

超小型放電型中性子源による地雷探知技術の開発

京都大学・教授 吉川 潔

1. はじめに

本研究開発では、地雷（火薬）自体の物性値に着目し、特定された地雷原における地雷探知作業において地雷を確実に、簡易かつ迅速に探知可能な地雷探知技術として、癌治療で用いられている中性子捕捉療法（NBT）の原理である中性子捕獲反応を利用して、金属探知器などで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します。

本探知技術で使用する中性子源は、安全な重水素ガス（D）と放電電力のみを用いる新式の超小型放電型核融合中性子源です。この中性子源を高性能化し、遠隔操作で安全に地雷探査を行うための中性子センサ技術の構築を目指します。

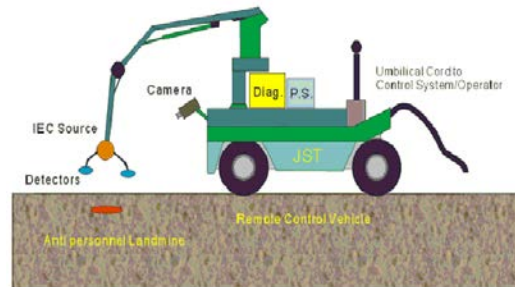


図1 地雷探知システム車両(概念図)

2. 地雷(爆薬)検出の原理

地雷が埋設された土壤中に中性子を照射した場合、爆薬成分との間で中性子捕獲反応と呼ばれる核反応を起こし、特定のエネルギーを持つ捕獲ガンマ線が放出されます。爆薬中の原子数密度比は表1のように定まっていますので、例えば、水素と窒素の中性子捕獲反応で生じる 2.22MeV と 10.83MeV の捕獲ガンマ線を計測することにより、地雷の有無及び種類を同定することが可能になります。この方法は、火薬そのものを同定するので、金属製の外殻構造を持つ地雷のみならず、金属探知器では探知困難なプラスチックなどの外殻構造を持つ地雷についても検出が可能になります。

他に、爆薬中に含まれる水素は中性子と散乱する確率が高いので、地雷が存在すると散乱によって地表に戻ってくる中性子（後方散乱中性子）の数が増えます。そこで、この後方散乱中性子を計測することにより、地雷の有無を判定することも可能になります。また、計測では、爆薬成分と中性子との反応時間を考慮しパルス中性子照射を行います（図2）。

表1 爆薬中の元素数

爆薬の種類	爆薬中の元素数			
	H	C	N	O
TNT	3	7	3	6
Pentrite	8	5	4	12
Hexogen	2	1	2	2
Ammonium nitrite	4	—	2	3

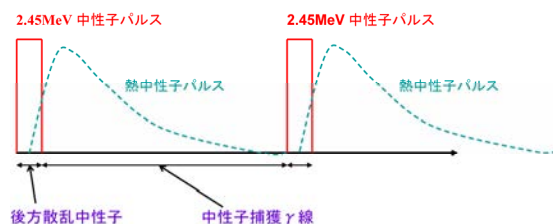


図2 地雷の検出方法(有無と種類の同定)

また、捕獲ガンマ線と後方散乱中性子を複数の検出器で同時計測することにより、地雷の位置を同定することが可能になります（図3）。

中性子検出器の候補としては、 ^3He 比例計数管や有機液体シンチレータ（ガンマ線の検出も可能）、ガンマ線検出器の候補としては、NaIシンチレータ、CsIシンチレータ、BGOシンチレータなどがあります。

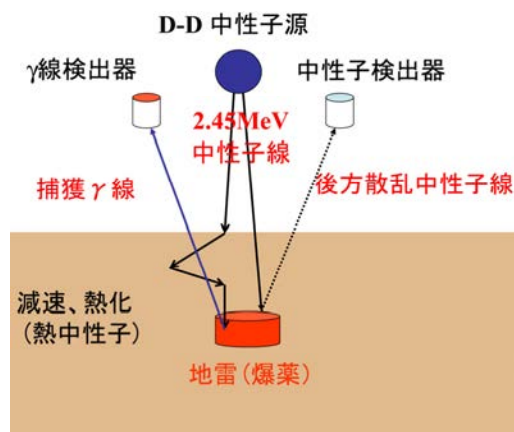


図3 地雷の検出方法
(場所・種類の同定)

3. 超小型放電型中性子源の開発

本研究で開発する中性子源は、慣性静電閉じ込め核融合（IECF）というイオンを球形状中心に収束させ核融合反応を起こさせるビーム・ビーム衝突核融合の一種です。

図4のように球形状の陽極（真空容器）および陰極（中空メッシュ状）の間で放電を起こさせると、この領域で生じた重水素イオンは陰極に向かって加速され、メッシュ状陰極を通過し球中心に集束されます。作動ガスとして重水素ガスを用いれば、重水素イオン同士が中心部で衝突することにより核融合反応（D-D反応： $\text{D} + \text{D} \rightarrow ^3\text{He} + \text{中性子}$ ）が起こり、2.45MeVの中性子が生成されます。

現在まで本放電型核融合中性子源については、過酷な環境下にある現地での実用を考慮し、放射線被曝線量を抑え、高効率で、小型・軽量、更に無保守で昼夜の温度差が大きくかつ振動の激しい過酷な環境下でも安定に動作し、操作が簡易な装置の開発を行ってきています。図5の直径20cmの真空容器で中性子発生の実験（図6）を行い、当初の目標中性子発生率（ 10^8n/s ）を既に達成しました（図7）。さらに高い値を実現するため、放電機構にマグネトロン放電を採用した結果、効率のよいイオン生成が可能となり、パルス運転化との特性も良好であることが確認されました。

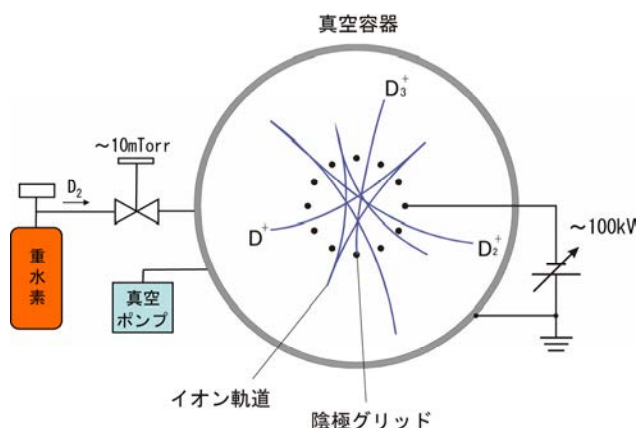


図4 IECFの原理



図5 真空容器

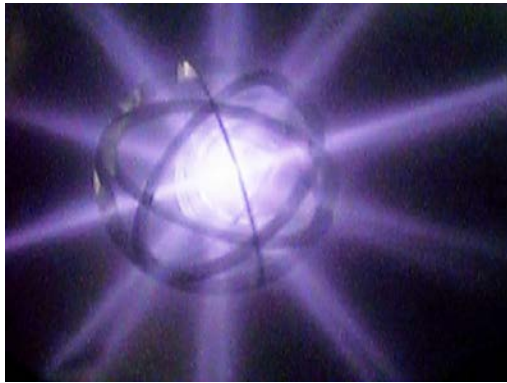


図6 放電写真(中心陰極領域)

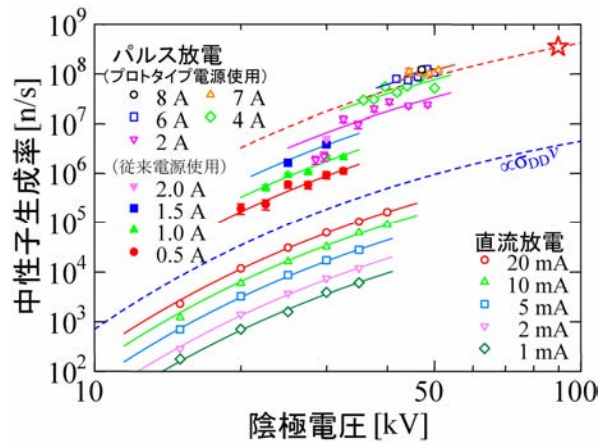


図7 パルス中性子発生率の
電圧・電流依存性

4. 車載用パルス電源の開発

D-D核融合中性子源に用いる車載用電源システムについて、65kV、30Aの半導体スイッチを用いてプロトタイプ電源(図8)を試作し、絶縁耐圧試験および基本動作性能試験(図9)を行いました。現状では、スイッチの関係で電圧仕様が若干低いのですが、パルス運転での標である 10^8 n/sの中性子生成率の2倍を達成しました。今後は、当初予定していた能力のスイッチを導入することにより、更なる性能向上を目指します。

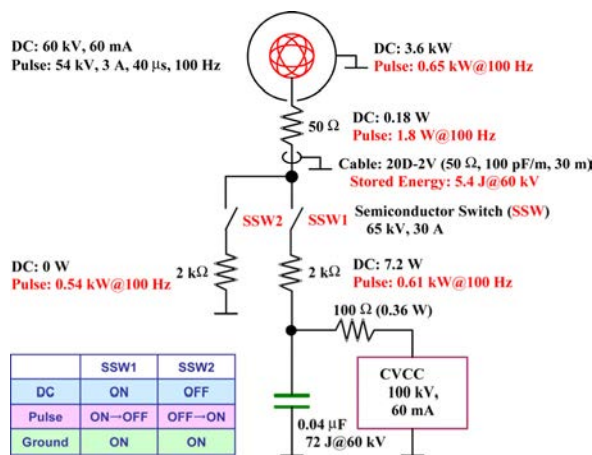


図8 プロトタイプ電源回路

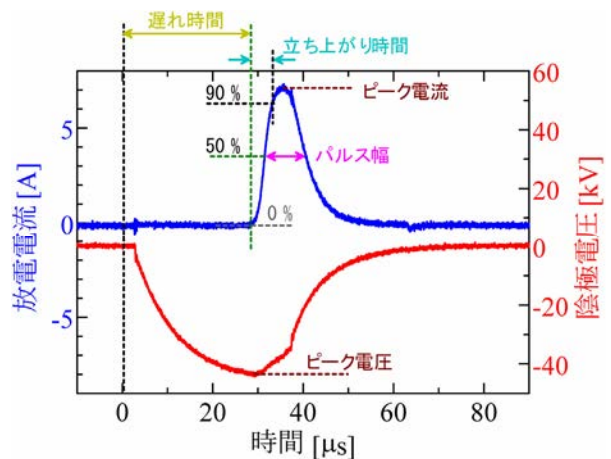


図9 パルス電圧・電流波形(短パルス)

5. 地雷検出法の検討

プロトタイプ検出系の設計・製作を念頭に置いて、候補検出器を絞り込むために種々の中性子源（Cf-252 や研究炉など）を用いて、地雷模擬物質（メラミン： $C_3H_6N_6$ ）に中性子を照射したときに放出されるガンマ線および中性子の計測を行っています。併せて、鉛（ガンマ線遮蔽体）、ホウ素入りポリエチレンやLiFタイル（中性子遮蔽体）を組み合わせ、中性子源、検出器と遮蔽体の配置方法について実験的に検証しています。

今後は、地雷成分による信号を効率的に抽出するためにバックグラウンドの低減を図った検出器の開発を行って特性試験を行うとともに、実験で中性子およびガンマ線の遮蔽体の配置が重要であることが判明したので、より精度の高い計測方法を目指し、検出器と遮蔽体の最適配置に関する検討を更に進めます。

また、これと並行して、シミュレーション計算法を確立して計算を行い、中性子源、検出器、遮蔽体配置の最適化と探知性能の概略評価に役立てるとともに、トモグラフィー技術（断層撮影技術）の応用の可能性についても検討を行います。

6. おわりに

これまで、既存の核融合中性子源とプロトタイプ電源を用いて中性子発生の実験を行い、当初の目標である中性子発生率 $10^8n/s$ を達成しました。今後は、マグネトロン放電型イオン生成機構の最適化、パルス電源装置の高性能化などにより、更なる中性子発生率の向上を目指します。

一方、放射線計測系については、中性子源と地雷模擬物質を用いて中性子とガンマ線の計測を行うことにより精度の高い計測方法を検討し、より詳細な実験を行うことにより中性子源、検出器と遮蔽体の配置方法の最適化を行います。

併せて、アフガニスタンでの使用環境、人的環境を考慮し、より操作が簡単で、かつ信頼性・耐久性のある装置にしていく予定です。