連載
講座

核セキュリティ入門

第3回 核セキュリティのための核物質検知技術

京都大学複合原子力科学研究所 高橋 佳之,
日本原子力研究開発機構 小泉 光生

核セキュリティの向上に関して、世界的にソフト・ハード双方でさまざまな対策が行われている。今回は、不法な核物質を検知するための技術開発について、放射線計測技術の観点から開発が進んでいるわが国の研究開発の動向について解説を行う。京都大学では、中性子計測による核物質検知手法を新たに開発し、これらの手法を用いた核物質検知システムの開発を行っている。原子力機構においては、核共鳴蛍光非破壊分析法を用いた核物質検知システムの開発を行っており、さまざまな試験を通して成果を挙げている。核物質検知技術は、安全・安心の社会構築に向けたインフラ技術として、わが国でも更なる研究開発が求められている。

KEYWORDS: *Nuclear Security, Special Nuclear Material, Active Neutron Method, Threshold Energy Neutron Analysis (TENA), Delayed Neutron Noise Analysis (DNNA), Nuclear Resonance Fluorescence (NRF), Laser Compton Scattering (LCS)*

I. はじめに

原子力技術は、発電をはじめとしてさまざまな産業に用いられており、世界各国において、われわれの日常生活にとって欠かせないものとなっている。その一方、原子力技術は兵器として転用された場合、人類にとって多大な脅威となる。1990年代以降、ソ連の崩壊とロシアの核管理の不徹底により、ルース・ニュークス (loose nukes) と呼ばれる旧ソ連諸国をめぐる核関連物質の密輸や盗難、核兵器本体の紛失疑惑が相次ぎ、これらがテロリストの手に渡り不法な核実験などの行為に利用される可能性が国際社会で認識され始めた。さらに、2001年に米国で発生した9.11同時多発テロ事件をきっかけに、IAEA (国際原子力機関) を中心として、それまでの「核物質防護」ではなく、核テロ対策の意味合いが強い「核セキュリティ (核物質、その他の放射性物質、その関連施設およびその輸送を含む関連活動を対象にした犯罪行為又は故意の違反行為の防止、検知および対応¹⁾)」という概念が、広く使われ始めた²⁾。

原子力の平和的利用を拡大するためには、核兵器への転用が可能な核物質の取り扱いや核兵器開発につながる

技術の拡散を伴ってしまうため、原子力利用の平和的恩恵を受けるためにも、世界的に核セキュリティの取り組みを一層強化していくことが重要視されている。例えば、2014年3月の核セキュリティサミットでは、管理の強化が宣言されるなど、テロ組織への核物質の流出を防ぐための取り組みは近年各段に強化されている。しかし、万が一核物質がテロリストの手に渡ってしまった場合には、現在のテロ対策インフラに導入されている検知装置ではウラン235を検知することはできない。検知装置には、高い発見能力、低い誤警報率、短時間での検査等が求められており、9.11以降、米国では精力的に、あらゆる核物理現象を利用した核分裂物質検知技術の研究開発が進められているが、高濃縮化することで大量破壊兵器として用いられる可能性のあるウラン235に対しては、現在のところわが国のみならず世界的にも有効な検知装置は存在しない。

これらを受け、わが国においても、放射線計測技術等を用いた核物質検知技術の研究開発が進められている。本解説では、わが国での現状として、京都大学 (Ⅱ章) と日本原子力研究開発機構 (Ⅲ章) で行われている核検知技術の研究開発について紹介する。

Ⅱ. 中性子計測による核物質検知手法

1. アクティブ中性子法

中性子を用いた核物質検知手法として、測定対象となるウラン (U) やプルトニウム (Pu) からの自然壊変によって放出される中性子を測定して核物質の検知を行うパッ

Introduction to Nuclear Security (3) ; Nuclear material detection technique for nuclear security : Yoshiyuki Takahashi, Mitsuo Koizumi.

(2020年1月27日 受理)

■ 前回タイトル

第2回 核セキュリティ強化に向けた取り組み

シブ中性子法がある。しかし、自発核分裂により発生する中性子量は、U のみの場合は自発核分裂がほとんど起きないため、測定される中性子は極めて微量であり、核物質検知は困難である。そこで、測定対象物を中性子や γ 線などで照射して核物質に核反応を誘起し、その結果発生する中性子を検出することで核物質の分析を行う方法がアクティブ中性子法である。アクティブ中性子法は照射線源強度を増大することにより核分裂により発生する中性子量を増やすことができ、分析感度を高めることができるので、一般にパッシブ中性子法よりは感度が高い。また、照射する中性子として高速中性子を用いれば透過性が高いので、容器内の対象物や大きな対象物や高密度の対象物などの測定が可能となる。これまでに開発されているアクティブ中性子法を用いた核物質検知手法の例を示す。

・DN(Delayed Neutron)法

核分裂によって生じる遅発中性子を測定することにより核物質の有無を判断する手法である。核分裂によって生ずる中性子のうち、遅発中性子の割合は全体の U を対象とした場合 0.7 %ほどと低いため、検出効率を高めることが本測定手法の問題点である。

・DDT(Differential Die-away Technique)法³⁾

中性子の熱化にかかる時間遅れを利用した計数法である。照射パルス立ち上がり後に遅れて発生する核分裂中性子を計測し、核物質の有無を判断する。

・エネルギー弁別法

低速中性子を試料中に照射し、核物質が存在した場合に核分裂による入射中性子以上のエネルギーを持つ中性子が現れた時、核物質の存在を判断する手法である。問題点としては、熱中性子の場合と比べて高速中性子の検出効率が低いことである。

・中性子雑音解析を用いた核物質検知手法

核分裂の影響により測定される中性子がポアソン分布からどれだけずれているかを解析することにより、核物質の有無を判断する手法である。

京都大学では、上記に示した手法のうち、エネルギー弁別法と雑音解析手法を改良した閾エネルギー中性子弁別法と遅発中性子雑音解析を用いた核物質検知手法を新たに開発した。以下にその方法について簡単に説明する。

2. 閾エネルギー中性子弁別法

核燃料物質に中性子を照射すると、核分裂反応によって平均約 2 MeV の高エネルギー中性子が発生する。そこで、入射中性子に 2.45 MeV の単色中性子を放出する D-D 中性子源を使用することによって、核物質の有無を、照射する 2.45 MeV 中性子のエネルギーより高いエ

図1 閾エネルギー中性子弁別法概念

ネルギーの中性子の有無で判定する方法が閾エネルギー中性子弁別法 (Threshold Energy Neutron Analysis: TENA) である。2.45 MeV の中性子がウラン 235 やプルトニウム 239 といった核物質と核分裂を起こした場合の核分裂中性子スペクトルは、図1のような最大約 10 MeV までの連続エネルギー分布をもった形で表される。対象に核物質がある場合、図中の斜線部のように、2.45 MeV より大きいエネルギーをもった中性子が検出される。一方、対象に核物質がなければ、原理的には 2.45 MeV より小さいエネルギーをもった中性子しか存在しない。従って、図1の斜線部の領域にあるような 2.45 MeV 以上のエネルギーをもった中性子を測定することができれば、核物質を検知することが可能となる。

京都大学エネルギー理工学研究所では、慣性静電閉じ込め型核融合装置 (Inertial Electrostatic Confinement fusion device) の開発を進めており、これを核物質検知システムの中性子源として使用する。本装置は小型でトリチウムなどの放射性物質を使用しない点など、ポータブル型の核物質検知装置の開発などにも適している。検出器には、従前から高エネルギー中性子測定に使用されている有機液体シンチレータや、新しく開発した張力準安定性流体検出器を使用し、S/N 比改善のための研究開発を進めている。

3. 遅発中性子雑音解析手法による核物質検知

中性子雑音解析手法は、原子炉の動特性パラメータや未臨界度測定で使用されている方法で、中性子の時系列データから、解析により核分裂の連鎖反応の有無を判定する方法である。原子炉内の中性子数の時間変化は、核分裂反応による中性子発生や吸収反応による中性子消滅などの中性子と原子核との核反応が確率事象であり、また、核分裂により発生する中性子の個数(ウランの熱中性子による核分裂の場合は平均 2.4 個)が確率事象であるため、定常出力での運転中の原子炉においても、検出器のカウントを時間関数として示すと平均値の周りに不規則な揺らぎが存在している。この原子炉内における中性子数の不規則な揺らぎは中性子炉雑音(または炉雑音)

と呼ばれるものであり、この揺らぎの中に原子炉の動特性などに関する情報が含まれている。炉雑音から原子炉の情報を得る手法を中性子雑音解析手法(以下、雑音解析手法)とよび、これまでファインマン α 法(Feynman- α 法)、ロッシ α 法(Rossi- α 法)や周波数解析法等が考案されている。

Feynman- α 法^{4,5)}は分散対平均法とも呼ばれ、ある時間間隔(ゲート幅と呼ぶ)において検出された中性子カウンターの分散と平均の比(以下、分散対平均と呼ぶ)を計算し、この値を時間間隔の関数として求める手法である。例えばAm-Beのような放射性物質の崩壊(この場合はAmの α 崩壊)により発生する中性子の場合、放射性物質の崩壊がポアソン分布に従うため検出される中性子のカウンターのポアソン分布となり、その場合は分散と平均が等しいため分散対平均の値は1となる。しかし、核分裂の連鎖反応がある場合には中性子計数率分布はポアソン分布からずれて、この値は1にはならない。この1からのズレの度合いをY値と定義する。そして、時間間隔に対してY値をプロットし、それを理論的にフィッティングすることで即発中性子減衰定数 α を求めることができる。この解析は比較的容易であり、また、パルス中性子源を用いた場合のフィッティング式も存在するため、本手法における核物質検知ではこの方法を採用した。

新しく考案した遅発中性子雑音解析手法(Delayed Neutron Noise Analysis)は遅発中性子領域に着目した雑音解析であり、外部から中性子源として、2.節で紹介したD-D中性子源のような加速器などによるパルス中性子源を使用する。パルス中性子源を使用した場合、検出器で得られた時系列データは、即発領域のカウントと遅発領域のカウントが交互に存在する。即発領域とはパルス打ち込み後中性子のカウントが立ち上がったのちに指数関数的に減衰する部分でありこのカウントは主に即発中性子によるものである。一方、遅発領域とは、即発中性子の減衰に比べ、減衰が緩やかである遅発中性子が支配的な領域である。この即発領域のカウントは、計数率が高いため、検出器の不感時間の影響によりカウントの数え落しが存在すること、また、パルス入射直後は体系内での中性子束分布が基本モードになっていない(すなわち、中性子源位置の影響を強く受けた中性子束分布になっている)ため、精度の良い測定が難しいとされている。そこで、パルス入射時刻を時系列データ中に記録し、この数え落としが存在する即発領域のカウントを除去すれば、数え落としの少ない遅発領域のカウントのみを抽出することができる。この遅発領域のカウントを利用して雑音解析を行なったものが遅発中性子雑音解析である。核物質が存在する場合、遅発領域は遅発中性子先行核から発生する中性子とその中性子を中性子源にして核分裂の連鎖反応により生じた即発中性子によってカウン

トが維持されている。この遅発中性子先行核から出る遅発中性子が発生する統計的変動はポアソン分布であるが、遅発中性子先行核の周囲に存在する核分裂性物質により核分裂連鎖反応が生じるため、検出されるカウンターの頻度分布は非ポアソン分布となる。よってこの遅発領域において雑音解析を行い、Y値を評価することにより、核物質の存在が検知できる。京都大学では、複合原子力科学研究所にある臨界実験装置を用いて、高濃縮ウランによる実証試験を実施した。その結果、通常の雑音解析法では検知できなかった核物質を遅発中性子雑音解析法で検知できることが分かった⁶⁾。

Ⅲ. 核共鳴蛍光非破壊分析法

1. 核共鳴蛍光

原子力機構では、文部科学省「核セキュリティ強化等推進事業費補助金」の一環として技術開発を行っている。その一つは、レーザー・コンプトン散乱ガンマ線をプローブとした原子核共鳴蛍光散乱(Nuclear Resonance Fluorescence: NRF)による核検知・測定技術開発である。これは、核種特有のガンマ線吸収・放出を用いるため、核種を選択的に測定することができる。また、高エネルギーのガンマ線を使用するので貫通力が高く、粒子放出の閾値以下のガンマ線エネルギーを使用するので、照射による放射化がほとんどないという点に特徴がある。今後、原子炉使用済燃料等に含まれる核物質の測定や、貨物中に隠ぺいされた核物質の検知などに適用する技術の有力な候補になると考えている。これまで、原子力機構、量研、KEK、兵庫県立大学とで、研究を進めてきた。本章では、これまで行ってきたNRFの技術開発について簡単に紹介する。

2. 核共鳴蛍光散乱

NRFは、原子核が特定のエネルギーのガンマ線を吸収し、励起状態になった後、ガンマ線を放出して脱励起する現象である。図2に示すように核種(U-235や、Pu-239など)によって、それぞれ異なる励起エネルギー

図2 NRF概念図

Pu-239やU-235等の核種には固有の励起状態が存在し、励起エネルギーに等しいガンマ線が照射されると、ガンマ線の吸収・放出が起きる。測定対象以外の核種では、励起エネルギーが異なるためNRFは起こらない。

の状態が存在するため、測定したい核種の励起エネルギーに等しいガンマ線を照射すると、その核種のみを脱励起することができる。したがって、脱励起の際に放出される散乱されたガンマ線を計測することにより非破壊で核種の検知・測定が可能となる。

3. レーザー・コンプトン散乱によるガンマ線ビームの発生

NRFにより核物質の非破壊検知・測定を行うには、任意のエネルギーの(できれば単色に近い)大強度のガンマ線が必要である。核検知・測定に適用する1 MeV以上の準単色ガンマ線を発生できるエネルギー可変光源としては、レーザー・コンプトン散乱(Laser Compton Scattering; LCS)が唯一の技術である。

図3は、LCSの原理を模式的に示したものである。加速器で光速近くまで加速した電子とレーザー光を衝突させると、電子によって散乱されたレーザー光は、電子の運動エネルギーを受け、高エネルギー光子となる。LCSで発生するガンマ線のエネルギーは、電子ビームのエネルギーやレーザーの波長、散乱角によって決定され、コリメーターによりガンマ線を切り出すと、単色に近いガンマ線ビームを引き出すことができる。

高強度LCSガンマ線を得るには、電子線、レーザー共に高強度でかつ高密度なビームを用いかつ高繰り返しで衝突させる必要がある。そこで、原子力機構、量研、KEKは、エネルギー回収型リニアック(ERL)で電子ビームの密度を上げるとともに、レーザー蓄積装置を用い高密度レーザービームと高繰り返しの衝突を可能とする技術を開発(図4, 5)した⁷⁾。

KEKつくばキャンパスのコンパクトERL(エネルギー回収型リニアック)で行った実験では、電子ビーム(20 MeV, 57 μ A)を最小30 μ mの微小サイズでレーザービームと162.5 MHzの高繰り返しで衝突させた。電子ビームの進行方向でエネルギー6.9 keVの準単色X線を取り出し、それを測定した結果、毎秒 2.6×10^7 個のX線が発生したことが分かった⁷⁾。このことから、ERLの最大電流10 mAで運転した場合には、毎秒 10^9 個に近いX線の発生を期待できると想定される。将来、電子エネルギーを350 MeV程度、13 mAに上げ、レーザー強度の向上(蓄積したビーム強度で700 kW)を実現

図3 レーザー・コンプトン散乱の原理
高エネルギー電子とレーザー光子との衝突により、光子は散乱され、その際に電子から得たエネルギーで反対方向に散乱されるガンマ線となる。

図4 LCSガンマ線の発生原理

電子入射器からの電子ビームは、超伝導加速器で加速された後、LCSガンマ線の発生に用いられる。さらにその後、電子ビームは再び超伝導加速器へ導かれるが、その際、電子が減速されるタイミングで超伝導加速器へ電子を入射することで、電子のエネルギーを回収する。減速された電子ビームは、ビームダンブへ捨てられる。装置の全長は25 m程度になると考えている。

図5 レーザー蓄積装置

入射されたレーザーパルスは、4枚の高反射率鏡で作られる閉軌道(約1.8 m)を周回する。この周回するレーザーパルスと新たなレーザーパルスの入射を精密に一致させ次々と重ねることで、蓄積されるレーザーパルスの強度を増すことができる。

すれば、図2に示すような核物質のNRFに必要な2-3 MeVの高強度準単色高強度ガンマ線(毎秒 10^{13} 個)を発生することができると考えられ、文献8で提案された直径2 cmのガンマ線ビームによる核検知を効率的に進められる。

4. シミュレーションコードの開発

NRFを用いた実用装置の設計においては、LCSガンマ線を試料に入射してNRFガンマ線を検出するまでを、シミュレーションを用いて検出器の配置などを最適化し、また混在物などの影響を考慮する必要がある。しかしながら、NRFの核データの整備はあまり進んでおらず、また、NRFを組み込んだシミュレーションコードは存在していなかった。そこで、開発コードの組み込みが可能で、汎用性の高いGeant4で開発を進めてきた⁹⁾。実際にNRF測定を行う場合、測定試料は単体で置かれることはなく、何らかの構造物や不純物に囲われている。そのため、NRFではないガンマ線弾性散乱が、測定のバックグラウンドとなる。このような弾性散乱には、レーリー散乱、原子核トムソン散乱、デルブリュック散乱がある。1 MeV以上のエネルギー領域では、デルブリュック散乱が主たる寄与となる。しかしながら、ガンマ線の弾性散乱を評価する計算コードに、デルブリュック散乱が考慮されているものがなかったため、これらの

図6 NRF 核検知実証試験

自動ステージ上に約 30 cm の鉄の箱(正面と横一面は厚さ 1 cm, 後方と他の面は厚さ 3 cm)を設置, その中に模擬試料を入れた。入射ガンマ線のビーム径は Φ 4 mm で, NRF を鉄箱の両横にあるガンマ線検出器で測定した。

弾性散乱過程の寄与をすべて足し合わせて微分断面積を求める計算コードを Geant4 に実装した¹⁰⁾。

5. 核共鳴蛍光散乱の核検知技術への適用

港湾等において重遮蔽物(コンテナなど)の中に隠された核物質の持ち込みの防止は, 核セキュリティにおける課題とされている。一般に, コンテナなどに核物質や放射性物質が隠ぺいされているかどうかを調べるためには, モニタリングポストなどを通して調べられる。モニタリングポストは, ガンマ線や中性子の検出器であり, 放射線を放出する物質の検知に有効である。しかしながら, 巧妙に隠された核物質については, 検知することができない。X 線を使ったイメージング技術も開発されているが, 重元素と核物質を識別することができない。それに対し, NRF 技術を用いると核物質かどうかを確実に判断することができる。例えば, 海上輸送コンテナ(鉄 5 mm 厚)の X 線検査で怪しい部位が見いだされたときに, コリメーターを通した毎秒 10^{11} 個の LCS ガンマ線ビームを照射すると, 容器に隠された 1 kg の U-235 を 1 点につき数秒でサーベイできると考えられる⁸⁾。

そのことを実証するため, 兵庫県立大学のニュースバル施設において LCS ガンマ線ビームを用い, 図 6 に示すような鉄箱に入れた模擬試料 Pb-208(直径 8 mm 円柱)の検知試験を行い, それに成功した。

IV. おわりに

本解説では, 京都大学と原子力機構で進められている核物質検知技術の開発の現状について紹介した。このような技術は, テロに屈しない安全, 安心の社会を実現するための次世代インフラとして非常に重要であり, テロに対してこのような検知装置を保有し配備すること自体が, テロの企みを躊躇させる意味でも極めて有効である。世界的にニーズも高まっている今, わが国としても積極的に研究開発を進め, 核セキュリティ向上に対してグローバルに貢献していくことが望まれている。

－ 参考文献 －

- 1) 原子力委員会「核セキュリティの確保に対する基本的考え方について」
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/senmon/bougo/siryo/bougo25/ssiry01.pdf>
- 2) 宇佐美正行「核セキュリティをめぐる国際的取組の進展～核テロ対策強化の経緯と今後の課題～」立法と調査 No.309.
- 3) K.A. Jordan, et al, *NIM* 3, pp436-444 (2008).
- 4) Feynman, R.P., et al, *Journal of Nuclear Energy*, 3, pp64-69. (1956).
- 5) T.Misawa, et al, *Annu. Rep. Res. React. Inst. Kyoto Univ.* Vol. 27(1994).
- 6) T. Misawa, et al, Proc. of 2012 IEEE-NSS.
- 7) T. Akagi, et al, *Phys. Rev. Accel. Beams* 19, 114701 (2016).
- 8) H.H.Negm et al, 2015 IEEE Int. Symp. on Technologies for Homeland Security.
- 9) T.Shizuma et al, *NIM A* 737 (2014) 170, and T.Hayakawa et al, *NIM A* 621 (2010) 695.
- 10) M. Omer and R. Hajima, *Nucl. Instr. Meth. B* 405, 43-49 (2017).

著者紹介

高橋佳之 (たかはし・よしゆき)

京都大学複合原子力科学研究所
核セキュリティ・保障措置関連技術の開発・放射線計測技術の応用に従事。専門分野は放射線計測。

小泉光生 (こいずみ・みつお)

日本原子力研究開発機構 核不拡散・核セキュリティ総合支援センター
核セキュリティ・保障措置関連の技術開発, 原子核分光研究等に従事。専門分野は原子核物理学。