

都市ガス製造における最適化

稲村 栄一

1. はじめに

効率的に都市ガスを製造し、顧客に送り届けることは都市ガス事業者の基本的な使命のひとつである。都市ガス製造における効率化のポイントは、原料や設備の変遷に伴い少しずつ変化している。はじめに大阪ガスを例に都市ガス製造の変遷をふりかえりたい。

1960年代までは石炭系、石油系原料を用いた比較的小規模なガス化工場が周辺地域の顧客にガスを供給しており、個々のプラントの運転効率を改善することによりコストの低減をはかってきた。その後LNG（液化天然ガス）導入により、従来の都市ガス（4500kcal/m³）は天然ガス（11000kcal/m³）に転換されるとともに、従来の小工場は大規模なLNG基地へと集約化がすすみ、スケールメリットを生かしての製造コストの削減が推進された。しかし1970～80年代にかけての天然ガス転換期間中は、近畿2府4県におよぶ供給エリアに2種類の都市ガスが混在し、効率化の推進はあいかわらず、設備単体あるいは基地個別のものにならざるをえなかった。

1989年天然ガス転換が完了し、また東西をつなぐ高压幹線パイプラインが完成したことに伴い、当社のガス製造輸送体制は新たな局面をむかえた。これまで基地ごとに局所的な最適化を行っていたものが、変動する顧客の需要に応じての負荷配分を基地横断的な見地から決定し、より効率的な操業を行なうことが可能となった。

ここでは、以上の背景のもと、都市ガス製造におけるOR適用の事例として、当社で構築を行なっている最適な生産計画を作成支援するコンピュータシステム（LNG基地最適運用システム）について紹介するとともに、今後のORへの期待について述べる。

2. 都市ガス製造の概要

2.1 製造プロセスの特徴

LNGを原料とする都市ガス製造プロセスの概略フロ

いなむら えいいち 大阪ガス(株) 姫路製造所

〒672 姫路市白浜町灘浜1

ーを図1に示す。都市ガス製造プロセスの主な特徴として以下があげられる。

(1) シンプルな工程による1品種大量生産

東南アジアやオーストラリアなどから海上輸送され、タンクに受け入れられたLNGは、ポンプで昇圧された後、海水により再び気化され、カロリーや圧力などの調整を行ない、都市ガスとして送られる。本プロセスにおける唯一の製品は都市ガスであり、また従来の石炭系、石油系の原料による都市ガス製造プロセスと異なり化学反応を伴わないため、大部分は物質収支の線形式により表現できるシンプルなプロセスとなっている。

(2) 需要変動への対応

都市ガスの需要は、気温、水温、そして季節、曜日、日内時間帯などにより、大幅に異なる。ガス田からの長大なパイプラインや、季節間の需要差までも吸収する地下岩盤へのガス貯蔵設備による都市ガス供給を行なっている欧米型の都市ガス事業者と異なり、日本においては、コンピュータによるきめの細かいプロセス制御を行なうことにより、時々刻々と変化する需要に対応した都市ガスの製造を行なっている。

(3) 多種多様な設備

プロセスを構成するLNG貯蔵、LNG払出し、LNG気化、熱量調整の各段階において、設備の合計能力は、冬期平日の夕刻に代表される最大需要時期に対応できるようにしている。したがって、通常は取り得る稼働設備の組合せには膨大なバリエーションがある。諸設備は需要の増加や天然ガス転換の進捗に伴い、少しずつ増設されてきたものであり、技術開発、需要構造の変化に伴い、設置時点で最も適切な容量をもつ最も効率のよい型式の設備が選択されている。その結果、現状のLNG基地にはさまざまな型式、容量、効率を有する機器が設置されている。

(4) 冷熱利用の促進

LNGは海外で産出される天然ガスを海上輸送の便のため不純物を取り除きながら液化したものであり、これにより天然ガスに比べて体積が約1/600となるとともに、-160°Cという極低温となる。この低温エネルギー（以下

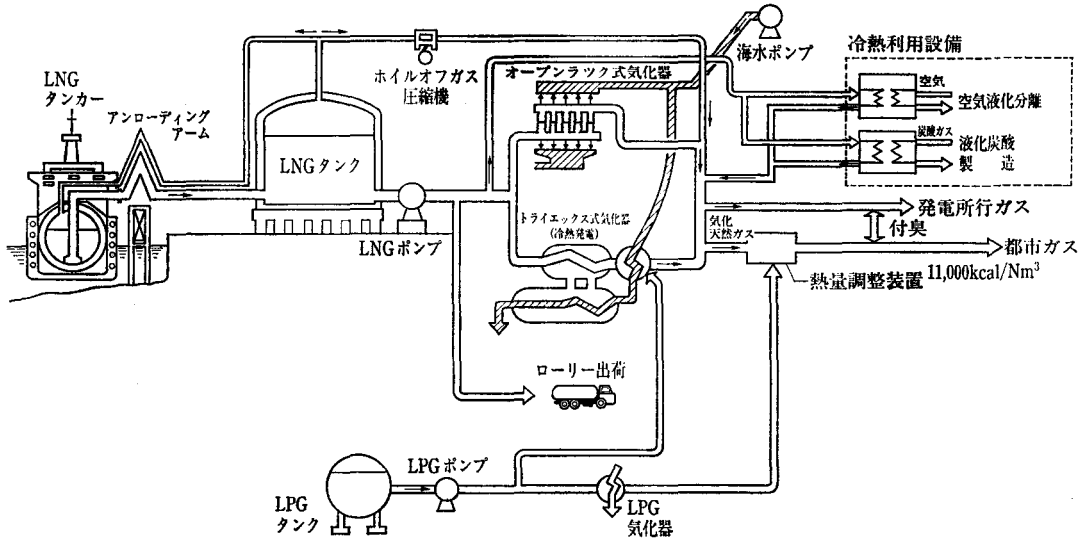


図1 都市ガス製造プロセス概要

「冷熱」と呼ぶ)を有効に利用するため、冷熱発電、空気分離(液体窒素、液体酸素、液体アルゴンの製造)などを行なっているが、利用できる冷熱量は都市ガスの製造量に比例するため、各LNG基地への都市ガス製造負荷配分は冷熱利用メリットに大きな影響を与える。

(5)外部コスト環境の複雑化

主原料であるLNG以外のコストとしては、電力コストと都市ガスの熱量調整に用いられるLPG(プロパン、ブタン)コストが都市ガス製造のなかで大きな比重を占めている。このうちLPGの価格は、立地条件により各LNG基地ごとに異なるうえに、原油価格や為替レートにより大きく変動する。また電力においても、時間帯別料金制度が実施されるなど近年都市ガス製造をとりまく環境は複雑化している。

2.2 都市ガス製造における生産計画

生産計画の作成は図2に示されるフローにもとづき行なわれる。これまでの本社部門における生産計画では、簡易なパソコン計算や経験的な知識にもとづいて、需要予測や原料調達スケジュールとの整合性に代表される各種の制約条件を満足するフィジブル解の算出に手一杯の状態であった。すなわち基地間の独立性が強かったため、コスト低減のための施策は各基地ごとの局所的な最適解の追及にゆだねられていた。高圧幹線パイプライン網の充実に伴う基地間の相互バックアップの実現とともに、需要増加に伴う基地や設備の増加と多様化により、選択し得る操業形態のバリエーションは大幅に増加し、

またどの組合せを選択するかが、製造コストに大きな影響を与えるようになった。

基地横断的な視野から生産計画を作成することによりさまざまなコストの削減が期待できる。たとえば冷熱発電設備に代表される効率的な設備へ他基地、他設備の負荷を移行し稼働率をあげることができる。またポンプなどの電動機は、一般的に定格能力運転にて最大の効率を得ることができるが、各基地における中途半端な負荷を集中化させることにより、電動機の数削減による電力料金の低減が可能である。さらに熱量調整用LPGはカロリーあたりの単価が一般的にLNGよりも高く、基地ごとにコストが異なる。一方LNGも産地ごとにカロリーが異なるため、LNG産地とLNGを受け入れる基地を適切に組合せればLPGコストの削減が可能となる。

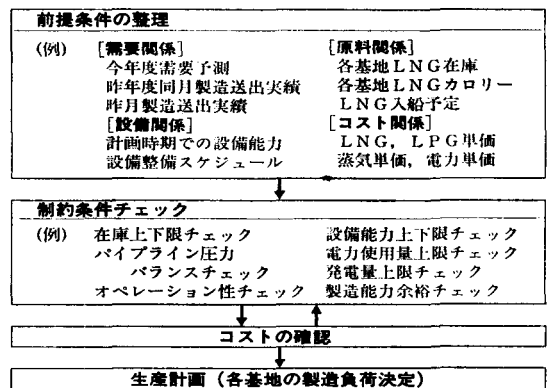


図2 生産計画作成フロー

しかしこれらの条件はさまざまな制約のもとで相互に関係しており、簡易計算での最適解の算出は不可能である。たとえば熱量調整装置には、LPGを蒸気で気化してから天然ガスに混入する型式の設備と、液体のまま混入できる蒸気不要の型式の設備がある。一般のボイラーからの蒸気は燃料、水処理などのコストを要するが、コジェネレーション（蒸気と電気を同時に発生させる設備）が設置されている基地もあり、この場合発電メリットを考慮しなければならない。発電メリットの評価は時間帯により異なる買電単価により行なう必要がある、また基地内での使用電力量を超えての発電をしてもメリッ

トにはならない、最低運転負荷など、設備ごとにさまざまな制約も付加され、LNG在庫やパイプラインの圧力バランスについても十分な配慮が必要である。このように複雑、多数の選択肢のなかから全社的かつ長期的な見地から最適な都市ガス生産方法を決定することが新たなコスト低減のポイントとなり、これを支援するコンピュータシステムの必要性がクローズアップされてきた。

3. LNG基地最適運用システム

3.1 システムの概要

この最適化システム構築の第1段階として、LNG基地の最適な月間設備運用計画を作成する「LNG基地最適運用システム」の構築に着手した。

構想段階の初期はエキスパートシステムの構築を検討した。しかし従来の経験則の通用しない不透明な時代において全社の需要予測の修正、設備の故障、各種コストの変化など急変する内外の環境に迅速柔軟に対応しながら最適な政策決定を行なうには、数理的な解析が不可欠であると考え、数理計画法をベースとしたシステムとした。しかし当社においては数理計画法によるシステム構築の実績に乏しく、FSにより特に計算速度、計算精度についての試行錯誤をくりかえしながら、実用面で許容される計算時間の範囲で都市ガス製造プロセスをより精度を高めるよう数理モデル化した。ここでは変動する都市ガス需要、設備状態、コスト環境に対応するため月間の27の時間帯を考慮した。さらに次月以降のことを考慮せず、計画の対象となる1カ月だけを最適化したのでは次月以降の在庫操作が困難になることが考えられるためまず3カ月を対象に大まかな最適化を行なったのち、これにもとづき最初の1カ月の上旬、中旬、下旬のそれぞ

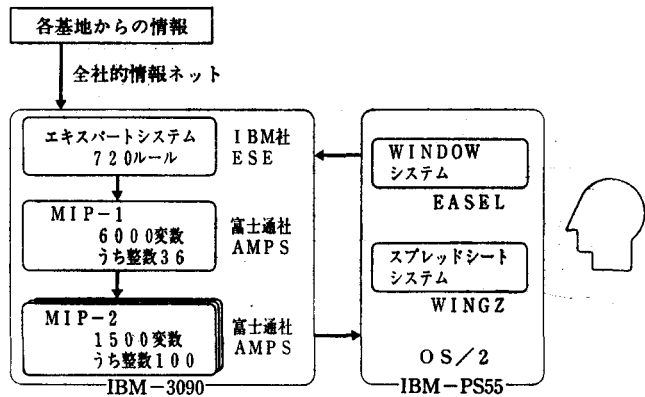


図3 システムの概略構成

れについて詳細な最適化計算を実施するようにした。

3.2 システム構成

本システムの構成を図3に示す。

(1) 入力部

入力項目となる計画作成の前提条件は、ガス需要予測、原料在庫、設備整備やLNG入船のスケジュールなどである。フロントエンドプロセッサとしてはパソコンを使用しており、おもに入力データの作成、結果データの整理および帳票作成などのスタンドアロン型コンピュータとしての機能と、データ伝送などホストコンピュータ端末としての機能を併せもっている。またグラフィカルユーザーインターフェースを構築し、操作性の向上をはかっている。入力は、非定期的に行なわれる定数の変更を含め、スプレッドシートに埋め込む形で行なわれ、簡易な演算とともに入力値の妥当性をチェックする。また別途構築されている全社の情報ネットワークシステムよりできる限りのデータを取り込むことにより、入力操作の軽減を行なっている。

(2) 最適化計算部

バックエンドプロセッサとしては全社の情報ネットワークシステムのホストコンピュータを利用している。

最適化計算部は混合整数計画問題 (Mixed Integer Programming Problem: MIP) システムとエキスパートシステムにより構成され、与えられた条件のもとでの設備をどのように稼働させれば全社レベルでコストミニマムになるかという計画を算出する。このエキスパートシステムは、与えられた入力条件のもとで経験的、論理的な知識を用いて、MIPにおける整数変数の上下限の絞り込みを最適性を損なわない範囲で行なうことを主たる目的としている。たとえば、あるポンプの台数が

8基の場合、ポンプ台数を表わす変数の上下限を(0.8)とするのではなく、需要予測量などの条件から、これを(4.6)というように縮小するものである。さらに冷熱発電設備を運転するか停止させるかという0/1変数があるが、特に効率的な設備であるため、需要予測量や設備整備状態など、いくつかの条件を満たした場合、MIPで計算するまでもなく冷熱発電設備は運転する方が効率的であると判断し、変数を1(運転)と固定する。これらによりMIPにおける整数解の探索領域を縮小し、実用的な時間内での計算を実現している。

(3)出力部

パソコンでは、転送された計算結果のスプレッドシートへの出力、グラフの表示を行なう。また出力された解の妥当性、最適性の確認の一助とするため、MIP計算結果の変数値を一部変更した場合の目的関数の変化を計算する機能を設けた。これは一部の変数を任意の値に固定したうえで、MIPの再計算を行なうものである。

4. 今後の方向

都市ガス製造をとりまく内外の急速な変化に対応すべく最適化の検討を行なってきたが、さらに広い視野から見た場合、それはまた局所的な最適解でしかない。現在、月間モデルをベースに年間モデルの構築を検討中である。また、より安価、安定、安全な都市ガスの製造供給を実現していくため、最適化の対象範囲をさらに拡張していきたいと考えている。

(1)供給設備を含めた運用

今回のシステムでは全社の製造設備を対象にした運用の最適化を行なったが、さらに高圧幹線パイプラインやピークシェーピング用のガスホルダーなどのガス供給設備をも含めた最適運用をめざしていきたい。これにより、需要変動がガスホルダー等により吸収され、製造設備の負荷が平準化されるため、効率化が期待できる。

(2)設備投資

都市ガス産業では、年々のガス需要の増加に伴い製造、供給設備の増強が行なわれる。需要増加に対応するためにはLNG気化器などの製造設備の増強やパイプラインの増強以外に、LNG基地稼働率平準化のための大容量貯蔵や、パイプライン輸送効率の向上をめざしたブースターコンプレッサー設置、ガスの再液化貯蔵など、製造部門以外における施策も含め選択肢は多彩である。これらの設備投資を適正化するため、比例費と固定費を総合しての種々の施策の比較ができる評価手法の確立をす

めたい。

(3)コスト以外の要因

コスト低減とならぶ都市ガス製造における基本的使命は、安全で安定な操業(信頼性)の確保である。トレードオフの関係となることが多いコスト低減と信頼性向上の最適な折衷点を発見するためには、まず信頼性の定量的な評価が必要である。当社ではLNG基地とその製造設備の信頼性評価手法として、Kaman Science Corp.がEPR Iの委託により原子力安全を目的として開発したGO手法に、機器レベルの故障による基地能力の減少量の計算機能、故障頻度の計算機能などを付加したものを構築している。

5. おわりに

これまでの企業活動においても、意思決定は当然「最適化」をめざして行なわれてきたはずである。ところがあらためてこれを数理モデル化しようとする、現実の意思決定の複雑かつ非論理的なメカニズムが前に立ち上がる。システム化においては、透明性、発展性の確保に四苦八苦となる。これら多くの難題を克服しながら、企業の意思決定を支援する大規模な最適化問題のシステム化をはかることはじつに困難であると痛感している。

しかし技術、経済、そして人々の価値観の複雑化に伴い、時代は都市ガス事業者にまさに複雑な多元連立方程式を解くことを求めている。ORについては後進の当社ではあるが、諸先達のご指導を仰ぎながら今後とも全体最適化に果敢に挑戦していきたいと考えている。

参考文献

- [1] Inui M., Kubo K., Inamura E.: An Optimal Operation Planning System for Town Gas Production, Proc. Japan-USA Symposium on Flexible Automation, 1992
- [2] Inamura E., et al.: Optimal Operation of Production and Supply Facilities in Osaka Gas, Proc. Osaka Gas R&D Forum '91, 1991
- [3] Fujii T.: Development of Reliability Evaluation Method in LNG Terminals, Proc. 18th World Gas Conference (International Gas Union), 1991
- [4] Fujii T., Kiyota M.: Reliability Estimation Method for an LNG Terminal, Proc. of International Symposium on Reliability and Maintainability, 1990