

## 特集 化学プラントのライフサイクル・エンジニアリング

特集

Chemical Engineeringは、プラントのハードウェア面とソフトウェア面の両側面の一生に関わるものづくりについて、「本質的な複雑性 (Essential Complexity)<sup>1)</sup>」を取り扱う工学である。そこには、Artificialな<sup>2)</sup>統合的システム (System of Systems ; SoS<sup>3)</sup>) を対象としたエンジニアリングという意味決定の積み重ねから成るアクティビティ全般を通じて、木を見ながら森をも見なければ解決できない課題が現在も山ほど存在している。

本特集では、ハードウェアとしてのプラントの一生にまつわるエンジニアリング業務プロセス全体を概観できる形で紹介することによって、本来あるべきプラントエンジニアリングのプロセスをライフサイクルとして統合するために必要な仕組みについて議論を展開する。そのためには、どのような業務・情報リソース連携が必要であるのか、逆にそのような連携を前提にできれば将来どのようなエンジニアリングがあり得るのかを考察するとともに、プラントのハードウェア面を支える技術的・情動的側面となるソフトウェア&ウェットウェア<sup>4)</sup>面に立脚したプロセス・プラント管理及びプロセス安全管理を具現した、プラントのライフサイクル・エンジニアリング実現につながる枠組みを考えたい。本特集が、我が国のこれからのプロセス産業のあり方を論じる足がかりとなることを期待する。

1) Brooks, F. P.: 人月の神話 狼人間を撃つ銀の弾はない, 20周年記念増訂版, 新装版, ビアソン (2002)

2) Simion, H. A.: The Science of the Artificial (邦題「システムの科学」), 3rd Ed., MIT Press (1996)

3) [https://www.sebokwiki.org/wiki/Systems\\_of\\_Systems\\_\(SoS\)](https://www.sebokwiki.org/wiki/Systems_of_Systems_(SoS))

4) もととの意は、ハードウェア・ソフトウェアに対するものとしての人間の頭脳のことを指すが、ここでは、Andy Hunt: リファクタリング・ウェットウェア 一達人プログラマーの思考法と学習法, オライリー (2009) が示唆する、達人の持つ直感・洞察・知恵・智慧のこと。エンジニアリング・センス。

(編集担当: 北島禎二) †

## プロセス・プラントライフサイクルエンジニアリング

瀧野 哲郎

### 1. はじめに

化学産業の製造は、プロセス合成、プロセス開発を中核とするプロセスライフサイクルにおいて創り出されたプロセス技術を、設計、建設、生産、保全の業務ステップからなるプラントライフサイクルへ技術移転することから始まる。日本でも老朽化プラントの問題が取り沙汰されるようになった今日、そのライフが60年以上となる場合があることを疑う人はいない。この間に、様々な変化、変更がおこなわれる。それは、操業に伴う設備の劣化、その復旧業

務としての設備保全、設備の更新、市場や競合状況の変化、それに伴う原料の切り替えや製品品質変更、増産や減産、合理化のための改修、さらにオペレーションの変更などであり、このプラントライフサイクルにおける変化、変更がプロセスの安定性やプラントの信頼性の喪失に繋がる現象を発現及び進展させる条件を作り出した時、プラント設備と操作条件の間の整合性が失われ、その結果、漏洩や事故として顕在化することとなる。

安定性と信頼性の喪失に繋がる現象とは、主に副反応、暴走反応や腐食反応などであり、それらの現象の発現及び進展に関わるプロセスパラメータと、結果に至るまでの因果関係は、技術移転情報としてプロセス設計業務ステップに伝えられ、プロセス設計業務において、安定性と信頼性の喪失に繋がる現象を、発現及び進展させないことを意図してプロセス構造、プロセス操作条件そしてプラントが設計される。しかし、60年に及ぶプラントライフサイクルは、初期設計段階における設計意図もしくは設計根拠を、不明瞭なものにするには、十分すぎる時間であり、そのようなプラントに対して変化、変更をおこなうことは、初期設計



Process/Plant Lifecycle Engineering

Tetsuo FUCHINO (正会員)

1985年 東京工業大学理工学研究科修士課程修了

1995年 同大学同研究科 博士(工学)

現在 東京工業大学物質理工学院応用化学系 准教授

化学工学会安全部会部会長

連絡先: 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

E-mail fuchino@chemeng.titech.ac.jp

2019年12月27日受理

† Kitajima, T.

令和元, 2年度化工誌編集委員(3号特集主査)  
東京農工大学工学部化学物理工学科

意図や根拠からの逸脱を招き、安定性と信頼性の喪失に繋がる危険性が増大する。さらには、プロセス技術そのものの変化、変更、それに伴う製品の変更や、プラントの流用がおこなわれる場合もあり、そのような変化、変更に対して、既設の設計根拠からの逸脱の有無の判断が必要となる場合もある。

ライフサイクルを通じて安全性を確保するということは、上記のような変化や変更に対して、常に安定性と信頼性の喪失に繋がる現象の発現と進展の要因となるか否かの判断が求められることに他ならず、今日その判断の論理性、合理性が求められている。それを実現するためには、プロセス技術情報はもとより、プロセス設計・プラント設計情報、それら設計の根拠情報、プラントライフサイクル業務結果、変化・変更の履歴とそれに対する安定性、信頼性情報を共有化する（情報を抽出し、電子情報に置き換え、必要な時にいつでも取り出すことを可能にする）ための仕組みが不可欠であり、そのためには、ライフサイクル業務機能自体の明示化、業務機能を発現するために必要となる情報と業務機能で創り出される情報の抽出とそれらの関連付け定義が急務である。

## 2. プロセスライフサイクルエンジニアリング

化学産業の製造は、製造機能であるプロセスと、その機能を発現させるためのプラントから構成される。これは、自動車に代表される組み立て型産業の製造にはない、化学産業の特徴であり、製造には、取り扱われる物質のライフサイクルのほか、プロセスライフサイクルとプラントライフサイクルを管理する必要がある。

「プロセスLCEを実施する(A0)」をトップアクティビティ(最上位業務機能)とする IDEF0 (Integration DEFINITION<sup>1)</sup>) 業務プロセスモデルとしてプロセスライフサイクル業務を表すと図1となる。「研究開発」という言葉を、「部門」などの呼称をつけた組織の名称として使うことがある。しかし、研究(Research)と開発(Development)は、業務機能としては別の活動であり、プロセス合成が研究に、プロセス開発が開発に相当する。プロセス合成は、触媒開発を例とすれば、素反応レベルでの条件最適化により開発された触媒に対して、研究室レベルで反応システムの合成をおこなうことに相当する。この段階ではラボ施設やベンチスケールの施設が用

いられ、現象として反応性能に影響する要因、被毒や活性低下要因の抽出及びその定量的な評価、取り扱い物質の基本物性、燃焼限界、爆発限界や毒性など、商用化検討や商用プロセスの設計に向けた基礎情報の収集がおこなわれる。これらの情報は、プロセス開発段階に送られ、パイロット設備の設計施工に用いられるとともに、商用生産に対する実行可能性の検討として、スケールアップ検討、マーケティング用サンプル試作、実原料での試験、試験生産、生産技術の検討(品質、コストなど)などがおこなわれる。

プロセス合成、プロセス開発で得られた情報は、プロセスLCE管理情報として、「プロセスLCEを管理する(A1)」アクティビティで承認後、技術移転情報としてプラントライフサイクルに送られる。プラントライフサイクルでは、まず技術移転情報に基づき設計業務が動き出し、もしも情報に不備、不足があった場合には、プロセスライフサイクルに対して情報の提供要求がもたらされる。その後運用段階においても、特に安全に関わる情報について、技術移転情報に不備、不足が生じた場合には、情報の提供要求がもたらされるが、このような情報の手戻りは、安全情報の共有化を妨げ、リスク増大を招きかねない。したがって、プロセスライフサイクルのマネージは、過不足のない技術移転情報の管理と伝達、さらにはプロセスライフサイクルで、これら情報を共有するための仕組みの提供が求められることとなる。

## 3. プラントライフサイクルエンジニアリング

本来、業務プロセスモデルは、時間的な順序や動的な挙動を表すモデルではないが、プロセスライフサイクルにおいて、プロセス合成、プロセス開発がおこなわれ、その情報が技術移転情報として「プラントライフサイクルエンジニアリング(LCE)を実施する」に伝達されてから、特定のプラントのプラントライフサイクルは機能を開始すると解釈することができる。

図2に、「A0:プラントLCEを実施する」をトップアクティビティとするプラントライフサイクル業務プロセスモデル<sup>2)</sup>の一部を示す。外部より、技術移転情報と設計要求が入力され、技術移転情報は、Node-A0の「A7:LCEのための基準・資源・情報を提供する」に格納され、設計要求(サイト情報、製品仕様、生産量、原料仕様など)は、「A1:プラントLCEを管

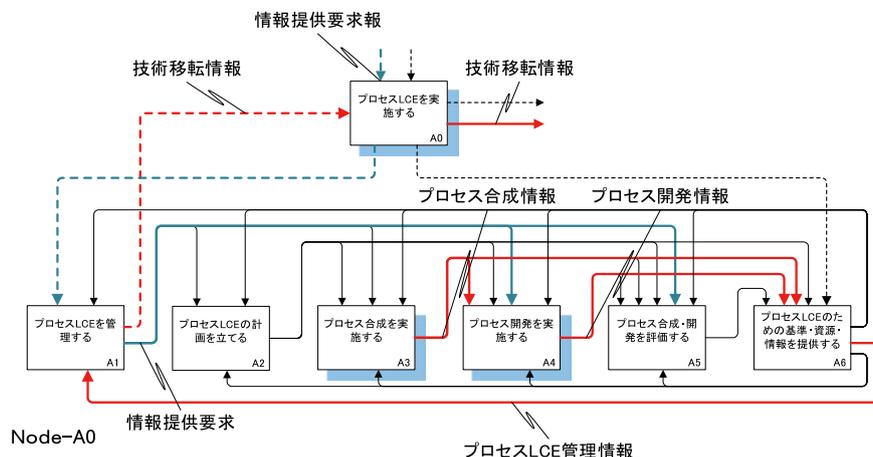


図1 プロセスライフサイクル業務プロセスモデル

理する」に伝達される。プラントライフサイクル業務プロセスを構成する主要業務プロセスは、A1、A7の他、「A2：プラントLCEの計画を立てる」、「A3：設計をする」、「A4：建設をする」、「A5：生産する」であり、A1は、入力された設計要求をより具体的な設計要求として、それをA2、A3に伝え、A2は、設計要求と、技術移転情報にある実行可能性検討結果等を勘案して、プロジェクトバリューとしての設計ベースをA3に出力する。A3は、A1からの設計要求、A2からの設計ベースを制約として、A7からの技術移転情報に基づき設計をおこない、設計結果情報、さらには設計根拠情報をA7に出力する。この時、技術移転情報が不十分であれば、A7に情報提供要求が出力され、A1を経由し承認された情報提供要求として、プロセスライフサイクル業務プロセスにフィードバックされる。

続いて「A4：建設する」では、A7からの設計結果情報に基づき建設がおこなわれ、建設結果情報は、A7に送られる。A7に送られた技術移転情報、設計結果情報、設計根拠情報、建設結果情報は、「A5：生産する」に送られる。この段階では、「A0：プラントLCEを実施する」は、外部より市場情報を受け取り、「A1：プラントLCEを管理する」は製造ビジネス戦略を、「A2：プラントLCEの計画を立てる」は生産要求をA5に伝える。「A5：生産する」は、「A51：生産を管理する」、「A52：生産計画を立てる」、「A53：生産を実行する」、「A54：設備保全をする」、「A55：生産に関するパフォーマンスを評価する」、「A56：生産に必要な基準・資源・情報を提供する」に展開される。A51は、A5に伝えられた製造ビジネス戦略及び生産要求に基づき、生産計画立案要求を「A52：生産計画を立てる」に伝え、A52は、A53及びA54にオペレーションプラン、アセット管理プランを伝える。A53はオペレーションプランに基づき、A54はアセット管理プランに基づき、A7に伝えられた技術移転情報、設計結果情報、設計根拠情報、建設結果情報

を用いて、生産及び設備保全を実行する。A53、A54の実行、実施結果はA56に伝えられ、A51を介して生産結果として「A7：LCEのための基準・資源・情報を提供する」に格納される。

一方、「A3：設計をする」アクティビティは、図3に示すように、「A33：プロセス・プラント概念設計を行う」、「A34：プロセス・プラント基本設計を行う」、「A35：プロセス・プラント詳細設計を行う」の3つの設計段階を経て詳細化され、各設計段階はプロセス設計とプラント設計に分類される。この詳細化の段階を、プロセス設計だけから見ると、プロセス合成、開発段階からの技術移転情報を用いて、プロセス概念設計（A33）がおこなわれ、プロセス概念設計結果とプロセス概念設計根拠が、技術移転され、合成、開発段階の技術移転情報と合わせて、プロセス基本設計（A34）がおこなわれ、プロセス基本設計結果とプロセス基本設計根拠が、技術移転され、合成、開発段階の技術移転情報と合わせて、プロセス詳細設計（A35）がおこなわれ、プロセス概念、基本、詳細設計結果とプロセス概念、基本、詳細設計根拠が、「A37：プロセス・プラント設計のための資源を提供する」に技術移転されると考えることができる。そして、これら技術移転されたプロセス設計結果情報とプロセス設計根拠情報が、「A31：設計を管理する」を介して、「A3：設計をする」に伝わり、最終的にA7に格納される。

以上より、プロセス合成、開発段階の技術移転情報、設計段階からプラントライフサイクル業務プロセス全体に技術移転される、設計結果、設計根拠情報、及び運転実行、設備保全実施の結果情報の管理（情報を取り出し、電子情報として保存し、いつでも取り出せる状態にすること）は、「A7：LCEのための基準・資源・情報を提供する」の機能であることが、プロセス、プラントライフサイクル業務プロセスモデルの解析からわかる。

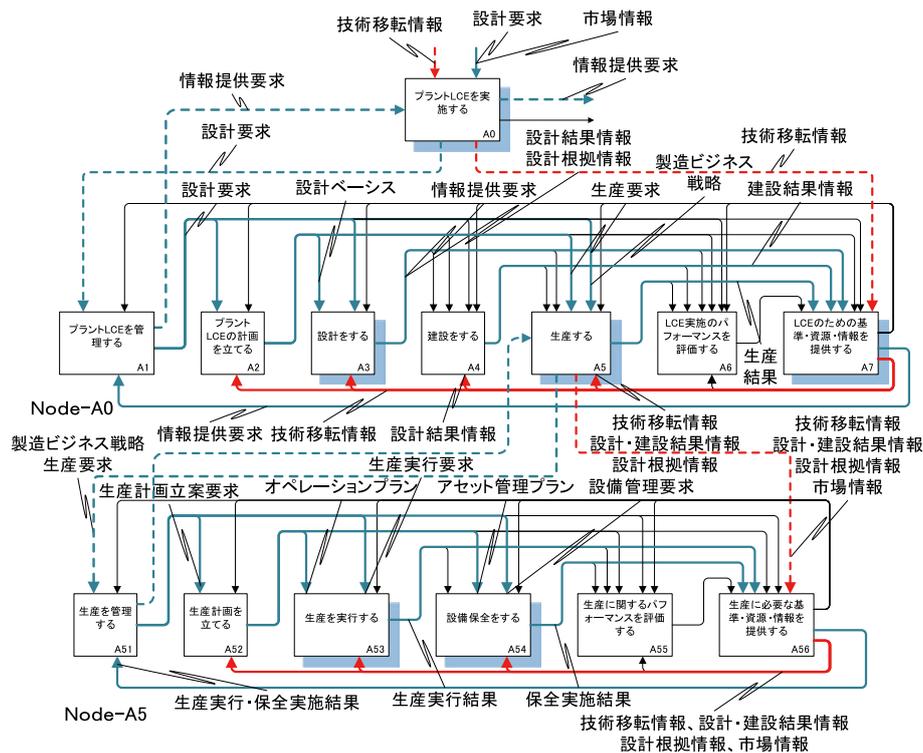


図2 プラントライフサイクル業務プロセスモデル

表1 OSHA/PSM プロセス安全情報

化学物質の危険性の情報
毒性, 許容露出制限, 物性データ, 反応性データ, 腐食性データ, 熱的・化学的安定性データ, etc.
プロセス技術情報
BFD, PFD, プロセス化学, 最大プロセス・インベントリー量, 安全操作領域, 重大な結果情報, etc.
プロセス設備情報
建設資材, P&ID, 防爆クラス, リリーフシステムの設計基準, 設計コードと標準, 物質収支, エネルギー収支, 安全システム, etc.

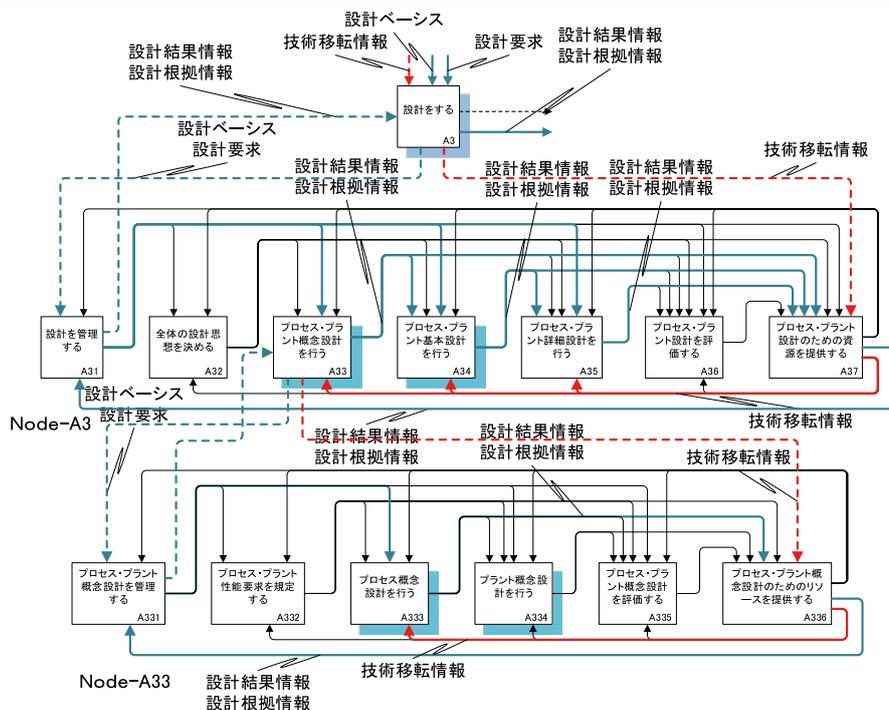


図3 「A3:設計をする」アクティビティの展開

#### 4. プロセス安全情報

欧米では、1970年代から80年代にかけて起きた重大事故の解析により、それらの根本原因が「マネジメント」の不備に起因すると認識されるようになり、プロセス安全管理(PSM: Process Safety Management)に対する法規の整備がおこなわれてきた。米国では、1984年に起きたインドBhopalのイソシアン化メチルの流出事故により、Occupational Safety and Health Administration (OSHA) が、1992年に14エレメントで構成される Process Safety Management of Highly Hazardous Chemicals (OSHA-PSM<sup>3)</sup>) (29CFR1910.119) 規制を発効する契機となった。OSHA-PSMは、プラントライフサイクルを通じた安全管理を、変更管理が持つPDCAサイクルの機能を利用して、実現しようとするものであり、そのために必要なエレメントを規定しているといっても過言ではない。そして、前節で述べた「A7: LCEのための基準・資源・情報を提供する」において、ライフサイクルを通じて共有すべき情報をプロセス安全情報 (PSI: Process Safety Information) として規定している。もちろんOSHA-PSMは、法規としての性質から、最小要件となる。OSHA-PSMがPSIとして共有すべき情報を、表1に示す。OSHA-PSM/PSIは、必要な情報を3つのカテゴリーに分けている。このうち、「化学物質の危険性の情報」及び「プロセス技術情報」の「プロセス化学」は、主にプロセス合成、プロセス開発からの技術移転情報であると考えことができ、その他の「プロセス技術情報」、「プロセス設備情報」は、主としてプラントライフサイクル業務プロセスの設計段階で得られる情報であると解釈できる。しかし、そうだとすると、前節まで議論してきたプロセス設計根拠情報が一切OSHA-PSM/PSIでは規定されないこととなる。法規としての解釈がどのようなものであるかは、別問題としてプロセス安全管理 (PSM) として考えた時、プロセス設計根拠情報は、ライフサイクル

を通じた安全管理を実現するために、重要な情報である。詳細は、本特集記事の他の記事に任せるが、化学工学会安全部会では、前節の後半、プロセス設計業務プロセスで述べたように、プロセス設計根拠情報は、段階的に次のステップの設計、さらには設計以外のプラントライフサイクル業務プロセスに対して、プロセス合成、開発情報とともに、技術移管されるべき情報であると考えており、「プロセス技術情報」の「プロセス化学」情報として管理されるものと解釈<sup>4)</sup>をしている。

#### 5. おわりに

今日、60年以上に及ぶライフサイクルを有する化学プラントにおいて、その長きにわたりプロセスの安定性、プラントの信頼性を高いレベルで保ち、安全性を確保し続けることが求められている。そのためには、プロセスライフサイクル業務プロセスからの技術移転情報と、プラントライフサイクル業務プロセスにおけるエンジニアリング情報を、プラントライフサイクルで共有し、管理する(情報を取り出し、電子情報として保存し、いつでも取り出せる状態にすることが必要であるとともに、その仕組み作りが急務である。本稿は、プロセス・プラントライフサイクルエンジニアリングの視点から、プロセス、プラントライフサイクル業務プロセスモデルに基づき、ライフサイクルを構成する業務プロセスと取り扱われる情報について概観した。各ライフサイクル業務内容については、以降の記事に任せることとし、本特集記事を通じて、読者の皆さんが、エンジニアリング情報の統合環境の重要性と必要性を理解し、あるべき統合環境について議論を始めるきっかけとなれば幸いに思う。

#### 参考文献

- 1) ISO/IEC/IEEE 31320-1, Information technology - Modeling Languages - Part1: Syntax and Semantics for IDEF0 (2012)
- 2) 化学工学会安全部会: 化学工学テクニカルレポート No.44 (2017)
- 3) OSHA: Process Safety Management, OSHA 3132 (2000 (Reprinted))
- 4) 頼昭一郎: 化学工学, 82(11), 662-665 (2018)