

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2007～2010

課題番号：19206102

研究課題名（和文）：単色 X 線・中性子線源の原子力・セキュリティ応用

研究課題名（英文）：Nuclear Security Application of Micro Electron-Beam Linear Accelerator X-Ray Source and 14MeV Neutron Source

研究代表者

上坂 充 (UESAKA MITSURU)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：30232739

研究成果の概要（和文）：

原子力界においては、核物質の定量管理が重要な課題となっている。放射線廃棄物中の U-235、Pu-239 など定量管理、およびクリアランスレベルのクリアなど、高感度・高精度が要求される。核物質によるテロを防ぐためにも税関や港等で核物質を迅速に検査する手法が求められる。そのために手荷物隠ぺい核物質の検査に向けた 2 段シンチレータ開発において検出部の基礎デバイスを Monte Carlo シミュレーション結果に基づいて設計した。そして実用システムの実証実験を行い、鉛と鉄の識別することができた。特に中性子検査で探知できない場合を想定し、polyethylene, polyvinyl chloride, boron 入りガラス隠蔽材の中に金属サンプルを入れて撮影を行い、得られた実効原子番号イメージ結果から鉄と鉛が識別できることを確認した。

また、爆発物探知実験では爆発物を模擬したアセトン、メラミンの X 線撮影を行ったものの識別できず、単色性の高い X 線で識別度を上げる方法を考案した。この方法においては X 線管とフィルターを用いて 27 と 56 keV のピークを持つ単色 X 線の発生ができた。

核物質探知技術では昨年度実施した中性子輸送シミュレーションで鉄体系でのバックグラウンドの低減効果の確認のための測定実験を行い良好な結果を得ることができた。また、短時間で効率よく核物質を探知するためにリストモード MC S 測定器を導入し解析手法について試験研究を行った。爆薬探知技術では、昨年度に整備した BGO、NaI 及び Ge 検出器を用いて 14MeV 高速中性子照射による (n・γ) 反応特性実験を行うと同時に、爆発物特定方法については、中性子輸送シミュレーション計算により中低速中性子及び熱中性子に対する (n・γ) 反応を利用した各種の爆発物の γ 線スペクトルを求め、爆薬ごとの捕獲 γ 線エネルギー分布パターンの認識技術について考察を行った。また、反応特性実験では、爆薬と元素構成が類似しているメラミンを用いた測定実験を行い、爆発物に多く含まれる窒素の (n, γ) 反応に起因する 10.85MeV の γ 線ピークを確認することができ、爆発物や核物質など対テロ対策に有用な危険物発見の基礎技術の開発を行った。

研究成果の概要（英文）：

A nondestructive assay system for security management application is proposed. We employ a compact electron linac as an X-ray source and 14.1MeV neutron source. The combination of these novel technologies realizes a fast security scanning system. Due to a need for security screening instruments capable of detecting explosives and nuclear materials there is growing interest in neutron generator systems suitable for field use for applications broadly referred to as active neutron interrogation. The system incorporate hermetically-sealed particle accelerator tubes designed to produce fast neutrons using deuterium-tritium ($E_n = 14.1$ MeV) fusion reactions. Employing next-generation features including advanced sealed-tube accelerator designs, all-digital control electronics and innovative housing configurations these systems are suitable for many different uses. The neutron source is used for active neutron

The 950 keV portable X-band (9.4 GHz) linear accelerator (Linac) provides on-site high-energy X-ray inspection, including material recognition up to a certain precision. We have developed an X-band Linac system and have achieved the maximum 950 keV X-ray by using the low-power magnetron (250 kW) in a 2-ms pulse length. We

have already experimentally verified the dual-energy X-ray material recognition with and without an energy filter. Further, the array of the scintillator detector for dual energy X-ray measurement without the energy filter is numerically analyzed and designed for much quicker measurements. Updated results will be presented.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	12,300,000	3,690,000	15,990,000
2008年度	15,300,000	4,590,000	19,890,000
2009年度	9,500,000	2,850,000	12,350,000
2010年度	1,070,000	0	1,070,000
年度			
総計	38,170,000	11,130,000	49,300,000

研究分野：総合工学

科研費の分科・細目：原子力学

キーワード：加速器、ビーム工学、核物質定量管理、セキュリティ、放射線計測

1. 研究開始当初の背景

原子力界においては、核物質の定量管理が重要な課題となっている。放射線廃棄物中のU-235, Pu-239など定量管理、およびクリアランスレベルのクリアなど、高感度・高精度が要求される。核物質によるテロを防ぐためにも税関や港等で核物質を迅速に検査する手法が求められる。9.11以降、特にアメリカにおいて2002年からDepartment of Homeland Securityが設立され、核物質と危険物の非破壊評価の技術開発に拍車がかかっている。国家の安全保障は自主開発がかなりの割合で不可欠である。

2. 研究の目的

この課題に対して、研究分担者の春山らが開発した14MeV中性子問かけ法は、高速中性子故、内部まで浸透して熱化して核反応を起こすため、感度がほぼ一樣になる大きな長所がある。この方法によって、高精度でトータル量の評価が可能となるが、クリアランス濃度検認では、バックグラウンドの大幅低減によるPPBオーダーの検出限界が要望されている。しかしながら、核物質の位置や形状は以前わからない。一方、代表者の上坂らが改良・利用し続けているSバンドライナックを用いた可変MeV X線CTを行えば、Puまでの原子を4グループ程度($Z \sim 5, \sim 13, \sim 26, \sim 82$)に大別して3次元分布を得ることが出来る。X線減衰は光電効果、コンプトン散乱、電子対生成によって決まり、原子によって異なる。減衰曲線のX線エネルギー分布を精度よく解析関数で近似すると、2つのMeV X線の透過・CT画像から、実

効原子番号の3次元分布が得られる。X線光源サイズとX線の散乱で決まる検出の空間分解能(サブミリ程度)での平均的原子番号分布がわかる。重金属の検出の場合、予備検討より2つのMeV X線のピークエネルギーは4.8MeVあたりが、X線減衰曲線の解析関数近似と検出に最適であることがわかっている。可変MeV X線CTによってU-235, Pu-239のグループの位置と形状がサブミリの精度でわかる。両者の識別は困難である。しかし、14MeV中性子問かけ法では両者の質量はわかることになる。両者を併用すれば、位置・形状・質量が同定できることになる。この技術は港湾・空港での貨物中の核物質の検出に適用できる。keV X線を使用する理由は、過酸化アセトンが低Z(原子番号)の分子であり、またスーツケースや手荷物にも重金属がほとんどないと考えてよく、透過性の観点がまずある。もうひとつは、 $Z=40$ 以下であれば、数十keV以下のX線減衰曲線は、光電効果のみで、exp関数で精度良く近似できて、高精度に2色X線CTから実効原子番号・電子密度の3次元分布が得られることである。トータル量決定には同様に中性子問かけ法を適用する。ここでは14MeV中性子のエネルギーを適切な減速材を使って中性子エネルギーを最適化し、ニトロ系爆薬の検出能力及び探知信頼度の大幅改善を進めると共に、過酸化系爆薬について、C, H, Oに(n, γ)反応を起こさせ、照射中性子エネルギーに対する γ 線スペクトルの違いにより、C, H, Oの成分比を決定することを試みる。2色X線CTによる位置と形状と実効原子番号・電子密度と、中性子問かけ法によるC, H, Oの成分比と絶対量より、過酸

化アセトンを高精度に検出するスキームを構築する。

3. 研究の方法

東大は MeV・keV 単色 X 線源 CT を使って、それぞれ核物質・危険物の実効原子番号分布・位置・形状を同定する。原機構は 14 MeV 中性子問かけ法によって核物質の質量の評価、および危険物の組成を評価する。2 色 X 線 CT において、日本での keV 2 色 X 線 CT の第一人者である放射線医学総合研究所取越正己氏に参画いただく。X 線減衰曲線の解析関数モデリングによる 2 色 X 線 CT による実効原子番号分布の評価は原子番号が 40 以下の原子では有効な結果を出している。しかし、今回は ^{235}U , ^{239}Pu の評価が必要である。そのためには、光電効果のみならず、コンプトン散乱・電子対生成も考慮した X 線吸収曲線の解析関数モデリングが必要となる。中性子輸送シミュレーション実験により行い、有望な中性子減速反射材を抽出し、整理する。次に抽出選択された有望な中性子減速反射材で構成する核分裂反応検出体系の最適構造などを検討するため中性子輸送シミュレーション実験を実施する。中性子輸送シミュレーション及び中性子照射実験を行いバックグラウンドの低減のため総合的な評価解析を行い、検出限界大幅改善 (PPB オーダー) の検出手法を確立する。

4. 研究成果

1. KeV 単色 X 線 CT の開発においては、手荷物隠ぺい核物質の検査に向けた 2 段シンチレータ開発において検出部の基礎デバイスを Monte carlo シミュレーション結果に基づいて設計した。そして実用システムの実証実験を行い、鉛と鉄の識別することができた。特に中性子検査で探知できない場合を想定し、polyethylene, polyvinyl chloride, boron 入りガラス隠蔽材の中に金属サンプルを入れて撮影を行い、得られた実効原子番号イメージ結果から鉄と鉛が識別できることを確認した。爆発物探知実験では爆発物を模擬したアセトン、メラミンの X 線撮影を行ったものの識別できず、単色性の高い X 線で識別度を上げる方法を考えた。この方法においては X 線管とフィルターを用いて 27 と 56 keV のピークを持つ単色 X 線の発生ができた。

また、中性子問かけ法の開発においては、中性子輸送シミュレーションで鉄体系でのバックグラウンドの低減効果の確認のための測定実験を行い良好な結果を得ることができた。また、短時間で効率よく核物質を探知するためにリストモード MCS 測定器を導入し解析手法について試験研究を行った。爆発物探知技術では、昨年度に整備した BGO、

NaI 及び Ge 検出器を用いて 14MeV 高速中性子照射による (n・ γ) 反応特性実験を行うと同時に、爆発物特定方法については、中性子輸送シミュレーション計算により中低速中性子及び熱中性子に対する (n・ γ) 反応を利用した各種の爆発物の γ 線スペクトルを求め、爆薬ごとの捕獲 γ 線エネルギー分布パターンの認識技術について考察を行った。また、反応特性実験では、爆薬と元素構成が類似しているメラミンを用いた測定実験を行い、爆発物に多く含まれる窒素の (n, γ) 反応に起因する 10.85MeV の γ 線ピークを確認することができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

Kiwoo Lee, Eiko Hashimoto, Tomohiko Yamamoto, Takuya Natsui, Azusa Mori, Shunsuke Hirai, Mitsuru Uesaka, "Design and experiment of dual-energy X-ray material recognition using a 950 keV X-band Linac", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2011

Eiko Hashimoto, Tomohiko Yamamoto, Takuya Natsui, Kazuyoshi Koyama, Kazuyuki Demachi, Mitsuru Uesaka, Naoki Nakamura, Masashi Yamamoto, and Eiji Tanabe, "Medical and Nuclear Applications of Micro Electron-Beam Linear Accelerator X-Ray Sources", International Journal of Automation Technology Issue 3, 2009

Kiwoo Lee, Takuya Natsui, Shunsuke Hirai, Mitsuru Uesaka, Tomohiko Yamamoto, "Material Recognition System using 950 keV X-band Linac with Dual Energy X-ray Scintillator Array", IPAC2010 (The first International Particle Accelerator Conference)

李基羽、橋本英子、山本智彦、夏井拓也、森梓、平井俊輔、上坂充, "X-band ライナックを用いた手荷物検査用準 2 色 X 線シンチレータアレイの基本設計", 第 6 回日本加速器学会年会 2009, p. 350 ~352

[学会発表] (計 5 件)

上坂充、坂本文人、谷口善洋、山本智彦、夏井拓也、上野健治、肥後壽泰、吉田光宏: "Application of monochromatic keV X-ray source to X-ray drug delivery system dev"

ICFA Workshop on "Compton Sources for X/gamma rays: Physics and Application. (20080909). イタリア

坂本文人、谷口善洋、上坂充、山本智彦、夏井拓也、上野健治、肥後壽泰、吉田光宏: "Compton Scattering Monochromatic Tunable X-ray Source based on X-band Multi" ICFA Workshop on "Compton Sources for X/gamma rays: Physics and Application. (20080909). イタリア

谷口善洋、上坂充、坂本文人、山本智彦、夏井拓也、上野健治、肥後壽泰、吉田光宏: "Upgrade of X-band Thermionic Cathode RF-gun for Compton Scattering X-ray Source" ICFA Workshop on "Compton Sources for X/gamma rays: Physics and Application. (20080909). イタリア

谷口善洋、上坂充、坂本文人、山本智彦、夏井拓也、上野健治、肥後壽泰、吉田光宏: "単色 X線源用熱陰極高周波電子銃の適正精度設計・製作" 日本原子力学会北関東支部若手研究者発表会. (20080428). 茨城県

Y. Taniguchi, F. Sakamoto, T. Natsui, T. Yamamoto, E. Hashimoto, M. Uesaka, M. Yoshida, T. Higo, S. Fukuda, M. Akemoto: "Upgrade of X-band Thermionic Cathode RF-gun for Compton Scattering X-ray Source" 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33rd Linear Accelerator Meeting in Japan. (20080806-08). 広島県

H. Taguchi, N. Yusa, A. Sakumi, F. Sakamoto, E. Hashimoto, T. Yamamoto, T. Natsui, Y. Taniguchi, M. Uesaka: "Medical Application of Dual-energy X-ray CT using Compton Scattering Monochromatic X-ray Source" 第 97 回日本医学物理学学会学術大会. (20080910-12). 韓国

T. Natsui, T. Yamamoto, Y. Taniguchi, F. Sakamoto, A. Sakumi, M. Uesaka, E. Tanabe, N. Nakamura, M. Yamamoto, S. Fukuda, T. Higo, M. Akemoto, M. Yoshida: "Development and Experiment of X-ray Source by 9.4 GHz X-band linac for Nonde" 16th Pacific Basin Nuclear Conference(16PBNC). (20081013-18). 青森県

夏井拓也、山本智彦、坂本文人、谷口善洋、田口博基、遊佐訓孝、上坂充、福田茂樹、肥後壽泰、明本光生、吉田光宏、山本昌志、中村直樹、田辺英二、森田成基: "非破壊検査

用可搬型 Xバンドライナック X線源の安定高出力化" 日本原子力学会 2008 年秋の大会. (20080904-06). 高知県

Natsui, M. Uesaka, T. Yamamoto, F. Sakamoto, E. Hashimoto, L. Kiwoo, N. Nakamura, M. Yamamoto, E. Tanabe, M. Yoshida, Toshiyasu Higo, S. Fukuda: "Development of a Portable 950 keV X-band Linac for NDT" 20th International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry(CAARI 2008). (20080808-13). USA

平井俊輔、夏井拓也、李基羽、谷口善洋、山本智彦、橋本英子、上坂充、中村直樹、山本昌志、草野譲一、田辺英二: "950keV ライナック擬似 2 色 X線撮影試験" 日本原子力学会 2009 年春の年会. (20090323-25). 東京都

山本智彦、夏井拓也、李基羽、谷口善洋、平井俊輔、橋本英子、上坂充、中村直樹、山本昌志、草野譲一、田辺英二: "オンサイト非破壊検査用可搬型 950keV Xバンドライナック X線源" 日本保全学会 第 5 回学術講演会. (20080710-12). 茨城県

山本智彦、夏井拓也、李基羽、谷口善洋、中村直樹、山本昌志、平井俊輔、橋本英子、上坂充、草野譲一、田辺英二: "950keV X-band Linac を用いた X線非破壊検査装置による撮像試験" 第 5 回日本加速器学会、第 38 回リニアック技術研究会. (20080806-08). 広島県

T. Yamamoto, T. Natsui, M. Uesaka, E. Hashimoto, L. Kiwoo, N. Nakamura, M. Yamamoto, E. Tanabe, M. Yoshida, Toshiyasu Higo, S. Fukuda: "On-site Real-Time Inspection System for Pump-impeller using X-band Linac-X-ray" 20th International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry(CAARI 2008). (20080808-13). USA

山本智彦、夏井拓也、李基羽、谷口善洋、中村直樹、山本昌志、平井俊輔、橋本英子、上坂充、草野譲一、田辺英二: "可搬型ライナック X線源によるポンプ状態監視保全の原理実証" MAGDA コンファレンス in 日立. (20081120-21). 茨城県

山本智彦、夏井拓也、李基羽、谷口善洋、中村直樹、山本昌志、平井俊輔、橋本英子、上坂充、草野譲一、田辺英二: "可搬型 X-band Linac X線源による回転機リアルタイム撮影" 日本原子力学会 2009 年春の年会.

(20090323-25). 東京都

李基羽、夏井拓也、山本俊彦、橋本英子、谷口善洋、平井俊輔、上坂充：“小型 X-band Linac X 線源とラインセンサーを用いた物質判別法” 日本物理学会 2009 年春の年会。(20080327-30). 東京都

J. Takamine, M. haruyama, M. Takase, S. Yamaguchi: “Research and Development for the high sensitivity non-destructive assay of fissile nuclide by using fast neutron direct interrogation method” 16th Pacific Basin Nuclear Conference (16PBNC). (20081013-18). 青森県

春山 満夫：“小型中性子源による核物質の高感度検出” 日本原子力学会 2008 年秋の大会「加速器・ビーム科学部企画セッション」。(20080904-06). 高知県

高峰潤、春山満夫、高瀬操、山口聡：“14MeV 中性子直接問いかけ法を用いた Pu-239 及び U-235 の分離測定法の開発” 日本原子力学会 2008 年秋の大会。(20080904-06). 高知県
高峰潤、春山満夫、高瀬操：“非破壊手法によるウラン・プルトニウム組成比決定法の研究” 日本保全学会 第 5 回学術講演会。(20080710-12). 茨城県

Kiwoo Lee, Takuya Natsui, Shunsuke Hirai, Mitsuru Uesaka, Eiko hashimoto, “950 keV X-band Linac for material recognition using two-fold scintillator detector as a concept of dual-energy X-ray system”, CAARI2010 (21st International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry) 2010 年 8 月 7 日 アメリカ Texas 州

李基羽、橋本英子、山本智彦、夏井拓也、森梓、平井俊輔、上坂充、中田博之、内藤匡浩、鎌上則夫，“X-band ライナックを用いた手荷物検査用準 2 色 X 線シンチレータアレイの基本設計”，第 6 回日本加速器学会年会，2009 年 8 月 6 日，原子力科学研究所

李基羽、橋本英子、山本智彦、夏井拓也、森梓、平井俊輔、上坂充、中田博之、内藤匡浩、鎌上則夫，“950keVX バンドライナック用準 2 色 X 線シンチレータアレイの基本設計”，日本原子力学会 2009 年秋の大会，2009 年 9 月 17 日，東北大学

李基羽、橋本英子、山本智彦、夏井拓也、森梓、平井俊輔、上坂充、中田博之、吉田正樹、鎌上則夫，“X-band LinacX 線による 2

段シンチレータアレイの物質判別実験”，日本原子力学会 2010 年春の大会，2010 年 3 月 26 日，茨城大学

李 基羽、夏井 拓也、平井 俊輔、上坂 充，“950 keV X-band Linac を用いた物質識別実験及び散乱 X 線対策”，2010 年加速器学会，2010 年 8 月 5 日，姫路文化センター

春山 満夫：“ウラン・プルトニウム廃棄物等のクリアランスのための高感度測定技術” 原子力施設 デコミッションング技術講座 第 21. 119-144 (2009), 1

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計◇件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上坂 充 (東京大学大学院工学系研究科 原子力専攻教授)

研究者番号：30232739

(2) 研究分担者

春山 満夫 ((独) 原子力研究開発機構・超高感度 U・Pu 非破壊検査法開発特別グループ)

研究者番号：60446466

(3) 連携研究者

取越 正巳 (放射線医学総合研究所)
研究者番号 : 90280742

作美 明 (東京大学大学院工学系研究科原子
力専攻)
研究者番号 : 30360556