

POWER SAVING TOP-UP OPERATION OF THE SPRING-8 BOOSTER SYNCHROTRON

Tsuyoshi Aoki #, Kenji Fukami, Chikaori Mitsuda, Hiroyuki Kanadani, Hiroto Yonehara
JASRI/SPring-8, 1-1-1 Kouto, Sayo, Sayo-gun, Hyogo 679-5198

Abstract

The SPring-8 storage ring accumulates an electron beam of 100mA by the top-up beam injection. We improved the excitation sequence of the magnets of the booster synchrotron during the top-up operation to reduce the power consumption. The magnet power supplies stand by DC corresponding to 1GeV during no beam and operate 1-8GeV pattern excitation intermittently when the beam ejection. The power consumption of the magnet system has decreased to 1/5 by this power saving method. We describe the points of improvement about the magnet system and report the machine performance during the economical operation.

SPring-8 ブースターシンクロトロンの省電力 Top-up 運転

1. はじめに

SPring-8 の蓄積リングはトップアップ運転により 100mA の蓄積電流をキープしながら一定強度の放射光の供給を行っている^[1]。入射器のブースターシンクロトロンは、100mA までの蓄積電流の積み上げ時は 1Hz の繰り返しでビーム入射を行い、トップアップ運転時は蓄積電流が減少したときのみ間欠的にビーム入射を行う^[2]。蓄積電流の電子寿命はフィリングパターンによって異なるため、ビーム入射は 20 秒~1 分間隔で行われる。これにより、蓄積電流値の変動幅は 0.03mA 以下、光源強度安定度は 3×10^{-4} を達成している。

数年前まで、トップアップ運転時にブースターの電磁石電源（偏向、四極、六極電磁石用）は蓄積リングへのビーム入射の有無にかかわらず、エネルギーのランプアップのための 1-8GeV に相当する台形状のパターン励磁を行っていた。近年の省エネルギーや CO2 排出削減の必要性より、我々は使用電力の削減を目的とし、ブースターにおける電磁石の通電を制限した運転方法を考案し、実運転への適用を試みた。この省電力運転では、トップアップ運転時のビーム入射以外において、エネルギーのランプアップのための電磁石パターン励磁停止の方法がメインとなる。本報告では省電力運転を実現するための各機器の改造内容、及び省電力運転によるビーム性能劣化に関する問題点とその解決法について記述する。さらに昨年度よりユーザー運転中に省電力運転の適用を行っており、その状況について報告する。

2. 省電力運転のための機器の改造

2.1 電磁石電源の間欠運転化

SPring-8 ではトップアップ運転の実施以前は 1 日 2 回の定時入射を行っており、定時入射時以外の入射器の主要機器は定格出力以下のスタンバイ状態としていたため、大きな電力消費は生じなかった。

トップアップ運転の実施に伴い、入射器も 24 時間の運転状態となり電力消費は大幅に増加した。蓄積電流の電子寿命は実験に用いるフィリングパターンに依存するため、トップアップ運転時のビーム入射は約 20 秒~1 分間隔となる。このビーム入射を行わない間に入射器をスタンバイ状態とすれば省電力化となることは明かであったが、機器の動作安定性やビーム性能の安定化を優先して常時ビーム運転状態を継続していた。

ブースターでは省電力化の一方法としてビーム入射時以外の機器の一時停止の検討を行ってきた。電磁石電源（偏向、四極、六極電磁石電源）は磁場の再現性を得るため、ビームの入出射に関わらず、常時 1Hz の繰り返しで 1-8GeV のパターン励磁状態としていた。電磁石電源は運転状態・スタンバイ状態の切り替えが比較的容易であるため、消費電力の削減には最も効果的であると判断して、ビーム運転時のみパターン出力を行う間欠的な運転に向けての最適化を行った。

電磁石電源のパターン励磁は外部トリガーをパターン出力スタート信号として取り込み、VME のメモリーに記録された電流と電圧パターンを設定値として励磁電流を出力する。パターン出力スタート信号は SPring-8 全体の 1Hz 繰り返し信号と商用電源の 60Hz に同期しており、ブースター全体のタイミングを司るタイミングシステムから出力される。パターン励磁の停止はスタート信号の停止で容易に行えるため、タイミングシステムのトリガー信号出力の ON/OFF 指令の変更のみで実現可能である。電磁石電源へのパターン出力スタート信号が入力されない場合、電源は 1GeV 相当の DC 励磁を行ったままとなり、実質的にはスタンバイ状態が得られる。

2.2 タイミングシステムの変更

SPring-8 加速器全系のタイミングシステムでは線形加速器の電子銃トリガーのタイミングを制御し、電子ビームを蓄積リングの指定したバケットに入射することが可能である。さらにタイミングシステムはトップアップ運転時に蓄積電流を 100mA にキープ

aoki@spring8.or.jp

ブするよう、入射器に対して減少した電流を継ぎ足すためのビーム入射指令を送信する。タイミングシステムの入射指令は、電子寿命から予め入射時刻を計算しておき、その時刻にビーム入射を行うこととしている。現在、トップアップ運転は蓄積電流がある閾値(通常は 99.5mA)を下回らないように、電流値を優先した随時入射モードで行われている。

ブースターのタイミングシステムではビーム入射予定時刻に電磁石電源へパターンスタート信号を出力し、ビーム入射の間だけパターン励磁を行う間欠的な運転を行うようロジック変更を行うこととなる。タイミングシステムでは CPLD (Complex Programmable Logic Device)を用いており^[1]、トリガー信号出力のロジック変更が容易に行えるという特徴があるため、電磁石電源の間欠運転への適応は容易に行うことが可能であった。

3. 間欠運転による問題点

3.1 電磁石の磁場強度再現性

電磁石電源の間欠運転を行う場合では連続で励磁を行う場合と異なり、スタンバイ状態からパターン励磁を開始した後のショット毎の磁場強度の再現性が問題となる。電磁石のパターン励磁のショットごとの磁場強度が一定値に達するまでには数ショットの予備励磁(空打ち)が必要であることをビームのベータートロンチューンの変化により確認した。パターン運転開始後の3ショット分の垂直方向ベータートロンチューンの変化の様子を図1に示す。

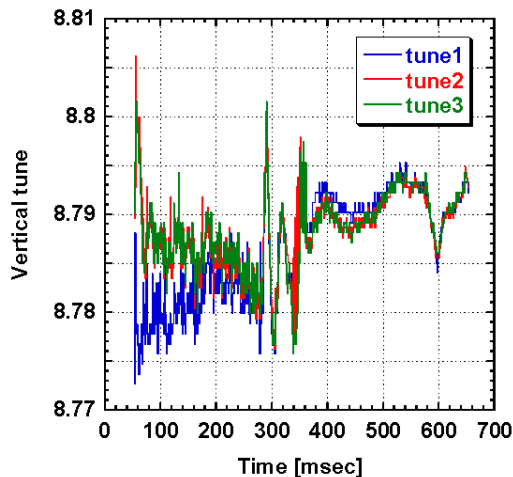


図1：電磁石電源スタンバイからビーム運転開始直後のチューンの変化

最初の1ショットのチューン(tune1)以外はほぼ一定値に落ち着くことがわかる。このため、ビーム運転での磁場再現性を得るには、最低でも1ショットの空打ちが必要であるといえる。この結果をもとに、安定度の余裕を見込み、3ショットの空打ちで十分な磁場再現性が得られると判断した。タイミングシステムからはビーム出射予定時刻の3秒前にパターンスタート信号を送信するように再設定を行った。さらに、空打ち回数は任意の値を設定可能とし、

トップアップ運転時以外の運転モードでは常に連続運転となるような設定とした。これにより、トップアップ運転時の間欠的なパターン励磁状態でも十分な磁場再現性が得られることを確認した。

3.2 間欠運転によるバンチ純度の悪化

ブースターシンクロトロンでは、蓄積リングで高いバンチ純度の孤立バンチを蓄積するために RFKO 法による単バンチの純化を行っている^[4]。RFKO システムは 1GeV のエネルギーで入射された単バンチに対して垂直方向のベータートロン振動に共鳴する周波数で約 250ms の間において垂直方向のキックを行い、放射光実験のノイズ源となる不要なバンチの除去を行う。メインバンチは RFKO 信号がゼロクロスするタイミングと同期したバケットに入射され、キックの影響を受けることはない。これにより、SPRING-8 はあらゆるフィリングパターンにおいて高いバンチ純度を達成できるという特徴を持っている。

ところが、孤立バンチを有するフィリングパターンにおいてブースターの間欠運転を適用したところ、ユーザーの実験に大きく影響を及ぼす程度のバンチ純度の悪化が発生した。調査の結果、間欠運転の開始後にブースターにおいてチューンの変動が発生し、RFKO 周波数との共鳴のずれが大きくなることによりバンチ純化効率が低下していることがわかった。このため初期の段階において、間欠運転は高いバンチ純度を必要としないマルチバンチトレインのフィリングパターン以外には適用できなかった。

4. 間欠運転によるビーム性能低下の抑制

4.1 電磁石・電磁石電源の冷却水温度一定化

バンチ純度の悪化につながるチューン変動の主な原因の一つとして、連続・間欠運転の切り替えによる電磁石通電時間の変化が電磁石及び電磁石電源の機器温度の変化となり、数時間単位の長期的な励磁電流の変動に至ったと考えられる。恒常的に間欠運転を適用するためには、間欠・連続の運転状態にかかわらず機器の温度を一定に保つことが重要であると考え、機器冷却設備の改造を行うこととした。

ブースターの冷却設備は1台の冷却塔を有する二次冷却系に対し、熱交換器を介して一次冷却系が各機器に接続される構成となっている。間欠運転実施以前の電磁石及び電源系の一次冷却水は機器の熱負荷が常に一定であったため、特別な温度制御の必要がなかった。ところが、間欠運転の実施により各機器が過冷却となり、電磁石系で 4.0℃、電源系で 2.4℃の一次冷却水温度の低下が発生した。電磁石・電源系の温度制御系の追加改造は、二次系冷却水の熱交換器への流入流量を調整することにより、連続・間欠の運転状態の切り替えにかかわらず、一次側の冷却水温度を一定に保つようなフィードバックシステムを導入することとした。図2に冷却設備の改造に関する概略図を示す。一時冷却水温度の目標値は、電磁石系：33.0±0.2℃、電磁石電源系：32.0±0.2℃、連続・間欠切り換え後の温度安定に要する時間はそれぞれ20分以内とした。

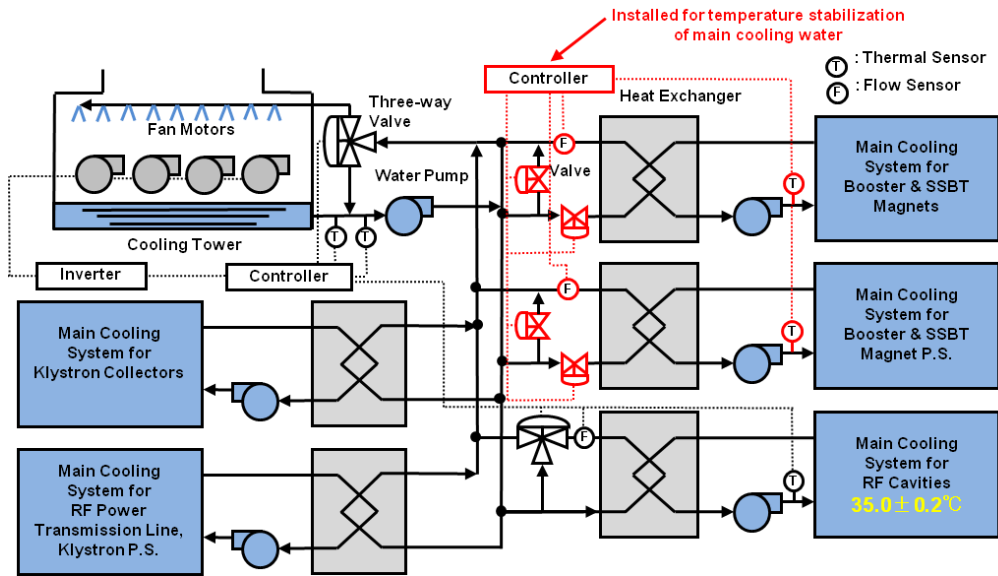


図2：ブースターシンクロトロン機器冷却設備改造の概略図

図中の赤で示した部分が改造箇所である。温度調整は電磁石系及び電磁石電源系の一次冷却水温度をモニターし、二次系の熱交換器への冷却水流入量を二方弁にて制御する方式である。高周波加速空洞の冷却系に関しては、加速用高周波の高次モード(HOM)抑制のための温度調整機構が組み込まれており、今回の改造による影響が及ぶことはなかった。

この温調化の改造により、電磁石の通電時間の違いによる機器の温度変化を抑制し、励磁電流の変化量を減少させることが可能になった。一例として収束四極電磁石電源について、冷却設備改造前後にお

ける連続・間欠運転の切り替え時の1GeVフラットボトムでの励磁電流の変化の様子を図3に示す。改造前の連続・間欠切り替え時の変動量の平均値-0.017Aを改造により-0.003Aにまで減少することができた。測定に用いたDCCT (HITEC社製TOPACC 2000シリーズ)の精度は1.5ppm/Kであり、制御部は1°C以下で温調を行う恒温槽に収納されている。測定値のばらつきはA/D変換までのノイズの影響と思われる。電磁石電源が定電流電源でありながら、負荷温度の変化により出力電流が変化するメカニズムについては今後詳細な解析を行う予定である。

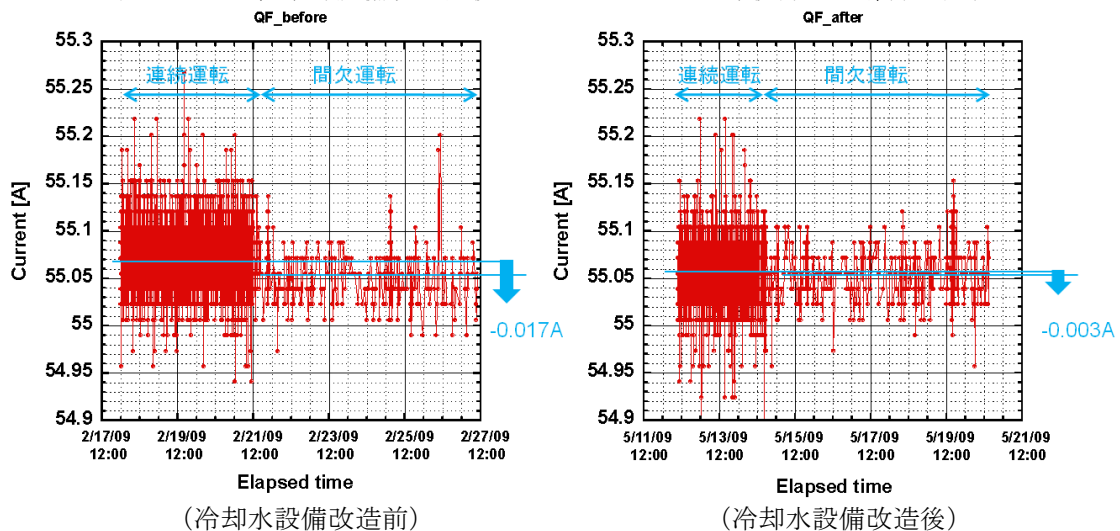


図3：収束四極電磁石電源の連続・間欠運転切り替え時のフラットボトム(1GeV)励磁電流の変化

4.2 バンチ純度悪化の抑制結果

高いバンチ純化効率を保つようにRFKO周波数とチューンの共鳴をキープするためには、1GeVフラットボトムでの垂直方向のチューンの変化量を $\Delta v_y = \pm 0.002$ 以内に抑える必要があることが過去に行ったスタディにより確認されている。図3で行っ

た連続・間欠運転切り替え時の偏向・四極電磁石電源の励磁電流測定結果を表1にまとめた。冷却水設備改造前後での各電源の1GeVフラットボトムにおける平均電流と運転切り替え時の変化量、並びに各四極電磁石の励磁電流変化量から予想される垂直方向のチューンシフトを表に示す。この結果より、改造前のチューンシフトは $\Delta v_y = \pm 0.002$ の範囲を超えて

おり、バンチ純度悪化の可能性が十分にあったこと、さらに改造後にはチューンシフトがバンチ純度に影響のない程度に十分減少していることがわかる。

表 1：冷却設備改造前後における各電磁石の励磁電流値の変化量及び予想されるチューンシフト

		1GeV フラットボトム平均電流 [A]			QF,QDの変化量より 予想される チューンシフト Δv_r
		収束四極	発散四極	偏向	
改造前	連続	55.072	47.443	169.94	-0.00213
	間欠	55.055	47.433	169.86	
	変化量	-0.017	-0.01	-0.08	
改造後	連続	55.057	47.435	169.90	0.00052
	間欠	55.054	47.436	169.88	
	変化量	-0.003	+0.001	-0.02	

また、冷却設備の改造後に行った定期的なチューン測定の結果、電磁石の通電時間に関係なくチューンの変化量は全幅で 0.0013 程度に抑えられていることを確認した。これにより、蓄積リング中の孤立バンチの純度を悪化させることなく間欠運転によるトップアップ入射が可能であると判断した。

間欠運転を適用した 2009 年 9 月からの第 4、第 5 サイクルのユーザー運転中のバンチ不純度（メインバンチに対する割合）の変化を図 4 に示す。赤が孤立バンチの前方、緑が後方のバケットの不純度を表す。途中の段差はフィリングパターンの変更による孤立バンチの電流値の違いによるものであり、これらの期間中ではバンチ純度の悪化は見られていない。

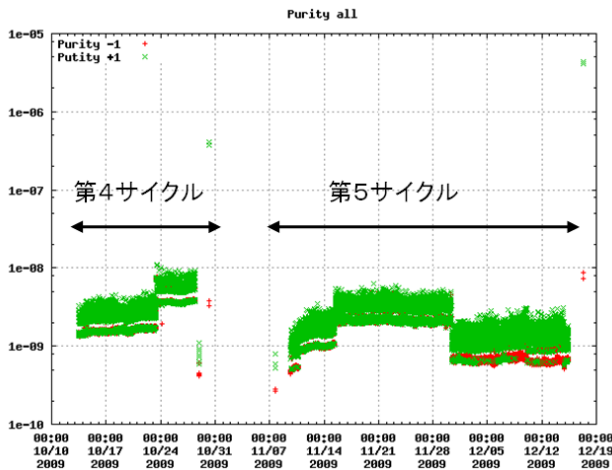


図 4：ユーザー運転中のバンチ不純度の変化

5. 電力量の削減結果

2009 年 9 月 30 日開始のユーザー運転より、あらゆるフィリングパターンにおいて間欠運転の適用を行った結果、電力量の大幅な削減が可能になった。図 5 に間欠運転の有無による偏向電磁石電源の 1 ヶ月間の電力量の比較結果を示す。間欠運転を行っていない 2008 年 10 月を青線、間欠運転適用後の 2009 年 10 月を赤線で示す。電力量の段差状の変化はフィリングパターンの変更による入射間隔の変化、

スパイク状の増加はビーム入射によるものである。トップアップ運転中の電力量は連続運転時と比較して、最大で 1/6 まで減少していることがわかる。

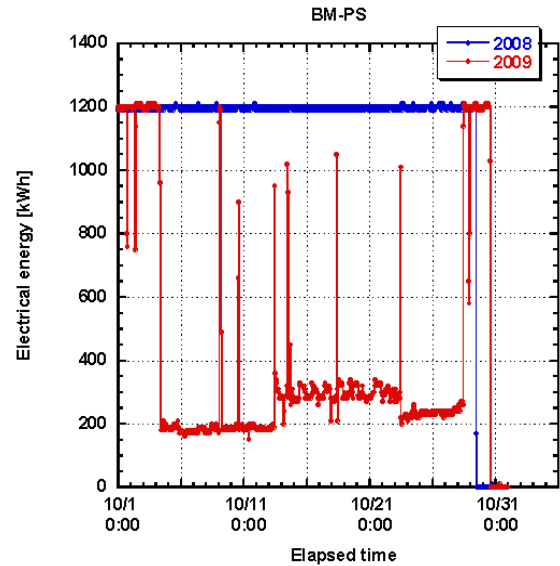


図 5：偏向電磁石電源の一ヶ月間の電力量の変化

表 2 にビーム調整やマシンスタディを含む一月間の電力量（1 時間当たりの平均値）を示す。この結果、間欠運転により年間で約 1/2～1/3 程度の電力消費の削減が期待できることがわかる。

表 2：間欠運転の有無による電力量の比較

	平均使用電力量 (kWh)		
	偏向電磁石	四極電磁石	合計
2008年10月(間欠なし)	1097.2	276.5	1373.7
2009年10月(間欠あり)	408.3	115.2	523.5

6. まとめ

2009 年 9 月よりブースターの省電力化を目的とする電磁石電源の間欠運転を開始した。この結果、電力量を従来の 1/2 以下にまで削減しながらもユーザー運転に支障のない高いバンチ純度のビームを供給することが可能となった。

参考文献

- [1] H. Tanaka, et al., "Top-up Operation at SPring-8 - Towards Maximizing the Potential of a 3rd Generation Light Source", Proc. of the 9th European Particle Accel. Conf., Lucerne, 2004, p.222.
- [2] M. Takao "SPring-8 加速器運転の現状", 第 5 回日本加速器学会年会第 33 回リニアック技術研究会報告集 (2008), p.13.
- [3] N. Hosoda, et al., "Reconfigurable Timing Controller using PLDs", Proc. of the 9th International Conference on Accelerator & Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS03), Gyeongju, Korea, (2003) 13 Oct.
- [4] T. Aoki, et al., "Bunched Beam Cleaning System of SPring-8 Booster Synchrotron", Proc of the 2003 Particle Accelerator Conference (PAC03), Portland, USA, (2003) 12 May.