

二 プロセスシステム工学の現状と将来の展望 二

The Present Status and Future Prospects
of Process Systems Engineering



講師 京都大学工学部教授
高松 武一郎
Prof. Dr.
Takeichiro Takamatsu
at Kyoto Univ.
抄録 技術開発本部
平尾 俊 策

This is a summary of the lecture spoken by Prof. Dr. T. TAKAMATSU of Kyoto Univ. at the 30th anniversary of our foundation. He emphasised as follows: Process Systems Engineering is an academic and technological field related to methodologies for chemical engineering decisions, and it should be made progress to the direction of seeking the truth by means of "Synthesis". In this article, Process Systems Engineering are referred to its definition, history, general structure and future prospects.

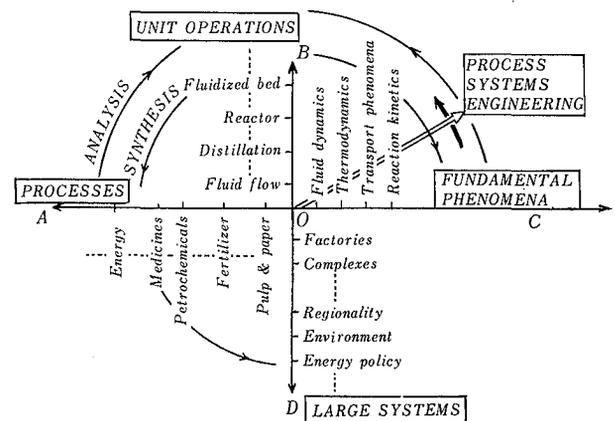
1984年8月1日、当社の創立30周年記念行事の一環として、大阪日本生命中之島研修所にて、約300名のユーザー各位を迎え、記念講演会を開催いたしました。本講演会において、プロセスシステム工学の世界的権威であります京都大学工学部高松武一郎教授より、首記演題にてご講演頂きました。本文は、このご講演内容の要旨をまとめたものです。

1. プロセスシステム工学の定義

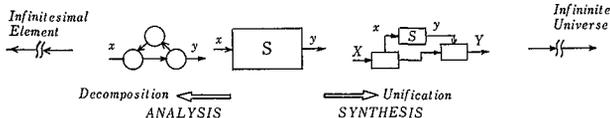
'82年京都で、化学工学協会主催にて、「プロセスシステム工学」に関する国際シンポジウムが開催され、続いて'85年、英国での開催が予定されているように、プロセスシステム工学（以下PSEと略す）は、化学工学という学問分野における一つの核として発展してきた。技術用語の意味内容は、時代やその用語の用いられる分野の状況により変化するがPSEという用語は、1963年、AIChE（米国化学工学協会）のシンポジウムシリーズの中で、単位操作の動特性の解析分野の総称として初めて用いられた。システムとは、一つの具体的な物ではなく、一つの「見方」であり、多くの部分より構成され、全体として何らかの目的条件を達成するものをいう。従って、システム工学とは、このシステムの目的、条件を達成させるべく工学的意思決定を行う方法論であると表現できる。一方、PSEにおいては、単位操作、化学プロセス等の明確な対象を有し、これら対象物に蓄えられた解析情報を効率的に、一般的方法論と結びつけることが重要となる。従って、PSEとは、エネルギー、物質の変化全般を対象とする広義の化学プロセスにおいて、その計画、設計、運転、制御の工学的意思決定を行うための方法論と定義できる。

2. 化学工学とプロセスシステム工学

化学製品を生産する化学プロセスは無数にあるが、それらは反応操作、汜過操作等のある限られた数の単位操作より構成されている。つまり、全ての化学プロセスは第1図O A軸からO B軸に示すように、単位操作の結合系であり、化学プロセスを合理的に設計、運転するためには、単位操作としての工学的確立が必要であった。これが化学工学という学問分野の出発点である。ところが、単位操作の改良、新しい単位操作の開発のためには、第1図O B軸からO C軸に示す単位操作を構成する基礎現象の解析が必要となり、化学工学の分野において移動現象論、流体力学等の現象解析が、1950年代より重視されるようになった。ここで、基礎現象の解析知識のみで、単位操作、ひいては、



第1図 プロセスシステム工学と化学工学
Fig. 1 Process Systems Engineering and Chemical Engineering



第2図 解析と合成
Fig. 2 Analysis and Synthesis

化学プロセスの正当な工学的決定が可能かという疑問がおきる。工学分野において、現象を緻密に解析していくことは重要なことである。しかし、化学工学の最終目的が化学プロセスの設計、運転にあるとすれば、基礎現象の合成としての単位操作、単位操作の合成としての化学プロセスを合理的に作り出す学問分野が必要となる。この合成のための学問分野こそPSEであり、PSEは第1図の全象限を回転するものであり、OC軸からOB軸、OB軸からOA軸をとりつづ重要な役割を果たす。新しい化学工学の展開のためには、現在までバルクとしてとらえていた基礎現象を、よりミクロな分子レベルに着目した現象解析と同時に、より大規模なシステムへの着目が必要とされている。つまり、全ての化学プロセスは、経済性のみならず、工場、地域社会というようなより大きいシステムに対して合理的であることが要求される。また、PSEは第1図OD軸に示すプロセスを越えた地域、国家レベルで、環境問題、エネルギー問題等のより広範な問題における工学的決定の上でも寄与していくことが期待される。

PSEは合成のための学問分野であると述べたが、第1図に示すように合成と解析は、経路として逆方向であるものの、合成のためには解析情報が必要である。第2図に合成と解析の概念を示す。解析とは対象をいくつかの部分に分解し、その間の因果関係および部分の機能、特性を把握することである。無限小の要素に分解された無限大の情報を得ること、つまり、完全な解析的情報を得ることは現実的には不可能である。一方、合成とは計画、運転、設計、制御の工学的意思決定を意味するが、合成しようとするシステムは、そのシステムを包含するより大きいシステムの部分であり、その必然性により、合成しようとするシステムの目的、条件が決定される。ところが、無限大のシステムからの必然性を把握することは事実上不可能である。従って、解析的情報、合成の目的、条件には、必ず不確実性が存在しているという認識が大切である。そこで、

- 1) できるだけ詳細な解析情報と、
- 2) できるだけ大きなシステムからの必然性を把握して、
- 3) できるだけ早く意思決定する

ことが理想的であるが、どれを優先させるかという検討も必要となる。このためには、多大な情報量を取扱う必要がある。欧米ではComputer Application in Chemical Engineeringという分野があるが、内容的には、ここで述べるPSEと同じものである。これは、PSEの発展が電算機の発展、活用とともに歩んだことを示している。

3. プロセスシステム工学の方法論

PSEの意義はどのような対象に対しても共通のアプローチの仕方ができることにあり、第

3図にPSEの一般的な方法論の構造を示す。システムの意思決定を行なうにあたって、まず関連する現象、事象を選定することが第一段階となる。例えば、収率に着目する定常反応条件と、異常反応防止に着目する反応条件とは、おそらく、その状態や変数の種類も異なるように、合成の対象の目的、条件を満足させるための必要かつ十分な現象、事象を取り上げねばならないが、先見的にこの選定を行なう方法は、今後の研究の進歩にゆだねざるを得ない。次に、その選定された現象、事象の因果関係構造を仮定し、これを定量的に表現するにあたって、欠けている事項を観察、実験で補うという方法をとる。ここまでのステップは、対象に対するモデリングと呼ばれる。次に、この定量的表現を用いて、工学的意思決定を行なう。ところが、この定量的表現の中には、不確実性を含むので、意思決定した結果への、その不確実性の影響を考察することが重要である。この不確実性のバックアップを、設計余裕とか制御系に頼るだけでなく、対象の目的、条件は本質的に多くの不確実性を持つものであり、バックアップの考察で満足すべき結果が得られない場合は、再度、対象の目的、条件および関連する現象、事象を吟味することが必要となる。つまり、モデリングと合成の思考、検討段階を分離することなく、繰り返しフィードバックしながら行なうことがポイントである。

4. プロセスシステム工学の従来の成果

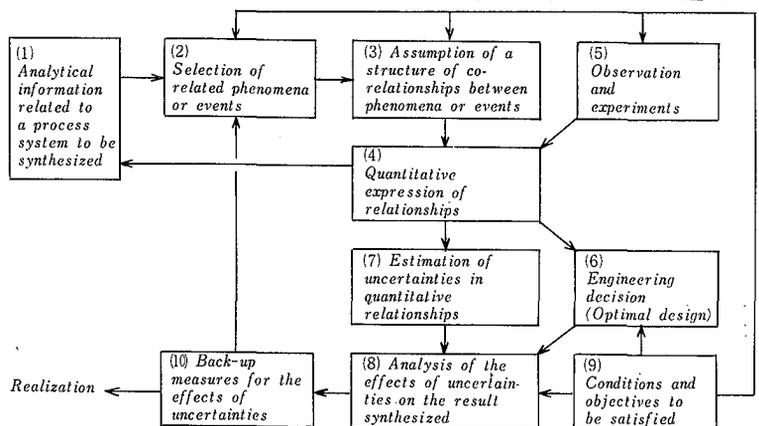
1) プロセスシステム工学の誕生

化学工学の分野では、昔から最適経済設計の理念は存在していたのであり、流体輸送における最経済的流速の存在、蒸留塔における最適環流比の問題等が、化学工学の教育の中に取り上げられていた。しかし、これらの最適性の多くは、数値計算や経験から得られたものであった。1950年代になって、ダイナミックプログラミングやPontryaginの最大原理などの最適化の数理的手法が開発され、これらの数理的手法を単位操作の最適設計に応用することにより、1960年頃、PSEの一部が誕生したといえる。

一方、プロセス制御という流れとして、単位操作に対するPIDフィードバック制御が、ほぼ同年代に誕生した。

2) 不確実性の考察

数理的手法により得られた結果は、用いた数式モデルの構造やモデルの持つ不確実性に依存するところが多く、ある平均値を用いた結果を現実の単位操作にそのまま適用し



第3図 プロセスシステム工学の方法論
Fig. 3 Methodology of process Systems Engineering

かねるといふ評価があった。そこで、用いた数式モデルの不確定性を全てパラメータの値の変動に集約したとき、そのパラメータの値の変化が得られた結果にどのような影響を与えるかといった研究が活発に行なわれるようになった。また、プロセス制御の流れでは、不確定性のバックアップとしての制御系における必要制御精度について論じられた。

3) システム境界の拡大

単位操作の最適な入出力条件の決定や評価は、単位操作独自の立場からはなされ得ず、単位操作の結合系であるプロセスの立場からなされるべきものである。また、この発展として、単位操作からプロセスへ、ひいては単一プロセスからより大きいプロセスの結合系へと、次第により大きなシステムの計画、設計を合理的に行なうべくPSEは、展開されてきた。このプロセスにおける物質収支、エネルギー収支、単位操作の決定変数などの関係をシミュレートするというようなPSEの展開を可能にしたのは、電算機の著しい発展であり、数多い変数に関する膨大な計算処理が極めて短時間でこなえるようになったことによる。従って、PSEの内容の中で、CAD(Computer Aided Design)、CAO(Computer Aided Operation)等のプログラム開発およびその基礎となる論理の研究も、極めて重要な位置を占める。

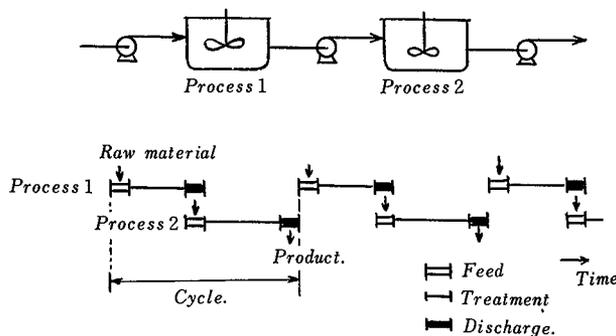
4) 単一目的から多目的に

従来PSEは、プロセスシステムの計画、設計問題を経済的評価のもとで解決する分野を中心に展開してきた。しかし、対象とするプロセスが大規模になるにつれ、単なる経済評価のみならず、環境への影響、安全性、柔軟性などに対する評価も加えた、いわゆる、多目的評価のもとでのプロセスシステムの合成が社会的に要求されるようになった。ここで、安全性、柔軟性等に関しては、計画、設計の問題より、運転、制御に関する意思決定の問題が大きく浮かびあがってくる。従って、現在PSEは従来、設計を中心に考えられてきた方法論から、設計、計画問題と運転、制御問題とを一体化して解決しうる合成の有効な方法論にチャレンジしていく段階にある。

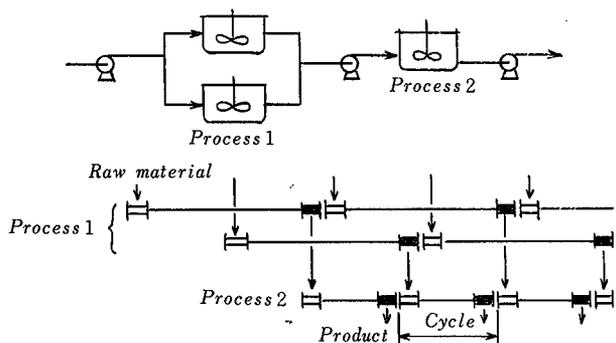
5. バッチプロセスシステム工学へのアプローチ

近年、多品種少量生産の観点からバッチプロセスの利点が見直されてきている。これはプロセスに対する生産量や品質の変更などの要求に対する柔軟性、一つのプラントを多目的に利用できることなどによる。多人数複雑操作といった感のある従来のバッチプロセスから、最近急速に進歩しているマイコン、ロボットを利用しながら、理論的操作に基いた少人数自動化による新しいバッチプロセスが期待されている時代ともいえる。従来、化学工学では、連続プロセスを設計することに比重が置かれていたが、バッチプロセスは、連続プロセス以上に、自由度が大きく、先に述べた設計問題と運転問題を一体化して解決していかねばならない。これらの点から、PSEの一部として、スイスE.T.HのRippin教授らによっても、その研究が展開されつつあることは喜ばしいことである。

バッチプロセスシステム工学の必要性を、2工程よりなる簡単なプロセスを例にとって説明する。各バッチ装置

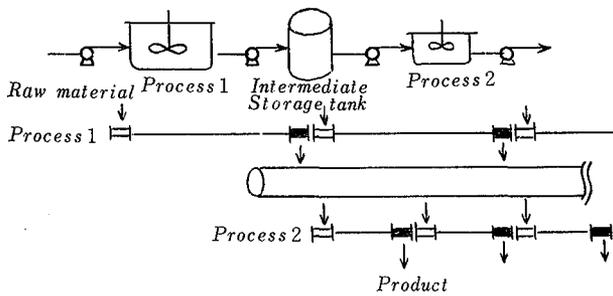


第4図 非重複運転計画
Fig. 4 Non-overlapping Operation Schedule



第5図 重複運転計画
Fig. 5 Overlapping Operation Schedule

は、流入、処理、流出という操作を繰り返し運転されるものとして、最も単純なバッチプロセスを第4図に示す。このプロセスでは、工程2から製品の流出が終わるまで工程1の装置への原料の流入は行なわないとする。このようなバッチプロセスでは、ポンプのような工程間移動を目的とする間欠の連続装置の能力を適当に調節したとしても、バッチ装置からみるとかなり長い遊休時間を持つ生産周期となる。いいかえると、生産効率は悪いが、変動に対して柔軟性があるプロセスといえる。次に、このプロセスの生産周期を短くする方法を考える。第5図に示すように工程1の装置の処理時間に比べ、工程2の処理時間が短いと仮定すると、工程1に並列に装置を設置し、等間隔に位相をずらして運転することにより生産周期が短縮でき、その結果小さなバッチサイズで生産要求を満たすことができるようになる。バッチ装置の遊休時間を減らすもう一つの方法は、第6図に示す工程間に中間タンクを設置することである。中間タンクの設置により、工程1からの出力は、直接工程2の入力とならない。従って、両工程のバッチサイズ、周期を等しく選ぶ必要がなくなり、生産要求に見合う処理能力を持つ装置を各工程に設置することが可能となる。以上のような生産周期、設備費、変動に対する柔軟性、操作性などの数多くの情報を合成することにより、より良いバッチシステムを合理的に設計、運転することが期待される。ここでは、バッチプロセス工学の必要性についての概念を述べたが、この方面の研究は、まだその数が少なく、今後

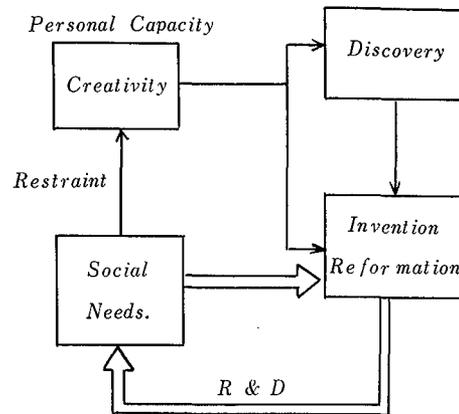


第6図 中間タンクを持つプロセスの運転計画
 Fig. 6 Operation Schedule of a Batch Process with Intermediate Storage Tanks,

の展開が期待される。

6. おわりにかえて

昨今 R&D (Research & Development) の方法論について、様々な論議がされているが、R&D の道具として、プロセスシステム工学的アプローチについて若干の考察を加える。R&D を論じる場合、一般的に個人の創造性がクローズアップされがちであるが、第7図に示すように、R&D の本質は、社会の要求という束縛の中で創造性に端を発した発見、発明を社会の中に具現化するためのプロセスと考えることができる。技術的可能性、経済性、市場性、



第7図 R&Dの構造
 Fig. 7 Structure of R&D

生産性、タイムリー性等の各方面からみた最終ゴールの選定、つまり対象の目的を不確定性を含みながらも決定することが最も大切であり、R&Dとは、この最終ゴールまでの経路であり、情報、データの製造プロセスといえる。

よく、学問とは真理の追求であるといわれるように、プロセスシステム工学とは、合成のための真理の追求であると表現でき、今後とも健全な発展により、社会に貢献していくことが期待される。