

■ 特 集 ■ 省エネルギー

ボイラー等による廃熱回収システム

Waste Heat Recovery System for Boilers etc.,

溝 渚 泉^{*}
Izumi Mizobuchi

1. まえがき

廃熱を回収して、これを蒸気に変換する廃熱ボイラーでは、その蒸気用途に問題があり、蒸気をどう使うかで計画がゆきつまることは時にはあり得るであろう。このため廃熱回収による廃熱ボイラーの将来はゆきつまりつつあると単純に放言する人達もいるようであるが、そうではなくてこのような使途がありますよという方式の組合せを本気になって再認識すべきである。

もともと廃熱回収には基本原則があって、第1に廃熱は加工原料の予熱に使うというのと、第2は蒸気発生用途のみではなく最も便利な用途に使うというのがこれであるから、この基本原則にそうことを思考しながら、以下にいくつかの事例を述べてみよう。

2. 廃熱回収プロセスの概要

廃熱回収プロセスにはつぎの図-1～10のような事例があり、多くの方式は大体このプロセスのものか或はその変形や組合せとなっているようである。

図-1は鍛造炉などの廃ガスと原材料を熱交換させて予熱された原材料を熱源となる炉に送るものであり、

図-2はボイラーから出る蒸気の配管系に1～2 atgの熱落差を生じるような過給機を組み込み、過給機を出た蒸気はユーザに送って熱仕事をさせ、凝縮熱水はボ

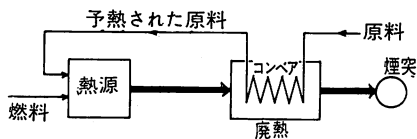


図-1 廃熱による原材料予熱方式

イラー給水を熱交換器によって予熱してボイラーへ給水し、過給機軸に取付けられた送風機ランナを回転させて所要の燃焼用空気をボイラーへ送る方法、

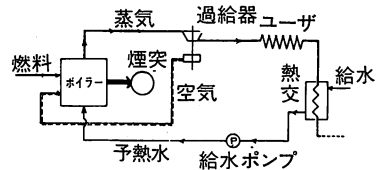


図-2 減圧弁を使わず過給機を使って送風機を運転し、また凝縮熱水で給水を予熱する方式

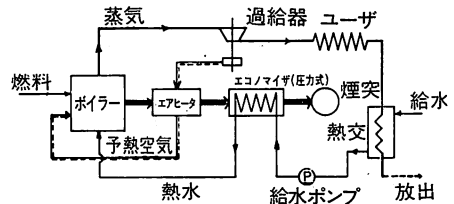


図-3 減圧弁を使わず過給機を使って送風機を運転し、凝縮熱水で給水を予熱し、廃ガス系統にエアヒータ、エコノマイザを組合せる方式

図-3は減圧弁などをやめてボイラーの蒸気ラインに熱落差1～2 atgの過給機を組み込み、過給機排出蒸気はユーザで熱仕事をさせた後、給水の予熱に利用し、さらに圧力式エコノマイザを経てボイラーに給水し、過給機のタービンと同軸に取付けた送風機を回転させて、この送気をエアヒータで予熱し、ボイラーへ給水する方法であり、図-2も図-3も送風機始動用電動機を都合により設置したとしても、所定の蒸気発生がはじまれば送風用電力は零になる。

図-4は廃熱ボイラーの蒸気でタービンを運転し、ゼネレータにより電気を発生させ、タービン排出蒸気を冷却水により凝縮熱水にしてボイラー給水とする方式であり、タービンには蒸気タービンの他に熱水タービ

* 關平川鉄工所 常務取締役技術部長
〒531 大阪市大淀区大淀北1-9-36

ンなどが実験されており、最も用途の多い方法である。

図-5は炉筒煙管式または煙管式の廃熱真空温水器であり、大気圧未満の圧力下で温水を製造し、暖房ユーザに供給する方式で、温水流路は温水器内で間接熱交換されるようになっているので、クローズドシステムとして構成することができる。このためボイラー構造規格の適用外とされている。

図-6は廃熱ボイラーの発生蒸気を用いて臭化リチウム熱媒体などによる吸収式冷凍機により暖冷房を行う方式である。

図-7は廃熱高圧再生器を吸収式冷凍機に組合せて、臭化リチウムなどの熱媒体の再生を行うと共に暖房回路と冷房回路を運転する方式。

図-8は廃熱エコノマイザ（要すれば圧力式）により給水を予熱し、ボイラー給水などに利用する方式。

図-9は廃熱エアヒータにより予熱空気を製造し、こ

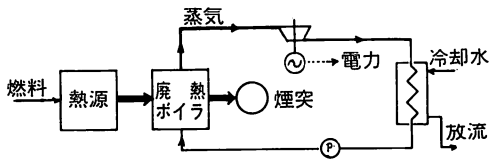


図-4 廃熱ボイラーの蒸気でタービンを運転して電力に変換し、タービン排出蒸気を凝縮熱水にしてボイラー給水とする方式

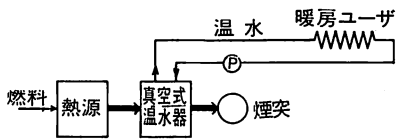


図-5 法的適用外の真空式温水器による廃熱回収の温水暖房方式

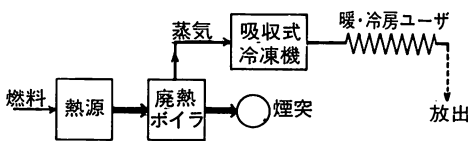


図-6 廃熱ボイラーと吸収式冷凍機の組合せ方式

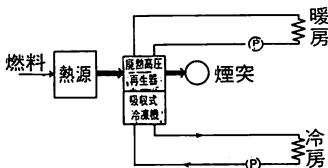


図-7 廃熱高圧再生器を吸収式冷凍機に組合せ、暖冷房を行う方式

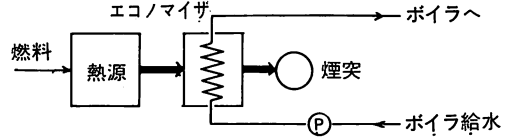


図-8 廃熱エコノマイザで給水を予熱し、ボイラー給水などを行う方式

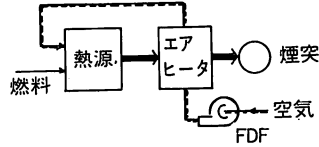


図-9 廃熱エアヒータにより予熱空気を製造する方式

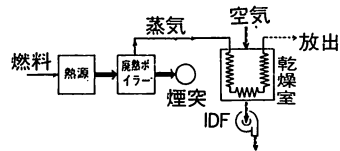


図-10 廃熱ボイラーの蒸気を乾燥室に供給する方式

れを燃焼用空気その他の用途に供給する方式。

図-10は廃熱ボイラーの発生蒸気を乾燥室に供給する方式であり、熱源は廃材焼却炉などの場合もある。

3. 廃熱回収に使われる機器

これらの廃熱回収プロセスには各種の機器が組合せられているので、それらの機器のいくつかを紹介してみ

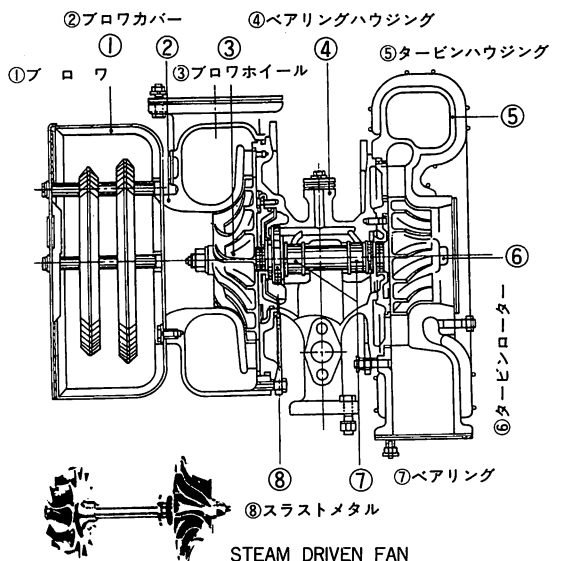


図-11 過給機の構造およびタービンとプロワ同軸組合せ状態

よう。

図-11はボイラーの蒸気配管系統に組合すことのできる過給機構であり、同軸上に取付けられた送風機ランナからの風量は通常のボイラーに要する燃焼用空気量とよくマッチングする。したがってボイラー圧力をタービン熱落差の1~2 atg 上下させるだけで容易に無電力で送風ができ、またタービン出口蒸気もそのままユーザに使用することができる。

図-12は横煙管式廃熱ボイラーであり、煙管群は特殊構造のら旋管で、通常の平滑管よりもほぼ2倍の熱伝達率が得られるように伝熱上の工夫がなされている。

図-13は廃熱強制循環式水管ボイラーであり、二重管構造にしてあると共に水管群は廃ガスの流通する煙道

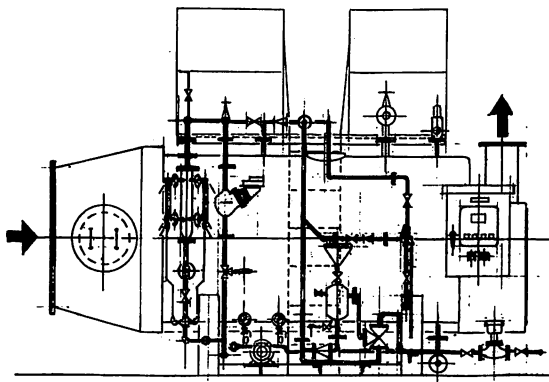


図-12 横煙管式廃熱ボイラー組立図

VG 蒸気発生器概略図

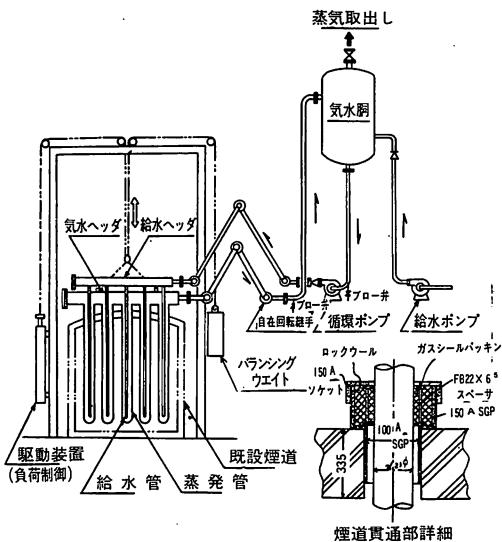


図-13 煙道抜き差し形の強制循環型 廃熱水管ボイラー-VG型

内に挿入され、負荷状況や定期検査などの場合任意に水管の抜き差しができるために、前段の炉には何の支障も与えることなく使い勝手がよい。

このような図-11~13は筆者らのグループの開発である。

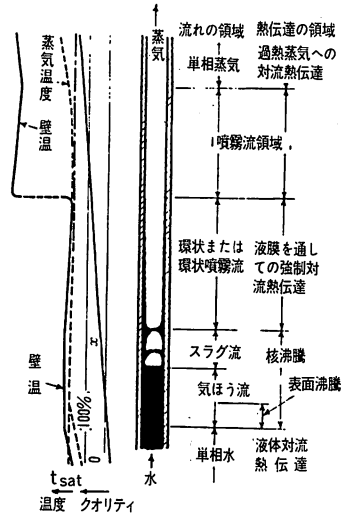


図-14 二相熱伝達の領域区分

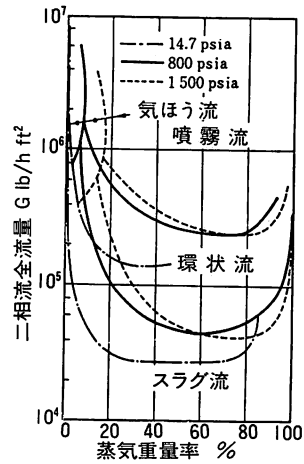


図-15 気液二相流判定図

図-14~16は気液二相流の状態を示したもので、図-15は Goldmann の報告である。

これらは図-13のような水管内の流動に関係するものであって、図-13の煙道抜き差し任意の廃熱水管ボイラーも必然的にこの作用を受けることは避けられない。このような廃熱水管ボイラーでは伝熱面熱負荷または熱流束は20~40×10⁴ kcal/m²hの程度に設計されるが、不用意に設計すると図-16(a)のようなドライアウト q_{BO}の領域にはいるかまたは低温廃ガスの場合でも管

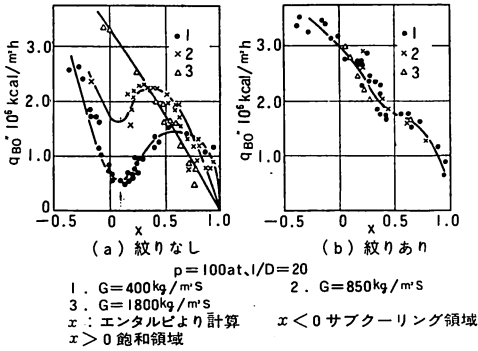


図-16 気液二相流のバーンアウトとドライアウト熱流束

壁温度の過度上昇を生じ水管の変形、歪を起すことを知っていなければならない。

図-17~18は廃熱水管ボイラーにはフィン付き水管を採用することが多いが、この図は凝縮伝熱促進のため高さ0.5~1mmのフィンまたは溝を設けた内田・中山の報告であり、この図のような加工は押し出し塑性加工や切り起し機械加工によったもので、フィン先端を鋭くすると表面張力により凝縮液の排除駆動力がまして、伝熱性能の向上がはかれるといわれており、これからの熱交換上有用な示唆を与えてくれている。

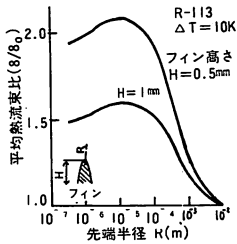


図-17 フィン先端半径が伝熱促進に及ぼす効果

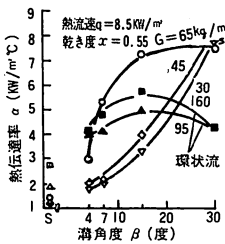


図-18 溝角度と熱伝達率で管内面にらせん状溝を切った場合

図-19は吸収式冷凍機の原理を示したもので、通常は臭化リチウム水溶液を熱媒体として、真空圧力下で

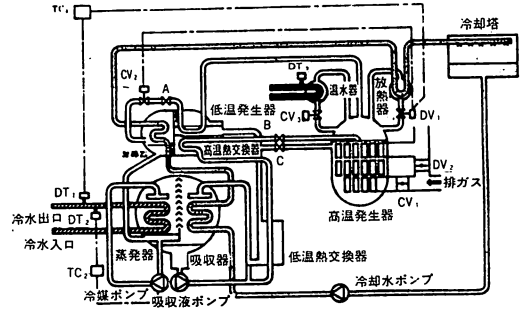


図-19 排ガス二重効用吸収冷温水機の原理図

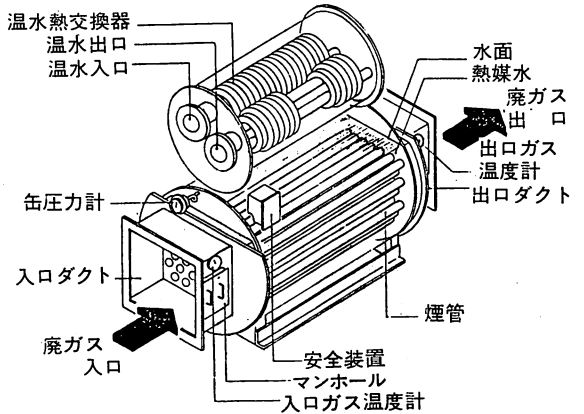


図-20 真空温水発生器で廃熱回収用とした構造

使用され、冷温水の供給を可能にする。高圧再生器というのは一種の煙管ボイラーであり、熱媒体の加温再生に使用されるので熱源に燃料を必要とするが廃熱を用いることも容易である。

図-20は真空、蒸発、凝縮を行う真空温水発生器で熱源に廃ガスを用いた構造であり、図-19中の高圧再生器と同じように真空圧力下で使用するものでこれを含め筆者らの企業では昭和46年以降500基以上の実用実績を持っている。これは熱源との熱交換により器内液を沸騰蒸発させて発生蒸気を、上部に設けた熱交換器により凝縮降下させるもので、蒸発器内蔵液は原則上保給の必要はなく、熱交換器により加熱された温水は各種の用途に循環使用されるものであり、英国標準規格 (BSI.) と異なり、日本では現段階で法規の適用を除外されている。日本ではタクマが最初に開発した。

図-21は工業炉(たとえば分塊連铸片加熱炉など)のホットクーリングボイラー(廃熱ボイラー)を示したものであり、図中の(A)は強制循環方式(B)は自然循環方式である。この方式は高温加熱中の鋼塊を支える炉床

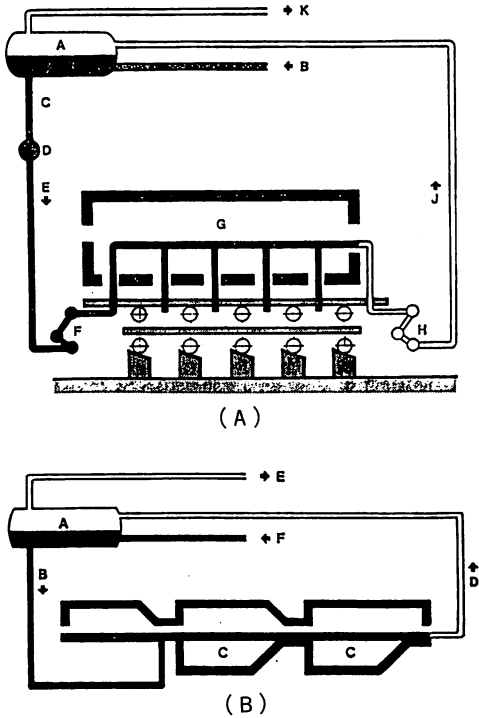


図-21 工業炉のホットクーリングボイラー（廃熱ボイラー）で(A)は強制循環、(B)は自然循環（西独ライニング社による）

に水管群を列架したもので、鋼塊の局所過冷を防止し、設備寿命を向上させ、冷却水熱損失を蒸気として回収するなどの効果は大きいとされている。日本では既に3製鉄所が実施して稼働段階にはいりつつあり、西独ライニング社（Reining Heisskühlung）では多くの実績を持ち高温にさらされるものの冷却装置として多くの用途に使用されている。ライニング社のライセンスは日本シャックエンジニアリング社が持っている。

ここで Hot と Cooling と呼ぶ両者の矛盾は、0～40℃未満を冷水冷却、40～100℃未満を温水冷却、100℃以上を高水温冷却と西独では区分しこれをホットクーリングを称している。

筆者らの企業はこれの法的製造許可を最初に得ている。

図-22はスラグ熱回収の概念図で、小塚は高炉、転炉などのスラグは日本で約 3000×10^4 ton /年に達し、その成品スラグ用途は土木、建築用資源化が進んでいるため、商品目的に適した品質、形状品として回収することと、その熱回収が重要であり、スラグは ton 当り $40 \sim 50 \times 10^4$ kcal の顕熱を持つようであると報告しているが、近く実証テストプラントも出来上るようであるから、将来 $1200 \sim 1500 \times 10^6$ kcal /年の大きな熱回収が予想される。

図-23は大型鑄鉄、鑄鋼部品を生産する工場で熱処理炉、アーク炉からの廃熱を回収して、プロセス蒸気として使用したものであり、三菱重工神戸造船所二見工場の実施例である、所要熱量の85%をこれで賅っているといわれている。

図-24は既存設備の廃熱を集めて発電する「世界中で初めて」といわれる日本鋼管京浜製鉄所扇島の廃熱を集中回収し、発電を行う方式であり、この設備の2万KW 働動10段落復水型タービンに過熱蒸気を廃熱水管ボイラーで供給している。図中のCDQは（Coke Dry Quenching）コークス乾式消火設備であり、ここで使用しているのは低圧タービンで、タービン入口圧力13 kgf/cm²g、入口温度250℃、蒸気消費率5.36kg/kwh、タービンの前にドレントラップを設け、タービンブレードも特に大きく設計されている。

筆者らの企業はこの廃熱ボイラーの設計製造を担当し、円滑な稼働にはいたれたのは大きな喜びであった。

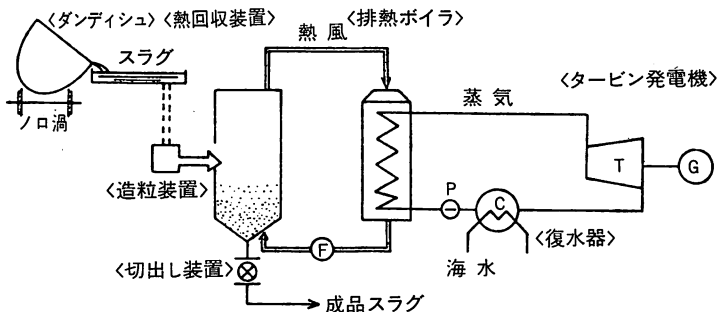
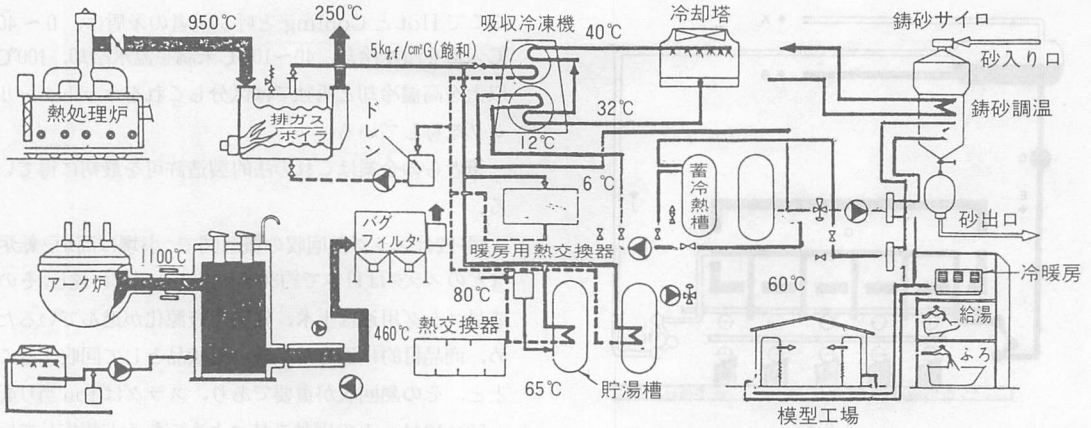
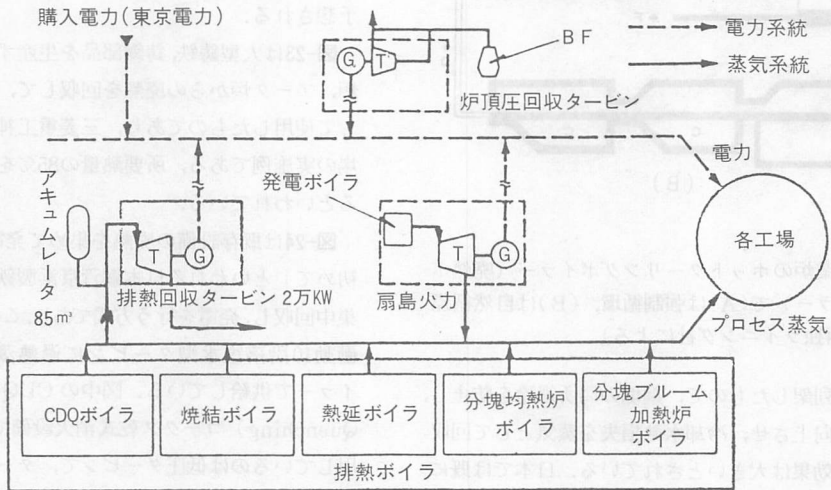


図-22 スラグの熱を廃熱ボイラーおよび電力として回収する概念図



● MERCSのフローダイヤグラム

図-23 熱処理炉とアーク炉からの廃熱を回収するプロセス (三菱重工神戸造船所二見工場)



● 排熱集中発電システム (T:タービン、G:発電機)

図-24 廃熱ボイラーの蒸気をプロセスの用途および発電に変換するシステム (日本鋼管京浜製鉄所扇島)

4. あとがき

上述のように廃熱回収システムの事例には多くのものがあり、その設備投資上でもまだこれからのものを除けば、ほとんどが経済的に、しかも割合と短かく償却が可能である。しかも中西によれば消費されたエネルギーは最終的に熱に変換され地球上に放出される必然性があり、これが地表面の入射太陽熱の1%を越えることになると気象変異などの大きな問題が生じると予測されているから、地表面熱負荷を減少させるためには廃熱回収を含め省エネルギー努力は、ますます必要性を増すことはあっても減ることはない。としているから経済的側面からの必要性もあってその実行が推進されざるを得ないであろう。

以上テーマに従って廃熱回収システムの事例を述べたが本稿取りまとめに当たって作図などに協力して下さった吉田誠治氏・河合満嗣氏に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 中西重康: 熱力学的にみた廃熱回収—日本機械学会関西支部第39回特別講義会 1 p.
- 2) 内田幹和・中山恒: 最近の熱交換器の構造と設計上の進歩—全上第39回特別講義会 19 p.
- 3) 佐野 真: 吸収式冷温水器による廃熱回収技術—全上第39回特別講義会 53 p.
- 4) 小塚和泉: 製鉄所における排熱利用—全上第39回特別講義会 81 p.
- 5) 伝熱工学資料, 日本機械学会 1966年 80, 83, 84 p.
- 6) 省エネルギー特集・排熱回収 52, 55 p. NIKKEI MECHANICAL 1980, 4.14.
- 7) REINING HEISSKÜHLUNG, 説明書.