

高耐放射線燃料デブリセンサー開発のための要素技術研究

Research on Elemental Technology to Develop Radiation-resistant Sensor
for Fuel Debris

萩原 雅之 ¹⁾	田中 真伸 ¹⁾	坂口 将尊 ¹⁾	濱田 英太郎 ¹⁾
Masayuki HAGIWARA	Manobu TANAKA	Masataka SAKAGUCHI	Eitaro HAMADA
庄子 正剛 ¹⁾	岸下 徹一 ¹⁾	宮原 正也 ¹⁾	
Masayoshi SHOJI	Tetsuichi KISHISHITA	Masaya MIYAHARA	
武山 昭憲 ²⁾	牧野 高紘 ²⁾	大島 武 ²⁾	
Akinori TAKEYAMA	Takahiro MAKINO	Takeshi OHSHIMA	

¹⁾高エネルギー加速器研究機構 ²⁾量研

(概要)

東京電力福島第一原子力発電所の廃炉を加速するためには、燃料デブリの位置を把握し、潜在的なリスクを想定・低減しつつ廃炉工法を決定する必要がある。本研究では、冠水した燃料デブリの分布状況及び臨界性を「その場」で測定・分析することを目的として、マルチフェイズドアレイ・ソナーや表層下部音波探査装置(SBP)とダイヤモンド中性子センサーからなる複合計測技術の開発を分野横断的な体制で実施している。

燃料デブリの存在が示唆されている原子炉格納容器内部は非常に高レベルな γ 線環境であるため、コバルト 60 ガンマ線照射施設を用いて、二つの重要な要素技術(ダイヤモンド中性子センサー用信号処理集積回路と音波探査装置)の γ 線に対するTID効果を調べることを目的とする。信号処理集積回路の技術に関しては、幅広い応用が期待できるため、照射目標を10 MGyとし、素子の動作限界を知ること、耐放射線電子回路開発への新たな知見とする。

キーワード: トランジスタ、高集積回路、ガンマ線照射、中性子センサー

1. 目的

東京電力福島第一原子力発電所(以下1F)の廃炉を加速するためには、まずは燃料デブリの位置を把握して、通常の原子力発電所にはない放射性物質に起因するリスクを、継続的、かつ速やかに下げながら、廃炉工法を決定する必要がある。更に燃料デブリの取り出し時における作業員の安全を確保するためには、廃炉工法の各工程における燃料デブリの臨界性をなるべく正確に評価し、迅速に対策を施すことが重要となる。本研究では、このような1Fの炉内状況の把握、燃料デブリ取出しの早期実現、臨界リスク管理に資するため、原子力分野のみならず他分野の最先端技術を融合させ、これまでの原子力施設での作業環境に比べはるかに高い放射線環境下においても遠隔で動作する画期的な燃料デブリ探査用複合センサーの技術開発を行う。冠水した燃料デブリから放出される自発核分裂中性子に着目して、高 γ 線環境下においても動作するダイヤモンド中性子センサーの研究開発と、マルチフェイズドアレイ・ソナーや表層下部音波探査装置(SBP)による水中探査技術の研究開発を行い、極限放射線環境下での中性子エネルギー分布測定技術に応用する。この二つの重要な要素技術(ダイヤモンド中性子センサー用信号処理集積回路と水中ロボットに搭載する音波探査装置)に関して、高線量 γ 線照射試験を通じて、遠隔制御による廃炉作業を支える耐放射線エレクトロニクス基盤技術の確立への新たな知見とする。

2. 実施方法

トランジスタサイズ(W/L)に着目し、トランジスタ長(L)が60 nm、120 nm、10 μ m、トランジスタ幅(W)が120 nm、360 nm、1 μ mの通常構造のトランジスタおよび耐放射線強化した構造のトランジスタの照射用サンプルを製作し、ガンマ線照射前後においてトランジスタの静特性の変化を調査した。

照射試験は、量研機構高崎量子応用研究所にあるガンマ線照射施設(コバルト第1棟2セル)にて行った。積算照射線量が6 MGyになるまで⁶⁰Coのガンマ線をトランジスタサンプルに照射し、照射中はトラ

ンジスタへのダメージが最も大きい条件(ドレイン-ソース間電圧 V_{ds} = ゲート-ソース間電圧 V_{gs} = ドレイン間電圧 V_{dd} (1.2V)) にして室温で通電を維持した。

次に、ガンマ線照射によって劣化した Si MOS トランジスタの電流特性を、電気的な操作によって回復する技術の検討を開始した。NMOS, PMOS のサンプルをそれぞれ 4 種類作成し、 W は $2\ \mu\text{m}$ とし、 L は $60\ \text{nm}$ と $120\ \text{nm}$ の 2 種類、Finger 数は 8、32 の 2 種類とした。電圧-電流特性測定にあたってはダイオード接続とし、ゲート-ソース間電圧 V_{gs} (= ドレイン-ソース間電圧 V_{ds})、ドレイン電流 I_d を取得した。ガンマ線照射前に電流特性を取得した後、 ^{60}Co のガンマ線を $\sim 7\ \text{kGy/h}$ の照射線量率 (SiO_2 換算) で、積算照射線量が $2\ \text{MGy}$ になるまで照射した。照射は室温で行い、照射中は $V_{gs} = V_{ds} = 1.0\ \text{V}$ とし、通電状態を維持した。照射後、トランジスタの電流特性の回復操作を実施した。回復操作前後において、トランジスタの電流特性を測定し、その効果を確認した。

また、CMOS 半導体プロセスを使用してアナログデジタル変換集積回路 2 種類および高速増幅回路等を開発し、ガンマ線照射後の回路動作を確認した。照射は各回路を搭載した基板ごとに行い、電源および回路の連続動作に必要なクロック信号は、貫通孔を通じて照射セル外部より与えた。

3. 結果及び考察、今後の展開等

まずトランジスタサイズ(W/L)に対する依存性をまとめる。 L の大きいものに対する照射影響は $5\ \text{MGy}$ では観測できず、 $5\ \text{MGy}$ までの積算線量において良好な動作を示しているため回路設計においては特殊なトランジスタ形状を使用しなくてもよいことが明確になった。一方、 L が短いものについては $1\ \text{MGy}$ 以上の積算線量において製造プロセスによるトランジスタ性能のばらつき範囲から逸脱するものが確認されたが、 $1\ \text{MGy}$ 以下ではプロセスによる性能のばらつき範囲内に収まっており問題なく使用できることが分かった。しきい値の異なるトランジスタについても同様な傾向がみられ、定性的には従来のガンマ線照射によるしきい値変動モデルで理解できる範囲である。

積算照射線量が $1\ \text{MGy}$ を超えると、トランジスタしきい値変動以外の効果 (I_{ds} - V_{gs} 曲線のトランジスタが動作している領域における傾きが小さくなる現象) が起こりトランジスタのコンダクタンスが減少することが確認された。この効果は W 依存性があるため、ガンマ線照射によって生じるゲート周りのトラップ電荷によって W の実効値が減少することにより引き起こされていると推測される。この現象に関しては、ゲート付近のトランジスタ構造に依存するため今後の詳細な評価が必要となる。

耐放射線性能を強化した構造を持つトランジスタについては、 $5\ \text{MGy}$ まで積算線量を照射した L の短いトランジスタにおいても良好な静特性を示している。この傾向はしきい値の異なるトランジスタについても同様であり、前述したようにトランジスタの形状を変化させた結果、ガンマ線照射によって引き起こされる実効的な W の変化を抑えられたためと推測できる。

次に電気的な操作によってトランジスタ性能を回復する技術の検討に関して述べる。どのサンプルでも照射後は電流の低下が確認された。NMOS トランジスタの放射線耐性はサイズ依存性が強い傾向があり、 L 長が短く、かつ W が狭いものの劣化が激しい。特にゲートサイズが最小のサンプルの劣化が最も激しく ON 電流の減少率は 34% 程度となった。一方で、ゲートサイズ最大のサンプルは 3.5% 程度の劣化に抑えられていることが確認された。PMOS トランジスタについては、サイズ依存性があまり大きくなく、ON 電流の減少率は $7\sim 10\%$ 程度に収まっている。NMOS の劣化が大きくなった理由はインターフェーストラップの影響によるものと推察される。次に、劣化が激しかった最小サイズの NMOS トランジスタに対して、回復技術を適用した。ゲート、ソース、ドレイン電圧は $0\ \text{V}$ 、バルク電圧は $2.2\ \text{V}$ とし、 40 秒間電圧を印加したところ、ON 電流が -34.4% から $+5\%$ に大幅に回復した。また、電流のスロープも回復しており、照射試験前の特性に近い特性が得られ、十分な効果が確認された。

CMOS 半導体プロセスを使用した集積回路の照射試験に関しては、逐次比較型 $10\ \text{MHz}$ アナログデジタルコンバータ(SARADC)の結果を例として示す。 $1\ \text{MGy}$ ガンマ線照射前後で入出力用回路の電源の消費電流が $70\ \mu\text{A}$ 増加したが、それ以外に他の回路ブロックの消費電力に変化はなかった。また、照射後有効ビット数等の詳細評価を行ったが、有効ビット数は 9.06 ビットで十分 $10\ \text{MHz}$ $10\ \text{bit}$ 分解能の ADC として使用できる性能を示しており、 $1\ \text{MGy}$ 照射後でも十分な性能を保っていることが実証できた。

以上をまとめると、トランジスタの耐放射線耐性については、酸化膜を薄くすることで $1\ \text{MGy}$ まで十分に動作可能なトランジスタを商用プロセスで製造可能なことが本実証実験により示された。更にトランジスタ構造を改良することにより、より高い放射線耐性を持ったトランジスタが製造できることも実証された。また、トランジスタ回復動作に関する研究も行い、その効果を確認した。サンプル数と照射時間の制限により $5\ \text{MGy}$ までの結果しか得られなかったが、今後サンプル数や積算照射時間を増やし $10\ \text{MGy}$ までの特性変化を詳細に調べトランジスタモデル構築やアニーリング効果の検証を継続することは、高耐放射線環境下でのモニタリング、制御において非常に重要な知見となると考えられる。