

Study on Klystron RF Pulse Shortening and Development of Waveform Diagnostic FPGA Board

Mitsuhiro Yoshida^{1,A)}, Shinichiro Michizono^{A)}, Hiroaki Katagiri^{A)},
Shuji Matsumoto^{A)}, Shigeki Fukuda^{A)}

^{A)} High Energy Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

The RF pulse shortening occurred in the X-band klystron in the KEK-XTF. During the maintenance measurement in KEKB injector linac, we also observed that the S-band klystron had a similar phenomenon. These pulse shortening phenomena were studied with various equipments and methods. Further we developed FPGA IP and AD/DA hardware to record such abnormal waveforms effectively.

クライストロンのRF波形欠けの原因追跡と波形診断用FPGAボードの開発

1. はじめに

Xバンド大電力PPMクライストロンはリニアコライダー用のRF源として開発が進められていたが、開発当初より出力RFの波形欠け現象が問題になっていた。またこのようなRF波形欠け現象は、頻度は少ないもののSバンドクライストロンでも類似な現象が観測された。これらの波形欠け現象の原因追跡を行うと共に、このような波形異常を効率的に選択するため、FPGAを用いた波形診断IP及び安価で汎用の多チャンネル高速AD/DA変換ボードの開発を行った。

2. XバンドクライストロンのRF波形欠け

Xバンド大電力PPMクライストロン^[1]では40MW以上のRF出力において深刻な波形欠けが起きる。図1は正常時の波形(左)と波形欠けが起きた際(右)である。

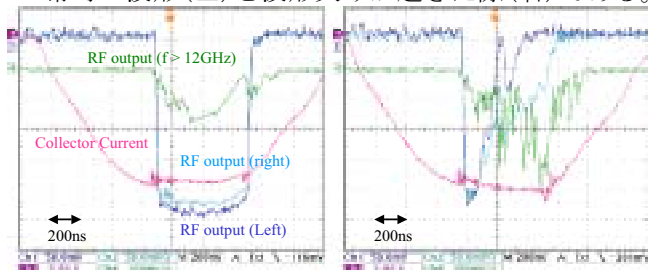


図1 : XバンドクライストロンでのRF波形欠け

RF波形欠けが起きるとコレクター電流の透過率が上がっているのが分かる。これは出力空洞のRF電界が無くなると、ビームが広がらずにコレクターに入射するためであると考えられる。このRF波形欠けの原因追究のため、様々な手段で測定を試みた。

2.1 RF電力/カソード電圧/周波数依存性

図2は、図1のような出力波形の際のRF波形欠

けRF電力依存性(左)と、カソード電圧/周波数依存性(右)である。

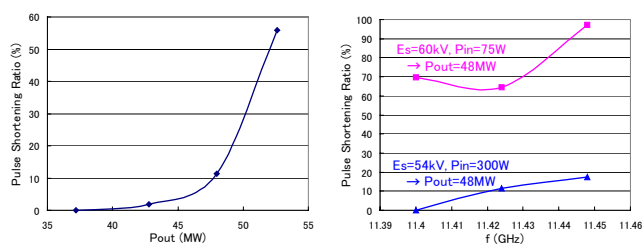


図2 : RF波形欠けのRF電力依存性(左)及びRF出力48MWの時の電圧/周波数依存性(右)

図2からRF波形欠けの頻度は、出力RF電力に大きく依存するだけでなく、同じRF出力でもカソード電圧が高くなると、頻度が大幅に増える事が分かった。また周波数依存性は、カソード電圧により依存性も異なる事が分かった。

2.2 高調波

図1から分かるようにRF波形欠けと同時に高調波の放出が確認されている。スペクトラムアナライザーでこの高調波成分を観測した所、22.4GHzと32.4GHzの成分がある事が分かった。しかしこれは波形を詳細に見てみた所、RF波形欠けの結果として出ているように見られた。

2.3 音響センサー

さらにRF波形欠けの原因を調査するため、音響センサーをクライストロンのビームパイプ周辺及び出力導波管に取り付けた。図3は音響センサーの出力波形で、図3(上)はクライストロン本体に上から順にセンサーを取り付けたもの、図3(下)は出力導波管に順に取り付けたものであり、左右は正常波形

¹ E-mail: mitsuhiro.yoshida@kek.jp

の際(左)、と波形欠けが起きた際(右)で、図1の左右に対応している。

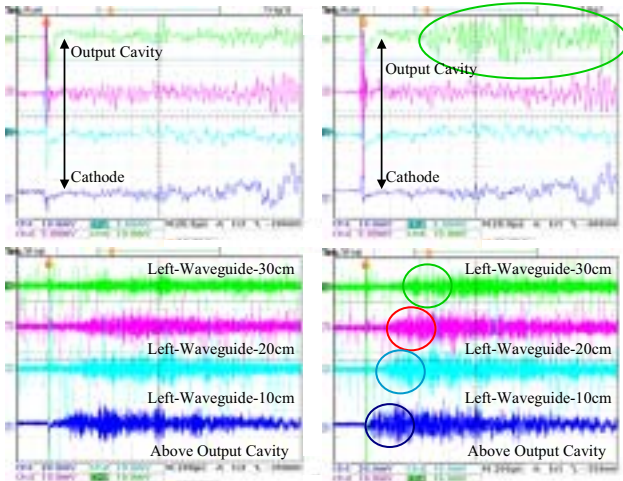


図3：音響センサーの波形。
正常時(左)、RF波形欠け時(右)

図3からRF波形欠けが起きた際、本体に取り付けた音響センサーに関しては、出力空洞付近の音響センサーの振幅のみが増加しているのが分かる。さらにこの図3(下)に対して、音響センサーの波形の振幅を計算し、波形欠けが起きた際の振幅から、正常時の振幅を引いた波形が図4である。

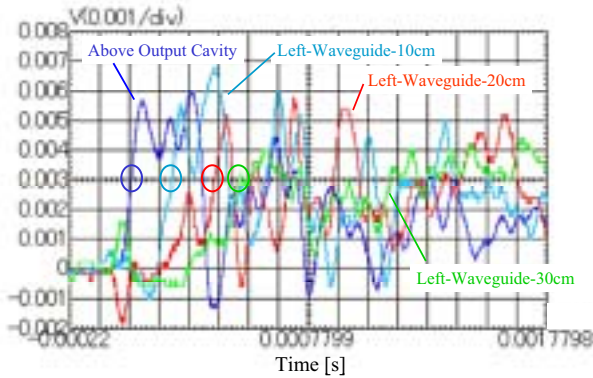


図4：音響センサーの振幅解析後の波形

図4から音波が導波管に沿って出力導波管から順に伝播しているのがはっきり分かり、RF波形欠けが起きた際、放電音が出力空洞付近から出ている事が確実となった。

2.4 XバンドRF波形欠けに関する対策及び予定

これまでの波形欠けの調査により出力空洞付近での放電の疑いがあるため、出力空洞をソレノイドクライストロンで波形欠けの起きなかった設計のものに変更し、さらに出力導波管との結合孔の角を丸める等の改善を行った6号機を製造した。現在この6号機の試験中である。

3. SバンドクライストロンのRF波形欠け

電子陽電子入射器には60台のSバンド大電力クラ

イストロン(2856MHz, 4 μ s, 50Hz, 最大RF出力50MW)が常時運転中だが^[2]、このSバンドクライストロンでも類似のパルス欠け現象が見つかった。そこで60台すべてについてRF波形欠け頻度の計数を行った所、以下の箇所でRF波形欠けが見つかった。

表1：RF波形欠けの頻度

| Unit | Es [kV] | Pf [MW] (VSWRメータ) | 欠け数/1hour | 総運転時間 [h] 2005/6/1 現在 |
|------|---------|-------------------|-----------|-----------------------|
| A-2 | 41 | 47.3 | 7.11 | 52,018 |
| A-3 | 42 | 49.7 | 1.54 | 9,208 |
| B-4 | 42 | 54.7 | 8.33 | 6,834 |
| B-5 | 42 | 52 | 1.93 | 52,020 |
| B-6 | 42 | 54.8 | 3.59 | 52,124 |
| B-7 | 42 | 41.8 | 5.01 | 41,109 |
| B-8 | 42 | 37.5 | 3.46 | 47,705 |
| C-1 | 42 | 53.9 | 0.86 | 51,407 |
| C-2 | 42 | 57.5 | 0.83 | 51,516 |
| C-6 | 42 | 35.6 | 2.54 | 50,666 |
| C-8 | 42 | 40.5 | 8.65 | 54,738 |
| 1-3 | 42 | 44.6 | 1.38 | 47,062 |
| 1-5 | 42 | 40.9 | 2.54 | 29,526 |
| 2-3 | 42 | 45 | 1.40 | 35,560 |
| 2-7 | 42 | 39.3 | 1.29 | 26,886 |
| 3-5 | 41 | 41.2 | 0.37 | 20,715 |
| 4-6 | 41 | 50.2 | 5.88 | 27,446 |
| 5-5 | 42 | 44.2 | 1.07 | 48,323 |
| 5-8 | 42 | 40.6 | 1.63 | 27,302 |

以上の結果、運転に支障は無い頻度ではあるが、原因の究明の必要があるため、これらの中で特にRF波形欠けの頻度が高く、さらにアーク部でビームロスにつながるB-7クライストロンを交換し、交換したクライストロンをテストスタンドに装着して、詳細な試験を行った。以下がその結果である。

3.1 RF電力/カソード電圧/周波数依存性

図5はカソード電圧を変えると共に、RF入力を変えて各カソード電圧に対して出力RF電力を変えた際のRF波形欠けの頻度をプロットしたものである。

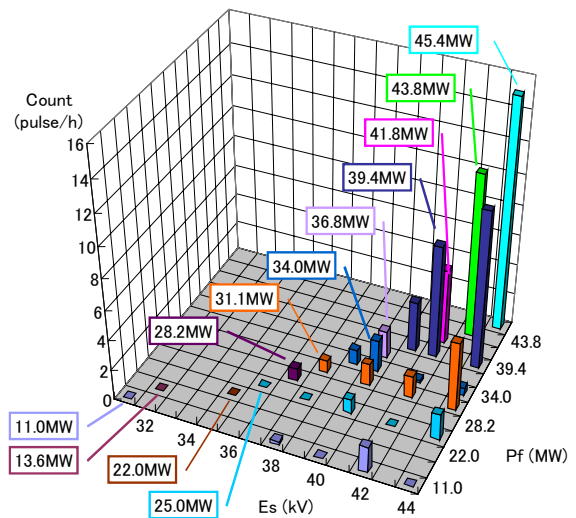


図5：RF電力/カソード電圧依存性

これからXバンドクライストロンの時と同様に、RF波形欠けの頻度は、RF出力電力への依存性が大きい、同じRF出力電力でもカソード電圧を上げると増加する事が分かる。

3.2 シンチレーションファイバー

さらに電子ビームの状態を判断するためシンチレーションファイバーをクライストロンのボディーとコレクターに巻きつけた。図6(右)はシンチレーションファイバーの出力信号であり、RF波形欠けが起きた後ではクライストロンボディーでの電子ビームの損失は少なくなり、コレクター側ではダイオード運転の時と同じレベルになるが、時間的な振動が検出された。これらの事からRF欠けが起きると実際に出力空洞にはRFの蓄積エネルギーが無くなり、かつバンチの状態が不安定であると推測できる。

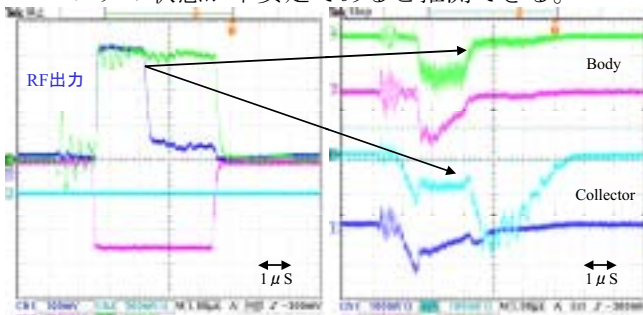


図6：シンチレーションファイバーの波形

3.3 Sバンドクライストロン波形欠けのまとめ

Sバンドクライストロンでの波形欠けの頻度は多い所でも10パルス/時間=0.005%以下であるため、実質的な運転では問題にならない。このパルス欠けが経年変化によるものなのかなど、今後調査を継続する予定である。

4. 波形診断IP

上記のような異常波形を分別及び計数するのはオシロスコープ単体では難しい。そのためFPGA上のIP(Intellectual Property)で波形をデジタル信号処理して異常波形の検出を行い、リアルタイムにトリガーを出力した。この際AD/DA変換及びFPGAのハードウェアとしては、今回は既製品であるXilinx社のXtremeDSPボードを利用した。図7(左)は波形診断用のIPのブロック図である。

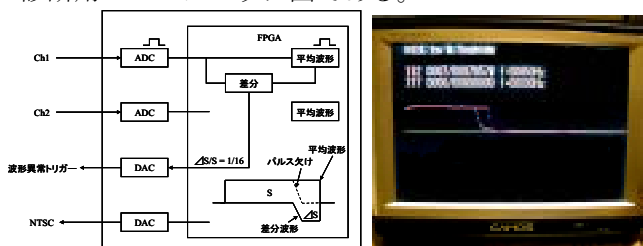


図7：波形診断IPのブロック図(左)と液晶TV上の波形とカウント(右)

またNTSC-IPを開発し、図7(右)のようにTV上に現在の波形と一つ前の異常波形を表示すると共に、波形異常の計数を表示している。さらにFPGAボードからのトリガーをオシロスコープの外部トリガーとして入力し、pythonwin-TekVISAで波形を収集した。

5. 波形診断用汎用FPGAボードの開発

クライストロンで異常が起きた際、それぞれの出力信号の相関関係を見るためには、モニターすべき信号が非常に多数ある。特にXバンドクライストロンでは、常にモニターしておくべき高速信号だけでも、カソード電圧、電流、コレクター電流、RF入力、RF出力透過、反射のそれぞれ右、左、RF窓のフォトマル右、左と10chある。さらに音響センサー、シンチレーションファイバー等を追加すると20ch以上が必要になる。上記の波形欠け調査では波形異常トリガーを複数のオシロスコープに入力しデータを収集したが、オシロスコープは高額な上データ収集の速度も遅くリアルタイムでの信号処理は不可能である。

そこで今後のこのような波形診断を容易にするため汎用のFPGA-AD/DAボードの開発を行った。開発したボードの仕様は表2の通りであり、極力安価な部品を使用したため価格は10万円程度である。

表2：FPGA-AD/DA/LVDSボードの仕様

| FPGA | Xilinx Spartan-3 XC3S1500 |
|-----------|--|
| A/D ×10ch | AnalogDevices AD9235(12bit, 65MS/s) or AD9215(10bit, 105MS/s) |
| D/A ×4ch | AnalogDevices AD9744(14bit, 165MS/s) |
| LVDS ×2ch | LV1023-LV1224(660Mbps) |

6. まとめ

これまでのクライストロンの出力RF波形欠けの調査により、原因が出力空洞付近にあることが分かってきた。今の所決定的な結論にまでは至っていないが、出力空洞周りの磁場やビーム軌道等についていくつかの仮説が立てられた。

クライストロンのような真空管は完成してしまうと内部のビームに関する情報が極端に少なく、異常が起きた際の原因追及が非常に難しい。そのため様々なセンサーを取り付ける事が必要であり、またそれらの信号を効率的に選別するために波形診断用の回路が重要である。

参考文献

- [1] S. Matsumoto, et al., "Development of PPM-focused X-band pulse klystron", Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Saga, Japan, Jul. 20-22, 2005
- [2] I. Sato, et al., "Design Report on PF Injector Linac Upgrade for KEKB", KEK Report 95-18, Mar., 1996