

長坂山トンネル太陽光発電設備

大阪管理部 電気通信課	桃澤宗夫
大阪管理部 施設維持事務所	鳥越稔
神戸第一建設部 施設課	建部実

.....

要 約

近年の地球環境は多くの環境問題を抱えており、これら諸問題の解決を図るために従来の化石燃料に代わるクリーンな自然エネルギーの有効利用が、国際的・全世界的にも注目され始めている。

わが国においては、これら環境問題、特に地球温暖化の問題が最重要課題の一つとして認識され、その抜本的解決策として太陽光発電の開発普及が極めて重要な国家的課題であると考えられている。

長坂山トンネル太陽光発電システムは、これらの社会的背景のもとに、阪神高速道路上の電気通信設備増加に伴う電力需要の上昇に対する有効な新技術として導入されたものであり、高速道路トンネルへの適用としては例の無いシステムとなっている。

本太陽光発電システムの導入により、設計当初の目標であった、トンネル緩和照明に必要な電力のピークカットには有効に稼動することが確認できたが、同時に今後の太陽光発電設備の設計上の検討課題も明らかになった。

本稿では、長坂山トンネル太陽光発電設備について、その設備概要を紹介するとともに、設備の稼働状況と今後の設計上の検討課題について述べるものである。

キーワード：クリーンエネルギー、環境調和、負荷パターン、発電パターン、
系統連系方式、発電電力制御

まえがき

太陽光発電は、クリーンでかつ無尽蔵な太陽からの光エネルギーを直接、電気エネルギーに変換するシステムであり、1954年にアメリカ・ベル研究所のピアソン他によって発明された。以来、人工衛星や灯台などの無人電源として実用化が進み、1980年代からの太陽電池電卓の商品化によって急速に身近なものとなった。

わが国における太陽光発電技術開発は、化石燃料の代替エネルギー源の開発を目指して1974年にスタートした通商産業省工業技術院による「サンシャイン計画」の一環として進められている。近年では、世界的な地球温暖化、酸性雨、オゾン層破壊や海洋汚染といった地球環境規模の問題がクローズアップされる中、地球環境保全に関する国

際条約に基づき開始された「ニューサンシャイン計画」において、重点導入を図るべき新エネルギーとして中心的役割を期待されている。

また、太陽光発電技術の開発普及のための周辺環境についても、電気事業法関係法令の改正や「系統連系技術要件ガイドライン」（通商産業省資源エネルギー庁公益事業部技術課監修、以下ガイドライン）の策定、電力会社による余剰電力の買い取り開始、「住宅用太陽光発電システムモニター事業」と呼ばれる個人住宅への太陽光発電システム設置費の助成制度開始など着実に進展しており、これに伴う需要の拡大と市場の成長、その結果としての低価格化の進展も期待される状況にあるといえよう。

このような社会的背景のもとに阪神高速道路公団においても、クリーンで無尽蔵な太陽エネルギーの利用によるエネルギー供給基盤や環境保全への寄与と、阪神高速道路上の電気通信設備増加に伴う、電力需要の上昇に対する有効な新技術の一つとして太陽光発電技術の適用が検討され、7号北神戸線の長坂山トンネル（神戸市北区藍那）に系統連系方式による太陽光発電システムが導入された。

本稿は、本システムの設備概要を紹介するとともに、設備の稼働状況および今後の太陽光発電システム設計上の検討課題について述べるものである。

1. システムの概要

1-1 太陽電池の原理

太陽電池は半導体の一部で、図-1のようにP型半導体とN型半導体を積み重ねた形状を持ち、PN接合での光電変換作用を利用したものである。

半導体は光エネルギーを受けると内部にN型半導体では電子を、またP型半導体では正孔を発生するため、それぞれにプラス、マイナスの起電力を生じ、電極を通して電力を取り出すことができる。これが太陽光発電の原理である。

太陽電池には、図-2に示すとおり各種の材料を用いたものが開発されており、選定に当たっては変換効率やコスト、耐久性などを考慮し決定する必要がある。

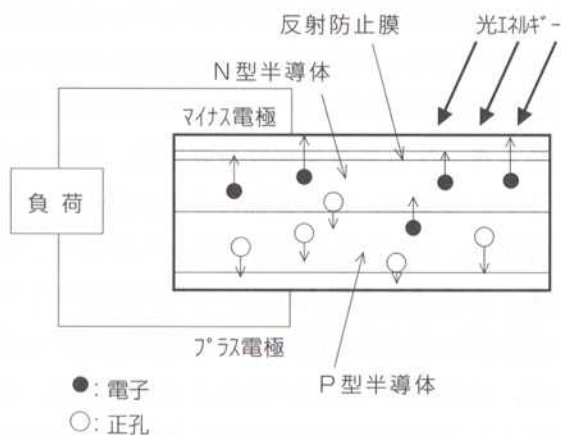


図-1 太陽電池素子の基本構造

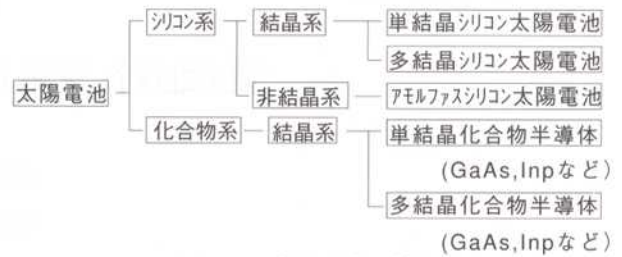


図-2 太陽電池の種類

1-2 対象負荷の選定

太陽光発電では太陽光の日射強度の変化に比例して発電電力が変動する。このため、発電した電力を有効に利用しようとするれば、太陽光発電の発電パターンと適用負荷の負荷パターンが相似するほど、効率的に発電電力を利用することができる。

太陽光発電システムの適用負荷を選定するにあたって考慮すべき項目は主に以下のとおりである。

- (1) 負荷特性（発電パターンと負荷との相関性）
- (2) 省電力効果
- (3) 設置スペース
- (4) 負荷増への拡張性
- (5) 既存設備との適応性
- (6) 工事の施工性
- (7) 保守点検性
- (8) 環境との調和
- (9) 公共的アピール性

これらの各項目を比較検討した結果、トンネル緩和照明、料金所電源、および高架下照明などが適用の可能性を持つものと考えられるが、図-3に示すように野外輝度が高いほど明るく、野外輝度が低いほど暗く制御される照明負荷と太陽光発電パターンとの相関性は非常に高く、坑口付近に中央分離帯という広い設置スペースを持つトンネル緩和照明が、負荷増への拡張性、省電力効果、および公共的アピール性の面でも最適である。

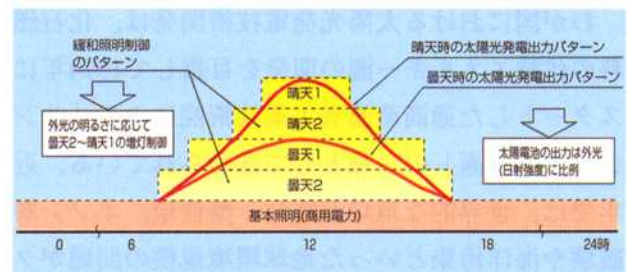


図-3 長坂山トンネル緩和照明負荷および発電パターン

1-3 システムの形態

太陽光発電システムの形態は、大きく分類すると独立システムと系統連系システムに大別される。

独立システムは、商用電力系統との関係を持たず、主に太陽光発電のみで電力供給するシステムであり、負荷直結型、蓄電池設置型およびハイブリッド型などに分類される。

また、系統連系システムは商用電力系統との連系運転により電力を供給するシステムで、発電電力が商用電力系統へ逆方向潮流しないバックアップ型と、余剰発電電力が商用電力系統へ逆方向潮流する完全連系型に分類される。

本システムでは、トンネル緩和照明の負荷特性を考慮し、電力供給の信頼性の高さを優先して系統連系システムとした。さらに、発電電力と負荷との相関性が非常に高く、同変電設備構内の他負荷への電力供給の可能性は考えられるが受電所の契約電力を超えて商用電力系統への逆方向潮流は現実的に考えられないこと、および既設の受変電

設備を有効利用できることなどからバックアップ型システムを選定している。これにより、蓄電池設備を持たない経済的なシステム構成となった。

1-4 太陽電池容量の算出

太陽電池の出力表示は、一般に日射強度 1 kW/m^2 、素子温度 25°C における最大出力を採用しているが、実際に使用する場合、表-1に示す要因により出力低下が生じる。

表-1 太陽電池容量の算定係数

$$P = K1 \times K2 \times K3 \times K4 \times W \times K5$$

P : 負荷へ供給できる電力 (負荷容量)

K1 : 温度に対する補正係数

(温度 1°C につき 0.5% 低下、夏期高温時 60% とする)

$$K1 = 1 - (1 - 0.005 \times (60 - 25)) = 0.825$$

K2 : 表面汚損、経年変化による出力補正係数 K2=0.99

K3 : 直流回路のロス係数 K3=0.972

K4 : 最大出力点からのずれに対する補正係数 K4=0.971

W : 太陽電池の定格出力容量

K5 : インバーターの変換効率 K5=0.92

(注) K2、K3、K4、K5の各係数については、発表されているデータ (電気学会技術報告「太陽エネルギー技術の基礎と応用」) に基づき算定している。

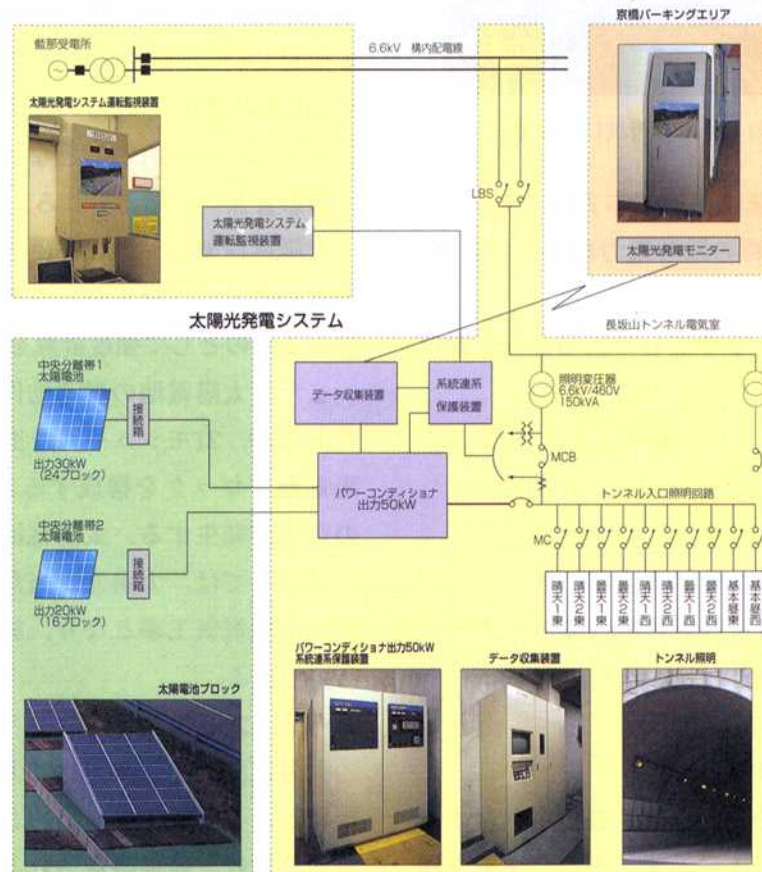


図-4 長坂山トンネル太陽光発電システム構成図

表-2 主要な機器の仕様一覧

太陽電池仕様	
電池種類	単結晶シリコン
変換効率	セル17.1%、モジュール14.6%
電池表面	防眩ガラス採用
数 量	840枚 (21枚/ブロック) × 40ブロック
発電出力	最大61.1W/モジュール 1.25KW/ブロック
定格出力	50KW
寸 法	970×430mm/モジュール W3110×D2750×H1990mm/ブロック
設置角度	30度傾斜
設置方位	南向き

※変換効率およびコストを考慮し、長年の実績もある信頼性の高い単結晶シリコンを選定した。

パワーコンディショナ仕様	
種 類	常時系統連系形
定格容量	50KW
定格入力電圧	DC 0～500V
定格運転電圧	DC±270～375V (Pmax運転電圧範囲)
出力電圧	山相三線 AC460V
出力周波数	連系系統周波数60Hz
インバータ方式	電圧型自励式
スイッチング方式	正弦波PWM方式
絶縁方式	商用周波絶縁方式
電力制御方式	最大電力追従制御方式
出力制御方式	電流制御方式

※力率、流出高調波などを考慮し電圧型自励式を、またコストとコンパクト性よりPWM方式を選定した。



写真-1 長坂山トンネル西坑口の全景

また、太陽電池容量算出の基本方針としては、「太陽光発電電力で負荷の瞬時電力を賄える容量」とした。

したがって、これらを考慮して次のように容量を算出した。

$$P = K1 \times K2 \times K3 \times K4 \times W \times K5$$

$$P = 0.825 \times 0.99 \times 0.972 \times 0.971 \times W \times 0.92$$

$$\approx 0.7 \times W$$

よって、容量算出係数は約0.7となり、現地調査の結果より想定される負荷容量Pが34.8kWであるため、太陽電池の定格出力容量は以下となる。

$$W = 34.8 / 0.7 \approx 50 \text{ [kW]}$$

1-5 本システムの構成

本システムの構成を図-4に、長坂山トンネル西坑口の全景を写真-1に示す。また、主要な機器の仕様を表-2に示す。

2. 工事の施工

2-1 太陽電池

太陽電池架台と基礎の施工に当たっては、太陽の光が年間を通じて良好に得られるように配置を検討した。

受光障害の発生で最も厳しい条件となるのが冬至の時期であるが、現地調査の結果、全モジュールに対し約6.2% (52モジュール) の影響のみで、かつ影響が懸念されるのはそれらのモジュールのごく一部だけであることなどから発電出力の低下には影響無いと考えられる。

太陽電池架台および基礎の設置角度としては南向き30度とし、風圧荷重や耐震性に対して十分に耐えるものとして強度計算を行っている。

また、太陽電池の最適動作電圧は直流17V程度であるが、21モジュールを直列に接続し一つの太陽電池ブロックを構成するため、直流360V程度の電圧が発生する。太陽電池の据付および電気工事に際しては、太陽光が当たるとすぐに発電するため活線電気工事となり、施工には十分に注意が必要である。

2-2 太陽電池接続箱

太陽電池の出力電力は、太陽電池接続箱で並列接続し、必要な容量に集約されるため、接続箱の設置位置は、並列接続される各太陽電池ブロック群の付近が望ましい。

また、内部には配線用遮断器、ブロッキングダイオードおよびアレスターなどが収納されている。

2-3 パワーコンディショナおよび系統連系保護装置

パワーコンディショナは太陽電池からの直流電力を交流電力に変換するとともに、太陽電池出力を最大限に引き出す発電電力制御（最大電力追従制御）を行う。また、商用電力との系統連系運転において、異常発生時の事故を最小限に食い止めるため、系統連系保護装置にはガイドラインに準拠した保護リレーを内蔵する。

これらの機器は、設置環境やメンテナンス性を考慮しトンネル照明に電力を供給する既設の変電設備と同じく坑口付近のトンネル電気室内に設置した。

なお、保護リレーおよびその整定値については、電力会社との協議が必要である。

2-4 データ収集装置および太陽光発電モニター

システムの発電電力、電圧、電流、日射強度、温度、トンネル照明負荷などの各種計測データや運転時間などの運用データをデータ収集装置に収集・蓄積し、今後の統計解析に有効活用するもの

とした。

また、太陽光発電に関する基礎知識や本システムの概要、並びにデータ収集装置にて収集・蓄積した各種データを一般利用者にもモニタリングできる様に、太陽光発電モニターを3号神戸線の京橋パーキングエリア（神戸市中央区新港町）に設置し、利用者サービスと公共的アピールに貢献するものとした。

2-5 その他留意点

7号北神戸線長坂山トンネルは、神戸市北区の緑豊かな自然環境に囲まれた立地条件にあり、周辺環境への調和にも十分に配慮した。

配置デザインを決定するに当たっては、

- (1) 発電容量の50kWを確保する
- (2) 設置方位南向き、設置角度30度を原則とする
- (3) 既存施設との取り合いを考慮する

といった前提条件があったが、コストやメンテナンス性などについても検討した結果、中央分離帯の地盤をリサイクルウッドなどの自然素材を用いたストライプ模様とすることにより太陽電池の無機的要素を自然環境の中に融合させることができた。なお、太陽電池表面には走行車両への安全性

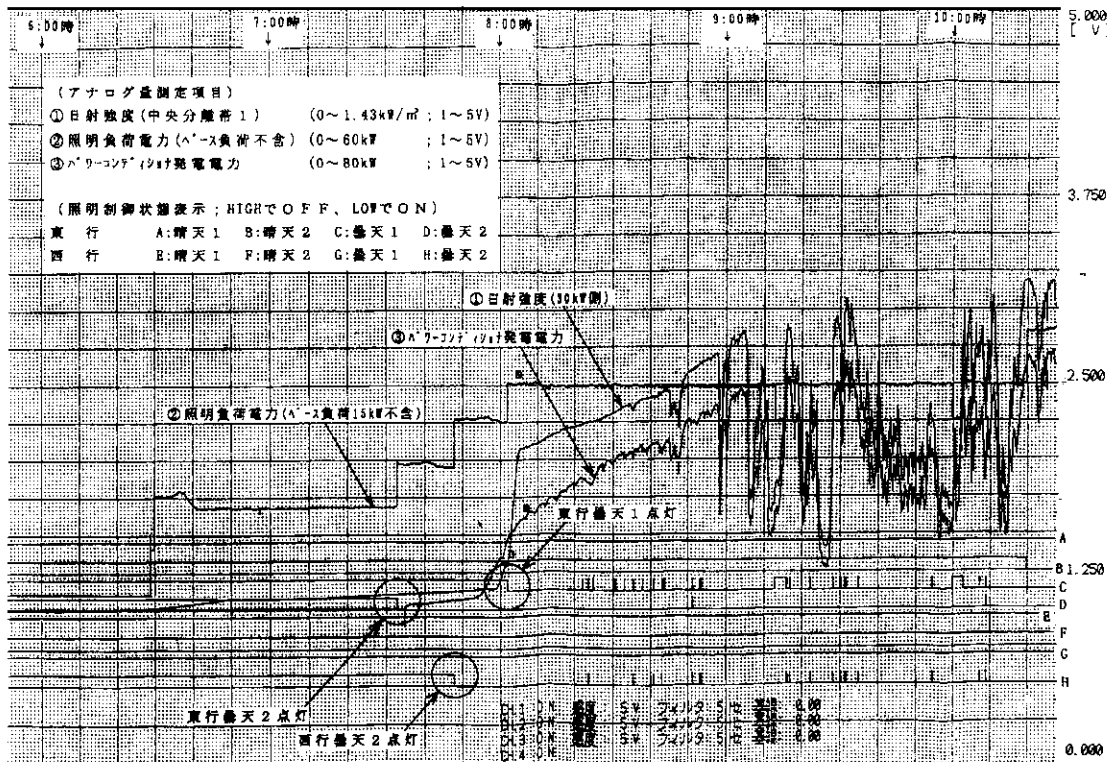


図-5 システム稼働状況（天候；快晴一時曇）

を考慮し、防眩性ガラスを採用した。

また、中央分離帯内にはデータ収集装置にて収集・蓄積する各種データ計測用の日射計、温度計および雨量計などのセンサー類も設置している。

3. システムの稼働状況

太陽光発電システムの稼働状況を図-5に示す。

トンネル緩和照明は図-3で示したように、野外輝度に応じて順次増灯あるいは減灯される。図-5によれば、午前7時33分頃にまず東行曇天2が点灯し、続いて西行曇天2，東行曇天1と野外の明るさに応じて順次増灯制御され、照明負荷電力が段階的に増加する様子が見られる。

一方、中央分離帯内で計測された日射強度は30分程度遅れて上昇を始め、太陽光発電電力（パワーコンディショナ出力電力）もそれに比例して出力上昇を見せている。

以上より、トンネル緩和照明の負荷パターンと太陽光発電パターンの相関性が非常に高く、緩和照明に必要な電力のピークカットには効果的であるという結果が確認できる。

4. 今後の検討課題

長坂山トンネル太陽光発電システムの概要と工事の施工、並びにシステムの稼働状況を紹介した。

前述のように、太陽光発電設備のトンネル緩和照明への適用は効果的であり、現在考え得る高速道路電気設備への適用としても最も効率的な利用形態であるといえる。しかし、今後の高速道路への太陽光発電の普及に向けてはいくつかの検討課題が明らかとなった。以下にその検討課題を述べる。

4-1 システムの低コスト化

太陽光発電システムは近年の国家的な普及促進策により、着実にコストダウンへの良循環が実現しつつあるが、一般家庭の電気料金20~30円/kWh程度に相当する発電コスト水準より相当割高なのが現状である。

太陽電池については、今後さらなる高効率な太陽電池の開発や量産などによる低コスト化、あるいは周辺機器の低価格化が期待されることであるが、適用システムの選定および構成、周辺機器の簡素化、並びに既存設備の活用など、設計上の配慮によりシステムの低コスト化を図れる場合が

表-3 逆潮流ありと逆潮流なしとの保護協調方式の相違点

系統連系技術要件ガイドライン		
項 目	逆潮流なし	逆潮流あり
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">保護協調</div> 保護継電器	<ul style="list-style-type: none"> ・地絡過電圧継電器 (OVGR) ・過電圧継電器 (OVR) ・不足電圧継電器 (UVR) ・周波数低下継電器 (UFR) [単独運転検出] ・逆電力継電器 (RPR) [単独運転検出] 	<ul style="list-style-type: none"> ・地絡過電圧継電器 (OVGR) ・過電圧継電器 (OVR) ・不足電圧継電器 (UVR) ・周波数上昇継電器 (OFR) [単独運転検出] ・周波数低下継電器 (UFR) [単独運転検出]
転送遮断装置の設置		転送遮断装置 (系統側対策) または単独運転検出機能 (インバータ側能動的対策+負荷制限またはRy整定値調整) の設置
路線無電圧確認装置 (LPD) の設置	LPDの省略条件 ・保護装置の2系列化 ・不足電力継電器 (UPR)	LPDの省略条件 ・単独運転検出の2方式 (インバータ側対称) 採用と2箇所遮断
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">電圧変動</div>		自動的に電圧調整する対策を行う (電力用コンデンサの制御またはインバータ進相運転等による無効電力制御)

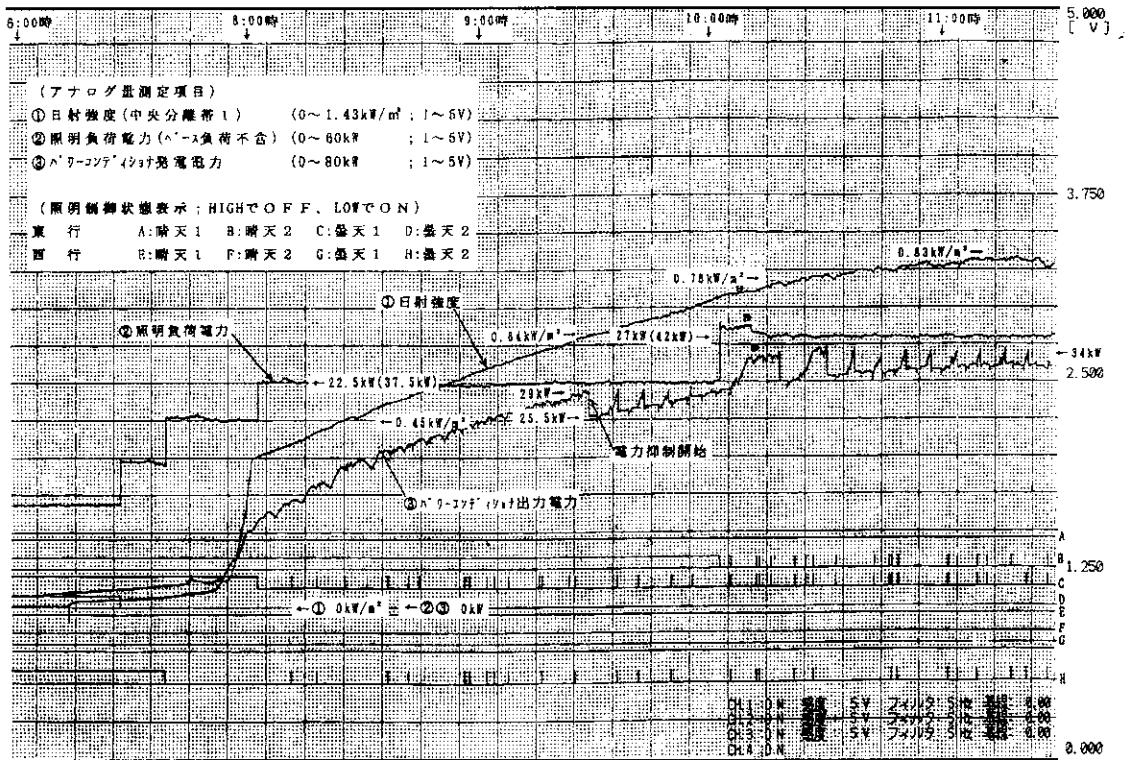


図-6 UPR作動時のシステム稼働状況(天候;快晴)

多分にある。

高速道路電気設備を想定した場合、負荷に適した最小限のシステム構成とする、あるいは構造物や建築物、遮音壁などと一体化した構造とし、別途架台を設けないなどの対策によりシステムコストを低くすることが設計上の検討課題となろう。

4-2 負荷制御と発電電力制御の融和

太陽光発電システムでは、系統連系方式の区分により、ガイドラインに定められた各種の保護継電器を設置する必要がある。表-3に系統連系方式の逆潮流ありと逆潮流なしとの保護協調方式の相違点を示す。

事故時などの再閉路に際して、太陽光発電システムの解列が確認できないと、太陽光発電システムを含む電力設備に損害を与える恐れがあるため、電力会社の配電用変電所側に線路無電圧確認装置を設置するが、本システムではこれを省略するため、ガイドラインに準拠しUPR(不足電力継電器)により保護システムを構築している。

UPRは、負荷容量に対する発電電力の相対的な増加によって、商用系統からの供給電力がある一定値を下回った時に、逆潮流状態の前段階で動作

する継電器であり、逆潮流(逆充電)に至らない様に一時商用系統からシステムを解列、すなわち太陽光発電電力の供給を一時停止し、商用系統からの供給電力が一定値以上に戻ればシステムを自動復帰させている。

したがって、UPRの動作は本質的異常、故障あるいは危険状態を示す動作ではないが、天候状態によっては停止・自動復帰が1日20回以上生じる日があり、運用上好ましい状態ではない。

原因としては新設時で発電効率が予想以上に高いこと、および負荷制御と発電電力制御のタイミングのずれが挙げられる。

野外輝度によりトンネル緩和照明を制御する自動調光装置は、照明器具の寿命などを考慮し、野外輝度変化に対して約2分程度の時限を持たせて増灯制御している。一方、太陽光発電電力はパワーコンディショナにおいて日射強度変化に対して数秒で最大電力を追従制御している。このため、雲間から急に日が射すなどの不安定な天候が繰り返すと、一時的に照明負荷よりも発電電力が大きくなる可能性がある。

対策としては、UPR動作時に発電電力制御方式

を一定時間だけ最大電力追従制御から電力抑制制御（一定電圧制御）に移行する方式をとった。

改良後のシステムの稼働状況を図-6に示す。UPR動作時に断続的に電力抑制制御に移行することにより不要解列が回避されている様子（ノコギリ形波形）がわかる。

今後の太陽光発電の適用に際しては、これら負荷制御と発電電力制御の特性の融和を考慮し、以下の項目が検討課題であると考えられる。

- (1) 発電容量算出に際しては、システムの構成と負荷制御特性を考慮した基本方針を十分に検討し、容量を算出する。
- (2) 負荷制御と発電電力制御の特性を融和させ、太陽光発電電力の有効利用を図る。

あとがき

本システムは、平成8年10月10日に竣工し、現在運用中であるが、収集・蓄積された各種データの活用やデータ収集・統計のためのメンテナンス手法など、細部については今後さらに検討を要する。

また、前述のUPR動作に対する対策については、トンネル緩和照明制御と発電電力制御の相互の特性を融和させ、本システムの運用方法、メンテナ

ンスの手法、安全性およびガイドラインなどを考慮のうえ、さらなる検討と対策の可能性のあるものとする。

今後は今回得た経験を生かし、収集・蓄積された各種データを基に、太陽光発電技術の開発普及に向けた、高速道路電気設備としての設計・検討手法を確立していくことが課題となろう。

今後の事業推進の中で、ここで述べた太陽光発電システムの概要、工事の施工、稼働状況および今後の検討課題が何等かの参考となれば幸いである。

最後に、本システムの導入実用化のご検討を頂いた「阪神高速道路の電気通信設備に関する調査検討委員会（委員長：長谷川利治 京都大学工学部教授）」の委員を始め、工事施工に際しお世話になった関係各位には深く感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：阪神高速道路の電気通信設備に関する調査検討業務報告書，1993.3.
- 2) 阪神高速道路公団：太陽光発電システム設計業務報告書，1994.2.