



Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences



素粒子実験における 放射線影響の研究について

大阪大学 理・物

中沢 遊

2018.08.23

自己紹介

- 中沢 遊 (なかざわ ゆう)
 - ・ 大阪大学 理・物 D3 (DC2)
 - ・ y-nakazawa@kuno-g.phys.sci.osaka-u.ac.jp
 - ・ 素粒子実験：COMET実験
 - ・ 放射線耐性
 - ・ 機械学習ユーザー (超初心者)

本日の流れ (半導体・ソフトウェア)

- 素粒子実験における放射線問題
 - ・ 素粒子実験とは？
 - ・ 放射線問題
- 【具体例】 COMET Phase-I
 - ・ COMET Phase-I
 - ・ ソフトエラー対策
 - ・ 対策の評価試験



ほぼ初の異分野コミュニケーションなので...

1. 少しでも勉強して帰りたいです.
2. 難しい部分と簡単な部分が極端かもしれません.

素粒子実験における 放射線問題

素粒子実験とは

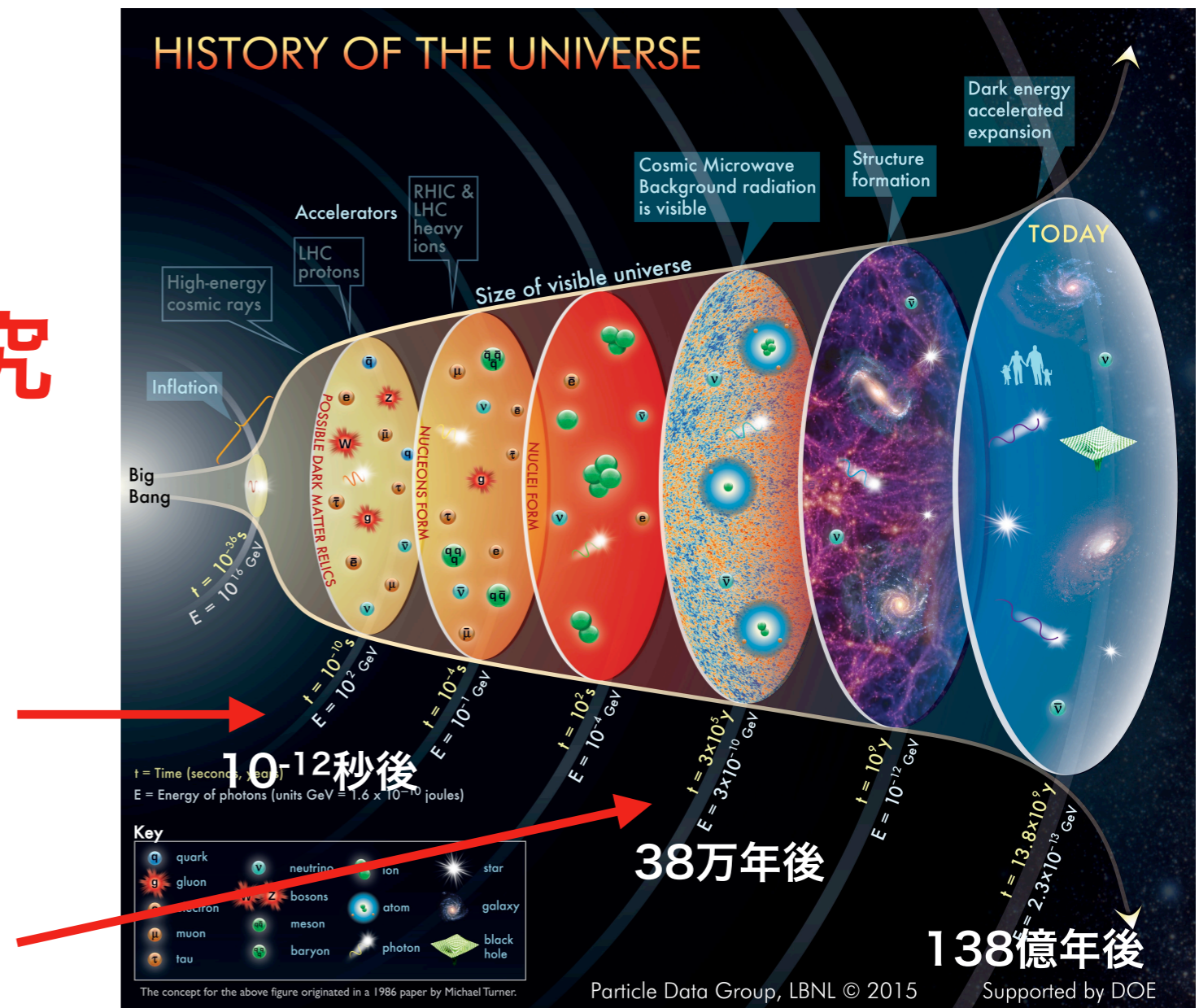
- 何が物質を構成しているのか？
- どういう力が働いているのか？

より深く知るためには
全ての根源である

初期宇宙の状態を研究 (高エネルギー)

光や粒子で満ちた宇宙
(加速器の限界)

宇宙の晴れ上がり
(光が長距離進める)



URL: <http://www.particleadventure.org/history-universe.html>

高エネルギーへのアプローチ

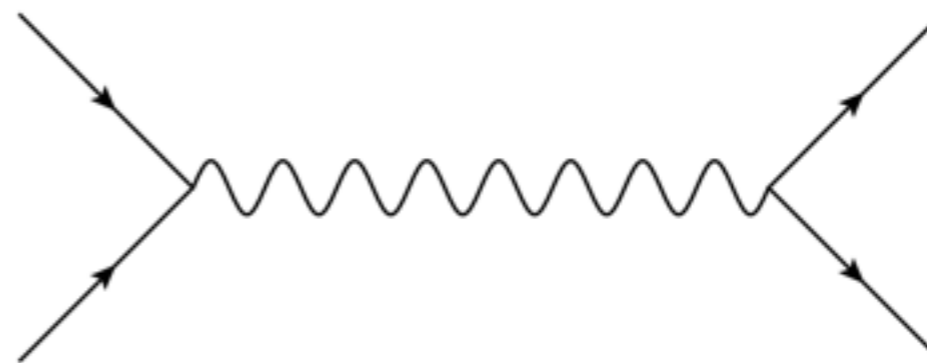
エネルギー・フロンティア（直接観測）

- 質量とエネルギーの等価性： $E = mc^2$



アインシュタイン

衝突粒子



新しい粒子

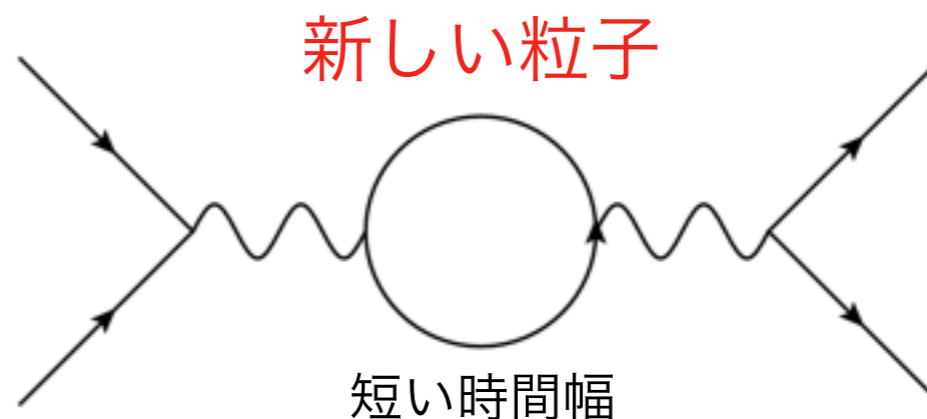
インテンシティ・フロンティア（間接観測）

- 不確定性原理： $\Delta E \cdot \Delta t \gtrsim \hbar$ (const.)



ハイゼンベルグ

相互作用粒子



新しい粒子

観測粒子

短い時間幅

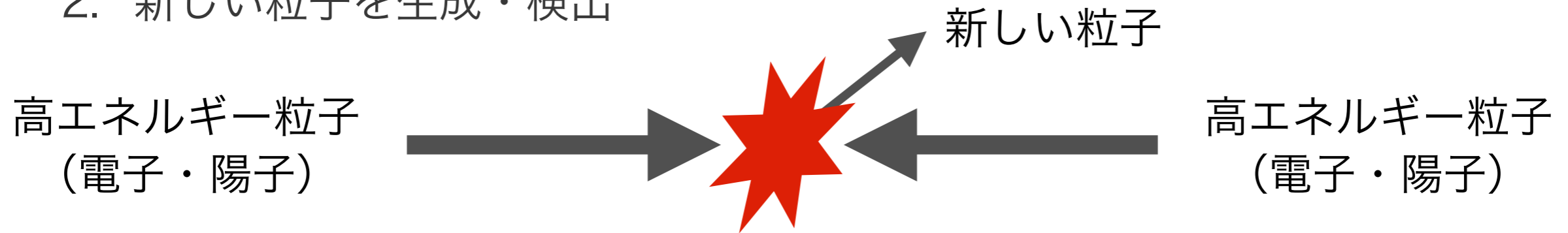
高エネルギーへのアプローチ

より深刻化する

エネルギー・フロンティア（直接観測）

- 質量とエネルギーの等価性： $E = mc^2$

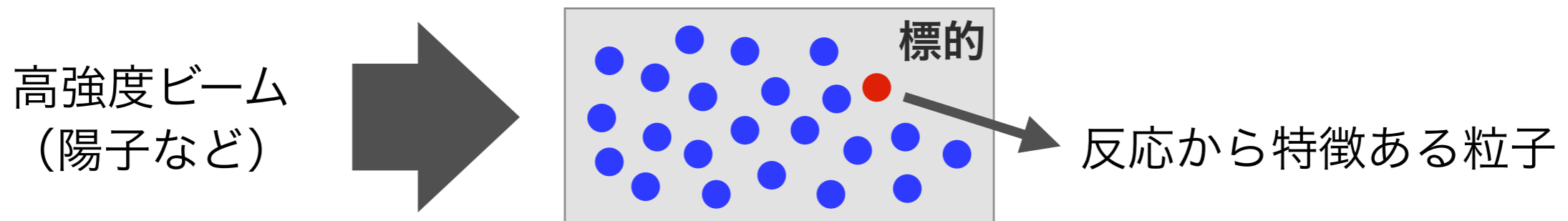
1. より高いエネルギーで衝突 → **高エネルギー・高強度の放射線**
2. 新しい粒子を生成・検出



インテンシティ・フロンティア（間接観測）

- 不確定性原理： $\Delta E \cdot \Delta t \gtrsim \hbar$ (const.)

1. より多くの粒子を生成 → **高強度の放射線**
2. 新しい反応後の特徴ある粒子を検出



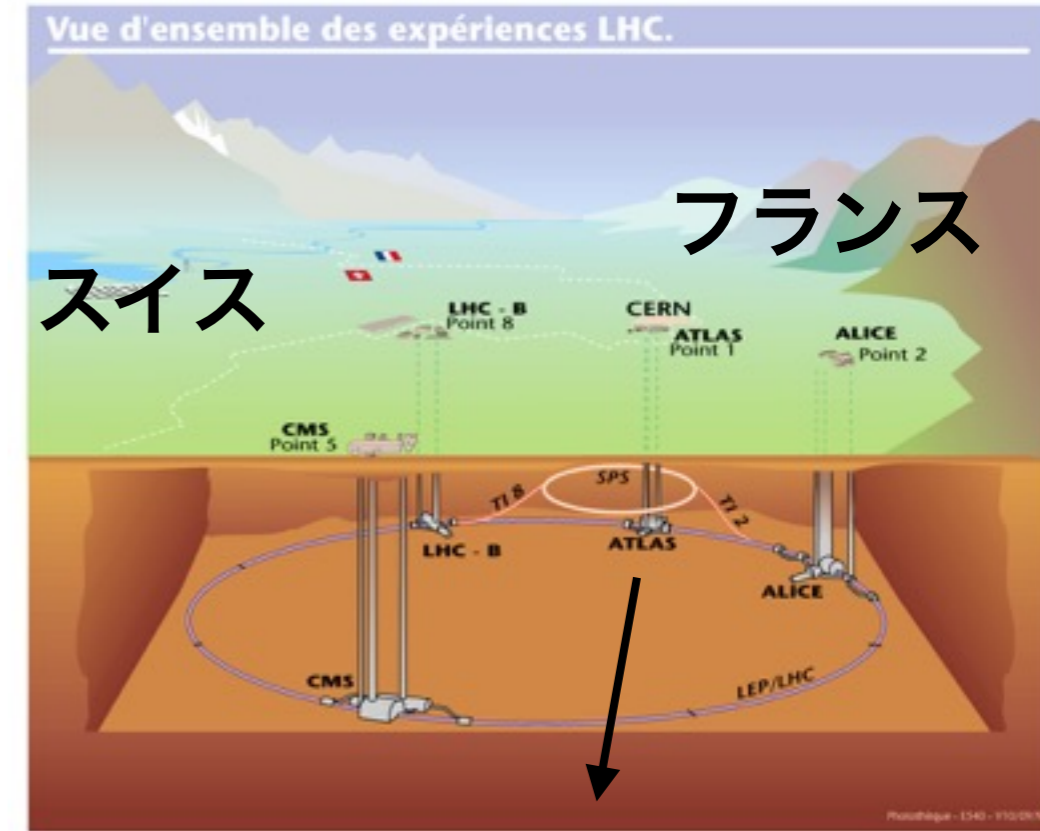
LHC @CERN



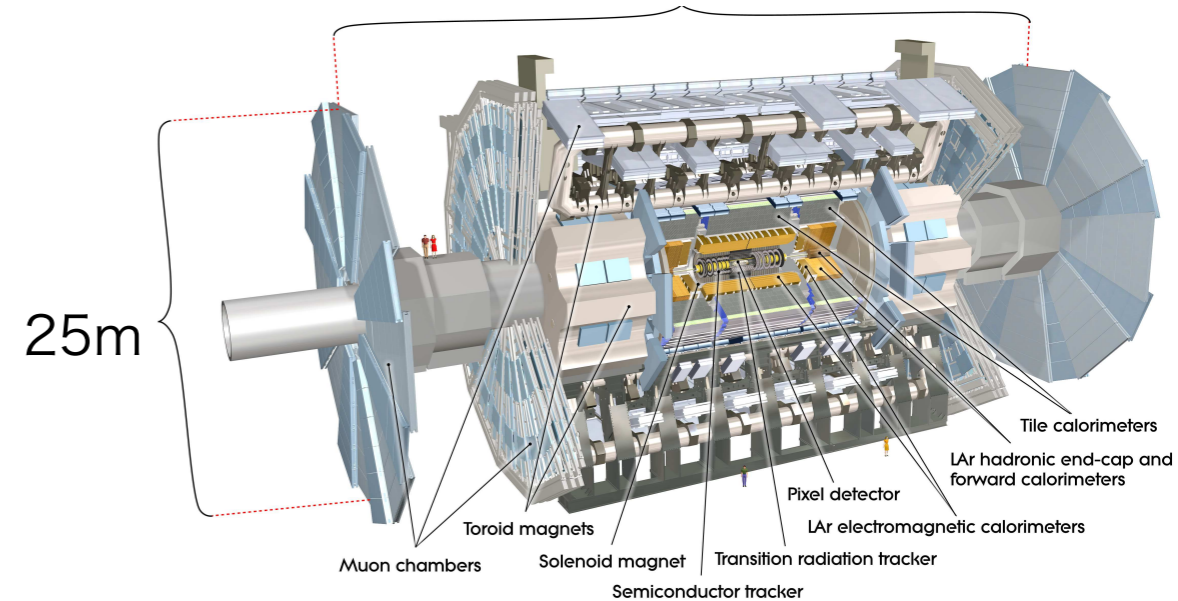
参照：Overall view of LHC experiments
URL: <https://cds.cern.ch/record/841555?ln=ja>

Large Hadron Collider

- エネルギー・フロンティア
 - ・ 衝突粒子：陽子 - 陽子
 - ・ 衝突エネルギー：13 TeV(eV：電子を1 Vの電位差で加速した時の電子のエネルギー)
- 最大放射線レベル [year⁻¹]
 - ・ ガンマ線：<1.6 MGy
 - ・ 中性子線：10^{14~15} n_{1MeVeq}/cm²
- 放射線の影響を受けるもの (ATLAS)
 - ・ 半導体検出器 (中心部)
 - ・ 約1億チャンネル
 - ・ 処理回路 (検出器近辺：S/N, ケーブリング)
 - ・ ASICやFPGAなどで検出器からの信号処理
 - ・ (全検出器) 約1億6000万チャンネル



ATLAS検出器
44m



参照：九州大学素粒子実験研究室/ATLAS

URL: <http://epp.phys.kyushu-u.ac.jp/index.php?ATLAS>

Belle II @KEK



SuperKEKB for Belle II

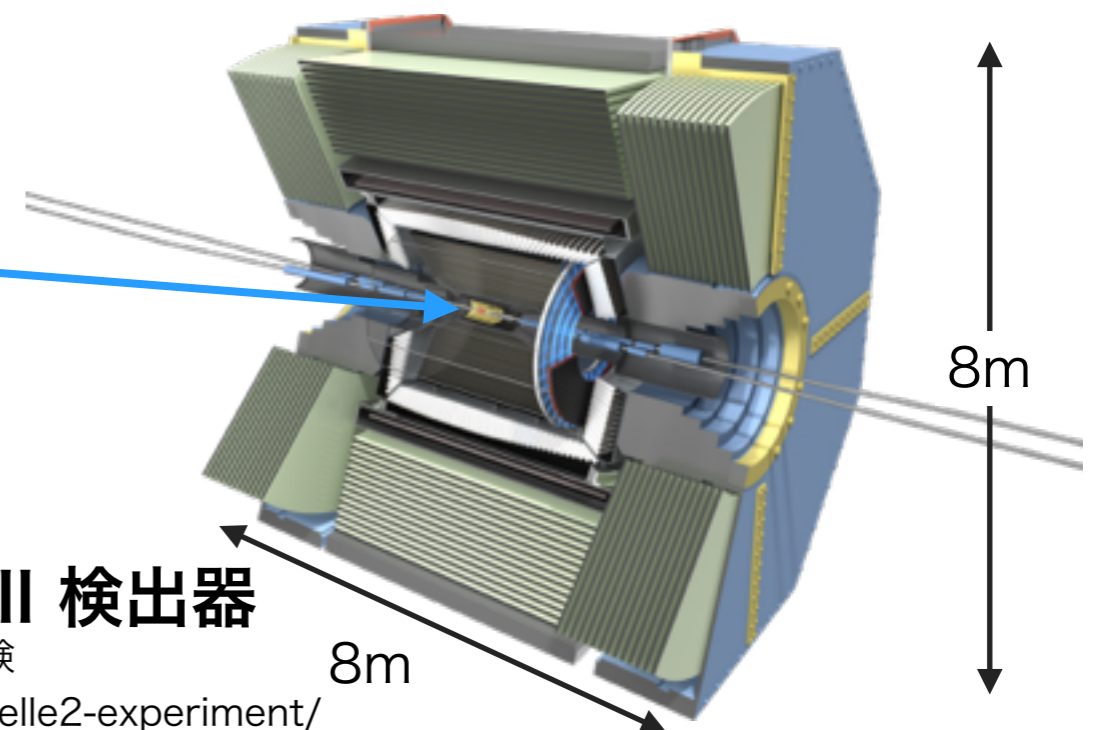
- インテンシティ・フロンティア
 - ・ 衝突粒子：電子 - 陽電子
 - ・ 衝突エネルギー
 - ・ 電子：7 GeV 陽電子：4 GeV
- 最大放射線レベル [year^{-1}]
 - ・ ガンマ線：30 kGy
 - ・ 中性子線： $10^{12} \text{ n}_{1\text{MeVeq}}/\text{cm}^2$
- 放射線の影響を受けるもの
 - ・ 半導体検出器（中心部）
 - ・ 約800万チャンネル
 - ・ 処理回路（検出器近辺）
 - ・ (全検出器) 約840万チャンネル

参照：KEK素粒子原子核研究所：Belle II 実験

URL: <https://www2.kek.jp/ipns/ja/special/belle2-nicolive/belle2-experiment/>



Belle II (首都大) URL: <https://www-hep.phys.se.tmu.ac.jp/research/belle2/index.html>

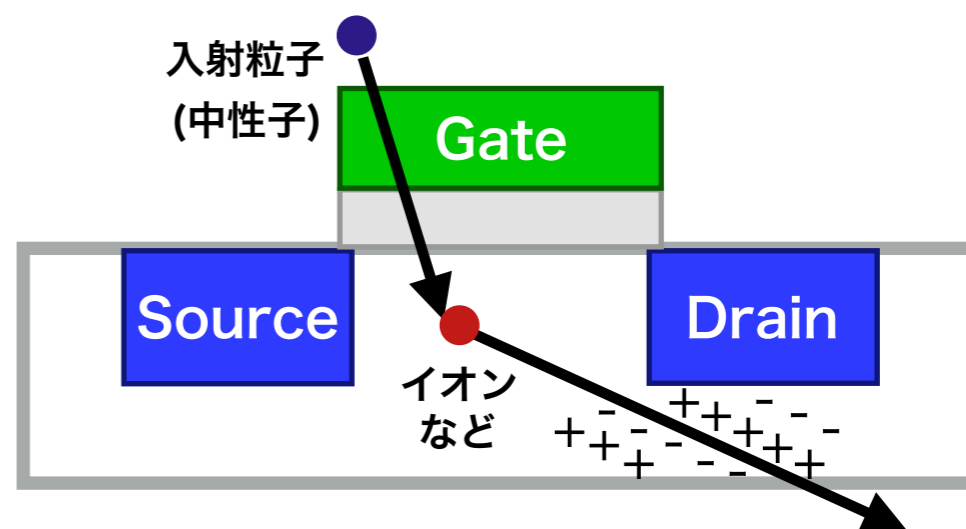


Belle II 検出器

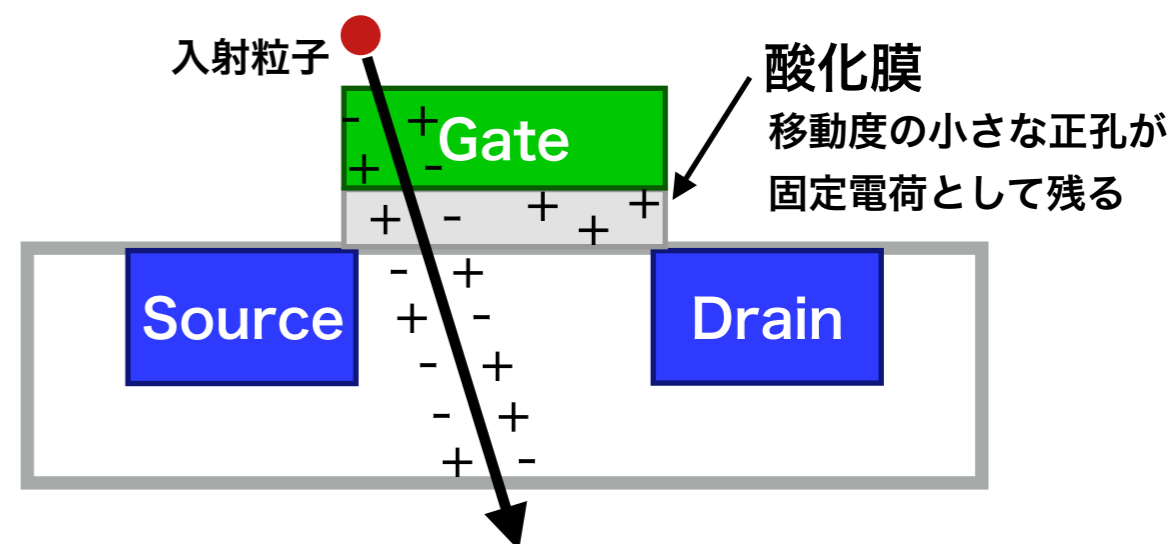
放射線による影響

- シングルイベント効果
 - ・ 1個の入射粒子が引き起こす電離作用による高密度電荷形成
 - ・ 一時的損傷または、永久損傷
- トータルドーズ効果
 - ・ 多量の放射線による固定電荷の形成
 - ・ 素子の特性劣化と永久損傷
- はじき出し損傷効果
 - ・ 放射線による半導体結晶内原子のはじき出し
 - ・ 素子の特性劣化と永久損傷

中性子のシングルイベント効果模式図



トータルドーズ効果模式図



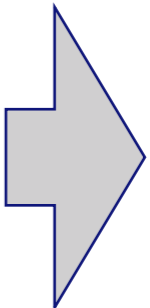
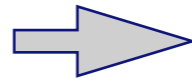
本講演のトピック：素粒子実験におけるソフトエラー

ASICやFPGAなど半導体を有する集積回路

1Bit反転 (Single Event Upset : SEU) はよくある

複数Bit反転 (Multi Bit Errors : MBE) は見かける

放射線への対策（ソフトウェア）

- 対策方法の例**
- 放射線量の削減（遠距離・遮蔽）
 - 誤り訂正符号を用いた自動修復（後半に紹介）  主流
 - 外部からのモニター&再書き込み
 - 耐放射線の素子を購入・開発  中・小規模実験では、予算とマンパワー的に厳しい
 - 価格がおおよそ2桁違う

CERN（人も予算も最大規模）

- 放射線耐性のある素子の独自開発
- 耐性試験をした商用製品の利用

【具体例：ATLAS】 検出器と処理回路が一体

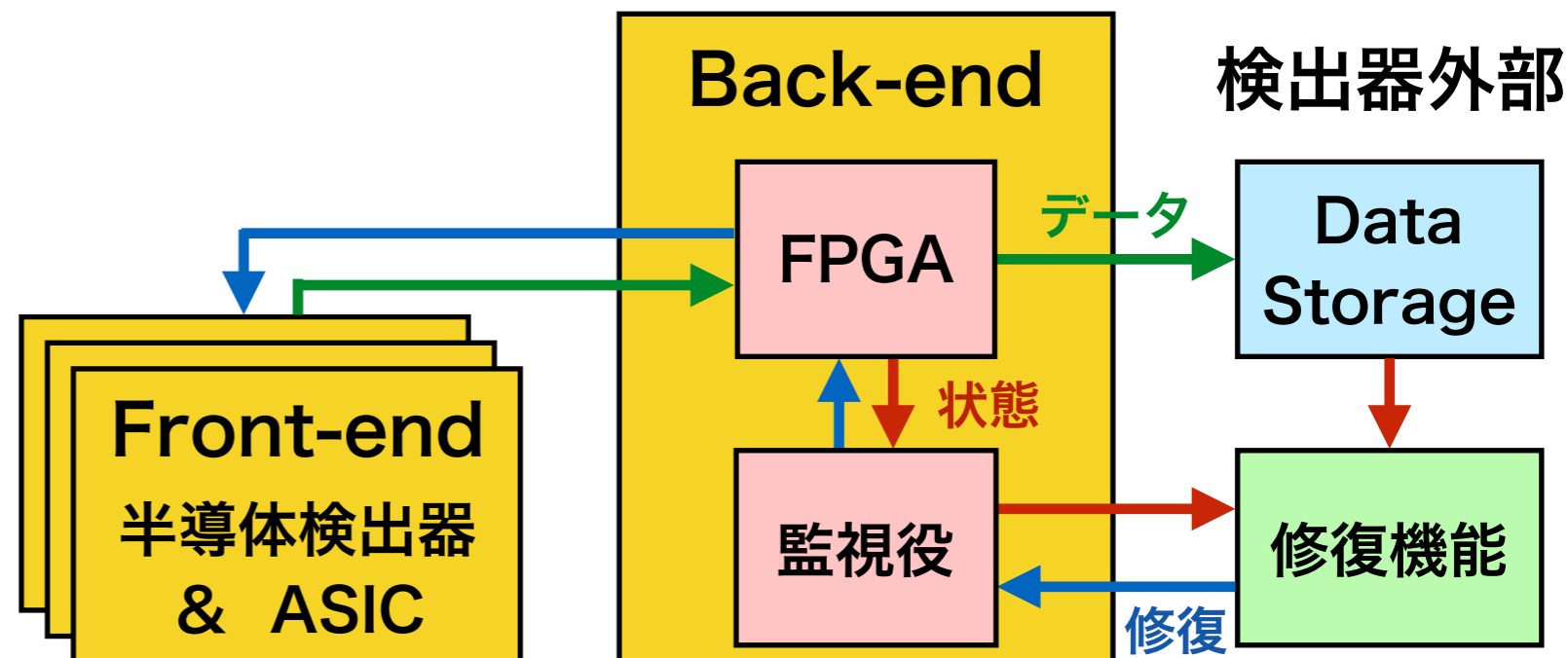
- ASICへの定期的なリコンフィギュレーション
- FPGAのエラーに対する修復アクション（リセット等）
- データの確認と全体への修復アクション

Belle II

- 耐放射線半導体検出器の独自開発
 - 検出器の性能は大切
- 耐性試験をした商用製品の利用

他の実験

- CERNや企業と共同開発
- 商用品の購入



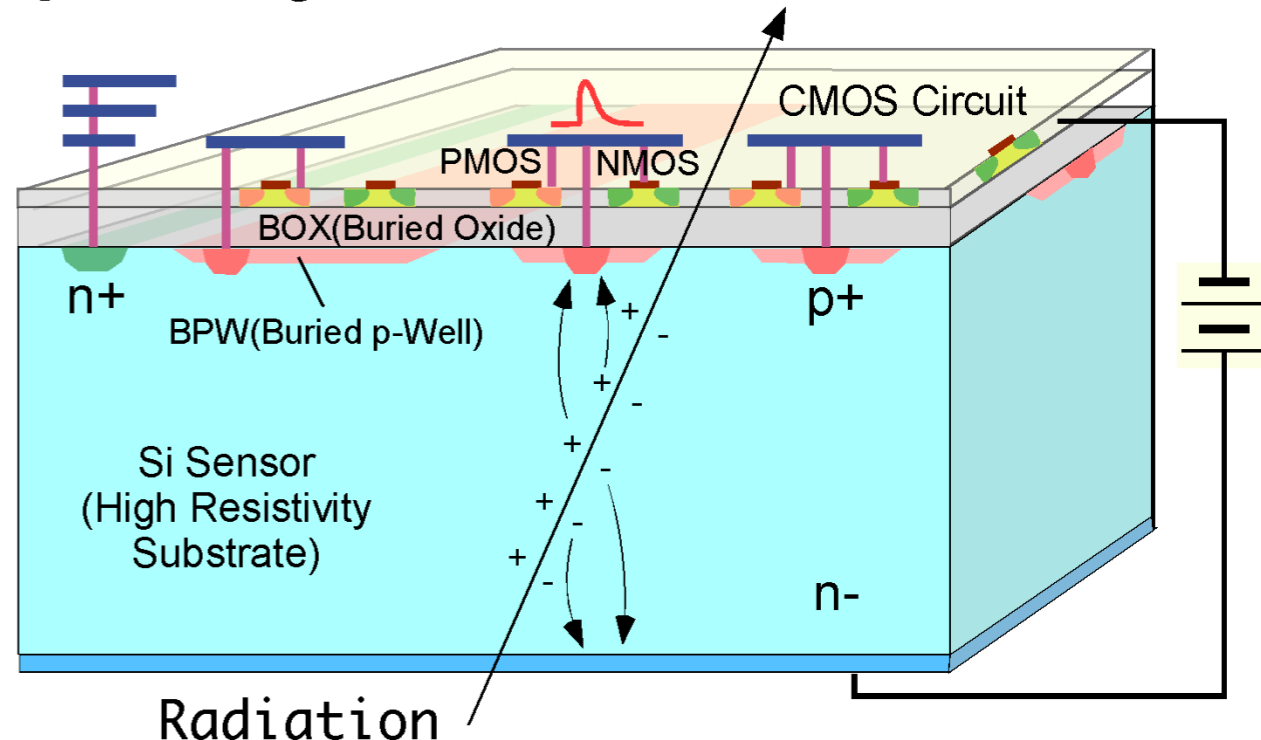
参照：矢島和希（阪大），日本物理学会2017年秋季大会

【余談】放射線の影響を受ける検出器

半導体検出器 (Belle IIで利用)

- 用途：荷電粒子の飛跡再構成
- 主な放射線影響：トータルドーズ効果
 - ・ 酸化膜内にも電子正孔対ができる
 - ・ 酸化膜に正孔がトラップされ正に帯電
- 対策例：Double SOI構造
 - ・ 酸化膜に中間シリコン層（負電位固定）を導入
 - ・ 正に帯電した影響を打ち消す

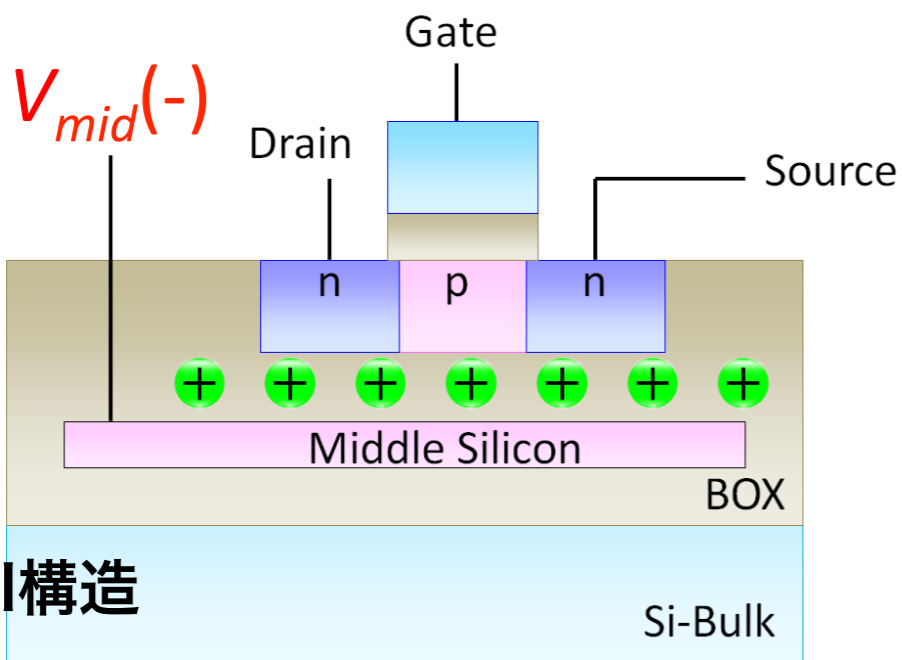
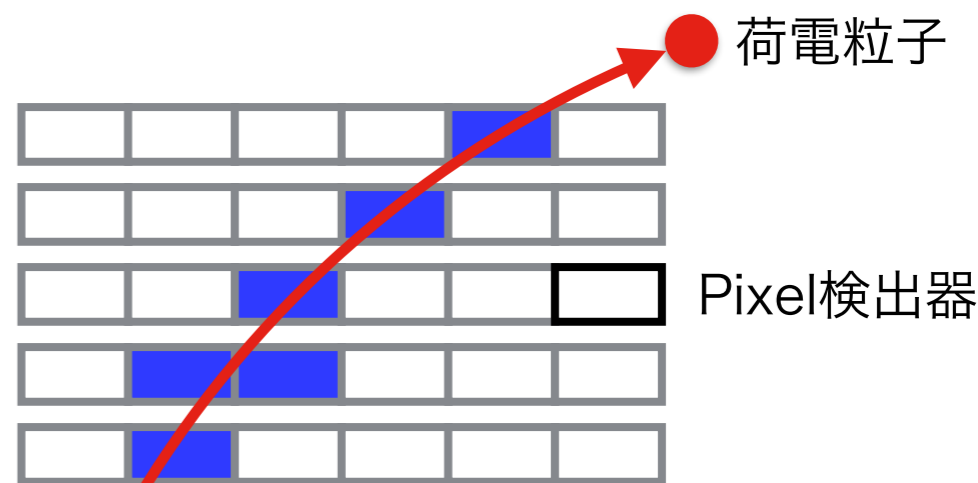
SOI Pixel Detector



新学術領域研究「3次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イメージングの展開」(H25~H29)

(昨年) 世界初, 位置分解能 $1\mu\text{m}$ 以下を達成

半導体検出器による飛跡再構成



Double SOI構造

小野善将, “高エネルギー実験のためのSOI技術を用いたPIXOR
Back 半導体検出器の研究開発 ~修士論文章・記念講演編~, 2012

前半まとめ：素粒子実験

- より初期に近い宇宙の状態を再現したい

- ・ 高エネルギー化・大強度化

→ **高エネルギー・大強度の放射線量**

- 放射線による半導体への影響

- ・ シングルイベント効果
- ・ トータルドーズ効果
- ・ はじき出し損傷効果

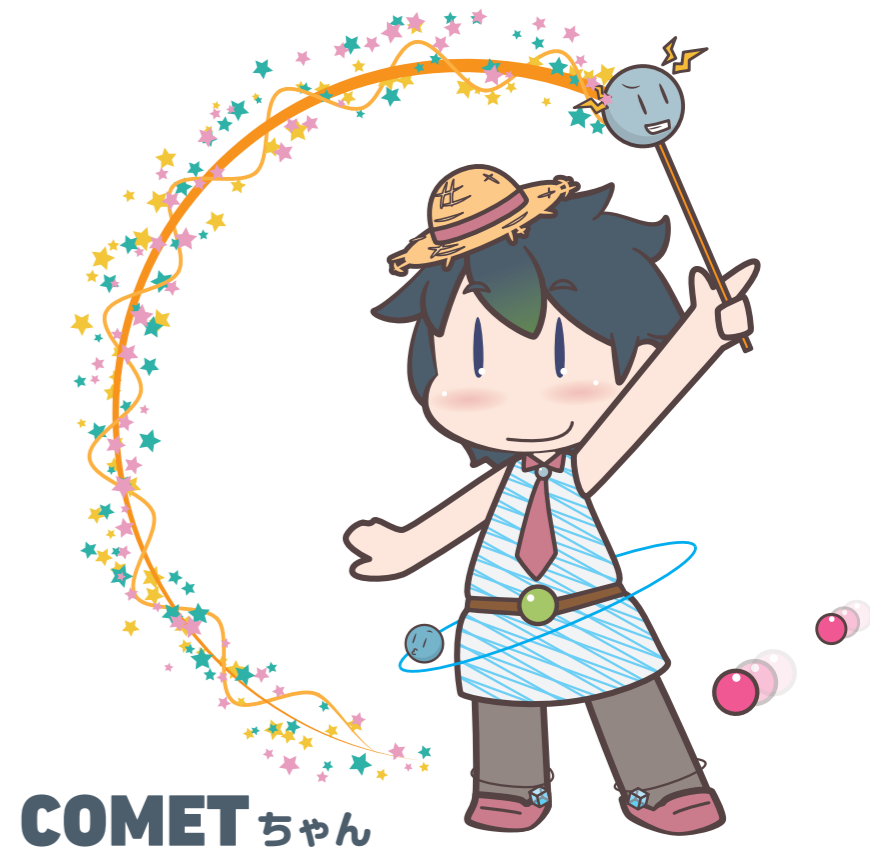
- 放射線への対策

- ・ 検出器：耐放射線検出器の開発
- ・ 信号処理回路

- ・ 大規模実験：独自開発 or **商業製品の放射線耐性評価**

- ・ **中・小規模実験：商業製品の放射線耐性評価**

施設／実験	ガンマ線 [kGy/year]	中性子 [n _{1MeVeq} /cm ² /year]
CERN	1600	10 ^{14~15}
Belle II	30	10 ¹²



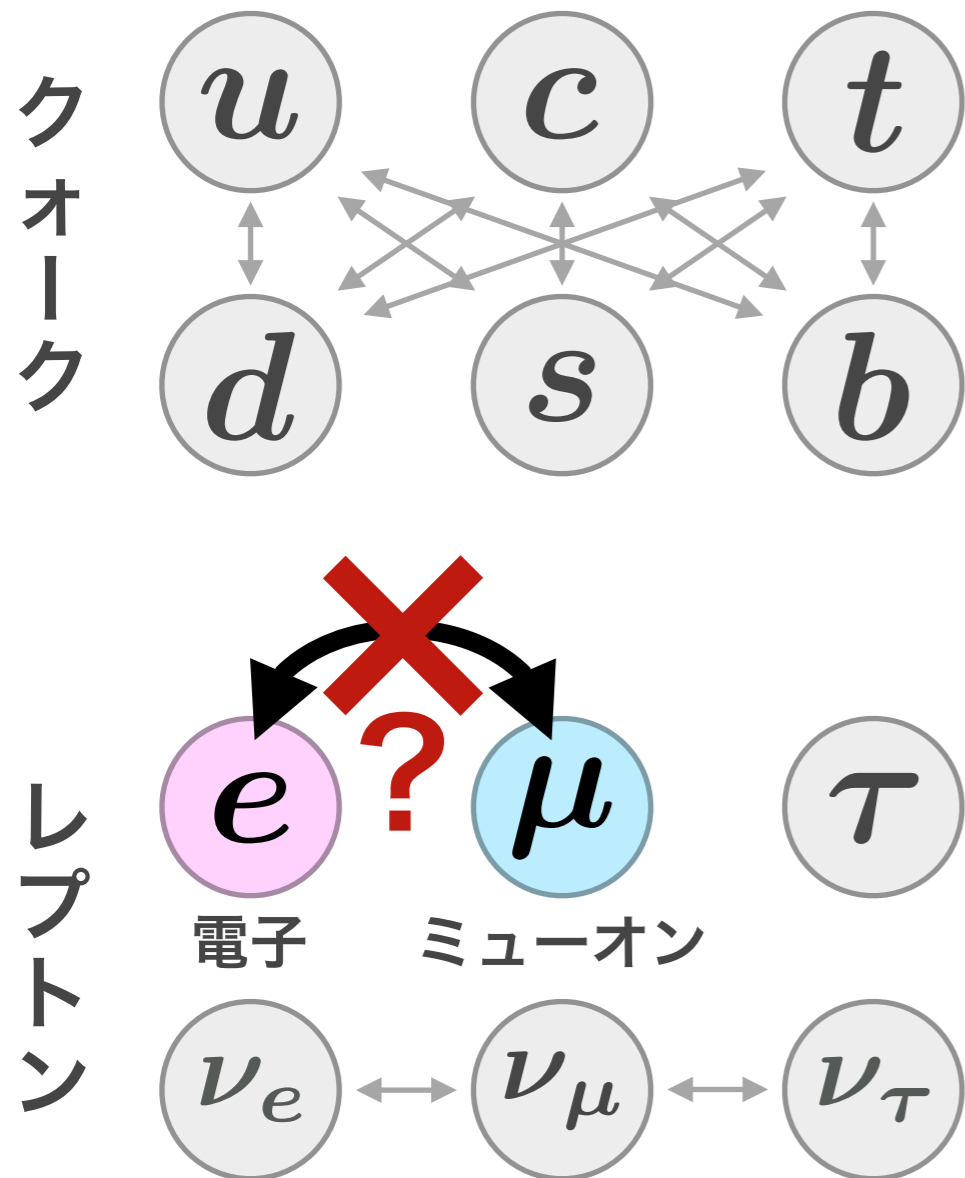
【具体例】

COMET Phase-I

ミューオン電子転換過程

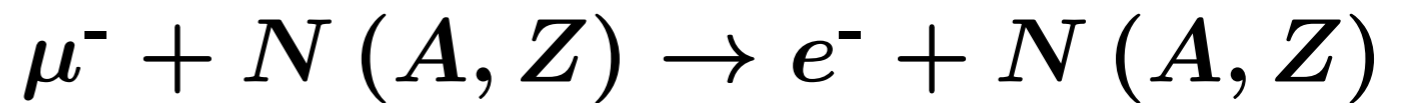
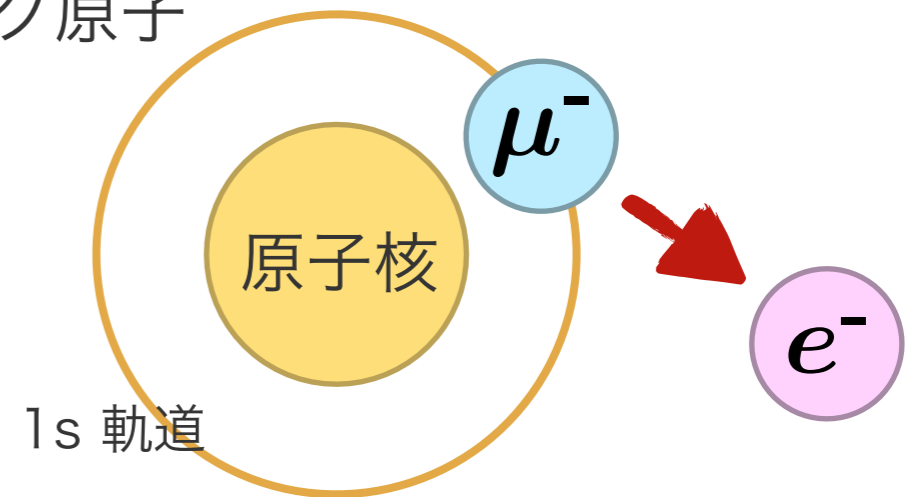
素粒子物理学 標準模型の物質粒子

小林・益川理論 (2008年 ノーベル賞)



ニュートリノ振動 (2015年 ノーベル賞)

ミューオンニック原子



ミューオン電子転換過程 (荷電レプトンフレーバー非保存)

例： $\mu \rightarrow e\gamma$ の崩壊をする割合

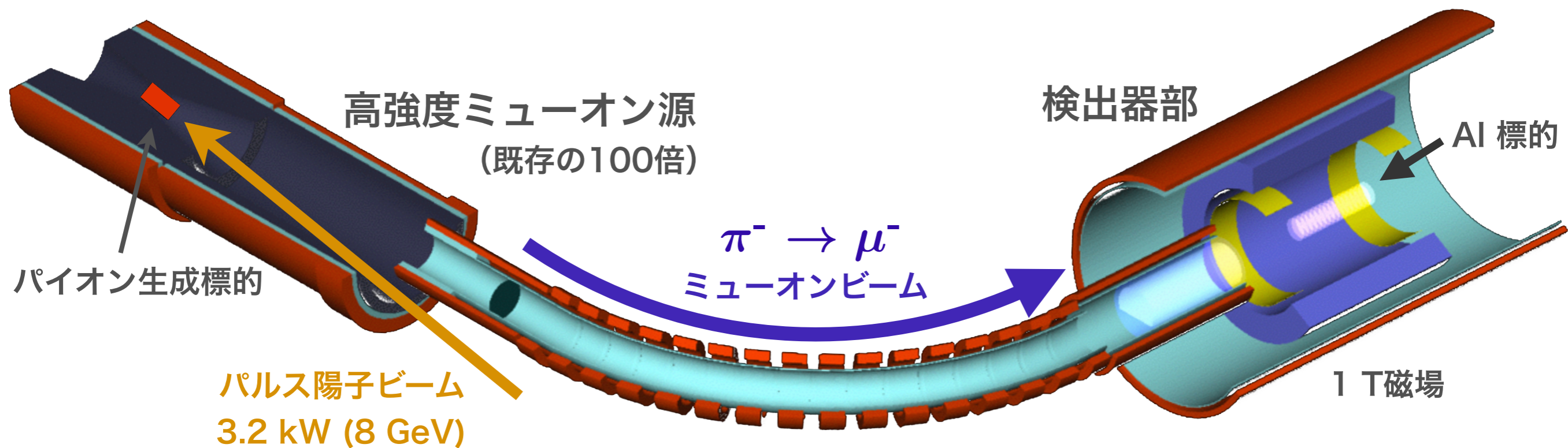
標準模型： $O(10^{-54})$

標準模型を超えた新物理： $O(10^{-15} \sim -17)$

(通常崩壊： $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$)

観測すれば新物理を示唆

COMET Phase-I



目的：AI原子中でのミュオン電子転換過程探索

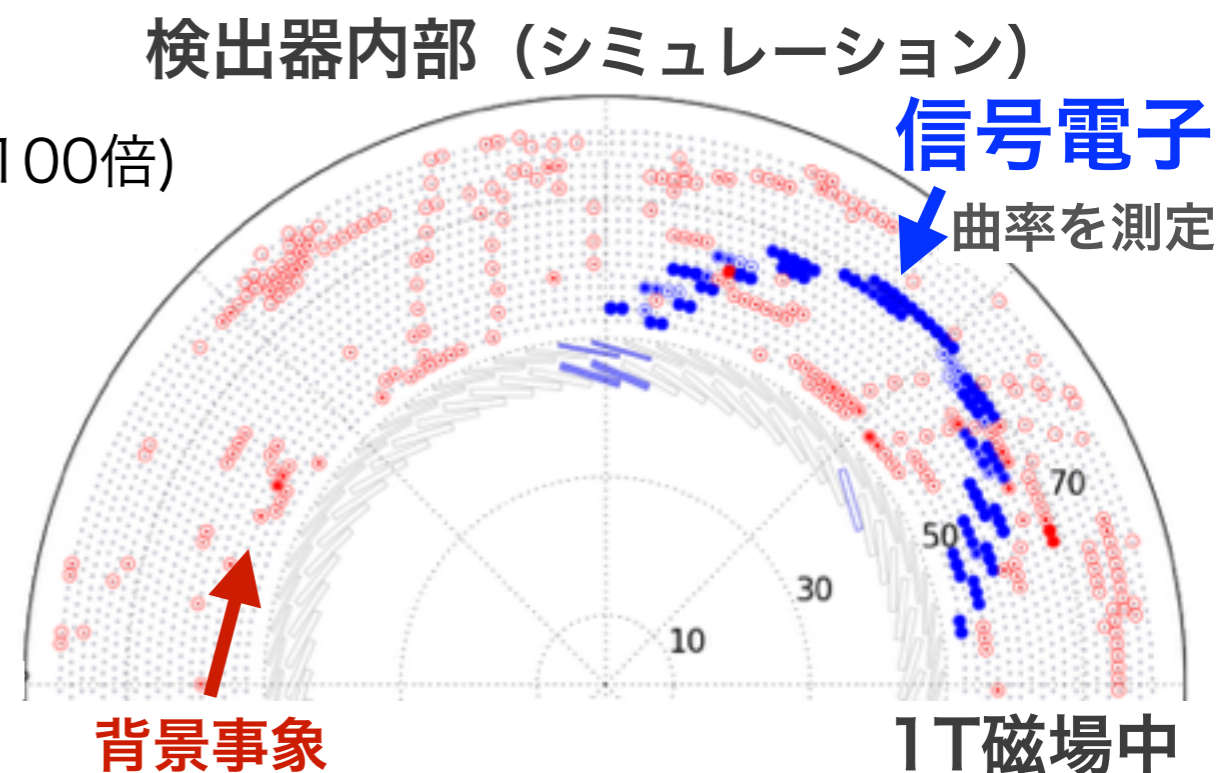
- ・ 茨城県東海村 J-PARC (2020年代初め)
- ・ 国際共同実験 (16カ国, 約180名) (先行実験の100倍)
- ・ 150日間で崩壊割合 $\sim 3 \times 10^{-15}$ まで測定

信号：単一エネルギー (105 MeV/c) の電子

粒子飛跡検出器：電子の運動量測定

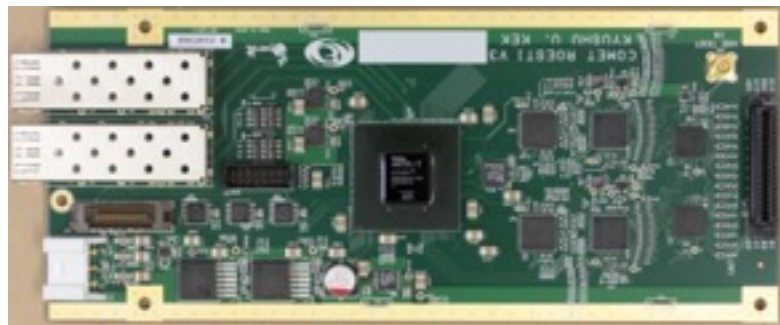
データ処理：FPGAベースのデータ処理回路

- ・ 検出器からの多チャンネルの信号を高速処理



COMET Phase-I で使用する回路

ROESTI (150枚)



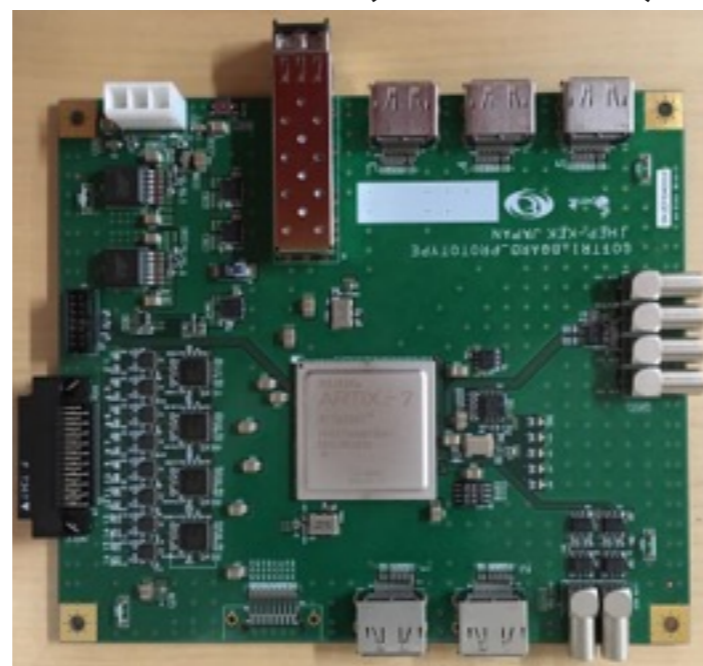
FCT (~10枚)



RECBE (104枚)



COTTRI (10枚以上)



主な4つの回路の用途

- ROESTI & RECBE
 - ・ 検出器のアナログ信号読み出し
- COTTRI
 - ・ データ取得タイミング制御
- FCT
 - ・ Clock分配
 - ・ 他回路からのBusy信号処理

どの回路にも半導体を使ったチップが実装されている

FPGA, Power regulator, ADC, ASD など...

放射線量のシミュレーション

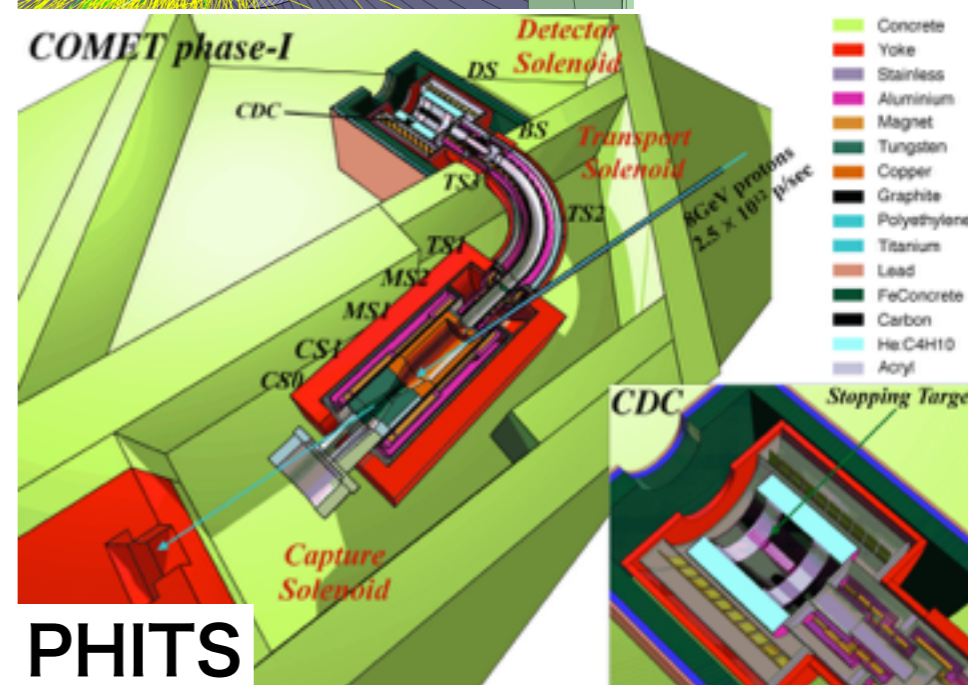
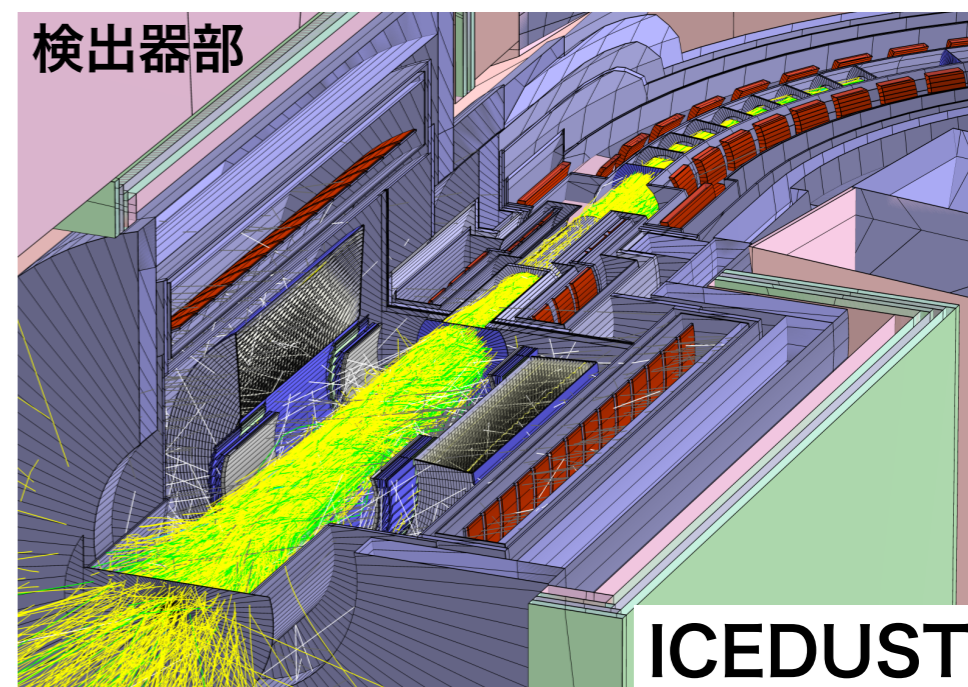
4種類のシミュレーションソフトを使って評価

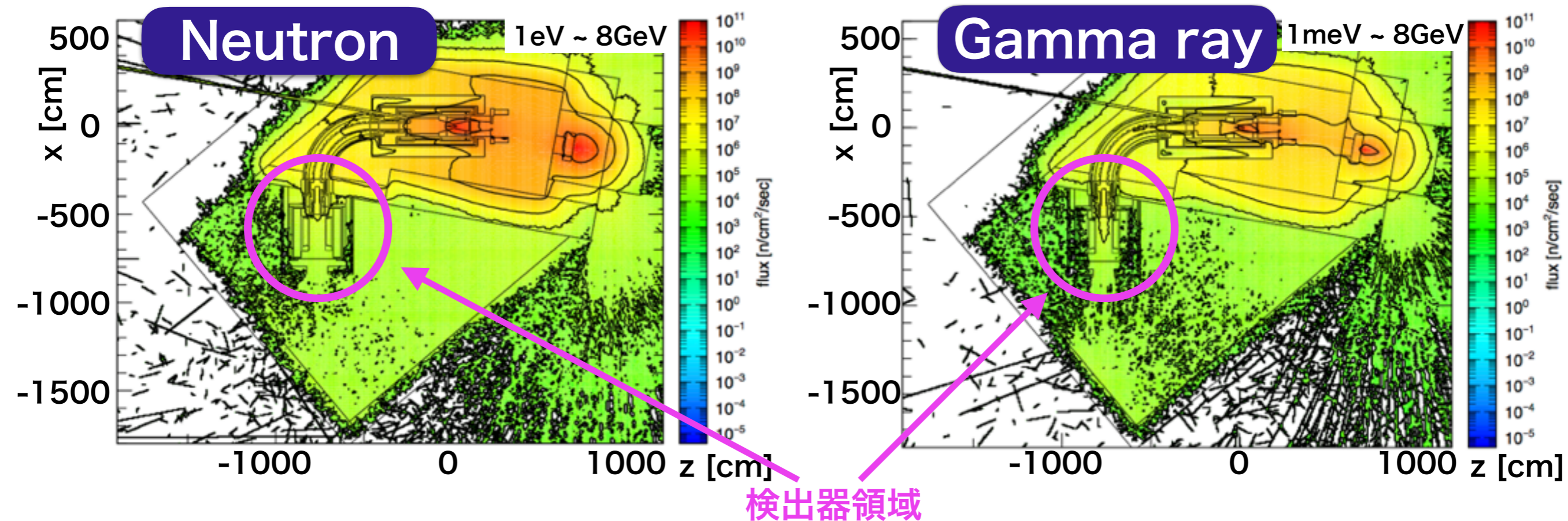
- ・得意とするエネルギー領域・核反応などが異なる

→ 各ソフトの結果を比較し、シミュレーションの精度と信頼性を調査中

シミュレーションソフト

- FLUKA from CERN (Fortran base)
 - ・ ミューオン源周辺のシミュレーション
- ICEDUST (Geant4 base)
 - ・ COMET実験用の汎用解析プログラム
 - ・ Geant4 from CERN (C++ base)
 - ・ 実験のフルシミュレーションとデータ解析
- MARS from FNAL (U.S.)
 - ・ 実験ホール全体のための遮蔽計算
- PHITS from JAEA (Fortran base)
 - ・ 磁石部分と検出器部の放射線量の見積もり





高強度ビームによる高放射線環境を危惧
検出器領域において (150日間)

ガンマ線 : ~2 kGy (safety factor: 10)

中性子 : ~10¹² neutron/cm² (1 MeVeq.)

検出器、読み出し回路は、高放射線耐性が求められる！

放射線耐性試験： FPGAのソフトウェアエラー対策

照射対象

	FPGA from Xilinx Inc.	Package Size [mm]	CRAM used [Byte]	BRAM used [Byte]
RECBE	Virtex-5 (XC5VLX155T-1FFG1738C)	35 x 35	5,380,288	2,934,000
ROESTI	Artix-7 (XC7A200T-2FBG676C)	27 x 27	9,730,652	1,105,920
COTTTRI	Artix-7 (XC7A200T-2FFG1156C)	35 x 35	9,730,652	131,072
FCT	Kintex-7 (XC7K160T-2FFG676C)	27 x 27	6,692,572	18,600

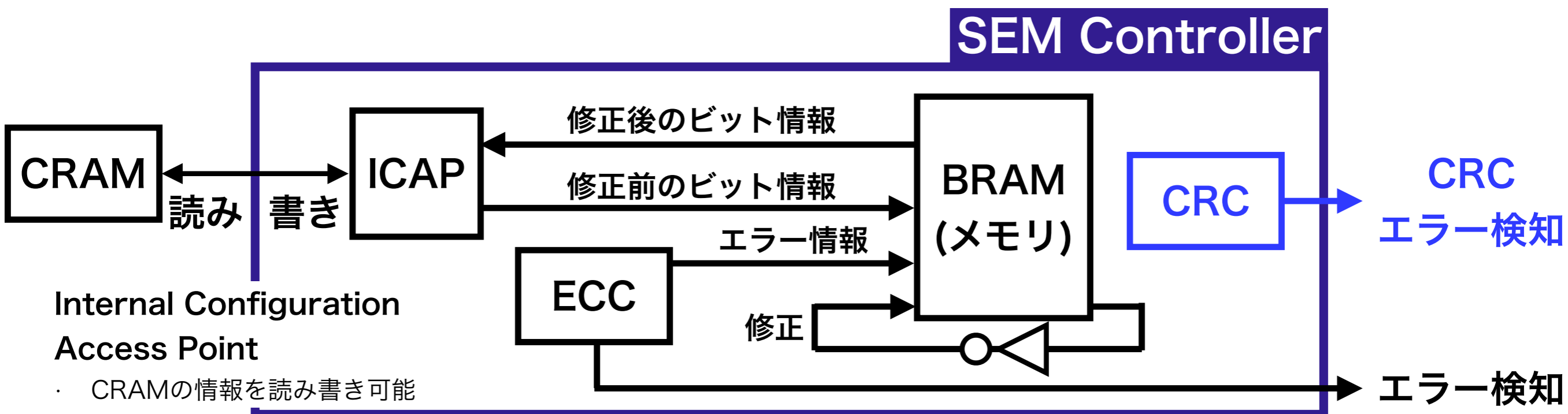
(*) CRAM用の自動修復機能はFPGAの全領域をみるためCRAM usedはフルサイズ

問題：FPGAのファームウェアやデータの破損

- **Configuration RAM**：回路構成を決定するRAM
 - ・ SEU Controller for Virtex-5
 - ・ Soft Error Mitigation (SEM) Controller for 7-series
- **Block RAM**：一時的にデータを保管するRAM
 - ・ Error Correction Code (ECC)
 - ・ Triple Modular Redundancy (TMR) 試行錯誤中

CRAM : SEU & SEM Controller

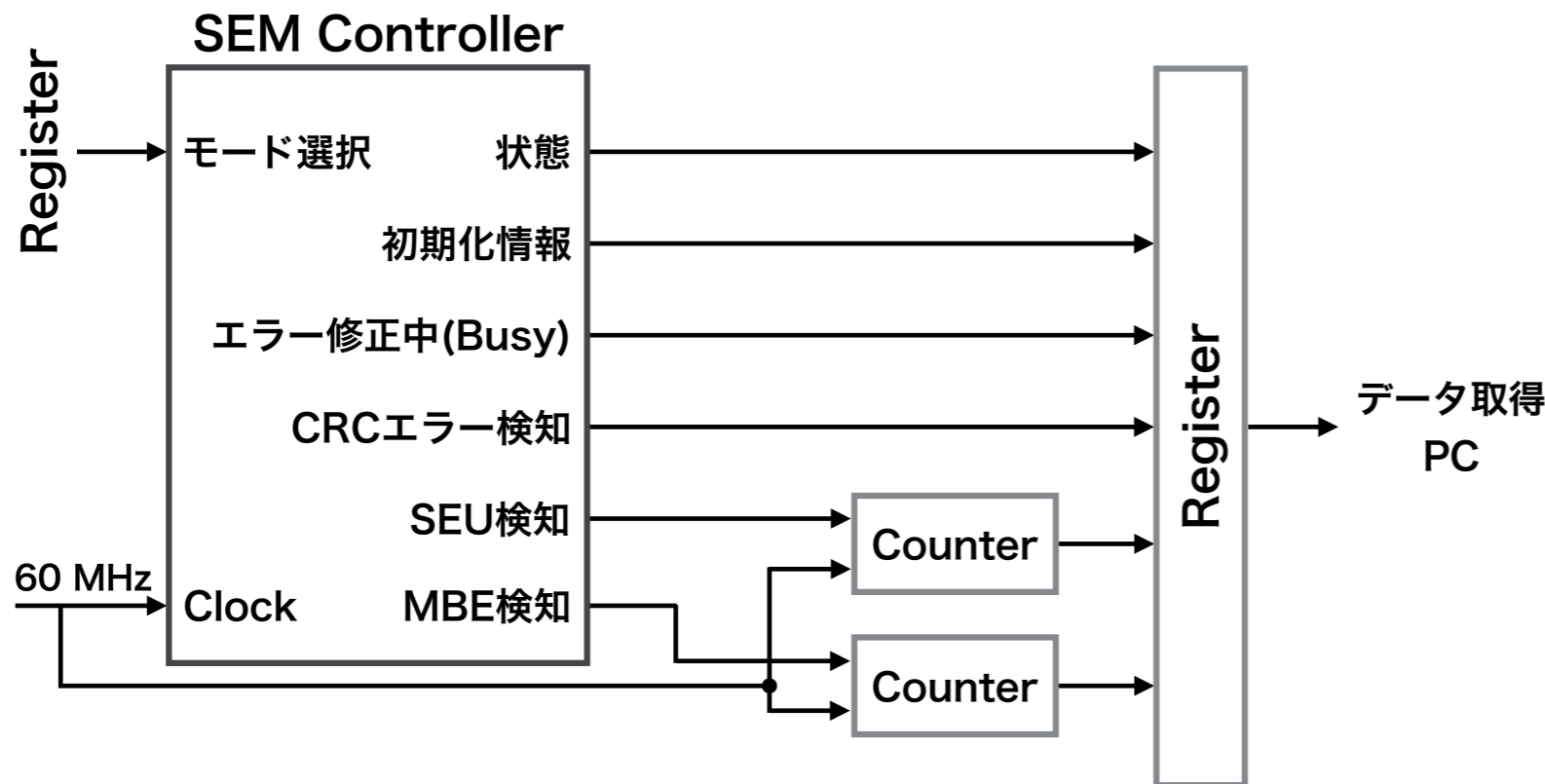
- **Error Correction Code (ECC) による検出と修正**
 - ・ ハミングコード (w/ Hsiaoコード) によるBit反転箇所の特定
 - ・ 複数のBit反転 (MBE) は修正不可
- **Cyclic Redundancy Check (CRC) による検出**
 - ・ モジュラー演算を利用した独立なBit反転検出
- **(SEM) 置換 (未実装) 難しい...**
 - ・ Bit反転の発生フレームがわかれば, フレーム単位で置換
 - ・ 同フレーム内の任意の数のBit反転を修復可能



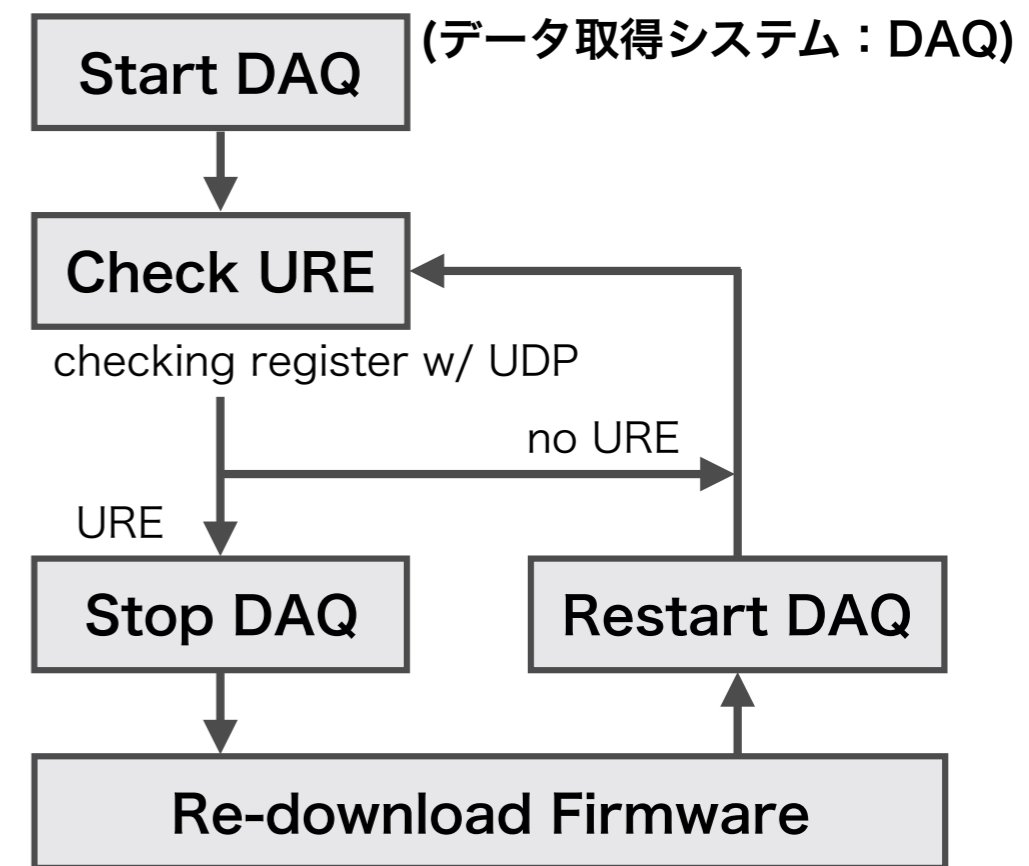
SEU & SEM Controllerの実装

- ソフトエラーに対する動作

- ・ SEU & MBE : カウンターで発生回数を記録
 - ・ MBE発生後は修復機能が停止
- ・ 修正不可能な状態や誤動作 : Unrecoverable Error (URE)
 - ・ MBE・Busyが継続・通信不可・レジスタ値の異常など
 - ・ PC側からファームウェアを完全に書き直す



自動ファームウェアダウンロード機能



w/ iMPACT (Xilinx Inc.)

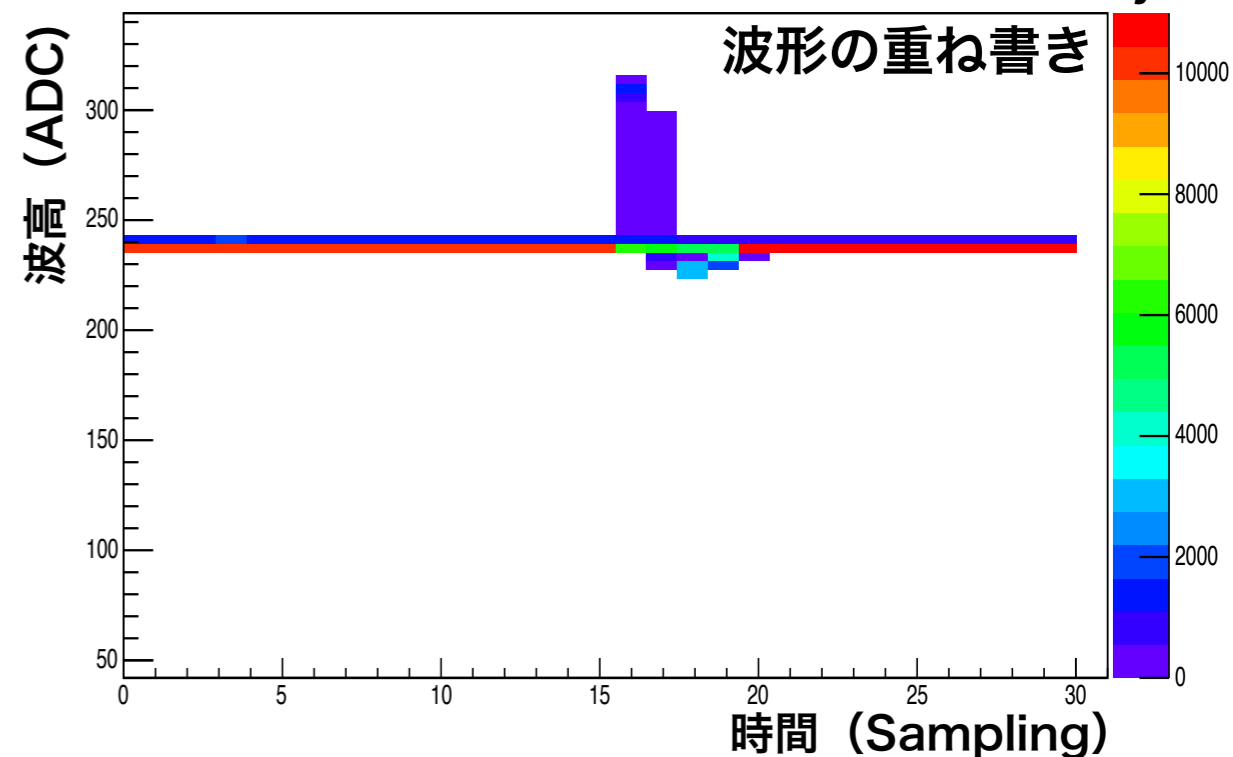
BRAM : ECC

CRAM用のSEU対策だけでは不十分
中性子によるデータのBit反転を確認

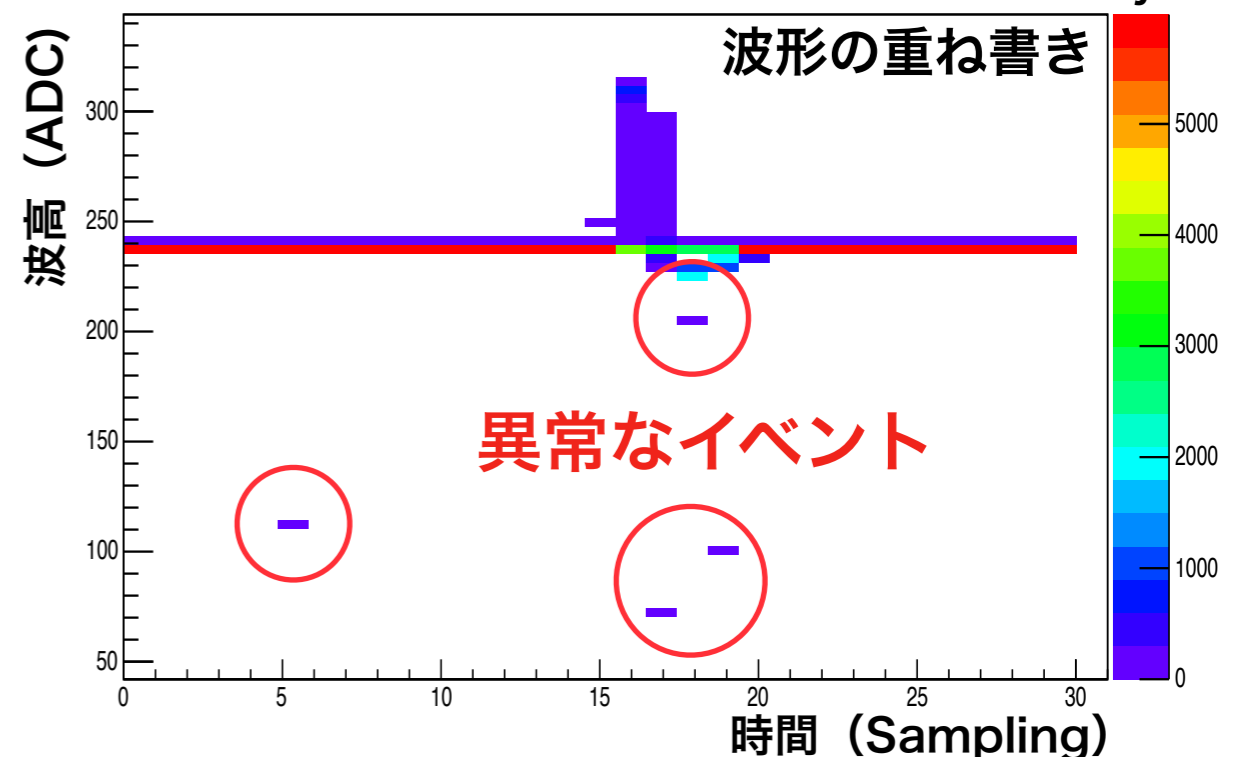
BRAM用自動修復機能 : ECC

- SEM Controllerのものと同様
 - ・ 出力はレジスタに書き込み, PCで確認
 - ・ MBEによるファームウェアの書き換えはしない
- BRAM実装時のオプション
 - ・ FIFOやRing Buffer
 - ・ データ幅によって使用不可
- (最近) ECC自体のコードを書き換え
 - ・ 今まで未対応のデータ幅にも使用可能にした
 - ・ 他回路との通信時の誤り訂正符号として利用

正常な波形 : CH40 Entry

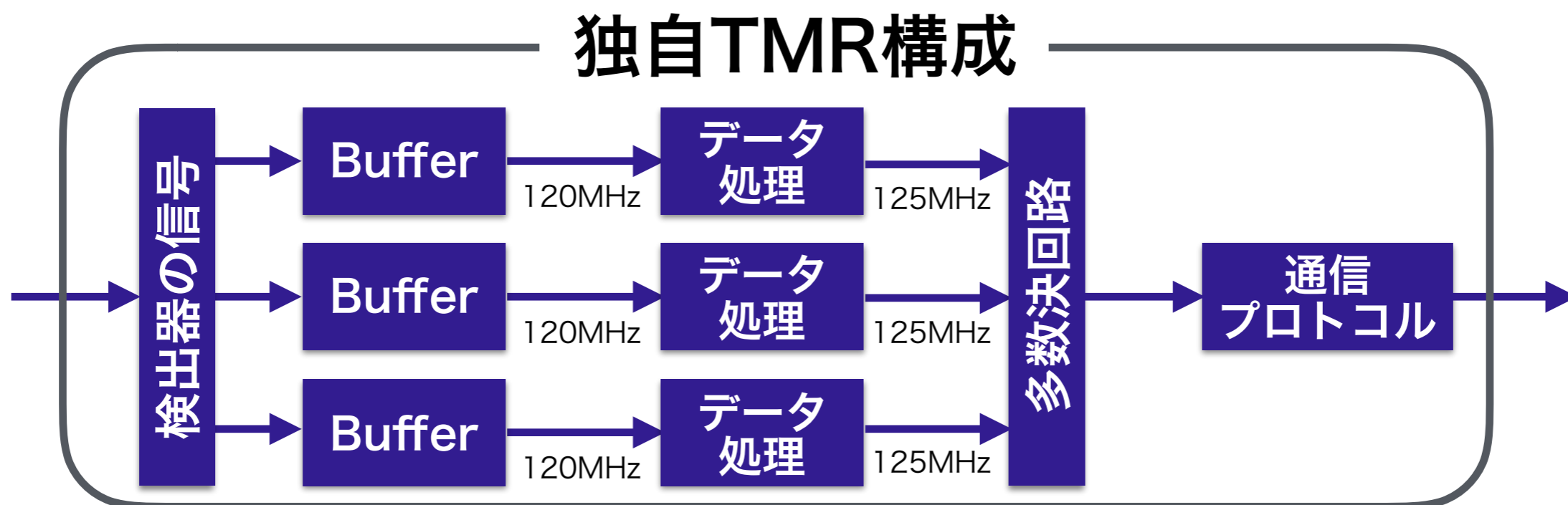
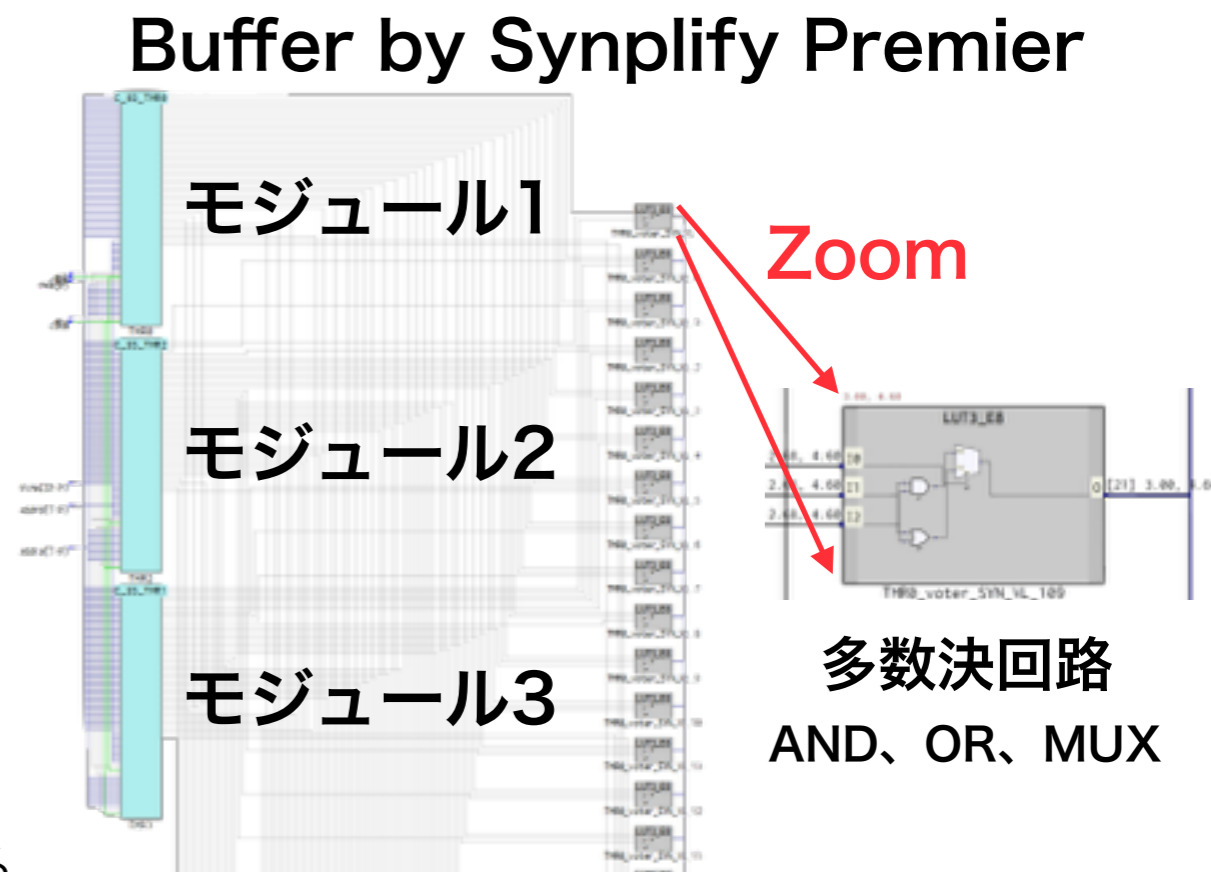


異常な波形 : CH40 Entry



BRAM : TMR (試行錯誤中 : 結果なし)

- 独自に三重化してみた
 - ・ タイミング同期が難しい
- Synplify Premier (Synopsys社) を使ってみた
 - ・ ネットワークライセンスが必要 (5万円/年)
 - ・ 指定したモジュールを自動で三重化
- リソースが1つしかない部分は三重化できない
- ファームウェアの一部を三重化
 - ・ TMR自体の性能評価は難しい
 - ・ COMET Phase-I におけるTMRの価値は評価できる



中性子照射試験セットアップ

TANDEM加速器 @神戸大学

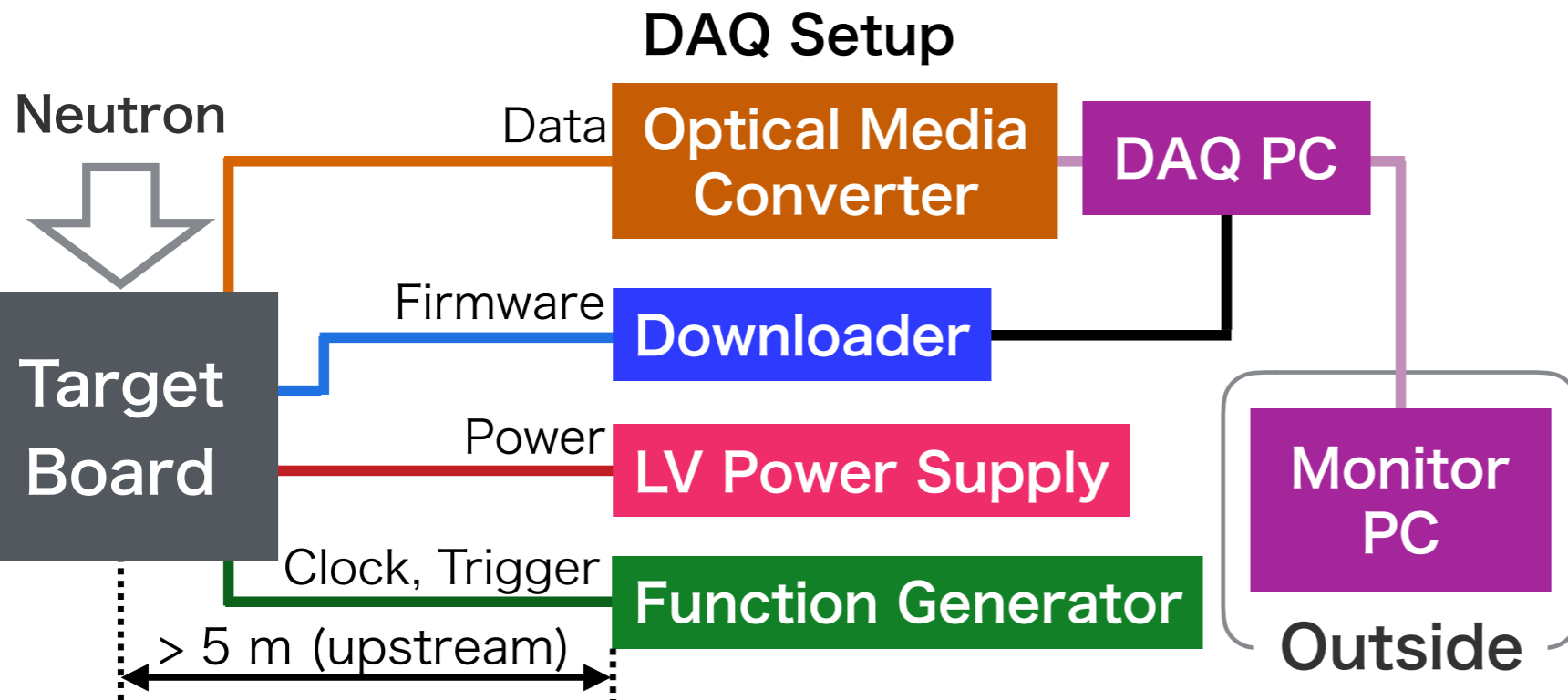
ビーム：3 MeV 重陽子

標的：Be (径20 mm)

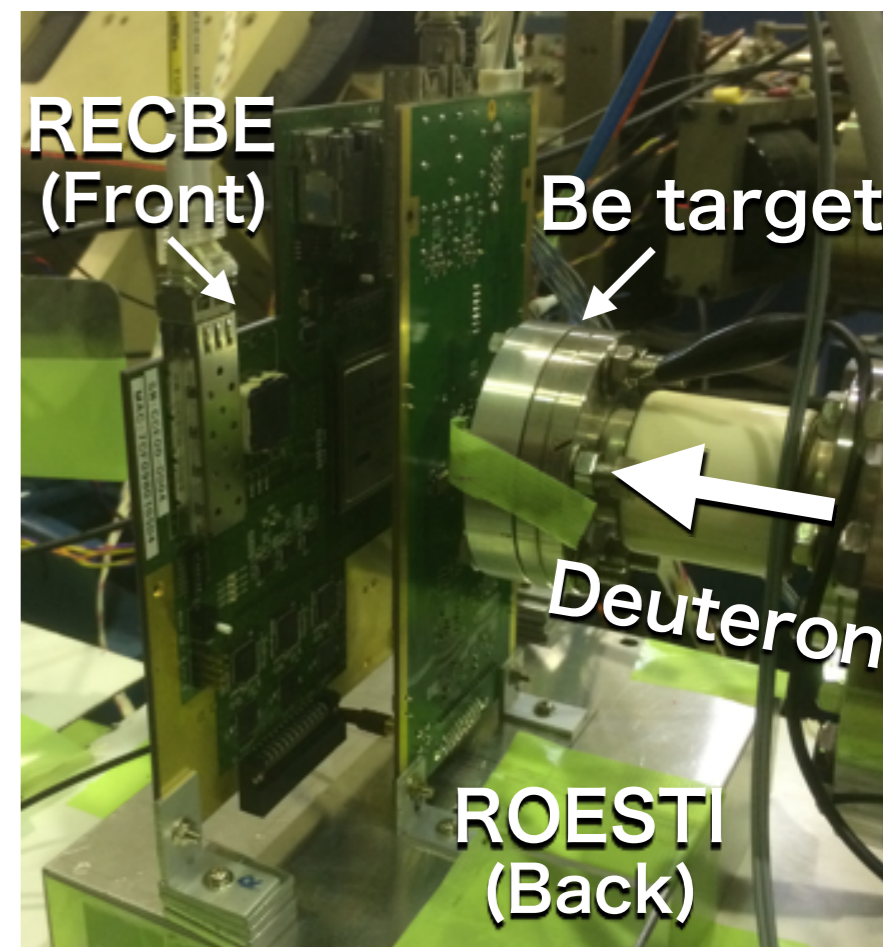
中性子エネルギー：2 MeV (<7 MeV)

中性子強度：4.9 MHz/cm²

(*) Be標的からの距離：10 cm ビーム電流：1uA



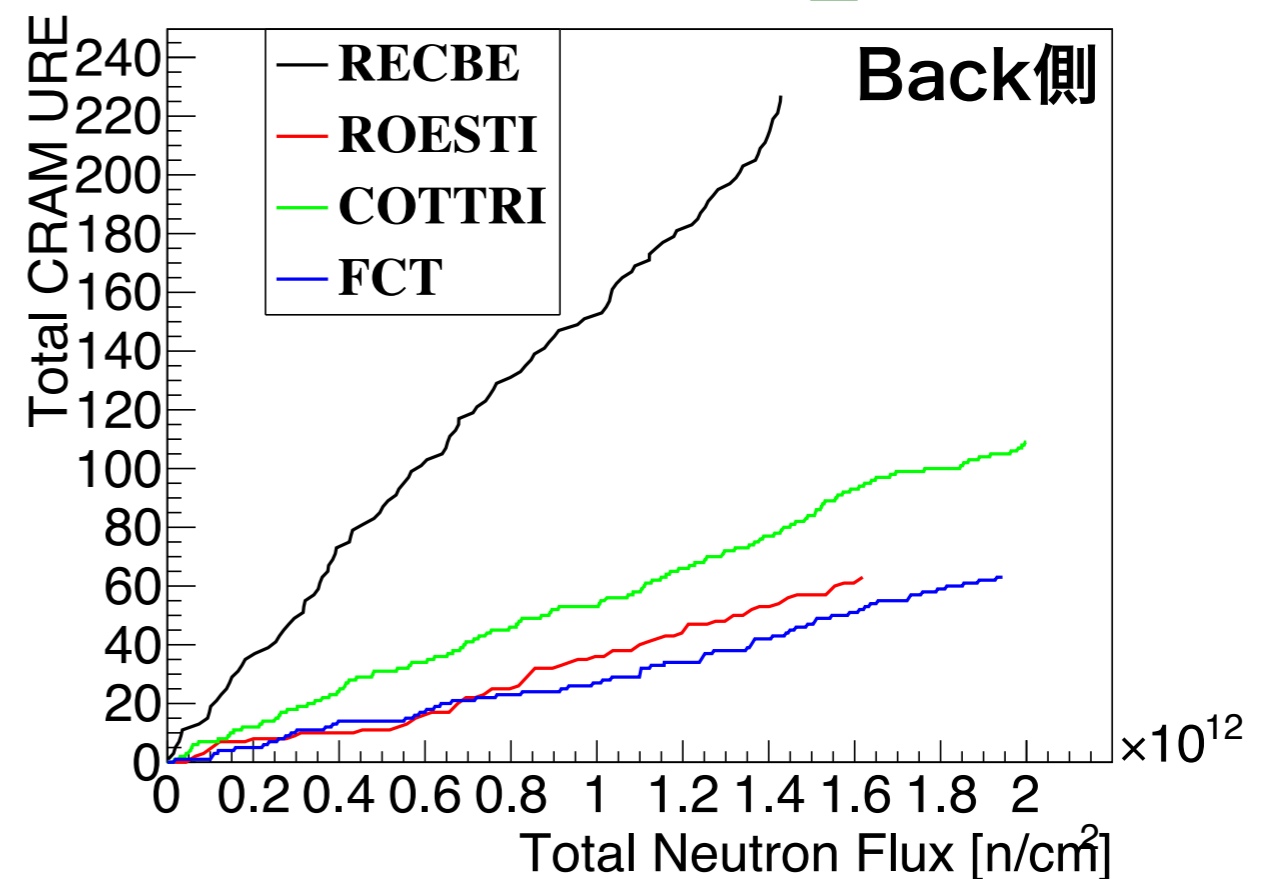
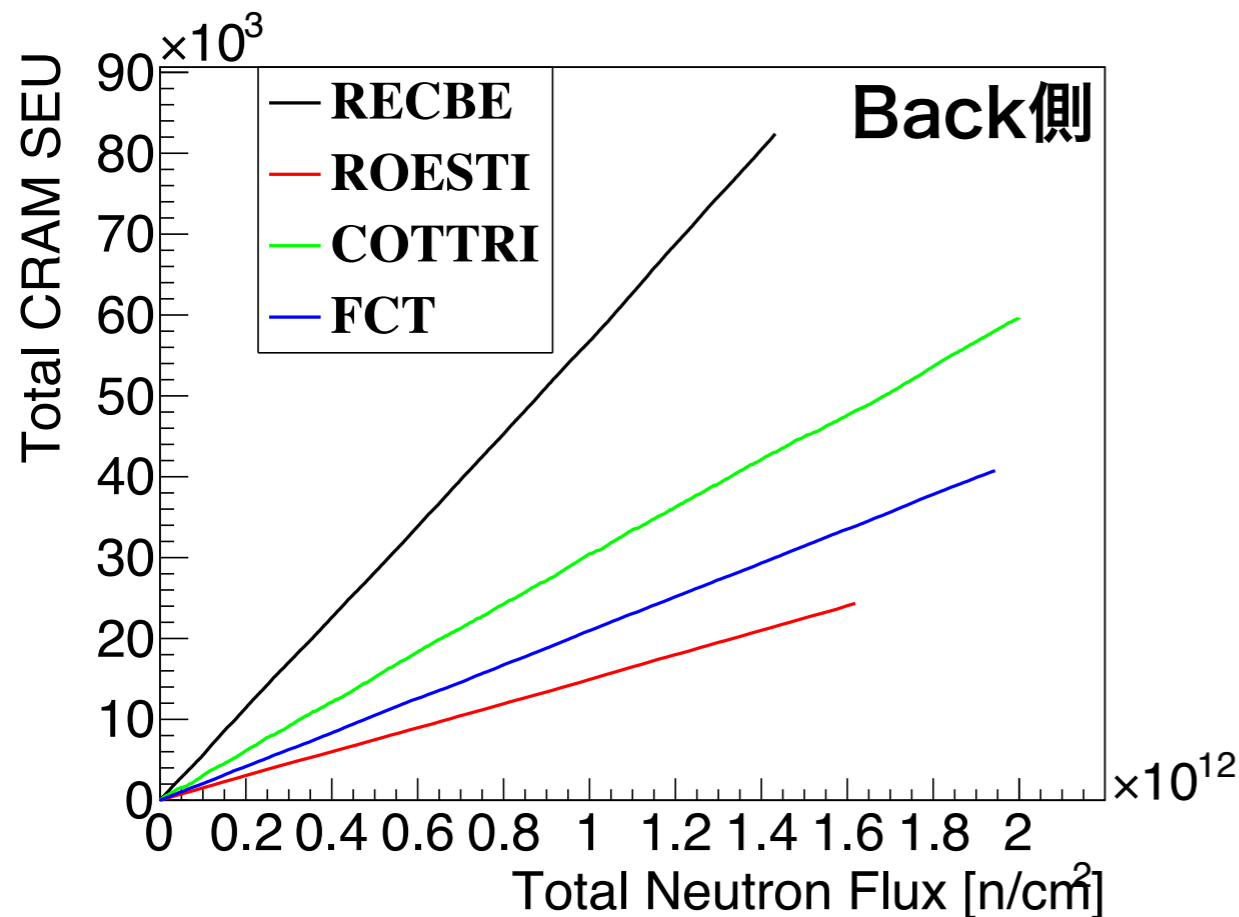
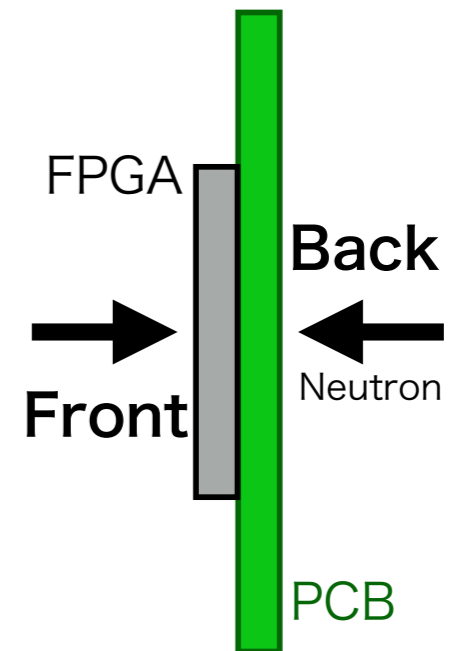
毎秒ソフトウェアのデータを取得



結果：CRAM

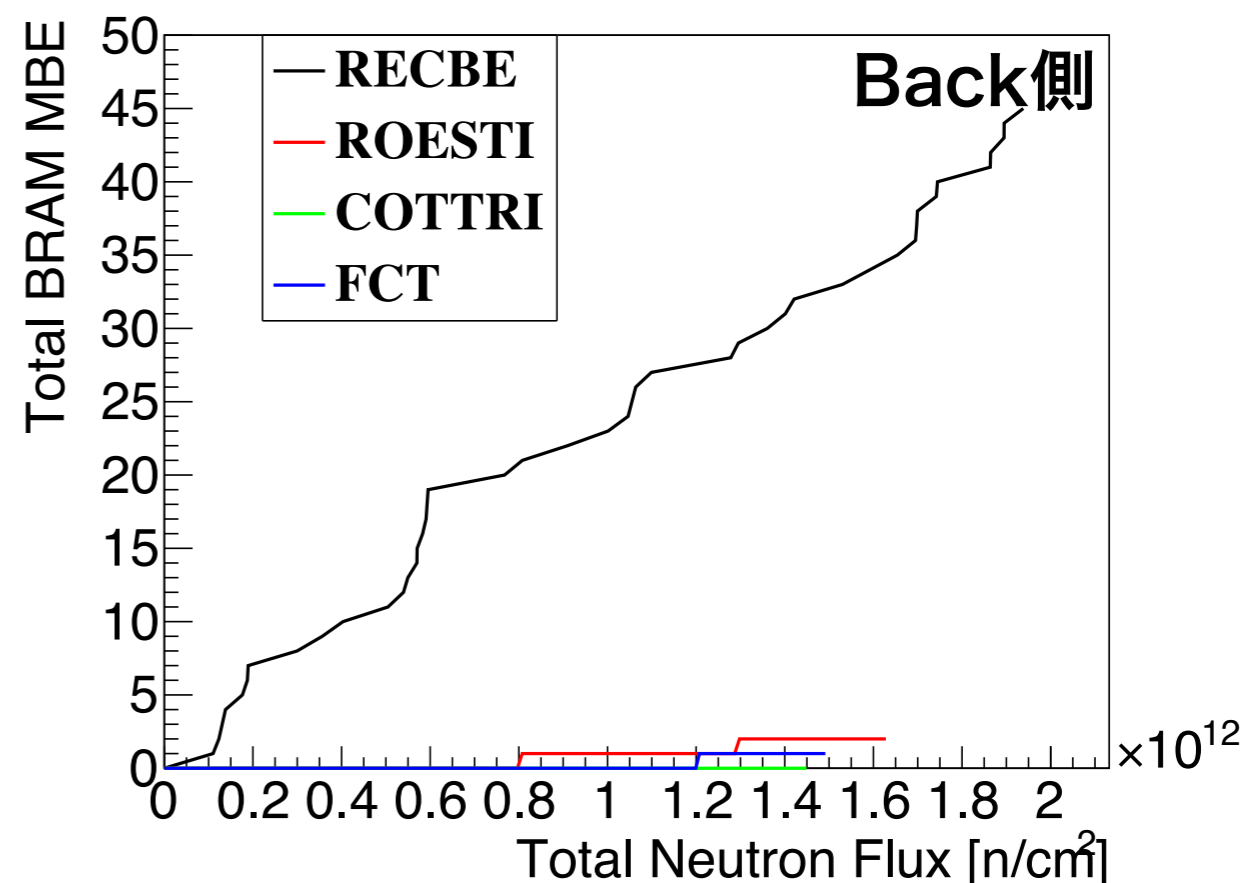
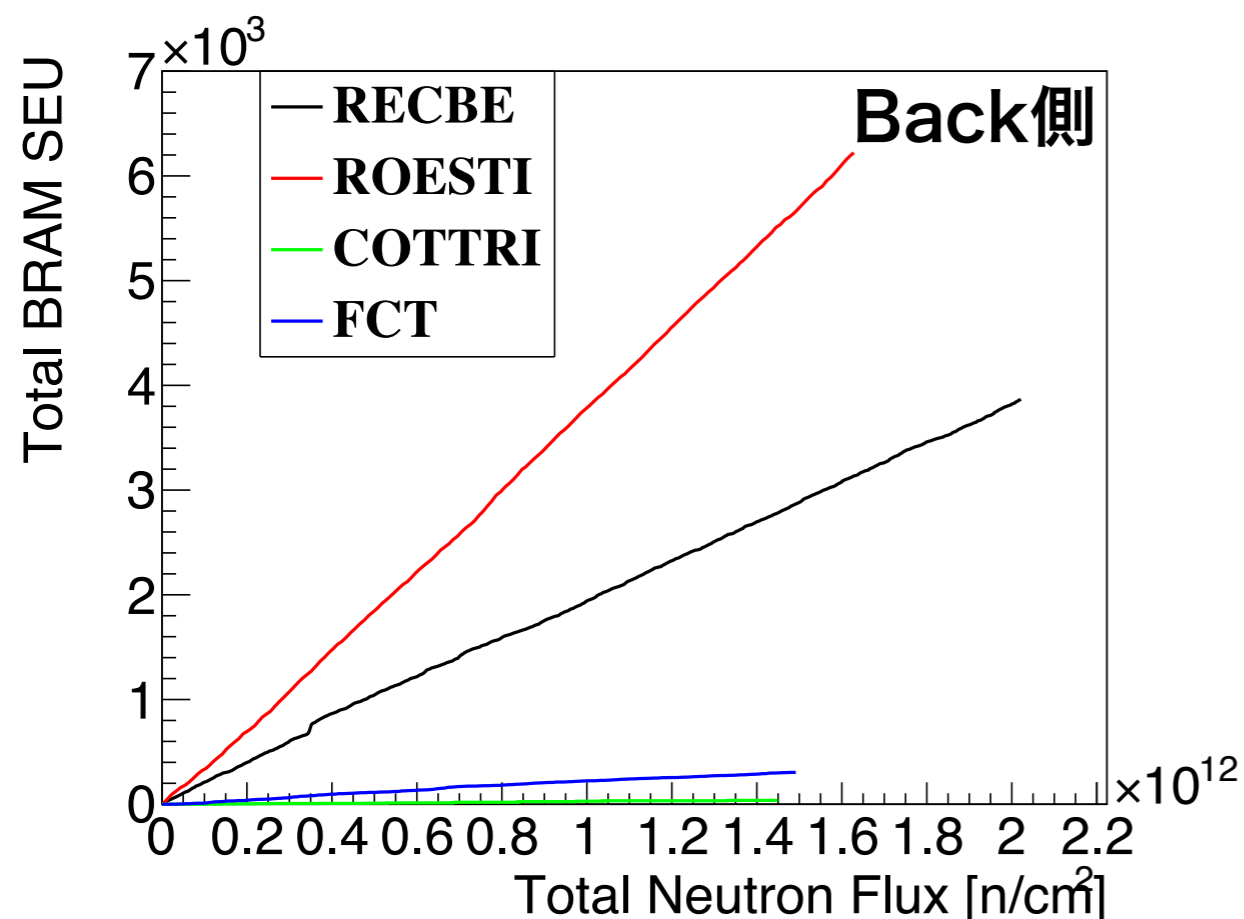
- 永久損傷は確認していない
 - ・ 過去の総照射量： $>1.0 \times 10^{13} / \text{cm}^2$
- 7-seriesはVirtex-5よりも高い耐性を持つ
 - ・ 半導体あたりの中性子の反応率，エネルギー損失量の違いが影響しているのではないか
 - ・ Virtex-5：65 nm 7-series：28 nm

ビームの入射方向の定義



結果：BRAM

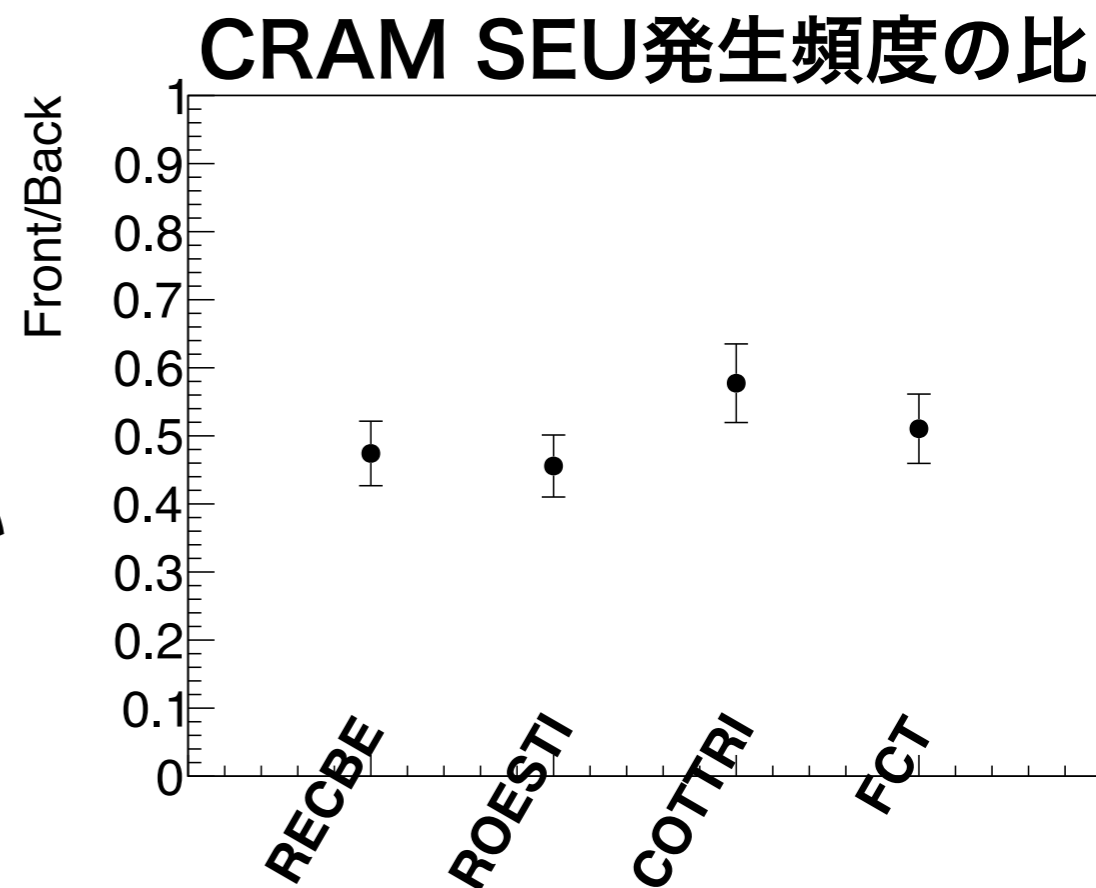
- データの信頼性が向上
- Bit反転の回数が回路によって大きく異なる
 - ・ 使用メモリー領域, データ保持時間の違い
- MBEはほとんど発生しなかった (小統計)
 - ・ COMET Phase-I においては稀な事象だとわかった



結果

国際会議 (14th Pisa Meeting) で発表
ProceedingsをNIM-Aに提出中

- Front側の耐性が優位に高い
 - ・ FPGAで差は見られない
 - ・ PackageとPCBの物質量差が原因か
- ROESTIのURE発生頻度が比較的高い
 - ・ MBE以外の誤動作なども含まれる
 - ・ ファームウェアの違い



Back side	CRAM		BRAM	
	SEU [seu/[n/cm ²]]	URE [ure/[n/cm ²]]	SEU [seu/[n/cm ²]/KB]	MBE [mbe/[n/cm ²]/KB]
RECBE	$(1.2 \pm 0.1) \times 10^{-7}$	$(3.5 \pm 0.4) \times 10^{-10}$	$(1.8 \pm 0.2) \times 10^{-10}$	$(2.5 \pm 0.3) \times 10^{-12}$
ROESTI	$(8.6 \pm 0.9) \times 10^{-8}$	$(3.1 \pm 0.5) \times 10^{-10}$	$(1.9 \pm 0.2) \times 10^{-11}$	$0(10^{-14})^*$
COTTRI	$(7.4 \pm 0.7) \times 10^{-8}$	$(1.4 \pm 0.2) \times 10^{-10}$	$(1.8 \pm 0.3) \times 10^{-11}$	$(3.6 \pm 1.0) \times 10^{-12}$
FCT	$(6.7 \pm 0.7) \times 10^{-8}$	$(1.5 \pm 0.2) \times 10^{-10}$	$(2.2 \pm 2.5) \times 10^{-11}$	$0(10^{-14})^*$

【余談】 トータルドーズ効果対策

パーツ選定のためにCOMETでガンマ線照射した対象

- エレキパーツ
 - ・ Positive & Negative power regulator (LMZ10503, LT1963-series, LT3070, LTM4620, LTM4644, LT8612, LT8614, L79 などなど全29種)
 - ・ SFP (AFBR-57D9AMZ, AFBR-5705PZ など9種) → CERN製の耐放射線SFPの使用を検討中 (10 kGy耐性)
 - ・ ADC (AD9637, LTC2264, AD9287 など)
 - ・ DAC (MC41050, AD5324)
 - ・ FPGA (Virtex5:XC5VLX155T, Artix7:XC7A200T)
 - ・ LVDS buffer (SN65LVDS104) などなど
- その他
 - ・ 光検出器 (MPPC, APD, PMT:H8409-70)
 - ・ シンチレーションファイバー
 - ・ 接着剤 などなど

SFP (Small Form Factor Pluggable)
光ファイバーや一般的な銅線のLANケーブル
など多数の企画で利用可能なポート

近々論文にして発表予定！

【余談】レギュレータとSFPの例

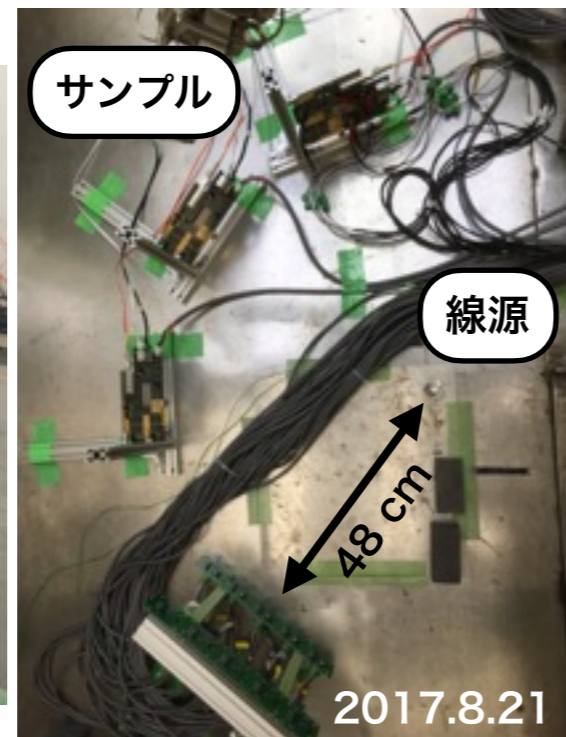
施設：高崎量子応用研究所
 加速器・ビーム応用科学センター @九大
 放射線総合センター @東工大
 量子ビーム科学研究施設 @阪大

線源： ^{60}Co (1.17 MeV, 1.33 MeV)

線量率：200 ~ 4.5 Gy/h

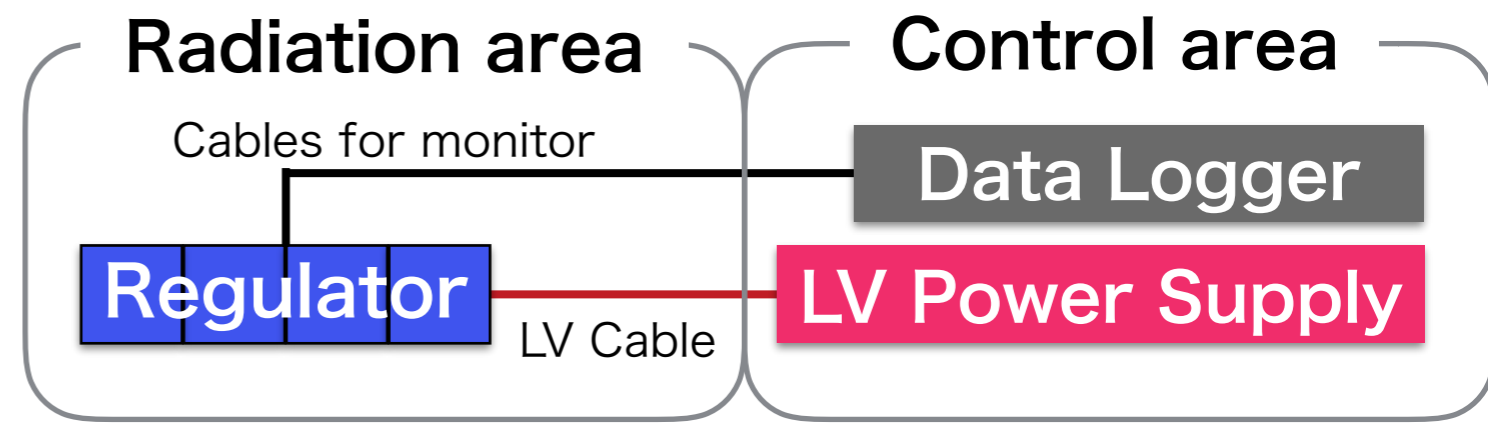
COMET Phase-I：~0.04 Gy/h

目標照射量：2 kGy (電源切/入：200 Gy毎)



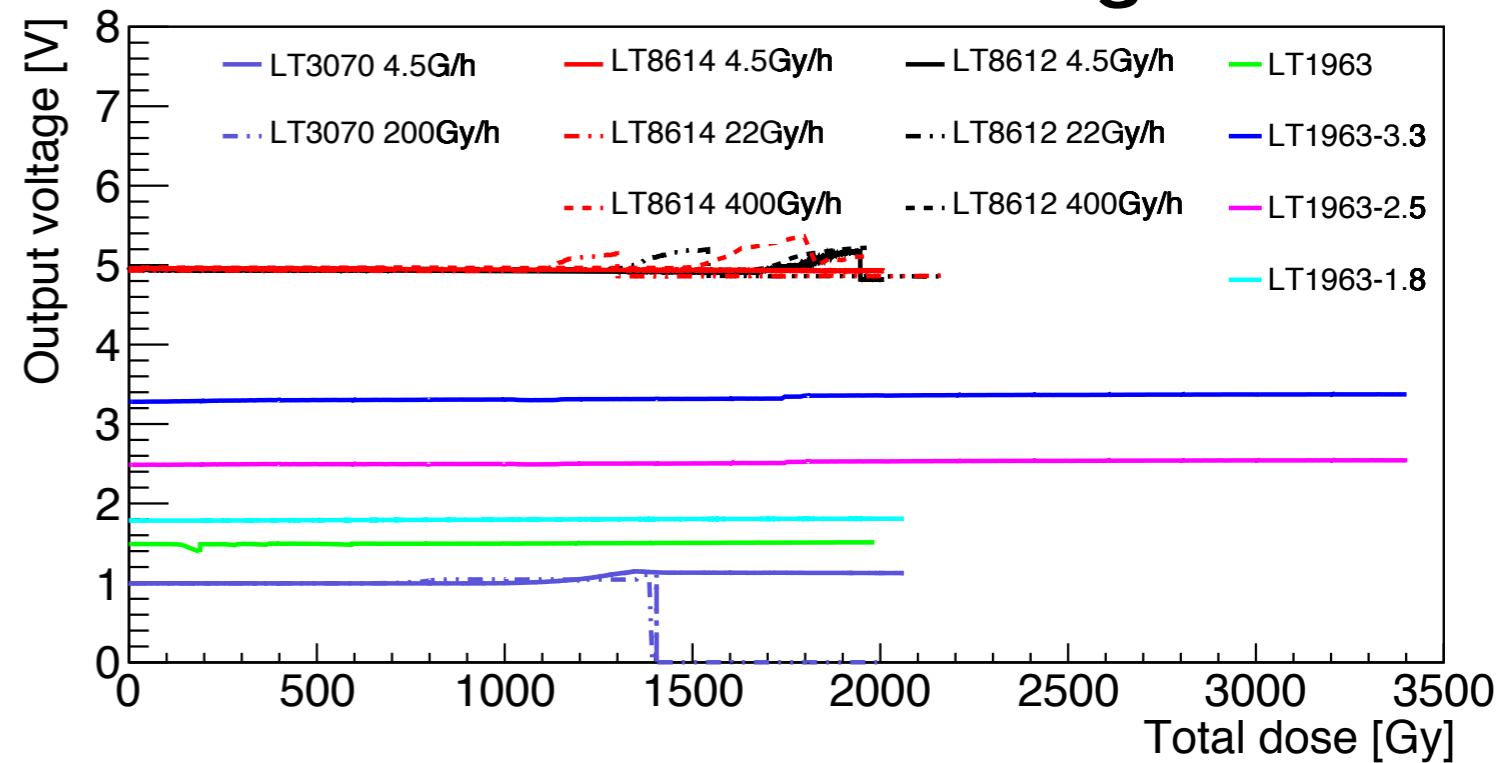
放射線総合センター

量子ビーム科学研究施設



レギュレータ：負荷抵抗を実装

照射結果の例：Positive regulator



中性子照射をしたのちパーツ選定完了

上記のパーツは選考通過済み

後半まとめ：COMET Phase-I

- 現在の物理模型の枠組みを超えたミュオン電子転換過程を探索
- 大強度ビームの利用による放射線問題
 - ・ 複数のシミュレーションソフトでクロスチェック中
ガンマ線：2 kGy 中性子： $1.0 \times 10^{12} n_{1\text{MeVeq}}/\text{cm}^2$

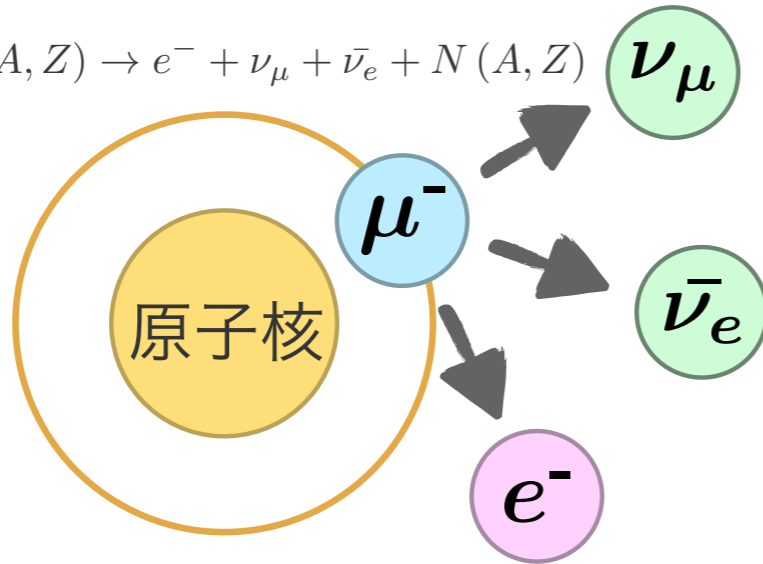
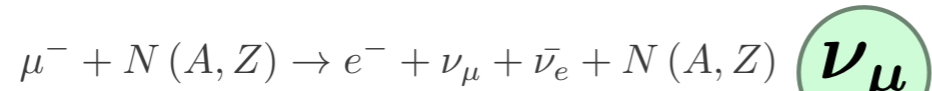
放射線対策

- ソフトエラー：COMET Phase-I における影響
 - ・ Xilinx Inc. 提供のマクロなどを改良したりして利用
 - ・ 本実験を想定するため実機ファームウェアを実装したFPGAに中性子照射
 - ・ 個々のマクロの評価は難しい場合がある
 - ・ 自動修復機能によって多くのソフトエラーを修復可能
 - ・ SEUの発生頻度はUREよりも2桁以上高い
 - ・ 7seriesとVirtex-5とでの放射線耐性を確認 (テクノロジーの違い)
- 他の放射線対策
 - ・ これまでに約50種類のパーツについて耐放射線の要求を満たすか評価

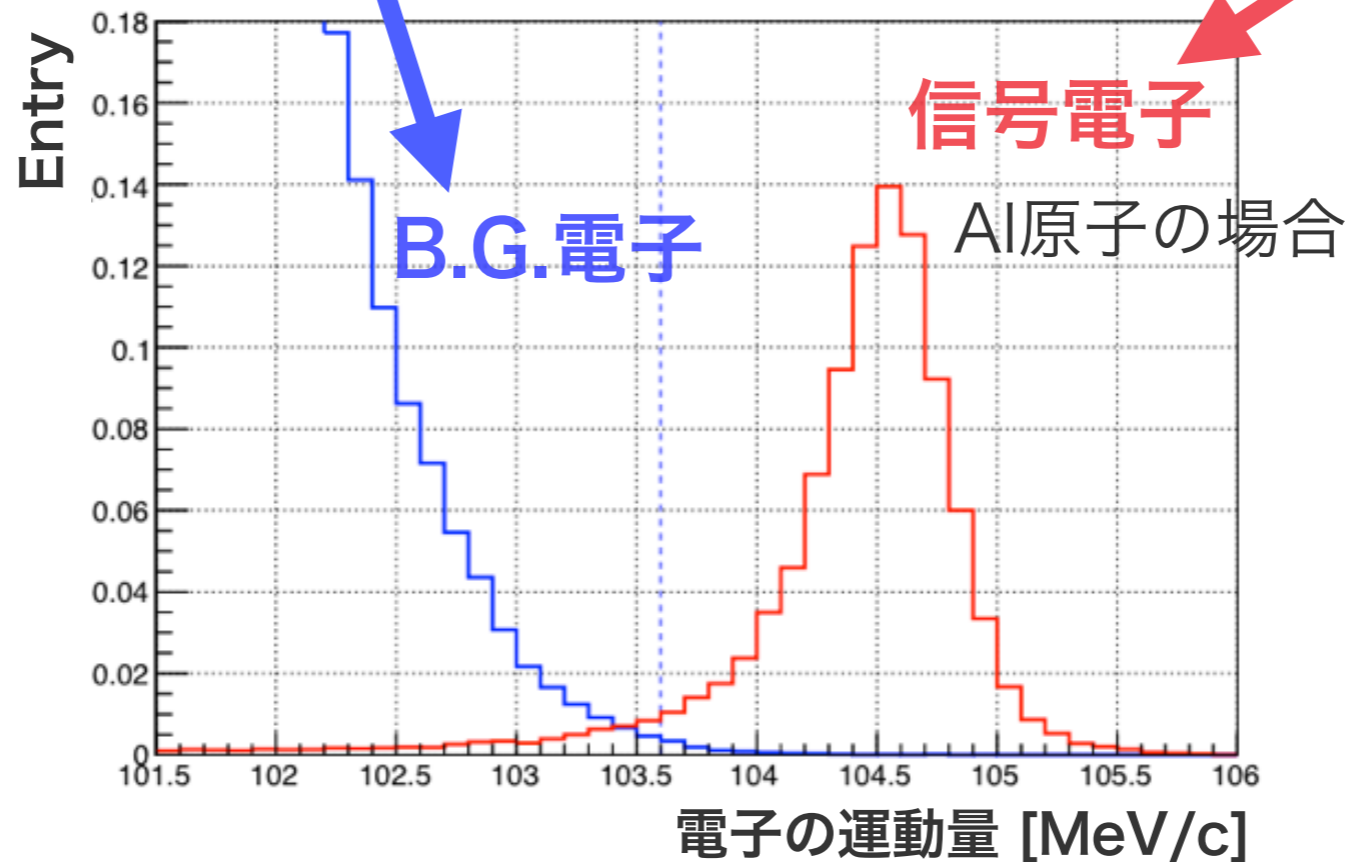
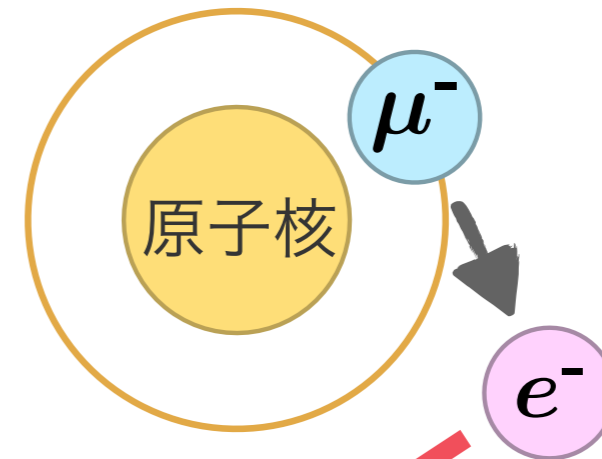
Backup

ミューオン電子転換過程

原子軌道上の三体崩壊



ミューオン電子転換過程



信号領域ではB.G.電子は無視できる量

Cylindrical Detector System

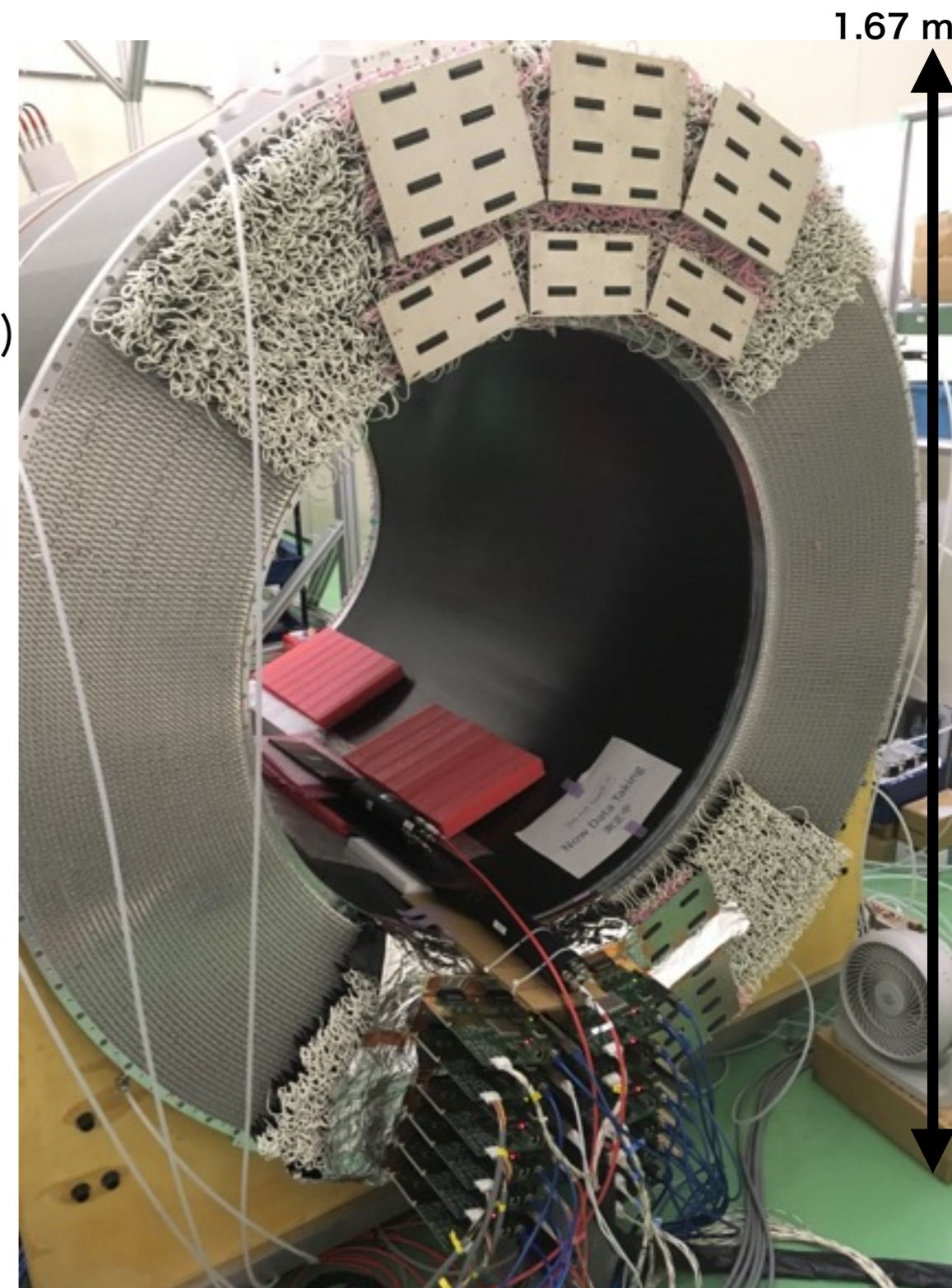
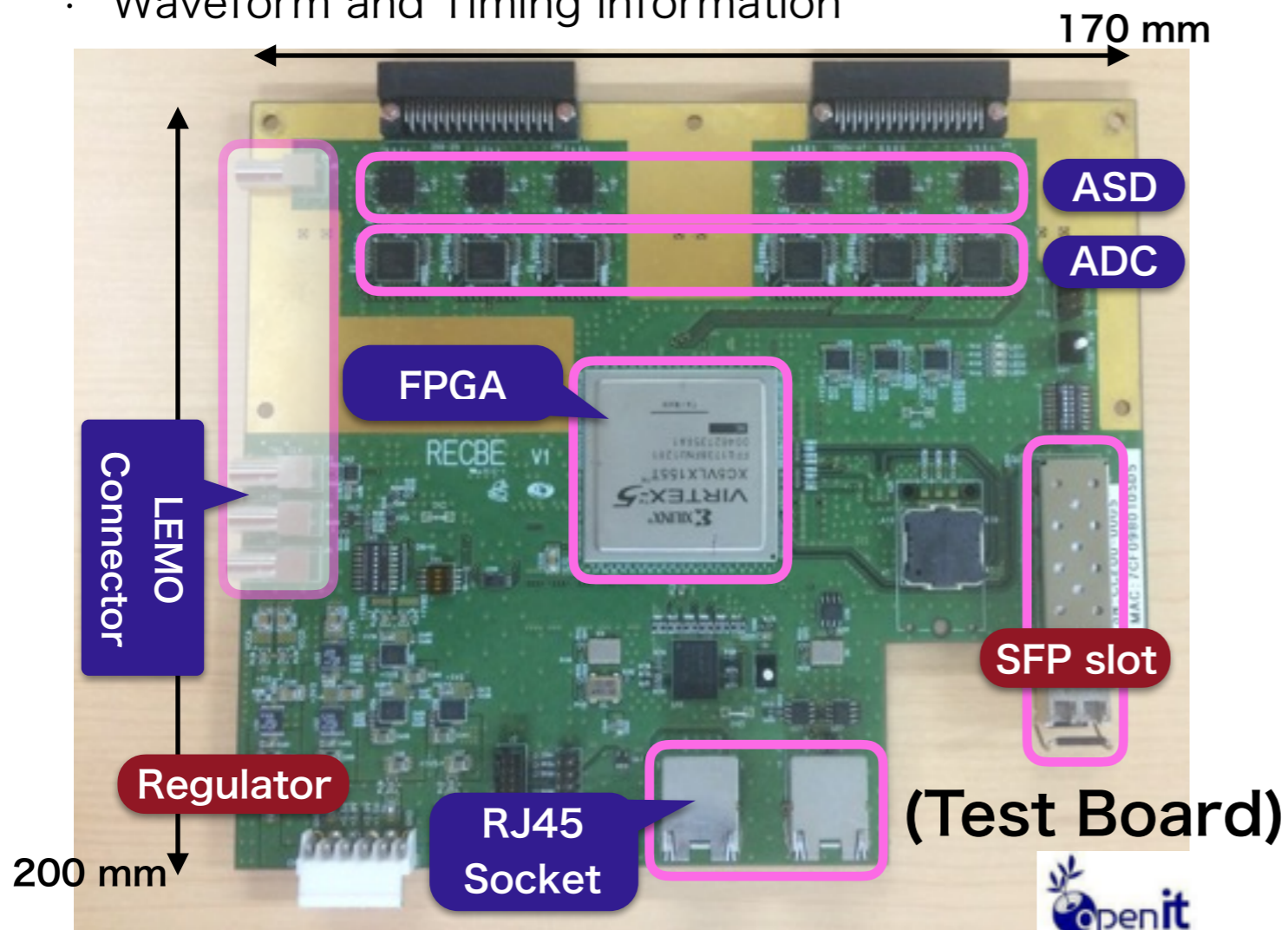
Cylindrical Drift Chamber

Momentum measurement

- Resolution : $< 200 \text{ keV}/c$ for 105 MeV electrons

Readout : Readout Electronics for the Central drift chamber of the Belle II detector (RECBE)

- Developed by the Belle-II CDC group
- Waveform and Timing information



Cylindrical Detector System

Cylindrical Trigger Hodoscope Counter

Scintillator : High momentum particle

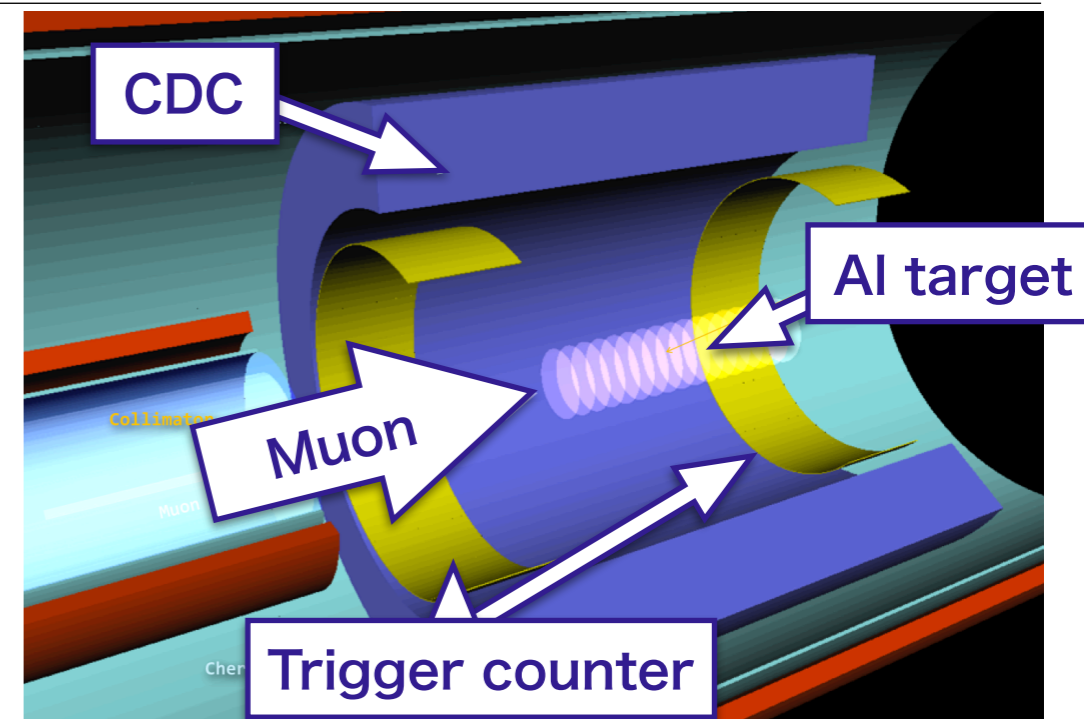
Cherenkov : Electron

Photo sensor : Fine-mesh PMT

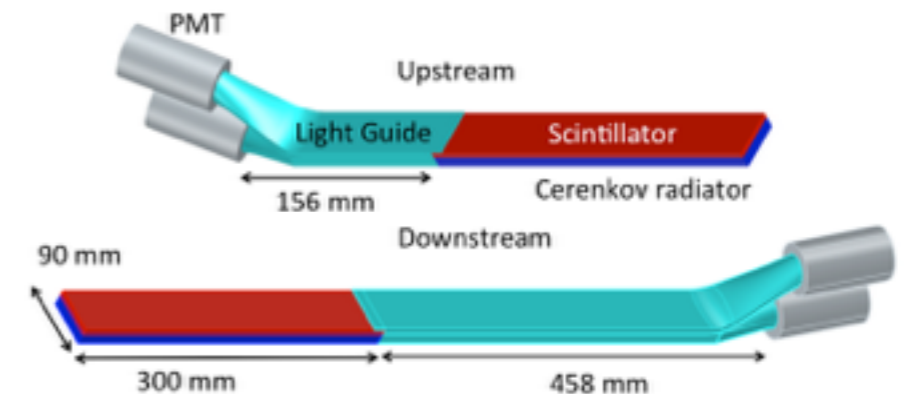
Readout

Front-end Board : Single-end to Differential

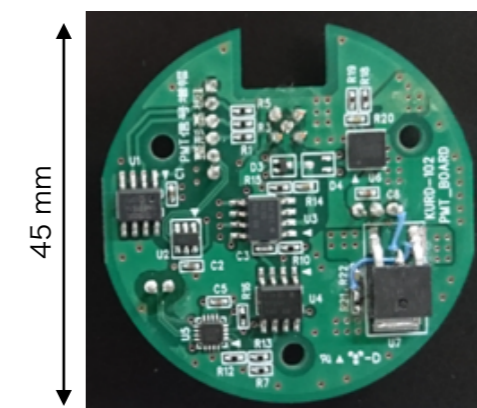
COTTRI : CTH signal processing, Trigger decision



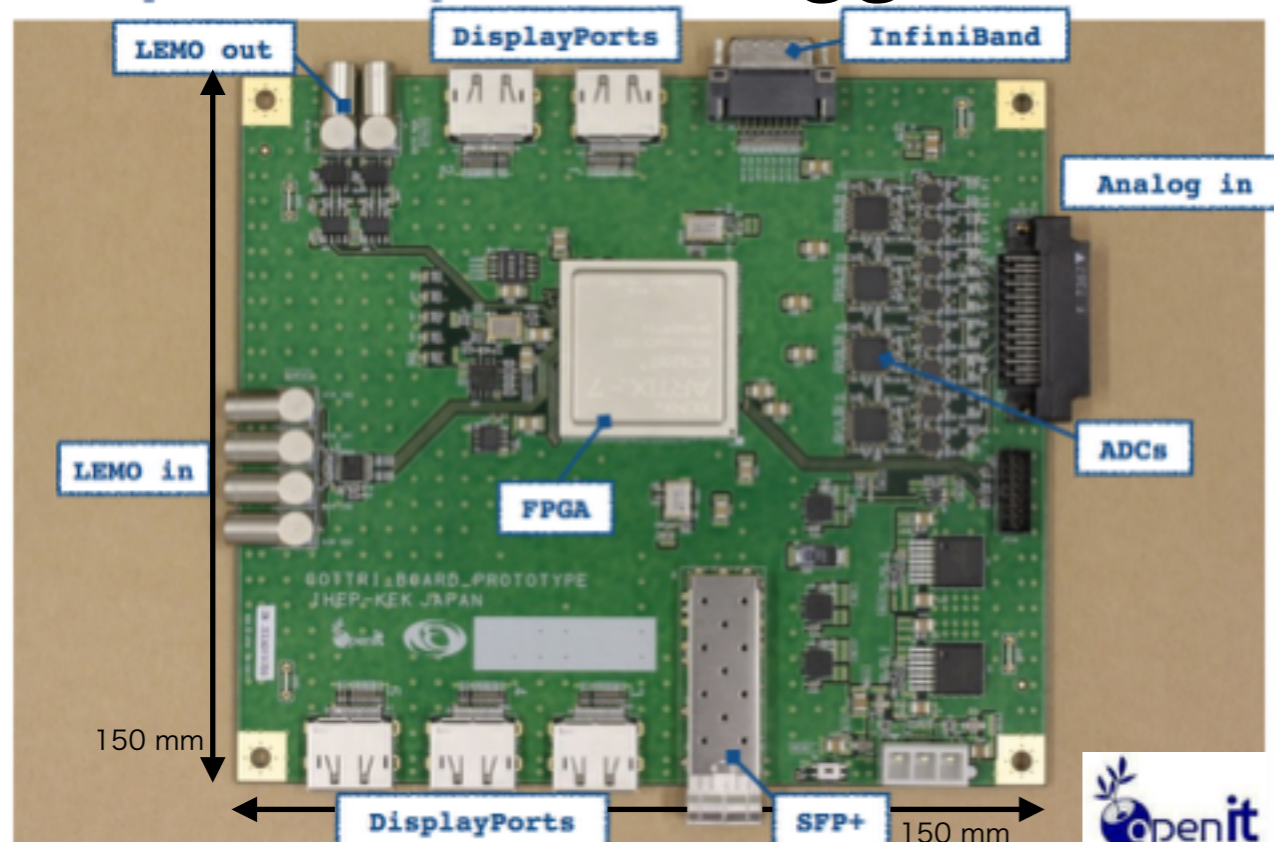
Cylindrical Trigger Hodoscope



Front-end Board



COmeT TRigger



StrECAL

Straw Tube Tracker

Momentum measurement

- Resolution : $< 200 \text{ keV/c}$ for 105 MeV electrons

Readout : Read Out Electronics for Straw Tube Instrument (ROESTI)

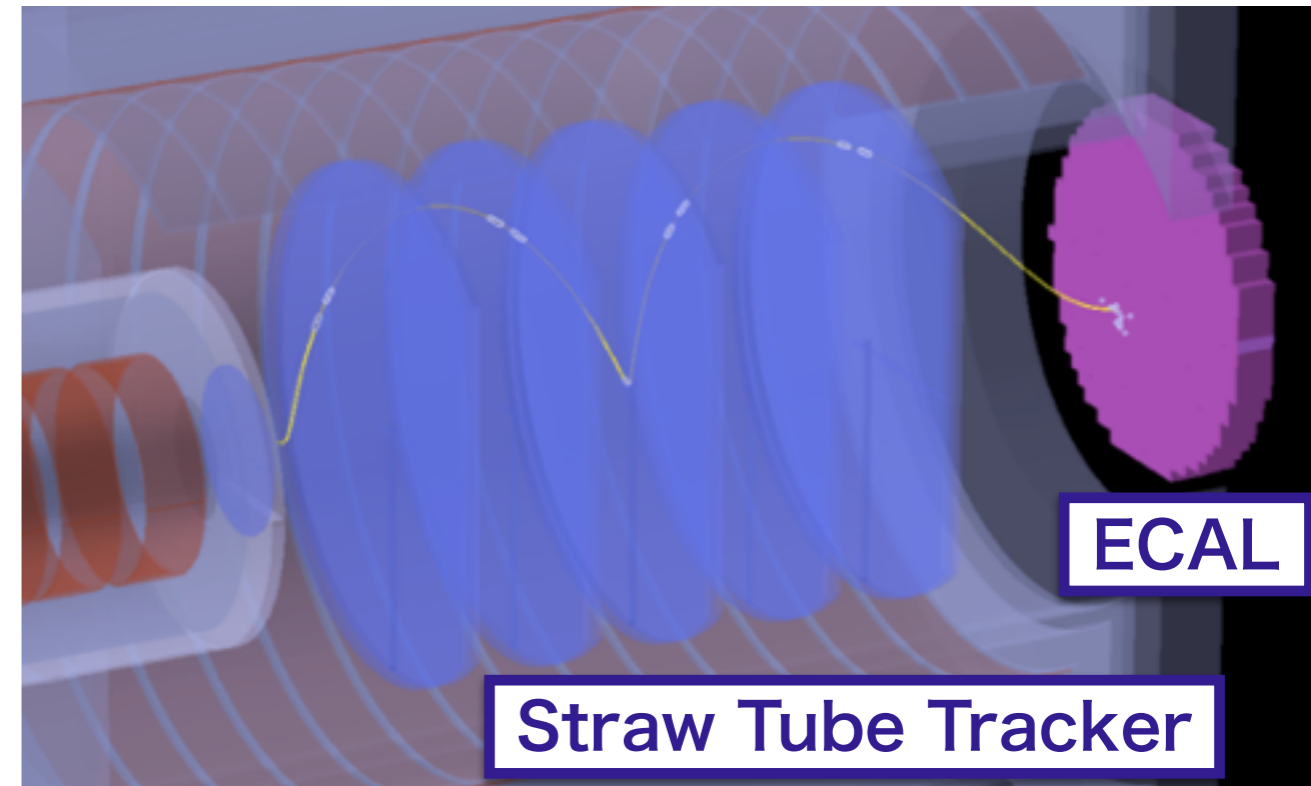
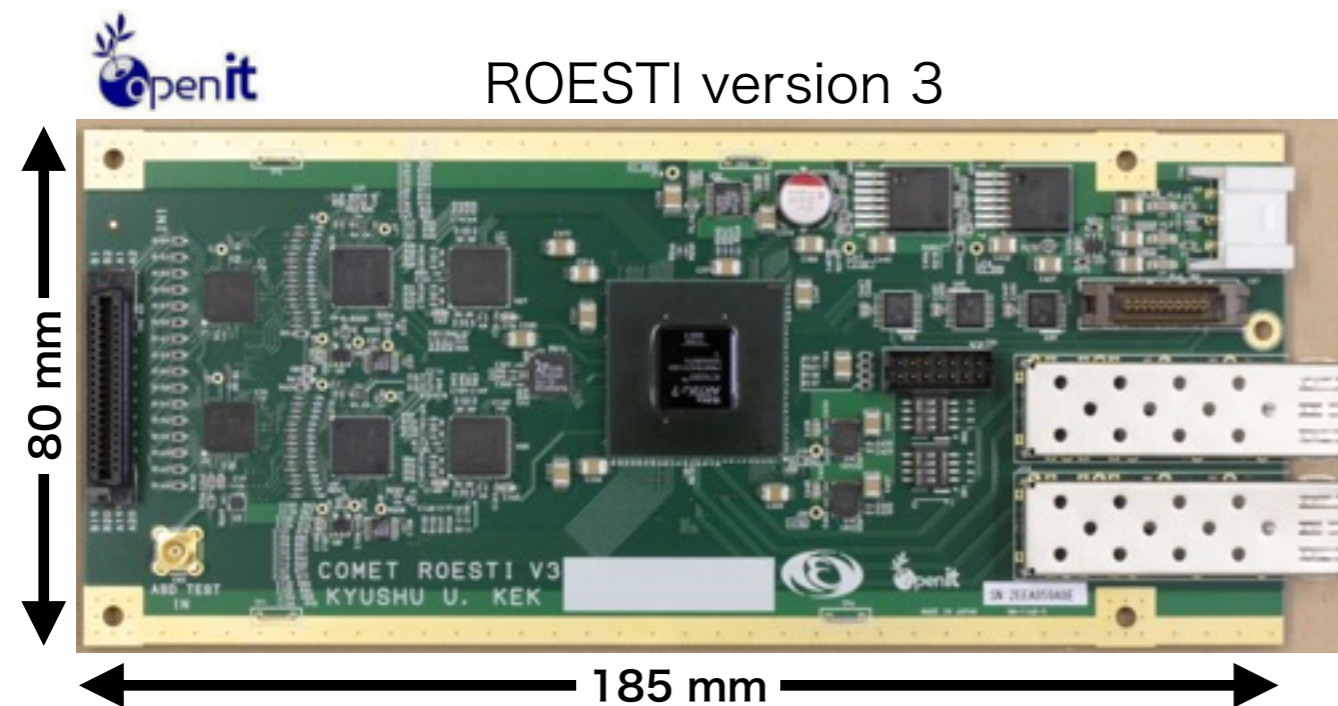
- Developed by the COMET StrECAL group

Electron Calorimeter

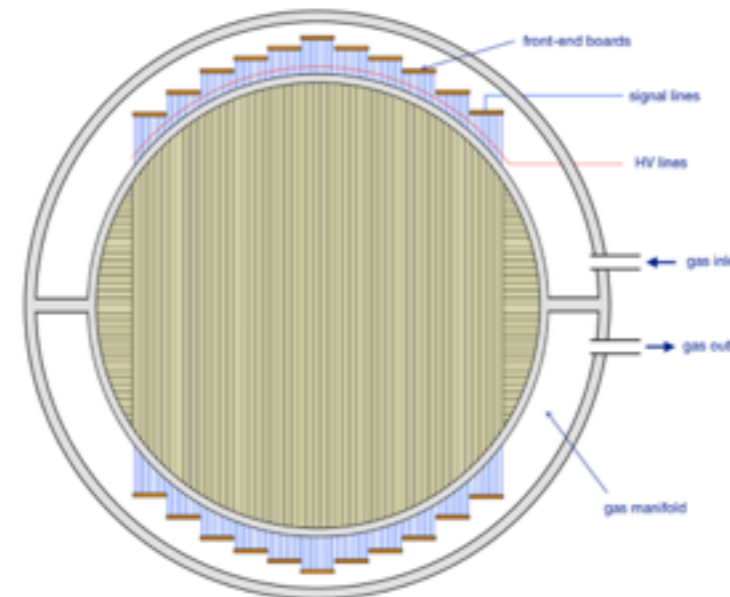
Crystal : LYSO

- Particle identification ($e/\mu/\pi$)

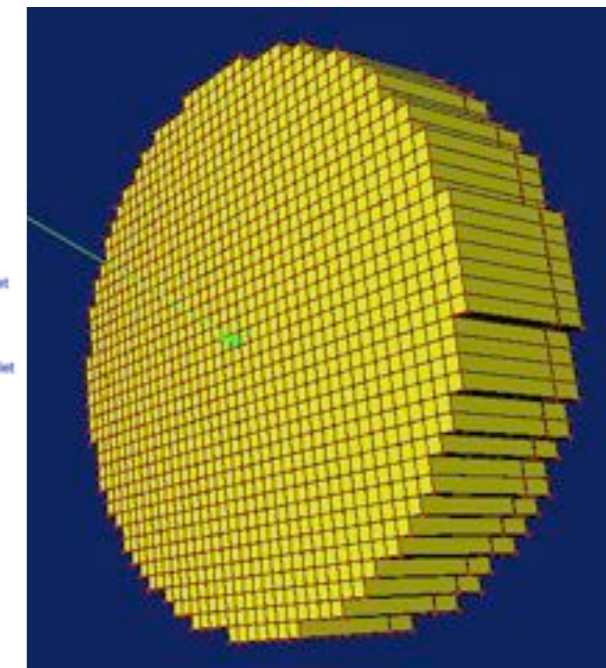
Readout : ROESTI



Straw Tube Tracker



Electron Calorimeter

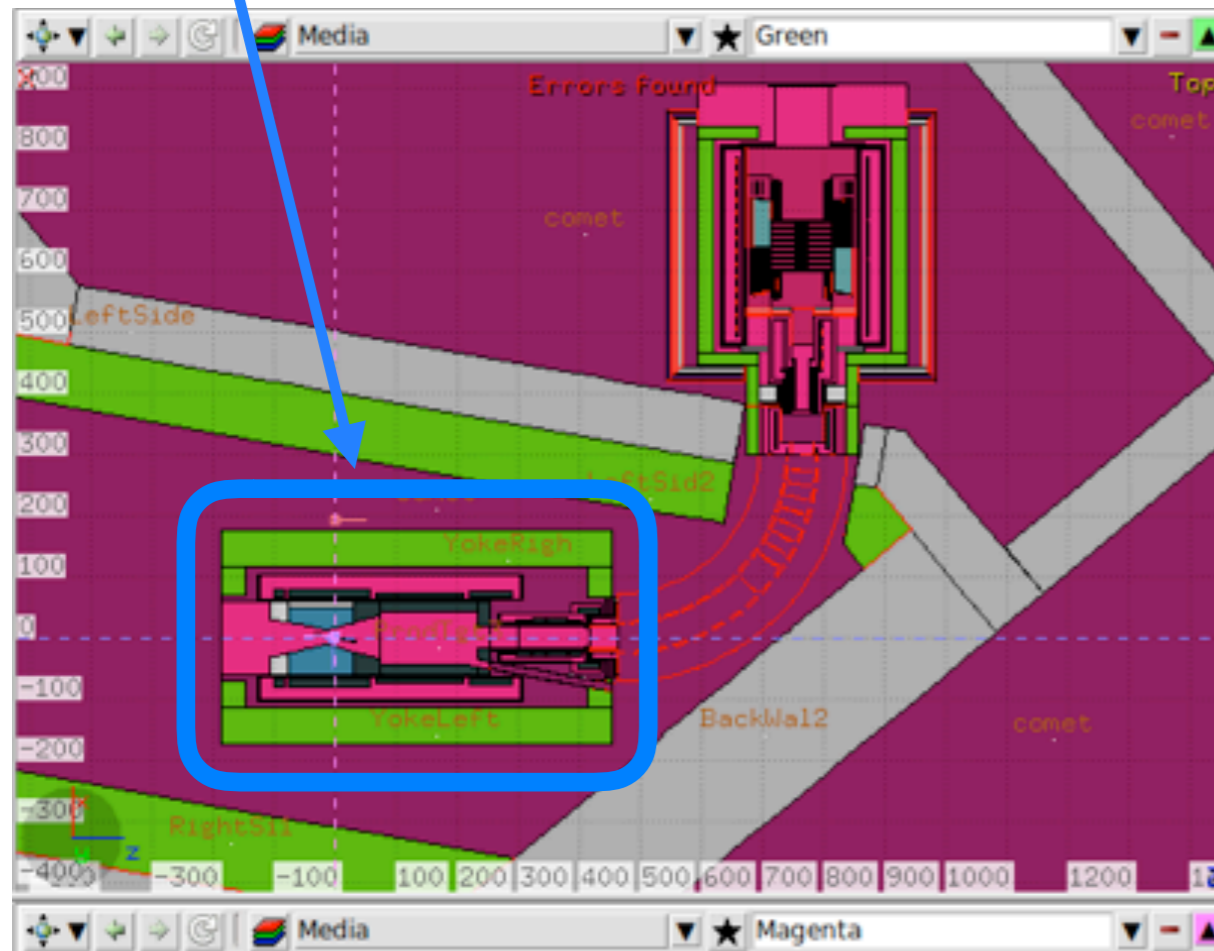


シミュレーション：FLUKA & ICEDUST

FLUKA from CERN

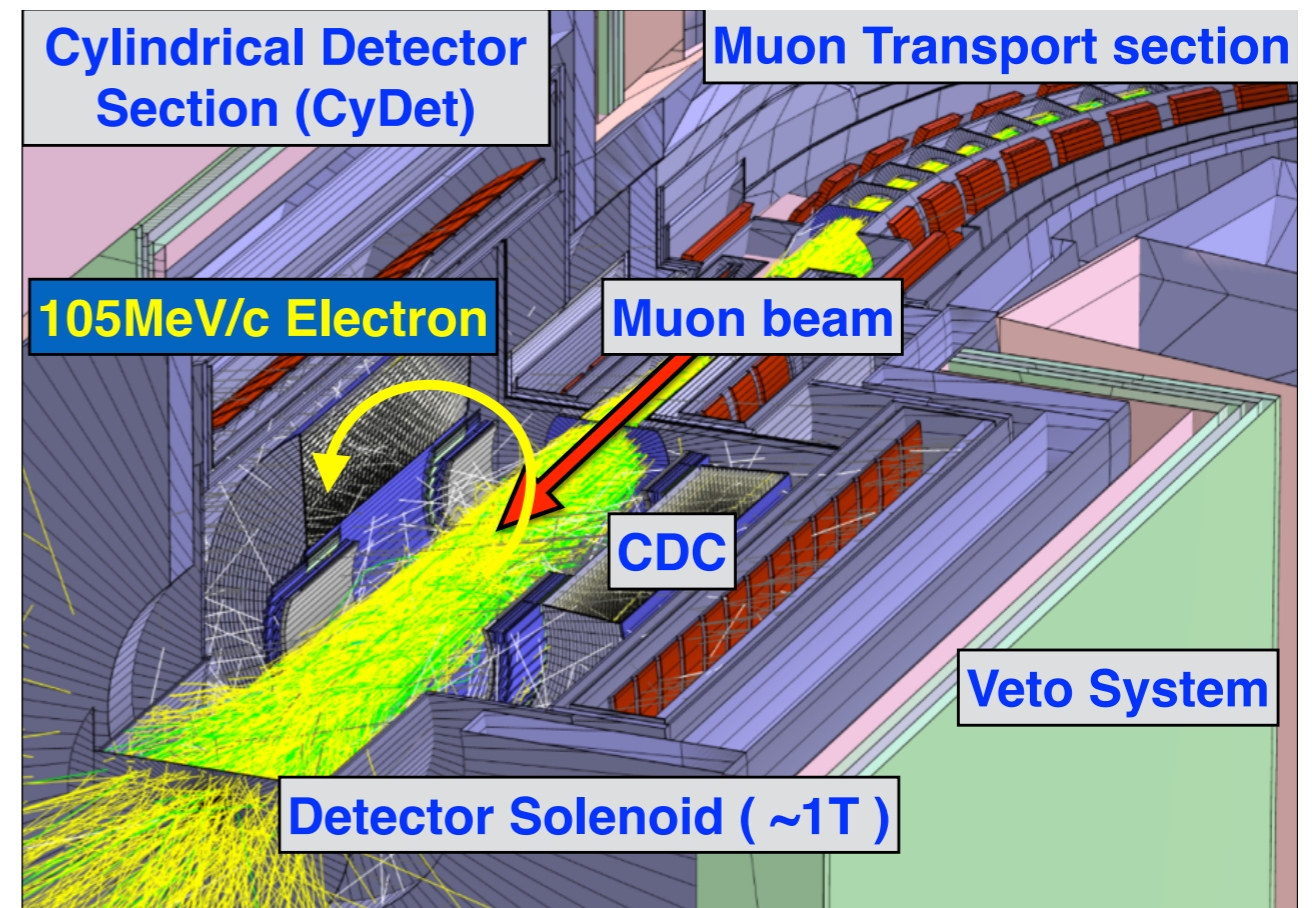
- ・ Fortranベース汎用粒子輸送計算コード
- ・ 放射線量の見積もり
- ・ ミューオン源周辺のシミュレーション

URL: <http://www.fluka.org/fluka.php>



ICEDUST (Geant4ベース)

- ・ COMET実験用の汎用解析プログラム
- ・ Geant4 from CERN URL: <https://geant4.web.cern.ch/>
 - ・ C++で記述された物質中における粒子の飛跡シミュレーションソフト
- ・ 実験のフルシミュレーション
- ・ 本実験のデータ解析

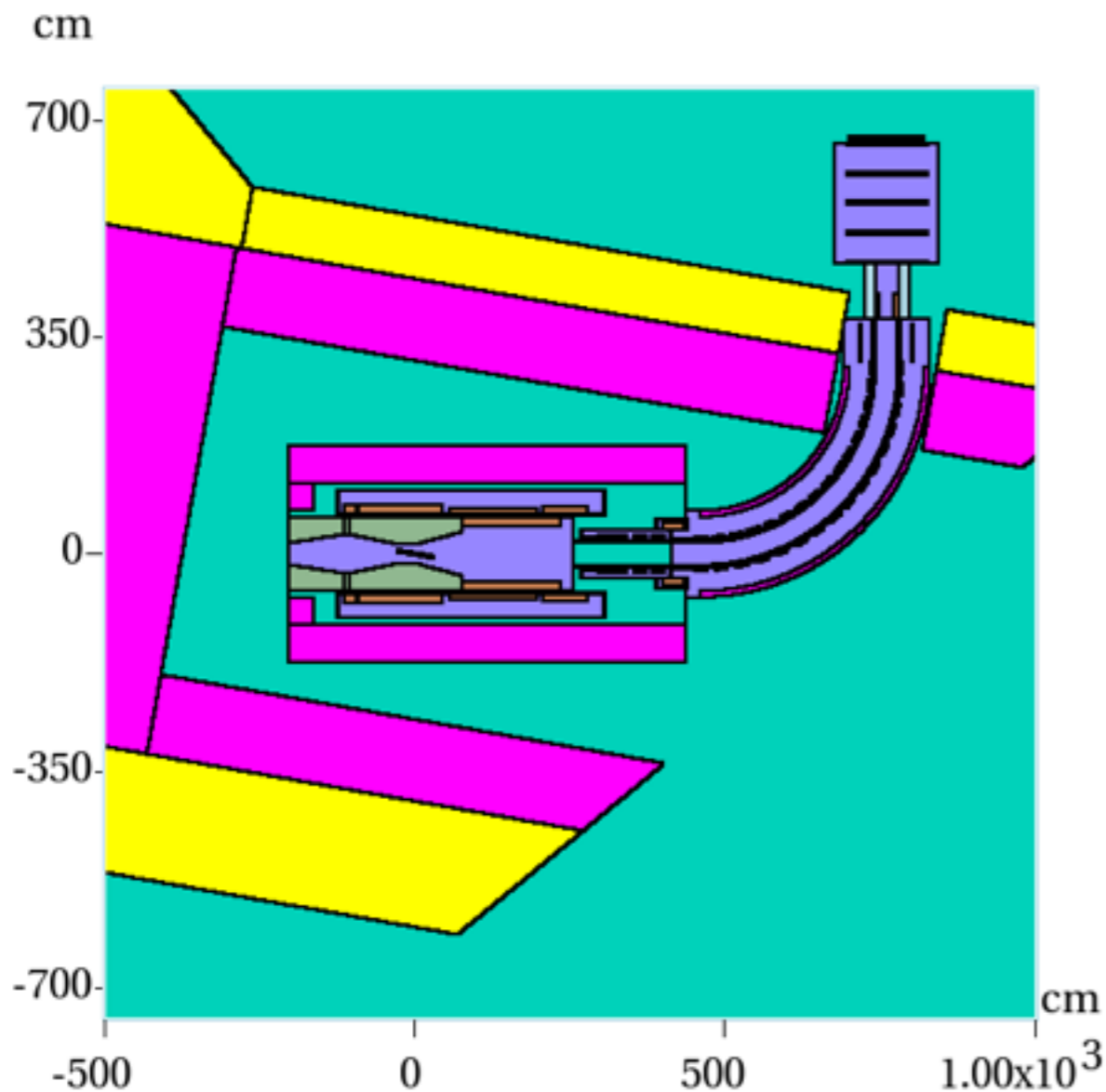


シミュレーション：MARS & PHITS

MARS from FNAL (U.S.)

- ・ 汎用粒子輸送計算コード
- ・ 実験ホール全体のための遮蔽計算

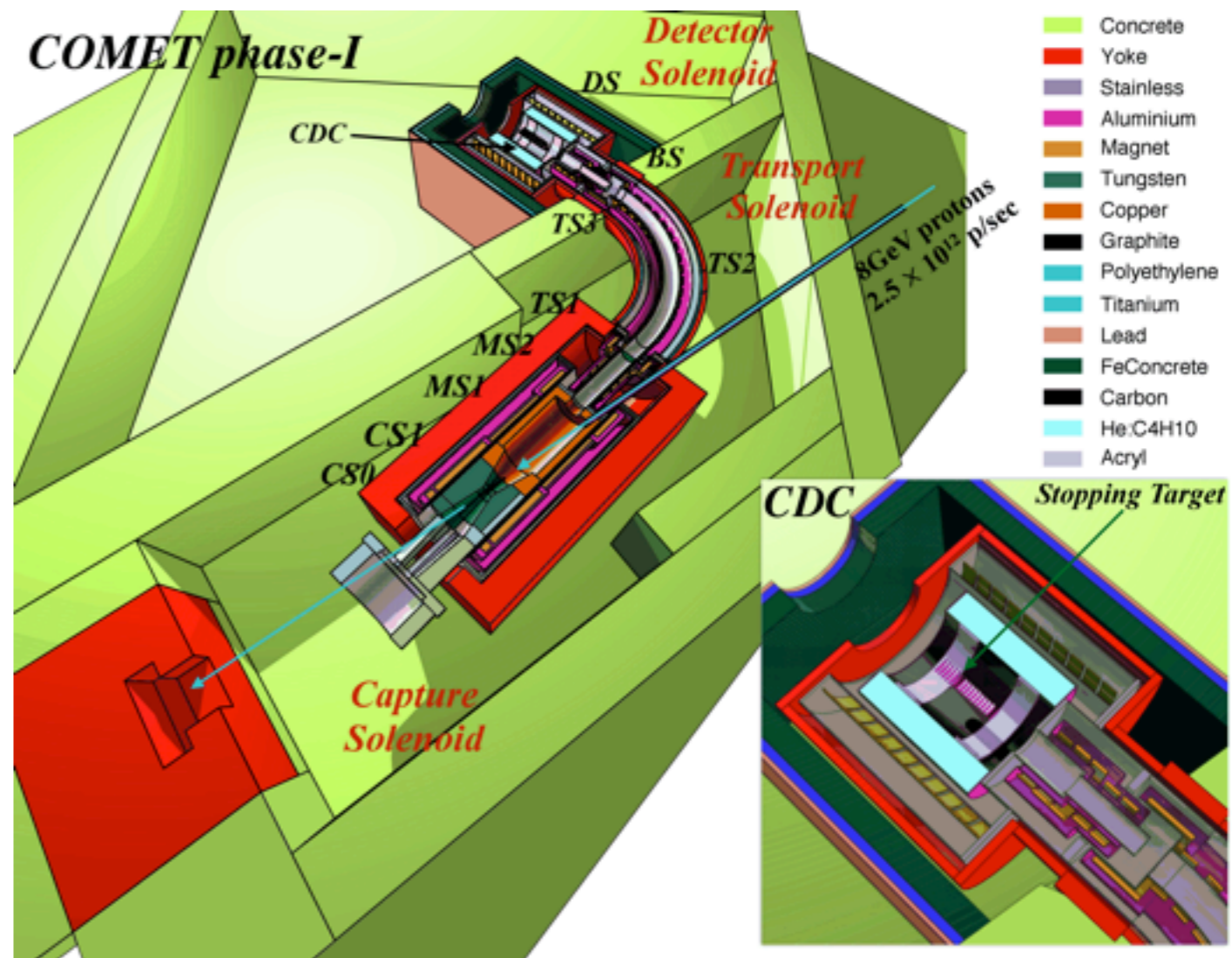
URL: <https://mars.fnal.gov/>



PHITS from JAEA

- ・ Fortranベースの汎用粒子輸送計算コード
 - ・ 詳しくは安倍さんのスライド参照
- ・ 放射線量の見積もり
 - ・ ソレノイド磁石部分
 - ・ 検出器部

URL: <https://phits.jaea.go.jp/indexj.html>



放射線照射施設

TANDEM加速器 @神戸大学

ビーム：3 MeV 重陽子

標的：Be (径20 mm)

中性子エネルギー：2 MeV (<7 MeV)

中性子強度：4.9 MHz/cm²

(*) Be標的からの距離：10 cm ビーム電流：1uA

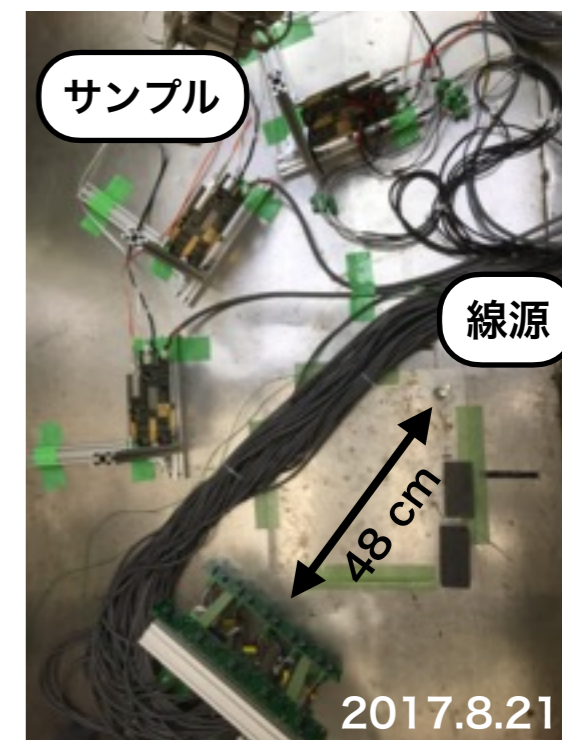


利用したガンマ線源 (Co-60) の強度表

照射施設	ガンマ線強度 [Gy/h]
高崎量子応用研究所	15 @60cm (2015年1月)
加速器・ビーム応用科学センター @九州大学	1400 @10cm (2013年8月)
放射線総合センター @東京工業大学	191 @40cm (2016年6月)
量子ビーム科学研究施設 @大阪大学	50.9 @100cm (2016年10月)

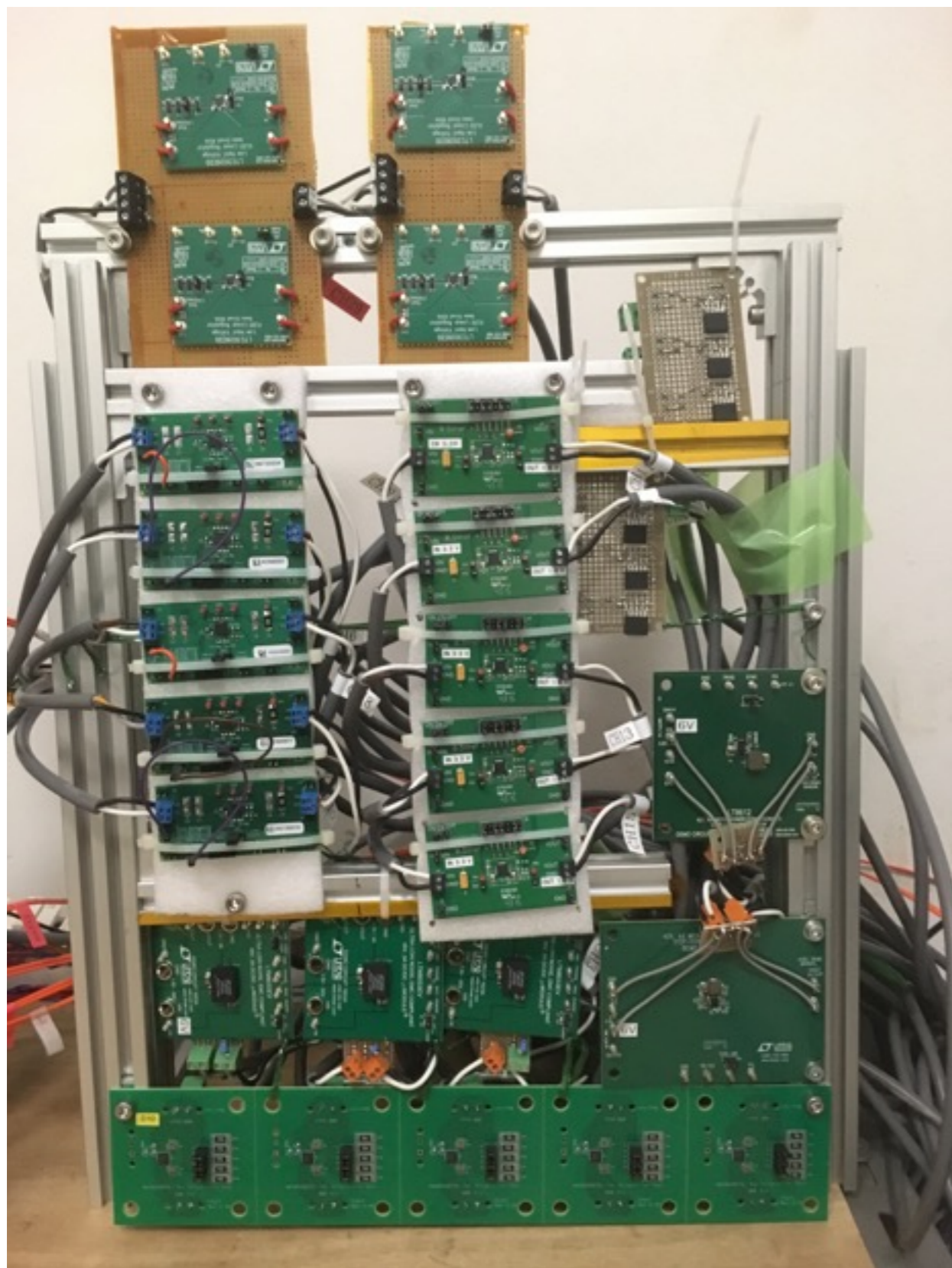


放射線総合センター

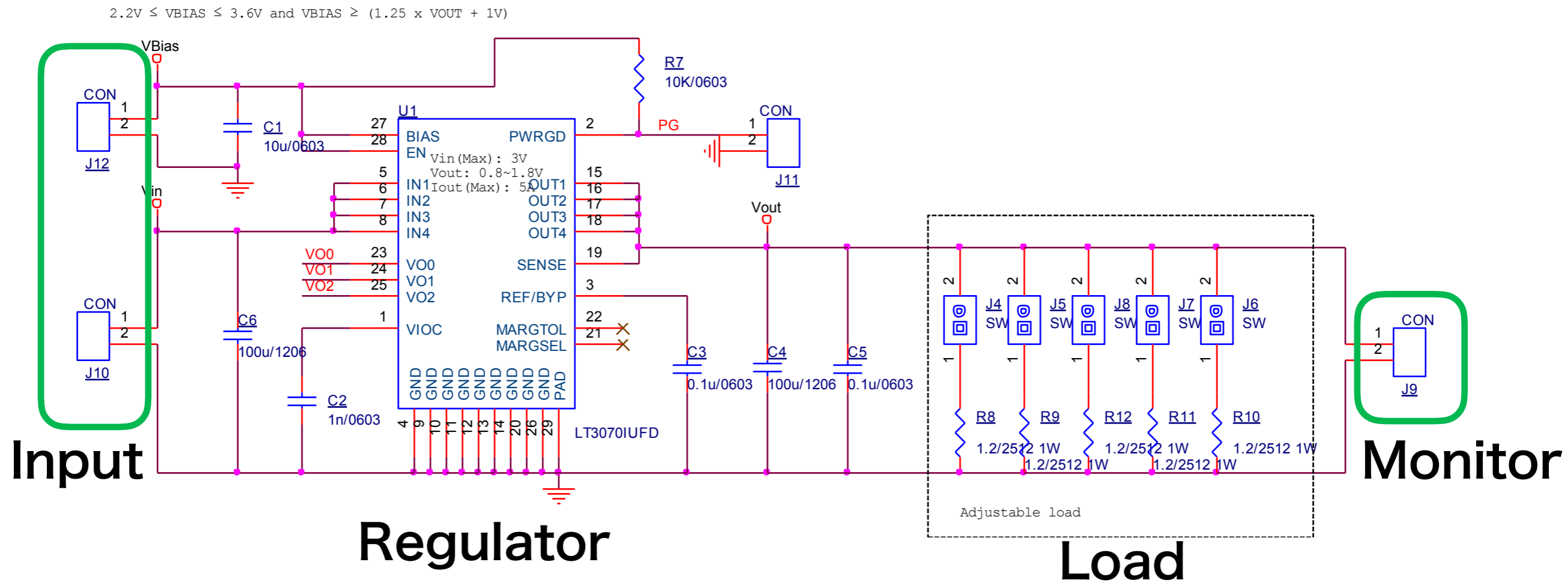


量子ビーム科学研究施設

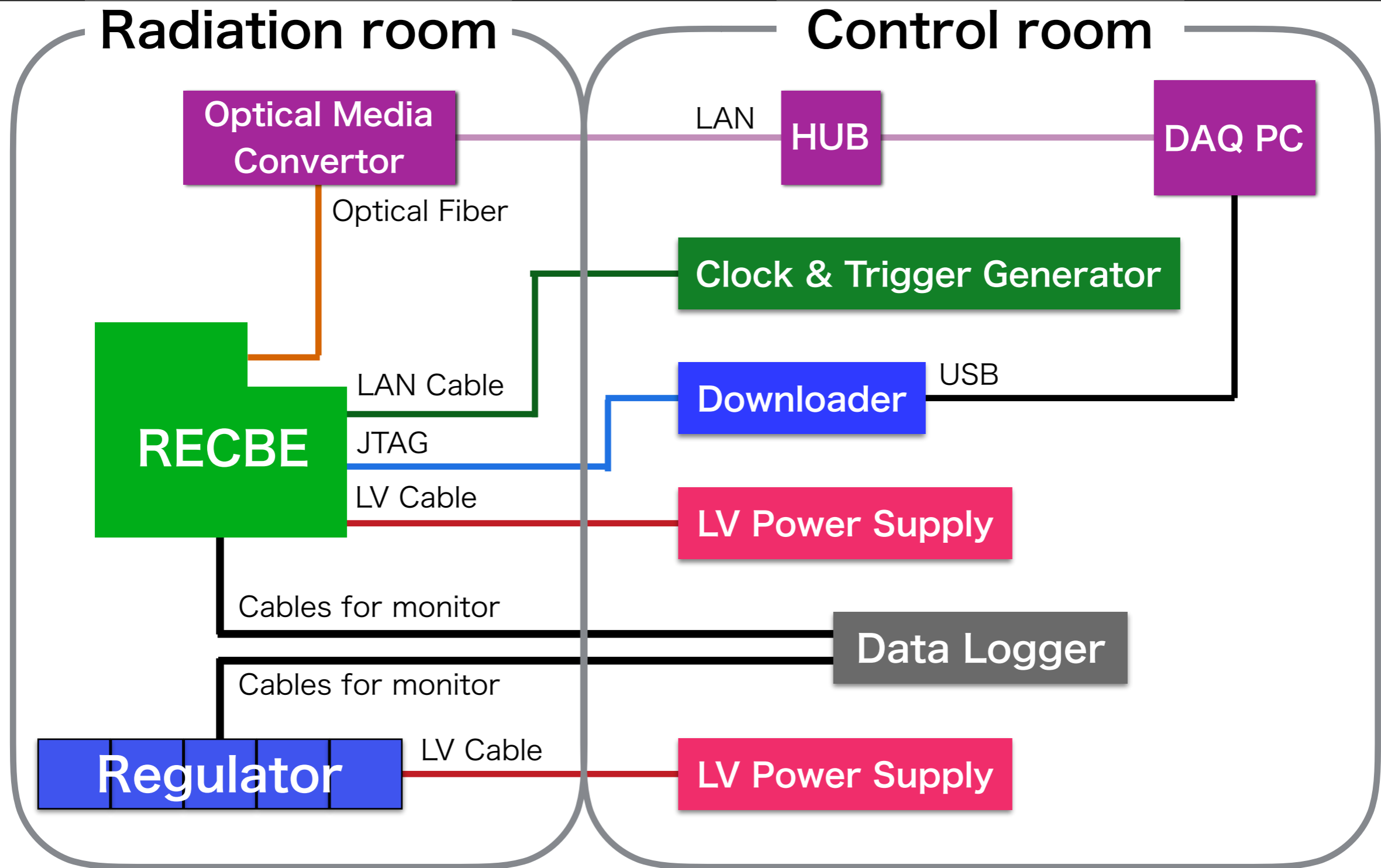
ガンマ線@東工大：セットアップ



Schematic diagram



セットアップ : DAQ



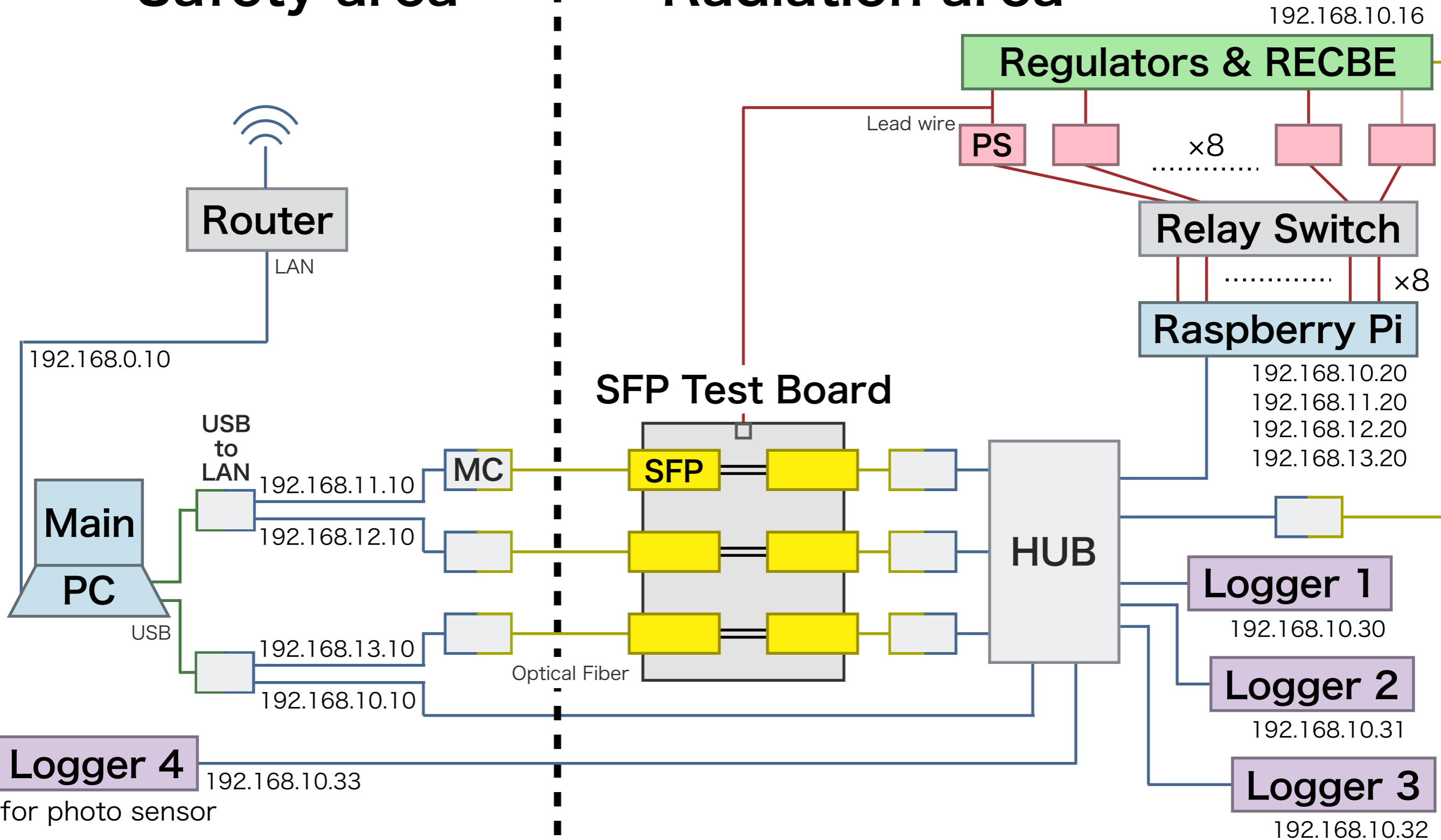
(*) 各Regulatorの出力電圧をロガーで記録

(*) RECBEとの通信をペデスタルデータを取得しながらDAQ PCで確認

Setup : Network @TIT

Power Supply : PS
Media Converter : MC

Safety area ← → Radiation area



(*) All systems are operated by remote control with TeamViewer via the main PC.

ガンマ線試験：セットアップ

施設：量子ビーム科学研究施設 @阪大
放射線総合センター @東工大

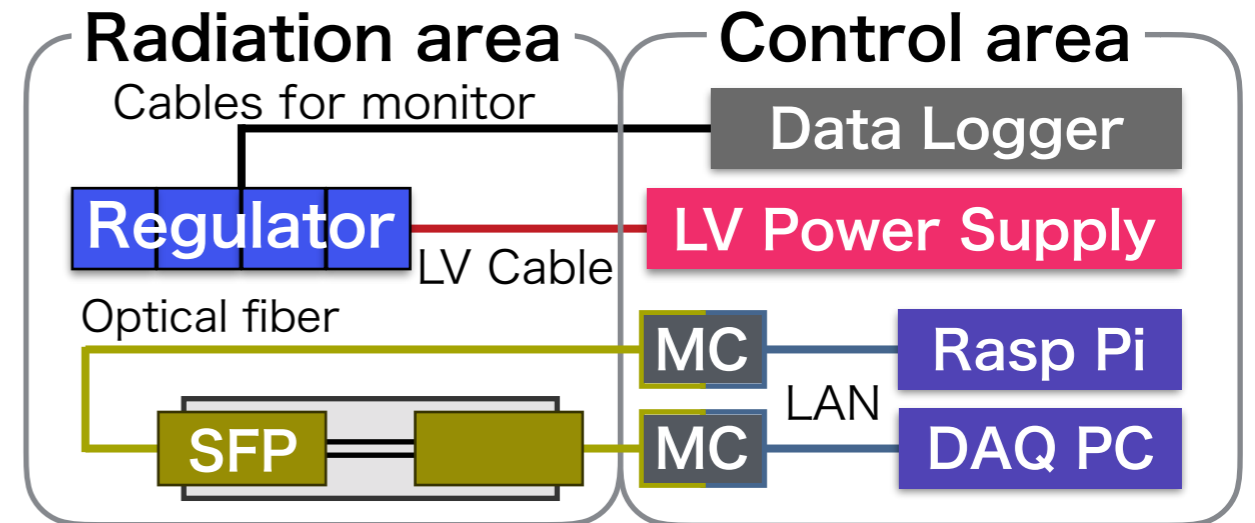
線源： ^{60}Co (1.17 MeV, 1.33 MeV)

線量率：400 Gy/h, 200 Gy/h,
22 Gy/h, 4.5 Gy/h

COMET Phase-I : ~0.04 Gy/h

目標照射量：2 kGy (安全係数：10)

電源OFF/ON：200 Gy毎



レギュレータ：負荷抵抗を実装
SFP：“ping”で動作確認

Positive		Negative
Linear	Switching	Linear
LT1963	LT8612	L79
LT1963-3.3	LT8614	MC7905
LT1963-2.5	LMZ10503	NJM2828
LT1963-1.8	+3 レギュレータ	ADP7182
+8 レギュレータ		+8 レギュレータ

全 29種類

SFP
AFBR-57D9AMZ (Avergo)
SFP made in China (very cheap)
EHB-EX-SFPGSX (ELECOM)
LAN-SFPGSX (サンワサプライ)
63GGJ (DELL)
SFPGESST (STARTECH.com)
SFP+
FINISAR
KCC-REI-NXT-NEXT-SFP 10G-SR
10G-SR (Starline)
EHB-EX-SFPGSX (ELECOM)

中性子試験

TANDEM 加速器 @神戸大学

ビーム : ~3 MeV 重陽子

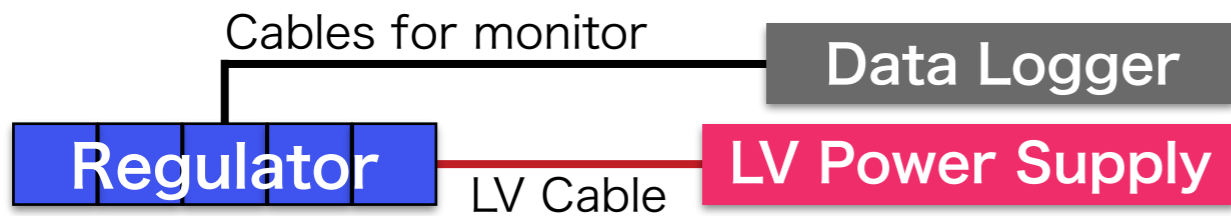
標的 : Be (ϕ 20 mm)

中性子エネルギー : 2 MeV (< 7 MeV)

中性子流量 : 1.6×10^6 neutrons/cm²/sec

(標的からの距離 : 10 cm)

(ビーム電流 : 1 μ A)



- **MC7905・L79の出力は安定**
- LT1963シリーズは読み出し回路の中性子照射時に評価済み
 - ・ SFP (AFBR5D9AMZ) も同様
- LT8612・LT8614は4月に評価予定

