

SYSTEM DESIGN OF RIKEN RIBF MUSES 300MeV ELECTRON LINAC

Y.Kamino*1, N.Inabe, M.Wakasugi, T.Katayama*2

RIKEN Accelerator Research Facility (RARF) Wako Saitama 351-01, Japan

ABSTRACT

The Multi Use Experimental Storage rings (MUSES) is planned as one of the main research assets in addition to the super conducting ring cyclotrons(SRC-4 and SRC-6) and RI beam generator(BigRips) for RIKEN RI beam factory (RIBF). Muses is composed of Double Storage Ring(DSR),Accumulator Cooler Ring(ACR) and Booster Synchrotron(BSR) for various collision experiments of RI particle, ions, electron and SOR photon. The MUSES 300MeV electron LINAC provides electron beam to BSR and DSR. This electron LINAC features a compact high energy LINAC with a high quality beam of low energy spread and small emittance. In this paper the system design of the LINAC is presented and the innovative approach to suppress the energy spread is discussed.

理研 RI ビームファクトリ MUSES 用 300MeV 電子リニアックのシステム設計

1. はじめに

理研 RI ビームファクトリでは、RI ビーム発生のための超伝導リングサイクロトロン (SRC-4, SRC-6) 及び RI ビーム発生装置 (Big Rips) とともに主要な実験設備として 2 重蓄積リング系 (MUSES) が計画されている。これは、2 重蓄積リング (DSR) を中心として、蓄積・冷却リング (ACR)、ブースタシンクロトロン (BSR) を備えて、RI 粒子、イオン、電子及び放射光の正面、寄り合い衝突等の種々の衝突実験を可能とするものである。本電子リニアックは、MUSES 加速器システムの一部として BSR 及び DSR に 300MeV の電子ビームを供給するものであり、以下の性能を達成しつつ極力コンパクトな構成とすることが求められている。また、機器配置上、電子ビームラインが鋭敏な測定機器と同一フロアに配置される計画のため、ビームラインから放射される電磁ノイズを最小化する必要がある。

- 加速周波数 : 2856MHz
- 加速エネルギー : 300MeV 以上
- パルス繰返周波数 : 50Hz (最大)
- LONG PULSE MODE : ビームパルス幅 5 μ sec
ピーク電流 100mA
- SHORT PULSE MODE : ビームパルス幅 1nsec
ピーク電流 1A
- エネルギー幅 : $\pm 0.25\%$ (目標値)
- 規格化エミッタンス : 100π mm mrad 以下

2. システム構成

ビームラインを短くするためには高い加速電界により加速管 1 本当たりの加速ゲインを稼ぐ必要がある。パルス幅が 1 μ sec 以下の短パルスのみであれば、SLED 等により高いピーク加速電界を得る事も可能であるが、LONG PULSE MODE では 5 μ sec のビームパルス幅が要求されており SLED の適用はできない。このため、現時点で最高のピーク

*1: Mitsubishi Heavy Ind. Nagoya Aerospace Systems
*2: Center for Nuclear Study, Graduate School of Science University of Tokyo

出力の東芝製クライストロン E-3712 (80MW 球) の使用を想定する。5 μ sec のビームパルス幅に対して、加速管のフィリングタイムを考慮して加速 RF パルス幅としては 6 μ sec 程度が必要となる。更にクライストロンモジュレータでは、パルスの立上がり及び立下がり部分が使用できないため、ビームパルス幅としては 8.2 μ sec (パルス波高 70%) が必要となる。これらの条件でクライストロンメカと調整した結果、安定動作のための余裕を見て定格運転は 50MW とする。各クライストロン当たり駆動する加速管数については、所要の加速エネルギーを得るのに必要なビームライン長とモジュレータ数についてケーススタディを行って、レギュラ部では 1 クライストロン当たり 2 本の加速管を駆動する設計とした。このため、ビームローディングとしては軽めとなっているが、これはエネルギー幅特性改善の点からも好ましい。本電子リニアック全体の構成を Fig.1 に示す。レギュラ部は、3 本のクライストロンと 6 本の 3mCG 型進行波加速管で構成する。維持整備の点からは、クライストロンの機種統一が望ましく、インジェクタ部用にも E-3712 を使用する。バンチャ管で必要とする加速 RF は 15MW で、これに対して E-3712 は余剰の出力があるため、25MW でレギュラ加速管を 1 本駆動して、加速エネルギーに余裕を持つこととする。両モードについてエネルギーゲインを計算した結果を Fig.2 に示す。LONG PULSE 及び SHORT PULSE の両モードで、10% 以上のエネルギーゲイン余裕があり、余裕を持って 300MeV の電子ビームが供給できる。

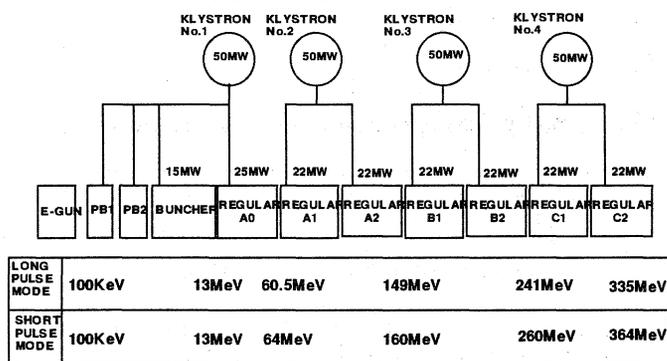


Fig.2 Energy Gain Diagram

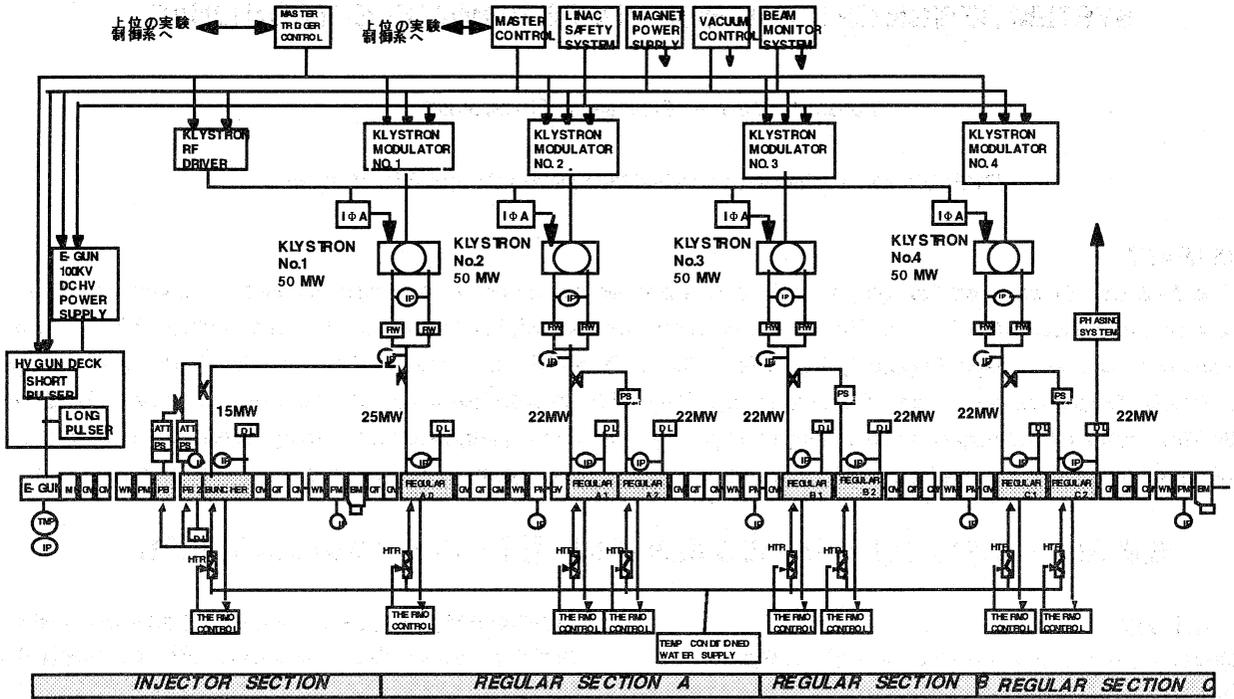


Fig.1 System Block Diagram

3. インジェクタ部

インジェクタ部は、定在波型プリバンチャ(PB1)、進行波型プリバンチャ(PB2)及び $\beta = 1$ の進行波型CG管から構成されるSLAC型とする。この方式は、PB2での加速効果があるため電子銃電圧を低くすることができる。電子銃の出力電流としては、SHORT PULSE MODEでインジェクタ部の透過率を80%として1.3Aが必要である。ビームラインから放射される電磁ノイズを抑えるためには、電子銃を直流ドライブとする必要があるが、このビーム電流を良好なオプティクスで引き出すことができ、直流ドライブでも絶縁の点で問題の無い点から加速電圧は100KVとした。カソードノグリッドアセンブリは、良好なオプティクスを確保するためできるだけ小面積のものが望ましく、実用上1.6Aの温度制限放出電流が得られるEIMAC Y-845(カソード面積 0.5cm^2)とする。電子銃電極形状は、1.3Aの放出電流に対して最適となるように設計し、電流値の小さいLONG PULSE MODEではアイリスでビーム径を絞ることで電流を制限する。Fig.3にE-GUNの軌道トレースの結果を示す。

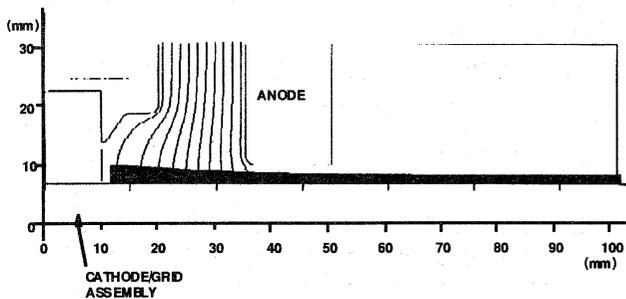


Fig.3 E-GUNの軌道トレースの結果

Fig.4及びFig.5にそれぞれLONG PULSE MODE及びSHORT PULSE MODEでのPARMELAシミュレーション結果を示す。

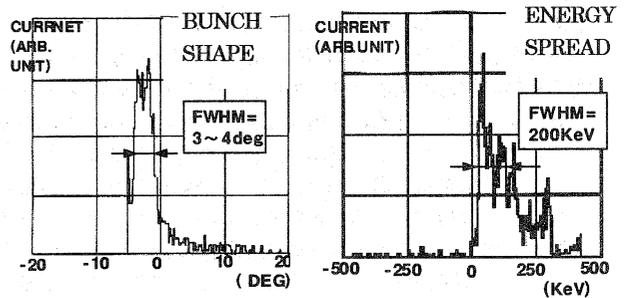


Fig.4 LONG PULSE MODE

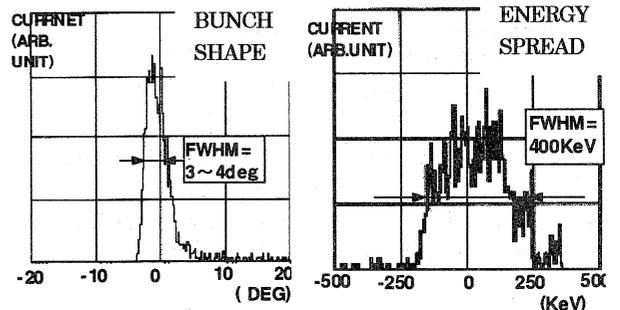


Fig.5 SHORT PULSE MODE

4. レギュラ部

レギュラ部は、A、B、Cの3ユニットから構成される。各ユニットともに3mのCG型進行波加速管を使用し、それぞれのユニットでは同じ減衰定数の加速管とする。長尺の電子ニアックで問題となるCumulative BBUは、加速管内の HEM_{11} モードがビームを径方向にキックしビームの軸からのずれ量が加速管毎に増幅されてついにはビームホールで切られてパルス幅が短縮する現象であるが、CG管の場合には加速管内の上流部で発生した HEM_{11} モードが下流部でカッ

トオフとなる現象があり、相互作用領域は加速管の入り口から約 10 キャビティ程度の部分に限られる。同様の原理で、あるユニットで加速管の相互作用領域の HEM_{11} モードの周波数が下流のユニットの加速管の相互作用領域でカットオフとなるよう、下流のユニットに進むに従って減衰定数を高くとり、ホール径(2a 寸法)を絞って HEM_{11} の周波数が上昇するように設計する。現設計では、A,B,C の各ユニットの加速管の減衰定数はそれぞれ 0.5Neper, 0.6Neper, 0.7Neper としているが、BBU が問題となる LONG PULSE MODE の電流値は 100mA と少なく現設計が過剰対策の可能性もあり、今後、BBU の成長率を詳細に評価して見直していく。

5. ビーム輸送系

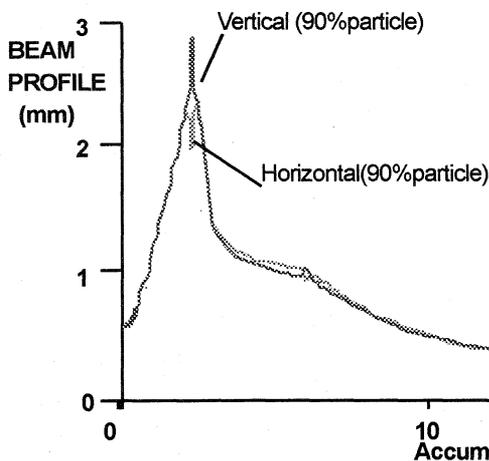
インジェクタ部のビーム輸送はソレノイドコイルによる。また、バンチャ管出口以降は QT(Quadrupole Triplet)による強収束系で行う。TRANSPORT を用いた設計結果の例(LONG PULSE MODE)を Fig.6 に示す。

6. エネルギー幅に関する検討

エネルギー幅の原因は以下の通りと考えられる。

- (1) クライストロン出力のパルス内変動による加速電界変動
- (2) クライストロン電圧のパルス内変動による加速位相変動
- (3) 電子バンチャ幅分布
- (4) PHASING 誤差による電子バンチャの加速 RF 位相ずれ
- (5) Reactive Phase Distortion による加速 RF 位相ずれ
- (6) イニシャルビームローディング

上記のうち、(1)(2)についてはクライストロンモジュレータ電圧の安定度を 0.3%(p-p)以内とし、(3)については 3. の PARMELA シミュレーション結果から FWHM で 4° 以下で十分な性能が得られる見通しである。(4)についてはビーム誘起電力法により $\pm 3^\circ$ 程度の精度が得られる。(5)についてはビームローディングが軽いため約 1° を見込んでおけば良い。以上、(1)~(5)の要因により発生するエネルギー変動の rms 値は LONG PULSE 及び SHORT PULSE の両モードともに $\pm 0.2\%$ 以下である。これに対して(6)は、LONG PULSE MODE で、従来のように加速管のフィリングタイムが経過してから電子ビームを入力した場合、約 10% 程度のトランジェントが発生する。このトランジェントは加速管のフィリングタイム程度の時間内に整定して定常状態となるが、ビームパルス幅 $5 \mu\text{sec}$ 中約 $1 \mu\text{sec}$ は、後続のビームラインのエネルギーアパーチャで損失となる可能性がある。



これを補正する方法としては、ECS(Energy Compression System)を使用する方法もあるが、磁石系及びエネルギー幅圧縮用の加速管を含めて 10m 程度の長さとなるため、ビームラインをコンパクトに纏めることができない。これに対して RF 入力後加速管のフィリングタイムが経過する前に加速管内に電子ビームを入力してトランジェントを抑圧する方法や更に推し進めて各クライストロンの RF トリガタイミングを電子ビームのトリガタイミングに対して調節して、トランジェント抑圧を図る方法も考えられるが、十分なトランジェント抑圧効果が得られなかったのが現状である。

SLAC の NLCTA で、クライストロン RF の立ち上がり部に振幅変調を与えて良好なトランジェント抑圧効果が得られることが確認された。¹⁾²⁾NLCTA では SLED II で供給 RF を位相変調して SLED II の出力立ち上がり部分に直線的な振幅変調を与えている。これは NLCTA に採用された DDS 加速管に対応したものであり、通常の CG 管に適用するためには、電子ビーム入力前に定常状態と同じ電界分布を加速管内に作るように振幅変調のパタンを変更する必要がある。下図には数値的に求めた振幅変調のパタンと、これによるトランジェント抑圧効果のシミュレーション結果を示す。

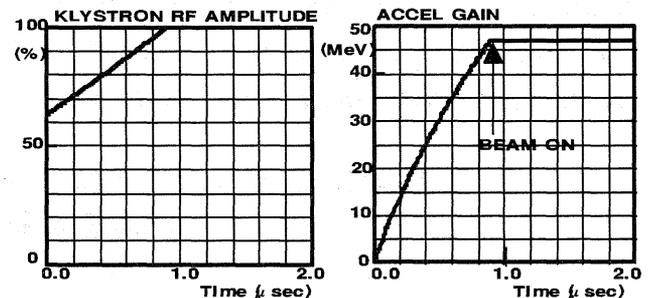


Fig.7 ENERGY TRANSIENT SUPPRESSION BY RF AMPLITUDE MODULATION

7. 結論

コンパクトでかつ良好なエネルギー幅特性を目指した RIBF MUSES 用 300MeV 電子リニアックのシステム設計について概略を述べた。今後、BBU 及びトランジェント抑圧について更に検討を加え、詳細な設計を進める。

8. 謝辞

トランジェント抑圧方式に関して貴重な御意見を頂きました SLAC の Dr. Juwen Wang 及び KEK の小林仁先生に感謝致します。

参考文献

- 1) NLC Test Accelerator Conceptual Design Report, SLAC Report-411 pp32-pp33
- 2) Private Communication from Dr. Juwen Wang at SLAC

Fig.6 Beam Transport Simulation Result (Long Pulse Mode)