

Measurement of Ultra Low Current Beams

R.Taniguchi, H.Wakamatsu, T.Kojima and S.Okuda
Radiation Research Center, Osaka Prefecture University
1-2 gakuen-cho, Sakai, Osaka 599-8570, Japan

Abstract

Ultra low current and high energetic electron pulsed beams were produced by the use of an electron linear accelerator. The beam current were measured by a charge sensitive amplifier and a NaI(Ag) scintillation detector. The minimum beam charge was estimated to be about several aC/pulse by statistical analysis of the fluctuation of the NaI output pulse height. The spatial profiles of the beams were also measured by the high sensitivity 2-dimensional radio-imaging system which consisted of a cooled CCD camera with a thin NaI(Ag) scintillation plate.

超微弱ライナック電子線の計測

1. はじめに

電子線形加速器から出力される電子線パルスは、通常 1 パルスあたり 10^{13} コ程度の電子を含む。本研究ではこれを微弱化し、最終的には単一電子を取り出すことをめざしている¹⁾。このようにして取り出された高エネルギー電子は、RI 等からの線とは異なり、

- ・ 方向が揃い、
- ・ エネルギーが単色であり、
- ・ 明確な時間原点を持っている。

このため、検出器、特に多次元放射線検出器の感度較正、方向依存性の評価、半導体集積回路のソフトウェアの評価等に大きな威力を発揮すると考えられる。また、生物学の分野でも、細胞あるいは、たんぱく質の特定部位に電子がヒットした場合の影響を調べる、いわゆる精密放射線生物影響の研究にも寄与するものと考えられる。さらに、この電子パルスは、究極のインパルスであり、自由電子レーザー等、パルスの時間構造に敏感な分野に対しても強力な研究ツールとなると考えられる。

2. 電子ビームの微弱化

微弱電子ビームを取り出す方法は様々考えられる。例えば、1)スリット等で空間的に絞る、2)電子銃を微弱化する、3)RF パルスを短くする、等が考えられる。スリットでビームを極端に絞った場合、スリット表面での小角散乱成分が増加するとともに、制動 X 線等による 2 次線成分が増加し、ビームの S/N が劣化することが予想されることから、本研究では、3 つの手法を併用しながらも、特に 2)の電子銃の微弱化を中心に検討した。

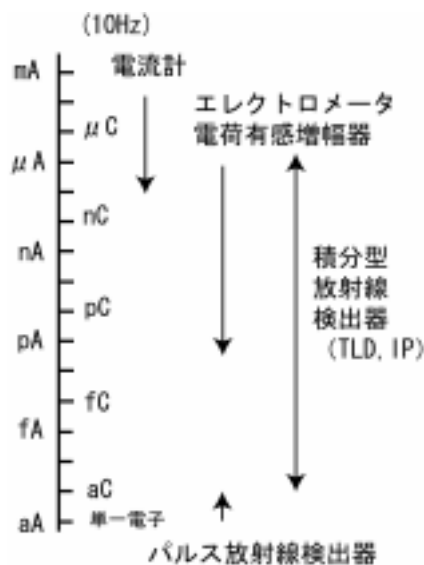


図1 微弱ビーム電流測定法

3. 微弱電子ビームの計測

微弱電子ビームを制御するためには、それに対応した高感度ビーム計測技術が不可欠であるが、fC を下回るような超微弱電子ビームを通常の電流測定法で直接モニターすることは不可能に近い。図1に各電荷レベルで考えられるパルスビーム測定法を示す。通常の電流計での測定ではナノクーロンが限界であると考えられる。一方、単一電子に近い超微弱パルスの場合、放射線を1つ1つ数える、パルス放射線計測法が適用可能となる。しかし、この方法も、パルスに含まれる電子の数が、ある程度(数十個以上)になれば、応答がパイルアップし正確な電子数

を数えることは困難となる。さらに、この2つの検出法の間領域、具体的にはナノクーロンからフェムトクーロンの領域は、適当な検出法が現存しない空白の領域である。

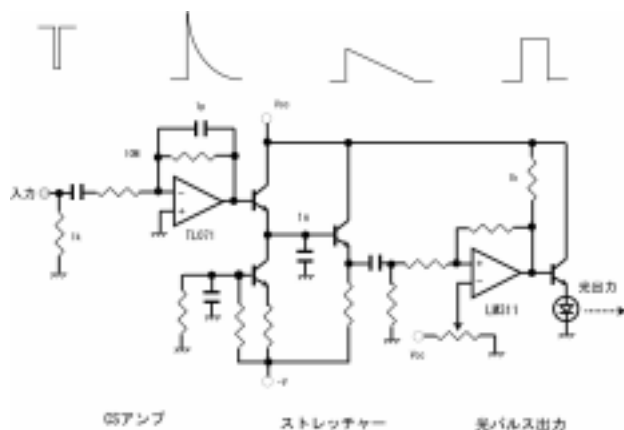


図2 電荷有感型 (CS) パルスビームモニター回路

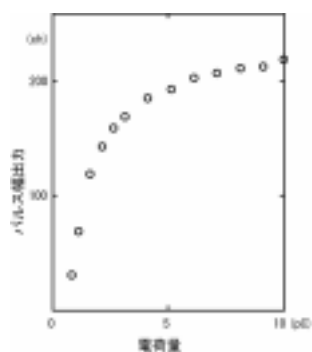


図3 CS ビームモニターの感度特性

2.1 電荷有感型ビーム電流モニター

微弱ビームを取り出す場合、通常はマイクロクーロン程度のビームで加速器の調整を行い、その後、段階的に微弱化を行う。そのためビームモニターとしては、各段階の微弱ビームの計測が必要となる。本研究では、この電流領域をカバーする検出法として、放射線パルス計測のプリアンプとして用いられる電荷有感型 (CS) 増幅器を用いたビーム電荷量のパルス計測法の適用を試みた。ただし、通常の CS アンプは電気的ノイズに極端に弱く、電子線形加速器のように厳しい電気的環境では使用が困難であることから図2のような回路を開発して使用した。これはバッテリーで動作し、CS アンプからの出力をパルス幅に変換し、光パルスとして出力する。電荷量の測定は電子線パルスごとに行われる。この回路は、周囲と電気的に完全に絶縁されており、耐ノイズ性に優れている。図3にテストパルサーを用いて得られた、このアンプの電荷量 パルス幅の関係を示す。

図のように、電荷量が大い領域では対数特性を示すが、1pC 近辺では直線的な応答を示している。検出限界は、約 0.2pC と評価された。

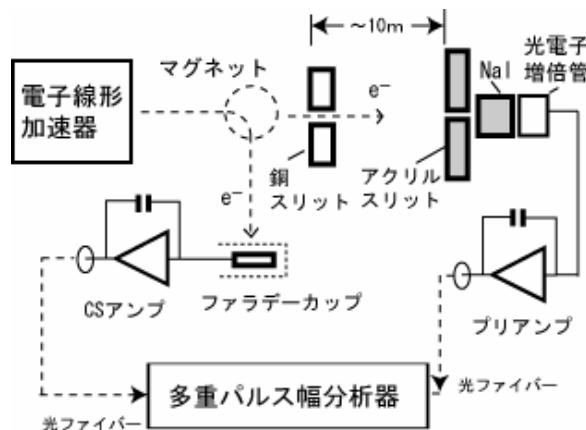


図4 微弱電子ビーム実験体系の概略

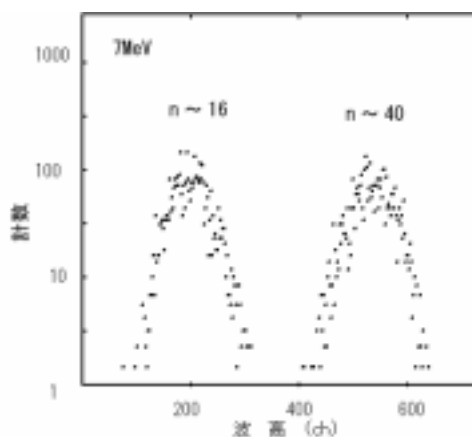


図5 NaI シンチレータを用いて測定した微弱ビームの波高分布

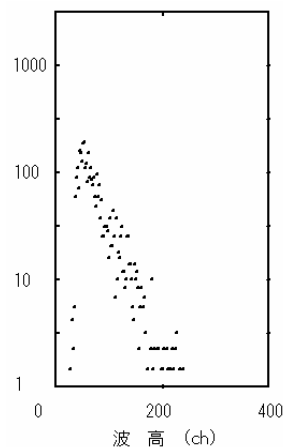


図6 最もビームを絞った場合の NaI シンチレータの波高分布

4. 微弱電子ビームの取り出し

図4に微弱電子ビーム実験体系を示す。ビームラインの中央に水冷のスリットを設置しビームをカットした。通常のビームでスリットの効果を測定した結果では、ビームの減衰率は、ほとんどスリットの幾何条件で決まり、4 MeV から 12MeV のビームで 1/330 から 1/350 の値が得られている。実験では、スリットの手前のマグネットでビームを曲げ、そこで高感度の CS アンプでモニターしながら、電子銃のカソード温度、RF パワーなどを含めた加速器パラメータを調整し、1pC 程度にビームを調整した。安定なビームが得られた後、マグネットを元にもどし、ビームを直進させ、スリットで減衰させた後で約 10m 離れたターゲットに入射する。ここでの電流量は測定限界以下であり、直接測定することは不可能であるが、予備実験の結果から、1/350、すなわち 3fC 程度のビームに減衰していると推定している。このビームをさらに 1mm の 1cm 厚のアクリル製スリットで絞り、2 インチの NaI シンチレーション検出器で計測した結果を図5、図6に示す。RF パルス幅を絞ることによって波高分布は低波高側に移動し、最終的には図6のような分布となった。

図5の波高分布は、多数の高エネルギー電子応答がパイルアップしたものであるが、その波高のゆらぎ、すなわち波高ピークの分布幅はパルスを構成する電子数のゆらぎが主たる成分であると考えられる。このゆらぎがポアソン分布に従うと仮定した場合、図5の右のピークが約 40 個の電子、左の分布が約 16 個の電子の応答で構成されていると評価された。これは電荷量に換算すると約 2.5aC に相当する。ただし、図6に見られるように、この「電子」のエネルギー分布は、低エネルギーに重心をもつ指数関数分布であり、単色であると期待される加速電子の分布とは明らかに異なっている。この原因は現在検討中であるが、通常の加速を受けた電子以外の、2次線あるいは、不規則に加速された成分が多数を占めていると考えている。

5. ビームプロファイルの測定

得られた微弱ビームの空間分布を、高感度放射線画像装置を用いて測定した。図7に示すように、この装置は、冷却型 CCD カメラと NaI シンチレータ (1mm 厚、50mm) で構成され、暗箱の中に収められている。これを図4の NaI 検出器の位置に置いてビームを照射した。図8に結果の一例を示す。ビームが最も弱い場合 (3.3fC) は、明確な像が得られなかったことから、300 個のパルスの応答を重ね合わせているが、他の画像は単一ビームのプロファイルである。図のように電荷が最も多い 11pC のビームは、若干横長の 5mm 程度のビームであることが明確に分かる。さらにビームを微弱化した場合も、プロファイルに大きな変化は見られないが、分布の

中心部分が弱くなり、分布の裾が若干広がっているように見える。

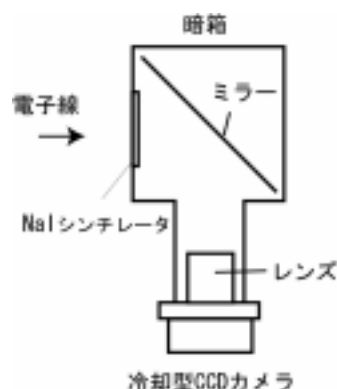


図7 高感度2次元ビームプロファイルモニタ

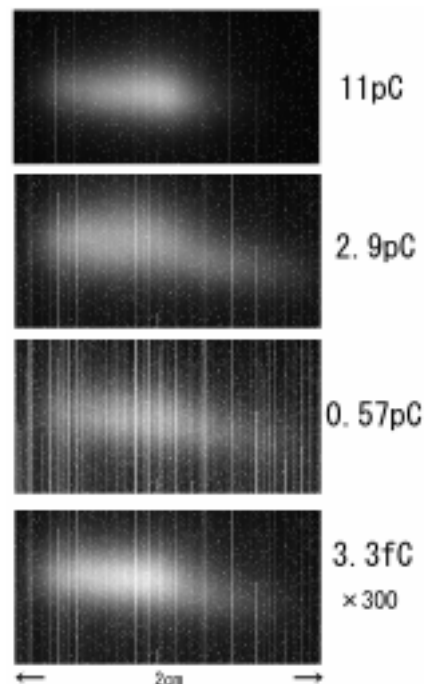


図8 微弱電子ビームのプロファイル

6. まとめと今後の課題

高感度ビーム測定系を整備し、fC 以下の超微弱ビームの電荷と空間分布を測定した。今後は得られた微弱ビームのエネルギー測定と S/N の向上を行っていききたい。

参考文献

- [1]谷口他、日本原子力学会「2004 年秋の大会」要旨集 K9