

# 放射線耐性に優れた 半導体素子の開発

筑波大学 数理物質系  
助教 奥村 宏典

令和2年10月8日

# グループ構成

奥村 宏典

井村 将隆



(ワイドギャップ半導体)

西永 慈郎



(CIGS)

宮原 正也

外川 学

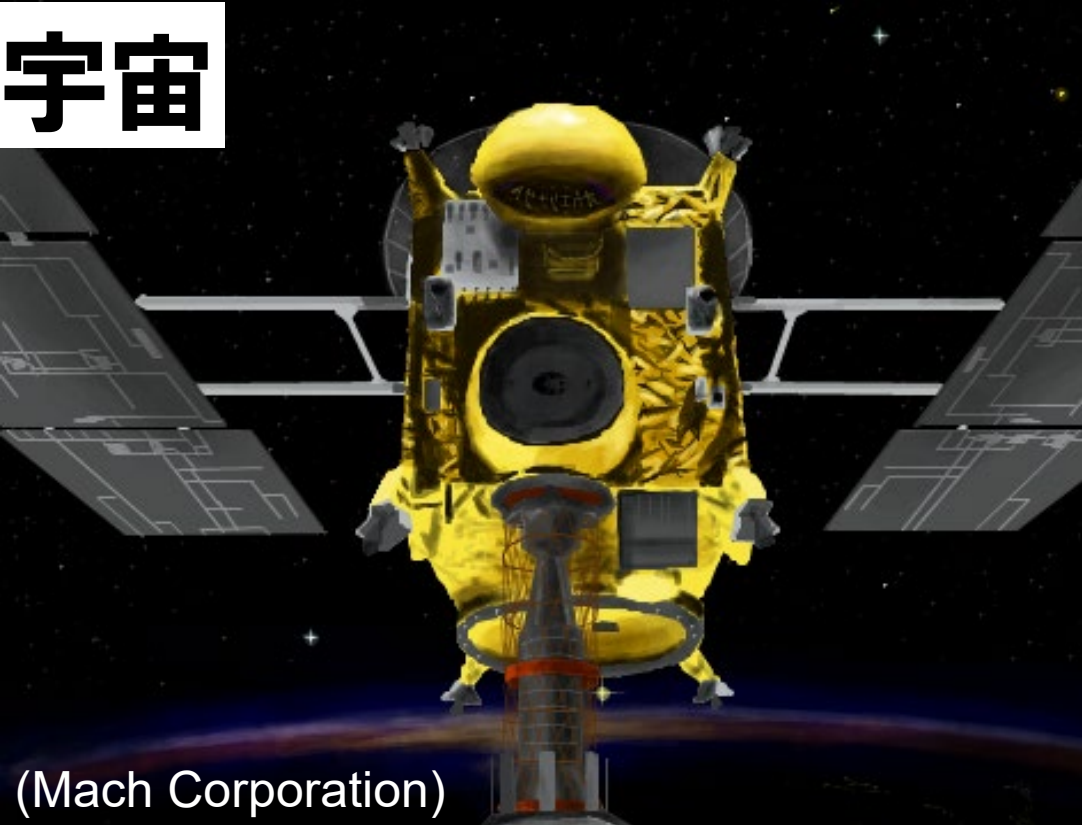


材料開発～デバイス作製

回路設計

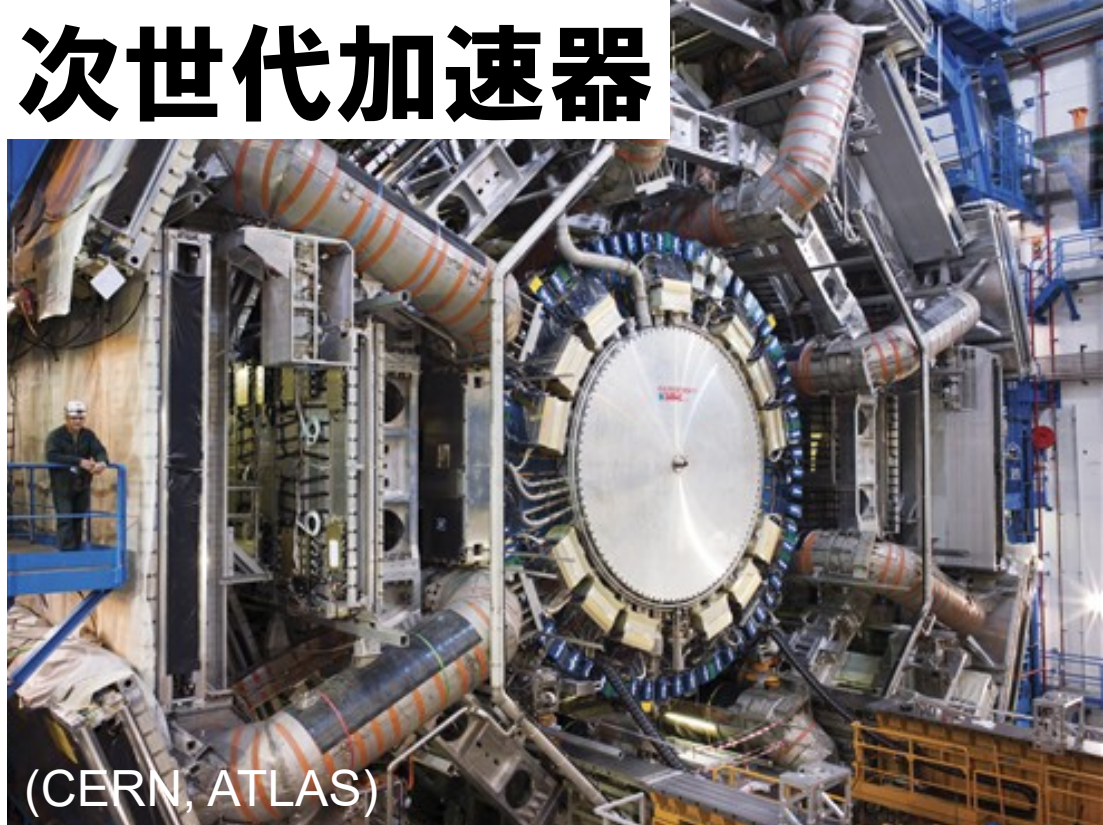
放射線物理

# 宇宙



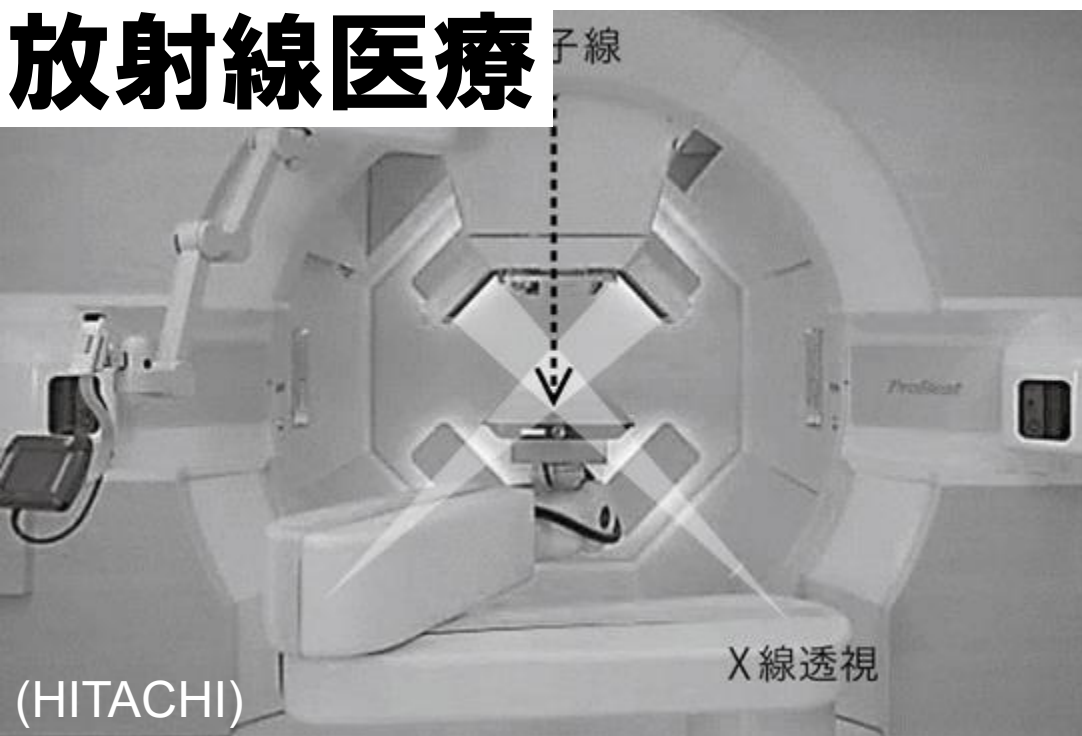
(Mach Corporation)

# 次世代加速器



(CERN, ATLAS)

# 放射線医療



(HITACHI)

# 原子力発電所



(HITACHI-GE)

# 私達の企業側への期待

- **高放射線環境でのデバイス特性の劣化に困っている、企業との共同研究を希望**
- **宇宙・医療分野への展開に、本技術の導入が有効**
- **企業側の目的に合わせて、企業と一緒に特許出願・製品開発することを希望**
- **「我々を構成する物質の基本要素である素粒子」の実験に必要な次世代加速器開発への協力**



# 従来技術とその問題点

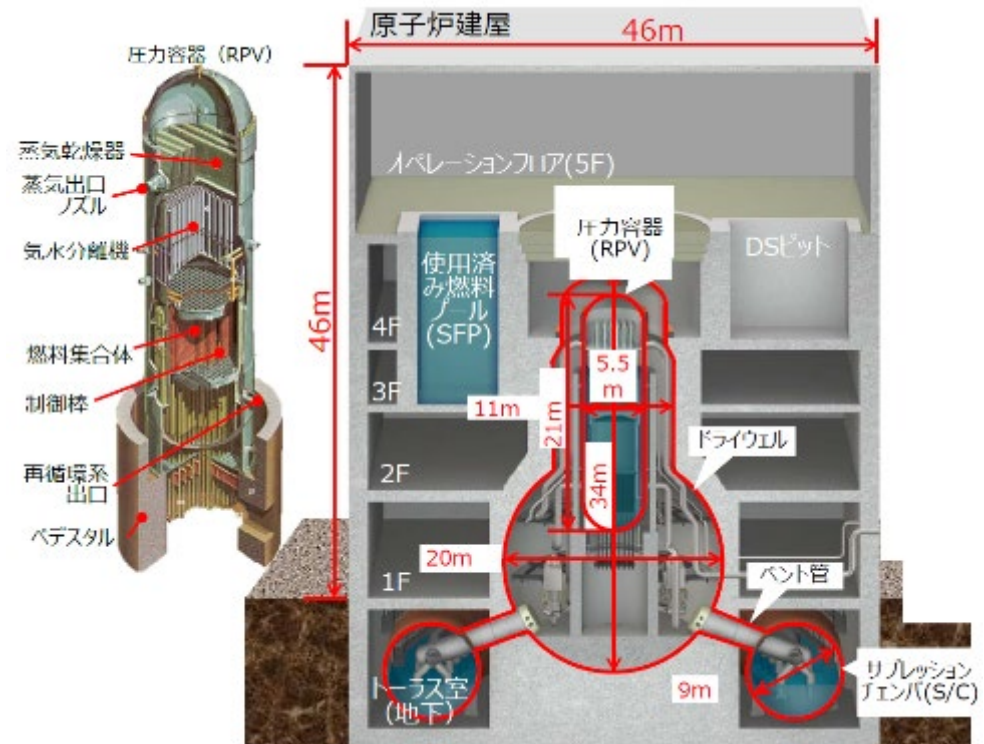
	光導電型撮像管 (ビジコン, トリニコン)	固体撮像素子 (CCD, CMOS)
信号変換の原理	光照射により発生した電荷位置を電子線走査	フォトダイオード
サイズ	大きな真空管	小型
消費電力	大きい	小さい
蓄積線量	$2 \times 10^6$ Gy	1000 Gy



シリコン撮像素子を搭載した  
格納容器内部調査装置  
(IRID, HITACHI-GE)

圧力容器内: 1000 Gy/h  
格納容器内: 100 Gy/h

シリコン素子の放射線耐性  
わずか1時間!



\*新井民夫(芝浦工大), 技術研究組合国際廃炉研究開発機構(IRID)2016年シンポジウム

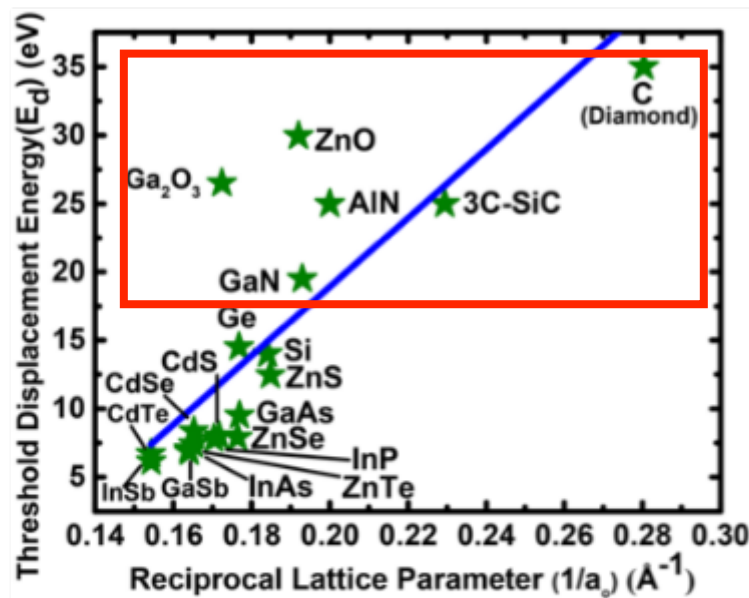


FIG. 1. The empirical relation between the mean threshold displacement energy ( $E_d$ ) with the lattice parameter of various semiconductors. (Data were taken from Refs. 2-4.)

Khanal et al., J. Appl. Phys. 124, 215702 (2018)

材料	ダイヤモンド	SiC	Si
平均原子番号	6	10	14
禁制帯幅(eV)	5.47	3.27	1.1
絶縁破壊電界 (MV/cm)	>10	3.0	0.3
ヌープ硬度 (kgf/mm <sup>2</sup> )	8000	3000	1150
動作温度(°C)	>500	300	200*
γ線耐性	◎	○	×
中性子耐性	◎	△	×

\* SOI (Silicon On Insulator)技術

\*金子純一(北大), 計測システム研究会 2016年

ワイドギャップ半導体：原子間結合が強い



長期動作可能な放射線耐性素子用材料として有力

ワイドギャップ半導体  
材料間の比較は未報告

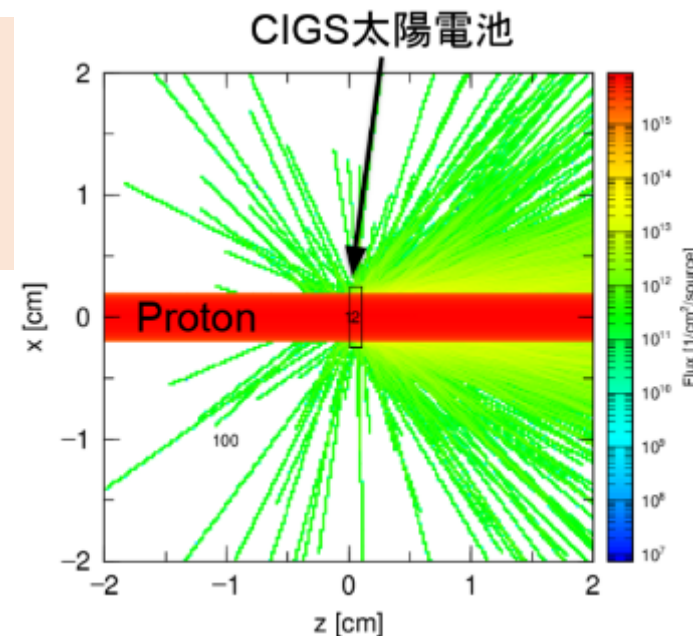
	Bandgap energy (eV)	Mean excitation	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Normalized number of e-h pairs to Si	Lattice constant (nm)	Total ionizing dose (MGy J/kg)	Energy loss* (J/cm <sup>2</sup> )
Si	1.1	3.6	2.33	1	0.543	6.0	140
CIGS	1.2	3.0	5.7	2.93	0.560	4.4	255
SiC	3.2	7.8	3.21	0.64	0.307	6.3	203
GaN	3.4	8.9	6.15	1.07	0.320	5.2	320
Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.8	12	6.44	0.83	0.300	5.3	344
Diamond	5.5	12	3.50	0.45	0.357	6.9	241
AlN	6.1	15	3.26	0.33	0.311	6.2	203

\*Sample thickness: 100 μm, proton: 70 MeV, NIEL: 1x10<sup>16</sup> MeV n<sub>eq</sub>/cm<sup>2</sup>

## Cu (In,Ga) Se<sub>2</sub> (CIGS)

高い光検出効率のため、  
薄膜利用による放射線損失低減が可能

Proton 70 MeV	CIGS 2um	Si 150 um
NIEL (MeVn <sub>eq</sub> /cm <sup>2</sup> )	1×10 <sup>16</sup>	1×10 <sup>16</sup>
TID (Gy, J / kg)	4.4×10 <sup>6</sup>	6.0×10 <sup>6</sup>
Energy loss (J / cm <sup>2</sup> )	<b>5.1</b>	210





# CIGS太陽電池の放射線耐性

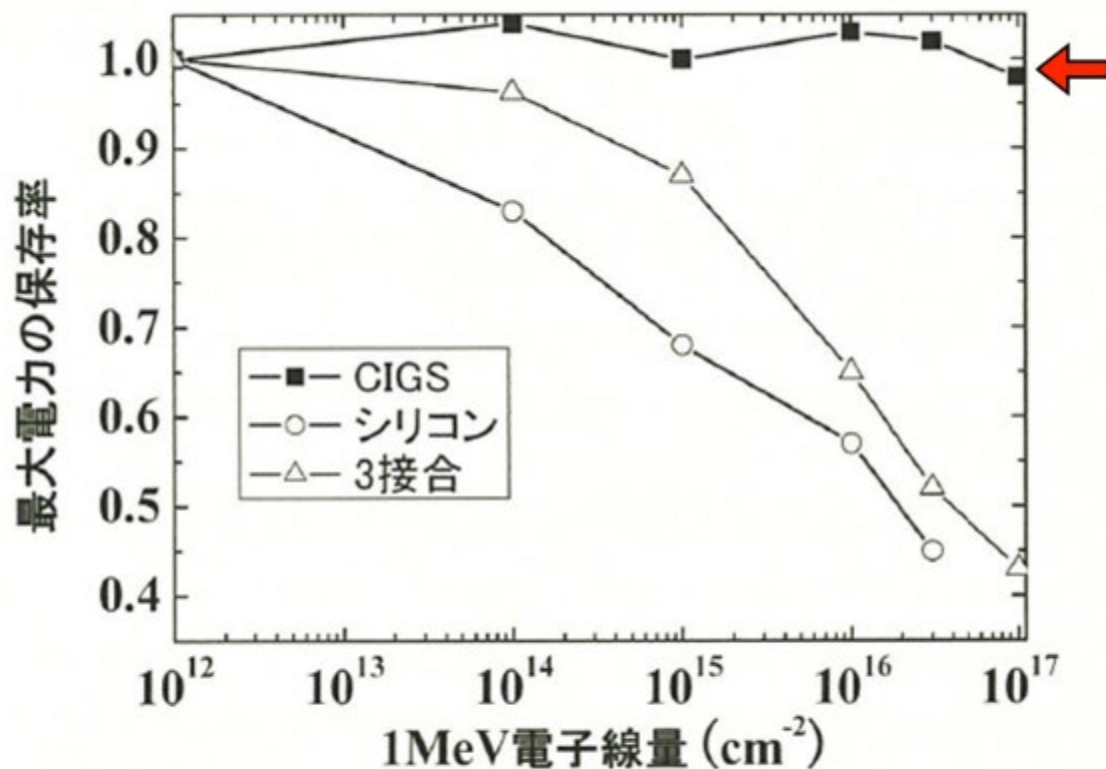


図1 CIGS太陽電池, 宇宙用シリコン太陽電池, 宇宙用3接合太陽電池の1 MeV電子線による電気性能の劣化特性

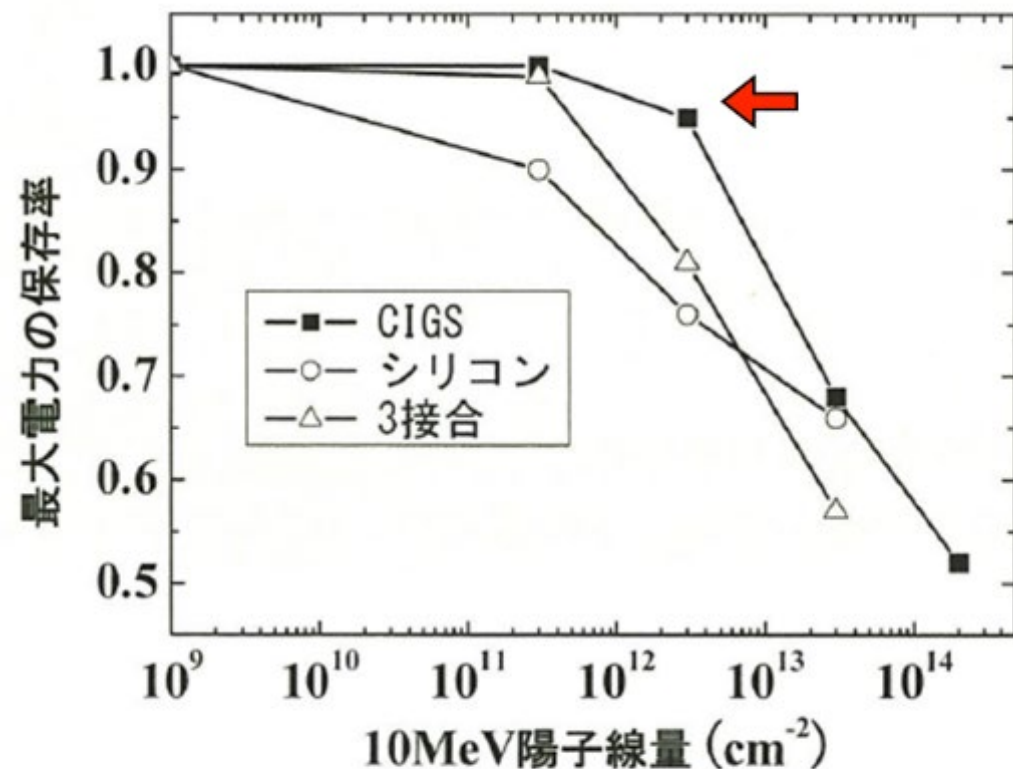


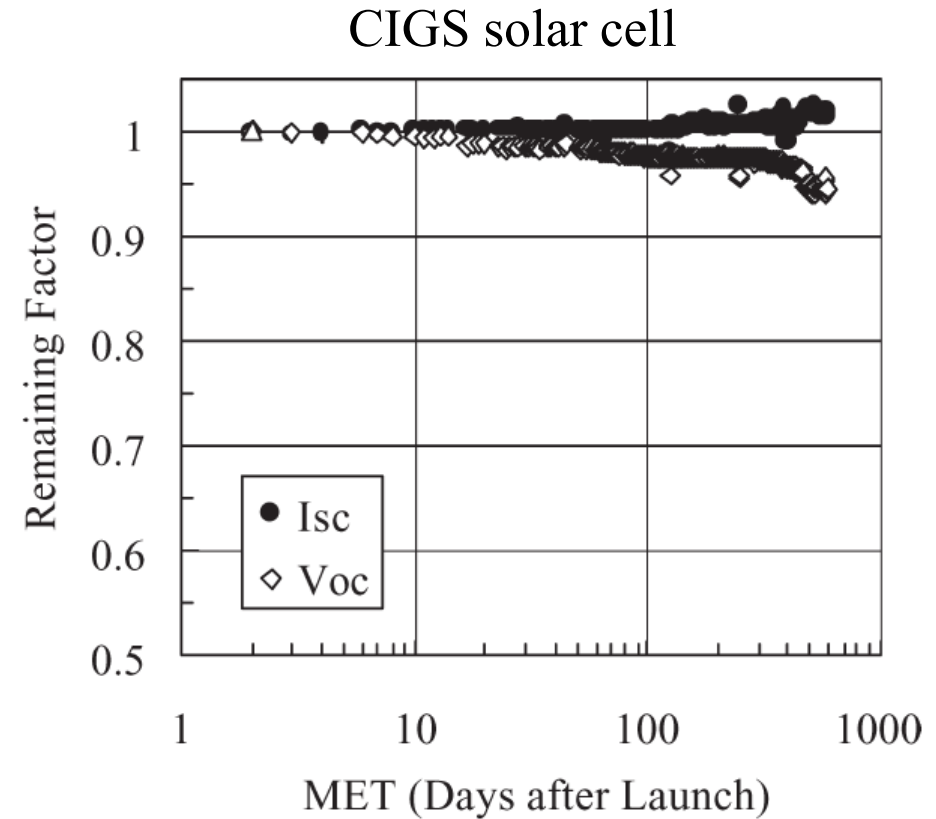
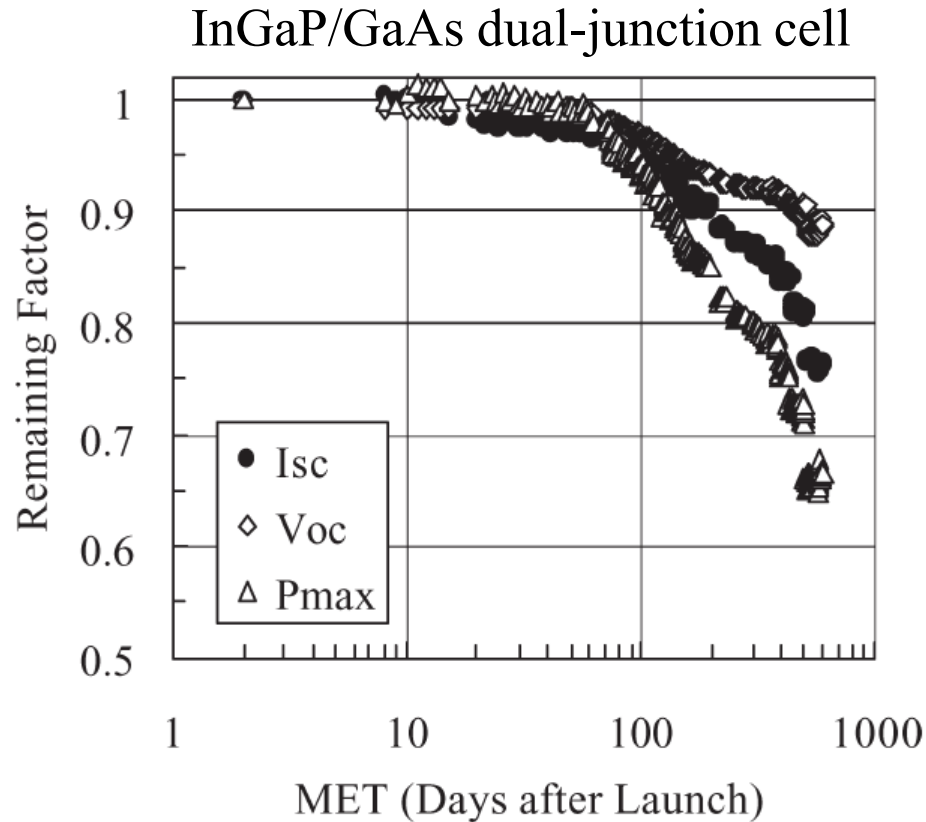
図2 CIGS太陽電池, 宇宙用シリコン太陽電池, 宇宙用3接合太陽電池の10 MeV陽子線による電気性能の劣化特性

\*川北史朗(JAXA), 化合物薄膜太陽電池の最新技術II, 2014年、シーエムシー出版.





# CIGS太陽電池の 宇宙空間での実証例

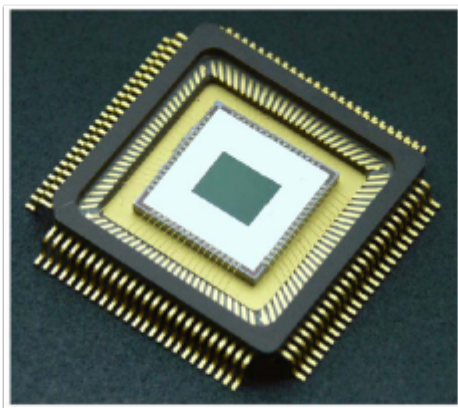
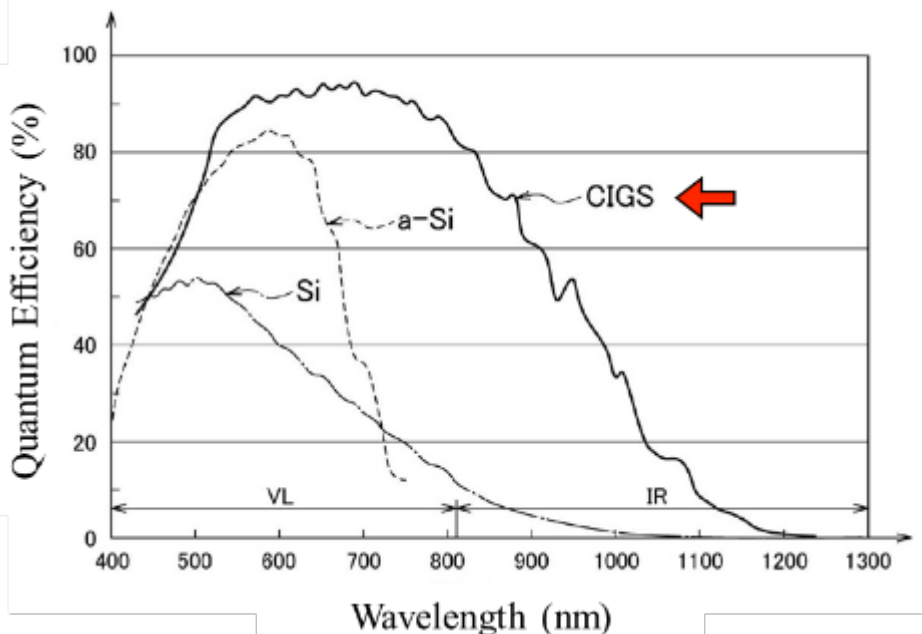


**MSD-1 (“Tsubasa”) により、高い放射線耐性を検証済み**

\*M. Imaizumi et al. Prog. Photovolt: Res. Appl. 13, 529 (2005).

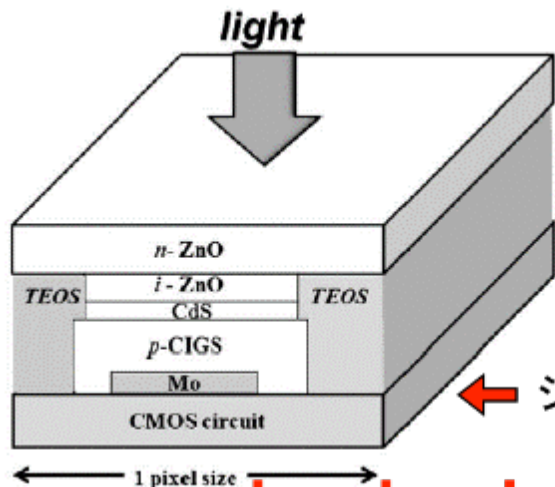


# CIGSを用いた 赤外線カメラ応用



CIGS撮像素子

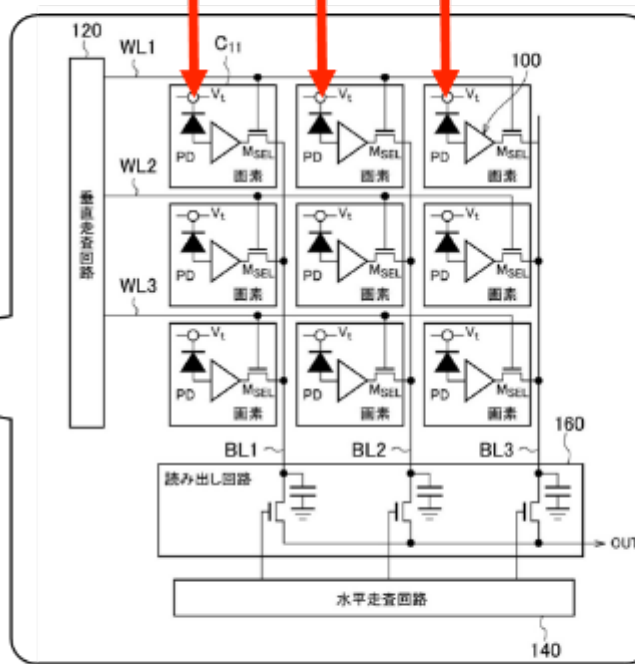
集積化  
(ピクセル化)



← CIGS光検出部  
(太陽電池構造)

本研究にて  
放射線耐性調査

← シリコンCMOS駆動回路  
(調査済み)



**高放射線環境向け  
高感度・高寿命  
CIGS素子は未開発**

\*K. Miyazaki, et al. Thin Solid Films 517(2009) 2392.

特開2014-127945.

**放射線耐性に優れた半導体材料の探索**

(SiC, GaN, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Diamond, AlN)

**放射線損傷回復が可能な半導体素子**

(CIGS)

- 陽子線照射
- 電流その場観察

- 試料の損傷回復
- 電気的特性評価

東北大学CYRIC

KEK

**2つのアプローチで高放射線環境用デバイス開発**

# 本研究の2つのアプローチ

**放射線耐性に優れた半導体材料の探索**

(SiC, GaN, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Diamond, AlN)

**放射線損傷回復が可能な半導体素子**

(CIGS)

- 陽子線照射
- 電流その場観察

- 試料の損傷回復
- 電気的特性評価

東北大学CYRIC

KEK

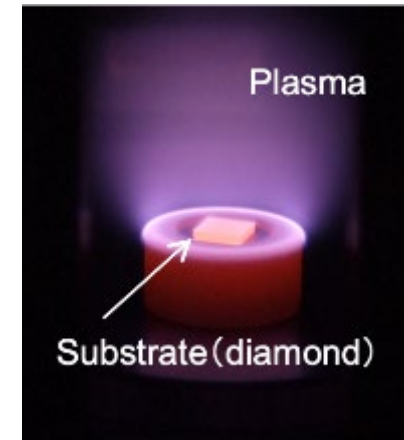


Microwave Generator 2.45 GHz

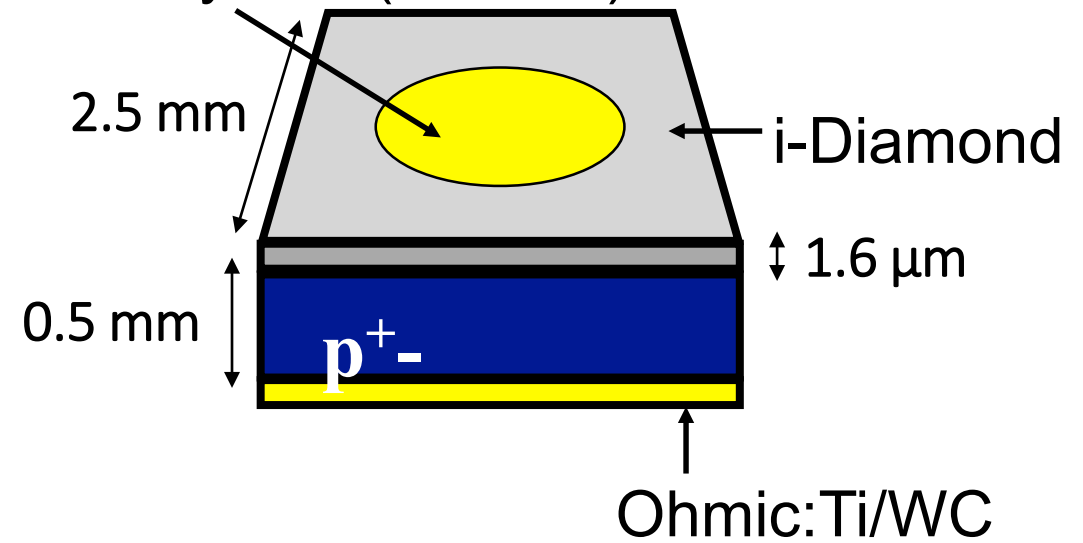


マイクロ波プラズマ気相成長法  
NIMSオリジナル

$H_2+CH_4$   
900 - 1000 °C

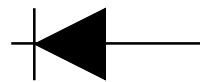
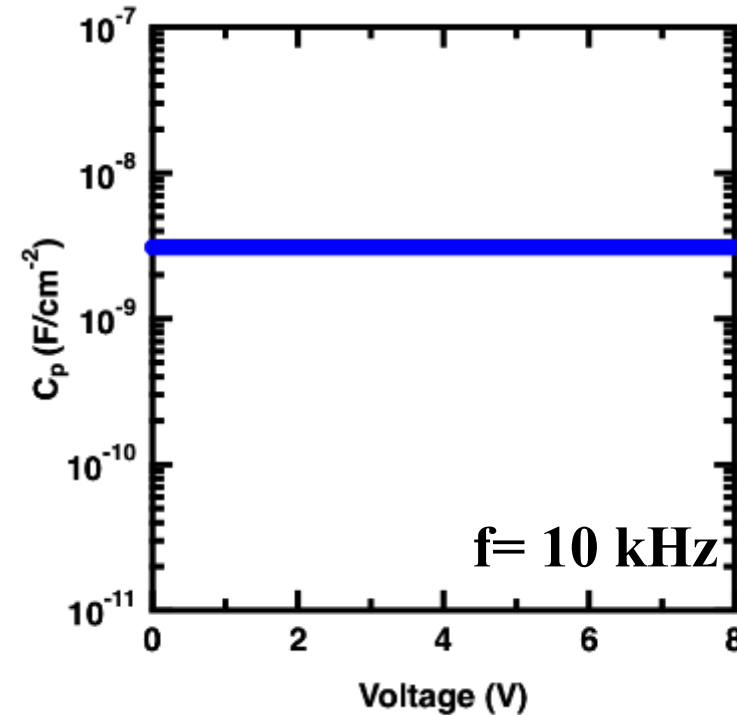
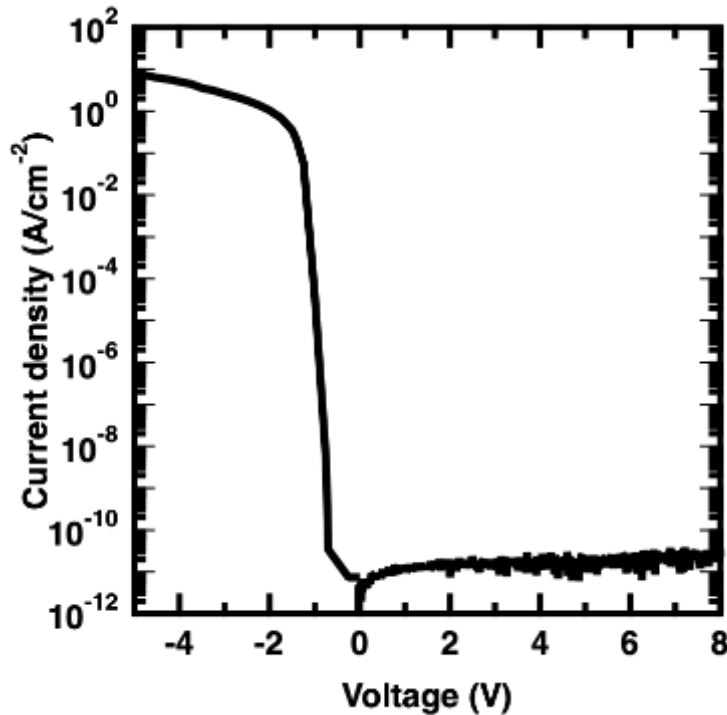


Schottky:WC (1 mm $\Phi$ )



Vertical-type SBD

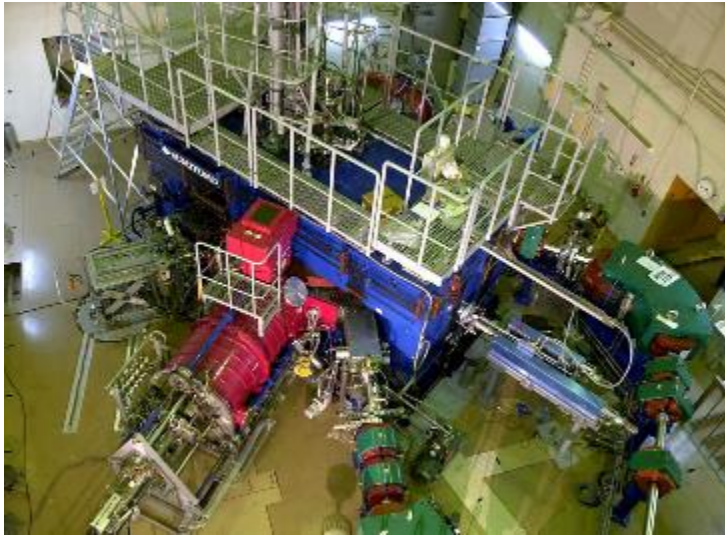
# ダイヤモンドSBDの 放射線照射前の電気的特性



$\epsilon_r \sim 5.7$   
 $d \sim 1.6 \mu\text{m}$

設計通りのダイオード特性

設計通り構造



## 930 AVF cyclotron

E: 70 MeV

T: -15 °C

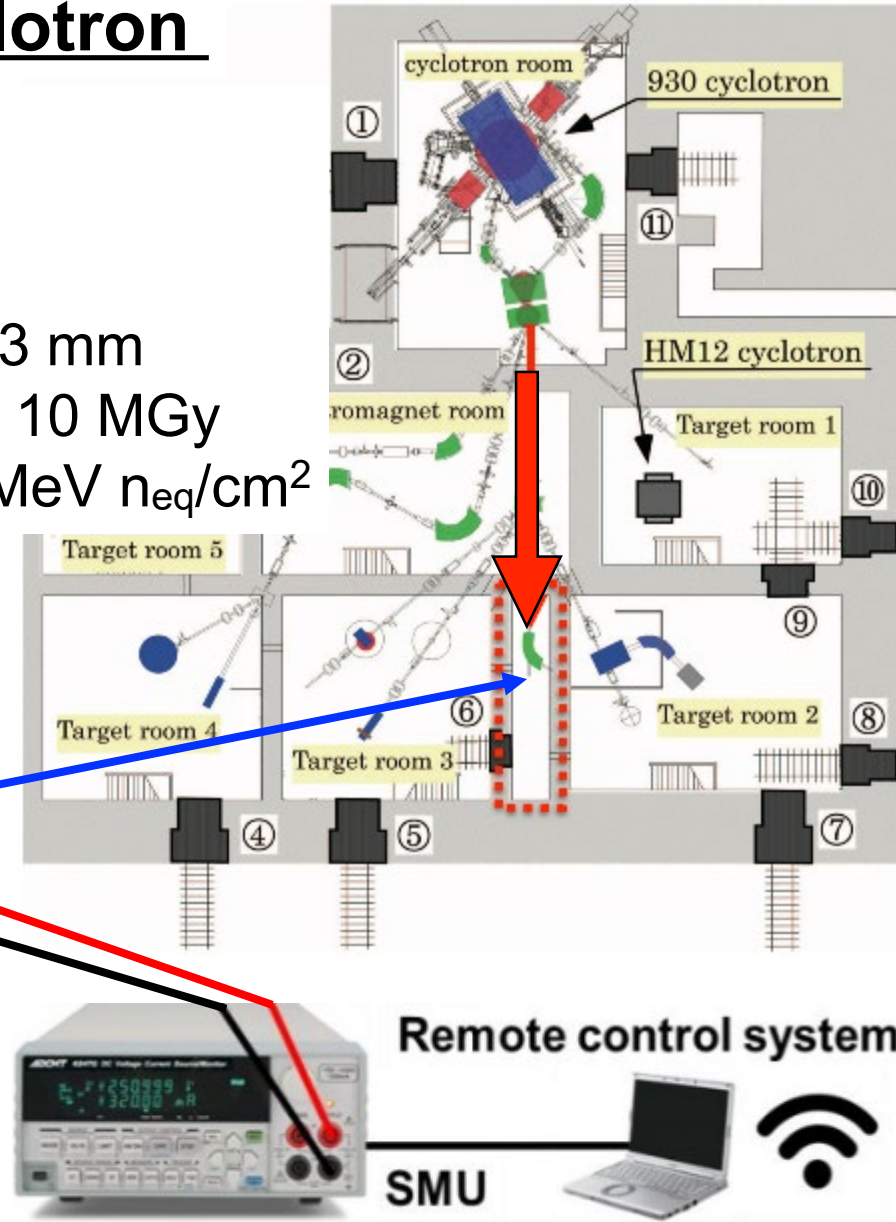
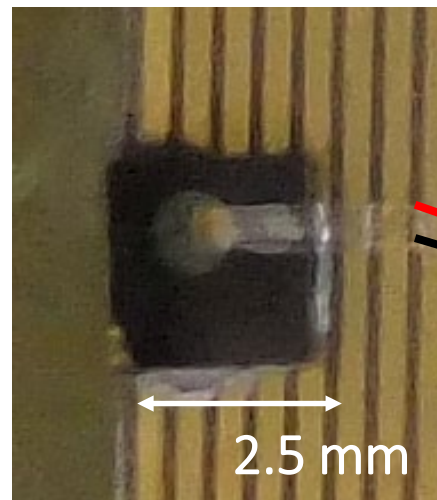
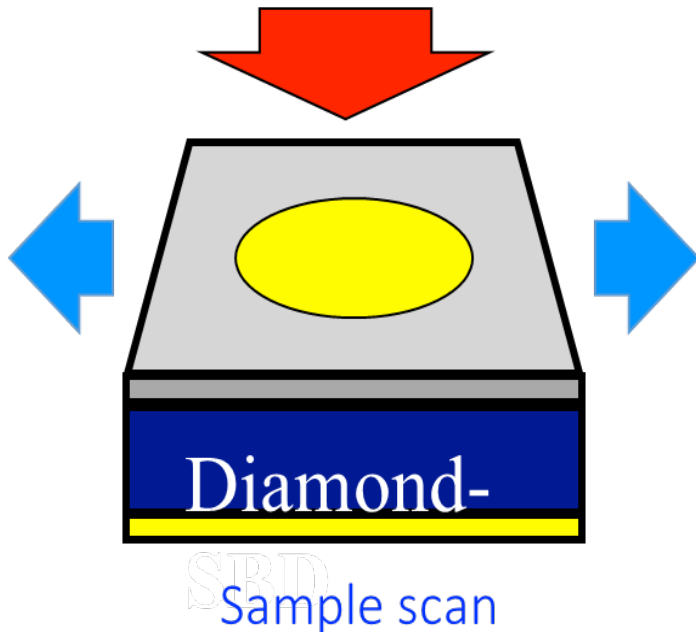
I: 500 nA

Beam size  $1\sigma$ : ~3 mm

TID(Si 150  $\mu\text{m}$ ): 10 MGy

NIEL:  $1.4 \times 10^{16}$  MeV  $n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$

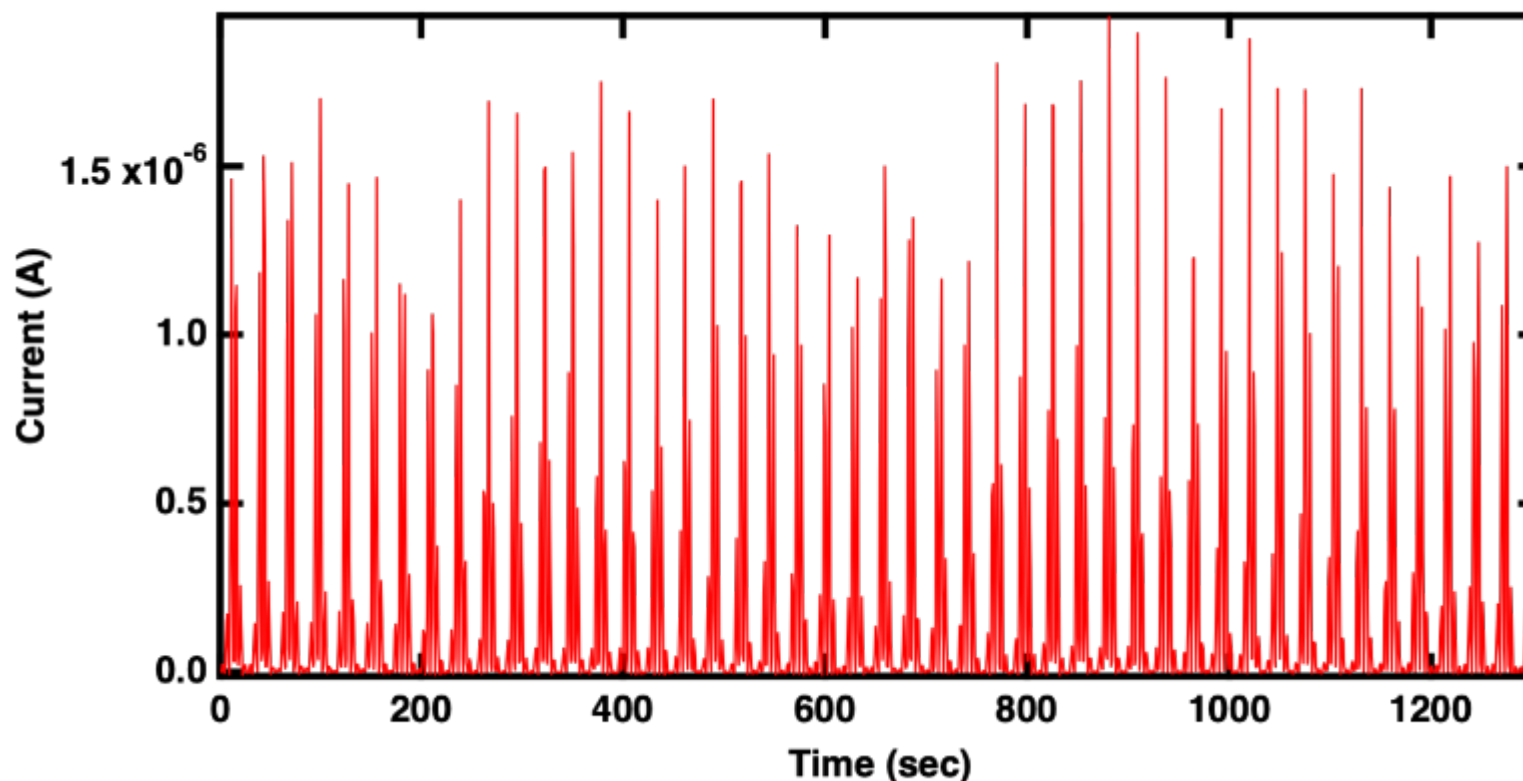
Proton beam (70 MeV)



# ダイヤモンドSBDの 陽子線応答特性

サンプルスキャンのため離散的応答

動作電圧 0V



圧力容器内約1年分 (TID) の放射線量+NIELで安定応答動作を確認  
ダイヤモンド：信頼性の高い放射線検知器用材料として有望

- 今後
- SiC, GaN, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AlNショットキーバリアダイオードと比較
  - 点欠陥評価により各材料の特性劣化の原因解明



# 本研究の2つのアプローチ

放射線耐性に優れた半導体材料の探索

(SiC, GaN, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Diamond, AlN)

放射線損傷回復が可能な半導体素子

(CIGS)

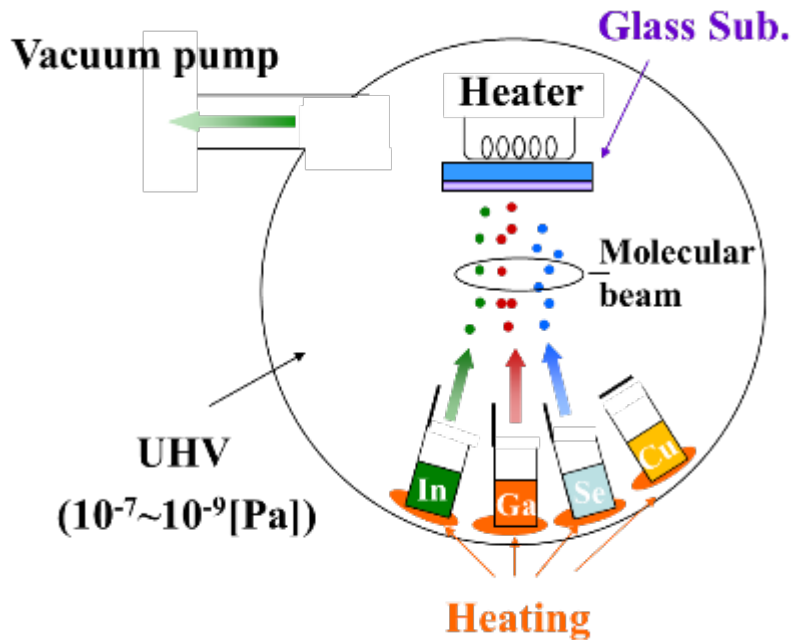
- 陽子線照射
- 電流その場観察

- 試料の損傷回復
- 電気的特性評価

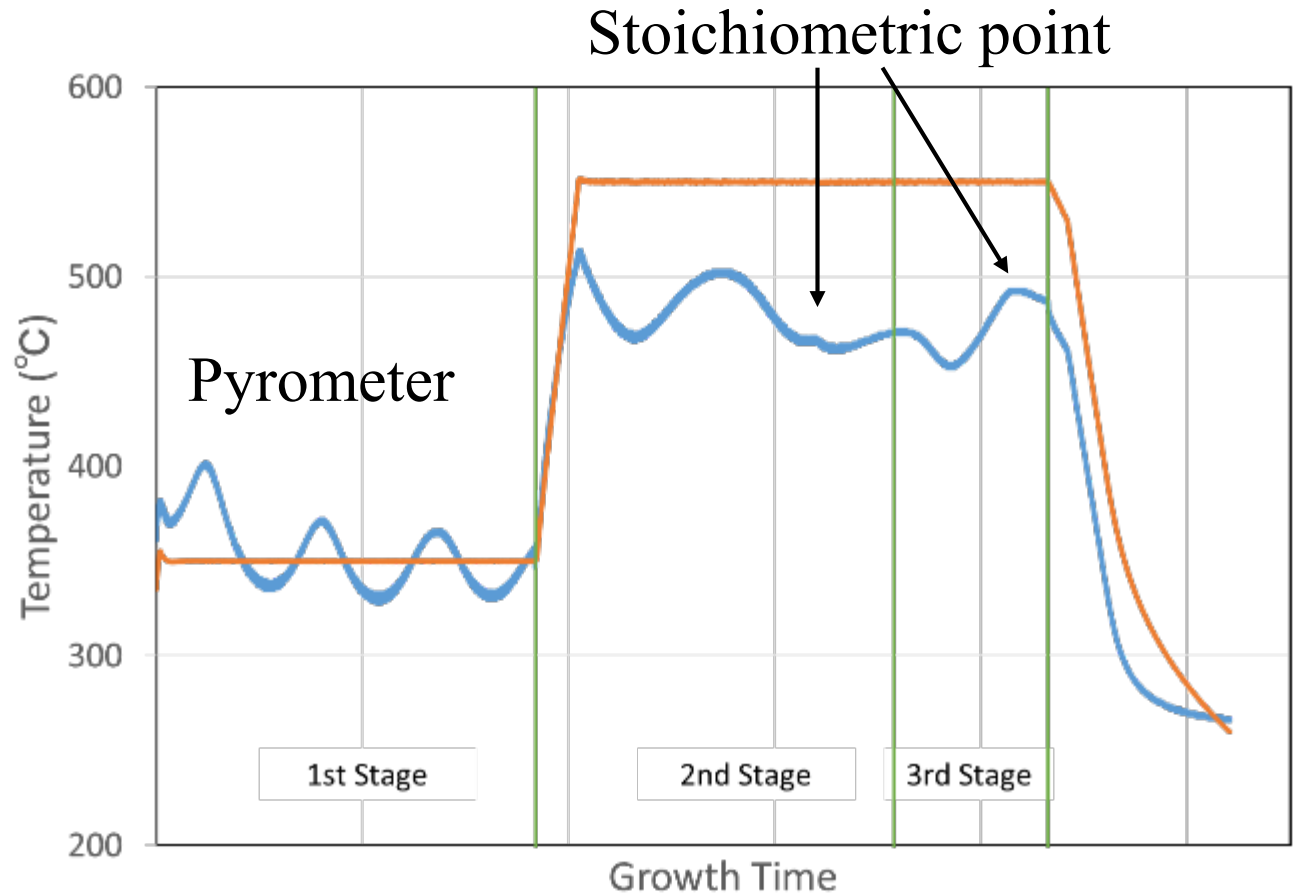
東北大学CYRIC

KEK

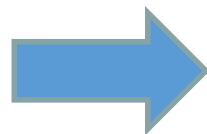
p型CIGSを再現性良く成膜可能



Molecular Beam Deposition

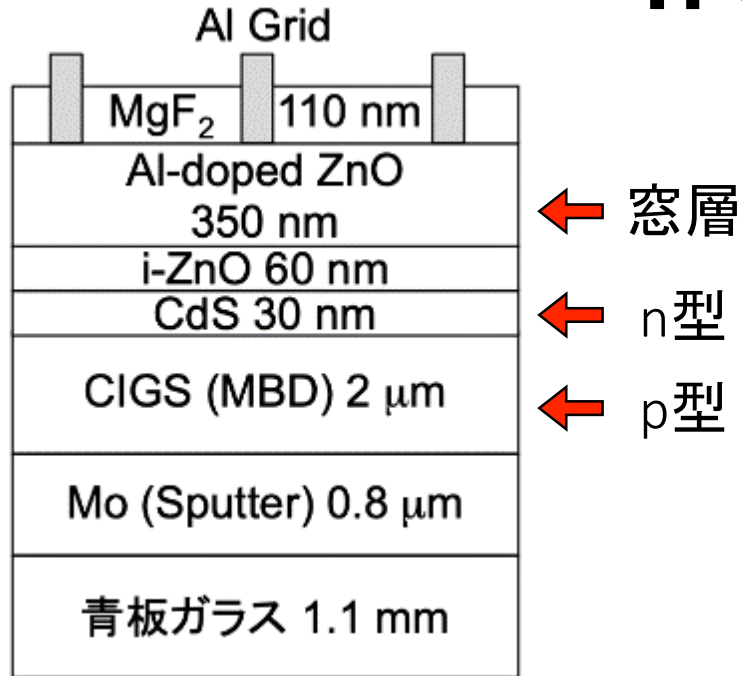


1<sup>st</sup> stage: In, Ga, Se  
2<sup>nd</sup> stage: Cu, Se  
3<sup>rd</sup> stage: In, Ga, Se

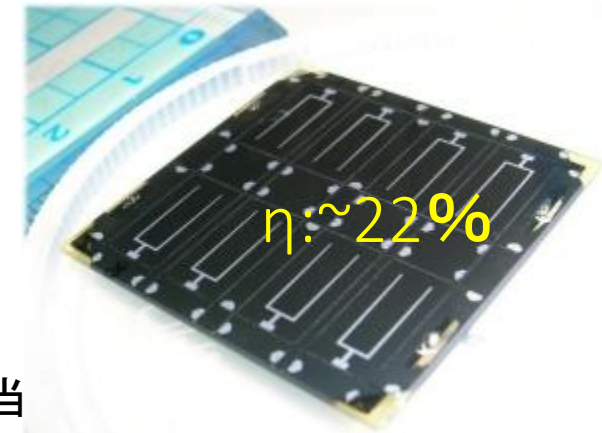
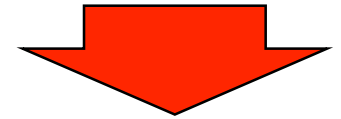


1<sup>st</sup> stage:  $(\text{In,Ga})_2\text{Se}_3$   
2<sup>nd</sup> stage:  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2 + \text{Cu}_2\text{Se}$   
3<sup>rd</sup> stage:  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2 + \text{Cu}(\text{In,Ga})_3\text{Se}_5$

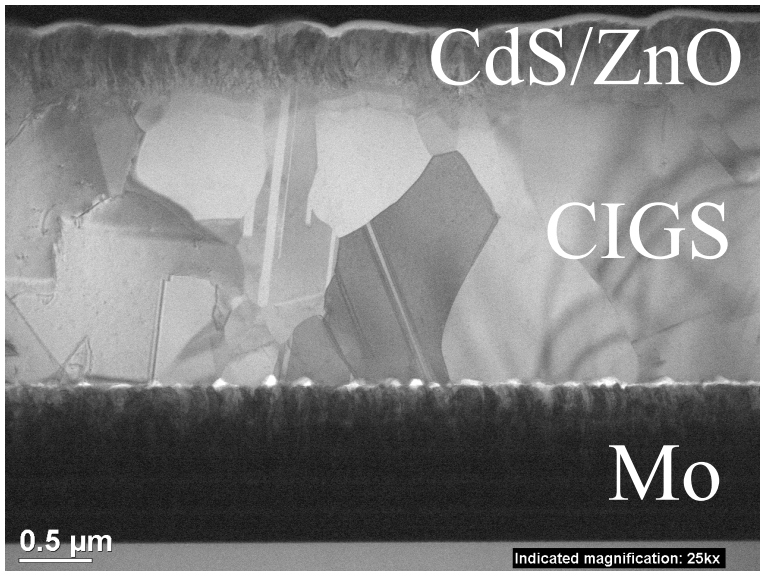
# CIGS太陽電池の 作製と評価方法



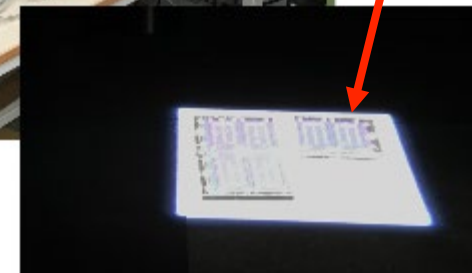
Proton beam 70 MeV



撮像素子の1ピクセルに相当

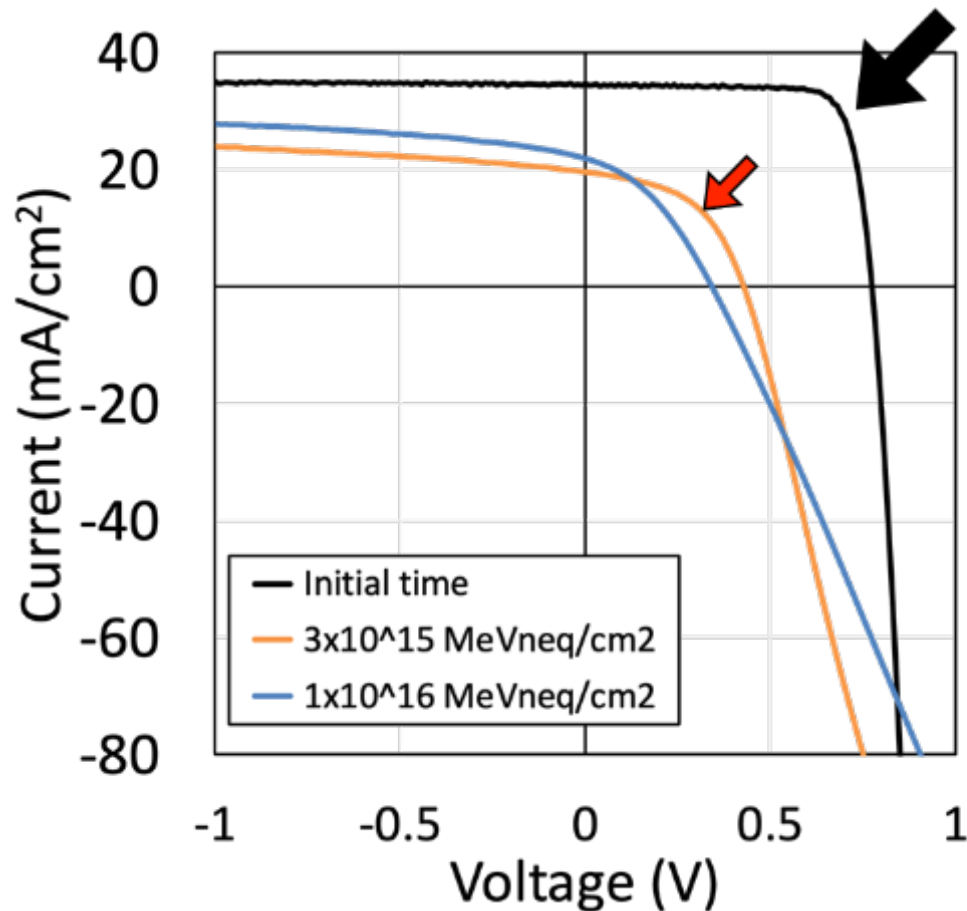


KEK富士実験棟



熱光処理((1 Sun, 95°C))

# 陽子線照射前後の CIGS太陽電池の電気特性



## 陽子線照射量

TID: 2 MGy (圧力容器内約3ヶ月分)

NIEL:  $3 \times 10^{15}$  MeV neq/cm<sup>2</sup>

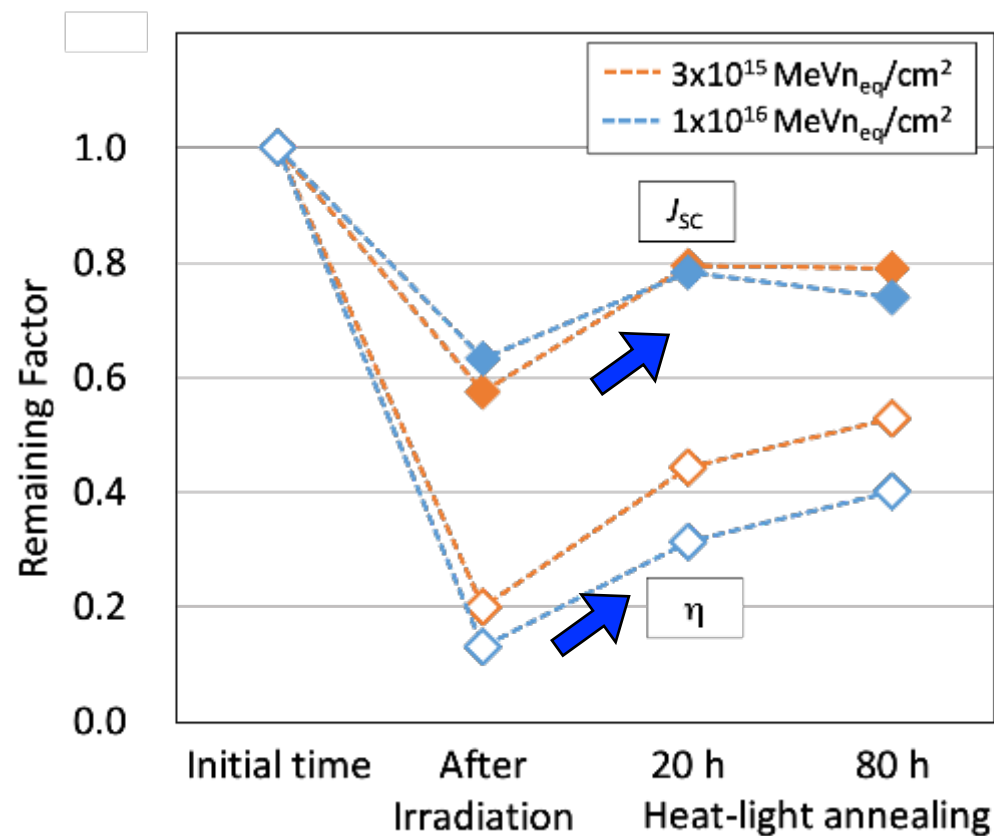
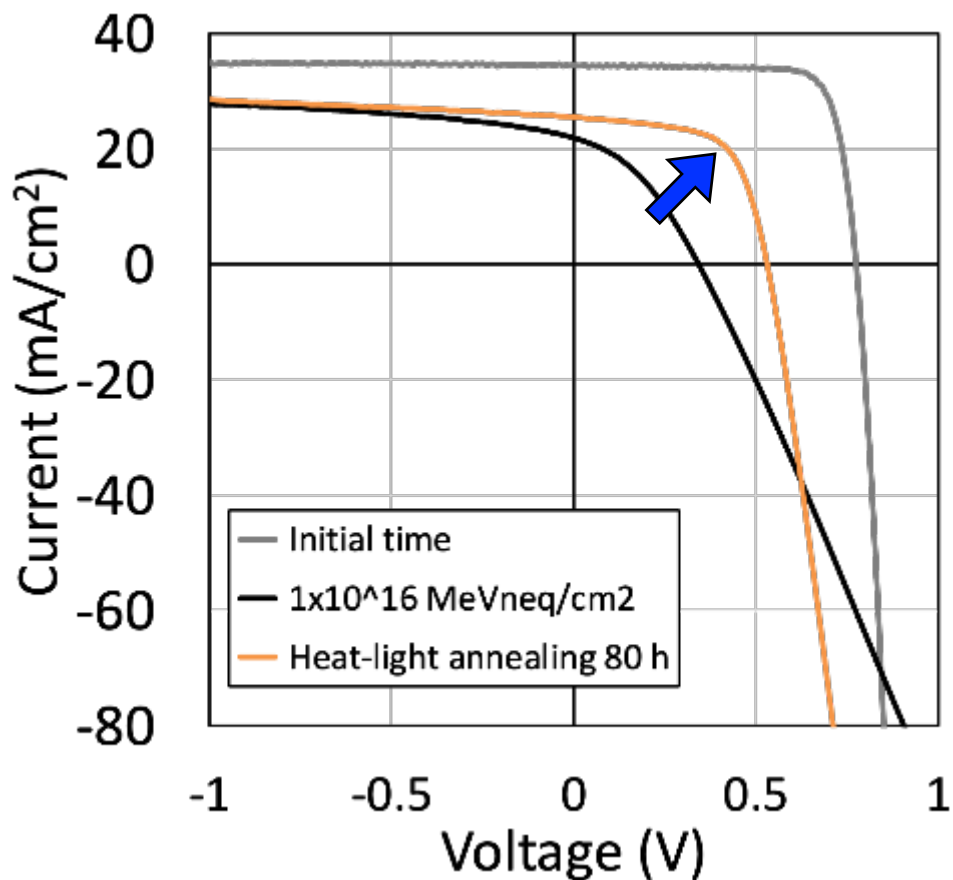
TID: 7 MGy (圧力容器内約7ヶ月分)

NIEL:  $1 \times 10^{16}$  MeV neq/cm<sup>2</sup>

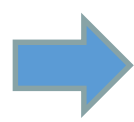
	Eff. (%)	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF
Initial time	21.4	0.774	34.7	0.795
2 MGy	4.1	0.429	19.6	0.493
7 MGy	2.8	0.34	22.0	0.373



# CIGS太陽電池の 熱光処理による特性回復



熱光照射 (1 sun, 95°C) により、  
短絡電流が短時間で保存率0.8まで回復



特性劣化しても交換の必要なし  
高放射線環境での長期利用

## 放射線耐性に優れた半導体材料の探索

(SiC, GaN, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Diamond, AlN)

## Diamondショットキーバリアダイオード

- **陽子線70 MeV照射でも安定動作**
- **高信頼性の放射線検出器として有望**

## 放射線損傷回復が可能な半導体素子

(CIGS)

## CIGS太陽電池

- **陽子線照射 (7 MGy) 後も動作可能**
- **熱・光照射により、  
電気-光変換効率・光電流が回復**
- **高信頼性撮像素子として有望**
- **スパッタ法による大面積・低価格試料  
の作製が可能**

## 2つのアプローチで高放射線環境用デバイス開発

# 想定される用途

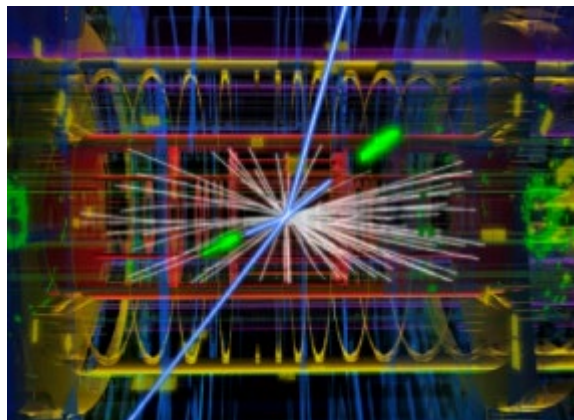
- CIGS素子は、**熱・光照射により特性を何度も回復させることができるため、宇宙や原子炉内のような機器修理が難しい環境でメリット**
- ワイドギャップ半導体素子は、**放射線照射による特性の劣化が少ないため、放射線曝露環境にある製品の長期利用にメリット**
- 高効率放射線検出という特徴に着目すると、放射線医療用検出器といった分野や用途に展開することも可能

## 原子炉内カメラ



(IRID, HITACHI-GE)

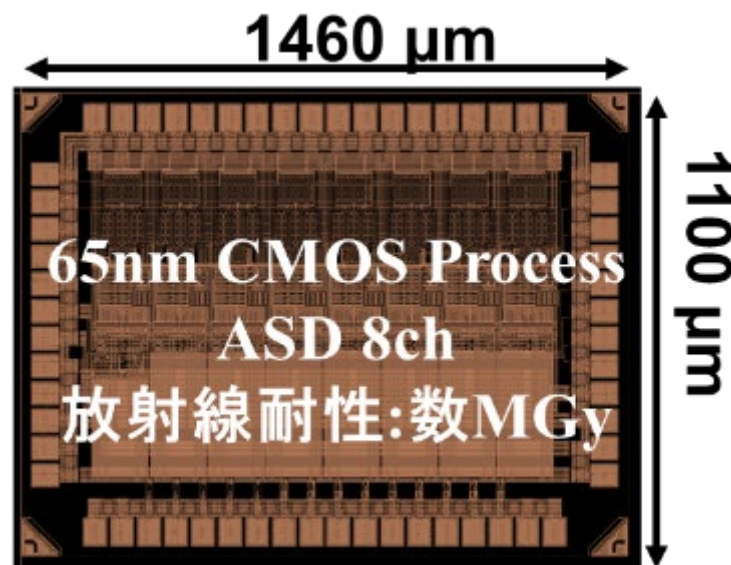
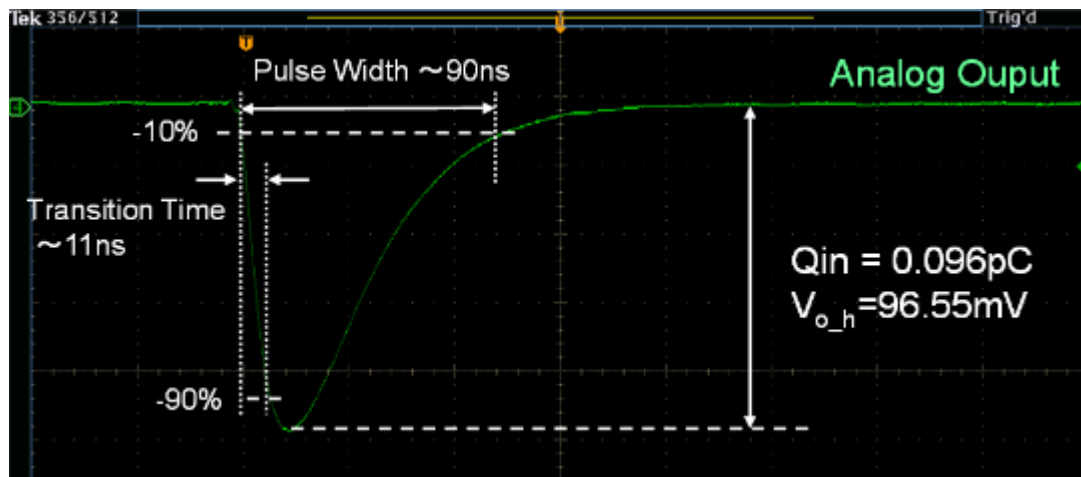
## 衝突型加速器実験



- 重粒子線実験用検出器
- 放射線医療用検出器
- 原子炉内カメラ
- 衛星用カメラ

# 実用化に向けた課題

- CIGS光検出部と高放射線耐性ASICの接合が未達成  
(接合のアイデアは既に構築済み)
- 今後、放射線耐性のあるASICを接続し、高放射線環境における撮像素子としての特性を調べる



- ワイドギャップ半導体は、電気特性と点欠陥評価を用いて、放射線検出器として適切な材料を提案する



# 産学連携の経歴

- 2005年-2014年 産総研とローム社が共同研究実施  
(赤外線カメラ用CIGS撮像素子)
- 2018年- 連携プログラム探索推進事業「かけはし」に採択  
(産総研・NIMS・KEK・東北大・筑波大で共同)
- 2019年 NanotechJAPANに出展
- 2019年-2020年 つくば産学連携研究強化プロジェクトに採択
- 2020年-2021年 村田学術振興財団の助成金に採択

# お問い合わせ先

筑波大学 国際産学連携本部  
技術移転マネージャー 野村 豪

TEL 029-859-1682

FAX 029-859-1693

e-mail [nomura.tsuyoshi.fw@un.tsukuba.ac.jp](mailto:nomura.tsuyoshi.fw@un.tsukuba.ac.jp)