

## 球形空洞型パルス圧縮器のデチューナー設計

### DETUNER DESIGN FOR SPHERICAL-CAVITY-TYPE PULSE COMPRESSOR

肥後壽泰<sup>#, A)</sup>, 坂東佑星<sup>B)</sup>, 恵郷博文<sup>A, B)</sup>, 阿部哲郎<sup>A, B)</sup>, 東保男<sup>A)</sup>, 林显彩<sup>C)</sup>, 施嘉儒<sup>C)</sup>  
Toshiyasu Higo<sup>#, A)</sup>, Yusei Bando<sup>B)</sup>, Hiroyasu Ego<sup>A, B)</sup>, Tetsuo Abe<sup>A, B)</sup>, Yasuo Higashi<sup>A)</sup>, Xiancai Lin<sup>C)</sup>, Jiaru Shi<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> KEK, High Energy Accelerator Research Organization

<sup>B)</sup> SOKENDAI, Graduate University for Advanced Studies

<sup>C)</sup> Department of Engineering Physics, Tsinghua University

#### Abstract

An S-band spherical-cavity-type pulse compressor was developed for KEK electron-positron linac aiming at the same electrical performance as the present SLED's. Though it was proven to be well performed in high-power, it was not equipped with detuner. As the next step to meet it possible to replace the present SLED's, a detuner was designed, fabricated and tested in low power. In this paper, the design consideration and the basic features are presented. The frequency is detuned by 14 MHz and the Q value is degraded, both consistent to the calculation. Some spurious resonances are found which are excited when rotational symmetry is broken but appeared at higher frequency well above the operation.

#### 1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器[1]では、現行の SLED パルス圧縮器に置き換え可能な、新規の球形空洞型パルス圧縮器の開発を行ってきた[2-4]。本稿では、このタイプを SCPC (Spherical Cavity Pulse Compressor) と呼ぶ。

このタイプは当初 X バンド周波数で SLAC で開発されたが、空洞離調は冷却水温度等で行うとしてデチューナーは装着されていない[5]。同じ原理で開発した本稿の SCPC でも開発の第一段階ではデチューナーは設計のみに留め、パルス圧縮有の運転で高電力特性を確認してきた[4]。第二段階として、現行の SLED に備えてあるデチューニング機構を同様に搭載することにした。

なお、SLAC 製の SLED を一台長年使用してきたが、デチューナーに放電痕が現れていることが目視でき、同軸構造にパワーが引き込まれてデチューナー内部での放電につながっていると理解でき、デチューナー内への電磁波の遺漏を極力抑えるような設計製作を目指すことが必要であると認識して詳細に検討し、低電力試験も行った。本稿では、設計、製作、低電力試験を通じて、SCPC のデチューナーに付いてその特性を述べ、実機の特性を示し、今後の改善検討を議論する。

#### 2. 電気設計

本 SCPC の基本設計は文献[6]を出発点にして進めて文献[7]に示した。一方デチューニングの評価の電磁場シミュレーションは当初 HFSS[8]を使用して進め、その設計は参考文献に詳しい[9]。加えて本稿に関連した追加の電磁界シミュレーションは主に CST[10]を使用した。デチューナー設計は下記の指針に従って進めた。

1. 十分な周波数デチューニング量を有する
2. デチューニングの ON/OFF が可能である
3. 使用した TE<sub>112</sub> モードの対称性を崩さない
4. もれパワーが十分小さい
5. 真空特性が良好である

Figure 1 に空洞内の関係するモードの電磁場強度を示した。導入するロッドと電界の向きが直交するので、共振周波数変化は摂動で得られると仮定でき、 $H^2 - E^2$  の依存性があるので、この差分が大きくなる場所が必要である。また対称性を破らず離調するために空洞内に摂動を加えることができる構造は、天頂から結合孔に向けて同軸構造を挿入することが確実であり、これを基本に設計することとした。

##### 2.1 デチューニング基本構造

ロッドの直径の二乗でほぼ周波数変化を得られると考えると、ロッドは太い方が効率的であるが、ロッドと一定のギャップを開けて穴を形成しておく必要があり、これが太いとパワーの引込みが大きくなり、無負荷 Q 値の低下にもつながる。設計では十分高い遮断周波数、14.6 GHz、となるよう、φ12 の穴とした。これにギャップ 1.5 mm 程度保持するのが機械的に妥当だと考えてロッド径を φ9 と選択した。運転時にはロッドは天頂の開口穴には 6 MV/m 程度の TE<sub>11</sub> 電場が発生するが、ロッド先端を 20 mm 以上引き抜いておけば、漏れ電界は円筒導波管 TE<sub>11</sub> モードで減衰し、ロッドの頭で 13 kV/m 程度に抑えられ、φ12 内での瞬時積分でも 160 V 程度でマルチパクターは発生しない。

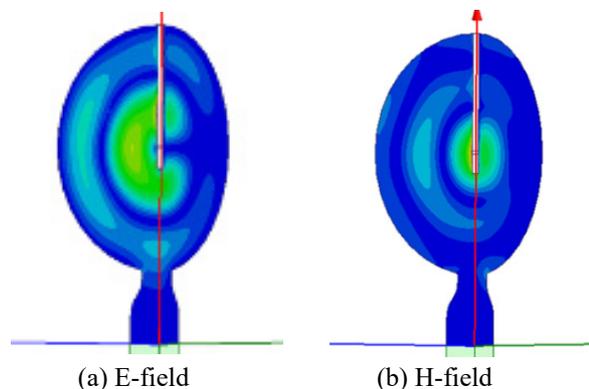


Figure 1: Field strength profile and detuner rod.

<sup>#</sup> toshiyasu.higo@kek.jp

## 2.2 デチューニングの計算

デチューナーによる周波数の変化量は、Fig. 1 の構造で空洞共振モードの解析を行うことにより可能である。円筒導波管から線偏極をした TE<sub>11</sub> モードで励振して計算評価した。結果を Fig. 2 に示した。ロッドの挿入量に対する空洞の共振周波数変化を(a)に、Q 値の変化を(b)に示した。挿入初期には電場強度の強い場所に入り、周波数を 3.5 MHz 下降させることができる。更に挿入して球の中心(挿入量 129 mm)を 2 cm 突き抜ける位置まで挿入して、§ 2.3 に述べるように、デチューニング量を 13 MHz 程度確保できることが分かった。この挿入に対して Q<sub>0</sub> 値は半分程度まで落ちることも分かった。

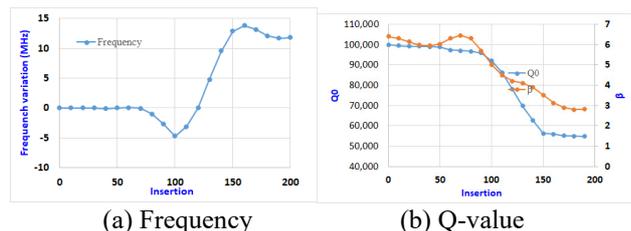


Figure 2: Cavity detuning feature vs. rod insertion. Left figure shows frequency variation, while right intrinsic Q value and coupling beta.

## 2.3 共振のテールでの空洞励振評価

入力結合孔までは入力パワー ( $P_{in}$ ) が常にきていて、空洞がデチューニングされていても多少のパワーは空洞内に励振される。このパワーを評価した。入力円筒導波管側から見て空洞の反射係数  $\Gamma$  は、結合定数  $\beta$  と離調パラメータ  $\xi$  で、

$$\Gamma = \frac{1}{1 + \xi^2} \left\{ \left( \frac{\beta - 1}{\beta + 1} - \xi^2 \right) - j \frac{2\beta}{\beta + 1} \xi \right\}$$

となる。ここで  $\xi$  は、運転周波数  $f_0$  からの共振周波数  $f$  の周波数離調量  $\mathcal{F}$  として

$$\xi \equiv \frac{Q_0}{1 + \beta} \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) \equiv \frac{2Q_L \mathcal{F}}{f_0}, \text{ where } \mathcal{F} = f - f_0$$

と定義する。離調時の空洞内の蓄積エネルギー  $U(\delta f)$  は、周波数が合っている時を  $U_0$  とすると、

$$U(\mathcal{F}) = U_0 (1 - \Gamma^2) = U_0 \frac{4\beta}{(\beta + 1)^2} \frac{1}{1 + \xi^2}$$

と評価でき、結果を Table 1 に示す。

一方摂動を受ける本来の空洞モード (TE<sub>112</sub>) 以外のモードの混入がないかの検討として、一番周波数の近いモードを考えてみる。低周波側に TM<sub>22</sub>、高周波側に TE<sub>41</sub> があるが、共に 100 MHz 以上はなれており、デチューナーによるこれらのモードの周波数変化は数 MHz であるので、問題にならない。また、これらのモードは高次の回転対称性があり、軸上に電磁場小さく軸上のロッドとの結合は小さいと考えられる。

Table 1: Power Flow into Cavity While Detuned

Rod Insertion mm	Q <sub>0</sub>	$\beta$	$\delta F$ MHz	P <sub>cav</sub> / P <sub>in</sub> Steady state	P <sub>cav</sub> / P <sub>in</sub> Square pulse
100	92,000	5	4	-35 dB	-34 dB
150	58,000	3.7	13	-43 dB	-42 dB

## 2.4 対称性の崩れによる同軸への電磁場の漏れ

§ 2.1 で述べたように、デチューナーの基本構造は、内径  $\phi 12$  のデチューナーポート内に、 $\phi 9$  の金属ロッドが挿入されている構造である。パルス圧縮時には、空洞内の蓄積されたモードの円筒対称性の対称軸は空洞の軸で良く決まっているので、回転対称性は良く保たれており、ポートへの漏れは TE<sub>11</sub> モードのみを通してである。この遮断周波数は Table 2 に示した様に十分高く、問題を生じない。しかし特に強い電磁場領域にデチューナーが偏心して挿入されたとき、共振モードの対称性も崩れデチューナーポートへの TEM モードでの侵入が可能になり、侵入した電磁波はポート内で減衰も小さく問題になる可能性がある。この状況は Table 2 に示した。

Table 2: Characteristics of Modes in Detuner Port

	Unit	Circular		Coaxial	
		TE <sub>11</sub>	TEM	TE <sub>11</sub>	TEM
Cutoff freq.	MHz	14.64	—	9.09	0
Attenuation	dB/mm	-3.0	—	-1.6	—

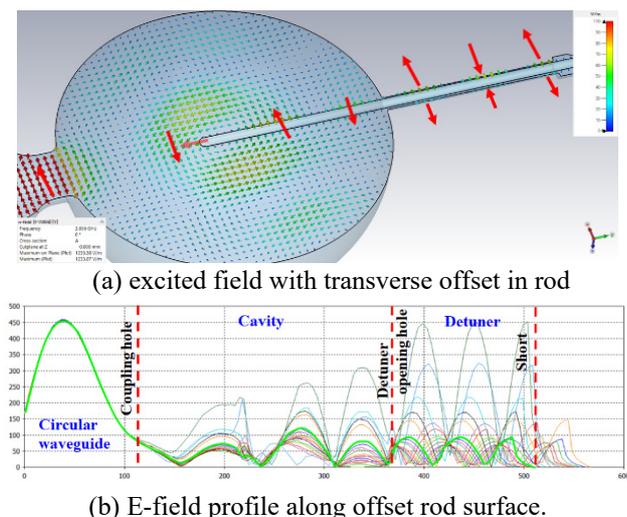
パルス圧縮運転時にデチューナー開口部には 0.11 MV/m の TE<sub>11</sub> 電場が現れるが、ロッドをポート入口から 20 mm 以上離してあるので 60 dB 減衰されて十分小さくなる。

デチューン時にはロッドが正に空洞内に大きく挿入されているので、これが偏心すると Fig. 3(a) に示されているように、同軸の TEM モードとしてポート内に漏れが発生する。この漏れは Fig. 3(b) に示した様に、ロッド半径だけ軸から離れた位置のロッドに向かう電場強度でみると、ショート面で完全反射された定在波パターンができる。このショート構造で電磁場は外部には漏れないが、ショートの位置を最適化して空洞開口部からショートまでの空間に立つ定在波の電磁場強度をおさえる必要がある。ショート位置の最適化は次節に述べる。

## 2.5 同軸の遮断特性とショート位置の決定

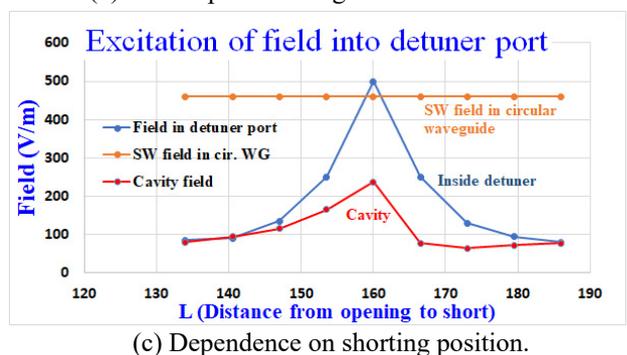
デチューナーポートの末端には Fig. 3(a) の図の右上に見えているような電氣的ショートの構造を設けた。ギャップを広げた理由は、Fig. 4(a) に写真で示したような、バネ特性を有するフィンガーで接触圧を保ちながらスライディングさせる機構を持ち込むためである。この構造を決めると、漏れを抑制するためのパラメータは開口部からショート面までの距離のみである。

今回選択したショート位置  $L$  は 145 mm であり、その時の分布が Fig. 4(b) にライトグリーンで示してある。また、



(a) excited field with transverse offset in rod

(b) E-field profile along offset rod surface.

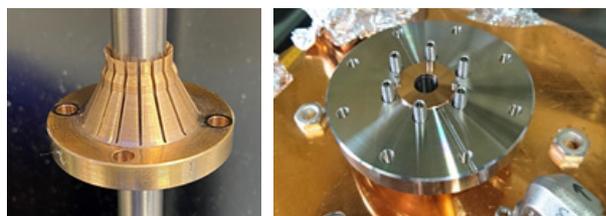


(c) Dependence on shorting position.

Figure 3: Power leakage into the detuner port, when the rod is offset w.r.t. cavity axis. (a) E-field pattern, (b) E-field profile along the rod, and (c) maximum field as a function of shorting position.

Fig. 3(c)には、円筒導波管、空洞、デチューナー内の最大電場をショート位置の関数としてプロットした。デチューナー取付フランジ位置からなるべく短い距離にショートを置きたいが、デチューナー組立に必要な構造物を配置できる最短位置として選択した。

なお、Fig. 5には励振される最大ギャップ電界と電圧を示した。CST 計算では入力 0.5 W が円筒導波管に入力され線形偏極モードを励起するので、フルパワー (40 MW) 運転では一つの線形偏極のモードに対しては 20 MW 入力と等価と考え、CST で得られる電磁場量を 6325 倍してプロットした。オフセットしたデチューナー同軸部に励起される電界は狭い方のギャップが大きくなり、フルパワーでの最大電場と Transit-time factor を考慮しない瞬時積分のをロッドのオフセットの関数としてプロット



(a) Sliding short (b) Detuner flange

Figure 4: Parts for the detuner.

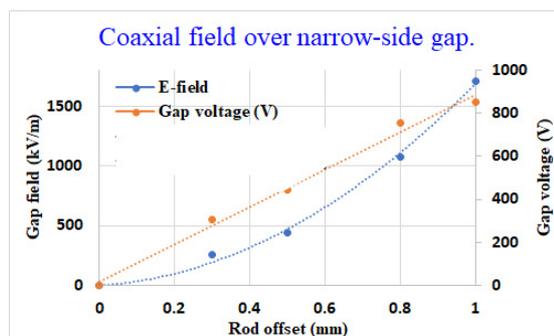


Figure 5: Gap field and voltage over narrow-side gap.

した。オフセットを 0.3 mm 以下に抑えれば、電圧は 300 V に抑えられ、マルチパクターなどは発生しないと考えられる。

### 3. 機械設計

デチューニングは、天頂にあげた穴に SUS ロッドを空洞の中心を越す辺りまで挿入して実現する。概観を Fig. 6 に示した。スライディングショートはマウントフランジの数 cm 外(固定位置)に設け、その外側はベローズで真空シールする。ベローズの空間は必要に応じて ICF34 フランジを通して排気するが、その位置はスライディングショートを見込む位置にしてあり、必要に応じて電磁場の漏れを計測できるようにもしてある。

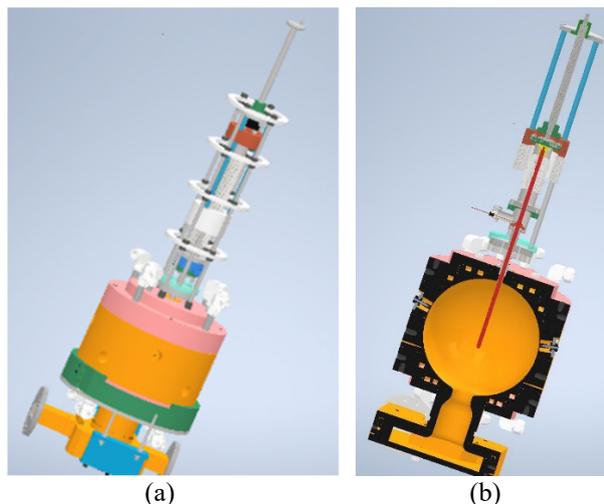


Figure 6: SCPC with detuner (a) and close-up view (b).

#### 3.1 機械設計

基本設計は、

1. 同軸構造: 外径  $\phi 12$ 、内径  $\phi 9$ 、ギャップ 1.5 mm
2. ストローク: 180 mm 以上(実設計では 190 mm)
3. 同軸のアラインメント  $\pm 0.3$  mm ( $\pm 0.1$  目標)
4. フランジマウント部: 外導体ギャップ無しとした。

#### 3.2 組立、駆動機構とアラインメント

デチューナー自身を組み立てた後に、Fig. 4(b)に示した MO 型フランジに組みこむ。フランジ位置はガスケットと併にピンでアラインメントされる。駆動は 5 mm ピッチの

ボールネジを手動で回転させておこなう。ロッドは、フランジに精密に立てた3本のロッド (Fig. 6(a)の青い3本柱) を基準にスライドするブロック (同図、茶色部) とスライディングショート (Fig. 6(b)茶色部、又は Fig. 4(a)の BeCu 部) で決まる。

### 3.3 スライディングショート

ショートは空洞の上部に位置するので、SUS304 のロッドとの摺動時にゴミのなるべく出ない組合せの物質として、ベリウム銅を採用した。円柱から削り出しで厚さ 0.5 mm の円錐状コーンを製作して、これにワイヤカットで 0.5 mm 幅のスリットを16本形成し、スプリング特性を持たせた。直径で 0.2 mm の締め代をもたせ、チューニングロッドへのフープ応力は 1 kg 程度を確保した。実際にロッドに装着したときの写真を Fig. 4(a)に示した。

## 4. 空洞離調特性測定

円筒導波管からみた球空洞の測定から一番直接的に空洞特性が得られるのでこれを基本計測とした (Fig. 7(a))。円筒導波管に直線偏向した TE<sub>11</sub> モードで空洞を励振し、デチューナーポートからφ9 のロッドを差し込んだ時の反射特性から空洞のモードを測定した。ロッド挿入に対する共振周波数変化は計算と良く一致することが確かめられた。SCPC として完成後は Fig. 7(b)に示した様に、実デチューナーをマウントして矩形導波管 WR284 入出力ポートの透過特性 S<sub>21</sub> を計測することにより、二つのモードを使用する実機の空洞評価をする。

後者の方法で得られた S パラメータの典型例を Fig. 8 に示した。Figure 8 の左図はデチューニング無しの時であり、上図の透過 S<sub>21</sub> ディップは空洞共振を表し、下図の反射 S<sub>11</sub> ではモードの縮退が良く保たれていることを示している。同右図は最大限デチューニングを行っている時で、上図 (透過計測) に空洞モードが 13MHz 上昇、下図 (反射計測) には運転周波数近傍では導波管偏極器の特性のみが残っていることが現れている。

このように後者の方法で計測し、Fig. 8 上図のディップ位置から得られるデチューナー挿入による周波数変化量は、Fig. 9 に赤●でプロットしてあり、前者の計測方法

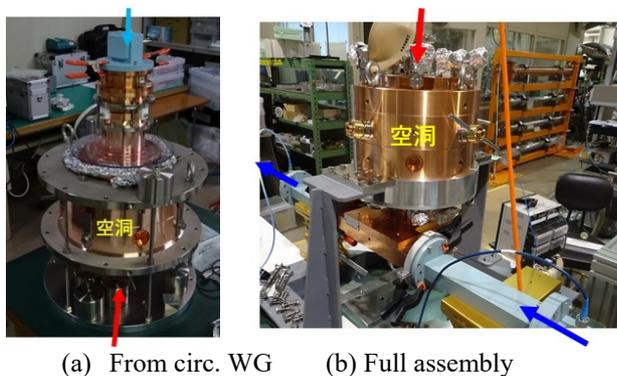


Figure 7: Low power test setups. Measurement ports are shown in blue arrows, (a) measurement seen from circular waveguide and (b) that from S-parameter between input and output waveguides. Insertion of detuner rod is shown by red arrow.

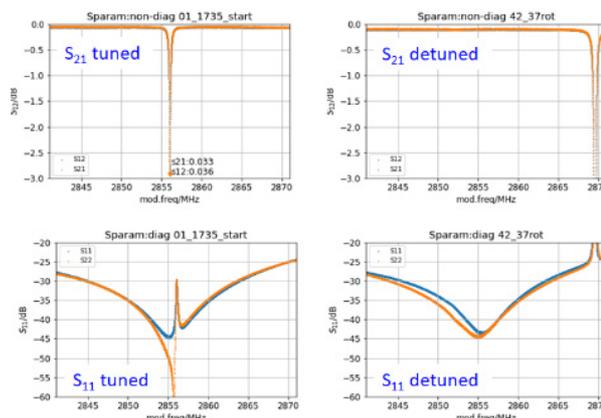


Figure 8: S-parameter feature of tuned and detuned. Left shows S<sub>21</sub> and S<sub>11</sub> when tuned, while right those detuned.

で得られた結果と良く一致していることが確認できた。周波数変化は計算値を良く再現していることが確認でき、デチューナーが摂動以上の大きな寄与を与えていないことが確認できた。

Q 値は Fig. 8 上図の透過特性から得られ、結果は Fig. 9 に青□でプロットしてある。Q 値は銅ロッドではデチューニングにより半分程度まで低下することが計算 (Fig. 2(b)) からわかっており、空洞壁と同じ程度のパワーロスがロッド表面での壁ロスで生じていると理解できる。SUS304 製の実ロッドは、壁ロスは6倍になり、ほぼ実験で得られた低下を説明できることが分かった。

## 5. 漏れ電磁場

### 5.1 ロッド位置に関する寄生共鳴

Figure 10(a)には、ロッド位置 146 mm における入力導波管からみた 2840~2880 MHz 範囲の透過・反射特性を示した。デチューンされた空洞共振が 2869 MHz 付近に見えるが、縮退が大きく解けてスプリットしている様子が見える。またその 2 MHz ほど下の周波数にデチューナーに存在するスプリアス共振が見えている。スプリアスはデチューナーロッド位置に敏感で、Fig. 10(b)に示した様にロッド位置が 140 mm 以上で現れ、特に挿入量 145 mm 付近で顕著である。

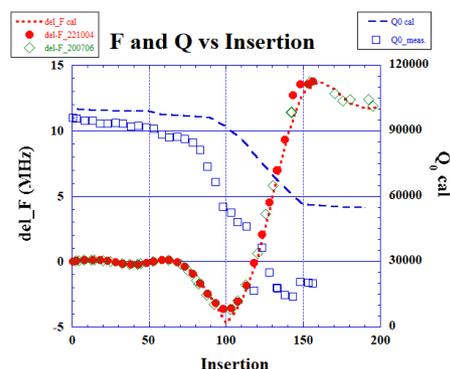
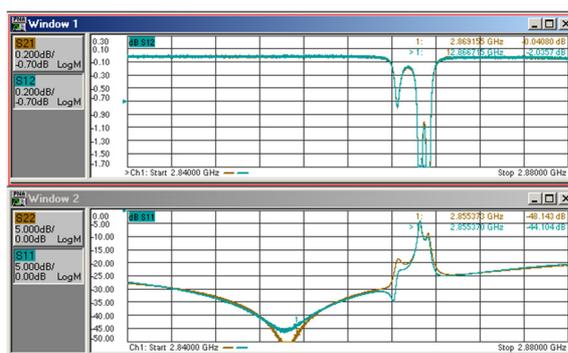
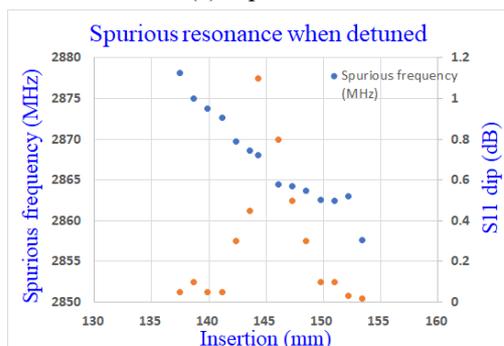


Figure 9: Cavity resonant frequency vs. rod insertion. Dotted lines are calculation results and symbols are those measured.



(a) S-parameter



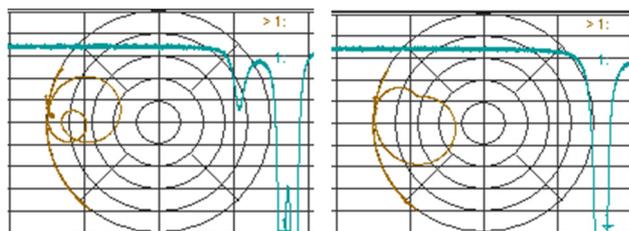
(b) frequency and dip

Figure 10: Spurious resonance features. (a) shows  $S_{ij}$  showing typical interference between spurious detuner resonance and cavity resonance, while (b) frequency and  $S_{ii}$  dip as a function of the rod position.

運転周波数は 2856 MHz の位置で、その周辺ではこのスプリアスに見られるような  $S$  パラメータの変化は全く ( $S_{21}$  で 0.1dB より十分小さいレベル) 見られず、デチューニングによる空洞の寄生発振の問題はないと判断した。

## 5.2 軸ずれ起因の寄生共振

§ 3.2 で述べたように、ロッドのミスアラインメントは組立時の精度とスライディングショート部をピボットとした傾きにより発生する。実際に強制的にロッド軸ずれを起こしてみると空洞モードの対称性が崩れ、デチューナーポート内への電磁場の漏れの原因になっていることを確認した。Figure 11 には、前節で寄生共振の顕著な場所(挿入量 146 mm)で、ロッドを横方向に手押ししたときの  $S$  パラメータの変化を示した。この様に寄生共振の様子は顕著に変化することが分かった。



(a) As is

(b) Rod push

Figure 11:  $S_{21}$  in polar and  $S_{12}$  in Log-Mag plot at the rod insertion of 146 mm. (a) Rod stress free, while (b) the end close to rotation handle was transversely pushed by hand.

## 6. 結果と議論

SCPC のデチューニングのための同軸型デチューナーを設計、製作し、低電力での計測を行った。空洞モードに対して十分な 13 MHz のデチューニング量とれることを確認した。更に同軸構造であるデチューナーにミスアラインメントが生じたときに起因する電磁場の漏れを評価し、低電力でその特性を計測した。これらの計測から、目標とした特性が得られることを確認できた。今後高電力試験でこれを確かめる。

本件のデチューナーでは、ロッドを球空洞の中心を超えて挿入することが必要であったが、運転時に許容される空洞内に励起される電磁場強度を多少リラックスできれば、挿入量は 100 mm 3.5 MHz の離調で済ませることが考えられる。特にロッド先端部分を銅メッキすれば、 $Q$  値の低下も 10%程度におさまり、現デチューナーと比較して検討の余地がある。ロッドのストロークも小さくでき、偏心量も少なく抑えられる。更に、ロッドを太くして挿入量を抑えることも含めてデチューナーによる離調システムを最適化していく。

## 謝辞

低電力試験に必要な環境整備や各種作業に関して、三菱電機システムサービスの牛本信二氏には多大な協力を頂き、感謝致します。

また試験によるゴミ等の SCPC への流入を抑制するため、クリーンエアフローを確保したが、KEK 超伝導グループの阪井寛志氏と株式会社 NAT の山田浩気氏には、フィルター装置の貸し出しを頂き、感謝致します。

## 参考文献

- [1] I. Sato *et al.*, ed. "Green book", KEK Report 1995-18, 1996.
- [2] H. Ego *et al.*, "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", WEP045, 第 19 回日本加速器学会年会, Japan, Oct. 18-22, 2022.
- [3] T. Higo *et al.*, "高周波特性からみた球形空洞型パルス圧縮器の製作", TUP045, 第 18 回日本加速器学会年会, Japan, Aug. 9-12, 2021.
- [4] 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.
- [5] 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).
- [6] P. Wang *et al.*, "Development of an S-band spherical pulse compressor," Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 901 (2018) 84–91.
- [7] 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
- [8] Ansys HFSS; <https://www.cybernet.co.jp/ansys/product/lineup/hfss/>
- [9] T. Higo *et al.*, "Design of spherical-cavity pulse compressor for SuperKEKB", Technical note 2021-001, 2021, unpublished.
- [10] CST Studio Suite; <http://www.cst.com/>