

# ガス分離を用いた製鉄所の コプロダクションとインテグレーション —社会のエネルギー回生を実現するエネルギー創出—

中川 二彦

## 1. 局所(工場, 家庭)の最適化から全体(社会)の最適化へ

我が国の政府は1990年のCO<sub>2</sub>排出量を2020年に25%, 2050年に60~80%削減する目標を掲げ、様々な開発を支援している。その概要はCool Earth-エネルギー革新技術開発ロードマップにまとめられているが、要素技術が中心であり、各要素技術の相互関係を基に目指すべきエネルギーシステムの全体像や具体的な数値目標は必ずしも明確ではない。

エネルギーシステムとはエネルギーの質や時間変動を考慮して需給バランスを調整する仕組みである。したがって、国全体としてCO<sub>2</sub>排出量を削減するために重要な視点は、空間的な制約(グリッド)の中でシステム全体のエネルギー利用率を最大にすることである。実際に、我が国の企業は工場内のエネルギー利用率を最大化して、世界No.1の省エネルギーを達成してきた。しかし、エネルギー利用率を更に向上するためには、工場単独での最適化には限界があり、局所(工場)でのエネルギーの過不足を社会全体として相互に融通し合う仕組みを構築する必要がある<sup>1)</sup>。

## 2. エネルギー効率とエネルギー回生

我が国のエネルギー利用率は34%である<sup>2)</sup>。エネルギー利用率は(=目的に対して理論的に必要なエネルギー量/一次エネルギーの使用量)で定義される。したがって、エネルギー利用率34%の意味するところは、理論的に必要なエネルギー量に対して、約3倍の一次エネルギーが使用されており、エネルギーが必ずしも上手く使われているとは言い難い。



Co-production and Integration for Steel Works through the Use of Gas Separation  
Tsuguhiko NAKAGAWA (正会員)  
1982年 大阪大学大学院基礎工学研究科化学工学分野修了 博士(工学)(名古屋大学)  
現在 岡山県立大学情報系工学研究科 教授  
連絡先: 〒719-1197 岡山県総社市窪木111  
E-mail [nakagawa@cse.oka-pu.ac.jp](mailto:nakagawa@cse.oka-pu.ac.jp)

2012年12月17日受理

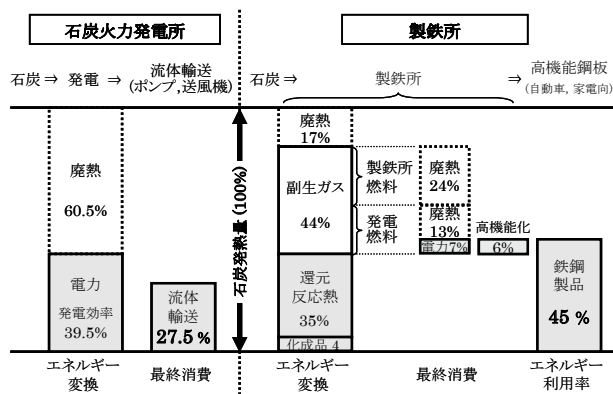


図1 発電所と製鉄所における石炭エネルギー利用率の比較

「何故、上手く使われていないのか」ということを理解するための一例として、エネルギー利用率の視点から石炭エネルギーの使い方を製鉄所と他の方法とで比較した例を図1に示す<sup>3)</sup>。

図1は石炭で発電した電力を用いて流体を輸送した場合と、石炭を鉄鋼製品の製造に用いた場合とで、エネルギー利用率を比較した結果である。比較条件として、電力は最終目的の製品ではないので、電力を最も効率良く使える流体輸送と比較した。また、鉄鋼製品の高機能化とは、使用用途に合わせた材質、強度および形状などの組織制御や造り分けや、鍍金などの表面処理である。

図1より、高炉法の鉄鋼プロセスのエネルギー利用率は45%に達しており、国内平均のエネルギー利用率34%よりも+10ポイント以上も高い。一方、石炭⇒発電⇒流体輸送におけるエネルギー利用率は27.5%であり、国内平均の利用率34%よりも6.5ポイント低い。しかも、鉄鋼プロセスでは鉄鋼の最終製品までを考慮しているのに対し、単に流体を輸送するだけで27.5%の利用率しかない。鉄鋼プロセスには高温設備向けの大量な冷却水の輸送設備も含まれることから、両者のエネルギー利用率の差は大きい。その理由は、図1からも明らかなように、製鉄所では還元の目的で一度使用したエネルギーを副生ガスとして回生し、製鉄所内の燃料として再利用しているためと考えられる。

一方、石炭を用いた発電では廃棄する損失熱が大きい

め、ガス化と組み合わせたIGCC (Integrated Coal Gasification Combined Cycle) を開発し、損失熱を減らす努力がおこなわれている。燃焼過程のエクセルギー損失を動力で再生する一種のコプロダクションとも言え、その当面の目標は発電効率50% (流体輸送含むエネルギー利用率35%) であるが、発電だけを目的にしてその利用率を向上することは容易ではない。

以上の事実から、石炭エネルギーは発電など単一の目的で使用するのではなく、例えば、還元などの目的で一度使用した後に排出されるエネルギーを再生して利用することが極めて重要な考え方であることが分かる。

社会システムとして提案しているエネルギー回生の概念を図2に示す<sup>1)</sup>。エネルギー回生は一度利用したエネルギー、廃熱および副生物を再利用の用途に合わせて価値の高いエネルギーに再生し、再利用 (回生) する方法であり、排出・回収されたエネルギーの質の低下に伴って段階的に使用するカスケード利用とは異なる。勿論、回収したエネルギーをそのまま再利用しても良いが、エンタルピー値は高くても、エクセルギー値の低いエネルギーは再利用し難い。

提案するエネルギー回生は、省エネなどによる「エネルギー創出」と、創出されたエネルギーに加えて再生可能エネルギーを上手く利用する仕組みである「双方向システム」から成る。また、エネルギー回生ではエネルギーの需給を一体の仕組みとして構成し、バッファ (需給調節機能) を自己制御性の高いシステムとすることが重要である。

ここでは「エネルギー創出」について説明し、「双方向システム」については次の記事で述べることにする。

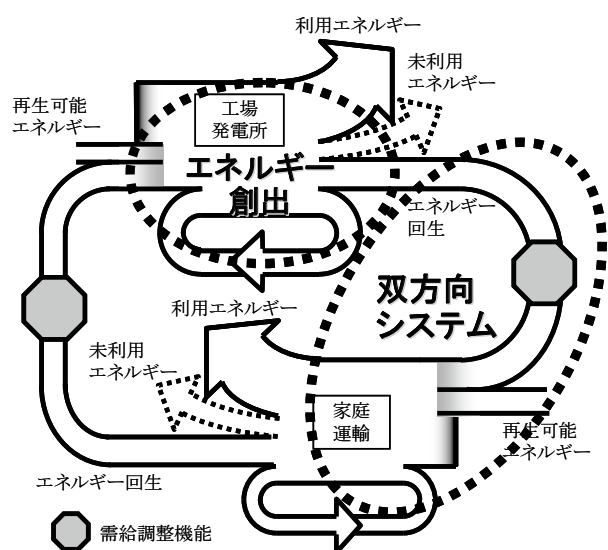


図2 エネルギー回生の概念

### 3. 製鉄所からのエネルギー創出 (コプロダクション)

「エネルギー創出」の具体例として、製鉄所の研究事例を示す。図1で述べた製鉄所の副生ガスには、低位発熱量  $LHV = 19.3 \text{ MJ/Nm}^3$  のコークス炉ガス (Cガス)、 $LHV = 3.3 \text{ MJ/Nm}^3$  の高炉ガス (Bガス)、および  $LHV = 8.4 \text{ MJ/Nm}^3$  の転炉ガス (LDガス) がある。Bガスは全発生熱量の50%以上を占めるが、 $LHV$ が低く、単独で燃焼することが難しいため、発熱量の高いCガスと混合して使われている。

Bガスの組成例を示すと、 $H_2 = 3\%$ 、 $CO = 23\%$ 、 $CO_2 = 22\%$ 、 $N_2 = 52\%$ であり、燃料としては74% ( $= CO_2 + N_2$ ) も燃焼に寄与しない成分を含んでいる。これらの成分は各燃焼設備で加熱されて排出されるだけなので、排ガス損失熱を増やす原因になる。そこで、これらの燃焼に寄与しない成分を除去し、副生ガスの価値を高めて回生すればエネルギーの利用効率を高めることができる。具体的には、ガス分離のエネルギーに製鉄所の低温排熱を利用して、分離後の副生ガスをGTCC (Gas Turbine Combined Cycle) 発電の燃料に用いる。その結果、従来に比べ発電効率が向上し、その増分発電量を社会に供給することができる<sup>4)</sup>。そこで、下記の①~⑤を実施した場合について考えてみる。

①Bガスから $CO_2$ と $N_2$ を分離する。ただし、 $N_2$ の分離は高炉送風段階でおこなう。これにより、熱風炉での燃料使用量が減少する。 $CO_2$ の分離エネルギーは製鉄所の温排水を回生して利用する<sup>5)</sup>。②Cガスを自らの発生顕熱で改質する。③製鉄所の全加熱炉ヘリジェネバーナを導入し、省エネをおこなう。④これらの結果、総発熱量が増加した副生ガスをGTCCの発電燃料に用いる。⑤その際、発熱量が増加した副生ガスに合わせてGTCCの燃焼温度upなどをおこない高効率化する。

現状の製鉄所エネルギーフローを図3(a)に、上記の①~⑤を全て適用した後の製鉄所のエネルギーフローを図3(b)に示す。また、図3(a)と(b)の検討条件と結果のまとめを表1に示す。表1は分離後の $CO_2$ を貯留せずに大気放散する場合の結果を示したが、それでも製鉄所から排出している $CO_2$ の25%を社会全体として削減でき、大きな効果が得られる。この理由は、図3(a)に示した現状の製鉄所では $30 \text{ kWh/t-s}$ の電力を購入しているのに対して、①~⑤を適用したエネルギー回生では、図3(b)に示すように、製鉄所外において利用可能な $542 \text{ kWh/t-s}$ の余裕電力が創出されるためである。

なお、表1において、発電の $CO_2$ 排出原単位を石炭火力代替の $0.864 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh}$ を用いたが、東日本大震災以降に増加した石油火力代替の $0.695 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh}$ で評価しても

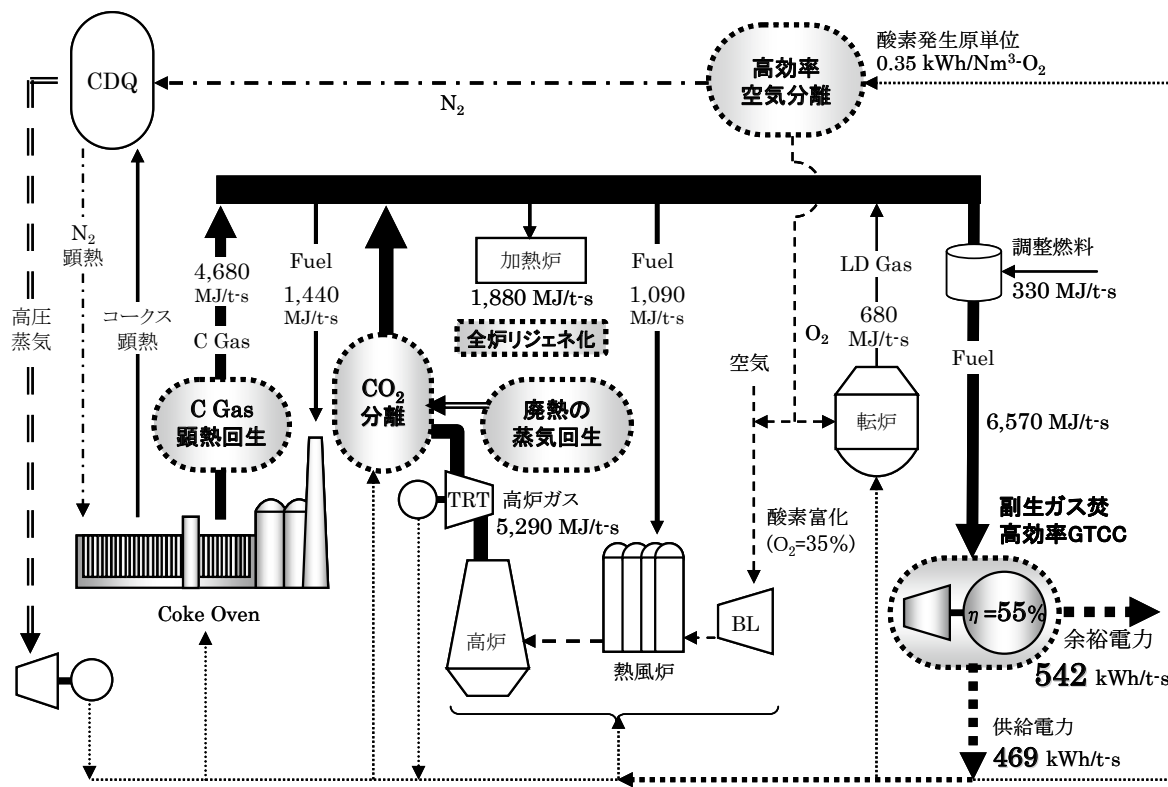
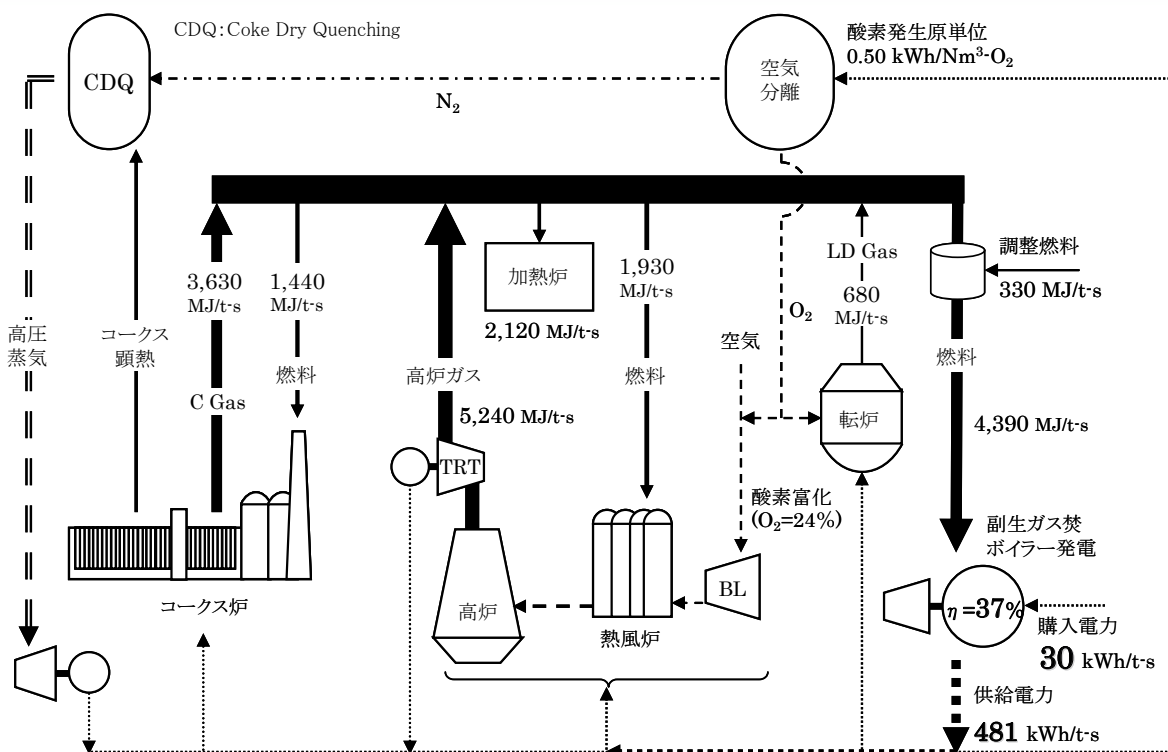


図3 副生ガスを用いたコプロダクションによる電力創出

20%以上の削減になる。

以上の結果から、粗鋼生産1,000万t/年の製鉄所へガス分離を用いたエネルギー回生を適用することによって創出される電力量は図3(a)に示した3.0億kWh/年(=30kWh/t-s×1,000万t/年)の購入電力が省電力されることに加えて、

図3(b)に示した54.2億kWh/年(=542kWh/t-s×1,000万t/年)の余裕電力が生じることから、合計57.2億kWh/年になる。国内の全製鉄所(高炉粗鋼9,000万t/年)換算では520億kWh/年(=(54.2+3)×9,000/1,000)の電力創出ポテンシャルがあることになり、この創出電力は国内総電力需要の5.2

表1 副生ガスのコプロダクションによる電力創出の効果

		現状	副生ガス コプロダクション	差異
生産条件	粗鋼生産(万t/年)		1,000	
	還元材比(kg/t-pig)		490	
購入石炭(兆kJ/年)		217	216	-1
購入燃料(調製用)(兆kJ/年)			3.3	-
電力使用量①(億kWh/年)		48.1	46.9	-1.2
副生ガス燃料発電量②(億kWh/年)		45.1	101.1	+56.0
創出電力②-①(億kWh/年)		-3.0	54.2	+57.2
CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> 排出量(万t-CO <sub>2</sub> /年)	1,970	1,470	-500
	CO <sub>2</sub> 排出量削減率(%)	100	74.6	-25.4

注) 創出電力のCO<sub>2</sub>排出量は、製鉄所が24hr稼働であることから、ベース石炭火力との代替(0.864 kg-CO<sub>2</sub>/kWh)で評価した<sup>6)</sup>。

%であり、原子力発電所7基分に相当し、極めて大きい。また、これを現状の石炭火力と代替すると最大4,500万t-CO<sub>2</sub>/年のCO<sub>2</sub>削減効果が期待できる。

以上のことから、日本国内ではCO<sub>2</sub>排出量を削減するという目標に対して、製鉄所単独でCO<sub>2</sub>削減を図る方法が必ずしも現実的とは言えない。むしろ、製鉄所単独での削減を考え、還元材比低減だけに拘った技術開発や、増エネルギーになるCO<sub>2</sub>地中貯留は、その開発や投資のコストを考えると再考の余地が残っている。

製鉄所と類似したコプロダクションが可能な分野としては、製紙工場と発電や、廃棄物処理と発電などがあり、将来的には、バイオマスを活用した製薬やプラスチック製造などと、エネルギー創出のコプロダクションが考えられる。

その他の課題として、要素技術開発やスケールアップなどの技術的な課題もあるが、これらの技術課題に加えて、普及促進を図る上での様々な制度や仕組み上の問題も解決する必要がある。具体的には、高効率化によって創出された電力を既存の系統で効率良く流通させるとともに、導入を促進するための競争原理やインセンティブなどの制度や仕組みが必要である。加えて本提案のようなインテグレートシステムの開発・導入を促進する政策を、特区制度や防

災対策と連携したエネルギー施策として、各地で開発中のスマートコミュニティシステムの設計に反映していくことが重要である。

なお、今回の得られたCO<sub>2</sub>排出量25%削減の結果は最適化された結果ではない。効果を更に拡大するためには、ガス分離の省エネ、エネルギー利用のポートフォリオの最適化、省エネ技術の開発と導入を推進することが重要になる。

#### 4. おわりに

- ①日本の製鉄所では、一度使われた石炭エネルギーを副生ガスとして回収・利用するため、石炭から鉄鋼製品に至るエネルギー利用率は45%に達し、国内平均を10ポイント以上上回る高いエネルギー利用率を有する。
- ②製鉄所のエネルギー利用率が高い理由に着目すると、我が国のCO<sub>2</sub>排出量を削減するためには、製鉄所の副生ガスの価値を高めて経済性のあるCO<sub>2</sub>削減をおこない、社会としてのエネルギー回生の仕組みを構築することが重要である。
- ③社会全体としてインテグレートされたエネルギー回生において、ガス分離を用いた高効率の副生ガス焼きGTCCを開発・導入することによって、国内の全製鉄所(高炉粗鋼9,000万t/年)ベースでは原子力発電所7基分に相当する520億kWh/年以上の電力を創出し、最大4,500万t-CO<sub>2</sub>/年以上のCO<sub>2</sub>排出量を削減できる。

#### 参考文献

- 1) SMART研究会：地域分散エネルギー技術，海堂堂出版，東京(2004)
- 2) 平田賢：日本機械学会RC185資料(2001)
- 3) 中川二彦：エネルギー資源学会論文誌，32(4)，1-8(2011)
- 4) 中川二彦，辻康範：日本機械学会論文集(B編)，78(793)，1560-1571(2012)
- 5) 中曾浩一，Erifina Oktariani，野田敦嗣，板谷義紀，中川二彦，深井潤：エネルギー資源学会論文誌，32(5)，9-16(2011)
- 6) 電気事業連合会：電気事業における環境行動計画，p.10(2012)