

地雷探査用高度化即発ガンマ線分析システムの開発

名古屋大学・教授 井口 哲夫

1. はじめに

本研究では、地中に埋設された対人地雷の探査において、直接地雷中の爆薬の検知を狙い、中性子を利用した即発ガンマ線分析手法を適用します。特に、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、地雷の有無および埋設位置を遠隔・非破壊・選択的に検知する方式について、重水素(D)–重水素(D)核融合反応による可搬型強力中性子源との組み合わせを前提に、BGO シンチレータベースの高機能即発ガンマ線検出システムの開発を行っています。また、高エネルギー分解能 Ge 半導体検出器の測定システムを融合することにより、高い探知率と低い誤認率を両立できる地雷探査用中性子センサーシステムの構築を目指しています。

2. 検出原理と特長

中性子を照射したとき地雷等が埋設されている場合、爆薬中に豊富に含まれる窒素と中性子捕獲反応という核反応を起こし、特徴的な高エネルギーガンマ線（捕獲ガンマ線）が放出されます。この特徴的な高エネルギーガンマ線を測定することにより、爆薬の有無、つまり、地雷の有無を検知します。

この特徴的な高エネルギーガンマ線は、物質中に入射すると、高い確率で多重散乱により（物質を構成する元素の電子とビリヤードのように玉突き衝突を繰り返しながら）エネルギーを失います。検出器に使用するBGO（ビスマスジャーマナイト： $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ）は、ガンマ線が入射すると発光する物質（シンチレータ）で、大きな比重と原子番号を持っているので、高エネルギーガンマ線を、高効率で検出できます。本研究では、特に窒素から放出される最大エネルギー10.8MeVのガンマ線を対象に、BGOシンチレータのサイズを $15\text{cm}\times 15\text{cm}\times 10\text{cm}$ として、全エネルギーの検出効率を $\sim 40\%$ まで高めると同時に、シンチレータ内をおよそ 2000 個に分割して、1つのガンマ線の多重散乱によるシンチレータ内多点同時発光（エネルギーと位置）を三次元的に捉え、その軌跡を運動力学に基づいて逆に追跡することで、ガンマ線の入射方向を推定する方式（マルチコンプトンガンマカメラ方式）を提案しています。コンパクトなサイズでありながら、10.8MeVという高エネルギーガンマ線を高効率で検出（地雷の有無を直接検知）でき、しかもガンマ線入射方向（地雷位置）も推定できる方式は、世界初の試みです。

一方、土壌や爆薬中に含まれる各種元素からの即発ガンマ線スペクトルパターンを、高効率かつ高分解能で測定可能な可搬型 Ge 半導体検出器を併用し、ニューラルネットワーク等を用いた知的信号処理（情報融合）を行うことで、より高精度かつ迅速な地雷探査が可能となります。

図1に、本研究におけるガンマ線測定・分析システムの模式図を示します。また、金属探知器や地中レーダー等の電磁探査技術と探知原理が全く異なるので、相補的に活用することで、地雷探知率とともに誤認率の大幅な軽減に寄与できる他、土壌表面の凹凸にあまり影響を受けないことや土壌水分量とともに検出感度が向上するので、電磁探査による地雷探知技術の弱点を補える点も特長と言えます。

3. これまでの主な成果

BGO シンチレータスタック型マルチコンプトンガンマカメラの開発研究に関して、角柱 BGO シンチレータの適切なスタック法（表面処理法）を実験的に見出し、角柱 BGO 64 本（8×8 マトリクス、1/6 モデル）とフラットパネル型マルチアノード光電子増倍管からなる基本ユニットセンサーヘッドを製作しました。また、ASIC（特殊用途集積回路）素子を用いた高機能信号読み出し回路の設計・試作を行い、所定の基本動作の確認しました。図 2 に試作したプロトタイプ検出器ユニットの分解写真と各パーツの機能の模式図を示します。現在、産業技術総合研究所の電子蓄積リングに設置されたレーザー逆コンプトン準単色高エネルギー光子発生装置を用いて、窒素の特性ガンマ線エネルギーに相当する 10.8MeV ガンマ線に対する検出器応答測定実験を行っています。角柱 BGO 16 本による予備的な実験結果として、ガンマ線の入射方向の差により、各 BGO シンチレータの発光位置分布に差異を観測できた他、全エネルギー吸収ピークに関して、概ね計算値と実験値は一致しました。さらに、これら実験的に得られた基本特性（空間分解能およびエネルギー分解能）をもとに、検出器面から約 25cm 離れた位置にある 2cm 角の地雷爆薬より生成された 10.8MeV ガンマ線の入射方向の逆推定を試みたところ、空間分解能の改善の必要性があるものの、約 300 個の事象を検出することで、図 3 のようにガンマ線発生源の位置を同定できることが示されました。

4. おわりに

本研究の開発の目玉である BGO シンチレータベースの高機能即発ガンマ線検出システム（高エネルギーガンマ線入射方向検出器系）は、試行錯誤の連続ながら、漸く角柱 BGO 64 本（8×8 マトリクス、1/6 モデル）の基本ユニットシステムの部分試作を完了しました。現在、計算および実験の両面から、10.8MeV ガンマ線の入射方向逆推定の原理を実証できた段階にあります。産総研での再実験と性能改善に向けてチューンアップ中です。今後は、これらの実験結果を見極めた上で、フルシステムへの拡張・製作および DD 中性子源と組み合わせた特性測定実験へ展開していく予定です。

なお、本研究では、コンパクト加速器中性子源と Ge 半導体検出器のシステムインテグレーションの下で、中性子・ガンマ線輸送計算に基づく本手法の地雷探知限界の評価も実施しており、地表面での中性子束： $\sim 10^6$ n/cm²/s において、探知率 99.9%、誤認率 40%で、当面の目標：10 分間測定、1m×1m 四方内、20cm 深さ、30g 相当の地雷爆薬の直接検知の達成が見込まれています。

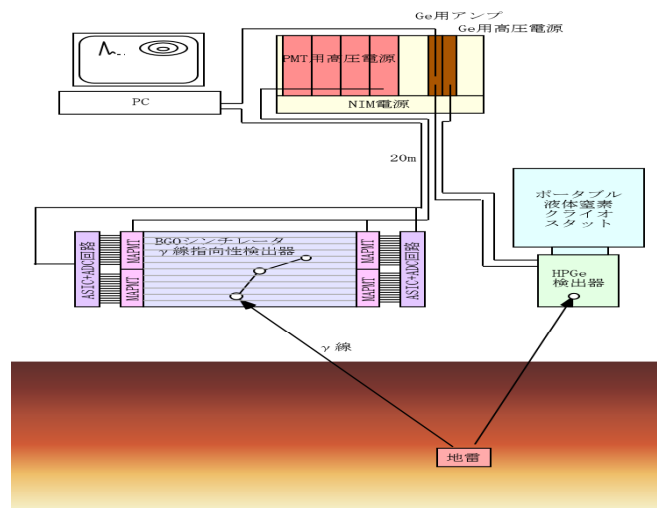


図1 即発ガンマ線計測・分析システムの構成

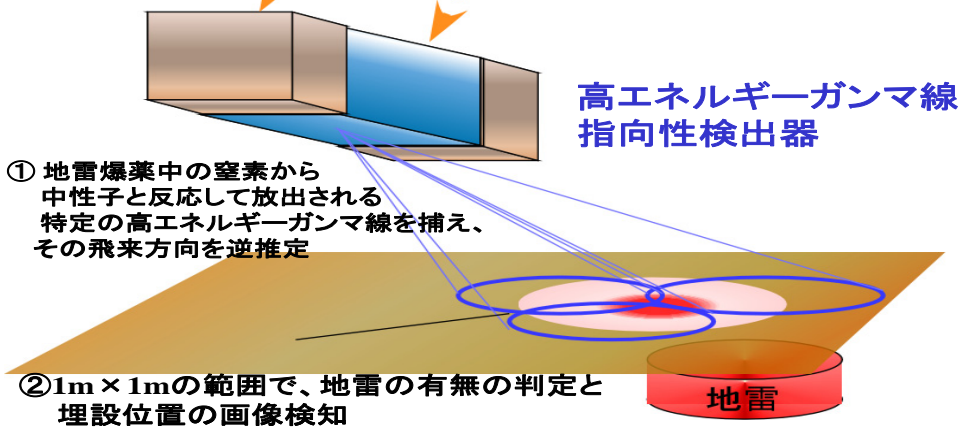
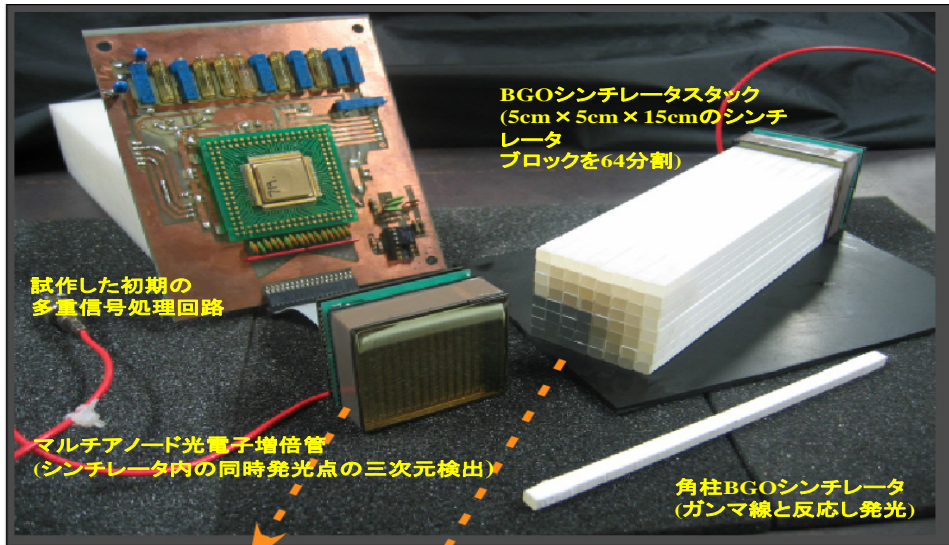


図2 試作検出器ユニットのパーツ概観と機能

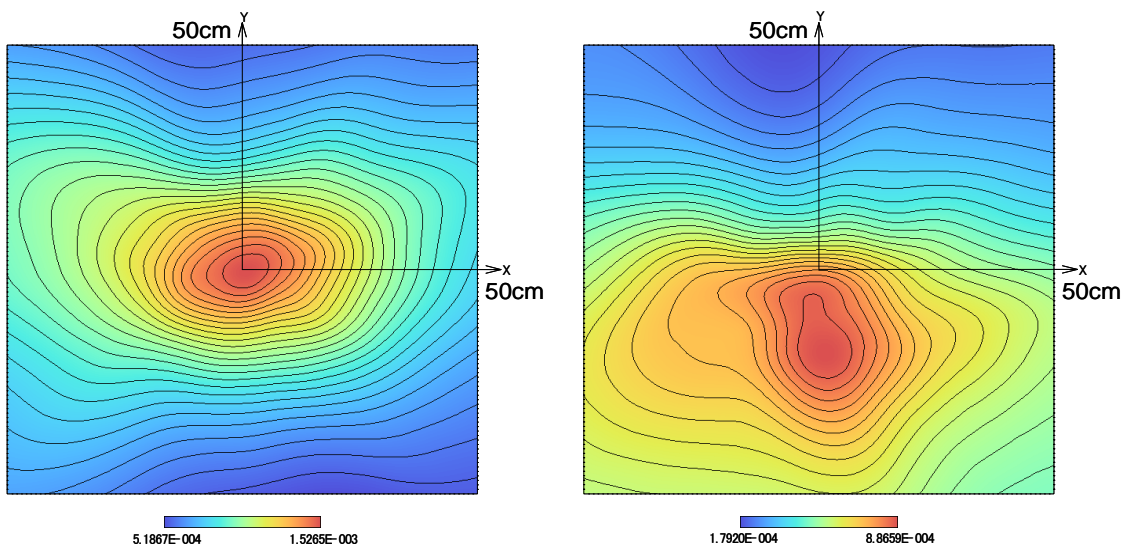


図3 ガンマ線発生源プロファイルの逆推定結果

(左図: $y=0\text{cm}$ 、右図: $y=20\text{cm}$ に γ 線源(模擬地雷)を設置、単一角柱 BGO の位置分解能 3.0cm ・エネルギー分解能 15% at 1.0MeV ガンマ線を仮定)