



Title	北海道大学45MeV線形加速器によるナノ秒パルス電子ビーム発生を試み
Author(s)	本間, 彰; Homma, A.; 沢村, 貞史 他
Citation	北海道大学工学部研究報告, 158, 79-86
Issue Date	1992-01-31
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/42303">https://hdl.handle.net/2115/42303</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	158_79-86.pdf



## 北海道大学 45 MeV 線形加速器による ナノ秒パルス電子ビーム発生を試み

本間 彰 沢村 貞史\* 秋本 正\*\* 谷田 弘明\*  
佐藤 孝一\* 青木 毅 沢村 晃子 山崎 初男  
(平成3年10月31日受理)

### Test Acceleration of Hokudai 45MeV Linear Accelerator for Nano-Second Pulsed Electron Beam Generation

A. HOMMA, S. SAWAMURA\*, T. AKIMOTO\*\*, H. TANIDA\*,  
K. SATO\*, T. AOKI, T. SAWAMURA, and H. YAMAZAKI  
(Received October 31, 1991)

#### Abstract

The short-pulse response of the electron gun which has been used for the Hokudai 45 MeV Linac was studied in order to generate a nano-second pulsed electron beam.

A harmful reflection of the grid drive pulses, caused by the discontinuities of impedance at the input-terminal and at the grid-cathod assembly, was found.

The insertion of a matching resistor across the gun input-terminal and the driving by a high voltage nano-second pulser (~3 kV output peak voltage, 3 ns pulse width) with a large grid bias voltage was adopted to overcome these reflected signals.

The characteristics of the accelerated beam were obtained; the dose measured by the pulse radiolysis method was about 30-45 Gray, and the pulse width was about 3.5 ns determined by the time-distribution of bremsstrahlung photons obtained by bombardment to a tungsten target with the electrons.

#### はじめに

北大 45 MeV 線形加速器はエネルギー45 MeV のパルス状電子ビームを発生する装置である。得られるビームの最小パルス幅は10 ナノ秒(ns)であり、このときの電荷量はおよそ5 ナノクーロン(nc)である。近年、本施設ではパルスラジオリシス、中性子飛行時間測定法等の研究分野から2~3 ナノ秒のパルス(以下、ナノ秒パルスと略記)のビームが要求されている。また最近の動向としてビームの高エネルギー化、短パルス化、低エミッタンス化、高輝度化、高デューティーサイクル化、高強度化などビームの高品質化の要求が強い。本施設においても高品質化の第一段階として加速電子ビームの短パルス化—ナノ秒パルスビーム加速—のため入射系、特に電子銃改良のための計画が現在進行中である。

原子工学科 基礎原子核工学講座, \* 北大 45 MeV 線形加速器研究施設

\*\* 原子工学科 原子炉工学講座

本研究ではこれらの計画の実行に先立ち、現在稼働中の電子銃のナノ秒領域でのパルス応答を調べた。更にパルス幅の減少のために高電圧( $\sim 3$  kV)ナノ秒パルス発生器を試作し、これを用いて加速実験を行った。加速電子ビームの線量評価はパルスラジオリシス法を、パルス幅の評価にはループ型電子ビーム波形モニターと X 線の検出時間分布測定法を用いた。

## 1. 現有電子銃のナノ秒領域に於けるパルス応答

### 1. 1 パルス応答

現在使用している電子銃の内部構造の概略図を Fig. 1 に示す。この電子銃は内部においてグリッド・カソード部 (G.K.) と入力端子間に長さ 13.3 cm の同軸線路 (信号伝搬時間  $\sim 0.75$  ns) を有する。線路の形状、誘電材からこの線路のインピーダンスはおおよそ  $75 \Omega$  程度と見積られる。また、入力端子は同軸構造を採用していないためこの部分においてインピーダンスの定まらない区間が 3 cm ほど存在する。この電子銃のグリッドパルス発生器からグリッドカソード部までのグリッド制御信号伝搬経路の概略を Fig. 2 に示す。パルス発生器から電子銃の入力端子までは長さ 95 cm、インピーダンス  $50 \Omega$  の同軸線路 (信号伝搬時間  $\sim 4.75$  ns) を用い、グリッド制御パルスを印加する。抵抗  $R \Omega$  は後に述べる反射パルスの影響を低減させるために用いられる整合用の抵抗器である。G.K. の動作時の入力インピーダンスは  $1$  k $\Omega$  程度であることから印加パルスは、

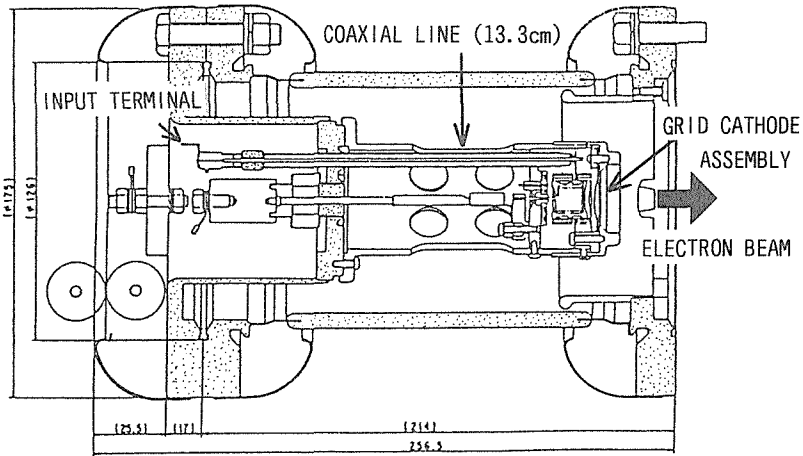


Fig. 1 Electron gun which has been used for the Hokudai 45MeV Linac.

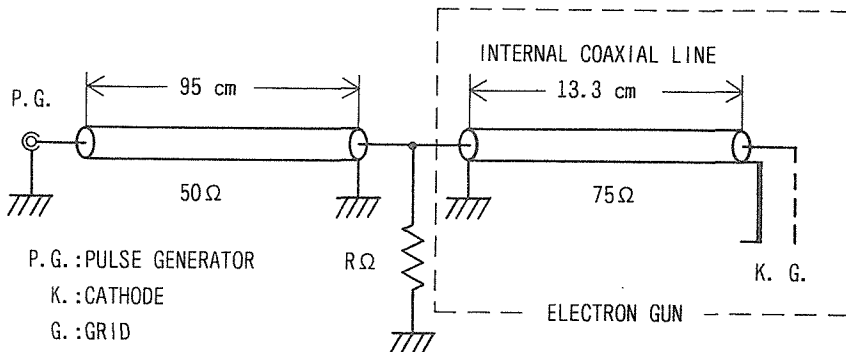


Fig. 2 Simplified path of grid control pulse from the pulse generator to the grid-cathode assembly.

1) グリッド・カソードと電子銃入力端, 2) G.K.とパルス発生器の間において多重反射を繰り返す。グリッドパルス波形はこれら反射波形の重ね合わせとなり, 前者はパルス幅に影響をあたえ, 後者は主パルスの他にサテライトパルスを発生させることが推測される。すなわちG.K.(インピーダンス $>50\Omega$ )で同相反射したパルスは, パルス発生器の出力端(出力インピーダンス $<50\Omega$ )で負極性に符号を変え, 再びG.K.へと戻る。この過程を繰り返すため, 主パルスの後に2Tごとの時間間隔で負, 正, の順に極性の反転した反射パルスがG.K.に印可されることになる。ただしTはパルス発生器からG.K.まで信号伝搬時間で, およそ5.5 nsである。電子の加速に寄与するのは正のパルスであるため, 主パルスの後に4Tごとに反射波に起因するサテライトパルスが出現すると予測される。

### 1. 2電子銃ナノ秒パルス応答実験

これらのことがらを確認するため電子銃のグリッド制御信号にナノ秒パルスを用い加速実験を行った。実験に用いたグリッドパルス波形を Fig. 3 に示す。半値幅 2 ns, ピーク電圧 1.6 kV である。Fig. 4 にビームの平均電流値の測定と波形を観測するための体系図を示す。ここで波形観測には我々の開発したループ型電子ビーム波形モニターを用いた。ループ型モニターの詳細は参考文献<sup>1)</sup>に譲るが, その概略はビーム軸を中心軸とする金属円筒壁に配置した1辺1 cmの正方ループを用い, ビームの作る電磁場を検出するものである。パルス波形は帯域幅1 GHz オシロスコープ(テクトロニクス社7104型)で撮影した。モニターからオシロスコープまでの伝送ケーブルには低損失同軸ケーブル(三菱電線AF-50/14型)を用いた。

このパルサーを用い, グリッドバイアス電圧を $-400\text{ V}$ としたときのビーム出力波形を Fig. 5 a に示す。北大45 MeV線形加速器に用

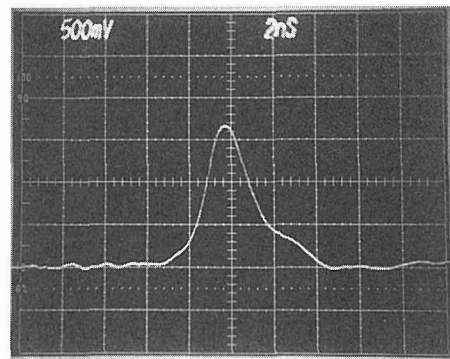


Fig. 3 Output waveform of the pulse generator which is used for the study of pulse response of the electron gun.  
V: 500[V/div.], H: 2[ns/div.].

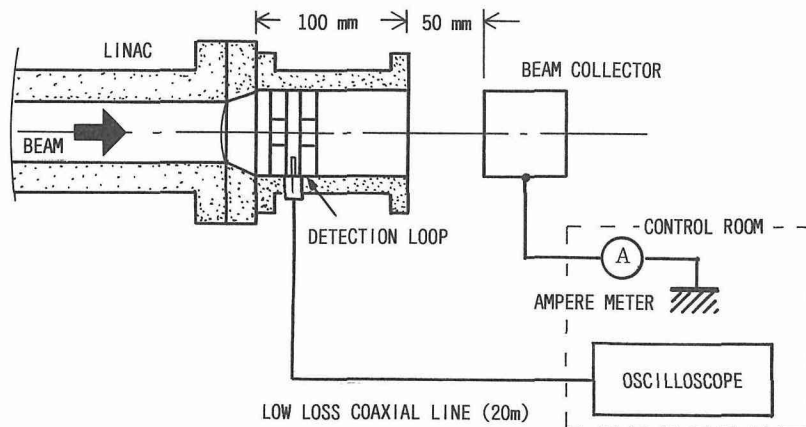


Fig. 4 Measuring system for the accelerated beam waveform using a loop monitor and for the average beam current using a beam collector.

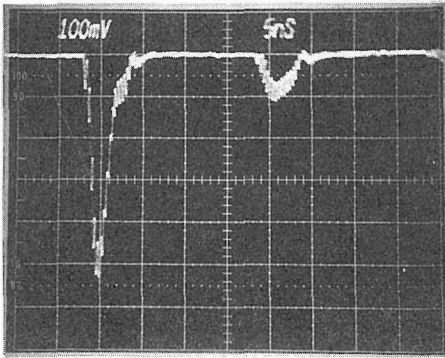


Fig. 5a) Accelerated beam waveform measured by the loop monitor shown in fig. 4.  
V: arb., H: 5[ns/div.].

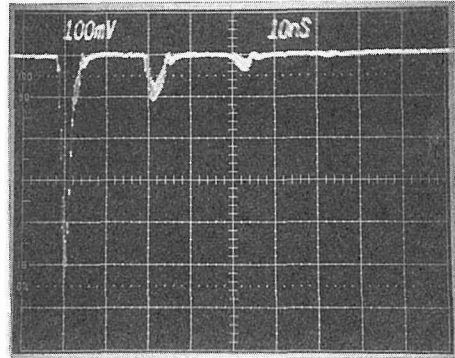


Fig. 5b) Accelerated beam waveform measured by the loop monitor shown in fig. 4.  
V: arb., H: 10[ns/div.].

いている加速用マイクロ波の周波数は2856 MHz(周期350 ps)である。電子ビームの波形はこの周期で集群されたパルス—微細構造パルス—の列よりなる。ループ型モニターはこの微細構造パルスを検出することができる。Fig. 5の観測波形に見られる微細構造パルスの数から、加速ビームのパルス幅は2~3 nsであることが確認できる。

Fig. 5 b)は同 Fig. a)の時間軸を10 nsとして観測した波形である。主出力の後に反射によるサテライトパルスが観測できる。主出力とサテライトパルスの時間間隔がおよそ20 nsであることから、このサテライトパルスが、先に述べたG.K.とパルス発生器間の多重反射(4 T~22 ns)によるものと見ることができる。これら実験結果から、現有の電子銃を用いてナノ秒パルスの発生を行うためには、1) 反射パルス波高よりも大きなグリッドバイアスを採用し反射波を除去する、2) 伝送経路上で適当な整合を行うことによって反射波の影響を低減するの、二つの方法が考えられる。前者の方法では、主パルスもグリッドバイアス電圧増加分だけ減少する。後者の方では50 Ω負荷で製作されたパルス発生器の出力は1/2以下に減衰するため、加速ビームの電荷量が低減し実用上十分な電荷量を得ることは困難となる。

## 2. ナノ秒パルス加速実験と測定

本実験では上述の2方法を併用して加速実験を行った。出力ビームパルスの低減に対処するため著者らによって考案されたパルス加算方式<sup>2)</sup>を用い、16台のパルス発生器からの出力をパルス加算器で合成し、半値幅2.8ナノ秒、負荷抵抗50 Ωに出力2750 Vのナノ秒パルスを発生することのできるパルサーを試作した<sup>3)</sup> Fig. 6に出力波形を示す。オシロスコープの垂直軸の入力には60 dBのアッテネータ(周波数帯域1 GHz)を用いて測定した。

加速実験は、グリッド—カソード間のバイアス電圧を変化させ、各バイアス電圧における電子平均電流、ビームのパルス波形、パルス当たりの吸収線量測定を行った。平均電流(電荷量)の測定は、電子ビームを完全に止めるのに十分な厚さを有する7 cm立方のタングステンブロックを用いて行った(Fig. 4参照)。ビームパルス波形測定にはループ型モニター及びフォトンカウンティング法を原理とする制動X線の検出時間分布測定法を用いた。ループ型モニターの概略についてはすでに説明したので、ここに、制動X線の検出時間分布測定法について述べる。高エネルギー

ギー電子によって発生する制動輻射 X 線の量（単位時間当たり発生するフォトン数）は電子線強度に比例し、その発生時刻は電子線がターゲットに入射した時刻と見ることができる。よって制動 X 線強度の時間分布はパルス電子ビーム波形に対応する。制動輻射 X 線の時間分布を測定することにより電子ビームのパルス波形を求めることができる<sup>4)5)6)</sup> 測定系は時間波高変換器 (TPHC) と多重波高分析器 (PHA) で構成されている。そのブロックダイアグラムを (Fig. 7) に示す。電子ビーム波形の立ち上がり時刻を検出し時間分析のトリガ信号 (ス

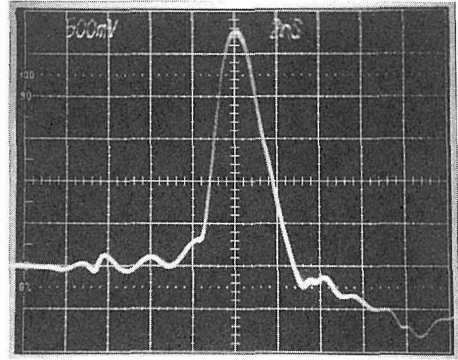


Fig. 6 Output waveform of the high voltage nano-second pulse generator. V : 500[V/div.], H : 2[ns/div.].

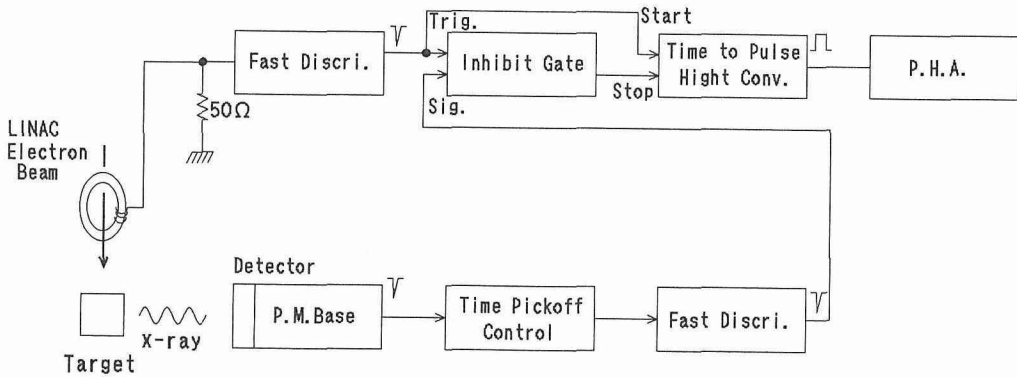
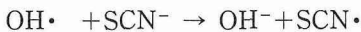


Fig. 7 Measuring system for the time-distribution of bremsstrahlung photons obtained by bombardment to a tungsten target with the electrons.

タート信号, 時間原点) した。液体シンチレータ NE 213 の X 線検出信号を入力信号 (ストップ信号) とし、両信号間の時間間隔を分析し、X 線の検出時間分布 (即ち、電子ビーム波形) を求めた。TPHC-PHA 時間分析器を用いて正確に測定を行うためには 1 ビームパルス当りの検出フォトン数を 1 以下にする必要がある。本実験ではビームパルス当りの検出 X 線信号数を 0.2 個とした。

次に吸収線量の測定について述べる。パルス当たりの吸収線量は、KSCN 水溶液を用いたパルスラジオリシス法により測定された。照射された KSCN 水溶液中において、480 nm 近傍に極大を有する過渡的吸収スペクトルが測定される。この吸収は次のような反応



において生成する (SCN)<sub>2</sub><sup>-</sup> ラジカルアニオンによるものである。この吸収種が 2 次反応によって減衰する事や、分子吸光係数 (ε)、放射線化学吸収量 (G 値) 等は良く調べられている<sup>7)8)9)</sup> したがって、パルスラジオリシ法により、電子線照射直後の (SCN)<sub>2</sub><sup>-</sup> に基づく吸光度 (OD<sub>0</sub>) を測定することにより、次式からパルス当たりの吸収線量を求めることができる。

$$D = \frac{9.65 \times 10^6 \times OD_0}{G \epsilon l \rho} \quad (\text{Gy})$$

ここで、 $l$  は光路長、 $\rho$  は水溶液の密度である。

### 3. 結果と考察

Fig. 8 にナノ秒・高出力アバランシェパルサーを用いた加速実験におけるビーム出力波形の一例を示す。観測にはループ型モニターを用いた。(バイアス電圧=-500 V, パルサー出力抵抗=83  $\Omega$ )。Fig. 8 より、現在の電子銃を用いても半値幅約 3 ns のパルス電子ビームの加速が可能であることがわかる。Fig. 9 にバイアス電圧を変化させて得られた制動 X 線の検出時間分布を示す。Fig. 9 の最初のピークが主パルスの波形を示しており、その後に見られる 2~3 のピークは第 1 章で述べたサテライトパルスである。このサテライトパルスの影響は、

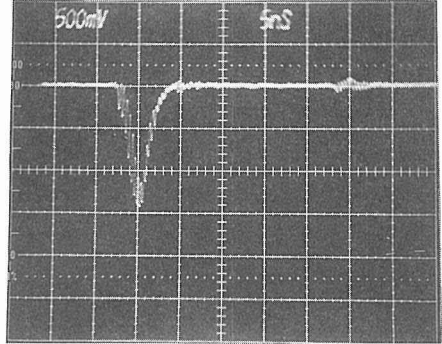


Fig. 8 Accelerated beam waveform measured by the loop monitor using the high voltage nano-second pulse generator for the electron gun. V: arb., H: 10[ns/div.].

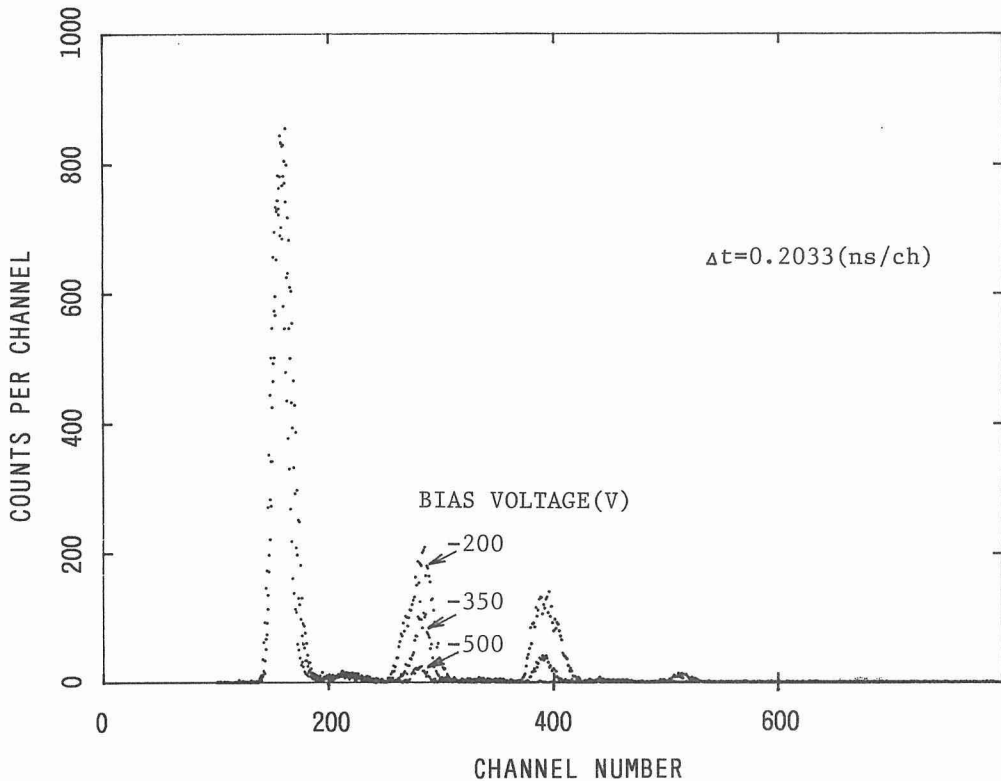


Fig. 9 Accelerated beam waveform measured by the time-distribution of bremsstrahlung photons using the high voltage nano-second pulse generator for the electron gun.

**Table 1** FWHM of accelerated beam Pulse, the charge and absorbed dose per pulse. The charge ratio of main pulse to the total is also given.

Bias voltage: [V]	FWHM of main pulse: $t_w$ [nsec]	Charge of main pulse: Q[nC]	Absorbed dose of main pulse: Q[nC]	Charge fraction of main pulse to total: r[%]
-200	4.1	2.7	45.0	64.0
-350	3.7	2.3	39.0	83.0
-500	3.1	2.0	32.0	94.0

主パルスの振幅を余り減少させずに、バイアス電圧を大きくすることにより軽減し得ることが Fig. 9 からわかる。これより制動 X 線の検出時間分布測定法によって得られた主パルスの半値幅は約 3 ns であり、ループ型モニターで得られた値とはほぼ一致した。

Table 1 に各バイアス電圧において得られた主パルスの半値幅 ( $t_w$ )、主パルスの電荷量 (Q)、主パルスによる吸収線量 (D) および全パルスの積分値に対する反射パルスの割合 (r) を示す。r は制動 x 線の検出時間分布測定法によって得られた各パルスの面積比から求めた。平均電流測定や吸収線量測定の結果には反射パルスによる成分が含まれている。主パルスのみによる電荷量や吸収線量は測定結果に r を乗ずることにより求めた。Table 1 の結果を従来の 10 ns パルス運転時と比較すると、パルス幅で約 1/3、吸収線量で約 1/2~1/3 程度に低減している。吸収線量がパルス幅の短縮分程には減少していないことは本方式の有効性を示している。即ち、反射パルスの低減に伴うビームパルス波高の低減を、高出力短パルスバルサー採用により補償することができ、更にそれ以上に波高の増大を実現していることが示された。

## おわりに

北大 45 MeV 線形加速器によるナノ秒パルスビームの発生を試みた。現在の入射系では電子銃の内部構造に起因する反射波の影響を完全に排除することは困難である。そのため、現在、短パルス加速に適した電子銃の軌道解析を行い、これに基づく電子銃の設計開発を含め、入射系テストベンチの作製を実行中である。

## 参考文献

- 1) A. Homma *et al*, "Detection of Signal from Bunched Electrons in a Linac Beam by Using a Pick-Up Coil Monitor", Bulletin of the Faculty of Engineering. Hokkaido University, [127] (1985)77.
- 2) A. Homma *et al*, "High Voltage Nanosecond Pulse Generator by Using Avalanche Transistors and Pulse Transformer", Proc. 13th Meeting on Linac in Japan, (Spt. 1988) 103.
- 3) A. Homma *et al*, "Improvement of Injection System of Hokudai 45 MeV Linac", Proc. 15th Meeting on Linac in Japan, (Spt. 1990) 106.
- 4) T. Sawamura *et al*, "Radiation-Burst Propagation in Air" Journal of Nuclear and Technology, 17 [12] (1980)942.
- 5) T. Akimoto *et al*, "A Correction Formula for the Counting Loss Using a Time to Pulse Height Converter and Experimental Verification of the Formula" Nucl. Instr. and Meth., 184 (1984) 525.

- 6) D. Tronk, "A New Compression System for Intense Relativistic Electron Beams" Nucl. Instr. and Meth., 228 (1985) 217.
- 7) I. G. Draganic, z. d. draganic, "The Radiation Chemistry of Water" Academic Press, New York, N. Y., page 289.
- 8) N. W. Holn, R. J. Berry. "Manual on Radiation Dosimetry" Marcel Dekker Inc., New York, N. Y., (1970) 289.
- 9) M. C. Sauer Jr., S. Arai and L. M. Dorfmann, J. Chem. Phys., 42 (1965) 708.