

研究開発課題別事後評価結果

1. 研究開発課題名：地雷探査用高度化即発ガンマ線分析システムの開発
2. 研究代表者名：井口 哲夫（名古屋大学 大学院量子工学専攻 教授）
3. 研究内容及び成果

対人地雷中の爆薬の主要構成元素である窒素を、その中性子捕獲反応で生成される固有の高エネルギーガンマ線を計測することにより、地雷の有無および埋設位置を遠隔・非破壊・選択的に探知するセンサ「先進中性子利用対人地雷探知システム (NUANDAM; Nagoya University's Advanced Neutron-based Detection System for Anti-personnel Mines)」を開発した。このセンサの構造は、大別して、可搬・小型の（コッククロフト・ワルトン型）加速器強力中性子源（重水素(D) - 重水素(D)核融合反応利用）と、高効率でエネルギーと入射方向情報が同時に取得できる高機能な即発ガンマ線検出器とからなる。中性子源では加速電極構造、ターゲット冷却・除熱系の改良により、コンパクト化（市販品の中では最小）、軽量化、メンテナンス性等、屋外使用に向けた機能向上が図られた。一方、高機能な即発ガンマ線検出器システムとして、BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) シンチレータロッドを多段に重ねることで、コンパクトなサイズでありながら、窒素と中性子の捕獲反応で放出される高エネルギー特性ガンマ線（数 MeV ~ 10.8MeV）を高効率で検出（地雷の有無を直接探知）でき、しかも検出器内の蛍光パターン（入射した高エネルギーガンマ線とBGO検出器材との相互作用で生じる電子飛跡パターン）からガンマ線入射方向（地雷位置）も推定できる独自の蛍光パターン認識型ガンマカメラを開発した。センサの総重量は約 230kgとなった。

〔小型加速器強力中性子源〕

開発した中性子源は、0.13m(D)×0.9m(H)のサイズであり、従来（市販）のペニング型イオン源に代わり、約1桁高いイオン密度の生成が可能なヘリコン波プラズマイオン源を新たに採用することで、DD核融合反応の中性子発生率～2桁向上（ $\sim 2 \times 10^8$ n/s）を達成した。この中性子源は、発生させた重水素イオン源からイオンを引き出し、130 kVの高電圧に対し均一な電位勾配形成を目指した多重電極配置のコンパクト多段システム構造を採用した静電型加速器（コッククロフト・ワルトン型）で加速し、重水素がトラップされているターゲットのチタン金属薄膜に当てることで、DD核融合反応を起こし中性子を発生させるものである。この際、ターゲットのチタン金属内の重水素は、加速されてターゲットに当たるもののうちDD核融合反応を起こさないものが新たにトラップされることで補充されるため、長時間運転が可能な中性子源となっている。なお、DD核融合反応に伴う 10^8 n/sレベルの中性子発生時には、26mmのターゲット面に対し約400Wの熱が発生する。この高熱流束に対し、衝突噴流型の冷却方式で500Wの除熱性能を有する冷却システムを開発した。

〔即発ガンマ線検出器（蛍光パターン認識型ガンマカメラ）〕

開発したガンマカメラは 6 ユニットのガンマ線検出器ユニットで構成され、各ユニットは角柱 BGO シンチレータ（各角柱 5.4mm 角×長さ 150mm : BGO ロッド）を 64 (8×8) 本束ねたものの両端に 64 個のアノード出力を持つ位置検出型光電子増倍管（MAP MT : H 社 ; H8600）を装着したものである。BGO ロッド間の隙間にはテフロンテープが挿入されており、良好なエネルギー分解能および位置分解能を得ることと各 BGO ロッドチャンネルの発光を独立にする役割を担っている。各 BGO ロッドでは、側面からガンマ線との相互作用により発光した角柱シンチレータを同定するとともに、シンチレータ内の光の減衰を利用した両端の信号出力の比から角柱シンチレータ長軸方向の発光位置を推定することにより、スタック状シンチレータ内で起こったコンプトン散乱等による三次元的な多点発光事象の測定を可能としている。このセンサ部（ガンマカメラ）は、外環境からの保護と遮光のためアルミニウム板で作製した筐体に収納されている。

また、ASIC ベースのアナログ デジタル信号融合技術を駆使することで、高速（～ 50 kcps 相当）で高機能な多重同時信号処理系を構築するとともに、多点発光事象のパターンが検出器に入射した高エネルギーガンマ線の飛来方向の情報（ガンマ光子と相互作用して生成される電子が運動量保存則により前方に放出される性質）を反映していることを利用して、電子飛跡の逆投影やシミュレーション計算結果とのパターンマッチング方式により、電子的なコリメーション（物理的なコリメータなし）で、特定エネルギーのガンマ線（ここでは、水素や窒素の中性子捕獲ガンマ線）の入射方向を逆推定するアルゴリズムを開発した。

〔探知性能等〕

開発したセンサの地雷（爆薬）の探知性能については、2007 年 9～10 月名古屋大学工学研究科原子核第一実験棟中性子発生装置室にて、模擬土壌体系（W1000mm×B1350mm×H300mmの木製ケース内に真砂土（深さ 250mm）を敷き詰めたもの）を構築し、TNT（Tri-Nitro Toluene）（100g、240g）および RDX（Research Department Explosive）（29 g、100g）を非爆化した模擬爆薬について、国内評価試験を実施した。試験条件は、埋設深度 5～15 cm、水分含有率 5～15%、計測時間 5 分、中性子発生率は概ね 1.2×10^7 n/s だった。この試験条件で得られた即発ガンマ線スペクトルの 2 MeV、5 MeV、10 MeV の 3 つのエネルギー領域における計数率に加え、それらの多変量解析における主成分分析法を用いさらに後方散乱中性子計数比をインデックスとして相関プロットし、地雷爆薬の判定確信度の向上を図った。

その結果、爆薬量が 100g 以上の場合で土壌水分率が～5%台の場合は、15cm までの深さの対人地雷についてほぼ確実に地雷の有無を判定することが可能であることが示された。また、2007 年 3 月に AMS（Advanced Mine Sweeper）との総合アセンブルによる屋外機能試験で、1m 四方の探知区画の位置決め精度が 6.3 mm 以内であること

を確認するとともに、地表面に模擬地雷として置かれた塩化カリウム (KCl) 中の天然放射性同位元素⁴⁰Kから放出されるガンマ線プロファイルを～10cm程度の空間分解能で測定できることを実証した。さらに、2007年9～10月の国内評価試験で、空間分解能は良くないものの線源位置情報を反映することが実験的に確認され、測定体系をモデル化したEGS5コードによるシミュレーション計算から得られる検出器応答関数で補正を行うと、1m四方×20cm深さの土壌体系内の地雷爆薬に対しおよそ10cmの空間分解能で三次元的に画像化することに成功した。

4 . 事後評価結果

4 - 1 . 技術開発目標の達成度

強力な小型加速器 (DD核融合) 中性子源と高機能な即発ガンマ線検出器とからなるセンサを用いて、比較的乾燥した地中 (深さ15 cm程度まで) に埋められた地雷 (爆薬量100g以上) の有無を判定出来、かつ、地雷の埋設位置を約10 cmの空間分解能で三次元的に画像化する技術の開発に成功した。

その成果は、「可搬型強力 (DD核融合反応) 中性子源を利用した即発ガンマ線分析手法を適用し、爆薬の主要構成元素である窒素をその中性子捕獲反応で生成される10.8MeV 高エネルギーガンマ線の計測により捉え、地雷の有無および埋設位置を遠隔・非破壊・選択的に探知する技術を開発する」という当初の目標のうち、地雷の有無についてはある程度、埋設位置を探知することについてはほとんど達成したものと考えられる。しかし、当初の「10.8MeV 高エネルギーガンマ線の計測」のみではなく、2 MeV (水素の中性子捕獲反応で発生)、5 MeV (窒素の中性子捕獲反応で発生) を測定し、それらを総合して判定していることから地雷有無判定の仕方がやや複雑になり、水分や鉄 (5 MeVの中性子捕獲反応ガンマ線を発生させる) の存在から影響を受けやすいものとなった。この方式の判定を適用する場合は、土壌成分の影響を十分把握する検証測定が必要であると考えられる。一方、開発した中性子利用爆薬センサの重量は230kg程度と、地雷原で使うものとしては大型のものとなり、そのまま地雷原に持ち込めるものではないが、探知能力上は比較的爆薬量の少ない (爆薬量100g以上の) 地雷について乾燥した土壌体系ではかなりの確率 (15 cmの深さで95%) で発見出来るものとなったため、実用化のための実証機としての開発は成功したものと考えられる。

探知速度に関しては、ある地点の周辺 (半径数十cm) を探知するのに約5分かかっており、このセンサ単独での全面走査方式の地雷 (爆薬) 探知は時間がかかり過ぎることから適しておらず、他のセンサである金属探知機、地中レーダ (GPR) センサ等と組合せた使い方が有効であると考えられる。

4 - 2 . 得られた研究開発成果の科学技術への貢献度

本研究で開発した中性子利用センサは、非常に小型のDD核融合反応装置 (加速器中性子源) を用いるもので、地雷探知あるいはテロ対策等での爆薬探知で一般的に使われ

る中性子源である放射性同位元素 (^{252}Cf 等) やDT (重水素 (D) - 三重水素 (T)) 核融合反応中性子源と異なる方式の中性子源を用いた。このメリットは、放射性同位元素の使用やDT核融合反応の場合、 ^{252}Cf や三重水素 (T) 等の取扱いに注意を要する放射性同位元素を使用するのに対し、DD核融合反応の場合、放射性元素の使用がないことであり、電源を切り反応を止めれば中性子源は非放射性的の物質と同じ取扱いが出来ることである。この方式の装置では、これまで連続的な中性子発生では $\sim 10^6$ n/s程度の発生率しか達成していなかったのに対して、2桁程度上回る発生率 2×10^8 n/sを達成した。この点では、小型加速器 (DD核融合反応) 装置をより使いやすい中性子源として多方面の研究開発で利用出来るようにしたと言える。一般的に被ばく防止の観点では、放射性物質の閉じ込め、放射線の遮蔽、が求められるが、本中性子源では放射性物質の閉じ込めは必要なく、放射線 (中性子線) の遮蔽対策が必要とされるのみである。また、開発した即発ガンマ線検出器 (蛍光パターン認識型ガンマカメラ) は、通常の物理的コリメータ (鉄や鉛などの重量物) を用いずに、コンパクトかつ高い検出効率の下で、高エネルギー (MeVオーダーの) ガンマ線の入射方向からその発生位置を探知する能力があり、地雷中の爆薬探知ばかりではなく、その他の物質の遠隔・非破壊探知にも十分適用出来るものとなっている。

4 - 3 . 総合コメント

開発した中性子利用センサは、1か所あたりの測定時間が長く現時点においては全面走査方式の探知には適さないが、金属探知機やGPRにより位置が確認された地雷らしき物体中に爆薬が含まれるか否かで地雷と判定する、爆薬確認センサとしての使い方が有効と考えられる。このセンサの重量は230kg程度であるが、今後さらなる小型化を行い、専用搭載車両にこのセンサを搭載し、遠隔で走査出来るようにしたものが実用的な地雷 (爆薬) 探知ロボットとして考えられ、このための基礎が出来た。地雷探知・除去作業は地雷の誤爆と隣合わせの作業であり、誤爆からの作業員安全確保の観点より、対人地雷探知・除去を行うグループから他のメンバーはある程度の安全距離 (10m程度) を確保して作業を行うこととしている。これは放射線作業における管理区域の考え方と同じものであり、地雷探知作業において放射線管理区域の考え方を採用して遠隔で離れた位置からDD核融合反応中性子利用地雷 (爆薬) 探知ロボットを使うことは、現在実施されている地雷探知・除去作業に良くマッチするものである。また、この爆薬探知センサは、小型化、爆薬探知効率の向上、専用車両との統合化が今後の課題となっているが、それらを実施することで、日本がオタワ条約署名式において表明した「犠牲者・ゼロ」宣言の趣旨に沿い、人道的対人地雷探知・除去作業を安全に効率的に実施するための装置を完成させることが出来る。