

T. Ueda, T. Kobayashi, Y. Yoshida and K. Miya
Nuclear Engineering Research Laboratory,
Faculty of Engineering, University of Tokyo

Abstract

The beam stability of the 28 MeV electron LINAC has been improved for the pico-second pulse radiolysis experiments. The fluctuation of the emission, the time jitter and drift of the trigger circuit, the phase modulation drift and the power drift of the klystron, the frequency drift of the master oscillator, and the temperature drift of the water cooling unit were tested. The fluctuation of the peak beam current was less than $\pm 0.3\%$ (pulse to pulse) and the drift of the average beam current was less than $\pm 0.6\%$ during 80 minutes.

東大ライナックビームの安定性と運転制御

<序> 最近では、小型SOR入射ライナックビームの安定性または自由電子レーザ実験における高品質ライナックビームの安定性等、ビーム性能の向上に伴いその安定度も厳しいものが要求される。しかし、一概に安定性といっても、その加速器を使用する目的により要求されるビームの質並びに安定度も異なる。我々のところではツインライナックによる $\sim 10\text{ps}$ での高時間分解能パルスラジオリシス実験を行っている。この実験では、パルス毎及び長時間（1時間以上）のビーム電流（電荷量）の安定度が要求される。また、ビーム取出し出口 $3\text{mm}\phi$ スリットを透過したビームを用いるため、エネルギー変動も極力少なくしなければならない。今回は現状での28MeVライナックにおけるピコ秒単パルスビームの電流とエネルギーの安定度及び各コンポーネントの安定度を報告する。

<吸収実験とS/Nの改善> Fig-1にピコ秒レーザーダイオードと28MeVピコ秒ライナックを用いて測定して得られた吸収波形を示す。Fig-1で縦軸はオプティカルデンシティ(O.D.)で表され、横軸は時間を示す。システムのS/Nの向上のためには光源、測定器、ライナックのそれぞれの性能向上が要求される。このうちライナック性能向上としては以下のことが考えられる。1)ビームの電荷量の増大、2)パルス繰り返し数の増大、3)ビームのパルス毎の安定度と長時間安定度。今回は3)のビームのパルス毎の安定度と長時間安定度について1%以内を目標に実験を行った。

<28MeVライナックの構成とビーム安定性の測定方法> 28MeVピコ秒ライナックの構成をFig-2に示す。発振器は水晶の119MHzを基準周波数として、476MHz、2856MHzを発生する。入射部構成は、電子銃はY-796（アイマック社）を使用し、476MHz SHB及び2856MHz PBでピコ秒シングルビームのバンチングを行う。加速管はC.I.型1.7mと2.0mを直列に導波管で結合し、6MWクライストロンパワ

一を供給する。エミッションの制御は、マイクロ波と同期をとったトリガパルスで板極管(7211)あるいはアバランシェトランジスタで作ったグリッドパルサーへ加え1.4nsのパルス出力とバイアスで制御する。また、ビーム電流の安定性の測定は3mmφスリットを通過させた電流を同軸型ビームキャッチャで受け、平均電流をレコーダに記録すると同時にタイムプロファイルをオシロスコープで測定した。また各コンポーネントの安定度は差動アンプ(TEK 7A13)を用い0.1%以上の分解能で測定した。ビームは主に繰り返し50ppsでピコ秒シングルビームを用いた。

〈ビーム不安定性の要因〉 ビーム不安定性の要因となる主な項目を以下に述べる。

エミッション 電子銃エミッションに対する電子銃パルサーの影響は $I=PV^{3/2}$ から、電圧変動の1.5倍が電流変動となる。また、板極管グリッドパルサーの場合B電源パルサー(2kV板極管プレート電圧用)の電圧変動もエミッション変動となる。更にピコ秒単パルスビーム出力に対して電子銃エミッションのジッターの増大はFig-3に示すごとく、メインパルスのピーク電流の減少とともにサテライトビームの増加となる。メインピーク電流の変化を1%以下とするためにはトリガのジッターとドリフトは±40ps以下としなければならない。

マイクロ波 Fig-4の実験結果より、1%以下に電流変動を押えるためにはマイクロ波の位相の変化は2856MHzで±6°以内476MHzで1°以内に押えなければならない。クライストロン電圧変動に対するクライストロンの位相の変動は現有のクライストロンでは1%の電圧変動は約6°の位相変動をおこす。また、クライストロン電圧変動に対するビームエネルギー変動は1.25倍である。ライナックのエネルギー変動を0.1%以内にするためには、現在のシステムでは周波数変動で $(df/f)=3.44$ ppm(9.71KHz)以下でなければならない。現有の発振器の周波数変動は主に環境の温度変化に影響されカタログ性能では1.5ppm(4.28KHz)/°Cである。従って0.1%のエネルギー変動に押えるならば温度コントロールを±0.5°C以下にしなければならない。

冷却系 加速管の温度の影響は、50KHz/°Cの周波数変動として計算される。これを0.1%エネルギー変動に押えるためには周波数変動 (df/f) で約10KHzである。従って加速管の温度コントロールとして0.2°Cに安定させなければならない。

電磁石電流 ビーム出口に3mmφのスリットを設けてビームを取出しているため、電磁石電流変動はビーム誘導系の軌導の変化に大きく影響する。そのため各電磁石電流の安定度も重要である。

供給電源電圧変動 電力会社からの電圧変動は±10%ある。従ってライナックのパルサー関係には自動電圧調整器(AVR)を通じて電力が送られる。現有のAVRの出力変動は±2.5%以内である。

室内温度 室内温度の変化は各種電源のドリフトやマイクロ波ケーブル及びトリガ伝送ケーブルの伸縮による位相変化並びにトリガのタイミングの変化に影響する。各種電源の電圧温度係数は約100ppm/°C程度である。同期回路に使用している電源電圧の変化と時間ドリフトは1.625ps/mVと計算されるため10psに押えるためには6.25mVの変動に押える必要がある。10V電源では室内温度を±3°C以内に押えなければならない。ケーブル(5D4E)のパルス遅延時間は $T_g = 3.6$ ns/mで与えられ、また温度変化は $(\delta T_g / \delta T) = 3 \times 10^{-5}$ ns/m/°Cである。従って100mケーブルを使用した場合3ps/°Cになるため10ps以内に押えるには約3°Cの室温の変化に押える必要がある。

〈各コンポーネントの安定度〉 各コンポーネントの安定度について測定した結果をFig-5に示す。

Fig-5の結果から、各種の電圧変化よりエミッションの変化は0.2%以下と推定する。また、2856 MHzマイクロ波の1.4%パルス毎の位相変動は90°ハイブリッド位相検出回路での測定結果であり、出力変動0.7%/2Hrを考慮しても1%以下のエネルギー変動に押えることができる。発振器の周波数変動は実測した結果0.42ppm (2856MHz系で1.2KHz) であり、発振器のクーラーの温度コントロールが実測でも $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以下であった。周波数の変動周期はクーラーの周期に一致しており約10分である。この場合の周波数に対するエネルギー変動は0.015%と計算上ほとんど影響がない。更に電磁石電源の変動に伴うビーム変動は特に観測されなかった。従って0.3%という電流変動の設計性能は現段階ではほとんど問題なかった。その他冷却系温度と室内温度も現段階では特にビームに対しての影響は確認できなかった。

<同期トリガのジッターとドリフト> ピコ秒オーダーでの同期トリガのジッター及びドリフトのヒストグラム測定がTEK CSA803、SD24サンプリングスコープを使用することにより今回初めて測定できた。その結果、Fig-6に示すように各素子のジッターの定量化ができ、各コンポーネントのピコ秒オーダーでのドリフトの測定も可能となった。特に同期回路での電源変動に伴うドリフトの測定は重要であり、ピコ秒単パルスビーム出力の長時間安定性の測定も可能となった。Fig-7にピコ秒単パルスビームを同軸キャッチャーで測定した結果を示す。この結果グリッドパルサーまでのジッターは、6.692ps (RMS) であり、ビームのジッターは7.816ps (RMS) と結論できる。

<ピコ秒単パルスビーム電流の安定度> ビーム出口3mmφスリットを通過した後の同軸キャッチャーによるパルス毎のビーム電流の安定度を測定した結果をFig-8に示す。Fig-8はピークを拡大したものであり、その変動巾は $\pm 0.3\%$ であった。また平均電流による長時間安定度をFig-9に示す。その結果 $\pm 0.6\%/80\text{min}$ という結果が得られた。

<今後の方針> ビームの安定度に関しては、各コンポーネントが最高の性能を出して初めて長時間の安定度が得られる。そのためには各コンポーネントについて常時0.1%以下のモニター及び連続記録が必要である。更に0.1%の安定度を求めるにはジッターを更に小さくしなければならない。また、現在の同期回路では各パルサーに対して32ns程度のタイミングのゆらぎがある。これをより少なくするためには、2重同期回路方式や高周波での同期回路方式にする必要がある。更に各コンポーネントの安定度の目標も0.1%以内とする必然がある。

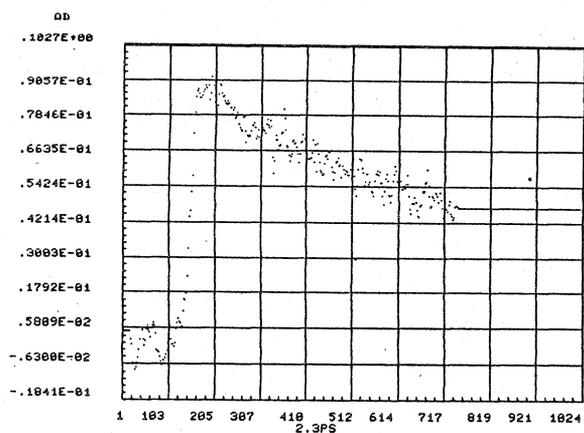


Fig-1 ピコ秒単パルスビーによる吸収波形

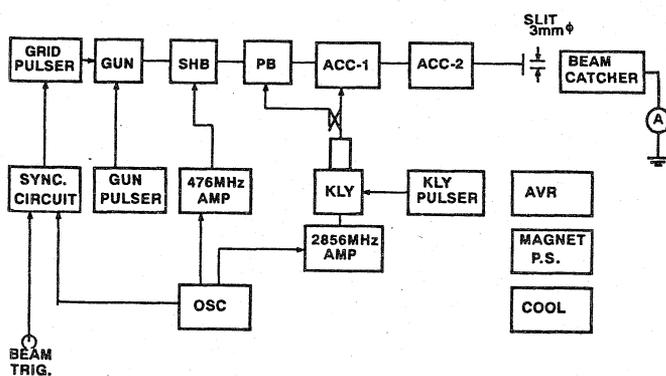


Fig-2 28MeV LINAC構成図

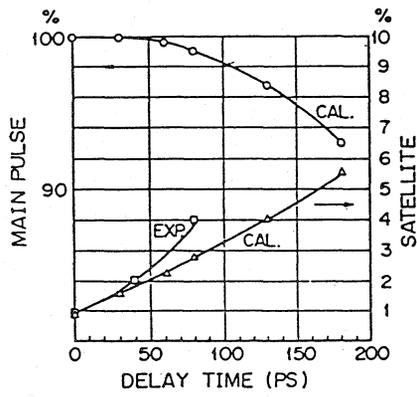


Fig-3 入射エミッションのタイミングとピコ秒単パルスビームの出力とサテライトの関係

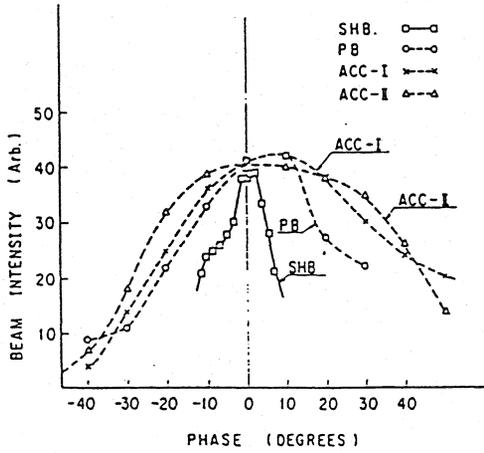


Fig-4 ピコ秒ビームにおけるマイクロ位相の影響 (実験値)

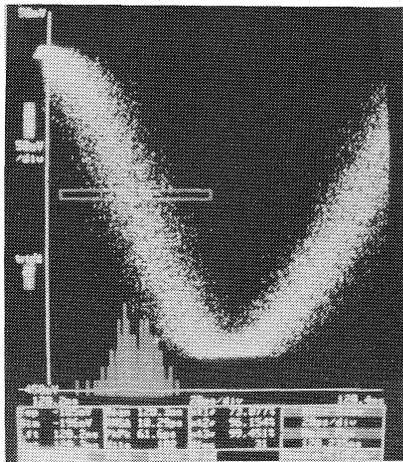


Fig-7 ピコ秒単パルスビーム出力のジッター
50mV/div 20ps/div

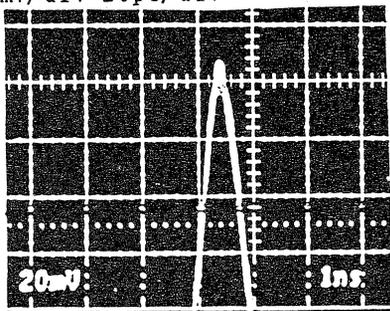


Fig-8 ピコ秒単パルスビーム出力の安定度
(ピークの拡大) 全体2V

分類	測定項目	測定値
エミッション	1)電子銃バルサー電圧変動 2)グリッドバルサー電圧変動 3)ヒータ電力or温度変化 4)真空度変化	<0.12%/パルス毎 <0.2%/パルス毎 <2 × 10 ⁻⁹ torr
2856MHz マイクロ波	1)クライストロン電圧変動 2)クライストロン位相変動 3)クライストロン出力変動	<0.1%/パルス毎 <1.4%/パルス毎 <0.7%/2Hr
476MHz マイクロ波	1)SHBアンプ位相変動 (フェーズロック有) 2)SHBアンプ出力変動	<0.3%/Hr (設計値) <2.4%/2Hr
発振器	1)周波数変動 (476 MHzで) (2856 MHz) 2)発振器の温度コントロール	<200Hz <1.2KHz 0.42ppm <±0.5℃
電磁石 電源	1)電流変動	<0.3% (設計性能)
同期 (ジッター)	1)電子銃グリッドバルサーと 476MHzとのジッター 2)長時間ドリフト	<6.7ps (R.M.S)
冷却系	1)温度コントロール	<±0.5℃ (設計性能)
空調	温度変化	<3℃

Fig-5 各コンポーネントの安定度

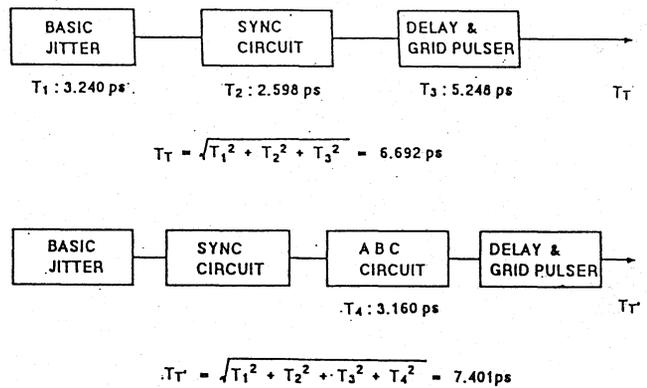


Fig-6 トリガ系ジッターの計測

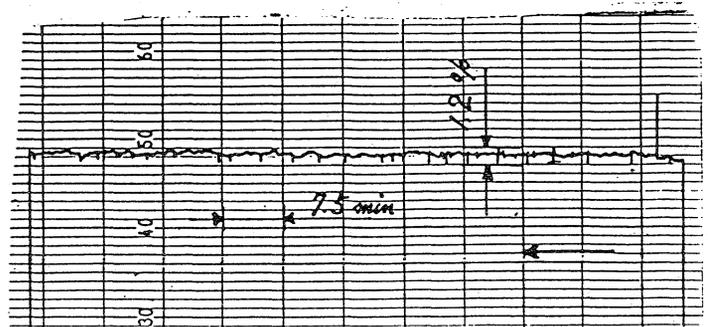


Fig-9 ピコ秒単パルスビームの平均電流
の安定度 (3mmφ透過後)