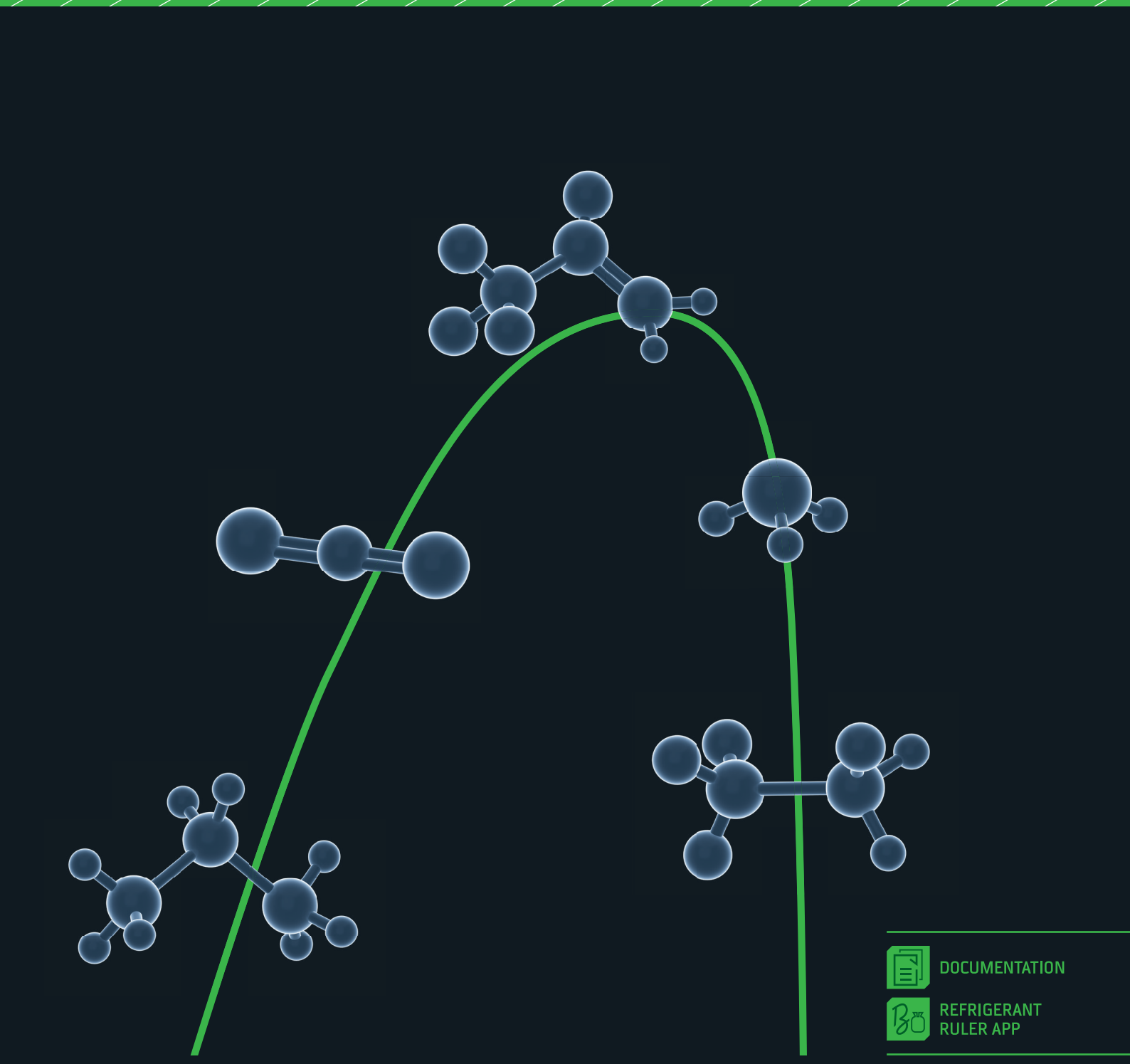
DAS HERZ DER FRISCHE

# 冷媒レポート 21

A-501-21 JP



DOCUMENTATION

REFRIGERANT RULER APP

目次 ページ


第 20 版からの重要改訂 / 補遺

**冷媒の開発と法的状況** ..... **3**

**代替冷媒（概要）** ..... **4**

**環境的側面** ..... **6**
地球温暖化と TEWI 因子 ..... 6
環境効率 ..... 7

**HCFC 冷媒** ..... **8**
暫定的な冷媒としての R22 ..... 8

**HFC 冷媒** ..... **9**
R12 および R22 の代替となる R134a ..... 9
R134a の代替 ..... 11

**混合冷媒** ..... **13**

**冷凍システムに使用する R22 の代替** ..... **17**
R22 および R502 の代替となる R404A および R507A ..... 17
R22 および R502 の代替となる R407A、R407B、R407F、R407H、R422A ..... 18

**空調システムおよびヒートポンプに使用する R22 の代替** ..... **20**
R22 の代替となる R407C // R22 の代替となる R410A ..... 20
R22 の代替となる R417A、R417B、R422D、R438A、R427A ..... 22
R22 の代替となる R32 ..... 23

**HFC の代替となる「低 GWP」の HFO 冷媒と HFO/HFC 混合冷媒** ..... **24**
HFO 冷媒と HFO/HFC 混合冷媒 ..... 24
R134a の代替 ..... 24
R404A/R507A、R410A の代替 ..... 25
その他の開発プロジェクト ..... 26

**ハロゲンを含まない（自然）冷媒** ..... **28**
代替冷媒としての $NH_3$（アンモニア） ..... 28
$NH_3$ の代替となる R723（$NH_3$/DME） ..... 29
代替冷媒としての R290（プロパン） // プロパンの代替となるプロピレン（R1270） ..... 30
代替冷媒および二次流体としての二酸化炭素 R744（$CO_2$） ..... 33

**特殊用途向けの冷媒** ..... **37**

**圧縮機用の潤滑油** ..... **41**

**冷媒の特性** ..... **42**

**適用範囲** ..... **44**

**潤滑油の概要** ..... **45**


BITZER 冷媒ルーラ アプリへ

Android

iOS

デジタル版 冷媒レポートへ

この版はこれ以前のすべての版に優先するものとします。

冷媒の排出による成層圏オゾン層の破壊と大気の温室効果は、1990 年代初頭から冷媒 / 空調技術に大きな変化をもたらすことになりました。

これは特に、用途の広い商業用冷凍および空調プラントの分野に当てはまります。以前これらのシステムに使用されていた主な冷媒は、オゾン破壊性のタイプ、つまり R12、R22、R502 でした。そして、特殊な用途には R114、R12B1、R13B1、R13、R503 が使用されていました。

これらの物質の使用は、工業国ではすでに禁止されていますが、R22 の使用は移行期間の終わりまで延長されています。しかし欧州連合では、R22 も早期に段階的廃止を進めることにしており、数段回にわたって法制化されています（8 ページを参照）。国際的な合意に反して早期に R22 を禁止した主な理由は、小さいとはいえ、オゾン層破壊係数があることです。2010 年以降、段階的禁止のための規制が米国などの他の国々でも発効しています。

こうした状況があるため、冷凍 / 空調業界に非常に大きな影響が及ぶことになります。そのため BITZER は、環境に配慮したシステム設計の研究・開発において指導的な役割を担うことに全力を傾けました。

塩素を含まない（ODP = 0）HFC 冷媒の R134a、R404A、R407C、R507A、R410A が商業的冷凍、空調およびヒートポンプに広く使用されるようになってから多くの年月が経ちますが、ここへ来て新しい課題が浮上してきました。それは主に温室効果に関することで、目指すのは、冷媒損失による直接的排出と、特に効率的なシステム技術からの間接的排出を確実に低減することです。

この分野ではすでに法規制が導入されており、たとえば EU における F ガス規制 No. 517/2014（BITZER カタログ A-510 を参照）、EU エコデザイン指令に一部採択済みまたは準備中の規制（BITZER の A-530 のカタログを参照）などがあります。同様の規制については、オーストラリア、カナダ、米国などで準備が進められていたり、すでに施行されているところもあります。国際レベルでは、2016 年にモントリオール議定書のいわゆる「キガリ改正」が採択され、HFC の段階的削減（フェーズダウン）を 2019 年から開始することで合意されました。エネルギー生産によって生じる間接的排出が、HFC 冷媒によって生じる直接的（$CO_2$ 等価）排出よりもはるかに多いとはいえ、将来的に、高い地球温暖化係数（GWP）をもつ冷媒は使用規制または禁止の対象となります。これに相当するのは主に R404A と R507A で、すでにこれらに代わるものとして、GWP のより低い代替冷媒が提供されつつあります。しかし、法的目標を達成するには、さらに多くの代替冷媒の開発と、自然界に存在する物質（$NH_3$、$CO_2$、炭化水素）の使用を増やすことが必要になると考えられます。

そのために、これらの冷媒や適切なオイル、さらにそれらに応じて調整されたシステムについて、広範囲にわたる試験が求められます。このことから、学術団体、冷凍および石油産業、部品製造業者、多くの革新的な冷凍および空調会社が緊密な協力体制を築いています。

これまでに非常に多くの開発課題が達成され、代替冷媒に適した圧縮機が提供されています。

BITZER は開発プロジェクトのほかにも、冷媒の責任ある使用やシステム / コンポーネントの効率を高める方法に関する法規制と自発的努力を積極的に支持しています。

以下のレポートでは、中規模および大規模の商業用／産業用冷凍、空調システム、ヒートポンプシステムにおいて、環境影響を低減した技術への短期的または中期的な変更を実現する方法を述べていきます。さらに、これまでの経験とプラント技術に対するその影響についてもご紹介いたします。

❄ ❄ ❄

複数の研究により、約 -40°C の冷却部温度に至る範囲で、商業分野で通常使用される蒸気圧縮冷凍プラントは、他のすべての処理過程よりはるかに優れた効率を発揮することが確認されています。

しかし、代替冷媒の選択とシステム設計は特に重要な意味を持ちます。ODP=0、つまりオゾン層を破壊しない物質が求められるほか、特に温室効果の間接的な一因としてのシステムのエネルギー需要が重要な判断基準となっていきます。そのほかにも、冷媒排出による直接的な地球温暖化係数（GWP）も考慮する必要があります。

これらを踏まえてシステムを適切に評価するために、温室効果への総合的な影響の分析を可能にする計算方法が開発され、いわゆる TEWI（Total Equivalent Warming Impact、総合等価温暖化因子）が導入されました。また、「環境効率」を考慮した、より広範囲にわたる評価方法も開発されています。これは生態学的な基準（TEWI など）と経済的な基準を考慮したものとなっています（詳細については 7 ページを参照）。

このため、環境に関する冷媒の評価は、設置場所と運転方法に応じて異なる可能性があります。

これまで使用されていた CFC と HCFC、あるは GWP が比較的高い HFC の代替を綿密に評価すれば、代替となり得る純物質冷媒はごく限られていることが分かります。その 1 つが R134a で、GWP が比較的低いため、しばらくの間は使用できると考えられます。同様に、ハイドロフルオロオレフィン（HFO）の R1234yf および R1234ze(E)（GWP < 10）も F ガス規制の対象から除外されています。

R134a より高い体積冷凍能力と圧力レベルを持つほぼすべての冷媒の場合、直接的な代替（フッ素化炭化水素系）は、（主に）混合物として「調合」するしかありません。しかし、熱力学的特性、可燃性、毒性、地球温暖化係数を考慮に入れると、使用可能な候補のリストは極めて限定されたものになります。GWP の小さい混合物には、R134a、R1234yf、R1234ze(E) のほかに、主なものとして R32、R125、R152a があります。

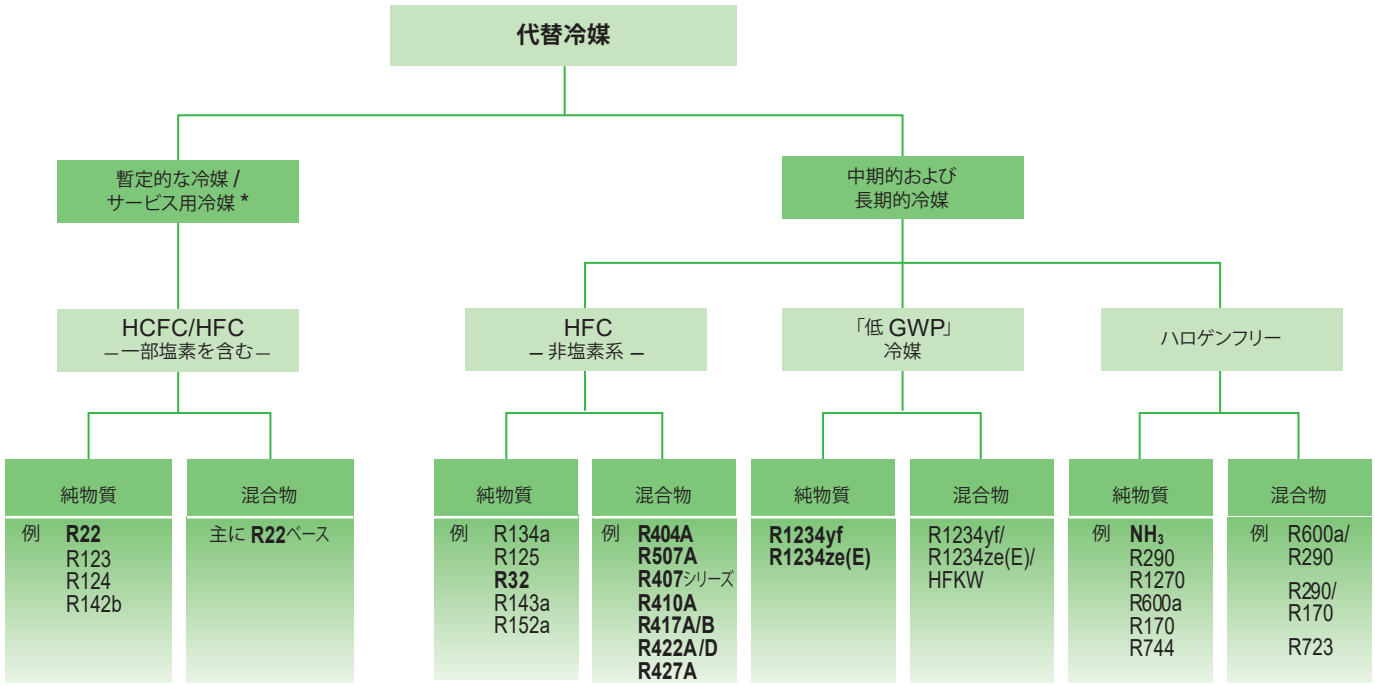
さらに、ハロゲン化された冷媒、アンモニア（$NH_3$）、炭化水素も代替物質と見なされます。ただし、商業用途での使用は厳格な安全要求事項によって制限されています。

二酸化炭素（$CO_2$）は、代替冷媒および二次流体としてもますます重要になってきています。しかし、その特殊な特性のため、一般使用にはさまざまな制限があります。

次のページの図は、代替冷媒の概要を構造化して示し、現在利用可能な単一物質や混合物質を概観できるようにしたものです。この図の後で個別のテーマについて説明していきます。

冷媒特性、適用範囲と潤滑油の仕様については 42 ～ 45 ページをご覧ください。

わかりやすくなるよう、あまり知られていない製品や一部の地域でしか使用されない製品についてはこのレポートでは記述しませんが、それらの製品が劣っていることを意味するものではありませんのでご了承ください。




* サービス用冷媒には、混合成分として HCFC が含まれています。そのため、これらには R22 と同じ法規制が適用されます（8 ページを参照）。
古い設備の改修が進んでいるため、これらの冷媒の重要性は明らかに低下しつつあり、中には生産がすでに打ち切られたものもあります。
しかし、サービス用混合冷媒の開発史上の観点から、このレポートでは今後もこれらの冷媒についても言及していきます。

図 1　冷媒の構造的分類

## HFC 冷媒

2020 年 9 月現在

| 以前の冷媒 | 代替冷媒 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **ASHRAE 分類** | **商品名** | | **組成（混合物を含む）** | **詳細情報** |
| R12<br>(R500) | **R134a**<br>**R152a** ①<br>**R437A** ④ | –<br>–<br>ISCEON®MO49 Plus | <br><br>Chemours | –<br>–<br>R125/134a/600/601 | ページ<br>9~12, 16, 42~44 |
| R22/R502 | **R404A**<br>**R507A**<br>**R422A** | 各種<br>各種<br>ISCEON®MO79 | <br><br>Chemours | R143a/125/134a<br>R143a/125<br>R125/134a/600a | ページ<br>17~19, 42~44 |
| R22 | **R407A**<br>**R407C**<br>**R407F**<br>**R407H**<br>**R410A**<br>**R417A**<br>**R417B**<br>**R422D**<br>**R427A**<br>**R438A** | –<br>各種<br>Performax®LT<br>–<br>各種<br>ISCEON®MO59<br>–<br>ISCEON®MO29<br>Forane®427A<br>ISCEON®MO99 | Koura (Mexichem), Arkema<br><br>Honeywell<br>Daikin Chemical<br><br>Chemours<br>Daikin Chemical<br>Chemours<br>Arkema<br>Chemours | R32/125/134a<br>R32/125/134a<br>R32/125/134a<br>R32/125/134a<br>R32/125<br>R125/134a/600<br>R125/134a/600<br>R125/134a/600a<br>R32/125/143a/134a<br>R32/125/134a/600/601a | ページ<br>18~23, 42~44 |
| R114<br>R12B1 | **R236fa**<br>**R227ea** | –<br>– | | –<br>– | ページ<br>37, 41~43 |
| R13B1 | **R410A** | 各種 | | R32/125 | ページ39, 42~44 |
| R13<br>R503 | **R23**<br>**R508A**<br>**R508B** | –<br>KLEA®508A<br>Suva®95 | <br>Koura (Mexichem)<br>Chemours | –<br>R23/116<br>R23/116 | ページ<br>40, 42~44 |

表 1　CFC および HCFC 冷媒の代替品（非塩素系 HFC）

## HFO および HFO/HFC 混合冷媒

2020 年 9 月現在

| 現在の冷媒 | 代替冷媒 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | ASHRAE 分類 | 商品名 | | 組成（混合物を含む） | 詳細情報 |
| R134a | R1234yf ① | 各種 | | – | ページ 24～27<br>42～44 |
| | R1234ze(E) ① | 各種 | | – | |
| | R450A | Solstice® N-13 | Honeywell | R1234ze(E)/134a | |
| | R456A | AC5X | Koura (Mexichem) | R32/1234ze(E)/134a | |
| | R513A | Opteon™ XP10<br>R513A | Chemours<br>Daikin Chemical | R1234yf/134a | |
| | R516A | ARM-42 | Arkema | R1234yf/152a/134a | |
| R404A/R507A*<br>(R22/R407C*) | R448A | Solstice® N-40 | Honeywell | R32/125/1234yf/1234ze(E)/134a | ページ 24～27<br>42～44 |
| | R449A | Opteon™ XP40<br>Forane® 449 | Chemours<br>Arkema | R32/125/1234yf/134a | |
| | R449C | Opteon™ XP20 | Chemours | R32/125/1234yf/134a | |
| R410A | R32 ① | 各種 | | – | ページ 24～27<br>42～44 |
| | R452B ① | Opteon™ XL55<br>Solstice® L-41y | Chemours<br>Honeywell | R32/125/1234yf | |
| | R454B ① | Opteon™ XL41 | Chemours | R32/1234yf | |

* HFO/HFC 混合冷媒はさまざまな種類があり、開発された製品に変更が加えられる可能性があるため、上記のリストには、R134a および R404A/R507A の代替として GWP が約 600（R134a）および GWP < 1500（R404A/R507A）の不燃性の混合冷媒のみを記載しています。HFO/HFC 混合冷媒については、24 ページの「HFC の代替としての「低 GWP」HFO 冷媒と HFO/HFC 混合冷媒」を参照してください。また、その他の選択肢についても説明します。

表 2　「低 GWP」の冷媒および混合冷媒

## ハロゲンを含まない冷媒

2020 年 9 月現在

| 現在の冷媒 | 代替冷媒 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | ASHRAE 分類 | 商品名 | 化学式 | 詳細情報 |
| R134a | R290/600a ①<br>R600a ①③ | –<br>– | $C_3H_8/C_4H_{10}$<br>$C_4H_{10}$ | ページ<br>30, 42～44 |
| R404A<br>R507A<br>R22 | R717 ①②<br>R723 ①②<br>R290 ①<br>R1270 ① | –<br>–<br>–<br>– | $NH_3$<br>$NH_3$ + R-E170<br>$C_3H_8$<br>$C_3H_6$ | ページ<br>28～32, 42～44 |
| R124 | R600a ① | – | $C_4H_{10}$ | ページ<br>37, 42～44 |
| R410A | 直接的な代替なし | | | |
| R23 | R170 ① | – | $C_2H_6$ | ページ<br>39, 42～44 |
| 各種 | R744 ③ | – | $CO_2$ | ページ<br>33～36, 42～44 |

図 3　HCFC および HFC 冷媒の代替品（ハロゲンを含まない冷媒）

表 1～3 について　① 可燃性　② 有毒性　③ 以前の冷媒と比べて、冷凍能力と圧力が大きく異なる　④ ODP ゼロのサービス用冷媒

## 地球温暖化と TEWI 因子

すでに述べたように（3 ページの「冷媒の開発と法的状況」を参照）、個々の冷凍プラントの運転が地球温暖化に及ぼす影響を判定する計算法（TEWI = **T**otal **E**quivalent **W**arming **I**mpact）が開発されています。

すべてのハロカーボン系冷媒（非塩素系 HFC を含む）は温室効果ガスの範疇に属しており、これらの物質を排出すると、地球温暖化効果の一因となります。しかもその影響は、（水蒸気と並んで）大気中の主な温室効果ガスである $CO_2$ と比較してはるかに大きいものです。100 年の期間で見ると、たとえば 1kg の R134a からの排出量は 1430kg の $CO_2$ とほぼ等しくなります（GWP = 1430）。

したがって、冷媒損失の低減は将来へ向けての主な課題の一つになることは間違いありません。

一方、冷凍プラントによる地球温暖化効果の主な要因は、エネルギー生成によって生じる（間接的な）$CO_2$ の排出です。欧州の平均的な $CO_2$ 排出量は、発電所で使用される化石燃料の比率が高いため、電力 1kWh につき約 0.365kg になります。発電所の全寿命を考えると、これは著しい地球温暖化効果を持つことになります。

（熱力学的）エネルギー収支の優れた代替冷媒が必要となるだけでなく、全体のバランスに占める決定的な比率のため、**高効率の圧縮機**とその関連機器、および最適化されたシステムコンポーネントとシステム制御への要求も高まっています。

さまざまな圧縮機の設計を比較してみると、（エネルギー需要による）間接的な $CO_2$ 排出量の相違が全体の効果に対して、冷媒損失よりもさらに大きな影響を及ぼす場合があることが分かります。

通常の計算式は図 2 に示す通りです。ここから TEWI 因子を計算し、さまざまな影響領域を分離することができます。

次の図 3 は、さまざまな冷媒充填量、漏れ損失、エネルギー消費量（例：中温用途の R134a を使用）に対する TEWI の値を示したものです。

この例は、冷媒充填量に対する百分率で全漏れ量を簡単に示しています。実際の値は変動が大きいため、個別に構築したシステムや著しく細分化されたプラントでは、リスクが大きくなります。

世界中で温室効果ガスの排出量を低減するために大きな努力が払われ、法規制がすでに一部で整備されています。2007 年以降、EU では「特定のフッ素化温室効果ガスに対する規制」が施行されており、その中で冷凍 / 空調システムに対する厳格な要求事項も定義されています。さらに、改正された規制 No. 517/2014 が 2015 年 1 月より適用される予定です。

**TEWI** = TOTAL EQUIVALENT WARMING IMPACT

$$TEWI = (GWP \times L \times n) + (GWP \times m \times [1 - \alpha_{recovery}]) + (n \times E_{annual} \times \beta)$$

漏れ ／ 回収損失 ／ エネルギー消費量

地球温暖化に対する直接的な寄与 ／ 地球温暖化に対する間接的な寄与

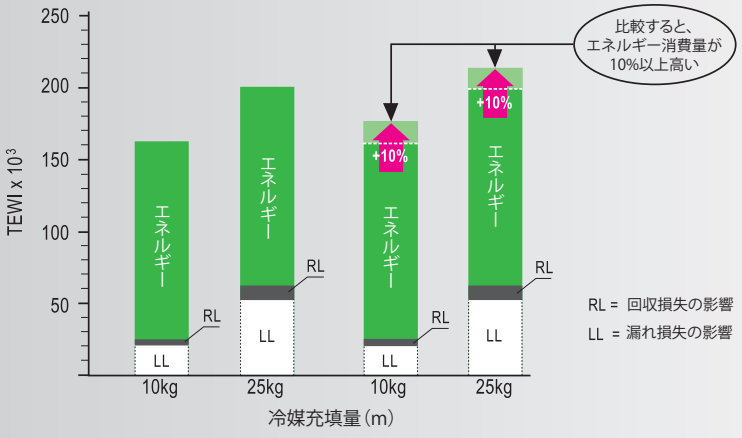
| | | |
|---|---|---|
| GWP | = 地球温暖化係数 | [IPCC 評価報告書の $CO_2$ 関連項目に準拠] |
| L | = 年間漏れ率 | [kg] |
| n | = システムの稼働時間 | [年] |
| m | = 冷媒充填量 | [kg] |
| $\alpha_{recovery}$ | = リサイクル係数 | |
| $E_{annual}$ | = 年間エネルギー消費量 | [kWh] |
| $\beta$ | = 1 kWh 当たりの $CO_2$ 排出量 | （エネルギーミックス） |

図 2　TEWI データの計算方法

例

中温用途のR134a

| | |
|---|---|
| SST | -10 °C |
| SCT | +40 °C |
| m | 10 kg // 25 kg |
| $L_{[10\%]}$ | 1 kg // 2.5 kg |
| CAP | 13.5 kW |
| E | 5 kW x 5000 h/a |
| $\beta$ | 0.365 kg $CO_2$/kWh* |
| $\alpha$ | 0.75 |
| $\eta$ | 15 years |
| GWP | 1430 ($CO_2$ = 1) |
| | 時間枠100 年 |




* EU2019 の平均、出典：www.carbonfootprint.com

図 3　TEWI データの比較（例）

## 環境効率

上述したように、特定の TEWI 値に基づいた評価は、冷凍、空調、ヒートポンプ設備の運転期間中の地球温暖化効果を考慮していますが、生態学的および経済的な側面全体を考慮しているわけではありません。

ただ、生態学的側面はさておき、技術の評価と投資の判断を行う場合、経済的な側面は非常に重要になります。技術的なシステムの場合、環境影響を低減すると高いコストを伴うことが多く、反対にコストの削減がたびたび生態学的な影響を増大させてきました。投資コストはほとんどの企業にとって決定的な要素となりますが、生態学的な問題を最小限に抑えることに関する議論はおざなりにされがちです。

そこで、より客観的な評価を目指して、2005 年と 2010 年にスーパーマーケットの冷凍プラントの例を用いて、**環境効率**を評価するためのコンセプトを説明した研究 * が発表されました。この研究は、付加価値（製品の経済価値）と結果としての環境影響との関係に基づいています。

この評価アプローチでは、システムのライフサイクル全体が以下の観点で考慮されています。

- ISO 14040 に準拠したライフサイクルアセスメントのコンセプトに従った生態学的成果
- ライフサイクルコスト分析による経済的成果

これは、全体的な環境影響（直接的および間接的な排出を含む）のほか、投資コスト、運転および廃棄コスト、資本コストについても考慮されていることを表しています。

これらの研究では、最適化された（運転コストを最小限に抑えた）プラント設備に投資することで環境効率を改善できることも明らかにされています。ここでは、冷凍および関連システム技術の選択が重要な役割を担います。

環境効率は図で表すことができます（図 5 の例を参照）。ここでは環境効率評価の結果が座標系の X 軸、ライフサイクルコスト分析の結果が Y 軸に示されています。この図を見れば分かる通り、座標系の右上にあるシステムほど環境効率が高く、逆に左下にあるのは非効率なシステムです。

座標系内に引かれた斜線は、環境効率が等しい線です。これは、ライフサイクルコストと環境影響が異なるシステムやプロセスであっても、環境効率が等しくなる可能性が十分あることを意味しています。

*2005 年の研究：
作成：Solvay Management Support GmbH、Solvay Fluor GmbH（ハノーファー）
協力：Information Centre on Heat Pumps and Refrigeration（IZW、ハノーファー）

2010 年の研究：
作成：SKM ENVIROS（UK）
委託および協力：EPEE（European Partnership for Energy and Environment）

いずれのプロジェクトも冷凍産業のエキスパートから成る諮問グループの支援を受けています。

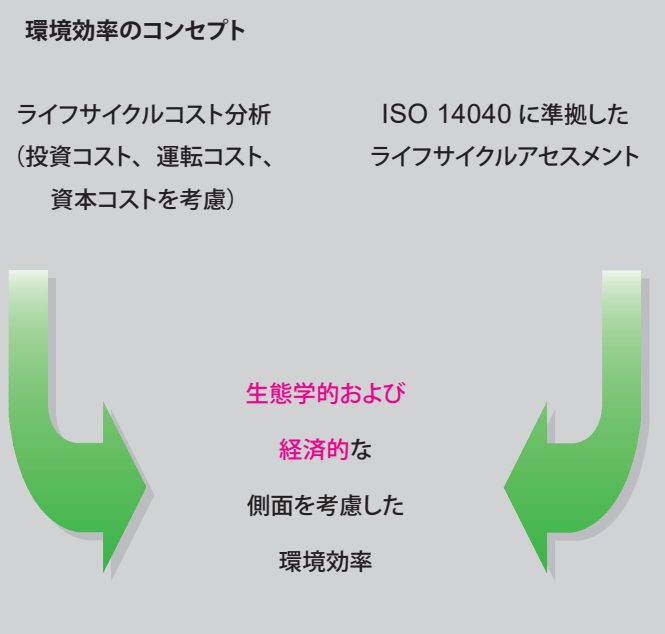



図 4　環境効率のコンセプト

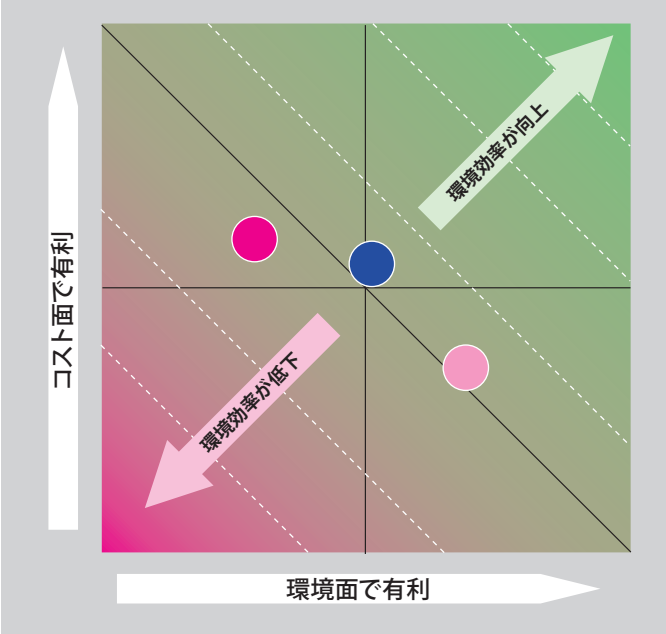



図 5　環境効率評価の例

## 暫定的な冷媒としての R22

R134a、R404A/R507A などの非塩素系の冷媒（図 1 と表 1）が広く利用されるようになったとはいえ、EU などではすでに GWP のより低い製品に切り替わりつつあります。しかし R22 は、依然として多くの分野で国際的に、新設備や既存の設備の改造においても使用されています。

その理由としては、投資コストが比較的低いこと（特に R134a システムと比べて）に加えて、適用範囲が広いこと、熱力学的特性が優れていること、エネルギー需要が小さいことなどが挙げられます。さらに、R22 とその成分はまだ広く入手できることも重要な要素となっていますが、代替冷媒はまだ全面的に保証されているわけではありません。

R22 はこのように一般的には好ましい性質を持っているにも関わらず、わずかながらもオゾン層を破壊する可能性があるため、すでにさまざまな地域で新しいシステムやサービス目的で使用することが制限されています*。

コンポーネント / システム技術に関しては、多くの詳細事項も考慮する必要があります。冷媒の R22 は、R12** に比べて約 55% 高い冷凍能力と圧力レベルを備えています。また、R12（図 6）および R502** と比べてはるかに高い吐出しガス温度も重要な要素となっています。

HFC 冷媒の R134a、R404A/R507A と比較した場合、熱負荷に関して類似の関係が見られます（9 ページおよび 17 ページ）。

### 結果としての設計基準

吐出しガス温度が高いため、とりわけオイルと冷媒の熱安定性の面で、また酸の生成と銅被膜の危険を防止するためにも、低温のプラントが特に問題となります。そこで、二段圧縮、冷媒噴射の制御、補助冷却、吐出しガス温度の監視、吸込みガス過熱度の制限、特に慎重な設置などの特別な措置が必要になります。

* ドイツとデンマークでは 2000 年 1 月 1 日以降、スウェーデンでは 1998 年以降、新しい設備への使用は許可されていません。

2001 年 1 月 1 日以降、EU の他の加盟国にも制限が適用されています。関連措置は、2009 年に改正されたオゾン破壊性物質に関する EU 委員会の ODS 規制 1005/2009 で定義されています。この規制は、全 EU 加盟国内でサービス用 R22 の使用についても制限しています。

2010 年以降、段階的廃止のための規制が米国などの他の国々でも適用されています。

** ほぼすべての国々ですでに禁止されています。

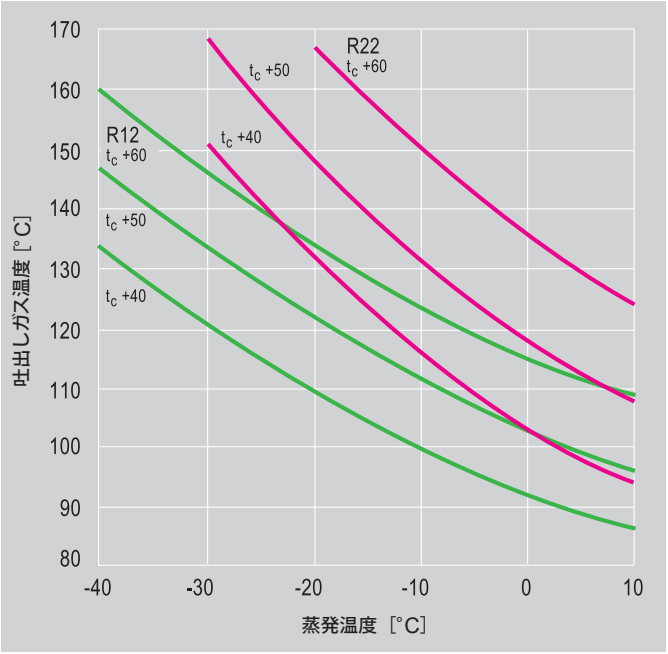



図 6　R12/R22 – 半密閉型圧縮機の吐出しガス温度の比較

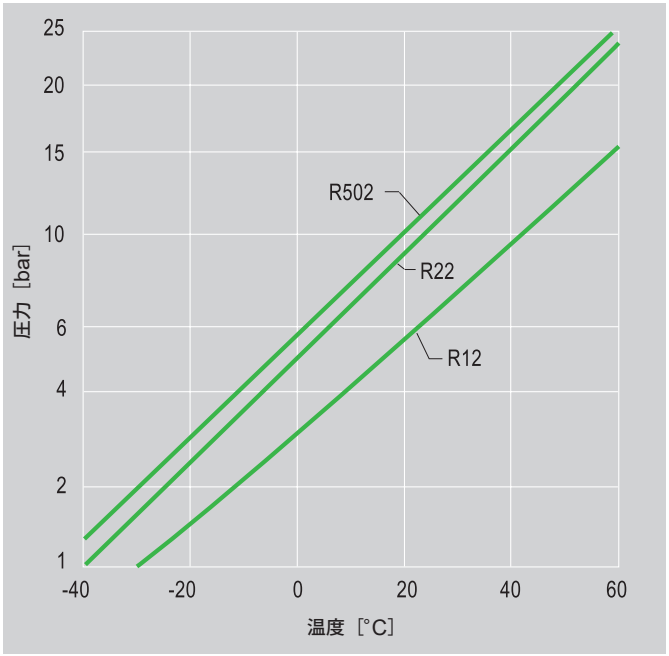



図 7　R12/R22/R502 – 圧力レベルの比較

## R12 および R22 の代替となる R134a

R134a は総合的に試験された最初の非塩素系（ODP = 0）の HFC 冷媒で、現在は世界中の多くの冷凍 / 空調ユニットで使用され、良い結果が得られています。R134a は、純物質として使用されるだけでなく、さまざまな混合冷媒の成分としても使用されています。

**R134a の熱力学的特性は R12 と類似：**

冷凍能力、エネルギー需要、温度特性と圧力レベルについては、少なくとも空調 / 中温冷凍プラントでは同等です。そのため、この冷媒は以前の R12 のほぼあらゆる用途の代替として使用できます。

一部の用途では、**R134a は R22 の代替としても推奨されています**。その大きな理由は、新しいプラントやサービスで R22 の使用が制限されていることです。しかし、R134a の体積冷凍能力が低いため（図 9 を参照）、R22 の場合より大きな圧縮機の押しのけ量が必要となります。

また、低い蒸発温度で使用する場合の制約も考慮に入れなくてはなりません。総合的な試験により、R134a の能力は広範囲の圧縮機運転条件において、理論的な予想を上回ることが実証されています。温度レベル（吐出しガス、オイル）は R12 よりも低く、したがって R22 の値を大きく下回ります。そのため、空調および中温冷凍プラントやヒートポンプで数多くの用途が考えられます。特に、非共沸混合冷媒と異なり、蒸発器と凝縮器における伝熱特性が優れているため、経済的に使用できます。

R134a には、GWP が比較的低い（1430）という特徴もあります。したがってこの冷媒は、将来の規制（EU の F ガス規制など）を考えても、かなりの期間にわたって使用できると考えられます。必要な場合には、GWP が約 600 の不燃性（A1）の HFO/HFC 代替冷媒（表 5）に後で切り替えることも比較的容易に行えます。

**R134a とその他の HFC 用の潤滑油**

従来の鉱物油と合成潤滑油は、R134a や以下に述べるその他の HFC と混和性（相溶性）がありません。そのため、冷却回路内に十分に行き渡りません。

非混合性オイルは熱交換器内に沈積して熱伝導を妨げることがあり、プラントが稼働できなくなるおそれがあります。

そのため、適切な溶解度を持った新しい潤滑油が開発され、多年にわたり使用されています。これらの潤滑油のベースとなっているのは、ポリオールエステル（POE）とポリアルキレングリコール（PAG）です。

潤滑油の詳細については、41 ページの「圧縮機用の潤滑油」の章を参照してください。

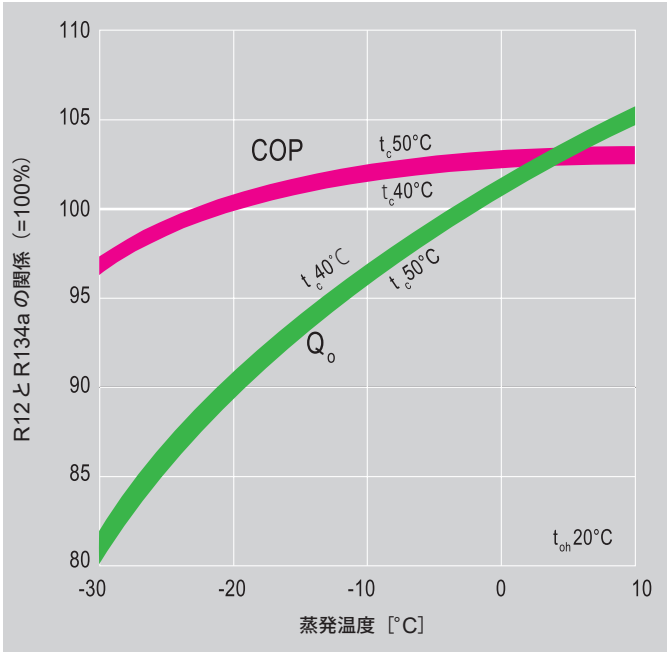



図 8　R134a/R12 – 半密閉型圧縮機の性能データの比較

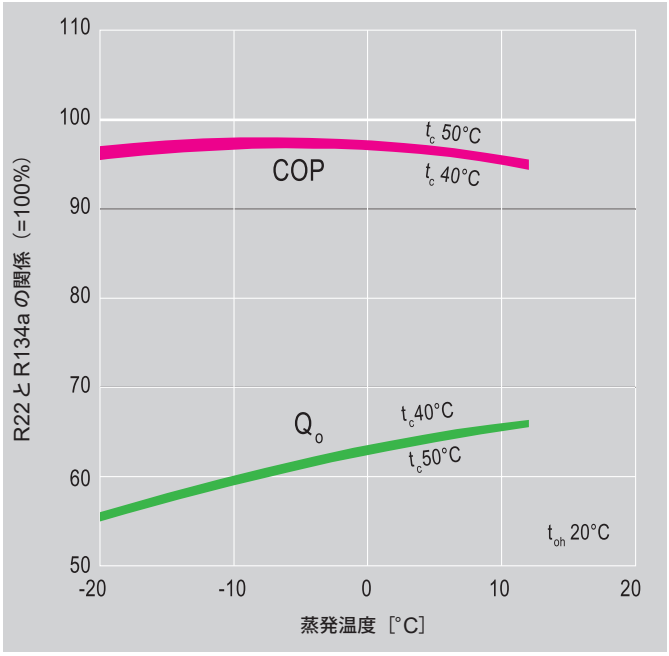



図 9　R134a/R22 – 半密閉型圧縮機の性能データの比較

### 結果としての設計と構造基準

R134a と特殊な充填オイルの場合は、適切な圧縮機とシステムコンポーネントが必要になります。CFC プラントで使用される通常の金属材料もエステルオイルの使用に関して実証済みですが、エラストマは変化した状況に合わせなくてはならない場合もあります。特にフレキシブルホースについては、残留含水率が最小限であることと、透過率が低いことが求められます。

プラントは特別な注意を払って脱水を行う必要があり、潤滑油の充填や交換の際にも注意が必要です。さらに、比較的大きなドライヤを装備し、これを R134a の小さい分子サイズに適合させる必要もあります。

**これまで、R134a とエステルオイルに関して非常に有益な経験が何年にもわたり積み重ねられてきました。この冷媒向けに、BITZER は豊富な種類のレシプロ圧縮機、スクリュー圧縮機、スクロール圧縮機を提供しています。**

### 既存の R12 プラントの R134a への切り替え

この件に関しては当初から盛んに議論が交わされ、いくつかの改造方法が推奨・実践されました。今日では、技術的および経済的に適切なソリューションについて一般的な意見の一致が見られています。
その方法では、エステルオイルの特性が非常に有利に働きます。ある条件下でエステルオイルは CFC 冷媒とともに使用することができ、鉱油との混合も可能で、R134a システムにおいて塩素の割合を数百 ppm まで許容できます。

しかし、残留含水率が大きな影響力を持つため、徹底した真空引き（残留塩素の除去と脱水）が必須となり、十分なサイズのドライヤを設置する必要もあります。メンテナンス不良、ドライヤの能力不足、高い熱負荷などにより、R12 を使用した運転ですでに化学的な安定性が十分に得られていなかったシステムの場合には、確かな実績は得られませんでした。この場合、塩素を含むオイル分解生成物の沈積が増加することがよくあります。これらの生成物は、エステルオイルと R134a の混合物の極性が大きいために発生し、圧縮機や調整装置に入り込んでしまいます。そのため、条件の良いプラントでなければ切り替えを行うことはできません。

### 可搬式空調（MAC）システムにおける R134a の制限

「MAC システムからの排出」に関する EU 指令により、R134a を新しいシステムに使用することは禁止されており、すでにさまざまな代替技術が利用されています。詳細については 11 ページ、36 ページを参照してください。

### R134a の使用に関する BITZER の補足情報（https://www.bitzer.de も参照）

❑ KT-500 に関する技術情報
「レシプロ圧縮機用の BITZER 冷凍圧縮機オイル」

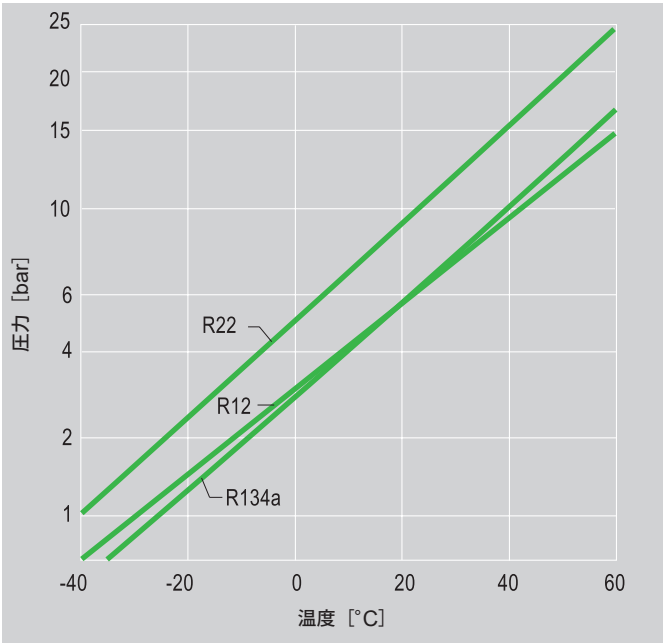



図 10　R134a/R12/R22 – 圧力レベルの比較

## R134a の代替

冷媒回路に開放型圧縮機とホース接続口を備えた可搬式空調システム（MAC）では、床置式のシステムよりも漏れの危険が著しく高くなります。この用途における直接排出を低減するために、EU 指令（2006/40/EC）が発せられました。この指令の適用範囲内で 2011 年以降、新しい車両の型式承認は、地球温暖化係数（GWP）が 150 以下の冷媒を使用する場合にのみ認められています。これにより、これらのシステムで長い間使用されてきた R134a（GWP = 1430）は禁止されることになりました。

そこで、これまで代替冷媒と新しい技術が開発され、試験が進められてきました。その際、R152a の使用についても詳しい調査が行われました。

かなり以前から自動車産業はいわゆる「低 GWP」の冷媒の使用について合意してきました。「低 GWP」の冷媒については後述します。

この用途には以前から $CO_2$ 技術が有用とされてきましたが、さまざまな理由から広く利用されるには至っていません（12 ページ、36 ページ）。

## R152a – R134a の代替（?）

R152a は体積冷却能力（約 -5%）、圧力レベル（約 -10%）およびエネルギー効率に関して、R134a と非常に似ていますが、質量流量、蒸気濃度、さらに圧損の低下の面ではかなり有利となっています（約 -40%）。

R152a は長年にわたり混合物の成分として使用されていますが、今日まで純物質の冷媒としては使用されてきませんでした。特に有利な点は、地球温暖化係数が非常に低いことです（GWP = 124）。

R152a はフッ素含有量が少ないため可燃性で、安全性グループ A2 に分類されています。その結果、安全要求事項が増えるため、対応するリスク分析とともに、個別の設計ソリューションと安全措置が必要になります。

このため、乗用車用の可搬式空調システム（MAC）への R152a の使用はまだ実現していません。

## 「低 GWP」の HFO 冷媒 R1234yf

EU 内で可搬式空調システムでの R134a の使用が禁止されたことで、一連の研究プロジェクトがスタートしました。$CO_2$ 技術（36 ページの「可搬式空調システムにおける $CO_2$」の章を参照）のほか、GWP が極めて低く、熱力学的特性が R134a に近い冷媒が開発されています。

2006 年初めに、「Blend H」（Honeywell）および「DP-1」（DuPont）という名称の 2 種類の混合冷媒が発表されました。これに続き、INEOS Fluor が製品名「AC-1」として、別の仕様の混合冷媒を送り出しました。これらの冷媒はすべて、広い意味でさまざまなフッ素化分子の混合物です。

開発・試験の段階ですべての判定基準をクリアできたわけではないことが明らかとなり、これらの混合物に関して、その後の試験は中止となりました。
このため、DuPont（現在は Chemours）と Honeywell は研究開発を統合し、2,3,3,3 - テトラフルオロプロペン（$CF_3CF=CH_2$）に特化した共同事業で推進することになりました。この冷媒は R1234yf と呼ばれ、ハイドロフルオロオレフィン（HFO）のグループに属しています。これらの冷媒は二重結合を 1 つ持つ不飽和 HFC です。

地球温暖化係数は極めて低く抑えられています（GWP = 4）。大気に放出されると分子が速やかに数日以内で分解するため、GWP は非常に低くなります。ただ、このことは、実際の条件下での冷却回路における長期的安定性に不安を残すことになります。しかし、広範囲の試験が実施されたことで、可搬式空調システムに必要な安定性が実証されました。

R1234yf は、ASTM 681 での測定によると弱可燃性ですが、R152a などよりはるかに多くの点火エネルギーを必要とします。その低い燃焼速度と高い点火力のため、ISO 817 に準拠した新しい安全性グループ「A2L」に分類されました。

広範囲におよぶ一連の試験で、構造上の適切な措置を講じることにより、冷媒の可燃性による MAC システムでのリスクの増大を回避できることが示されました。しかし、（Daimler などの）一部の研究では高い危険性も指摘されています。そのため、多数のメーカが代替技術の開発に再び力を入れるようになりました。

毒性試験、冷却回路に使用されるプラスチックおよびエラストマ材料の適合性試験では、いずれも極めて良好な結果を示しています。一部の潤滑油は高い化学反応性を示したものの、適切な調合または「安定剤」の添加によりこれを抑止することができます。

これまでの実験室や現場で得られた運転に関する経験から、特に性能 / 効率特性に関して有利であると判断されています。可搬式空調の通常の運転条件の範囲では、冷凍能力と成績係数（COP）は R134a と比較して 5% の範囲内にあります。そのため、簡単なシステム変更により R134a と同程度の能力と効率が得られると期待されます。

臨界温度と圧力レベルもほぼ同じですが、蒸気濃度と質量流量は約 20% 高くなります。これを使用した場合の吐出しガス温度は最大で 10 K 低くなります。

可搬式空調システムの改造が比較的容易であることから、この技術は今日に至るまで、競合する $CO_2$ システムに優先して採用されてきました。

しかし、すでに説明したように、R1234yf には可燃性があるため、他の技術ソリューションに焦点を当てた研究が進められています。その中には、消火器（アルゴンなどを使用）のほか、$CO_2$ システムの強化も含まれています。

性質と用途については、24 ページの「HFC の代替となる「低 GWP」の HFO および HFO 冷媒／HFC 混合冷媒」の章を参照してください。

## 混合冷媒

各種の混合冷媒が、既存のプラントや新しいプラント用に、これまで使用されていた冷媒と同等レベルの特性を備えた冷媒として開発されてきました。

混合冷媒に関しては、以下の 3 つのカテゴリーに分ける必要があります。

**1. 暫定的な混合冷媒 / サービス用混合冷媒**
主な成分は HCFC R22 です。これらは R12、R502、その他の CFC の使用が禁止されたことを受けて、主に**比較的古いプラント用のサービス用冷媒**として使用することを意図しています。これに相当する製品はさまざまなメーカから市販されており、切り替えに必要な手順を含めた実際的な経験が提供されています。

ただし、これらの混合冷媒にも、R22 の場合と同様の使用および段階的廃止に関する法的要件が適用されます（8 ページを参照）。

**2. HFC 混合冷媒**
これは冷媒 R502、R22、R13B1、R503 の代替冷媒で、特に R404A、R507A、R407C、R410A が広く使用されています。あるグループの HFC 混合冷媒には炭化水素系の添加剤が含まれています。この添加剤により潤滑油との相溶性が改善され、特定の条件下では従来のオイルを使用することができます。そのため、オイルを変更せずに既存の (H)CFC プラントを非塩素系冷媒（ODP = 0）に切り替えられることもよくあります。

**3. HFO/HFC 混合冷媒**
HFC 冷媒の後継世代にあたり、「低 GWP」の冷媒（R1234yf など）と HFC の混合物です。その基本的な目標は、地球温暖化係数（GWP）を既存のハロゲン化冷媒よりもさらに低減することです（24 ページを参照）。

2 成分および 3 成分の混合冷媒は、冷媒産業においてすでに長い歴史があります。純物質の冷媒と類似した熱力学的特性を備えた、いわゆる「共沸混合冷媒」（R502、R507A など）と、「温度すべり」を伴う相変化のある「非共沸混合冷媒」に大きく区別できます（次章も参照）。「非共沸混合冷媒」は当初、主に特殊な低温用途やヒートポンプシステム用に開発されましたが、例外的な場合を除き、実際のシステム構築には至りませんでした。

初期の実践である程度共通していたのは、R22 に R12 を混合することでオイル戻りを改善し、圧力比が高い場合の吐出しガス温度を低下させることでした。また、能力を向上するために R12 システムに R22 を加えたり、オイル送りを改善するために超低温域で炭化水素を加えることも一般的に行われました。

このように、特定の性質を引き出すための「調合」が可能であることが、新世代の混合冷媒開発の基礎となっていました。

このレポートの冒頭（3 ページの「冷媒の開発と法的状況」の章を参照）ですでに説明したように、以前用いられていた / 現在用いられている冷媒（フッ素化炭化水素系）に対する単一成分の代替品で、R134a よりも体積冷却能力の高いものはありません。そのため、そのような代替冷媒は混合物として「調合」するしかありません。しかし、熱力学的特性、可燃性、毒性、地球温暖化係数を考慮に入れると、使用可能な候補のリストはかなり絞られます。

以前に開発された CFC および HCFC 代替冷媒の場合は高 GWP の物質も使用できたため、物質の選択範囲はまだ比較的広いものでした。しかし、GWP を大幅に低減した混合冷媒を調合するには、使用可能な冷媒は R134a、R1234yf、R1234ze(E) に加え、主に R32、R125、R152a などの冷媒となります。これらのほとんどは可燃性で、その沸点についても大きな差があるため、体積冷凍能力の高いすべての「低 GWP」の混合冷媒はかなりの温度すべりを持つことになります（次章を参照）。

**BITZER は混合冷媒に関して幅広い経験を蓄積してきました。実験室と現場での試験を早い段階で開始したため、混合割合の最適化と適切な潤滑油の試験に関する基本的な情報を得ることができました。このデータに基づき、早くも 1991 年に大型のスーパーマーケットプラント □BITZER の半密閉型システムを 4 基並列接続 □ の稼働をスタートさせることに成功しました。また、最先端の技術により、長年にわたってこれらの混合冷媒を実にさまざまなシステムで使用してきた実績も広く知られています。**

### 非共沸混合冷媒の一般特性

蒸発および凝縮プロセスにおいて単一物質として扱われる共沸混合冷媒（R502、R507A など）と異なり、非共沸混合物の相変化は一定の温度範囲にわたる「温度すべり」の形で起こります。

この「温度すべり」は程度の差こそあれ、はっきりと現われ、主に個別成分の沸点と配合比率に左右されます。実効的な値によっては、何らかの補助的な定義が用いられることもあり、たとえば温度すべりが 1 K 以下の冷媒は「疑似共沸」または「半共沸」混合冷媒と呼ばれます。

温度すべりの本質的な点は、蒸発中であっても温度がわずかに上昇し、凝縮中でも温度が低下することです。言い換えれば、ある圧力レベルでは、液相と気相とで異なる飽和温度が生じることになります（図 11）。

純物質の冷媒と比較できるよう、蒸発温度と凝縮温度が平均値として定義されることがよくあります。そのため、過冷却あるいは過熱状態の測定値（平均値に対して）は現実の値ではありません。どちらに対しても、実際の温度差（露点と沸点に関して）はより小さい値となります。圧縮機吸込み側での最低過熱度（通常は 5 ～ 7K）と液受液器（蒸気泡）下流の冷媒の質を評価する場合、これらの要因は非常に大きな意味を持ちます。

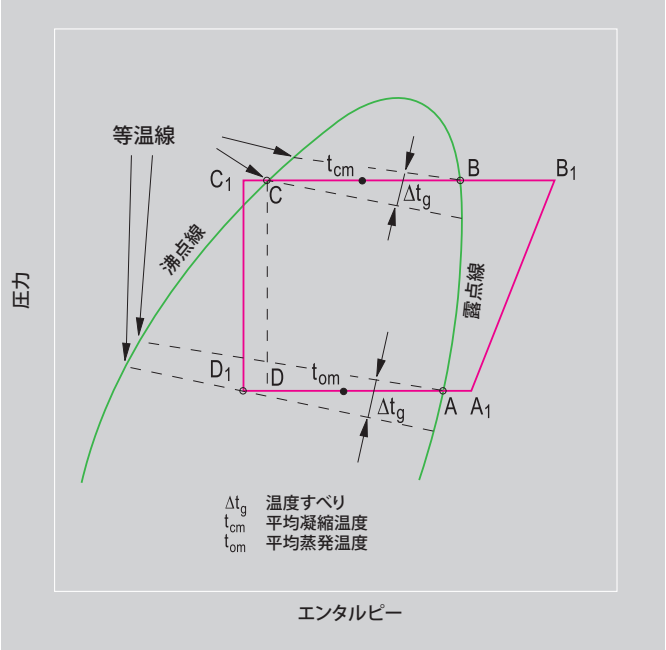



図 11　非共沸混合冷媒の蒸発特性と凝縮特性

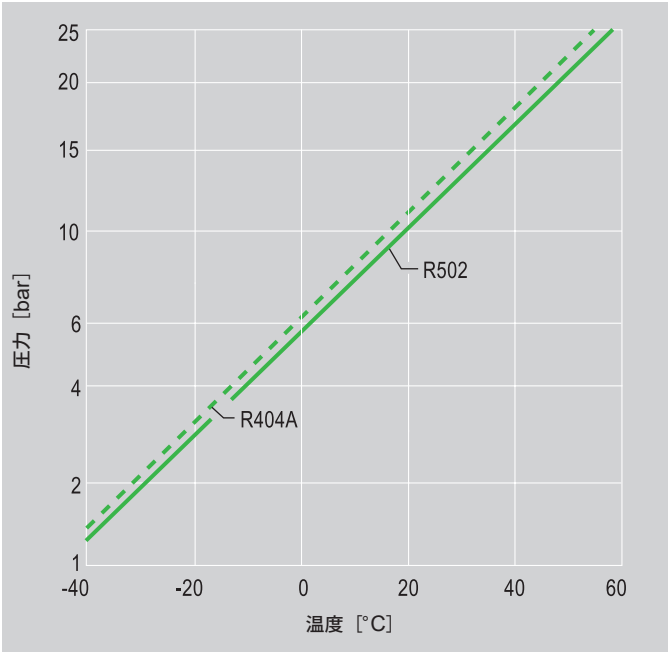



図 12　R404A と R502 の圧力レベルの比較

圧縮機の定格容量の統一された分かりやすい定義に関しては、改正基準の EN 12900 および AHR1540 が適用されます。蒸発温度および凝縮温度は飽和条件（露点）を基準としています。

- ❑ A 点（図 11）による蒸発温度
- ❑ B 点（図 11）による凝縮温度

この場合、有効な過熱度と過冷却温度の評価は簡単になります。

ただし、システムの実際の冷凍能力 * が圧縮機の定格容量よりも大きい場合があることを考えなければなりません。その原因の 1 つは、蒸発器入口の温度が実際にはより低いことがあるためです。

非共沸混合冷媒のさらなる特徴は、漏れが生じたときに濃度シフトが起こる可能性があることです。純気相および純液相における冷媒の損失は基本的に問題とはなりませんが、膨張弁の直後、蒸発器や凝縮器 / 受液器内などの相変化領域での漏れには注意する必要があります。したがって、これらの部分にはろう接または溶接継手を使用することが推奨されます。

一方、広範囲にわたる研究の結果、漏れによる濃度変化は当初懸念されていたほど重大ではないことが分かってきました。いずれにせよ、後述の安全性グループ A1 の物質（42 ページを参照）は、回路の内外を問わず可燃性混合物を形成することはありません。温度すべりが小さい場合は、元の冷媒を補充することで、それ以前と事実上同じ運転条件と温度を実現できます。

混合冷媒を実際に取り扱う際、下記のような条件や推奨事項も考慮する必要があります。

- ❑ プラントには常に液冷媒を充填する必要があります。充填シリンダから蒸気が入り込むと、濃度シフトが生じる可能性があります。
- ❑ すべての混合冷媒には 1 つ以上の可燃成分が含まれているため、システム内に空気が入り込まないようにする必要があります。空気の比率が高いと、高圧下または真空引きの際に発火点の危険なシフトが起こることがあります。
- ❑ 満液式蒸発器を用いるプラントでは、温度すべりの大きい混合冷媒の使用は推奨できません。この種の蒸発器の内部では著しい濃度シフトが予想されるため、循環する冷媒の質量流量も変化します。

* コンデンシングユニットの EN 13215 規格の新版（2020）には、平均蒸発温度に基づく性能データの宣言も含まれています。これにより、単一成分冷媒の性能データと直接比較できます。

## R502 の代替として R22* を使用したサービス用混合冷媒

古い設備の改修が進んでいるため、これらの冷媒の重要性は明らかに低下しつつあり、中には生産がすでに打ち切られたものもあります。しかし、サービス用混合冷媒の開発史上の観点から、このレポートでは今後もこれらの冷媒についても言及していきます。

これらの冷媒は「サービス用混合冷媒」のグループに属し、R402A/R402B*（HP80/HP81 – DuPont）、R403A/R403B*（旧 ISCEON® 69S/69L）、R408A*（Forane® FX10 – Arkema）などの名称で市販されています。

ベース成分にはいずれも R22 が使用されていますが、その高い吐出しガス温度は、断熱圧縮指数の低い非塩素系物質（R125、R143a、R218 など）を加えることにより大幅に低下しています。これらの添加剤は質量流量が非常に大きいことを特徴としており、その混合冷媒は R502 と極めて似たものになります。

R402A/B と R403A/B には、R290（プロパン）が第 3 の成分として加えられ、炭化水素の特に良好な溶解特性によって従来の潤滑油との相溶性を改善しています。

これらの混合冷媒にはそれぞれ 2 種類のバリエーションがあります。R502 と同等の冷凍能力を持つように混合冷媒を最適化したとき、実験室での測定では非常に高い吐出しガス温度が確認されました（図 13）。そのため、特に吸込みガス過熱度が比較的高い場合（スーパーマーケットで使用する場合など）では適用範囲が制限されます。

一方、吐出しガス温度を R502 のレベルまで下げる効果のある R125 や R218 の割合を多くすると、冷却能力をある程度高めることができます（図 14）。

材料適合性に関しては、これらの混合冷媒は (H)CFC 冷媒と類似したものと判断できます。R22 と R290 の割合により、従来の冷凍機油（できれば半合成油または全合成油）を使用することも可能です。

プラスの側面の他に、不利な点もいくつかあります。その 1 つが、これらの物質を代替として使用できるのは限られた期間内だけという点です。（低い割合とはいえ）R22 が含まれるため、オゾン層を破壊する可能性があるほか、添加成分の R125、R143a、R218 は高い地球温暖化係数（GWP）となっています。

### 結果としての設計基準 / 既存の R502 プラントの改造

R502 に適合する圧縮機とコンポーネントは多くの場合、そのまま使用できますが、適用範囲の限界には注意が必要です。すなわち、R502 に比べて R402B**、R403A**、R408A** では吐出しガス温度が高く、R402A**、R403B** では圧力レベルが上昇します。

R22 と R290 は相溶性が良好であるため、プラントの改造後に塩素を含むオイル分解生成物の沈殿物が溶けて、圧縮機や制御装置内に入り込むおそれがあります。R502 を使用した運転において、すでに化学的安定性が不十分だったシステム（メンテナンス不良、ドライヤの能力不足、高い熱負荷など）は特に危険にさらされることになります。

そのため、改造する前に、洗浄用として大型の吸込みガスフィルタと液ラインドライヤを取り付け、約 100 時間の運転後にオイルを交換する必要があります。さらに、その他の点検を実施することも推奨します。

*R22 を含む混合冷媒を使用する場合は、規制を遵守する必要があります（8 ページも参照）。
** ASHRAE 標準名称に準拠した分類

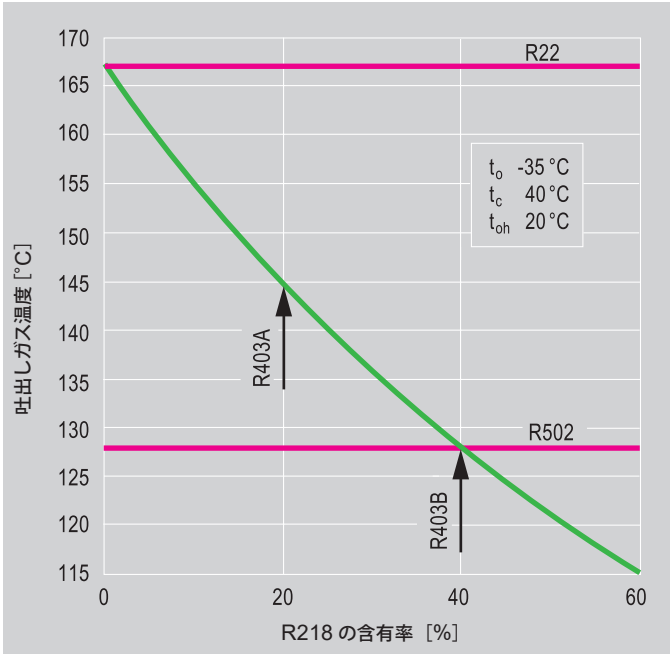



図 13　吐出しガス温度への混合バリエーションの影響（例：R22/R218/R290）

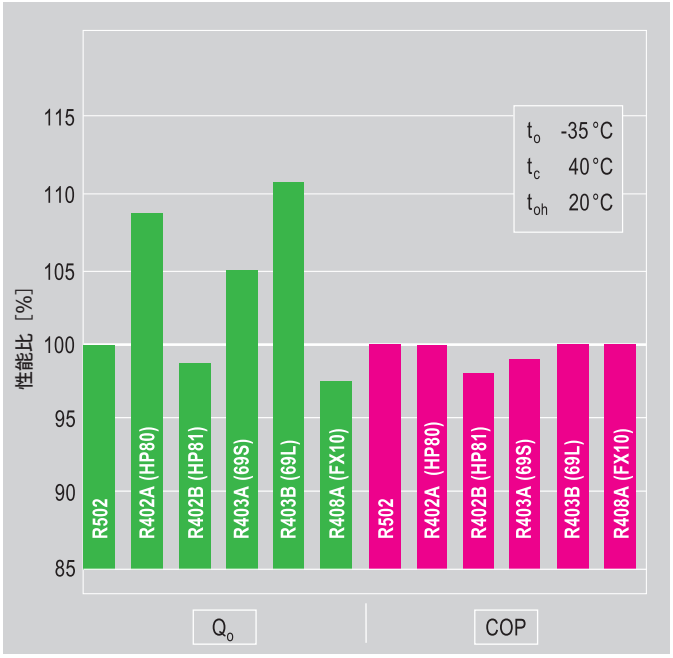



図 14　半密閉型圧縮機の性能データの比較

R502 を使用した場合の運転条件（吐出しガス温度と吸込みガス過熱度を含む）を記録しておき、改造後の値と比較できるようにしてください。その結果によっては、制御装置のリセットやその他の追加測定が必要になる場合があります。

## R12（R500）の代替となるサービス用混合冷媒

すでに得られた経験によると、R134a も既存の R12 プラントからの切り替えに適していますが、そのような「改造」の手法が一般的に可能であるとはいえません。以前に設置された圧縮機のすべてが、R134a の使用に対応するよう設計されているとは限らないからです。また、R134a に切り替える場合、オイルの変更も可能にする必要がありますが、実際のところ、これはほとんどの全密閉型圧縮機では実行することができません。

さらに、経済的な面についても考慮する必要があり、特に R134a に切り替える際に比較的大規模な措置が必要になる古いプラントではこれが重要になります。そのようなプラントでは化学的安定性が不十分であることも多く、成功する可能性はかなり低くなります。

こうしたプラントでは、R134a の代わりに「サービス用混合冷媒」を使用することができ、実際に R401A/R401B、R409A の名で市販されています。その主要成分は HCFC 冷媒の R22、R124 または R142b で、第 3 成分として HFC R152a または R600a（イソブタン）が使用されています。主に HCFC の割合が多いため、従来の潤滑油（できれば半合成油または全合成油）を使用した運転も可能です。サービス用混合冷媒としては R413A（ISCEON® 49 –DuPont）と呼ばれるものもありましたが、2008 年末までに R437A に切り替えられました。しかし、サービス用混合冷媒の開発史上の観点から、このレポートでは今後もこれらの冷媒についても言及していきます。R413A の構成要素は非塩素系の R134a、R218、R600a です。R134a の含有量が多いにもかかわらず、R218 の比較的低い極性と R600a の有利な相溶性のため、従来の潤滑油を使用することができます。

R437A は R125、R134a、R600、R601 の混合冷媒で、R413A と同様の能力と特性を備えています。なお、この冷媒も塩素を含みません（ODP = 0）。

しかし、R413A および R437A と鉱物油およびアルキルベンゼンオイルとの相溶性が限られているため、油分離器などを装備していないと、システムでのオイル循環率が高くなったり、受液器内の液体積が増加することがあります。

圧縮機へのオイル戻りが不十分である場合には、冷媒メーカはオリジナルの充填オイルの一部をエステルオイルに変更することを推奨しています。しかし、圧縮機メーカの観点からすると、そのような方法では潤滑条件に関して非常に入念な検討を行う必要があります。例えば、圧縮機のクランクケースに泡立ちの増加が認められる場合には、エステルオイルへの完全な切り替えが必要になります。また、エステルオイルと HFC の混合物の高い極性の影響で、エステルオイルとの混合またはエステルオイルへの切り替えによって、分解生成物の溶解量が増加し、配管に汚れが発生します。そのため、大型サイズの吸込み洗浄フィルタを取り付ける必要があります。その他の詳細については、冷媒メーカの「指針」を参照してください。

**結果としての設計基準 / 既存の R12 プラントの改造**

圧縮機とコンポーネントは、ほとんど既存のシステムのものを使用することができます。ただし、R413A および R437A を使用する場合は、HFC 冷媒に対する適合性をチェックする必要があります。実際の「改造」手段は、主に冷媒（可能ならばオイルも）の切り替えと膨張弁の過熱度設定の入念な点検に限定されます。

個々の物質の沸点に比較的大きな差があるため、温度すべりが著しく、実効的な吸込みガス過熱度を評価するには、飽和条件に関する正確な知識が必要になります（冷媒メーカの蒸気表と BITZER Refrigerant アプリでご確認いただけます）。

さらに、適用範囲も確認する必要があります。蒸発温度が高い場合と低い場合とで別のタイプの冷媒が求められることがあり、また明らかな容量差があれば、それについても考慮する必要があります。これは、R12 と比較して容量特性曲線が急勾配であるためです。

特に低温混合冷媒の一部では R22 の割合が高いため、冷媒によっては吐出しガス温度が R12 の場合よりもかなり高くなります。そのため、切り替える前に圧縮機の適用制限を確認する必要があります。

その他の用途基準は、すでに述べた R502 の代替の基準と同じです。

* R22 を含む混合冷媒を使用する場合は、規制を遵守する必要があります（8 ページの「暫定的な冷媒としての R22」の章を参照）。

## R22A および R502 の代替となる R404A および R507A

これらの混合冷媒は、中温域および低温域で R22 および R502 に代わる非塩素系の代替冷媒（ODP = 0）です。

すでに 1992 年初めに発売された組成物が Suva® HP62（DuPont）の商品名で知られています。これは長い期間使用され、良い結果を残しています。その他にも Forane® FX70（Arkema）、Genetron® AZ50（Allied Signal/Honeywell）、Solkane® 507（Solvay）などの混合冷媒が市販されていました。HP62 と FX70 は ASHRAE 標準名称に R404A として、AZ50 は R507A として掲載されています。

基本成分は HFC グループに属しており、そのうち R143a は可燃性カテゴリーに分類されています。R125 と比較的高い割合で組み合わされているため、漏れが発生した場合でも可燃性が効果的に抑制されます。

3 つの成分に共通する特長は非常に低い等エントロピー圧縮指数で、その結果吐出しガス温度は R502 に近いか、さらに低い値になります（図 15）。そのため、蒸発温度の低い単段圧縮機を効果的に利用することができます。

3 成分混合冷媒の R404A では、R143a と R125 の沸点が近く、R134a の割合が比較的低いため、適用範囲内の温度すべりは 1 K 以下となります。そのため、熱交換器内の特性は共沸混合冷媒の場合とあまり異なりません。また、伝熱測定からも有利な結果が得られています。

R507A は 2 成分の組み合わせで、比較的広い範囲で共沸混合特性を示します。そのため、どちらかと言えば、条件はさらに良くなります。

各種混合冷媒の性能（図 16）にはほとんど差がなく、R502 に極めて近似しています。このことは、これらの冷媒が市場に広く浸透している理由ともなっています。熱力学的特性の点では、これらの冷媒は特に中低温の商業用途に適しています。

通常の金属材料は HFC 冷媒に対して適合性があります。しかし、エラストマは冷媒の特性の変化に対応させる必要があります。その際に適切な潤滑油は、ポリオールエステルです（41 ページの「圧縮機用の潤滑油」の章を参照）。

地球温暖化係数が比較的高い（GWP = 3922 ～ 3985）のは主に R143a と R125 のためで、このことは問題点ではありますが、R502 に比べれば良好であり、またエネルギー要求量が改善されているため TEWI の値も低下しています。また、いっそう開発が進んだシステム制御により、この点についてその他の改善も見込めます。

ただ、R404A、R507A は地球温暖化係数（GWP）が高いため、EU では 2020 年以降に新設した設備には使用が認められなくなります。このことは、2015 年以降に適用される F ガス規制 No.517/2014 ですでに決定済みですが、現在の段階的廃止計画が厳格な割当制によっているため、多くの用途では段階的な廃止がすでに行われています。詳細については BITZER の A-510 のカタログを参照してください。

米国、カナダとオーストラリアでは、R404A および R507A についても段階的廃止が求められています。HCFC、HFC 冷媒の国際的な段階的廃止（2019 年以降）については、モントリオール議定書のいわゆる「キガリ改正」が 2016 年に採択されました。

GWP がより低い代替冷媒として、以下に述べる HFC 混合冷媒、新しく開発された HFO 冷媒／HFC 混合冷媒（24 ページ以降）があります。

ハロゲンを含まない冷媒や異なる冷媒を使用するカスケードシステムも、特定の用途については選択肢となります（28 ページ以降）。

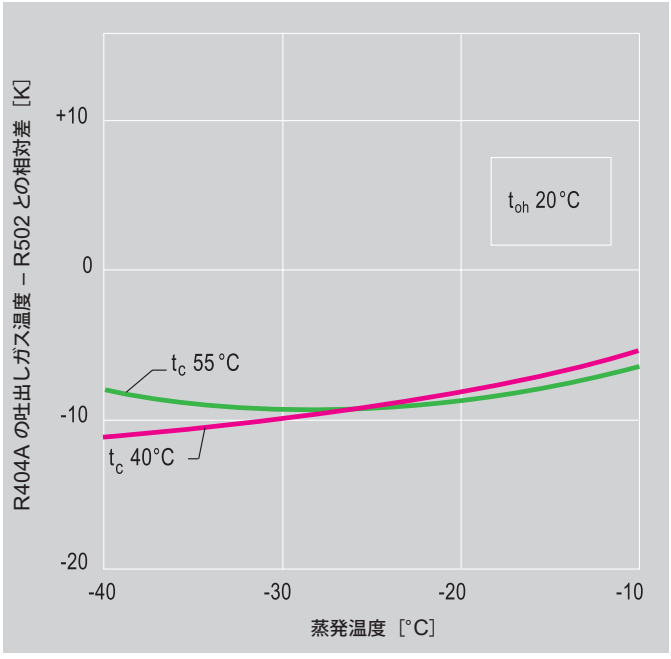



図 15　R404A/R502 – 半密閉型圧縮機の吐出しガス温度の比較

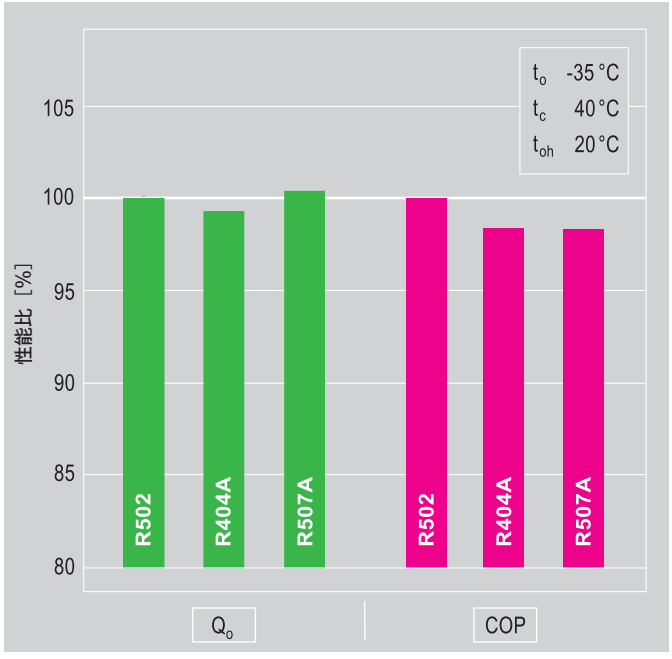



図 16　半密閉型圧縮機の性能データの比較

### 結果としての設計基準

冷凍システム技術は、広い範囲にわたって R22 および R502 に関する経験を基礎とすることができます。

熱力学的な側面では、吸込みラインと液ライン間に熱交換器を設けることが推奨されます。これにより冷凍能力と COP が改善するためです。

**BITZER は、R404A および R507A 用のレシプロ圧縮機、スクロール圧縮機、スクリュー圧縮機を各種提供しています。**

**HFC 混合冷媒の使用に関する BITZER の補足情報（https://www.bitzer.de も参照）**

- ❑ A-540 に関する技術情報「改造 R22 または R404A/R507A ー ステップバイステップ」
- ❑ KT-500 に関する技術情報「レシプロ圧縮機用の BITZER 冷凍圧縮機オイル」

## R22 および R502 の代替となる R407A /407B / 407F / 407H

前述した代替冷媒に代わるものとして、R143a と同様に非塩素系（ODP = 0）で可燃性の R32 をベースとした新たな混合物群が開発されました。R32 冷媒も HFC 系であり、当初は R22 の有力な代替候補とされていました（20 ページ）。しかし、混合のバリエーションが広いため、R404A/R507A と同等の熱力学的特性を得ることも可能です。

この種の冷媒は当初 KLEA® 60/61(ICI) の商品名で販売され、ASHRAE 標準名称には R407A/R407B* の名で掲載されています。

Honeywell は別の混合冷媒を開発し、Performax® LT（ASHRAE 番号は R407F）の商標名で発売しました。Daikin Chemical の R407H も同様の製品です。両製品とも R407A に比べて R32 の含有量が高く、R125 の含有量は低くなっています。R407H の場合、このことが低温用途に制約となっている点があります。

しかし、R32 を含む代替冷媒に必要な条件は、前述した R143a ベースの代替と比べて有利なものではありません。R32 の沸点は非常に低い -52 °C で、さらに等エントロピー圧縮指数は R22 の場合よりはるかに高くなっています。そこで、R404A や R507A のレベルで特性を適合させるには、R125 と R134a の割合を比較的高くする必要があります。これにより R32 の可燃性は効果的に抑制できますが、R134a の割合が高いことから、沸点に大きな差が生じ、温度すべりが拡大します。

R32 の主な利点は地球温暖化係数（GWP = 675）が比較的低いことで、R125 や R134a と組み合わせても、上述した R143a ベースの代替品（R407A：GWP = 2107、R407F：GWP = 1825、R407H：GWP = 1490）よりもかなり低くなります。

そのため、これらは 2020 年以降に GWP < 2500 の冷媒のみを許可することになる EU の新しい F ガス規制の要求事項もクリアしています。

R32 を含有する混合冷媒は測定値で見れば、蒸発温度の低い R404A、R507A に比べて容量が多少低くなっています。しかし、COP にはそれほどの差はなく、中温用途ではむしろ高めです（図 18）。

*R407B の市販はすでに停止されています。しかし、HFC 混合冷媒の開発歴史上の理由から、このレポートでは以後もこの冷媒について言及していきます。

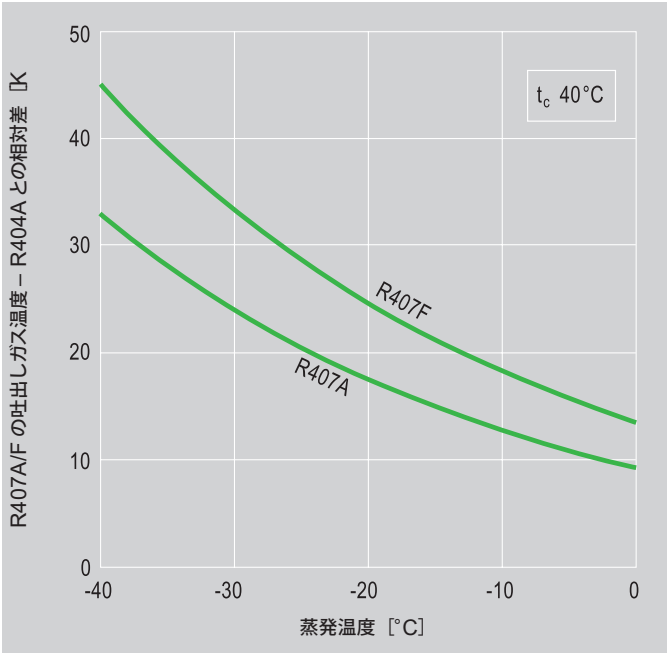



図 17　R407A、R407F/R404A – 半密閉型圧縮機の吐出しガス温度の比較

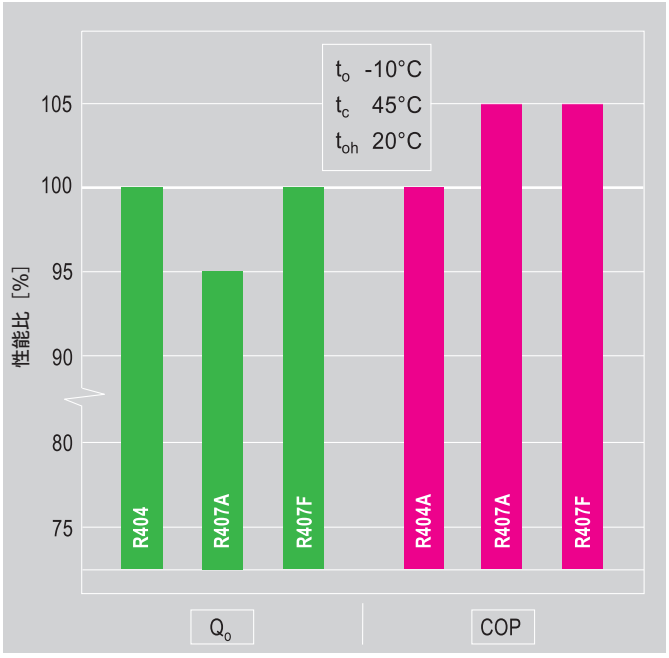



図 18　半密閉型圧縮機の性能データの比較

これらの好ましい条件が実際の使用状況で確保されるかどうかは、システム設計によって左右されます。重要な要因の1つは温度すべりが大きいことで、蒸発器と凝縮器の容量 / 温度の差に悪影響を及ぼす可能性があります。

材料適合性に関しては、R32 混合冷媒は R404A および R507A と同様の評価となります。また、潤滑油についても同じことが言えます。

R32 混合冷媒では、R125 と R134a の割合が比較的高いにもかかわらず、吐出しガス温度は R143a ベースの代替冷媒よりも高くなります（特に R407F で高く、R407H ではさらにそれより高くなっています）。その結果、高い圧力比で運転する場合、適用範囲や圧縮機の補助冷却に対する要件にある程度の制約が生まれます。

特に大きな上昇が確認できる場合には、二段圧縮機の使用が非常に効果的です。これによる重要な利点は、液過冷却器を使用できることです。

### 結果としての設計基準

R404A/R507A および R22 に関する経験はプラント技術に広く活用することができます。ただし、温度すべりと熱力学的特性の相違は考慮に入れる必要があります。このことは、特に熱交換器および膨張弁の設計・製作において重要な意味を持ちます。

### 既存の R22 プラントの R407A / 407B / 407F / 407H への切り替え

実践的な経験によれば、条件付きで切り替えを行うことができます。R22 と比較して、体積冷却能力はほぼ同じですが、冷媒質量流量がごくわずかだけ高くなります。このことは、中温および低温 R22 システムの切り替えには比較的好ましい条件となります。

主要なコンポーネントは、HFC 冷媒とエステルオイルに対応しているものであれば、既存のシステムのものを使用することができます。

ただし、温度すべりが大きい場合には、熱交換器に求められる要件を考慮する必要があります。エステルオイルに切り替える必要もありますが、これにより分解生成物の溶ける量が多くなり、配管内の汚れが増えてしまいます。そのため、大型サイズの吸込み洗浄フィルタを取り付ける必要があります。

### 既存の R404A / R507A システムの R407A / 407B / 407F / 407H への切り替え

熱力学的特性（質量流量、吐出しガス温度など）の差が一層大きく、R407A/F/H に温度すべりがあるため、既存システムの切り替えに際しては、制御コンポーネントの交換と圧縮機冷却系の追加が必要になることがあります。システムを新たに設置する場合には、コンポーネントとシステムについても適切な設計が必要になります。

**BITZER は、R407A 用および R407F 用のレシプロ圧縮機とスクリュー圧縮機を豊富に取り揃えています。また、ご要望に応じて R407H 用の圧縮機を個別に選択することも可能です。**

## R22 および R502 の代替となる R422A

R22 および R502 を使用している中低温冷凍システムから容易に切り替えられる非塩素系冷媒（ODP = 0）を生み出すことを主な目的として、R422A（ISCEON® MO79 – Chemours）が開発されました。

このためには、R404A、R507A、R22 と同等の性能とエネルギー効率を持つ冷媒を調合する必要がありました。これが実現すれば、従来の潤滑油を使用可能にすることにもつながります。

R422A は R125 と R134a を主成分とし、少量の R600a を加えた非共沸混合物です。R134a の割合が比較的高いため、温度すべり（42 ページの「冷媒の特性」の章を参照）は R404A より大きくなりますが、同じ成分が混合されている他の冷媒（R417A、R422D など）よりは小さくなります（22 ページを参照）。

断熱指数は R404A や R507A と比較して小さいため、圧縮機の吐出しガス温度と油温も低くなります。このことは、極めて低い温度では利点となります。しかしエステルオイルを使用していると、圧力比が低く、吸込みガスが過熱状態の場合には冷媒の溶解が増加するため、不利になることもあります。材料適合性は上述の混合冷媒と同等で、潤滑油にも同じことが当てはまります。R600a の適切な溶解度のため、条件が良ければ従来の潤滑油を使用することもできます。

特に既存の R22 および R502 システムを切り替える場合、上述のように利点が生じます。ただし、オイル循環率が高い、または受液器の液充填が多いプラントでは、例えば油分離器が取り付けられていないとオイルの移動が生じる可能性があります。

圧縮機へのオイル戻りが不十分である場合には、冷媒メーカはオリジナルの充填オイルの一部をエステルオイルに変更することを推奨しています。しかし、圧縮機メーカの観点からすると、そのような方法では潤滑条件に関して非常に入念な検討を行う必要があります。例えば、圧縮機のクランクケースに泡立ちの増加が認められる場合には、エステルオイル * への完全な切り替えが必要になります。また、エステルオイルと HFC の混合物の高い極性の影響で、エステルオイルとの混合またはエステルオイルへの切り替えによって、分解生成物の溶解量が増加し、配管に汚れが発生します。そのため、大型サイズの吸込み洗浄フィルタを取り付ける必要があります。その他の詳細については、冷媒メーカの「指針」を参照してください。

熱力学的な側面では、吸込みラインと液ライン間に熱交換器を設けることが推奨されます。これにより冷凍能力と成績係数が改善します。また、結果的に運転温度が上昇し、より好ましい潤滑条件（溶解度の低下）となります。

R422A は地球温暖化係数が高いため（GWP ≥ 2500）、EU では 2020 年以降、新設の設備への使用が禁止されます。要求事項と制限事項は F ガス規制 517/2014 に規定されています。

* スクリュー圧縮機と液チラーを、内部構造型の熱交換器配管を備えた DX 蒸発器とともに使用する場合の一般的な提案です。また、可能な追加処置に関して個別のチェックが必要になります。

**BITZER の圧縮機は R422A に対応しています。また、ご要望に応じて個別に選択することも可能です。**

## 空調システムおよびヒートポンプに使用する R22 の代替

HCFC 冷媒 R22（ODP = 0.05） は暫定的なソリューションとしてのみ受け入れられるため、さまざまな非塩素系（ODP = 0）の代替冷媒の開発・試験が広く行われてきました。これらはすでに広範囲の用途に使用されています。

しかし経験によれば、これらの代替品のどれもがすべての点で冷媒 R22 に代わるわけではありません。特に、体積冷凍能力の違い、可能な用途の制限、システム設計に対する特別な要件や圧力レベルの大きな差などの問題があり、個別の運転条件に応じてさまざまな代替品を考慮することになります。

考えられる代替は、単一成分の HFC 冷媒 R134a を除いて、主に R32、R125、R134a、R143a、R600(a) を成分とする（組成が異なる）混合冷媒です。以下に、主にこれらの混合冷媒の開発と可能な用途について説明していきます。ハロゲンを含まない代替品として $NH_3$、プロパン、プロピレン、$CO_2$ も考慮すべきですが、これらの使用には特別な基準を適用する必要があります（28 ページ以降に記述）。

さらに、R32、HFO/HFC 混合冷媒も代替として使用できます（23 ページ以降の「R22、HFO/HFC 混合冷媒の代替となる R32」の章を参照）。

## R22 の代替となる R407C

EU では R22 の早期の禁止を視野に入れ、HFC 冷媒 R32、R125、R134a の混合物が R22 の短期的な代替として好ましいと考えられました。性能を示す数値や効率の点では両者はほぼ同等です（図 19）。最初に登場したのは組成の等しい 2 種の混合物 AC9000*（DuPont）と KLEA® 66*（ICI）でした。これらは ASHRAE 標準名称に R407C として掲載されています。その後、組成が若干異なるその他の混合冷媒バリエーション（R407A/R407F/R407H など）も開発され、その特性は特定の用途に合わせて最適化されました（18 ページを参照）。

ここで考えている空調システムおよびヒートポンプ用の R22 代替冷媒は、同じ混合成分を含む冷凍システム用の R22 代替冷媒（18/19 ページを参照）よりも R32、R134a の配合比が高くなっており、これにより圧力レベル、質量流量、蒸気濃度、体積冷凍能力の点で R22 との対応が良くなっています。さらに、地球温暖化係数が比較的低いです（GWP = 1774）。

また R407C は、2020 年以降に GWP < 2500 の冷媒のみを許可する EU の新しい F ガス規制の要求事項にも適合しています。ただ、「段階的廃止」の過程での量的規制により、入手可能性もかなり狭まるものと予想されます。

大きな温度すべりは、適切なシステム設計が求められる通常の用途では不利となり、熱交換器の効率にマイナスの影響を与えるおそれがあります（13 ページの「非共沸混合物の一般特性」の章を参照）。

上述した特性のため、R407C は空調 / ヒートポンプシステム用の R22 代替冷媒として好ましく、また（ある程度の制限内では）中温冷凍にも使用できます。しかし R134a の割合が高いため、低温冷凍の場合は冷凍能力と成績係数の大幅な低下が予想されます。また、蒸発器内で混合冷媒中の R134a の濃度が上昇する結果、能力の低下や膨張弁の不具合（吸込みガスの過熱不足など）が起こる危険があります。

材料との適合性は上に述べた混合物と同様で、潤滑油についても同じことが言えます。

* 以前の製品名は現在使用されていません。

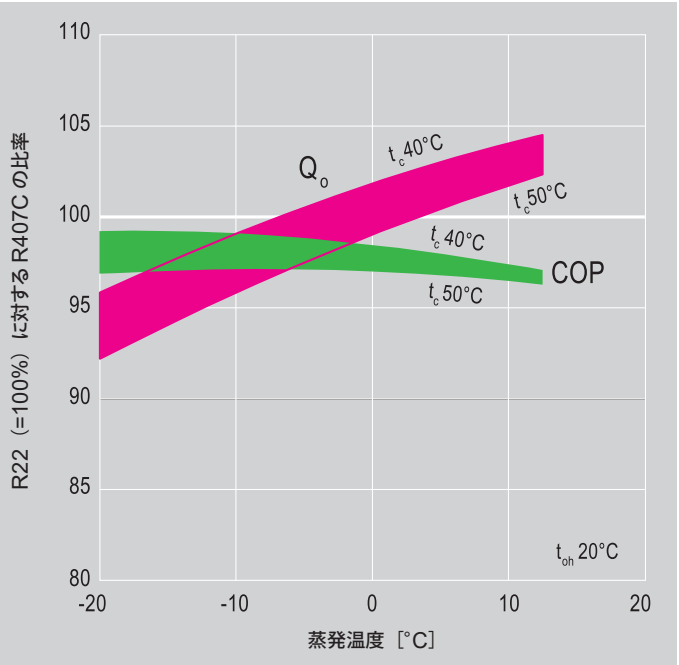



図 19　R407C/R22 – 半密閉型圧縮機の性能データの比較

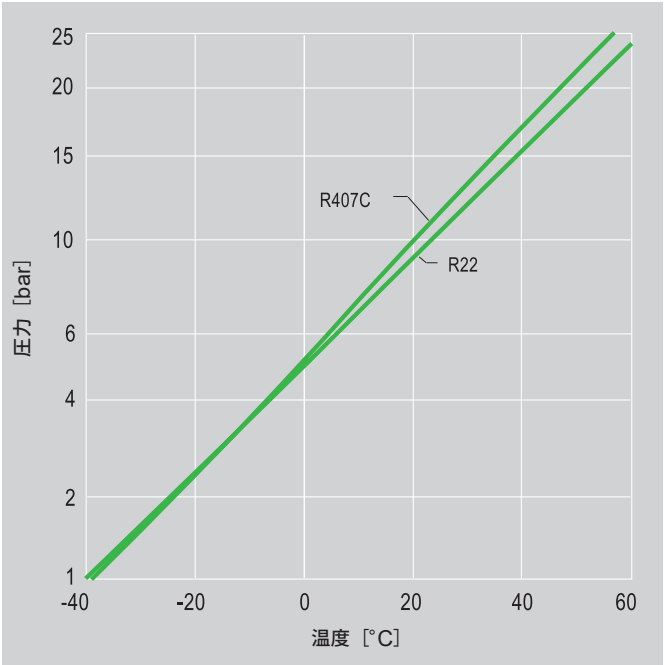



図 20　R407C/R22 – 圧力レベルの比較

### 結果としての設計基準

システム技術に関しては、R22 に対する以前の経験を活用できるのは限られた範囲内にとどまります。

顕著な温度すべりがあり、蒸発器、凝縮器、膨張弁などの主要なシステムコンポーネントの特殊な設計が必要になるためです。これに関連して、熱交換器を向流運転用に配置し、冷媒分布を最適化するのが望ましいことを考慮しなくてはなりません。また、制御装置の調整やサービス時の処置に関しても特別な要件があります。

さらに、満液式蒸発器付きシステムでの使用は、著しい濃度シフトと蒸発器内での層形成を招くおそれがあるため、推奨されません。

**BITZER は、R407C に対応した半密閉型のレシプロ圧縮機、スクリュー圧縮機、スクロール圧縮機を豊富に取り揃えています。**

### 既存の R22 プラントの R407C への切り替え

上述した基準のため、一般的な指針を定義することはできません。具体的な場合ごとの個別検討が必要になります。

## R22 の代替となる R410A

R407C のほか、ASHRAE で R410A と記載されている準共沸混合物も利用でき、中規模の空調やヒートポンプに広く使われています。

体積冷凍能力が R22 に比べて 50% 近く高いことが大きな特徴ですが（図 21）、それに比例してシステム圧力も高くなります（図 22）。

凝縮温度が高いときには、エネルギー消費 / 成績係数は最初のうち、R22 の場合より好ましくないように思われます。

これは主に熱力学的特性のためです。その一方で、非常に高い等エントロピー効果を実現できるため（レシプロ / スクロール圧縮機を使用した場合）、実際には差がもっと小さくなります。

今ひとつ注目されるのは、多くの試験で蒸発器と凝縮器で高い伝熱係数が測定されていることで、結果的に特に有利な運転条件が得られます。システム設計を最適化すれば、他の冷媒を使用した場合よりも全体的に高い効率を達成することは十分可能です。

温度すべりが無視できる程度（< 0.2 K）であるため、一般的な可用性は純物質冷媒と同様です。

材料適合性は上述の混合冷媒と同等で、潤滑油にも同じことが当てはまります。しかし、圧力レベルとシステムコンポーネントに対する大きな個別負荷を考慮に入れる必要があります。

### 結果としての設計基準

R410A を用いるシステム技術にも、HFC 混合冷媒に対する基本的な基準が当てはまります。ただし、圧量レベルが高いことに注意する必要があります（凝縮温度 43 °C はすでに絶対圧 26 bar に相当）。

R22 用に設計された圧縮機とその他のシステムコンポーネントは、この冷媒には全く、あるいは限られた範囲でしか適合しません。

しかし、適切な圧縮機やシステムコンポーネントを入手することは可能です。

通常の R22 の適用範囲をカバーするためには、熱力学的特性（圧力レベル、質量 / 体積流量、蒸気密度など）に大きな違いがあることを考慮する必要があります。

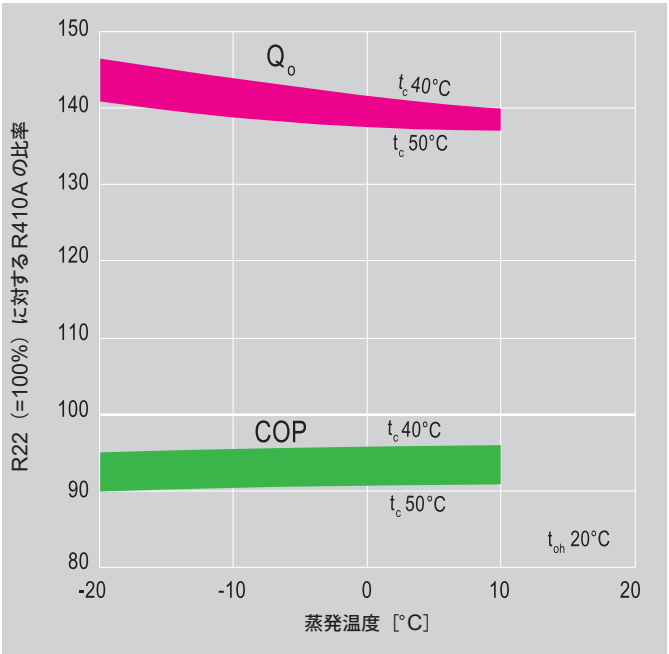



図 21　R410A/R22 – 半密閉型圧縮機の性能データの比較

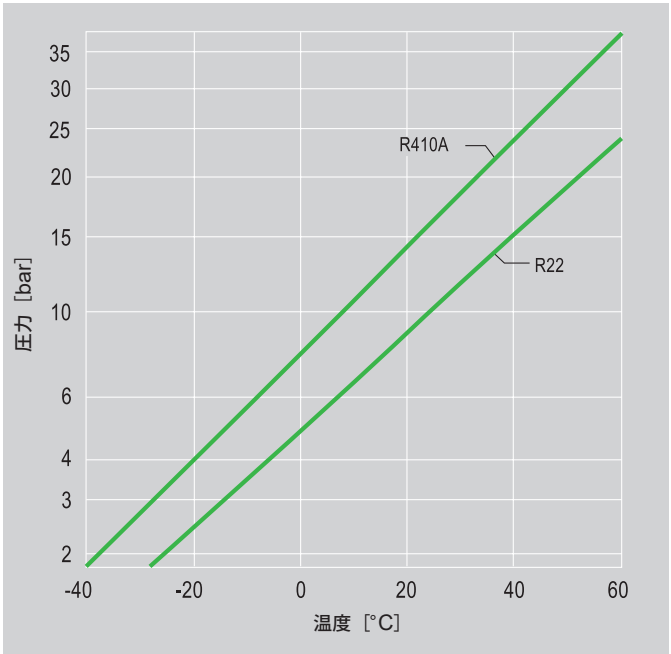



図 22　R410A/R22 – 圧力レベルの比較

その際にも、圧縮機、熱交換器、制御装置や振動調整方法について構造上の大幅な変更が必要になります。安全上の要件も厳しくなり、配管やフレキシブルホースエレメントの品質と寸法などにも影響が及びます（凝縮温度約 60 °C/40 bar に対応）。

臨界温度が 71° C と比較的低いことも 1 つの判断基準です。このため、高圧側のコンポーネントの設計に関係なく、凝縮温度が制限されます。

R410A は、2020 年以降に GWP< 2500 の冷媒のみを許可する EU の F ガス規制の要求事項に適合しています。ただ、「段階的廃止」の過程での量的規制により、入手可能性もかなり狭まるものと予想されます。EU では R410A への需要が極めて大きいため、適時に代替品への切り替えが必要になります。

**BITZER は、R410A に対応した半密閉型シリーズのレシプロ圧縮機とスクロール圧縮機を取り揃えています。**

## R22 の代替となる R417A / 417B / 422D / 438A

R422A の場合（19 ページ）と同じく、これらを開発した目的の 1 つは、既存の R22 プラントから容易に切り替えられる非塩素系の冷媒（ODP = 0）を提供することです。

R417A は数年前に市場に登場し、ISCEON® MO59 (Chemours) の製品名でも販売されています。この R22 の代替冷媒には混合成分 R125/R134a/R600 が含まれているため、R32 の割合が高い R407C などとはかなり異なります。

一方、同じ成分から成るものの、R125 の比率が高い冷媒に ASHRAE 番号 R417B が与えられています。R134a の含有量が少ないため、R417B の体積冷凍能力と圧力レベルは R417A より高くなっています。このことから性能パラメーターが異なり、適用範囲にも相違が生じます。

主要成分が同じで、炭化水素系の添加剤として R600a を使用する今ひとつの混合冷媒にも、同じことが当てはまります。この製品は ISCEON® MO29（Chemours）の名称で市販されており、ASHRAE 番号は R422D です。

2009 年には HFC/HC 混合物に属するまた別の冷媒が ISCEON® MO99 (Chemours) として発売されました。なお、ASHRAE 番号は R438A です。この調合物は特に熱帯地域で使用できるよう、臨界温度を高めたものとして計画されました。このベースとなっている成分は R32、R125、R134a、R600、R601a です。

R407C と同様に、4 つの代替冷媒はすべて、ある程度の温度すべりのある非共沸混合冷媒です。この点で、R407C について述べた基準はこれらにも当てはまります。

冷凍能力は似ていますが、熱力学的特性とオイル循環性には基本的な違いがあります。R417A/B と R422D は R125 の割合が高いため、R407C よりも質量流量が増え、吐出しガス温度が低下し、過熱エンタルピーが比較的高くなります。これらの特性からわかるように、システムコンポーネントの最適化にさまざまな差があるほか、液ラインと吸込みラインの間に熱交換器を設置することが有効です。

HFC 冷媒の割合が優勢であるにもかかわらず、炭化水素成分の相溶性が優れているため、ある程度まで従来の潤滑油を使用することができます。しかし、オイル循環率が高いシステムや受液器内の液量が多いシステムではオイル移動が発生する場合があります。

そのような場合には追加措置が必要となります。オイル戻りと潤滑油に関する詳しい説明については、19 ページの「R22 および R502 の代替となる R422A」の章を参照してください。

R417B および R422D は地球温暖化係数が高いため（GWP ≥ 2500）、EU では 2020 年以降、新設の設備への使用が禁止されます。要求事項と制限事項は F ガス規制 517/2014 に規定されています。ただ、「段階的廃止」の過程での量的規制により、R417A および R438A の入手可能性もかなり狭まるものと予想されます。

**BITZER の圧縮機は R417A/ 417B / 422D / 438A の使用に適しています。また、ご要望に応じて個別に選択することも可能です。**

## R22 の代替となる R427A

この混合冷媒は数年前に Forane® FX100（Arkema）の商標名で発売されたもので、ASHRAE 番号は R427A となっています。

この R22 代替冷媒は、既存の R22 システムを「ゼロ ODP」ソリューションに切り替えることが求められる場合のために提供されています。この冷媒は、R32/R125/R143a/R134a をベース成分とした HFC 混合物です。

純粋な HFC 冷媒をベースにした混合組成であるにもかかわらず、メーカは切り替えを容易に行えると説明しています。

切り替えが容易なのは R143a の比率のためです。R22 から R427A に切り替えるときに必要となるのは、それまでのオイルをエステルオイルに交換することのみです。比率 15% 以下の鉱油またはアルキルベンゼンはシステム内のオイル循環に重大な影響を及ぼさないため、追加の洗浄措置は必要ありません。

ただ、エステルオイルと HFC の混合物は極性が高いため、分解生成物の溶解の増加や配管の汚れが発生することを考慮に入れなくてはなりません。そのため、大型サイズの吸込み洗浄フィルタを取り付ける必要があります。

冷凍能力、圧力レベル、質量流量、蒸気濃度において、R427A は R22 に比較的似ています。切り替える場合も、膨張弁などの基本コンポーネントは既存のシステムのものを使用することができます。断熱指数の小さい混合成分の割合が高いため、吐出しガス温度は R22 の場合よりもかなり低くなり、圧力比が高いときプラスの効果をもたらします。

この製品も明らかな温度すべりを示す非共沸混合冷媒であることに注意する必要があります。したがって、R407C に対するのと同じ基準がこの場合にも当てはまります。

R427A は、2020 年以降に GWP < 2500 の冷媒のみを許可する EU の F ガス規制の要求事項に適合しています。ただ、「段階的廃止」の過程での量的規制により、入手可能性もかなり狭まるものと予想されます。

**BITZER 圧縮機は R427A に対応しています。また、ご要望に応じて個別に選択することも可能です。**

**HFC 混合冷媒の使用に関する BITZER の補足情報（https://www.bitzer.de も参照）**

- ❑ A-540 に関する技術情報「改造 R22 または R404A/R507A ーステップバイステップ」

## R22 の代替となる R32

前述したように、R32 は HFC 冷媒グループに属しますが、当初は主に混合冷媒の一成分としてしか使用されませんでした。純物質として利用する上で最大の障害となるのは可燃性です。そのため、特に設備が屋内にある場合には、ある程度の充填量制限あるいは追加安全措置が必要になります。また、圧力レベルと吐出しガス温度が非常に高くなります（圧縮指数が R22 および R410A の場合より高い）。

一方、R32 は有利な熱力学的特性を備えています。たとえば蒸発エンタルピーおよび体積冷凍能力は非常に高く、蒸気密度が低く（配管内の圧力降下が小さく）、質量流量が小さく、圧縮のための動力が少なくて済みます。地球温暖化係数は極めて低く抑えられています（GWP = 675）。

これらの有利な特性に着目し、排出量を低減するための今後の措置を考慮すれば、R32 も工場生産システム（空調機、液体チラー、ヒートポンプ）での冷媒としての使用が増えると考えられます。

可燃性試験では、着火に必要なエネルギーが極めて大きく、火炎速度が小さいことが証明されています。これにより R32 は（R1234yf、R1234ze と並んで）ISO 817 の新しい安全性グループ A2L に分類されています。

これによる安全上の要求事項は改訂版 EN 378（2016 年改正）に規定されています。

R32 は従来 R410A を使用していた、より冷媒充填量の大きいシステム（たとえば空調用・プロセス用液チラーやヒートポンプなど）のための代替としても考慮されています。ただしその場合は、システムの設置場所に応じて適切な冷媒充填量制限を遵守しなくてはなりません。屋外設置（関係者以外の立ち入り禁止）や機械室への設置（EN 378-3:2016 等に準拠）を行う場合には、そのような制限はありません。ただし、あらかじめ R32 を充填したチラーについては、輸送時に特定の要件が課せられる可能性があることに注意が必要です（圧力機器指令によれば、R32 はフルードグループ 1 に分類）。

**BITZER のスクロール圧縮機シリーズである ORBIT GSD6...AL と GSD8...AL は、R32 の使用に合わせた認可を受け、発売されています。**

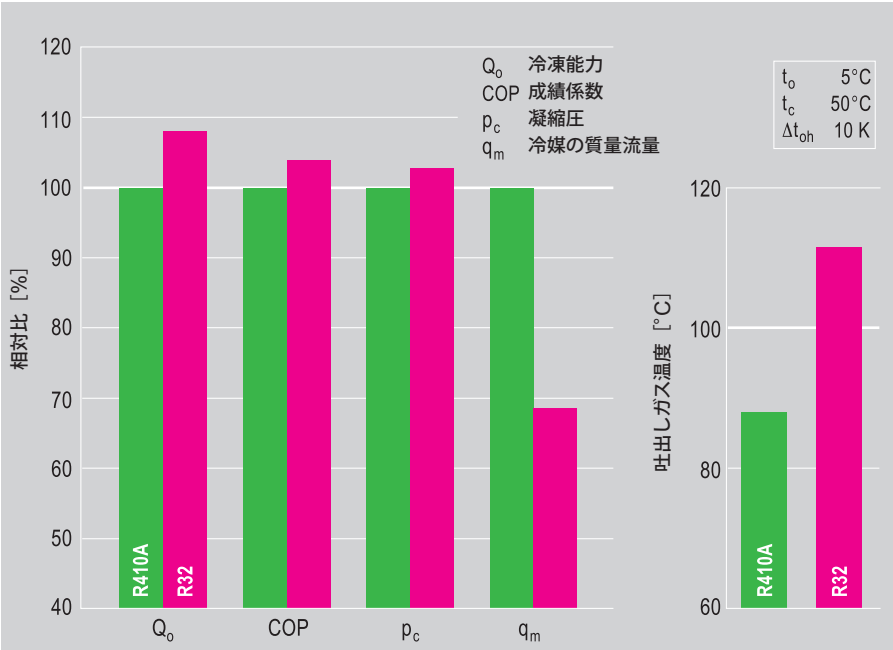



図 23　R32/R410A – スクロール圧縮機の性能と運転データの比較

## HFC の代替となる「低 GWP」の HFO 冷媒と HFO/HFC 混合冷媒

乗用車用の可搬式空調システムに「低 GWP」冷媒を使用する決定により（11/12 ページを参照）、可搬式設備用および床置式冷凍・空調・ヒートポンプシステム用の新たな代替冷媒の開発が促されることにもなりました。

その主な目的は、GWP を大幅に低下させ、かつ現在の主流である HFC と同等の熱力学的特性を持つ単成分または多成分の冷媒を使用することです。

その基本成分として重要になるのが R1234yf（$CF_3CF=CFH$）です。この冷媒はハイドロフルオロオレフィン（HFO）、すなわち二重結合を含む不飽和 HFC に属します。主にポリウレタンの発泡剤やエアロゾルに用いられている R1234ze(E) もこのグループに属します。R1234ze(E)（CF3CH = CFH）と R1234yf では分子構造が異なります。

いずれも優先的に選択されるにふさわしい性質を持ち、HFO/HFC 混合冷媒の主成分としても使用されています。地球温暖化係数は極めて低く、R1234yf で GWP = 4、R1234ze(E) で GWP = 7 です。しかし、これらの冷媒は可燃性（安全性クラス A2L）で、設置場所に応じてシステム内の冷媒の量に注意する必要があります。また、長寿命のものが多い床置式システムで重要となる長期的安定性の問題については、今のところ十分に解明されているとは言えません。さらに、体積冷凍能力が比較的低く、R1234yf では R134a に近い値で、R1234ze(E) ではさらに 20% 以上低くなっています。

可燃性に関してもやや不確実な点があります。R1234ze(E) は安全データシートには不燃性として示されていますが、これは輸送と保存についてのみ当てはまるもので、冷媒として使用するときは、可燃性試験における参照温度としてはより高い 60°C を適用しなくてはなりません。この温度では R1234ze(E) は可燃性であり、したがって R1234yf と同じく安全性クラス A2L に分類されます。R1234ze(E) は R134a の代替とされることがありますが、その体積冷凍能力は R134a または R1234yf よりも 20% 以上低くなっています。沸点（-19 °C）も蒸発温度の低い用途では大きな制約となります。そのため、その主要な用途は液チラーや高温用途になります。その他の詳細については 37 ページの「特殊用途向けの冷媒」の章を参照してください。

これ以外にも可能性のある HFO 冷媒はかなりの数存在しますが、熱力学的特性、可燃性、毒性、化学的安定性、材料および潤滑油との適合性の面で要求事項を満たす流体はごくわずかしかありません。たとえば、不燃性（安全グループ A1）の低圧冷媒 R1224yd(Z)、R1233zd(E)、R1336mzz(E)、R1336mzz(Z)、R514A（R1336mzz(Z)/R1130(E) の混合冷媒）などです。これらは主に大型ターボ圧縮機を備えた液体チラーのオプションであり、ORC システムだけでなく高温用途の容積形圧縮機にも使用できます。詳細情報：37 ページの「特殊用途向けの冷媒」の章を参照してください。

R1224yd(Z) と R1233zd(E) は、HCFO（ハイドロクロロフルオロオレフィン）のグループに属し、極めて低いオゾン層破壊係数（ODP）となっています。しかし、これらの分子は大気中に放出されると急速に分解します。

ただ、HFO 系に R22/R407C、R404A/R507A、R410A のような市販品で同様の体積冷凍能力を備えた適切な候補は今のところありません。そのため、これらの冷媒に直接代替でき、かつ相当程度に低い GWP を持つ物質は、R1234yf または R1234ze(E) と HFC 冷媒との混合物として、場合によっては少量の炭化水素、$CO_2$、またはその他の適当な分子を加えた「構成」とするしかありません。

しかし、HFC 冷媒には混合成分として適切な特性があるため、可燃性と GWP が互いに正反対の関係になります。言い換えれば、GWP < 約 900 の R22/R407C 代替混合物は可燃性です。これは、混合物中の R404A/R507A の GWP < 約 1300 の代替品、および混合物中の R410A の GWP < 約 2000 の代替品にも当てはまります。その理由は、必要とされる不燃性成分がいずれも高い GWP を持っていることにあります。ただしいくつかの例外もあり、それらについては 26 ページの「その他の「低 GWP」冷媒の開発プロジェクト」の章で説明します。

R134a の代替品の状況はより有利です。R134a の GWP がすでに比較的低いため、R1234yf または R1234ze(E) との混合により、GWP が約 600 の不燃性冷媒を調合することができます。

このことから、開発では 2 つの主要な方向が追求されています。

- ❑ 上記の限界内の GWP 値を持つ不燃性 HFC 代替冷媒（混合冷媒）– 安全性グループ A1 に対応：これらの冷媒は、安全上の要件に関して現在使用されている HFC と同じ方法で利用できます。
- ❑ 上記の限界を下回る GWP 値を持つ可燃性 HFC 代替冷媒（混合冷媒）– 安全性グループ A2L（低可燃性の冷媒）に対応

このグループの冷媒は、将来の A2L 冷媒に対する要求事項に従って充填量の制限を受けることになります。

一方、R1234yf や R1234ze(E) よりも体積冷凍能力と圧力がはるかに高い冷媒成分を用いる開発プロジェクトも存在します。そのような物質は R32 と混合し、いくつかの性質を最適化した R410A 代替品を調合するのに用いられています。詳細については 26 ページのその他の「低 GWP」冷媒の開発プロジェクトの章を参照してください。

### R134a の代替

R134a の代替として、先に述べた可燃性 HFO 冷媒の R1234yf や R1234ze(E) のほかに、不燃性混合物も入手可能です。前述のように、当初はそうした混合冷媒に極めて有利な状況がありました。

これらの物質は約 600 の GWP 値を達成しており、この値は R134a（GWP = 1430）の半分以下です。さらに、この種の混合物には共沸性のものもあり、それらは純物質冷媒と同様に使用することができます。

かなり長期間にわたり、ある混合冷媒の試験が実際のシステムで大規模に行われました。これは Chemours によって開発された冷媒で、Opteon™ XP-10 と呼ばれています。これまでの試験結果は、非常に満足度の高いものです。

Honeywell の R134a 代替の Solstice® N-13 も同様ですが、組成が異なります。

これらの冷媒の ASHRAE 番号は R513A（Chemours）、R450A（Honeywell）となっています。

混合冷媒の R516A（ARKEMA ARM 42）と R456A（Koura/Mexichem AC5X）も同じカテゴリーに属します。

これらの冷媒は冷凍能力、所要動力、圧力レベルともに R134a に近いため、膨張弁の過熱度の調整など小さい修正を加えるだけで、コンポーネントもシステム技術もそのまま引き継ぐことができます。

ポリオールエステルオイルは適切な潤滑油ですが、添加剤を使用する場合などには特別な要求事項を満たす必要があります。

特に有望なのはスーパーマーケット用の、低温用 $CO_2$ とカスケード接続した中温域での使用です。ただ、その場合には冷媒充填量のより多い液チラーの場合と同じく、可燃性または有毒の冷媒の使用に広範囲の安全措置が必要になります。

特殊なケースとして R515B 冷媒があります。これは R1234ze(E) と少量の R227ea との共沸混合物です。製造元である Honeywell が R134a の代替品としているこの組み合わせは、GWP が約 300 と極めて低いにもかかわらず、不燃性（A1）です。

しかしこの物質が代替品と考えられるのは、前述の R1234ze(E) と同じく、一定の制約条件の範囲内に限られます。また、体積冷凍能力も R134a または R1234yf に比べて 20% 以上低くなっています。

このカテゴリーの代替品には、R1234ze(E)、R1336mzz(E)、および R227ea の混合冷媒である R471A(Honeywell) も含まれます。R1336mzz(E) は、不燃性の HFO 低圧冷媒であり、ターボ圧縮機や高温ヒートポンプにも使用できます。2 つの主要な HFO 成分があるため、混合冷媒の GWP は 150 未満ですが、それでも不燃性です（A1）。

ただし、欠点は、R515B と比較して体積冷凍能力がさらに低いことです。

### R404A/R507A および R410A の代替

現在利用できる HFO 分子（R1234yf と R1234ze）は上記の HFC 冷媒と比較して体積冷凍能力がかなり低いため、代替とするためには、体積冷凍能力の高い HFC を比較的多く追加する必要があります。可能性のある候補は限られており、その 1 つが、GWP が 675 と比較的低い R32 です。

ただ、可燃性（A2L）という弱点があり、混合物の体積冷凍能力を高めながら GWP の利点も生かすという目的で配合量を多くすれば、得られた混合物も可燃性となります。

一方、不燃性混合物とするためには、フッ素含有量の高い冷媒（R125 など）の添加量を相当高めなくてはなりません。その場合の難点は、GWP が不燃性の R22/R407C 代替冷媒で約 900 以上、R404A/R507A 代替冷媒で約 1300 以上と高くなることです。ただ、R404A/R507A と比較すれば、値は 3 分の 1 に抑えられています。

EU の F ガス規制に見られるように、F ガスの段階的廃止が将来急速に進むことを見越して、GWP 値が確実に 500 以下となる R404A/R507A 代替冷媒の需要がすでに発生しています。そのような冷媒は適切な組成（高い割合の HFO、R152a、できれば炭化水素も追加）の混合物として実現可能ですが、可燃性（安全性グループ A2L または A2）が欠点となります。この場合には、使用に際してより高い安全要件が課せられ、適切に調整したシステム技術が必要になります。

現在のところ、商業用途でより広範に利用可能な不燃性の R410A 代替冷媒はありません。純物質としては R32（23 ページを参照）、混合物としては R32 と HFO の混合物を使用することができます。後者の場合、体積冷凍能力が高いため、非常に高い割合の R32 が必要になり、GWP は約 400 ～ 500 にしかなりません。HFO の割合を高くすれば GWP をさらに下げることができますが、その代償として冷凍能力が顕著に低下します。

上記の R1234yf および R1234ze(E) 混合冷媒はすべて、成分の沸点の差が大きいため、多少とも顕著な温度すべりを示します。そのため、R407C に関連して述べた基準が当てはまります。

その上、これらの HFC 混合冷媒と比較して、ほとんどの R404A/R507A 代替冷媒の吐出しガス温度はかなり高くなります。

単段の低温システムでは、これが圧縮機の適用範囲の制限を招いたり、補助冷却のための特別な措置が必要になることがあります。輸送関連用途や小型コンデンシングユニット付きの低温システムの場合には、吐出しガス温度が高いため、使用する圧縮機が求められる運転レンジに適合できないこともよくあります。そのため、R32 と HFO をベースにして、R125 の割合が比較的高い混合冷媒も開発されています。GWP は 2000 を少し超えますが、2020 年以降の EU の F ガス規制で設定されている 2500 の制限を下回っています。この種の混合冷媒の主な利点は、吐出しガス温度が中程度であることで、R404A の標準適用制限内での運転が可能になります。

上記の代替混合物の成分として可能性のあるものを表 4 にまとめました。R22/R407C の代替品と R404A/R507A の代替品は同じ成分から成る場合がありますが、混合比が異なります。

一方、Chemours、Honeywell、Arkema、Mexichem、Daikin Chemical の各社がこれに対応するバリエーションを実験室的試験および現場試験向けに提供しており、一部はすでに実用化されています。多数の冷媒が今なお開発中とされており、特別の協定によって試験用に入手できるのみです。多数の HFO/HFC 混合冷媒がすでに ASHRAE 標準名称に掲載されていますが、今日まで製品名がしばしば使用されています。

表 5 は、現在利用可能な冷媒または開発製品として公表されている冷媒の範囲を示しています。開発製品には様々なバージョンがあり、変更の可能性も多々あるため、42/43 ページ（表 7/8）の表には、すでに市販されている R134a、R404A/R507A、R410A の代替冷媒のデータのみを記載しています。

「低 GWP」冷媒の試験のために、AHRI（米国）は「代替冷媒評価プログラム」（Alternative Refrigerants Evaluation Program、AREP）を発足させました。ハロゲンフリー冷媒だけでなく、表 5 に記載されているいくつかの製品についても調査･評価を行っています。

### その他の「低 GWP」冷媒の開発プロジェクト

Chemours は特定用途向けに不燃性（A1）の R410A 代替冷媒を開発し、いくつかの国と地域で Opteon™ XP41 の商標名で販売しています。ASHRAE には R463A として記載されています。

これは R32、R125、R1234yf、R134a、$CO_2$ の混合物で、GWP は 1494 です。R32 と R1234yf の配合比が高いにもかかわらず、可燃性は R125、R134a、$CO_2$ の混合によって抑制されています。

熱力学的特性については、R410A との差はわずかです。しかし、$CO_2$ を加えたことによって顕著な温度すべりが生じ、そのことから用途にある種の制約が課せられると同時に、熱交換器の設計にも特別な要件が課されることになります。

混合物のすべての成分と性質はよく知られており、材料との適合性に関して既知の R410A 代替冷媒と特に異なるところはありません。

実験室的試験または現場試験のための圧縮機の提供には、用途の個別的検討を経て特別な協定を結ぶ必要があります。

少し前に、Honeywell が新しい不燃性（A1）の R410A 代替冷媒の開発を発表し、Solstice® N-41 の商標名が付けられ、ASHRAE 番号は R466A となっています。

R466A は、R32、R125、およびこれまで冷凍に用いられたことのないヨード・メタン誘導体 R13I1（$CF_3I$、トリフルオロヨードメタン）の混合物です。$CF_3I$ は R125 と同じく不燃性で、この冷媒は R32（A2L）の含有量が比較的高いにもかかわらず、不燃性（A1）です。

GWP が 3500 である R125 の比率が際立って高いものの、全体の GWP は 733（AR4）、つまり A2L に分類されている R32、R452B と大差ない値となっています。

熱力学的特性においても、R410A と R466A の差は比較的わずかです。体積冷凍能力、圧力レベル、吐出しガス温度はやや高く、質量流量の差はこれよりわずかに大きくなっています（約 15 ～ 20% 高い）。温度すべりもごくわずかです。

このため、R466A は R410A の代替として有望と考えられます。ただし、$CF_3I$ が多く含まれるため、冷凍サイクル固有の要件下での長期的安定性や材料との適合性にはなお不確実な点があります。

このため、さらに研究を進める必要があり、現時点では R466A の最終的評価を下すことはできません。いずれにせよ、現状ではこの冷媒を最新のシステムで使用する（切り替える）ことはできません。実験室的試験のための圧縮機の提供には、用途の個別的検討を経て特別な協定を結ぶ必要があります。

AGC Chemicals は R410A および純 R32 の代替として、R1123（$CF_2$=CHF）と R32 の混合物に一部 R134yf を添加したものを販売しています。これは、オゾン層破壊係数（ODP）が極めて低い HCFO です。R1123 の体積冷凍能力は R1234yf や R1234ze(E) より明らかに高く、この点では有利です。しかし圧力レベルは R32 よりさらに高く、臨界温度は約 59° C に過ぎません。この点を別としても、冷凍サイクルの特別な要件下での長期的な化学的安定性には未確認の問題があります。また安全データシートによれば、この物質に関する安全上の要求事項は極めて厳格なものです。

したがって、現状ではこれらの混合物について最終的な評価を行うことはできません。

圧縮機メーカの観点からすると、現在増え続けている製品の多様性を制限し、将来供給するものについて数種の「標準冷媒」に限定することを目指す必要があります。コンポーネントや装備品のメーカだけでなく、設置業者やサービス業者にとっても、膨大な種類の代替冷媒を取り扱うことは実際上不可能であるためです。

**BITZER は早くから HFO/HFC 混合冷媒に関するさまざまなプロジェクトに関与しており、それらの使用に関して重要な知見を得ています。半密閉型レシプロ圧縮機の ECOLINE シリーズ、さらに CS. および HS. スクリュー圧縮機では、すでにこれら新世代の冷媒を使用できるようになっています。**

**そのいくつかはすでに評価・承認を得ており、それらの性能データについては BITZER SOFTWARE でご確認いただけます。**

**スクロール圧縮機 ORBIT GSD6...VL、GSD8...VL シリーズは、R32/HFO 混合冷媒の R452B、R454B 向けとして承認を得て発売されました。**

**HFO および HFO/HFC 混合冷媒の使用に関する詳細については、A-510 のカタログの第 6 章を参照してください。**

2020 年 9 月現在

| 実際のHFC冷媒 | 代替冷媒 | | 成分/「低GWP」代替成分 (例) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 安全性グループ ↓ | GWP④ ↓ | R1234yf A2L GWP 4 | R1234ze(E) A2L 7 | R32 A2L 675 | R152a A2 124 | R134a A1 1430 | R125 A1 3500 | R13I1⑤ A1 <1 | R227ea A1 3220 | R1336mzz(E) A1 7 | $CO_2$② A1 1 | R290② A3 3 |
| **R134a** GWP 1430 | A1 | ~ 600 | ✔ | ✔ | ✔ | | ✔ | | | | | | |
| | A1 | ~ 300⑥ | | ✔ | | | | | | ✔ | | | |
| | A1 | < 150⑥ | | ✔ | | | | | | ✔ | ✔ | | |
| | A2L | < 150 | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | | | | | | |
| | A2L | < 10 | ✔ | ✔ | | | | | | | | | |
| **R404A/R507A** GWP 3922/3985 | A1 | < 2500① | ✔ | | ✔ | | | ✔ | | | | | |
| | A1 | ~ 1400 | ✔ | ✔ | ✔ | | ✔ | ✔ | | | | | |
| | A2L | < 250 | ✔ | | ✔ | ✔ | | | | | | | |
| | A2L③ | < 150 | ✔ | | ✔ | | | | | | | ✔ | |
| | **A2** | < 150 | ✔ | | ✔ | | | | | | | | ✔ |
| **R22/R407C** GWP 1810/1774 | A1 | 900..1400 | ✔ | ✔ | ✔ | | ✔ | ✔ | | | | | |
| | A2L | < 250 | ✔ | | ✔ | ✔ | | | | | | | |
| | A2L | < 150 | ✔ | | ✔ | | | | | | | | |
| | **A2** | < 150 | ✔ | | ✔ | | | | | | | | ✔ |
| **R410A** GWP 2088 | A1 | < 1500 | ✔ | | ✔ | | ✔ | ✔ | | | | ✔ | |
| | A1 | < 750 | | | ✔ | | | ✔ | ✔ | | | | |
| | A2L | < 750 | | | ✔ | | | | | | | | |
| | A2L | ~ 400..750 | ✔ | ✔ | ✔ | | | ✔ | | | | | |

① 冷凍能力、質量流量、吐出しガス温度は R404A と同等
② 温度すべり（$CO_2$）および可燃性（R290）のため少量に限定
③ R32/HFO 混合冷媒は基準冷媒よりも冷凍能力が低く、$CO_2$ の添加により大きな温度すべりが生じる
④ IPCC IV（AR4）による近似値
⑤ R13I1（トリフルオロヨードメタン $CF_3I$）：ヨード・メタン誘導体
⑥ 基準冷媒より体積冷凍能力が低い

表 4　「低 GWP」代替冷媒用として可能性のある混合成分（例）

2020 年 9 月現在

| 現行のHFC 冷媒 | HFC 冷媒に対する「低GWP」代替冷媒 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ASHRAE 番号 | 商品名 | | 組成（混合物を含む） | GWP③ AR4 (AR5) | 安全性グループ | 沸点 [℃] ④ | 温度すべり [K] ⑤ |
| **R134a** GWP 1430① | R450A | Solstice® N-13 | Honeywell | R1234ze(E)/134a | 604 (547) | A1 | -24 | 0.6 |
| | R456A | AC5X⑥ | Koura (Mexichem) | R32/1234ze(E)/134a | 687 (627) | A1 | -30 | 4.8 |
| | R513A | Opteon™ XP10<br>R513A | Chemours<br>Daikin Chemical | R1234yf/134a | 631 (573) | A1 | -30 | 0 |
| | R515B② | – | Honeywell | R1234ze(E)/227ea | 293 (299) | A1 | -19 | 0 |
| | R471A② | – | Honeywell | R1234ze(E)/1336mzz(E)/227ea | 148 (148) | A1 | -17 | 3.2 |
| | R1234yf | 各種 | | – | 4 (< 1) | A2L | -30 | 0 |
| | R1234ze(E)② | 各種 | | – | 7 (< 1) | A2L | -19 | 0 |
| | R444A | AC5⑥ | Koura (Mexichem) | R32/152a/1234ze(E) | 92 (89) | A2L | -34 | 10 |
| | R516A | ARM-42 | Arkema | R1234yf/R152a/R134a | 142 (131) | A2L | -29 | 0 |
| **R404A/R507A** GWP 3922/3985<br>**(R22/R407)** | R448A | Solstice® N-40 | Honeywell | R32/125/1234yf/1234ze(E)/134a | 1387 (1273) | A1 | -46 | 6.2 |
| | R449A | Opteon™ XP40<br>Forane® 449 | Chemours<br>Arkema | R32/125/1234yf/134a | 1397 (1282) | A1 | -46 | 5.7 |
| | R452A | Opteon™ XP44 | Chemours | R32/125/1234yf | 2140 (1945) | A1 | -47 | 3.8 |
| | R454A | Opteon™ XL40<br>R454A | Chemours<br>Daikin Chemical | R32/1234yf | 239 (238) | A2L | -48 | 5.7 |
| | R457B | ARM-20b | Arkema | R32/1234yf/152a | 251 (251) | A2L | -47 | 6.1 |
| | R454C② | Opteon™ XL20 | Chemours | R32/1234yf | 148 (146) | A2L | -46 | 7.8 |
| | R455A | Solstice® L-40X | Honeywell | R32/1234yf/$CO_2$ | 148 (146) | A2L | -52 | 12.8 |
| | R457A② | ARM-20a | Arkema | R32/1234yf/152a | 139 (139) | A2L | -43 | 7.2 |
| | R465A | ARM-25 | Arkema | R32/1234yf/290 | 145 (143) | A2 | -52 | 11.8 |
| | R468A | | Daikin Chemical | R32/1234yf/1132a | 148 (147) | A2L | -51 | 12.3 |
| **R22/R407C** GWP 1810/1774 | R449C | Opteon™ XP20 | Chemours | R32/125/1234yf/134a | 1251 (1146) | A1 | -44 | 6.1 |
| **R410A** GWP 2088 | R32 | 各種 | | – | 675 (677) | A2L | -52 | 0 |
| | R452B | Opteon™ XL55<br>Solstice® L-41y | Chemours<br>Honeywell | R32/125/1234yf | 698 (676) | A2L | -51 | 0.9 |
| | R454B | Opteon™ XL41 | Chemours | R32/1234yf | 466 (467) | A2L | -51 | 1.0 |
| | R463A | Opteon™ XP41 | Chemours | R32/125/1234yf/134a/$CO_2$ | 1494 (1377) | A1 | -59 | 12.2 |
| | R466A | Solstice® N-41 | Honeywell | R32/125/13I1($CF_3I$) | 733 (696) | A1 | -52 | 0.7 |

① R134a は GWP が比較的低いため、より長期にわたって使用可能
② 体積冷凍能力は基準冷媒を下回る
③ AR4：IPCC IV による // AR5：IPCC V による – 時間枠 100 年
④ 概算値
⑤ 1.013 bar（絶対圧）における沸点から露点までの全温度すべり
⑥ 開発製品

表 5　HFC 冷媒の「低 GWP」代替品 – 詳細なデータについては、表 7、8（「冷媒特性」）を参照してください。

## 代替冷媒としての $NH_3$（アンモニア）

$NH_3$ 冷媒は 1 世紀以上にわたり工業用、大型冷凍プラント用として使用されています。アンモニアにはオゾン層を破壊するおそれがなく、地球温暖化の原因にもなりません。効率は最低でも R22 と同等であり、分野によってはさらに優れています。そのため、間接的な地球温暖化への寄与は僅少で、価格も非常に低廉です。では、アンモニアは理想的な冷媒であって、R22 の代替ないし HFC と並ぶ 1 つの選択肢として最適であると結論付けて良いのでしょうか？実際、$NH_3$ は極めて優れた特徴を持ち、それらを大型冷凍システムやヒートポンプで十分活用することができます。

しかし残念ながら欠点もあり、それが商業分野での普及を妨げたり、コストの高い、一部では新たな技術開発が求められることもあります。

$NH_3$ の短所の 1 つは高い等エントロピー指数（$NH_3$ = 1.31 / R22 = 1.19 / R134a = 1.1）で、吐出しガス温度が R22 に比べてもさらに高くなります。そのため、蒸発温度が約 -10 °C より低い場合には、単段圧縮がすでに制約を受けることになります。

適切な潤滑油の問題も、ある種の用途の小規模プラントについてはまだ十分には解決されていません。最も普通に用いられている鉱油やポリαオレフィンはアンモニアとの相溶性がありません。これらは複雑な技術を用いて分離する必要があり、伝熱が悪化するため、「直膨式蒸発器」の使用が大きく制限されます。

また、吐出しガス温度が高いため、潤滑油の熱安定性に関して特別な要求事項が生じます。このことは特に、潤滑油が回路内で数年にわたって安定性を保てなくてはならない自動運転を考慮する場合に重要です。$NH_3$ はエンタルピー差が極めて大きいため、循環質量流量が非常に小さくなります（R22 の場合の 13 ～ 15%）。大規模プラントに有利なこの特長も、小規模プラントでは冷媒噴射の制御が困難になります。

さらに、銅を含む材料への腐食性も考慮しなくてはならず、配管はスチール製とする必要があります。また、半密閉型構造の基礎としての $NH_3$ に対する耐性のあるモータ巻線の開発も困難になります。含水率が高い場合、冷媒が電気伝導性であることも問題点です。

その他、毒性と可燃性にも注意が必要で、システムの構築や運用には特別な安全対策が必要になります。

### 結果としての設計と構造基準

技術の現状では、工業用 $NH_3$ システムには、通常の商業用システムと比べてまったく異なるプラント技術が必要になります。

潤滑油との不溶性と冷媒の特殊な特性により、通常は高効率の油分離器と重力またはポンプ循環による満液式蒸発器が用いられます。蒸発器を冷却スペースに直接取り付けることは、公衆や冷却する製品に危険がおよぶことがあるため不可能なことがあり、その場合には補助冷媒回路による除熱が必要になります。

また、熱的挙動により、中程度の圧力比においても二段式圧縮機またはスクリュー圧縮機を使用し、大型サイズのオイルクーラを設ける必要があります。

冷媒ライン、熱交換器と継手はスチール製にする必要があるほか、大口径の配管は資格を有する技術者による検査が必要になります。場合によっては、アルミニウムを材料として使用することもできます。

さらに、プラントの規模と冷媒充填量に応じて、適切な安全措置と専用の機械室が必要になります。

冷凍圧縮機は通常「開放型」の設計で、駆動モータは独立コンポーネントとなります。

こうした措置により、$NH_3$ プラントは特に中小規模の場合、高額なものになります。

そのため、商業分野でも使用可能な、より簡素なシステムの開発が世界中で進められています。

研究・開発プログラムの一部は、システム内のオイル循環を改善するため、一部可溶性のある潤滑油に向けられています。また別の方法として、不溶性オイルの自動戻り方法の簡素化も試験されています。

**BITZER はこれらのプロジェクトに積極的に関わっており、運転中の圧縮機を多数保有しています。今日までの経験により、一部可溶性のあるオイルを用いるシステムは制御困難であることが判明しています。システム内の含水率は、回路の化学的安定性と圧縮機の摩耗に重要な影響を及ぼします。また、オイル内の冷媒濃度が高いときは（湿り運転、油温不足など）、ベアリングやその他可動部品の摩耗が著しくなります。これは、$NH_3$ が潤滑エリアで気化するときの体積変化が大きいためです。こうした研究開発は現在も継続中で、不溶性潤滑油に対する代替品も重視されています。**

さまざまな機器メーカが、冷媒充填量を大きく下げられるような特殊な蒸発器を開発しています。また、いわゆる「少量充填」システムに向かう顕著な傾向も見られます。その大きな動機は、安全上の要件が冷媒充填量に大きく左右されることです。

さらに、$NH_3$ プラントを「封入する」方法の開発も進められています。つまり、コンパクトな液チラー（充填量が 50 kg 以下）を密閉したコンテナ内に設置し、漏れに備えて $NH_3$ を吸収するウォータリザーバを内蔵させる方法です。このタイプのコンパクトなユニットは、安全上の要件を満たすために安全性グループ A1 の冷媒を使用するプラントで以前に確保されていたエリアに設置することができます。

HFC 冷媒と従来の技術を使用したシステムの代わりに $NH_3$ コンパクトシステムを使用することについての評価は、特定の用途を考慮して個別に行うほかありません。純技術的な観点から見て、かつ容認できる価格レベルを想定するならば、近い将来により多くの製品が利用可能になると予想されます。

**現在の BITZER の製品ラインナップには、さまざまなタイプの潤滑油に対応した $NH_3$ 圧縮機が数多く含まれています。**

- **単段開放型レシプロ圧縮機（1450 rpm 時の押しのけ量：19 ～ 152 $m^3/h$）、空調 / 中温 / ブースタ用途向け**
- **開放型スクリュー圧縮機（2900 rpm 時の押しのけ量：84 ～ 1015 $m^3/h$ – 並列運転の場合は 4060 $m^3/h$）、空調 / 中温 / 低温冷却向け低温冷却用オプション：**
  - **単段運転**
  - **エコノマイザ運転**
  - **ブースタ運転**

### 既存プラントの切り替え

$NH_3$ 冷媒は、既存の (H)CFC または HFC プラントの切り替えには適していません。プラントはすべてのコンポーネントを含めて、完全に新たに構築する必要があります。

### $NH_3$ の使用に関する BITZER のその他の情報（https://www.bitzer.de も参照）

- **AT-640 に関する技術情報「BITZER 圧縮機でのアンモニア（R717）の利用」**

## $NH_3$ の代替となる NR723 ($NH_3$/DME)

直接蒸発方式の商用冷凍プラントに $NH_3$ を使用する前述の経験から、$NH_3$ に油溶性の冷媒成分を添加する試験が行われるようになりました。その主な目的は、従来の潤滑油を用いたときのオイル送りと伝熱を改善すると同時に、吐出しガス温度を下げ、単段圧縮機を使用する適用範囲を広げることです。

この研究プロジェクトの結果として得られたのが $NH_3$（60%）とジメチルエーテル（DME）（40%）の混合物で、ドレスデン（ドイツ）の空調・冷凍技術研究所（Institute of Air Handling and Refrigeration、ILK）により開発され、いくつかの現実のシステムで使用されています。これはほとんど無機の冷媒で、平均分子量が 23 kg/kmol であるため、標準冷媒命名法に基づいて R723 の名称が付けられています。

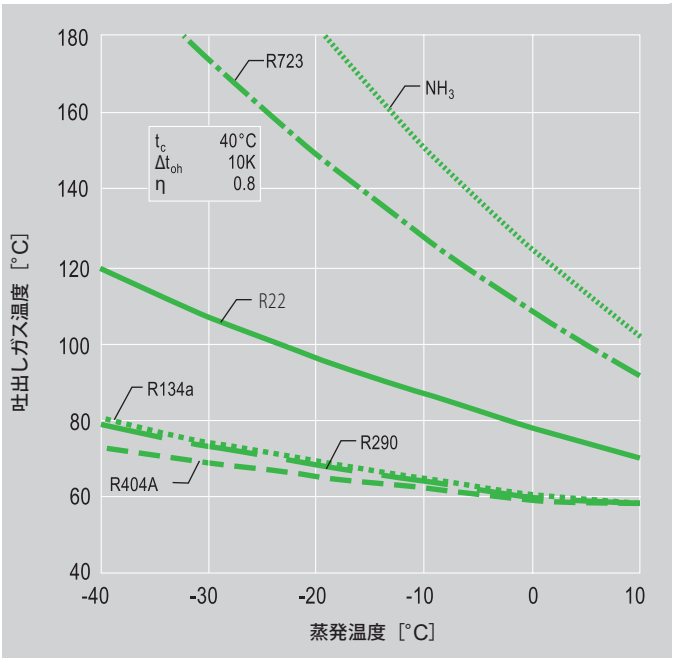



図 24　吐出しガス温度の比較

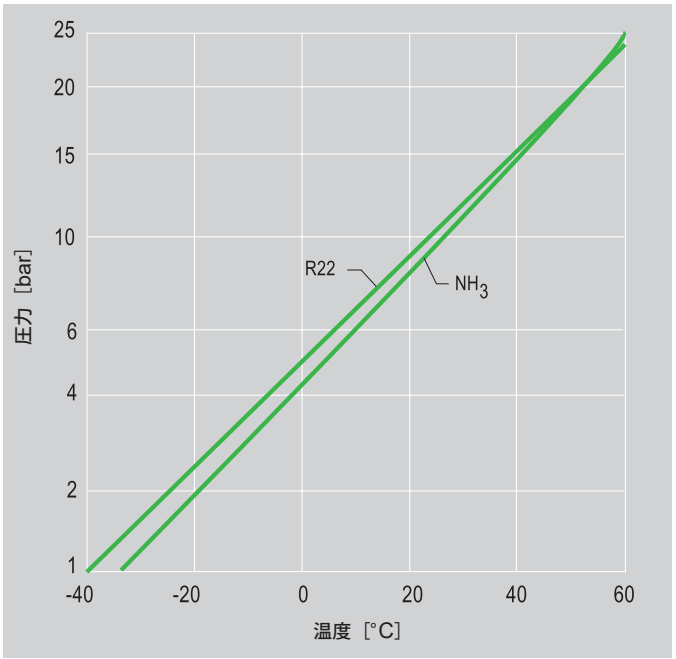



図 25　$NH_3$/R22 – 圧力レベルの比較

DME は、相溶性が優れ、それ自体の安定性が高いため、追加成分として選ばれました。沸点は -26° C、断熱指数は比較的低く、毒性がなく、高純度の製品が入手できます。$NH_3$ と DME は上記の濃度比で共沸混合物を形成し、圧力レベルは純 $NH_3$ よりやや高くなります。この混合物の沸点は -36.5° C（$NH_3$ -33.4° C）で、凝縮圧の 26 bar（絶対圧）は 58.2° C（$NH_3$ 59.7° C）に対応します。

空調および中温域での吐出しガス温度は約 10 ～ 25 K 低下し（図 24）、適用範囲をより高い圧力比まで拡張することができます。熱力学的計算によれば、冷凍能力は $NH_3$ に比べて数 % 高くなります。成績係数はほぼ同じで、圧力比の高いところではより優れていることが試験で確認されています。圧縮中の温度レベルがより低いため、少なくともレシプロ圧縮機使用時に圧力比が上昇するケースで、体積効率と等エントロピー効果の向上も期待されます。

DME の分子量が高いため、$NH_3$, に比べて質量流量と蒸気濃度が約 50% 増加しますが、商業用プラントの場合、特に短い回路ではさほど重要なことにはなりません。しかし、標準的な工業冷凍プラントの場合には、これは圧損の低下や冷媒の循環に関する実質的な基準となります。これらの考察によっても、R723 に最適な用途は商用、特に液チラーであることが再確認できます。

材料適合性は $NH_3$ と同等です。非鉄金属（CuNi 合金、真鍮、硬ろうなど）も含水量の少ない（<1000 ppm）システムであれば適当と考えられますが、システム設計は通常のアンモニアを使用する場合に倣うことが推奨されます。

潤滑油としては、鉱油または（望ましくは）ポリαオレフィンが適しています。前述の通り、DME の比率によってオイルの溶解度と部分的相溶性が改善されます。さらに、オイルの密度が比較的低く、オイル中の DME 濃度が高いため、オイル循環が促進されます。PAG オイルは、典型的な使用法では R723 と部分的または完全な相溶性がありますが、化学的安定性の面で、また圧縮機のクランクケース内での溶解度が高いため（ベアリング中で多量の蒸気が発生する）、推奨はされません。

試験の結果、R723 と鉱物油を使用したシステムでは、蒸発時の伝熱係数と高い熱流束が、$NH_3$ と鉱油を使用した場合よりも改善されていることが示されました。

その他の特徴として、毒性と可燃性があることが挙げられます。空気中の発火点は、DME の含有によって 15% から 6% に低下します。この共沸混合物は安全性グループ B2 に分類されているものの、再評価が行われれば別の分類に入る可能性があります。

### 結果としての設計基準

上述した $NH_3$ コンパクトシステムに関する経験は、プラント技術に活用することも可能です。しかし、質量流量が大きいことを考慮してコンポーネントの配置を調整する必要があります。また、蒸発器と膨張弁を適切に選択し、高度に安定した過熱度制御を確保しなくてはなりません。オイルの相溶性が改善しているため、湿り運転の場合には、不溶性オイルを使用した $NH_3$ システムに比べてかなり不都合な結果につながることがあります。

安全規制に関しては、$NH_3$ プラントと同様の設置 / 運転基準が適用されます。

圧縮機として適切なのは特殊な $NH_3$ バージョンです。ただし、質量流量とオイルの連続的循環に適合するよう調整を行わなくてはならない場合があります。レシプロ圧縮機を使用する場合には、油分離器は通常不要です。

**BITZER の $NH_3$ レシプロ圧縮機は、基本的に R723 に適合しています。また、ご要望に応じて特別に適合した圧縮機を個別に選択することも可能です。**

## 代替冷媒としての R290 ( プロパン)

R290（プロパン）は代替冷媒としても使用することができます。プロパンは有機化合物（炭化水素）であるため、オゾン層を破壊するおそれがなく、地球温暖化の直接の原因にも事実上なりません。ただ、夏季のスモッグの一因となることについては考慮する必要があります。

圧力レベルと冷凍能力は R22 と同程度で、温度挙動は R134a と同じくらい有利です。

材料に関しては特段の問題はありません。$NH_3$ とは異なり、銅材にも適合するため、半密閉型または全密閉型圧縮機を使用できます。潤滑油としては広範囲の使用場面において、HCFC システムに使用されている通常の鉱油を使用することができます。ポリオールエステル（POE）とポリαオレフィン（PAO）は一層好ましい性質を持っています。

R290 は主に工業分野の冷凍プラントの冷媒として、世界中で何年にもわたって使用されている「実証済み」の冷媒です。

また R290 は、住宅用空調ユニットやヒートポンプなど、冷媒充填量の少ない小型コンパクトシステムにも使用されています。さらに、商業用冷凍システムやチラーでも使用されることが増えてきています。

プロパンは、ハロカーボン系冷媒と同様の性能を持たせるため、イソブタン（R600a）またはエタン（R170）との混合物としても提供されています。純粋なイソブタンはほとんどの場合、小規模システム（望ましいのは家庭用冷蔵庫や冷凍庫）用の R12 の代替として考えられています。

炭化水素の不利な点は可燃性が高いことで、このため「安全性グループ A3」の冷媒として分類されています。システム設計とリスク分析は、商用プラントで一般的に採用されている冷媒充填量に基づき、防爆規則に適合したものである必要があります。

いわゆる「密閉」システムにおける半密閉型圧縮機はこの場合、危険ゾーン2（稀に生ずる短期間のリスクのみ）に対する規制を受けます。安全上の要件には、過度な圧力から保護する特殊な装置と電気系統の特別な配置が含まれます。また、冷媒が漏れた際に可燃性混合ガスの発生を効果的に防ぐため、換気により確実に危険を防止する処置も必要になります。

設計上の要件は規格（EN378 など）で定められ、国によって異なる場合があります。EU 内で使用するシステムについては、EC 指令 94/9/EC（ATEX）に準拠した評価も必要になることがあります。開放型圧縮機はその結果、ゾーン 1 に分類される可能性があり、その場合は耐炎設計の電気機器が必要になります。

### 結果としての設計基準

プロパンプラントには中温・低温域において、上記の措置以外に通常の (H)CFC および HFC システムと異なる措置は求められません。ただし、コンポーネントのサイズを決定する場合には、比較的低い質量流量（R22 の約 55 ～ 60%）を考慮する必要があります。ここで大きな利点となるのは、溶媒充填量が大きく低減することです。熱力学的な観点から、吸込みラインと液ライン間に内部熱交換器を設けることが推奨され、これにより冷凍能力と COP が改善されます。

R290（および R1270）は通常の潤滑油への相溶性が特に高いため、R290/R1270 に対応した BITZER の圧縮機には、粘度指数が高く、特にトライボロジー特性の優れた専用オイルが充填されています。

ここでも内部熱交換器を備えることが望ましく、それによって油温が上昇し、溶解度が低下し、したがって粘度が改善されます。

温度挙動は非常に有利であるため（図 24）、蒸発温度が約 - 40° C までの単段圧縮機を使用することができます。その場合は、R290 を一部の HFC 混合冷媒の代替と見なすこともできます。

**ECOLINE 圧縮機と CS. コンパクトスクリュー圧縮機には、R290 に対応したものも揃っています。個別の要求事項に応じて、特別装備の圧縮機仕様もご提供いたします。お問い合わせ・ご注文の際には R290 用と明記してください。また、ご注文の際には当事者双方の合意による契約が必要になります。R290 に対応した開放型レシプロ圧縮機も、要求される可能性のある種々の耐炎性アクセサリも含めて各種揃っています。**

### R22 または HFC を使用した既存プラントの R290 への切り替え

R290 を使用するときは特別の安全対策が必要となるため、既存システムの切り替えが可能になるのは例外的な場合に限られると考えられます。切り替えられるのは、該当する安全規定を満たすための改変が許容できる範囲で可能なシステムのみです。

### R290 の使用に関する BITZER のその他の情報（https://www.bitzer.de も参照）

- ❑ **AT-660 に関する技術情報「半密閉型圧縮機によるプロパン (R290) とプロピレン (R1270) の使用」**

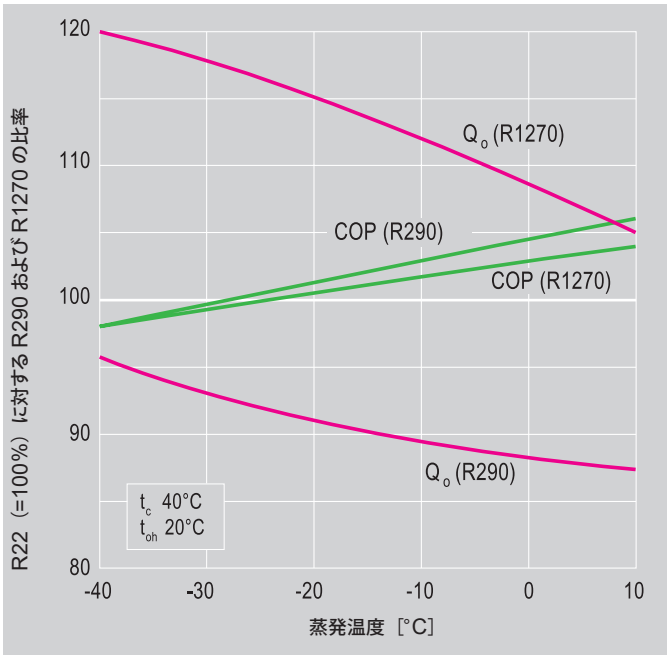



図 26　R290/R1270/R22 – 半密閉型圧縮機の性能データの比較

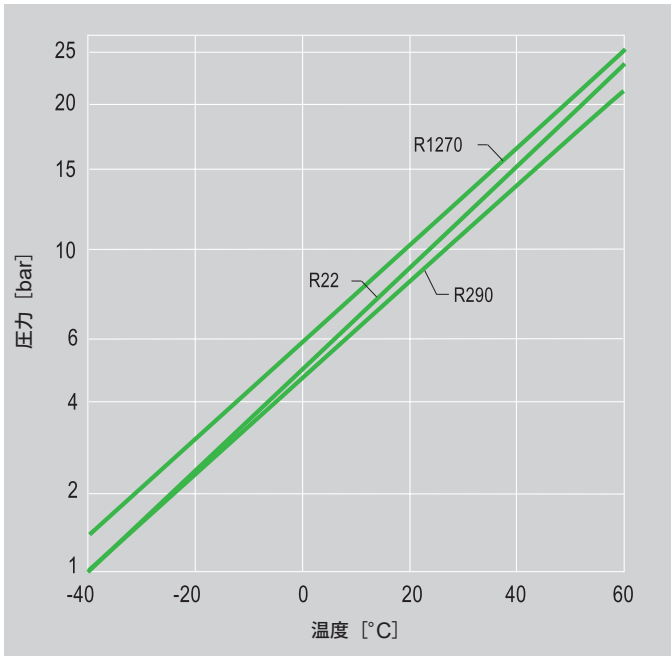



図 27　R290/R1270/R22 – 圧力レベルの比較

## プロパンの代替となるプロピレン（R1270）

R22 または HFC の代替となるプロピレン（プロペン）の使用への関心がしばらく前から高まっています。体積冷凍能力が高く、（R290 と比べて）沸点温度が低いため、スーパーマーケット用液チラーなどの中温・低温システムでの使用に特に関心が集まっています。一方、高い圧力レベル（> 20%）と吐出しガス温度を考慮する必要があるため、可能な適用範囲は限られます。

材料適合性はプロパンと同等で、潤滑油の選択も同様です。プロピレンは着火しやすいため、安全性グループ A3 に分類されます。そのため、プロパンの場合と同じ安全規定に従う必要があります（31 ページ）。

プロピレンは二重結合を持つため、反応性が高く、高温・高圧下では重合する可能性があります。しかし、炭化水素メーカによる試験および実設備での安定性試験により、冷凍システムでは事実上反応性がないことが示されています。プロピレンの発がん作用の可能性に関して、文献で懸念が述べられたこともありますが、その仮説は適切な研究によって反証されています。

### 結果としての設計基準

システム技術に関しては、プロパンの使用から得られた経験を広くプロピレンに適用することができます。しかし、体積冷凍能力が高いため、コンポーネントの寸法を変更する必要があります（図 26）。これに対応して、圧縮機の押しのけ量は低く、吸込み側および高圧側の体積流量も少なくなります。蒸気濃度が高いため、質量流量は R290 の場合とほぼ同じです。液濃度がほぼ同じであるため、回路内の液量についても同じことが当てはまります。

R290 の場合と同じく、吸込みラインと液ラインの間に内部熱交換器を設置することが有効です。ただ、R1270 の吐出しガス温度は高いため、圧力比が高いところでは一部で制限が必要になります。

**ECOLINE 圧縮機と CS. コンパクトスクリュー圧縮機には、R1270 に対応したものも揃っています。個別の要求事項に応じて、特別装備の圧縮機仕様もご提供いたします。お問い合わせ・ご注文の際には R1270 用と明記してください。**

**また、ご注文の際には当事者双方の合意による契約が必要になります。R1270 に対応した開放型レシプロ圧縮機も、要求される可能性のある種々の耐炎性アクセサリも含めて各種揃っています。**

**R1270 の使用に関する BITZER のその他の情報**
**（https://www.bitzer.de も参照）**

- ❑ **AT-660 に関する技術情報「半密閉型圧縮機によるプロパン (R290) とプロピレン (R1270) の使用」**

## 代替冷媒および二次流体としての二酸化炭素 R744（$CO_2$）

$CO_2$ は、冷凍技術に関して 19 世紀まで遡る長い歴史を持っています。$CO_2$ にはオゾンを破壊するおそれがなく、直接的な地球温暖化係数も無視できる範囲に収まっています（GWP = 1）。化学的に不活性で、不燃性であり、通常の意味では毒性はありません。したがって、HFC に対する厳格な抑制要件（F ガス規制）、そして可燃性や毒性のある冷媒に対する規制も $CO_2$ には適用されません。しかし、HFC と比べて、空気中での臨界値が低いことを考慮する必要があります。また、密閉された屋内では、特別な安全および検知システムが必要となる場合があります。

さらに、$CO_2$ は低コストで、回収や廃棄を行う必要がないほか、運転条件によっては体積冷凍能力が極めて高くなり、R22 や $NH_3$ の約 5 ～ 8 倍に達することがあります。

最初に広く使用された根本的な理由は、特に安全に関する特性が優れていることで、主要な用途は船舶用冷凍システムなどでした。「安全な冷媒である (H)CFC」の導入に伴って、$CO_2$ は次第に使用されなくなり、1950 年代以降はほぼ姿を消しました。

その主な理由は、冷凍 / 空調システムでの通常の使用のためには熱力学的特性が比較的不利であることです。

$CO_2$ 使用時の吐出し圧力は極めて高く、臨界温度は 31°C（74 bar 時）と極めて低い値です。高圧側のヒートシンクの温度によっては、100 bar を超える圧力での遷臨界運転が必要になります。このような条件下では、伝統的な蒸気圧縮プロセス（凝縮あり）と比べてエネルギー効率が低くなることが多いため、間接的な地球温暖化効果が高くなります。

それでもなお、$CO_2$ を非常に経済的に、また有利な環境効率で使用できる用途は残っています。たとえば、臨界値以下で運転するカスケードプラント、高圧側での温度すべりを有利に使用できる遷臨界システムなどがあり、システム条件によっては長時間の亜臨界運転も可能です。$CO_2$ の伝熱係数が他の冷媒よりかなり高いことにも注意する必要があります。蒸発器、凝縮器、ガスクーラでの温度差が非常に小さくなる可能性があるからです。さらに、必要な配管寸法が非常に小さく、圧損の影響をあまり受けません。その上、二次流体として使用する場合には、循環ポンプに求められるエネルギーが極端に少なくなります。

次の章では、数例の亜臨界システムと結果としての設計基準について説明し、それに続く章では遷臨界用途について詳述します。

### 亜臨界 $CO_2$ 用途

エネルギーと圧力レベルの観点から、工業用および大規模な商業用のプラントで非常に有利な用途が見込まれます。このためにはカスケードシステムにおいて $CO_2$ を二次流体として使用することができ、必要ならば蒸発温度を下げるためにさらにブースタステージを併用します（図 30）。

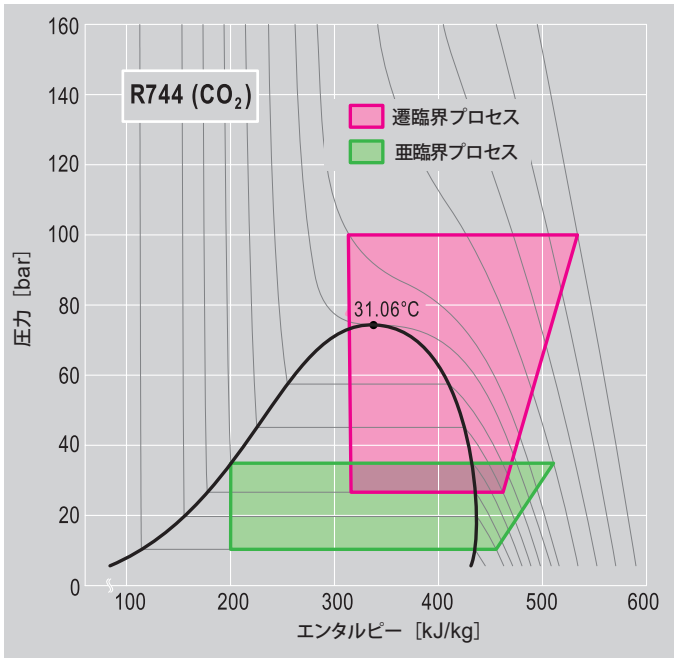



図 28　R744（$CO_2$）– 圧力 / エンタルピー図

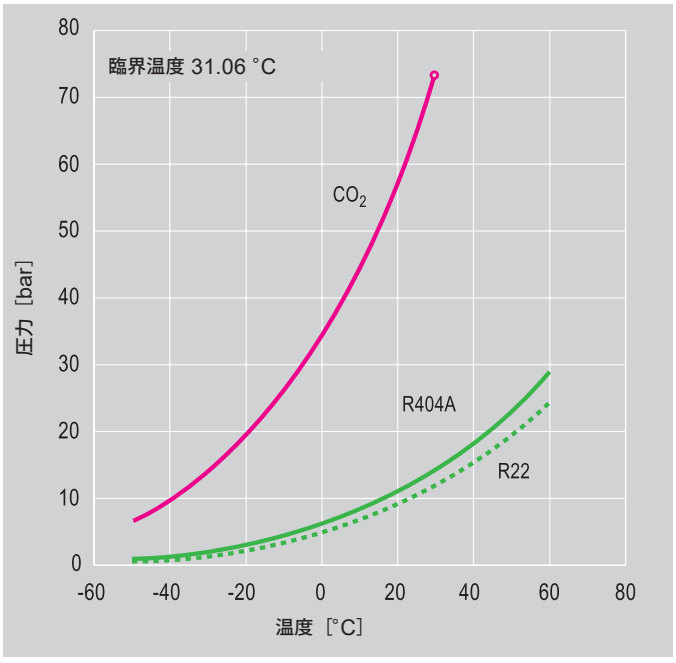



図 29　R744（$CO_2$）/R22/R404A – 圧力レベルの比較

運転条件は常に亜臨界とすることで、良好な効率レベルを達成できます。最も有利な適用範囲（約 -10 ～ -50 ℃）での圧力は、R410A 用などのすでに提供されているコンポーネントを、許容範囲内の努力で適合させることのできるレベルにあります。

### 結果としての設計基準

そのようなカスケードシステムの高温側にはコンパクトな冷却ユニットを使用でき、その蒸発器は二次側で $CO_2$ 用の凝縮器として働きます。この場合、$NH_3$、HC、HFC、HFO および HFO/HFC 混合冷媒などの非塩素系冷媒が適しています。

$NH_3$ の場合は、漏れが発生したときに危険となる炭酸アンモニウムの形成を防げるようにカスケード熱交換器を設計する必要があります。なお、この技術は醸造所で長年にわたり利用されてきました。

$CO_2$ を使用した大規模プラント用の二次回路を構成するには、$NH_3$ プラントでよく用いられているような低圧ポンプ循環システムと同じ原則を広い範囲で適用できます。本質的な相違点は、$CO_2$ がカスケードクーラ内で凝縮することで、受液器タンク（アキュムレータ）は単なる供給容器として働きます。

$CO_2$ の体積冷凍能力が極端に高いため（相変化による潜熱）、質量流速は非常に低くなり、断面積の小さい配管が使用でき、循環ポンプに必要なエネルギーは最小限となります。

低温用などでの他の圧縮段階との組み合わせには、さまざまなソリューションがあります。

図 30 は追加受液器付きのバリエーションを示したもので、1 基以上のブースタ圧縮機が蒸発圧力を必要な値まで引き下げます。同様に、吐出しガスはカスケードクーラに送り込まれ、凝縮されてから受液器に供給されます。低圧受液器（LT）への送りは、レベル制御装置により行われます。標準的なポンプ回路に代えて、LPR システムと呼ばれるブースタステージを構築することもできます。

この場合、循環ポンプは不要ですが、$CO_2$ 噴射量の配分を均等にするために、蒸発器の数が制限されます。

システムが機能停止して圧力が上昇するおそれがある場合には、必要な注意を払った上で、安全弁から $CO_2$ を大気中に放出することができます。この代わりに、$CO_2$ 凝縮用の補助冷却ユニットを使用することもでき、停止期間が比較的長い場合でも危険な圧力上昇が生じることはありません。

商業用途のシステムの場合には直膨式バージョンを採用することも可能です。

通常配管が細かく分岐しているスーパーマーケット用プラントの場合、この点で特に有利となる可能性があります。中温システムは従来の設計で、または二次回路付きで実現され、低温用途の場合には $CO_2$ カスケードシステム（亜臨界運転用）との組み合わせが用いられます。そのシステムの一例を図 31 に示します。

ただ、一般的な用途では、現状ではすべての要求事項を満たすことはできません。これらの要求事項を満たすには、システム技術を多くの点で変更し、特別に調整したコンポーネントの必要性を検討しなくてはなりません。

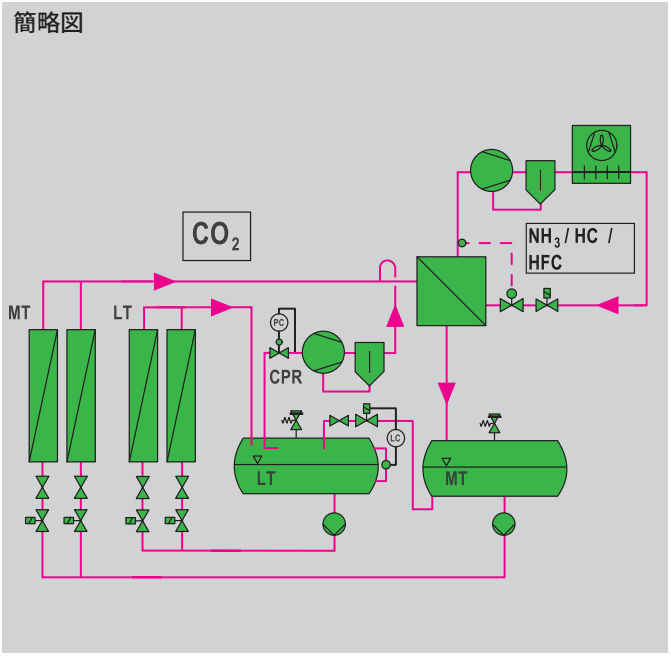



図 30　$CO_2$ を使用する工業用途向けのカスケードシステム

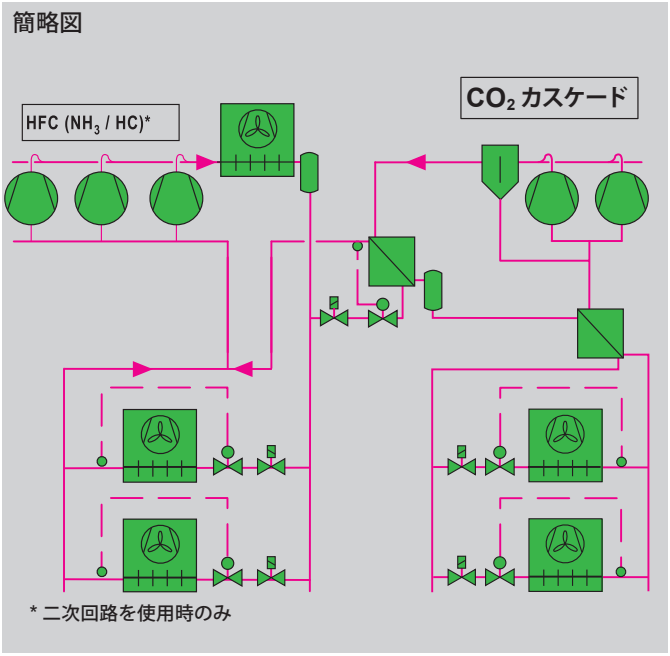



図 31　$CO_2$ 低温カスケードと組み合わせた従来の冷凍システム

例えば、蒸気濃度と圧力レベル（特に吸込み側）が高いため、圧縮機を適切に設計する必要があります。また、材料についても特別な要求事項が生じるほか、高度に乾燥した $CO_2$ のみを使用する必要もあります。

さらに潤滑油にも高い要求事項が課せられます。従来のオイルの大部分は相溶性がないため、システムからオイルを戻すためには、かなりコストのかかる措置を講じなくてはならなくなります。一方、もし相溶性で溶解度の高いPOEを用いれば、粘度が著しく低下します。潤滑油の詳細については41ページ、および45ページの図37を参照してください。

**BITZERは、亜臨界 $CO_2$ システム向けに2つのシリーズの特殊圧縮機を提供しています。**

**亜臨界 $CO_2$ システム用圧縮機の選択に関するBITZERのその他の情報**
**（https://www.bitzer.de も参照）**

- ❑ **カタログ KP-120**
  **亜臨界 $CO_2$ システム向けの半密閉型レシプロ圧縮機**
  **（LP/HP 停止圧力は最大 30/53 bar）**
- ❑ **カタログ KP-122**
  **亜臨界 $CO_2$ システム向けの半密閉型レシプロ圧縮機**
  **（LP/HP 停止圧力は最大 100 bar）**
- ❑ **その他の文献については別途お問い合わせください**

### 遷臨界 $CO_2$ 用途

遷臨界プロセスには、高圧側での排熱が等温ではなく等圧で進行するという特徴があります。亜臨界運転における凝縮プロセスとは異なり、ガス冷却（過熱解消）が行われ、それに対応して温度すべりが現れます。そのため、熱交換器はガスクーラと呼ばれます。臨界圧力(74 bar）を超えた範囲で運転が続いている間は、高密度の蒸気のみが送られます。凝縮は、膨張（中間圧受液器での中間膨張など）により圧力が下がった後でのみ生じます。ヒートシンクの温度曲線によっては、遷臨界運転用に設計されたシステムを亜臨界運転で使用することもでき、それにより効率が向上します。この場合はガスクーラが凝縮器となります。

高圧を所定のレベルに制御する必要があることも遷臨界運転の特徴です。この「最適圧力」はガスクーラ出口温度の関数で、可能な最大のエンタルピー差と最小の圧縮動作のバランスで決まります。最適圧力は、インテリジェントな調整機能を備えたコントローラを使用し、関連する運転条件に合わせて調整する必要があります（システムの例については図32を参照）。

上述したように、純粋に熱力学的な側面からすれば、遷臨界運転モードはエネルギー効率の点で不利なように思われます。実際、高圧側のヒートシンクの温度が比較的高いシステムの場合はその通りです。しかし、並列圧縮（エコノマイザシステム）あるいは冷媒膨張時の絞り損失を回復するためのエジェクタや膨張器を使用するなどの追加措置を講じることにより、効率を改善することも可能です。

それとは別に、遷臨界運転がエネルギー需要の点で有利となる用途もあります。清浄水用や乾燥プロセス用のヒートポンプがその例です。ガスクーラ入口での吐出しガス温度とヒートシンクの吸込み側温度の間の温度すべりは通常、非常に大きくなるため、出口側のガス温度を非常に低くすることができます。これは、温度すべり曲線により、また $CO_2$ 蒸気と二次流体の間の比較的高い平均温度差によって、一層容易になります。ガス排出温度が低いことからエンタルピー差が特に大きく、したがって高いシステム成績係数が得られます。

低容量の清浄水用ヒートポンプはすでに製造され、多数使用されていますが、中容量ないし大容量向けのプラント（ホテル、プール、乾燥システムなど）は個別に設計・構築する必要があります。このため設置数はまだ多くありませんが、増加傾向にあります。これら特定の用途のほかにも、スーパーマーケットなどの標準的な冷凍•空調向けにも種々の開発がなされています。並列複合圧縮機を採用した設備もより大きな規模で使用されるようになってきています。それらは主に、中温回路と低温回路を（熱交換器なしで）1つに接続したブースタシステムです。運転実績とエネルギーコストの計算値から、期待できる結果が得られています。ただし投資コストは、HFCと直膨式を使用した標準プラントの場合よりもいまだかなり高い状況です。

しかし、コンポーネントとシステム制御の最適化が進み、熱伝導と圧損に関する前述の利点もあるため、エネルギーコストの面では有利となります。一方、これらの設備は、外気温の年間変動の関係で長時間の亜臨界運転が可能な気候帯で主に使用されています。

$CO_2$ スーパーマーケットシステムの効率を上げ、それらをより温暖な気候帯で使用するために、並列圧縮またはエジェクタを使用した上記の技術を採用する事例が増えつつあります。

このような状況から見て、また技術的な困難さや設計者・サービス要員の育成の必要性から、$CO_2$ 技術をHFC冷媒を使用するプラントの一般的な代替と見なすことはできません。

### 結果としての設計基準

この課題に関する詳細な説明はこのレポートの範囲を越えるものとなります。いずれにせよ、システム技術も制御技術も従来のプラントとは大きく異なります。圧力レベル、体積、質量流量を考えただけでも、特別に開発されたコンポーネント、制御装置、安全装置、適切な寸法の配管が必要になります。

圧縮機技術には特に厳しい要件が課せられます。こうした特別な要件があるため、まったく異なるアプローチが必須になります。たとえば設計、材料（破裂耐性）、押しのけ量、クランクギヤ、ワーキングバルブ、潤滑システム、圧縮機やモータの冷却などの再検討が必要です。ここでは、高い熱負荷により単段圧縮向けの用途が大きく制限されます。低温冷却には二段圧縮が求められ、並列複合システムでは高圧圧縮機と低圧圧縮機の分離が特に有利となります。

亜臨界システムに関連して上述した基準は、潤滑油に対しては一層厳しく適用されます。潤滑油の詳細については 41 ページ、および 45 ページの図 37 を参照してください。

遷臨界 $CO_2$ 技術はこのようにさまざまな分野でさらなる開発を必要としており、一般的には最新技術とは言えません。

**BITZER は、遷臨界 $CO_2$ システム向けに豊富な特殊圧縮機を提供しています。これらは特定用途向けとなるため、個別の試験と評価を行う必要があります。**

**遷臨界 $CO_2$ システム用圧縮機の選択に関する BITZER のその他の情報（https://www.bitzer.de も参照）**

- ❑ **カタログ KP-130 遷臨界 $CO_2$ システム向けの半密閉型レシプロ圧縮機**
- ❑ **その他の文献については別途お問い合わせください**

**可搬式空調システムにおける $CO_2$**

長い間議論されてきた冷媒の直接排出量の抑制対策、および EU 域内における MAC システムでの R134a の使用禁止を見据えて、$CO_2$ システムの開発が数年にわたり集中して進められています。

一見したところでは、標準的な環境条件下での $CO_2$ システムは効率、つまり間接的排出の面では不利であるように思われます。しかし、旧型の R134a システムは設置に関する特定の条件や、配管および熱交換器における圧損の大きさから、同じ容量の床置式プラントよりも効率が劣ることを考慮する必要があります。$CO_2$ の場合には、圧損による影響ははるかに小さく、熱交換器の高い伝熱係数によりシステム効率も向上します。

こうした理由により、最適化された $CO_2$ 空調システムは、R134a の効率に匹敵する効率を発揮することができます。このようなシステムの通常漏れ率については、TEWI の点でより有利なバランスが得られます。

$CO_2$ 技術がこの用途で長期的に通用するかどうかについては、現時点ではまだ予測することができません。またその将来性が、自動車工業に導入された「低 GWP」冷媒の経験（11 ページ「R1234yf」の章を参照）によって左右することも確かです。なかでも、運転の安全性、コスト、グローバルなロジスティクスなどの要因も重要な役割を果たすと考えられます。

**簡略図**

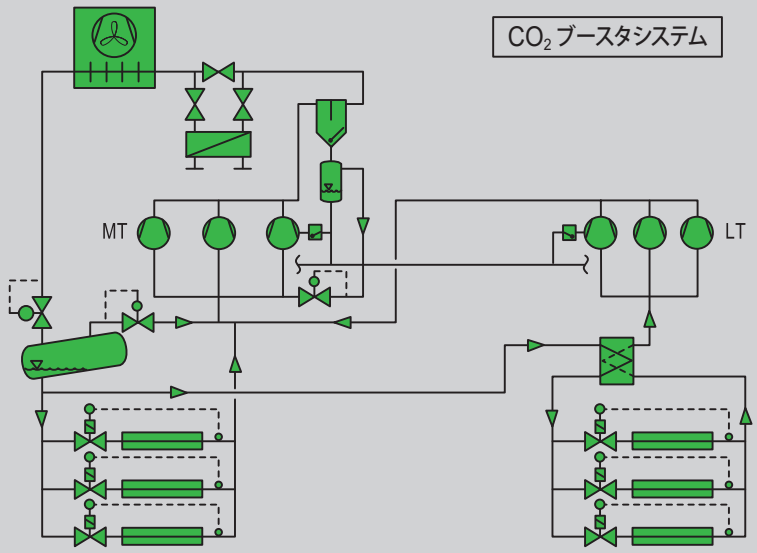



図 32　遷臨界 $CO_2$ ブースタシステムの例

## R114 および R12B1 の代替となる R124 および R142b

EU 域外の大部分の地域では、高温ヒートポンプやクレーン空調システムに従来用いられていた R114 および R12B1 の代替として、HCFC である R124 および R142b をまだ使用することができます。

これらのガスとともに、以前から実績のある潤滑油、できれば鉱油や高粘度のアルキルベンゼンも使用できます。

これらの冷媒はオゾン層を破壊するおそれがあるため、あくまでも暫定的なソリューションにすぎません。EU 加盟国や一部の地域では、HCFC の使用はすでに許可されなくなりました。R124 と R142b に対して、R22 と同じ制限が適用されます（8 ページ）。また、R142b が可燃性（安全性グループ A2）であることも安全上考慮する必要があります。

**結果としての設計基準 / 既存プラントの切り替え**

R114 と比較し、これらの代替冷媒の沸点温度は低いため（約 -10°C）、圧力レベルと体積冷凍能力に大きな差が生じます。これにより、蒸発温度と凝縮温度が高い用途での制約がより大きくなります。

既存の設備からの切り替えでは多くの場合、圧縮機と制御装置の交換が必要になります。また、体積流量が少ない（体積冷凍能力が高い）ため、蒸発器と吸込みラインの調整が必要となる場合もあります。

**過去数年間にわたり実際の設備で使用した結果、BITZER の圧縮機は R124 と R142b によく適合していることが明らかになりました。ただし、用途と圧縮機型式に応じて変更も必要になります。設計上の詳しい指示を含む性能データについては BITZER にお問い合わせください。**

## 特殊用途の非塩素系代替冷媒

超高温および超低温用途のシステムの市場はかなり限られているため、これらの分野向けの代替冷媒とシステムコンポーネントの開発はそれほど盛んではありませんでした。

その後、CFC である R114 とハロンである R12B1（高温）、R13B1、R13、R503（超低温）に対する一群の代替品が提案されました。しかし詳しく検討すると、これら代替品の熱力学的特性は従来の冷媒とかなり異なることが分かります。そのため、特に既存のシステムからの切り替えには高いコストがかかることもありえます。

## R114 および R12B1 の代替冷媒

R227ea と R236fa は、GWP が比較的高いため、EU では 2020 年以降に新たに設置する場合には使用できなくなりますが、これらは依然として適切な代替として考えられています。

R227ea は、完全な交換用と見なすことはできません。試験および実プラントでの経験では良好な結果が得られていますが、臨界温度が 102°C であるため、通常のプラント技術では凝縮温度が 85 ～ 90°C に限定されます。

R236fa は、臨界温度が 120°C を超えるため、少なくともこの点に関してはより有利ですが、体積冷凍能力が低いのが難点だと言えます。つまり、その能力は R114 と同じレベルで、超高温用途に広く使用されている R124 の能力を 40%も下回ります。

R600a（イソブタン）は、安全規定が炭化水素（安全性グループ A3）の使用を容認している場合には、注目に値する代替冷媒です。臨界温度が 135°C であるため、100°C またはそれ以上の凝縮温度を実現することができます。また、体積冷凍能力は R124 とほぼ同程度です。

「低 GWP」冷媒である R1234ze(E)（24 ページ）も超高温用途向けの候補となる可能性があります。冷凍能力は R124 よりも 10 ～ 20% 高く、圧力レベルは約 25% 高い値となっています。質量流量は、同じ冷凍能力に対してはわずかに異なるのみです。臨界温度は 109°C で、凝縮温度が約 90°C 以下での経済的な運転が可能です。ただし、R1234yf と同様、R1234ze(E) も可燃性が低いため、新しい安全グループ A2L に分類されます。また、該当する安全規定を遵守する必要があります。

この冷媒を用いた運転経験がまだ十分蓄積されていないため、現状では長期的使用への適性を評価することはまだできません。

プロセス技術用高温ヒートポンプや特殊な高温用途に向けて、主に圧縮機を備えたシステム用に開発された HFO と HCFO に基づく低圧冷媒も適している可能性があります（24 ページ）。

それらは非常に高い臨界温度（>130℃）を特徴とし、100℃をはるかに上回る凝縮温度での運転が可能となりますが、そのためには、専用の圧縮機とシステム構成部品を使用しなくてはなりません。

もう 1 つの利点は、GWP が非常に低く、安全グループ A1（不燃性、非毒性）に分類されていることです。

これらの冷媒や潤滑剤の化学的安定性については、非常に高い動作温度や、産業用システムに必要とされる長い耐用年数の観点から、まだ詳細な評価はできていません。

特殊用途には、コージェネレーションシステムー「オーガニックランキンサイクル」（ORC）も含まれ、その重要性は高まってきています。また、上記の表に記載されている適切と考えられる物質に加えて、熱源とヒートシンクの温度レベルに応じた他の一連の流体が必要になります。

それらには、これまで主に使用されていた R245fa（GWP 1050）が含まれ、臨界温度は 154℃、沸点温度は 15.1℃です。

Solvay は ORC 用の新しい冷媒として、R365mfc を主成分とする混合物を販売しています。「Solkatherm® SES36」という商品名で数年前に発売されたこの製品は、成分としてペルフルオロポリエーテルを含み、臨界温度が 178°C の共沸混合冷媒です。一方、R365mfc と R227ea を含む 2 種類の非共沸混合冷媒が開発されました。これらは混合比が異なるため、臨界温度は 177°C と 182°C となっています。商品名はそれぞれ Solkatherm® SES24、SES30 です。ORC システムでは、非共沸挙動がメリットとなることもあります。単相の熱源とヒートシンクの場合、蒸発と凝縮時の温度すべりにより、いわゆる「ピッチ点」での温度差を大きくすることができます。これにより駆動平均温度差が大きくなるため、伝熱が改善されます。

**スクリュー圧縮機とスクロール圧縮機は、ORC システムのエキスパンダとして構造上適合させることができます。BITZER は数年前から様々なプロジェクトに携わっており、この技術を使ってすでに重要な洞察を得ることができ、スクリューエキスパンダの設計やその応用にも実装されています。ご要望に応じて、個別のエキスパンダ設計も可能です。**

**ORC システムに関する包括的な説明は、この冷媒レポートの範囲を越えるものとなります。詳細については BITZER までお問い合わせください。**

2020 年 9 月現在

| 冷媒 | 型式 | 組成物（混合あり） | GWP AR4 (AR5) | 安全グループ | 沸点温度 (℃) | 臨界温度 (℃) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **R1224yd(Z)** | HCFO | | 4 (1) | A1 | 14.6 | 156 |
| **R1233zd(E)** | HCFO | | 5 (1) | A1 | 18.3 | 166 |
| **R1336mzz(E)** | HFO | | – (7) | A1 | 7.6 | 130 |
| **R1336mzz(Z)** | HFO | | 9 (2) | A1 | 33.5 | 171 |
| **R514A** | HFO | R1336mzz(Z)/R1130(E) | 7 (2) | A1 | 28.8 | 178 |

表 6　HFO（HCFO）低圧冷媒の特性

## R13B1 の代替冷媒

R410A のほか、ISCEON® MO89 (DuPont) も R13B1 の代替と見なすことができます。R410A の場合は、R13B1 と比べて実質的に高い吐出しガス温度を考慮する必要があり、これにより二段圧縮システムでも適用範囲が大幅に制限されます。

ISCEON® MO89 は多年にわたって主に凍結乾燥プラントで使用されています。現在では生産が中止されていますが、歴史的な理由からこのレポートでは引き続き取り上げることにします。この冷媒は、R125 と R218 の混合物に少量の R290 を添加しています。2 つの主成分の性質から、密度と質量流量は比較的高く、吐出しガス温度は極めて低くなっており、液過冷却は特に有利な点です。

上記の冷媒のどちらも圧力レベルが比較的高いため、通常の二段圧縮機を使用する場合に凝縮温度が 40 ～ 45°C に制限されます。その結果、蒸発温度が -60°C を下回る場合には、容量も R13B1 より少なくなります。また、圧力限界の低下が急であることから、非常に低い温度での使用が制限され、低温ステージで R23、R508A/B、R170（エタン）などを使用したカスケードシステムへの切り替えが必要になる場合もあります。

潤滑および材料との適合性については他の HFC 混合冷媒と同様です。

EU の F ガス規制（付帯文書 III）には「製品を -50°C 以下に冷却するための用途」に対する適用除外が定められています。これにより、2020 年以後も新設プラントに GWP > 2500 の冷媒を使用できることになります。しかし「段階的廃止」が予定されているため、量が制限され、価格が上昇すると同時に入手が極度に困難になると予想されます。

そのため代替冷媒の開発は急務ですが、包括的な推奨を行うことはできません。たとえば R448A/449A（安全性グループ A1) または R1270 (A3) とともに、二段圧縮機を蒸発温度 -60 ～ -65°C で運転することは可能であると考えられます。GWP < 約 250 の R404A/R507A の代替品（安全性グループ A2L）も可能性としては考えられますが、使用経験は典型的な低温冷凍に限られています。

蒸発温度が -50 ～ -52°C の場合、二段圧縮システムとカスケードシステムのどちらでも、$CO_2$ による運転は可能です。

ただ、いずれのバリエーションにおいても、基本的に個別設計と実験室での試験が必要になります。

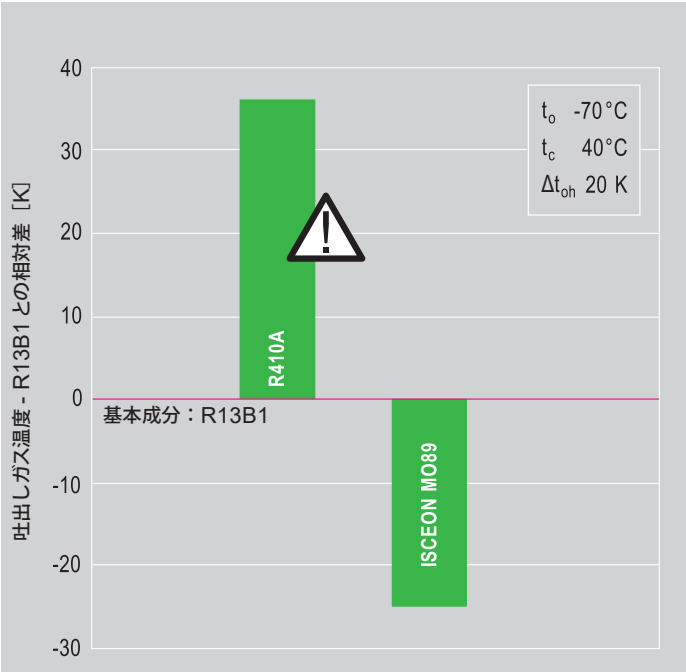



図 33　R13B1/HFC 代替冷媒 – 二段圧縮機の吐出しガス温度の比較

## R13 および R503 の代替冷媒

純技術的な観点から見ると、これらの物質について条件はなお良好で、R23 および R508A/R508B による代替が可能です。R170（エタン）も、安全規制において可燃性物質（安全性グループ A3）が許容される限り、対応可能です。

この冷媒は R13 に比べて、圧力曲線が部分的に急峻となり、R23 は吐出しガス温度が高いため、圧縮機の能力と適用範囲の差を考慮する必要があります。また、熱交換器と制御装置については個別に調整しなくてはなりません。

R23 および R508A/B 用の潤滑油としてはポリオールエステルが適していますが、超低温においては特別な要件に合わせて調整する必要があります。

R170 は通常のオイルと相溶性がありますが、温度に合わせた調整が必要になります。

これらの冷媒の用途は -50°C 以下の冷凍製品に限られます。このため、前章で述べた EU の F ガス規制の適用除外の対象となります。

しかし R23 および R508A/B については、特に「段階的廃止」の影響を大きく受けます。GWP 値は 13200 ～ 14800 の範囲にあるため（AR4）、比較的少量でも許容されている割当量の大きな部分を占めることになります。

A3 冷媒に対する安全上の特別な考慮を要する R170（エタン）を別とすれば、HFO または HFO/HFC 混合冷媒（安全性グループ A1 または A2L）については、直接比較できる代替品はありません。ただ、多くの場合、A3 グループの冷媒は使用不可であるか、または可能な特定用途においてコストの面で無理が出ます。

このような問題への取り組みとして、Weiss Technik 社は、ドレスデン工科大学と協力して、R32、R125、$CO_2$ の不燃性(A1) 冷媒混合物を開発しました。これは、R23 の代替として、いわゆる環境試験装置で使用される場合に適していることが証明されています。また、これは WT69 の商品名で販売されており、TEGA TechnischeGase が販売しています。冷媒は現在、R469A の下で ASHRAE の命名法にも記載されています。

R23 と比べて大きな利点は、GWP が 90%以上削減されることです（1398）。これにより、少なくとも中長期的な可用性が確保されます。

熱力学的観点から、R23 とは大きな違いがあるため、それぞれの用途での適合性を個別に確認する必要があります。沸点の差は大きくありませんが（R23 では -78.5℃対 -82℃）、混合物には明瞭な温度すべりが見られます。熱交換器に必要な特殊設計とは別に、これは運転プロセスと圧縮機のサイズに影響を与える可能性があります。

さらに、$N_2O$（亜酸化窒素）の使用を調査する研究プロジェクトがスタートし、$N_2O$ と $CO_2$ の混合物をより詳細に調査しています。カールスルーエ工科大学とドレスデンの空調・冷凍技術研究所（Instituteof Air Handling and Refrigeration、ILK）の広範な試験研究では、注目に値するさまざまな結果が得られつつあります。

$N_2O$（R744A）は、$CO_2$ と似た熱力学的特性と圧力、そして等しい分子量を持ち、三重点は極めて低く（-90.8°C）、臨界温度は 36.4°C となっています。GWP は 298 で、R23 や R508A/B の数分の 1 にすぎません。このように概観すると、蒸発温度が約 -80°C までの用途においては理想的な代替品であるように感じられるかもしれません。

確かにこれらは一見すると極めて大きな利点ですが、残念ながら欠点もあり、そのため $N_2O$ を純物質として使用することは事実上できません。

純粋な $N_2O$ を冷媒とすることは安全上のリスクを伴います。麻酔作用があり、燃焼を促進してしまうためです。$N_2O$ は他の物質を酸化することができるほか、特定の条件下（圧力、温度または着火源）では発熱的分解反応が起こることがあります。そしてこのことは、純粋な $N_2O$ を用いた冷凍システムの運転安全性に根本的な疑問を提起するものとなります。

$CO_2$ を多く(約 15% 以上) 添加すれば、三重点がやや高くなりますが、同時に酸化や分解に関しては良好な効果（「不活化」）が得られます。これにより安全上のリスクがかなり低減され、材料との適合性も著しく改善します。それにもかかわらず、特に潤滑油が高い抗酸化性を持ち、しかも低温条件に関する特殊な要件を満たすよう求めるのは大きな挑戦となります。研究は今なお続けられており、最終的な評価はまだ出ていません。そのため、こうしたシステムの設計や実現に関する指針を現時点で作成することはできません。

**BITZER は上記の冷媒のいくつかについて研究を行い、経験を積み重ねています。性能データや指示事項をご提供することもできますので別途お問い合わせください。これらの特殊設備については個別のシステム技術となるため、BITZER までご相談ください。**

## 圧縮機用の潤滑油

商業用・工業用の冷凍 / 空調 / ヒートポンプシステムに最も多く使用されている容積型圧縮機はいずれもオイルで潤滑されます。適切な構造を採用し、油分離器を設置したとしても、少量のオイルが圧縮ガス流とともに回路内に送り込まれます。このオイルのバランスを安定させるためには、適切な手段を講じて連続的なオイル戻りを実現する必要があります。この点で、溶解性があり、冷媒と相溶性を持つオイルが有利となります。オイルに冷媒が溶け込むことで、粘度が大きく低下し、流動性が増加して、熱交換器での伝熱に対する悪影響を最小限に抑えられます。

以前はいわゆるナフテン系鉱油や合成アルキルベンゼンが一般的に使用されていました。CFC および HCFC 冷媒（R22 など）や炭化水素を用いるシステムでは、溶解度と相溶性の点で極めて有利であったためです。一方で、それらの極性が低いことから、極性の高い HFC および HFO 冷媒との相溶性は低く、冷凍サイクル中に十分入り込みません。

不溶性のオイルは熱交換器内に蓄積され、伝熱を妨げ、最終的にはシステムを運転できない状態になってしまいます。

そのため、HFC および HFO 冷媒を用いるシステムのために、適切な溶解度 / 相溶性を持つ新しい潤滑油が開発されました。これらはポリオールエステル（POE）やポリアルキレングリコール（PAG）を主成分としています。その潤滑性能は従来の潤滑油と同等またはそれ以上ですが、冷媒の溶解度に従って多少とも吸湿性があります。このため、オイルの製造（乾燥工程を含む）・輸送・保管・充填に際して特段の注意を払い、プラント内での化学反応（POE の加水分解など）を防ぐ必要があります。

特に PAG 系潤滑油は吸湿に敏感で、絶縁耐力が比較的低いため、半密閉型および全密閉型の圧縮機にはあまり適していません。現在の主な用途は、オイル循環率が高く、潤滑性に関する特別な条件と高い溶解度 / 相溶性が求められる、開放型圧縮機を用いた可搬式空調システムとなっています。これらのシステムでは、銅被膜の形成を避けるため、非鉄金属が使用されています。

その他の冷凍分野ではこれまでのところ、POE オイルがよく用いられています。経　験によれば、このオイルは、含水量が 100 ppm を大きく超えない限り有用です。ただし、圧縮機メーカの指定する銘柄を必ず使用する必要があります。特に HFO はオイルとの反応性が高いため、HFO を用いているシステムではこの注意を特に守らなくてはなりません。

工場用の空調設備やチラーの圧縮機では、ポリビニルエーテル（PVE）オイルが使用されることも増えてきています。これらは POE より高い吸湿性がありますが、加水分解に強い抵抗性を示し、熱的および化学的にも安定性があり、優れた潤滑特性と高い絶縁耐力を備えています。また POE と異なり、金属石鹸を形成しにくいため、毛細管が詰まる危険が低減します。

$CO_2$ システムでは、潤滑油に対する特別の要件があります。特定の POE 系調合物は特に優れた溶解度 / 相溶性を持ち、高度に分岐した配管系での使用に適しています。しかし、この性質は粘度と潤滑性能（トライボロジー）には不利に働くため、圧縮機のドライブギアには極めて堅牢で耐摩耗性の優れたものが必要になります。また、ヒートポンプなどで負荷が極めて高い場合は、特に $CO_2$ 用として開発された PAG オイルが一層良好な潤滑性能を発揮します。

アンモニア（$NH_3$）に対しては、その熱力学的特性とそれに基づくプラント技術により、不溶性のオイルが有利となります。その例として挙げられるのは、鉱油やポリαオレフィン（PAO）などです。しかし、これらにはオイル分離と再循環のための特別な技術が必要になります。部分的に溶解性のある PAG オイルの使用に関する詳細や用途に関する追加情報については、「代替冷媒としての $NH_3$（アンモニア）」の章（28 ページ）と追加情報（下記）を参照してください。

図 37 の「潤滑油の概要」（45 ページ）と特定冷媒の説明の項にも追加情報が記載されています。

**潤滑油に関する BITZER のその他の情報（https://www.bitzer.de も参照）**

- ❑ **KT-500 に関する技術情報「レシプロ圧縮機用の BITZER 冷凍圧縮機オイル」**
- ❑ **ST-500 に関する技術情報「スクリュー圧縮機用の BITZER 冷凍圧縮機オイル」**
- ❑ **EST-500 に関する技術情報「スクロール圧縮機用の BITZER 冷凍圧縮機オイル－床置式用途」**
- ❑ **AT-640 に関する技術情報「BITZER の圧縮機でのアンモニア（R717）の使用」– 章：「オイルとシステム設計への影響」**
- ❑ **AT-660 に関する技術情報「半密閉型 BITZER 圧縮機でのプロパン（R290）とプロピレン（R1270）の使用」– 章：「オイル」**
- ❑ **KB-120、KB-130 の取扱説明書「$CO_2$ システム用半密閉式レシプロ圧縮機」**

2020 年 9 月現在

| 冷媒の種類 | 組成（化学式） | 代替対象冷媒 | 適用範囲 | ODP [R11=1.0] | GWP$_{(100a)}$⑤⑥ [$CO_2$=1.0] AR4 (AR5) | 安全性グループ④ | 実用限界 [kg/m³]⑤ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| HCFC 冷媒 | | | | | | | |
| R22 | $CHClF_2$ | R502 (R12①) | | 0.055 | 1810 (1760) | A1 | 0.3 |
| R124 | $CHClFCF_3$ | R114①, R12B1 | | 0.022 | 609 (527) | A1 | 0.11 |
| R142b | $CClF_2CH_3$ | | | 0.065 | 2310 (1980) | A2 | 0.049 |
| HFC 単一成分冷媒 | | | | | | | |
| R134a | $CF_3CH_2F$ | R12 (R22①) | 44 ページを参照 | 0 | 1430 (1300) | A1 | 0.25 |
| R152a | $CHF_2CH_3$ | 主に混合冷媒用成分 | | | 124 (138) | A2 | 0.027 |
| R125 | $CF_3CHF_2$ | | | | 3500 (3170) | A1 | 0.39 |
| R143a | $CF_3CH_3$ | | | | 4470 (4800) | A2L | 0.048 |
| R32 | $CH_2F_2$ | R410A (R22) | | | 675 (677) | A2L | 0.061 |
| R227ea | $CF_3$-CHF-$CF_3$ | R12B1, R114① | | | 3220 (3350) | A1 | 0.63 |
| R236fa | $CF_3$-$CH_2$-$CF_3$ | R114 | | | 9810 (8060) | A1 | 0.59 |
| R23 | $CHF_3$ | R13 (R503) | | | 14800 (12400) | A1 | 0.68 |
| HFC 混合冷媒 | | | | | | | |
| R404A | R143a/125/134a | R22 (R502) | 44 ページを参照 | 0 | 3922 (3940) | A1 | 0.52 |
| R507A | R143a/125 | | | | 3985 (3990) | A1 | 0.53 |
| R407A | R32/125/134a | | | | 2107 (1920) | A1 | 0.33 |
| R407F | R32/125/134a | | | | 1825 (1670) | A1 | 0.32 |
| R407H | R32/125/134a | | | | 1490 (1380) | A1 | 0.38 |
| R422A | R125/134a/600a | | | | 3143 (2850) | A1 | 0.29 |
| R437A | R125/134a/600/601 | R12 (R500) | | | 1805 (1640) | A1 | 0.081 |
| R407C | R32/125/134a | R22 | | | 1774 (1620) | A1 | 0.31 |
| R417A | R125/134a/600 | | | | 2346 (2130) | A1 | 0.15 |
| R417B | R125/134a/600 | | | | 2920 (2740) | A1 | 0.069 |
| R422D | R125/134a/600a | | | | 2729 (2470) | A1 | 0.26 |
| R427A | R32/125/143a/134a | | | | 2138 (2020) | A1 | 0.29 |
| R438A | R32/125/134a/600/601a | | | | 2264 (2060) | A1 | 0.079 |
| R410A | R32/125 | R22① (R13B1②) | | | 2088 (1920) | A1 | 0.44 |
| R508A | R23/116 | R503 | | | 13210 (11600) | A1 | 0.23 |
| R508B | R23/116 | | | | 13400 (11700) | A1 | 0.25 |
| HFO および HFO/HFC 混合冷媒 – その他の混合冷媒とデータについては 24 ～ 27 ページを参照 | | | | | | | |
| R1234yf | $CF_3CF=CH_2$ | R134a | 44 ページを参照 | 0 | 4 (< 1) | A2L | 0.058 |
| R1234ze(E) | $CF_3CH=CHF$ | | | | 7 (< 1) | A2L | 0.061 |
| R513A (XP10) | R1234yf/134a | | | | 631 (573) | A1 | 0.35 |
| R450A (N-13) | R1234ze(E)/134a | | | | 605 (547) | A1 | 0.319 |
| R471A | R1234ze(E)/1336mzz(E)/227ea | R134a① | | | 148 (148) | A1 | N/A |
| R515B | R1234ze(E)/227ea | | | | 293 (299) | A1 | 0.29 |
| R448A (N-40) | R32/125/1234yf/1234ze(E)/134a | R404A, R507A | | | 1387 (1270) | A1 | 0.388 |
| R449A (XP40) | R32/125/1234yf/134a | | | | 1397 (1280) | A1 | 0.357 |
| R454C | R32/1234yf | | | | 148 (146) | A2L | 0.059 |
| R455A | R32/1234yf/$CO_2$ | | | | 148 (146) | A2L | 0.105 |
| R452B | R32/125/1234yf | R410A | | | 698 (676) | A2L | 0.062 |
| R454B | R32/1234yf | | | | 466 (467) | A2L | 0.061 |
| ハロゲンを含まない冷媒 | | | | | | | |
| R717 ($NH_3$) | $NH_3$ | R404A (R22) | 44 ページを参照 | 0 | 0 | B2L | 0.00035 |
| R723 | $NH_3$/R-E170 | R404A (R22) | | | 1 | B2 | N/A |
| R600a | $C_4H_{10}$ | R134a① | | | 3 | A3 | 0.011 |
| R290 | $C_3H_8$ | R404A (R22) | | | 3 | A3 | 0.008 |
| R1270 | $C_3H_6$ | R404A (R22) | | | 2 | A3 | 0.008 |
| R170 | $C_2H_6$ | R23 | | | 6 | A3 | 0.008 |
| R744 ($CO_2$) | $CO_2$ | 各種 | | | 1 | A1 | 0.07 |

表 7　冷媒の性質（表 8 へ続く）

これらのデータの有効性は留保付きで、各冷媒メーカから公表されている情報に基づいています。

① 代替冷媒では、冷凍能力と圧力により大きな偏差が現れます。

② 代替冷媒では、蒸発温度 -60 °C 以下でより大きな偏差が現れます。

③ R290/600a 混合冷媒（R12 の直接的な代替品）の成分としても使用

④ EN 378-1 および ASHRAE 34 による分類

⑤ EN 378:2016 による

⑥ AR4: IPCC IV による – 時間枠 100 年 – EU の F ガス規制 517/2014 の基礎ともなっている
AR5: IPCC V による – 時間枠 100 年

N/A：データ未公表

2020 年 9 月現在

| 冷媒の種類 | 沸点温度 [°C] ① | 温度すべり [K] ② | 臨界温度 [°C] ① | 26 bar（絶対圧）時の凝縮温度 [°C] ① | 冷凍能力 [%] ③ | 吐出しガス温度 [K] ③ | 潤滑油（圧縮機） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| HCFC 冷媒 | | | | | | | |
| R22 | -41 | 0 | 96 | 63 | 80 (L) ④ | +35 ④ | 45 ページを参照 |
| R124 | -12 | 0 | 122 | 105 | ⑤ | ⑤ | |
| R142b | -9 | 0 | 137 | 112 | | | |
| HFC 単一成分冷媒 | | | | | | | |
| R134a | -26 | 0 | 101 | 79 | 97 (M) | -8 | |
| R152a | -24 | 0 | 113 | 85 | | | |
| R125 | -49 | 0 | 66 | 51 | ⑤ | ⑤ | |
| R143a | -47 | 0 | 73 | 55 | | | |
| R32 | -52 | 0 | 78 | 42 | 108 (H) | +21 | |
| R227ea | -16 | 0 | 102 | 96 | ⑤ | ⑤ | |
| R236fa | -2 | 0 | 125 | 115 | | | |
| R23 | -82 | 0 | 26 | 2 | ⑤ | ⑤ | |
| HFC 混合冷媒 | | | | | | | |
| R404A | -46 | 0.7 | 72 | 56 | 105 (M) | -34 | |
| R507A | -47 | 0 | 71 | 54 | 107 (M) | -34 | |
| R407A | -45 | 6.5 | 82 | 59 | 98 (M) | -19 | |
| R407F | -46 | 6.4 | 83 | 57 | 104 (M) | -11 | |
| R407H | -45 | 7.0 | 87 | 60 | 99 (M) | -8 | |
| R422A | -47 | 2.5 | 71 | 55 | 100 (M) | -39 | |
| R437A | -32 | 3.5 | 95 | 75 | 108 (M) | -7 | |
| R407C | -44 | 7.1 | 86 | 61 | 100 (H) | -8 | |
| R417A | -39 | 5.0 | 85 | 67 | 97 (H) | -25 | |
| R417B | -45 | 3.4 | 74 | 58 | 95 (M) | -37 | |
| R422D | -43 | 4.9 | 78 | 62 | 90 (M) | -36 | |
| R427A | -43 | 6.8 | 85 | 63 | 90 (M) | -20 | |
| R438A | -42 | 6.2 | 83 | 64 | 88 (M) | -27 | |
| R410A | -51 | 0 | 71 | 43 | 140 (H) | -4 | |
| R508A | -88 | 0 | 10 | -3 | ⑤ | ⑤ | |
| R508B | -88 | 0 | 11 | -3 | | | |
| HFO およびHFO/HFC 混合冷媒 – その他の混合冷媒とデータについては24 ～ 27 ページを参照 | | | | | | | |
| R1234yf | -30 | 0 | 95 | 82 | 98 (M) | -14 | |
| R1234ze(E) | -19 | 0 | 109 | 92 | 75 (H) | -6 | |
| R513A (XP10) | -30 | 0 | 95 | 78 | 102 (M) | -7 | |
| R450A (N-13) | -23 | 0.6 | 104 | 86 | 88 (M) | -6 | |
| R471A | -17 | 3.2 | 112 | 97 | 67 (H) | -7 | |
| R515B | -19 | 0 | 109 | 93 | 75 (H) | -7 | |
| R448A (N-40) | -46 | 6.2 | 83 | 58 | 96 (M) | +12 | |
| R449A (XP40) | -46 | 5.7 | 82 | 58 | 96 (M) | +12 | |
| R454C | -46 | 7.8 | 86 | 64 | 86 (M) | +7 | |
| R455A | -52 | 12.9 | 86 | 61 | 93 (M) | +10 | |
| R452B | -51 | 0.9 | 77 | 46 | 98 (H) | +7 | |
| R454B | -51 | 1.0 | 78 | 47 | 97 (H) | 0 | |
| ハロゲンを含まない冷媒 | | | | | | | |
| R717 ($NH_3$) | -33 | 0 | 132 | 60 | 100 (M) | +60 | |
| R723 | -37 | 0 | 131 | 58 | 105 (M) | +35 | |
| R600a | -12 | 0 | 135 | 115 | 55 (H) | -9 | |
| R290 | -42 | 0 | 97 | 70 | 86 (M) | +4 | |
| R1270 | -48 | 0 | 91 | 61 | 104 (M) | +12 | |
| R170 | -89 | 0 | 32 | 4 | ⑤ | ⑤ | |
| R744 ($CO_2$) | -57 ⑥ | 0 | 31 | -11 | ⑤ | ⑤ | |

表 8　冷媒の特性

① 概算値

② 圧力 1.013 bar（絶対圧）における沸点から露点までの全温度すべり。実際の温度すべりは運転条件によって左右されます。
蒸発器でのおおよその値：
H/M：全温度すべりの 70%、
L：全温度すべりの 60%

③ これらの値の基準冷媒は表 7 の「代替対象冷媒」（3 列目）に示されています。
括弧内の文字は運転条件を示しています。
H　高温（+5 ～ 50°C）
M　中温（-10 ～ 45°C）
L　低温（-35 ～ 40°C）

④ 単段圧縮機に有効

⑤ データはお問い合わせください（運転条件を明示のこと）

⑥ 5.27 bar 時の三重点

上記の性能データは熱量計試験に基づいた平均値です。

## HFC 冷媒

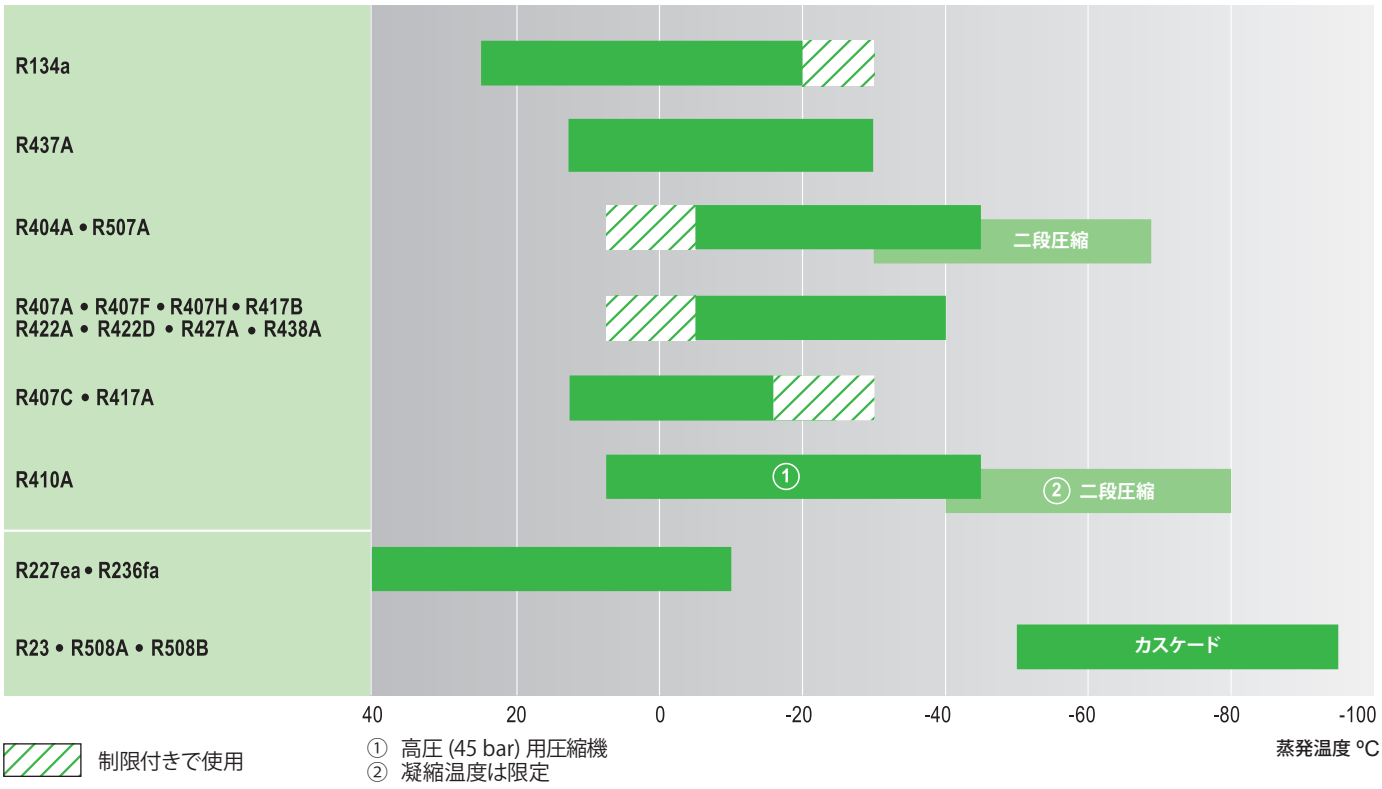
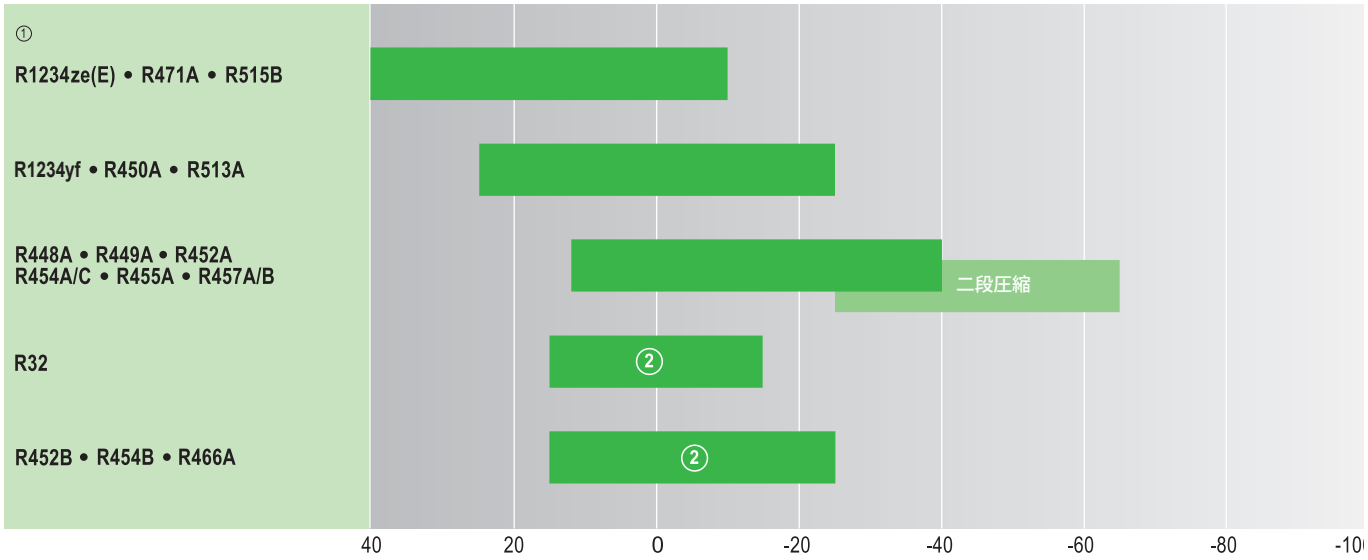



図 34　HFC 冷媒および混合冷媒（ODP = 0）の適用範囲

## 「低 GWP」冷媒（HFO、HFO/HFC 混合冷媒、R32）




① ASHRAE 標準名称に収載され、すでに市販されているか、または近い将来市販の見込みのある冷媒のみを表にまとめています。
② 高圧（45 bar）用圧縮機

図 35　「低 GWP」冷媒（HFO、HFO/HFC 混合冷媒、R32）の適用範囲

## ハロゲンを含まない冷媒

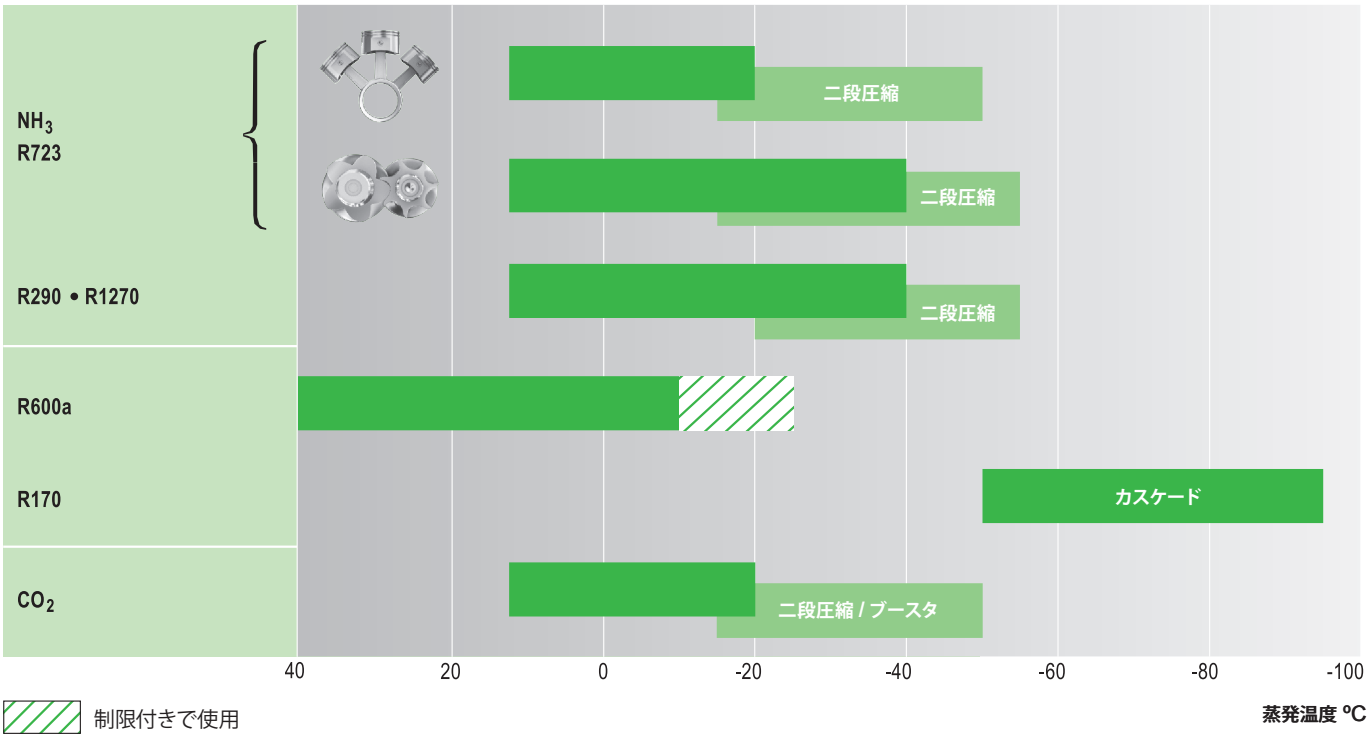



図 36　ハロゲンを含まない冷媒の適用範囲

## 潤滑油の概要

| | 従来の潤滑油 | | | | 新しい潤滑油 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 鉱油 (MO) | アルキルベンゼン (AB) | 鉱油＋アルキルベンゼン | ポリαオレフィン (PAO) | ポリオールエステル (POE) | ポリビニルエーテル (PVE) | ポリグリコール (PAG) | 水素添加分解鉱油 |
| (H) CFC | ■ | ■ | ■ | ▨ | ⚠+VG | | | |
| R22 を使用したサービス用混合冷媒 | ▨ | ■ | ■ | | ⚠+VG | | | |
| HFC + 混合冷媒 | | ▨ | | | ■ | ■ | ⚠ | |
| HFC/HC 混合冷媒 | ▩ | ▩ | ▩ | | ■ | ■ | | |
| HFO+HFO/HFC 混合冷媒 | | | | | AD | AD | | |
| 炭化水素 | VG | VG | VG | VG | VG | | ⚠ | |
| NH3 • R723 | ■ | ▨ | ▨ | ■ | | | ⚠ | ■ |
| CO2 | | | | ▩ | AD | | AD | |

■ 適合性良好　▨ 制限付きで使用　▩ システム仕様により適合　□ 適合しない　⚠ 特に湿気がある場合に問題あり　AD 特別に調合可能　VG 基本粘度が高くなる可能性あり

「圧縮機用の潤滑油」の章 (41 ページ ) と特定冷媒の説明の項にも追加情報があります。

図 37　圧縮機用の潤滑油

メモ

メモ

**株式会社 ビッツァー・ジャパン**
〒 534-0024 大阪府大阪市都島区東野田町 1-10-13
イマス M-1 ビル 2F
Tel 06-6948-8592 // Fax 06-6948-8593
www.bitzer.jp // info@bitzer.jp

予告なく変更する場合があります。// 80050206 // 12.2020