

## SPRING-8 線型加速器における高速振り分け入射

### FAST ALTERNATE BEAM INJECTION FROM SPRING-8 LINAC

出羽英紀<sup>#, A)</sup>, 鈴木伸介<sup>A)</sup>, 柳田謙一<sup>A)</sup>, 小林利明<sup>A)</sup>, 青木毅<sup>A)</sup>, 小林和生<sup>A)</sup>, 高雄勝<sup>A)</sup>, 佐々木茂樹<sup>A)</sup>, 花木博文<sup>A)</sup>, 佐治超爾<sup>A)</sup>, 松下智裕<sup>A)</sup>, 都筑之彦<sup>A)</sup>, 皆川康幸<sup>A)</sup>, 竹村育浩<sup>A)</sup>, 竹内裕嗣<sup>B)</sup>, 庄司善彦<sup>C)</sup>, 宮本修治<sup>C)</sup>  
 Hideki Dewa<sup>#, A)</sup>, Shinsuke Suzuki<sup>A)</sup>, Kenichi Yanagida<sup>A)</sup>, Toshiaki Kobayashi<sup>A)</sup>, Tsuyoshi Aoki<sup>A)</sup>, Kazuo Kobayashi<sup>A)</sup>, Masaru Takao<sup>A)</sup>, Shigeki Sasaki<sup>A)</sup>, Hirofumi Hanaki<sup>A)</sup>, Choji Saji<sup>A)</sup>, Tomohiro Matsushita<sup>A)</sup>, Yukihiko Tsuzuki<sup>A)</sup>, Yasuyuki Minagawa<sup>A)</sup>, Yasuhiro Takemura<sup>A)</sup>, Hiroshi Takeuchi<sup>B)</sup>, Yoshihiko Shoji<sup>C)</sup>, Shuji Miyamoto<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Japan Synchrotron Radiation Research Institute

<sup>B)</sup> SPring-8 Service Co., Ltd.

<sup>C)</sup> University of Hyogo

#### Abstract

The electron beam from Spring-8 linac has been distributed to the booster synchrotron (Sy) of Spring-8 and New SUBARU (NS) of University of Hyogo. The beam direction from the linac had been changed every fifteen or twenty seconds in TopUp operation by sending command messages to network devices from central control room. Because the commands are software-based and executed successively one by one, it took about ten seconds to complete them. To change the beam routes every 0.5 seconds, we modified the timing system of linac and NS. NS timing system was changed to synchronize with that of Sy and gun trigger signals were modified to get time-shared for Sy and NS. The radiation safety system was also improved to fit faster alternate injection. These modifications were completed successfully in June 2013 and realized no wait injection of SR and NS.

#### 1. はじめに

Spring-8 ブースターシンクロトロン(Sy)の入射器である Spring-8 線型加速器は兵庫県立大学の蓄積リング New-SUBARU(NS) の入射にも利用されている。同時にこれら 2 台の加速器の入射器として運用するために、これまでは中央制御室の加速器運転用ソフトウェアにより、それぞれの加速器へのビーム入射を切り替えていた。ソフトウェアによる切り替えのため、ビームルートを変更するには最低 10 秒程度の時間がかかっていた。

一方で、近年 SPring-8 蓄積リングでは低エミッタンスオプティクスを導入、またシングルバンチの高電流化などの高性能化を進めてきた。それに伴い蓄積ビームの寿命が短くなっており、この傾向は今後も続くと思われる。蓄積リングは TopUP 入射（蓄積電子ビームが常に一定になるように、失われた電子ビーム分だけを定期的に入射する方法）を行っているため、寿命が短くなると 1 パルスあたりの入射電子が同じであれば、Sy の入射頻度が多くなる。そうすると、Sy だけではなく NS にも入射する必要があるためビームルートを変更しなくてはならなくなる。これまでのソフトウェアを用いたビームルートの切り替えではこのような状況に対してもはや対応できなくなりつつあった。

このような背景のもと、ソフトウェアでなくハードウェアを用いて高速にビームルートを変更できる

ように加速器の改造を行った。改造は平成 23 年春に開始し、平成 25 年 6 月の加速器の運転から高速のビームルート切替を利用運用に適用した。その結果、Sy と NS に 0.5 秒間隔で、それぞれ最大 1 Hz でビームを振り分け入射できるようになった。これを実現するために行った加速器および安全システムの改造および現在の運用状況について報告する。

#### 2. 線型加速器からのビームルート

線型加速器で 1GeV まで加速された電子ビームは、Sy, NS, L2 ビームダンプ, L3 ビームダンプへ輸送される。これら 4 つの方向のどこに輸送されるかは、3 台の偏向電磁石の励磁、非励磁の組み合わせで決定される。線型加速器からのビームルートならびに偏向電磁石の配置を Figure 1 に示す。

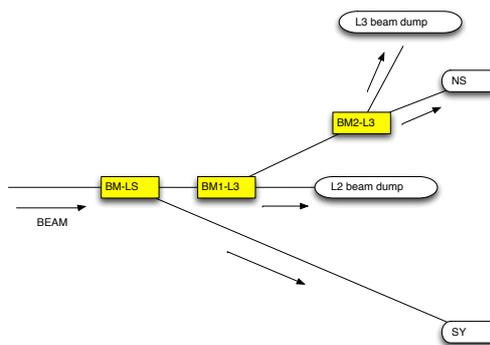


Figure 1 Beam routes from SPring-8 linac.

<sup>#</sup> dewa@spring8.or.jp

このときビームルートと 3 台の偏向電磁石の励磁状態の関係は Table 1 の通りである。

Table 1: Beam routes and the combination of magnetic states of three bending magnets.

Bending magnet /Beam routes	BM-LS	BM1-L3	BM2-L3
Sy	ON		
L2 beam dump	OFF	OFF	
L3 beam dump	OFF	ON	ON
NS	OFF	ON	OFF

Sy と NS のビームルートを切り替える場合は、BM1-L3 を励磁、BM2-L3 を非励磁に固定した状態で、BM-LS の励磁/非励磁を切り替えれば良い。3 台の偏向電磁石のうち、BM-LS だけは硅素鋼板で作られた高速励磁が可能な電磁石である。したがって BM-LS にパルス電流を流すことにより、BM-LS にパルス磁場を発生させることが可能である。BM-LS の電磁石電源には 2 つのモードがある。1 つは DC モードで、これは一定の電流を流し続けるモードである。もう一つはパターンモードで、外部からの TTL トリガー入力により、電流 ON になり、ダイヤルスイッチで設定された時間だけ電流を流した後、電流 OFF となるモードである。Figure 2 に BM-LS にパルスモードで励磁したときのパルス電流モニター出力をオシロスコープで測定した波形を示す。



Figure 2: The pulse current of BM-LS (in pattern-mode). The rise time and fall time are 190 ms, and the pulse width on the top is 260 ms.

パターンモードを用いて 1 Hz の周期で BM-LS をパルス励磁することにより、1 Hz で Sy に入射することができ、励磁されていないタイミングを用いて NS へも 1 Hz で入射することができる。

なお BM-LS の真空チャンバーはこれまでアルミ製の物を使用していたが、パルス励磁試験でうず電流による発熱が大きく、約 80 度まで上昇することが判明したため、ステンレス製のものに交換した。

### 3. 高速振り分け入射へ向けた改造

線型加速器のタイミング系トリガーには主に電子銃トリガー、モジュレータ用トリガー、モニター用のトリガーがある。電子銃トリガーは最大 1 Hz の繰り返しで、電子銃からビームを出射する時のみ動

作する。モジュレータ用トリガーは常時 2 Hz で動作し、モニター用トリガーは常時 1 Hz で動作している。Sy から NS, または NS から Sy にビームルートを切り替えるときには、中央制御室のソフトウェアを通じて、トリガースイッチを切り替えていた。Figure 3 に改造前のタイミングトリガーの流れを示す。

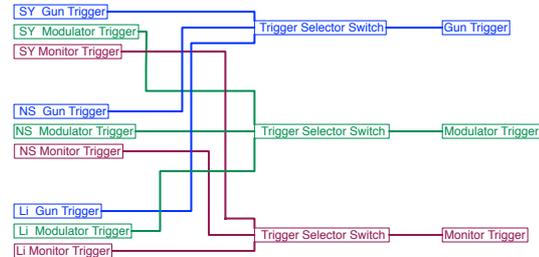


Figure 3: Trigger signal flow in the linac timing system.

Three sets of trigger signals from Sy, NS, and linac internal trigger (Li) are input to linac timing system. Triggers are selected by trigger switches remotely controlled from the central control room.

ビームルートを切り替える際には、Figure 3 のトリガーの切り替え、および LS-BM1 のオンオフ、安全インターロックの状態確認を 1 つずつ、シーケンシャルに実行しているために、自動化していても 10 秒程度かかってしまう。高速な振り分けをおこなうには、このような方式では困難であるので、ハードウェア的に Sy, NS それぞれ 0.5 秒おきにそれぞれ最高 1 Hz で入射できるようにタイミング系、BM-LS1 のパルス化および電子銃トリガーとの同期化、安全インターロックの高速化を計ることにした。

ハードウェアの改造のポイントは

- Sy, NS のタイミング系の同期化
  - タイムシェアリング (時分割) による排他制御
  - 安全インターロックシステムへの対応
- の 3 つである。

#### 3.1 Sy と NS の同期化

a. の同期化であるが、元々 Sy と NS のタイミング系は独立であったため、同期していなかった。ソフトウェアでの制御では、ビームルートが設定されている時間 (BM1-LS が励磁されている時間または BM1-LS が励磁されていない時間) が長かった。従って Sy と NS が同期化されていなくてもビームを打つ時間は十分確保されていた。しかしビームルートを 0.5 秒おきに変更した場合、同期化しないままではビームルートが設定されている数百ミリ秒の短い時間にビームトリガーを出さない確率が高く、ビームルート変更を高速化しても効率的な入射が行うことはできないと考えられた。

この問題を解消するために、ビームルートの変更のタイミングと Sy および NS の電子銃のトリガータイミングを同期化した。同期化により Sy と NS の電子銃トリガーは 0.5 秒おきに交互にそれぞれ 1 Hz で出力できるようになった。また同時にモジュレータトリガーおよびモニター用トリガーも同期化した。

もともと Sy と NS のタイミング系は独立していたため、同期化するためには大幅な回路の変更が必要だと思われたが、Sy のモジュレータ用トリガー、モニター用トリガーに適切な遅延回路を通して NS へ送ること及び NS のタイミング回路を数箇所変更するだけで同期を実現することができた。以下改造方法を説明する。

まず、NS の元々のタイミング回路は電源周波数の 60Hz から作られていた。Figure 4 に改造前の Sy と非同期なタイミング系回路を示す。改造前はまだ節電対策<sup>1)</sup>を始めていなかった(2011年4月)のでモジュレータのトリガーの周波数は 10 Hz であった。電源周波数の 60 Hz を 6 分周して 10Hz のトリガー信号を作り、この 10Hz のトリガーを基にモジュレータ信号を作っていた。また、さらに 10 分周して 1 Hz の電子銃トリガーおよびモニター用トリガーのためのトリガー信号を作っていた。

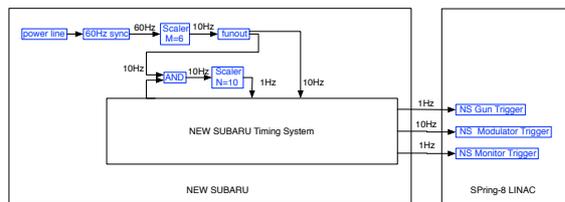


Figure 4: NS timing system before modification. It was not synchronized with Sy timing system. The figure shows the case when  $M=6$  and  $N=10$ , the modulator trigger were working at 10 Hz. If you set  $M=30$  and  $N=2$ , you can run the modulator trigger at the same 2Hz as the present condition, although they have not been actually applied in this old timing system.

次に Sy のタイミングと同期を取るために行った改造を説明する。タイミング系の拙速な改造により SPring-8 の利用運転に影響を与えてはならないことを考慮し、改造は次の 3 つの段階を踏んで進められた。

(1) NS のモジュレータトリガーを Sy のモジュレータトリガーと同期させる。ただしトリガー間には一定の delay が残る。

(2) さらに delay を加えて NS と Sy のトリガーをジッターの範囲内で一致させた。電子銃トリガーは完全に同期していない。

(3) さらに電子銃トリガー、モニター用トリガーを同期させる。

(3) が終了した時点での最終的な NS のタイミングシステムを Figure 5 に示す。

まず (1) を実現するために、Figure 4 の電源周波数を 6 分周した 10Hz のトリガー信号の代わりに、Sy のモジュレータ用の 10 Hz のトリガー信号を NS に光伝送し、このトリガー信号をスタートトリガーとして利用することにした。こうすると Sy のタイミングで NS のタイミングシステムが動くようになった。平成 23 年 5 月の NS のスタディで Sy と同

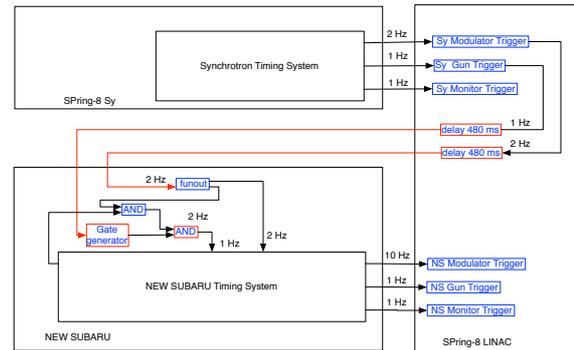


Figure 5: NS timing system after fully modified to synchronize itself with the Sy timing system.

期をとってもビーム入射に問題がないことを確認した上で、同年 6 月から利用運転で運用を開始した。

このときはまだ Sy と NS のモジュレータトリガーには一定のタイムラグがあった。これは linac タイミング系内で Sy におよそ 2ms, NS に 22ms の遅延を与えているため、NS のタイミングが Sy に対して 20ms 遅れてしまうからである。

つぎに (2) の Sy と NS とのモジュレータトリガー間のタイミングを一致させるために Sy のトリガーを DG535 で遅延を加えた。これによりジッターの範囲内で 2 つのトリガーのタイミングが一致するようになった。このときは節電対策で Sy のモジュレータトリガーは 5Hz, さらに 2 Hz へと低繰り返しになっていた。設定した DG535 の遅延の値はモジュレータが 5 Hz 運転時で 180ms, 2Hz 運転時には 480ms である。このとき NS のトリガーは Sy の 1 つ前のトリガーから作られることになる。

最後に (3) を実施した。(2) の状態でモジュレータトリガーを 2Hz とした場合には NS の電子銃トリガーは Sy と一致するか、500 ms ずれたところに現れるかどちらか不定の状態となる。500ms 毎のタイムシェアリングを実現するためには、NS の電子銃トリガーは必ず Sy の電子銃トリガーの 500ms 後にくるようにする必要がある。そのために Figure 4 の  $N=10$  で使用しているスケーラーの代わりに、Figure 5 のように AND 回路に置き換え、Sy の Monitor トリガーを 480ms 遅らせて作ったゲート信号との AND を取るようにした。この改造で Sy と NS の電子銃トリガーは必ず 500 ms 毎に交互に出力するようになった。以上の過程を得て Sy と NS のトリガーを全て同期することができた。

### 3.2 Sy/NS のタイムシェアリング

b. のタイムシェアリングは a. の同期化と密接に関連する事項であるが、同期化されたトリガーを出力する部分にゲート回路を用いた排他制御回路を付加した。

電子銃トリガーについては同期化により 0.5 秒毎に Sy, NS から交互に出力されているので、これで自動的にタイムシェアリング(時分割)されているが、さらにノイズや誤動作による誤出力がないように、排他制御回路を設置している。Figure 6 に電子銃トリガーの回路図を示す。Sy, NS それぞれ最大 1 Hz,

排他制御回路出口で最大 2Hz のトリガーが出力される。最大と書いているのは、ビームを Sy, NS が 1Hz で連続的に出した場合であって、実際には Sy, NS のビームトリガーは入射させたい時（これは SPring-8 および NS の運転ソフトウェアで制御される。）のみ出力されるからである。

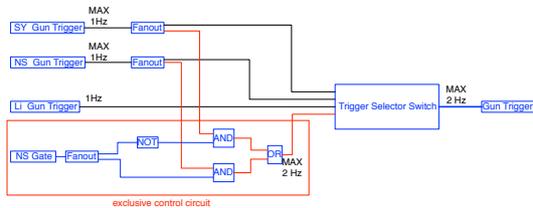


Figure 6: Circuit diagram for the electron gun trigger (after modification). The red rectangular indicates an exclusive control circuit. The signal 'NS gate' is a gate signal for exclusive control and generated by a delay & gate generation circuit triggered by the Sy monitor trigger signal. When the Sy/NS fast alternate injection is operated, the input of the trigger switch is fixed to the exclusive control circuit output.

SY/NS 高速振り分け時には、Figure 6 の電子銃トリガー回路図の Sy 電子銃トリガー、NS 電子銃トリガー、排他制御出力トリガー、NS gate, BM-LS の励磁状態の時間的な関係は Figure 7 のようになる。

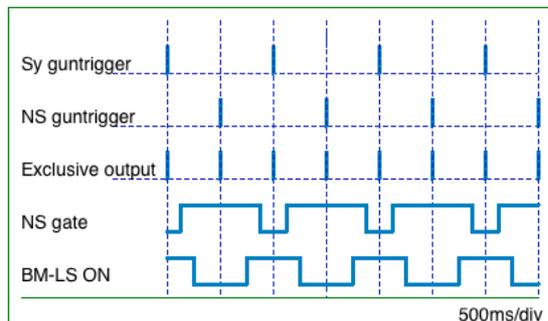


Figure 7: Timing chart for electron gun triggers and NS gate signal and magnetic status of BM-LS.

モジュレータトリガーは Sy, 及び NS からそれぞれ 2 Hz の同期されたトリガーがほぼ同時に出力されている。これに電子銃トリガーと同じ排他制御回路を通すことでモジュレータトリガーを 0.5 秒毎に Sy / NS で切り替え、排他制御回路出口で 2Hz で出力することができる。Figure 8 にモジュレータトリガーの回路図を示す。

モニター用トリガー回路も同様な排他制御出力を付加する改造を行った。Sy, NS 各 1 Hz のトリガーがそれぞれ 0.5 秒おきに入力され、排他制御回路を通して 2 Hz の信号が出力される。電子銃トリガーと異なるのは、電子銃トリガーは入射が必要などときだけ出力されるのに対して、モニター用のトリガーはビーム出射に関わらず、常時 2Hz で出力されることである。

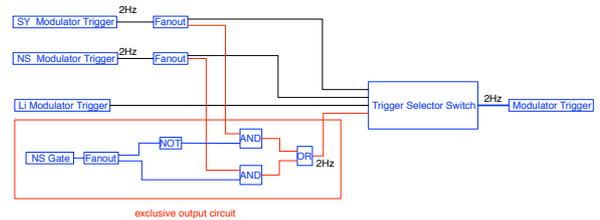


Figure 8: The circuit diagram for modulator trigger (after modification).

モジュレータトリガーが Sy, NS から 1 Hz でなく 2 Hz で入力しているのは、Sy, NS 単独で運転する時に BM-LS を従来の DC モードで運転する可能性を考慮したからである。この場合、排他制御回路をスルーした信号にトリガースイッチで切り替えることで Sy, NS のどちらかのモジュレータトリガー信号を単独で 2 Hz を得ることができる。(Figure 8 を参照)

またこれらのトリガーとは別に 2856MHz の lowlevel の RF 信号もタイムシェアリングの為に NS gate 信号を使って、Sy と NS とで 0.5 秒毎に切り替えるように改造した。SPring-8 ではビームの安定度を向上するため、Sy の 508MHz, NS の 500MHz のクロックで動作する 2 台の任意波形発生器で 89.25MHz を作り、32 通倍して 2856MHz を作ることで、ビームタイミングでの線型加速器と Sy および NS の RF 周波数を同期させている<sup>[2]</sup>。そこでこの 2 種類の 2856MHz の信号を高速に切り替える半導体スイッチを製作し、高速振り分けに対応させた。

### 3.3 加速器安全システムへの対応

以上に述べた加速器改造により物理的には Sy/NS の高速振り分けが可能になったが、実際に高速振り分けでビームを出すには、c. の加速器安全システムへの対応が必要があった。なぜならビームルートの切替にかかわる放射線安全の規定を満たさなければならぬためである。

つまり

NS ビームルートの時、NS 入射条件である

- 電子銃パルサーは 500ps または 1ns である。
  - 電子銃トリガーは NS のトリガーである。
- が満たされない時、安全アラームを発報すること。さらに放射線安全上、計測が必要な

- SR 入射損失電子数積算計
- L4 電荷量積算計

ならびに安全上必要ではないが、加速器の運転を管理するのに必要な、

- 入射数カウントモジュールが高速振り分け時に正しく計測されること

が必要であった。

これまで使用してきた加速器安全システムは、安定かつ確実な安全インターロック動作を目的に、比較的低速な処理回路とネットワーク通信をもつ PLC (Programmable logic controller) を採用していた。そのままでは高速化に対応できないため、高速な

ビームルート変更に関わる判断を行い、上記の安全システムを機能させるモジュールとして Sy/NS ビームルート切替器を製作した。

Sy/NS ビームルート切替器を導入後の安全システムの回路図を Figure 9 に示す。この切替器では

(1) 偏向電磁石の励磁/非励磁ステイタスからビームルートを決出し、安全システムに出力する。

(2) 40ns のパルサーが NS 入射ビームルートの時に選ばれたならば、安全インターロック PLC に対して安全アラームを出力する。

(3) NS 入射ビームルートの時にもし電子銃トリガーが NS でないものが選択されているならば、安全インターロック PLC に対して安全アラーム発報状態を出力する。

の3つをおこなっている。

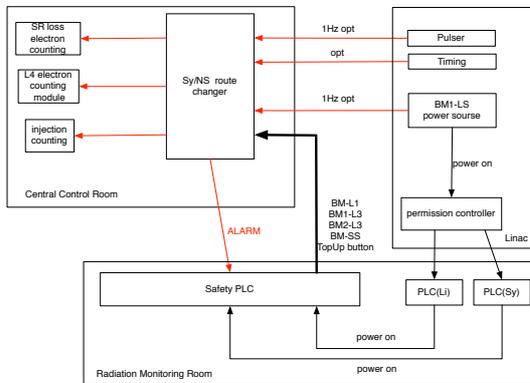


Figure 9 : Safety system after modification.

#### 4. Sy/NS 高速振り分けビーム試験

以上で Sy/NS 高速振り分けの準備が完了し、実際にビーム試験を行った。電磁石 BM-LS をパターンモードにてパルス励磁、トリガーセクターを排他制御出力 (Sy/NS) に設定し、ビーム入射を行った。

まず Sy への入射においては、DC モードで使用していたのと全く同じパラメータでビームを Sy に入射することができた。さらに SR への入射も実施し、SR 入射損失電子数積算計、入射数カウントモジュールが数え落としなく正常に動作することを確認することができた。

一方 NS への入射は NS の 500MHz の RF 位相を調整後、ビームが正常に入射できていることを確認できた。そして、L4 ビーム出射量積算計、入射数カウントモジュールが正常に動作していることを確認した。

Figure 10 に Sy/NS 高速振り分け入射での Sy および NS への入射電流をビーム位置検出器で計測した結果を示す。このとき Sy は毎秒 1 回入射、NS は 3 秒に 1 回の入射を実施している。安定に入射できていることがわかる。

1 つ問題点としてわかったことは、調整時に使用している CT 電流モニターが正しく読めなくなっていたことである。これは線型加速器からのビーム出射が 1Hz から 2 Hz に変わったのに関わらず、デー

タの読み取りが 1 Hz のままであったためである。今後データの読み取りをビーム同期して行うように変更して、正常に読めるようにする予定である。

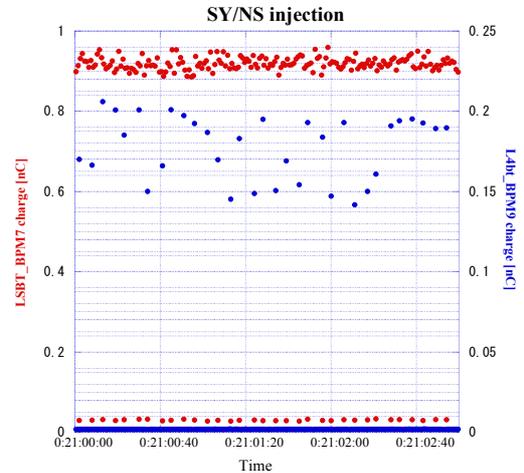


Figure10: Beam current in fast alternative injection, for Sy (left), NS (right).

#### 5. Sy/NS 高速振り分けの運用状況

以上の結果を踏まえ、2013年第3サイクル(6月3日開始)の運転から Sy/NS 高速振り分けを開始した。7月19日まで約2ヶ月弱の運転を行ったがこの間システムは正常に動作している。

高速振り分け開始により、以下のようなメリットが明らかになった。

- SR では TopUP 運転中の最小入射インターバルを 15s から 5s まで短くすることができた。
- NS では 1 Hz の連続入射が可能で、いままでの Sy 入射の間の待ち時間が無くなった。例えば SR が TopUP 運転時における NS の 300A の積み上げ入射の時間は約 10 分短縮された。また NS が TopUP 運転時には蓄積電流の変動は 0.2mA 減少した。

#### 6. まとめ

SPring-8 および NS の入射器である SPring-8 線型加速器においてタイミング系を改造し、交互に 1 Hz の高速振り分け入射が可能となった。改造は Sy と NS を同期化し、タイムシェアリングによる排他制御を進め、また同時に必要な安全システムの高速化を行った。2013年6月より利用運転に導入し、安定に高速振り分け入射ができている。

#### 参考文献

- [1] S. Suzuki, et al., "The Component improvement of SPring-8 Linac", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Aug. 8-11, 2012, pp 891-893.
- [2] 安積隆夫 他, "同期タイミングシステムとビーム特性", Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, July 30-Aug. 1, 2001, pp336-338