

高輝度LHC-ATLAS実験に向けた ミュオン検出器で用いる SFP+光トランシーバーの放射線耐性試験

名古屋大学大学院 理学研究科
高エネルギー素粒子物理学研究室(N研)

橋本 大輔

2023/02/21 ICEPP Symposium 30th

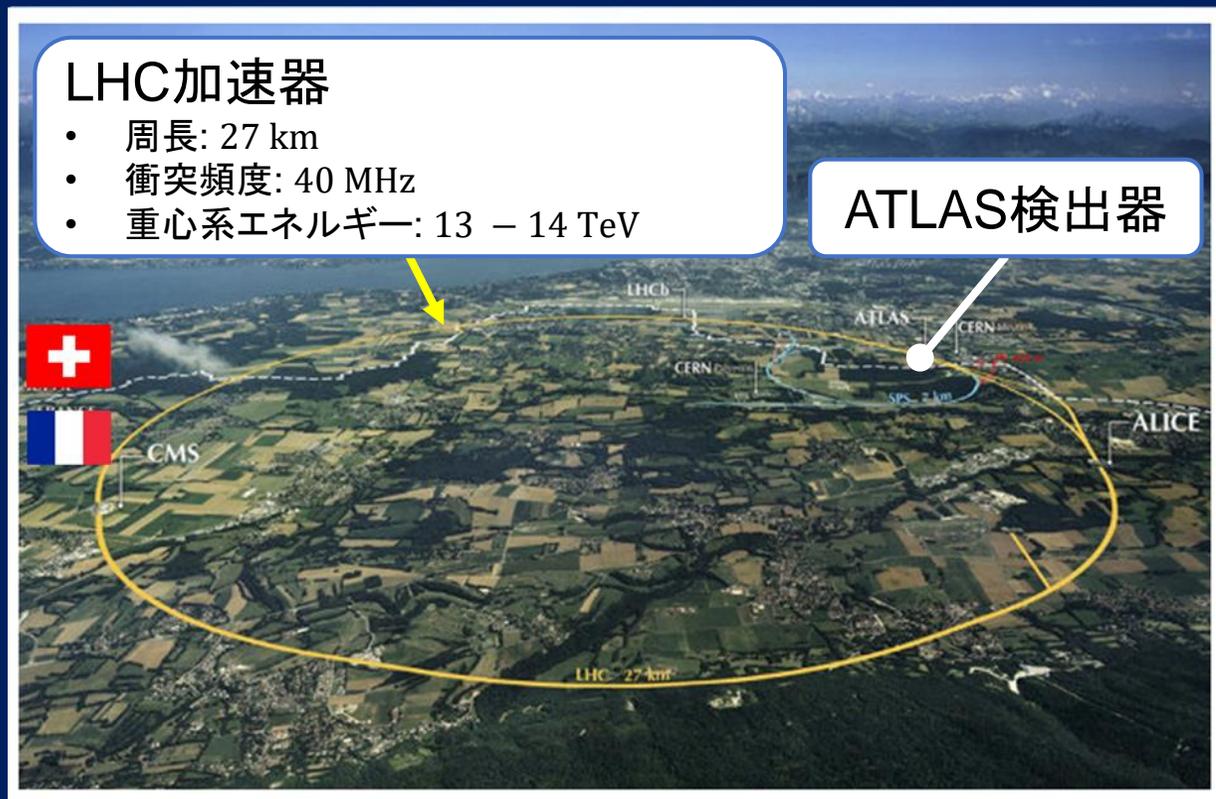


SFP+



LHC-ATLAS実験 –LHCの高輝度化へ–

LHCで加速した陽子同士の衝突反応をATLAS検出器で観測する



LHCのこれまでの軌跡と進化

2012年

ヒッグス粒子の発見

瞬間ルミノシティを約3倍増強

2023年
(現行)

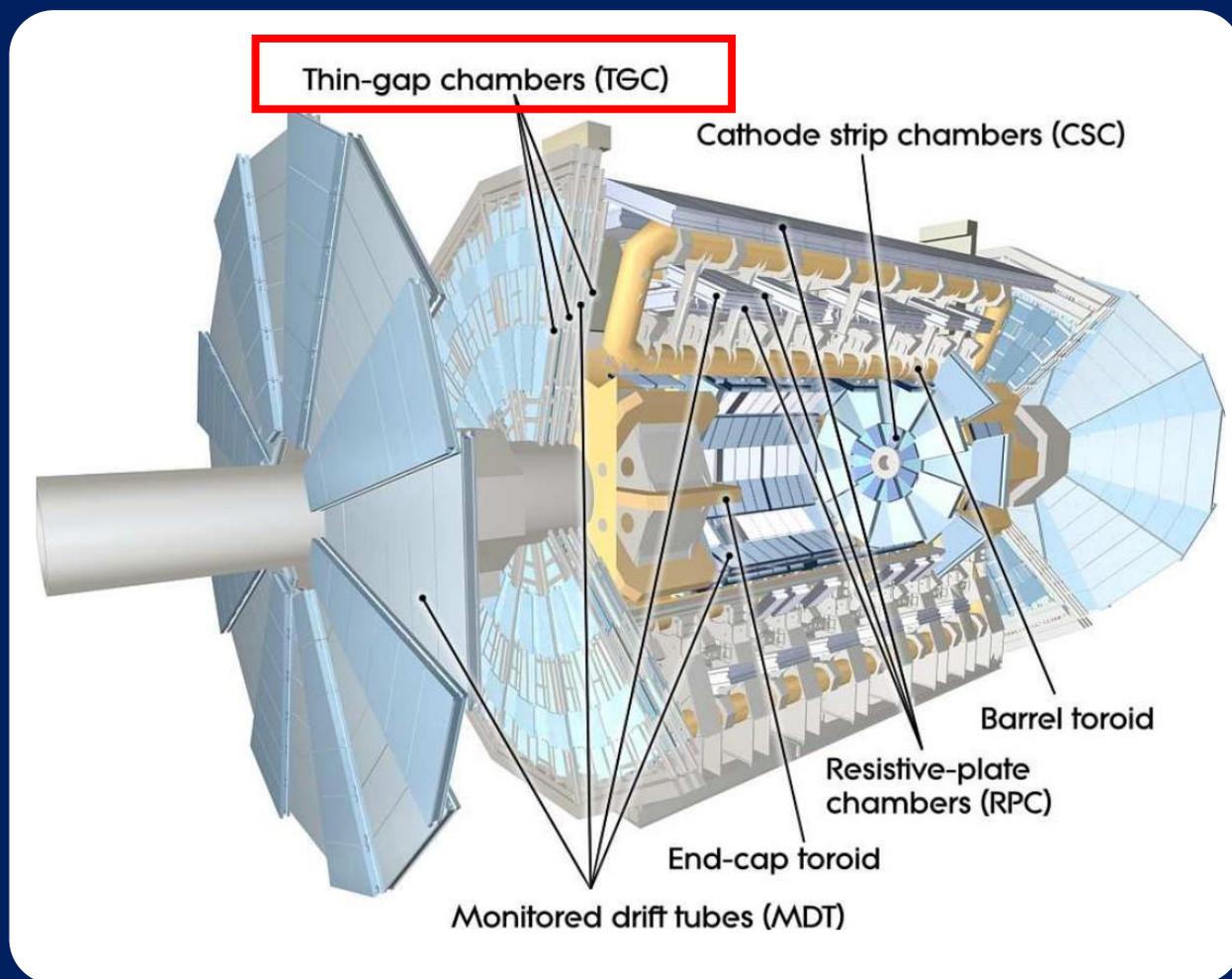
$2.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

2029年
(高輝度LHC)

$7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

世界最高エネルギーで 4000 fb^{-1} の大統計データを目指し、新物理探索へ

ATLASミューオン検出器の概要



MDT: 精密飛跡再構成

CSC: 精密飛跡再構成

RPC: トリガー, 精密飛跡再構成補助

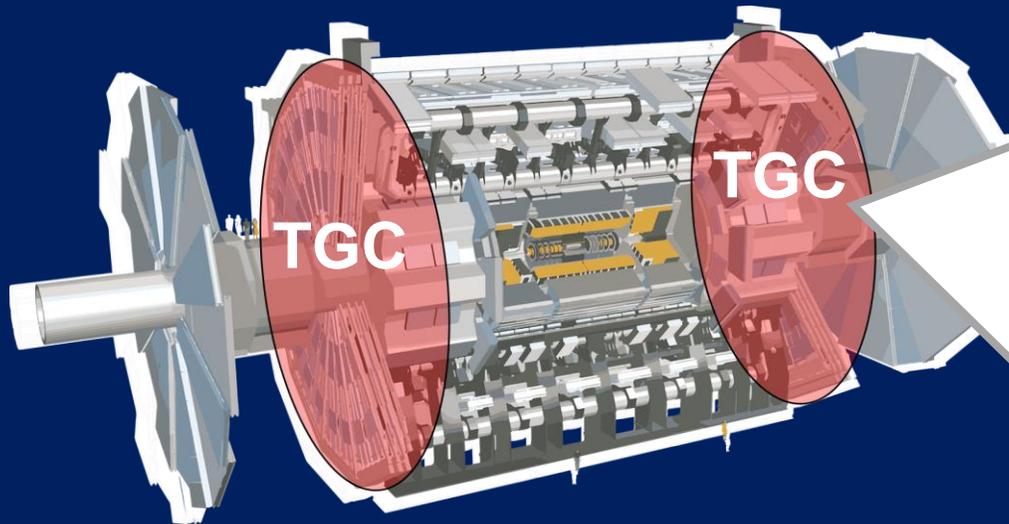
TGC(日本): トリガー, 精密飛跡再構成補助

→ 本研究の検出器

高輝度LHCに向けて検出器(トリガー・読み出し回路)のアップグレードが要求される

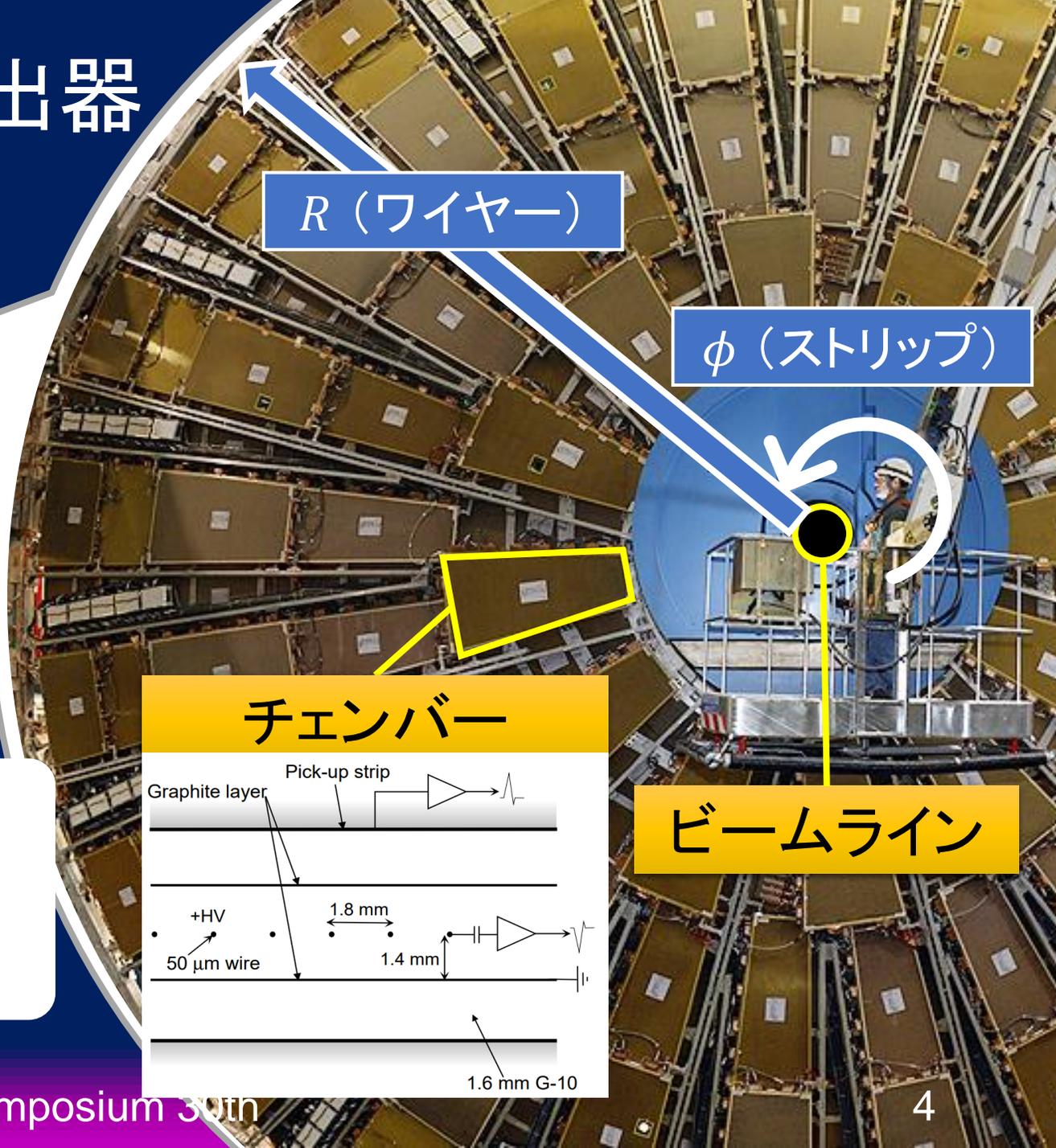
ミュオントリガーTGC検出器

高運動量をもつミュオンを捉える



TGC検出器

- 多線式比例計数管
- ワイヤー(R方向), ストリップ(ϕ 方向)の2次元読み出し
- 構造: 7層かつ3つのステーション
- ガス: 55% CO₂, 45% n-pentane
- 全チャンネル数: 32万チャンネル

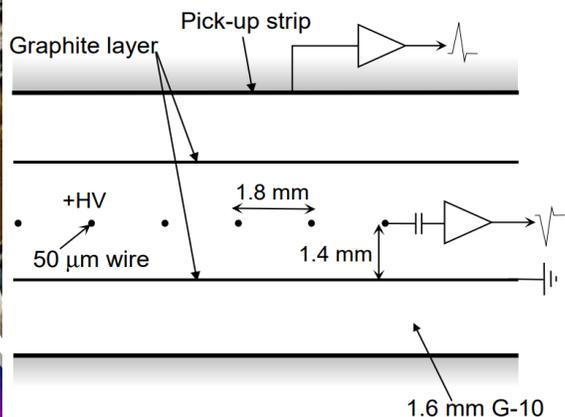


R (ワイヤー)

ϕ (ストリップ)

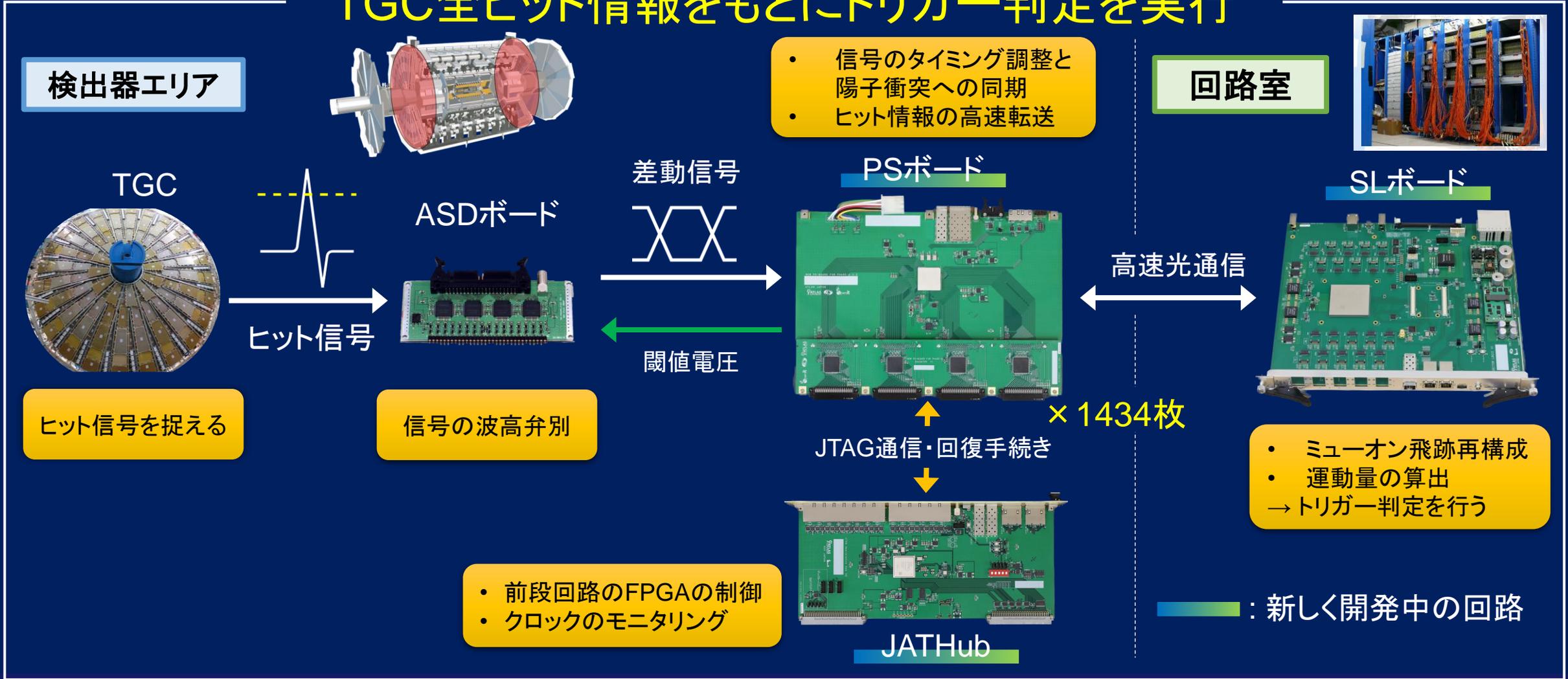
ビームライン

チェンバー



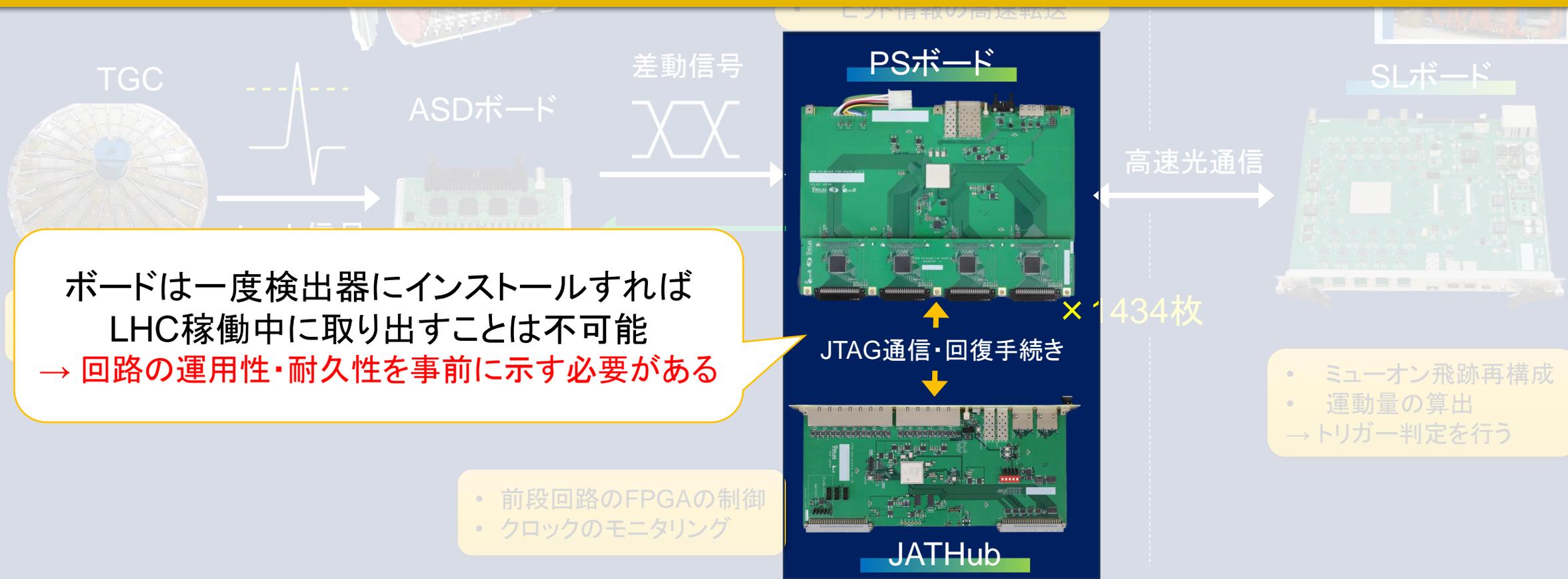
新たなTGCTリガー回路

TGC全ヒット情報をもとにトリガー判定を実行



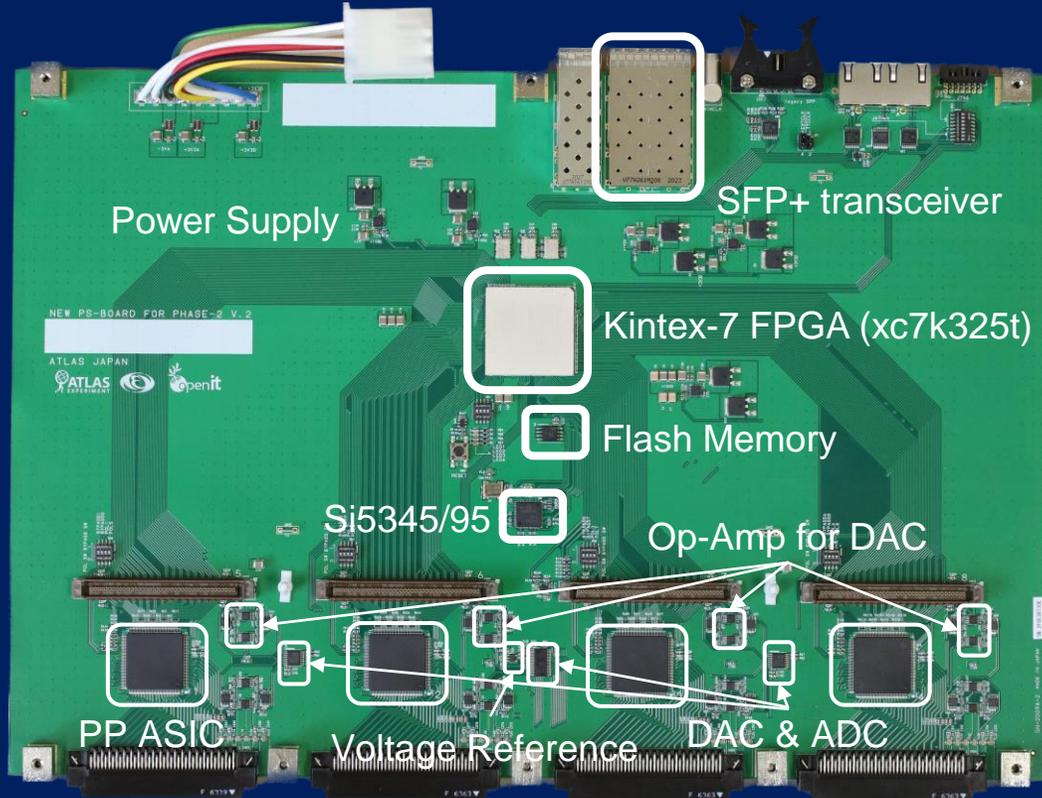
フロントエンド回路に対する放射線耐性

検出器エリアに設置されるボードには高い放射線耐性が要求
→高輝度LHC10年間の安定動作を保証するための堅牢性

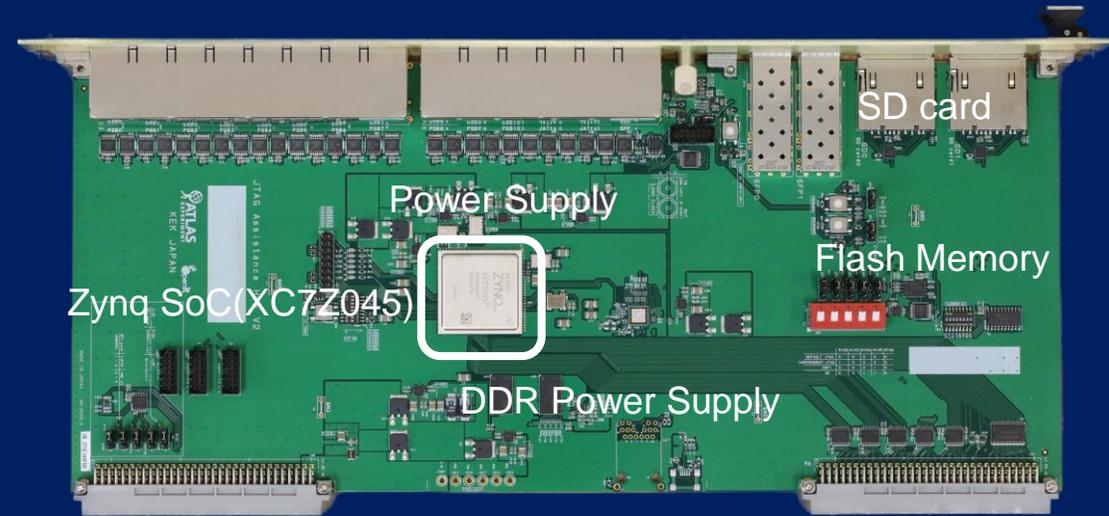


PSボードとJATHHubボードの概要

PSボード



JATHHub



➤これまで搭載予定の**商用素子**に対する放射線耐性試験を進めてきた

各ボードのSFP+光トランシーバーの重要性

PSボード

JATHub

- 全ヒット信号をSLボードへ転送する
- 1本あたり8 Gbpsで高速光通信を行う



SFP+光トランシーバー

- 送信機: TX
- 受信機: RX

- 光Ethernet通信用のインターフェースとして機能する
- 現在の設計: 1 Gbpsで通信する

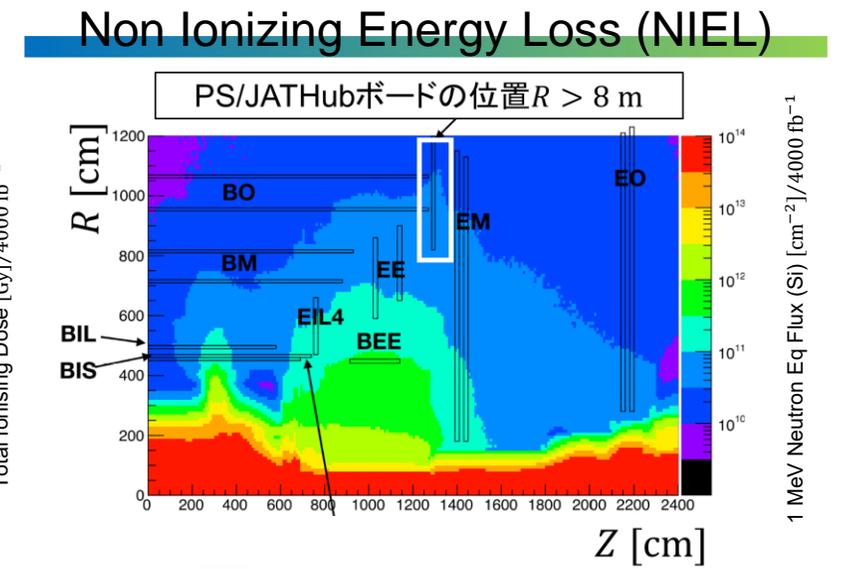
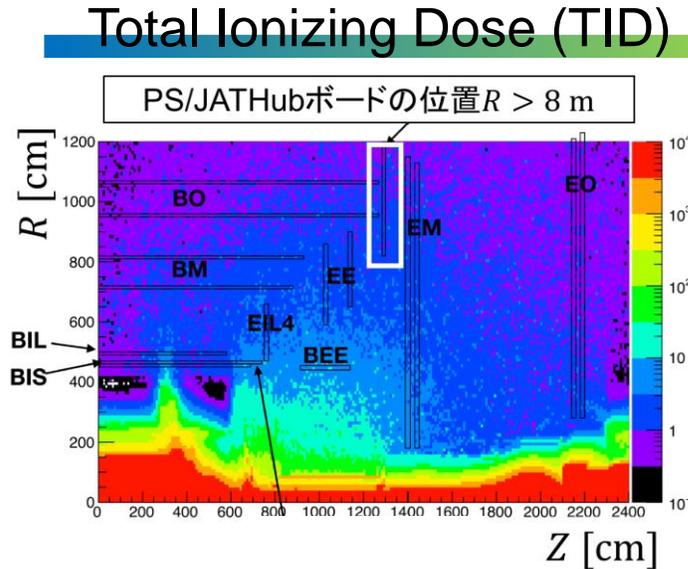
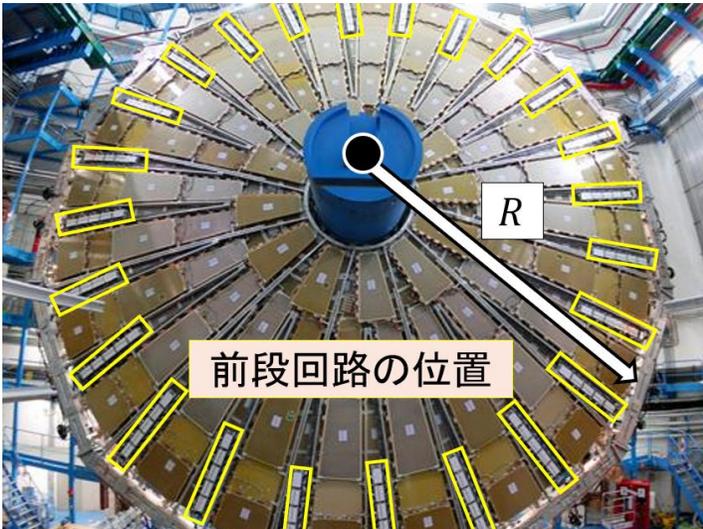
約4000個のSFP+を使用(購入)するにあたり、TGCの運用上問題ないものを選定する必要がある

➤本研究: SFP+光トランシーバーに対する放射線耐性試験について述べる

放射線耐性の要求(1)

方針: シミュレーションによる放射線量の見積りに対して、安全係数を設けて要求を決定

1. シミュレーションによる線量の見積り



積分ルミノシティ 4000 fb^{-1}

放射線による影響	放射線量の見積り(PSボードの値を参照)
TID	7.3 Gy
NIEL (1 MeV eq neutron)	2.2×10^{11} neutron/cm ²

放射線耐性の要求(2)

方針: シミュレーションによる放射線量の見積りに対して、安全係数を設けて要求を決定

2. 安全係数(Safety Factor)の設定と要求値の決定

※生産用ロット/リール以外のチップの場合 → $SF_{lot} = 1$

SF_{sim} TID	SF_{sim} NIEL	SF_{sim} SEE	SF_{test} TID	SF_{test} NIEL	SF_{test} SEE	SF_{lot} TID	SF_{lot} NIEL	SF_{lot} SEE
1.5	1.5	1.5	1	1 or 1.3	1 or 2 or 5	3	3	3

- SF_{sim} : 放射線シミュレーションの不定性
- SF_{test} : 試験方法および、各損傷における放射線耐性の違いを考慮した不定性
- SF_{lot} : 製造ロット・リール間の個体差を考慮した不定性

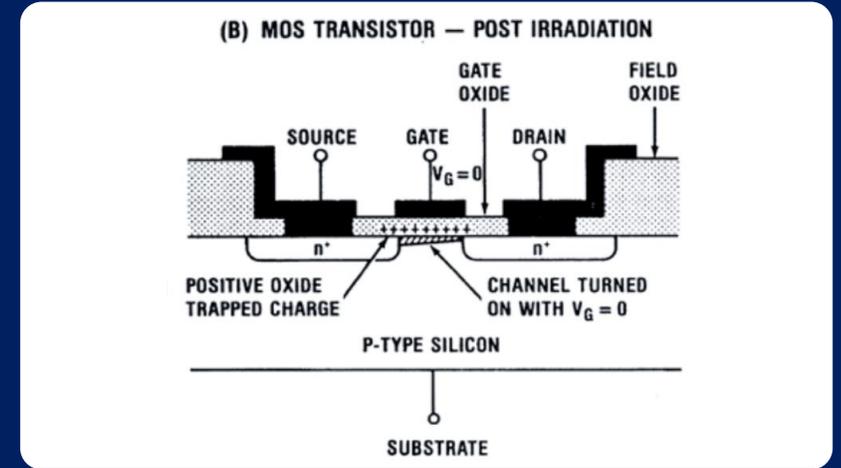
要求値 = 放射線の見積り × 安全係数

放射線による影響	放射線量の見積り	TGC運用上の要求値
TID	7.3 Gy	33 Gy
NIEL	0.22×10^{12} neutron/cm ²	1.3×10^{12} neutron/cm ²

本研究で考慮する放射線損傷プロセス

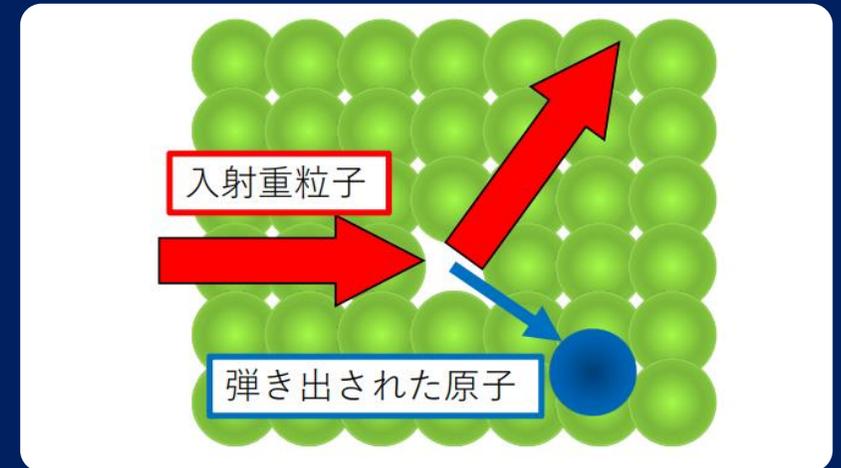
イオン化損傷: Total Ionizing Dose (TID)

- 飛来放射線により生じるホールがMOSトランジスタのゲート下の酸化膜に蓄積される
→ 結果: MOSの $I - V$ 特性が変化して、素子の損傷に繋がる
- **ガンマ線照射試験**で検証・評価する



非イオン化損傷: Non Ionizing Energy Loss (NIEL)

- 飛来放射線により半導体構成原子がはじき出され、格子欠陥が生成される(バルク損傷)
→ 結果: デバイスの性質が変化して、素子の損傷に繋がる
- **中性子照射試験**で検証・評価する

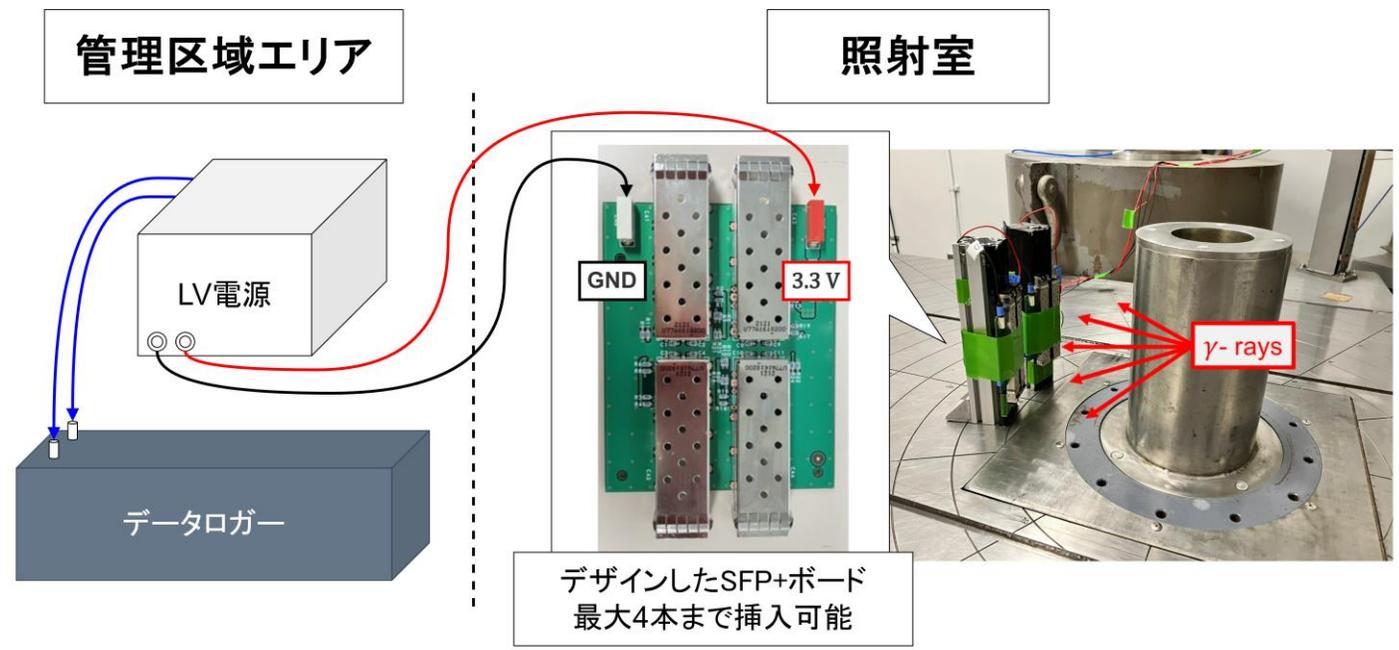


ガンマ線・中性子照射試験からそれぞれTID, NIEL耐性を評価する

ガンマ線照射試験—TID耐性評価—

ガンマ線照射試験の概要

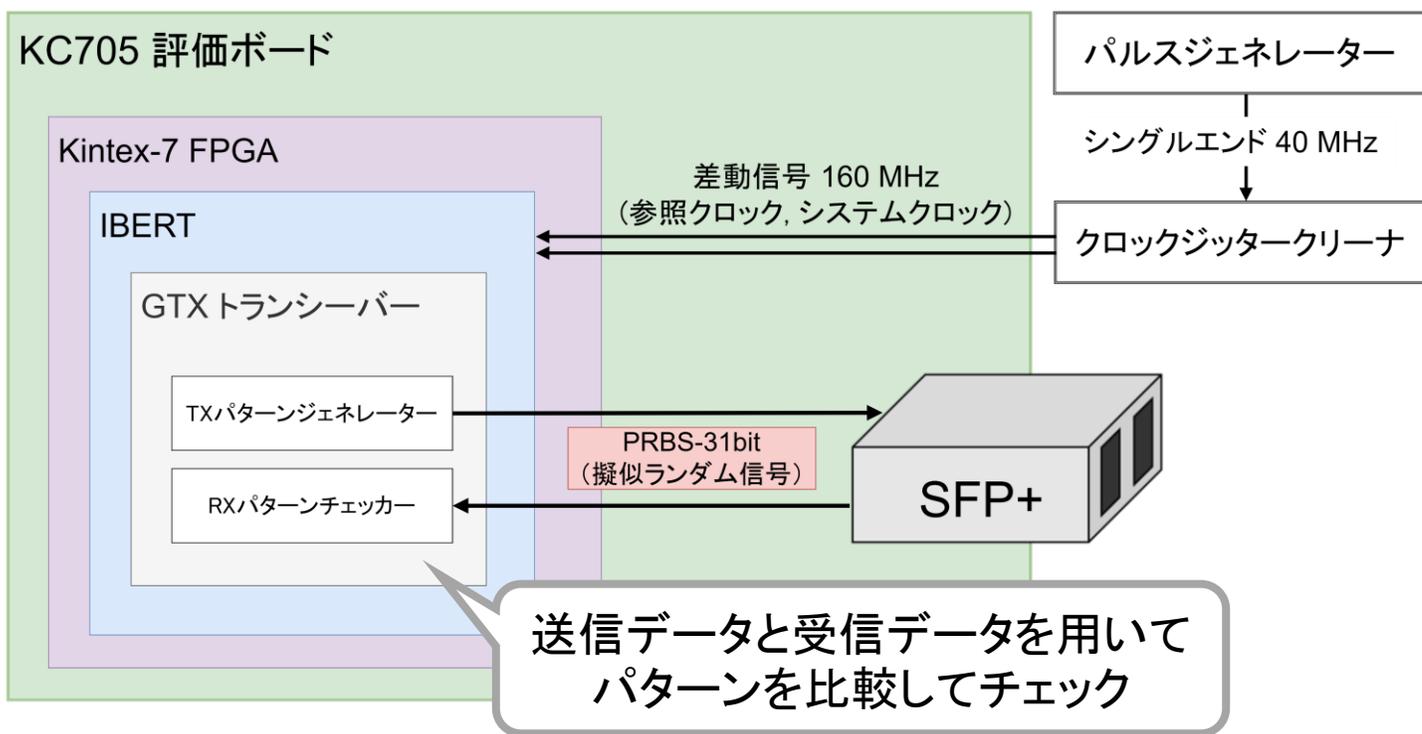
- 場所: 名古屋大学Co60ガンマ線照射室
- 線量要求値: 33 Gy
- 対象SFP+モデル: Ficer社 FSPH-H7-M85-X3DM series (10), Broadcom社 AFBR-710SMZ (10)
- バイアス電圧 (3.3 V) をSFP+に常に供給した状態で照射 ()は試験個体数



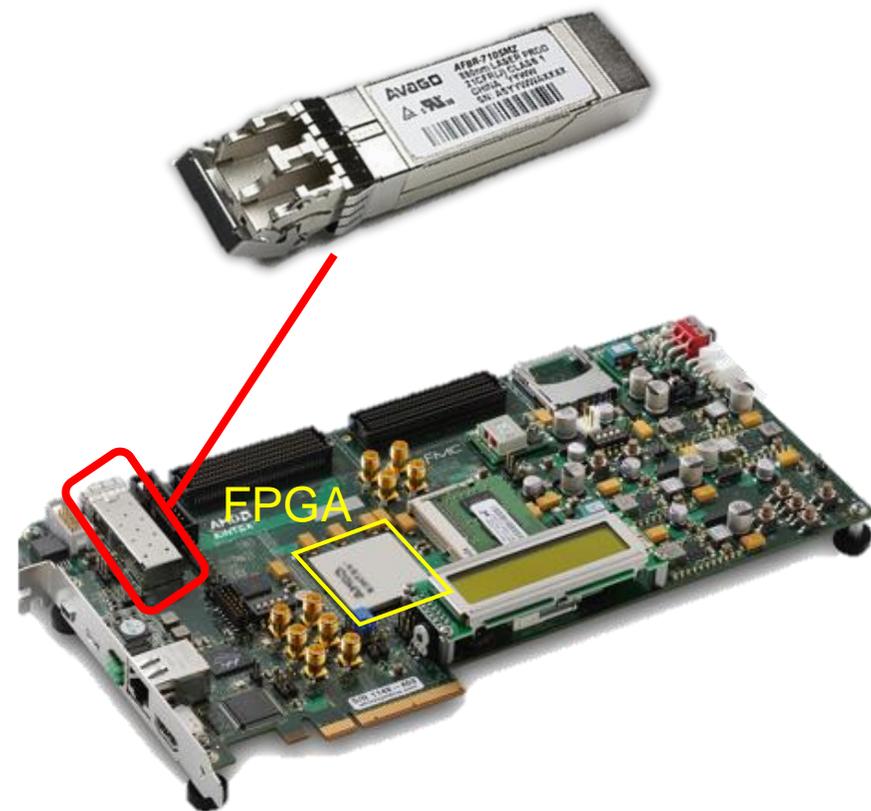
測定方法 —ガンマ線・中性子照射試験で共通—

目的: 光通信機能や光量の出力を確認する

メインロジック: 論理回路と外部セットアップ



- IBERT: IP Core (FPGAに内蔵されたツール) の1種 (次項で詳細)
- PRBS: 1と0のビット構成された周期性をもつランダム信号 (今回: 31ビット)

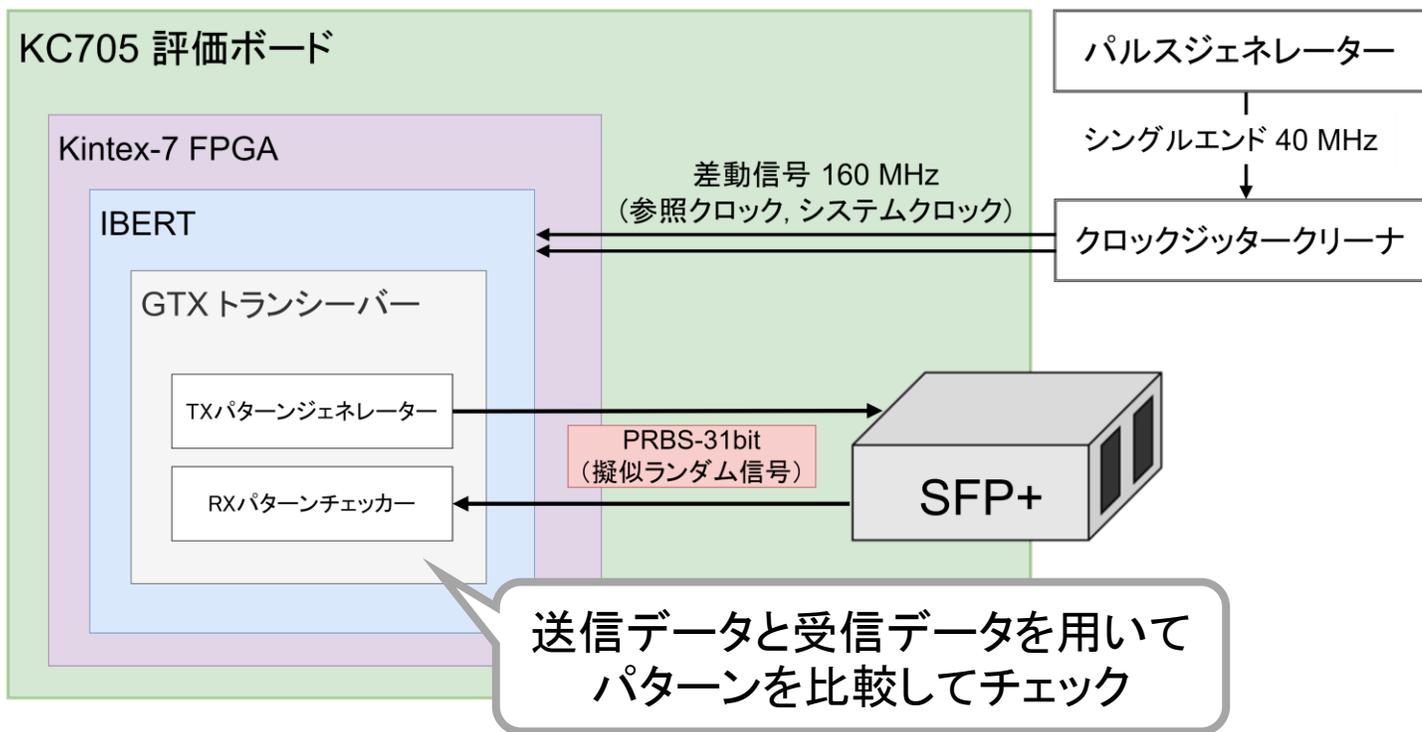


KC705評価ボード
PS boardと同一のFPGAが実装されている

測定方法 —ガンマ線・中性子照射試験で共通—

目的: 光通信機能や光量の出力を確認する

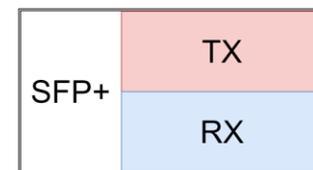
メインロジック: 論理回路と外部セットアップ



- IBERT: IP Core (FPGAに内蔵されたツール) の1種 (次項で詳細)
- PRBS: 1と0のビット構成された周期性をもつランダム信号 (今回: 31ビット)

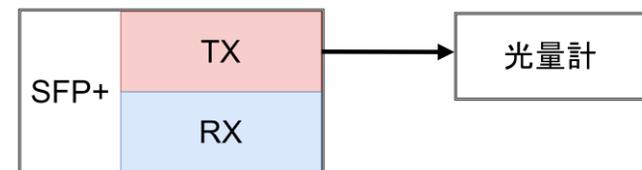
測定方法

1. IBERTループバック通信試験



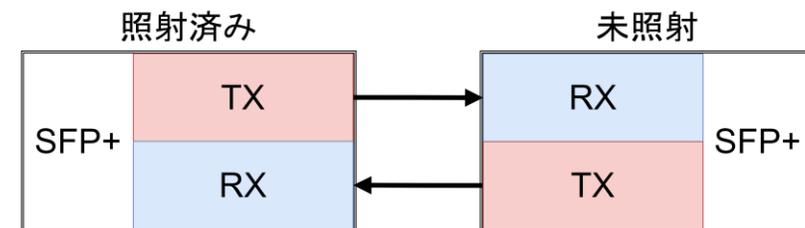
- 通信レート:
- JATHub 1.0 Gbps
 - PS board 8.0 Gbps

2. 光量測定



3. TX, RXセパレート試験

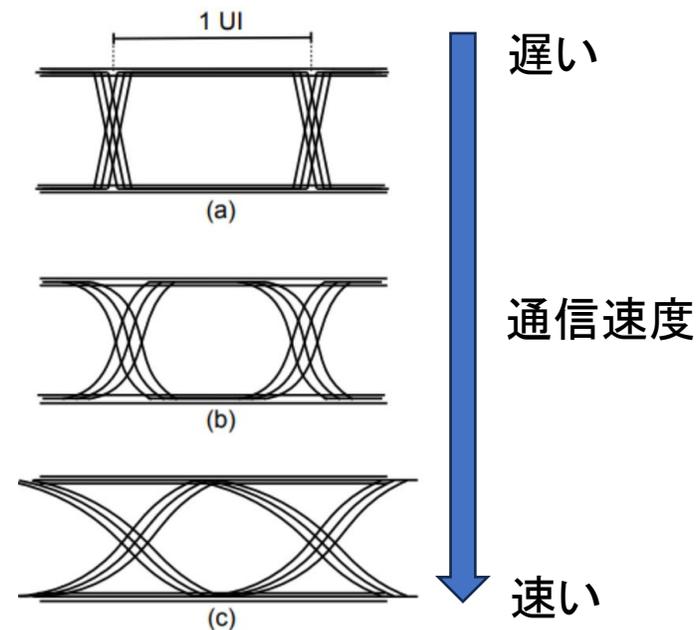
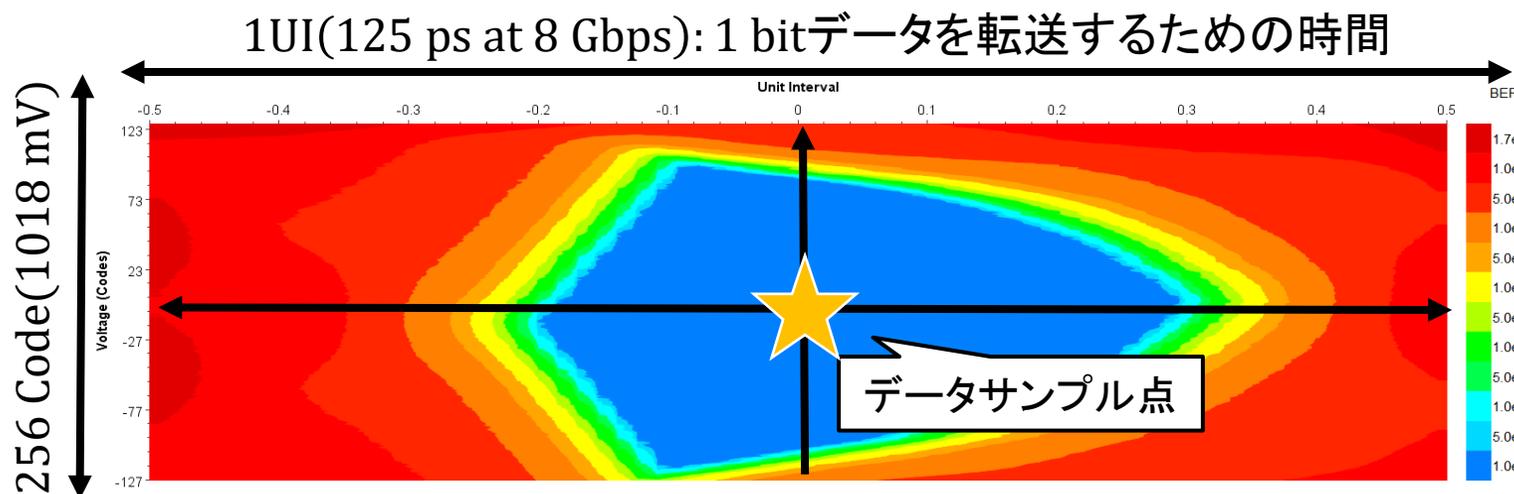
(*ループバック失敗時の場合)



IBERT (Integrated Bit Error Ratio Tester)

光通信の質をアイスキャンから評価することができる

- BER(Bit Error Ratio): 検出したエラー数 / 送信したビット数
- データサンプル点において時間(縦軸)と電圧(横軸)でオフセットを設けて、各点でBERを測定する
- アイの開きを照射前後で測定・比較することで光通信の質を評価する



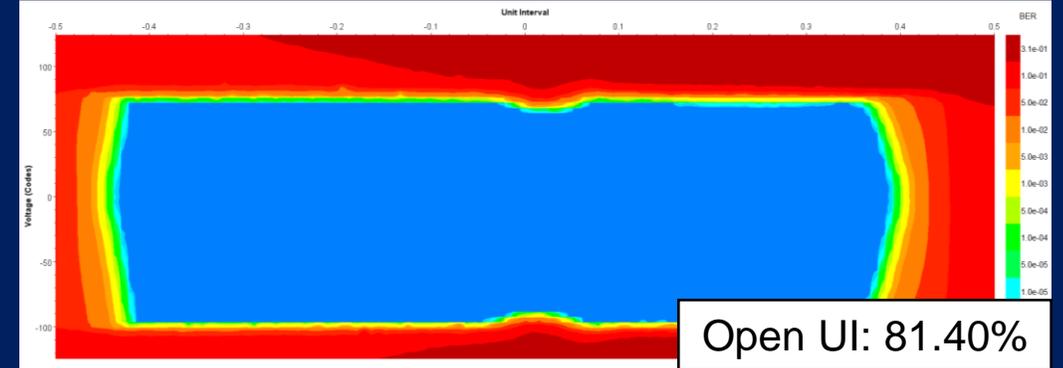
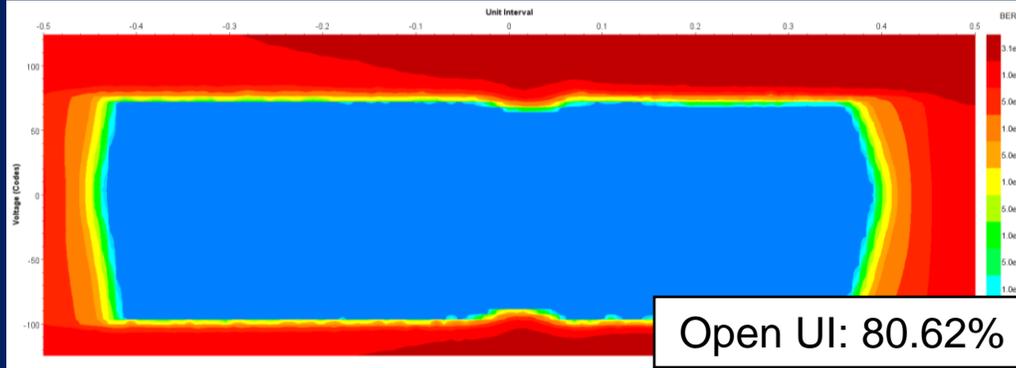
- x軸: オフセット, y軸: 電圧オフセット, z軸: BER
- 青色領域: 通信可能領域(エラー0)

測定結果: IBERTループバック通信試験

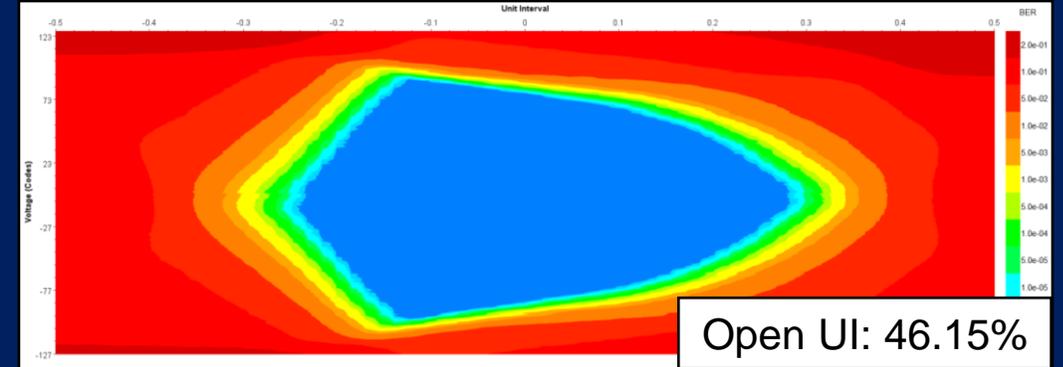
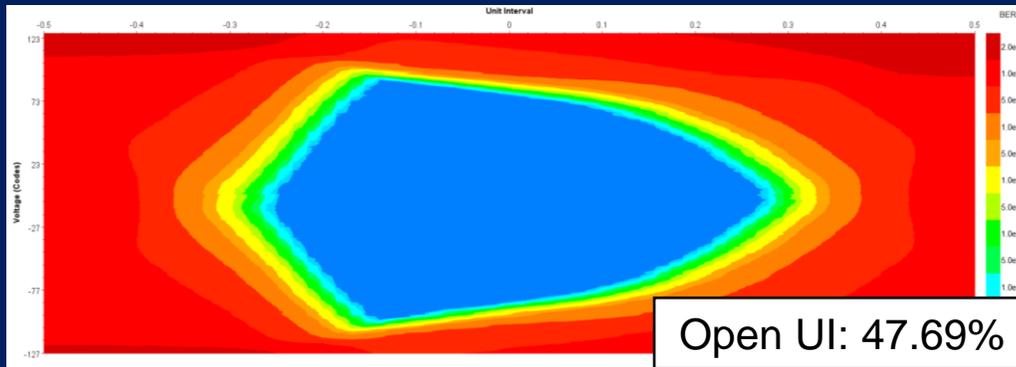
事前測定(0 Gy)

TGC要求値照射後測定(33 Gy)

JATHub
1.0 Gbps



PS board
8.0 Gbps



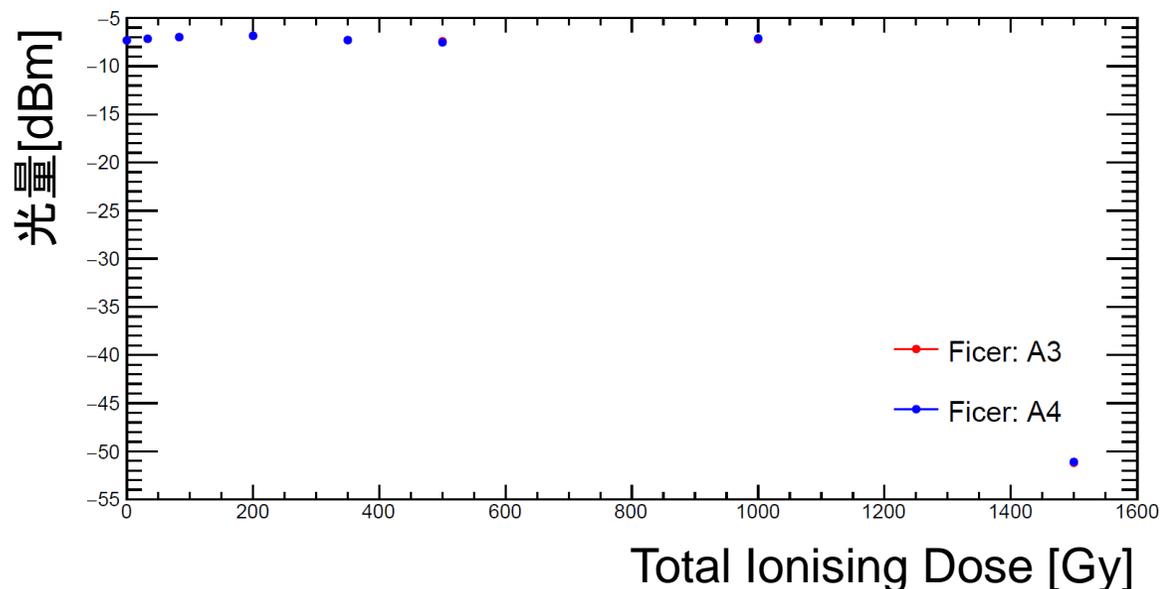
- Broadcom社, Ficer社の両方でEyeの開きにほとんど変化はなく、光通信機能に問題ないことを確認
- SFP+のTX or RXに損傷が観測された時点で、通信状態は基本的に接続不可(No Link)となる

測定結果: 光量測定

SFP+ TXの光量を測定し、正常な出力値であるか判断

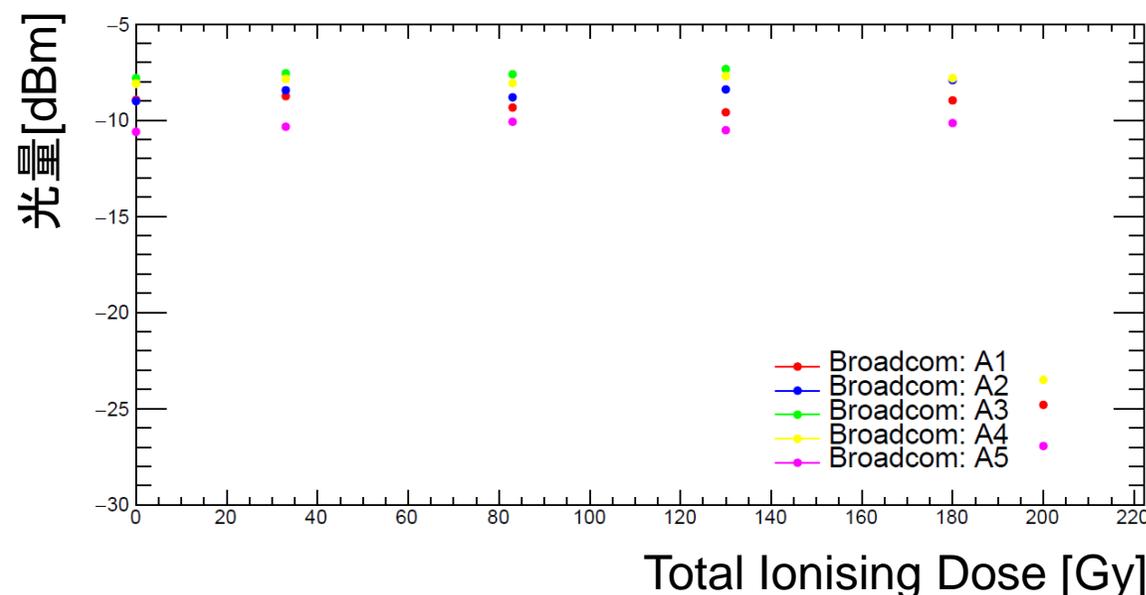
Ficer社:

- 1250 Gyまでは出力に変化なし
- 1500 Gyの時点で初めて不出力



Broadcom社:

- 200 Gyの時点で初めて不出力



TXが損傷したタイミングで光量に影響が及ぶ

dBm

- 1mW = 0 dBmと定義したときの電力の単位
- $P[\text{mW}], A[\text{dBm}]$ とすると $A = 10 \log_{10} P$

TX, RXセパレート試験

2台のKC705を用いたIBERT相互試通信試験から、TX/RXの損傷の切り分けを行う

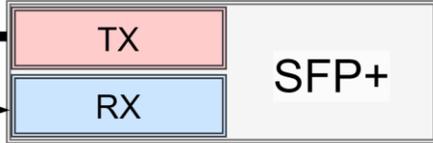
照射済みSFP+



SFP+

←→

未照射SFP+



SFP+

期待される通信状況の組み合わせ

照射側SFP+の状態	照射側SFP+: RX	未照射側SFP+: RX
TX損傷	Link	No Link
RX損傷	No Link	Link
TX損傷, RX損傷	No Link	No Link

【結果の例】

Ficer社: FSPP-H7-M85-X3DM

累計照射量 [Gy]

照射済みSFP+	200	250	1500
TX	○	○	×
RX	○	×	×

Broadcom社: AFBR-710SMZ

累計照射量 [Gy]

照射済みSFP+	33	200
TX	○	×
RX	○	○

○: 生存
×: 損傷

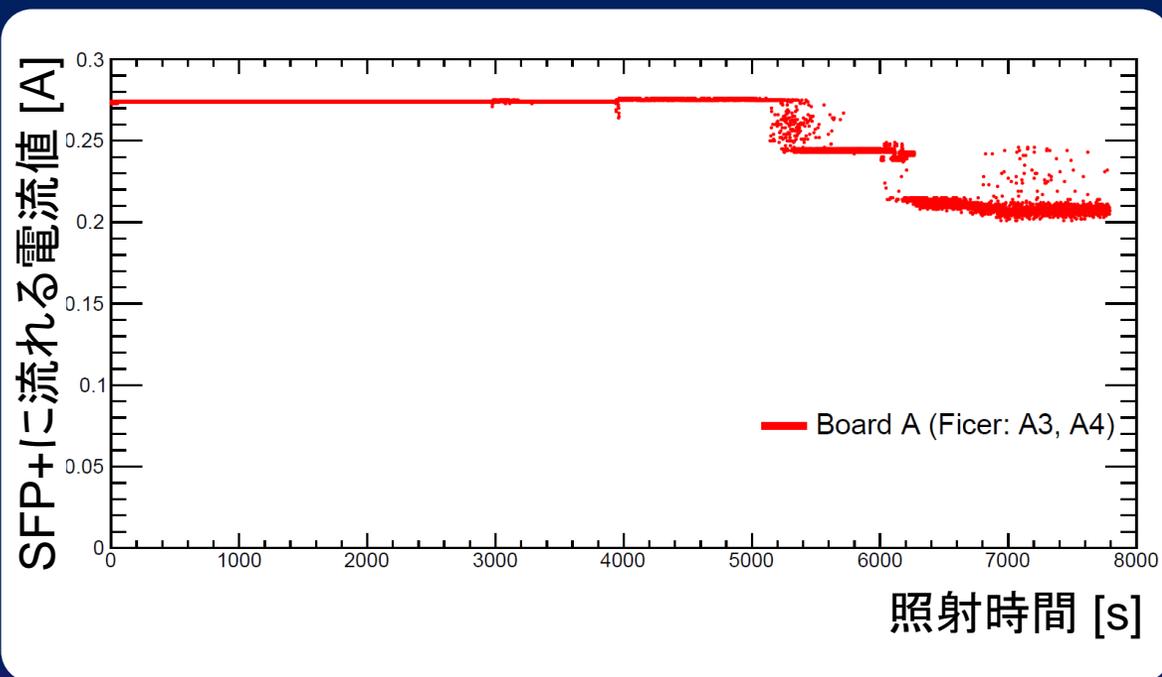
2社間のモジュールで損傷の仕方に違いがある

電流値の変化

照射中にSFP+に流れる電流を測定し、損傷したときの様子をモニタリング

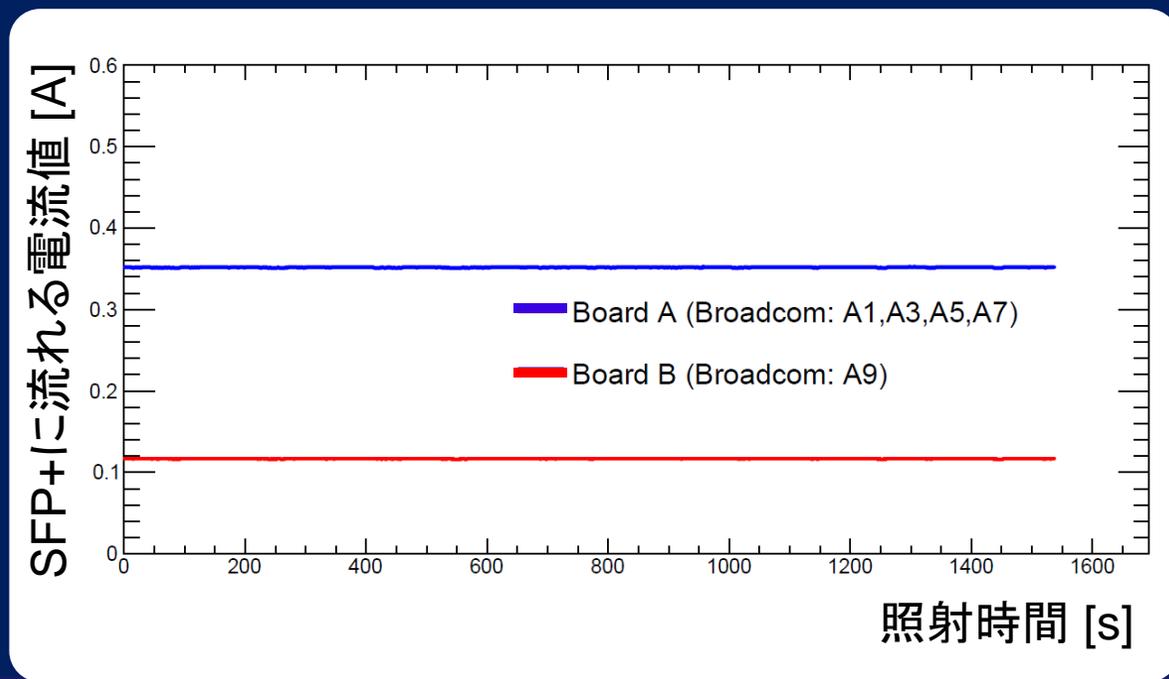
Ficer社:

- 照射中(1500 Gy時)に明らかなドロップを観測した
- RX損傷ではカレントに変化はなかったが、新たにTX損傷が観測されたタイミングでドロップ



Broadcom社:

- 照射量に関係なく電圧に変化なし
- 損傷の有無に関係なく一定であることが明らかに



ガンマ線照射試験のまとめ

SFP+ 型番	TID要求値	正常動作可能線量*	個体数
Ficer: FSPP-H7-M85-X3D*	33 Gy	200 Gy	10
Broadcom: AFBR-710SMZ		33 Gy	10

全個体でTGC運用上の要求値における正常動作を確認した

*: 全個体で正常動作を確認出来たときの線量

【試験結果の内訳】

Ficer社: FSPP-H7-M85-X3D*

累計照射量 [Gy]

累計照射量 [Gy]	200	250	350	500	750	1000	1250	1500
X3DM: 5個体	○	—	□	□	—	□	—	×
X3DMi: 5個体	○	□	—	—	□	—	□	—

○: TX, RX 生存
 —: 照射なし
 □: TX 生存, RX 損傷
 ×: TX, RX 損傷

Broadcom社: AFBR-710SMZ

累計照射量 [Gy]

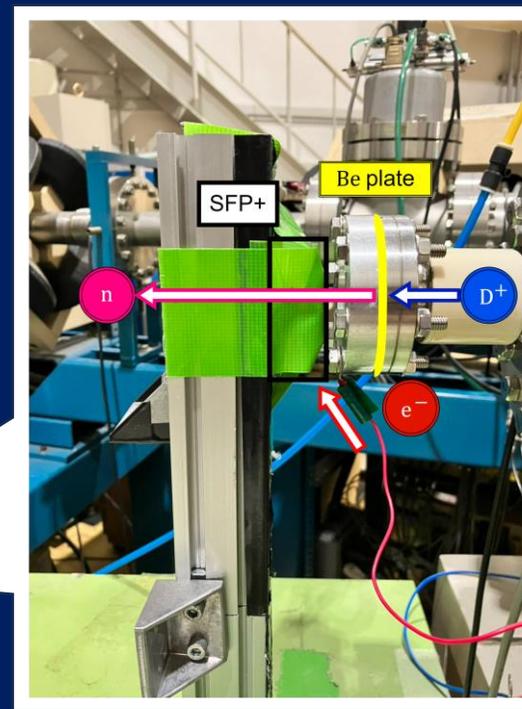
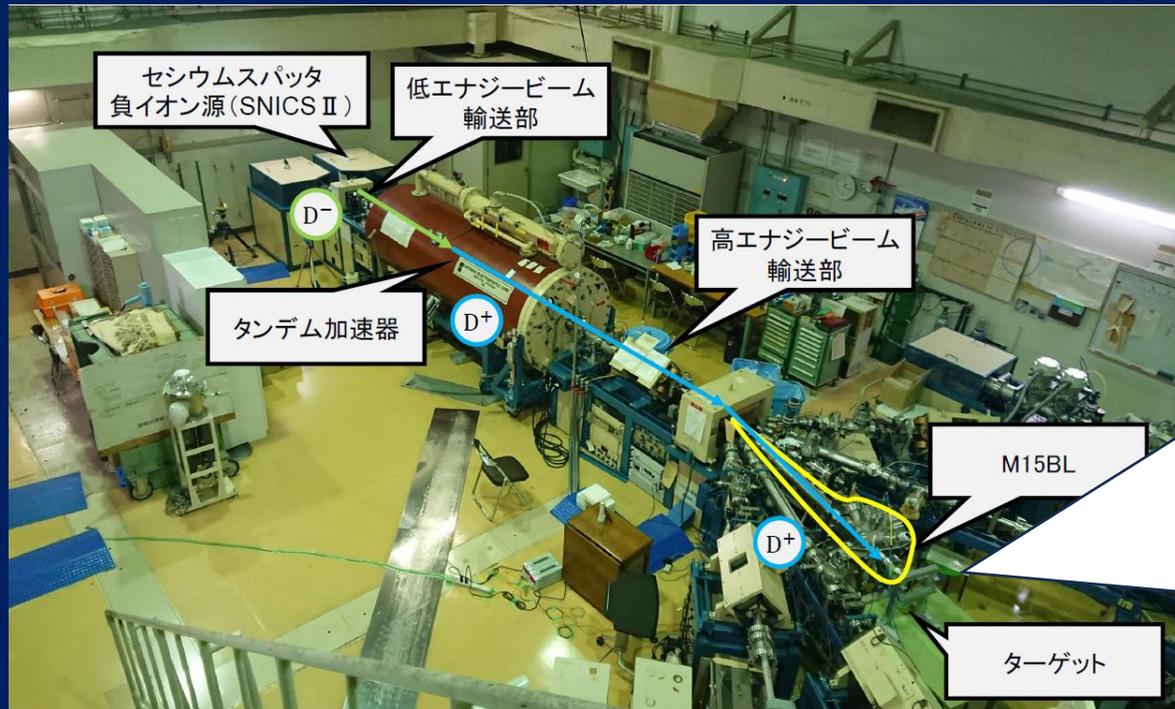
累計照射量 [Gy]	33	83	130	180	200
1個体	○	△	△	—	—
9個体	○	○	○	○	△

○: TX, RX 生存
 —: 照射・測定なし
 △: TX 損傷, RX 生存

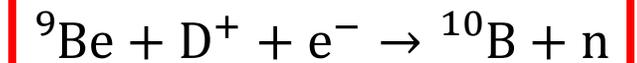
中性子線照射試験—NIEL耐性評価—

中性子照射試験の概要

- 場所: タンデム静電加速器 @神戸大学
- 線量要求値: 1.3×10^{12} neutron/cm²
- 対象SFP+モデル: Ficer社 FSPH-H7-M85-X3DM series (10個体)
- タンデム加速器で生成したD⁺をBe板に衝突させて生じる中性子をSFP+に照射



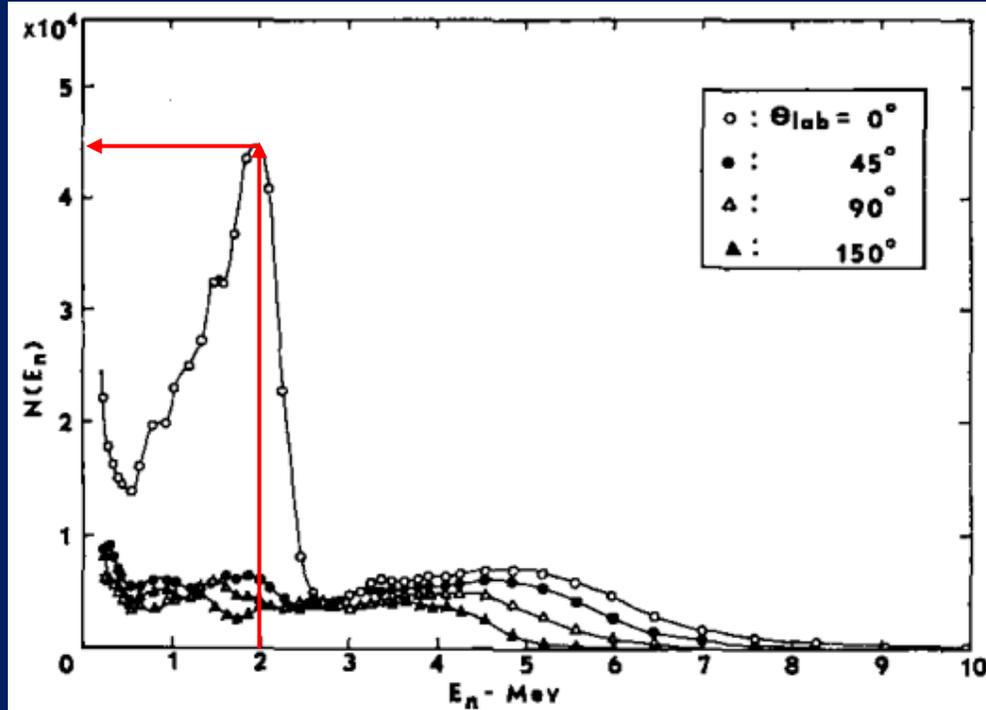
約2.8 MeV のD⁺がBe板に衝突し、中性子が放出される



電子数(ターゲット電流値)から中性子数を計算する
→ データロガーから解析

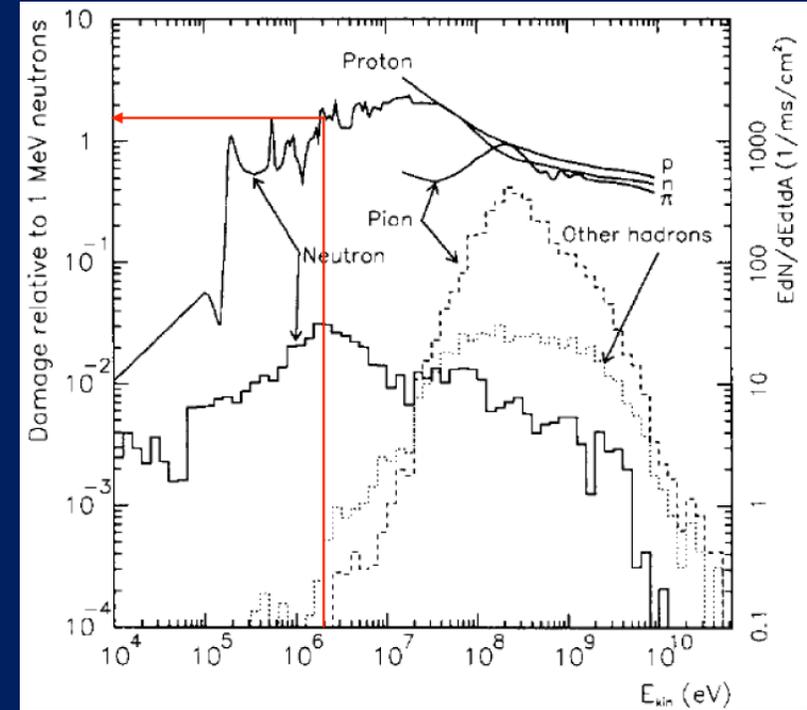
中性子のエネルギー分布と相対効果

Journal of Nuclear Science and Technology 5, 22 (1968)



D⁺ (2.8 MeV)がBe板に衝突したときに生じる中性子のエネルギー分布

NIMA 335 (1993) 580-582

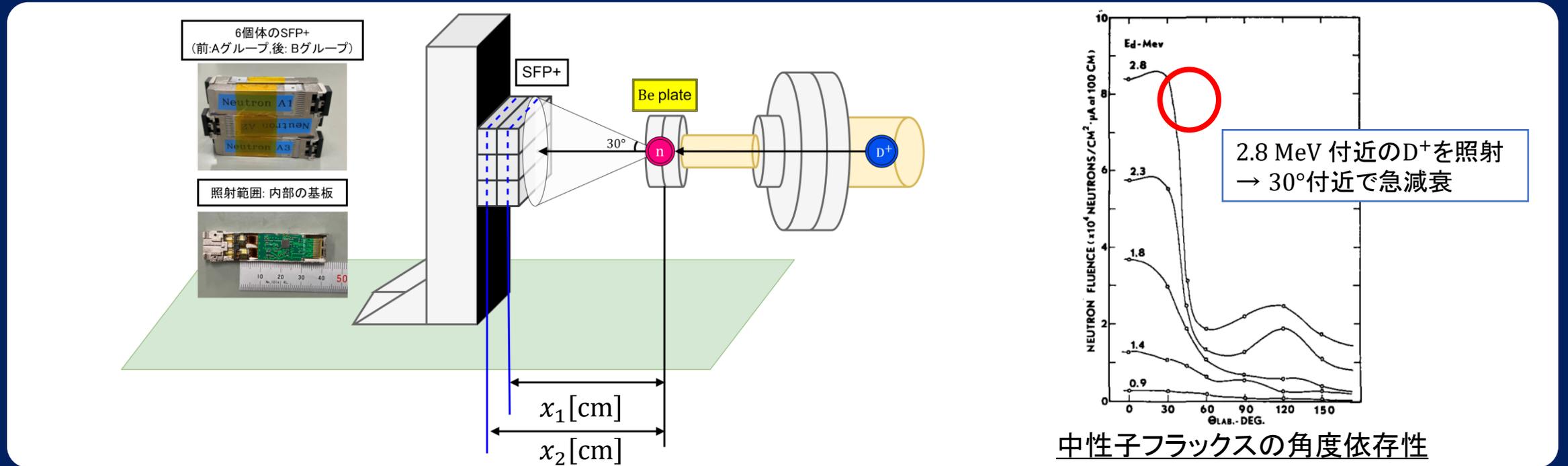


1 MeV中性子に対する相対効果

- 2 MeVのとき中性子数がピーク(左図)
- 1 MeVに対して、2 MeV中性子を与える影響は0(20%)ほど変化する(右図)
- 本実験では、保守的に中性子数を1 MeV中性子数としてカウント

照射セットアップと中性子数の見積り

中性子フラックスの角度依存性・照射範囲を考慮してセットアップを構築



(単位時間・面積あたりの)中性子数
$$N(x, t, I) = (4.9 \pm 1.5) \times 10^6 \text{ neutron/cm}^2/\mu\text{A/s} \times \left(\frac{10}{x}\right)^2 \times \int I dt$$

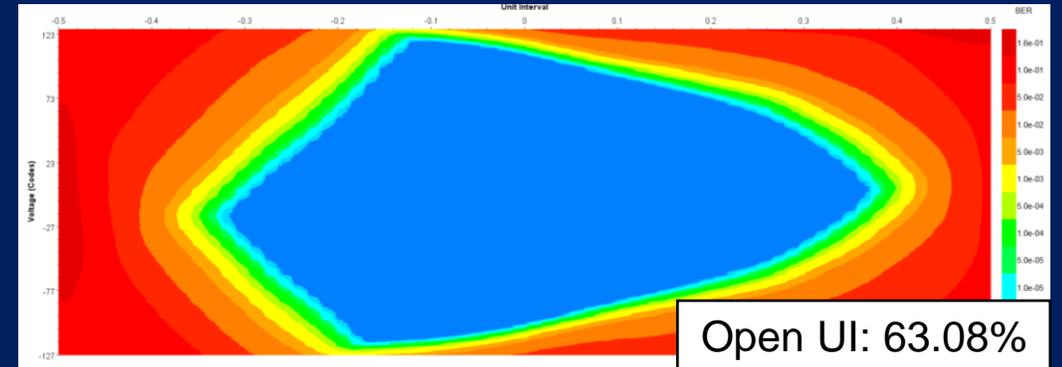
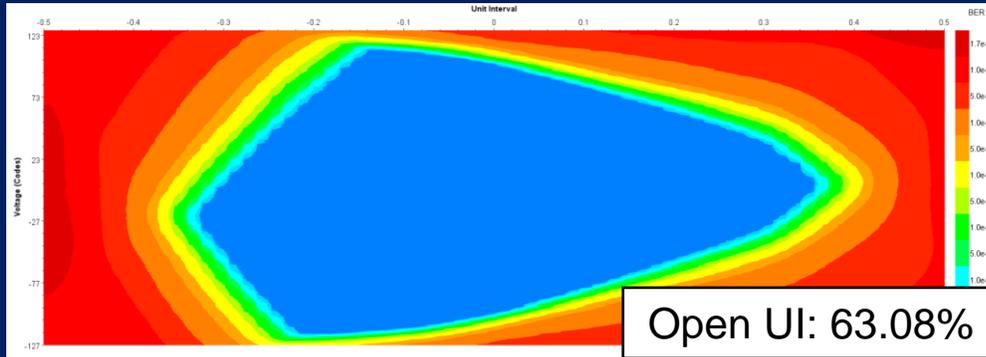
- 先行研究 (COMET phase-I): Beターゲットから10 cm, カレント1μAの中性子数 $(4.9 \pm 1.5) \times 10^6$ neutron/cm²/μA/s
- I [μA]: ターゲットカレント, x [cm]: Be板からの距離, t : 照射時間

測定結果と中性子照射試験のまとめ

事前測定(0 Gy)

TGC要求値達成後測定
(11×10^{12} neutron/cm²)

PS board
8.0 Gbps



- 全個体でEyeの開き、光量において問題は観測されていない
- 測定において、TX, RXに損傷は見受けられない

SFP+ 型番	NIELの要求値 ($\times 10^{12}$ n/cm ²)	正常動作可能線量 ($\times 10^{12}$ n/cm ²)	個体数
Ficer: FSPP-H7-M85-X3D*	1.3	0.8** - 11**	10

全個体でTGC運用上の要求値における
正常動作を確認した

*: 温度や通信レートのカバー範囲が異なるモジュール

** : 損傷したわけではなく、マシンの状況やマシンタイムにより打ち止め

これまでの放射線耐性試験のまとめ

- 商用素子およびボードに対する追加の照射試験を実施してきた
- 搭載素子に対する試験は一通りコンプリート

種類	TID (ガンマ線照射)	NIEL (中性子照射)
For PS board		
LDO	完了	完了
DAC	完了	完了
参照電圧供給素子	完了	完了
オペアンプ	完了	完了
QSPI フラッシュメモリ	完了	完了
クロックジッタークリーナ	完了	-
PP ASIC	完了	-
光ファイバー	完了	-
For JATHub		
DDR用LDO	完了	完了
SDカード	完了	-
For PS board and JATHub		
SFP+トランシーバー	完了	完了

ボードのTID試験も進行中

JATHub: 完了

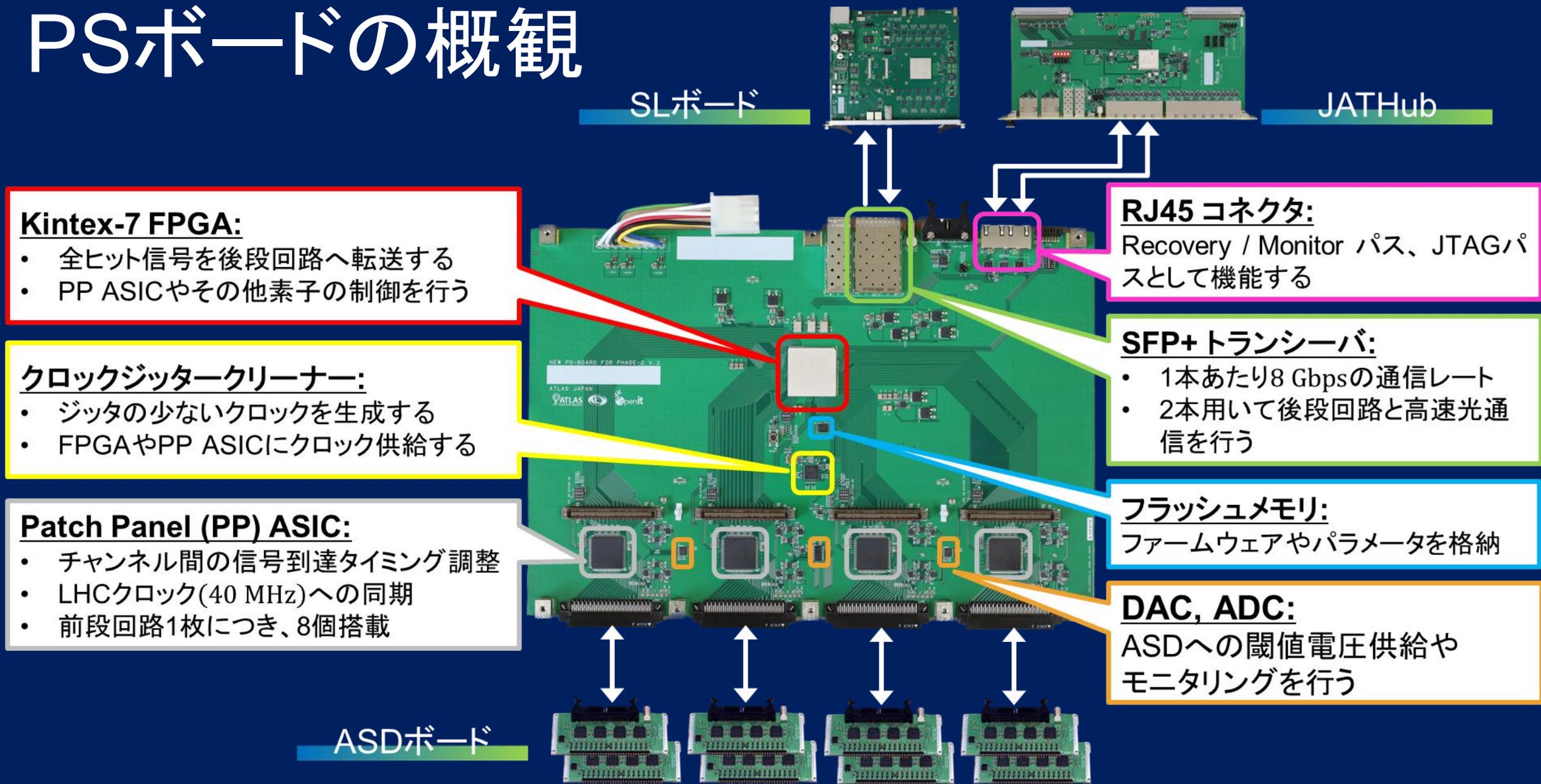
PS board: 来春中の実施を検討

結論

- 2029年から高輝度LHCが運転開始予定
 - ATLASミュオン検出器(TGC)には回路系のアップグレードが要求
- 検出器近傍に設置されるフロントエンド回路には高い放射線耐性が必要
 - 10年間で安定動作を保証するための堅牢性
 - TID: $\mathcal{O}(10)$ Gy
 - NIEL: $\mathcal{O}(10^{12})$ neutron/cm²
- 回路系の量産に向けてSFP+(商用素子)の放射線耐性試験を実施した
 - 照射した全個体が高輝度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
- Next: SFP+の追加検証、PSボードに対するガンマ線照射試験を行う

Backup

PSボードの概観



BER測定の実理

- 送信ビット数と発生したエラー数の比で算出される
- 実際の評価で用いる送信ビット数は有限であるため、信頼区間を導入し、BERの上限値を定める

- CI: Confidence Interval

$$\text{(送信ビット数)} = \frac{1}{\text{BER}} \left(-\ln(1 - \text{CI}) + \ln \sum_{k=0}^{\text{(発生したエラー数)}} \frac{\text{((送信ビット数)} \times \text{BER})^k}{k!} \right) \quad (1)$$

- 発生したエラー数が0の時

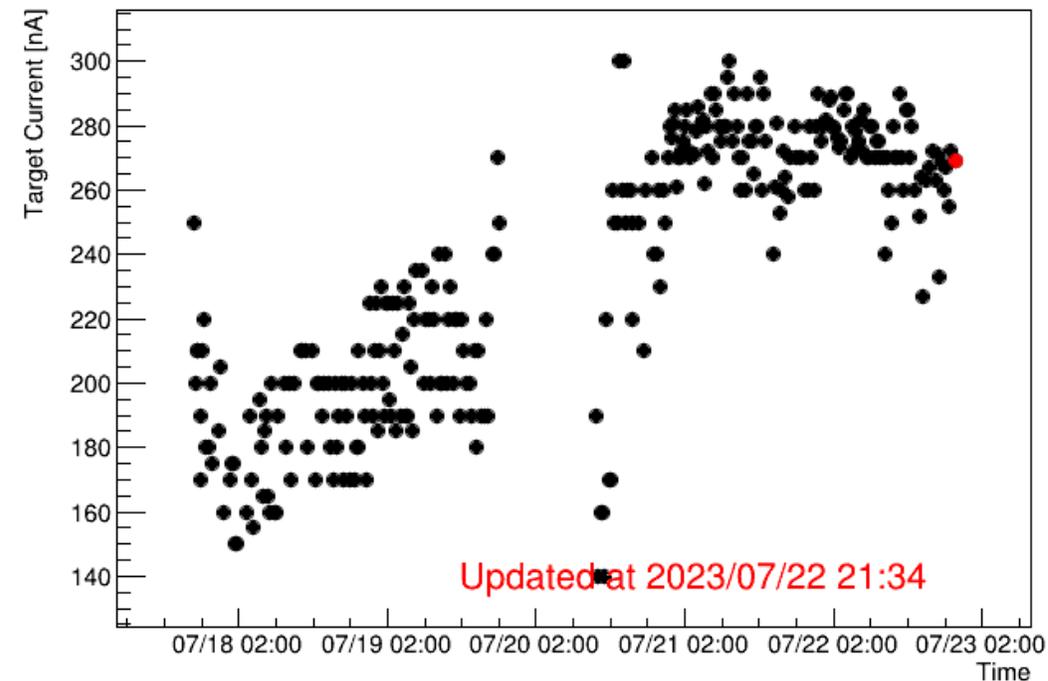
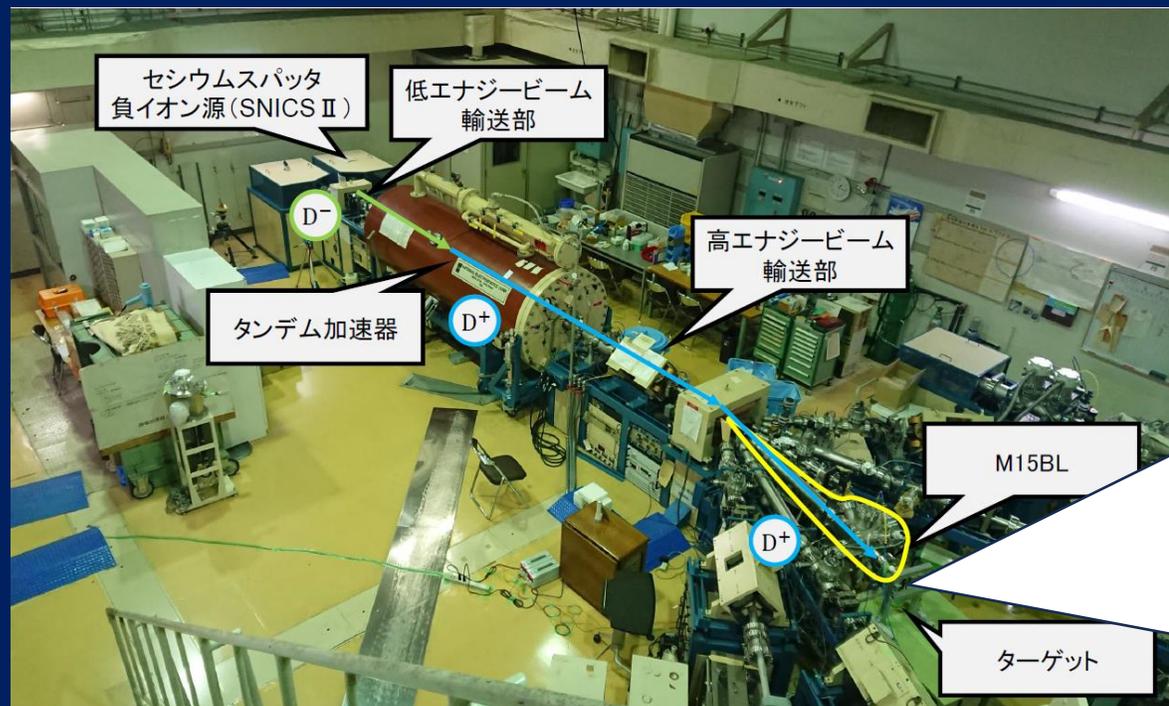
$$\text{BER} = \frac{-\ln(1 - \text{CI})}{\text{(送信ビット数)}} \quad (2)$$

タンデム加速器のオペレーション

➤ 中性子の生成(数)は以下のパラメータに依存

- 加速器のオペレーション(ビームの偏向、収束、加速器のターミナル電圧)
- イオン源の寿命や状態

➤ ターゲットカレント: 最大で $1 \mu\text{A}$, $4.9 \times 10^6 \text{ neutrons/cm}^2/\text{s}$ で運用可能



タンデム静電加速器

1.セシウムスパッタ負イオン源(SNICS II)

- ・ 負重水素イオン(D^-)ビームを生成

2.低エネルギービーム輸送部

- ・ ビームの収束や軌道修正

3.タンデム加速器

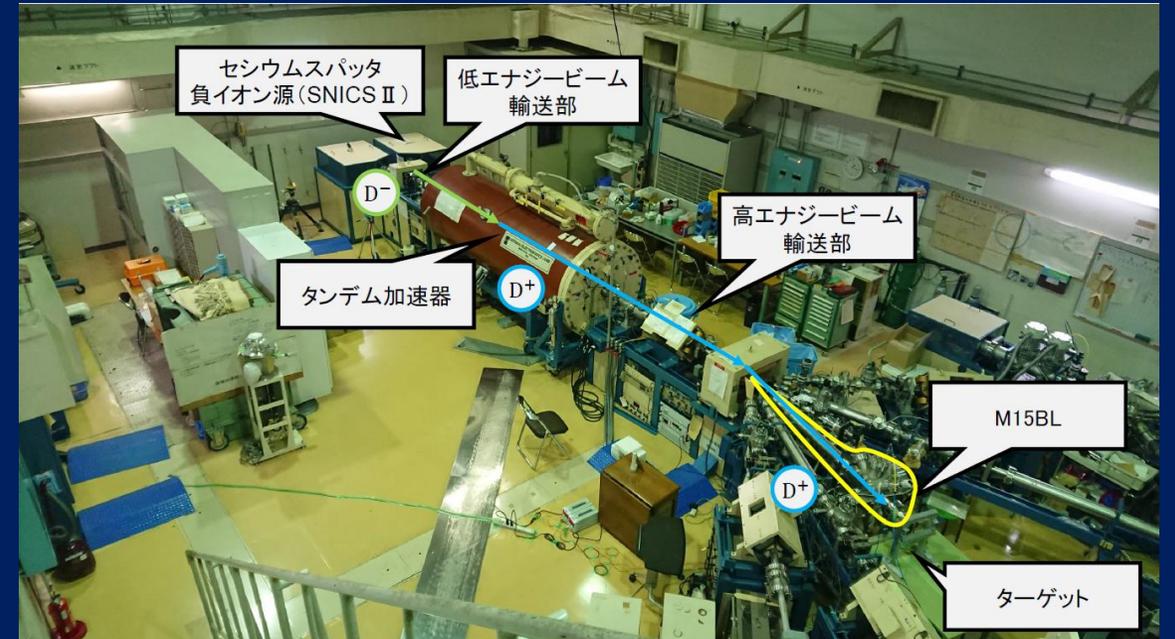
- ・ D^- が加速し、 D^+ (重陽子)に変換されさらに加速

4.高エネルギービーム輸送部

- ・ 二重磁気四重極レンズを用いて、ビームの収束
- ・ 偏向電磁石を用いて、各ビームラインに配分

5.M15BL

- ・ ターゲットにビームを照射
- ・ Be 板に D^+ を衝突させて生じる中性子をSFP+に照射



引用:[加速器について \(kobe-u.ac.jp\)](http://kobe-u.ac.jp)

タンデム静電加速器

加速器本体

- 2本の加速管を両端にもった高電圧ターミナルが納められている

加速の仕組み

低エネルギービーム輸送部から入射された負イオン D^- が高電圧ターミナルに向かって加速

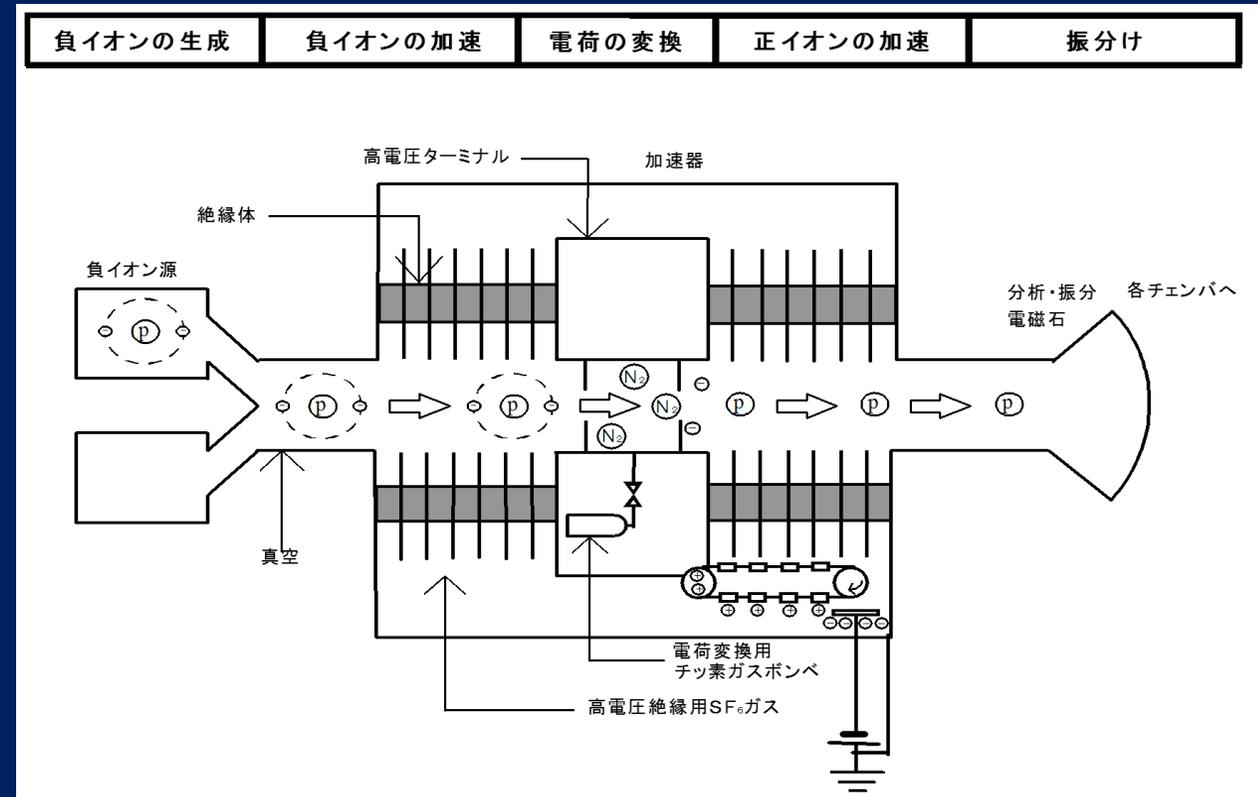


ターミナル内の窒素ガス層で電子をはぎとられて D^+ に変換(荷電変換)



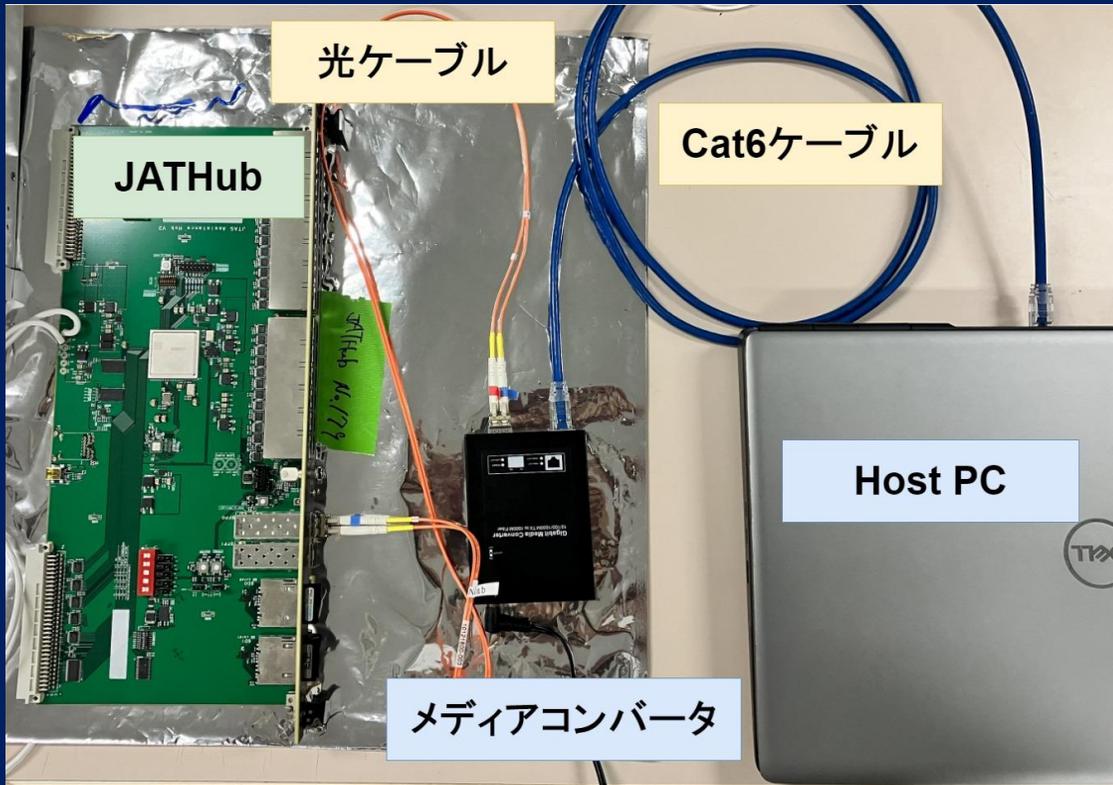
D^+ が加速器出口に向かって加速

→ 荷電変換を行うことで一つの電圧で2段階加速を実現



JATHubを用いた光Ethernet通信試験

- 使用するSFP+に対して光Ethernet通信(ping, ssh)が可能か事前測定として確認
- メディアコンバータの規格変換(電気信号↔光信号)



```
コマンドプロンプト - ssh root@19
Microsoft Windows [Version 10.0.22621.2428]
(c) Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\dhash>ping 192.168.1.10

192.168.1.10 に ping を送信しています 32 バイトのデータ:
192.168.1.10 からの応答: バイト数 =32 時間 <1ms TTL=64

192.168.1.10 の ping 統計:
    パケット数: 送信 = 4、受信 = 4、損失 = 0 (0% の損失)、
    ラウンドトリップの概算時間 (ミリ秒):
        最小 = 0ms、最大 = 0ms、平均 = 0ms

C:\Users\dhash>ssh root@192.168.1.10
The authenticity of host '192.168.1.10 (192.168.1.10)' can't be established.
RSA key fingerprint is SHA256:Ry3aJb09GVKk/nQtUV/4vd6WsMCTVCZ773MTeuyK4ZI.
This key is not known by any other names
Are you sure you want to continue connecting (yes/no/[fingerprint])? yes
Warning: Permanently added '192.168.1.10' (RSA) to the list of known hosts.
root@192.168.1.10's password:
root@jat-flashtest:~#
```

ping

ssh