

FCC 最適運転 AI システムとその将来展望

（千代田化工建設）○入倉 ^{いりくら} 基樹 ^{もとき}

1. はじめに

本講演では、まず千代田化工建設株式会社（以降「当社」）のデジタルソリューションである EFEXIS®を概説するとともに、当社が考える自律操業への道筋について述べる。次に、当社がこれまで開発を進めてきた FCC 最適運転 AI システム™の技術内容と期待される効果、ならびに FCC 装置の運転最適化/自律運転に向けた将来展望について述べる。

2. EFEXIS® と自律操業への道筋

EFEXIS®は“Efficiency（効率性）”と“Expertise（専門性）”を語源とする造語であり、当社のエンジニアリング技術とデジタル・AI（Artificial Intelligence：人工知能）技術を融合し、プラントへの実装を通じて、運転の最適化、アベイラビリティの向上、保守の効率化を通じた、資産の価値向上への貢献を目指すものである。この EFEXIS®は、大きな設備改造を伴わないプラントの運転・保全の可視化、自動化、モデル化、最適化、自律化の実現を支援し、顧客が目指すプラントの自律操業に貢献していく。プラントの自律操業が適切に実現されれば、運転や保守・保全・保安の安全性、信頼性、効率、収益性が格段に向上するとともに、自律化に至る過程において熟練運転者の暗黙知を形式知にして可視化する等により、技術伝承も図られ、プラント操業のデジタル変革(DX)につながるかと考えている。

プラントの運転面での自律化を目指す中でのデジタルソリューションの活用として、以下のようなステップが考えられる。

- (1) 特定の機器あるいはユニットを対象に、従来計器で測定するプロセスパラメータからでは把握できない状態を見える化する、いわゆるソフトセンサーを構築し、見える化した情報と従来の計器による測定データと併せて活用し、プラントの特定の機器あるいはユニットにおける通常運転をより最適化するための運転操作の支援を行う。この段階ではまだ運転操作は運転員が行う。
- (2) 上記運転支援で運用実績が得られた後に、通常運転範囲内での最適操作を自動化す

る。なお、既に操作が自動化されている部分についてはその部分が最適化されているか確認することとなり、必要に応じ改善を図る。

- (3) 通常運転状態とは異なる異常状態を検知する機能、およびそれらを正常状態に戻す操作をガイドする機能や、スタートアップ/シャットダウン等の非定常運転に対して運転ガイドを提供する機能を構築し、運転員による対応を支援する。既に異常時の対応操作が自動化されている部分については、将来予測機能を追加導入したり、異常予測機能の精度向上等を、必要に応じ検討する。
- (4) 特定の機器あるいはユニットに対し、上記(1),(2)の通常運転最適化ならびに(3)の非定常運転や特殊事象への対応操作まで含めて全て適切に自動化できれば、人が介入しない自律運転が実現する。操業者側はこれを遠隔監視する等が想定される。
- (5) 上記(1)～(4)をプラントの特定機器あるいはユニットを対象に実施、さらに他の機器やユニット、事業所にも展開していく。必ずしも一つのユニットを完了した後次に展開しなければならないということはなく、その優先度や実現性を踏まえて実施計画を検討すべきと考える。

以上の(1)～(5)のステップは順を追って実現されると想定するが、例えば(1)のみを実現した場合においても、プラント操業は高度化され、大きな価値創造に繋がる可能性も考えられる。

これらを実現していく中で、ソフトセンサー、異常検知、運転ガイド、運転最適化、制御/自動化等の機能を構築するために、当社では、これまでに培ったエンジニアリング知見(物理モデルとそれらをベースとしたシミュレーション技術を含む)に加え、AI 技術を積極的に活用している。

1980 年代のいわゆる人工知能第 2 期より当社はエキスパートシステムの開発と適用を検討し始め、近年ではプロセスプラントの自律操業を目指し、エンジニアリングと人工知能技術の融合を始めとする高度デジタル技術の開発

を継続し、顧客プラントへの導入を進めて実績を上げてきた。この高度デジタル技術を駆使したプロダクト群が EFEXIS であり、以降では、その一つである、製油所の FCC（流動接触分解）装置を対象とした最適運転支援 AI システムについて述べる。

3. FCC 最適運転 AI システム™

FCC 最適運転 AI システム™ (FCC AI Optimizer™: FCCAIO™) は FCC 装置の運転最適化を支援するデジタルソリューションである。機械学習を活用して過去の運転データとエンジニアリングノウハウを反映したデータを学習した AI により、従来困難とされてきた、(a)FCC 装置の反応状態の見える化、(b)触媒再生塔におけるアフターバーニング現象の予測、が可能である (Fig. 1)。FCCAIO™ はプラントに実装後、FCC ユニット廻りのデータを自動取得し、リアルタイムで (a) および (b) の結果を表示し、反応状態を最適化するための運転、およびアフターバーニングを回避するための運転を支援することが可能である。

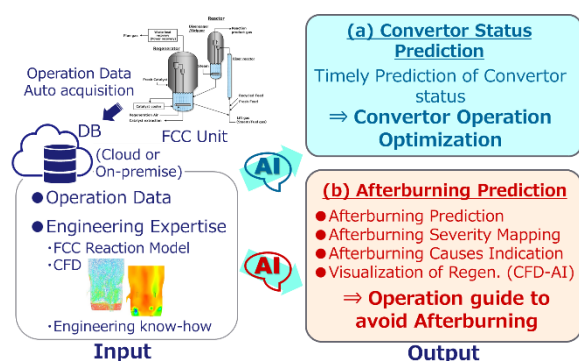


Fig. 1 FCC AI Optimizer™ 概要

3.1 FCC 反応状態見える化 AI システム

FCC 装置内の反応状態は、原料油の性状やその処理量、その他運転条件、触媒の劣化状態等の影響を受け、そのメカニズムは非常に複雑であり [1]-[3]、従来はリアルタイムの把握が困難とされてきた。またこのことにより、余裕をみた運転条件にならざるを得ず、最適運転に向け多くの改善余地があった。過剰な余裕代は生産ロスに繋がる為、余裕代削減の改善が望まれる。

FCC 反応状態見える化 AI は、FCC 装置の過去の運転データやそれらを基にした各種計算値と、FCC 反応状態との相関関係を学習することにより、反応状態を提示する機能を有する (Fig. 2)。また FCC 反応モデルの知見や当

社の高度解析技術を応用することにより予測精度の向上が図れる。同 AI により、これまでは困難であったリアルタイムの反応活性状況の把握(従来は分析結果が出るまでに数週間の時間を要していた)が可能になり、目標とする反応状態・製品収率により近い運転が可能になる。

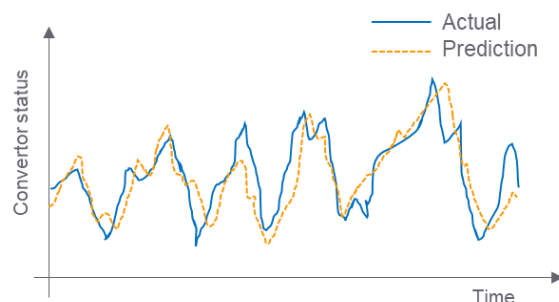


Fig. 2 AI による FCC 反応状態の予測

この反応状態見える化 AI システムは実際にプラントの FCC 装置に導入・運用された実績があり、反応活性をリアルタイムで把握することにより、導入した初期の段階から、それ以前よりも反応活性を安定化できることが確認されている (Fig. 3)。Fig. 3 では、反応活性の最大振幅が導入前よりも小さくなっていることがわかる。また、実運用しているユーザーからは同システムの有効性についてポジティブなフィードバックを得ており、FCC 装置の大きな収益改善に繋がることが確認されている。さらに、ここで見える化した反応状態の情報は、反応活性の安定化に留まらず、FCC 装置のより広範囲の運転の最適化のために活用できることもわかってきている。このように、FCC 反応状態見える化 AI システムの導入を起点として、AI の活用先を拡張していくための議論が広がる効果も出ている。

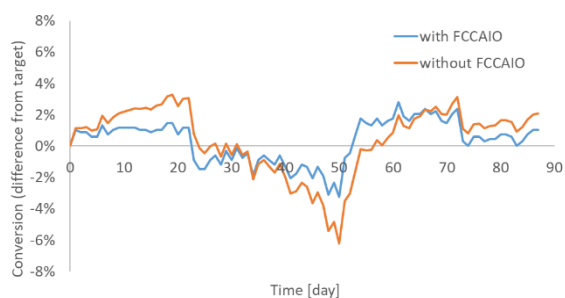


Fig. 3 反応活性の安定化 (実運用結果)

3.2 アフターバーニング予測 AI システム

FCC 装置の触媒再生塔内におけるアフターバーニング現象（以降、“AB”と表記）は、触媒に付着したコークを燃焼する際に残った一酸化炭素等が再生塔上部のガス相やその下流で燃焼する現象であり、原料油の性状や、コーク収率、再生塔内の流動状況等に依存し^{[4],[5]}、その発生の有無、程度や要因は時々刻々変化する。この現象により、再生塔の排ガス温度が上昇し FCC 装置や下流設備の温度管理値等に抵触し、場合によっては処理量を制限せざるを得ないことがある。ハード面を改造することにより再生塔内の流動分布を改善する対応が考えられるが、設備改造せずに運転を調整することによる改善も望まれている。また、添加剤の投入による対応も実施されているが AB を完全に改善できないこともある。

アフターバーニング予測 AI は、過去の運転データや各種計算値と AB の発生との相関関係を学習し、発生を数十分前に予測する機能を有する（Fig. 4）。また、各運転変数の AB への寄与度評価により発生要因を提示することもできる。

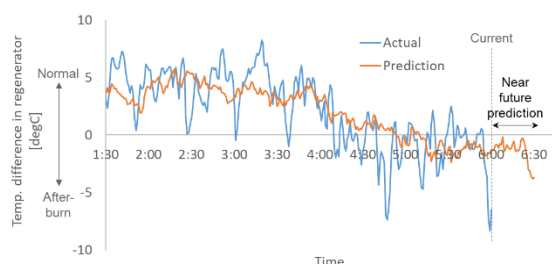


Fig. 4 AI によるアフターバーニングの事前予測

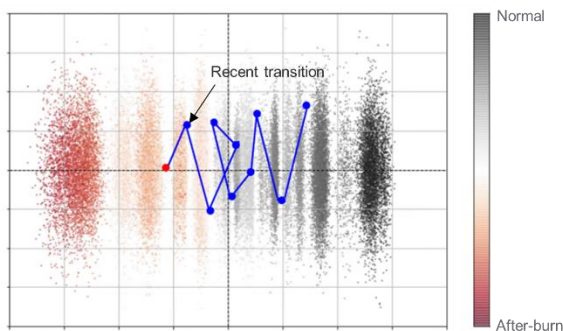


Fig. 5 アフターバーニングの過酷度の遷移のリアルタイム提示

また、AB の過酷度の遷移を、二軸のグラフ上にマッピングし遷移の方向性をリアルタイムに示すことができる（Fig. 5）。AB の過酷度は、

例えば再生塔内の温度差のことを指す。さらに、Computational Fluid Dynamics (CFD) シミュレーションの技術と AI を組み合わせることにより、再生塔内の熱流動状況をリアルタイムに提示することも可能である（Fig. 6）。

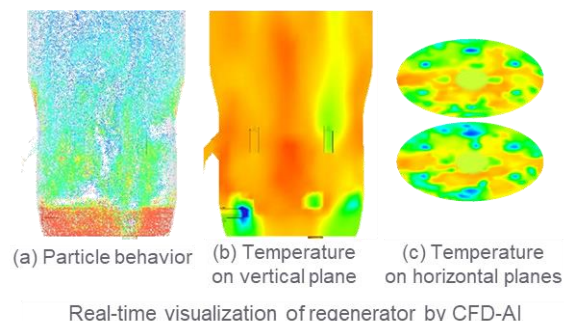


Fig. 6 再生塔内の熱流動状況のリアルタイム提示

上記の各機能により AB を事前に予測するとともに、それに寄与する運転パラメータを特定し、さらに操作パラメータを変更した場合の熱流動状況を確認することができるため、AB を改善するための運転を支援することが可能である。

以上で述べた(a)反応状態見える化 AI および(b)アフターバーニング予測 AI は、併用することも可能であり、例えばアフターバーニングを回避しつつ、反応状態を最適化する運転を支援することも可能である。また、プロセス制御と当該 AI システムを連携させ、運転自動化/自律化に近づけることを進めている。

4. 将来展望

FCC 装置においてこれまで把握が困難とされていた反応状態やアフターバーニング発生を FCCAIO™ によりリアルタイムで見える化できることを実証した。また、同 AI システムを実際にプラントで運用することにより、その効果を確認できた。

現状は望ましい運転を実現するための運用者の支援が FCCAIO™ の主な用途であるが（つまり 2 節の(1)の段階）、その用途のみであっても装置収益の改善に繋がることが確認されている。また、今後はプロセス制御システムと連携する等により、FCC 装置の自動最適化を図るとともに、さらなる収益改善の実現を目指している。さらに将来的には FCC 装置におけるその他の異常状態を AI により検知し、それを正常状態に戻す運転を支援したり、スタ

ートアップやシャットダウン、モード切替等の非定常運転操作の支援等も構想している。また、FCCAIO™により見える化した情報を、FCC装置の信頼性維持のための設備保全計画に活用することにより、運転最適化を実施した場合の設備信頼性への影響を評価できるようになるため、生産効率化と設備信頼性維持を両立することにも繋がられると考えている。

今回紹介した FCCAIO™は、当社のプラントエンジニアリングで培った技術やノウハウと、AIを活用して開発したAIソリューションの一つであり、FCC装置に対し従来の方法では対処困難であった課題の解決を可能にした。当社では他にも、常圧蒸留装置の油種切替を最適化する油種切替AIシステム(CDU Optima™:CDUO™)、アミン系設備等のフォーミングを予測するフォーミング予測AIシステム(FPAS)、加熱炉の運転監視強化/保全計画高精度化・効率化を支援するエフ・ドクターズ™(F-Dr.s™)を開発した。(詳しくは URL：<https://www.efexis.com/ja/videos.html>、<https://www.efexis.com/ja>を参照のこと。) これらが対象とする種々の課題は、将来、プラントの自律操業を実現するために解決する必要があるものであり、当社はこれらの運転上の課題解決を一步一步進めることにより、自動運転・自律運転の実現を目指している。

5. 参考文献

- [1] Arbel, A., Huang, Z., Rinard, I. H., Shnnar R and Sapre, A. V., “Dynamic and Control of Fluidized Catalytic Crackers. 1. Modeling of the Current Generation of FCC’s.”, Ind. Eng. Chem. Res. 1995a, 34, 1228-1243.
- [2] Jacob, S. M., Gross, B., Voltz, S. E. and Weekman, V. W., “A Lumping and Reaction Scheme for Catalytic Cracking.”, AIChE Journal., 1976, 22, 4, 701-713.
- [3] Takatsuka, T., Sato, S., Morimoto, Y. and Hashimoto, H., “A Reaction Model for Fluidized-bed Catalytic Cracking of Residual Oil.”, Int. Chem. Eng., 1987, 27, 107.
- [4] Froment, G. F., and Bischoff, K. B., “Chemical Reactor Analysis and Design”, Wiley and Sons, 1979.
- [5] Fletcher, R., Clark, S. and Blaser, P., “Identifying the Root Cause of Afterburn in Fluidized Catalytic Crackers”, Proc. AFPM, 2016, AM-16-15.