

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