

SuperKEKB のための S バンド球形空洞型パルス圧縮器の設計

DESIGN OF S-BAND SPHERICAL-CAVITY-TYPE PULSE COMPRESSOR FOR SuperKEKB

肥後壽泰^{#, A)}, 惠郷博文^{A, B)}, 東保男^{A)}, 坂東佑星^{B)},
 野村伊久磨^{C)}, 佐治晃弘^{C)}, 井原功介^{C)}, 林显彩^{D)}, 施嘉儒^{D)}
 Toshiyasu Higo^{#, A)}, Hiroyasu Ego^{A)}, Yasuo Higashi^{A)}, Yusei Bando^{B)},
 Akihiro Saji^{C)}, Kosuke Ihara^{C)}, Ikuma Nomura^{C)}, Xiancai Lin^{D)}, Jiaru Shi^{D)}

^{A)} KEK, ^{B)} The Graduate University for Advance Studies, ^{C)} Toyama Co. Ltd., ^{D)} Tsinghua University

Abstract

A pulse compressor operated at S-band frequency for SuperKEKB was designed. The design is originated from the spherical-cavity-type pulse compressor developed at Tsinghua University. We improved the design mostly aiming at an operation in a stable operation for long term at higher average power. The prototype system is under construction. We present the various key design considerations on storage cavity such as the thermal deformation due to full power operation amounts to 4 μm and resulting frequency variation of 90 kHz small enough to cold-startup process, and the alignment tolerance between two hemispheres to be less than 0.1 mm to make the two degenerate modes to be close enough in frequency for normal operation.

1. はじめに

高周波パルス圧縮器は多くの加速器で加速エネルギーアップのために用いられているが、最初に開発されたのは SLAC において 2 個のシリンダー状の空洞を用いたシステムである[1]。KEK 電子陽電子入射器[2]では KEKB のエネルギー増強のために同様のシステムを用いたパルス圧縮器を 1990 年代初頭より用いてきたが、老朽化や予備不足が現実のものとなったため、現行圧縮器と置き換え可能なモデルの開発を始めた。再開発にあたり、高電力での安定性、小型軽量化、量産への対応考慮した設計、を目標として球形空洞型を採用する。本稿では、この球形タイプを SCPC (Spherical Cavity Pulse Compressor) とよぶ。SCPC は最初、X バンド帯で SLAC の LCLS 用に開発され稼働している[3]。その後清華大学で S バンドでも開発され[4]、本デザインの出発点とした。今回、我々の開発目標に沿って、電気、熱、機械設計にわたって各種の評価を詳細に行い、安定性の向上、誤差解析に基づく製作方法の最適化、高い平均電力に対応する冷却効率の向上、確実に安価な量産に向けた製造方法の適用、などの観点から設計を進めた。本稿では、これら設計について述べるとともに、試験機製作の初期段階の測定結果について報告する。

2. 基本設計

本パルス圧縮器は、現在運転中の SuperKEKB 入射器に用いているシステムと互換性を持つよう、電気仕様は表 1 に示した KEKB 用 SLED と等価である。表より明らかのように、違いは蓄積空洞の形とそれにより決まる共振モード、及び空洞の数である。

球形空洞を採用するため、関与するモードは球形共振器に対応するモード群である。球形空洞モードの電磁場[5]はベクトルポテンシャルを用いて

$$E = -\nabla \times r \psi^f + \frac{1}{\hat{y}} \nabla \times \nabla \times r \psi^a, \quad (1)$$

$$H = \nabla \times r \psi^a + \frac{1}{\hat{z}} \nabla \times \nabla \times r \psi^f$$

と書け、

$$F_{mnp} = r \psi^f = \hat{J}_n(u_{np} \frac{r}{a}) P_n^m(\cos \theta) \begin{cases} \cos m\phi \\ \sin m\phi \end{cases} : TE \quad (2)$$

$$A_{mnp} = r \psi^a = \hat{J}_n(u'_{np} \frac{r}{a}) P_n^m(\cos \theta) \begin{cases} \cos m\phi \\ \sin m\phi \end{cases} : TM$$

と表される。共振の周波数は、球形空洞内壁で電場の並行成分がゼロとなる条件から決まり、

$$TE : k_{mnp} = \frac{u_{np}}{a}, \quad TM : k_{mnp} = \frac{u'_{np}}{a} \quad (3)$$

とかける。但し、 u_{np} , u'_{np} は 2 式に現れる球ベッセル関数の零点である。

Table 1: Electrical Design Parameters

Project	KEKB	SuperKEKB
Frequency [MHz]	2856	2856
Coupling	6.4	6.4
RF Pulse width [μs]	4	4
Compressed pulse width [μs]	1	1
Rep. rate [Hz]	50	50
Cavity shape	Cylinder	Spherical
Number of cavities	2	1
Q_0	1×10^5	1×10^5
Mode	TE ₀₁₅	TE ₁₁₂

[#] toshiyasu.higo@KEK.jp

今回の球空洞半径設計 127.9 mm の球空洞に存在するモードを図1にプロットした。

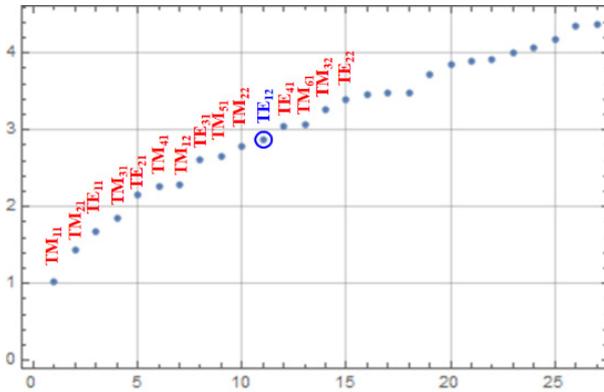


Figure 1: Resonant frequencies of the spherical cavity with a radius of 127.9 mm. Suffixes in mode names are m and n .

今回採用したモードは TE_{112} ($m=1, n=1, p=2$) と呼んでおり、図中で青丸マークの共振である。SLAC の X バンドでの設計では TE_{114} を採用し高次のモードを使って Q 値を高くできているが、SCPC バンドではサイズが大きくなるため、相対的に低い次数のモードを選択している。このモードの電磁場分布を図2に示しておく。

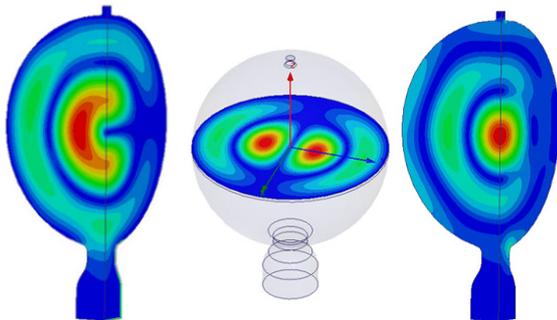


Figure 2: Field patterns of the operating mode. E-field in the vertical cross section, E-field in the horizontal cross section and H-field in the vertical cross section in order from left to right.

図2で示した共振モードは、下部の円筒導波管に偏向面が90度ずれ、位相も90度ずれている二つの TE_{11} モードを同時に励振させ、その二つのモードを同時に結合孔から球空洞内に結合させることにより励振できる。ここで、式(2)で示される TE_{12} 型の縮退するモードは、3軸の存在に対応して図2に示される他に天頂方向に電場の向くモードが存在するが、これは円筒導波管でのモードの極性から励振されないことに注意しよう。矩形導波管 TE_{10} モードから円形導波管の円形偏極の TE_{11} モードへの設計は SLAC の設計[3, 6]を基に構造を単純に改良した設計を用いた。本設計で用いたモード変換器のモードパターンを3次元電界シミュレーションでの結果として図3に示した。

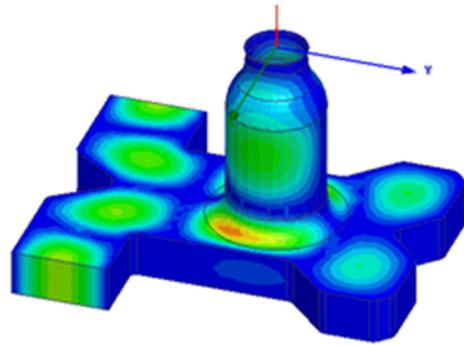


Figure 3: Mode converter from TE_{10} mode in a WR284 rectangular waveguide to TE_{11} mode in a circular waveguide.

3. 表面電磁場

3.1 結合孔の電磁場強度

SuperKEKB での標準入力パワーである 40 MW を矩形導波管入力部に加えたときに、充分空洞内に蓄積モードがビルドアップした空洞表面での電場と磁場の各々絶対値分布を図4に示した。図から分かるように、電場磁場どちらも結合孔部が局所的に高いことが分かる。

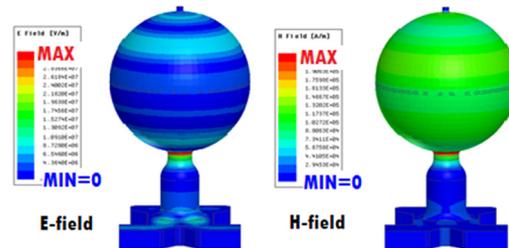


Figure 4: Magnitude of surface fields: (right) electric field and (left) magnetic field. Color coding is in linear scale.

Table 2: Surface Fields at 40 MW Input

Location	Electric field [MV/m]	Magnetic field [kA/m]
Coupling hole (Present)	31.9	212
Coupling hole (Tsinghua)	36.7	246
WR284	6.0	11.6

本デザインでの表面電磁場の最大値は、表2に示したように、矩形導波管 WR284 内の値に比べると、電場で数倍、磁場で 20 倍大きい。この増大は空洞内にエネルギーを蓄積するため必然的ではあるが、清華大学で稼働している SCPC の場合と比較して低く、運転に問題はないと考えている。因みに表面電界の最大値は 30 MV/m を超えるが、SuperKEKB 加速管の値よりは低く、しかも電場の向きは回転しており、同一面での高電界でのメカニズムが関与する放電は抑制されると考えている。

また磁場は $3 \mu\text{s}$ でのパルス温度上昇が 9°C に達する程の値であり無視できるとは言えないが、銅表面の金属疲労が懸念される温度が、Xバンド周波数で 50°C 程度と見積もられており、これよりは充分小さい。本設計での SCPC は、これまでの円筒空洞の値とも比較して検討する必要があるが、上記の表面電磁場強度に関する考察や、清華大学での 50 MW 入力の実績から、安定な運転を確保できる設計領域にあると考えた。

一方複素ポインティングベクトル S_c が真空放電に対する安定性を評価する指標になるとの議論があり[7]、 $S_c=4\sim 5 \text{ (W}/\mu\text{m}^2)$ 程度が安定性の指標とされているが[8]、本設計では、結合孔で $S_c\sim 3.5$ であり、この評価基準でも安定領域にあるといえる。

3.2 空洞壁損失分布と熱設計

図 4 でも分かるように、本件のモードは回転モードであり、時間的に平均すると回転対称のロス分布となる。そこで単位面積当たりの発熱量を、図 5 に示したように経線方向の分布として評価し、熱計算のインプットとした。図からわかるように発熱は、 $\pm 30\%$ 程の高低はあるが、全体的にはほぼ均一な発熱分布であり、唯一結合孔近傍で局所的な増大が見える。

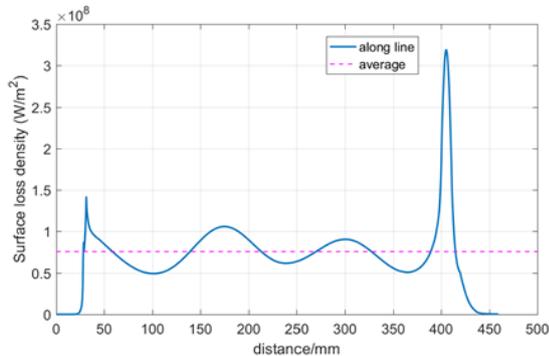


Figure 5: Surface loss along a lateral line of the inner wall. Horizontal axis is the contour length from top of the sphere to the coupling hole at bottom.

発熱量は $\sim 0.6 \text{ W}/\text{cm}^2$ に対して、本設計では安定性向上のために、冷却効率の良い構造を検討した。詳細は[9]に記すが、赤道部には 16 本の $\phi 10$ のパイプを並行させ、両極部分は、周回する水路を球形空洞の外側に彫り込むことにより、冷却効率を高めた設計とした。ロス分布を基に熱解析を行い、温度上昇は平均値で 2.1°C に抑えることができることが分かった。この温度上昇に対しての変形を計算すると、半径 $3.2\sim 4.4 \mu\text{m}$ の膨張になり、周波数は 90 kHz の低下となることが分かった[9]。

4. 機械設計

4.1 機械設計の考え方

本 SCPC 設計では、下記の点を考慮して進めた。

- 組立箇所をなるべく少なくする
- できるだけ空洞内面近くに冷却水路を通す
- 組立工程途中で電気計測を行い、必要に応じてチューニングを加えながら製作する

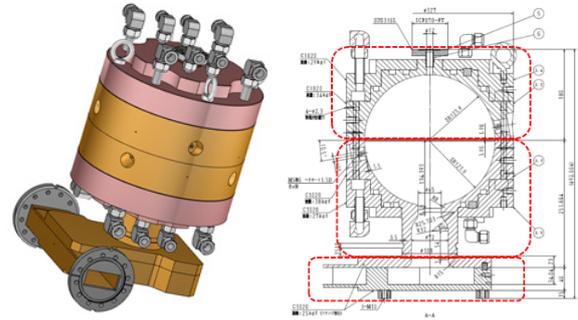


Figure 6: Schematic view (left) and cross-sectional view (right) of the present SCPC.

4.2 構造と組立の概観

図 6 に、本件で進めている SCPC の概観を示した。球形空洞は赤道面で二分割して加工し半球パーツを形成する。冷却水路は半球パーツの外側に彫り込み、その上に蓋をして形成する。結合孔側の半球は円筒導波管と一体として加工する。半球同士は赤道面でのロウ付けにより球形空洞を形成させ、一つのブロックを形成する。この時点で円筒導波管部分から空洞の特性を確認し、必要なら調整を経て組立に進む。矩形導波管に形成する偏極器(モードコンバータ)は X 字型の構造で、中央に円筒導波管を立てる構造を有し、もう一つのブロックを形成する。偏極器は彫りこみと蓋の構造でロウ付け組立とし、球空洞本体との組立前に性能を確認する。これら二つのブロックは各々電気的性能を確認した後、必要ならチューニングを行った上で合体させ、SCPC としての構造を完成させる。

4.3 加工組立と周波数の制御

運転周波数と共振周波数を一致させることは高周波デバイスでの最も重要なことの一つである。本 SCPC でも Q 値幅が $f_0/Q_L \sim 220 \text{ kHz}$ となり、それより充分良い精度での制御が必要である。そのために今回採用した製作から運転にわたる周波数制御の考え方を製造工程の順に示す。括弧内の数字は、想定している加工誤差(mm)である。

1. 中仕上げ加工 (± 0.01)
2. RF 計測(大きな間違いの有無を確認する)
3. 500°C アニール
4. RF 計測(変形の有無確認)
5. 仕上げ加工 (± 0.01)
6. RF 計測
7. 調整加工 (± 0.005)
8. RF 計測
9. 球空洞形成ロウ付け
10. RF 計測
11. 必要に応じてチューニング
12. 導波管偏極器を組み込み完成
13. RF 計測
14. ディンプルチューニング(主に塑性変形)
15. 運転での温度上昇による周波数低下
16. 運転、又は経年変化に対応して弾性変形内のチューニング

因みに、工程 7 での調整加工には、片方(結合孔と反対側)の半球の赤道付近、周波数を高めるためには赤道部端面の加工、周波数を下げる場合は赤道部の 20 mm 程度の幅で半径を拡大させる。また、工程 15(運転による熱膨張起因の周波数低下)では 90 kHz 程度を想定しており、その分オフセットをかけて製作しておくことに注意する。因みにこの程度のおフレズナンス運転では、約半分のパワーが空洞に供給され、次第に本来の周波数に近づく。

5. 各種特性評価と関連設計

5.1 円筒導波管の長さ選定

円筒導波管には、矩形導波管と結合孔の間に TE_{11} モードがトラップされる可能性があり、その共振周波数を運転周波数から遠ざける長さとする設計を行った。

5.2 半球のずれに対する縮退の解け方

本システムは、球形空洞内の二つのモードが縮退していることを用いて、あたかも二つの空洞があるように振る舞うので、その縮退をよく確保しておく必要がある。縮退は回転対称性を破る構造に対して起きるので、半球同士のずれに対する周波数変化を計算した。結果は図 7 に示す。ずれの方向に TE_{11} の電場があるモードの周波数が上がり、それと垂直の極性を持つモードが低下する。本 SCPC では、端面のピンにより 0.1 mm より充分良い精度でアラインメントがなされることを想定している。

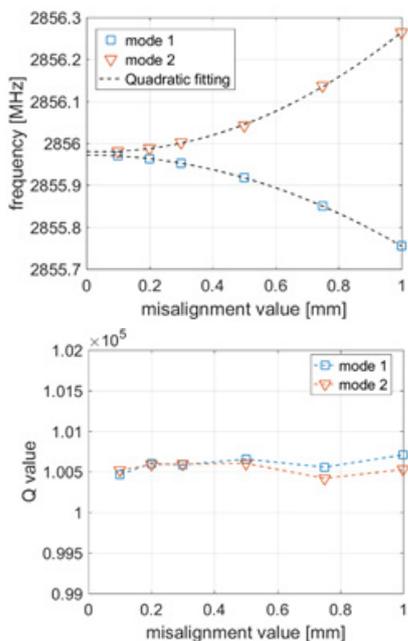


Figure 7: Frequencies (top) and Q value (bottom) of the cavity composed of two hemispheres with finite misalignment between each axis.

5.3 デチューニング設計

デチューニングは、結合孔のない側の極に $\phi 12$ の穴をあけ、そこから $\phi 9$ のロッドを挿入することにした。挿入したときの電場分布と、挿入量に対する周波数の変化の

計算を図 8 に示した。十分なデチューニング量を確保するために、空洞の中心を突き抜ける位置(図中の青線~150 mm)まで挿入し、14 MHz のデチューニングが実現され、空洞内に入力されるパワーは -40 dB 以下に減衰される。

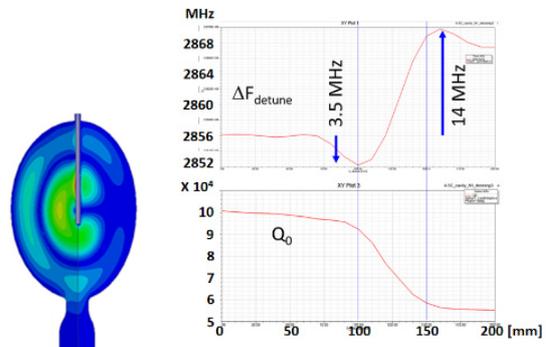


Figure 8: Left: electric field when the detuning rod is fully inserted. Right: Frequency and Q_0 versus insertion length.

6. 開発機(#0)の現状

6.1 加工

現在製作中の試験機(#0)では、納期の関係もあり、第二種無酸素銅 C1020 を使用した。また半球などは加工後でも 30 kg を超える重量があり、周波数を決める精密な加工も超精密加工機でなく、精密旋盤で進める事にした。但し、回転軸に対して半径方向の加工を決める軸を加速器用に直角に調整した旋盤を用いている。図 9 に精密旋盤で加工した半球の内面を示した。極に当たるところには結合孔が見えている。



Figure 9: Medium-machined hemisphere with a coupling hole.

6.2 円筒導波管からの RF 計測

中仕上げ後の RF 計測を実施した。半球を合わせて球形空洞を形成させ、円筒導波管から高周波計測を行った。セットアップを図 10 に示す。セットアップから明らかのように、円筒導波管の TE_{11} モードは線偏極したモードであり、空洞内の縮退する二つのモードのうち、片方のみ、式(2)で示した \cos/\sin の一方のみ、を選択的に励起して評価していることになる。図 11 にはこのセットアップで見た S_{11} 周波数特性である。

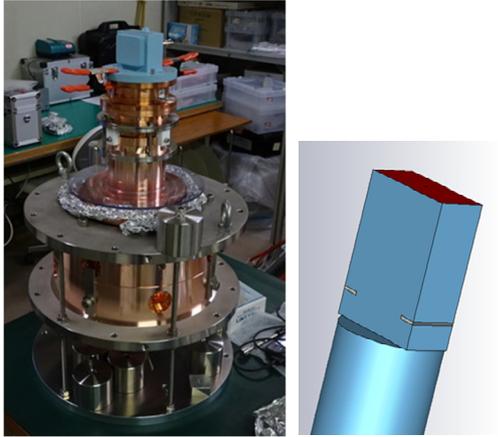


Figure 10: Left: Experimental setup for RF measurement of the sphere cavity composed of two hemispheres. Linearly polarized TE₁₁ mode in the cylindrical waveguide is used for exciting the spherical cavity mode. Right: Mode convertor from TE₁₀ mode in rectangular waveguide to TE₁₁ mode in the circular waveguide.

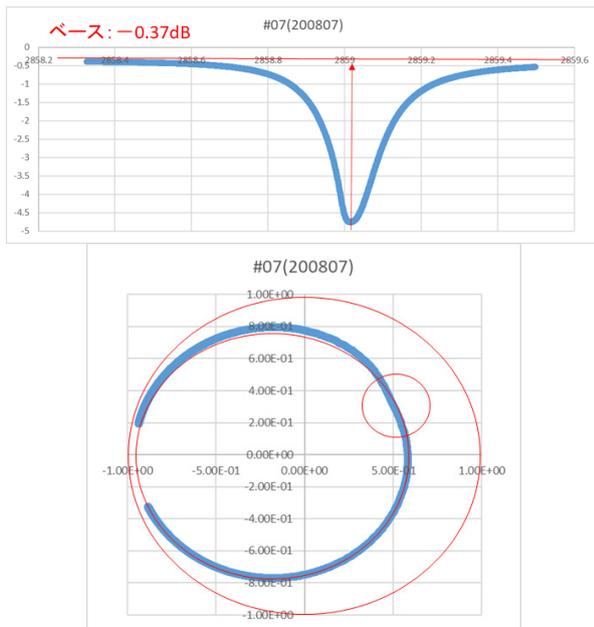


Figure 11: Top: $S_{11}(f)$ in LogMag plot over 10 MHz. Bottom: Polar plot of the $S_{11}(f)$.

表 3 には、アニール後の主要計測値を掲げた。反射 S_{11} の最少となる周波数をモード周波数として、周波数は目標値に 0.14 MHz の誤差であった。これを単純に半径の誤差によるとすると、半径 128 mm に対して誤差は 6 ミクロンに相当し、充分良い精度が得られていることが分かった。一方 Q 値は計算値の 62% 程度しかなかった。これは中仕上げ状態では幅 ~30 mm 強の平面として残してある赤道部の端面がポテトチップス状に歪んでおり、端面同士の接触が不完全で、幅広のギャップが形成されてパワーが漏れることに起因していると理解している。この低い Q 値はロウ付け工程を経て改善すると考えている。また、結合は計算値より 1 割程度大きいことが見えており、仕上げ加工時に、0.2 mm の加工代を半分にして、

RF 計測により調整加工段階で結合孔を再度広げることに対応することとした。

Table 3: RF Measurement Results

Frequency error	$f^{\text{meas}} - f^{\text{cal}}$	-0.14 MHz
Intrinsic Q value	$Q_0^{\text{meas}} / Q_0^{\text{cal}}$	62 %
Coupling	$Q_{\text{ex}}^{\text{meas}} / Q_{\text{ex}}^{\text{cal}}$	91 %

7. サマリーと議論

基本設計を終え、試験機(#0 号機)を製作中である。現在は中仕上げ状態での計測を終え、仕上げ加工を行っている。半球に関してはクランプでの RF 計測を経てほぼ問題ない感触は得ており、今後ロウ付けによる組み立て工程に進める。導波管パーツなどの加工も終わり、今年度中に完成予定をしている。完成後は速やかに高電力試験を行い、性能評価と実機製作の問題点洗い出しを行う。

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] I. Sato *et al.*, ed. "Green book", KEK Report 1995-18, 1996.
- [3] J. W. Wang *et al.*, "Development for a supercompact X-band pulse compression system and its application at SLAC," PHYSICAL REVIEW ACCELERATORS AND BEAMS 20, 110401 (2017).
- [4] P. Wang *et al.*, "Development of an S-band spherical pulse compressor," Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 901 (2018) 84–91.
- [5] Roger F. Harrington, "Time Harmonic Electromagnetic Fields", McGRAW-HILL BOOK COMPANY, 1961.
- [6] S. Tantawi, "Compact Waveguide Circular Polarizer", US patent 9419322.
- [7] A. Grudiev, S. Calatroni, and W. Wuensch, "New local field quantity describing the high gradient limit of accelerating structures," PRST-AB 12, 102001 (2009).
- [8] D. Alesini, "Progress on high gradient C-band gun for high repetition rate photo-injectors and linac clamped structures," 12th International Workshop on Breakdown Science and High-Gradient Technology, HG2019, Chamonix, 2019; <https://indico.cern.ch/event/766929/>
- [9] A. Saji *et al.*, "SuperKEKB のための球形空洞型パルス圧縮器の熱解析", THPP39, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Japan, Sep. 2-4, 2020.