

SAGA-LS 電子蓄積リング入射不調要因の特定

INVESTIGATION OF THE PRIMARY FACTOR IN THE INJECTION TROUBLE AT THE SAGA-LS STORAGE RING

岩崎能尊[#], 高林雄一, 金安達夫, 江田茂

Yoshitaka Iwasaki[#], Yuichi Takabayashi, Tatsuo Kaneyasu, Shigeru Koda

SAGA Light Source

Abstract

Normally the time of beam injection to the storage ring is around 3 minutes to accumulate beam current of 340 mA at the SAGA-LS storage ring. Recently the user operation delayed due to the beam injection trouble. The primary factor in the beam injection trouble at the SAGA-LS storage ring had been investigated. To make the cause clear we investigate the relationship between the stability of the main power supplies of the storage ring magnets and the beam injection efficiency. It was found that output electric current of one of the main quadrupole power supply at beam injection energy was fluctuating by the order of 1×10^{-3} . After repairing the power supply, beam injection time has been recovered.

1. はじめに

SAGA-LS 電子蓄積リング[1, 2]にはリニアックにより 255 MeV まで加速された電子が入射される。約 340 mA の電子蓄積後にリング内で 1.4 GeV までランプアップする。ランプアップ完了後に超伝導ウィグラー[3, 4]の励磁、ビームサイズ調整等を行い、ユーザー運転を開始する。蓄積リングへの入射時間は概ね 2~4 分程度である。入射状況を決定する要因は複雑であるが、入射不調時には従来、蓄積リング電磁石パラメーターの微調整、RF 空洞電圧の調整、ビームの全廃棄、再ランプアップ等の対処法が取られてきた。入射キッカー電磁石電源サイクロン不良に伴う出力ジッターの増大により入射が不調となる事例があった。しかし、入射不調はキッカー電源正常時においても発生した。Figure 1 に入射不調時の状況を示す。従来の対処法によっては状況が改善せず、入射不調のために所定の時刻までにユーザー運転が開始できないケースが発生した。安定したユーザー運転を継続するために入射不調の原因特定と対策が必要とされた。

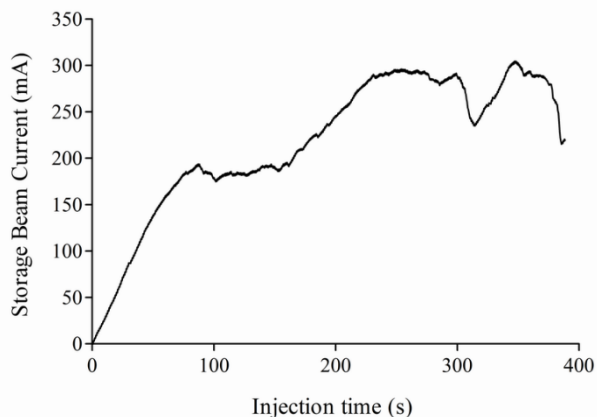


Figure 1: Storage beam current in bad injection condition.

[#] iwasaki@saga-ls.jp

リング主要電磁石電源の安定性は 1.4 GeV 定格運転中においては設定電流に対し仕様上 1×10^{-4} 程度である。しかし入射エネルギーにおける安定性は必ずしも明確ではなかった。SAGA-LS 電子蓄積リングにおいては、入射状況はベータートロンチューンの変化に対し敏感である。そのため、入射不調の主要因は蓄積リング 4 極電磁石電源の入射エネルギーにおける動作不安定性であると推定し、入射エネルギーにおける主要電磁石電源出力値と入射状況の関連性を調査した。本稿においては、入射不調時の状況、蓄積リング主要電磁石電源の入射時安定性モニタリング、および改修後の状況について報告する。

2. 入射不調時の状況

SAGA-LS 電子蓄積リングにはマクロパルス長 0.2 μ sec のビームが 1Hz で入射される。リニアックの出力ビーム電流は約 6 nA である。特に機器類のトラブル等がない場合には 340 mA 蓄積までの入射時間は概ね 2~4 分程度である。リニアックのビームエネルギーが低くエネルギーブレッドが広い場合には入射速度が低下する。またセプタム電磁石電源の設定によっても入射速度は変化する。入射キッカー電磁石の出力ジッターが 200 nsec 以上あると入射速度が低下するだけでなく蓄積されたビームが損失する。しかし SAGA-LS 電子蓄積リングでは、リニアック、セプタム、およびキッカーに問題がない状況においても入射が不調となるケースがあった。入射速度には問題はないものの、ある蓄積ビーム電流以上になると頭打ちとなり、入射状況が回復しても 340 mA には届かず、リニアックよりビームが入射されているにも関わらず蓄積ビームが減少する。(Fig. 1 参照)

このような状況は過去にも発生することがあり、経験則的に以下の対処法が取られてきた。1)蓄積リング主要電磁石電源の微調整、2)蓄積ビームの全廃棄、3)RF 空洞電圧の調整、4)ランプアップした後の再入射。入射が不調となる状況は過去より存在したものの、上記の対処法により入射不調によるアボートは回避されてきた。しかし、上記の対処法のどれを実行しても入射不調が改善せず所定の時刻までにユーザー運転が開始できないケース

が発生した。入射は調子が良い日もあれば悪い日もあり、頭打ちになる蓄積ビーム電流に明確な閾値はなかった。入射状況はベータートロンチューンの変化に敏感である。SAGA-LS 電子蓄積リングでは 0.01 程度のチューン変化が入射に影響を与える。リング主要 4 極電磁石電源の 1×10^{-3} の変動はチューンに 0.01 程度の寄与がある。入射エネルギーにおいてリング主要電磁石電源に 1×10^{-3} オーダーの不安定性があると推定し、入射時におけるリング主要電磁石電源のモニタリングと入射状況との関連性を調査した。

3. 蓄積リング主要電磁石電源モニタリング

3.1 アラームシステムの追加と電磁石電源モニタリング

SAGA-LS 電子蓄積リング主要電磁石電源(偏向電磁石電源、4 極電磁石電源、6 極電磁石電源)は外部 DCCT(HITEC STACC 2000)により実電流を計測している。外部 DCCT からの信号は National Instruments ADC(Fieldpoint AI110)により 1Hz で常時モニターされている。データベースへは 1 分間隔でモニター値が保存されている。入射状況と電源安定性との関連性を調査するために 1Hz での電源出力値のデータ記録を開始した。また、これまで電源出力値に対するアラーム表示は設けていなかった。そこで入射好調時におけるモニター値よりも $\pm 0.05\%$ 以上モニター値が変化した場合にアラ

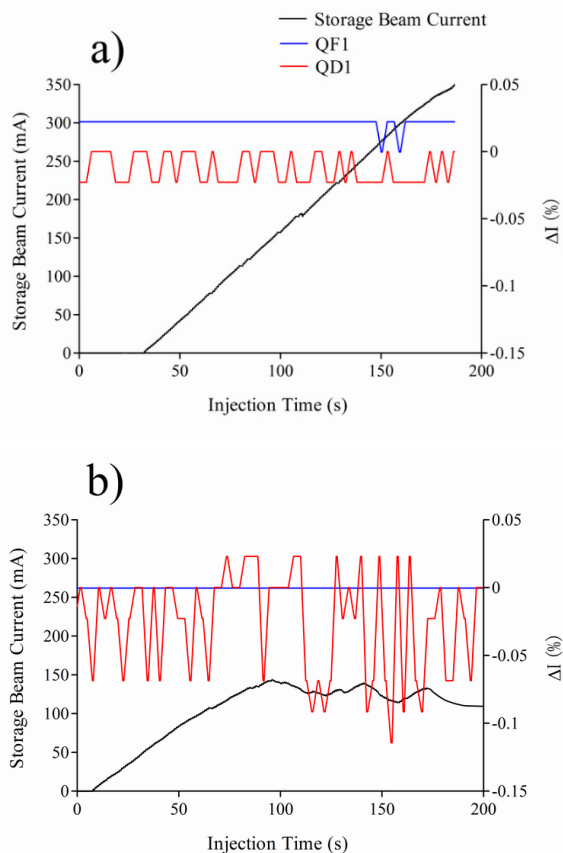


Figure 2: Storage beam current and variation of the power Supplies of QF1 and QD1 during the beam injection.

ム点滅するよう制御アプリケーションの GUI に簡易な改良を施した。アラームシステム導入後、入射不調時において主要 4 極電磁石電源の 1 台である QD1 電源がアラーム点滅する事例があった。しかし QD1 電源にアラーム表示がない場合にも入射不調は発生した。入射好調時および入射不調時における QF1 電源および QD1 電源の変動の様子を Fig. 2 に示す。Figure 2 a) に見られるように入射好調時においては QF1, QD1 電源の電源設定値に対する変動は 2×10^{-4} 程度であった。入射不調時において、Fig. 2 b) に見られるように QD1 電源出力の変動幅が 1×10^{-3} 以上となっているケースが確認された。

3.2 速い記録計による電磁石電源のモニタリング

3.1 節に記述したように QD1 電源にアラーム表示されない場合においても入射不調となるケースがあった。Filepoint では検出されないより高い周波数にて電源が変動している可能性があったため、より速いサンプリングレートを持つデータロガー(YOKOGAWA DL750P)を電源室に設置し、電源出力値の変動を AC モードにてモニターした。DL750P の画面は制御室で監視できるようにした。Figure 3 に DL750P で観測した入射時における QD1 電源出力の変動の様子を示す。

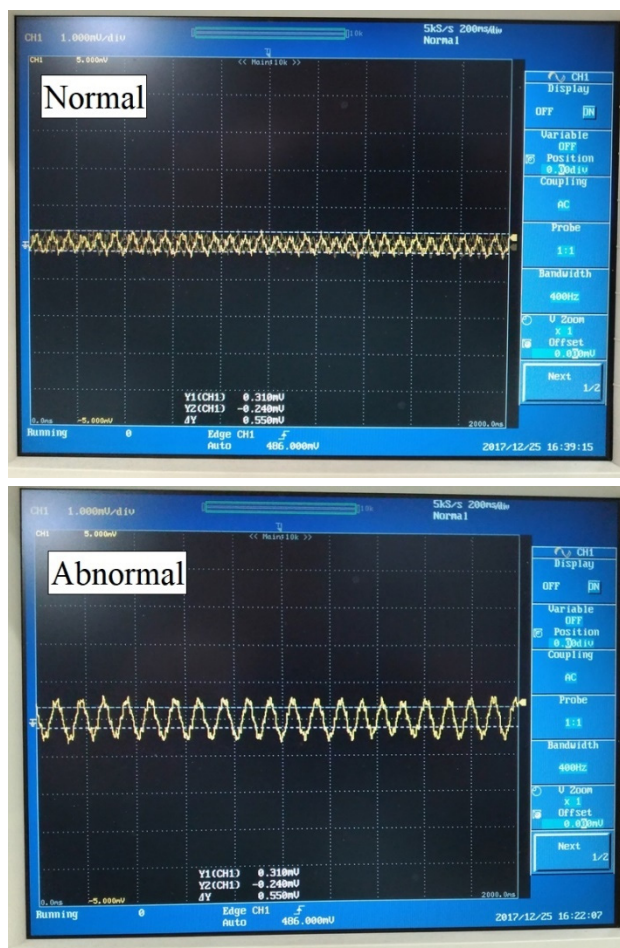


Figure 3: Fluctuation of QD1 power supply during the beam injection measured by using the fast data logger (YOKOGAWA DL750P).

Figure 3 下図に見られるように QD1 電源は入射エネルギーにおいて周期約 10~11 Hz、最大 1.5×10^{-3} 程度の出力変動が発生していることが確認された。Figure 3 上図に見られるように QD1 電源の変動は大きくない場合もあり、また周期が 5~6Hz 程度の場合もあった。Figure 3 上図程度の変動の場合は入射に影響はなかった。Feildpoint による 1Hz の観測系によっては異常が検出されない場合であっても Fig. 3 下図のように QD1 電源が変動している際には必ず入射不調となることが判明した。DL750P には QD1 電源の他、偏向電磁石電源、QF1、QF2 電源のモニター値も取り込み、入射エネルギーにおけるリング主要電磁石電源の安定性を確認した。異常が検出されたのは QD1 電源のみであった。

4. 電源改修と現在の入射状況

QD1 電源に入射エネルギーにて異常な出力変動があることが確認されたため電源の改修を行った。電源出力異常の原因は、電源内部の基準電圧の変動であった。基準ラインと電源内部制御回路部の接地を強化することで異常振動を抑制した。電源内部のフィードバック異常、部品の劣化などは確認されなかった。

QD1 電源の改修後、入射不調は完全に解消した。リング主要電源の微調整、RF 空洞電圧の調整、再ランプアップ等従来の対処法が必要となることはなくなった。電磁石のヒステリシスを考慮し、加速器運転前に 3 回リング電磁石の初期化を行っていたが、現在はウォーミングアップのために定格まで 1 回励磁するのみである。リニアックのビームエネルギーやセプタム電源のドリフト、キッカー出力タイミングのずれ等により入射速度は日々の運転で多少の相違はある。しかし、機器類等のアクシデントが発生しない限り 340 mA 以上の安定したビーム入射が可能となった。電源改修後、一貫して良好な入射状況が継続されている。Figure 4 に QD1 電源改修後の入射状況を示す。Fig. 2 よりも入射速度が速いが、これはリング 4 極電磁石電源の安定性とは関係がない。リニアックビームパラメーター等、ベストなマシンコンディションにおける入射の 1 例である。

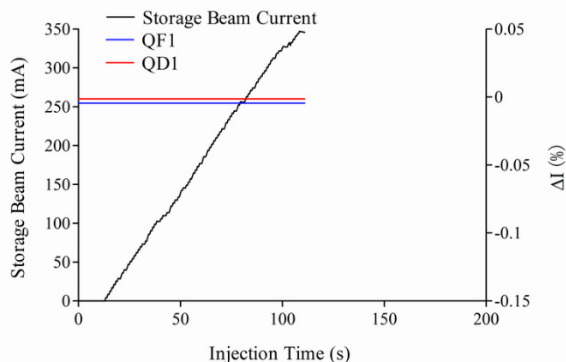


Figure 4: Storage beam current and stability of the power Supplies of QF1 and QD1 during the beam injection after the repairing of the QD1 power supply.

5. おわりに

SAGA-LS 電子蓄積リングへの入射はコミッショニング当初困難が伴った。しかし、300 mA 以上のビーム蓄積が可能になった後も、入射には好不調があった。QD1 電源の入射エネルギー(定格 720A に対し、入射時の通電電流は 100A 程度)での出力異常の発生時期は不明である。しかし、かなり早い時期より発生していたものと推定される。入射不調が目立ってきたのは超伝導ウィグラー2号機が設置された 2015 年秋以降である。しかし、超伝導ウィグラー2号機の設置と QD1 電源の入射エネルギーにおける出力不安定性との因果関係は考えにくい。QD1 電源の入射エネルギーでの出力異常の頻度と変動幅の大きさが次第に増大し、近年のアボートを発生させる入射不調を招いたと考えている。定期点検においては、電源設定値に対する出力電流の絶対値精度、安定性、リップル等の検査を毎年実施している。しかし安定性の検査には時定数の長い計測を行い、またリップル測定では電源スイッチング周波数に近い 100kHz 程度の周波数領域での計測を実施する。SAGA-LS における通常の機器類のモニタリングは 1Hz であるため、今回のトラブルのように 10 Hz 程度のオーダーで変動する現象については原因の特定が遅れた。当然ながら入射時におけるチューンの測定は実施していた。しかし SAGA-LS の現在のチューン測定系において 10 Hz オーダーで変動する電源異常は予測できなかった。1Hz の計測系ではあるが、入射時のアラーム表示は有効であった。単に制御アプリケーションの GUI に係る部分ではあるが、リング主要 4 極電磁石電源のうち、QD1 のみアラーム表示されることがあり、これが原因特定の第一歩となった。

一方で、QD1 電源に約 10 Hz で 1×10^{-3} オーダーの変動がある際に大電流ビーム蓄積が困難になるメカニズムそのものについては解明されていない。この点については今後の研究課題としたい。

参考文献

- [1] T. Tomimasu *et al.*, "The SAGA Synchrotron Light Source in 2003", Proceedings of PAC'03, Portland, 902-904, 2003.
- [2] Y. Iwasaki *et al.*, "Lattice Design of SAGA Synchrotron Light Source", Proceedings of PAC'03, Portland, 3270-3272, 2003.
- [3] S. Koda *et al.*, "Design of a Superconducting Wiggler for the SAGA Light Source Storage Ring", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, 21, 32 (2011).
- [4] S. Koda *et al.*, "Effects of a hybrid superconducting three-pole wiggler on the stored beam at the SAGA-LS storage ring", Nucl. Instrum. Methods A682, 1(2012).