

特集 産業界における実学としての化学工学

特集

化学工学がカバー・関連する分野は、古くからの石油化学工業や、化学プラント設計に加え、環境・エネルギー・資源問題に対応する新プロセスや新材料開発、バイオマス利用、食品や医薬品など医／薬／農との学際領域までどんどん広がっており、多くの産業分野で化学工学系学科の出身者がエンジニアとして活躍している。産業界で化学工学の基礎理論や考え方を修得している技術者のニーズは高い。

本特集では、多種の産業の第一線で活躍している化学工学技術者に、大学で身に付けた化学工学のどの分野の知識が仕事にどのように役に立っているのかを解説していただき、これから社会に出る大学生・大学院生や、社会に出て間もない若手技術者に、化学工学の実学としての応用範囲の広さや学びのポイントを認識してもらうことを期待する。
(編集担当：篠竹昭彦)†

COREFLUX[®] プロセスの開発から運転まで ～プラントエンジニアリングと化学工学～

栃原 平祐

1. はじめに

化学工学は、化学製品の大量生産が始まった時代に化学プラントを最適に設計する必要性から生まれた、化学工業における製造プロセスを総合的に研究する学問である。その応用範囲はプラントの基本設計から運転方法に至るまで幅広い。化学プラント設計がその主要な仕事の一つであるプラントエンジニアリング会社にとって、化学工学は会社の根幹を支える学問である。

プラントエンジニアリング会社が扱うプラント建設プロジェクトは基本設計、詳細設計、機器調達、建設、試運転の各段階を経て完成する。基本設計の段階ではプラントにおける単位操作構成の最適化、個々の単位操作の仕様決定、さらにそれらの単位操作に必要な配管、機器、計器類の要求機能を決定する。詳細設計では要求機能を実現するための具体的な配管形状や調達に必要な機器仕様を決定する。プラントの基本設計に必要な設計技術は化学工学が基

礎となっており、プラントエンジニアリング会社の基本設計の担当部署には化学工学を学ぶ学科の出身者が多数を占める。これら基本設計を担当するエンジニアは当社ではプロセスエンジニアと呼ばれる。プラントエンジニアリング会社に勤務する筆者は入社以来、プロセスエンジニアとしてプラントの基本設計業務に従事してきた。

本稿では、筆者がこれまで経験した業務の中から、基本設計段階から関わり、建設後の商業運転、運転調整にまで携わったあるプラント建設プロジェクトについて紹介し、プラントエンジニアリングと化学工学の関わりについて述べる。

2. COREFLUX[®]-LNG プロセス開発¹⁾

ここで、本稿で紹介するプロジェクトにて建設したプラントおよび採用されているプロセスについて概要を紹介する。

本プロジェクトでは、LNG（液化天然ガス：Liquefied Natural Gas）から NGL（Natural Gas Liquid）すなわちエタン、LPG（プロパン、ブタン）を回収するための蒸留分離操作を主とするプラントを建設した。実際に建設されたプラントの全景を図 1 に示す。客先はインド石油ガス公社（ONGC：Oil and Natural Gas Corporation）であり、建設地はインドのグジャラート州ダヘッジである。ダヘッジは石油、石油化学プラントが集ま



Development of COREFLUX[®] Process and Plant Operation – Chemical Engineering for Plant Engineering –
Heisuke TOCHIHARA

2003年 早稲田大学理工学研究科応用化学専攻修了 修士(工学)

現在 東洋エンジニアリング(株)プロセスエンジニアリング部

連絡先：〒272-0024 千葉県習志野市茜浜 2-8-1

E-mail heisuke.tochihara@toyo-eng.com

2019年1月30日受理

† Shinotake, A. 平成29,30年度化工誌編集委員(5号特集主査) 帝京大学理工学部機械・精密システム工学科

る工業地域であり、当社が建設したLNG受入基地（LNGを受入れ、タンクに貯蔵、気化してパイプラインに供給する設備）も稼働している。本プラントはこのLNG受入基地に隣接する敷地にあり、受入基地からLNGを一旦受入れ、エタンおよびLPGを回収し、近隣の石油化学プラントに供給、一部のLPGは家庭用ガスとしてトラック出荷し、残ったLNGは再びLNG受入基地に戻し、パイプラインに供給する。図2に上記の概略フローを示す。図2における“NGL回収”の設備が本プラントに該当する。

本プラントには、NGL回収プロセスとして当社の保有の分離技術であるCOREFLUX®-LNGプロセスが採用されている。本プロセスは、98%以上の高回収率でLNGからエタン、LPGを回収することができる。

COREFLUX®-LNGのプロセスフローを図3に示す。圧力0.1 MPa (A)、温度-161℃の原料LNGはLNGタンクから液体で供給され、さらにポンプで昇圧される。その後加熱、一部気化された後、脱メタン塔にフィードされる。脱メタン塔では、エタン回収率を上げるためにコンデンサーを設置し、メタン濃度99%以上の液をリフラックスとして供給している。コンデンサーに必要な冷熱は、原料LNGとの熱交換により供給される。脱メタン塔の運転圧力は2.9 MPa (A)、温度は塔頂部で-97℃、塔底部で31℃である。またリフラックスドラムで分離された気体を4.0 MPa (A)まで昇圧することにより凝縮温度を上げ、原料の持つ冷熱

を有効利用することによりリフラックスドラムからの気体を再液化し製品LNGとしている。分離されたエタン、LPGは下流の分離工程に送られ蒸留によりエタン、プロパン、ブタンの各製品に分離される。

原料LNGは液体として供給されるが、蒸留操作のためには気化させる必要があるため、脱メタン塔に外部の熱源から熱を与える。この外部の熱源の熱負荷を下げるために、脱メタン塔に設置したサイドリボイラーに下流の脱エタン塔および脱プロパン塔の塔頂コンデンサーから回収した熱を与えている。脱エタン塔、脱プロパン塔の塔頂コンデンサーとしては、LNGから回収した冷熱を有効利用している。間接冷媒には、凍結防止のためのメタノールを使用している。熱回収システムも含めたプロセスフローは図4のとおりである。

本プロセスでは、LNGの組成にもよるが、例えば年間500万トンのLNG（エタン濃度7 mol%）からエタンを98%の回収率で分離しエタン分解した場合、年間46万トンのエチレンを生産できる。

3. プロセスシミュレータと化学工学

本プロセスの開発にあたっては、プロセスシミュレータを利用した。プロセスシミュレータとは、物質収支、熱収支、物性、蒸留分離、伝熱といった化学工学の基本単位操



図1 プラント全景(写真提供 インド石油ガス公社)

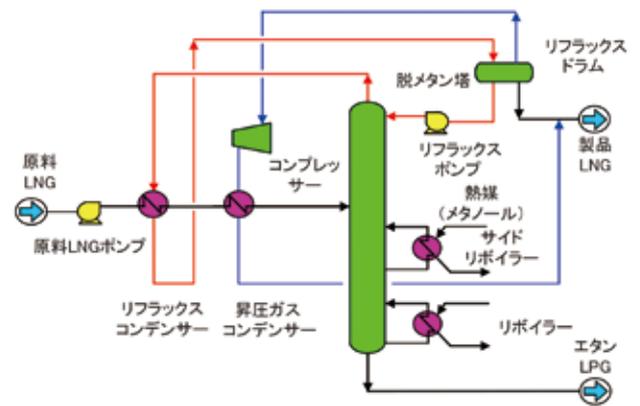


図3 COREFLUX®-LNGのプロセスフロー

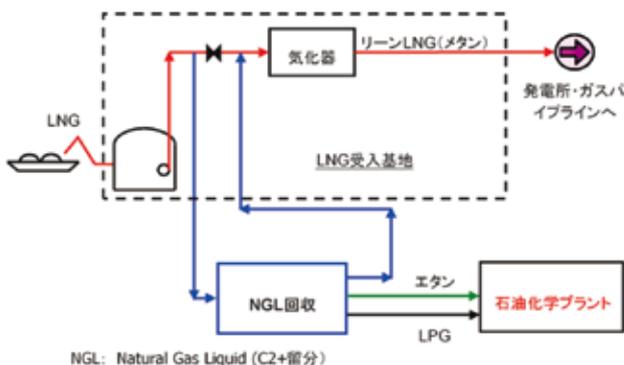


図2 LNG受入基地におけるエタン、LPG分離

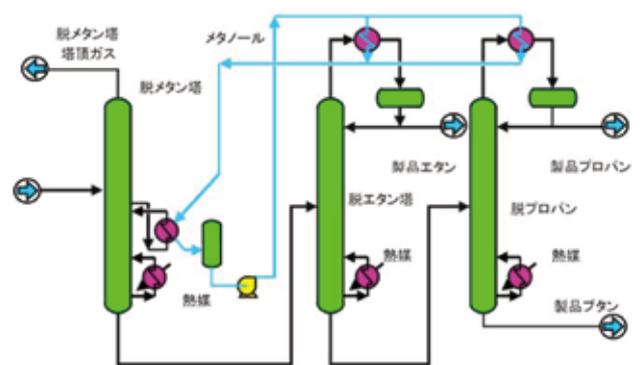


図4 メタノールによる熱回収システム

作の式が組み込まれた計算ソフトである。新規プロセスの開発にあたって、パイロットプラントにて実証し、スケールアップして商業規模のプラントを建設するという方法もあるが、本プロセスはパイロットプラントによる実証テストは実施していない。シミュレータの精度が高いこと、プロセスを構成する個々の機器は既知の技術であることによりシミュレータによるプロセス開発が可能と判断した。

プラントの基本設計においてプロセスシミュレータは、物質収支の作成、蒸留塔の設計、ポンプ、圧縮機、熱交換器の仕様決定といった様々な場面で使用される。シミュレータさえあれば簡単に単位操作計算をできてしまうことも事実であるが、適切にプラントを設計するには単にシミュレータから解を得れば良いというものではない。シミュレータの計算結果の評価が重要であり、評価するためにはプロセスエンジニアは化学工学の基本的な考え方を理解している必要がある。

例えば、蒸留塔の設計において最適な原料供給段の位置を決めたい場合、シミュレータを用いて繰り返しケーススタディをおこなうことで結果を求めることができる。しかしながら、シミュレーションが出した答えが常に正しいとは限らないため、適切に設計するためにはシミュレーションの結果を定性的に理解し、評価する必要がある。その際には、例えば、大学において蒸留を学ぶ際に始めに習うマッケーブシーレの階段作図法のような基礎的な理論が助けとなる。また新規プロセス開発のようなプロセスフローを新たに構築する際には、やみくもにシミュレータでケーススタディをしてもなかなか最適解に辿り着かず、基礎理論に基づいて検討することが重要である。

実際のプラントの基本設計には、シミュレータによる単位操作計算に加えて、プロセス制御や運転についての知識も必要となる。

4. ダイナミックシミュレーションによる運転解析

通常、基本設計には定常シミュレーションを使用する。これは原料組成、流量、運転条件などは全て一定である条件下における計算である。一方、ダイナミックシミュレーションは、定常シミュレーションに時間的な要素を加えたものである。すなわち、圧力流量バランス計算を解くことによりプラントの運転状態(温度、圧力、流量、液面等)が刻一刻と変化する過程を再現することができる。プラントの各単位操作は定常シミュレーションと同様に単位操作計算式により計算され、ダイナミックシミュレーション上で運転条件の変動のない定常となった状態では定常シミュレーションと同じ計算結果が得られる。ダイナミックシミュ

レーションを用いれば、プラントのスタートアップ、通常生産、シャットダウンの運転方法やプロセス制御方式まで再現することができ、機器や配管のサイズを決めるだけでなく、運転方法の決定、制御の設計も含めたより広範囲な検討対象について定量的な評価ができる。

本プラントは、COREFLUX®-LNGプロセスを初めて適用するプラントであったため、過去の運転実績がなかった。このため、運転の観点からも適切に設計されていることを検証するために、ダイナミックシミュレーションによる運転解析を実施することとした。プラントのスタートアップ、シャットダウン、回転機停止などの外乱が加わった場合のプラント挙動について解析した。

本プロジェクトにおいては、プラントの運転訓練シミュレータ用にダイナミックシミュレーションモデルが作成され利用可能であった。運転訓練シミュレータとは、プラントの運転操作を習得するために、ダイナミックシミュレーションとプラントの操作パネルを模した画面から成る訓練装置である。運転訓練シミュレータでは、より実際に近いプラント挙動を再現するためにインターロックと呼ばれるプラントの安全停止ロジックをモデルに組み込む。回転機停止といった異常時の非定型操作の訓練には通常のプロセス挙動だけではなく、異常時に作動するインターロックの挙動を確認することが重要となる。筆者は運転訓練シミュレータの開発担当であったことから、ダイナミックシミュレーションによる運転解析についても担当した。ダイナミックシミュレーションの運転解析の一例として、プラントスタートアップ時の脱メタン塔の冷却操作のシミュレーション結果を図5に示す。図5は脱メタン塔入口ラインに設置された熱交換器の冷却操作中の温度変化を示している。このようにスタートアップのような非定常状態における操作条件や運転条件を知ることができる。

5. プラント現場における運転指導

筆者は訓練シミュレータの開発、ダイナミックシミュ

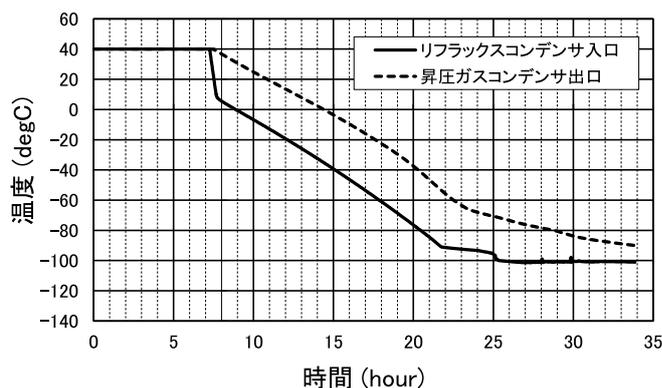


図5 脱メタン塔冷却操作のシミュレーション

レータによる運転解析に携わっていた経緯から、プラントのスタートアップ運転、性能保証運転に現場にて立ち合い、客先運転員に対して運転アドバイスをする機会を得た。

実際のプラントの挙動はダイナミックシミュレーションの結果から想定していた挙動に近く、ダイナミックシミュレーションによってプラントの運転方法について理解を深めていたことが運転の現場では役に立った。例えば、熱回収システムを通じた上流の蒸留塔と下流の蒸留塔が干渉する挙動はあらかじめ予想していたとおりであり、その対処方法について運転員に早めにアドバイスを与えることができた。

しかしながら、現場では計器の誤表示などシミュレーションでは表現しきれない現象もしばしば発生した。そのような場合、物質収支、熱収支、蒸留などの基礎理論に基づいて現象を解析することにより、何が起きているのかを知ることができ対処方法が分かる。時には、実際のプラントの計器が示す値よりも、理論的に予測した結果のほうが正しいこともある。特にプラントの初期スタートアップにおいて、計器には測定誤差が含まれている、あるいは動作不具合が起きる可能性が高い。トラブルが起きた場合は、必ず原因があり、理論的に説明できるという信念を持って対処することが大切である。当社においても、例えば蒸留塔のフラッシング、配管振動といったプラント運転時に発生するトラブルを過去に経験しているが、必ず理論に基づいて原因を究明し、同様なトラブルが再発しないよう設計基準を見直すことを標準としている。

6. 商業生産時の運転調整

プラントは無事にスタートアップすることができ、商業生産を開始した。しかしながらその数年後、客先よりも少し生産量を上げたいという連絡を受け、運転条件調整のために再度現場に赴くこととなった。ボトルネックは、プラントへ供給される原料の条件が設計時の想定と異なることであったが、運転条件の調整だけで生産量をアップすることを試みた。

現場にて、客先運転員と共に運転条件を変更しては生産量アップを試みるという試行錯誤を繰り返し、最適な運転条件を見出すことができた。生産量が増える結果となり客先からは感謝の意を表された。試行錯誤の裏では、シミュレータによる解析をおこない、理論に基づいた予測があったことが良い結果に繋がったと言える。最終的には、ボトルネックである原料条件の変更に対処するための設備改造案を提示して帰国し、現在では改造プロジェクトが進行中である。プラントは現在でも生産継続中であり、多少なりとも客先の利益に貢献できたことは大きな喜びである。こ



図6 客先スタッフと筆者(中央)

の一連の経験を通して、化学工学をこれまで学んで良かった、と実感した次第である。帰国前に客先運転員らと記念撮影した写真を図6に載せておく。

7. 新規顧客開拓

筆者が携わったCOREFLUX[®]-LNGプロセスのプラントに続き、2件目のCOREFLUX[®]プラントとして、当社保有のCOREFLUX[®]-C2という天然ガスからエタンを回収するプロセスを採用したプラントの建設プロジェクトを当社は受注した。

新たに受注したプラントにおいても筆者はダイナミックシミュレーションを用いた運転解析に携わった。解析の結果より、プロセス制御方法に工夫を加え、スタートアップ時やシャットダウン時でも安定的に運転できるような設計とした。昨年末、プラントは無事に客先に引き渡しを完了している。

8. おわりに

プラントエンジニアリング会社に入社して以来、化学プラントの設計業務に携わっており、業務では様々な場面において大学で学んだ化学工学が役に立っている。プラント設計という化学工学そのものと言える業務だけでなく、化学製品の製造現場における幅広い場面で役に立つ実学であり、化学工業に携わる者としては必修の科目であると考えている。化学以外の産業分野にも化学工学の基礎理論や考え方は応用できるものと思う。もちろん化学工学を学ぶ機会は大学における教育のみではないが、企業にとっても、また学生にとっても実学である化学工学を大学で習得する意義は大きい。

参考文献

- 1) 横畑裕之ら：LNGからのエタン、LPG分離プロセスの開発、分離技術、36(5)、271-275(2006)