

低温工学ハンドブック

目 次

日本語版によせて

推せんのことば

訳者のことば

第1章 低温工学—その歴史と応用分野—	1
1.1 発展の歴史	1
1.2 応用分野	5
1.3 学術用語	8
参考文献	10
第2章 熱力学の基礎	13
2.1 はじめに	13
2.2 基本法則	13
2.3 寒冷生成の原理	15
2.3.1 問題設定	15
2.3.2 寒冷生成の最小仕事	16
2.3.3 冷凍機	17
2.3.4 液化機	17
2.4 非可逆過程	18
2.4.1 エネルギー損失の計算	19
2.4.2 実際の装置の効率	20
2.5 物性値	21
2.5.1 力学的および熱的状态量の決定	22
2.5.2 状態量の表現	23
第3章 寒剤の性質	25
3.1 はじめに	25
3.2 力学的性質	28
3.2.1 p, v, T に関する線図	28
3.2.2 状態方程式	32

3.2.3	蒸気圧曲線	33
3.2.4	表面張力	35
3.3	熱的性質	35
3.3.1	p - v - T 関係で表現した熱的狀態量	35
3.3.2	ジュール-トムソン効果, 等温絞り効果, 等エントロピー膨張	37
3.3.3	ジュール-トムソン効果と等温絞り効果による狀態量決定	39
3.3.4	種々な狀態の比熱	40
3.3.5	潜熱	43
3.3.6	蒸気の顕熱	44
3.4	輸送現象	45
3.4.1	粘性	45
3.4.2	熱伝導率	47
3.5	電氣的性質	48
3.5.1	比誘電率	48
3.5.2	電気伝導度	49
3.5.3	誘電正接 ($\tan \delta$)	49
3.5.4	絶縁破壊強度	49
3.6	超流動ヘリウム	50
3.6.1	^4He の λ 転移	50
3.6.2	^4He の超流動実験	51
3.6.3	2流体モデル	53
3.6.4	機械-熱効果	55
3.6.5	熱-機械効果と噴水効果	55
3.6.6	He II の熱伝達	56
3.6.7	^4He - ^3He 混合液と液体 ^3He の超流動	58
3.6.8	超流動の解釈	59
	参考文献	61
第4章 ヘリウム資源とその採取技術		63
4.1	寒剤としてのヘリウム	63
4.2	ヘリウムの埋蔵量	63
4.3	ヘリウムの消費量	65
4.4	ヘリウムの価格	67
4.5	ヘリウムの採取方法	68
4.5.1	透過法	69

4.5.2 凝縮法	69
4.5.3 吸着法	70
4.5.4 吸収法	70
4.6 ヘリウムガス採取装置の実例	70
4.6.1 Kansas の天然ガスからヘリウムを採取する装置	70
4.6.2 北海の天然ガスからヘリウムを採取する装置	76
4.6.3 米国のヘリウム分離装置とヘリウム保存計画	77
4.6.4 ヘリウムと水素の分離	79
4.6.5 空気分離装置の副産物としてのヘリウム採取	80
4.7 ヘリウム3	81
参考文献	83
第5章 低温生成装置の熱力学—エクセルギー解析	85
5.1 種々の寒冷生成法	86
5.1.1 ジュール-トムソンの方法 (J-T 法)	86
5.1.2 クロード方式	91
5.1.3 スターリングサイクル	98
5.1.4 ディスプレサを用いたスターリングサイクルの実例	101
5.1.5 ギホード-マクマホンサイクル (G-M サイクル)	103
5.2 渦流管(ボルテックス・チューブ)	107
5.3 損失をもたらす因子	109
5.3.1 圧縮	109
5.3.2 外部仕事を伴う膨張	109
5.3.3 熱伝達における有限の温度差	110
5.3.4 室温部からの熱侵入(断熱損失)	113
5.3.5 圧力損失	113
参考文献	114
第6章 低温生成装置の実例	115
6.1 液化冷凍装置に要求される項目	117
6.2 窒素液化機への応用例	119
6.3 往復動機器とタービン	121
6.4 圧縮機	121
6.5 膨張機	126
6.6 ヘリウム液化冷凍機の実例	130

6.7	1.8 K, 300 W 冷凍機	133
6.8	コリンズ型ヘリウム液化機	135
6.9	多段スターリングガス冷凍機	136
6.10	ギホード-マクマホン冷凍機	138
6.11	小型冷凍機	141
	参考文献	143

第7章 低温における温度測定145

7.1	はじめに	145
7.2	温度測定の条件と測定システム	145
7.2.1	温度測定の条件	145
7.2.2	温度測定システム	146
7.3	熱力学的温度目盛	147
7.3.1	理論的基礎	147
7.3.2	熱力学的温度目盛の実現	149
7.4	1968年国際実用温度目盛 (IPTS 68)	156
7.4.1	目的と定義	156
7.4.2	白金抵抗温度計	158
7.4.3	蒸気圧温度計	159
7.4.4	20 K 以下の温度目盛	163
7.5	抵抗温度計	163
7.5.1	純金属と合金	163
7.5.2	半 導 体	165
7.6	熱起電力による温度測定	168
7.6.1	熱電対の特性	168
7.6.2	基準温度 T_0 および合金の組成のばらつき	170
7.7	低温の温度を決定する他の方法	172
7.8	温度センサーへの放射線と磁場の影響	173
7.8.1	低温用温度計に対する粒子線とガンマ線の効果	173
7.8.2	低温用温度計に対する磁場の影響	174
7.9	低温用温度計の校正	177
7.10	熱 接 触	179
	参考文献	181

第8章 低温における材料の性質	187
8.1 はじめに	187
8.2 熱的性質	187
8.2.1 比熱	191
8.2.2 熱伝導	193
8.2.3 電気伝導	198
8.2.4 熱膨張	199
8.3 機械的性質	201
参考文献	206
第9章 低温流体の熱伝達	207
9.1 基本概念	207
9.2 単相流熱伝達	209
9.2.1 超臨界ヘリウムの自然対流熱伝達	209
9.2.2 超臨界ヘリウムの強制対流熱伝達	211
9.2.3 低温ガスおよび過冷却流体の強制対流熱伝達	213
9.2.4 He II の熱伝達(カピッツァ伝導)	213
9.3 沸騰熱伝達	214
9.3.1 沸騰曲線	214
9.3.2 気泡生成のメカニズム	218
9.3.3 沸騰遅延(ヒステリシス)	220
9.3.4 伝熱面の性質が核沸騰曲線に及ぼす影響	222
9.4 強制2相流熱伝達	223
9.4.1 流れのパターン	223
9.4.2 垂直管内強制対流熱伝達	225
9.5 二, 三の例題	230
9.6 記号の説明	234
参考文献	236
第10章 断熱技術	239
10.1 熱抵抗の定義	239
10.2 伝熱のメカニズム	240
10.3 断熱の方法	241
10.3.1 非真空断熱	241

6 目 次

10.3.2 真空断熱	243
10.3.3 新しい断熱方法	257
10.4 蒸発ガスを活用した断熱方法	259
参考文献	262
第11章 クライオスタットの設計と製作	265
11.1 問題解決の方法	267
11.2 クライオスタットの構成例	267
11.2.1 要求事項の把握とその対策	267
11.2.2 材料の選択	269
11.2.3 熱負荷	270
11.2.4 堅ろう性	272
11.2.5 クライオスタット内の配置	272
11.3 クライオスタットを構成する各部品	274
11.3.1 パッキング	274
11.3.2 窓	277
11.3.3 温度測定	278
11.3.4 弁	281
11.3.5 導管の取り出し方法	283
11.3.6 トランスファチューブとその接続方法	284
11.4 応用例	288
11.4.1 液体ヘリウムの汲み出し	288
11.4.2 超電導の交流損失実験用クライオスタット	290
11.4.3 電子線マイクロアナライザーを用いて、組織切片試料を 分析するための継続冷却装置	293
参考文献	296
第12章 種々のクライオスタット	297
12.1 液溜め式クライオスタット	298
12.1.1 熱負荷	301
12.1.2 液体ヘリウムの自動供給	304
12.2 連続フロー式クライオスタット	305
12.2.1 連続フロー式クライオスタットの温度制御	309
12.3 冷凍機を用いたクライオスタット	312
参考文献	314

第 13 章 液化ガスの取り扱いに関する安全対策	315
13.1 低温液化ガスの性質とその作用	315
13.2 安全対策	316
13.2.1 一次的危険性に対する安全対策	316
13.2.2 二次的危険性に対する安全対策	318
13.3 一般的な注意事項	327
13.4 規定, 規準	328
参考文献	329
第 14 章 真空技術と低温技術	331
14.1 熱力学的ガス理論	332
14.1.1 平均自由行程 \bar{l}	332
14.1.2 マクスウェル速度分布	333
14.1.3 ガス圧力	334
14.1.4 モル比熱	335
14.1.5 壁をたたく粒子数 Z_A	336
14.2 真空技術の概念	338
14.2.1 排気速度 S , 排気効率 Q	338
14.2.2 クライオポンプとソーブションポンプのポンプ確率 W_p	339
14.2.3 クライオポンプの到達圧力 p_{end} と最終粒子数密度 n_{end}	340
14.2.4 構造要素による排気速度の低下(コンダクタンス C)	340
14.3 電離真空計を用いた真空度測定	345
14.4 輸送現象	347
14.5 真空システムにおける表面の影響	349
14.6 おわりに	353
参考文献	354
第 15 章 クライオポンプ	355
15.1 各種ガスの蒸気圧の温度依存性	356
15.2 クライオポンプの特性	357
15.2.1 到達圧力	358
15.2.2 排気速度	358
15.2.3 初期圧力と初期残留ガス量	360
15.2.4 クライオパネルへの熱負荷	361

15.2.5	凝縮層の成長速度	363
15.2.6	凝縮層の熱伝導率	364
15.2.7	クライオトラッピングとクライオソープン	364
15.3	クライオポンプの設計	368
15.3.1	液溜め式クライオポンプ	368
15.3.2	連続フロー式クライオポンプ	369
15.3.3	冷凍機付きクライオポンプ	370
15.4	おわりに	373
	参考文献	374
第16章 超低温の生成		375
16.1	液体 ^3He の排気減圧 ($\geq 0.3\text{ K}$)	375
16.2	^3He - ^4He 希釈冷凍機	384
16.2.1	希釈冷凍機の原理	384
16.2.2	希釈冷凍機の構成	390
16.3	ポメラニチュク冷却	399
16.4	断熱消磁	403
16.4.1	核断熱消磁の一般原理	404
16.4.2	超微細相互作用による増強核断熱消磁	413
16.4.3	核断熱消磁用クライオスタットの構成	415
16.5	超低温温度測定	418
16.5.1	絶対温度計	418
16.5.2	二次温度計	422
	参考文献	427
第17章 超電導の基礎		429
17.1	超電導状態	429
17.1.1	はじめに	429
17.1.2	臨界温度と超電導の出現	429
17.1.3	臨界磁界と臨界電流	430
17.1.4	マイスナー効果	431
17.1.5	ロンドン方程式と侵入深さ	432
17.1.6	永久電流と磁束の量子化	432
17.1.7	熱伝導	433
17.2	超電導状態の現象論的記述	434

17.2.1 相転移の熱力学434

17.2.2 ギンツブルグ-ランダウ方程式 (G-L 方程式)435

17.2.3 界面エネルギー436

17.2.4 第2種超電導体437

17.2.5 第3種超電導体439

17.2.6 表面超電導440

17.3 超電導状態の微視的描像440

17.3.1 秩序化とエネルギー・ギャップ440

17.3.2 BCS 理論441

17.3.3 トンネル効果442

17.3.4 ジョセフソン効果442

参 考 文 献444

第18章 超電導の応用445

18.1 はじめに445

18.2 電子工学と高周波工学445

18.2.1 ジョセフソン素子445

18.2.2 超電導空洞共振器449

18.3 エネルギー工学における超電導体453

18.3.1 高磁界超電導体453

18.3.2 安定化多芯超電導線454

18.4 超電導マグネット製作法の一般論459

18.4.1 部分安定化超電導コイル459

18.4.2 完全安定化超電導コイル461

18.5 超電導マグネットの興味ある応用分野464

18.5.1 実験研究用の超電導マグネット464

18.5.2 高エネルギー物理学における超電導マグネット465

18.5.3 核融合炉用超電導マグネット468

18.5.4 MHD 発電用超電導マグネット472

18.5.5 電磁エネルギー貯蔵用超電導マグネット474

18.5.6 磁気分離用超電導マグネット477

18.6 超電導マグネットによる磁気浮上479

18.6.1 はじめに479

18.6.2 電磁誘導反発方式の主要特性480

18.6.3 誘導反発方式の原理482

10 目 次

18.6.4	浮上および案内系のダンピング	482
18.6.5	駆動系	483
18.6.6	超電導マグネットの冷却	484
18.6.7	磁気浮上関連分野の開発プロジェクト	486
18.7	電気機器	492
18.7.1	従来の電気機器の限界	492
18.7.2	直流機	494
18.7.3	同期機	502
18.8	超電導ケーブル	510
18.8.1	はじめに	510
18.8.2	超電導ケーブルの機械的構成	511
18.8.3	導体配置	512
18.8.4	熱絶縁(冷却管)	513
18.8.5	ケーブル用超電導材料	514
18.8.6	ケーブルコア(芯線)	516
18.8.7	電気絶縁	518
18.8.8	ケーブルの冷却	521
18.8.9	ケーブル終端箱	524
18.8.10	超電導ケーブルのプロジェクトおよび経済性	526
	参考文献	530

付 録 I 低温工学データ集 535

目 次	535
低温工学学術用語表	538
図表・データ	542

付 録 II 超電導工学データ集 597

目 次	597
超電導工学学術用語表	599
図表・データ	603

索 引i~xx
