

セベラルバンチ運転の状況（マシンからの報告）

財団法人高輝度光科学研究センター
 加速器部門 鈴木 寛光、川島 祥孝
 谷 教夫、細田 直康、米原 博人

Abstract

Multi-bunch-mode, single-bunch-mode and several-bunch-mode operations of electron or positron beam were designed in the SPring-8 storage ring. At the beginning of the commissioning multi-bunch-mode operation was mainly carried out. At the same time the rf knockout system was tested in the synchrotron for a request of the single-bunch-mode operation from users. A long pulse train of 1 μ s or 40 ns is injected from the Linac to the synchrotron, one bunched beam is remained with the rf knockout system in the synchrotron and the beam is injected into an aimed bunch of the storage ring repeatedly. The several-bunch-mode operation could be realized and used for users of BL09. The impurity of the satellite buckets was less than 10^{-6} . A beam life time at the current value of 19 mA in 21-bunch-mode operation was about 18 hours. The phenomenon that purity became worse with the time was not observed at all. Sometimes the beam was injected into other bunches in addition to aimed bunches and the reason has been investigated.

1. 前書き

SPring-8加速器の概念設計が行われていた1990年頃、本加速器設備のタイミング設備に関連する事柄で以下の4点について大筋で決定された。

リナックの基本周波数を2,856MHzとする。
 ブースターシンクロトロン及び蓄積リングの基本周波数は508.58MHzとする。
 したがって二つの基本周波数間の位相関係は全く採らない。
 蓄積リングの運転モードに、マルチバンチ運転モードだけでなく、シングルバンチ運転モード（シングルバンチを基本にして、適当な間隔にいくつかのバンチ形状を作るセベラルバンチ運転モード、ハイブリッドバンチ運転モードも含む）を入れる。

ここで、蓄積リングでシングルバンチ運転を達成することが、タイミング設備にとって最も厳しい条件となる。SPring-8共同チーム内では、この運転モードを基本周波数を周回周波数まで分周し、商用周波数とのアナログ同期をとった信号をリナック電子

銃のトリガにすることにより達成できると考えていた。加速器周長が比較的短い場合には、分周比がそれほど小さくなく、このようにして得られた同期信号とシングルバンチ位置との間の精度が保たれ、実用上問題はなかった。しかし、SPring-8の場合、分周比はシンクロトロンで1/672、リングで1/2,436となり、時間精度をアナログ同期回路に求めるのは困難であると考え、1990年6月頃から、SPring-8のタイミング設備に必要な性能及び達成方法の検討をシンクロトロングループ有志で始めた。その結果、リングの基本周波数508.58MHzを直接カウントし（当初使用できるデジタル素子は200MHzまでであったため、加速周波数を1/2あるいは1/3分周した周波数をタイミング設備の基本クロックとすることも考慮しながら、素子の開発が進み使用周波数が高くなることを期待した。）各電源トリガの時間設定をし、各加速器間（最長実装距離は約1km）の伝送は位相安定化光ケーブルで接続し、各タイミング機器は温度管理された部屋に設置することを基本方針とした。検討を進める過程で川島ら蓄積リングRFグループも加わり、要素機器のテストをともに行うようになった。幸運なことに、我々が本タイミング設備

の建設に使用する機器を決定する直前に、必要な性能を持った機器が次々と販売された。例えば、高速のデジタルICが市販され、これを使い508.58MHzに同期させたカウンタを作ることができるようになった[1,2]。さらに、シンクロトロンでシングルバンチビーム生成波形を作るための基本周波数分周回路の試作検討時期に、新規に製品として市販された高速任意波形発生装置が入手でき、専用の分周回路を試作する期間を大幅に短縮できた。このグループの活動が当初からSPring-8のプロジェクトの一部として認知されていたわけではなく、また、途中で活動を停止せざるを得ないこともあったが、当グループがプロジェクトの途中からタイミング設備の建設を担当することが認められ、1996年12月からのシンクロトロンにおける加速器の試験調整運転時期に間にあわすことができた[3]。更にシンクロトロンに設置したRFKOシステムにより、シングルバンチのみ残し、これを蓄積リングへ入射しシングルバンチ運転モードを実現することができた。結果的には供用開始直後のユーザーの希望に合わせてシングルバンチビームの供給も行うことができた。

2. 序論

SPring-8は1GeV-Linac (Li), 8GeV-Synchrotron (Sy)[4,5], 8GeV-Storage ring (St.R)の3つの加速器から構成されている。St.Rでは電子或いは陽電子のマルチバンチ/シングルバンチ(セベラルバンチを含む)運転モードが用意されている。当初、シン

グルバンチ運転時にはLiより1ns幅の短パルスでSyへ入射し、SyのRFKOでサテライトバンチを蹴り飛ばしてシングルバンチだけに整形し、St.Rへ入射する予定であった。しかし、現在Liの電子銃からのパルス波形を変更するには回路交換およびビーム調整に時間がかかるため、マルチバンチ/シングルバンチ運転を簡単に切り替えられない。そこで、Liからロングパルス(1μsまたは40ns)のビームをSyへ入射し、SyのRFKOシステムでシングルバンチだけ残し、St.Rの1バンチ或いは等間隔の数バンチに入射することを試みた。このシステムを使用するとRFKOのON/OFFだけでマルチバンチ/シングルバンチの切り替えが容易に行うことができる。

Syでは繰り返し1Hzで、Liからの1GeVビームを8GeVまで加速し、St.Rへ入射している。Syの主なパラメータをTable.1に示す。偏向、四極、六極電磁石の電流パターンはFig.1のようにになっている[6]。RFKOを用いてシングルバンチを整形するには、ダンピングタイムが長く、また必要とするRFKOパワーが少なくすむ1GeVのフラットボトム内で行うことが有利である。マルチバンチ入射時にはこのフラットボトムの開始から33.3ms後に1パルスのロングパルスビームを入射している。また、ショートパルスビーム入射時或いは陽電子入射時にはSt.Rへの入射時間をできるだけ短くするために、LiからSyへ等間隔の8パルス入射を、またSyからSt.Rへの8パルス出射を16.7ms間隔で行うことが可能である。Syの8パルス入射時には、1パルス目はフラットボトム

Table1. Synchrotron design parameters.

Injection energy	1.0GeV
Maximum energy	8.0GeV
Repetition rate	1Hz
Circumference	396.12m
Revolution frequency	756.8kHz
Harmonic number	672
Radio frequency	508.58MHz
Maximum rf voltage	18.7MV
Maximum rf power	2MW
Natural emittance (at 8 GeV)	230nmrad
Momentum spread (at 8 GeV)	0.126%
Nominal tune(ν_x / ν_y)	11.73/8.78
Natural chromaticity(ξ_x / ξ_y)	-14.4/-11.5

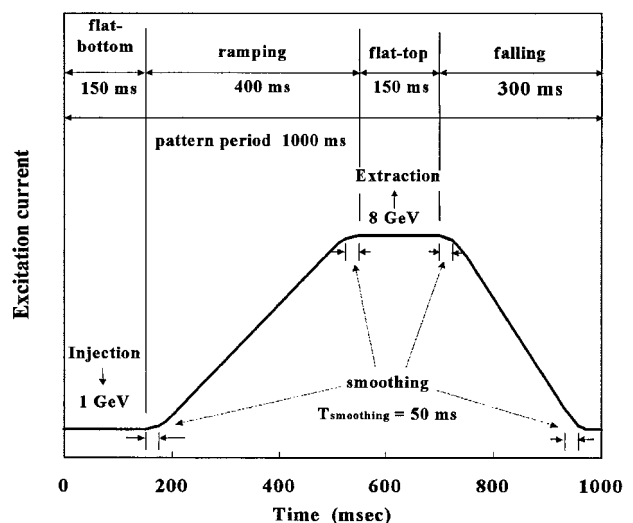


Fig.1 Current pattern of the power supplies for the dipole, quadrupole and sextupole magnets.

開始から33.3ms後に入射され、8パルス目は150ms後に入射される。そのためフラットボトム時間は150msを必要としている。現在シングルバンチビーム運転を行う場合には、LiからSyへ1パルス入射後、ビームは約117msの間にRFKOにより、シングルバンチに整形される。RFKOの基本波形はSyの垂直方向のチューンに共鳴するサイン波である。このサイン波に目的の1バンチ分だけゼロクロスするような矩形波のパルス変調を与えることにより、この1バンチのみビームを残すことができる。このシステムによりSt.Rの等間隔の21バンチへ、合計電流19mAを蓄積した時のビームの不純度は 10^{-6} 以下を得ることができた。この運転モードでのビーム寿命を実際に測定した結果は、19mAの時に18時間であった。このビーム寿命はタウシェック効果による評価と良くあっている。タウシェック効果により散乱された電子が他のバンチに入り不純度を増加させることが懸念されていたが、そのような現象は現在のところ観測されておらず、不純度が 10^{-6} 以下のビームをユーザーに供給することができている。

3. 原理

一般にRFKOとはトランスバース方向のベータatron振動と共鳴した周波数の高周波電流を4ロッド電極に流し、発生した電磁場によりビームにトランスバース方向の変位を与えるものである。この変位がビームダクトのアーチャー或いはスクレーパーより大きくなればビームは失われる。RFKOの基本周波数 (f_{RFKO}) は次式で与えられる。

$$f_{RFKO} = \{ -Integer(\nu_y) + n \} \times f_{rev} \quad (1)$$

ν_y = vertical or horizontal tune

Integer(ν_y): integer of tune

n : 0 or positive integer

f_{rev} = revolution frequency

LiからSyへ1秒毎にビームが入射される。また、入射ビームのエミッタンスや運動量幅が大きいいため、ビームの入射効率に影響を与えずにロックアウトされたビームを遮るようなスクレーパーを設置することはできない。そこで、ロックアウトされたビームはダクトに当たって失われることになる。Syの真空ダクトのアーチャーは縦方向が ± 15 mm、横方向が ± 40 mmであるので縦方向に変位を与えたほうが横方向よりも短時間でビームを蹴ることができる。(1)式に下記の数値を代入すると

$$\nu_y = 8.78 ; \text{vertical tune}$$

$$Integer(\nu_y) = 8 ; \text{integer of vertical tune}$$

$$n = 1$$

$$f_{rev} = 756.8 \text{ kHz}$$

$f_{RFKO} = 1.3524 \text{ MHz}$ となる。ビームの変位量は次式で表せる。

$$x = f_{rev} \times t \times \sqrt{\nu_{RFKO}} \times \sqrt{\nu_{maximum}} \quad (2)$$

t : RFKOの所要時間、但し、ダンピング

タイム (0.88 s at 1 GeV) 以下

ν_y : ビームの変位角、 $\nu_y = 0.30 \times BL / E$

B : 磁場強度 (T) ; 7.2×10^{-6} T

@ 50 w/rod

L : RFKO電極の長さ

E : ビームのエネルギー (GeV)

ν_{RFKO} : RFKOの場所での関数 (m)

; 15m

$\nu_{maximum}$: 最大の関数 (m) ; 18m

計算上 $t = 10 \text{ ms}$ で、 $x = 269 \text{ mm}$ となり、ビームダクトの縦方向のアーチャー15mmより十分大きくなる。

シングルバンチを作成するためには(1)式で表されるサイン波にパルス変調を与え、672バンチの内2バンチのみゼロクロスさせ、ロックアウトしないようにする。1バンチをSyの1周期 (1.32 μs) の内、時間幅1 μs のビームが入射されない0.32 μs の部分になるようにし、これと対角の位置にあるもう一つのバンチのみ残すことができる。このようなRFKO信号を発生させるためには、RFKO波形を作成するためのクロックを基本周波数508.58MHzに完全に同期させなければならない。すなわち次式で表されるような信号を作成する必要がある。

$$V = V_0 \sin(2\pi f_{rf}/376) \times \text{rectangle}(2\pi f_{rf}/m) \quad (3)$$

$$f_{rf} = 508.58 \text{ MHz}$$

$f_{rf}/376$: f_{RFKO} を f_{rf} をクロックとして用い、表現した。

N : 12, 21, 32とし、40ms毎に位相連続で切り替える。

理論上、Nの値は672だけでよいはずであるが、その場合RFKOに使用している広帯域増幅器の周波数帯域以下となり、サグが現れるので十分な変位が得られない。この増幅器はサイン波の場合には250kHz ~ 150MHzの周波数帯域があるが、矩形波の場合10MHz以上すなわち50分周以下でないと増幅されないことが実験的に測定された。このため、672の公約数を取り、50分周以下の波形を随時切り

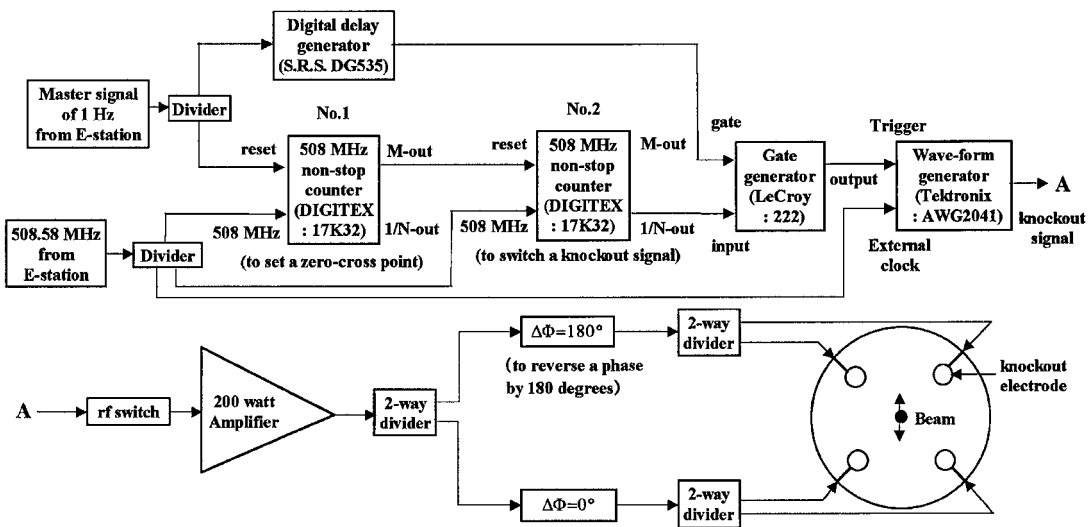


Fig.2 Block diagram of the rf knockout system for the formation of the single-bunch-mode

替え、最小公倍数が672になるように分周波形を選択することにした。672 = 2⁵ × 3 × 7であらわせる。ここでN=21(3 × 7), 32(2⁵)とすれば前述の条件を満たすが、早い段階ですぐ隣のバンチにいるビームを蹴ることによりバンチ純度を良くすることが実験で確認されたので12(2² × 3)分周の波形を使用している。

4. RFKOシステム

Fig.2にRFKOシステムの構成を示す。本システムはRFKO波形を作成するローレベル系、波形を増幅し、2分岐後180度位相を変え、再度2分岐するハイパワー系、およびRFKO電極からなっている。

4-1. ローレベル系

St.Rのどのバケットにビームを入射するかという

情報を含むマスターパルスと基本周波数(508.58MHz)をSt.RのE-ステーションから受ける[7]。これらの信号を508MHz-ノンストップカウンタに入力し、ゼロクロスポイントを指定し(カウンタNo.1)、40ms毎に3種類の波形を切り替えるトリガを作成する(カウンタNo.2)。任意波形発生器(テクトロニクス:AWG2041)に、上述の波形切り替えトリガと外部クロック(508.58 MHz)を入力し、(3)式で示されるRFKO波形を作成する。

4-2. ハイパワー系

Fig.2の上段に示したローレベル系で作成したFig.2の下段に示すようにRFKO波形を、広帯域増幅器(ENI:3200L)に入力し200ワットまで増幅し、2分岐した後、片方を180度位相反転する。2分岐した出力をもう一度2分岐し、RFKO電極に入力する。

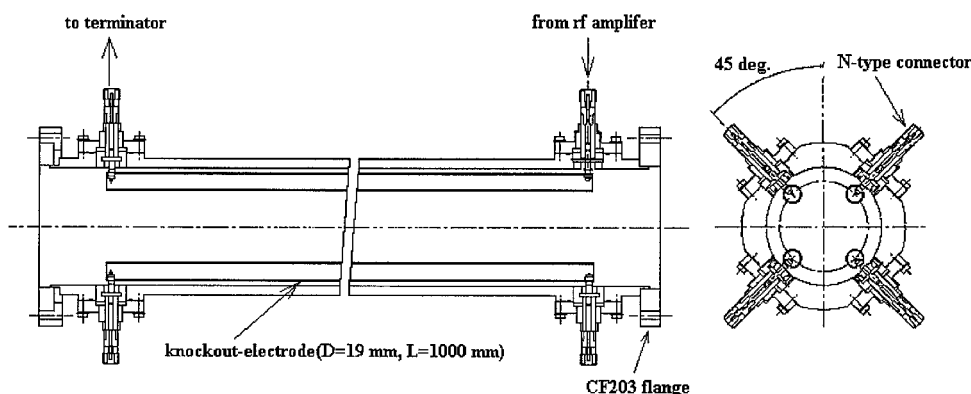


Fig.3 Cross section of the rf knockout-electrode

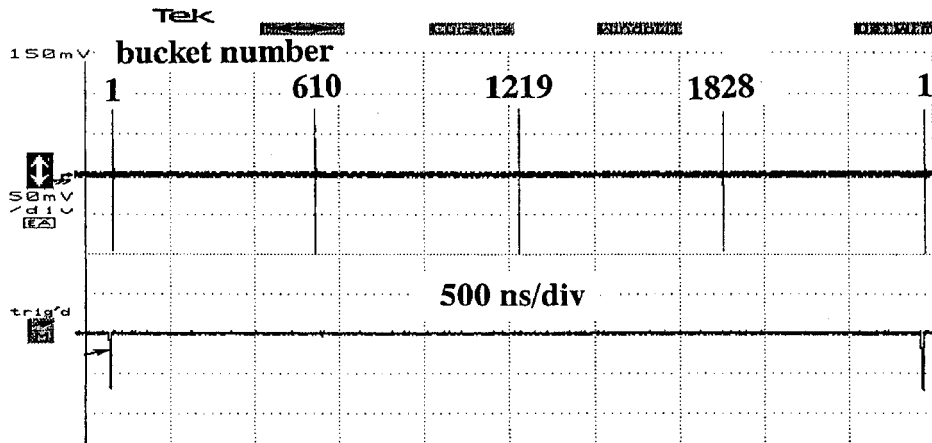


Fig.4 The waveform of four equally-spaced bunches in the storage ring with the aimed bucket changing four times.

4-3 . RFKO電極の構造

ハイパワー系で作成した各々50ワットの4出力をRFKOの4電極に入力する。Fig.3にRFKO電極の構造を示す。4電極は各々50 にインピーダンスマッチングされた長さ1mの伝送ラインになっている。出力側には電力吸収用の50 ターミネータが接続されているため、高周波電流は一定方向に流れ、反射されないようになっている。2電極には180度位相反転した電流が流れるため、合成した電磁場成分は電子ビームを上下方向に変位させる力を発生する。

5 . RFKO波形の作成

任意波形発生器で発生した矩形波をオシロスコープで測定した結果、立ち上がり時間は1nsであった。この矩形波を広帯域増幅器に入力し、出力波形を測定した結果、立ち上がり時間は3nsであった。この立ち上がり時間がこれ以上かかると、直ぐ隣のバンチビームを完全に蹴ることができなくなる。できれば2ns以下で立ち上がることが望ましい。

6 . シングルバンチモード運転

Syで作成したシングルバンチビームをSt.Rのシングルバンチあるいは数バンチに入射した。シングルバンチビームは、1997年5月からのSt.R試験調整運転時にビームモニタの試験のためにSt.Rに供給され、1997年11月、ユーザーに供給された。St.RのBPMの一電極で測定し、この時得られた4バンチ入射時の波形をFig.4に示す。図で下の信号波形はSt.Rの周回時間間隔4.8 μsを表示している。上の波形は等間隔で4バケットにビームが蓄積されていることを表している。これではシングルバンチの不純度が

どのくらいかはっきりしないため、ビームラインでフォトンカウンティングにより測定したビーム波形をFig.5に示す。これよりシングルバンチの不純度は 10^{-6} 以下であることがわかる。現在St.Rでは21バンチで19mAのビーム運転を行い、ユーザーによりNMR散乱等の実験が行われている。この実験の詳細については本誌の矢橋氏の報告を御参照されたい。この入射にかかる時間は、電流値を増加させた時のLiからのビームの運動量幅がビームローディングのため大きくなること、Liからの運動量の変動が大きいためSyへの入射効率が悪いこと、および放射線申請上の限界のためこれ以上Liのピーク電流値を増やせないことにより、現在のところ0mAから19mAまで蓄積するのに1時間程度かかっている。マルチバンチ入射時にはシングルバンチ作成時と同一

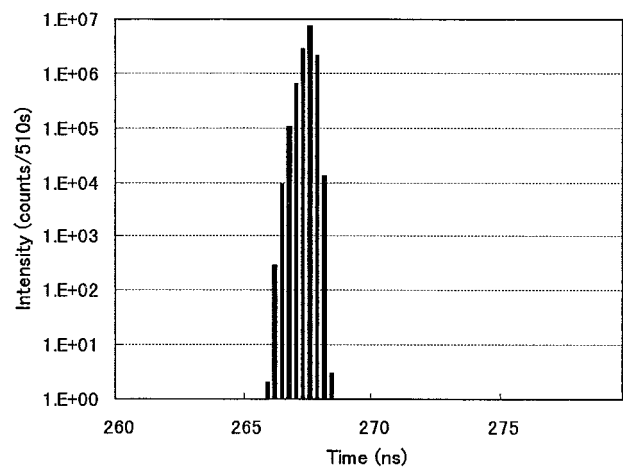


Fig.5 Beam profile of 21-bunch beam operation at Dec./14/97. Summation of 21 bunches are shown. The impurity is less than 10^{-6} .

のビーム条件でLiからSyへ40ns (Syで20バンチに相当する) のマクロパルスで入射し、RFKOをOFFにしている。このマクロパルスを116パルス入射した時、蓄積リングには約15mA蓄積できている。この結果よりRFKOをONにし、シンクロで1バンチだけ残し、蓄積リングへ21バンチで0mAから19mAまで蓄積するのに要する時間を計算すると、約3000秒となり、実際に要する入射時間約3600秒 (1時間) と比較して0.8倍程度の時間となっている。したがってRFKOをONすることにより、目的とする1つのバンチのビーム電流は0.8倍程度に減少するとどまっている。入射時19mAであったビーム電流は、12時間後に約12mAとなり、不純度を増加させることなく追加入射され、19mAまで再度蓄積される。この時の入射時間はLiからの入射ビームの強度に依存するが、約20分程で追加入射は完了する。21バンチで19mAのビーム運転時のビーム寿命は18時間であった。

7. 結論

Liからロングパルスビームを入射しても、SyのRFKOシステムを用いて不純度が 10^{-6} 以下のシングルバンチビームを作成することに成功し、ユーザー運転に供することができた。但し、目的とするバンチ以外にずれてビームが入射されるという異常が時々観測されており、現在原因を調査している。

8. 今後の予定

Liから1ns幅のショートパルスビームをSyのある1つのバケットをねらって入射し、入射効率を向上させる。たとえ隣のバケットにビームが入ったとしてもRFKOでサテライトバンチのみ除去する。また、パルス幅が短くなるため、ビームローディングが減り、Liからのピーク電流を増やすことが可能となる。ピーク電流を現在の約10倍の1A程度に増やせば、入射時間は10分の1の数分程度になる。この改良により不必要なビームをSyへ入射することがなくなるため、機器の放射化および放射線の発生を低減することができる。更により短時間に入射することを目的としてSyで8パルス入射8パルス出射する運転モードが用意されている。この運転モードでSt.Rへの21バンチ入射をLiからの40ns幅のビームを用いて既に行っているが、最後の8パルス目のパルスビームが入射されてすぐにランピングが始まるため、RFKOが十分働かず、不純度が良くないことがわか

っている。また、St.Rに8パルスのビームを入射する時にダンピング時間8msに対して入射繰り返し時間が16.7msであるためダンピングに必要な十分長い時間が取れないことにより、蓄積されたビームのトランスバース方向の振動が収束する前に次の入射が始まるため、蓄積されていたビームの一部が入射セプトラムに衝突し、ロスしていることも分かっている。これらの問題点を回避する方策として、以下の2つのことを考えている。Syのフラットボトム時間を150msから250msに増やし、8パルスのパルスビームの最後から100msのRFKO時間をかけることで不純度の向上を図る。フラットトップ時間を150msから250msに増やすことで出射繰り返し時間を16.7msから33.3msに増やし、St.Rで十分なダンピング時間を取り、St.Rへの実質的な入射効率を増加させる。この2点の改良によりSyの繰返し周期は現在の1sから1.2sへ増加するが、1周期で8パルスの入射が可能となるので、実質的にはSt.Rへの入射時間が約7分の1に短縮できるはずであり、実行計画の検討を開始した。上記2つの改良が実現すれば、21バンチ運転で19mA蓄積するのに要する時間は、1分程度まで短縮できるであろう。

9. 謝辞

1990年6月頃、SPRing-8タイミング設備の検討を始め、リングの基本周波数をカウントすることにより、各種電源のトリガ信号をそのカウント値で決める方式を選択するに際して、高エネルギー物理学研究所 (現在のエネルギー加速器研究機構) の吉岡、浦川両氏と議論し、文献・助言の提供を受け、基本的に有効であることの賛同を得、非常に勇気付けられた。ここに改めて謝辞を述べたい。シンクロトロン・タイミング設備が本設備の中で重要な役割を果たしており、この部分の製作を担当した(株)東芝は、契約所掌を超えた協力を行った。改めて感謝の意を表したい。シングルバンチビームの生成結果を確認するため、当初はリング・モニターグループ、最近になってはBL09実験グループの協力を得た。貴重なデータとなっており感謝する。

References

- [1] H. Suzuki *et al.*, 9th Symp. on Acc. Sci. Tech., 249-251 (1993)
- [2] H. Suzuki *et al.*, 10th Symp. on Acc. Sci. Tech., 252-254 (1995)

- [3] H. Suzuki *et al.*, J. Synch. Rad.(1998), to be published.
- [4] H. Suzuki *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **66** (2), 1964-1967 (1995)
- [5] H. Yonehara *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **66** (9), (1996)
- [6] K. Fukami *et al.*, 10th Symp. on Acc. Sci. Tech., 109-111 (1995)
- [7] H. Suzuki *et al.*, 11th Symp. on Acc. Sci. Tech., 80-82 (1997)



鈴木 寛光 SUZUKI Hiromitsu

昭和36年4月13日生
 (財)高輝度光科学研究センター 加速器部門
 〒678-1298 兵庫県赤穂郡上郡町
 SPring-8中央管理棟
 TEL : 07915-8-0879
 FAX : 07915-8-0883
 e-mail:hiromitu@haru01.spring8.or.jp

略歴：昭和62年、東京工業大学理工学研究科原子核工学修士課程修了(重イオン線型加速器の開発研究)、昭和62年、放射線医学総合研究所重粒子線研究部勤務(入射器担当)、平成元年、日本原子力研究所入所(大型放射光施設開発室シンクロトロンの高周波系担当)、平成9年、高輝度光科学研究センター加速器部門へ出向。日本物理学会会員。最近の研究：シンクロトロンの高周波システム、タイミングシステムおよびセベラルパンチ運転の開発。今後の抱負：セベラルパンチ運転を安定にし、入射時間を短縮すること。趣味：テニス、スキー。



川島 祥孝 KAWASHIMA Yoshitaka

昭和25年4月18日
 (財)高輝度光科学研究センター 加速器部門
 〒678-1298 兵庫県赤穂郡上郡町
 SPring-8中央管理棟
 TEL : 07915-8-0628
 FAX : 07915-8-0850
 e-mail:kawasima@kekvox.kek.jp

略歴：昭和54年、大阪市立大学大学院博士課程中途退学、昭和54年、東京大学宇宙線研究所研究員、昭和56年、ハワイ大学DUMANDセンター研究員、昭和59年、東京大学中間子科学実験施設に勤務、高エネルギー物理学研究所非常勤講師、東京大学原子核研究所研究員を歴任、平成2年、理化学研究所大型放射光施設計画推進本部研究開発室に勤務、平成5年、高輝度光科学研究センター加速器部門に勤務現在に至る。理学博士。専門は素粒子物理実験、特にミューオンを用いた弱い相互作用の研究。最近の研究：蓄積リングの高周波システム、タイミングシステム。



谷 教夫 TANI Norio

昭和42年2月25日生
 (財)高輝度光科学研究センター 加速器部門
 〒678-1298 兵庫県赤穂郡上郡町
 SPring-8中央管理棟
 TEL : 07915-8-0879
 FAX : 07915-8-0883
 e-mail:tani@haru01.spring8.or.jp

略歴：平成3年、神戸商船大学商船学部原子動力学科卒業、平成5年、神戸商船大学商船学研究科原子動力学専攻修士課程修了、平成5年、日本原子力研究所入所、平成9年、高輝度光科学研究センター加速器部門へ出向。プラズマ核融合学会会員。最近の研究：シンクロトロン制御システム、タイミングシステム。



細田直康 HOSODA Naoyasu

(財)高輝度光科学研究センター 加速器部門
 〒678-1298 兵庫県赤穂郡上郡町
 SPring-8中央管理棟
 TEL : 07915-8-0851
 FAX : 07915-8-0850
 e-mail:hosoda@sp8sun.spring8.or.jp



米原 博人 YONEHARA Hiroto

昭和25年4月13日生
 (財)高輝度光科学研究センター 加速器部門
 〒678-1298 兵庫県赤穂郡上郡町
 SPring-8中央管理棟
 TEL : 07915-8-0883
 FAX : 07915-8-0850

略歴：昭和56年広島大学大学院理学研究科物理学専攻博士課程修了。同年東京大学原子核研究所核研究員、重イオンビームのストカスティック冷却の研究。理学博士。昭和58年岡崎国立共同研究機構分子科学研究所文部教官助手、分子研UVSOR建設及びビーム不安定性の研究、リングFELの研究。平成2年日本原子力研究所入所、SPring-8入射系シンクロトロンの設計及び建設を担当。