

COMET Phase-I CDC用 読み出しボードの開発

阪大 博士前期課程2年

中沢 遊

2016.2.29

22nd ICEPP Symposium @白馬

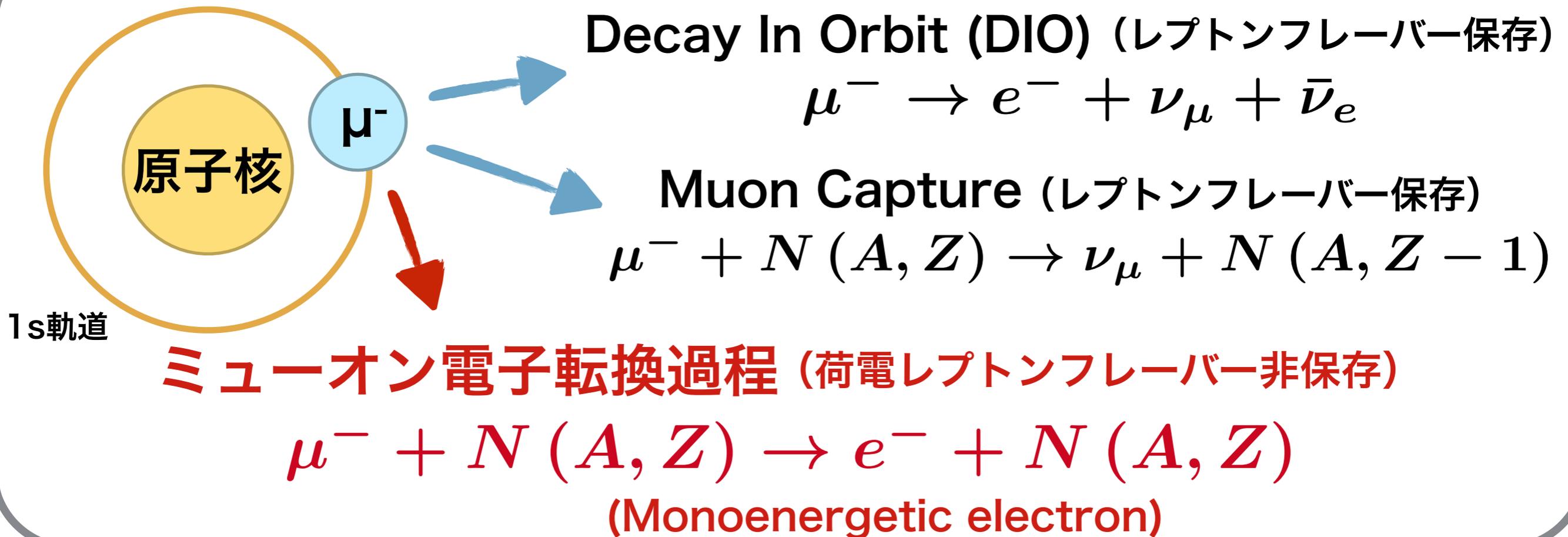
目次

- **イントロダクション**
 - ミューオン電子転換
 - COMET Phase-I 概要
 - 読み出しボード (RECBE)
- **中性子対策**
 - 概要
 - 中性子照射試験
 - セットアップ
 - 測定結果
- **まとめ**

イントロダクション

ミュオン電子転換過程

ミュオニック原子



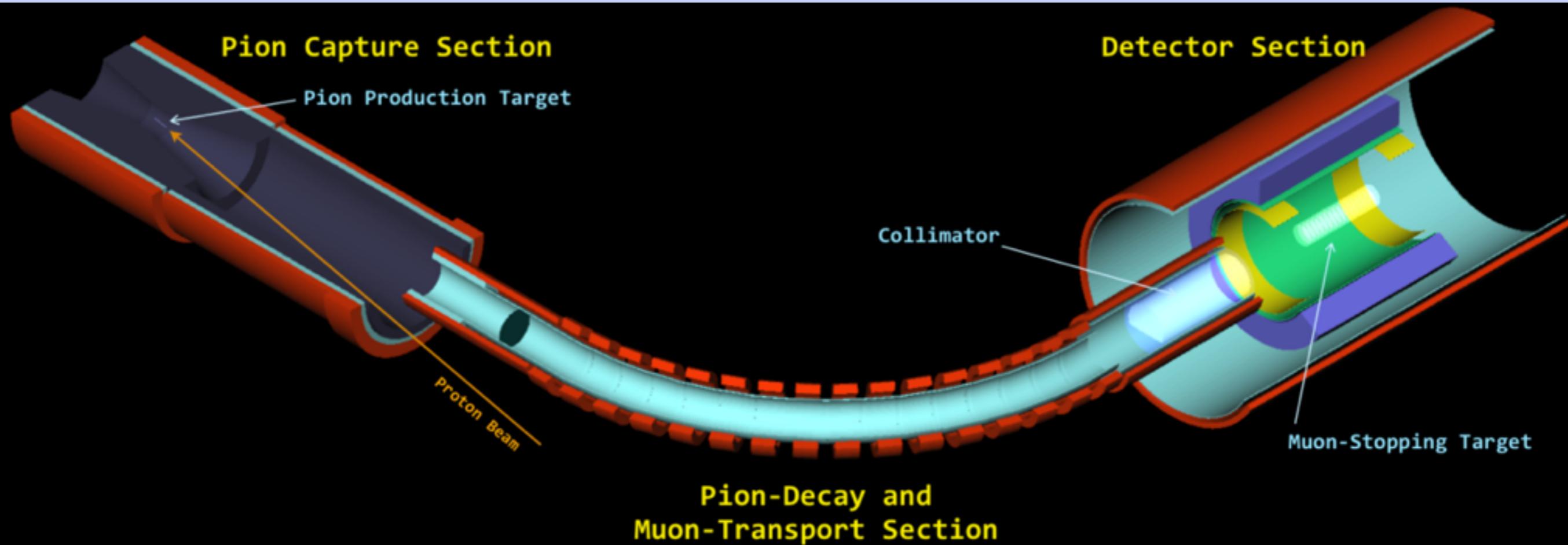
荷電レプトンフレーバー非保存の分岐比

標準模型 : $O(10^{-54})$ \longrightarrow 厳しく制限されている

標準模型を超える理論 : $O(10^{-15})$

ミュオン電子転換過程の発見は新物理を示唆する

COMET Phase-I



目的：荷電レプトンフレーバー非保存過程探索

- ・ Al原子中でのミュオン電子転換過程 @J-PARC (2018年)
- ・ 110日間の測定で実験感度 (S.E.S.) $\sim 3 \times 10^{-15}$ (先行実験の100倍)

検出器： **Cylindrical Drift Chamber (CDC)** & ストロー飛跡検出器

信号： ~ 105 MeVの単一エネルギーを持った電子

背景事象： Decay-In-Orbit (DIO) 電子 & ビーム由来の事象

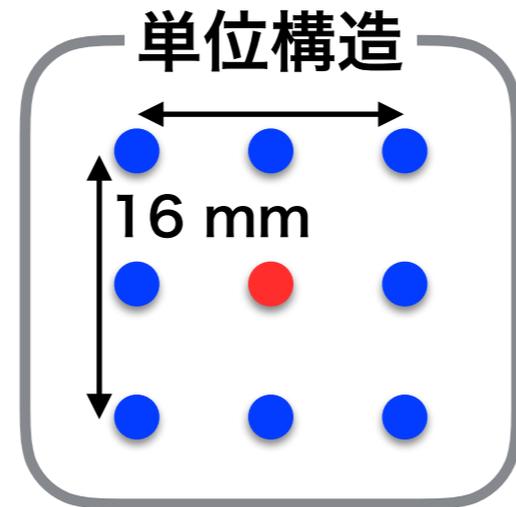
CDC読み出しボード： Belle-IIで開発されたRECBE

Cylindrical Drift Chamber

COMET CDC

A. サイズ

- ・ 内径 : 496 mm
- ・ 外径 : 835 mm



B. ワイヤー

- ・ センス ● : $\phi 25 \mu\text{m}$ W plated Au
- ・ フィールド ● : $\phi 126 \mu\text{m}$ Al

C. ガス : Heベースの混合ガス (未決定)

- ・ 90%He - 10%iC₄H₁₀
- ・ 50%He - 50%C₂H₆

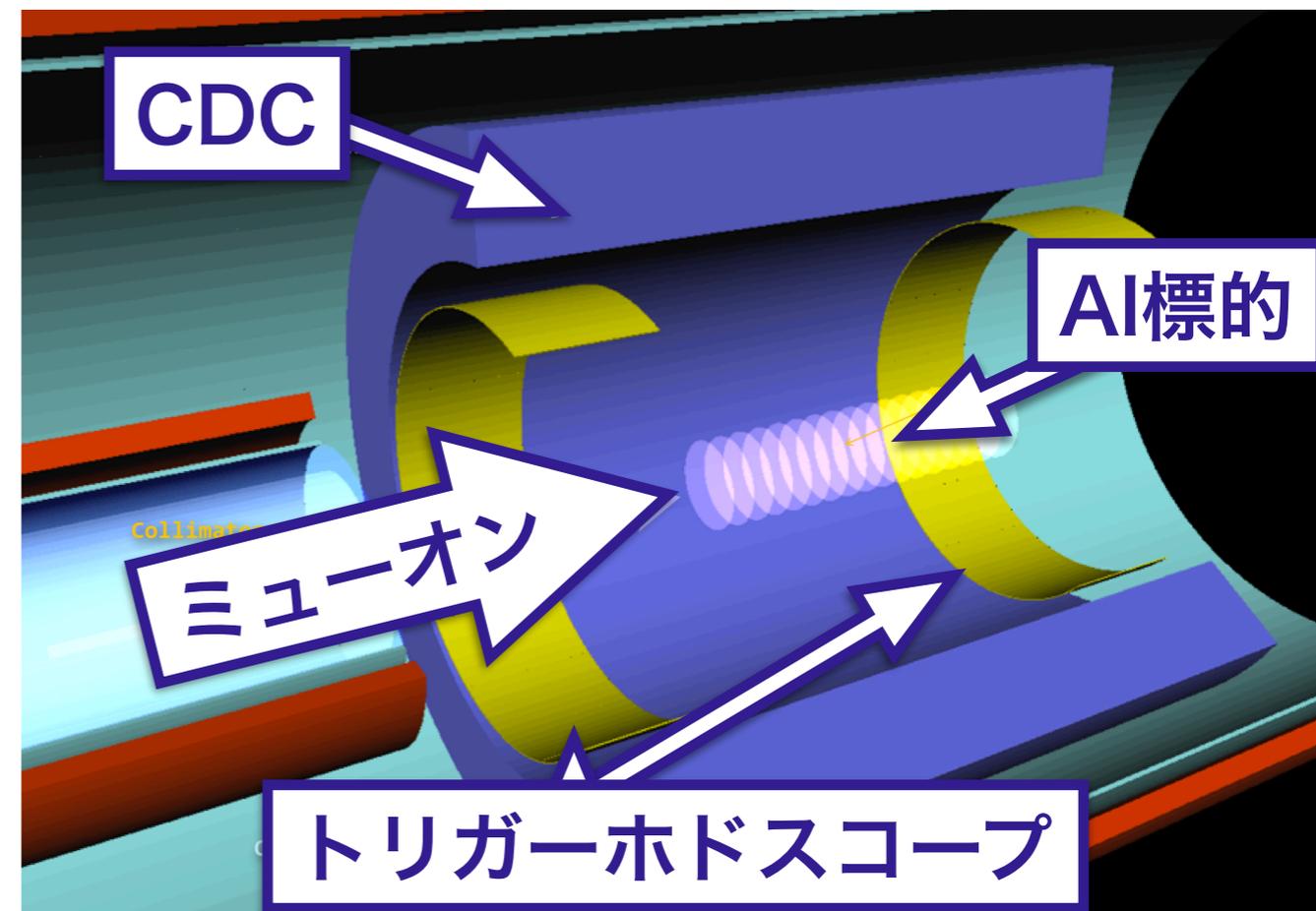
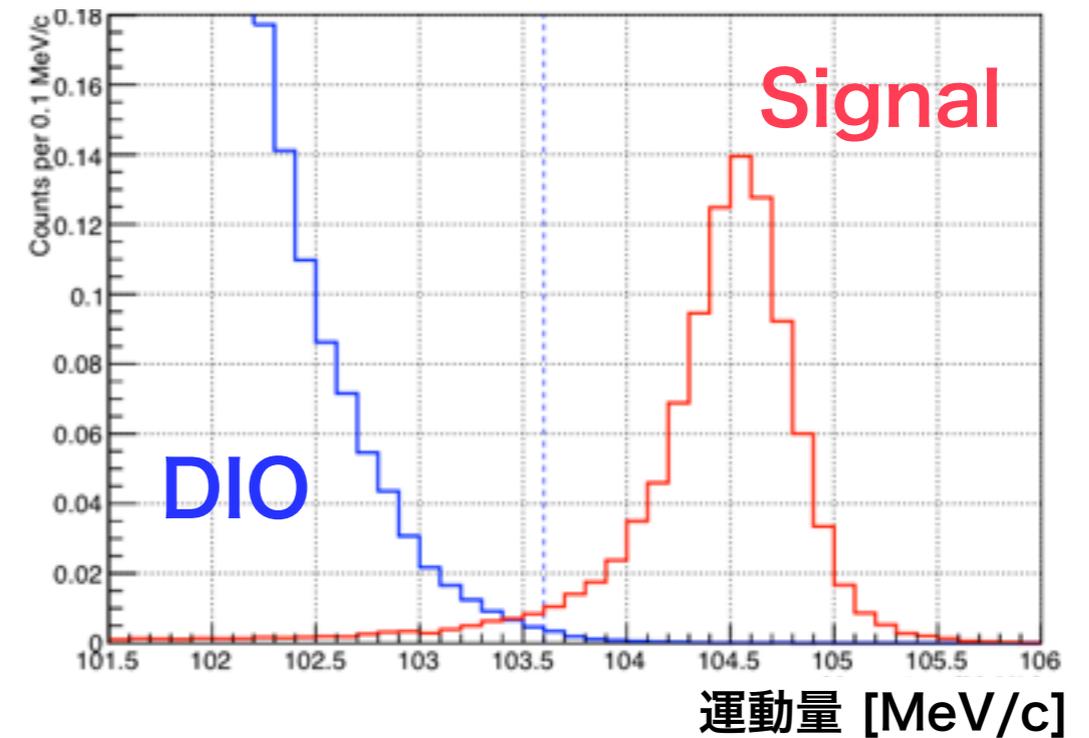
D. 運動量分解能 : 200 keV/c

- ・ DIOとシグナルを識別可能な高い運動量分解能

E. データ読み出し回路 : 104 RECBEs

- ・ 中国のIHEPにて大量生産を完了

COMETで予想される電子の運動量分布



RECBE

ASD

- ・ Amp shaper Discriminator
- ・ 8 ch/chip

ADC (AD9212)

- ・ 8 ch/chip
- ・ 2 Vp-pを10 bit分解能でデジタル化
- ・ 30 Msps

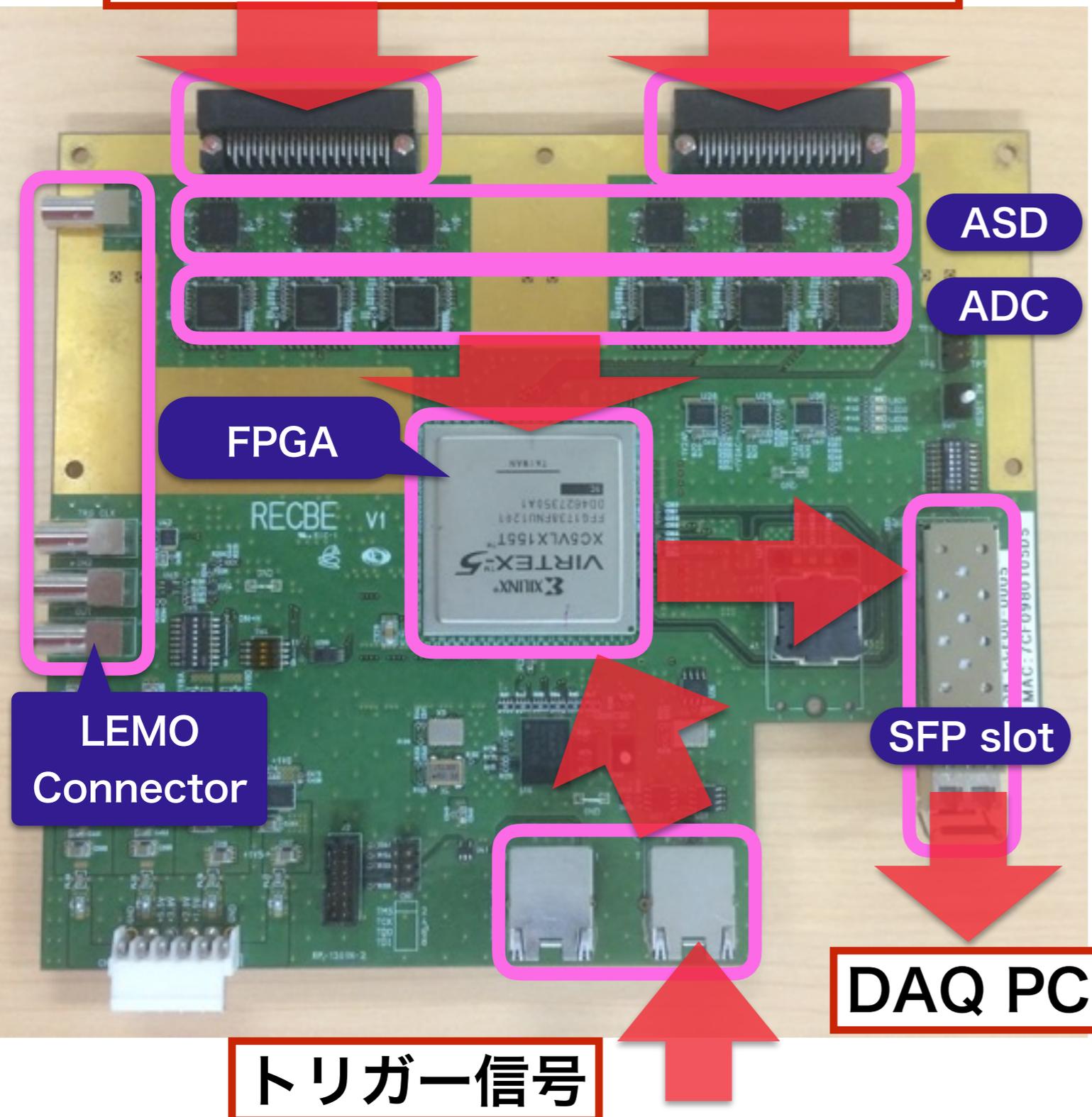
FPGA (Virtex-5 XC5VLX155T)

- ・ ボード全体をコントロール
- ・ KEKの内田准教授が作成したファームウェアを最適化

RJ-45 (JTAG, LVDS)

- ・ LVDS
 - ・ 共通動作クロック(40 MHz)の付与
 - ・ トリガー信号の入力
- ・ JTAG
 - ・ ファームウェアのダウンロード

CDCからの信号 48 ch/board

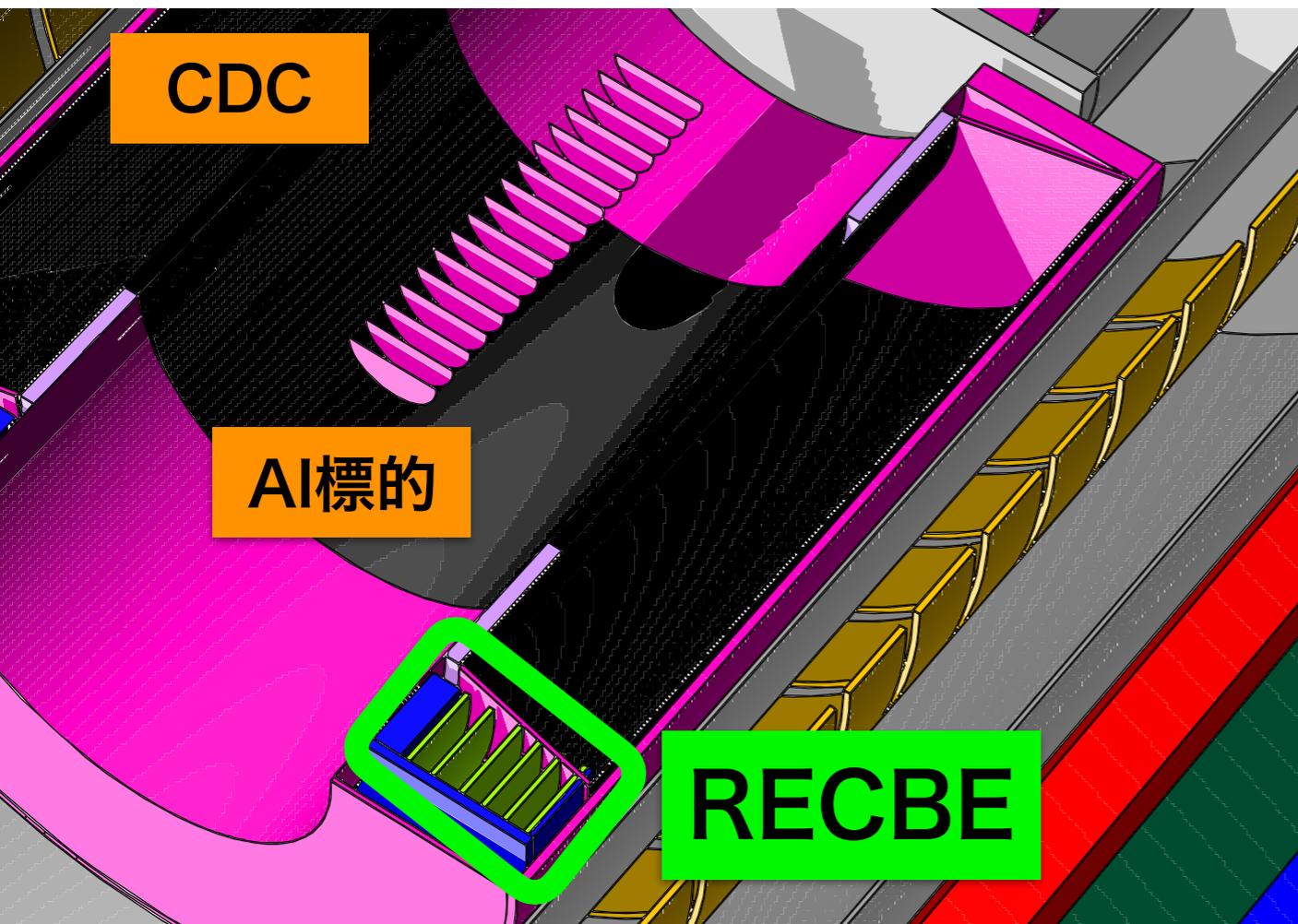


COMET Phase-Iにおける中性子量

Phase-IにおいてRECBEに入射する中性子流量 (PHITS)

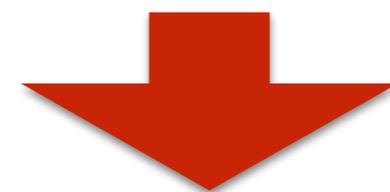
Neutron Energy [Mev]	Neutron Flux [n/cm ² /sec]
En < 0.1	5.89×10^4
0.1 < En < 5	2.95×10^4
5 < En < 10	8.03×10^2
En > 10	1.36×10^3

from Y. Yang (Kyushu Univ.)



中性子線耐性 (for 110 days)
 $\sim 10^{12}$ neutrons/cm²

たくさん中性子来るけど大丈夫？



大丈夫じゃないらしい...

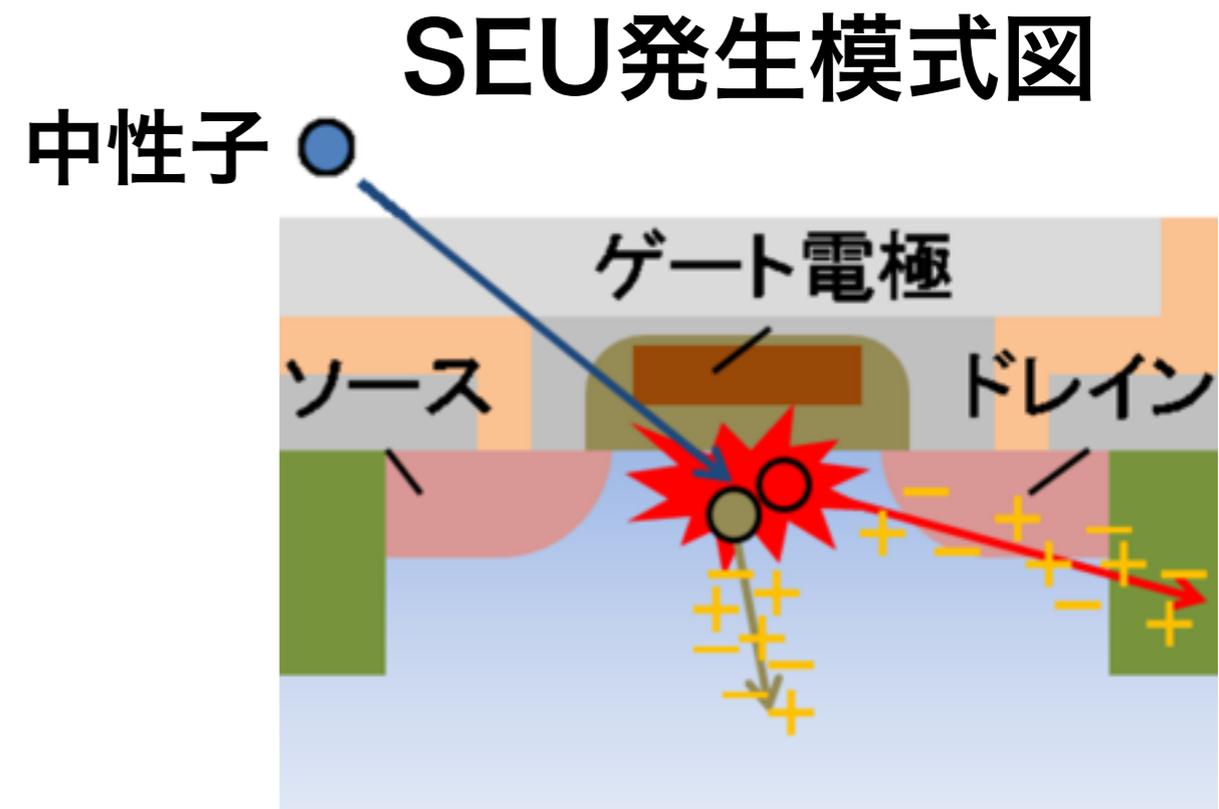
中性子対策

概要

- ・ ファームウェアが中性子により破損 (Single Event Upset ; SEU)
- ・ 自動修復マクロ (SEU Controller) の実装
 - ・ ハミングコードによるSEUの検出と修正が可能
 - ・ モジュラー演算を利用した独立検知機能 Cyclic Redundancy Check (CRC)
 - ・ UnRecoverable Error (URE) : 修正不可能
 - ・ URE発生時はファームウェアの書き直し
 - ・ UDP通信によりデータ読み出し可能
- ・ 中性子試験照射試験の評価項目
 1. SEU Controllerの動作確認
 2. SEUの発生頻度
 3. UREの発生頻度

Single Event Upset

- ・ 中性子と半導体原子の核反応による荷電粒子の生成
- ・ 荷電粒子のドリフトにより生成した電子正孔対により論理反転
- ・ 複数同時発生したSEU ; Multi Bit Errors (MBE)



安部晋一郎 (九州大学) 修士論文

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 (厚さ20 mm)

中性子強度： $(1.90 \sim 3.81) \times 10^6$ neutrons/cm²

(標的からの距離：10 cm)

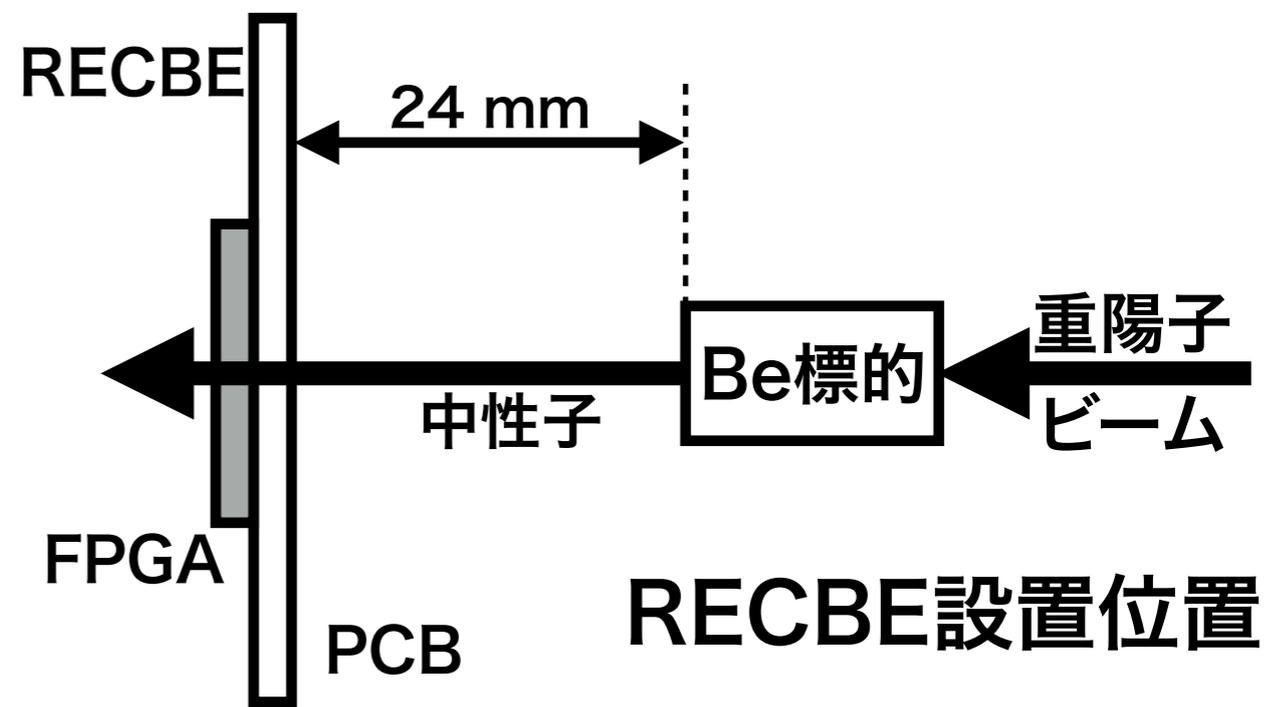
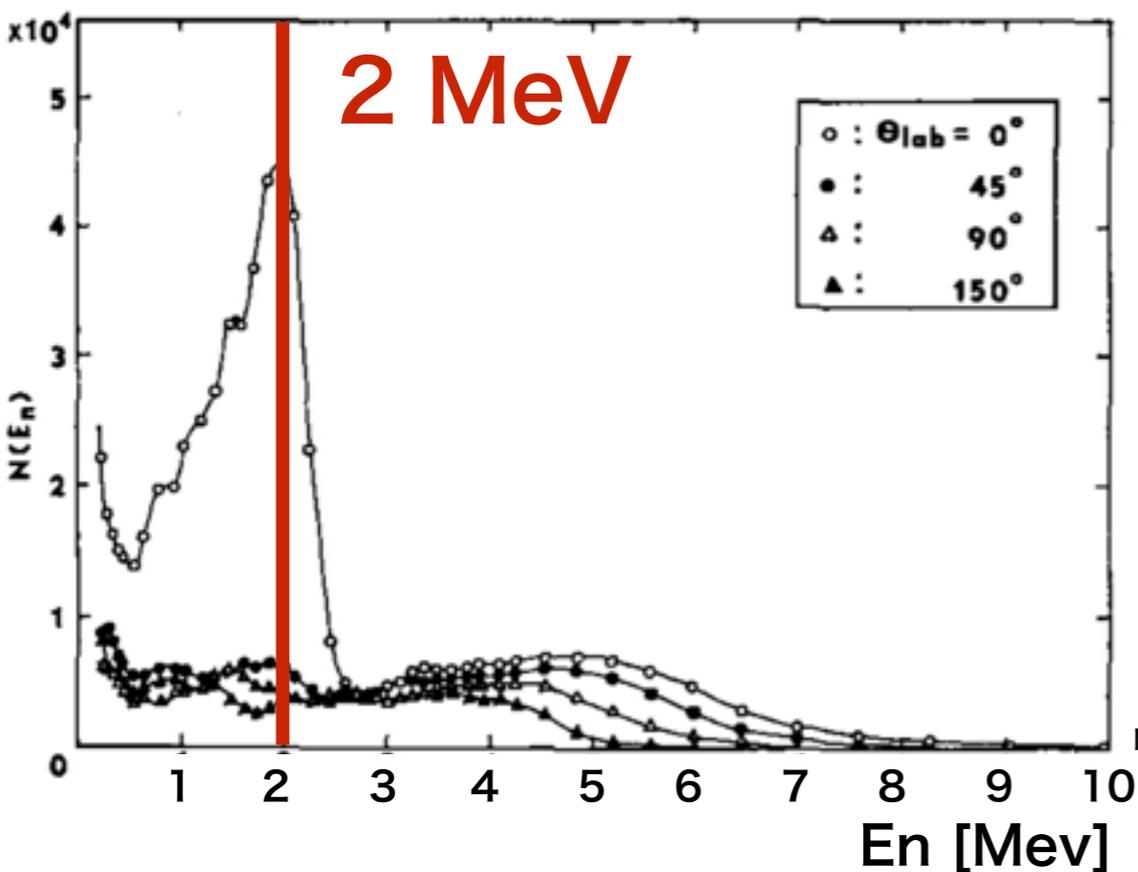
(ビーム電流：1 microC/s)

ref. Nakanishi Hitoshi, (Univ. of Tokyo), JPS 2015 autumn

ref. Yubin Zuo, "Neutron yields of thick Be target bombarded with low energy deuterons", Phys Procedia

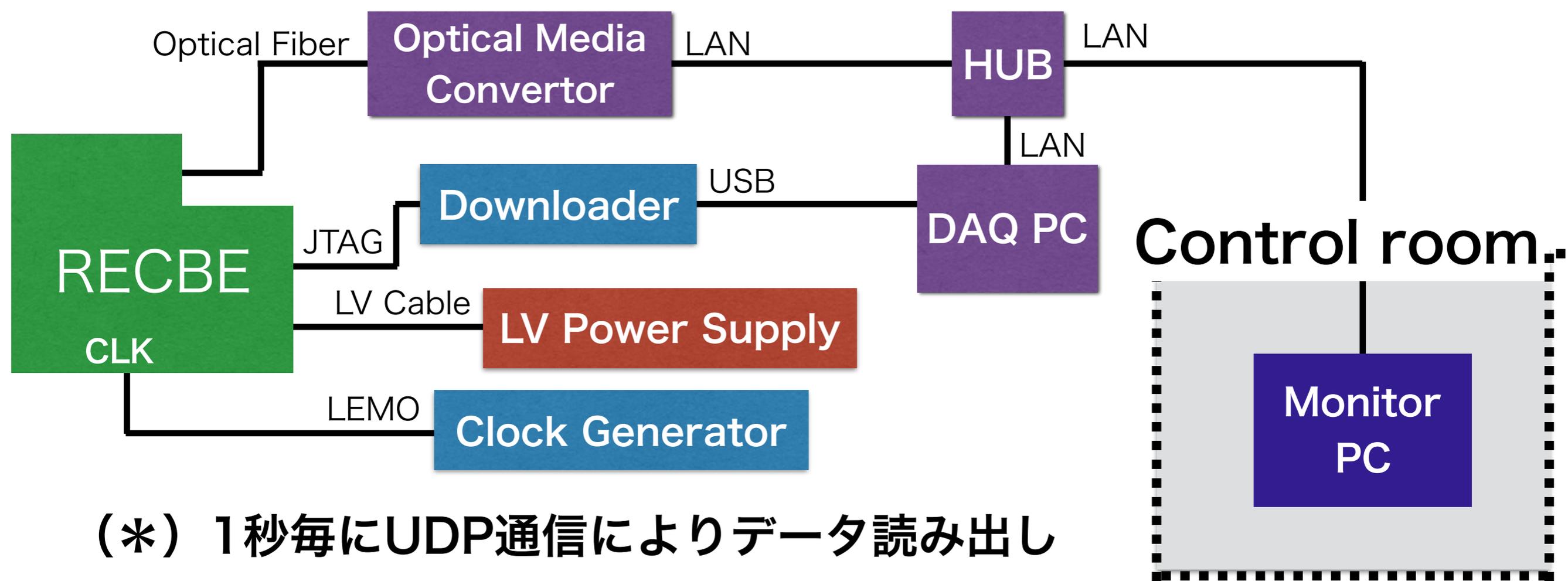


中性子エネルギースペクトル



ref : Neutrons from Thick Target Beryllium Reactions at 1.0 MeV to 3.0 MeV (Tetsuo INADA, 1968)

中性子照射試験：動作確認



UDP通信で読み出したレジスタの値

SEU Controllerの動作確認

- ・ SEUカウンターの数が時間とともに増加
- ・ CRCの出力は常にゼロ
- ・ **SEU ControllerによるSEU検知及び、修正を確認**

	Unix time	SEU counter				CRC	
1	1452717274	01	01	00	00	0001	00 00
2	1452717275	01	01	00	00	0002	00 00
3	1452717276	01	01	00	00	0003	00 00
4	1452717277	01	01	00	00	0003	00 00
5	1452717278	01	01	00	00	0003	00 00
6	1452717279	01	01	00	00	0003	00 00
7	1452717280	01	01	00	00	0005	00 00

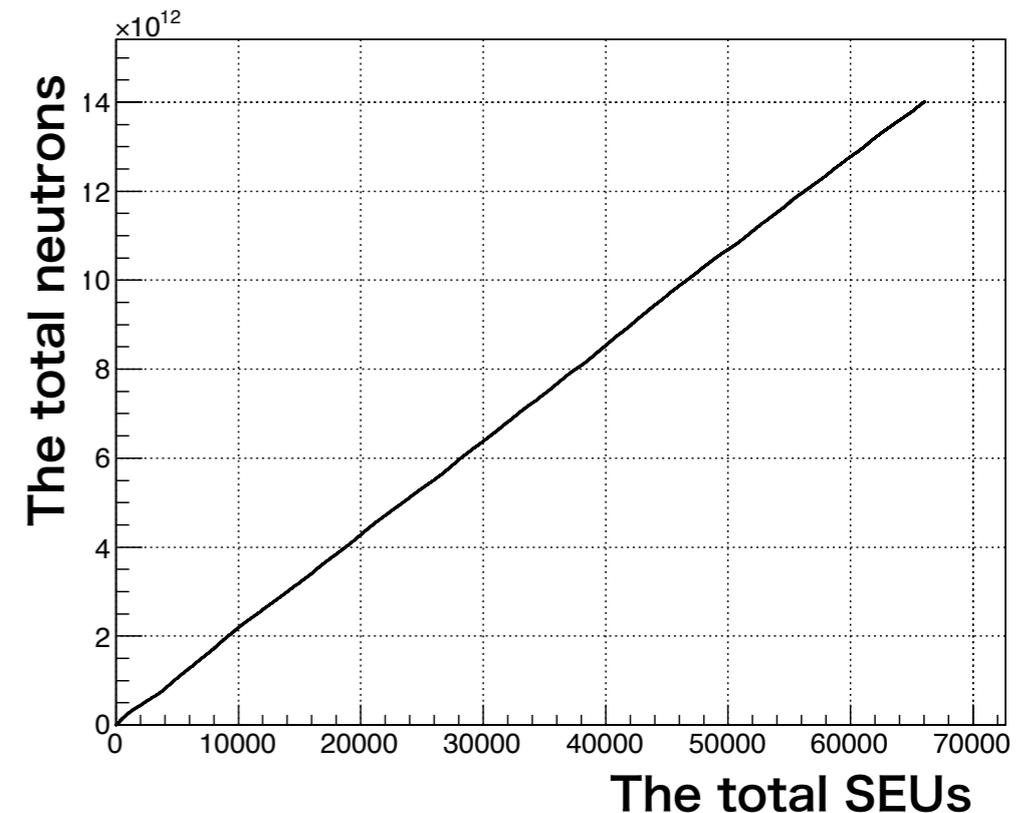
中性子照射試験：測定結果

SEUの発生頻度

- ・ SEUの発生回数とFPGAへ入射した中性子量が比例
- ・ SEUと中性子量の総数から $Rate^{-1}$ を計算

$$\begin{aligned}
 Rate^{-1} &= \frac{(1.41 \sim 2.83) \times 10^{13}}{(6.60 \pm 0.03) \times 10^4} \\
 &= (2.12 \sim 4.25) \times 10^8 \text{ Neutrons/SEUs}
 \end{aligned}$$

SEUとFPGAへ入射した中性子量の関係

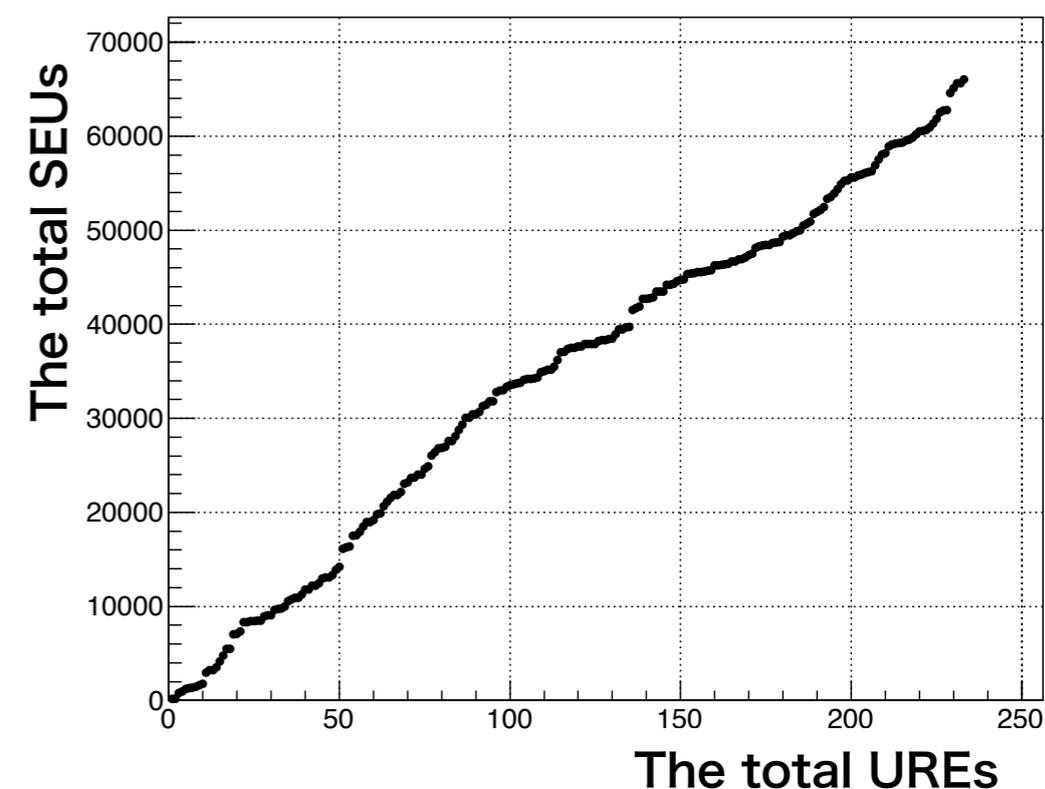


UREの発生頻度

- ・ SEUとUREの発生回数がおおよそ比例
- ・ SEUとUREの発生回数の比を求めた。

$$\begin{aligned}
 \frac{SEUs}{URE} &= \frac{(6.60 \pm 0.03) \times 10^4}{233 \pm 15} \\
 &= 283 \pm 19 \text{ SEUs/URE}
 \end{aligned}$$

SEUとUREの発生回数の関係



COMET Phase-IにおけるSEUの見積もり

COMET Phase-Iにおける**SEUの発生頻度**
(SEU Controllerがない場合での再ダウンロード頻度)

$$Rate^{-1} = 1.05 \sim 2.11 \text{ sec/SEU/104boards}$$

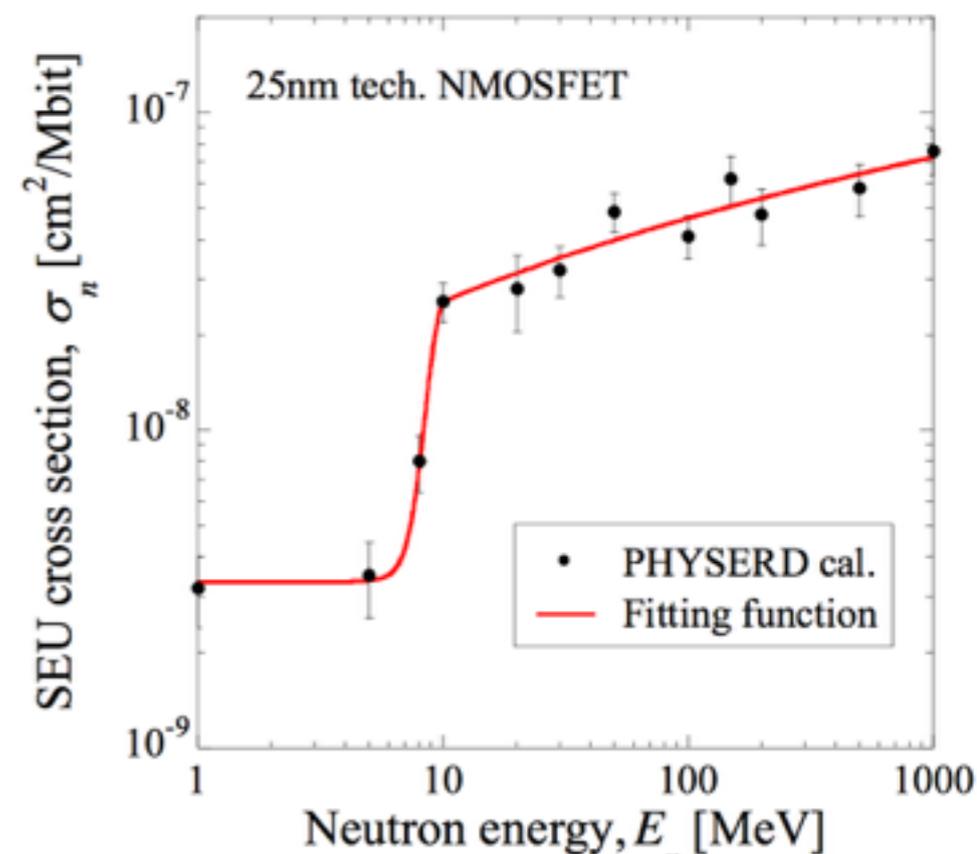


× 283 SEUs/URE

COMET Phase-Iにおける**UREの発生頻度**

$$Rate^{-1} = 4.94 \sim 9.91 \text{ min/URE/104boards}$$

中性子エネルギーとSEU
反応断面積の関係 (PHITS)



ref. Abe Shinichiro (Kyushu Univ.) 61st JSAP meeting

さらなる中性子対策

- ・ パラフィンによる遮蔽 → 中性子量を10分の1
- ・ ファームウェアの改良
 - ・ Triple Modular Redundancy
 - ・ block RAM用自動修復機能

課題

- ・ 中性子流量による依存性
- ・ 中性子の入射角による依存性
- ・ Triple Modular Redundancy
- ・ block RAM用自動修復機能

まとめ

まとめ

COMET Phase-I 概要

- AI原子中でのミュオン電子転換過程をS.E.S. 10^{-15} で探索
- 高い運動分解能を要求する飛跡検出器 Cylindrical Drift Chamber
- Belle-IIグループによって開発された読み出しボードRECBEの使用

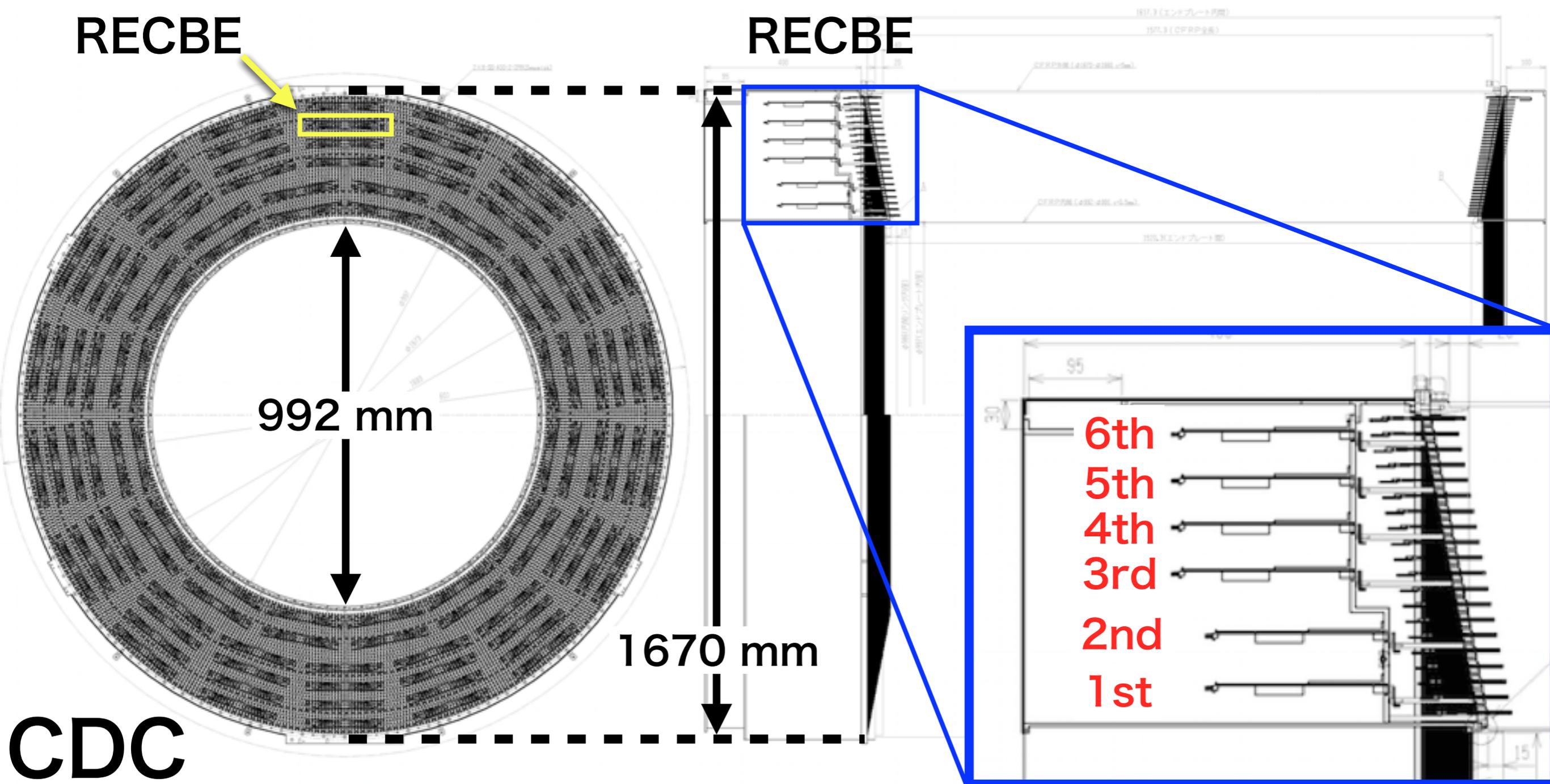
読み出しボードの中性子対策

- SEU Controllerを実装したファームウェアでの中性子照射試験。
 - ・ SEU Controllerの動作確認完了
 - ・ SEUの発生頻度： $(2.12 \sim 4.25) \times 10^8$ Neutrons/SEU
 - ・ SEU vs URE：289 SEUs/URE
- さらなる対策
 - ・ パラフィンによる遮蔽
 - ・ ファームウェアの改良 (Triple Modular Redundancy、block RAM用自動修復機能)

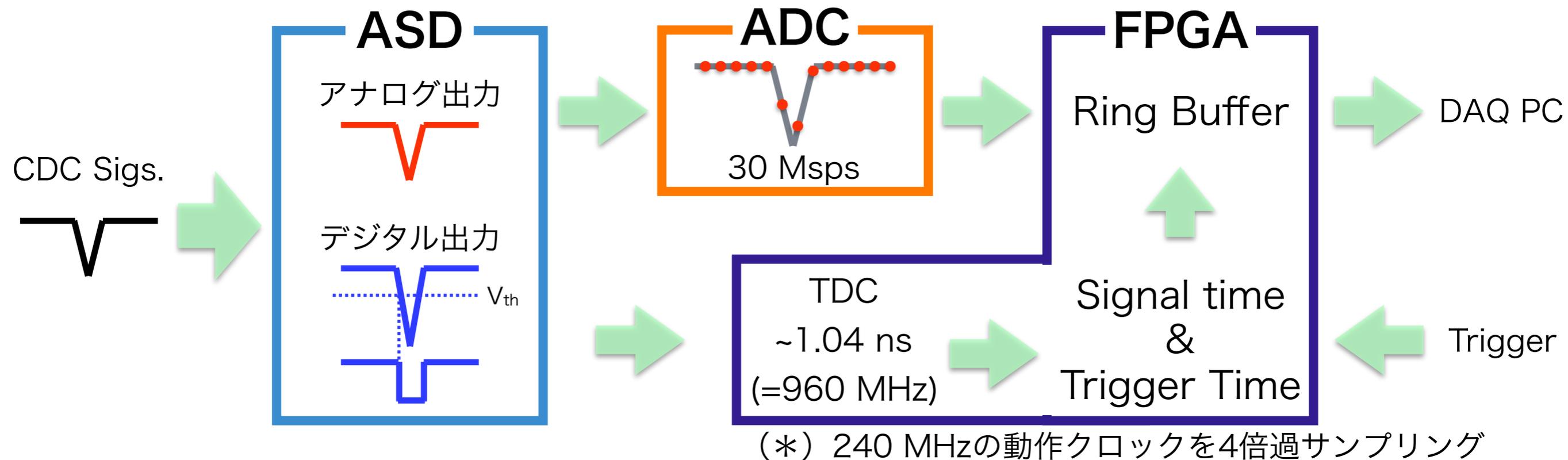
Backup

イントロダクション

RECBEの取り付け位置



RECBE : ブロック図



データフォーマット

Rawモード

- ・ 全チャンネルのADC、TDC値を時系列に全て転送する
- ・ 波形解析が可能
- ・ データ量が多い
- ・ 評価試験、エンジニアリングランで使用

Suppressモード

- ・ ヒットのあるチャンネルのみデータを転送する
 - ・ ADCの積分値
 - ・ TDC値のうち早いものを2つ
- ・ 波形解析が不可能
- ・ データ量が少ない
- ・ 物理測定時に使用

RECBE : データフォーマット

Rawモード

- ・ 全チャンネルのADC、TDC値を時系列に全て転送する
- ・ 波形解析が可能
- ・ データ量が多い
- ・ 評価試験、エンジニアリングランで使用

			Data Name		
Header (12 Bytes)			Mode, Board_ID, Send_No., TRG_time, Length, TRG_No.,		
Event Data	Sample clock #	ADC	ADC CH0 (16 bits)		
			ADC CH1 (16 bits)		
			...		
			ADC CH47 (16 bits)		
	TDC	Hit Flag (1 bit)	TDC CH0 (15 bits)		
		Hit Flag (1 bit)	TDC CH1 (15 bits)		
		...			
Hit Flag (1 bit)		TDC CH47 (15 bits)			
Next Sample	...				

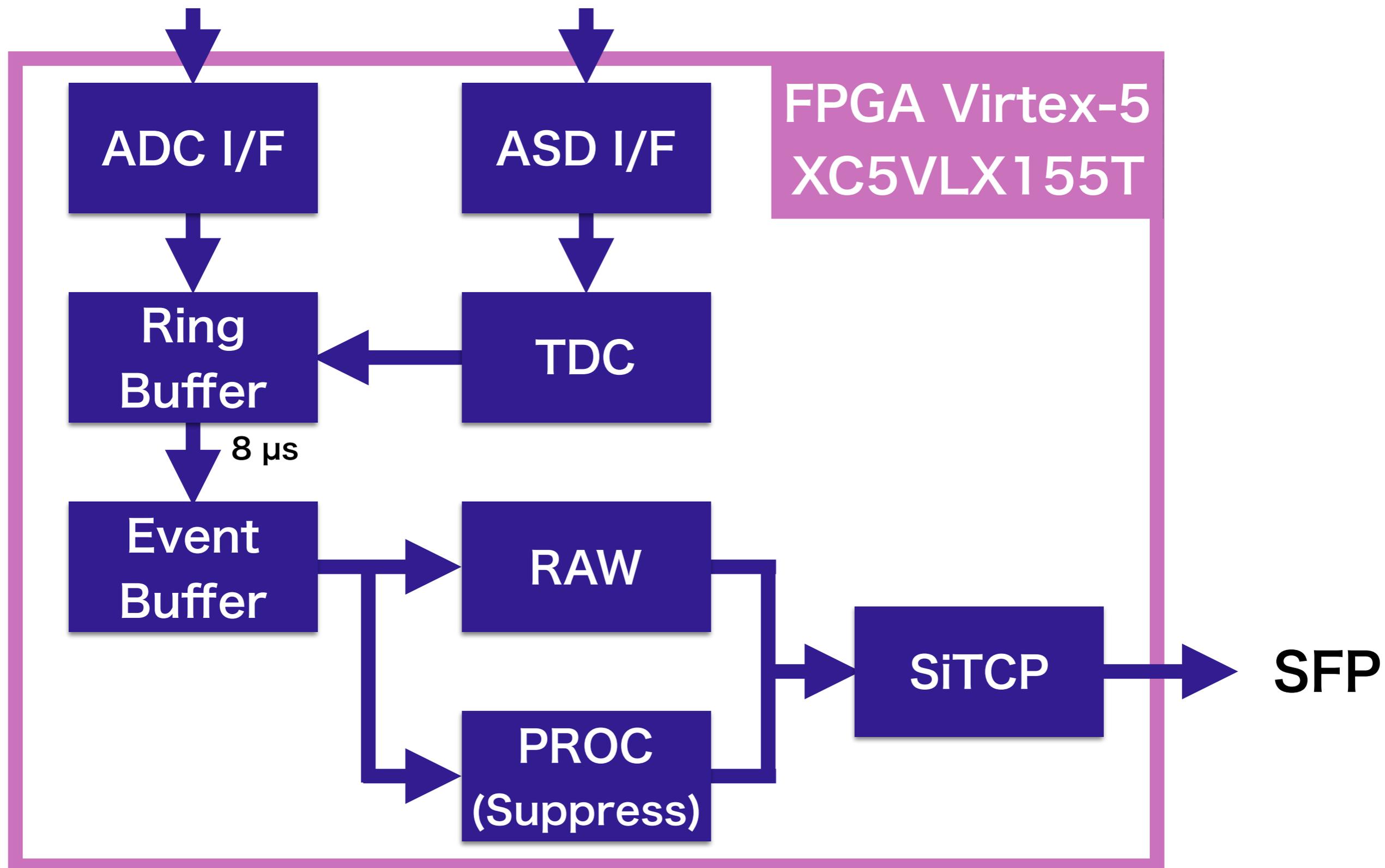
Suppressモード

- ・ ヒットのあるチャンネルのみデータを転送する。
 - ・ データ取得時間窓に対して、ADCの閾値を超えたサンプリング数
 - ・ ADCの積分値
 - ・ TDC値のうち早いものを2つ
- ・ 波形解析が不可能
- ・ データ量が少ない
- ・ 物理測定時に使用

			Data Name	
Header (12 Bytes)			Mode, Board_ID, Send_No., TRG_time, Length, TRG_No.,	
Event Data	Hit Ch# Data	Header	Ch ID (8 bits)	Length (8 bits)
			Count Over Threshold (16 bits)	
		ADC (q)	Summed ADC Value (16 bits)	
		TDC	TDC Hit 0 (16 bits)	
			(TDC Hit 1 (16 bits))	
	Next Hit Ch#	...		

RECBE : Data Flow

ADC デジタル出力(ASD)



RECBE : ガンマ線耐性

Belle-II 調べ

FPGA : 8.8 kGy以上

SFP slot : 0.3 kGy

Voltage regulator : 1.0 kGy

ref: Radiation tolerance of readout electronics for Belle-II

Topical workshop on electronics for particle physics 2011

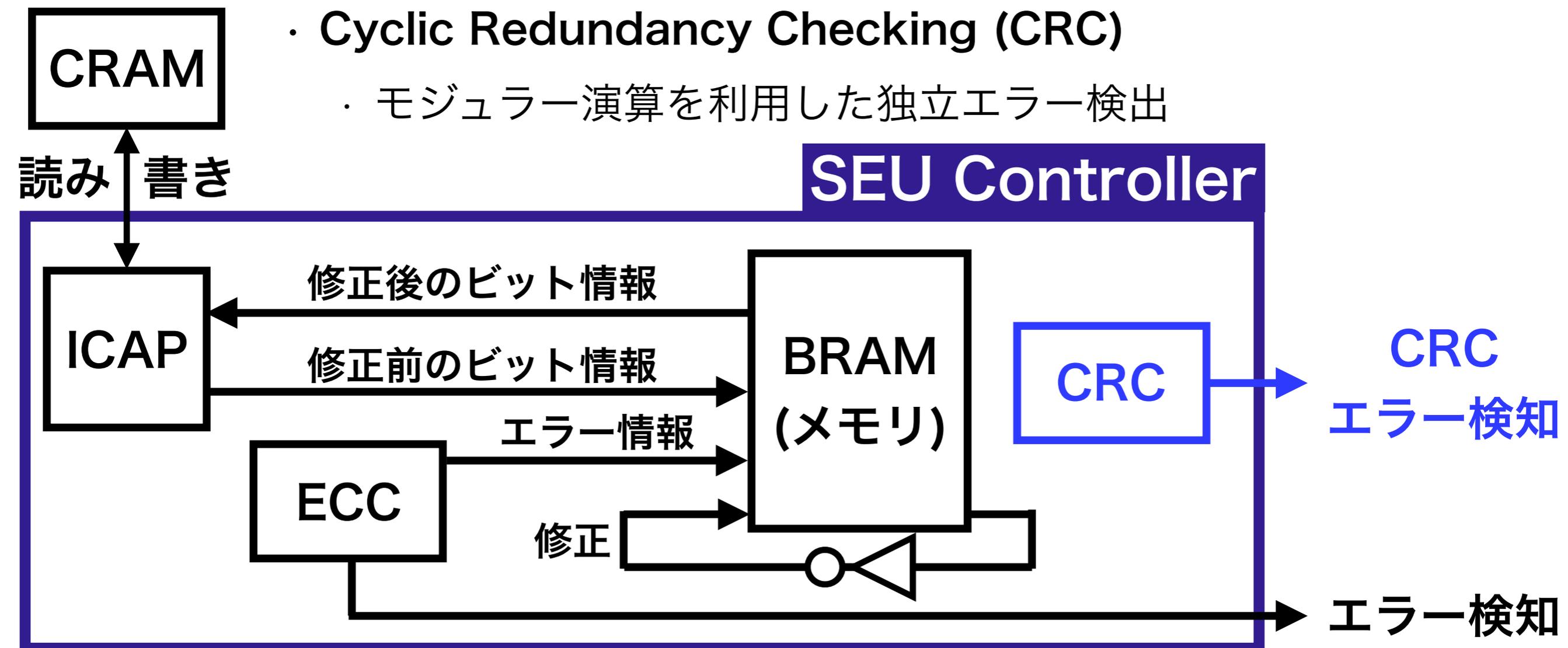
中性子対策

UREの発生条件

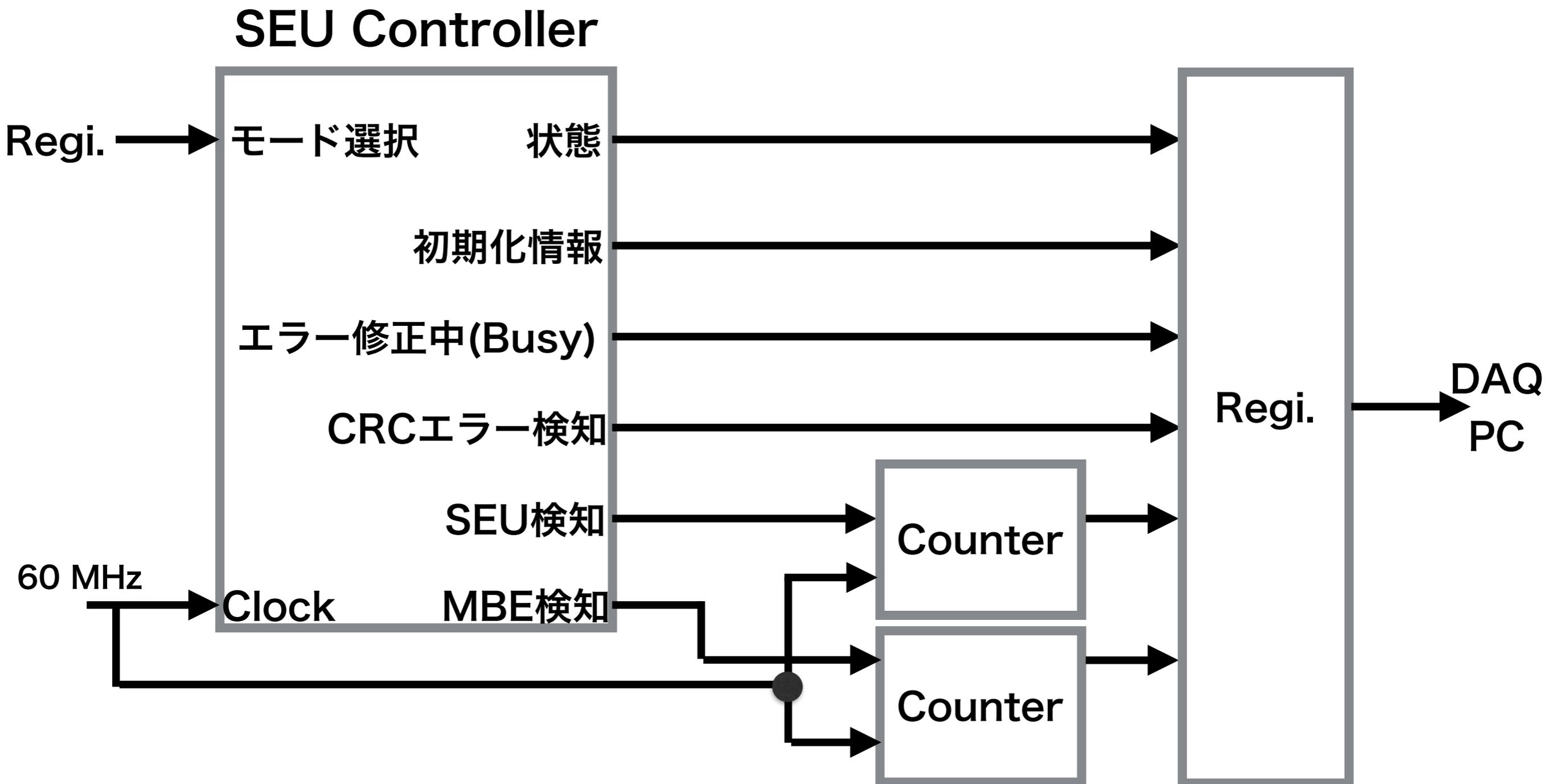
- 自動的に検出モードへ切り替わる
- MBEの発生
- SEU ControllerのBusy信号の継続した出力
- SEUが修正されずに残る
- 通信ができなくなる

SEU Controller

- **Internal Configuration Access Point ; ICAP**
 - Configuration RAMの情報を読み書き可能
- **Error Correction Code ; ECC**
 - ハミングコードを利用しエラー検出
 - エラーが1つの場合、位置検出可能
- **Cyclic Redundancy Checking (CRC)**
 - モジュラー演算を利用した独立エラー検出



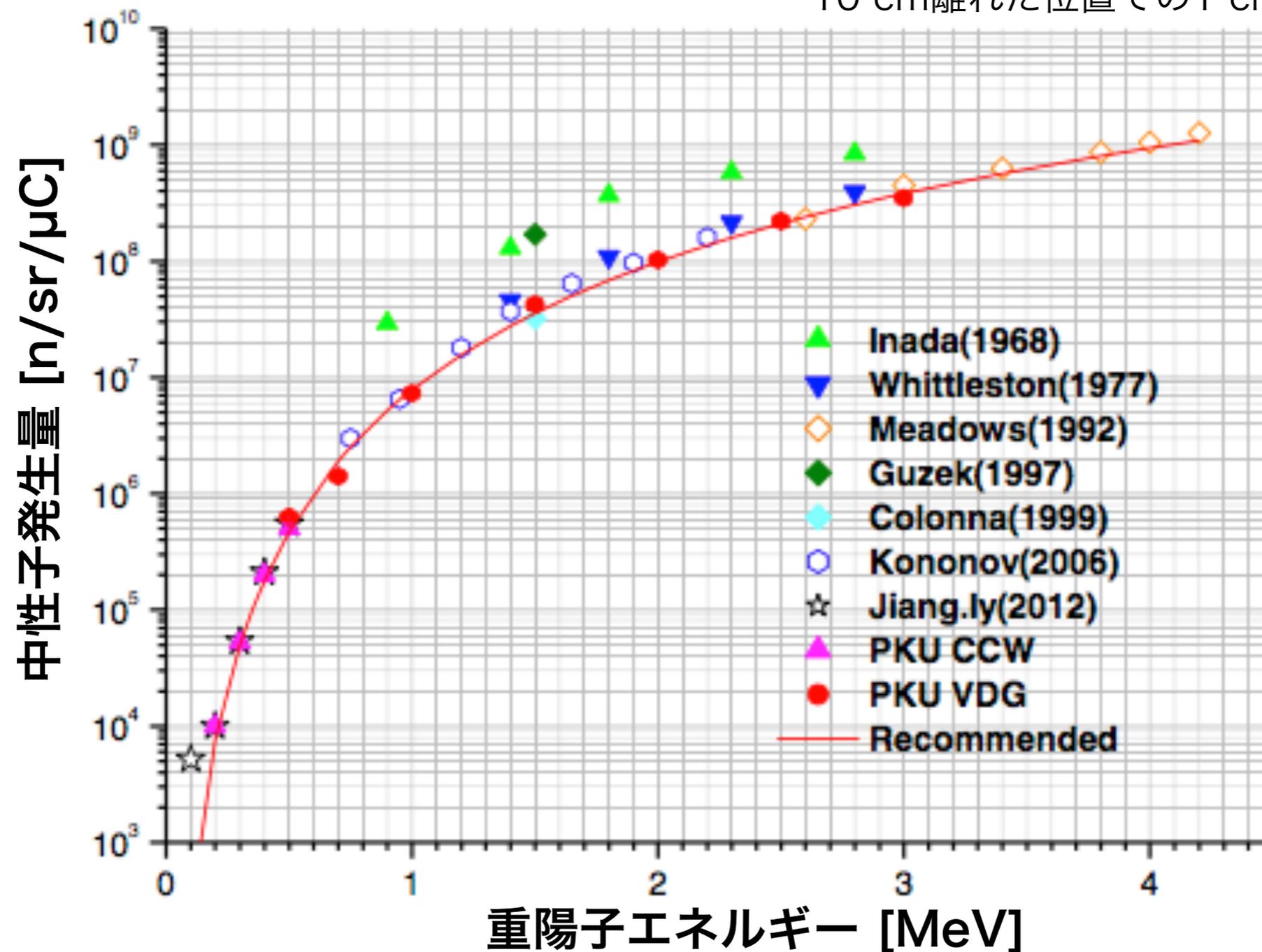
自動修復機能のブロック図



中性子照射試験：中性子量

3.0 MeVの重陽子をBe標的に照射した場合に発生する中性子量

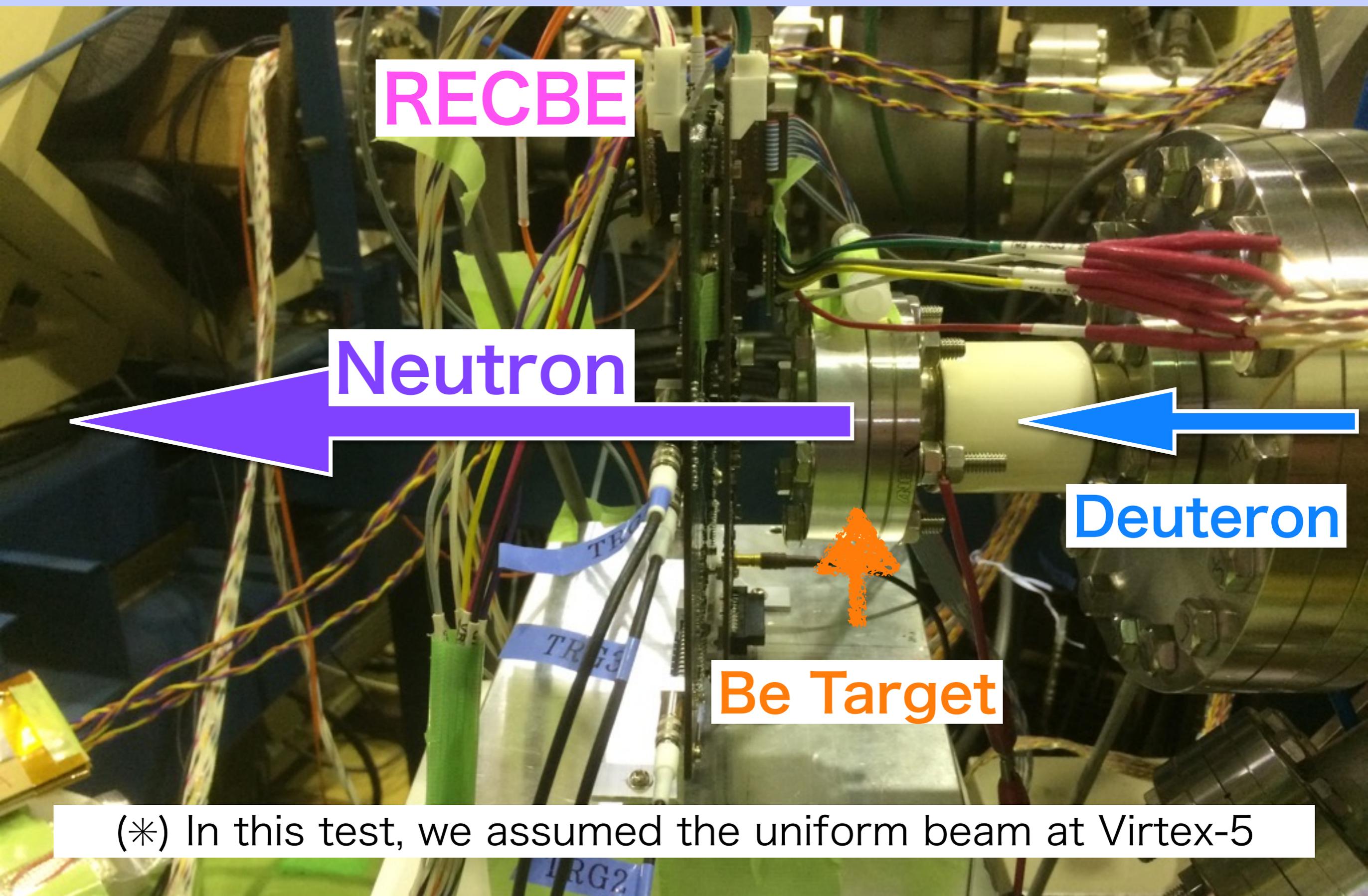
10 cm離れた位置での1 cm² = 100 sr



ref : Yubin Zuo, et al., Phys Procedia 60 (2014) 220 - 227

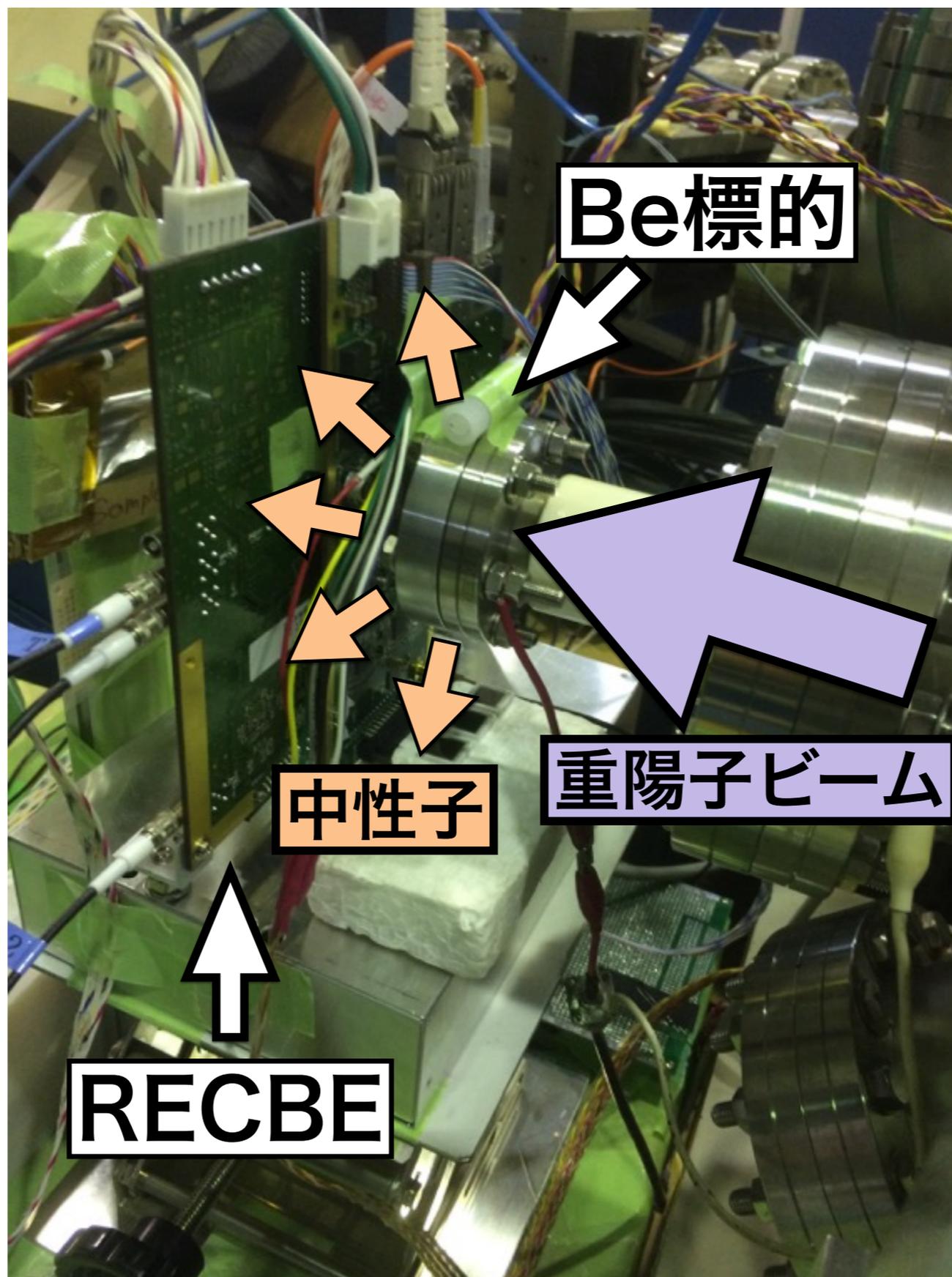
“Neutron yields of thick Be target bombarded with low energy deuterons”

中性子照射試験：セットアップ



(*) In this test, we assumed the uniform beam at Virtex-5

中性子照射試験：セットアップ



中性子照射試験：測定結果

測定	角度 [°]	距離 [mm]	測定時間 [sec]	中性子量	SEU	MBE	URE	SEU/ MBE	SEU/ URE	Neutron/ SEU/ Virtex5
1	180	24	26353	1.40E+13	66039	153	233	431.1	290.7	2.12E+08

中性子照射試験：臨界電荷量

CONF-970711--18

SAND97-1778C
SAND--97-1778CApplication of Reactors for Testing Neutron-Induced Upsets in Commercial SRAMs¹

Patrick J. Griffin, T. F. Luera, F. W. Sexton, P. J. Cooper, S. G. Karr, G. L. Hash

Sandia National Laboratories, P.O. Box 5800

Albuquerque, NM, 87185-1146

E. Fuller

Novus Technology, Inc.

Albuquerque, NM, 87185

RECEIVED

JUL 30 1997

OSTI

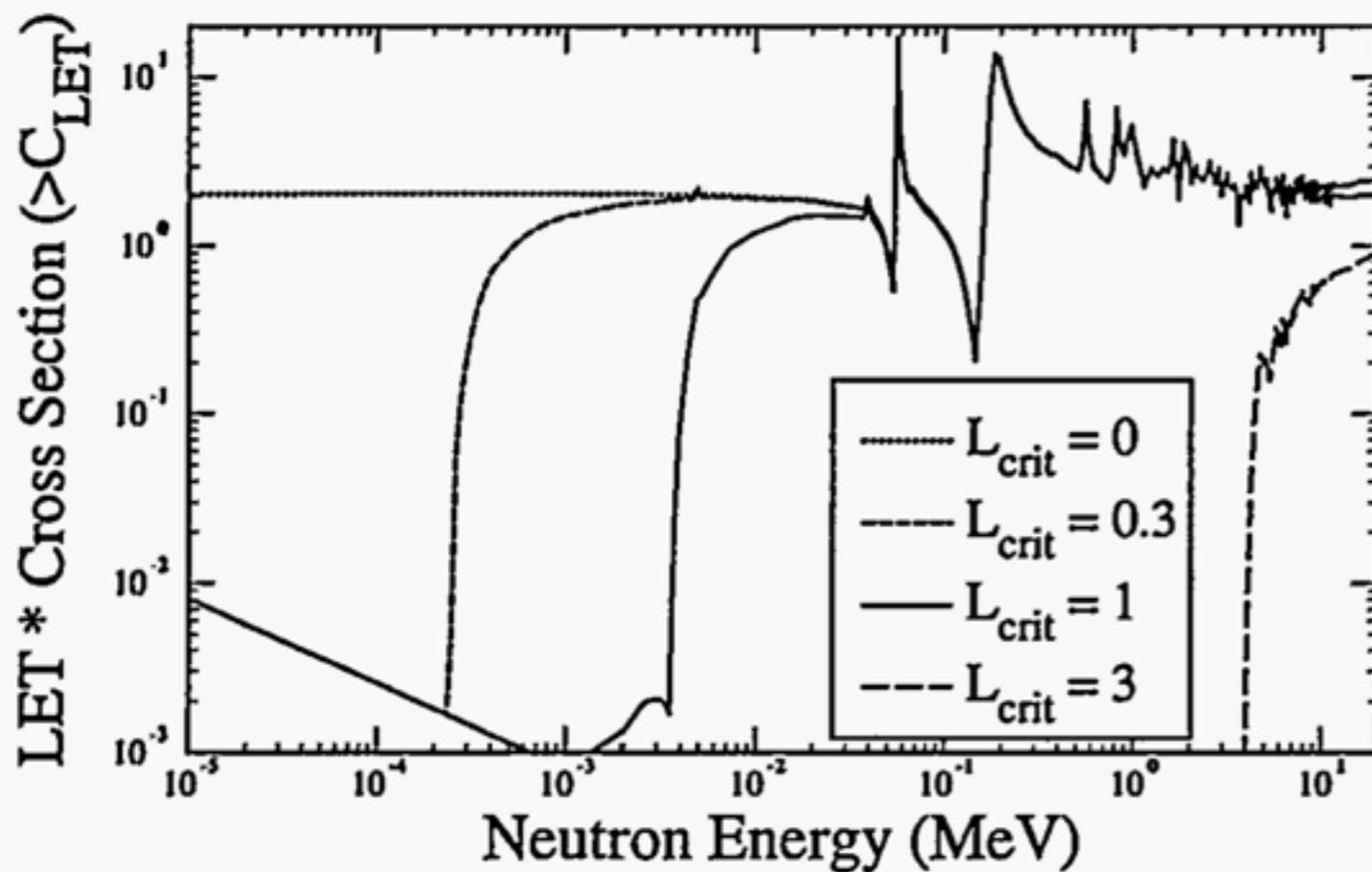


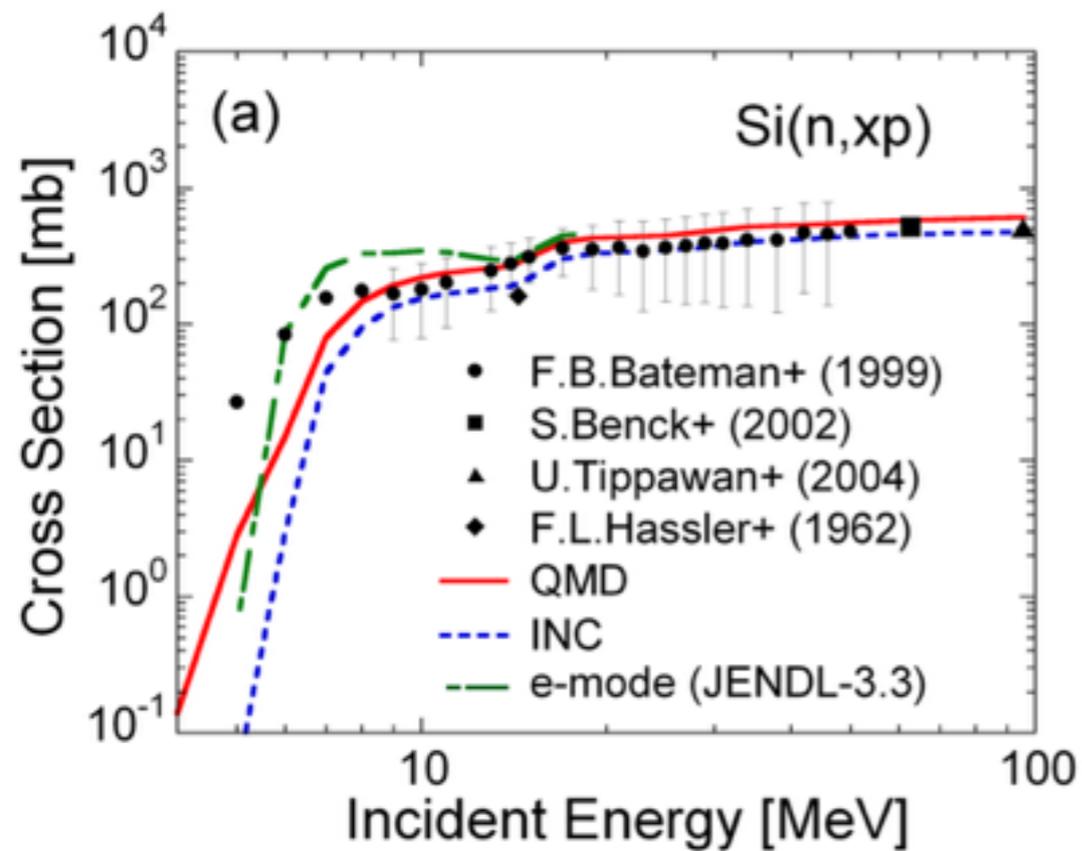
Figure 7: ²⁸Si LET Generation Cross Section

計算では最悪のパターンを想定

$$L_{\text{crit}} = 0$$

L_{crit} : SEUが起こる臨界電荷量を表す値

中性子照射試験：Si反応断面積



Journal of the Korean Physical Society, Vol. 59, No. 2, August 2011, pp. 1443~1446

Applicability of Nuclear Reaction Models Implemented in PHITS to Simulations on Single-event Effects

S. ABE,* S. HIRAYAMA and Y. WATANABE

Department of Advanced Energy Engineering Science, Kyushu University, Fukuoka 816-8580, Japan

N. SANO

Institute of Applied Physics, University of Tsukuba, Ibaraki 305-8571, Japan

Y. TOSAKA, M. TSUTSUI, H. FURUTA and T. IMAMURA

Semiconductor Technology Academic Research Center, Kanagawa 222-0033, Japan

(Received 26 April 2010)

