

Sバンド球形単空洞型コンパクトパルスコンプレッサー実機の製作

PRODUCTION OF THE S-BAND SPHERICAL-CAVITY-TYPE PULSE COMPRESSOR FOR THE KEK ELECTRON AND POSITRON INJECTOR LINAC

惠郷博文^{#,A,B}, 阿部哲郎^{A,B}, 由元崇^{A,B}, 肥後壽泰^A, 東 保男^A, 坂東佑星^B, 牛本信二^C, 芦田宗信^D,
武田千夏^D, 宇崎聡太^D

Hiroyasu Ego^{#,A,B}, Tetsuro Abe^{A,B}, Takashi Yoshimoto^{A,B}, Toshiyasu Higo^A, Yasuo Higashi^A, Yusei Bando^B,
Shinji Ushimoto^C, Munenobu Ashida^D, Chinatsu Takeda^D, Sota Uzaki^D

^AHigh Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^BThe Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

^CMitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

^DMeisyo Kiko Co., Ltd.

Abstract

We have developed a spherical-cavity-type pulse compressor (SCPC) as an alternative to the aging SLED-type pulse compressor used in the KEK electron/positron injector linac for approximately 30 years. The SCPC resonating at the degenerate TE₁₁₂ dipole modes with a high Q -value of 100,000 has a supercompact body with rf performance equivalent to that of the SLED and markedly reduces production costs. A prototype of SCPC was fabricated to have a robust body for high-power operation and demonstrated the excellent performance as we designed. The actual mass-production SCPC was manufactured in 2021. In this paper, we report on the production of the actual machine and brief results of the frequency tuning and high-power test.

1. はじめに

KEKB 入射器増強時に SLED 型パルス圧縮器が開発され[1]、約 30 年に渡って KEK 電子陽電子入射器で使用されてきた。この SLED 型パルス圧縮器が老朽化してきていること、更に、製作コストが高いため、高周波加速ユニット増強用のパルス圧縮器として、新機軸の球形単空洞型パルス圧縮器 (SCPC) [2]の S バンドタイプを 2020 年より開発してきた[3-7]。電子陽電子入射器での定格運転 (2856 MHz・40 MW・4 μ s・50 Hz) にて、ピークで約 6 倍、平均 4 倍のパルス圧縮率を得ること、高負荷運転に耐えうる冷却能力を有すること、低コスト量産に向けた製造が可能なること等の条件を満足するように高周波・熱・機械設計を進め[3, 4]、プロトタイプ機製作と高電力試験を実施した[5-7]。これにより良好な試験・解析結果を得たため、ビーム加速システムに投入する実機製作を 2021 年度に行なった。プロトタイプ機製作で得た知見を元に、量産と製作コスト削減を視野に入れた加工プロセス、接合組立、電気性能調整手法を確立することが本研究の課題である。

2. 構造・高周波特性

SCPC は、Fig. 1 に示すように SLED とは大幅に異なる構造を持つ[3]。ただし、高周波特性は、互換性を考慮して KEK-SLED と同じ値になるように設計している (Table 1) [3]。高周波エネルギーを蓄積する空洞は球形単セル型で高い Q 値を持つ TE₁₁₂ モード

で共振する。SLED で RF パワーを振り分ける 3 dB ハイブリッドの代わりに 3 ポート導波管偏極器 (以下、偏極器) を球形空洞に接続する。入出力ポートは WR-284 矩形導波管で TE₁₁ モード、空洞と接続する ϕ 72 円筒導波管は円偏向 TE₁₁ モードで高周波を伝送し、球空洞内に回転する TE₁₁₂ モードを励起する。この回転状態は、偏向面が直交し、位相が 90°異なる 2 つの TE₁₁₂ モードの縮退状態と見なすことができる。従って、パルス圧縮率を劣化させないためには、空洞内で縮退モードの励起を確保することが重要となる。

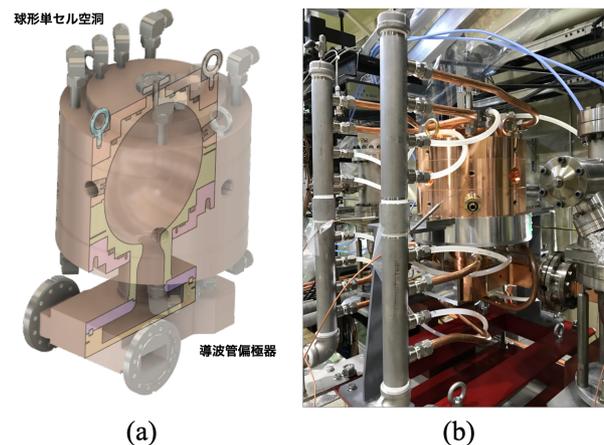


Figure 1: (a) Cut-off schematic and (b) photo of the prototype SCPC.

[#] ego@post.kek.jp

Table 1: Design RF Parameters of SCPC and KEK-SLED

	SCPC	KEK-SLED
周波数 [MHz]		2856
無負荷 Q		100,000
β		6.4
ピークパワー圧縮率		6.2
空洞共振モード	Spherical TE ₁₁₂	Cylindrical TE ₀₁₅

3. 製作

3.1 製作工程

プロトタイプ機の製作工程、加工精度などの詳細は、文献[3, 5]に記されているので参照されたい。Figure 2 に SCPC の部品構成を示す。実機もプロトタイプ機と同じく 6 つの主要部品から構成され、クラス 1 無酸素銅材から削り出し加工した。

今回の実機製作では加工、ろう付け手順を変更した。プロトタイプ機では上下の半球部品を仮組みして周波数測定と調整加工を行なったが、水路や水路蓋接合面の保護を考慮して、実機では半球部品と水路蓋、冷却水パイプを先ず一体ろう付けして上下の半空洞を形成後に周波数の調整加工を行なった。また、外部機器との接続、ろう付け姿勢の変更により下記の仕様変更を行った。

- デチューナー[8]ポートフランジ
→ $\phi 70$ ハイブリッドタイプ (SUS316L)
- 主冷却配管 $\phi 18$ mm → $\phi 3/4$ インチ
- ろう溝加工位置

量産を視野にいた加工組立、周波数調整手順は下記のとおりである。最初にクラス 2 無酸素銅材にて試作して、改変した製作手順と各過程での仕上がりに状態確認と電気特性測定技術の習得を行った。

1) 各パーツ製作

本体銅材に関しては第 1 次加工後に 900°C アニールを行った。その後、球面を持つ半球部品以外を仕上げ加工まで完了させた。球面初期加工半径は、設計値より 200 μ m 小さくした。空洞結合孔、円筒導波管を含め、内面はダイヤモンドバイト精密旋盤で加工、その精度及び表面粗さの仕様を Table 2 に示す。

2) STEP1 接合組立

半空洞：第 1 次加工後の各半球部品と水路蓋、

Table 2: Machining Accuracy and Surface Roughness

空洞内面輪郭度・平面度	10 μ m 以下
空洞内表面粗さ	Rz 1 μ m 以下
偏極器円筒導波管部 内面輪郭度	10 μ m 以下
偏極器矩形導波管部 内面輪郭度	50 μ m 以下
偏極器内表面粗さ	Rz 10 μ m 以下

- 冷却パイプを先に銀ろう (ナイス社製 V1008-2M) にて真空ろう付けで接合して半空洞を形成した。この STEP1 ろう付けにより半球開口部付近の半径が約 30 μ m 収縮した。偏極器単体：規定寸法まで仕上げ加工した偏極器の本体と蓋、KEK 型 RF 丸フランジ (SUS316L) を真空ろう付け (V1008-2M) にて組み立てた。
- 調整加工
半空洞を仮組みして球形空洞を形成後、円筒導波管部にモード変換器[3]を取り付けて高周波計測し、その結果に応じて内面修正加工を数回繰り返して周波数を調整した (Fig. 3)。計測繰り返しによる半空洞合わせ面の表面劣化を回避するため、修正加工は空洞半径と同時に接合面も切削加工した。Figure 3 (b) に試作品での設計寸法差 (ΔX) と周波数差の関係を示す。縮退状態は、モード変換器を回転させて S パラメータ、共振周波数、 Q 値を測定することによって確認した。縮退している場合は回転角に依らずに一定の高い Q 値を示す。
 - STEP2 接合組立
空洞内面の調整加工終了後、全部品を銀ろう (BAg-8) にて真空ろう付け接合で組み立てた (Fig. 4)。STEP2 ろう付けによって共振周波数は 80 kHz 上昇した。
 - 周波数調整
組立完了した SCPC の高周波測定を行い、電気特性を確認しながら、デインプリングによる周波数精密調整を行った。この測定は偏極器の WR-284 導波管入出力ポートを使用して行う。着脱可能なチューナー[4]を空洞本体に取り付けて (最大 8 ケ所：Fig. 4)、TE₁₁₂ モードを縮退させると共に共振周波数を 2856 MHz (定格運転状態時) に調整した。チューナー押し引きでバックラッシュは生じるが、1 台あたりの周波

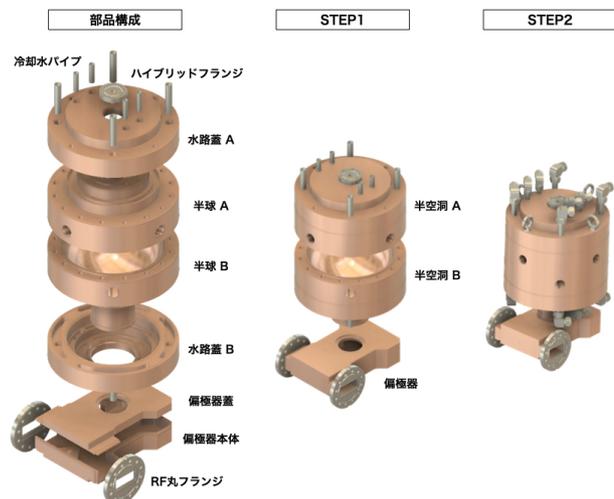


Figure 2: SCPC components and fabrication steps by Ag-brazing.

数調整量は約 40 kHz/mm である[5]。縮退は入出力ポートの S_{11} 、 S_{22} 値が -30 dB 以下で最小となるように複数のチューナーで調整した。この調整により Q 値も設計値相当が得られた。

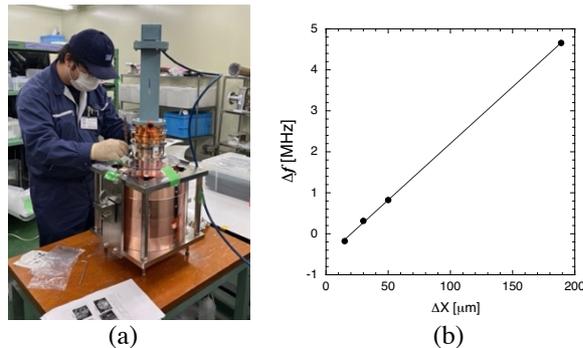


Figure 3: (a) Temporary assembly of the spherical cavity for RF measurement before correction processing and (b) frequency change of the trial product cavity by correction processing.



Figure 4: Fabricated SCPC with the frequency tuners.

3.2 製作結果

製作した SCPC 試作機と実機の低電力測定結果を Table 3 に示す。 Q_{ex} は外部 Q 値を表す。無負荷 Q 値が計算値より 1~2% 程度低いのがパルス圧縮率やエネルギーゲインにはほとんど影響ない。両機で共振周波数が異なるのは今後の使用目的が異なるためである。実機はビーム加速システムにインストールするため、定格運転時に生じる周波数低下量を考慮、試作機はテストスタンドでの今後の実験で想定される値に調整した。

実機 SCPC を高電力テストスタンドに設置してピーク出力 80 MW (パルス幅、繰り返しは規定値) となるまでコンディショニングを行った。プロトタイプ機と同様に順調に高電力運転できることを確認した。最大入力パワーは下流側に設置したダミーロードの許容値によって制限されている[7]。

4. まとめ

S バンド球形単セル空洞型パルスコンプレッサー

Table 3: RF Characteristics of the Fabricated SCPC

SCPC	共振周波数 [MHz]	Q	Q_{ex}	β
31°C 真空換算				
試作機	2856.028	98,800	15,600	6.35
実機	2856.081	98,000	15,100	6.48

の実機製作を行った。プロトタイプ機から改変した工程にて量産手法、高周波特性調整方法を確立した。低電力電気特性試験や高電力試験にて設計性能を満足するパルス圧縮率を得ることも確認できた。今夏のメンテナンス期間に電子陽電子入射器にインストールし、秋より新型加速管[9]のビーム加速運転に用いる予定である。

謝辞

SCPC 開発の推進及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 前研究主幹に深く感謝いたします。また、大電力試験を行うにあたり、入射器 RF グループ及び三菱電機システムサービス (株) 運転員各位に多くのご支援をいただきました。感謝いたします。

参考文献

- [1] I. Sato *et al.*, “Green Book”, KEK Report 1995-18, 1996.
- [2] J. W. Wang *et al.*, “Development for a supercompact X-band pulse compression system and its application at SLAC”, *Phys. Rev. Accel. and Beams*, 20, 110401, 2017.
- [3] T. Higo *et al.*, “Design of S-band spherical-cavity-type pulse compressor for SuperKEKB”, FRPP39, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sep. 2-4, 2020, Online.
- [4] A. Saji *et al.*, “Thermal analysis of a spherical-cavity-type pulse compressor for the SuperKEKB project”, THPP39, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sep. 2-4, 2020, Online.
- [5] A. Saji *et al.*, “Fabrication of a spherical-cavity-type pulse compressor”, MOP045, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 9-12, 2021, QST-Takasaki, Online.
- [6] T. Higo *et al.*, “RF characteristics view of construction of spherical-cavity-type pulse compressor”, TUP045, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 9-12, 2021, QST-Takasaki, Online.
- [7] Y. Bando *et al.*, “High power test of S-band spherical-cavity type pulse compressor”, WEOB06, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 9-12, 2021, QST-Takasaki, Online.
- [8] T. Higo *et al.*, “Detuner design for spherical-cavity-type pulse compressor”, WEP046, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Oct. 18-21, 2022.
- [9] H. Ego *et al.*, “New S-band accelerating structure for the KEK electron and positron injector linac”, WEOA04, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 9-12, 2021, QST-Takasaki, Online.