

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 22 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2015

課題番号：23740220

研究課題名(和文)耐強放射線・耐強磁場性能を持った広帯域データ通信エレクトロニクスの研究

研究課題名(英文) Research of broadband data link electronics with tolerance to strong radiation and magnetic environment

研究代表者

樋口 岳雄 (Higuchi, Takeo)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任准教授

研究者番号：40353370

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：高エネルギー加速器実験の強放射線・強磁場という特殊な環境で動作可能なデータ収集系について、とくにその部品を研究した。

Belle II実験を例に、10年分のバックグラウンド線や中性子線を複数銘柄のFPGA・光通信用トランシーバー・レギュレーター等に照射して、各部品の一時的エラー頻度および恒久的破壊耐性について定量的に評価して論文誌に公表した。また、1Tほどの強磁場中に置いたデータ収集系についても異常は起きないことを確認した。また、検出器本体の放射線耐性研究も行い、崩壊点検出器ではその部品が十分な放射線耐性をもつことや、検出器自体のセンサー位置が放射線によってほぼ影響を受けないことも確認した。

研究成果の概要(英文)：We searched for electronics parts that can be operable in a severe radiation and magnetic environment of a data acquisition electronics for high energy physics experiments.

We took Belle II experiment as the reference of our study. We bombarded background gamma rays and neutrons of the 10-year equivalent Belle II operation to several products of FPGAs, optical transceivers, regulators, etc. We identified some robust parts quantitatively for the long Belle II operation and published the results in a journal. We also identified a standard-design electronics will operate normally in a strong (~1T) magnetic field.

We extended our research to a radiation-tolerant detector rather than the electronics. We irradiated 50-year equivalent gamma rays to a vertex detector. We found sensor position distortion in the detector from the irradiation was negligible. We also found the mechanical strength of a thermal insulator and the peel strength of standard glue were not degraded by it.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：放射線耐性 データ収集系 ビーム試験実験

1. 研究開始当初の背景

本研究の開始時にはすでに素粒子標準理論は(後に発見されるヒッグス粒子を除いても)完成されたものと考えられており、素粒子物理学の関心は素粒子標準理論を超える新しい素粒子理論の探究へと向いていた。そしてこの状況は現在でも変わっていない。ところで、我々の暮らす宇宙は低温極限の宇宙であり、素粒子現象は素粒子標準理論に支配されていて新しい素粒子理論は非常にわずかな関与しかしない。そのため、新しい素粒子理論の追究には高いエネルギー状態で大量に生成した素粒子反応データをかき集めてその内容を調べる必要がある。高エネルギー加速器実験の分野では、より大量のデータを提供可能な大強度加速器を用いて実験することによりこの状況に対応している。本研究の開始当初は CERN では LHC という高い衝突エネルギーを持った加速器により ATLAS/CMS 実験が稼動を始めたばかりであったし、また KEK でも SuperKEKB という高い衝突頻度の加速器による Belle II 実験が始まろうとしていた。

2. 研究の目的

次世代の高エネルギー加速器実験では粒子検出器からの膨大な量のデータの処理が課題のひとつとなる。本研究の開始当初から、何本もの信号ケーブルと信号増幅回路を要する「アナログ送信方式」は、検出器のデータを送信する上ではもはや不適切とみなされていた。そこで検出器側の早い段階で信号をデジタル化し、シリアル通信によって広い帯域を確保しつつ光ファイバー等の高速通信リンクを用いてデータを送信する「デジタル送信方式」が当時一般的になりつつあった。

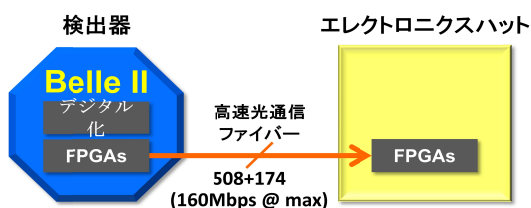


図 1. 検出器からのデータ送信。

検出器側で信号をデジタル化・シリアル化し、光通信によってデータを送信するには、検出器の直近(よって加速器直近)にデータ読み出しエレクトロニクスを配置するということである(図 1)。したがってこのエレクトロニクスには加速器直近の特殊条件である「強放射線 強磁場」への十分な耐性を持つ必要があった。しかし、本研究の開始当初は、強放射線耐性・強磁場耐性を持った読み出しエレクトロニクスというものが自明ではなかった。この課題に答を与

えることを研究の目的として本研究を開始した。

3. 研究の方法

前述のようなエレクトロニクスには、一般に、プログラマブル論理集積回路(FPGA)や光ファイバー用光トランシーバーなどの部品が搭載されており、これらはいずれも放射線耐性が高くないと考えられている。たとえば FPGA は、線からの二次粒子や中性子線が内部のレジスタを書き変えてしまうことによって、機能不全に陥ってしまうことはよく知られていた。また、光トランシーバーも内部に集積回路を搭載しており放射線耐性が高くないことが予想されていた。本研究では、Belle II 実験の環境を参照値とし、それと同等の試験環境に実際に読み出しエレクトロニクスを設置してその性能劣化を評価することで部品の環境耐性を定量的に議論することとした。なお、Belle II 実験では検出器内部に読み出しエレクトロニクスが設置され、その予想放射線量は 10 年間の実験期間で線が最大約 1kGy、中性子線が最大約 10^{12} 個/cm² である。また Belle II 検出器内部の磁場は 1.5T である。これらに加えて、読み出しエレクトロニクスがデータを読み出すべき検出器本体の部品の放射線耐性についても研究した。

4. 研究成果

まずデータ通信エレクトロニクスの中性子線照射実験について報告する。まず我々は東京大学の実験原子炉 ($E_{\text{peak}}=0.3\text{MeV}$) でこのエレクトロニクス(図 2)に単純に中性子線を照射した。なおこのエレクトロニクスは FPGA については Xilinx 社製の XC5VLX30T を、光トランシーバーについては AVAGO 社製の AFBR-57R5APZ または FINISAR 社製の FTLF8524P2BNV を搭載している。その結果、Belle II 実験の 12 年分に相当する積算中性子線量では部品に恒久的な故障は見られなかった。また神戸大学のタンデム加速器 ($Q=4.36\text{MeV}$) でも同様の実験を行ったが、FPGA は 4.8 年分、光トランシーバーは 2.3 年分までの照射量ではやはり恒久的な故障は見られなかった。

図 2. データ通信エレクトロニクスの写真。



中性子線は FPGA 内の論理を書きかえるため、ビットエラーが発生する。FPGA 中のコ

ンフィギュレーション領域やブロック RAM 領域が 1 ビット書きかえられた場合は SEU と定義され、これは FPGA の自己修復機能で復旧できる。他方、コンフィギュレーション領域やブロック RAM 領域で 2 ビット以上書きかえられた場合はそれぞれ URE、MBU と定義され、自己修復は不能となって FPGA の再起動が必要となる。我々は東大実験原子炉の中性子線を使用して中性子線による FPGA のデータ書き換えの影響を評価した。放射線境内と環境外の 2 か所にデータ通信エレクトロニクスを設置し、両者を光ファイバーで接続して互いに通信ができるようにした。そして双方のエレクトロニクスにはあらかじめ決まったパターンのデータをやりとりするように設定し、放射線被曝側が誤ったデータを出力した時点で SEU、URE、MBU が発生したと判断した。なお、これまでの我々自身の研究結果から、SEU の発生頻度と中性子線の入射角度に関係があると考えられたため、中性子線の入射角度を 0°、90°、180° の 3 通りに代えて SEU の発生頻度を調べた。表 1. に結果を示す。

表 1. 中性子線照射実験における FPGA の SEU、MBU、URE の発生頻度。

入射角度	コンフィギュレーション領域	
	SEU	URE
0°	3.90/分	1.73/時
90°	5.40/分	6.11/時
180°	9.49/分	2.68/時
入射角度	ブロック RAM 領域	
	SEU	MBU
0°	1.36/分	4.60/時
90°	1.43/分	6.54/時
180°	1.70/分	13.06/時

この FPGA では入射角度が 0° のときに SEU などの発生頻度が最小となりコンフィギュレーション領域とブロック RAM 領域を合わせて 5.26/分の SEU が発生している。この環境では 90 分で Belle II 実験の 10 年分の積算中性子線量となるため、この FPGA は 10 年で 473 回程程度の SEU を起こす。Belle II 実験の飛跡検出器では Xilinx 社製の XC5VLX155T を搭載したエレクトロニクスを 302 台使用するが、FPGA の論理サイズを考慮するとこれは XC5VLX30T の 1560 個分に相当する。以上を計算することによって、我々は Belle II 実験の飛跡検出器ではおおむね 4 分に 1 回の SEU が発生すると結論づけた。また同様の議論により、再起動を要する URE は約 11 時間に 1 回発生すると結論付けた。これは Belle II 実験のデータ収集系では処理可能な頻度であると考えられる。我々は、ここで併せて中性子線の入射角度と SEU の発生頻度についても論じた。XC5VLX30T の SEU 角度依存性 R^{15} を $R^{15} = [\text{SEU-rate}]_{180^\circ} / [\text{SEU-rate}]_0$ で定義する。このとき、コンフィギュレ-

ション領域とブロック RAM 領域のそれぞれの R^{15} は $R^{15, \text{config}} = 2.43 \pm 0.07$ 、 $R^{15, \text{RAM}} = 1.25 \pm 0.09$ であり、両者の平均は $R^{15} = 2.13 \pm 0.06$ となって統計的に 1 から有意に離れている。我々は同様の実験を ALTERA 社製の FPGA である Spartan-6 に対しても行い、 $[R^{16, \text{config}}]^{-1} = 1.37 \pm 0.30$ を得た。これらは XC5VLX30T と Spartan-6 で SEU 角度依存性が異なっていることを示しており、非常に深刻な放射線環境ではこの点も考慮して読み出しエレクトロニクスの配置を検討する必要があることがわかった。なお、この SEU 角度依存性の違いは FPGA パッケージ内でのダイオードの向きの違いに由来している可能性がある。

続いてデータ通信エレクトロニクスの ^{60}Co の線照射実験について報告する。東京工業大学の線実験施設を使用した以外は実験のセットアップは中性子線の場合と同様である。その結果、FPGA については Belle II 実験の 100 年分に相当する積算線量でも正常に動作することが判明した。他方、光トランシーバーについてはいずれも 4 年分程度しか放射線耐性がないことも判明した。そこで我々は表 2. に示すバリエーションの光トランシーバーにも放射線を照射し、Belle II 実験に適用可能な光トランシーバーの調査を行った。

表 2. 放射線耐性を評価した光トランシーバー。

型名	製造会社	通信速度
FTLF8519P2BNL	FINISAR	2.125Gbps
AFBR-57M5APZ	AVAGO	2.125Gbps
AFBR-57J5APZ	AVAGO	3.072Gbps
AFBR-57R5AEZ	AVAGO	4.25Gbps
AFBR-57D7APZ	AVAGO	8.5Gbps

この実験では放射線照射中 (270Gy/h) は光トランシーバーには +3V の電力を供給するだけとしてデータ通信をさせず、60 分照射して電源切断のサイクルを可能な限り繰り返した。その結果、AFBR-57D7APZ 以外は $270\text{kGy} < R < 540\text{kGy}$ の範囲で故障したが、AFBR-57D7APZ だけはそれ以上の積算線量でも動作することが判明した。ついで我々は AFBR-57D7APZ にデータ通信をさせながら故障するまで同様のサイクルで放射線を照射しつづけた。その結果、AFBR-57D7APZ はほぼ 1kGy までの積算量に耐えられることが判明した。DC-DC コンバーターも線被曝に弱いと考えられたが、我々のエレクトロニクスに使用している部品 (Linear Technology 社製 LTC3026、LTC1963、LTC1761) は Belle II 実験の 26 年分の積算線線量でも故障しなかった。

強磁場耐性に関する実験については、KEK

の大型電磁石(1.6T)中にデータ通信エレクトロニクスを設置して実験したが、磁場の影響は見られなかった。なお Belle II 実験の電磁石強度は 1.5T である。

これまでの研究が非常に順調であったため、その発展形として、データ通信エレクトロニクスがそのデータを読み出す検出器自身についても我々は放射線耐性を調査した。Belle II 実験では荷電粒子の通過位置を精密に決定するためシリコンセンサーを搭載した粒子検出器(SVD)を使用する。そこで、SVDの構成部品に最大129kGyの線を照射し、部品への影響を調べた。まず、接着剤(Araldite 2011)については、線照射によって剥離強度が25%ほど減少したが、検出器の構造上深刻な問題となるものではなかった。PEEK材、断熱材(AIREX)、およびガラスエポキシ材については、線照射によって機械的強度に有意な変化はみられなかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計8件)

T. Higuchi, M. Nakao, and E. Nakao, "Radiation tolerance of readout electronics for Belle II," *Journal of Instrumentation* **7**, C0202 (2011).

K. Hara *et al.*, "Evidence for B^0 → $\pi^0 \pi^0$ bar with a hadronic tagging method using the full data sample of Belle," *Phys. Rev. Lett.* **110**, 131801-1 (2013).

J. Dalseno *et al.*, "Measurement of the CP violation parameters in $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ decays," *Phys. Rev. D* **88**, 092003-1 (2013).

M. Friedl *et al.*, "First results of the Belle II silicon vertex detector," *Journal of Instrumentation* **9**, C12005 (2014).

K.H. Kang *et al.*, "Study of gluing and wire bonding for the Belle II silicon vertex detector," *Nucl. Instrum. Methods A* **763**, 255 (2014).

K. Adamczyk *et al.*, "The silicon vertex detector of the Belle II experiment," *Nucl. Instrum. Methods A* **824**, 406 (2016).

K. Adamczyk *et al.*, "Belle-II VXD

radiation monitoring and beam abort with sCVD diamond sensors," *Nucl. Instrum. Methods A* **824**, 480 (2016).

K. Adamczyk *et al.*, "Belle II SVD ladder assembly procedure and electrical Qualification," *Nucl. Instrum. Methods A* **824**, 381 (2016).

[学会発表](計5件)

T. Higuchi, "Radiation tolerance of readout electronics for Belle II," TWEPP2011, Austria, Vienna, 2011/09/28.

T. Higuchi, M. Nakao, R. Itoh, S. Y. Suzuki, and E. Nakano, "Study of radiation damage in front-end electronics components," IEEE Real-Time Conference 2012, NY, USA, 2012/06/14.

T. Higuchi, "Current status of CP violation measurements," Physics at LHC and beyond (招待講演), Quy Nhon, Vietnam, 2014/08/13.

樋口岳雄・他、「Belle II 実験におけるピクセル検出器読み出しシステムの設計と開発状況」、日本物理学会 2012 年年次大会、神戸市・日本、2012/03/25。

樋口岳雄・中尾幹彦、「Belle II 実験のための高い放射線耐性を持った DAQ エレクトロニクス」、日本物理学会 2012 年秋季大会、京都市・日本、2012/09/11。

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

ホームページ等

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

樋口 岳雄 (HIGUCHI, Takeo)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・

特任准教授

研究者番号：40353370

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

中尾 幹彦 (NAKAO, Mikihiro)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子
核研究所・准教授

研究者番号：80290857