

研究開発課題別事後評価結果

- 1 . 研究開発課題名：超小型放電型中性子源による地雷探知技術の開発
- 2 . 研究代表者名：吉川 潔（京都大学 名誉教授）
（元 京都大学 エネルギー理工学研究所 所長（教授））
- 3 . 研究内容及び成果

本研究では、中性子線を地雷原に照射して、爆薬のニトロ基を構成する窒素原子の中性子捕獲反応で発生する高エネルギーガンマ線（10.8MeV）を捉えることにより、爆薬の有無を探知する爆薬探知装置（爆薬センサ）を開発した。このセンサの構造は、大別して、安定して長時間連続運転の可能な超小型の放電型核融合中性子源と、10.8 MeVの高エネルギーガンマ線を高効率検出可能で、しかもガンマ線の飛来方向を弁別可能なBGO/NaI 複合検出器とから構成される。また、センサは中性子源の高電圧接続部も含めて防滴仕様で、さらに、中性子源の運転に必要な真空排気・圧力制御には非蒸発型ゲッターポンプを採用することで振動に弱い機械式ポンプを排除し、屋外使用に耐える仕様となっている。センサ重量は約 500kg となった。

〔超小型放電型核融合中性子源〕

中性子の発生方法としては、重水素プラズマの慣性静電閉じ込め方式を採用した。直径 20 cm程度の真空容器の中心にグリッド状の球殻陰極を設置しただけの極めてシンプルな構造で、静電ポテンシャルを形成して正電荷を持った重水素（D）イオンを閉じ込める。閉じ込められたイオンは陰極と真空容器（陽極）の間を往復運動し、他のイオンや分子と衝突して DD 核融合反応により中性子を発生する。

このような単純な構造と原理により、本方式の中性子源は元来、長寿命で運転も容易であるという特長がある。本開発ではさらに、二重槽構造の水冷式とすることで、直径 20cm 程度の超小型でありながら、数時間以上にわたって極めて安定・連続的に毎秒 10^7 個以上の高中性子生成率を得ることに成功した。また、この水冷構造は、その厚みに角度分布を持たせることで中性子の地雷原方向への集束、さらには、中性子源を使用する際の安全確保に必須の放射線遮蔽材も兼ねており、センサシステム全体の小型化にも寄与している。

〔BGO/NaI 複合ガンマ線検出器〕

開発した複合ガンマ線検出器は、円柱形状の主検出器と、それを円筒状に取り囲む副検出器からなる。高密度でかつ比較的大型の BGO シンチレータを主検出器として採用したことで、高い透過力を有する 10.8 MeV の高エネルギーガンマ線を高効率で捉えることが出来る。この主検出器を取り囲む副検出器（NaI シンチレータ）には次の 2 つの役割がある。（1）主・副検出器で同時に検出された信号を除外する非同時計数法により、副検出器の開口部（地雷原方向）から飛来するガンマ線を選択的に検出する

ことでバックグラウンドの低減が可能となった。(2) 主検出器で発生する消滅ガンマ線を副検出器で捉える同時計数法によって、高エネルギーガンマ線に対する検出効率のさらなる向上にも寄与する。(1)(2)の測定法を複合的に用いることによって、高エネルギーガンマ線の飛来方向を弁別するとともに、地雷探知に必要な高 S/N 比を得ることに成功した。

〔探知性能等〕

2007年7～9月に京都大学宇治キャンパスエネルギー理工学研究所南3号棟実験室で、非爆化した爆薬模擬剤(TNT 240g、TNT 100g、RDX 100g、RDX 29g)を用いた国内評価試験を実施した。試験条件は、「埋設深度5～15cm、土壌含水率2～18.5%、計測時間15分～20分、中性子発生率は概ね 10^7 n/s」であった。地雷原土壌含水率は爆薬中核種(窒素、水素)からのガンマ線の生成率に大きく影響を与えるが、本システムは、土壌含水率変化に対しても最適な中性子熱化を実現出来るよう中性子源下部に中性子減速材板を自動挿入可能な設計となっている。また、屋外使用時に予想される環境変化によるゲイン変動に対処出来るよう、BGOによる計測ガンマ線エネルギースペクトルの自動エネルギー校正が可能となる計測システムを構築した。「TNT100g、水分率2%、埋設深度15cm」および「RDX29g、水分率2%、埋設深度10cm」という条件で100%の探知率を達成したことから、本地雷探知システムの有効性を証明し、実用化に向けての可能性を示すことが出来た。

4 . 事後評価結果

4 - 1 . 技術開発目標の達成度

超小型放電型(DD核融合)中性子源およびBGO/NaI複合ガンマ線検出器からなるセンサを用いて、地中(深さ15cm程度まで)に埋められた爆薬(最少量RDX29g)の有無を判定出来る技術の開発に成功した。その成果は、「超小型放電型中性子源を用いて、探知が困難なプラスチック地雷の場所、およびその種類も同定可能な技術を開発する。」という当初の目標のうち、プラスチック地雷の場所を同定するという目標は達成したものと考えられるが、地雷中の爆薬の種類を同定するまでには至らなかった。一方、開発した中性子利用爆薬センサの重量は500kg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RDX29gという最少量の爆薬もかなりの確率(15cmの深さで約8割)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20～30cmを探知するのに約15～20分かかることから、このセンサ単独での全面走査方式の地雷(爆薬)探知について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、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（超小型放電型核融合中性子源）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 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、反応前後に放射性元素の使用・出現がないことであり、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 $\sim 10^5$ 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 2×10^7 n/s での数時間の連続運転を達成した。この点では、小型 DD 核融合反応装置を使いやすい中性子源として多方面の研究開発での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 BGO/NaI 複合ガンマ線検出器は、NaI シンチレータで BGO シンチレータを覆いその組合せ測定によりガンマ線の方向弁別機能を持たせ、目標とする方向からのガンマ線のみを測定することを可能としたものであり、中性子捕獲反応で生ずる高エネルギーガンマ線の有効探知技術を新たに開発した。これは少ない中性子発生量で有効な探知を行うために必要な技術であり、小型 DD 核融合反応装置を使いやすくするための技術にもなっている。これらの技術は、地雷中の爆薬探知ばかりではなく、その他の物質の探知にも十分適用出来る。

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15分～20分と長く、現時点で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 500kg 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実施するための装置を完成させることが出来る。