

ガンマ線による核物質非破壊検知システム

実施予定期間：平成 22 年度～平成 26 年度

研究代表者：大垣 英明（国立大学法人京都大学・エネルギー理工学研究所）

I. 概要

中性子による事前探査及び、逆コンプトン γ 線の核共鳴蛍光散乱を用いて、意図的に遮蔽された核物質を検知する装置を開発する。本装置は、核種に固有の核共鳴蛍光散乱を用いることで、ウラン 235、プルトニウム 239 だけでなく、コバルト 60 等を識別できる。約 2MeV の γ 線をプローブとして用いるため、鉄や鉛の遮蔽や、中性子を遮蔽するためのボロンや水素等も透過して検知可能である。装置には、実績のあるマイクロトロン加速器、レーザー、検出器を用いるため信頼性は高い。京大が γ 線計測装置、中性子装置を担当し、マイクロトロンを保有する原子力機構が γ 線源を担当し、ポニー工業が製品化を担当する。

1. 目標

海外から搬入、又は日本を経由して諸外国に搬出される貨物などに隠された核物質（ウラン 235、プルトニウム 239）を、非開封、非破壊で探知する装置を開発する。対象物はコンテナ貨物、輸送トラックなどであり、装置の設置場所は港湾、空港、核物質保管施設の出入り口である。

本システムの特徴は複数の計測手法を用いる点である。前段計測として中性子による計測を行う。重水素-重水素核融合装置から生成された中性子をプローブとして用い、中性子によって誘発された核反応から放出された中性子 \cdot γ 線を計測することで、核物質が隠蔽されている可能性が高いコンテナを識別する。この放射線計測ないし既存の X 線装置等によって核物質が隠蔽されている疑いが高い部位を同定する。次に、核物質が隠蔽されている可能性が高いコンテナ部位に対して、小型加速器であるマイクロトロンで加速された電子とレーザーの散乱によって生成された逆コンプトン γ 線をプローブとして照射し、核共鳴蛍光散乱で核物質固有の γ 線を計測することで核物質の存在の有無を同定する。

また、本システムは中性子とガンマ線といった全く性格の異なる非破壊検査手法を用いるので、どのような遮蔽に対しても検知できるシステムと考えられる。

装置の大きさや重量は、非破壊で貨物トラックやコンテナ貨物を計測するために、必然的に大型になるものの、製品の競争力の観点から、現在開発が先行している Passport Systems Inc(米)の X 線計測システムや、Rapiscan 社(米)の中性子計測システムと同程度ないし小型のシステムを開発の目標とする。これらの装置は、同時に複数台のトラックがトンネル内に入り、順次計測を受ける大型の装置である。港湾等の大型施設においては、このような大きさの装置でも十分設置可能である。

2. 技術的内容

「ガンマ線による核物質非破壊検知システム」は、全く新しい技術である逆コンプトン γ 線による核共鳴蛍光散乱を用いた精密検出システムと対象物を高効率で検知するための中性子を用いた前段検知システムと、から構成される。

a. 逆コンプトン γ 線を用いた核共鳴蛍光散乱による核物

質精密検出システム

まず、逆コンプトン γ 線による核共鳴蛍光散乱測定法の原理について述べる。核種（元素の同位体）には、それぞれ固有の励起エネルギーがある。測定対象となる原子核固有の励起エネルギーに等しい逆コンプトン γ 線を照射すると、核共鳴蛍光散乱（NRF）が発生し、入射したエネルギーに等しいエネルギーが入射角とは異なる角度に放出される（核共鳴蛍光散乱 γ 線）。この核共鳴蛍光散乱 γ 線を計測することで目的の同位体の量を知ることができる。

このような測定技術には、エネルギー可変でシャープなエネルギー幅を有する光源が必要不可欠である。高エネルギー電子とレーザー光の衝突散乱（逆コンプトン散乱）は、エネルギー可変かつ準単色の γ 線ビームを発生できることから、NRF 用の γ 線源として最適であり、本システムではこの原理に基く γ 線源を用いる。本手法が優れている点は、散乱 γ 線エネルギースペクトルのピーク近傍では S/N 比が原理的に高い点である。核共鳴蛍光散乱においては、入射エネルギーに等しい γ 線のエネルギーが検出される。しかし、バックグラウンドを形成する対象試料中での散乱（コンプトン散乱など）では散乱するガンマ線はエネルギーを失うため、ピークエネルギーより低いエネルギーになる。そのため、 γ 線検出器で測定したエネルギースペクトルにおいて、バックグラウンドは低エネルギー領域に出現し、ピーク近傍では高い S/N 比が実現する。

本システムは、(1)核共鳴蛍光散乱 γ 線を計測する計測器システムと、(2)準単色の γ 線を生成する逆コンプトン γ 線発生装置から構成され、それぞれについて開発を行う。この 2 つの開発項目について詳細を述べる。

(1) γ 線測定システム

一般に、核共鳴蛍光散乱 γ 線に対してエネルギー分解能が最も高い Ge（ゲルマニウム）半導体検出器が最も有効な測定手段の 1 つである。しかし、Ge 半導体検出器には、1) 一般に製造できる Ge 単結晶の大きさは 12～15cm 程度に限定される、2) 液体窒素で冷却する必要があり長時間の運転には適さない、3) 計数率に上限（ <10 kHz）があるという短所がある。このため、実用システムを構築する際、Ge 半導体検出器が必ずしも最有力ではない。一方、LaBr₃(Ce)シンチレーター（臭化ランタン・シンチレーター）は、662keV の γ 線に対して分解能 dE/E = 2% であり、シンチレーターとしては分解能が非常に高く、同位体固有の γ 線の分離が可能である。また、シンチレーターの利点として、複数の結晶を光学的に接続することでデッドスペースを生じずに大容量が可能になる点がある。大容量の検査対象物に対して大きな面積を覆うことができるばかりか、高エネルギー γ 線に対する有効な検出効率を上げられるという長所がある。LaBr₃結晶の製造技術は進展しており、現在では 10cm（4 インチ）以上の長さが製造可能になっている。

本開発項目では ϕ 3 インチ \times 3 インチの大きさの LaBr₃検出器を用いて性能試験を行う。これにより、ハイスループット非破壊検査のための検出器システムの設計指針を与える。また、コンテナ中での核物質の位置を同定する検出器システムのデザイン及びアルゴリズムを開発する。

(2) マイクロトロンによる γ 線発生装置

数百 MeV のエネルギーの電子を加速できる加速器としては、レーストラック型マイクロトロンが最も小型で効率的である。国内では、住友重機械工業(株)による製品が数箇所へ納品されており極めて信頼性の高い加速器である。原子力機構の関西光学科学研究所(京都府)では、150MeV まで加速可能なマイクロトロンが設置され、Nd:YAG レーザーを組み合わせて、逆コンプトン γ 線の発生研究が既に開始されている。本開発項目では、この研究をさらにすすめ実用レベルのマイクロトロンによる逆コンプトン散乱 γ 線発生装置の作製に必要な技術を実地に開発することを目的とする。

実用化には、高輝度かつ小型な逆コンプトン γ 線源の開発が重要な課題なので、電子エネルギー220MeV まで加速可能で小型(150MeV の場合で2m×4m)のレーストラック型マイクロトロンの設計を行う。商品化を考慮する上で、コストダウンが重要な要件である。Rapiscan 社(米)で開発中の高速中性子を用いた検出システムは試算では、システム全体で100億円であるが、その1/10を十分に下回る価格を実現したい。そのためには、マイクロトロンの設計を本計測システム用に最適化した上、新規に設計を行う必要がある。

b. 中性子計測システム：重水素・重水素核融合中性子源を用いた前段検知システム

核物質の能動的探知技術の中で最も有望な方法の一つとして、パルス中性子照射時の遅発中性子を検出する技術(Differential Die-away Technique; DDT)の開発が、特に米国において進められている。DDT は比較的容易に高S/N比の得られる利点があるが、検出する遅発中性子の発生量は、即発中性子も含めた総中性子発生量のうちの高々数%に過ぎない。そこで本開発項目では、即発中性子及び、遅発中性子の約10倍の放出量の遅発ガンマ線を検出する技術を開発し、DDTによる遅発中性子の検出と組み合わせ、より低い中性子照射線量、短い検査時間で検査する計測システムを開発する。

一般に、中性子源としては水素水素吸蔵固体ターゲットを用いるD-T中性子管が広く使われている。しかし、半減期が約14年の放射性同位体であるトリチウムを含むため取り扱いに厳格さが要求されるという難点がある。そこで、本提案では、重水素プラズマの慣性静電閉じ込め(Inertial Electrostatic Confinement; IEC)を利用した放電型の高出力DD中性子源を用いる。IEC中性子源は、水素水素吸蔵固体ターゲットを用いるD-T中性子管とは異なり、プラズマ中のイオンまたはガス分子をターゲットとしている点に大きな特長がある。そのため大電力投入が可能で、D-T核融合反応のおよそ1/100の断面積しかないD-D核融合反応でも、D-T中性子管と同等以上の中性子出力が既に得られている。

本開発項目では、このIEC中性子源の大型化(直径1m程度)、大電圧化と高性能イオン源の開発により、現在の

IEC中性子源の中性子発生率を数十倍高め(定常で 10^8 個毎秒以上、パルスピークで 10^{12} 個毎秒以上)、放射性物質であるトリチウムを用いず、短い検査時間を実現する。

3. 技術開発期間終了時の目標

核テロに未然に防ぐために、重要施設のゲートや、税関に設置しコンテナ貨物やトラックを非開封で、核物質を非破壊検知する装置を開発する。本装置は、高効率の中性子システムで前検知し、核物質の可能性がある場合には γ 線の核共鳴蛍光散乱によって遮蔽されていてもウラン235等の核物質を検知、同定する装置である。本装置は、逆コンプトン γ 線による核共鳴蛍光散乱計測システム((1) γ 線計測システムと、(2)マイクロトロンによる γ 線発生装置)及び、前段の(3)中性子計測システムから構成されるので、技術開発期間では下記の3項目の技術開発を行う。

(1) γ 線計測システムの研究

本項目では、核共鳴蛍光散乱によって発生する γ 線を計測して、目的とする核物質を検知する計測システムを研究する。そのため、Ge半導体検出器等と比較しつつ臭化ランタン・シンチレーターの性能評価を既存の逆コンプトン γ 線を用いて行う。その結果を踏まえ、 γ 線検出システムを開発する。

(2) マイクロトロンによる γ 線発生装置の研究

本計測システムの要となるマイクロトロン加速器を用いた γ 線源である。原子力機構が保有するマイクロトロン加速器を用いて逆コンプトン γ 線の高強度化に必要な技術開発を行い、 10^5 photons/sの強度生成が可能であることを実証する。並行して220MeVまで電子を加速可能なマイクロトロンの設計を行う。それらの結果を踏まえ、実用機に必要な 3×10^5 photons/sの強度が発生可能なマイクロトロン γ 線発生装置の最適設計を行う。

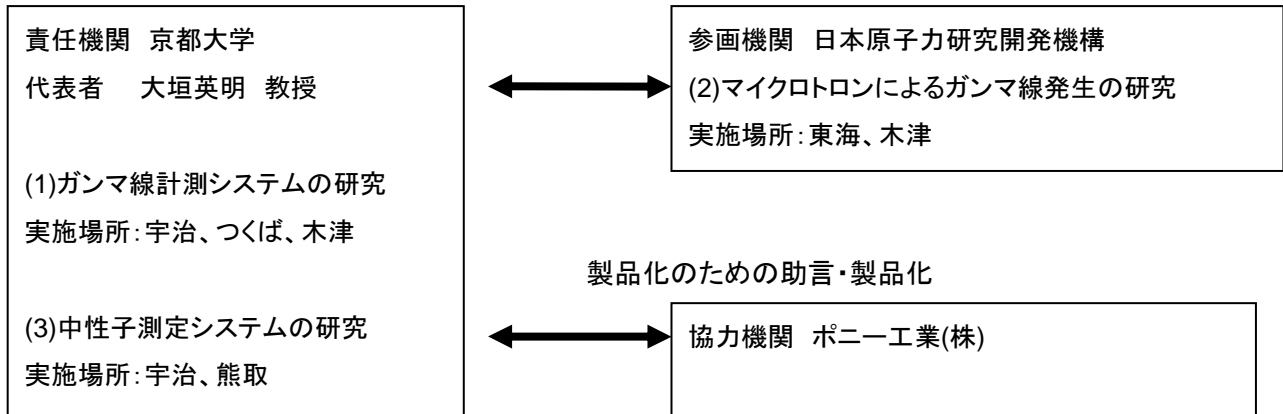
(3) 中性子計測システムの研究

前段検知の中性子検出システムを開発を行う。このため、高出力パルス中性子源の開発を行い、定常で中性子強度 10^8 個毎秒以上を実現する。これに並行して、核物質に対して中性子入射反応によって誘発される放射線を測定する計測システムを開発する。

4. 実証期間終了時の目標

原子力機構が保有するマイクロトロンを用いた γ 線源に、主に京都大学で開発した γ 線計測システムを移設して、模擬試料による実証実験を行い、ウラン235を模擬した物質が検知可能であることを実証する。実用機では、ウラン235が検知できる性能を有することを実証する。マイクロトロン施設では、ウラン235を用いることが出来ないため模擬物質を用いる。中性子計測システムは比較的小型なので京大原子炉実験所に移設し、ウランを用いた模擬試料で実証実験を行う。

5. 実施体制



6. 各年度の計画と実績

a. 平成 22 年度（技術開発期間 1 年目）

(1) γ 線計測システムの研究：LaBr₃(Ce) シンチレーター検出器を購入し、産総研の逆コンプトン γ 線を用いて、他の種類の検出器と比較しつつ性能評価を行う。

(2) マイクロトロンによる γ 線発生の研究：また、電子とレーザーの散乱の効率を高めるため、誘導ブリルアン散乱を用いたレーザーのパルス圧縮技術の開発を行う。また、製品用マイクロトロンの基礎検討を行う。

(3) 中性子計測システムの研究：IEC 中性子源のイオンエネルギーの向上による高出力化のため、既設 IEC 中性子源（100kV）を高電圧化（200kV）する。さらに既設イオン源の改造により、大電流パルス動作のためのイオン源開発の予備実験を行う。中性子およびガンマ線の検出器と、それぞれの信号処理システムを導入し、既設中性子源（定常中性子発生率 10^8 個毎秒）を用いて、遅発および即発の中性子およびガンマ線の検出実験を開始する。

b. 平成 23 年度（技術開発期間 2 年目）

(1) γ 線計測システムの研究：前年度購入した LaBr₃(Ce) シンチレーター検出器に合わせて、複数台から構成されるシステムを構築し、効率良く計測できるシステムを開発する。

(2) マイクロトロンによる γ 線発生の研究：150MeV マイクロトロンでは、電子とレーザーの最適な散乱条件を得るため、電子、レーザーの収束システムを開発する。更に γ 線を定量的に計測することで、散乱効率の向上を確認する。また、マイクロトロンの詳細検討を行う。

(3) 中性子計測システムの研究：IEC 中性子源のため、直流小電力動作で実績のあるマグネロン型イオン源を、大電流パルス動作させるための電極構造や冷却構造を製作する。これを既設 IEC 中性子源に設置して性能試験と改造・調整を行う。計測システムのため、核物質検知アルゴリズムを開発する。

c. 平成 24 年度（技術開発期間 3 年目）

(1) γ 線計測システムの研究：コンテナ、トラックの荷台を想定した幾何的配置の上で効率良い検出器の配置を検討し、核物質の隠蔽されている位置を効率良く同定するソフトウェア及びハードウェアの両方を含めた手法を開発する。

(2) マイクロトロンによる γ 線発生の研究：既存のレーザーよりも、大強度のレーザーを導入し、技術開発 2 年目までに行ってきた技術と合わせて、 10^5 photons/s の γ 線強度を実証する。また、マイクロトロンの詳細検討を行う。

(3) 中性子計測システムの研究：これまでの技術開発を元に高出力パルス中性子源を試作する。また、既設中性子源を用いて中性子及びガンマ線計測システムの性能評価を行う

d. 平成 25 年度（実証期間 1 年目）

(1) γ 線計測システムの研究及び(2) マイクロトロンによる γ 線発生の研究：高輝度化された原子力機構保有のマイクロトロン加速器の逆コンプトン γ 線を用いて、模擬物質を用いて実証試験を行うために、検出システムの移設及び拡張を行う。マイクロトロンの設置された研究施設では、地元との協定によりウランを用いることが出来ないため、レアアース等の模擬物質を用いて次年度に試験を行う。

(3) 中性子計測システムの研究：技術開発期で開発した高出力パルス中性子源を、ウランを用いた実験が可能な原子炉実験所に移設し、実証実験のための準備を行う。また、この時点までに開発した測定システムと中性子源を組み合わせる。

更に製品化に向けた全体システム設計を行う。

e. 平成 26 年度（実証期間 2 年目）

(1)～(3)全ての計画：高輝度化した原子力機構のマイクロトロンの γ 線と模擬物質を用いて実証試験を行うとともに、高出力パルス中性子源と、測定システムを用いて、ウランを用いた性能評価試験を行い、製品化を目指す。

7. 年次計画

取組内容	1年度目	2年度目	3年度目	4年度目	5年度目
(1) γ 線測定システムの研究	産総研の逆コンプトン γ 線を用いたLaBr ₃ (Ce)の性能評価	複数の検出器による検出システムの開発	検出アルゴリズムの開発		
(2) マイクロトロンによる γ 線発生の研究	レーザーパルス圧縮技術の開発	高輝度 γ 線発生のための散乱条件の最適化	高出力レーザーによる高輝度 γ 線発生技術の開発	γ 線測定システム(1)をマイクロトロン施設(2)に移設するとともに原子炉実験所にパルス中性子源装置を移設し、予備実験を開始	マイクロトロン施設で模擬試料による実証試験及び中性子源によるウランを用いた実証試験
(3) 中性子計測システムの研究	既存の中性子発生装置のイオンエネルギー増加による性能評価と計測システム作製	中性子源のための大電流イオン源のプロトタイプ作製と核物質検知アルゴリズムの開発	高出力パルス中性子源の作製と計測システムの作製並びに実証試験		