

副題：バイナリー発電の効率と適用性

本稿は工業通信者が発行する月刊誌「化学装置」の2015年10月号に掲載されたレポートである。出版社の許可を得て転載する。

SCE・Net 松村 眞

7. 排熱発生源の種類と温度水準

7.1 固体の排熱発生源と温度水準

排熱発生源の状態には、固体、液体、気体がある。固体排熱の代表例は製鉄所の高炉スラグで鉄滓ともいわれる。鉄鉱石の約半分を占める不純物で、主成分は酸化ケイ素 (SiO_2) や酸化カルシウム (CaO) である。高炉スラグは高炉で銑鉄と分離し、約 1500°C の高温状態で抜き出される。そのまま徐々に温度が低下すると塊状に固化するので、大量の水をかけて急激に冷却し粒状にする。粒状にするのはセメントの原料など、再利用の用途が広がるからである。冷却水はほとんど蒸発して 30°C から 40°C 程度の水蒸気になるから、用途がなく熱回収の対象にならない。高炉を出た銑鉄は次工程の転炉で酸素を吹き込み炭素を除去するが、転炉でも大量のスラグが発生する。しかし高炉スラグと同様に熱回収はされない。転炉を出た鋼鉄は、スラブと称する鋼塊になり、約 1000°C から 800°C で圧延され、H型鋼や厚板などの鉄鋼製品になるが、やはり熱回収はされない。高温の鉄塊や鉄鋼製品は 500°C 以上の排熱源だが、ほとんど熱回収されていない。決定的な理由は、排熱の大部分が固体の顕熱なので、そのままでは熱交換器が使えないからである。鑄造工場も製鉄所と同様に高温の製品が製造されるが、やはり熱回収されずに大気に放熱し冷却している。結論として固体の排熱は、 500°C 以上の高温でもほとんど熱回収されず、大気への放熱か低温の水蒸気や水になって廃棄されている。例外はコークスからの熱回収で、高温コークスの排熱を回収するために窒素をコークス炉に送入し、排熱を窒素ガスに移す。次に熱交換器で水を加熱し、水蒸気を発生させて熱源や発電に使用している。固体の排熱を気体に移し、それから多管式の熱交換器で蒸気に転換する2段階の工程が必要なのである。

7.2 液体の排熱発生源と温度水準

液体の排熱回収には熱交換器が使えるので広く普及している。石油精製と化学工場には数百基の熱交換器が設置されており、高温の中間製品が保有する熱を低温の中間製品で回収している。しかし熱回収には一定の温度差が必要なので、熱回収量を増やそうとすると

温度差が接近し、必要な伝熱面積が大きくなってしまふ。伝熱面積は与熱流体と受熱流体の温度差に逆比例するのである。伝熱面積が大きいくことは、熱交換器の費用が大きいくことにほかならぬ。この温度差の限界から、液体の排熱は一定の温度水準までは熱回収できるが、その温度以下は回収できない。回収できない温度水準でも、製品タンクの貯蔵温度よりは高い場合が多い。このため熱回収用の熱交換器の下流に冷却器を設置し、残る排熱を冷却水で冷却する。冷却水は熱を受けて入り口温度より 10℃ぐらゐ高くなるが、夏場でも 35℃程度だから利用価値がない。なお、冷却器も熱交換器も構造は同じだから外見では区別できない。熱回収を目的とする熱交換器では中間製品が受熱流体になることが多いが、冷却器の場合は海水や工業用水が受熱流体になるという違いだけである。

図 3 は全国の製油所に設置されている凝縮器と冷却器の入り口温度と、その温度水準での保有熱量である。この図から、概ね 200℃から 50℃以下の排熱が冷却水に廃棄されていることが分かる。また、150℃以上で廃棄される排熱は保有熱量が小さく、50℃以上 150℃以下で廃棄される排熱は保有熱量が大きい。高温排熱は与熱流体と受熱流体の温度差が大きいくから、熱回収に必要な熱交換器の費用対効果が大きい。このために積極的な熱回収の対象になる。一方、低温排熱は与熱流体と受熱流体の温度差が小さい。このため熱交換器が大きくなり、熱回収の費用対効果が劣るので、熱回収の対象とされずに廃棄されるのである。図 3 は製油所の実態だが、化学工場も状況はよく似ており、液体排熱は概ね 50℃から 150℃で冷却水を通じて環境に廃棄されている。他の業種については、省エネルギーセンターの工場群の排熱実態調査（平成 9 年度）によると、食品が 60℃から 120℃、繊維が 80℃から 100℃、紙パが 60℃から 120℃で廃棄されている。業種の特徴から 100℃以上の排熱は水蒸気の凝縮水が多いものと思われる。結論として液体の排熱は、水蒸気の凝縮水も含めて概ね 60℃から 100 数十℃で廃棄されていると考えてよいであろう。

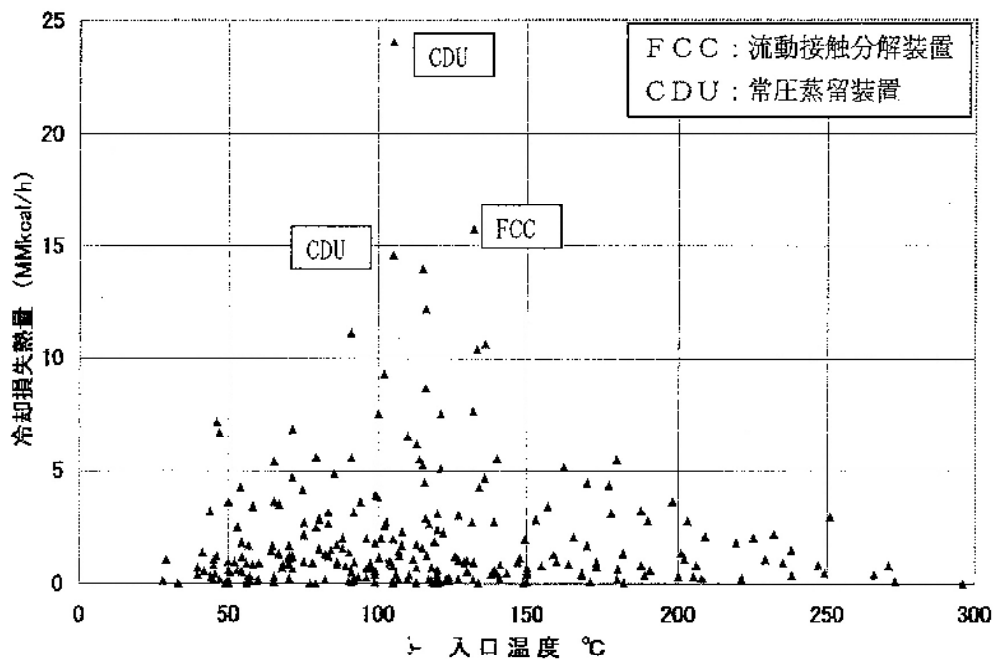


図3. 製油所の液体排熱温度と保有熱量

出典：製油所における最新省エネ技術の適用可能性調査報告書、
 (石油産業活性化センター・PEC-2003T-20)

7.3 気体の排熱発生源と温度水準

気体の排熱発生源は3種類と考えてよい。一つは蒸気か温水を発生させるボイラーで、日本全国では数百万台が稼働している。発電所のボイラーが最大規模で、1時間あたりの蒸気発生量は数千トンから数万トンである。次に規模の大きいのは製鉄所や化学工場のボイラーで、1時間あたりの蒸気発生量は数百トンが多い。小規模のボイラーは業務施設とオフィスビル用で、1時間あたりの蒸気発生量は1トンから数トンが多い。ちなみに清掃工場のごみ焼却炉に設置する廃熱ボイラーは、1時間あたりの蒸気発生量が概ね20トンから50トンである。ボイラーの燃料は、ほとんどが石油・ガス・石炭である。図4は製油所のボイラーと加熱炉の気体排熱温度と保有熱量だが、概ね130°Cから200°C数十度が多い。高温排熱ほど量が少なく、低温排熱ほど量が多い理由は液体排熱の場合と同じ理由である。他の業種については、前節と同じ調査で食品が100°Cから200°C、繊維が100°Cから250°C、紙パも100°Cから250°Cで廃棄されている。結論として、ボイラーと液体加熱炉の排ガスは、概ね120°Cから200°Cで大気中に廃棄されていると考えてよいであろう。

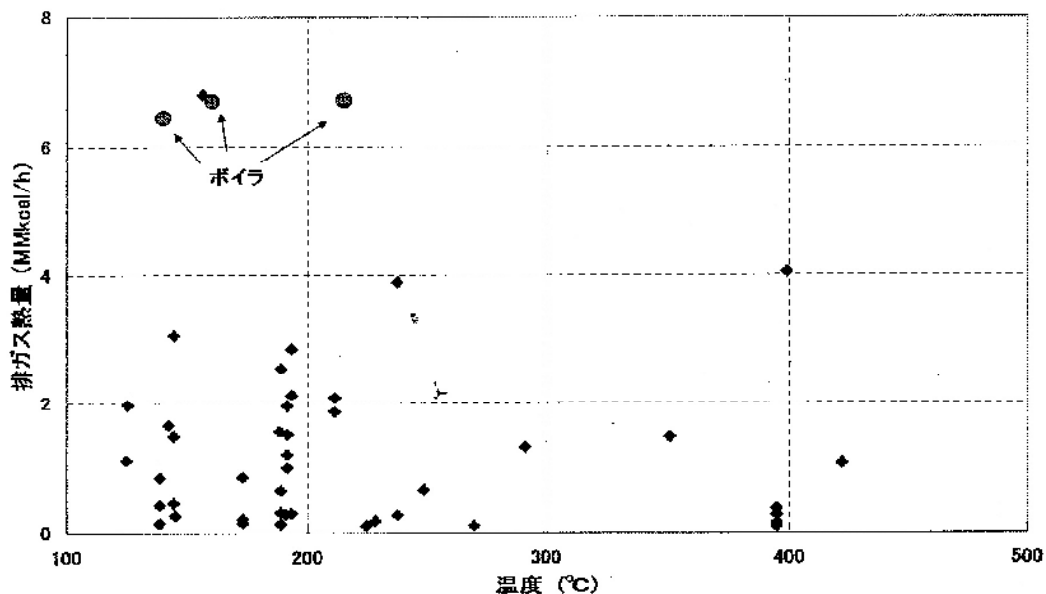


図4. 製油所の気体排熱温度と保有熱量

出典：製油所における最新省エネ技術の適用可能性調査報告書、
(石油産業活性化センター・PEC-2003T-20)

2番目の気体排熱発生源は固体加熱炉である。鋳物製品の製造には800°C以上の加熱を必要とし、直火式の固体加熱炉が使われるので800°C以上の燃焼排ガスが発生する。自動車部品や家庭電器製品の乾燥や塗装にも直火式の固体加熱炉が使われており、300°C程度の燃焼排ガスが発生している。住宅の外壁に使う建築材料や石膏ボードの乾燥・仕上げ・塗装にも直火式の固体加熱炉が使われており、300°C程度の燃焼排ガスが発生しているであろう。固体加熱炉の排熱も熱交換器で回収し燃焼用空気の予熱に使われることが多い。固体加熱炉は連続稼働ではないことが多く、操業条件の変動が大きいことから、熱回収率はボイラーや液体加熱炉より低い。固体加熱炉の燃焼排ガスは、概ね200°Cから500°C程度で大気中に廃棄されているものと推察される。

3番目の気体排熱発生源は清掃工場の焼却炉である。焼却炉は熔融炉を別にして850°Cから900°Cで運転されているので、同じ温度の燃焼ガスが発生する。大型焼却炉の場合は、炉のガス出口部分に伝熱管を縦に配置し、中に水を通して熱回収している。焼却炉を出た排ガスは、水を噴射して温度を下げる。集塵や窒素酸化物の除去には、200°C程度に温度を下げる必要があるからである。したがって、連続稼働のごみ焼却炉排ガスは、概ね150°C近辺で大気中に放出され排熱を廃棄している。一方、処理量が少なく1日の稼働時間が短い準連続式焼却施設やバッチ式焼却施設は、排熱を回収しない場合が多い。このため、もっと高温、たとえば300°Cから400°Cで排熱を大気中に廃棄しているであろう。

8. 熱源温度の発電効率への影響

日本では全産業が省エネルギー対策を推進しているが、前項に述べたように大量の熱が大気中や水中に廃棄されている。理由の一つは、固体排熱は効率のよい熱回収方法がないことにある。液体排熱は熱交換器で熱回収できるが、温度差の制約と経済性の両面から限界があるからである。気体排熱の場合も経済性に大きな制約があるからである。では熱ではなく電力に変換して回収すれば、どの程度の回収率を実現できるだろうか。

低温排熱の回収利用には前項のような制約があることから、長い間、電力に変換して回収する方法が期待されていた。それでも容易に電力変換回収が進展しなかったのは、低温排熱の電力変換効率が非常に低く、経済性が低かったからである。熱を熱として回収できれば 100%利用できるのに、電力に変換すると熱エネルギーの半分以下しか利用できず、残りは全くの損失になってしまうのである。なぜそうなのか、どの程度の排熱温度ならどの程度の変換効率か以下に整理しておく。

電力のエネルギーは、電気ストーブのようにほぼ 100%まで熱エネルギーに変換できる。機械エネルギーも、95%以上を熱エネルギーに変換できる。一方、この逆、つまり熱エネルギーを電気エネルギーに変換すると大きな損失が発生する。この理論最大効率は、カルノーの効率といわれ次式で示される。

$$\text{カルノー効率} = 1 - T_L / T_H$$

T_L：低温熱源温度（冷却温度）の絶対値（摂氏温度+273）

T_H：高温熱源温度の絶対値

火力発電では 550℃の蒸気を高温熱源とし、水で冷却するので冷却温度を 25℃とすると、火力発電の最大効率は 66%になる（ $1 - 298 / 823 = 0.66$ ）。残る 34%の熱エネルギーは損失になり、大気中または冷却水中に低温排熱となって廃棄される。種々の熱源温度について最大発電効率を計算すると表 1 になる（冷却温度は 25℃とする）。表 1 の数値は理論上の最大効率だから、実際の効率はこれより低く、たとえば最新の火力発電所でも 55%程度である。このように熱源温度が低くなるほど発電効率（熱エネルギーの電力変換効率）が低下するので、電力変換によるエネルギー回収が容易に進展しないのである。バイナリー発電では、循環温水の発電側入口温度を 95℃から 75℃、冷却水温度 30℃から 15℃に設定していることが多い。仮に温水温度を 95℃、冷却水温度を 25℃とすると、最大発電効率は 19%になる。この数値は理論最大効率なので、実際は機械の摩擦や熱損失のためにこ

れより数%低い値、たとえば平均で 15%程度ではないだろうか。なお、熱源が 125℃の水蒸気の場合は、最大発電効率が 25%になる。

表 1. 熱源温度と最大電力変換効率

熱源温度	最大発電効率	熱源温度	最大発電効率
550℃	66%	125℃	25%
500℃	59%	95℃	19%
400℃	56%	80℃	15%
300℃	48%	70℃	13%
200℃	37%	60℃	10.5%

9. バイナリー発電に必要な追加設備

工場排熱があっても、そのままではバイナリー発電に使えない場合は、熱源側に表 2 に示す新たな設備の追加が必要になる。ただしバイナリー発電設備との接続に必要な配管設備、ポンプ、送風機を除く。

表 2. 熱源の種類と必要な追加設備。

排熱発生源	利用形態	追加設備
飽和水蒸気	直接利用	①不要。しかし発生源が分散していると、集約するまでに温度が低下する。大量発生源が望ましいが、大量の場合は熱回収され温度が低下していることが多い。 ②低圧の飽和水蒸気は排出量が季節的、または時間的に変動することが多いので、稼働率の経済性への影響を考慮する必要がある。 ③メーカーによっては、水蒸気の直接利用に対応できない。
	間接利用	飽和水蒸気と循環温水の熱交換器が必要。
液体排熱	直接利用	①排熱源が排水で、水質がバイナリー発電装置の仕様に適合していれば追加設備不要。ただし多くはないであろう。
排水と冷却水を含む	間接利用	①排熱源が排水でも水質不適合の場合は、熱源排水と循環温水の熱交換器が必要。熱源が温泉の場合は、伝熱管の表面に固形分を析出させるので、伝熱管を洗浄しやすい構造が必要。 ②排熱源が排水ではなくプロセス流体の場合は、循環温水との熱交換器が必要。すでに冷却器が設置されている場合は、既

		<p>存冷却器の上流に熱交換器を設置し、70℃以上 95℃以下の温水を製造する。熱回収を考えていない冷却器は、製品の温度を概ね 30℃以下にしている。このため、発生している冷却水は温度が低すぎてバイナリー発電には使用できない。</p> <p>③排熱が蒸留塔の塔頂蒸気凝縮液の場合は、既存凝縮器の上流に熱交換器を設置し、70℃以上 95℃以下の温水を製造する。熱回収を考えていない凝縮器の冷却水は、温度が低すぎてバイナリー発電には使用できない。</p>
気体排熱	間接利用	<p>①熱源がボイラーまたは液体加熱炉排ガスの場合は、熱源排ガスと循環温水の熱交換器が必要。ただし排ガスと循環温水との熱交換器は、伝熱面積が大きいのでコスト上昇要因。燃焼排ガスは、バイナリー発電装置から離れている場合が多く、配管コストが高くなる点に要注意。燃焼ガスに硫黄酸化物や煤塵が含まれていると腐食や汚れの要因になるので要注意。</p> <p>②熱源が固体加熱炉排ガスの場合も、熱源排ガスと循環温水の熱交換器が必要。加熱炉が連続稼働でない場合、および稼働状況の変動が大きい場合は、循環温水の変動も大きくなり発電量が低下する。排ガス発生源が発電装置から離れていると配管コストが高くなる。</p> <p>③熱源が清掃工場の焼却炉排ガスの場合も、循環温水との熱交換器が必要。焼却炉排ガスにはダストを多く含まれているので、熱交換器の設計に配慮が必要。</p>
固体排熱	間接利用	<p>①固体排熱を回収利用するには、固体排熱を気体（排ガス）に変換する排熱回収設備が必要になる。具体的には高温の固体を箱型や円筒形の閉鎖的な設備に入れ、空気や窒素のような気体と接触させて熱風状態で回収する。製鉄所では灼熱コークスを挿入した円筒形のチャンバーに、下部から窒素を挿入して気体の排熱に変換している。気体に変換した後は、気体（排ガス）と循環温水の熱交換器が必要。熱交換器の前に排熱回収設備が必要になるので、液体や気体排熱の回収より設備が多くなる。しかも固体からの熱回収設備は伝熱特性が劣るので設備費が高い。このため、一般的には経済性の点でバイナリー発電の対象にはならない。</p>

10. バイナリー発電の適用性

表 2 に示した追加設備を考慮したバイナリー発電の適用対象候補を表 3 に示す。右欄は費用対効果を考慮した筆者の定性的な評価である。バイナリー発電では発電側の設備費と熱源側の設備費が固定費なので、稼働時間と発電量が経済性に大きく影響する。このため、実稼働時間と熱源の時間的な変動を十分に検討し、経済評価に反映するのが望ましい。

表 3. バイナリー発電の適用性評価（例）

排熱発生源	利用形態	業種	対象排熱	評価
飽和水蒸気	直接利用	全業種	余剰低圧蒸気	◎
液体排熱	直接利用	食品/飲料製造工場	濃縮や蒸発装置の加熱蒸気凝縮水	◎
		調味料製造工場	濃縮や蒸発装置の加熱蒸気凝縮水	◎
		化学工場	保温や原料加熱の加熱蒸気凝縮水	◎
	間接利用	全業種	電熱併給エンジン冷却水	○
		石油精製・化学工場	プロセス流体の熱回収下流廃液	○
			蒸留塔の塔頂プロセス流体凝縮液	○
気体排熱	間接利用	全業種	ボイラー排ガス	△
		金属加工工場	加熱炉の燃焼排ガス	△
		自動車部品工場	焼き付け塗装排ガス	△
		家電製品製造工場	焼き付け塗装排ガス	△
		建築材料製造工場	焼き付け処理炉排ガス	△
			焼き付け塗装排ガス	△
清掃工場	焼却炉排ガス	△		
固体排熱	間接利用	鋳造工場	鋳物排熱	×
		金属加工工場	鍛造排熱	×
		製鉄/製鋼工場	鋼塊排熱	×
		セメント工場	クリンカー排熱	×

注：◎：追加設備不要

○：液体と循環温水との熱交換器追加が必要。

△：ガスと循環温水との熱交換器追加が必要。

×：ガスと循環温水との熱交換器追加のほかに、固体からの熱回収設備が必要。

（おわり）