

熱中性子によるFPGAのSingle Event Upset

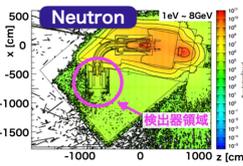
大阪大学理学研究科 青木研究室 M1 山田千尋

1.はじめに

近年の加速器技術の発展による粒子ビームの大強度化に伴って、実験環境の放射線量はより深刻な問題となっている。放射線によるエレクトロニクスへの影響として、ハードエラーとソフトエラーが考えられる。またこれらの損傷を引き起こす粒子は主に中性子とガンマ線である。本研究では、中性子の中でも低速な熱中性子に着目し、高エネルギー実験で用いられるFPGAを使用して熱中性子によるソフトエラーを調査した。

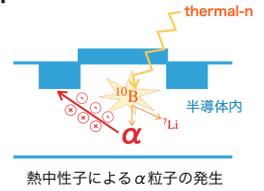
高エネルギー実験の中性子環境

J-PARCで準備中のミューオン稀崩壊を探索するCOMET実験Phase-Iでは、約150日間の測定で検出器領域に照射される中性子量は約 $10^{12} n_{eq}/cm^2$ と見積もられている[1]。また、KEKのSuperKEKBを使用するBelle II実験は、B中間子やCharmハドロン、 τ レプトンに関する大統計データを用いて新物理探索を行うが、10年間の測定で同程度の中性子照射量が予想される[2]。



中性子によるSingle Event Upset (SEU)

SEUは電子機器に起こるソフトエラーの一種である。素子内に放射線が入射すると、内部に荷電粒子が生成されて論理が反転する。これをSEUと呼ぶ。高速中性子は半導体原子核との相互作用で荷電粒子を生成するため、



これまでのSEUの発生率などが広く調査されてきた[3]。一方で、近年熱中性子によるSEUの可能性についても議論が増えている[4][5]。熱中性子は素子に含まれるホウ素 ^{10}B に捕獲されて α 粒子を放出する($^{10}B + n \rightarrow ^7Li + ^4He$)。したがって、熱中性子もSEUを起こす可能性はあり、本研究では、実際に素粒子実験で用いる、書き換え可能な集積回路FPGAで、熱中性子によるSEUが発生するかを調査した。

2. 熱中性子によるSEUの測定



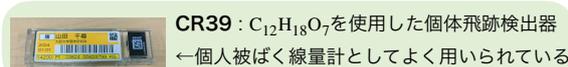
3 MeV 重陽子ビーム
 $^9Be + d(3MeV) \rightarrow ^{10}B + n$
中性子エネルギーピーク: 2 MeV
中性子Flux*: $(4.9 \pm 1.5) \times 10^6 n_{eq}/cm^2/sec$
(*Beから10 cm, ビーム1 μA あたり)

@神戸大学タンDEM加速器

<使用FPGA>AMD社製 Artix-7 (28-nm CMOS プロセス)

<セットアップ>熱中性子を生成するため、ポリエチレン (PE) ブロックをビーム軸周辺に配置

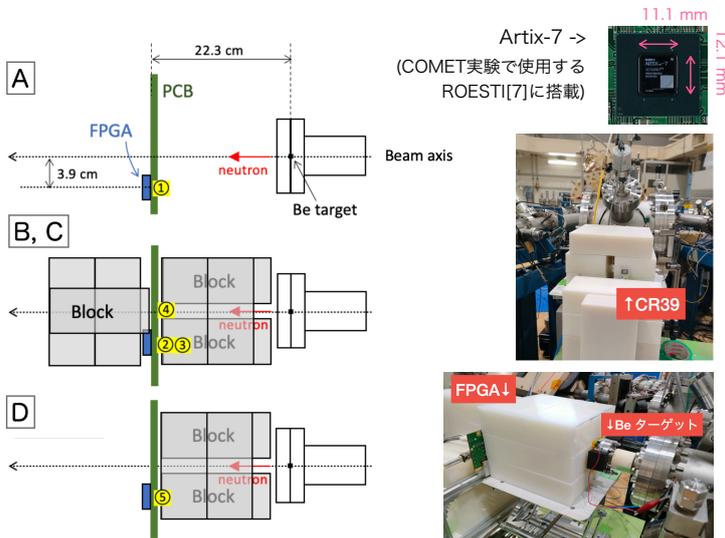
- A: ブロック無し (リファレンス) ①
- B: ホウ素入りPEブロック (高速、熱中性子遮蔽) ②
- C: PEブロック (高速中性子遮蔽、熱中性子生成) ③ ④
- D: FPGA後方のブロック無し (反射由来の熱中性子量の確認) ⑤



<測定>

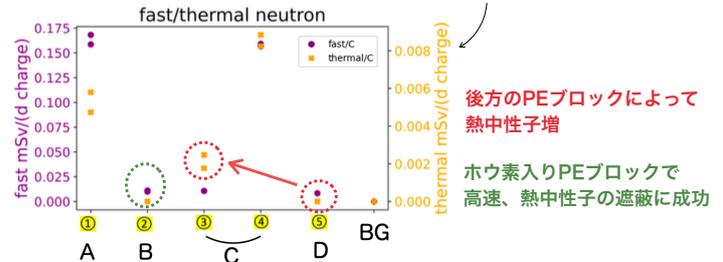
- (1) CR39を使って各セットアップ ② で高速中性子量と熱中性子量を測定
- (2) AMD社が提供するSoft Error Mitigation (SEM) IPコア[6]を使用しSEUを検知、回数を測定

・フランジに当たった重陽子ビームの電荷を測定し、中性子照射量を評価



3. 結果

<CR39の結果>



<各セットアップのSEU数>

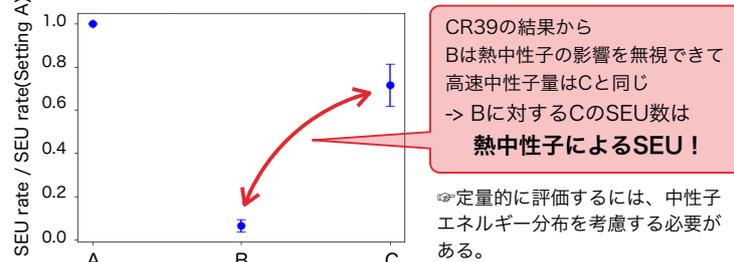
照射される中性子量は重陽子ビームの電荷に比例するため、ビーム電荷に対するSEU比で比較↓

Setup	SEU count	deuteron charge[C]	SEU / (d charge)
A	113	4.9×10^9	2.3×10^{-8}
B	6	4.0×10^9	1.5×10^{-9}
C	104	6.2×10^9	1.7×10^{-8}



セットアップ Aの結果を基準として、ビーム電荷の不定性をキャンセル

SEU rate



4. まとめと今後の展望

高エネルギー実験でよく用いられるFPGAに熱中性子を照射し、SEUの発生率について調査した。これまでは高速中性子の影響のみを考慮する場合が多かったが、実際には熱中性子によってもSEUが発生していることがわかった。今後はシミュレーションによって、より詳細な熱中性子量の見積もりを行うこと、FPGAを元素分析し、ホウ素の熱中性子捕獲反応が起こっていることを調査する予定である。

参考文献

- [1] G. Adamov, *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. 033C01, (2020)
- [2] Abe T. *et al.*, arXiv:1011.0352 (2010)
- [3] Y. Nakazawa, *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A, **936**, 351-352, (2019)
- [4] H. Iwashita, *et al.*, IEEE Trans Nucl Sci., **70**, 216-221, (2023)
- [5] M. Cecchetto, *et al.*, IEEE Trans Nucl Sci., **67**, 1412-1420, (2020)
- [6] AMD PG036 - Soft Error Mitigation Controller Product Guide
- [7] K.Ueno, *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A , **936**, 298-299, (2019)