

高周波特性からみた球形空洞型パルス圧縮器の製作

RF CHARACTERISTICS VIEW OF CONSTRUCTION OF SPHERICAL-CAVITY-TYPE PULSE COMPRESSOR

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

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

^{B)} Graduate University of Advanced Studies (SOKENDAI)

^{C)} Toyama Co., Ltd.

^{D)} Department of Engineering Physics, Tsinghua University

Abstract

A prototype of the spherical-cavity pulse compressor (SCPC) was developed, which can be used for replacing the presently operating SLED's of KEK electron-positron injector linac. It has the same electrical parameters and the same waveguide flanges and flange position as those of the SLED. Since two degenerate TE₁₁₂ modes with a phase difference of 90 degrees in the spherical cavity are used, two features, firstly the cavity resonance parameters seeing from the opening to the cavity, and secondly the two modes entering to this opening with the same amplitude and 90 degree phase difference, are the most important features to realize the SCPC system. These important features in mind, we report the measurements in various stages of the fabrication of the prototype system. The SCPC was successfully completed and is under high power conditioning.

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 2 個のシリンダー状の空洞を用いたシステム SLAC Energy Doubler (SLED)である[1]。KEK 電子陽電子入射器[2]ではエネルギー増強のために同様のシステムを 1990 年代初頭より用いてきたが、放射線発生が多くに見られることや予備が不足しているため、置き換え可能な互換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、球形空洞型を採用した[3]。本稿では、このタイプを SCPC (Spherical Cavity Pulse Compressor) と呼ぶ。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[4]。その後清華大学で S バンドでも開発され[5]、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[6]。2021 年 3 月に、プロトタイプシステムを完成させたので、本稿ではその製作の勘所を電氣的計測に基づく評価、チューニング等に視点を当てて報告する。製作の詳細は[7]に詳しく、また高電力特性は[8]に報告される。

2. 設計

Figure 1 左に電界分布のスナップショットを示した。モードは、球形空洞内の共振モード分類で述べると、

ϕ 方向に $\cos(\phi)$ 分布をもち、 θ 方向にはルジャンドル関数 $P_2^1(\cos \theta)$ で示される分布で、動径方向には 2 つのノードを持つモードをもつ TE₁₁₂ と称するモードである。実際にはモードは縮退し、位相が 90 度ずれて重ね合わせされるモードとして構成される。機械構造は Fig. 1 右の断面図で示した。高周波は矩形導波管偏極器の入力ポートから励振し、モード変換されて円筒導波管内に 90 度ずれた二つの TE₁₁ モード進行波を供給する。これが各々の偏極軸によって決まるモードを空洞内に励振させ、球形空洞内に縮退し 90 度位相のずれた共振を形成する。入力高周波の位相反転の後には、空洞内に蓄積したプロセスと反対に空洞からも高周波が偏極器の矩形導波管出力ポートに取り出され、位相反転している入力高周波に重ね合わされて高電力を矩形導波管の出力ポートに集中する。

製作の要点は、導波管偏極器のモード変換性能と空洞の電氣的特性、特に共振周波数、Q 値と結合定数である。周波数と結合定数は形状によるので計算可能で、Fig. 2 に示すような感度の高い寸法を慎重に製作する必要があり、また必要に応じて調整機構を使うこととした。

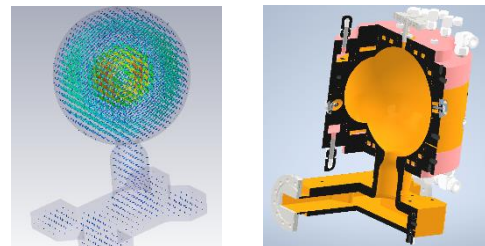


Figure 1: Left: Electric field snap shot of the TE₁₁₂ mode of SCPC. Right: Cut view of SCPC.

[#] toshiyasu.higo@kek.jp

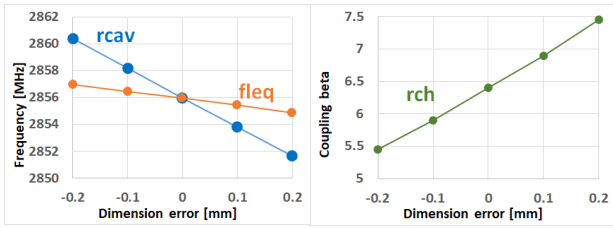


Figure 2: Left: Frequency vs dimensions, rcav (cavity radius) and fleq (full length of cylindrical part at equator), right: coupling beta vs. rch (radius of coupling hole)

周波数は、製作中から運転に至るまで、最も精度を要求されるパラメータであり、製造過程での各種エラーやその補正の考え方、また縮退特性の回復や最終的な運転環境に合わせるための周波数チューニングをFig. 3に示した。ステージ⑭に示す高電力運転では、フルパワー(40 MW 入力)で約 88 kHz 周波数が下がるが、今回のプロトタイプの高電力試験ではその半分程度周波数を上げてチューニングおき、運転経験を積んで最適なチューニング点を見つける予定である。

周波数のチューニングには、空洞外周から内面近くまでφ26 mmの穴(チューニング穴)を開け、空洞表面近くに厚さ1.5 mmの薄い部分をつくり、その中央にφ10 mmの円柱状つまみを設けた。このつまみを押し引きして空洞内面を变形(ディンプリング)させ、ある角度に偏極軸を有するモードの共振周波数に摂動を導入する。これが今回製作したSCPCのチューナーである。これはφ20 mm程度の台地状のアップダウンとほぼ同じと評価でき、チューナー1個を1 mm動かして約50 kHzの周波数微調が可能である。

3. 機械製作

3.1 半球の製作

第二種無酸素銅の円柱を中ぐりして整形した。赤道部で合わせて球形を構成する設計であり、TE₁₁₂モードは赤道をよぎる電流があるので、この部分の接触が重要であり、半球の赤道部端面の平面度とロウ付けによる確実な接触の実現が必須である。加工はダイヤモンドツールで行ったが、重量が30~40 kgあったので超精密旋盤

を使うことは現実的でなく、通常精密旋盤を使用したため、輪郭公差は0.02 mmとした。このため、0.2 MHz級の周波数誤差は覚悟しなければならなかった。Fig. 3で示すようにステージ①で、安全率として±0.7 MHzへの対応を検討し、周波数を電的に計測した後、補正のために赤道部付近を部分的に加工することによって±0.05 MHzに持ち込むこととした。しかし、実測の結果、この補正加工は不要であった。

3.2 導波管の製作

第二種無酸素銅の板を購入し、WR284の高さ、34 mm、をX字型に彫りこみ、蓋をロウ付けして形成することにした。X形状はマシニングセンターへの一回のチャッキングで加工するので、相対精度は良く制御でき、指定した輪郭度0.05 mmは十分確保できた。これに円形導波管につながる窓部分の穴があけてある蓋をのせるが、アライメントが自動的に達成される段差をつけた構造は加工が難しくなるので、相対位置精度はピンによって実現させる設計とした。

3.3 ロウ付けによる組立

参考文献[7]にあるように、半球をロウ付け組合せで球空洞を形成する前後で空洞のモードを評価した。また、導波管も同様にロウ付け前後で電気的な特性確認を行って進めた。両者(球形空洞と導波管偏極器)が各々完成した後、最終組立直前にも全てのパーツをクランプして電気計測して良好なことを確認し、最終ロウ付けに進めた。

3.4 チューニング

最終ロウ付け後に、システムを電気計測しながらチューナー4個を用いてチューニングを実施した。片側半球の4個は90度おきに配置されているので90度方向を差動で使って縮退の回復を図り、全部同相で共振周波数の調整を行った。反対の半球にある残り4個のチューナーは今後のチューニング代として残してある。

4. 電気計測とチューニング

4.1 モード変換器(MC: mode convertor)

昨年度の報告[3]で示した様に、円筒導波管にTE₁₁モードを励振して、このモードとの特性を計測することにより、球空洞のモードや導波管偏極器の特性を計測した。この計測用モード変換器のマッチング特性をFig. 4に示

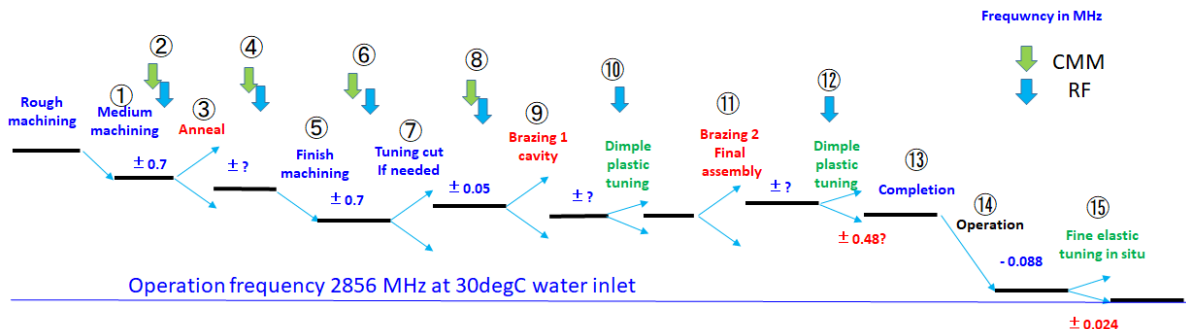


Figure 3: Control idea of the cavity resonant frequency through all the fabrication stages and until full-power operation.

したが、±10 MHz で−40 dB 以下であり、十分な性能を確認できた。

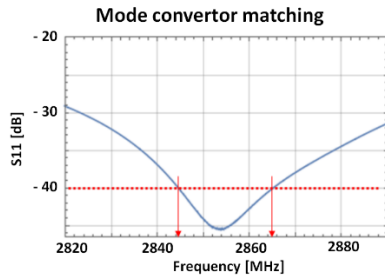


Figure 4: Matching characteristics of the mode converter from the rectangular wave guide TE₁₀ mode to the circular wave guide TE₁₁ mode.

4.2 球形空洞の計測

半球をセットして円筒導波管から空洞の計測を行った。Fig. 5 左は半球を合わせる直前を示しており、2 個のピンでアラインメントをする。また Fig. 5 右は、空洞から上方に突き出た円筒導波管にモード変換器を取り付けた状態である。電気的コンタクトは図に見えるように必要に応じて M10 や M6 のボルトナットで行った。

モード変換器は直線偏向の TE₁₁ モードを励起するので、これに結合する空洞のインピーダンス[9]は相対角度 θ として $\sin^2 \theta$ 、 $\cos^2 \theta$ の結合度合いで変わること考慮して、eq. 1 のようにかける。このインピーダンスに対し

$$\hat{Z} = \frac{\cos^2 \theta / Q_{ex,1}}{j\left\{\frac{\omega}{\omega_{0,1}} - \frac{\omega_{0,1}}{\omega}\right\} + 1/Q_{0,1}} + \frac{\sin^2 \theta / Q_{ex,2}}{j\left\{\frac{\omega}{\omega_{0,2}} - \frac{\omega_{0,2}}{\omega}\right\} + 1/Q_{0,2}} \quad (1)$$

$$S_{11} = \Gamma = \frac{\hat{Z} - 1}{\hat{Z} + 1} \quad (2)$$

て、eq. 2 式の反射量がきまる。Fig. 6 左には、空洞の加工誤差や組立状態によって縮退が 40 kHz 崩れたときに、一つのモードの偏極軸方向にセットしたモード変換器から見たときの反射と、45 度ずれた角度にセットして計測し

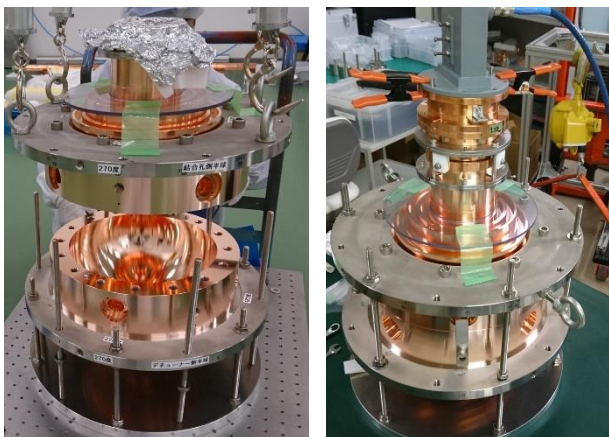


Figure 5: Left: Two hemispheres are being set to make a spherical cavity, right: mode converter is set on top of the circular wave guide, ready to measure cavity resonance from circular wave guide.

た例を示した。縮退が解けている時、両モードを励振できる角度では、単一モードと異なり複数の共鳴特性が見え、複数の共鳴を同時に解析することが必要になることがわかる。

実際に円筒導波管から見た球形空洞のモードの反射特性を Fig. 6 右に示した。−60 度、及び+30 度の測定は、空洞の摂動で決まる共振モードの偏極軸と合った方向にセットされており、単一モードとして評価できるが、その他の角度では両モードに結合した計測になっている。反射の実部、虚部の周波数依存性を同時にフィットできるパラメータを得ることが難しかったので、どちらかのモードを選択的に計測できる角度のデータを用いて空洞の特性を評価することにした。周波数は 2855.954 MHz と計測され、追加工による補償加工が不必要であることを確認した。昨年報告した測定例では空洞の Q 値が設計値の 6 割しかなく、かなり低い問題があったが、上で述べた測定方法の改善により安定に測定することができ、Q 値は設計値の 104 % と計測され、設計通りであることがわかった。

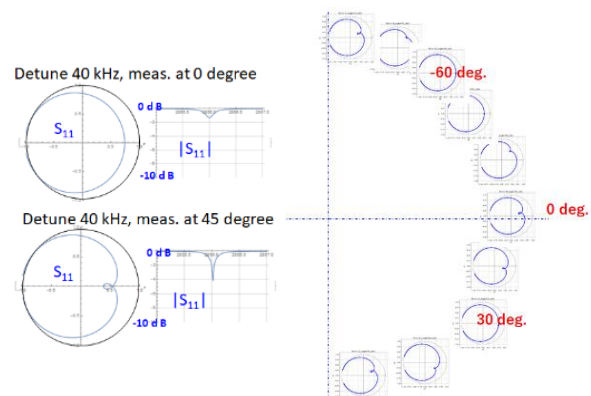


Figure 6: S₁₁ reflection measurement of the cavity mode by the setup in Fig. 5. Left: examples of two lightly degenerate modes seen from a mode converter set at 0 and 45 degrees w.r.t. one of the modes.

4.3 空洞のチューニングと縮退

ダミーの半球を用いて、円筒導波管からみた球形空洞の共振周波数を見ながらチューニング試験を行った。Figure 7 (left) より、チューナーを引き抜いたときに周波数が下がることを確認した。この量は、ある偏極のモードに対してそれに寄与する方向のチューナー 4 個全てを用いた時に±200 kHz 程度の変化を与えることができる量

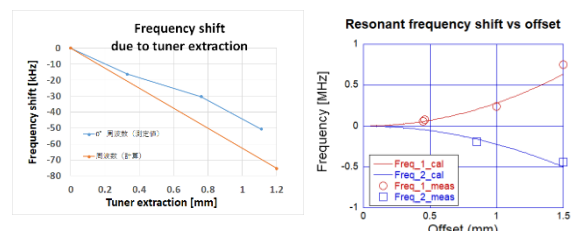


Figure 7: Left: Frequency tuning by a dimple tuner, right: frequency variations due to mutual offsets between the two hemispheres.

である。Fig. 7 (right)には、周波数振動が周波数を上げる方向の偏極軸をもつモードと、直交するもう一つのモードの周波数を、半球軸を相互にずらして計測した例である。

周波数は、周波数の関数として計測した S_{11} 反射量のディップに現れる二つのディップの痕跡を追うことで計測した。図に示されているように、シミュレーションで得られた実線によく合っていることが確かめられ、縮退が解けていく様子を確認できたと理解している。

4.4 導波管偏極器の計測

MC の矩形導波管入力、出力をポート 1、2 と呼び、円形導波管の二つの直行 TE_{11} モードをポート 3、4 と呼ぶことにする。導波管偏極器の特性確認には、ポート 3、4 にどちらのモードにもマッチングのとれたアダプターを装着して計測することができれば完璧であるが、そのようなアダプターは実現困難であると判断し、今回は § 4.1 で示した線偏極の MC を用いて行うことにした。ポート 3 に MC を設置して TE_{11} モード (モード 3) を励起し、ポート 2 を高周波ロードで終端した時の、ポート 1 への出力 S_{13} 、及びポート 1 終端時のポート 2 への出力 S_{23} を計測する。MC の角度を中間の位置にすれば、角度で決まる振幅で 3、4 両方のモードを励振することになる。励振対称性から、モード 3 を、ポート 1、2 に対して対称出力させるものと定義した。この時、ポート 1、2 には同相に出力される。直交するモード 4 の励振は反対称であり、出力位相差は 180 度となる。実際に計測した結果を Fig. 8 に示した。ポート 1、2 への出力は等分配されていることが確認できた。MC 角度を 90 度回して、モード 3 からモード 4 へ変換すると、ポート 1、2 への出力の位相差は 0 度から 180 度まで変化して設計通りだと確認できた。

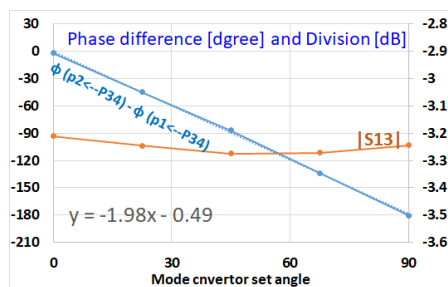


Figure 8: Characteristics of the wave guide mode convertor: measured S-parameters, transmission from MC from the circular wave guide to the rectangular wave guide.

4.5 システムの計測

全体接合して組み上がったパルス圧縮器のシステム評価は、Fig. 9 の写真に示したセットアップで計測した。ポート 1、2 間の S パラメータ計測が基本である (ポート 3、4 は空洞に接合)。広範囲の計測結果を Fig. 10 に示した。数 MHz の鋭いパターンを示しているのが球形空洞の共振を表していて、緩やかな変化は導波管モード変換器に関係した特性である。2856 MHz 付近を拡大して Fig. 11 に示した。

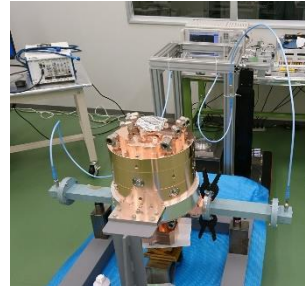


Figure 9: Measurement setup of the SCPC system. The SCPC body is set on a girder and wave guide adapters were mounted by clamping. In the back are seen a network analyzer (straight back) and pulse-response measurement instruments (back left).

4.6 チューニング

Figure 11 Log-mag グラフに示した S_{11} に現れる共振モードに起因する鋭いピークは縮退すべき二つのモードの周波数差を主な起源としたピークである。これを下げるように全 8 つあるチューナーのうち、片方の半球にあって 90 度おきに配置してある 4 個のチューナーを用いてチューニングを行った。Figure 12 に 4 個のチューナーの動きを示した。最初に 0 度位置と 180 度位置のチューナーを引き、その後 90 度と 270 度のチューナーを押し込んで、-30 dB 以下に抑え込んだ様子を Fig. 13 に示

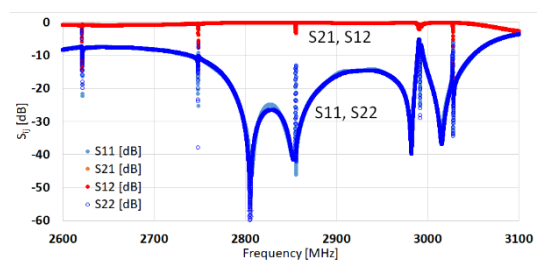


Figure 10: Wide range measurement of S_{ij} on the SCPC system after final brazing.

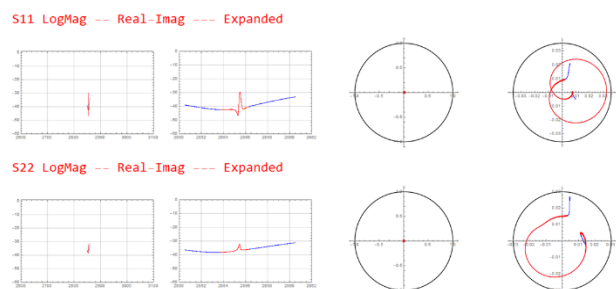


Figure 11: Expanded views of S-parameters of the SCPC system near the resonant frequency of the cavity TE_{112} mode. The upper row shows S_{11} and the lower S_{22} . From left to right, log-mag plots for full spectrum, the same near 2856 MHz, complex-plane plots with unit circle and the magnified complex-plane plots. For all the plots, the red lines show near 2856 MHz, while blue lines for the full-span plots.

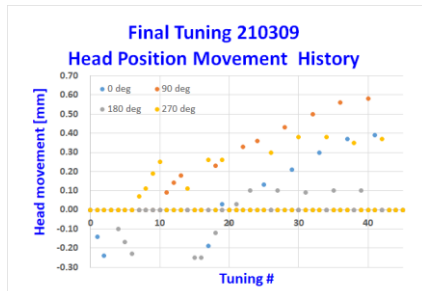


Figure 12: Tuning history: tuner head movements (mm) versus tuning number.

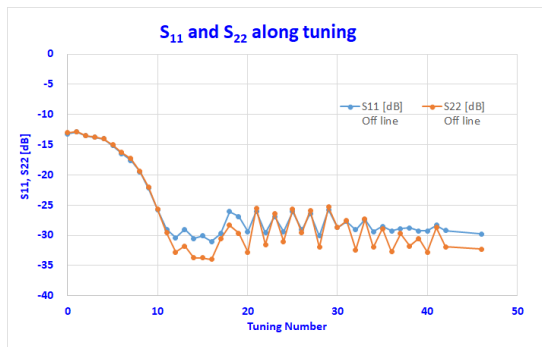


Figure 13: Reduction in the peak value of S_{11} and S_{22} near 2856 MHz through all the tuning history.

した。それ以上のピークの低減は難しく、17 回目のチューニングからは、4 個のチューナーを同じ方向に、縮退の解けが大きくならない程度ずつ、徐々に押し込んでいって、共振周波数が運転周波数の数 10 kHz 上になるまで追い込んだ。周波数の追い込み履歴は Fig. 14 に示されている。これで全てのチューニングを終え、完成とした。

最後に、パルス波形レスポンスを計測した。ポート 1 にフルパルス幅を 4 μs で、3 μs 時に位相反転するパルスで励振し、ポート 2 に出力される高周波を IQ デモジュレータで検出した。結果を Fig. 15 に示したが、良好な圧縮波形が得られることを確認できた。

5. サマリーと議論

バンドの球形空洞型パルス圧縮器の製作を行った。パーツの機械加工は加工直後のパーツ毎に行う電気計測で特性を確認し、調整加工無くすすめることができた。空洞にほぼ縮退している 2 モードが確認され、線形偏極モード変換器を用いて、そのセッティング角度を適正に選ぶことにより、どちらか一方のモードを選択的に取り出して特性を計測できることがわかった。導波管の特性確認も同じモード変換器で確認した。ロウ付け組立後のチューニングにより、入力ポートから見た反射 S_{11} が -30 dB 以下になるように調整でき、周波数も運転時の熱膨張による共鳴周波数の下降を考慮してフルパワーでの下降量の半分程度をオフセットするよう 50 kHz 程度、運転周波数より高い周波数に調整、パルスレスポンスも予想通りであることを確認して完成できた。なお、 S_{11} が更に小さくなるように調整できなかったが、その原因は今後

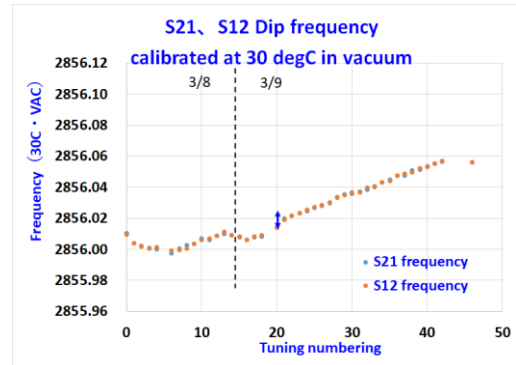


Figure 14: Variation of cavity resonant frequency through whole tuning history.

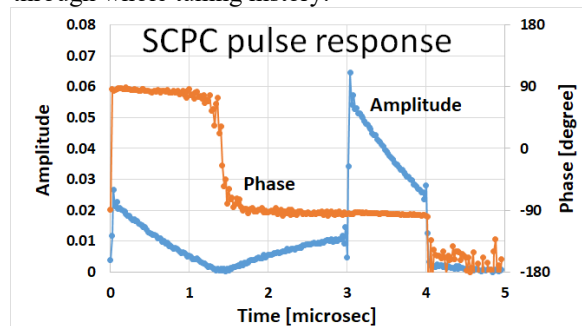


Figure 15: Typical pulse response of the SCPC system. 究明する。

謝辞

KEK での組立計測には、重量物のハンドリングなど、三菱電機サービス(株)の牛本氏には度々の尽力を頂き、感謝致します。

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] I. Sato et al. ed. "Green book", KEK Report 1995-18, 1996.
- [3] T. Higo, et al., "SuperKEKB のための S バンド球形空洞型パルス圧縮器の設計", FRPP39, 第 17 回日本加速器学会年会, Japan, Sep. 2-4, 2020.
- [4] 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).
- [5] P. Wang et al., "Development of an S-band spherical pulse compressor," Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 901 (2018) 84-91.
- [6] 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, 第 17 回日本加速器学会年会, Japan, Sep. 2-4, 2020.
- [7] A. Saji, et al., "球形空洞型パルス圧縮器の製作", THPP39, 第 18 回日本加速器学会年会, Japan, Aug. 9-12, 2021.
- [8] Y. Bando, et al., "S バンド球形空洞型パルス圧縮器の高電力試験", WEOB06, 第 18 回日本加速器学会年会, Japan, Aug. 9-12, 2021.
- [9] J. C. Slater, "Microwave Electronics", eq. (4.14), D. van Nostrand co. Inc., 1950.