

J-PARC RCS におけるペイント入射用電磁石電源の高精度出力調整

PRECISE CURRENT ADJUSTMENT OF THE POWER SUPPLY FOR THE INJECTION PAINTING MAGNETS IN THE J-PARC RCS

加藤新一^{#, A)}, 高柳智弘^{A)}, 原田寛之^{A)}, 堀野光喜^{A)}, 飛田教光^{A)}, 植野智晶^{B)}, 金正倫計^{A)}
Shinichi Kato^{#, A)}, Tomohiro Takayanagi^{A)}, Hiroyuki Harada^{A)}, Koki Horino^{A)}, Norimitsu Tobita^{A)}, Tomoaki Ueno^{B)},
Michikazu Kinsho^{A)}

^{A)} JAEA/J-PARC

^{B)} Nippon Advanced Technology Co., Ltd.

Abstract

For the high intensity proton accelerator, the mitigation of the space charge force is most important because it causes the beam loss. For mitigation, the painting injection method which arranges the injection beam on the wide phase-space area during the multi-turn injection has been performed to expand the circulating beam in the J-PARC RCS. In the horizontal plane, the position and angle of the injection beam are fixed and these of the circulating beam are changed during the painting injection. Specifically, the time variation of the bump orbit height at the injection point is generated by the 4 paint bump magnets whose power supply are separated. Hence, the accuracy of the painting injection depend on the precision of the output current adjustment of the magnet power supplies. Therefore, the output characteristics of the power supplies were examined for the precise adjustment. In addition, the automatic adjustment tool has been developed based on that results.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設である Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)[1]は、400 MeV リニアック、3 GeV シンクロトロン(RCS)、50 GeV シンクロトロン(MR)の3基の加速器で構成される。これらは世界最高クラスの大強度陽子ビームを物質・生命科学、原子核・素粒子、ニュートリノの各実験施設に供給し、最先端の実験を可能にする。特に RCS は、ミュオン生成標的及び中性子生成標的へのビーム供給と、MR の入射器という二つの役割を担っており、リニアックから入射された陽子ビームを 20 ms で 3 GeV まで加速する。RCS は、陽子シンクロトロンとしては世界初の出力領域である、従来の陽子シンクロトロンと比較して 1桁大きい、1 MW のビーム出力を目指している。

陽子加速器では、出力はビームロス量によって制限される。なぜなら、ロスとなった陽子ビームは、真空ダクトや周辺の機器を放射化し、加速器のメンテナンスを困難にするからである。つまり、大強度出力を実現するためには、ビームロスを低減させることが最重要である。

大強度陽子加速器でのロスの起源の 1 つに、空間電荷力がある[2]。これは、ビーム自身が持つ電荷による反発力である。RCS では、空間電荷力を緩和するため、多重入射中にリニアックからの入射ビームを位相空間上の任意の範囲に意図的に広げて入射するペイント入射を行っている。Figure 1(A)に、水平方向のペイント入射の概要を示す。RCS は、リニアックからの H⁻ビームを入射点で陽子に荷電変換

して入射する。まず、電源を共有する 4 台のシフトバンパ電磁石(SB1-4)と個別の電源を持つ 4 台のペイント電磁石(PB1-4)によって、バンパ軌道を立ち上げる。リニアックからの入射ビームは、入射点に設置された第 1 荷電変換膜(1st Foil)で陽子に変換されて入射される。変換されなかった H⁻ (図中の橙)、H⁰ (図中のピンク)は第 2、第 3 荷電変換膜で陽子に変換されてダンプに導かれる。多重入射回数は 307 周回、入射時間は 500 μs である。ペイント入射では、多重入射中に入射ビームの軌道はそのままに、4 台のペイント電磁石の出力を落としていくことで、周回軌道を徐々に立ち下げていく。その結果、Figure 1(B)に示すように、入射ビームは水平方向の位相空間上の広い範囲に配置され、空間電荷力の緩和された幅の広いビームが形成される。周回軌道は、入射ビームを位相空間上の楕円に一樣に配置するため、位置と傾き共に $x(\text{or } x') = A\sqrt{t}$ (A は任意定数) の時間変化をさせている。ペイント入射では、周回軌道が荷電変換膜から離れていくため、周回ビームが膜で散乱されることによるビームロスを抑制する効果もある[3]。一方、垂直方向のペイント入射は、入射ラインに設置されている 2 台の電磁石によって、入射点で入射ビームの傾きを直接、時間ごとに変化させることによって行っている。

ペイント入射の精度は、ペイント電磁石電源の出力電流の調整精度で決まる。出力電流が意図した時間変化から逸脱した場合、所定のペイントエリアに入射ビームを配置できない。また、4 台のペイント電磁石の出力バランスが崩れた場合には、閉軌道変動が生じてフィジカルアパーチャが減少する。このため、ペイント電磁石電源に対する高精度の出力調整が必須である。さらに、ビーム調整の効率化や、

[#] skato@post.j-parc.jp

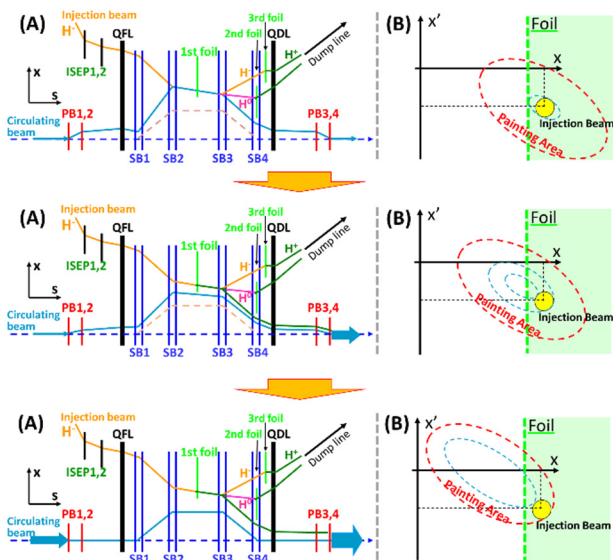


Figure 1: The schematic drawing of the horizontal painting injection process. (A) shows the orbits of the injection and the circulating beam in the horizontal plane. (B) shows the phase-space at the injection point of the ring.

新しいペイント時間変化パターンの導入に対応するために、調整時間の大幅な短縮化が求められている。そこで、ペイント電磁石電源の出力特性を詳細に把握し、自動化可能な高精度出力調整手法の開発を行った。

この論文では、最初にペイント電磁石電源の概要を述べる。次に、電源の出力応答特性の測定と結果について述べる。最後に、今回開発した出力応答特性を用いた高精度出力調整手法について述べる。

2. ペイント電磁石電源の概要

2.1 電源の構成

ペイント電磁石電源は、スイッチに IGBT を用いた 4 象限チョッパ回路 (フルブリッジインバータ)

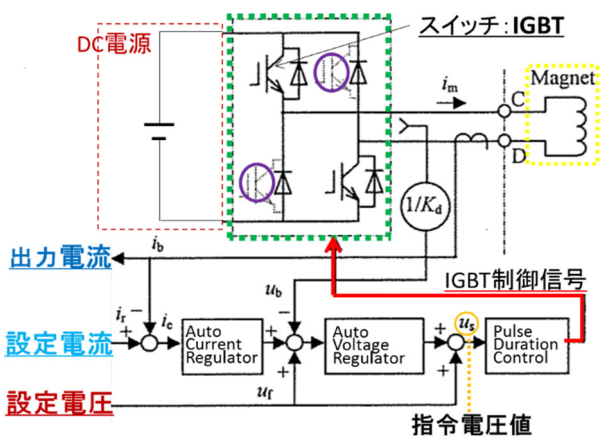


Figure 2: The schematic diagram of the power supply.

となっている。Figure 2 に概要を示す。供用運転時は、図に紫円で示す 2 つの IGBT を切り離して 2 象限チョッパ回路とし、電磁石に対して 1 方向の電流のみ流れるようにしている。図では省略しているが、C 側、D 側のチョッパアセンブリはそれぞれ 18 並列で構成され、3 並列ごとに共通の IGBT 制御信号が接続させている。詳細は[4]に述べられている。定格出力は 20 kA である。

Figure 3 に、Figure 2 に示した設定電流、設定電圧、出力電流の実際の時間構造 (波形) を示す。また、設定電流と出力電流の差 (出力電流偏差) を示す。ペイント電磁石電源では、出力したい電流の時間変化パターンを設定電流として指定する。Figure 3 の設定電流は、入射開始時間 $T_{inj} = 0$ から $\sqrt{1 - (t/500 \mu s)}$ の時間変化で減少させている。また、 $T_{inj} = 0$ 付近での電流変化率が電源の許容電圧を超えないように、 $T_{inj} = 0$ から 88 μs 間は時間に比例した減衰パターンとなっている。

出力電流は、指令電圧値を変換した IGBT 制御信号によってアナログ制御される。この制御信号は、電流フィードバックと電圧フィードフォワードによって生成される。制御回路は、電流フィードバックとして、出力電流が設定電流と一致するように連続的に指令電圧値を決定し、IGBT 制御信号を生成する。しかし、電流フィードバックの応答時定数は 20 μs 程度であるため、今回のように入射時間 500 μs の短い時間で電流値が連続的に大きく変化する場合、出力電流の設定電流からの逸脱が生じる。そこで、電圧フィードフォワードとして、設定電流波形に基づいて負荷回路全体のインダクタンスと抵抗から求められる電圧 (設定電圧) を制御回路に直接投入している。

2.2 出力電流の調整手法

ペイント電磁石電源の出力電流の調整では、電圧フィードフォワードに使用している設定電圧の調整、

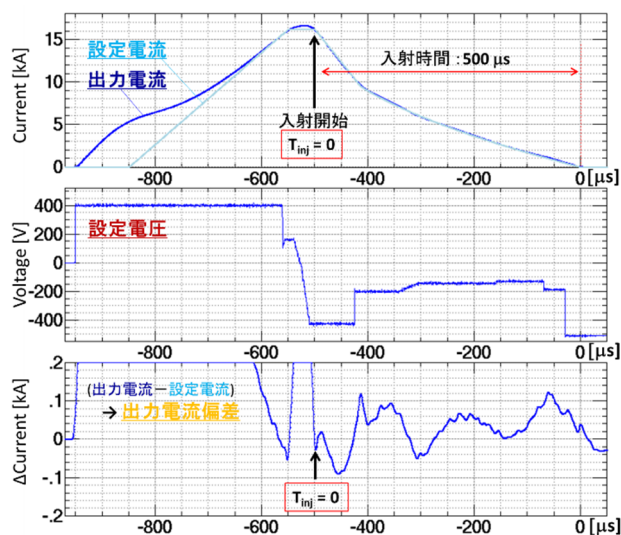


Figure 3: The wave forms of the set and output currents (top), set voltage (center) and the current deviation (bottom).

最適化を行う。まず、単純な $V = L_m(di/dt) + R_m i$ (L_m , R_m はそれぞれ負荷回路全体のインダクタンスと抵抗) の式より求めた設定電圧を用いて通電し、出力電流を得る。そして、出力電流偏差が 0 となるように設定電圧の一部を変化させる。これを繰り返し行うことで、出力電流偏差を最小化していく。

今までは、出力電流偏差を目視で判断し、手動で設定電圧の調整を行っていた。そのため、調整には 1 台当たり数時間かかっていた。また、設定電圧に対する出力電流の正確な応答が把握できておらず、調整精度に限界があった。具体的には、調整精度は ± 100 A 程度であり、これはリング全周にわたって最大で ± 5 mm 程度の閉軌道変動を新たに引き起こしていた。

3. 設定電圧に対する出力応答特性の測定

3.1 出力応答特性の測定手法

高精度出力調整に向けて、設定電圧の変化量に対する出力電流の応答を測定した。応答を明確に得るために、測定は定電流の領域で行った。具体的には、Figure 4(a), (b)の青線で示すような、定電流の領域が長い波形(台形波形)を設定電圧、出力電流共に基準波形として用いた。この基準波形は、出力電流誤差が ± 100 A 以内に調整されている。この波形に対して、Figure 4(b)の赤線に示すような、 ΔV の設定電圧変化を ΔT_v の間付加した時の出力電流の応答を測定した。出力電流、設定電圧と基準波形との差分を Figure 4(c), (d)に示す。ここで ΔI , ΔT_I は、それぞれ電流差分のピーク値と、ピーク値に至るまでの時間である。 ΔV が 0 になると、電流フィードバックの

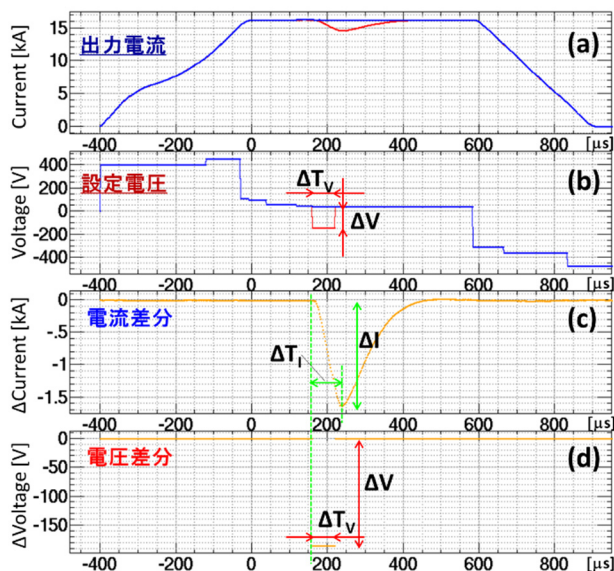


Figure 4: The reference wave form and the parameter definitions for the measurement of the output current response. The blue lines show the reference wave forms. The red lines show the modified wave forms. (a), (b), (c), (d) show the output current, set voltage, current difference and the voltage difference, respectively.

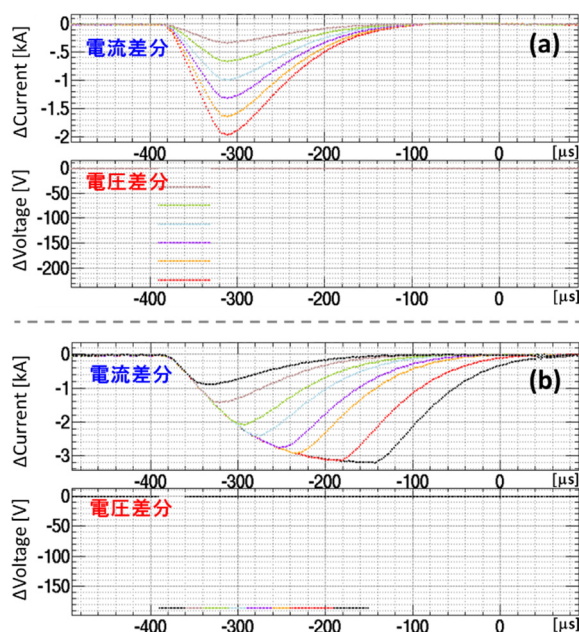


Figure 5: The examples of the output current responses. (a) shows the responses when ΔV is modified. (b) shows the responses when ΔT_v is modified.

効果により ΔI も 0 に収束する。

設定電圧変化による出力電流応答のいくつかの例を Figure 5 に示す。Figure 5(a)のように ΔV を増やすことで ΔI が増加すること、Figure 5(b)のように ΔT_v を伸ばすことで ΔT_I が増加し ΔI が増加することが分かる。加えて、Figure 5(b)より、 ΔT_v が長くなると、電流フィードバックの効果により ΔI の増加が抑制されることも分かる。

3.2 出力応答特性の測定結果

ここでは、PB1 に接続されているペイント電磁石電源の測定結果を示す。まず、 ΔT_v に対する ΔT_I の応答を Figure 6(a)に示す。また、 ΔT_v に対する $(\Delta T_I - \Delta T_v)$ の応答を Figure 6(b)に示す。 $(\Delta T_I - \Delta T_v)$ は、 ΔV が 0 となってから電流差分がピークを迎えるまでの時間的な遅れである。また、それぞれ ΔT_v

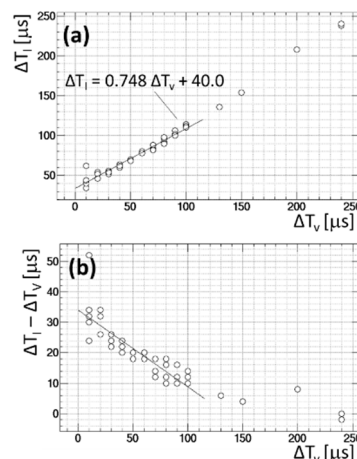


Figure 6: The relations between ΔT_I and ΔT_v .

< 120 μs の領域を直線でフィッティングした結果を示す。Figure 6(a)より、 ΔT_1 は ΔT_V に比例して増加している。一方で Figure 6(b)より、 ΔT_V の増加に比例して ($\Delta T_1 - \Delta T_V$) が減少していくことが分かる。これは、 ΔT_V が長い場合、 ΔV が 0 となった時点で電流フィードバックが直ちに作用するからである。このため、Figure 6(a)に示す ΔT_V に対する ΔT_1 の増加率は 1 ではなく、約 0.75 となっている。また、応答の線形性は $\Delta T_V < 120 \mu\text{s}$ の領域となっている。

次に、 ΔV に対する ΔI の応答をまとめたものを Figure 7(a)に示す。この結果、 ΔV に対する ΔI の応答が線形であることが確認できた。また、 ΔT_V に対する $\Delta I/\Delta V$ の応答を Figure 7(b)に示す。 ΔT_V が長い場合には、 ΔV が 0 となった時点で電流フィードバックが直ちに作用し ΔI が抑制されるため、この応答は線形でない。しかし、2 次関数でフィッティングすることで、任意の ΔT_V での $\Delta I/\Delta V$ を得ることが可能になった。

また、異なる出力値の基準波形を用いた応答測定と、基準波形として通常のペイント波形を用いた応答測定を行った。この結果、Figure 7(a)と同様の応答が得られた。つまり、今回得た応答は電流波形の形状、出力値にほとんど依存しないことが分かった。このため、今回得た応答は任意の設定電流波形の調整に使用できると判断した。

ΔT_V に対する ΔT_1 の応答、 ΔV に対する ΔI の応答測定は、磁石の細かな形状差、電源の個体差を加味するため、4 台のペイント電磁石電源に対して個別に行った。

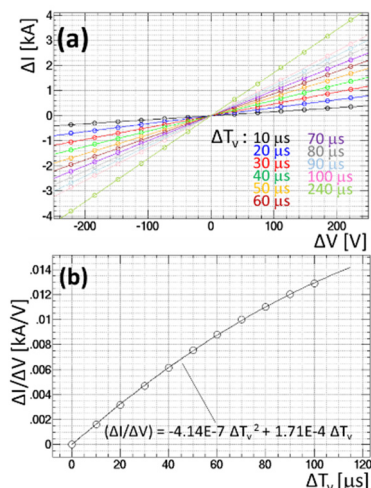


Figure 7: The relations between ΔI and ΔV for the several ΔT_V .

3.3 回路全体のインダクタンスと抵抗の測定

出力調整では、初期の設定電圧として、単純な $V = L_m(di/dt) + R_m i$ の式より求めたものを用いる。そのため、 L_m と R_m が正確に把握できていない場合、初期の出力電流偏差が大きくなり調整が困難となる。ここで必要としている L_m 、 R_m は、制御回路に付加する設定電圧値に対するものである。今までは、電磁石本体やケーブルといった回路の負荷側のみを直

接測定した値を用いていたため、正確ではなかった。そこで、複数の設定電圧値(V)で出力電流(i)を測定し、出力電流の時間微分(di/dt)を算出した。そしてこれらの結果から得られる連立方程式によって L_m と R_m を算出した。この測定は、電流フィードバックの効果をできる限り排除するため、出力電流偏差が少ない時間領域で行った。Table 1 に測定結果をまとめる。PB-2 と PB-3 の電源、磁石形状は同じであるため、この 2 つの L_m 、 R_m は近い値になっている。また、PB-1 と PB-4 は、磁石形状は同じであるが、電源内部の IGBT 並列数が異なっているため、この 2 つの L_m 、 R_m は異なっている。

Table 1: Inductance and Resistance

PB No.	L_m (μH)	R_m ($\text{m}\Omega$)
PB-1	6.43	4.63
PB-2	5.39	7.48
PB-3	5.42	7.29
PB-4	5.85	8.24

4. 高精度出力調整

4.1 設定電流波形の改良

今回の高精度出力調整において、設定電流波形の改良も合わせて行った。今までは、Figure 3 に示すようなビーム入射の直前に 50 μs の一定出力領域を持つ波形を用いており、 $T_{inj} = 0$ の手前で意図的に設定電流から逸脱させた出力電流調整をしていた。これは、 $T_{inj} = 0$ にある変曲点での出力電流の逸脱を防ぐためであった。しかし、この逸脱によって生じる電流フィードバックが $T_{inj} = 0$ 直後に影響を及ぼし、Figure 3 に示すように波打った出力電流偏差を生じさせていることが分かった。そこで、今回の高精度出力調整では、波形の立ち上がり部分と立下り部分を 4 次関数で滑らかにつないだ新しい設定電流波形を用いた。波形形状は、以下の出力調整結果の項で示す。

4.2 自動出力調整手法の開発

出力調整を高精度に、かつ短時間で行うため、測定した出力応答を用いた自動出力調整手法を開発した。この手法では、2 つの異なった調整手順を組み合わせた。

手順 1 は、出力電流偏差の傾きを連続的に判定し、それを平滑化するものである。まず、時間幅 100 μs 分の出力電流偏差のデータ点を直線でフィッティングし、この直線の傾きを出力電流偏差の傾き ($\Delta I/\Delta t$) とする。データ点の時間ステップが 2 μs であるので、フィッティングも 2 μs ずつずらしながら連続的な傾きの変化を求める。そして、Figure 7 から得られる $\Delta T_V = 2 \mu\text{s}$ の時の $\Delta I/\Delta V$ の値 ($\Delta I/\Delta V$)_{2 μs} を用いて、($\Delta I/\Delta t$) $\times 2 \mu\text{s} = (\Delta I/\Delta V)$ _{2 μs} $\times \Delta V$ _{補正量} から ΔV _{補正量} を得る。そしてこれを 2 μs 毎に設定電圧に付

加する。この手順では、設定電圧を滑らかに保ったまま出力電流を補正することが可能である。しかし、この手法のみでは、出力電流偏差に生じる $100 \mu\text{s}$ 以下の幅の凹凸に対して調整ができない。そのため、以下に示す2つ目の手順が必要となる。

手順2は、出力電流偏差の凹凸を自動判定してから、平滑化するものである。Figure 8に概要を示す。まず、時間幅数 $10 \mu\text{s}$ の出力電流誤差のデータ点を直線でフィッティングする。これは手順1と同様に、 $2 \mu\text{s}$ ずつずらしながら全時間領域で行う。そして、フィッティングした直線の傾きの符号が変化した地点を凹凸として判定する。また、平坦区間も判定する。次に、この凹凸をそれぞれ傾き $\Delta I / \Delta T_1$ の直角三角形として近似する。そして、 ΔT_1 に対応する ΔT_V と、 ΔI に対応する ΔV を出力応答から求め、設定電圧に付加する。この手順により、設定電圧に凹凸が生じてしまうものの、出力電流偏差に生じる数 $10 \mu\text{s}$ 幅の細かい凹凸に対して調整が可能である。

高精度調整では、まず手順1による出力電流補正を複数回繰り返す、その後手順2を繰り返すことによって出力電流偏差を最小化した。

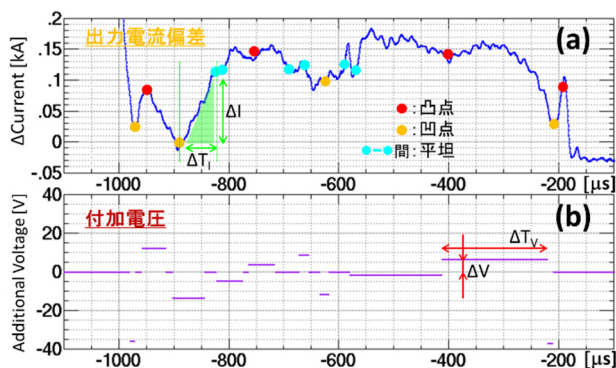


Figure 8: The correction method. (a) shows the automatic peak search result. (b) shows the calculated additional voltage.

4.4 出力調整結果

Figure 9に、今回開発した手法を用いて行ったPB1用電源の高精度出力調整の結果を緑色で示す。また、以前の出力調整後の波形も青色で示す。調整では、今回新たに測定した L_m と R_m から算出された設定電圧を初期値として用いて、前項で述べた手順1を10回、手順2を7回繰り返した。Figure 9に示す通り、新しい設定電流波形の採用によって、波形の立ち上がり段階から連続して出力電流偏差を抑制できた。結果として、出力電流偏差を $\pm 50 \text{ A}$ 以下に調整することが出来た。また、調整にかかった時間は30分以下であった。

出力電流偏差を $\pm 50 \text{ A}$ より追い込めなかった原因は、電磁石電源の1サイクル毎の出力のふらつきが $\pm 50 \text{ A}$ 程度あるからである。そこで現在、予備電源を用いた、ふらつきの抑制試験が行われている。また、出力電流偏差を数10サイクルの平均値として速やかに取得するための制御系の構築をしている。最

終的には、閉軌道変動が $\pm 1 \text{ mm}$ 以下となる、 $\pm 20 \text{ A}$ 以下の出力電流偏差を目指す。

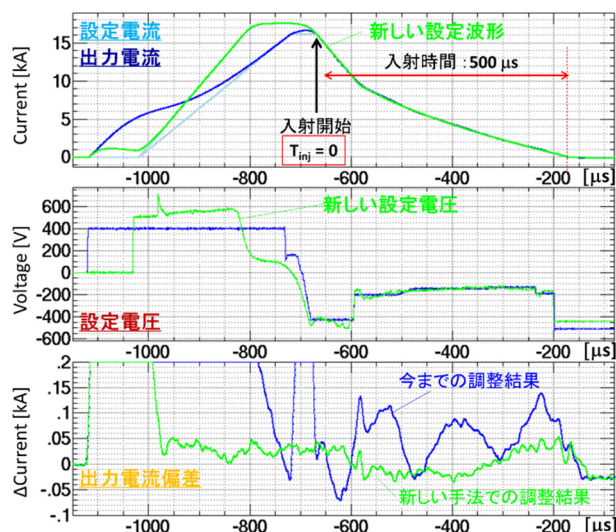


Figure 9: The results of the current adjustment. The blue lines show the previous pattern and the adjustment result. The green lines show the developed pattern and the adjustment result.

5. まとめ

RCSにおけるペイント入射の高精度化や多重入射中の閉軌道変動の抑制のために、ペイント電磁石電源の高精度出力調整手法の開発を行った。主に設定電圧値によって制御される電磁石電源において、設定電圧値に対する出力応答を測定した。また、設定電流波形の改良、制御系を含めた回路全体のインダクタンス、抵抗の測定も合わせて行った。これらの測定結果を用いた自動出力調整手法を考案し、実証試験を行った。その結果、今まで $\pm 100 \text{ A}$ 程度あった出力電流偏差を $\pm 50 \text{ A}$ 以下に抑制することに成功し、高精度出力調整手法を確立できた。また、今まで数時間かかっていた調整時間も30分以下に抑制できた。これにより、新しいペイント入射の時間変化パターンを短時間で精度よく作成することも可能になった。

今後は、調整手順のさらなる自動化によって調整時間を10分程度まで短縮し、秋以降のビーム調整試験から本手法を運用することを目指す。また、様々な出力において電荷密度を均一化するために、出力に応じた新しいペイント入射の時間変化パターンの考案、検証を行っていく。

参考文献

- [1] Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Facility Project, JAERI Report No. JAERI-Tech 2033-004 and KEK Report No. 2002-13.
- [2] H. Hotchi, the text of the high-energy accelerator seminar (OHO'2010) (2010).
- [3] H. Harada, KEK Report No. 2009-7.
- [4] T. Takayanagi, et al., "高精度大電流パルス励磁電源の開発", 電気学会, 電学論D, 127巻8号 (2007).