

産業自家発電のエネルギー効率と二酸化炭素排出率に関する研究

山村 充、今田長英*

環境人間学部、(財)地球環境戦略研究機関関西研究センター*

A Study on Energy Efficiencies and Carbon Dioxide Emission Rates of the Industrial Power Generation Systems in Japan

Mitsuru Yamamura, Choei Konda*

School of Human Science and Environment, University of Hyogo

1-1-12, Shinzaike-honcho, Himeji-city, Hyogo, 670-0092 Japan

Kansai Research Centre, The Institute for Global Environmental Strategies*

IHD Center, 1-5-1 Wakinohamakaigan-Dori, Chuo-ku, Kobe, Hyogo, 651-0073 Japan

Abstract

This study was intended to find the energy and environmental efficiencies of industrial power generation systems in Japan, based on the data of the Yearbook of the Current Survey of Energy Consumption, by the Ministry of Economy, Trade and Industry (METI). Boiler-steam turbine systems account for the largest portion (73%) of the electricity produced on-site for factories' power needs, and combined heat and power (CHP) systems (16%) follow them. The power efficiencies of boiler-steam turbine power generation systems installed in 9 types of industry are in a range of 26-44% (total average: 37%), and their CO₂ emission rates are in a wider range of 0.47-1.19 CO₂-kg/kWh (total average: 0.66 CO₂-kg/kWh). Then, the total efficiencies of CHP systems are in a range of 34-77% (total average: 62%), and their CO₂ emission rates are in a range of 0.62-1.18 CO₂-kg/kWh (total average: 0.72 CO₂-kg/kWh). These results indicated that industrial boiler-steam turbine systems were not so efficient in power generation, and had slightly larger CO₂ emission rates than ones of the public power generation companies. And also, although industrial CHP systems were made sure to be useful measures for the climate changes as a whole, certain types of industry with low heat-demands hardly achieved the high performance.

Keywords : industrial power generation, energy efficiencies, CO₂ emission rates, boiler-steam turbine power generation systems, combined heat and power (CHP) systems

1. はじめに

地球温暖化対策の一つとして、電力の需要地又はその周辺で発電する分散型電源に対する関心が高まっている。しかし、この分散型電源の概念は必ずしも新しいものではなく、産業の分野では自家発電として以前から行われていた。

自家発電は電気を自らの工場や店舗で使う目的で自ら発電するもので、分散型電源の代表的な利用形態である。特に、発電と排熱回収を同時に行うコージェネレーションは、エネルギーの総合効率(投入された燃料のエネルギー量のうち、熱又は電力に変換された割合の合計)を高める方法として世界で関心を集めている。また、紙・パルプ製造業、鉄鋼業、化学工業などのエネルギーを多量に消費する産業では、工場敷地内のボイラーで石炭等の燃料を燃焼させて蒸気を発生させ、その蒸気でタービ

ンを回して発電する方式(以下、汽力発電という)も広く行われている。

総合エネルギー統計平成15年度版は、産業部門の自家発電におけるエネルギー収支の推計方法を示し、産業部門全体におけるコージェネレーションのエネルギー総合効率を63.7%と報告している。さらに、同様に産業部門におけるボイラーでの投入燃料から蒸気への変換効率は91.2%、発電用蒸気から電力への変換効率は40.2%とそれぞれ推計している。[1]

一方、西山らは産業におけるコージェネレーションシステムのエネルギー総合効率を施設毎に調査し、業種別のエネルギー総合効率が54~66%で全体では62%であることを報告している。[2]しかし、西山らの調査対象は主に省エネ法のエネルギー管理指定工場(第1種・第2種)となっており、どちらかというエネルギー管理

意識の高い施設であり、必ずしも産業の全体像を正確に反映していない可能性がある。

本研究は、総合エネルギー統計平成15年度版で用いられた自家発電におけるエネルギー収支の推計方法を用いて、最新の石油等消費動態統計から産業部門の自家発電（汽力発電とコージェネレーション）の業種別エネルギー効率とCO₂排出率を計算し、自家発電、ひいては分散型電源の地球温暖化対策としての可能性を検証するものである。

2. 推計の方法

総合エネルギー統計平成15年度版では、産業分野における投入燃料からボイラー蒸気への変換効率（ μ_s ）、ボイラー蒸気から電力への変換効率（ μ_{se} ）は次のように求めている。

$$\mu_s = \text{ボイラー蒸気 (Sb)} / \Sigma \text{ボイラー投入燃料 (Fib)}$$

$$\mu_{se} = \text{汽力電力 (Es)} / \text{発電用蒸気 (Se)}$$

そして、汽力発電に用いるボイラー発生蒸気は業種全体では均質と考えても支障ないと考えて、汽力発電における投入燃料から電力への変換効率（ μ_{be} ）は下記式で表されるものと考えた。

$$\mu_{be} = \mu_s \times \mu_{se} \quad \dots \textcircled{1}$$

また、コージェネレーションの総合効率（ μ_c ）は、本来、電力への変換効率（ μ_{ce} ）と蒸気への変換効率（ μ_{cs} ）との和として求められる。

$$\mu_c = \mu_{ce} + \mu_{cs} \quad \dots \textcircled{2}$$

①と②の式を用いて、石油等消費動態統計月報 [3] のデータ（2005年）を用いて汽力発電とコージェネレーションのエネルギー収支を分析した。

さらに、地球温暖化対策の面から、汽力発電とコージェネレーションについて電力量当たりの二酸化炭素の発生量を求めた [4]。電力への変換効率を推計した場合と同様にCO₂の発生は業種全体では均質と考え、CO₂排出率は、投入燃料の量からCO₂排出量を計算し、それに発電に使用したエネルギー量の割合（ p ）を乗じ、発電した電力量（ E_s ）で除して求めた。計算式は、③式の通りである。

$$\text{CO}_2 \text{ 排出率} = \Sigma \text{燃料種ごとのCO}_2 \text{ 発生量} \times p \div E_s \quad \dots \textcircled{3}$$

3. 自家発電の構成と発電量

石油等消費動態統計月報から、2005年における製造業の自家発電の構成を示したのが図1である。石油等消費動態統計の調査対象にエネルギー集約型産業が多いため、自家発電が消費電力量全体（購入した電力量と自家発電した電力量の合計）に占める割合は50%と高い。ちなみに、総合エネルギー統計のデータ（2002年度）から求めた、製造業全体における自家発電の占める割合は21%である。このように消費電力量全体に占める自家発電の割合が高いのは、特にエネルギーを大量に消費する紙・パルプ製造業、鉄鋼業などの業種では、製品製造に必要な石炭・石油などのための港湾設備や貯蔵施設を活用して発電燃料を自ら調達できる点が理由として挙げられる。また、製造工程からの黒液、高炉ガスなどの副生成物を燃料として活用してエネルギーの有効利用を図るという側面もある [5]。

石油等消費動態統計の調査対象9業種では、自家発電について汽力発電が72.8%と圧倒的に多く、コージェネレーションは16.3%に過ぎない（図1）。水力、太陽光発電、風力発電などの自然エネルギーの割合はさらに低い状況である。1998年以降の経年変化をみると、自家発電の発電量の合計は、多少の変動はあるものの、増加傾向にあるものとみられる（図2）。その増加の主要な

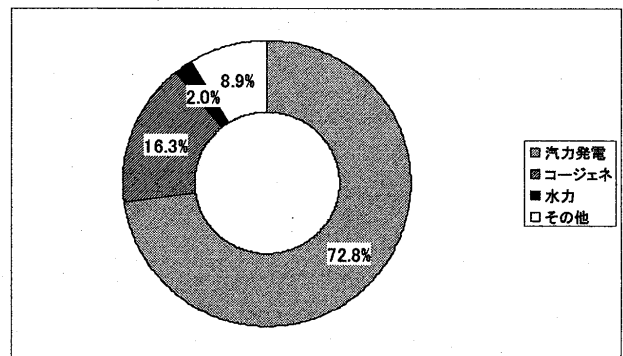


図1. 自家発電の構成 (2005年)

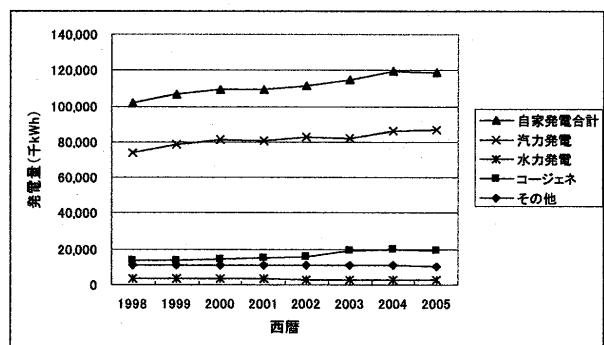


図2. 自家発電量の推移

要因となっているが汽力発電とコージェネレーションである。

業種ごとの自家発電量とその構成を図3に示す。自家発電量が最も多いのは鉄鋼業で31,286千kWh、次いでパルプ・紙・板紙工業27,587千kWh、化学工業25,438千kWhと続く。そして、自家発電量の少ない4業種（ガラス製品工業、非鉄金属地金工業、化学繊維工業及び機械工業）と1つの例外（鉄鋼業）を除くと、消費電力量に占める自家発電の割合は60～90%と高い状況である。つまり、消費電力量が多い業種は、その多くの電力を自家発電により賅っているといえる。その中で鉄鋼業は自家発電の割合が38.5%と唯一低くなっているが、これは鉄鋼業には電力を用いて鉄スクラップ等から鉄鋼製品を製造する電気炉メーカーも含まれるため、鉄鉱石から鉄を還元して鉄鋼製品にする高炉メーカーについていえば90%以上の高い割合となる。

また、自家発電量の多い業種の中では汽力発電の割合が圧倒的に高く、石油製品工業のようにコージェネレーションの割合が40%を占めているのは例外ともいえる。逆に、自家発電量の少ない業種では、機械工業とガラス製品工業のように自家発電に占めるコージェネレーションの割合がそれぞれ82%、66%と高い。

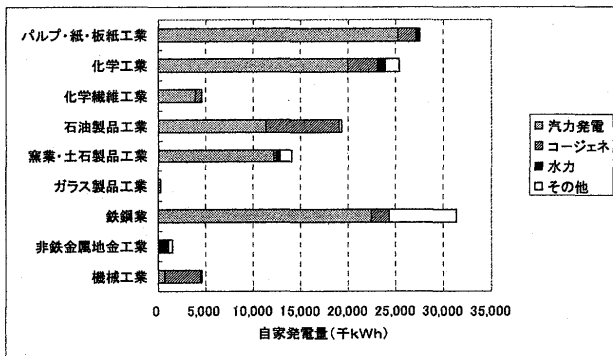


図3. 自家発電の業種別構成 (2005年)

表1. 産業自家発電のエネルギー効率 (単位:%)

	汽力発電	コージェネ*
パルプ・紙・板紙工業	37	70 (30)
化学工業	44	68 (25)
化学繊維工業	36	62 (33)
石油製品工業	35	77 (32)
窯業・土石製品工業	36	48 (37)
ガラス製品工業	-	34 (31)
鉄鋼業	35	61 (26)
非鉄金属地金工業	26	54 (38)
機械工業	-	- (29)
全体	37	62 (29)

*: 熱と発電の総合効率(発電のみの効率)。

4. 自家発電のエネルギー効率

表1は、汽力発電とコージェネレーションの業種別のエネルギー効率を示したものである。汽力発電における燃料から電力への変換効率は、非鉄金属地金工業の26% (最低値) と化学工業の44% (最高値) を除くと、35～37%に集中しており、産業全体では37%となる。この37% (産業全体) という効率は、火力発電所 (一般電気事業者: 電力10社) の送電損失を考慮した効率39% (2004年の10社平均値; 電気事業便覧 [6] の汽力発電所熱効率 (発電端) と送配電損失率より算出) と比べて若干ながら低い値となっている。なお、非鉄金属地金工業のエネルギー効率が26%と低い理由として、汽力発電による発電量が34千kWhと小さく、また規模の小さな蒸気ボイラーと発電機が多いためと考えられる。一方、化学工業の44%は他の業種に比べてかなり高いエネルギー効率となっているが、これは化学工業における汽力発電が大規模で、しかもボイラーと発電機の両方が最も効率のよい条件で稼働していることが理由であると推測される。

一方、コージェネレーションについてみると、電力と熱を合わせたエネルギーの総合効率は62% (産業全体) となり高い効率が達成されていた (表1)。この値は、対象業種の違いなどがあるにもかかわらず、西山らの事例調査 [2] におけるエネルギー総合効率62% (全体) と一致する結果であった。パルプ・紙・板紙工業などの蒸気を大量に必要とする業種では、コージェネレーションは60～80%の高い総合効率を達成しているが、ガラス製品工業のように蒸気を余り必要としない業種では総合効率が40%を割ってしまっている。このことから、ガラス製品工業の工場では、コージェネレーション設備がエネルギー効率の改善には役立っていない場合が多いものと思われる。機械工業ではそもそもコージェネレーションについて蒸気量の統計を取っていないが、これはそもそも業種として熱需要が少ないことの反映であり、コージェネレーション設備を導入している場合でも空調 (吸収式冷凍機など) の熱源としての利用が多く、空調負荷が季節により変動する場合には、排熱利用率は低くなるといわれる。 [7]

5. 自家発電の業種別CO2排出率

自家発電の業種別CO2排出量は図4に示す通りである。自家発電の中で、CO2排出の割合は圧倒的に汽力発電由来のものが多く全体の91%を占める。また、電力量当たりのCO2排出率を表2に示す。まず、汽力発電についてみると、黒液 (バイオマス) を燃料として利

用するパルプ・紙・板紙工業はCO₂排出率が0.47 CO₂-kg/kWh となっており、火力発電所(発電端)のCO₂排出率0.62 CO₂-kg/kWh (2001年) [8] よりは小さいが、全電源平均(使用端)のCO₂排出原単位0.38 CO₂-kg/kWh (2001年度) [9] までは至っていない。一方、CO₂排出率が最も高いのは非鉄金属地金工業の1.19 CO₂-kg/kWhで、次いで鉄鋼業の0.93 CO₂-kg/kWh、窯業・土石製品工業の0.87 CO₂-kg/kWhと続く。非鉄金属地金工業のCO₂排出率が高い理由は、高炉からの副生成ガスを燃料として利用する割合が高く(エネルギー換算で36.3%)、かつ発電のエネルギー効率自体も高くないこと(表1)が原因と考えられる。また、鉄鋼業のCO₂排出率が高いのは燃料に占めるに副生成ガスと石炭の割合が高いこと(エネルギー換算でそれぞれ55.5%、33.5%)、また窯業・土石製品工業は燃料に占める石炭の割合が高いこと(エネルギー換算で80.4%)が理由と考えられる。以上のように、産業の汽力自家発電から供給される電力はいずれも、市販電力に比べてCO₂排出負荷が大きいことが判った。

次に、コージェネレーションについてみると、熱利用を考慮しない電力のみのCO₂排出率(括弧内の数値)は、石油製品工業が火力発電所のCO₂排出係数(0.62 CO₂-kg/kWh)と同じなのを除けば、その他の業種ではいずれもそれより大きい値となっている。一方、熱回収された蒸気のエネルギー量を補正した値でみると、一般電気事業者の全電源平均のCO₂排出原単位(0.38 CO₂-kg/kWh; 2001年度)を下回っているのは石油製品工業(0.26 CO₂-kg/kWh)、化学工業(0.29 CO₂-kg/kWh)、パルプ・紙・板紙工業(0.30 CO₂-kg/kWh)、化学繊維工業(0.37 CO₂-kg/kWh)である。さらに全体でも0.34 CO₂-kg/kWhと、産業におけるコージェネレーションの地球温暖化対策としての有効性が確認された。

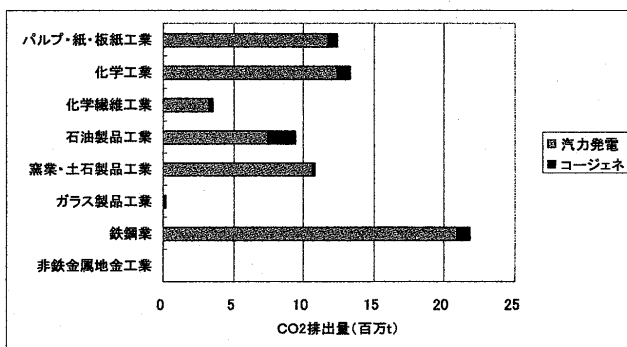


図4. 自家発電による業種別CO₂排出量(2005年)

6. 考察

本研究では、各業種において投入燃料から蒸気の発生及び発電は業種全体では均質と考え、この仮定の下で対象9業種について分析した。その結果に大きな問題はみられず、本研究で用いた分析方法は業種レベルのエネルギー効率やCO₂排出率の特徴を把握するには有効であると考えられた。

(社)日本内燃力発電設備協会によれば、コージェネレーション設備の設置台数(排熱回収を行わないものも含む)はこれまで増加の一途をたどってきたが、近年の電気料金の値下げ傾向、石油をはじめとするエネルギー価格の高騰、環境規制などを背景として、自家発電設備の設置台数と施設数が、2004年度にはじめて減少に転じたといわれる。[10] こうした状況はコージェネレーションの発電量(図2)でも、2005年度については微減となっており、同様の傾向が認められる。発電量の変化を業種別に示したのが表3a(汽力発電)と表3b(コージェネレーション)である。9業種のうち汽力発電のエネルギー効率が特に低かった非鉄金属地金工業は、1998年度に比べて明らかに2005年度の発電量は減少している。一方、コージェネレーションでエネルギー総合効率が最も低かったガラス製品工業はその発電量が逆に増加傾向にあるが、エネルギー総合効率が中程度(50%前後)である窯業・土石製品工業と非鉄金属地金工業は1998年から2000年又は2001年までコージェネレーションの発電量が急激に減少した後、横這い状態となっている。こうした産業自家発電の利用動向から、企業はエネルギー効率つまり省エネルギーだけを考慮して自家発電を行っているのではないことが判る。

また、地球温暖化対策(CO₂排出率)の側面からみても、排出率の最も大きい非鉄金属地金工業の汽力発電量は1998年以降減少しているが、非鉄金属地金工業に

表2. 産業自家発電のCO₂排出率(CO₂-kg/kWh)

	汽力発電	コージェネ*
パルプ・紙・板紙工業	0.47	0.30 (0.70)
化学工業	0.62	0.29 (0.79)
化学繊維工業	0.82	0.37 (0.69)
石油製品工業	0.65	0.26 (0.62)
窯業・土石製品工業	0.87	0.54 (0.70)
ガラス製品工業	-	0.65 (0.71)
鉄鋼業	0.93	0.51 (1.18)
非鉄金属地金工業	1.19	0.48 (0.69)
機械工業	-	- (0.68)
全体	0.66	0.34 (0.72)

*: 回収蒸気を発電量に加算した値(発電のみ)

表3a. 汽力発電による業種別発電量の推移(単位:百万kWh)

	1998年	1999年	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年
パルプ・紙・板紙工業	24,627	25,093	25,483	25,298	25,009	24,806	25,375	25,208
化学工業	20,557	21,841	22,751	22,028	21,051	19,781	20,246	19,957
化学繊維工業	5,461	5,355	5,224	5,000	4,880	4,919	4,904	3,968
石油製品工業	5,495	6,801	6,847	6,780	6,876	8,629	11,094	11,378
窯業・土石製品工業	9,953	10,245	11,339	11,270	11,237	11,264	11,653	12,227
ガラス製品工業	-	-	-	-	-	-	-	-
鉄鋼業	16,899	18,612	19,605	19,966	22,244	21,686	22,243	22,496
非鉄金属地金工業	147	128	124	130	91	92	67	34
機械工業	659	655	681	630	668	658	696	673

表3b. コージェネレーションによる業種別発電量の推移(単位:百万kWh)

	1998年	1999年	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年
パルプ・紙・板紙工業	2,024	2,068	2,110	1,993	1,994	2,000	2,009	1,908
化学工業	3,244	3,438	3,482	3,424	3,334	3,177	3,156	3,099
化学繊維工業	900	924	810	778	730	725	753	632
石油製品工業	3,371	3,658	4,027	3,998	4,200	7,344	7,723	7,681
窯業・土石製品工業	462	303	216	213	212	219	225	198
ガラス製品工業	129	135	135	149	209	206	212	221
鉄鋼業	1,394	1,423	1,526	2,159	2,152	2,169	2,174	1,813
非鉄金属地金工業	552	177	93	60	63	58	57	59
機械工業	1,581	1,958	2,256	2,420	2,899	3,229	3,404	3,768

次いで排出率の大きい鉄鋼業及び窯業・土石製品工業の力発電量は逆に増加している。コージェネレーションも同様であり、やはり企業が CO₂ 排出率つまり地球温暖化対策だけを考慮して自家発電を行っているのではないことが判る。

以上のように産業自家発電量の大部分を占める汽力発電とコージェネレーションの利用は、必ずしも省エネルギー対策や地球温暖化対策のために企業が導入しているのではなく、むしろ電力価格や燃料価格などの价格的要素からの理由が大きいものと推測される。

7. まとめ

汽力発電は産業自家発電量全体の72.8%を占めており、そのエネルギー効率37% (産業全体) は送電損失を考慮した火力発電所のエネルギー効率 39% よりも若干ながら低かった。こうした産業自家発電では製造工程からの副生成物をはじめとした安価な燃料を使って安い電力を得てきたといわれ [11]、そうした電力費用の問題が企業に自家発電を選択させる大きな要因となっていると考えられる。また CO₂ 排出率でみても、汽力発電は 0.66CO₂-kg/kWh と火力発電所の CO₂ 排出係数 0.62CO₂-kg/kWh (2001年) より大きく、CO₂ 排出負荷が大きいことが判った。

電力の需要地又はその周辺で発電する分散型電源の考え方は、電力の長距離送電による損失を抑えるとともに、

自家発電からの排熱の利用も図ることによりエネルギー効率を高めて地球温暖化対策に繋げようとするものである。しかし、分散型電源の代表に挙げられるコージェネレーションについてみると、エネルギーの総合効率は62% (産業全体) と高く、また CO₂ 排出率でみても 0.34CO₂-kg/kWh と市販電力に比べて CO₂ 排出負荷は小さいものの、現在の産業分野の自家発電に占める割合は16.3% と限定的でありその地球温暖化対策への寄与は現時点では小さい。また、業種によっては排熱の利用が少なくコージェネレーションの利点が生かされていないものもあり、熱需要を十分に考慮しないでコージェネレーション設備を導入する場合には省エネルギーや地球温暖化対策の面で十分な効率が達成できない可能性が高いことが判った。

(文 献)

- [1] 資源エネルギー庁長官官房総合政策課編、総合エネルギー統計平成 15 年度版、pp.162-164、(株)通商産業研究社 (2005 年)
- [2] 西山智康 他、三菱総合研究所 所報、No.45、pp.88-108 (2005 年)
- [3] 経済産業省経済産業政策局調査統計部、石油等消費動態統計月報 平成 17 年 年計 (2006 年)

- [4] 山村 充、近畿における二酸化炭素排出量の算定、
兵庫県立大学環境人間学部研究報告、第7号、pp.91
-98 (2005年)
- [5] 茅 陽一編、エネルギーの百科事典、pp.297、丸
善(株) (2001年)
- [6] 電気事業連合会統計委員会編、電気事業便覧平成
17年版
- [7] 文献2の pp.100
- [8] 中央環境審議会地球環境部会 (第16回) 資料 4-2
(2004年)
- [9] 電気事業連合会、電気事業における環境行動計画
(2002年)
- [10] http://www.nega.or.jp/07/a/0508_01.html
- [11] 省エネルギーセンター編、新訂エネルギー管理技
術 熱管理編、pp.439 (2003年)

(平成18年10月3日受付)