

天然ガス化学、石油化学、石炭化学

日本の石油化学と、それを取り巻く米国や中東の天然ガス化学、中国の現代的石炭化学について最近のトピックスをまとめた。また、重要性が高まっている天然ガスおよび天然ガス化学の魅力と課題について紹介した。

2017 年 3 月



株式会社 旭リサーチセンター

シニアリサーチャー 府川 伊三郎

まとめ

- ◆2013～14年の原油高で高コスト構造に陥った日本の石油化学は、2015～16年にナフサ・クラッカーの一部休止を実施し、日本のエチレン総年産能力は600万トンに減少した。ところが、2015～16年は約50ドル/バレルの原油安と円安に恵まれ、日本の石油化学は収益を改善した。しかし、米国のエタン・クラッキングは依然としてコスト的に優位である。そして、米国の、新設のエタン・クラッカーが2017～18年にいよいよ完成する（エチレン総生産能力 850万トン）。一方、中国のMTO&MTP法による軽質オレフィン（エチレンとプロピレン）の総生産能力が1,000万トンを超えた。

(p. 2～3、6～7)

- ◆米国シェール革命は、メタン主体のドライシェールガスから始まり、エタン、プロパンを多く含むウェットシェールガス、さらにシェールオイルと高付加価値な資源に拡大した。シェールは、優良なガス田・油田への集中と採掘技術の革新によりコストダウンに成功し、原油安下でも競争力がある。また、2016年に米国のシェールガス（メタン）、エタン、シェールオイルの輸出が開始された。

(p. 3～6)

- ◆CTO（石炭からのオレフィン製造）の建設には議論があるものの、中国の第13次5か年計画（2016～20年）においても重要開発技術として位置づけられた。

(p. 7～10)

- ◆中東・サウジで2016年にPetro Labigh（Aramco／住友化学）の第二期エチレン年産30万トンプラントが完成し、またSadara（Aramco／DOW）のプロジェクトが完成した（年産150万トンのエチレンと年産40万トンのプロピレンのプラント）。

(p. 10～11)

- ◆日本国内の石油化学は縮小したが、一方で、2016年に住友化学（合併）はサウジで新設エチレンプラントの稼働を開始し、シンテック（信越化学子会社）は米国でシェール由来のエタン・クラッキングを建設中である。また日本の化学企業が持つ高付加価値誘導品も海外に進出し、生産しているものが多い（例 溶液重合SBR）。ケーススタディとして、SBRの生産拡大を支えるブタジエンの生産を目的とする工業化を検討した。

(p. 11～13)

- ◆ExxonMobilがシンガポールでナフサの代わりに原油を直接分解するクラッカーを2014年に工業化し、Aramco・SABIC共同体も大型プロジェクトを計画中である。

(p. 13)

- ◆各種オレフィン製造技術の原料費の比較を行った。2016年の原油最安値が30ドル/バレル

の時のナフサ・クラッキング原料費は、エタン・クラッキングとPDH（プロパン脱水素法）の組み合わせとほぼ同じレベルになった。（p. 13～16）

◆天然ガスがエネルギー源として、また化学原料として重要性が高まっている。石炭や石油に比べ燃焼時の発熱量が多く、また発電効率が高い。しかも燃焼時、地球温暖化の原因である二酸化炭素（CO₂）の発生が少ない。これまで、世界的には石油より安価であった。日本は天然ガスを全量LNG輸入し、供給確保のため原油価格リンクの長期購入契約をしている。原油高騰時は世界に比べ天然ガス価格が高い。天然ガスの重要性が増しているので、できるだけ安価にかつ安定して天然ガスを手に入れるための仕組み（自由市場の創設）やインフラの強化（国内外のパイプライン強化）が望まれる。（p. 16～20）

◆Ineosは2016年より、米国のシェールエタンを専用液化エタン船で欧州に運搬し、欧州でエタン・クラッキングを開始した。インド、中国でも同様な計画が進んでおり、シェールエタンを使ったエタン・クラッキングが世界に広がる。（p. 20～21）

◆メタンは有効な工業的水素源で、石油、石炭、バイオマスに比べ重量当たりの水素生成量が多く、CO₂発生量が少ない。アンモニア合成に利用されている。また固定式燃料電池に実用化された。また、メタン原料のメタノール合成法は、CO₂を原料の一部として大量に使用するので、CO₂の資源化を既に実現している。（p. 21～23）

◆天然ガス化学のうち、技術ブレイクスルーの余地があるプロセスがいくつかある。例えば、メタンからメタノールをつくる従来技術は、ステップが多くコストが高い。触媒・プロセスの開発によるブレイクスルーが期待される。（p. 23～24）

◆メタンからエチレンを直接製造するSiluriaの革新技术が注目されている。固有の酸化ナノワイヤー触媒を用いてメタンの酸化的カップリング（OCM）法でエチレンをつくる。デモンストレーションプラント（1トン/日）の運転を1年間行い、成功裡に2016年前半で終了し、工業化の検討が始まっている。（p. 24～26）

◆資源の価格高騰や枯渇から、石油化学→天然ガス化学→石炭化学→バイオマス化学へのシフトが考えられる。しかし、地球温暖化を考慮すると別の絵が浮かんでくる。石炭化学への大幅シフトは難しく、また地球温暖化によるクリティカルな気候変動が資源枯渇よりも早く到来するシナリオも考えられる。（p. 26～28）

目 次

はじめに	1
1 日本の石油化学を取り巻く状況	2
1.1 原油安でひと息つく日本の石油化学	2
1.2 米国シェール革命の経緯	3
1.3 米国の最近の状況——新設エタン・クラッカーの完成	6
1.4 中国の最近の状況——現代的石炭化学	7
1.5 中東の状況	10
1.6 日本の状況——海外進出と高付加価値石化誘導品	11
1.7 原油の直接分解技術の工業化	13
1.8 各種オレフィン製造技術の原料費比較	13
2 天然ガスと天然ガス化学	16
2.1 天然ガスの特徴	16
2.2 天然ガスの輸送と価格	17
2.3 Ineos の挑戦——専用液化エタン船で米国シェールエタンを欧州に輸送	20
2.4 優れた水素源にもなる天然ガス	21
2.5 天然ガス化学の技術課題（ケーススタディ）	23
2.6 Siluria のメタンから直接エチレンをつくる革新プロセス	24
3 天然資源化学と地球温暖化	26
おわりに	28
参考資料	28

はじめに

本レポートは、ARCレポート「石油化学から天然資源化学へ」2016年版（参考資料(1)）に続く2017年版である。2016年版では4つの天然資源化学である石油化学、天然ガス化学、現代的石炭化学、バイオマス化学について技術、事業、市場について詳細に述べた（図1）。本レポートは、天然資源化学の2016年のトピックスと天然ガス化学を中心にまとめた。したがって、本レポートと併せて2016年版を読まれることをお勧めする。

（注） 天然資源化学

石油、天然ガス、石炭、バイオマスのいずれからも基幹化学品のエチレンとプロピレンがつくれるようになった（図1）。各国・各企業は、最も有利な資源を複数選択し、リスクを軽減しながら収益を上げる戦略を取りつつある。既に、石油の高騰に備え、他の安価な天然資源を利用しようとして大きくシフトしている。また、長期的にはバイオマス化学にシフトすることを念頭に準備を進めている（詳細は参考資料(2)参照）。

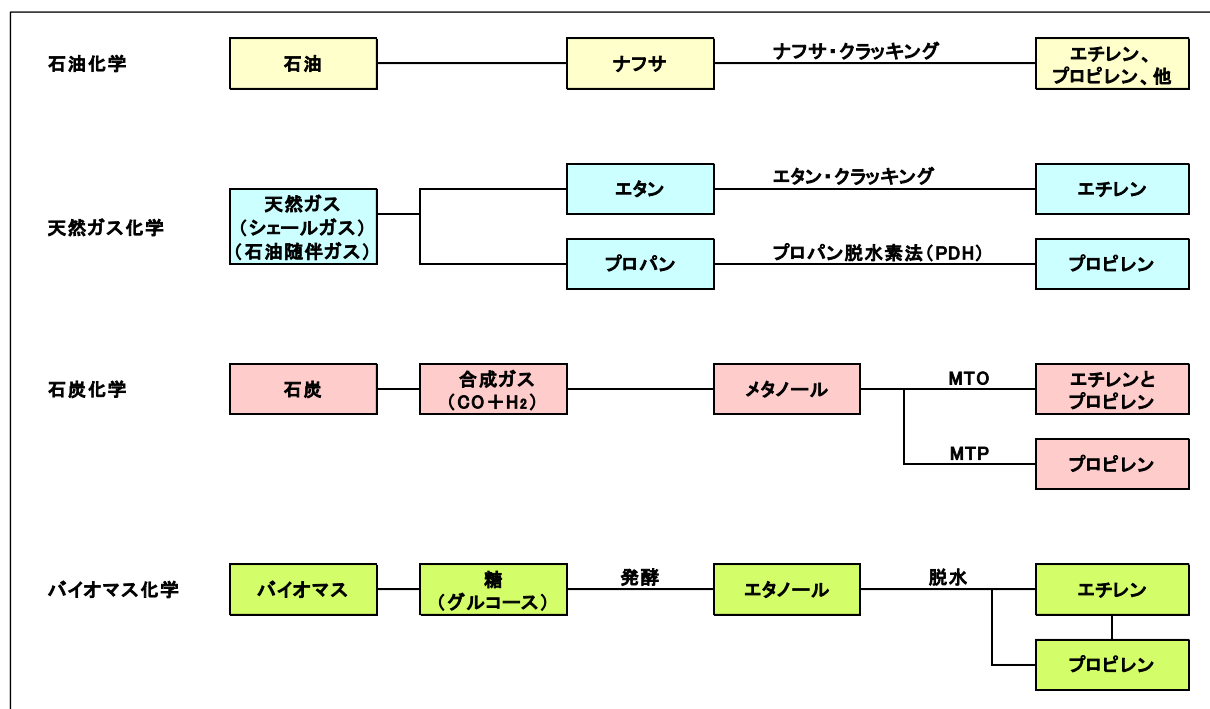


図1 天然資源化学（石油化学、天然ガス化学、石炭化学、バイオマス化学）の体系

出典：各種資料より旭リサーチセンターが作成。

1 日本の石油化学を取り巻く状況

1.1 原油安でひと息つく日本の石油化学

表1に示すように、2012～14年に原油が100ドル/バレルを超えるまで高騰し、ナフサを原料とする日本の石油化学は高コストに陥った。これまで石油化学製品の輸出によりエチレンセンターの稼働率を維持してきたが、将来的にそれは困難なことからエチレン生産能力の調整が決断された。2015～16年にかけて三菱化学の鹿島のエチレンプラントと住友化学の千葉のエチレンプラントが休止し、三菱化学と旭化成の水島のエチレンプラントを統合して1基にし、残り1基が休止した。これらの結果、日本のエチレン生産能力は720万トンから600万トンに減じた。

表1 石油化学、天然ガス化学、石炭化学の最近の状況

年	原油	ナフサ	メタン (米国)	エタン (米国)		日本 ナフサ	米国 シェールガス	中国 石炭
	\$/バレル	\$/トン	\$/百万 Btu	\$/百万 Btu	\$/トン	ナフサ・クラッキング	エタン・クラッキング (ナフサ・クラッキング からシフト)	MTO&MTP 軽質オレフィンの 累積生産能力
2012	100	970	4	12	600	3社休止の発表		182万トン
2013	100	970	4.3	4.3	220		新設計画	272万トン
2014	100	970	4.3	4.3	220		新設着工	748万トン
2015	50	500	3.2	3.2	160	3社休止の実施		1011万トン*
2016*	30	300	2.7	2.7	130			
2017	～50	～500					新設完成 同上	2016～19年計画 合計 1030万トン
2018								
2019								
	* 2016年の原油最低値の時の価格 注：原油100\$/バレルは、 約16\$/百万Btu					エチレン生産能力 720→600万トン (休止▲120万トン)	新設エチレン生産能力 計約850万トン	* 1011万トンの内訳 エチレン 420万トン プロピレン 590万トン

出典：各種資料より旭リサーチセンター作成。

一方、2014年11月から原油価格が下落し、2015～16年は約50ドル/バレルの原油安になった（表1）。米国のシェールオイル増産やイランの石油輸出解禁など供給量が増加する中で、新興国経済の成長鈍化が表面化したためである。この原油安と円安が重なり、日本の石油化学は、コスト競争力を回復し、2015～16年は収益を改善した。

米国は原油高騰時に、既存エチレンプラントの原料を高価なナフサ（970ドル/トン）か

ら安価なシェールガスのエタン（220ドル/トン）にシフトさせ、圧倒的なコスト競争力を有するようになった。現在、エタン原料が約95%になっている。さらに、建設中のシェール由来のエタン・クラッカーの新設プラントのうち、着工が早かった第一陣のプラントがいよいよ2017年に完成する（表1）。合わせてPE工場も完成する。

原油安で米国のエタン・クラッキングの圧倒的なコスト優位（アドバンテージ）は大きく減じたが、依然としてナフサ・クラッキングに対して優位である（表1、図5、表5）。

また、中国は、新規技術であるMTO（Methanol To Olefins）法とMTP（Methanol To Propylene）法を使って軽質オレフィン（エチレンとプロピレン）を製造するプラントを大規模に工業化した。特に、安価な国内資源の石炭からメタノール経由で軽質オレフィンを生産する一貫プロセスであるCTO（Coal To Olefins）は競争力がある。そして、生産された軽質オレフィンからポリオレフィン（ポリエチレン（PE）and/orポリプロピレン（PP））が同じ工場サイトで製造される。中国の2015年末のMTO&MTPプラントの総生産能力は、エチレン420万トン、プロピレン590万トンに達した（表1）。ナフサ・クラッキングに比べ、プロピレン生産量の比率が高い。したがって中国はPPの生産増が多く、PE生産量が急増する米国とは対照的である。

1.2 米国シェール革命の経緯

（ドライシェールガス→ウエットシェールガス→シェールオイル→原油安）

米国のシェール革命は、まずシェールガスの発見に始まる。米国の中堅企業が開発した水平坑井・水圧破碎法により、取り出しが困難と考えられていた頁岩（シェール）から天然ガス（シェールガス）を経済的に取り出すことに成功した。2009年頃より生産量が増加した。シェールガスの主成分はメタンであり、それより高沸点成分（NGL）にはエタン、プロパン、ブタン、液体成分が含まれる。

当初、掘削されたシェールガスは、ドライシェールガスと呼ばれるメタンがほとんどの天然ガス（例 メタン～90%（産地Marcellusなど））であった。メタンは火力発電用燃料や都市ガスなどに使用される。米国はそれまで天然ガスの輸入国で価格も高かったが、豊富な天然ガスを産出し、需給が緩み価格が低下した（図6）。その背景には、米

国政府が一次エネルギー（原油や天然ガス）の輸出をカナダ、メキシコ以外の国には禁止していたことと、天然ガスをLNG輸出するための液化設備がなかったことがある。そして、米国のドライシェールガスは国内市場にとどまり、国際価格よりも低い価格となった。

このため、ドライシェールガスよりも高付加価値成分を多く含むウェットシェールガス（例、メタン73%、エタン12%、プロパン7%、ブタン5%、液体成分3%（産地Permianなど））の採掘にシフトした。エタンはエタン・クラッキングの原料で、2012年年初まではメタンより3倍高かった（表1）。またプロパン・ブタンは沸点が低く液化や圧縮が容易なことから輸送しやすく、メタンやエタンより価格が高い（プロパンは20℃、8.5気圧あるいは30℃、11気圧で液化する）。ウェットシェールガスにシフトしたことからエタン、プロパン、ブタンが豊富に産出し、米国からのプロパン輸出が急増した。一方、エタンはエタン・クラッキング需要を超える量が産出し、メタンと同様に輸出設備がないことから価格が下落した。そして、エタンは低価格のメタンと同価格になった（表1）。

シェールガス（ドライおよびウェット）の価格低迷に苦しんだ採掘業者は、タイトオイル層より原油を採取できることを見だし、シェールオイルに大きくシフトした。なにしろ原油は当時100ドル/バレルであり、米国は原油の大輸入国であったので、シェールガス採掘に比べ経済的メリットがはるかに大きかった。シェールオイルの生産量の増加は目を見張るものがある（図3）。

2013年12月にEIA（米国エネルギー情報局）は、米国がロシア、サウジアラビアを抜いて天然ガス、原油の世界一の産出国になったと発表した。これはサウジアラビアやロシアに大きな衝撃を与えた。

米国のシェールオイル増産が一つの引き金となり、2014年末以来の原油安（約50ドル/バレル）となり、結果として米国エタン・クラッキングのナフサ・クラッキングに対するコスト的アドバンテージを大きく減じたのは皮肉であった。

またこの原油安と天然ガス安により、シェールガス・オイルの採算は赤字になるのではないかと当初予想された。しかし、優良な油田とガス田への選択と集中、稼働掘削装置

(リグ) 数の大幅削減（約8分の1）、水平坑井・水圧破砕法技術の大幅革新によりコストダウンに成功し、原油安・天然ガス安の状況でも競争力のある生産が可能になった。図2と3にEIAが2016年6月に発表した天然ガスと原油の生産実績と将来予測を示す。天然ガスは2015年実績でシェールガスとそれ以外のガス生産量がほぼ1：1で、将来はシェールガスが大きく伸びる予想である。原油についても、2015年実績でシェールオイルとそれ以外のオイルがほぼ1：1になっている。原油安の影響で2016年は生産量が一時的に減少するもののその後は穏やかな増加を続け、過去最高の原油生産量9.6百万バレル/日に近づくものと見ている。

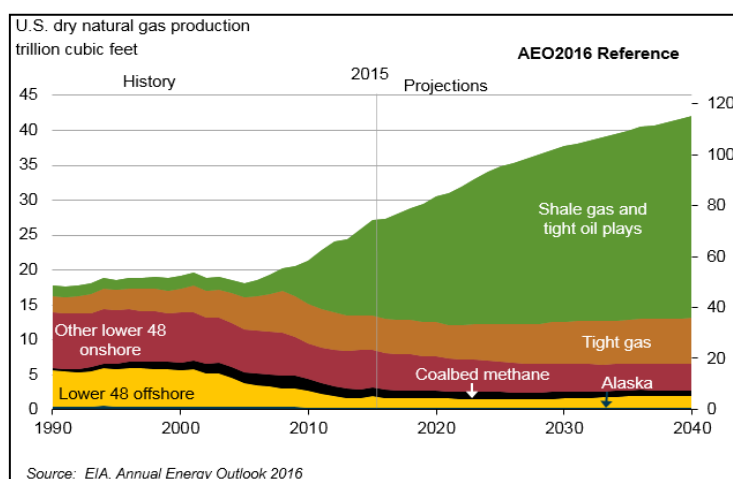


図2 米国における天然ガス生産実績と予測

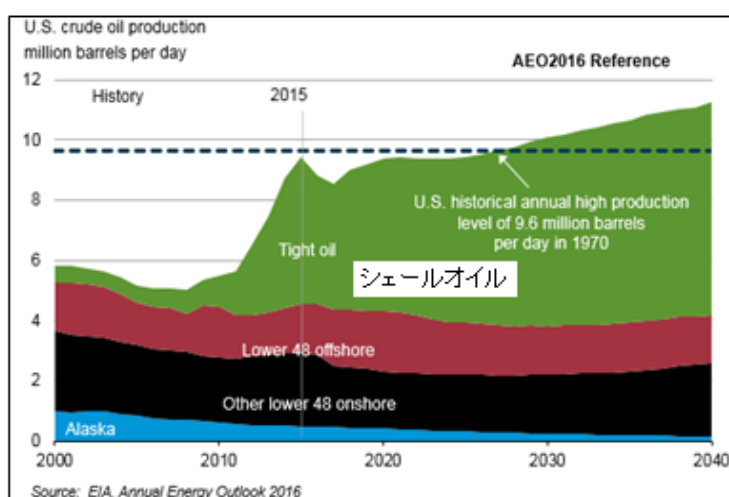


図3 米国における原油生産実績と予測

出典：図2、3はEIA（米国エネルギー情報局）の2016年6月発表資料による。

米国は現在も原油の輸入国であるが、シェールオイルはナフサに近いオクタン価の低い軽質油のため産出量の割に需要が少なく、2016年1月より輸出解禁となった。なお、天然ガス（メタン）も2016年1月から輸出解禁となった。2016年に輸出用の天然ガスの液化設備が完成し、またパナマ運河の拡幅工事が完了したことから、LNG輸出が本格化する。また2.3に述べるように、エタンの輸出も2016年より始まった。

1.3 米国の最近の状況——新設エタン・クラッカーの完成

表2に示すように、着工の早かったChevron Phillips、Dow Chemical、ExxonMobil Chemical、OxyChem/Mexichemのシェール由来のエタン・クラッカーがいよいよ2017年に完成する。ポリエチレン工場も順次完成していく。次いで2018年に、Formosa Plastics、Sasol、シンテックのエタン・クラッカーが完成の予定である。Sasolは投資金額が膨らんだため誘導品計画を見直している。信越化学の100%子会社であるシンテックは、自社の塩化ビニルモノマー用に購入しているエチレンのかなりの部分を自社生産する。

表2 米国におけるシェールガス原料のエタン・クラッカー建設予定

会社	立地	エチレンの 生産能力 万トン/年	誘導品 ポリエチレン(PE) など	投資額	着工	完成 予定年
Chevron Phillips	テキサス州 ベイトウン	150	2PE、計100万トン	6,000億円	2014.4	2017
Dow Chemical	テキサス州	150	PE 75、エラストマー 50	4,000億円	2014.6	2017
ExxonMobil Chemical	テキサス州 ベイトウン	150	2PE、計130万トン		2014.6	2017
OxyChem/Mexichem	テキサス州 インゲルサイド	55	(既存塩ビ(VCM)用)		着工	2017
Formosa Plastics (台湾)	テキサス州ポイント・ コンフォート	159	LDPE、VCM、EG	2,000億円	着工	2018
Sasol (南アフリカ)	ルイジアナ州 レークチャールズ	150	EO、アルコール、PE α-オレフィン、ゴム	8,100億円	2014.1 投資決定	2018
シンテック (信越化学)	ルイジアナ州 プラクマン	50	既存塩ビ(VCM)用	1,400億円	2015年4月 投資決定	2018
Shell Chemical	ペンシルベニア州 モナコ	150	3PE、計150万トン		2016年 投資決定	
Lotte-Axiall	ルイジアナ州 レークチャールズ	100			2016.6	2020

出典：各種資料¹より旭リサーチセンター作成。

¹ IHS ChemicalWeek, 21/28 November 2016, 3 ページ、February 29/March 27, 2016, 22 ページ
C&EN September 26, 2016, 23 ページ、各社ホームページ。

2013年に建設計画を発表以来、投資決定がずっと遅れていたShellのエチレン150万トンのエタン・クラッカーとポリエチレン工場の建設が2016年6月に決定した。2020年代の初めに稼働の予定である²。これまで新設エタン・クラッカーがメキシコ湾岸のテキサス州とルイジアナ州に集中していたが、Shellのプラント立地はペンシルベニア州で、シェールガス産地（Utica、Marcellus）に近く、またニューヨークなどのポリエチレンの大消費地に近い。

原油安でエタン・クラッキングのアドバンテージが減じ、いくつかのエタン・クラッカー建設計画が中止された。その中で例外的に、Lotte-Axiallが原油安後にエタン・クラッカー建設計画を発表し、2016年6月に着工した。2020年完成の予定である。Lotteは韓国の化学会社で、Axiallは米国の化学会社である。

そのほか、Formosa（第二プラント、ルイジアナ州）、SABIC／ExxonMobil合弁、PTT（タイ）／丸紅合弁、Total Petrochemical（フランス）、Odebrecht／Braskem（ブラジル）合弁などの計画が発表されているが、投資決定には至っていない。

また、原油（シェールオイル）と天然ガス（シェールガス）の価格は次のように予測されている。

2016年11月のOPECの減産同意を受け、2017年の原油価格は50ドル/バレルを下回ることはないと予想されている。今後数年穏やかに価格上昇するという見方が多い。米国の天然ガス（メタン）価格も穏やかに上昇の方向で、国際価格並みになると見られる。エタン価格は、メタン価格より高くなると見られている。

1.4 中国の最近の状況——現代的石炭化学

（1）MTO、MTPの新プラント完成状況（表3、2015年までの詳細は参考資料（1）参照）

4つのグループがMTOまたはMTPの技術を開発し、ライセンスしている。Hanywell UOPが開発したMTO、DICP（中国科学技術院大連化学物理研究所）らが開発したDMTO、Sinopecらが開発したSMTO、Airliquid・Lurgiが開発したMTPである。UOP・MTOは、2016年11月に

² IHS ChemicalWeek, 5/12 December 2016, 13 ページ

吉林省の康乃尔集团（Jilin Connel Chemical）に9番目のライセンスをした。一方、DMTOの第10番目のライセンス先である内蒙古の中煤蒙大は、2016年4月に年産60万トンプラントの稼働を開始した。これで、DMTOの総生産能力は年産580万トンになった。また、SMT0の最大プラントを建設中だった中天合創能源公司（Sinopec中心の合弁会社）は同プラントを2015年に完成し、石炭からメタノールをつくる前工程が2016年9月に稼働した³。

図4にプラント立地を示す。内モンゴル（内蒙古）、寧夏回族自治区、陝西省などの炭鉱地帯ではCT0が多く、浙江省や山東省の沿岸部は購入メタノールを使うMT0やMTPが多い。

（2） 中国の現代的石炭化学の評価

中国の現代的石炭化学には、①石炭から軽質オレフィンを製造するCT0、②石炭から合成ガソリンをつくる方法（CTL）、③石炭から代替天然ガス（SNG：物質はメタン）をつくる方法が含まれる（図10）。これまで、現代的石炭化学は国の重要技術に位置付けられ、新規プラント建設に巨額の投資が行われてきた。

しかし、今後のCT0プラント建設については課題が多く、賛否が分かれている。

慎重派の中国化学工程集団の汪寿建総工師は、①工場立地場所の制約（石炭の開発区で、かつ水資源が豊富な環境キャパシティの良好な地区が優先される）、②水資源利用のボトルネック（石炭産地は水資源が乏しいところが多い）、③環境汚染問題（廃水、固形廃棄物、CO₂排出など）、④製造できるポリオレフィンが同質で付加価値が低い点やポリオレフィン工場が消費地から離れていること、⑤原油安による競争力低下の5つの問題点を指摘している。このため、第13次5か年計画の中でCT0を位置づけていた地方も慎重になっている⁴。

2016年3月に発表された第13次5か年計画（2016～2020年）では、現代的石炭化学は引き続き開発を進める重要技術⁵に位置付けられたが⁶、新規プラントの建設承認の基準は厳しくなることは間違いない。

³ <http://www.asiam.co.jp/news/detail.php?id=8022>

⁴ <http://www.asiam.co.jp/news/detail.php?id=7141>

⁵ 5か年計画のコラム7：ハイエンド設備イノベーション発展プロジェクトの（8）先進的化学工業プラント設備の項で現代的石炭化学技術が書かれている。（環境）技術の改良や国産技術の開発が目標である。

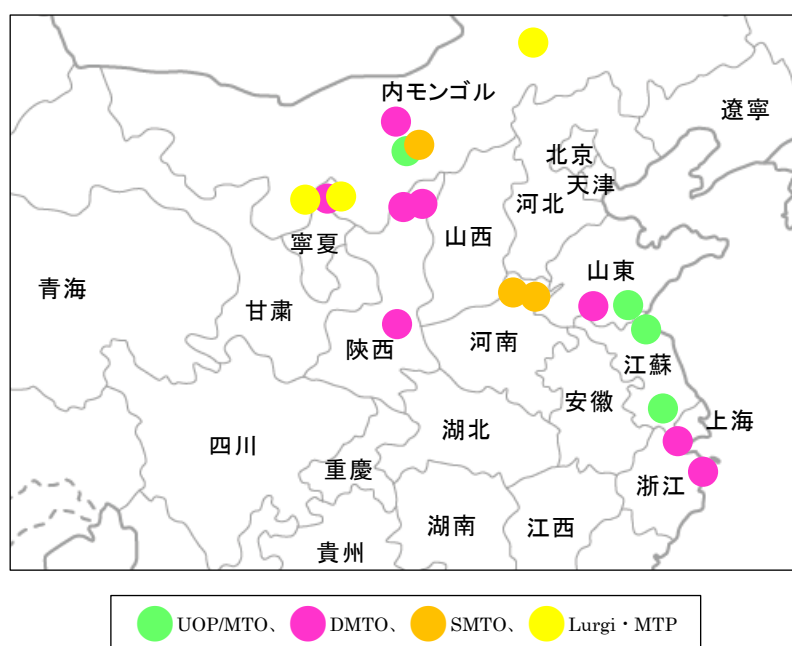
⁶ https://reports.btmuc.com/File/pdf_file/info002/info002_20160411_001.pdf

表3 中国のMT0とMTPのプラント建設実績

会社名	プロセス	立地	軽質オレフィン（エチレン+プロピレン）の年産能力（万トン）					
			～2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年～
惠生（南京）清潔能源公司	UOP・MTO	江蘇省南京		29.5				
臨沂（山東）陽煤恒通化工公司	UOP・MTO	山東省臨沂			29.5			
久泰能源（准格爾）公司	UOP・MTO	内蒙古、オルドス			60			
江蘇斯爾邦石化有限公司	UOP・MTO	江蘇省連雲港市				83.3		
(Better Clean Energy)	UOP・MTO	山東省					30	
魯西化工集團	5番目ライセンス	(Shandong)					予定	
(Luxi Chemical Group)	UOP・MTO					12月		
	6番目ライセンス					契約		
南京誠志清潔能源	UOP・MTO	江蘇省南京						60(2018)
	UOP・MTO	遼寧省大連						60(2019)
康乃尔集团	UOP・MTO	吉林省					11月	30(2017)
(Jilin Connell Chemical)	9番目ライセンス						契約	予定
神華包頭	DMTO	内蒙古、包頭	60(2010)					
寧波富德能源化工	DMTO	浙江省寧波		60				
寧夏宝豐能源集团	DMTO	寧夏回族、銀川			60			
中煤陝西榆林能源化工公司	DMTO	陝西省榆林			60			
山東神達化工	DMTO	山東省滕州市			36			
陝西延長中煤榆林能源化工公司	DMTO	陝西省榆林			60			
蒲城清潔能源化工	DMTO	陝西省蒲城県			60			
浙江興興新能源科技公司	DMTO	浙江省嘉興				60		
富德（常州）能源化工	DMTO	江蘇省常州市						60(2017)
中煤蒙大新能源化工	DMTO	内蒙古烏審旗					60	
(China Coal Mengda)	10番目ライセンス	(Mongolia)					(4月稼働)	
中原石油化工有限公司	SMT0	河南省濮陽	20(2011)					
Sinopec/河南煤業化工集团	SMT0	河南省鶴壁			60			
中天合創能源公司	SMT0	内蒙古、オルドス				120		
大唐内蒙古多倫煤化工有限公司	Lurgi・MTP	内蒙古、シリンゴル	50(2008)					
神華寧夏煤業集团公司 (SNCG)	Lurgi・MTP	寧夏回族、銀川	52(2010)					
神華寧夏煤業集团公司 (SNCG)	Lurgi・MTP	寧夏回族、銀川			50			
生産能力合計(万トン/年)			182	90	476	263		
累計生産能力合計(万トン/年)				272	748	1011		

表3と図4の出典：プロセスのライセンサーの発表などをもとに旭リサーチセンター作成。

図4 中国のMT0とMTPプラントの立地



一方、2016年9月に中国で行われた石炭クリーン高効率利用フォーラムでは、現代的石炭化学工業は依然として石炭クリーン・高効率利用の有効な道筋であると強調された。石炭化学工業については近年さまざまな議論を呼んでいるが、事業規模が大きく安全・環境保護施設が整備されているため、「三廃」（排気・廃水・固体廃棄物）に対する高度の総合処理と資源化利用が可能であるとしている⁷。こちらは推進派の意見である。

1.5 中東の状況

サウジアラビア（以下、サウジ）は安価な石油随伴ガス（天然ガス）を使うエタン・クラッキングが中心で、ナフサ・クラッキングもある。これまで石油随伴ガス由来のエタンは0.75ドル/百万Btuと破格に安く、競争力のあるポリエチレンやエチレングリコールなどの誘導品が中国や西欧などに輸出されてきた。しかし、原油安で国の財政状況が悪化したため、サウジは、2016年1月にエタンを0.75から1.75ドル/百万Btuに、またメタンを0.75から1.25ドル/百万Btuに値上げした。同時に、ガソリンを50%、電気を40%アップした⁸。

中東の化学工業はこれまで大きく成長してきた。2015年の化学品の全生産能力は1兆4,460万トンで2005年の約2倍になっている。また、2015年の中東のエチレン生産能力は年産2,459万トンで、内訳はサウジが1,664万トン、UAEが360万トン、カタール259万トン、クエート180万トンである。サウジのなかでは、SABICの1,281万トン、Petro Labigh（Aramcoと住友化学の合弁）の130万トン、Saudi Polymers Co.（SPC）の122万トンなどが大きい。SABICの生産能力が極めて大きく、中東の約半分を占める。

2016年にPetro Labighの追加のエチレン年産30万トンの設備が完成して、同社の総生産能力は160万トンになった。特筆すべきは、2016年に完成したSadara（AramcoとDOWとの合弁、サウジ）の200億ドル（2兆円）のプロジェクトで、年産150万トンのエチレンと年産40万トンのプロピレンを生産する。水蒸気分解炉が12基あり、そのうち7基はエタン・クラッキング用、残り5基はナフサ・クラッキング用である。12基のうち、3基

⁷ <http://www.asiam.co.jp/news/detail.php?id=7992>

⁸ IHS ChemicalWeek, 5/12 December 2016, 25～29 ページ、7 November 2016, 19～25 ページ

はエタンとナフサの両方が使用できる仕様になっている。誘導品はポリエチレンとポリオレフィンエラストマーで、ポリエチレンは既に稼働している。また、そのほかにサウジにとって初めての工業化となる14種類の特殊化学品プラントが併設されたことが特徴である。

2019年に完成予定のものとしては、オマーンのLiwa Plastics Projectのエチレン年産80万トンがある。45億ドル（4,500億円：1ドル＝100円で換算、以下同じ）の石油化学コンプレックスを、現在建設中である。

なお、中東は新規のプロジェクトについては、事業環境が悪いことから慎重である。

1.6 日本の状況——海外進出と高付加価値石化誘導品

日本の石油化学工業はエチレン生産プラントの一部設備休止により、エチレン生産能力は年産600万トンに縮小した。しかし、日本企業の海外でのエチレン生産能力は増加しており、また日本企業は高付加価値誘導品を有し、海外に展開しているので、単純に日本の石油化学が縮小したということは適当でない。

(1) 海外進出

日本の化学企業は、安価な原料や成長する市場を求めて海外進出をしている。最近の海外進出のトピックスを挙げると、

- a. 住友化学はAramcoと合弁で、サウジのRabighで第1期の大型エチレンセンターを稼働している。また、第2期工事が完成し、2016年に30万トンのエチレンセンターが稼働した。
- b. 溶液重合SBRメーカー（旭化成、JSR、日本ゼオン、住友化学）は相次いで、ブタジエンが入手できるシンガポール、タイに進出した。2013～17年にかけて、総生産能力27万トンの新プラントが稼働した。
- c. 信越化学は1973年より米国でポリ塩化ビニル事業に進出し、現在は米国および世界トップのシェアを有している。2015年にシェールガスを使うエタン・クラッカー建設を発表し、現在工事中である。2018年に完成の予定である（表2）

- d. 旭硝子はインドネシアで、2016年に3つの設備の能力を倍増し、苛性ソーダ（年産70万トン）、塩化ビニルモノマー（同80万トン）、ポリ塩化ビニル（同55万トン）になった。

(2) 競争力ある石化誘導品と付加価値の高い誘導品

日本の化学メーカーは、競争力のある石化誘導品と付加価値の高い誘導品、あるいは優れたコア技術（触媒・プロセス、ポリマー）を持っている。表4に原料別、モノマー／ポリマー別に分類して、まとめた。黄色地は、世界的に高いシェアを有するものである。これらの優れた製品と技術は世界に展開し、海外に生産プラントを有するものが多い。

表4 日本の競争力のある石化誘導品と付加価値の高い誘導品

		エチレン(C2)系・ プロピレン系(C3)系	ブタジエン・ブテン(C4)系 イソブレン・シクロペンタ ジエン(C5)系	アロマ(BTX: C6・C7・C8)系、 CO/H2系 C1(CO、メタノール、ホルマリン)
モノ マー	世界的に 高いシェア	C2: エチレン法などのMMA(三菱化学) C3: AN・プロパン法AN(旭化成)		C8: パラキシレン (JX日鉱日石エネルギー)
	コア技術 (触媒・ プロセス)	C2: オメガ法EG(三菱化学) C2・C6: 塩化ビニルイソシアネート チェーン(東ソー) C3: 直酸法アクリル酸	C4: 直酸法MMA(日本触媒 住友化学) C4: 直メタ法MMA(旭化成)	C6: 気相ベックマン法カプロラクタム (住友化学) C6: シクロヘキセン法シクロヘキサノール(旭化成) CO/H2: ナイトライト法EG,ジメチル カーボネート(宇部興産)
ポリ マー	世界的に 高いシェア (汎用・ 準汎用)	C2: ポリ塩化ビニル(信越化学) C2: ポリビニルアルコール、エバー (クラレ) C3: PP触媒・PPコンパウンド (三井化学ほか)	C4: 末端変性溶液重合SBR (旭化成、JSR、日本ゼオン 住友化学)	C1: エンプラ(POM: ポリプラ他) C6: 非ホスゲン法PC(旭化成・ ライセンス)
	高付加価値 ポリマー	C2: メタロセンPE(PEメーカー) C3: ポリアクリル酸(吸水性樹脂) (日本触媒ほか)	C4,5: 熱可塑性エラストマー (SBS・SISと水素SBS・SIS) (旭化成、日本ゼオン、クラ レ、JSR)	C6,8: エンプラ(PC, PBT, m-PPE、 ポリアミド: エンプラメーカー)
	特殊 ポリマー (独占的 高いシェア) 、または 高付加 価値品)	C2: 超高分子量PE(三井化学) C2: LIBセパレーター用PE(旭化成 東レ) C2: ポリビニルブチラール (クラレ、積水化学) C3: アクリル系カーボンファイバー (東レ、三菱化学、帝人)	C4: 水添NBR(日本ゼオン) C4: ポリクロロブレン (デンカ) C5: 環状ポリオレフィン、 石油樹脂(日本ゼオン) C5: 耐熱性ポリアミド樹脂 (クラレ)	CO: ポリグリコール酸(クレハ) C6: PPS: (DIC、東レほか) C6: シンジオタクチックポリスチレン (出光興産)

出典：各種資料より旭リサーチセンターが作成。

(3) ブタジエンの目的生産の工業化（ケーススタディ）

末端変性溶液重合SBRは低燃費タイヤ用に日本で開発された製品で、世界をリードしている。最近、日本の合成ゴムメーカー4社がシンガポールとタイで新プラントを建設し、生産している。汎用石油化学製品（汎用グレード）の中で差別化あるいは高付加価値化に成功した稀れな例である。東南アジアに進出した大きな理由は、日本ではブタジ

エンモノマーの供給能力が不足で、東南アジアはブタジエンソースが豊富なためである。

エタン・クラッキングやMT0&MTPではブタジエンの副生が極めて少なく、需要を満たすためにはブタジエンの目的生産が必要になる。溶液重合SBRをはじめとするブタジエン系合成ゴムに強い日本が、ブタジエンのみを生産する新プラントの建設を行うチャンスがある。

実現のための課題の一つは、原料のブテン（ブテン-1とブテン-2の混合物）の調達で、石油精製メーカーとの連携が一つの選択肢である。石油精製メーカーはガソリン製造時にブテンを大量に製造し、使用している。もう一つの課題は、工業化実績がないことであり、企業グループ（石油化学・石油精製企業のグループ）による実証プラントの建設が必要である。

本プラントは経済性から、年産20万トン以上の規模が必要であろう。プロセスとしては、旭化成や三菱化学が開発中のブテンの酸化的脱水法が有望である。

1.7 原油の直接分解技術の工業化

ExxonMobilは高価なナフサに依存せず、原油を直接分解する原油分解プラントをシンガポールに建設し、2014年より生産を開始した。また、AramcoとSABICは共同で同じく原油から化学品を直接生産するプロジェクトを2016年6月に発表した。投資額3兆円規模のプロジェクトで、2020年頃の完成である。ねらいは石油精製工程を省略することによる原料コストの競争力アップである。ExxonMobilの方法は、ナフサ・クラッキングに近い水蒸気分解法であるが、Aramco・SABICの開発技術はそれとは異なり、熱クラッキング、FCC（流動接触分解）、水蒸気分解を組み合わせたプロセスである。

1.8 各種オレフィン製造技術の原料費比較

軽質オレフィン（エチレン、プロピレン）を製造する各種製法の原料費比較を図5と表5に示す。ケース1は2014年の原油100ドル/バレルの時、ケース2は2015年の原油50ドル/バレル、ケース3は2016年の原油最安値30ドル/バレルの時であり、その他の原料の価格を図下の付表に示す。

いずれのケースでもエタン・クラッキングは競争力がある。

ケース3では、エタン・クラッキング（エチレン）＋ PDH（プロピレン）の天然ガス化学の全体原料費とナフサ・クラッキングの原料費とはほぼ同じである。また、ケース2と3では、MTOとMTPの原料費はいずれも高く、競争力がない。これはメタノールの価格が高いためである。

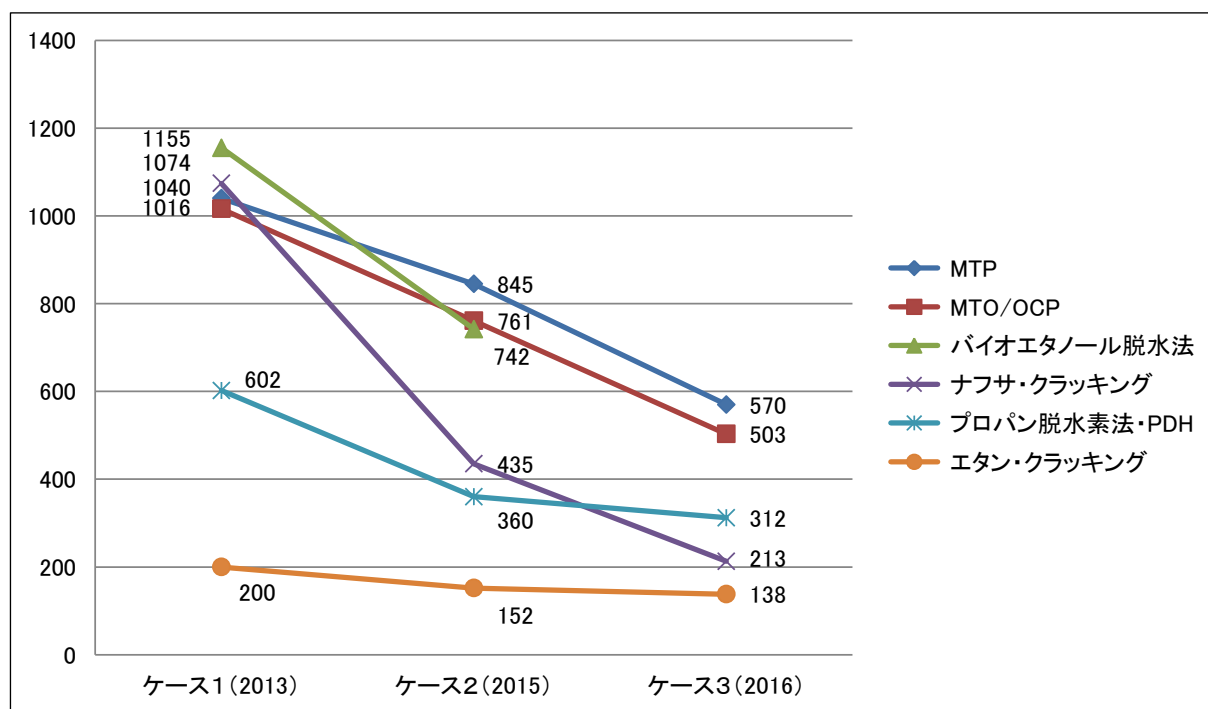


図5 軽質オレフィン製造プロセスの原料費（旭リサーチセンター試算）

原料	単位	ケース1	ケース2	ケース3
		2014年	2015年	2016年
原油	ドル/バレル	100	50	30
ナフサ	ドル/トン	970	500	300
エタン	ドル/MMBtu	4.3	3.2	2.7
エタン	ドル/トン	220	160	138
プロパン	ドル/トン	500	300	[260]
メタノール	ドル/トン	400	300	[200]
エタノール	ドル/トン	700	450	—

プロセス	原料	生成物
MTP	メタノール	プロピレン
MTO/OCP	メタノール	エチレン・プロピレン
バイオエタノール脱水法	エタノール	エチレン
ナフサ・クラッキング	ナフサ	エチレン・プロピレン、他
PDH	プロパン	プロピレン
エタン・クラッキング	エタン	エチレン

また、表6のUOPの発表資料によれば、中国の石炭を原料とするCTOのキャッシュコストは、天然ガス（メタン）を原料とするGT0（Gas To Olefins）やMTOのキャッシュコストよりはるかに安く、競争力がある。CTOの設備費は軽質オレフィン年産100万トンで33億ドル（3,300億円）と巨額で、GT0の22億ドル（2,200億円）、MTOの9.9億ドル（990億円）よりはるかに高いが、CTOのNPVとIRRはGT0並みである。

表5 軽質オレフィンの各種製法一覧と原料費の比較

プロセス(開発会社)		ナフサ・クラッキング	エタン・クラッキング	MTO (MTO/OCF統合プロセス) UOP 法	MTP Lurgi 法	プロパン脱水素法 (PDH) Lummus 法
製造条件	反応 触媒 温度 反応器 原料	水蒸気分解 なし 約900℃ 管型 ナフサ	水蒸気分解 なし 約900℃ 管型 エタン	接触分解 SAPO-34 350～500℃ 流動床 メタノール	接触分解 HZSM-5 420～490℃ 管型の固定床 メタノール	脱水素 Cr ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃ 520～680℃ 固定床 プロパン
	原料フィード量	ナフサ 213	エタン 117	メタノール 260	メタノール 354	プロパン 122
軽質オレフィン (エチレン+プロピレン) を100にした バランス ()内は%	エチレン	67(31)	97(83)	41(37)		
	プロピレン	33(16)	3(2.3)	59(53)	100(65)	100
()内は%	ブタジエン	10(5)	2(1.5)		LPG 12(8)	4
	その他C4	17(8)	1(0.5)	その他 12(9)		
()内は%	ペンゼン・トルエン	17(8)	1(0.5)		ガソリン 38(25)	
	燃料ほか	40(19)	1(0.5)		燃料ガス 5(3)	
()内は%	軽質分	H ₂ , CH ₄ , 30(14)	H ₂ , CH ₄ 6(13.6)	水 151	水 199	
	水					
原料費内訳 (ドル/トン)	原料 ケース	ナフサ 3 2 1	エタン 3 2 1	メタノール 3 2 1	メタノール 3 2 1	プロパン 3 2 1
	原料単価	300 500 970	138 160 220	200 300 400	200 300 400	260 300 500
原料費内訳 (ドル/トン)	原料原単位(トン/トン)	2.13 2.13 2.13	1.17 1.17 1.17	2.6 2.6 2.6	3.54 3.54 3.54	1.22 1.22 1.22
	原料費	639 1065 2066	161 187 257	520 780 1040	708 1062 1416	317 366 610
原料費内訳 (ドル/トン)	副生ガス控除(138、160、200)	40 48 60	7 10 12	17 19 24	24 27 34	5 6 8
	副生燃料控除(300、500、900)	171 285 513	14 25 45		114 190 342	
原料費内訳 (ドル/トン)	化学品控除(800、1000、1500)	215 270 405				
	副生品控除合計	▲426 ▲630 ▲978	▲21 ▲35 ▲57	▲17 ▲19 ▲24	▲138 ▲217 ▲376	▲5 ▲6 ▲8
軽質オレフィン1トン当たりの原料費(ドル)		213 435 1088	138 152 200	503 761 1016	570 845 1040	312 360 602

注：控除のカッコ内は各ケースの副製品単価を示す。

出典：各種資料より旭リサーチセンター作成。

表6 MTO、GTO、CTOのコスト比較

	原料	MTO	GTO	CTO
		メタノール	天然ガス	石炭
UOP 試算	原料単価 (ドル/トン)	400	300	60
	キャッシュコスト(軽質オレフィン1トン当たり) (ドル/トン)	1040	580	370
	設備費(軽質オレフィン年産100万トン) (億ドル)	9.9	22	33
	NRV (億ドル)	16 〈7〉	49 〈26〉	42 〈20〉
	IRR (%)	26 〈21〉	32 〈26〉	23 〈18〉
旭 リサーチ センター 試算	原料単価 (ドル/トン)	400	300	60
	原単位 (トン/トン)	2.6	1.9	6.8
	原料単価×原単位 (ドル/トン)	1040	570	408
	副製品控除 (ドル/トン)	▲24	▲24	▲24
	原料費(軽質オレフィン1トン当たり) (ドル/トン)	1016	544	384

注 < >内は年産60万トン

出典：UOP、Methanol to Olefins, IOCL Conclave, Feb. 7, 2014

2 天然ガスと天然ガス化学

2.1 天然ガスの特徴

天然ガスの特徴を石油、石炭、バイオマス（再生エネ）と比較して表7、8にまとめた。

近年、各種エネルギーの中で天然ガスの重要性が高まっている。1970年代にロシアの劇的な天然ガスの発見があり、同時期にカタール、カナダなどでも発見された。そして、近年米国で豊富なシェールガスが発見され、埋蔵量が増加した。また、天然ガスの単位熱量当たりの価格は世界的には石油より安い。また、温室効果ガスのCO₂（二酸化炭素）の発生量が石炭を100とすると石油70、天然ガス50と少ないことが大きなメリットである。天然ガスはCO₂の排出量ゼロではないが、排出量を抑えることのできる準クリーンな資源である。

表8に示すように、米国では火力発電を石炭から天然ガスに置き換えつつある。日本では東日本大震災以後、原子力の代替として、CO₂排出が比較的少なく発電施設に余力のあった天然ガス発電に急遽シフトしたので天然ガスの使用量が急増した。天然ガスを使った最高性能のコンバインドサイクル発電（GTCC）は、熱効率54%を達成している。石炭を使った最高性能の超臨界発電（USC）の熱効率は39%である。天然ガスは燃焼時の単位熱量当たりのCO₂の発生量が少なく、しかもGTCCは熱効率が高いので、当然、GTCCはUSCよりも単位発電電力当たりのCO₂の排出量は少ない。

なお、石油には天然ガスが及ばない優れた特徴が残っている。石油は液体なので取り扱いが容易で、必要な時、必要な場所で使用できる。また、用途は広く、ガソリンエンジン、ディーゼルエンジンにはなくてはならない燃料である。

表7 石油、天然ガス、石炭、バイオマスの特徴、用途、価格

	石油	天然ガス	石炭	バイオマス	
種類	化石燃料	化石燃料	化石燃料	再生可能エネルギー	
形状	液体(取り扱い容易)	ガス	固体	固体	
用途	自動車・ジェット燃料、 その他燃料など広い用途	発電、都市ガス	発電、燃料	発電、燃料	
世界の消費量比率(2014)	31%	21%	29%	10%	注1
日本の消費量比率(2014)	41%	25%	26%		注2
世界の価格	一番高い	石油より安い	最も安価		
2015年3月CIF価格(日本)	4.51円/1,000kcal	5.81円/1,000kcal	1.65円/1,000kcal		注3

注1：その他は原子力5%、水力2.4%、新エネ（風力、太陽電池など）1.4%（出典EIA）。

注2：その他は水力3.4%、新エネルギーなど4.4%（出典 エネルギー白書）。

注3：出典：経産省資料。

表8 石油、天然ガス、石炭、バイオマスの燃焼、発電特性

			単位	石油	天然ガス	石炭	再生エネ	原子力
組成式(H/C)				CH ₂ (2)	CH ₄ (4)	C(0)	C ₆ H ₁₀ O ₅ (木材)	
燃 焼		発熱量	MJ/kg	45	56	29	木(MAF) 22	
		CO ₂ 発生量	相対比	70	50	100	0	0
発電 電力量	世界	2013年	%	4	22	41	水力16 他6	11
	米国	2013年	%	1	27	40	水力6 他7	19
		2015年	%	1	33	33	水力6 他7	20
	CPP	2040年	%	1	38	18	水力6 他21	16
	No CPP	2040年	%	1	34	26	水力6 他17	15
	日本	2010年	%	7	29	25	水力9 他1	29
		2014年	%	11	46	31	水力9 他3	0
現在最高の 発電性能		発電方式 熱効率	%		GTCC 54	USC 39		

注：MAF：水分と灰分フリーベース、CPP：Clean Power Plan（オバマ大統領）

出典：発熱量はWikipedia、発電電力量の米国はEIA、日本はエネルギー白書、発電性能は経産省資料。

2.2 天然ガスの輸送と価格

石油、天然ガス、石炭の主要産地、日本の輸入先、輸送方法を表9に示す。

石油は中東が生産量の48%を占め、日本輸入先の80%を超える。天然ガスは中東（イラン、カタールが主要産地）43%と旧ソ連邦が多い。日本の輸入先はアジアからの輸入が約50%と多く、その他カタール19%、ロシア10%が多い。石炭は、産地が広く世

界に分布していて、供給が安定している。日本の輸入先はオーストラリアが74%で、突出している。なお、今後、米国からの石油、天然ガスの輸入がどの程度増えるかが注目される。

表9 石油、天然ガス、石炭の主要産地、日本の輸入先、輸送方法

	石油	天然ガス	石炭
生産地	中東 33%、アフリカ 9% 北米 21%、中南米 9% ロシア 13%、アジア大洋州 10%	北米 28%、欧州・旧ソ連邦 29% 中東 17%、アジア大洋州 15%、 アフリカ 6%、中南米 5%	中国 47%、米国 11% インド 8%、インドネシア 6% オーストラリア 6%、ロシア 4%
確認埋蔵量	中東 48%、米州 33% 旧ソ連 8%、アフリカ 8% アジア大洋州 3%	中東 43%、欧州・旧ソ連邦 31% アジア大洋州 8%、アフリカ 8% 北米 7%、中南米 4%	米国 27%、ロシア 18% ヨーロッパ 17%、中国 13% オーストラリア 9%、インド 7%
日本の輸入先	中東 80%超 (サウジ 33%、 UAE 25%、カタール 9.6% クウェート 6.9%、イラン 5.2%) ロシア 8.4% インドネシア 2.6%	アジア大洋州ほか 70.6% (オーストラリア 20.6%、マレーシア 17.2%、 ロシア 9.6%、インドネシア 5.8%、 ナイジェリア 5.7% ほか) 中東 29.4% (カタール 18.5%、UAE 6.4% ほか)	オーストラリア 74.3% インドネシア 12.9% ロシア 8.7%
輸送方法	(国内) ローリー、パイプライン (国外) タンカー(常温常圧)	パイプライン LNG船、パイプライン	トラック、内航船 石炭船(バルク船)

出典：生産地、確認埋蔵量と日本の輸入先は、エネルギー白書2016。

天然ガスはパイプラインがあれば、容易に輸送できる。ただし、ガスなので液体の石油の輸送に比べ密度が低く、輸送効率をはるかに低いのが欠点である。米国、欧州ーロシアの内陸部には長距離のパイプラインが敷設されている。

輸送距離が～4,000km以上で、LNG輸送が可能なところでは、パイプライン輸送に代わってLNG輸送が採用される。LNG輸送は、輸出港では天然ガスを-162℃以下に冷却して液化する設備とエネルギーが必要であり、海上輸送は専用のLNG船が必要となる。また輸入港では、LNGをガス化するための設備とエネルギーが必要となる。このため、LNG輸送は、コストが高い。天然ガス産地から遠く離れた日本は、すべてLNG輸送(図8)で、天然ガス産地よりもその分価格が高くなり、不利である。輸送コストが安く、世界中どこでもほとんど同じ価格で購入できる原油と違うところである。

日本に輸入され、ガスに戻した天然ガスのコストは、(天然ガス産地の価格) プラス (LNG輸送費) で決まるが、実際の購入価格は契約で決まることが多い。

図6に2000年以降の日本、米国、ヨーロッパの天然ガス価格の推移を示す。日本の天然ガス価格は図7の原油価格の推移とよく対応している。これは原油価格リンク（熱量換算で等価）の長期契約を結んでいるためである。また、天然ガスのユーザーが公共事業の電力会社と都市ガス会社なので、供給確保を重視したためであろう。それで、原油高（100ドル/バレル）のときは15～16ドル/百万Btuという世界一の高値になった。現在は、原油安で半値に下落した。

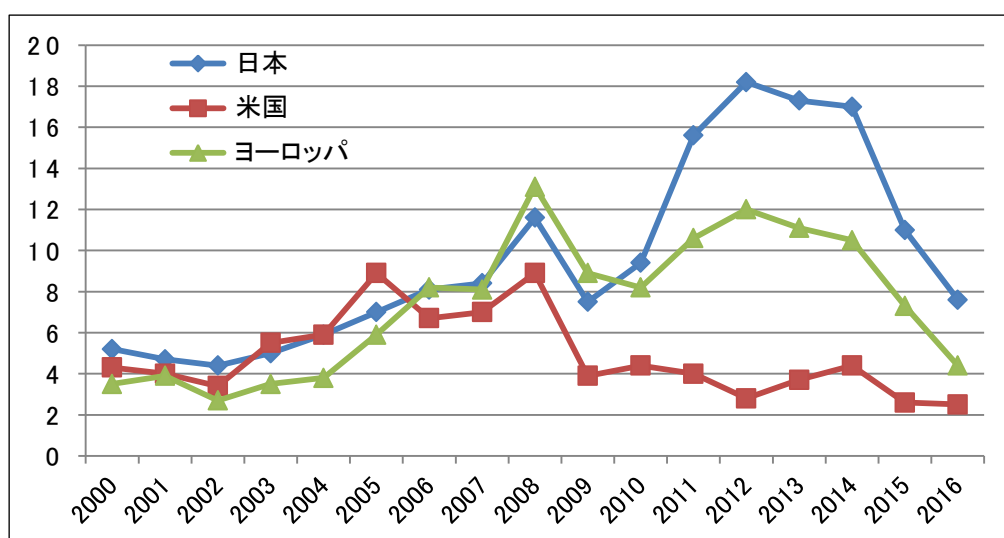


図6 天然ガス価格推移（単位：ドル/百万Btu）

出典：IMF-Primary Commodity

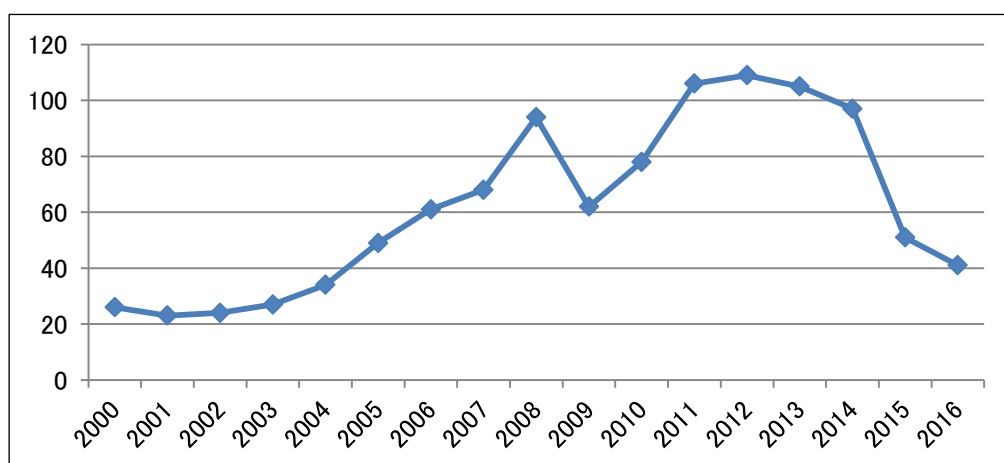


図7 ドバイ原油価格の推移（単位：ドル/バレル）

注：熱量換算で、100ドル/バレルは約16/百万Btuに当たる。

現在は、米国（シェールガス）、イランやロシアなどの輸出で天然ガスの供給力が豊かな状態であり、輸入先の選択肢が多い。現行の原油価格リンクより安価に天然ガスを手に入る価格契約に変更することが期待される。また、バーゲニングパワーを高めるためには、パイプラインによる供給など選択肢を増やすことも考えたほうがいい。かつてサハリン北部のガス田から東京までパイプライン（2,000km）を敷設する計画があったが、実現しなかった⁹。

経済産業省は2016年11月に「LNG産消会議2016」を開催し、アジア諸国が参加した。「この会議では、経済産業省が5月に発表した『LNG市場戦略』の具体化を図るため、柔軟で流動性のあるLNG市場の発展やLNGの需給を反映した適切な価格指標のあり方、さらには、アジアにおけるLNG市場の開拓等のために議論を行ったものである」。



図8 東京ガスのLNG船

注：マックス162℃以下、最大級の積載容量
175,000M³（約7.9万トン）
出典：東京ガスホームページ



図9 Ineosの専用液化エタン船

注：マックス90℃以下、Dragon Class Ship
積載容量 27,500M³（液化エタン約1.5万トン）
出典：Ineosホームページ

2.3 Ineosの挑戦——専用液化エタン船で米国シェールエタンを欧州に輸送

欧州の大手化学メーカーのIneosは10億ドル（1,000億円）投資して、2015年に8隻のエタン専用船（図9）を建造し、またLNG輸入設備を建設した。年間80万トンの米国シェールエタンをヨーロッパに輸入し、自社の欧州3か所のエタン・クラッキング設備でエチレンを生産する。2016年に欧州2か所に供給を開始し、エチレン生産を開始した（3月に米国よりノルウェーのRafnesにある同社エタン・クラッカーに、次いで同年9月にイ

⁹ 石井 彰「エネルギー論争の盲点」NHK出版新書356（2011年）154～160ページ

ギリス北部のGrangemouthにある同社エタン・クラッカーに輸送)。

Ineosは2016年に米国シェールエタンを、ExxonMobilとShellの合併会社のエタン・クラッカー (Mossmorran、イギリス) と、SABICのエタン・クラッカー (Poriares、イギリス) に輸送する契約を結んだ。

Ineosは企業再生ファンドでリストラクチャリングされた欧州の化学会社で、投資家で大株主でもあるRatcliffe社長のリーダーシップで急成長している。売上高は2014年に540億ドル (5兆4,000億円) であった。Ineosはイギリスでシェールガスの掘削開発も積極的に進めており、その成否が注目される。

また、インドのRilianceも大型エタン専用船 (VLEC) 6隻 (7億2,000万ドル) を建造中で、2017年末の設備完成・稼働を目指している。米国のシェールエタンを輸入し、グジャラート州ダヘジのエタン・クラッカーでエチレンを生産する。

また、中国のSP Chemicalsの子会社SP Olefinsは、米国からエタンとプロパンを輸入して65万トンのエタン・クラッカーを建設する計画を発表した。

このように、米国のシェールエタンを使ったエチレンクラッカーが世界に広がりつつある。IHSの推定では、米国のエタン・クラッカーのエタン使用量は2,100万トンであるが、2022年にはこれが3,700万トンに増加し、それ以外に800万トンがLNG船あるいはパイプライン (カナダとメキシコ) で輸出される¹⁰。

2.4 優れた水素源にもなる天然ガス

現在の水素製造の原料は化石燃料である。化石燃料のうち、天然ガス (メタン) は化学式が CH_4 で表されるように炭素原子当たりの水素原子の数が4と多く、しかも水素製造時の CO_2 の副生が少ないので、水素 (H_2) をつくるのに最も適している。天然ガス由来の水素はアンモニア合成用に大量に使用されている (図10)。同様に、石炭由来の水素からもアンモニアがつくられているが、石炭の場合は、天然ガスに比べ水素をつくる段階ですっと多くの CO_2 を排出する。現在、天然ガスは環境的に最も優れたかつ重要な

¹⁰ C&EN November 7, 2016, 28 ページ

工業的な水素源である。

クリーンな水素社会の到来を日本政府が目指すとしており、マスコミでも宣伝されているが、留意しなければならないことがある。一つは、水素は化石燃料のような一次エネルギーではなく、化石燃料などからつくられる二次エネルギーであることである。もう一つは、化石燃料から水素をつくる時には必ずCO₂を発生することである。この「隠れCO₂」に注意すべきである。

現在、オーストラリアの炭鉱で褐炭から水素をつくり、日本に持ってくる計画が進んでいる。水素製造時に発生するCO₂はCCS (Carbon oxide Capture and Strage ; CO₂の回収・貯留) で採掘済みの炭鉱の空洞に押し込む計画になっている。したがって水素製造とCCSはセットの計画である。CCSは開発段階の技術で、水素1トン当たりどれくらいのコストがかかるかも正確にはわかっていない。日本に持ってこられた水素はクリーンであるが、CCSコストと炭素税が付加されることになるだろう。

一方、水の電気分解で水素をつくれば、CO₂が発生しないと言われる。しかし、電気分解に必要な電気を火力発電でつくとCO₂が発生する。太陽電池や風力発電でつくれば、CO₂は発生しないが、電力代が高くコストが合わない¹¹。

また、CO₂を減らす有効な方法として、CO₂の資源化の研究開発が注目されている。しかし、ここでも「隠れCO₂」に注意しなければならない。例えば、CO₂と水素を反応させてメタノールをつくるプロセスがある。できたメタノールを燃料として燃焼すると、原料に使ったCO₂と同じ量のCO₂が発生する。これだけならば、プラスマイナスはゼロであるが、実際には前述のように、水素をつくるためにCO₂が既に排出されている。

現在、CO₂資源化に貢献しているのは、メタン原料で合成ガス（一酸化炭素（CO）と水素（H₂）の混合ガス）をつくるプロセスである。メタノールをつくるために合成ガスはCO+2H₂の組成のものが必要であるが、メタンから合成ガスをつくとCO+3H₂ができて、水素過剰になる。このためシフト反応を利用し、CO₂とH₂を反応させて、COとH₂Oに変換する。このときの全体の化学量論式は、 $3\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow 4\text{CO} + 8\text{H}_2$ となり、

¹¹ 人工光合成による水素製造の効率性は現状低く、実用化は相当先になるだろう。

メタン3分子当たりCO₂ 1分子を資源化する。これは、CO₂資源化の最も規模の大きい工業化例である¹²。

天然ガス（メタン）は、「エネファーム」の燃料電池の水素源として使用されている。高分子型燃料電池（PEM）では、触媒を用いてメタンを水素とCOに転換し、さらに触媒を使ってCOを除去して純粋な水素を燃料電池にフィードする。固体酸化物型燃料電池（SOFC）では、触媒を用いてメタンを水素とCOに転換し、混合物をそのままフィードすることができる。両方とも「エネファーム」の家庭用の分散電源として使用されている。

2.5 天然ガス化学の技術課題（ケーススタディ）

天然ガス化学のうち、エタン・クラッキングやプロパン脱水素（PDH）は完成した技術である（図1）。また、メタンを原料に水蒸気改質で合成ガス（CO+H₂）を製造し、次いで合成ガスからメタノールをつくるルートは古くから工業化されている（図10）。しかし、安価なメタンを使用し、しかもメタノールは水を付加した構造なのでメタンの理論原単位は0.5と小さい割にメタノールの価格は高い。このためメタノールを原料とするMTOやMTPのコスト競争力は低い（図5）。これはメタンからメタノールを製造するステップが多く（水蒸気改質、シフト反応、メタノール合成）、またそれぞれの反応条件が厳しいためと思われる。メタノール合成には触媒・プロセスの開発によるブレイクスルーの可能性が残されている。

ケーススタディとして、メタンと合成ガスの周辺の改善余地のある既存プロセスと未踏の新規プロセスを以下にリストアップした。

既存ルートの改善としては、①合成ガスの製法、②合成ガスからメタノールの合成、③FT（フィッシャー・トプシュ）反応による合成ガソリンや高級オレフィンの合成（FT法で合成ガスから低級オレフィンが直接できれば大きなブレイクスルーとなる）などがある。

¹² 石炭から合成ガスをつくるときは、逆にCO₂が排出される。
化学量論式は、 $3C + 3/2O_2 + 2H_2O \rightarrow CO + 2H_2 + 2CO_2$

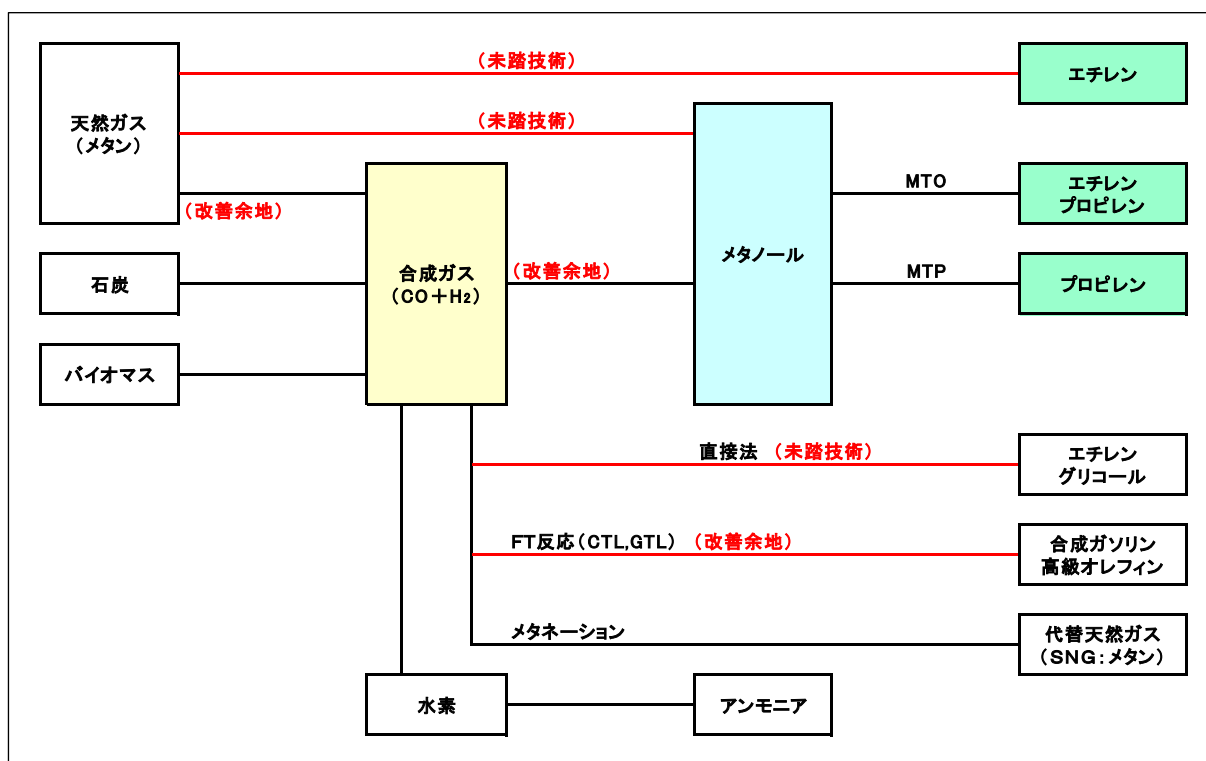


図10 メタンケミストリー、合成ガスケミストリー、メタノールケミストリーの経路図

注：合成ガスは、天然ガス（メタン）だけでなく、石炭、バイオマスからも製造されるので、重要な基幹物質。
出典：各種資料より旭リサーチセンター作成。

未踏技術への挑戦としては、①メタンからのエチレンの直接合成、②メタンからのメタノールの直接合成、③合成ガスからナイトライトを介さないエチレングリコールの合成がある。

2.6 Siluriaのメタンから直接エチレンをつくる革新プロセス

メタンから直接エタンをつくる反応は30年前から研究されてきたが工業化されていない未踏技術である。Siluria Technologies（米国、サンフランシスコに本社があるベンチャー企業、以下Siluriaと略す）はこれをブレイクスルーする革新技術を開発し、注目されている。Siluria技術は、固有の酸化物ナノワイヤー触媒を用いてメタンの酸化的カップリング（OCM：Oxidative Coupling of Methane）することで、従来法より200℃低い反応温度でエチレンをつくることができる。OCM触媒はファージ（バクテリア）を鋳型に金属酸化物を選択的に成長させることによりナノワイヤーにしている。触媒の寿命は1年もつといわれる。

デモンストレーションプラント（1トン/日）の運転を2015年初めにスタートし、約1年間成功裡に運転した（2016年5月に発表）。現在、提携中の大手エンジニアリングメーカーのLinde（ドイツ）が工業化に向けて各種設計に入っている¹³。デモンストレーションプラントはテキサス州La PorteにあるBraskem Amerika（ブラジルの大手化学会社Braskemの子会社）のPE工場に隣接して建てられ、Braskemが運転を担当した。BraskemはSiluriaに投資しており、本技術の非独占使用権を取得している。また、Siluriaは2014年6月に商業的な各種のエチレンプラントを設計するためにエチレンプラント設計に強いLindeと提携した。また、Siluriaは2014年8月にSaudi Aramco Energy Venturesより3,000万ドル（30億円）の戦略的投資を受けている。

OCMの推定プロセスを図11に示す。まず触媒を充填した固定床の断熱反応器（OCM反応器）にメタンと酸素をフィードし、酸化のカップリング（OCM）により直接エチレンをつくる。酸化のカップリングは大きな発熱反応であり、その熱を利用して吸熱反応であるエタンの脱水素反応を行う。脱水素反応器は同じく固定床の断熱反応器で、OCM反応器の出口に直結させる。反応生成物は、分離精製して水素、COとCO₂、未反応メタン、製品のエチレンを得る。COとCO₂は水素と反応してメタンを生成させる（メタネーション）。この生成メタンと未反応メタンは、循環してOCM反応器にフレッシュなメタンとともにフィードする。メタネーションを行うことにより、炭素収率を改善している。特許によれば、メタンのエチレン選択率は約60%で、副生成物はCOとCO₂である。

OCMは、ナフサ・クラッキングやMTO&MTPよりコストが安い。ただし、米国ではメタンとエタンが現在同価格なので、収率80%のエタン・クラッキングのほうがOCMよりコストが安い。将来的には、エタン価格はメタン価格より高くなるで、OCMのほうがコスト的に有利になる可能性は高い。

¹³ Siluria ホームページ、IHS ChemicalWeek, 21/28 November 2016/23

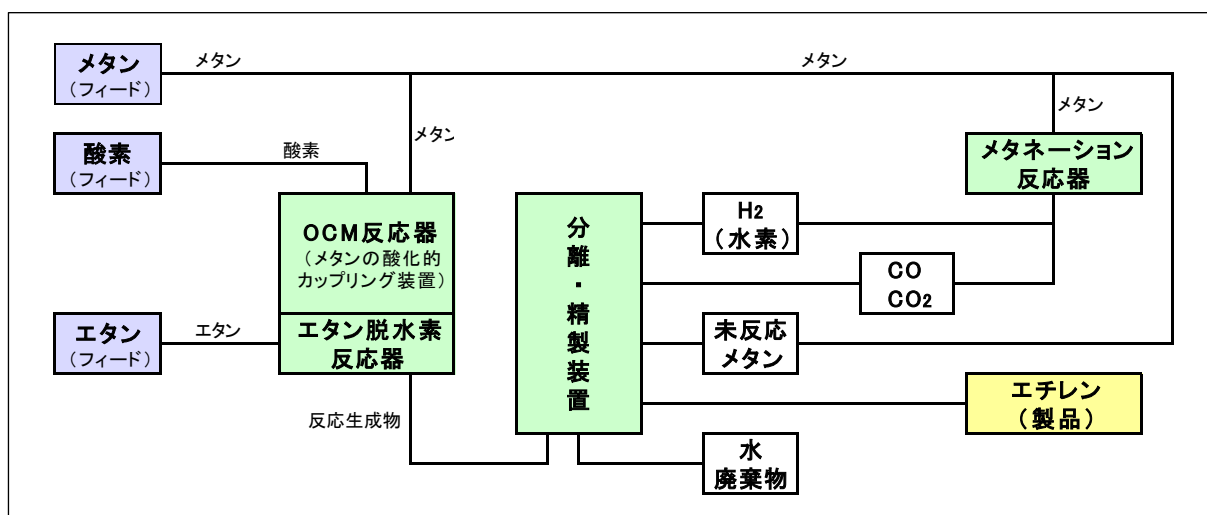


図11 Siluria TechnologiesのOCMプロセスの推定フロー

注：Siluria発表資料、特許などより旭リサーチセンター作成。

3 天然資源化学と地球温暖化

(1) 天然資源化学による資源の多様化

石油、天然ガス、石炭、バイオマスのいずれからも基幹化学品のエチレンとプロピレンがつくれるようになった（図1）。各国、各企業は、最も有利な資源を複数選択し、リスクを軽減しつつ収益を上げる戦略を取りつつある。

世界的に見れば、米国はナフサとエタンの両方に使えるエチレンプラントをもち、現在はエタン・クラッキングに完全にシフトしている。中国は自国資源の石炭を有効活用して、現代的石炭化学を進めている。欧州は、Ineosなどがシェールエタンを米国から輸入し、エタン・クラッキングを2016年に開始した。インド、中国もシェールエタンを輸入してエタン・クラッキングを始める計画を具体化している。中東は石油随伴ガス（天然ガス）を使ったエタン・クラッキングが主体であるが、ナフサ・クラッキングももつ。

それに比べ、日本は石油化学一本足で石油高騰時に脆弱である。日本では、出光興産が既存のナフサ・クラッカーにプロパンを使用する計画を発表した。

最近注目すべきは、サウジのSABICが2025年に向けた戦略の中で原料多様化のための3プロジェクトを打ち出したことである。これらは、①中国で神華寧夏煤業集团公司（SNGC：Shenhua Ningxia Coal Industry Group）と寧夏回族自治区（Shenhua）で石炭

を原料とするCTOプロジェクト、②ExxonMobilと共同でシェールガスを原料とするエタン・クラッキング（ガルフコースト）プロジェクト、③Aramcoと共同の石油精製を経ない原油の直接分解（OTC：Oil To Chemical）のプロジェクトである（1.7参照）。

3つのプロジェクトはいずれも、量的に限界が見えてきたサウジの石油随伴ガス依存を脱却して、新たな原料（資源）を求める戦略である。

(2) 地球温暖化に関するパリ協定の発効

天然資源化学の将来に大きな影響を与えるものとして地球温暖化問題がある。

パリ協定で、温室効果ガス（CO₂など）の排出削減について主要国が合意した。①世界共通の長期目標として、産業革命以後の温度上昇を2℃以下に抑える目標のみならず、1.5℃以下に抑えることに言及した。②主要排出国を含むすべての国が削減目標を5年ごとに提出・更新すること、共通かつ柔軟な方法でその実施状況を報告し、レビューを受けることの2点である。日本の自主削減目標は2030年度までに2013年度比26%減である。

(3) 化石資源枯渇時期と地球温暖化のタイムリミットはどちらが先か

エネルギーとして、石油、天然ガスがまず枯渇し、次に埋蔵量の多い石炭が枯渇したら、最後はバイオマスなどの再生可能エネルギーに頼らざるを得ない。実際には枯渇が見えてくると、価格が高騰し、次のエネルギーへのシフトが加速する。化学産業も巻き込まれ、石油化学から天然ガス化学、石炭化学、バイオマス化学にシフトしていかざるを得ない。

石油化学から天然ガス化学へのシフトは地球環境上好ましいが、石炭化学へのシフトは多くの環境上の問題を克服していかなければならない。また、バイオマスは嵩高く、薄く広く分散しているので集めるのが大変である。また、バイオマスの化学構造は酸素を多く含むためエネルギーとしては熱量が低く、また炭化水素（オレフィン、ジエン、芳香族類）をつくる化学原料には適していない。しかし、その時代には何とか使いこなす技術を開発せざるを得ない。

気候変動がクリティカルになるタイムリミットがいつ来るのだろうか。あるいは、資源枯渇と気候変動のタイムリミットはどちらが先に来るのだろうか。気候変動のタイムリミットが先に来て、使いやすい石油や天然ガスが豊富に残っているのに使用できない

くなる事態が起こるのだろうか。それらはいずれもわかっていなし、問題が大きすぎるので、企業はどういうスタンスでこの問題に対応したらいいか苦慮するが、少なくとも注意深く情勢把握することが必要である。

おわりに

天然ガスは石油をいろいろな意味で補う形で、ますます重要になる。天然ガスの燃焼時、発電時、化学反応時にCO₂の排出が少ないことは大きな特徴である。

再生可能エネルギー（資源）が地球温暖化の最終解であるかもしれないが、現状はコストが高くこれをすぐに石油代替や原子力代替に使用すると膨大な費用がかかる。時間をかけてコストを下げていくほうが得策である。そのつなぎに天然ガスは使えるので、低炭素社会に向けた現実的な解を与えてくれる。

また、天然ガス化学は大きなイノベーションにより、大きく発展する可能性を秘めている。

日本は世界一の天然ガス輸入国であるが、輸入用パイプラインはなく、また国内のパイプラインも全国をつなぐものはなく不十分である。多くの産業が天然ガスを使用できるようなインフラの強化が望まれる。

以上のことから、この際、天然ガスの価値とポテンシャルを見直す必要がある。そして、クリーンな水素社会の前に、準クリーンな天然ガス社会を推進すべきである。

参考資料

- (1) 府川伊三郎、ARCレポート（RS-998）“「石油化学」から「天然資源化学」へ”
（2016年版）、2016年1月、www.asahi-kasei.co.jp/arc/service/pdf/998.pdf
- (2) 府川伊三郎、ARCレポート（RS-978）“バイオマス化学”、
2014年9月 www.asahi-kasei.co.jp/arc/service/pdf/978.pdf
- (3) Wittcoff, Reuben, Plotkin「工業有機化学」（上）、（下） 田島慶三、府川伊三郎
訳、東京化学同人（2015、2016）

<本レポートのキーワード>

石油化学、天然ガス化学、現代的石炭化学、水素社会、エチレン製造コスト、合成ガス、シェールガス・シェールオイル、CO₂の資源化、地球温暖化

(注) 本レポートは、ARCのホームページ (<https://www.asahi-kasei.co.jp/arc/index.html>) から検索できる。

このレポートの担当

シニアリサーチャー 府川 伊三郎

お問い合わせ先 03-3296-5056

E-mail fukawa.id@om.asahi-kasei.co.jp

株式会社 旭リサーチセンター

東京都千代田区神田神保町 1-105 神保町三井ビルディング

電話 (03) 3296-3095 (代)

E-mail : arc@om.asahi-kasei.co.jp