

(補論2)

産業部門内部での自家用発電・産業用蒸気のエネルギー転換について

1. 産業部門内部でのエネルギー転換

製造業をはじめとする産業部門の内部においては、一次エネルギー供給されたエネルギー源を電力・蒸気・動力などの生産活動に便利なエネルギー源に転換することが日常的に行われている。

特に日本においては、国際的に見て高いエネルギー費用の削減は企業経営上の重要な課題であったこと、歴史的に産業部門の省エネルギーに対して政府が支援に力を入れてきたことなどから、主要な製造業の工場・事業所では電力・蒸気のエネルギー特性を巧みに活用した自家用発電・産業用蒸気の複合・回収利用システムが整備されており、エネルギーの有効利用が図られている。

こうした自家用発電・産業用蒸気の複合・回収利用システムの主要な要素技術としては以下のようなものが挙げられる。

- a. 産業用蒸気ボイラー
- b. 蒸気利用・再生・回収システム
- c. 蒸気タービン発電機
- d. コージェネレーション・システム(内燃機関又はガスタービンと廃熱ボイラー、「コジェネ」)
- e. 電力利用・回収システム
- f. エネルギー管理システム(a.～e.を統合的に管理する制御システム)

これらの要素技術は、各工場・事業所の生産品目やエネルギー需要特性などにより様々な形態に組合わされて利用されており、その形態は一様ではない。さらに、殆どの工場・事業所では、外部から電力・蒸気を購入・受入していると同時に、内部で産出した電力・蒸気の一部を一般電気事業者や隣接する関連工場などの外部に販売・供給している。

2. 自家用発電・産業用蒸気の複合・回収利用システムの模式化と業種別利用形態

個別の業種による差異を捨象し、一般的な日本での自家用発電・産業用蒸気の複合・回収利用システムを模式化して表現した場合、図補2-1. のように表現することができる。

多くの製造業では、蒸気ボイラー・タービンとコジェネの両方を持っているが、製造業で使用される大型の産業用蒸気ボイラーの転換効率は90%程度と極めて高いため、紙パルプなど蒸気利用が卓越する工場・事業所や化学・鉄鋼など高温高圧蒸気を必要とする工場・事業所では主として蒸気ボイラー・タービンを中心としたシステムが用いられている。また、電力利用が極度に卓越し蒸気の消費が殆どない窯業土石工業などでは蒸気ボイラーと蒸気タービンを直結したシステムが多く用いられ、コジェネは殆ど用いられていない。

コジェネは電力・蒸気を通算した場合60%程度の効率が得られること、内燃機関・ガスタービンを使うため負荷追従性が高いこと、設備が小型化でき規模の選択性に優れていること、ボイラー管理士が不要であることなどから、電力・蒸気の消費がほぼ等量で中小規模の事業所の多い機械工業で主に用いられている。また、多くの業種でコジェネは蒸気ボイラー・タービンを補完・支援するサブシステムとして位置づけられており、統合的に管理・運用されている。

このようにシステム毎に普及状況や運用の差異を生じる原因は以下のように説明される。

1) 規模の経済に関する経済的特性

蒸気ボイラー・タービンを中心とするシステムでは規模の経済性が大きく大規模なシステムを整備する際に有利であるが、コジェネは規模に対し中立的であること。

2) 総合転換効率と燃料選択に関する技術的・経済的特性

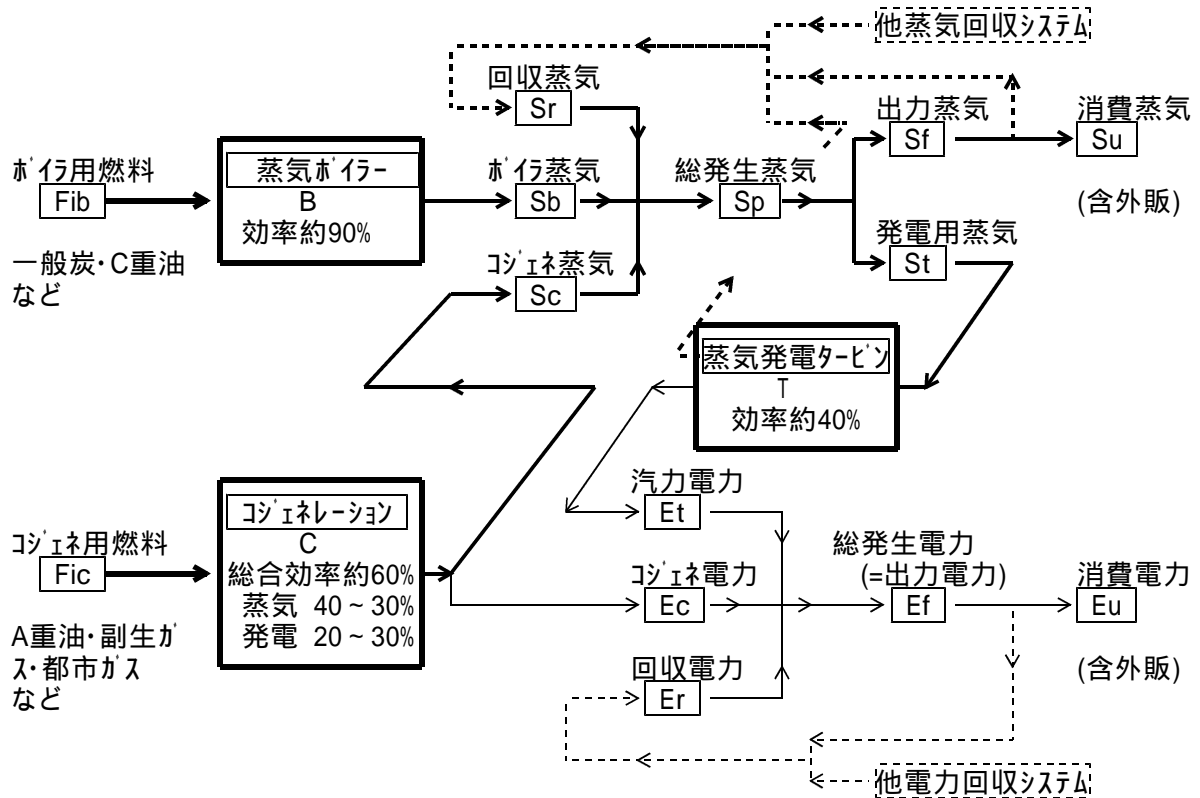
コジェネでは電力あるいは蒸気に偏った需要を賄おうとすると総合転換効率が蒸気ボイラー・タービンに対し相対的に劣ってしまうこと(図補2-2. 参照)。

さらに費用面から見た場合、コジェネではA重油・都市ガスなど高価な燃料を必要とするが、蒸気ボイラー・タービンでは廉価な一般炭・C重油が使えるため、設備費が相当廉価であるか総合転換効率が相当優位にないとコジェネは選択されないこと。

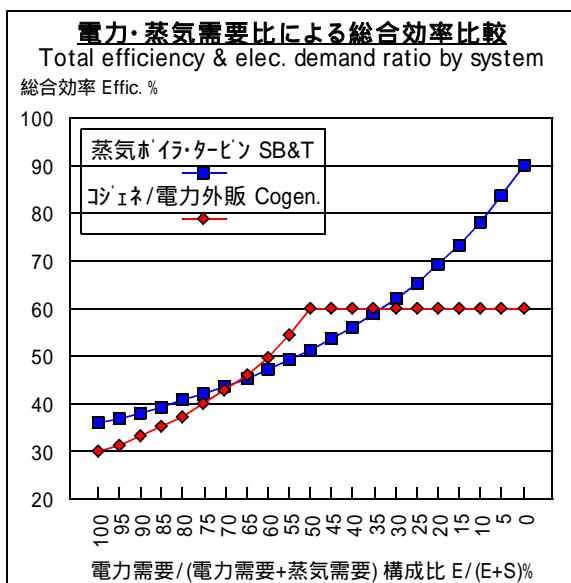
[図: 補2-1. 自家発電・産業用蒸気の複合・回収利用システムの模式図]

[エネルギー投入側]

[エネルギー産出側]



[図: 補2-2. 電力・蒸気需要構成比によるコジェネ・システムと蒸気タービンシステムの効率比較]



図注) 蒸気ボイラー-効率90%、蒸気タービン効率40%、コジェネ発電効率30%・蒸気効率30%とし、コジェネシステムの余剰電力がある場合無制限に外販(売電)可能と仮定した。

一般に、コジェネシステムからの発生蒸気は蒸気ボイラーからの蒸気に比べ相対的に低温低圧であり、特殊な条件を除いてそのままの形で外部供給は困難であるため、蒸気の外販は考慮していない。

3. 自家用発電・産業用蒸気と投入エネルギー源との対応関係

自家用発電・産業用蒸気の複合・回収利用システムが存在する場合について、その電力・蒸気別のエネルギー転換効率やエネルギー起源炭素原単位を算定しようとする場合、蒸気ボイラーやコジェネに投入された各エネルギー源と、発生した電力・蒸気の対応関係を推計することが問題となる。当該問題は、以下のような2つの仮定を置くことにより解決可能である。

(1) 現実のシステムは仮想的に「等価モードシステム」に置換可能であること

自家用発電・産業用蒸気の複合・回収利用システムは、実際の工場・事業所内では多数の蒸気ボイラーやコジェネ・システム、蒸気タービン及び極めて複雑な蒸気回収配管・蒸気溜(ヘッダー)や所内配電網で形成されているが、電気工学における「等価回路則」同様に、如何に複雑な内部構造を持つ自家用発電・産業用蒸気の複合・回収利用システムであっても、巨視的に見た場合には図補2-1. のように仮想的にこれと等価な機能・特性・容量を持った蒸気ボイラー、コジェネ、蒸気タービンを1つずつ備え、電力・蒸気1系統ずつの回収系を持つ単純な模式的システム(「等価モードシステム」)に置換して表現することが可能であると考えられる。

(2) システムに投入されたエネルギー源は「均質化」されて再分配されていること

自家用発電・産業用蒸気の複合・回収利用システムにおいて、投入されたエネルギー源が電力・蒸気に変換されてしまった後は、送配電網や蒸気配管・蒸気溜タンクなどで一括して供給され、また回収系の配管・配線を介して再投入されていくため、個々の電力・蒸気と特定のエネルギー源の直接的な関係を分離して識別することは不可能である。

しかし、逆に巨視的に見た場合、由来の異なるエネルギー源がシステム内部で完全に均質に混合されているのであれば、エネルギー源の種類に関係なく、蒸気ボイラー用あるいはコジェネレーション用エネルギー源として投入された燃料が、蒸気ボイラーやコジェネ、蒸気タービンの中で一定の平均的な比率で電力と蒸気に分配されていくものと考えることができ、最終的に投入されたエネルギー源が自家用発電・産業用蒸気の投入として「均質化」されて再分配されていくものと考えることができる。

4. 現実の産業部門での自家用発電・産業用蒸気に関する推計

具体的に、3. の仮定に基づいて、公的統計から得られる数値から、産業部門における自家用発電・産業用蒸気に関する等価モードシステムとエネルギー源の再分配に関する推計を行う手順と代表的な推計結果を示す。

当該手順・内容は、2001年度以降の総合エネルギー統計「エネルギー供給転換モジュール(PEM)」に組込まれ、エネルギー効率やエネルギー起源炭素原単位の推計に用いられている。

(1) 等価モードシステムの推計

3. -(1)の仮定の下で、現実の産業部門での自家用発電・産業用蒸気の複合・回収利用システムに等価モードシステムを当てはめ、石油等消費動態統計における実績値から等価モードシステム上でのエネルギーの流れと各変換効率に関する値を推計した結果を図補2-3.に示す。

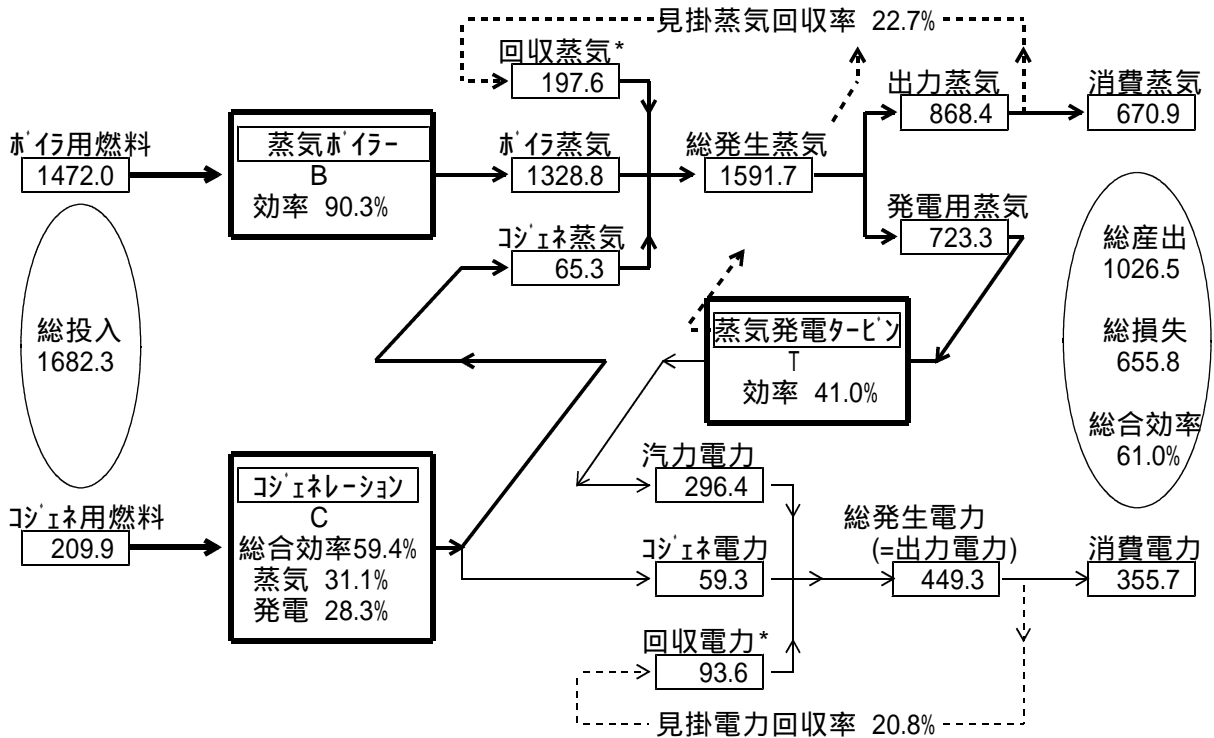
産業部門での自家用発電・産業用蒸気の複合・回収利用システム全体を見た場合、産業用蒸気の利用が卓越しているため総合効率は61.0%と非常に高く、コジェネの効率59.4%を上回っていることが観察される。見方を変えれば、産業部門においては現状技術水準のコジェネを普及させると却って効率が低下・停滞してしまう可能性が高いことが理解される。

蒸気ボイラー・タービンの効率は既に十分高くほぼ理論的限界に達しつつあることから、今後の産業部門の省エネルギーを進める上では、実運転状態で効率70%台を実現する高性能燃料電池の開発など、コジェネ機器側での効率向上努力が不可欠であることが理解される。

[図: 補2-3. 産業部門の自家発電・産業用蒸気の等価モードシステム推計結果]
(2002年度; 石油等消費動態統計全業種部門合計; 単位PJ)

[エネルギー投入側]

[エネルギー産出側]



図注) 1. 簡略化のため外部供給を受けた電力・蒸気需給、内部での自家用水力発電・地熱発電などを除いている。
2. 比較のため回収電力・回収蒸気は一次エネルギー換算・重複補正処理をしていない数値を計上している。

(2) エネルギー源の電力・蒸気別再配分結果の推計

3. -(1),(2)の仮定の下で、現実の産業分門での自家発電・産業用蒸気の複合・回収利用システムにより産出される自家発電電力・産業用蒸気とエネルギー源の対応関係を、石油等消費動態統計による数値を用いて推計する手順及び推計結果を図補2-4. に示す。

自家発電電力・産業用蒸気とエネルギー源の対応関係を具体的に算定するためには、ボイラー用・コジェネ用のエネルギー投入のうちどの程度の量が最終的に電力・蒸気に転換されたのかを等価モードシステム上で算定し、その構成比からボイラー用・コジェネ用それぞれの投入エネルギー源について電力・蒸気への再分配率を計算する。

当該対応関係が推計できてしまえば、エネルギー収支や炭素に関する物質収支から自家発電・産業用蒸気の区分毎のエネルギー転換効率、エネルギー起源炭素原単位を算定することが可能である。

2002年度の推計結果によれば、自家発電のエネルギー転換効率(発電効率)は38.8%であり、LNG複合火力発電などの高効率設備を多数保有する一般電気事業者発電の41.3%には若干劣るものの、外部用発電の39.0%とほぼ遜色ない結果となっている。産業用蒸気のエネルギー転換効率は86.7%であり極めてエネルギー効率が高いことが理解される。

自家発電のエネルギー起源炭素原単位は業種による差異が大きい平均して157gC/kWh程度であり、原子力発電・水力発電を多く保有する一般電気事業者用発電の86.5gC/kWhには及ばないが、外部用発電の159gC/kWhを下回る原単位を達成していると推定される。同様に産業用蒸気は平均で16.5gC/MJであると推定される。

[図: 補2-4. 自家発電・産業用蒸気の複合・回収利用システムに関するエネルギー源の電力・蒸気別再配分結果の推計手順と結果]

(2002年度; 石油等消費動態統計全業種部門合計; 単位PJ)

注) 簡略化のため水力・回収電力などの表現を一部省略して表示している。

(第1段階: 蒸気ボイラー/コジェネレーション別投入エネルギー源の集計整理)

石油等消費動態統計からボイラー用・コジェネ用のエネルギー源別投入量を集計整理する。

	石炭・同製品	石油・同製品	天然・都市G	(等価モードシステム)	電力	蒸気
合計	-599.7	-817.2	-90.6		--	--
ボイラー用	-578.5	-683.9	-37.0		--	--
コジェネ用	-21.2	-133.3	-53.8		--	--

(第2段階: 等価モードシステムの推計と再分配率の推計)

等価モードシステムの推計結果から、投入-産出の経路別のエネルギー流量とその構成比を求め、ボイラー用・コジェネ用に投入されたエネルギーが最終的に電力・蒸気の発生に分配された比率(再分配率)を推計する。

	石炭・同製品	石油・同製品	天然・都市G	(等価モードシステム)	電力	蒸気
	(エネルギー投入量)				(再分配率)	
ボイラー用	-578.5	-683.9	-37.0		0.519	--
コジェネ用	-21.2	-133.3	-53.8		0.748	--
					--	0.252

(第3段階: 自家発電電力・産業用蒸気別の投入エネルギー源の再分配・再集計)

「均質化」の仮定に基づき、第2段階で求めた再分配率を投入エネルギー源に一律にあてはめ、自家発電電力・産業用電力毎に投入されたエネルギー源の量を推計する。

	石炭・同製品	石油・同製品	天然・都市G	(等価モードシステム)	電力	蒸気
	(エネルギー投入量)				(再分配率)	
ボイラー-電力	-578.5×0.519	-683.9×0.519	-37.0×0.519		0.519	--
ボイラー-蒸気	-578.5×0.481	-683.9×0.481	-37.0×0.481		--	0.481
コジェネ電力	-21.2×0.748	-133.3×0.748	-53.8×0.748		0.748	--
コジェネ蒸気	-21.2×0.252	-133.3×0.252	-53.8×0.252		--	0.252

(第4段階: 自家発電電力・産業用蒸気別のエネルギー効率などの推計)

第3段階の結果を整理し、投入されたエネルギー量と産出した電力・蒸気のエネルギー量から自家発電電力・産業用蒸気毎の効率が推計できる。同様に、各投入エネルギー源毎の炭素量の合計を産出量で除せばエネルギー起源炭素原単位が推計できる。

石炭・同製品	石油・同製品	天然・都市G	水力・回収他	電力	蒸気	効率	炭素原単位
(推計エネルギー投入量)				(エネルギー産出量)			
電力(ボイラー+コジェネ)	-370.3	-417.4	-51.3	-203.8	402.8	--	0.388
							157gC/kWh
							(43.6gC/MJ)
蒸気(ボイラー+コジェネ)	-229.4	-399.4	-39.3	-286.2	--	827.7	0.867
							16.5gC/MJ