

# 超微弱電子ビームの利用

谷口良一<sup>1,A)</sup>、荒木太郎<sup>A)</sup>、奥田修一<sup>A)</sup>、大嶋隆一郎<sup>A)</sup>

川崎智<sup>B)</sup>、佐々木朋三<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup>大阪府立大学先端科学研究所

〒599-8570 堺市学園町 1-2

<sup>B)</sup> 日立製作所(株) 原子力事業部

〒317-8511 日立市幸町 3-1-1

<sup>C)</sup> 原子力環境整備促進資金管理センター

〒105-0001 東京都港区虎ノ門 2-8-10

## 概要

ビーム電流を高感度の電荷有感型増幅器で直接パルス計測し、空間的な絞りとパルス幅の短縮を併用してビームを絞ることで、10fC/pulse 以下の微弱電子ビームを安定的に取り出すことに成功した。この超微弱電子ビームを用いることで重金属ターゲットから放出される制動 X 線のスペクトルを通常のシンチレーション検出器で計測することが可能となった。

## 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  $\mu\text{C}$  (クーロン) 程度の電荷を持っている。すなわち、1パルスあたり  $10^{13}$  コ程度の電子を含むことから、そのパルスから放出される制動 X 線光子の数も同じオーダーとなる。通常の放射線のエネルギースペクトル計測では、シンチレータもしくは、半導体検出器から出力されるパルス波高 (電離総量あるいは発光総量に相当) の分布をエネルギースペクトルとして計測するが、このようなバースト状の放射線場では、1パルスあたりに多数の光子が入射することになり、エネルギースペクトルの積分値しか計測できなくなる。これは、いわゆるパイルアップの状態であるが、その積算の程度が大きい場合個々のスペクトルを分解して推定することは、ほとんど不可能に近い。

本研究では、これらの問題を解決し、制動 X 線スペクトルを簡単に計測することをめざして、電子ビームを極端に絞り、極めて微弱な電子ビームを取り出し、そのビームの照射によって発生する制動 X 線のエネルギースペクトルを直接、パルス放射線検出器で測定することを試みた。

## 2. 微弱電子ビームの計測

微弱電子ビームを取り出すこと自体に問題は少ない。例えばスリットを用いてビームを絞ることで、

原理的には際限なく弱いビームとすることが可能である。問題はむしろ微弱電子ビームを計測し、モニターし、制御することにあると言える。fC に近い超微弱電子ビームの場合ビーム電流を直接モニターすることは不可能に近い。そこで本研究では図 1 のような測定体系を用いて実験を行った。これには以下のような工夫がなされている。

### 2.1 電荷有感型増幅器

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) 増幅器を用いてビームの電荷量のパルス計測を行った。ただし、通常の CS アンプはノイズに弱く、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 のような特殊なアンプを開発して使用した。これは図のように、入力したビーム電流を入力部のコンデンサーに蓄え、定電流放電させ、その放電時間をパルス幅として出力する、電荷 - パルス幅変換型のプリアンプである。電荷量の測定は電子線パルスごとに行われる。この増幅器では図のように、放電に一定時間の遅延をはさみ、ビーム発生時のノイズをさける工夫がなされている。さらに、出力されるパルスは直接光パルスに変換され、同時に光ファイバーで伝送される。また、この増幅器はバッテリー駆動であり、周囲と電氣的に完全に絶縁されていることから、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。図のように良好な直線性が得られている。このアンプの測定限界は約 10 pC と判断された。

### 2.2 スリットとグリッド

電子ビームは、スリットによって空間的に絞られ、電子銃のグリッドによって時間的に絞られる。実験では図 1 のように、ビーム経路の中央に水冷のスリットを設置しビームをカットした。予備実験として、それほど弱くないビームを使用し、スリットによるビームの減衰率を測定した。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

<sup>1</sup> E-mail: tan@riast.osakafu-u.ac.jp

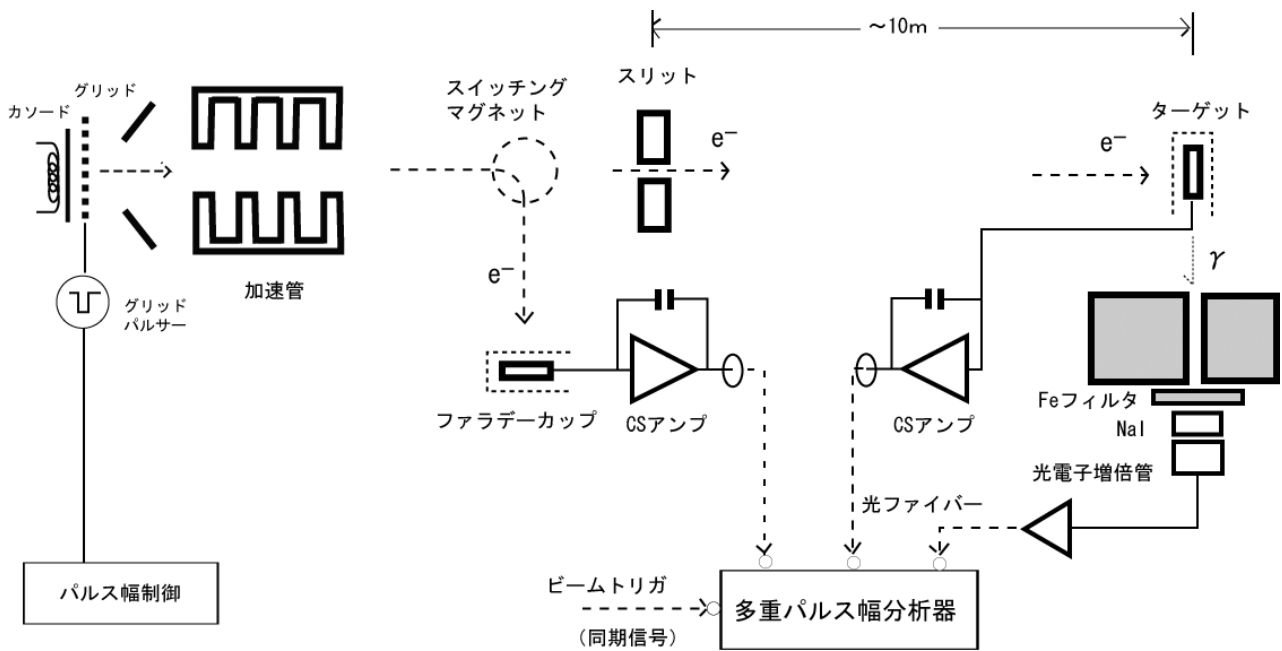


図1 微弱電子ビーム実験体系

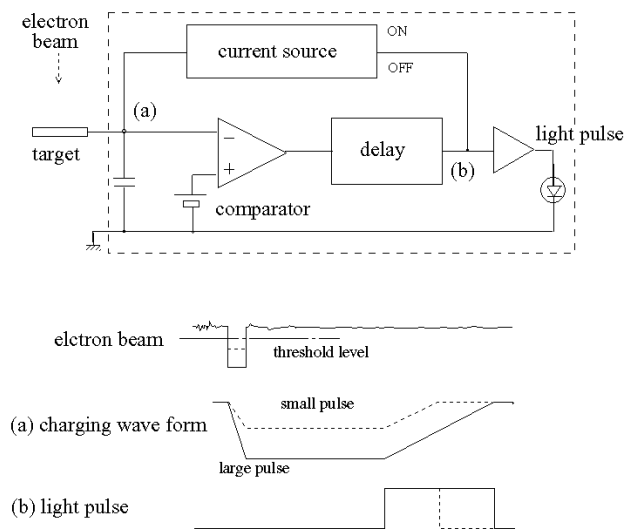


図2 電荷 パルス幅変換型 CS アンプ

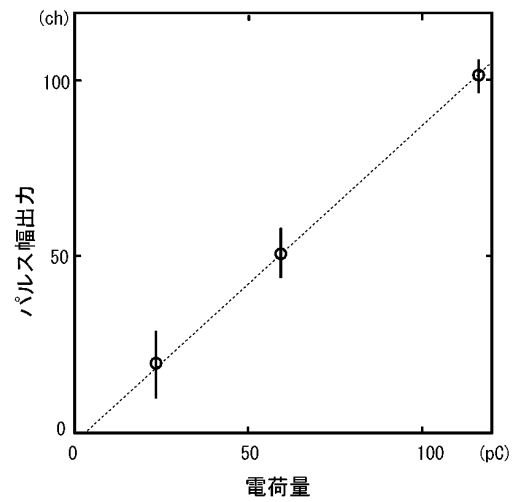


図3 CS アンプの電荷量 パルス幅特性

12MeV のビームで 1/330 から 1/350 の値が得られている。また、グリッドによるパルス幅の圧縮は、グリッドエミッションの影響もあり約 1/10 程度の値にとどまっている。

実験ではその後、スリットの手前のスイッチング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、測定限界ぎりぎりの 10pC 程度にビームを調整する。

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、パルス幅を限度まで絞ることで、1/3500、すなわち 3fC 程度のビームに減衰していると推定される。

### 3 . 制動 X 線の計測

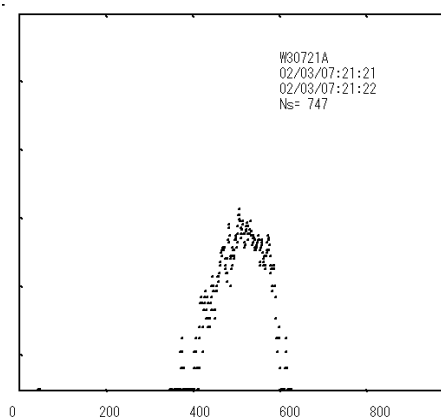
図 1 に示すように制動 X 線の測定には NaI シンチレータを用いた。ターゲットには、厚さ 2mm、40mm の Au を用い、約 2 m 離れた位置で測定した。試料と測定器の間には 1 m 厚のコンクリート遮蔽があり、20cm のコリメータが設置されている。

制動 X 線測定の場合も、微弱電流測定の場合と同様に、ノイズの問題が考えられる。そのため、電流測定と同様に、光電子増倍管の電流パルス出力値をパルス幅に直接変換するプリアンプを製作し、そのパルスを光パルスに変換し、光ファイバーで送信した。また、計測は加速器のトリガに同期して行い、S/N を向上させた。さらに、検出器の前面に、厚さ 25mm の鉄フィルタを挿入している。これは、様々な地点から発生すると考えられる低エネルギーの線をカットする役割を持っている。図 4 に、この測定系で観測された Au ターゲットからの制動 X 線のエネルギースペクトルと、ビーム電流の関係を示している。縦軸に計数値を対数で示し、横軸にパルス

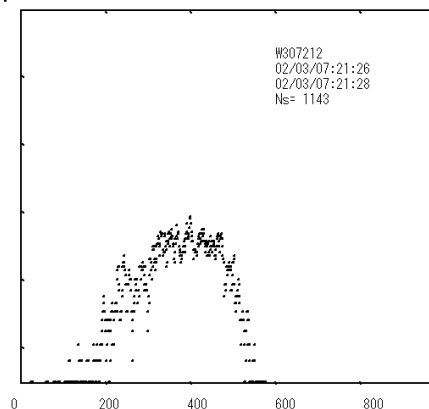
幅（エネルギー）を示している。f C の微弱パルスであっても、まだ  $10^4$  近くの電子の集合であり、放出される X 線もバースト状である。ただし、この程度のレベルでは、検出器の検出効率の関係から、計測される光子は、1 パルスあたり 1 個に近づいている。図 4 (a) は、およそ 20 個の光子を同時に計数したスペクトルと推定され、ピークを形成していた。ビームのパルス幅を絞ることで、図 4 (b) のように、ピーク位置が低くなり、その半値幅も広がった。

ある程度電流量を絞ると、スペクトルは図 4 (c) のようになり、これ以降、電流量に対しては変化しなくなった。これが  $n = 1$  の点であると判断でき、図のスペクトルは Au の制動 X 線のエネルギースペクトルを示すものと考えられる。

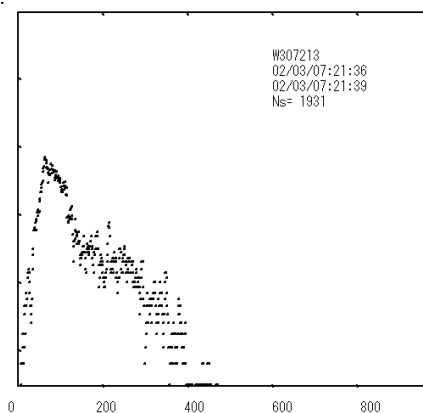
本研究は、経済産業省からの委託による開発研究の一部として行われた。



(a) パルス幅が最も長い場合の  
パルス幅分布



(b) パルス幅を若干絞った場合



(c) 最も電流を絞った場合

図 4 NaI シンチレータで得られた制動 X 線スペクトル。電荷量が多い場合、(a),(b)のようにパイルアップ分布となり、ピークを形成する。ビームのパルス幅を絞ることによって、最終的には、(c)のような分布となり、これ以上パルス幅を絞ってもスペクトルは変化しない。分布のピーク位置とその広がりから計算した結果では、(a)で約 20、(b)で約 4 個の光子が同時に入射したものと推定された。(c)の場合は 1 個以下である。