

鉄鋼業の省エネルギー

Energy Savings in Steel Industry

一 色 尚 次* 湯 学 忠**

1. 緒 論

ほとんどのエネルギー資源を海外から輸入している我が国では、現在もその15%程度を消費している鉄鋼業の省エネ・新エネ化は重要な課題である。

第一次オイルショック以来我が国の鉄鋼業界は互いに協力あるいは競合しつつ省・新エネルギー化に目覚ましい成果を挙げてきた。その結果、1973年当時に比べると、平均約14%、ある事業所によると20%以上もの省エネに成功し、粗鋼1トン当り、1981年度で平均556万Kcal、最良で500万Kcalのエネルギー消費量に減らしている。また石油から石炭への転換や合理化によるオイルレス化も大いに進み、オイル消費はすでに1973年に比べて約10分の1以下になりつつある。

このように省エネルギー成功したことは、鉄鋼業が複雑な装置産業であって、かつては白煙製造業といわれた程多くの排熱を放出しつつ、もっぱら高能率化と省人化が進められていたので、むしろかなり省エネルギー化の可能性が残されていたことも一因ではあるが、やはり石油ショック以来の関係者の多大の努力によって多くのプロセスに対して、きめ細かい省エネを行うとともに多くの大型省エネ機器を導入したことによると思われる。しかし、今日においてもまだ多くの排熱を主体とする省エネ・新エネ化の余地が残されており、逆オイルショックといわれている今日の機会に鉄鋼業の省エネ成果を見直して将来の一層の省エネ進展に備えるのは多大の意義があると思われる。

2. 省エネルギーの諸段階

筆者らは以前より省エネには幾つかの段階があると

述べてきたので、それによる見直しを行いたい、その段階とは次の通りである。

- ① 基本省エネ段階（熱管理合理化、多種燃料）
- ② エンタルピ回収段階（ホットチャージ、レキュペレーター、排気ボイラ等）
- ③ エクセルギー回収段階（排熱発電、炉頂圧発電、フロンタービン等）
- ④ ヒートポンプ段階
- ⑤ エネルギー蓄熱段階（アキュムレーター等）
- ⑥ 大自然エネルギー段階（ソーラー等）

以上の段階の順序は、まず熱損失を減少し、ついで低温域でも省エネ効果のあるエンタルピ回収を行い、ついで熱効率は低くても動力化（発電）を行うエクセルギー回収、さらに複雑なヒートポンプ利用、蓄エネ、と進み、最後は大自然エネルギーによる補助と進むものであり、鉄鋼業においてもこの段階がふまれていることを確認したい。

現在の我が国の一般産業における省エネルギーはほぼ①と②を主体とする第一段階であるが、鉄鋼業では、その装置が多様複雑であり取り扱いエネルギー量も大きいことと、電力の消費も大きいことから、各種大型排熱発電による③段階のエクセルギー回収が早くから進展して来ているのは注目に値する。ここで参考とし

表1 大型排熱回収設備の設置状況

設 備	年度19										合 計		
	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82		83	
エンタルピ回収	1	0	0	0	1	4	16	9	2	1	0	34	
エクセルギー回収 (或はその可能性が あるもの)	高炉炉頂圧 発 電	0	1	1	3	0	10	7	6	4	1	0	33
	コークス乾式 消火(CDQ)	0	0	1	5	3	0	3	0	4	3	2	21
	焼結冷却機 排 熱 回 収	0	0	0	0	0	3	3	1	3	4	0	14

* 東京工業大学名誉教授

〒156 東京都世田谷区経堂2-29-6 (自宅)

** 北京鋼鉄学院講師

て表1に我が国の鉄鋼業における大型排熱発電設備等の設置状況を示して参考としたい。同表のように設備は1978年以降急激に増加している。これらの設備による発電量は消費電力の約8%に上っている。

この例のように鉄鋼業の省エネルギーは極めて高いレベルであり、他の産業の範となっているものであるといえよう。

3. 基本省エネ（熱管理）段階

鉄鋼業は、大型設備を設置する前段階として熱損失を減少し熱管理を強化するという基本的省エネに対しても地味ではあるが、極めて多大の努力と成果を挙げて来たといえる。その主な項目だけを挙げると次のようなものとなる。

- (1) 各種炉の断熱強化
 - (2) 炉の空気（ガス）漏洩の遮断の強化
 - (3) ローラー冷却水、デスケリング水等のジェットや配管合理化による省水力
 - (4) ファン、ポンプ、ミル等の運転合理化、空転防止、回転数制御等の強化
 - (5) 機器の大きさと運転台数の合理化（集中化もしくは小型分散化）
 - (6) 弁、トラップ、シール等の改善、保温強化
 - (7) 圧縮空気の使用先と圧縮機の合理化
 - (8) 加熱炉のバーナーの火焰調節とO₂制御の合理化
- これらによって、個々の既存設備における数パーセント以上の省エネの積み上げは全体として極めて大きな効果となっている。

これらの基本段階の省エネ努力が大きく払われた実

例として、1982年度の省エネセンター主催の省エネ推進全国大会においては鉄鋼・非鉄金属部門における省エネ事例76例中、約90%がこの基本省エネ段階に属するものであり、そのうちの優秀事例として、川鉄千葉工場においての転炉OGガスの回収に対して、操業時間と圧力合理化、炉のスカートの改善等により、OGガスを鋼1トン当り132.5m³回収するという世界記録を示したものが上げられている。

このような基本段階の熱管理強化とその成果は、日本人の勤勉さと労働意識の高レベルを示すもので、諸外国にはあまり見られないものであり、鉄鋼の省エネのバックボーンとして注目されるべきものであろう。

4. エンタルピ回収段階の省エネ

4.1 ホットチャージ

製鉄所における無効エネルギーのうち最大のものは各所に生ずる排熱であり、消費エネルギーの約40%に達する。その内訳とエンタルピ及びエクセルギー量の一例は図-1のようになる。そのエンタルピは低温に近い程大きい傾向を示すが、エクセルギーは高温部の方が大きい。

さて排熱の積極的利用の第一着手は、そのエンタルピをそのまま利用できる所に回すことであり、回収されたエンタルピはその温度の高低に無関係に、その量に等しい燃料の節減に直結する。すなわち1対1の対応で省エネとなる。

鉄鋼生産におけるこの省エネプロセスの第一としては、加熱過程によって生ずる製品の顕熱や燃焼ガス、スラグ等の出熱をその加熱過程及び次の加熱過程等に

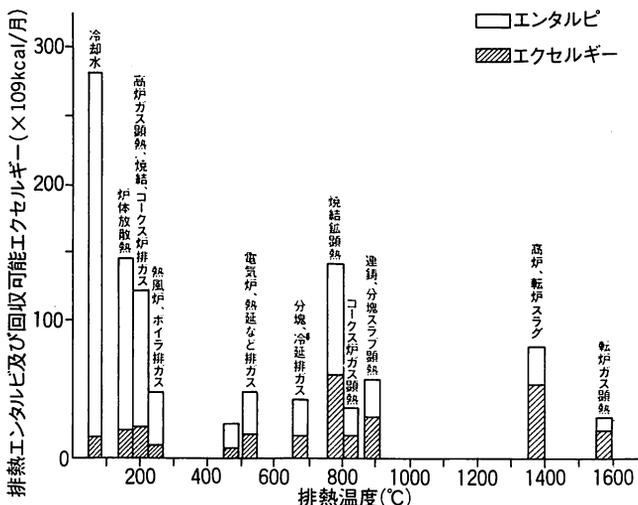


図-1 製鉄所の排熱実態の1例

入る製品、燃料、空気等の予熱に回すことであり、これを総括的に広義のホットチャージと言いたい。このホットチャージにはレキュペレーターによる空気予熱、ホットトンネル、ダイレクトロール、などが含まれる。また、ホットチャージの変形ではあるが、もともと効率増大と省人化、熱損失軽減から始められたものとして鋼片の連続鋳造（CC）があり、それとダイレクトロールとの結合形式の省エネルギー効果は大きい。我が国における連続鋳の比率は1973年度の21.5%から1981年度の72.7%に達し世界のトップレベルである。またダイレクトロールによる燃料原単位の改善は大きく、スラブ温度が $1,100^{\circ}\text{C}\sim 400^{\circ}\text{C}$ で $300\sim 60\times 10^3\text{Kcal/トン}$ に達する。

また鋳造スラブ片を多数直送する際、スラブを多数集めて重ね合わせて熱損失を防ぎ次へホットチャージする態勢も各種研究されている。将来の炉はすべての原料燃料等がホットチャージされるものとなろう。

4.2 レキュペレーター

広義のホットチャージの一つとして炉へ送入される空気を排熱で温めるレキュペレーターがあり、これは省エネ時代以前より多く使用されて来たものであるが、最近に至って各種の熱交換システムが開発され近代化されて来た。その例としてつぎの三つの熱風炉レキュペレーターがある。

(a) 回転式（ユングストローム）熱交換器

神戸製鋼加古川製鉄所では $200\sim 280^{\circ}\text{C}$ の熱風炉排ガスを通ずる回転式熱交換器を二個備え、一つを燃料ガス加熱、一つを燃焼用空気の予熱に用いて、熱風炉の熱効率を81.5%から87.9%に引き上げに成功している。そのシステムを図-2に示す。

(b) ヒートパイプ式熱交換器

図-3は日本鋼管、日立製鉄所、バブコック日立が共同開発に成功して福山製鉄所第4高炉に設置したヒートパイプ式の熱風炉排熱回収設備を示す。

ヒートパイプは高温側と低温側が分離でき、また可動部を有しない利点がある。操業実績は、空気温度上昇 115°C で、温度効率77%、熱量原単位低減率4.6%である。

(c) 熱媒体式熱交換器

図-4には新日本製鉄と日鉄化工機が開発した熱媒体循環式の熱風炉の排熱回収の概念図を示す。熱媒体としては、日本製鉄化学の「サムS-800」が採用されている。この方式は設備がかなり拡散配置可能で、循環量の調節による温度制御等が容易である利点がある。

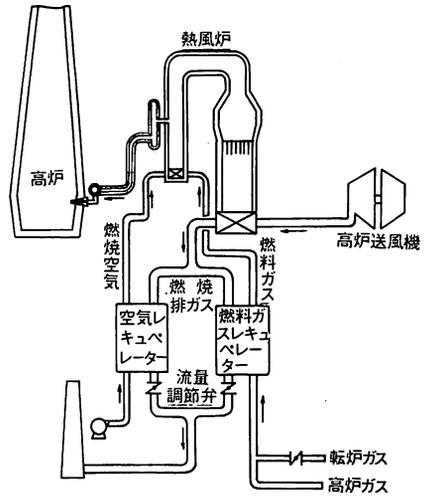


図-2 回転式レキュペレーターによる熱風炉排ガス顕熱回収システム

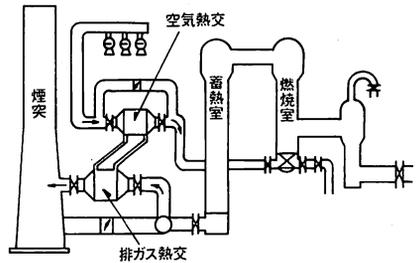


図-3 ヒートパイプ方式による熱風炉排ガスレキュペレーター

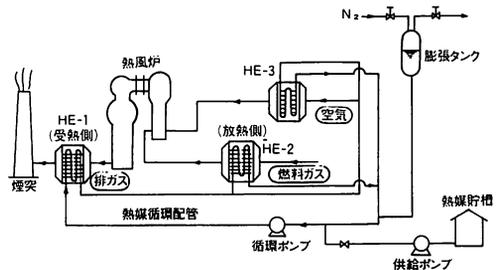


図-4 熱媒体循環式の熱風炉排ガスレキュペレーター

4.3 鋼片の噴流予熱

連続して送入される鋼片の加熱炉の改善は鋭意なされてきて、その方法としては炉長の延長、温度上昇の直線化、等があるが、ホットチャージ的な要素を強く加えたものとして図-5に示すような燃焼ガス噴流による予熱領域の設置例がある。この方式により、単なる炉長延長の際より大きな効果が出る。

4.4 排熱ボイラによるエンタルピ回収

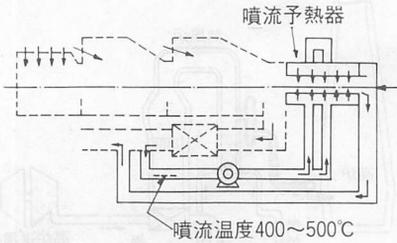


図-5 鋼板加熱炉における噴流予熱による強制ホットチャージ

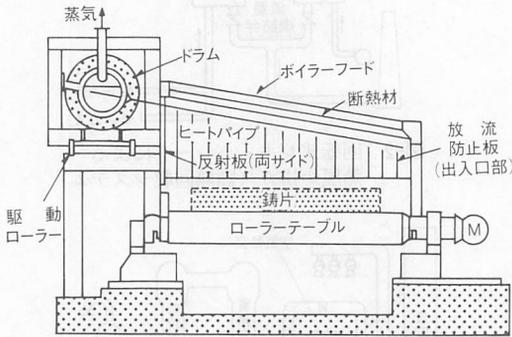


図-6 鋳片放射熱回収用ヒートパイプボイラ例

広義のホットチャージなどによって自己原料の加熱に回すことのできないエンタルピを他のプロセスへ輸送するには、排熱ボイラによる方法が最も一般的である。最近では極めて多くの形式の排熱ボイラが各所に設置されるようになった。ボイラによる蒸気は単なるエンタルピ利用ばかりでなく、後節に示すようなエクセルギー回収に回される場合も多い。ここでは主としてエンタルピ回収に利用される幾つかの例を示したい。

(a) 鋳片用ヒートパイプ式ボイラ

図-6は連鋳後の切断スラブの滞留部に設置したヒートパイプボイラの例で、鋳片の放射熱を回収している。住友金属鹿島製鉄所第一製鋼工場に設けたものは1.5トン/hの蒸気発生がある。

(b) 転炉排熱ボイラ

転炉により発生する転炉ガス（OGガス）は従来その発生直後フード内で燃焼させてその顕熱を排熱ボイラで回収させる方式がとられていたが、最近では、このガスは低硫黄でありクリーンであるので所内燃料として回収されるようになっている。その際にはフードに放射熱を吸収する排熱ボイラが設けられ、ガスは燃焼されることなくガスホルダーに送られる。

(c) 移動層式熱交換器

各種の熱排ガスが多くの粉じんを含む場合、固体の

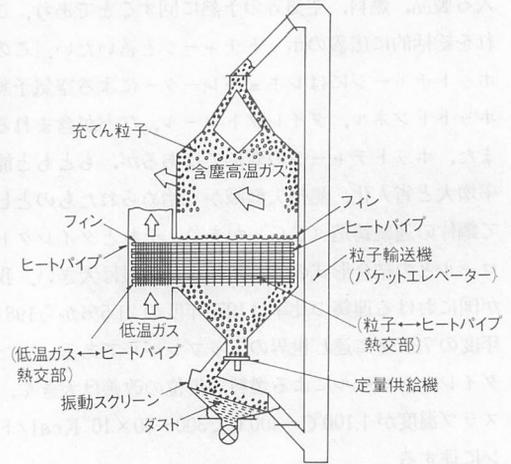


図-7 移動層（粒子）式熱交換器による含じん高温ガスの排熱回収

粒子を媒体とする移動層もしくは流動層式の熱交換器が開発されている。図-7に示すものは、神戸製鋼が開発中の乾式集じん並びに蓄熱機能を有する移動層式熱交換器であり、ヒートパイプが粒子内に入れていて低温ガスに熱を移す。今の所熱回収効率は50%である。

(d) セラミック定常流交換器

とくに高温排ガスの熱を空気に回収する熱交換器としてセラミック管を使用する定常流熱交換器の研究が盛んであって、外国では使われた実例があるが、我が国においても、日本鋼管と旭ガラスが協力して、1,000℃の炉ガスに対するセラミック直管型熱交換器を試作研究して優れた成果を収めている。今後この方面は大いに進むであろう。

5. エクセルギー回収

5.1 鉄鋼業におけるエクセルギー回収

エクセルギー回収とは前記のように、排棄エネルギーを発電もしくは動力として回収することであって、高温の排熱もしくは廃棄圧力エネルギーにより取り出すことができる。

鉄鋼業におけるエクセルギー回収は、高炉の炉頂ガスの有する圧力エネルギーによる発電する炉頂ガスタービン発電に始まり、ついで高温の固体顕熱による蒸気タービン発電、および中低温度の大量の排熱によるフロンタービン発電が実施されていて、他のいかなる業種にも優れたエクセルギー回収がなされている。

5.2 炉頂圧タービン発電（TRT）

最近の高炉の高圧化に伴ない、炉頂排出ガスは温度は150℃前後であっても圧力は2~3 ataであって、その量も大きい(約1,500 N m³/トン)ので、排出エクセルギーも出鉄1トン当り30~40Kwhに達する。これで発電するのが炉頂圧タービンである。

この方式は1969年ソ連で始められたのが最初であるが、1974年から1981年にかけて我が国で多数製作設置され、すでに合計320Mwに達する設備容量に達している。

この炉頂圧発電の発達とともに注目する必要があるのが高炉ガスの乾式集じん方式の開発である。従来は湿式であったが、それではガス温度が40℃前後に下るので、回収エネルギーが減少し、かつタービン出口ガス温度が下りすぎるので、バグフィルターなどを使用する乾式が使用されるようになった。

図-8に、住友金属の小倉製鉄所に設置された乾式収

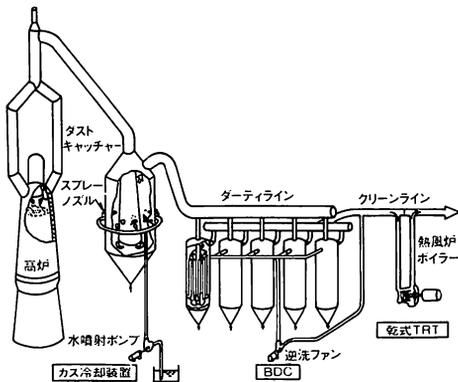


図-8 乾式収じん機つきの炉頂圧タービン発電 (TRT)

じん機つきの炉頂圧タービン発電プラントの概略図を示す。同所のもはタービン入口温度は125℃に改善されている。また圧力も在来の1.43atgから1.72atgになっている。またこの方式によると発電出力を従来より30~40%も向上させ、今後の省エネルギー推進に意義は極めて大きいものと思う。

5.3 固体排熱よりのエクセルギー回収

製鉄所における固体排熱を分類すると図-9のようになり、その温度は大部分が1,000℃を越している。温度が高い程エクセルギーが高いのでこれらの固体排熱によって、高温蒸気を発生し、蒸気タービン発電機に回させるエクセルギー回収が盛んになったのは当然である。しかし固体は取り扱いが困難であるので、これらの発電は関係者の多大な努力の結果、やっと実現したものであり、大いに敬意を表するものである。

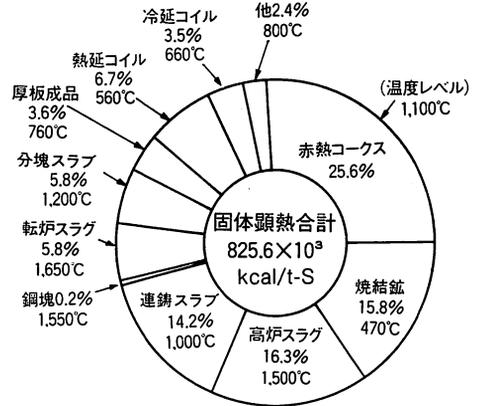


図-9 製鉄所の主要な固体排熱の種類と温度²⁾

固体排熱によるエクセルギー回収には、実現された順に、コークス乾式消火 (CDQ) 発電、焼結機冷却発電、各種炉スラグ冷却発電がある。それらについて示したい。

(a) コークス乾式消火 (CDQ) 発電

コークス部門だけで製鉄所の消費エネルギーの7~8%を消費しているが、その約45%はコークス炉から出る赤熱コークスの顕熱である。CDQは燃焼排ガスのような不活性循環ガスによってこの顕熱を回収し、ボイラで蒸気を発生させる設備である。現在我が国で稼動しているCDQはすでに9ヶ所19基に及び、普及率は20%を越えつつある。

図-10は住友金属鹿島製鉄所のシャフト型CDQの概念図であって、ボイラで生ずる蒸気は107atg、温度545℃に達していて、蒸気は発電と同時に送風動力に使用している。

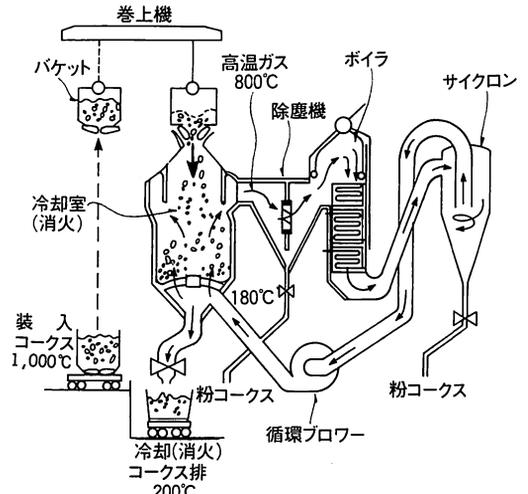


図-10 シャフト炉によるコークス乾式冷却(消火)装置の原理図

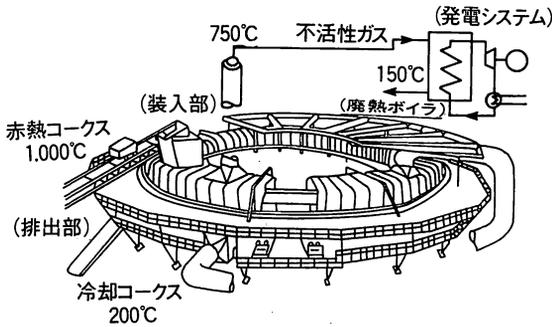


図-11 ロータリー形コークス顕熱回収装置

シャフト型CDQは、大型になると冷却ガスの温度変化が脈動し、また炉内のコークスの粉化も避けられない。図-11に示すのはこのような問題解決のため、1976年以降、三菱重工と東邦ガスの共同開発しているサーキュラグレート型CDQ概念図を示す。この方式の方がシャフト型より連続的一様操作ができるため、処理能力が大きくなることもできる。また建設費も小さくなるがシールに研究開発上の焦点がある。この方式の進歩が期待される。

(b) 焼結機熱回収発電

焼結機の排ガスの温度は350~400°Cに達している上、その風量も大きい(50万Nm³/hのオーダー)ので、その回収を行うとかなりのエクセルギーが回収できる。

その方式には、通常の蒸気ボイラー~蒸気タービン方式、熱水ボイラー~熱水タービン方式、フロンボイラー~フロンタービン方式の三者があり、各所で独自の開発がされている。

図-12には代表例として住友金属によって開発された鹿島製鉄所の第2焼結機排熱回収発電設備の概念図を示す。図のように1.35Mwの出力を生じ、蒸気発生

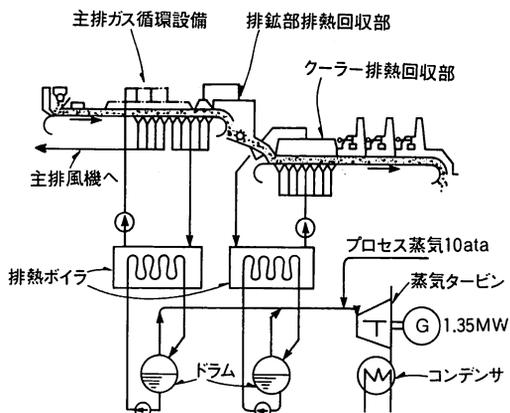


図-12 焼結材熱回収設備の一例(鹿島第2)

率は焼結鉱1トン当り91.7kg(蒸気)に到っている。これにより焼結工程の入熱の16.5%が補足されている。

また新日本製鉄八幡製鉄所の第1焼結機には熱水発電システムが設けられている。これは熱水による方が配管寸法が小さい利点より同社と三菱重工業とが共同開発したもので、約350°Cの排ガスから250°C、50atgの熱水(加圧水)を作り熱水タービン(トップタービン)に送って発電し、ついで気水分離器及び多段フラッシュャーで分離した蒸気で低圧タービンを動かすものであり、約4Mw(発電端)の発電を行っている。電力回収原単位は焼結鉱1トン当り約3.5Kwであり、消費エネルギーの約3%が発電回収される。この方式では熱水タービンは必ずしも効率は高くないが他の利点があるので注目されよう。

またフロンタービン方式については後章に回す。

(c) スラグ排熱発電

転炉や高炉より出る固体スラグ(熔さい)は前記のように高温であり、取り扱いが難しく、かつ最終的に建材用などに利用可能でなければならないなど多くの制限はあるが、その顕熱利用には多くの努力が払われ、成果が上っている。

その方式には

(1) 攪拌造粒・シャフト炉冷却方式;

これはポット内で攪拌し造粒してから、コークス消火と同様なシャフト炉に入れ空冷し蒸気を作るもの(川鉄-川重)

(2) スラグボイラー冷却方式;

これは約90mmの径の筒内にスラグを入れ周囲を水冷して蒸気を発生するもの(新日鉄堺)。

(3) 落下液滴・回転ドラム造粒・空冷・破碎方式;

これは回転ドラムに溶けたスラグを落して造粒した後熱回収するもの(住金-IHI)。

(4) 風砕・ボイラー方式;

これはスラグを空気流にぶつけて吹き飛ばし、ふく射ボイラもしくは流動床ボイラで熱回収するもの(新日鉄および日本鋼管)。

(5) バッチボイラー方式;

これはスラグを密閉容器に入れ水を吹き込んで蒸気冷却するもの。

等がある。いずれも興味ある方式であり、今後のこの方面の進歩が待たれる。

5.4 フロンタービンによる発電(ORCS)

約350°C以下の中低温排熱に対しては、フロンや各種有機作動流体を使用するいわゆるフロンタービン、

もしくはORCS (Organic Rankine Cycle System) によるエクセルギー発生が最も効率も高く、装置もコンパクトとなるとされてきた。鉄鋼業においては率先してORCSの導入がなされて幾多の成果を上げているのでここに代表的なものを示したい。

(a) 焼結機排熱利用フロリノール発電

新日本製鉄君津第3焼結機には図-13に示すようにその排熱をフロリノール85なる有機媒体を作動流体とするORCSが設置されている。フロリノール85は使用可能温度が高いので中低温排熱のエクセルギーを有効に回収するには最も向いているとされており、アメリカや我が国で研究がされて来たものであるが、ここでは、圧力41ata、温度267°Cのフロリノール蒸気を発生し、12.5Mwのタービン出力を行う世界最大の画期的なORCSタービン発電を行ったのは注目に値する。

(b) 転炉冷却水フロン発電

住友金属鹿島製鉄所では転炉のOGガス回収の際のガスのダクト冷却に対し、まず冷却水で熱をとった後、その熱水でフロンR-11を加熱し、フロンタービンで発電するORCSシステムを開発した、そのシステムの概念図は図-14に示す。

図の示すように98°Cの熱水から4.7ataのフロンを作り2.9Mwの出力を得ている。

(c) ORCSのサイクル効率

中低温排熱による発電サイクルの効率については、鉄鋼業における幾多の大型機の実例によってその傾向がつかめつつある。前節までの蒸気タービン、フロリノール85タービン、フロンR-11タービン、熱水タービン等を使用した実機効率を、作動流体最高温度を横軸にとって示したのが図-15である。図にはカルノーサ

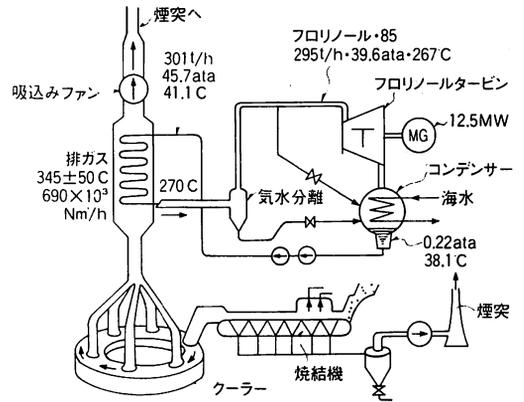


図-13 フロリノール85を使用する焼結機排熱ORCS発電の例(君津)

イクル効率と実サイクル計算による計算効率とが併示してあるが、図のように中温域でフロリノール85が最も高いが、低温域で蒸気、フロンいずれも高く、結局ていねいに作られたものは、熱水サイクル以外はどれも十分高い効率を示すことが示された。これは世界的にも初めてのデータであり大いに誇れるものである。

6. 将来展望とまとめ

以上において、製鋼における省エネルギーに、低次元の熱管理向上段階から、ホットチャージ、レキュペレーターを主とするエンタルピー回収段階、各種廃熱発電や炉頂圧タービンを主とするエクセルギー回収段階について、多くの事例を上げて説明してきた。

さらに一般的省エネルギーの高次元の段階としては、ヒートポンプ段階とエネルギー蓄積段階、大自然エネルギー段階がある。ヒートポンプの使用は、例えば大

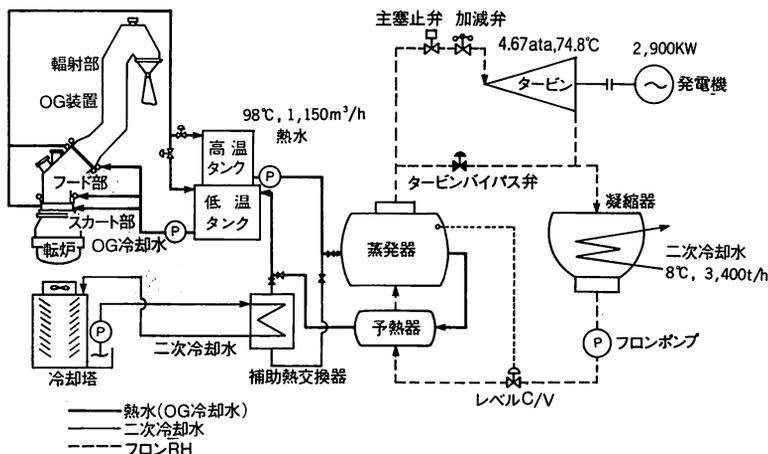


図-14 転炉のOGガス回収熱により作動するフロンタービンの線図(鹿島)

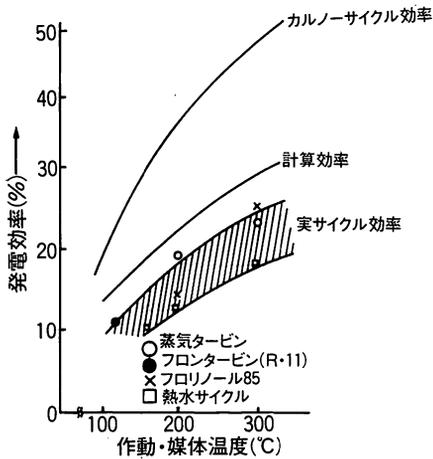


図-15 各種排熱発電の効率比較

量に出る低温排水，鋼片水冷却時の発生大気圧蒸気等を熱源として更に高温の熱水と蒸気を作るのに適用できる。

またエネルギー蓄積は，各種ケミカル反応，水溶液濃度差などで余剰排熱を回収し一時蓄積するもので，各種のエネルギーを複雑に利用する製鉄所では最終的な省エネルギー源となろう。

また太陽熱の利用も太陽炉クラスの高温度域の利用や長大な工場屋根を利用する太陽光発電などが将来考えられるであろう。その他の多くの大自然エネルギーも補助的に加えられるべきである。また将来は各種排熱は地域暖冷房等にも回されることとなろう。それには現在あまり利用の道のない90~70℃くらいの温排水の適用が考えられる。そのさいにはヒートポンプによる

昇温と調温も考えられる。

さて現在までの製鉄所における省エネルギーの進展に対しここに大きな敬意を表するとともに，普及率と効率の一層の進展向上と，システム的な総合省エネルギーが完成されるとともに，他の多く業種に対する模範となることを祈りつつ本稿を終えたい。

また本稿を作るにあたって，多くの資料を参考とさせていただいたので，それらの方々にも誌面を借りて御礼を申し上げたい。

主な参考文献 主な参考文献

- 1) 一色尚次；製鉄におけるこれからの省エネルギー，日本鉄鋼協会西山記念講座第39回，p. 31，(1976)
- 2) 北村信行，豊永清；鉄鋼業における固体排熱回収，省エネルギー，35，3 (1983)，p. 120
- 3) 菊地一成；高炉炉頂圧発電システム，同上，p. 100
- 4) 片岡真一；熱媒方式による高炉熱風炉の排熱回収，同上，p. 115
- 5) 北村信行他2名；Waste Energy Recovery at Kashima Steel Works, Iron & Steel Engr. July (1982)，p. 30
- 6) 村田裕司；鉄鋼業における中低温廃熱の実態とその熱回収技術の展望，鉄鋼協会西山記念講座第80回，p. 61 (1982)
- 7) 古賀文幹，織田紀之他4名；セラミックチューブ式熱交換器の実炉実験，日本機械学会，RC-79，代替エネルギー分科学会報告Ⅱ，(1983)
- 8) 省エネルギーセンター（財），省エネルギー事例全集（鉄・非金属編），第8回（1983）4月

