

BOOSTER SYNCHROTRON FOR CENTRAL JAPAN SYNCHROTRON RADIATION FACILITY

Koichi Nakayama^{#,A)}, Aki Murata^{A)}, Naohisa Tsuzuki^{A)}, Teruyasu Nagafuchi^{A)}, Shinya Matsuda^{A)},
Junko Watanabe^{A)}, Kosuke Sato^{A)}, Yoshifumi Takashima^{B)}, Masahito Hosaka^{B)}, Naoto Yamamoto^{A)},
Kiyoshi Takami^{B)}, Hiroyuki Morimoto^{B)}, Atsushi Mano^{B)}, Takumi Takano^{B)}, Masahiro Katoh^{C),B)},
Yoichiro Hori^{D),B)}, Shigeki Sasaki^{E),B)}, Shigeru Koda^{F),B)}

^{A)} Toshiba Corporation Power System Company, 8 shinsugita, isogo-ku, yokohama 238-8523

^{B)} Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603

^{C)} Institute for Molecular Science, National Institute of Natural Science, Myodaiji-cho, Okazaki 444-8585

^{D)} High Energy Accelerator Research Organization, KEK, 1-1 OHO, Tsukuba, Ibaraki 319-1112

^{E)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/Spring-8), Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198

^{F)} Saga Light Source, 8-7 Yayoigaoka, Tosu, Saga, 841-000

Abstract

The 1.2 GeV Booster synchrotron for Central Japan Synchrotron Radiation Research Facility (Provisional) has been designed, constructed. The 1 ns single bunch electron beam from 50 MeV injector linac is injected by on-axis injection scheme and accelerated up to 1.2 GeV. The beam commissioning for beam extraction has been progressing. The design beam emittance is designed about 200 nm for Top up operation. FODO lattice has applied with 10 Bending magnet, 10 Focusing Quadrupole and 10 Defocusing Quadrupole magnet. Six sextupole magnets for chromaticity correction and 8 Horizontal and Vertical magnet also installed. The 499.654 MHz 10 kW RF Solid state amplifier used for Accelerator cavity. The repetition cycle is 1 Hz and Power supply for lattice magnets and RF solid state amplifier is operated with pattern memory system. The EPICS control system is used with timing control system for pulse magnet and pattern memory system.

中部シンクロトロン光利用施設（仮称）1.2 GeV ブースターシンクロトロン

1. はじめに

中部シンクロトロン光源利用施設（仮称）の 1.2 GeV ブースターシンクロトロンの設計・製作および据付が完了して、入射用 50 MeV のライナックを用いたビーム調整作業を行っている。現在は、1.2 GeV までのビーム加速を確認して、光源リングのビーム調整試験を並行して行っている。^[1,2,3,4]

将来の TOP-UP 運転に備えて、ビームエミッタンスを 200 nm 程度を目指してラティス設計を行った。ブースターへのビーム入射効率の向上を考慮して 50 MeV ライナックから 1 ns の電子ビームを ON-AXIS 入射して、ブースターシンクロトロンでのシングルバンチ運転を行う。

電磁石は 10 台の偏向電磁石 (BM) および各 10 台の QF および QD から構成される。加速立ち上げ時のうず電流による 6 極磁場の効果を含めて、クロマティシティ補正用の 6 極磁石 6 台 (SF, SD) を設置した。電磁石の製作および設置誤差による誤差磁場による閉軌道の補正用に、軌道補正電磁石水平 7 台および垂直用 8 台を設置する。高周波加速系は、10 kW の 500 MHz 半導体アンプで光源リングと同じ 500 MHz 加速空洞に高周波を伝送する。各電磁石および高周波アンプは、パターンメモリーを用

いて 1 Hz のパターン運転を行う。制御系は EPICS を用いたシステムで、タイミング制御系により入射電磁石およびパターン電源のタイミング制御を行っている。

2. ブースターシンクロトロンの設計

ブースターシンクロトロンは、電磁石および電源の小型化および蓄積リングへのトップアップ運転時のビーム輸送・入射効率を考慮して SPring-8 ブースターシンクロトロンの 200 nm-rad 程度のエミッタンスを目指してラティスの検討を行った。

小型で低エミッタンスのラティスとして 10 セルの FODO ラティスを選択した。4 極電磁石は、2 ファミリーの QF および QD の 2 種類で考えた。直線部を 1420 mm と 1180 mm を交互に配置して入射部、出射部および高周波空洞は 1420 mm の長直線部への配置をおこなう事で周長を 48 m にした。

入射用の 50 MeV ライナックからの入射電子ビームは、ブースターシンクロトロンのシングルバンチ運転を行うためにパルス幅が 1 ns 以下で ON-AXIS 入射を行い入射後のベータトロン振動を抑えている。

表 1 は、チューン 2.75/1.75 にした場合のパラメータである。エミッタンスは 1.2 GeV で 213 nm となり、出射時の最大ビームサイズ（水平方向で 1σ 分）は、2.21 mm になる。

koichi.nakayama@toshiba.co.jp

表 1 : ブースターシンクロトロンパラメータ

入射エネルギー	50 MeV
出射エネルギー	1.2 GeV
周長	48m
チューン	2.75/1.75
Chromaticity	-2.46/-2.34
Momentum compaction	0.129
エミッタンス(1.2GeV)	214nm
加速周波数	499.654MHz
ハーモニック数	80
繰り返し	1 Hz
出射時最大ビームサイズ	2.2mm

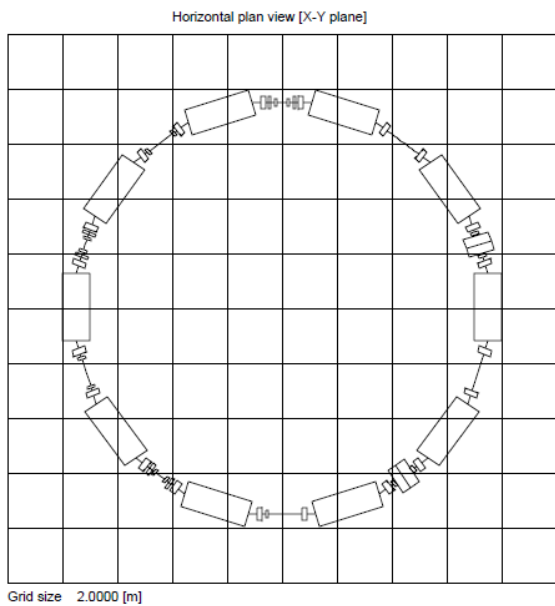


図 1 : ブースターの配置

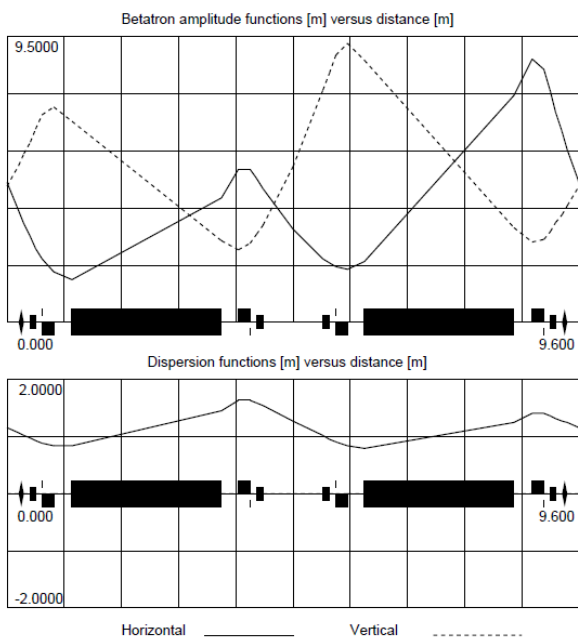
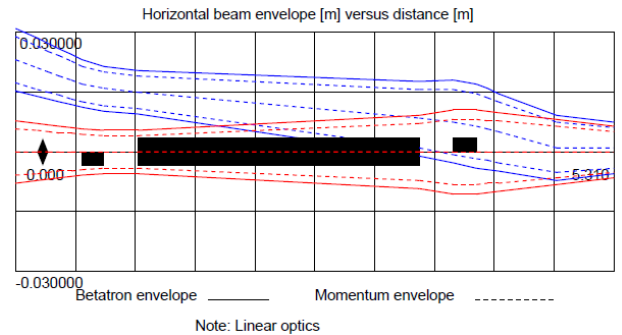


図 2 : ブースターラティス関数(1/5 周分)

2-1 ビーム入射軌道およびパルス電磁石

ビーム入射軌道および周回ビームの入射部の軌道を図 3 に示す。



(青 : 入射軌道 および 赤 : 入射時ビームサイズ ; $\epsilon = 1 \pi \text{ mm/mrad}$ 、 $dp/p = \pm 0.5\%$)

図 3 : 入射部での入射ビーム軌道および周回軌道

50 MeV ライナックからの電子ビームは、入射セプタム電磁石によりブースターに入射されて入射キッカー電磁石により中心軌道を周回する。入射パルス電磁石の仕様を表 2 に示す。

表 2 ; 入射パルス電磁石仕様

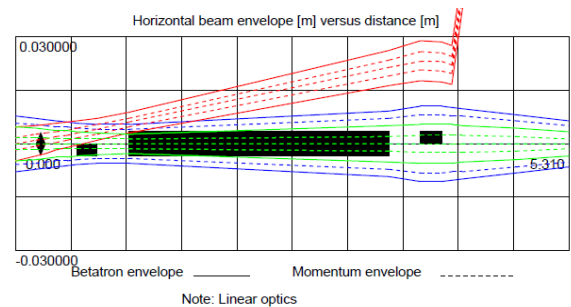
入射用セプタム電磁石仕様

台数	1 台
磁極長	0.524 m
偏向角	30 度
偏向半径	1 m
磁場強度	0.167 T
磁場波形	2 $\mu \text{ sec}$ 正弦半波

入射用キッカー電磁石仕様

台数	1 台
磁極長	0.2 m
最大キック角	8 mrad
最大磁場強度	0.0064 T
磁場波形	立下り 150nsec 台形波

ビーム出射軌道および入射時周回ビームの出射部の軌道を図 4 に示す。



(赤 : 出射軌道、緑 : 出射時ビームサイズ
青 : 入射ビームサイズ

($\epsilon = 1 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 、 $dp/p = \pm 0.5\%$)

出射キッカーのけり角 5.2 mrad

図 4 : 出射部でのビーム出射軌道および周回軌道

1.2GeV まで加速された電子ビームは、周回時間より立ち上がりに早いキッカーで出射セプタムに導かれて取り出される。
出射パルス電磁石の仕様を表3に示す。

表3 ; 出射パルス電磁石仕様

出射用セプタム電磁石仕様	
台数	1 台
磁極長	0.863m
偏向角	16.482 度
偏向半径	3 m
磁場強度	1.32 T
磁場波形	100 μ sec 正弦半波
出射用キッカー電磁石仕様	
台数	1 台
磁極長	0.16 m
最大キック角	5.2 mrad
最大磁場強度	0.12 T
磁場波形	< 160nsec

2.2 加速時のうず電流の影響および6極補正

ブースターシンクロトロンの運転は1 Hz で、偏向部磁場は、入射時の0.041T から1.2GeVの1.005Tまで、0.45秒間で直線的に変化させる。この磁場の変化により、偏向部ダクトにうず電流が流れて6極成分が発生する。

運転パターンとしては、0.45秒で50MeVから1.2GeVまで直線的に立ち上げることを考える。このときに発生する、偏向部ダクトのうず電流による6極成分を以下に評価する。
楕円のビームダクトの厚さをDとして、電磁石のギャップの1/2をhとした場合のうず電流による、6極磁場成分mは以下になる。

$$m = 1/B\rho \cdot d^2 B/dx^2$$

$$= \mu_0 \cdot \sigma \cdot D \cdot d B/dt / (B\rho h)$$

$$= 8.83E-2 / (0.047625 + 2.434 * t)$$

ここで $\sigma = 1.36E6 (1/\Omega \cdot m)$: SUS

$$D=0.7 \text{ m m}, h=10 \text{ mm},$$

$$dB/dt = (1.005T-0.041T) / 0.45 = 2.224 \text{ T/s}$$

この6極磁場の影響は加速開始時が最大となるため、直線的な磁場変化では、0.8mm厚のSUSダクトを使用すると、うず電流の6極成分によるクロマテシティーが大きくなり、ビームを安定に加速するには6極磁場によるクロマテシティー補正が必要になる。SUSダクトとしてUVSORおよびSPring-8等で使われている0.3mmの薄肉ダクトを使用すると、6極磁石の補正なしでもビームが安定に加速できる。一方、うず電流による6極成分は、磁場立ち上げのスムージングを行うことにより、線形に立ち上げ場合と比較して、1/2から1/3に低減できる。このため、0.8mm厚のSUSダクトでもビーム安定領域が

広くできることがわかった。
図5に、スムージングによる6極成分低減を示す。

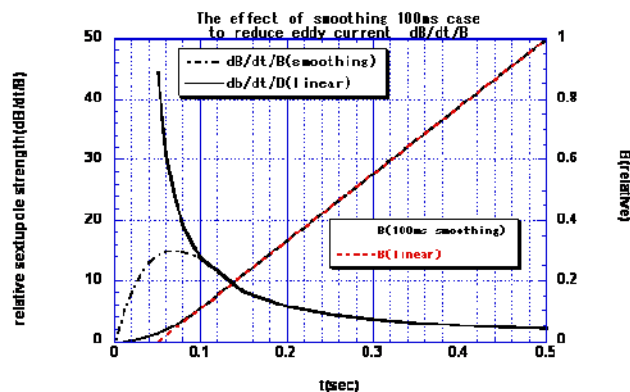


図5 ; 加速開始時のスムージング(50ms)によるうず電流6極成分の低減

うず電流による6極磁場がある場合の、6極磁場の非線形効果によるビーム安定領域について計算コードMAD8で計算を行った。図6に、SUS0.3mmのダクトで直線的な磁場変化で1 Hz運転を行った場合を示す。SUS0.8mmのダクトを使用する場合には、磁場立ち上げ時にスムージングを行うことで安定領域を確保できる。

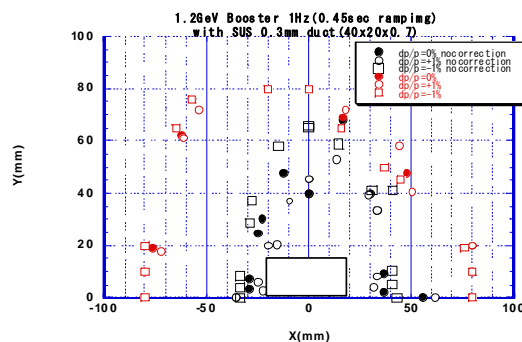


図6 : うず電流の6極成分によるビーム安定領域

2.3 高周波システム

ブースターシンクロトロンの高周波空洞は、光源リングと同じ空洞本体を使用する。高周波システムの仕様を表3に示す。

表3 : 高周波システムパラメータ

RF周波数	499.654MHz
空洞シャントインピーダンス	6.8MΩ
RF加速電圧(最大)	0.2MV
量子寿命(1.2GeV@0.2MV)	>10sec
空洞RFロス(@0.2MV)	5.9kW
放射光ロス(1.2GeV)	46.1keV/turn
ビームRFロス(1.2GeV@1mA)	0.0461kW

最大 RF 加速電圧に関しては、1.2GeV での量子寿命が 10 秒以上という条件から、図 7 より 0.2MV と決定した。

高周波源としては必要な RF 電力が最大で 6.0kW 程度のため出力 10kW の半導体アンプを採用した。

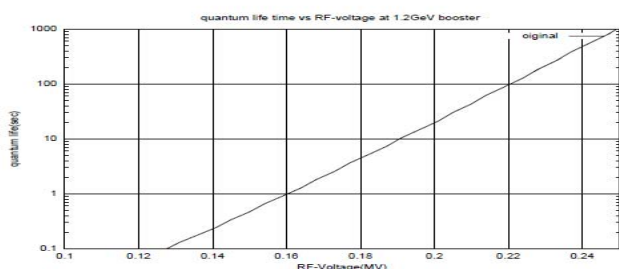


図 7：量子寿命と RF 加速電圧の関係（1.2GeV）

入射時 50MeV での RF ピーク電圧によるバケット高さのエネルギー広がり考えたビームサイズを、図 8 に示す。RF 電圧一定運転の場合は、 $V_{rf}=0.2MV$ でバケット高さは 1.55% になる。この場合は、ビームサイズは最大±28 mm になる。

ビームサイズを抑えるためには、RF 電圧を 0.02MV 程度にする必要があることがわかる。現状のラティスのアパーチャーは 1.0% 程度のエネルギー全幅を許容するように考えてある。

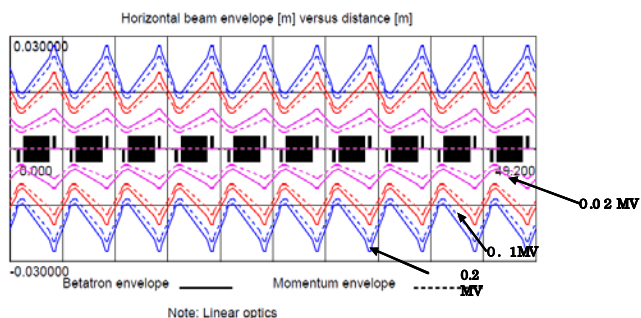


図 8：入射時の RF 電圧によるビームサイズ変化

2.4 電磁石電流と空洞電圧のパターン制御

ブースターシンクロトロンへの偏向電磁石電流、4 極電磁石電流、6 極電磁石電流、および加速空洞の加速電圧については、加速エネルギーに依存する変化パターンを与える必要があります。このためにパターンメモリ装置を用いてこれらの基準信号をパターンとして出力します。図 9 にパターン制御の構成図として偏向電磁石電源を例として示す。4 極電磁石電源、6 極電磁石電源、および加速電圧も同様のパターン制御を行う。

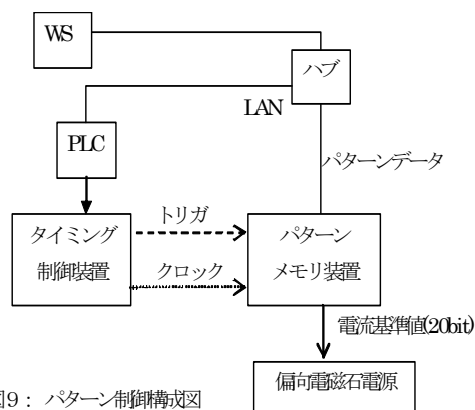


図 9：パターン制御構成図

パターンデータ(電流波形)はワークステーション(WS)よりネットワーク経由でパターンメモリ装置に送られてメモリに記録される。このメモリのデータがクロック信号によって先頭から順番に読み出されて電流基準値として出力される。トリガ信号の入力により、メモリは先頭に戻り、再びクロック信号の入力により電流基準値が出力される。この動作を図 10 のタイムチャートに示す。加速開始とフラットトップへの移行時は二次関数により滑らかにつながるようパターン作成ソフトによりパターンデータを作成する。

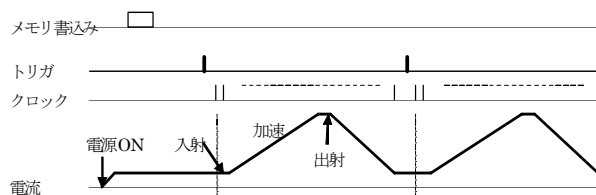


図 10：タイムチャート

3. 現状および今後の予定

2012 年 4 月末までには、1.2GeV ブースターシンクロトロンへのビーム入射および 1.2GeV 加速を確認している。その後、光源リングへのビーム入射試験を続けて、2012 年 7 月末にビーム蓄積に成功してファーストライトの観測した。

現在は、光源リングへの蓄積実験と並行して、ブースターシンクロトロンのビーム調整を行っている。

参考文献

- [1] Y. Takashima, et al., "Present Status of Accelerators of the Central Japan Synchrotron Radiation Facility", *These Proceedings*, THPS012
- [2] M. Yamamoto, et al., "DESIGN OF THE 50MEV LINAC OF THE CENTRAL JAPAN SYNCHROTRON RADIATION FACILITY", *These Proceedings*, THPS027
- [3] A. Murata, et al., "Accelerator system FOR CENTRAL JAPAN SYNCHROTRON RADIATION FACILITY", *These Proceedings*, THPS047
- [4] N. Yamamoto, et al., "Commissioning of Accelerators of the Central Japan Synchrotron Radiation Facility", *These Proceedings*, THPS040