- 120) Toor, H. L.: *A. I. Ch. E. Journal*, **8**, 70 (1962)
 121) Van de Vusse, J. G.: *Chem. Eng. Sci.*, **21**, 631 (1966)
 122) Van de Vusse, J. G.: *ibid.*, **21**, 645 (1966)
 123) Van Krevelen, D. W. and P. J. Hoftijzer: *Rec. Trav. Chim.*, **67**, 563 (1948)

- 124) Yagi, S. and H. Inoue: *Chem. Eng. Sci.*, **17**, 411 (1962)
 125) Yamaguchi, I., T., Oishi, N. Hashimoto and S. Nagata: *Mem. Fac. Eng., Kyoto Univ.*, **27**, 118 (1965)
 126) 吉田文武, 大竹伝雄, 中尾勝実: 化学工学, **30**, 460 (1966)

XXX-4. 吸 収 装 置 と 吸 収 プ ロ セ ス*

鈴 木 昭**

ま え が き

吸収操作は広く化学工業の分野において、硫酸、硝酸、塩酸の製造、アンモニア、メタノール、オキシ合成ガス等の精製、都市ガス、水素ガス、製油所廃ガスの精製、各種ガスから有効成分の回収等に使われている。装置規模の大型化、公害問題と関連してより経済性のあるしかも信頼性の高い装置およびプロセスの選定が重要となる。本稿では最近の文献に発表されている工業的吸収装置と吸収プロセスに関する設計資料、設計手法、選定の基準および概要について紹介する。

1. 吸 収 装 置

吸収理論の展開、吸収機構の理解、装置設計の基礎資料などに関する実験が活発に行なわれており、とくに化学反応を伴うガス吸収について多数の報告がなされている。

正田、浅井らはアルカリ水溶液による炭酸ガス、硫化水素の吸収を液柱、濡れ壁を使って行ない、反応吸収機構を明らかにしている^{35,36)}。Thomas は液柱による炭酸ガスのモノエタノールアミンへの吸収を行ない⁸⁴⁾、Astarita らは濡れ壁を使って硫化水素の苛性ソーダ、アルカリ炭酸塩およびモノエタノールアミンへの吸収を行ない、反応機構を明らかにしている^{1,2)}。Brian らは濡れ壁を使って炭酸ガスのモノエタノールアミンによる吸収をプロピレンの放散と同時にしない、炭酸ガスの吸収による液境界層内の表面張力の勾配がもたらす乱れによって物質移動係数が増加すること、この物質移動係数を採用することにより浸透説による理論解との一致がよくなることを報告している⁴⁾。

Jefferys らは液柱により炭酸ガスの炭酸ソーダ水溶液

への吸収を行ない、吸収液にグリシンを添加することにより吸収速度が増加することを述べている⁴²⁾。アルカリ性水溶液による炭酸ガスの吸収において、触媒を添加することにより吸収速度が増加することは、すでに工業プロセスのいくつかに応用されている。添加する触媒として亜硫酸^{68,69)}、ほう酸、未公開添加物²⁴⁾を使ったプロセスの紹介がなされている。Danckwerts らは、アルカリ性水溶液による炭酸ガスの吸収において、添加触媒が吸収速度を増大せしめる機構を溶液の境界層における炭酸ガスの水和反応、すなわち触媒が反応速度の遅い式 (1) の反応を

促進することで説明している。触媒として亜硫酸、ホルムアルデヒド、次亜塩素酸などの炭酸ガスの吸収速度への影響を攪拌槽を使って測定し、触媒作用は溶液に吸収されている炭酸ガスの量が多い状態で著しいことを報告している^{11,12,72)}。

Danckwerts らは炭酸ガスの硫酸ソーダ、炭酸カリおよび重炭酸カリの緩衝溶液、苛性ソーダ水溶液への吸収を攪拌槽および各種充填物を充填した充填塔を使い、ガス側の抵抗が無視できる条件で測定し、求めた液側物質移動係数と有効表面積の値を報告している^{13,14,70)}。

吉田らは充填塔および連珠塔を使って炭酸ガスの苛性ソーダ、苛性カリ水溶液への吸収を行ない有効表面積を求めた⁹¹⁾。恩田らは各種の充填物を使ってアンモニアの水による吸収⁶¹⁾、炭酸ガスの水による吸収⁶²⁾を行ない、ガス側、液側物質移動係数、および有効表面積を表わす式 (2), (3), (4) を提案した。

$$\frac{k_a RT}{a_i D_a} = 0.272 \left(\frac{G}{a_i \mu_a} \right)^{0.80} \left(\frac{\rho_a^2 g}{\mu_a^2 a_i^3} \right)^{0.20} \left(\frac{\mu_a}{\rho_a D_a} \right)^{0.50} (a_i D_p)^{-1.6} \quad (2)$$

$$k_L \left(\frac{\rho_L}{\mu_L g} \right)^{1/3} = 0.015 \left(\frac{L}{a_i \mu_L} \right)^{1/2} \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D_L} \right)^{-1/2} (a_i D_p)^{0.4} \quad (3)$$

* 昭和44年6月19日 受理

** Akira Suzuki 千代田化工建設株式会社

$$\frac{a_w}{a_t} = 1 - \exp \left[-1.45 \left(\frac{L}{a_t \mu_L} \right)^{0.1} \left(\frac{a_t L^2}{\rho_L^2 g} \right)^{-0.05} \left(\frac{L^2}{\rho_L g a_t} \right)^{0.2} \left(\frac{\sigma_c}{\sigma} \right)^{0.75} \right] \quad (4)$$

この物質移動係数と有効表面積とから計算した総括容量係数は、炭酸ガスとモノエタノールアミン系で実測したそれと±20%以内で一致したことを報告している。上記の総括容量係数の計算を二次反応として計算していることから、個々の物質移動係数、および有効表面積の式は二次反応を伴う吸収系においても十分使用できると述べている⁶³⁾。Vivian らは炭酸ガスと水系の吸収を充填塔で行ない液側抵抗を^{88, 89)}、Sharma らは亜硫酸ガス、塩素と水系、アンモニア、トリエチルアミンと硫酸系の吸収によりガス側基準容量係数を⁷³⁾、Ellis は炭酸ガスのアルカリおよびアミンへの吸収を充填塔で行ない総括容量係数を²⁵⁾、DeWaal らは炭酸ガスと水系、酸素と亜硫酸水溶液系の吸収を充填塔で行ない液側基準容量係数を¹⁵⁾、Astarita らは炭酸ガスのアルカリ水溶液への吸収を充填塔で行ない液側基準容量係数を³⁾ 報告している。

Porter らは塔径3フィートの泡鐘塔で炭酸ガスと水および苛性ソーダ水溶液による吸収を⁶⁶⁾、Smith らは多孔板塔で炭酸ガス-苛性ソーダ水溶液の吸収⁷⁴⁾を行ない、液側物質移動係数と有効表面積を報告している。

吸収装置として工業的に使用されている気液接触装置は充填塔、濡れ壁塔、段塔、ジェットその他の気液接触装置などで、使用目的、気液比、腐蝕雰囲気、固形物および発泡性の有無などを考慮して選ばれる。

充填塔はガスの吸収にもっとも一般的に使われている気液接触装置である。Eckert らは多数のガス吸収系に対して充填塔の特性と総括容量係数の資料について述べている²⁸⁾。Morton らはマクマホン、スター、ラシヒリングの三種の充填物について運転特性を測定し、ローディング領域以下⁴⁶⁾とローディング領域⁴⁷⁾における圧力損失とホールドアップの関係式を実測値と比較している。この関係式は充填物をサドル型とリング型の二つに区分

して与えられており、実測値との比較については⁴⁸⁾、ローディング領域以下では±50%以内、ローディング領域では±40%以内で一致すると報告している。Mohunta らは充填塔におけるホールドアップの関係式を⁴⁹⁾、Secor らはホールドアップが化学反応を伴うガス吸収の吸収速度に与える影響を⁷⁵⁾ 報告している。Shulman らはベルサドル、カーボンおよびセラミックラシヒリング充填物を用いてホールドアップ⁷⁶⁾、有効表面積⁷⁷⁾の測定を行ない、ガス側物質移動係数、有効表面積とホールドアップとの関係を⁷⁸⁾、DeWaal らは塔径1フィートのラシヒリング充填塔で圧力損失、ホールドアップ、有効表面積¹⁶⁾を測定している。

充填塔内の充填層を流れる液の分散状態が吸収の性能に影響があることは当然であり、充填塔の設計上、液の分散機構、塔径と充填物寸法の関係、充填高の影響などは重要な問題点である。充填層内の液分散のモデル、およびその解析が Hoftyzer³⁷⁾、Jamson⁴³⁾、Porter⁶⁷⁾ らによってなされている。

充填塔のフラiddiングについては周知の Sherwood, Lobo, Eckert らによる線図があるが、Mersmann は新しいフラiddiングおよびローディング線図を提案し、その計算例をあげている⁵⁰⁾。充填塔のフラiddiングの計算に必要な各種の充填物に対応するパッキングファクターが Eckert らにより発表されており、これを表1に示す²⁷⁾。

Dankwerts らは攪拌槽で求めた吸収速度のデータを使って充填塔を設計する手法を発表している^{13, 14)}。すなわち適当な攪拌速度を選ぶことによって攪拌槽と充填塔で得られる物質移動を一致させることが可能であり、したがって攪拌槽を充填塔のモデルとして使うことができる。炭酸ガスの苛性ソーダ水溶液による吸収実験の結果、十分な精度でこの手法が使用できるとしている。Semmelbauer はガス吸収の速度論と流体力学とにともづき H. T. U. の計算法を提案し、この手法は他の

表1 パッキングファクター-水張-不規則充填

充 填 物	材 質	呼 称 寸 法 (inch)										
		1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	3	3 1/2
Intalox Saddle	Ceramic	600	—	200	—	145	98	—	52	40	22*	—
Intalox Saddle	Plastic	—	—	—	—	—	31*	—	—	21*	14*	—
Berl Saddle	Ceramic	900	—	240	—	170	110	—	65	45	—	—
Pall Ring	Ceramic	—	—	—	—	—	—	—	—	44*	29*	—
Pall Ring	Plastic	—	—	—	97	—	52	—	32	25	—	16
Pall Ring	Metal	—	—	—	71	—	48	—	28	20	—	—
Raschig Ring	Ceramic	1400	1000	640	380	255	160	125	95	65	37	—
Raschig Ring 1/32" 厚み	Metal	700	—	300	190	155	115	—	—	—	—	—
Raschig Ring 1/16" 厚み	Metal	—	—	340	290	230	145	110	83	57	32	—
Raschig Ring 1/8" 厚み	Metal	—	—	—	—	—	—	—	—	—	38	—

* Iwao Engg. Co. Data

物質移動をとともう単位操作においても使用可能であると述べている⁷⁹⁾。泡鐘塔は従来からもっとも広く採用されている気液接触装置の一つであるが、その段効率^{5,27)}、運転範囲⁵¹⁾についての検討がなされている。多孔板塔に関する研究は主として装置設計上の問題について行なわれており、下降管の設計法⁸⁵⁾、圧力損失の計算式^{17,80,93)}、安定運転範囲⁹⁴⁾などの報告がある。吉田らは長方形断面を有する多孔板塔の圧力損失、ホールドアップ、飛沫同伴について通常多孔板塔との比較を行なっている⁹²⁾。Giles らはターボグリッド塔の圧力損失、トレイの液洩れ、飛沫同伴の測定を行ない、他の段塔との比較について述べている³⁴⁾。Todd らはジェットトレイ塔についての実験から反力損失、飛沫同伴、安定運転範囲などの設計資料を求め、とくに液量の多い気液接触に適するとしている⁸⁶⁾。Manning は段塔の段間にガスに遠心力を与える機構を設けることにより、過大な飛沫同伴なしに塔内ガス流速を大にすることができると報告している⁵²⁾。濡れ壁塔のフラッシングに関する関係式が藤田によりまとめられている²⁹⁾。

泡鐘塔、多孔板塔、ターボグリッド塔、リップルトレイ塔の特性についての実験が Cei¹⁰⁾、McQuinn ら⁵³⁾によって行なわれ、圧力損失、効率の比較が述べられている。Thibodeaux らは流れ特性の面から段塔と充填塔の比較を行ない、それらの選定の基準について提案している⁸⁷⁾。Bauer らはベンチュリースクラパーで炭酸ガスの水への吸収実験を行ない、最適気液比、安定運転範囲を求め、ベンチュリースクラパーによるガス吸収においては液流量の決定が性能および経験性に大きな影響を与えることを指摘している⁸⁾。

工業装置としての吸収装置の設計および運転にあたって、系の腐蝕性、発泡性は装置の材料および型式の選定に大きな影響を与える。Schwarz らは市販の表面活性剤についてその作用、用途を紹介し、消泡剤としての利用についてもふれている⁸¹⁾。

熱炭酸カリ水溶液を使った吸収装置⁷⁾、モノエタノールアミンを使った吸収装置において経験された腐蝕とその対策について多数の報告が発表されている^{18,28,54,60,64)}

2. 吸収プロセス

本稿ではおもに酸性ガス、すなわち炭酸ガス、硫化水素、硫化カルボニルなどの吸収プロセスで、最近の文献に発表されたプロセスについて紹介する。工業的に使用されている酸性ガスの吸収除去プロセスは、アミン、炭酸カリなどに代表される化学吸収プロセス、酸性ガスのメタノールなどの溶剤に対する溶解性を利用した物理吸収プロセス、吸収溶液として混合溶剤を使うことにより

化学吸収と物理吸収の両機能を発揮するプロセスなどが発表されている。最近では装置の大型化、ガス吸収の操作圧力の上昇の傾向から、化学吸収に比べて溶液再生熱が少なくすむ物理吸収が注目され、より酸性ガスの溶解度の大きい溶剤を使用した新プロセスを開発する試みがなされているようである。

アミン水溶液による酸性ガスの吸収は、最近その理論的解析も多数行なわれていることは前述したが、工業装置としてのアミンプロセスの利用に関する報告も多数発表されている。Wendt らは SNPA プロセスについて報告している⁹⁰⁾。このプロセスは天然ガスに大量に含まれている硫化水素を除去するために、吸収溶液としてデタノールアミン (DEA) の水溶液を使うプロセスであるが、通常の DEA プロセスに比較して DEA の濃度が高く、DEA 20~30 wt %, しかも循環溶液あたりの硫化水素吸収量を大きくとることにより、大幅に循環液量を少なくしている点に特徴がある。このため装置は小さくてすみ、溶液再生に必要な熱量も少ない利点がある。モノエタノールアミン (MEA) 水溶液による脱硫と比較した場合、精製ガス中の硫化水素残は大きい、溶液の劣化の度合、溶液の損失の面で優れている。実装置における運転の実績から、溶液のアミン濃度の高いこと、吸収液に吸収される酸性ガス量の多いことから心配される腐蝕は、通常のアミンプラントにおける腐蝕に比べ、特別な問題はなかったといわれる。Holder は $\beta\beta$ ヒドロオキシアミノエチルエーテル (DGA) を吸収溶剤とした酸性ガス除去プロセスについて、パイロットプラントおよび既存のモノエタノールアミンとエチレングライコール (MEA-DEG) のプラントの溶液の入れ換えによって得られた結果について発表している³⁸⁾。Maddox らは MEA による炭酸ガスと硫化水素の除去について、設計資料および設計法を述べている^{55,57)}。工業的に使用されているアミン (MEA, DEA, TEA, MDEA, グライコールアミン) による脱硫プロセスに関する全般的な解説が発表されている^{56,58)}。

Benson らによって開発された熱炭酸カリ水溶液による酸性ガスの除去プロセスについては多数の稼働中の工業装置があり、プロセスの解説、設計資料、運転実績などに報告が行なわれている^{8,9,59)}。このプロセスは、その特徴である吸収塔の運転温度が高いため、精製ガス中の炭酸ガス残が MEA プロセス、GV プロセスに比較して高い点に問題があったが、従来の炭酸カリ水溶液に添加剤を加えることによって炭酸ガス残を 0.1% 以下に容易に減すことができるようになり、すでに工業装置で確認されている。このプロセスにおいては、吸収温度が高いため、ガス中の硫化カルボニルが式 (5) によって水和され、定量的に除去される利点がある。

添加剤を加えた熱炭酸カリプロセスを改良熱カリプロセス (Modified Benfield Process) と称する。炭酸カリ水溶液に触媒作用を有する添加物を加えることにより、酸性ガス吸収の吸収速度、吸収能力、溶液上の気液平衡の改良をはかったプロセスについては先に述べたが、その中の一つである GV プロセス^{68,69)}は亜砒酸を添加剤として加えたプロセスであり、すでに多数の工業装置が稼動中である。このプロセスは熱炭酸カリプロセスが炭酸ガスと硫化水素の同時吸収であるのに比較し、添加剤と硫化水素の反応により、ガス中の硫化水素と炭酸ガスの選択的除去が可能³⁰⁾である。吸収除去した硫化水素は溶液の空気酸化により固型硫黄として回収することができる。添加剤の種類は明らかにされていないが、カタカーブプロセス (Catacarb Process) が、炭酸カリ水溶液に特殊な添加物を加えることにより、従来の熱炭酸カリプロセスに比較して精製ガス中の炭酸ガス残、溶液再生熱、循環溶液当りの炭酸ガスの吸収量などに大幅な改善がみられ、大型アンモニア装置の炭酸ガス除去プロセスとして注目されている。すでに工業装置も稼動中である²⁴⁾。

アミン、炭酸カリ水溶液による酸性ガスの除去プロセスは化学反応を伴う吸収プロセスであり、溶液に吸収される酸性ガス量は溶液中のアミンまたは炭酸カリ量によって、たとえガス中の酸性ガスの分圧がいかに高くとも、限界がある。一方、物理吸収においては、ガス中の酸性ガスの分圧が高ければ高いほど溶液中に吸収される酸性ガスの量は増加する。スルフィノールプロセス (Sulfinol Process) は、ジイソプロパノールアミンとスルホランおよび少量の水からなる混合溶液を使うことにより、酸性ガスを除去するプロセスである。溶液は化学吸収と物理吸収の両作用を有するので両者の特徴をそなえている。すなわち、酸性ガスの吸収能が高く、溶液再生のための熱が少なくすみ、ガス中のメルカプタン、硫化カルボニル、水の除去も同時に行なわれる。溶液の腐蝕性、損失も少ないといわれている。パイロットプラントおよび工業装置の解説、運転実績等多数の報告がなされている¹⁹⁻²³⁾。

酸性ガスの除去に物理吸収を利用するプロセスは古くから工業装置に採用されている。物理吸収においては、溶液中に吸収される酸性ガスの量は酸性ガスの溶解度と分圧によって決定される。したがって高圧におけるガス吸収に適している。酸性ガスを吸収した溶液の再生は、本質的には減圧によってなされるので、溶液再生のための熱は化学吸収の場合に比べて無視できる程度である。物理吸収プロセスにおいては、もちろん溶剤の安定性、腐蝕性、コストなどを考慮せねばならないが、酸性ガス

に対する溶解度の大きい溶剤を使うことがもっとも重要である。レクチゾール (Rectisol Process) はメタノールを溶剤とした酸性ガスの吸収プロセスである。酸性ガスの溶解度を増加し、溶剤損失を減少するため、吸収操作は低温 (-60°C) で行なわれる。プロセスの解説³⁹⁾と工業装置の紹介⁶⁵⁾がなされている。Kutsher らはポリエチレングライコールのデメチルエーテル (DMPEG) が炭酸ガス、硫化水素、メルカプタンに対し、高い吸収能を示すことからパイロットプラントの結果を報告している⁴⁴⁾。硫化水素は 1ppm 以下に、炭酸ガスは 0.3% 以下に精製することが可能で、硫化水素および硫化カルボニルを含むガスを脱硫し、全硫黄分 3ppm 以下に精製することができた。酸性ガスの除去とともにガスの脱水も同時に行なわれると述べている。溶液の発泡性、劣化が少なく、溶液の再生は減圧と空気によるストリッピングが採用される。溶液の硫化水素と炭酸ガスの溶解度の差を利用して両者の選択吸収も可能であり、ガス中の酸性ガス分圧が低い場合には、ディソプロパノールアミン (DIPA) を溶液に添加した混合溶液を使うのが好ましいと述べている。

Stotler はアセトン吸収剤として使用する酸性ガス除去プロセスを発表している。その特徴は酸性ガスの溶解度が高く、再生熱が少なく、腐蝕性が少ないなどである。パイロットプラントで得られた結果をもとにして他のプロセスとの経済性の比較を行っており⁸²⁾、精製ガス中の炭酸ガスは数 ppm 以下にすることが可能であるが、経済的には 100ppm 程度であろうと述べている。*n*-メチルピロリドンに酸性ガスの吸収溶剤とするビューリゾールプロセス (Purisol Process) が高圧下のガス精製プロセスとして注目されはじめて^{39,41)}。さきに述べた低温におけるメタノールを溶剤とするレクチゾールプロセスに比べ、ガス精製の圧力が 80 気圧以上ではビューリゾールプロセスの方が経済的であるといわれている。したがって高圧天然ガス中の酸性ガスの除去、高圧 (80~120 気圧) ガス化プロセスで発生した合成原料ガスの精製、大型水素製造装置における圧縮後の脱炭酸などに使用することが可能である。このプロセスはガスの吸収が常温で行なわれるので、レクチゾールプロセスで必要な冷凍設備は不要である。溶剤の安定性が高い、硫化水素と炭酸ガスの選択吸収が可能であり、硫化水素 1ppm 以下、炭酸ガス 0.1% 以下に精製することが可能である。

酸性ガスの除去プロセスには化学吸収、物理吸収、および両者の併用のプロセスなどがあるが、使用目的、使用条件、関連設備とのつながりなどから最適なプロセスを採用するべきである。Riesenfeld らは天然ガスの脱硫プロセスの最近の進歩について述べ、各プロセスの解説

を行なっている⁷¹⁾。Hoogen Doorn ガスは脱硫プロセスについて、化学吸収と物理吸収の両プロセスの比較を行なっている⁴⁰⁾。Fitzgerald らは酸性ガスの組成、メルカプタンの有無により酸性ガス除去プロセスの選定の方針を、それぞれのプロセスの使用限界、最適応用範囲、

設計資料などを考慮して解説している^{31, 32)}。

煙道ガスの脱硫は近年公害問題の解決のため注目をあつめているが、この分野における研究開発の現状、パイロットプラントの運転結果についていくつかの文献が発表されている^{33, 45, 83)}。

使用記号

a_t : 充填物の全表面積 [m^2/m^3], a_w : 充填物の濡れ面積 [m^2/m^3], Dg : 気相拡散係数 [m^2/hr], DL : 液相拡散係数 [m^2/hr], D_p : 充填物の代表寸法 [m], G : ガスの空塔質量速度 [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$], g : 重力の加速度 [m/hr^2], k_g : 気相物質移動係数 [$\text{kg} \cdot \text{mole}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{atm}$], k_L : 液相物質移動係数 [m/hr], L : 液の空塔質量速度 [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$], μ_g : ガスの粘度 [$\text{kg}/\text{m} \cdot \text{hr}$], μ_L : 液の粘度 [$\text{kg}/\text{m} \cdot \text{hr}$], ρ_g : ガスの密度 [kg/m^3], ρ_L : 液の密度 [kg/m^3], σ : 液の表面張力 [kg/hr^2], σ_c : 臨界表面張力 [kg/hr^2], R : 気体定数 [$\text{m}^3 \cdot \text{atm}/\text{kg} \cdot \text{mole} \cdot ^\circ\text{K}$], T : 絶対温度 [$^\circ\text{K}$]

引用文献

- 1) Astarita, G. and F. Gioia: *Chem. Eng. Sci.*, **19**, 963 (1964)
- 2) Astarita, G., F. Gioia and C. Balzano: *ibid.*, **20**, 1101 (1965)
- 3) Astarita, G.: *I & EC (Fund.)*, **2**, 294 (1963)
- 4) Brian, P. L. T., J. E. Vivian and D. C. Matiatos: *A. I. Ch. E. Journal*, **13**, 28 (1967)
- 5) Bakowski, S.: *Brit. Chem. Eng.*, **8**, 472 (1963)
- 6) Bauer, W. G., A. G. Friedrichson and H. M. Tsuchiya: *I & EC (Proc. Design & Devel.)*, **2**, 178 (1963)
- 7) Bienstock, D. and J. H. Field: *Corrosion*, **17**, 89 (1961)
- 8) Bacard, J. P. and B. J. Mayland: *Hydrocarb. Proc.*, **41**, No. 4, 128 (1962)
- 9) Benson, H. E. and J. H. Field: *Petrol. Refiner*, **39**, 127 (1960)
- 10) Cei, R. P. and W. F. Furter: *Can. Journal Chem. Eng.*, Dec., 341 (1965)
- 11) Danckwerts, P. V. and K. M. McNeil: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **45**, T-32 (1967)
- 12) Danckwerts, P. V. and K. M. McNeil: *Chem. Eng. Sci.*, **22**, 925 (1967)
- 13) Danckwerts, P. V. and A. J. Gillhan: *Trans. Instn. Chem. Eng.*, **44**, T-42 (1966)
- 14) Danckwerts, P. V. and M. M. Sharma: *Trans. Instn. Chem. Eng.*, **44**, CE-244 (1966)
- 15) De Waal, K. J. A. and W. J. Beek: *Chem. Eng. Sci.*, **22**, 585 (1967)
- 16) De Waal, K. J. A. and A. C. Mameren: *A. I. Ch. E., ICE Meeting Proc. Symp.*, **6**, 60 (1965)
- 17) Detman, R. F.: *Hydrocarb. Proc.*, **42**, No. 8, 147 (1963)
- 18) Dingman, J. C., D. L. Allen and T. F. Moore: *Hydrocarb. Proc.*, **45**, No. 9, 285 (1966)
- 19) Deal, C. H., C. L. Dunn, E. S. Hill, et al.: *Secs. N, Paper-32*, 6th WPC (1963)
- 20) Dunn, C. L., E. R. Freitas, et al.: *Oil-Gas Journal*, March 16, 95 (1964)
- 21) Dunn, C. L., E. R. Freitas, et al.: *Hydrocarb. Proc.*, **43**, No. 3, 150 (1964)
- 22) Dunn, C. L., E. R. Freitas, et al.: *Oil-Gas Journal*, March 29, 89 (1965)
- 23) Dunn, C. L., E. R. Freitas, et al.: *Hydrocarb. Proc.*, **44**, No. 4, 137 (1965)
- 24) Eickmeyer, A. G.: *Chem. Eng. Prog.*, **58**, No. 4, 89 (1962)
- 25) Ellis, J. E.: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **38**, 216 (1960)
- 26) Eckert, J. S., E. H. Foote, et al.: *I & EC*, **59**, No. 2, 41, (1967)
- 27) Eckert, J. S., E. H. Foote, et al.: *Chem. Eng. Prog.*, **62**, No. 1, 59 (1966)
- 28) Ewing, R. C.: *Oil-Gas Journal*, Oct. 30, 125 (1967)
- 29) 藤田重文: *化学工学*, **30**, 179 (1966)
- 30) 福原: *燃料協会誌*, **42**, 628 (1963)
- 31) Fitzgerald, K. J. and J. A. Richardson: *Hydrocarb. Proc.*, **45**, No. 7, 125 (1966)
- 32) Fitzgerald, K. J. and J. A. Richardson: *Oil-Gas Journal*, Oct. 24, 110 (1966)
- 33) Field, J. H., R. C. Kurtzrock and D. H. McCrea: *Chem. Eng.*, **74**, 158 (1967)
- 34) Giles, B. D. and C. E. Drgden: *I & EC (Proc. Design.)*, **2**, 188 (1963)
- 35) 疋田晴夫, 浅井悟はか: *化学工学*, **32**, 278 (1968)
- 36) 疋田晴夫, 浅井悟はか: *同誌*, **28**, 1017 (1964)
- 37) Hoftyzer, P. J.: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **42**, T-109 (1964)
- 38) Holder, H. L.: *Oil-Gas Journal*, May 2, 83 (1966)
- 39) Hochgesand, G.: *Chem. Jng. Techn.*, **40**, 432 (1968)
- 40) Hoogen Doorn, J. C.: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **41**, 264 (1963)
- 41) Information from Lurgi Gesellschaft fur Warme und Chemotechnik MBH.
- 42) Jefferys, G. V. and A. F. Bull.: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **42**, T-118 (1964)
- 43) Jemson, G. J.: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **45**, T-74 (1967)
- 44) Kutsher, G. S., G. A. Smith and P. A. Green: *Oil-Gas Journal*, March 20, 116 (1967)
- 45) Katell, S.: *Chem. Eng. Prog.*, **62**, 1067 (1966)
- 46) Morton, F., P. J. King and B. Atkinson: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **42**, T-35 (1964)
- 47) Morton, F., P. J. King and B. Atkinson: *ibid.*, **42**, T-42 (1964)
- 48) Morton, F., P. J. King and B. Atkinson: *ibid.*, **42**, T-49 (1964)
- 49) Mahunta, D. M. and G. S. Laddha: *Chem. Eng. Sci.*, **20**, 1069 (1965)
- 50) Mersmann, A.: *Chem. Ing. Techn.*, **37**, 218 (1965)
- 51) Mittelstrass, M.: *Chem. Tech.*, **10**, 138 (1964)
- 52) Manning, E.: *I & EC*, **56**, No. 4, 14 (1964)
- 53) McQuinn, M. W. and W. F. Furter: *Can. Jour. Chem. Eng.*, June, 179 (1966)
- 54) Moore, K. L. and D. B. Bird: *Hydrocarb. Proc.*, **44**, No. 5, 179 (1965)
- 55) Maddox, R. N. and M. D. Burns: *Oil-Gas Journal*, Sep. 18, 112 (1967)
- 56) Maddox, R. N. and M. D. Burns: *ibid.*, Aug. 21, 83 (1967)
- 57) Maddox, R. N. and M. D. Burns: *ibid.*, Oct. 2, 110 (1967)
- 58) Maddox, R. N. and M. D. Burns: *ibid.*, Aug. 14, 131 (1967)
- 59) Maddox, R. N. and M. D. Burns: *ibid.*, Nov. 13, 122 (1967)

- 60) 内藤, 橋本, 高村: 石油学会誌, 11, 872 (1968)
- 61) 恩田, 佐田, 城戸, 川竹: 化学工学, 30, 226 (1966)
- 62) 恩田, 竹内, 小山: 同誌, 31, 126 (1967)
- 63) 恩田, 長坂, 高橋: 同誌, 31, 716 (1967)
- 64) Oakes, B. D. and M. C. Hager: *Material Protect.*, 5, No. 8, 25 (1966)
- 65) *Oil-Gas Journal*, May, 15, 83 (1967)
- 66) Porter, K. E., M. B. King and K. C. Varshney: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, 44, T-274 (1966)
- 67) Porter, K. E. and M. C. Jones: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, 41, 240 (1963)
- 68) Riesenfeld, F. C. and J. F. Mulloney: *Petrol. Refiner*, 38, No. 5, 161 (1959)
- 69) Riesenfeld, F. C. and C. L. Blohm: *Hydrocarb. Proc.*, 41, No. 4, 123 (1962)
- 70) Richards, G. M., G. A. Ratcliff and P. V. Danckwerts: *Chem. Eng. Sci.*, 19, 325 (1964)
- 71) Riesenfeld, F. C. and M. Markles: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, 46, CE-240 (1968)
- 72) Sharma, M. M. and P. V. Danckwerts: *Chem. Eng. Sci.*, 18, 729 (1963)
- 73) Sharma, M. M.: *Chem. Eng. Sci.*, 22, 673 (1967)
- 74) Smith, R. K. and G. B. Wills: *I & EC (Proc. Design.)*, 5, 39 (1966)
- 75) Secor, R. M. and R. W. Southworth: *A. I. Ch. E. Journal*, 9, 561 (1963)
- 76) Shulman, H. L., C. F. Ullrich and N. Wells: *ibid.*, 1, 247 (1955)
- 77) Shulman, H. L., C. F. Ullrich, A. Z. Proulx and et al.: *ibid.*, 1, 253 (1955)
- 78) Shulman, H. L., C. G. Savini and R. V. Edwin: *ibid.*, 9, 479 (1963)
- 79) Semmelbauer, R.: *Chem. Eng. Sci.*, 22, 1237 (1967)
- 80) Sundermann, U.: *Chem. Ted.* (Berlin), 19, 267 (1967)
- 81) Schwarz, E. G. and W. G. Reid: *I & EC*, 58, 26 (1964)
- 82) Stotler, H. H.: *Hydrocarb. Proc.*, 42, No. 10, 154 (1963)
- 83) 坂部: 石油学会誌, 12, No. 3, 182 (1969)
- 84) Thomas, W. J.: *A. I. Ch. E. Journal*, 12, 1051 (1966)
- 85) Thomas, W. J. and M. Campbell: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, 45, T-64 (1967)
- 86) Todd, W. G. and Mauhew Van Winkle: *I & EC (Proc. Design)*, 8, 95 (1967)
- 87) Thibodeaux, L. J. and P. W. Murill: *Chem. Eng.*, 73, No. 15, 155 (1966)
- 88) Vivian, J. E., P. L. T. Brian and V. J. Krukonis: *A. I. Ch. E. Journal*, 13, 174 (1967)
- 89) Vivian, J. E.: *ibid.*, 10, 221 (1964)
- 90) Wendt, C. J. and L. W. Dailey: *Hydrocarb. Proc.*, 46, No. 10, 155 (1967)
- 91) Yoshida, F. and Y. Miura: *A. I. Ch. E. Journal*, 9, 331 (1963)
- 92) Yoshida, F., T. Nishibe and S. Nagai: *A. I. Ch. E., ICE Meeting Proc. Symp.*, 8, 34 (1965)
- 93) Zelfel, E.: *Chem.-Ing.-Techn.*, 39, 284 (1967)
- 94) Zelfel, E.: *Chem.-Ing.-Techn.*, 39, 433 (1967)

[レビュー おわり]