

# モンゴルにおける独立小型太陽光発電システム 実証研究のデータ解析・システム評価

Performance Analysis of Portable Photovoltaic Systems based on the Demonstrative  
Research Data in Mongolia

アジヤバト・アマルバヤル \*<sup>1</sup>

Amarbayar ADIYABAT

黒川 浩 助 \*<sup>2</sup>

Kosuke KUROKAWA

## Abstract

This paper describes the performance analysis of small scale photovoltaic (PV) systems based on 37 sites operation data in Mongolia. The NEDO of Japan has performed demonstrative research on movable type PV systems for nomadic lifestyle in Mongolia. We have detailed analyzed the field data obtained by this project. The whole system losses separated into 6 items, also the cause of system failure investigated. From the results, many functional failures of the batteries and the increase in battery loss, array capture loss, and high load mismatch losses, user's bad managements of load were observed. The main reasons of failures are oversize and underused of the systems, also much evaporation electrolyte of batteries, due to low humidity in Mongolia. Stand-alone PV systems evaluation method was improved with combinational use of parametric analysis method and time-serial simulation method. Also it was clarified the general weather conditions and important points that should be considered about PV system designing in Mongolia.

キーワード：独立小型の太陽光発電システム，実測データ解析，運転性能評価

Key Words：Solar Home System, Measured Data Analysis, Performance Evaluation

## 1. はじめに

独立小型の太陽光発電システム（SHS＝ソーラーホームシステムともいう）は開発及び発展途上国の無電化地域においては電化対策として有望な選択肢である。そのため、世界各国では国際共同研究から国家計画まで様々なプロジェクト・普及啓発活動が実施されて来た。

しかし、技術的ではない問題である修理サービスや保守管理体制の不備、ユーザの知識不足などによる失敗ケースも後を絶たなかった。その理由の一つは、独立小型の PV システムの性能と寿命がユーザの電力需要管理（DSM＝デマンドサイドマネージメント）と保守管理に大きく左右される特徴を持つことにある。このような非技術的な問題対策については、国際エネルギー機関（IEA）の太陽光発電システム研究協力協定<sup>1)</sup>（PVPS）におけるタスク 3、9 の活動によってガイドラインがまとめられている<sup>2)</sup>。

また、技術的な問題ともいえるべき、設計における使用環

境の考慮、蓄電池の容量などを含む周辺機器の設計バランス、制御機能等における欠点も少なくない。P.Dunlop 氏らは独立型太陽光発電システムの故障・機能低下の原因は蓄電池の設計にあると指摘している<sup>3)</sup>。

独立型太陽光発電システムの運転性能の評価手法については、IEA/PVPS タスク 2 では、国際基準 IEC 61724 に基づき、システムの基本性能を示すパラメータによる評価方法が使用されている<sup>4)</sup>。しかし、独立小型の太陽光発電システムについて、詳細解析やシステムの損失分離に関する研究論文が見あたらない。

スケールの大きい太陽光発電システムには運転性能を表す主なパラメータを自動計測・記録するシステムを装備することが一般的である。しかし、SHS のように小規模のシステムにはコストが掛かるため計測装置を付けることはまれである。そのため、システムの故障や機能低下原因が明らかにならないことが多い。

本研究では発展途上国であるモンゴルの遊牧民に使用された独立小型の太陽光発電システムを対象とする。

モンゴル国全人口の約 33%になる 80,8500 人が農牧林業の従事者で、その大半が家畜と共に牧草を求めて移動を繰

\*1 東京農工大学大学院工学教育部学生（〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16）e-mail: amar@cc.tuat.ac.jp

\*2 東京農工大学 大学院 共生科学技術研究部 教授  
（原稿受付：2005 年 4 月 21 日）

り返す生活を営む遊牧民である<sup>5)</sup>。彼らに商用電源から電力を供給することは困難であり、独立分散型の電力供給システムが必要となる。モンゴル国政府は太陽光発電システムが遊牧生活スタイルに適していることを認識し、遊牧民の住居（ゲル）を電化する「10万戸ソーラーゲル計画」を打ち出している<sup>6)</sup>。太陽光発電システムを導入する上でモンゴルの気象環境や生活スタイルに適する詳細設計及び評価に関する研究開発が求められている。

本研究では、独立小型太陽光発電システムの詳細解析手法を検討し、先行研究<sup>7)</sup>の実測データを活用して、モンゴルにおけるSHSの使用者環境とシステムの運転特性を定量的に分析することを目的とする。

## 2. 独立小型太陽光発電システムの実証研究について

新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）はモンゴル国において平成4年度から平成8年度まで独立小型の太陽光発電システム（Fig.1）について実証研究を行った。この実証研究の目的はモンゴルの非定住の社会システムをフィールドにして、蓄電池・インバータ等の周辺機器を含むSHSの小型軽量化、可搬性・信頼性の向上を図ることであった<sup>7)</sup>。



Fig.1 Solar Home System in the Nomadic Family

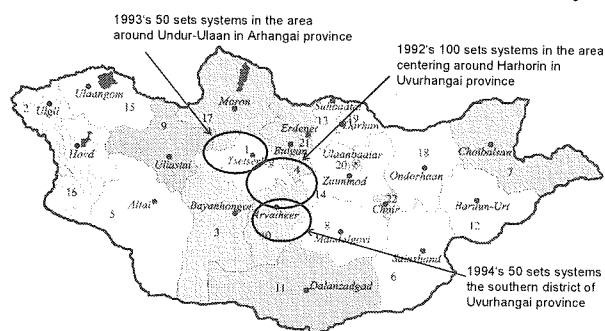


Fig.2 Installation areas of Solar Home Systems

実証研究の発電システムの設置対象地はゲルの多い平野部及び山岳部に位置するウブスハンガイ県ハルホリン、アルハンガイ県ウンデルウランを中心とする地域であった。Fig.2に示す各地域に平成4年度から平成6年度にかけて合計200台のシステムが設置され、実証研究が行われた。

## 3. 実証研究の太陽光発電システムの構成

実証研究の太陽光発電システムはFig.3に示すように太陽電池ユニット、コントロールユニット、蓄電池ユニットから構成されている。定格102Wのモジュール2枚を並列に接続されたアレイの出力はチャージコントローラ（CC）を介して蓄電池に蓄えられ、インバータでAC（220V・50Hz）に変換され負荷に供給する。

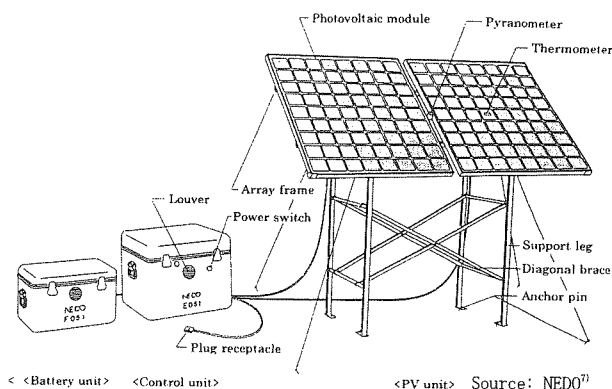


Fig.3 Overall appearance of the Solar Home System

自動車用鉛蓄電池はPV用途に薦められていないが、当時モンゴルで入手が簡単かつ経済的であったため12V・70Ah（初年度のシステムでは100Ah）の自動車用バッテリー2個が直列接続で使用された。蓄電池の連続不日照日数を3日、放電深度を70%とし、負荷に照明機器、ラジオ、テレビを想定して、一日で280Whまで消費できるように設計されている。実際の負荷に白黒テレビ、蛍光灯などが一日に3-5時間程度使用された。Table 1は1次システムおよびそれを改善した2次、3次システムの仕様を示している。

Table 1 System specifications

|              |                           |             | 1992's System                                                                         | 1993's System    | 1994's System    |
|--------------|---------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|
| PV Unit      | Array Rated Power         |             | 204W (51W x 4)                                                                        | 204W (102W x 2)  |                  |
|              | Structure                 | Panels      | Angle Variable                                                                        | Two-split table  |                  |
|              |                           | Array angle | 30° ,45° ,60°                                                                         | 45°              |                  |
|              | Legs                      |             | Built-in type                                                                         |                  |                  |
|              | Frame material            |             | Array frames, support legs: Aluminum                                                  |                  |                  |
|              |                           |             | Braces: Stainless steel                                                               |                  |                  |
|              | Assembled dimensions (mm) |             | L1832xD800xH2070                                                                      | L1786xD700xH1700 | L1786xD700xH1701 |
|              | Weight                    | Panels      | 26.6 kg                                                                               | 13.5 kg x 2      | 13.1 kg x 3      |
| Legs         |                           | 11.3 kg     | 6.5 kg                                                                                | 5.7 kg           |                  |
| Total weight |                           | 40.9 kg     | 33.5 kg                                                                               | 31.9 kg          |                  |
| Control Unit | Input Voltage             |             | DC 24V                                                                                |                  |                  |
|              | Output Voltage            |             | AC 220V 50Hz                                                                          |                  |                  |
|              | Output Capacity           |             | 300VA                                                                                 |                  |                  |
|              | Dimensions (mm)           |             | L476xD426xH555                                                                        | L470xD420xH465   |                  |
|              | Weight                    |             | 43.0 kg                                                                               | 41.7 kg          | 35.6 kg          |
| Battery Unit | Functions                 |             | Overcharge/overdischarge prevention,<br>Overcurrent/Overvoltage protection, and timer |                  |                  |
|              | Storage battery           | Type        | Lead-Acid battery for car                                                             |                  |                  |
|              |                           | Voltage     | 24V ( 12V x 2 in series )                                                             |                  |                  |
|              | Capacity                  |             | 100Ah                                                                                 | 70Ah             |                  |
|              | Dimensions (mm)           |             | L476xD426xH555                                                                        | L415xD315xH320   |                  |
|              | Weight                    |             | 65 kg                                                                                 | 40.1kg           |                  |
| Total weight |                           | 148.9 kg    | 115.3 kg                                                                              | 107.6 kg         |                  |

Source: NEDO<sup>7)</sup>

コントロールユニットにはシステムの運転状態を記録するための自動データ計測装置が装備されている。測定項目は、①アレイ面日射強度、②セル温度、③アレイ電流、④バッテリー電圧、⑤バッテリー温度（初年度システム）、コントロールユニット温度（2,3 次システム）、⑥インバータ出力電力、⑦直流出力電流（3 次システムのみ）、⑧振動（一部）であった（Fig. 4）。計測は初年度システムでは10分毎に、2次、3次システムでは20分毎に行われ、それぞれ約3, 6ヶ月分のデータが保存される。データ収集については、多数のシステムが広範囲に設置されたこと、また交通手段の不備などによって困難を極めたことが報告されている<sup>7)</sup>。

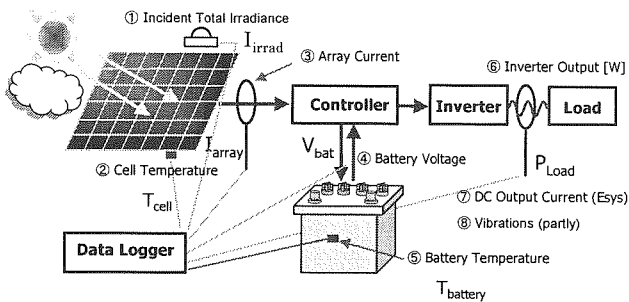


Fig. 4 Measurement Items and Points

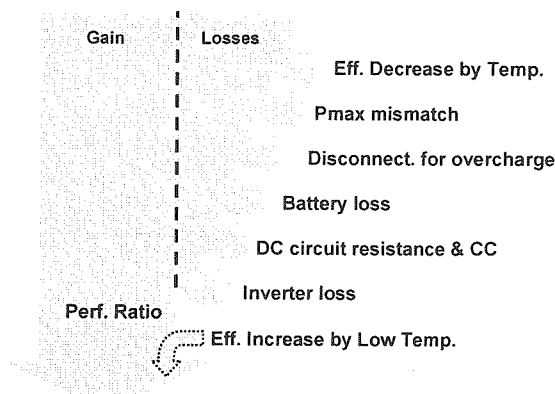


Fig. 5 Breakdown of gain and losses

#### 4. 解析方法

実測データから解析的に求める方法とモデル式を用いた時系列シミュレーションする方法を組み合わせ、PVシステムの運転時に発生する損失を次の6つの項目（Fig. 5）に分離する：

- ① インバータ損失
- ② 直流回路及び充放電装置の損失
- ③ バッテリーの充放電損失
- ④ 満充電状態によるアレイ損失
- ⑤ Pmax ミスマッチ損失
- ⑥ 温度上昇が原因で出力低下による損失

また、システムの利得に含まれる低温によるアレイ出力向上の割合も算出した。アレイ出力電力量から負荷消費・

インバータ・直流回路及び充放電装置損失を差し引いた値を蓄電池の充放電等の損失と定義した。

#### 4.1 基本性能パラメータ

異なった設置環境に置かれる PV システムの性能を比較・評価するためにエネルギーを定格出力での稼働時間に換算した以下の4つのパラメータが広く使われる。システムの基本性能を示す式を国際基準 IEC 61724 に次のように定義している<sup>8)</sup>：

- 等価日太陽日照時間 (reference yield)  $Y_r = H_A / G_s$  (1)
- 等価アレイ運転時間 (array yield)  $Y_A = E_{A,d} / P_{max}$  (2)
- 等価日システム稼働時間 (final yield)  $Y_f = E_{load,d} / P_{max}$  (3)
- 等価アレイ運転時間 (array yield)  $K = Y_f / Y_r$  (4)

等価日太陽日照時間  $Y_r$  は、基準アレイ面日射強度  $G_s$  で日積算アレイ面日射量  $H_A$  を供給するのに必要な時間数を、等価アレイ運転時間  $Y_A$  は、積算アレイ出力電力量  $E_{A,d}$  を定格出力  $P_{max}$  で運転する場合の時間数を、等価日システム稼働時間  $Y_f$  は、PV システムの発電量  $E_{load,d}$  がアレイ定格出力  $P_{max}$  の何時間分に相当するかを表している。システム出力係数  $K$  は、アレイ定格出力  $P_{max}$  に対するシステム全体の性能を表す指標である。

#### 4.2 アレイ出力のシミュレーション

温度及び  $P_{max}$  ミスマッチによるアレイ出力低下を計算するためにアレイ出力のシミュレーションを行った。太陽電池モデルを太陽電池等価回路の基礎式(5)に基づいて作成した。日射強度、周囲温度を用いて、標準試験条件下での各係数を求め、温度補正し、非線形連立方程式を解いて太陽電池の出力電流を算出するようにした。

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left\{ q \left( \frac{V + R_s I}{n k T_c} \right) \right\} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (5)$$

ただし、 $I$ ：セル出力電流、 $I_{ph}$ ：光誘起電流、 $I_0$ ：ダイオード飽和電流、 $q$ ：電子の電荷量、 $V$ ：セル出力電圧、 $R_s$ ：セル内部の直列抵抗、 $R_{sh}$ ：並列抵抗、 $n$ ：ダイオード因子、 $k$ ：ボルツマン係数、 $T_c$ ：セル温度である。

太陽電池特性は温度により大きく影響されるので各定数の温度係数を実験的に求めた近似式(6)から(9)を用いた<sup>9)</sup>。

$$I_{ph} = I_{ph0} \left\{ 1 + 7.9736 \times 10^{-4} \cdot (T_c - 25) \right\} \times \left\{ 0.94 G_A + 0.06 [1 - \exp(-8 G_A)] \right\} \quad (6)$$

$$I_0 = I_{00} \cdot \exp \{ 0.14132 (T_c - 25) \} \quad (7)$$

$$R_s = R_{s0} \left\{ 1 + 3.4158 \times 10^{-3} \cdot (T_c - 25) + 2.5324 \times 10^{-5} \cdot (T_c - 25)^2 \right\} \quad (8)$$

$$R_{sh} = \frac{R_{sh0}}{1 + 4.449 \times 10^{-2} \cdot (T_c - 25) + 8.0575 \times 10^{-4} \cdot (T_c - 25)^2} \quad (9)$$

Fig. 6 に示すように、標準試験条件の最大アレイ出力  $P_{max,25^\circ C}$  と測定された温度での最大アレイ出力  $P_{max,at T_{cell}}$  との差から温度による出力低下損失を求めた。全てのシステム

には、最大出力点の追尾機能がため、蓄電池の電圧がシステムの動作電圧となり、出力  $P_{\text{operating}}$  は最大出力より低くなり、Fig. 6 に示すように、動作点による出力の差が生じる。このような出力差  $P_{\text{max mismatch}}$  をミスマッチ損失と定義し、シミュレーションによって損失量を算出した。また、充放電装置の過充電防止機能によってアレイが短絡される間に吸収できなかったエネルギーをアレイ損失 (array capture loss) と定義し、算出している。

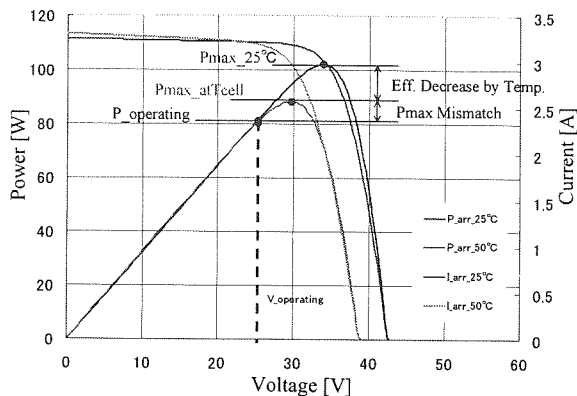


Fig. 6 I-V curves of modeled array

#### 4.3 インバータ及び充放電装置等の損失

インバータの入力電力が計測されていなかったため、測定データだけではDC-AC変換による損失を求めることができない。そのため、NEDOの実証研究の見本システムを用いた実験 (Fig. 7) によってインバータの効率曲線を取得した。Fig. 8 には、負荷定格容量 300W の負荷率に対するインバータ効率曲線を測定し、2 次曲線式で近似したインバータ効率  $\eta_{\text{inverter}}$  と充放電装置を含む全体の効率  $\eta_{\text{total}}$  を示す。また、Fig. 5 に示すケーブルの抵抗損失を含む充放電装置の回路損失を全体の損失からインバータ損失を差し引いた値と定義した。

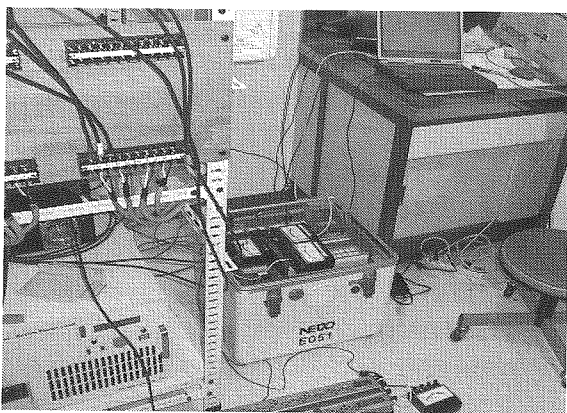


Fig. 7 Experimentation for an inverter efficiency curve

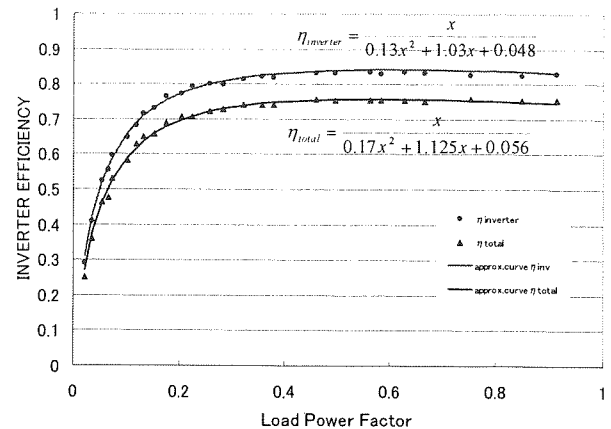


Fig. 8: Inverter efficiency vs load power factor.

#### 5. 結果及び考察

解析対象にした 37 サイトの月別日積算アレイ面日射量とアレイ出力電力量及び負荷消費電力量を Fig. 9 に示す。年平均アレイ面日射量は 1 次システムでは 4.88 kWh/m<sup>2</sup>/日；2 次，3 次システムでは 4.71 kWh/m<sup>2</sup>/日と年々並みである。消費電力量  $E_{\text{load\_avrg}}$  は減少する傾向にあるにもかかわらずアレイ出力電力量  $E_{\text{arr\_avrg}}$  が著しく増加している。その原因は、蓄電池が劣化し、充放電効率が低下したため、アレイから吸収する電力量が増えたことにあると思われる。システム出力係数の分布は 0.24 に集中している (Fig. 10)。

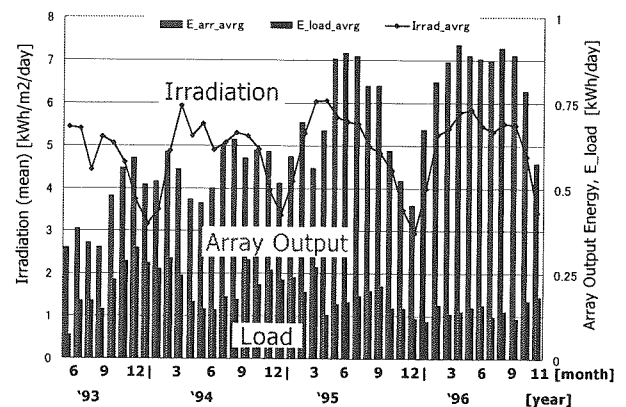


Fig. 9: Monthly average values of Irradiation, Array and Inverter output energy

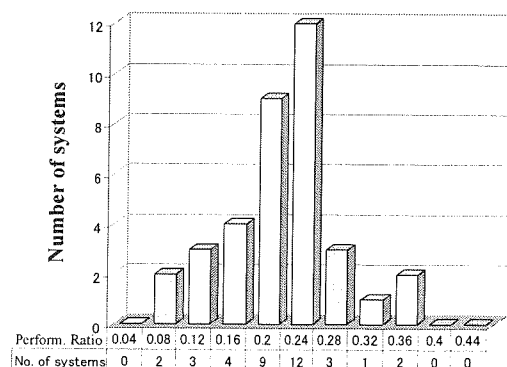


Fig. 10 Distribution of annual performance ratios

実証研究の計測データから詳細な運転特性を読み取るために特定のシステムに対して損失分離のシミュレーションを行った。アルハンガイ県ウンドルウラーンに設置された1次A019システムの平成6年度運転データのシミュレーション解析例をFig. 11に示す。計測された積算日射量に相当するアレイ出力(25℃換算)を100%とし、システム出力係数および各損失の割合を算出した。電力需要は照明が必要となる冬期に掛けて大きく増えている。インバータ及び充放電装置の損失は負荷に比例して一定であるのに対して、蓄電池の充放電損失と過充電防止機能によるアレイ損失は季節によって大きく変動する。温度上昇による出力低下は夏季に最大で5%程度であり、低温における出力向上は動作点が蓄電池の電圧に制限されるため、見られない。

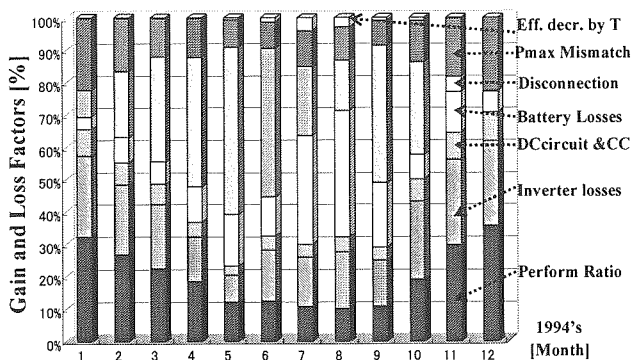


Fig. 11 Monthly average performance ratio and losses for A019 systems.

運転データが揃う37つのシステムに対して上記のような損失分離のシミュレーションを行い、各損失の平均割合をFig. 12に示す。ミスマッチ損失は一定で約20%を示し、温度上昇による損失は夏場に8%まで増加する傾向が見られる。

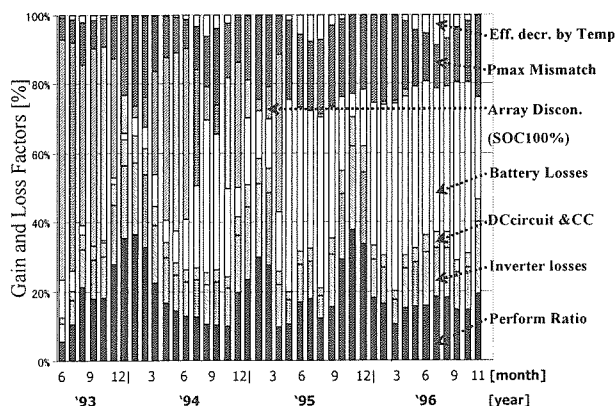


Fig. 12 Monthly average performance ratio and losses for 37 sites output energy

また、蓄電池が新しい内は充放電損失が小さく、過充電防止機能によるアレイカプチャー損失が大きいことが分かる。自動車用バッテリーを使用しているため、運転して2年間経つとアレイ損失がほぼなくなり、充放電損失がシス

テム損失のほとんどを占めている。Fig. 9のアレイ出力電力量の増加原因と同様に、蓄電池が劣化し、充放電効率が低下したため、太陽電池から吸収する電力量が増え、アレイ損失が減ったと考えられる。

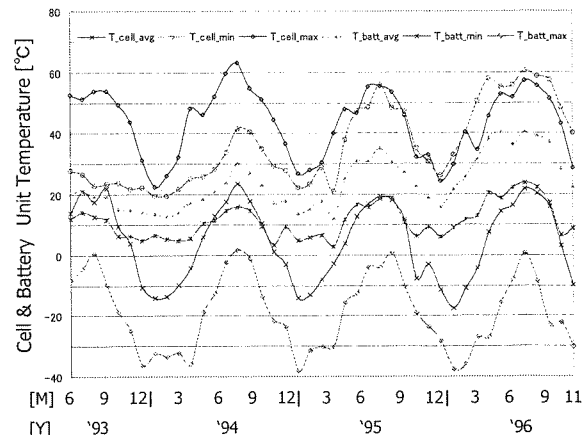


Fig. 13 Monthly maximum, minimum and average values of cells and battery unit temperatures

Fig. 13には、太陽電池セル温度 $T_{cell}$ 、蓄電池ユニット内の温度 $T_{batt}$ の月別平均値、最大値、最小値を示す。太陽電池セル温度の最大値 $T_{cell\_max}$ 、最小値 $T_{cell\_min}$ は-40℃から+65℃まで幅広く変動しており、温度ストレスの大きい運転環境であったことが分かる。ただし、セル温度の最小値 $T_{cell\_min}$ については、太陽電池が動作してない夜間の外気温とほぼ同じ値を示している。蓄電池ユニットの平均温度 $T_{batt\_avg}$ は周囲が低温であったにもかかわらず、10℃以上に保たれており、断熱性が良かったことが分かる。一方、ユニット温度は年々上昇している。これは、蓄電池の劣化に伴う効率低下と発熱量の増加が要因だと考えられる。

## 6. まとめ

解析結果から、全体的に蓄電池の充放電損失の著しい増加、早期機能低下、ミスマッチによる損失量が観測された。その主な原因は次の通りであると考察できる。

- モンゴルの気候は乾燥しているため蓄電池の電解液が激しく蒸発し、機能が低下した。補充液を定期的に行う必要がある。
- 蓄電池が満充電状態には充放電装置の過充電防止機能が働き、アレイ出力がスイッチングするチャタリング現象を起こし、蓄電池の寿命に悪影響を与えた。
- 自動車用バッテリーは大電流放電できるように設計されているため、内部抵抗が大きく、据置用途に充放電効率が低くなる。
- 外気温-20℃の真冬でも蓄電池の温度10℃以上で保たれており(Fig. 13)、ゲル内の温度は零度以下になることが少なく、蓄電池の容量や寿命に大きな影響がなか

ったと考えられる。

著者らは、独立小型太陽光発電システムの解析・評価方法をシステムの基本性能を示すパラメータ分析法とシステム損失を詳細に分離できる、時系列のシミュレーション方法と組み合わせることによって改善した。

実証研究の実測データを詳細に解析し、全体の損失を6つの項目に分離して、システムの機能低下・故障原因を明らかにした。また、半乾燥地域に使用する、独立小型太陽光発電システムの設計に不可欠な気象環境や電力需要などの特性を明確にした。

#### 参考文献

- 1) 国際エネルギー機関 (IEA) の太陽光発電システム研究協力協定 (PVPS), <http://www.iea-pvps.org/>
- 2) IEA/PVPS Task-3, Managing the Quality of Stand-Alone Photovoltaic systems - Recommended Practices, 2003
- 3) James P. Dunlop etc, Recommendations for Maximizing Battery Life in PV Systems: A Review of Lessons Learned, Proceedings of Forum 2001 Solar Energy, April 2001
- 4) IEA/PVPS Task-2, Analysis of Photovoltaic Systems, Report IEA-PVPS T2-01, 2000
- 5) Mongolian Statistical Year Book 2000, National Statistical office, 2001
- 6) N. Enebish, National Photovoltaic Program "100,000 Solar House (GER) in Mongolia, 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, September 15-22, 2000
- 7) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) : 太陽光発電システム実用化技術開発 (携帯型太陽光発電システム実証研究, 平成9年3月
- 8) IEC; The International Electrotechnical Commission, "Photovoltaic system performance monitoring Guidelines for measurement, data exchange and analysis", IEC 61724, 1998
- 9) U. Jahn, D. Mayer, M. Heidenreich and etc. "International Energy Agency PVPS Task 2: Analysis of the operational performance of the IEA Database PV systems", 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Glasgow, United Kingdom, May 2000
- 10) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 成果報告書「システム評価技術の研究開発」平成13年, 日本品質保証機構