

OPERATION AND CURRENT STATUS OF INJECTION AND EXTRACTION MAGNET AND THE POWER SUPPLY FOR J-PARC 3 GeV RCS

Masao Watanabe[#], Kazuaki Suganuma, Tomohito Togashi

Japan Atomic Energy Agency J-PARC Center

2-4 Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan

Abstract

3-GeV RCS (Rapid Cycling Synchrotron) at High Intensity Proton Accelerator Facility (J-PARC) have started for 24-hour operation with repetition rate of 25 pps in February, 2011. Kicker power supply system which uses thyatrons switches is used for extraction of the proton beam. There were many troubles for unstable operation of the thyatrons just after beam commissioning started. Recently, however, the operations were improved and the failure rate was reduced to approximately 0.1 % in October 2010. After the earthquake on March 11, 2011, the injection and extraction magnets, power supplies, the cables and the bus-duct have been checked. Insulation resistance test, impedance test were performed. Reflected wave measurements by the low-level and high-power pulse of the kicker magnets were performed. Visual checks by a fiber endoscope were also performed in the kicker magnets. The results of the measurements and the checks were all not in the problem.

J-PARC 3GeV RCS 入出射用電磁石電源システムの運転と現状

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の 3 GeV シンクロトロン(RCS)は 2009 年 1 月より繰り返し 25Hz で 24 時間の連続運転を開始した。当初、出射用キッカー電磁石システムは、主にスイッチング素子であるサイラトロン¹の動作不安定性のために、ビーム運転停止率は 10%以上に及んだが、2010 年秋には 0.1%程度の運転停止率にまで減少させることに成功した。また、2011 年 3 月 11 日の東日本大震災のため、ビーム運転停止を余儀なくされた。J-PARC は茨城県東海村に位置するため、その影響も大きく、各装置は毎年の定期点検以上に詳細に点検する必要性に迫られた。例年は負荷ケーブルから電磁石までを一括して行っていた絶縁抵抗試験を、電磁石、ケーブル・バスダクトそれぞれの異常の有無を確認するため、ケーブル類を電磁石から切り離して行った。また、キッカー電磁石は、製作時に行ったインピーダンス測定試験を今回あらためて行うなどした。その他、通常は定格運転において行う反射波測定を、今年度はローレベルパルスによる反射波測定をあらかじめ行い、異常がないことを確認後、充電電圧 60kV の定格運転を行った。また電磁石内部を内視鏡にて目視確認を行っている。本件は、まずキッカー電磁石システムについて説明し、キッカーの運転現状、そして震災後の電磁石・電源の健全性確認について報告する。

2. キッカー電磁石電源システム

RCS のキッカー電磁石電源システムは、双子型分布定数キッカー電磁石と高電圧パルス電源 8 台で構成される。図 1 にキッカー電磁石電源システムを示

す。1 台のキッカー電磁石電源には 2 組のパルス電源を使用している。電源の充電電圧 60kV、出力電流 3kA、パルス幅約 1.3 μ sec、25pps 運転を行っており、スイッチには EEV 社製の 4ギャップセラミックサイラトロン (CX1193C) を使用している。サイラトロンの電流立ち上がり時間は約 30nsec で、キッカー電磁石の特性インピーダンスは 10 Ω である。電磁石の終端は短絡されていて、電流を全反射させ電流を 2 倍にすることで所定の磁場を達成している。

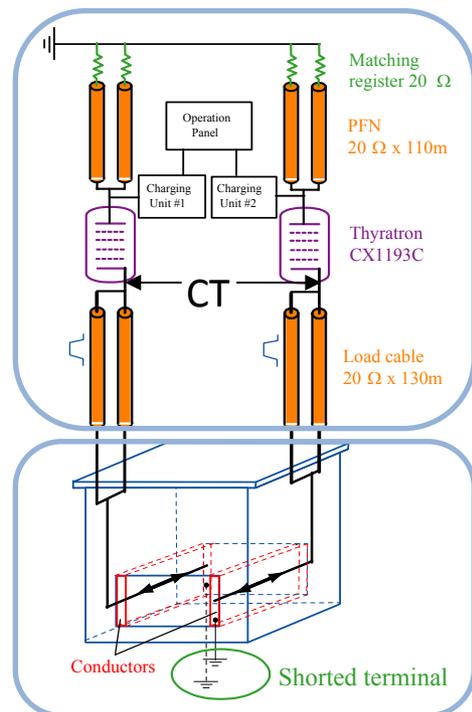


図 1 : キッカー電磁石電源システム

[#] watanabe.masao30@jaea.go.jp

3. キッカー電源サイラトロンの運転実績

RCS 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。J-PARC では、1 カ月に一度 (1 日～数日) メンテナンス期間を設けている。図 2 に、キッカーシステムのビーム時間停止率の推移を示す。

(運転時間は、RCS 以降の施設でビームを利用した時間。停止時間は、キッカー電磁石電源システムが停止してから立ち上げ完了までの時間を言う。)

連続運転開始当初は、約 282 時間の運転で故障発生回数が 73 回と非常に多く、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や、運転状況の詳細な管理を実施した結果故障率は右肩下がりになり、2010 年 4 月の運転で 0.5%以下を達成した^[1]。その後 2011 年 3 月 11 日まで非常に安定した運転を継続する事ができ、現在ではビーム時間停止率約 0.1%を継続している。

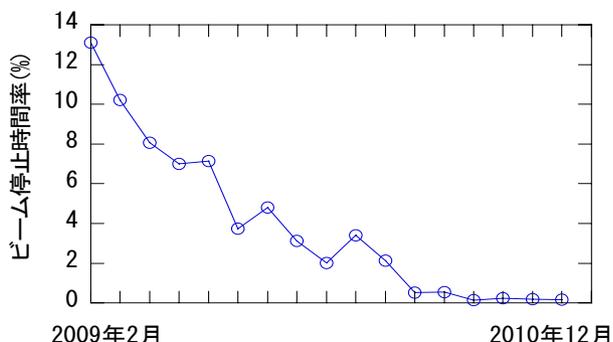


図 2: ビーム時間停止率の推移

4. 電磁石電源の健全性確認

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災のため、ビーム運転停止を余儀なくされた。J-PARC は茨城県東海村に位置するため、その影響も大きく、各装置は毎年の定期点検以上に詳細に点検する必要性に迫られた。特にキッカー電磁石は、磁場を出すためのフェライトや絶縁ためにセラミックの部品といった、衝撃で欠けたり、壊れる可能性のある部品で構成されているため、その健全性を早急に確認する必要があった。しかし、キッカー電磁石は真空下で使用されているため、容易に直接目視することはできない。そこで、電磁石が致命的な破壊に至っているかどうかの確認を早急に行うべく、簡易に測定可能なキッカー電磁石のインピーダンス測定、ローレベルパルス測定をまず行った。これらが特に問題ないことを確認後、高電圧通電試験、そして真空をアルゴンでベントした後に電磁石内部の目視確認を行った。また、本件では入出射 DC 電磁石電源システムの電磁石のインピーダンス測定とセプタム電磁石に使用しているバスダクトの健全性確認について報告する。

4.1 キッカー電磁石のインピーダンス測定

キッカー電磁石に接続している同軸ケーブルを外し、その端子からのインピーダンスの測定を行った。測定結果を表 1 に示す。ただし、製作時では電磁石内部に接続されている高圧端子板から測定したのに対し、今回は高圧導入端子から測定している。高圧端子板から高圧導入端子までのインダクタンスは 1kHz で 0.3~0.4μH 程度である。

表 1: キッカー電磁石のインダクタンス

測定日	2011/4/26	製作時
電磁石 No.	L(μH)@1kHz	L(μH)@1kHz
No.1 左	1.50	1.2
No.1 右	1.50	1.2
No.2 左	1.40	1.2
No.2 右	1.35	1.2
No.3 左	1.45	1.2
No.3 右	1.50	1.2
No.4 左	1.60	1.8
No.4 右	1.45	1.6
No.5 左	1.45	1.1
No.5 右	1.40	1.1
No.6 左	1.55	0.8
No.6 右	1.55	1.2
No.7 左	1.45	1.1
No.7 右	1.40	1.1
No.8 左	1.40	0.9
No.8 右	1.50	1.4

ここで、No.1 はキッカー電磁石 1 号機のこと、ビームから見て一番上流に設置している電磁石である。また[左][右]とは図 1 で示したように別のルートで電流を流しているため、上流から見て[左][右]としている。

この結果から、多少ばらつきがあるものの、特に大きな変化はないため、少なくとも致命的な破壊はないことを確認できた。

また、テスターにて導通状態の健全性も確認したが、抵抗値ほぼ 0 の導通状態を維持していたため、電流が流れるルートも問題ないことを確認できた。

4.2 キッカー電磁石のローレベルパルス反射波測定

キッカー電源に接続している同軸ケーブルを外し、キッカー電磁石までのローレベルパルス反射波測定をおこなった。外した 20Ω 並列 (=10Ω) の同軸ケーブルに、パルサーを接続し、ケーブル・パルサー間に 50→10Ω 変換器で 10Ω に変換している。パルサーにて約 1μsec 幅のパルスを発生させ、ケーブル端子に接続したオシロスコープでその波形を確認した。その波形の例を図 3 に示す。インピーダンス変換の影響などで立ち上がりにリングングが見えるが、全体としては反射波がフラットで戻ってきている様子が見える。したがって、電磁石内部で大きな破壊等の問題がないことを確認できた。



図 3 : キッカー電磁石のパルス入射反射波形の例

4.3 キッカー電磁石の通電試験

電源のインターロック等の健全性検査をおこなった後、キッカー電磁石の通電試験をおこなった。試験はビーム運転と同じ条件の充電電圧 60kV、出力電流 3kA、パルス幅約 1.3 μ sec、25pps 運転でおこなった。ただし、冷却水系が使用できなかったため、運転時間は 1 分とした。出力電流波形の例を図 4、5 に示す。測定はサイラトロン(スイッチ)のアノードに接続しているケーブルの端子部に CT を接続し電流値を測定している。図 4 は、ビーム運転時に測定した正常な波形であるが、図 5 の今回測定した波形はほぼ同じであり特に問題はなかった。また、このキッカーシステムの等価回路を PSpice (micro cap 7 CQ) にて計算し、波形の確認を行い、測定値とかなり良く一致した計算結果が得られた。等価回路を図 6 に、計算した出力電流波形を図 7 に示す。この計算結果から、反射波がフラットでない理由が、同軸ケーブルを電磁石に接続している箇所のインダクタンスが大きい事が原因であることがわかった。

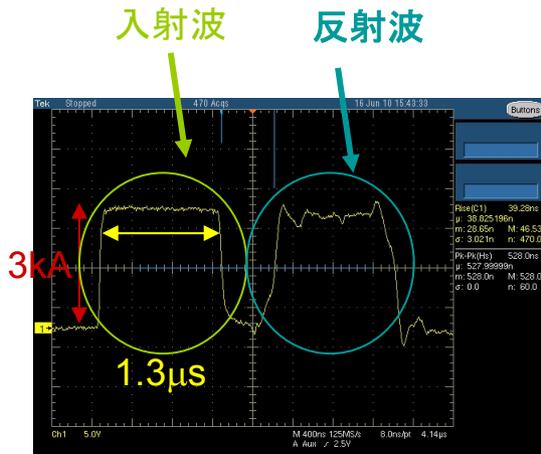


図 4 : 地震前 (ビーム運転時) の電流波形

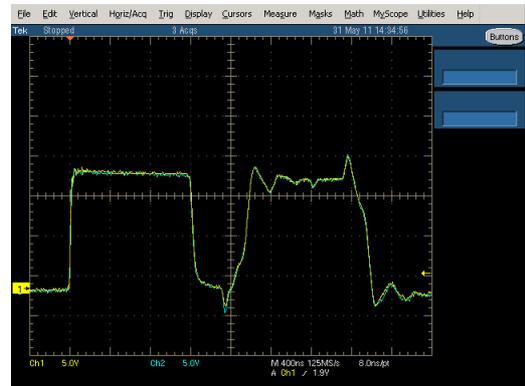


図 5 : 地震後の電流波形

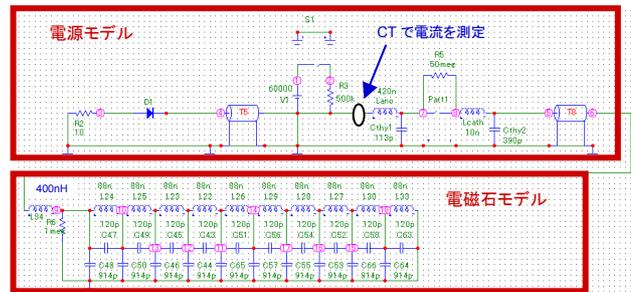


図 6 : キッカーシステムの等価回路

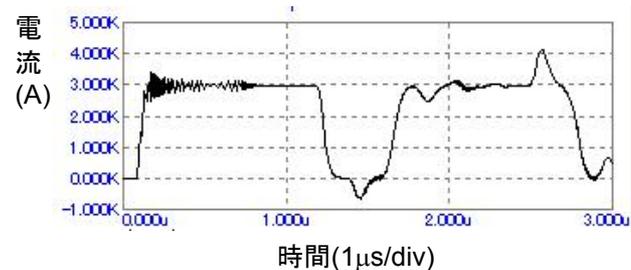


図 7 : 計算した出力電流波形

4.4 キッカー電磁石の内部目視検査

キッカー電磁石は磁場を出すためのフェライトや絶縁のためにセラミックの部品といった、衝撃で欠けたり、壊れる可能性のある部品で構成されているため、その健全性を確認する必要がある。しかし、キッカー電磁石は真空下で使用されているため、直接目視することはできない。そこで、出射ラインをアルゴンでパージし、大気圧にし、フランジを開けて内視鏡にて目視確認を行った。キッカー電磁石は全部で 8 台あり、上流の 3 台が真空容器 A、下流の 5 台が真空容器 B にインストールされている。真空容器 B を図 8 に示す。また、電磁石を図 9 に示す。真空容器のフランジを開けて内部を内視鏡でフェライトとセラミクスを観測した例をそれぞれ図 10 と図 11 に示す。内視鏡にて詳細に観測したが、特にワレや欠けもなく正常な状態で保たれており、健全性を確認できた。

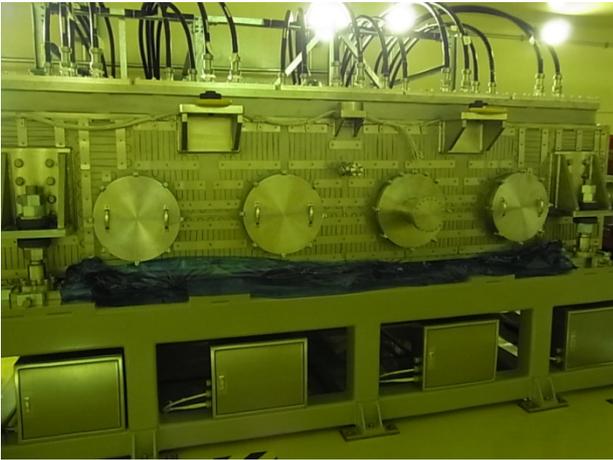


図 8：キッカー電磁石真空容器 B 外観

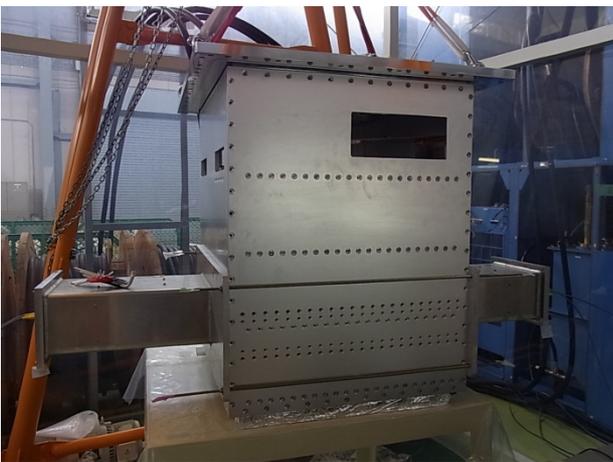


図 9：キッカー電磁石外観



図 10：キッカー電磁石内部（ビーム通過部）観測写真
フェライトが並んでいる様子がわかる。
特に欠けなどは見られなかった。

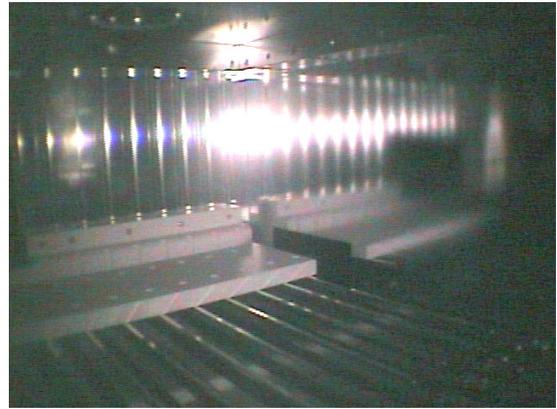


図 11：キッカー電磁石内部（電流導入部）観測写真
高圧板を支持しているセラミックが見えている。
特に欠けなどは見られなかった。

4.5 入出射用 DC セプトム電源のバスダクトの点検

入出射 DC 電磁石・電源間に接続しているケーブル・バスダクトの健全性確認をおこなった。バスダクトは入出射用セプトム電磁石に用いているが、電磁石・電源間に建屋のエキスパンションジョイントを通っているが、地震のため加速器トンネルがある内側に対して、エキスパンションジョイントより外側が 15mm 程度下がってしまった。ケーブルは可とう性があるため特に問題なく、絶縁抵抗試験を行ったが、特に例年と異なる結果にはならなかった（1000V メガで 10MΩ 以上）。バスダクトは基本的にはリジットだが、エキスパンションジョイントのみフレキを用いている。震災後特に段差が大きかった出射部のエキスパンションジョイント部の写真を図 12 に示す。バスダクト、床、ケーブルラックがずれているのが見て取れる。復旧はまず、始めに絶縁抵抗試験を行い 1000V メガで 10MΩ 以上と問題ないことを確認した。その次にバスダクト支持の脚をボルトで高さ調整し、フレキ部でのズレを修正した。ズレ修正後のカバーを空けてフレキが見えている様子を図 13 に示す。また復旧後の写真を図 14 に示す。ズレ修正後、絶縁抵抗試験を行い 1000V メガで 10MΩ 以上と最終的に健全性を確認できた。



図 12：エキスパンションジョイント部
地震のため段差ができていている様子がわかる。



図 13 : バスダクトフレキシ部修正後写真
フレキシ部は黒いゴムシートで覆われている。

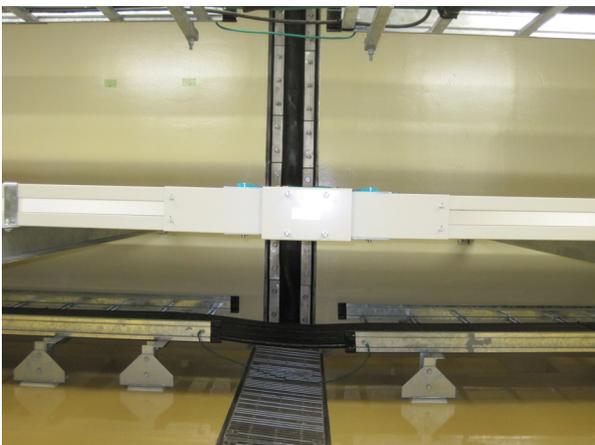


図 14 : バスダクト修正後写真

4.6 入出射 DC 電磁石の絶縁抵抗測定

入出射 DC 電磁石の絶縁抵抗測定をおこなった。例年は電磁石からケーブル・バスダクトの接続を外さないが、今年は電磁石とケーブル・バスダクトの接続を外してから絶縁抵抗試験をおこなった。各電磁石の絶縁抵抗測定結果を表 2 に示す。

入射垂直ステアは冷却水を用いていないため、 $200\text{M}\Omega$ 以上である。その他の電磁石は冷却水を用いているが、表 2 の値はその冷却水がホロコン等に入った状態で測定を行っており、 $\text{M}\Omega$ 程度の値になっている。したがって、抵抗値は冷却水の抵抗値でほぼ決まっていると思われる。(その後冷却水ができるだけ抜いて抵抗値を測定した。その結果その値は上昇したが、水を完全に抜く事が難しかったため、抵抗値のばらつきが大きかった。)

例年行っている絶縁抵抗測定の合格値は $0.2\text{M}\Omega$ 以上である。出射セプタムは 3 台接続して測定しているため $0.2\text{M}\Omega$ だが、基準値以上のため全ての電磁石において特に異常はないと結論した。

表 2 : 入出射 DC 電磁石の絶縁抵抗

電磁石名	抵抗値 (Ω) (電磁石単体)
入射垂直ステア 1	*200M 以上
入射垂直ステア 2	*200M 以上
入射水平ステア 1	*200M 以上
入射水平ステア 2	*200M 以上
入射セプタム 1	1.5
入射セプタム 2	1.5
ダンプセプタム 1	0.8
ダンプセプタム 2	1.5
ダンプ 4 極	2.5
ダンプ水平ステア	9
ダンプ垂直ステア	8
低エネルギー出射 1	6
低エネルギー出射 2	5
出射セプタム 1・2・3 (3 台直列接続)	0.2

5. まとめ

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の 3 GeV シンクロトロン(RCS) の出射用キッカー電磁石システムは、連続運転を開始当初、主にスイッチング素子であるサイラトロン動作不安定性のために、ビーム運転停止率は 10% 以上に及んだが、2011 年 2 月には 0.1% 程度の運転停止率にまで減少させることに成功した。

また、2011 年 3 月 11 日の東日本大震災のため、ビーム運転停止を余儀なくされたが、健全性点検・試験を行った。ケーブル・バスダクトの復旧及び絶縁抵抗試験、キッカー電磁石のインピーダンス測定、ローレベルパルスによる反射波測定、高電圧通電試験、電磁石の内部目視確認までを行い、その健全性を確認できた。入出射 DC 電磁石電源については、冷却水や高圧受電で現状ではできていないため、通電試験は 11 月に行う予定である。

参考文献

- [1] 富樫智人 et al., “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”, 第 7 回日本加速器学会年会, p579-583.