

化学工学

I

81.17
951
=1

化学工学 I

藤 田 重 文 編
東 畑 平 一 郎



東京化学同人

ふじ た しげ ふみ
藤 田 重 文

1909年 東京都に生まれる

1934年 東京工業大学応用化学科 卒

現 東京工業大学 教授

専 攻 化学工学

工学博士

とう はた へい いち ろう
東 畑 平 一 郎

1921年 三重県に生まれる

1944年 東京大学工学部 卒

現 中央大学理工学部 教授

専 攻 化学工学

第1版 第1刷 1963年 6 月 15 日 発行

第2刷 1963年 10 月 20 日 発行

化 学 工 学 I ¥ 1,200

編 集 藤 田 重 文
 東 畑 平 一 郎

© 1963

印 刷 中 央 印 刷 株 式 会 社

製 本 株 式 会 社 松 岳 社

発 行 株 式 会 社 東 京 化 学 同 人

東京都千代田区九段4丁目2番地

TEL.322-6460・振替 東京 84301

編 集 担 当

藤 田 重 文

B 1 2437

序

化学工学は広く化学工業の諸操作の技術ならびにその装置や機械、プラントなどの設計、製作、建設に関する学問である。それは化学工業の学術的基礎として、化学と車の両輪のように並んで必要なのである。化学工学が独立の工学として認識されはじめたのは比較的新しいとはいえ、すでに50年余りの歴史を有する。

化学工学のアイディアは米国で起こったのであり、初めは蒸留とか、蒸発、吸収などの諸操作をおもなる対象としたので、やがて単位操作という言葉も生まれてきた。それに伴って単位操作に関する研究開発が盛んになり、実地の工業にも大いに活用され、役立ったのである。1930年代までは単位操作が化学工学のほとんどすべてであるような感じであった。

内田俊一、亀井三郎両氏と筆者らが日本において化学工学を専攻しだしたのはちょうどそのころであった。それより前に西川虎吉氏ら少数の先覚者がその必要性を認識して化学機械の名称で端緒を開かれたが、いまだ体系をなしてはいなかったのである。当時は、一般社会はもちろん、産業界や学者、技術者間でさえ化学工学の名称すら知る人は少なかった。

それから30年余——途中に大戦があったが——世界の科学および工学の進歩は著しく、発展しつつある産業界の要望に応じて、化学工学もまたその質の深さと範囲の広さとを増大した。

本書は全4巻より成る。第I巻は物性、流動、伝熱、物質移動などの基礎編である。第II、III巻は主として単位操作である。第IV巻は化学工学の範囲拡大として発展した新分野、すなわち反応工学、プロセス設計、プラント設計、コストメーション（経済評価）、計測および制御である。本書の著者名と担当題目を一覧し、それぞれ現職第一線の優秀な青壮適任者を得ているのを欣快に思う。30年前を回顧して隔世の感がある。

本書のモットーは“入門から初段まで”という。入門級の読者に初段級

107663

の実力を与えるのを目標とするのである。それは容易なことではなくて、各著者や編集の苦心は並々ならぬことと思うと同時に、読者もこれに報いるだけの熱意がなくては“猫に小判”の懸念も起こる。しかしながら本書の内容を見ると、決して入門級のためのみとは思われない。入門級から初段以上まで、どの程度の読者に対してもそれぞれに応じて啓発示唆の価値があると考える。

1963 年 3 月 30 日

八 田 四 郎 次

東北大学名誉教授，工学博士
千代田化工建設株式会社常務
取締役，技術総合研究所長

序

一冊の本を何人かで分担執筆するのはなかなかむずかしいことである。長所も多いが短所も少なくない。本書の執筆要綱の冒頭には“化学工学の専攻でない方々にも化学工学を知っていただくため、……”という意味のことを書き、執筆にあたっての心がまえを十分に統一したつもりである。しかし、“どの程度の内容にすればよいか？”，“最近続々と出版される化学工学の解説書に対してどこに特徴をもたせようか？”という2点については考えれば考えるほどわからなくなった。これが本書の企画にあたって最も苦慮した点である。

それぞれの執筆者¹に対しては申しわけないくらい、いろいろ注文をつけた。その結果、各章のレベルはほぼそろったと思う。

しかし各章の執筆者はそれぞれその方面の専門家であるためにかえって“どういうところがわかりにくいか”ということがわからないのである。したがって本書の評価は正直のところ読者以外には不可能だろうと思う。本書改訂の際の貴重な資料として、いまから忌憚のないご批判をお願いするしだいである。

順序が逆になったが、本書は化学工学のなかでも最も基礎的な分野を集めた。いわゆる transport phenomena (移動現象とか輸送現象とかいわれている) に関する解説をできるだけわかりやすく書いていただいたつもりである。しかし、このような基礎知識を、実際問題にぶつかったとき、どう応用すればよいかというところまでは紙数のつごうでなかなか言及しにくかったかもしれない。この点は第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ巻によって補っていただけるものと確信している。

本書はぱらぱらとながめても理解できる性質のものではない。腰をおちつけて熟読していただくことを衷心からお願いして序文とする。

1963 年 6 月

藤 田 重 文

化学工学 I

執筆者

井	ぐち	あき	ひろ	東京工業大学化学工学教室
伊	とう	し	ろう	東京工業大学教授, 工学博士
大	たけ	つた	お	大阪大学工学部教授, 工学博士
くに	い	だい	ぞう	東京大学工学部教授, 工学博士
佐	とう	かず	お	東京工業大学教授, 工学博士
ふじ	た	しげ	ふみ	東京工業大学教授, 工学博士

(五十音順)

装幀 立花智恵子

化 学 工 学 (全 4 卷)

総 目 次

第 I 卷

1. 緒 論
2. 移動に関する物性定数
3. 物質収支とエネルギー収支
4. 運動量移動
5. 伝 熱
6. 物質移動

第 II 卷

1. 粉体と粒体
2. 粉 砕
3. かくはんと混合
4. 機械的分離 (I)
一固-液, 液-液系一
5. 機械的分離 (II)
一固-気, 気-液系一
6. 機械的分離 (III)
一固-固系一
7. 真空技術
8. 冷 凍

第 III 卷

1. 蒸 留
2. 吸 収
3. 吸着・イオン交換
4. 抽 出
5. 調 湿
6. 乾 燥
7. 蒸 発
8. 晶 析

第 IV 卷

1. 工業反応速度
2. 反応装置
3. プロセス設計
4. プラント設計
5. 経済収支計算法
6. 計 測
7. 制 御

目 次

1. 緒 論

- 1・1 化学工業における化学と工学…………… 1
- 1・2 化学工学の概要……………10

2. 移動に関する物性定数……………21

- 2・1 移動現象の相似性……………21
- 2・2 気体分子の移動現象……………25
- 2・3 分子間力……………30
- 2・4 Lennard-Jones ポテンシャルによる物性の計算……………31
- 2・5 常圧気体物性の推算……………37
- 2・6 高圧気体物性の推算……………44
- 2・7 液体の物性の推算……………51

3. 物質収支とエネルギー収支……………61

- 3・1 物質収支……………62
- 3・2 物質移動操作における物質収支……………74
- 3・3 化学反応を伴う物質収支……………79
- 3・4 非定常状態の物質収支……………89
- 3・5 エネルギー収支……………91
- 3・6 物理過程のエネルギー収支……………98
- 3・7 反応過程のエネルギー収支……………110
- 3・8 物質収支とエネルギー収支の組合わせ……………121
- 3・9 質量とエネルギーの変換……………126

4. 運動量移動……………131

- 4・1 流体およびその流れの基本的性状……………132

4・2	流れの物質収支およびエネルギー収支	146
4・3	実在流体の運動	165
4・4	流体と粒子群	207
4・5	境界層	221
4・6	乱流	244
5.	伝熱	259
5・1	伝導伝熱	259
5・2	強制対流伝熱	274
5・3	自然対流伝熱	288
5・4	相の変化を伴う伝熱	292
5・5	放射伝熱	302
5・6	粉粒体の伝熱	322
5・7	熱交換器における伝熱	336
6.	物質移動	347
6・1	概説	347
6・2	物質移動係数とその使い方	352
6・3	物質移動係数の実験式	371
6・4	物質移動速度に関する理論	377
6・5	むすび	384
索 引		385

1 緒 論*

1・1 化学工業における化学と工学

1・1・1 化学工業の特異性

化学工業が機械工業その他の工業と顕著に異なる点は、“装置”の中で物質の状態、組成、性質をつぎつぎに変化させる“プロセス”を経て、製品が生産される点にあるといえよう。しばしば、化学工業は装置工業であるといわれ、また代表的なプロセス工業であるといわれるゆえんである。

従来、化学工業の定義の中には“化学反応”ということばが使われるのがふつうであった。化学反応は化学工業の重要な要素であるからである。しかし、化学反応を利用して、物質に化学変化を与えただけでは製品は得られない。化学反応の前後に精製、分離のような、主として物理変化を目的とする前処理、後処理が必要である。むしろ一般には全工程中、化学変化を目的とする部分よりも、それまでの準備やあとしまつの工程のほうに経費がかかる場合が多い。にもかかわらず、物理的処理を研究対象とする科学はなく、もっぱら経験をもととする技術（engineering art）にたよって

* 執筆担当： 藤田重文

たのが化学工学誕生以前の化学工業であった。

しかし、今日では、化学的処理と物理的処理とによって物質に状態、組成、性質の変化を与える工程のすべてを“プロセス”ということばで代表させるようになったのである。いうまでもないが、機械工業や自動車工業のように、原材料を加工して形状や大きさだけの変化を与える工程はプロセスとはいわない。したがってプロセスは化学工業を定義づける一つの重要な要素となるわけである。

なお、装置が重要な要素であることは今世紀のはじめ Mataré が指摘した点であるが、今日でもわが国には装置と機械とを混同している論議をしばしばきくことがある。もちろん機械も化学工業にとって重要ではあるが、それは化学工業の特異点ではなく、機械はあらゆる工業に必要なものであるから、定義の中で特に強調しないまでのことである。

さて、装置とプロセスとを特異性とする点においては前世紀の化学工業も現代の化学工業も何らかわりはない。けれどもこれを原料、エネルギー源、生産規模、プロセス、装置およびその構成材料、運転、管理の方式などの面からながめれば、その様相はまったく一変してしまったといっても過言ではない。この点は化学工業の特異性ではないが、このような変化をもたらしたものが科学、技術の進歩であることは疑う余地がない。

1・1・2 化学工業における科学と技術

前世紀におけるイギリス、ドイツ、フランス、その他主として欧州の化学者たちによる研究成果が近代化学工業の基礎となったことはいうまでもない。そのため、長い間化学工業の基礎となる科学は化学であると考えられていた。化学研究の結果を利用して工業生産に移すために必要なのは化学工業技術である。しかし、少なくとも前世紀においては、その技術は個人の経験をもとにした発明、着想、工夫などを中心とし、それを土木工学や機械工学などの知識によって補っていたものとみられる。土木や機械などの工学の基礎は、当時といえども物理や数学などの科学であったはずである。そう考えれば、当時の化学技術の基礎は物理学、数学および個人の経験と独創力とであったともいえよう。化学の面では行きづまっていたアンモニアソーダ法が Solvay によって工業化されたのは、Solvay がガス工場でえた経験と土木技術者として教育された知識とをもとにして、装置に関する技術的問題の解決に努力した結果であると

考えることができる。

プロセスの改良や装置の発明が飛躍的な生産能率の向上をもたらした例は Solvay 以前にもある。鉛室法硫酸製造におけるゲイリュサック塔、グラバー塔の発明などはその好例である。

土木工学や機械工学が比較的早くから発達していたことはその方面の技術者を中心とする学会や協会が早く結成され、相互の啓発、向上の場をもっていたことからもうかがえる（表 1・1 参照）。しかし、化学と化学技術とを結ぶための工学は 19 世紀に

表 1・1 おもな学会設立の年

1828	The Institution of Civil Engineers (英)
1847	The Institution of Mechanical Engineers (英)
1849	The Chemical Society (英)
1852	American Society of Civil Engineers
1876	American Chemical Society
1878	化学会 → 東京化学会 → 日本化学会 (1948)
1879	工学会 → 日本工学会
1880	American Society of Mechanical Engineers (ASME)
1881	The Society of Chemical Industry (英)
1884	American Institute of Electrical Engineers
1888	電気学会
1897	機械学会 → 日本機械学会
1898	工業化学会 → 日本化学会 (1948)
1908	American Institute of Chemical Engineers (AIChE)
1914	土木学会
1922	The Institution of Chemical Engineers (英)
1926	Die deutsche Gesellschaft für chemisches Apparatewesen (Dechema)
1934	Chinese Institute of Chemical Engineers
1936	化学機械協会 → 化学工学協会 (1956)
1939	Philippine Institute of Chemical Engineers
1947	Indian Institute of Chemical Engineers

はついに現われなかった。化学者と化学技術者との間にはなぜか大きな溝があったらしい。マサチューセッツ工業大学 (M. I. T.) の名誉教授 W. K. Lewis はこれをつぎのように表現している¹⁾。

“Chemical education had thus refused to be influenced by the experience of the engineering profession in training men for practical work. There still was an iron curtain between chemistry and engineering.”

1) W. K. Lewis, *Chem. Eng. Progress*, 54, No. 5, 50 (1958).

ここでいう engineering は工学というより、技術に近い意味だと思うが、とにかく化学者の教育は行なわれていても技術者の教育は行なわれていなかった。この鉄のカーテンを取払うために努力したのがイギリスの G. E. Davis である。すなわち彼は 1880 年、化学工業技術者すなわち chemical engineer という職業を確立するために新しい学会を創立しようと試みた。ところが、鉄のカーテンは意外に重く、chemical engineer ということばさえも理解されず、多くの反対に会ってついに会の創立は実現されなかった。ただその翌年(1881年)、The Soc. of Chemical Industryが創立されたのは一つの副産物であった(表 1・1 参照)。

しかし Davis はこれに屈せず、その後も化学工業の職業的指導者養成のためにはすべての化学工業に共通な原理とその応用方法の実例を教えるべきであるという理念を捨てず、Manchester Technical School における講義のノートを整理して、“A Handbook of Chemical Engineering”を発行した(1901年)。chemical engineering ということばをはじめて使ったのはこの Davis であり、W. K. Lewis は“Davisこそ modern chemical engineering の先覚者である”といっている。

Davis のこのような努力もイギリスではむくもられず、その考え方はアメリカに移った。化学工業技術のための工学すなわち化学工学は chemical engineering としてアメリカで育ち、アメリカで成長することになった。

1・1・3 工業化学と化学工学

わが国に化学会*が創立されたのは 1878 年(明治 11 年)であるが、アメリカではその 2 年前 1876 年に Am. Chem. Soc. が創立された。当時アメリカには有機化学の研究室をもつ大学はわずか 3 校(ペンシルバニア大学、バージニア大学、マサチューセッツ工業大学)にすぎず、その学生数は 3 大学あわせて 11 名にすぎなかったという。

そのマサチューセッツ工業大学(M. I. T.)では 1888 年に化学と機械工学とを併修させる形で chemical engineer の教育をはじめたが、その中心人物 L. M. Norton 教授の死(1893年)によって中断された。A. D. Little(M. I. T. 化学科出身)とと

* のちに東京化学会、日本化学会と改称され、1948 年に工業化学会と合併した(表 1・1 参照)。なおイギリスの The Chem. Soc. は 1849 年の創立である。

もにコンサルティング・エンジニアをしていた W. H. Walker が M. I. T. の教授に就任するや、同教授は物理化学の Noyes 教授および A. D. Little などの意見を参考にしてカリキュラムの編成にあたった。



W. H. Walker



A. D. Little



R. K. Meade

図 1・1

たまたまそのころ、“*The Chemical Engineers*” 誌の主筆 R. K. Meade が化学技術者もぜひ学会を結成すべきであるという運動をはじめた。ただちに世人の注目を引くことはできなかったが、Meade の熱心な努力によって、約2年後、1908年6月、*American Institute of Chemical Engineers* (A. I. Ch. E. と略す) が創立された。この創立総会では化学会の役員の反対討論も行なわれたのであるが、その反対者たちは化学会の内部に工業化学の部会をつくり、翌1909年から *Industrial and*

Engineering Chemistry を発刊することになった。Davis の提案に反対して J. S. C. I. が発行されたのとはよく似ている。

A. I. Ch. E. は創立後ただちに“化学工学教育委員会”をおき、Walker, Little 両氏に化学技術者養成のためのカリキュラムの立案を委嘱した。その結果、1915 年委員会に答申されたのが有名な“単位操作の概念”である。

単位操作 (unit operation) ということばは新しいが、その内容は Davis の考え方を整理したものといってよいと Lewis 教授は述べている。その具体的な内容は 1923 年、Walker, Lewis, McAdams の共著“Principles of Chemical Engineering” (本文 17 章、609 ページ) として発表された。参考のために章名を列記するとつぎのとおりである。

(1) 工業化学量論の基礎 (2) 流体境膜 (3) 流体の流れ (4) 熱の流れ (5) 燃料および動力 (6) 燃焼 (7) 工業用炉 (8) ガス発生炉 (9) 粉碎 (10) 機械的分離 (11) ろ過 (12) 蒸発操作の基礎原理 (13) 蒸発 (14) 湿度および乾湿球湿度計 (15) 増湿器、減湿器および冷水塔 (16) 乾燥 (17) 蒸留

わが国の化学工学の先覚者達が約 30 年前に M. I. T. で学んだ化学工学の内容が、すなわち本書の内容であった。今日の化学工学はこの単位操作を骨格として十分に肉をつけられ、幅の広いものに成長したことはアメリカでもわが国でも変わらない。それは後述するとして、上記の内容は当時としては正に画期的なものであったにちがいない。

既成の化学工業について多種多様の化学工業製品の製造法を教えるというそれまでの工業化学の教育法は急速に単位操作を中心とする化学工学の教育法に切り換えられた。大学で学んだ製造法は卒業後の化学工場ではすでに陳腐化しているというのが理由であった。かくてアメリカは工業化学科あるいは応用化学科を廃し、化学科と化学工学科に切りかえたことを誇りとした。しかし、今日アメリカの識者は自国の chemical engineer が化学に弱いことを欠点と考え、chemistry と engineering の combination の重要性を強調している。鉄のカーテンは依然として残っていたようである。これは単位操作が物理的变化を与える場合に片寄っていたためばかりではない。この点は後述のようにその後しだいに改められ、今日では反応装置の設計も化学工学の不可欠な要素となっていることから明らかである。問題は装置やプラントの設計、建設、運転、管理の面のみを強調しすぎて、プロセス、ことに化学反応が主と