

自動化に向けた課題:ISA-TR-106 より

ふちの てつお
(東工大) ○(正) 渕野 哲郎

1. はじめに

近年、プロセス産業／石油プロセス産業において、製造の合理化、少人化による省コスト化に加えて、オペレータの操作ミスによる重大事故の発生防止を目指して、連続プロセスのスタートアップ、シャットダウン操作を含む、非定常操作における自動化に向けた動きが活発化し、そのための技術要件や必要な要素技術の開発、運転支援システムの開発やAIの活用などが検討されてきている。

経営情報部会では、2020年に「連続プロセスオペレーション自動化基盤技術の調査」WG(WG2)を設立し、ISA-TR106; “Procedure Automation for Continuous Process Operations” [1], [2]を参考として、プロセス運転の自動化への取り組み方法を調査・検討を行ってきた。このISA-TR106のエッセンスを概観したのち、TR-106が前提条件として、これまで議論がなされてこなかった課題について論ずる。

2. ISA-TR106の概要

ISAの出版物は、Sで始まるStandardとTRで始まるTechnical Reportに大別でき、TR-106; “Procedure Automation for Continuous Process Operations”は、後者に分類される。このTechnical Reportは、2冊に分かれており、1冊目TR-106.00.01-2013[1]には、“Models and Terminology”の副題がつき、2冊目TR-106.00.02-2017[2]には、“Work Processes”の副題がつく。TR-106は、連続プロセスの運転における手順(Procedure)の自動化をテーマとし、手順の自動化に関するグッドプラクティスをまとめ、自動化された手順を産業用のシーケンサーや基本プロセス制御システム(BPCS)へ組み込むための戦略の導出を目的としている。

3. TR-106.00.01-2013

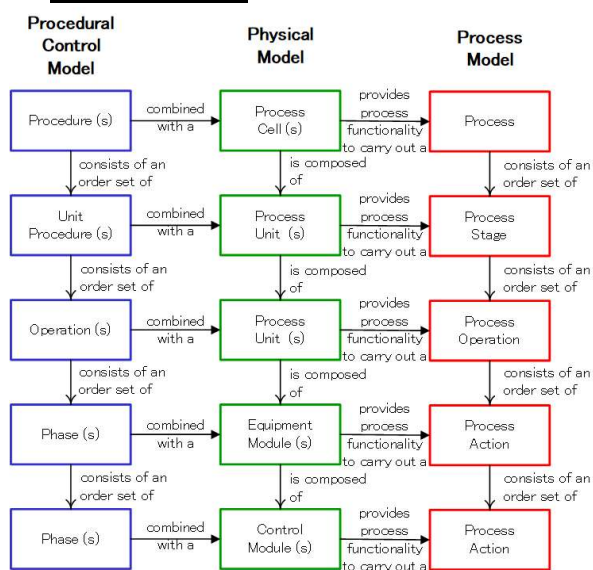


図-1 S88.01-1995 モデル

TR-106.00.01 は、バッチプロセスオートメーションの規格であるANSI/ISA-S88.01-1995[3]を連続プロセスの非定常操作に適用したものである。ANSI/ISA-S88.01では、エンジニアリングを、Procedureの階層化構造を表す「Procedural Control Model」、Equipmentの階層化構造を表す「Physical Model」、そしてProcess Functionの階層化構造を表す「Process Model」の3つのモデルのアソシエーションとして表し、1995年に発表された1st Editionでは、図-1に示すように、「Procedure」を「Equipment」に作用することで「Process Functionality」を発現する、バッチオペレーションを定義するモデルを提示している。

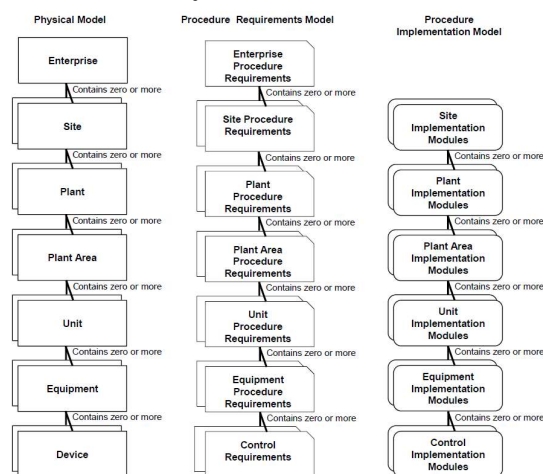


Figure 5 Model Summary

図-2 TR-106.00.01のモデル(TR-106.00.01[1]より抜粋)

TR-106.00.01では、「Physical Model」、「Procedure Requirements Model」、「Procedure Implementation Model」の3つの階層化構造を有するモデルの組み合わせにより、連続プロセスオペレーションを表し、図-2では、「Physical Model」であらわされるプロセスモジュールによって、必要なプロセス状態を得るための「Procedure Requirement」を実行するための「Procedure Implementation」が導出されることを表している。S88.01モデルと、TR-106.00.01モデルとは、操作要求を「Process Model」とするか、「Procedure Requirement Model」とするかの違いはあるが、根本的には大きな差はない。また、両モデルともPhysical、Process、Procedure Models(特にPhysical Model)の「モジュール化」技術に基づくという点でも同じであり、モジュール化に対して技術的な問題がないことを前提としている。

4. TR-106.00.02-2017

TR-106.00.02-2017では、ライフサイクルを通じて、意図通りの自動化された手順を維持管理してゆくための参照モデルを規定して、実装のための仕組みを定義している。

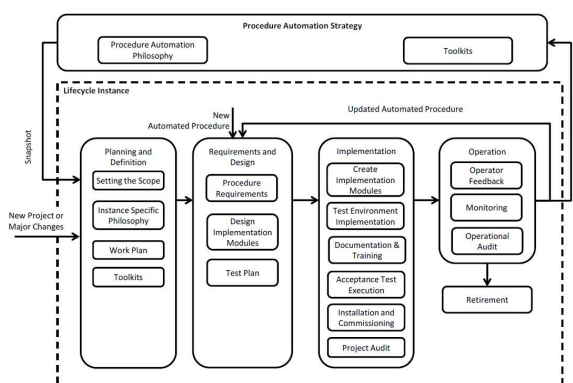


図-3 TR-106.00.02 の自動化された Procedure のライフサイクルリファレンスモデル(TR-106.00.02 より抜粋)

図-3 では、ライフサイクルアクティビティを、「Procedure 自動化戦略」レベルと、「ライフサイクルインスタンス」レベルの 2 段階に分け、前者レベルで、実装、実行結果と Procedure 自動化思想との間の整合性を管理し、後者レベルで、前者レベルから出力された「Procedure 自動化思想」に基づき、Procedure 自動化の計画、要求定義を行い、設計、実装、実施を、PDCA サイクルにより管理する仕組みを規定している。図-3 のリファレンスモデル自体は、ソフトウェア開発などで用いられる V 字モデルと同様であり、図-2 のモデルが、自動化のための Procedure 設計を表すことができることを前提として、Generic なモデルである。

5. 連続プロセスの自動化に向けた課題

3, 4で述べたように、TR-106.00.01、TR-106.00.02 は、モジュール化技術が前提であり、それはプロセス/プラントを構成する機器、操作要求(プロセス要求)、そして実装される操作を、階層間で整合するようにモジュール化するための技術のことである。前述したように、TR-106 は、ISA-S88.01 を連続プロセスに拡張したものであり、ISA-S88.01 もモジュール化技術が前提となる。しかし、バッチプロセスオペレーションでは、モジュール化に様々な組み合わせが存在し、それによって、Building Block としてモジュールの汎用性に影響することはあっても、モジュール化によって自動化自体を阻害することは稀である。

バッチプロセスを構成する機器が、それぞれ単独で機器モジュールの最小単位となりうること、機器のオペレーションが、複数の操作モジュールによって構成されるが、各操作は機器モジュール内で完結する特徴を持つ。これであれば、プラントを構成する機器をどのようにモジュール化したとしても、機器モジュールと操作モジュールが入れ子状態となることはない。これは、物質の流れと、操作の流れが等しいことに起因する。

対して、連続プロセスでは、流通していなければ、安定な状態に保つことができないため、物理的なモジュールを構成するためには、循環オペレーション(ブロック運転)をするためのプロセス構造を設計しておく必要がある。しかし、これだけであれば、モジュールサイズが多少大きくなることと、

モジュールの起動条件や終了条件を考慮して、モジュール間の動作順序を設計する必要性が生ずるだけで、バッチプロセスオペレーションとの差はない。何故ならば、モジュール間、モジュール内の操作順序と、物質の流れとが整合するが故である。

バッチプロセスと連続プロセスの最大の違いは、生産性にあり、連続プロセスは製造コストの低減、省エネルギーを目的として、初期設計に加えて、リバンプ設計において、熱回収や熱統合のために HEN(熱交換器網:Heat Exchanger Network)設計や変更設計が行われる。特に近年では、エネルギー価格の高騰に加えて環境への配慮から、PDM(Pinch Design Method)により、最小必要用益量(Minimum Required Utility)まで熱回収が行われるようになってきている。熱回収に余裕があり、モジュール内だけで熱回収が行われているのであれば問題はないが、プロセス概念設計のモジュール間で熱回収が行われるようになると、物質の流れは物理的なモジュールと操作モジュールの間で整合したとしても、エネルギーの流れがモジュール間で相互作用を生む。この問題を解決するためには、

- (1) 干渉しあうモジュール間で同期をとる
- (2) 干渉する機器に必要な装置を加えて、どちらかのモジュールだけに組み込む

必要がある。しかし、(1)は、干渉するモジュールを一つのモジュールに組み込むことを意味し、オペレーションの階層化が困難となる。このことは、モデルの保全性が低下することを意味し、変更を管理するために多くの労力を必要とし、自動化の実行可能性は低下する。(2)は物理的なアイソレーションや、単独に操作を行うための装置、安全操作に必要な装置の追加が必要となり、それらの追加装置にかかわる操作を、既存の操作モジュールに加えなければならない。これら装置の追加と操作の追加は、装置の複雑化と操作の複雑化を招き、結果としてリスクの増大を生み、許容リスクを超えると、さらなる安全対策が必要となり、自動化は困難となる。

連続プロセスの自動化に向けた課題とは、モジュール化の問題であり、技術的には物質の流れと、エネルギーの流れがモジュールを介して整合しないことに起因する。この問題は、単独で物理的な機器のモジュール化を行っていたのでは解決にはならない。機器モジュールと操作モジュールが整合するように、機器のモジュール化を行う他ない。

6. Startup Block Operation を初期概念設計で考慮することで熱回収システム設計においてモジュール化を行った例

化学プロセスの操作性、安全性を含めて、オペラビリティはプロセス構造に依存する。逆に言えばオペラビリティを確保するためには、許容されるオペラビリティを制約条件としてプロセス構造を決定しなければならない。そして、基本的なプロセス構造が決定されるのは、一般にオペレーションが設計されるとされる詳細設計段階ではなく、概念設計段階の早い時期である。このことは、連続プロセスの自動化において、例えばプラントのスタートアップ操作を考えたとき、プロ

ック運転を可能にするためのプロセス構造、すなわちブロック運転としての操作要求を満たす、プラント機器のモジュール化は、概念プロセス設計の早い時点である、BFD (Block Flow Diagram)設計段階で考慮されなければならないこと示している。

Fuchino, et. al. (2018) [4]は、メタノールを出発原料として、MTO (Methanol To Olefin)プロセスの中間原料となる Di-Methyl Ether (DME)の製造プロセスの概念設計を例に、ブロック運転に対する操作要求を制約として BFD 設計を行い、それに基づき Preliminary PFD 設計、HEN 設計を含めた PFD 設計を行った。ここでは、この設計結果を用いて、スタートアップのためのブロック運転に対する操作要求を満たす PFD 設計の可能性について考察する。

表 1 に、BL における原料、製品、ユーティリティ取り合い条件を示す。原料として、Methanol (Me-OH)プロセスの粗メタノールセパレータ液を原料とするため、原料には約 25mol%水が含まれ、Me-OH 合成ループにおける未反原料である CO₂が約 0.5mol%溶け込んでいる。

表 1 設計要求(一部)

Item	Specification
Feed Me-OH	75mol % Me-OH+25mol% Water 30[C], 1.013[bar] Liquid(@BL) Impurity: containing a saturated amount of CO ₂
Product	99.5 wt% DME (+Me-OH) 46[C], 11.4[bar] Liquid (@BL)
Production rate	1500 (t/day)
Utilities	Heating Steam: 12[bar] saturated (=190[C]) Cooling Water: 30[C] supply, 38[C] return LP high purity N ₂ available
Waste Water	99wt% (less than 1wt% of Me-OH)

表 2 技術移転情報(一部)

Category	Item	Transferred Information
Main Reaction	Thermochemical equation	$2\text{CH}_3\text{-OH(g)} \rightarrow \text{CH}_3\text{-O-CH}_3\text{(g)} + \text{H}_2\text{O(g)} + 11770[\text{kJ/kmol}]$
	Catalyst	Gamma Alumina
	Catalyst Deactivation	Condensed Water
	Normal Operating Region	250[C] to 400[C] without no side reaction
Kinetic Model		$-r_M = k_0 \exp(-E_a/RT) p_{\text{Me-OH}}^n \exp(-E_d/RT) p_W$ $r_M [\text{kmol/m}^2\text{-cat-h}], P_{\text{Me-OH}} [\text{kPa}], P_W [\text{kPa}]$ $k_0 = 1.21 \times 10^6 [\text{kmol/m}^2\text{-cat-h-kPa}], E_a = 80.48 \times 10^3 [\text{kJ/kmol}]$ $k_d = 5.07 \times 10^8 [\text{kmol/m}^2\text{-cat-h-kPa}], E_d = 11.83 \times 10^4 [\text{kJ/kmol}]$ $T[\text{K}], R = 8.314 [\text{kJ/K-kmol}]$
	Equilibrium Model	Refer to Ghavipour, M. and R.M.Behbahani, J of Ind. Eng. Chem., 20,1941-1951(2014)
Side Reactions	Me-OH reaction	$\text{Me-OH} \leftrightarrow 2\text{H}_2 + \text{CO}, \text{Me-OH} \leftrightarrow 3\text{H}_2 + \text{CO}_2$ (less than 250[C])
Corrosion	Olefin reaction	nDME $\leftrightarrow 2\text{C}_4\text{H}_{10} + n \text{H}_2\text{O}$ (more than 400[C])
	SUS	Deposits under carbonate pitting
Physical properties estimating equation	CS	Deposits under carbonate uniform corrosion
		PRSV

表 2 には、開発からプロセス設計へ伝達される技術移転情報の一部を示す。触媒は γ アルミナベースであり、凝縮水の存在によって被毒されるため、反応器に原料が供給される前に、水を分離する必要がある。また、原料に含まれる CO₂の存在は、Carbonate Pitting の危険性が予測されるため、Me-OH Separator に入る前に、CO₂を Light End として分離することとした。更に、触媒が、凝縮水によって触媒が被毒されることは、スタートアップ時の反応器 Heating Up に、実流体を用いることができないことを表し、Hot N₂を熱媒体とすることし、反応器を Hot N₂ 循環システムと合わせて独立したモジュールとした。反応器出口の蒸留分離プロセスは、Direct Sequence とし、反応器出口流体下流の Me-OH Separator は、供給原料中の水を分離するための Me-OH

Separator と統合し一塔とすることで、運転および維持管理を必要とする装置の数を減らしている。反応器入口、出口配管および機器の加熱には、加熱媒体として Me-OH Separator Distillate の Me-OH を用いる。反応器の加熱が独立に行われることから、スタートアップにおける反応器入口、出口の Heating 操作では、熱媒体となる Me-OH は、反応器をバイパスし、バイパスした Me-OH は凝縮された後に供給原料ラインに戻される。反応器入口、出口および反応器の Heating Up 段階では、DME が生産されていないため、DME Separator はこの段階では起動の必要がないため、独立したモジュールとして取り扱う。以上より図 4 に示す BFD を得ることができ、3 種類の色に分けて示すようにモジュール化を行うことが可能となる。

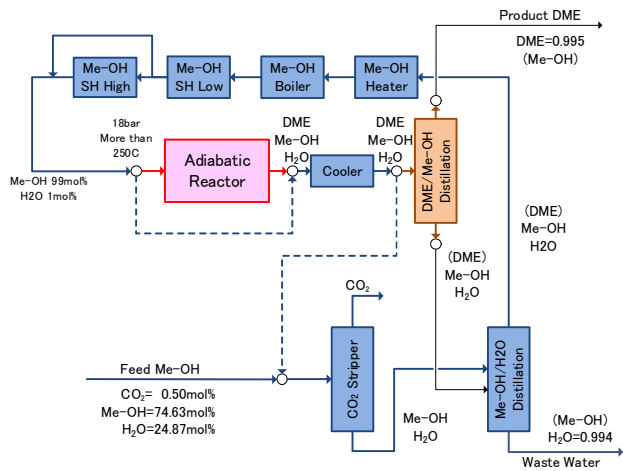


図 4 Startup Block Operation を考慮した BFD (Block Flow Diagram)

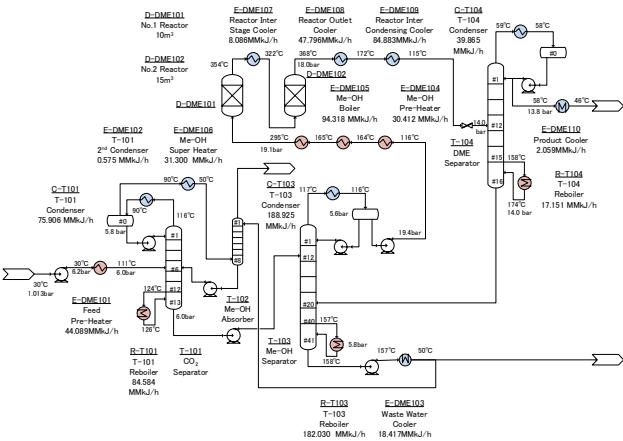


図 5 HEN 設計のための Preliminary PFD 設計

図 4 に示す基本 Scheme に従い、各単位操作ごとに設計を行い図 5 に示す Preliminary PFD (Process Flow Diagram) 設計を得ることができる。ここでは、HEN はまだ設計されていない。各流体(青で表す低温流体、オレンジで表す高温流体)の必要加熱量と必要冷却量を算出する。

図 5 の必要加熱量を必要冷却量を及び温度プロファイルを入力として、 $\Delta T_{min}=20[\text{K}]$ として熱解析(Problem Table)を行い、Grand Composite Curve を得た。これにより、124°C (低

温流体基準)で Pinch Point が存在することが確認された。

求められた Pinch Point に対して、Pinch Point をまたいで熱交換が行われないように(最大熱回収を達成できるように)、PDM (Pinch Design Method)により、Grid Diagram 上で熱交換器網の設計を行う(図6)。この時、図4のモジュール内での熱交換に限ることとすることで、物質の流れとエネルギーの流れとスタートアップ操作の間で不整合とならないように留意した。反応器入口／出口間の熱交換に加えて、反応器入口流体と、Me-OH Separator Bottom の Waste Water Cooler との間で熱交換を行う結果を得た。図4のモジュール内だけの熱交換で、最大熱回収を達成することができた。

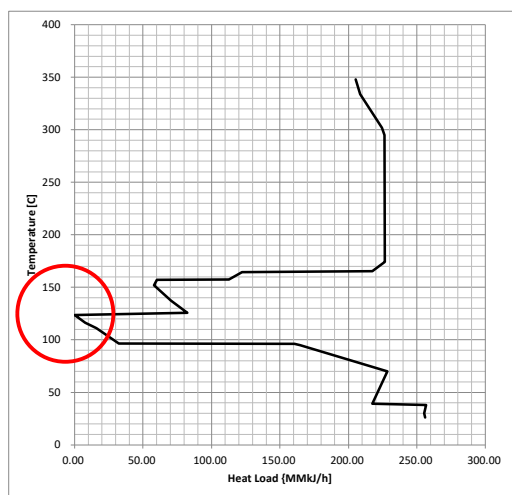


図6 熱解析結果(Grand Composite Curve)

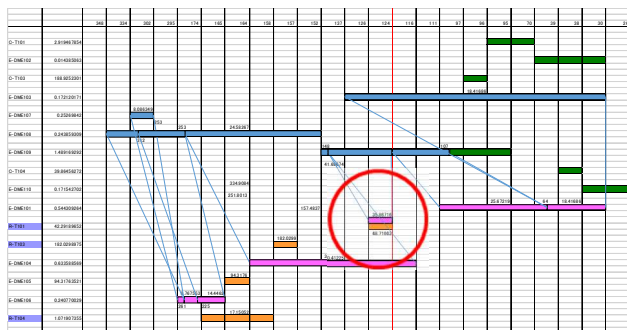


図7 Grid Diagram による HEN 設計

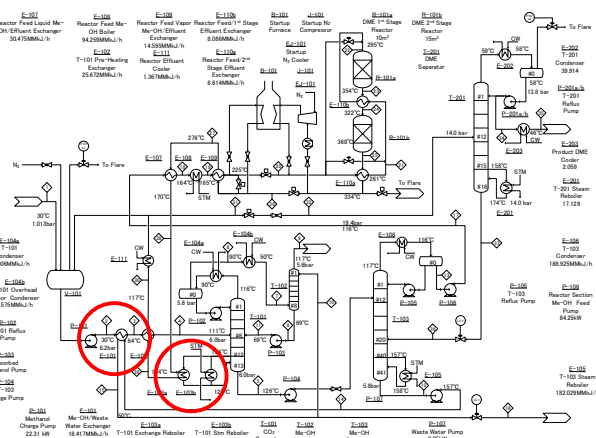


図8 Start Up Block Operation を考慮した PFD (Process Flow Diagram)

Grid Diagram 上での HEN 設計結果をフローシートシミュレーション上で実現させ、図8の Start Up Block Operation を考慮した PFD (Process Flow Diagram)を得ることができた。

7. おわりに

連続プロセスの自動化に向けた課題として、モジュール化の問題を指摘した。これは、物質の流れと、エネルギーの流れがモジュールを介して整合しない場合に生じ、この問題を解決するためには、最大熱回収を達成する HEN の Heat Match が、モジュールを超えて熱交換することがないようにモジュール化を行うほかにはない。DME プロセスの概念設計を例に、BFD レベルで操作要求を考慮したモジュール化を実施し、モジュール内だけで熱回収を行うように HEN を設計することで、自動化の要件を満たすモジュール化の可能性を示した。しかし、この例題で最大熱回収を可能にして、モジュール化を行うことができた最大の理由は、CO₂ Stripper の Reboiler 熱負荷が、Upper Pinch Point 上に現れるように、たまたま Stripper 操作圧力を設定することが出来たことに寄る。連続プロセスの自動化を技術として確立するためには、HEN 設計制約及び操作設計制約を同時に満たしたモジュール設計方法の確立が不可欠であろう。

参考文献

- [1] ISA. ISA-TR106.00.01, "Procedure Automation for Continuous Process Operations –Models and Terminology," August 2013.
- [2] ISA. ISA-TR106.00.02, "Procedure Automation for Continuous Process Operations – Work Processes", May, 2017.
- [3] ISA. ANSI/ISA-S88.01, "Batch Control Part 1; Models and Terminology", October, 1995
- [4] Tetsuo Fuchino, Teiji Kitajima, and Yukiyasu Shimada, "Representation of Process Design Rationale for Change Management", Proceedings of PSAM 14 Probabilistic Safety Assessment and Management, September, 14-21, Loss Angels, CA, USA, 2018, Paper 250.