

KEK 電子陽電子入射器用 S バンド加速管の開発

NEW S-BAND ACCELERATING STRUCTURE FOR THE KEK ELECTRON AND POSITRON INJECTOR LINAC

恵郷博文^{#, A, B)}, 榎本嘉範^{#, A, B)}, 肥後壽泰^{A)}, 東 保男^{A)}, 坂東祐星^{B)}, 牛本信二^{C)},
重岡伸之^{D)}, 菅野東明^{D)}, 比嘉究作^{D)}

Hiroyasu Ego^{#, A, B)}, Yoshinori Enomoto^{A, B)}, Toshiyasu Higo^{A)}, Yasuo Higashi^{A)}, Yusei Bando^{B)}, Shinji Ushimoto^{C)},
Nobuyuki Shigeoka^{D)}, Tomei Sugano^{D)}, Kyusaku Higa^{D)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)}The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

^{C)}Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

^{D)}Mitsubishi Heavy Industries Machinery Systems, Ltd. (MHI-MS)

Abstract

New S-band accelerating structures have been developed to be replaced with the current structures deteriorating over time in the KEK electron and positron injector LINAC. The new structures are a TM₀₁-2 π /3 mode traveling-wave type generating a quasi-constant accelerating gradient. They were designed to have a shunt impedance of 61.7 M Ω /m and to generate an electric gradient of 25.9 MV/m at a rated input power of 40 MW. The disc irises of the structures have oval fillets lowering their surface electric fields to suppress discharge. The irises tapered along the structure detune the HEM₁₁- π like modes with the highest transverse impedances to suppress long-range-wake instabilities in operation of 2-bunch beam with a high charge of 4 nC. We report on the design, manufacture, and high-power operation up to 100 MW over the rated power.

1. はじめに

約 40 年に渡り KEK 電子陽電子入射器で使用されている PF タイプ S バンド加速管 (以下、PF タイプ管) [1, 2]の多くに経年劣化による放電多発や水漏れなどが生じており、入射器安定運転への障害となっている。硬性鏡による加速管の内面観察[3]、重障害加速管の切断調査[4]から修復や再コンディショニングによる回復は困難と判断されたため、代替機となるディスクロード型 S バンド加速管の開発を 2017 年より開始した[5]。本稿では加速管実機的设计、製作、大電力運転について報告する。

2. 製作

2.1 高周波設計

新加速管は TM₀₁-2 π /3 モード 2856 MHz (本体 30°C、内部真空中) 準定勾配進行波型である。加速管の概形図と断面図を Fig. 1、PF タイプ管と比した高周波特性の設計値を Table 1 に示す。加速管全長、フランジタイプ (KEK 入射器専用丸型) とその位置、運転周波数、運転条件などは劣化加速管との交換を考慮した設定である。PF タイプ管は、高次モードによる BBU (beam break-up) 対策としてディスクアイリス径 2a サイズの分布が異なる 5 種類が存在する。Table 1 は 5 種の各パラメータに対して最大、最小の値を示している。新加速管のディスクアイリスのエッジは 1:2 の楕円形状に丸めており、PF タイプ管の円型に比べて表面電界強度は約 20% 低くなる。

R&D 機では、磁界強度が高くなる内面外周部に R を付けて Q 値を向上させたセル形状としたが[4]、コストや製作工程を考慮して実機では通常のディスク・シリンダータイプとした。

シャントインピーダンスの設計値は 61.7 M Ω /m、定格 40 MW 入力で 25.9 MV/m の加速電界を発生する。入射器の加速管は SLED によって 1 μ s にパルス圧縮されたパワーで運転されている (Fig. 2)。

SuperKEKB 蓄積リングに電子、陽電子ビームを供給する際、最大 4 nC の電荷を持つ 2 バンチビームを加速する。バンチの時間間隔は、バンチャー周波数と蓄積リングの加速空洞周波数、RF パルスコンプレッサーの利得曲線の幅を考慮して 96.29 ns となっている[6]。この高電荷 2 バンチビームを安定に加速するため、long-range ウェイクによるビーム不安定性を抑制するように 2a 径を設定した。TM₀₁-2 π /3 加速モードを 2856 MHz に設定すると、4.3 GHz

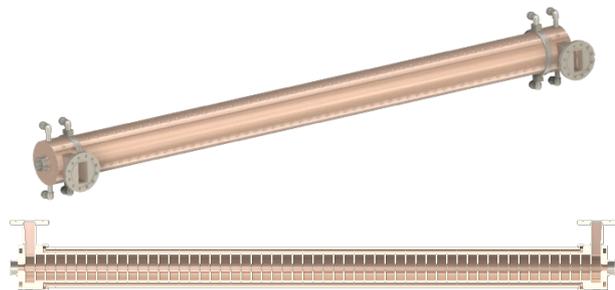


Figure 1: New S-band accelerating structure for the KEK injector and its cutaway view.

[#]ego@post.kek.jp

付近で横方向に高いインピーダンスを持つ HEM11- π モードがビームと同期する。このモードに対して 122.3 MHz の線形周波数分布を与え、最初のバンチが励起した HEM11 ウェイク場が次のバンチが通過する 96.29 ns 後にビートの節となって、1/1000 程度まで減少するように設計した。

カップラーに関しては R&D で設計、試作した形状を採用した (Fig. 3)。放電抑制および表面電流によるパルスヒーティング低減のため、カップラーアイリス部や電界対称性補正凹部 (三日月カット) から鋭いエッジを排除した形状となっている。

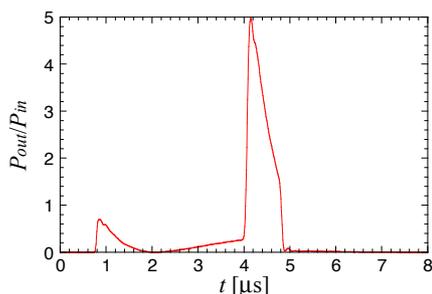


Figure 2: Waveform of an output power of the KEK RF pulse compressor. P_{out}/P_{in} shows the power multiplication factor.

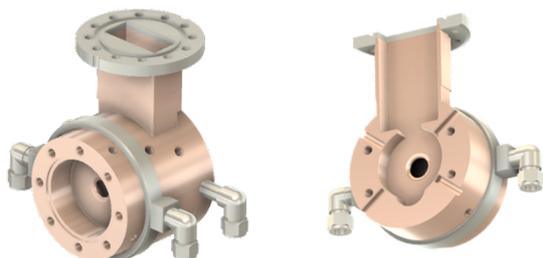


Figure 3: Schematic of the input/output coupler and its cutaway view.

2.2 製作・低電力測定

材料は HIP 処理したクラス 1 無酸素銅 (C1011) を用いた。超精密旋盤による加工にて主要寸法の公差は $\pm 5 \mu\text{m}$ 以下、ディスク平坦部とシリンダー部の表面粗さは Rz 0.1 以下、ディスクアイリス部は Rz 0.3 以下に仕上げた。PF タイプ管は加速セル本体を電鋳で一体化、その本体にろう付け組立したカップラーを EBW で接合、TIG による冷却ジャケット溶接など複雑な製作工程で組立されており[2]、現在ではその製作方法を再現することは技術、コスト両面でメリットがない。そのため、今回の製作ではろう付けによる組立とし、接合条件の最適化を行った。

実機セル加工と組立を行う前に加速管最上流部、中央部、最下流部の $2a$ 径をもつ 3 種の 9 セル定インピーダンスモデル管を製作して加工精度の確認、加速モードおよび HEM11- π モードの高周波特性の測定、ディンプリングによる周波数調整試験を行った。モデル管の測定結果は 3 次元 RF シミュレータ ANSYS-HFSS[7]や MAFIA、CST-Studio[8]から得た

設計値に非常によく一致した。各モデル管の HEM11- π モード周波数はシミュレーション計算値より約 1.4 MHz 低い値であったが、周波数変化量のばらつきは 0.1 MHz 以下で誤差として問題のない結果が得られた。低電力 RF 測定で得た実機加速管 4 本の高周波特性を Table 2 に示す。シャントインピーダンスはモデル管の平均値である。周波数調整のディンプリングのため、加速管内面が荒れて Q 値が設計値より約 3% 低くなっているが、それ以外は設計性能通りの良好な高周波特性となっている。

Table 1: RF Properties of the Accelerating Structure

	PF タイプ (5 種)	新型
運転周波数 f_a [MHz]	2856	
運転モード	TM01- $2\pi/3$	
型式	準定加速勾配進行波型	
レギュラーセル数	54	
入出力カップラー	電界対称性補正凹み付き 1 開口型	
ディスクアイリス $2a$ [mm]	27.875-19.700	23.340 - 19.234
減衰定数 τ [Neper]	0.302 - 0.368	0.366
平均シャントインピー ダンス R_{sh} [$M\Omega/m$]	57.3 - 58.3	61.7
Q	13,700	14,000
平均群速度 v_g/c	0.0137 - 0.0113	0.0117
フィリングタイム T_f [μs]	0.462 - 0.558	0.570
加速利得 [$\text{MeV}/\text{MW}^{1/2}$]	7.00 - 7.58	7.87
全長 L [mm]	2,066	2,064

Table 2: RF Properties of the Fabricated Structures

号機	#001	#002	#003	#004
測定周波数 [MHz]	2856.000			
30°C 真空換算				
累積相誤差 [°]	2.67	-2.86	-1.59	-1.89
入力 VSWR	1.008	1.004	1.010	1.002
出力 VSWR	1.021	1.021	1.026	1.019
平均シャントイン ピーダンス (モデ ル管) [$M\Omega/m$]	62.3			
τ	0.38	0.38	0.38	0.38
T_f [μs]	0.57	0.57	0.57	0.57
Q	13,610	13,600	13,620	13,590
v_g/c	0.012	0.012	0.012	0.012

3. 大電力運転

製作した4本の加速管は、2ヶ所のSバンド機器テストベンチで大電力性能の確認とコンディショニングを行った。放射線シールド内に設置した新加速管の様子を Fig. 4 に示す。イオンポンプで加速管を 10^6 Pa レベルに真空引きした状態で、大電力高周波を投入していった。加速管本体内部には $\phi 10$ mm の水路が8本設けられており (Fig. 3)、 30°C 純水を18 L/min 流して冷却した。



Figure 4: S-band accelerating structure set in the radiation-shield room for RF high-power conditioning.

Figure 5 に2号機のコンディショニング履歴を示す。パルス運転の繰り返しは50 Hz、RFパルスコンプレッサー出力パルス幅 $0.5 \mu\text{s}$ でスタートし、100 MW 到達後、パルス幅を定格の $1 \mu\text{s}$ まで広げた。現在の定格運転パワーは40 MW であるが、将来、80 MW での運転を予定している。加速管フィリングタイムの時間平均で80 MW 投入するにはRFパルスコンプレッサー出力ピークで126 MW までコンディショニングする必要があるが、加速管出口に接続したダミーロードの入力パワー制限のため、今回の運転上限パワーは100 MW となった。 $1 \mu\text{s}$ での上限値が96 MW に制限されているのも、パルス幅が長くなるに連れてダミーロードの真空悪化頻度が上がるためである。パルス幅 $0.5 \mu\text{s}$ で100 MW に到達するまでに463時間 (インターロックによる一時停止時間を含む)、パルス幅 $1 \mu\text{s}$ で96 MW に到達するまでに80時間を要した。最初から $1 \mu\text{s}$ でコンディショニングを開始する場合に比べると $0.5 \mu\text{s}$ コンディショニングはガス放出の量・頻度も少なく、ダ

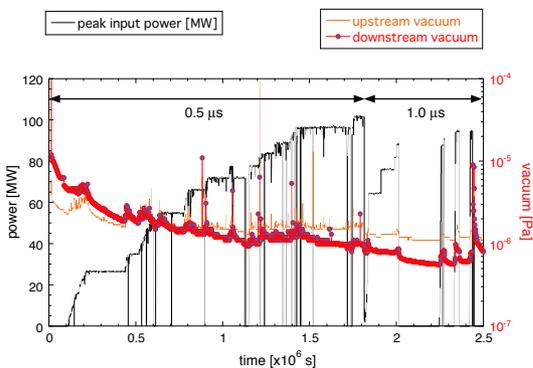


Figure 5: Conditioning history of the S-band accelerating structure #002.

ミーロードへの負荷も少ないため、より短い時間で目標パワーへ到達した。パルス幅 $0.5 \mu\text{s}$ コンディショニング後であれば、 $1 \mu\text{s}$ コンディショニングでの真空悪化や反射異常の頻度は少なく、短時間で目標値へ到達する。

100 MW までのコンディショニングを終了した加速管4本は2021年1月に入射器トンネル内4セクター第4加速ユニットに設置され、現在、ビーム加速運転に使用されている。このユニットは2022年度にクライストロンが増設され、加速管1本あたり80 MW で運転を行う。

4. まとめ

経年劣化によるPFタイプSバンド加速管の代替となる新型Sバンド加速管の開発を行った。加速管はTM01- $2\pi/3$ モード2856 MHz 準定勾配型で定格40 MW 入力で25.9 MV/m の加速電界を発生する。製作した4本の加速管は設計通りの高周波特性を有し、コンディショニングによりRFパルスコンプレッサーのピーク出力で約100 MW の大電力運転が可能となった。SuperKEKB での6s 共鳴実験に必要なエネルギー増強と安定運転を実現するため、現在、12本の量産を行っており、2023年度内に入射器へのインストールを完了させる予定である。

謝辞

新加速管開発の推進および多大なサポートをいただいた加速器第五研究系 古川和朗主幹に感謝いたします。また、大電力試験を行うにあたり、入射器RFグループおよび三菱電機システムサービス (株) 運転員各位に多くの支援をいただきました。深く感謝いたします。

参考文献

- [1] I. Sato *et al.*, "Design report on PF Injector Linac Upgrade for KEKB", KEK Report 95-18, in Japanese.
- [2] Y. Iino *et al.*, "PF 2.5 GeV Linac Accelerator Tube Fabrication", Proceedings of the 7th Meeting on Linear Accelerators, KEK, Japan, Aug. 24-26, 1982, pp. 52-55.
- [3] T. Higo *et al.*, "KEK の電子陽電子入射器に30年以上用いられてきた加速管の内面検査と高電界特性", Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, Aug. 8-10, 2016, pp. 853-857.
- [4] T. Higo *et al.*, "30年以上用いられたKEK電子陽電子入射器Sバンド加速管の内面検査", Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 456-459.
- [5] A. Saji *et al.*, "Sバンド加速管の製作", Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 918-921.
- [6] Y. Ogawa *et al.*, "KEKB ライナックにおける陽電子倍増のための大強度2バンチ加速", Proceedings of the 26th Meeting on Linear Accelerators, Tsukuba, Japan, Aug. 1-3, 2001, 1B-2.
- [7] <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss/>
- [8] <https://www.3ds.com/ja/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>