

UDC 669.1 : 662.99 : 669.18

解 説

省エネルギーにかかわる新技術*

—とくに廃熱利用について—

一 色 尚 次**

New Technology for Energy Saving with a Particular
Emphasis on the Utilization of Waste Heat

Naotsugu ISSHIKI

1. 緒 言

筆者は製鉄の専門家ではないが、最近濃度差エネルギーシステム利用などを中心とする省エネルギーの研究に従事しているので、この機会に廃熱利用に関連する省エネルギー技術についての現状と将来を述べたい。

そもそも我が国の製鉄産業は、世界的に見ても極めて合理化され、製品トン当りの消費エネルギー量は年ごとに低減されている。しかしその産業の特質上いぜんとしてかなり大量のエネルギー資源を必要としていることは事実であつて、僅か1~2ヶ所の製鉄所で我が国全体のエネルギー消費の2~3%を消費しているというところもあるくらいである。

そのためエネルギーショック以来のエネルギー資源の節約の上からも、またそれ以前より盛んに希望されている環境保護、地域福祉などの面からも、また製鉄業そのものの合理化の上からも、製鉄に必要なエネルギーをさらに節約し、特に多量に出されている廃エネルギーを、所内利用はもちろんのこと、ひいては近隣地域にもまわせば大いに好ましい。

さて鉄鋼産業の廃棄エネルギーの大部分は熱エネルギーであることに着目しつつも、本報告では必ずしも製鉄にこだわらず、一般的な熱エネルギーの回収貯蔵活用法を取り上げ、それにかかわる最近の技術等を取り上げ、かつ私見を述べてみたい。

2. 熱エネルギーの回収と活用について

2.1 熱エネルギー回収目的

熱エネルギーを回収するには、まずその有効な利用先がなければならない。また何を目的として回収するかによつてその技術的手法も根本的に異なってくる。

熱エネルギー回収の用途としては次の4者が主なものとなる。

①単に熱損失の減少を目的とするもの；これは保温材や熱管理強化で達成できよう。

②プロセス内直接利用；熱エネルギーを回収し直ちに他の同一工場内の加熱過程に流用するもので、その最も手近なものは、リキュペレーターなどの再生器による排熱の空気予熱への再生であり、また最近注目を浴びている廃熱による製品の加熱によるホットチャージ、などもこれに属する。またそのさい別の熱媒体を利用してもよい。

③工場内外への給熱；これはいつたん熱媒体に熱エネルギーを移してから工場内外の加熱や暖冷房、外部の工場、農水産業など、製鉄プロセス以外の給熱に利用するもの。

④電力及び動力への転換；これはさらに積極的に廃熱を熱源として適当な発電システムで発電したり、また動力化をして所内動力ばかりでなく工場外への給電を行なつたり、また輸送機器を駆動したりするものであり、過去における高炉ガス発電や炉頂ガス発電などでもこれに属するものである。このさいこれらのエネルギーを中間で蓄積する過程があることが望ましい。

2.2 熱回収の諸段階

上記のような多くの目的の段階があつた上で、熱回収や省エネルギーの進め方の段階を考えると次のようになる。

(1) 熱管理段階；これは単に熱損失の軽減を計る段階である。

(2) ホットチャージ段階；これは製品（未成品を含む）や原料を何度も加熱したり冷却したりするプロセスを減少し合理化する段階である。

* 昭和 53 年 3 月 23 日受付 (Received Mar. 23, 1978) (依頼解説)

** 東京工業大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama Meguro-ku Tokyo 152)

(3) 熱転用段階；これは何らかの熱媒体（たとえば廃熱ボイラよりの蒸気）によつて廃熱を加熱や冷暖房などの他の用途に転用する段階である。

(4) 動力化段階；これはフロンタービンやトッピングタービンなどによつて廃熱などを動力化し、主として発電によつて他へ転用する段階である。またヒートポンプとの併用もこれに入る。

(5) エネルギー蓄積段階；エネルギーを蓄積して利用側のピークに対応させるようとする総合的なのもので最も高級な段階である。

一般にこのように段階が進むに従つて設備が増すが、一方でエネルギー消費は減少し、かつ合理化されよう。なお遠い未来では太陽熱、風力などの大自然エネルギーとのドッキングも考えられることとなり、これが最終段階となる。

2.3 ホットチャージと熱転用の効率

いま温度 T_1 なるA物体の廃熱を温度 T_2 で他のB物体に利用しようとする、もしB物体の温度 T_2 が熱の供給によつて温度が変化しなければ、利用できる熱量 Q_1 は

$$Q_1 = (T_1 - T_2) \bar{C}_p M_A \dots\dots\dots (1)$$

となることは明らかである。ここで $\bar{C}_p$ はA物体の平均比熱であり、 M_A はA物体の重量流量である。しかしこのさいは T_2 まで温度が下がったA物体の T_2 以下の温度は利用できないので、仮りに T_2 が外気温度 T_0 に等しいとしたときに放出できる廃熱 Q_0 、すなわち

$$Q_0 = (T_1 - T_0) \bar{C}_p M_A \dots\dots\dots (2)$$

にくらべての利用効率 η_1 は

$$\eta_1 = \frac{Q_1}{Q_0} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_0} \dots\dots\dots (3)$$

となり、 η_1 は T_2 が高くなるほど小さくなる。故に高温物体の廃熱を利用して高温のB物体を加熱しようとするときは、単にB物体の温度一定の状態に加熱するのは効率が低い。

しかしA物体でB物体を図1 aのように向流形式で加熱するさいは、もしA物体とB物体の重量と比熱が等しいときに限り、ちょうど向流形式熱交換器のようになつ

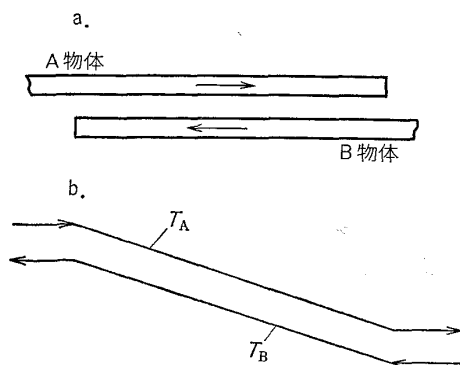


図 1 向流形式加熱による省エネルギー

て互いに同図bのように熱を交換し得る。

このときの効率 η_1 は向流熱交換器の温度効率と同じになり、理論上、理想的には $\eta_1 = 1$ となりうる。

實際上、この方法を具体化すると、たとえば図2のように鏡面だえんトンネルの焦点上を、向流で加熱側物体と被加熱物体を通し、ふく射伝熱で熱交換するホットチャージラインが考えられる。

また両者が同種の物体の場合；たとえば検査などのために低温とする必要があるビレットなどのようなときはトンネル内をU字型に通して出し入れして熱を回収することが考えられよう。

この線から将来の鉄鋼プラントの設計にたいしては、流動路を整備して製品や鉱滓などが互いに向流熱交換して従来の冷却プロセスにおける放熱を直接別の加熱プロセスに使用できることが最も必要となる。

2.4 熱の発電や動力化利用の効率

ついでA物体のもつ廃熱を動力化しようとする、その熱効率は従来の熱力学的サイクルの考え方と異なってくる。今までのサイクルはたとえばカルノーサイクルのように一定温度の高温源と低温源とを考えていたのであるが、物体の温度は熱供給とともに低下するので一定温度として考えているわけにはいかない。そのため図3のように、A物体が最初の温度 T_1 から大気温度 T_0 まで冷却される間にすべての温度レベルで微小カルノーサイクルを連続的に動かすときに最大出力が生ずることになる。このさいの最大仕事 $W_{\max}$ はA物体の比熱 $\bar{C}_p$ が一定として、微小サイクルを積分することにより

$$W_{\max} = \int_{T_0}^{T_1} \frac{T - T_0}{T} dq = \bar{C}_p \cdot M_A \cdot \left[(T_1 - T_0) - T_0 \ln \frac{T_1}{T_0} \right] = \bar{C}_p \cdot M_A T_0 (x_0 - \ln(1+x)) \dots\dots\dots (4)$$

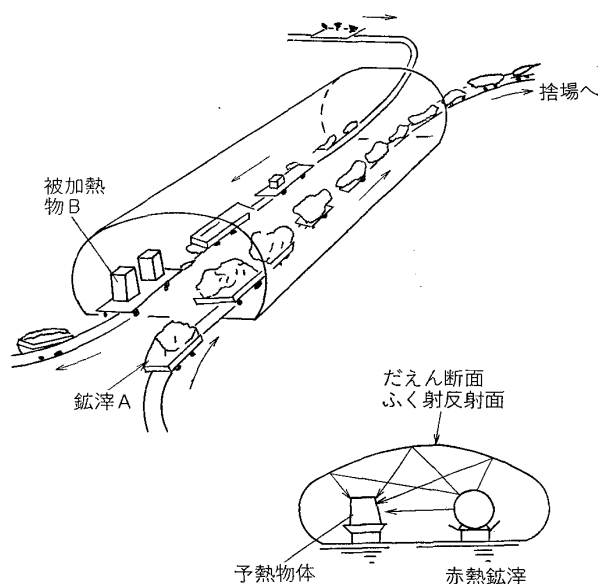


図 2 対向流動だえんふくしゃトンネル(案)

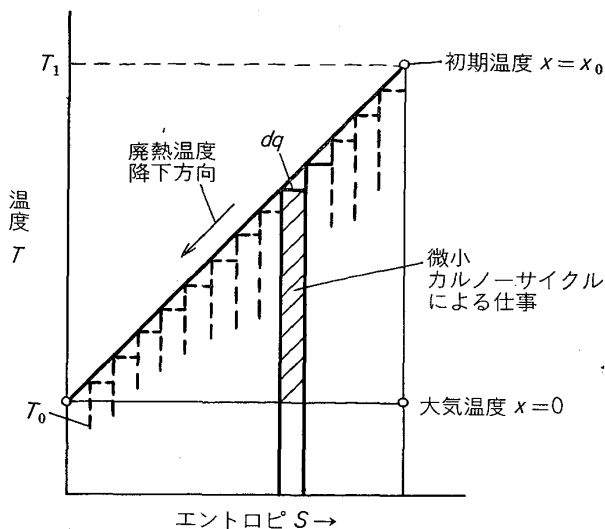


図3 無限段カルノーサイクルによる廃熱利用動力化

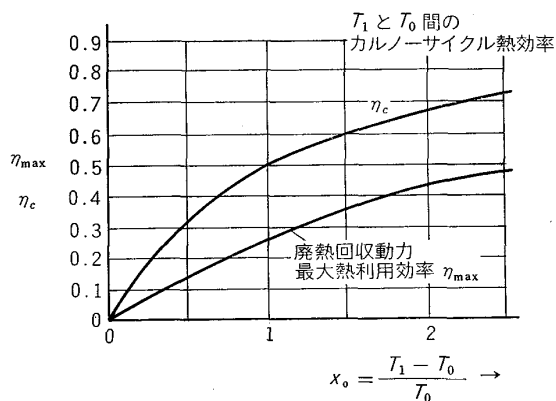


図4 最高、最低温度間のカルノーサイクルと廃熱回収エクセルギーサイクルとの効率比較

となる。ここで、 x_0 は

$$x_0 = (T_1 - T_0)/T_0 \dots\dots\dots (5)$$

なる初期温度差と大気温度との比である。

この $W_{\max}$ の値より、さきの (2) 式による熱量にたいしこの廃熱回収機関の最大熱効率 $\eta_{\max}$ は

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{1}{x_0} \ln(1 + x_0) \dots\dots\dots (6)$$

となつて、 x_0 の値にたいして $\eta_{\max}$ の値は図4のようになる。このようなサイクルで取り出せる動力は、最大可使動力、もしくはエクセルギ (Exergy) という呼び名で呼ばれるものであつて、いわばエクセルギサイクル効率というべきものである。

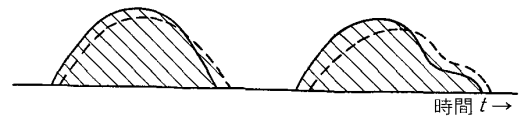
さて一方において、初期温度 T_1 と大気温度 T_0 との間の在来カルノーサイクル熱効率 η_c は

$$\eta_c = 1 - \frac{T_0}{T_1} = \frac{x_0}{x_0 + 1} \dots\dots\dots (7)$$

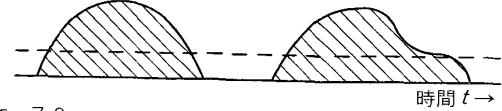
であるので $\eta_{\max}$ と η_c の関係は

$$\frac{\eta_{\max}}{\eta_c} = \frac{1}{\eta_c} \left[1 + \frac{(1 - \eta_c)}{\eta_c} \ln(1 - \eta_0) \right]$$

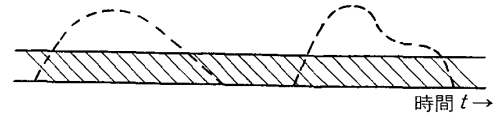
a. ケースA



b. ケースB



c. ケースC



—— 廃エネルギー

----- 回収動力

図5 エネルギーの蓄積の諸ケース

$$= \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \eta_c + \frac{1}{12} \eta_c^2 + \frac{1}{20} \eta_c^3$$

となつて、エクセルギサイクルは同一初期温度のカルノーサイクルの効率の約 1/2 である。そもそもエクセルギサイクルの実現は難しく、通常、単一の媒体でランキサイクル等を行なわせるので効率はさらに小さくなり、そのサイクルをできるだけ図3の場合に近づけることが最大出力を得るものとなる。

2.5 エネルギー蓄積の利用

廃熱利用など省エネルギーののさらに高い段階として考えられるのが、熱や動力などの廃エネルギーを一たん何らかの形で蓄積しておいて後でそれを使用する場合である。

この利用には、図5(a)に示すように、廃エネルギーと利用エネルギーがほぼ同一の位相周期の場合、(ケースA)にたいして、同図(b)のように廃エネルギーの変動が大きく、出力側がそれを平均化して使用する場合(ケースB)と、同図(c)のように利用側がピーク変動が大きくて、それに対処して、エネルギーを貯める場合(ケースC)の3つのケースがある。

たとえば在来の揚水発電はケースCに属し、また将来の太陽熱発電はケースBに属すると考えられる。

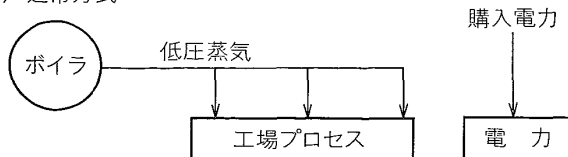
工場排熱利用においても、たとえば間欠的な炉の使用に対して出力を一様に取り出す場合や、連続的廃熱にたいして間欠的な動力供給を行なう場合の両ケースが考えられる、このようなエネルギー蓄積については、単なる蓄電池や揚水によるもの以外にフライホイール、濃度差など多くの方式が考えられるが一長一短がある。

これらの技術については第6章で示すこととする。

2.6 トッピングサイクルによる省エネルギー

以上のように相対的に低温の廃熱となつた状態でエネルギー回収を行なう場合以外に、たとえば工場用加熱蒸気のように比較的低温蒸気を大量に必要とする場合、その蒸気を図6(a)のように単に蒸気ボイラで送るという

(a) 通常方式



(b) トッピング方式

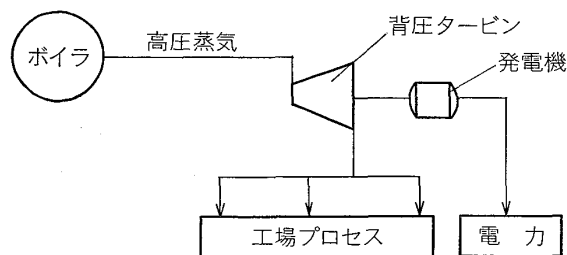


図 6 トッピング方式による省エネルギー

方式よりも同図(b)のように、さらに高压の蒸気ボイラタービンによるトッピングサイクルで一たん発電をし、その背圧で工場に蒸気を送るといいうゆる背圧タービンシステムを行なうことによつて、発電される電力を工場内で使用して購入する電力分を減らし、全体として省エネルギーとなるシステムが考えられる。

この方式は、工場での蒸気使用と電力使用のバランスがよい場合には必ず経済的となるので米国のERDA*(エネルギー開発庁)などでもトッピングサイクルプロジェクトとして省エネルギーコンビナート実現の調整が始まっている。(※現 DOE)

3. 熱媒体による動力化

3.1 廃熱利用に向けた熱媒体

各論の始めとして熱媒体による動力化を考えよう。そもそも廃熱利用を行なつて熱媒体やヒートポンプなどを作動させる熱媒体作動流体としては、蒸気(工場内蒸気や廃熱ボイラ蒸気)や空気、フロンなどたくさんのものが考えられ、ケースバイケースに選定されるべきものであるが、ここでは一般論としてどのようなものがよいかを考察したい。

これらの熱媒体にはつぎの性質が要求される。

- (a) 比熱 C_p 潜熱 L が大きいこと。
- (b) 適用温度範囲で適当な蒸気圧を有すること、これにより過大なタービン圧力、過大なコンデンサ真空、などを必要としないこと。
- (c) 熱伝導率 λ が大きくて粘性が低いこと。
- (d) 安定で分解しないこと。
- (e) 腐食性低くかつ不活性であること。
- (f) 毒性、放射性、引火性のないこと。
- (g) 輸送しやすく、かつ高圧ポンプ、真空ポンプ、デューワービンなどを要することなく保存蓄積ができること。

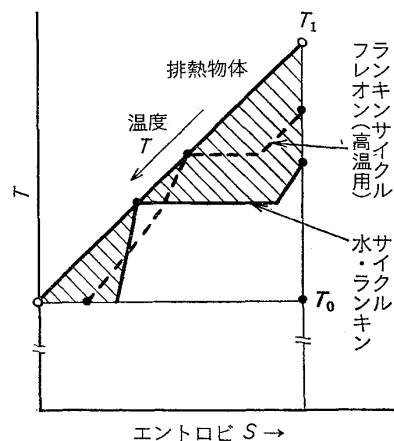


図 7 水とフロン等によるランキンサイクルのT~S線図比較

と。

(h) 入手しやすく、低価格であること。

などである。

これらの要求に応じて考えられる熱媒体とそのサイクル候補にはつぎのものがあろう。

(A) 液体とその蒸気によるランキンサイクル: 水、特殊流体(フロン、プロパン、アンモニア、 CO_2 など)によるランキンサイクル

(B) ガス: 空気、 N_2 、 H_2 、 CO_2 などによるガスタービンサイクル

(C) 溶液(濃度差システム用): 塩類水溶液、アンモニア水溶液による濃度差サイクル

3.2 ランキンサイクル媒体の特性

ここではまずランキンサイクルを行なう媒体について考察する。

(A) 水: 水は上記の要求する性質のほとんどすべてをよく満足するため、廃熱利用の熱媒体としては従来より、いわゆる廃熱ボイラ、タービン使用ランキンサイクルシステムとして、第一にとり上げられて来たものである。しかし水ランキンサイクルシステムは、低温の廃熱利用においては次の欠点を生ずる。

(1) 動力化において水の潜熱の大きいことが、かえつて廃熱の利用効率を下げる。すなわち、水による廃熱利用ランキンサイクルはT~S(エントロピー)線図上において図7の実線のようになり、図3の示す理想的な無限段ランキンサイクルからは遠ざかつて来てハッチングしたところがエントロピー損失となつてきている。

(2) 蒸気は低温において蒸気圧、密度ともに過小となつて、そのため配管、低圧タービン、コンデンサ、などがいずれも巨大となる。

以上の欠点があるが、水~蒸気系は、水が入手しやすく、熱輸送上の容量が大きく、装置が製作しやすく、経験も豊富である等々の理由で廃熱の回収のために、まず一考するべきであり、後述の濃度差システムなどと、ハ

表1 廃熱回収用流体の例

名 称	分子式	分子量	沸点°C	臨 界 圧 kg/cm ²	臨界温度 °C
フルオリノール-85 (水と混合)	CF ₃ CH ₂ OH	87.7	73.8	—	—
トリクロロモノフルオロメタン	CCl ₃ F	137.4	23.7	43.2	198
デクロロテトラフルオロエタン	C ₂ ClF ₄	170.9	3.6	32.2	145.8
トリクロロトリフルオロエタン	C ₂ ClF ₃	187.4	47.6	33.7	214
クロロペンタフルオロベンゼン	C ₆ Cl ₅ F	203	115	32.7	291.5
ヘキサフルオロベンゼン	(C ₆ F ₆)	186	79.4	32.6	243
パーフルオロクロロベンタン	(C ₆ F ₁₀)	250	20	24.1	137.2
パーフルオロメチルクロヘキサン	(C ₇ F ₁₀)	350	76	23.0	213.2
パーフルオロデカリン	(C ₁₀ F ₁₈)	460	142.2	25.6	293.2
ダイフロン (フレオン) R-11	CCl ₃ F	137.4	23.7	44.6	198
〃 (〃) R-12	CCl ₂ F ₂	120.9	-29.8	41.4	112
〃 (〃) R-13	CClF ₃	104.5	-81.5	39.4	28.8
〃 (〃) R-21	CHCl ₂ F	102.9	8.92	52.7	178.5
〃 (〃) R-22	CHClF ₂	86.5	-40.8	50.3	96
〃 (〃) R-112	C ₆ Cl ₃ F ₃	203.8	-92.8	35	278
〃 (〃) R-113	C ₂ Cl ₂ F ₄	187.4	47.7	34.8	214.1
〃 (〃) R-114	C ₂ Cl ₂ F ₄	170.93	3.6	33.2	145.7
エタノール	C ₂ H ₅ OH	46.1	78.3	243.1	65.2
ベンゼン	C ₆ H ₆	78.10	80.1	196	44.3
イソプロパノール	(CH ₃) ₂ CHOH	60.1	82.3	—	—
n-ペンタン	CH ₃ (CH ₂)CH ₂	72.2	36.1	197	34.1

イブリッドされて用いられるべきである。

(B) フロン系流体 (フレオン、プロパンなど): 廃熱を回収して動力化するフロン (フレオン), プロパンなどの低沸点特殊流体を計画するケースがますます増加しつつある。これらは, 低温域で密度が大きいので機器や配管がコンパクトになるとともに潜熱に比べて相対的に顕熱が増すので T~S 線上で, 図 7 の点線のようになり, 水の場合よりエントロピー損失が少なくなるので, 熱回収動力化効率が増すと考えられる。しかし, これらのフロンは一般に

(1) 高温で不安定である (フレオンは 130°C くらいから上で分解しやすくなる)

(2) 漏れに対する補給が必要である。

(3) 熱伝導率 λ が低いので密度が大きいわりには熱伝導率が上昇せず, とくにフレオンボイラとコンデンサの熱通過率が低い。

などの欠点もあるが, タービンや配管はコンパクトになる。

とくに最近各所で提唱されている フルオリノール 85 というフロン系の流体は 350°C くらいまで安定であつてフロンタービンの作動流体としてたくさんの特徴を持っているとされ, 後章に示すような実例もある。

これらのフロンを含めた熱媒体の代表例の分子式や分子量, 沸点等を表 1 に示して参考としたい。

4. フロンタービンなどの技術の開発例

4.1 動力回収の現状

フロンタービンや蒸気タービンなどを用いて廃熱から動力回収を行なうことに関しては, 筆者らが船用ディーゼル機関で以前行なつた廃熱回収や, 最近の米国における

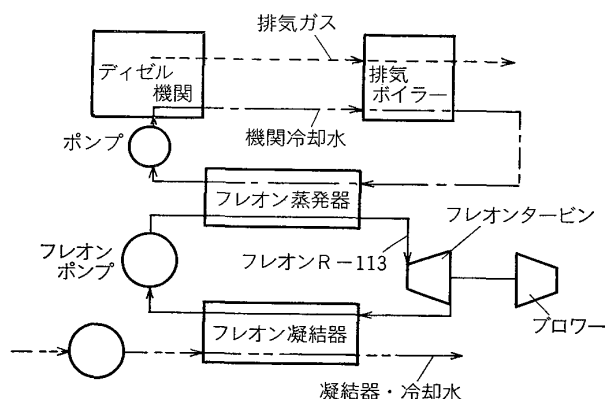


図 8 デイゼル廃熱フレオンサイクルフローチャート

試験研究など, 主として実験的な例が多く存在し, とくに米国ではフルオリノール 85 を使用するパッケージ型廃熱回収装置の開発などが行なわれている。また, とくにフロンや水蒸気用の小出力エキスパンダーの開発研究も極めて活発である。それらはまだいずれも本格的な実用段階には到っていないが, 近いうちに実用になると思われるので, ここではその幾つかを紹介しておきたい。

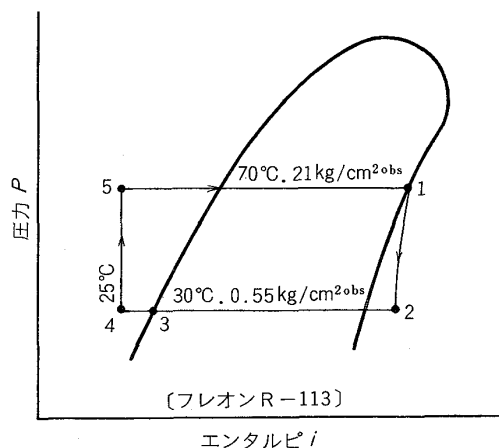
4.2 フロンタービン実験例

1) フレオン 113 による動力回収例として, 新潟鉄工が主となつて行なつた約 1 000 PS の船用ディーゼル機関の排気熱よりの動力回収実験例がある。

これは図 8 にそのフローチャートを示すように, ディーゼル排気ガスよりまず一次水を保有する排気ボイラに熱をうつし, それより二次媒体としてのフレオン 113 にフレオン蒸発器にて熱を伝えるとともにフレオン蒸気を発生してタービンを回すもので, 一次水では機関冷却も行なっている。

このさいのフレオンの $p \sim i$ (圧力エンタルピ) 線図は図 9 に示すようであつて、上下わずか 40°C の温度差のランキンサイクルを行なわせている。また図 10 にこのさいの装置の側面図を示す。

この実験によつて実際上約 80 PS の動力が回収されることが示され所期の目的を達したが、まだ熱工学的に洗練されていながつたのでシステムが複雑でかつ巨大となつたのでその後の研究は中断された。しかし、この実験の結果僅か 40°C の温度差でも十分動力が発生できることが実証され、その後の低温度差熱利用に対して大きな



1. タービン入口 (蒸発器出口)
2. タービン出口 (凝結器入口)
3. 凝結器出口 (過冷却器入口)
4. 過冷却器出口 (ポンプ入口)
5. ポンプ出口 (蒸発器入口)

図 9 フレオンサイクルの $P \sim i$ 線図

希望が与えられる基となつた。

2) 廃熱利用 600 kW ボトミングサイクル機関例

米国では工場やごみ焼却の廃熱を利用して動力化するサイクルをボトミングサイクルと称して、ERDA 及び民間で熱心な研究が行なわれている。

この例はイリノイのサンドストランド社が提唱しているトルエン使用の図 11 に示すようなシステムでコンデンサー内にトルエン予熱器を設けたことと、廃熱入口に直接トルエンスーパーヒーターを使用することに特長があるが、大略はいわゆる単一流体ランキンサイクルの原理と同一である。

同社のものは 600 kW 程度のボイラ・タービンを単位大きさのプレハブのパッケージユニットとして、工場廃熱、ディーゼル廃熱、ガスタービン廃熱、ごみ焼却廃熱を対象として、1980 年には実用品として完成させる計画であり、すでに初期実験が実施の段階にある。

なお同システムは 315°C から 425°C までの廃ガスを対象として設計され、熱効率 20% 以上を考えているとしている。またコスト計算によれば、まず廃熱の温度に対しては図 12 のように約 400°C 以下で急激にコストが上昇し、また廃熱の熱量に対しては、図 13 のように約 $3 \times 10^6 \text{ kcal/h}$ 以下ではやはりコスト高となるとしている。この計算の結果は概念的に他のランキンサイクル動力回収機関にもあてはまると思われる。

3) 水～フロン二重サイクル機関例

また他の例として ERDA のプロジェクトとして、ニューヨークのメカニカルテクノロジー社などが研究を開始しているものに、図 14 にそのダイアグラムを示すよ

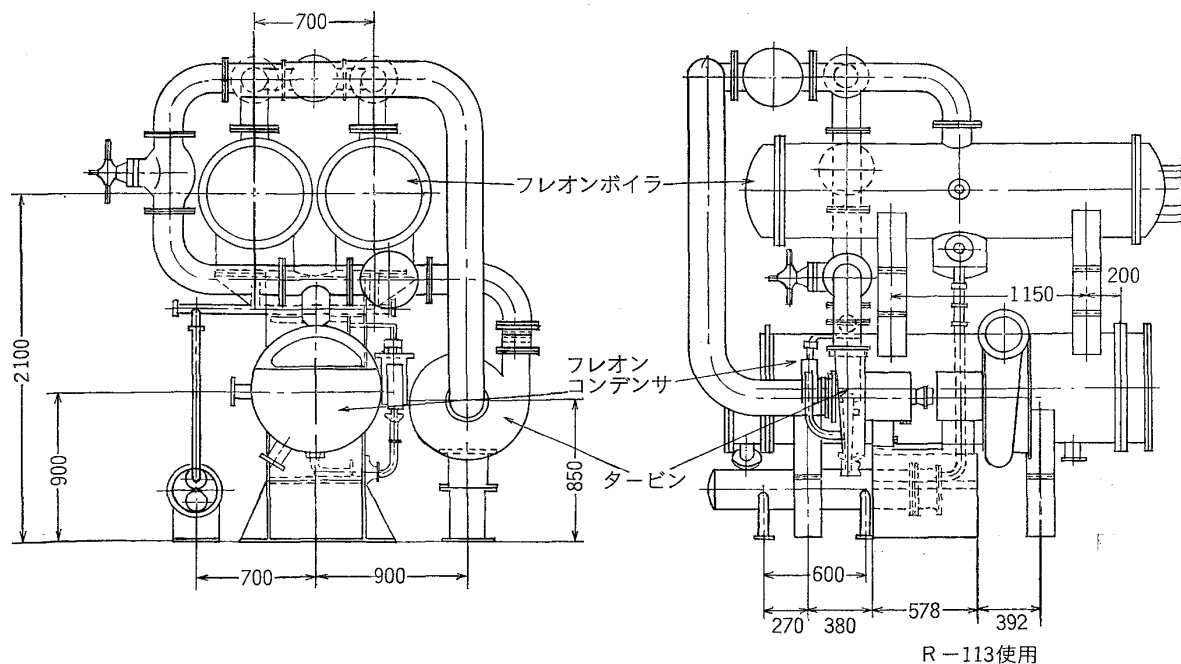


図 10 フレオンタービンによる動力回収実験装置側面図

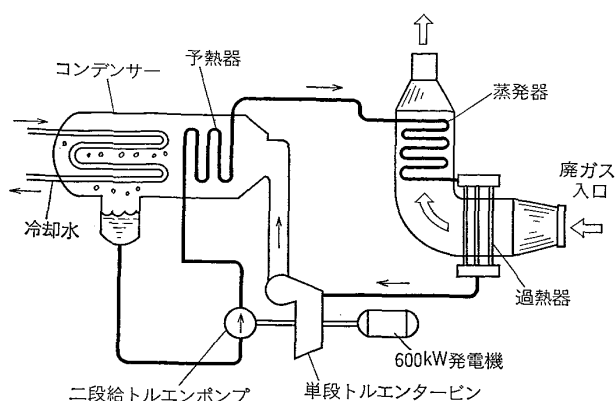


図 11 600 kW トルエンタービンサイクルの概念図

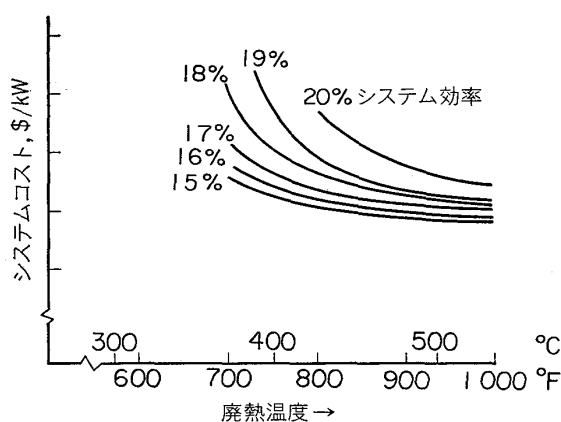


図 12 廃熱温度に対するシステムコストの変化

うな、水〜フロン二重ランキンサイクル機関システムがある。図のものは約 270°C くらいの廃熱より、まず通常の蒸気ボイラで 227°C 、 $2.7 \text{ kg/cm}^2 \text{ g}$ の過熱蒸気を発生し、ほぼ大気圧の背圧で排気蒸気をフロンボイラ加熱に使った後、再びリサイクルされる。またフロンボイラより生じたフロン蒸気は 88°C 、 $5 \text{ kg/cm}^2 \text{ g}$ であつてフロンタービンを駆動してからほぼ大気圧で背気となつてリサイクルされる。

このシステムの特長は二重サイクルであるので効率が良好で廃熱の 20% 以上の動力回収を目指していることと、エキスパンダーとしてラジアルタービンを使用していることである。

ラジアルタービンはとくに小型（数百 kW から 1000 kW、くらい）で他より効率がよく、かつ、構造簡単でコンパクトとなり得る可能性があるので、その領域の動力再生用エキスパンダーとして有望である。

4) 特殊エキスパンダーの開発について

まめな工場廃熱による動力回収には大出力のものより局所的に直接動力となる小出力のものの方が期待度が高い。

その線でまずネックになるのは、小出力、とくに、数 kW から数百 kW くらいの領域で高効率で低価格のエキ

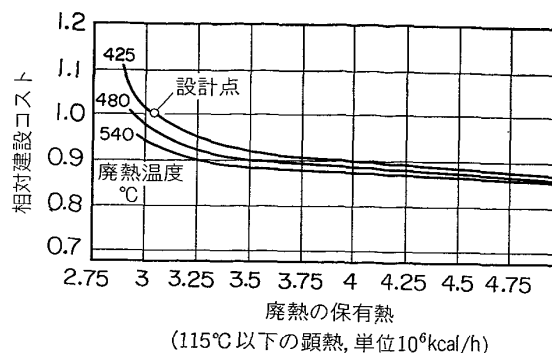


図 13 廃熱流量によるシステムコストの変化

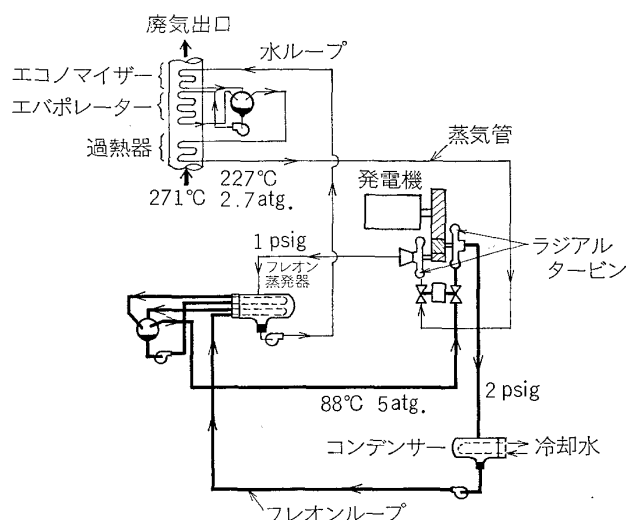


図 14 廃熱回収のための水-フロン二重サイクル機関線図

スパンダーがあまり存在しないことである。

この領域がこれからの省エネルギー研究には益々盛んとなつてくると思われ、さきに示したラジアルタービンの利用などもこの方向である。

ここにさらに他のエキスパンダー研究についても触れたい。

(a) 空気モーターの転用；筆者らはハンドドリル用の空気モーターを改良して蒸気タービンとする研究を行なつた。その結果、蒸気通路を若干大きくすること、油を蒸気に混入させること、および、スタート時の水撃とかじりを避けるため電気ヒーター等で予熱すること、などを行ない、蒸気でもよく作動することがわかつた。

ただし 2 kW 機でも効率は約 20% 内外であり、あまり高効率は期待できない。

(b) ロータリーエキスパンダー；カナダのレークヘッド大のロビンソン氏は図 15 に示すような四翼三葉のバンケルエンジン型のロータリーピストンを有するスチームエキスパンダーを開発して、蒸気により静粛かつ良好な作動をすることを示している。なお同図のものはカットオフの調整ができるようになってい

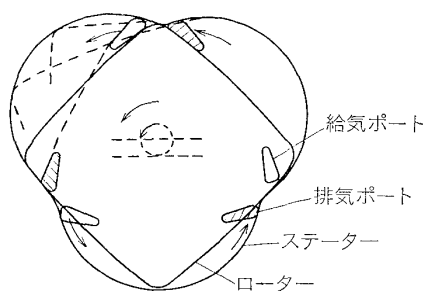


図 15 ロータリーエキスパンダー例

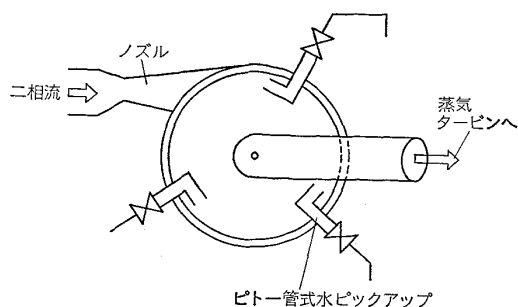
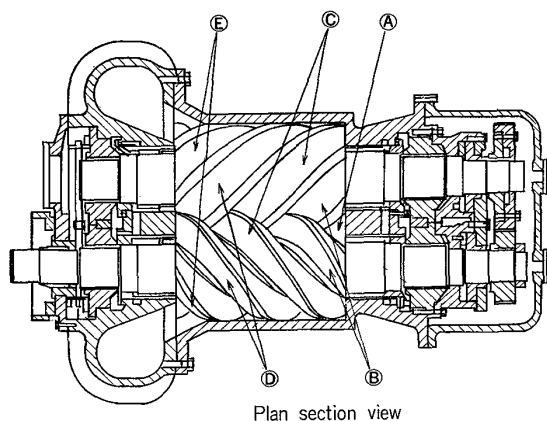
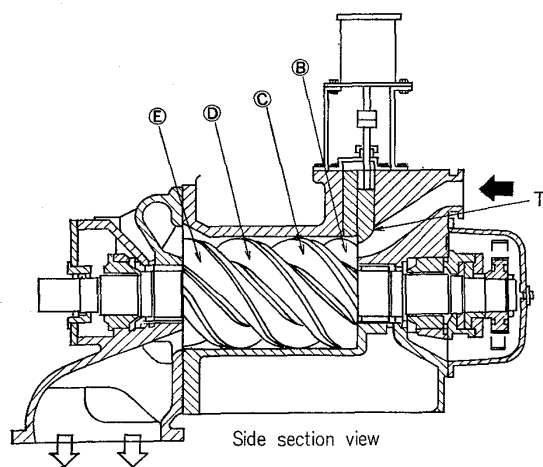


図 17 円筒内面セパレーター



Plan section view



Side section view

図 16 並列スクルーエキスパンダー

(c) スクリュー式エキスパンダ; パサデナのジェットプロパルジョンラブでは、図 16 に示すような並列スクルー式の 50kW エキスパンダーを実際に試作して、野外での使用実験に成功している。この特長は二相でもよいことである。

(d) 二相流タービン; 低温度でのランキンサイクルではかなり湿度の高い二相流がタービン入口に入ってくる場合が多いので二相流をそのまま扱えるタービンが期待される。

二相流タービンとして完成されたものは少ないが、考え方としては二相を分離して蒸気タービンと水車にするものが普通である。とくに図 17 のように、同筒の内面

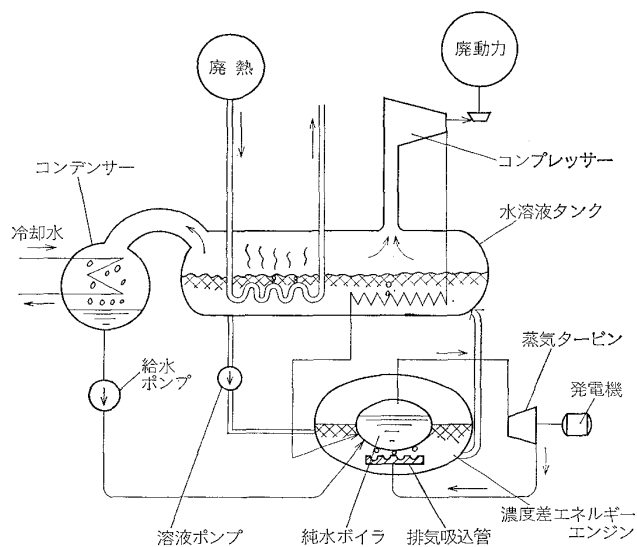


図 18 濃度差エネルギーシステムとエンジン

に二相を吹いて気液の分離をすると同時に水をピトー管で外部へ排出させることにより、水ポンプの節約を行う方式もある。

5. 濃度差エネルギーシステムによる熱回収の提案

5.1 濃度差エネルギーシステムとは

筆者は、塩類水溶液の濃度変化のさいの物理化学的ポテンシャル差、すなわち濃度差エネルギー、もしくは濃度エネルギーによつて廃熱や廃動力のエネルギーを回収蓄積するシステムについて提案してきた。

このシステムの原理は図 18 に示すように、大きな水溶液タンクにためられた濃い塩類水溶液を中心的な個動流体として廃熱などによつて、その水溶液を加熱蒸発させて濃い水溶液に濃縮し、また廃動力によつては圧縮機を駆動して蒸気を抽気することによりやはり水溶液の濃縮を行ない、その濃くなった水溶液によつて一方に配置した濃度差エネルギーエンジン(もしくは塩水エンジン)を動かし発電しようというものである。

この濃度差エネルギーエンジンとは、同図右下に示すように、沸点近傍の水溶液、たとえば 150°C のリチウ

ム塩水溶液の中に通常の純水ボイラを浸漬しておくことにより、ボイラ水の方が沸点が低く、約5気圧の蒸気を発生するので、それによつて蒸気タービンを回し、その排気蒸気を1との水溶液の中に吹き込んで吸収発熱させるもので、この吸収発熱によつてボイラ蒸気は連続的に発生し、水溶液が十分薄くなるまで、エンジンが作動する。

5.2 濃度差エネルギーエンジンの開発

筆者らは、このシステムを実証するため、図19に示すようなダイアグラムを有する1kWクラス濃度差エネルギーエンジンを試作してその実験を行なつた。図20にその実験結果の例における各部温度や圧力の経時変化を示す。ただしこの実験は一度濃縮した水溶液を全く再濃縮することなく一回だけエネルギーを放出させたバッチ運転の例であつて、そのため時間とともに温度、圧力が低下することが、かなり長時間にわたつてエンジン

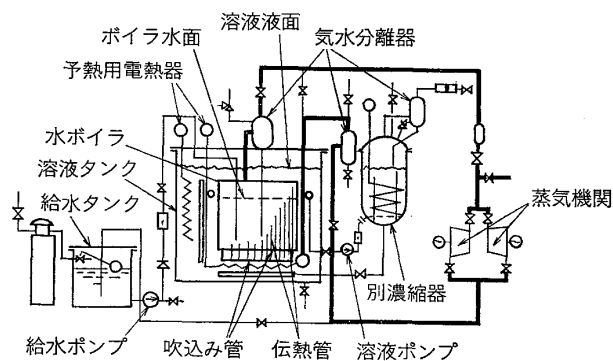


図19 1kW級濃度差エネルギー機関

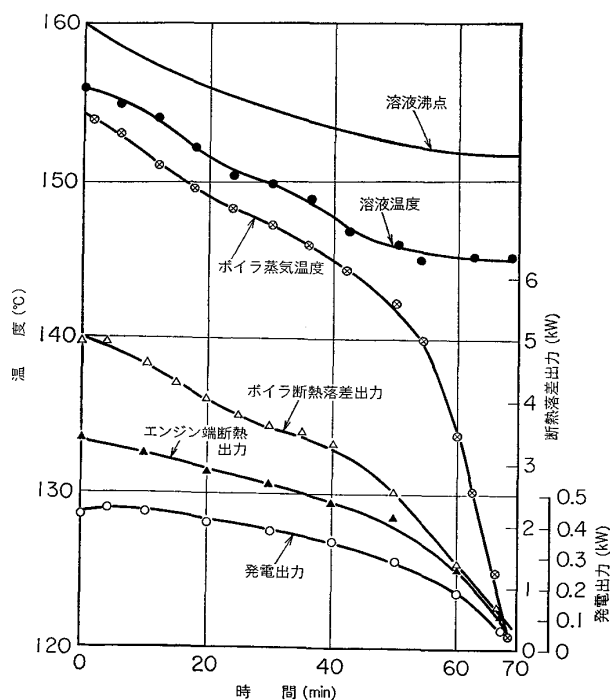


図20 1kWクラス濃度差エネルギー機関の実験例

が作動することがよく示されている。またボイラ蒸気温度は水溶液の沸点より約5°C~10°C低い程度であつていわゆる相当ボイラ効率は約90~75%くらいの好成績を示している。これは吹き込み蒸気によつて熱伝達が活発になるからである。

このような一連の研究の結果、濃度差エネルギーエンジンそのものは性能的には十分実用化できる範囲のものであることがわかつた。このさい使用した溶液はリチウムとカルシウムの塩化物の約1:3ないし3:2のはんいの約60%混合水溶液であつて、それに適する材料はリン青銅であり一ぱんに銅系統の合金を使用すれば比較的低価格で製作できる。

5.3 水溶液による動力の蓄積量

さて、一般に水溶液の濃度差による動力の蓄積可能量は、その水溶液の各濃度における沸点上昇と密度及び吸収発熱量さえわかれば理論的に計算できる。このさい近似的なクラペイロン・クロージュスの式を利用すると、沸点上昇がわかれば吸収発熱量は、純水の蒸発潜熱から計算できる。

いま図21に各種水溶液の濃度 m にたいする沸点と最大溶解点の測定値を示すが、強アルカリのNaOHが最も高く、中性塩のLi, Mg, Ca, Znなどの塩化物がそれについていることがわかる。他に H_2SO_4 , HNO_3 などの強酸もNaOH程度の高い沸点上昇を示すことは知られていて、一般に強アルカリ、強酸は沸点上昇も最大溶解度も高く、エネルギー量が最も大きい。しかし耐食材料に難点があるので、現在はやはりLi, Caなどの中性塩がよい。

また図22にNaOHと $ZnCl_2$ の性能を示すが、図には、濃度 m_f に対する沸点上昇 $\Delta T^\circ C$ 、濃度 $m=1.0$ から $m=m_f$ にいたるまでに吸収できる水蒸気量 G_l [kg/kg (dry 塩)], 最終濃度 $m=m_f$ における水溶液1kgおよび1lあたりに生ずる比吸収発熱量 Q_w [kcal/kg ($m=m_f$ 溶液1kg)] および Q_v [kcal/l ($m=m_f$ 溶液の1l)] およびそれを可逆カルノーサイクルで動力化したときの理論的な比動力発生率 P_w [kWh/t ($m=m_f$ の溶液1t)], および P_v [kWh/m³ ($m=m_f$ の溶液1

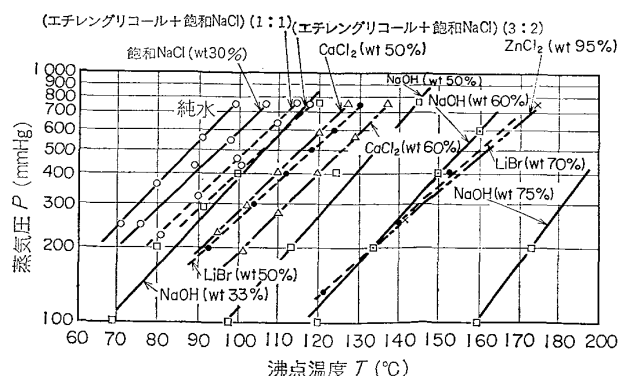


図21 種々の溶液の飽和蒸気圧線図

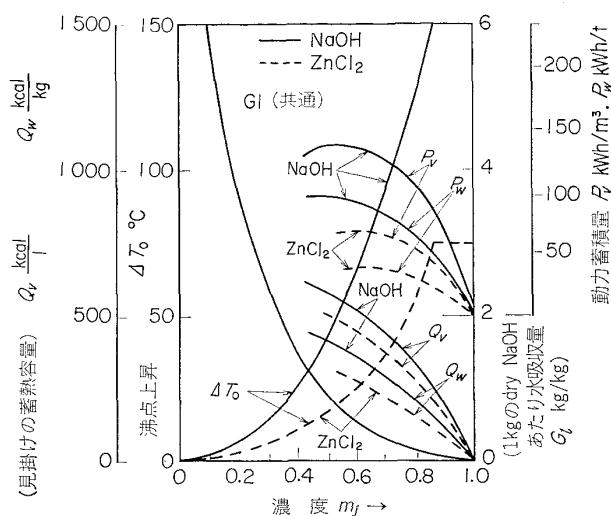


図 22 NaOH と ZnCl_2 水溶液の沸点上昇, ΔT_b , 見かけの蓄熱容量 Q_v , Q_w , 比動力蓄積量 P_v , P_w , および水吸収量 G_l

m^3], の値が示されている。

図により, とくに P_v , P_w の値は $m_f=0.5$ 付近で最大となり, その最大値は NaOH において, 約 100kWh/t , ZnCl_2 において約 50kWh/t であることが示されている。

NaOH が保持しうる動力値は, 鉛バッテリーの保持し得る動力量の理論値 $P_w=120\text{kWh/t}$ とほぼ同一オーダーである。なお鉛バッテリーの今までの実験値はその3分の1くらいである。また LiCl と CaCl_2 の混合中性塩の水溶液は ZnCl_2 よりやや大きい理論値を示し, 理論的な最大の P_w は約 60kWh/t である。

それに対しさきの図 19 による実験装置により, 実験値として約 20kWh/t なる熱蓄積量が実現されている。

この値は今後水溶液の沸点上昇濃度範囲をさらに拡大し, かつもつと熱伝達性能のよい伝熱面を使用することによつて約 $30\sim40\text{kWh/t}$ くらいに上昇させることは可能であると考えられ, その値はほぼ実際の鉛バッテリーの到達値に近いので, 水溶液は鉛バッテリーと同等のエネルギー蓄積量があると考えてよい。

5.4 濃度差エネルギーシステムによる廃熱動力回収

これをしようとするとき, まずはさきの図 19 のような方式が考えられるが, ただ一般では熱効率が低いので, 一般には多段濃縮によつて広い温度範囲の水溶液を濃縮し, それを中央のタンクに集結して1段の蒸気タービンで動力化することが考えられ, 熱効率と出力の増大が計られる。ただしシステムが複雑化する欠点がある。

また別の方式として, とくに $80^\circ\text{C}\sim100^\circ\text{C}$ の熱水を対象としたとき, 図 23 に示すように熱水からフラッシュボイラで蒸気を発生させ, その蒸気を冷却水を注入するコンデンシングインセクタに投入して真空を生じさせその真空によつて水溶液の濃縮を行なわせる方式が考えられる。

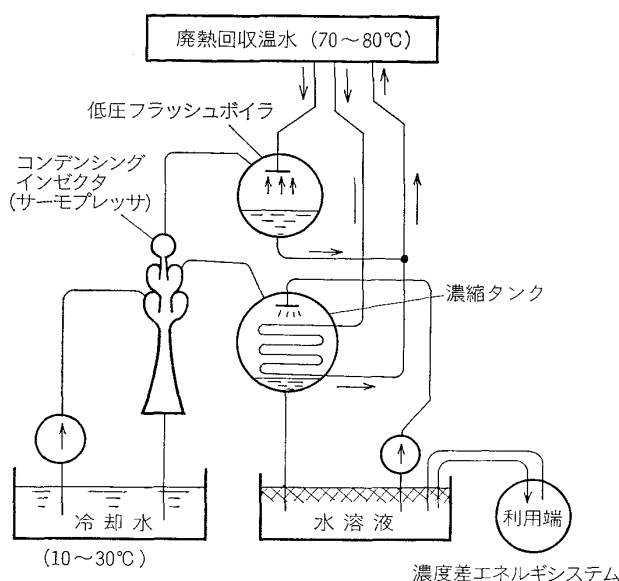


図 23 低圧コンデンシングインゼクタによる水溶液の濃縮

筆者らの計算によると濃度差エネルギーシステムは単純な蒸気ランキンサイクルに比べて伝熱面積が増すので 1kW あたりの建設費は約 50% ないし 100% 増すが, その代りエネルギーの蓄積量が増すので, エネルギーの蓄積を考える段階では十分有利となる。

またこの方式ではそのままでもフロンタービンを使用するランキンサイクルシステムとほぼ同一価格であり, その廃熱発電は在来方式の太陽熱, 風力, 海洋熱等による発電よりは十分低価格であることも示された。

6. エネルギーの蓄積技術

6.1 各種のエネルギー技術

省エネルギーの最も高次と考えられる段階はエネルギーを蓄めておいて時間的・空間的に融通しあうためのエネルギー蓄積技術の応用である。

現在省エネルギーに使用できるようなエネルギー蓄積技術, とくに動力の蓄積には, つぎのような諸方式がある。

(a) 蓄電池; これは鉛バッテリーやアルカリバッテリーによる在来方式のエネルギー蓄積方式で, すでに技術的には確立されているのであり, 現在直ちに高信頼性で実用化できる唯一のものである。

しかし, 電池の価格が高いこと, 充電時間が放電時間に比べて長いこと, 瞬間放電能力が低いこと, などにおいて欠点があり, 大容量のエネルギー蓄積には必ずしもすぐに利用できない。

(b) 揚水による水力蓄電; この方式もすでに多くの電力網において実現されている所であり, 大きな揚水池と可逆ポンプタービン発電機があればよいが, 水 1トン 当たり蓄積できるエネルギー量が小さいので, 大量の水と高いヘッド差を必要とし, また工場や都市でのエネ

ルギー蓄積に向いていない。

(c) 蒸気アキュムレーターによる蒸気蓄積；この方式も従来の工場用蒸気や火力発電などで動力や加熱用のエネルギー蓄積に利用されていたものである。

この方法は蒸気圧力が高い程エネルギー量が多いので火力発電や自家発などで使用するのは大へん好都合である。

しかし、低温の廃熱利用に対しては蒸気圧力が低いので容量が小さくなり、かつ圧力が大きく変動する点が欠点である。

しかしアキュムレーターは少くとも極めてクリーンであり、かつ在来技術が十分確立していないので、今後他の方式と一しよにハイブリッドで利用されるのが好ましい。

(d) 顕熱や融解熱による熱の蓄積；低温の熱エネルギー蓄積に対しては従来より水や岩石の顕熱（比熱）による方式が用いられ、とくに冷暖房に向いている。しかし動力用の高温エネルギーに対してはそれで不十分で、 NaSO_4 、 CaSO_4 など多くの無機塩類の単体や混合物融解熱の使用が盛んに試みられるようになって来た。

(e) 可逆化学反応による熱の蓄積；たとえば CaO と H_2O が反応して Ca(OH) になるさいは吸熱し、逆作用で発熱するこのような可逆反応熱を使用する方法がやはり最近多く考えられている。 SO_3 が SO_2 と O_2 に分かれる反応も研究されている。

(f) 水素エネルギーシステムによる蓄積；これはよく知られているようにあらゆるエネルギーを一たん水素に変化した後、その水素をポンプ、金属水化物、液化水素などに蓄積するもので、さらに適当な炭素原料があれば、それと重合してメタノール、エタノールなどにする場合も考えられるものである。

この水素エネルギー方式はクリーンでスマートではあるがまだ個々のプロセスの効率が低く、かつ高価格すぎるので実用化にはかなりの時間がかかりそうである。

(g) フライホールによる動力蓄積；これはコマを巨大にしたようなフライホールを廃動力にて回転し、適宜効力を取り出そうというものであり、自動車用や、発電所でのピーク蓄積に使用されるための研究が盛んである。しかし工場の動力蓄積用としてはまだ十分な研究は行なわれていない。しかし機械のブレーキ動力のような特別な廃動力の出入には向いているのでこまめな省エネルギーには大いに研究される必要がある。

(h) 濃度差エネルギーによる蓄積；これはさきの第5章にて説明したように、水溶液等の濃度差で熱及び動力エネルギーを蓄積しようとするものであつて、システムとして比較的複雑であるが、溶液と材料の選定にまだ研究段階がある。しかし多種類の廃熱や廃動力を統一的に扱える点と、現在の技術でハードの設計ができる点に魅力があろう。

(i) その他；その他たとえば地下空洞やポンプに圧縮空気をつめる空気圧方式やバネ・ゴム等の弾性体を使用する方式などがあるが工場の省エネルギー的ではないので割愛したい。

6.2 エネルギー担体の比較表

いま前節の各種エネルギー担体の比較として、一次及び二次エネルギー種類、使用温度単位重量、容積にあたり比動力、などを表2に示して参考としたい。

7. 廃熱利用のまとめ

7.1 廃熱の温度分類

以上の廃熱利用を総合すると廃熱の温度と形態によってそれに適する利用方式が分れることがわかる。筆者の考えによるその分類はつぎのようなものとなる。

(a) 400°C 以上； 400°C 以上の温度範囲ではふくしやを含めた熱伝達も良好で熱負荷も大きくとれるので在来の水の廃ガスボイラで熱や動力を回収するのが最も容易であるが、なおセルフリカバーやホットチャージの熱源として僅かな経路変更や、熱交換器増設で利用できよう。

(b) 250°C ないし 400°C ；この範囲は蒸気およびフロンタービン（とくに耐高温フロン）の領域である。

(c) 150°C ないし 250°C ；この範囲は低温フロンやトルエン、ペンタン等の熱媒体タービンを使用することが考えられるが、同時に水溶液の濃縮に使用して濃度差システムによる回収も考えられる。

(d) $80^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ ；この領域は濃度差システムが最も向いている。とくに熱水の場合は前記のようにインゼクタコンデンサの使用がよいであろう。

(e) 80°C 以下；この領域は水-アンモニアの混合液のような低沸点媒体が使用できよう。

7.2 総合的利用について

廃熱はただ一ヶ所の廃熱利用だけで終わつては有効な活用ができない。有効な活用はつぎの注意が必要であろう。

① できるだけ多くの廃熱を集合させる。

② 多種類の廃熱、廃動力を同一システムに集めるように計つて装置の稼働率を増し、かつエネルギーの蓄積を考える。

③ もし必要があれば太陽熱、風力などの大自然エネルギーの補助的利用も考えられる。

④ 回収エネルギーの利用先を開発し、まず同一工場内での利用を有機的に考える。たとえば酸素製造、原料のホットチャージ、などあらゆる内部利用を考える。ついで工場外や地域への給熱、給動力等をも考慮する。また工場内の車輻運搬機等は廃熱で動かすようにすればよい。

7.3 廃熱の質の向上について

つぎに重要なことは廃熱自体の質の向上であつて、エ

表2 各種のエネルギー蓄積体の容量

エネルギー蓄積体名称	一次エネルギー (入力)	二次エネルギー (出力)	使用時 温度°C	蓄熱量 (発熱量)		蓄動力		全効率 %	水に対する 見掛け 比重
				kcal/kg	kcal/l	kWh/t	kWh/m ³		
石油 (比較のため) (燈油程度)	—	熱→動力	2000	1.0×10 ⁴	0.9×10 ⁴	5200	5800	△ 33	0.9
在来鉛バッテリー (容器, エンジン, トラクタ等) (含まず)	電力	電力	常温	—	—	110/40*	—	★ 60	—
水素エネ ルギー システム	液化水素 (容器含まず) 300 ata ボンベ入り (ボンベ 含む) 金属収蔵 (金属含む)	電力 (電気分解) もしくは 高温 (熱分解)	—253	2.8×10 ⁴	2×10 ³	15000	1050	★ 13	0.017
			常温	350	680	180	360	★ 23	2.0
			400	290	2300	150	1200	★ 21	5~8
回転体 (フライホイール, 本体のみ)	力学エネルギー	力学エネルギー	常温	—	—	100/72*	—	★ 72	8~9
圧縮空気 300 ata ボンベ入り (ボンベ含む)	力学エネルギー	力学エネルギー	常温	—	—	4.6	11	★ 60	2.4
揚水発電用水 (60mヘッド)	力学エネルギー	力学エネルギー	常温	—	—	0.2	0.2	★ 72	1.0
熱的蓄積	蓄熱水そう (水のみ)	熱→動力	常温+30	30	30	—	—	○ 90	1.0
	50 ata 蒸気蓄熱器 (容器含む)	熱	150~260	80~180	70~140	19~48	33~38	△ 64	1.2
	塩類融解熱 (Li+Na塩)	熱	360~450	—	—	130	250	△ 25	—
	生石灰水反応 (CaO+H ₂ O)	熱	400~600	300	—	100/60*	—	△ 18	—
	NaOH 水溶液	熱及び力学エネ ルギー	150~200	600	750	100/70*	130/100*	★ 50	1.6
濃度差蓄積	LiCl+CaCl ₂ (1:1) 水溶液	熱→	150~160	500	600	60/40	75/50*	★ 50	1.3

(備考) 蓄動力量における 100/60* などの値は前記理論値, 後が実測値を示す。全効率欄の★は電力 (あるいは動力)→電力を示す, △は熱→電力, ○は熱→熱を示す。

クセルギ理論などの示す通り、少しでも温度の高い廃熱ほどその出し得る動力が大きく、近似的には温度差の自乗に比例すると考えてよい。

そのため、①に高温と低温の廃熱を混合しないこと、②できるだけ高温の廃熱を集めること、の2つが重要なポイントとなる。

たとえば製鉄所などで、高温となつた排水と低温冷却水をそのままビルジへ落とすようなことは避けるべきでできるだけ温度別回収をして高温のものの利用を考えるべきである。

またたとえばホットスラグの冷却水の生ずるフリー蒸気を回収するさいでも、それをできるだけ空気と混ぜないで高温のまま回収できれば、回収率が高い。

このような意味で廃熱回収には廃熱自体の管理が先決である。これからはこのような「省エネルギーのための廃熱管理」の時代となるであろう。

8. 結 論

以上のように省エネルギーにかかわる新技術のうち、とくに廃熱利用を中心として、フロンタービン、濃度差エネルギーシステムなどについて述べ、かつエネルギー蓄積技術についてふれた。

ここに示したように工場での省エネルギー方式は単なるヒートロス軽減からホットチャージ、熱の転用、動力の回収、エネルギーの蓄積と幾つかの段階が存在し、現在はまだ低い段階のものしか実際には実現されていないが、いずれ近い将来には高次元の省エネルギーが実施されることになると考えられる。

本報に示したことが、とくにエネルギー消費の大きい製鉄技術にたずさわる方々に少しでも参考となれば幸甚である。