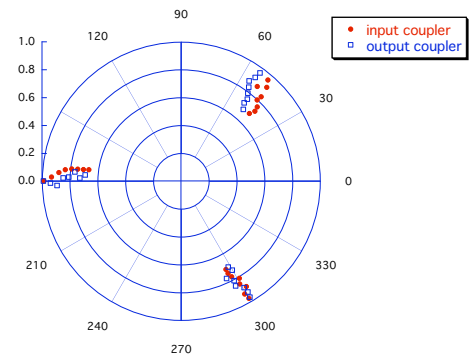


図 7 : ノードルシフト位相プロット

VSWRが入力側1.14、出力側1.12と若干悪く、位相プロットでは60°位置において入力側13°、出力側7°位相回りが小さくなっている。原因は調査中であるが、カプラー部でのマッチングが不十分であるためと推測される。また、ディンプリング中にディンプリングしていない近傍セルの共振周波数が100~200kHz低下するという現象が発生している。共振周波数低下の原因は不明で、現在、機械強度やロウ付け等の観点から調査中である。

4. まとめ

SPring-8線型加速器の暗電流量低減を目的として新型加速管の開発を進めており、1m加速管が完成した。今後、大電力試験を経て、RF電子銃ビームラインでのバンチ圧縮用エネルギー変調管として使用する予定である。

最後に、本加速管製作を担当いただいた日本高周波(株)の三浦厚、相澤修一、櫻井良平の各氏に感謝いたします。また、東芝機械(株)の西岡昌彦、工藤裕紀の各氏には超精密旋盤加工および形状測定に関して格段のご協力をいただきましたことをここに感謝いたします。

参考文献

- [1] C.D. Nantista et al., Proc. of the 2003 Particle Accelerator Conference, Portland, USA, May 12-15, 2003, p1276.
- [2] T. Taniuchi et al., Proc. of 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, Funabashi, Aug. 4-6, 2004, p326.
- [3] J. W. Wang and G. A. Loew, Proc. of the Joint US-CERN-Japan International School, 1996, p773.
- [4] H. Tomizawa et al., Proc. of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2003, p132.
- [5] H. Tomizawa and H. Ohtsuka, Japan Patent Application No.2007-84245.
- [6] H. Tomizawa et al., Proc. of LINAC08, Victoria, 29 Sep. - 3 Oct. 2008, p889.
- [7] E. Westbrook, SLAC-TN-63-103, Dec. 1963.