

## ソーラートライジェネレーションの提言

Proposal of Solar Tri-Generation

田中 忠良 \*1  
Tadayoshi TANAKA安藤 祐司 \*1  
Yuji ANDO天野 雅継 \*1  
Masatsugu AMANO

## Abstract

Presently, each of the heat and electricity is individually supplied even if their energy resources are the same. Therefore, from the viewpoint of the effective use of energy resources, development of co-generation producing both of them is promoted. To enhance more the use of energy resources, it is thought that it is suitable to supply three different types of energy from one energy resource. That is, it is tri-generation, which supplies heat, electricity and fuel. From this definition, it is easily understood that tri-generation is realized by solar energy. Based on this consideration, the concept and configuration of solar tri-generation is defined in this paper and we make clear the effectiveness of this system by the simplified analysis of solar co-generation and of the three different systems of fossil fuel co-gene, solar co-gene, and solar tri-gene. with fossil fuel co-gene..

キーワード: 太陽エネルギー、ハイブリッドシステム、コジェネ、トライジェネ、ソーラー燃料

Key Words: Solar energy, Solar hybrid system, Co-generation, Tri-generation, Solar fuel

## 1. 緒言

わが国の経済と生活社会を豊かにする上でエネルギーは最も重要な資源の一つであり、また、エネルギーの消費は将来も増大すると予想されていることから肥大化しつつある電力、ガスなどの既存エネルギーネットワークに大きな負担をかけず、また、海外のエネルギー依存度を低減することがわが国のエネルギー供給の安全性、信頼性を維持する上で重要と思われる。さらに、地球環境の再生とわが国のエネルギーセキュリティの観点からエネルギー資源に乏しいわが国がある程度自立してエネルギーを確保するために太陽エネルギー等の地域に密着した環境から得られる資源をエネルギーとして利用する技術を進展させることが重要と思われる。

そこで、エネルギーの高効率利用とエネルギー源の確保という観点から一つのエネルギーから熱、電気、燃料

の三つのエネルギーを供給するトライジェネレーション(以下、トライジェネと称する)を提唱<sup>1)</sup>し、この新しいトライジェネを実現できるエネルギー源が太陽だけであることを概説し、それを実現するシステムを例証した。

本報では、太陽エネルギーによるトライジェネをソーラートライジェネと称することとし、その概念を実現するシステム事例を提示し、その方式と既に市販されているソーラーコジェネ(熱と電気を太陽エネルギーで供給)との太陽エネルギー有効利用率の比較および太陽エネルギー単独では安定に熱と電気のエネルギーを供給することが困難であるために近い将来、実用化が期待されているマイクロガスタービンや燃料電池などの化石燃料使用コジェネとそれを併設したソーラーコジェネ、ソーラートライジェネの三つの異なるシステムについて、同量の熱と電気を供給することを制約条件にして、それらのエネルギーを供給するために消費するエネルギー量の比較について解析し、ソーラートライジェネの有用性を明らかにした。

## 2. トライジェネレーションの基本概念と特長

\*1 産業技術総合研究所 エネルギー利用研究部門  
(〒305-8569 つくば市小野川16-1)  
e-mail: tad.tanaka@aist.go.jp  
(原稿受付: 2002年6月4日)

## 2.1 基本概念

生活や産業にとって最も必要とされるエネルギー形態は、電気と熱である。これらのエネルギーは現在、地球環境問題から CO<sub>2</sub> の排出の少ない天然ガスが主に使用されている。天然ガスを使用しても、利用目的によって熱は熱、電気は電気と単一のエネルギーしか発生していない。その理由は通常、大型の火力発電設備は、輸入した天然ガスが得やすい臨港地帯にあり、熱を消費する居住地への熱の長距離輸送・利用が経済性に劣るために発電専用となっていると思われる。しかし、超高層ビルなどでは、熱需要と隣接しているために電気と熱を併用することが可能であり、電気と熱を供給する熱電併給発電、すなわちコージェネレーション(以下、コジェネと称する)が普及しつつある。

周知のように発電専用の効率は約 40%に対してコジェネの効率は 70 から 80%と言われ、コジェネを導入することによってエネルギーを有効に利用することができる。この概念を演繹すると一つのエネルギー源から三つのエネルギーを供給すればよいことになる。これがトライジェネの基本的な概念である。

このトライジェネを実現するにはエネルギー源が何であり、三つ目のエネルギーが何であるかを明らかにする必要がある。

この命題の回答を考える上で、わが国のエネルギー事情を考慮に入れると、将来においても生活・産業に必要なエネルギーは熱と電気であり、その他の形態のエネルギーは不必要と思われる。また、わが国は将来においても海外に依存しないでエネルギーを確保することは不可能であろう。この状況が将来にわたっても変わらないとすれば、三つ目のエネルギーは自立化に役立つエネルギー、すなわち燃料である。しかし、エネルギー源から燃料を生産する場合、化石燃料のような消費して枯渇する再生不能エネルギーをエネルギー源に使用すると、燃料転換に伴う損失のために化石燃料の枯渇を助長するだけで化石燃料から他の燃料を製造することは得策ではない。しかし、再生可能エネルギーである太陽エネルギーであれば、容易に熱が得られ、光起電力効果による電気の発生(太陽電池)、光化学効果による燃料製造(水電解による酸素・水素の製造)が可能であり、太陽エネルギーは

消費しても枯渇することなく太陽から絶えずエネルギーが供給されるために燃料を製造してもエネルギーの無駄にはならない。

以上の理由によりトライジェネは、エネルギー源に太陽エネルギー、三つ目のエネルギーを燃料として実現でき、これが唯一の解と考えられる。

従って、太陽エネルギーによるソーラートライジェネの基本概念は図 1 のように示すことができる。太陽エネルギーから熱、電気、燃料を生産するには図に示したように熱を発生する集熱と太陽電池などの光起電力効果から電気を発生するエネルギー変換機能と光触媒や光電気化学による水電解によって水素を発生するなどの燃料生産機能をもてばよいことになる。太陽から燃料への転換もエネルギー変換の一種であるが、2.2 で述べるように熱と電気は「消費するエネルギー」、燃料はそれらを「生産するエネルギー」と機能が分かるようにここでは区分した。

このような機能は太陽エネルギーの直接利用技術から容易に理解することができる。

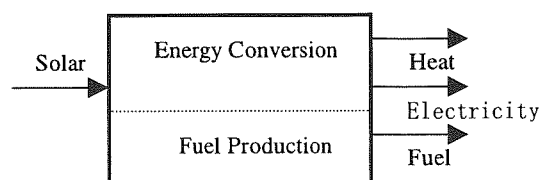


Fig.1 Basic Concept of Solar Tri-Generation

図 1. ソーラートライジェネの基本概念

## 2.2 特長

前節で述べたように、わが国のエネルギー消費は今後も増大すると予測されているが、肥大化する既存のエネルギーネットワークの供給安定性と信頼性を確保し、エネルギーの海外依存度を低減することは重要である。また、地球環境保全の観点からも CO<sub>2</sub> 排出削減のために太陽熱利用および太陽光発電システムの普及が重要視されている。これらの技術は太陽エネルギーからそれぞれ熱と電気を個別に供給するシステムであるが、それらを併給するソーラーコージェネの光・熱複合コレクタ<sup>2)</sup>が市販されている。

このような状況において、それらの技術とソーラートラ

イジェネを比較した時、ソーラートライジェネは次のような長所を有している。

- 1) 熱と電気は、消費(消滅)する方向の下流に流れるエネルギーであるが、燃料は、それらを生産する方向の上流に還流するエネルギーである。
- 2) エネルギー利用の形態として、コジェネの場合は、電気と熱の二つの自由度であるが、トライジェネの場合は、自由度が三つになり、エネルギー利用の自由度が増す。
- 3) 将来、化石燃料コジェネを付設した分散型のエネルギーシステムが各所に構築された時、システム間で電気と熱を個別に融通することも可能であるが、トライジェネであれば、コジェネの燃料を供給するだけで電気と熱を同時に融通することができる。また、燃料の輸送には電気や熱と違って、輸送過程でエネルギーの損失はない。

これらの特長を生かし、有用性を明らかにするためにソーラートライジェネの構成方式とソーラートライジェネの特長を明らかにするために以下のような簡単な解析を行った。

### 3. ソーラートライジェネレーションの方式

太陽エネルギーを用いて 2 節で述べた三つの技術を融合したソーラートライジェネのシステム構成を明確にするために以下のような検討を行った。

光・熱複合コレクタが既に市販されているので、それに光作用を加えたソーラートライジェネコレクターを開発すれば三つのエネルギーを供給することができる。

そこで、ソーラートライジェネコレクタを開発するにあたって、光・熱複合コレクタを導入した例<sup>2)</sup>を見ると、一般家庭で必要とする熱と電気(3kW 相当)を供給するのに 36 枚のパネル(1 枚のパネルの面積は 0.9m<sup>2</sup>)が使用され、複合コレクタは 6 枚、30 枚は太陽電池だけのパネルである。これは集熱効率と太陽電池の発電効率に大きな差があるために全部複合コレクタを使用すると熱が余ってしまうためである。従って、ソーラートライジェネコレクタを用いた場合でも熱が余ることになる。従って、光作用は効率の低い太陽電池と組み合わせて太陽光複合コレクタと

した方がよいと思われる。

このような前提条件においてソーラートライジェネを行うためには図 2 に示したように光・熱複合コレクタと太陽電池と光作用を組み合わせた光複合コレクタにより実現することが可能となる。

光複合コレクタを開発するのに、太陽電池と組み合わせ太陽エネルギーを直接利用できる燃料生産機能に光触媒と光電気化学反応が考えられる。光触媒については、現在、研究が進められ、従来は紫外光線しか利用できなかったが、可視光線でも水を分解する触媒が開発されている<sup>3)</sup>。しかし、太陽エネルギーの利用効率は余りにも低く、水素をエネルギーとして利用できるところまで開発は進んでいない。

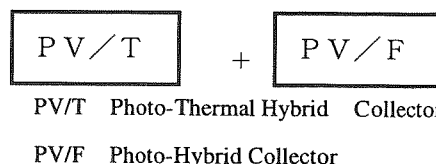


Fig.2. Collector for Solar Tri-Generation

図 2. ソーラートライジェネ用コレクタ

一方、太陽電池を用いた光電気化学反応においては、効率 9%のアモルファス太陽電池( $\alpha$ -Si 電池)を水に浸漬し、太陽光を照射させ、発生した電気で直接水電解した実験によれば、総合効率 7.2%(電解効率、約 80%)で水素を発生したとの報告<sup>4)</sup>がある。

従って、本報では、太陽電池を用いた光電気化学反応による水素製造を行うこととし、 $\alpha$ -Si 電池を水素製造用、結晶系のシリコン太陽電池(Si 電池)を電力用にした光複合コレクタとする。

### 4. 特性解析

#### 4.1 ソーラーコジェネとソーラートライジェネの太陽エネルギー利用率の比較

光複合コレクタのようなタンデム型の太陽電池により電気を発生し、 $\alpha$ -Si 電池の出力を水電解に用いるよりも電気として利用した方がよいとも考えられる。

そのため、光複合コレクタにおいて $\alpha$ -Si 電池の出力を水電解用に使用した場合とそうでない場合について以下

のような条件のもとで比較検討を行った。

そこで、住宅用太陽光発電システムモニター事業で設置した 65 件の運転特性評価が行われ、その結果によれば、電池パネルから発生した電気のうち、モジュール温度により 5.5%、インバータ変換により 7.4%、MPPT ミスマッチにより 10.3%、日影により 4.9%が年間平均して損失していると報告している<sup>5)</sup>。日影については設置を配慮すればなくすことが可能であるが、MPPT ミスマッチについては日射の変動等に追従して MPPT を行うことは技術的に難しいと思われる。しかし、これらの損失のうち、モジュール温度とインバータ変換に伴う損失はここで提案する方式によってそれらの損失を低減することは可能と考えられる。

すなわち、図3に示したように $\alpha$ -Si 電池は水に浸漬し、Si 電池はそれに接触して配置されているので、モジュール温度は大きく上昇しないと考えられる。また、インバータ変換の効率が悪くなるような場合、Si 電池の電力を $\alpha$ -Si 電池に電位を整合して供給すればその電力を水電解に利用することができる。なお、Si 電池から $\alpha$ -Si 電池に強制的に外部から通電することになるが、このような事例は太陽光発電による融雪システム<sup>6)</sup>で実証されている。しかし、この方法が効率面で不利な場合には、経済性、稼働率の問題があるが、固体高分子水電解装置などを付設し、Si 電池の電力により水素を発生することも考えられる。

以上のことから $\alpha$ -Si 電池による水電解、固体高分子水電解装置の効率が同一と仮定すると上述の二つの方法は等価であるので $\alpha$ -Si 電池と Si 電池を組み合わせた光複合コレクタによって電力供給用の Si 電池で損失する電力を水電解によってこれらの損失を吸収する可能性について以下のような簡単な解析を行った。

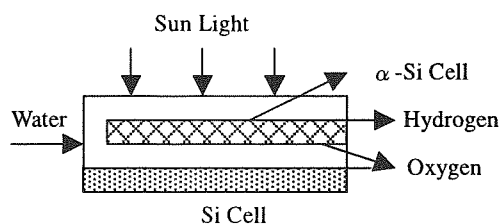


Fig.3 Photo - Hybrid Collector

図3. 光複合コレクタ

すなわち、光複合コレクタからの $\alpha$ -Si 電池の出力を $E_a$ 、Si 電池の出力を $E_s$ とし、電気のみを発生する時の総出力を $S_1$ 、電気と水電解する時の出力を $S_2$ とし、上記の損失分の割合を $a$ 、水電解効率を $b$ とすると、それぞれの出力は以下ようになる。

$$S_1 = (E_a + E_s)(1 - a) \quad (1)$$

$$S_2 = b(E_a + aE_s) + (1 - a)E_s \quad (2)$$

(2)式の右辺第一項は水電解に使用する電気から生産された燃料で、単位は電気と同一である。

ここで、 $S_2$ と $S_1$ の出力差を $\Delta E$ とすると、(1)、(2)式より $\Delta E$ は、

$$\Delta E = S_2 - S_1 = abE_s - (1 - a - b)E_a \quad (3)$$

となる。ここで、日射量を $Q_0$ とし、(3)式の両辺を $Q_0$ で割ると、 $E_a/Q_0$ 、 $E_s/Q_0$ の値はそれぞれ太陽電池の効率に相当し、その値を $\eta_a$ 、 $\eta_s$ とする。また、 $\Delta E/Q_0$ を電力利用効率の向上分、すなわち、太陽エネルギー利用率の向上分、 $\Delta \eta$ とすると、(3)式は、

$$\Delta \eta = ab\eta_s - (1 - a - b)\eta_a \quad (4)$$

となる。

ここで、 $b = 0.8$ (水電解効率。参考文献4)に基づく)、 $\eta_a = 0.1$ (アモルファス太陽電池の効率)、 $\eta_s = 0.2$ (シリコン太陽電池の効率)とすると、(4)式は、

$$\Delta \eta = 0.26a - 0.02 \quad (5)$$

(5)式の値が正の値を取れば、電気だけを供給するよりも燃料を発生する方が太陽電池パネルから発生した電気を有効に利用することになる。従って、(5)式より、 $\Delta \eta \geq 0$ の条件から

$$a \geq 0.077 \quad (6)$$

となる。上述のモジュール温度とインバータ変換による損失が約 0.13 であるから、それらの損失分から(6)式の 0.08 以上回収できれば、電気を水電解に使用することによって電力専用の光発電システムの場合よりも電気を有効に利用できるとともに、2.2 で述べた特長を活かすことができる。

なお、年間平均値から予測した値であるため、実際の日間時にどのような効果が得られるのか不明であるため、実証実験を行う予定である。

4.2 化石燃料使用コジェネとそれを併設したソーラーシステムにおける供給負荷一定の時に必要とするエネルギー量の比較

4.1において、ソーラートライジェネによる有効性を示したが、太陽エネルギーは天候や時間に制約を受けるため太陽エネルギー単独で電気と熱のエネルギーを安定に得ることは難しい。そのため、蓄エネルギーも必要であるが、将来、化石燃料を使用するマイクロガスタービンや燃料電池などの小型のコジェネが普及されようとしている。そのため、これらの小型のコジェネを補助にソーラートライジェネと組み合わせることにより、トライジェネで生産した燃料を使用すれば、日射がなくても安定にエネルギーを得ることができる。さらに近い将来、普及が期待されている燃料電池自動車の燃料としても利用することができる。

そこで、化石燃料を使用するコジェネ単独、コジェネを併設したソーラーコジェネとトライジェネについて必要エネルギーを供給する場合に消費するエネルギー量の相違について以下のような検討を行った。

比較対象にしたシステムを図4から6に示した。

図4は、熱と電気を供給する化石燃料使用コジェネで、このシステムが消費するエネルギー量を基準とした。図5はソーラーコジェネ、図6はソーラートライジェネであり、水電解による燃料化部分を独立させて示した図である。

これらの三つのシステムを解析するために、4.1では、供給すべきエネルギー量を制約していなかったが、ここでは、どのシステムも供給する電気と熱の量は同一であると仮定した。

従って、供給する電気量と熱量を  $X, Y$ 、水電解に使用する電気量を  $W$ 、そのために使用する化石燃料から供給されるエネルギー量を  $Z$ 、太陽エネルギーからのエネルギー量を  $S$  とし、解析を容易にするためにエネルギー貯蔵は行わないとすると、各システムのエネルギーバランスは以下のようになる。

基準コジェネ  $Z_0 = X + Y + L$  (7)

ソーラーコジェネ  $Z_1 + S_1 = X + Y + L$  (8)

ソーラートライジェネ  $Z_2 + S_2 + \xi W = X + Y + L + W$  (9)

ここで、 $L$  は損失、 $\xi$  は水電解効率、 $\xi W$  は燃料である。添え字 0, 1, 2 はそれぞれ基準、ソーラーコジェネ、ソーラ

ートライコジェネを示す。

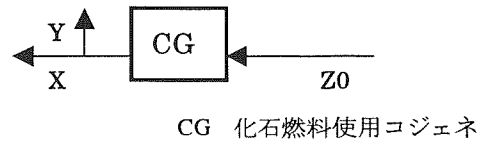


Fig.4. Co-Generation (Standard)

図4. コジェネ(基準)

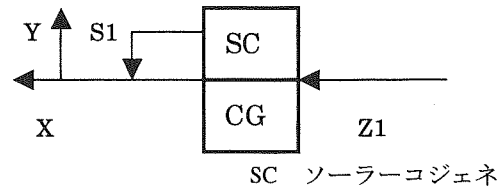


Fig.5. Solar Co-Generation (Fuel Non-Production)

図5. ソーラーコジェネ(燃料非生産)

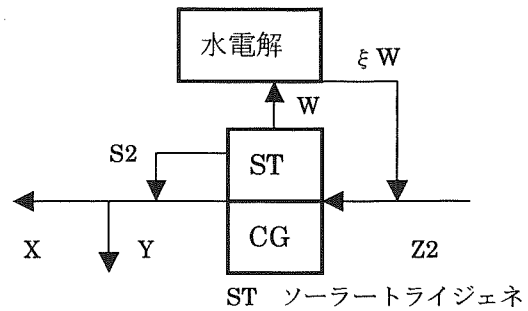


Fig.6. Solar Tri-Generation (Fuel Production)

図6. ソーラートライジェネ(燃料生産)

以上の3式において、式(7)と(8)との差

$$Z_0 - Z_1 = S_1 \quad (10)$$

は、太陽を導入したソーラーコジェネにより実質的な化石燃料消費削減分( $S_1$ )になり、化石燃料代替量となる。

一方、式(7)と(9)との差は、

$$Z_0 - Z_2 = S_2 - W(1 - \xi) \quad (11)$$

となり、ソーラートライジェネは太陽を導入した分のうち燃料転換による損失分( $W(1 - \xi)$ )が化石燃料の消費削減に寄与していないことになる。

すなわち、式(10)と(11)あるいは、式(7)と(9)の差は、

$$Z_1 - Z_2 = S_2 - S_1 - W(1 - \xi) \quad (12)$$

となり、ソーラートライジェネはソーラーコジェネに比べて化石燃料代替量が減少する。そこで、燃料を製造しても化石燃料の消費が増大しないようにするには式(12)の値が0になればよい。従って、

$$S2 = S1 + W(1 - \xi) \quad (13)$$

となる。そのため、燃料非生産のソーラーコジェネに比べて燃料生産の損失分を補充するために 4.1 で述べた方法を導入する。すなわち、図 5 のシステムは光・熱複合コレクターで熱と電気を供給するシステムであり、モジュール温度とインバータ変換による損失がある。しかし、図 6 のソーラートライジェネで、燃料を生産する時の損失分を式(6)の条件を満足するようにモジュール温度とインバータ変換で損失する電力を回収すれば、負荷に供給するエネルギーの制約があってもソーラーコジェネと等価になるだけでなく、燃料を生産することによりソーラートライジェネの機能が拡充することになる。

以上の簡単な解析からソーラートライジェネは、従来に増して太陽エネルギーを有効に利用することができることがわかる。

## 5. 結言

一つのエネルギー源から熱、電気、燃料の三つのエネルギーを供給するシステムがトライジェネであり、それを実現するエネルギー源が太陽であることを述べ、ソーラートライジェネを構成する方式を提案し、そのシステムの有意性を簡単なシステム解析で明らかにし、次の結論を得た。

- 1) ソーラートライジェネは、既に市販されている光・熱複合コレクターを用い、太陽電池などの光電気化学反応により水電解で水素を発生する機能を太陽電池と組み合わせることによって実現できる。
- 2) 太陽光発電システムにおいて太陽電池パネルで発生した電気のうち、モジュール温度とインバータ変換によって損失する電力をトライジェネで水電解に利用すれば、その損失分を水素という燃料として回収でき、電気という消費するエネルギーからそれを発生することもできるエネルギーに変換することができる。

本報では、文献等を参照し、新しいソーラーシステムを提案し、その妥当性を明確にするために、太陽エネルギーは天候や時間に制約されるために太陽から安定にエネルギーを得ることは難しいため、将来普及が期待されている小型のコジェネと組み合わせ、化石燃料使用コジェネ、ソ

ーラーコジェネとソーラートライジェネのエネルギー源消費について比較し、供給するエネルギーが同じでも、2) で述べた理由により化石燃料の消費低減(CO<sub>2</sub> 排出の低減)に寄与することを示したが、定常状態であれば、4.2 は成立すると考えられるが、ここで述べたソーラートライジェネは思考モデルであるため、以上論述した内容を実証するために実験等を進める予定である。

なお、図 1 に示したソーラートライジェネは高温の太陽熱を必要としないシステムであり、わが国でも実用可能と思われるソーラートライジェネである。しかし、高温の太陽熱を利用した場合、特に、太陽熱発電技術を基本にして天然ガスや石炭などの化石燃料<sup>7)</sup>あるいはバイオマス<sup>8)</sup>から CO<sub>2</sub> の少ないメタノールを製造するシステムや太陽水素吸蔵化学物質による水素循環システム<sup>7)</sup>を構築することができる。

## 参考文献

- 1) 田中忠良・安藤祐司・天野雅継: トライジェネレーションシステムの開発と将来展望、電気学会新エネルギー・環境研究会、FTE-02-4 (2002) 29-32。
- 2) 松崎純一・加納正史・村田智昭: 光・熱複合ソーラーシステムにおける冬期性能結果及びハイブリッド電気温水器の検討、太陽/風力エネルギー講演論文集、(2000) 155-158
- 3) 産業技術総合研究所: AIST Today, Vol. 2, No. 2 (2002) 6-7
- 4) リニューアブルエネルギー有効利用・普及促進機構: JOPRE Communication, Vol. 1, No. 19, (2001) 7
- 5) 大谷謙仁・作田宏一・加藤和彦・杉浦忠敏・内田奈輔・山口智彦・黒川浩助: 住宅用太陽光発電システムの運転特性評価、電気学会新エネルギー・環境研究会、FTE-00-5, (2000) 27-35
- 6) ソーラーシステム: 太陽光発電と融雪のハイブリッドシステム、No. 76, (1999) 42-47
- 7) 田中忠良: トライジェネレーションシステム(熱+電気+燃料供給システム)総論、月刊エコインダストリー、7-4 (2002) 31-39
- 8) 西上泰子: 太陽熱・バイオマス利用ハイブリッド型ソーラー燃料生産システム、太陽エネルギー、Vol. 28, No. 2 (2002) 19-24