

目次

第 I 部 低温工学の歴史と物理的な背景

| | |
|--|----|
| 第 1 章 冷凍技術の歴史 | 3 |
| 1.1 大昔, 文明を手にし始めた人類の夢 | 3 |
| 1.2 低温工業はどのようにして生まれたか? | 5 |
| 1.3 熱機関と冷凍機・液化機 | 6 |
| 1.4 新しい学問「熱力学」 | 12 |
| 1.5 ファン・デア・ワールスの状態方程式 | 18 |
| 1.6 温度に見る自然の豊かさ —低温工学の対象とする温度範囲— | 20 |
| 第 2 章 低温工学の物理的基礎 | 25 |
| —冷媒 (^3He ・ ^4He) の物性と極低温生成— | |
| 2.1 液体 ^4He と超流動 | 25 |
| 1. ^4He 元素 | 25 |
| 2. ヘリウム原子間相互作用 | 25 |
| 3. ジュール-トムソン効果と逆転温度 | 27 |
| 4. 量子流体としての液体ヘリウム | 28 |
| 5. 超流動の発見 | 30 |
| 6. 超流動現象と二流体モデル | 31 |
| コラム: フィルムフロー | 32 |
| 7. 二流体モデル | 33 |
| 8. ボース-アインシュタイン凝縮 | 37 |
| 9. ヘリウムにおける量子統計 | 38 |

| | |
|--|----|
| 10. ボース凝縮と相互作用 | 39 |
| 11. なぜ超流動になるか | 40 |
| 12. 素励起(フォノン, ロトン, 量子化うず)と臨界速度, 乱流 | 41 |
| コラム: 超流動超音波顕微鏡 | 43 |
| 2.2 液体 ^3He と $^3\text{He}/^4\text{He}$ 混合液 | 44 |
| 1. ^3He 元素 | 44 |
| 2. ^3He の液化 | 45 |
| 3. 1 K 以下の液体 ^3He | 46 |
| 4. $^3\text{He}/^4\text{He}$ 混合液 | 46 |
| コラム: 超流動 ^3He の発見と 1996 年度のノーベル物理学賞 | 48 |
| 2.3 極低温生成 | 49 |
| 1. ^4He の減圧沸騰による低温生成 | 49 |
| 2. ^3He クライオスタット | 50 |
| 3. $^3\text{He}/^4\text{He}$ 希釈冷凍機 | 51 |
| 4. 断熱消磁 | 54 |
| 5. 核断熱消磁 | 55 |

第II部 低温工学の熱工学としての基礎

第3章 低温生成の熱力学 59

| | |
|--------------------------|----|
| 3.1 熱力学の基礎 | 59 |
| 1. いくつかの用語 | 59 |
| 2. 熱力学の法則 | 61 |
| 3. 流体の巨視的性質 | 64 |
| 4. 過程の評価と有効エネルギー(エクセルギー) | 65 |
| 演習問題 1 | 67 |
| 5. クライオゲンの性質 | 68 |
| 6. ジュール-トムソン膨張と断熱膨張 | 70 |
| 演習問題 2 | 81 |
| 3 | 83 |
| 4 | 85 |
| 7. 等エントロピー圧縮と等温圧縮 | 87 |
| 演習問題 5 | 91 |

| | |
|-----------------------|-----|
| 3.2 冷凍の基本概念 | 92 |
| 1. 逆カルノーサイクルと逆カルノー冷凍機 | 92 |
| 演習問題 6 | 95 |
| 2. 最小仕事と逆カルノーサイクル | 96 |
| 演習問題 7 | 98 |
| 3. 冷凍性能の評価 | 99 |
| 演習問題 8 | 101 |
| 3.3 液化と液化機 | 101 |
| 1. 液化の意味と目的 | 101 |
| 2. 冷凍と液化 | 102 |
| 3. リンデ-ハンプソン法 | 104 |
| 演習問題 9 | 107 |
| 4. クロード法 | 113 |
| 演習問題 10 | 116 |
| 11 | 120 |

第4章 冷凍技術 126

| | |
|-----------------------------|-----|
| 4.1 冷凍サイクルのエクセルギー評価 | 126 |
| 1. エクセルギーの定義 | 126 |
| 2. エクセルギー損失 | 128 |
| 3. エクセルギー効率 | 133 |
| 4. エクセルギー解析の実例 | 134 |
| 4.2 蓄冷式冷凍機の熱力学的基礎 | 142 |
| 1. 冷凍サイクルの分類 | 142 |
| 2. スターリングサイクル | 144 |
| 3. 振動流体のエネルギー輸送能力 | 150 |
| 4. 蓄冷器の基本的機能 | 155 |
| 5. 蓄冷器の効率 | 160 |
| 4.3 パルス管冷凍機 | 173 |
| 1. 基本構成 | 173 |
| 2. 位相制御機構 | 174 |
| 3. ベーシック型パルス管冷凍機 | 175 |
| 4. オリフィスおよびダブルインレット型パルス管冷凍機 | 176 |
| 5. GM 方式パルス管冷凍機 | 184 |

第III部 低温工学の実際

第5章 冷媒の低温工学 193

- 5.1 冷媒の状態図と相変化 193
- 5.2 冷却温度と冷媒 199
- 5.3 大気中の冷媒 200
- 5.4 作業流体としてのヘリウム 201
 - 1. エントロピー 201
 - 2. ジュール-トムソン膨張とエンタルピー 202
 - 3. エントロピーとエンタルピーの算出 205
- 5.5 効率的な冷やし方 208
- 5.6 超流動ヘリウム 210
 - 1. 二流体モデル 210
 - 2. 超流動ヘリウムの熱移送特性の限界 212
 - 3. チャンネル中の熱移送 217
- 5.7 冷媒の危険性と取扱い方 218
 - コラム：Dance with Nitrogen 220

第6章 蓄冷材の冷凍工学 222

- 6.1 蓄冷材の物理と熱力学 222
 - 1. 蓄冷材と蓄冷器 222
 - 2. 蓄冷材の役割 223
 - 3. 磁性体を用いた蓄冷材 224
- 6.2 冷凍機の中での蓄冷材の役割 225
 - 1. GM 冷凍機 225
 - 2. GM 冷凍機の動作原理 226
 - 3. 磁性蓄冷材を用いた GM 冷凍機 230
 - 4. 磁性蓄冷材式 GM 冷凍機の能力向上 233
 - 5. 最近の研究開発の状況 238
- 6.3 冷凍機設計の演習 241
 - 1. 設計計算の概要 241

- 2. 蓄冷損失（蓄冷効率）の考察 243
- 3. 冷凍機冷凍能力の見積り 247
- 6.4 断熱消磁とサブケルビン生成 249
 - 1. 断熱消磁 249
 - 2. サブケルビン生成 250
- 6.5 磁気冷凍 251
 - 1. 基本原理 251
 - 2. 静止型磁気冷凍機 252

第7章 低温維持のための技術 257

—クライオスタットの設計技術—

- 7.1 クライオスタットの概要 257
- 7.2 クライオスタットの断熱技術 260
 - 1. 断熱技術の概要 260
 - 2. 真空断熱技術と放射の断熱技術 261
 - 演習問題 1 268
 - 3. 熱伝導に対する断熱技術 269
 - 演習問題 2 273
 - 4. 電流リードの断熱技術 273
 - 演習問題 3 277
- 7.3 クライオスタットにおける小型冷凍機の選択 279
 - 1. 小型冷凍機の分類と特徴 279
 - 2. 4 K 冷凍機の選択 285
- 7.4 クライオスタット設計における注意事項 287
 - 1. 熱伝導による温度差 287
 - 演習問題 4 289
 - 2. 接触熱抵抗 289
 - 3. 熱収縮 291
 - 4. サーマル・オシレーション 292
- 7.5 実際のクライオスタット設計例 293

さくいん 303