

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（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、逆コンプトンガンマ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探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 のガンマ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。京大がガンマ線計測装置、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ガンマ線源を担当し、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ウラン 235、プルトニウム 239 のような核物質を、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・ガンマ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ガンマ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ガンマ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ガンマ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から構成される。

a. 逆コンプトンガンマ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、逆コンプトンガンマ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ガンマ線を照射すると、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（核共鳴蛍光散乱ガンマ線）。この核共鳴蛍光散乱ガンマ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ガンマ線ビームを発生できることから、NRF 用のガンマ線源として最適であり、本システムではこの原理に基づくガンマ線源を用いる。本手法が優れている点は、散乱ガンマ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ガンマ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、ガンマ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)核共鳴散乱ガンマ線を計測する計測器システムと、(2)準単色なガンマ線を生成する逆コンプトンガンマ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) ガンマ線測定システム

一般に、核共鳴蛍光散乱ガンマ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る長時間の運転には適さない、3) 計数率に上限（<10kHz）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 のガンマ線に対して分解能 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、同位体固有のガンマ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ながあげられる。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、高エネルギーガンマ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(Ce)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× 3 インチの大きさの LaBr₃(Ce)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ガンマ線発生装置

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科学研究所(京都府木津拠点)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、逆コンプトンガンマ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ガンマ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ガンマ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 を下回る価格を目標にする。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 1 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 年の放射性物質であるトリチウムを必要とする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、本課題提案では、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 の反応断面積しかない 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)、大高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以上高め(定常で 10^8 個毎秒以上、パルスピークで 10^{12} 個毎秒以上)短い検

査時間を実現すると同時に、放射性物質であるトリチウムを用いず安全で取扱も容易な中性子検査装置を実現する。

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ガンマ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、逆コンプトンガンマ線による核共鳴蛍光散乱計測システム(1)ガンマ線計測システムと、(2)マイクロトロンによるガンマ線発生装置)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) ガンマ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ガンマ線を計測して、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ガンマ線を用いて行う。その結果を踏まえ、ガンマ線検出システムを開発する。

(2) マイクロトロンによるガンマ線発生装置の研究

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ガンマ線源である。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ガンマ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ガンマ線発生装置の最適設計を行う。

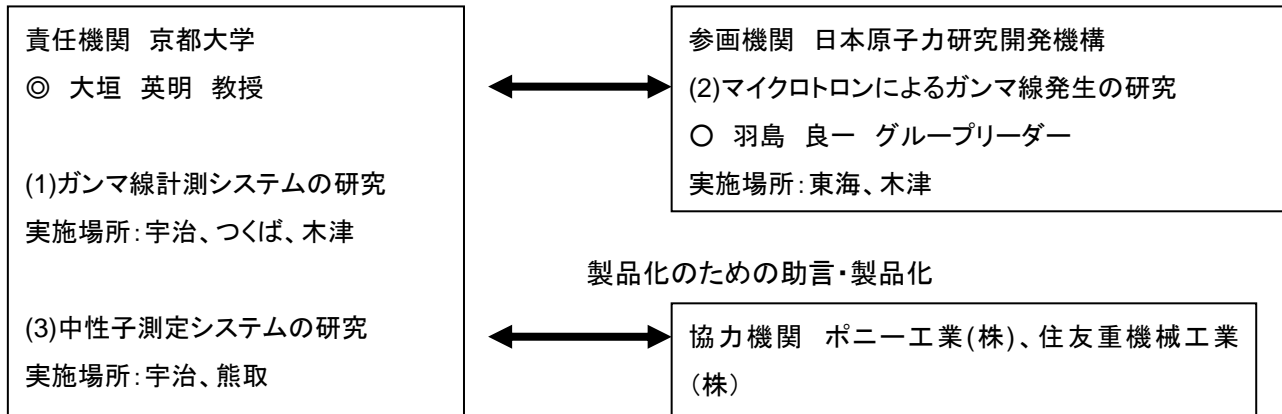
(3) 中性子計測システムの研究

前段検知の中性子検出システムの開発を行う。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ガンマ線源に、主に京都大学で開発したガンマ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）

・計画：

(1) ガンマ線計測システムの研究：LaBr₃(Ce) シンチレータ検出器を購入し、産総研の逆コンプトンガンマ線を用いて、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ガンマ線発生の研究：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 10⁸ 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。

・実績：

(1) ガンマ線計測システムの研究：光核共鳴散乱からの高エネルギーガンマ線の検出器として、高いエネルギー分解能をもち、高速応答の LaBr₃(Ce) シンチレータ検出器を整備した。またこの検出器を動作させるためのデータ収集システムを構築した。この整備したガンマ線検出器の性能評価を行うため、京都大学宇治キャンパスにて天然放射性元素を用いた実験や、産業技術総合研究所 (つくば) の逆コンプトンガンマ線を用いて、¹¹B 原子核等からの光核共鳴散乱ガンマ線を用いた実験を高純度 Ge 検出器 (既存) との性能比較を行いつつ実行した。さらに、核物質検知のためのガンマ線検出器システムの最適設計のためのシミュレーションコードの開発を開始した。本コードは GEANT4 をベースとするモンテカルロ計算であり、大規模シミュレーションのための計算環境についても一部整備を行った。

(2) マイクロトロンによるガンマ線生成研究：木津拠点に現有する 150MeV 電子加速器であるマイクロトロンを用いた高輝度ガンマ線生成の技術開発として、電子ビームとレーザービームのタイミング・位置精度の安定化を行った後、電子ビーム特性の測定、測定データに基づいたシミュレーションを行い衝突点の最適設計を行った。木津拠点では、さらに、レーザーと

電子ビームの短焦点距離衝突を可能にするための、誘導ブリルアン散乱によるレーザーパルス圧縮技術の開発を行い、10ns の Nd:YAG レーザーパルスを 1ns 以下に圧縮可能な装置を完成した。東海拠点では、これらの技術開発と並行して、実機製品のガンマ線光源、ガンマ線検出システムの設計を行い、マイクロトロン加速器の基本仕様を決定した。

(3) 中性子測定システム研究：重水素プラズマの慣性静電閉じ込め (IEC) 中性子源の中性子発生率を数十倍高める目的で、高電圧化と電位分布改善による中性子源の高出力化を目指し、高電圧導入部の電極構造を数値解析計算により設計し製作した。また、既設の中性子源真空容器を一部改造して、製作した高電圧導入部をこれに設置し、200kV の高電圧印加が可能な装置を完成した。さらに、既設の直流電源を用いた高圧試験を開始した。一方イオン源の大電流パルス動作のための予備検討実験を開始し、冷却構造の設計に必要なデータを取得した。また、中性子による核物質検知の実験を開始した。具体的には、当該年度は中性子源としては別途所有している D-T 加速管型を使用し、検知対象としては実際に 93% 高濃縮ウランおよび天然ウランを用い、中性子照射により誘発される核分裂反応で発生する中性子の計測を行った。また、核分裂反応で発生する中性子とガンマ線を検出するための検出器とその測定回路系の整備、測定データ収集と解析処理システムの開発を行った。

b. 平成 23 年度（技術開発期間 2 年目）

・計画：

(1) ガンマ線計測システムの研究：前年度購入した LaBr₃(Ce) シンチレータ検出器、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ガンマ線発生の研究：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。更にガンマ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トロン型イオン源を、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に、核物質検知アルゴリズムを開発する。

・実績：

(1) ガンマ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（1.5 インチ x3 インチ、3 インチ x4 インチ）と既存の Ge 検出器、データ収集系を用いて、複数台から構成される検出システムを構築した。更にこれを用いて、¹⁴B、²³⁵U を用いた NRF 実験を行い LaBr₃(Ce)（1.5 インチ x3 インチ）を用いることが有利であることが、明らかとなった。また汎用モンテカルロ計算コードである GEANT4 を拡張し、NRF 実験体系のシミュレーションを可能にした。

(2) マイクロトロンによるガンマ線発生の研究：現有する 150MeV 電子加速器であるマイクロトロンを用いて、高輝度γ線（ガンマ線）の発生試験を行い、ガンマ線の発生を確認した。並行して、関連する現地視察・情報収集活動を行い、実機設計に有益な情報を得た上で、220MeV のマイクロトロンの設計並びにガンマ線光源、ガンマ線検出システムの設計を進めた。

(3) 中性子測定システムの研究：マグネトロン型イオン源の冷却構造を改造して大電流試験を行い、大電流パルス化のために必要な冷却性能を有していることが確かめられた。一方、前年度製作した高電圧化装置において、既設の直流高電圧電源を用いてコンディショニングを進めた。その結果、真空での耐電圧試験においては目標の 95 % である 190 kV、DD 中性子発生実験では目標電圧の 80 % である 160 kV まで到達して、従来の約 3 倍で目標の約 3 割となる 3×10^7 n/sec まで到達した。これらの実験と並行して、次年度製作する高出力パルス中性子源用の高電圧パルス電源を設計・製作した。核物質検知のための計測システム開発においては、従来法の課題を解決可能な、遅発中性子成分のみを積極的に利用した新しい炉雑音解析アルゴリズムを開発し、93%高濃縮ウランと既設の DT 加速器中性子源、時間分解能を向上させた新しいデータ収集装置を用いた実験によって、その有効性を確認した。また、本計画の特徴である DD 中性子源においてのみ可能な、2.5MeV 以上の核分裂反応中性子の測定により核物質を検知する手法についても、モンテカルロ計算による検討を行い、今後の実験計画を策定した。

c. 平成 24 年度（技術開発期間 3 年目）

・計画：

(1) ガンマ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ガンマ線発生の研究：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 のガンマ線強度を実証する。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

・実績：

(1) ガンマ線計測システムの研究：8 台の LaBr₃(Ce)シンチレーター検出器（1.5 インチ x3 インチ）と多チャンネル高速データ収集系から構成される検出器システムをこれまでの研究結果に基づいて設計・構築し、このためのリアルタイムの合成スペクトル作成ソフト

ウェアを開発した。更にこれを用いて、高純度 ²³⁵U の検知実験を米国 Duke 大学のγ線を用いて行った。また汎用モンテカルロ計算コードである GEANT4 を拡張し、検出器の最適な配置について検討を行った。

(2) マイクロトロンによるガンマ線発生の研究：現有する 150MeV 電子加速器であるマイクロトロンを用いて、高輝度γ線（ガンマ線）の発生試験を行い、 10^5 photons/s のガンマ線強度を、複数の検出手法にて確認した。並行して、住友重機械工業の協力を得て、220MeV のマイクロトロンの設計を行うとともにガンマ線光源システムの設計を進めた。

(3) 中性子測定システムの研究：前年度製作した高電圧パルス電源の動作試験を行い、所期の性能を確認するとともに、中性子源本体を製作して高電圧パルス発生部に設置した。一方、中性子発生率を高める目的で、数通りの異なる直径の球形陰極と球形陽極を製作し、更に高電圧コンディショニングを進めることで、目標電圧の 95% である 190kV（直流）において、定常 1×10^8 n/sec の中性子発生率を達成した。

また、京都大学原子炉実験所では既設の D-T 加速器と高濃縮ウランを用いた核物質検知実験を行って、開発した中性子及びガンマ線計測システムの性能評価を行った。その結果、ガンマ線計測による高濃縮ウランの同定は現時点で困難であることが判った。一方、中性子計測システムについては、新たに開発した遅発中性子炉雑音解析手法にて測定を行い、ウラン塊を検知できることが判った。この結果を基に実コンテナと開発中の D-D 中性子源を組み合わせた体系での解析を行い、32 本の ³He 検出器をコンテナ上部に設置することによりウランを検知できることが判った。さらに、この手法とは別に核分裂で発生する高速中性子のエネルギー測定により核物質を探知する新しい手法の開発を進め、その有効性を確認した。

d. 平成 25 年度（実証期間 1 年目）

・計画：

(1) ガンマ線計測システムの研究及び(2) マイクロトロンによるガンマ線発生の研究：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ガンマ線を用いて、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た実証試験のためのバックグラウンドの評価とその低減対策を行う。

(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）

・計画：

(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ガンマ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) ガンマ線測定システムの研究	産総研の逆コンプトンガンマ線を用いた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ガンマ線発生の研究	レーザーパルス圧縮技術の開発	高輝度ガンマ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ガンマ線発生技術の開発	ガンマ線測定システム(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		