

アンモニアを使用したガスエンジン排熱利用技術の開発

Development of Gas Engine Exhaust Heat Utilization by Ammonia

○正 藤本 洋(大阪ガス)

薬師寺 新吾(大阪ガス)

Hiroumi Fujimoto, Osakagas CO., LTD., 6-19-9, Torishima,, Konohana-ku, Osaka

Shingo Yakushiji, Osakagas CO., LTD.

It has been said that cogeneration system is energy saving system because, by using recovered heat, it dramatically increases the utilization of primary energy. However, recent technological developments of power generation in large scale power plant as well as heat pumps have been gradually decreasing the value of exhaust heat. Although the system can be energy saving so long as the exhaust heat is fully used, not so many location sites have enough heat demand to use it up. To overcome this problem and exploit the market, new exhaust heat conversion system needs to be developed. This paper concerns with two types of gas engine exhaust heat recovery system with ammonia/water mixture as a working fluid; one is for power generation and the other is for freezing. These two systems can be merged to one system that converts the exhaust energy variably into power, cold/hot water in accordance with the demand pattern. The paper describes the development and the test results of the system.

Key words: Internal Combustion Engine , Gas Engine, Cogeneration, Hybrid Refrigeration Cycle, Waste Heat Recovery, Ammonia

1. 概要

コージェネレーション（以下CGS）はオンサイトで発電し、同時発生する排熱を有効利用する事によってエネルギー利用効率を高めようとするエネルギー供給システムである。しかし、実際の設置現場においては、原動機側の熱電比と需要側の熱電比が一致せず、また熱需要そのものが小さいために、排熱をうまく使えない事が多い。さらに、最近の大型発電所の発電効率の向上や高効率ヒートポンプの出現によって熱の相対的価値も低下する傾向にある⁽¹⁾。この問題を解決するには、

- (1) 発電効率の高いシステム
- (2) 熱電比を需要に応じて変える熱電可変システム
- (3) 排熱を新たな価値をもったエネルギーに変換するシステム

の実現が必要である。

これらのニーズを背景に筆者らは、平成12年から15年にかけて、NEDO の開発補助金を得て、ガスエンジンの排熱から動力を取り出すシステムと-20 の冷熱を取り出すシステムの開発を行った。これらのシステムはアンモニア吸収冷凍機の原理を拡張したものであり、排気ガスとジャケット水という性質の異なる二種類の排熱から効果的に動力や熱を取り出すことができる。これら二つのシステムは融合可能であり、電気、冷熱、温熱を需要に応じて熱電比可変で取り出すことができる。

本論文 では、この開発の概要と、試験結果について報告する。

2. 通常の高スエンジン排熱回収システム

典型的な高スエンジンの排熱回収システムを図1に示す。

エンジンの排熱源には、温度500 程度の排気ガスと温度が90 程度のジャケット冷却水があるが、通常、図のようにジャケット冷却水でひとまとめにして、夏は単効用吸収冷凍機を駆動して冷房の用に、冬は熱交換器を通して暖房の用に供している。こういったシステムでは、排気ガスの高温を効果的に利用できないだけでなく、中間期は給湯需要がなければ 排熱を捨てざるをえない。一方、この冷凍機で氷点下の冷凍を行うことができれば新たなマーケットを見いだすこともできるが、ジャケット水レベルの温度では氷点下の冷凍はできない。これは次のような理由による。

圧縮式冷凍機も吸収冷凍機も冷凍作用は蒸発器内の冷媒の蒸発で行っている。この冷媒の蒸発温度は容器内の圧力（蒸発圧力）によって決定されるが、蒸発圧力を一定に維

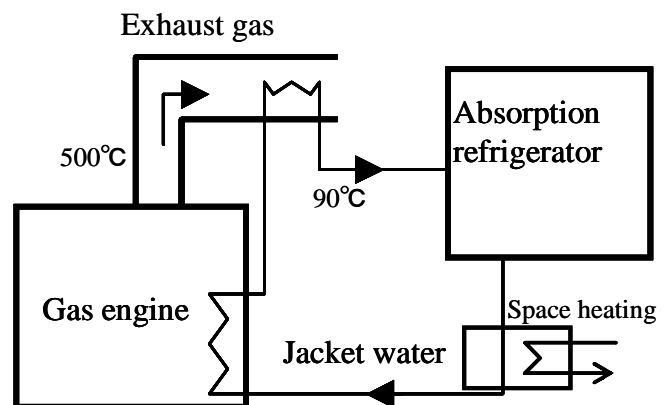


Fig.1 Conventional exhaust heat recovery system

持するためには、蒸発した冷媒を排除する必要がある。圧縮式冷凍機では圧縮機への吸い込みによって、吸収冷凍機では吸収液への吸収によってそれを行っている。後者の場合、その吸収力は吸収液と冷媒との濃度差である。図2にアンモニア吸収冷凍機概念図を示す。吸収冷凍機は、蒸発器、吸収器、再生器、凝縮器からなっている。蒸発器で蒸発した冷媒（アンモニア）は吸収器の吸収液に吸収される。吸収液（水とアンモニアの混合物）は再生器に送られ、ジャケット水排熱によって加熱されて冷媒を分離する。冷媒濃度が薄くなった再生吸収液は吸収器に戻るが、一方、分離された冷媒は凝縮器で凝縮し、蒸発器に供給され、サイクルを繰り返す。ここで蒸発温度を低くするには蒸発圧力も低くしなければならないが、蒸発温度が氷点下になると蒸発圧力が低くなりすぎ、ジャケット水レベルの低温排熱で再生した吸収液の冷媒濃度ではもはや冷媒を吸収できなくなる。吸収するには、もっと再生器の温度を上げて濃度を低下させなければならない。排気ガス的高温部を使えばこの目的を達せられるが、排熱量としてはわずかである。

図3は、ガスエンジンの排熱を利用して高圧水蒸気をつくり、タービンを回して動力を得るシステム、いわゆる複合サイクル概念図である。この場合も排気ガス高温部のみしか使えない。排気ガス低温部やジャケット水排熱は他に用途がなければ捨てざるを得ない。本論文で報告するシステムはこのような問題を解決するためのものである。

3. システムのコンセプト

3.1 ハイブリッド冷凍システム 吸収液で冷媒を吸収できなくとも、冷媒を蒸発器から機械的に排除すれば、氷点下でも冷凍作用を維持できる。図4はハイブリッド冷凍システム概念図である。図2の冷凍機との違いは、吸収器と蒸発器の間に圧縮機Cを挿入して、蒸発器の冷媒を強制排除している点である（経路はE→C→A）。この圧縮機によって吸収器の圧力は冷媒を吸収できるまで高くなっている。圧縮機はターボチャージャーの片方であり、タービン部分Tは排気ガスボイラBで発生させた、高圧NH₃-H₂O蒸気で駆動する。タービン出口の排蒸気の温度は高いので、再生器行きの溶液を使って熱回収し、システム内で再利用する。このメカニズムにより、エンジンの二種類の排熱を高温から低温まで効果的に利用できる。タービンと圧縮機のトルクバランスは吸収器の溶液濃度を調整することによって得られる。なお、タービンにも、圧縮機にもバイパスラインが付いていて、前者は起動と出力調整に、後者はサージングの防止に使われる。図では省略しているが、システム中には4個の熱交換器があり、それぞれ、

HEX1：再生器から吸収器への還り液の熱回収（ ）

HEX2：ターボからの排蒸気の熱回収（ ）

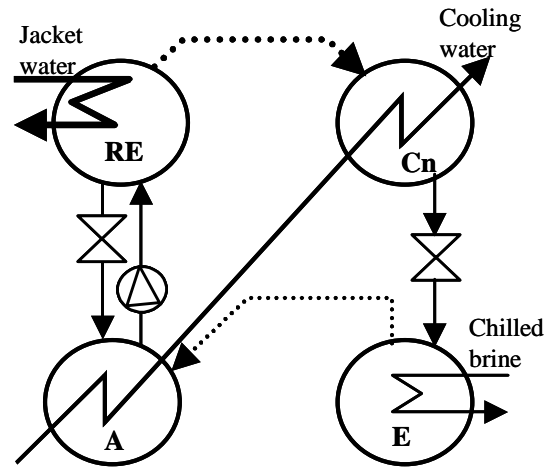
HEX3：凝縮液の冷却（ ）

HEX4：蒸発器の残留水分強制蒸発（ E ）

の目的で使われている（括弧内は熱流方向を示す。）。

ターボチャージャーの軸受はガス軸受であり、凝縮を防ぐため再生器で発生した高濃度アンモニア蒸気を供給している。システム内では、アンモニア/水以外の媒体を使用していないのでシステムは完全密閉にでき、オイルによる汚れや漏洩の心配が無い。

3.2 動力回収システム 図4の圧縮機を発電機に置き換えれば発電できるが、この際、不要となった再生器は出力向上の用途に転用できる。図5は発電（動力回収）システム概念図である。図中の吸収器Aはランキンサイクルの復水器に相当する。NH₃-H₂O混合液は排気ガスボイラBで



A: Absorber RE: Regenerator Cn: Condenser E: Evaporator

Fig.2 Conventional absorption refrigerator

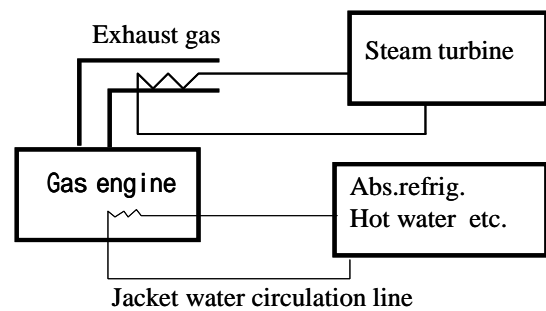
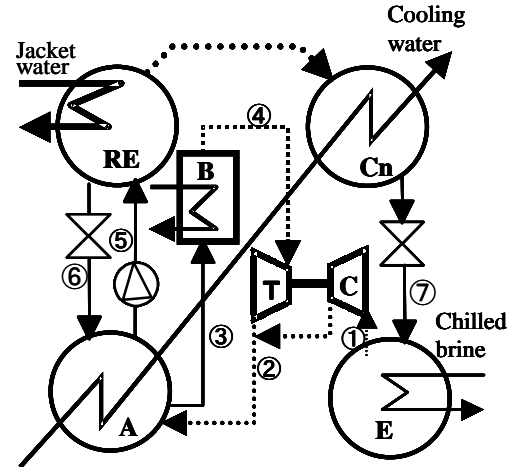


Fig.3 Power/heat recovery system from exhaust heat

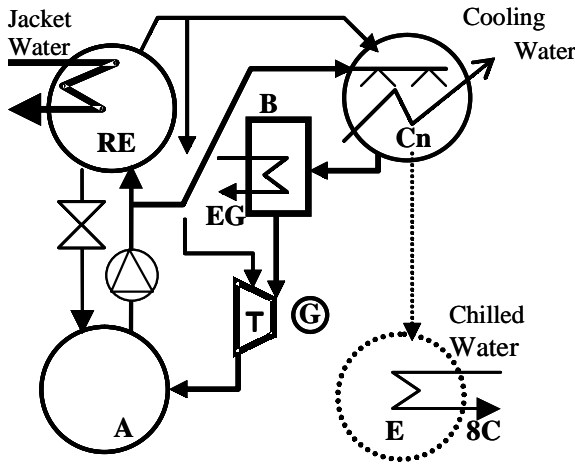


A: Absorber RE: Regenerator Cn: Condenser E: Evaporator

B: Exhaust gas boiler T/C: Turbocharger

Fig.4 Hybrid refrigerator

蒸発させ、タービンTを駆動して吸収器に戻る（経路はA→Cn→B→T）。経路の途中Cnにおいて、アンモニア蒸気を吸収混入する。このアンモニアは再生器でジャケット水排熱を使って分離したものである。この操作により、ボイラ給水のアンモニア濃度が上昇し、排ガスからの熱回収量が増える。これは、ジャケット水低温排熱を間接的に動力に変えたことになる。再生器で分離した蒸気の一部はタービンの2段目に導入される。Cnの凝縮液の一部は電力が不要な時に抜き出して蒸発器Eで冷房の用に供することもできる。



G:Generator Other symbols:same as in Fig.4
Fig.5 Power generation system

Table1. Test system utility specification

Exhaust Gas	
Fuel	13A gas burned at $\lambda=1.66$
Flow Rate	3221 kg/h
Temperature	515 °C
Jacket Water	
Flow Rate	53,300 kg/h (29,326 kg/h)
Temperature	93→88 °C
Cooling Water	
Flow Rate	120,000 kg/h (139,469 kg/h)
Temperature	30→35 °C (20→25 °C)
Brine	
Temperature	-15→-20 °C

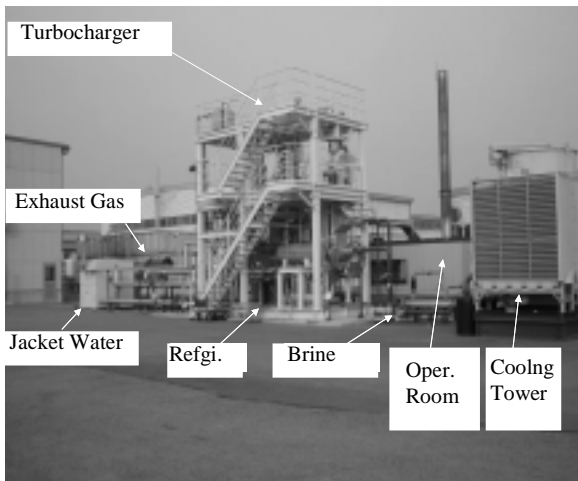


Fig.6 Test facilities

4. 試験設備

冷凍と動力回収のシステムは相互に類似しているため、最初冷凍設備を制作し、試験した後に動力回収設備に改造した。表1はシステムのユーティリティー仕様である。括弧内は冷凍システムの仕様を示す。ジャケット水と排熱はパーナードで作った。排熱量は570kWのJenbacher社製ガスエンジン（発電効率38%）のそれに相当するが、冷凍設備では、予算上の都合からジャケット水熱量を定格の55%とし、代わりに、冷却水温度を下げて能力を調整した。タービン入口の蒸気温度は耐腐食性の観点から300 に押さえた。

Table2. Test results on refrigerator

Items	plan	result
Cooling capacity	214 kW	250.4 kW
Recovered heat		
Exhaust gas	439.7 kW	464.1 kW
Jacket water	170.5 kW	155.7 kW
Regenerator		
Vaporized NH ₃	796.5 kg/h	973 kg/h
Temperature	83 °C	92 °C
Pressure	10.97 bar	11.0 bar
Evaporator		
Ref. supply	661.6 kg/h	633.4 kg/h
Temperature	-24 °C	-24.6 °C
Pressure	1.58 bar	1.42 bar
Turbine inlet		
Pressure	30 bar	22 bar
Temperature	300 °C	284.1 °C
Steam supply	604.3 kg/h	655.4 kg/h
Turbine efficiency	0.61	0.65
Comp. efficiency	0.72	0.79

Table3. Test results on power generation system

Items	Design	Data1	Data2	
Vapor at the Inlet of 1 st Stage				
NH ₃ Concentration	0.5	0.4416	0.4455	
Flow Rate G1	kg/h 605.10	612.48	640.58	
Temperature	°C 300.00	294.38	294.24	
Pressure	MPa 3.0	2.7058	2.8274	
Enthalpy	kJ/kg 2479.6	2530.4	523.43	
Vapor to be mixed at the Inlet of 2nd Stage				
NH ₃ Concentration	0.8742	0.9243	0.9242	
Flow Rate G2	kg/h 339.2	411.42	401.17	
Temperature	°C 89.00	78.10	78.44	
Pressure	Mpa 0.44	0.4	0.409	
Enthalpy	kJ/kg 1616.7	1536.24	1536.72	
Vapor at the outlet				
NH ₃ Concentration	0.6344	0.6356	0.6298	
Flow Rate	kg/h 944.30	1023.90	1041.7	
Temperature	°C 132.40	111.98	113.95	
Pressure	Mpa 0.1170	0.1152	0.1156	
Enthalpy	kJ/kg 2006.5	1960.57	1971.57	
Turbine				
Output	W kW	42.79	40.5	41.88
Brake Thermal Efficiency	η %	33.45	32.49	32.11
Mechanical Efficiency	η_m %	97.66	97.59	97.67
Adiabatic Efficiency	η_i %	34.25	33.29	32.88

図6に設備の外観図を示す。

5. 試験結果と考察

5.1 ハイブリッド冷凍システム 表2に設計値と試験データの比較を記す。蒸発器への冷媒供給量は設計値よりも4.3%少ないが、冷凍能力は逆に17%高くなっている。これは次の理由による。

- (1) 蒸発器Eと水分蒸発用熱交換器HEX4に於ける冷媒分布量の違い
- (2) 顕熱部分の冷却貢献量の違い
- (3) 蒸発圧力の違い

タービンと圧縮機の断熱効率は設計値より若干高くなっている。しかし、別途ターボチャージャーのみについて行った空気試験の結果ではタービン効率で81%、圧縮機効率で68%（各々換算値）を得ており、この値には達していない。これは、ガスベアリングの不調によりたびたび分解、組み立てを繰り返したからと思われる。

再生器での冷媒発生量は設計値よりも22%多い。これはターボ効率が設計値より良かったので、ターボバランスを

6. 参考文献

- (1) 田中俊六,省エネルギーシステム概論 (2003) p.11-22, オーム社

とるため蒸気の一部をタービンバイパスに逃がし、その熱がHEX2で回収されて蒸気再生に寄与したからである。一方、蒸発器への冷媒供給量はあまり増えていない。これは、ガス軸受が不良で、冷媒を多量に消耗したからである。

これらの問題点にも関わらず、冷凍能力は250.4kWと従来の排気ガス高温部のみを使用する吸収冷凍機の約1.97倍の性能が得られた。

この冷凍機は - 20 の取り出し温度であるが、冷暖房空調にも応用できる。試験で得られたデータをもとにシミュレーションを行った結果、8 の冷水取り出しでCOP = 0.82、40 ~ 50 の温水取り出しでCOP = 1.7 ~ 1.3が得られることが分かった（アンモニア冷凍機はヒートポンプにも転用できる。）。

5.2 動力回収システム 試験結果を表3に示す。表においてタービンの出力は動力計で測定した。出力約41kWが得られた。軸端効率、機械効率、断熱効率はそれぞれ以下の式で計算した。

$$= W \div (G_1 \times H_1 + G_2 \times H_2)$$

$$m = W \div (W + 1)$$

$$i = \frac{\quad}{m}$$

ここに、 H_1 、 H_2 は断熱エンタルピー落差、添え字は翼の段を示す。その他の記号は表中に示した。

断熱効率32%は、同一タービン、同一熱落差を用いて別途行った水蒸気試験の結果と同程度であった。このことから、規模の異なるガスエンジンに適用した場合の性能推算において、同規模の水蒸気タービンの断熱効率を使用しても良いことになる。

この試験データをもとに、5000 kWクラスのガスエンジンに適用したケースを、規模による断熱効率の向上、およびタービン本体の改良を考慮して試算してみた。排熱の温度と割合が同等のガスエンジンの場合、エンジンのガス消費量に対する発電効率で7%程度の効率が見込めることが分かった。一般に、ガスエンジン本体の効率が向上すると、排熱量のみならず排ガス温度が低下するため、水蒸気タービンでは殆ど動力を回収できなくなる。しかし、当該システムを用いた場合、発電効率48%、排気ガス温度400 のガスエンジン(ただし、排熱量と温度は仮定に基づいている。)でも6%程度の効率を確保できることが分かった。

5.3 耐久試験 性能試験終了後、動力回収システムについて、2年間、約2000時間の耐久試験を行った。途中不凝縮ガスの影響で出力が低下したこともあったが、概ね順調に運転できた。腐食問題も特に発生しなかった。

6. 結論

ガスエンジン排熱利用システムとして - 20 の冷熱を取り出すハイブリッド冷凍システムと動力回収システムを開発し、570kWガスエンジン相当の排熱を用いて試験した。さらに、約2000時間の耐久テストで信頼性を確認した。

ハイブリッド冷凍システムの場合には、通常の排ガス吸収冷凍機の約2倍の出力が得られた。このシステムを空調冷暖房に適用すると、8 の冷熱取り出しでCOP = 0.82が、40 ~ 50 の温水取り出しでCOP = 1.7 ~ 1.3が得られることが分かった。動力取り出しの場合には41 kWの動力が取り出せた。これは5000 kWクラスのガスエンジンに適用した場合、エンジンの発電効率を、ガス消費量に対して6~7%上げるのに相当する。これら二種類のシステムは相互に類似しているため融合可能であり、需要に応じて、電力、温熱、冷熱を可変で取り出すシステムを構築できる。