

NEW CONSTRUCTION OF 90MEV INJECTOR LINAC FOR THE ELECTRON SYNCHROTRON AT TOHOKU UNIVERSITY

Shigeru Kashiwagi^{#A)}, Masayuki Kawai^{A)}, Yoshinobu Shibasaki^{A)}, Ken Takahashi^{A)}, Ikuro Nagasawa^{A)}, Ken-ichi Nanbu^{A)}, Fujio Hinode^{A)}, Toshiya Muto^{A)}, Hiroyuki Hama^{A)}, Nuan-Ya Huang^{B)}

^{A)} Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University,
1-2-1 Mikamine, Taihaku-ku, Sendai, Miyagi, Japan, 982-0826

^{B)} Institute of Photonics Technologies, National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan 30013

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 300 MeV linac operated for 46 years as an accelerator for radioisotope production and also as an injector of the 1.2 GeV booster synchrotron for nuclear physics experiments. The accelerator will be rebuilt with all the recyclable components. New small linac is constructed as the injector for the booster synchrotron. The injector consists of thermionic rf-gun, 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 introduced in this conference.

東北大学電子シンクロトン入射用 90MeV リニアックの新設

1. はじめに

昨年3月の東日本大震災により、電子光物理学研究センターの最大エネルギー300MeVの電子リニアックおよび1.2GeV電子シンクロトロンは甚大な被害を受けた。特に運転中に被災したりリニアック部の被害は深刻で、建設から40年以上経つこともあり交換部品の入手が難しく、リニアックの全面復旧は不可能であると判断せざるをえなかった。震災までリニアックはRI生成実験および原子核実験に供される電子ブースターシンクロトロン入射器として利用されてきたが、我々は比較的被害の少なかったリニアック低エネルギー部をRI生成実験のために復旧し、電子シンクロトン入射用リニアックを新たに

建設することにした。新設する入射用リニアックは、熱陰極 RF 電子銃で生成した電子ビームを3m長のSバンド加速管2本を使い約90MeVまで加速し、シンクロトンへと入射する。高周波システムは、1本の50MWクライストロンのRF出力を電子銃空洞および2本の加速管へ分配する構成とした。熱陰極RF電子銃は、東北大学でこれまで超短電子バンチ生成用に開発したものであり、低エミッタンスビーム生成およびビーム縦方向位相空間分布制御が可能である。本発表では、新設する電子シンクロトン入射用90MeVリニアックの開発状況の詳細を報告する。

2. シンクロトン入射用リニアック

電子光物理学研究センター(旧核理研)の電子リニアックは、熱陰極電子銃、プリバンチャー・バンチャー空洞、1m加速管8本と2m加速管12本で構成され、5台のクライストロンからRF電力を高周波空洞に供給し、最大ビームエネルギーは300MeVであった。昨年の震災で被害を受けたリニアックの完全復旧は、必要な部品の調達不可能であることから断念せざるをえなかったが、再利用可能な加速器の部品をかき集めRI製造用にビームを供給する低エネルギー部(50MeV)を再構築することにした。だが、このリニアックを使ってビームをシンクロトンへ入射することは、エネルギーが低くビームエミッ

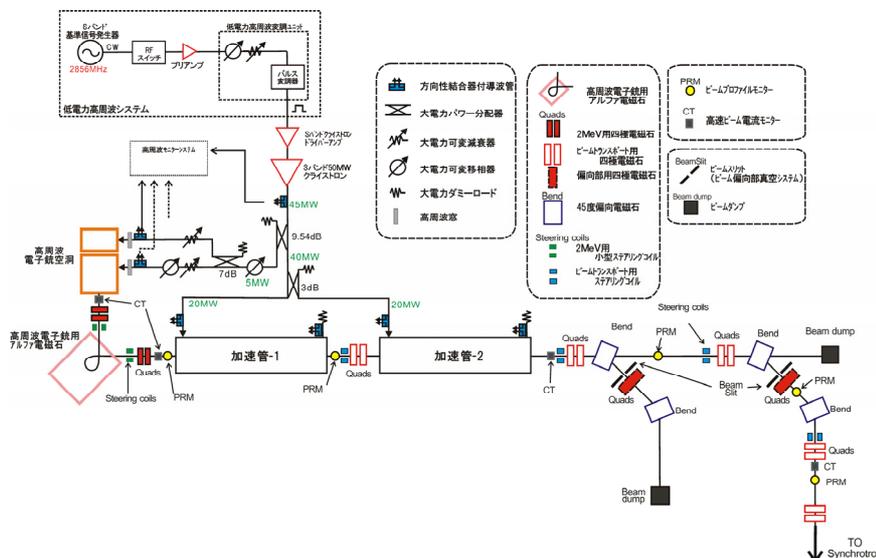


図1: シンクロトン入射用90MeVリニアック構成図

[#] kashiwagi@lns.tohoku.ac.jp

タンスの断熱減衰も小さいため困難である。また、限られた復旧予算でこれと同じエネルギー（150～200MeV）でビーム入射ができるリニアックを新たに構築することは不可能であった。幾つかのリニアック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て使い、3m加速管2本で90MeVまで加速するリニアックをシンクロトンの入射器として新設することにした（図1参照）。入射エネルギーがこれまでよりも40%以上も下がるが、今回の加速器復旧ではシンクロトンの電磁石用振り上げ電源の更新なども行われるため、低エネルギー入射によるビーム不安定性の問題は生じないと考えている。また、新設する入射器の構成機器は、クライストロンを含め我々が現在研究用に開発中である50MeV光源加速器で使用しているものと互換性のあるものを用いることにした。こうすることで、故障時に速やかに入射リニアックを復旧することができる。以下に90MeV入射用リニアックの各システムについて説明する。

2.1 電子源

電子源には我々がこれまでに低エミッタンス・超短電子バンチ生成用に開発した独立2空洞型熱陰極高周波電子銃（ITC RF 電子銃）を用いる。このITC RF 電子銃は2つの高周波空洞間に結合がなく、それぞれの空洞へ供給するRFの位相と振幅を独立に制御することが可能である^[1-3]。α電磁石と組み合わせて用いることにより、加速管に入射する電子ビームの縦方向位相空間分布を変化させることができる（図2）。α電磁石の真空チェンバー内には可動スリットが設置されており、ビームのエネルギー幅や電荷量を調整することが可能である。RF電子銃の運転パラメータやスリットで切り出すエネルギー幅を調整することにより、60mA以上のビーム電流を得ることが可能である。

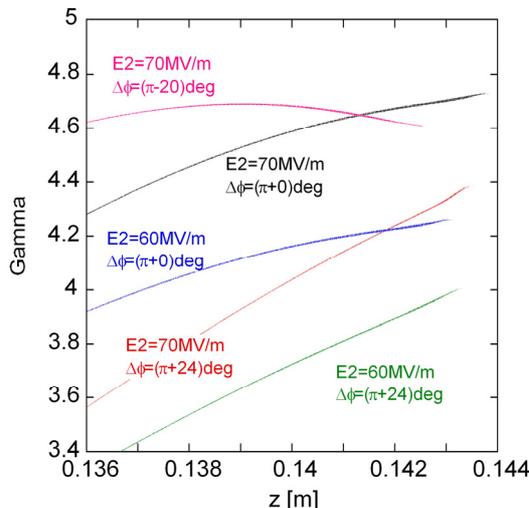


図2：ITC RF 電子銃の空洞間位相差・振幅を変化させた時の縦方向位相空間分布変化。（GPTによる計算）E1 = 25 MV/m：固定、カソード電流密度：50 A/cm²

表1：ITC RF 電子銃パラメータ

共振周波数	2856[MHz]
結合度: β	~4
Q ₀ (1 st /2 nd 空洞)	~9500/~12500
加速勾配: Ez (1 st /2 nd 空洞)	25 / 70 [MV/m]
2 空洞間位相差可変範囲	0 ~ 2π
カソード電流密度	50 [A/cm ²]

RF 電子銃の熱陰極には直径 1.78mm の LaB₆ 単結晶を用いる。このカソードはサイズが小さいために初期エミッタンスを低く抑えることができ、規格化エミッタンス 2~3π mm·mrad のビーム生成が可能である。その他、各 RF 空洞と導波管の結合度 (β) を大きくとることで filling time を短くする設計になっており（表1）、ビームの有効時間幅を RF パルスに対して長くとれるようになっている。

2.2 高周波システム

新設するシンクロトン入射用リニアックでは、復旧予算の制限から1つのRFユニットしか構築することができず、図1に示した様に1台のクライストロンの高周波出力を3台の分配器を使ってRF電子銃2空洞と3m加速管2本へと電力を供給する構成とした。高周波立体回路には、減衰器と移送器が各2台設置される。減衰器はRF電子銃2空洞へ供給する電力の調整に用いられ、2台の移送器はRF電子銃と加速管の位相差、RF電子銃の2空洞間の位相差をそれぞれ調整するのに用いられる。2本の加速管は、両者の加速位相が同じになるように設置される。導波管は全て真空で使用する。RF電子銃2空洞への導波管にセラミック窓を設置するが、これは加速管を大気解放せずに、RF電子銃のカソード交換などができるようにするためである。

大電力高周波源であ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を採用することにした^[4]。高いエネルギー利得を得る為にSLEDなどのRFパルスコンプレッサーを用いたいが、本システムでは熱陰極RF電子銃を使用するためにSLEDを導入することができない。できる限り多くの高周波電力を加速管に供給できるように、導波管立体回路中の分配器の電力配分比の最適化を図った。また、クライストロン（地上1階）と加速器本体（地下）の設置位置の関係で導波管長が約20mになってしまうため、導波管での電力損失を抑えるために、SUSフランジ内面に銅メッキを施すことにした。

2.3 加速セクション

加速管はKEK-ATFなどでも使用されている3m長の高シャントインピーダンス (r) のものを用いる。RF入出力カップラー部での電場非対称性によるエミッタンスの劣化を抑制するために、シングル入力準対称型を採用した（入力・出力導波管の対面にλ/4導波管が付いた形状になっている）。加速管

表 2 : クライストロン出力とエネルギー利得

Kly. Output [MW]	50	48	46
Acc. Input [MW]	19.6	18.8	18.1
Eg [MeV/m]	16.19	15.86	15.56
Eg/str. [MeV]	48.58	47.58	46.68
Eg/linac [MeV]	97.15	95.15	93.36
Eg/linac with BL [MeV]	93.05	91.05	89.26
(Vb [MeV, Ib = 50mA])	(-4.1)	(-4.1)	(-4.1)

の基本パラメータは、加速モード： $2\pi/3$ モード、空洞数：86（ノーマル空洞：84、結合空洞：2）、減衰係数（ τ ）：0.57、シャントインピーダンス（ r ）：59 M Ω /m（仕様値：53 M Ω /m 以上）である。ビーム電流が 50mA の時、加速管 1 本あたりのビーム負荷電圧は約 2.05MV である。クライストロンの出力電力とエネルギー利得の関係を表 2 にまとめた。表 2 の計算結果は、導波管での電力損失や移相器・減衰器の挿入損失も含んでいる。RF 電子銃で生成される電子ビームのエネルギーは約 2MeV であるので、90MeV 以上でビームをシンクロトロンへ入射するためにはクライストロン出力が 46MW 以上必要である。

2.4 ビーム輸送ライン

図 1 に示した様に、シンクロトロンへのビーム輸送ラインはビームを 90MeV まで加速した後、90 度偏向して既設の入射ラインへと繋がる。ビーム輸送

ラインの計算は、1 本目の加速管出口までを GPT、それ以降のビームラインについては SAD を用いて行った。図 3（上）に α 電磁石出口から 1 本目の加速管までのビームサイズ変化、図 3（下）に 2 本目の加速管以降のビームサイズ、 β 関数、分散関数を示す。図 3（下）右側のコンクリート壁よりも下流は既設の輸送ラインである。今回新設するビーム輸送ラインの四極電磁石はダブレット構成を採用した。分散部は 2 台の 45 度セクター型偏向電磁石（曲率半径：0.5m）と 1 台の四極電磁石で構成され、ここでの分散関数の最大値は中央の四極電磁石の位置で約 0.6m である。分散部には、四極電磁石の前後にビームスリットとスクリーンモニターを設置する。旧 300MeV リニアックでは、分散部に設置したビームスリットを使ってリングに入射するビーム電流量を調整していたが、今回設置するスリットは主に加速管で発生する暗電流の削除に使用する。本システムの場合、加速後のエネルギー拡がり（ σ ）は約 0.1%と小さく、分散部でのエネルギー拡がりによるビームサイズは 1mm 以下と小さい。ビーム輸送ラインにはエミッタンス測定用のスクリーンモニター（YAG 蛍光スクリーン）、ビーム軌道測定用のポタン型ビーム位置モニター（6 台）、電流測定用の高速電流モニター（3 台）を設置する。シンクロトロン入射のオプティクスマッチングは既設のビームラインに設置してあるスクリーンモニターを用いて行う予定である。また、シンクロトロンへのビーム入射ラインの他に 2 本のビームラインを設置し、ビーム診断などに使用する予定である（図 1）。

3. 今後の予定

本格的な入射器の設置作業は 2012 年 11 月から開始される。RF 電子銃と加速管の RF エージングをした後、2013 年 1 月末にはリニアックでのビーム加速を行う。シンクロトロンへのビーム入射は 2 月末ごろから行う予定である。また、入射器の建設作業と並行して、t-ACTS で ITC RF 電子銃の特性評価のための試験的なビーム生成実験を実施する^[5]。

謝辞

シンクロトロン入射用リニアックの新設にあたり、三菱重工業株式会社の三浦禎雄博士、鈴木大輔氏、日新パルス電子株式会社の大下英次氏をはじめ多くの方々にご協力頂いています。ここに感謝致します。

参考文献

- [1] F. Hinode et al., Proc. of IPAC'10, (2010) 1731 (TUPEC010)
- [2] F. Miyahara et al., Proc. of IPAC'10, (2010) 4509 (THPD094)
- [3] 柏木茂 他、第 8 回日本加速器学会年会(TUPS030)
- [4] H. Hama et al., New J. Phys. 8 (2006) 292
- [5] 黄 暖雅 他、第 9 回日本加速器学会年会(WEUH06)

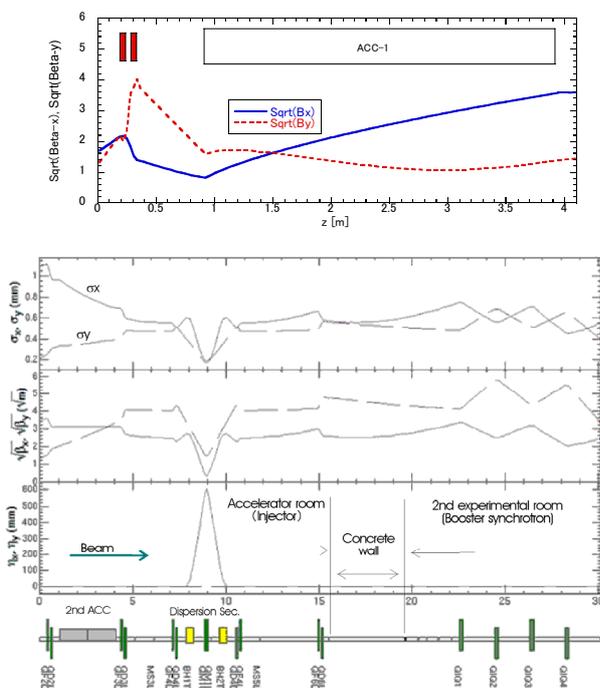


図 3 : ビームライン光学系,
(上) α 電磁石 ~ 第 1 加速管出口 (下) 第 2 加速管以降