

ターボ冷凍機の吸着式自動抽気装置

柳 下 英 明*

Thermal Purging and Adsorption System for Centrifugal Refrigerating Machines

by Hideaki YAGISHITA

The Guideline for Prevention of Refrigerant Leakage from Refrigerating and Air-conditioning Equipment and Systems (JRA GL-14:2010) was established in Japan on September the 28, 2010. This guideline, made referring to the EU F-gas Regulation, is designed to reduce direct impact on the environment by high-efficiency refrigerating equipment and machines, as well as to reduce the same by refrigerant leakage. The following introduces newly developed low-pressure refrigerant products for centrifugal refrigerating machines. These refrigerants are made reusable by an adsorption process using activated carbon, enabling a reduction in the “visible” leakage amount of the refrigerant to be 1/100 of that of conventional Ebara refrigerant products.

Keywords: Adsorption, Refrigerant, Centrifugal refrigerating machine, Purge, Leakage, Recovery, Activated carbon

1. はじめに

冷凍空調機器、特にフロン（フルオロカーボン：fluorocarbon）を冷媒に使用するターボ冷凍機に関して、冷凍サイクルの高効率性に着目した場合、環境に間接的に及ぼす影響（間接影響）が同等程度の代替手段を求めることは現在のところ難しい。しかし、自然冷媒に比してその環境に直接的に及ぼす影響（直接影響）の大きさから、自然冷媒を含めたより直接影響の少ない代替冷媒技術の訴求とともに、冷媒漏洩量自体の削減が必要とされている。

元来密閉サイクルでの使用を前提としているので理論効率の高い、すなわち間接影響の少ない冷媒を使用した機器ほどライフサイクル（Life cycle）での環境影響を最小限にできると考えられてきた。しかし、昨今の冷凍空調機器からの漏洩や未回収の冷媒量の実態から、ある程度の漏れ量をあらかじめ想定した上で、例えば総合温暖化影響 TEWI（Total Equivalent Warming Impact）¹⁾ を最小化するために、自然冷媒や HC（Hydrocarbon）、

HFO（Hydrofluoroolefin）などの直接影響のより少ない代替冷媒を導入する動きが盛んになりつつある。もちろん、それらは中長期的に重要な施策の一つであるが、短期的に既存の冷媒の漏洩を防止する技術の開発はその経済的損失の抑制だけでなく環境影響低減の観点からも我々の課題の一つである。

ヨーロッパの F ガス規制（F-gas regulation）を参考として我が国では「冷凍空調機器の冷媒漏洩防止ガイドライン」（JRA GL-14：2010）²⁾ が 2010 年 9 月 28 日に制定された。今後は機器及び設備の高効率化による環境への間接影響の低減努力だけでなく、冷媒の漏洩による直接影響の低減についても更なる取り組みが求められることになる。

そこで、低圧フロン冷媒（以降、冷媒といえばフロンを指す）を使用したターボ冷凍機において、活性炭吸着により抽気時に外部へ放出される“目に見える”冷媒漏洩量を 1/100（当社従来比）以下に低減するとともに、繰り返し再生利用可能な装置^{3, 4)}を紹介する。

2. 低圧冷媒と自動抽気装置

2-1 低圧冷媒と高圧冷媒

冷凍空調機器からの冷媒の漏れを皆無とすることは技

* 荏原冷熱システム(株)

本報は公益社団法人日本冷凍空調学会発行の「冷凍 2011年 11月号」に掲載された内容を一部加筆修正したものである。

術的にも費用的にも相当に困難であり、実運用上は可能な限り機器の能力に支障の生じない程度の気密度を確保することに主眼が置かれている。そのような状況で荏原冷熱システム株が冷媒として低圧冷媒を積極的に採用する理由は、高圧冷媒に比べて理論効率の高さ、取り扱いの容易性、そして冷媒の漏れにくさなどの利点が挙げられるからである。

図1に冷凍機からの漏洩発生概念図を示す。高圧冷媒は運転中又は停止中にかかわらず常に大気圧以上となるため、機器全体からの外部への漏洩を防止する必要がある。一方、気密不良が生じて保守管理時や低圧故障停止等の不具合が生じた場合を除いては、日常どの程度の漏洩を生じたかを認識されることは少ない。

これに対し、低圧冷媒は機器の停止中には全体がほぼ大気圧に近い圧力となる一方、運転中には圧縮機等の高圧部は大気圧以上、蒸発器等の低圧部は大気圧以下となるが、高圧冷媒に比べて格段に内外圧力差が小さいので、仮に前者と同程度の気密レベルなら漏洩量も格段に少ないものと考えることができる。しかし後者については、

機内に外気が侵入すると不凝縮ガスとして凝縮器内に滞留・蓄積することにより熱交換器の性能を阻害し、LTD (Leaving temperature difference) が増大し、能力の低下や圧縮機吐出圧力の過上昇による高圧故障停止などの不具合を引き起こす要因となるため、主として低圧部への外気の漏れ込みを想定して対処することが必要になる。このため、低圧冷媒を使用した機器には通常機内に侵入した不凝縮ガスを機外へ排出する自動抽気装置が設けられている。抽気回数の日常管理を行うことで間接的に気密劣化の傾向を把握することもできるのが特長である。

2-2 冷媒漏洩量の把握

図2にR 245faを冷媒を使用した当社製のターボ冷凍機(RTCF型*)について、据付後3年以内(試運転時を除く)の市場における抽気動作頻度を調査した結果を示す。このデータから、稼働期間の短い現場も含めると実に6割以上の現場では年間平均で1日に1回未満、その内約3割の現場では月に1回未満しか抽気装置が作動していないことが判明した。すなわち大気圧との差圧が少ない低圧冷媒を使用した冷凍機では直接的な漏洩量が極めて少ないことが想定できる。

運転中に大気圧以上となる圧縮機等からの直接的な漏洩についてはこのデータだけでは判読できないが、少なくとも停止中及び低圧部からの漏れ込みに対する“目に見える”漏洩量は前記の抽気回数から間接的に把握することが可能で、冷凍機の気密度の維持管理の容易性につながるものである。

次に冷凍機からの直接的な全漏洩量Qを簡易的な式に表すと以下ようになる。

$$Q = \{R_1 \times (1 - Z) + R_2 \times Z + V\} \times T + W \dots\dots\dots (1)$$

Q: 冷凍機からの全漏洩量 [kg]

R₁: 停止中の漏洩率 [kg/年]

R₂: 運転中の漏洩率 [kg/年]

V: 保守管理時の漏洩率 [kg/年]

W: 廃棄時の漏洩量 [kg]

Z: 稼働率 [-]

T: 設置期間 [年]

また直接的漏洩率Rはおよそ式(2)のように表すことができる。

$$R = S/L \times X \times \Delta P \dots\dots\dots (2)$$

S: 機器の継手封止部透過断面積 [m²]

L: 透過長さ [m]

X: 透過率 [kg/(m・MPa・年)]

ΔP: 内外圧力差 [MPa]

ここで透過率Xは封止部の構造、材料、透過ガスの種

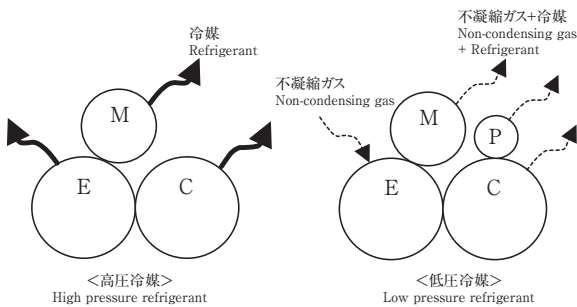


図1 運転中の冷媒ガスおよび不凝縮ガスの出入 (E: 蒸発器, C: 凝縮器, M: 圧縮機, P: 抽気装置)
Fig. 1 In-out of refrigerant gas and non-condensing gas during operation (E: Evaporator, C: Condenser, M: Compressor, P: Purge unit)

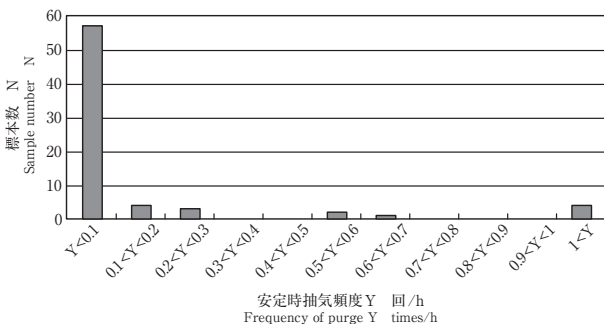


図2 RTCF型ターボ冷凍機の抽気頻度(2009)
Fig. 2 Frequency of purge in model RTCF (2009)

表1 フロン類の環境影響特性^{1, 2, 5~9)}

Table 1 Refrigerant's environment influencing characteristics

特性 Specific	単位 Unit	R 11	R 123	R 245fa	R 134a
分子式 Molecular formula	-	CCl ₃ F	CHCl ₂ CF ₃	CHF ₂ CH ₂ CF ₃	CH ₂ FCF ₃
分子量 Molecular weight	-	137.37	152.93	134.05	102.03
オゾン層破壊係 数ODP Ozone depletion parameter	R11比 R11	1	0.02	0	0
温暖化係数GWP (100年積分値) Global warming potential (100)	CO ₂ 比 CO ₂	4750	77	1030	1430
大気中寿命 Life in the atmosphere	年 years	45	1.3	7.6	14
沸点 Boiling temperature	℃	23.8	27.9	15.3	-26.1
高圧ガス保安法 適用の有無 High Pressure Gas Safety Act	-	-	-	-	○
停止時圧力 (25℃) Normal pressure	MPa (ゲージ圧力)	0.004	-0.010	0.048	0.564
凝縮圧力 (38℃) Condensing pressure	MPa (ゲージ圧力)	0.078 (40℃)	0.043	0.134	0.862
蒸発圧力 (6℃) Boiling pressure	MPa (ゲージ圧力)	-0.059 (0℃)	-0.058	-0.031	0.261
抽気装置の有無 Purge unit	-	○	○	○	-
分解温度 Decomposing temperature	℃	>125	>125	250	>175

類(分子量)等により適宜決定されるべきで、より分子量が大きい冷媒ほど漏れにくいと考えられる。表1に示すように、低圧冷媒は分子量が大きい傾向にあるので直接漏洩に対して有利といえる。

一方、低圧冷媒特有の間接的漏洩率 R' 、すなわち抽気動作に伴う漏洩率は、式(1)の R_1 、 R_2 の一部に相当する機内への外気の漏れ込み率に対して、抽気ガスに含まれる冷媒ガスと不凝縮ガスとの分圧比を乗じたものとなる。

ところでターボ冷凍機では構造的に冷媒の保有量が比較的多くなる傾向にあるが、ここで注目すべき点として、絶対的な冷媒保有量が漏洩量とは直接的には関係がないことが分かった。もちろん、大型機器ほど配管継手の口径が大きいことや継手箇所が多いことに関連性があるか

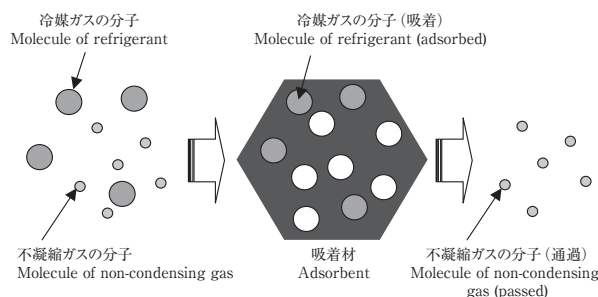


図3 分離吸着模式図

Fig. 3 Schematic view of adsorptional separation

もしれないが、これについては今後の調査、研究に委ねるところである。一度漏洩事故が発生すれば、1件あたりの漏洩量は保有量に匹敵する可能性が大きいので、心して事故防止に努めなければならないことはいまでもない。

3. 自動抽気装置

3-1 抽気ガス成分の分離方法

図3は吸着材(活性炭)が冷媒を選択的に分離、吸着するしくみを模式的に表したものであるが、図3のように抽気ガスには冷凍機外への排出を必要とする不凝縮ガスと、本来は排出する必要のない冷媒ガスとが同温における分圧比で混合した状態で含まれている。この混合ガス中の冷媒分圧比は、凝縮器と抽気装置との圧力差及び抽気タンクの温度により決まるため、混合ガスを抽気装置内において冷却し、不凝縮ガスを濃縮してから排出(抽気)してきた。これが従来の抽気動作における“目に見える”漏洩量である。原理的には、極低温度まで冷却することで抽気ガス中に含まれる冷媒の含有比率を最小化することが可能であるが、冷却のための投入エネルギーとのバランスを考慮する必要がある。

本装置では前記のように従来抽気時に排出されていた混合ガスを更に活性炭に通すことにより、冷媒ガスの分子が選択的に吸着され、分離され残ったその他の不凝縮ガス成分だけが通過し、機外へ排出される。

3-2 吸着材の特性

吸着の原理は、活性炭には無数のミクロの穴が開いており、分子間力によって引き寄せられた冷媒ガスの分子が、この穴に捉えられると考えられている。このとき吸着した冷媒は擬似的に液体の状態に近いと考えられ、このため吸着反応の際には冷媒の凝縮潜熱に相当する発熱を生じる。またこの吸着反応は図4に示すように可逆反

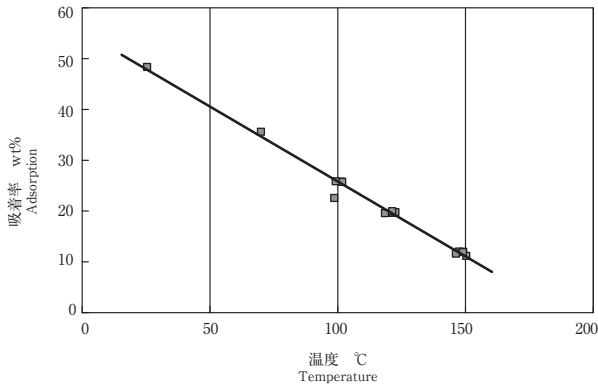


図4 活性炭のフロン (R 245fa) 吸着率
Fig. 4 Adsorption of R 245fa by activated carbon

応であるため、熱を加えることにより活性炭が保持できる吸着限界を超えた冷媒を脱着させ、再び冷媒ガスとして取り出すことも可能である。すなわち、前記のようにして吸着材に留まった冷媒を脱着し、冷凍機内へ還流させることにより、従来排出されていた冷媒を回収し、なおかつ吸着材は再生して吸着能力を回復する。なお、図4における吸着率とは、活性炭の質量に対し保持できる冷媒量の比率を示し、温度に対して負の比例関係にあることが分かる。

ところで、本装置は冷凍機の密閉サイクルに直結した連続使用を想定して、吸着時は不定期に作動する抽気に対応するため特段の冷却手段を設けてエネルギーを無駄に消費することなく室温のままとする一方、吸着材の再生時のみ加熱することとした。このとき冷媒自体の熱分解温度 (表1) を超えない範囲で加熱装置をコントロールしている。

3-3 吸着材収納容器

吸着材の加熱再生時はできるだけ速やかに昇温し、再生完了後は速やかに再び常温に戻して抽気動作に備えなければならない。これら相反する要求に加えて吸着材は多孔質で伝熱面積が小さい上に熱伝導率が低いことから、容器内に収容した全体を速やかにかつ均一に加熱及び冷却することは容易でない。

以上の制約条件のなかで、図5に示すような吸着材収納容器⁴⁾を製作し、所定の性能が得られることを確認した。容器本体はアルミニウム鋳物製で、内部に充填した活性炭の伝熱距離がどの断面でもほぼ等しくなるように伝熱促進のためのフィンを設けた。また、外部は再生完了後の冷却のためにあえて断熱はせず、通風用のダクトを兼ねた保温、防護用のカバーで覆っている。

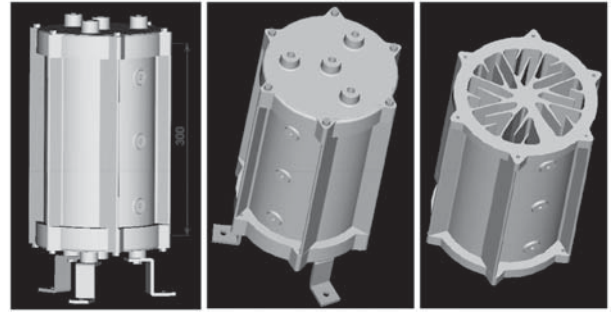


図5 吸着材収納容器 (計画図)
Fig. 5 Schematic view of adsorbent tank

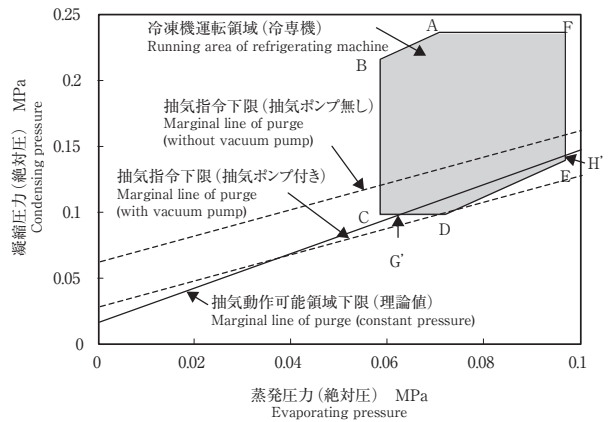


図6 抽気動作範囲 (R 245fa)
Fig. 6 Purge area (R 245fa)

3-4 自動抽気制御

図6に本自動抽気装置の運動動作可能範囲 (図6の破線) を示す。図6のとおり、抽気ポンプを装備した場合には一般的な冷房専用機の運転範囲をほぼ網羅していることが分かる。従来は、無用な冷媒の放出を抑制するために安全を見越して、抽気動作可能領域の下限 (図6の実線) より幾分高めに動作制限を設けていたが、吸着装置を導入するにあたり動作条件を見直すことにより理論値を下回る領域までの動作を可能とした。

なお、抽気動作可能領域は冷媒の種類及び抽気指令のON / OFF ディファレンシャル (Differential) 設定値により決定され、抽気ガスに占める不凝縮ガスの分圧が前記ディファレンシャル設定値を下回ると抽気タンク内の不凝縮ガスをすべて排出しても抽気指令がOFFとならない。これを理論上の抽気動作限界という。抽気ポンプで瞬間的に抽気タンク (不凝縮ガスを冷却、濃縮する凝縮容器) 内の圧力を、前記ディファレンシャル設定値以下にすることにより、抽気動作を完結させることができる。

3-5 導入効果

このようにして、本装置は自動抽気装置の作動に伴い排出される冷媒量を当社従来比で1/100以下に抑えることができた。しかし、前記のとおり本装置はエネルギーを投入して吸着した冷媒を回収するから、3-4に示した運用上の効果を除いても、それに見合った環境への影響を低減する効果が十分に得られなければ本来の目的を達することにならない。

そこで導入効果を判断する一つの指標として、回収される冷媒量にCO₂基準の温暖化係数GWPを乗じたものを分子とし、投入エネルギー（消費電力）に一次エネルギー換算のCO₂発生原単位を乗じたものを分母としてCO₂換算の環境COPを試算した。ここで仮に環境COPが1を下回ると、投入エネルギーが環境に及ぼす影響が、冷媒を回収することで削減される影響を上回ることになり、環境に悪影響を及ぼすこととなるような設計は避けなければならない。さて計算の結果は、R 245faは65、R 123は10となり、GWPが元々低いR 123を含めてランニングのCO₂削減効果は十分に見込めることが分かった。ただし、前記試算には製品の製造及び廃棄時に要する投入エネルギーが含まれていないため、LCCO₂（Life Cycle CO₂：製品の製造、使用から廃棄までを通じて生じるCO₂の総量）としての評価ではないことをお断りしておく。

また、R 123におけるCO₂ベースでの削減効果がそれほど大きくないようにも見えるが、ODP（オゾン破壊係数：Ozone Depletion Potential）を削減する効果も同時に期待できることを申し添えておく。このことから、従来ODPが“ゼロ”でないことから廃止が決定されたR 123ではあるが、本装置の適用により実質的に限りなくゼロに近づき他の新冷媒に比べても遜色のないものとなる。

4. おわりに

末筆で失礼ながら2011年3月11日の東日本大震災により被災された方々にお見舞い申し上げます。荏原冷熱システム(株)の冷凍機稼動現場においても停電による非常停止などの影響が少なからず生じたが、そのような状況下においても低圧冷媒の利点である、“漏れにくさ”が被害の拡大を抑制することに貢献できたとの報告も聞き及んでおり、地震大国ニッポンの冷凍機のあるべき姿に改めて思いを巡らせた次第である。本報が冷凍機についてのリスク管理評価の一助になれば幸いである。

* RTCF型は当社の機種記号である。

参考文献

- 1 日本冷凍空調学会、「冷凍空調技術 冷凍編」、第3次改訂版、日本冷凍空調学会、東京（2000）。
- 2 日本冷凍空調工業会：「冷凍空調機器の冷媒漏洩防止ガイドライン」、JRA GL-14:2010、日本冷凍空調工業会、東京（2010）。
- 3 柳下英明、他5名：「抽気回収装置とその運転方法及びそれを備えたターボ冷凍機」、特開2011-75208（2011）。
- 4 柳下英明、他5名：「冷媒吸着材充填容器、それを備えたターボ冷凍機用抽気回収装置とターボ冷凍機及び冷媒回収装置」、特開2011-133191（2011）。
- 5 日本冷凍協会：「冷凍空調便覧」、第1巻、第5版、日本冷凍協会、東京（1993）。
- 6 日本冷凍協会・日本フロンガス協会：「代替フロン類の熱物性－HFC-134a・HCFC-123－」、日本冷凍協会、東京（1992）。
- 7 外務省：オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書の改正、外務省告示744号、(1995)。
- 8 IPCC/TEAP: IPCC/TEAP Special Report “Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System: Issues Related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons”, (2005).
- 9 IPCC: IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007, (2007).