

## Nuclear Reaction Analysis by Using Ultra Low Intensity Electron Beam

Ryoya Sasaki, Ryoichi Taniguchi, Takao Kojima, Shuichi Okuda  
Radiation Research Center, Osaka Prefecture University, 1-2 Gakuen-cho, Sakai, Osaka, 599-8570

### Abstract

Energetic electron beams higher than several MeV occasionally induce direct nuclear reactions with the target nuclei. These processes are attributed to the quasi-elastic scattering of electrons ( $e, e'$ ) with the target nuclei and similar to the photo-nuclear reactions. These reactions are useful for the non-destructive analysis of heavy elements such as U and Th. However, the huge X-ray burst caused by the bremsstrahlung with the electron pulse bombardment was the most harmful phenomenon for the system. In this study, an ultra low intensity electron beam was used for relieving the problem, which has been developed by modifying an electron linear accelerator. The minimum beam charge about several aC/pulse has been achieved at the present. Consequently, the neutron emitted by  $Pb(e, e'n)Pb$  reaction was measured successfully by the use of the low intensity beams.

## 超微弱電子を利用した元素分析法

### 1. 緒言

電子線形加速器から取り出される電子ビームは、エネルギーや方向を精密に制御でき、放射性同位元素等からの $\beta$ 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。

しかし、応用面から見れば、この加速器からの電子線は強すぎる場合が多い。そのため我々のグループでは、これまで電子線形加速器で微弱ビームの発生を試みてきた<sup>[1]</sup>。その結果、現在までに1マクロパルスあたり1fC以下の微弱ビームが得られている。

図1に、電子線形加速器の各電流レベルにおける応用分野を示している。mAから $\mu$ Aという通常電流では、図のようにX線ラジオグラフィ、医療用照射、材料照射、表面処理等に用いられている。より低電流の領域では、生物の照射効果、放射線検出器の応答評価など、大線量領域とは異なった応用分野が期待される。非破壊検査の分野に限った場合でも、電子線ラジオグラフィあるいは核反応分析といった項目が新たな応用分野として加わることになる。このように、より微弱な電子線を発生させることができれば、多くの新たな応用が可能となることが考えられる。

また、これまで通常の強度の電子線を用いた放射線測定では、X線バーストの影響を強く受けることが難点であった。これは超微弱ビームを用いることで解決すると考えられることから、本研究では電子線形加速器から発生する微弱電子線を試料に入射し、電子の準弾性散乱による核反応に伴って発生する中性子を検出することによって試料の元素分析を行う方法を検討した。

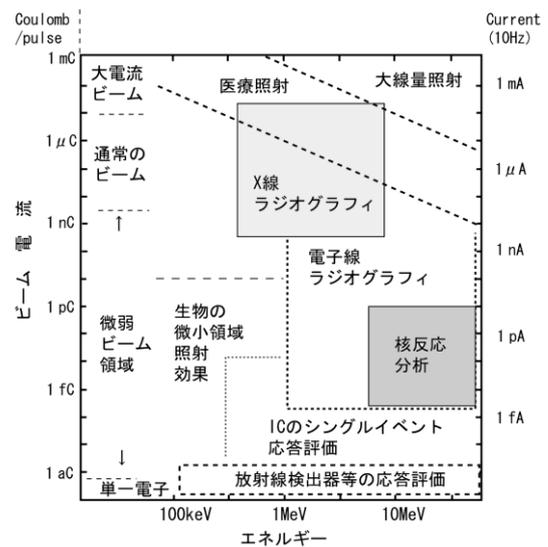
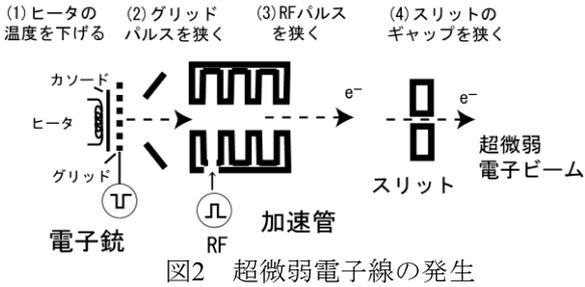


図1 電子線形加速器の各電流レベルにおける応用分野

### 2. 微弱電子線の発生

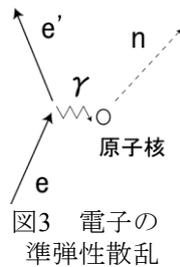
微弱電子線の発生には、大阪府立大学放射線研究センターの電子線形加速器を用いた。この装置の概略を図2に示す。加速器のビームを弱くするという操作は簡単なものと見られがちであるが、十桁以上の微弱化を行うにはいくつかの技術的な問題がある。微弱化の方法としては図の上部に示すようにいくつかの方法が考えられるが、例えば(4)の方法でビームを極端に絞ると、小角散乱成分が増加する等の問題がある。本研究では主に(1)の方法を用いた<sup>[2]</sup>。

微弱化法



3. 電子の準弾性散乱

数MeV以上のエネルギーの電子線は、重元素に対して直接核反応を誘起することができる。これは図3に示すように、重元素に高速電子が衝突し制動X線（仮想光子）が発生し、光核反応したものと理解されている。電子の準弾性散乱と呼ばれる、この反応で発生した中性子等を検出すれば核反応分析が可能となる。これは①光核反応を利用した光量子放射化分析法と同様に、重元素の感度が高いことが期待される。特にU、Th等の感度は高い。②電子線は電磁氣的に集束、走査が容易であることから、 $\gamma$ 線法よりも局所的な感度が高く2次元分析に適している。



4. 実験

図4に中性子検出体系を示す。電子線に照射された試料から放出された中性子は、1m程度離れた場所に設置されたBF3中性子検出器で検出される。この検出器は厚さ2cm程度のパラフィンで覆われており、入射した速中性子はここで減速され熱中性子となり検出される。プリアンプから出力された信号は、照射室の外に送られ最終的には多重波高分析器で計測される。

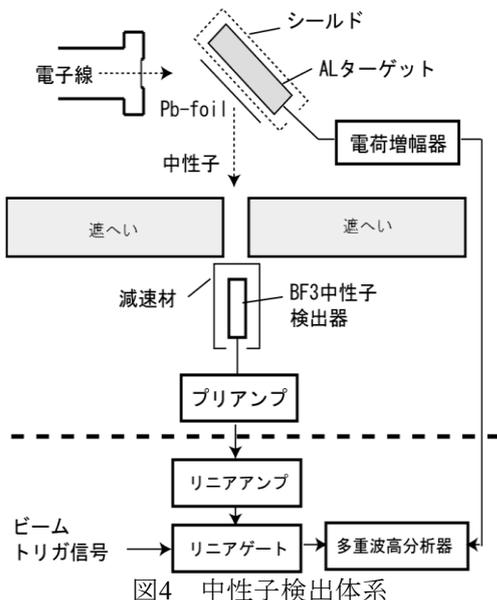


図5に試料として鉛ブロックを置いた時のプリアンプの出力波形を示す。照射した電子ビームは、1nCという通常のビームの1000分の1程度の微弱ビームであるが、中性子信号の手前に巨大なX線バースト信号が発生していることが分かる。このX線は電子線が試料に入射した際に発生する制動X線であり、測定信号に比べて桁違いに大きな信号となることから、電子線を用いた放射線計測では避けることのできない問題とされてきた。X線バーストの発生は電子線ビームの照射時に限られることから、このバーストの大きさが測定システムの許容範囲に収まるならば、図6のようなリニアゲート回路を用いてその影響を軽減することができる。

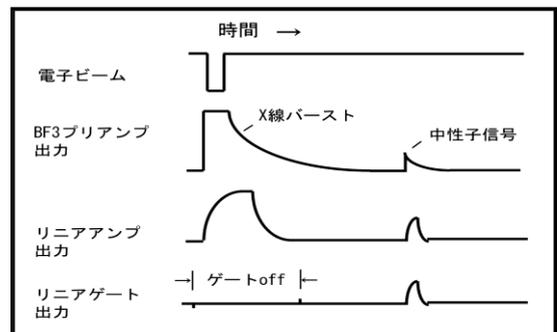
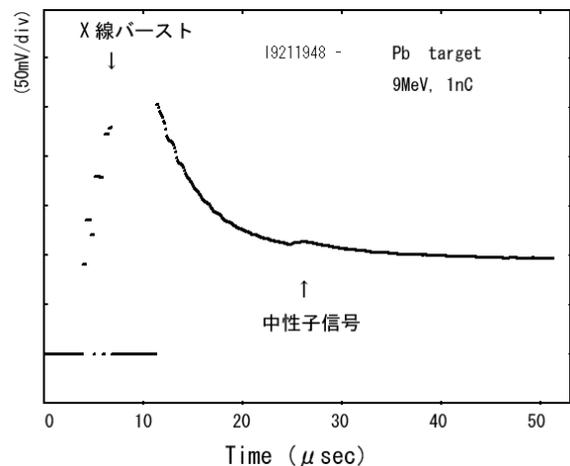


図7にPbターゲットを10MeVの電子線で照射した際のBF3検出器の波高分布の例を示す。図は、横軸にパルス波高、縦軸に計数率を対数で表示している。これは1パルスあたり約30pCという超微弱ビームの照射であるが、中性子信号よりもX線バーストの方が優勢である。ただし熱中性子を計測する場合、熱化時間による遅れが利用できることから、電子ビーム発生から一定の時間信号を遮断することによってX線バーストの影響を軽減することができる。図7の下部の波高分布は、10 $\mu$  secのゲートをかけた例である。この程度のビーム強度に絞ることができれば、信号処理によって中性子計測は可能となることが分かる。ただし電子ビームがこれよりも大幅に強

い場合、X線バーストによる出力信号の歪が大きくなり、ゲートによる信号処理もあまり有効ではなくなる。

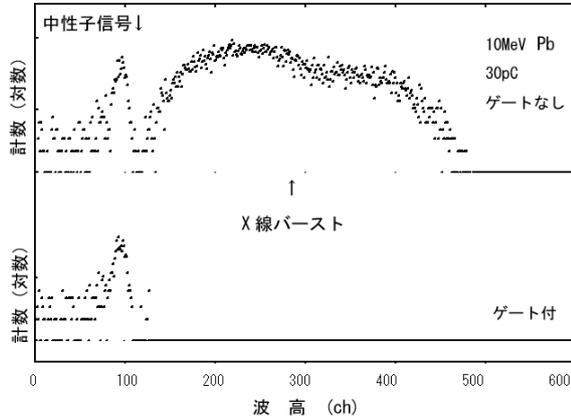


図7 中性子信号とX線バーストの波高分布とリニアゲートの効果 (10分計数)

さらにビームを微弱化した場合のBF3出力の変化を図8に示す。図7と同様に10MeVの電子ビームをPbターゲットに照射したものである。図5(a)は150pC, (b)は40pC, (c)は15pC, (d)は5pCの照射である。ゲートによる信号処理は加えていない。図のように、ビーム強度が弱くなるに従いX線バースト信号の波高は低くなり、同時に中性子信号の計数ピークは低くなっている。また5pC程度になれば、X線バースト応答は波高分布からは消え、ゲート操作なしでも中性子の測定は可能であった。

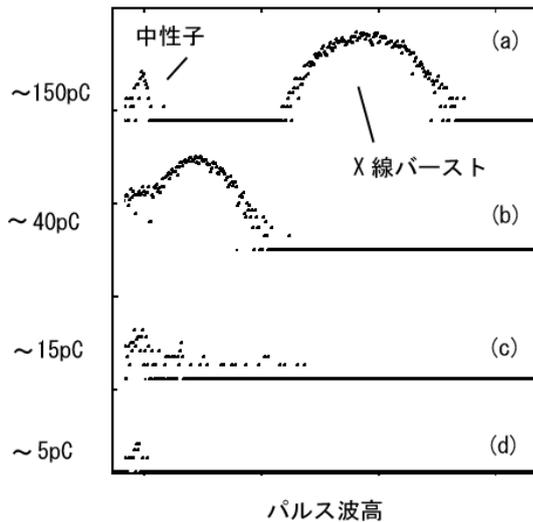


図8 超微弱電子ビームの電荷量を変化させた場合の、中性子応答とX線バースト応答の変化 (10分計数)

この検出体系で、中性子の検出感度を測定した。図9のようにAlターゲットに0.5mm厚の板状のPbを貼り合わせ、0, 1, 2, 3, 4, 6, 8枚までそれぞれ10MeV

の電子線を照射し、中性子を計測した。図10は横軸にPbの枚数、縦軸に中性子の計数をとったグラフである。十分な線形性が得られており、電子ビームの断面積、計数、Pbの密度と厚さから中性子1カウントあたりPb約0.51mgが算出された。

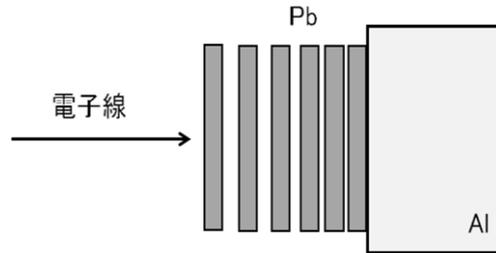


図9 検出感度測定体系

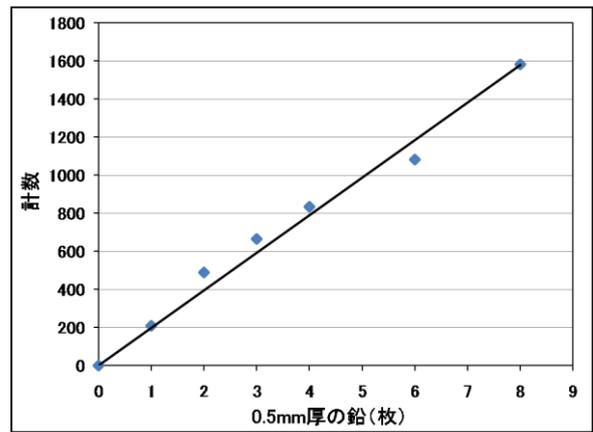


図10 鉛の枚数と検出量の関係

## 5. 結言

電子線を試料に入射し、電子の準弾性散乱による核反応分析を検討した結果、電子ビームを微弱化すれば、X線バースト信号の応答はリニアゲートの信号処理によって圧縮できた。さらにビームを微弱化すると、ゲート操作なしでも中性子の測定は可能であった。この状態が確保できれば、高速中性子あるいは2次ガンマ線の測定も可能であると考えられる。

Pbを用いて中性子の検出感度を測定した結果、約0.51mgで1個の中性子を放出することが分かった。今回評価したPbと同じ重元素の中でも、光核分裂反応が利用できるUあるいはThなどの核物質の検出感度は、今回評価したPbよりもはるかに優れていると考えられる。

## [参考文献]

- [1] 谷口他、原子力学会2007年年会A09
- [2] Taniguchi et al., Proc. of 20th Workshop on Radiation Detectors (Feb.2006, KEK, Japan)pp86-95