

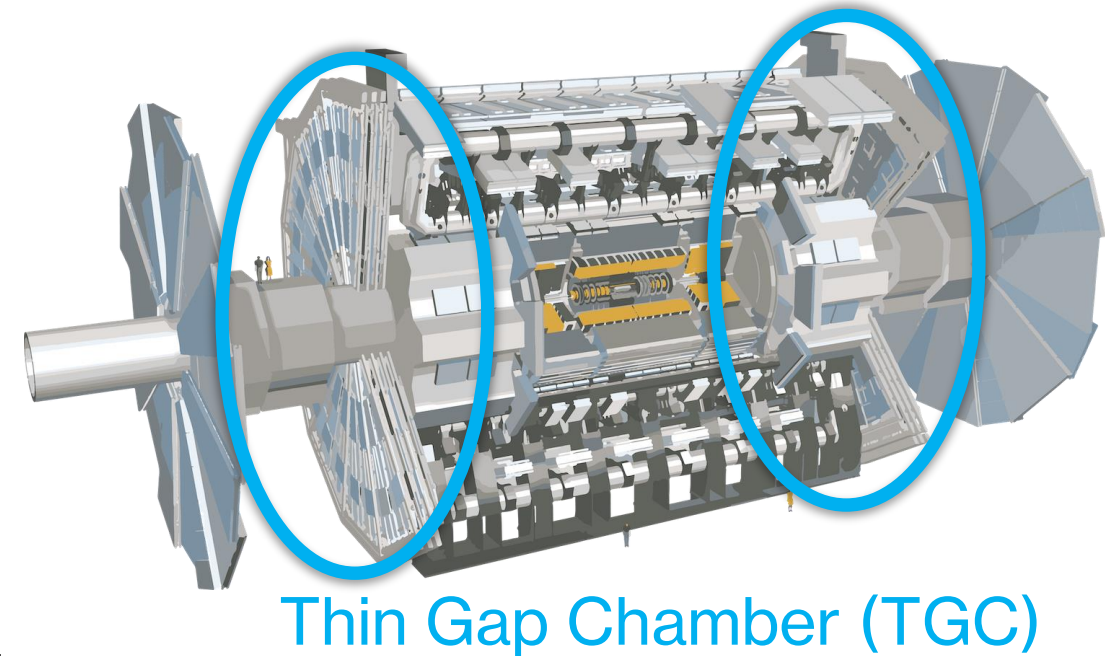
HL-LHC ATLAS 実験ミュオン粒子検出器 読み出し回路のための電気回路素子 放射線耐性試験の最新結果まとめ

計測システム研究会
2023年11月20日
大隅悠矢 (名古屋大学)



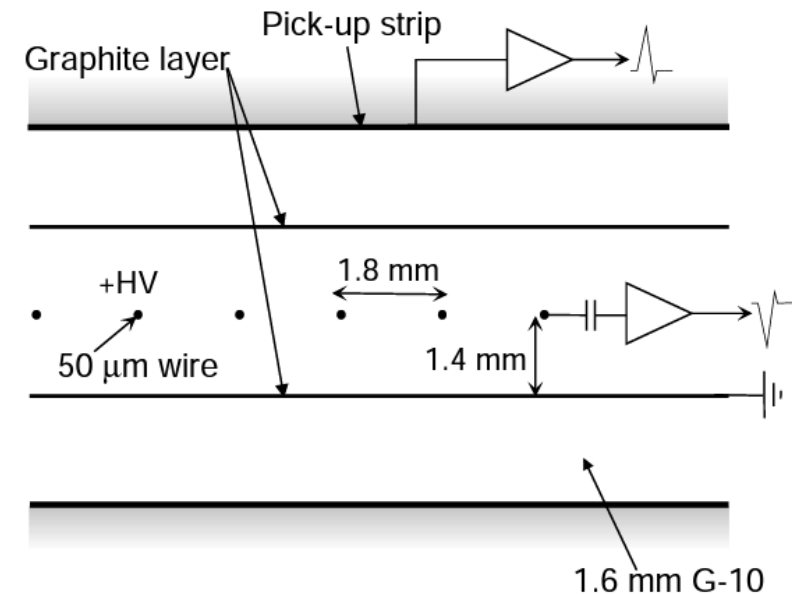
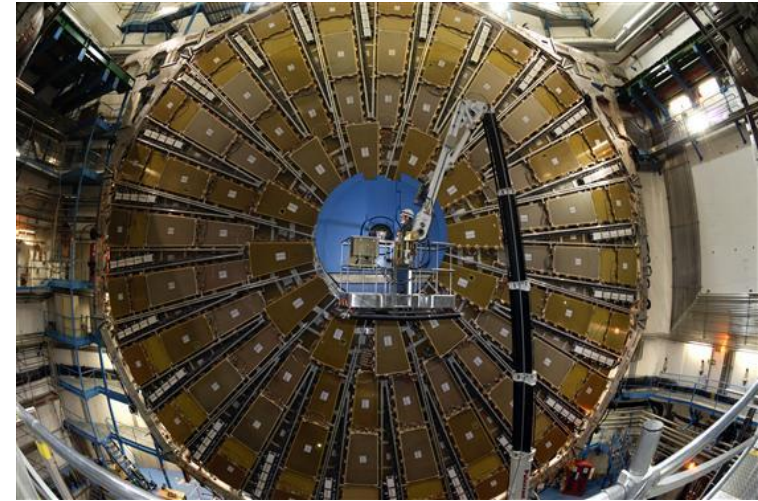
はじめに

- ATLAS ミューオン検出器
 - MDT: 精密飛跡再構成
 - RPC:
トリガー、精密飛跡再構成補助
 - TGC:
トリガー、精密飛跡再構成補助
 - NSW:
トリガー補助、精密飛跡再構成
- 2029 年開始予定の HL-LHC
に向けてトリガー・読み出し
回路のアップグレードが必須

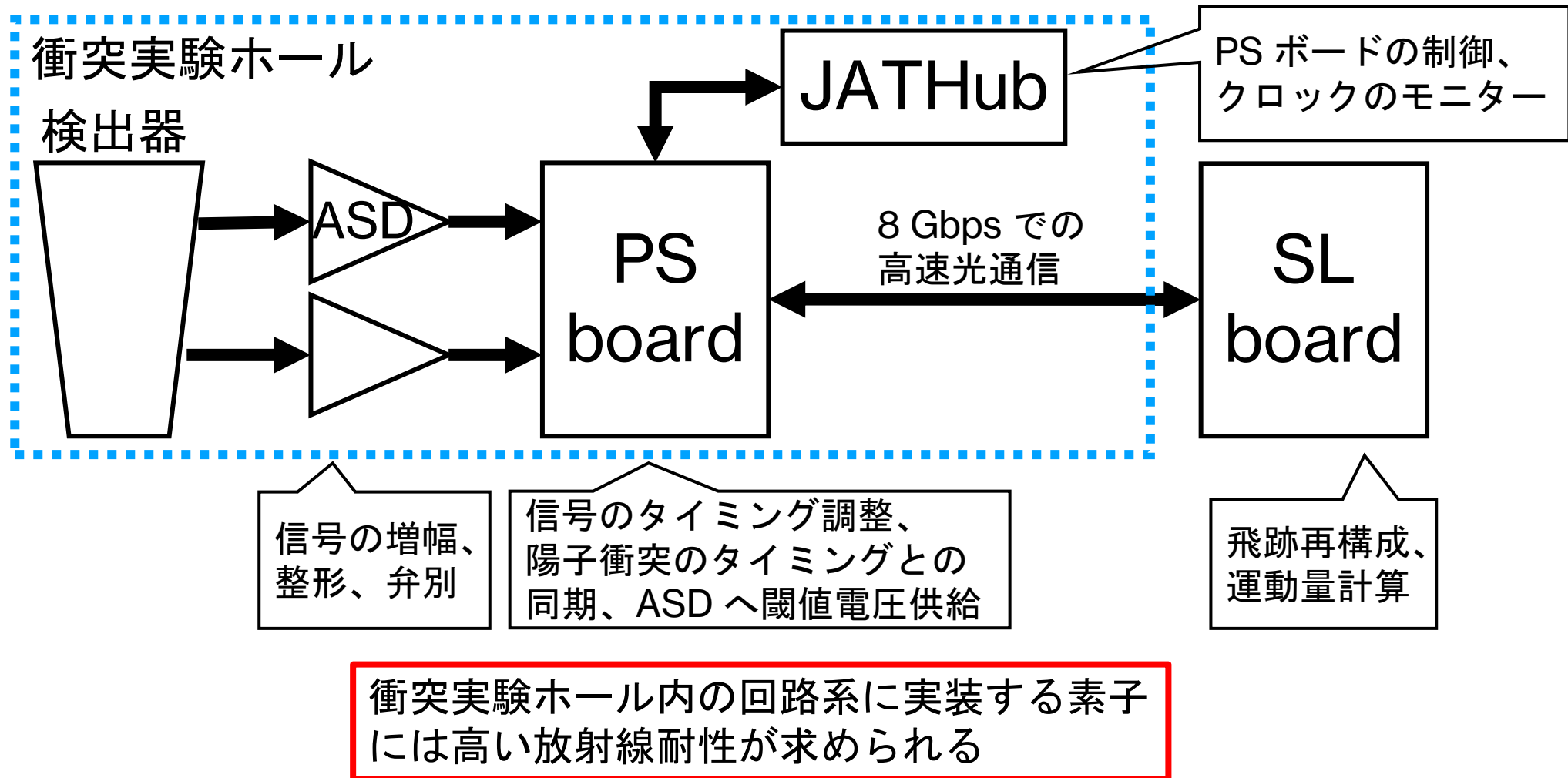


TGC 検出器

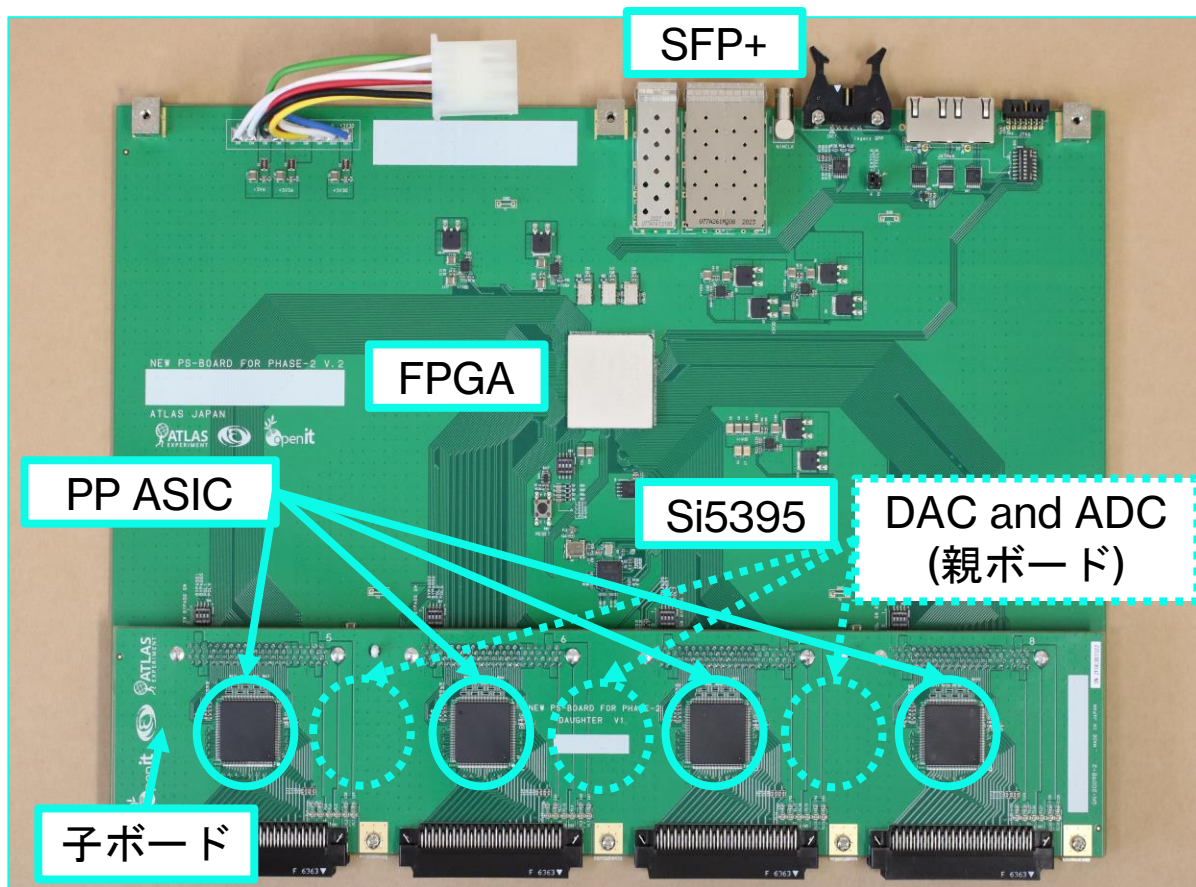
- Thin Gap Chamber
比例計数管型トリガー検出器
- ワイヤー、ストリップにより
ミューオンの位置の R, ϕ 座標の
二次元読み出し
- ガス
CO₂: 55 %, n-pentane: 45 %
- チャンネル幅 O(1) cm



TGC エレクトロニクス

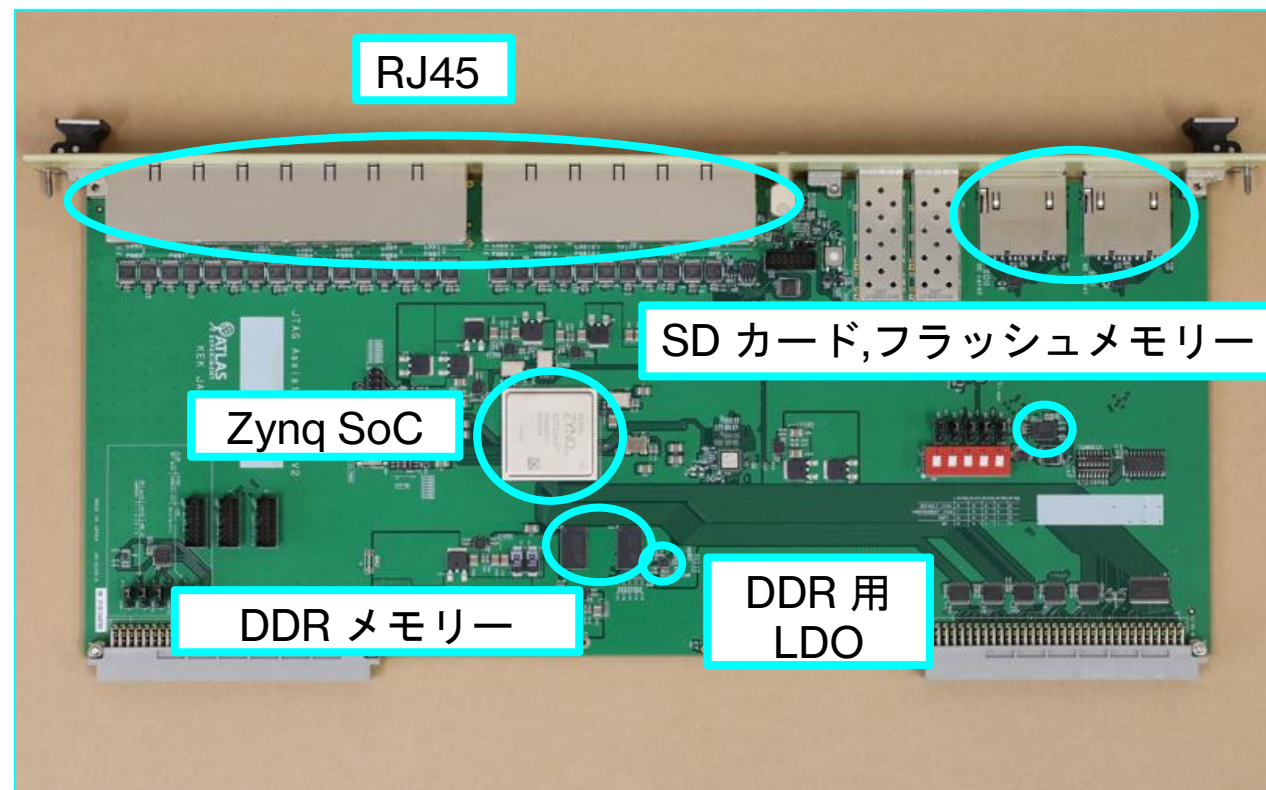


PS ボード、JATHub



PS ボード試作機

2023/11/20



JATHub 実機

計測システム研究会

放射線耐性試験の概要

- これまで3つの放射線の影響を考えて試験を行ってきた
 - Total Ionizing Dose (TID)
放射線により生じたイオンが酸化膜にトラップされる
 - Non-Ionizing Dose (NIEL)
飛来放射線により半導体構成原子がはじき出される
 - Single Event Effect (SEE)
飛来放射線によりビット反転等が起こる
- 現在、放射線耐性試験は最終段階
より個体差を意識し、商用素子に対してできる限り
実機のロット、リールで試験

放射線耐性に対する要求

- HL-LHC 10 年間の運用で目指す
4000 fb⁻¹ での線量の見積もり
(Simulated Radiation Level, SRL) はシミュレーション
ベースで求められる
- SRL に安全係数 Safety Factor (SF) をかけて要求値を設定
 - SF_{sim}: シミュレーションの不定性
 - SF_{test}: 耐性試験と実機運用の条件の違いを考慮した不定性
 - SF_{lot}: ロット間およびロット内の個体間の放射線耐性の違い
- 以上から要求値は、素子の種類や検証方法により、
TID では O(10) Gy, NIEL では O(10¹²) neutrons/cm² ,
SEE では O(10²) /cm²/s と求められる

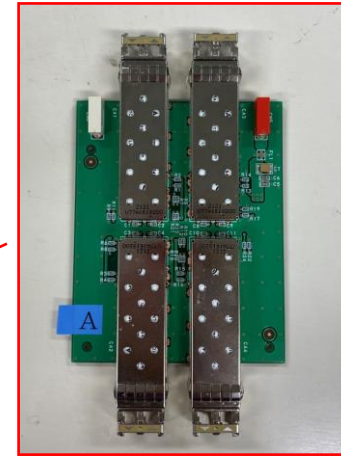
TID 試験の概要

- 名古屋大学 Co60 照射施設にて
ガンマ線照射試験
- TID 損傷の検証のため、バイアス電圧を
供給した状態で照射
- 照射対象の素子:
参照電圧供給素子 (VREF)、SD カード、
オペアンプ、クロックジッタークリーナー、
QSPI フラッシュメモリー、SFP+、
光ファイバー、DDR 用 LDO 電源
- 試験概要、結果の例として SFP+ について
話していく

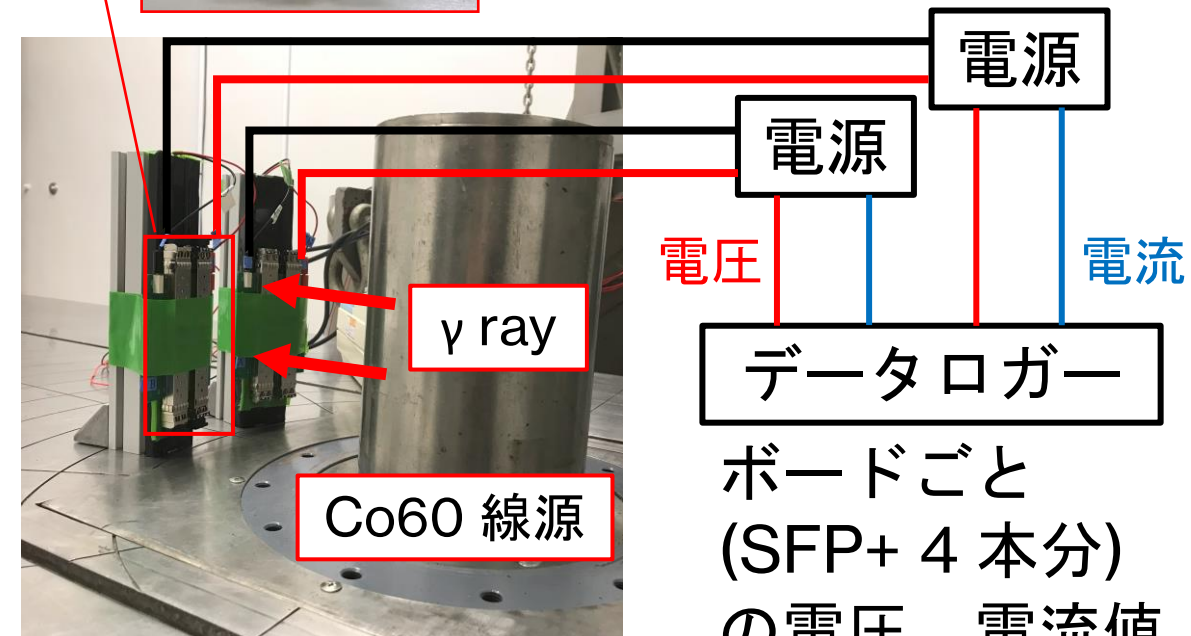


TID 試験 (SFP+)

- 型番:
Broadcom 社 AFBR-709SMZ
II – VI 社 FTLX8574D3BCV
- ATLAS 実験における積分輝度
4000 fb⁻¹ における要求値
(安全係数含む)
33 Gy

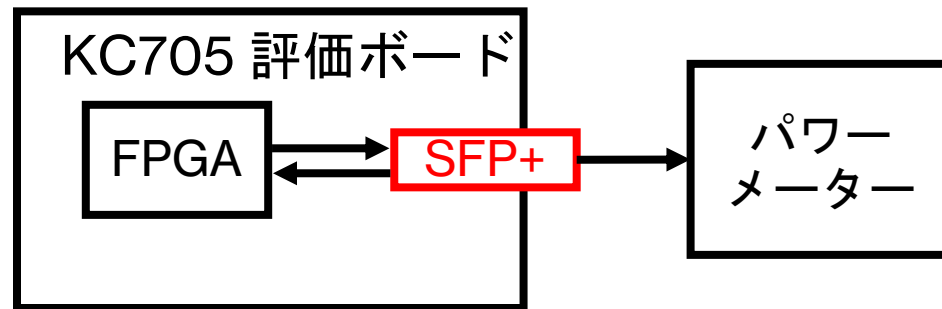


照射中に電源供給
に使用したボード
1枚につき
SFP+ 4本

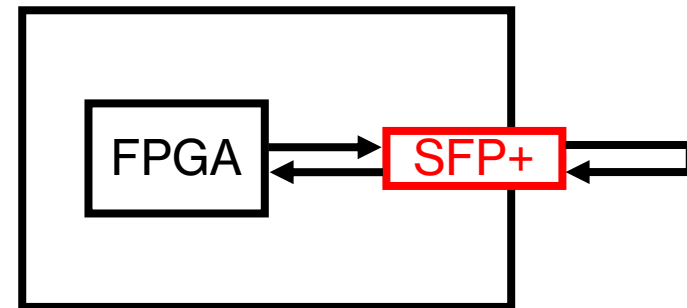


TID 試験 (SFP+): 測定項目

1. 光量測定
Kintex-7 FPGA 評価ボード (KC705) とパワーメーターを用いて光量の変化を記録
2. 通信機能の試験
KC705 を用いて IBERT (詳細は次ページ) により通信機能 (8 Gbps) を評価



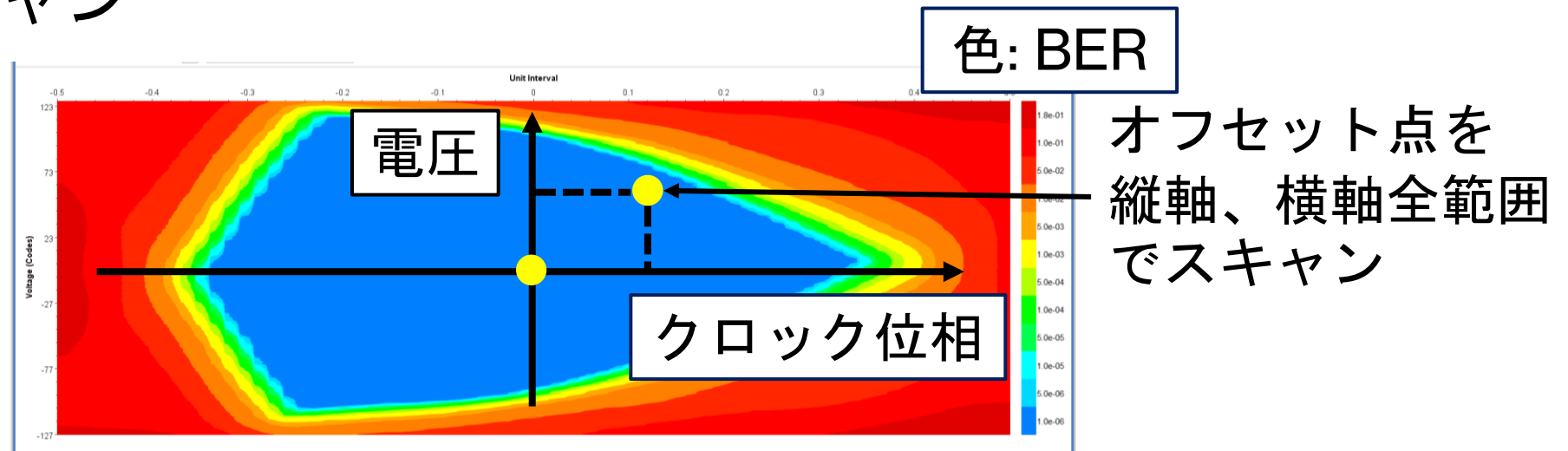
測定 1 のセットアップ



測定 2 のセットアップ

IBERT

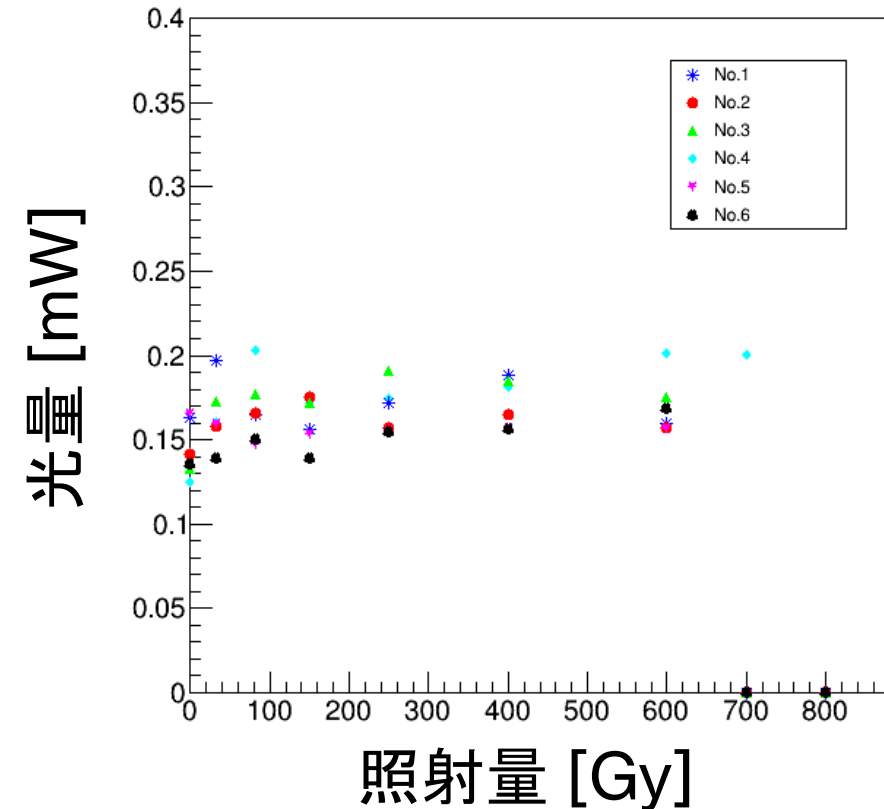
- IBERT (Integrated Bit Error Ratio Tester)
AMD Xilinx 社が提供する FPGA 内蔵トランシーバーの
評価モジュール
- Bit Error Ratio (BER) = (検出エラー数)/(送信ビット数)
- アイスキャン



TID 試験 (SFP+): 結果

- 要求値 33 Gy 照射後も通信機能に問題が無いことを確認
- Broadcom 社 → 600 Gy
II – VI 社 → 250 Gy
照射後に光量が大きく減少

照射量と光量
(Broadcom 社)



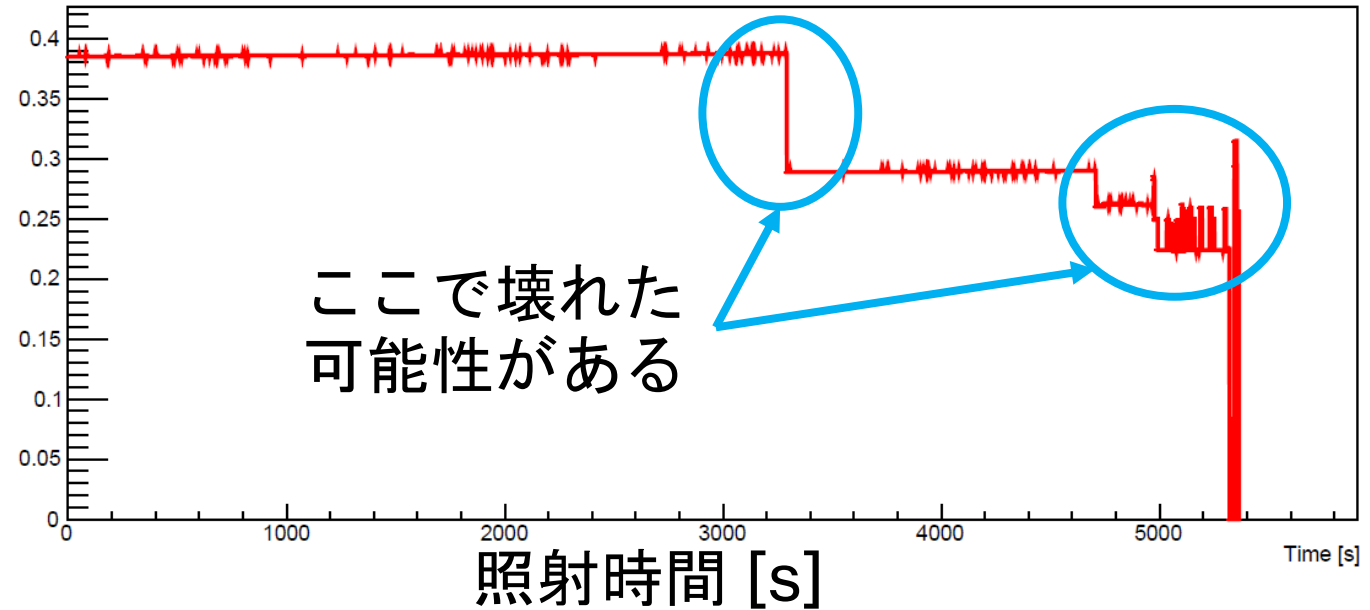
TID 試験 (SFP+): 電流値の変化

照射中にボードごと (SFP+ 4 本分) に流れる電流を測定
壊れた時のモニター結果

- II-VI 社
照射中は電流値
変わらず
一度電源を落とし
再投入すると
電流値が下がった
- Broadcom 社
照射中に電流値が
下がった

電流値 [A]
(SFP+ 4 本分)

Broadcom 2 本が壊れた
時の電流値のモニター



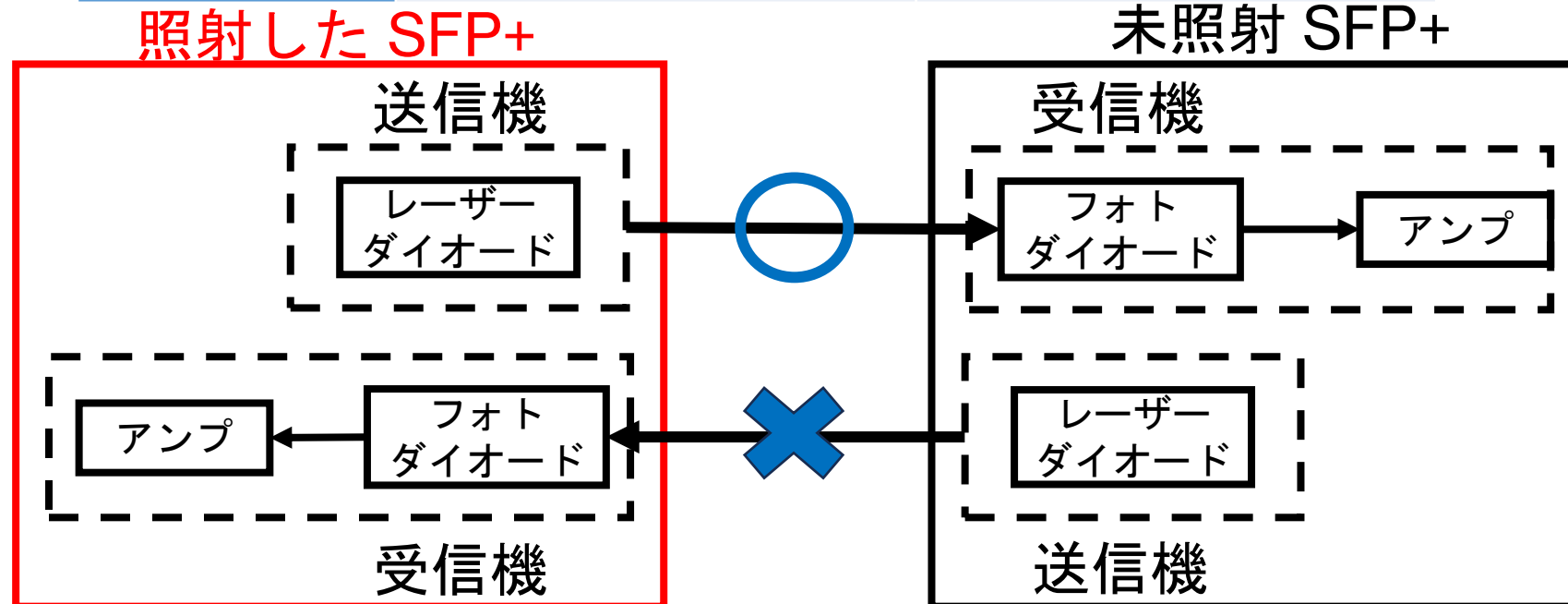
2 社間で壊れ方に違いを観測

TID 試験 (SFP+): 追加検証

Ficer 社 SFP+ について、2 台の KC705 間で通信を行い、送信機と受信機を切り分けて機能の評価を行った

	250 Gy 照射後	1500 Gy 照射後
送信機	○	×
受信機	×	×

本試験においては受信機側が先に損傷



TID 試験結果まとめ

照射した個体全てが HL-LHC の運用に十分な放射線耐性を持つことを示した

	型番	照射個体数	正常動作可能線量※1 [Gy]
VREF	REF2025	10	1200
SD カード	SDSDAF3-008G-I	10	400
オペアンプ	LM7322MM/NOPB	20	> 2600
ジッタークリーナー	Si5395	3	100
QSPI フラッシュ メモリー	MX25L12845GM2I-08G	11	100
SFP+	Broadcom 社 AFBR 709SMZ	6	600
	II – VI 社 FTLX8574D3BCV	10	250
	Ficer 社※2 FSPP-H7-M85-X3D	5 (5)※2	200
光ファイバー	1-LC.P LC.PGI(PE A10G) -DF N 500	6	180
DDR 用 LDO 電源	TPS51200	5	600

※1
全ての個体で
正常動作を
確認できた
線量

※2
温度レンジの
異なる2つの
型番、5個
ずつ照射した

2023/11/20

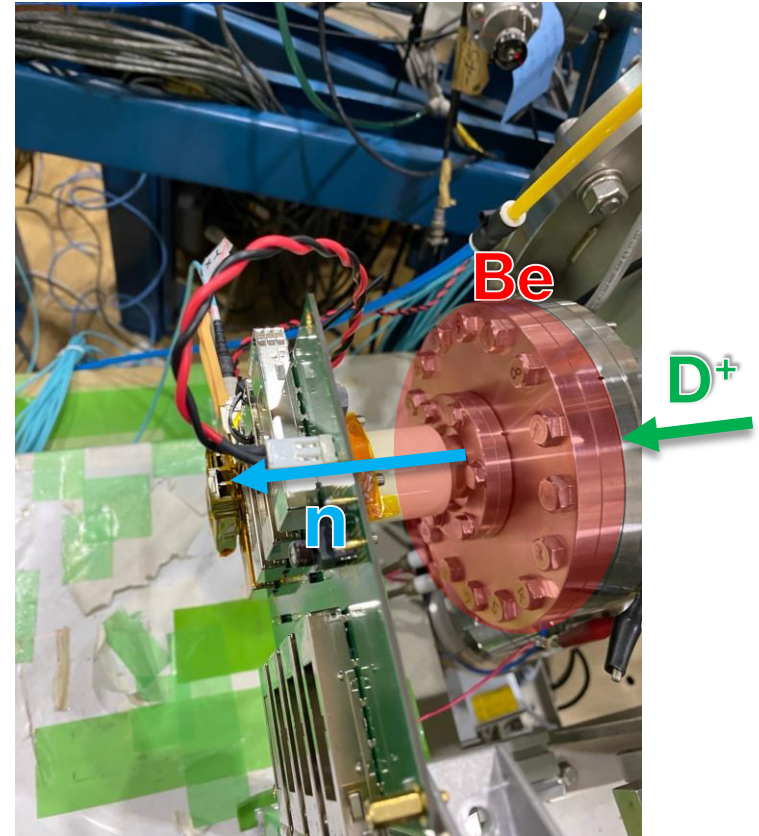
計測システム研究会

NIEL 試験の概要

- 神戸大学にてタンデム加速器を用いて中性子照射試験
- 2.6 – 3.0 MeV に加速された重水素イオン D^+ が Be 板に衝突して 2 MeV ほどにピークをもつ中性子が出てくる



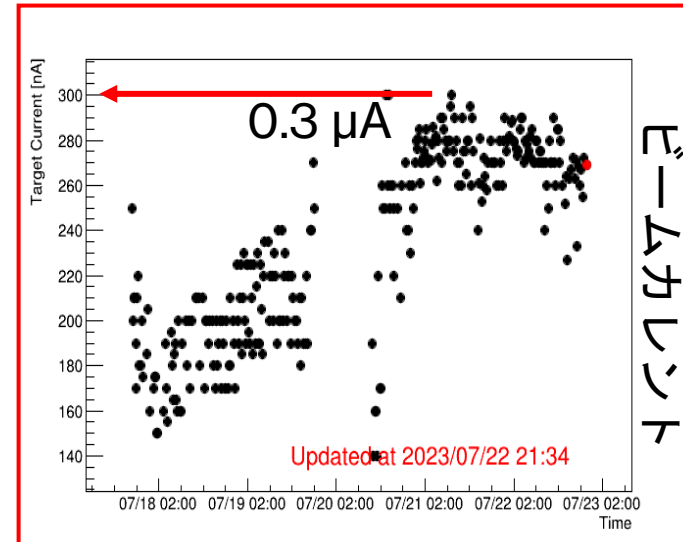
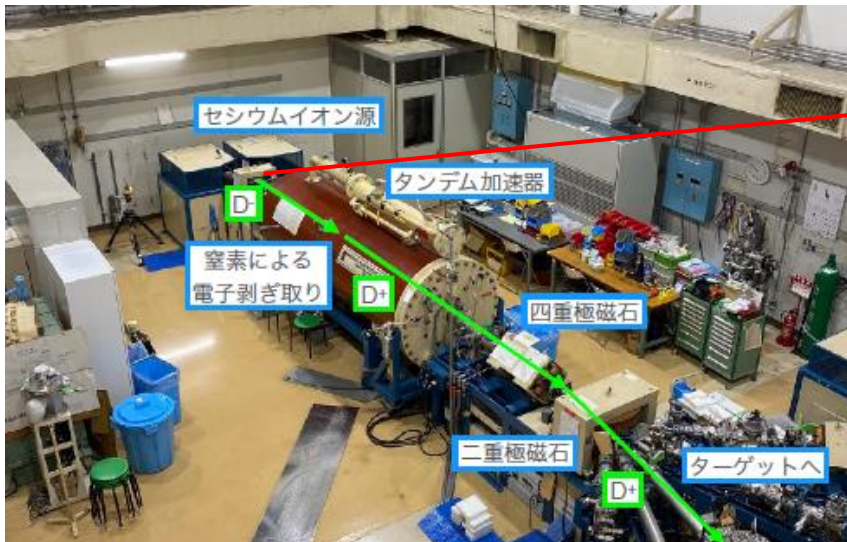
- 試験概要、結果の例として SFP+ について話していく



タンデム加速器のオペレーション

- 加速器のオペレーションはイオン源からターゲットまで (基本的に) 自分たちで行う
- イオン源のカソードを交換した直後はなかなかビームカレントが増えない (最大で $1 \mu\text{A}$, $4.9 \times 10^6 \text{ neutrons/cm}^2/\text{s}$ で運用可能)

5日間でのビームカレントの推移



この時は
ビームカレント
が最大出力の
3割ほど

NIEL 試験 (SFP+)

- Ficer 社の 4 つの型番に対して試験

型番	対応温度レンジ [°C]	対応レート [Gbps]
FSPP-H7-M85-X3D	0 ~ 70	8.5 ~ 11.32
FSPP-H7-M85-X3Di	-40 ~ 85	8.5 ~ 11.32
FSPP-H7-M85-X3DM	0 ~ 70	1.0625 ~ 11.32
FSPP-H7-M85-X3DMi	-40 ~ 85	1.0625 ~ 11.32

値段
安い



高い

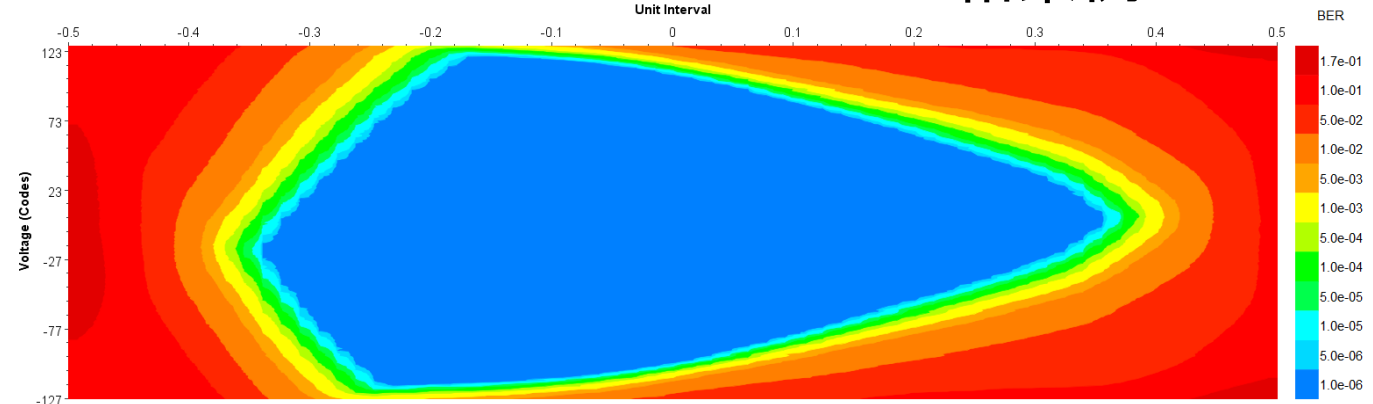


- ATLAS 実験における積分輝度 4000 fb^{-1} における
要求値 (安全係数含む)
 $1.3 \times 10^{12} \text{ neutrons/cm}^2$
- 検証項目: 光量測定、通信機能 (TID 試験と同様)

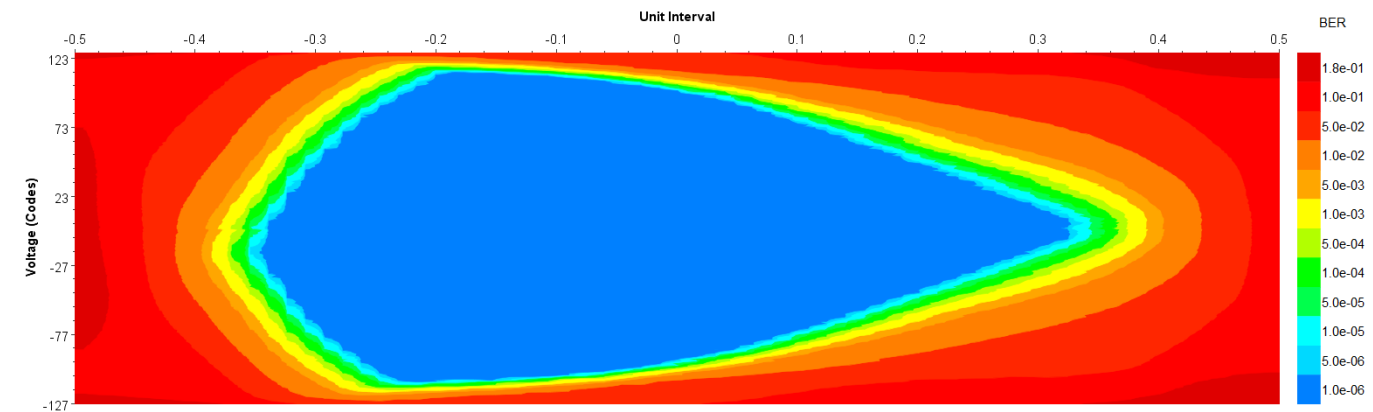
NIEL 試験 (SFP+): 結果の例

FSPP-H7-M85-X3DM の結果例

- 1.1×10^{13} neutrons/cm²
(要求値の約 8.7 倍)
照射後も通信機能に
問題ないことを確認
- 出力光量も照射前後で
有意な変化は観測されず



照射前



1.1×10^{13} n/cm² 照射後

NIEL 試験結果まとめ

照射した個体全てが HL-LHC の運用に十分な放射線耐性を持つことを示した
表に示す最大照射量照射後も正常動作が確認できた

	型番	照射個体数	最大照射量 [$\times 10^{11}$ n/cm ²]
VREF	REF2025	10	8.6
オペアンプ	LM7322MM/NOPB	10	12
QSPI フラッシュ メモリー	MX25L12845GM 2I-08G	9	43
SFP+	Broadcom 社 AFBR-709SMZ	1	18
	II – VI 社 FTLX8574D3BCV	1	18
	Ficer 社 FSPP-H7-M85-X3D(i)	1	16
	Ficer 社 FSPP-H7-M85-X3DM(i)	5	44
DDR 用 LDO 電源	TPS51200	2	15

SEE 試験 (イタリアのグループが実施)

- CERN の陽子照射施設にて 226 MeV 陽子を照射ターゲットでの fluence 1.1×10^{12} proton/cm²
- 照射対象: Ficer 社 SFP+ FSPP-H7-M85
- 10 個の SFP+ にまとめて電源供給した状態で照射
- Single Event Latch-up を観測 (約 0.14 A ほど電流が増加した)
- この結果から Ficer 社の SFP+ は用いないことにした

まとめ

- LHC では 2029 年から大きく輝度を上げて運転予定 (HL-LHC)
→ ATLAS ミューオントリガー検出器は回路系刷新が必要
- 衝突実験ホール内に設置される前段回路系に実装する素子には高い放射線耐性が求められる
TID → O(10) Gy, NIEL → O(10^{12}) neutrons/cm²,
SEE → O(10^2) /cm²/s
- 回路系の量産に向けて商用素子の放射線耐性試験を行った
- 照射したすべての素子が HL-LHC の 10 年間の運転において十分な放射線耐性を持つことを示した
- 今後、SFP+ の追加検証、ボード全体へのガンマ線照射試験を行う予定