

大型化学プラントのプロセスエンジニアリング

Process Engineering of Large Chemical Plants

機械事業本部 唐 崎 睦 範*¹ 三 井 直 広*²
守 田 和 裕*²

化学プラントのプロセスエンジニアリングは、基本設計の中でも重要な段階であり、原料から製品に至る過程（プロセス）を、客先要求、原料事情、製品品質、省エネルギー要求度等に応じて、最適な設計（エンジニアリング）を行なうことである。当社の得意分野であるアンモニア、メタノール及びエチレンの大型化学プラントにおいて、建設費の低減とエネルギー原単位の向上のために、プロセスエンジニアリングの果たす役割の重要性はますます高まっている。今後ともプロセスライセンスとの関係を強化していくとともに、当社プロセス技術者自身がライセンス領域に更に踏み込み、新しい改良点を織込んだ技術検討を続けていくことが強く求められている。本報では、高温下（あるいは極低温下）、高圧下での各種要素技術を保有する上記のプラント別に、当社のエンジニアリング技術の特徴、適用事例を中心に報告する。

Process engineering of chemical plants is to carry out optimum engineering of the process from raw material to the product, based on client's requirements, raw material specifications, product quality, energy saving requirement, etc.: In order to reduce investment cost and increase energy recovery for chemical plants such as Ammonia, Methanol, and Ethylene which are the strong areas in MHI business, the importance of the role which process engineering plays will increase. In the future, it is strongly advised that the process engineer should continue his own technical study of the territory which is to be included in the process licensor's design area, together with strengthening relation between the process licensor and MHI. In this report, we have described mainly the features of our process engineering and their application for the above plants which utilize various elemental and unit technology under the high temperature(or cryogenic)and high pressure operating conditions.

1. ま え が き

化学プラントは、基本設計、詳細設計、機材調達並びに現地工事の段階を経て、建設が行なわれる。本報では、基本設計の中で特に重要な段階であるプロセスエンジニアリング技術の当社の実情について述べる。

プロセスエンジニアリングとは、プラント内に供給される原料からプラント外へ送出される製品に至る過程（プロセス）を、客先要求、原料事情、製品品質、省エネルギー要求度等に基づいて、最適な設計（エンジニアリング）を行うことである。

対象機種として、当社の得意分野であり、近年需要の拡大が見込まれるアンモニアプラント、メタノールプラント並びにエチレンプラントの大型化学プラントを採上げた。

アンモニアプラントは、プロセスライセンスとしてハルダー・トプソ社（デンマーク）をかついで、下流の尿素プラント（スナム・プロゲッティ社、イタリア）と共に応札することが多い。最近では、インドやマレーシア向けに受注を果している。

メタノールプラントは、三菱ガス化学(株)との共同開発の成果であるメタノール合成塔を核として、ライセンスとしての一翼を担い、サウジアラビアやベネズエラ向けに継続的に実績を重ねている。

エチレンプラントは、過去に三菱化学(株)〔旧三菱油化(株)〕との共同開発による独自のプロセスに基づき、中国にプラントを納入した実績を有する。近年はより競争力を上げるために、新たにプロセスライセンスの協力を得て、受注活動に注力している。

2. アンモニアプラント

2.1 アンモニア製造プロセス

現在、代表的なアンモニア製造プロセスとして、トプソ法、ケ

ログ法、ブラウン法、ウーデ法、ICI法が挙げられる。当社は、デンマークのトプソ社とライセンス契約を結び、その優れたプロセスをベースにアンモニアプラントを納めている。

トプソ社は、プロセスライセンスであると同時に世界的に有力な触媒メーカーであり、また、アンモニアプラントの心臓部であるリフォーマ、アンモニアリアクタの自主開発では世界をリードしており、その優れた総合技術により、近年のアンモニアプラントではトップシェアを占めている。1986年以降スタートアップしたアンモニアプラントを例に採ると、全世界で59件のうち、トプソ法採用プラントは26件に上っている。

アンモニアプラントの原料としては、石炭系、石油系（ナフサ等）、天然ガス等があるが、最も一般的な原料である天然ガスの場合を例に、当社が採用しているトプソ法アンモニア製造プロセスを、図1に示すブロックフローに沿って説明する。

原料天然ガスは、水添脱硫工程で、成分中の硫黄（触媒毒）を水素添加により硫化水素に転化し、吸着脱硫により除去された後、改質工程に供給される。改質工程の一次リフォーマにて天然ガスは水蒸気改質され、水素が生成される。

二次リフォーマでアンモニア製造のもう一方の原料である窒素が空気として加えられ、その空気中の酸素による燃焼熱により改質反応は更に進み、原料天然ガス中のメタンはほとんど改質される。次のCO転化工程（高温・低温の二段工程）では、ほとんどのCOはCO₂に転化され、同時に水素が生成される。この工程で水素の生成は完了する。プロセスガスは次に脱炭酸工程に送られ、ガス中のCO₂ガス成分のほとんどが除去される（除去されたCO₂ガスは、尿素肥料製造の原料として使用できる）。プロセスガス中の残留CO、CO₂ガスは、次のメタネーション工程でアンモニア合成触媒に無害であるメタンに転化される。

水素/窒素のモル比をほぼ3に調整された合成ガスは、所定合成

*1 化学プラント技術センタープロジェクト部主査

*2 化学プラント技術センタープロジェクト部プロセスグループ主務

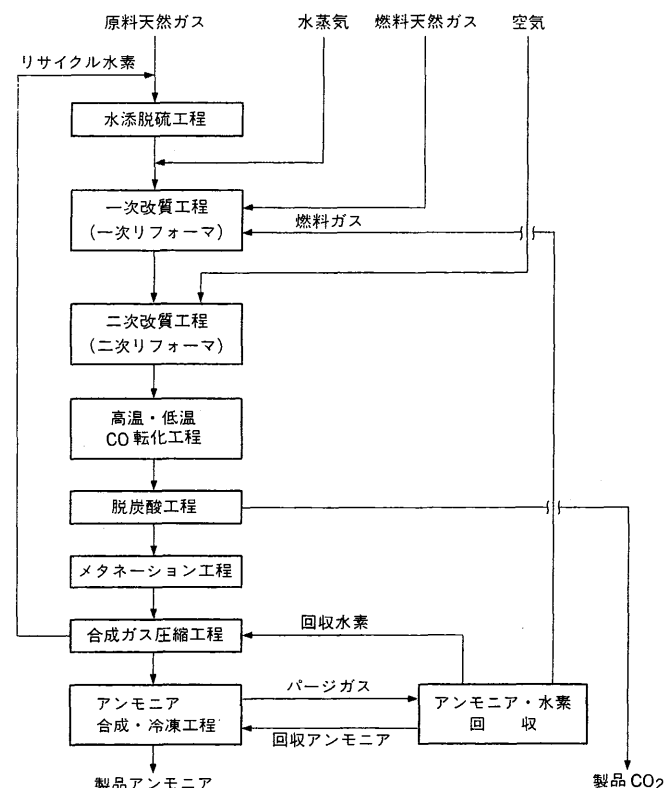


図1 アンモニア製造プロセスブロックフロー図(天然ガス原料の例)
Ammonia process block flow chart (Natural Gas feed case)

圧力まで合成ガス圧縮機で昇圧された後、アンモニア合成・冷凍工程に送られ、アンモニアが合成され、冷却・凝縮した液体アンモニアが製品となる。アンモニア合成工程に供給された反応成分以外の成分、すなわちメタン、アルゴン等の成分は、バージガスとして抽出され、同伴アンモニア、水素ガス成分が分離回収された後、燃料として使用される。

2.2 エンジニアリング技術

当社は、上記のプロセスユニット、各ユーティリティユニット、オフサイトユニットを含むプラント全体を、各プロジェクト条件、すなわち、原料性状、気象条件、製品品質、製品の貯蔵・出荷条件、省エネルギー要求度等を総合的に設計に反映させ、客先要求を最も満足させるプラントを納めている。そのエンジニアリング手法・技術の例を紹介する。

アンモニアプラントは、それを構成するアンモニア製造プロセスが優れているだけでは、プラント全体として優れたものになるとは限らない。プロセスユニット、ユーティリティ及びオフサイト設備が有機的に結びつき、補完し合ってこそ、初めて真に優れたアンモニアプラントとなる。そのために、当社はプラント全体を一つの有機体としてとらえ、例えばエネルギー消費に関しては、プロセスライセンサの範囲外の設備はもちろん、範囲内の設備であっても、圧縮機・タービン等に代表されるベンダの機器・機械品の特性及びそのデータを勘案の上、全体設計に組み込み、プロセスライセンサが設定したプロセス条件を変更することも必要に応じて行われる。

これは、プロジェクトごとに、その固有な条件に従って行うものであるが、これをサポートすべく、当社は従来から、プラントの製造規模に応じた最適な圧縮機・タービン選定を行っており、それに対応したプロセスユニットの最適操作条件(圧力など)を、プロセスライセンサと共同で設定している。その際の最適条件選

定は、省エネルギー指向の場合と、設備費低減指向の場合とがある。

これらの検討を行うに当たっては、プロセスライセンサのプロセスシミュレーションにゆだねることもできるが、当社は独自のプロセスシミュレータを開発済みであり、それらシミュレータを駆使し、プロセスライセンサと並行して当社独自でも検討を行っている。

また、当社はハードの製造メーカでもあるというメリットを生かして、研究所・事業所—MCEC(化学プラント技術センター)が一体となった、ソフト・ハードの総合エンジニアリングを展開し、各アンモニアプラントに最も適した、最も信頼されるプラント心臓部の機器・機械品を納める体制を作上げている。

上記エンジニアリング手法・技術の展開により、1992年3月引渡しプラントであるバングラディッシュ BCIC 向け大型アンモニア・尿素肥料プラントでは、当時としては世界最高レベルの省エネルギーを達成し、かつ現在に至るまで、いわゆる定期検査以外でプラントが停止したことはほとんどない、極めて信頼性の高いプラントになっている。この省エネルギー度は、現在でも高レベルにある。

また、同様のエンジニアリング手法・技術の展開により、1996年受注した、マレーシア・ペトロナス向け大型アンモニア・メタノール・尿素・ホルムアルデヒド併産複合プラントにおいても、省エネルギー度、設備費共に極めて優れたプラントとして、客先から高く評価されている。さらに、1996年インド向けに大型アンモニア・尿素肥料プラントを受注した。これらの受注実績は、当社の高いエンジニアリング技術が実を結んだ結果であると自負している。

2.3 今後の課題

これまでのエンジニアリング手法・技術を更に発展させ、客先の評価を高めるべく、世界トップレベルの省エネルギー形かつ高信頼性のプラントを納め続けるとともに、今後の新技術開発の面で、プロセスライセンサと協業し、並行して更に信頼性のある機器・機械品の適用・開発を、実績プラントからのフィードバックも含め、積極的に取進めて行きたい。

3. メタノールプラント

3.1 三菱メタノールプロセス

三菱ガス化学(株)(以下MGC)と当社は、共同でメタノールプロセスの開発に取り組んできた。

MGCは、メタノールのプロセス技術のみならず、メタノール製造の分野においても日本の指導的立場にあり、触媒を中心とした長年にわたって蓄積された諸技術と、当社のエンジニアリング技術、ハード技術をインテグレートして最新プロセスが開発された。

メタノールプラントも近年一層の高効率化とともに大型化が要求されており、両社が設計、建設してきたプラントも大型化してきた。1975年完成のMGC新潟工場における日産800tプラントに始まり、1983年完成のサウジアラビア向け第1号機の日産1815t、1991年完成のサウジアラビア向け第2号機の日産1906t、1994年完成のベネズエラ向けの日産2200tに続き、1997年完成予定のサウジアラビア向け第3号機は日産2500tとプラント規模も大きくなっているが、毎回大型化を可能とする新技術が組み込まれてきている。メタノール製造プロセスは図2に示すように4工程に分けられる。

天然ガスを原料とするプロセスの場合で説明する。原料に硫黄

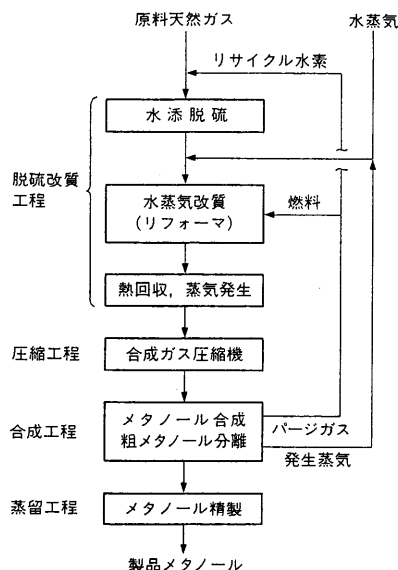


図2 メタノール製造プロセスブロックフロー図 (天然ガス原料の例)
Methanol process block flow chart
(Natural Gas feed case)

分が含まれる場合、脱硫装置にて脱硫された後水蒸気を混合し、ニッケル触媒を充てんした改質反応管へ送られ、加熱により分解改質される (脱硫改質工程)。この反応条件は 17~20 atm, 850~880℃である。改質されたガスは高压蒸気発生及びそのほかで熱回収された後、圧縮機に送られる。合成原料ガスは、プロセスで回収発生された高压蒸気を駆動力源とする遠心圧縮機により合成反応に必要な圧力まで昇圧される (圧縮工程)。圧縮された合成原料ガスは未反応の循環ガスと合流し、反応温度まで昇温されて合成塔 (メタノール合成反応器) へ入る。反応器形式によるが、最新のスーパーコンバータ (以下 SPC) の場合、発熱反応により生じた熱は 40 atm レベルの蒸気として熱回収される。合成塔を含む合成ループの設計が他のメタノールプロセスとの違いを示す特徴の一つであり、各社のプロセスにより異なる点が多い (合成工程)。合成工程にて生成した粗メタノールは、メタノール以外に水、高級アルコール等の微量成分を含む。粗メタノールは蒸留塔により所定の規格を満たす製品メタノール (通常米国連邦規格 AA 級) にまで純度を上げる。性能上は大気圧下での蒸留操作により不純物分離は可能であるが、プラントの大型化による塔サイズのコンパクト化、エネルギー回収の最適化の観点から、加圧蒸留や、多重効用の採用も行われる (蒸留工程)。

3.2 特徴的なエンジニアリング技術

メタノール製造プロセスのエンジニアリングとして特徴的な部分は、より正確で詳細な検討を行なうために自社開発したプロセスシミュレータ (SOL-C1) を利用することである。本シミュレータは通常の熱物質収支計算以外に、合成反応器の詳細計算 (触媒活性、副反応による不純物成分濃度)、スチームシステム検討が行なえるほか、物性推算、気液平衡、伝熱係数、蒸留段効率なども実プラントや実験により定めたより信頼性の高いデータを用い、限界設計に近いエンジニアリングを可能としている。

また、プラント性能への影響の大きい圧縮機・タービンは自社製品であり、より効率の良い型番選定、運転レンジが決定可能である。さらに、ダイナミックシミュレータ (自社開発) を用いて、プラントの安全性、運転性確保に重要な部分 (特にボイラ、大型

タービン、ポンプ類を含むスチーム系) の設計パラメータを決定している。当社はピンチテクノロジーの研究でも有名な UMIST (英国、マンチェスター工科大学) のプロセス研究会メンバーとして日本では最初に参加し、プラントの最適化手法の新しいアプローチを取り入れているが、この手法をメタノール製造プロセスへも適用して、より迅速にかつ効果的に各プロジェクトに応じた最適化が行えるように検討を進めている。

3.3 今後の課題

メタノール製造プラントは近年大型化により経済性が追求され、主に産ガス国に天然ガスを原料とする大型プラントが建設されてきたが、今後燃料メタノールとしての用途が増えてくると、原料も天然ガス以外に重質油、石炭も加わり、かつ製品仕様も化学品以外の燃料仕様が出てこよう。プラント規模も立地条件等により変化するだろう。これらの様々な設計条件に対し、より経済的なプラントの設計、建設 (プロセス、ユーティリティすべてを含めた仕様) が行えるだけのメニューをそろえておくことが必要である。

例えば、改質工程については従来の水蒸気改質以外に内燃式改質炉にて酸素による部分酸化を行い、合成原料ガス組成をよりメタノール合成反応に適したものとする二段改質工程の採用は、大型プラントで原料単価の高い条件に適している。蒸留工程のフロースキームも、製品仕様や熱回収システム等により種々のオプションが考えられる。合成工程の反応条件、スチーム系の組方も、個別のプラントの条件により種々のオプションがある。エンジニアリング技術としては、これら多くの設計要素をいかに効率良く、客先の期待に沿うべく、迅速に最適設計を行うかということが必要である。

4. エチレンプラント

エチレンプラントは、エタン、プロパン、ナフサ、ガスオイル等の広範囲な炭化水素原料を無触媒下にて高温短時間で熱分解して、エチレン、プロピレン、ブテン等のオレフィン及びベンゼン、トルエン、キシレン等のアロマティックスを生成し、これを分離精製するプラントである。エチレン製造プロセスの特徴を以下に述べる。

4.1 製造プロセス

エチレン製造プロセスとして世界的に著名なプロセスには、ルーマス法、ケロッグ法、ストーン・ウェプスター (S&W) 法、CFブローン法、リンデ法、KTI 法などが挙げられる。代表例としてルーマス法のフローシーケンスを図3に示す。ルーマス法は、分離精製系の最上流部に脱メタン塔を配置するシーケンス (脱メタン塔ファースト方式) を採用しているのが特徴であり、ケロッグ法、S&W 法、KTI 法もこの方式を採用している。

これに対し、リンデ法は脱エタン塔ファースト方式を、CFブローンは脱プロパン塔ファースト方式を採用している。このフローシーケンスは、原料性状の変化に対するプロセスの追従性、設備費の削減、圧縮機所要動力の低減など、プラントの運転性や経済性を総合的に検討した結果に基づいて決定される。

4.1.1 要素技術

エチレンプラントの主要な要素技術として、熱分解技術と分離精製技術が挙げられる。熱分解技術は、原料炭化水素を希釈スチームと共にふく射コイルに導き、無触媒下、高温、短滞留時間にて急速加熱し、熱分解する技術であり、エチレンプラントの心臓部とも言える最重要技術である。分離精製技術は、分解ガスに含

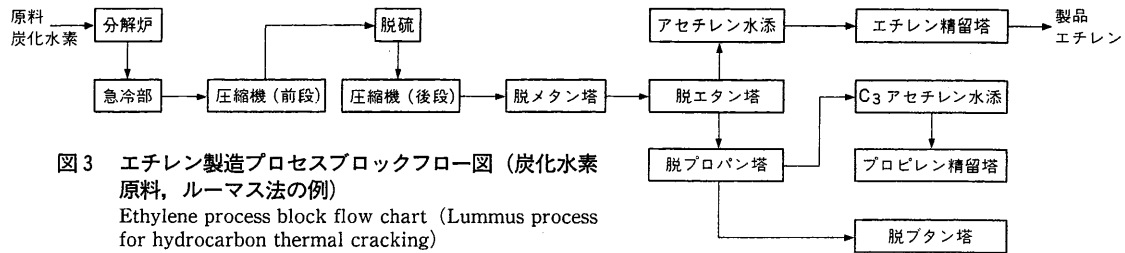


図3 エチレン製造プロセスブロックフロー図(炭化水素原料, ルーマス法の例)
Ethylene process block flow chart (Lummus process for hydrocarbon thermal cracking)

まれるエチレン, プロピレン, 副生物等を効率的に分離精製するための圧縮, 冷却, 液化, 蒸留技術であり, 冷媒としてエチレン, プロピレンの2元冷凍システム(または, メタンを含む3元冷凍システム)が使用される。

(1) 熱分解技術

ルーマス法の熱分解炉は, Short Residence Time (SRT) 型分解炉と呼ばれ, この10年間で世界のエチレンプラントの約40%のシェアを占めている。SRT炉は, 高苛酷度(短滞留時間)・高選択性分解を可能とし, デコーキング間隔を長く採れるという特徴があり, 既存のSRT-V型(内面フェイン管)から, 最新モデルのSRT-VI型(内面裸管)まで, 豊富な実績を持っている。このようにSRT炉は同一の炉において, エタンから重質原料までの幅広い原料の処理が可能であり, 製品エチレンを最大の収率で得られること, また, 長期の運転周期を達成できることが実証されている。希釈スチームと共にSRTふく射コイルに導入された原料炭化水素は, 極めて短時間(0.数s), 高温(800℃以上)で熱分解され, 約30%のエチレンを含む分解ガスを得ることができる。続いて分解ガスは, 副反応の進行を抑えるために, 分解炉出口の低圧損型の急冷熱交換器で冷却され, 高压スチームとして熱回収が行われる。この分解急冷系では, エチレンプラントの中で最も高温で膨大なエネルギーが消費, 回収されるので, このエネルギーをいかに有効に利用するかが, エチレン製造プロセスの優劣を左右すると言っても過言ではない。

(2) 分離精製技術

分解急冷系を出た分解ガスは, 油(クエンチオイル)冷却, 水(クエンチ水)冷却され, 更なる熱回収が行われる。クエンチオイル冷却系では中圧スチームが発生され, クエンチ水冷却系ではプロピレン精留塔のリボイラ熱源として熱回収される。水冷却された分解ガスは所定の圧力まで圧縮された後, 順次脱硫(酸性ガスの除去)・脱水, 冷媒による冷却, 液化, 蒸留, さらにアセチレン類の水添等の操作が行われ, 製品エチレン, プロピレン等が分離精製される。この分離精製系における分解ガスの圧縮機, エチレン冷凍機, プロピレン冷凍機若しくはメタン冷凍機の駆動に必要なエネルギーとして, 分解急冷系で発生された高压スチームが使用される。ルーマス法の分離精製プロセスは, 脱メタン塔ファースト方式を採用している。脱メタン塔の操作圧力を低圧にすることによって, 分離効率を向上させ還流比の低減を図り, 冷凍圧縮機の所要動力を大幅に削減することに成功している。また, 分離精製系を構成する機器単体の改良(例えば蒸留塔の充てん塔化)や熱回収システムの改善などにより, 系全体として大きな省エネルギーが達成されており, エチレンプラントの原単位の向上に大きく寄与している。

4.1.2 シミュレーション技術

エチレンプラントのシミュレーションを行うためには, プラント能力, 原料性状, 分解炉収率分布, 製品エチレン・プロピレン

仕様, ユーティリティ条件等に基づいて, プロセスの操作圧力・温度, キー成分の回収率, ヒートロス等多数の境界条件を決める必要がある。シミュレーションの目的は, 全系の熱物質収支計算を実行することによって, 原料性状の変動に対するプロセスの挙動を追跡することであり, ねらいは以下のポイントにある。

- (1) 複数の原料を熱分解する場合, 分解炉から精製系末端までの局部プロセスにおいてどのような挙動・特性が見られるか。また, その変化の大きさはどうか。
- (2) この変化の大きさを把握して実際の単一装置能力はどの程度の余裕を見込むべきか。
- (3) スタートアップ時点の極めて特殊な分解ガス性状において著しい特徴は何か。設計上いかなる配慮が必要か。

具体的には起動, 停止, 非常, 間欠運転時等のプラント操作を考慮して, 設計面, 運動制御面での検討をすることにある。

また, 近年はピンチテクノロジーとして知られるヒートインテグレーション解析法による熱回収システムの改善によって, 冷凍圧縮機の所要動力の大幅な削減が実践されている。

プロセスライセンスと協力してプロセスエンジニアリングを進める場合, 基本設計はライセンス所掌で, 詳細設計は当社所掌という体制が想定されるが, 上記のようなプロセスの本質にかかわる部分に深く踏込んだ検討を行うことによって, プロセス技術者本来の能力を発揮する場を拡大することが重要であろう。

4.2 今後の課題

近年エチレンプラントは生産能力年産50万t以上の規模へと大型化が進んでいる。これからもスケールメリットをねらったより経済的な設備投資が行われるとともに, エネルギー原単位の更なる向上が追求されていくものと思われる。

したがって, この大型プラントに取組むに際しては, 有力なプロセスライセンスとの技術的協力関係を強化して, 競合相手に打勝てる技術的・経済的競争力を備えていくことが, 当社にとって重要な課題であろう。そして石油化学の基幹プラントであるエチレン製造プロセスの高度なエンジニアリング能力を, 当社の技術の核として育成していくことが我々に求められている真の課題と言えよう。

5. む す び

化学プラントのプロセスエンジニアリングの重要性は, 本報で採上げたアンモニア, メタノール及びエチレンの大型化学プラントに限らず, 当社が取組むプラント分野において, ますます高くなるものと思われる。

化学プラントの競争力強化のために不可欠なプロセスライセンスとの協力関係を基盤として, 当社独自のプロセスエンジニアリング能力を更に育成強化して, 案件ごとに最適プロセスを究明し, 経済性と信頼性の高いプロセスを提供していくことが我々の使命であると考えている。