解 説

GTL (gas-to-liquids) 技術の適用性*

栗 村 英 樹**

(Received August 3, 1998; accepted November 26, 1998)

Applicability of gas-to-liquids technology to gas and oil field development

Hideki Kurimura

Abstract: Recently, major oil companies, engineering companies, and research-oriented venture businesses outside of Japan have claimed that the significant improvement of GTL technology has been achieved. With such technological improvement, purely commercial application of the GTL technology is being studied in several potential projects. Nevertheless, very few detailed technical and economical information has been disclosed so far. Considering the above, we have evaluated the state-of-the-art GTL technology in terms of commercial applicability with the licensor information. As a result of the economical evaluation, it is concluded that the current GTL technology can only be applied to the projects with extremely low feed gas costs and/or with existing intensive infrastructures.

Key words: GTL technology, commercial application, economical evaluation

1. はじめに

既発見の天然ガス資源(図1)は、坑井を通じて採取される場合、製品化されるか、フレアーされるか、地下圧入されるかのどれかである(図2)。これに対して、特に中小規模ガス田の場合、発見されているにもかかわらず、経済的に開発ができない場合も多い。天然ガスは常温でガス体であることから、経済的な輸送手段の確保にはスケールメリットを要求されるためである。現在喫緊の課題として位置づけられている地球環境問題と将来的な化石資源枯渇問題から、「フレアーされているガス、あるいは既発見未開発のガス資源、特に中小規模ガス田をいかに有効に活用するか」が重要課題となっている。

*平成10年6月3日、平成10年度石油技術協会春季講演会開発・生産部門シンポジウム「ガス資源の有効活用(環境との調和)」で講演 This paper was presented at the 1998 JAPT Development and Production Technology Symposium entitled "Effective utilization of gas resources - cohabitation with the environment -" held in Sapporo, Hokkaido, Japan, June 3, 1998.

**帝国石油(株) Teikoku Oil Co., Ltd.

本課題に対して、近年欧米において天然ガスから化学的に市場規模の大きい液体炭化水素を合成する技術(GTL 技術)の改良が進み、大規模のみならず中小規模ガス田への適用性が高まっているとされている。これにより GTL プラント建設計画が相次いで発表されているが、GTL 技術の適用性に関する実態は、一般には必ずしも明らかとはならない。そこで、プラント建設コストなどライセンス情報を入手し、これに基づき GTL 技術の適用性を調査した。

図1 世界の既発見天然ガス田

図2 ガス資源を取り巻く問題

2. GTL 技術

2.1 プロセス概要

現在、適用性が高いとされる GTL プロセスは、合成ガス（水素および一酸化炭素の混合ガス）を経由するいわゆる間接法で、以下の基本構成となっている（図3）。

- ・合成ガス製造
- ・FT 合成（フィッシャートロプッシュ合成）
- ・水素化分解等精製

なお、図3の中のかっこ内の比率は、合成ガス製造に酸素を用いる場合の設備費構成比を表す。

(1) 合成ガス製造

天然ガス（メタン主体ガス）からの合成ガス製造には、以下の方式がある。

- ・部分酸化 ($\text{CH}_4 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{CO}$)
- ・水蒸気改質 ($\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{CO}$)
- ・ATR（部分酸化と水蒸気改質の組合せ）

部分酸化反応は発熱反応であり、エネルギー効率上有利であるが、一般に高価な純酸素（深冷蒸留による空気分離）を必要とする。一方、下流に位置する FT 合成においては、水素と一酸化炭素が 2:1 のモル比で反応するため、この観点から部分酸化反応は都合がよい。現在、商業化されている部分酸化反応による合成ガス製造装置では、炭素析出問題があるため触媒が用いられておらず、1,000℃以上の高温運転が行われている。

水蒸気改質は Ni 触媒下で行われるが、吸熱反応であるため連続的な熱の供給が必要であり、高コストである（典型的反応条件：30 atm, 900℃）。また、生成する合

図3 GTL プロセス概念図

表 1 既開発 GTL プロセス (開発途上含む)

開 発 者	プロセス名	運 転 実 績 (bbl/日)	合成ガス製造	特 徴	適 正 規 模 (千 bbl/日)
Sasol	SSPD	2,500	・部分酸化 ・水蒸気改質	安価 FT 反応器	10/系列
Shell	SMDS* GtS	12,500	部分酸化 部分酸化	高性能 FT 触媒 酸素富化空気利用	10~100 1~10
Exxon	AGC-21*	200	ATR	安価 FT 反応器	50~100
Syntroleum		2 (70)	ATR	・空気直接利用 ・非リサイクル	2.5~25
Rentech		250 (360)	・部分酸化 ・水蒸気改質 ・ATR	安価 FT 触媒	0.5~5

(注 1) 上記以外に、BP, Energy International, Syncrude などがある。

(注 2) 運転実績のカッコ内は、現在建設中。

(注 3) * 印のプロセスについては、ライセンス供与の意思なし。

図 4 Syntroleum 社 GTL プロセス概念図

成ガスの水素と一酸化炭素の比が 3:1 であるため、後続 FT 合成に必ずしも適していない。

ATR (auto-thermal reforming) は、水蒸気とともに酸素を吹き込み、メタンと酸素との燃焼反応による熱の発生を利用するもので、水蒸気改質の欠点を補うものである。

(2) FT 合成

FT 合成技術は、1923年にドイツにおいてフィッシャー (Fantz Fischer) とトロプッシュ (Hans Tropsh) によって開発され、Co や Fe などの触媒を用いて、以下の反応式により合成ガスから液体炭化水素 (直鎖状パラフィン) を製造する。

FT 反応による生成物の性状は、反応器温度および圧力に依存し、高温、低下下では主として軽質炭化水素が合成され、低温、高圧下では重質炭化水素が多く合成さ

れる。典型的な反応条件は、30 atm、250~350℃である。FT 反応は、特定成分を選択的に合成するものではないため、生成するワックス分などの重質炭化水素は、多くの場合水素化分解して灯油留分化される。なお、上式に示すとおり大量の水が生成されるため、その利用あるいは処分が必要である。

2.2 製品性状

FT 合成油は、触媒毒となるサルファーを除いた天然ガスを原料とする。また、FT 反応は直鎖状パラフィンを合成する。したがって FT 合成油はサルファー、芳香族、窒素化合物、重金属を含まない非常にクリーンな基本的性状を有する。油種別には、着火性能の高い高セタン価軽油基材、燃焼性の高い高煙点灯油基材、高粘度指数潤滑油基材、高純度ワックスなどが得られる。なお、FT 合成にて得られる軽質留分は、オクタン価が低いため、ガソリン基材には不適切である。

図5 熱効率とプロセスの複雑さの関係

2.3 既開発プロセス

開発途上のものを含む既開発 GTL プロセスを表1に示す。表1の中の各プロセスとも触媒、反応器などに特色を有するが、特に Syntroleum 社プロセスでは中小規模ガス田に対する適用性を高めるために、合成ガス製造局面において空気を直接利用し、さらに FT 合成局面で生成されるガスを燃料として用いリサイクルを行わないことによって(図4)、設備費の大幅な削減を図っている点が注目されている。ただし、リサイクルを行わないことなどによる設備費の削減(プロセスの簡略化)は、熱効率(製品収率)の低下を招くため(図5)、フィードガスコストが大きい場合、またはプラント規模が大きい場合には、適用性が低下すると考えられる。なお、Syntroleum 社プロセスでは、プラント内必要エネルギーを排熱回収およびオフガス(メタンなどのガス生成物、水素などの未反応ガス)の利用により賄うことができる。

3. 適用性

中小規模ガス田への適用性が高まったとされている Syntroleum 社 GTL プロセスについて、プロセス概念設計に基づくコスト試算結果などのライセンサー情報を入手し、適用性を評価した。

3.1 コスト試算

(1) 前提条件

- ・製造能力: 5,000, 10,000 bbl/日
- ・製品性状: 燃料油(ナフサ, 灯油混合物)
- ・フィード量: 61, 122 MMSCFD
- ・フィード条件: 58 atm, 32°C
- ・フィード組成: C₁ (80%), C₂ (5%), CO₂ (10%)

ほか

なお、ワックスなどを含む製品構成も考えられるが、現時点において具体的な性状把握が困難であることから、燃料油のみを製品とした。

(2) 試算結果

ATR, 空気圧縮機, FT 反応器などを主要機器とする GTL プロセス本体の建設費, すなわち IBL (inside battery limit) コストの試算結果は次のとおり。

- ・5,000 bbl/日: 1.233億ドル
- ・10,000 bbl/日: 1.789億ドル

また、冷却水循環ポンプ、製品タンク、送油ポンプなどを主要機器とする用役系およびオフサイトの建設費, すなわち OBL (outside battery limit) コストは、既存インフラ整備状況などに依存するため、ここでは典型的とされている IBL コストの15%を用いる。

人件費ほかを含む操業保全費(フィードガス調達費を除く)の試算結果は、年間稼働率92%の条件で、

- ・5,000 bbl/日: 840万ドル/年
- ・10,000 bbl/日: 1,340万ドル/年

である。

3.2 経済性評価

(1) 製造原価

3.1 節に示した試算結果および次の前提条件により、製造能力2,500~25,000 bbl/日(Syntroleum 社による同社 GTL プロセス適用可能範囲)における製品原価(投資回収分含まず)を試算した(図6)。

- ・資本費: 総建設費の10%/年
- ・フィードガス費: 0.5ドル/MCF
- ・年間稼働率: 92%

図6から、次が指摘できる。

- ① Syntroleum 社プロセスには、資本費部分に顕著なスケールメリットが存在する。
- ② しかしながら、プラント規模が大きくなるにつれて、フィードガス費の全体コストに占める割合が大きくなり、10,000 bbl/日を超えるとスケールメリットは小さくなる。
- ③ Syntroleum 社プロセスは、熱効率が低く(空気を直接改質に利用するため)、純酸素利用などの改質に比して、単位燃料油製造量に必要なとされる

図6 GTL 製品原価構成

フィードガス量が多いことから（20％程度）、フィードガス費の比率が大きくなる20,000 bbl/日以上の大規模プラントへの適用には、空気を直接利用しない他方式のほうが経済的に有利になる可能性もある。

- ④ 2,500 bbl/日規模のプラントは、フレアガス（フィードガス費が非常に低い）などへの適用、あるいはワックスなどの高付加価値製品化の場合以外、適用性は極めて低い。

(3) 製品価格

GTL 製品の種類は、燃料油（ナフサと灯軽油留分混合物；以下中間留分混合と呼ぶ）、ナフサ/灯油/軽油留分（各留分へ分離；以下中間留分分離と呼ぶ）、潤滑油/ワックスとなる。このうち、潤滑油/ワックスについては、市場規模が小さいためここでは考慮しない。中間留分混合、中間留分分離、原油の価格比較は、ライセン

サーに対するヒアリングと原油および石油製品スポット価格の推移（図7）から、次のように推定される。

- ・中間留分分離：平均原油価格＋6～8 ドル/bbl
- ・中間留分混合：平均原油価格＋3～4 ドル/bbl

これは、製油所などのマーケットまで他の低品位原油との混合がないことが前提で、GTLプラント側に分留装置、各製品別タンク、出荷設備などが必要になる。なお、GTL 製品をセタン価向上剤などに利用することを想定すると、同製品のプレミアム化が期待されるが、ここでは考慮しない。GTL 製品と他の低品位原油との混合が避けられない場合、すなわち既存原油パイプライン利用の場合、製品価格は混合比に依存する。この場合、当然のことながら GTL 製品は中間留分分離ではなく、中間留分混合となる。

3.3 総合評価

原油価格を下落時の13ドル/bbl（現状）と回復時の

図7 原油および製品スポット価格の推移

図8 Syntroleum 社 GTL プロセス適用可能範囲（原油相当 GTL 製品）

図9 Syntroleum 社 GTL プロセス適用可能範囲 (石油製品相当 GTL 製品)

20ドル/bblを想定し、Syntroleum 社 GTL プロセスの経済性を評価する。ここで、製品については中間留分分離と混合を考慮し、中間留分分離時の OBL コストを IBL コストの65%とし (油種別の付帯設備が必要なため)、中間留分混合時の OBL コストを IBL コストの15%とする。また、中間留分分離時の製品価格を「原油価格+7ドル/bbl」、中間留分混合時の製品価格を他低品位原油との混合を前提として「原油価格並」とする。以上の条件により、税引前の ROR (rate of return) 15%を確保する最大フィードガスコストを、Syntroleum 社 GTL プロセス適用可能規模 (2,500~25,000 bbl/日) を対象に試算した (図8, 9)。

その結果、現在の油価では、GTL 技術の適用性はほとんどないと考えられる。環境規制を受けるフレア随伴ガスや、LNG などへ市場が限定される大規模ガス田、あるいはサンクコストが無視できる既発見ガス田といったフィードガスコストが非常に低い場合は、油価の回復に伴って GTL 技術の適用性が高まってこよう。また、送油パイプラインなどの既存インフラが発達している場合、すなわち OBL コストを小さくできる場合も GTL 技術適用検討対象となりうる。しかしながら、いくら既存インフラが発達していても、サンクコストを考慮する必要がある場合、既発見中小規模ガス田 (1 TCF 未満) の GTL 技術による開発は極めて困難と考えられる。既発見ガス田に対して現在の GTL 技術の適用を検討するには、以下が最低必要条件の大まかな目安である。

- ・原油価格: 20ドル/bbl 以上
- ・鉱量: 1 TCF 以上

ここで、鉱量 1 TCF は、回収率70%、生産期間20年、10 MCF=1 bbl の条件で、10,000 bbl/日規模の GTL プラントに相当する。なお、10,000 bbl/日規模を超える場合の GTL 製品については、本試算前提条件におい

て、中間留分混合物に比して高価格となる各留分に分離したものに、顕著な経済的優位性がある。

4. 将来展望

4.1 今後の課題

前述のように、適用性が高まったとされる Syntroleum 社 GTL プロセスであるが、その適用可能領域は極めて限定的である。すなわち、油価の回復を前提としても、フィードガスコストが低い大規模ガス田を除いて適用性を有するのは、実質的に環境規制の厳しいフレア随伴ガス程度である。現在、開発が困難な既発見中小規模ガス田の開発には、GTL 技術における大幅なコストダウンが必要である。

4.2 期待される新技術

今後、大幅なコスト削減のポテンシャルを有し、その技術開発が期待されるものに、

- ・セラミック膜式反応器 (図10)
- ・直接法

がある。後者については、反応生成物の化学的安定性が低いため低収率になるという極めてハードルの高い問題を抱えており、いまだ実用化が見通せる状況にはないため、世界的に研究開発は停滞状況にある。一方、セラミック膜式反応器については、酸素透過性セラミック材料の発見や、さらに FT 合成油、メタノール、DME (di-methyl ether) などといった最終製品の選択幅が広いことから、近年欧米において研究開発投資が活発化している。なお、最終製品については、現時点において市場規模から FT 合成油が最も有望であるが、将来的には燃料電池自動車の商業化によるメタノール需要の拡大などが期待される (図11)。

4.3 新技術の適用性

将来的に GTL プロセスの改良あるいは技術革新が進

みコストダウンが達成された場合、その適用可能領域がどの程度拡大するかについて、今回得られた Syntroleum 社 GTL プロセスの建設費、操業保全費、フィードガス費を以下のように低下させて検討した。

- ・ IBL コスト：70%
- ・ 操業保全費：70%
- ・ フィードガス費：80%

IBL コストについては、セラミック膜式反応器などの革新的技術導入を想定し、操業保全費については、IBL コストと同レベルで低下するものと想定した。フィードガ

ス費については、一般的な熱効率60%程度が達成されるものとした (Syntroleum 社 GTL プロセスは、一般的な熱効率より20%程度低い)。

検討結果 (図12, 13) から、5,000 bbl/日 (鉱量0.5 TCF 相当) まで適用可能領域が拡大しており (適用可能フィードガスコストが0.5ドル/MCF 以上であるため)、中小規模ガス田への適用性が高まっていることが分かる。

5. ま と め

エクソン、シェルなどのオイルメジャーは、スケールメリットを追求するために、GTL 技術の大規模ガス田への適用を指向している。すなわち、GTL プラントの1系列当たりの製造能力拡大による大規模 GTL プラントの経済性確保をねらっている。これに対して Syntroleum 社などは、中小規模ガス田への適用を指向する技術開発を進めてきたが、残念ながらその適用性は依然として極めて低いと言わざるをえない。これは、スケールメリットのない中小規模ガス田の井戸元コストを低く抑えるのが困難なためである。

GTL 技術開発は、今後ますます大規模プラント指向と中小規模プラント指向の二極化が進むと思われ、この分野の技術開発が遅れている我が国としては、オイルメジャーと異なる技術開発戦略、すなわち中小規模プラントを指向する技術開発を進めるべきと考えられる。これには、大幅なコストダウンポテンシャルを有する革新的な技術開発が必要であることを念頭に置かなければならない。

図10 セラミック膜式合成ガス製造反応器概念図

図11 燃料電池自動車の燃料

図12 新技術適用可能範囲 (原油相当 GTL 製品)

図13 新技術適用可能範囲 (石油製品相当 GTL 製品)

6. おわりに

地球環境問題、資源枯渇問題を背景として、エネルギー源を持つことより、高いエネルギー技術力を有することのほうが重要になる時代がいずれ来るであろう。我が国としても、このような時代に向けて GTL 技術を含めた技術開発戦略の再構築が必要と考える。

謝 辞

本調査は、石油公団操業ニーズ支援調査として実施さ

れた。本報告の公表を許可された石油公団に対し深く謝意を表する。

SI 単位換算係数

$$\text{atm} \times 1.01325 \times 10^5 = \text{Pa}$$

$$\text{bbl} \times 1.589874 \times 10^{-1} = \text{m}^3$$

$$\text{ft}^3 \times 2.831685 \times 10^{-2} = \text{m}^3$$

* は正確な値