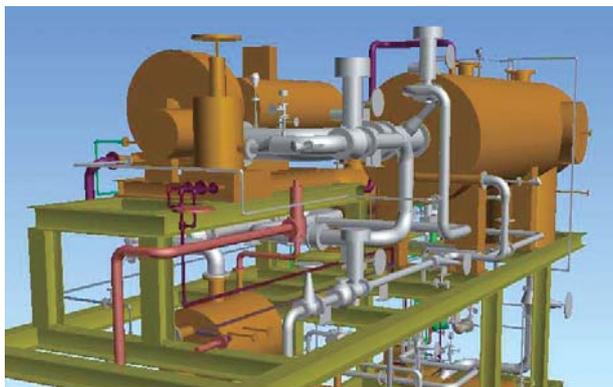


中温廃熱を対象とした有機ランキンサイクル発電設備の開発

The Development of an Organic Rankine Cycle Power Plant for Mid-Grade Waste Heat



岡崎 泰英	Yasuhide Okazaki	①
加藤 剛	Tsuyoshi Kato	①
柳 浩敏	Hirotohi Yanagi	②
大塚 裕之	Hiroyuki Otsuka	②
大島 翼	Tsubasa Oshima	②

あ ら ま し

地球温暖化の主要因であるとされる温室効果ガス、特にCO₂の排出量削減は世界的な環境課題の一つである。CO₂排出量の削減のために、従来から様々な方策が検討されてきた。当社では、有効に利用されずに捨てられている熱エネルギーを電力として回収することが、現時点で最も効果があり、現実的な方策であると考え、廃熱回収発電設備の開発を進めてきた。

本報では、300℃～450℃の温度域の中・小規模廃熱を対象とする廃熱回収システムとして、当社が提案する有機媒体ランキンサイクルと従来の水蒸気ランキンサイクルについて、エネルギー回収効率の比較を行った。その結果、500kW以下の規模の廃熱に対しては、シリコン系媒体を用いる有機媒体ランキンサイクルの方が従来の水蒸気ランキンサイクルと比較して有効であるという結論を得た。

Abstract

Reduction of CO₂ emissions is one of the most important and urgent environmental issues in the world. In order to reduce the consumption of fossil fuel and consequent production of CO₂, various methods have been proposed and studied in the past. At present, we are certain that the organic Rankine cycle (ORC) is one of the most effective and feasible methods for generating electricity from mid-grade waste heat.

In this paper, we compare the ORC process, which uses silicone as the working medium, with the steam-based Rankine cycle for efficiency in recovering energy from waste heat. As a result, it has become apparent that the heat recovery efficiency of our ORC process is higher than steam-based Rankine cycle generators outputting less than 500kW.

1. 緒 言

有機媒体ランキンサイクル（以下ORC）は、作動媒体に有機媒体を用いるランキンサイクルで、一般的な水蒸気ランキンサイクルと比較して低い温度域で作動する。このため、中・低温域の廃熱回収発電装置として注目されてきた。当社でも、1970年から80年代にかけて、R114を作動媒体にした温排水からの廃熱回収発電装置の開発を行った^①。また、1990年代にはアンモニアを作動媒体とした廃熱回収発電設備を開発した^②。しかしながら、これらは低温廃熱を対象としているために熱効率が低く、回収動力（あるいは電力）に対して装置コストが高いという課題があった。

しかしながら、今日では、CO₂排出量の削減は緊急の課題であり、そのための省エネルギー機器の開発が強く望まれている。当社では、従来から培ってきた廃

熱回収技術を活かし、社会の要請に適合する新たな廃熱回収発電設備の開発を進めている。

2. 工場廃熱の規模

図1に、(財)省エネルギーセンターによる国内工場の業種別・温度別廃熱量の調査結果^③を示す。ここでは、100℃以上のガス廃熱、40℃以上の温水廃熱、200℃以上の固体の廃熱を有効廃熱と定義している。これらの総量は272,000Tcal/年に達し、仮に、これらを回収して発電するとすれば、100万kW規模の電源に相当する。

これらの有効廃熱のうち、より効率的に動力を回収できる比較的溫度レベルの高い廃熱（250℃以上のガス廃熱、80℃以上の温水廃熱、200℃以上の固体廃熱）を回収対象とすると、廃熱の総量は56,600 Tcal/年で、前述の有効廃熱の約20%にあたる。これを、廃熱回収発電設備で回収する場合の工場当たりの平均設備容量を図2に示す。この図は、廃熱回収設備の年間稼働時

① Hitz日立造船(株) エンジニアリング本部 エネルギービジネスユニット エネルギー計画部

② Hitz日立造船(株) 事業・製品開発本部 技術研究所

間を8,000時間と仮定し、発電効率を温度レベルによって6～17%の範囲で変化させて試算した結果である。図からわかるように、国内工場廃熱に対する廃熱回収設備の平均設備容量は、ガス廃熱に対しては1,000kW以下、温水廃熱に対しては100kW以下と、比較的小規模であることがわかる。すなわち、国内産業の廃熱の総量は依然として大きいものの、工場当たりの廃熱規模は小さく、従来の水蒸気を作動媒体とする廃熱回収設備では、主に費用対効果に課題があって十分に回収されてこなかったと考えられる。

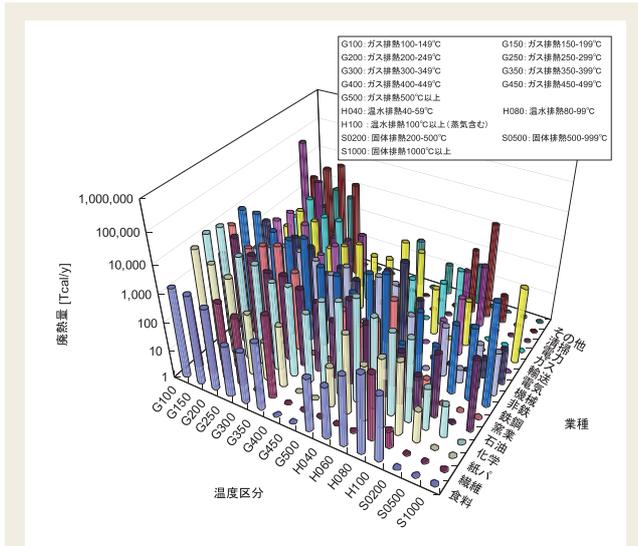


図1 業種別/温度別工場廃熱量

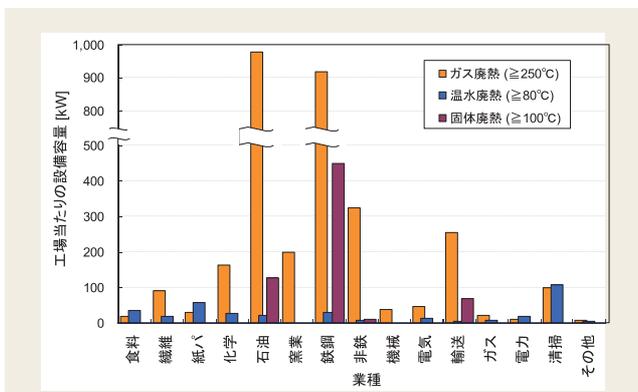


図2 工場当たりの廃熱回収発電設備容量

一方、中・小規模熱源に対しては、効率やコスト面でORCシステムが有効であるとされており、近年、ヨーロッパを中心に設置件数が急激に増加している⁽⁴⁾。これには、各国の環境政策に因るところも大きいですが、ORCシステムが中・小規模の熱源に対する有効な発電システムであることが評価された結果であるとも言える。

現状では、ORCシステムの多くは、バイオマスや地熱を熱源とする発電設備として用いられており、廃熱回収用途として採用されているのは全体の20%程度である。しかしながら、今日のように、CO₂排出量削減圧力の高まりの中、政府の環境政策とあいまって、今後、ORCシステムの廃熱回収設備への適用例が増

加するものと期待する。

3. ORCシステムと媒体の選定

3.1 ORCシステムの構成

図3に中温度域廃熱(300℃以上)を対象とする一般的なORCシステムの作動線図とフロー図を示す。中温廃熱を対象とするORCは作動媒体系と熱媒体油系の2つの系からなり、廃熱は熱媒体油系を介して作動媒体系に供給される。この温度域の廃熱に対しては、ORC作動媒体の熱的劣化を防止し、さらに、廃熱の急激な変動に対するORC出力の変動を緩和するために、廃熱源と作動媒体系との間に熱媒体油系を設けているものが多い。

このシステムは、作動媒体を予熱・蒸発させるための蒸発器、作動媒体から仕事を取り出すための膨張機、膨張機の排気エネルギーを有効に回収するための再生器、膨張機の排気蒸気を冷却・凝縮させる凝縮器、および凝縮液を加圧するポンプ等で構成される。これをT-S線図(温度-比エントロピ線図)上で表したものが図4(a)である。2→3→4は蒸発器における作動媒体の予熱・蒸発過程、4→5は膨張機での膨張過程を示す。5→6と

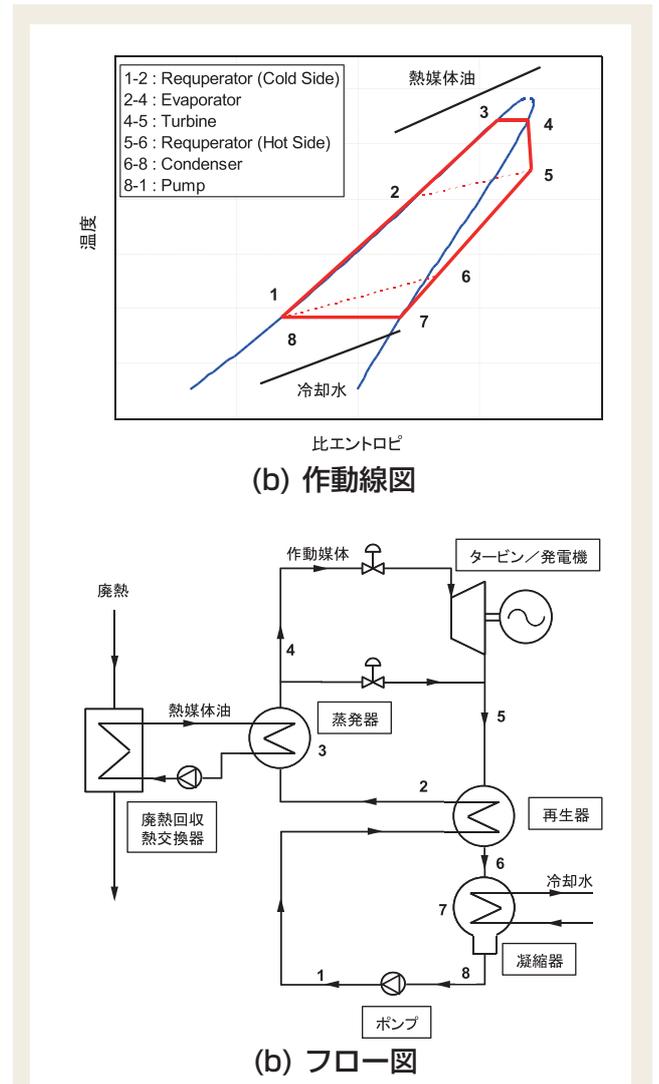


図3 一般的な中温ORCの構成

1→2は、蒸気の排気エネルギーを回収して凝縮液を加熱する再生過程である。これによって、サイクルの熱効率が大きく向上する。6→7→8は排気蒸気の凝縮過程、8→1はポンプでの圧縮過程である。

3.2 作動媒体の選定 ORCシステムにおいて、作動媒体の選定は、システムの性能やコストに影響を及ぼす重要な課題である。当社では、下記の5点を主な選定基準とする。

- ①環境にやさしいこと
- ②取り扱いが容易であること
- ③熱的に安定であること
- ④エネルギー回収率が高いこと
- ⑤設備コストが安価になること

このうち、①については、オゾン層破壊係数（ODP）が0であることが必須である。また、温暖化係数（GWP）が極力小さいことが望ましい。②については、人体に悪影響を及ぼさないことは言うまでもないが、難燃性、あるいは弱燃性の媒体の方が好ましい。③については、特に、HFC系の媒体では、熱分解によって有害ガスが発生する可能性があり、この媒体を選定する場合には使用条件やハンドリング方法等に注意が必要である。④については、作動温度レベルが決まれば、概ね蒸発潜熱の大小によって決まり、一般的には、潜熱の小さい媒体の方が廃熱から回収できる熱量が大きくなる。ただし、蒸発潜熱が小さいことは、同じ廃熱量に対して作動媒体の流量が多いことを意味し、ポンプなどの補機動力の増加や、システムの安定性を確保するために必要な媒体の保有量の増加を伴うこともある。そのため、廃熱の規模や作動条件などもあわせて検討することが必要である。②および⑤に関連する項目として、作動圧力と作動温度がある。作動温度の上昇に伴って熱効率は上昇するが、廃熱条件、経済性、作動媒体の特性などによって制約される。当社の中温廃熱回収ORCでは、これらの条件を考慮した上で、作動温度を250℃未満、作動圧力を2MPaA未満とした。

次に、ランキンサイクルあるいはバイナリーサイクルに用いられる代表的な5つの媒体（水蒸気、MDM、アンモニア、ペンタン、R245fa）について、その特性を比較した。結果を表1に示す。表には、臨界温度、飽和蒸気圧などの熱物性に加えて、熱的安定性や環境への影響等も示した。

表1 作動媒体の性状比較

作動媒体		水蒸気	MDM	アンモニア	ペンタン	R245fa
臨界圧力	MPaA	22.1	1.4	11.3	3.4	3.7
臨界温度	℃	374	291	132	197	164
飽和圧力(@250℃)	MPaA	3.98	0.75	-	-	-
飽和温度(@2MPaA)	℃	212.4	-	49.4	163.5	121.9
熱的安定性(使用可能温度)	℃	-	350	-	-	260
ODP / GWP*	-	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 10	0 / 950
可燃性	-	-	弱燃性	弱燃性	強燃性	-
人体への影響	-	-	-	有	-	-

※ ODP : Ozone Depletion Potential

GWP : Global Warming Potential

水蒸気は、250℃の飽和圧力が2MPaAを超えるため、飽和蒸気としては選定条件を満たさない。蒸気圧力を2MPaAとした場合には、対応する飽和蒸気温度は212℃であるが、熱効率や排気の湿り度を考慮すると、タービン入口の状態を過熱蒸気にする必要がある。これに対して、MDMは、蒸気温度250℃に対する飽和蒸気圧力は0.75MPaAであるので、蒸発器で発生させた飽和蒸気を直接タービンに送入することができる。これ以外の媒体のうち、ペンタンは強燃性媒体であり取り扱いに注意が必要である。また、アンモニアは弱燃性の媒体ではあるが、劇物であり、漏洩した場合の人体への影響が懸念される。R245faは低温領域の作動媒体として有用な媒体の一つであるが、熱的安定性の点で、ここで対象とする中温度域の作動媒体としては適当ではない。

以上の結果から、中温度域の作動媒体として、水蒸気とMDMに着目し、両者を作動媒体とするシステムの性能について比較した。

3.3 水蒸気システムとMDMシステムの比較

3.3.1 各システムの特徴

表2に、350℃の廃熱を対象とした水蒸気とMDMを作動媒体とする廃熱回収システムの特性比較を示す。表中の水蒸気Ⅰは、膨張機として復水タービンを、水蒸気Ⅱは背圧タービンを想定した場合である。表に示すように、水蒸気の蒸発潜熱は、MDMの約20倍と大きいため、蒸発量は復水タービンでMDMの約8%、背圧タービンで10%程度である。一方、水蒸気タービンの理論断熱熱落差は、MDMと比較して著しく大きく、復水タービンと背圧タービンについて、それぞれMDMの約16倍、および約7倍である。すなわち、水蒸気システムは、大きな熱落差を利用して動力を得るシステムであるのに対して、MDMを作動媒体とするシステムは、熱落差が小さく、膨張による運動エネルギーは小さいが、大量の蒸気によって動力を発生させるシステムであると言える。

表2 水蒸気システムとMDMシステムの比較

		水蒸気Ⅰ (復水タービン)	水蒸気Ⅱ (背圧タービン)	MDM
蒸気温度	℃	310	220	250
蒸気圧力	MPaA	1.76	0.79	0.75
過熱度	K	104	50	0
凝縮温度	℃	42	100	92
蒸発潜熱	kJ/kg	1,916	2,049	93
蒸発量	-	0.089	0.114	1.0
理論断熱熱落差	kJ/kg	900	373	56

一般に、水蒸気などT-S線図上で表した飽和蒸気線が右下がりの媒体は、“WET”な媒体と呼ばれ、飽和蒸気の状態から膨張すると、膨張後の状態は湿り蒸気である。タービン排気の湿り度が一定以上になると、効率の低下や壊食などの問題が生じるため、排気の湿り度が極端に高くないようにタービン入口の状態

を過熱蒸気にしておく必要がある。これに対して、MDMなどの有機媒体は、飽和蒸気線が右上がりの特性をもつ、いわゆる“DRY”な媒体である。これらの媒体は、飽和蒸気の状態から膨張しても膨張後の状態は乾き蒸気であるため、前述の水蒸気の場合に生じる壊食や効率低下の問題がなく、さらに、過熱器を必要としないという利点がある。

3.3.2 タービン効率 Balje⁽⁵⁾は種々の形式のタービンについて、(1)式で定義される比速度(n_s)とタービン効率(η)の関係を示している。これによれば、軸流タービンに対して高効率を与える比速度は、およそ0.1～2.0の範囲にあるとされる。

$$n_s = \omega \frac{V_2^{1/2}}{\Delta h_{ad}^{3/4}} \quad \dots (1)$$

ここで、 n_s :比速度[-]、 ω :回転角速度[rad/s]、 V_2 :タービン排気の体積流量[m³/s]、 Δh_{ad} :理論断熱熱落差[J/kg]である。

(1)式からわかるように、熱落差が大きい場合に高効率を与える比速度を得るためには、タービンの回転数を高める必要がある。蒸気量が少ない場合も同様である。水蒸気を作動媒体とするシステムでは、MDMの場合と比較して、熱落差が大きく蒸気流量が小さいために、高いタービン効率を得るには回転数を高めるか、多段タービンを採用して、段落あたりの熱落差を小さくする必要がある。

図4に水蒸気システムとMDMシステムについて、タービンの比速度の比較を示す。図はそれぞれのシステムについて、2,000kg/hから50,000kg/hの蒸気を発生させるのに必要な廃熱量(横軸)とそれに対応する比速度(縦軸)を示している。図中のMDMは単段落のタービンを3,600rpmで用いた場合を示している。一方、水蒸気については、比較のために、段落数と回転数を変えた3種類の条件について示した。

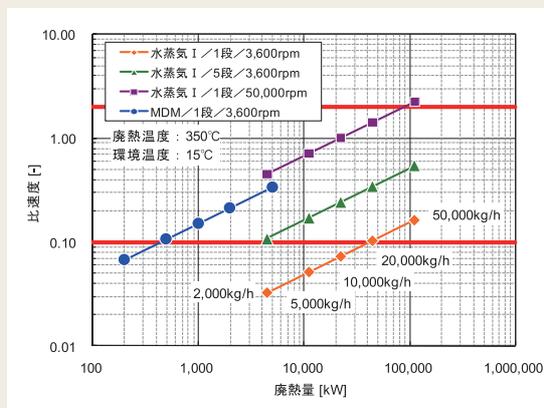


図4 廃熱規模と比速度の比較

図に示すように、MDMの場合には、およそ500kW以上の廃熱規模に対して、単段落のタービンを3,600rpmで用いることで高効率を与える比速度範囲

で運転できる。この場合には、発電機とタービンを直結することができ、減速機が不要になる。これに対して、水蒸気の場合には、低回転で運転する場合にはタービンの段落数を増やす、もしくは、単段落タービンを採用して50,000rpm程度の高回転で運転する必要がある。ただし、水蒸気の場合には、いずれも対象廃熱規模は数千kW以上である。

次に、タービン各部に生じる諸損失を考慮して両者の性能を比較する。タービンの損失には、タービン段落で生じるノズル損失や動翼損失などの内部損失と翼先端からの漏れ損失、軸受摩擦損失、ロータの円板摩擦損失などの外部損失がある。このうち、漏洩損失については、羽根車の径に対して翼高さが小さくなると、翼先端の相対隙間が大きくなり、漏洩損失が急激に増加する。すなわち、蒸気流量の低下に伴い、漏洩損失は急激に増加し、タービン効率が著しく低下する。

蒸気量に対するタービン各部の損失を考慮し、一定の発電出力に対して必要となる廃熱量を試算した結果を図5に示す。図からわかるように、300～450℃程度の廃熱を回収する場合、回収動力が300kW程度であれば、同一出力を得るために必要な排ガス量はMDMの場合が最も少なく、中・小規模廃熱に対しては、MDMシステムのエネルギー回収効率が最も高いと言える。一方、回収動力が500kW程度の場合には、MDMと水蒸気I(復水タービン)は同程度の廃熱量を必要とする。回収動力が1,000kW以上の場合には、水蒸気Iが最も効率的に廃熱を回収できる。ただし、水蒸気Iは5段落程度の多段タービンである。水蒸気II(背圧タービン)の回収効率は、1,000kW以下の出力域でMDMを上回ることではない。

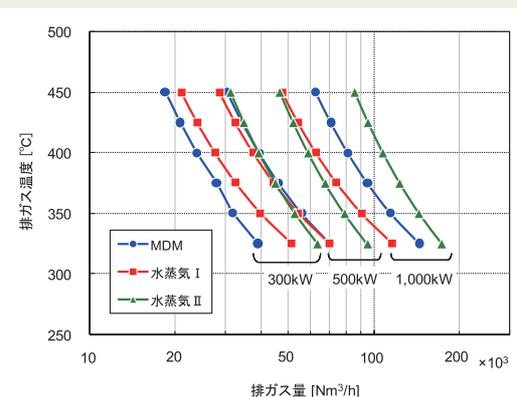


図5 必要廃熱量の比較

以上の結果より、回収動力が1,000kW以下の当社中温ORCシステムでは、作動媒体としてMDMを採用することとした。

4. Hitz ORC システム

図6に当社の中温廃熱回収ORCシステムの構成を示

す。基本的には、図3に示す基本システムと同様であるが、さらに廃熱回収率を向上させるために、予熱器と廃熱回収熱交換器Ⅱを設けている。このシステムでは、ポンプで加圧された低温の作動媒体の一部を再生器に送り、ここでタービン排気の顕熱を回収（再生）する。残りの液媒体は予熱器に導かれ、蒸発器を通過した熱媒体油によって加熱される。低温になった熱媒体油は、廃熱回収熱交換器Ⅱに送られ、排ガスのエネルギーを低温まで回収する。

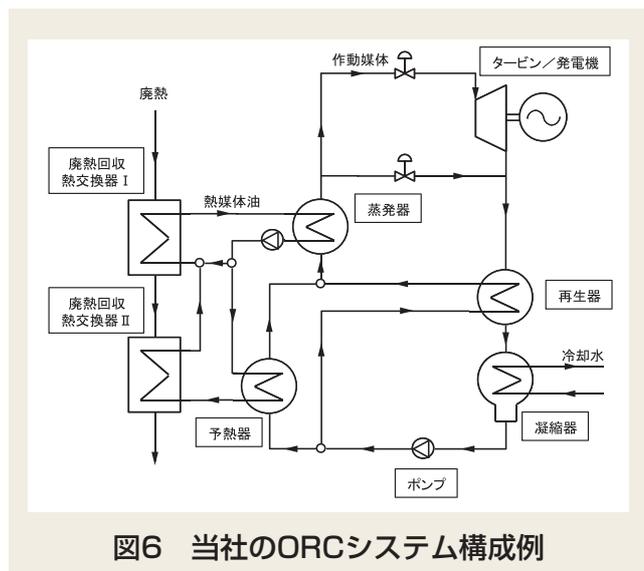


図6 当社のORCシステム構成例

ORCシステムの性能は、蒸発温度、凝縮温度など、様々なパラメータの影響を受ける。さらに、当社の中温度域ORCの場合には、再生器と予熱器に送る媒体流量の比（以下、流量比）にも影響を受ける。そこで、ここでは蒸発温度と流量比がシステム性能に及ぼす影響について示す。

図7にORCシステムの性能に及ぼす作動温度の影響を示す。ただし、図中の廃熱回収率（ η_r ）、およびエネルギー回収率（ η_e ）は次の（2）式、および（3）式で定義した。

$$\eta_r = \frac{h_{gi} - h_{go}}{h_{gi} - h_{ga}} \quad \dots (2)$$

$$\eta_e = \eta_g \times \eta_r \quad \dots (3)$$

ここで、 h ：排ガスの比エンタルピー [kJ/kg]、 η_g ：発電効率 [%]を表し、添字は、 gi ：廃熱回収熱交換器入口、 go ：廃熱回収熱交換器出口、 ga ：周囲環境（ここでは15℃とした）である。

図からわかるように、作動温度の上昇に伴って、蒸気流量が減少し、廃熱回収率も低下する。したがって、廃熱を最大限に回収するには、作動温度が低い方が良い。しかしながら、発電電力は廃熱回収率とは異なり、240～245℃の間にピークを持ち、作動温度が230℃以下では急激に低下する。

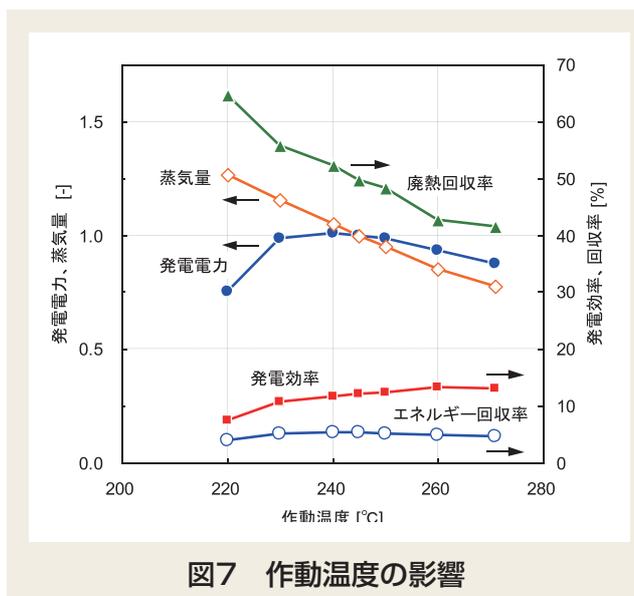


図7 作動温度の影響

前述のように、ORCに用いられる有機媒体は“DRY”（あるいは“等エントロピー”）な特性を有する。これらの媒体を飽和蒸気の状態からタービンで膨張させた場合、タービン排気は乾き蒸気であり、一般には、凝縮温度よりも十分高い。したがって、システムの熱効率を向上させるには、タービン排気から凝縮温度までの顕熱を回収する必要があるが、再生器を通過する被加熱側の媒体流量がシステムの性能に影響を及ぼす。そこで、再生器を通過する媒体流量のシステム性能への影響を調べた。結果を図8に示す。図からわかるように、流量比の増加に伴って発電効率は上昇する。しかしながら、流量比の増加に伴って、排ガスからの回収熱量が減少（廃熱回収率が低下）する。結果として、発電電力は流量比が0.5～0.75の間に極大値をもつ。

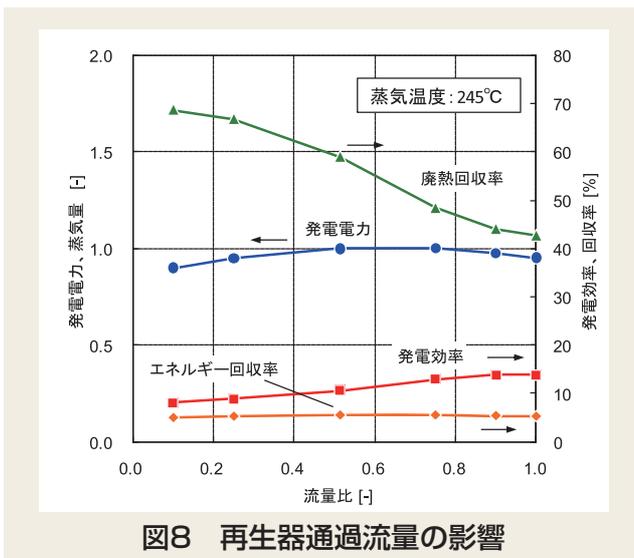


図8 再生器通過流量の影響

5. 結 言

中温度域廃熱を対象とするORC廃熱回収発電設備について、作動媒体および各種設計パラメータがシス

テム性能に及ぼす影響を検討し、以下の結論を得た。

- (1) 水蒸気ランキンサイクルは、MDMを作動媒体とするORCと比較して、小流量で熱落差の大きい条件で運転される。そのため、膨張機には多段落のタービンを用いる必要がある。一方、MDMの場合は、蒸気量が大きい、熱落差が小さいため、単段落タービンを発電機に直結させて用いることができる。
- (2) 中温度域（300～450℃）の排ガスから熱回収を行う場合、回収動力が500kW以下ではMDMを用いたORCの方が水蒸気ランキンシステムよりもエネルギー回収率が高い。一方、回収動力が500kW以上の場合には、水蒸気ランキンシステムの方が必要な廃熱量が少ない。
- (3) MDMを作動媒体とするORCでは、蒸気温度が240～245℃の間でエネルギー回収率が極大値をもつ。また、流量比については、0.5～0.75の間にエネルギー回収率のピークをもつ。

以上のように、中・小規模廃熱を対象として廃熱回収発電を行う場合には、従来の水蒸気ランキンサイクルよりも、MDMを媒体とするORCの方がコンパクトで効率的なシステムであると考えられる。

当社では、昨年度に要素試験を完了し、今年度中に実廃熱を対象とした実証試験を行うべく、現在準備を進めている。本設備が、省エネルギーによるCO₂削減に、ひいては地球温暖化抑制に貢献できるよう、今後の開発を進めていく。

参考文献

- (1) 中西 他6名, フロンタービンの試作研究, 日立造船技報, **1983**, 44 (1), 19-28.
- (2) 高鍋 他5名, アンモニア・ランキンサイクルによる廃熱回収発電, 日立造船技報, **2004**, 65 (1), 6-9.
- (3) 工場群の排熱実態調査研究, (財) 省エネルギーセンター, **2001**.
- (4) Quoilin, S., Lemort, V., Technological and Economical Survey of Organic Rankine Cycle Systems, 5th European Conference Economics and Management of Energy in Industry, **2009**.

- (5) Balje, O.E. Turbomachines: A Guide to Design, Selection and Theory, John Willy & Sons, **1981**, 47-60.

【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株)エンジニアリング本部
エネルギービジネスユニット エネルギー計画部
岡崎泰英
Tel: 06-6569-0209 Fax: 06-6569-0222
e-mail: okazaki_y@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation
Engineering Headquarters
Energy Solutions Business Unit
Energy Design & Planning Department
Yasuhidei Okazaki
Tel: +81-6-6569-0209 Fax: +81-6-6569-0222
e-mail: okazaki_y@hitachizosen.co.jp



岡崎 泰英



加藤 剛



柳 浩敏



大塚 裕之



大島 翼