

Current status of the kicker thyatron operation in J-PARC 3GeV RCS

Tomohito Togashi, Masao Watanabe, Kazuaki Suganuma, Tomohiro Takayanagi, Tomoaki Ueno
Norio Tani, Yasuhiro Watanabe

Japan Atomic Energy J-PARC Center
2-4 Shirane Shirakata, Tokai-Mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan

Abstract

The 3-GeV RCS (Rapid Cycling Synchrotron) at J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) has the pulse kicker power supply system which uses the thyatron switches for beam extraction.

There were many troubles caused by unstable operation of thyatrons after beam commissioning started in January 2009. The failure rate of the kicker power supply system was about 13%. To improve this status, we have been managed the operations of the thyatron in detail. As a result, the unstable operation has been improved and the failure rate has been achievement less than 0.5% (Run32) in April, 2010. In this paper, we report current status of the thyatron operation of the kicker power supply system.

RCS キッカー電磁石電源システムのサイラトロンオペレーションの現状

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) ^[1] の 3-GeV RCS (Rapid Cycling Synchrotron) では、3GeV に加速した大強度陽子ビームの取り出しに、サイラトロンスイッチを採用したパルスキッカー電磁石電源システム^{[2]-[5]}を利用している。連続運転を開始した当初は、サイラトロンの不安定な動作に起因して停止する事象が最も多く発生し、J-PARC 加速器全体の故障率のうち、キッカー電磁石電源システムが最も高く (約 13%)、ビーム運用停止の主因となっていた。この状況を改善するため、サイラトロンの運転状況について詳細管理を徹底して行った。その結果、サイラトロンの最適なオペレーション方法の構築と、故障の予防と保全に基づいた適切なサイラトロン交換時期の見極めが可能となり、2010 年 4 月 (RUN32) の運転では、故障率を 0.5% 以下にまで改善する事ができた。本稿では、キッカー電磁石電源システムを安定に稼働するためのサイラトロンオペレーションの現状について報告する。

2. キッカー電磁石電源システムの概要

2.1 キッカー電磁石電源システムの構成

キッカー電磁石電源システムは、3GeV に加速された陽子ビームを取り出すため、8 台の双子型分布定数キッカー電磁石と、これらを高速励磁するための高電圧矩形パルス電源 8 台で構成される。図 1 にキッカー電磁石電源システムの概略を示す。負荷のキッカー電磁石は双子型であるため、1 台のキッカー電磁石電源には独立した 2 組のパルス電源が用いられている。キッカー電磁石の特性インピーダンスは $10\ \Omega$ で終端を短絡しており、電源からの出力はここで全反射させている。電源の充電部は、特性インピーダンスが $20\ \Omega$ の高耐圧高周波同軸ケーブル

ルを 2 並列とする事で電源のインピーダンス $10\ \Omega$ を形成している。パルス電源の放電スイッチには、EEV 社製の 4 ギャップセラミックスサイラトロン (CX1193C) を採用し、キッカー電磁石電源システム全体で 16 本のサイラトロンを使用している。

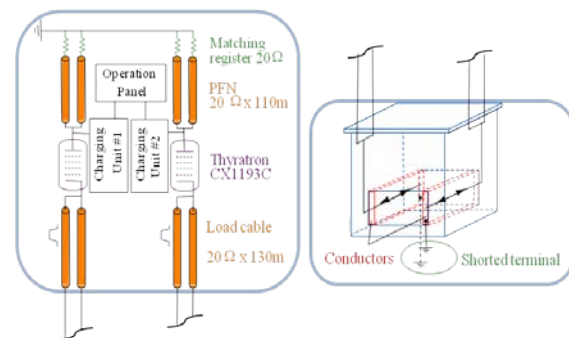


図 1 : キッカー電磁石電源システムの構成

2.2 キッカー電磁石電源システムの動作特性

キッカー電磁石電源システムの定常運転時における充電電圧パターンと電流パターン、及び出力電流波形パターンを図 2、3 に示す。充電方式は、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) を用いた定電流型を採用しており、充電開始から 20ms で充電され、放電時間は 35ms 以内となっている。出力電圧は最大 30kV で 3kA の電流を供給する。一方、3GeV に加速された陽子ビームを取り出すために必要とされる電流は 6kA であるため、励磁電流は電磁石終端を短絡して全反射された反射電流を重畳する事で達成される。出力電流は、繰り返し周期 25Hz で供給され、電流の立ち上がり時間は 30ns 以下、出力タイミングからのジッタは 10ns 以下にコントロールする。このような条件で電源を安定に運転するためには、サイラトロンの取り扱い是非常に重要な要素となる。

togashi.tomohito@jaea.go.jp

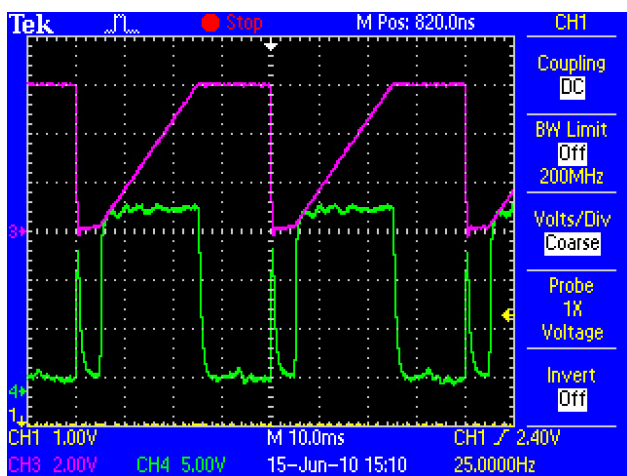


図 2：電源の充電電圧パターン（上）と電流パターン（下）

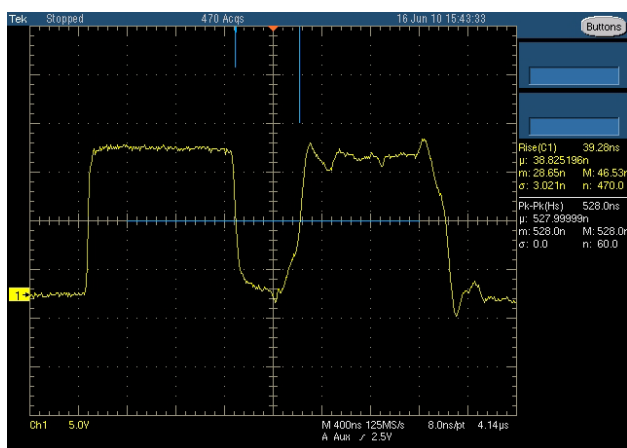


図 3：電源の出力電流波形パターン

3. キッカー電磁石電源システム運転履歴

3.1 これまでの運転状況推移

キッカー電磁石電源システムは、2009年1月より繰り返し周期25Hzによる24時間連続運転を開始した⁶⁾。J-PARCでは、LinacとRCSによるビーム試験、MLF(Material and Life Science Experimental Facility)各施設のユーザーと、MR(Main Ring Synchrotron)によるビーム利用並びに、加速器の機器メンテナンスを1カ月の周期で実施しており、各運転期間をRunと呼ぶ。

キッカー電磁石電源システムは、RCSによるビーム試験開始までにレンジング⁷⁾（4.1章参照）を行い、ビーム試験開始前日から24時間連続運転に移行し、以下の条件で運転履歴管理を開始する。

運転時間は、MFL及びMRによるビーム利用が開始された時間を起点とし、ビーム利用終了までを積算する。この間に装置の故障などにより電源が停止した場合は、故障が発生した時刻を起点とし、電源の再立ち上げが完了した時刻までを停止時間とする。この条件で積算した運転時間と停止時間の比率を故障率として評価している。RCSのビーム試験中

の故障は、サイラトロンのコンディションを判定するために必要な微調整を実施するための予備期間とし、運転履歴の成績には反映しない事としている。

以上の条件で得られた結果をもとに、RCSキッカー電磁石電源システムの故障率の推移を図4に、運転時間と故障停止時間の推移を図5示す。また、図6に故障発生回数の推移を示す。

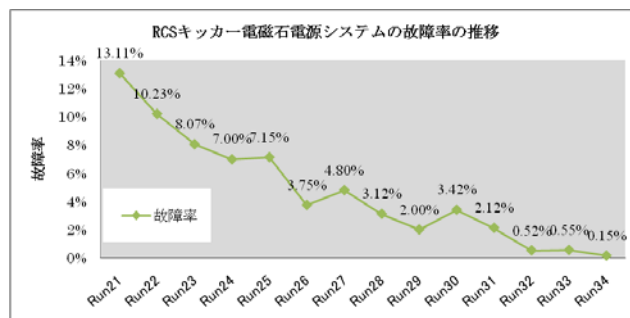


図 4：故障率の推移

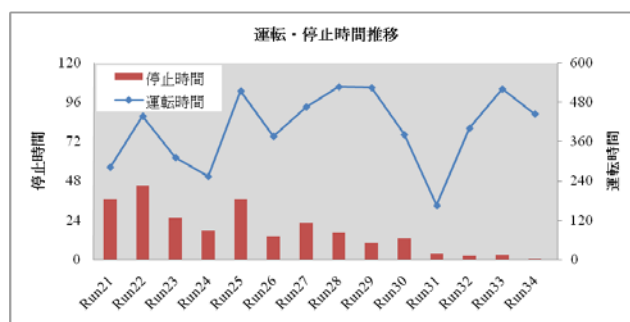


図 5：運転時間と停止時間の推移

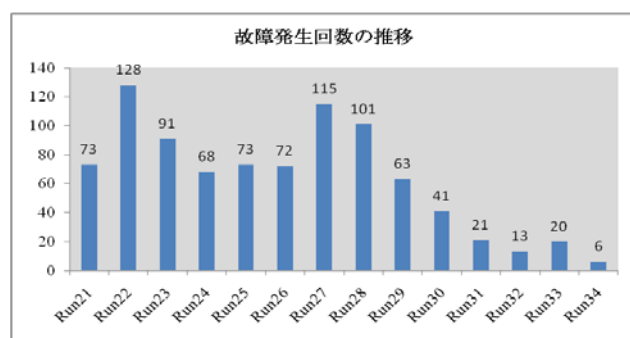


図 6：故障発生回数の推移

連続運転を開始した当初は、約282時間の運転で故障発生回数が73回と非常に多くまた、停止時間は37時間であり故障率は13%であった。その後、サイラトロンの取り扱い方法（4章参照）や、運転状況の詳細な管理を実施した結果故障率は改善し、2010年4月の運転（Run32）で0.5%以下にまで改善した。その後、2010年6月（Run34）現在も非常に安定した運転を継続している。

3.2 故障要因の内訳

ビームの連続運転を開始したRun21からRun34までのキッカー電磁石電源の総稼働時間は5613時

間である。その内、装置の故障などによる停止時間は 247 時間(約 4.4%)であった。図 7 に、キッカー電磁石電源システムの故障要因の内訳を、図 8 にサイラトロン故障要因を示す。

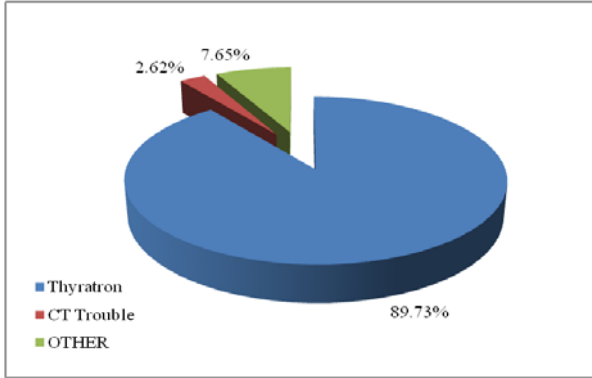


図 7: キッカー電磁石電源システム故障要因内訳

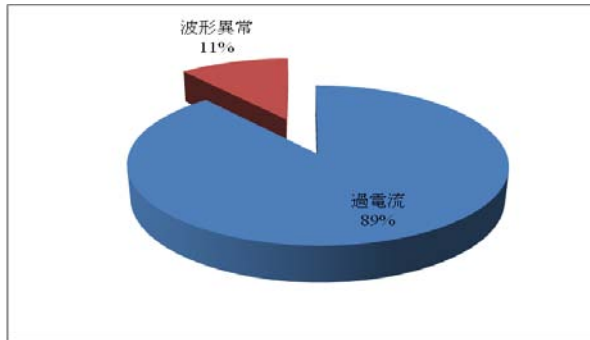


図 8: サイラトロンの故障要因

この図に示す通り、キッカー電磁石電源システムの故障は、サイラトロン関連が最も多く全体の 9 割を占める。また、サイラトロンの故障要因は、所定の充電電圧で使用できない場合に発生する充電電源の過電流が多い。この過電流は、サイラトロン内部のガス圧をコントロールするリザーバー電圧の調整によって回避することができる(4.1 章参照)。しかしながら、リザーバー電圧の調整を実施してもサイラトロンの動作が不安定な状況に陥る場合があり、この場合は、寿命としてサイラトロンの交換を行う必要がある。

3.3 サイラトロンの寿命

キッカー電磁石電源システムの通電試験は、2006 年 6 月に開始した。サイラトロンの運転時間の積算は、この時期を起点とする。これまでに 52 本のサイラトロンを受け入れたが、製造番号によってサイラトロンの取り扱い方が異なっていた。図 9 に製造番号 1988 以前のサイラトロンの積算運転時間を示す。なお、製造番号 1988 は、受け入れ検査の段階で不合格となり製造元に返却された。製造番号 1988 以前のサイラトロンは 28 本で、製造元が発行する試験成績書に記載されたリザーバーの電圧設定値(推奨値)で受け入れ検査を実施した。その内の 20 本は、実機での運用もその推奨値で 1000 時間近

く運用した経歴を持ち、残りの 8 本は、実機へのインストールの際に、適正なリザーバー電圧設定値を導き出すレンジングを実施して運用したサイラトロンである。製造番号 1988 以前のサイラトロンの 1 本当たりの平均運転時間は 2990 時間であった。その内、最も短い運転時間は 395 時間で、最も長い運転時間は 6791 時間であった。この内、比較的短時間で寿命を迎えた 2 本のサイラトロンを分解調査した結果、カソードの熱シールドの表面がアーク放電により激しい損傷を受け、セラミック表面にカソード物質が蒸着されて耐圧が著しく低下していた事が判明した。これらの事象は、リザーバー設定電圧を低い状態、つまり、サイラトロン内部のガス圧を低い状態で使用した結果であると考えている。

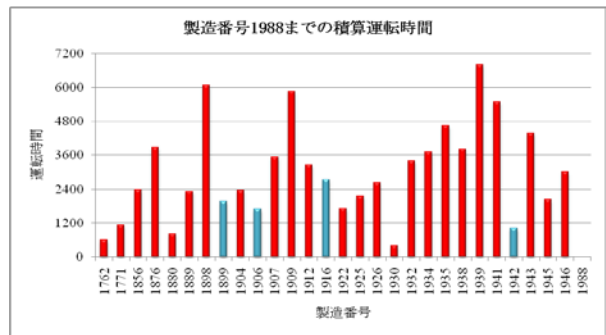


図 9: 製造番号 1988 までの積算運転時間

図 10 に、製造番号 1989 以降のサイラトロン積算時間を示す。製造番号 1989 からは、受け入れ検査の段階からレンジングの手法を導入し、常に適正なリザーバー電圧設定で運用を行っているサイラトロンである。これらは、2009 年 3 月から実機での利用を開始した。その後、2010 年 5 月に全てが適正なリザーバー電圧で調整を行ったサイラトロンに入れ替わった。現時点では運転経過年数が少なく明確に比較する事は困難であるが、2010 年 6 月までの 1 本当たりの平均運転時間は 2091 時間である。製造番号 1944 は、1800 時間の運転でリザーバー電圧設定が定格を超えたため、交換を余儀なくされたが、それ以外のサイラトロンは、現在も安定な運転を続けており、レンジングの手法を導入する以前のサイラトロンのように、数百時間で寿命になるサイラトロンは無い。

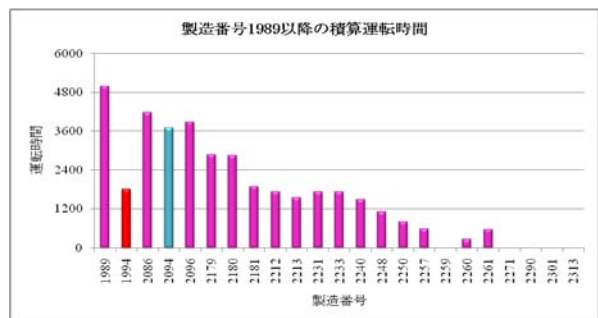


図 10: 製造番号 1989 以降の積算運転時間

4. サイラトロンの保守

4.1 レンジング

サイラトロンのリザーバー電圧を調整して連続通電状態の上限値 (Break down 電圧) を走査する手法をレンジング⁷⁾と呼ぶ。リザーバー電圧の調整は、サイラトロンの電圧保持能力に大きな影響を与えるため、極めて重要な調整であり、サイラトロンを採用する加速器で広く一般的に利用される手法である。Break down 電圧の走査は、リザーバー電圧を 0.1V 刻みで調整し、管内のガス圧を安定させるための 5 分間の保持時間を設けながら行う。1 本当たりの走査時間は約 90 分となる。図 1 1 に、リザーバー電圧と電流の立ち上がり時間の変化 (10-90% Rise time) を示す。図 1 1 の Break Down 電圧は 5.2V である。

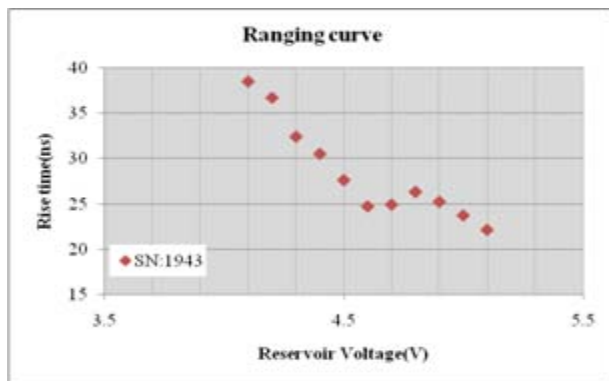


図 1 1 : レンジング曲線

RCS では当初、低いガス圧で運転した場合に誘発されるアーク放電による重篤な損傷を回避するため、レンジングで判明した Break down 電圧から 0.2V を減算した値を初期設定値として採用した。その後の経過観察の結果、この設定ではサイラトロン内部のガス圧が若干高く、充電電源過電流の発生回数を抑制する事が困難な傾向が見られたため、現在では、Break down 電圧から 0.3V を減算した値を初期設定としている。最終的なリザーバー電圧の最適値は、レンジング終了後、1~2 日間の連続運転による故障率で判定し、故障率の高いサイラトロンについては、初期設定値からさらに 0.1V 単位で下げて行きアーク放電発生の際値と考えている Break down 電圧から 0.5V の減算を下限として故障率の最も少ない設定を最適値として採用している。

リザーバー電圧の最適値は、連続運転が続くとともに緩やかに増加して行く傾向がある。RCS における運用では、現在、定期点検などの長期停止期間後に全台と、次節に述べる日々の管理で特に変化の現れたサイラトロンについて、各 Run に設けられたメンテナンス日にレンジングを実施している。

4.2 日々の管理

運転中は、サイラトロンの故障発生状況の記録と、出力波形の定時測定を実施している。特定の故障 (充電電源過電流) が頻発する場合は、リザーバー

電圧の設定を 0.1V 単位で下げる調整を行い、故障発生が抑制されるリザーバー電圧まで下げる処置を講ずる。そして、メンテナンス日にレンジングを実施し、現状のリザーバー電圧設定が Break down 電圧から 0.5V を減算した下限値以下でない事を確認する。サイラトロンの出力波形の計測は、オシロスコープ (Tektronix TDS5104B) を用いて 1 日 4 回実施している。計測する項目は次の通りである。

- 10-90% Rise time (500pulse average)
- Jitter (500pulse peak-peak)

計測した結果をグラフ化し、Rise time と Jitter の変化を日々観測する。そして、リザーバー電圧 (Vr) の調整が必要な状況と判断したサイラトロンについては、メンテナンス日にレンジングを実施し、リザーバー電圧の最適値を再設定するように努めている。図 1 2 に、リザーバー電圧の調整を行った典型的な例を示す。

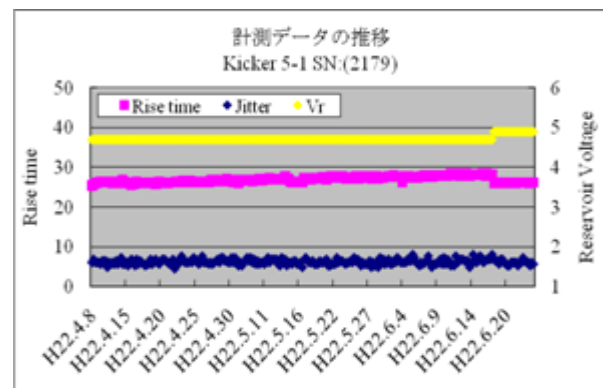


図 1 2 : 計測データの推移

このサイラトロン (製造番号 2179) は、2010 年 4 月 5 日にレンジングを行い、リザーバーの電圧を 4.7V に設定して運転を開始した。約 2 カ月の波形計測の結果、徐々に Rise time が上昇する傾向が表れた。変化量は、25.4ns から 28.5ns で約 11% である。ジッタはこの間、10ns 以下で安定に推移しており目立った変化は表れていない。この状況を受け、2010 年 6 月 18 日にレンジングを実施した所、図 1 3 に示すように、Break down 電圧が変化していた (4 月 5 日は 5.0V。6 月 18 日は 5.2V)。

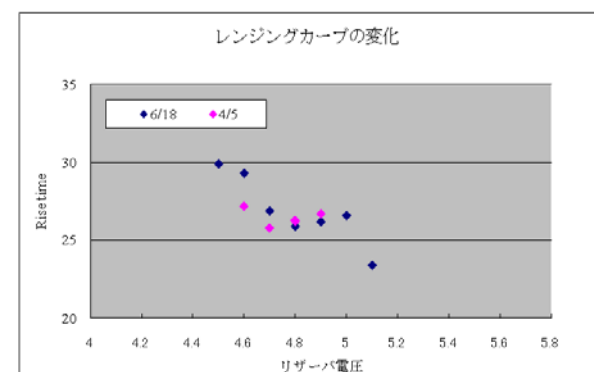


図 1 3 : レンジングカーブの変化量

この結果より、リザーバー電圧の最適値が約2カ月で0.2V変化したと言える。サイラトロンの経時変化量は個体差により様々であるが、定期的な調整管理をする事は極めて重要であると言える。

4.3 サイラトロンの交換時期の判定

サイラトロンの交換時期の判定は、加速器施設の安定運転を実現するために最も重要な要素となる。前節に述べた通り、サイラトロンの動作特性は経時的に変化する。しかしながら、その変化量は個体差によってバラツキがあるため、運転時間の積算結果だけでは交換時期を的確に判断する事は困難である。このため、サイラトロンの交換時期についても、定期的な波形観測から、安定運転の確立の観点に立った見極めが必要となる。図14に、交換時期を迎えたサイラトロンの波形計測結果の一例を示す。

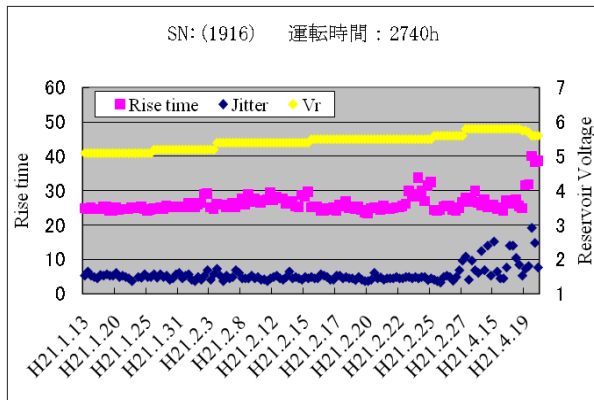


図14：サイラロン交換までのデータ推移

このサイラトロンは、製造番号1916で運転開始から約2740時間で充電状態を保持できなくなり交換を実施したサイラトロンである。

基本的な特性として、出力波形のRise timeの変化が短期間で発生するようになる。それに合わせて、安定に推移していたジッタの変動も大きくなり、規定の電圧で充電できなくなる時に発生する充電電源過電流と、出力波形が規定のタイミングゲートから外れる時に発生する出力波形異常が頻発する。このような状況に陥る前に、サイラトロンを交換する判断が必要である。

これまでのデータを整理すると、ジッタにおいて、10ns以上のバラツキが散見されるようになると、短期間に交換が必要な状況となる傾向がある。従って、サイラトロンの交換は、ジッタの動向に細心の注意を払う必要がある。

5. まとめ

キッカー電磁石電源システムの稼働率は、サイラトロンの運転管理により改善する事ができた。特に、定時測定から、サイラトロンの動作特性には個体差と経時変化があり、最適な動作設定値は、随時調整する必要がある事がわかった。そのため、サイラトロンの管理を徹底する事で安定な状態でコントロールする事が可能となった。サイラトロンの

個々の寿命についても、データ管理を継続し、現在の安定した運転状態を保つことによって、大きな成果があるものと期待している。

6. 謝辞

当該システムの立ち上げにご尽力し、運転管理の礎を築きあげられました神谷潤一郎氏には、多大なご指導を賜り深く感謝致します。日々の保守と波形データの収集につきましては、昼夜にわたりご協力を戴きました三菱電機サービス、並びに日本アドバンステクノロジーの方々に深く感謝を致します。システムの省力化と安定化につきましては、原田寛之氏並びにSAHA Pranab氏より遠隔コントロールシステムのプログラムを構築して戴き深く感謝致します。

参考文献

- [1] "Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Project, J-PARC," JAERI Technical Report, 2003-044 and KEK Report 2002-13.
- [2] M. Watanabe *et al.*, Proceedings of the IPAC'10, p. 3296 (2010).
- [3] J. Kamiya, T. Takayanagi, and M. Watanabe, "Performance of extraction kicker magnet in a rapid cycling synchrotron," *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 12, 072401 (2009).
- [4] J. Kamiya, M. Kinsho, M. Kuramochi, T. Takayanagi, O. Takeda, T. Ueno, M. Watanabe, K. Yamamoto, Y. Yamazaki, and M. Yoshimoto, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 18, 293 (2008).
- [5] J. Kamiya, T. Ueno, and T. Takayanagi, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 16, 1362 (2006).
- [6] H. Hotchi *et al.*, "Beam commissioning of the 3-GeV rapid cycling synchrotron of the Japan Proton Accelerator Research Complex," *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 12, 040402 (2009).
- [7] 明本光生, "サイラトロンスイッチを使用した大電力パルス電源の現状", *J. Particle Accelerator Society of Japan*, Vol.7, No.1, 2010(15-24)