

## 球形空洞型パルス圧縮器の製作

### FABRICATION OF A SPHERICAL-CAVITY-TYPE PULSE COMPRESSOR

佐治 晃弘<sup>#, A)</sup>, 井原 功介<sup>A)</sup>, 野村 伊久磨<sup>A)</sup>,  
肥後 壽泰<sup>B)</sup>, 恵郷 博文<sup>B, C)</sup>, 阿部哲郎<sup>B)</sup>, 東 保男<sup>B)</sup>,  
坂東 佑星<sup>C)</sup>, 林 显彩<sup>D)</sup>, 施嘉儒<sup>D)</sup>  
Akihiro Saji<sup>#, A)</sup>, Kousuke Ihara<sup>A)</sup>, Ikuma Nomura<sup>A)</sup>,  
Toshiyasu Higo<sup>B)</sup>, Hiroyasu Ego<sup>B, C)</sup>, Yasuo Higashi<sup>B)</sup>, Yusei Bando<sup>C)</sup>, Xiancai Lin<sup>D)</sup>, Jiaru Shi<sup>D)</sup>  
A) Toyama Co., Ltd.  
B) High Energy Accelerator Research Organization, KEK  
C) Graduate University for Advanced Studies  
D) Tsinghua University

#### Abstract

A spherical-cavity-type pulse compressor (SCPC) is more compact than a SLAC Energy Doubler (SLED) and comprises a single spherical cavity and a waveguide polarizer. Based on the S-band SCPC developed in Tsinghua University (China), we designed a SCPC capable of high power operation in the KEK e-/e+ LINAC and compatible with the currently running SLED. A prototype SCPC was manufactured to establish machining, brazing and tuning. It achieved the proper RF properties and a robust body for the high power operation. We report in this paper the fabrication of the SCPC, focusing on the assembly method and brazing procedure.

#### 1. 序論

高周波パルス圧縮器は加速管に入力する RF パワーを増大させるために用いられる。SLAC で開発された従来のシリンダー形状の 2 空洞型のものと比較して[1]、球形空洞型パルス圧縮器は共振部が 1 つの球体であるため非常にコンパクトになる。S バンドの球形空洞型パルス圧縮器は清華大学で開発されて実験室レベルで稼働している実績がある[2]。KEK は、このモデルを基に SuperKEKB の高い安定性と高繰返しに対応できるように設計し直して[3]、KEK 電子陽電子入射器で稼働している既存の 2 空洞型のものと同置換え可能なパルス圧縮器として製作し、目標の電気的特性を得た[4]。現在、大電力試験が行われている[5]。本稿では、プロトタイプ球形空洞型パルス圧縮器における製作過程でのパーツの組立方法や接合要領を中心に製作方法及びその結果を報告する。

#### 2. 機械設計

今回開発した球形空洞型パルス圧縮器では、小型軽量化によるコストダウンのほか、組立アライメントの再現性が高く且つ接合箇所が減るように、構成部品点数を減らす事をコンセプトとして設計した。この球形空洞型パルス圧縮器の概観図を Fig. 1 に示す。主要部品は、半球 2 ケ、水路蓋 2 ケ、導波管偏極器(本体及び蓋)、及び RF チューナーであり、全重量は 150 kg 程度である。共振部の球形空洞は、中ぐりで加工でされる半球 2 ケより形成する。縮退する 2 つの 90 度位相のずれた共振モードは半球接合部を過る電流を持つので、この接合部は電気的に良好な接触が要求される。球形空洞と導波管偏極

器を接続する円筒導波管は、結合孔側の球形空洞半球と一体構造にした。導波管偏極器は X 字型 3dB ハイブリットの中央に円筒導波管を接続する構造である。RF 発熱分布は局所的に高い結合孔近傍を除けば全体的にはほぼ均一であるので、空洞内面の近くにバランス良く水路を配置した[6]。具体的には球形空洞中央付近に RF チューナーを避けて均等に 16 本の主系統  $\phi 10$  水路に加えて、発熱量の大きい結合孔近傍を含む両極部に各 2 列の周回する水路を配置して冷却効率を高めた。空洞の共振を外すディチューナー用ポートフランジには、銅ガスケット 1 枚で真空シール及び RF シールができる MO フランジを採用した[7]。RF チューナーは半球接合部から近い位置に対称に計 8 か所設置した。0.05 mm 以下の分解能が要求されるので、送りねじ機構とした。

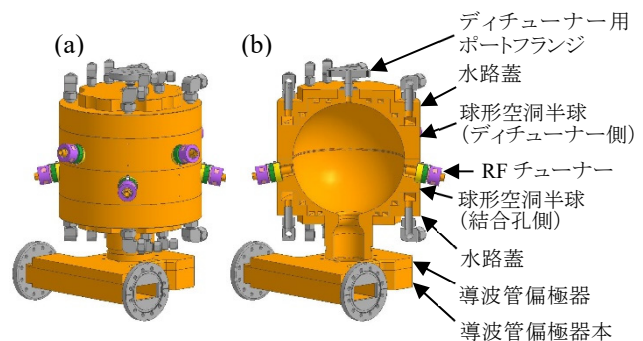


Figure 1: (a) Schematic view and (b) a part of cross-sectional view of the spherical-cavity-type pulse compressor (SCPC).

<sup>#</sup> saji@toyama-jp.com

### 3. 製作

#### 3.1 製作手順及び概要

今回のプロトタイプ機製作では、球形空洞や導波管等の銅材には無酸素銅 2 種 (C1020) を用い、その他フランジや冷却パイプ等の材質には SUS304 を用いた。主要部品の機械加工については(株)オオツカが行い、それ以外の製作については(株)トヤマが行った。主要部品の接合手法には、接合面の密着性が高いため、 $Q$  値の劣化が少なく、局所的な熱変形が生じにくい真空ロウ付けを用いた。ディチューナー用ポートフランジの接合については、真空シールエッジが軟化せぬようにロウ付け後に TIG (Tungsten Inert Gas) 溶接で行った。また工程毎に RF 測定を行い、各製作工程による低電力 RF 特性への影響の把握に努めた。以下に製作手順を示す。

1. 丸棒切断
2. 荒加工
3. 中仕上げ加工
4. 500°Cアニール (球形空洞半球のみ実施)
5. 仕上げ加工 (球形空洞内面と半球接合面)
6. ロウ付け 1 (球形空洞半球、水路蓋、冷却パイプによる空洞形成)
7. ロウ付け 2 (導波管偏極器の単体組立)
8. ロウ付け 3 (空洞と導波管偏極器、ディチューナー用ポートの組立)
9. ディチューナー用ポートフランジの TIG 溶接
10. RF チューニング

#### 3.2 部品製作と評価

共振空洞半球は仕上げ加工前に 500°Cアニール処理を施した。その後変形が生じないようにクランプ形状の専用治具を用いてチャッキングし、ダイヤモンドバイトにて精密旋盤による加工で仕上げた。仕上げ加工の切削代は多 0.2 mm まで少なくした。仕上げ加工前の RF 測定の結果より、加工での最終切削代を残すため、目標とする結合度  $\beta$  より若干小さくなるように、結合孔直径を本来の設計値より 0.2 mm 小さく仕上げた。仕上げ加工後の空洞の共振周波数は設計値に対して 50 kHz 程度低い程度であり、縮退する 2 つのモードの共振周波数差は 5 kHz 程度であった。この時点で十分な低電力 RF 特性を得たので、結果的に半球接合面または半球内面に施す予定だった共振周波数を補正するための RF 調整加工を実施しなかった。半球内面の輪郭度は 20  $\mu\text{m}$ 、半球接合面の平面度は 10  $\mu\text{m}$  以下となるように加工し、CMM 測定で確認した。球形空洞内面の表面粗度は直接測定していないが、テストピースの加工結果より  $Rz1.5 \mu\text{m}$  以下になっていると思われる。仕上げ加工前のディチューナー側球形空洞半球及び結合孔側球形空洞半球の写真を Fig. 2 に示す。仕上げ加工後のディチューナー側球形空洞半球の内面側写真を Fig. 3 に示す。

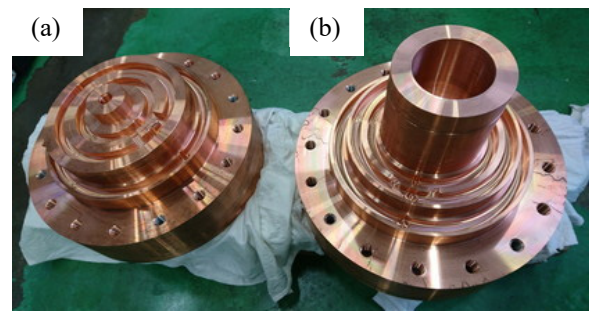


Figure 2: Water-channel side of medium-machined hemispheres (a) with a detuner port and (b) with a coupling port.

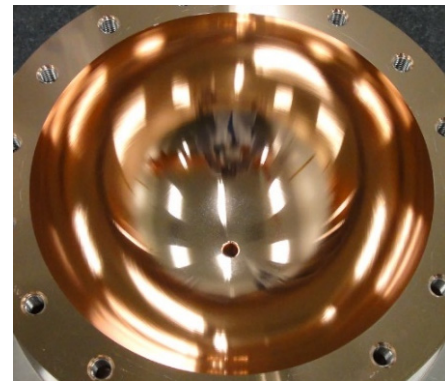


Figure 3: Inner surface of the machined hemisphere with the detuner port.

#### 3.3 組立及び接合

主要部品は重量物であり 30 kg を超えるものも含まれるので、傷や打痕が付かぬように慎重に組立てた。球形空洞半球、導波管偏極器のアライメントには組立精度及び再現性が十分確保できるように位置決めピンで行った。真空ロウ付けによる接合については実体温度を測定しながら計 3 回に分けて行った。半球、水路蓋及び冷却パイプにより空洞を形成するロウ付けと導波管偏極器を単体組立するロウ付けでは、濡れ性が高く、また液相点と固相点が等しい銀ロウ材 BAg-8 を使用した (Fig. 4)。空洞、導波管偏極器及びディチューナー用ポートを接合する全体組立のロウ付けでは、インジウムを含み液相点の低い銀ロウ材 TK-671 を使用した (Fig. 5)。ロウ付け面の面積やギャップを考慮してロウ材の量や溝配置を決定した。さらに半球同士の接合については、実機と同じ接合面を持つテストピースを用いて想定する接合温度と荷重条件でロウ付け試験を実施し、空洞内面境界までロウが浸み出さずにその近傍で密に一体化する条件を確認した。ロウ付けテストピース断面の拡大画像を Fig. 6 に示す。

これら 3 回のロウ付けにより球形空洞型パルス圧縮器の形成をした。実機においても空洞内面境界に、ロウの浸み出し及び隙間が無いことをカメラ画像で確認した。ロウ付け後に行った通水試験では、各水路に規定の 2 倍程度の流量で通水時の各圧損値合計は 0.4 MPa 程度であった。よって既定流量での圧損は十分低くなる見込みである。各種試験検査後に架台に据え付けたパルス圧縮器の写真を Fig. 7 に示す。

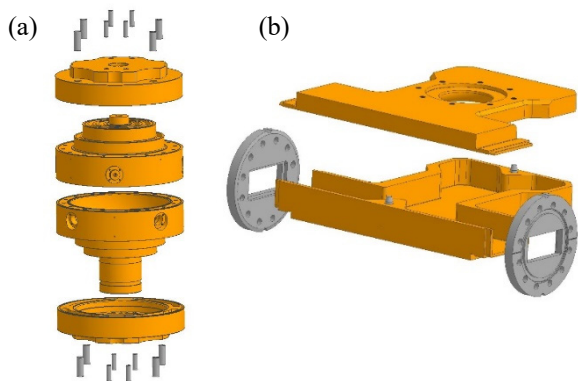


Figure 4: Fabrication of (a) the spherical-cavity and (b) the RF waveguide polarizer by brazing.

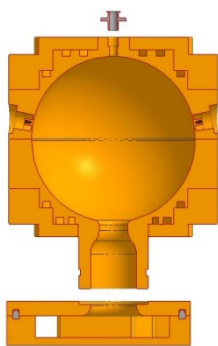


Figure 5: SCPC before final brazing.

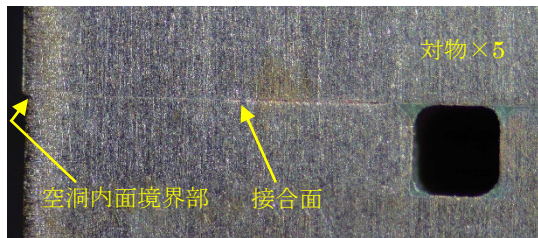


Figure 6: Cross-section of the test piece after brazing.

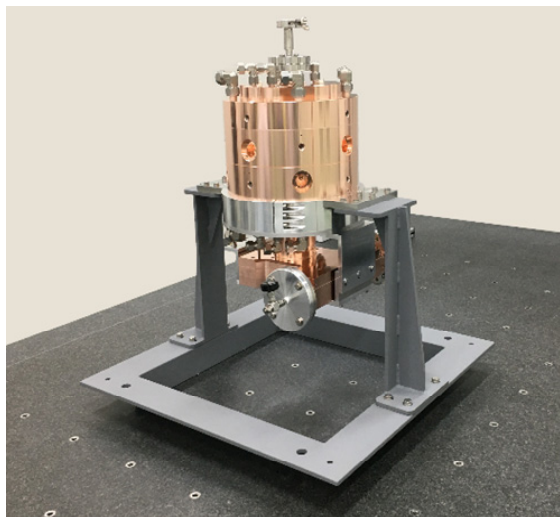


Figure 7: SCPC after brazing and dimple tuning.

### 3.4 RF チューニング

製作誤差に加えて定常運転時の熱変形による共振周波数変化を補正するために、各モードに対して 200 kHz 程度の周波数調整を 8 ケの RF チューナーで行う。ロウ付け後、空洞の共振周波数は設計値より 10 kHz 程度高い値になった。実機のチューニングは[4]に詳しく報告される。ここではプロトタイプ機と同形状の試験用半球を用いた RF チューナーによるディンプリング量の評価と、試験用半球 2 ケより形成した空洞に線形偏極モード変換器を取付けて、選択的に取り出した各モードのディンプリングに伴う共振周波数変化の評価を報告する。1.2 mm 程度押し引きした状態での半球内面のディンプリング跡の写真を Fig. 8 に示し、CMM 測定にて取得したディンプリング部の断面プロファイルを図. 9 に示す。この断面プロファイルに示した押し引きの変化量は、共振空洞半球の外形より実測したチューナー穴深さの変化量及び RF チューナー送りねじの回転数より算出したねじ進み量とよく一致していた。1 ケの RF チューナーを 1.2 mm 程度まで引く試験において、共振周波数がチューナーの動きに対して概ね比例して 50 kHz 程度まで低下した。モード変換器を 90 度回転すると周波数変化は無く、縮退が解かれた (Fig. 10)。以上の結果より、周波数調整量は 8 ケの RF チューナーで十分に確保されること、RF チューナーの送りねじ回転数に追従して半球内面が概ね想定通りに変形すると共に相応にディンプリングする方向に極性を持つモードの共振周波数が変化することを確認した。その後、プロトタイプ機に装着する実機チューナーについては装着の容易さや、ネジのガタつきやバックラッシュを減らす等の改良を加えた。

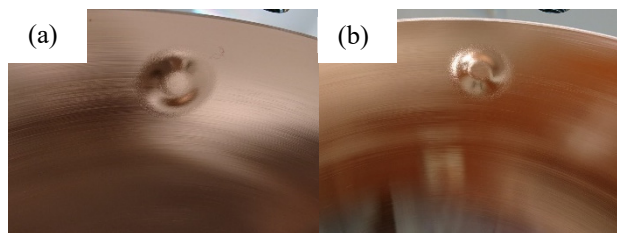


Figure 8: Inside of the sample hemisphere (a) after pulling by 1.2 mm and (b) after pushing by 1.2 mm using the RF tuner.

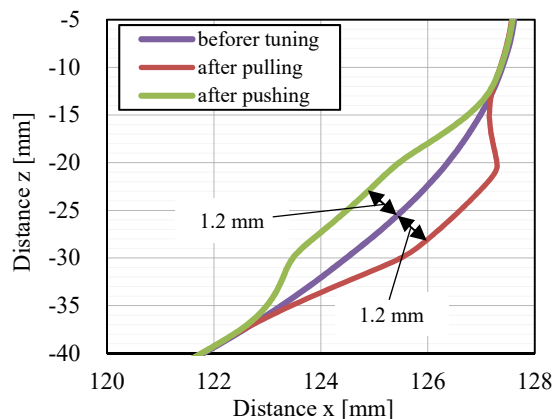


Figure 9: Cross-section profile of the sample hemisphere after dimpling.

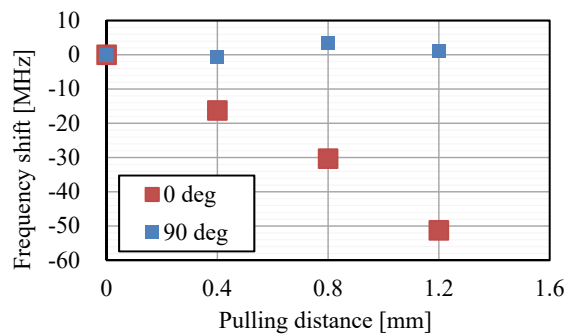


Figure 10: Frequency shifts of the spherical test cavity by pulling.

#### 4. まとめ

SuperKEKB で使用するための球形空洞型パルス圧縮器のプロトタイプ機の製作を行い、その詳細を報告した。機械加工とロウ付け組立は問題なく進み、最終チューニングを得てほぼ設計値通りの低電力 RF 特性を得る事ができた。現在、大電力試験は順調に進行中である。これまでに定格の半分にあたる 20 MW の RF 入力パワーでパルス圧縮が正常に行われていることを確認し、目論んでいた電気的特性や冷却性能を実証できた。今回の製作で球形空洞型パルス圧縮器の製作要領を確立した。

#### 謝辞

KEK で行った各種評価の様々な場面において、三菱電機システムサービス(株)の牛本氏には大変なご尽力を頂きました。深く感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] Z. D. Farkas, H. A. Hoag, G. A. Loew and P. B. Wilson, "SLED: A Method of Doubling SLAC's Energy", SLAC-PUB-1453, 1974.
- [2] Wang Ping *et al.*, "Development of an S-band spherical pulse compressor", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 901 (2018): 84-91.
- [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, Japan, Sep. 2-4, 2020.
- [4] 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, Japan, Aug. 9-12, 2021.
- [5] 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, Japan, Aug. 9-12, 2021.
- [6] 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, Japan, Sep. 2-4, 2020.
- [7] H. Matsumoto and M. Ohtsuka, in Proceedings of the 24th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sapporo, 7-9 July, 1999, p. 271.