

## SPRING-8 1GeV 線型加速器クライストロンモジュレータの現状 PRESENT STATUS OF KLYSTRON MODULATOR OF 1-GEV SPRING-8 LINAC

小林 利明、出羽 英紀、馬込 保、谷内 努、鈴木 伸介、水野 明彦、柳田 謙一、花木 博文  
Toshiaki Kobayashi, Hideki Dewa, Tamotsu Magome, Tsutomu Taniuchi, Shinsuke Suzuki, Akihiko Mizuno,  
Kenichi Yanagida, Hirohumi Hanaki  
JASRI/SPRING8

### Abstract

After the earthquake disaster in Tohoku, we had been required to reduce the operation frequency of the klystron modulators to save electric power. Our modulator adopts a de-Qing circuit for charging a PFN circuit, whose voltage decays along with the trigger interval time. Not to reduce the modulator output voltages, we invented the bi-periodic 4-Hz operation of klystron modulators, which turns thyratrons on by alternative intervals of 100 ms and 400 ms. We accelerate an electron beam on the RF power generated after the 100-ms interval. The bi-periodic 4-Hz operation results in the gain of 2 kV in terms of the PFN voltage comparing with the normal isochronic 5-Hz operation. The PFN high-voltage probes of our modulators show the aged deterioration causing the variations of voltage dividing ratio. The preliminary installation of the new probe shows the improvement in the PFN stability. Now we are replacing all the probes with the new ones. Our present power supply for thyatron heater and reserver is an AC power supply, which is coarsely stabilized by a CVT. To reduce timing jitters or fluctuation in the turn-on of thyatron, we preliminarily replaced one AC power supply with a DC stabilized power supply. The result presents that the timing variations of 120 ns were sufficiently reduced to 10 ns.

### 1. はじめに

SPRING-8 では、震災後の関西の電力事情は逼迫により、加速器施設も当然その対応を求められてきた。施設の照明やエアコン等の電力節約はもとより、加速器本体の電力の節約も続けており、SR のビームエネルギーを 7GeV に下げる事で大幅な節電を達成する試験も行った。

線型加速器でも、節電要請のレベルに応じて、パルス電源装置の繰り返し周波数を下げる事などを行ってきた。

この他にクライストロンモジュレータ電源の更なる安定化のため、サイラトロンヒータ・リザーバ電源の直流電源化によるジッター・ドリフトの対策や経年変化が現れている PFN 電圧プローブの更新などを行いつつある。

主な改良点を記述すると以下の通りである。

- ダブルパルス運転により低繰り返し時の PFN 電圧低下を解消し、安定な低繰り返し省エネルギー運転を実現。
- PFN 電圧プローブを更新し、PFN 電圧を安定化。
- サイラトロンヒータ・リザーバ電源直流化によるサイラトロン点弧タイミング変動改善。

これらについて現在の状況を報告する。

### 2. モジュレータ電源省エネ運転

線型加速器から SPRING-8 シンクロトロンと NewSUBARU に入射する最短の周期は、双方に交互

振分入射する場合の 0.5 秒である。従って、クライストロンは 2pps で RF を出力すれば十分である。

一方、SPRING-8 線型加速器のクライストロンモジュレータは従来の de-Qing 方式による電圧安定化を採用しているため、PFN に充電後は PFN 電圧の制御を行うことができない。すなわち、サイラトロンの点弧直後に自動的に PFN に蓄積された電荷は、PFN 回路のリーク電流等が原因で徐々に放電され、PFN 電圧は低下していく (Figure1 の  $V_{PFN}$  波形参照)。つまり、低繰り返し運転に依って放電間隔が長くなると PFN 電圧低下は顕著となり、それだけクライストロンの RF 出力も低下してしまう。従って省エネルギーのために単に繰り返し数を下げるのでは別の問題が生じるため、従来は 10pps 運転を行っていた。

上記の不具合を解決して安定な省エネルギー運転を達成するために、クライストロンの RF 出力に先んじて予めサイラトロンを点弧 (pre-trigger) して PFN を放電させ再充電してから、改めてサイラトロンを点弧し、RF 出力の低下を最小限にする方式 (ダブルパルス運転) を考案した[1]。

現状では、Figure1 に示すように、pre-trigger 信号で PFN を放電させて再充電を行い、100ms 後の trigger 信号で PFN を放電させる際にクライストロンに RF 信号を入力して大電力 RF を得ている。そして 400ms 後には次の pre-trigger 信号がやってくる。従ってモジュレータは、100ms および 400ms の二通りの放電周期を有する変則的な 4 pps 運転となっている。この運転により、単なる 5pps 運転に比べて

平均 2kV 程度高い PFN 電圧が得られている。

さて上記ダブルパルス運転の場合、PLC の AI モジュールにより PFN 電圧 (Vpfn) やクライストロン電圧 (Vpls) などを RF 出力時に読み込む際にデータの同期性を確保するためには、Fig. 1 で示すように、それぞれ異なるタイミングで読み込む必要がある。個別の AI Read 用トリガ信号を複数用意するのはモジュレータトリガ系をかなり改造する必要があるため、モジュレータ制御用の PLC ですべての処理を行った。

すなわち、PLC はモジュレータトリガ信号を常時読み込み、トリガ信号の間隔を測定することにより、モジュレータの運転モードが上記のダブルパルス運転なのか、あるいは等間隔の通常運転なのかを自動判別する。その判別結果により、最適なタイミングでデータ読み込みを行う。この改造により、変則的 4 pps 運転時でも、モニタ電圧のデータ取得を安定して行えるようになった。

上記省エネルギー運転はその後殆ど問題もなく、順調に続けられている。さらに低繰り返し化は、モジュレータ電源部及び放電部での発熱を減少させ、これらを冷却している交流電源 fan 5 台のうち 2 台を停止出来るようになった。

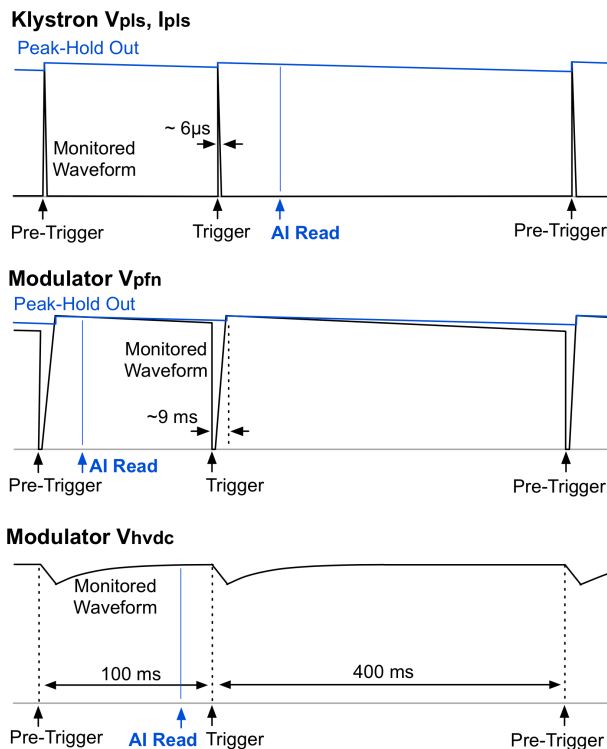


Figure 1: Important analog monitor signals and their timing positions (AI Read) for the synchronized data acquisition in the case of the bi-periodic 4-pps operation.

### 3. PFN 電圧プローブ更新

#### 3.1 PFN 電圧モニタ系の安定化

PFN 電圧モニタ系は、高圧プローブとそのマッチ

ングボックス、出力を分配する fanout 回路、ピークホールド回路、メータリレー部などに分かれる。

これらの中で、最も大きな温度特性を持ち測定値が不安定であった fanout 回路の更新は 2011 年に行われた。さらに、制御用 PLC を製造中止となった東芝 T2N から横河 FA-M3 に更新した際、取得データの精度を上げるため、アナログ信号モニタ系のゲインの最適化等も行っている。これらの改良の結果、モニタ値の安定性は向上した。

しかし、PFN 電圧用の高圧プローブは、経年劣化もあり、分圧比が設計値から変化した結果モニタ電圧値の精度が著しく悪い物も出てくるなど不具合が目立つようになった。そこで、高電圧プローブを新型に交換する事にした。

#### 3.2 新型 PFN 電圧プローブ

新型の PFN 電圧プローブは、日新パルス電子 (株) 製で、従来の 50kV プローブと寸法は殆ど変わらないようにした。プローブは 50kV を安定に測定できるように、耐電圧を 50kV から 60kV に変更し、絶縁碍子にはテフロンが用いられている。Fig. 2 は、新型プローブの設置状況である。左に見えているタンクがチャージングチョーク。

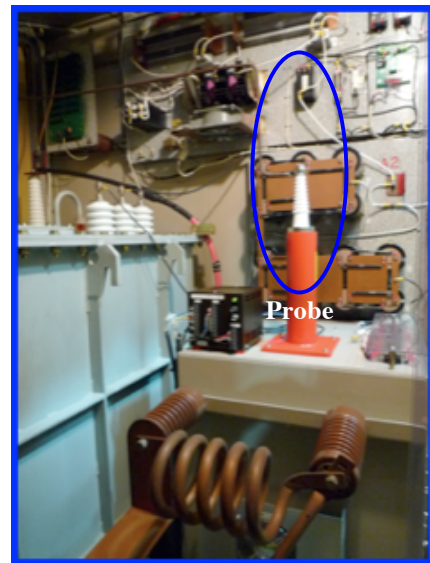


Figure 2: New PFN-voltage probe installed in M16 klystron modulator.

プローブの温度特性は、13 台の内 3 台について計測したところ、15~40 ppm/°C まで抑えられている事を確認した。

PFN 電圧をモニタしているプローブの出力電圧は、例えばプローブの分圧比等が変動していても、その値が一定になるように de-Qing 回路が PFN 充電回路を制御してしまうため、プローブ自体の変動を、PFN 電圧モニタ値から読み取る事は出来ない。一方、de-Qing 回路が実 PFN 電圧を無用に変化させているため、その結果クライストロンのパルス電圧 (Vpls) およびパルス電流 (Ipls) に変動が現れる。

2013 年 3 月の停止期間に M16 号機の PFN 電圧プ

ローブを交換して、その後運転を継続しながら長期安定度を測定してきた。Fig. 3 および 4 は、プローブ交換前後の Vpfn および Vpls の変動を示したものである。これらのグラフが示すように、交換前に観測されている Vpls の長期的変動は、交換後には明らかに減少しており、新型 PFN プローブが結果的に PF 電圧安定化ももたらしていると考えられる。

2013 年の夏期停止期間中にすべてのモジュレータのプローブを更新し、fanout 回路などのゲイン調整も行う予定である。

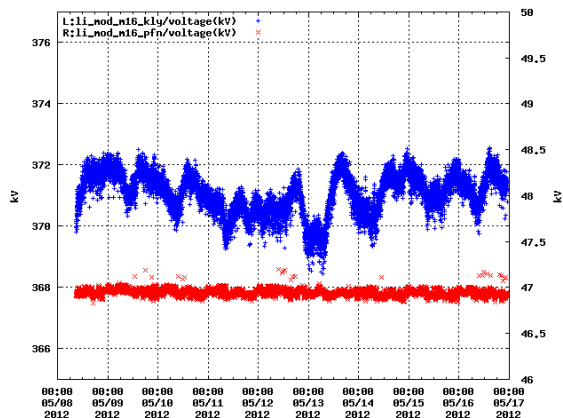


Figure 3: Variations of the M16 PFN voltage and klystron pulse voltage before the renewal of a PFN probe.

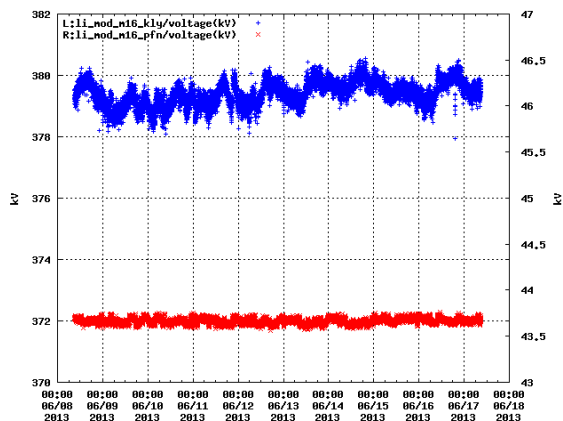


Figure 4: Variations of the M16 PFN voltage and klystron pulse voltage after the renewal of a PFN probe.

#### 4. サイラトロンヒータ・リザーバ電源

過去の運転経験では、ヒータ・リザーバ電源電圧が急に変動する事象が、13 台のモジュレータ電源で年に数回ほどあった。これら電圧変動の原因は、電源電圧調整用スライダックのスライダー部接点の接触不良が関連していると考えている。

そこで、クライストロンモジュレータ M10 号機と M14 号機について、既存のサイラトロンヒータ・リザーバ交流電源を、安定度に優れた直流電源ユニットに置き換え、長期試験を継続中である。Fig. 5 に組み込まれたユニットを示す。

また、試験的にリザーバ電源電圧の変化とクライ

ストロンパルス電圧のタイミングシフトとの関係を測定した。号機によって違いがあると思うが、M16 号機では、0.2V のリザーバ電圧低下により 50ns のクライストロンパルス電圧の遅延があり、0.6V の低下では 600ns の遅延となった。

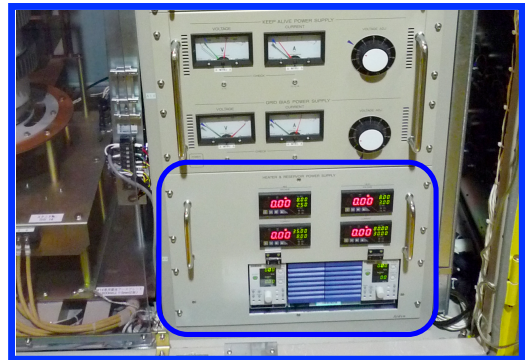


Figure 5: New thyatron DC power supply installed in M10 and M14 modulator.

尚、このようなタイミングシフト、すなわちサイラトロン点弧タイミングの変動が発生した場合の原因としては、サイラトロンヒータ・リザーバ電源系統 (CVT トランスを含めて) の電圧不安定性だけでなく、サイラトロンのトリガアンプのトリガ励振器出力のジッター/変動 (こちらの系統には CVT が入っていない) も考えられる。後者については別途対策をほどこし、試験を続けている。

#### 4.1 サイラトロン電源安定度

サイラトロンヒータ・リザーバ電源を直流電源化する前後における、クライストロンパルス電圧波形立ち上がり部のジッター/変動およびリザーバ電圧の変動の相関を Fig. 6 および 7 に示す。それぞれ 10 日間のジッター/ドリフトは、改造前のジッターとリザーバ電圧の変動に正の相関があるが、電源直流化後からジッター/ドリフトとリザーバ電圧とは相関がなくなっていることがわかる。尚、この間ではサイラトロンの交換及びサイラトロン電源の調整は行っていない。

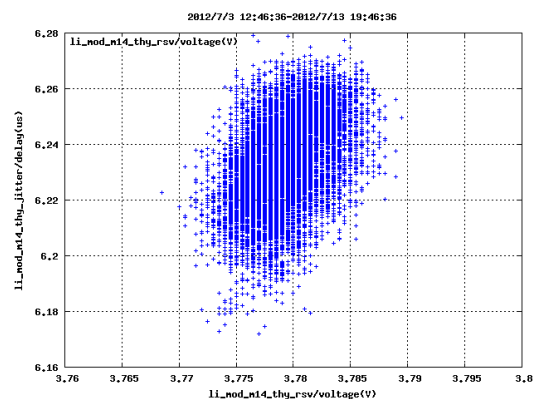


Figure 6: Correlation of the M14 thyatron timing and reservoir voltage before the introduction of a DC PS for thyatron heater and reservoir.

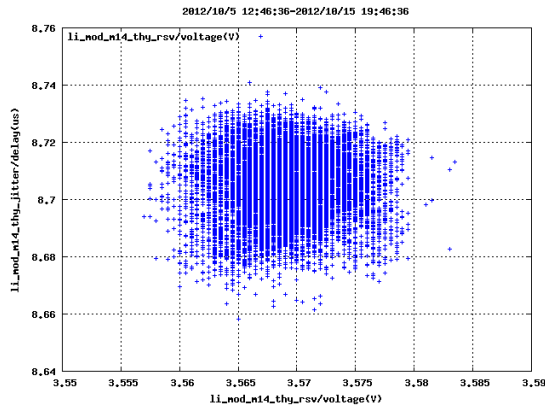


Figure 7: Correlation of the M14 thyatron timing and reservoir voltage after the introduction of a DC PS for thyatron heater and reservoir.

2013年夏にはさらに1台実機に設置して、計3台の運用試験を行い、その結果によっては2013年冬に全台数を直流電源化する予定である。

#### 4.2 サイラトロンへの突入電流防止

サイラトロンヒータ・リザーバ電源の直流電源化により、定電流制御されているヒータ・リザーバ電源は、例えばM10号機についてFig. 8とFig. 9に示すように、AC式電源が持つ電源投入直後のダッシュカレントをDC式ではほぼ無くす事ができた。これにより過大電流を押さえる事ができ、サイラトロンの寿命を延ばす事も期待される。

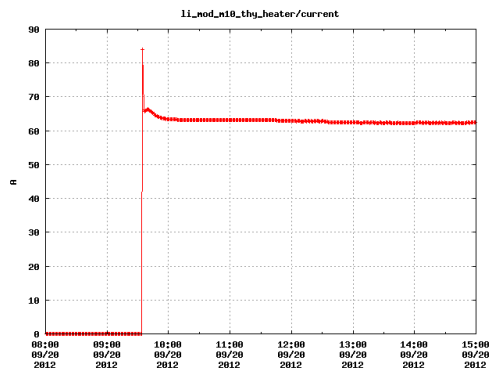


Figure 8: Trace of thyatron heater current trace before the introduction of a DC PS for thyatron heater and reserver.

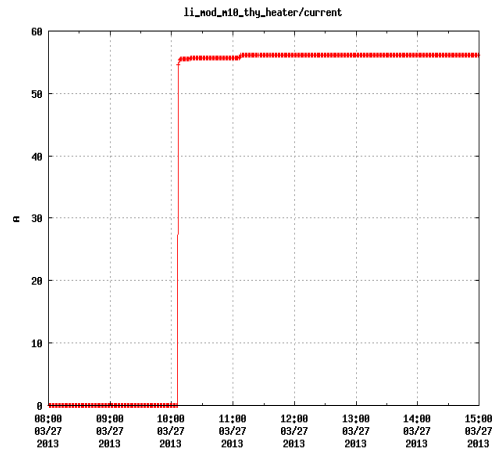


Figure 9: Trace of thyatron heater current trace after the introduction of a DC PS for thyatron heater and reservoir.

## 5. まとめ

SPring-8 線型加速器では、省エネのためにモジュレータ電源の低繰り返しダブルトリガ運転を行っている。またモジュレータ電源の安定化のため、PFN電圧を計測しているPFN高電圧プローブの経年劣化も含めた対策として、新規に製作したPFNプローブをM16号機に設置した。その結果電圧安定度は改善され、他の安定な号機と遜色ないPFN電圧安定度になった。経年劣化も考え、2013年夏の停止期間に全号機のプローブを更新して回路系の調整を行う。さらに、サイラトロンヒータ・リザーバ電源の直流電源化を行い、電圧・電流の安定化によるサイラトロン点弧タイミングの安定化と、ヒータ・リザーバへの突入電流の低減によるサイラトロンの長寿命化を図りたいと考えている。

## 参考文献

[1] T.Kobayashi, et al., “SPring8 1GeV 線型加速器モジュレータと電子銃テストベンチの現状”, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Aug.8-11, 2012, pp.1227-1230.