

# 高放射線環境対応技術 の共有化の提案

2017.10.3

上野一樹 (KEK IPNS)

計測システム研究会@函館アリーナ

# もくじ

- イントロダクション
- 放射線による影響と対策
- COMET実験による取り組み
- 技術・資産の共有化
- まとめにかえて

# イントロダクション

唐突ですが

放射線問題で困っています！

# イントロダクション

## 今日のお話

### 対象分野

物理実験で用いる計測システムの実装について議論します。

科学実験・観測を目的とした装置の要素技術からシステム統合技術まで幅広い技術分野に関する講演と参加者を募集します。

計測システム研究会@函館アリーナHPより

- システムインテグレーション技術
- エレクトロニクス技術（回路技術、実装技術、ソフトウェア技術）
- 検出器技術
- 加速器制御・モニター技術
- 極限環境対応技術（極高・低温、高放射線、真空環境対応など）
- 装置・技術保守
- 計測技術教育

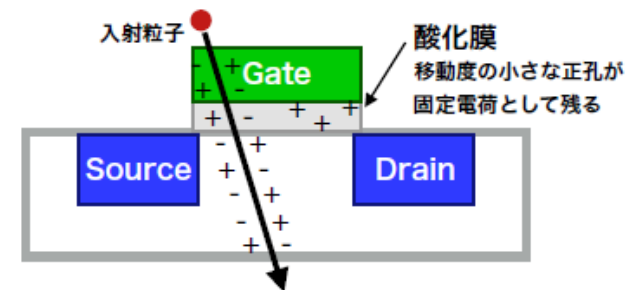
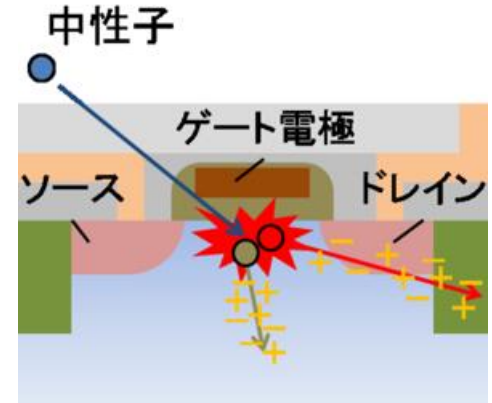
開発に焦点を合わせているので結果報告ではなく以下の様な内容を含む事を期待しています。

- 遭遇した問題とその解決方法
- 直面している問題と現在の状況
- 新しい開発方法や技術提案
- 開発した技術の共同利用提案

これらに関する、特に高放射線対応技術に関する提案です。

# 放射線による影響

- Single Event Upset (SEU)
  - 中性子 (との核反応による荷電粒子) や高エネルギー重粒子による論理反転
  - FPGA、フラッシュメモリ
- Type Inversion
  - 中性子による半導体内のハード損傷
  - 半導体検出器、トランジスタ
- Total Ionizing Dose Effect (TID)
  - 多量の放射線 (主にガンマ線) による半導体内の電離作用で固定電荷や界面準位が形成され永久損傷
  - レギュレータ、SFP
- Displacement Damage Dose (DDD)
  - 放射線 (主に電子や陽子) により半導体結晶内の原子がはじき出されることによる永久損傷



# 放射線対策

- SEU

- FPGA

- エラー訂正機能の実装
    - ファームウェア再ダウンロード手法の確立

- フラッシュメモリ等

- パーツ選定または使用の断念

- Type Inversion

- 耐性を持つパーツの選定

- TID, DDD

- 耐性を持つパーツの選定

こいつらはやっかい

# COMET実験による取り組み

の前にCOMET実験を簡単に紹介

# COMET実験

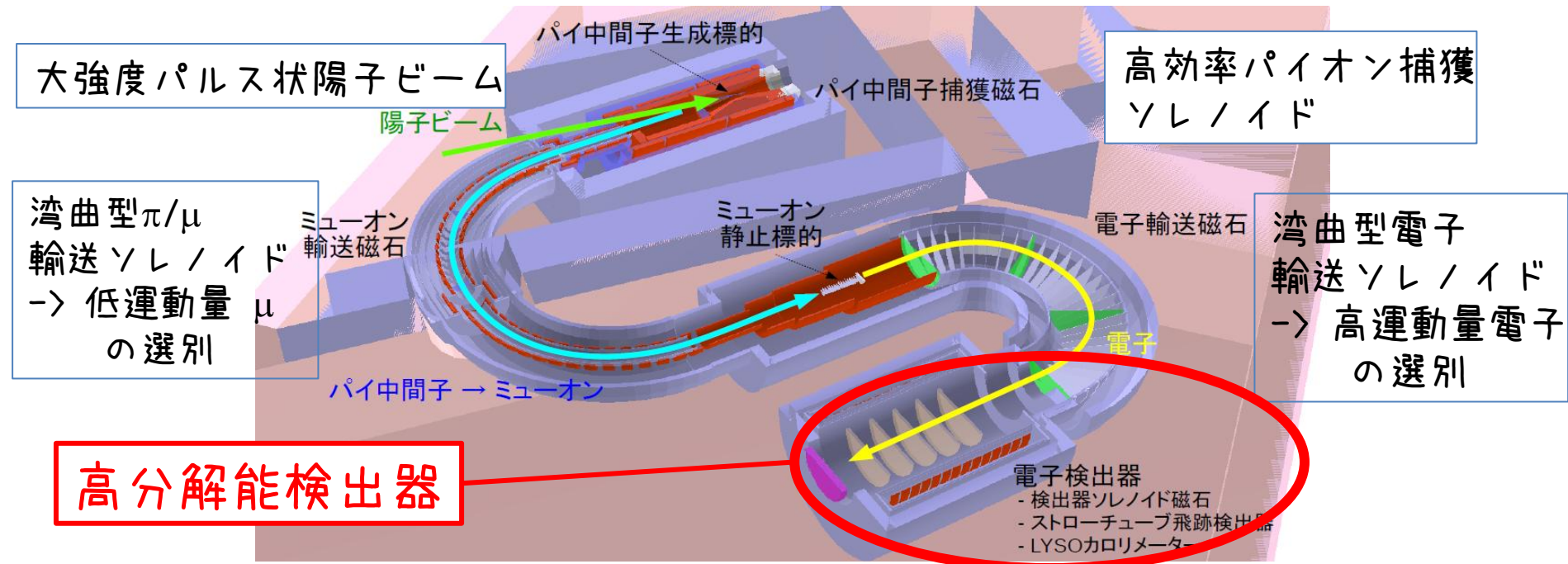


## COMET実験=ミューオン電子転換過程探索実験@J-PARC

標準理論 : 荷電レプトン混合反応の分岐比  $\sim 0(-54)$  観測不可能。。。

➡ **荷電LFVの発見 = 標準理論を越える物理**

標準理論を越える模型 (ex. SUSY-GUT, SUSY-SEASAW: 分岐比  $\sim 0(-15)$ )  
観測可能!

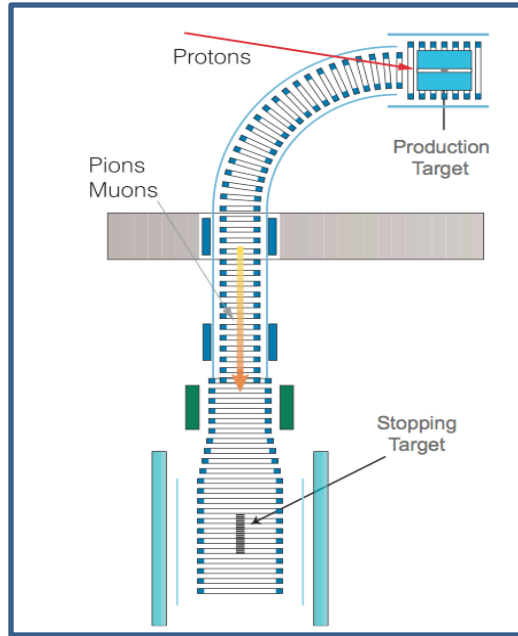




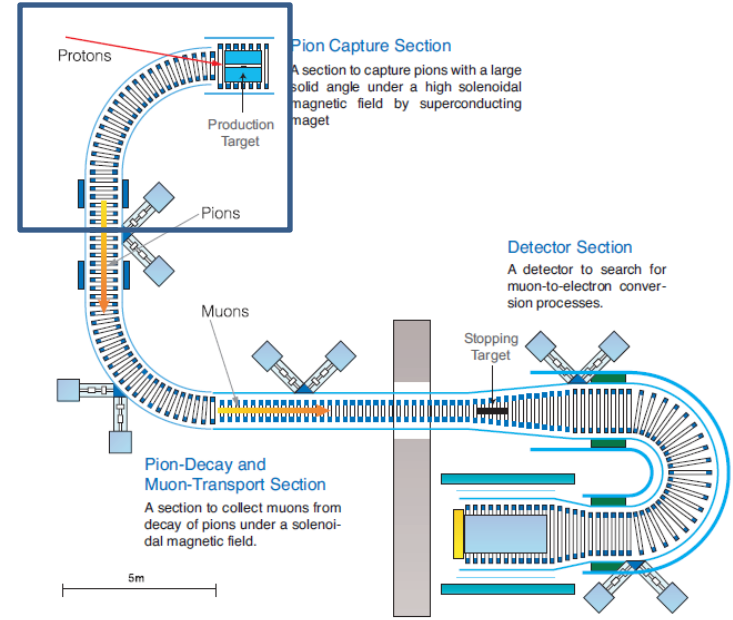
# COMET実験



## ステージングアプローチ



Phase-I (2019)



Phase-II (2020~)

## Phase-Iの目的

### 1. Phase-IIのためのR&D

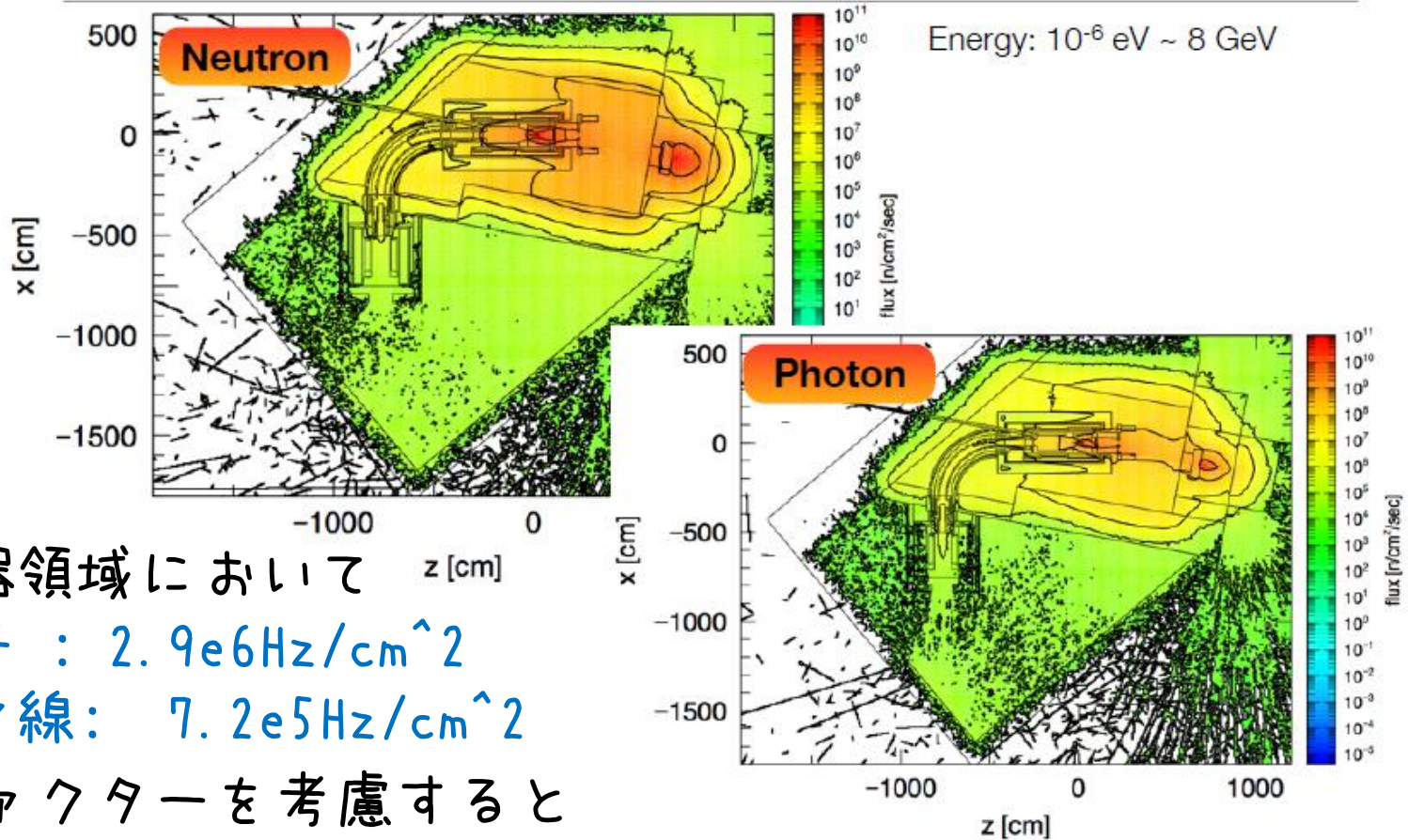
ビーム診断 ⇒ Phase-II同様の検出器使用

### 2. ミューオン電子転換過程探索

実験感度  $O(10^{-15})$  (現状の100倍) での探索 ⇒ CDC使用

# COMET実験における放射線量

- PHITSによる計算for Phase-I実験



検出器領域において

中性子 :  $2.9e6 Hz/cm^2$

ガンマ線 :  $7.2e5 Hz/cm^2$

安全ファクターを考慮すると

中性子 :  $1e12/cm^2$

ガンマ線 :  $\sim 2kGy$  (200days)

の放射線に耐えられる必要あり

# COMET実験による取り組み

- シミュレーションスタディ
  - 前述PHITSに加え、Geant4、FLUKAによるクロスチェック
- SEU対策
  - 中性子照射試験によるSEU rate調査@神戸大学タンデム加速器
  - Configuration RAM
    - SEM(IP core from Xilinx)を実装
    - Unrecoverable Error (URE)発生の際はfirmware再ダウンロード
  - Block RAM
    - ハミングコードを利用したError Correction Code (ECC) (IP core from Xilinx) を実装
    - Cyclic Redundancy Check (CRC)によるチェック機能を実装
    - ハミング符号、CRC符号をデータに付加。Multi Bit Errors (MBE) の際はオフラインで確認
  - 詳しくは物理学学会2016秋季大会 上野発表(24pSF02)等参照
- TID等対策
  - ガンマ線照射試験による耐放射線パーツの選定
  - radhard品の調査

# TID等対策

- 今のところ確実な対処法がない（調べた限り）
- 実際に照射試験をするしかない（？）
  - これまでに複数回実施@大阪大、東工大、九大、高崎QST
  - 他グループでも同様に実施
- 耐放射線パーツ（主に宇宙用）を取り扱っている業者は存在する
  - 構造等は聞いても当然教えてもらえない
  - ざっくりコマーシャル品より2桁高い値段＋納期も半年以上。遅いものだと1年以上のものも。

# ガンマ線照射試験

COMETでこれまでにあてたもの

## － エレキパーツ

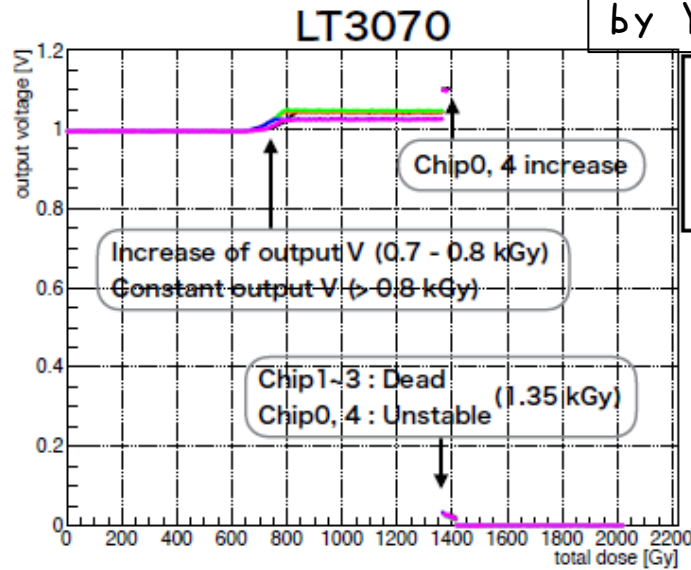
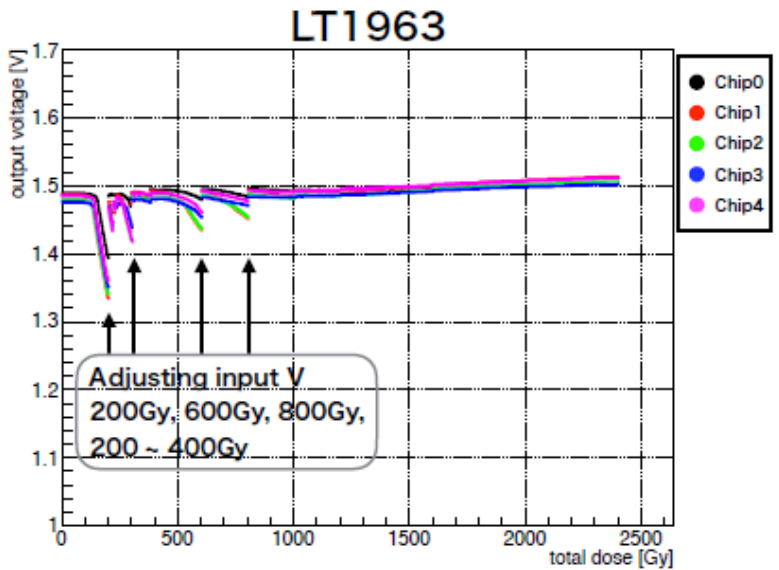
- レギュレータ (LMZ10503, LT1963シリーズ, LT3070, LTM4620, LTM4644, MAX8556, LT1764A, LT3091, LT3090, LT1964, LT3032, LT3015, LT3086 などなど)
- SFP (AFBR-57D9AMZ, AFBR-5705PZ)
- ADC (AD9637, LTC2264, AD9287 など)
- DAC (MC41050, AD5324)
- FPGA (Vertex5:XC5VLX155T, Artix7:XC7A200T)
- LVDS buffer (SN65LVDS104 など)
- などなど

## － その他

- 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

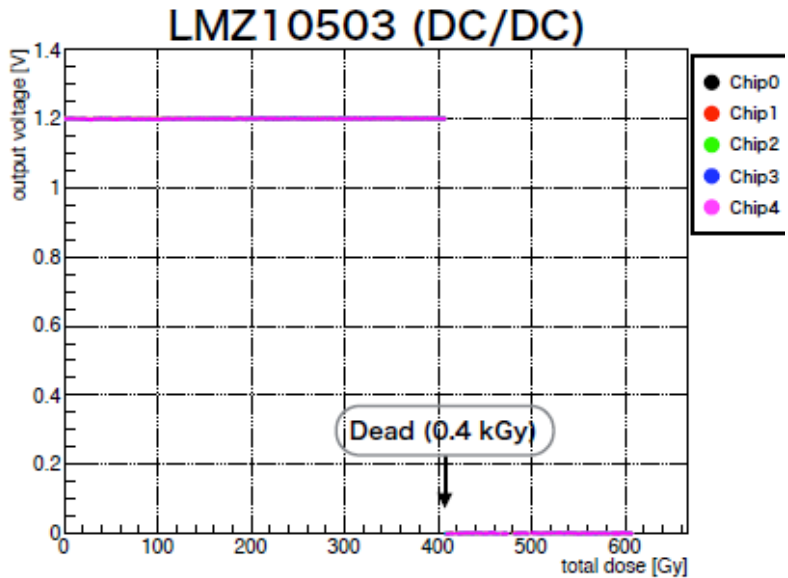
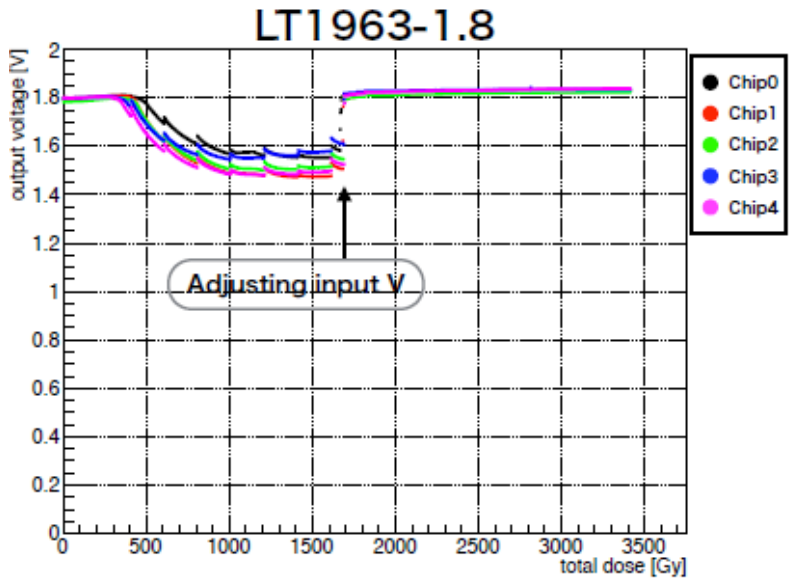
# ガンマ線照射試験の例

by Yu Nakazawa



200Gy/h照射  
@大阪大

(\*) recording every 30 sec



(\*) recording every 30 sec

# ガンマ線照射試験の例

- その他は下記を参照
  - 中居 本研究会
  - 中沢 物理学会 2017秋季大会 12pS35-04
  - K. Ueno et al. IEEE NSS CR 2016 N43-2
  - 中沢 計測システム研究会2016@J-PARC
  - 上野 物理学会 2016秋季大会 24pSF-02
  - 中沢 物理学会 2016秋季大会 24pSF-03
  - など

# ガンマ線照射試験

- 未だレギュレータ、SFPは解がほぼなし  
- と思っていたがSFPは先週光が見えてきた？  
- レギュレータは・・・困ってます。

Table 3. Gamma irradiation results for the Linear Technologies LTM4619. The results are arranged in descending order by dose rate, and enhanced tolerance to ionizing radiation is evident at lower rates.

Sample	Rate (Gray/Hr)	Dose at Failure (Gray)
1	50	300 <sup>1</sup>
2	22	1800 <sup>2</sup>
3	22	2300 <sup>2</sup>
4	16	2000 <sup>1</sup>
5	5	≥ 4000 <sup>2</sup>

<sup>a</sup> ENEA Calliope

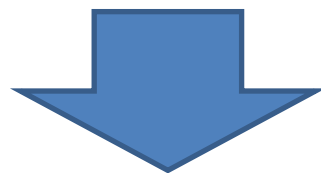
<sup>1</sup> Brookhaven SSIF

– 最近こういうのを見つけたので、トライ中。



# 技術・資産の共有化

- そんなわけで放射線対策は中々大変
- 各グループでそれぞれやるのは非効率
- 日本には情報共有の場がない
- 開発もそんなに進んでいない（宇宙は別）
- 今後（特に大強度加速器実験等では）更に必須になってくる技術



Open-Itを利用して共有の場を展開したい

# 技術・資産の共有化

- ひとまず「枠」は作ってみました
- <http://openit.kek.jp/project/RADHARD/RADHARD>
- (とりあえず公開はしています。)

## 取り組み

- 情報共有
  - 民生用パーツ、マテリアル等の放射線耐性試験結果
  - 耐放射線パーツ、マテリアル等の開発の動向
  - 耐放射線検出器の現状
  - 各機関、グループにおける取り組み
  - 参考になる論文、資料等のまとめ
- 開発
  - SEU対策FPGAファームウェア
  - 新たな耐放射線パーツ、マテリアル開発
- ワークショップ、セミナー
  - 各グループのスタディについての議論
  - 専門家によるセミナー

# 技術・資産の共有化

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	Ot
	positive	Type	Vin	Vout	Iout	Regulator	Manufacturer	size [mm^2]	Gamma ray Toleranc	Neutron Tolerance	Test group	Group having	
1	positive	LDO Linear		1.25 - 37 V	1.5 A	LM317	Texas Instruments		>2kGy	△(1e12)	CTH	CTH	Slig
2	positive	LDO Linear		5 - 20 V	1 A	LM2941	Texas Instruments	15.49 x 10.16	>2kGy	>1e12	CTH, ROESTI	CTH, ROESTI	2 sa
3		DC/DC		0.8 - 5.0 V	3 A	LMZ10503	Texas Instruments	13.77 x 10.16	>1kGy	>1e12	ROESTI, I/F, COT	ROESTI, I/F, COTTRI	One rush One after
4		LDO Linear		0.4 - 32 V	2.1 A	LT3086	Linear Technology		<2 kGy	>1e12	CTH, COTTRI	CTH, COTTRI	doe gan
5		DC/DC		< 32 V	2 A	LTM8023	Linear Technology		NG	NG	ROESTI	ROESTI	
6		LDO Linear		0.8 - 1.8 V	5 A	LT3070IUFD#PBF	Linear Technology	4 x 5	>2 kGy	>1e12	RECBE, ROESTI	RECBE, ROESTI	Slig san irra (6 s
7		LDO		5 V	1.5 A	LT1963AEFE#PBF	Linear Technology	4.4 x 5	>2.4 kGy	>1e12	RECBE	RECBE	2 sa
8		LDO		2.5 V	1.5 A	LT1963AEFE-2.5#PBF	Linear Technology	4.4 x 5	>3.4 Gy	>1e12	RECBE	RECBE	2 sa
9		LDO		3.3 V	1.5 A	LT1963AEFE-3.3#PBF	Linear Technology	4.4 x 5	>3.4 kGy (2017.8), <200 Gy (2017.8)	>1e12	RECBE	RECBE	6 sa irra wor (20
10		LDO		1.8V	1.5A	LT1963AEFE-1.8#PBF	Linear Technology	6.6 x 4.7	>3.4 kGy	>1e12	ROESTI	ROESTI	
11		LDO		0.9 - 5 V	2A	TPS7A7200RGWR	Texas Instruments	5.15 x 5.15			COTTRI	COTTRI	Not
12													
13													
14													
15	negative	LDO Linear		-3 - -24 V	1 A	LM2991	Texas Instruments		~1 kGy	△(1e12)	CTH	CTH	Slig

- ワークショップ、セミナー

各グループのスタディについての議論

専門家によるセミナー

# 技術・資産の共有化

- ひとまず「枠」は作ってみました
- <http://openit.kek.jp/project/RADHARD/RADHARD>
- (とりあえず公開はしています。)
- いかがでしょう？

## 取り組み

- 情報共有
  - 民生用パーツ、マテリアル等の放射線耐性試験結果
  - 耐放射線パーツ、マテリアル等の開発の動向
  - 耐放射線検出器の現状
  - 各機関、グループにおける取り組み
  - 参考になる論文、資料等のまとめ
- 開発
  - SEU対策FPGAファームウェア
  - 新たな耐放射線パーツ、マテリアル開発
- ワークショップ、セミナー
  - 各グループのスタディについての議論
  - 専門家によるセミナー

# まとめにかえて

- 放射線問題はなかなかやっかい。
- 技術・資産の共有化は非常に有用。

ぜひご協力をお願いします。