

球形空洞型パルス圧縮器のデチューナー設計(2)

DESIGN OF DETUNER FOR SPHERICAL-CAVITY-TYPE PULSE COMPRESSOR (2)

肥後寿泰^{#,A)}, 恵郷博文^{A)}, 東保男^{A)}, 阿部哲郎^{A)}, 設楽暁^{A)}, 坂東佑星^{B)}, 牛本信二^{C)}

Toshiyasu Higo^{#,A)}, Hiroyasu Ego^{A)}, Yasuo Higashi^{A)}, Tetsuo Abe^{A)}, Satoru Shitara^{A)},

Yusei Bando^{B)}, Shinji Ushimoto^{C)}

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

^{B)} SOKENDAI, The Graduate University for Advanced Studies

^{C)} Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

Abstract

The spherical-cavity-type pulse compressor has been developed for the KEKB electron-positron injector linac and gradually installed into the line. The pulse compressor sometimes needs a detuning function, which makes the high-power transmission skipping over the cavity of the pulse compressor. A detuner with a rod diameter of 9 mm was reported in PASJ2022. The prototype was tested in high power and the performance was confirmed but the rod insertion is so deep as beyond the center of the spherical cavity. We understood that an improved design is better be developed for the stable operation considering the mechanical vulnerability hiding in the long coaxial rod-type detuner. In this paper is presented the design improvement with using a thicker rod of 16 mm in diameter. The insertion can be reduced to the point being 30mm ahead of the cavity center, and the residual power going into the cavity will be more reduced by 10 dB than that of the prototype.

1. はじめに

KEK 電子陽電子線形加速器[1]では、球形空洞型 S バンドパルス圧縮器 (SCPC, Spherical-Cavity-type Pulse Compressor) を開発し、徐々に通常運転で使用され始めている[2-4]。

パルス圧縮器では圧縮をしない運転モードを持つことが必要、又は都合の良い、ことがあり、高電力が圧縮器を通らない運転をするためにデチューナーを備えていることも多い。2022 年の学会ではその初期開発を報告した [5]。プロトタイプ機は高電力での安定運転まで実証されたが、デチューナーの挿入量が球空洞の中心を越して奥まで挿入する程に大きく、デチューナーに用いるロッドのミスアラインメントに関連した寄生共振が観測されていたりしたので、長期の安定性を目指した設計変更が必要だと判断していた。

この目的に沿って、挿入量を小さくした設計を試みたので、本稿ではその設計方針と、設計詳細について述べる。

2. 現設計デチューナー

現設計は[5]に詳述した。単空洞でパルス圧縮するためには、同一周波数をもつ Q 値の高い二つのモードが必要で、本 SCPC は球形空洞内の TE₁₁₂ モードを用いている。このモードは、直交する極軸をもつ、縮退した二つのモードが 90 度ずれた位相で共存する状態を用いており、時間を追って電磁場を見ると軸の周りに回転するモード、回転対称モード、であると理解できる。デチューナーの設計にはこの高い Q 値を維持し、少量の周波数シフト量に対しても大きなデチューニング(離調)を実現して、運転周波数で空洞内に入り込むパワーを抑え込む

ことが重要である。このため本 SCPC では、二つのモード間の縮退を維持するため、デチューナーも回転対称形状であることが条件となるので同軸構造を採用した。円柱状のロッドをモードの対称軸に沿って設けた円筒ポート内に設置し、空洞内に挿入することにより、周波数デチューンを行う事にした。球形空洞の TE₁₁₂ モードの電場・磁場分布パターンから、ロッドを挿入するに伴ってまず電場の支配的な場所を通過するので共振周波数が下がり、更に空洞中心まで挿入していくと磁場が支配的になって周波数が上昇してくることがわかる。実際にデチューナー試験機を製作して計測した結果[5]とシミュレーション結果をFig. 1 に示した。

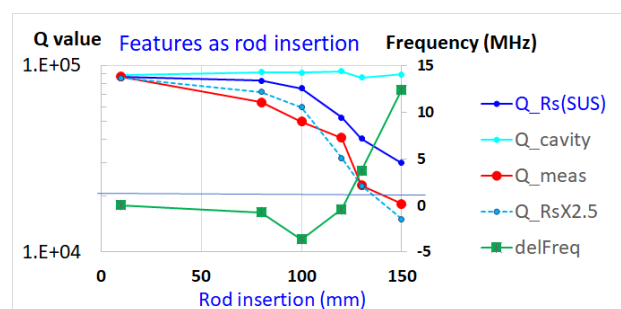


Figure 1: Measured frequency (green square) and Q value (red circle) of the storage mode in SCPC as function of detuner insertion. Q_{cavity}, Q_{Rs(SUS)}, and Q_{RsX2.5} are intrinsic cavity Q value, Q value due to stainless-steel rod and that assuming larger rod surface resistance by a factor 2.5, respectively.

結果をまとめると、

1. 周波数摂動量は安定して計算通りである。

[#] toshiyasu.higo@KEK.jp

- Q 値の測定値は赤で示したが、ロッド材質(ステンレス)を仮定した Q 値の計算値、Q_Rs(SUS)、(Fig. 1 青点)より低かった。ロッドの表比抵抗ではステンレスの 2.5 倍を仮定する程度である(Fig. 1 水色点線)。
- 空洞中心を越してロッドを挿入すると、ロッドのミスアラインメントに起因する寄生共振があり、運転周波数に対して 10 MHz まで近づいてくるのが観測された。

上記第 2 項(Q 値劣化)と第 3 項(寄生共振)の観点から長期安定なデチューナーの再設計が望まれた。

3. デチューナーの改造

3.1 基本方針

試験機のロッド径 $\phi 9$ mm では、最大周波数デチューニングを得るためにロッドを、空洞(半径 ~ 129 mm)中心を越す所まで挿入すると、駆動機構を考慮したロッドの長さは 300 mm 級に延ばさざるを得ない。このように長い同軸構造では、横方向ミスアラインメントを生じ易く、安定な構造とするには機械強度を向上させねばならない。そこで大きな摂動を少ない挿入量で実現するためにロッド径を増やし、ロッド挿入を電場が主な領域に留めることを検討した。

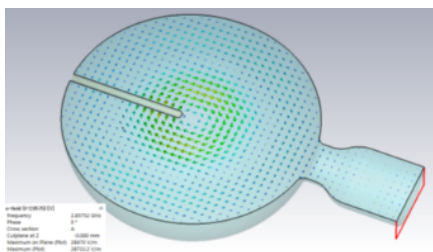


Figure 2: Simulation geometry and TE₁₁₂ mode seen from the circular wave guide at the right end.

3.2 周波数

2 章で示したように周波数は計算値によく合うことがわかっているので、新設計への摂動量評価は Fig. 2 の形状で CST studio Suite [6]を用いて計算した。入力波は右端の円筒導波管から円筒半径方向へ線形に偏極した TE₁₁ モードでフィードし、同じ方向に線形偏極した空洞内 TE₁₁₂ モードに対する反射特性 S₁₁ パラメータから求めた。3 次元計算結果は Fig. 2 のように共振点近傍の周波数に対してプロットして、デチューニング前のモードパターンに大きな変化のないことを確認した。

周波数変化の計算結果は Fig. 3(左図)に示した。左図の青色が現状ロッド $\phi 9$ であり、残りは摂動の大きさに順に $\phi 12$ (灰色)、 $\phi 16$ (赤)、 $\phi 20$ (緑)の結果である。挿入量に対して定性的にはほぼ同じ挙動を示しており、蓄積電磁場モードに対する摂動におさまっていると考えられる。改良設計では周波数の最下降点でのデチューニングを考えているが、最高点の周波数シフト値も含めてロッド径の関数として表してみたプロットが Fig. 3(右図)

である。挿入体積に比例したロッド径の二乗ではほぼ再現できることがわかった。

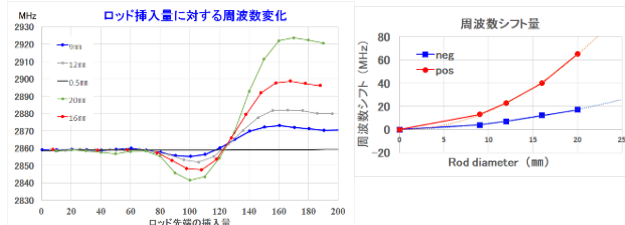


Figure 3: Frequency variation as a function of rod insertion (Left). Frequency shifts of the positive and negative peaks as a function of rod diameter (Right).

3.3 Q 値

蓄積モードの Q 値は、球形空洞内の TE₁₁₂ モードのロスと、挿入するロッド表面でのロスが関与する。この様子を Fig. 4 (左図)に示した。ロッドの挿入量が小さく電場が主の領域では磁場起因の損失は少ないのでロッドロスに起因する Q 値は空洞モードの Q 値に比べて大きい。球中心までロッドを挿入すると、球空洞中心近傍にある高い磁場に起因してロッド上表面電流が大きくなり、ロッド起因の Q 値が空洞モードの Q 値に近づいてくる。従って、高い Q 値を維持しておくためには、ロッド挿入を球空洞中心の手前までに抑える設計が望ましい。

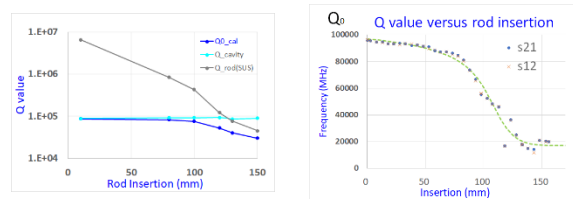


Figure 4: Left: Q value due to rod wall loss in addition to that of cavity wall loss. Right: Measured Q values with 9mm-diameter rod (gray square) and fitting (green broken line).

新設計の具体化を進めるため、現在のデチューナー($\phi 9$ ロッド)の挿入に対する Q 値計測結果を再考した。2 章で議論したように、ロッドのロスのみでは正確に表せないことがわかっていたので、次の 3.4 節での解析には、Fig. 4(右図)に示したような、実験的に得られた Q 値データを、2 個の Fermi 分布型関数の積と定数項の和を仮定してフィットした Q 値を使用した。このカーブは Fig. 4(右図)の緑色点線で示してある。但し、ロッド径が異なる場合、適用妥当性は保証できていないことに留意しておき、実設計には実験的な検証も含めて、今後詳しく検討する。

3.4 空洞入力パワーの抑制

入力結合孔までは入力パワー(P_{in})は常にきていて、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漏れ込み、振幅が小さいながらも空洞モードを励振する。この漏れ込むパワー比率を評価した。

入力円筒導波管側から見て空洞の反射係数 Γ は、結合定数 β と離調パラメータ ξ で、

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

とかける[7]。ここで ξ は、運転周波数 f_0 からの共振周波数 f の周波数離調量 δf として

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

と定義する。離調時の空洞内の蓄積エネルギー $U(\delta f)$ は、デチューナー未挿入状態を U_0 とすると、

$$U(\delta f) = U_0(1 - |\Gamma|^2) = U_0 \frac{4\beta}{(\beta+1)^2} \frac{1}{1+\xi^2}$$

と評価できる。周波数変化は Fig. 3 をフィットした関数 (Fig. 5 (左)) を用意し、Q 値は Fig. 5 (右図) を用いた。これらを用いて空洞へのパワー漏れ込み量を評価すると、Fig. 6 のようになる。

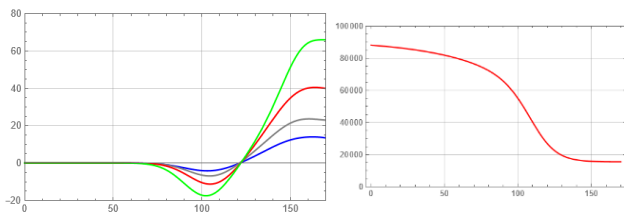


Figure 5: Frequency detuning curve (left) and assumed Q value (right) for simulation as a function of rod insertion.

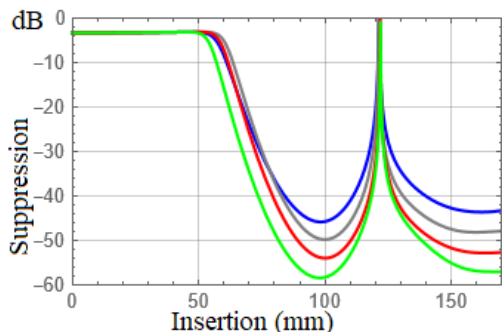


Figure 6: Suppression of power into the cavity as rod insertion. Color coding is used for rod diameters: blue=9, gray=12, red=16mm and green=20mm.

3.5 新設計パラメータ選択

Figure 6 に示した様に、Q 値の劣化がロッドに依存しないとされた時には、ロッド径が大きいほど摂動量を表すデチューニングパラメータ ξ が大きくとれるので、パワーの流入抑制特性が高くてできる。実際のデチューナーは同軸構造をとるので、そこへの TE_{11} モードでのパワー侵入がありたい同軸では遮断特性が弱くなるが、 $\phi 20$ ロッド

を選択しても遮断波長 λ_c は $\lambda_c \sim 20 \pi \text{ mm}$ であり、遮断周波数は $c/\lambda_c \sim 5 \text{ GHz}$ で、運転周波数より充分高いので問題にはならない。Figure 6 の計算結果を基にすると、球空洞の中心までは挿入せずに現設計と同じ周波数摂動量がとれる $\phi 16$ 程度が、Q 値劣化も少なく、総合的にパワー流入抑制特性が大きくとれるので、妥当なパラメータと選択した。

4. 議論

今回ロッド径は $\phi 16$ を選択したので、空洞の中心手前 30 mm (挿入量 100 mm) で 10MHz の周波数デチューニングを確保でき、Q 値の劣化も小さく、寄生発振も抑制できるパラメータとして総合的な解と結論した。

初期の設計や他の直径選択の場合との比較を Table 1 に示した。青枠で囲った直径 $\phi 9$ の初期設計では挿入量を 145 mm として大きく周波数をふったが、Q 値の劣化が大きく、Q 値の測定結果を用いた今回の解析的設計比較では 95 mm 挿入の方がパワー流入量を抑制できていた可能性がある。これと比較して、新設計の $\phi 16$ ロッドの場合 (緑枠) は、パワーの空洞内への流入量は $\phi 9$ 青枠の場合に比べて 10dB 改善されている事が分かる。

Table 1. New Design Parameters

	unit	9	9	12	12	16	20
Insertion	mm	100	150	100	135	100	98
delF (MHz)	MHz	-4.5	+12	-7	-12	-10	-18
QL		60000	15000	54000	18500	55000	53000
β		2.7	0.25	2.5	0.3	2.5	2.4
ξ (gzi)		-170	115	250	140	400	680
$1- \Gamma ^2$	dB	-46	-44	-50	-44	-54	-58

さらなる改善可能性としては、できる限り直径を大きくとり、その分挿入量を抑えて Q 値劣化の極力少ない領域に留めることも考えられるが、この場合は、パルス圧縮運転の場合に同軸部の外導体の作るくぼみ (ロッド挿入用ポート) による磁場の局所増大に気をつけながら設計する必要が生ずる。

ロッドの表面でのロスも Q 値の劣化に効くので、最終設計としては銅などでロッド表面をコーティングして用いることも考えられるが、磁場の大きな領域には挿入しない設計をとる限りロッド表面でのロスはそれほど気にすることはなかろうと考える。

これまでの $\phi 9$ ロッドを用いたデチューナー設計に比べて、径を $\phi 16$ に増やすことにより、表皮ロスが増えてくる空洞中心付近へのロッド挿入をしない設計ができ、抑制性能がこれまでより 10dB 程改善された。更に太いロッドを用いた最適設計も可能と思われるが、実験に基づく Q 値劣化の理解、確認が必要である。

参考文献

[1] H. Ego *et al.*, "SuperKEKB 入射性能向上への KEK 電子陽電子入射器アップグレード", PASJ2024, THP023, Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024.

PASJ2024 THP066

- [2] 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”, Proc. PASJ2021, Takasaki (Remote), Japan, Aug. 2021, TUP045.
- [3] A. Saji *et al.*, “球形空洞型パルス圧縮器の製作”, Proc. PASJ2021, Takasaki (Remote), Japan, Aug. 2021, MOP045.
- [4] 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”, Proc. PASJ2022, Kyushu (Remote), Japan, Oct. 2022, WEP045.
- [5] T. Higo *et al.*, “球形空洞型パルス圧縮器のデチューナー設計”, Proc. PASJ2022, Kyushu (Remote), Japan, Oct. 2022, WEP046.
- [6] CST Studio Suite,
https://www.aetjapan.com/cst/technical_topics/
- [7] T. Weis, “Interaction between RF-System, RF-Cavity and Beam”, TU Dortmund, Germany, DELTA Internal Report 05-02, 2005.