

Fri. Nov 13, 2020

Room F

Continuous process operation

[2F10-12] Continuours process operation 1

Chair:Fumitaka Higuchi(Idemitsu Kosan Co., Ltd.)

2:15 PM - 3:45 PM Room F (3F/Conf. Room F1-2)

[2F10] Expectations and technical requirements for  
automation in process industry

○Tetsuo Fuchino<sup>1</sup> (1. School of Material and Chemical  
Technology, Department of Chemical Science and  
Engineering, Tokyo Institute of Technology)

2:15 PM - 2:45 PM

[2F11] A study on process automation with focusing on  
ISA standards

○Teiji Kitajima<sup>1</sup> (1. Institute of Engineering, Tokyo  
University of Agriculture and Technology)

2:45 PM - 3:15 PM

[2F12] Standardization trends and activities of Yokogawa  
Electric Corporation in MTP

○Shinpei Kurokawa<sup>1</sup> (1. Yokogawa Electric Corp.)

3:15 PM - 3:45 PM

Continuous process operation

[2F13-14] Continuours process operation 2

Chair:Tetsuo Fuchino(Tokyo Institute of Technology)

4:00 PM - 5:00 PM Room F (3F/Conf. Room F1-2)

[2F13] Application of integration technology with AI and  
simulator

○Takashi Hiramatsu<sup>1</sup> (1. Chiyoda Corp.)

4:00 PM - 4:30 PM

[2F14] Introduction of self-optimizing APC system and  
vertically integrated production optimization  
system

○Koji Takasato<sup>1</sup> (1. AspenTech Japan)

4:30 PM - 5:00 PM

Continuous process operation

## [2F10-12] Continuours process operation 1

Chair:Fumitaka Higuchi(Idemitsu Kosan Co., Ltd.)

Fri. Nov 13, 2020 2:15 PM - 3:45 PM Room F (3F/Conf. Room F1-2)

---

### [2F10] Expectations and technical requirements for automation in process industry

○Tetsuo Fuchino<sup>1</sup> (1. School of Material and Chemical Technology, Department of Chemical Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology)

2:15 PM - 2:45 PM

### [2F11] A study on process automation with focusing on ISA standards

○Teiji Kitajima<sup>1</sup> (1. Institute of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology)

2:45 PM - 3:15 PM

### [2F12] Standardization trends and activities of Yokogawa Electric Corporation in MTP

○Shinpei Kurokawa<sup>1</sup> (1. Yokogawa Electric Corp.)

3:15 PM - 3:45 PM

# プロセス産業におけるオートメーション化への期待と要件

ふちの てつお  
(東工大) ○(正) 渕野 哲郎

## 1. はじめに

プロセス産業は、自動制御技術の開発により、最も早くから自動化を実現した産業である。プロセス産業を装置集約型産業、組立産業を労働集約型産業と呼ぶのは、その表われの一つである。しかし、電子技術の発達、NC (Numerical Control) マシンを生み、産業用ロボットの登場、電子部品の無人化工場に始まり、自動化された産業ロボットの組立工場の実現など、プロセス制御技術が担ってきた製造業の自動化は、ロボット制御、機械制御に取って代わられた感があり、いつの間にか製造業の自動化は、組立産業(ディスクリート産業)の代名詞のように言われるようになってきている。

しかし、石油、石油化学に代表されるプロセス産業は、最も運転タームの長い定常運転期間は、ほぼフルオートで運転されており、自動化率を考えれば、現在でも、最も自動化された産業である。更に、エチレンプラントの品種切り替え運転に代表されるような、非定常運転においても、経済的効果が見込める部分には、高度制御による自動化が適用されてきた。しかし、このような「経済的に効果が見込めれば」といった意識を一変させたのが、2005年に起きた PB Texas City Refinery の火災爆発事故[1]であろう。老朽化プラントの信頼性が問題視される中で、自動化比率や安全計装の導入比率の低いプラントで、オペレータの誤認、操作ミスが起因事象を最悪の蒸気雲爆発につなげる決定的な要因となった事故であり、15人死亡180人が負傷した最悪の災害であり、これを契機に、オペレータが間違いを犯しても、重大事故につながらないための一つの対策として、スタートアップ/シャットダウンの自動化が検討されるようになったといえる。

一方、前出の通り、自動化設備のイメージが、電子材料や電子機器など、高付加価値製品の製造設備であり、人の関与が品質に悪影響を及ぼす可能性のある設備であり、これを単純にプロセス産業に当てはめると、医薬品製造プロセスが思いあたり、どうしても自動化=無人化と連想されがちである。本稿では、石油、石油化学の大量生産を目的とする大型連続プロセスを対象とする。これまでは、オペレータがオペレーションを行う主体であり、それをシステムがバックアップしてきた。対して、本稿で取り扱う自動化は、オペレーションを行う主体がシステムであり、オペレータがバックアップするシチュエーションを想定する。

次に、PB Texas City Refinery の火災爆発事故について考察し、自動化の必要性を論ずる。

## 2. BP Texas City Refinery 火災爆発事故の概要と自動化に対する期待

事故を起した設備は、低オクタンンのブレンディングオイルを、無鉛レギュラーガソリン混合用のハイオクタン成分に転

化するための異性化反応装置 (ISOM: ISomerization Unit) 内の Raffinate Splitter Unit である。Raffinate Splitter Unit は、アロマ回収ユニット (ARU) からの残油 (Raffinate) を原料として、原料に 40% 含まれる C5/C6 成分を塔頂から、ジェット燃料として利用される重質 Raffinate を到底から回収するユニットである。

事故(2005年3月23日)は、定期修理を終えたあとのスタートアップ時に発生した。前日22日深夜、ナイトシフトのオペレータが、オペレーションマニュアルに違反して、E-1101 Raffinate Splitter に ARU からの(1)原料 Raffinate を過剰に導入し、レベル計レンジがオーバーにより機能を喪失する(図1-1)。

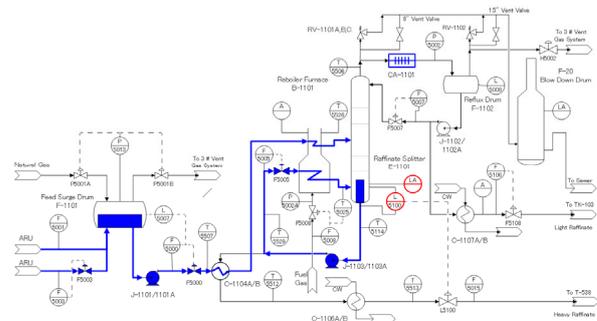


図1-1

翌23日、デーシフトオペレータが、スタートアップを再開する。オペレーションマニュアルに、Raffinate Splitter のレベルコントローラーをオートするよう指示されていたが、(2)マニュアル・クローズのまま、スタートアップさせた。液レベルが更に上昇する中で、B-1101; Reboiler Furnace による加熱を続け、温度上昇・圧力上昇を引き起こす(図1-2)。

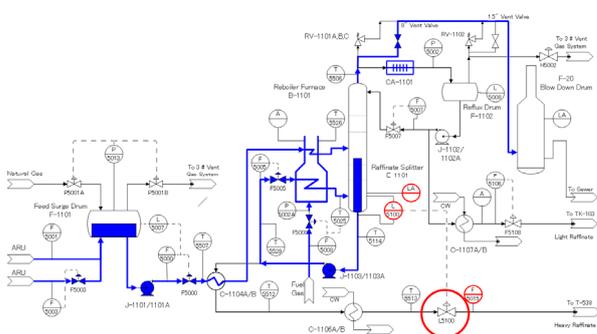


図1-2

マニュアル・クローズのままスタートアップして約3時間経過した後、Raffinate Splitter のレベルコントロールバルブ閉に気が付き、物質収支を確かめないまま、(3)LCV をマニュアル・オープンさせた。(4)Raffinate Splitter Inlet/Outlet Exchanger により入熱量が上昇し、ほぼ(5)満液状態で Raffinate Splitter が突沸による急激な液レベル上昇が起こり、

塔頂より大口径ガスを満液にした。(6)塔内圧力及び液ヘッドにより安全弁が作動し、F-20 Blow Down Drum に高温の Raffinate 液が流入、F-20 液面が上昇し、(7)F-20 スタックがフレアラインに繋がっていなかったために、スタックよりオーバーフローした(図1-3)。(8)オーバーフローが地上に落下、と同時に可燃性蒸気雲を形成し爆発した。

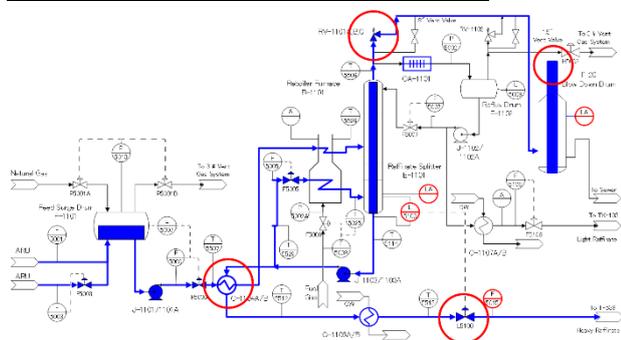


図1-3

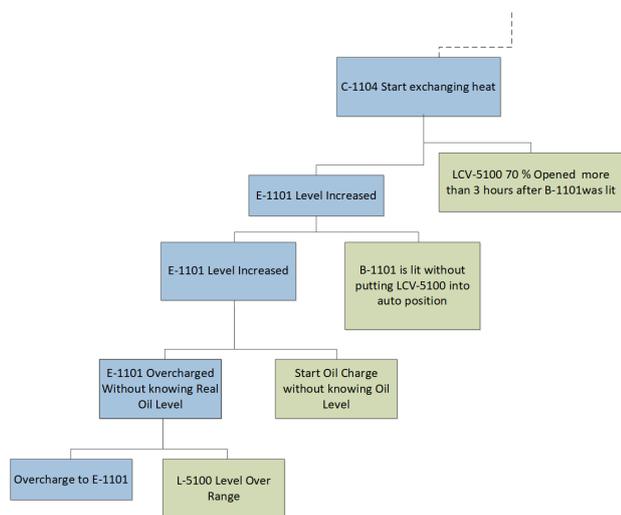


図2

BP Texas City Refinery 火災爆発事故の(1)～(8)に示す事故発展過程より、起因事象、助長事象のみを抽出すると、以下となる。

- (1) 「原料 Raffinate を過剰に導入し、レベル計レンジがオーバーにより機能を喪失」したこと
- (2) 「マニュアル・クローズのまま、スタートアップさせた。液レベルが更に上昇する中で、B-1101;Reboiler Furnace による加熱を続け、温度上昇・圧力上昇を引き起」したこと
- (3) マニュアル・クローズのままスタートアップして約3時間経過した後、Raffinate Splitter のレベルコントロールバルブ閉に気が付き、物質収支を確かめないまま、「LCV をマニュアル・オープンさせた。」こと

この事故では、(1)の起因事象が取りざたされることが多いが、突沸が起こるまでの仮定を Event Tree として書き表すと、図2となる。つまり、如何に蒸留塔の張り込みすぎがあろうが、それに伴い、レベル計が機能を喪失しようが、LCV-5100 をオートに入れていれば、(8)の火災・爆発という結果事象は起きなかったといえる。更に、蒸留塔の張り込みすぎ、レベル

計の機能喪失、LCV-5100 マニュアル・クローズのままスタートアップがあったとしても、約3時間たってから、LCV-5100 をマニュアル・オープンしなければ、突沸は起こらず、SV はどうさせず、F-20 に沸騰したガソリン成分は、送油されず、F-20 スタックからオーバーフローせず、蒸気雲爆発は起きなかったと予想される。

このように、200人近い死傷者を出した大惨事に対して、それを防ぐことのできた2回の重要操作の失敗 (Failure on Demand) がオペレータの見落としと、物質収支をチェックするという基本的な行動の欠如によるものであるとすれば、自動化によるオペレータの技能に依存しない環境の構築に期待をしないわけにはゆかなくなる。

### 3. 連続プロセスの自動化に向けた技術要件

化学工学会は、1993～1999の間、産業部門委員会安全委員会（現安全部会）において、「無人化設備安全対策ワーキング・グループ」（通称第3 WG）を設立して自動化について検討を行った。この WG では、テクニカルレポート 33[2]、35[3]に続いて、テクニカルレポート 38「少人化のための高信頼性プラントオペレータの役割とオペレーション安全設計」[4]を発行した後に解散となった。この WG が設立された経緯については、序章に以下のように記されている、「当時の社会状況では化学工業の現場は3 K職場といわれ若い技術者には敬遠されるきらいがあった。このような状況下で、当時としては、職場の省人化・無人化は火急のテーマであり、また、激化する国際競争の面からも必要とされるテーマであった」。自動化に対する基本的な考え方は、「1. はじめに」で書いたように、自動化＝無人化ではなく、「自動化により少ない要員でのオペレーションが可能になり、従来よりも少ない要員で、従来と同等レベル以上の安全を維持するの、高い信頼性をもつプラントの設計面および運転面における課題の抽出を目的とする」としている。このため、WG は、次の二つのグループに分かれ、それぞれ、技術要件のまとめ、そのための課題を記している。

- (a) オペレータの役割と少人化に伴う安全性への配慮 (B グループ)
- (b) 少人化のためのオペレーション安全設計 (A グループ)

主張するポイントの是非は後述するとして、まずは本レポートの内容について説明する。

#### 3.1 オペレータの役割と少人化に伴う安全性への配慮

##### 3.1.1 提言

現在の代表的なプラントにおけるオペレータの役割についての分析から、近未来の少人化プラントにおいて高信頼性を維持するためには、人間の総合判断の機能をどう機械化、自動化するかが最も重要であるとの結論が得られた。そこで人間の総合判断の仕組みを構造化し、各要素を機械化、自動化する際の阻害要因を分析し、現在の技術レベル、所要コスト等からみて、

人に頼らざるを得ない部分はどこかを明らかにする必要があります。

### 3.1.2 課題

#### ・ ここ当面の課題

<自動化関連>

- ① 従来の経験、知見、記録等のデータベース化に基づき、あらかじめ想定されるトラブル現象の整理、解析および機能のシステム化、オンライン化の推進
- ② 運転センター設置によるヒューマン・マシン・インターフェイス（HMI）の推進と人間の総合判断の分散化の推進
- ③ 少人数プラントに適合するオペレータの認識、役割の明確化、併せてオペレータの教育訓練によるさらなる精鋭化の推進

#### ・ 将来の課題

<自動化関連>

- ① 現象と原因の単純化によるシステム化、オンライン化の推進
- ② 経験のないプロセスに対しても適用できるプラントの構造を論理的に解析する技術の確立（例えばHAZOPを基とした新たな手法の開発）およびオンライン化

<運転思想>

- ① システムによる正常復帰ができない事態では、オペレータを介さずただちに自動停止する等、割り切った運転思想の確立

## 3.2 少人数のためのオペレーション安全設計

### 3.2.1 提言

プラントにおける事故や災害は、操作、プラント構造、内部挙動との間の整合性が崩れたときに生ずる。その整合性を崩す要因が、プラント構造体の劣化であったり、コンタミネーションによる予期せぬ反応であったり、誤操作であったりする。プラントのオペレーションは、構造体であるバルブなどの状態を変化させて挙動を制御し、プラント構造の許容範囲内で、目的に合った挙動を行わせる行為と考えることができる。一方プラントの安全設計とは、これら操作、プラント構造、および挙動の整合性を崩す要因を排除するか、それらを無害化する手当てを施すことにより、安全を維持することと言える。

ここで、想定された挙動が同じであれば、安全設計は、操作設計と構造体設計（計測機器、操作機器の配置やプロセス・スキームを含む）の間の、安全面からのトレードオフを設計することになる。したがって、異常時や緊急時においてオペレータに求められる（総合）判断は、このトレードオフによって規定され、構造体設計に大きく依存することとなる。また、さらに上位レベルからこれらのトレードオフを考えた場合、トレードオフ自体が、適用された安全思想や運転思想

により制約をうける。このようにオペレータの役割は、所定の安全思想および運転思想のもとで、構造体の設計（プロセス設計+プラント設計）とのトレードオフによって設計される（オペレータのワークデザイン）。

### 3.2.2 課題

これから将来に向けた課題として、上に述べたオペレータの役割と構造体の設計とのトレードオフを考慮した「オペレーショナルプロセス設計」の体系化、手法の確立が望まれ、以下のような視点からの議論が期待される。

- ① 安全・運転の思想を、いかにオペレーション設計（プロセス設計）に取り入れるか。
- ② オペレーション設計において、如何にオペレータ・ワークデザインを行うか。
- ③ 安全・運転の思想が、どのようにオペレータ・ワークデザインに影響してゆくか。
- ④ いかにしてオペレータ・ワークデザインとプロセス設計間のトレードオフを成立させるか。

## 3.3 化学プロセスの自動化に向けた技術要件のまとめ

テクニカルレポートでは、上記の2グループの提言・課題を図-3のようにまとめている。

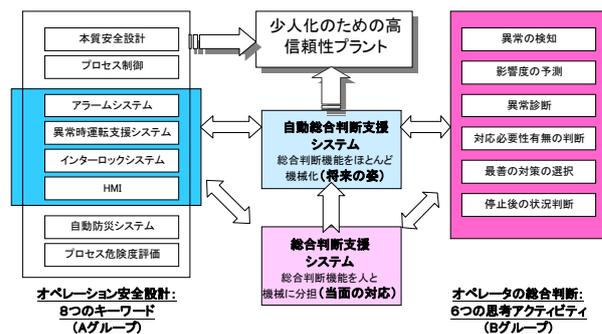


図-3

(化学工学会テクニカルレポート No.38 より抜粋)

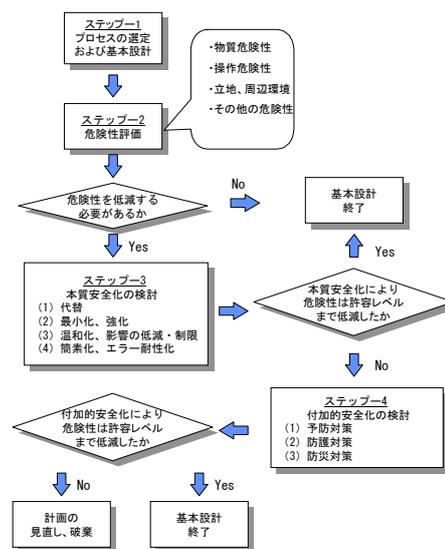


図-4

(化学工学会テクニカルレポート No.38 より抜粋)

また、図-3の「本質安全設計（化学工学会安全部会では、原文の **Inherently Safer Design** の意を正しく伝えるために、今日“本質的により安全な設計”と訳している）」の部分について、図-4に示すような方法論を展開している。

以上の議論において、オペレータの役割に関しては、当時日本の化学プラントの競争力は、オペレーションであると言われ、強みをオペレータの質に見出していた時代であり、それでも、オペレーションの負担提言を考えて、「システムによる正常復帰ができない事態では、オペレータを介さずただちに自動停止する等、割り切った運転思想の確立」を課題に入れているところは、当時としては画期的であったと考える。また、少人化のためのオペレーション安全設計（Aグループ）が述べている内容は、現在CCPSがリスクベースの安全設計（IPL設計）で主張していることとほぼ同等で、当時から、これに「ISD：本質的により安全な設計」を加えて全体のフレームワークを考えていたことには、驚かされる。

#### 4. **BP Texas City Refinery 火災爆発事故から見える自動化への問題点**

BPの事故は、1章でも述べたように、老朽化プラントの信頼性が問題視される中で、自動化比率や安全計装の導入比率の低いプラントで、オペレータの誤認、操作ミスが助長事象として災害に至らした事例であり、CSBの事故調査報告書[1]においても、自動化・自動運転を求めて言うわけではなく、SISの導入や、次の操作に行くための条件設定（インターロック）の設置が自動化としての要求レベルであるので、これを、我々が考える自動化のレベルで考えるのは、酷な話かもしれないが、現在稼働中のプラントの改造として、自動化を考えるのであれば、ちょうどよいレベルかもしれない。

##### ① ISD

事故を起こした Raffinate Stripper は、Heavy Raffinate から Light Raffinate への流用であり、C6/C7 カット程度の蒸留塔で Fired Heater を使っており、事故の助長事象は、Fired Heater であるから必要となった操作と考えられる。自動化を考えるうえで、ISDは避けて通れないハードルである。

##### ② IPL(2層から5層まで)

IPLの健全性の管理には、CCPSは、HAZOP⇒LOPA⇒IPLを推奨している。方法論、設計手法として確立しているとは言い難いが、フレームワークとしては確立しているといってもよい。この時 PFD (Probability of Failure on Demand) の検討が重要な要素となるが、2章で解析した通り、スタートアップ時の安全性確保で、非常に重量となるはずの、LCV-5100のオートポジションへの切り

替えについて何も Care されていないこと、SISが導入されていなかったこと等を考えると、自動化を実現するためには、最低でもCCPSが推奨するHAZOP⇒LOPA⇒IPLによる管理の仕組みが実装・実行される環境が不可欠である。

##### ③ SIS、SV、Dike層での操作

BPの事故は、見方によっては正しくSVシステムが作動し機器を保護した後で大災害となった例である。自動化を進めるということは、オペレータは監視業務を行うこととなる。オペレータがオペレーションに主体的に関わっている現在では、SISの作動後の操作については、ある種オペレータ対応で済まされたかもしれないが、自動化のためには、SIS、SV、Dikeそれぞれ、稼働後の処理も精緻に設計し、自動化する必要がある。どこかをオペレータに任せるかは、それこそ3章で議論したトレードオフかもしれないが、特にSISについては、SISによってどの状態に移行するのか、そのあとの操作ターゲットは、SUなのか、SDなのかも含めて、論理的な設計が求められる。

#### 5. **終わりに**

BP Texas City Refineryの火災爆発事故、化学工学会現安全部会の無人化設備安全対策ワーキング・グループの議論に基づき、連続プラントの自動化に対する期待、実現するための要件について考察した。プロセス設計、オペレーショナルプロセス設計、IPL設計と、オペレーションとの整合取る必要があり、CCPSではそこにHAZOP、LOPAが深くかかわってくる。

CCPSはLOPAに関して、Concept Book 一冊、Guidelines 二冊を出版している。化学工学会安全部会／安全工学会は、このうち Concept Book である、“Layer of Protection Analysis -Simplified Process Risk Assessment-” [5]の翻訳を行っており、2021年12月出版予定である。

#### 参考文献

- [1] <https://www.csb.gov/bp-america-refinery-explosion/>
- [2] 化学工学会産業部門委員会安全委員会、“化学プラント“省人化・無人化”の方向を探る—安全対策の視点から—”、化学工学テクニカルレポート No.33、化学工学会、1995
- [3] 化学工学会産業部門委員会安全委員会、“化学プラント“省人化／無人化”の安全対策—総合安全管理システムの提案—”、化学工学テクニカルレポート No.35、化学工学会、1997
- [4] 化学工学会産業部門委員会安全委員会、“少人化のための高信頼性プラント-オペレータの役割とオペレーション安全設計-”、化学工学テクニカルレポート No.38、化学工学会、1999
- [5] CCPS/AIChE, “Layer of Protection Analysis,” CCPS/AIChE, Wiley, 2001.

## ISA 標準を中心としたプロセス産業の自動化に関する考察

(東農工大)<sup>きたじま ていじ</sup>北島 禎二

### 1. はじめに

近年、製造業のスマート化に関する議論は、独国の Industrie 4.0[1]や米国を中心とした Industrial Internet Consortium (IIC) [2]等の動きが活発であるが、とくに国内では組立加工系のディスクリート産業での議論がほとんどであり、一部の事例を除きプロセス産業に関する議論は乏しい。スマート化された産業構造(バリューチェーン)下での経営面・安全面へのインパクトは装置産業であるプロセス産業においても重大であり、その実現のためには、より柔軟な製造業全体の自動化が求められる。製造業における Digital Transformation (DX) は、単なる経営・製造データのデジタル化 (Digitalization) ではなく、自動化が推進された産業構造全体を下支えする手段およびその様相と捉えるべきものである。

本講演では、そのような DX 時代のプロセスオートメーション (Process Automation; PA) 推進の核となる製造業の標準について、International Society of Automation (ISA) 標準を中心に、基本となる概念に関連の周辺動向とともに簡単に紹介し、今後の PA の在り方と可能性について考察する。

### 2. プロセスオートメーションに関する国際標準

石油精製、石油化学等の連続プロセスの制御において、定常状態の定値制御に関しては、いくつかの重要な課題は存在するものの、ある程度の方法論が確立している。対して、非定常状態での操作に関しては、オペレーション中に占める時間に比して事故の頻度も大きく、自動化の要求度が高いにもかかわらず、その方法論は確立されているとは言い難い。

連続系の PA に関する標準としては、(広義の)連続プロセス制御の中でもプロシージャの自動化に関する、ISA-TR106: Procedure Automation for Continuous Process Operations (以下、ISA-106) [3][4]がある。ここで TR は Technical Report の略であり、ISA-106 自体は正式な規格ではない。

ISA-106 の前身となるのが、バッチプロセスを対象とした、ANSI/ISA-88: Batch Control (以下、ISA-88) [5]である。ISA-88 はその名の示す通り、American National Standards Institute (ANSI) 規格 (= 米国の標準規格) であるが、ほぼ同じ内容が国際標準 IEC 61512[6]として規格化されている。

ISA-88 の階層モデルを、連続およびディスクリート (+後に、貯蔵) にまで拡張するとともに、垂直方向に製造レベルから経営レベルまでをスコープとして、主に Manufacturing Execution System (MES) 部分とその上下のインタフェースをリファレンスモデルとして標準化した規格が、ANSI/ISA-95: Enterprise-Control System Integration (以下、ISA-95) [7]である。ISA-88 同様、国際標準として IEC 62264[8]が規格化されている。

ISA-88 が、ISA-95 の製造システムの Control 部分に関するバッチプロセスの規格となっているように、ISA-106 は、ISA-95 の連続プロセスの Control 部分に対応している。そのため、ISA-106 を理解するには、大枠となる ISA-95 および前身となる ISA-88 の両規格の理解が必要となる。

### 3. ISA-106 理解のための予備知識: ISA-88 と ISA-95

本節では、ISA-106 に関する議論の準備のため、ISA-88 および ISA-95 について概説する。両規格とも、日本語入門書[9][10] (Ed.1.0 ベース) が公開されているので、それらもご参照いただきたい。

#### 3.1 ISA-88: バッチ制御

ISA-88 は、基本制御、プロシージャ制御、協調制御から成るバッチ制御の中で、主にプロシージャ制御に注目した標準規格である。バッチのプロシージャを、機器に依存せず製品固有であるレシピプロシージャ、および製品に依存せず機器固有の機器プロシージャに分離し、それらの組合せによって柔軟な生産を実現することが主眼となっている。

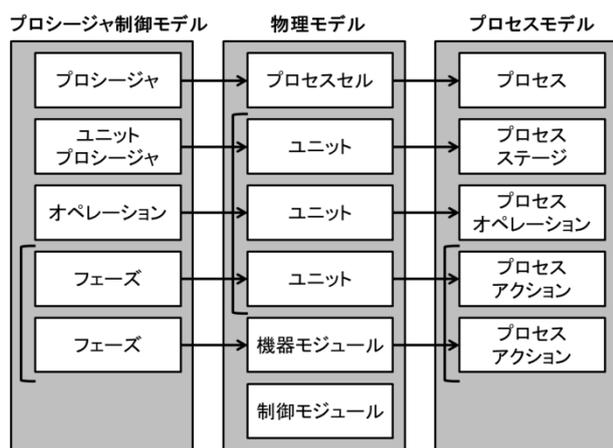


図 1:ISA-88 モデル [9]を基に用語を改変)

ISA-88 の核となるのは、以下の 3 つの part-of 関係の階層モデルと、それらの対応関係である(図 1)。

- プロセスモデル: 1 バッチを製造するための概念的なプロセス(工程)のモデル
- プロシーダ制御モデル: 上記プロセスを実現するためのプロシーダ・ロジックのモデル
- 物理モデル: 上記プロシーダを実行する物理的手段となるプラント設備構造体のモデル

乱暴に言えば ISA-88 は、プロシーダ制御モデルと物理モデルを組合せて柔軟にプロセスモデルを実現するための規格、とも言える。

### 3.2 ISA-95: 経営システムと製造システムとの連携

ISA-95 は、企業の様々な業務アクティビティを垂直方向に幅広く対象としているため、核となるモデルも多岐にわたる。その中でも最も基礎となるのが、他の様々な標準でも使用されている、機能階層モデルである(図 2)。ISA-95 は、中心となるレベル3製造オペレーションマネジメント内のアクティビティ、およびレベル3と直接相互作用するレベル4、レベル2内のアクティビティまでをスコープとしており、レベル2以下には、バッチ・連続・ディスクリートのすべての生産形態が含まれる。

各階層の機能を実現するのが、ISA-88 の物理モデルを拡張した、設備の役割階層モデルである(図 3)。この設備階層モデルの一部(主にディスクリート部分)を基に拡張したものが、Industrie 4.0 のリファレンスアーキテクチャモデル(RAMI 4.0)[11]の 1 軸(Hierarchy Levels 軸)にもなっている。

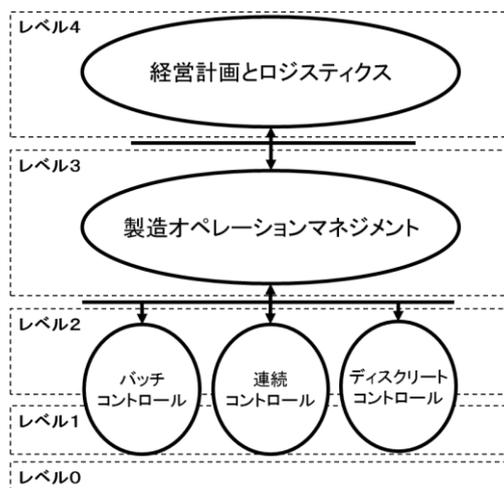


図 2:ISA-95 機能階層モデル[10]

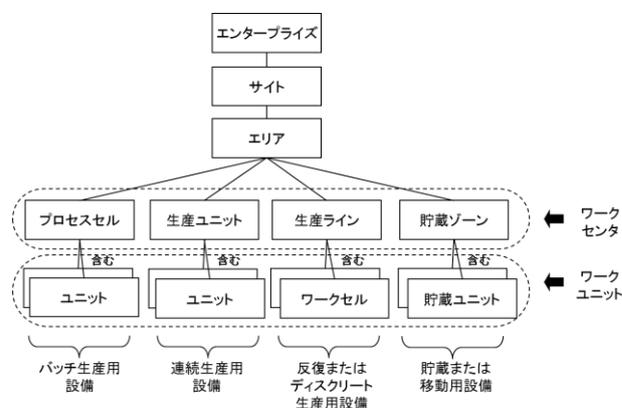


図 3:ISA-95 設備階層モデル[10]

## 4. ISA-106 の概要

ISA-106 序文[3]によると、その意図は、「プロセスオペレーションにおけるプロシーダの自動化に関するグッドプラクティス集、ならびに自動化されたプロシーダを産業オートメーションおよび基本プロセス制御システム(BPCS)に組み込むためのストラテジ集を提供する」こととなっている。TR として、「(関連する)ISA 標準を補完する」ものであるとされ、以下の 2 部構成となっている。

### 4.1 ISA-106 Part 1: モデルおよび用語

Part 1[3]では、プロシーダ自動化のために、以下の 3 つの階層モデルを定義している。

- 物理モデル: ISA-95 設備階層モデル(図 3)に対応し、ISA-88 同様、ユニット以下に機器レベルおよびデバイスレベルがある。プロセス機器と計装機器を含み、制御アルゴリズムは含まない。

- ・ プロシージャ要求モデル:何が必要かを定義し、プロシージャ実装時の機能要求となるプロシージャ要求を、どのように物理モデルの階層に対応させるのかを表す。
- ・ プロシージャ実装モデル:プロシージャ要求モデルと物理モデルとの間をつなぐ、実装された構成結果またはプログラミング結果を表す。

大雑把には、プロシージャ要求モデルは ISA-88 プロセスモデルに、プロシージャ実装モデルは ISA-88 プロシージャ制御モデルにそれぞれ相当すると捉えれば理解しやすい。

その他に、プロセス状態に基づく制御のための状態遷移・オペレーションモードの例や、プロシージャ実装モジュールと BPCS・安全計装システム・オペレータとの相互作用が図として提示されている。

#### 4.2 ISA-106 Part 2:ワークプロセス

Part 2[4]は、プロシージャのライフサイクル・リファレンスモデルを定義しており、「プロシージャ自動化のプロジェクト実行フェーズのための指針を与える一般的なワークプロセスを提供することを意図」している。

「計画および定義」「要求および設計」「実装」「運用」「撤去」の 5 つのワークプロセスから成るライフサイクル・インスタンスが、プロシージャ・ライフサイクル中繰り返し実行される。その繰り返しを通じて一貫して利用されるのが、「プロシージャ自動化フィロソフィ」「ツールキット」の 2 つのワークプロセスを含み、各ライフサイクル・インスタンスの実行結果からフィードバックを受けて適宜修正される、プロシージャ自動化ストラテジである。

Part 2 本文では、TR タイトル通りに前述の各ワークプロセス(「」で括ったもの)の内容について定めている。しかしその骨子は、一貫したプロシージャ自動化ストラテジの下でライフサイクル・インスタンスを滞りなく繰り返すという、ライフサイクル・リファレンスモデルにあると筆者は捉えている。

### 5. プロセスプラントの自動化に関する課題

ISA-106 で示されるような自動化されたプロシージャが実現すれば、PA 推進の基盤の 1 つが構築されることになる。しかしながら、ISA-88 でも同様だが、標準として示

されているのはあくまでも実現すべきものがどう在るべきかであり、それをどのようにして実現するかについてはスコープ外となっている。

本節では、PA の実現および推進のための課題について考察する。

#### 5.1 モジュール化のための指針

ISA-106 の前身となる ISA-88 は、ちょうどソフトウェア工学においてオブジェクト指向設計・開発方法論が定着し出した頃のものであり、根底にはその考え方が色濃く反映されている。ソフトウェア開発において、どのような単位をオブジェクトとして構造化すれば柔軟性や再利用性等の利便性が向上するかが重要な課題となったように、ISA-106(および ISA-88)においても、3 つの階層モデルをそれぞれどのようにモジュール化し、相互作用させれば、システム全体として合理的なものとなるかが PA 実装時の最重要課題となる。

ソフトウェア工学において、「銀の弾丸」[12]がないように、PA においても万能の方法論は存在しない。とはいえ、自動化に向けてまったく何の取っ掛かりもないという訳でもない。ISA-88 のベースの 1 つに独 NAMUR の Recipe-based Operation[13]があるが、この NAMUR から ISA-106 と時期を重ねて、Module Type Package (MTP) という Automation Modular Plants のための設計方法論が提唱され、現在、その国際標準化(IEC 化)が動き出している[14]。なお、MTP と ISA-106 等との関係については、独 ZVEI(電気・電子工業連盟) White Paper[15]をご参照いただきたい。

現時点で MTP は、設計・運転・保全、安全、通信等のプロセスプラントに関するほぼすべてのアクティビティをカバーする 12 部構成という大部の計画の規格となっている。この大部構成が整合性を保って標準化されれば、MTP は、「銀の弾丸」とまではいなくても、合理的なモジュール化指針を与える有力な候補となり得る。

#### 5.2 計画系まで含んだ広義のプロセス制御により垂直統合されたプロセスオートメーションの実現

前述のように ISA-88 のバッチ制御は、基本制御、プロシージャ制御、協調制御の 3 つで構成される。モジュール内の基本制御は BPCS によって、プロシージャ制御は

ISA-106 または ISA-88 によって実現されるとして、モジュール間の協調制御に関してはどうかだろうか？

協調制御の目的は、物理モデルの各階層で、サイト／プラント／プラントエリア／ユニット／機器／デバイス間を協調させて、企業体として合理的な生産業務を実現することである。そのためには、基本制御およびプロセス制御といった狭義のプロセス制御のみではなく、その枠を超えた生産計画やスケジューリングによる生産統制／管理(Production Control)までもを含めた広義のプロセス制御によって、経営の意思決定(長期計画等)を反映したオペレーション連携を実現する必要がある。

上記はいわゆる、「一貫通貫した垂直統合」の実現である。教科書的な説明では計画から製造までの階層間の相互作用は双方向として描かれるが、実際には情報(意思決定)の流れは、指示系統としての上意下達、すなわち上向きのフィードバックがない場合がほとんどであり、最終的に現場でのひとによるやりくりで凌いでいることも多いのではなかろうか。今後ますます生産の即応性、それも単に速いだけではなく確度の高い応対が求められるであろうことを考えれば、このようにひとの柔軟性に強く依拠した仕組みこそ可能な限り自動化したい。

そのためには、一貫したストラテジの下でプロセスが自動化された、すなわち、デジタル化された Operational Technology; OT を備えた PA を前提とした垂直(および水平)統合の再構築が求められる。これはかなり喫緊の課題であるかも知れない。そのような DX が現実のものとなれば、CIM(Computer Integrated Manufacturing)や ERP(Enterprise Resource Planning)が果たし得なかった真の垂直統合が、今度こそ実現されるのではないかと期待する。

### 5.3 設計根拠を与えるストラテジの整備

プロセス安全管理(Process Safety Management; PSM)では、最低でも 5 年毎の定期的なプロセスプラントの見直しが要求される[16]。また、プロセスプラントに大きな変更・改修が必要となった場合には変更管理要求が発生する。これらの要求は、プロセスのライフサイクルにわたって繰り返し実行されるライフサイクル・インスタンスのトリガの 1 つとなる。各ライフサイクル・インスタンスは、「計画および定義」から始まり、その中で、「スコープの

設定」が実施され、新規プラントでは PA のスコープを新規に設定し、既存プラントではスコープを見直して必要に応じて、「要求および設計」以下を実施する。

よって、その都度参照されるプロシージャ自動化ストラテジは、PA に関する設計意図／根拠(既存プラントの場合には、オペレーション情報等も含む)を与えるものでなければならない。このような情報は、製造業の垂直および水平方向にわたるエンジニアリング業務を、安全かつ安定して遂行するために必要なすべての情報であると捉えると、広義のプロセス安全情報と同義である。すなわち、一貫したプロセス安全情報の整備が PA 推進の鍵となると考える。

### 5.4 プロセス指向のライフサイクルエンジニアリング

標準規格に限らず、これまでのプロセスプラントに関する議論は、製造なら製造のみ、安全なら安全のみ、とスコープを限定した上で、必要があれば他の標準・基準類を参照する形がとられていた。しかしながら、とくに昨今のスマート化のような流れでは、限定的なスコープ内のみで議論することが難しくなっており、前述の MTP のように包括的な標準化の流れも出てきている。

また、前節のように PA においてプロセス安全の側面で見えるような見方は、ライフサイクルにわたるワークプロセスを考えることによって初めて可能となる(少なくともライフサイクルのつながりが念頭になれば、非常に困難な)ものである。ISA-106 Part 2 で定義されたプロシージャ自動化のためのライフサイクル・リファレンスモデルは、PA を対象とした Human Machine Interface(HMI)規格 ISA-101[17]でも同様のものが採用されており、ISA-88 の改訂等、今後 PA に関するその他の標準でも採り入れられていくことになるかも知れない(参考:文献[18]の Fig.4)。

Industrie 4.0 等と言及されているライフサイクルは、どちらかといえば、物理的な製品や製造設備等に関するモノ指向の印象が強い。今後、とくにプロセス産業においては、エンジニアリング業務プロセス(ISA-106 Part 2 ではワークプロセス)に基づくプロセスプラントのライフサイクルという観点[19]、いわば、プロセス指向のライフサイクルエンジニアリングという観点を持つことがますます重要となってくると考える。

## 5.5 関連標準間の整合および統合

PA に直接関連する標準には、システムアーキテクチャや通信に関連するものを除いて、ISA だけでも以下のものがある。

- ・ アラームマネジメント:ISA-18.2[20]
- ・ 機能安全:ISA-84[21]
- ・ バッチ制御:ISA-88
- ・ PA 用 HMI:ISA-101
- ・ 経営システムと製造システムとの連携:ISA-95
- ・ 連続プロセスのプロシージャ:ISA-106

その他にも前述の MTP, そこでの使用が前提とされている AutomationML[22], さらに, Industrie 4.0 や IIC, およびそれらに関連して国際標準化された諸規格等々, 百花繚乱の体を奏している。また, 安全に関して言えば, 機能安全のみでプラントの実操業時のプロセス安全を確保できるとも限らず, 別途, OSHA PSM[16]や CCPS RBPS (Risk-based Process Safety) [23]の導入が必要となる可能性も非常に高い。

MTP のように, 一規格で網羅的に関連分野を一括して標準化する試みもあるが, それがどのような決着となるかは未だ定かではない。PA の実現に際して, これらの個別の標準を整合させた上で, サイト特有の事情を盛り込み, プロセスプラント・システム全体として一貫性のある統合をどのように成し遂げるかは, 困難を極めるエンジニアリング課題である。それとともに, 標準化を含めた製造業に対するビジョンを国家的に確たるものとして方針を定めるべく, 高視点から戦略的に取り組むべき最重要の課題であるとも考える。

## 6. おわりに

本稿では, PA に関する ISA 標準, とくに連続プロセスのプロシージャ自動化に関する ISA-106 を中心に紹介し, PA 推進のための課題について考察した。

本来, PA の議論は非常に多岐にわたり, 標準関連だけに絞ったとしても, Industrial-process measurement, control and automation について管轄する IEC/TC65 の全域に関わる検討が必要となる。そのような検討は, TC65 配下の一作業グループ(WG), ましてやエンジニア個人の手には負えるスコープでは到底ない。多種多様な discipline を持った人々がオープンに議論し, 協力

できる場が必要不可欠である。我が国でも学会(≠学界)がそのような場として盛り上がることを期待する。

## 参考文献

- [1] <https://www.plattform-i40.de/>
- [2] <https://www.iiconsortium.org/>
- [3] ISA-TR106.00.01-2013, Procedure Automation for Continuous Process Operations – Models and Terminology
- [4] ISA-TR106.00.02-2017, Procedure Automation for Continuous Process Operations – Work Processes
- [5] ANSI/ISA-88.00.01-2010, Batch Control Part 1: Models and Terminology
- [6] IEC 61512-1 Ed.1.0:1997, Batch control - Part 1: Models and terminology
- [7] ANSI/ISA-95.00.01-2010 (IEC 62264-1 Mod), Enterprise-Control System Integration - Part 1: Models and Terminology
- [8] ISO/IEC 62264-1 Ed.2.0:2013, Enterprise-control system integration – Part 1: Models and terminology, Ed.2, 2013.
- [9] JBF: [S88 入門](#), PSE143 委員会, 2004.
- [10] [製造オペレーションマネジメント入門～ISA-95 が製造業を変える！](#), APSOM, 2015.
- [11] IEC PAS 63088:2017, Smart manufacturing – Reference architecture model industry 4.0 (RAMI4.0)
- [12] Brooks, F. P.: The Mythical Man-Month: essays on software engineering, Addison Wesley, 1975.
- [13] NE 033, Requirements to be met by Systems for Recipe-Based Operations, NAMUR, 2003.
- [14] IEC 63280 ED1, Automation engineering of modular systems in the process industry, 2022 (計画).
- [15] ZVEI White Paper, [Module-Based Production in the Process Industry – Effects on Automation in the “Industrie 4.0” Environment](#), 2015.
- [16] OSHA: [Process Safety Management of Highly Hazardous Chemicals standard \(29 CFR 1910.119\)](#), 2001.
- [17] ANSI/ISA-101.01-2015, Human Machine Interfaces for Process Automation Systems
- [18] IEC 65/840/INF, [International Standardization Activity: Digital Factory Framework](#), p.4, 2020.
- [19] 渚野: [プロセス・プラントライフサイクルエンジニアリング](#), 化学工学, Vol.84, No.3, 2020.
- [20] ANSI/ISA-18.2-2016, Management of Alarm Systems for the Process Industries
- [21] ISA-84.00.01-2004 (IEC 61511-1 Mod), Functional Safety: Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector - Part 1: Framework, Definitions, System, Hardware and Software Requirements
- [22] <https://www.automationml.org/>
- [23] CCPS (化学工学会安全部会監修・翻訳): リスクに基づくプロセス安全ガイドライン, 丸善出版, 2018.

## MTP の標準化の動向と横河電機の取り組み

横河電機株式会社

○黒川 晋平

## 1. はじめに

グローバル化の進む化学業界や製薬業界では、多様化する顧客ニーズ、減少する利益率、発展途上国における急速な市場の拡大、先進国における競争の激化、低価格へ向けた顧客の要求拡大といった課題に取り組んできた。このような課題を抱える化学業界において、プラントのエンジニアリングには以下のような要件が求められるようになってきている。

- 製品の市場投入までの時間の短縮
- 生産の柔軟性の拡大
- プラントの可用性の向上

これらの要件に対応するため、欧州化学工業のユーザーグループである NAMUR において、適応性のあるモジュラー型プラントのオートメーションの実現を目指す MTP (Module Type Package) の取り組みが始まっている。本稿では、MTP の特徴と標準化の取り組みの状況、横河電機における MTP の実装事例について紹介する。

## 2. MTP とは

MTP は、迅速な製品化、高フレキシブル生産（時間、場所、ベンダー、品種）、プラントの可用性の向上などの要件が求められる化学や製薬の製造業において、コスト競争力・時間短縮・柔軟性を実現することを目的としたモジュラーオートメーションの標準化のフレームワークである。複数の製造ユニットをモジュール化してつなげて相互運用性を実現する”plug and produce”を目指して NAMUR を中心に仕様開発のプロジェクトが 2012 年から始まった。

本プロジェクトでは、先ず NAMUR が、ドイツ電気・電子工業連盟 (ZVEI) と協力して、モジュラーオートメーションの勧告文書として NAMUR NE148 (Automation Requirements relating to Modularisation of Process Plants) を発行した。

その後、モジュラー型プラントの実現に向けて NAMUR/ZVEI タスクフォースチームが設立された。MTP の技術仕様はドイツ技術者協会(VDI)/ドイツ電気技術者連合(VDE)と連携

し、VDI/VDE/NAMUR 2658 として標準化が進められている。

モジュラー型プラントを実現するにあたってはサプライヤーに依存せず、モジュールを自由に組み合わせることが求められる。そのため、MTP は、HMI (Human Machine Interface)、診断・保全、アラーム管理、ヒストリカルデータ、プロセス制御といった項目にわたって標準化が進められ、表 1 に示すように複数のパートで構成されており、VDI/VDE/NAMUR 2658 標準として既にいくつかのパートが発行されている。

また、VDI/VDE/NAMUR 標準を国際標準化する取り組みが並行して進められている。2019 年 10 月に IEC(The International Electrotechnical Commission)に新作業項目として承認され、標準開発の作業グループとして IEC TC65 (工業プロセス計測・制御・オートメーション) 配下の分科委員会 SC65E の下に WG14 : Modular Type Package (MTP)が設置され、IEC 化の活動が開始された。IEC 化にあたり、国内での審議は、IEC TC65 国内委員会 (事務局：(一社)電気計測器工業会) の下に SC65E/WG14 国内委員会が設置され、その活動が進められようとしている。

表 1 VDI/VDE/NAMUR 2658 パート構成

Part	Title	Part	Title
2658-1	General Concept and Interfaces	2658-7.1	Implementation Guideline M&A w/ OPC UA
2658-2	Description of Operator Interfaces to Process Equipment Assemblies	2658-8	Safety MTP for Functional Safety
2658-3	Interfaces and Libraries for Basic Object Types	2658-9	Interfaces, Services and Libraries for Safety MTP
2658-4	Services for Process Equipment Assemblies	2658-9.1	Implementation Guideline Safety MTP w/ OPC UA
2658-5	Run Time Aspects and Communication	2658-10	Diagnosis & Maintenance of modular Plants
2658-5.1	Implementation Guideline Communications w/ OPC UA	2658-11	Interfaces, Services and Libraries for Diagnosis & Maintenance
2658-6	Modular Message and Alarm Management	2658-11.1	Implementation Guideline Diagnosis & Maintenance w/ OPC UA
2658-7	Interfaces, Services and Libraries for Messages and Alarms	2658-12	Verification, Validation and Commissioning

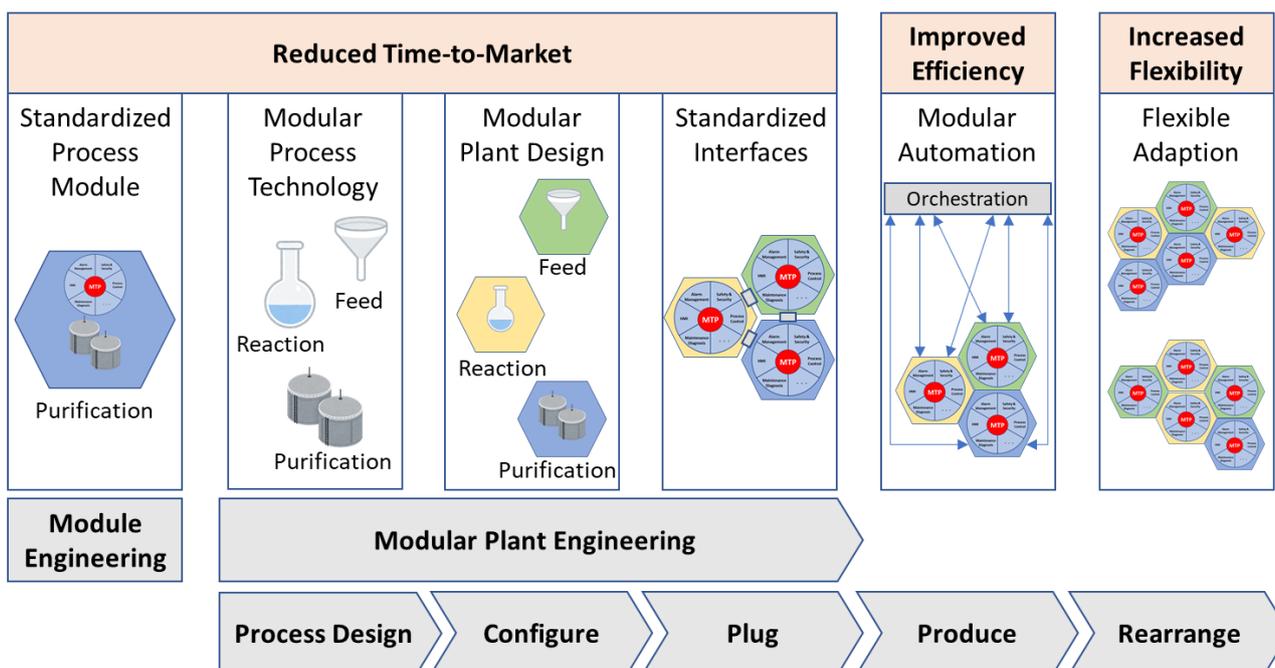


図1 モジュラー型プラントによるエンジニアリング

### 3. MTPの特徴

MTPでは、図1のようにひとつひとつの機能をモジュール化し、それらを組み合わせて生産ラインを構成できるようにすることで中小規模の生産プラントの計画と建設の効率化を図ることができる。モジュール化された機能ユニットは再利用も容易であり、使用実績のあるモジュールを再利用することで、エンジニアリング開発の初期段階におけるミスの発生を回避し、コストの削減と開発時間の大幅な削減につなげることができる。

MTPが目指すモジュラー型プラントは、モジュールエンジニアリングとPOL(Process Orchestration Layer)エンジニアリングからなる。モジュールエンジニアリングではそのモジュールが担うプロセスを実現するための機器の実装を行うだけでなく、プロセスにおけるシーケンスや原材料の流れなどのデータやインターフェースなどのエンジニアリングの自動化に関する情報も含めてMTPに保存される。モジュール間のプロセスの統合を担うPOLエンジニアリングでは、MTPに保存された、それらのデータを読み込むことで、生産ラインを構成するモジュールのプロセスや機能を識別して、モジュール間の統合を自動的に行うことができるようになる。そのため、モジュールの交換・再利用が容易となる。

MTPはこれらの特徴を活かして、化学業界のプラントエンジニアリングに求められる要件を以下のように実現しようとしている。

- 製品の市場投入までの時間の短縮
  - ：既存モジュールを再利用することによる、エンジニアリングの効率化とプラントの迅速な設立
- 生産の柔軟性の拡大
  - ：既存モジュールの交換を容易に行えることによる、プラントの再編成、少数多品種生産への対応
- プラントの可用性の向上
  - ：故障したモジュールを同等のモジュールと素早く交換することによる、プラントのダウンタイムの削減

### 4. MTPの実装事例

MTPの実装事例として、Evonik社が主導するパイロットプラントでの概念実証(PoC:Proof of Concept)プロジェクトが2018年より実施されている。このプロジェクトでは、横河電機と他のオートメーションサプライヤーとの協業により、商用産業環境でMTPを利用して、従来型の生産プラントに冷却装置パッケージを統合することを目指したものである。

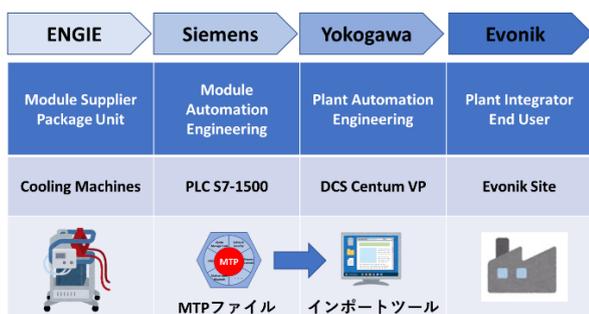


図 2 MTP による既存 DCS へのパッケージ  
ユニット統合のワークフロー

この冷却装置パッケージでは、オートメーションマークアップ言語（Automation Markup Language）をベースに横河電機が開発した MTP インポートツールを利用し、Siemens 社が作成した MTP ファイルを読み込むことで、HMI へ読み込ませるグラフィックの部分的な自動生成を行い、工数の削減に貢献することができた。

## 5. おわりに

MTP は化学業界や製薬業界が抱える課題を解決する技術として注目を集め始めている。化学業界や製薬業界をターゲットとした規格であることから、その標準化は NAMUR を中心としたドイツのユーザーが多く携わる形で進められている。

一方、MTP の国際標準（IEC）化にあたって、日本国内での審議を行う SC65E/WG14 国内委員会の構成はサプライヤー企業を中心であり、ユーザー企業からの参加者はいない状況である。IEC 化を進めていくにあたっては、グローバルに様々な観点からの考え方や意見が求められる。MTP の標準開発にあたり、日本の製造現場の意見を反映できるよう、ユーザー企業の国内委員会への参加を期待する。

**本文中に使われている会社名、商品名、およびロゴ等は、横河電機株式会社または各社の登録商標または商標です。**

Continuous process operation

## [2F13-14] Continuours process operation 2

Chair:Tetsuo Fuchino(Tokyo Institute of Technology)

Fri. Nov 13, 2020 4:00 PM - 5:00 PM Room F (3F/Conf. Room F1-2)

---

### [2F13] Application of integration technology with AI and simulator

○Takashi Hiramatsu<sup>1</sup> (1. Chiyoda Corp.)

4:00 PM - 4:30 PM

### [2F14] Introduction of self-optimizing APC system and vertically integrated production optimization system

○Koji Takasato<sup>1</sup> (1. AspenTech Japan)

4:30 PM - 5:00 PM

## AI-シミュレータ連携技術による予測・最適化の プラント適用事例紹介

(千代田化工建設) ○平松 隆志<sup>ひらまつ たかし</sup>

### 1. はじめに

本講演では、当社がこれまで開発を進めてきたAIとシミュレータを連携した新たな技術のプラントへの適用事例を紹介する。

### 2. EFEXIS™

まずは当社の高度デジタルソリューションであるEFEXIS™について紹介する。

EFEXIS™とは、“Efficiency（効率性）”と“Expertise（専門性）”を語源とする造語である。当社はエンジニアリングとデジタル技術を融合したEFEXIS™のプラントへの実装を通じて、既存アセットを最大限活用しながら、プラントの操業・保守・保全に新しい価値をプラントオーナーへ提供する。

#### EFEXIS™ ソリューションラインアップ

<b>Improve Performance</b> 	<b>Improve Availability</b> 	<b>Enhance Operation &amp; Maintenance</b> 
<ul style="list-style-type: none"> <li>• LNG Plant AI Optimizer®</li> <li>• Refinery Process Unit Optimizer</li> <li>• Distillation Column Operation Optimizer</li> <li>• Fired Heater Optimizer</li> </ul> <p>産業設備の運転を最適化することで、お客様のプラントの収率、効率、収量を改善し、収益性向上に貢献できます</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anomaly Prediction</li> <li>• Failure Prediction</li> <li>• Intelligent Furnace</li> <li>• Furnace Coking Prediction</li> </ul> <p>産業設備の運転停止や故障の予知が、それらの事象に迅速に対応することを可能にし、お客様の大切なプラントの安定操業に貢献できます</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tank Corrosion Monitoring</li> <li>• Gas Leak Detection</li> <li>• SDM Control Tool</li> <li>• Inspection Work Support and Automation Tool</li> </ul> <p>産業設備の過熱監視を可能とし、リスクや無駄を排除し、プラントの日常や定期点検の効率化、省人化、安全向上に貢献できます</p>

Fig. 1 EFEXIS™ ソリューションラインアップ

### 3. AI-シミュレータ連携技術のプラント適用事例

#### 3.1. AI ソフトセンサーへのシミュレータの活用

ソフトセンサーとは、直接測定できなかつたり、測定に時間がかかるプロセス値を複数のハードセンサーの測定値を入力とした関係式からリアルタイムで推定する技術であるが、この関係式をAI学習により構築したものがAIソフトセンサーである。一般的にAI学習には膨大な学習データが必要であるが、実際のプラント運転データでは学習量として不十分となることが多く、シミュレータを使用して学習に十分なデータを生成しAIに学習させることで、実用的な精度を得ることができる。さらにシミュレータの活用により、多様で複雑な運転パ

ーンでのソフトセンシングも可能となる。

また実プラントの運転データとシミュレータで生成したデータの両方を使用してAI学習を行うことを当社では“Hybrid 学習”と呼んでいるが、シミュレータで生成したデータのみで学習したAIより、Hybrid 学習したAIの方が予測精度が向上した事例も出てきており、今後の発展が期待できる技術である。

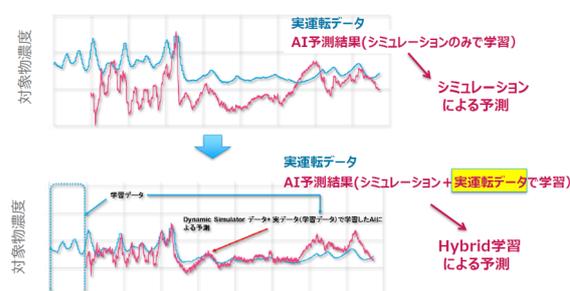


Fig. 2 Hybrid 学習によるAIの予測精度向上

#### 3.2. 油種切替 AI システム

油種切替 AI システムは、製油所における油種切替運転において、オペレータにリアルタイムで適切な運転パラメータを提供して運転を最適化するデジタルプロダクトであるが、AI構築にあたりプロセスダイナミックシミュレータ、過去の運転データおよび深層強化学習というAI技術を活用している。

深層強化学習は Google が開発した囲碁AI “AlphaGo”で用いられ有名となった技術であり、AI がとった行動の結果に「報酬」を与え、その「報酬」が最大化するようにAIが自ら学習を繰り返して精度をあげていく手法である。この仕組みを利用し、プラントの油種切替運転においてもAIがより良い運転（「報酬」の最大化）となるように自ら学習を繰り返すことで、省エネ・製品ロス最小化・運転制約・早期切替完了などの総合的な観点から最適な運転パラメータを提供できるAIを構築している。

その他に、本システムは以下のような特徴を有している。

- AI による重要計器の将来予測と製品品質データのリアルタイム可視化
- 装置内の各機器の運転/劣化状態の可視化

- 切替運転評価による高度な運転技術の伝承をサポート
- 切替中の中間留分量の増加（残渣油最小化）、切替運転時間短縮、熱バランス最適化などの運転パラメータ最適化

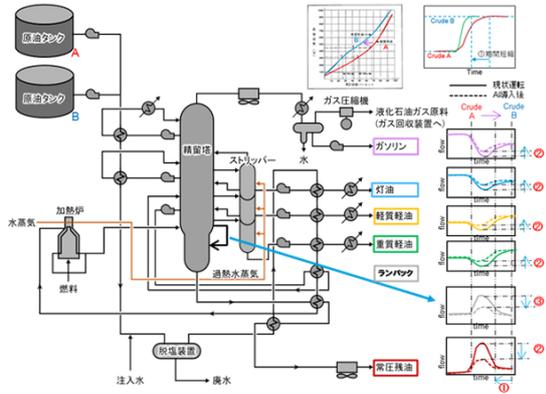


Fig. 3 製油所における油種切替運転

(引用)

Fig. 1, 3 :

<https://www.chiyodacorp.com/jp/service/ai/>

## 自律型 APC システムと垂直統合型のオペレーション最適化自動制御紹介

(AspenTech) ○ 高里 耕治

### 緒言

現在、世界中の様々な業界においてデジタルトランスフォーメーション（DX）が推進されるなか、Advanced Process Control（APC:高度制御）といった既に効果の実証されているテクノロジーにおいても、製油所における DX を実現するためには、従来の APC 機能だけでは不十分であり、新たな機能や、新しいあり方が必要とされる。

具体的には、次世代の APC では

①従来の自動化制御の問題点である、メンテナンス作業の複雑化や運転条件の違いによるパフォーマンス悪化の点を克服するための自律化機能

②生産計画、スケジューリングシステムなどの既存の技術と連携した垂直統合型の全体最適機能が

必須になる。

本発表では上記の点を踏まえた DX 時代にあるべき AspenTech 社の最新 APC 技術に関して紹介をする。

### 自律型 APC システム

現在の「VUCA」（「Volatility（激動）」「Uncertainty（不確実性）」「Complexity（複雑性）」「Ambiguity（不透明性）」）の時代において、あらゆるシステムにおいて環境変化に強いアダプテ

ィブな機能が求められている。より具体的に言うと APC を長期にわたり運用していくにあたり、様々な外的変化要因（装置の経年劣化、触媒の変更、装置改造、市場の変化）等の APC パフォーマンスに大きな影響がある中で、APC のパフォーマンスを維持するにあたり定期的なメンテナンス作業や、新しい装置、製造方針に合わせたリバンプ作業などが必須である。しかし現在では多くの APC ユーザーがそのメンテナンスコストと必要人的リソースの問題から十分なメンテナンス、リバンプ作業を行えていない、もしくはメンテナンス、リバンプをしている場合でも、エンジニアリング作業が旧来の属人化された方法であり、将来の運用において不安が常に残っている。DX 時代の APC では自律化という意味で、この問題点をクリアする必要があるし、最終的にはメンテナンス作業自体を機械学習で実行される機能が必要になるであろう。

Aspen DMC3（以下 DMC3）は従来の APC ソフトとは違い、長期にわたって APC システムをメンテナンスし運用していくことに主眼を置いて開発された製品であり、その有効性は導入時だけでなく、導入後の 2 年目以降に大きな効果を発揮する。以下に DMC3 の大きな特徴を列記する。

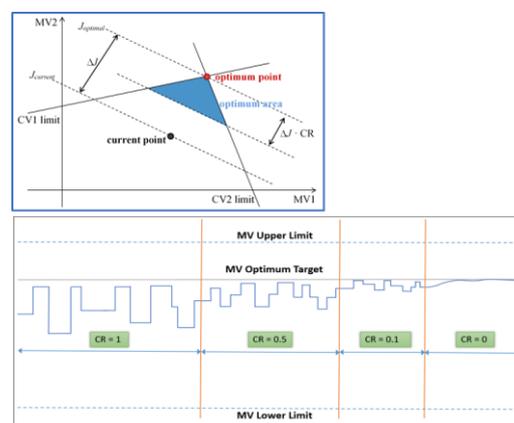
### 最新の自動ステップテスト機能

APC プロジェクトやメンテナンスにおいてモデルを同定するにあたり、プラントに人為的に外乱を与え、その挙動を解析する必要がある。具体的には APC の操作端となる変数のセットポイントをある間隔をあげながら変更する作業を行う。この作業は一般的にステップテスト（もしくはプラントテスト）と呼ばれるものであり、対象となる装置の範囲によるが 1~4 週間、24 時間交代で作業を行う形になり、この作業には多くのリソースの投入だけでなく、プラントの安全操業のリスク、プラントの省エネや生産性を度外視した運転の実施が必要になる問題があった。

DMC3 では自動でステップテストをすると同時に、APC と同様に LP を使用したコストの概念を持つことでステップテスト中の経済性のロスを最小化することを可能にした。この機能では例えばステップテスト初期やメンテナンスが必要なモデルの精度が悪い場合でも、LP の目標値が大きく変化しない様に自動で切り替わるだけでなく、運転装置の制限値または制限値付近に近づく自動で操作端の変化が最小になる様になることでステップテスト中の経済性 + 安全性を確保することを可能にした。またこの機能ではステップテスト中の経済性重視をするモード（小さなステップ動作）と、テストを重視するモード（大きなステップ動作）のトレードオフのバランスをエンジニアが簡単に調整できるようになっている（図 1 参照）。これにより解析データが不十分なステップテスト前半ではテストを重視し、データが豊富になっ

てきたステップテスト後半では経済性を重視したモードに移行する事が可能になっている。

図 1 最新の自動ステップテストモード



また、自動で行われるステップ動作は最小限のフィードバック関連のみを含んでいるため、著しい外乱が存在する場合でも高品質のテストデータができるようにステップ動作が行われる。

### 閉ループ自動モデル同定機能

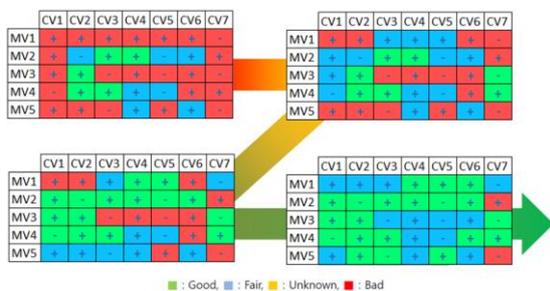
従来のモデル同定法ではプラントテストで APC の操作端を単独で大きくステップ上に動かす必要があったが、最新の部分空間同定法を使用する事で、複数の操作端で同時に小さなステップ動作を行っても、十分正確なモデルを得ることが可能になっている。さらに、以下の機能と特徴を有する事で、閉ループ制御での自動モデル解析とアップデートが可能になった。

1. プラントテスト中の運転データのプロセス値やステータス状態などを見て、モデル同定に使用するか否かを判別する自動データスライス機能

2. 上記機能に加え、さらに PID のパフォーマンスも加味した自動データスライス機能
3. 閉ループ制御中の自動同定で得られたモデル結果を、自動でクオリティ判別しウェブインターフェースの運転画面からモデルのアップデート、オフラインシミュレーションを行う機能

これにより、APC が数週間、あるいは数か月間制御している間に、全自動でデータを選び分け、モデル同定に適さないデータ期間を自動で削除し、自動でモデルを同定する事が可能である。またモデル同定の結果が収束すると、現在使用しているモデルの中から変更すべきモデル部分をピンポイントでハイライトしてくれる機能がある。

図 2 モデルクオリティ判別機能



また、上記の機能を有する事で、メンテナンス作業自身の最適化が可能にもなる。例えば従来のメンテナンス作業ではエンジニアはステップテストでは主にステップ動作作業にかかりきりになるため、ステップテスト終了後にモデル同定を行っていた。結果としてモデルをアップデートして、次に APC を投入するまで時間がかかり、その間に経済的な損失が発生していたが、DMC3 ではプラン

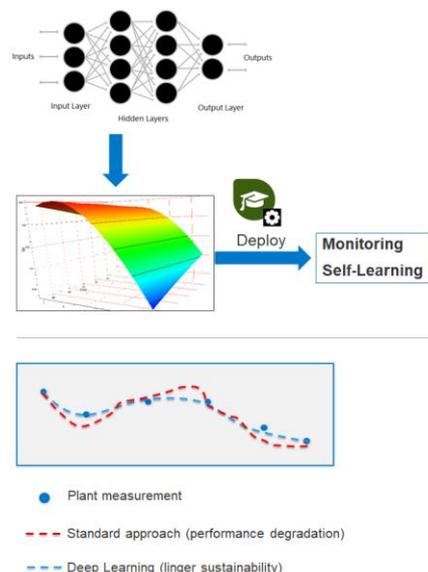
トテストを実施しながら同時にモデル同定と日々のアップデートができるため、テスト後半にはアップデートされた最新モデルでの制御にシームレスに移行できるようになり、メンテナンス作業における経済的なロスを最小化する事が可能になった。

### AI と融合した最新 APC 機能

現在、様々な業界において AI 技術を取り入れる試みが行われているが、AspenTech では長きに渡り積み上げてきた、業界に特化した経験/知見と AI 技術を融合した“Industry AI”を APC 機能と融合する事で、様々な機能の自律化を目指している。

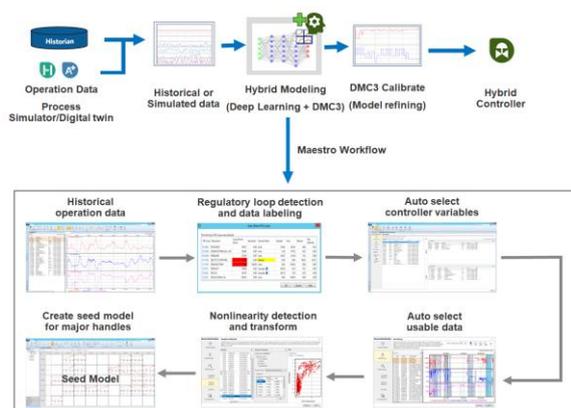
“Industry AI”と融合した最新の APC では Deep Learning Model によって、幅広い運転状況下でのプロセスの動特性をカバーする事が可能になる。この技術は制御だけでなく、ソフトセンサーにも使用することができ、非線形性が非常に強いプロセスなどにも応用できることが期待される。

図 3 Deep Learning Model



さらに、今まで APC エンジニアの経験に依存していた APC のデザイン設計そのものさえ AI で自動化させることが可能になる。

図 4 Industry AI による APC ワークフロー



#### APC と生産計画との関係による全体最適

次に「生産計画、スケジューリングシステムなどの既存の技術と連携した垂直統合型の全体最適機能」に関して紹介する。DX 時代では APC は単独のメリットだけではなく、生産計画、スケジューリングといった他の技術と連携した垂直統合型の全体最適（Production Optimization）を行える機能が必要になると考えられる。

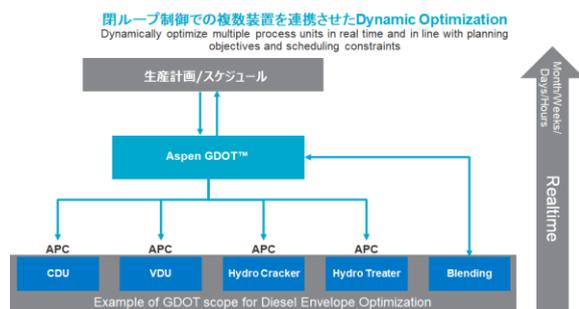
図 5 AspenTech のソリューションポートフォリオ



実際の石油精製、石油化学などの工場では、月次、週次レベルでのオペレーション最適を行うために生産計画やスケジューリングなどを使用しているが、ここで解かれた最適目標値が実際の工場の運転の目標値なる際には過去の実績から多少の余裕代（マージン漏れ）を含んで（もしくは先に生産計画やスケジューリングの中の調整ファクターを介して）週、日毎に各製造現場に与えられている。多くのプランナーやスケジューラーはこの余裕代を減らす努力をしているが、これは生産計画やスケジューリングの正確性を上げることだけでは解決しない。何故ならば、プランナーやスケジューラーはリアルタイムで実際の工場の運転状況をみて最適解を計算し続けているわけではないため、どうしても過去の実績をから想定される余裕代を考慮する必要がある。また、そもそもの生産計画やスケジューリングなどで各 APC システムなどとリアルタイムでリンクして制約条件を反映できる仕組み自体が無い場合も多い。

Aspen GDOT（以下 GDOT）では、上記の問題を解決するために生産計画モデルと APC のダイナミックモデルを組み合わせ、かつ革新的なデータの処理方法を使用する事により、分刻みのリアルタイムで各運転装置にある複数の APC のダイナミック制御の部分を検討しながら最適目標値を調整するといった工場全体の最適運転を可能にする。

図6 生産計画系と連携した全体最適 GDOT



GDOT の特徴として生産計画モデル（プロセスシミュレーターモデル内蔵も可能）と APC のダイナミックモデルを組み合わせた革新的なモデリングアプローチが挙げられる。これにより、工場全体でのユーティリティコスト削減だけでなく製造フローの連携最適も達成が可能になっている。例えば石油精製プラントやエチレンプラントの最適化の範囲には、工場全体での脱硫能力を鑑みての最終製品内のサルファー分最適化、アロマ製品の製造フローの最適化、各装置での負荷バランスの最適化（上流の装置で高純度にすることで、下流装置で使用するユーティリティを減らすなどの最適分配）が含まれる。

リアルタイムで工場の全体最適をするには、上記のモデリングの特徴だけでは達成はできない。なぜならば工場全体では上流装置と下流装置で製造フローの遅れや、中間タンクの存在、定常モデルでは表現できない部分などといった様々要因を考慮する必要があるためである。GDOT では上記の問題を克服するために、オンラインでのダイナミックデータを処理する独自のデータリコンシレーション技術により、リアルタイムでの実装置の運転

状況を監視しながらの閉ループ制御が可能になっている。

GDOT は 2018 年にアスペンテクノロジー社に買収される前から多くのグローバル企業で既に使用されており、既に実証済みの技術である。多くのユーザー様でそのメリットを発表していただいている。例えば精製能力日量 22 万バレル相当の製油所では、GDOT により中間留出生成物の 10%増加などで全体として年間 1,000 万ドルの利益を達成している。利益の大部分は、複数の APC を調整する事で、カットポイント（蒸留点）の最適化、各脱硫装置への最適分配、ガソリンブレンドの最適化などを実現する事で達成された。またエチレンプラントにおいて、GDOT は各ナフサの性状ごとに個々の分解炉毎にシビアリティ、スチーム比、分解ガスコンプレッサーのサクシオン圧の最適目標値計算を行い、装置全体としてオレフィン製品最大化、ユーティリティ最適化を実現する事が可能になっている。またスケジューリングソフトウェアと連携する事でデコーディングスケジュールの向上などにも大きな効果が見込められる。