

J-PARC 3GeV RCS キッカー電磁石電源の現状

CURRENT STATUS OF THE KICKER MAGNET POWER SUPPLY IN 3-GEV RCS

富樫智人, 高柳智弘, 山本風海, 金正倫計

Tomohito Togashi, Tomohiro Takayanagi, Kazami Yamamoto, Michikazu Kinsyo

Japan Atomic Energy Agency, J-PARC Center

Abstract

The J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) 3-GeV RCS (Rapid Cycling Synchrotron) has the pulse kicker power supply system which uses the thyatron switch for beam extraction. The power supply system has been used for more than 10 years. However the power supply is continuing the stable operation by carrying out the exchange of the regular maintenance and consumables. Furthermore, the thyatron switch has become possible use of more than an average of 10,000 hours by establishing a maintenance technique with many years of experience. On the other hand, the consumables will be discontinuing and the selection of the substitution product becomes a pending problem. Deterioration of the silicon oil has been progressed, and the recovery method of a performance and the consideration of a replacement procedure. This report explains the current state of the kicker magnet power supply system from the results of the regular maintenance and operation conditions.

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) [2] 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キッカー電磁石電源システムを利用している。本システムの電源は、使用開始からおよそ 10 年が経過しているが、定期的な保守点検や消耗品の交換を実施する事により現在も順調な稼働を継続している。また、サイラトロンの取り扱いについては、長年の経験をもとにした維持管理手法の確立により高い稼働率 (99.5%以上) を維持するとともに、寿命については平均で 10,000 時間を超える利用が可能な状況にまで改善されている。一方、消耗品については、経年的に製造中止品が増加しており、代替品の選定が懸案となっている。また、高圧機器の絶縁と冷却に使用しているシリコン油についても耐電圧性能の劣化が進んでいる傾向があり性能の回復方法や入れ替え手順などの検討が必要となってきている。本報告では、これまでの運転状況並びに保守点検結果を交えながらキッカー電磁石電源の現状について報告する。

2. キッカー電磁石電源の運転状況

2.1 運転パラメータ

キッカー電磁石電源は、3GeV に加速された陽子ビームを輸送系に高速出射するための高電圧矩形パルス電源で、最大充電電圧 80kV、パルス幅 1.2 μ s、繰り返し周期 25Hz の性能を有する。設置されている電源の総数は 8 台で 1 台あたり 2 本の e2v 社製サイラトン (CX1193C) を有する。キッカー電磁石電源 (Kicker PS) の運転パラメータは、精密な軌道計算並びにビーム試験結果に基づき策定され、現在は Table 1 に示すパラメータで運転を実施している。Figure 1 に定常運転時に取得した 1 号

機 No.1 (Kicker PS No.1-1) のパルス出力波形を示す。なお、本電源の詳細仕様並びに回路構成については巻末に掲載した参考文献[3]を参照願いたい。

Table 1: Set Value of Each Kicker Magnet Power Supply

Power supply number.	Charging voltage
Kicker PS No.1	58.82 kV
Kicker PS No.2	58.36 kV
Kicker PS No.3	59.44 kV
Kicker PS No.4	59.86 kV
Kicker PS No.5	59.59 kV
Kicker PS No.6	59.09kV
Kicker PS No.7	59.33 kV
Kicker PsSNo.8	59.12 kV

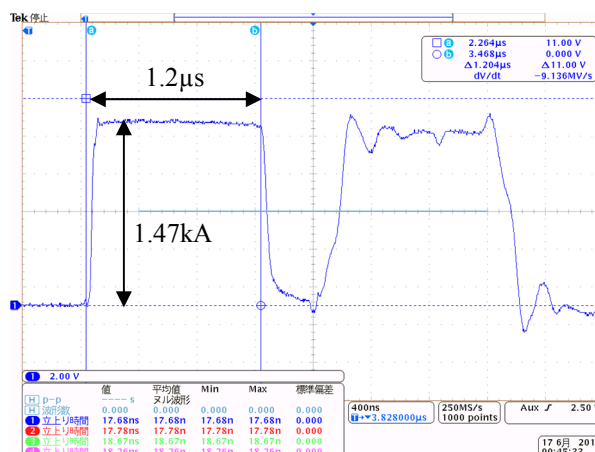


Figure 1: Pulse output waveform of Kicker PS No.1-1.

togashit@post.j-parc.jp

2.2 2015 年度の運転状況

J-PARC では 2015 年度、Run62 から Run67 の 6 サイクルの運用が実施された。この間キッカー電磁石電源の運転は、延べ 6,260 時間であった。故障による停止時間は年間約 15 時間で、稼働率は 99.76% であった。Figure 2 に、Run 毎の稼働率と、停止回数を示す。また、Figure 3,4 に、2015 年度 (Run62 から Run67) と 2016 年 6 月まで (Run68 と Run69) の電源毎の故障回数の分布を示す。

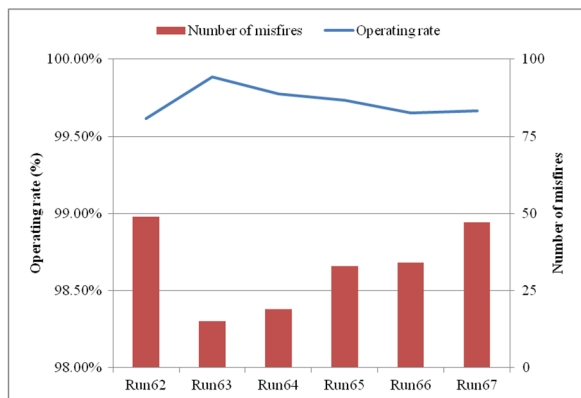


Figure 2: Number of the misfire.

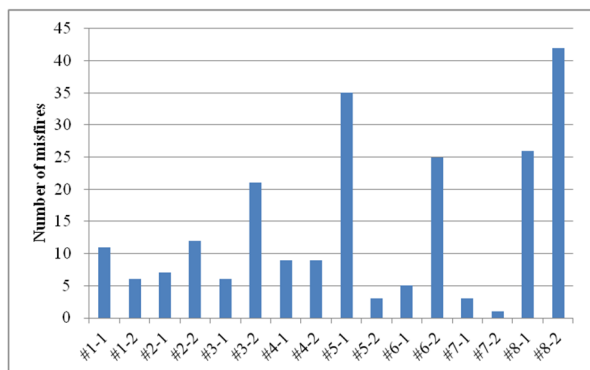


Figure 3: Number of the misfire of thyatron from Run62 to Run67.

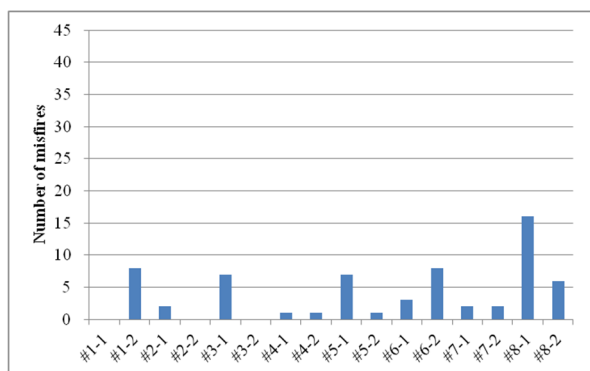


Figure 4: Number of the misfire of thyatron from Run68 to Run69.

2015 年度中は、#3-2、#5-1、#6-2、#8-1、#8-2 でそれ

ぞれ 20 回を超える故障が発生した。これらについては、リザーバ電圧の設定を見直す事によって故障発生回数の抑制を図った。しかし、2016 年度になっても、#8-1 については抑制効果が期待できない状況が見られる事から 2016 年度後期の運用が開始される前にサイラトロンを交換する予定である。

2.3 2015 年度に交換を実施したサイラトロンの状況

Table 2 に、2015 年度に交換したサイラトロンの交換理由と総運転時間を示す。

Table 2: Exchange Reason of the Thyatron and Operating Hour

number	The reason it was exchanged	operating hour
#3-2	ミスファイヤ頻発	9686h19min
#8-2	ミスファイヤ頻発	6886h01min
#6-2	観測波形に異常を認める	11013h51min
#4-2	V/max*が閾値に到達	14210h46min
#5-1	ミスファイヤ頻発	12301h46min
#3-2	ミスファイヤ頻発	8423h22min
#4-1	観測波形に異常を認める	13553h56min
#6-1	V/max*が閾値に到達	9817h57min
#5-1	運転時間が閾値を超過	15149h34min

(※V/max:リザーバヒータ電圧を上げた時に充電状態を維持できる上限値。RCS では 6.1V が閾値)

2015 年度は 9 本のサイラトロン交換を実施した。この内、本体の耐圧性能の劣化と推定されるミスファイヤの頻発が 4 本となり最も多い結果となった。交換を実施したサイラトロンの平均運転時間は 11,269 時間で、サイラトロンの公称寿命 5,000 時間を大きく上回る結果である。

3. 現状の課題

3.1 シリコン油性状の劣化

キッカー電磁石電源の主回路は、絶縁油を循環させて熱交換機で水冷とする方式が用いられ、絶縁油には信越化学工業(株)製のシリコン油「KF-96-20CS」を使用している。Table 3 に、使用しているシリコン油の一般特性を示す。

Table 3: General Characteristic [KF-96-20CS]

Outward appearance	Clear
Flash point (°C)	More than 260
25°C of Specific heat (J/g·°C)	1.6
2.5mm of Strength of the insulation breakdown (kV)	More than 50.0
Specific volume resistance (TΩ·m)	More than 1.0
25°C of weight	0.950

2015 年度の定期点検で、使用している全ての電源のシリコン油について絶縁破壊強さの測定を行ったところ Table 4 の結果を得た。

Table 4: Result of the Insulation Rupture Strength Test

電源名称	試験結果 (kV/2.5mm)	
	1回目	2回目
1号機	31.5	-
2号機	28.8	-
3号機	32.7	-
4号機	36.6	-
5号機	31.7	-
6号機	28.7	-
7号機	22.5	31.8
8号機	25.8	-
コンディショニング機 サイラトロン部	18.8	26.0
コンディショニング機 エンドクリップ1	19.1	20.7
コンディショニング機 エンドクリップ2	19.7	22.5
先行機	19.5	16.0
新油	46.5	-

絶縁破壊強さの試験は、試料油で満たされたオイルカップの中に置かれた直径 12.5mm の相対する球電極の電極間を 2.5mm に調整し、毎秒 3kV の割合で電圧を上昇させて絶縁破壊電圧を測定する方法で行った。この結果、コンディショニング電源のシリコン油について低い値を示す結果が得られた。また、コンディショニング電源のエンドクリップ系統のシリコン油については薄黄色い変色が確認された。Figure 5 に変色したシリコン油と新油の色見を示す。

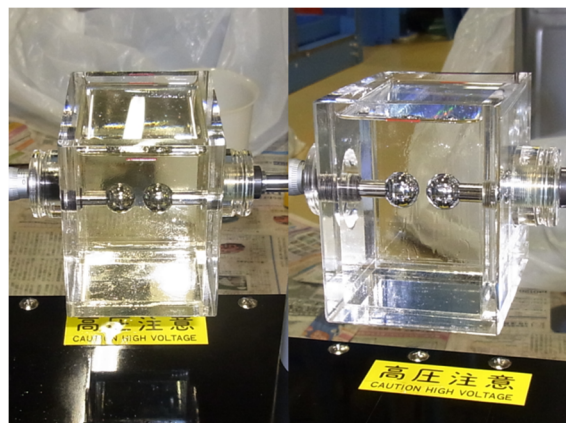


Figure 5: Picture of the Silicon Oil Color Sample. (Left side shows a deteriorated oil of the conditioning power supply. Right side shows new oil.)

絶縁破壊強さ試験の結果に異常が認められたシリコン油は、ゲル浸透クロマトグラフィー分析(Gel permeation

chromatography)が実施され、原因は不明であるが熱酸化劣化が発生した可能性が示唆された。これらの結果を受け、本年度中にシリコン油の更なる詳細な分析(水分量や全酸化値等)を実施し、劣化原因の同定と対策方針の立案を行う予定である。

3.2 マッチングロード高圧抵抗器の現状

キッカー電磁石電源のマッチングロードは、オリジン電気(株)製シリコン高電圧整流スタック(MD-O65SN1K)と東海高熱工業(株)製エレマ抵抗器(ER65ASH 油中仕様)で構成されている。マッチングロードは高圧同軸ケーブルの特性インピーダンス 20.5Ω とマッチングさせるため 1本あたり 512.5Ω±10%の抵抗器を 25 本並列で利用する事により合成抵抗 20.5Ω を形成している。Figure 6 に、キッカー電磁石電源のマッチングロードを示す。

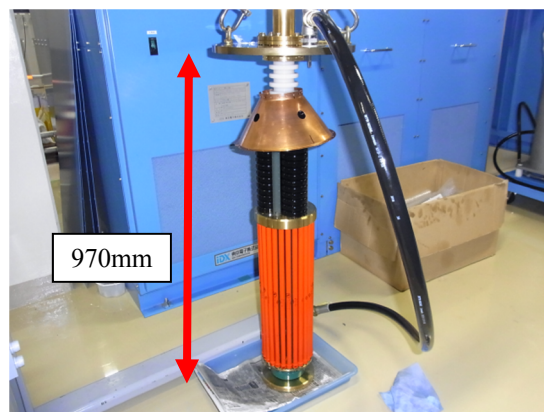


Figure 6: Matching resistor of a Kicker Power Supply.

マッチングロードの分解点検は、2011 年度から毎年実施している。エレマ抵抗器については、塗膜の目視点検と合成抵抗値の測定を行う。塗膜に傷等の物理的な異常が認められた場合は交換となる。また、合成抵抗値が規定の範囲(19.48Ω~22.43Ω)から外れている場合は単体の抵抗値測定を行い、規定の範囲に収まるのに必要な最小本数の抵抗器交換を実施する。2015 年度までに交換を実施した抵抗器は 8 台の電源で 77 本(総数 800 本)である。Figure 7 に、実機における作業年度毎の抵抗器交換本数を示す。

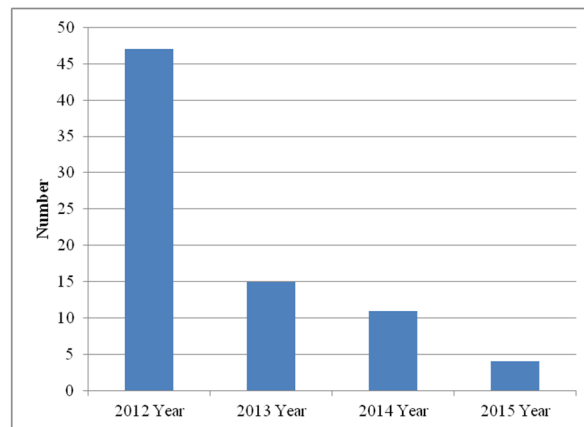


Figure 7: Number of the exchanged Resistor.

抵抗器の交換本数は減少傾向にあるが、抵抗値の増

加は毎年数パーセントずつ確実に進行しており、今後も定期的な交換は避けられないのが現状である。現在、交換用の予備抵抗器は、先行機に利用されていた抵抗器を流用しており残存数が僅かである。代替の抵抗器については現在開発を進めており、詳細は第 12 回年会の WEP078[5]にて報告されているので参照願いたい。

3.3 黒抵抗器の使用状況

キッカー電磁石電源のマッチングロードの抵抗器は、2003 年の電源製作当初、Figure 8 に示す表面に赤い塗装の施された通称赤抵抗器であった。一方、2013 年に購入した抵抗器は、表面に黒い塗装が施された通称黒抵抗器である。

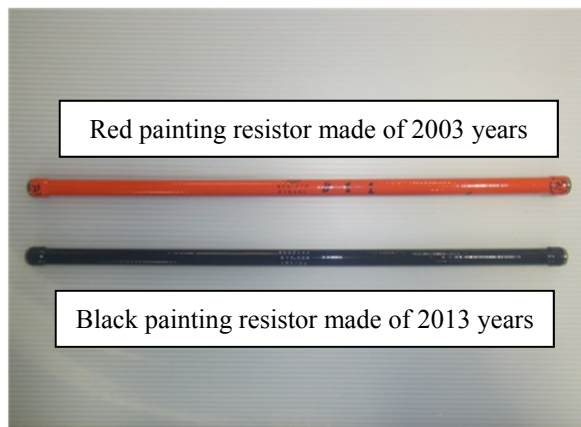


Figure 8: Old and new Resistor.

黒抵抗器は、表面に塗布されているエポキシ樹脂の成分が変更され、赤抵抗器と比較すると油中での抵抗値の変化が大きいとの理由で実機への実装が見送られている。現在は、先行機とコンディショニング電源に実装され、試験運用でのみ使用している。黒抵抗器を実装した先行機は、主にサイクロトロンを受け入れ検査用として利用している。充電電圧は、20kV から 80kV まで定められた手順で徐々に上昇して行き、80kV (この際、エンドクリップ部では 40kV/2kA を吸収) で長時間の保持運転 (5~10 時間で合計 10 時間以上) を実施する。抵抗器を黒抵抗に交換した 2012 年度から 2015 年度の 3 年間では Figure 9 に示す割合で合計 906 時間の通電を実施した。

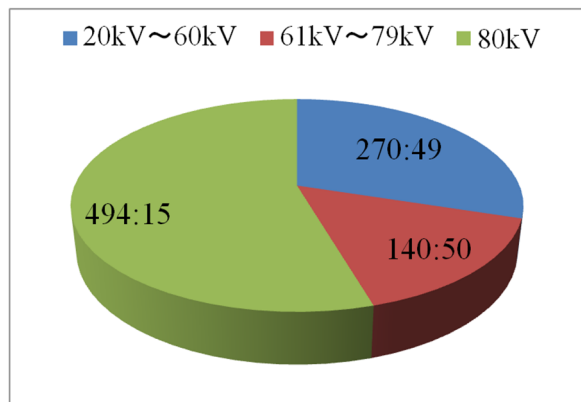


Figure 9: Distribution of the charging voltage. (total:906hour)

この結果、Figure 10 に示すようにマッチングロードの抵抗器 50 本に抵抗値の上昇が認められた。上昇の程度は、1%未満が 29 本、1%以上 2%未満が 7 本、2%以上が 14 本であった。最も抵抗値の上昇が認められた 1 本の上昇率は 11.73%で、これを除くと 49/50 本の変化率は 3.5%未満に収まる結果となった。何れの抵抗器も外観上の異常は認められなかった。なお、2015 年度の点検以降も 400 時間を超える通電を実施しており、2016 年度の点検でも抵抗値の測定を行い、黒抵抗器使用に関する経過を精査する予定である。

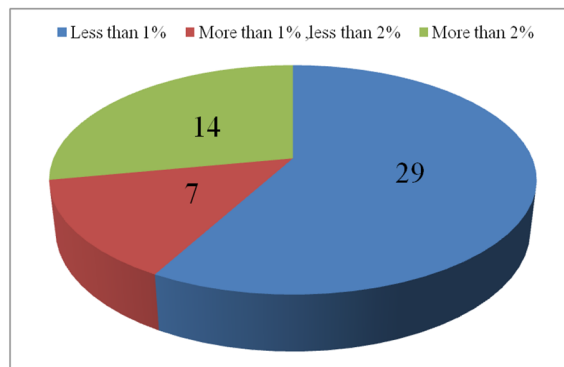


Figure 10: Distribution resistance value.

4. まとめ

キッカー電磁石電源は 2016 年度現在、日々の運転維持管理により 99.5%以上の稼働率で安定した運転を継続している。サイクロトロンも平均で 10,000 時間以上の使用が可能となっている。一方、老朽化に伴う懸案事項は以下の通り進める予定である。

- ・主回路冷却用のシリコン油については、水分量や全酸化値など精密な分析を行い、劣化原因の追及と再生方法の模索を進める。
- ・マッチングロード用抵抗器の代替品開発については、2016 年度中に耐久試験を開始してデータの蓄積を行う。

謝辞

抵抗器の開発にあたり、多大なご協力を賜りました東海高熱工業株式会社の皆様はこの場をお借りして厚く御礼申し上げます。また、キッカー電源の保守にご尽力頂いております株式会社 IDX の皆様にもこの場をお借りしまして厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] <http://j-parc.jp/index-e.html>
- [2] M.kinsho, "Progress and status of the J-PARC 3GeV RCS", Proceedings of IPAC2014, THPME064(2014).
- [3] J.Kamiya *et al.*, "THE EXTRACTION KICKER SYSTEM OF THE RCS IN J-PARC", Proceedings of 2005 Particle Accelerator Conference.
- [4] T.Togashi *et al.*, Proceedings of PASJ2012 WEPS042 (2012).
- [5] K.Suganuma *et al.*, Proceedings of PASJ2015 WEP078 (2015).