

小山高専 40kW 太陽光発電システムの評価

— 長期稼動状況と経年変化 —

鹿野 文久^{*1}

Performance Evaluation of the 40kW Photovoltaic System in NIT, Oyama College

— Long-term Circumstances and Failure Situation —

Fumihisa KANO

40kW photovoltaic system in NIT, Oyama College generated a total power of 498MWh from July 1999. For the reduction of power generation, power conditioners (PCS) and the photovoltaic module was either repair or replacement during the 16 years. In the management of photovoltaic power generation has been a failure detected easily in PCS, the failure of the photovoltaic it is difficult to detect only by monitoring the amount of power generation. By comparing the theoretical power generation amount of power generation of the photovoltaic, photovoltaic after 7 years in the failure was increased.

KEYWORDS : Photovoltaic, Solar Power Generation, Failure Situation

1. まえがき

地球温暖化防止施策から注目を集めた太陽光をエネルギーとした発電は、2011 年東北地方太平洋沖地震以降、再生可能エネルギー利用へのエネルギー政策への転換となり、特に太陽電池を用いた発電システムは国や地方自治体からの補助金の給付や平成24年7月に施行した再生可能エネルギーの固定価格買取制度から、図 1 に示す太陽電池国内出荷量に示すように急速に普及拡大した。

この太陽電池の寿命は一般的には 20 年から 30 年と言われ、現在 1990 年代に導入された太陽電池

が寿命を迎え、今後 2030 年以降は急速に普及した膨大な量の太陽電池が寿命を迎えることとなる。

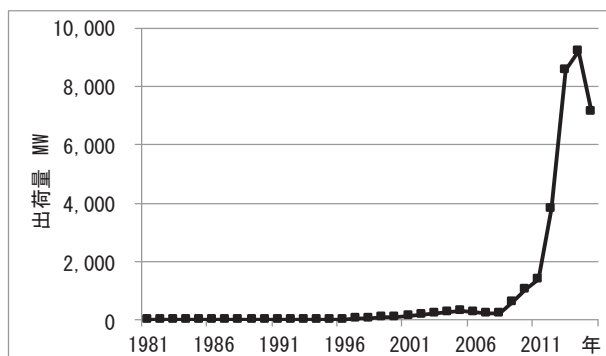


図 1 日本国内向け太陽電池出荷量の推移
一般社団法人 太陽光発電協会 HP¹⁾より引用

^{*1} 電気電子創造工学科 (Dept. of Innovative Electrical and Electronic Engineering), E-mail: kano@oyama-ct.ac.jp

急速普及に伴い太陽光発電システムについて維持管理のための故障診断や遠隔監視といった研究が進められているが、大規模太陽光発電システムの故障や発電量推移といった現況の報告は少ない。小山工業高等専門学校では太陽光発電システム普及初期の1999年に、総発電量40kWの太陽光発電システムとして栃木県内でも早期に稼働、この16年間電力供給するとともに、発電状況に関する稼働データを蓄積してきた。

そこで本論文では、小山高専40kW太陽光発電システムの1999年7月からの発電データをもとに、システムの発電状況の推移と故障や修理交換状況、さらに太陽電池の故障診断について発電量減衰からの検知を目的とした、太陽光発電システムの評価解析をおこなった。

2. 小山高専40kW太陽光発電システム

図2に太陽光発電システム概略図を示す³⁾。太陽電池で発電した直流電力は、パワーコンディショナーを介し三相交流200Vに系統連携され学内へ供給される。太陽光発電システムはこのほかに太陽電池の電圧・電流・温度の測定装置、日射量計や気温計からなる気象観測装置、そしてこれらのデータをコンピュータに記録するデータ解析システムから構成される。測定データはコンピュータにより6秒ごとに測定し積算・または平均値として5分間隔で自動保存した。

太陽電池はシャープ(株)製多結晶太陽電池(形名NE51FLR、最大出力120W、最大出力動作電圧25.7V、最大出力動作電流4.67A、モジュール変換効率12.5%)1モジュールを基本単位として用いた。このモジュールを電気情報・物質工学科棟屋上に6直列42並列・252モジュール約30kW出力と機械工学科棟屋上に6直列14並列・84モジュール約10kW出力の合計336モジュールとし、開放電圧308.4V、最適動作電圧154.2V、最適動作電流130.76A、最大出力40.3kWの太陽電池アレイとして構成した。太陽電池アレイの設置角と方位は、傾斜角20度、方位角90度(真東を0として南に90度)である。図3に校舎屋上に設置した30kW太陽電池アレイを示す。

パワーコンディショナー(PCS)は古河電気工業株式会社の10kWユニット単位のインバータを4ユニットで構成し、太陽電池アレイ出力に応じてユニットの運転台数を制御する。各々のインバ

ータは直流動作電圧を1秒間に5Vずつ微増・微減させ、その前後の発電電力を監視し、常に太陽電池出力電力が最大になるよう直流動作電圧を制御する、最大電力点追従制御による電流制御形PWMインバータ制御の機能をもつ。

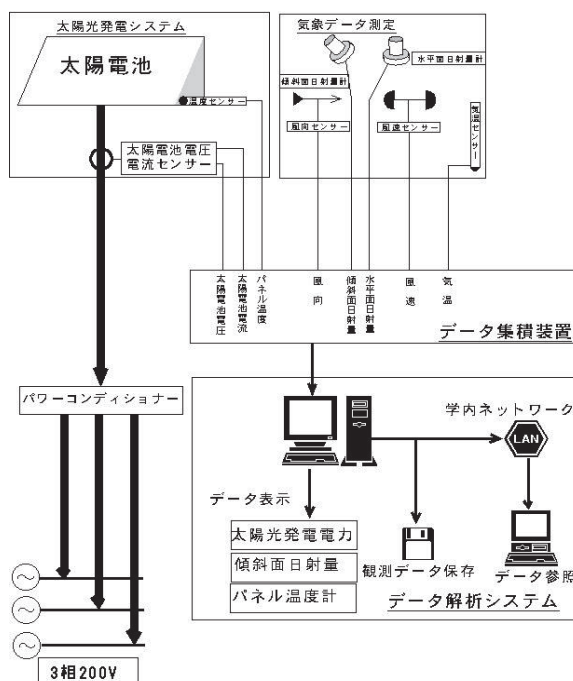


図2 小山高専太陽光発電システム概略図



図3 校舎屋上設置の30kW太陽電池アレイ

3. 太陽光発電量の経年推移

1999年7月から2015年7月までの太陽光発電電力について、図4に月毎に積算した発電電力量の推移を、図5に月毎積算積算電力量を毎年同じ月とした経年推移を示す。

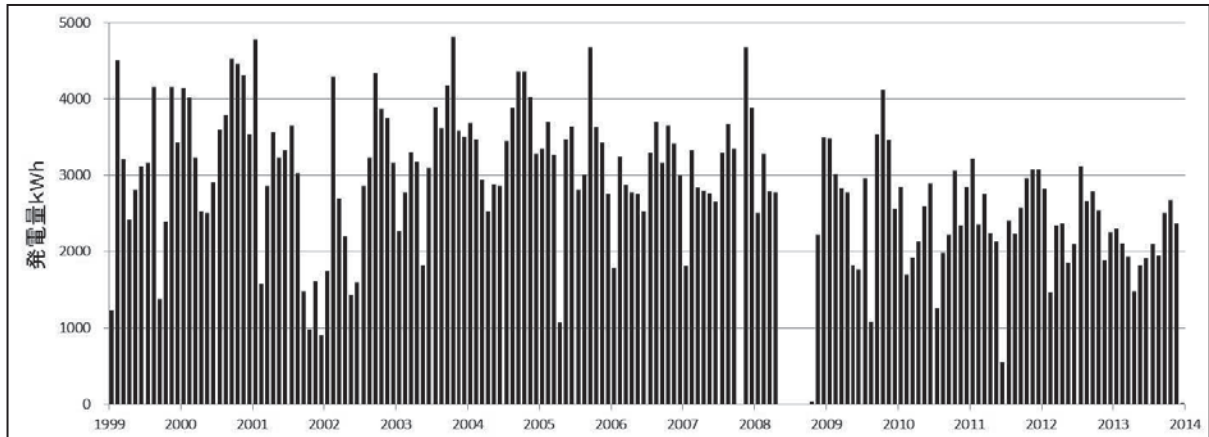


図4 1999年7月～2014年7月までの太陽光発電電力推移(月積算)

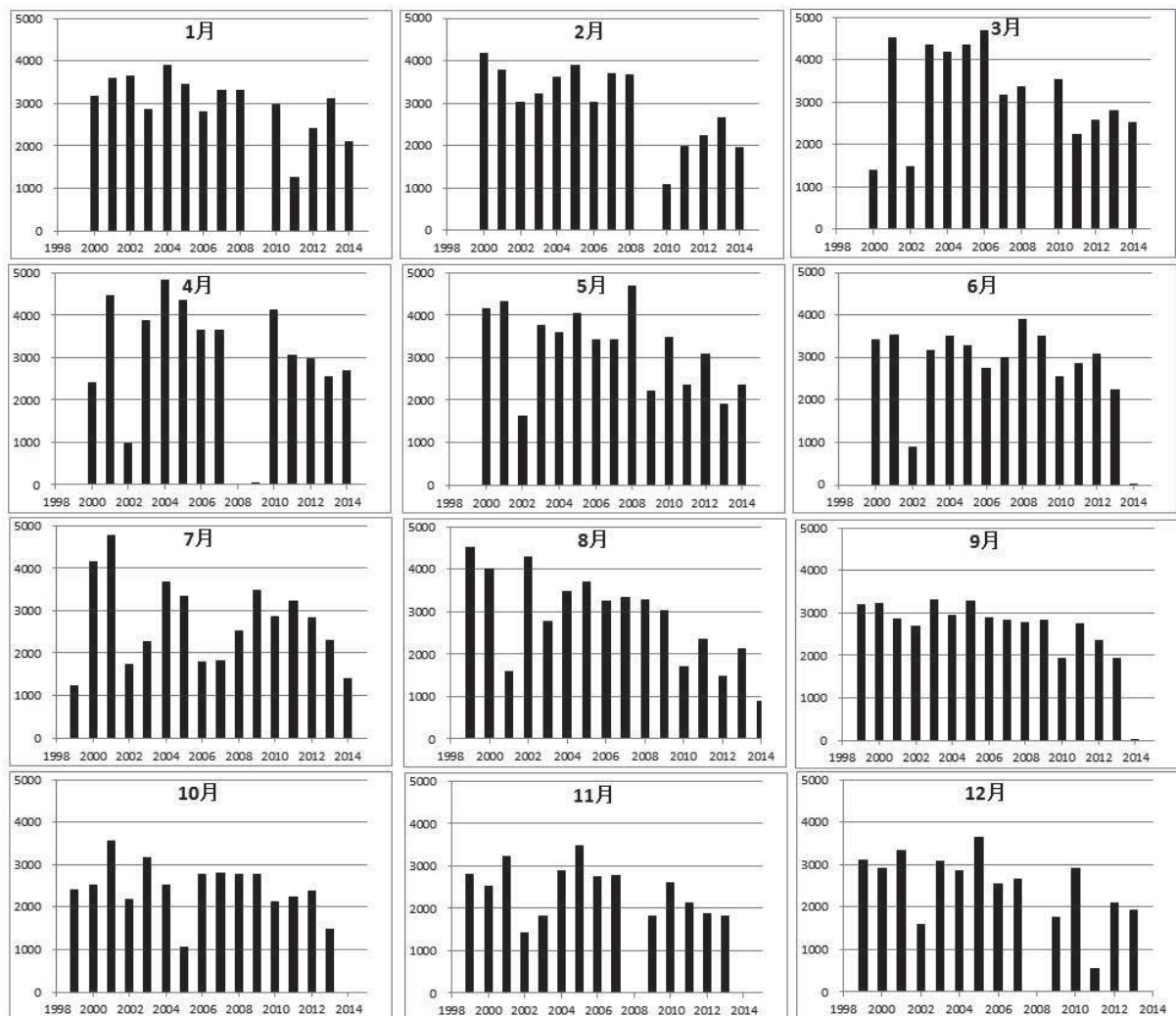


図5 毎年同月とした積算太陽光発電電力の年推移 (単位 kWh)

1999年7月から2015年7月までに小山高専太陽光発電システムが発電した総積算発電電力量は498,227kWhであり、月毎積算の最大発電電力は2004年3月に4,814kWhを記録した。この期間PCS

の不調や故障による発電量の差が含まれるが、2008年までの設置初期の結果においては、小山において3月～5月における発電電力量が高く、発電に適した天候状況が多いことが理解できる。

4. 太陽光発電システムの故障状況

4. 1 太陽光発電システムの故障と修理状況

表1に、太陽光発電システムの故障と修理状況を示す。小山高専の発電システムにおいて、PCSによる発電不調や停止から修理を3回実施した。

PCSの不調や発電停止といった故障発生時には、機器からの故障表示や図6に示すように太陽光発電システムの発電データに明確な症状が発生することから、容易に故障確認ができた。主な故障要因は電子機器であるPCSの回路基板によるもので、回路板交換により対処している。

小山高専において太陽電池故障によるモジュ

表1 太陽光発電システムの故障修理状況

故障日 (経過年月)	故障機器	修理内容
2003/03/05 (3年7ヶ月)	パワーコンディショナ(PCS)	プリント回路板交換
2008/08/15 (9年1ヶ月)	パワーコンディショナ(PCS)	A/D交換器、 トランスデューサ交換
	太陽電池	太陽電池1枚交換
2008/12/22 (9年5ヶ月)	パワーコンディショナ(PCS)	プリント回路板交換 ヒューズ交換
2010/04/26 (10年9ヶ月)	太陽電池	太陽電池29枚交換 (7月15日)

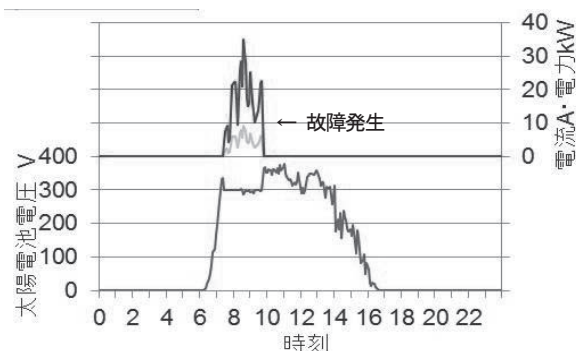


図6 PCS故障発生時の発電データ

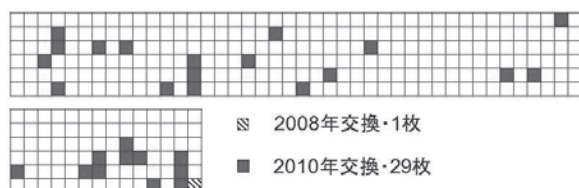


図7 太陽電池モジュールの交換修理箇所

ール交換は、表1に示した2008年と2010年の2回実施している。故障の特定方法はモジュールの赤外線カメラによる異常発熱検知²⁾と目視による故障確認である。図7に交換した30枚のモジュール配置を示す。336モジュール有する太陽電池の故障特定については、太陽電池の故障による発電量が急激に発電停止することは少なく、徐々に発電量が減少する場合が多い。発電データから太陽電池の故障特定は、太陽運動や気象変動といった日射量変動による発電量変動の方が大きい困難となる。実際、図8に示す年間発電量においてPCS故障による発電量低下以外、2008年以降徐々に発電量低下の傾向は確認できるが、太陽電池の発電不良による影響と判断するには困難がある。

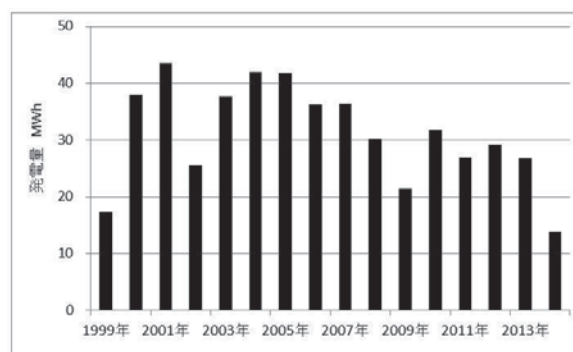


図8 太陽光発電システムの年間発電量推移

4. 2 太陽電池交換による電力回復効果

2010年7月15日に太陽電池モジュール29枚の交換修理に着目し、発電データを比較する。天候状況の相違が少ない日として、交換前の7月8日と交換後28日の発電特性を図9と図10に示す。

交換前8日の11時55分における傾斜面日射強度 $1.07\text{kw}/\text{m}^2$ ・太陽電池温度 56.0°C において、発電電圧・電流 $247\text{V} \cdot 99.1\text{A}$ で発電電力 22.26kW であったのに対し、交換後28日11時50分傾斜面日射強度 $1.09\text{kw}/\text{m}^2$ ・太陽電池温度 65°C において発電電圧・電流 $237\text{V} \cdot 103\text{A}$ の発電電力 23.52kW であった。太陽電池発電は、日射強度と太陽電池温度により変わるため、比較のため太陽電池の温度補正 $(-0.5\%/^\circ\text{C})$ を考慮しても、交換後の28日における発電電力増加は8日の10%程度しか増加していない。本来 40kW 出力太陽電池が、傾斜面日射強度 $1\text{kw}/\text{m}^2$ 時に太陽電池温度 65°C において予想される最大発電発電量が 32kW であることから、28日の発電電力は本来の74%程度しか得られておら

ず、太陽電池交換においても発電電力の回復には至らなかった。

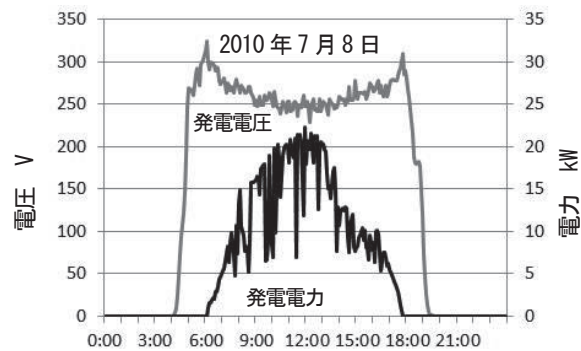


図9 モジュール交換前発電状況

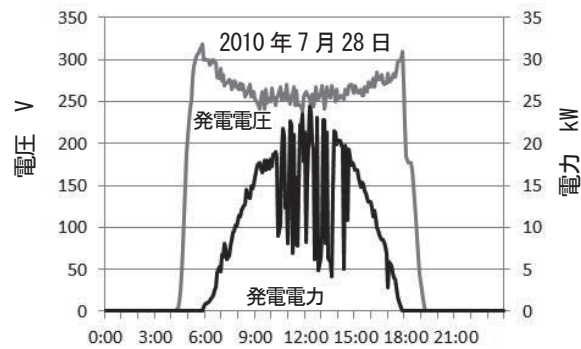


図10 モジュール交換後発電状況

4. 3 赤外カメラによる故障診断

機械工学科棟屋上に設置した 84 枚モジュールについて赤外カメラ (Fluke 製 Ti29) を用い故障診断を実施した。太陽電池の異常発熱にはホットスポットと呼ばれる太陽電池部位からの発熱と、太陽電池モジュールが発電不良時において直列につながった他の太陽電池からの電流を流すバイパスダイオード通電による発熱が発生する⁵⁾。

測定の結果図 11 に示すように、84 枚中 25 モジュールにおいて異常発熱を持つ部位を確認した。

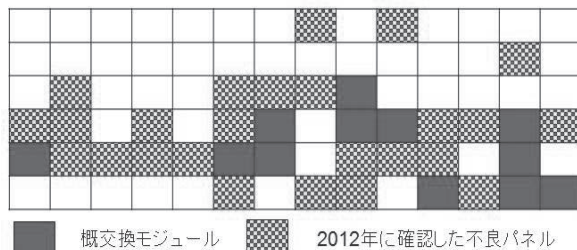


図11 赤外カメラによる故障診断結果

この数は既に交換したモジュールと合わせ 36 モジュールとなり、1999 年設置以来の故障割合としては 42.86%と高い故障率となる。

5. 発電電力量の評価

5. 1 理論発電電力量の算出

発電データからモジュール故障推移を評価するために、気象観測した日射状況から太陽電池の理論的な発電電力を求め、これと実際の発電量を比較し評価をおこなうこととした。

理論発電電力は、モジュールに到達する法線方向の日射強度、太陽光入射角、太陽電池の温度特性から理論的に算出が可能となる。

5. 2 太陽光入射角

太陽光入射角を求めるには任意時間における時角 τ (南中を 0 度とし 1 時間を 15 度刻みで表す角度) を (1) 式より求める。この式で求めた時角及び、栃木県小山市の緯度 α 、計算日の赤緯 γ から (2) 式で太陽高度 λ を求め、太陽高度から太陽方位角 ϕ を (3) 式、そして太陽入射角 Ψ を (4) で求める。

$$\tau = (t - 12) \times (\beta - \omega) + Eq \times 15 \quad [\text{deg}] \quad (1)$$

$$\lambda = \sin^{-1}(\cos \alpha \times \cos \gamma \times \cos \tau \pm \sin \alpha \times \sin \gamma) \quad [\text{deg}] \quad (2)$$

$$\phi = \cos^{-1}((\cos \gamma \times \sin \tau) / \cos \lambda) \quad [\text{deg}] \quad (3)$$

$$\Psi = \cos^{-1}\{\cos \lambda \times \sin(\delta + \theta) \cos(\phi - \sigma) + \sin \lambda \times \cos(\delta + \theta)\} \quad [\text{deg}] \quad (4)$$

τ : 時角[deg]、 t : 任意時間[h]、 α : 緯度[deg]、 β : 経度[deg]、 γ : 赤緯[deg]、 ω : 標準時経度[deg]、 Eq : 均時差[h]、 λ : 太陽高度[deg]、 ϕ : 太陽方位角[deg]、 Ψ : 太陽入射角[deg]、 θ : 勾配[deg]、 δ : 太陽電池の水平面傾斜角[deg] (水平に対する傾き)、 σ : 太陽電池の傾斜方位角[deg] (真南傾斜時を 0) 直達日射に対する各角度を図 12 に示す。

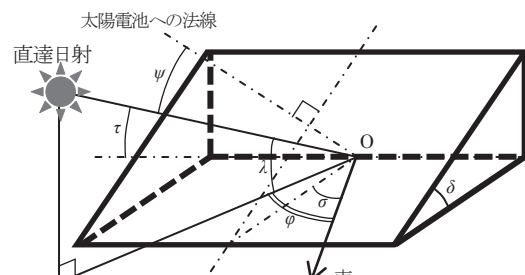


図12 太陽光日射角モデル

5. 3 太陽電池の温度依存特性

太陽電池の変換効率は温度によって変化する
ことから、太陽電池電力変換効率を(5)式で求める。

$$\eta_{SP} = \eta \times (100 - (T - T_0) \times \eta_T) [\%] \quad (5)$$

η_{SP} : 太陽電池電力変換効率[%], η : 25℃時の変換効率[%], T :
太陽電池温度[℃], T_0 : 基準温度=25[℃], η_T : 温度係数[%/℃]

5. 4 太陽電池の発電電力算出

太陽光入射角 φ より(6)式にて傾斜面日射強度
を求め、傾斜面日射強度と太陽電池変換効率 η_{SP}
から(7)式を用いて太陽電池発電電力が求まる。

$$RS_{DP} = RS_{MX} \times \cos \phi \quad [\text{deg}] \quad (6)$$

$$PW = RS_{DP} \times S \times \xi_{FW} \times \eta_{SP} \quad [\text{deg}] \quad (7)$$

RS_{DP} : 傾斜面日射量[W/m²], RS_{MX} : 最大到達放射強度=1[kW/m²],

PW : 太陽電池の発電電力[W], S : 太陽電池の貼付面積[m²],

ξ_{FW} : 晴天率=100[%]

天候を考慮した理論発電電力量は、(7)式の傾
斜面日射量 RS_{DP} に、モジュールの設置傾斜角と等
しく設置した日射量計にて実測した日射量値を代
入することで求まる。

5. 5 理論発電量による発電電力評価

図13に実測の発電電力と比較のため、雲のない
快晴日のみ(晴天率=100%)として温度補正を加え
算出した理論積算発電電力量と、傾斜面日射量計
の計測値をもとに温度補正をおこない天候を考慮
した発電電力量について、2000年から2010年ま
での期間について積算発電電力量と合わせて、年
推移として示す。

理論積算発電電力量は年間約63MWhであるが、
天候を考慮した場合は気象によって発電電力量が

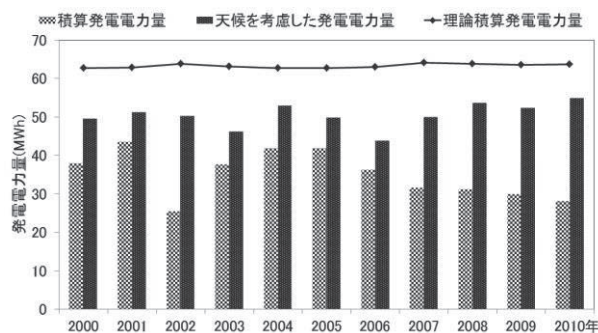


図13 通算の理論・実測年積算発電電力推移

変動するため、2006年の最小43MWhから2010
年の最大55MWhと変動する。2002年はPCS故
障による影響であるため除外すれば、天候を考慮
した発電量と実発電電力量の差は2006年までは
平均8.5MWh程度と大きな差はないが、2007
年以降差が増大し、2007年18MWh、2010年27
MWhと大きく実発電量の減少が生じた。

2007年以降徐々に発電量減少が進行した原因
の一つに太陽電池接続部位に何らかの抵抗増加が
発生し、ホットスポット発生による損失が増加し
ているものと理解できる。実際2008年から2年
間で29枚のモジュール交換、その後赤外線カメ
ラによる評価で84枚中25枚異常発熱した太陽電
池モジュールを確認している。太陽電池モジュ
ール故障は発電量モニターからは検知が困難であり、
赤外線カメラによる診断と併用で確実に検知が可
能となる。

6. まとめ

小山高専の太陽光発電システムでは、15年間で
498MWhの発電電力を得た。PCS故障は容易に
検知できたが、太陽電池の故障については発電電
力のモニター監視のみでは困難であった。天候を
考慮した理論発電電力との比較することにより、
設置後7年目からの発電電力減少を確認し、太陽
電池モジュール故障による影響であることを確認
した。今後、故障検知が困難な太陽電池モジュ
ールの故障に対して、確実な検知方法が重要となる。

参考文献

- 1) 太陽電池の出荷統計: 一般社団法人 太陽光発電協会HP,
<http://www.jppea.gr.jp/document/figure/index.html>
- 2) 加藤和彦: 太陽光発電システムの不具合事例ファイル,
日刊工業新聞社 (2010)
- 3) 鹿野文久, 小澤祐二, 田中昭雄: 小山高専40kW太陽光
発電システムの評価, 小山工業高等専門学校研究紀要
(33), 105-111, 2001-03
- 4) 岡田康史 他: 太陽電池モジュールにおけるホットスポ
ットの調査, 太陽/風力エネルギー講演論文集 2010,
535-538, 2010
- 5) 羽倉瑞季 他: バイパスダイオードの発熱状況による
太陽光発電システム不具合評価, 太陽/風力エネルギー講
演論文集, 2008, 273-276, 2008-11

【受理年月日 2016年 9月26日】