

発刊に寄せて（初版刊行時）

（社）日本冷凍協会の創立 60 周年記念事業の一つとして本書の刊行を企画して以来、関係各位のご努力により、ようやく「初級標準テキスト 冷凍空調技術」の発刊を見るに至りました。

ご承知のように、冷凍空調装置は民生生活その他に空気のように不可欠なものとなり、新しくこの分野の技術の勉強をされようとする方々も多くなっております。これらの初学の人々の教育を本会では重要事業の一つに挙げ、長い間努力を続けてきましたし、いわゆる入門書の発刊にも力を注いでまいりました。

一方、今日では冷凍空調技術の応用は大変幅広いものとなり、従来のようにハード面に絞った内容では、応用のソフト面から要請される技術課題を含めて全般的な理解を得るのに、不便であるとの声も、多く聞かれるに至りました。一方、これらの応用分野を含めたハンディでかつ読みやすい入門書は、内容が余りも多岐にわたるためもあり、従来適切なものが見当たらなかったと言えます。

本書は、このような要望に応えるため、この分野の各方面についてそれぞれ造詣の深い執筆者の方々をわずらわし、できるだけ重厚にならないよう、かつ基本的理解が得られやすいよう配慮しつつ一年半を費やし、ここに刊行に至った次第です。

このような点から、初学の方々はもちろん、各種講習あるいは研修用として恰好の伴侶になるものと確信しており、お役に立てば幸いです。

昭和 61 年 9 月 30 日

社団法人 日本冷凍協会

会長 宝谷幸男

創立 60 周年記念事業 教育委員会

委員長 森 肇

大 隅 和 男

千 葉 孝 男

豊 中 俊 之

宝 谷 幸 男

山 崎 公 丸

第 2 次改訂にあたって

日本冷凍協会（現日本冷凍空調学会）では、創立 60 周年記念事業の一つとして、新たに冷凍・空調・食品冷凍冷蔵に関する技術分野の仕事に携わろうという技術者を対象として、昭和 62 年 1 月に「初級標準テキスト冷凍空調技術」を刊行しました。

この本は刊行後好評のうちに多くの版を重ね、若い技術者の基本的なテキストとして広く利用されて今日までまいりました。

しかし、刊行後既に 10 年以上経ち、その間に冷凍・空調技術も大きく進歩・発展しました。さらに冷凍機用冷媒の主流を占めてきた CFC、HCFC といういわゆるフロン系冷媒による、成層圏のオゾン層破壊、地球温暖化に対処するための冷凍・空調設備の省エネルギー問題などが発生し、冷凍・空調技術ともに革新が迫られる時代になってきました。

そこで、この初級標準テキストの内容を現在の技術に合うようなものに改訂するとともに、内容の充実をも図って、平成 12 年初めから作業に入り、ようやく出版の運びとなりました。

本書の初版発刊時の編集趣旨は

- ① 冷凍空調技術者に要求される基礎技術を一応、網羅していること。
- ② 内容、ことに定義や解説のしかた、および用語が正しく、適切であること。
- ③ 計算式および各データの数値が正しく、適切で、計算方法がよく理解できること。
- ④ 量記号や単位が標準的であること。
- ⑤ 最新の実用技術をより多く採り入れていること。
- ⑥ 記述を平易にし、読みやすくすること。

にあり、さらに初学者対象の入門書を意図して、冷凍空調技術者の必須基礎知識として必要なレベルは十分満足される内容を目指し、実務に携わる技術者の座右の書になることを期待していました。

今回の改訂にあたって、この初版発刊時の編集意図を踏まえ、さらに最新技術も加えた斬新なものになることを目指し、内容も一新することとしました。

また平成 11 年 9 月からの新しい計量法への移行に対応して、単位を従来の重力単位系から国際単位系（SI）に全面的に改訂しました。

本書が、学生や若い技術者の冷凍・空調技術の技術研鑽に大いに役立てていただけることを期待するとともに、さらに高度の技術を身につけることを望まれる技術者は、本学会から出版されている「改訂版上級標準テキスト 冷凍空調技術 冷凍編」、同じく「空調編」および「食品冷凍技術」によって、勉学・研鑽を進められることを望んでおります。

また、技術は日進月歩していますので、これからも本書の内容で改めるべきところがでてくると考えられます。読者や識者のご意見などを寄せていただけることを望んでおります。

平成 13 年 4 月

初級標準テキスト改訂委員会

委員長 千葉孝男

執筆者（50 音順）

- | | |
|--------------|--|
| I 冷凍機編 | 鎌田聰士(ダイキンプラント(株))、五島正雄(東京商船大学)
千葉孝男(新日本空調(株)) |
| II 空調編 | 千葉孝男(新日本空調(株))、藤田稔彦(東京商船大学) |
| III 食品冷凍・冷蔵編 | 高井陸雄(東京水産大学)、武田宏治(三洋電機(株))
野口 敏(マルハ(株))、古川博一(有古川技術士事務所) |

第 3 次改訂にあたって

本書は以前から各種大学や技術系専門学校での教材として、あるいは関係業界各社の新人教育用テキストとして利用されていますが、(社)日本冷凍空調学会でも毎年開催される「冷凍空調技術者講習会(冷凍コース)・(空調コース)」でもテキストとして使っています。また、本学会の通信教育委員会では、新たに冷凍・空調・食品冷凍冷蔵に関する技術分野に携わろうとする技術者を対象に通信教育を毎年「5ヶ月間コース」前・後期2回開催していますが、これにも本書をテキストとして用いています。

長年にわたっての本書を使つての講習会の講師としての指導経験から、あるいは添削問題を作成している過程で発見された内容表現の不明瞭や説明不足なところ、通信教育実施期間中の受講生からの解答結果・質問から得られた誤解を招きやすい箇所や理解が困難な箇所など、講師あるいは添削者によって蓄積された多くの改良箇所を反映させた改訂版刊行の必要性に迫られ、本学会の常務理事会の承認を得て、第3次改訂に至りました。

今回の改訂にあたってとくに配慮した点は、既述の問題点の解決を図ることのほかに次の点にあります。

- ① 冷凍・空調・食品冷凍冷蔵の各編に見られた量記号の不整合を全ページにわたって統一し、術語も変遷しているものもあり最新のものに変更しました。
- ② 第2次改定以降から進化した技術・部材は新技術・新部材を追加あるいは書き換えました。たとえば、新冷媒、新冷凍機油、ブライン、小型圧縮機用直流電動機など。図表なども一部を新しく追加あるいは差し替えました。
- ③ 第2次改定その後の法令、JIS等の規格・基準の改正があったものは直近のものに変更しました。
- ④ 初心者の利用の便を配慮して、基本的な用語の解説と量記号および添え字の一覧表を新たに巻末の付録に追加しました。初めて冷凍・空調・食品冷凍冷蔵の分野に携わる人は、この巻末の用語の解説から学習を始めることを薦めます。

技術は日進月歩で発展していますので、これからも本書の内容で改めるところが出てくるものと考えられます。読者や識者のご意見などを寄せていただけることを望んでおります。

平成 18 年 12 月

社団法人 日本冷凍空調学会
通信教育委員会

委員長 古川 博 一
委員 宇田川 義紘
〃 岡田 昌章
〃 木下 盛光
〃 桑野 貢三
〃 田中 貴雄
〃 畑 政歳
〃 眞下 克之

第4次改訂にあたって

今回の増刷に当たって、本学会の通信教育委員会により運営する添削問題作成過程や受講生の解答結果の採点作業・質問事項から得られた内容などから、第3次改訂以降の情報に基づき、テキスト全般にわたって、説明文をより読みやすく理解しやすいように、記述内容を変えることなく若干の修正を行なった。

平成24年1月13日

公益社団法人 日本冷凍空調学会
通信教育委員会

委員長	古川博一
委員	太田育秀
〃	岡田昌章
〃	木下盛光
〃	桑野貢三
〃	関口恭一
〃	田中貴雄
〃	眞下克之

目 次

I 冷凍機編

第1章 冷凍とヒートポンプ…………… 1

- 1.1 ものを冷やす——冷凍の定義…………… 1
- 1.2 蒸気圧縮冷凍装置…………… 2
- 1.3 吸収冷凍装置…………… 3
- 1.4 冷凍機と駆動エネルギー…………… 4
- 1.5 ヒートポンプ…………… 6
- 例題…………… 7

第2章 蒸気圧縮冷凍サイクルと

$p-h$ 線図…………… 8

- 2.1 蒸気圧縮冷凍機の作用…………… 8
 - 2.1.1 圧縮機の作用…………… 8
 - 2.1.2 凝縮器の作用…………… 9
 - 2.1.3 膨張弁の作用…………… 9
 - 2.1.4 蒸発器の作用…………… 9
- 2.2 $p-h$ 線図の構成……………10
 - 2.2.1 冷媒の状態・特性などを表わす用語……………10
 - 2.2.2 冷媒の $p-h$ 線図の構成……………12
 - 2.2.3 $p-h$ 線図上の冷凍サイクル……………13
 - 2.2.4 冷凍効果, 冷凍能力, 理論圧縮動力……………14
 - 2.2.5 成績係数……………15
- 2.3 冷凍機の各種効率……………15
 - 2.3.1 体積効率……………15
 - 2.3.2 断熱効率 (圧縮効率), 機械効率……………16
 - 2.3.3 実際の圧縮機動力……………16
 - 2.3.4 冷凍装置およびヒートポンプ装置の成績係数……………16
- 2.4 蒸発温度, 凝縮温度の影響……………17
 - 2.4.1 蒸発温度の変化の影響……………17
 - 2.4.2 凝縮温度の変化の影響……………18
- 2.5 二段圧縮冷凍サイクル……………19
- 例題……………22

第3章 吸収冷凍サイクル……………24

- 3.1 水—臭化リチウム吸収冷凍機……………24
 - 3.1.1 概要……………24
 - 3.1.2 一重効用吸収冷凍サイクル……………24
 - 3.1.3 二重効用サイクル……………27
- 3.2 吸収冷温水機……………28
- 3.3 吸収ヒートポンプ……………29
 - 3.3.1 種類……………29
 - 3.3.2 第一種ヒートポンプ……………29
 - 3.3.3 第二種ヒートポンプ……………29
- 3.4 アンモニア吸収冷凍機……………29
- 例題……………30

第4章 圧縮機……………31

- 4.1 圧縮機の種類と特徴……………31
 - 4.1.1 圧縮機の分類……………31
 - 4.1.2 密閉形圧縮機と開放形圧縮機……………31
 - 4.1.3 圧縮機に要求される性能……………31
- 4.2 圧縮機の大きさの表わし方……………31
 - 4.2.1 ピストン押しのけ量……………31
 - 4.2.2 法定冷凍トン……………33
- 4.3 圧縮機の構造……………34
 - 4.3.1 往復圧縮機……………34
 - 4.3.2 ロータリ圧縮機……………36
 - 4.3.3 スクロール圧縮機……………38
 - 4.3.4 スクリュー圧縮機……………39
 - 4.3.5 遠心圧縮機 (ターボ圧縮機)……………41
- 4.4 圧縮機の潤滑……………42
- 4.5 圧縮機の冷却……………42
- 4.6 圧縮機の性能……………42
- 例題……………42

第5章 凝縮器・蒸発器……………44

- 5.1 伝熱の基礎……………44
 - 5.1.1 熱伝導と熱抵抗……………44
 - 5.1.2 熱伝達……………45
 - 5.1.3 熱通過……………46

5.2	凝縮器	50
5.2.1	凝縮熱量	50
5.2.2	凝縮器の種類と特徴	51
5.2.3	凝縮器における伝熱	54
5.2.4	凝縮器の容量制御	55
5.3	蒸発器の種類と構造	57
5.3.1	蒸発器内の冷媒の状態による分類	57
5.3.2	用途による分類	58
5.3.3	蒸発器の伝熱	60
5.3.4	蒸発器の容量制御	61
5.4	ブライン	62
5.5	吸収冷凍機の吸収器と再生器	63
5.5.1	吸収器	63
5.5.2	再生器	63
	例題	64

第6章 冷媒, 冷凍機油

6.1	冷媒	69
6.1.1	冷媒とその種類	69
6.1.2	冷媒の記号	70
6.1.3	冷媒の熱力学的性質	70
6.1.4	冷媒の化学的性質	72
6.2	冷凍機油	73
6.2.1	冷凍機油の使用目的	73
6.2.2	冷凍機油の種類	74
6.2.3	冷凍機油の使用	74
	例題	75

第7章 冷媒配管・付属機器

7.1	冷媒配管の構成	77
7.2	冷媒配管の基本	77
7.3	冷媒配管材料	78
7.3.1	配管材料	78
7.3.2	冷媒配管の接続と止め弁	80
7.3.3	冷媒配管の設計と施工	82
7.4	付属機器	87
7.4.1	油分離器	87
7.4.2	ドライヤ (冷媒乾燥器)	88

7.4.3	リキッド・フィルタ, サクション・ストレーナ	88
7.4.4	液ガス熱交換器	89
7.4.5	潤滑油冷却器	89
7.4.6	液分離器 (アキュムレータ)	89
7.4.7	受液器	89
	例題	90

第8章 電動機

8.1	電気の基礎	92
8.1.1	電気, 電圧, 電流	92
8.1.2	電源供給方式	92
8.1.3	電力, 力率, トルク, 動力, 電力量	93
8.2	電動機	95
8.2.1	電動機	95
8.3	動力配線用機器	99
8.4	インバータ (電源周波数変換器)	101
8.5	電気機器の制御	101
8.5.1	操作回路の読み方と書き方	101
8.5.2	電動機運転の基本回路	101
8.5.3	ポンプダウン制御	104
8.5.4	プログラマブルコントローラ	104
	例題	104

第9章 制御機器

9.1	冷凍装置の制御の特異性	105
9.2	膨張弁	105
9.2.1	膨張機構と膨張弁	105
9.2.2	温度自動膨張弁	105
9.2.3	電子膨張弁	109
9.2.4	キャピラリチューブ	110
9.2.5	手動膨張弁	111
9.2.6	定圧膨張弁	111
9.2.7	フロート弁	111
9.2.8	フロートスイッチ	112
9.3	冷媒圧力調整弁	112
9.3.1	蒸発圧力調整弁	112
9.3.2	吸入圧力調整弁	113
9.3.3	凝縮圧力調整弁	114

9.4	四方切換弁	114
9.5	圧力スイッチ	114
9.5.1	低圧圧力スイッチ	114
9.5.2	高圧圧力スイッチ	115
9.5.3	高低圧圧力スイッチ	116
9.5.4	油圧保護圧力スイッチ	116
9.6	サーモスタット	116
9.7	その他の制御機器	117
9.7.1	冷却水調整弁	117
9.7.2	断水スイッチ	117
9.7.3	フロースイッチ	118
9.7.4	ガス漏洩検知警報装置	118
9.7.5	感震装置	118
9.7.6	電磁弁	119
例題		119

第10章 冷凍装置の保安

10.1	冷凍装置の保安の必要性	121
10.1.1	高圧ガス	121
10.1.2	冷凍機の保安の必要性	121
10.2	圧力容器の構造と強度	121
10.2.1	冷媒設備の圧力区分	121
10.2.2	設計圧力と許容圧力	122
10.2.3	圧力容器に作用する応力と板厚	123
10.2.4	配管の肉厚	125
10.3	安全装置	125
10.3.1	安全装置の種類と使用制限	125
10.3.2	高圧遮断圧力スイッチ, 低圧遮断圧力スイッチ	126
10.3.3	安全弁	127
10.3.4	溶栓	128
10.3.5	破裂板	128
10.3.6	圧力逃がし装置	129
10.3.7	安全装置の取り付け	129
10.4	圧力試験	129
10.4.1	圧力試験の区分	129
10.4.2	耐圧試験	129
10.4.3	強度試験	130
10.4.4	気密試験 (配管以外の部分の 気密試験)	130

10.4.5	冷媒設備の気密試験	131
10.4.6	中間圧力による気密試験	131
10.4.7	真空試験	132
10.5	冷凍装置の保安上の施設基準	132
例題		133

第11章 冷凍機の運転・保守

11.1	蒸気圧縮冷凍機の運転・管理	135
11.1.1	運転管理の基本	135
11.1.2	運転準備から運転停止まで	135
11.1.3	運転と点検	137
11.1.4	冷凍装置の運転上のポイント	137
11.2	保守	143
11.2.1	保守管理とは	143
11.2.2	保守計画	143
11.2.3	保守管理の基本	144
11.2.4	保守スケジュール	146
11.3	計器と計測法	147
11.3.1	圧力計	147
11.3.2	温度計	148
11.3.3	湿度計	150
例題		150

II 空調編

第1章 空気調和の概要

1.1	空気調和とは何か	153
1.1.1	日本の気候と空気調和	153
1.1.2	空気調和の定義	154
1.1.3	空調の目的による分類	155
1.1.4	空調設備の構成	155
1.2	保健空調	156
1.2.1	人体の熱収支	156
1.2.2	室内温熱環境指標	158
1.2.3	作業空調における温熱環境	159
1.3	産業プロセス空調	159
1.3.1	産業プロセス空調の必要性	159
1.3.2	設計温湿度条件	161
1.4	換気	161
1.4.1	一般居室の空気汚染	161

1.4.2	産業換気の必要性	162	4.3.3	放射冷暖房方式	209
1.4.3	換気方式の分類	163	4.4	冷媒方式	210
例題		164	4.4.1	パッケージ形エアコンディショナ方式	210
第2章	湿り空気線図	167	4.4.2	ターミナルユニット形パッケージエアコンディショナ方式	211
2.1	湿り空気	167	4.4.3	マルチ形エアコンディショナ方式	212
2.2	湿り空気の状態量と熱量	167	4.5	直接暖房方式	212
2.3	空気線図	171	4.5.1	概要	212
2.4	空気線図の使い方	173	4.5.2	温水暖房方式	213
2.4.1	空調の単位プロセス	173	4.5.3	蒸気暖房方式	213
2.4.2	単一ダクト方式の空調プロセス	177	4.5.4	放射暖房方式	213
例題		179	4.6	空調方式の計画と適用	215
第3章	空調負荷	182	4.6.1	空調方式の選定	215
3.1	空調負荷の種類	182	4.6.2	省エネルギーの検討	215
3.1.1	空調負荷計算	182	4.7	熱源方式	215
3.1.2	空調負荷の形態	182	4.7.1	熱源方式の概要	215
3.2	室内負荷の求め方	184	4.7.2	基本的な熱源方式	216
3.2.1	設計外気条件	184	4.7.3	ヒートポンプ方式	218
3.2.2	室内設計条件	184	4.7.4	蓄熱方式	218
3.2.3	冷房負荷計算	185	4.7.5	地域冷暖房方式	219
3.2.4	暖房負荷計算	192	4.7.6	コージェネレーション方式	219
3.2.5	全日空調と間欠空調	193	4.7.7	熱源方式の選択	220
3.3	設備容量の決定	193	4.8	各種建物への適用	220
3.3.1	設計送風量	193	4.8.1	独立住宅	220
3.3.2	装置負荷(空調機負荷)	195	4.8.2	集合住宅	220
3.3.3	熱源機器容量	195	4.8.3	小規模事務所建物	220
3.4	省エネルギー計画	196	4.8.4	大規模事務所建物	221
3.4.1	空調設備の省エネルギー化	196	4.8.5	病院	221
3.4.2	PAL, CEC	196	4.8.6	劇場, 公会堂	222
例題		197	4.8.7	ホテル	222
第4章	空調方式	202	4.8.8	デパート	222
4.1	空調方式の分類	202	4.8.9	工場	222
4.2	全空気方式	202	例題		222
4.2.1	単一ダクト方式	202	第5章	ダクトと配管	225
4.2.2	二重ダクト方式	207	5.1	管内の流れ	225
4.3	水—空気方式	208	5.1.1	流体の性質	225
4.3.1	概要	208	5.1.2	流体の圧力とヘッド	226
4.3.2	ファンコイルユニット方式	208			

5.1.3	管路の抵抗	227
5.1.4	摩擦損失線図	229
5.2	ダクトの設計・施工	233
5.2.1	ダクトの種類と構成	233
5.2.2	ダクト系の設計	234
5.2.3	ダクトの材料と施工法	237
5.3	吹出し口と室内気流	239
5.3.1	吹出し口	239
5.3.2	吸込み口	240
5.3.3	室内気流分布	241
5.3.4	ダンパ	242
5.4	水配管の設計・施工	243
5.4.1	水配管の種類と方式	243
5.4.2	水配管の設計	244
5.4.3	膨張タンク	245
5.4.4	水配管の材料と施工法	246
5.5	蒸気配管と付属機器	248
5.5.1	蒸気配管の方式	248
5.5.2	蒸気配管の設計	248
5.5.3	蒸気配管の材料と付属品	250
例題		254
第6章 空調機器 257		
6.1	ボイラ	257
6.1.1	ボイラの種類	257
6.1.2	ボイラの出力と効率	259
6.1.3	ボイラ給水	259
6.1.4	ボイラ燃焼	260
6.2	冷凍機	261
6.2.1	ウォーターチリングユニット	261
6.2.2	遠心冷凍機（ターボ冷凍機）	261
6.2.3	吸収冷凍機	262
6.2.4	その他の冷凍機	263
6.3	冷却塔	263
6.3.1	種類と構造	263
6.3.2	冷却塔の性能	264
6.3.3	冷却塔の運転管理	265
6.4	送風機	266
6.4.1	送風機の種類	266
6.4.2	送風機の特徴	267

6.4.3	送風機の運転点と風量制御	268
6.5	ポンプ	268
6.5.1	ポンプの種類	268
6.5.2	遠心ポンプの特性	270
6.5.3	遠心ポンプの運転点と流量制御	270
6.6	空調機	272
6.6.1	空調機の構成	272
6.6.2	空調機構成機器の概略	276
6.7	自動制御・中央管制	278
6.7.1	自動制御	278
6.7.2	中央管制	280
6.8	設備の保守管理	280
6.8.1	保守管理の重要性	280
6.8.2	保守管理業務	281
6.8.3	設備の運転費と保守管理費	282
例題		283

Ⅲ 食品冷凍・冷蔵編

第1章 食品の凍結・解凍		287
1.1	凍結食品	287
1.1.1	水産物	287
1.1.2	畜産物	288
1.1.3	農産物	288
1.1.4	乳製品	288
1.1.5	加工食品（いわゆる冷凍食品）	289
1.2	凍結の物理	289
1.2.1	食品凍結の過程	289
1.2.2	凍結所要時間の推定	291
1.2.3	解凍	294
1.3	凍結食品の規格・基準	295
第2章 冷蔵庫		298
2.1	冷蔵庫の種類	298
2.1.1	収容物別の種類	298
2.1.2	自家用・営業用の分類	298
2.1.3	冷蔵庫保管温度の分類	299
2.1.4	流通段階での使用目的による 分類	300
2.1.5	規模による分類	301

2.1.6	建築構造による分類	302
2.1.7	防熱方式による分類	303
2.1.8	冷凍機と冷却器の配置による 分類	303
2.1.9	冷蔵庫の共通事項	306
2.2	冷蔵庫の防熱	308
2.2.1	防熱の基本	308
2.2.2	防熱材と壁の構成材料	309
2.2.3	防熱工事	310
2.3	冷凍・冷蔵負荷	315
2.3.1	壁面より侵入する熱量 (Φ_1 [kW])	316
2.3.2	換気による侵入熱量 (Φ_2 [kW])	316
2.3.3	搬入する品物を冷却するための 熱量(Φ_3 [kW])	317
2.3.4	作業員が発する熱量(Φ_4 [kW])	317
2.3.5	送風機が発生する熱量 (Φ_5 [kW])	317
2.3.6	青果物の呼吸熱による負荷 (Φ_6 [kW])	317
2.3.7	その他の熱量(Φ_7 [kW])	318
2.3.8	冷凍・冷蔵負荷総合計 ($\Sigma\Phi_i$ [kW])	318
例題		318

第3章 ショーケース 319

3.1	ショーケースの種類	319
3.2	ショーケースの構造	320
3.3	設置条件	321
3.4	冷却方式・除霜方式	322

第4章 凍結設備と解凍設備 324

4.1	製氷設備	324
4.1.1	角氷製造設備	324
4.1.2	自動製氷設備	325
4.2	凍結設備	326
4.2.1	凍結設備の種類と特徴	327

4.2.2	凍結設備に必要な冷凍能力	331
4.3	解凍設備	332
4.3.1	解凍設備の種類と特徴	333
4.3.2	解凍設備の必要加熱能力	336

IV 付 録

基本的な用語と量記号・単位 337

1.	基本的な用語	337
1.1	冷凍機	337
1.2	冷凍, 冷蔵 凍結	337
1.3	圧力	337
1.4	温度	338
1.5	比熱, 熱量	339
1.6	仕事, エネルギー, 熱	339
1.7	仕事率(動力, 工率)	339
1.8	冷凍能力	339
2.	量記号・単位と換算表	340
2.1	量記号・単位	340
2.2	単位換算表	343
2.3	10の整数倍乗の単位を作るための 接頭語	344
2.4	ギリシャ文字の一覧表	344

付表1	R 134 a 熱力学性質表	345
付図1	R 134 a p - h 線図	346
付表2	R 22 熱力学性質表	347
付図2	R 22 p - h 線図	348
付表3	R 404 A 熱力学性質表	349
付図3	R 404 A p - h 線図	350
付表4	R 407 C 熱力学性質表	351
付図4	R 407 C p - h 線図	352
付表5	R 410 A 熱力学性質表	353
付図5	R 410 A p - h 線図	354
付表6	アンモニア熱力学性質表	355
付図6	アンモニア p - h 線図	356

索引		357
----	--	-----

I 冷凍機編

1.1 ものを冷やす——冷凍の定義

冷蔵庫で食品を冷やしたり、保存したりし、また夏の暑い日にルームエアコンディショナを運転して冷房することは、日常生活で欠かせないものになっている。海外に飛ぶ航空機の中も冷房されており、遠洋航海してマグロなどを捕り日本まで運んでくる漁船でも、マグロは冷凍・冷蔵されている。このような冷凍・冷蔵・空調などは冷凍技術が基本になっている。

このようにものを温めたり、冷やしたりすることは我々が毎日の生活で経験していることで、その過程で物体間に温度差が生じたり、それともなって目には見えない熱が移動していることを経験的に理解している。そして、この熱は、川の水が高いところから低いところへ流れるように、温度の高いものから温度の低いものへと流れる。

したがって、ある物質を冷やすには、それよりも温度の低いものに接触させて、熱を移動させればよい。たとえば、常温のものを冷水に接触させると、その物質の熱は冷水に移動して冷やされる一方、冷水は熱を受け入れて温度が上昇することになる。

たとえば、1 kg の冷水が 4.1816 kJ の熱を取り入れると、1 K (ケルビンと読み、従来単位の温度差 1°C を表わす) だけ温度が上昇する。しかし、このような方法で大量の熱を物質から取り除くには、大量の冷水が必要になる。なお、熱の出入りによって冷水の温度が変化する場合のように、物質の温度が変化するときに使われる熱を顕熱といい、1 kg の物質の温度を 1 K 上昇させるのに必要な熱量を比熱という。

一方、水 1 kg がすべて蒸発するには、およそ 2500 kJ の熱を周囲から奪うことになる。し

たがって、少量の水を蒸発させることにより大量の熱を物質から奪い、物質を冷却することができる。しかし、この場合は物質を冷却するのに、水を低温で蒸発させる必要がある。この場合の物質の状態変化、たとえば、水から水に、あるいは水から水蒸気へと変化するのに使われる熱を潜熱といい、圧力が一定のもとで 1 kg の液体がすべて蒸気になるのに必要な熱量を蒸発の潜熱という。

一般に、液体は低い圧力にするほど低い温度で蒸発する。たとえば、水を絶対圧 0.6108 kPa のような低い圧力にすれば、0°C で沸騰、蒸発し、この圧力を保てば、0°C の状態で周囲の物質を冷やすことができる。しかし、このような高真空を維持するには、発生した水蒸気を常に取り除くために高性能な真空ポンプが必要で、あまり実用的ではない。さらに、0°C 以下では水は氷ってしまうので、0°C 以下の低温を得ることができない。

したがって、0°C 以下の低温を得るには、あまり高真空にすることなく、低い温度で沸騰・蒸発し、しかも蒸発の潜熱の大きい物質を媒体として選び、その蒸発の潜熱を周囲の物質から取り去るようにすれば、少量の媒体を用いて、物質を媒体の蒸発温度近くの低温まで冷やすことができる。このような冷やしたい物質から熱を取り去る媒体を冷媒という。

このようにある物質から熱を奪って、温度の高い周囲物体に放出し、物質の温度を下げた冷却プロセスを冷凍といい、冷凍を実現するための装置を冷凍装置という。

冷媒を使用して物を冷やす代表的な冷凍装置には、蒸気圧縮冷凍装置、吸収冷凍装置などがあり、これらはいずれも冷媒の蒸発の潜熱を利用したものである。

冷凍装置には、このように冷媒を利用するも

のほかに、水蒸気の吸着・放出現象を利用したもの、空気の断熱圧縮・膨張作用により低温の空気を発生するもの、蒸気エゼクタを利用して水を入れた容器を真空にして水を蒸発させ低温の冷水を発生する装置、異種の半導体の接点で低温を生み出すバルチエ効果利用のものなど、いろいろな装置が利用目的に応じて使われている。

本書では、蒸気圧縮冷凍装置および吸収冷凍装置について述べるものとする。

1.2 蒸気圧縮冷凍装置

0℃以下の低温を得る冷凍装置としては、冷媒としてアンモニアやフルオロカーボンを用いた蒸気圧縮冷凍装置が一般に広く使用されている。アンモニアは大気圧(101.325 kPa)でも-33.3℃で沸騰・蒸発し、さらに圧力を下げれば、もっと低い温度で沸騰・蒸発するので、周囲の物質をそれに近い温度まで冷やすことができる。液体が沸騰する状態のときの温度を沸点といい、大気圧における沸騰温度を標準沸点という。

また、大気圧のもとで-20℃以下で沸騰蒸発するフルオロカーボンには、R134a, R410A, R404Aなどがあり、これらはそれぞれ業務用の冷蔵庫や店舗用のエアコン(パッケージ形エアコンディショナ)などに使用されている代表的な冷媒である。家庭用冷蔵庫には、可燃性はあるが自然冷媒のイソブタン(R600a)が採用されている。

容器内の液体をある一定圧力のもとで加熱すると、沸騰して蒸気を発生し、容器内は蒸気と液で満たされた状態となる。このような状態を飽和状態という。飽和状態にある蒸気を飽和蒸気、液体を飽和液という。飽和蒸気と飽和液が混じり合ったものを湿り蒸気という。飽和状態にあるときの蒸気あるいは液体の温度を飽和温度、そのときの圧力を飽和圧力という。たとえば、水を大気圧のもとで加熱すると100℃で沸

騰する。この場合、大気圧(101.325 kPa)での水の飽和温度は100℃、あるいは100℃の水の飽和圧力は101.325 kPaであるという。

一般の冷凍装置において、冷媒の蒸発潜熱を利用して物を冷却するには、冷媒と物とを直接接触させずに、冷却管内や容器内で冷媒を沸騰・蒸発させ、その壁を介して冷却する。このような冷却管や容器で構成されたものを蒸発器(冷却器ともいう)という。

このようにして蒸発器で低温が得られたとしても、冷却時に熱を吸収して発生した冷媒蒸気を蒸発器から取り除かなければ、一定の蒸発圧力、すなわち、一定の蒸発温度(飽和温度)を維持することができない。このため発生した冷媒蒸気を蒸発器から常に吸引する必要がある。しかし、吸引した蒸気をそのまま大気に放出すれば、経済的でないばかりか、環境を悪化させることもあり、実用的ではない。したがって、一定蒸発圧力を維持すると同時に冷媒を液化させて再利用するための機器が必要となる。

先に述べたように、冷媒が沸騰・蒸発する温度(飽和温度)は圧力が下がるにともなって低下し、逆に圧力が上がると、この温度も上昇する。たとえば、R134aの大気圧下での沸点は-26.2℃であるが、圧力が771 kPaになると飽和温度は30℃に上昇する。したがって、蒸発器内で発生したR134aの蒸気を周囲から容易に得られる30℃の外気や水で冷却して再び液化(蒸気が液体に変化することを凝縮という)するためには、この蒸気の圧力を30℃の飽和圧力(771 kPa)以上に高めればよい。このように、蒸発器から発生した蒸気を吸引し、蒸気が凝縮する圧力まで高めるために用いられる機器が圧縮機である。

蒸発器で蒸発した冷媒蒸気は圧縮機に吸い込まれ、圧力が高められた後、管内や容器内に送られ、外気や冷却水によって冷却され凝縮する。冷媒蒸気を凝縮させる伝熱管や容器で構成された機器を凝縮器という。凝縮する際の冷媒蒸気の圧力を凝縮圧力といい、この圧力は冷媒の種

類、冷却空気温度あるいは冷却水温度などによって変わる。

凝縮した高压の冷媒液を、低压の蒸発器で蒸発した量だけ、狭い弁通路を通して蒸発器に補給すれば、蒸発器内を一定の低い圧力に保つことができ、蒸発器内の冷媒液はその圧力における低い飽和温度で蒸発が続けられることになる。圧力が高い凝縮器と圧力が低い蒸発器とを結ぶ狭い通路の弁は膨張弁と呼ばれ、その開度と弁前後の圧力差によって冷媒液の補給量が決定される。家庭用冷蔵庫などでは、コストを安くするため膨張弁の代わりに毛細管（キャピラリチューブ）が使用されている。

以上のように圧縮機を使用して蒸発した冷媒を再び液化させ、繰り返し冷媒の蒸発の潜熱を利用して低温を得る装置を蒸気圧縮冷凍装置という。以上の説明からわかるようにこの装置は、図 1.1 に示すように主要機器である蒸発器、圧縮機、凝縮器および膨張弁とこれらを接続する配管によって構成されており、冷媒は装置内を蒸発、圧力上昇、液化、膨張、再蒸発といった状態変化を繰り返しながら循環し、目的の冷凍作用を行う。

このように冷媒が状態変化をして冷凍作用を行い、もとの状態に戻る過程を冷凍サイクルという。また、圧縮機を使用した冷凍サイクルを蒸気圧縮冷凍サイクルと呼んでいる。なお、図 1.1 の中の受液器は装置内を循環する冷媒流量を調節するための液だめで、電気冷蔵庫などの

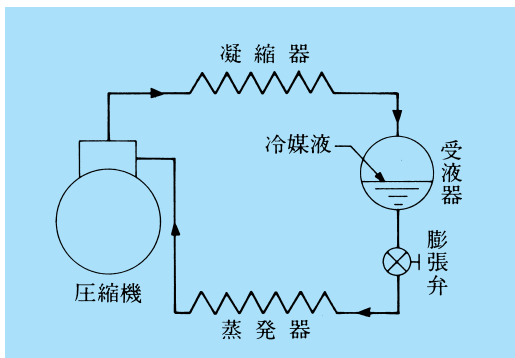


図 1.1 単段圧縮装置略図

小形の装置では省略されている。

図 1.1 に示す装置は、冷媒の蒸発温度が -30°C くらいまで使用され、単段圧縮冷凍装置とも呼ばれている。

それよりもさらに温度の低い $-30\sim-70^{\circ}\text{C}$ くらいの蒸発温度を得たいときには二段圧縮冷凍装置が利用される。この冷凍サイクルの詳細は 2.5 を参照されたい。

1.3 吸収冷凍装置

水を冷媒として使用し、冷房やその他冷却用の冷水を得ることができる吸収冷凍装置が近年よく利用されている。

先に述べたように、液体の飽和温度は圧力が低くなるほど低下する。水の場合には絶対圧 0.8 kPa くらいの真空にすると、その飽和温度は約 4°C となり、この温度で沸騰・蒸発する。したがって、蒸発して発生した水蒸気を除去してこの真空を維持すれば、最低 5°C 程度の冷水を得ることができる。

吸収冷凍装置では、臭化リチウム（化学式： LiBr ）水溶液（吸収液）が水蒸気を吸収する性質を利用して、これに発生した水蒸気を吸収させている。したがって、装置内を初めに真空にしておけば、その後は真空ポンプを使用することなく、蒸発器内は真空が保たれる。この冷凍装置を臭化リチウム吸収冷凍装置という。

また、アンモニア蒸気が水によく吸収される性質を利用したアンモニア吸収冷凍装置もある。この装置では、アンモニアが冷媒となり、水が吸収剤の役割をもち、 -60°C 程度の低温を得ることができる。

図 1.2 に一重効用臭化リチウム吸収冷凍装置の概略を示す。

蒸発器で発生した水蒸気は吸収器に導かれ、ここで臭化リチウム水溶液に吸収される。この際、水蒸気は潜熱を放出して液化するので溶液が温度上昇する。溶液の温度が上昇すると吸収器内の圧力が上昇して、水蒸気の吸収が連続的

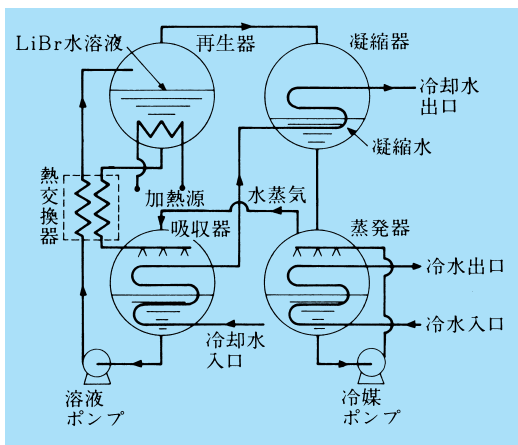


図 1.2 一重効用吸収冷凍装置略図

に行うことができなくなるので、これを防ぐために冷却水によって溶液を冷却して一定温度に維持している。

水蒸気を吸収した溶液は希釈されて、臭化リチウム水溶液の濃度が低下し、希溶液になる。このため、溶液の吸収能力が低下するので、希溶液を溶液ポンプによって再生器に送り、再生器内で希溶液を加熱して水蒸気を発生させて濃縮し、臭化リチウム水溶液の濃度を水蒸気吸収前の濃度まで高めた濃溶液にし、吸収器に戻す。その際、再生器での加熱量の節約と加熱され高温となった濃溶液の冷却のため、溶液熱交換器を設けて再生器に入る希溶液と再生器から出る濃溶液とで熱交換させている。

再生器内で発生した水蒸気は凝縮器で冷却水によって冷却されて液化する。液化した水は低圧に維持されている蒸発器内で冷水より熱を奪って（冷却作用）蒸発する。このように冷媒である水は装置内を状態変化しながら循環する。

蒸気圧縮冷凍装置では、蒸発器内で発生した冷媒蒸気を圧縮機で吸い込み圧縮するが、吸収冷凍装置では圧縮機の代わりに吸収器で吸収液が冷媒蒸気を吸い込み、再生器で加熱され冷媒蒸気を吐き出す。したがって、圧縮機以外の主要構成機器である凝縮器や蒸発器などは圧縮式の場合と同様の作用を行う。

蒸発器や吸収器内の圧力は蒸発温度によって、

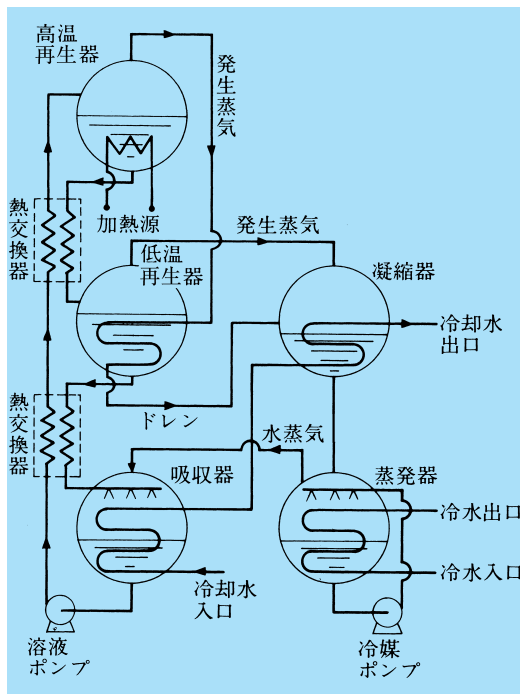


図 1.3 二重効用吸収冷凍装置略図

再生器や凝縮器内の圧力は凝縮温度によってそれぞれ決まる。通常の臭化リチウム吸収冷凍装置では、凝縮温度 40°C で、再生器および凝縮器内圧力は約 9 kPa 、再生器内温度は約 90°C となる。

一重効用吸収冷凍装置では、発生した水蒸気の凝縮の潜熱を冷却水に捨てているが、この熱を有効に利用することにより、効率の改善を図った二重効用吸収冷凍装置も広く使用されている（図 1.3）。二重効用吸収冷凍装置については 3.1.3 を参照されたい。

1.4 冷凍機と駆動エネルギー

この章の始めに述べたように、熱はそれ自体では低温から高温へは移動しない。このため、冷凍作用を行うには、熱を運ぶバケツである冷媒に何らかのエネルギーを加える必要がある。圧縮のために力学的エネルギーを利用する方式が蒸気圧縮冷凍装置で、熱エネルギーを利用する方式が吸収冷凍装置である。

蒸気圧縮冷凍装置では、冷媒蒸気を圧縮するために力学的なエネルギーを加えるので、圧縮後の冷媒蒸気は圧力が高くなるとともに温度も上昇する。このとき、圧縮機から周囲に熱が逃げなければ(このような圧縮を断熱圧縮という)、冷媒の保有するエネルギーは圧縮仕事の分だけ増えたことになる。熱も力学的なエネルギー(ここでは、圧縮仕事)も形態は異なるが同じエネルギーなので、ともにJ(ジュール)という単位で表わされる。また、これらは相互に変換することができ、等価である。

圧縮機に流出入する冷媒1kgが保有するエネルギーは、運動エネルギーや位置エネルギーが小さく無視できる場合には、内部エネルギー(u)と呼ばれる熱的なエネルギーと、冷媒を押し出し流動するための仕事(pv)との和であり、次式で表わされる。

$$h = u + pv \quad (1.1)$$

ここで、 u は比内部エネルギー、 p は圧力、 v は比体積(冷媒蒸気1kgの体積)で、 h は比エンタルピーといい、流動する冷媒の保有エネルギーを表わす。

したがって、圧縮機に単位時間に流出入する冷媒量を q_m [kg/s]、圧縮機入口および出口の冷媒の比エンタルピーをそれぞれ h_1 および h_2 [kJ/kg]とすると、圧縮機によって冷媒に加えられる単位時間当たりの圧縮仕事、すなわち圧縮動力 P [kW]は

$$P = q_m(h_2 - h_1) \quad (1.2)$$

となる。ここに q_m を冷媒流量という。

蒸発器においては、冷媒は熱を汲み上げ、その量だけ保有エネルギーが増大する。したがって、冷媒1kg当たりが汲み上げる熱量 r [kJ/kg](冷凍効果という)は、蒸発器出口の冷媒の比エンタルピー h_1 から入口の比エンタルピー h_4 を差し引いた値となり、次式で表わされる。

$$r = h_1 - h_4 \quad (1.3)$$

また、蒸発器で冷媒が周囲から汲み上げる単位時間当たりの熱量 Φ_0 [kW]を冷凍能力といい、次式で表わされる。

$$\Phi_0 = q_m(h_1 - h_4) \quad (1.4)$$

一方、凝縮器では、冷媒は冷却水あるいは冷却用空気に熱を放出する。単位時間当たりの放出熱量 Φ_k [kW]を凝縮負荷といい、凝縮器入口の冷媒の比エンタルピー h_2 と出口の比エンタルピー h_3 を用いて凝縮負荷を表わすと

$$\Phi_k = q_m(h_2 - h_3) \quad (1.5)$$

となる。

つぎにこれら冷凍装置に流出入するエネルギー(P , Φ_0 , Φ_k)の関係について考えると、**図1.4**に示すように単位時間当たりに冷凍装置に入るすべてのエネルギーは、単位時間当たりに装置から出るすべてのエネルギーと等しくなければならないので、次式が成立する。

$$\Phi_k = \Phi_0 + P \quad (1.6)$$

また、冷凍作用を行うのに必要なエネルギー P に対する得られる冷凍能力 Φ_0 の比を冷凍サイクルの成績係数(COP_c)といい、次式で表わされる。

$$COP_c = \frac{\Phi_0}{P} \quad (1.7)$$

この値は同じ冷凍装置であっても、運転条件(蒸発温度、凝縮温度など)によって変わり、また同じ運転条件であっても、使用する冷媒によって異なる。

吸収冷凍装置では、**図1.5**に示すように冷凍作用を行うための主な駆動エネルギーは、再生器において溶液を濃縮させるための熱である。単位時間当たりのこの駆動熱量を Φ_G 、蒸発器で汲み上げる熱量を Φ_0 、吸収器および凝縮器での冷却水への放熱量をそれぞれ Φ_A および Φ_k とすると、吸収冷凍装置の熱収支は次式で表わ

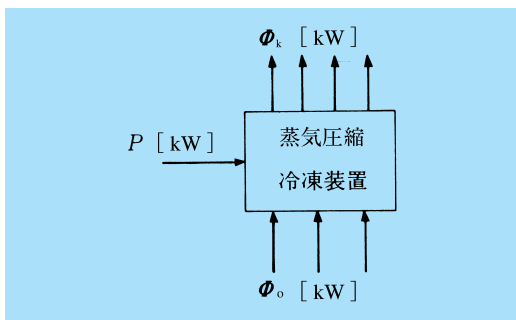


図 1.4 蒸気圧縮冷凍装置の熱収支

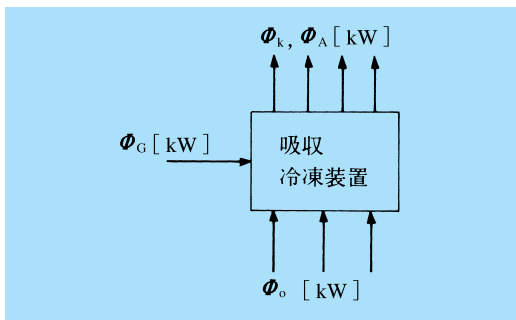


図 1.5 吸収冷凍装置の熱収支

される。

$$\Phi_G + \Phi_o = \Phi_A + \Phi_k \quad (1.8)$$

また、吸収冷凍装置の成績係数 (COP_c) は冷凍作用に必要なエネルギー Φ_G に対して得られる冷凍能力 Φ_o の比で表わされるので次式となる。

$$COP_c = \frac{\Phi_o}{\Phi_G} \quad (1.9)$$

1.5 ヒートポンプ

蒸気圧縮冷凍サイクルでは、冷媒を凝縮するために凝縮器で熱量 Φ_k を冷却水あるいは冷却空気に放熱している。この熱を単に捨ててしまうのではなく、暖房やその他の加熱源として使用することを目的とした装置をヒートポンプ装置といい、そのサイクルを蒸気圧縮ヒートポンプサイクルという。このサイクルの性能すなわち成績係数 COP_h は、単位時間当たりの圧縮

仕事 P に対する得られる加熱能力 Φ_k の比で定義され、次式で表わされる。

$$COP_h = \frac{\Phi_k}{P} \quad (1.10)$$

式 (1.10) に式 (1.6) および式 (1.7) を代入すると

$$\begin{aligned} COP_h &= \frac{\Phi_o + P}{P} \\ &= COP_c + 1 \end{aligned} \quad (1.11)$$

となる。この式より、ヒートポンプサイクルの成績係数は、同じ温度条件の冷凍サイクルの成績係数よりも 1 だけ大きい値になることがわかる。外気温度が 0°C 近くの場合の暖房を考えると、 COP_c の値は約 4~5 となるので COP_h の値は約 5~6 となる。このことは、1 kW の電熱器を使用して暖房する場合には 1 秒間当たり 1 kJ の熱量しか発生しないが、ヒートポンプ装置を使用して暖房する場合は、1 kW の駆動動力を投入すれば、1 秒間当たりに 5~6 kJ の熱量が得られることを示しており、エネルギーの有効利用の上から大変好都合である。

すなわち、ヒートポンプ装置は、低温の外気や常温の水を熱源とし、比較的少ないエネルギーを使ってこれらの熱源より熱を汲み上げ、暖房や加熱用の温度まで高めて利用するもので、得られる熱量（加熱能力）は、汲み上げた熱量に汲み上げるために投入したエネルギーを足したものとなる。蒸気圧縮ヒートポンプサイクルは冷凍サイクルと基本的に同じであるが、その目的に応じた蒸発温度と凝縮温度になる点異なる。

吸収冷凍サイクルにおいても同様に、冷媒が凝縮器で凝縮する際放出する熱量 Φ_k と吸収器で吸収される際放出する熱量 Φ_A を暖房や加熱用熱源として利用する装置が吸収ヒートポンプで、そのサイクルを吸収ヒートポンプサイクルという。このサイクルの成績係数 COP_h も投入したエネルギー、すなわち再生器で溶液を加熱し濃縮するため使用した単位時間当たりの熱量 Φ_G に対する得られる加熱能力 (Φ_k と Φ_A の

和)の比として定義され、次式で表わされる。

$$COP_h = \frac{\Phi_k + \Phi_A}{\Phi_G} \quad (1.12)$$

式(1.12)に式(1.8)および式(1.9)を代入すると、

$$\begin{aligned} COP_h &= \frac{\Phi_G + \Phi_0}{\Phi_G} \\ &= COP_c + 1 \end{aligned} \quad (1.13)$$

となり、蒸気圧縮ヒートポンプの成績係数に関する式(1.11)と同一の式が得られる。

冷凍装置は、その機能からわかるように、温度の低い所から高い所へ熱を汲み上げるポンプに相当する。そして、凝縮器や吸収器などから冷媒が放出する熱を利用の対象とする場合、冷凍装置を一般にヒートポンプ装置といている。

ヒートポンプ装置はいろいろな熱源や用途に応じた利用が進められている。外気を熱源とする家庭用のエアコンはもちろんのこと、地下水や工場排水を熱源とし、暖房や給湯に用いる水熱源方式や、工場、地下街の排気の熱を回収して利用する空気熱源方式など、温度が低くてそのままではまったく利用価値のない熱を有用な温度レベルまで高め、有効に利用できるようにしている。

例題

例題 1

つぎの記述のうち、正しいものはどれか。

- イ. 冷媒の蒸発潜熱は冷媒の種類に関係なく一定である。
- ロ. 同じ温度のもとでは、標準沸点の低い冷媒ほど圧力は高くなる。
- ハ. 蒸気圧縮冷凍装置では、冷媒の蒸発の潜熱を利用して冷却作用を行う。
- ニ. 冷凍装置では、蒸発器で取り入れた熱量と凝縮器で放出する熱量は等しい。

ホ. 蒸気圧縮冷凍装置の冷却能力は、圧縮機に加えるエネルギーに等しい。

ヘ. 吸収冷凍装置の駆動源は熱であり、これを装置(再生器)に加えることにより低温を得る。

ト. 蒸気圧縮ヒートポンプでは、装置内を循環する冷媒の流れ方向が冷凍サイクルのそれと逆方向になる。

チ. 蒸気圧縮ヒートポンプの成績係数は、同じ温度条件での冷凍サイクルの成績係数より1だけ大きい。これは冷媒を圧縮するのに要したエネルギーが熱として冷媒に加わるからである。

リ. 冷凍サイクルの成績係数は、蒸発温度や凝縮温度には関係しない。

ヌ. ヒートポンプの成績係数の値は常に1よりも大きい。

解

ロ, ハ, ヘ, チ, ヌ

例題 2

冷凍能力4.5 kWの冷凍装置があり、圧縮機の消費動力は1.5 kWである。この装置の凝縮器で放出される熱量 Φ_k [kW]はいくらか。

また、この装置の成績係数 COP_c はいくらか。

解

式(1.6)より、凝縮負荷 Φ_k [kW]は

$$\Phi_k = \Phi_0 + P = 4.5 + 1.5 = 6.0 \text{ kW}$$

と求まる。

成績係数 COP_c は式(1.7)より、

$$COP_c = \frac{\Phi_0}{P} = \frac{4.5}{1.5} = 3$$

と求まる。