資料

診断用 X 線領域における太陽電池の応答とその応用

廣田淳一・樽澤孝悦・工藤幸清

弘前大学(大学院)保健学研究科医療生命科学領域放射線生命科学分野

論文受付
2009年12月28日論文受理
2010年8月6日

Code No. 814

緒言

太陽光発電は、近年の省資源、CO₂削減による地球温暖化対策の担い手として脚光を浴び、急速に発展してきている^{1,2)}。発電を行う際の最も重要な技術はその素子であり、結晶系(単結晶、多結晶)、非晶質系(アモルファス)や色素系の素子(以後、セルまたは発電セル)が用いられる。特に、Si(ケイ素)を用いたセルは太陽光に対する変換効率がほぼ理論限界値に近づいてきており、大変安価にまた手軽に高品位のセルが入手できる現況にある。太陽光発電に用いられる太陽光の波長域は400~800 nmの可視光域で、エネルギーに換算すると1~2 eV程度となる、これをpn接合型半導体の順バイアス時の光起電力効果により光エネルギーを直接電力に変換する方式が主流と

なっている³⁾。しかし、その波長ごとの感度を求めると、結晶系で700~800 nm、アモルファスで500~600 nm近傍にピークを有し、その前後で急激に減少する特性を有する。このことから従来は、10 nm以下の短波長域での感度が必要なX線等の電離放射線への応用はできないと思われていた。

一方、放射線計測分野での半導体検出器は、pin接合に逆バイアス電圧を印加することで、i層を放射線の飛程に合わせて伸張り光電効果により電離された電子を集め電荷有感型処理により電離放射線を測定する。このようにセル自体は計測分野で用いられるものと同等であると考えられる。

本研究の目的は、広く一般に市販される太陽電池のX線領域での感度を求めることで、新しいタイプの

The Property and Applications of the Photovoltaic Solar Panel in the Region of Diagnostic X-ray

Jun'ichi Hirota, Kohetsu Tarusawa, and Kohsei Kudo

Department of Radiological Life Sciences, Division of Medical Life Sciences, Hirosaki University Graduate School of Health Sciences

Received December 28, 2009; Revision accepted August 6, 2010; Code No. 814

Summary

In this study, the sensitivity in the diagnostic X-ray region of the single crystalline Si photovoltaic solar panel, which is expected to grow further, was measured by using an X-ray tube. The output voltage of the solar panel was clearly proportional to the tube voltage and a good time response in the irradiation time setting of the tube was measured. The factor which converts measured voltage to irradiation dose was extracted experimentally using a correction filter to investigate the ability of the solar panel as a dose monitor. The obtained conversion factors were $N_S=13\pm1[\mu V/\mu Sv/s]$ for the serial and $N_P=58\pm2[\mu V/\mu Sv/s]$ for the parallel connected solar panels, both with the Al 1 mm+Cu 0.1 mm correction filter, respectively. Therefore, a good dose dependence of the conversion factor was confirmed by varying the distance between the X-ray tube and the solar panel with that filter. In conclusion, a simple extension of our results pointed out the potential of a new concept of measurements using, for example, the photovoltaic solar panel, the direct dose measurement from X-ray tube and real time estimation of the exposed dose in IVR.

Key words: photovoltaics, sensitivity, X-ray, single-crystalline silicon

別刷資料請求先: 〒036-8564 青森県弘前市本町 66-1

弘前大学(大学院)保健学研究科医療生命科学領域放射線生命科学分野 廣田淳一 宛

Table 1 The performance of the 2 types of photovoltaic solar panel under AM1.5

	Serial Connection (S panel)	Parallel Connection (P panel)
Open terminal Voltage (V)	6	0.5
Short Circuit Current (mA)	60	300
Dimension (mm ³) (sensitive area; mm ²)	57×57×3 (51×51)	33×63×3 (22×52)

Fig. 1 Schematic layout of experiments and size of irradiation field.

(a) Schematic Layout

(b) Relationship between Irradiation Field Size and Solar Panel Size

放射線モニタあるいは放射線検出器としての可能性について議論することにある。

1. 実験方法

発電セルまたは太陽電池には、単結晶 Si、多結晶 Si およびアモルファス Si がある。このうち、空乏層が整流特性を示しその厚みが最も厚い単結晶 Si セルを用いることとした。また、市販される単結晶 Si 太陽電池には、セルを直列に接続し高電圧化した直列モジュール(以下、S パネル)および並列に接続し高電流化した並列モジュール(以下、P パネル)が存在することから両者を用意した。用いた太陽電池の太陽光下 AM1.5⁴⁾での性能を Table 1 に示す。ここで、AM1.5 とは平均的な晴れた日に地球上に届く光量を規格化したもので太陽電池の性能を評価する場合の基準太陽光条件(1000 W/m²)を与える。単結晶 Si 1 セルの pn 接合時に予想される光起電力、すなわち開放端電圧は Si の仕事関数より 0.5 V 程度になることから、S パネルはおよそ 12 回路を直列に接続した構造と推測した。今回用いた S パネルは、25 cm² であることから、1 回路あたり 2 cm² となり、短絡電流はおよそ 30 mA/cm² と一般的な単結晶 Si の短絡電流～35 mA/cm² よりわずかに小さいが同等な値を有している。この値および P パネルの面積 11 cm²、開放端電圧 0.5 V より、P パネルでは 5～6 回路を内部で並列に接続した構造と考えられる。

1-1 出力電圧

実験は、これらの太陽電池を可視光に感じないように遮光膜で包み、Fig. 1a に示すような配置および Fig. 1b に示す照射野を用いて X 線管より X 線を照射し、電池出力を負荷抵抗 1 k Ω の両端に接続したペン書きオシロスコープ National VP-6424A で測定した。ただし、本実験では付加フィルタなし、焦点-太陽電池間距離は、0.3 m で行っている。ここで、遮光膜には X 線を吸収しない素材として KODAK X-OMAT TL2 フィルムの個別梱包用外装を使用した。X 線発生装置には、島津製作所製 3 相 12 パルス方式一般撮影装置 HD150B-30 を用いた。一般撮影装置 HD150B-30 には、型番 1/2 P33D、総ろ過 2.5 mmAl[固有ろ過: 1.5 mmAl+ 絞り(R-20): 1.0 mmAl]の X 線管が装着されている。Table 2 に使用した X 線照射条件を示す。

1-2 線量当量率変換係数

本研究では、太陽電池の応用として最も有望と考えられる放射線モニタとしての可能性を探るために、焦点-検出器間距離を 4 m とした同様な配置で検出器にアロカ製 Sv メータ(SvMETER Aloka DRM-301)を用い、各管電圧での 1 cm 線量当量率(μ Sv/s)をあらかじめ求めておいた。次に、以下に示す 5 種類の付加フィルタを太陽電池前面に設置し、Fig. 1b の配置にて実験を行い、各太陽電池の線量当量率変換係数(以後、変換係数)を求めた。

Table 2 Irradiation parameters for the X-ray tube

Tube Voltage	40 kV–140 kV by 10 kV step
Tube Current	100 mA fixed
Irradiation Time	2 s fixed and 1 s fixed
Irradiation Field	120×120 mm ²
Distance from Tube to the solar panel	0.3 m and 1.0 m

Fig. 2 Output voltage wave form obtained from S panel with no filter.
 (a) in the case of tube voltage 40 kV, irradiation time 2 s.
 (b) in the case of tube voltage 100 kV, irradiation time 2 s.

- (1) アクリル板 10 mm
- (2) Al 板 3 mm
- (3) Cu 板 0.1 mm
- (4) Cu 板 0.2 mm
- (5) Al 板 1 mm+Cu 板 0.1 mm

照射条件は、(1)、(2)、(5)のフィルタについては、管電圧 40～140 kV を 10 kV 間隔で、管電流および照射時間は、100 mA、1 s 同一で行った。(3)、(4)のフィルタについては、最小および最大管電圧の 2 点についてのみ行った。用いた照射野は太陽電池、S パネル：57×57 mm²、P パネル：33×63 mm²、およびフィルタ：80×80 mm²、を十分覆う大きさとして 120×120 mm² を用いた。

1-3 線量率依存性

最後に、線量率依存性を確認するために焦点－太陽電池間距離を変化させて同様の実験を行った。このとき、太陽電池出力は上記と同様に負荷抵抗 1 k Ω の両端電圧と負荷抵抗 ∞ 、すなわち開放端電圧の 2 種類を用いた。一般に、開放端電圧は光量増加により急速に一定値に収束するため、一定以上の光量では線量率評価に用いることができないが、極少光量領域の場合は光量に比例した出力電圧が期待できることからその測定を行うこととした。

2. 実験結果

2-1 出力電圧

Fig. 2 に得られたフィルタなし S パネルの出力電圧波形の一例を、Fig. 3 にフィルタ(5)を付加した P パネルの出力電圧波形の一例を示す。照射条件は、管電圧 40、100 kV、管電流 100 mA、照射時間 2 s(S パネル)、1 s(P パネル)である。Fig. 2、3 より、照射時間が指示値の 2 s(S パネル)、1 s(P パネル)であること、高管電圧を使用する場合、0.3～0.5 s 間で、いったん出力電圧がオーバシュートしその後一定電圧に安定する様子、すなわち X 線出力の settling time を観測することができる。Fig. 4 に、S パネル、P パネルの出力電圧と管電圧との関係を示す。S、P パネル出力と管電圧の関係を得るために、両者の相関係数 r を求めた。その結果、S、P パネルとも $r=+0.99$ となり、出力電圧は管電圧に比例することが分かる。したがって、これらの太陽電池は X 線領域においても光量センサーとして使用可能であると推測できる。

2-2 線量当量率変換係数

変換係数は、得られた太陽電池の出力電圧とあらかじめ求めた各管電圧での線量当量率との比として求めた。本実験では、線量率モニタとして周辺線量当量率 $\dot{H}^*(d)$ を測定するシーベルトメータ($d=1$ cm)を用い、その指示値を線量当量率とした。求めた変換

Fig. 3 Output voltage wave form obtained from P panel with Al 1 mm+Cu 0.1 mm filter.

(a) in the case of tube voltage 40 kV, irradiation time 1 s.
(b) in the case of tube voltage 100 kV, irradiation time 1 s.

係数が管電圧によらず一定値を示す場合、太陽電池が比較に用いた線量率モニタと同一と考えられる。したがって、太陽電池が線量モニタとして使用可能であることを示す。

S パネルを用いた結果を、Fig. 5 に示す。フィルタを用いない場合(記号◆)、変換係数は指数関数的、または双曲関数的に減少する傾向が得られた。次に、アクリル板 10 mm(記号■)を付加すると、50 kV 以下の部分の低下を引き起こしているがほぼフィルタを用いない場合と同様で、50 kV 以下の低下が不十分であることが分かる。

この結果をもとに、次に金属フィルタによる効果を調べた。Al 板 3 mm(記号▲)では 50 kV より高い部分で管電圧依存性をほとんど打ち消すことができているが 50 kV 以下の値を含めると一定とは言い難い。そこで、最小管電圧および最大管電圧の 2 点を用いて線形近似を行い、その傾向から最適フィルタを求めることとした。Al 板 3 mm での勾配は $-80 \mu\text{V}/\mu\text{Sv/s}$ と負の勾配であった。Al 板 3 mm と同様な効果が期待できる Cu 板 0.1 mm(記号×)では、その勾配は $-126 \mu\text{V}/\mu\text{Sv/s}$ と同様に負となり Al 板 3 mm より効果は小さいがほぼ同等な値を得た。次に、低下の大きいことが予想される Cu 板 0.2 mm(記号*)で行った。その結果、変換係数の勾配は、 $+55 \mu\text{V}/\mu\text{Sv/s}$ と正の勾配になり予想通り低下が大きく、上記結果と逆の傾向になることを確認した。したがって、最適フィルタは Al 板 3 mm または Cu 板 0.1 mm と Cu 板 0.2 mm の間に存在する。よって、最適フィルタとして Al 板 1 mm+Cu 板 0.1 mm(記号●)を選んだ。その結果、S パネル変換係数 N_s は、

$$N_s = 13 \pm 1 \left[\frac{\mu\text{V}}{\mu\text{Sv/sec}} \right]$$

Fig. 4 Tube voltage dependence.
Circle points for S panel, square points for P panel, respectively.

と、測定範囲において誤差 8% で管電圧依存性を打ち消す結果を得た。

次に、P パネルに S パネルで決定したフィルタ(5)を付加して同じ条件で実験を行った。その結果得られた変換係数を Fig. 6 に■記号で示す。図中(◆)は、比較のための S パネルの結果である。これより、P パネル変換係数 N_p は、

$$N_p = 58 \pm 2 \left[\frac{\mu\text{V}}{\mu\text{Sv/sec}} \right]$$

と、誤差 4% で一定とすることができた。さらに、P パネル変換係数は、S パネルの変換係数より 4.5 倍大きな値を有することも分かる。

Fig. 5 The conversion factors for the S panel with various filters.

Fig. 6 The conversion factor for P panel with Al 1 mm+Cu 0.1 mm filter. S panel (◆) is for comparison.

2-3 線量率依存性

Fig. 7 に焦点-太陽電池間距離と変換係数の関係を示す。図中◆印は、焦点-太陽電池間距離 $l=0.3\text{ m}$ 、■印が、 $l=1.0\text{ m}$ の結果である。それぞれの変換係数は、

$$l=0.3\text{ m} \quad N_p=58\pm 2$$

$$l=1.0\text{ m} \quad N_p=5.7\pm 0.4$$

となる。

距離の逆二乗則による入射 X 線の減少量 1/10 と変換係数比率 0.1 が一致することから太陽電池出力の線量率依存性を確認した。一般に X 線出力は管電流に比例することから、この結果は間接的に管電流

依存性と等価であると考えられる。さらに、図中▲は、P パネル $l=1.0\text{ m}$ での開放端電圧の結果を示す。負荷抵抗 $1\text{ k}\Omega$ 時に比べて、約 7 倍の出力電圧を得ることができ、変換係数も、 $N_p=40\pm 2$ と $l=0.3\text{ m}$ 時の 69% であった。

3. 考 察

時間応答性について、Fig. 2 および Fig. 3 に照射 ON と OFF 時刻を矢印で示す。太陽電池は直流時には Fig. 8 に示す等価回路(実線部)で表されるが交流時には電流源と並列な pn 接合に対応した等価容量 C (図中、点線にて表示)を考慮する必要がある。した

Fig. 7 The linearity on the conversion factor for the P panel with Al 1 mm+Cu 0.1 mm filter.

がって、パルス入力に対して有限の時定数 $\tau = CR_s$ で応答する。これより照射時間としてパルスが立ち上がる直前(照射 ON)から立ち下がる直前(照射 OFF)までを取っている。パルス立下り波形より時定数の大きさを推定すると、0.06 s となる。これより、太陽電池はこの時定数より長いパルスの観測に適するといえる。また、高電圧パルスのマイクロ構造はこの時定数で平滑され観測されないものと考えられる。

また、太陽電池を Fig. 8 実線部の等価回路²⁾に置きなおすと変換係数の大きさの相違を説明することができる。太陽電池は、理想電流源 I_p 、逆流防止ダイオード D_s 、内部並列抵抗 R_{sh} および内部直列抵抗 R_s で表すことができる。理想的には $R_{sh} = \infty$ 、 $R_s = 0$ であるが、実際は、 $R_{sh} \gg R_s$ 、 $R_s = R_s$ (有限)と考えることができる。無負荷の場合、発電された電流は内部並列抵抗 R_{sh} で消費され、最終的には熱に変換される。負荷を接続した場合、内部直列抵抗 R_s と負荷抵抗により流れる電流が決定される。したがって、S パネルの場合、内部直列抵抗が直列接続となるため、接続数分の高い内部抵抗を有する状態に、P パネルの場合、並列接続となるため、1/ 接続数分の低い内部抵抗状態にある。これに負荷抵抗を接続するため、パネルによって最適負荷抵抗に違いが生じることとなる。今回は、負荷抵抗に 1 k Ω を使用しており、この値が並列接続時の内部抵抗により近い状態であったと推測される。これより、S パネルにおいては、インピーダンス不整合の度合いが大きく P パネルより出力電圧

Fig. 8 Equivalent circuit for photovoltaic solar panel. In the case of n serial connection, output impedance is equal to nR_s and in the case of n parallel connection, output impedance is equal to R_s/n .

が低い結果になったと考えられる。

これらの結果を透視条件、管電圧 100 kV、管電流 1~2 mA、照射時間 >1 s に拡張し適用する。予想される Al 1 mm+Cu 0.1 mm フィルタ付 P パネルの出力電圧 V は、焦点-太陽電池間距離 1 m で

$$V = 2 \sim 4 \mu V$$

となる。

したがって、透視線量においても十分測定可能な大きさであることが分かる。さらに、線量率依存性より S パネル、P パネルともその示す出力電圧は、太陽光下に比較すると入射光量がほぼ 0 近傍、すなわち極少光量領域での出力であると考えられるため、出力

電圧の大きな開放端電圧を用いれば、より少ない X 線出力での測定が可能になると考えられる。

以上の結果から、太陽電池を用いた新たな計測技術、たとえば、

- 1) X 線管の線量、時間応答の直接計測
- 2) X 線照射下での IVR(interventional radiology) 手技時の被ばく線量のリアルタイム計測

等への応用の可能性を示唆することができたと考えられる。一般に放射線管理においては線量当量 S_v が、事故等の確定的影響を調べる場合には吸収線量 Gy が、それぞれ用いられる。このため上記 1)、2)への厳密な応用を行うには、今回用いた周辺線量当量率($d=1\text{ cm}$)との校正に加え、吸収線量率や各種線量当量率等の定義に沿った値付け、すなわち相応の校正が必要となることに注意しなくてはならない。さらに、 S_v メータの低エネルギー領域における感度低下等の応答特性より、低エネルギー領域の X 線量を過少に評価する可能性も忘れてはならない。

最後に、診断領域 X 線管では一般にその X 線出力は、管電圧の 2~5 乗に比例して増加するといわれているが、本実験で得られた太陽電池出力は相関係数

解析より管電圧の 1 乗に比例する結果となった。この原因として、太陽電池の空乏層厚、X 線吸収のエネルギー依存性等の要因が考えられるが詳細は現在のところ不明である。しかし、従来用いられたことのない順バイアス pn 接合で電離放射線の測定が可能であることを示したことは意義深いと考える。

4. 結 論

最近発展の著しい太陽電池、単結晶 Si セルの X 線領域での感度を一般撮影用 X 線管を用いて測定した。その結果、得られた出力電圧は X 線管の管電圧に比例し、X 線管の照射時間をよく再現した。さらに、Al 1 mm+Cu 0.1 mm の付加フィルタを用いることで、直列型 $N_s=13\pm 1[\mu V/\mu Sv/s]$ および並列型 $N_p=58\pm 2[\mu V/\mu Sv/s]$ と 2 種類の太陽電池について、管電圧依存性を打ち消す線量当量率変換係数を得ることができた。また、X 線管と太陽電池間距離を変化させ、X 線出力を減少させることにより変換係数の線量率依存性を確認した。これらより、X 線管の線量および時間特性の直接計測、IVR 時の被ばく線量のリアルタイム計測等新たな応用の可能性を示すことができたと考えられる。

参考文献

- 1) 太陽光発電技術研究組合. NEDO 成果報告書 太陽光発電評価の調査研究. 報告書 No. 010019372 2001.
- 2) 山田興一, 小宮山宏. 太陽光発電工学 ISBN4-8222-8148-5. 2002.
- 3) 伊藤勝隆. 太陽電池の発電原理とその種類及び特性. 「知恩」2009; 31(45): 125-128.
- 4) JIS. JIS C 8911 二次基準結晶系太陽電池セル 2001.

図表の説明

- Fig. 1 実験配置および照射野の大きさ
- Fig. 2 フィルタなしの S パネルからの出力電圧波形
(a) 管電圧 40 kV, 照射時間 2 s 時
(b) 管電圧 100 kV, 照射時間 2 s 時
- Fig. 3 Al 1 mm+Cu 0.1 mm フィルタを付加した P パネルの出力電圧波形
(a) 管電圧 40 kV, 照射時間 1 s 時
(b) 管電圧 100 kV, 照射時間 1 s 時
- Fig. 4 管電圧依存性
丸印は S パネル, 四角印は, P パネルにそれぞれ対応する。
- Fig. 5 フィルタ付加時の S パネル出力の変換定数
- Fig. 6 Al 1 mm+Cu 0.1 mm フィルタを付加した P パネル出力の変換定数
菱形印は, 比較のための S パネル結果
- Fig. 7 Al 1 mm+Cu 0.1 mm フィルタを付加した P パネルの変換定数の直線性
- Fig. 8 太陽電池の等価回路
 n 個の直列接続の場合, 出力インピーダンスは nR_s と等しく, n 個の並列接続の場合, 出力インピーダンスは, R_s/n に等しくなる。

Table 1 AM1.5 での 2 種類の太陽電池の性能

Table 2 X 線照射条件