

ソーラートータルトライジェネレーションの特性

Performance of Solar Total 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, we proposed that tri-generation is realized by direct utilization technologies of solar energy, that is, solar tri-generation. In this paper, we proposed a solar system introduced not only solar direct utilization technology but also solar indirect utilization technology such as wind power and biomass energy into solar tri-generation. We named this system as solar total tri-generation. We make clear the effectiveness of this system by the simplified analysis of the three different systems of fossil fuel co-generation, and solar co-generation and solar total tri-generation with fossil fuel co-generation.

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

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や生活等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することは益々重要になると思われる。

そこで、エネルギーの高効率利用とエネルギー資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論説し、それを実現するシステムを例証した⁽¹⁾。

すなわち、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た。その概念を実現するシステムを構築する方法として、既に市販されている熱と電気を供給するソーラーコジェネである光・熱複合コレクタ⁽²⁾と太陽電池による水電解を行う機能をもった光複合コレクタを組み合わせたソーラートライジェネを提言した。このソーラートライジェネの有用性を明らかにするためにソーラーコジェネと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⁽³⁾。

このソーラートライジェネは太陽エネルギーの直接利

*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19日)

用技術で構成されているが、本報において、太陽エネルギーの間接利用である風力、バイオマスも包含し太陽エネルギーの直接および間接の2つの利用法を総合的(トータル的)に利用するソーラートータルトライジェネを提案した。このシステムの特性を明確にするために、上述のソーラートライジェネの特性解析を行ったような条件のもとで熱と電気を安定に供給する観点から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、ソーラートータルトライジェネの三つのシステムについて特性解析を行い、三者の特性を比較検討した。

2. ソーラートータルトライジェネレーション

2.1 ソーラートライジェネレーションの基本概念

太陽エネルギーの利用法には表1に示したように直接利用と間接利用がある。太陽光を直接利用すると、集熱して熱を得ることができ、太陽電池のような光起電力効果により電気を得ることができる。また、光触媒や光電気化学効果を利用すると水を分解させて水素を得ることができる。

Table1. Energy obtained from the sun

表1. 太陽から得られるエネルギー

<u>Solar Direct Utilization</u>	
Solar Concentration	Heat
PV Cell	Electricity
Photo-Chemical	Fuel (Hydrogen)
<u>Solar Indirect Utilization</u>	
Wind, Ocean	Electricity
Biomass	Fuel (Methane)

一方、太陽の間接利用である風力や海洋のエネルギーから電気を得ることができ、太陽エネルギーを蓄えた生体であるバイオマスを燃料として利用できる。

これらの太陽エネルギーの利用技術で構成したソーラートライジェネの基本概念が図1である。文献(3)で報告したソーラートライジェネは太陽エネルギーの直接利用による集熱、太陽電池による電気を発生するエネルギー

変換機能および光触媒や光電気化学による水分解により水素を発生する燃料発生機能で構成した。

しかし、地球環境問題におけるCO₂による温暖化対策が重要な課題になり、わが国で新エネルギーの普及促進が急務となり、とりわけ、太陽熱利用、太陽光発電システムの普及だけでなく、風力発電やバイオマスの熱利用と発電に関する技術の普及促進も重要になってきた。

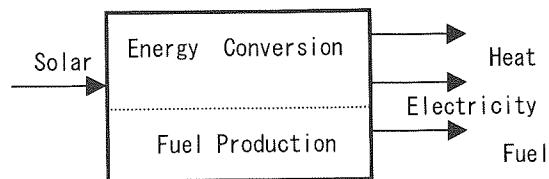


Fig.1 Basic Concept of Solar Tri-Generation

図1. ソーラートライジェネの基本概念

このような状況から、これまでの太陽エネルギー直接利用技術で構成されたソーラートライジェネに間接利用も包含したシステムをソーラートータルトライジェネと呼称することとし、ソーラートライジェネとのシステム構成の相違等について以下に述べる。

2.2 ソーラートータルトライジェネレーションの方式

既に開発された光・熱複合コレクタの導入事例⁽²⁾によると、一般家庭用として、給湯と電力(3kW)の供給に36枚のパネル(1枚のパネルの面積は0.9m²)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と考えられる。そのために、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考えられるためにソーラートライジェネは図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とした。

また、水素製造に関しては、光触媒を用いた研究が進められ、可視光線でも水を分解する触媒が開発されている⁽⁴⁾が、太陽エネルギーの利用効率は低く、現状、分解して発生した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。

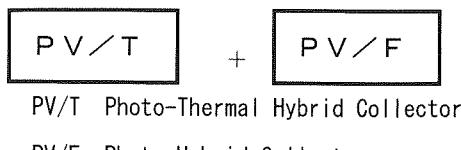


Fig. 2. Collector for Solar Tri-Generation

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ついては、効率9%のアモルファス太陽電池(α -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⁽⁵⁾があるので、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、 α -Si電池を水素製造用、結晶系のシリコン太陽電池を電力用にした光複合コレクタを使用することとした。その構成法は文献(3)に示した。

以上のようにソーラートライジェネは概略的には図2のように構成されるが、ソーラートータルトライジェネは図3に示されるように構成される。

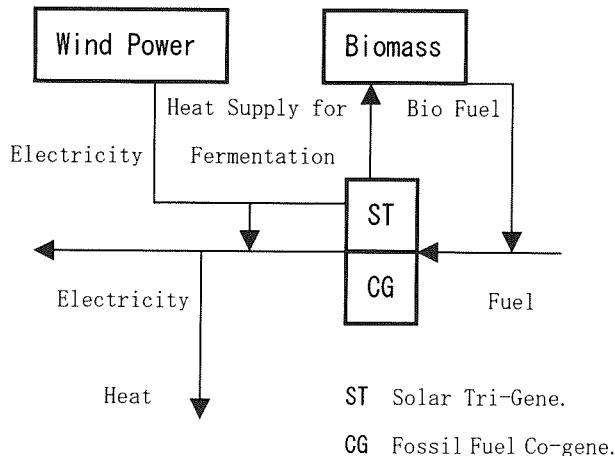


Fig. 3. Solar Total Tri-Generation

図3. ソーラートータルトライジェネレーション

ソーラートータルトライジェネは太陽エネルギーの間接利用技術もシステムに導入するために、風力とバイオマスのエネルギーはソーラートライジェネの基本システム外からエネルギーを供給するように構成される。従つ

て、風力発電の電力供給とバイオマスを発酵させ、メタン化する装置が付随しているところがソーラートライジェネと異なっている。

バイオマスのメタン化については、有機物を高温メタン菌(約52°C)で発酵させるとしている⁽⁶⁾。この温度は平板型などのコレクタで容易に得られる熱である。

以上、述べたシステム構成のソーラートータルトライジェネの特性を明らかにするために以下のような簡易解析を行った。

3. 特性解析

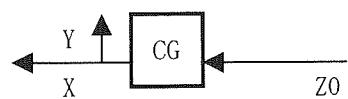
太陽エネルギーは天候や時間に制約され、太陽単独で電気と熱のエネルギーを安定に得ることは難しい。そのため、蓄エネルギーも必要であるが、将来、化石燃料を使用するマイクロガスタービンや燃料電池などの小型のコジェネが普及されようとしている。従って、これらのコジェネを補助にすれば、太陽から生産された燃料が使用できる。

そこで、化石燃料を使用するコジェネで消費するエネルギーを基準にして、そのコジェネを併設した2つのトライジェネによる化石燃料代替効果について以下のようないくつか検討を行った。

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を使用したコジェネで、このシステムの化石燃料の消費量が基準になる。図5はソーラーコジェネであり、図2に示したように光・熱複合コレクタと光複合コレクタから構成されている。図6がソーラートータルトライジェネであり、風力からの電力、バイオマスによる燃料化と水電解による燃料化部分を独立させて示している。

ソーラートータルトライジェネについて、日射、風力、バイオマス資源は独立したエネルギー要素であり、各要素の特性がそのまま全体システムの特性になるとは限らない。また、それらのエネルギー要素から得られるエネルギーによって必ずしも負荷に対応してエネルギーを供給できるとは限らないが、ここでは、各要素の特性は全体システムの特性と一致し、負荷に応じてエネルギーを供給することができると仮定する。

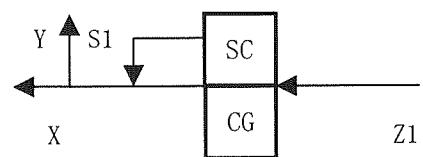
バイオマスの燃料化については、上述のように有機物を高温メタン菌(約 52°C)で発酵させてメタンにすると仮定した。また、水電解には風力の電力も利用できるが、ここでは風力発電の出力は電力用として使用し、水電解は文献(3)で述べたように光複合コレクタにより行うこととした。



CG Fossil Fuel Co-Gene.

Fig. 4. Fossil Fuel Co-Generation (Standard)

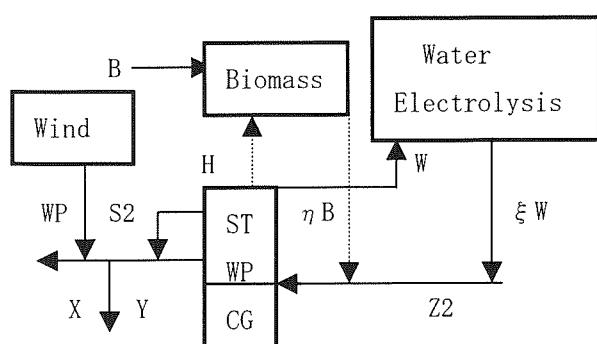
図 4. 化石燃料使用コジェネレーション



SC Solar Co-Gene.

Fig. 5. Solar Co-Generation

図 5. ソーラーコジェネレーション



ST Solar Tri-Gene.

WP Wind Power

Fig. 6. Solar Total Tri-Generation

図 6. ソーラートータルトライジエネレーション

解析にあたり、図 4 から 6 のいずれのシステムも負荷に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, バイオマスの発酵に使用する熱を H, バイオマスの供給量を B, 使用する化石燃料を Z, 太陽エネルギー

の出力を S, 風力の出力を WP 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、各システムのエネルギーバランスは以下のようになる。

$$\text{基準コジェネ} \quad Z_0 = X + Y + L \quad (1)$$

$$\text{ソーラーコジェネ} \quad Z_1 + S_1 = X + Y + L \quad (2)$$

$$\text{ソーラートータルトライジエネ}$$

$$Z_2 + S_2 + \xi W + \eta B + WP = X + Y + L + W + H \quad (3)$$

ここで、L は損失、 ξ は水電解効率、 ξW は燃料、 η はバイオマスの燃料変換効率、 ηB は燃料である。全て同一の単位系とする。添え字 0, 1, 2 はそれぞれ基準、ソーラーコジェネ、ソーラートータルトライジエネを示す。なお、ソーラートライジエネの場合は、バイオマスによる燃料供給がないだけである。

以上の 3 式において、式(1)と(2)との差

$$Z_0 - Z_1 = S_1 \quad (4)$$

は、太陽を導入したソーラーコジェネによる実質的な化石燃料消費削減分(S1)であり、化石燃料代替量となる。

一方、式(1)と(3)との差は、

$$Z_0 - Z_2 = S_2 + WP + \eta B - W(1 - \xi) - H \quad (5)$$

となり、ソーラートータルトライジエネは太陽を導入した分(S2)、風力分(WP)およびバイオマスからの燃料補給(ηB)により化石燃料消費の削減分になる。しかし、ソーラーコジェネと違って、燃料転換による損失分($W(1 - \xi)$)とバイオマスの燃料転換用の熱供給分(H)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、ソーラーコジェネとソーラートータルトライジエネを比較すると、式(2)と(3)あるいは、式(4)と(5)の差は、

$$Z_1 - Z_2 = S_2 + \eta B + WP - S_1 - W(1 - \xi) - H \quad (6)$$

となる。

ここで、ソーラートータルトライジエネとソーラーコジェネで化石燃料の消費が同一とすると、式(6)の値が 0 になればよい。従って、

$$S_2 + \eta B + WP = S_1 + W(1 - \xi) + H \quad (7)$$

となる。すなわち、ソーラートータルトライジエネはソーラーコジェネに比べて、燃料生産の損失分とバイオマス燃料転換用の熱供給分だけ多くエネルギーを供給している

ことになる。そこで、ソーラートータルトライジェネで太陽の設備を大きくしないで、それを補充する方策について以下のように考察した。

まず、式(7)の右辺第2項の光電気化学による水素燃料生産の損失分については、文献(3)で述べたように図5のシステムは光・熱複合コレクタ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⁽⁷⁾を伴う。しかし、図6のソーラートータルトライジェネでは、水素燃料生産する時の損失分をモジュール温度とインバータ変換で損失する電力を光複合コレクタで水素発生用に回収することが可能であり、回収によってその損失分を補充できるものと思われる。

一方、式(7)の第3項のHは発酵を促進するための約50°C程度の温水であり、ソーラーコジェネにはこの機能がないので比較することは意味がないと思われるが、バイオマスからの燃料化について、 $\eta_B = H$ であれば損失にならない。従って、右辺の第2項が上述のように電力を回収できればソーラートータルトライジェネとソーラーコジェネは等価となる。

なお、 η_B はバイオマスから発生したメタンから得られる熱量である。有機物のメタン化について、 η は約80%程度⁽⁸⁾であり、得られたガス1m³の発熱量は重油、灯油の0.6リットル、都市ガスの1.2 m³⁽⁹⁾に相当する。このような有機物からのガス化における熱量バランスの詳細が不明であるが、このような微生物反応は熱量よりもむしろ増殖するための温度(適温)の影響に左右されると思われるために圧倒的に $\eta_B \gg H$ と考えられる。

また、バイオマスを燃焼するとCO₂が排出されるが、バイオマスはカーボンニュートラルであるためバイオマスが再生産され、その分のCO₂が吸収されれば正味のCO₂の増減はない。従って、太陽エネルギーと同様にバイオマスは再生可能エネルギーであるため、 $\eta_B = H$ であっても利用に便利なメタンを得ることができるためにエネルギーを確保するという意味で重要と思われる。

以上のことからソーラートータルトライジェネはソーラーコジェネに比べ同量のCO₂の排出で機能することができ、特に、ソーラーコジェネおよび我々が提案した太陽エネルギーの直接利用技術から成るソーラートライジェネは風力やバイオマスの利用を包含したシステムでない

が、風力は太陽と違って日射時間に制約されず、夜間などでもエネルギーを得ることが可能である。また、バイオマスのエネルギーは、 $\eta_B \gg H$ と多くのエネルギーを得ることができるとと思われる所以、その結果、ソーラートータルトライジェネは風力により太陽エネルギーから得られる電気を補完することができ、水素だけでなく、メタンという安定したエネルギー資源を得ることができるためソーラートータルトライジェネは、従来に増して太陽エネルギーを有効に利用したシステムといえる。

4. 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り、それを実現するソーラートライジェネの基本構成について、これまでの研究で論述した。このソーラートライジェネは太陽エネルギーの直接利用技術で構成されたシステムであるが、本報において、太陽エネルギーの間接利用技術をも導入し、太陽エネルギーの直接・間接利用をトータルに利用したソーラートータルトライジェネの概念を詳述した。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。

既に報告したソーラートライジェネと本報で提案したソーラートータルトライジェネの共通の特性として、

- 1) 太陽エネルギーの直接利用を用いて既に市販されている光・熱複合コレクタを用い、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た光複合コレクタ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光複合コレクタ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エネルギー源に変換することができる。

ソーラートータルトライジェネ単独の特性として、

- 1) 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ることが考えられる。その場合、化石燃料使用コジ

- エネ、ソーラーコジェネとソーラートータルトライジエネのエネルギー源の消費量について比較し、供給するエネルギーが同じでも、上記 2)で述べた理由により化石燃料の消費低減(CO₂ 排出の低減)に寄与することを明らかにした。
- 2) 風力およびバイオマスの導入により、風力は夜間等の太陽電池から電力が得られない時間帯での電力供給を補完するとともに、バイオマスは小型の化石燃料使用コジェネの燃料に転換することができ、これらの機能の拡大によってエネルギーの自給が高まる。
- 3) ソーラートライジエネは図 1 に示したように太陽エネルギー直接利用技術で構成され、それに太陽エネルギー間接利用技術を付帯したソーラートータルトライジエネは、太陽エネルギーを総合的に利用することができる。

図 3 に示したソーラートータルトライジエネは文献(3)で述べたソーラートライジエネと同様に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システムである。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、特に、西上氏が提唱しているバイオマスから CO₂ の少ないメタノールを製造するグローバルバイオメタノールシステム⁽¹⁰⁾はここで提案したソーラートータルトライジエネの代表的なシステムである。

ここで述べたソーラートータルトライジエネやソーラートライジエネの技術が開発されれば、わが国だけでなく、地球規模のエネルギー・環境問題の解消に寄与すると思われる。また、わが国のエネルギー産業の活性化に寄与するものと思われる。

参考文献

- (1) 田中忠良・安藤祐司・天野雅継：トライジエ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) 田中忠良・安藤祐司・天野雅継：日本太陽エネルギー学会太陽エネルギー新利用形態・新材料研究委員会第 1 回研究講演会資料 (2002. 8)
- (4) 産業技術総合研究所：AIST Today, Vol. 2, No. 2 (2002) 6-7
- (5) 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
- (6) 本多淳裕：バイオマスエネルギー、省エネルギーセンター、127-128 (1986)
- (7) 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
- (8) 美濃輪智朗・小島紀徳・松岡泰成：都市廃棄物のバイオマスエネルギー利用ビジョン、日本エネルギー学会誌、Vol. 81, No. 901 (2002) 301
- (9) 尾関浩章・丹羽文雄・桜井美政：有機物をバイオガス化する浄化槽について、太陽エネルギー、Vol. 25, No. 5 (1999) 56
- (10) 西上泰子：新説・石油がなくなる日、燃焼社、2001