

S バンド球形空洞型パルス圧縮器の波形パルス解析手法

ANALYSIS SCHEME OF PULSE WAVEFORM FOR S-BAND SPHERICAL-CAVITY TYPE PULSE COMPRESSOR

坂東佑星^{#,A)}, 肥後壽泰^{B)}, 恵郷博文^{A, B)}, 阿部哲郎^{A, B)}, 由元崇^{A, B)}, 東保男^{B)}, 牛本信二^{C)}
Yusei Bando^{#, A)}, Toshiyasu Higo^{B)}, Hiroyasu Ego^{A, B)}, Tetsuo Abe^{A, B)}, Takashi Yoshimoto^{A, B)}, Yasuo Higashi^{B)},
Shinji Ushimoto^{C)}

^{A)} The Graduate University of Advanced Studies, SOKENDAI

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

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

Abstract

The rf pulse compressor is used for higher accelerating gradient in KEK electron positron injector linac. A new S-band spherical-cavity type pulse compressor (SCPC), which can replace the current SLED type one, was fabricated, and conducted high-power operation. Although cavity parameters are important to evaluate the state of the machine, compared to low-power measurement, it is difficult to obtain them from high-power operation because the measurement is restricted to time-domain. We developed an analysis method to search for cavity parameters which fits to measured pulse. This paper reports on the detail of the analysis method.

1. はじめに

高エネルギーを目的とした加速器において、高い加速電場勾配を実現する手段として高周波パルス圧縮器 [1] が用いられている。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の電子陽電子線形加速器 [2] においては、KEKB のエネルギー増強を目的として同様のシステムを 1990 年代前半より導入してきた。しかし、近年となり装置の老朽化が問題となり、新機軸の球形空洞を備えたパルス圧縮器 (SCPC: Spherical-Cavity type Pulse Compressor) [3, 4] の開発を開始してきた [5-7]。新機軸の装置開発では、小型かつ軽量であり、量産に適した設計を採用した。2020 年度にはプロトタイプとなる高電力試験器を製作し、高電力試験を実施した [7]。この試験により装置の良好な動作を確認することが出来たため、2021 年度より線形加速器のビーム加速システムへの導入を目的とした実機製作を開始した [8]。

通常パルス圧縮器の性能評価は、ベクトルネットワー

クアナライザー (VNA) を用いた低電力測定が標準であった。典型的な測定例を Fig. 1 に、また、試験機製作後の解析結果を Table 1 に示す。ビーム加速システムにおける運転では高電力に起因する熱変形等が発生し、空洞の状態が低電力測定時とは異なることが考えられる。このことを正確に評価するためには、高電力運転状態における装置の状態を取得する必要がある。そこで、高電力運転中のパルス波形を用いて、装置の特性を表現する空洞パラメータを算出することとし、これが本研究の主題である。

Table 1: Cavity Parameters Measured by Using VNA

Parameters	
Resonance frequency f , converted to 31°C and vacuum environment.	2856.081 MHz
Unloaded Q: Q_0	98000
Loaded Q: Q_L	13150
Coupling coefficient: β	6.48

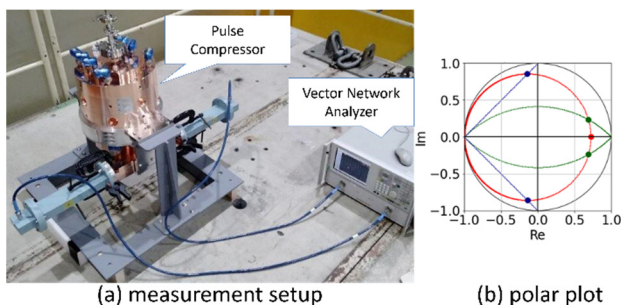


Figure 1: Low-power measurement setup (a) and its typical result (b). Cavity parameters are calculated by finding five points in the polar plot.

2. 波形パルスの解析手法

本研究でのパルス圧縮器の高電力試験運転は KEK 電子陽電子入射器内の T3 テストスタンドにおいて実施した。S バンドクワイストロン、SCPC、RF ダミーロード、およびパワー・位相計測器を使用した測定系を Fig. 2 に示す。計測器は入出力の高周波信号をそれぞれ 100 MHz のサンプリングレートで取得し保存する。パルス波形データの保存は、手動の操作により、あるいは、インターロック発生時には自動的に、その直前の 10 パルスのデータを保存する。

[#] yuseiban@post.kek.jp

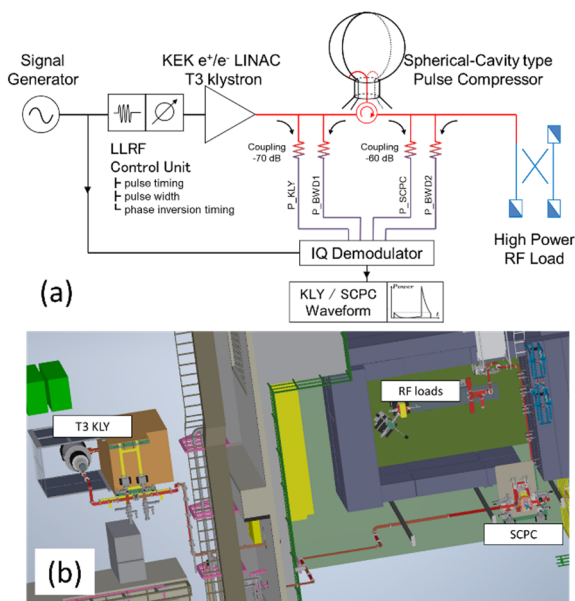


Figure 2: Schematic view (a) and CAD images (b) of high-power test facility setup.

$$\left(1 + \frac{\omega_c^2}{\omega^2}\right) \frac{dV_c}{dt} + \left\{ \frac{\omega_c}{Q_L} + j\omega \left(1 - \frac{\omega_c^2}{\omega^2}\right) \right\} V_c = \frac{2\omega_c\beta}{Q_0} V_i \quad (1)$$

この解析手法の主要な構成要素は、パルス圧縮器の

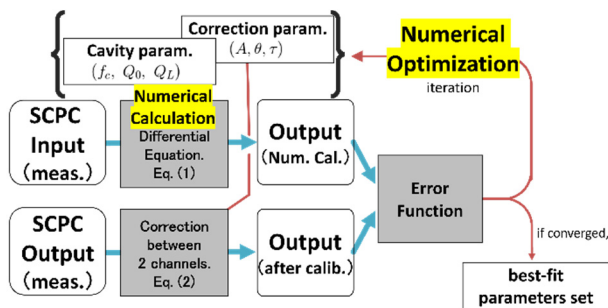


Figure 3: Schematic process of the analysis method. Searching for best-fit parameters by technique of numerical optimization and numerical calculation.

動作を等価回路によってモデル化して導出した時間発展の微分方程式を数値的に解く数値計算部と、数値最適化のライブラリを用いたパラメータ探索部からなる。この解析手法の流れ図を Fig. 3 に示す。

2.1 数値計算

SLED 形式のパルス圧縮器の動作に関して、入力波 $V_i(t)$ と出力波 $V_o(t) = V_c(t) - V_i(t)$ の関係は微分方程式でよく記述される[1]。入力波形から算出される出力波形は、等価回路として LCR 並列共振回路における応答を解いて得られる Eq. (1)を用いる[2]。ただし、導出において、高周波信号の振動が電磁場振幅の変化に対して十分に速いことを考慮した近似を用いている。

本研究において正常波形の解析では、Eq. (1) に含ま

れる各項の係数に寄与する空洞パラメータはパルス幅全体にわたって変化しない定数であるとした。4 次の Runge-Kutta 法により、データ取得間隔に等しい 10 ns 毎の出力信号の波形を数値計算によって取得する。

2.2 数値最適化による解析手法

続いて、測定によって得られた出力信号波形と数値計算によって得られた出力信号波形について、数値最適化の手法を用いて差を最小とするパラメータの組を探索する。本研究では、定格の $4 \mu\text{s}$ のパルス幅及び後続の $1 \mu\text{s}$ のテール部にわたって、各測定時点における複素数で表される電磁場の差の平均二乗偏差(RMSE: root-mean-square error)を最小化すべき誤差関数として採用した。この RMSE は、測定したパルスの入出力信号と、パラメータの組に対して算出される値である。ここで最適化のために探索するパラメータは、共振周波数と高周波周波数の差($\Delta f := f_c - 2856 \text{ MHz}$)、無負荷 Q 値(Q_o)、負荷 Q 値(Q_L)の装置に関する 3 つの空洞パラメータに加えて、入出力信号を測定する 2 チャンネルの間の補正のための、電場振幅補正(A)、位相補正(θ)、時間差補正(τ)の測定系に関する 3 つの補正パラメータを含めて探索することとした。補正式は Eq. (2) である。

$$\begin{cases} P_{o,\text{meas}}^{(\text{calib.})}(t) = A^2 e^{j2\theta} P_{o,\text{meas}}(t - \tau) \\ V_{o,\text{meas}}^{(\text{calib.})}(t) = A e^{j\theta} V_{o,\text{meas}}(t - \tau) \end{cases} \quad (2)$$

数値最適化のアルゴリズムに従って 6 つのパラメータの組の値を順に変更しながら、その都度誤差関数の値を算出することを繰り返し、指定した基準に従ってイテレーションを停止して最適化計算の収束解を取得する。RMSE を最小にするパラメータの組は、測定した入出力信号の関係をよく再現する組であることから、該当パルスを測定したときの装置の状態をよく表現するパラメータの組として尤もらしい解であるといえる。最適化計算のアルゴリズムは、SciPy[9]のライブラリを使用して実装した。

3. 解析手法の評価

3.1 典型的な解析例

まず、前章で述べた解析手法を正常運転時のパルス波形測定に対して適用させた際の結果を Fig. 4 に示す。水色の点はパルス圧縮器への入力波形 P_{in} を表す。橙色の点はパルス圧縮器の出力波形 P_{out} を表しているが、較正パラメータの値を用いて Eq. (2) により補正した波形である。黒色の折れ線は、収束した先のパラメータの値を用いて、パルス圧縮器の入力波形に対する出力波形を数値的に解いた波形である。数値計算による出力波形と、測定によって得られた出力波形がよく一致していることから、収束した先のパラメータの組は運転時のパルス圧縮器の状態を表現するに尤もらしいといえる。収束時のパラメータの値は図中に示している。

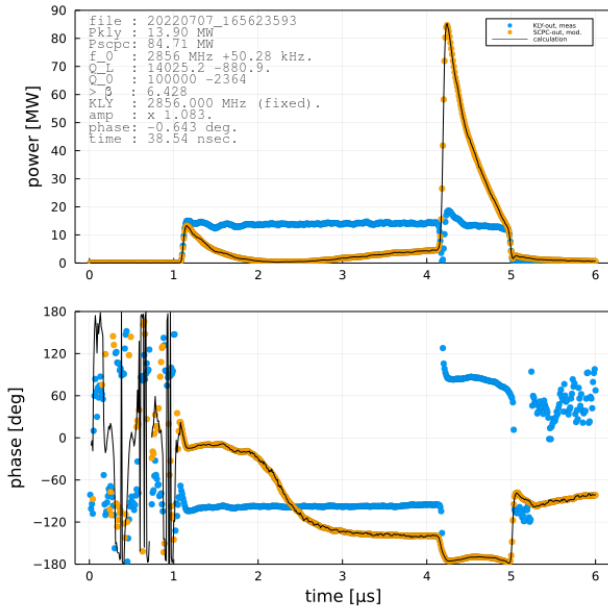


Figure 4: Analysis result of typical waveform. The measured input pulse (blue), output pulse (orange), and numerically calculated output (black). (up) RF powers, (down) phases.

3.2 複数のパルス波形測定に対する解析

連続運転中に取得した複数のパルスデータに対して独立に解析を実行し、収束先のパラメータの分布を計算した。ここでは、Fig. 4 のパルス波形を含む 1 分間に取得した 180 のパルスデータについて、最適化計算の各パラメータの収束先の結果を Fig. 5 に示す。対角線には各パラメータのヒストグラムを表しており、その左下には二つのパラメータの間の相関関係を散布図で表している。 (Q_0, Q_L, A) の間及び $(\Delta f, \theta)$ の組に強い相関がみられるが、パラメータの平均値および標準偏差は Table 2 に示す範囲に収まっていた。各パラメータの標準偏差は運転状態を評価するにあたって十分に小さく、実用上の問題はないと判断した。

Table 2: Converged Parameters Value of Analysis of Consecutive Pulses (N=180)

Parameters	
Δf (kHz)	49.93 ± 0.18
Q_0	$(9.77 \pm 0.14) \times 10^4$
Q_L	$(1.313 \pm 0.003) \times 10^4$
A	1.0830 ± 0.0012
θ (deg)	-0.64 ± 0.03
τ (ns)	38.59 ± 0.15
P_{in} (MW)	14.04 ± 0.07
P_{out} (MW)	85.6 ± 0.4

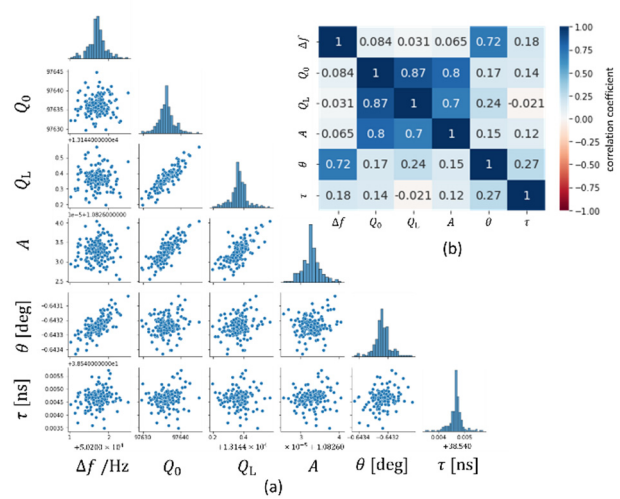


Figure 5: Converged parameters distribution for the same measured pulse data with different initial values. (a) pair-plot: diagonal subplots represent histograms and off-diagonal subplots represent scatter plots for every two variables pairs, (b) correlation coefficient matrix.

3.3 解析手法の初期値依存性

続いて、本解析手法を使用した解析において、単一のパルス入出力波形を対象として、最適化計算の収束先と初期パラメータの依存性を調べた。探索する 6 つのパラメータについて、空洞性能に対して十分に広い範囲をとったと判断する Table 3 に示す範囲でそれぞれについて一様乱数によって初期値の組を定め、Fig. 4 で示したパルス波形に対して独立に解析手法を適用した。200 回の初期値の取り方に対する収束の結果を同じく Table 3 に示す。

ここで示された初期値の組に対する収束先の値のばらつきは、先に述べた複数パルスの解析結果に対して十分に小さいことを確かめた。したがって、解析によって得られるパラメータの誤差は前節で述べたパルス毎の解析結果のばらつきが支配的であると判断した。

Table 3: Converged Parameters Value of Analysis with Randomized Initial Parameters (N=200)

Parameters	Initial Value	
Δf (kHz)	$-100 \text{ kHz} < \Delta f < 100 \text{ kHz}$	50.2817 ± 0.0002
Q_0	$70000 < Q_0 < 130000$	97636 ± 2
Q_L	$12000 < Q_L < 16000$	13144.37 ± 0.06
A	$0.6 < A < 1.4$	1.082633 ± 0.000002
θ (deg)	$-4^\circ < \theta < +4^\circ$	-0.64324 ± 0.00005
τ (ns)	$34.5 \text{ ns} < \tau < 40.5 \text{ ns}$	38.5447 ± 0.0003

3.4. 異なる入力電力のパルスに対する解析結果

以上の解析手法をもってして、パルス圧縮器の高電力運転中、特にクライストロンへの印加電圧を昇圧し、パルス圧縮器の入力電力を次第に変化させる過程におけるパルスデータに対して解析を行った。様々な入力電力に対して、印加電圧を一定に留めた状態で 100 パルス程度の波形を測定し、各パルスについて解析を行った。各物理量・パラメータの値を Fig. 6 に示した。Figure 6(a) から 6(d) まで、横軸を入力電力の平均電力とし、縦軸は順に出力ピーク電力、パルス圧縮器の共振周波数、無負荷 Q 値、結合係数である。入出力の電力の比はおおよそ一定であり、出力電力の最大値は入力電力平均値の 6.06 倍となる。また、電力の増加に伴う発熱量の増加のために共振周波数は低下し、おおむね線形に 1 MW の電力増加により 1.34 kHz の共振周波数の低下が生じる。無負荷 Q 値および結合係数 β は、4 MW 入力に対する解析では VNA 測定の結果 (Table 1) と比較して 1 割程度大きな値となっており合致していない。一方で、10 MW 程度以上の入力電力に対しては、おおよそ一致した解析結果を得ており、今回の測定範囲での最大電力であった 14 MW 入力に対する解析結果は先に示した Table 2 のようであった。空洞パラメータの値は VNA 測定と比較して標準偏差の範囲に入っており、この範囲の電力運転において本解析手法で得られるパラメータの値が低電力測定とコンシステントであることが確かめられた。

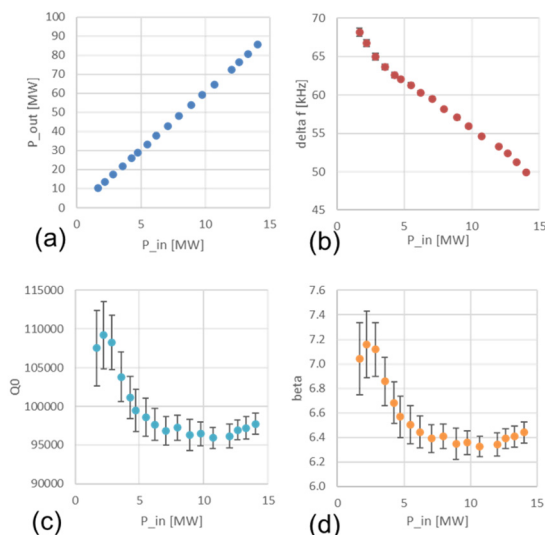


Figure 6: Distribution of converged parameters for different input average power. (a) output peak power, (b) Δf , (c) Q_0 , (d) β . Error bars on each plots represent the distribution of converged parameters for consecutive pulses (N~100).

4. 結論と課題

高電力運転時における SCPC の入出力のパルス波形を取得し、数値計算と数理最適化の手法を用いることによって運転中の空洞パラメータを算出する解析手法を構築した。高電力運転において、5~14 MW の入力電力の

運転において本手法を複数のパルスデータに対して適用することにより、共振周波数は 0.2 kHz のオーダーで、Q 値は相対変化量 1.4% のオーダーで算出することが出来ることを確認した (Table 2)。

本解析手法の課題として、以下の二つを挙げる。まず一つ目に、入力電力が数 MW 程度の解析においては、VNA を用いる低電力測定と一貫しない結果を返すことである。二つ目に解析の環境及び速度に関して、最適化計算においてパルス毎に 1 秒程度消費するため、全パルス解析のためには高速化・効率化が必要である。

謝辞

SCPC の高電力運転を実施するにあたり、入射器 RF グループおよび三菱電機システムサービス(株)運転員の方々に多くの支援を頂きました。深く感謝いたします。

本研究は JST 科学技術イノベーション創出に向けた大学フェローシップ創設事業 JPMJFS2136 の支援を受けたものです。

参考文献

- [1] Z. D. Farkas *et al.*, "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", Phys. Rev. Accel and Beams, 20, 110401, 2017.
- [4] P. Wang *et al.*, "Development of an S-band spherical pulse compressor", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 901, 84-91, 2018.
- [5] 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.
- [6] A. Saji *et al.*, "Fabrication of a spherical-cavity-type pulse compressor", MOP045, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Japan, Aug. 9-12, 2021.
- [7] 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.
- [8] H. Ego *et al.*, "Production of the S-band spherical-cavity-type pulse compressor for the KEK electron and positron injector linac", WEP045, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Japan, Oct. 18-21, 2022.
- [9] <https://scipy.org/>