

ガス屋のためのガスの物理
—Gas Professionals のガスの科学—

**A Guidebook of Science of Industrial Gases
for the Gas Professionals**

更新日 2019 年 11 月 21 日
川上浩

ガス屋のためのガスの物理
—Gas Professionals のガスの科学—
Science of Industrial Gases for the gas professionals

目次

はじめに

0.1	テキストの目的	0	-	2
0.2	産業ガスの事業	0	-	4
0.3	ガスの化学	0	-	6
0.4	ガスの物理	0	-	7
0.5	正確な情報を伝えるということ	0	-	12
0.6	正確な用語を使うということ	0	-	19
0.7	「普通」ではない、ガスの液化	0	-	24
0.8	産業ガスの新人教育と高圧ガス保安法	0	-	26
0.9	テキストの構成	0	-	28

第1章 産業ガスと空気分離

1

1.1	燃料ガスと産業ガス	1	-	2
1.1.1	燃料ガス	1	-	2
	補足 1-1：照明利用から始まった燃料ガスと酸素ガス	1	-	5
1.1.2	工業ガスと産業ガス	1	-	6
1.1.3	ガス屋の名称	1	-	7
1.1.4	産業ガスとセパレートガス	1	-	8
1.1.5	産業ガスと高圧ガス	1	-	9
1.2	産業ガスと純ガス	1	-	11
1.2.1	純ガス	1	-	11
	補足 1-2：液体の濃度と気体の分率	1	-	15
	補足 1-3：parts-per 表記の単位と課題	1	-	18
	補足 1-4：ppm よりもはるかに微量の計数	1	-	19
1.2.2	水分量と「露点」	1	-	20
	補足 1-5：露点計とその他の水分計	1	-	25

1.3	空気分離	1	-	27
1.3.1	酸素の製造	1	-	27
	(1) 化学反応による酸素の製造	1	-	27
	(2) プリン・プロセス	1	-	31
	補足 1-6：プリン・プロセスに関する情報	1	-	32
	(3) 分解と分離の比較	1	-	33
	補足 1-7：気体の標準状態	1	-	36
1.3.2	原料空気	1	-	42
1.3.2.1	大気と空気	1	-	42
	補足 1-8：対流圏の気温の変化	1	-	45
1.3.2.2	空気の組成	1	-	50
1.3.2.3	空気の主要 3 成分	1	-	54
1.3.2.4	酸素の資源と空気の量	1	-	55
1.3.2.5	空気の組成はどこでも同じ	1	-	60
1.3.3	空気を分離する方法	1	-	68
1.3.3.1	主な分離法	1	-	68
1.3.3.2	蒸留分離と気液平衡	1	-	70

第2章 ガスの物理 1

2.1	気体の液化、分子の発見	2	-	5
2.1.1	理想気体の研究	2	-	5
2.1.1.1	ロバート・ボイル	2	-	5
	(1) マクデブルクの半球	2	-	6
	(2) ボイルの法則の発見	2	-	7
	補足 2-1：流体の圧縮性	2	-	8
	(3) 錬金術から化学へ	2	-	9
	補足 2-2：ボイルの発見のひとつ、氷の膨張	2	-	12
	(4) ロバート・フック	2	-	13
	補足 2-3：王立協会	2	-	16
	補足 2-4：アイザック・ニュートン	2	-	18
2.1.1.2	シャルルとゲイ=リュサック	2	-	23
	(1) ボイル=シャルルの法則	2	-	23

(2) 空気の研究	2	-	26
(3) 空気の研究と気球	2	-	28
2.1.1.3 ション・ドルトンとアメデオ・アヴォガド ド	2	-	32
(1)ドルトンの法則と原子説	2	-	32
(2)アヴォガドの法則	2	-	35
補足 2-5：アヴォガド定数	2	-	36
2.1.2 気体の液化	2	-	40
2.1.2.1 マイケル・ファラデー	2	-	40
2.1.2.2 ジュールとウィリアム・トムソン	2	-	43
(1)ジェームズ・プレスコット・ジュール	2	-	43
(2)ウィリアム・トムソン	2	-	45
(3)トムソンとジュールの共同研究	2	-	45
(4)ジュール＝トムソン効果の理論	2	-	46
(5)ジュール＝トムソン効果の利用	2	-	47
2.1.3 実在気体の研究	2	-	49
2.1.3.1 ファン・デル・ワールス	2	-	49
2.1.3.2 気体と液体	2	-	52
補足 2-6：気体・液体・固体以外の相	2	-	56
2.1.4 分子の発見、アインシュタイン	2	-	59
2.1.4.1 分子の未発見	2	-	59
補足 2-7：仮想粒子	2	-	60
補足 2-8：周期表と「周期律表」	2	-	62
2.1.4.2 ブラウン運動の理論、分子の発見	2	-	63
補足 2-9：誤ったブラウン運動の説明	2	-	68
補足 2-10：元素と原子と同位体	2	-	70
2.1.4.3 アヴォガド定数	2	-	73
2.1.5 現代物理学と産業ガス	2	-	76
2.2 階層（物質の階層構造）	2	-	80
2.2.1 階層と尺度	2	-	82
2.2.1.1 長さで表わされる階層	2	-	82
補足 2-11：プランク単位と最も小さな階層・ プランク長	2	-	88

補足 2-12：国際単位系 SI	2	-	94
2.2.1.2 温度の尺度と温度の単位ケルビン	2	-	95
(1) 温度の概念	2	-	95
(2) 温度計	2	-	97
(3) セルシウス度	2	-	102
(4) ファーレンハイト度	2	-	104
(5) 温度目盛のまとめ	2	-	105
(6) 絶対温度と熱力学温度	2	-	107
(7) 国際温度目盛	2	-	111
(8) ITS-90	2	-	112
(9) 工業装置における温度の測定	2	-	114
補足 2-13：三つの熱電効果	2	-	116
2.2.1.3 ガスの圧力と産業ガス	2	-	121
(1) 圧力の単位	2	-	121
(2) ゲージ圧力	2	-	123
(3) 圧力の範囲	2	-	126
2.2.1.4 階層の観測	2	-	128
(1) 波の観測	2	-	128
(2) 音の情報	2	-	130
(3) 光の情報	2	-	140
補足 2-14：ニュートンの光の粒子説	2	-	141
(4) 光と電気による観測	2	-	147
2.2.1.5 大気と空気の階層	2	-	153
2.2.1.6 見えない気体を記述する	2	-	155
2.2.1.7 見えない気体を取り扱う	2	-	159
2.2.2 中くらいの階層(メソスコピック) 10^{-9}m	2	-	161
2.2.3 大きな階層(マクロスコピック)	2	-	168
2.2.3.1 宇宙と観測可能な宇宙、 $10^{27}\text{m}\sim$	2	-	169
2.2.3.2 銀河、 $10^{21}\text{m}\sim$	2	-	175
2.2.3.3 太陽系、 $10^{12}\text{m}\sim 10^{13}\text{m}$	2	-	183
2.2.3.4 地球、月、 $10^8\text{m}\sim$	2	-	186
2.2.3.5 人の生存圏、 $10^4\text{m}\sim$	2	-	189

2.2.4	小さな階層(ミクロスコピック)	2	-	194
2.2.4.1	小さな階層	2	-	194
2.2.4.2	小さな階層を電子で観測する	2	-	200
2.2.4.3	小さな階層を放射線で観測する	2	-	206
2.2.4.4	小さな階層を観測するその他の方法	2	-	200
	補足 2-15：スピン	2	-	210
2.3	量子力学(quantum mechanics,QM)	2	-	211
2.3.1	現代物理学と量子論	2	-	212
2.3.2	量子論のおおまかな歴史	2	-	217
2.3.3	前期量子論	2	-	220
2.3.3.1	量子とは	2	-	220
2.3.3.2	量子の性質、量子はとびとびの値をとる	2	-	223
	補足 2-15：放射温度計	2	-	225
	補足 2-16：古典物理学の終わりの時代	2	-	229
2.3.3.3	量子の性質、量子は波動性と粒子性を持つ	2	-	233
	補足 2-16：作用	2	-	234
2.3.3.4	シュレーディンガー方程式	2	-	235
	補足 2-17：ハミルトニアン	2	-	236
	補足 2-18：ルジャンドル変換	2	-	237
2.3.3.5	ハイゼンベルクの不確定性原理	2	-	239
	(1) 科学の原理	2	-	239
	(2) 不確定性原理	2	-	243
	(3) 量子の確率的性質	2	-	248
	(4) 前期量子力学の確立	2	-	251
2.4	特殊相対性理論	2	-	253
2.4.1	ガリレイの相対性理論	2	-	254
	補足 2-20：勾配	2	-	258
2.4.2	エーテル仮説	2	-	261
2.4.3	アインシュタインの特殊相対性理論	2	-	265
2.4.4	熱力学的時間の矢	2	-	272
2.5	量子論の確立	2	-	275

2.5.1	ディラック方程式と反粒子	2	-	275
2.5.1.1	場の量子論、反粒子と真空の科学	2	-	275
2.5.1.2	真空工学(低圧力の技術)	2	-	283
2.5.2	量子電磁力学(quantum electrodynamics, QED)	2	-	289
2.5.3	量子色力学(quantum chromodynamics, QCD)	2	-	292
2.5.4	量子化学(quantum chemistry)	2	-	296
2.6	アインシュタインの一般相対性理論	2	-	300
2.6.1	一般相対性理論の利用例	2		301
2.6.2	時間の階層(タイム・スケール)	2		304
2.6.3	宇宙 138 億年の歴史	2	-	306
2.6.3.1	科学的宇宙論	2	-	306
2.6.3.2	ビッグバン宇宙論	2	-	312
2.6.3.3	インフレーション宇宙論	2	-	316
2.6.3.4	CMB のその後の観測	2	-	319
2.6.3.5	力の統一理論	2	-	324
2.6.4	太陽系 46 億年の歴史	2	-	327
2.6.4.1	元素の合成	2	-	327
2.6.4.2	分子雲	2	-	330
2.6.4.3	惑星の誕生	2	-	331
2.6.5	地球 46 億年の歴史と空気の起源	2	-	334
2.6.5.1	ジャイアントインパクト	2	-	335
2.6.5.2	大気の歴史・空気の歴史	2	-	340
	補足 2-21: 地球史に用いられる単位 Ma	2	-	347
	補足 2-22: 紫外線の人体への影響	2	-	347
2.6.5.3	水の歴史	2	-	349
2.7	素粒子と複合粒子	2	-	355
2.7.1	素粒子	2	-	355
2.7.2	量子の統計性	2	-	360
2.7.3	複合粒子・ハドロン	2	-	363
2.7.4	複合粒子・原子核	2	-	364
2.7.5	同位体	2	-	368
2.7.5.1	安定同位体(SI)	2	-	368

2.7.5.2	天然存在比	2	-	370
2.7.5.3	放射性同位体	2	-	373
2.7.5.4	半減期・寿命・比放射能	2	-	376
2.7.5.5	安定同位体の濃縮	2	-	384
2.7.5.6	同位体の分子	2	-	385
2.5.6	複合粒子・原子	2	-	386
2.5.7	複合粒子・分子	2	-	388
2.8	物理学用語とトピック	2	-	390
	(1) 電子ボルト	2	-	390
	(2) 対称性	2	-	391

第3章 アルゴンとヘリウム

3.1	アルゴンの発見	3	-	3
3.2	アルゴンの起源	3	-	13
	補足 3-1：レアメタル、レアアース、レアガス	3	-	14
3.3	空気中のアルゴン	3	-	20
3.4	ヘリウムの発見	3	-	23
	補足 3-2：ロッキヤーのヘリウム発見とラムゼーのヘリウム発見	3	-	26
3.5	原子核の崩壊とアルゴンの生成・ヘリウムの生成	3	-	30
3.5.1	ベータ崩壊(β^- 崩壊)とニュートリノ	3	-	32
3.5.2	ベータ崩壊(β^+ 崩壊)と PET 診断	3	-	35
3.5.3	ベータ崩壊(EC 変換)とアルゴンの生成	3	-	39
3.5.4	アルファ崩壊とヘリウムの生成	3	-	41
3.5.5	ヘリウムとウラン	3	-	44
	補足 3-3：地球の放熱と熱源	3	-	49
3.6	ヘリウムの資源	3	-	51
3.7	ヘリウムの製造	3	-	59
3.8	ヘリウムの貯蔵・輸送	3	-	61
3.9	ヘリウムの特異な性質と超低温	3	-	66
3.10	その他の希ガス	3	-	70

3.10.1	空気からの希ガスの発見	4	-	70
3.10.2	ラドンの発見	4	-	73
3.10.3	空気からの希ガスの製造	4	-	76
3.10.4	キセノン	4	-	78

第4章 深冷空気分離

4.1	空気分離装置	4	-	2
4.1.1	空気分離器と空気分離装置	4	-	2
4.1.2	イナートガスとガスパーシ	4	-	5
	補足 4-1：希ガス化合物を予言したライナス・ポーリング	4	-	10
4.2	深冷空気分離の簡単な歴史	4	-	12
4.2.1	気体の研究と酸素の発見	4	-	12
	補足 4-2：ヘンリー・キャヴェンディッシュ	4	-	14
	補足 4-3：ジョゼフ・プリーストリー	4	-	15
4.2.2	カール・フォン・リンデ	4	-	15
4.3	ガスの冷却	4	-	21
4.3.1	熱交換器とエンタルピー($Q-T$ 線図)	4	-	21
4.3.2	温度-エントロピー線図($T-s$ 線図)	4	-	24
4.3.3	ジュール=トムソン膨張	4	-	27
	補足 4-4：JT 係数	4	-	28
4.3.4	リンデの空気液化サイクル	4	-	30
4.3.5	クロードの空気液化サイクル	4	-	31
4.4	深冷空気分離装置の基本形	4	-	33
4.5	棚段蒸留塔	4	-	37
4.5.1	カスケード分離と棚段蒸留	4	-	37
4.5.2	気液平衡操作(平衡フラッシュ計算)	4	-	41
4.5.3	気液平衡計算(棚段塔の蒸留計算)	4	-	46
	(1)蒸留塔の段数計算(設計型の蒸留計算)	4	-	46
	(2)操作型の蒸留計算	4	-	47
	(3)深冷空気分離装置の棚段蒸留塔	4	-	48

(4)より高度な蒸留計算	2	-	51
4.5.4 窒素製造プロセス	4	-	53
4.5.5 ダブルカラム・プロセス	4	-	54
4.5.6 ダブルカラム・プロセスと原料空気の圧力	4	-	57
4.5.7 アルゴンの濃縮	4	-	61
4.5.8 空気分離装置におけるヘリウム	4	-	66
4.6 充填蒸留塔	4	-	68
4.6.1 棚段蒸留塔の効率	4	-	68
4.6.2 充填塔	4	-	69
(1)深冷空気分離装置の前処理	4	-	70
(2)コールドボックス	4	-	72
4.6.3 規則充填物を用いた充填蒸留塔	4	-	76
4.6.4 充填層内の移動現象と蒸留の速度論モデル	4	-	82
4.6.5 速度論を用いた蒸留計算	4	-	90
4.6.6 規則充填塔の空気分離装置への適用	4	-	96
4.7 深冷分離による軽元素の同位体分離	4	-	98
4.7.1 酸素の同位体分離	4	-	99
4.7.2 酸素同位体の蒸留分離	4	-	100

第5章 産業ガスの広がり

第6章 産業ガスと資源・エネルギー

6.1 化学原料	6	-	2
(1) フィッシャー・トロプシュ反応	6	-	3
(2) 石油化学	6	-	5
6.2 エネルギー	6	-	11
6.2.1 エネルギーとは	6	-	11
6.2.1.1 エネルギーの概念	6	-	10
(1) 活力論争	6	-	10
(2) エネルギーの概念の発明	6	-	12
(3) エネルギーの定義	6	-	16

補足 6-1：KEK	6	-	19
補足 6-2：解析力学のおさらい	6	-	19
6.2.1.2 エンタルピー	6	-	21
6.2.1.3 エネルギーの保存と運動量の保存	6	-	25
6.2.1.4 エネルギーという言葉	6	-	28
補足 6-3：再生可能エネルギーと再生エネルギー	6	-	34
6.2.2 エネルギー資源の基準	6	-	35
6.2.3 エネルギー資源と文明	6	-	37
補足 6-4：国際エネルギー機関	6	-	40
6.3 石炭	6	-	44
6.3.1 石炭の物性	6	-	44
6.3.2 石炭資源	6	-	48
6.3.3 日本の石炭利用	6	-	51
6.4 石油	6	-	57
6.4.1 石油の利用	6	-	57
6.4.2 石油資源	6	-	62
補足 6-5：COP（締約国会議）	6	-	70
補足 6-6：石油天然ガス・金属鉱物資源機構 （JOGMEC、ジョグメック）	6	-	73
6.4.2 石油の経済的影響	6	-	76
6.4.3 石油の起源	6	-	81
6.4.4 石油のタンカー輸送	6	-	86
6.5 天然ガス	6	-	89
6.5.1 シェール革命	6	-	89
6.5.2 天然ガスの性質	6	-	98
6.5.3 天然ガスインフラ	6	-	102
6.5.4 LNG の冷熱利用	6	-	107
6.5.5 船舶の燃料転換	6	-	111
6.5.5 都市ガスと天然ガス	6	-	116
6.6 原子力エネルギー	6	-	118
6.6.1 原子力エネルギーの歴史	6	-	119
6.6.2 原子炉	6	-	127
(1) ウランの核分裂	6	-	127

(2) 核分裂と核融合	6	-	129
(3) 核エネルギー	6	-	131
(4) 原子炉の主な型式	6	-	133
(5) 原子炉の技術世代	6	-	138
6.6.3 日本の原子力発電	6	-	140
(1) 原子力発電の基本な利用方法	6	-	140
(2) 原子力エネルギーの備蓄性	6	-	141
(3) 平常時のクリーン性・で安全性	6	-	142
(4) 準国産エネルギー	6	-	143
(5) 原子力発電と立地地域との結びつき	6	-	143
(6) 日本の原子力発電技術	6	-	144
6.6.4 世界の原子力発電	6	-	145
6.7 再生可能エネルギー	6	-	149
6.7.1 再生可能エネルギーとは	6	-	149
6.7.2 再生可能エネルギーの普及支援制度	6	-	152
6.7.3 水力発電	6	-	155
6.7.4 太陽光発電(PV)	6	-	159
(1) 太陽光発電技術	6	-	159
(2) 太陽光発電の技術的特徴	6	-	160
(3) 太陽光発電の経済的特徴	6	-	161
(4) メガソーラー発電所	6	-	161
(5) 太陽光発電ビジネスの動向	6	-	163
(6) 太陽熱発電・太陽炉	6	-	165
6.7.5 風力・風力発電	6	-	166
6.7.6 地熱	6	-	169
6.7.7 再生可能エネルギーと電力	6	-	173
6.7.7.1 電力料金	6	-	173
補足 6-7：日本の電力多消費産業	6	-	173
6.7.7.2 ドイツの再生可能エネルギー	6	-	179
6.8 エネルギー貯蔵	6	-	186
6.8.1 電力貯蔵	6	-	186
6.8.2 電池	6	-	189

6.8.3	二次電池	6	-	191
	(1) 鉛蓄電池	6	-	191
	(2) ニッケル-水素充電電池	6	-	192
	(3) リチウム-イオン二次電池	6	-	192
	(4) ナトリウム・硫黄電池	6	-	197
6.8.4	水素エネルギー	6	-	199
6.8.5	燃料電池	6	-	202
6.8.6	CAES/G-T	6	-	204
6.9	省エネルギー	6	-	208
6.9.1	コージェネレーション	6	-	209
6.9.2	様々な省エネ技術	6	-	213
	(1) 省エネ家電	6	-	213
	(2) 地中熱利用	6	-	213
	(3) 熱電発電	6	-	214
	(4) 排熱回収・バイナリー発電	6	-	215
	(5) スターリングエンジン	6	-	217
	(6) 熱音響エンジン	6	-	218
	(7) ケミカルループ	6	-	219
	(8) 雪氷熱利用	6	-	220
	(9) エネルギーハーベスティング	6	-	220
6.9.3	輸送機器の動力と省エネ	6	-	221
	(1) 風力	6	-	221
	(2) 石炭動力	6	-	223
	(3) 石油(内燃機関)	6	-	225
	(4) ガス動力	6	-	229
	(5) 空気力エンジン	6	-	230
	(6) 電動機(狭義のEV)	6	-	231
	(7) 電動機(広義のEV)	6	-	232
6.10	6. 10 エネルギー利用のリスク	6	-	233
	6.10.1 発電に伴うリスク	6	-	233
	6.10.2 石炭利用のリスク	6	-	239
	6.10.3 大気汚染	6	-	241

(1) 石炭と大気汚染	6	-	241
(2) 大気中微小粒子状物質 PM	6	-	244
(3) その他の大気汚染	6	-	266
6.10.4 石油流出事故	6	-	248
6.10.5 天然ガスの事故	6	-	253
6.10.6 原子力の事故	6	-	254
6.10.7 再生可能エネルギーによる事故・災害	6	-	257
6.10.8 エネルギーの供給リスク	6	-	281

第7章 まとめ

7.1 科学と産業ガス	7	-	4
7.2 思考停止に陥らずに、自分で考えるということ	7	-	6

第8章 参考資料

8.1 「化学を築いた人々」	8	-	2
8.2 希ガス関連の書籍	8	-	5
8.3 参考図書、参考文献	8	-	9

第9章 付録

9.1 用語の課題	9	-	2
9.2 ガスの物理の理解に役立つ基礎科学(物理数学)	9	-	13
9.3 ガス・物質の科学を築いた人々	9	-	22
9.4 元素表と元素の発見者	9	-	50