

## 〔研究〕

# FEL用電子蓄積リングNIJI- の単バンチ入射システムの開発 Single Bunch Injection System of the Storage Ring NIJI-IV for Free Electron Laser Use

横 山 稔	河 合 正 之	山 崎 鉄 夫	山 田 家 和 勝
M. YOKOYAMA	M. KAWAI	T. YAMAZAKI	K. YAMADA
清 紀 弘	三 角 智 久	杉 山 卓	大 垣 英 明
N. SEI	T. MIKADO	S. SUGIYAMA	H. OHGAKI
野 口 勉	鈴 木 良 一	千 脇 光 國	富 増 多 喜 夫
T. NOGUCHI	R. SUZUKI	M. CHIWAKI	T. TOMIMASU

A single bunch injection (SBI) system has been constructed at the electron storage ring NIJI-IV of the Electrotechnical Laboratory. The system is intended to inject short pulse beam from an electron gun into only one of the 16-rf buckets in NIJI-IV. On a compact storage ring, the multi pulse beams in one pulse train can be stored into only one of many bunches by one injection. The optimum number of the grid pulses in one pulse train was determined to improve the storage efficiency and the stored current by one injection. The keeping time of the bump orbit was calculated by using the transfer matrices. The optimum pulse number obtained by the calculation was 2. In the SBI system, the number of grid pulses in one pulse train can be selected by the gate circuit. A snap off diode and a clip line are used to generate 2-ns grid pulses. The measured grid pulse was shorter than the longitudinal space 5.5 ns of the rf bucket with voltage of  $\sim 80$  V. The EIMAC Y-646B cathode-grid assembly is used as the electron source. It is expected that the injection system provides a higher peak current and easier operation for free electron laser use in comparison with the rf-knockout system.

### §1 はじめに

自由電子レーザー (Free Electron Laser; FEL) 専用の電子蓄積リング NIJI-IVは1990年12月に組み立てが完成し<sup>1-3)</sup>, 1992年8月には595 nm, 同年9月には488 nmの可視域のFEL発振に成功した<sup>4,5)</sup>。さらに, 1994年4月には352 nmの紫外域での発振に至った<sup>6)</sup>。

FELには高ピーク電流で高品質の電子ビームと低損失の共振器ミラーが要求される。NIJI- の場合, FELの利得に寄与するのは16バンチの中の1バンチに過ぎ

ない。一方アンジュレータ光の高調波成分による共振器ミラーの劣化が生ずるため, 余分な電子バンチを取り除きピーク電流を高くするための方法として, rfロックアウト法が1992年に完成していた<sup>7)</sup>。我々の実測では単バンチ運転のバンチ長は, フルバンチ運転のそれに比べて1/2となり, 結果としてピーク電流が2倍となる。rfロックアウト法では電子を蓄積してから余分な電子ビームバンチを取り除くためには10分ほどの時間が必要であり, この間に電流値が下がってしまう。さらにrfロックアウトを行って

KEY WORDS : free electron laser, single bunch injection, storage ring, NIJI-IV.

る間にビームの不安定性が生じ、しばしば極端な電流損失を招く。また rf ノックアウト法のためには、フルバンチ入射が行われる。このため入射電流値に対して蓄積に寄与する電流値は 0.1% 程度と低く、こぼれた電子ビームにより実験室の放射線強度が高くなるという問題も生じていた。これらの問題を取り除くための方法としては、単バンチ入射法 (single bunch injection; SBI) が理想的である。この SBI 法は UVSOR, SPring-8 などいくつかの施設で採用されている手法である<sup>8,9)</sup>。

本稿では、NIJI-IV の SBI システムについて報告する。本システムは 1993 年 6 月に完成したもので、このシステムは NIJI-IV に 16 個ある rf バケットの 1 つに短パルスの電子ビームを同期させて入射するものである。パルスの時間幅は rf バケットの時間幅より短い必要がある。NIJI-IV の場合、rf バケットの時間間隔を計算したところ 5.5 ns であった。短パルスの時間幅はジッタなどを考慮すると 2 ns 程度が適当と考えられる。また小型リングの場合、周回時間 (NIJI-IV の周回時間は約 100 ns) が短いために、一回の入射であっても 100 ns ごとの短パルス列を形成することで特定の rf バケットに複数回入射することが可能である。つまり、1 つのパルス列の数を最適化することで一回の入射に対する蓄積効率を上げることができる。入射時の条件を考慮して軌道計算を行った結果、一回の入射に対して、同一 rf バケットに 2 回入射することが可能であることがわかった。このための短パルス列を発生させるための回路構成としてクリップラインとスナッフオフダイオード (SOD) を使用した。製作されたグリッドパルサーの出力測定の結果、全幅で 2 ns、また必要な出力電圧として  $-80\text{ V}$  が得られた。電子ビーム源としてグリッド付きのカソード (CPI, EIMAC Division Y-646B) を用いた。放出電流値は約 1 A である。このようなシステムにより、これまでの rf ノックアウト方式に比べて容易に電子入射ができ、しかもより高い蓄積電流値が期待される。

§2 単バンチ入射に必要なグリッドパルサーの要求条件

2.1 パルス幅の条件

蓄積リングの特定の rf バケットの 1 つに電子入射を

行うためには、rf バケットに同期し、尚かつ進行方向の rf バケット よりも短いパルス幅の電子ビームが必要である。rf バケット は式(1)で表される。

$$\Delta E/E = eV_{rf}[\cos(\omega_{rf}t - \phi_0) - \cos(\omega_{rf}t - \phi)] - \omega_{rf}(t - t_0)U/eV_{rf}/ET \quad (1)$$

ここで  $e$  は電子の電荷、 $V_{rf}$  は高周波空洞内の電圧、 $E$  は電子ビームのエネルギー、 $T$  は電子の周回時間、 $\omega_{rf}$  は加速用高周波電力の周波数、 $U$  は周回毎に電子が失うエネルギーであり、 $\phi_0 = \omega_{rf}t_0$  である (ここで、高周波電力に同期した電子の位相を  $\phi_0$  で表している)。また  $\eta$  は電子 (一般に加速粒子) の運動量と軌道のずれとを関係づけるパラメーターで、コンパクションファクター (momentum compaction factor) と呼ばれている。これは、平均軌道半径およびずれを  $R$ 、 $R'$ 、電子の運動量およびずれを  $P$ 、 $P'$  とすると

$$R/R' = (\eta/P/P') \quad (2)$$

と表すことができる。Figure 1 に rf の最大電圧が 20 kV のときの  $\Delta E/E$  の計算結果を示す。軸方向の rf バケットは 5.5 ns のため、グリッドパルサーに要求されるパルス特性は、パルス幅は 2 ns、ジッターは 0.5 ns 以下となる。

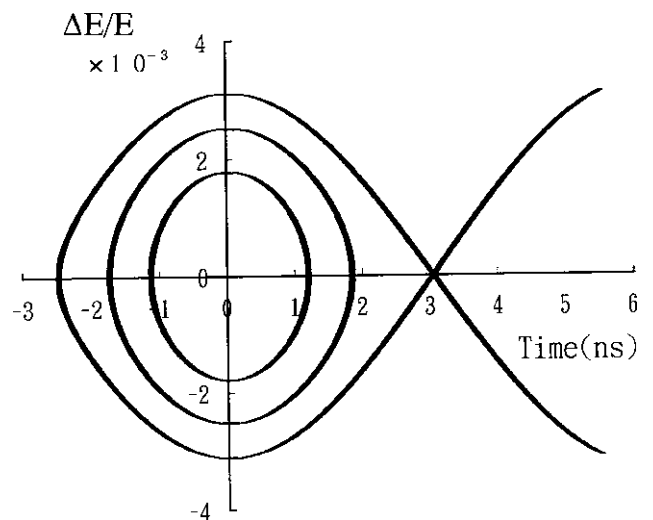


Fig.1 The calculated rf bucket of the NIJI-IV. (The rf peak voltage in the rf cavity is 20 kV).

2.2 パルス列中の電子ビームパルス数

最大の蓄積効率を得るためには、入射のパルス列の時間はキッカーマグネットにより発生するバンブ軌道が維持されている時間より短くなければならない。つまりキッカーにより生じたバンブ軌道が存在している間に入射電子ビームは蓄積軌道に導かれることが必要である。NIJI-IV では入射、蓄積の条件を満足するために、セプタムマグネットおよびキッカーマグネットをそれぞれ1台ずつ備えている。キッカーマグネットは入射点に設置されたセプタムマグネットとは対称に位置している高速パルスマグネットである。キッカーマグネットによるバンブ軌道は蓄積リング全体の軌道に影響を与える。電総研リニアック(TELL)からの電子ビームは、蓄積リングの中心軌道から42mm外側の位置から中心軌道にほぼ平行に入射される。セプタムマグネットの隔壁は、蓄積リングの中心軌道から29mm離れた位置にある。入射および蓄積電子の軌道はマトリクス(transfer matrices)<sup>10)</sup>により計算することができる。Figure 2は実際のキッカーマグネットの電流波形(実線)を仮

定し、この電流波形に対し入射時刻を変化させたときの電子の蓄積効率を示す。ここで蓄積効率とは、入射電子数と入射後20回まで周回できた電子数の比で表している。キッカーマグネットの全電流波形幅およびキッカーマグネットにより電子が偏向される最大の角度はそれぞれ750nsおよび1.3mradである。入射点での電子のエミッタンス、および Twiss parameter をそれぞれ  $1 \times 10^{-6} \pi$  mrad, -0.2, 8mと仮定した。この計算の詳細な結果をFig.3に示す。この図

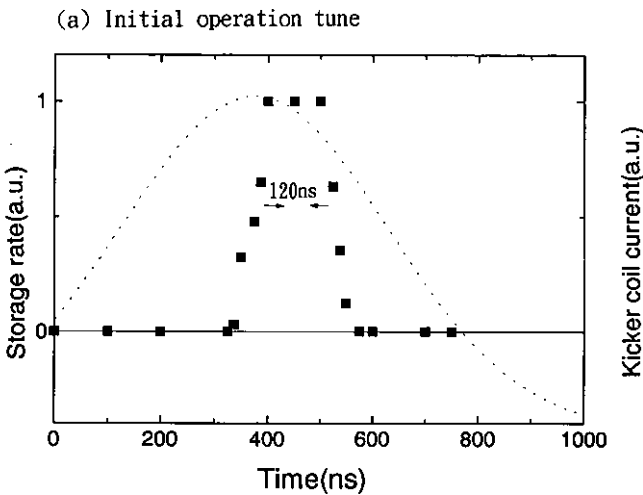


Fig.2 The kicker excitation time and the keeping time of the bump orbit. The solid line indicates the assumed excitation waveform of the kicker coil, and the dotted line, the calculated result of the storage rate vs injection time. The storage rate means the ratio of the number of injected electrons to the number of electrons which can circulate 20 turns without colliding with the septum wall in this calculation. The full excited time of the kicker magnet and the peak angle which the beam is kicked by the kicker magnet are 750 ns and 1.3 mrad, respectively. The storage rate was calculated by changing the timing of the injected beam against excitation time of kicker magnet. The keeping time of the bump orbit is about 120 ns.

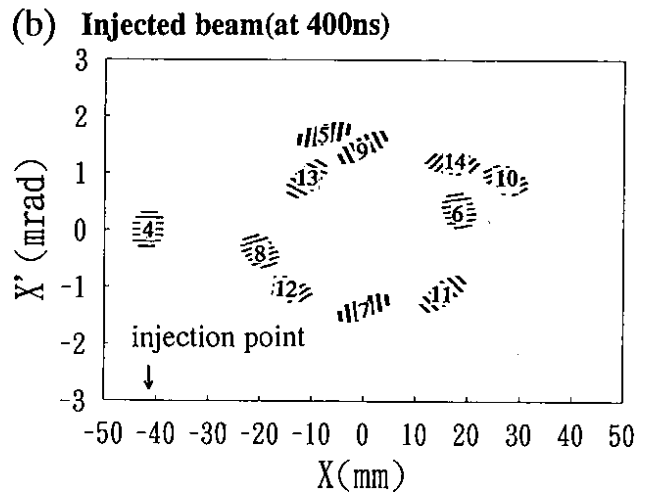
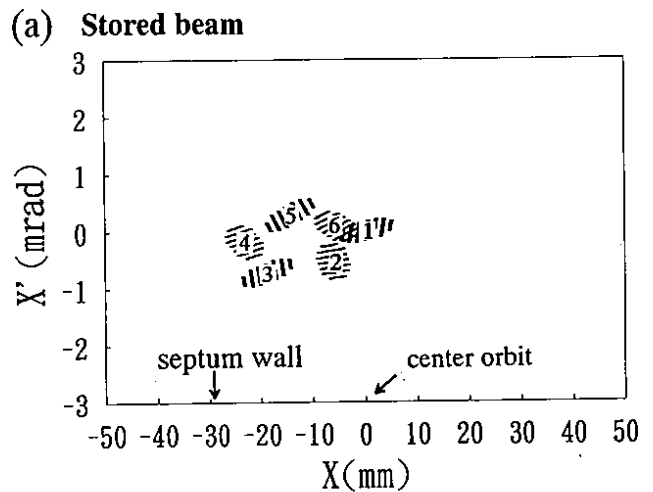


Fig.3 The beam tracking results of (a) the stored beam and (b) the injection beam at 400 ns of the kicker magnet excitation. Indicated numbers 1, 2, ... denote the number of turns. The ellipses are phase space of electrons. The electron beam is injected at 400 ns of the kicker magnet excitation. So the first turn number of the injection beam is the fourth of the stored beams. The orbit of the stored beam is distorted to the septum wall by the excited kicker magnet during third to fifth turns and at that time the injection beam is able to be stored in the ring. All the injection electrons at 40 ns of the kicker excitation can circulate 12 turns without colliding with the septum wall and the storage rate is 1.0.

で、(a) は蓄積電子ビームの航跡、(b)はキッカーにより偏向された入射電子ビームの航跡を示している。図中に示されている 1,2,3,...はそれぞれ電子の周回数を表している。入射電子ビームはキッカーマグネットの励磁の開始から400 ns経過した時点で入射されると仮定した。したがってFig. 3(b)に示されるように、1周目の入射電子ビームと4周目の蓄積ビームは同じ位置になる。重要なことは3 - 5周目の蓄積電子ビームの軌道はキッカーマグネットによりセプタムの隔壁に近づけられるが、しかしこの場合でも電子ビームは蓄積可能であるということである。同時に Fig.3(b)に示されるように、キッカーマグネットのタイミングにおける400 nsの時点で入射された電子ビームは、セプタムの隔壁に衝突することなく12周回することが解り、この場合入射効率は1.0となる。実際には入射電子ビームは多数回の周回の後放射減衰（水平方向の減衰時間は0.15 s）により、安定な蓄積軌道に集束される。Figure 2にキッカーマグネットの励磁時刻に対して、入射電子ビームのタイミングを変化させた計算結果が示されている。この結果から入射効率1.0が得られるバンブ軌道の持続時間はおおよそ120 nsである。一方、蓄積リングの電子の1周の時間は100 nsであることから、1回の入射に対して高い入射効率を

得るためには、入射のパルス列の数は2という結果になる。

2.3 リニアックへの組み込み

コアモニタによる短パルス列の観測は周波数応答性が低く、困難である。さらに電子ビームによる rf ローディングによる電流波形の観測も同様な理由で困難である。また rf と電子ビームの位相制御もかなり難しい。この困難さを克服するために電子ビームを2 - 24のパルス列で運転することとした。最大のパルス幅は2.4 μsであり、リニアックのマクロパルスのフラットトップ長に対応している。

2.4 入射の繰返し数

入射電子のエネルギー 300 MeV における電子の水平方向の軌道の放射減衰時間は0.15 sであるため、十分な減衰を待って次の入射をする必要がある。このため、最大の電子入射の繰返しは2 ppsとした<sup>3)</sup>。

§3 単バンチ入射装置

SBI システムの系統を Fig. 4 に示す。陰極のフィラメント電圧、グリッド電圧、グリッドバイアス電圧

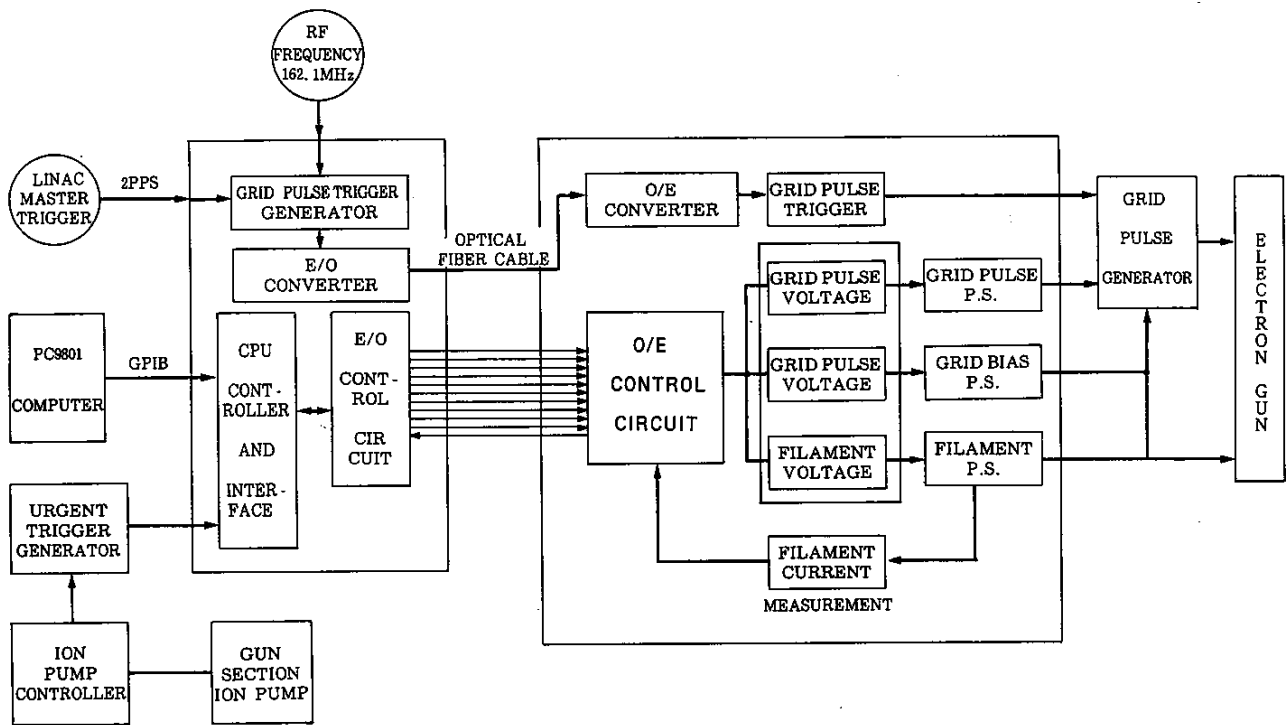


Fig.4 Block diagram of the controller of the SBI system.

はそれぞれ GPIB を介してコンピュータ制御される。高圧ターミナルに組み込まれている電子銃の制御部には、高電圧絶縁のために E/O と O/E 変換器が設けられており、12本の光ファイバにより信号の送受信がおこなわれるようになっていいる。このシステムには電子銃の真空に対するインターロックが組み込まれており、圧力が  $10^{-7}$  Torrより高くなると電子銃のヒーター電流が切られ、ヒーターの劣化を防止する。

SBIシステムおよび加速器システムの全体系統図を Fig.5 に示す。電子蓄積リングの信号発生器からの rf 励振周波数 (162.1 MHz) を 1/16 分周し、10.1 MHz とする。この 10.1 MHz の信号はゲート回路 (可変幅は 0.2 - 2.4  $\mu$ s) を通して、さらに E/O 変換器により光信号に変えられる。ゲート回路のトリガーは TELL 全体のシステムトリガーによって起動され、遅延回路を通して同期をとるようにしている。グリッドパルスのパルス列中のパルス数は、ゲート時間を変えることで最適な値を選択できる。E/O により光信号化され

た 10.1 MHz の信号は、電子銃の高圧ステージに光ファイバで送られ、さらに O/E 変換器でパルス幅 50 ns (10.1 MHz 信号の周期の1/2) , 立上がり 50 ns の電圧信号に変換される。この 50 ns パルス信号は D-MOSFET (D-metal-oxide semiconductor field effect transistor) のトリガー信号として使われる。この増幅された 50 ns のパルスは、初めに 5 ns パルス幅の SOD (snap off diode) に印加される。次に SOD は 220 ps 後にスイッチ off される。この波形はクリップラインの長さ分の遅延をさせ、極性反転をさせた電圧波形と重ね合わされる。クリップラインの長さは 20 cm である。このためグリッドパルスからの出力波形の全幅は 2 ns となる。それぞれパルスは 10.1 MHz の信号に同期している。

Figure 6 に電子銃の断面を示す。電子源としては CPI 社 (EIMAC Division) 製のグリッド付きカソード (Y-646B) が使われている。基本仕様はヒーター電圧 : 6.3 V , グリッドバイアス電圧 : 30 V , グリッド

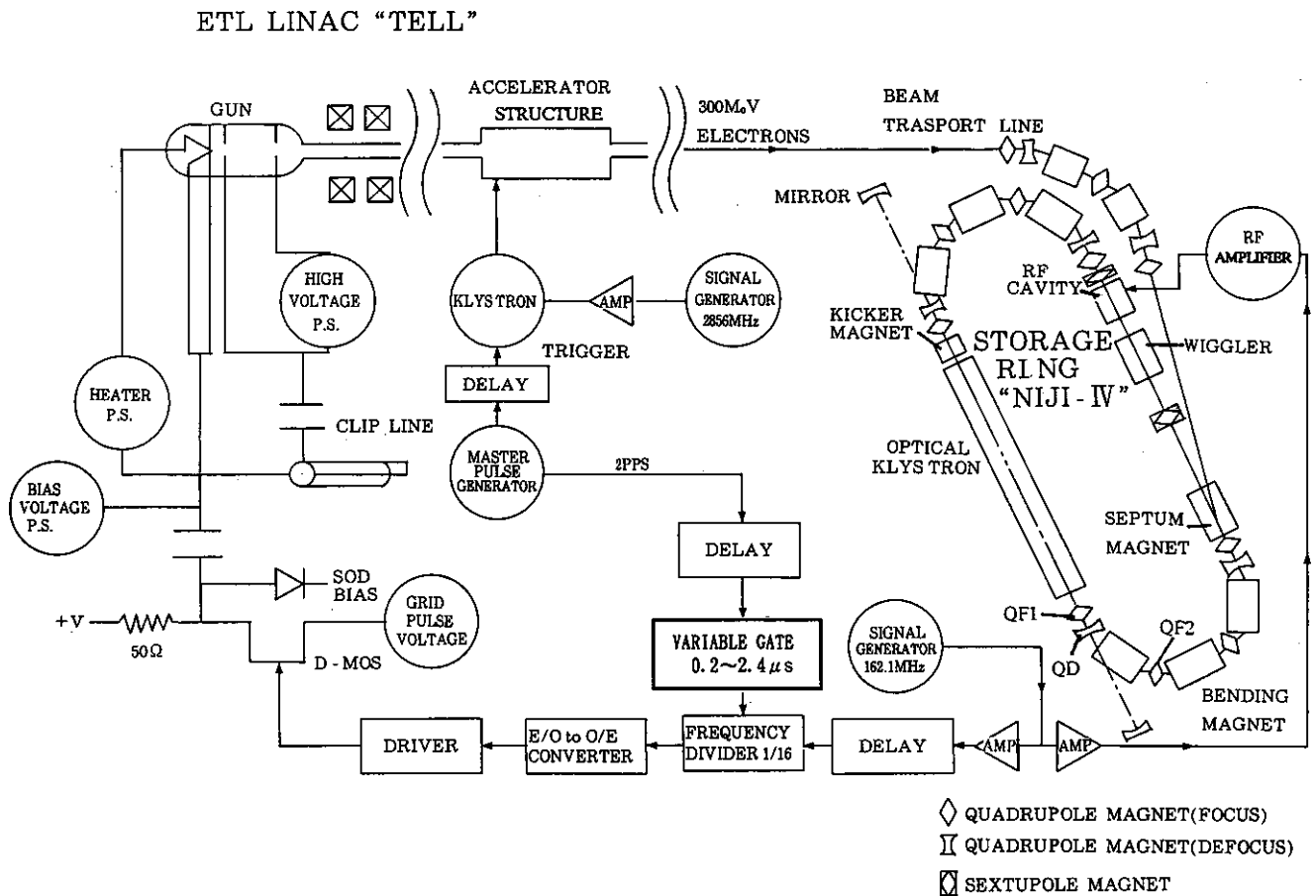


Fig.5 Schematic diagram of the SBI system.

パルス電圧： - 80 Vである。カソードとアノードとの間の電圧は 80 kVとした。これらの仕様において、約 1 A の電子ビーム電流が得られる。Figure 7 はグリッドパルス電圧の直接観測結果であり、Fig. 7(a) は 24 のパルス列、(b) はNIJI-IV の入射用の 2 パルス列、(c) は 1 パルスの時間の拡大波形をそれぞれ示している。これらのパルスの測定には Tektronix 社製のオシロスコープ (7104-7A29) を使用した。Figure 7(c) の波形には測定系の反射による波形も一部重なっていると考えられるので、実際の全パルス幅は測定より短い 2 ns 程度であると言える。またパルスのジッターは測定の結果 0.5 nsであった。Figure 7(c) の波形が示すように、反射が含まれると仮定しても、30 V のバイアス電圧が印加されているので、反射波形による電子の放出を防ぐことができる。以上のような試験結果から、このSBIシステムはNIJI-IV のシングルパンチ運転に適應できることが確認された。

§4 おわりに

今回試作・調整したNIJI-IV のSBIシステムは、最適の電子入射パルス列の個数を選択でき、1 回の入射に対する入射効率の改善と蓄積電流の増加が期待できる。蓄積電流  $I$  は  $I = Nef$  と表される。ここで、 $N$  は電子の個数、 $e$  は電子の電荷、 $f$  は電子の周回周波数を

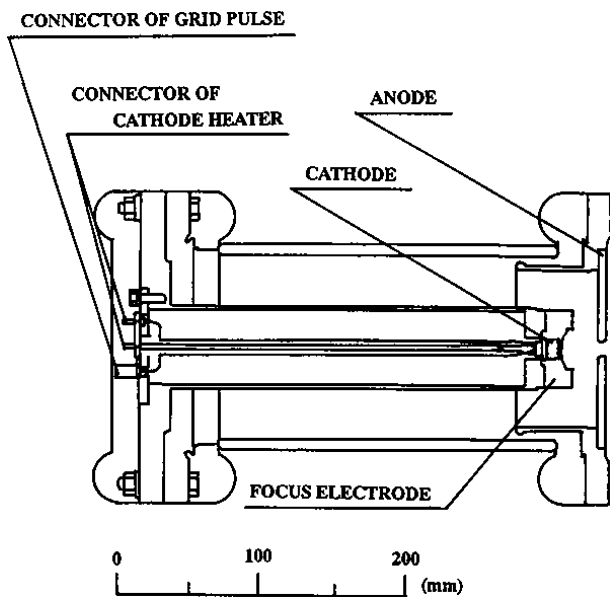


Fig.6 Cross-sectional drawing of the electron gun.

それぞれ表す。電子銃からの電子電流 1 A、電子銃から蓄積リングまでの輸送効率を 10%、1 パルス列中の

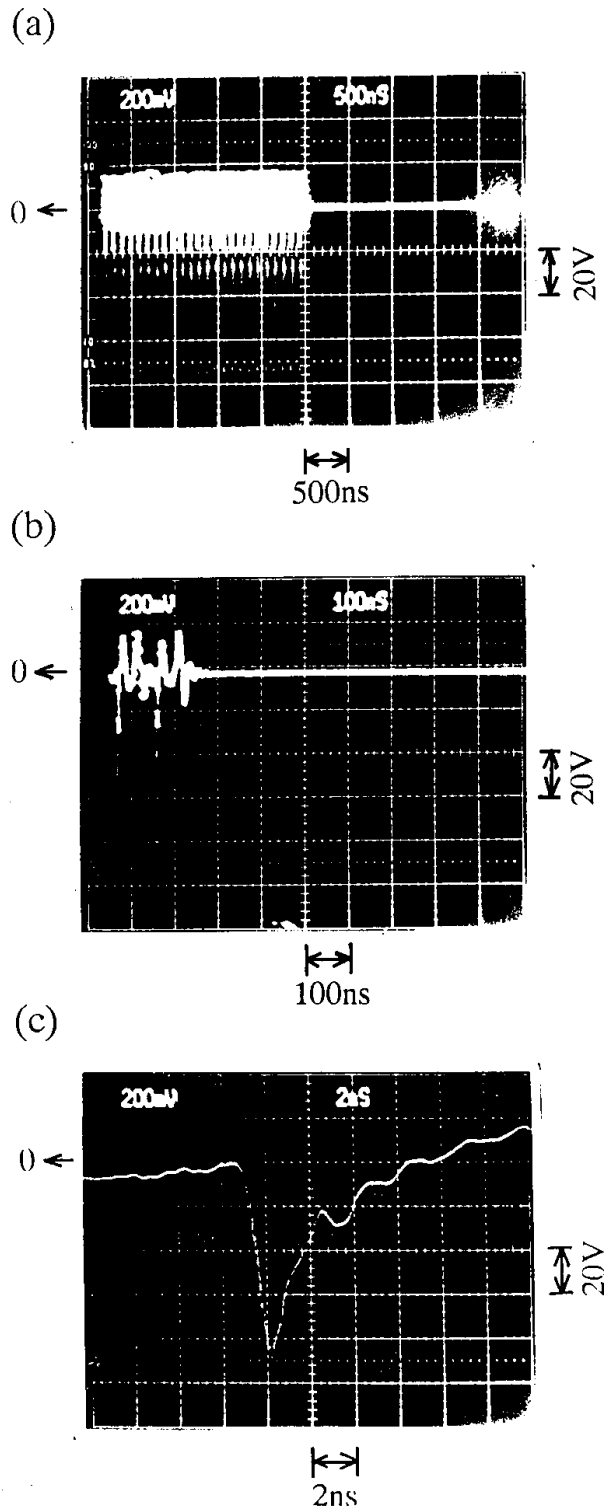


Fig.7 The oscilloscope tracing of the output of (a) 24 grid pulses in one train (for the setup of the linac), (b) 2 grid pulses in one train (for the injection into the NIJI- ), and (c) magnification of one grid pulse. Photographs were taken on the Tektronix 7104-7A29 with direct access plug-in vertical unit through the attenuator of 40 dB.

2 パルスが蓄積されると仮定する。さらに電子ビームのエネルギー広がりを2%、rfバケットの高さを0.2%と仮定する。蓄積リングに入射された電子ビームの10%が蓄積できると仮定する。しかし蓄積効率は位相空間の開口の大きさ、電子ビームのCOD (closed orbit distortion)、電子ビームと真空容器内の残留ガスとの衝突で制限される。この効率は50%と試算された。この結果このSBIシステムを用いたシングルバンチ入射によって1パルス列あたり0.1 mAの蓄積が可能であると試算される。

- 8) T. Kasuga, T. Kinoshita, M. Hasumoto, and H. Yonehara : *Proc. 5th Symp. Accel. Sci. Technol.*, KEK (1984) 295.
- 9) H. Suzuki, H. Yokomizo, H. Yoshikawa, K. Mashiko, M. Iizuka, T. Ishida, N. Nakamura, K. Yamada, and Y. Suzuki : *Proc. 7th Symp. Accel. Sci. Technol.*, Osaka Univ. (1989) 355.
- 10) C. Bovet, R. Gouiran, I. Gumowski, and K. H. Reich : CERN/MPS-SI/Int. DL/70/4(1970).

(1999.11.30受付)

## 参 考 文 献

- 1) T. Tomimasu, S. Sugiyama, H. Ohgaki, T. Yamazaki, K. Yamada, T. Mikado, M. Chiwaki, R. Suzuki, S. Suse, M. Yoshiwa, and A. Iwata: *Proc. 7th Symp. Accel. Sci. Technol.*, Osaka Univ. (1989) 347.
- 2) H. Ohgaki, T. Yamazaki, S. Sugiyama, T. Mikado, R. Suzuki, and T. Tomimasu: *Proc. 7th Symp. Accel. Sci. Technol.*, Osaka Univ. (1989) 284.
- 3) M. Kawai, K. Aizawa, S. Kamiya, M. Yokoyama, Y. Oku, K. Owaki, H. Miura, A. Iwata, M. Yoshiwa, T. Tomimasu, S. Sugiyama, H. Ohgaki, T. Yamazaki, K. Yamada, T. Mikado, and T. Noguchi : *Nucl. Instrum. Methods* **A318** (1992) 135.
- 4) M. Yokoyama, M. Kawai, K. Owaki, S. Hamada, K. Aizawa, Y. Oku, A. Iwata, M. Yoshiwa, T. Yamazaki, S. Sugiyama, H. Ohgaki, K. Yamada, N. Sei, T. Mikado, T. Noguchi, R. Suzuki, M. Chiwaki, and T. Tomimasu : *Nucl. Instrum. Methods* **A331** (1993) ABS34.
- 5) T. Yamazaki, K. Yamada, S. Sugiyama, H. Ohgaki, N. Sei, T. Mikado, T. Noguchi, M. Chiwaki, R. Suzuki, M. Kawai, M. Yokoyama, K. Owaki, S. Hamada, K. Aizawa, Y. Oku, A. Iwata, and M. Yoshiwa : *Nucl. Instrum. Methods* **A331** (1993) 27.
- 6) T. Yamazaki, K. Yamada, N. Sei, H. Ohgaki, M. Kawai, M. Yokoyama, S. Hamada, S. Sugiyama, T. Mikado, R. Suzuki, T. Noguchi, M. Chiwaki, and A. Iwata : *Jpn. J. Appl. Phys.* **33** (1994) L1224.
- 7) H. Ohgaki, S. Sugiyama, T. Mikado, M. Chiwaki, K. Yamada, R. Suzuki, N. Sei, T. Noguchi, and T. Yamazaki : *Proc. 9th Symp. Accel. Sci. Technol.*, KEK (1993) 407.