

太陽電池素子を用いた 低コスト量産型放射線計測技術

理化学研究所
光量子工学研究センタ
中性子ビーム技術開発チーム
研究員 奥野 泰希

2025年6月3日

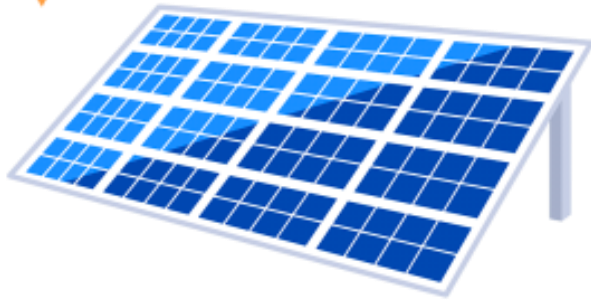
目次

1. 太陽電池素子の放射線検出特性
2. 廃炉応用に向けたCIGS太陽電池型検出素子
3. 医療応用に向けたペロブスカイト太陽電池型検出素子

目次

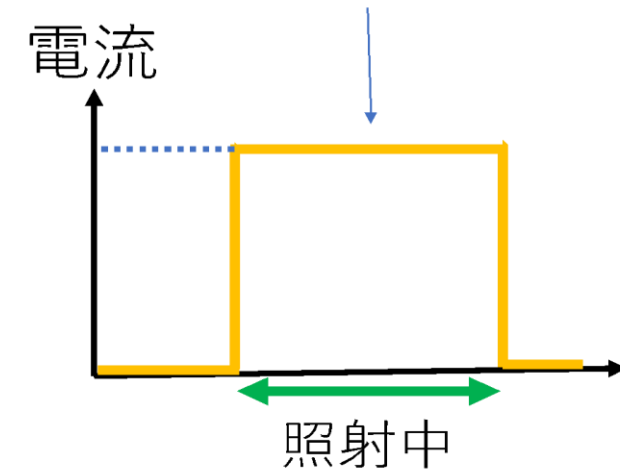
- 1. 太陽電池素子の放射線検出特性**
2. 廃炉応用に向けたCIGS太陽電池型検出素子
3. 医療応用に向けたペロブスカイト太陽電池型検出素子

太陽電池を応用した線量計のメリット



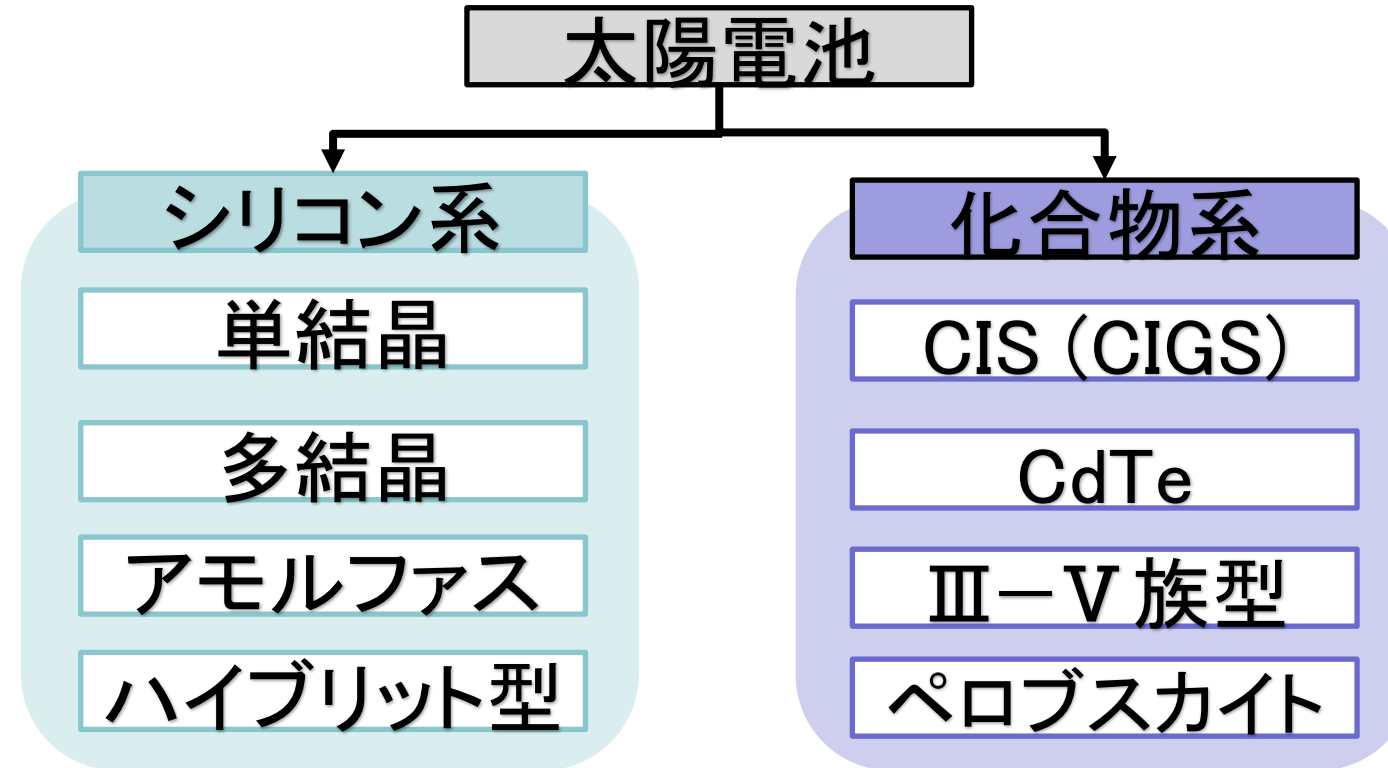
太陽電池型線量計の駆動概念

照射中のみ電流が発生



1. 「社会実装面」：安価・高品質な素子を容易に入手が可能
2. 「システム面」：自己電位駆動による非高圧電源化が可能
3. 「機能面」：光による性能評価による品質保証が可能

実用化されている太陽電池



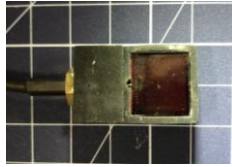
	コスト	効率	放射線耐性	フレキシブル化
シリコン単結晶	◎	○	X	△
CIS	○	○	○	○
CdTe	○	○	○	○
Ⅲ－Ⅴ系	△	◎	△	○
ペロブスカイト	○	○	◎	○

太陽電池によるガンマ線検出特性比較

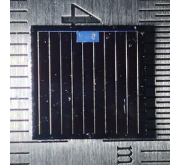
Si solar cell



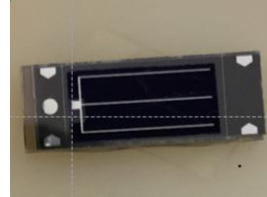
A-Si solar cell



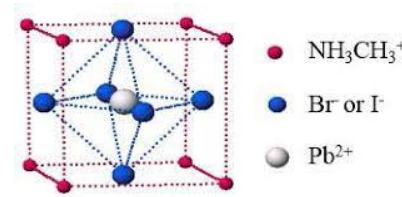
InGaP solar cell



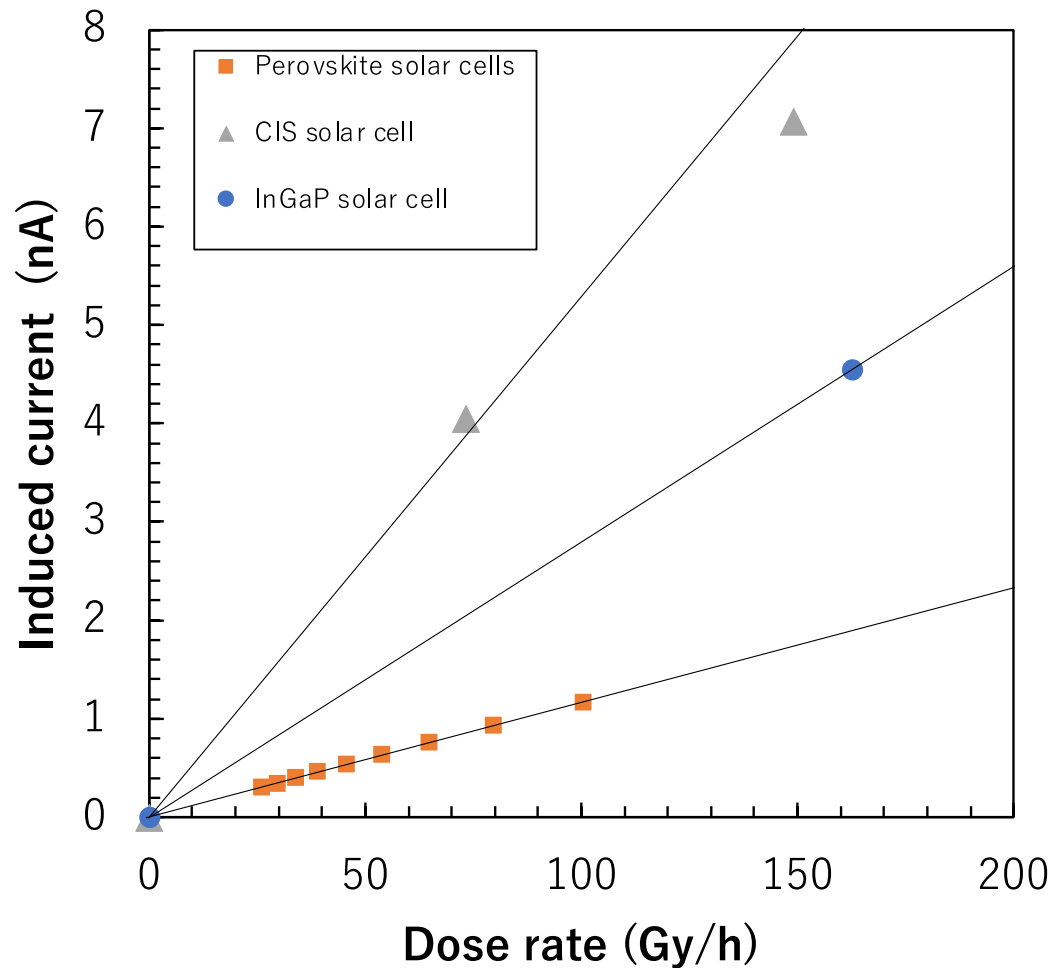
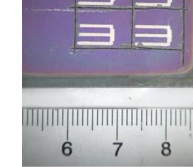
CIGS solar cell



Perovskite solar cell



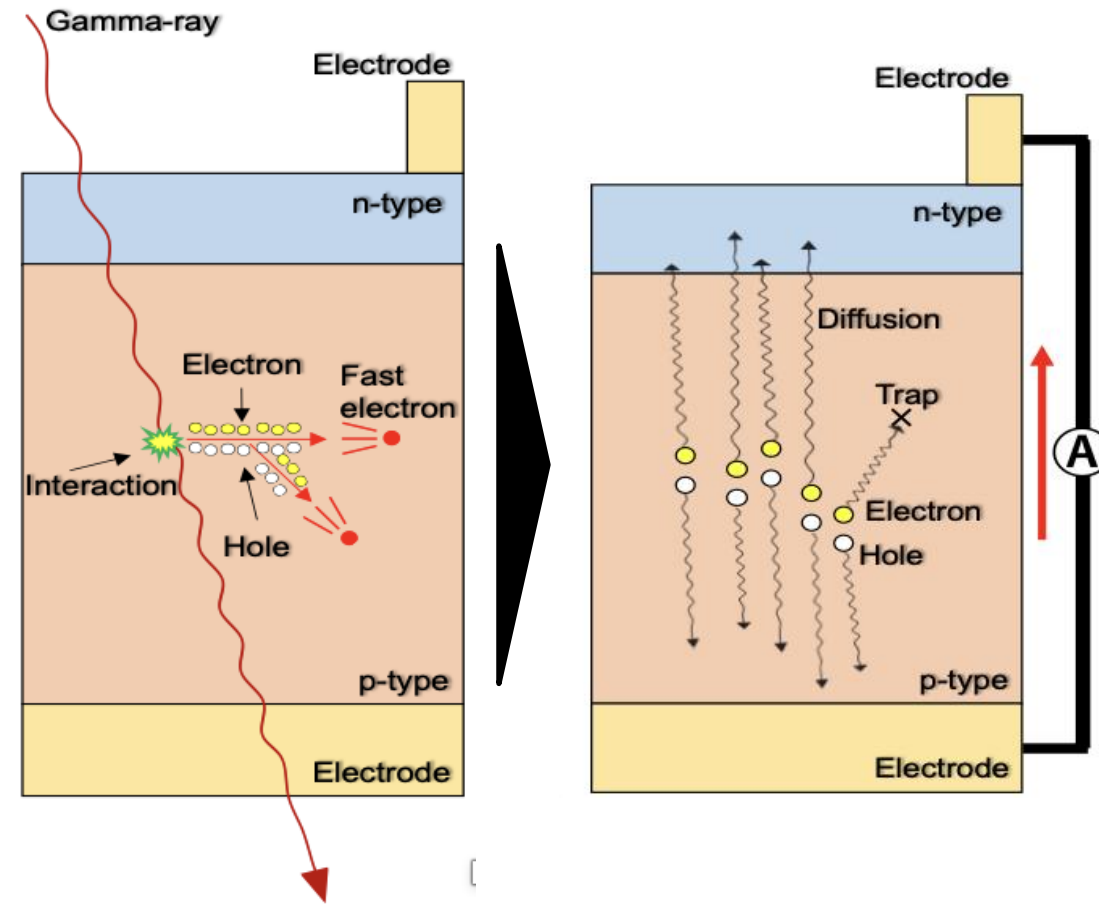
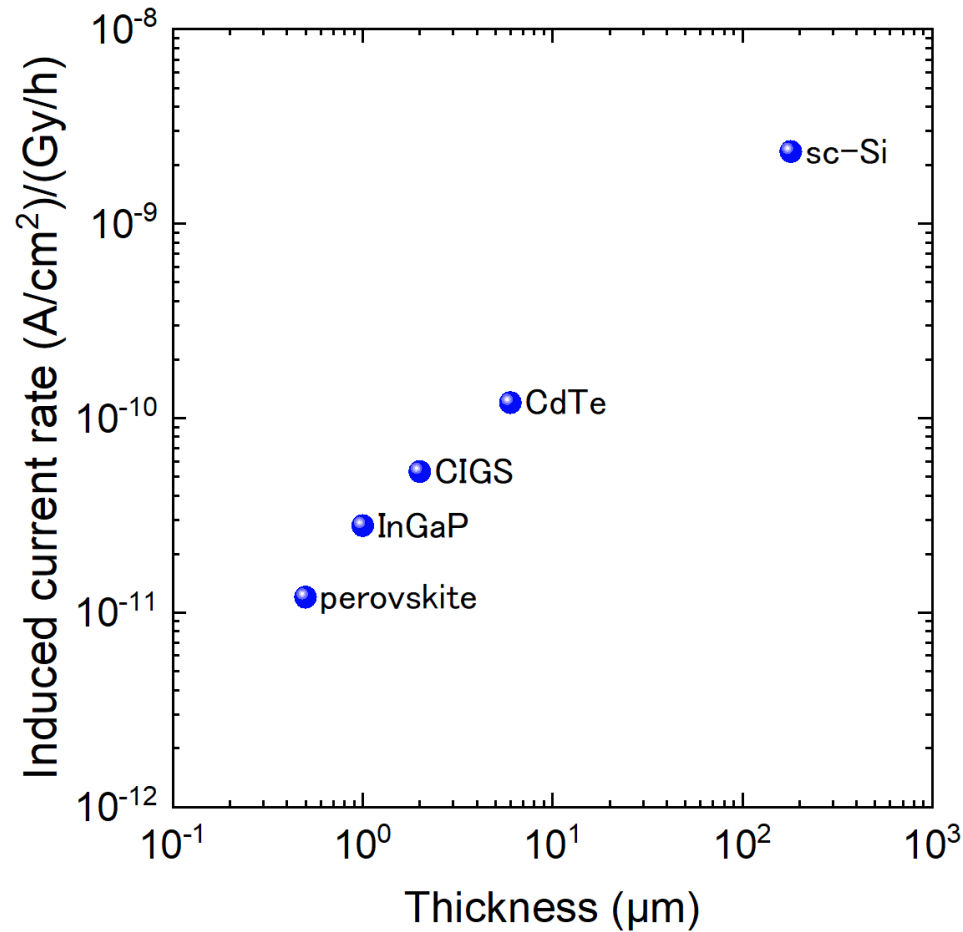
CdTe solar cell



太陽電池	ガンマ線感度 ((Gy/h)/(A/cm ²))	InGaP比	吸収層膜厚(μm)
Si	4.55×10^{-09}	86	180
CdTe	1.15×10^{-10}	4.11	5~10
CIGS	5.29×10^{-11}	1.89	2
InGaP	2.80×10^{-11}	1.00	1
perovskite	1.23×10^{-11}	0.439	0.5
a-Si	8.65×10^{-12}	0.309	<1

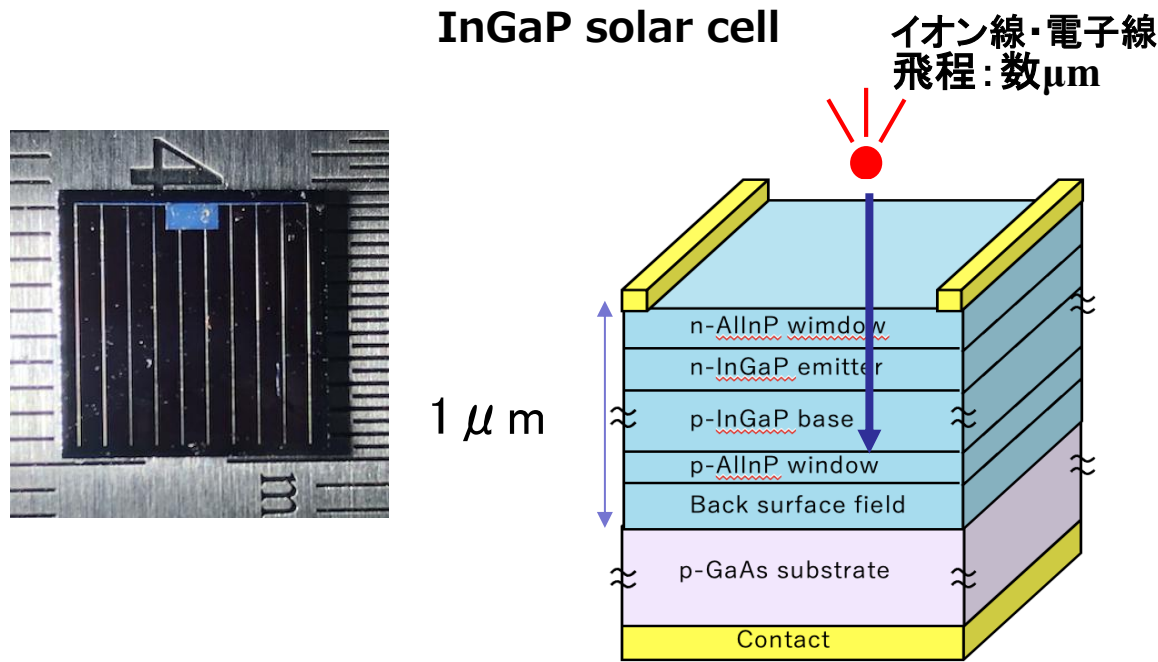
- 上記の太陽電池にてCo-60ガンマ線の照射試験を行い、誘起電流挙動（短絡電流）のガンマ線線量率依存性について取得した。
- それぞれの太陽電池にて誘起電流は、線量率に比例した発生量の増加を観測した。

太陽電池膜厚と誘起電流挙動

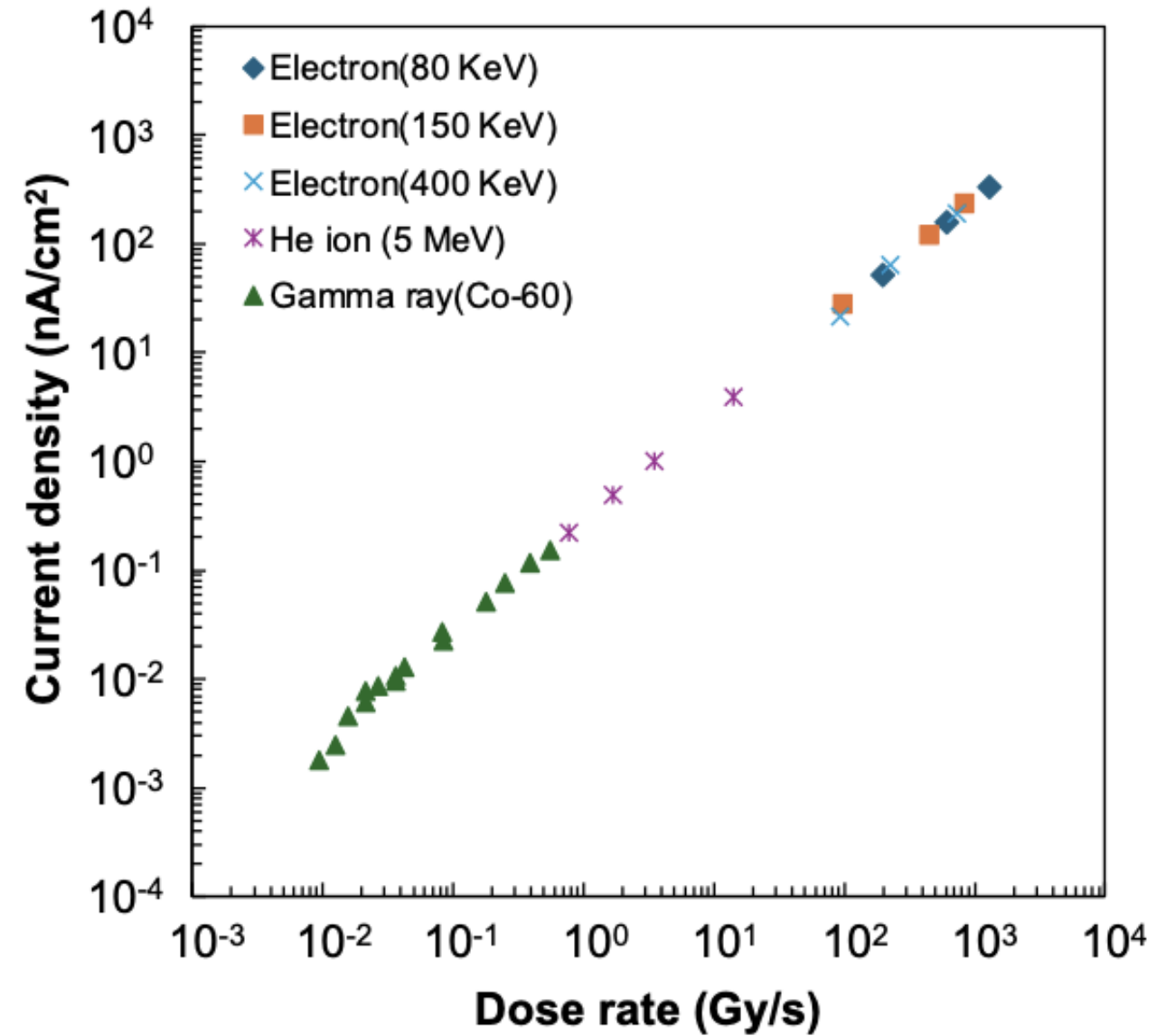


- 太陽電池の膜厚は、光吸収係数に応じた設計をしており、その膜厚に応じたガンマ線感度を有していると考えられる。
- 十分に膜厚が厚い場合は、キャリアの拡散長に対して出力される電流信号が律速することが考えられる。

イオン線、電子線、ガンマ線検出特性



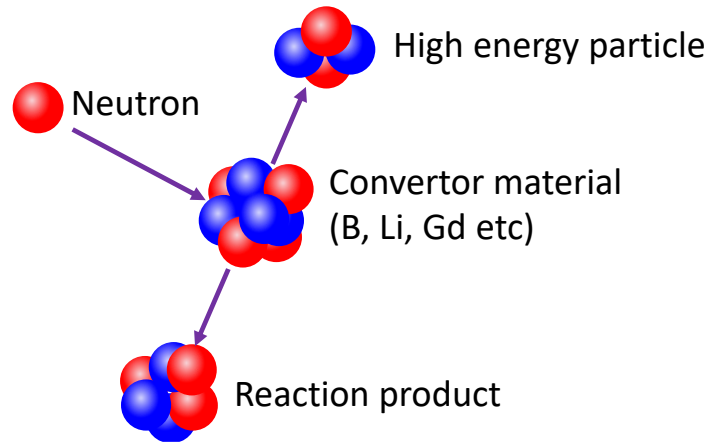
- 通常、飛程が短く検出困難であったイオン線や電子線についてInGaP太陽電池を用いて、検出することに成功した。
- 放射線の種類によらず、素子の付与エネルギーに比例した誘起電流が出力していることが明らかになった。



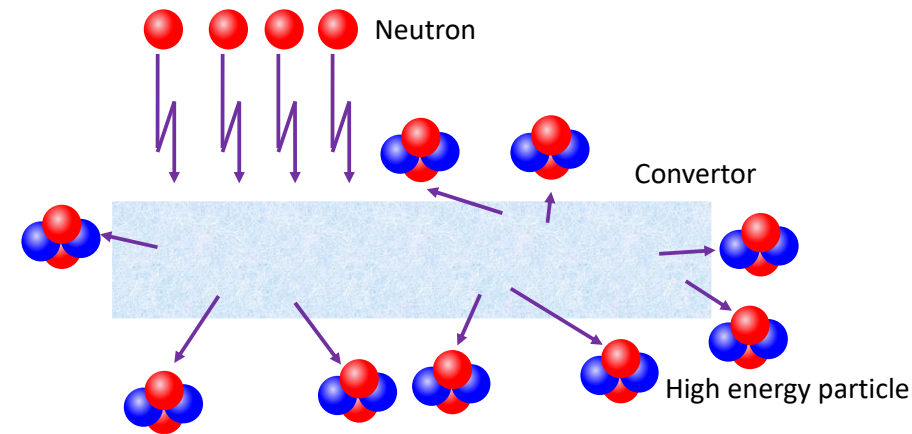
放射線挙動解析ソフト(PHITS)により、各放射線がInGaP太陽電池中に付与する線量率を計算してプロットした。

太陽電池による中性子検出の方法

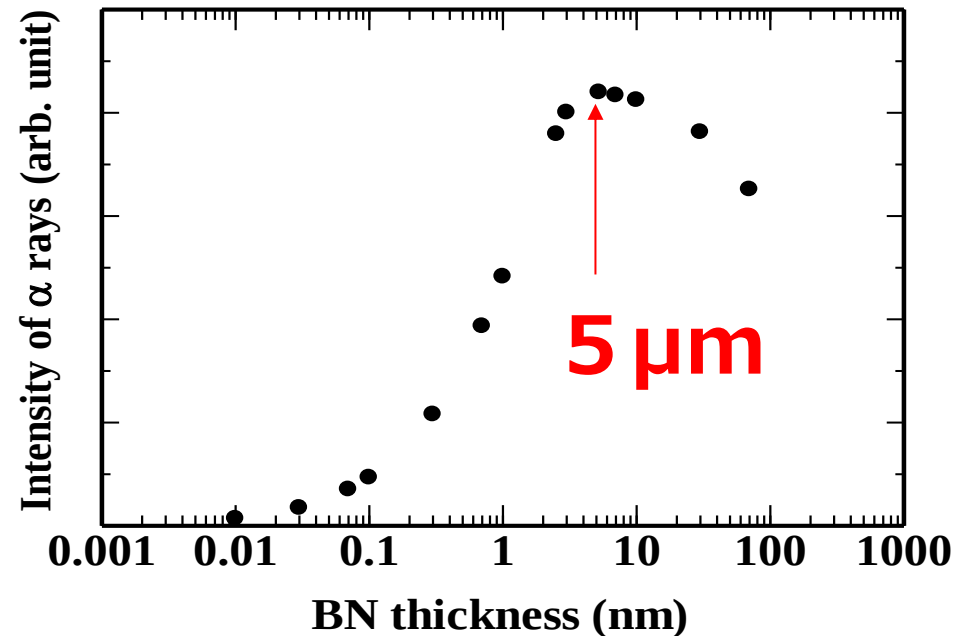
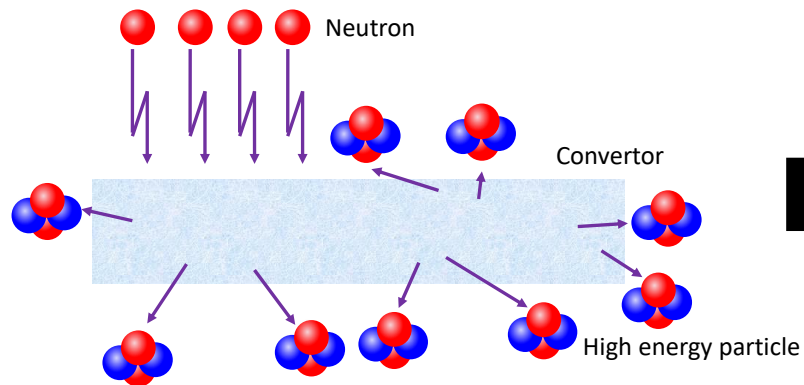
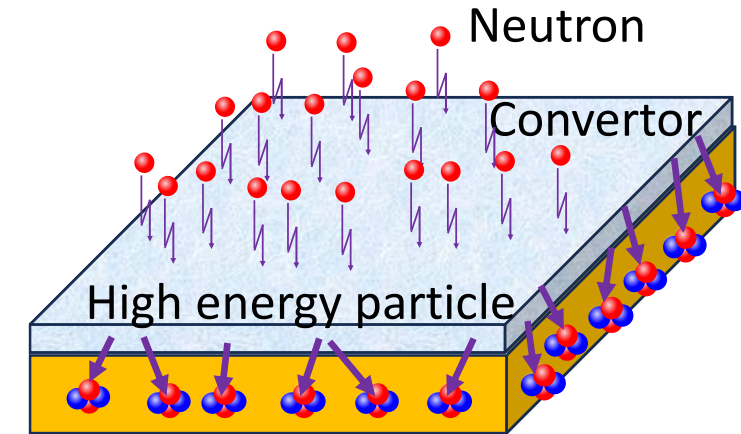
1. 中性子捕獲反応



2. 荷電粒子の放出



3. 荷電粒子の検出



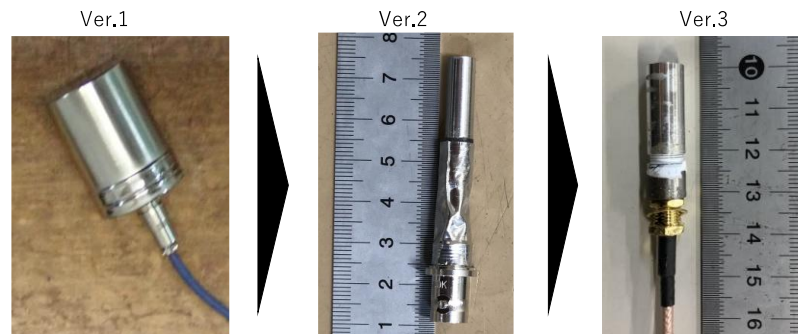
変換膜の種類

- B-10
- B(nature)
- BN
- Li-6F
- LiF
- Gd_2O_3

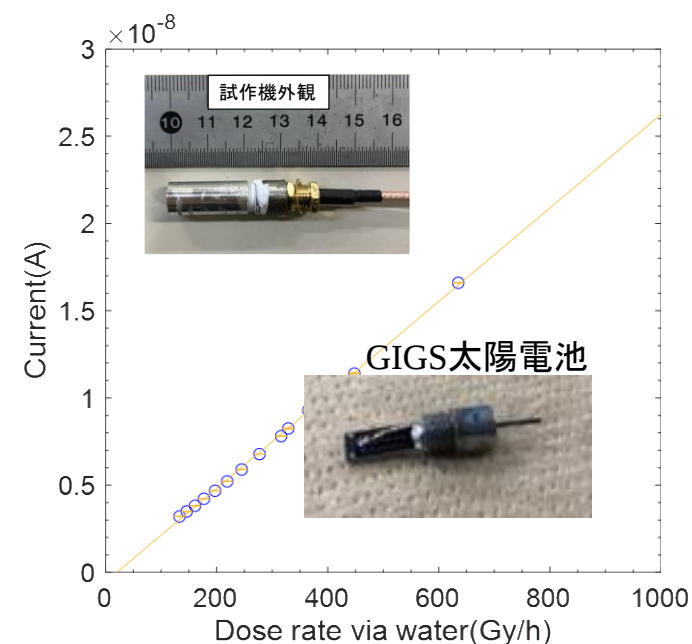
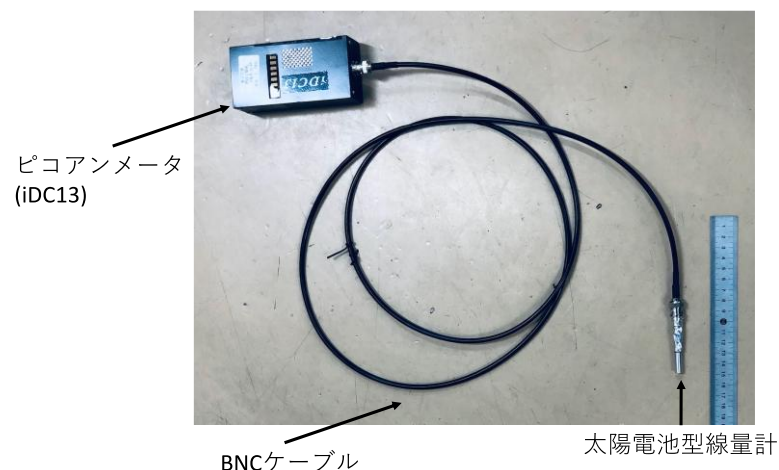
目次

1. 太陽電池素子の放射線検出特性
- 2. 廃炉応用に向けたCIGS太陽電池型検出素子**
3. 医療応用に向けたペロブスカイト太陽電池型検出素子

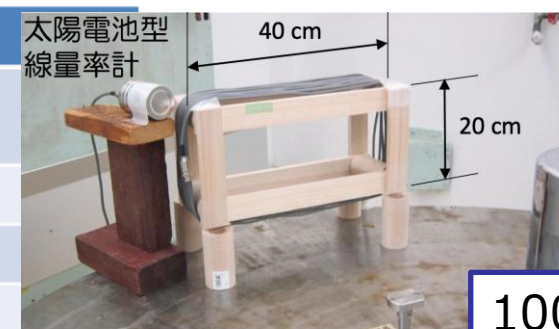
CIGS太陽電池型検出器



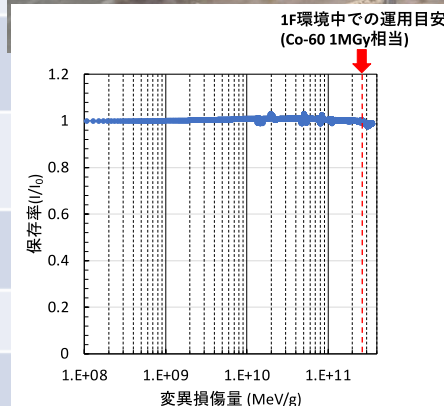
Version	シールド	小型	防水	気密
No.1	○	△	×	×
No.2	○	○	△	○
No.3	○	◎	○	○



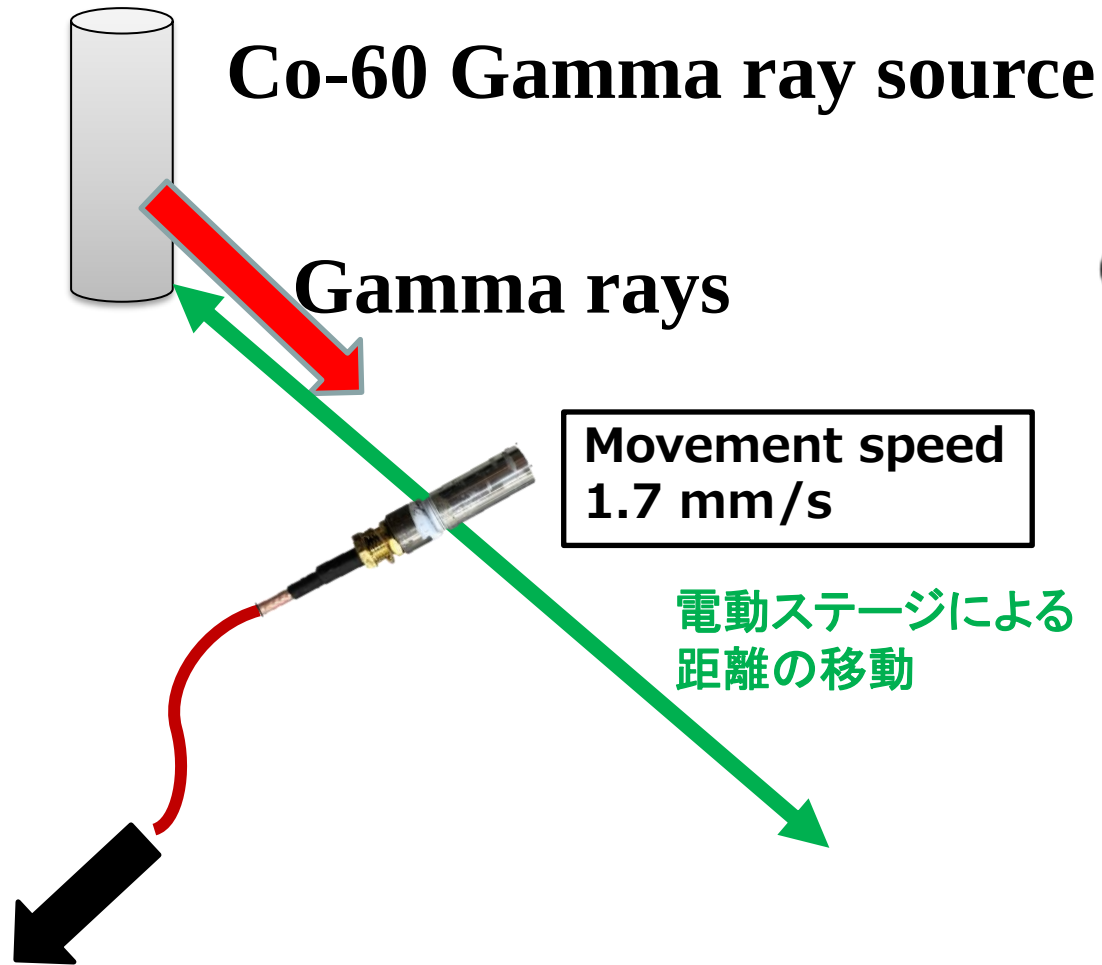
要求事項		内容
環境条件への対応	○ 耐放射線性	交換頻度を1回／1年 程度に抑えられるか (1MGy以上 (= 100 Gy/h × 365 d/y × 24 h))
	○ 耐水・圧性	耐水・圧性を備えているか(3号現状水位6.5mを仮定)
	○ 耐湿性	耐湿性を備えているか(湿度100%を仮定)
遠隔操作での取り扱い	○ アームとの接続	ロボットアーム等と接続が可能か
	○ 可搬重量	ロボットアーム等での持ち運びが可能か (現在検討中のロボットアーム; 200kg未満)
	○ 可搬サイズ	ロボットアーム等での持ち運びが可能か (現在検討中のロボットアーム; 径70cm, 長さ100cm未満)
	○ ユニットの除染	除染してアウターに持ち出せるか
	○ 検出器の校正	検出器の校正が可能か
	○ 修理・部品交換	部品の修理や交換が可能か (人による作業が必要)



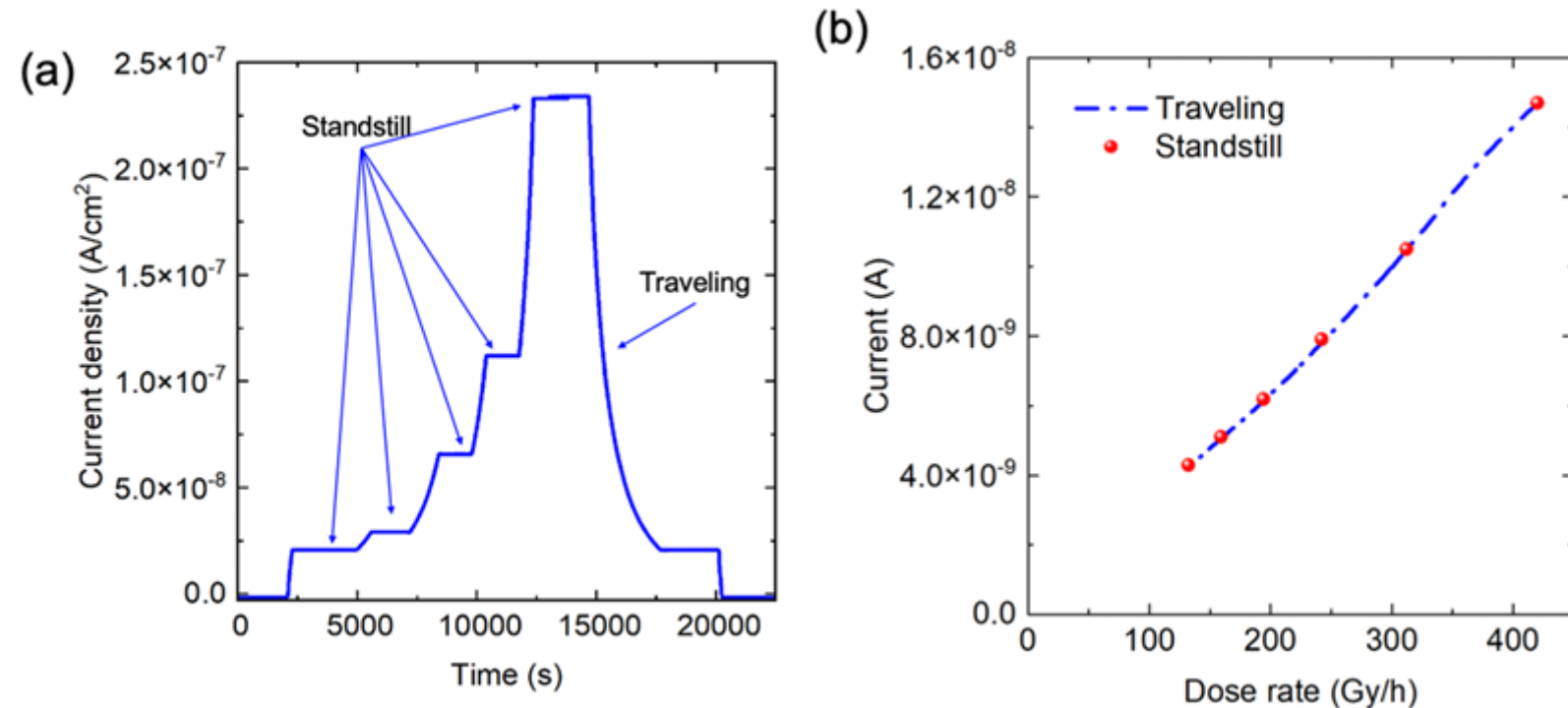
100mケーブルでの信号輸送



稼働ステージによるガンマ線照射試験



The cable was connected to an ammeter in the measurement room.

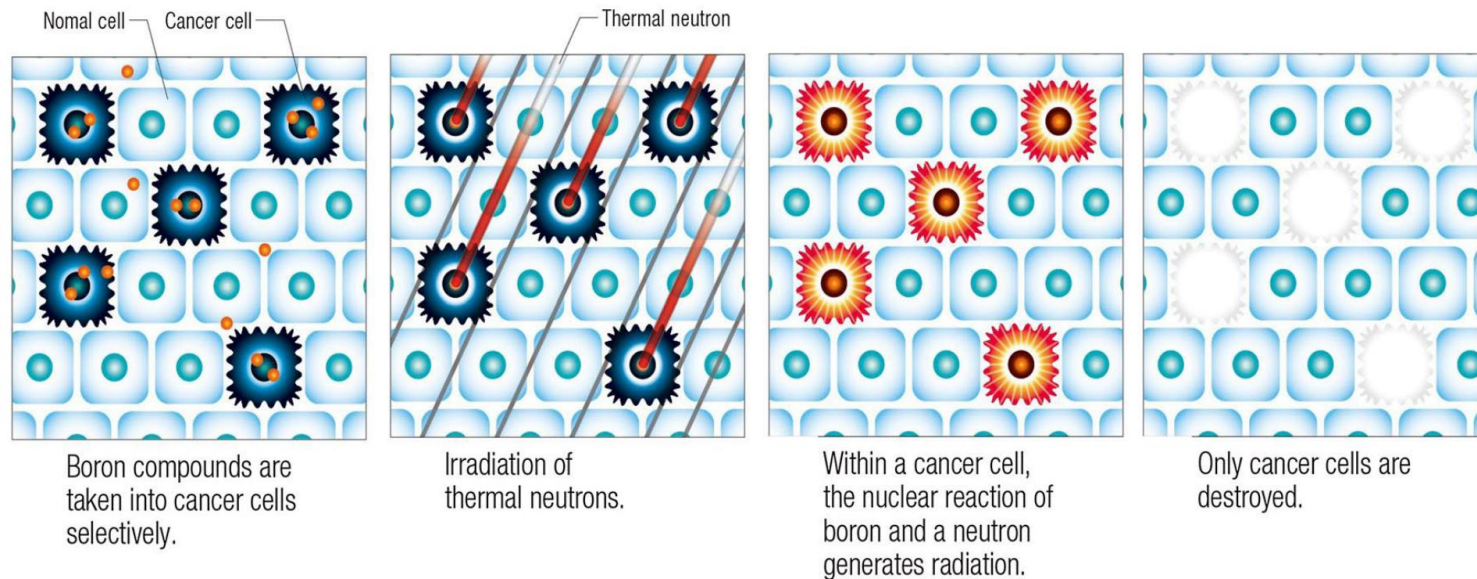
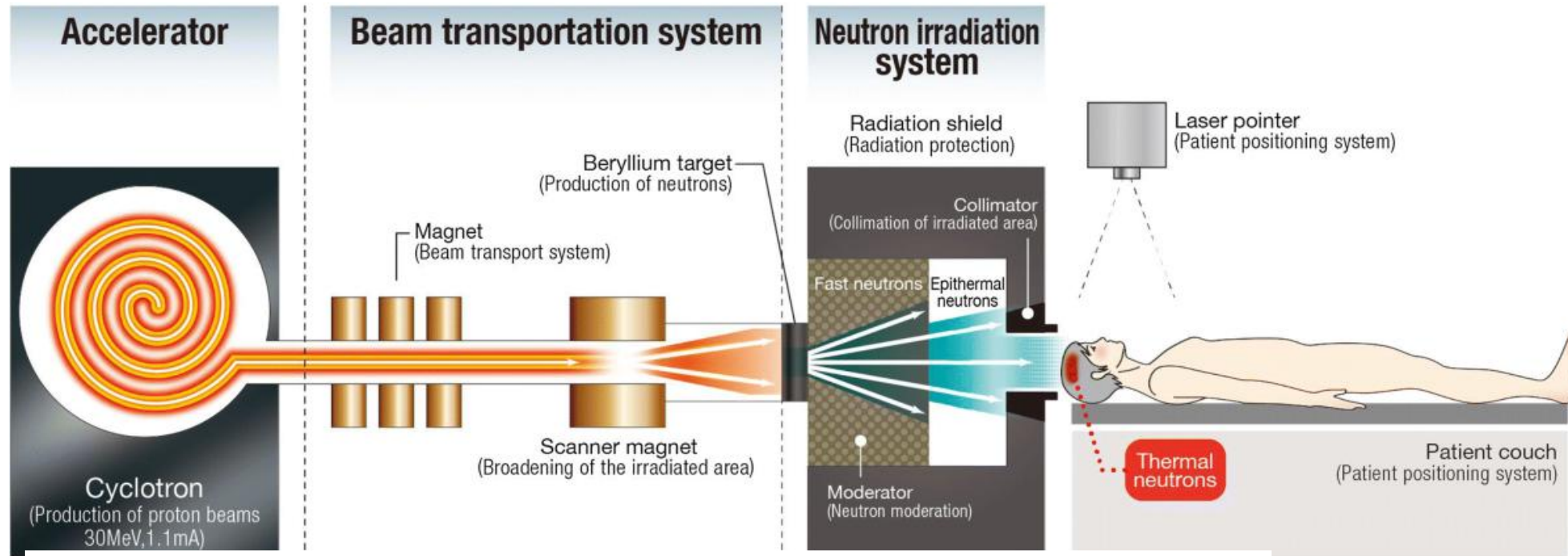


放射線の信号強度と電流強度は、ステージの移動に伴って変化し、移動環境での測定が効果的であることを示している。

目次

1. 太陽電池素子の放射線検出特性
2. 廃炉応用に向けたCIGS太陽電池型検出素子
- 3. 医療応用に向けたペロブスカイト太陽電池型検出素子**

ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) の概要



ホウ素中性子捕獲療法(BNCT)用センサー の実装イメージ

照射室

遮蔽壁

測定室

加速器中性子源

加速器内中性子モニタリングセンサー

中性子

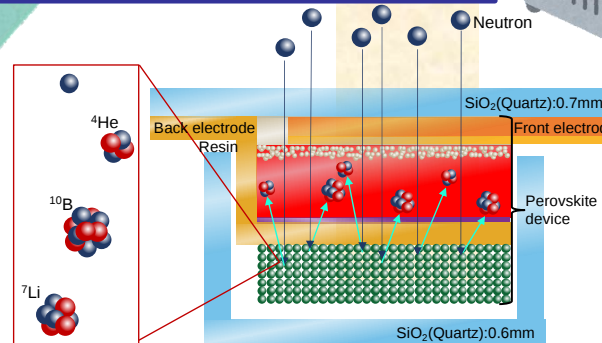
ペロブスカイト太陽電池型
中性子検出素子

人体設置型中性子モニタリングセンサー

通信ケーブル

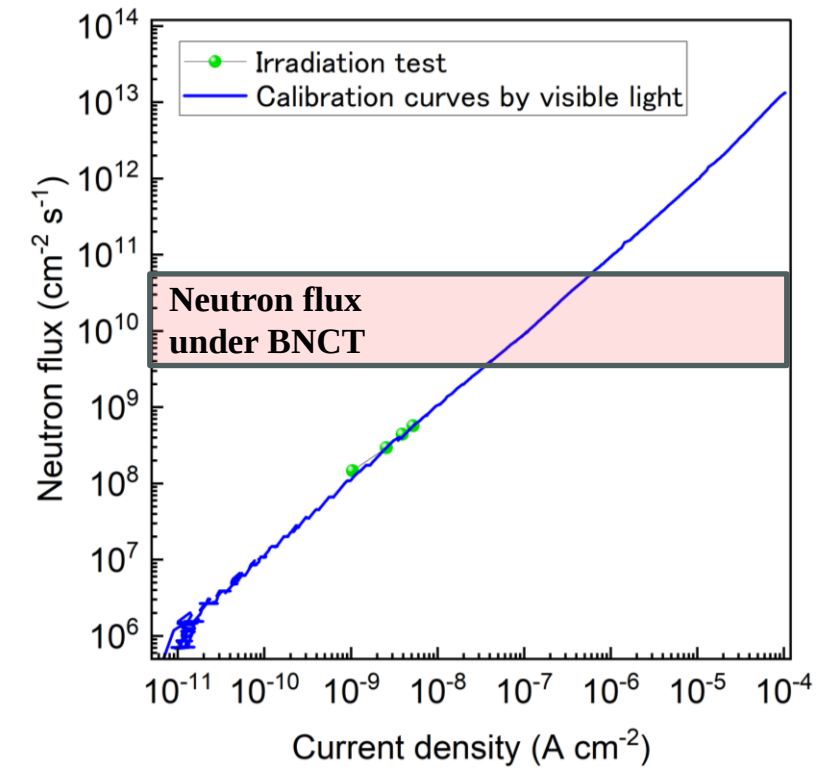
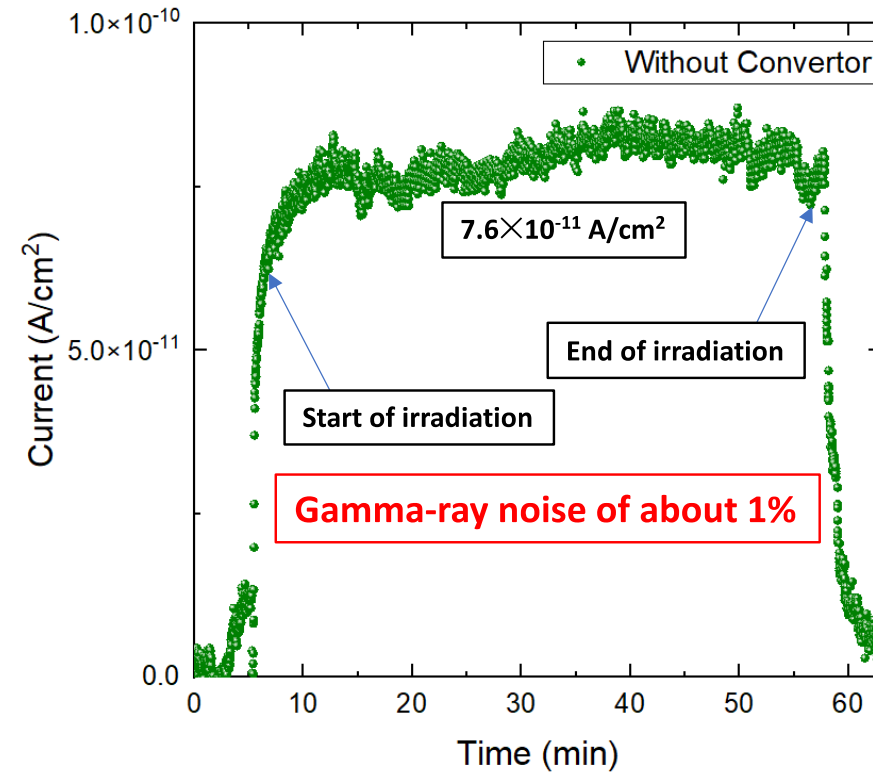
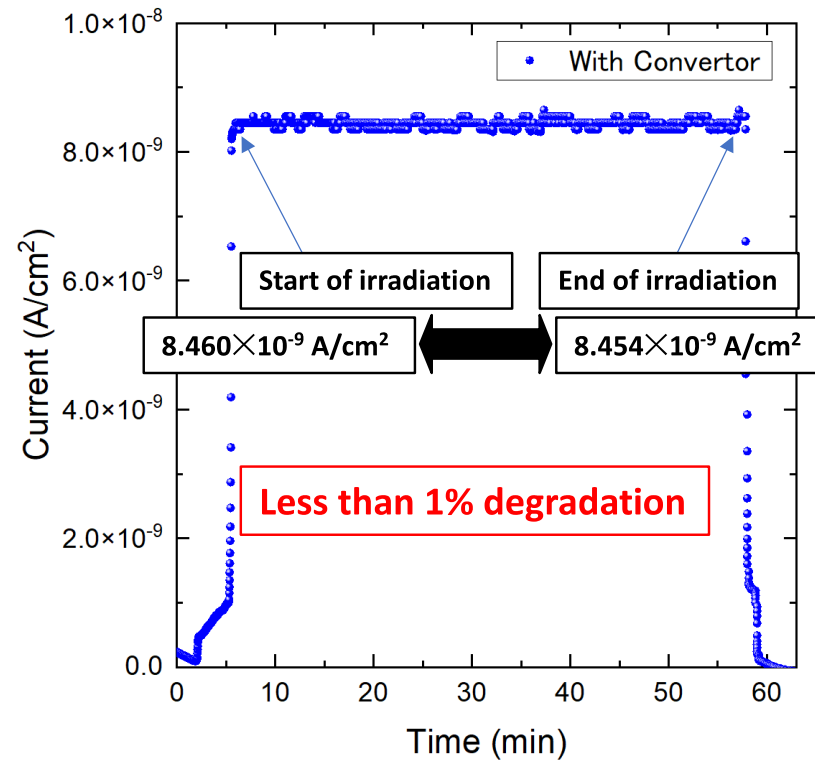
制御・解析用PC

信号解析装置



1. 加速器中性子源を用いたBNCTの中性子照射時の線量管理センサーが治療時に必要である。
2. フルエンス $\sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ の熱外・熱中性子を、5%以内の精度で測定する必要がある。
3. センサーには耐放射線性、ガンマ線ノイズ、感度直線性、人体設置安定性などの要求が求められており、その開発が進められている。

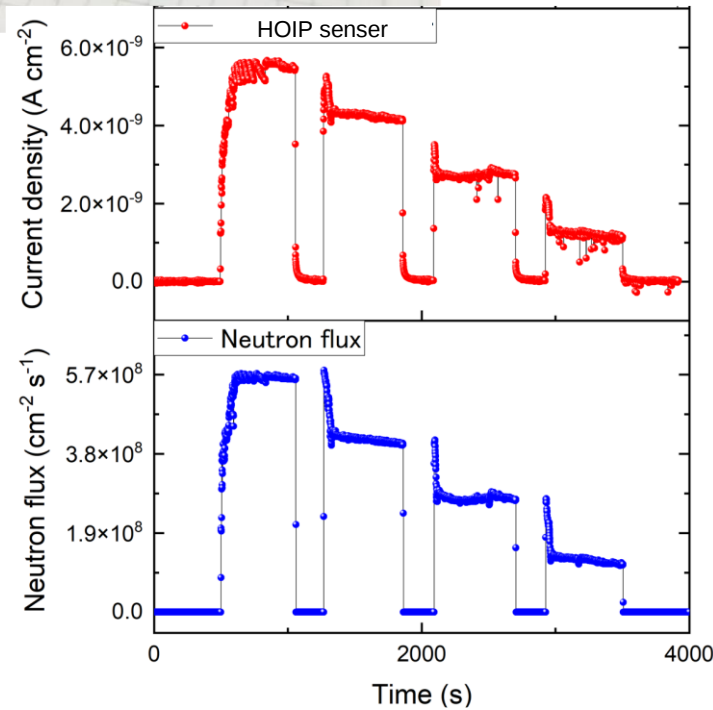
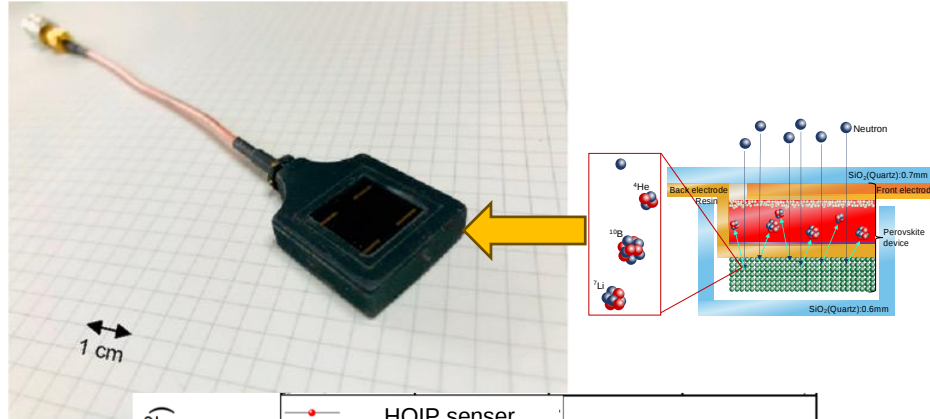
BNCT条件下でのペロブスカイト型検出器の特性



1. 放射線耐性 : 1%以下の劣化
2. ガンマ線ノイズ : 1%以下のノイズ
3. Sensitivity linearity : 謄号飽和なし

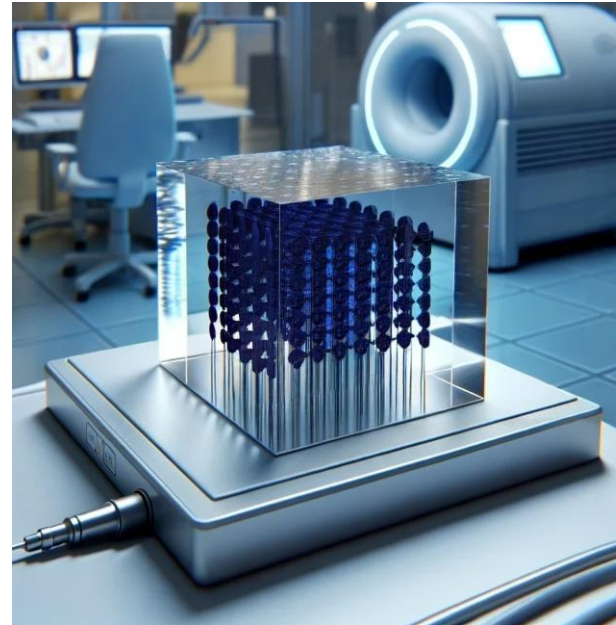
【解決方法】研究シーズと本研究の目的

ペロブスカイト 中性子検出センサー外観



計測ニーズ
A. 加速器中性子源の安定性

固体ファントムを利用した3次元中性子計測システム



ペロブスカイトセンサーを利用した
3次元中性子計測体系を実現する。

計測ニーズ
B. 人体中の中性子3次元分布

- ペロブスカイト太陽電池構造をベースとして、ホウ素粉末を荷電粒子変換膜として塗布をした中性子検出素子に対する中性子検出特性について明らかにした。
- ホウ素中性子捕獲反応により放出されるα線およびリチウム核の信号をペロブスカイト素子は捉えていることが明らかになった。
- BNCT中性子照射施設による試験の結果、BNCT治療時の中性子計測に成功し、センサーとして使用できることがわかった。

従来技術とその問題点

電離箱による計測法等が、既に実用化されているが、

- ・高電圧印加に起因する放電や感電リスクが発生
- ・複数素子駆動に計測機器が必要でありコストが高い

等の問題があり、線量マッピングや3次元計測などで
広く利用されるまでには至っていない。

新技術の特徴・従来技術との比較

- 従来技術の問題点であった、高電圧印加によるリスクやシステム制限を改良することに成功した。
- 従来は高電圧印加による放電リスクやシステム複雑化の点で短時間かつ単素子の使用に限られていたが、電圧印加なしで複数素子同時駆動まで性能が向上できたため、医療や廃炉現場などのシビアな環境に適応することが可能となった。
- 本技術の適用により、計測システムが簡略化できるため、導入コストが1/2～1/3程度まで削減されることが期待される。

想定される用途

- 本技術の特徴を生かすためには、太陽電池の製造ラインの一部に適用することで、量産によるコスト低下のメリットが大きいと考えられる。
- 上記以外に、太陽電池の評価手法を用いた素子の品質保証の効果も得られることも期待される。
- 達成された放射線の感度特性に着目すると、がん治療用センサーや廃炉・宇宙分野のロボット開発といった分野や用途に展開することも可能と思われる。

実用化に向けた課題

- 現在、太陽電池型センサー素子について量産化が可能なところまで開発済み。しかし、電流計測から放射線情報へ解析するソフトウェアの開発が未解決である。
- 今後、制御ソフトウェアについて開発体制を構築し、一般ユーザが使用可能なものに適用していく場合の条件設定を行っていく。
- 実用化に向けて、放射線の感度を光で計測する新技術の精度を標準的な工業規格まで向上できるよう技術を確立する必要もあり。

社会実装への道筋

時期	取り組む課題や明らかにしたい原理等	社会実装へ取り組みについて記載
基礎研究	・医療、廃炉、宇宙利用における基礎的なデータ収集が完了	
現在	・素子量産化のためのサプライチェーン体制が実現	・サンプル提供が実現
1年後	・素子のみの試験的な販売の進展 ・医療現場に関する実証試験が実現	・素子製造販売ベンチャー設立 ・試験販売が実現
3年後	・3次元計測システムの主要特性の評価 ・量産型計測単素子システムを実現	・評価基礎データの提供 ・簡易な計測システムの試験販売が実現
5年後	・医療用システムの試験的な製造販売の実現 ・廃炉、宇宙環境における線量計測サービスの提供	・医療機器製造販売ベンチャーの設立 ・医療機関へのサービスの実現 ・線量計測サービスベンチャーの設立

企業への期待

- 未解決のシステム開発については、業務委託によるシステムエンジニアとの連携により克服できると考えている。
- 医療機器の薬事承認の技術・経験を持つ、企業との共同研究を希望。
- 宇宙関係のシステムを開発中の企業、廃炉分野への展開を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる。

企業への貢献、PRポイント

- 本技術は簡易かつ低コストで導入が可能なため、製造販売だけでなく放射線の線量保証サービスまで展開することでより企業に貢献できると考えている。
- 本技術の導入にあたり必要な追加実験を行うことで科学的な裏付けを行うことが可能。
- 本格導入にあたっての技術指導等

本技術に関する知的財産権

- 【1】
- 発明の名称 : 電流発生装置、入射量計測装置、および電流発生装置の製造方法
 - 出願番号 : 2024-152393
 - 出願人 : 理化学研究所
 - 発明者 : 奥野泰希
- 【2】
- 発明の名称 : 電流発生装置及び入射量計測装置
 - 出願番号 : 2024-198749
 - 出願人 : 理化学研究所
 - 発明者 : 奥野泰希、大竹淑恵

お問合せ先

株式会社理研イノベーション
新技術説明会事務局

Email: license-contact@innovation-riken.jp