

間歇水冷による 1kW 級太陽電池の 発電効率向上に関する研究

Study on the efficiency of the 1kW class solar cell with
intermittent water cooling system

佐藤 義久^{*1}
Yoshihisa SATO

古田 真也^{*2}
Shinya FURUTA

村井 一哉^{*2}
Kazuya MURAI

鈴木 堯志^{*2}
Takashi SUZUKI

森本 浩紀^{*2}
Hiroki MORIMOTO

吉嶺 和哉^{*2}
Kazuya YOSHIMINE

鈴木 将史^{*3}
Masafumi SUZUKI

松川 達哉^{*4}
Tatsuya MATSUKAWA

Abstract

It is necessary to use the renewable energy, such as photovoltaics is required for realization of low carbonized society. The power generation characteristics of a solar cell will decrease 0.5%, if the temperature on the surface of a solar cell rises by 1 degree C. We tried to improve the power generation efficiency of solar cell by carrying out intermittent water cooling of the surface of solar cell with a sprinkler. We succeeded about 13% improvement in the power generation efficiency of the solar cell with the intermittent water cooling method of the 1kW solar cell.

キーワード：太陽光発電，太陽電池，発電効率，間歇水冷

Key Word：photovoltaics, solar cell, power generation efficiency, intermittent water cooling

1. はじめに

低炭素社会の実現に向け、発電時に CO₂ を排出しない太陽光発電、風力発電など再生可能エネルギーの有効活用を図っていく必要がある⁽¹⁾⁽²⁾。太陽電池は表面温度が 1℃ 上昇すると発電効率が 0.5% 程度劣化⁽³⁾するので、天候のよい日は太陽電池の表面温度が上昇してしまい、必ずしも太陽光発電に適しているわけではない。特に日射の強い夏季には太陽電池の表面温度は 50～60℃ にもなり、発電効率が 10% 以上低下する可能性がある。表面温度の上昇を防ぐためには風冷、水冷などで表面を冷却すればよいが、それに要するエネルギーが冷却効果以上となってしまうは意味がない。我々は既報告において太陽電池表面を間歇水冷し、水の気化熱を利用することにより温度上昇を抑えると同時に、それに要する電力と水を最小限に抑える間歇水冷方式を提案し、実験的研究により、その有効性を実証した⁽⁴⁾。本研究の目的は前報で報告した太陽電池モジュール 1 枚 (70W) のときの間歇水冷の有効性⁽⁴⁾を基に、太陽電池モジュールを 6 枚 (420W) および 16 枚 (1,120W) に増加させた実用規模の太陽電池を用いて間歇水冷による発電効率向上実

験を行い、その有効性を実証し、実用化に貢献することである。

2. 研究の背景・目的

2.1 研究の背景

太陽電池の表面温度を下げる方法として、太陽電池を住宅の屋根に設置する場合、太陽電池裏面と屋根の間に空間を設け煙突効果により自然風冷する方法が考案されているが十分な冷却効果は得られていない。また太陽電池裏面を直接冷却する方法として池や湖などに太陽電池を浮かべる方式が既に実施されているが、設置場所が限定され、あまり普及していない。著者らは住宅や工場の屋根などに設置する太陽電池の表面温度の上昇を防ぐ方法として、毛細管現象を利用し表面に水を流す方法や、直接水を掛けて冷却する方法を研究してきた⁽⁴⁾。毛細管現象を利用し太陽電池表面を冷却する方法では十分な冷却効果が得られず、太陽電池表面に直接水を掛けて冷却する方法は大きな冷却効果が得られるが冷却のための電力料金と冷却水料金が冷却による太陽電池の発電効率向上分を上回ってしまい、総合効

^{*1} 大同大学工学部電気電子工学科 教授
(〒457-8530 名古屋市南区滝春町 10-3)
e-mail:satoy@daido-it.ac.jp

^{*2} 大同大学大学院 工学研究科 電気・電子工学専攻

^{*3} シロキ工業株式会社

^{*4} 東京工業大学 原子炉工学研究所
(原稿受付：2009 年 11 月 24 日)

率はかえって下がってしまうという欠点がある．そこで我々は太陽電池表面の冷却に要する電力と水を最小限に抑えつつ発電効率の向上を図る間歇水冷方式を提案し，その有効性を太陽電池モジュール 1 枚の場合に実証した⁽⁴⁾．本研究の目的は太陽電池モジュールを6枚および16枚に増加させ，間歇水冷による発電効率の向上実験を実施し，その有効性を実証し，実用化に貢献することである．

2.2 基礎実験の概要

太陽電池2枚を名古屋市南区の大同大学D棟屋上に真南の方角に傾斜角 35° で設置した(図1 参照)．太陽電池の仕様を表1に，実験装置の構成を図2に示す．水冷間隔 $T=180\text{sec}$ ，水冷時間 $t=5\text{sec}$ の水冷パターンで間歇水冷を行

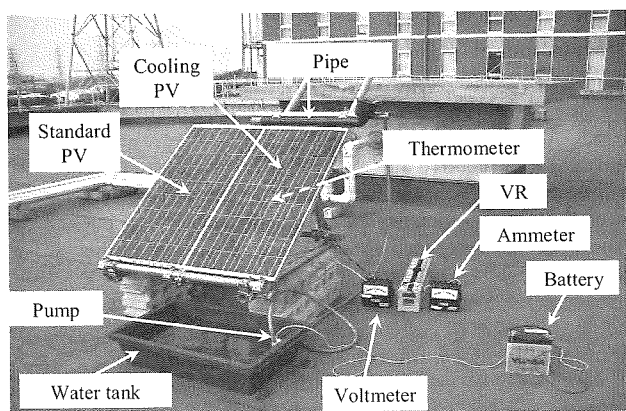


Fig.1 Conceptual figure of experiment equipment.

図1 実験装置構成図

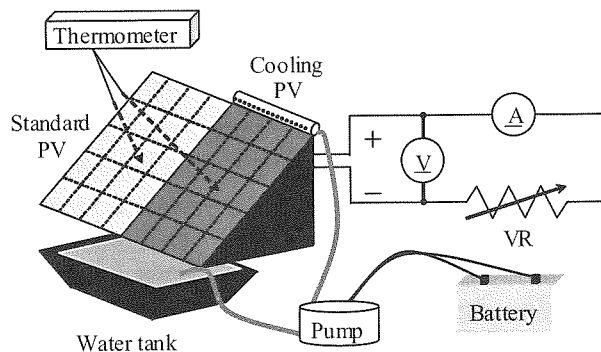


Fig.2 Photograph of experiment equipment.

図2 実験装置概観

Table 1 Specifications of PV.

表1 太陽電池の仕様

Photo Voltaic (PV)	SHARP NE-70A1T
Type	Polycrystal Si
Maximum power	70W (15.8V-4.43A)
Open circuit voltage	20.4V
Short circuit current	4.87A

った時の太陽電池の温度変化を図3に示す．図中に示した縦線は水冷を行った時間を示す．非水冷時との温度差が約 15.0℃となり，間歇水冷による冷却効果が十分に得られた．

2.3 間歇水冷方式による太陽電池1枚の発電特性

図3に示す間歇水冷パターンで1枚の太陽電池モジュールを間歇水冷したときの発電特性 (I-V 特性) を図4に示す．I-V 特性は図2に示す回路において可変抵抗 (VR) を 1Ω～19Ωに変化させ，電流 (I) - 電圧 (V) を同時測定したものである．このときの実験結果を図4に示す．間歇水冷した太陽電池モジュールの最大出力(MPP: Maximum Power Point)は 73.5W，基準太陽電池モジュールの MPP は 67.5W であり，6.0W 発電量が向上した．消費したポンプの使用電力は，18W(使用電力)×5sec(水冷時間)/180sec(水冷間隔)=0.5W(平均使用電力)となるので，ポンプの平均使用電力を考慮した発電効率の向上は，

$$\frac{\text{間歇水冷PV MPP}}{\text{非水冷PV MPP}} = \frac{73.5\text{W}-0.5\text{W}}{67.5\text{W}} = 1.0814 \approx 108.1\%$$

となり，間歇水冷により発電効率が 8.1%向上した．また，

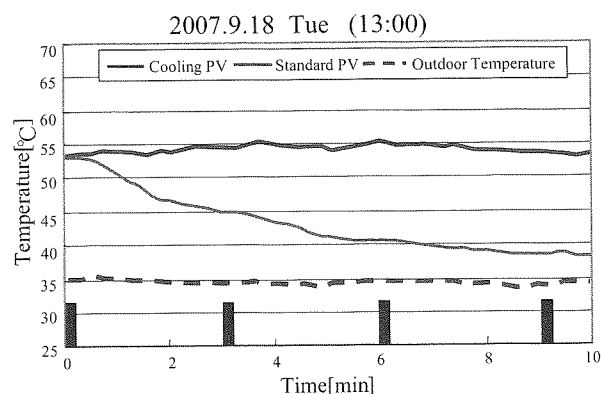


Fig.3 Temperature change of PV (Intermittent water cooling($T=180\text{sec}$, $t=5\text{sec}$)).

図3 間歇水冷による太陽電池の温度変化 ($T=180\text{sec}$, $t=5\text{sec}$)

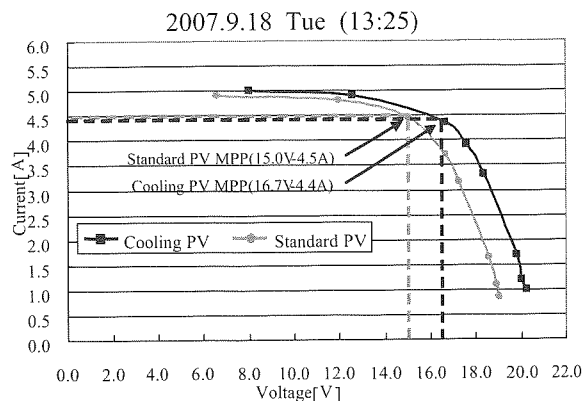


Fig.4 I-V characteristic (Intermittent water cooling($T=180\text{sec}$, $t=5\text{sec}$)).

図4 間歇水冷時の I-V 特性 ($T=180\text{sec}$, $t=5\text{sec}$)

このときの 2 つの太陽電池の温度差は 16.1°C であるから、発電効率の温度依存性は $0.5\%/^{\circ}\text{C}$ であることも分かった⁽⁴⁾。太陽電池モジュールが 1 枚の場合における間歇水冷の有効性を実験的に実証できたので、次に太陽電池モジュールを 6 枚、16 枚と増加させ、実用規模(kW 級)まで大型化した場合にも同様の冷却効果、発電効率の向上が得られるか否か実験的研究を行うこととした。

3. 太陽電池 6 枚での間歇水冷実験

3.1 実験装置概要

まず、太陽電池を 6 枚に増加し、同様にポンプを用いた水冷方式が有効か否かを実験的に検証した。実験装置の概観を図 5 に示す。6 枚の太陽電池上部には散水パイプを設置し、下部には水受けを用意し、水を循環利用することとした。水を循環利用した理由は、実際に一般住宅に設置された場合、雨水をタンクなどに貯めて使用することを想定したためである。水受けからパイプまでの水の汲み上げはバスポンプ(精工進製 mini pondo KP-25: 入力 AC100V-31VA, 出力 DC12.0V-1.5A: 水量 17~18ℓ/分(揚呈 0.5m))を DC12V 駆動に改造し、電源は DC12V バッテリから供給した。なお、ポンプの性能を確認するため、水受けから散水パイプまでの高さを変えて揚水量を測定する予備実験を行った。実験結果は、揚呈 3m では 10~11ℓ/分、本実験の揚呈 1m に相当する揚水量は 15~16ℓ/分であった。水を流し始めた時刻を実験開始時刻とし、その後 15 秒おきに 2 つの太陽電池の裏面温度をデジタル温度計で測定した。この時、水冷を行う間隔を水冷間隔 T 、水を流す時間を水冷時間 t とし、十分な冷却効果が得られ、かつ水冷に必要なエネルギーを最小に抑えられる最適な水冷パターンを見つけることとした。表面温度の計測は非接触型の赤外線温度計(CENTER TECHNOLOGY CORP 製 CENTER 350)を用いて太陽電池の中央付近を測定し、裏面温度の計測には、デジタル温度計(DER EE 製 DE-20W 温度計)をアルミテープで太陽電池の裏面の中央に固定して測定した。また、平均風速 2m/s 以下の日時を選び、温度は 6 枚すべて測定した。ただし、実験は 11 月の涼しい時期に行ったため、裏面温度が 40°C 以上になった場合にのみ有効なデータとした。大学校舎屋上で太陽電池の出力が最も高い晴天日の 12 時~14 時に実験を行った。測定方法は可変抵抗の抵抗値を 1Ω , 2Ω , 3Ω , 4Ω , 5Ω , 10Ω , 15Ω , 19Ω と設定し、各抵抗値で太陽電池の電流・電圧を測定し、同時に表面・裏面温度も測定する。電流計・電圧計は、YOKOGAWA ELECTRIC WORKS 製 CLASS0.5 を使用し、可変抵抗は、スライド抵抗(YAMABISHI 製 SLIDE RHEOSTATS TYPE D-7)を用いて実験を行った。

3.2 間歇水冷方式による太陽電池 6 枚の発電特性

水冷間隔 $T=180\text{sec}$ 、水冷時間 $t=10\text{sec}$ 、ポンプ 2 台の水冷パターンで間歇水冷を行った時の太陽電池の温度変化を

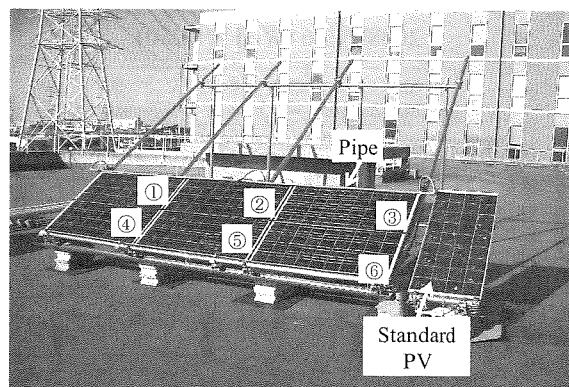


Fig.5 Photograph of experiment equipment.

図 5 実験装置概観

図 6 に示す。太陽電池の温度が一樣に下がらず十分冷却できていないため、使用するポンプを 3 台にし、中央からも水を供給することにした。水冷間隔 $T=180\text{sec}$ 、水冷時間 $t=10\text{sec}$ 、ポンプ 3 台の水冷パターンで間歇水冷を行った時の太陽電池の温度変化を図 7 に示す。ポンプを 3 台に増やすことですべての太陽電池が冷却できたので、この場合の発電増加量と発電効率向上分の予測を行った。図 7 より、温度差が約 17.3°C 得られているので、発電効率が約 8.7% 向上し、総発電量が約 34.2W 増加する。ポンプ 3 台の使用電力は 18W (1 台あたり使用電力) $\times 3$ 台 $\times 10\text{sec}$ (水冷時間) $/ 180\text{sec}$ (水冷間隔) $= 3.0\text{W}$ であるため、正味の発電増加量は 31.2W となり、約 7.9% 発電効率が向上することが分かった。よって装置を大型化(太陽電池 6 枚組み)しても、ポンプを用いた間歇水冷で十分に冷却できることが分かった。しかし、太陽電池の枚数がさらに多くなると、パネル全体に水をかけるのが難しくなる事や、ポンプの台数を増やすことで消費電力が増加するなど、ポンプを用いた水冷方式には限界があることも分かった。よって、さらに装置を大型化し、実機に近づける際は他の間歇水冷方式を考える必要がある。

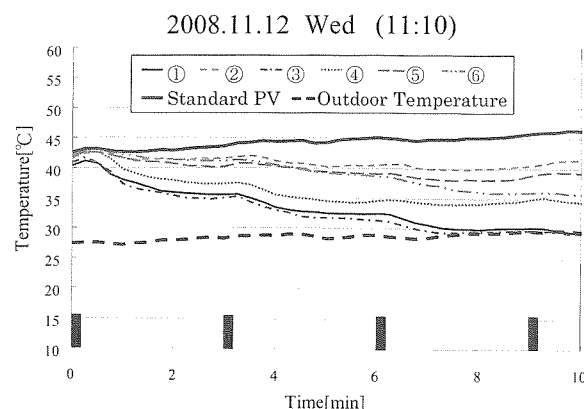


Fig.6 Temperature change of PV when two pumps are used (Intermittent water cooling($T=180\text{sec}$, $t=10\text{sec}$)).

図 6 ポンプを 2 台使用した時の間歇水冷による太陽電池の温度変化 ($T=180\text{sec}$, $t=10\text{sec}$)

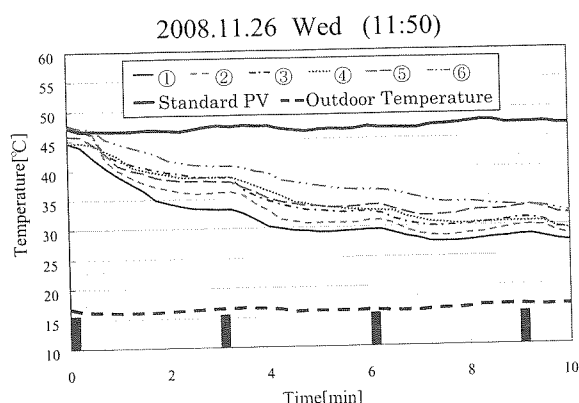


Fig.7 Temperature change of PV when three pumps are used (Intermittent water cooling($T=180\text{sec}$, $t=10\text{sec}$)).

図7 ポンプを3台使用した時の間歇水冷による太陽電池の温度変化 ($T=180\text{sec}$, $t=10\text{sec}$)

4. 太陽電池16枚(1kW級)での間歇水冷実験

4.1 実験装置概要

太陽電池をさらに増加させて実用規模の1kW級まで大型化した場合でも間歇水冷が有効か否かを確かめる為の実験を行った。図8に示すように太陽電池を縦4枚×横4枚(合計16枚)並べて設置した。従来のポンプを用いて水を汲み上げて水冷する方式では、太陽電池の枚数が増加すると水が全面に行き渡らず、十分な冷却ができないため、散水ノズルにより水を全面に吹きかける方式の間歇水冷を行うことにした。水冷の為の散水ノズル(Orbit 薄層用フラッシュヘッド, シュラブ スプリンクラーヘッド)を配置した実験装置の構成図を図9に示す。太陽電池の定格出力(表面温度 25°C での値)は日射量, 外気温, 風速に大きく依存するが, 気象条件が似通った日時を選んで実験を行い, 日射量の違いによる出力の差異は補正せず, 間歇水冷する太陽電池と非水冷の基準太陽電池の出力値の相対比較とした。実験は, 快晴で外気温が安定しており($33\sim 38^{\circ}\text{C}$), 平均風速 2m/s 以下, 太陽電池の表面温度が 50°C 以上になる気象条件が安定な日時を選んで実施した。

4.2 予備実験(連続水冷I-V特性測定)

太陽電池を連続水冷した場合のI-V特性を図10に示す。水冷を行わなかった時の総発電量は 948.2W , 連続水冷を行った時の総発電量は 1087.5W となり, 14.85% の発電効率向上が図られた。しかし連続水冷の場合, 使用する水量が10分で 165l と膨大となり, 水道料金が発電量増加分以上となってしまう。そこで, 発電効率向上のための水量をできるだけ減らし, かつ発電効率が向上するよう, 散水ノズルを間歇運転し, 気化熱を利用する冷却方法で太陽電池の温度が下がるか否かを実験的に調べることにした。連続水冷による太陽電池の裏面の温度変化を図11に示す。水冷開始直後から徐々に温度が下がり始め, 10分程度で 37°C

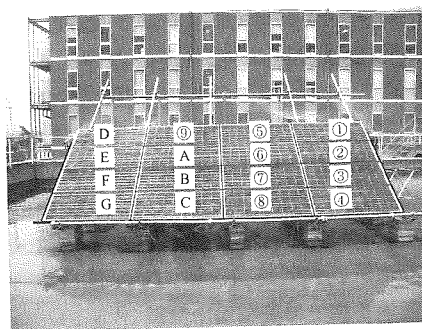


Fig.8 Photograph of experiment equipment.

図8 実験装置概観

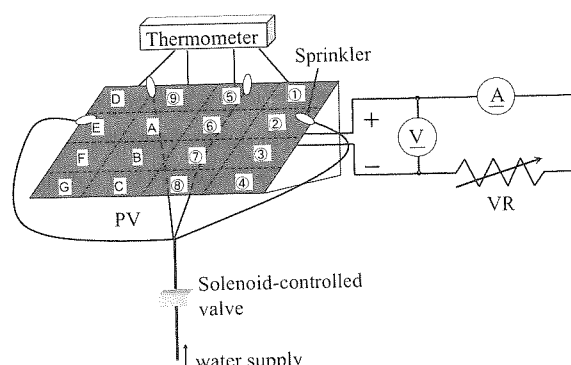


Fig.9 Conceptual figure of experiment equipment.

図9 実験装置構成図

付近の温度で安定した。この時, 水冷開始前と連続水冷後の温度差は約 15°C であった。次に, 水冷を止めた後の温度変化を図12に示す。裏面温度は, 水冷を止めた後, 約20分で元の温度に戻ってしまうが, 水冷を止めてから2分程度で温度が上昇し始め, 5分では完全に温度が上がり始めている。この予備実験結果から, 水冷間隔 T の最大値を2分(120sec)程度と推測した。そこで, 本実験では水冷間隔 T を 60sec , 90sec , 120sec , 180sec と変化させ, それぞれの水冷間隔 T において水冷時間 $t=10\text{sec}$ とした場合に, 冷却効果に差があるか否かを調べた。

4.3 間歇水冷による温度特性

水冷時間 $t=10\text{sec}$ とした場合, $T=180\text{sec}$ の結果を図13に, $T=120\text{sec}$ の結果を図14に, $T=90\text{sec}$ の結果を図15に, $T=60\text{sec}$ の結果を図16にそれぞれ示す。図中に示した縦線は水冷を行った時間を示している。 $T=180\text{sec}$ では, 温度は下がるものの水冷を止めてから約2分後で温度が上昇し, その後水冷を行った時点でまた温度が下がり始めるため, 冷却効果が不十分であることがわかる。 $T=120\text{sec}$ ではそれぞれの太陽電池の裏面温度にかなりの差が見られた。 $T=60\text{sec}$ と $T=90\text{sec}$ ではどちらも充分温度が下がり, その後も安定しており, また, それぞれの裏面温度にも差がないことから, 充分な冷却効果が得られ, かつ使用水量を抑えることができる $T=90\text{sec}$ を最適な水冷間隔 T と決定した。次に $T=90\text{sec}$ における水冷時間 t を 5sec , 3sec と変化させ,

10sec との比較を行った。 $t=5\text{sec}$ の結果を図 17 に、 $t=3\text{sec}$ の結果を図 18 に示す。 $t=5\text{sec}$ では十分に冷却され、 $t=10\text{sec}$ の結果とそれほど差がないのに対し、 $t=3\text{sec}$ では太陽電池の裏面温度に差が出てしまい、冷却が不十分であることがわかった。以上の実験結果より、使用水量をより抑えることができ、かつ十分に冷却効果のある水冷間隔 $T=90\text{sec}$ 、水冷時間 $t=5\text{sec}$ が最適な水冷パターンと決定した。以上の実験結果において太陽電池モジュールを縦 4 枚×横 4 枚（合計 16 枚）並べた供試 PV モジュールは裏面に熱が籠もる、あるいは側面方向に熱が逃げ難い等の理由で基準の太陽電池モジュールよりも若干温度が高くなり、特に中心部のモジュール温度が高くなる傾向があったが、いずれも数度程度であり実験誤差の範囲内である。ただし、今後さらに太陽電池モジュールの枚数を増加させる場合には中心部のモジュールの冷却方法をさらに工夫する必要がある。

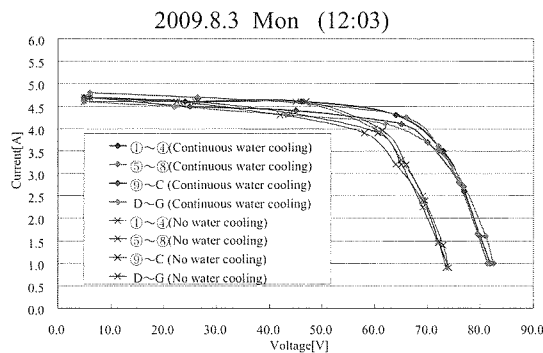


Fig.10 I-V characteristics (continuous water cooling).
図 10 連続水冷時の I-V 特性

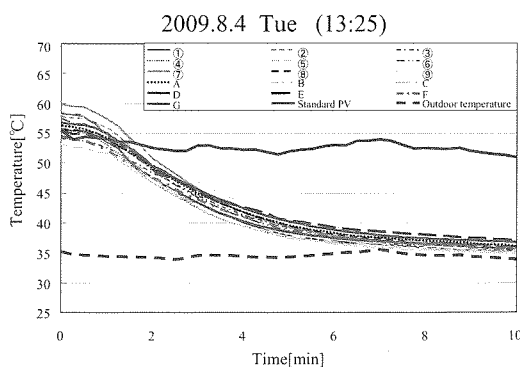


Fig.11 Temperature change of PV
(Continuous water cooling).
図 11 連続水冷による太陽電池の温度変化

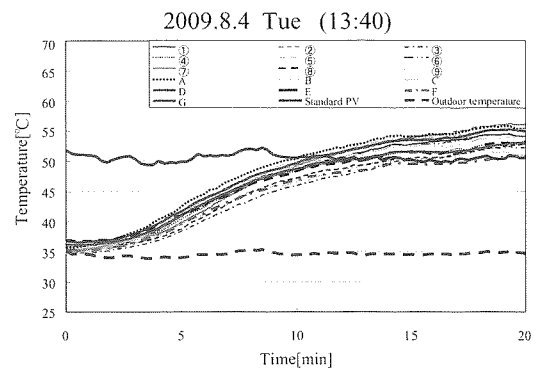


Fig.12 Temperature change of PV
(After continuous water cooling).
図 12 連続水冷後の太陽電池の温度変化

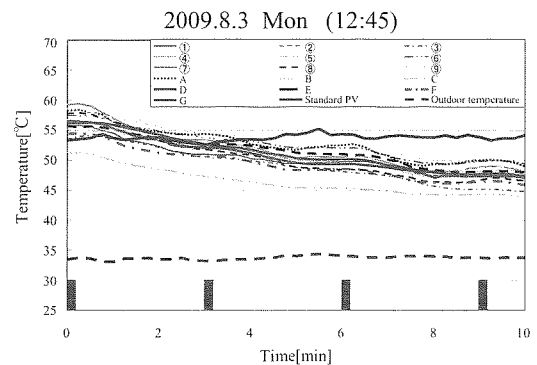


Fig.13 Temperature change of PV (Intermittent water cooling
($T=180\text{sec}$, $t=10\text{sec}$)).
図 13 間歇水冷による太陽電池の温度変化
($T=180\text{sec}$, $t=10\text{sec}$)

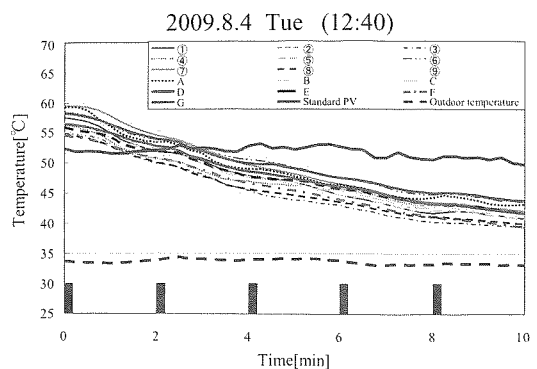


Fig.14 Temperature change of PV (Intermittent water cooling
($T=120\text{sec}$, $t=10\text{sec}$)).
図 14 間歇水冷による太陽電池の温度変化
($T=120\text{sec}$, $t=10\text{sec}$)

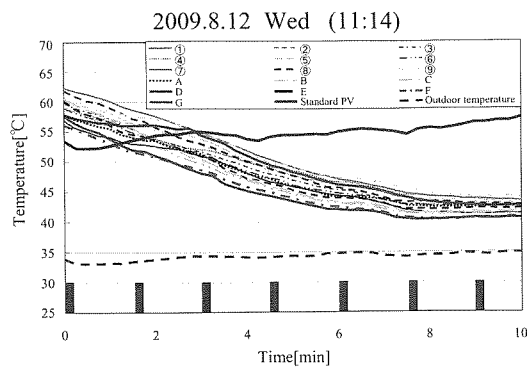


Fig.15 Temperature change of PV
(Intermittent water cooling ($T=90\text{sec}$, $t=10\text{sec}$)).
図 15 間歇水冷による太陽電池の温度変化
($T=90\text{sec}$, $t=10\text{sec}$)

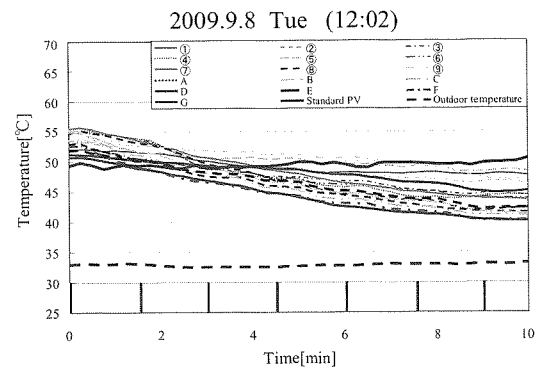


Fig.18 Temperature change of PV
(Intermittent water cooling ($T=90\text{sec}$, $t=3\text{sec}$)).
図 18 間歇水冷による太陽電池の温度変化
($T=90\text{sec}$, $t=3\text{sec}$)

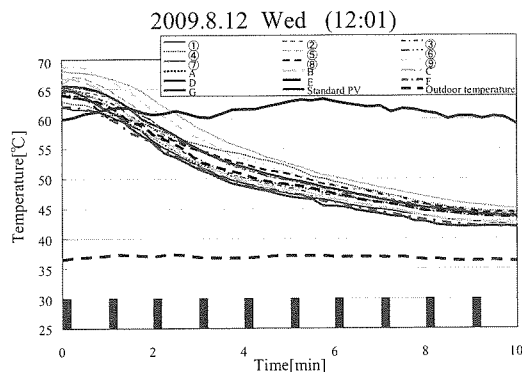


Fig.16 Temperature change of PV
(Intermittent water cooling ($T=60\text{sec}$, $t=10\text{sec}$)).
図 16 間歇水冷による太陽電池の温度変化
($T=60\text{sec}$, $t=10\text{sec}$)

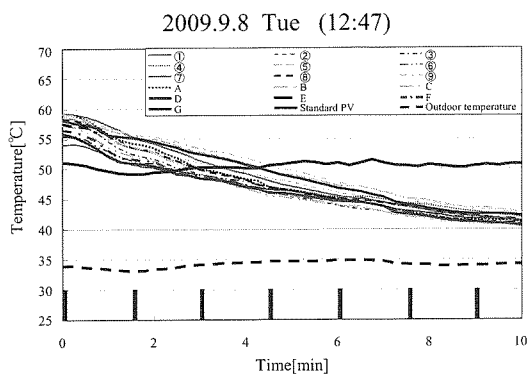


Fig.17 Temperature change of PV
(Intermittent water cooling ($T=90\text{sec}$, $t=5\text{sec}$)).
図 17 間歇水冷による太陽電池の温度変化
($T=90\text{sec}$, $t=5\text{sec}$)

次に決定した最適水冷パターンで太陽電池を間歇水冷した状態で I-V 特性を測定し、実際の間歇水冷における総合発電効率の向上を調べる。

5. 間歇水冷による太陽電池 16 枚の発電効率向上実験

最適間歇水冷パターン($T=90\text{sec}$, $t=5\text{sec}$)で間歇水冷を行い、太陽電池 16 枚分の I-V 特性を測定し、その効果を検証する。測定方法、測定機器などは“3.1 実験装置概要”と同様である。間歇水冷時 ($T=90\text{sec}$, $t=5\text{sec}$) の I-V 特性と非水冷時の I-V 特性の比較を図 19 に示す。非水冷時は最大発電量 948.2W が得られ、間歇水冷時は最大発電量 1070.4W が得られた。間歇水冷を行うことにより、発電量が 122.2W 増加し、発電効率が 12.9%向上した。また、非水冷時、間歇水冷時の温度差は、 $59.0[^\circ\text{C}] - 39.4[^\circ\text{C}] = 19.6[^\circ\text{C}]$ であり、 1°C あたりの発電効率向上は 0.66%となった。

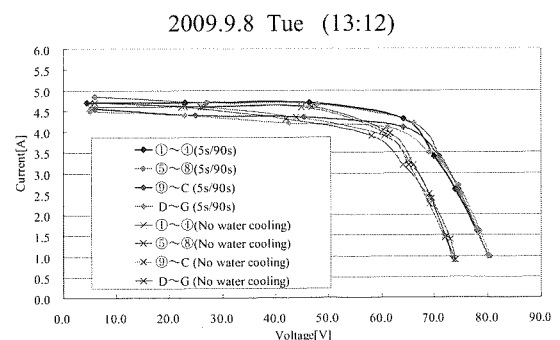


Fig.19 I-V characteristics
(Intermittent water cooling ($T=90\text{sec}$, $t=5\text{sec}$)).
図 19 間歇水冷時の I-V 特性 ($T=90\text{sec}$, $t=5\text{sec}$)

6. まとめ

本研究で得られた主な成果は以下のとおりである。

- (1)太陽電池 6 枚の時、ポンプを 3 台用いた間歇水冷時の最適水冷パターンは水冷間隔 $T=180\text{sec}$ 、水冷時間 $t=10\text{sec}$ であり、このとき発電量の増加分は 31.2W であり、約 7.9%発電効率が向上することが分かった。1℃あたりの発電効率向上は 0.5%であった。
- (2)太陽電池 16 枚の時、スプリンクラーを 4 台用いた間歇水冷の最適水冷パターンは水冷間隔 $T=90\text{sec}$ 、水冷時間 $t=5\text{sec}$ であり、このとき発電量の増加分は 122.2W であり、約 12.9%発電効率が向上することが分かった。1℃あたりの発電効率向上は 0.66%となった。

7. 今後の予定

今回の実験は夏季の暑い時期に行ったので、太陽電池モジュールの表面・裏面温度は 55℃以上となり、間歇水冷の効果が顕著に出た。現在、外気温、太陽電池の表面・裏面温度が低い秋季～冬季のデータを収集中であり、今後これらのデータを基にして周囲の気象条件をフィードバックして最適な間歇水冷パターンを自動的に決定する学習機能付間歇水冷装置を開発し、実用化に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 嶋田隆一 監修, 佐藤義久 著, 「図説 電力システム工学 電気をつくる・送る・ためる!」(2002), pp.123-129, 丸善
- 2) 佐藤義久・吉田尚嗣・嶋田隆一:「都市型風力発電システムの実用化開発」, 電学論 D, 125 巻,11 号 (2005), pp.1016-1021
- 3) 小林誠・谷辰夫:「環境因子の変化に対する太陽電池モジュールの出力特性」, 太陽エネルギー, 109 巻,4 号 (1993), pp.39-46
- 4) 佐藤義久・鈴木将史・小林大・小林由和・鈴木堯志・古田真也・森本浩紀:「間歇水冷による太陽電池モジュールの発電効率向上に関する研究」, 日本太陽エネルギー, Vol34, No.3 (2008-6), pp.75-80