

[F17p13]

Operation Status of The Klystron Modulator for SPring-8 Linac

S.Nagasawa, T.Hori, T.Asaka, N.Hirota, M.Yoshioka, K.Nakasima,
M.Adachi, S.Suwa, A.Tuboi, K.Harumoto, T.Hasegawa and H.Yokomizo

JASRI

SPring-8, Mihara, Mikazuki-cho, Sayo-gun, Hyougo, 678-5198 Japan.

Abstract

We have used a 7MW Booster klystron and 13 sets 80MW klystrons to produce an electron beam energy of 1GeV in SPring-8 Linac. The output power of 7MW klystron is supplied to bunching section and to drive line system for each 80MW klystrons. In main accelerating section, the accelerator unit is consist of an 80MW klystron, 190MW pulse modulator, and two 3m-long traveling wave type acceleration tubes.

In this paper, We describe the status of each klystron modulators of the past year, and the optimization of the reservoir voltage on thyatron for modulators.

S P r i n g - 8 線型加速器におけるクライストロンモジュレータの運転状況

1. はじめに

SPring-8 線型加速器では平成8年4月から行われた加速管のRFエージングより本格的なモジュレータの運用が開始され、約2年半が経過した現在低圧印加時間で約15,000時間、高圧印加時間で約11,000時間の運転を行った。我々は電子銃やブースタを含む15台のモジュレータの保守、運転等を行ったが、特にモジュレータを安定に動作するためのサイラトロンのリザーバ電圧調整は調整方法も含め再検討し、注意深く行った。

この報告では、過去1年間のモジュレータの使用及び不具合状況を述べると共に、サイラトロンの安定に動作するために得られた新たな知見を報告する。

2. モジュレータの概要

電子銃モジュレータ (GUN) はアノード電極に最大200kVの電圧を供給するもので、1.5 μ Sのパルス平坦部、長時間運転時の電圧安定度が $\pm 0.5\%$ 以内の性能を有する。インバータ方式の低電流電源 (40kV, 0.5A, MAXWELL Ltd.) を使用し、直接PFNコンデンサーに低電流で充電する方式のモジュレータである。

ブースタモジュレータ (Booster) はバンチング部と主クライストロン (E3712 TOSHIBA) の励振電力を供給するためのPV2012クライストロン (最大出力7MW, MELCO) のカソードに最大150kVの電圧を供給する。

主クライストロン用モジュレータはビーム上流側よりH0~M18号機まで13台設置されている。ピーク出力電力が190MW、クライストロンのビーム電圧と電流に394kV、480A (80MW出力時) の

表1: 号機別のサイラトロンと高圧印加時間 (1998/07/03 現在)

| 号機 | サイラトン | 初期値(V) | 現在値(V) | LV ON TIME(hr) | HV ON TIME(hr) |
|---------|---------|--------|--------|----------------|----------------|
| GUN | F241 | 3.4 | 3.86 | 14,593 | 10,066 |
| Booster | F175 | 3.85 | 3.2 | 16,270 | 12,885 |
| H0 | F351 | 3.3 | 4.5 | 14,789 | 10,573 |
| H1 | F351 | 3.3 | 4.3 | 14,651 | 10,766 |
| H3 | CX1937A | 6 | 6.5 | 14,839 | 10,701 |
| H5 | F351 | 3.6 | 4.7 | 14,568 | 10,758 |
| M2 | F351 | 3.2 | 4.2 | 14,646 | 10,693 |
| M4 | F351 | 3.4 | 4.4 | 14,550 | 10,501 |
| M6 | F351 | 3.8 | 4.2 | 14,935 | 10,805 |
| M8 | F351 | 3.3 | 4.0 | 14,465 | 10,690 |
| M10 | F351 | 3.4 | 4.5 | 14,811 | 10,939 |
| M12 | F351 | 3.4 | 4.5 | 14,629 | 10,839 |
| M14 | F351 | 3.2 | 4.3 | 14,603 | 10,806 |
| M16 | F351 | 3.6 | 4.0 | 14,517 | 10,488 |
| M18 | F351 | 3.2 | 3.4 | 14,977 | 10,713 |

パワーが供給可能で $\pm 0.5\%$ のパルス平坦部が2.1 μ S、長時間運転時の電圧安定度が $\pm 0.5\%$ 以内の性能を有する¹⁾。製作途中にサイラトロンのミスファイヤが多発した経緯があり、性能比較を行うため2機種 (F351:TRITON社製, CX1937A:EEV社製) のサイラトロンが実装されている。表1に号機別のサイラトロン機種、リザーバ電圧の設置時の値、現在のリザーバ電圧値、高圧印加時間を示す。

3. モジュールの使用状況

表2に過去1年間に発生したモジュールの主な不具合と調整項目について示す。

GUNでは高圧ケーブルの放電が2件発生しているが、その他はサイラトロン性能劣化に起因する不具合がほとんどであった。

表2：過去1年間に発生した主な不具合と調整項目

| | |
|--|--|
| GUN Mod. | |
| ・高圧電源側のHVケーブル端末部での放電 | |
| ・放電部のきょう体へHVケーブルを導入する箇所での放電 | |
| Booster Mod. | |
| ・サイラトロンのアノードディレイ時間の増大による高圧パルス出力の停止。新規サイラトロンに交換。 | |
| Main Mod. | |
| H3号機 | |
| ・サイラトロン性能劣化による高圧出力パルスのジッター増大。新規サイラトロンに交換。 | |
| M8号機 | |
| ・高圧印可時間7000時間でサイラトロンのグリッドスパイクが増大しサイラトロントリガーユニット内で放電が多発。新規サイラトロンに交換 | |
| M2,M4,M6,M14号機 | |
| ・サイラトロンのアノードに取り付けられている放熱用フィン部で放電が多発。 | |
| 全 数 | |
| ・最適なサイラトロンリザーバ電圧の再調整 | |
| ・モニタ用サンプリングトリガー遅延時間の再調整 | |
| ・クライストロンビーム電圧の長時間安定試験 | |
| M14号機のDe-Qing率の改善 ₂₎ | |

4. 最適なリザーバ電圧の再調整

モジュールの運用が開始されてから7000時間が経過した時M8号機のサイラトロン交換を行ったが、これを機会に安定でしかも長期間サイラトロンを使用するためには、稼働時間に応じてリザーバ電圧の再調整を行うことが非常に重要であることが判明した。

そこで、KEKで行われている調整方法₃₎で第1回目の調整を行った。この方法はPFN充電電圧波形(V_{pfn})を観測しながらリザーバ電圧を徐々に上げていき、連続通弧する点(上限値)を探す。次にクライストロンビーム電圧、電流波形(V_{pulse}, I_{pulse})を監視しながらリザーバ電圧を下げていきジッターが発生する点(下限値)を探す。そこでこの2点の平均値を算出し最適値とする方法である。

この調整の終了後、供給メーカーが推奨する方法を入手し検討した結果、第2回目(高圧印加時間で9000時間経過後)の再調整を行った。この方法は前回同様、V_{pfn}を観測しながらリザーバ電圧を徐々に上げていき、上限値を探す。次にこの値から0.3V差し引いた値を最適値とする方法である。

2回のリザーバ電圧調整の結果を図1に示す。変動値Iとは、設置当時のリザーバ電圧初期値と、1回目に調整した時の変化量、変動値IIとは、1回

目に調整した時のリザーバ電圧と、2回目に調整した時の変化量をそれぞれ表している。

この図から1回目と2回目を比較すると2回目の調整方法の方が明らかに設定電圧値が高い。チューブの耐圧はリザーバ電圧(管内のガス圧)と反比例する。しかしメーカーサイドの見解では、管内の冷却はガスによる熱の移動によって行われるため、できるだけ高い電圧で設定する方がチューブの寿命を延ばし安定に動作させるのに適している。

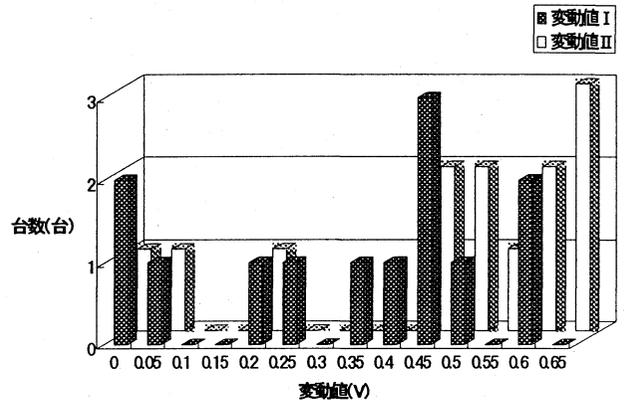


図1：リザーバ電圧調整による変動値と台数の推移

1回目の調整時に、高圧印加時間で200時間しか経過していないサイラトロン(M8)のリザーバ電圧が刻印の値に比べ上昇していた。実はこのサイラトロンは約2年間の保存期間を経て実装されたものである。従来、サイラトロンを交換した際には刻印された値にリザーバ電圧を設定し何も調整せず運転を行っていた。しかし今回の調整結果より、長期保存期間中のサイラトロンを実装する際は、交換直後に最適なリザーバ電圧調整を行なうことが、長寿命でしかも長期間安定に動作させる上で重要であることがわかった。

5. アノードディレイタイムの増大

メーカーの資料ではサイラトロンのアノードディレイタイムを“制御グリッドへの立ち上がり電圧パルスが、無負荷時の最大パルス振幅の25%の点を超えた時点よりアノードの導通が開始した時点の時間。”と定義している。

5-1. ブースター用サイラトロン

設置当初から使用していたF175型サイラトロンは、高圧印加時間で8000時間経過後、コントロールグリッドのトリガーパルス幅(2μs)を超えるアノードディレイタイムが発生した。原因を調査したところこのチューブは、通常RMS (Root Mean Square)アノード電流が6A_{dc}以上で使用される。しかしブースターモジュールのRM

Sアノード電流は0.6 A_{dc}と低すぎカソードの温度が上がらないため長期間の連続使用は無理であるとの結論を得た。

このモジュレータは建設途中でのクライストロンの試験器も兼ねていたため、35 MWクラスのクライストロンがドライブ可能なよう設計されており、サイラトロンにはF175型が採用された。7 MWクラスのクライストロンを長期間安定にドライブするサイラトロンとしては、スペック的に大きすぎる事が判明したのでF241/F351型サイラトロンに置き換えることを現在検討中である。

5-2. H3用サイラトロン

CX1937A サイラトロンはVpulse 波形のジッターが最大500 ns生じていたため、高圧印加時間で10000時間経過後新品と交換した。使用済みサイラトロンのアノードディレイタイムの変化を調査したところ、約1 μsのシフトが発生していることを確認した。この調査より性能が劣化したチューブは、ジッターが増大するだけでなく、アノードディレイタイムシフトも同時に生じることがわかった。

6. サンプリグトリガーディレイの調整

モジュレータのVpulse、Ipulse等のパルス波形をモニターしているメータは、タイミングシステムからの基準信号より生成されたサンプリグトリガーを基に値を測定している。図2にCX1937Aサイラトロンを交換する直前のサンプリグトリガーとVpulse、Ipulseのタイミングチャートを示す。

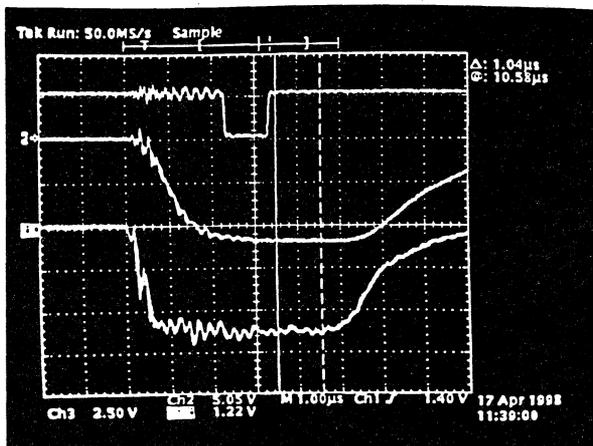


図2: サンプリグトリガー(上)とVpulse(真中)、Ipulse(下)のタイミング

図中のカーソル位置が設置当初のタイミングで、交換直前には、最適なタイミングから約1 μs変位していた。原因は、先に述べたアノードディレイタイムシフトの増大であり、正確に値をモニターする

ためには、VpulseとIpulse両方のパルス平坦部を満足する時間幅から外れないようにサンプリグトリガーを再調整することが重要である。

7. まとめと今後

過去2年半の運転経験より、クライストロンを含むモジュレータ関係のトラブルがビーム供給を中断する主な要因であることがわかった。

したがって、15台のモジュレータを長期間安定に動作することが重要であり、特にサイラトロンを確実に動作するためのリザーバ電圧調整が不可欠である。しかしグリッドスパイクの増大やアノードディレイタイム、ジッターの増大等の性能劣化を正確にモニターし、調整を行うことは非常に困難である。

そこで、より性能と保守性の向上を目指して以下の改良を予定している。

- 1) アノードディレイタイムシフトを低減するためのサイラトロンドライバー回路の低インピーダンス化。⁴⁾
- 2) プースタモジュレータのサイラトロンを半導体(IGBT)へ変更する。良好な結果が得られれば、メインのモジュレータへの応用も目指す。

8. 謝辞

モジュレータの保守・調整にあたり東芝電波特機の三沢英夫、寺村弘氏並びに三菱電機通信機製作所の中村直樹氏に協力・助言を頂きました。サイラトロンのデータに関しては、極東貿易の米田真太郎氏、コーンズアンドカンパニーリミテッドの竹久良一氏に助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

9. 参考文献

- 1) T.Hori et al., "Pulse modulator for 80MW Klystron in SPring-8 Linac", Proceedings of the 20th Linear Accelerator Meeting in Japan, September 6-8, 1995, Osaka, Japan, pp272-274.
- 2) T.Asaka et al., "Stability of RF system at SPring-8 Linac", Proceedings of this meeting.
- 3) H.Iijima et al., "Hydrogen Thyatron Ranging (Tuning Method of Reservoir Voltage) of Klystron Modulators.", Proceedings of the 16th Linear Accelerator Meeting in Japan, September 3-5, 1991, pp139-141.
- 4) H.Honma et al., "Improvement to the Output Characteristic of a Thyatron Grid Pulser Driver.", Proceedings of the 22nd Linear Accelerator Meeting in Japan, September 9-11, 1997, pp36-38.