

⑥

高線量環境に対応する放射線検出器の開発 ～福島第一原発の廃炉作業にむけて～

大学大学院工学研究科

M1 川谷 晋太郎

福島第一原発（1F）の廃炉作業を円滑に進めるには、炉内の高線量環境での線量率測定が必要で、従来の放射線検出器は正常に動作しない。例えば、1F1号機のペDESTAL内部でさえ1 Sv/h 以上の高線量率場となり、放射線計測は難しくなっている。特に、半導体素子を使った機器は、放射線に弱く、対策が必要となる。大阪大学の研究グループにおいても、いくつかの耐放射線性を有する測定システムの研究開発が進められており、本発表では、耐放射線性を有する放射線検出器を中心に報告する。

高線量環境に対応する放射線検出器の開発

～福島第一原発の廃炉作業にむけて～

大阪大学大学院 工学研究科

大阪大学東京電力福島第一原発事故調査チーム（1F-2050）

川谷 晋太郎

1. はじめに

大阪大学と福井工業大学の10研究室がひとつのユニットになった大阪大学東京電力福島第一原発事故調査チーム(1F-2050)[1]があり、そのチームでは福島第一原発事故の解析と廃炉に向けた研究、技術開発が行われている。この発表では、その1F-2050の研究活動のひとつである耐放射線性を有する放射線検出器の開発を中心に紹介する。

2. 半導体素子の耐放射線性について

福島第一原子力発電所の廃炉作業において、耐放射線性を有する機器の開発が重要となっている。福島第一原子力発電所1号機の燃料デブリを直接観測出来ないペDESTAL近傍でさえ線量率は10 Sv/h 近くあり、ROV(Remotely Operated Vehicle)、放射線検出器、超音波センサーなどの各種センサーの利用が難しくなっている[2]。このように、殆どの機器の放射線損傷は、半導体素子の放射線損傷の起因によるものである。半導体素子を利用せずに廃炉工程を進めることは難しく、半導体素子の放射線照射効果を克服することが廃炉工程の最大の解決策だと言っても過言ではないだろう。例えば、燃料デブリを探索するために、燃料デブリ特有に含まれる放射性核種からのガンマ線を放射線検出器で分析することが提案され、放射線検出においても半導体素子は不可欠である[3]。一般的な放射線検出器は、放射線検出部で構成されている。前置増幅器は、放射線検出信号を増幅、インピーダンス変換して、しかるべき分析装置に信号を伝達させる電子回路である。従って、検出部が耐放射線性を有していたとしても、前置増幅器が放射線に弱ければ、高線量場では使用できないことになる。表1は、トランジスタの耐放射線性についてまとめたもので[4]、構造、電子特性が異なるシリコン半導体トランジスタとして、バイポーラトランジスタ、JFET（接合型電界効果トランジスタ）、MOSFET（金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ）の3種類を比較している。

表1 トランジスタのガンマ線耐放射線性の比較

トランジスタ	バイポーラトランジスタ (NEC:2SC2026)	JFET (NEC:2SK68A)	MOSFET (Toshiba:2SK241)
耐放射線積算線量 (Sv)	～2,600	～600,000	～300

明らかに、JFETがバイポーラトランジスタとMOSFETと比較して耐放射線性が優れていることがわかる。これは、JFETは構造的にバイポーラトランジスタとMOSFETにくらべて、耐放射線性に優れているからである。近年では、製造工程から構造を十分に検討することで、耐放射線性に優れたMOSFETの研究開発も進められており、 10^6 Sv オーダーの耐放射線性を有する

もの[5]、JFET、MOSFETの半導体材料にシリコンカーバイド(SiC)[6]やダイヤモンド半導体[7]を利用した耐放射線性に優れたトランジスタも研究、開発されている。

3. 耐放射線を有する前置増幅器の開発

近年では、耐放射線性を高めるために、耐放射線性に優れた MOSFET の設計や、シリコン半導体の代わりに、シリコンカーバイドやダイヤモンド半導体を用いたトランジスタの耐放射線性について研究が進められている。表1で示されたようにシリコン半導体の JFET の耐放射線性は高く、JFET で構成された電荷前置増幅器[8]は、耐放射線性の向上が期待でき、量産性も高いことが期待される。図1は、JFET で構成される耐放射線性電荷前置増幅器の回路図である。この電荷前置増幅器はリセット機能を有する積分器型[9]であり、高線量場で放射線検出の頻度が非常に高い場合でも動作するように設計されており、1秒間に10万回の検出信号が処理できるように設計されている。この回路設計は、回路シミュレータの LTspice を用いておこなった。

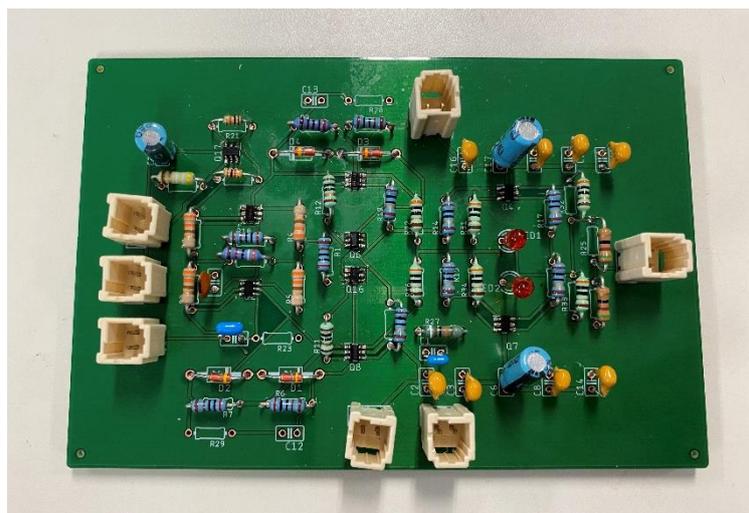
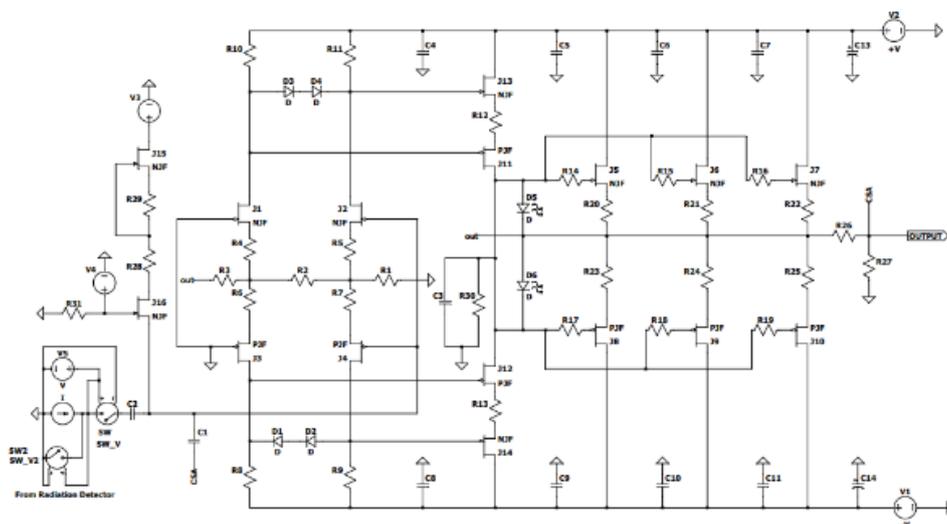


図1 JFET で構成される耐放射線性電荷前置増幅器の回路図と試作器の写真

さらに前置増幅器を構成する個々の JFET のガンマ線影響について調べたひとつとして、図2のコバルト 60 ガンマ線照射前後の $V_{gs}-I_d$ (ドレイン電流とゲートソース間電圧の関係) の変化を

示している。積算線量は、1.2 MSv で、この線量までは V_{gs} - I_d に大きな変化が見られていない。ガンマ線照射は大阪大学産業科学研究所のコバルト 60 ガンマ線照射施設を利用して、照射線量率は 6 kSv/h で、照射時間は 216 時間である。

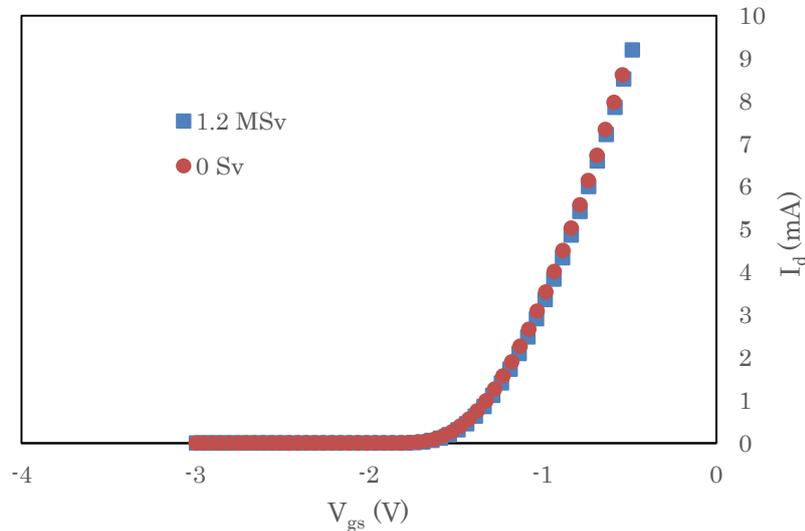


図2 nチャンネルJFETの V_{gs} - I_d 特性の放射線照射による変化 ($V_{ds} = 2.4$ V)

4. まとめ

耐放射線性を有する電荷前置増幅器を設計し、コバルト 60 を用いたガンマ線照射試験等を進めている。本発表では、放射線検出器の他に、大阪大学で進められている耐放射線性を有する 3D レーザースキャナー装置、超音波センサーの開発についても紹介する。

参考文献

- [1] 大阪大学東京電力福島第一原発事故調査チーム
<http://www.1f-2050.eng.osaka-u.ac.jp/> (閲覧日:2024.12.3)
- [2] 原子力規制委員会、第 37 回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会
<https://www.nra.go.jp/data/000427820.pdf>(閲覧日:2024.12.3)
- [3] 原子力規制委員会、第 34 回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会
<https://www.nra.go.jp/data/000414329.pdf>(閲覧日:2024.12.3)
- [4] T. Iida, et al., Journal of Nuclear Science and Technology, 21[8], pp. 634~641 (1984).
- [5] M. Sakaguchi, et al., Study for over 10MGy rad-hard CMOS integrated circuit (2022).
<https://kaken.nii.ac.jp/en/file/KAKENHI-PROJECT-20K14498/20K14498seika.pdf>
(閲覧日:2024.12.17)
- [6] A. Takeyama et al., "Threshold voltage instability and hysteresis in gamma-rays irradiated 4H-SiC junction field effect transistors", J. Appl. Phys., 131, 244503 (2022).
- [7] T. Yamaguchi et al., "Radiation hardened H-diamond MOSFET (RADDFET) operating after 1 MGy irradiation ", Applied Physics Letters 118(16) (021).
- [8] Dimitri Danyuk, audioXpress, October 2017, An All-JFET Amplifier: Exploring Modern JFETs Circuits

https://audioxpress.com/article/an-all-jfet-amplifier-exploring-modern-jfets-circuits_(
覽日:2024.12.3)

[9] C.L. Britton et al., IEEE Transactions on Nuclear Science, NS-31 (1) 455 – 460 (1984).

講演者略歴



川谷 晋太郎 (かわたに しんたろう)

所 属 大阪大学大学院工学研究科 環境エネルギー工学専攻

住 所 〒567-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

連絡先 TEL/FAX : 080-4277-3562 mail:u747191d@ecs.osaka-u.ac.jp

学 職 歴 2024年 大阪大学 工学部 環境・エネルギー工学科卒業

2024年 大阪大学大学院 工学研究科 環境エネルギー工学専攻
博士前期課程 入学

研究・活動 大阪大学と福井工業大学の10研究室がひとつのユニットになった大阪大学
分野など 東京電力福島第一原発事故調査チーム(1F-2050)では、福島第一原発事故の
解析と廃炉に向けた研究、技術開発が行われている。1F-2050の研究活動の
ひとつである「耐放射線性を有する放射線検出器の開発」に取り組んでいる。