

令和2-3年度  
原子力システム研究開発事業

原子炉中性子リアルタイムモニタリングのための  
太陽電池型線量計の開発

(研究代表者)

理化学研究所 小林 知洋

(研究分担者)

京都大学 奥野泰希

木更津高専 岡本保

宇宙機構 今泉充

量研機構 牧野高紘

# 中性子検出器と本研究の目的

## SMRなど将来の軽水炉型原子炉 中性子検出の動向

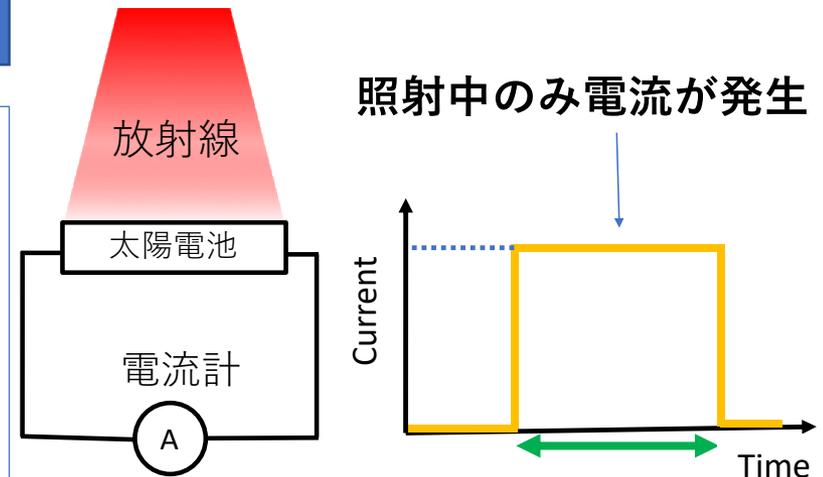
### 炉内中性子検出器の課題

- 1 高信頼性
- 2 長寿命化
- 2 低コスト化
- 3 自動較正遠隔点検

東京電力福島原発事故を踏まえて

- 4 外部電源喪失時にも駆動
- 5 多点・高速測定
- 6 防爆性

### 太陽電池型線量計



非高圧電源化による  
低コスト・省電力の  
線量計システム

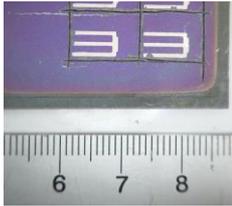
電源消失時にもバッテリー  
にて長時間モニタリング可能

# 太陽電池型線量計の概要

## 本研究で使用する太陽電池

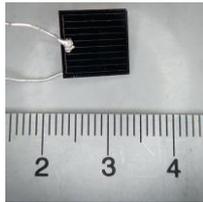
木更津高専

CdTe太陽電池



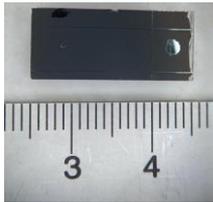
JAXA

InGaP太陽電池

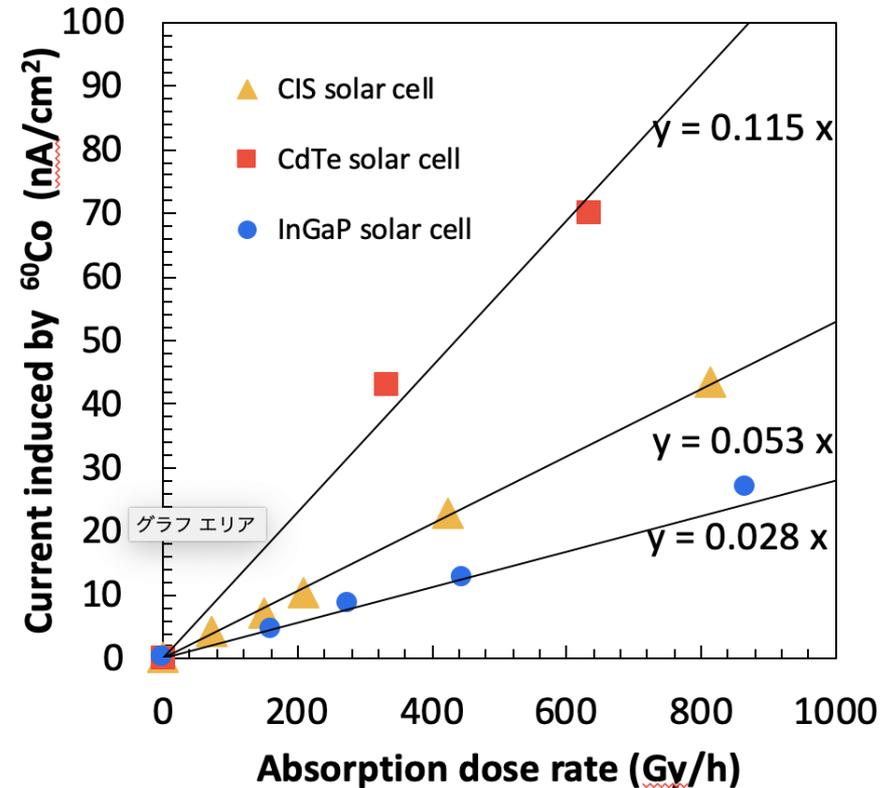


JAXA

CIGS太陽電池

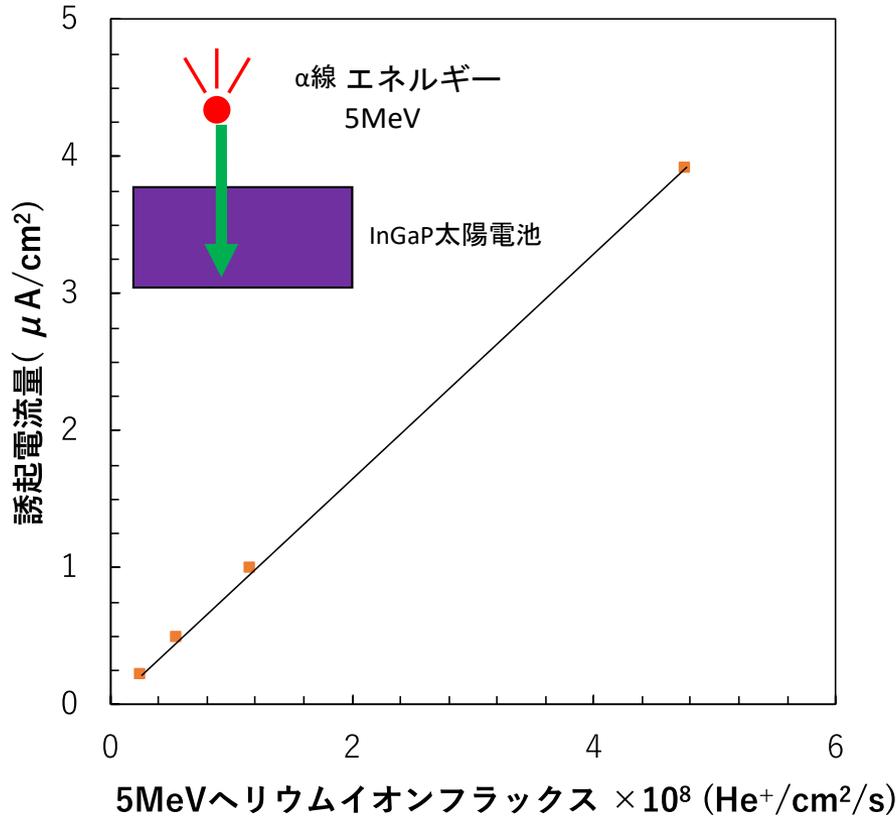


太陽電池	用途	γ線感度	放射線耐性	結晶品質
CdTe	地上	◎	○	○
InGaP	宇宙	○	○	◎
CIGS	地上	○	◎	○



(本プロジェクト以前)  
ガンマ線・電子線を中心に各種太陽電池の発電特性を検証

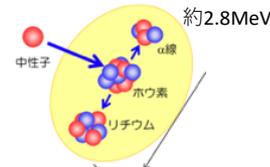
# 太陽電池による中性子検出



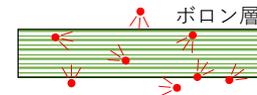
太陽電池の放射線誘起電流は、線源に関わらず付与エネルギーに応じて電流が取り出される。  
荷電粒子についても同様。

中性子 $\rightarrow$ 荷電粒子コンバータ  
例)  $\text{B}(n,\alpha)\text{Li}$ 反応の $\alpha$ 線  
線量率を測定できる可能性がある

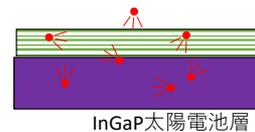
過程1  
熱中性子による $\text{B}(n,\alpha)\text{Li}$ 反応



過程2  
ボロン層からの $\alpha$ 線放出



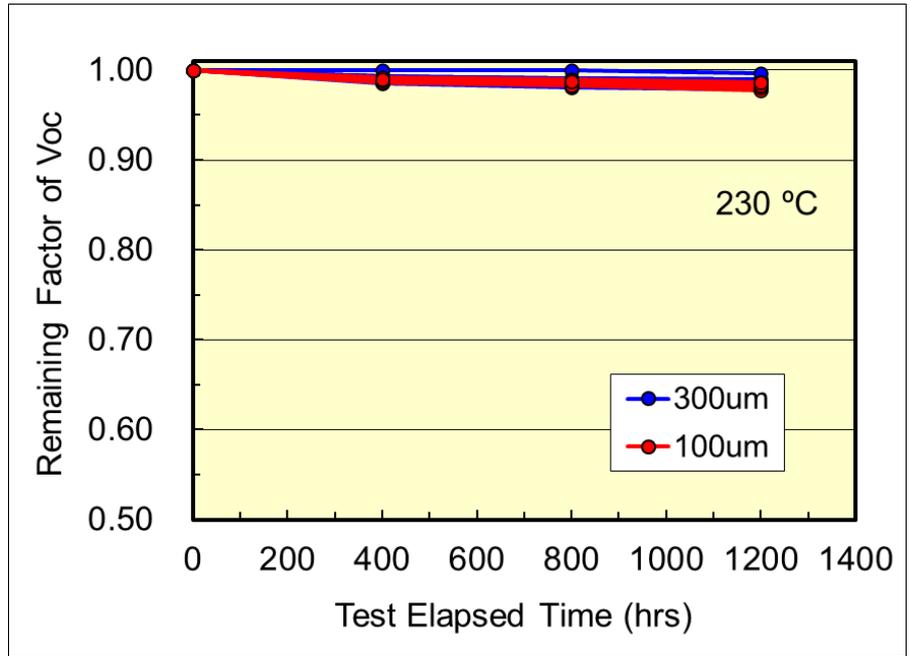
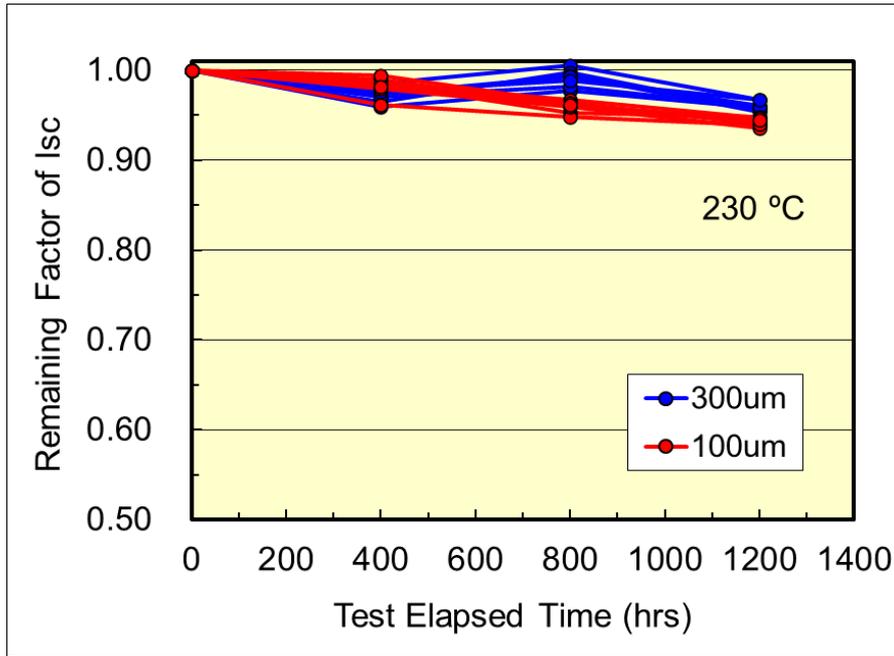
過程3  
 $\alpha$ 線のInGaP太陽電池入射



予備評価(PHITSコード)により  $10^4 \text{ n}/\text{cm}^2/\text{s}$  以上の熱中性子束を検出可能と予測

新たに「中性子検出用」太陽電池型線量計の設計・作製を行い、  
その高温駆動特性・中性子検出特性について解明する。

# 太陽電池の耐熱性



電流出力の耐性(低下傾向)

【参考】電圧出力の耐性(低下傾向)

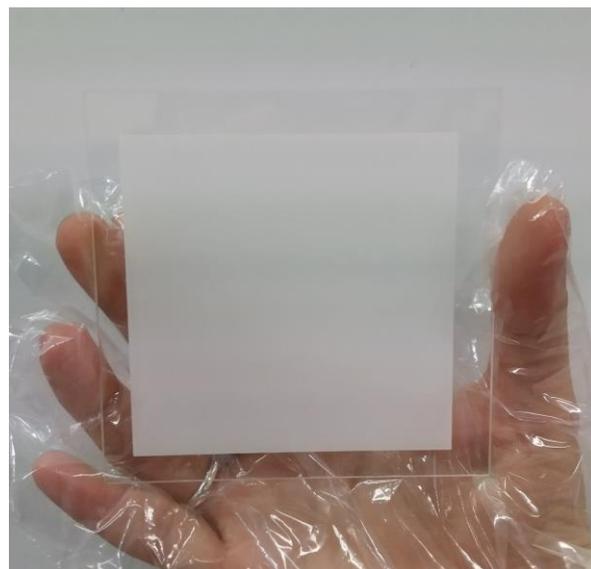
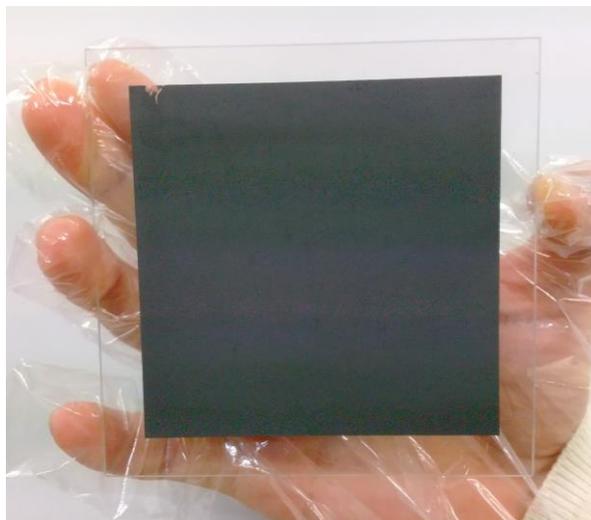
InGaP/GaAs/Ge構造3接合太陽電池の高温連続動作試験結果(JAXA実施)  
水星ミッションのための試験. 縦軸は初期値を1に規格化した相対値.  
(温度:230 °C, 時間:1200 h, 表面保護ガラス厚:100/300 μm)

候補太陽電池のひとつであるInGaP太陽電池を含む3接合太陽電池において、230°Cまでの高温耐性は実証済み（1200時間で5%程度の低下）。

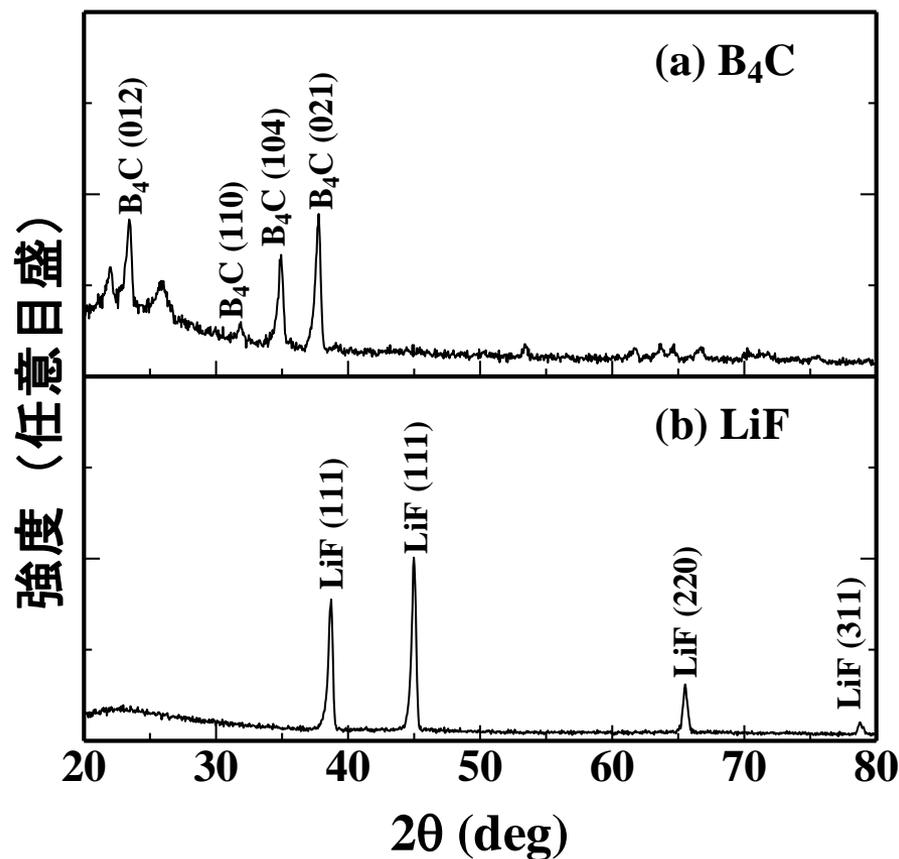
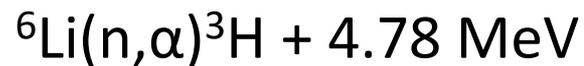
# 中性子検出器ロードマップ

研究開発項目	R2年度	R3年度
中性子検出素子開発 (JAXA、木更津高専)	 太陽電池素子作製  成膜装置・治具準備	 高温保持試験/耐性確認  B膜成膜/中性子検出素子作製
高温中性子照射 (理研)	 高温照射機器設計  常温照射試験	 高温照射機器製作  常温照射試験  高温照射試験
ヘリウムイオン照射 (QST、JAXA)	 照射準備	 He照射/劣化確認  劣化補正法確立  He線誘起電流測定
線量計システム設計 (東北大)	 高温用外装の準備  中性子線量解析ソフトの準備	 $\gamma$ 線誘起電流測定  中性子検出特性の解明  中性子誘起電流測定

# スクリーン印刷により作製した $B_4C$ 膜、 $LiF$ 膜

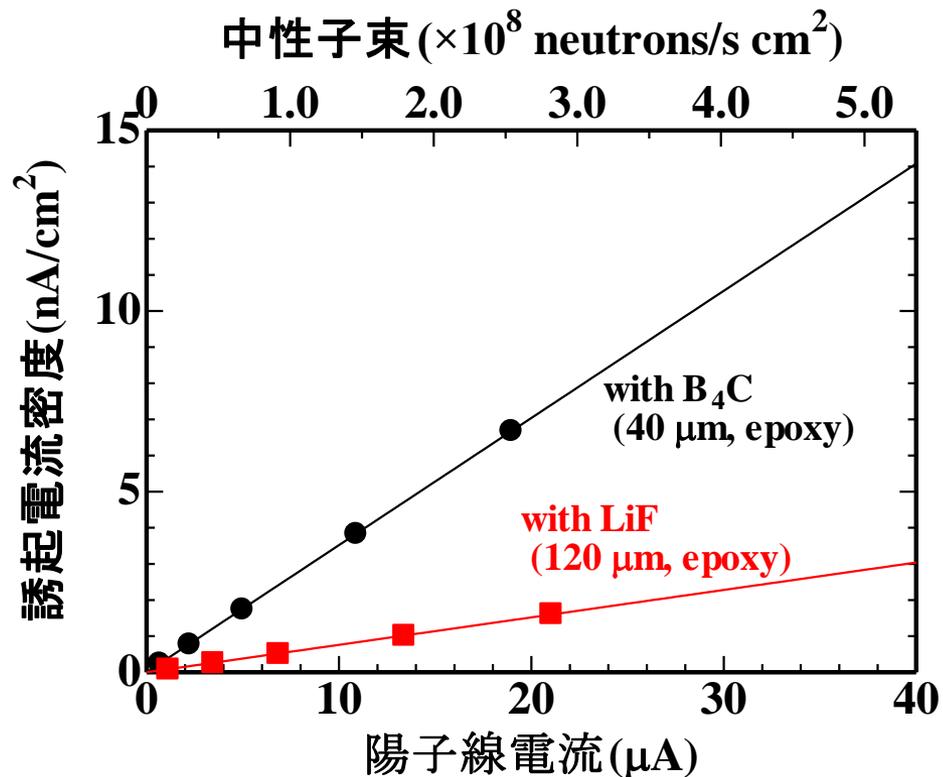
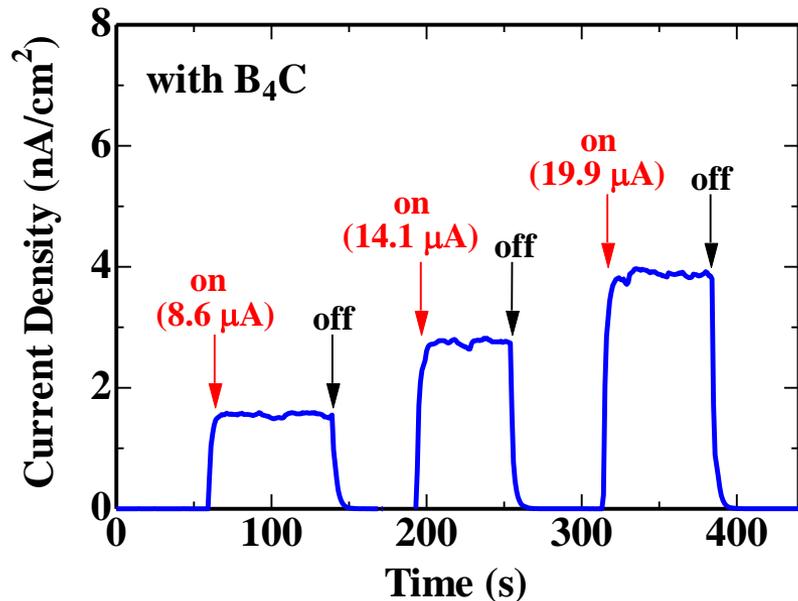
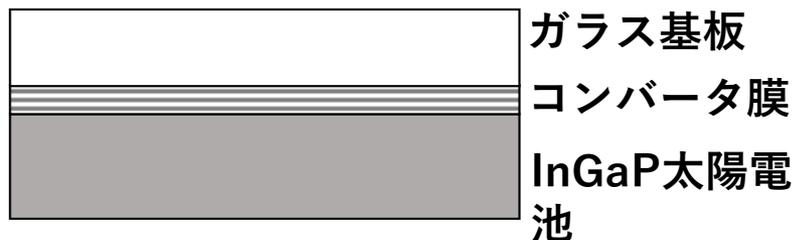


想定する核反応



■ 中性子検出素子開発(木更津高専・JAXA)

# コンバータ膜を有したInGaP太陽電池の中性子線誘起電流



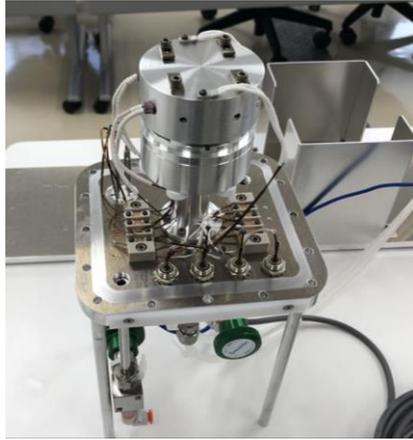
・ 誘起電流は陽子線電流に比例している。



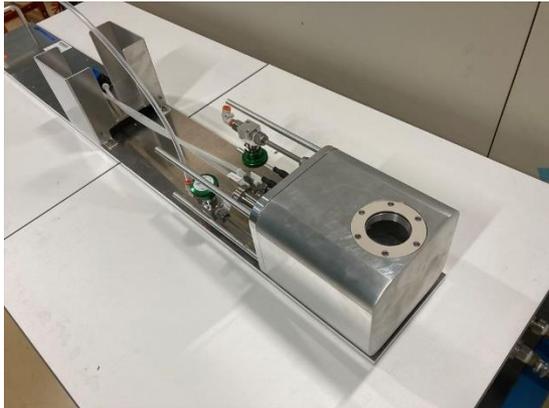
中性子束モニタとして使用できる

## ■高温中性子照射試験(理研)

# 高温照射試料ステージの製作と実照射



300°C試料ステージ



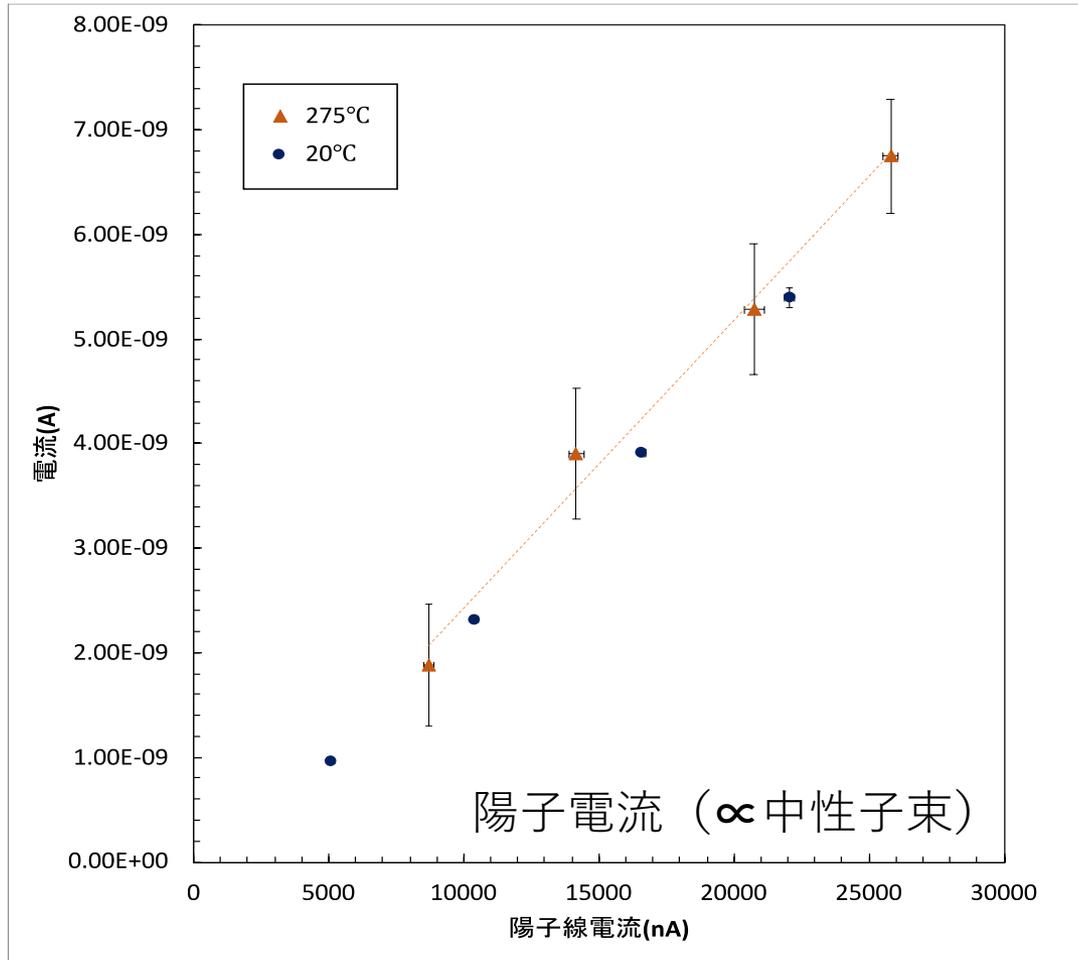
真空・ガス置換チャンバー



照射中の様子

## ■ 高温中性子照射試験(理研)

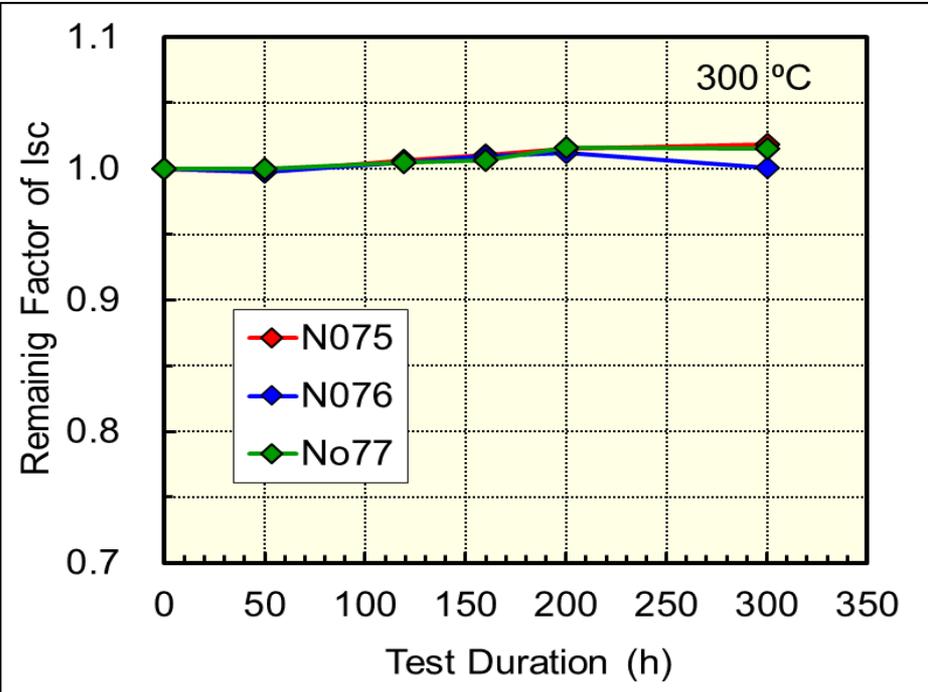
# 高温照射試料ステージの製作と実照射



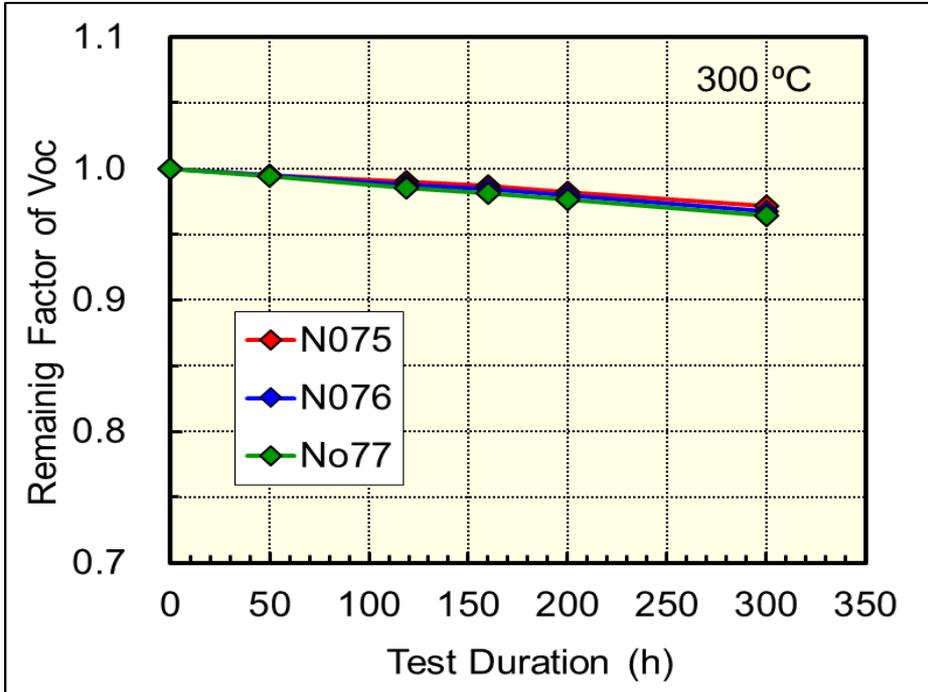
常温・高温照射結果

■劣化計測(He照射)と劣化補正法の確立(JAXA, QST)

大気中高温耐性 (300 °C)



電流出力



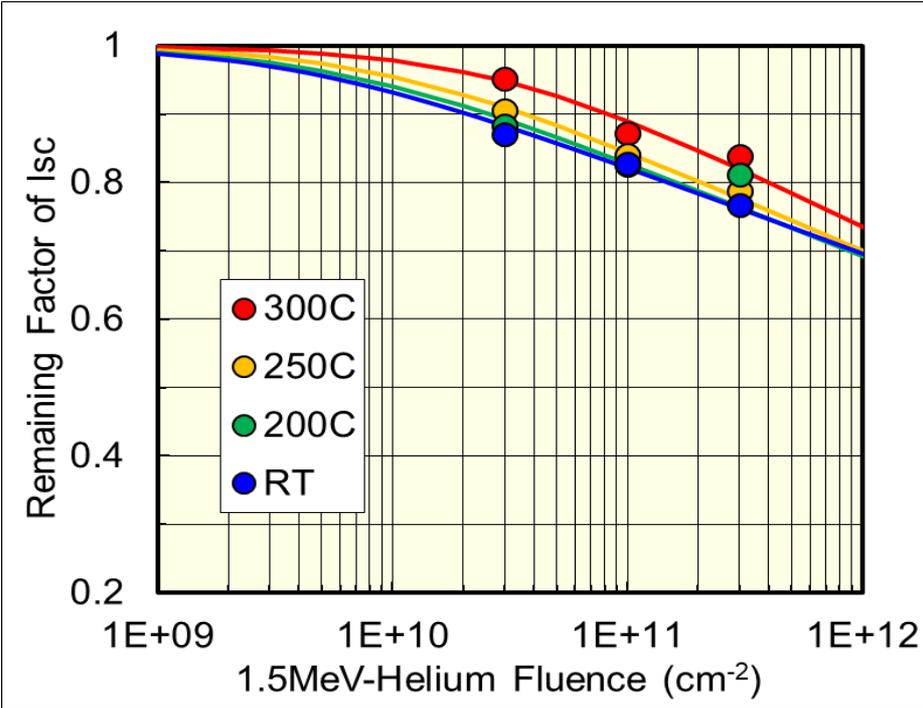
電圧出力

大気雰囲気中300°CでのInGaP太陽電池の出力変化

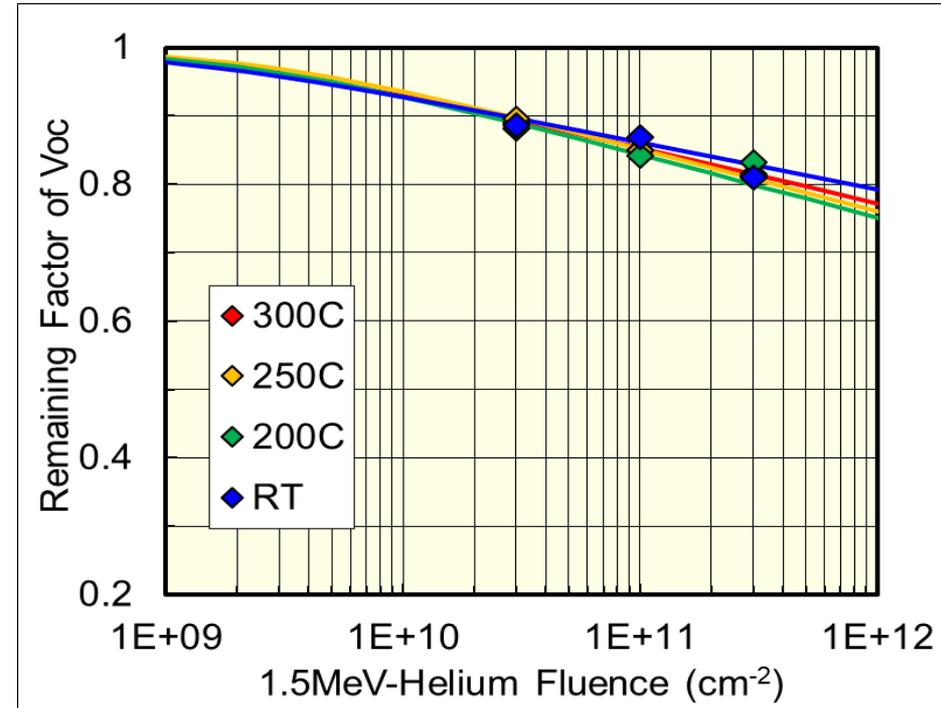
InGaP太陽電池デバイスの電流出力は、大気中300°Cでも劣化しない！

■劣化計測(He照射)と劣化補正法の確立(JAXA, QST)

放射線劣化特性 ( $\alpha$  粒子模擬: He<sup>+</sup>, 1.5 MeV)



電流出力



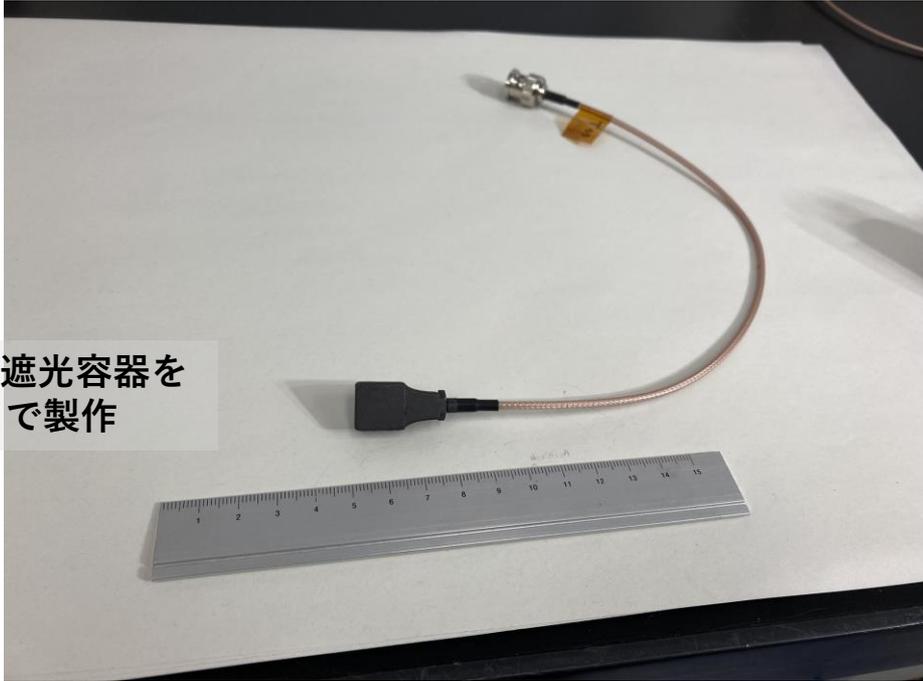
電圧出力

1.5 MeV-HeイオンによるInGaP太陽電池の電流出力の劣化特性

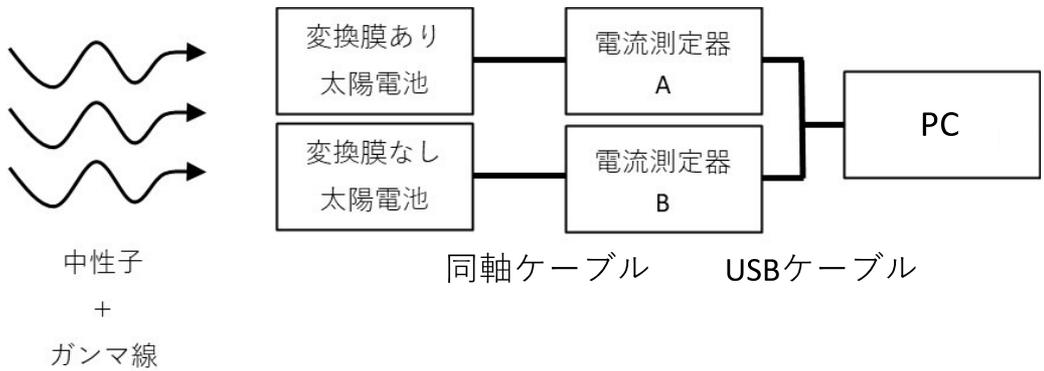
InGaP太陽電池デバイスの電流出力の放射線劣化は、RT~300°Cでわずかな温度依存性（高温で劣化減）があるが、定量的には有意差なし。

→ RTでの劣化特性を使用すればよい（劣化の過小評価にはならない）

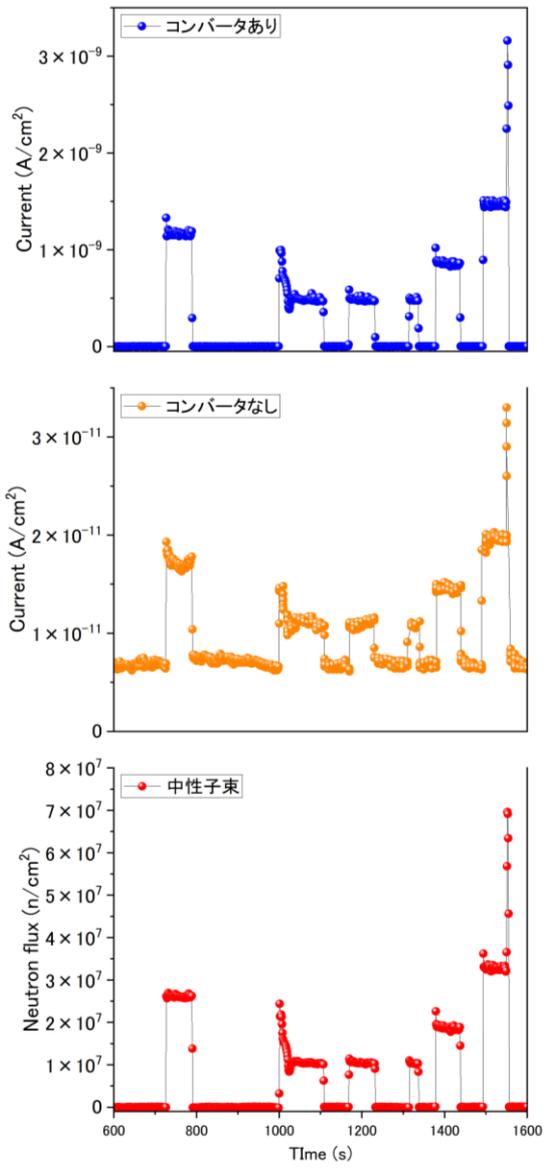
# ■線量計システム設計(京大) 計測モジュールの製作とシステム構築



素子保護・遮光容器を  
3Dプリンタで製作



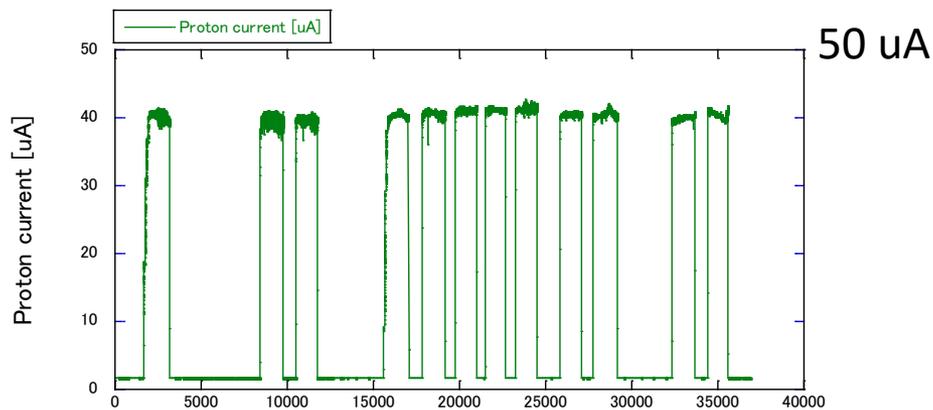
# ■線量計システム設計(京大) 加速器中性子源RANSにおける実測定



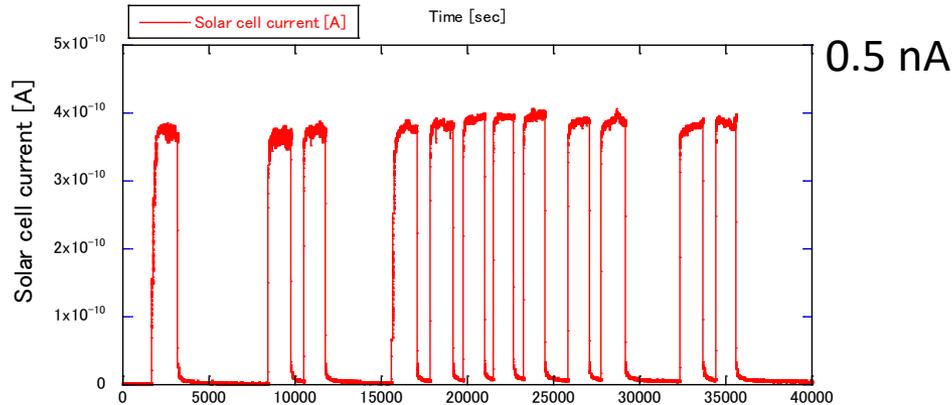
ガンマ線／中性子線の  
線量率が同オーダーの場合、  
電流値の差は2桁程度

# (参考)陽子電流( $\propto$ 中性子束)／太陽電池電流／ $^3\text{He}$ 検出器計数の同時記録

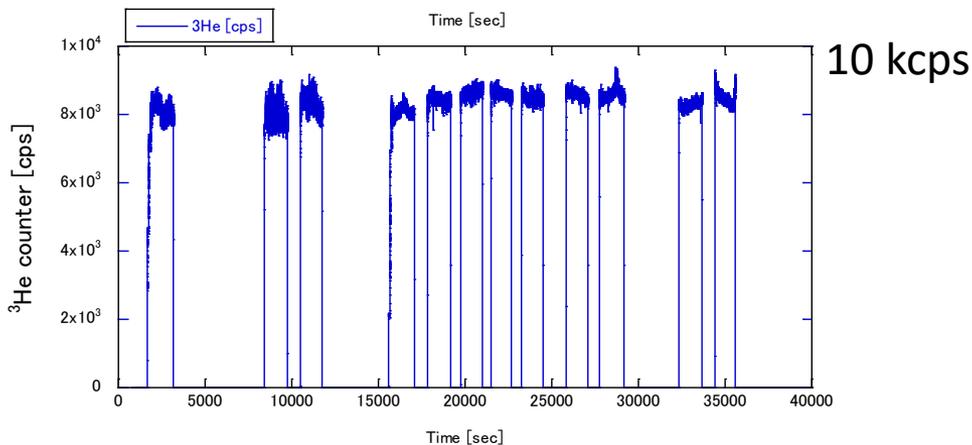
加速陽子電流



太陽電池(InGaP)  
発電電流  
@遮蔽体内



$^3\text{He}$ 検出器計数  
@遮蔽体外



# 結言

本研究により太陽電池が中性子モニタとして応用可能であることが示された

- ・ ダイナミックレンジ8桁以上と非常に広い特性を持つ
- ・ ホウ素だけでなく、リチウムやガドリニウムなど利用用途に応じた最適なコンバータの組み合わせが期待される
- ・ 目標通り高温耐性が示されたことにより、SMRでの使用が可能であると言え、低コスト化に多いに寄与すると期待される
- ・ BNCTなどの医療用途に向けた中性子検出センシングとしても十分な性能を有していると考えられる。興味を持った企業からの問い合わせがあった