

放電をともなう S バンド加速管における 音響スペクトル解析

ACOUSTIC SPECTRAL ANALYSIS FOR IDENTIFYING S-BAND ACCELERATING TUBES WITH RF BREAKDOWN

由元崇^{#, A, B)}, 肥後壽泰^{A)}, 惠郷博文^{A, B)}, 荒木田是夫^{A)}, 牛本信二^{C)}

Takashi Yoshimoto^{#, A, B)}, Toshiyasu Higo^{A)}, Hiroyasu Ego^{A, B)}, Yoshio Arakida^{A)}, Shinji Ushimoto^{C)}

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

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

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

Abstract

The SuperKEKB e^+e^- linear accelerator consists of ~60 accelerating units, each of which has four S-band accelerating tubes driven by one klystron. One of the issues for stable beam operation is to identify in which accelerating tube RF breakdowns frequently occur since directional couplers for each accelerating tube are not installed. We mounted acoustic sensors on the surface of RF couplers and dummy loads to address the issue. This paper describes several spectral analyses on acoustic signals with and without RF breakdowns.

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器では数十年におよぶ運転により加速管の経年劣化が問題となっている。とくに一部の加速ユニット(Fig. 1)において加速管内の放電により大電力の RF パワーを投入できない状況がみうけられるようになり、その加速ユニットを構成する四本の S バンド加速管のうちどの加速管内で放電が発生しているのかを特定するのが不可欠となってきた。しかしながら、本加速器においては RF 出力信号を計測できる箇所は SLED [1] と呼ばれる RF パルス圧縮器の前後と1本の加速管出力部のみで加速管毎に計測するようなシステムとはなっていない。その代替手段として音響センサを各加速管の下流カプラ部および終端抵抗部に取り付け、その信号波形を解析することにより放電加速管を特定しようとする研究が長年 KEK においてもなされてきた[2]。音響波はピーク値が数十 MW にもなる RF 電力 (4 μ s) が加速管内で熱エネルギーに変換され、加速管が瞬時に熱膨張した際に発生する。その音響波形はセンサの設置箇所や加速管及び導波管の固定方法などにおおきく依存する。また音響信号にはクライストロン等からまわりこむ巨大パルス雑音が含まれており、RF 放電の有無による音響信号波形の差異を時間領域で検出しようとする従来の試みでは放電加速管を峻別することは困難であった。本発表では音響スペクトル解析をもちいた新規手法により不良加速管を効果的に特定できた例について報告する。

2. 音響スペクトル解析

音響センサは各進行波加速管の下流カプラ部と終端抵抗部の表面に C 型クランプを用いて設置された (Fig. 2)。測定セットアップや従来の時間領域における音響信号解析については文献[2]に詳述されているので、そちらを参照されたい。一般的にクライストロン等から

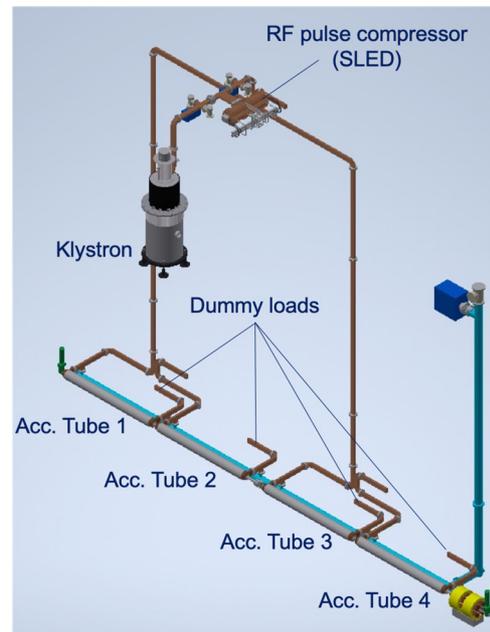


Figure 1: Accelerating unit consist of four S-band accelerating tubes driven by one klystron in the SuperKEKB linear accelerator.

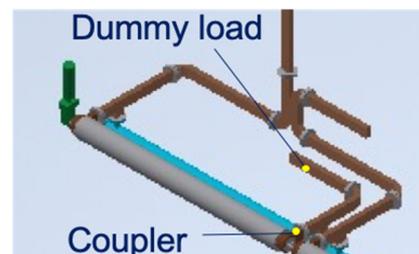


Figure 2: Location of acoustic sensors on the surface of the coupler and dummy load downstream of each accelerating tube.

[#] yoshimo@post.kek.jp

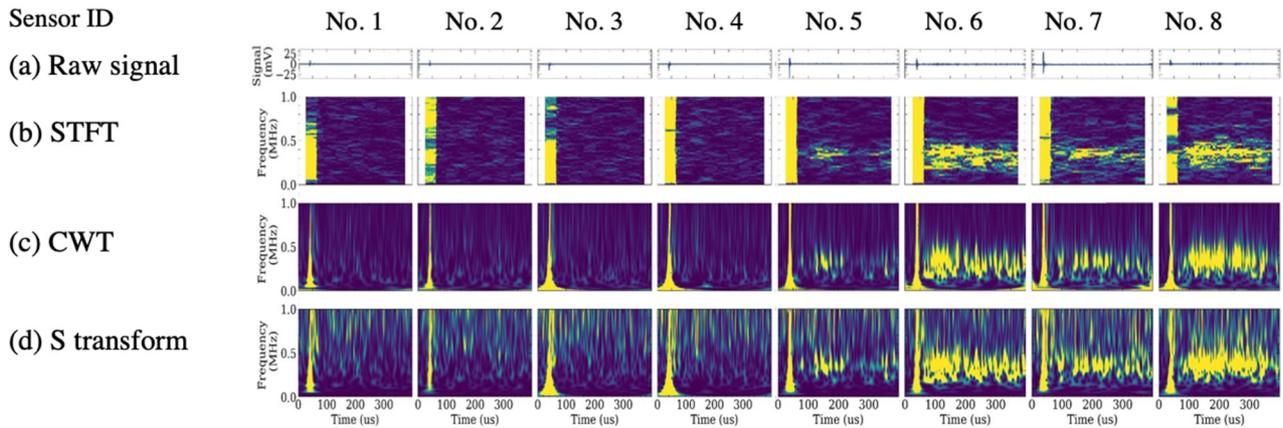


Figure 3: Spectrums of (a) normal frequency-domain acoustic signals: (b) STFT, (c) CWT, and (d) S transform. Sensors No. 1~No. 4 and No. 5~No. 8 are attached on the surface on the couplers and dummy loads, respectively, of four accelerating tubes. The color code in each spectrum indicates signal amplitude.

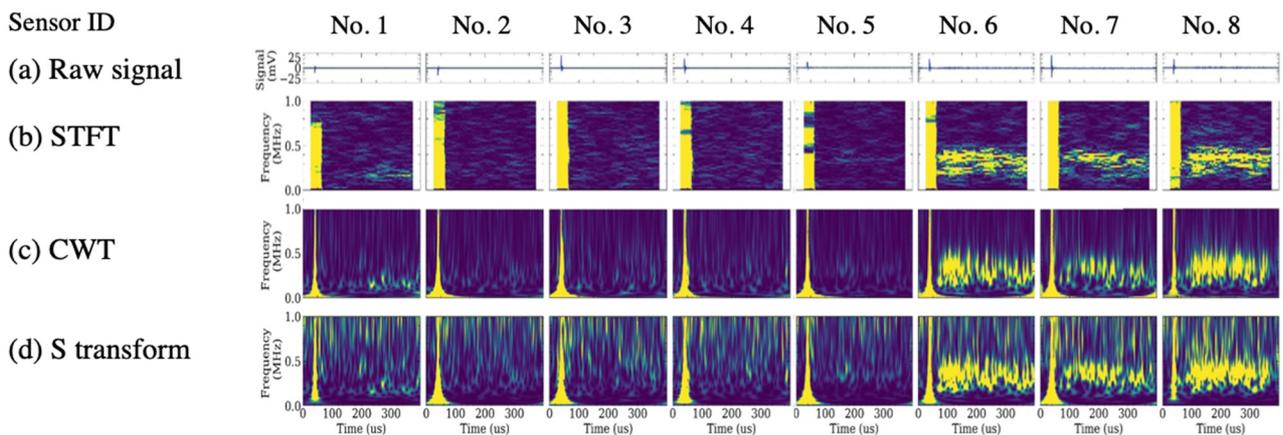


Figure 4: Spectrums of (a) frequency-domain acoustic signals from the same sensors in Fig. 2 with RF breakdown in one accelerating tube: (b) STFT, (c) CWT, and (d) S transform. RF breakdown signals are shown 250 μ s after the trigger signal at a frequency of 0.2~0.4 MHz in spectrum analyses with No. 1 and No. 5 in comparison with ones in Fig. 3.

わりこむ高雑音環境下において、加速管やダミーロードで発生した微小信号を検知するのは困難であるが周波数解析ではそれらを峻別できる可能性がある。本測定では RF パワー投入時から 400 μ s までの各音響信号データ(時間ステップ幅 400 ns)を、三種類のスペクトル解析手法:1) STFT(Short-Time Fourier Transform)、2) CWT (Continuous Wavelet Transform)、3) S transform (Stockwell transform) [3]を用いて分析した。RF 運転パルス幅 4 μ s に対して測定計測幅が 400 μ s である理由は、加速管を構成する主な材料である銅の音速 \sim 4.6 km/s が加速管長 \sim 2 m を伝導するのに必要な時間が \sim 400 μ s という概算からである。また時間ステップ幅は加速管の固有振動数は数百 kHz と予測されていたことからその十倍程度の周波数領域(2.5 MHz)まで計測できるように決められた。RF 放電していない通常運転時と RF 放電時のスペクトル解析結果をそれぞれ Fig. 3 と Fig. 4 に示す。

音響センサは一加速ユニット内に計 8 箇所(加速管下流カプラ:4、ダミーロード表面:4)取り付けられており、ど

の音響信号波形(時間領域と周波数領域)にも \sim 50 μ s にクライストロンからの巨大パルス雑音が観測されている。このため時間領域ではほぼ RF 放電の有無による違いは有意に観測できない。また \sim 100 μ s 後からのダミーロード部の音響信号波形(No. 5~No. 8)は 100~500 kHz にわたって大きな振幅(黄色)があることがわかる。これはダミーロードで吸収された熱衝撃によるインパルス応答振動に対応しているものと思われる。ただダミーロードの固定方法の違いによりその応答が異なっており、No. 5 のインパルス応答振動は小さい。どの加速管で放電しているのかを特定するためには Fig. 3 と Fig. 4 の各スペクトルを比較すればよく、音響センサ No. 1(最上流加速管の下流カプラ部)と No. 5(最上流加速管のダミーロード部)にのみ有意な差が観測されていることがわかる。この結果から放電が生じたのは最上流加速管であることが特定された。なおクライストロン(\sim 50 μ s)からの巨大パルス雑音波形と放電音波形($>$ 200 μ s)は波形毎に異なり再現性は低い。

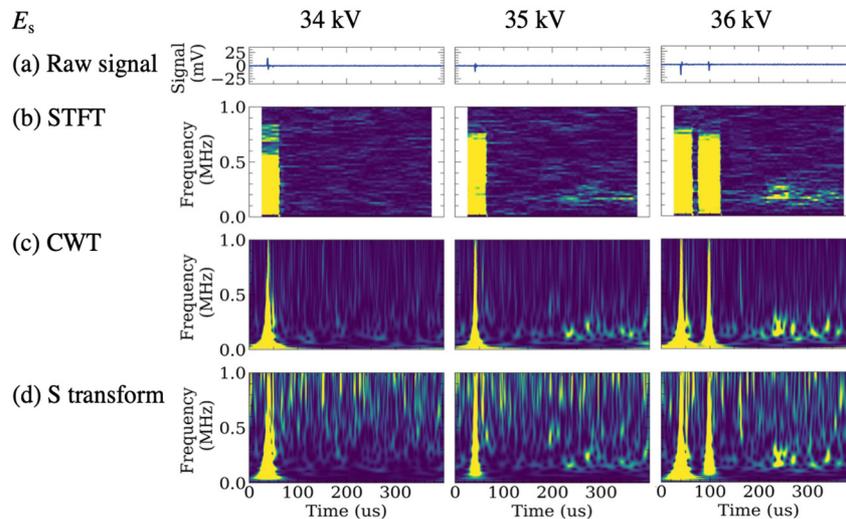


Figure 5: RF power dependence of spectrums of (a) time-domain acoustic signals with RF breakdown in an accelerating tube: (b) STFT, (c) CWT, and (d) S transform. Higher RF input powers (corresponding to E_s) show higher RF breakdown signals 250 μ s after the trigger signal at a frequency of 0.2~0.4 MHz in each spectrum analysis.

今回 3 種類のスペクトル解析手法を用いたが、一般に STFT は周波数分解能に、CWT は時間分解能に、S transform はその両方に優れているとされている。ただし本解析ではCWTが最も放電音を峻別できていることがわかった。次に放電波形の入力 RF パワー依存性を Fig. 5 に示す。クライストロンパルス電源の充電設定電圧 E_s が大きくなるにつれて(入力 RF パワーが大きいことに相当する)、放電に固有の音響スペクトラム (>~200 μ s) が ~200 kHz 近傍でより有意に観測できることがわかった。なお $E_s=36$ kV においてクライストロンからの二つの巨大パルス雑音が観測されているが、実際は波形毎に異なっており雑音波形に再現性がないことを示している。

3. まとめ

経年劣化によりRF放電が頻発するようになった加速管を特定することは SuperKEKB 電子入射器のビーム安定供給に不可欠である。各加速管に設置した音響センサからの音響波形をスペクトル解析する新規手法により、放電加速管を明確に特定することができた。また現状のスペクトル解析結果では Continuous Wavelet transform を用いると放電音を最も峻別しやすいということもわかった。今後は新しい S バンド加速管[4]においても同手法が適用できるのか、または音響スペクトルから放電位置を特定することができるのかを研究していく予定である。

謝辞

SuperKEKB 入射器グループおよび三菱電機システムサービズ(株)運転員各位の多大な支援に感謝いたします。

参考文献

- [1] Z. D. Farkas *et al.*, “SLED: A Method of Doubling SLAC’s Energy”, SLAC-PUB-1453, 1974.
- [2] Y. Arakida *et al.*, “音響センサによる加速管の放電検出”,

- the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 433-434.
- [3] R. G. Stockwell *et al.*, “Localization of the complex spectrum: the S transform”, IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 44, no. 4, pp. 998-1001, April 1996.
- [4] H. Ego *et al.*, “New S-band accelerating structure for the KEK electron and positron injector LINAC”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, QST-Takasaki Online, August 9-12, 2021, pp. 130-132.