ま　え　が　き

1822 年に Charles Cagniard de la Tour により臨界点が発見されて以来，超臨界流体に関する研究開発が活発になされ，1978 年にはドイツで超臨界二酸化炭素によるコーヒー豆からの脱カフェインのプラントが完成し工業的利用が始まった。その後，ホップの抽出や香料の抽出プラントが欧米を中心に稼働し始めた。最近ではワインボトル用のコルクからの不用成分の除去のために 18 m^2 の抽出槽 3 塔の大規模のプラントが欧州で建設されているなど新しい応用が始まっている。一方，日本でも超臨界流体の研究開発が始まってから 30 年ほど過ぎ，抽出溶媒としての超臨界二酸化炭素に始まり，反応場としての超臨界水，超臨界アルコール，そしてナノ構造体の材料調製媒体などとして超臨界流体を使った研究が活発に行われてきており，世界をリードする技術が生まれるとともに汎用性のある技術として工学的見地から基盤技術が構築されつつある。近年では，環境負荷低減に寄与できるグリーン溶媒であるとの認識によって，ナノテクノロジー，環境などの次世代を担う重点領域の要素技術となりつつある。工業的応用の点からもアジア諸国でも多くのプロセスが実用化されてきており，抽出分離プラントのみならず，廃水処理，ナノ粒子製造や染色のプラントがアジアで稼働するなど，超臨界流体技術で日本が世界をリードしつつある。

超臨界領域のみならず，臨界点以下の亜臨界状態の液体や気体も反応場，分離溶媒として有用であることが示されてきている一方，臨界点を遙(はる)かに超えた高圧の超臨界流体の利用も始まっており，超臨界流体技術は新しい分野への適用が急速に進展している。

これまでに超臨界流体に関するいくつかの著書が出版されてきているが，本書では新しい分野への応用を中心にその原理から実用化技術に至るまで第一線

で活躍されている研究者にわかりやすく解説して頂いた。Ⅰ編では分離プロセスおよび反応プロセスについて，高圧超臨界二酸化炭素，水と二酸化炭素の混合溶媒プロセスを始め，ジメチルエーテルやそのほかの炭化水素を超臨界・亜臨界流体としたプロセスや，資源循環への応用について解説した。Ⅱ編では材料調製プロセスとして超臨界流体を利用した微粒子製造，めっき，染色や塗装について解説し，最後にⅢ編では実用化に対する課題について解説した。

本書が超臨界流体に興味をお持ちの研究者，技術者にとって，新たな分野を開拓する推進力となれば幸いです。

2014 年 10 月

後藤　元信

◆ 執筆分担一覧 ◆

◇Ⅰ編　分離・反応プロセス

〔1 章〕後藤（ごとう）　元信（もとのぶ）（名古屋大学，工学博士）

〔2 章〕神田（かんだ）　英輝（ひでき）（名古屋大学，博士（工学））

〔3 章〕堀添（ほりぞえ）　浩俊（ひろとし）（名古屋大学，工学博士）

〔4 章〕佐古（さこ）　猛（たけし）（静岡大学，工学博士）

岡島（おかじま）いづみ（静岡大学，博士（工学））

◇Ⅱ編　材料調製プロセス

〔5 章〕内田（うちだ）　博久（ひろひさ）（信州大学，博士（工学））

〔6 章〕大嶋（おおしま）　正裕（まさひろ）（京都大学，工学博士）

〔7 章〕奥林（おくばやし）　里子（さとこ）（京都工芸繊維大学，博士（工学））

堀（ほり）　照夫（てるお）（福井大学客員教授，Ph.D.）

〔8 章〕川﨑慎一朗（かわさきしんいちろう）（独立行政法人 産業技術総合研究所，博士（環境科学））

◇Ⅲ編　実用化の課題

〔9 章〕福里（ふくざと）　隆一（りゅういち）（合資会社 エスシーエフテクノリンク，工学博士）

（所属は 2014 年 9 月現在）

目　　次

Ⅰ編　分離・反応プロセス

1章　超臨界・亜臨界流体抽出技術の進展

1.1　超臨界・亜臨界流体の特性 …… 1
1.2　天然物成分の溶解挙動 …… 4
1.3　抽　出　速　度 …… 6
　1.3.1　充塡層に対する物質収支式 …… 6
　1.3.2　局所溶解速度 …… 7
　1.3.3　局所平衡モデル …… 7
　1.3.4　シュリンキングコアモデル …… 8
　1.3.5　不均一モデル …… 9
1.4　高圧超臨界二酸化炭素抽出 …… 9
1.5　高圧二酸化炭素と水の二相系混合溶媒による抽出 …… 12
1.6　亜臨界水抽出 …… 15
1.7　超臨界・亜臨界流体抽出技術の今後 …… 16
引用・参考文献 …… 17

2章　亜臨界ジメチルエーテル抽出技術

2.1　亜臨界ジメチルエーテル抽出技術の開発背景 …… 20
　2.1.1　二酸化炭素排出源としての高水分炭の利用の問題 …… 20

2.1.2 下水汚泥の最終処分の問題 …… 21
2.1.3 PCBs 汚染底質の浄化技術の問題 …… 22
2.1.4 既存の溶媒置換法の問題 …… 23
2.2 ジメチルエーテルの特徴 …… 23
2.3 亜臨界ジメチルエーテル抽出技術の手順 …… 28
2.4 亜臨界ジメチルエーテル抽出技術の装置構成 …… 29
2.5 亜臨界ジメチルエーテル抽出技術の開発状況 …… 31
2.6 下水汚泥への亜臨界ジメチルエーテル抽出技術の応用 …… 33
2.7 微細藻類への応用例 …… 34
引用・参考文献 …… 35

3 章 超臨界・亜臨界炭化水素系溶媒等を活用したプロセスの研究開発

3.1 溶媒の物性と試験設備留意事項 …… 37
3.1.1 溶 媒 の 物 性 …… 37
3.1.2 試験設備留意事項 …… 39
3.2 減圧蒸留残渣からの精製脱瀝油抽出分離プロセス …… 40
3.2.1 石炭液化プロセスへの ROSE プロセス適用 …… 40
3.2.2 重質油熱分解プロセスへの ROSE プロセス適用 …… 42
3.3 藻からの精製油抽出プロセス …… 44
3.3.1 精製油抽出試験 …… 45
3.3.2 プロセスの構築と評価 …… 46
3.4 バイオエタノールの濃縮脱水プロセス …… 47
3.4.1 高圧相平衡の測定 …… 47
3.4.2 ベンチプラントによる検証 …… 50
3.4.3 プロセスの最適化と所要エネルギー概算 …… 51
3.4.4 改良プロセスの研究 …… 52

3.5　バイオブタノールの濃縮脱水研究 …… 56
3.6　水熱爆砕による草木質系バイオマスの糖化前処理研究 …… 58
3.6.1　水熱爆砕の原理と特長 …… 58
3.6.2　ユーカリの水熱爆砕試験 …… 59
3.6.3　過酸化水素溶液による杉の水熱爆砕試験 …… 61
引用・参考文献 …… 63

4章　超臨界・亜臨界流体による資源循環プロセス

4.1　超臨界・亜臨界流体を用いるバイオマスのエネルギー変換 …… 65
4.1.1　ガス化による水素ガス生成 …… 66
4.1.2　バイオエタノール生成 …… 69
4.1.3　炭化・固形燃料化 …… 72
4.1.4　熱エネルギー回収 …… 74
4.2　超臨界・亜臨界流体を用いるプラスチックのリサイクル …… 78
4.2.1　炭素繊維強化プラスチック（CFRP） …… 78
4.2.2　架橋ポリエチレン …… 85
引用・参考文献 …… 88

Ⅱ編　材料調製プロセス

5章　微 粒 子 創 製

5.1　超臨界流体を利用した微粒子創製技術 …… 91
5.2　急 速 膨 張 法 …… 93
5.2.1　超臨界溶体急速膨張（RESS）法 …… 93
5.2.2　ガス飽和溶体粒子創製（PGSS）法 …… 96

5.2.3 膨張溶液減圧晶析（DELOS）法 …… 98
5.3 緩速膨張法 …… 99
5.4 貧溶媒晶析法 …… 100
5.4.1 GAS 法 …… 101
5.4.2 SAS 法 …… 102
5.4.3 SEDS 法 …… 104
5.5 超臨界噴霧乾燥法 …… 105
5.6 反応晶析法 …… 107
5.6.1 超臨界水熱合成法 …… 107
5.6.2 マイクロエマルション法 …… 109
5.7 微粒子創製技術の今後の展望 …… 110
引用・参考文献 …… 111

6章 超臨界めっき

6.1 めっきの原理 …… 116
6.2 超臨界めっき法の基本的な考え方 …… 118
6.3 プラスチック部材の親水性改質 …… 120
6.4 樹脂の流動挙動を生かした部材表面の親水化 …… 122
6.5 無電解めっき＋アルコール添加 …… 124
6.6 めっきの接着強度 …… 125
6.7 工業化のための工程設計 …… 127
6.8 超臨界めっきの今後 …… 129
引用・参考文献 …… 129

7章 超臨界流体染色

7.1 染色の理論 …… 131

7.1.1　染色の平衡論……131
7.1.2　染色の速度論……134
7.2　超臨界流体染色……137
7.2.1　超臨界二酸化炭素への染料の溶解性……138
7.2.2　超臨界二酸化炭素中での高分子の膨潤……140
7.2.3　超臨界二酸化炭素中での染色速度と吸着等温線……142
7.2.4　超臨界二酸化炭素中での染料の拡散係数……143
7.2.5　超臨界流体染色の機構……145
7.3　超臨界流体染色の現状……147
7.3.1　プラントの構築……147
7.3.2　実用化の状況……149
7.4　超臨界流体染色の応用……150
引用・参考文献……150

8章　超臨界塗装

8.1　超臨界塗装開発の始まり……152
8.2　二酸化炭素利用技術の概略……154
8.3　従来型スプレー塗装と二酸化炭素塗装の比較……156
8.4　塗料への二酸化炭素溶解性と粘度低下……159
8.5　二酸化炭素塗装による噴霧特性……162
8.6　二酸化炭素塗装による成膜特性……164
8.7　二酸化炭素塗装の現状と今後の課題……166
8.8　二酸化炭素塗装からモノづくり技術への展開……166
引用・参考文献……169

Ⅲ編 実用化の課題

9章 超臨界流体技術の工学的扱い

9.1 化学プロセスとしての超臨界流体技術 …… 171
9.2 超臨界抽出技術の状況 …… 172
9.3 実用化に対するプロセス評価技術 …… 174
9.3.1 プロセス評価技術の必要性 …… 174
9.3.2 超臨界流体利用プロセスの基本設計 …… 175
9.3.3 超臨界二酸化炭素抽出プロセスの基本設計 …… 179
9.3.4 プロセス評価および概略経済性評価事例 …… 182
9.4 実用化における技術課題 …… 187
9.4.1 スケールアップ …… 187
9.4.2 全体プロセス効率化検討における熱回収 …… 190
9.4.3 安 全 診 断 …… 192
9.5 国内外の超臨界二酸化炭素抽出装置の現状 …… 196
9.6 高圧ガス保安法への対処 …… 197
9.7 超臨界流体利用プロセス実用化の課題 …… 203
9.7.1 高圧超臨界二酸化炭素抽出装置が抱える課題 …… 203
9.7.2 超臨界流体技術実用化促進を阻害する障壁 …… 204
9.8 超臨界流体技術の実用化に向けた工学的扱い …… 205
9.8.1 実用化促進のための必須アイテム …… 205
9.8.2 実用化にかかわる各種課題 …… 206
引用・参考文献 …… 207

索 引 …… 209

Ⅰ編 分離・反応プロセス

1 超臨界・亜臨界流体抽出技術の進展

有機溶媒や熱水により天然物中から有用物質を抽出することは古くから行われてきており，超臨界流体技術が開発されて以来，超臨界二酸化炭素を溶剤に用いた抽出は広範囲に実用化されてきている。近年は，従来からの超臨界二酸化炭素抽出に加えて，さらに高圧の二酸化炭素による抽出，亜臨界水による抽出，超臨界二酸化炭素と液体の水の二相系溶媒での抽出，二酸化炭素が溶解し膨潤した有機溶媒での抽出等，新しい抽出法が研究開発されている。特に二酸化炭素と水を用いる抽出技術はグリーン溶媒の観点から注目されている。

本章では，超臨界流体抽出における基礎的事項についての解説した後，水と二酸化炭素を用いた超臨界流体抽出の最近の動向を述べるとともに実用化の状況を概説する。

1.1 超臨界・亜臨界流体の特性

抽出操作は超臨界流体技術の中で古くから実用化が進んでいる分野であり，超臨界流体技術の実用プロセスの大部分が抽出分離に関するものであるため，多くの成書がある[1)～7)†]。超臨界流体抽出分離は基本的に超臨界流体を溶媒とした固体あるいは液体からの抽出分離であるが，選択的な分離のために，向流抽出塔や吸着剤，膜分離を用いるプロセスなどがある。超臨界流体抽出におい

† 肩付き数字は，章末の参考文献の番号を表す。

ては，① 被抽出物の超臨界流体への溶解度，② 助溶媒であるエントレーナの効果，③ 抽出操作条件（温度，圧力，溶媒流速，粒子径等）の最適化，④ 原料の前処理，⑤ 抽出過程の速度解析，⑥ 抽出装置の最適化等を検討する必要がある。

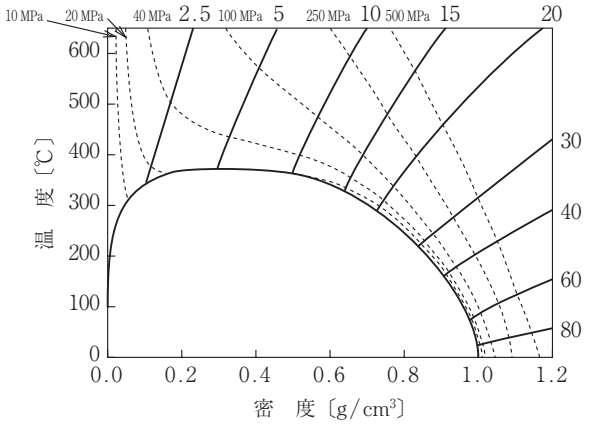
固体からの抽出は，対象とする溶質の超臨界流体への溶解度にかかわる相平衡ならびに拡散過程からなる物質移動が重要な因子となる。一般に超臨界二酸化炭素に対する溶解度と分子構造との関係についてはつぎのことがいえる[8)]。

① 極性が高いほど溶解度は小さい。例えば，水酸基が増えるにつれて極性が高くなるため，水酸基をメチル化することにより極性が下がり，それにつれて溶解度は大きくなる。② 分子量の増加に伴い溶解度が減少する。③ 側鎖は溶解度を増加させる。④ 不飽和結合は溶解度を増加させる。⑤ 芳香族は溶解度を減少させる。⑥ 極性の低い低分子量の物質は完全に溶解する。⑦ 高分子や極性の高い物質は溶解しにくい。

超臨界二酸化炭素は無極性に近い溶媒であるため，高分子量の分子や極性の高い分子は超臨界二酸化炭素への溶解度が低い。そのため，溶質と超臨界流体の分子間相互作用を増加させる物質，エントレーナを添加することもある。通常は二酸化炭素より極性の大きい物質が用いられる。食品関連のエントレーナとしてはエタノールや水などを使うことができる。

超臨界二酸化炭素中に水が存在する場合，水への二酸化炭素の溶解度は，圧力とともに増加し，二酸化炭素の溶解により炭酸が生成し，比較的低温では水の pH が 3 程度まで下がる。この性質を積極的に利用して，殺菌に用いたり，酵素を選択的に不活性化したりすることも試みられている。一方，二酸化炭素への水の溶解度は圧力とともに減少した後，増加し，20 MPa 以上ではほぼ一定（2.9×10^{-3} g-H_2O/g-CO_2）となる。

図 1.1 は水の比誘電率の温度・圧力依存性をプロットしたものであり，有機溶媒の比誘電率との比較を示している[4)]。常温常圧の水の誘電率は約 80 であるため極性が高く，極性の低い有機物質は溶解しにくいが，高温高圧での液体の水は 2 ～ 30 程度の誘電率となり，有機溶媒の誘電率の値に相当するため，



有機溶媒の比誘電率	
ヘキサン	1.8（20℃）
ベンゼン	2.28（20℃）
アセトン	20.70（25℃）
エタノール	24.55（25℃）
メタノール	32.63（25℃）

図 1.1　水の比誘電率の温度・圧力依存性

有機物質が溶解する。そのため，亜臨界状態の水は有機物質の溶解に対して有機溶媒に匹敵する溶解性があり，その溶解性は温度によりコントロールできる。

亜臨界領域を含む高温の水中における二酸化炭素の水への溶解度については**図 1.2** に示すように 100℃程度までは温度の増加とともに減少し，高圧ほど溶解度は高くなる。さらに高温の 150℃では 10 MPa を除いてやや溶解度が増加し，圧力の影響も大きくなり 60 MPa では常温より 150℃のほうが溶解度が高くなるというデータがあり，高圧では十分な量の二酸化炭素が高温でも溶解することになる。

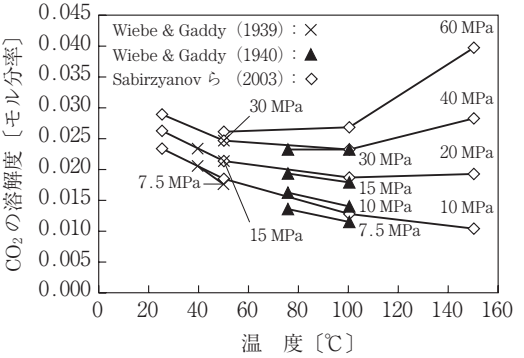


図 1.2　水への二酸化炭素の溶解度の温度・圧力依存性[9)~11)]

1.2　天然物成分の溶解挙動

超臨界二酸化炭素あるいは亜臨界水中における天然物の溶解度データの実測値はきわめて限られており，推算も容易ではない。なお，超臨界二酸化炭素中での天然物を含む各種物質の溶解度は成書にまとめられている[12)]。

天然物の溶解度の相間に多く用いられる方法に Chrastil モデルがある[13)]。このモデルは溶質の溶解度を超臨界流体の密度と両対数プロットで直線となる関係で相関させるもので，溶質が溶媒の k 個の分子と溶媒和して溶媒流体と平衡にあるという仮定を基にしており，次式で相関される。

$$\ln(s) = k\ln(\rho) + a/T + b \tag{1.1}$$

ここで

$$a = \Delta H/R,\quad b = -\ln\{M_c^{\,k}/(M_s + kM_c)\} + q \tag{1.2}$$

s は溶質の溶解度，R は気体定数，ρ は流体密度，k は溶媒和分子数，q は定数，M_s と M_c は溶質と溶媒の分子量である。

一方，溶解度を評価する手法に溶解度パラメータがある。ヒルデブラント（Hildebrand）の溶解度パラメータは次式で与えられる。

$$\delta = \sqrt{(\Delta H - RT)/V} \tag{1.3}$$

超臨界・亜臨界状態の温度・圧力での溶媒と溶質の溶解度パラメータの値が近いとき，溶解度が大きくなるという概念によるもので，多くの分野で使われている。さらに，その概念を拡張したものにハンセン（Hansen）の溶解度パラメータ（三次元溶解度パラメータ）がある[14)]。これは，蒸発のエネルギーを分散項 δ_d，極性項 δ_p，水素結合項 δ_h の三つに分割したものである。

$$\delta^2 = \delta_d^2 + \delta_p^2 + \delta_h^2 \tag{1.4}$$

ここで

$$\delta_i = (\Delta E_{v,i}/V)^{1/2} \tag{1.5}$$

$\Delta E_{v,i}$ は溶質あるいは溶媒の蒸発エネルギーである。溶解度パラメータの温度

依存性は還元温度 T_r を使って，次式のように表される。

$$\frac{\delta}{\delta_{ref}}=\left(\frac{1-T_r}{1-T_{r,\,ref}}\right)^{0.34} \tag{1.6}$$

天然物の物性値データは限られており，グループ寄与法などを用いて推算する必要がある。Srinivas らはハンセンの溶解度パラメータを使って溶解度の考察をしている[15)]。

超臨界流体の溶解度パラメータは次式で計算できる。

$$\delta_{fluid}=1.25(P_c)^{1/2}(\rho_{r,\,fluid}/\rho_{r,\,liquid}) \tag{1.7}$$

P_c は臨界圧力，$\rho_{r,\,fluid}$ は臨界点の値で還元した密度，$\rho_{r,\,liquid}$ は液体状態で還元した密度（2.6 ～ 3.1）である。二酸化炭素については溶解度パラメータは常温常圧で 0.31 $MPa^{1/2}$ であり，圧力の増加とともに大きくなる。**図 1.3** は二酸化炭素の溶解度パラメータを温度と圧力の関数としてプロットしたものであり，高圧低温ほど大きい値となっている。

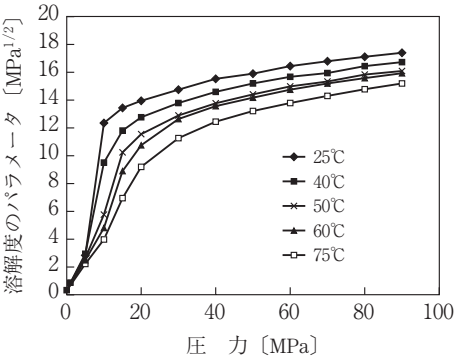


図 1.3　二酸化炭素の溶解度パラメータの温度・圧力依存性[15)]

溶質と溶媒間の最大の溶解度は $\delta_{fluid}=\delta_0$ のときであり，完全混合するときの条件は次式で近似される。

$$(\delta_{fluid}-\delta_0)\approx 5.11\ MPa^{1/2} \tag{1.8}$$

1.3 抽 出 速 度

固体原料からの抽出過程は，① 細胞組織への溶媒の浸透，② 成分（溶質）の溶解，③ 溶質の細胞内から表面への固体マトリックス中の移動，④ 溶質の流体境膜内での拡散による流体本体への移動等からなり，③ の物質移動過程が律速となる場合が多い。

種子からのオイルの抽出などの場合のように，原料中の溶質含有量が高いとき，溶質の超臨界流体中への溶解度が律速となり，飽和濃度で抽出される。その後，固体粒子内部の物質移動の影響を受けるため，抽出速度が徐々に減少する。コーヒー豆からのカフェインの抽出やハーブからの精油の抽出などのように，原料中の溶質含有量が少ないときは，抽出初期から物質移動の影響を受けることが多い。

1.3.1 充填層に対する物質収支式

原料固体（多孔質体）が充填された抽出槽に抽出溶媒を連続的に流して抽出する場合，抽出槽における物質収支式はつぎのように与えられる[3)]。

$$\varepsilon\frac{\partial C}{\partial t}+u\frac{\partial C}{\partial z}=D_{\mathrm{L}}\frac{\partial^2 C}{\partial z^2}-(1-\varepsilon)k_{\mathrm{f}}a_0\left[C-C_{\mathrm{i}}(R)\right] \tag{1.9}$$

$$\beta\frac{\partial C_{\mathrm{i}}}{\partial t}=D_{\mathrm{e}}\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial C_{\mathrm{i}}}{\partial r}\right)-\frac{\partial C_{\mathrm{s}}}{\partial t} \tag{1.10}$$

$$\frac{\partial C_{\mathrm{s}}}{\partial t}=\Omega \tag{1.11}$$

ここで，$C, C_{\mathrm{s}}, C_{\mathrm{i}}$ は流体相，固相，細孔内の溶質濃度であり，D_{e} は粒子内有効拡散係数，k_{f} は外部境膜物質移動係数，D_{L} は軸方向分散係数，ε は充填層空隙率，β は粒子内空隙率，t は時間，z は軸方向座標，r は粒子内座標，L は充填層長，R は粒子径，Ω は溶解速度である。

適当な初期および境界条件のもとに式 (1.9) ～式 (1.11) を解く。粒子表面

索　　引

【あ】

アスタキサンチン 10
アミン硬化エポキシ樹脂 83
亜臨界メタノール 83
亜瀝青炭 20
アンカー 119
安全診断 192

【い】

錨 119

【う】

ウェーバーの理論 162

【え】

エアスプレー塗装 156
エアレス塗装 156
エタノール 47
エタノール発酵 70
エッセンシャルオイル 15
エネルギー収支比 74
エポキシ樹脂 79
エントレーナ 2, 95, 173

【お】

押出し機 87
汚　泥 20

【か】

ガイドワード 192
解乳操作 110
化学的手法 92
化学ポテンシャル 131
化学めっき法 116
架橋ポリエチレン 85
拡散係数 134
ガス化 66
ガス飽和溶体粒子創製法 93, 96, 167
可塑化効果 118
活性化エネルギー 144
褐　炭 20
カフェイン 12
過飽和度 92
含液粉体創製 97
含水率 21
緩速膨張法 93

【き】

機能加工 150
揮発性有機化合物 152
逆ミセル 110
急速膨張法 93
吸　着 131
吸着等温線 134
共溶媒 95
金属酸化物微粒子 109

【く】

グルコース 70

【け】

下水汚泥 21
減圧蒸留残渣 40
原　油 40

【こ】

高圧ガス保安法 32, 39, 197
高圧過熱水蒸気酸化処理 75
高圧相平衡 47
高圧マイクロ混合器 157
高圧用二重管式熱交換器 77
酵素糖化 58, 70
固体共溶媒 95
固体燃料 72
コンポジット構造 119
コンラドソン残炭率 42

【さ】

再硬化樹脂 81
細孔モデル 136
再生 CFRP 83, 84
三点曲げ強度 82
酸無水物硬化エポキシ樹脂 80

【し】

ジメチルエーテル 20, 25
射出成形機 127
自由体積モデル 136
シュリンキングコアモデル 8
ジュール＝トムソン効果 96, 165
蒸気再圧縮法 30
シラン架橋ポリエチレン 85
親水化処理 128
親和力 132

【す】

水蒸気爆砕 59
水素ガス 66
水素結合 26
水熱合成 107
水熱爆砕 58
杉 61
スケールアップ 175, 187

スケールアップファクター 187
スプレードライ法 105

【せ】

精製脱瀝油 40
石炭液化プロセス 40
接触酸化 75
接着強度 125
染　色 131
染色平衡 134
染着平衡 142

【そ】

層間強度 84
層間せん断強度 83
草木質系バイオマス 58

【た】

帯電防止 120
棚沢らの経験式 162
炭化水素系溶媒 37
炭素繊維強化プラスチック 78

【ち】

抽出助剤 173
抽出速度 6
超臨界アセトン 84
超臨界含浸法 118
超臨界水酸化 74
超臨界水熱合成法 107
超臨界相法 91
超臨界注入法 118
超臨界噴霧乾燥法 105
超臨界メタノール 80, 85
超臨界めっき 116
超臨界溶体 96
超臨界溶体緩速膨張法 99
超臨界溶体急速膨張法 91, 93, 154

【て】

底　質 20
ディップ法 167
電気めっき 116

【と】

トリグリセリド 9

【な】

ナノ粒子 95

【ね】

熱回収 77
熱硬化性プラスチック 78

【の】

濃縮脱水 47
濃縮粉体創製法 97

【は】

バイオアベイラビリティ 95
バイオエタノール 47, 58, 69
バイオブタノール 56
バイオマス 59, 65
配管・計装系統図 192
ハイブリッド抽出プロセス 13
反応晶析法 93

【ひ】

引き剝がしテスト 125
引張り強度 82, 84
ビーム型染色機 147
比誘電率 2, 107
標準沸点 20
非溶媒 100
微粒子創製技術 91
貧溶媒 100
貧溶媒効果 158
貧溶媒晶析法 93, 100

【ふ】

ファンテンフロー 123
不揮発分濃度 164
ブタノール 56
物質移動 6
物理的手法 92
プロセス開発ユニット 177
プロセスの最適化 51
プロセスパラメータ 192
プロセス評価 174
プロセスフローダイアグラム 172, 181, 192
ブロック共重合体 120
プロパン 47
分配係数 134
分配則 146
粉末燃料 72
噴霧乾燥法 105

【へ】

平衡膨潤 141
ペクチン 12
ペーパースラッジ 69
ベンチプラント 50

【ほ】

膨張溶液減圧晶析法 93, 98
飽和蒸気圧 26
ポリ塩化ビフェニル類 22

【ま】

マイクロエマルション法 93, 107
マスターバッチ 128

【み】

ミセル 109

【む】

無電解めっき法 116

【も】
藻 44
【ゆ】
ユーカリ 59
ユーグレナ 44
ユニオンカーバイド 157
【よ】
溶解度 2, 92, 108
溶解度パラメータ 4
溶剤精製炭 40
溶剤染色法 145
溶媒和効果 118
溶媒和の理論 139
【り】
リコピン 10
リサイクル 65, 78
流動接触分解 40
臨界プロパン抽出法 45
臨界溶剤脱灰法 40
リングダイイング 144
【れ】
レベリング 165

【欧文】
ASAIS 法 104
ASES 法 102
CAN-BD 法 105
CCR 42
CFRP 78
Chrastil モデル 4
CO_2 ポンプ 203
CPF 法 97
CSDA 40
DAO 40
DELOS-SUSP 法 99
DELOS 法 93, 98
DME 25
EPR 74
FCC 40
GAS 法 100, 101
HAZOP 192
Ni-P めっき 119
NV 164
PCA 法 102
PCBs 22
PDU 177
PFD 172, 181, 192
PGSS 法 93, 96, 167
PID 192
REACH 118
RESAS 法 95
RESOLV 法 95
RESSAS 法 95
RESS-SC 法 95
RESS 法 91, 93, 154
ROSE プロセス 40
SAA 法 106
SAS-CTAR 法 104
SAS-EM 法 103
SAS 法 100, 102
SEA 法 106
SEDS-PA 法 105
SEDS 法 100, 104
SESS 法 99
SFEE 法 102
SRC 40
UNICARB プロセス 157
Viscous Encapsulation 123
VOC 152
water-in-CO_2（w/CO_2）型マイクロエマルション 110

―― 編著者略歴 ――

1979 年　名古屋大学工学部化学工学科卒業
1984 年　名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了（化学工学専攻）
　　工学博士
1984 年　名古屋大学助手
1988 年　熊本大学講師
1988
～90 年　カリフォルニア大学客員研究員兼任
1993 年　熊本大学助教授
2001 年　熊本大学教授
2012 年　名古屋大学教授
　　現在に至る

躍進する超臨界流体技術
― 新しいプロセスの原理とその実用化 ―
Innovations in Supercritical Fluid Technology
― Principle and Application of Novel Process ―
© Motonobu Goto 2014

2014 年 12 月 22 日　初版第 1 刷発行　★

検印省略

編 著 者　後藤元信（ごとう もとのぶ）
発 行 者　株式会社　コロナ社
　　代 表 者　牛来真也
印 刷 所　新日本印刷株式会社

112-0011　東京都文京区千石 4-46-10
発行所　株式会社　**コ ロ ナ 社**
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
Tokyo Japan
振替 00140-8-14844・電話（03）3941-3131（代）
ホームページ　http://www.coronasha.co.jp

ISBN 978-4-339-06635-7　（中原）　（製本：愛千製本所）
Printed in Japan

本書のコピー，スキャン，デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は，いかなる場合も認めておりません。
落丁・乱丁本はお取替えいたします