

# 東北大学電子ブースターシンクロトロン入射用 90MeV リナックの開発状況

## STATUS OF A NEW 90MEV INJECTOR LINAC FOR THE ELECTRON BOOSTER SYNCHROTRON AT TOHOKU UNIVERSITY

柏木 茂<sup>#</sup>, 日出 富士雄, 南部 健一, 柴崎 義信, 武藤 俊哉, 長澤 育郎, 高橋 健, 浜 広幸  
 Shigeru Kashiwagi<sup>#</sup>, Fujio Hinode, Kenichi Nanbu, Yoshinobu Shibazaki, Toshiya Muto, Ikuro Nagasawa, Ken Takahashi, Hiroyuki Hama

<sup>A)</sup> Electron Light Science Centre, Tohoku University

### Abstract

The Great East Japan Earthquake (March 11, 2011) has inflicted enormous damage on the accelerator facility of Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University. A 46-year-old 300 MeV linac had been operated for radioisotope (RI) production and also as an injector of a 1.2 GeV booster synchrotron for nuclear physics experiments. Low energy part of the linac will be rebuilt with all recyclable components to sustain RI production. A new small linac is constructed as the injector for the booster synchrotron. The injector consists of a thermionic rf-gun, an alpha magnet, two 3m-long accelerating structures and transport line to the synchrotron. The maximum energy of injector is 90 MeV with beam loading. The detail of the injector linac is presented in this conference.

### 1. はじめに

東北大学電子光物理学研究センターの電子加速器は東日本大震災により甚大な被害を受けた。特に300MeV電子リナックの高エネルギー部分は被害が大きく修復が困難であったため、1.2GeV電子シンクロトロン入射器として新たに90MeVリナックを建設した<sup>[1]</sup>。90MeV電子リナックは、熱陰極RF電子銃と2本の3m長Sバンド加速管、ビーム輸送系で構成されている。我々がこれまで開発を行ってきた独立2空洞型のRF電子銃を電子源としており、低エミッタンスの短パルス電子ビームを生成することが可能である。2012年10月末から2013年1月の約3カ月間で加速器の設置とRFチューニングを完了し、2013年1月29日にエネルギー90MeVまでのビーム加速に成功した。その後、入射用リナックのコミッショニングは加速器建屋内の他の復旧工事のために断続的に行われ、2013年5月より電子シンクロトロンへの本格的なビーム入射試験を開始した。本発表では、リナックから電子シンクロトロンへのビーム輸送ラインで行ったビーム特性計測の結果や入射のためのオプティクスマッチングなどの開発状況について報告する。

### 2. シンクロトロン入射用リナック

震災前までは、1.2GeVブースターシンクロトロンへのビーム入射はエネルギー150~200MeVで行われてきた。限られた復旧費と期間で入射リナックを再構築するために幾つかの構成を検討した結果、1台のクライストロンを高周波源とし、電子源は我々がこれまでに開発を行ってきた熱陰極RF電子銃を使い、2本の3m長Sバンド加速管で90MeVまでビーム加速するシステムとした(Fig. 1)。以下に、入射リ

ナックの各構成要素について説明する。

#### 2.1 電子源

電子源に採用したRF電子銃は、我々がこれまで低エミッタンス・超短電子バンチ生成用に開発してきた独立2空洞型熱陰極高周波電子銃(ITC-RF電子銃)である<sup>[2-4]</sup>。このITC-RF電子銃は2空洞間の結合度が極めて小さいので(-50 dB以下)、それぞれの空洞へ供給するRFの位相と振幅を独立に調整でき、ビームの縦方向位相空間分布を制御することが可能である<sup>[5]</sup>。また、アルファ電磁石とその内部に設置してある稼働スリットとを組み合わせることで、加速管に入射するビームのエネルギー幅を調整することができる。熱陰極は直径1.78mmのLaB<sub>6</sub>単結晶を使用している。カソードサイズが小さいので初期エミッタンスを低く抑えることができ、数mm mradの低エミッタンスビーム生成が可能であ

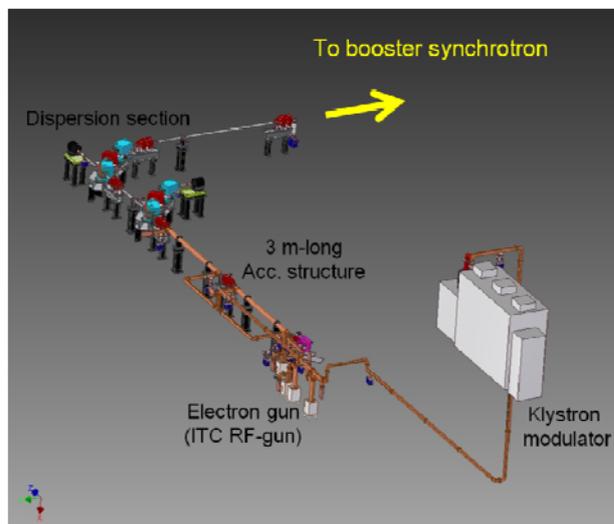


Figure 1: The 90 MeV injector linac for the electron booster synchrotron.

<sup>#</sup> kashiwagi@lns.tohoku.ac.jp

る。

## 2.2 高周波システム

入射リナックの高周波システムは、1 台のクライストロンより大電力 RF を出力し、RF 電子銃と 2 本の 3m 長 S バンド加速管に電力を供給する構成になっている。クライストロンは、研究用加速器 (t-ACTS) [3]でも使用している最大出力 50MW の東芝製 3730A を採用した。クライストロンモジュレータは、容量 16kJ(8kJ/sec×2 台)の充電電源、9 段の PFN およびサイクロンで構成され、最大出力電圧は約 320 kV、有効パルス幅 3  $\mu$ s、パルス半値幅 7  $\mu$ s である。出力電圧の振幅ジッターは 0.22 % (p-p)、パルス平坦度は 0.30 % (> 3.0  $\mu$ s flat-top)であった。

クライストロン出力の RF 電子銃と 2 本の加速管への電力分配比は、RF 電子銃で 2MeV 以上の電子ビームが生成でき、できる限り多くの電力を加速管に供給できるように決定した。導波管立体回路には、大電力移送器 2 台と減衰器 2 台が設置されている。2 台の移送器を使い RF 電子銃 2 空洞間の位相差および RF 電子銃と加速管の間の位相差を制御することができる。2 本の加速管の間の位相は、加速位相が同じになるように導波管長で調整してある。また、クライストロン (地上 1 階) から RF 電子銃空洞および加速管 (地下加速器室) までの導波管長が 20m 以上と長いので、導波管での電力損失を抑えるために SUS フランジの内面には銅メッキを施した。

## 2.3 加速セクション

加速管は 3m 長の高シャントインピーダンスタイプのもの( $r = 59 \text{ M}\Omega/\text{m}$ 、仕様値:  $53 \text{ M}\Omega/\text{m}$  以上、 $\tau = 0.57$ 、 $t_f = 830\text{ns}$ )を使用している。入出力カップラは、電場非対称性によるエミッタ劣化を抑えるためにシングル入力準対称型のものを採用した。クライストロン出力が 50MW の時、導波管における電力損失と RF 電子銃への電力分配を考慮に入れると、加速管 1 本あたりの入力電力は約 19.6MW となる。このとき、ビーム負荷なしで加速管 2 本でのエネルギー利得は約 97MeV となる。また、ビーム電流を 50mA とした場合、ビーム負荷電圧は加速管 1 本あたり約 2.1MV である。

## 2.4 ビームトランスポートライン

ビームは、約 90MeV まで加速された後、90 度偏向部およびダブレット Q 磁石で構成されるビームラインを通過し、既設の入射ラインへと輸送される。ビーム偏向部は、2 台のセクター型 45 度偏向電磁石と分散部の中央に設置された 1 台の四極電磁石で構成される。四極電磁石の位置で分散関数( $\eta$ )が約 0.6m と最大になる。四極電磁石の前後にはエネルギースリットとスクリーンモニタが設置されている ( $\eta = 0.4\text{m}$ )。またビームラインにはビーム診断のための、ボタン型 BPM とビームプロファイルモニタ (YAG screen:  $t = 200\mu\text{m}$ )、ビーム電流モニタが設置されている。

## 3. ビームコミッショニング

入射リナックのビームコミッショニングを 2013 年 1 月末より開始し、RF 電子銃より生成されたビームのエネルギースペクトル計測や加速後のエネルギー分布計測などを、ビーム調整のために行っている。5 月から行われているシンクロトンへのビーム入射の際は、エミッタンスおよび Twiss パラメータの測定、入射のためのオプティクスマッチングを実施している。

### 3.1 ビーム調整

ITC-RF 電子銃により生成される電子ビームの特性は RF 電子銃に供給する RF パラメータ (位相、振幅) に依存する。RF 電子銃の第 1、第 2 空洞の加速電場を 27MV/m、70MV/m に固定し、2 空洞間の位相差を変化させた時の電子銃出口と  $\alpha$  電磁石下流でのビーム電流を Fig. 2 に示す。測定された RF 電子銃出口でのビーム電流量の変化とシミュレーション結果の比較から、RF 電子銃の 2 空洞間の位相差が分かる。また、 $\alpha$  電磁石内に設置してあるスリットをビームの低エネルギー側から一定間隔で移動させ、その時の透過電流からビームのエネルギースペクトルを測定することが可能である。Figure 3 に  $\alpha$  電磁石下流で測定されたビーム電流 (赤プロット) とその差分をとったエネルギースペクトル (青プロット) を示す。このスペクトルを測定の形状から、RF 電子銃の位相と電場強度を決定する。

加速管の位相の調整は立体回路内に設置したハイパワー移送器により行う。ビームのマクロパルス内のエネルギー分布の計測は、90 度偏向部に設置したビームスリットと下流の電流モニタを使い行った。

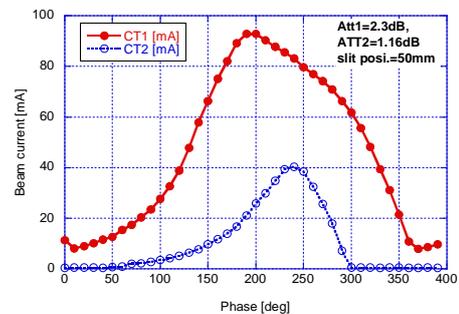


Figure 2: Measured beam current at the gun exit (red dot circle) and downstream of alpha magnet (blue open circle), respectively.

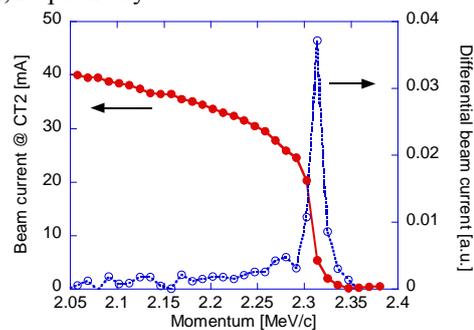


Figure 3: Measured beam current (solid circles) and its variation (open circles) at downstream of alpha magnet with different slit position.

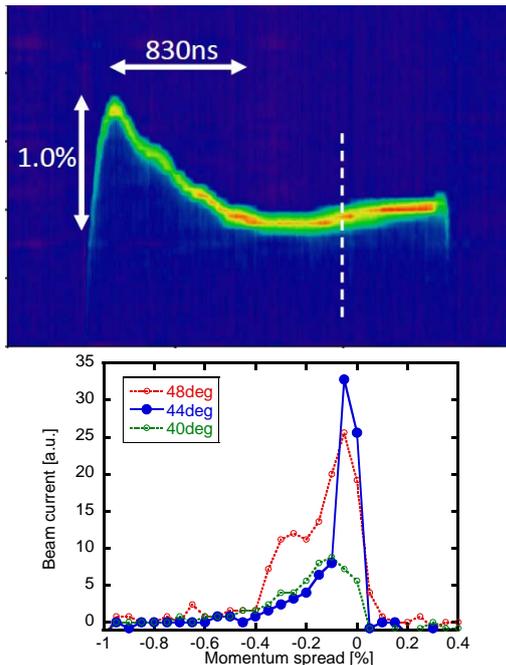


Figure 4: (Left) Measured energy spectrum of macro beam pulse. (Right) Slice energy spectrum.

Figure 4 (左)がカラーマップでビーム強度を表したマクロパルスの縦方向位相空間分布 (横軸: 時間、縦軸: 運動量)、(右)が左図の点線の時間でスライスしたエネルギースペクトルである。グラフ中の3つのプロット線は異なる位相で加速した時のスペクトル変化を表している。このように加速したビームのエネルギースペクトルを測定することにより、エネルギー広がりが最小になるように加速位相を調整することが可能である。また、Fig.4 (左)では、ビームパルス前半部で加速管での過渡的なビームローディングも観測された。

熱陰極 RF 電子銃の場合、電子ビームのマクロパルス幅の調整は、RF 電子銃に供給する RF パルス幅を変えることにより行う。Figure 4 の測定では、RF パルス幅を 2.5  $\mu$ s であった。加速後のマクロパルスの時間幅が RF 電子銃で生成されるビームよりも短いのは、マクロパルス先頭部分のエネルギーが低いために  $\alpha$  電磁石のスリットでカットされてしまうためである。

### 3.2 オプティクスマッチング

ビームの横方向エミッタンスと Twiss パラメータは Q スキャン法により加速管下流で測定される。Figure 5 に測定結果の一例を示す。上段が四極電磁石(QF3, QD3)を変化させた時のスクリーンモニタ (PRM3)で測定されたビームサイズ変化、下段はエミッタンスと Twiss パラメータから求まるビーム ellipse を表している。ビーム電流が約 25mA の時、水平・垂直方向の規格化エミッタンス ( $\epsilon_{nx}$ ,  $\epsilon_{ny}$ ) は約 6~9 $\pi$ mmrad であった。

シンクロトロンへビームを入射する際は、Q スキャンの測定結果を使い第 2 加速管出口からシンクロトロンの入射点までのオプティクスマッチングを

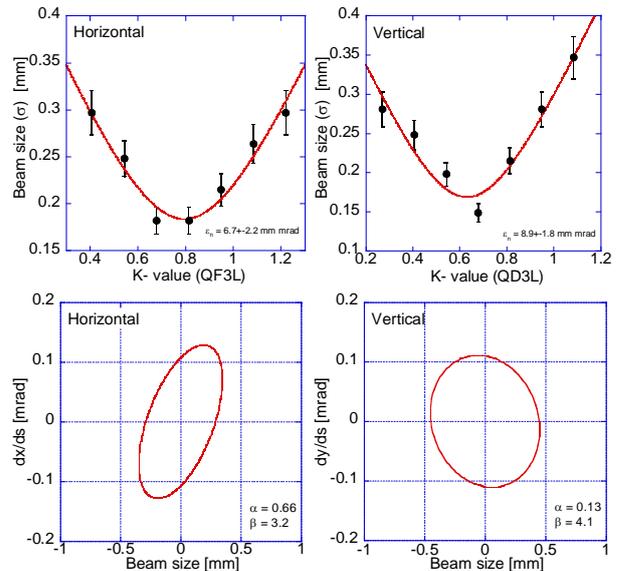


Figure 5: Quadrupole scan using single magnet in horizontal (left) and vertical (right) directions. The graphs of bottom row are beam ellipses in transverse phase space.

行う。Figure 6 は第 2 加速管出口からシンクロトンのビーム入射点までのトランスポートラインのレイアウトである。入射リナックが設置されている加速器室とシンクロトロンが設置されている第 2 実験室は、厚さ約 4m のコンクリートの壁によって仕切られている。第 2 実験室側の既設のトランスポートラインの途中に、リングのビームラインと交差する部分があり、この交差部ではビームがシンクロトロンへの偏向電磁石(BM7)の磁極のすぐ脇を通過するため、その漏れ磁場の影響を受ける。3 次元コードで漏れ磁場を計算したところ、高次の磁場成分もかなり大きい事が分かった。双極磁場成分に関する補正は、交差部前後に設置されたステアリング電磁石により軌道を補正することで行い、高次の磁場成分についてはビームサイズを小さく絞ることによりその影響を最小限に抑えるようにする。そのため、トランスポートラインのビーム輸送の条件は、入射点での Twiss パラメータを設計値に適合させる事と、リングのビームラインとの交差点でビームを水平・垂直方向に絞る( $\alpha_x = \alpha_y = 0$ ,  $\beta_x = \beta_y = 1.0$ )ことである。Figure 7 にトランスポートラインに沿った、 $\beta$  関数と分散関数を示す。交差部 (BM7) でビームウエストをつくるために加速器室側に設置してある四極電磁石(QF6, QD6)の位置で一度ビームを上げ、4m のコンクリートの壁越しにビームを集束させる。マッチング後は、リングの偏向電磁石を通電した場合でも、ビームプロファイルが大きく歪むような事が無いことを交差部下流のスクリーンモニタ (SCM3) で確認することができた。

## 4. まとめと今後の課題

2012 年 10 月末よりシンクロトロン入射用リナックの設置工事を行い、約 3 週間の RF エージングの

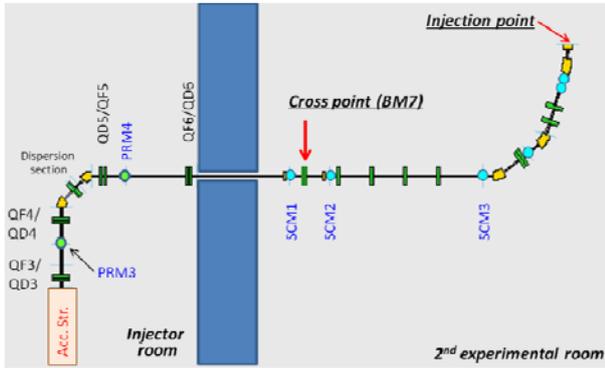


Figure 6: Layout of beam transport line from the injector to the booster synchrotron.

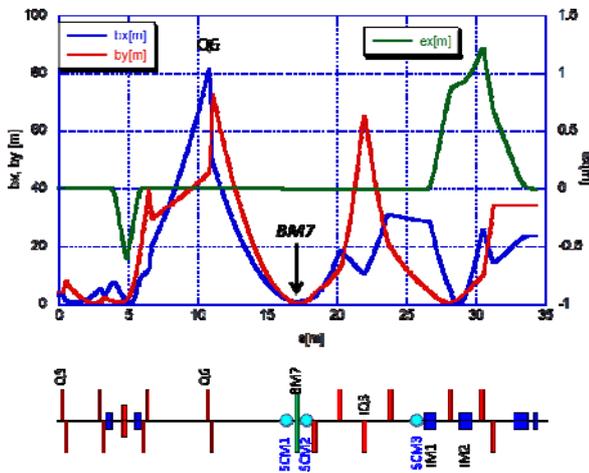


Figure 7: Beta functions and dispersion function along the transport line.

後、2013年1月29日に90MeVまでの加速に成功した。同年5月にはブースターシンクロトロンへの

ビーム入射を開始した。これまでに、入射リナックおよびトランスポートラインでは、エミッタンスなどのビームパラメータ測定や入射のオプティクスマッチングを行ってきた。ブースターシンクロトロンについては、6月中頃にビームのRFキャプチャに成功し、7月初旬には約1.3GeVのビーム周回に成功した<sup>[6]</sup>。

今後、シンクロトロン蓄積電流を増やすために、入射リナックの電流の増強や入射のオプティクスマッチングの精度向上を図る。マッチングの精度向上のために、ビームを使ったトランスポートラインの四極電磁石(K値)の校正を行っていく予定である。また、実際に原子核実験にビームが供される際は、リナックからシンクロトロンへのビームの入射は数10秒に一回と極めて低い繰返しとなる。そうしたビーム発生繰返しを下げた場合にも、安定にビーム生成がなされているかなど、ビーム安定度の評価を今後行っていく。

### 謝辞

シンクロトロン入射用90MeVリナックの建設では、三菱重工業株式会社の三浦禎雄博士、鈴木大輔氏、中垣雅弘氏、日新パルス電子株式会社の相根豊氏、大下英次氏をはじめ大変多くの方々にご協力頂きました。ここに感謝致します。

### 参考文献

- [1] 南部健一 他 第10回日本加速器学会年会 (SSFP24)
- [2] Hinode et al., Proc. 21st Particle Accelerator Conf., (2005) 2458-2460.
- [3] H. Hama et al., New J. Phys. 8 (2006) 292.
- [4] T. Tanaka et al., Proc. 27th Int. FEL Conf. (2005) 371.
- [5] 黄 暖雅 他、第9回日本加速器学会年会(WEUH06)
- [6] 日出富士雄 他 第10回日本加速器学会年会 (SUOS01)