Mechano-Chemistry と 化学工学*

久 保 輝 一 郎**

1. ま え が き

火薬の成分を乳鉢で摩砕すると爆発するとか、マッチの軸とマッチ箱とを摩擦させると発火するというような事例はわれわれの身近に常に行なわれている Mechano-chemical な現象である。このように Mechano-chemistry とは、固体物質が摩砕、剪断、圧延、衝撃などの方法で加えられた機械的エネルギーを、内部に保有することによってそれ自体の物理化学的性質に変化を起こすとか、周囲に存在する液体・気体物質に化学的变化を起こさせるとか、さらに固体内部における物質の拡散やそれに伴う相転移や化学反応などの化学の状態に影響を及ぼす現象を対象とする化学の分野である。

その際起こる化学の状態の変化の度合は、物質の種類、結晶構造の様式・完全性、機械的操作の方式、物質の状態変化の度合などによって著しく異なるが、この現象は無機化合物、有機化合物（とくに高分子物質）、金属などの広汎な分野において認められ、最近はとくにそ

の工学的意義も重要視されるにいたり、今後発展を予想される分野である。

この Mechano-chemical な問題については、実験の境界条件が複雑であり、また関連する分野が非常に広いので、それらに共通する関係を求めることは困難で、固体の偏形の度合と固体エネルギーの変化の研究は、まったく系統的に行なわれていない。

mechano-chemical な現象を最も古く実験的に研究したのは、Carey Lea (1893) である。すなわち、7 万気圧の下でも変化・分解せずに昇華させることのできる HgCl_2 が、モルタル中で軽く摩砕されると部分的に分解することを見出した。また AgCl , AgBr , AgF は赤熱融解しても分解しないが、摩擦で剪断ストレスを少し加えると分解して、 Ag を析出する。 N_2 と H_2 との混合気中で金属の摩擦によって NH_3 が、 CO 気中で鉄板の摩擦で $\text{Fe}(\text{CO})_5$ が生成することなどの現象もある。これらは、光や熱によっても容易には起こり得ない反応が、摩擦のような機械的エネルギーによって、金属内の格子不整を発生させ、化学反応を誘起した mechano-chemical な現象である。

ここには、化学工学において単なる物理的操作と考えられている摩砕（粉碎）・摩擦などの工程が、物質の物理化学的な性質にどのような影響を及ぼすかについて、諸種の事例をあげて記述する。

2. 爆轟衝撃と化学的性質の変化

爆轟衝撃は爆発性の物質を用いて衝撃的に加圧を行なう操作であるが、これによって粉碎（または形状変化）と、加熱（きわめて短時間）とが同時に起こる。この操作は他の機械的操作とかなり異なり、特異な表面化学的な性質をもつ物質をつくることができる。

爆轟衝撃による金属や金属酸化物の粉体の成形、加えた圧力と成形体の比容積との関係・電気抵抗の変化などのほか、硫化亜鉛¹⁾、グラファイト²⁾の化学的性質や、金属チタンとアセチレンブラックから固相反応による炭化チタンの合成³⁾、炭化チタン焼結体の製造⁴⁾などの研究がある。粉体自体の化学的性質の変化については、アセチレンブラックについて研究され⁵⁾、爆轟衝撃によってつぎの化学的諸性質の変化が観測されている。

図1 窒素中でコロガリ摩擦をした銅板の空気中での酸素の吸着

* 昭和41年2月2日 受理

** TERUICHIRO Kubo 東京工業大学

- 1) 見掛け密度の増大
- 2) よう素吸着量の増加
- 3) 比表面積の増大
- 4) 着火温度の低下
- 5) 被酸化性の増大
- 6) 接触分解能の増大
- 7) カーボンストラクチャーの崩壊
- 8) X線回折図形の鮮鋭化

3. 摩擦と化学反応

摩擦によってストレスをうけている金属では、そこに起こった格子不整（結晶格子の塑性偏形など）が、化学反応を誘起する。ストレスのない結晶格子中には、格子の弛緩部分（Lockerstellen）が統計的に分布しているが、塑性偏形を起すとその部分に弛緩部分の数が非常に増大する。そのためそこにある金属原子が活性化されて、周囲のガス・液体・固体などの他の原子と低温でも化学的結合をおこすようになる。

鋼板を室素中で約2時間コロガリ摩擦を行なった後、空气中で酸素の吸着を調べると、270倍に急増する⁶⁾（図1）。

この mechano-chemical な現象の原因として、湿気と温度が考えられていたが、乾燥空気中でも、また液体空気の温度でもこれがおこることから、もっぱら塑性偏形による活性化が原因とされている。しかし湿度・温度・ガス圧などは二次的影響を与えることは確かである⁷⁾。

4. 摩擦と嵩容積・密度

摩擦と嵩容積との関係については、単調な増大または減少を示さず、摩擦時間の長くなるにつれて、波状の曲線を示すことが測定されている。

図2はカオリナイト⁸⁾をボールミル(Betriebsmühle)で摩擦した結果であり、図3はNaCl⁹⁾についての測定で、両者は同様な形状を示している。後者については、比表面積（図4）、溶解熱（図7）と類似した傾向である。

同様なことは高純度ニッケル粉¹⁰⁾、軟鉄粉¹⁰⁾、電解銅粉¹⁰⁾についても認められている。

密度の変化については、カオリナイト、木節粘土、ハロサイト、滑石などの場合に摩擦とともに急激に低下し、変曲点を経てゆるやかな低下となり、ついでほぼ一定値に近づく¹¹⁾。

5. 摩擦と比表面積・粒度分布

摩擦と比表面積（BET法）との関係も、単調な増大

図2 カオリナイトの嵩容積と摩擦時間

図3 NaClの嵩容積と摩擦時間

図4 NaClの比表面積と摩擦

図5 電解銅粉の粒度分布と摩擦

図6 電解銅粉(0.1mm以上)の粒径分布に対する添加物と摩砕の影響

図7 食塩の溶解熱と摩砕

図8 酸化亜鉛の反応熱と摩砕

図9 煅焼ドロマイトの成形物の圧縮強度と摩砕

または減少曲線を示さず、極大・極小のある波状曲線をたどることが示されている。

NaCl¹²⁾の場合、嵩容積・溶解熱の関係と同様に約4分までは似た曲線であるが、後に急昇し、その後前記2者の場合と異なった経過をたどるが、波状変化を示す点では、類似した現象である(図4)。

カオリナイト¹³⁾、グラファイト¹⁴⁾についても同様なことが認められている。電解銅粉¹⁵⁾の摩砕による粒度分布の変化(図5)については、図5から粒度分布の連続的变化は起こらないこと、また実験の範囲内では摩砕平衡に到達しないことなどがわかる。 $>0.100\text{mm}$ の部分は、始め9%のものが、少し低下した後約35%に増大する。これは摩砕過程で起こる粉体粒子の冷間溶接現象によるもので、摩砕の時間を長くしても無限に微細化が起こらないことがわかる。

同様な現象はニッケル粉、軟鉄粉の場合にも起こる。

不活性物質(MgO、グラファイト、ステアリン酸亜鉛など)を添加して摩砕すると、凝集(冷間溶接現象)が防止でき、粒子の大きさはさらに小さくなり、粒度分布の状況も変化する(図6)。添加する不活性物質の化学的性質と、凝集防止効果との関係も研究されている¹⁶⁾。カオリナイト、木節粘土、ハロイサイトについて微細化と再凝集の電子顕微鏡による研究もある¹⁷⁾。

6. 摩砕と化学的エネルギー

固体がうけた機械的操作によって、そのエネルギーの変化を知るために、溶解熱、反応熱などを測定した研究がある。

NaClを摩砕して摩砕粉の水への溶解熱を測定する(図7)。図の縦軸は 500°C に熱して摩砕しない試料の溶解熱(1140cal/mol)を基準としたもので、それに対して約9%の増大が認められる。極小が基準線に戻らないことから、摩砕の過程でエネルギーの取得・放出があっても、取得したエネルギーの一部はNaCl中に残っていることがわかる。また粉体の結晶格子に格子不整が生成しても、摩砕の継続中にその一部が回復することも知り得る。この曲線の形状は嵩容積の変化とよく似ている。

ZnOの2N塩酸への溶解熱の変化(図8)も近似した曲線の形状を示している。

このような現象はつぎのように説明することができる。

固体を摩砕してゆくと、摩砕方法の様式や程度によって、それに相応したエネルギー量が固体中に蓄積され、同時にかなりの部分は熱エネルギーに変化する。蓄積されたエネルギーは、外部表面の著しい変化と結晶格子に局所的に複雑な格子不整を起こす。摩砕が継続して行なわれてゆくと途中で粒子の凝集などによって取得したエ

エネルギーの消化減少も起こるが、結晶化熱程度に蓄積されると、格子不整の新たな分布と正規格子の発生が起こる。これはある一定の変形の段階において、エネルギー取得よりも、エネルギーの減少が小さいものとする考え得られることである。このようにして変形の過程で全エネルギーあるいはその変化が極大と極小をとることとなる。

この関数的関係をさらに明らかにするには、機械的変形の過程におけるガス吸着や断熱的測定による研究が必要である。

7. 摩砕その他の冷間加工と焼結性

か焼ドロマイトを摩砕したものを成形 ($5t/cm^2$) とさらに焼結 ($1150^\circ C$) したものの圧縮強度の増大と摩砕時間との関係をみると、前者 600%, 後者では 1000% の増大がみられる¹⁸⁾ (図 9)。

溶解炉の内張りにか焼ドロマイトを用いる場合、あらかじめ室温で何回も圧縮や圧延を行なうと、比較的低い温度で焼結し、圧縮強度が増大する (図 10)。圧延のような冷間加工を繰返したもの (点線) は、その操作を行なわないもの (実線) に比べて、 $1300^\circ C$ の焼結で約 5 倍の圧縮強度を示す。これは実際の作業でスタンプすることの効果を裏付けるものである。

同様な摩砕による焼結物の圧縮強度の増大は、けい酸アルミニウム、酸化亜鉛、酸化カルシウム、鉄粉などについても認められている。

8. 摩砕と化学反応性

8.1 固相—気相の反応

ここでは主として摩砕と化学反応性 (酸化) を述べるが、ここに示されているように、摩砕時間と酸化速度との関係は簡単な曲線で表わすことはできず、実験の範囲では、少なくとも著しい最高値が現われている。

金属アンチモン粉の摩砕と加熱酸化： あらかじめ中性ガス中で約 $300^\circ C$ に熱し格子不整を除いた粒径約 $0.1mm$ 以下のアンチモン粉末を、空気中で $450^\circ C$ に加熱すると、 Sb_2O_3 と Sb_2O_5 とが生成し、それらの量と加熱温度との関係を図 11 中の A 曲線で示す。これを摩砕したもの、それを B 曲線で示す。B 試料では $270^\circ C$ で部分酸化がまず起こり、 Sb , Sb_2O_3 , Sb_2O_5 混合物が生成するか、 $450^\circ C$ 以上は A 試料と同様に酸素を徐々に吸収し、 Sb_2O_3 と Sb_2O_5 の混合物になる。

$270^\circ C$ での酸素の結合量と摩砕時間との関係は図 12 のようになり、 $1.5hr$ と $2.5hr$ に山ができる。

この活性化の原因は、粒径の変化と格子不整による活性化とが考えられる。しかし $1時間$ 摩砕し図中の A 点の

図 10 ドロマイトの冷間加工と成形物の圧縮強度

図 11 アンチモン粉の空気中での加熱酸化

図 12 アンチモン粉の酸化に対する摩砕の影響 ($270^\circ C$) (振動ミル)

表 1 粉砕による Fe_2O_3 の増加

実験	No. 1	No. 2
① 粗粉	タイラーハンドクラッシャーで粉砕 2.68%	厚紙で包み鉄乳鉢で粉砕 2.67%
② 微粉	①をメノウ乳鉢で粉砕 3.26%	①をメノウ乳鉢で粉砕 3.11%

表 2 粉砕による結晶水の変化

	硫酸マグネシウム	リン酸ナトリウム	カリ明ばん	塩化バリウム
摩砕しない結晶	51.85%	58.61%	45.47%	14.95%
2時間摩砕後	43.30 "	56.76 "	44.98 "	17.06 "
摩砕による増減	-2.55 "	-1.85 "	-0.49 "	+2.11 "

図 13 銅粉の酸化 (250°C) と摩砕 (重量変化は非摩砕試料に対する値)

図 15 活性化した軟鉄粉 (R2 粉) の 1N-HCl への溶解速度と放置時間

図 16 カオリナイトの摩砕と 0.75N-HCl, 48 hr の溶解性

図 14 軟鉄粉 (R2 粉) の 1N-HCl 中へ溶解速度に対する摩砕の影響 (振動ミル)

試料をつくり、また別に 1 時間摩砕後 A 中で 300°C、1 時間加熱したのち酸化すると酸化が起こらず B 点になる。これは未摩砕のものと同じである。B 点の試料は顕微鏡から粒径変化が起っていないことが明らかであるので、重量増加で示される活性化は、粒径変化による表面の発生によるものではなく、格子不整によるものであることが明らかになった。

粉碎効率の異なる別の形式のミルを用いても同様な現象がみられる。しかし山の位置は効率によってズレができる。

電解銅粉： あらかじめ加熱処理して格子不整を除いた 0.2~0.3mm の平均した粒径の粉末を、空气中で 250°C に加熱したときの重量増加 (%) (a)) とその未摩砕試料に対する重量変化量 (%) (b)) とを図 13 に示す。酸素吸収は 15 分摩砕で最高になり、150 分では未摩砕のものと同等に、150 分以上では重量増加量は低下する。したがって 150 分以下では活性化、以上では不活性化が起こることがわかる。

岩石・鉱物： 岩石・鉱物の化学分析を行なう際、粉碎の操作によって、FeO 成分が酸化されて Fe₂O₃ になる例が認められている。すなわち 2 時間の摩砕で FeO の 20~30% が酸化され、また表 1 の実験例がある¹⁹⁾。

これを防止する目的で、各種火成岩について水、アルコール、四塩化炭素などで湿潤させて摩砕すると、N₂ や CO₂ 気中で摩砕すると FeO の減量が少なくなる²⁰⁾。

摩砕によって結晶水の量の低下も認められている (表 2)²¹⁾。

マグネサイトと硫化水素との反応²²⁾、
マグネサイトを摩砕すると、20分の摩砕
で硫化水素との反応が極大を示す。

8・2 固相—液相の反応

摩砕によって固相—液相の反応に与え
る影響の例をつぎにのべる。

鉄粉の塩酸中への溶解速度²³⁾： 鉄粉
を還元剤として用いる際、酸への溶解速
度は重要な因子となるが、保護ガス中で
摩砕した鉄粉の半量が塩酸 (1N) 中に
溶解する速さと摩砕時間との関係を図14
に示す。図中右下に摩砕の初期の溶解速
度の変化を示す。図から、摩砕の初期に
は少し溶解速度が低下するが、Aまたは
 H_2 のいずれのガス中の摩砕でも溶解速
度は非常に増大し、最後には自然性とな
り測定不能になる。この化学反応性の増
大は粒径の大小にはほとんど関係がない
(別の実験) ことがわかっている。した
がって塑性偏形による格子不整の発生と
考えられる。格子不整を回復させるため
に、 400° 、 600° 、 $800^\circ C$ に粒生長の起
こらないようにして加熱した時の溶解速度
は (図 15)、加熱時間の増
大—格子不整の回復とともに
著しく低下する。

**カオリンの塩酸中への溶
解速度²⁴⁾：** カオリンを乾
燥状態で摩砕すると、比表
面積は 400 時間位までは増
大し、それ以後は低下す
る。他方塩酸 (0.75N、室
温、48 時間) への溶解量
は、比表面積の極大値を越
えた後でも増大している

図 17 CoO-TiO₂ 系の反応温度と摩砕

図 18 $CaCO_3$ の分解 (0.5 torr) と摩砕

図 19 摩砕機の種類と摩砕効率

図 20 摩砕用材料と摩砕効率

(図16)。溶解量の増大の始めの部分は比表面積の増大による寄与も考えられるが、単位面積当りの溶解量の増大は、粒子表面に起こった格子不整によると考えられる。

8・3 固相—固相の反応

摩砕によって固相の粉末反応が影響を示した例は数多く示されているが、一例を CoO-TiO_2 系の反応について述べる(図17)²⁵⁾。図中 C は CoO 、T は TiO_2 を意味し、その右下の数字は摩砕時間を、C、T の前の数字はモル数を括弧はあらかじめ成分を混合して摩砕したことを示す。図からわかることは i) Co_3O_4 の分解温度は摩砕によって影響は少ない ii) CoO を摩砕すると CoTiO_3 の生成温度は約 200°C 低下する。iii) TiO_2 の摩砕は CoO はど大きな影響はない。iv) 混合摩砕は CoTiO_3 の生成温度を著しく下げる。v) CoTi_2O_5 の生成温度は摩砕によってあまり影響されない。

この反応はかなり高温で起こるので、格子不整の回復による影響も考えられるから、影響の少ない結果も含まれているが、一般に固相反応は促進されるといえる。

混合摩砕による混晶の生成²⁶⁾：難溶性の炭酸塩を混合摩砕すると混晶が生成する。

CaCO_3 と水溶性の Li, Na, K, Rb などの硫酸塩、炭酸塩、硝酸塩とを混合摩砕すると、ある程度反応する。

9. 固体の分解反応

固体の熱分解に対する摩砕や圧延の影響については、つぎのような研究がある。

CaCO_3 の熱分解²⁷⁾ (図18)：摩砕の時間と、熱分解によって発生した CO_2 の量から求めた分解率(%)との関係を見ると、摩砕が3分、圧延が20回位のときはかえって発生量が少ないが、それ以外のときは分解が促進される。(圧延の影響の図は省略した)。

カオリナイトの脱水：カオリナイトを摩砕すると、無定形化したX線回形を示すと同時に、構造水の放出温度が低下する。摩砕の全工程中水分は12.9%で一定であるから、化学的分解は起こっていないものと考えられる。

10. 塩基交換反応

摩砕によってけい酸塩類の塩基交換容量が変化することは、カオリナイト、木節粘土、ハロイサイトなどについて調べられ、摩砕とともに塩基交換容量は増加し、極大を経て徐々に減少して一定値に近づく。この曲線の変

曲点と摩砕による密度変化のそれとは、ほぼ一定の摩砕時間で起こり一致している²⁸⁾。

11. 摩砕の様式と摩砕用材料²⁹⁾

以上述べた摩砕の実験においては、摩砕機の機種についての記載を行なわなかった。これは記述の煩雑さを避け摩砕の影響の傾向を示すためであったが、これは当然摩砕機の形式によって摩砕の効果は異なるものである。摩砕機の影響をけい酸アルミニウムの成形物の強度についてしらべた結果を図19に示す。図中の3種の摩砕機の中、円板粉砕機は最も効率がよく、2、3分の摩砕でけい酸アルミニウムの活性化が起こる。振動ミルでは1時間が必要でパルペライザーでは30時間でも最大活性化に到達しない。

摩砕用材料の影響は、パルペライザーについてしらべたが(図20)、図中の3種のボール材料で最大、最小値があらわれるが、その位置と幅はおおの異なる。この最大と最小の発生は、摩砕による粒子表面から起こった格子不整の発生と回復が大きな役割を果たしているものでこれについては前述した。

む す び

以上は主として mechano-chemical な現象として固体自体だけに関連する事柄について述べたが、固相に起こった mechano-chemical な効果によって周囲の液体が顕著な影響をうけることも最近多く認められている。たとえば、 NaCl 、 NH_4Cl 、 BaSO_4 、 CaF_2 などの分散系におけるスチレン、MMA、アクリロニトリルの mechano-chemical な重合や、グラファイト、石英、カーボンブラックなどの摩砕で生じた新鮮断面におけるグラフト重合など多くの研究がある。

このように機械的手段によって固体自体におこる変化が、周囲の気相・液相・固相との相互作用を促進して、従来極限状態だけでしか起こらなかった現象を容易に起こすとか、化学的な作用を異常に促進することができるならば、mechano-chemistry の意義内容が一層認識されるようになるであろう。またこれによって従来解釈のできなかった事象の解明もできるであろう。

これらの mechano-chemistry は、固体を扱う化学工学の分野と、固体化学との中間領域として今後発展することが予想され、さらに mechano-chemical な方法を合成化学あるいは触媒的手段に用いることが可能となれば、これは工学的にもさらに重要な意味をもつようになると思われる。

引用文献

- 堀口・野村：理研報告，39，211，257 (1963)
- 野村，堀口：工業火薬協会誌，24，26 (1963)
- 堀口，野村，片山，舟山：第58回理研学術講演会講演予稿集 p. 19 (1962)；Horiguchi, Y., Y. Nomura: *Bull. Chem. Soc., Japan*, 36, 486 (1963)
- 堀口，野村，舟山：工化誌，68，910 (1965)
- 堀口，野村，舟山：工化誌，68，170 (1965)
- Fink, M. u. Hofmann: *Archiv Eisenhüttenwesen*, 6 [4], 161 (1932)；*Z. Metallkunde*, 24 [3] 49 (1932)
Fink, M.: *Trans. Am. Soc. Metals*, p. 602 [1935], *Stahl u. Eisen*, 52 [2] 42 (1932)
- Peter, K.: *Symposium Zerkleinern*, S. 78, Verlag Chemie (1962)
- Gregg, S., K. Hill and T. Parker: *J. Appl. Chem.*, 4, 631 (1954)
- Naeser, G., W. Scholz and A. Friedler: *Kolloid-Z.*, 188, 147 (1963)
- Naeser, G.: *Arkiv für das Eisenhüttenwesen*, 34, 871 (1963)
- Takahashi, H.: *Bull. Chem. Soc., Japan*, 32, 235 (1959)
- Naeser, G., W. Scholz and A. Friedler: 前出
- Laws, D. and J. Page: *Soil Science*, 62, 319 (1942)
- Gregg, S. L.: *Kolloid-Z.*, 189, 5 (1960)
- Naeser, G.: 前出
- Quatinetz, M., R. Schafer and C. Smeal: *Trans. Metallurg. Soc., A. I. M. E.*, 221, 1105 (1961)
- Takahashi, H.: 前出
- Naeser, G., W. Scholz and A. Friedler: *Ber. d. Keram. Ges.*, 39, 280 (1962)
- Knight, N.: *Chem. News*, 97, 122 (1908)
- Hillebrand, W. F.: *J. Am. Chem. Soc.*, 30, 1120 (1908)
- Bleeker, I. B.: *Chem. News*, 101, 30 (1910)
- Schrader, R. and G. Tetzner: *Z. anorg. allg. Chem.*, 309, 55 (1961)
- Naeser, G.: *Arkiv für Eisenhüttenwesen*, 34, 871 (1963)
- Gregg, S. J., T. W. Parker and M. J. Stephens: *J. Appl. Chem.*, 4, 633 (1954)
- 久保，加藤：工化誌，66，403 (1963)，67，1502 (1964)
- 高島，横路：石膏と石灰，55，267 (1961)；その他 久保輝一郎：化学と工業，18，901 (1963) 参照
- Naeser, G., W. Scholz: *Ber. d. Keram. Ges.*, 39, 106 (1962)
- Takahashi, H.: *Bull. Chem. Soc., Japan*, 32, 235, 245, 252 (1959)
- Naeser, G., W. Scholz and A. Friedler: *Ber. d. Keram. Ges.*, 39, 280 (1962)

化学工学の三要素

3月号矢木先生巻頭言の「大学教育は訓練，学問体系，研究の3つの脚の調和の上に成立つ」というお話，また今月号水科先生巻頭言の「化学工学の三次元的広がり」を興味深く拝読し，化学工学の三要素とそのバランスを考えたので貴重な紙面をお借りしてのべてさせていただきます。

(A)は化学工学というものを，物理，化学を基礎とし，これに経済的評価を加えて化学工業における最大収益を獲得する手段を研究する学問と考えた場合である。図の矢印は化学工学が雑然とした化学工業技術の物理的体系化に始まり，単位反応を経て反応工学という形で化学をとり入れそれに最適設計，最適操作という形で経済的評価を加えていった化学工学発展の道筋を示したつもりである。人によってはさらに Chemical な側，あるいは Economics の側に近寄るべきだといわれるかもしれないがそうした意見が極めて単純にモデル化されているとはいえ三角図表上のべ

クトルとして定量的(?)に表わされるのがみそである。

そうして化学工学者個人としても物理あるいは化学に接するばかりの pure な所から出発して Economics の極に向いついには社長になる人もあれば，原価計算の仕事から出発してアカデミックな physicist or chemist になる人がいても一向かまわず，ただ方向性がはっきりしていればよいように，工業化学と共存する日本の化学工学が三角図表内の平面をどこまでカバーし将来はどの方向に進むべきかを考えることも大切ではなかろうか。

(B)は化学工学というものを工学の一部門として化学プロセス・プラントを対象としてその design と operation，それに必要な materials を研究する学問と考えた場合で (A) 同様個々の装置の design のみに重点のあった段階からプロセス，プラントの design, operation さらに materials を重視する方向へ発展してきた道筋を図上で考えることができる。

化学工学がその独自性を化学工業を対象としていることにのみ求めるならばその研究方法はどこまでも基礎科学にあおぎしかもその2番煎じ的な状態を越えることができず基礎科学→応用科学→工学→技術→技能といった一方交通的な学問の序列がたち切れないのではないかと，化学工学は対象の独自性と共に方法の独自性を確立すること（ひとりよがりのものでなく）が現在の急務ではないだろうか。

[T. H.]