

# SENSITIVITY OF URANIUM DETECTION BY THE USE OF DIRECT IRRADIATION WITH ULTRA LOW CURRENT ELECTRON BEAMS

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

## Abstract

High sensitivity nuclear reaction analysis method has been developed by the use of direct nuclear reaction (e,e') with electron bombardment. Huge X-ray burst caused by the bremsstrahlung could be suppressed by the use of ultra low intensity electron beams. Consequently, the neutron emitted by (e,e'n) reaction was measured successfully. The linearity between the neutron count and the concentration of target element and the sensitivity for U+Th was verified experimentally.

## 超微弱電子線直接照射法のウラン検出感度の評価

### 1. はじめに

近年、電子線形加速器を用いたウランの検出法の開発が各方面で行われている。これは、

- ・核兵器あるいは核物質の持ち込みを、水際で阻止するという安全保障上の要請。
- ・放射性廃棄物中の微量のウランの評価。
- ・放射線の測定によるアスベスト検知に代表されるような材料中の極微量のウランの評価。

などの目的に対応するものである。

これに対して我々は、高エネルギーの微弱電子ビームを試料に直接入射し、ウラン等を高感度に遠隔・非破壊検出するという試みを行ってきた<sup>1)2)</sup>。この方法は、通常の分析法に比べて感度が格段に高く、電子ビームの走査によって容易に2次元画像化分析が可能であるという特徴を持っている。

### 2. 様々な核物質検出法

ウランの遠隔探査技術としては、放射性廃棄物中の核物質の遠隔検査技術の開発が先行している。主な検出法を紹介すると、

- 1) パッシブ法：ウラン等から自然に放出される中性子あるいはガンマ線を検出する方法である。感度が低く、パッシブガンマ線法で、天然ウランに対して、4.2時間の測定で 0.1Bq/g程度、パッシブ中性子法では、3%濃縮ウランに対して8時間の測定で50Bq/g程度である。また、ガンマ線のエネルギーが低いことから大きな試料では検出が困難である。同様に厚い容器の場合でも測定できない。
- 2) アクティブ中性子法：試料に外部から中性子を照射し、ウラン等の核分裂によって増加した中性子を検出する方法である。大きな試料、遮へいされた試料の検査が可能である。検出感度は3%濃縮ウランに対して、0.8時間の測定で 0.1Bq/g程度で

あるが、十分強力な中性子源の確保、検査による試料の放射化等の問題がある。

- 3) 光中性子法：試料に電子線ライナックから取り出される高エネルギーのX線を照射し、ウラン等の光核反応によって放出される中性子を計測する方法である。X線の透過力が強いことからアクティブ中性子法よりも大きな試料、厚い遮へい中の試料の測定が可能となる。我々の実験結果では、天然ウランに対して0.007時間で1Bq/g以上の検出が可能であり、感度の面では光中性子法が格段に優れている。ただし測定時に強烈なX線バーストを伴うことから、測定には高度な技術が必要である。

図1にこれらの感度および測定時間の関係を示す。感度の面では電子線ライナックを用いた光中性子法が格段に優れていることは明らかである。一方、本研究で提案している直接照射法は、別名準弾性散乱法とも呼ばれているが、図1の光中性子法よりもさらに1桁以上高感度の部分に分布すると考えられている。

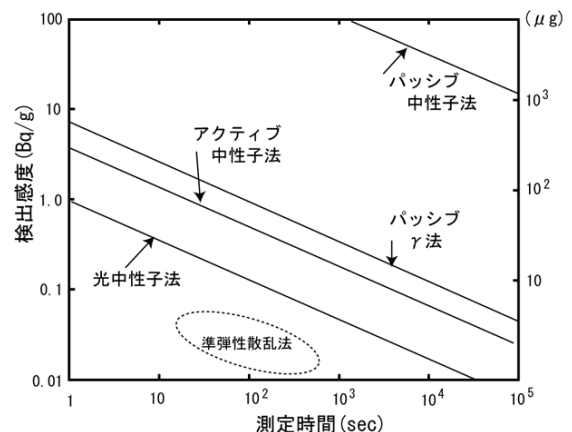


図1 ウラン検出法と感度

### 3. 電子の直接散乱によるウランの検知

一般に用いられている電子線形加速器を用いた核物質の検知法は、電子線を重金属ターゲットに照射し、そこで発生する制動X線を試料に照射するという形式をとっている。試料中でX線が光核反応を起こし、中性子が発生する。この反応の発生確率は、重元素が極端に大きいことが知られており、試料中に重元素の中でも最も原子番号の大きいウランが含まれている場合、当然、発生中性子が多くなる。そのため、中性子の検出量の大小でウランの検査が可能となることになる。ここで用いられている放射線であるX線も中性子線も、どちらも透過力が極めて強いことから、この分析法は、遠隔かつ非破壊で行うことが可能であり、かなり大きな材料の検査も可能である。

ところで、これまで電子と他の物質との相互作用は、電磁気力と弱い核力のみであり、強い核力が支配する原子核とは、直接核反応を起こさないと信じられてきた。そのため、電子線を用いた核反応分析では、電子を一旦光子（制動X線）に変換し、その電磁気力で原子核を核反応させるというプロセスをとってきた。ところが、高エネルギー電子は、一定の確率で、直接核反応を誘起することが可能であることが一部の核物理研究者の間では知られていた。これは、図2に示すように、入射した電子が原子核に散乱される時に放出される制動X線が、直接当該原子核と相互作用することで引き起こされるものと説明されている。このX線は外部で検出できないことから、特に仮想光子と呼ばれている。

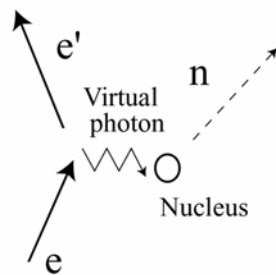


図2 電子の準弾性散乱

準弾性散乱による核反応の特徴は、基本的に光核反応と同様であり、重元素の感度が高い。元来、制動X線の放出確率は、重元素が高いことから、準弾性散乱による反応は、X線（仮想光子）の発生と、核反応のいずれも重元素で感度が高くなることから、重元素選択性が一層強くなることが予想される。ウランの実測例を図3に示す。図のように、準弾性散乱による核反応は、通常的光核反応の10分の1程度は得られることが分かる。電子の直接照射（準弾性散乱）による核反応分析法は、  
a) 電子ビームは、電磁氣的に収束可能であり、X線

に比べて局所的な強度を高めることができる。

- b) 同様に電子ビームは電磁氣的に走査が可能であることから、画像化が容易であ。
- c) 光核反応では、X線ターゲットで発生する光中性子が、大きなバックグラウンド要因であったのに対して、準弾性法では、これがないことから、中性子信号のS/Nが飛躍的に改善される。
- d) 電子ビームであっても、10MeV程度の高エネルギーになると、ある程度の透過力を持つ。例えば水等価の材料であれば数センチメートルの透過が可能であり、単なる表面検査にはならない。等の利点があり、遠隔・非破壊検査法として、十分検討する価値があるものと考えられる。

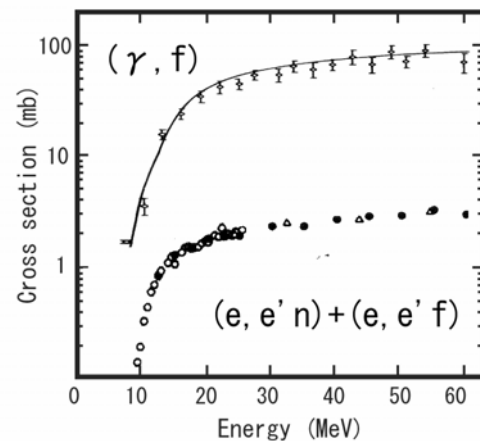


図3 Uの光核反応と準弾性散乱の断面積の測定例<sup>3)</sup>

### 4. 実験

実験には、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。実験装置の概略を図4に示す。電子線に照射された試料から放出された中性子は、1 m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2 cm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。プリアンブ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。パルス状の電子ビームを用いた、この種の実験では、制動X線がパルス状に発生する、いわゆる「X線バースト」が問題となってきた。検出器に発生するX線バーストの応答を、信号処理等によって軽減することは、原理的には可能であるが、応答が余りにも大きいことから、信号処理による対応が有効であった例はほとんどなかった。我々のグループは、これまで電子線形加速器を用いた超微弱ビームの発生を試みてきた<sup>4)</sup>。その結果、電子ビームをpC程度まで微弱化した場合、X線バーストは信号処理によって圧縮可能となった。

図6は、Alターゲット上に厚さ0.1~0.5mmの鉛シートを重ね、電子ビームを照射し、発生する中

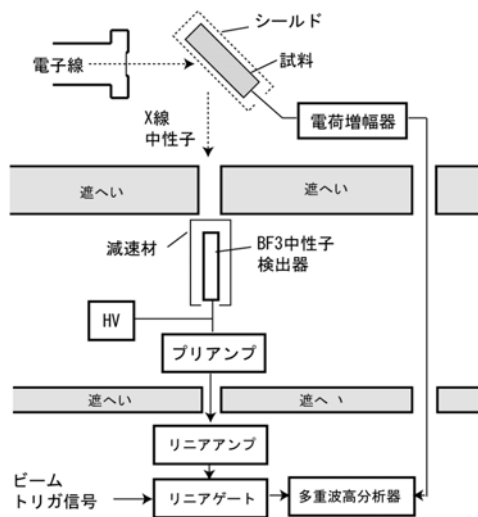


図4 実験体系

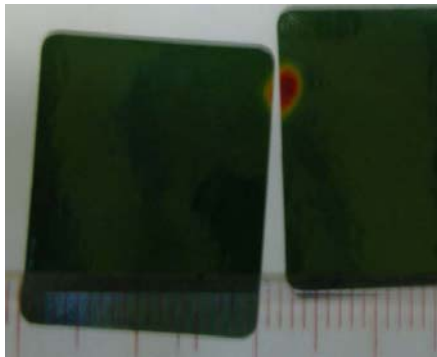


図5 電子ビームのプロフィール

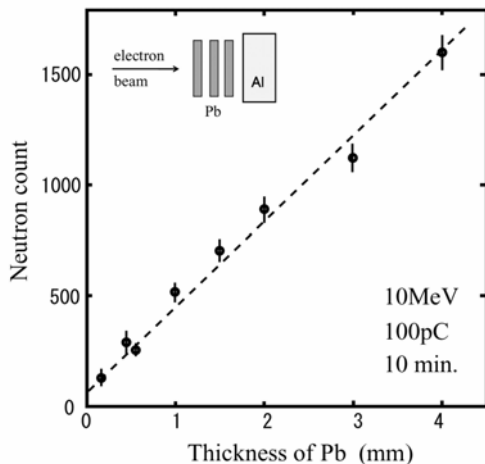


図6 鉛層の厚さと中性子検出量の関係

中性子の量と鉛層の厚さの関係を示したものである。また、その時の電子線のプロフィールを図5に示す。入射電子ビームのエネルギーは10MeV、電荷は100pCであった。図のように中性子の検出量と鉛層の厚さには線形関係がみられる。

次に、本装置における、ウラン・トリウムの検出感度の評価を行った。法律上の制約から、純粋なウラン、トリウム試料の照射が困難であることから、実験では、ウラン・トリウムを比較的多く含む天然物の照射を行った。結果を図7に示す。図の横軸はビームスポット中に存在していると予想されるウラン・トリウムの量を示している。照射時間は10分である。ウランの検出感度は入射電子ビームのエネルギーに敏感であり、10MeVでは、ほとんど検出できていない。12MeV入射の場合、図のデータの揺らぎ(誤差)からウラン・トリウム量の検出限界は約8  $\mu\text{g}$ であると評価された。

## 5. まとめ

本手法によって、 $\mu\text{g}$ オーダーのウラン・トリウムの検出が可能であることが示された。今後は、ビーム走査による2次元化を進めていきたい。

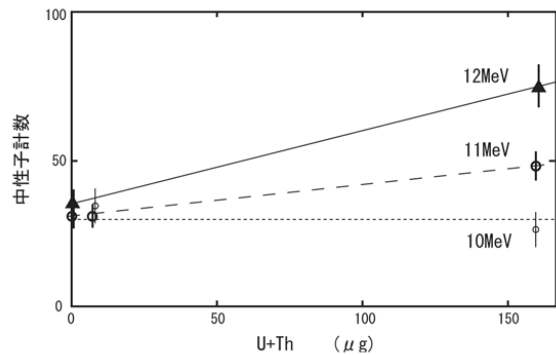


図7 ウラン・トリウムの検出感度

## 参考文献

- [1] 佐々木他、第6回放射線による非破壊評価シンポジウム論文集(2008)pp55-58
- [2] 谷口他、非破壊検査協会放射線分科会資料 No. 10423(2009)pp5-10
- [3] Gerab, M.N, Martins, Phys. Rev. C, Vol.48, No.1(1993) p105-108
- [4] R.Taniguchi, T.Kojima, S.Okuda, Rad. Phys. Chem. 76(2007)pp1779-1782