



Title	福島第一原子力発電所廃炉用高γ線線量率対応ダイヤモンド中性子計測システムの実用性向上に関する研究
Author(s)	織田, 堅吾
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16843号
Issue Date	2026-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16843
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99688
Type	doctoral thesis
File Information	Kengo_Oda_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 織田 堅吾

学 位 論 文 題 名

福島第一原子力発電所廃炉用高 γ 線線量率対応ダイヤモンド中性子計測システムの実用性向上に関する研究

(Improving the Practical Applicability of a Diamond Neutron Measurement System Operable under High γ -Ray Dose-Rate Conditions for the Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant)

単結晶ダイヤモンド放射線検出器は高い耐放射線性、5.47 eV のワイドバンドギャップを持つことによる高温環境下動作、高い絶縁破壊強度、低リーク電流、可視光不感等の特性を持つ。また、高い移動度と飽和ドリフト速度による高速時間応答性能を持つことから、極限環境下で使用可能な放射線検出器として期待されている。

現在、福島第一原子力発電所廃炉事業の燃料デブリ取り出し作業は大きな課題となっており、その作業にあたっては臨界近接監視システムという中性子を測定する検出システムが必要とされている。この検出システムはペネトレーションという直径 14 cm 程度の非常に細い部分を通して装置を挿入する必要があることとアーム型の装置を使用するためペイロードを 50 kg 以内に抑える必要があることから体積と重量が制限される。また、測定時には中性子に加えて多量の γ 線も同時に存在している。そのため、体積と重量の制限から鉛の遮蔽を使わずに 1 kGy/h という極めて高い γ 線線量率環境で安定して動作し、微量の中性子を測定することが可能な検出器が必要とされている。この候補として既存の検出器では B-10 検出器や SiC 検出器が検討されているが、体積と重量の制限から実用化は難しいとされている。

本論文では、単結晶 CVD ダイヤモンド検出素子と中性子-荷電粒子変換体から構成される中性子検出器、および高エネルギー加速器実験で開発されてきた耐放射線性シリコン半導体集積デバイスを用いた信号処理回路から構成される高い耐放射線性、低い γ 線感度、小型・軽量が期待できる単結晶 CVD ダイヤモンド中性子計測システムのプロトタイプ開発を行い、臨界近接監視システムへの適用可能性を検討した。

本論文は全 6 章で構成される。

第 1 章では、単結晶ダイヤモンド放射線検出器の特長およびダイヤモンドの諸特性について説明した。また、単結晶ダイヤモンド作製に使用したマイクロ波プラズマ CVD 法およびダイレクトウエハー法、単結晶ダイヤモンド放射線検出器の作製手法、動作原理、評価手法について説明した。最後に、単結晶 CVD ダイヤモンド放射線検出器応用における福島第一原子力発電所廃炉事業用中性子計測システムのプロトタイプ開発の背景について述べた。

第 2 章では、マイクロ波プラズマ CVD 法による単結晶ダイヤモンド成長における酸素添加が、結晶表面形態および電荷キャリア輸送特性に与える影響を評価した。高温高压 (HPHT) 法で合成された IIa 型単結晶ダイヤモンド基板の (001) 面上に、メタン濃度 1% を固定し、酸素濃度 0~0.8% で単結晶ダイヤモンドを成長させた。酸素濃度の増加に伴い、逆ピラミッド状のピットが形成された。カソードルミネッセンススペクトルにおける自由励起子再結合発光強度は、酸素濃度 0.5% で最大となった。酸素濃度 0.5% および 0.8% の試料は、優れた電荷収集効率とエネルギー分解能を示した。一方で移動度-寿命 ($\mu\tau$) 積は、 $(7.1 \pm 1.7) \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{V}$ にとどまり、これはメタン濃度 0.2% かつ酸素無添加の試料の約 1/4 であった。

第 3 章では、福島第一原子力発電所の廃炉作業に不可欠な臨界近接監視システム向けダイヤモン

ド検出器素子の開発について述べる。このシステムは、搭載重量の制約から最小限の遮へいしか用いられない状態で、1 kGy/h の線量率に達する γ 線に耐える必要がある。試作ダイヤモンド検出器に対する γ 線の影響を評価し、イオンビームエッチングによるダイヤモンド膜のリフトオフ分離面除去と p+ ダイヤモンド層の追加により、 γ 線の影響を効果的に低減できることを確認した。また、 2.53 mm^2 の感度領域を持つダイヤモンド検出器と、 $180\text{ }\mu\text{m}$ 厚の ${}^6\text{LiF}$ 中性子-荷電粒子コンバータを組み合わせた試作ダイヤモンド検出器を用いて、しきい値エネルギーを 1 MeV に設定した場合、 ${}^{252}\text{Cf}$ 線源に対して $3.0 \times 10^{-4}\text{ cps/nv}$ の中性子検出効率が得られた。また、耐放射線性フロントエンド集積回路とダイヤモンド検出器の組み合わせにより、 ${}^{60}\text{Co}$ 線源を用いて最大 600 Gy/h の線量率で測定した結果、0.915 MeV における γ 線ノイズは 0.001 cps と推定された。さらに、1 kGy/h の線量率では γ 線ノイズは 0.0004 cps となり、ファイマン α 法で要求される $S/N \geq 1$ を満たしていた。これより、将来的に 1,024 個のダイヤモンド検出器を使用すれば、臨界接近監視システムの中性子検出効率を 1.9 cps/nv まで高められる可能性が示された。

第 4 章では、単結晶ダイヤモンド検出素子と中性子-荷電粒子コンバータから構成される中性子検出器、および高エネルギー加速器実験で開発されてきた耐放射線性シリコン半導体集積デバイスを用いた信号処理回路から構成される単結晶ダイヤモンド中性子計測システムのプロトタイプ開発を行った。本プロトタイプを用いた中性子計測性能の実証試験により、以下の成果を得た。日本原子力研究開発機構での感度評価試験では、ダイヤモンド検出素子 1ch(検出面積 4.0 mm^2) あたりの中性子感度として $4.1 \times 10^{-4}\text{ cps/nv}$ を取得した。また、近畿大学原子炉における中性子追従試験では、制御棒操作による反応度変化に伴う中性子束変動に対し、計測された計数率が適切に追従することを確認した。さらに、測定データを基に炉の反応度(ドル単位)を逆推定可能であることが示され、燃料デブリ取り出し作業における安全管理用途への適用可能性が得られた。加えて、九州大学の γ 線照射施設において γ 線照射試験を実施した結果、55 Gy/h 程度の γ 線線量率下においても中性子信号が取得可能であり、一定の γ 線照射耐性を有することを確認した。以上のように臨界接近監視システムへの適用可能性を検討した結果を報告した。

第 5 章では、単結晶ダイヤモンドのさらなる応用例として硝酸中に存在する放射性物質から放出される α 線を、従来原子燃料再処理施設向けに主に使用されてきた多結晶ダイヤモンドやその他の材料の代わりに、単結晶 CVD ダイヤモンド放射線検出器を用いて測定し、詳細なエネルギー情報を取得することを試みた。10 mm 四方の単結晶 CVD ダイヤモンド基板を用い、ダイレクトウエハー法により検出器用単結晶 CVD ダイヤモンドを成長させた。成長させた $66\text{ }\mu\text{m}$ 厚の自立型単結晶 CVD ダイヤモンド膜の両面には、蒸着法により Ti/Au オーミック接触アノード電極および Pt ショットキー接触カソード電極を形成した。作製した検出器の 5.486 MeV α 線に対する電荷収集効率は正孔と電子の両方で 99.1% であり、エネルギー分解能はそれぞれ 0.55% と 0.54% であった。Pt カソード電極の代わりに 5 mol/L の硝酸を用い、硝酸中に拡散させた酸化トリウムからの α 線スペクトルを測定した。前置増幅器出力信号の立ち上がり時間は約 30 ns であり、高いエネルギー分解能により、従来の多結晶ダイヤモンド検出器を用いた場合よりも詳細なエネルギー構造を反映したスペクトルを得ることができた。さらに、72 時間にわたる連続測定により、 γ 線の影響は小さいことも確認された。

第 6 章では、研究全体の結論と今後の展望について述べた。