

特集記事 4

次世代コークス炉技術と環境保全

三浦隆利
Takatoshi Miura東北大学 大学院工学研究科
化学工学専攻 教授

Environmental Protection in Cokemaking Process towards 21st Century

1 環境問題への対応

環境問題は人間社会に大きく影響を与えるため、その問題をないがしろにして持続可能な製造業はあり得ないし、環境対策を含めた製造技術によりコスト低下を図る時代になったと思う。しかし現状は、リストラおよびコスト削減の要請により製造工程の手直し程度で対処しようとしている。例えば、①リサイクルの方法を差別化するために、LCAがあるはずであるのに、現実にはリサイクルしないでバージン原料で製造することとの差別化をしているに過ぎない、②製品を作る場合には、原料の安全性を把握してから使うべきであり、そのためには最終的に廃棄物として自ら処理する方法まで考慮して物質および製造工程を選択すべきである、③リユースを主体とした設計を行っていないので、リサイクル製品の市場性を考慮しないでリサイクル事業を実施しようとするが、リサイクルは形を変えて、品質のレベルを全体的に下げるので、高付加価値の製品ができないものにも拘わらず、市場性を探る、等である。手直しは期待している好景気の時に大幅な技術革新で補うという考えであろうが、コストを考慮した自己技術評価に基づく戦略性のある製造技術の見直しが必要であり、それに基づいた手直しであることが要望される。

その点、鉄鋼業は、ご承知のように他の製品と異なり分離の優位性があり、リサイクルにより製造コストも低減されるためリサイクル率は高く(スクラップは年間約3,500万トン('96年)が回収・リサイクルされ、鉄スクラップの発生量は'95年ベースで11億トンを越える鉄鋼蓄積量の2~3%で推移)、リサイクルまで含めた鉄製造プロセス技術として完成している。このように廃棄物の再生までも考慮している点で経済構造的に継続性があり、製造プロセスとしては有利であるが、他の産業と比べるとCO₂の発生量の多い点が問題となっている。その解決策は個々のプロセスにおい

て省エネルギーと高生産性を図ることである。図1にはコークス製造における指針を示した。内容は当然のことであり、コークス製造においても安全・省エネ・最適生産・廃棄物低減の戦略手法を具体化し、コークス炉設備・運転コスト・環境保全設備などの点で革新的なコークス製造方法を確立すれば、高度なプロセスとして維持されられる。

廃棄物処理は自社で行うことが難しいというが、原則的には製造者自身が廃棄までも考慮して設計・製造を行うべきであろう。しかし現実には専門家を養成するのは難しいとしたら、製造者と同じマインドで廃棄物処理を行う業者を、つまり適正処理を行うだけではなく、リユースあるいはリサイクルの立場で処理を行う業者を育成し、任せるべきである。これに関して既に鉄鋼業は実績があり、製造者自身で廃棄物処理までを考慮した技術を有している。

大量消費・廃棄を是正しリサイクルを推奨するため製品にエコマークをラベルした製品が見られるが、リサイクルをしているだけで取得できるマークなどは環境のために何にもならない。それは資源の保存を行っているだけで、真の省資源・エネルギーを図るには、ISO 14000シリーズ、LCAおよび環境汚染物質排出・移動登録(OECDで行っているPollutant Release and Transfer Register)、有害物質排出登録(米国のTRI、Toxic Release Inventory等)など

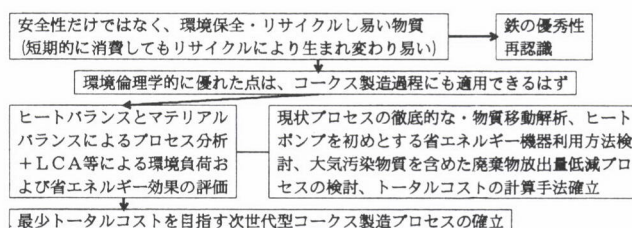


図1 省エネルギー・環境調和型コークス製造プロセス化

を利用し、総合的に物質の安全性・生産性・販売価格などを考慮し製造された製品を推奨すべきである。鉄は製造面での環境保全あるいは廃棄物利用の面でも優等生であり、さらに素材としての環境面での優位性を強調すべきである。

2 コークス炉の現状

1981年に稼働していた我が国のコークス炉は6,374門あり、コークスを年間4,358万t生産していたが、1997年には30炉団(4,262室)で約3,350万tと製造量は年々減少している。最近では中国からも年間130万t輸入する一方、微粉炭吹き込み量は900万t(115kg/t-銑鉄)にも達しており、輸入量と微粉炭吹き込み量は、高価なコークス炉の更新が困難な現状と相俟って、今後も増加すると予想されている¹⁾。表1中、一門当りのコークス生産量は多少の変動はあるものの年々増加傾向にありフリー温度増加などにより生産性を向上させていることが分かる。

石炭の国内年間使用量は現在1億3,618万tで、鉄鋼など製造業で9,000万t、電力用4,460万t位であり、鉄鋼における石炭の使用量は大きく(原料炭購入6,241万t)、その中でも大部分をコークス製造用が占めている²⁾。日本のコークス炉は新設すると数百億円～1千億円(現状の製造規模から1炉団の年間製造量を平均110万tとする)掛かるが、一方中国では二千～三千万円(年間製造量規模を数万tとする)である。但し、中国の場合、ガスの回収設備、環境対策用設備もない一方で、日本の場合には中国の安いコストに押され、設備廃棄せざるを得なくなる恐れもある。このような状況下において輸入量は増加の一途を辿ると思われるが、環境対策を施さないで製造を続けることは、必ず子孫に負の財産を残すことになるため、早急に改善する必要がある。

また我が国の粗鋼トン当りエネルギー消費原単位を100とすれば、西ドイツ103、イギリス112、フランス111、アメリカ118であり³⁾、中国は我が国の二倍強と云われている。中国のエネルギー効率を向上させ、環境設備などを付設し、その分でCO₂排出権を購入する余力が我が国に残っていれば良いのだが、難しい状況にある。世界各国の賃金(製造業労働者、1995年)を見ても、日本は中国の約90倍であり、韓

国の3倍位である。このような人件費と流通費の高い経済環境で研究者は何をを目指すべきかと問われている時代でもあり、特効薬あるいは遅効性でも良薬となるような技術開発による貢献が不可欠である。

3 上工程としての製鉄

3.1 DIOSの役割

現在の高炉メーカーのエネルギー原単位は1万9200MJ/tであり、コークス比398kg、微粉炭比115kgである¹⁾。生産能力的には現状の生産量を維持するにはDIOSの方が投資額が高くなるが、所要エネルギーが20%弱減少することからエネルギー効率を改善できると云われている。したがって大型化による課題解決に進むよりも10～100万t/年クラスの初期投資が少ない少量生産対応の鉄源製造プロセスとして汎用化され则认为られる(6,000t/day規模の設備コストで高炉法と比較して35%、製造コストで19%の削減可能、4%位の省エネルギー、約5%CO₂排出量削減)⁴⁾。恐らく東南アジアなどでの新規設備に有用と思われる。

3.2 コークス炉の現状

高炉法に不可欠なコークス炉は年々減少しつつあり、炉の稼働率も120%を越える状態となっている。高炉操業に依存しているため、粗鋼生産需要に合わせたコークス炉操業を強いられている。また表2に年度毎のコークス消費量と製造に要するエネルギー消費量を示したが⁵⁾、乾留に要する消費熱量は、乾燥設備の利用により2.34～2.45MJ/t-coalの範囲で安定している。しかしこの値を今後維持できたとしても、コークス炉の老朽化に従いメンテナンス費用が増加すると思われる。現状では、消費熱量を減少させることは、品質の低下に繋がるため、品質を維持できる省エネルギー型のプログラミング加熱法の開発が要望され、コークス炉内現象の詳細な解明と同時に、高炉における空隙分布、応力分布およびコークス反応強度なども加味できる精巧なシミュレーション技術が必要と思う。

3.3 廃熱の利用

表2に示すように乾留消費熱量は、頭打ちであり、これ以上の省エネルギーは現状を革新する次世代型コークス炉あるいは低品質コークスを使用可能にする高炉操業法の出

表1 コークス・銑鉄生産状況

	'81	'84	'87	'90	'93	'96
コークス生産量[万t]	4358	4392	4005	4176	3701	3761
高炉使用コークス量[万t]	3797	3884	3494	3548	3141	3010
銑鉄生産量[万t]	7923	8015	7329	7965	7361	7459
コークス比[kg/t]	480	485	477	445	427	404
稼働室数[門]	6374	5946	4859	4825	4576	4287
一門当りの生産量[t]	6837	7386	8242	8655	8088	8773

表2 年度毎のコークス使用量と製造に要するエネルギー消費量

	'90	'91	'92	'93	'94	'95	'96	'97
コークス炉室数	4825	4774	4749	4576	4569	4287	4287	4262
高炉コークス消費量 万t	3548	3656	3150	3478	3045	3404	3010	3130
消費熱量, MJ/t-coal	2.45	2.43	2.37	2.38	2.37	2.39	2.37	2.44

現を待つしかない。現状でもエネルギー原単位を減少させる上で不可欠なのは、廃熱の利用である。都市型の製鉄所では、ヒートポンプの設置による地域住民へのエネルギー供給も可能であり、図2に示すように可能な限り冷暖房システムへの活用を検討することが、省エネルギーの観点から重要と考えている。

4 新しい概念でのコークス炉の特徴

ゼロエミッションに限りなく近いコークス炉操業を目指して次世代型コークス炉の開発研究が行われ(Super Coke Oven for Productivity and Environment Enhancement toward the 21st Century, SCOPE21)⁶⁾、個別の要素技術研究をほぼ終了し、要素組合せ試験を行い、技術複合化での効果およびスケールアップでの実用化時の課題を明らかにしている段階に入っている。全体プロセス構成を図3に示す。予熱器で350～400℃まで加熱し、細かい石炭は成形して粗い石炭と混合する(ここまで1時間以内)。その後、コークス炉に装填し750～850℃まで加熱し(6時間程度)、製造したコークスを1000℃迄加熱して冷却する(2時間程度で全体で約9時間であり、現状の約20時間を大幅に短縮する)。これらは全てクローズドシステムで行う。

その特徴は以下の通りである。

- ①高熱伝導率の炉材を使用し、伝熱性能を向上する、
- ②省エネ率は現状の炉より13%程度向上する(熱回収等により20%目標)、
- ③石炭の輸送、乾留中のコークス炉、製造されたコークス

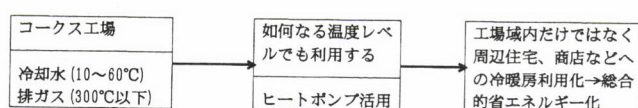


図2 低エネルギーレベル温冷排水(ガス)の有効利用

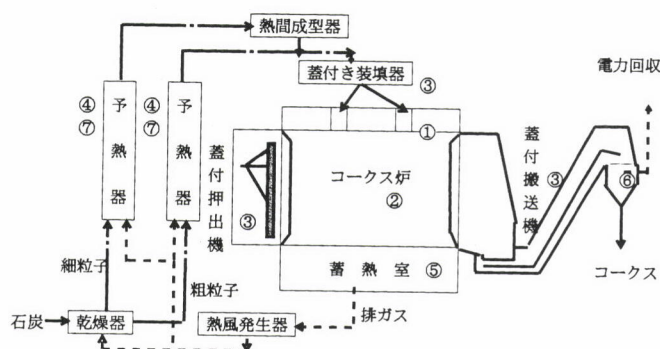


図3 SCOPE21の概略

押出し時などの既存炉におけるガス漏れおよび煤塵の発生等を装置改善により防止する、

- ④前処理工程で高温窒素気流中(400～450℃)で石炭を急速加熱し、コークス炉の生産性を300%向上する、
 - ⑤多段燃焼・排ガス再循環方式によりNOx低減を図る、
 - ⑥CDQにおいて冷却による熱利用だけでなく、約1000℃まで昇温させコークス改質を行うことによるコークス炉の生産性向上、
 - ⑦急速加熱により非微粘結炭の粘結性を向上させ広い石炭種を利用可能にする、
- などによりSCOPE21は明確に鉄鋼業界のCO₂対策として位置づけられている。

5 環境保全の面からの開発研究

5.1 高熱伝導率の炉材の使用

高熱伝導率炉材の開発は伝熱性能を向上させるため周知のように加熱操作上の省エネルギーになる。この観点から開発研究が推進され、現状ではほぼ開発を終了したと思われる。今後は、この開発研究の場合と同じ位の情熱で、極低熱伝導率炉材を開発し、大気と接する部位の放熱を抑えることが必要であろう。

5.2 省エネルギー率の向上

省エネルギーのためには、熱回収が重要であり。従来から300℃以上のエネルギーレベルであればボイラ熱源としても十分活用できるため、低温廃熱も積極的に回収する努力が払われてきた。最近、各種ヒートポンプが開発され、工場廃熱(温水も含む)は勿論、河川水までもエネルギーとして活用するようになってきた。ヒートポンプの運用は、成績係数(COP)=利用できる熱量(kcal)/{圧縮機の電力量(kWh)×860(kcal/kWh)}で表され、その値が3以上を目標として設置される。しかし、工場の温排水・ガスを暖房用として利用する場合にはCOPが5以上になるが、冷房時には3程度に低下する。この冷房用への応用は年々進歩しており、他産業の動向を見据えながら鉄鋼への導入が必要であろう。またこのエネルギーの利用効率を向上させるには、工場だけではなく周辺の住宅・商店などへの供給も大切であると思われる。

5.3 ガス漏れおよび煤塵の外気への放散防止

コークス製造時に揮発性有機物としてベンゼン、トルエン、キシレン、クロルベンゼン、ベンゾピレンなどの芳香族化合物が発生し、人間が吸い込むと悪い影響を及ぼす。また生成物質は、オゾン層を破壊する物質も含まれ、極め

て深刻な環境破壊を引き起こすと云われている。乾留過程では外気に閉じたプロセスとなるために問題ないが、発生したガスはコークス炉の熱源として利用されるため、この過程で発生する排煙の処理が重要である。排煙中の揮発性物質は、一般には電子ビーム照射、活性炭吸着、バーナで加熱して分解処理などの方法で除去している。しかし完全燃焼であればこれらの装置は不要となる。

粉塵の発生も粉粒体を扱う場合には、気流の速度>粉体の終末速度の場合に粉体は気流に同伴されるため、粉塵を避けられない。そこで粉塵発生部に覆いをするようになるが、粉塵外部放散防止装置の覆いあるいはフィルターに付着した粉塵の除去(メンテナンス時に集中すると考えられる)において二次公害を生じない工夫が欲しい。粉塵に限らないが、特に最近エンジニアリングで必須となっている設計者・作業員・操作員も含めた健康、安全の維持には初期の段階で検討することが要求されよう。

5.4 高温気流方式急速加熱による生産性向上

乾燥後(130℃前後で調湿される)に400℃位まで予熱される気流加熱過程では、可及的に粒子数密度を増加させて加熱させることになる。発火などの危険回避の処置は当然であり、数密度の増加では壁付近の風速の低い領域での粒子降下を抑制させる工夫があると効率は向上するであろう。なお、乾燥工程では大量の水蒸気が発生することになるが、水蒸気熱は上記のヒートポンプでの利用が可能となるであろう。融点の低い酸化物(硫化物)は内壁に固着する可能性もある。また加熱工程で発生する有機ガスなどの利用はプロセスの鍵でもある。つまりそのガス量は少量であり環境保全を考慮するとコスト増になるため、利用するには本工程で可及的に少ない気流の流量で輸送し、そのガスをエネルギー資源化を図ることが望まれる。

5.5 多段燃焼方式によるNOx低減

化石燃料からの大気汚染物排出量の中で、石炭燃焼から発生する二酸化硫黄は、石油の1.7倍、二酸化窒素は石油の2倍および二酸化炭素は石油の1.4倍と云われている。NOxの低減には、炉内燃焼技術により生成量を抑制する方法として、二段燃焼法、排ガス再循環法、低NOxバーナなどがある。一方、煙道で触媒を用いてアンモニアを吹き込む方法(触媒を使用する場合を接触還元法、触媒を用いない場合もある)、活性炭法および電子線照射法などがある。煙道での処理は余計なエネルギーを使用するため、バーナの選択および多段(二段あるいは三段)燃焼・排ガス再循環による燃焼装置の改善が良いと考えられる。

NOxの生成はサーマル、プロンプトおよびフューエルの

三種の機構があり、バーナも含めた燃焼装置の改善は原理的に空気比を減少しNOx生成量を低下させることになる。石炭中にはN分が元素分析値で1.5%含まれる場合もあり(Clは最大でも355mg/kg以下)、電力のように排出濃度を60ppmとするには煙道もしくは新たな脱硝装置を設置する必要がある。その場合、脱硝装置はコークス炉単独ではなく、高炉・焼結炉などとの併用となると思われる。なお排ガス再循環は温度を低下させるのでサーマルNOxの低減に影響するだけと考えられている。

5.6 脱硫装置

日本の輸入炭の硫黄分は1%未満(太平洋炭0.2%)であり、中国生産の石炭の平均値は1.35%(広西自治区7%)と高く、総じて石炭には全硫黄が0.5%以下の低硫黄含量のものから最大12%の高硫黄含量のものまである。石炭中の硫黄分は窒素分と異なり、燃焼操作で発生を軽減することはできないため、硫黄分の少ない石炭の採用もしくは脱硫装置が不可欠である。現状では排ガス中に含まれている硫黄酸化物(SOx)対策としてアンモニア硫安法という世界でも例をみない高効率の排煙脱硫装置を設置しSOxの排出量を'77年当時の約10%に引き下げる⁷⁾など技術開発は盛んである。特に電力のように排出濃度50ppmを目指す場合には装置固定費と運転費の低減が重要であり、石膏法を継続する場合にはその過剰を新たな硫黄含有物質として利用する方法を開拓することも必要となっている。

5.7 その他の有害物質低減策

上記5.3の煤塵と関係するが、浮遊粒子状物質(SPM: Suspended Particulate Matter、大気中に浮遊する粒子状物質であり、粒径が10ミクロン以下。10ミクロンを超える大きい粒子状物質であれば、鼻や喉に引っ掛かり排出されるため、あまり問題にならない、自動車(主にディーゼル車)の排出ガスが約48%で最大で、大気中の窒素酸化物や硫黄酸化物が化学反応し、二次的に生成されるものが約18%、土壌系が約15%など)の排出濃度は0.01g/Nm³以下を目指すことになれば、集塵装置の負担が大きくなる。

コークス炉ガスからのダイオキシン発生を防止することは問題ないと考えている。廃棄物の燃焼排ガスで0.1ng/Nm³以下というのは、厚生省の基準において800℃以上で(最適温度は930℃以上)、十分な滞留時間を取り、例えば800℃で2秒、燃焼ガスと酸素との接触混合を良くし、煤塵の量を少なくし、ダイオキシン生成温度域(200~400℃)の滞留時間を短縮し、燃焼させることになっているが、8.37 MJ/kg程度の低発熱量の廃棄物の場合であり、1400℃位のフリー温度を利用したコークス炉では、コークス炉ガス

を燃焼させ、酸性ガスの処理を適正に行う限り外気への排出量は当然規制値以下となるであろう。問題は大気汚染物質ガスの放出を防止するため冷却等の操作が入り、利用できるエネルギーレベルが下がり、省エネルギー方針と相違することである。

6 コークス塊強度・寸法の予測

環境対策と同時に行う必要があるのは、現状のように実験から得られるコークス強度・反応性・寸法ではなく、それらの値がどのような操作条件においても予測でき、省エネルギー条件でコークス炉を運転することである。そのためには、下記のような検討が必要と考える。

- ① 炉内コークス生成塊強度・寸法の予測および高炉におけるコークス塊挙動の予測
- ② 粘結炭以外の非微粘結炭など輸入石炭種類を拡大するために粘結機構の解明
- ③ コークス化時の気孔生成機構と気孔を有するコークス塊の強度発現機構の解明
- ④ 灰分のコークス塊内凝集機構の解明
- ⑤ 寸法予測のための縦亀裂ならびに横亀裂発生・進展機構の解明
- ⑥ 高炉側の物性要求基準の柔軟化のケーススタディ解析法の開発

また炭化過程においてタール状となる粘結成分の存在量および亀裂内輻射伝熱量の増大による乾留所要熱量の減少などは既に解析されているが、肝心の凝集・融着機構に関しては研究会において緒についたばかりである。

7 おわりに

本稿ではCO₂対策に関しては示さなかったが、省エネルギーを行い、1%でも固定化を図れば良いという考えに立っている。すなわち固定化は、①3000mの深海に99%溶解させる海洋貯留、②枯渇油ガス田、帯水層などの800m以深の堆積岩の空隙に貯留する地中貯留、③微細藻類、高等植物などの生物的固定化、④接触水素化、有機合成、脱水素反応のCO₂共存などの科学的有効利用などの方法の中で安価で高効率なプロセスを使えば良いと考える。そのためには排煙からのCO₂の安価な分離・回収技術化が不可欠であるが、固定化も含めてCO₂とH₂Oだけの排ガスなら技術化は容易であるが、大量のエネルギーを使う以上、酸素製造を含むエネルギー効率からは純酸素燃焼法は採用が難しく容易には達成できない。

- 1) 野瀬正照, 向井幸一郎: 日本エネルギー学会誌, 77 (1998), 561.
- 2) 大谷聡一郎, 森 博康: 日本エネルギー学会誌, 77 (1998), 535.
- 3) 林 明夫: 第35回白石記念講座, 日本鉄鋼協会, (1998), 64.
- 4) 北川 勝: 日本エネルギー学会誌, 75 (1996), 890.
- 5) 毎年の重要なエネルギー関係事項, 日本エネルギー学会誌, (1991-1998)
- 6) 西岡邦彦: 日本エネルギー学会誌, 75 (1996), 899.
- 7) 山下 申, 斎藤 陽, 佐藤博史: 日本鋼管技報, 69 (1976), 27.

(1999年3月5日受付)