



製鉄プロセスにおける排エネルギー回収

吉 田 弘*・小 西 二 郎*²

Waste Energy Recovery in Ironmaking Processes

Hiroshi YOSHIDA and Jiro KONISHI

1. は じ め に

二度にわたる石油危機は、エネルギー多消費産業である鉄鋼業に大いなるインパクトを与えた。最近 10 年間の鉄鋼業はこのような状況に対し、石炭への回帰と省エネルギー技術の革新によりエネルギーコスト低減を目ざして必死の対応を行ってきた。ここでの省エネルギー技術の革新とは、各工程のエネルギー原単位の低減と排エネルギー回収技術である。石油危機以前の石油の安い時代には忘れられていた排熱利用技術は、一転して見直され、高温から中低温領域に至るまで排熱回収技術の開発が積極的に展開された。

このように国をあげて省エネルギーに邁進してきた時代も、昨今の円高・オイル安の到来と共にややかげりが見えはじめています。大型省エネルギー投資は、コスト面での不利が避けられず、利用拡大にブレーキがかかり始めたわけである。

一方、鉄鋼業の中でエネルギーに関する製鉄プロセスの位置付けは相変わらず極めて大きいものがある。一次エネルギーの大半は製鉄部門で消費され、多大な二次エネルギーを他工程に供給しており、またこの部門からでる排エネルギーの量も膨大である。

省エネルギー全盛の風潮にややかげりの見えはじめた今、これまで製鉄部門でどのような排エネルギー回収技術が開発され、実用化されてきたかを振り返ると同時に、現状での問題点、今後考えるべき課題について解説を試みた。

2. 製鉄プロセスと排エネルギー回収

2.1 製鉄プロセスの排エネルギー

第二次石油危機以降、徹底したオイルレス指向、石炭回帰の中で、高炉はオールコークス化、更には副生ガス回収増のために高燃料比操業が行われてきた。ここ 1 ～

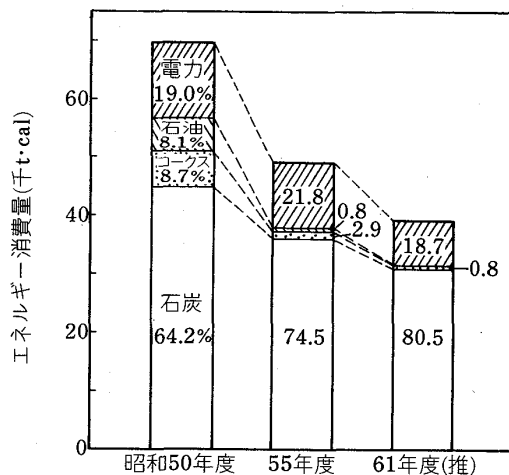


図1 製鉄所エネルギー消費の変遷 (日本鋼管 福山)

2 年来、重油価格は一時のピークを過ぎ低下しているものの、操業の基調は変わっていない。

その結果増加した製鉄所副生ガスは、各所立地条件による差異はあるものの、所内エネルギー源として利用され、更には蒸気また電気に変換され外部からの購入電力および購入重油の削減に大きく寄与している。また副生ガスの外販も積極的に行われている。購入エネルギー構成の変化例を図1に示す。この 10 年間に石炭エネルギーの比率が大きく増加したことがわかる。

このような背景の中で、製鉄部門が消費する一次エネルギーは図2の例のように、製鉄所全体の 75% を占めている。これをうけて排エネルギーについても、製鉄部門が 55% と大きな比率を示している (図3参照)。つまり製鉄部門は一次エネルギーの最大使用先であると同時に、最大の排エネルギー発生源であるわけである。このような位置づけはプロセスの特徴から将来にわたっても変わらないと思われる。

昭和 62 年 4 月 30 日受付 (Received Apr. 30, 1987) (依頼解説)

* 日本鋼管(株)福山製鉄所環境エネルギー部技術室長 (Environmental Control & Energy Dept., Fukuyama Works, Nippon Kokan K.K., 1 Kokan-cho Fukuyama 721)

*² 日本鋼管(株)鉄鋼技術部エネルギー技術チーム主査 (Iron and Steel Technology Dept., Nippon Kokan K.K.)

Key words: waste energy recovery; ironmaking sector; cokeoven; blast furnace; hot stove; energy source; energy cost; energy saving; by product gases.

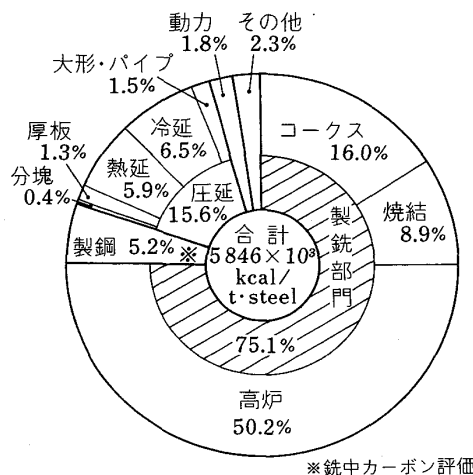


図2 製鉄所における部門別エネルギー使用比率
(日本鋼管 福山 昭和 61 年度上期)

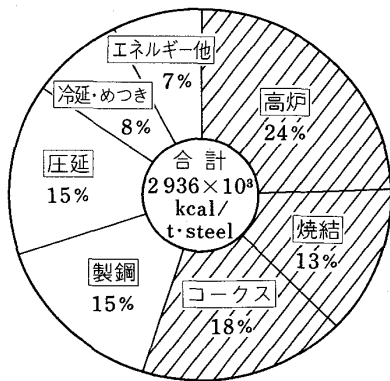


図3 製鉄所における一次排エネルギーの発生比率
(日本鋼管 福山 昭和 61 年度上期)

製鉄プロセスの一次排熱の主な項目について、温度レベルに分類して図4に示した。固体顕熱として1500℃レベルの高炉溶融スラグ、1000℃レベルの赤熱コークス、また500℃レベルの焼結鉱顕熱がある。排ガス顕熱としては、操業条件により異なるが、100～600℃まで広く分布している。炉体冷却水顕熱も低温ではあるが熱量としては大きい。これらの他に排エネルギーとしては、高炉炉頂ガスの圧力エネルギーも大きな項目である。

これら多岐にわたる製鉄プロセスからの排エネルギーは、(1)各設備からの排出量の規模が格段に大きい、(2)ダスト、腐食性成分を含有するケースが多い、(3)高炉スラグのように資源再生と合わせた技術開発が必要などの特徴があり、回収には難しい技術を要するケースが多い。

2.2 排エネルギー回収の要点

製鉄プロセスの排エネルギー回収について記述するにあたり、排エネ回収の要点について簡単に触れたい。

排エネルギー源がある場合、単純に回収方法を考えるのではなく、その設備の将来の動向を見極めた上で効率

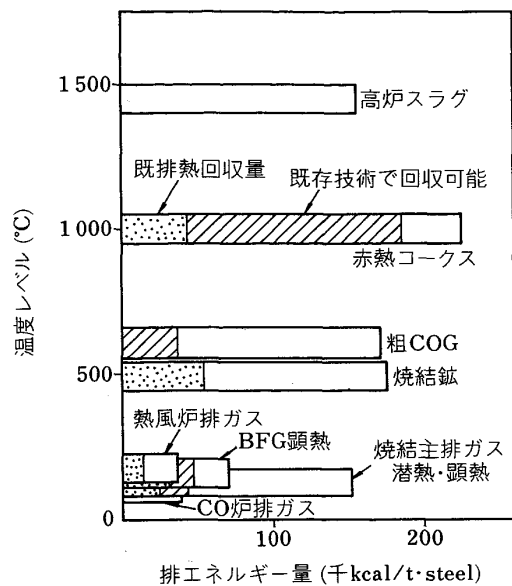


図4 製鉄部門における主要排熱分類 (日本鋼管 福山 昭和 61 年度)

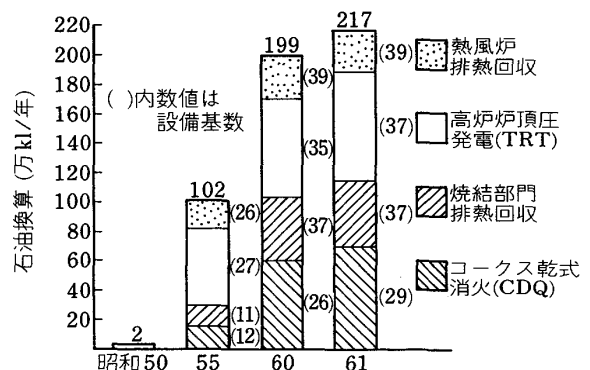


図5 わが国の製鉄部門における主要排エネルギー回収設備によるエネルギー回収能力の推移¹⁾

向上の余地がないか検討することが先決である。排熱の利用先を考えるに際しては、まず自己循環を考え、次に排熱源近くで熱としての利用を、最後に二次エネルギー(蒸気、電力等)への変換を考えることになる。二次エネルギーへの変換の場合には

(1) どの排熱からプロセス蒸気を、どの排熱から電力を回収するのが効率的か

(2) 将来の排熱発生の変化、プロセス蒸気需給の変化への柔軟性はあるか

など十分に検討の上エネルギー・トータルシステムの構想を作るべきである。

設備エンジニアリングにおいては、高温・低温腐食の問題、耐熱性、ダスト付着およびダストによる摩耗等の問題を克服する必要がある。

また実機化に際しては、経済性の評価が重要なポイントとなることは論を待たない。エネルギー価格の変化によつてこの評価は変わる。我が国の製鉄部門の主要排エ

プロセスラインの需給圧力調整が可能となつている。蒸気回収効率は約 82% である。

蒸気回収量については、ボイラー後のサブエコマイザーの設置、装入装置の各種改良等により、コークス t 当たり 550 kg⁵⁾ 程度まで上昇している。また可燃物を含む放散ガスの回収も行われている。CDQ のメリットには、熱回収の他にコークス品質の向上がある。湿式消火時に比べ多孔化やき裂発生が防止できること、また炉内でのスタビライズ効果により、ドラム強度 2%、熱間強度 (CSR) では 2% 程度の向上⁶⁾ が認められている。

CDQ は、各社多数の改良が重ねられており、顕熱回収設備としてハード、ソフト面共に成熟の域に近い技術といえる。しかし充填層内部の状態に関しては不明な点が多く、冷却塔内コークス冷却の均一化、コークス粒度偏析の防止、循環ガス分布の調整機能等については、今後更に操業解析が進められ、効率アップがはかれることになろう。

また操業の弾力性の大きさ、スケールアップの容易さに着目して、サーキュラーグレード式⁷⁾ CDQ の開発も進められた。ムーンライト計画の開発テーマの一環として取り組まれ、既に開発が終了し一部実用化されている。

3.1.2 COG 顕熱

コークス炉排熱の 30% 以上を占める COG は、ガス温度が 600~700°C と比較的高く、流量も安定しているにもかかわらず、タール、ピッチ等を多量に含んでいること、また多数の上昇管に分割されて排出されることの

ため排熱回収は困難であつた。

昭和 55 年前後から、この顕熱に対して各種の回収方式の検討が積極的に行われた。表 2^{8)~11)} に熱回収部位による分類を示す。この中で上昇管に熱媒体を循環させて熱回収を行い、コークス炉燃焼ガスの予熱熱源として用いる新日鉄名古屋方式¹⁰⁾ が実機化された (昭和 57 年)。

更に粗 COG 顕熱とコークス炉煙道排ガス顕熱を回収しこれを石炭調湿に結び付けた新プロセスが昭和 58 年新日鉄大分¹¹⁾ で稼働している。図 7 にシステムフローを示す。煙道ガス、上昇管 COG の排熱を有機熱媒で回収し、多管型回転乾燥機を用いて、石炭水分最大 11% を 5% まで乾燥している。装入炭水分の低下による乾留熱量の低減と同時に、石炭乾留室内の装入炭密度上昇によるコークス強度の向上効果が下記のごとく認められている。

- (1) コークス乾留熱量低減：約 15%
- (2) コークス強度向上 DI_{15}^{50} ：約 1.5%
- (3) コークス炉生産性向上：約 10%

このプロセスはコークス炉排熱を利用した石炭調湿設備として、世界初の注目すべき技術である。

粗 COG 顕熱回収は実用化の面では、まだ端緒にいたばかりであり、熱回収および利用技術面でのいつそうのレベルアップを進める必要がある。また設備コストの低減も重要な課題である。

3.1.3 コークス炉燃焼排ガス

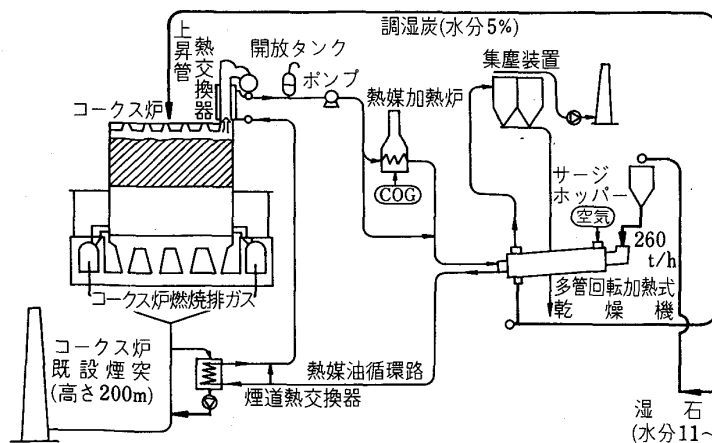


図 7 石炭調湿設備フロー (新日鉄大分 1, 2CO)¹¹⁾

表 2 粗 COG 顕熱回収方法の比較

回 収 方 法	プ ロ セ ス	特 徴
上昇管部熱回収	上昇管部に熱媒 (有機熱媒、熱水 etc.) を循環させて粗 COG 顕熱を回収	・上昇管部のカーボン・タール付着トラブル防止上回収温度範囲は制限される ・伝熱特性がよく回収熱が比較的大きい ・新日鉄名古屋、大分で稼働中 (熱媒方式)¹⁰⁾¹¹⁾
上昇管~集気管部熱回収	上昇管と集気管の間で直接固体 (アルミナ粒子、石炭 etc.) と接触させて粗 COG 顕熱を回収 ⁸⁾⁹⁾	・粗 COG 顕熱の高回収 (60~70%) が可能 ・設備改造が大きく新設コークス炉への適用が望ましい
プライマリークーラー部熱回収	ドライメン冷却後の粗 COG 潜熱を低圧蒸気等で回収	・カーボン・タール付着トラブルはないが回収熱レベルが低い

コークス炉煙道排ガス温度は約 150°C で一般加熱炉に比較してかなり低い。装炭量 $6\,000\text{ t/日}$ 規模のコークス炉で排ガス顕熱は $15 \times 10^6\text{ kcal/h}$ になる。

この排ガス顕熱回収については (1) 温度レベルが低い他に (2) 集合煙道での熱交換設備は工事が難しい (3) コークス炉はドラフト自然通風のため圧損への制約が厳しいなど技術的難問が多い。

顕著な実用化例は前節に述べた有機熱媒を用いた間接加熱形石炭乾燥機 (新日鉄大分) の事例である。また新日鉄広畑¹²⁾ では、コークス炉排ガスと燃焼用空気の間を熱交換器を設置している (昭和 56 年)。中低温排熱の用途および経済性から排熱回収の実施例は少ない。また排熱回収時には、酸露点対策を考慮する必要がある。

3.2 焼結部門

焼結機においては約 $330 \times 10^3\text{ kcal/t}\cdot\text{sr}$ の熱量が投入されるが、出熱の内訳は概略焼結反応熱 30%、焼結鉄顕熱 32%、主排ガス顕熱・潜熱が 28% である。

3.2.1 焼結鉄顕熱

焼成を完了した焼結鉄は $400 \sim 700^{\circ}\text{C}$ で焼結機から排出され、クーラーで $100 \sim 150^{\circ}\text{C}$ まで空冷されるが、こ

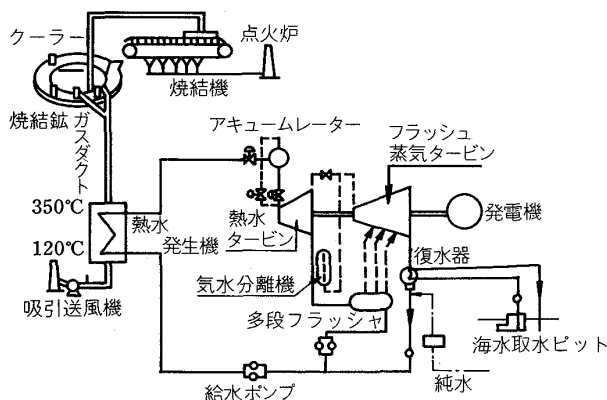


図8 熱水発電設備フロー (新日鉄 八幡)¹⁵⁾

こでの排ガスはかつて最高 400°C 位で大気放散されていた。クーラーはサーキュラー形が多く通風機による大気押込みにより冷却される。この排風は腐食成分もなく比較利用しやすい排ガスといえる。

各社その回収技術開発にとりくみ昭和 51 年以降逐次実用化していった。当初は点火炉燃焼用空気の前熱¹³⁾、原料前熱¹⁴⁾ など焼結機自体の省エネルギーつまり燃料や粉コークス使用の低減に用いられた。

最近の排熱回収の形態は蒸気として回収するものが多く、発生した蒸気はプロセス用として使用することも、また蒸気タービンを介して電力回収することも可能である。

電力として回収する事例として、昭和 54 年から稼働している新日鉄八幡 (若松) の熱水発電設備¹⁵⁾ がある。クーラー排ガスから高温高压の熱水 (250°C , 50 atg) を作り熱水タービンで発電し、更に後段のフラッシュ蒸気タービンにより発電する。電力回収原単位は約 $3.5\text{ kWh/t}\cdot\text{sr}$ である。図8にシステムフローを示す。

また新日鉄君津¹⁶⁾ では焼結クーラー排ガスをボイラーにて、熱媒 (フロリノール 85) と熱交換し、発生蒸気でタービンを回し発電している。エクセルギー効率 48.2% と中低温排熱回収発電としては他に例のない高効率である。図9にフローを示す。

またクーラー排熱を転炉フード冷却排熱と組み合わせることにより、中低温排熱回収効率をあげ、経済性を高めた住金と歌山のフロン発電システム¹⁷⁾ (昭和 59 年) もある。

3.2.2 主排ガス顕熱

焼結機主排ガスは、 $150 \sim 160^{\circ}\text{C}$ と平均温度が低いこと、腐食性成分 (H_2O , SO_x) を含むこと、また焼結操業に影響を及ぼすことが懸念されたため、クーラーでの顕熱回収に比べ実用化は遅れた。

しかし、排ガス温度分布 (図 10¹⁸⁾) にしめすように、焼結機後半部のみを考えると温度も $300 \sim 400^{\circ}\text{C}$ あり、

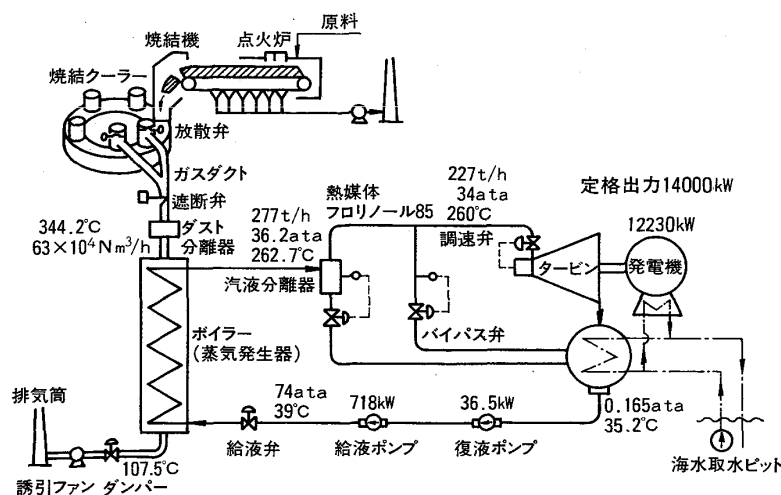


図9 低沸点媒体発電設備 (新日鉄 君津)¹⁶⁾

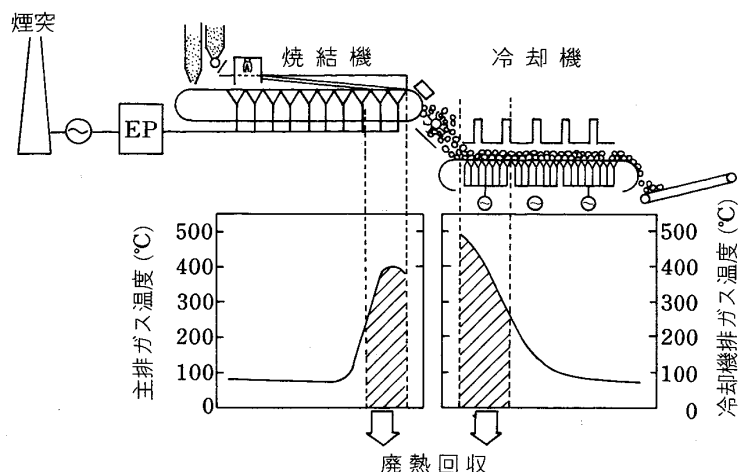


図 10 焼結プロセスにおける排ガスの温度分布¹⁸⁾

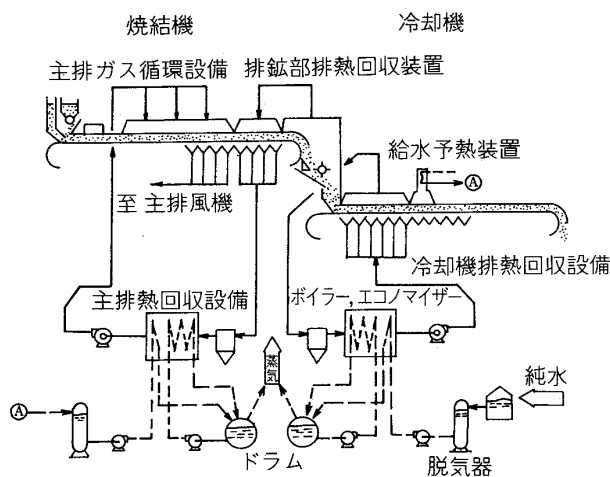


図 11 焼結熱風循環システム（住友金属 小倉 3 焼結）²⁰⁾

またガス性状も水分、 SO_x が比較的少ない。そこで部分回収をベースに開発が進められた。技術開発のポイントは主排ガスを抽出する方法、また熱回収後の主排ガスは温度低下することから、排ガス系の低温腐食対策であった。

更に焼結機後半部からの高温排ガスを顕熱回収したのち、前半部に循環する方法¹⁹⁾が住金小倉で昭和 56 年より実用化された。吸引ガス中の O_2 濃度は排ガス循環の場合、18% 以上あれば生産面、品質面からの問題はないことが判明している。主排ガス循環によりクーラーに給鉄される焼結鉄の平均温度は上がり、クーラーでの蒸気回収も増大するわけである。同時に大気放散する主排ガス量が減ることにより、集塵機、脱硫設備のコスト低減にも効果がある。

3.2.3 トータル回収システムと課題

従来クーラー排熱回収、主排ガス顕熱回収は、おのこの別個に行われていたが、この両者を組み合わせ更に排鉄部熱回収を加えたトータルとしての排熱回収システム²⁰⁾が、住金小倉（昭和 58 年）で完成された。図 11

に小倉 3 焼結のシステムフローを示す。

しかし、焼結機及びクーラーは構造上漏風が多く、この防止対策はブロー省電力につながると同時に、排熱回収アップにつながる。各種の検討がなされているが今後更に設備構造まで含めた抜本的な対策が望まれるところである。構造にからむ大幅な改造事例として、住金と歌山²¹⁾では（昭和 60 年）焼結機とクーラーを一体化構造とし、ストランド冷却部と簡易クーラー排ガスの完全循環により排熱回収効率を大幅に上昇させた。

更にクーラーおよび主排ガス顕熱回収が実施されてもなお、50% 前後を占める低温排ガスは未回収のまま残されており、これら低温排熱の回収は今後の課題である。新日鉄八幡（若松）²²⁾において昭和 58 年クーラートラフ上に伝熱器を設置して、焼結鉄放射熱と排ガス顕熱を同時に回収する試みがなされている。

また、主排ガス中の未燃 CO 潜熱回収については、一部回収の試みがなされているが、実用化普及の面では今後の課題である。

3.3 高炉部門

高炉プロセスは製鉄所のエネルギー消費の約 50% を占める。その大部分は高炉燃料であるが、近年コスト的に石炭系エネルギーが有利であるため燃料比はむしろ高目で、高炉はエネルギーの発生源として位置付けられている。高炉部門からの排エネルギーは、高炉発生ガス（以下 BFG）の顕熱および圧力エネルギーが約 30%、溶融スラグ顕熱が約 22%、残りは熱風炉での排ガス顕熱更には炉体冷却水顕熱である。

3.3.1 炉頂 BFG 圧力および顕熱

高炉での生産性向上、還元ガス利用率向上を目的とする高圧操業は、操業上不可欠となつている。大型高炉では 2.5 kg/cm^2 程度の炉頂圧力が標準であり、発生ガスを考慮するとそのエネルギーは膨大である。従来この圧力は、セプタム弁で膨張してホルダー圧力まで下げていたが、この圧損を膨張タービンに利用する方法（以下 TRT）が実用化された。この技術はソ連およびフランス

表 3 TRT 設備設置状況 (62 年 5 月)

会 社	事業所	対 象 炉	認可出力 (MW)	稼働開始 (昭和年・月)	備 考
新日鉄	室 蘭 津	2 号	7.0	60.7	60.2 更新 61.7 58.12 60.11 56.6
		2	8.9	57.5	
	名古屋	3	16.8	61.6	
		1	14.3	55.7	
	堺	3	13.5	51.9	
		2	12.2	56.3	
	八 幡	4	8.2	56.5	
		1	14.5	55.9	
	大 分	4	15.2	55.5	
		1	14.5	55.1	
鋼 管	福 山	2	18.0	54.1	61.12 60.5 乾式化 57.8 (乾式 TRT)
		1	15.2	54.3	
		2	20.5	54.9	
		2	8.2	58.12	
		4	16.0	51.2	
川 鉄	千 葉 水 島	5	20.0	61.3	61.8 乾式化 61.3 59.2 60.4
		2	7.5	56.2	
		6	21.5	53.4	
		2	12.1	49.10	
		3	10.3	53.10	
住 金	鹿 島 和歌山 小 倉	4	19.0	51.10	59.8 57.3 乾式化
		1	11.5	54.9	
		3	12.5	53.6	
		2, 3	11.0	56.4	
神 鋼	神 戸 加古川	4	7.6	54.3	60.3 58.10 60.5
		2	6.6	54.4	
		3	5.4	58.4	
日 新	呉	2	14.0	54.5	56.8
		3	14.5	53.6	
		1	8.6	51.12	
		2	3.1	56.1	

を中心に開発されたものであり、我が国では川鉄水島での川重-ソフレア式ラジアルタイプ²³⁾の設置 (昭和 49 年 8 MW) が 1 号機である。

その後国内で高効率でしかもダスト、ミストを含有するガスに耐える軸流タイプが開発され、この方式が広く各社に普及している。現在までの設置状況²⁴⁾を表 3 に示す。

また、高炉炉頂圧制御と TRT とを組み合わせると静翼可変制御方式が採用されるようになった。これはタービン静翼角をガス量、ガス圧の変動に応じて自動的に変えることにより、炉頂圧をコントロールする方式である。更にはタービン羽根のダスト付着防止技術、腐食対策技術など各種の改良が設置のたびに加えられた。また二つの高炉を同時にカバーするタービンシステム²⁵⁾の実用化例もある。

しかし炉頂ガスを TRT に導く前に従来のようにベンチュリースクラバー等の湿式集塵機を設置している限り、BFG 顕熱の大半が損失エネルギーとならざるをえない。乾式集塵装置の開発が待望された。

昭和 57 年稼働した住金小倉の BDC 方式²⁶⁾は乾式集塵装置としてバグフィルターを用いた方式である。炉頂温度上昇対策としては、散水冷却方式を採用した。また鋼管福山では乾式電気集塵機 (EP) を利用し、高温ガスからの EP 保護および高炉異常時対応として蓄熱バッファを開発し、乾式集塵 TRT システム²⁷⁾として完成させた (昭和 60 年)。福山 2 BF のシステムフロー

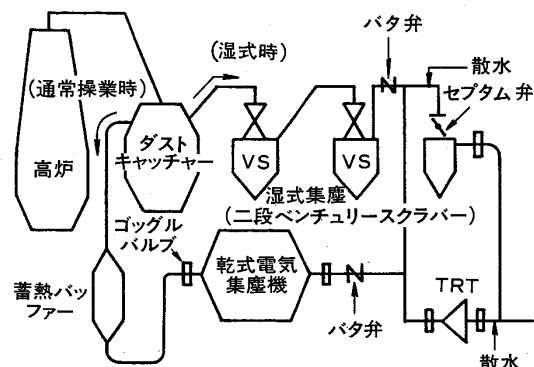


図 12 乾式集塵-TRT システムフロー (日本鋼管 福山 2BF)²⁷⁾

を図 12 に示す。これら乾式 TRT システムにより発電出力は 30~40% 向上し、炉頂 BFG の圧力・顕熱の回収技術はほぼ完成したと考えられるが、保全面では TRT 後部や出口配管のドレン発生対策を考慮しておく必要がある。

また従来タイプの湿式集塵機の圧損を極力減らし、タービン入口圧力を上げる方法として、新日鉄八幡 (戸畑) の、低圧損形集塵機 TRT²⁸⁾がある (昭和 61 年)。前記乾式 TRT に比べ効果は少ないが、設備投資の小さい点が特徴である。

3.3.2 スラグ顕熱

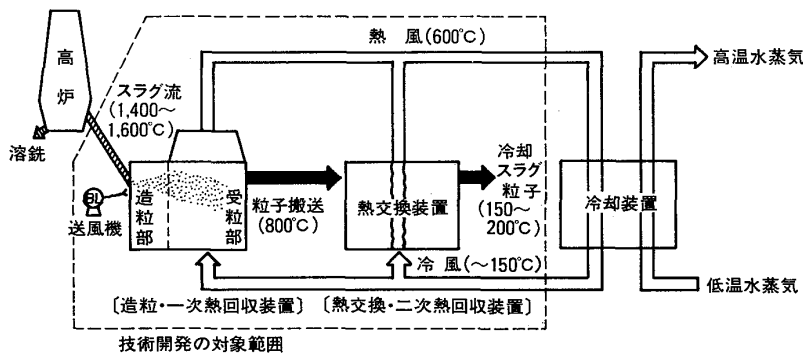
高炉溶融スラグは、排出時 1500°C の高温であり、鉄 t 当たり 300 kg 程度である。スラグ顕熱は約 $135 \times 10^3 \text{ kcal/t} \cdot \text{pig}$ にもおよび残された最大の排熱源と言える。この溶融物を造粒して資源化する過程での熱回収の研究が各社で進められているが、いまだどの方式も実用化の域に至っていない。

溶融スラグの特性として (1) 温度の低下と共に急激な流動性の低下を伴うこと (2) 潜熱、熱伝導率が小さく表面の固化、断熱層の形成が早いなどの点があり、熱回収が難しい。路盤材、コンクリート用粗骨材・細骨材またセメント原料などの目的商品の性状を満たした造粒方法と効率の高い熱回収装置のマッチングが必要である。また高炉鑄床近傍での連続処理を可能にするには、装置の単純化、連続化も重要な因子である。各社種々の開発研究がなされているが、主な方式を表 4^{29)~37)}に示す。それぞれ実験としては成功し、技術的成果は蓄積されつつある。しかし、エネルギーコスト、製品スラグの付加価値を含めたトータルの経済性評価においては、実用化の域に達していない。

また高炉大手 6 社が公的支援も受けて昭和 57 年から研究開発に入った製錬新基盤技術研究組合の「高炉溶融スラグ顕熱総合回収技術」³⁷⁾がある。顕熱を効率的に回収しながら、乾式造粒法でセメント原料としてのガラス質スラグを製造するプロセス開発をめざすもので、昭和

表 4 主な高炉スラグ顕熱回収技術

	造 粒 方 法	熱 回 収 方 式	備 考
落下液滴造粒法	熔融スラグを回転ドラムに落下衝突させて液滴として造粒する	流動層および移動層方式	住金, IHI 共同開発 和歌山 ²⁹⁾ 55 年 50 t/h 試験プラント
風砕造粒法	熔融スラグを風力で破碎し粒状化する	流動層方式	54 年新日鉄-堺 ³⁰⁾ 吹製能力 1 t/min, 実機規模
攪伴造粒法	熔融スラグをポット内で攪伴して, 表面のガラ張り (固形層) を防止しながら高温スラグ粒を得る	スラグポット-輻射熱回収 シャフト式冷却装置により高温スラグ粒顕熱を回収	川鉄, 川重の共同開発 千葉 ³¹⁾ 56 年 40~50 t/h
スラグボイラー凝固法	チューブ内凝固スラグを製品として利用する	熔融スラグをチューブ内に注水し, チューブ周囲の水と熱交換	新日鉄-堺 55 年公表 ³²⁾ 研究レベルの試験
ツインドラム薄層方式	一对の回転ドラムに熔融スラグを供給し, スラグを巻き上げるようにして薄層スラグを得る	回転ドラム冷却用の熱媒体で熱回収	鋼管-福山 58 年公表 ³³⁾ 能力 50 t/h テストプラント
回転カップ風砕方式	ロータリーカップと風力で熔融スラグを粒状化する	流動層方式	BSC で研究レベルの試験を実施 60 年公表 ³⁴⁾
圧延方式冷却法	回転移動床型冷却盤上で回転ロールとの間で圧延して急冷させる	冷却盤より熱回収	住金-鹿島 60 年公表 ³⁵⁾ パイロットプラント試験
塊状凝固法	上下の伝熱盤の間に熔融スラグを流しこみサンドイッチ状態で塊状スラグを得る	伝熱盤内の水管より熱回収	新日鉄-堺 61 年公表 ³⁶⁾ 実機 1/4 中間プラント
製錬新基盤研究組合方式	風砕方式により細かい粒子 (粒径 1~2 mm) を造粒する	風洞熱風および高温粒子から 2 段階熱回収	62 年 100 t/h 実証プラント ³⁷⁾ 鉄鋼 6 社, 国家助成金補助

図 13 熔融スラグ顕熱回収技術概要図³⁷⁾

62 年大型実証プラントでのテスト段階に入っている。成果が期待されるところである。このフローを図 13 に示す。

一方既存の水砕製造過程を前提として, その温排水から熱媒等を用いて, 蒸気や電気を回収することも考えられる。この場合も技術的には可能であるが, トータル経済性から現状での実機化には無理がある。

3.3.3 熱風炉排ガス顕熱

高炉熱風炉の排熱は 200°C 前後のレベルであり, 35×10^3 kcal/t・pig 程度である。この熱を回収して熱風炉燃焼用空気またガスを予熱して燃料原単位低減をはかる。

燃焼用空気の前熱に関しては, 昭和 48 年新日鉄室蘭をはじめとして, エレメント回転式, フード回転式また固定プレート式などの熱交換装置が設置された。

燃料ガス予熱については, 高炉ガス中の飽和水分とミストによる硫酸腐食から熱風炉バーナーを保護するニーズからも開発を要請されていた。昭和 54 年新日鉄堺³⁸⁾

において, 低沸点媒体を用いたチューブ排熱回収装置の実用化に成功した。更に君津では昭和 54 年ガス, エアー両方を予熱するシステム³⁹⁾を実用化している。

なお鋼管福山では, ヒートパイプ⁴⁰⁾を用いた排熱回収が昭和 57 年実用化している。ヒートパイプの特徴として離れた場所への熱移動が容易であり, 駆動部がないため設置上のスペース制約がなく, メンテナンスも容易である。

これらの熱風炉排熱回収設備は, 現在ほとんどの高炉に設置されており, 熱風炉熱効率で約 4%⁴¹⁾の向上とされている。更なる回収効率の向上には, 伝熱面積の増加ではコスト, スペース増となり, 熱交本体の伝熱効率向上対策が必要である。

熱風炉の負荷の低下や, 排熱回収の増加と共に熱交出側温度は低下する。排ガス中には微量の S が含まれており熱交出側以降での硫酸腐食を考慮する必要がある。熱交換器自体には耐腐鋼の使用や板厚の工夫が取られており, 煙道, 煙突部での酸露点管理が必要となる。

3.3.4 その他の排エネルギー

(1) 高炉均排圧時の BFG 回収

高圧高炉への原料装入時、炉頂装入装置を構成するホッパー室を均排圧する必要がある。従来均圧用に使われる清浄ガスは排圧時大気放散されていた。このガスをクローズドタイプにして低圧のガス系統へ回収する設備⁴²⁾が昭和 55 年以降採用されはじめた。高炉ガス回収量は約 $15 \text{ Nm}^3/\text{t} \cdot \text{pig}$ である。

(2) 炉体冷却水落差エネルギー回収

高炉炉体はクーリングステーブまたは冷却函で冷却されている。冷却後の排水を集め冷却塔に戻すまでの有効落差を利用する小水力発電が川鉄水島、住金鹿島にて実用化されている。

(3) 冷却水顕熱

高炉炉体冷却水、熱風弁冷却水は、冷却塔を経由して循環使用されている。総熱量で約 $100 \times 10^3 \text{ kcal/t} \cdot \text{pig}$ に相当するが、温度レベルが低くまだ回収検討の段階にない。

4. 今後の課題

これまで述べてきたように、製鉄部門の排エネルギー回収は、鉄鋼業全体をリードする形で、技術開発がなされ実用化が進められてきた。大型の即効的なテーマは既に普及が進んでいる。しかし膨大な製鉄部門の排エネルギーを考えると、まだまだ残された部分は大きいといわなければならない。

コークス部門では、CDQ の大幅な普及によりコークス顕熱回収については一応の技術確立をみているが、総排熱の約 60% は未回収のままである。COG 顕熱と燃焼排ガス顕熱の回収利用が最大のテーマである。既に一部に実施されている石炭調湿への利用技術を踏まえ、今後の開発、普及が課題である。

焼結部門では、焼結鉱顕熱、主排ガス顕熱の回収技術は確立されているが、このプラント特有の漏風対策が問題であり、省エネルギー、排熱回収の両面から設備構造面も含めて見なおす余地が大きい。次に、排ガス中未燃 CO 潜熱の回収、より低いレベルでの排ガス顕熱回収技術が今後の課題である。

高炉部門では、炉頂 BFG の顕熱・圧力回収については乾式 TRT 技術の開発により技術確立の域に達した。熱風炉排熱回収についても今後効率向上を残すのみである。残された最大のテーマはスラグ顕熱の回収であり、6 社共同開発の技術を含めて今後の技術の前進に期待したい。

これら残された課題は、回収技術もしくは周辺関連技術の難しいものであり、現段階の技術でシステムを構築しても、経済的に採算性のとれないものである。

これらの排エネ回収の実用化を推進するには、単に従来技術の改良改善では、おのずと限界がありエネルギー

効率の飛躍的向上、設備の低廉化の面で技術のブレークスルーが必要であろう。例えば、1) ヒートポンプ等の新しい熱回収技術 2) 耐熱、耐食性を含めた新しい素材技術 3) 排熱源と利用先を結ぶ熱媒体の開発 4) 更には蓄エネルギー技術等の分野で、革新的な技術開発がなされ、それらが排熱回収システムに組み込まれることを期待したい。またコージェネレーション等の複合化技術、エネルギーの広域利用など発想を転換した熱回収利用方式も将来の課題となろう。

一方製鉄所全体のエネルギー需給構造は、これまで以上に複雑化してくると想定される。例えば副生ガスは所内消費から発電向け外販、更にはケミカル向け外販と多岐にわたり、その配分の際には、カロリーの最適配分またエネルギーの昼夜間運用調整などを考慮する必要がある。このような中で、排熱回収の形態と利用方法も最適エネルギーネットワーク構築の見地から十分検討されるべきであろう。

ところで経済環境からみると、直近の円高、原油安の状況下で、大型省エネルギー投資に対する回収効率は下がり、投資意欲は減退感をまねがれない。しかし、資源を全面的に海外に依存している鉄鋼業にとつて、将来にわたつて国際競争力を確保していくには、製品の付加価値向上はもとより、排エネルギー回収率を更に高め、更なるコスト低減を追及していく必要がある。いつその技術革新をめざして技術開発を推進していくことが今鉄鋼業に携わっている我々の使命の一つであると思われる。

5. おわりに

製鉄部門においては、その膨大な排エネルギーの回収にたいして、ここ 10 年間多くの開発努力がなされ、実用化したものも多い。しかし、まだこの時点においても、技術的見地また経済的見地から回収技術の実用化が遅れ、残されている排エネルギーも多い。

今、我が国鉄鋼業は未曾有の危機に遭遇している。抜本的な体質強化と競争力確保が重大な課題である。その意味でもこれまで蓄積された技術を踏まえ、新しい技術革新が待たれるところである。

一方製鉄部門のプロセス自体も、より安い原料を使うこと、より安い製造法を目指して、技術革新が続けられていくことになる。当面成型コークスや高炉への微粉炭の大量使用等が考えられ、更には熔融還元プロセスの時代を迎えることになろう。これらの新プロセスにおいても、エネルギー原単位の低減が、成功の鍵を握っており、排エネルギー回収をも含めたトータルエネルギーシステムとしてのプロセス構築が不可欠といえよう。

文 献

- 1) 鉄鋼界 (1986 年 5 月), p. 36

- 2) 例えば, 山本英樹: 第 116・117 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1987), p. 62 など
- 3) 新日本製鉄(株) (私信) 1986 年 11 月
- 4) 濱 正浩, 黒瀬雅章, 木田正夫, 滝田修身, 漆谷春雄, 森本大三: 火力原子力発電, **37** (1986) 10, p. 128
- 5) 日本鉄鋼連盟資料 (1986 年 10 月) (私信)
- 6) 美浦義明, 原口 博, 西 徹, 古牧育男, 小串嘉宏: 鉄と鋼, **66** (1980), p. 1277
- 7) 板野重夫, 古河洋文, 荒井敬三, 村家 猛: 鉄と鋼, **72** (1986), S 36
- 8) 小川原文夫, 桑田富喜男, 尾上 宏, 親本俊弥, 太尾田清通, 横野勝照: 三菱重工技報, **21** (1984), p. 596
- 9) 佐藤武夫, 森下良彦, 大橋 茂, 加藤友則, 杉山峻一, 阿部正広: 鉄と鋼, **71** (1985), S 846
- 10) 江崎 滯, 上野正助, 猪飼恭三, 村松 匠, 井上展夫, 増田富良, 久保清和: 鉄と鋼, **67** (1981), S 788
- 11) 和栗真次郎, 細川勝也, 大西輝明, 中川浩一郎, 高野橋豊, 串岡 清, 金野好光, 大野護允: コークスサーキュラー, **34** (1985), p. 92
- 12) 大竹一史: 省エネルギー, **36** (1984) 3, p. 24
- 13) 田中紀元: 鉄と鋼, **64** (1978), p. 1922
- 14) 田代 清, 相馬英明, 柴田充蔵, 今野乃光, 細谷陽三: 鉄と鋼, **66** (1980), p. 1603
- 15) 野坂庸二, 入江俊二, 井手康人, 岩田 実, 馬越逸雄, 磯部松郎, 福田征孜: 鉄と鋼, **66** (1980), S 629
- 16) 鈴木俊行, 平川靖憲, 木村寿博: 山陽技術雑誌, **33** (1982) 1, p. 10
- 17) 寺本信夫: 省エネルギー, **36** (1984) 13, p. 24
- 18) 山本亮二, 塩原勝明, 服部道紀, 清水正安, 小松 修, 高木 昭: 日本鋼管技報, **108** (1985), p. 1
- 19) 佐藤義政, 佃 利夫, 篠原照人: 住友重機械技報, **32** (1984) 94, p. 115
- 20) 二口 隆, 畠山恵存, 川澤建夫, 中原芳樹, 村井達典, 松本広美, 東風平玄俊: 住友金属, **34** (1982), p. 534
- 21) 川合 晟, 川崎正洋, 柳沢一好, 国部賢司, 喜多村健治, 橋川久司: 鉄と鋼, **71** (1985), S 861
- 22) 仙崎武治, 岡本健一, 島川義明: 鉄と鋼, **73** (1987), S 116
- 23) H. FUJIMORI and M. INUBUSHI: Iron Steel Eng. (1976), p. 51
- 24) 新日本製鉄(株), 日本鋼管(株), 川崎製鉄(株), 住友金属工業(株), (株)神戸製鋼所, 日新製鋼(株) (私信) 1987 年 5 月
- 25) 水野 豊, 佐伯 彰, 牧野英夫, 三宅貴久: 鉄と鋼, **67** (1981), S 25
- 26) 浅井武二, 望月 顕, 高和 正, 倉重宗寿, 谷田功二: 住友金属, **34** (1982), p. 512
- 27) 山本亮二, 岸本純幸, 斉藤典生, 辻本一彦, 田村幸博: 鉄と鋼, **71** (1985), S 785
- 28) 中村正明, 岸田正担, 牟田敏英, 岩熊孝雄, 竹井良夫, 野瀬正照, 松倉慎一郎, 牧 睦夫: 製鉄研究 (1986) 323, p. 82
- 29) 香川俊之, 田辺政三, 岩橋楓雄, 藤井孝一, 重松達彦, 中村哲之: 住友金属, **34** (1982), p. 520
- 30) 小島佑介, 松居英雄, 近清敬朗: 製鉄研究 (1980) 301, p. 71
- 31) 藤本春海: 川崎重工技報, **76** (1980), p. 117
- 32) 蜂谷整生, 小浜徳夫, 松居英雄, 田村健二: 鉄と鋼, **66** (1980), S 662
- 33) 梶川脩二, 高崎靖人, 金井一男, 伊藤春男, 篠田作衛, 大越見寿: 鉄と鋼, **68** (1982), S 91
- 34) S. J. PICKERING, H. HAY, T. F. ROYLANCE and G. H. THOMAS: Ironmaking Steelmaking, **12** (1985), p. 14
- 35) 藤井孝一, 中村哲之, 川狼英靖, 嶋田洋二, 坂 修平: 鉄と鋼, **71** (1985), S 100
- 36) 高橋敏夫, 岩見和俊, 成田 裕, 高野 実, 吉本博光, 中川 佩, 厚見 直: 鉄と鋼, **72** (1986), S 100
- 37) 五十嵐努: 鉄鋼界 (1986 年 6 月), p. 19
- 38) 花房章次, 山際 直, 齊田敬三, 前田光洋, 原岡通朗: 鉄と鋼, **66** (1980), S 113
- 39) 阿山葉善作, 久米正一, 中本克己, 天野 繁, 田中義勝, 阿波靖彦, 水内千明: 鉄と鋼, **66** (1980), S 84
- 40) 梶川脩二, 小西二郎: 省エネルギー, **34** (1982) 10, p. 69
- 41) 例えば, 里見弘次, 渋谷悌二, 斎藤正紀, 飯野文吾, 泉 正郎, 鴨志田友男: 鉄と鋼, **66** (1980), S 111 など
- 42) 例えば, 高部良二, 石原直樹, 村上禮三, 川合隆成, 小川 満, 楠 光裕: 鉄と鋼, **69** (1983), S 779 など